

博士学位論文
2017年度

エネルギー資源と経済

成蹊大学大学院
経済経営研究科
博士後期課程
経済学専攻

D121101

井上 正澄

目次

はじめに	5
第1章 エネルギーによる経済計測の意義	9
第1節 経済の考え方と資源の関係	9
第2節 経済成長と景気変動	14
第3節 貨幣価値とエネルギーによる経済計測	18
第4節 米国の経済とエネルギーの歴史	27
第5節 地球のエネルギーフローと経済	32
第2章 企業と産油国の行動分析	41
第1節 枯渇性資源の最適生産経路	41
第2節 油田の生産プロファイルと利益最大化	63
第3節 産油国のゲーム理論分析	80
第4節 ピークオイルと Hubbert 曲線	102
第5節 第2章のまとめ	109
第3章 エネルギー資源の質と量	111
第1節 天然資源と枯渇性資源の分類と階層	111
第2節 枯渇性資源の賦存量推定と人類文明の長期的持続可能性	118
第3節 油田の規模分布と発見量の推定	129
第4節 油田発見履歴の再現と未来予測	154
第5節 第3章のまとめ	163
第4章 経済とエネルギーの相互作用	165
第1節 原油価格の決定メカニズム	165
第2節 石油生産量・鉱工業生産・原油価格の相互作用	190
第3節 石油生産量・原油価格と油田発見数の関係	201
第4節 第4章のまとめ	204

第5章 石油の消費と価格の内生的動学分析	207
第1節 内生的力学系モデル	207
第2節 各ケースと使用パラメータ	219
第3節 シミュレーション結果	221
第4節 第5章のまとめと課題	225
第6章 資源の遷移	229
第1節 シェール資源の特徴と量	229
第2節 エネルギー資源の変遷	238
第3節 第6章のまとめ	244
第7章 まとめと今後の課題	247
参考文献	251

はじめに

資源の枯渇が懸念されている中、震災事故により脱原発の流れが生じているが、原油価格は不安定で、化石燃料、とりわけ石油にいつまでどの程度依存できるかが不明である。一方で、米国ではシェール資源の開発が盛んだが、その資源量や採算性・継続性については不明な点が多い。また、人類文明の「持続可能性」、すなわち資源の枯渇と環境の劣化が懸念されている。

一方、金融政策・財政政策の効果は限定的で、経済成長は長期にわたって低迷している。第一次・第二次石油危機および2008年の原油価格高騰の後に世界的不況に見舞われ、大恐慌に先立つ1920年代にも石炭・原油価格は高騰していた。エネルギー資源の価格や利用可能性が経済を規制していることは自明だが、資源（わけてもエネルギー）の供給は従来の経済学では外生的に扱われ、内生的には組み込まれていなかった。こうした問題意識から、エネルギー資源の代表である石油生産量と原油価格の決定機構に焦点を当てつつ石油と経済の係わり合いについて分析した。

マルサス (Malthus, 1798:人口・食糧) , ジェヴォンズ (Jevons, 1866 : 石炭問題) , ローマクラブ (Meadows et al., 1972:資源・環境)は資源などの制約を経済学に取り込んだが、資源量を固定的に捉えていたため必然的に「成長の限界」に至り、その予測は的中しなかった。これまでの資源科学者からの、資源量・品位分布・採算性などへのインプットは固定的で、「木を見て森を見ない」傾向があり、常に上方修正を余儀なくされてきた。これは、資源は物理的な存在ではなく、人間の生活や産業等の諸活動に利用可能な経済的存在であるため、何が資源と認識されるかはその時代や社会によって異なることによる。したがって、資源は「可塑性」(低品位および代替資源への遷移, 井上ほか, 2015)を示し、その量は需要や価格に応じて増減する。すなわち、経済は資源に、資源は経済に、制約されている。

そこで本論文では、経済をエネルギーで記載するとともに、エネルギー資源を経済学的視点で評価して、両者を統合することにより経済動向の歴史の再現と未来予測を行い、人類文明の持続可能性をも占う。具体的には、次のように単純化した形で、エネルギーと経済の関わり合いの全体像を議論する。

(1) 経済をエネルギーフロー(より具体的には石油生産量)で代表させる。これは過度

の単純化ではあるが、エネルギーと経済の関係に焦点を当てることにより、経済変動をより純化した形で抽出して再現・予測を行うことを目的とする。エネルギーで経済を代表させる妥当性については、第1章で論じる。

- (2) 信頼できるデータの制限などから、エネルギー消費をその大半を占める石油で代表させる。ただし、本論文の議論を成因・産状・採取方法などが共通する天然ガスおよび同じ化石燃料の石炭へ敷衍することは可能であり、シェール資源ならびに資源の遷移については第6章で論じる。
- (3) 国、地域ごとの差異は原則として無視し、世界全体を対象とする。したがって、貿易や為替などは一切考慮しない。また、経済をエネルギーフロー・レベルで議論するので金利・物価などは捨象され（ただし、物価全般に対するエネルギーの相対価格は用いる）、労働・失業・税なども考慮しない。また、エネルギー資源の在庫は消費に含めるべきなので（第4章参照）、本論文では生産量と消費量は等しいとして議論を進める。
- (4) 石油生産者（産油国・企業）の利潤最大化と地下の排出エネルギーの観点から、ミクロ経済学的手法およびゲーム理論などを適用して、地下に存在する埋蔵量の最適生産経路を論じる。これらにより、埋蔵量さえ既知ならば、経済に対するエネルギーフローの制約（上限）が評価できる。（第2章）
- (5) 地質学的知見・理論などは「木を見て森を見ない」傾向があるので、原則としてこれに頼らず、マクロ経済学に倣い集計データを確率・統計的に扱う理論・手法を開発して適用し、石油の賦存量（地下に存在する全量）・資源量（最終的に利用される総量）・埋蔵量（既発見で商業性可能な量）の評価を行う。また、これらの経済に依存した「可塑性」も検討する。（第3章）
- (6) エネルギー資源の「可塑性」を評価するため、計量経済学的手法を実績データに適用して、経済活動・石油生産・原油価格の関係を分析する。また、これらの探鉱量および発見への影響を分析して、経済の埋蔵量積み上げへのフィードバックを評価する。（第4章）
- (7) 経済とエネルギー資源の相互フィードバックの全体を動的に分析するモデルを構築する。金利・物価・労働・税などの伝統的な経済要素はすべて捨象し、探鉱・発見・生産・消費・投資などがエネルギーで評価され、すべてが内生的にシステム内の循環で自己完結的に決定する。このモデルの計算結果を現実の履歴と比較し、将

来予測も行う。(第5章)

- (8) シェール資源の特徴と量を検討する(本論文ではデータの制約により、米国のシェールガスに焦点を当てる)。その結果を参考に、資源の遷移のモデルを構築し、過去のエネルギー資源の遷移実績を再現し、将来予測も行う。(第6章)
- (9) 全体をまとめ、その意味するものを考察するとともに、本研究の課題を抽出して、今後の研究の方向を展望する。(第7章)

全体として一つの流れの中で論じており、各章および節は、基本的にそれに先立つ章・節の結論を踏まえ議論しているが、それぞれがある程度独立した論文となっている。このため、各章・節で用いられた理論や手法は必ずしも整合性がない。全体を統合する「大統一理論」は今後の課題である。多くの章や節で独自の理論や手法による分析を行っており、先行研究の検証を行った章や節でも、独自の切り口を提示した。主観や既存理論による先入観をできるだけ排し、科学的・定量的な議論を心掛けたつもりである。この結果、従来の通説とはかなり異なる結論が得られた。環境問題には触れなかったが、本研究の考え方・理論・手法・成果などの延長上に位置付けられ、今後の発展課題である。

エネルギーの単位はSI単位系ではJ(ジュール) = $\text{kgm}^2\text{s}^{-2} \doteq 0.24 \text{ cal}$ (1 cal $\doteq 4.2 \text{ J}$) であり、そのフローは年あたり J/Y, または、秒あたり $\text{W}=\text{Js}^{-1}$ であるが、業界の慣例などにより、異なる単位系や体積または重量(しばしばエネルギー等価の石油に換算)で統計が表記されることが多く、本論文でもそれらをそのまま使用する。これらは資源の品質や計測条件(温度・圧力)に依存するため換算は必ずしも厳密ではなく、概算である。

石油 : 1 トン(t) $\doteq 7.33$ バレル(bbl) $\doteq 1.165$ キロリットル(kL)

1 バレル(bbl) $\doteq 159$ リットル(L) $\doteq 6\text{MMBTU}$ (百万英国熱量単位) $\doteq 6.3 \times 10^9 \text{ J}$

1TOE (石油 1 トンエネルギー等価) $\doteq 10^7 \text{ kcal} = 10^{10} \text{ cal} \doteq 4.2 \times 10^{10} \text{ J}$

また、バレルを B または bbl, 立方フィートを cf, 百万を MM, 十億を B, 一兆を T と略記することもある(したがって、「BB」は十億バレル, 「Tcf」は一兆立方フィート)。

本研究を進めるにあたって、成蹊大学教授・井上智夫先生には終始丁寧なご指導を賜った。同大学教授・中神康博先生, 平尾由紀子先生, 藤垣芳文先生, 吉田由寛先生, 大野正智先生からはご指導・ご助言を賜った。これらの方々に深く感謝する。

第1章 エネルギーによる経済計測の意義

第1節 経済の考え方と資源の関係

世界経済は周期的な変動を繰り返しながら成長してきた。最近の大きな景気変動（不況）としては、1973年および1979年の第1次および第2次石油危機に引き続く不況と2008年の「リーマンショック」が挙げられるが、現在の経済学ではこれらを的確に予測することはできなかった。これらのうち前2者は石油逼迫による原油価格の高騰に端を発しており、金融システムの破綻によるとされる後者も、原油価格はその直前に過去最高値を更新しており、それが遠因となった可能性がある。また、米国の大恐慌に先立つ1920年代にも石炭・原油価格は高騰していた。このように、資源の制約が経済に影響を与えることは明らかであるが、これまでの経済モデルでは資源の制約やショックは外生的に与えられていたため、事後説明は可能でも、その時期や規模を予測することは不可能であった。

経済、すなわち人間活動の規模は一般に貨幣単位で計測される。人々の厚生あるいは福利（幸福・利益）や満足度は概念的には「効用」で計測するとされるが、それは観測不可能で、異なる個人間の比較もできない。しかし、経済活動で産出される財・サービスは、一部の自家消費分（第3節参照）を除き市場で取引されるため、そこでの均衡価格が限界効用（財・サービスの1単位追加〔削減〕による効用増加〔減少〕）に相当すると考えれば、市場で取引される財・サービスの価格の総計が全体での効用規模（すなわち福利・満足度）を代表しているとみなせる。これにより、経済規模が計測でき、適切な実質化や為替換算を行えば（第3節参照）異時点間や異国・異通貨間の比較も可能になる。

ただし、市場で取引されるすべての財・サービスを総計すると、多重計上が生じ経済規模（産出量）が過大評価される。例えば、GDPは、ある期間（通常は1年）に対象国で産出された、貨幣単位で計測した付加価値の総計と定義されるが、ここで「付加価値」というのは、多重計上を排するという意味である。例えば、自動車の売買価格を全て総計に含めると、鉄板（中間投入）の価格分（別の取引で計上済）が二重計上されるため、後者を前者から差し引いて総計することを意味し、この付加価値分を自動車産業での産出と考える。

貨幣価値で表現された経済規模（GDPなど）は、一般には資本（工場・機械など）規模と労働投入の関数（「生産関数」）であるとされ、収入は均衡においてはそれぞれの貢献の度

合い（限界生産性で計測）に応じて分配される。しかし、この過程で資本は産出（GDP）に転化されて減少するわけではなく、劣化・陳腐化などによる減耗を除き保存され、毎年の投資が蓄積して雪だるま式に肥大していき、この資本増加（および労働人口増加）が経済成長の原因とみなされている。資本は減少せずに保存されるため、例えばアダム・スミスは「すべての商品の交換価値をはかる真の尺度は労働」（Smith, 1776）という労働価値説を唱え、マルクスも労賃を超えて労働が生み出した剰余価値を資本家が搾取していると説いた（Marx, 1885）。

自動車の例では、中間投入である鉄板価格が自動車価格から差し引かれるが、全く同様に鉄板価格からは、中間投入の鉄鉱石価格が差し引かれる。しかし、鉄鉱石に対する「地球からの中間投入」は評価されず、資本と労働（および動力）の投入だけから（しかも資本は消費せずに残る）鉄鉱石の価値（すなわち「無から有」）が生じるとみなされる。鉱床が存在しなければ全く同じ資本と労働を投入して掘削しても価値は生み出されないので、この地球からの中間投入を無視することは、マルクス流に言えば「地球を搾取」してレント（超過利潤）得ていることになる。

労働も実は、人間（身体）とエネルギーに分けられる。前者は減少することなく保存されるが、後者は消耗し食料を補充する必要がある。これは家畜にも当てはまり、食肉として消費されれば消滅するが、使役・搾乳に利用されるときにはエネルギー（飼料）は消費するが、家畜自体は保存される。機械や工場も（減耗分を除き）保存され、消費されるのはエネルギーや原材料である。すなわち、経済における生産活動では、人間や家畜を含む「広義の資本」は保存され、物質（原材料）とエネルギーが消費されるのである。

この「広義の資本」が財やサービスに転化すると考えると、ここでも「無から有」が生じることになり自然界の基本法則、質量・エネルギー保存則に抵触する。実際には保存則を満たす物質とエネルギーのフローが財・サービスに転化されるのであり、その速度を資本（および労働）が規制しているのである。したがって、物質・エネルギーが潤沢な時は資本（広義）で経済を記述しても問題ないが、これらが不足してくると経済が説明しきれなくなる。資本は、化学反応における触媒に相当する。触媒は化学反応に参画し、反応を促進する（場合によっては触媒がないと反応が開始しない）が、反応後には全く元の形で戻され、誤反応などによる減耗分を除き目減りしない。原材料が十分あれば触媒を増やすと反応速度が上昇するが、ある程度を超えると原材料を増やさない限り反応は増進されない。

資本で資源（原材料およびエネルギー）を代替できるか否かという論争がある。Solow

(1974) が資源は資本で代替可能であるとしたのに対し、Georgescu-Roegen (1975) はエントロピー増大則に基づいた議論により、資本では資源を代替できないことを指摘した。Daly(1997)はこの問題を再提起し、資源は資本では代替不可能で、枯渇性資源も考慮すべきと論じたが、Solow (1997) および Stiglitz (1997) は、少なくとも短期的には、枯渇性資源は資本（および再生可能資源）で代替可能であると答えた。しかし筆者には、経済学はこの問題に正面から回答していないように見られる（枯渇性資源の量に関する情報が資源科学から適切に提供されていないことも一因と思われる）。

確かに、資本（触媒）が少ないために GDP などの経済フローが低迷する（反応速度が遅い）ときに原材料やエネルギーの投入を増加すると、産出（反応）が促進されることがあり、代替性が認められるように見える。このとき逆に、資本（触媒）を増強しても産出（反応）は促進されるが、そのときは原材料やエネルギーの使用量が抑制できるのではなく、むしろそれらの使用が促進される。すなわち、資本（触媒）と原材料・エネルギーは代替材ではなく補完財なのである。バルブ（または水道栓）を開けば流量は増えるが、それは水を代替するのではなく、その消耗を助長する。もう一つ注意すべきは、GDP などの経済フローは速度（単位時間当たりの量）であり、資本（触媒）はその速度を律しているが、量自体には全く貢献しないということである。このため全期間を通しての累計量は物質・エネルギーの存在量だけに依存し、資本（触媒）の増加は単にその期間を短縮する（したがって枯渇を早める）のみである。使用される資本（触媒）の種類によって同量の物質・エネルギーを投入しても得られる成果物（財・サービス）の歩留まりに差があるときは、資本（触媒）の量ではなく、質（「技術」と表現されることが多い）の相違による効率の差と解釈される（第3節参照）。

物質・エネルギーが転化した産出のうち消費されない部分が投資になり、それが累積したストックが資本であり、その一部は劣化・陳腐化により徐々に減耗し、物質（廃棄物）・エネルギー（排熱など）として廃棄される。また、資本の一部である在庫（「在庫投資」の累積）や家畜は（後者は食肉として）フローに放出され消費に転化することもある。したがって、ストックである資本も物質・エネルギーのフローの一部を形成しているとみることができる（図 1-11 参照）。農作物や森林も物質・エネルギーフローに挟まれた短周期のストックと解釈でき、これらの資源を持続的に使用するには消費量をフロー量以内に制限するか、植林などの形で人工的にフローを補充してストックを増強する必要がある。環境経済学などで適用される Hartwick's rule は、枯渇性資源から得られた利益を全て資本ストックに投資

すれば世代間の持続可能性が担保されるというものだが(Hartwick, 1977), 主としてこのタイプを念頭において、資本と資源の代替性を前提にしている。近年注目されている「レジリエンス (復元力)」(Mäler, 2008, Mäler et al., 2009) や IWI (包括的富指数) (UNEP & UNU-IHDP, 2014) の自然資本もこのタイプを対象にしている、投資 (植林など) により持続可能性が維持できると想定している。こうした「一時預かり」的な短周期ストックの資本 (在庫・食肉・農作物・森林) の場合は、資源フローとの代替性が認められるが、物質・エネルギーフローを規制し、消費には転化しないという本来の姿の資本においては、資源との代替性は認められない。

このように物質とエネルギーのフローが経済の本質であると考えられるが、この二つは実は同等ではない。質量保存則により、物質 (元素) は消滅するわけではないので、エネルギーさえ投入すればリサイクルが可能であり、事実、多くの金属元素でリサイクルによる二次生産物の利用が半分以上となっている (UNEP, 2011)。今後、物質の一次資源が枯渇してきてその価格が上昇すれば、リサイクルの比率はますます高まってくる。一方、エネルギーも物理学的には保存されるが、熱力学第二 (エントロピー増大) 法則により、エネルギーフローは低エントロピー (高温、濃集など) から高エントロピー (低温、分散など) への一方通行であり、逆流はできない。環境問題もエネルギーフローの環境 (大気・海洋・宇宙) への廃棄によるエントロピー増大 (排熱・乱雑化) とみなすことができる。

さらに、物質 (金属) やエネルギーの資源を採集するにはエネルギーを投入する必要がある。金属など物質資源は、枯渇による希少化で価格が上昇すれば、エネルギーさえ投入すればどんなに低品位の資源も利用できるが、エネルギー資源の場合、品位が低くなると採集のための投入エネルギーが採集した資源により回収できるエネルギーを超えてしまい、もはや資源として利用できなくなる。すなわち、エネルギー資源はある閾値 (「逆臨界」) より品位が低いものがいくら大量に存在しようと、それは利用されない。

金属資源に限らず、エネルギーフローはすべての財・サービスにおいて極めて重要な位置を占めるようになってきている。「緑の革命」は、肥料・農薬・動力などを集中してフローを強化することにより収量の大幅増を達成したが、この過程で窒素固定 (ハーバー・ボッシュ法) や重機・トラクターの燃料などの形で大量のエネルギーを消費し、環境に廃棄している。食料自給率は熱量換算で議論されることが多いが、実は日本の農作物では、収穫エネルギー/投入エネルギー比は全作物平均で 0.3 と極端に低く (仁平, 2003), エネルギー資源とみれば「逆臨界」を大きく下回っている。「植物工場」では均一高品質・高収率のために採

用される人工光の費用が経済性のネックになっており（井熊・三輪，2014），漁業でもイカ釣り船を筆頭にエネルギー費の負担が高く（松下，2016），原油価格が高騰すると多くの漁船は休業する。

したがって，経済活動の本質は物質・エネルギーフローであると考えられるが，そのうち物質の多くはエネルギーで代替可能で，経済規模はエネルギーフローだけで代表できる可能性がある。すなわち，「労働価値説」ならぬ「資源価値説」または「エネルギー価値説」である。もちろん，エネルギーフローだけで経済や効用をすべて表現できるわけではなく，限界効用理論に基づく貨幣価値による計測（GDP など）を補完するものであるが，エネルギーによる経済計測には多くの利点や可能性があり，それらは第3節で概観する。

上記の如くエネルギーも保存されるため，厳密にはこの過程はエントロピーの増大で記述すべきものである。エネルギーはそのすべてを利用できるわけではなくエントロピー増大の範囲に限られ，この利用可能な部分を「エクセルギー(exergy)」と呼ぶ。本論文では深入りしないが，エントロピー（またはエクセルギー）で経済が記述できれば，生産過程だけでなく，CO₂，排熱，大気汚染，水質汚染などの異なる環境問題が同一の尺度で統一的に議論できる可能性がある。さらにエントロピーは，情報量（乱雑さの減少）を定義するのにも用いられることから，情報を含めた経済を記述できる可能性もある。Georgescu-Roegen（1971, 1975）は経済をエントロピーに基づき解析することを提唱しており，定式化できれば理論的には最も精確な議論が期待できることから，その試みも行われている

（例えば，室田,1979，槌田,2007）が必ずしも成功していない。それは，エントロピーやエクセルギーの測定は必ずしも容易ではなく，信頼できる統計データが存在しないことと，仮に有意な結論が得られたとしてもその含意は一般には理解されにくく，政策などへの活用が困難なことによる。そこで，本論文では次善の策として，エネルギーで経済を計測・解析することとし，エントロピーやエクセルギーはエネルギーの利用効率の形で検討する（第3節参照）。

第2節 経済成長と景気変動

1.2.1. 各国の経済成長の比較

図1-1に先進各国（米国・日本・ドイツ）の1人あたりGDP成長率の推移を示した。これらは、ほぼ一致していて、同時期に同方向に同程度の変動をしており、これら各国の金融・財政政策はかなり異なっていたにもかかわらずその相違の影響は小さい。日本も、1980年代末の「バブル」で上に、1998年の「アジア危機」で下に、それぞれやや外れている以外は、他国との相違は小さい。「失われた90年代」も（一人あたりで見ると）他国との差は有意ではなく、むしろ人口減少を反映していたものと思われる。黒太線は、これら3国以外も含めた全世界の平均経済成長率の推移であるが、これも3国とよく同期・一致している。したがって、各国の経済成長は、その国の経済成熟度や金融・財政政策などの各国特有の要因よりも、むしろ汎世界的要因に依存していると考えられる。原油価格の高騰（1973, 1979, 1990, 2000年）の後、不況が発生して（2009年の不況に先立つ2008年に原油価格は過去最高値を付けたが、その後急落し、年平均では価格高騰が表現されていない）、両者間の関連が示唆される。

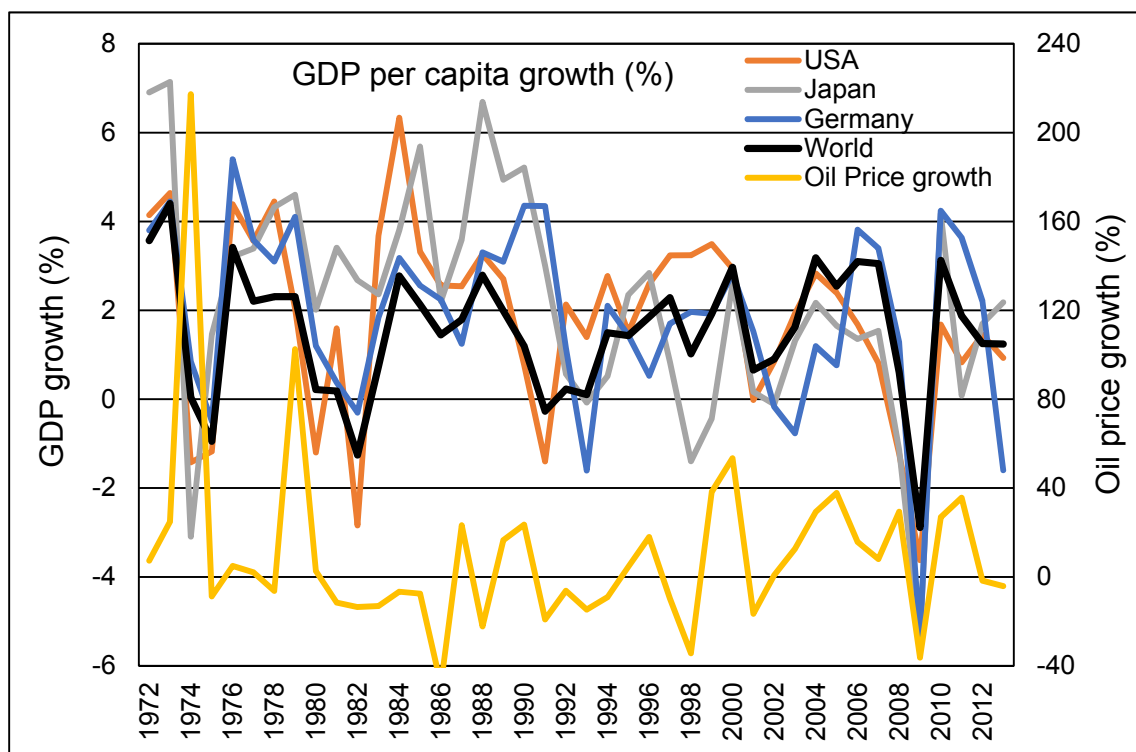


図1-1 先進各国の一人あたりGDP成長率の比較

(データ出典) 原油価格：BP(2017), その他：World Bank

1.2.2. 成長会計と全要素生産性 (TFP)

図 1-2 日本の成長会計（上：積み上げグラフ，下：個々の要素の成長率寄与分+労働力人口比率と就業率の成長率）の変遷を示した。

成長会計とは，GDP の成長率を各要素の成長率の寄与分に分解するものである。生産関数は一般には次のようなコブ・ダグラス型関数で表現される。

$$Y = AK^\alpha L^{1-\alpha} \quad (1-1)$$

Y が産出 (GDP)， K が資本， L が労働投入， α が資本分配率， $1-\alpha$ が労働分配率である (A はスケール係数，詳細後述)。式 (1-1) の両辺の自然対数をとる。

$$\log Y = \log A + \alpha \log K + (1 - \alpha) \log L \quad (1-2)$$

両辺を時間で微分する (連続系を想定)。

$$\frac{d \log Y}{dt} = \frac{d \log A}{dt} + \alpha \frac{d \log K}{dt} + (1 - \alpha) \frac{d \log L}{dt}$$

$$\frac{d \log Y}{dY} \frac{dY}{dt} = \frac{d \log A}{dA} \frac{dA}{dt} + \alpha \frac{d \log K}{dK} \frac{dK}{dt} + (1 - \alpha) \frac{d \log L}{dL} \frac{dL}{dt}$$

$$\frac{dY/dt}{Y} = \frac{dA/dt}{A} + \alpha \frac{dK/dt}{K} + (1 - \alpha) \frac{dL/dt}{L} \quad (1-3)$$

すなわち，産出 (GDP) の成長率 (左辺) は， A (スケール係数) の成長率，資本の成長率の α (資本分配率) 倍，および労働の成長率の $1-\alpha$ (労働分配率) 倍の和で表される。右辺の各項をそれぞれの「寄与度」と呼び，このように産出 (GDP) の成長率を各要素の寄与度に分解することを成長会計と呼ぶ。 A (スケール係数) の成長率は，産出 (GDP) の成長率 (左辺) のうち資本と労働の寄与度で説明しきれない残差で，特に「全要素生産性」(TFP: Total Factor Productivity) と呼び，技術や教育 (「人的資本」) を表現していると説明されることが多いが，確証が示されているわけではない。

図 1-2 では，さらに労働 (L) を質と量に，資本 (K) を ICT (情報通信技術) とそれ以外に細分して寄与度を示している。図 1-2 (上) はこれらの寄与度を労働の質，量，ICT 資本，それ以外の資本，の順に足し合わせて，積み上げて表示している。したがって，これらの寄与度を合計した黄色線と丸付黒線 (GDP 成長率) の差が TFP (残差) の成長率に相当する。

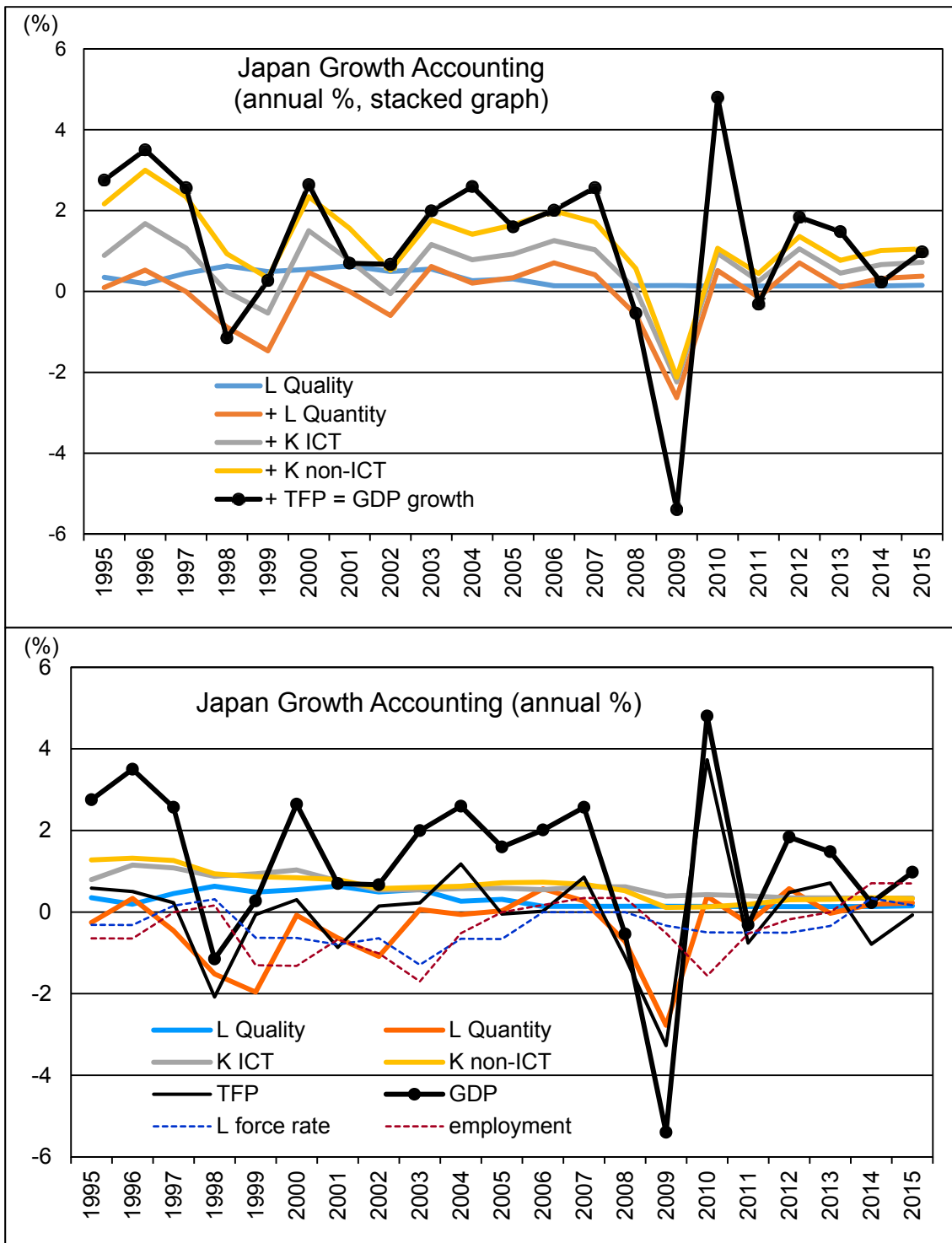


図 1-2 日本の成長会計(上) と 米国および日本の GDP・TFP・エネルギー成長率(下)
 (データ出典) 労働力調査：総務省統計局，その他：The Conference Board, Inc

図 1-2 (下) は TFP も含むこれらの寄与度を (積み上げではなく) 比較したものである。労働の質は全期間を通して成長率が低く、とくに 2006 年以降はほとんど成長していない。資本の寄与度は、ICT もそれ以外も、1990 年代には共にそれぞれ約 1%/年の成長寄与を示していたが、徐々に低下し最近ではほぼ成長 0 となっている。したがってこれらの 3 要素は期間前半の成長率の底上げには若干貢献したものの、産出 (GDP) の成長率の短期的変動 (最大で約 10%の幅) には全く寄与していない。

したがって、産出 (GDP) の成長率の短期的変動は労働の量 (オレンジ線) と TFP (黒細線) に依存している。ただし、労働力人口比率 (青点線: 労働力人口 (= 就業者 + 完全失業者) / 15 歳以上人口) と就業率 (赤点線: 就業者 / 労働力人口) の変化率は労働の量 (オレンジ線) とは同期せず、むしろその 1~2 年遅れで変動している。すなわち、労働力人口や就業者の変動は GDP 変動の原因ではなく、結果である。また、労働量の変化率 (オレンジ線) も、残業やパートの就業時間の増減と解釈されることから、GDP 変動の原因ではなく (残業が経済成長をもたらすのではない)、結果である (仕事が多いので残業する) と考えられる。したがって、GDP の短期的変動は労働や資本の変化では説明できない。

消去法的には TFP (残差) が原因ということになり、事実、最近では GDP の変動はほぼ TFP で説明し尽くされているが、これは他の要因 (変動がほぼ 0) では説明できないことの裏返しに過ぎない。TFP は一般には技術進歩や「人的資本」(教育) と解釈されているが、これらは長期間に徐々に効果を表すもので、短期的変動の説明は困難である。すなわち、経済成長 (少なくとも最近の成長率の短期変動) は、労働・資本・教育・技術進歩などの古典的要因や生産関数では説明できず、別の原因によると考えられ、経済成長そのものも別の要因や考え方 (例えば貨幣価値以外での計測) で説明する方が適切かもしれない。

第3節 貨幣価値とエネルギーによる経済計測

1.3.1. 市場貨幣価値による経済計測（GDP など）の特徴と問題点

GDP は、各国の経済規模、すなわち国民の福利（幸福・利益）の総計を測定・比較することを目的とした指標で、一定期間（通常は1年）に市場で取引されたすべての商品・サービスの「付加価値」（第1節参照）を合算したものである。市場価格（貨幣単位）で計測されるが、国際比較や異時点間比較が可能のように、集計データに一連の複雑な処理を施した理論上の数値である。

人々の福利や満足度を表現する概念上の指標としては「効用」があるが、その計測や個人間比較が困難なうえに、それを国単位や世界全体に合算する方法も定まっていない。このため、一般には貨幣単位で計測し合算した GDP など代用される。この根底には、（完全）競争市場において需要と供給の均衡に決定される市場価格は、顕示された人々の選好を示すとともに、その均衡は経済（GDP など）を最大化し、全体としての人々の福利を最大化するという思想がある（第1節参照）。

しかし、GDP には次のような問題点がある。

- ① GDP は市場取引に限定されるため、市場取引されない家庭内生産、ボランティア、「地下経済」などは含まれない。グーグルの無料検索（従来ならば相当の費用を要していたはずの内容）は全く計上されない。逆に、「非生産的な」金融業の売り上げ（リスク肩代わりの代償など）は含まれている。また、研究開発（R&D）を費用とみるか投資とみるかで GDP の規模は大きく異なる。
- ② 空気（酸素）は人類を含む生物の生命維持に不可欠の物質であるが、豊富に存在し誰もが入手可能であるため市場で取引されるはず価格が付かないため、GDP 等の貨幣価値による経済計測には含まれない。水も生命にとって最も重要な物質であるが、その豊富さゆえに貨幣価値では極めて過小評価されている。価格は希少性を反映するが、必要性や重要度の指標としては必ずしも適切ではない。
- ③ 世界の富の過半は数十人の富豪が所有しているといわれ、貨幣単位で計測すれば、世界の福利の大半をこれらの富豪が独占することになる。どうしても「No.1」を欲する人々がいると（No.2 以下との実質的な差が僅少であっても）競争市場では異常に過大評価され、福利を正當に反映しない。三ツ星レストランでの1人のディナー代で数十人を飢餓から救えるとき、両者の福利は等価とは思えず、奢侈財が過大評価されている。

- ④ 国際比較のためには為替レートを用いるが、これでは全く同じ商品でも異なる価値に評価されることもある（例：「ビッグマック指数」）。購買力平価を用いることもあるが、これも決定的な換算法ではなく、必ずしも豊かさの実態を表さない。
- ⑤ 異時点間の比較はより困難である。総体的な「物価」は貨幣供給量に依存するため、同じ品揃えの財・サービスの組み合わせを比較して、「物価」の影響を取り除くべく「実質化」するが、技術進歩などは組み込めない。IT 技術の進歩と普及は著しいが、低価格化の進行により、貨幣単位で計測すると IT 製品・サービスの GDP に占める比率は内容に比して大幅に過小評価されてきている。
- ⑥ 将来の価値は時間選好率（現在を将来より重視）で割り引いて比較することが多いが、マイナス金利の現状ではその妥当性に疑問が残る。将来を軽視することは、特に資源・環境の枯渇が危惧されている現状では世代間の対立を招きかねない。最近では持続可能性、すなわち資源の枯渇や環境の劣化など将来世代への負担も含めて評価すべきだという意見も多い。

要約すると、GDP など市場価格で表現された経済規模の指標は、貨幣の交換・価値尺度機能を反映して多くの利点を有し、さらに国際・異時点比較を可能にすべく種々の工夫が施されているが、逆にそれが一意性・客観性を損なっている側面もあり、人々の満足度を正確に表現しているとは言いきれない。

こうした問題点を克服すべく、GDP を代替する多くの指標も考案されてきている。ブータン政府がアンケートを集計して算出した GNH (国民総幸福量) はよく知られており、GDP では最貧国の 1 つである同国が高く評価され、市場経済や貨幣価値に対するアンチテーゼとしては興味深い。しかし、主観的で恣意性が高く、改良版では同国の評価も低くなり (<http://www.grossnationalhappiness.com/survey-results/index/>)、人々の福利の指標として普及するには至っていない。その後、GDP の欠点を補う多様な指標が考案されているが決定版はなく、サルコジ仏大統領 (当時) からこの問題の調査を依頼されたスティグリッツ、センらは、一つに絞らずに多くの指標を網羅する「ダッシュボード」評価を推奨している (Stiglitz et al., 2009)。

最近では、持続可能性の評価を主目的にした IWI (包括的富指数) に関する報告書が国連から出された (UNEP and UNU-IHDP, 2014)。同指数は自然資本も考慮しているが、森林に代表されるように、その減耗は投資 (植林) により回復可能としていて、枯渇性資源問題の本質が必ずしも解析されていない (詳細は第 1 節および第 3 章参照)。

1.3.2. エネルギーによる経済計測の利点

以上概観したように、GDP など貨幣価値による経済計測には問題点があるので、ここではエネルギーで経済を計測することを考える。

「李克強指数」という中国経済の実勢を推定するための指標がある。中国の李克強現首相が2007年に米国大使に「中国のGDP成長率などは信用できない。私は鉄道貨物輸送量・銀行融資残高・電力消費の推移をみている」と語ったとされ（Economist, 2010），次式で表現される。

$$(\text{李克強指数}) = (\text{鉄道貨物輸送量}) \times 25\% + (\text{銀行融資残高}) \times 35\% + (\text{電力消費}) \times 40\%$$

これは、銀行融資残高を除くと、エネルギー消費に他ならない。

「エネルギー」を基準に経済を記述・分析できれば、次のような利点が期待できる

- ① 質量・エネルギー保存則やエントロピー増大則など自然界の基本法則と調和的なモデルが構築できる可能性がある。
- ② エネルギーはリサイクルできない（熱力学第二法則）が、物質（金属など）はエネルギーさえ加えればリサイクル可能で（質量保存則），前者で両者を代表できる。
- ③ 資源枯渇（使用量＝減少量）や環境負荷（汚染量←使用量とほぼ線形関係，図1-3右上挿入図）がより直接的に評価できる。
- ④ 為替換算・実質化などの恣意性のある加工がなく，客観性が高い。効率や幸福度など，価値判断などが絡む要素は，分離して別途分析すればよい。
- ⑤ 人々の福利をより反映し（線形関係に近い，詳細下記），奢侈品などに対する過大評価が是正され，貧富・世代間格差にも対応できる（時間割引なし）可能性がある。
- ⑥ 好況（エネルギー消費増）が需給逼迫を経て価格高騰につながり，それが不況を招くという景気循環が内生的に分析・再現できる可能性がある。
- ⑦ 資源量は，技術や価格に応じて増減する可塑性を有し，品位分布と探鉱プロセスを組み込めば，資源の弾力性，さらには他資源への遷移も再現でき，人類文明の時持続可能性も評価できるようになるかもしれない。

1.3.3. GDP とエネルギー消費の関係

図1-3にGDPとエネルギー消費の関係を示した。上図は1969～2014年のGDPと世界のエネルギー消費および石油生産量（≒消費量）の関係の推移を示しており，下図は1990

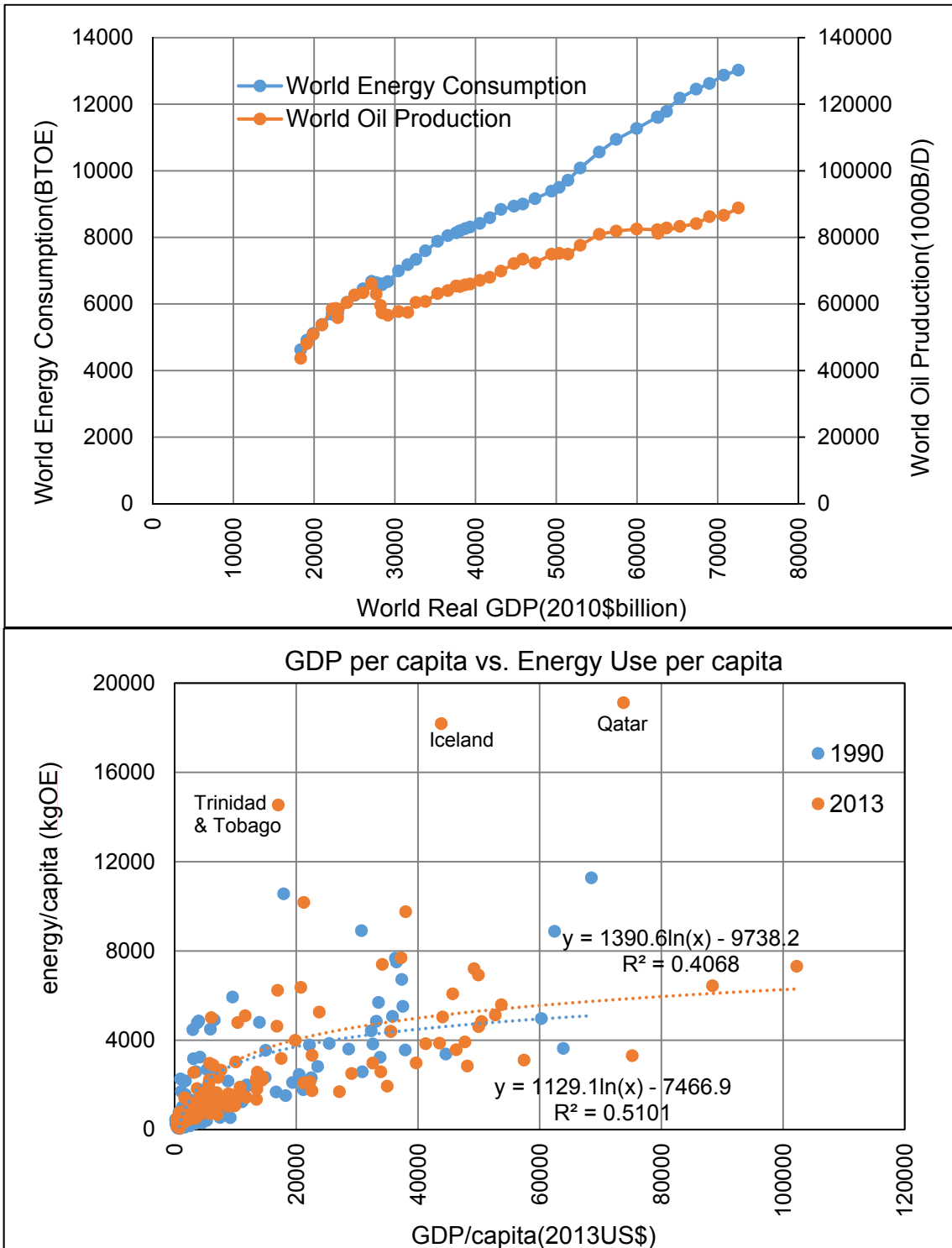


図 1-3 GDP とエネルギー消費・石油生産の関係

(データ出典) 一次エネルギー・石油生産量：BP(2017)，GDP：OECD, World Bank

年と 2013 年の各国の一人当たりの GDP とエネルギー消費の関係を示している。

図 1-3（上）で世界のエネルギー消費は GDP の成長と軌を一にして増加してきている。しかし、GDP の増加に対してエネルギー消費は必ずしも線形で増加するわけではなく、その増加は逡減して（緩やかになって）きている。世界の石油生産量は、1970 年代の 2 度の石油危機での他資源への転換などにより急落したが、それを除くとエネルギー消費同様に、GDP 成長に呼応して増加しているが、その増加度は線形ではなく逡減してきている。ただし、このグラフは時系列データなので、この増加度の逡減は省エネなどによる「エネルギー強度」（消費エネルギー/GDP、「エネルギー生産効率」の逆数）の経時的な低下を表現しているとも解釈できる。

そこで、図 1-3（下）では 1990 年と 2013 年の 2 時点の世界各国の 1 人当たり GDP と 1 人当たりエネルギー消費の関係を示した（一種のパネルデータ）。各国の点はかなり散らばっているが、ともに指数関数で近似され、同一時点においても GDP 増加に対しエネルギー消費の増加は逡減している。さらに、近似曲線はむしろ 2013 年の方が僅かながら上方に位置し、経年による省エネ効果は認められない。2013 年の方が上方に位置するのは、カタール（世界最大ガス田を有し LNG 液化による自家消費が多い）、アイスランド（発散プレート境界にホットスポットが重なった特異点で地熱供給が異常に多い）などのエネルギー異常消費国（トリニダード・トバゴも LNG 輸出国だが統計処理上の問題の可能性もある）による影響で、これらの国を除けば両年度の近似曲線はほぼ一致する。

すなわち、エネルギー（および石油）消費は GDP に対し逡減的な対数関数で近似される。一方、効用も一般に貨幣価値に対する対数関数などの逡減的な関数と推定されている（例えば、von Neumann の期待効用関数：von Neumann and Morgenstern, 1944）。したがって、効用とエネルギー消費の貨幣価値（GDP など）に対する逡減性が類似（例えば、ともに対数関数で近似される）していれば、GDP など貨幣価値よりエネルギー（石油）消費のほうが、より直接（線形）的に効用を代表していることになる。

GDP など貨幣価値による経済計測は人々の福利（幸福度）を反映させるべく種々の工夫がされているが、上記のように必ずしも成功していない。これに対して、エネルギーは計測における恣意性は低く客観的であるという利点があり、効用や福利（幸福度）と線形関係の可能性もあるが、これらを直接反映していることを示す（限界効用理論のような）理論的根拠はない。そこで両計測法を対比させて、それぞれの計測値と福利との関係を考察する。

これらは次式のように表現される。ただし、各係数 (α , β) は定数とは限らない。

貨幣価値 (GDP など) ⇒ 福利 (幸福度)

$$(\text{福利}) = \alpha_1 \times \alpha_2 \times \alpha_3 \times \alpha_4 \times (\text{取引価格}) \quad (1-4)$$

α_1 : 為替レート (国際間の比較)

α_2 : 物価 (異時点および異なる商品・サービス間の比較, 「実質化」)

α_3 : 時間割引 (将来消費する商品・サービスの現在価値) (世代間の利益相反)

α_4 : 消費者の選好率・「効用関数」 (貨幣価値→幸福度など)

「実質 GDP」の場合, $\times (\alpha_1 \times) \alpha_2$ の補正は既に修正済み

エネルギー消費 ⇒ 福利 (幸福度)

$$(\text{福利}) = \beta_1 \times \beta_2 \times \beta_3 \times \beta_4 \times (\text{エネルギー消費}) \quad (1-5)$$

β_1 : 企業 1 (鉱山など) で自家利用・廃棄されずに搬出される割合

β_2 : 企業 2 (製油所・発電所など) での効率 (精製率・発電効率など)

β_3 : 企業 3 (製造業など) で作られた製品の効率 (車の燃費, LED vs. 白熱球など)

β_4 : 消費者の効率・選好率 (使用様式, エネルギー→幸福度など)

これらを比較すると、市場均衡に基づく貨幣価値 (GDP など) のほうがより「福利」に近いはずだが、 α_1 および α_2 に恣意性や価値判断が入る余地があり、一意性・客観性が損なわれる危険がある。これに対し、エネルギー消費を用いたほうが客観性・一意性が高く、各効率 ($\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$) を別途検討すれば、省エネなどへの指針も得られると考えられる。 $\beta_1 \sim \beta_3$ の補正を行ったものがエントロピー (またはエクセルギー) に相当し、これらの係数の同定には、実データによる推計に加えて、熱力学的な理論解析も有効である。福利 (効用) との関係を示す α_4 と β_4 が最も重要であるが最も評価困難で、 α_4 は富者偏重、 β_4 は貧者重視の傾向があり、 β_4 は定数 (線形関係) の可能性がある (上記)。

しかし、いずれにせよ本論文は、エネルギーが貨幣価値計測を代替できると主張するものではなく、財政・金融・物価・金利・失業・貿易・為替・税など多くの経済現象の解明には従来の貨幣価値に基づく経済学が必要なことは自明であり、エネルギーによる経済計測はそれを補完するにすぎない。しかし、この従来とは異なった視点を導入することには多くの利点と可能性があり、以下でそれを試みて検証しようというのが本論文である。

1.3.4. GDP・CO₂ 排出量・エネルギー消費・石油生産量の成長率の関係

GDP など貨幣価値による経済計測には多くの問題点があるとはいえ、これが最も基本的な経済指標であることは論を待たない。したがって、エネルギーによる計測が有効であるためには、まず、貨幣価値計測（GDP など）をどの程複製できているかがチェックポイントになる。図 1-3 から両者の水準には正の相関が認められたが、次に、GDP などの変化（成長率）がどの程度エネルギー消費の変化に反映されているかがポイントとなる。

図 1-4 に、世界の GDP 成長率と世界の第一次エネルギー消費量および石油生産量の成長率を比較して示した。環境負荷の指標として世界の CO₂ 排出量の変化率も示した。

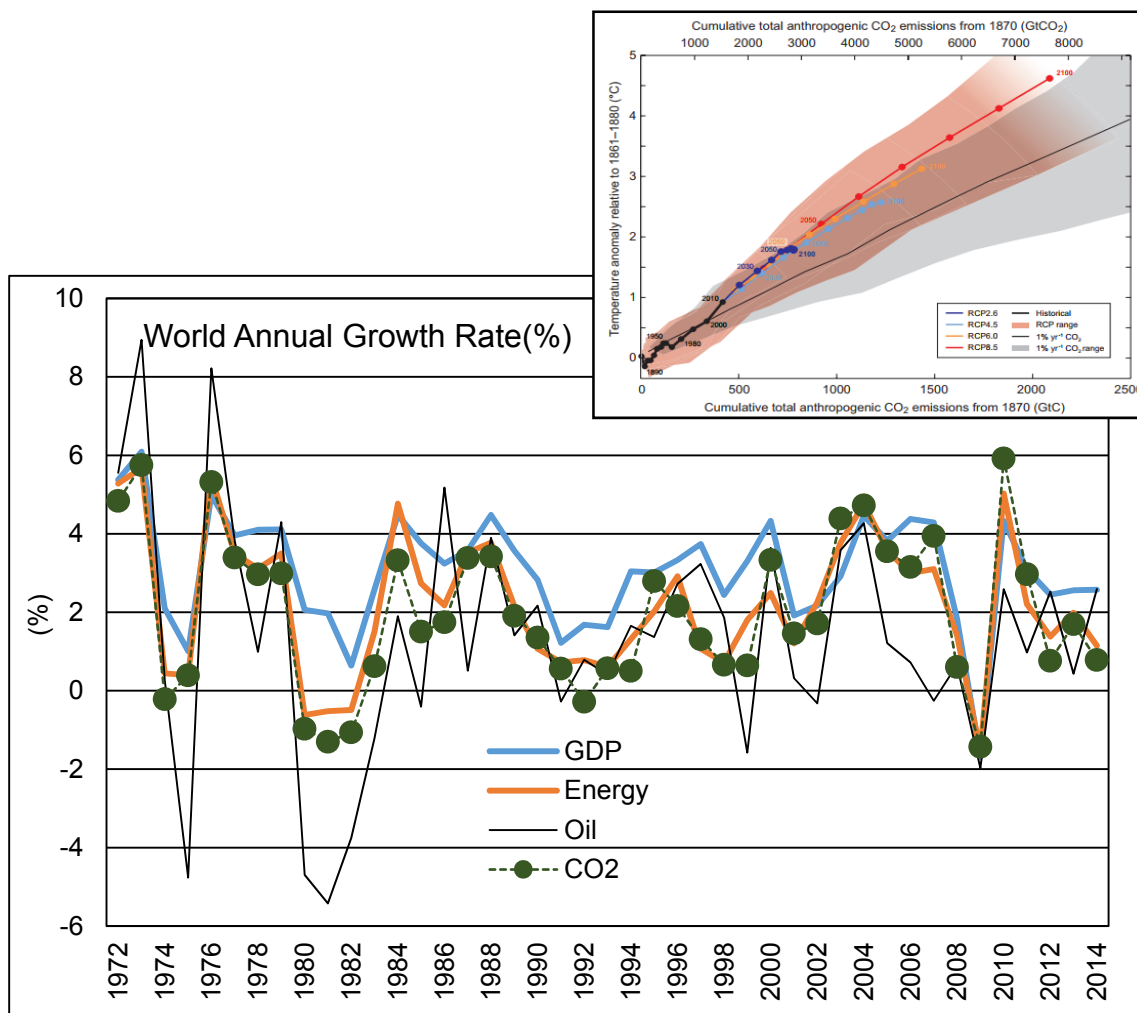


図 1-4 世界の GDP・一次エネルギー・石油生産量・CO₂ 排出量の関係 (右上: IPCC, 2013)

(データ出典) 一次エネルギー・石油生産量: BP(2017), その他: World Bank

図 1-4 の右上挿入図は、IPCC による第 5 次報告書 (IPCC, 2013) から引用したもので、横軸は 1870 年以降に世界で大気に排出された燃料由来の CO₂ の累積排出量で、縦軸は 1861~1880 年の平均気温からの気温上昇 (温暖化) である。左下の黒線が 2010 年までの実績、その右上に続く色の異なる線は CO₂ 排出量の異なるシナリオの 2100 年までの予測シミュレーション結果 (の期待値) である。右上への線の伸びは排出量の最も多い現状維持シナリオ (赤線) で最も長く、CO₂ 排出量の削減度合いに応じて右上への伸びは短くなるが、どれも傾斜がほぼ同じ直線上に位置している。すなわち、シナリオごとの CO₂ 排出速度の相違は気温上昇/排出量費には全く影響しない。これは、排出された CO₂ は (地質学的) 長時間を経て、海洋への溶解を経由して炭酸塩岩として沈殿して大気から除去されるが、このプロセスは CO₂ 排出に比べてずっと緩慢なためである。したがって、CO₂ の累積排出量と気温上昇はほぼ線形の関係にあり、前者がわかれば後者は一意に決定する。

図 1-4 では、燃料由来の CO₂ の累積排出量は、(当然ながら) 一次エネルギー消費量に極めてよく一致していて、エネルギー (および石油) の累計消費量が環境負荷の良い指標となる、すなわち、右上挿入グラフは横軸にエネルギーまたは石油の累計消費量を用いても有効であることを意味している。

図 1-2 では資本や労働では GDP の成長率をほとんど説明できなかったが、図 1-4 では世界の GDP の成長率は一次エネルギー消費量および石油生産量の変化率ときわめてよい同期・一致を示している。したがって、エネルギー (または石油) 消費量は GDP に替わる経済計測の指標としての資格を十分有していると考えられる。ただし、どちらが原因でどちらが結果であるかはこのグラフだけでは断言できない。しかし、図 1-1 で GDP の急落の前には原油価格が高騰していることから、石油の需給逼迫が原油価格高騰をもたらした結果、石油の消費量 (= 生産量) が減少している可能性があり、もしそうなら石油供給が経済変動を規制していることになる。

1.3.5. 投資とエネルギー消費

経済学では伝統的に、資本が産出 (GDP など) を規定すると考えられてきた。本章第 1 節で、このとき資本は化学反応における触媒の役割を果たし、資本 (触媒) が多いときにはより多くの資源フローを需要することを明らかにした。一方で、資源フローの一部が投資され、その累積が資本になる。したがって、投資 (資本形成) はエネルギー (または石

油) 消費量と正の相関を示し、資本は累計エネルギー（または石油）消費量に対応する。こうして蓄積した資本（累計エネルギー消費に対応）が、今度は各時点のエネルギー消費を規制する。この関係は、上で議論した累計エネルギー消費が CO₂ の累積排出量につながり、それが気温上昇を招くというプロセスに似ている。

図 1-5 に世界の投資（資本形成）と石油消費・原油価格の関係を示した。世界の投資実績と石油生産（消費）量には良い相関が認められる。特に、1970 年代～80 年代前半は絶対値も含め極めてよく一致している。石油消費が経済を代表するとすれば、それと投資の成長率が一致するという事は、ケインズ流に限界投資(=貯蓄)性向が一定であることを意味する。1985 年以降は石油消費に対する投資の感応度（弾力性）が拡大してきている。

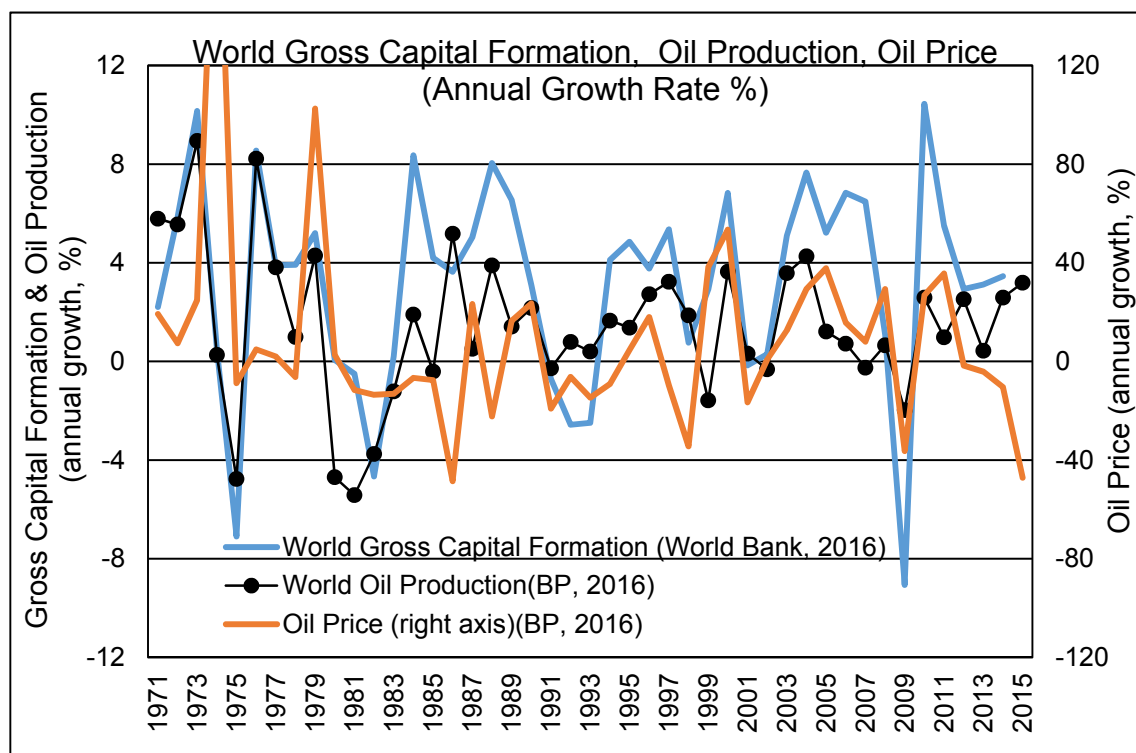


図 1-5 世界の投資と石油消費・原油価格の関係

(データ出典) Capital Formation : World Bank, その他 : BP(2017)

図 1-5 には原油価格の変化率も示しているが、投資および石油生産の増加は（おそらく需給の逼迫を通して）1 年程度の遅れで原油価格の高騰を招き、それは 1～2 年遅れで不況、すなわち投資・石油生産の減少を招くが、それにより需給は緩和し原油価格が低下し、景気は好転する・・・というフィードバックサイクルを形成していると解釈できる。この点について、次章以降で検証していく。

第4節 米国の経済とエネルギーの歴史

次章以降で、石油生産でエネルギー消費を代表させ、世界全体を対象に経済とエネルギーの関係を考察するが、石油生産が全世界に拡張・展開したのは第二次世界大戦後で、まだ数十年の歴史しか有していない。一方、米国のエネルギー産業は100年を大きく超える歴史を有するので、本節では、次章以降の解析の参考のために、石油・天然ガスに限らず石炭や鯨油を含めた米国のエネルギー資源の歴史を概観する。

1.4.1. 米国のエネルギー経済史

米国は、100年以上にわたる経済およびエネルギー関係の統計が整備されており、エネルギー源も遷移してきていて、エネルギーと経済の関係を考察する際には大変参考になる。図1-6に1900年からの米国のインフレ・失業率と世界の金生産量・原油価格の関係を示した。

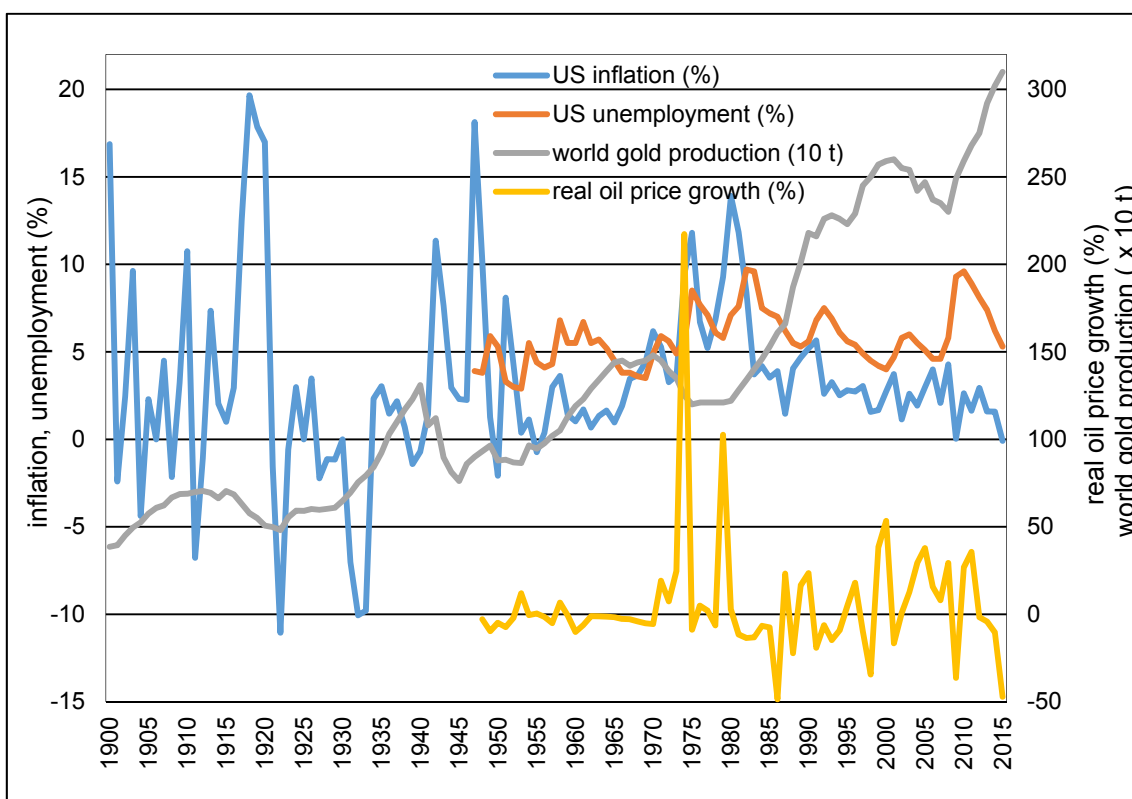


図1-6 米国のインフレ・失業率と世界の金生産量・原油価格（1900～）

(データ出典) インフレ(US CPI)・失業率： US Bureau of Labor Statistics,
世界の金生産量： USGS, 原油価格： BP(2017)

金本位制および固定相場制の時期（～1972）には、経済成長（実質 GDP など）に比べて、累計金流通量の増加（金生産量）が大きいとインフレ（金の価値低下）が起こり、小さいとデフレが起きる傾向があり、インフレ率 0%を中心に、正にも負にも大きく振れている。金の生産量が多かった時期の後に、急激なインフレ（金の減価）が発生する傾向がある。変動相場制の時期（1973～）には、2回の石油危機を除き、インフレ率は正の数%で比較的安定していた。インフレと失業率にはトレードオフの関係（「フィリップス曲線」）があるといわれるが、このデータからは、むしろ原油価格の高騰がインフレにつながり、それは 1~2 年遅れで失業率の上昇を招くという関係が読み取れる。米国ではインフレの兆候が見られると半自動的に金融引き締めが行われることが多く（Taylor, 1993），それが失業率の上昇を招くのかもしれない。

図 1-7 に、米国の GNP、石油生産量、石炭（瀝青炭）の生産量および価格の水準の推移を示した。

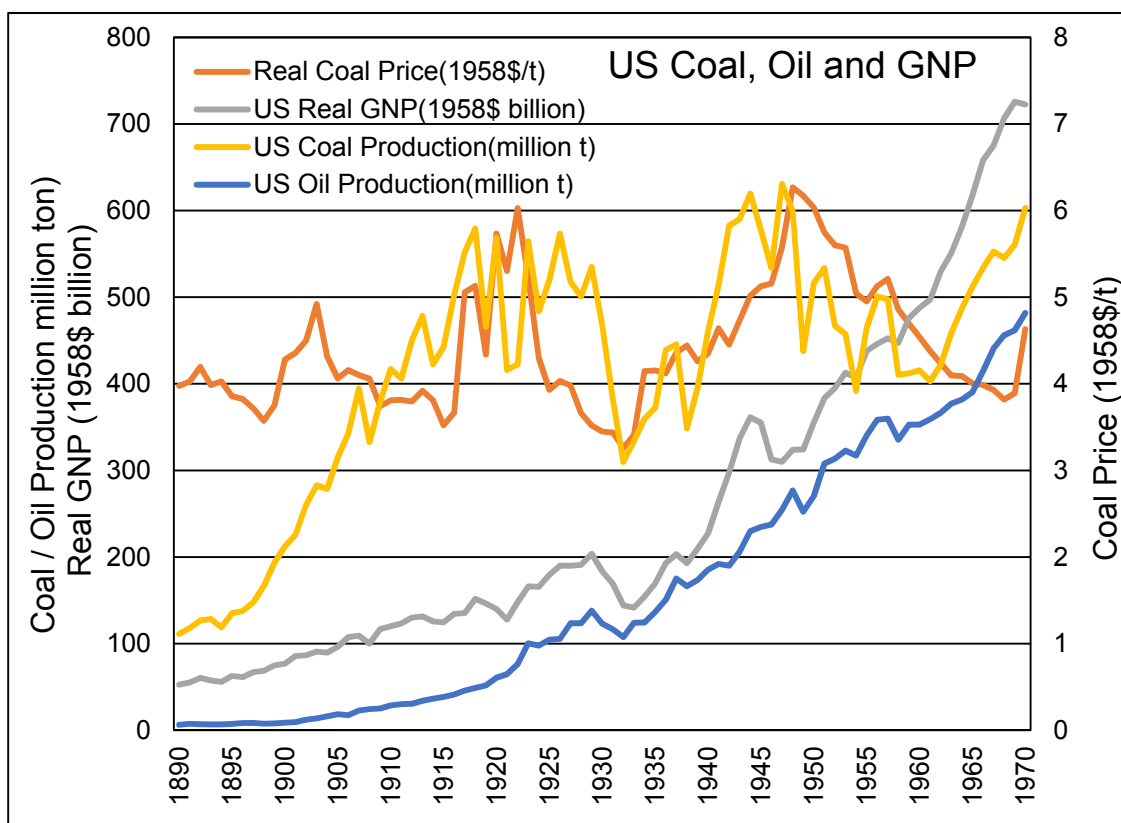


図 1-7 米国の GNP と石油生産量および石炭（瀝青炭）生産量/価格の推移

（データ出典） US DOC (1975)

米国の GNP の変動は石炭（瀝青炭）生産量の変動と調和的である。石炭生産量は、1910～20 年代および 1940 年代にピークを示し、それに呼応して石炭価格も高騰し、1920 年頃および 1945～50 年にピークとなった。前者（1920 年代）の場合は、それに引き続く 1930 年代に石炭生産量（および価格）が下落し、それに呼応して GNP が急落した大恐慌に相当している。大恐慌の原因については種々議論されているが、エネルギー資源の逼迫が誘因となった可能性がある。後半のピークは第二次世界大戦に相当し、その後の 1950 年代にやはり石炭生産量および価格が下落しているが、この時期には米国エネルギーの主役が石油に移行していたこと（石油のトン当たり発熱量は石炭の約 1.7 倍）もあってか、経済（GNP）に対する影響は軽微であった。

図 1-8 に米国のエネルギー各種資源の生産量および GNP の水準の推移（対数スケール）を示した。

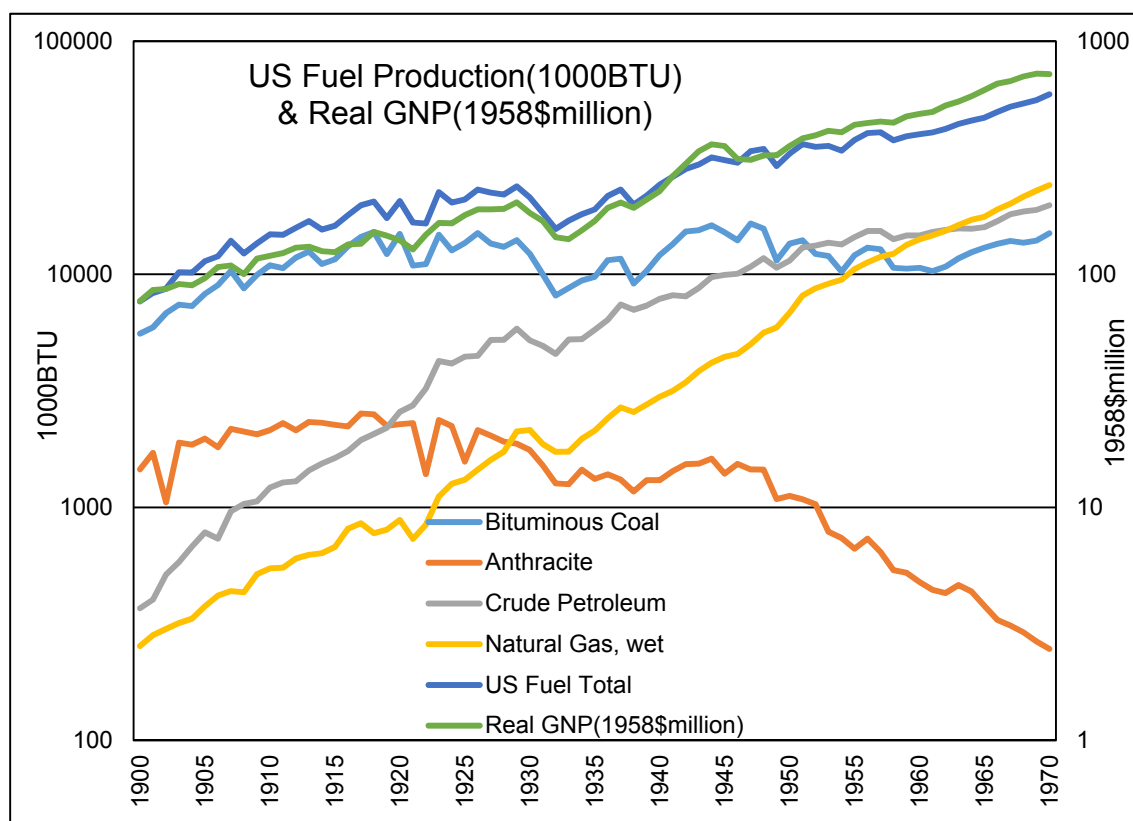


図 1-8 米国のエネルギー資源生産量および GNP の推移

(データ出典) US DOC (1975)

米国の GNP の推移は全燃料消費（総生産）と極めて調和的で、細かい変動も同期している。ただし、両者の関係は必ずしも線形ではなく、図 1-3 同様、GNP 増加に対してエネルギー消費の増加は逡減している。エネルギー資源は、無煙炭 ⇒ 瀝青炭 ⇒ 石油 ⇒ 天然ガス、と遷移してきた。1960 年以前のエネルギー総消費および GNP の変動は、ほとんど瀝青炭生産量の変動で賄われている。その後は、エネルギー消費の主役が石油および天然ガスに移行した。

図 1-9 に米国の GNP 成長率と石炭（瀝青炭）生産量成長率および価格を示した。

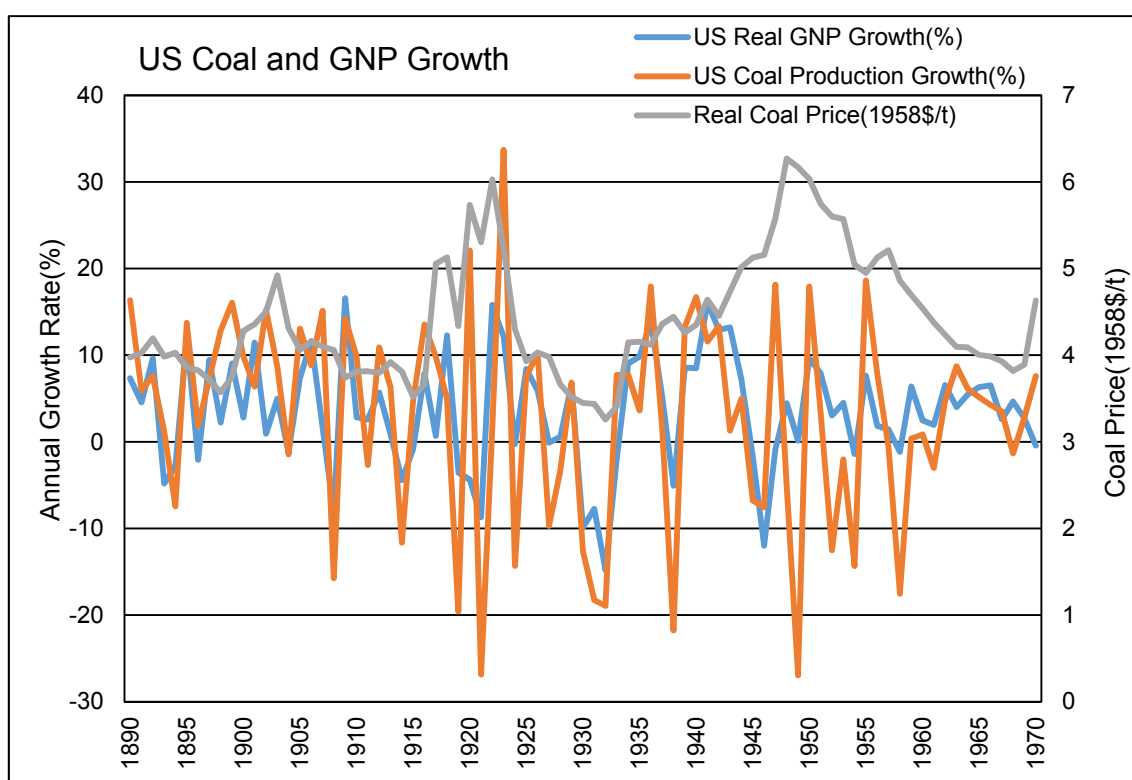


図 1-9 米国の GNP 成長率と石炭（瀝青炭）生産量成長率および価格

(データ出典) US DOC (1975)

GNP と石炭（瀝青炭）生産量の変化（成長）率は極めてよく同期しており、その値（絶対値）も近い。すなわち、エネルギー（この場合石炭）生産量（＝消費量）で経済（ここでは GNP）が代表できる。石炭価格の高騰期には石炭生産量および GNP の変動幅が大きくなる。石炭価格の高騰のピークの 1（～2）年後に（年次データのためラグ期間の評価は不正確）石炭生産量および GNP の成長率が 0 または負にまで急落し、経済が収縮している。

1.4.2. 19世紀米国の鯨油生産量・価格と石油への転換

図 1-10 に米国の鯨油生産量・価格と石油生産量の推移を示した。鯨油の主要用途は灯火で、米国では 1820 年頃から生産量は増加し、sperm oil (マッコウクジラ) は 1830~40 年代に、whale oil (ナガスクジラ) は 1840~50 年代に生産ピークを迎えた (ちなみに、1853 年の「ペリー来航」は北西太平洋で操業する米国捕鯨船の水・食料・燃料の確保が主目的であった)。1859 年のドレークによる成功以降その地位は石油 (灯油) に取って代わられた (むしろ鯨油の枯渇が代替品の石油への転換を促進したとみるべきだろう)。鯨油価格は、生産量 (需要) 増加にあわせて 1830 年以降徐々に上昇したが、生産量のピーク (1840~60) 以降の需給逼迫により急騰し、1865-66 にピークに達した。この結果、その直前の 1859 年のドレーク井で採掘に成功した石油への代替が急速に進み (1 barrel = 42 gallon), 鯨油の生産量も価格も急速に下落した。ここでも、需要増加 ⇒ 需給逼迫 ⇒ 価格高騰 ⇒ 代替資源への遷移, という構図が読み取れる。

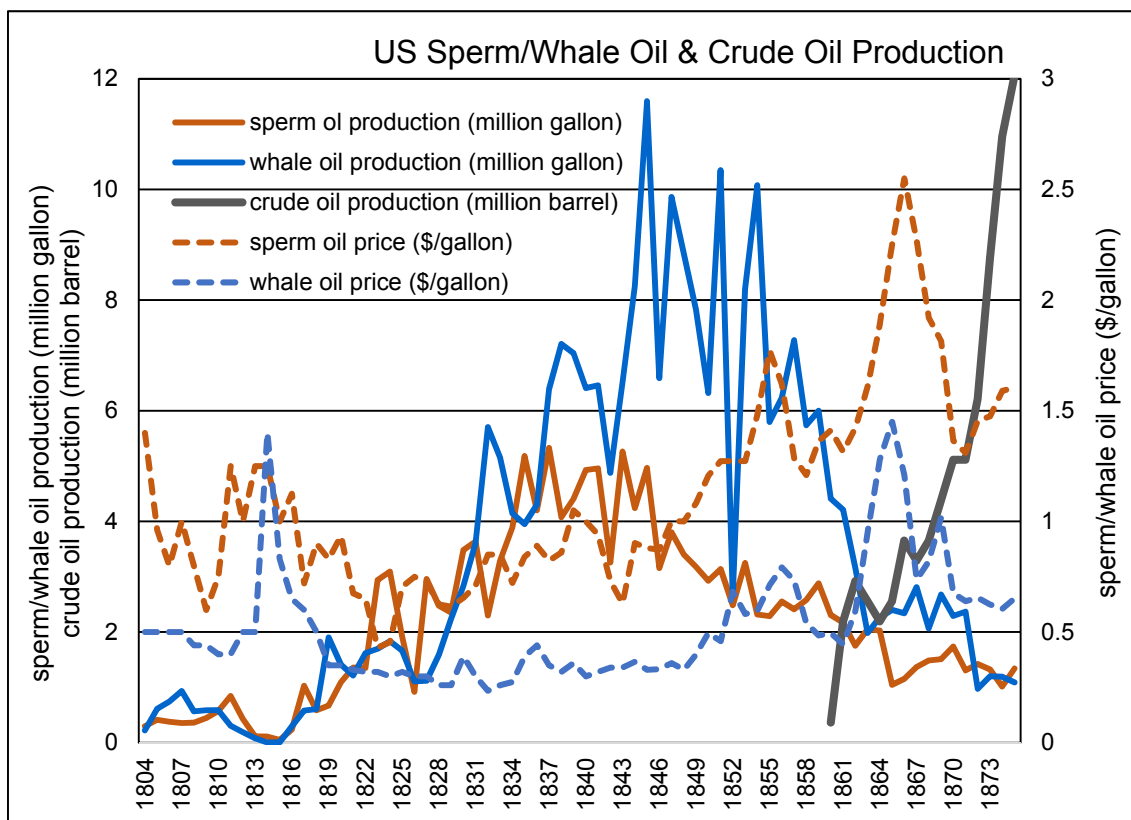


図 1-10 米国の鯨油生産量・価格と石油生産量の推移

(データ出典) 鯨油生産量・価格 : Starbuck(1878), 石油生産量 : US EIA

第5節 地球のエネルギーフローと経済

1.5.1. 地球のエネルギーフロー

ここで、地球のエネルギーフローの全体像を概観する。

図 1-11 に、有史前（人類が食料以外のエネルギーを利用する前）と現在を比較して、地球のエネルギーのフローおよびその間に挟まるストックを、3種類の本源的エネルギー源（太陽光・地球内部・潮汐）、化石燃料などのストックの形成、人類による経済活動（資本形成と消費）、環境への廃棄に着目して模式的に示した（詳細は第3章参照）。

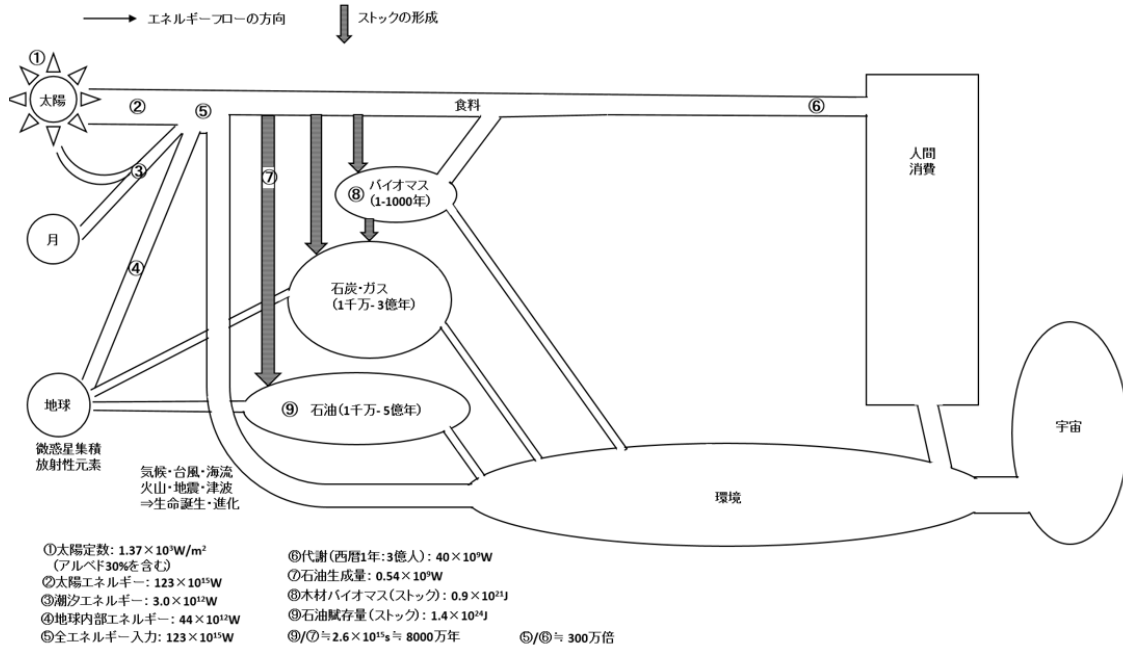
3種類の本源的エネルギーのうち量的に最も重要なのは太陽光である。太陽定数（地球近辺での単位面積に垂直に入射する単位時間当たりエネルギー量）約 1370W/m^2 ($\text{W}=\text{J/s}$, 仕事率:単位時間当たりエネルギー) からアルベド(大気外での直接反射) 30%を差し引いて、地球断面積を掛け合わせれば、全地球が毎秒受け入れているエネルギー量 $1.23 \times 10^{17}\text{W}$ が求まる。これは1年あたりに換算すると、 $3.9 \times 10^{24}\text{J/Y}$ になり、世界の1年あたり一次エネルギー消費量 $5.35 \times 10^{20}\text{J/Y}$ (BP, 2017) の7000倍以上にあたる。もっとも、太陽光の大半は海洋に注がれており、また、そのほとんどは大気・水循環や気象現象に使用され、その残りの一部を、植物を含む全生物が利用している。したがって、その約 $1/7000$ を人類が使用しているというのは決して小さい比率ではない。もちろん、風力・水力・太陽光発電などの「再生可能エネルギー」もすべてこの内数である。

地球内部エネルギーは、いわゆる「地熱」で、地球形成時の微惑星凝集や隕石重爆撃の位置・運動エネルギーと放射性元素の崩壊エネルギーが徐々に開放されているものである。地球全体で $4.4 \times 10^{13}\text{W}$ ($1.4 \times 10^{21}\text{J/Y}$) と太陽光の約 $1/3000$ であるが (Pollack et al.,1993), 火山・温泉や地震のエネルギーはすべてこの内数である。人類の使用量はすでにこの40%近くに達しており、「火山や地震の莫大なエネルギーが利用できれば、化石燃料に頼らなくとも人類文明は永劫に持続可能」という説は全くの誤解である。

潮汐エネルギーは、海水などが月および太陽に引っ張られるもので、地球の自転エネルギーが徐々に消費されている（このため地球の自転は僅かずつ遅くなっている）。地球全体で $3.0 \times 10^{12}\text{W}$ ($9.5 \times 10^{19}\text{J/Y}$) と人類使用量の20%以下である (Pollack et al.,1993)。他に、星の光や宇宙線のエネルギーなどもあり、後者の一時的・爆発的到来は地球環境急変や生物大絶滅に関係しているといわれるが、定常的なエネルギーフローとしては無視できるほど小さい。したがって、核（質量）エネルギーを除くと、いかな

るエネルギーも実は上記3種の本源的エネルギーから転換したものである(例:化石燃料)。定常状態では、これらのエネルギーフローのすべて(全く同量)が高エントロピー(低温・拡散)の排熱などとなって宇宙空間に廃棄されている(「エネルギー放出量が入射量より少ないのが地球温暖化の原因」という説は誤り)。

地球のエネルギーフローと世界経済 (1) 有史前



地球のエネルギーフローと世界経済 (2) 現在

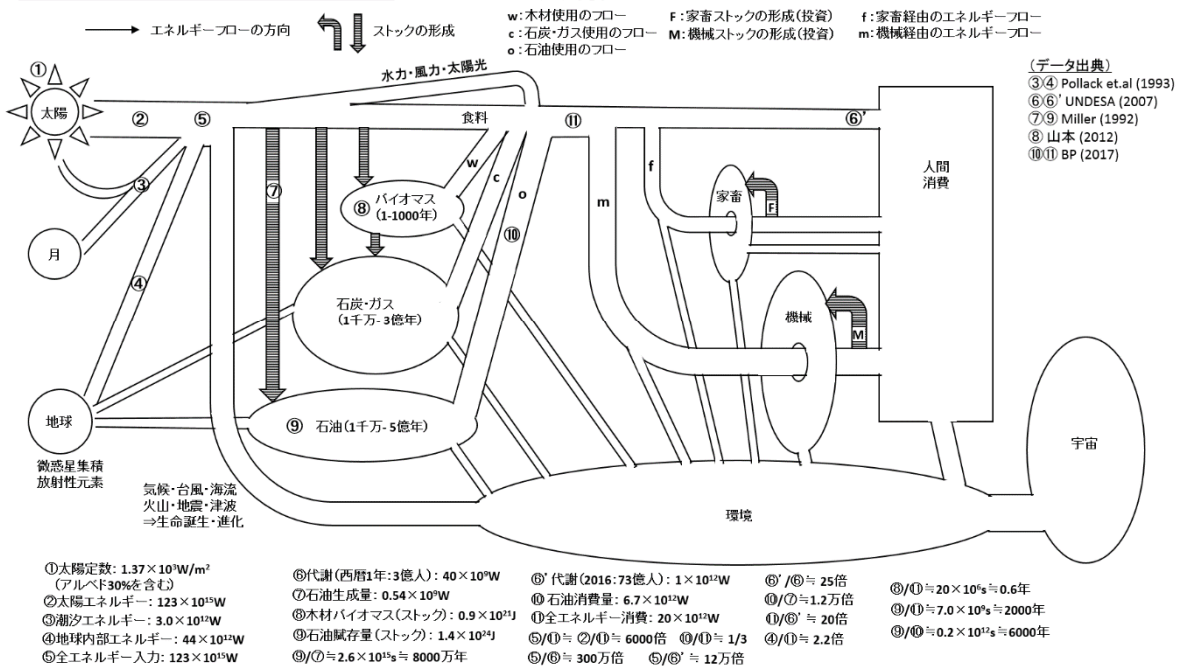


図 1-11 地球のエネルギーフローと世界経済 (上) 有史前 (下) 現在

図 1-11 (上) は人間が食料以外のエネルギーを利用していなかった有史前の状況である。上記 3 種類の本源的エネルギーのフローは基本的に現在と同じであり (正確には地球創生初期には、太陽光が今より弱く、代わりに高濃度の CO₂ による温室効果が大きかった)、今後も数十億年は継続すると考えられている。

このエネルギーフローの一部はバイオマスや化石燃料のストックを形成する (下向き矢印)。前者は植物・樹木などを含み最長でも数千年周期で入れ替わっているが、後者は微生物・藻類およびバイオマスの一部 (木材など) が地中に埋没して地熱 (地球内部エネルギー) により熟成し、数千万年～数億年かけて、徐々に、しかし大量のストックが形成された。これらのストックの一部は枯死・破壊・散逸などにより (近似的にはストック量に比例して) 減耗していく。この比率は小さいが、生命誕生から 40 億年近く経過してストックが大量に蓄積したため、ストック形成量と減耗量が釣り合う平衡に達し、大局的には (人類による採収が行われない限り) ストック量が一定の定常状態に達している。

単位時間当たりのストック形成量 (とりあえず一定と仮定) を I 、減耗率を δ とすると、単位時間当たりのストック追加量は次式のようになる。

$$\frac{dK}{dt} = I - \delta K \quad (1-6)$$

変形して、両辺を時間 $\tau = 0 \rightarrow t$ で定積分する ($t=0$ で $K=0$ とする)。

$$\int_0^t \frac{1}{I - \delta K} \frac{dK}{dt} dt = \int_0^t dt$$

$$-\frac{1}{\delta} \{ \log(I - \delta K) - \log I \} = t$$

$$\frac{I - \delta K}{I} = 1 - \frac{\delta K}{I} = e^{-\delta t}$$

$$K = \frac{I}{\delta} (1 - e^{-\delta t}) \quad (1-7)$$

この値は、 $t > 0$ では常に正で増加していくが、時間の経過とともに増加率は逓減し、 $t = \infty$ で I/δ に収束する。この値 (I/δ) の平衡に達するには無限時間を要する (到達できない) が、十分長い地質学的時間を経れば近似的には平衡に達しているとみなせる (人類による採収前)。

現在の全世界の木材バイオマス量は $9 \times 10^{20} \text{J}$ 程度と評価され (山本, 2012)、全世界のエ

エネルギー使用量の2年分にも満たない。したがって、全エネルギーをバイオマスに頼るならばストック形成量（植林など）を大幅に増加し、逆に使用量を絞る必要がある。「石油を造る生物を発見したので、もはや化石燃料に頼る必要はない」というニュースは量的思慮に欠けている。石油のストック量については、 I が可変の場合を含めて第3章で検討する。

人類は有史前には、一部のバイオマス・ストックを利用する以外は、基本的にはフローを食料の形で消費していた。1人当たり130W（現在の世界の平均値：1日約2,700kcal, FAO, 2012）とすると、紀元1年の世界人口3億人でも、全世界で約 $4 \times 10^{10} \text{W}$ ($1.2 \times 10^{18} \text{J/Y}$) となり、現在のエネルギー使用量の1/400以下であった。現在（人口73億人）でも、食料に限ればエネルギー使用量は約 $1 \times 10^{12} \text{W}$ ($3 \times 10^{19} \text{J/Y}$) であり（UNDESA, 2007）、人類はその約17倍のエネルギーを別の形で使用している。

図1-11（下）は人類文明の開闢以降、現在に至る状況を示している。農耕が開始され、家畜を使役を使用するようになると、各時点の資本ストック（家畜数）に応じて追加のエネルギー補給が必要になり、それが（一部は利用されずに廃棄されるが）産出へと転化する。産出は家畜自身の成長・繁殖のための投資（資本ストック追加，上左向き矢印）と人間による消費へと分化する。家畜ストックは死亡により減耗し、一部は食肉の形で消費される。さらに、機械が使用されるようになると、そこでも資本ストックに応じた産出が始まり、それは投資（ストック追加）と消費に分化する。この様子を図1-11ではドーナツ状の円盤で表現している。投資（資本ストック形成）により家畜および機械の円盤が拡大すると中央の穴も拡大し、より大きなフローが要求され、それにより経済（産出・消費）は成長していく。この供給フローに対する追加要求は、当初は水力・風力・太陽光などのフローで賄われていたが、それでは不足するため、自然界のストックであるバイオマス（木材）、次いで化石燃料にも手を付けるようになり、これらのストックはこの時点から「枯渇性資源」となった（ストック量は減少していく）。

第1節および第2節で議論したように、エネルギーフローのすべてが利用できるわけではなく、一部は直接環境に廃棄される。これに資源ストックおよび資本ストックの減耗分と消費後の排熱・廃棄物が加わり、最終的には入力された本源的エネルギーの全量が環境（そして宇宙）へと廃棄される。

資本ストック（ここでは家畜と機械の区別はせず、人間（身体）も含むと考える）の規模について検討する。エネルギーで計測することを想定して、次のような生産関数を考える。

$$Y = AK^\alpha \quad (1-8)$$

式(1-1)のコブ・ダグラス型生産関数で労働を無視した、あるいは、両辺を L (労働) で割って、一人当たりで換算したと考えてもよい。投資 (I) は産出の一定率 (s) であるとする、

$$I = sY = sAK^\alpha \quad (1-9)$$

式(1-6)同様、資本の変化は投資から減耗 (δK) を引いたものになる (δ は減耗率)。

$$\frac{dK}{dt} = I - \delta K = sAK^\alpha - \delta K = K(sAK^{\alpha-1} - \delta) \quad (1-10)$$

$\alpha = 1$ のとき、 $sA > \delta$ だと式(1-10)は常に正なので、資本 (K) は無限に拡大し、 $sA < \delta$ だと減少する (または資本蓄積が開始しない)。 $\alpha \neq 1$ のときは、資本 (K) が次の値のとき、式(1-10)は 0 になり、投資と減耗が釣り合っって資本は変化しない定常状態になる。

$$K = \left(\frac{\delta}{sA}\right)^{\alpha-1} = \left(\frac{sA}{\delta}\right)^{1-\alpha} \quad (1-11)$$

$\alpha > 1$ のときは、 K が式(1-11)の値より小さいと K は減少し、この値より大きいと増加する。すなわち式(1-11)の平衡は不安定で、この値からごくわずかでも離れると K は無限大、または 0 に向かう。 $\alpha < 1$ のときは逆に、 K はどの値からでも式(1-11)の平衡に向かう。実はこれが経済成長論の「ソロー・スワンモデル」(Solow, 1970) に他ならない。ただし、現在までのところ資本は増加し続けているので、 $\alpha = 1$ であるか、 $\alpha < 1$ であるがまだ平衡に達していない (または、モデルの前提が成立していない) ことになる。

係数 α (資本分配率) が $\alpha < 1$ なのは、生産関数の一次同次性、すなわち規模の収穫一定 (すべての生産要素を n 倍すると産出も n 倍になる) を前提にしている、式(1-1)のコブ・ダグラス型生産関数において労働分配率 ($1 - \alpha$) との合計を 1 としている (資本と労働の代替性が前提) ため、必然的に資本分配率 (α) は 1 以下になるからである。しかし、本論文では、労働も人間 (身体) とエネルギーに二分し、前者は資本に含め、さらに、資本 (広義) とエネルギー (資源) は代替材ではなく補完財と位置付けている。したがって、一次同次性を前提とするなら、資本の収穫一定となり、式(1-8)の係数は $\alpha = 1$ ということになる (これは「AK モデル」(Rebel, 1991) に他ならない)。

しかし、以上の議論は資本によるフローの規制 (図 1-11 の右側) だけを対象としていて、資本の要求する資源フローが無制限で得られることを前提としている。図 1-11 の左側の資源によるフローの制約が全く考慮されていないが、実際は資本の要求する「需要」と資源が提供可能な「供給」のせめぎあいによってフロー量が決定すると考えられる (したがって、需要側が資本の収穫一定の「AK モデル」タイプであっても、最終的には収穫逓減と成り得る)。す

でに議論したように、資本と資源は代替性がないため、コブ・ダグラス型、または代替の弾力性を一定としてより一般化した CES(Constant Elasticity to Substitution)関数のような代替性を前提とした生産関数は適切ではない。そこで、資本の要求する量は式(1-8) ($\alpha = 1$ の「AK モデル」を基本とするが、これにこだわらない) に基づいて「需要」として評価し、これに対して資源側の制約を「供給」として評価して、その均衡に資源の相対価格と実際に供給(消費)量が決定すると考えて、次章以降で検討を行う。

1.5.2. 資源 - 経済モデルの概要

図 1-11 (下) の資源ストック(ここでは石油)と経済(資本ストックと消費)に焦点を当てて描き直したのが図 1-12 である。下部の資源部分と上部の経済部分が中央で連結されており、この模式図に即してエネルギーフローに基づく経済モデルを予察的に概観する。

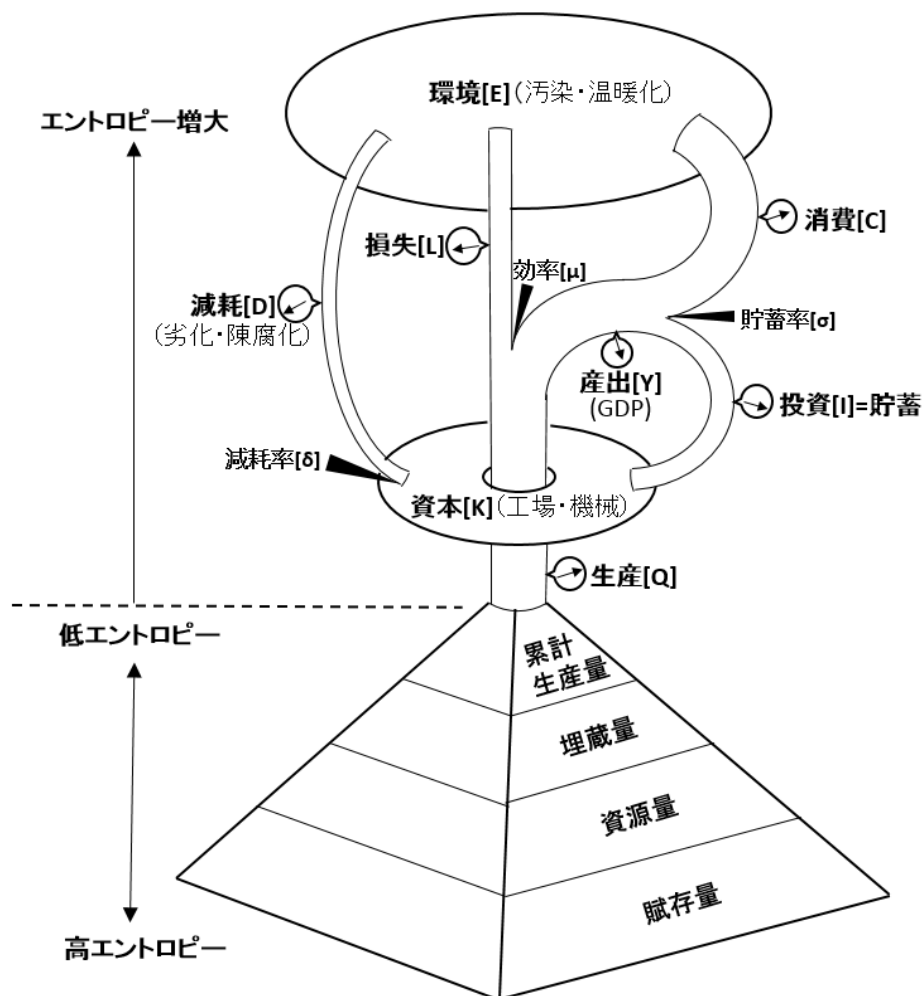


図 1-12 エネルギーフローの経済 (模式図)

中央の連結部で、下部の資源からの「供給」と上部の経済の「需要」のせめぎあいでの生産量 (= 消費量) が決定する。このメカニズムを、まず第2章で、下部の資源の量を所与として、その量がどのように生産されるかを、企業・産油国の利益最大化や油田の排出エネルギーなどの観点から考察する。

図 1-12 の下半分が「資源ピラミッド」で低品位 (高エントロピー) の資源は多いが、高品位 (低エントロピー) の資源は少ない (McCabe, 1998)。高品位側から発見・開発・生産が開始され、累計生産量→埋蔵量 (既発見で商業性可能な量) →資源量 (最終的に利用される総量) →賦存量 (地下に物理的に存在するストック全量) と拡大 (境界が下降) していく (この過程で、それぞれの資源は逆に、賦存量→資源量→埋蔵量→累計生産量と「格上げ」されていく)。このプロセスの検討および式(1-6)に基づく賦存量推定を第3章で行う。

上部が経済セクターで、資本とそれが要求する生産量 (「需要」) は基本的には式(1-8)と式(1-10)に従って成長すると考える。また、「供給」とのせめぎあいでの決定した生産量 (⇒産出量) とそれに対応する相対価格は探鉱活動に影響を与え、下部構造 (「資源ピラミッド」) での「格上げ」を規定する。これらのプロセス (価格の決定と探鉱への影響) については、第4章で検討する。

図 1-12 を簡略化し、3種類の異なる条件について示したのが図 1-13 である。

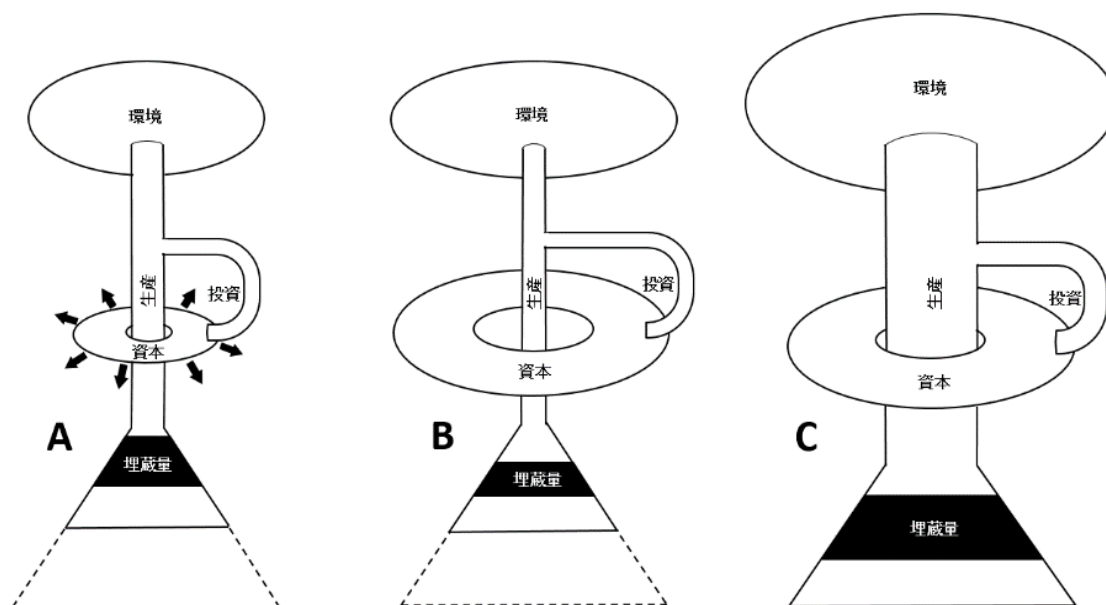


図 1-13 エネルギー消費と経済の成長

前記したように需要増や資源価格上昇により探鉱活動が励起され、油田発見が埋蔵量に繋がり、それに応じて生産能力が決定する。しかし、当初は資本が小さいのでそれに規制されて実際の生産量は小さい (A)。このエネルギーフローは、消費・投資などを経て、最終的には環境に廃棄される。生産の一部は投資され資本が拡大するため、探鉱による埋蔵量増加が順調であれば生産量は増大し、投資を経て資本はますます拡大し、経済は (環境汚染も) 正のフィードバックで成長する (C)。しかし、探鉱量や資源の規模・品位分布によっては埋蔵量追加が不足する。このときには財政・金融政策などにより消費や投資を刺激しようとしても生産量は増加せず、むしろ埋蔵量は累計生産量への「格上げ」により減少する (B)。需要や価格が探鉱・発見・開発へ順次反映されるまでにはタイムラグがあるため経済は脈動する。

このメカニズムも含めて、第5章では、資源と経済のフィードバックの全体を記述するモデルを構築して、その結果を過去の実績と比較し、将来予測も行う。従来、景気循環は在庫・設備・建設・技術革新・太陽黒点などの周期、あるいは外生的なショックにより説明されてきたが、本モデルにより過去の景気変動が再現され、将来予測もより精確に行える可能性がある。

以上の議論は、単一の資源 (本論文では石油) を対象にしていたが、第6章ではこれを多資源系に拡張し、シェール資源について概観し、米国で経験したような (本章第4節) 資源の遷移を再現するモデルを構築して将来予測を試みる。

第2章 企業と産油国の行動分析

第1節 枯渇性資源の最適生産経路

Hotelling(1931)以来、多くの研究者が枯渇性資源の最適生産問題を検討している。これらの先行研究の前提には多くの問題がある(2.1.4で議論する)が、まず、単純化・一般化したモデルで種々のケースについて動学的に分析し、これらの先行諸研究を検証する。先行研究の多くでは、資源量(最終的に利用される総量、詳細第3章)が当初より既知で、その全量を随意に生産できるとしているが、これは資源量が埋蔵量(既発見・既知で、現在の技術・経済環境で生産可能)に等しいことを意味する。そこで本章では、特に断らない限り、資源の総量は「埋蔵量」と記述する。

ここでは、Barro and Sala-i-Martin(2004)を参考にして、Pontryagin(1989)の最大値原理を適用する。生産量を制御変数、埋蔵量を状態変数として定式化し、所与の埋蔵量(または資源量) R_0 に対して、利益の現在価値 V (割引率 r は全期間を通して一定と仮定) を最大化する各時点の資源の生産量 $Q(t)$ を求める。なお、生産量は瞬間流量で、例えば時間の単位が年の時の生産量単位はバレル/年などであるが、時間で積分しないと量(例えばバレル)にはならない。

ここで使用する Lagrangian および Hamiltonian は元来、物理学(解析力学)で開発された手法で、位置(座標)と速度(前者の微分が後者)の関数として記述され、最小作用経路と種々の保存則などが導かれる。その後、Pontryagin(1989)が最適制御理論に発展させ、工学のみならず経済学にも応用されている。経済学では消費と投資を制御・状態変数に選択することが多いが、両変数の関係が曖昧で物理学者には違和感を覚える者もいるという(長沼, 2016)。本章の定式化では制御変数が状態変数の厳密な微分(ただし符号が逆)であり、累計生産量と残存埋蔵量の合計が保存されるなど、本来の用法に合致している。

2.1.1. 一般化した問題設定

Pontryagin(1989)の最大値原理を適用し、Barro and Sala-i-Martin(2004)を参考にして、生産量の最適時間経路、すなわち各時点の最適生産量を求める。ただし、ここでの「最適」とは、あくまで企業の利潤の観点からであり、消費者の効用も含めた全体での最適化とは異なる。

まず、次の単純化した前提条件のもとで、問題を一般化して検討する。すべての枯渇性資源に適用可能だが、ここでは一応「石油」と記して議論を進める。なお、本論文で使用する対数はすべて自然対数である。

- ① 特に断らない限り、全世界を一体として対象とする（個々の産油国や企業の最適戦略の問題は本章第3節で考察する）。
- ② 時間 t （例えば単位は「年」）の連続系で表現する。したがって、生産量 $Q(t)$ 、費用 $C(t)$ などは、例えば「バレル/年」、「\$/年」などの単位で記載されていても瞬間量を表す。
- ③ 残存埋蔵量（または残存資源量、以下「埋蔵量」と表記） $R(t)$ が状態変数(state variable)で、当初量（全量）が既知で、その後の生産量分減少していくが、新規の追加はない。
- ④ 各時点の生産量が制御変数(control variable)で、その時点の残存埋蔵量の範囲で任意に設定（例えば即座に全量生産）できる。
- ⑤ 特に断ること（例えば、"back-stop technology" や「上限価格」、2.1.2.1.3.参照）がない限り、競合資源の存在は考慮しない。
- ⑥ 販売価格 $P(t)$ についてはこの段階では特定しないが、以下では、完全競争、独占などの設定に応じて、生産量などの関数として表現する。
- ⑦ 費用は、初期投資はなく、各時点の操業費の形で発生する。費用を無視できる場合（例えば $P(t)$ が費用控除後の収入）および費用が生産量または残存埋蔵量に依存する場合を検討する。初期投資の影響については次節で検討する。
- ⑧ 生産期間（生産終了時点） T は有限・無限、いずれの場合にも適用され、生産終了時に完全枯渇する（残存埋蔵量が0となる）とは限らず、残されている場合もありうる。
- ⑨ 収入（価格×生産量）から費用を減じた利益の瞬間現在価値 $v(t)$ を通期にわたり積分した V を最大化する生産経路を最適とみなす。現在価値を求める割引率（利子率） r は全期間を通して一定とする。

これらの単純化した前提は、全体としては現実を比較的良く模しており、異なる設定のケースに容易に敷衍できるものもあるが、現実と大きく異なる前提もあり（特に③、④）、その問題は本節最後（2.1.5）で議論する。

この問題は次のように表現される（上ドットは時間微分を表す： $\dot{A} \equiv \frac{dA}{dt}$ ）。

$$\max_{Q(t)} V = \int_0^T v(t)e^{-rt} dt = \int_0^T \{P(t)Q(t) - C(t)\}e^{-rt} dt, \quad \text{subject to}$$

$$(a) \quad Q(t) = -\dot{R}(t) \tag{2-1}$$

$$(b) R(0) = R_0 > 0$$

$$(c) R(T) \geq 0$$

ただし,

V : total present value (objective function), $v(t)$: instantaneous current profit at time t ,
 $Q(t)$: instantaneous production (control variable), $R(t)$: reserves at time t (state variable),
 R_0 : initial reserves, $P(t)$: price at time t , P_0 : initial price, $C(t)$: instantaneous cost,
 r : discount rate (constant), t : time, T : terminal time.

このうち制約条件(a)は, 生産量が埋蔵量の減少に等しいことを示す。この問題を Kuhn-Tucker の定理に基づき, 次のように Lagrangian で表現する。

$$L = \int_0^T \{P(t)Q(t) - C(t)\}e^{-rt} dt - \int_0^T \mu(t)\{Q(t) + \dot{R}(t)\}dt + vR(T) \quad (2-2)$$

ただし,

$\mu(t)$: dynamic Lagrange multipliers (at time t)= present-value shadow price of reserves,
 $q(t) = \mu(t)e^{rt}$: current-value shadow price of reserves,

v : static Lagrange multiplier for terminal time T (shadow price of terminal reserves).

式(2-2)の第2項は式(2-1)の制約条件(a)に, 第3項は制約条件(c)に, それぞれ対応している。置換積分により次の変換が成り立つ。

$$\int_0^T \mu(t)\dot{R}(t)dt = [\mu(t)R(t)]_0^T - \int_0^T \dot{\mu}(t)R(t)dt = \mu(T)R(T) - \mu(0)R_0 - \int_0^T \dot{\mu}(t)R(t)dt \quad (2-3)$$

式(2-3)を使って式(2-2)を書き換える。

$$L = \int_0^T [\{P(t)Q(t) - C(t)\}e^{-rt} - \mu(t)Q(t)]dt + \int_0^T \dot{\mu}(t)R(t)dt + \mu(0)R_0 - \mu(T)R(T) + vR(T) \quad (2-4)$$

式(2-4)の第1項の大かっこ内を Hamiltonian function と呼び, 現在価値(present value Hamiltonian)を J , 経時価値(current value Hamiltonian)を H と表記する。

$$J(R, Q, t, \mu) \equiv e^{-rt}\{P(t)Q(t) - C(t)\} - \mu(t)Q(t) = e^{-rt}\{P(t)Q(t) - C(t) - q(t)Q(t)\} \quad (2-5)$$

$$H(R, Q, t, q) \equiv Je^{rt} = P(t)Q(t) - C(t) - \mu(t)Q(t) = v(t) - \mu(t)Q(t) \quad (2-6)$$

これらは次のように解釈できる。ある時点 t における生産量 $Q(t)$ は2つの経路を通して全期間の価値に影響を与える。直接的にはその生産量に価格を掛けた収入から費用を差し引いたその時点の利益を通して, もう一つは埋蔵量の減少に伴う将来の利益の減少として

shadow price を掛けることにより評価される。価格も shadow price も時間（状況）とともに変化する。

現在価値(present value) Hamiltonian J を用いて式(2-4)の Lagrangian を書き換える。

$$L = \int_0^T \{J(R, Q, t, \mu) + \dot{\mu}(t)R(t)\} dt + \mu(0)R_0 - \mu(T)R(T) + vR(T) \quad (2-7)$$

ここで最大値原理を用いて最適生産経路を求めるわけだが、厳密な数学的記載は Pontryagin(1989)に譲り、ここでは Barro and Sala-i-Martin(2004)の数学付録に倣い、簡便法で一階条件の導出を試みる。最適経路の経時生産量を $Q^*(t)$ 、そのときの経時埋蔵量を $R^*(t)$ とし、この経路からわずかに摂動することを考える。

$$\begin{aligned} Q(t) &= Q^*(t) + \varepsilon p_1(t) \\ R(t) &= R^*(t) + \varepsilon p_2(t) \\ R(T) &= R^*(T) + \varepsilon dR(t) \end{aligned} \quad (2-8)$$

微小摂動 ε を用いて、式(2-7)の Lagrangian を次のように書き換える。

$$\bar{L} = \int_0^T \{J(R(\cdot, \varepsilon), Q(\cdot, \varepsilon)) + \dot{\mu}(t)R(\cdot, \varepsilon)\} dt + \mu(0)R_0 - \mu(T)R(T, \varepsilon) + vR(T, \varepsilon) \quad (2-9)$$

$Q^*(t)$ (および $R^*(t)$) が常に最適経路上に位置するのであれば、 $\partial \bar{L} / \partial \varepsilon$ は常に 0 となるはずである。

$$\frac{\partial \bar{L}}{\partial \varepsilon} = \int_0^T \left(\frac{\partial J}{\partial \varepsilon} + \dot{\mu} \frac{\partial R}{\partial \varepsilon} \right) dt + (v - \mu(T)) \frac{\partial R(T, \varepsilon)}{\partial \varepsilon} = \int_0^T \left(\frac{\partial J}{\partial \varepsilon} + \dot{\mu} \frac{\partial R}{\partial \varepsilon} \right) dt - \mu(T) \frac{\partial R(T, \varepsilon)}{\partial \varepsilon} + v \frac{\partial R(T, \varepsilon)}{\partial \varepsilon} \quad (2-10)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \frac{\partial J}{\partial \varepsilon} &= \frac{\partial J}{\partial Q} \frac{\partial Q}{\partial \varepsilon} + \frac{\partial J}{\partial R} \frac{\partial R}{\partial \varepsilon} = \frac{\partial J}{\partial Q} p_1(t) + \frac{\partial J}{\partial R} p_2(t) \\ \frac{\partial R}{\partial \varepsilon} &= p_2(t) \\ \frac{\partial R(T, \varepsilon)}{\partial \varepsilon} &= dR(T) \end{aligned} \quad (2-11)$$

これらを式(2-10)に代入する。

$$\frac{\partial \bar{L}}{\partial \varepsilon} = \int_0^T \left[\frac{\partial J}{\partial Q} p_1(t) + \left(\frac{\partial J}{\partial R} + \dot{\mu} \right) p_2(t) \right] dt + (v - \mu(T)) dR(t) \quad (2-12)$$

これが常に 0 になるためには、すべての時点 t に対して次の 3 式が成立する必要がある。

$$\begin{aligned} \frac{\partial J}{\partial Q} &= 0 \\ \frac{\partial J}{\partial R} + \dot{\mu} &= 0 \\ v - \mu(T) &= 0 \end{aligned} \quad (2-13)$$

これらは、 $Q^*(t)$ (および $R^*(t)$) が最適時間経路であることの一階 (必要) 条件であり、十分条件のためには実際に関数の凸性の検討などが必要である。

Hamiltonian の経時的変化をみるために、 J を t で微分する (全微分)。

$$\frac{dJ(R,Q,\mu,t)}{dt} = \frac{\partial J}{\partial R} \dot{R} + \frac{\partial J}{\partial Q} \dot{Q} + \frac{\partial J}{\partial \mu} \dot{\mu} + \frac{\partial J}{\partial t} \quad (2-14)$$

ここで、式(2-1),(2-4)、および式(2-13)より、

$$\frac{\partial J}{\partial \mu} = -Q = \dot{R} \quad (2-15)$$

$$\frac{\partial J}{\partial Q} = 0 \quad (2-16)$$

$$\frac{\partial J}{\partial R} = -\dot{\mu}$$

これらを式(2-14)に代入。

$$\frac{dJ}{dt} = \dot{\mu} \dot{R} + 0 \cdot \dot{Q} - \dot{R} \dot{\mu} + \frac{\partial J}{\partial t} = \frac{\partial J}{\partial t} \quad (2-17)$$

すなわち、Hamiltonian の時間による全微分は偏微分に等しい。これは、問題となる関数も制約式も直接的には時間に依存しないとき ($\frac{\partial J}{\partial t} = 0$) には全微分も 0 となり、Hamiltonian は常に一定値である (保存される) ことを示している。

以上では、価格や費用も時間の経過に伴って変化するとしているが、特定関数は想定していない。価格が生産量に、費用は生産量および埋蔵量に依存するとき、式(2-13)の一階条件は次のように書き換えられる。

$$\frac{\partial J}{\partial Q} = e^{-rt} \left\{ \frac{\partial P(Q,t)}{\partial Q(t)} Q(t) + P(Q,t) - \frac{\partial C(Q,R,t)}{\partial Q(t)} - q(t) \right\} = 0$$

$$\frac{\partial J}{\partial R} = -e^{-rt} \frac{\partial C(Q,R,t)}{\partial R(t)} = -\dot{\mu}(t) \quad (2-18)$$

$$v = \mu(T)$$

これを用いて経時価値(current value) Hamiltonian に対する制約を記述する。

$$\frac{\partial H}{\partial Q} = e^{rt} \frac{\partial J}{\partial Q} = \frac{\partial P(Q,t)}{\partial Q(t)} Q(t) + P(Q,t) - \frac{\partial C(Q,R,t)}{\partial Q(t)} - q(t) = 0 \quad (2-19)$$

$$\frac{\partial H}{\partial R} = e^{rt} \frac{\partial J}{\partial R} = -\frac{\partial C(Q,R,t)}{\partial R(t)} = -e^{rt} \dot{\mu}(t) = -e^{rt} \{ \dot{q}(t) e^{-rt} - r q(t) e^{-rt} \} = r q(t) - \dot{q}(t)$$

$$(2-20)$$

式(2-19)を書き換える。

$$q(t) = \frac{\partial P(Q,t)}{\partial Q(t)} Q(t) + P(Q,t) - \frac{\partial C(Q,R,t)}{\partial Q(t)} \quad (2-21)$$

右辺は、第1項と第2項の合計が生産量変化に対する限界収入を、第3項が限界費用を示し、全体として限界利益（限界収入－限界費用）を表している。左辺の shadow price はその時点に保持している残存埋蔵量の価値をあらわすが、それが最適経路での限界利益に一致する。

同様に、式(2-20)を書き換える。

$$\dot{q}(t) = rq(t) - \frac{\partial H}{\partial R} = rq(t) + \frac{\partial C(Q,R,t)}{\partial R(t)} \quad (2-22)$$

左辺の shadow price の変化は、割引率に埋蔵量変化の費用への影響を加えたものになる。埋蔵量変化は負（減少）であり、通常その費用への影響は正（増加）なので、式(22)の最後の項は負となる。すなわち、埋蔵量減少が費用増大要因となるときは、最適生産経路における shadow price の変化（上昇）は割引率より低くなる。

以下では価格や費用が生産量および残存埋蔵量に依存するケースも含めて、各種のケースについて、式(2-13)の一階条件が具体的にどのような形になり、それが生産量、価格、生産期間などをどのように規定するかを検討する。

2.1.2. 費用が無視できるとき

費用が無視できるほど小さいとき以外にも、例えば、費用の生産量あたり単価が（資源の）価格 $P(t)$ に比例し、利益（収入－費用）が収入の一定割合（すなわち、マークアップ率一定）である場合（費用単価が埋蔵量の影響を受けない場合など）がこのケースに含まれる。このときは、 $P(t)$ を生産量あたり利益単価（価格の一定割合）と読み替えばよい。実際には（資源）価格の変動は費用単価の変動より激しく、厳密にはこの仮定は成立しないが、近似モデルとしては有効である。費用がこれとは異なる関数で表現されるケースは2.1.3で考察する。以下では必要に応じ、当初生産量、当初価格、終末生産量、終末価格を次のように略記する。

$$Q_0 \equiv Q(0), \quad P_0 \equiv P(0), \quad Q_T \equiv Q(T), \quad P_T \equiv P(T)$$

このモデルでは、式(2-21)から費用項が削除され、次のように単純化される。

$$q(t) = \frac{\partial P(Q,t)}{\partial Q(t)} Q(t) + P(Q,t) \quad (2-23)$$

式(2-23)の右辺は t 時点における限界収入（または限界利益）であり、 $M(t)$ と表記する。

$$M(t) \equiv \frac{\partial P(Q,t)}{\partial Q(t)} Q(t) + P(Q,t) = q(t) \quad (2-24)$$

すなわち、shadow price は限界収入（実際には限界費用を差し引いた限界利益）に一致する。ただし、この限界収入（限界利益）は世界全体を対象にしており、個々の企業のものではない。特に、完全競争における price taker の場合、生産量の変化は価格変化に結びつかず、限界収入は価格に等しくなる。

同様に、式(2-22)も単純化される。

$$\dot{q}(t) = rq(t) \quad (2-25)$$

すなわち、費用が無視できる、または生産量あたり費用単価が埋蔵量などの影響を受けずに単に価格に比例して変動するときには、shadow price は式(2-22)と異なり割引率で上昇していく。式(2-25)を移項して両辺を t で積分して順次変換し、 $q(t)$ の関数形を求める (C は任意定数)。

$$\int \frac{\dot{q}}{q} dt = \int r dt$$

$$\log q(t) = rt + C$$

$$q(t) = e^C e^{rt} = q(0)e^{rt} \quad (2-26)$$

式(2-24)が成立するとき、限界収入 $M(t)$ は shadow price $q(t)$ に等しいので、以下も成り立つ。

$$\dot{M}(t) = rM(t)$$

$$M(t) = M(0)e^{rt} \quad (2-27)$$

すなわち、限界収入も割引率（一定）で上昇することになる。ただし、世界全体の限界収入は、その時点の価格に単純に一致するわけではなく式(2-23)に示される如く、生産量変化の価格に対する影響 $\frac{\partial P(Q,t)}{\partial Q(t)} Q(t)$ も受ける。以下では、生産量の変化経路（一定率で減少するときは「減退率」）および価格の変化経路について、需要の価格弾力性、競争形態（完全競争、独占）および上限価格の有無に着目して検討する。

2.1.2.1. 需要の価格弾力性が一定のとき

2.1.2.1.1. 一般型と独占

詳細は本章第3節で検討するが、現在の石油の生産（消費）量と価格は市場での均衡に決

定しており、需要の価格弾力性はほぼ一定であるとみなせる。生産量と価格が均衡、すなわち需要曲線と供給曲線の交点に決定しているのであれば、各時点のこれらの値は需要の価格弾力性を反映していることになる。

需要の価格弾力性 ε (式(2-8)~(2-12)の微小摂動とは異なる) が一定であれば、それは次式で表現される ($\varepsilon > 0$)。

$$\varepsilon \equiv -\frac{dQ/Q}{dP/P} = -\frac{dQ/dP}{Q/P} \quad (2-28)$$

移項して両辺を積分し、順次変換する (C は任意定数, a は定数)。

$$\int \frac{dQ}{Q} = -\varepsilon \int \frac{dP}{P} \quad (2-29)$$

$$\log Q = \log P^{-\varepsilon} + C$$

$$Q(t) = aP(t)^{-\varepsilon} \quad (2-30)$$

式(2-30)は、価格が上昇すれば需要が減少するという需要関数に他ならない。定数 a は、量と価値を結びつける係数で、通貨価値 (為替レートなど) や需要水準などに依存する。

式(2-28)より、

$$\frac{\partial P}{\partial Q} Q = \frac{\partial P}{\partial Q} \frac{Q}{P} P = -\frac{1}{\varepsilon} P \quad (2-31)$$

したがって、限界収入は価格弾力性を用いて、次の通り表される。

$$M(t) = \frac{\partial P(t)}{\partial Q(t)} Q(t) + P(t) = -\frac{1}{\varepsilon} P(t) + P(t) = \left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right) P(t) \quad (2-32)$$

上式と式(2-27)から、次のように価格も割引率で上昇することが導かれる。

$$P(t) = \frac{\varepsilon}{\varepsilon-1} M(t) = \frac{\varepsilon}{\varepsilon-1} M(0)e^{rt} = P_0 e^{rt} \quad (2-33)$$

ここで注意すべきは、生産量 $Q(t)$ は世界全体の合計であり、したがって限界収入 $M(t)$ も世界全体を対象としており、全世界を一企業が独占している場合の最適経路 (独占企業の利潤最大化) に相当する。式(2-32)の $M(t)$ は $\varepsilon \leq 1$ では0または負となる。したがって、 $\varepsilon \leq 1$ で一定とする仮定は、上限価格が存在する場合 (この後検討) を除き現実的ではない。ただし、完全独占の場合以外は、個々の企業の限界収入が負になるとは限らない。完全競争の場合は、個々の企業は price taker で限界収入が価格に一致するため、その範囲で生産量を最大化し、全世界合計では過剰生産となり価格が低下する「合成の誤謬」が生じる (ただし、あくまで企業の利益最大化の観点からの「誤謬」であり、消費者を含めた福利最大化を

考慮しているわけではない)。両者の中間に位置する不完全競争の場合には独占や競争の程度に依存するが、一部の企業や産油国が価格上昇を狙って生産量を絞ると、その生産シェアが低下し、独占度、すなわち価格への影響力が低下する。この問題については、第3節でゲーム理論を用いて分析する。

式(2-32)を生産量で微分し、式(2-31)、(2-32)による変換を行う。

$$\frac{\partial M}{\partial Q} = \left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right) \frac{\partial P}{\partial Q} = \left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right) P \left(\frac{1}{P} \frac{\partial P}{\partial Q}\right) = M \frac{1}{P} \frac{\partial P}{\partial Q} = \frac{M}{P} \left(\frac{\partial P}{\partial Q} Q\right) \frac{1}{Q} = \frac{M}{P} \left(-\frac{1}{\varepsilon} P\right) \frac{1}{Q} = -\frac{M}{\varepsilon Q} \quad (2-34)$$

生産量の変化は次のようになる（第3項→第4項は式(2-27)および(2-34)による）。

$$\dot{Q} = \frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial M} \frac{\partial M}{\partial t} = \left(-\frac{\varepsilon Q}{M}\right) (rM) = -\varepsilon r Q \quad (2-35)$$

移項して両辺を時間で積分して順次変換し、 $Q(t)$ の関数形を求める（ C は任意定数）。

$$\int \frac{\dot{Q}}{Q} dt = -\int \varepsilon r dt$$

$$\log Q(t) = -\varepsilon r t + C$$

$$Q(t) = e^C e^{-\varepsilon r t} = Q(0) e^{-\varepsilon r t} = Q_0 e^{-\varepsilon r t} \quad (2-36)$$

すなわち、最適生産経路においては、生産量は徐々に減少していき、その減退率は割引率に需要の価格弾力性を乗じた εr になる。なお、この議論では需要曲線を固定して考えているが、実際には需要は成長する。需要が一定率 g で成長するときには、上記の割引率（利子率） r を割引率－成長率（ $r-g$ ）で置き換えて考えればよい（以下の議論でも同じ）。

式(2-32)では、生産が行われるためには価格弾力性 ε は 1 より大きいことが要求されるが、そのとき式(2-36)より、減退率は割引率より大きくなる。しかし、第3節で検討するように生産実績から推定される需要の価格弾力性の値は 1 よりかなり小さく、現実はこのモデルから乖離している。実際には、競争・情報の不完全性およびリスクの存在や初期投資などの要因により、需要の価格弾力性が 1 以下でも生産が行われると考えられるが、ここでは原則として、価格弾力性が 1 以上として議論を進める。

ここで求めたのは生産量の減退率であって生産量水準ではない。減退率が既知の場合、各時点の生産量水準を知るには生産開始時の生産量 Q_0 が必要である。最終時点 T （有限または無限遠）において全埋蔵量を採り尽くすとすれば（ $R(T) = R_T = 0$ ）、累計生産量が当初埋蔵量 R_0 に等しくなるという以下に示す制約から Q_0 が求まる（式(2-36)を利用）。

$$\int_0^T Q(t) dt = \int_0^T Q_0 e^{-\varepsilon r t} dt = -\frac{Q_0}{\varepsilon r} [e^{-\varepsilon r t}]_0^T = \frac{Q_0}{\varepsilon r} (1 - e^{-\varepsilon r T}) = R_0$$

$$Q_0 = Q(0) = \frac{\varepsilon r R_0}{1 - e^{-\varepsilon r T}} \quad (2-37)$$

この段階では、生産期間 T は自由に選択でき、異なる経路の現在価値は無差別であるが、

前提には含まれない種々の要因（ここでは無視している固定費用など）により、より長期に平準化した経路が好まれると想像される。そこで、以下では特に断らない限り、無差別のオプションのうちで最長（多くの場合、無限）期間の経路を念頭に置いて議論する。式(2-37)において、 $T \rightarrow \infty$ とすると、 $e^{-\epsilon r T} \rightarrow 0$ より $Q_0 = \epsilon r R_0$ となり、当初生産量は当初埋蔵量に減退率を掛けた値となる。さらにこの関係は、どの時点 t を「当初」と見做しても成立するため、時点 t の生産量と埋蔵量の間には次の式が成り立つ。

$$Q(t) = \epsilon r R(t) \quad (2-38)$$

$$R(t) = \frac{Q(t)}{\epsilon r} = \frac{Q_0 e^{-\epsilon r t}}{\epsilon r} = R_0 e^{-\epsilon r t} \quad (2-39)$$

このとき、埋蔵量および生産量が当初量の半分になる「半減期」を $T_{1/2}$ と表記すると、

$$R(T_{1/2}) = R_0 e^{-\epsilon r T_{1/2}} = \frac{R_0}{2} \quad (2-40)$$

$$T_{1/2} = \frac{\log 2}{\epsilon r} \cong \frac{0.693}{\epsilon r} \quad (2-41)$$

すなわち、割引率 r が 0.1/年、需要の価格弾力性 ϵ を 1.0 とすると、半減期は約 7 年となり、7 年ごとに生産量も残存埋蔵量も半減していくことになる。個々の油田の生産は、一般にはほぼ一定率で減退しており、上記の結果と整合的であるように見える（ただし、定率生産減退はむしろ油田の産出エネルギーの減退に起因している。詳細は本章第 3 節参照）。しかし、ここで対象にしているのは全世界の生産量であり、それは有史以来現在に至るまで概ね増加傾向にある。これは一つには、実際には全埋蔵量が当初から既知ではなく、その後発見された埋蔵量が順次開発され生産に結びついて来たためである。

有限時点 T において埋蔵量を全て枯渇する場合（競合資源の技術完成時期が既知で、それまでに採り尽くしたいときなど）は式(2-37)に従い、各時点の生産量は式(2-38)より多くなる。しかし、割引率 r が 0.1/年、需要の価格弾力性 ϵ が 1.0、期間 T が 100 年とすると、式(2-37)の $e^{-\epsilon r T}$ は 4.5×10^{-5} となり、各時点の生産量は制約がない場合と大差なく [m1][m2][m3][m4]、生産期間が極端に短い場合を除き、式(2-38)はよい目安となる。

以下では、需要の価格弾力性一定という仮定は保持したまま、完全競争と独占の場合について、生産量水準の最適経路を比較検討する。それに応じて価格経路や生産期間にも相違が出てくる。また、太陽光などの「無尽蔵」の "back-stop technology" があり、その価格、すなわち対象としている枯渇性資源（石油）の上限価格（これより高いと他資源に完全に移行する）が推定できる場合についても検討する。

2.1.2.1.2. 完全競争と Hotelling rule

生産企業が完全競争の状態にあるときは、市場価格は全体の需要と供給の均衡に決定するが、個々の企業は十分に小さく、その供給量の変化は価格に影響を与えない（生産量を減らしても価格は上がらない）ため、price taker として市場価格を受け入れて生産し、最適経路では各時点の限界収入（限界利益）と shadow price は価格に一致する。このため、生産量の変化の影響を含む式(2-23), (2-24), (2-32)は成立せず、次式となる。

$$q(t) = M(t) = P(t) \quad (2-42)$$

また、式(2-26), (2-27)に加えて次式も成立する。

$$P(t) = P(0)e^{rt} = P_0e^{rt} \quad (2-43)$$

すなわち、限界収入も shadow price も価格も割引（利子）率で上昇する。この関係は "Hotelling(1931) が最初に示したので "Hotelling rule" と呼ばれる。ただし、このとき価格と shadow price が等しいので、資源の生産と保持が常に無差別となり、他の制約を課さないと生産量や生産期間は具体的に決定しない。

完全競争であっても、世界全体での生産量は需要の価格弾力性に規定されるため、式(2-28)～(2-30)がそのまま適用される。限界収入は価格と等しくなるため、それを生産量で微分した式(2-33)は、次に示すように途中の内容は変更されるが、最終結果は同じになる。

$$\frac{\partial M}{\partial Q} = \frac{\partial P}{\partial Q} = \left(\frac{\partial P}{\partial Q} Q\right) \frac{1}{Q} = \left(-\frac{1}{\varepsilon} P\right) \frac{1}{Q} = -\frac{P}{\varepsilon Q} = -\frac{M}{\varepsilon Q} \quad (2-44)$$

これを使うと、生産量の時間微分は、次のように式(2-34)と同じになる。

$$\dot{Q} = \frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial M} \frac{\partial M}{\partial t} = \left(-\frac{\varepsilon Q}{M}\right) (rM) = -\varepsilon r Q \quad (2-45)$$

したがって、生産量 $Q(t)$ の関数形も、次の通り式(2-35)と同じである。

$$Q(t) = e^C e^{-\varepsilon r t} = Q(0)e^{-\varepsilon r t} = Q_0 e^{-\varepsilon r t} \quad (2-46)$$

また、期末に完全に枯渇するとすれば（特別な状況でない限り、地下に埋蔵量を残すのは最適経路ではない）、生産期間（無限も含む）が同じなら完全競争でも独占と同じく、式(2-36), (2-37)（生産期間が無限なら式(2-38)～(2-41)）が当てはまり、両者の最適生産経路は完全に一致する。

Stiglitz(1976)は、独占は生産量が過少（価格は過大）で資源保護的であると思われがちだが、費用が無視でき、需要の価格弾力性が一定の枯渇性資源の場合は、独占と完全競争の最適経路が価格も生産量も一致することを指摘したが、その主張が確認された。

ただし、以下で検討するように、上限価格がある場合や費用および価格弾力性の設定が異

なれば、独占と完全競争の最適経路は異なってくる。

2.1.2.1.3. 上限価格 (back-stop price) があるとき

太陽光発電・核融合などの「無尽蔵な」“back-stop technology”が存在するが、その価格が高いため現時点では競争力がなく現在は生産されていない。しかし、石油価格がそこまで上昇すると資源の交代が起こる。こうした場合の最適経路を Nordhaus(1979)が検討している。そこで、以上の定式化とモデルを用いて彼の結論を検証してみる。

(1) 完全競争

「無尽蔵な」“back-stop technology”の価格が「上限価格」(back-stop price) P_{BS} (経時価値 current value が一定) となっていて (この価格に対応する生産量を Q_{BS} と表記する)、現資源の価格がそこに達したとき資源の交代が起こり、残存埋蔵量が無価値になる。したがって、完全競争の場合は、その前に資源を採り尽くすのが最適経路になる。その時の生産量は式(2-37)で記述され、上限価格がない場合と基本的には同じであるが、以下では、独占ケースとの比較を念頭に、上限価格に到達したとき (時点 T) に資源がちょうど枯渇するケースについて検討する。

上限価格 (P_{BS}) による制約より、

$$P_{BS} = P(T) = P_0 e^{rT} \quad (2-47)$$

したがって、生産期間 (T) は

$$T = \frac{1}{r} \log \frac{P_{BS}}{P_0} = \frac{1}{r} (\log P_{BS} - \log P_0) \quad (2-48)$$

当初生産量 P_0 で微分すると、

$$\frac{dT}{dP_0} = \frac{1}{r} \left(-\frac{1}{P} \right) = -\frac{1}{rP_0} < 0 \quad (2-49)$$

この値は、常に負である。したがって、当初生産量が増加すると、生産期間 (上限価格に到達するまでの期間) は長くなる。

一方、埋蔵量の制約により (上限価格到達時に資源が枯渇すると想定)、

$$R_0 = \int_0^T Q(t) dt = \int_0^T aP(t)^{-\varepsilon} dt = \int_0^T a(P_0 e^{rt})^{-\varepsilon} dt = \frac{aP_0^{-\varepsilon}}{-\varepsilon r} [e^{-\varepsilon r t}]_0^T = \frac{a}{\varepsilon r P_0^{\varepsilon}} (1 - e^{\varepsilon r T}) \quad (2-50)$$

$$\frac{\partial R_0}{\partial P_0} = \frac{-\varepsilon}{\varepsilon r} a P_0^{-\varepsilon-1} (1 - e^{-\varepsilon r T}) = -\frac{a}{r P_0^{\varepsilon+1}} (1 - e^{-\varepsilon r T}) < 0 \quad (2-51)$$

$$\frac{\partial R_0}{\partial T} = -\frac{\varepsilon r}{\varepsilon r} a P_0^{-\varepsilon} (-e^{-\varepsilon r T}) = \frac{a}{P_0^{\varepsilon}} e^{-\varepsilon r T} > 0 \quad (2-52)$$

埋蔵量 R_0 が増加したとき、生産期間 T が同じなら（当初）価格 P_0 が低下し、価格 P_0 が同じなら生産期間 T が長くなる。また、陰関数定理により、

$$\frac{dT}{dP_0} = \frac{\partial R_0 / \partial P_0}{\partial R_0 / \partial T} = \frac{1 - e^{-\varepsilon r T}}{r P_0 e^{-\varepsilon r T}} > 0 \quad (2-53)$$

すなわち、当初価格が高ければ、それは生産量が低いことを意味し、生産期間は長くなる。

（当初）価格 P_0 と生産期間 T はこれらの制約の均衡点に決定する。

式(2-50)に式(2-47)および(2-33)の関係を代入する。

$$R_0 = \frac{a}{\varepsilon r P_0^{\varepsilon}} (1 - e^{-\varepsilon r T}) = \frac{a}{\varepsilon r P_0^{\varepsilon}} \left\{ 1 - \left(\frac{P_0}{P_{BS}} \right)^{\varepsilon} \right\} = \frac{a}{\varepsilon r P_0^{\varepsilon}} - \frac{a}{\varepsilon r P_{BS}^{\varepsilon}} = \frac{Q_0 - Q_{BS}}{\varepsilon r} \quad (2-54)$$

当初価格 P_0 について解き、式(2-43)により任意時点 t の価格 $P(t)$ に変換する。

$$P_0 = \frac{P_{BS}}{\left(\frac{\varepsilon r}{a} R_0 P_{BS}^{\varepsilon} + 1 \right)^{1/\varepsilon}} \quad (2-55)$$

$$P_t = \frac{e^{rt} P_{BS}}{\left(\frac{\varepsilon r}{a} R_0 P_{BS}^{\varepsilon} + 1 \right)^{1/\varepsilon}} \quad (2-56)$$

一方、式(2-54)を当初産出量 Q_0 について解くと、

$$Q_0 = \varepsilon r R_0 + Q_{BS} \quad (2-57)$$

すなわち、上限価格が存在するときの当初生産量は、無限遠の将来に枯渇する場合の当初生産量より終末生産量（上限価格に対応する生産量） Q_{BS} 分だけ多くなる。

式(2-55)の分子に式(2-47)を代入する。

$$P_0 = \frac{e^{rT} P_0}{\left(\frac{\varepsilon r}{a} R_0 P_{BS}^{\varepsilon} + 1 \right)^{1/\varepsilon}} \quad (2-58)$$

両辺の P_0 に着目すると、これは次式が成り立つことを意味している。

$$e^{rT} = \left(\frac{\varepsilon r}{a} R_0 P_{BS}^{\varepsilon} + 1 \right)^{1/\varepsilon} \quad (2-59)$$

さらに、生産期間 T について解く。

$$T = \frac{\log\left(\frac{\varepsilon r}{a} R_0 P_{BS}^\varepsilon + 1\right)}{\varepsilon r} \quad (2-60)$$

こうして、埋蔵量 R_0 と上限価格 P_{BS} が既知であれば、生産期間（生産終了時期） T および生産量 $Q(t)$ と価格 $P(t)$ の最適経路が決定される。

$$B \equiv \left(\frac{\varepsilon r}{a} R_0 P_{BS}^\varepsilon + 1\right)^{1/\varepsilon} (= e^{rT}) \quad \text{と表記すれば、これらは次式で示される。}$$

$$T = \frac{\log B}{r}$$

$$P(t) = \frac{e^{rt} P_{BS}}{B} = \frac{e^{rt} P_{BS}}{e^{rT}} = \frac{P_{BS}}{e^{r(T-t)}} \quad (2-61)$$

$$Q(t) = aP(t)^{-\varepsilon} = a \left(\frac{B}{e^{rt} P_{BS}}\right)^\varepsilon = a \left(\frac{e^{r(T-t)}}{P_{BS}}\right)^\varepsilon = \frac{a e^{\varepsilon r(T-t)}}{P_{BS}^\varepsilon}$$

(2) 独占

上記では、どのケースでも基本的に最適経路は同じパターンであった。しかし、上限価格が存在する場合の独占ケースでは、費用が無視でき需要の価格弾力性が一定であっても、これまでのケースとは異なった最適経路となる。

上限価格に到達したとき、まだ地下に埋蔵量が残されている時を考える。完全競争であれば、最適経路では式(2-42)に従い限界収入（費用を無視するので限界利益に等しい）と価格が一致することが求められる。限界収入は式(2-27)に従い上昇する必要がある。価格は式(2-30)に従い生産量を絞れば上限価格を超えて上昇するが、その瞬間に“back-stop technology”による代替資源にすべての需要を奪われるので、上限価格を超えることはできず、これに対応した生産量にとどまらざるを得ない。したがって、全現在価値は最適経路のそれを下回ることになるので、上限価値到達以降に枯渇する経路は最適ではない。

独占の場合、上限価格のすぐ下では限界収入（ M_1 と表記）は式(2-32)に従い価格より低い。それも式(2-27)に従い上昇する必要がある。ところが、上限価格に達すると生産量にかかわらず価格は一定に保たれるため、石油企業はもはや独占ではなく price taker となり、限界収入（shadow price に等しい）は式(2-42)に従うようになり、上限価格に等しい値（ M_2 と表記）まで上昇可能である。しかるに、shadow price は式(2-25), (2-26)に従い q_1 （ M_1 に対応）から q_2 （ M_2 に対応）まで、割引率に等しい定率 r で上昇する。したがって、 $q_2 = M_2$

が上限価格に達する迄は最適生産経路をたどることができ、この期間中 (T_{BS} と表記) 価格は上限価格 P_{BS} 、生産量はそれに対応する Q_{BS} の一定量で継続する。限界収入 (=shadow price) が上限価格に達し ($q_2 = M_2$)、それを超えてしまうともはや最適経路ではなくなるので、その時点で埋蔵量を探り尽くすのが最適となる。

これらは次式で表現される。

$$M_2 = q_2 = q_1 e^{rT_{BS}} = M_1 e^{rT_{BS}} = \left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right) P_{BS} e^{rT_{BS}} \quad (2-62)$$

この式を定量期間 T_{BS} について解く。

$$T_{BS} = \frac{\log \frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}}{r} = \frac{\log \varepsilon - \log(\varepsilon-1)}{r} \quad (2-63)$$

(3) 完全競争と独占の比較

上記 (1), (2) で求めた完全競争と独占の最適経路を比較してみる。価格・生産量が一定水準の期間 (独占ケースの T_{BS}) を除くと、両ケースとも、価格 (P) および限界収入 (M) は割引率 (r) で上昇し、生産量は(割引率)×(需要の価格弾力性) ($r\varepsilon$) で減退するという点で一致している。しかし、独占ケースでは、上限価格 (P_{BS}) で定量生産する期間 (T_{BS}) があるため、価格および生産量の水準が異なる。

まず、価格が上限価格に到達した点について比較する。完全競争ケースでは、この点で資源を探り尽くすのに対し、独占ケースでは、まだ地下に埋蔵量が残っており、逆に言えば、この時点までの累計生産量が少なく、したがって生産開始からの経過期間も短い。このため両ケース共通の成長率及び減退率で遡って比較すると、生産開始時点では、独占の方が価格 (P_0) は高く、生産量 (Q_0) は少ない。

次に、それぞれがこの価格および生産量で、両ケースが同時に生産開始する場合を比較する。両者の成長率および減退率は同じであるため、完全競争ケースが上限価格 (P_{BS}) に達する (枯渇して生産終了する) まで、常に独占の価格が高く、生産量が低い (したがって累計生産量も少ない)。両者の価格および生産量は、完全競争ケースが枯渇して生産終了する時点で初めて、上限価格 (P_{BS}) およびそれに対応する生産量 (Q_{BS}) で一致する。独占ケースはこの時点より前からこの価格および生産量を維持して定量生産しているが、累計生産量が少ないため地下に埋蔵量が残されており、完全競争ケースが生産終了した後も、埋蔵量が枯渇するまでこの水準での定量生産が継続する。

すなわち、独占ケースは生産量が低いため価格が高く、先に上限価格に達するがその時点

でも残存埋蔵量があるため一定水準の生産に移行し、それは完全競争ケースが上限価格に到達して生産終了した後もしばらくは（埋蔵量が枯渇するまで）継続する。

こうして、Nordhaus(1979)の主要結論が再確認された。

2.1.2.2. 需要の価格弾力性が生産量に依存するとき

(1) 完全競争

完全競争の時は、需要の価格弾力性にかかわらず、式(2-42), (2-43)が成立する。式(2-45), (2-46)も同様に成り立つが、そこでは需要の価格弾力性 ε が定数ではなく、生産量 Q に応じて変化する。

(2) 独占

独占では、限界収入が生産量変化の影響を受けるので、 $\gamma \equiv 1 - \frac{1}{\varepsilon}$ と定義すると、次式で表現される。

$$M = \frac{\partial P}{\partial Q} Q + P = -\frac{1}{\varepsilon} P + P = \left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right) P = \gamma P \quad (2-64)$$

ここで次式より、 $\dot{\gamma}$ と $\dot{\varepsilon}$ の符号は一致する。

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial \gamma}{\partial t} = \frac{\partial \gamma}{\partial \varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -(-\varepsilon^{-2}) \dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon^2} \quad (2-65)$$

式(2-64)の両辺の対数を取り、 t で微分し、式(2-27)を用いる。

$$r = \frac{\dot{M}}{M} = \frac{\dot{P}}{P} + \frac{\dot{\gamma}}{\gamma} \quad (2-66)$$

したがって、需要の価格弾力性が上昇するとき ($\dot{\varepsilon} > 0$)、 γ の変化も正 ($\dot{\gamma} > 0$) で、価格の上昇率 (\dot{P}/P) は割引率 (r) より低く（緩慢に）なり、生産の減退も完全競争より緩慢になる。これは、埋蔵量が同じで同時に枯渇するなら、独占では当初生産量が完全競争よりも低いことを意味する。逆に、弾力性が下降するとき、価格上昇率は割引率より高くなり、生産の減退率は完全競争より高く（減退はより速く）、したがって当初生産量は高くなる。Stiglitz(1976)は、時間とともに需要の価格弾力性が高くなる時には、独占において完全競争に比較して価格上昇は緩やかで資源保護的になると結論しているが、それがこのモデルでも確認された。

式(2-65)を生産量変化との関係でとらえなおす。

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{d\gamma}{dQ} \frac{dQ}{dt} = \frac{d\left(\frac{1-\frac{1}{\varepsilon}}{dQ}\right)}{dQ} \dot{Q} = -\left(-\frac{1}{\varepsilon^2}\right) \frac{d\varepsilon}{dQ} \dot{Q} = \frac{d\varepsilon}{dQ} \frac{\dot{Q}}{\varepsilon^2} \quad (2-67)$$

ここでは、価格は上昇するので生産量は減少する（ $\dot{Q} > 0$ ）設定であり、弾力性の生産量変化に対する反応（ $d\varepsilon/dQ$ ）と $\dot{\gamma}$ （したがって ε ）の符号は逆になる。すなわち、生産量が減少したとき需要の価格弾力性が上昇するのなら、価格上昇率は割引率より低く（緩慢に）なり、生産の減退率も低く、当初生産量が完全競争より低くなる。これが、上記した Stiglitz(1976)の言う「時間とともに需要の価格弾力性が高まるケース」に対応し、資源保護的である。生産量が減少したとき弾力性が低下するのなら、逆に資源浪費的になる。

2.1.3. 費用を考慮するとき

前節では、費用を無視できる、または、費用単価が価格に比例する場合について検討した。後者はマークアップ率が一定の場合に相当し、この時は $P(t)$ を価格から費用単価を差し引いた利益単価（マークアップ）と読み替えればよかった。本節では、これとは異なる形で費用が与えられる場合について検討する。以下では複雑化を避けるため、需要の価格弾力性（ ε ）が一定であるとして議論を進める。

式(2-21)に基づき式(2-24)を次のように書き換えて M を限界利益として定義し直す。

$$q(t) = M(t) \equiv \frac{\partial P(Q,t)}{\partial Q(t)} Q(t) + P(Q,t) - \frac{\partial C(Q,R,t)}{\partial Q(t)} \quad (2-68)$$

式(2-31)を用いると、これは次のように書き換えられる。

$$M = \frac{\partial P}{\partial Q} Q + P - \frac{\partial C}{\partial Q} = -\frac{1}{\varepsilon} P + P + \frac{\partial C}{\partial Q} = \left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right) P - \frac{\partial C}{\partial Q} \quad (2-69)$$

2.1.3.1. 費用が生産量に比例するとき

生産量あたり費用単価が一定の場合で、費用を $C = bQ$ と表現する（ $b > 0$: 定数）。

(1) 完全競争

完全競争の時の限界利益は次式となる。

$$M = P - b \quad (= q) \quad (2-70)$$

この時の限界利益（式(2-27)に基づき、割引率に等しい）は次式となる。

$$r = \frac{\dot{M}}{M} = \frac{d(P-b)/dt}{P-b} = \frac{\dot{P}}{P-b} = \frac{(P-b)}{P-b} \quad (2-71)$$

すなわち、生産量あたり利益単価 $(P - b)$ の上昇率は、最適経路では割引率に等しい。

(2) 独占

独占の場合、式(2-69)に $C = bQ$ を代入して、次のように書き換えられる(ただし $\varepsilon > 1$)。

$$M = \left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right)P - \frac{\partial C}{\partial Q} = \left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right)P - \frac{\partial(bQ)}{\partial Q} = \left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right)P - b \quad (2-72)$$

したがって、限界利益の成長率は、次式のようになり、完全競争の時より高くなる。

$$r = \frac{\dot{M}}{M} = \frac{d\left\{\left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right)P - b\right\}/dt}{\left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right)P - b} = \frac{\left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right)\dot{P}}{\left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right)P - b} = \frac{\left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right)\dot{P}}{\left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right)(P - b) - \frac{b}{\varepsilon}} = \frac{\dot{P}}{(P - b) - \frac{b}{\varepsilon - 1}} > \frac{\dot{P}}{P - b} \quad (2-73)$$

すなわち、生産量あたり費用単価が一定の場合、独占では限界利益の成長率は(したがって、価格の上昇率も)完全競争の時(成長率は割引率に等しい)に比べて低くなり、低い当初生産量からゆっくりと減退し、独占の資源保護性が示される。

2.1.3.2. 費用が残存埋蔵量に依存するとき

この設定は、個々の鉱床(油田)を対象とするより、むしろ全世界の全埋蔵量を対象としたときの、探鉱の成熟化による低品位化や開発の困難化に伴うコスト増大を念頭に置いている。

単純化のため、費用は生産量には依存しないと仮定すると、式(2-21)は次のようになる。

$$M(t) = q(t) = \frac{\partial P(Q,t)}{\partial Q(t)}Q(t) + P(Q,t) - \frac{\partial C(R,t)}{\partial Q(t)} = \frac{\partial P(Q,t)}{\partial Q(t)}Q(t) + P(Q,t) \quad (2-74)$$

同様に、式(2-22)は次のように書ける。

$$\dot{M} = \dot{q} = r q + \frac{\partial C(R,t)}{\partial R(t)} = r M(t) + \frac{\partial C(R,t)}{\partial R(t)} = M(t) \left(r + \frac{\partial C(R,t)/\partial R(t)}{M(t)} \right) \quad (2-75)$$

$\partial C/\partial R$ は、埋蔵量減少(負)に伴う費用上昇(正)の効果を表し、全体として負となる。

したがって、限界利益は次のように表現される。

$$M(t) = M_0 e^{\left(r + \frac{\partial C/\partial R}{M}\right)t} \quad (2-76)$$

上式において、 $\partial C/\partial R$ は負なので、限界利益の成長率(指数部分のカッコ内)は割引率 r より小さくなる。

ここでは、需要の価格弾力性を一定と仮定しているので、式(2-28)、(2-31)により、独占

の場合には式(2-74)は次のように書きかえられる。

$$M(t) = q(t) = \frac{\partial P(t)}{\partial Q(t)} Q(t) + P(t) = \left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right) P(t) = \frac{\varepsilon-1}{\varepsilon} P(t) \quad (2-77)$$

式(2-76), (2-77)により価格の関数形は次のようになる。

$$P(t) = \frac{\varepsilon}{\varepsilon-1} M(t) = \frac{\varepsilon}{\varepsilon-1} M_0 e^{\left(r + \frac{\partial C/\partial R}{M}\right)t} = P_0 e^{\left(r + \frac{\partial C/\partial R}{M}\right)t} \quad (2-78)$$

すなわち価格は、限界利益の成長率と同率で上昇し、その上昇率は割引率より低くなる。したがって、生産量の減退は費用が埋蔵量に依存しない場合に比べて緩やかになる。これは、当初生産量がより低いことを意味し、資源保護的である。

完全競争の場合は、価格と限界利益が等しいため ($P=M$)、式(2-78)は次のように書き換えられる。

$$P(t) = M(t) = M_0 e^{\left(r + \frac{\partial C/\partial R}{M}\right)t} = P_0 e^{\left(r + \frac{\partial C/\partial R}{M}\right)t} \quad (2-79)$$

途中は単純になるが結果は式(77)と同じであり、費用が埋蔵量の減少に伴い増加する場合には、完全競争であっても資源保護的になる。

2.1.4. 最適生産経路問題 (第1節) のまとめ

以上の検討結果を文章の形で以下にまとめる。

- (1) 埋蔵量または資源量が当初から既知であると仮定し、その通期における利益現在価値 (ここでは割引率は全期間を通して一定と仮定) を最大化するように各時点の資源の生産量を決定すると考える。この際、所有者は資源量の範囲内で各時点の生産量を自由に選択できると仮定する。2.1.5 で議論するように、これらの仮定は現実とはそぐわず、問題を単純化した仮想的設定である。
- (2) まず、単純化のため費用を無視する (または単位生産量あたり費用が価格に比例する) と、資源の潜在経時価格 (current-value shadow price, 地下に保持している埋蔵量の単位あたり価値) は生産量当たりの限界収入 (費用を無視しているので限界利益) に等しくなり、その上昇率が割引率に等しくなるような生産経路が最適となる。
- (3) さらに、需要の価格弾力性が生産量にかかわらず一定であると仮定すると、生産量は (需要の価格弾力性) \times (割引率) で減退する必要がある (需要が定率で成長するとき、(割引率) に換えて (割引率) - (成長率) を用いる)。したがって、弾力性が1であれば減退率は割引率に等しく、弾力性が1より大き (小) ければ減退率は割引率よ

り大き（小）い必要がある。ただし、独占など、世界全体での利益現在価値最大化を目指す場合は、需要の価格弾力性が1以下であると、上限価格や生産期間などの制約がないかぎり、生産をしない(可能な限り先延ばしする)方が有利となり現実的ではない。

(4) 上記(2), (3) は、完全競争と独占の双方に等しく当てはまる。均衡では潜在経時価格 (current-value shadow price) はその時点の限界収入に常に一致し、生産者は資源の保持と生産が無差別になる。限界収入は、完全競争の時はその時点の価格に等しく、独占の時はその時点の価格に生産量変化による限界価格変化 (生産量を増やすと価格が下がる) を加えたものになるが、価格上昇率は、完全競争でも独占でも同じで、割引率に等しくなる。このとき、生産量は (需要の価格弾力性) \times (割引率) (または、(割引率) - (需要成長率)) で減退する必要がある。これが”Hotelling rule”で、枯渇性資源生産の基本命題である (Hotelling, 1931)。

(5) 上記(4)においては、常に生産と保持が無差別なため、当初生産量と当初価格は一意には決定できない。ただし、生産期間が定められていて生産終了時に、または、無期限生産でその極限 (無限遠の将来) において資源が枯渇すると仮定すれば、生産量と価格の経路が定まる。無期限生産の場合は、当初生産量は当初埋蔵量に価格弾力性と割引率 (または、割引率-需要成長率) を掛けたものになる。生産期間が有限の時は無限生産に比べて、生産量は高く、価格は低くなる。

(6) 上記において、太陽光発電・核融合などの「無尽蔵な」な “back-stop technology” が存在するが、採算に必要な価格が現在の資源の価格 (原油価格) を上回るため、現時点では生産開始していない場合を考える。原油価格がその価格 (「上限価格」) に達する (わずかに超える) と、資源の全面転換が起こり、石油生産は完全に停止する。したがって、完全競争においては、上限価格に達した時に資源がちょうど枯渇するのが最適経路になる。このとき、上限価格に達するまでの期間 (すなわち “back-stop technology” が利用可能になる時期) が同じなら埋蔵量が多いほど当初価格が低くなり、当初価格が同じなら埋蔵量が多いほど生産期間は長くなり、埋蔵量が同じなら高い当初価格は長い生産期間を意味する。当初埋蔵量と上限価格が既知であれば、最適生産経路 (生産量・価格・期間) はこれらの相反する制約の均衡点に決定する。

(7) 上記(6)の議論で、独占の場合は、価格上昇率および生産減退率は完全競争と同じであるが、上限 (より微小に低い) 価格に達しても、その価格 (および生産量) でしばらく生産を継続するのが最適経路になる。これは、独占の時の限界収入が価格より低いた

- め、上限価格に達した時点（この時“price taker”になる）でも限界収入（割引率で上昇）に上昇余地があるからである。上限価格（およびそれに対応した一定の生産量）での生産は限界収入が上限価格に達するまで続き、そこで枯渇するのが最適経路になる。したがって、同一の埋蔵量および上限価格で、完全競争ケースと同時に生産開始するとき、独占ケースは、当初生産量がより低く（価格はより高く）、先に上限価格に達するが、そこでの定常生産がしばらく続き、枯渇して生産停止するのは完全競争より後になる。
- (8) 上記(3)の需要の価格弾力性一定という仮定を緩め、価格弾力性が生産量に応じて変化する場合を考える。完全競争においては、各企業は“price taker”であり価格弾力性にかかわらず限界収入は価格に一致するため、上記(3)～(6)はそのまま成立する。独占の場合、生産量低下が弾力性上昇に結びつくときは（一般にはこれを想定）、価格上昇率は割引率よりも低く、生産減退も完全競争より緩慢になる。これは、埋蔵量が同じで同時に枯渇するのなら、独占は完全競争に比べて、当初生産量は少なく、残存埋蔵量は常に多く、資源保護的になる。生産量低下により弾力性が下降するなら（考えにくいケースではあるが）、逆に独占が資源浪費的になる。
- (9) 次に、費用を無視（0または価格に比例）という(2)の制約をゆるめ、費用が生産量に比例する（すなわち、生産量あたりの費用単価が一定の）場合を考える。完全競争のときは、最適解における収入（価格－費用）の上昇率が割引率に等しくなる。一方、独占の場合、収入の上昇率は割引率より低くなる。すなわち生産減退も価格上昇も完全競争より緩やかになり、したがって当初価格がより高く、当初生産量がより低くなり、独占は完全競争に比べ資源保護的となる。
- (10) 資源の減少に伴ってその生産がより困難になると考え、費用が残存埋蔵量の減少関数（累計生産の増加関数）であると考えたと（単純化のため費用は生産量には依存しないと仮定）、費用を無視したケースに比べ、限界収入および価格の上昇率は割引率より低くなり、生産減退率も低くなる。したがって、同時に枯渇するのなら、費用が埋蔵量の減少に伴い増加する場合には、そうでない場合より常に生産量は低く、独占・完全競争とも資源保護的になる。

2.1.5. 最適化問題の問題点と限界

以上の如く、一般化したモデルにより先行研究の主要結論が検証された。このモデルは比較的単純で汎用性があり、枯渇性資源の生産パターンについて考察する際に参考になる。し

かし、世界全体の生産量が徐々に減退し、価格は徐々に上昇するという共通の結論は実績とは大きくかけ離れており、実際には生産は現在に至るまで増産傾向にあり、価格はしばしば乱高下してきた。これは、本モデルの前提には、下記の如く幾つかの致命的欠陥があるためと考えられ、特に石油・天然ガスの場合、現実の生産実績を検討するには適していない。

- (1) 個々の油田の埋蔵量は、生産開始前にある程度正確に推定できるが、全世界の総資源量は、今後発見される未発見油田も多く未確定で、次章で検討するように過去の資源量推定は常に上方修正されてきた。一方、既発見埋蔵量は探鉱・開発の進行に伴い増大（「埋蔵量成長」、詳細次章）するものである。したがって、当初から資源量が既知である、あるいは埋蔵量が一定であるという前提は成立しない。
- (2) 石炭や金属鉱物（特に露天掘り）は、生産・採鉱量を埋蔵量の範囲である程度自由に選択できるが、石油・天然ガスの場合、その生産量は地層の深度・特性および排出エネルギーに依存していて（ポンプ採油・水攻法などの2・3時回収法も自然エネルギーを補完するものに過ぎない）、生産量（の上限）は坑井数に応じて半自動的に決定し、自由裁量で選択できるものではない（詳細次節）。
- (3) 石油・天然ガスの場合、探鉱（物理探査・試掘など）および開発（生産井掘削、処理・輸送・出荷施設の建設など）の初期投資が出費の大半を占める。瞬間生産能力（生産量上限）を上げるには多額の初期投資が必要になり、それを初期には生産量を絞って回収を先延ばしにすることは投資効率が悪く、現実的ではない。同様に、割引率や価格上昇率が大きく変化しない限り、中途投資で採算性があるのなら、それを当初から行ったほうがより採算は向上する。すなわち、ひとたび生産設備の規模（特に坑井数）が決定すれば、それに対応して地層の排出エネルギーにより決定される生産能力の上限で生産するのが最適経路となる。この問題は、初期投資（坑井数）の最適化を含めて次節で検討する。
- (4) **Back-stop** 技術（核融合、太陽光発電など）による「上限価格」は、それらの技術の本格的実用化直近にならないと正確には推定できず、過去にも常に上方修正を余儀なくされてきた。また、第3章第2節で検討するように、太陽光などの無尽蔵性にも疑問がある。

第2節 油田の生産プロファイルと利益最大化

前節で指摘した最適生産経路に関する先行研究の問題点と限界のうち、特に(2)の各時点の生産量を自由裁量で決定でき、それを最適化するという設定は非現実的である。すなわち、石油・天然ガスの生産量は、地層の深度・特性および排出エネルギー（主として流体圧力）に依存し、その経時的変化は排出エネルギーの減退に規定されるが、それは主として残存埋蔵量の関数である。そこで本節では、石油生産量の経時変化（「生産プロファイル」）の各パターンの検討を行い、それに基づき生産者の現在価値または投資効率を最適化する生産経路を考察する。

本節で使用する数式中の文字・記号は、特に断らない限り、前節と共通である。ただし、前節で検討したのは世界（または、個々の企業・産油国）全体の最適生産経路であり、本節で検討するのは個々の油田の生産経路（生産プロファイル）である。後者では排出エネルギーの減退により生産能力も減退していくが、前者では次々と新規油田が発見・開発・生産開始していくので、全体としては時期のずれた複数の生産プロファイルの重ね合わせとなり、現在に至る実績は、減退ではなくむしろ増産のトレンドを示してきている。

本節の対象は個々の油田であるため、その生産量は価格に影響を与えない **price taker** である。また、過去の枯渇性資源（例えば原油）の価格は、安定期と乱高下する期間が交錯し、特定のトレンドを呈さない。そこで、本節では価格 P （各企業が生産計画を策定する際に想定する価格）を一定と仮定して議論を進める。事実多くの石油会社は、価格上昇基調であった 1970 年代を除き、実質原油価格一定を仮定して採算検討を行っている。

原則的に、微分・積分が利用できる連続系で議論を進めるが、実際のデータは一般に年産量など離散系で表現されるので、必要に応じて連続系と離散系の比較も示す。なお、特に断らない限り、対数表示は自然対数を示す。

2.2.1. 生産プロファイルの理論的検討

石油・天然ガスの生産量の経時的変化は排出エネルギーの減退に規定されるが、それは主として残存埋蔵量 (R) の関数である。そこで以下では、基本となる生産プロファイルの検討を行う。

2.2.1.1. 生産プロファイル（減退曲線）の一般型

生産量がその時点の残存埋蔵量に比例する（比例定数： $\alpha \geq 0$ ）とすると（ C は任意定数），

$$Q(t) = -\dot{R}(t) = \alpha R(t) \quad (2-80)$$

$$\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt} = -\alpha$$

両辺を時間 t で積分する。

$$\int \frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt} dt = - \int \alpha dt$$

$$\log R(t) = -\alpha t + C$$

$$R(t) = R_0 e^{-\alpha t} \quad (2-81)$$

$$Q(t) = \alpha R(t) = \alpha R_0 e^{-\alpha t} = Q_0 e^{-\alpha t} \quad (2-82)$$

$$-\frac{\dot{Q}(t)}{Q(t)} = -\frac{dQ(t)}{dt} \frac{1}{Q(t)} = -\frac{dQ_0 e^{-\alpha t}}{dt} \frac{1}{Q(t)} = \frac{\alpha Q_0 e^{-\alpha t}}{Q(t)} = \frac{\alpha Q(t)}{Q(t)} = \alpha \quad (2-83)$$

すなわち，埋蔵量も生産量も一定率 α で減退する。この生産パターンを「指数（定率）減退」（exponential decline）， α を「減退率」（decline rate）と呼び，これが油田減退の基本的なパターンである。放射性元素の崩壊の場合，統計的に（多数原子の集合として）この関係（半減期一定）が認められ，年代測定などに利用されている。

式(2-82)の両辺の対数をとる。

$$\log Q(t) = -\alpha t + \log Q_0$$

すなわち，時間 t に対して生産量の対数をプロットしたとき（片対数プロット）の直線の傾き（負）が減退率 α である。

この指数減退の式の形は，前節で検討した最適生産経路における生産量の減退の式（式(2-36)など）と全く同じであり，そこでは（割引率） \times （需要の価格弾力性）が減退率となっていた。理論的には，生産が行われるには価格弾力性が1以上であることが必要であり，算出される減退率は，本節で検討する現実の油田の減退率（多くの場合 10～40%）と調和的である。しかし，前節の議論は最適生産を保証するための価格上昇には全世界の合計生産量の減退が必要というもので，個々の油田の生産能力を検討している本節とは，問題設定が全く異なる。

上記の議論では，放射線元素同様，減退率を一定と仮定していたが，油田の枯渇に伴い周囲や下方の地層水からの圧力，すなわち排出エネルギーのサポートがある場合には，生産量

は時間とともにそれほど減退しなくなる（減退率が低下する）。ただし、減退率は負になる（増産に転じる）ことはなく、時間とともに0に近づくので、その逆数が時間の経過に比例して増加すると仮定して、生産プロファイルの一般化を試みる。以下では、減退率のうち時間に依存しない部分を α とし、減退率の時間減少率を β ($\beta \geq 0$, 減退率一定=指数減退のときは $\beta = 0$) として議論を進める。

$$\frac{d\left(\frac{Q}{dQ/dt}\right)}{dt} = -\beta \quad (2-84)$$

両辺を t で積分する (C は任意定数)。

$$\frac{Q}{dQ/dt} = -\beta t + C$$

この式で $\beta = 0$ のときの減退率が α なのでこの式は次のように書き換えられる。

$$\frac{Q}{dQ/dt} = -\beta t - \frac{1}{\alpha} \quad (2-85)$$

この式が生産減退を表現する一般形であるが、次のように書き換えられる。

$$\frac{dQ/Q}{dt/(t+\frac{1}{\alpha\beta})} = -\frac{1}{\beta}$$

すなわち、時間軸の原点を $-1/\alpha\beta$ にとれば、生産量の時間弾力性は $1/\beta$ で一定である。

これは双曲関数を表すが、このうち特に $\beta = 0$ の場合を指数（定率）減退（exponential decline）、 $\beta = 1$ の場合を調和減退(harmonic decline)と呼ぶ。 β は理論的には任意の正の整数であるが、一般には $0 \leq \beta \leq 1$ （現実の油田では殆どのケースで $\beta \leq 0.6$ ）で、この一般形を双曲減退（hyperbolic decline）と呼ぶ。

2.2.1.2. 指数（定率）減退での現在価値利益

(1) 連続系の減退率と現在価値利益

まず指数（定率）減退について検討する。単位生産量あたりの利益（収入-費用）を P で一定、現在価値を求めるための割引（利子）率を r （全期間一定）とすると、油田の生産期間 T を通した利益（初期投資は無視）の現在価値 V_T は式(2-82)に基づき次のようになる。

$$V_T = \int_0^T PQ(t)e^{-rt} dt = \int_0^T P\alpha R_0 e^{-\alpha t} e^{-rt} dt = -\frac{\alpha PR_0}{\alpha+r} \left[e^{-(\alpha+r)t} \right]_0^T = \frac{PQ_0}{\alpha+r} \{1 - e^{-(\alpha+r)T}\} \quad (2-86)$$

ここで考えている双曲関数族の減退曲線では、どれも生産量は 0 に漸近して減退するも

の永久に 0 にはならず、従って、価格（単位生産量あたり利益）を P で一定としている限りは永久に生産が継続できることになる。しかし、実際には費用（操業費）も完全には生産量比例せず、固定部分が存在するため、ある時点で経済限界（操業利益 0）に達しそこで生産は停止する。上式ではこの時点をも T としていて、したがって R_0 のうち一部は回収されずに地下に残されることになる（厳密に次章の定義に従えば、 R_0 からこの分を差し引いた実際に生産される量が「埋蔵量」）。

永久生産をして、極限で R_0 を全部産出するときの通期現在価値は収束し、次のような簡単な式になる。

$$V_{\infty} = \int_0^{\infty} PQ(t)e^{-rt} dt = -\frac{\alpha PR_0}{\alpha+r} \left[e^{-(\alpha+r)t} \right]_0^{\infty} = \frac{PQ_0}{\alpha+r} \quad (2-87)$$

生産を途中で打ち切った場合の現在価値利益 (V_T) の永久生産のそれ (V_{∞}) に対する比率は次式で示される (Q_T : 終了時の生産量)。

$$\frac{V_T}{V_{\infty}} = 1 - e^{-(\alpha+r)T} = 1 - \frac{Q_T e^{-rT}}{Q_0} \quad (2-88)$$

通常、割引率（リスクを考慮）は 10% 程度、油田の生産期間は 30 年程度、終了時の生産量は初生産の 1/25 程度（減退率 10% 強に相当）であるから、これらの数値を入れるとこの比率は 99.8% 以上となり、現在価値利益を考える際には永久生産で近似しても実用上全く問題ないことが分かる。

(2) 離散系との比較

以上、連続系について検討してきたが、実業の世界や各種統計では、微分可能な連続関数ではなく年単位などの離散系で表現されることがほとんどである。したがって、以下では離散系についても検討し、連続系との比較を行う (Q_t : t 期生産量 (期間値), Q_0 : 初生産量 (瞬間値), R_t : t 期末埋蔵量, v_t : t 期現在価値 (期間値), V_D : 離散系累計現在価値, D : 離散系減退率, i : 離散系割引率)。なお離散系の割引は、期間中の利益が年央に集中しているとみなして行う (年央法)。

離散系で表現した各期の生産量は離散系減退率を用いて次のように表現される。

$$Q_t = Q_{t-1}(1-D) = Q_1(1-D)^{t-1} \quad (2-89)$$

累計生産量、すなわち当初埋蔵量－残存埋蔵量は次式で示される。

$$R_0 - R_t = \sum_{n=1}^t Q_n = Q_1 \sum_{n=1}^t (1-D)^{n-1} = Q_1 \{1 + (1-D) + (1-D)^2 + \dots + (1-D)^{t-1}\}$$

(2-90)

両辺からそれぞれの $(1-D)$ 倍を差し引くと、

$$D(R_0 - R_t) = Q_1\{1 - (1-D)^t\} \quad (2-91)$$

期間を $t \rightarrow \infty$ とすると、 $R_t \rightarrow 0$, $(1-D)^t \rightarrow 0$ なので、

$$D(R_0 - R_\infty) = DR_0 = Q_1$$

これを式(2-91)の両辺から差し引いて整理すると、

$$DR_t = Q_1(1-D)^t = Q_{t+1} \quad (2-92)$$

したがって、(2-82)の関係は(1期ずれるものの)離散系でも成立している。ただし、離散系減退率 D は連続系の減退率 α とは異なり、両者の関係は以下で検討する。離散系における第1期の生産量 Q_1 は連続系で次のように表現される。

$$Q_1 = R_0 - R(1) = R_0(1 - e^{-\alpha}) = \frac{1}{\alpha} Q_0(1 - e^{-\alpha}) \quad (2-93)$$

同様に t 期の生産量 Q_t は、 $t-1$ 期と t 期の埋蔵量の差に等しいから、式(2-82), (2-89), (2-93)により次のように連続系で表現できる。

$$\begin{aligned} Q_t &= Q_{t-1}(1-D) = Q_1(1-D)^{t-1} = R(t-1) - R(t) = \frac{1}{\alpha} Q_0 e^{-\alpha(t-1)} - \frac{1}{\alpha} Q_0 e^{-\alpha t} \\ &= \frac{1}{\alpha} Q_0 e^{-\alpha(t-1)}(1 - e^{-\alpha}) = Q_1 e^{-\alpha(t-1)} = Q_1(e^{-\alpha})^{t-1} \end{aligned} \quad (2-94)$$

したがって、離散系減退率 D と連続系減退率 α の間には次の関係がある。

$$1 - D = e^{-\alpha} \quad (2-95)$$

価格(単位生産量あたり利益) P を一定とすると、離散系における t 期の利益の現在価値 v_t は年央法では次のように表現される。

$$v_t = PQ_t \frac{1}{(1+i)^{t-1/2}} = \frac{PQ_1(1-D)^{t-1}}{(1+i)^{t-1/2}} = \frac{PQ_1}{(1+i)^{1/2}} \left(\frac{1-D}{1+i}\right)^{t-1} = v_1 \left(\frac{1-D}{1+i}\right)^{t-1}$$

したがって、離散系における累計での現在価値利益 V_D は次のようになる。

$$V_D = \sum_{n=1}^T v_n = \frac{PQ_1}{(1+i)^{1/2}} \sum_{n=1}^T \left(\frac{1-D}{1+i}\right)^{n-1} = \frac{PQ_1(1+i)^{1/2}}{i+D} \left\{1 - \left(\frac{1-D}{1+i}\right)^T\right\} \quad (2-96)$$

生産期間 $T \rightarrow \infty$ のときは、上式の最終項の中括弧が1に漸近するため次式となる。

$$V_{D\infty} = \frac{PQ_1(1+i)^{1/2}}{i+D} \quad (2-97)$$

なお、連続系と離散系の減退率と割引率の間には次の関係が成り立つ。

$$\frac{1-D}{1+i} = e^{-(\alpha+r)} = e^{-\alpha}e^{-r} = (1-D)e^{-r} \quad (2-98)$$

下表に離散系の減退率 D および割引率 i と連続系の α (または r) の対応を示す。

減退率 : D	0.091	0.095	0.1	0.131	0.139	0.15	0.166	0.181	0.2
(連続系) α / r	0.095	0.1	0.105	0.140	0.15	0.163	0.182	0.2	0.233
割引率 : i	0.1	0.105	0.111	0.15	0.162	0.177	0.2	0.221	0.250

式(2-96)の PQ_1 , i , D および $(1-D)/(1+i)$ に連続系表記を代入する。

$$V_D = \frac{PQ_1(1+i)^{1/2}}{i+D} \left\{ 1 - \left(\frac{1-D}{1+i} \right)^T \right\} = \frac{\frac{1}{\alpha} PQ_0(1-e^{-\alpha})e^{r/2}}{e^r - e^{-\alpha}} \{ 1 - e^{-(\alpha+r)T} \} \quad (2-99)$$

これを連続系の式(2-86)の V_T と比較すると、次のようになる。

$$\frac{V_D}{V_T} = \frac{\alpha+r}{\alpha} \frac{e^{r/2} - e^{r/2-\alpha}}{e^r + e^{-\alpha}} \quad (2-100)$$

この比率は、期間 T には依存せず、 r および α の値に応じて下表のように変化する。

		離散系現在価値 (V_D) / 連続系現在価値 (V_T)					
α		0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3
r							
0.05		1.000	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999
0.1		0.999	0.999	0.999	0.998	0.998	0.997
0.15		0.998	0.998	0.997	0.997	0.996	0.995
0.2		0.998	0.997	0.996	0.995	0.994	0.993
0.25		0.996	0.995	0.994	0.993	0.992	0.991

離散系 (年央法) の現在価値は、連続系のそれよりごくわずかに小さい。これは、各期の前半のほうが生産量 (したがってキャッシュフロー) は大きいにもかかわらず、離散系では当該期全額が年央に発生したのものとして割り引いているためである。しかし、その割合は想定される係数の範囲内では上表のように 1% にも満たない。すなわち、離散系は、年央法で割り引いて、減退率と割引率に適切な値を使用すれば、連続系で十分近似できる。

2.2.1.3. 双曲減退（一般型）

指数（定率）減退が生産プロファイルの最も基本的なパターンであるが、周囲や下方の水層からの圧力サポートがある場合などは、時間の経過とともに減退率が低下する。これは、双曲関数の一般形、式(2-85)に $0 < \beta < 1$ を代入したケースである（ただし現実の油田では、ほとんどのケースで $\beta \leq 0.6$ ）。ここでは、この一般形の連続系と離散系の諸式をまとめておく。使用記号は指数減退と共通であるが、ここでは、 $\beta=0$ でない限り、当初減退率 α ($0 < \alpha < 1$) は通時的な減退率ではなく、減退率はこの値から徐々に低下していく。

(1) 連続系

双曲減退の一般形は次のとおりである（式(2-85)再掲）。

$$\frac{Q(t)}{dQ(t)/dt} = -\beta t - \frac{1}{\alpha} \quad (2-101)$$

両辺を t で積分する (C は任意定数)。

$$\int \frac{1}{Q(t)} \frac{dQ(t)}{dt} dt = \int \frac{-\alpha}{1+\alpha\beta t} dt$$

$$\log Q(t) = \frac{-\alpha}{\alpha\beta} \log(1 + \alpha\beta t) + C$$

$t=0$ のとき $Q(t) = Q_0$ より、

$$Q(t) = Q_0(1 + \alpha\beta t)^{-\frac{1}{\beta}} \quad (2-102)$$

α について解く。

$$\alpha = \frac{(Q_0/Q(t))^{\beta-1}}{\beta t} \quad (2-103)$$

時間 t までの累計生産量は次の通り（最後の変換は式(2-102)による）。

$$\begin{aligned} R_0 - R(t) &= \int_0^t Q_0(1 + \alpha\beta\tau)^{-\frac{1}{\beta}} d\tau = \left[-Q_0 \frac{1}{\alpha\beta} \frac{\beta}{1-\beta} (1 + \alpha\beta\tau)^{\frac{\beta-1}{\beta}} \right]_0^t \\ &= \frac{Q_0}{\alpha(1-\beta)} \left\{ 1 - (1 + \alpha\beta t)^{\frac{\beta-1}{\beta}} \right\} = \frac{Q_0}{\alpha(1-\beta)} \left\{ 1 - \left(\frac{Q(t)}{Q_0} \right)^{1-\beta} \right\} \end{aligned} \quad (2-104)$$

上式で $t \rightarrow 0$ のとき、 $R(t)=0$ 、 $Q(t)=Q_0$ より、

$$R_0 = \frac{Q_0}{\alpha(1-\beta)} \quad (2-105)$$

$$R(t) = R_0(1 + \alpha\beta t)^{\frac{\beta-1}{\beta}} = R_0 \left(\frac{Q(t)}{Q_0} \right)^{1-\beta} = \frac{Q_0^\beta Q(t)^{1-\beta}}{\alpha(1-\beta)}$$

第1項と第3項の対数をとって整理すると、

$$\log R(t) = \log R_0 + (1 - \beta) \log Q(t) - (1 - \beta) \log Q_0$$

$$\log Q(t) = \frac{1}{1-\beta} \log R(t) + \log Q_0 - \frac{1}{1-\beta} \log R_0 \quad (2-106)$$

すなわち、残存埋蔵量 $R(t)$ (当初埋蔵量－累計生産量) の対数に対する生産量 $Q(t)$ の対数の両対数プロットは直線を呈し、その傾き $(1/(1-\beta))$ から β が求まる。

式(2-104)に式(2-103)を代入。

$$R_0 - R(t) = \frac{\beta t}{\{(Q_0/Q(t))^\beta - 1\} (1-\beta)} \left\{ 1 - \left(\frac{Q(t)}{Q_0} \right)^{1-\beta} \right\} \quad (2-107)$$

この式を時間 t について解く。

$$t = \frac{1-\beta}{\beta} \frac{(R_0 - R(t))}{Q_0} \left(\frac{Q_0}{Q(t)} \right)^{1-\beta} \frac{(Q_0/Q(t))^{\beta-1}}{(Q_0/Q(t))^{1-\beta} - 1} \quad (2-108)$$

すなわち、 β が近隣油田の両対数プロット (式(2-106)) などから推定できていれば、最終的な残存埋蔵量とそのときの生産量の当初生産量に対する比率 (例えば経済限界) から生産終了までの期間 (油田の寿命) が求まる。この時の α は式(2-103)で決定するので、当初減退率がこの値になるよう坑井数を調整すればよい。

(2) 離散系

上記連続系の係数 α と β を用いて、離散系における t 期の生産量と現在価値利益 (年中央法) を記載する。

$$\begin{aligned} Q_t &= R(t-1) - R(t) = \frac{Q_0}{\alpha(1-\beta)} \left[\{1 + \alpha\beta(t-1)\}^{\frac{\beta-1}{\beta}} - (1 + \alpha\beta t)^{\frac{\beta-1}{\beta}} \right] \\ &= R_0 \left[\{1 + \alpha\beta(t-1)\}^{\frac{\beta-1}{\beta}} - (1 + \alpha\beta t)^{\frac{\beta-1}{\beta}} \right] \end{aligned} \quad (2-109)$$

$$v_t = \frac{PQ_t}{(1+i)^{t-1/2}} = \frac{PQ_0}{e^{r(t-1/2)} \alpha(1-\beta)} \left[\{1 + \alpha\beta(t-1)\}^{\frac{\beta-1}{\beta}} - (1 + \alpha\beta t)^{\frac{\beta-1}{\beta}} \right] \quad (2-110)$$

2.2.1.4. 中間双曲減退

既述のように、現実の油田では β は最大でも 0.6 程度である。したがって、 $\beta = 0.5$ の「中間」双曲減退 (“mid-hyperbolic decline”) が、基本である指数 (定率) 減退のほぼ対極に位置し、現実はこの両者の中間に位置する。現実には β を正確に推定することは困難なことが多く、単に「双曲減退」というときには、この中間形を指すことが多い。以下に示すように、一般形 of 双曲減退に比べて式が簡単になるので実用上も便利である。

(1) 連続系

$$\frac{Q(t)}{dQ(t)/dt} = -0.5t - \frac{1}{\alpha} \quad (2-111)$$

$$Q(t) = Q_0 \left(1 + \frac{\alpha t}{2}\right)^{-2} = \frac{Q_0}{(1 + \alpha t/2)^2} \quad (2-112)$$

$$R(t) = R_0 \left(1 + \frac{\alpha t}{2}\right) = R_0 \sqrt{\frac{Q(t)}{Q_0}} = \frac{2\sqrt{Q_0}\sqrt{Q(t)}}{\alpha}$$

$$\alpha = \frac{2(\sqrt{Q_0/Q(t)}-1)}{t} = \frac{2Q_0}{R_0 - R_T} \left(1 - \sqrt{\frac{Q(T)}{Q_0}}\right) = \frac{2Q_0}{R_0}$$

$$t = \frac{R_0 - R(t)}{Q_0} \sqrt{\frac{Q_0}{Q(t)}} = \frac{R_0 - R(t)}{\sqrt{Q_0 Q(t)}}$$

$$T = \frac{R_0 - R(T)}{Q_0} \sqrt{\frac{Q_0}{Q(T)}}$$

$$R_0 - R(t) = R_0 \left\{1 - \left(1 + \frac{\alpha t}{2}\right)^{-1}\right\} = \frac{2Q_0}{\alpha} \left(1 - \frac{2}{2 + \alpha t}\right) = \frac{2Q_0}{\alpha} \left(1 - \sqrt{\frac{Q(t)}{Q_0}}\right)$$

$$= \{R_0 - R(T)\} \frac{1 - \sqrt{\frac{Q(t)}{Q_0}}}{1 - \sqrt{\frac{Q(T)}{Q_0}}} = \frac{\{R_0 - R(T)\} Q_0 t}{R_0 - R(T) + Q_0 \left(1 - \sqrt{\frac{Q(T)}{Q_0}}\right) t} \quad (2-113)$$

(2) 離散系 (年央法)

$$Q_t = \frac{2}{\alpha} \sqrt{Q_0} (\sqrt{Q(t-1)} - \sqrt{Q(t)}) = \frac{2}{\alpha} \sqrt{Q_0} \left(\frac{\sqrt{Q_0}}{1 + \alpha(t-1)/2} - \frac{\sqrt{Q_0}}{1 + \alpha t/2} \right) =$$

$$\frac{4Q_0}{\{2+\alpha(t-1)\}(2+at)} \quad (2-114)$$

$$Q_1 = \frac{2}{\alpha} Q_0 \left(1 - \sqrt{\frac{Q(1)}{Q_0}} \right) = \frac{2Q_0}{2+\alpha} = \frac{R_0 Q_0}{R_0 + Q_0} = \frac{\{R_0 - R(T)\} Q_0}{\{R_0 - R(T)\} + Q_0 (1 - \sqrt{Q(T)/Q_0})} \quad (2-115)$$

$$v_t = \frac{PQ_t}{(1+i)^{t-1/2}} = \frac{4PQ_0 e^{-r(t-1/2)}}{\{2+\alpha(t-1)\}(2+at)} \quad (2-116)$$

ただし、

$$\alpha = \frac{2Q_0}{R_0 - R_t} \left(1 - \sqrt{\frac{Q(T)}{Q_0}} \right) = \frac{2Q_0}{R_0}$$

(3) 指数減退と中間双曲減退の比較

基本パターンである指数（定率）減退のほぼ対極に位置する中間双曲減退（ $b=0.5$ ）の離散系・有限期間生産を指数（定率）減退と比較すれば、実際に油田から得られる利益現在価値の範囲が確定できる。ここでは、指数（定率）減退（連続系・永久生産）の累計生産量（すなわち当初埋蔵量 R_0 ）と、中間双曲減退（離散系・期間 T ）の累計生産量（ $R_0 - R_T$ ）が等しいとしてこれを R と置く。これは、「埋蔵量」の厳密な定義（次章参照）は技術的・経済的に回収可能な量（すなわち予想累計生産量）であり、2.2.1.2 で検討したように指数減退の場合はこれを永久生産で近似して差し支えない一方で、双曲減退では初期の減退が激しく時間とともにそれが緩やかになるため、指数減退と埋蔵量（累計生産量）を等しくするには生産期間を定める必要があることを考慮したものである。後者については生産量が初生産量の（ $Q(T)/Q_0$ ）が 1/10 および 1/25 になった時点で生産終了するケースについて検討する。ここでは価格 P を一定としているため、割引を行わなければ、プロジェクトの累計キャッシュフローは常に PR で、減退パターンには依存しない。以下では、割引率 r が 10, 15, 20% の時に、 R および初生産量 Q_0 が等しいとき（ Q_0/R が 0.1, 0.15, 0.2, 0.3）の指数減退（ V_E ）と双曲減退（ V_H ）の現在価値を比較する。

指数（定率）減退（連続系・永久生産）のときの通期利益現在価値は次の通りとなる（式(2-87)再掲）。ただし、ここでは、 $\alpha = Q_0 / R$ である。

$$V_\infty = \frac{PQ_0}{\alpha+r} = \frac{\alpha PR}{\alpha+r} \quad (2-117)$$

一方、中間双曲減退（離散系・期間 T ）の生産終了までの合計利益の現在価値は次の通り。

$$V_H = \sum_{t=1}^T v_t = \sum_{t=1}^T \frac{4PQ_0 e^{-r(t-1/2)}}{\{2+\alpha(t-1)\}(2+\alpha t)} \quad (2-118)$$

ただし、ここでの α は次のとおりである。

$$\alpha = \frac{2(\sqrt{Q_0/Q(t)}-1)}{t} = \frac{2Q_0}{R} \quad (2-119)$$

利益現在価値の指数減退と中間双曲減退の比較を次表に示す。

利益現在価値の比較（指数減退を 1 としたときの中間双曲減退の比率： V_H/V_∞ ）

$Q(T)/Q_0$	<u>1/10</u>			<u>1/25</u>		
	<u>0.1</u>	<u>0.15</u>	<u>0.2</u>	<u>0.1</u>	<u>0.15</u>	<u>0.2</u>
Q_0						
0.1	0.964	0.955	0.952	0.902	0.900	0.901
0.15	0.977	0.964	0.953	0.910	0.900	0.896
0.2	0.982	0.970	0.960	0.919	0.907	0.897
0.3	0.993	0.982	0.972	0.936	0.918	0.906

すなわち、双曲減退 ($b = 0.5$) を同じ埋蔵量 R の指数（定率）減退の永久生産で近似すると、現在価値はわずかに過大評価になり、それは初生産量や割引率にはあまり影響を受けず、主として双曲減退の終／初生産量比 ($Q(T)/Q_0$) に依存している。その比率は想定される係数の範囲内では、 $Q(T)/Q_0$ が 1/10 のときには最大でも 5%弱、1/25 のときでも概ね 10%以下で ($b < 0.5$ ならばこの誤差はさらに小さくなる)、探鉱段階における埋蔵量や生産プロファイルの推定誤差に比べて充分小さい。これは、初期の急速減退が後期の減退率低下と早期回収完了で相殺されているためである。したがって、双曲減退の利益現在価値評価においても、定率（指数）減退（永久生産）で近似しても実用上は支障がない。

2.2.1.5. 調和減退

調和減退 ($\beta=1$) は、現実にはほとんど認められず、理論上の概念的なものに過ぎない。しかし、双曲減退（一般形）に比較すると単純な式になるので、参考のために以下に示す。なお、調和減退では、永久生産のとき累計生産量は収束しないので、生産終了時 (T) までの累計生産量を R_0 （すなわち $R(T)=0$ ）としている。

(1) 連続系

式(2-102)に $\beta = 1$ を代入。

$$Q(t) = Q_0(1 + \alpha t)^{-1} = \frac{Q_0}{1 + \alpha t} \quad (2-120)$$

$$\alpha = \frac{\frac{Q_0}{Q(t)} - 1}{t} = \frac{\frac{Q_0}{Q(T)} - 1}{T} = \frac{Q_0 \log \frac{Q_0}{Q(t)}}{R_0 - R(t)} = \frac{Q_0 \log \frac{Q_0}{Q(T)}}{R_0 - R(T)} = \frac{Q_0 \log \frac{Q_0}{Q(T)}}{R_0} \quad (2-121)$$

$$1 + \alpha t = \frac{Q_0}{Q(t)} = R_0 + Q_0 t \log \frac{Q_0}{Q(T)} \quad (2-122)$$

$$R_0 - R(t) = \int_0^t Q_0(1 + \alpha \tau)^{-1} d\tau = \left[\frac{Q_0}{\alpha} \log(1 + \alpha \tau) \right]_0^t = \frac{Q_0}{\alpha} \log(1 + \alpha t) = \frac{Q_0}{\alpha} \log \frac{Q_0}{Q(t)} \quad (2-123)$$

$$R_0 = R_0 - R(T) = \frac{Q_0}{\alpha} \log \frac{Q_0}{Q(T)} = \frac{Q_0}{\alpha} \log(1 + \alpha T) = \frac{Q_0 T}{Q_0/Q(T)^{-1}} \log \frac{Q_0}{Q(T)} \quad (2-124)$$

$$T = \frac{R_0 \left(\frac{Q_0}{Q(T)} - 1 \right)}{Q_0 \log \frac{Q_0}{Q(T)}} \quad (2-125)$$

(2) 離散系 (年央法)

$$\begin{aligned} Q_t = R(t-1) - R(t) &= \frac{Q_0}{\alpha} \left(\log \frac{Q_0}{Q(t)} - \log \frac{Q_0}{Q(t-1)} \right) = \frac{Q_0}{\alpha} \log \frac{Q(t-1)}{Q(t)} \\ &= \frac{Q_0}{\alpha} \log \frac{1 + \alpha t}{1 + \alpha(t-1)} = \frac{Q_0}{\alpha} \log \left\{ \frac{R_0 + Q_0 t \log \frac{Q_0}{Q(T)}}{R_0 + Q_0(t-1) \log \frac{Q_0}{Q(T)}} \right\} \end{aligned} \quad (2-126)$$

2.2.2. 坑井数の最適化

以上の各種生産プロファイルの検討の結果、指数(定率)減退の連続系・永久生産で生産能力を代表させて問題ないことが判明した。そこで以下では、指数減退・連続系・永久生産の場合について利益現在価値を最大化することを考える。

生産井1坑当たり当初生産量 Q_0 はすべての生産井で同一、すなわち油田全体の当初生産量は坑井数 (W) を乗じた WQ_0 となる。この値と埋蔵量 (R_0) が所与のとき、割引率 r を一定として、利益の現在価値を最大化する坑井数 W を求める。ここで対象にしているのは

個々の油田の生産であるので、その生産量は価格に影響せず (price taker)、価格 (実質価格) は全期間を通して一定であると仮定する。価格が一定率 g で上昇するときには割引率に r に替えて $r - g$ を使用すれば良い (生産を開始させるため、ここでは $r > g$ とする)。単位生産量当たり操業費は価格に比例するとして、それを差し引いた単位生産量当たり利益を P で一定 (または一定率 g で成長) とする。

このプロファイルの生産能力は生産量の上限であり、企業はこれより少ない生産量を任意に選択できる。しかし指数減退では、生産量も現在価値も指数関数となり定率で減退・低下するので、あとで生産して利益が上がるなら、その分を可能な限り早く生産するのが最も価値が高まる。すなわち、指数減退の能力上限まで生産し、生産井は途中で追加せず総て最初から掘削・生産するのが最適解になる。したがって、動学分析では端点解となるため、ここでは静学分析 (連続系) にとどめる。

2.2.2.1. 坑井数と利益現在価値

まず、坑井数に対応した利益現在価値を定式化する。 $Q(t)$: 時点 t の 1 坑当たり生産量, Q_0 : 1 坑当たり初生産量, $R(t)$: 時点 t の残存埋蔵量, R_0 : 初期埋蔵量, W : 生産井数, I : 生産井 1 坑当たり投資額, F : 固定投資額, P : 生産量当たり利益 (価格・操業費, 一定), α : 生産井減退率 (指数減退), r : 割引率 (一定) とする。

油田全体の生産量と埋蔵量・減退率には次の関係が成立する。

$$WQ(t) = -\dot{R}(t) = \alpha WR(t) \quad (2-127)$$

変数を分離し、両辺を時間 t で積分する (C は任意定数)。

$$\int \frac{R(t)}{R(t)} dt = \int \frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt} dt = -\int \alpha W dt + C$$

$$\log R(t) = -\alpha W t + C$$

$t=0$ のとき $R(t) = R(0) = R_0$ なので、

$$R(t) = R_0 e^{-\alpha W t} = R_0 e^{-\frac{W Q_0 t}{R_0}} \quad (2-128)$$

$$WQ(t) = \alpha WR(t) = W Q_0 e^{-\frac{W Q_0 t}{R_0}}$$

したがって、累計利益の割引現在価値は次式となる。

$$\begin{aligned}
V &= \int_0^{\infty} PWQ(t)e^{-rt} dt - WI - F = \int_0^{\infty} PWQ_0 e^{-\left(\frac{WQ_0}{R_0} + r\right)t} dt - WI - F \\
&= -\frac{R_0}{WQ_0 + rR_0} \left[PWQ_0 e^{-\left(\frac{Q_0}{R_0} + r\right)t} \right]_0^{\infty} - WI - F = \frac{WPQ_0 R_0}{WQ_0 + rR_0} - WI - F \quad (2-129)
\end{aligned}$$

2.2.2.2. 利益現在価値の最大化

まず、割引現在価値 V を最大化することを考える。 V の坑井数 W による 1 階および 2 階微分は次の通り。

$$\frac{\partial V}{\partial W} = \frac{R_0 P Q_0 (W Q_0 + r R_0) - R_0 P W Q_0}{(W Q_0 + r R_0)^2} - I = \frac{r P Q_0 R_0^2}{(W Q_0 + r R_0)^2} - I \quad (2-130)$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial W^2} = -2 Q_0 \frac{r P Q_0 R_0^2}{(W Q_0 + r R_0)^3} = -\frac{2 r P Q_0^2 R_0^2}{(W Q_0 + r R_0)^3} \quad (2-131)$$

式(2-131)は常に負なので、式(2-130)を 0 にする坑井数 W^* が利益現在価値を最大化する。

$$\begin{aligned}
(W^* Q_0 + r R_0)^2 &= \frac{r P Q_0 R_0^2}{I} \\
W^* &= \frac{\sqrt{r P Q_0 R_0^2}}{I} + r R_0 = \left(\sqrt{\frac{r P Q_0}{I}} - r \right) R_0 \quad (2-132)
\end{aligned}$$

すなわち、最適坑井数は固定投資 F に関係なく埋蔵量 R_0 に比例する。

2.2.2.3. 投資効率の最適化

以上では、投資額には無関係に利益現在価値の最大化を目指している。しかし、現実には手持ち資金（または借入限度額）は無限ではなく、他の投資機会との競合するため、利益の絶対額ではなく、むしろ投資効率の最適化を図るべきである。

投資効率は通常、内部利益率（IRR、利益現在価値を 0 にする割引率）で測られるので、これを r^* と表し、その最大化を試みる。 r^* は次式を満足するときの割引率（ r ）である。

$$V(r^*) = \frac{WPQ_0 R_0}{WQ_0 + r^* R_0} - WI - F = 0$$

$$r^* = \frac{WPQ_0}{WI+F} - \frac{WQ_0}{R_0} \quad (2-133)$$

この内部利益率 (r^*) を坑井数 (W) で1階および2階微分する。

$$\frac{\partial r^*}{\partial W} = \frac{PQ_0(WI+F) - WPQ_0I}{(WI+F)^2} - \frac{Q_0}{R_0} = Q_0 \left\{ \frac{PF}{(WI+F)^2} - \frac{1}{R_0} \right\} \quad (2-134)$$

$$\frac{\partial^2 r^*}{\partial W^2} = \frac{-2WPQ_0F}{(WI+F)^3} \quad (2-135)$$

式(2-135)は常に負なので、式(2-134) (の中括弧) を0にする坑井数 W^* が利益現在価値を最大化する。

$$(W^*I + F)^2 = PFR_0$$

$$W^* = \frac{\sqrt{PFR_0} - F}{I} = \frac{\sqrt{F}(\sqrt{PR_0} - \sqrt{F})}{I} \quad (2-136)$$

通常、規模の経済が働くため、埋蔵量 (R_0) の増加に比較し、固定投資額の増加は緩慢なので、埋蔵量が増加すると単位埋蔵量当たりの固定投資額 F/R_0 と最適坑井数 W/R_0 は減少 (1坑当たり埋蔵量 R_0/W は増加) する。一般に1坑当たりの当初生産量 (Q_0) は埋蔵量規模には依存しないので、これを同じとすれば、油田全体の減退率 = 埋蔵量当たり生産量 ($W\alpha = WQ_0/R_0$) は大規模油田ほど低下し、寿命 (ここでは永久生産を考えているので、例えば、半減期 : 残存埋蔵量が半減する期間) は長くなる。

以上をまとめると次表のようになる。

油田規模	埋蔵量当たり		油田全体			
	坑井数	初期投資	生産量 \Leftrightarrow 減退率	寿命	枯渇	
R_0	W/R_0	$(WI+F)/R_0$	WQ_0/R_0 (同値)	$W\alpha$ (半減期)		
小	多	大	大	大	短	早
\updownarrow						
大	少	小	小	小	長	遅

2.2.2.4 坑井数最適化モデルの問題点と課題

本モデルは全体としては現実をかなり良く近似しており、上記の結論は全体傾向の把握

にはきわめて有効であると考えるが、いくつかの単純化した仮定が含まれており、より詳細には次の問題点/課題がある。

- (1) 現実でも、油田に係わる費用の大半は初期投資で、坑井も初期に総て掘削されるのが一般的である。しかし、使用できる掘削リグ数の制約などにより、全坑井が同時に掘削されるのではなく、逐次掘削され、完了したのから生産に供される。また、生産開始前には埋蔵量や地下地質情報が不正確なので、生産井掘削により得られた情報により開発の最適化を図るという意味もある。このため実際には、全坑井が完了・生産開始するまでの増産 (build-up) 期が存在し、大油田の場合は数年間に及ぶ。この期間には生産量は坑井数に比例して、線形 (より正確には階段状) で増産していく。
- (2) 情報の追加 (埋蔵量増加など) や新技術の適用 (増進回収法など) により生産期間の途中で追加坑井の掘削が行われることもある。しかし、これらについては生産開始前に予測することが困難で、モデルには組み込めない。
- (3) 本モデルでは各坑井は常に各時点の最大能力で生産することになる。可変投資額として坑井費のみを考えればこれが最適であるが、実際には処理施設やパイプライン等の投資も含まれる。これらの設計・投資をピーク時の最大流量に合わせて行くと、残りの期間で能力の大半が遊休してしまうため、これらの施設の能力をやや落として、当初は生産量を絞って一定期間プラトーとすることがある。またガス、とくに LNG では、一定量の供給契約がある場合が多く、それに合わせたプラトー生産となる。
- (4) 本モデルの前提である指数減退の永久生産は、上記で検討したように実用上有効な近似である。しかし、産油国との契約条件により期間が限定されているときには、本モデルの最適解より早く、契約期間中に全量を枯渇したほうが採算は向上する場合もあり、そのときの最適坑井数はより多くなる。
- (5) 本モデルでは、地下の油層は均質かつ導通していて、どの坑井も全く同じ挙動を示すと仮定している。実際には地下の地質は複雑で、この仮定は正確ではない。
- (6) 本モデルでは、生産期間中の費用は価格および生産量に比例すると考えて無視している。この仮定は操業費については妥当な近似であるが、一方、産油国との契約は多種多様で、期間生産量・累計生産量・埋蔵量・収益率などに応じて royalty・利益配分・税などの率が不連続に変化するのが普通であり、これらも費用に含めて扱う場合には複雑な取り扱いが必要になる。

これらの問題の多くは、連続系の関数で表現することが困難で、微分・積分等にはなじま

ない。実際の石油企業は、それぞれの契約や油田ごとに、個別の離散系モデルを構築し、表計算ソフトなどで試行錯誤的に最適坑井数や生産量を決定している。また、地下地質の複雑性の問題に対しては、地下をグリッドに細分して、地質情報などを組み込んだ大規模な数値油層モデルを構築して、グリッド間の物質や圧力のやり取りを物理法則に基づき動的にシミュレートしている。しかし、本論文では世界全体を対象とし、その総体的傾向を考察することが目的なので、上記結論をそのまま敷衍して問題ないと考える。

第3節 産油国のゲーム理論分析

本章第1節では、世界全体を対象に、増産すれば価格が低下するという前提のもとに最適生産経路を検討した。その結果は、示唆に富むものではあるが、多くの前提条件が現実離れしているため、実際の生産実績とは大きく異なっていた。そこで第2節では、排出エネルギーに焦点を当て、個々の油田の利益現在価値を最大化する生産経路を検討した。ここでは、各油田の生産量は原油価格に影響を与えない **price taker** とみなされ、常に能力一杯のフル生産が最適解であった。このモデルは現実を比較的よく近似していると考えられるが、産油国レベルでは生産量が価格にある程度の影響を与える不完全競争の状況が生じ、特に大産油国は減産して価格の上昇を狙うべきか否かの意思決定に迫られることがある。

そこで本節では、ゲーム理論でこの問題を考察する。ゲーム理論とは、相互に影響し合う人または団体（「プレーヤー」）の行動・意思決定・戦略などを分析する手法であり、von Neumann & Morgenstern(1944)による本格的な体系化以降、経済学・生物学・行動科学など多くの分野に応用されている。原則として、全員が、①自己の利益最大化を目指し、②入手可能な情報（以下で示す利得行列を含む）をすべて活用して合理的に考え行動すること、を前提にしている。

2.3.1. 石油生産ゲームの基本的定式化

OPEC 諸国の生産調整を例にとり、最も基本的な「 2×2 同時ゲーム」（2プレイヤー、各2戦略、同時に意思決定、変更不可）のいくつかの古典的なパターンを概観する。生産を削減すれば原油価格は上昇するが、利益が増加するか減少するかは生産量に対する価格の感応度や生産シェアなどに依存し、いくつかのパターンが考えられる。

生産量の多い産油国A（サウジアラビアを想定）とそれに次ぐ生産量の産油国Bを考える。それ以外の産油国は、価格に影響を与えない **price taker** で常に能力一杯の生産をするものとみなして分析対象には含めず、残りの需要をA国とB国で分け合う。 2×2 の戦略（現状維持、生産削減）の組み合わせに対する両国の利益（または効用）を下表の「利得行列」に示した（利得の数値は説明のために便宜的に示した架空の数値に過ぎない）。行がA国、列がB国の戦略を表し、各欄の斜線の左下がA国、右上がB国の利得であり、カッコ内に利得の数値例も示す。ここでは両国の利得合計はゼロ（または一定）とは限らず、「非ゼロサム（非定和）ゲーム」である。両国ともこの利得行列の内容は熟知してい

る（「完備情報」）が、相手の着手はわからない（「不完全情報」）とする。

2.3.1.1. 「囚人のジレンマ」 ($a_2 > a_4 > a_1 > a_3$, $b_3 > b_4 > b_1 > b_2$)

<u>A \ B</u>	<u>現状維持（自白）</u>	<u>生産削減（黙秘）</u>
現状維持（自白）	$a_1 \setminus b_1$ (4\2)	$a_2 \setminus b_2$ (8\1)
生産削減（黙秘）	$a_3 \setminus b_3$ (2\4)	$a_4 \setminus b_4$ (6\3)

A, B 両国とも「現状維持」が支配戦略（相手がどの戦略を選んでも、それぞれにおいて最良の戦略）であり、その交点（左上）の「4\2」が「ゲームの解」となる。ただし、この利得の組み合わせは右下の「6\3」（ゲームの解ではない）にパレート改善（相手の利得を悪化させずに自分の利得を増加）可能である。それ以上パレート改善できない利得の組み合わせを「パレート最適(Pareto optimum)」と呼び、このケースではゲームの解の「4\2」以外はすべてパレート最適であり、何らかの価値判断を行わないとこの3者間の優劣はつかない。ベンサム流の功利主義では利得合計が最大の「8\1」と「6\3」が、ロールズ流の平等主義では最貧者の利得が最大の「6\3」が最適解になる。すなわち「ゲームの解」は、パレート最適でも各種観点からの最適解でもなく、「ジレンマ」と言われるゆえんである。後で検討するように、OPEC は実はほとんどの期間、生産カルテルとしては機能していなかったとみられるが、多くの産油国が「囚人のジレンマ」状態であったためと考えられる。

「現状維持」を「自白」、「生産削減」を「黙秘」と読み替え、共犯2人を別々の独房に入れ、司法取引（一人だけ自白すれば大幅減刑）を認めると、最適解の両者黙秘ではなく（囚人にとって）望ましくない両者自白に至る（制度としては成功）というのが「囚人のジレンマ」である。

2.3.1.2. 「合理的な豚」 ($a_2 > a_4 > a_3 > a_1$, $b_3 > b_4 > b_1 > b_2$)

<u>A \ B</u>	<u>現状維持（待機）</u>	<u>生産削減（押す）</u>
現状維持（待機）	$a_1 \setminus b_1$ (3\2)	$a_2 \setminus b_2$ (8\1)
生産削減（押す）	$a_3 \setminus b_3$ (4\4)	$a_4 \setminus b_4$ (6\3)

このケースでは、現状維持がB国の支配戦略であるが、A国には支配戦略はない。しか

し、B国が常に現状維持を選択するのであれば、A国の最適戦略は生産削減になり、左下の「4\4」（ローズ流最適解）がゲームの解となる。サウジアラビアだけがスイング・プロデューサーとして生産削減し、他国は目一杯生産した1980年代前半に相当する。

レバーを押すと餌が出る檻に大豚と小豚が入っているとき、小豚はレバーを押すとその間に餌の大半を大豚に食べられるので常に待機するため、大豚がレバーを押さざるを得ず、その時は小豚（「合理的な豚」）も大豚並みの餌が得られる（選択肢が限られる弱者のほうが有利）。

2.3.1.3. 「チキンゲーム」 ($a_2 > a_4 > a_3 > a_1$, $b_3 > b_4 > b_2 > b_1$)

<u>A \ B</u>	<u>現状維持 (直進)</u>	<u>生産削減 (回避)</u>
現状維持 (直進)	$a_1 \setminus b_1$ (2\1)	$a_2 \setminus b_2$ (7\2)
生産削減 (回避)	$a_3 \setminus b_3$ (3\5)	$a_4 \setminus b_4$ (6\4)

A国もB国も価格決定にある程度の影響力を持ち、共に生産削減すれば、両者とも現状より利得が向上するが、相手だけ生産削減して自国が現状維持すれば利得を最大化できる。このとき、A国にもB国にも支配戦略はない。しかし、左下の「3\5」と右上の「7\2」では（どうやってここに至るかについてはここでは議論しない）ともに、両国ともその時の相手の戦略に対する最適解になっていて、互いに相手が動かない限り戦略を変更する誘因のない不動点である。これを「ナッシュ均衡(Nash equilibrium)」と呼び、支配戦略がない場合でもゲームの解となる。「混合戦略」（複数の戦略を確率的に組み合わせた戦略、例えばPKキッカーが左右に一定割合で蹴り、キーパーは左右に一定割合で飛ぶ）まで拡張すれば必ずナッシュ均衡（ゲームの解）が存在する（この例のように複数の場合もある）ことが証明されている（Dasgupta and Maskin,1986, Gibbons,1992,27-48）。

細い1本道で対向車が遭遇するとき、ともに直進すれば最悪の事態となるが、相手が回避すれば直進した車の利得は最大となり、回避した相手は弱虫（チキン）と呼ばれる。

2.3.1.4. 「協調ゲーム」 ($a_4 > a_2 > a_3 > a_1$, $b_4 > b_3 > b_1 > b_2$)

<u>A \ B</u>	<u>現状維持</u>	<u>生産削減</u>
現状維持	$a_1 \setminus b_1$ (3\2)	$a_2 \setminus b_2$ (5\1)
生産削減	$a_3 \setminus b_3$ (4\3)	$a_4 \setminus b_4$ (6\4)

A国の価格決定力は強く、他国の戦略に係らず生産削減するのが支配戦略となる。B国には支配戦略はないが、A国が支配戦略（削減）を常に採用するのなら生産削減が最適解で、右下の「6\4」がゲームの解（さらに、パレート最適、ベンサム流でもロールズ流でも最適）となる。OPECの生産枠のようなカルテルは、こうした状況にないと抜け駆けが生じるため安定しないと考えられる。

2.3.1.5. 「男女の争い」 ($a_1 > a_3, a_4 > a_2, b_1 > b_2, b_4 > b_3$)

<u>A \ B</u>	<u>現状維持（格闘技）</u>	<u>生産削減（AKB）</u>
現状維持（格闘技）	$a_1 \setminus b_1$ (4\2)	$a_2 \setminus b_2$ (5\1)
生産削減（AKB）	$a_3 \setminus b_3$ (3\3)	$a_4 \setminus b_4$ (6\4)

このケースにも支配戦略は存在しないが、左上の「4\2」と右下の「6\4」がナッシュ均衡（ゲームの解）となっている（後者はさらに、パレート最適、ベンサム流でもロールズ流でも最適）。相手が生産削減すれば自国も削減するのが最適だが、相手が現状維持ならば自国も現状維持が最適解になる。主導的な産油国が一方的に減産を宣言し、それを維持することをコミットすれば、ここに至る。ただし、B国が、各々が意思決定権を有する複数の産油国（または企業）からなるときは、そこでの戦略決定・意思統一は別のゲームである。サウジアラビアをA国、他のOPEC諸国を集合的にB国とすれば、ある時期はこのケースに相当していた可能性がある。

特に、 $a_4 > a_1 > a_3 > a_2, b_1 > b_4 > b_3 > b_2$ のとき（上表とは若干異なる）、現状維持を「格闘技」（彼女の好み）、生産削減を「AKB48」（彼の好み）と読み替えれば「男女の争い」となる（デートで会えないよりは相手の好みに合わせるほうが望ましい）。

2.3.2. 非同時ゲームと展開形ゲーム表示

同時ゲームでは両プレイヤーは完備情報ではあるが、相手の着手を知らずに自分の戦略を決定し、それは変更できない（不完全情報）と考えたが、現実には、相手の着手を知りそれに応じて自分の戦略を決定できること（完全情報）も多い。この場合、将棋や囲碁と同様に、両プレイヤーが交互に着手する「交互ゲーム」と考えられる。

男女の争いは、同時ゲーム（変更不可）では必ずしもナッシュ均衡に到達するとは限ら

ないが、これが交互ゲームであると、先手が自分の好みを選択し後手はそれに従うナッシュ均衡に至り、先手が有利である。

2.3.2.1. 非同時「囚人のジレンマ」と時効の効果

上述の「囚人のジレンマ」で両プレイヤーはいつでも戦略を変更できるとする。両プレイヤーとも利得行列の内容を知っている（完備情報）、相手が裏切らない限り右下の「生産削減\生産削減」を取り続け、もし相手が裏切って増産に転じたら自分も増産に変更するのが得策である。ただし、これでは常に相手の裏切りにおびえ続けなければならないので、期限を切る（時効を設ける）とどうなるであろうか。その時点で「生産削減（黙秘）\生産削減（黙秘）」に凍結されればよいが、そうはならない。両者とも時効直前（相手がもはや戦略を変更できないタイミング）に裏切るのがゲームの解となり、結局囚人のジレンマに戻ってしまう。一見囚人に有利な時効も場合によっては逆の効果をもたらす。

2.3.2.2. 「囚人の抜け道」（仮称） $(a_4 > a_2 > a_1 > a_3, b_3 > b_4 > b_1 > b_2)$ と後退帰納法

<u>A \ B</u>	<u>現状維持（自白）</u>	<u>生産削減（黙秘）</u>
現状維持（自白）	$a_1 \setminus b_1$ (3\2)	$a_2 \setminus b_2$ (4\1)
生産削減（黙秘）	$a_3 \setminus b_3$ (2\4)	$a_4 \setminus b_4$ (5\3)

上表は「囚人のジレンマ」に似るが、 $a_4 > a_2$ となっている点が異なる。A国には支配戦略はないが、現状維持がB国の支配戦略で、同時ゲーム（上表）ならば囚人のジレンマ同様「現状維持\現状維持」がゲームの解となる。交互ゲームでは後手の着手は先手の着手に応じて変えられるので、先手・後手各1手の場合、後手の戦略は4種類あり、利得行列は 2×2 ではなく、 2×4 （Aが先手）または 4×2 （Bが先手）となる。

(Aの利得\Bの利得)	<u>Aの着手が 維持の時 / 削減の時 のBの着手</u>			
<u>A(先手)の着手</u>	<u>維持 / 維持</u>	<u>維持 / 削減</u>	<u>削減 / 維持</u>	<u>削減 / 削減</u>
現状維持	3\ 2	3\ 2	4\ 1	4\ 1
生産削減	2\ 4	5\ 3	2\ 4	5\ 3

Aが先手の場合（上表）、Bは「現状維持 / 現状維持」（Bの着手欄の「/」の左は先手

Aが「現状維持」のとき、右はAが「生産削減」のときのBの着手）が支配戦略（同点が含まれるので厳密には「弱支配戦略」）であり、これを見越せばAも「現状維持」を選び、「現状維持\現状維持」(3\2)がゲームの解となる。

一方Bが先手の場合（下表）は、Aの「現状維持|生産削減」（「|」の左は先手Bが「現状維持」のとき、右はBが「生産削減」のときのAの着手）が（弱）支配戦略であり、「生産削減\生産削減」(5\3)がゲームの解となる。

(Bが先手)	(Aの利得\Bの利得)	<u>Bの着手</u>	
<u>Bの着手が</u> 維持の時 削減の時	<u>のAの着手</u>	<u>現状維持</u>	<u>生産削減</u>
維持 維持		3\ 2	4\ 1
維持 削減		3\ 2	5\ 3
削減 維持		2\ 4	4\ 1
削減 削減		2\ 4	5\ 3

着手数が増えると戦略数が天文学的に増加し、戦略形表示は煩雑になるので、交互ゲームは展開形表示（「ゲームの木」，図2-1）のほうが扱いやすい。本論文では時間の経過を上から下に表現する。ただし、分析は逆に、将来（下）から現在（上）に向かって行い、これを「後退帰納法」（バックワード・インダクション）という。

各ノード（分岐点）はどちらかのプレイヤーの着手を表しており、全体は両プレイヤーの取り得るすべての戦略の組み合わせを示している。下のノードから順に、手番のプレイヤーの観点からの最適戦略を選んでいく。それより上位のノードの戦略選択では下位で選ばれた選択肢（太線）だけを考慮すればよい。任意のノードより下位の「部分ゲーム」のすべてでナッシュ均衡になっているとき、全体ゲーム（これも部分ゲームの一種）の均衡を「部分ゲーム完全均衡」といい、全プレイヤーが後退帰納法により充分深読みし、合理的に戦略選択を行ったときのゲームの解である。展開形表示では部分ゲームナッシュ均衡ではない（非現実的な）選択肢の剪定によりゲームを単純化できる。

ここではA, B各1手の交互ゲームを考える。Aが先手の場合は、部分ゲーム完全均衡（ゲームの解）は同時ゲーム同様「維持\維持 (3\2)」となるが（図2-1A），Aが先手ならば「削減\削減 (5\3)」がゲームの解となる（図2-1B）。

囚人Aの別件の罪状が軽く、両者黙秘時のAの利得が自白による司法取引より高ければ、それを知る囚人Bが先に完全黙秘を宣言すればAも黙秘し、囚人たちは重罪を免れ

る。逆に言えば、司法取引は充分魅力的でないとも効果がないということになる。

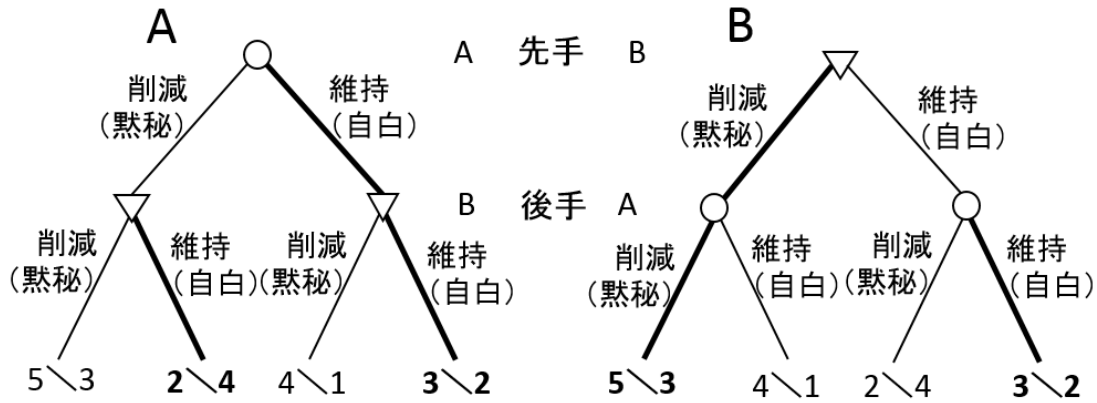


図 2-1 交互ゲームの展開形表示（「ゲームの木」） 太線：選択される枝

A : Aが先手, B : Bが先手, ○ : Aの手番, ▽ : Bの手番, 5 \ 3 : A \ Bの利得

2.3.3. 需給均衡の決定メカニズム

以上では、生産量を「現状維持」と「生産削減」に定性的に二分し、これに対する利得表も天下り的に与えていたが、ここでは、寡占（複占）状態において生産量および原油価格がどのようにして決定するのかを、長岡・平尾（1998）を参考にして考察する。本章第1節では需要関数の価格弾力性が一定の場合を基本に検討を行ったが、ここではより簡略化して次の線形関数（価格弾力性は一定ではない）で需要曲線を表現する（ Q : 需要, P : 原油価格, P_0 : 切片: $Q=0$ の時の価格）。価格には、係数（傾き）が1になるように、適当な為替レートの通貨単位を使用していると考え、次式のごとく単純化できる。

$$Q = P_0 - P \tag{2-137}$$

この需要をA, Bの2大産油国とその他の産油国（集散的にC国と呼ぶ）で分担して生産している。C国は価格決定力のない price taker の集合で、常に生産能力一杯の定量（ Q_c ）を生産しているとする（現実にも中小産油国は限界規模の油田が多く、生産量の調整は困難）。C国の生産量で世界需要が満たされてしまうと、A, B両国が生産する余地がないので、 $P_0 > Q_c$ の関係にある。A, B両国が収入（単純化のために費用は無視し、収入=利益とみなす）を最大化すべく生産量（ Q_A, Q_B ）を調整すると仮定する。とりあえず、両国には生産能力の制限はないと考える。

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C \tag{2-138}$$

以上の設定において、A、B両国の生産戦略を考察する。

2.3.3.1. 結託

A、B両国が結託して両国合計で最大の収入を得るケースを考える。両国合計の生産量を Q_{A+B} ($\equiv Q_A + Q_B$) とすると両国合計の収入は次式になる。

$$\pi_{A+B} = PQ_{A+B} = (P_0 - Q_{A+B} - Q_C)Q_{A+B} = (P_0 - Q_C)Q_{A+B} - Q_{A+B}^2 \quad (2-139)$$

これを Q_{A+B} で1階および2階偏微分する。

$$\frac{\partial \pi_{A+B}}{\partial Q_{A+B}} = P_0 - Q_C - 2Q_{A+B} \quad (2-140)$$

$$\frac{\partial^2 \pi_{A+B}}{\partial Q_{A+B}^2} = -2 \quad (2-141)$$

式(2-141)は常に負なので、式(2-140)を0とする値 Q_{A+B}^* で両国合計収入は最大になる。

$$Q_{A+B}^* = \frac{P_0 - Q_C}{2} \quad (2-142)$$

これは独占企業の価格付けに相当する。この量をA、B両国の力関係により分配することになる。この分配が安定するには、両国とも下記の「同時ゲーム」の収入を上回る必要があり、その条件はそれぞれの国の取り分が両国合計の4/9以上になることである。したがって、両国の生産量に2割以上の差異がある場合には結託は安定しない。

2.3.3.2. 同時ゲーム (クールノー均衡)

A、B両国が同時に、相手の挙動を予測して、あるいは微調整を繰り返して生産量を決めるケースを考える。このときのA国の収入は相手の行動に応じて次式で表される。

$$\pi_A = PQ_A = (P_0 - Q_A - Q_B - Q_C)Q_A = (P_0 - Q_B - Q_C)Q_A - Q_A^2 \quad (2-143)$$

これを Q_A で1階および2階偏微分する。

$$\frac{\partial \pi_A}{\partial Q_A} = P_0 - Q_B - Q_C - 2Q_A \quad (2-144)$$

$$\frac{\partial^2 \pi_A}{\partial Q_A^2} = -2 \quad (2-145)$$

式(2-145)は常に負なので、式(2-144)を0とする値 Q_A^* でA国の収入は最大になる。

$$Q_A^* = \frac{P_0 - Q_B - Q_C}{2} \quad (2-146)$$

これがA国の反応曲線（相手国の生産量に対する自国の最適生産量）で、B国についても同様に反応曲線が求まる。

$$Q_B^* = \frac{P_0 - Q_A - Q_C}{2} \quad (2-147)$$

式(2-146)と(2-147)の表す2本の反応曲線の交点が均衡生産量 (Q_A^{**}, Q_B^{**}) になる。

$$Q_A^{**} = \frac{P_0 - Q_C}{2} - \frac{P_0 - Q_A^{**} - Q_C}{4} = \frac{P_0 - Q_A^{**} - Q_C}{4} \quad (2-148)$$

この解が Q_A^{**} になるが、対称性により、それは Q_B^{**} にも一致する。

$$Q_A^{**} = Q_B^{**} = \frac{P_0 - Q_0}{3} \quad (2-149)$$

この均衡点はお互いが相手国の生産量に対する最適反応のナッシュ均衡であるが、特に「クールノー均衡(Cournot equilibrium)」と呼ぶ。図 2-2 に両国の反応曲線とクールノー均衡（交点）を示した。仮にこの点から外れていても、交互に最適反応を繰り返すことによりこの均衡点に至る（図 2-2 の点線矢印）。

この均衡点においては、両国の生産量は等しく、共にこれを超える生産能力を有していることが前提になる。仮にB国の生産能力が均衡点の生産量を下回るときは、B国は生産能力一杯の（均衡点より少ない）生産を行い、A国は式(2-146)で示される反応曲線上でこのB国の生産量に対応した（均衡点より多い）生産を行うのが最適戦略となる。この時、B国はC国同様 price taker に転じて、価格支配力を有するのはA国だけとなる。過去には、サウジアラビアがこの時のA国に相当した時期が存在したと見られる。その時、米国およびロシア（ソ連）もサウジアラビアに匹敵する生産量であったが、これらの国では多くの企業が乱立するなどして減産への意思統一が困難であり、他方、価格が低下すれば採算割れする限界油田および一度減産すると回復が困難な中小油田も多く、自在な戦略の行使は無理であったと考えられる。

2.3.3.3. 交互ゲーム（シュタッケルベルグ均衡）

A国が先に生産量を決め、これに応じてB国が最適反応するゲームを考える。先手（A）、後手（B）ともに着手は1回きりでそれ以上は繰り返さない。このとき先手

(A) は後手 (B) の反応曲線を熟知しており、あらかじめ B の反応を深読みして「合理的に」着手を決めると考える。すなわち A 国は、B は必ず同国の反応曲線上の生産量を選ぶと考え、この線上の点のうち A の収入を最大にする点を選ぶことにより、上記クールノー均衡より自国に有利な生産量の組み合わせに到達しようとするのである。A の生産量が与えられた時の B の最適反応は(2-147) 式で与えられる。これを式(2-137)に代入すると価格は次式となる。

$$P = P_0 - Q_A - Q_B^* - Q_C = P_0 - Q_A - \frac{P_0 - Q_A - Q_C}{2} - Q_C = \frac{P_0 - Q_A - Q_C}{2} \quad (2-150)$$

したがって、このときの A 国の収入は同国の生産量 Q_A の関数となる。

$$\pi_A = P Q_A = \frac{P_0 - Q_A - Q_C}{2} \cdot Q_A = \frac{(P_0 - Q_C) Q_A - Q_A^2}{2} \quad (2-151)$$

Q_A で 1 階および 2 階の偏微分を行う。

$$\frac{\partial \pi_A}{\partial Q_A} = \frac{P_0 - Q_C}{2} - Q_A \quad (2-152)$$

$$\frac{\partial^2 \pi_A}{\partial Q_A^2} = -1 \quad (2-153)$$

式(2-153)は常に負なので、式(2-152)を 0 とする生産量 (Q_A^{**}) が A 国の収入を最大化する。

$$Q_A^{**} = \frac{P_0 - Q_C}{2} \quad (2-154)$$

これに対応する B 国の反応曲線、式(2-147)上の生産量 (Q_B^{**}) は次式となる。

$$Q_B^{**} = \frac{P_0 - Q_A^{**} - Q_C}{2} = \frac{P_0}{2} - \frac{P_0 - Q_C}{4} - \frac{Q_C}{2} = \frac{P_0 - Q_C}{4} \quad (2-155)$$

この組み合わせ (Q_A^{**}, Q_B^{**}) が「シュタッケルベルグ均衡(Stackelberg equilibrium)」である。 Q_B^{**} は Q_A^{**} に対する最適反応であり B 国の反応曲線上に位置するが、その逆ではなく A 国の反応曲線には乗っていない (図 2-2)、すなわちナッシュ均衡ではない。A 国は生産量を減らすことで Q_B^{**} に対する Q_A の最適値 (A 国の反応曲線上) を選び収入を最大化できるが、仮にそうすると反応はそこでは止まらず、B 国は Q_B^{**} から増産し、この新しい Q_A 値に対する最適生産量に転じる…、というように 2.3.3.2 のクールノー (ナッシュ) 均衡に達するまで交互反応が続く。すなわち、シュタッケルベルグ均衡では、先手の A 国が、あえて予想される相手の反応に対する最適化を避けて、自国の反応曲線から離脱することにより、結局はクールノー (ナッシュ) 均衡よりも大きな収入が得られる。

現実には、A国がこの生産量を宣言してここに至る可能性は低い。まず、A国の宣言にかかわらずB国が先に式(2-155)の均衡生産量を超えて生産すれば、A国はそれに対する自国の反応曲線(式(2-146))上の点を選択せざるを得なくなる。また、仮にA国が先に式(2-154)の生産量に達したとしても、B国は式(2-155)より大きい生産量を選ぶという対抗処置をとる可能性がある。この時はどちらかが減産を迫られる「チキンゲーム」に相当するが、結局は「合理的な豚」同様、最も余力のある(価格上昇の恩恵の最も大きい)A国がスイング・プロデューサーとなって生産削減するか、低い価格でシェアを確保する(完全競争)か、意思決定を迫られることになり、前者の場合は上記検討とは逆にB国有利のシュタッケルベルグ均衡に至る。

2.3.3.4. 完全競争(ベルトラン均衡)

同質財においては、販売競争は量ではなく価格で行われることが多い。このとき、商品が完全に同質で供給能力に制限がなければ、わずかでも低い価格を付けたものがすべての需要を独占できるので、仮に参加者が2社(国)だけであっても、市場価格は限界費用まで下がり、完全競争市場と同じ結果になる。この過程を「ベルトラン競争」といい、最終結果を「ベルトラン均衡(Bertrand equilibrium)」と呼ぶ。

長岡・平尾(1998)によると、ベルトラン競争が成立するためには、①商品の同質性、②生産能力の制約なし、③カルテルが存在しない、という3条件が必要である。原油は異なる油種間で品質差・価格差があるとはいえ、油種間の代替性と価格変動の相関が高く、基本的に同質財と見なせる。OPECはカルテルの代表のように見られているが、実は生産カルテルとして機能していたことは殆どなかったと考えられる。次章で分析するように、過去の生産実績は、油田の埋蔵量発見履歴に前節で検討した生産プロファイルを適用して算出した生産能力の変遷に極めて近く、(スイング・プロデューサー時のサウジアラビアを除き)多くの産油国が常にほぼ能力一杯に生産していたとみられる。例えばベネズエラは、かつてはOPECの生産枠(quota)破りの常習犯であったが、1999年にチャベス政権が誕生すると生産枠遵守を宣言し、それが2000年代の価格上昇につながったとされることがある。しかし、実は油田の老朽化とPDVSA(国営石油会社)の幹部・技術者の追放により、21世紀初頭の同国の生産能力は急落しており、チャベスがそれを政治的に逆利用したに過ぎず、ベネズエラはこの期間を含め、常にほぼ能力一杯の生産をしていたとみられる。

一方②に関しては、実際には生産能力に制限があり、その範囲内での競争となる。これまでは生産能力が価格に依存しないものとして議論してきたが、価格は需要と供給の均衡点に決定し、完全競争における供給とはその価格で採算がとれる供給能力に他ならない。したがって、上記の議論では一定量としていたC国（その他の国の集合、採算限界の油田が多い）の生産量も実際には価格に依存し、A国の増産・低価格戦略はC国の生産量を抑えてシェアを拡大する意味がある。シェール資源への遷移については第6章で議論するが、サウジアラビアが減産・高価格による収入増を狙わず、敢えて低価格戦略を採用しているのもシェール資源の増産を抑える意図による。逆に、シェール資源の生産能力は価格に鋭敏に反応して増減し、今や需要に対応した受動的なスイング・プロデューサーとして機能し、原油価格の安定化に寄与している。

2.3.3.5. 各種均衡の比較

上記の各種均衡（結託（独占）、同時ゲーム（クールノー均衡）、交互ゲーム（シュタツケルベルグ均衡）、完全競争（ベルトラン均衡））における原油価格、A国、B国および全世界の生産量と収入の比較を下表にまとめ、A、B両国の反応曲線と各均衡点を図2-2に示した。

	価格	生産量			収入（利潤）		
		A国	B国	全世界	A国	B国	全世界
結託*	$\frac{P_0 - Q_C}{2}$	$\frac{P_0 - Q_C}{4}$	$\frac{P_0 - Q_C}{4}$	$\frac{P_0 + Q_C}{2}$	$\frac{(P_0 - Q_C)^2}{8}$	$\frac{(P_0 - Q_C)^2}{8}$	$\frac{P_0^2 - Q_C^2}{4}$
同時	$\frac{P_0 - Q_C}{3}$	$\frac{P_0 - Q_C}{3}$	$\frac{P_0 - Q_C}{3}$	$\frac{2P_0 + Q_C}{3}$	$\frac{(P_0 - Q_C)^2}{9}$	$\frac{(P_0 - Q_C)^2}{9}$	$\frac{2P_0^2 - P_0 Q_C - Q_C^2}{9}$
交互**	$\frac{P_0 - Q_C}{4}$	$\frac{P_0 - Q_C}{2}$	$\frac{P_0 - Q_C}{4}$	$\frac{3P_0 + Q_C}{4}$	$\frac{(P_0 - Q_C)^2}{8}$	$\frac{(P_0 - Q_C)^2}{16}$	$\frac{3P_0^2 - 2P_0 Q_C - Q_C^2}{16}$
完全競争*	0	$\frac{P_0 - Q_C}{2}$	$\frac{P_0 - Q_C}{2}$	$P_0 + P_C$	0	0	0

* 結託および完全競争の時はA,B両国で生産量を折半と仮定。 ** 交互はAが先手。

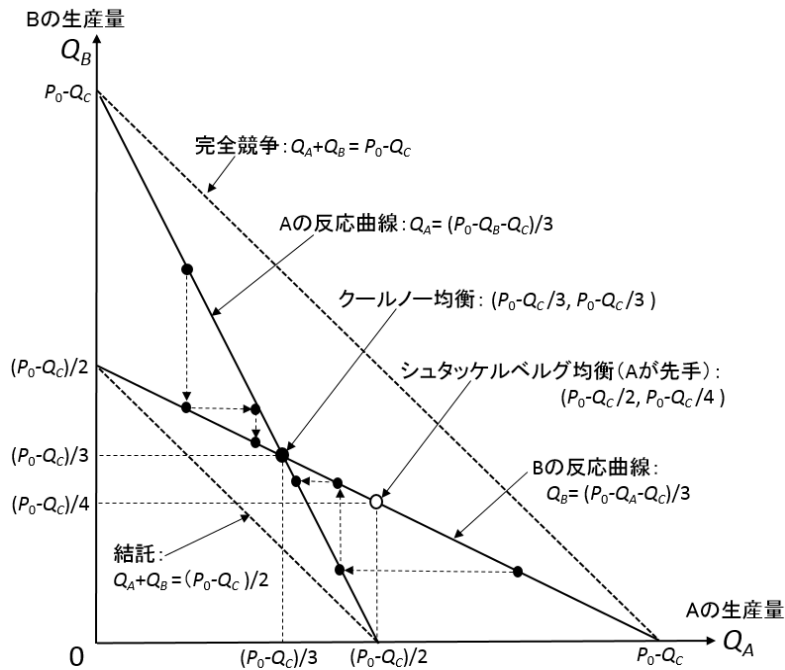


図 2-2 A国, B国の生産量反応曲線と均衡点

ここでは費用を無視しているため、収入は利益に等しい。したがって、完全競争では価格が漸近的に 0 になり、産油国の収入 (=利益) も 0 となる。価格は、完全競争 (ベルトラン均衡) の 0 から、交互ゲーム (シュタッケルベルグ均衡)・同時ゲーム (クールノー均衡)・結託 (独占) の順に高くなり、A 国および全世界の生産量はこの逆の順で高くなる。B 国の生産量は、結託 (独占) と交互ゲーム (シュタッケルベルグ均衡) が同じで、一番低くなる。B 国と全世界の収入 (利潤) は、価格と同じ順序になる。ただし、ここで「全世界の収入 (利潤)」と言っているのは生産者の視点からのことで、全世界の人々の効用は、生産量と正の相関があるとすれば、これとは逆の順になる。A 国の収入 (利益) は、結託 (独占) と交互ゲーム (シュタッケルベルグ均衡) が同じで最高になるが、これは当該期に限った比較で、前者では地下に余分に埋蔵量が保持されるため通期での利益はより大きくなる。

2.3.4. 石油生産の需給均衡と価格決定機構

2.3.4.1. 需要の価格弾力性と生産シェア

以上の検討では、簡略化のため石油の需要は原油価格の線形関数 (式(2-137)) で表現されると仮定していた。しかし、第 1 節の検討のように、需要の価格弾力性は基本的に一

定という設定の方が実情を反映していると考えられる。原油価格が石油の需要と供給の均衡に決定するときの需要の価格弾力性（価格が1%上昇〔低下〕したとき需要が何%減少〔増加〕するか）を一定（ ε ）とすると次式で表現される（ Q ：世界全生産量， P ：原油価格）。

$$\frac{dQ/Q}{dP/P} = \frac{dQ}{dP} \frac{P}{Q} = -\varepsilon \quad (2-156)$$

左辺に Q の関数，右辺に P の関数をまとめる。

$$\frac{dQ}{Q} = -\varepsilon \frac{dP}{P}$$

両辺を $Q_1 \rightarrow Q_2$ および $P_1 \rightarrow P_2$ で定積分する。

$$\begin{aligned} \int_{Q_1}^{Q_2} \frac{1}{Q} dQ &= \int_{P_1}^{P_2} -\varepsilon \frac{1}{P} dP \\ [\log Q]_{Q_1}^{Q_2} &= -\varepsilon [\log P]_{P_1}^{P_2} \\ \log Q_2 - \log Q_1 &= -\varepsilon (\log P_2 - \log P_1) \\ \log \frac{Q_2}{Q_1} &= -\varepsilon \log \frac{P_2}{P_1} \end{aligned} \quad (2-157)$$

したがって，需要の価格弾力性(ε)は生産量および価格の変化により次式になる。

$$\varepsilon = -\frac{\log(Q_2/Q_1)}{\log(P_2/P_1)} \quad (2-158)$$

式(2-156)より，価格の微小変化は次式で表現される。

$$dP = -\frac{PdQ}{\varepsilon Q} \quad (2-159)$$

このとき A 国（生産量 q ）の収入の微小変化（全微分）は次式になる。

$$d\pi_A = d(Pq) = \frac{\partial Pq}{\partial q} dq + \frac{\partial Pq}{\partial P} dP = Pdq + qdP \quad (2-160)$$

上式に式(2-159)および生産シェア（生産シェア $s=q/Q$ ）を代入すると次式になる。

$$d\pi_A = Pdq - \frac{Pq dq}{\varepsilon Q} = Pdq \left(1 - \frac{s}{\varepsilon}\right) \quad (2-161)$$

上式において $P > 0$ なので，A 国が増産した時（ $dq > 0$ ）および減産した時（ $dq < 0$ ）に，同国の収入（ π_A ）が増えるか減るかは，括弧内の符号，すなわち，次表のように生産

シェア (s) と需要の価格弾力性 (ε) の大小関係に依存する。

<u>生産シェア(s)と価格弾力性(ε)の関係</u>	<u>増産 ($dq > 0$)</u>	<u>減産 ($dq < 0$)</u>
$s > \varepsilon$	減収 ($d\pi_A < 0$)	増収 ($d\pi_A > 0$)
$s < \varepsilon$	増収 ($d\pi_A > 0$)	減収 ($d\pi_A < 0$)

2.3.4.2. 生産シェアの変化と利得行列

2大産油国A国とB国の生産能力は現在の生産量 (A国>B国) より十分大きく、自国の収入を最大化すべく増産または生産削減できるが、他の産油国はどれも弱小で価格に対する影響力がなく、常に能力一杯 (一定量) の生産を行うと仮定する。需要の価格弾力性 (ε) を一定とすると、A国、B国および両国合計の生産量の世界全生産量に対するシェア (s) と ε の関係から、A、B両国の利得および戦略を検討する。両国とも「増産」と「生産削減」の2つの戦略があるとすると、その組み合わせは4ケースとなり、それぞれの利得(ここでは、収入=利得と考える)を下表のように表現する。

<u>A国 \ B国</u>	<u>増産</u>	<u>生産削減</u>
現状維持	$a_1 \setminus b_1$	$a_2 \setminus b_2$
生産削減	$a_3 \setminus b_3$	$a_4 \setminus b_4$

このとき、A国、B国および両国合計の生産量 (A国>B国) の世界全生産量に対するシェア (s) と価格弾力性 (ε) の関係により想定される4基本ケースの両国の利得の順序は、上記 2.3.4.1 の検討結果に基づき、下表のように定まる。

<u>ケース</u>	<u>生産シェア(s)と価格弾力性(ε)の関係</u>			<u>利得の順序 (括弧内は順不定)</u>	
	<u>A国</u>	<u>B国</u>	<u>A+B</u>	<u>A国</u>	<u>B国</u>
1	$s > \varepsilon$	$s > \varepsilon$	$s > \varepsilon$	$a_4 > (a_2, a_3) > a_1$	$b_4 > (b_2, b_3) > b_1$
2	$s > \varepsilon$	$s < \varepsilon$	$s > \varepsilon$	$a_4 > (a_2, a_3) > a_1$	$b_3 > b_4 > b_1 > b_2$
3	$s < \varepsilon$	$s < \varepsilon$	$s > \varepsilon$	$a_2 > a_4 > a_1 > a_3$	$b_3 > b_4 > b_1 > b_2$
4	$s < \varepsilon$	$s < \varepsilon$	$s < \varepsilon$	$a_2 > a_1 > a_4 > a_3$	$b_3 > b_1 > b_4 > b_2$

上記の各ケースの利得行列の例を下表に示す（利得の数值は理解を助けるための架空値を例示したに過ぎず、相対的な大小関係以外の具体的意味はない）。

(Aの利得\Bの利得)	<u>ケース1</u>		<u>ケース2</u>		<u>ケース3</u>		<u>ケース4</u>		
	<u>Bの戦略</u>	増産	削減	増産	削減	増産	削減	増産	削減
<u>Aの戦略</u>									
増産	2\1	4\2	2\2	4\1	3\2	5\1	4\3	5\1	
削減	3\3	5\4	3\4	5\3	2\4	4\3	2\4	3\2	

太字の数值は「ゲームの解」

ケース1は両国とも $s > \varepsilon$ なので、ともに生産削減が支配戦略で「削減\削減」がゲームの解となる。ケース2では、A国削減、B国増産が支配戦略で「削減\増産」がゲームの解となる（「合理的な豚」の変型）。ケース3と4は、ともに両国とも増産が支配戦略であるが、ケース3ではゲームの解（ナッシュ均衡）はパレート最適ではなく（「削減\削減」にパレート改善可能）囚人のジレンマになっている。

この4ケースだけなら比較的簡単だが、増産または生産削減により全世界の生産量も変化するため、自国だけでなく他国のシェアも変化する。生産削減により生産シェアは低下するため、ケース1→ケース2→ケース3（→ケース4）という遷移が起こり、逆に他国の生産削減により生産シェアが高まる場合もある。そこでは種々のパターン、例えば、ケース2と3の境界付近では「囚人の抜け道」（仮称、2.3.2.2）などが出現する可能性がある。

現実の OPEC 生産量はサウジだけが突出していて、1980-85 年はケース2で、それ以降はケース3であったと考えられる。OPEC 外では米国とロシアがサウジ並みの生産量で、そのシェアは需要の価格弾力性の絶対値を上回るが、サウジと異なり、これらの国々では多くの企業が生産していて、「国内ゲーム」で生産削減に合意する可能性は低い。

2.3.4.3. 1980年代のケーススタディー

2.3.4.3.1. 需要の価格弾力性の推定

産油国の生産シェアは単に全世界の生産量に対する比を取ればよいが、供給曲線だけでなく、需要曲線もシフトするため、需要の価格弾力性の方は容易には求まらない。しか

し、短期間に全世界の供給量が急変した時には、需要曲線が固定されているとみなせる（図 2-4）。

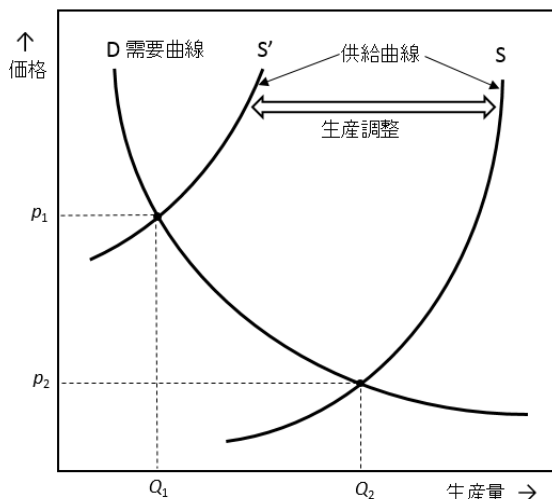


図2-4 需給均衡と価格決定機構

サウジアラビアは 1985 年末にスイング・プロデューサー（生産削減策）を放棄して増産に転じ、その結果 1986 年には原油価格は暴落した。この短期間には需要構造（需要曲線）には変化がなかったと見なせ、1985 年と 1986 年の世界の石油生産量と原油価格（下表，出典：BP 統計）から世界の石油需要の価格弾力性（ ε ）を推定する（表中の「仮想」と記した行の意味は後で説明する）。

(出典：BP, 2017)	全世界		サウジアラビア		
年度	生産量(MMBD)	価格(2016\$)	生産量(MMBD)	生産シェア(s)	収入(MM\$/D)
1984	57.7	66.48	4.5	0.078	299
1985	57.5(Q_1)	61.47(P_1)	3.6	0.063	221
1986	60.4(Q_2)	31.60(P_2)	5.2	0.086	164
(仮想	59.55	38.39	4.35	0.073	167)
1987	60.7	38.95	4.6	0.076	179

上表の 1985 年と 1986 年の全世界の生産量および価格（ Q_1, Q_2, P_1, P_2 ）を式(2-158)に代入する。

$$\varepsilon = -\frac{\log(60.4/57.5)}{\log(31.60/61.47)} = -\frac{\log 1.05}{\log 0.514} = -\frac{0.0488}{-0.665} = 0.073 \quad (2-162)$$

こうして需要の価格弾力性は、 $\epsilon = 0.073$ と求まる。

第1節では、独占など生産量と価格が直結する状況で生産が開始されるためには、需要の価格弾力性は1より大きい必要があったが、それに比べるとここで求めた値はかなり小さい。現実にはむしろ完全競争に近く過剰生産になりやすいこと、初期投資が大きいことなどが、低い価格弾力性でも生産が行われている理由だと考えられる。また、実際には価格弾力性は一定とは限らず、生産量や価格の値に依存している可能性もある。更に、需要曲線は経済成長や構造変化に伴い左右にシフトするため、ここで述べる解析は特定条件下でのスナップショットに限られる。しかし、以下では価格弾力性が一定で、1より小さくても成立し、その値が変化しない前提で議論を進める。

2.3.4.3.2. サウジアラビアの生産戦略の検討

サウジアラビアの生産量は1980年および1981年には日量1千万バレル(10MMBD)を超えており、世界に対する生産シェア(s)は16~18%であった。しかし、1979~80年の第二次石油危機の後の需要の急落により、1981年以降原油価格は徐々に下降していく。この期間、サウジアラビアはスイング・プロデューサーとして生産量を低下させていき、ほぼ単独で原油価格の下支えを行った。OPEC諸国には生産枠(quota)が課せられていたが、後で概観するように、生産枠が能力限度に近かったり、多くの国で生産枠破りが常態化したり、戦争などの外的要因で生産が阻害されたりして、実質的に他の国は能動的な減産は行っていなかった。

上表のように、1984年にはサウジアラビアの生産量は日量450万バレルまで低下したが、生産シェアは7.8%で需要の価格弾力性を上回っていた。したがってこの時点までは、サウジアラビアは減産することにより逆に収入を増加でき、減産は単なるボランティアではなく合理的な戦略だったといえる。それが1985年になると、\$60(2016\$)以上の原油価格をさせるためにサウジアラビアは更なる減産を強いられ、生産シェアは需要の価格弾力性の0.073を下回ってしまった。こうなると更なる減産は収入低下を招く。そこで、サウジアラビアは翌1986年(実際は1985年の後期)にはスイング・プロデューサーを放棄し、増産に転じた。他の産油国による増産の影響も加わり、原油価格はほぼ半値にまで急落し、サウジアラビアの収入も低下したが、生産シェアは需要の価格弾力性を上回った。上表の「仮想ケース」は、このとき増産を多少抑え、生産シェアをちょうど価格弾力性に等しくしたケースで、こうすればサウジアラビアの収入は若干改善したはずである

(1987年の生産実績はこれに近いものであった)。

2.3.4.4. 主要産油国の生産実績の概観 (図 2-4)

需要の価格弾力性が、この時期だけでなく全期間を通して一定であるとする、生産量のシェアがこの値を超えていた時期のある国は米国、ソ連 (→ロシア)、サウジアラビア (および、短期間 (1960年代末~70年代) のイラン) だけであり、それ以外の国の生産能力は常に、この価格弾力性値よりかなり低かったと考えられる。

この機会に、1965年以降の全世界および主要産油国の生産履歴を概観してみる。全世界の石油生産量は期間を通して増加傾向にある。例外は1973年と79年の石油危機の後で、特に後者に引き続く生産低迷は長く続き、1979年レベルを超えたのは1994年であった。また石油危機後の生産増加トレンドは、それ以前に比べて緩やかになっている。

これに対して、主要産油国の生産パターンは国ごとにかかなりの相違が認められる。米国の石油生産は、後述する Hubbert の予測が的中し、1970年をピークに減退を開始した。その後アラスカで大油田が発見され、減退は緩やかになったとはいえ、米国の生産量は、1976年にはソ連に、1992年にはサウジアラビアにも抜かれて、2008年まで低下の一途をたどった。それが、2008年の原油価格高騰の後、急上昇に転じ、2015年までに日量約600万バレル増加して、底 (2008年) のほぼ倍に達し、再度世界一に返り咲いた。この増加は、同時期の世界の生産増の2/3以上に相当し、サウジアラビアの1970年代の増産および1980年代後半の回復のペースをも凌駕するものである。その大半はシェール資源 (シェールオイルおよびシェールガス由来のコンデンセート) によるもので、この資源遷移については第6章で議論する。

ソ連 (1985年からロシア) は1960~70年代に急成長して米国を追い抜いて世界一の生産量となった。しかし、同国の生産量は1983年にピークに達すると、その後は (ソ連の崩壊とロシアへの移行を挟んで) 増産期を裏返した形で急減退し、米国以上に Hubbert 曲線の典型例とみられた。しかし、1990年代の停滞期を経て、2000年代には増産に転じ、1980年代に近いレベルにまで回復してきている。現在では、同国の生産減退とその後の回復は、油田施設の老朽化および政治的混乱とその後の西欧技術・競争の導入によるものと見られている。

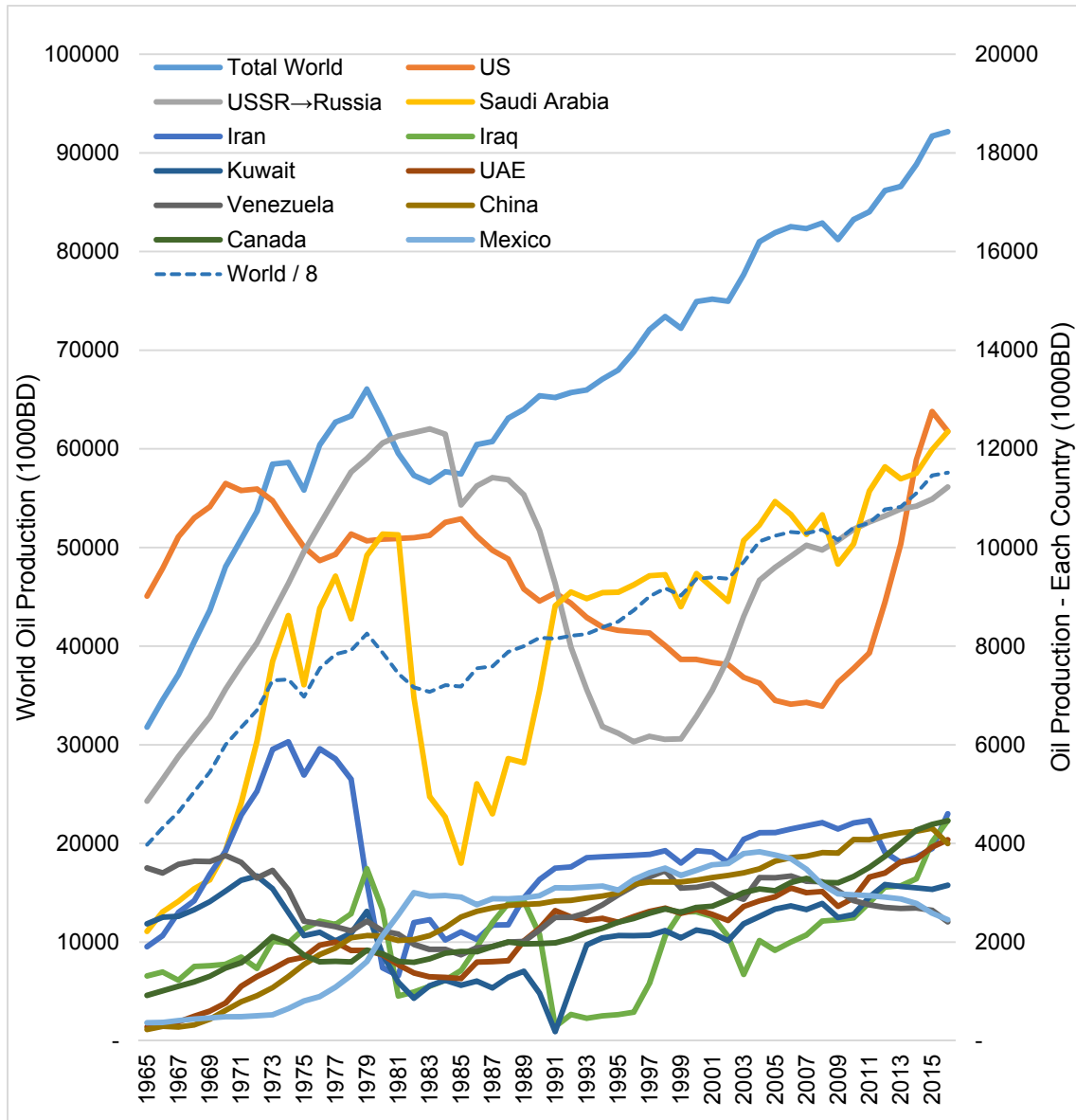


図 2-4 世界および主要産油国の生産履歴 データ出典：BP(2017)

サウジアラビアの石油生産は 1960～70 年代に急成長し、1980 年には日量 1 千万バレルを超え、米国・ソ連と並ぶ大産油国となったが、その直後に第二次石油危機に引き続く需要急落と価格低下に直面し、前記のようにスイング・プロデューサーとして価格の下支えのための減産を行い、1985 年にはピーク生産量の約 1/3 にまで下落し、その世界全体に対するシェアは（需要の価格弾力性より低い）6%台にまで低下した。同国はこの時点でスイング・プロデューサーを放棄して増産に転じたが、1970 年代のレベルに戻るのに 5～6 年を要した。その後同国は、増産のペースを落とし、以降は世界生産量の約 1/8 のレベル

(図 2-4 の破線) をキープしているように見える。Simmons(2005)は、同国の生産能力は頭打ちで早晩減産を余儀なくされると予測したが、今日に至るまで同じペースで増産を継続している。

これら 3 国に比べるとその他の産油国の生産量は低く、概ね半分以下である。唯一の例外は 1970 年代のイランで、1974 年には日産 600 万バレルを超えるピークに達し、その時には全世界に対するシェアは 10%を超えた。しかし同国は、1979 年のイラン革命とそれに引き続くイラン・イラク戦争など政治的擾乱により低迷し、その後徐々に回復してきているが、未だにピークの 60%程度にとどまっている。イラクは、イランに近いポテンシャルを有しているが、イラン・イラク戦争、湾岸戦争、イラク戦争、経済制裁など常に政治的擾乱に巻き込まれ、生産量は低位で乱高下を繰り返した。近年ようやく日産 400 万バレルを上回ったが、その潜在能力には達していないとみられる。

ベネズエラとクウェイトの生産量は、1965 年にはサウジアラビアを上回っていたが、それぞれ 1970 年と 1972 年にピークに達した後は低迷期に入り、1990 年代以降は徐々に回復してきているものの、ピーク生産量までは戻っていない。その他の産油国には、緩やかに増産しているものが多い。中国もこうした産油国の一つだが、生産量が急増する需要に追い付かず、輸入量が急増している。

以上を総合すると、ソ連（ロシア）、イラン、イラクなど政治的要因などで半強制的に生産が制限される場合を除くと、各産油国は常にほぼその能力一杯で生産していたとみられる。米国およびソ連（ロシア）の生産シェアは需要の価格弾力性を上回っていたが、複数の石油会社が乱立する「国内ゲーム」での減産合意は困難であり、老朽油田や限界油田が多い両国では、一部の生産井密閉などによる減産を行うと生産量の回復が容易ではない。唯一の例外はサウジアラビアで、1980 年代前半にスイング・プロデューサーとして機能した。同国を含め（既存油田の生産減退期に入っていた米国を除く）主要産油国は、1970 年代の二度の石油危機には、むしろ目一杯の増産をしていた。OPEC の生産制限が石油危機および原油価格高騰を招いたといわれることが多いが、そうした兆候は全く認められず、この時期の需要増加が急速な生産増加をも上回ったことが真の原因であると思われる。この問題については、次章以降で定量的に検討する。

2.3.4.5. 現状分析への応用

2014～15 年に原油価格は \$ 100/bbl 付近から \$50/bbl 程度にまで暴落した。一般には、

米国のシェールガスなどの増産が原因とされているが、上記のモデルでこれを検証する。

2011～15年に米国のシェールオイルの生産は日量約500万バレル増加した。シェールオイルの増産などにより、世界の石油生産量が $Q_1=85\text{MMBD}$ から $Q_2=90\text{MMBD}$ に増加したとする。式(2-158)にこれらの数値を代入すると、需要の価格弾力性が上記で推定した $\varepsilon=0.073$ から変化していないとすれば、 $P_2/P_1=0.458$ となり、原油価格の半値以下への暴落は説明がつく。

現在、サウジアラビアの生産は日量約1200万バレルでそのシェアは全世界の約13%で、価格弾力性($\varepsilon=0.073$)を上回っており、減産すれば収入は増大するはずである。シェア(s)が需要の価格弾力性(ε)に等しくなるまで減産(Δq)できるとする。

$$s = \frac{q_1 - \Delta q}{Q_1 - \Delta q} = \varepsilon \quad (2-163)$$

ここに、 $Q_1=90$ 、 $q_1=11.5$ 、 $\varepsilon=0.073$ を代入すると $\Delta q=5.32$ となり、日量約500万バレル程度(すなわち米国のシェールオイル増産分)は減産余地があり、その結果以前の $Q=85\text{MMBD}$ に戻すことができれば、原油価格は\$100/bbl程度に回復し、その結果、収入は $\$45.8/\text{bbl} \times 11.5\text{MMBD} = \527MM/D から $\$100/\text{bbl} \times 6.5\text{MMBD} = \650MM/D に増加するはずである。

しかし、この間に探鉱・開発されたシェールオイルからの追加などにより(少なくとも短期的には)2MMBD程度の生産能力の追加が見込めることから、サウジアラビアがほぼ限度一杯の5MMBDの減産を行ったとしても世界の生産量は $Q_2=87\text{MMBD}$ に留まると見られる。これを式(2-158)に入れると、原油価格は $P_2 = \$72.8/\text{bbl}$ に留まり、サウジアラビアの収入は $\$72.8/\text{bbl} \times 6.5\text{MMBD} = \473MM/D と現状維持ケースの $\$527\text{MM/D}$ を下回る。したがって、減産しないというサウジアラビアの政策は合理的と判断される。

第4節 ピークオイルと Hubbert 曲線

2.4.1. Hubbert 曲線の理論的根拠

ひところ、石油生産量グラフが左右対称のベル型（「Hubbert 曲線」）を呈するという「ピークオイル論」がもてはやされた（Campbell, 1997a,b, 2003, Deffeyes, 2001, Simmons, 2005 など）が、その理論的根拠は Hubbert(1966)自身も明示しておらず、井上(2004, 2005)、本村・本田(2007)などが若干議論しているにとどまる。そこで、ここでは理論的にこの曲線を導出するとともに、その意味するところと利点および課題を検討する。

一つの考え方は、減退曲線の重ね合わせで説明するものである。油田発見がある期間に限られ、かつ、毎年一定量に限定されると仮定する。個々の埋蔵量が開発・増産・プラトー・減退を経て生産されると、合算された生産のグラフは、一定の条件を満たせば、左右対称に近い曲線を描く（井上, 2004）。しかし、発見期間が限られ毎年一定量であるという仮定は非現実的で、生産量曲線は一般にはベル型にはならない。Hubbert (1966) も生産量曲線は発見量曲線を何年か遅れで繰り返して、生産量曲線がベル型で近似される原因はベル型の発見量曲線にあると考えている。

そこで、発見量がベル型になる理由を考察する。資源量 E が固定されているとき（資源量の定義は次章を参照）、①時間当たり探鉱量（例えば試掘数）は累計発見量 $D(t)$ に比例して成長し、②試掘 1 坑の平均発見量は未発見資源量 $E-D(t)$ に比例すると仮定する。①は探鉱の進行と情報の集積に伴うその資源や堆積盆地への信頼度上昇と資源消費・資本蓄積による経済成長・需要喚起を象徴し、②も近似としては妥当な仮定である。このとき、時間当たり発見量は次式で表現される（ b は比例定数）。

$$\frac{dD(t)}{dt} = b (E - D(t))D(t) \quad (2-164)$$

$$\frac{dD}{(E-D)D} = \frac{\{(E-D)+D\}dD}{E(E-D)D} = \frac{dD}{ED} + \frac{dD}{E(E-D)} = \frac{1}{E} \left(\frac{dD}{D} + \frac{dD}{E-D} \right) = b dt$$

両辺を積分（ C は任意定数）。

$$\int \frac{dD}{D} + \int \frac{dD}{E-D} = \int bE dt$$

$$\log D - \log(E - D) = \log \frac{D}{E-D} = bEt + C$$

$$\frac{E-D}{D} = \frac{E}{D} - 1 = e^{-bEt-C} = e^{-C} e^{-bEt}$$

$$\frac{E}{D} = 1 + e^{-C} e^{-bEt}$$

右辺を X と置くと、

$$D = \frac{E}{X}$$

両辺を t で微分する。

$$\frac{dD}{dt} = \frac{dD}{dX} \frac{dX}{dt} = -\frac{E}{X^2} e^{-C} (-bE) e^{-bEt} = \frac{e^{-C} bE^2 e^{-bEt}}{X^2} = \frac{bE^2 e^{-C} e^{-bEt}}{(1+e^{-C} e^{-bEt})^2} \quad (2-165)$$

式 (2-164) を変形する。

$$\frac{dD}{dt} = b(ED - D^2) = -b \left(D - \frac{E}{2} \right)^2 + b \frac{E^2}{4} \quad (2-166)$$

したがって、左辺（時間当たり発見量）は $D=E/2$ ，すなわち資源量の半分を発見した時（この時点をも t_p と表記）に $(bE^2)/4$ で最大（ピーク）になる。式(2-165)が $t=t_p$ でこの値となるためには次の関係が成り立つ必要がある。

$$e^{-C} = e^{bEt_p}$$

この関係を式(2-165)に代入すると次式になる。

$$\frac{dD(t)}{dt} = \frac{bE^2 e^{bE(t_p-t)}}{\{1 + e^{bE(t_p-t)}\}^2} \quad (2-167)$$

この式がベル型の「Hubbert 曲線」を表現するが、これはロジスティック曲線に他ならない。Hubbert (1966) のように生産量曲線は発見量曲線を何年か遅れで繰り返していると考えれば、式 (2-164) および (2-167) の累計発見量 (D) を累計生産量 (Q)，発見量 (dD/dt) を生産量 (dQ/dt) と読み替えれば次の「生産量版 Hubbert 曲線」となる。

$$\frac{dQ(t)}{dt} = b (E - Q(t)) Q(t) \quad (2-168)$$

$$\frac{dQ(t)}{dt} = \frac{bE^2 e^{bE(t_p-t)}}{\{1 + e^{bE(t_p-t)}\}^2} \quad (2-169)$$

2.4.2. Hubbert 曲線による資源量推定

式(2-169)を横軸に時間、縦軸に発見量を取ったグラフに描くとベル型の曲線になり、

その下の総面積が資源量に相当する。しかし、この式は複雑で、時間の範囲も $-\infty$ から ∞ にまで及んでいて、そこから資源量を読み取ることは困難である。そこで、式 (2-168) の両辺を Q で割ると、を次のような簡単な線形の式に書き換えられる。

$$\frac{dQ(t)/dt}{Q(t)} = -bQ(t) + bE = b(E - Q(t)) = -b(Q(t) - E) \quad (2-170)$$

すなわち、横軸に（累計生産量）、縦軸に（生産量／累計生産量）を取ると、縦軸の切片が bE 、傾きが $-b$ の直線となり、横軸の切片が資源量 E になる。したがって、ある程度の生産履歴が得られれば、それをこのグラフにプロットして直線を右下に延長して、横軸に交わった切片（この点は時間的には無限遠の将来に相当）を読み取れば、それが資源量になる。

Hubbert 曲線またはピークオイル理論は、資源量の半分を産出した時点で生産のピークが来ることを主張する理論と説明されることが多い。たしかに、半分を産出した時点が生産ピークになるというのは、式(2-166)からも明らかであるが、ピーク前に資源量を推定することは困難である。逆に、生産ピークが来たら資源量の残りが半分と予測することができるが、この方法は生産後半の減産期に入らないと使えない。しかし、実は生産前半であっても、ある程度のデータが得られれば、それを横軸が（累計生産量）、縦軸が（生産量／累計生産量）のグラフ（図 2-5A）にプロットして、式(2-170)の直線フィッティングに基づき傾き $-b$ と横軸への切片（資源量 E ）を求めることができる。また、式(2-166)に基づき資源量の半分を生産した時点（ T_p ）が生産ピークとなり、これとの時間差を用いれば式(2-169)に従い、任意の時点の生産量が求まる。こうして、生産初期の限られたデータからでも、資源量や将来の生産量の予測などが行えるところにこの理論の真価がある。

図 2-5A に世界の生産データの式(2-170)によるフィッティングを、図 2-5B にそれらのフィッティング生産量の時間経路を実績と比較して示した。

フィッティング 1 は 1965～85 年で生産実績は図 2-5A でほぼ $b=0.14$ の直線上に乗っていて、資源量は 7 千億バレルと予測された。図 2-5B でも 1979 年の生産ピークをはじめ実績が極めてよく再現されている。しかし、前節で検討したように、1980 年代の生産減退は、実は、石油危機における価格高騰とそれに引き続く需要急減、およびサウジアラビアのスイング・プロデューサーとしての大幅減産によるところが大きい。

石油危機と価格高騰により全世界で活発な探鉱活動が展開され、数年遅れでそれらは油田発見につながった。これによる生産能力上昇とサウジアラビアのスイング・プロデュー

サー放棄後の 1985～2005 年の期間がフィッティング 2 で、図 2-5A ではほぼ資源量 2 兆バレル、 $b=0.057$ の直線上に乗り、生産ピークは 2002～2003 年に予測された。これを根拠に 2000 年頃にはピークオイル論が盛んに喧伝された（例えば、Deffeyes, 2001）。しかし時間経路で見ると、実績は予測されたピークを容易に突き破って生産成長した（図 2-5B）ため、ピークオイル論は徐々に下火になっていった。

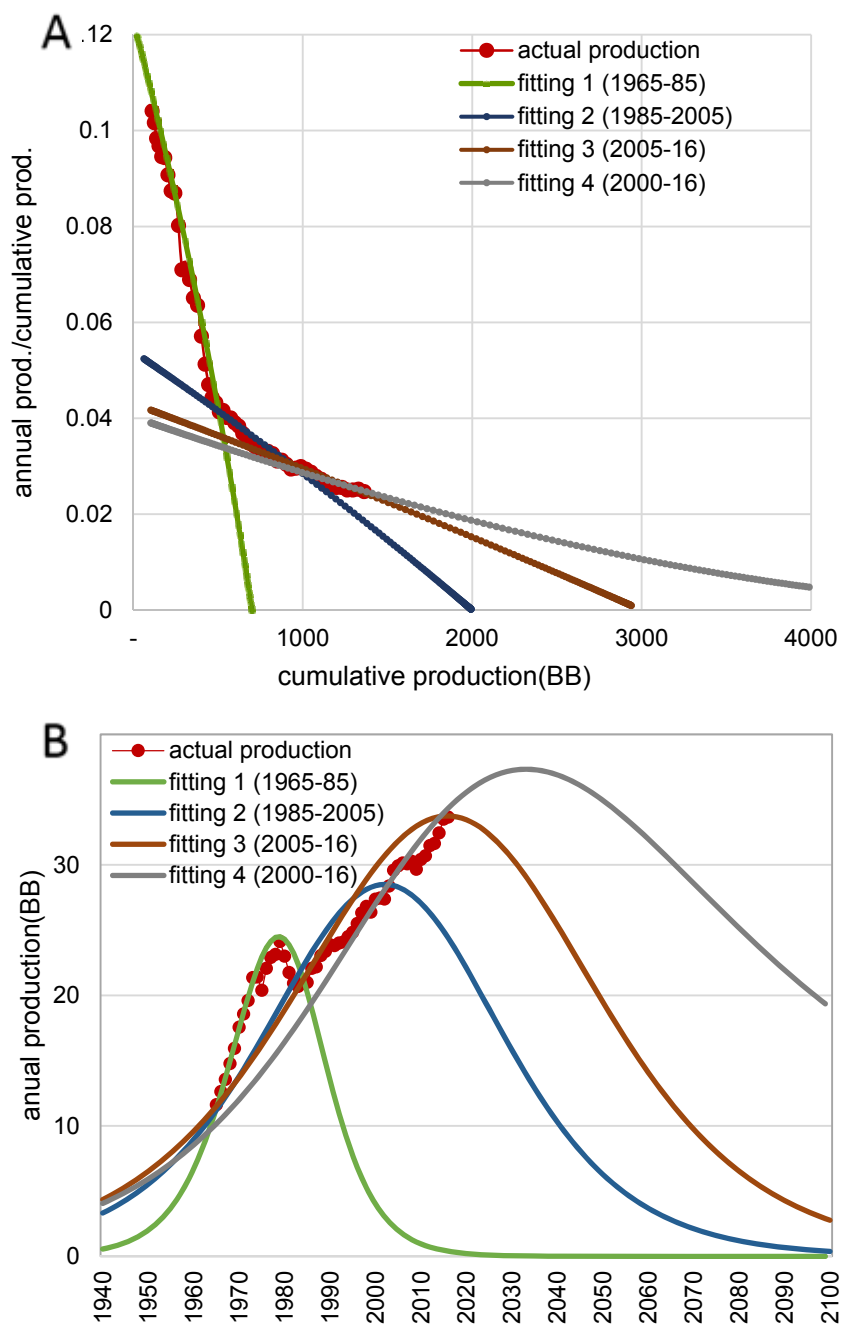


図 2-5 世界の石油生産履歴の Hubbert 曲線フィッティング

これに引き続く 2005~2016 年がフィッティング 3 で、より傾斜の緩い資源量 3 兆バレルの直線 ($b=0.045$) で近似される。ちなみに、この 3 兆バレルというのは、現在最も引用されている USGS(2000)の資源量に一致する。しかし、この直線フィッティングでは、2016 年がまさに中点でピークのはずであるが、図 2-5B の時間軸プロットでは生産実績は未だに増産途中にある。

図 2-5B の時間軸プロットで見るとフィッティング 1 の 1965~1985 年のプロットはモデルと実績がよく一致している。図 2-4 の米国やロシアの石油生産実績や第 1 章で検討した米国の瀝青炭・無煙炭および鯨油の生産履歴は、生産ピークの前後の 10~20 年は Hubbert 曲線 (ロジスティック曲線) でよく近似されるが、より長い期間で見ると必ずしも左右対称形ではなく、後半の減退が緩やかになる、または生産の回復により複数のピークが生じることが多い。図 2-5A ではフィッティング 2 および 3 も短期的には当てはまるが、10~20 年後には実績がモデルを上回り、図 2-5B での当てはまりは悪い。

2.4.3. 「修正 Hubbert 曲線」

上で検討したように、生産実績は、式(2-170)のモデルで近似すると、短期的には良く当てはまるが、長期的には資源量予測は常に上方修正を余儀なくされる。これは、図 2-5A のフィッティングで直線の傾斜 (負) が徐々に緩くなってくること、すなわち、全体としては直線ではなく下に凸な曲線で近似されることを意味する。そこで、こうした現実を反映させるために、式(2-168)を次のように修正する。すなわち、係数 b を定数ではなく Q の関数と考える。

$$\frac{dQ}{dt} = b(Q) (E - Q)Q \quad (2-171)$$

両辺を Q で割る。

$$\frac{dQ/dt}{Q} = b(Q)(E - Q) \quad (2-172)$$

したがって、図 2-5A において、累計生産量が Q の時点のプロットと枯渇点 $(E, 0)$ とを直線で結んだ時の傾きが $-b(Q)$ になる。ここでは、係数 $b(Q)$ は残存資源量に比例して低下すると考える (b' は定数)。

$$b(Q) = b' \frac{(E-Q)}{E} \quad (2-173)$$

これを代入すると、式(2-171)および(2-172)は次のように書き換えられる。

$$\frac{dQ}{dt} = b' \frac{(E-Q)}{E} (E-Q)Q = \frac{b'(E-Q)^2 Q}{E} = b'EQ - 2b'Q^2 + \frac{b'Q^3}{E} \quad (2-174)$$

$$\frac{dQ/dt}{Q} = b' \frac{(E-Q)}{E} (E-Q) = \frac{b'(E-Q)^2}{E} = b'E - 2b'Q + \frac{b'Q^2}{E} \quad (2-175)$$

このモデルで 2000 年以降の生産実績をフィッティングしたのが、図 2-5A および図 2-5B のフィッティング 4 ($b' = 0.042$) であり、現実によく合致している。これに従えば、生産量は 2030~2040 年頃ピークとなり、その後減退する。曲線は非対称的で、増産に比べて減退は緩やかになり、究極資源量 (E) が 6 兆バレルのケースが最も当てはまりが良かった。式(2-175)を Q で微分して曲線の各 Q 値における接線の傾きを求める (最後の変換は式(2-173)による)。

$$\frac{\frac{dQ/dt}{Q}}{dQ} = -2b' + \frac{2b'Q}{E} = -2b' \frac{E-Q}{E} = -2b(Q) \quad (2-176)$$

したがって、図 2-5A において、累計生産量が Q の時点における接線の傾き (負) は、その時のプロットと枯渇点 ($E, 0$) とを結ぶ直線の傾きの 2 倍となる。つまり、短期間のデータだけからの直線 (すなわち接線) プロットは、残存資源量を半分に過小評価することになる。したがって、残存資源量を直線プロットの倍として累計生産量と合算すれば、資源量が得られることになる。

ただし、6 兆バレルという究極資源量 (E) はこれまでのどの研究者の推定値よりも相対的に大きな数値である。しかし累計生産量は、生産量がピークとなる 2033 年時点で約 2 兆バレル、2100 年だと約 4 兆バレルとなり、過去の諸評価 (のうち楽観的な値) と整合的である (例えば、井上(2005) は別の方法で 2100 年までの累計生産量を約 4 兆バレルと予測した)。残りの約 2 兆バレルは 2100 年以降に長期間をかけて細々と生産されることになる。すなわち、この方法で推定する資源量は将来の究極時点の累計生産量であり、その意味では次章で議論する資源量の厳密な定義に合致する。

2.4.4. ピークオイル理論 (Hubbert 曲線) の課題と問題点

以上検討してきたように、ピークオイル理論 (Hubbert 曲線) にはそれなりに理論的

根拠があり、一部の研究者が言うように資源量を事前に別の方法で入手することは実は必要なく、初期の生産データだけで、資源量や生産経路などの予測が可能であり、その意味では優れた予測手法である。また、世界や多くの国の石油および他の枯渇性資源の生産履歴に、少なくともある期間は、本理論による生産予測が良く当てはまる。

しかし、本理論には次に述べるような課題と問題点がある。

- (1) 発見量は実際には、式(2-164)よりも複雑な過程で決定される。すなわち、探鉱量、探鉱熟成度、当初油田規模分布、発見効率などに依存する。
- (2) 仮に、発見量曲線が妥当であったとしても、これが生産量曲線に繰り返される保証はない。実際には、埋蔵量は第1節および第2節（特に後者）で検討した形で生産量に変換される。その際には油田規模が重要であり、発見量は油田規模に応じた生産プロファイルに従って生産量に転換されると考えられる。
- (3) 本理論による生産予測が「少なくともある期間は」当てはまると書いたが、これらのフィッティングが当てはまるのは、多くの場合10～20年程度で、ピーク生産以降は減退がより緩やかになる、または、生産が回復して別のピークが1回または複数回出現することが多い。この事実は、過去の資源量推定が常に上方修正を余儀なくされてきた歴史と調和的である。すなわち、資源量評価は、その時点の技術や経済環境の影響を受け、また探鉱対象地域や鉱床タイプが拡大していくため、結果として過去の資源量推定値は過小評価であったことが判明する。
- (4) 上記(3)の問題点に対処するため「修正 Hubbert 曲線」を導入した。このモデルは実績との当てはまりが良く、近似としては有効である。しかし、係数 b が残存資源量 $(E - Q)$ に比例する (式(2-173))、すなわち、生産量 (dQ/dt) が残存資源量 $(E - Q)$ の2乗に比例するという仮定には、確たる理論的根拠がない。また、この方法で推定する資源量は厳密な定義に合致するが、それは逆に、各時点の評価値よりかなり大きく（累計生産量がこの値になるには無限時間が必要）になることを意味する。

総じて、Hubbert 曲線（特に修正版）は、全体の傾向を把握し、考察するには有効だが、より詳細には探鉱量、探鉱熟成度、油田規模分布、発見効率、生産プロファイルなどを含めた検討が必要であり、それは次章で行う。

第5節 第2章のまとめ

本章では、石油生産にかかわる企業と産油国の行動の、主としてマイクロ経済学的分析を行った。

第1節では、解析力学の手法（Lagrangian, Hamiltonian）を応用して一般化したモデルを用いて、Hotelling(1931)以来の先行研究の検証を行った。その結果、原油価格の上昇経路および石油生産量の減退経路に関する多くの知見が得られたが、このモデルの、埋蔵量または資源量が当初から既知であるり、企業（または産油国）はこの範囲内で各時点の生産量を自由に選択できるという仮定が非現実的なため、そのままの形では現実に適用できない。

そこで、第2節では排出エネルギーに起因する現実の油田の生産減退パターンに基づいて、企業（または産油国）の利益を最大化する生産経路を検討した。第1節と第2節の結果を総合し、個々の油田の生産量は価格に影響を与えないと仮定すると、企業は所与の生産井数において、油田の排出エネルギーの範囲で最大限の生産を行うことが最適経路である。一方、最適な開発規模（生産井数）は当該油田の規模（埋蔵量）に依存することがと判明した。

ただし、産油国レベルで考えると、当該国の生産量を絞ると価格が上昇して、その国の利益を最大化できることもあり得る。しかしこの時、価格は世界全体の生産量に依存するため、他国の産油量の増減により当該産油国の最適行動は異なってくる。第3節ではゲーム理論を用いてこの問題を考察した。その結果、減産により価格上昇を経由して利益を増加できる産油国は、世界における生産シェアが需要の価格弾力性を上回る国、具体的には米国、ソ連（→ロシア）およびサウジアラビアである。更に、前2国では減産に適さない限界油田が多く、国家による生産量の規制も困難で、実質的には候補はサウジアラビア1国に限られる。確かに同国は、1980年代前半にスイングプロデューサーとして減産を行い、それは最適行動であった。しかし、それ以外の期間には同国を含めほぼ能力通りの生産を行っていたとみられる。高価格になると中小油田（現在ではシェール資源）の採算性が向上して開発され、自国の減産効果が無効になるため、それを抑制する意味もある。

したがって、特定の期間を除き、各産油国・企業は各時点の埋蔵量に応じて最大限の生産を行うと考えてよい。そこで、世界の生産量は発見量を後追いしているとみなし、一方、発見量は需要（←累計生産量）と供給（←残存資源量）に依存すると考えるとピーク

オイル理論の Hubbert 曲線が導ける。第 4 節ではこの過程を示した。しかし、ピーク以降の現実には常に Hubbert 曲線を上回るため、それを反映した「修正 Hubbert 曲線」を導入した。

本章での議論は、全体像を把握するという点では有用であるが、現実の経済予測に用いるには精度が不足している。それは、経済変動を表現していると考えられる資源の生産量（ここでは石油で代表）が、需要・価格や工場・機械の規模（「資本」）などの経済的要因だけでなく、資源の量・質やあり方に大きく規制されているからである。そこで、次章では資源のあり方がどうなっているか、それがどう発見されて埋蔵量となるか、さらに如何に生産されるかを、データに基づきより詳細に考察し、第 4 章では経済と資源の相互関係を検討する。

第3章 エネルギー資源の質と量

第1節 天然資源と枯渇性資源の分類と階層

3.1.1. 天然資源の分類と経済学的含意

天然資源にはフローを利用するものとストックを利用するものがあるが、賦存量やリサイクルの可能性なども考慮して次のように分類し、それぞれを概観する（図 1-11 参照）。

(1) タイプ1（太陽光，地球内部エネルギーなど）

基本的にフローを利用するエネルギー資源で，地球（太陽系）の誕生以降 50 億年近く継続しており，今後も 50 億年程度続くと予想される。ほぼ一定量のフローであるが，その規模は膨大で人類に利用されているのはごく一部に過ぎず，最終的にはその全量が熱（赤外線）として宇宙空間に放出される。太陽光は太陽の核融合に由来しており地球上で利用可能なエネルギーの大半を占め，気象現象・海洋循環・動植物の生命活動なども太陽光のエネルギーに依存している。

地球内部エネルギーは，地球形成時の位置エネルギー（微惑星の衝突・合体・凝縮）や放射性元素の崩壊エネルギーが徐々に放出されるもので，量的には太陽光より小規模（約 1/3000）で（Pollack et al., 1993），地熱・温泉などの形で一部が利用されているに過ぎないが，地殻変動・プレート運動・火山噴火・地震などの原因でもある。これ以外に月（および太陽）の潮汐エネルギー（地球の自転に由来）があるが，地球内部エネルギーよりさらに 1 桁小さく，ほとんど利用されていない。

このタイプは，以下のすべてのタイプ（超新星爆発に由来する重元素の核分裂エネルギーを除く）の根源になっているが，（自然または人工的に）ストックに変換されない限り基本的にフローだけであり，利用されなくても貯蔵されることなく宇宙空間に散逸する。現時点では，人類の利用量に比べて十分大きく一見無尽蔵に見えるが，ほぼすべての自然現象および生物活動の源泉であり，また後で検討するように，仮に人類がこの全量を利用可能であるとしても，経済成長に呼応して使用量が成長していけば人類の歴史に比べ十分短い数百年で天井に頭打ちとなり，それ以上成長できない（詳細次節）。

(2) タイプ2 (空気, 水など)

質量保存則に従う物質資源ではあるが、太陽光エネルギーにより数日～数千年単位で循環しており、基本的にそのフロー（水の場合は途中に海・湖などのストックがはさまる）を人類は利用している。この循環は太陽エネルギーなどに駆動されていて、位置エネルギーの確保や浄化により利用しやすい形（低エントロピー）で提供される。浄化（ O_2 の生成も含む）には生物の貢献も大きいですが、光合成など生命活動の原動力はやはり太陽エネルギーである。

大気中の CO_2 は、呼吸や燃焼による生成後、植物の光合成と、海洋による吸収、岩石風化および石灰岩の沈殿などにより循環しているが、産業革命以降は循環量に対して生成量が大きいため、大気中の存在量（ストック）が平衡に達しておらず増加の一途をたどっている。

水のフローは地球上全体では現在の使用量の約 10 倍で、まだ余裕があるが、一部地域（カザフスタン、米国を含む）では「バーチャルウォーター」を小麦や綿花の形で大量輸出していて（沖, 2009, 2012）、アラル海（カザフスタンなど）やオガララ滞水層（米国）などのストックにまで手を付けていて、それらは枯渇の危機にある。

(3) タイプ3 (金属元素など)

質量保存則に従う物質資源で（核反応などを除き）その全量は変化せず、人類はストックを利用している。これらの元素は一般には希薄に分散している（高エントロピー）が、火山や熱水などの地球内部エネルギーにより低エントロピーの鉱床に濃集したものが利用される。この濃集過程は長時間を要し、これらの資源は人間のタイムスケールでは枯渇性と考えるべき。

ただし、物質は消滅しないので、使用後にエネルギーを投入することにより、人為的にリサイクルが可能であり、これがエネルギー資源との大きな相違点である。また、高品位の鉱床でも利用するにはエントロピーが高いので、さらに大量のエネルギーを投入して製錬するのが普通である。例えば、ボーキサイトは他金属の鉱石に比べてエントロピーが高く、アルミニウムは製錬に大量の電力を要するため「電気の缶詰」とも呼ばれ、酸化させることにより電気を得る一種の電池としての利用が検討されているほどである（松井, 2015）。なお、ウランは金属であるが、核燃料（エネルギー資源）として

利用するときはリサイクルできず、タイプ5に分類される。「高速増殖炉」は、資源性の低い(高エントロピーの) U^{238} に対してエネルギーを投入することにより資源性の高いプルトニウムに変換するもので、リサイクルしているわけではなく、 U^{238} のストックは莫大とはいえ究極的には枯渇する。

(4) タイプ4 (バイオマスなど)

森林や食料がこのタイプに含まれる(人工林や農作物は厳密には天然資源ではないがここに含める)。タイプ2の水資源も、河川などのフローではなく、湖などのストックを利用する場合はこのタイプに相当する。「コモンズ」の資源(牧草地など)の多くもこのタイプに属する。ストックを利用するが、循環周期が数か月~数千年と、タイプ3やタイプ5に比べて短いため、フローを超えて利用すると短期で枯渇する。イースター島の文明は森林枯渇により滅んだとされ(Diamond, 2005)、英国でも製鉄などの木材使用により森林滅亡の危機にあったが、石炭に代替して免れた。

持続的に使用するには使用量をフロー量以内に制限するか、植林などの形で人工的にフローを補充する必要がある。環境経済学などで適用される Hartwick's rule は、枯渇性資源から得られた利益を全て投資して資本ストックを一定水準にすれば世代間の持続可能性が担保されるというものだが(Hartwick, 1977)、主としてこのタイプを念頭においていて、資源と資本の代替性を前提にしている。近年注目されている「レジリエンス(復元力)」(Mäler, 2008, Mäler et al., 2009)や IWI (包括的富指数)(UNEP & UNU-IHDP, 2014)の自然資本も主としてこのタイプを(およびリサイクルできるタイプ3も)対象にしていて、投資(植林)などにより回復すると想定している。

「緑の革命」は、肥料・農薬・動力などを集中してフローを強化することにより収量の大幅増を達成したが、この過程で窒素固定(ハーバー・ボッシュ法)や重機・トラクターの燃料などの形で大量のエネルギーを消費している。食料自給率は熱量換算で議論されることが多いが、実は日本の農作物では、収穫エネルギー/投入エネルギー比は全作物平均で0.3と極端に低い(仁平, 2003)。「植物工場」では均一高品質・高収率のために採用される人工光の費用が経済性のネックになっている(井熊・三輪, 2014)。漁業でもイカ釣り船を筆頭にエネルギー費の負担が高く(松下, 2016)、原油価格が高騰すると多くの漁船は休業する。

(5) タイプ5 (化石燃料など)

化石燃料は太陽光(タイプ1)を固定したバイオマス(タイプ4)の一部が地中に埋もれ、地質学的期間(数千万年~数億年)をかけて地熱(タイプ1)にさらされることにより熟成して低エントロピーに濃集したものである。この過程は現在も継続中であるが、利用量に比べてフローは極端に小さく(例えば石油の生成量は使用量の約2万分の1、詳しくは次章)、循環に長時間を要するため、基本的にはストックを利用し、枯渇性である。ただし、以下に述べるように、物質としては「低品位」の(「資源」とはみなせない)ものも含めた「賦存量」は莫大なことが多いが、「高品位」で使いやすく採算性のある「資源量」は限られる。ただし、技術進歩や価格高騰に応じて「低品位」の部分も資源量に繰り込まれる「可塑性」(井上ほか, 2015)を有していて、資源量の推定は常に上方修正されてきた。なお、次節で検討するように、「シェールオイル」は石油の賦存量に、「シェールガス」は天然ガスの賦存量に、それぞれ含まれる。

これらのうち、タイプ2, 3, およびタイプ4の一部が物質資源で、タイプ1, 5, およびタイプ4の一部がエネルギー資源である。(核反応を除き)質量および元素が保存されるため、物質資源はエネルギーさえ加えればリサイクル可能である。一方、エネルギーも保存されるが、熱力学第二法則によりエントロピーが増大するので、利用可能な高品位のエネルギー(エクセルギー)は消費され、エネルギー資源は究極的には枯渇する。そこで、本論文では、基本的にはタイプ5のエネルギー資源のストックを検討対象とする(次節ではタイプ1の資源も若干検討する)。

3.1.2. 枯渇性資源の量の分類と階層

資源とは人間の生活や産業等の諸活動に利用可能なものを言い、広義には人的資源も含まれるが、狭義には水・森林・水産・岩石・鉱物・金属・エネルギーなどの天然資源を言う。人間の活動に利用可能なものを指すため、何が資源と認識されるかは時代や社会によって異なり、資源ではなかったものが資源になる、またはその逆が起こり得る。

ここでは枯渇性資源(上記タイプ3およびタイプ5)に関するストック量を、累計生産量(cumulative production), 埋蔵量(reserves), 資源量(resources), 賦存量(endowment)に分類して論じる。金属資源(例えばU.S. Geological Survey, 2011)との整合性も考慮して、石油開発業界で標準的に用いられている定義(PRMS; Society of Petroleum Engineers

et al., 2007, 2011)をより簡略化して次のように定義する。

- (1) 累計生産量 (cumulative production) : 過去の生産量の累計。石油・天然ガスの場合、累計消費量にほぼ等しい。計測や単位換算に伴う誤差を除いて概ね正確で確定した値である。
- (2) 埋蔵量 (reserves) : 現時点で既発見かつ技術的・商業的に回収可能な量。累計生産量は含まない。この点を明確にするために、頭に「残存」(remaining)を付けることもある。評価に不確実性が伴うため、確実度に応じて「確認」(proved, proven), 「推定」(probable), 「予想」(possible), などの接頭辞を付ける, または実現確率 (P90, P10, または P95, P5 など) で表現する。本論文では, 原則として実現可能性が 50%の「P50」または「確認」+「推定」(P+P, または 2P) を指すが, 確率的に平均する場合は期待値(Expectation)または平均(Mean)を使用する (通常これらの数値は近いため, どの数値を使うかは本質的な問題ではない)。同一油田でも, 回収技術の進歩などにより埋蔵量評価が上方修正されることがあり, 追加分を「埋蔵量成長」(reserves growth)と呼ぶ。
- (3) 資源量 (resources) : 最終的に生産・消費されると推定される量 (「究極可採資源量」)。未発見量を含み, 将来の技術と経済環境で商業的に回収されると予想される量。累計生産量と埋蔵量に PRMS の“Contingent Resources” (既発見資源の回収率の向上分, 「埋蔵量成長」にほぼ同義) と“Prospective Resources” (未発見のうち将来発見される資源) を加えたもの。将来の発見量と採算性の両面で不確実性があり, 前者は残存賦存量と探鉱量に, 後者は価格・技術・需要などに依存する。回収できる量は地下に存在する総量 (賦存量) の一部で, この比率を「回収率」(recovery factor) といい, 一般に, 各油ガス田あたり石油は 10~60%, 天然ガスは 60~90%程度である。
- (4) 賦存量 (endowment) : 地殻 (または地球・宇宙) 中に存在するその資源物質の物理的な量。石油・天然ガスの“Total Initially In Place” (「原始埋蔵量」) の総量, 金属資源の“Resource Base”とほぼ同義。品位が低く (例えば微細に分散) 将来的にも商業回収は不可能で, 資源とはみなせない量も含む。次節で検討するように, 「シェールオイル」および「シェールガス」は, それぞれ石油および天然ガスの賦存量に含まれる。

これらの分類とは別に、枯渇性資源（石油や天然ガス）は、「在来型(conventional)」と「非在来型(unconventional)」に分けて語られることがある。後者にはシェールオイル、オイルシェール（両者の違いは第6章で説明する）、オイルサンド、シェールガス、メタンハイドレートなどが含まれ、「通常の油田・ガス田以外から産出される」石油やガスを意味するとされるが、何が「通常」かについての明確な定義はなく、一般には従来技術では産出できないものを指し、かつては深海や僻地の石油・ガスも「非在来型」と呼ばれていたこともある。したがって、上記の分類の「賦存量」に相当するが、「非在来型」の一部はすでに生産が開始されていて、その分は「埋蔵量」または「資源量」にも含まれる。すなわち、「非在来型」は、少し前までは「資源量」には含まれなかったが、その後（および今後）の技術の進歩や知見の蓄積により順次「資源量」に組み入れられるものである。本論文では厳密には定義せず、シェール資源など鉱床の形態・採取法などが従来とは異なるタイプの資源の総称として用いる（詳細は第6章参照）。

ボーヴォワールの名言“On ne naît pas femme: on le devient.”（人は女性に生まれるのではない、なるのだ）（de Beauvoir,1949）になぞらえ、Zimmerman(1964)は“Resources are not, they become.”（資源は存在するのではない、なるのだ）と述べた。この言葉は資源の本質を端的に表現しており、技術的・経済的に利用可能になって初めて資源といえる。このため「資源量」は「賦存量」に比べて極端に少なく、例えば、地球中心核に多量に賦存する鉄は、少なくとも近未来には資源ではない。物質資源は価格さえ上昇すればエネルギー投入により何度でもリサイクルでき、どんな低品位のものでも資源となる。一方、エネルギー資源には、①リサイクルできない、②エネルギーの投入が回収を上回る「逆臨界」を超えられない、という特徴がある。熱力学第二法則により低エントロピーの良質エネルギー（エクセルギー）の減少は避けられず、「逆臨界」を超えた低品位のものはもはや資源ではない。

「埋蔵量」は、既発見のうちで現在の技術と経済環境で商業的に回収可能な量を言う。メディアなどではこれらが混同され、混乱に拍車をかけている。シェール資源評価に用いられるEUR（Estimated Ultimate Recovery）やTRR（Technically Recoverable Resources）は商業性を無視しており、賦存量と資源量の間概念である（詳細は第6章）。ハイドレート資源（メタンハイドレート）の評価も多くは技術や商業性を無視した賦存量であり、これらを在来型資源などの埋蔵量あるいは資源量と単純に比較することは不適切である。

「R/P」は埋蔵量をその時点の年間生産量で割ったもので、しばしば可採年数あるいは「寿命」と呼ばれるが、新規発見などによる埋蔵量追加が全くなく、将来の生産量が現在と全く

同じときにのみ完全枯渇までの寿命と一致する。かつて 30 年であった石油の「寿命」が現在 50 年以上なのは、新規発見・埋蔵量成長と非在来型資源の埋蔵量への組み入れのペースが生産量の成長を上回ったからに他ならない。

資源量評価には、新規発見・埋蔵量成長などの物理的予測と需要・技術・価格・代替資源などの経済的予測の両方が必要になる。過去の評価は、各時点での最善予測ではあっても、その後の技術進歩や価格上昇を過小評価しがちで、結果として資源量の評価値は時代とともに増加してきた。

第2節 枯渇性資源の賦存量推定と人類文明の長期的持続可能性

3.2.1. 石油の賦存量推定

3.2.1.1. 石油の生成集積モデル（年あたり生成量一定のケース）

世界の石油賦存量を推定するには、地質学的に類似した探鉱熟成堆積盆地と面積・堆積物量などを比較する方法、根源岩（石油やガスを生成する地層）の量・質および熱履歴から生成する石油の量を地球化学的・熱力学的に計算し、これらのうち貯留岩（石油・ガスを貯める地層）に移動・集積する量（ここから散逸・破壊量を差し引く）をシミュレーションなどにより求める方法などがある。しかし、いずれの方法もミクロのデータから積み上げて推定するため、米国のシェール資源の例でも分かるように探鉱熟成地域でも追加発見余地は大きく、これらの方法は過小評価になりやすい。

そこでここでは一般に用いられている地質学的・地球科学的手法ではなく、資本の蓄積と減耗（式(1-9)）を参考にした「経済学的」モデルで、地球全体を一つのシステムとみなして、世界の石油賦存量の概数を推定する。Miller（1992）がこの方法で世界の石油賦存量の推定を行っているが、ここではそれを発展させ、理論的にも補強する。

石炭・石油・天然ガスなどの化石燃料は、太陽エネルギーを固定した生物の遺骸が、地熱（地球内部）エネルギーにより長時間をかけ濃集・熟成して生成されてきた。一方で、その一部は破壊・散逸により失われていく。この2つのフローに挟まれたストックが賦存量に相当する。これは、毎年の投資額と減耗のバランスで資本が蓄積されていく過程（式(1-10)）と同じである。経済では、各時点の資本の総額の一定割合が減耗すると考えることが多いが、以下でも同様に、その時点に集積されている油・ガスの一定割合が破壊・散逸すると考える。このメカニズムは放射性元素の崩壊でも同じで、そこでは分子数が莫大なため、大数の法則により、常に存在量の一定割合がほぼ正確に放射線を出して崩壊するため、年代測定などに利用されている。

ある時点から石油の生成が開始され、毎年 G の量の石油が生成されるとする。取り敢えず、 G （単位時間（ここでは年）あたり生成量）は一定量とし、連続系で考えるため、コンスタントに常に一定量が生成され続けるとし、蓄積されていく石油の量を $E(t)$ とし（前章では資源量を E としたが本章では賦存量を E とする）、その一定割合 δ （年あたりの率）、すなわち量としては毎年 $\delta E(t)$ が破壊・散逸し、その分が常に $E(t)$ から差し引かれていくとする。この時、差し引きされた後の $E(t)$ の時間（年）あたり増加量は次式で示される。

$$\frac{dE(t)}{dt} = G - \delta E(t) \quad (3-1)$$

この式で石油生成開始時点では $E(t) = E(0) = 0$ であり、 $G > 0$ なので、右辺は正であり、連続関数であれば、右辺が負になるためには 0 を経由する必要がある。しかし、仮に右辺が 0 になるとその時点で $E(t)$ は変化しなくなる（すなわち、平衡に達する）。したがって、上式の右辺は負にはならない。式(3-1)を書き換える。

$$\frac{1}{G - \delta E(t)} \frac{dE(t)}{dt} = 1 \quad (3-2)$$

両辺を t で積分する。

$$\int \frac{1}{G - \delta E(t)} \frac{dE(t)}{d(G - \delta E(t))} \frac{d(G - \delta E(t))}{dE(t)} \frac{dE(t)}{dt} dt = \int \frac{1}{G - \delta E(t)} \frac{1}{-\delta} d(G - \delta E(t)) = \int 1 dt \quad (3-3)$$

$G - \delta E(t)$ は負にはならないので、次のようになる（ C は任意定数）。

$$\log(G - \delta E(t)) = -\delta t + C \quad (3-4)$$

$C' \equiv e^{\delta C}$ として、これを解く。

$$E(t) = \frac{G - C' e^{-\delta t}}{\delta} \quad (3-5)$$

生産開始時点（ $t=0$ ）では $E(t)=0$ なので、式(3-5)にこれらを代入する。

$$E(0) = \frac{G - C' e^0}{\delta} = \frac{G - C'}{\delta} = 0 \quad (3-6)$$

したがって、 $C' = G$ となり、各時点の石油賦存量の式(3-5)は次のように書き換えられる。

$$E(t) = \frac{G - G e^{-\delta t}}{\delta} = \frac{G(1 - e^{-\delta t})}{\delta} \quad (3-7)$$

これを式(3-1)に代入すると、賦存量の変化は次のようになる。

$$\frac{dE(t)}{dt} = G - \delta \frac{G - G e^{-\delta t}}{\delta} = G - (G - G e^{-\delta t}) = G e^{-\delta t} \quad (3-8)$$

平衡（賦存量が変化しない）になるには、この式の右辺が 0 になる必要があるが、それは $t = \infty$ でしか成立しない。しかし、極めて長い時間を考えれば、実質的に賦存量が一定の平衡に達するとみなせる。例えば、百万年あたりの破壊・散逸率を 1% ($\delta = 1 \times 10^{-8}/Y$) とすると、石油生成開始 6 億年後には賦存量は平衡量の約 99.8% となる。（ほぼ）平衡に達した後は、生成量と破壊・散逸量が（ほぼ）一致するため、賦存量は次式で（ほぼ）一定となる。

$$E_{\infty} = \frac{G}{\delta} \quad (3-9)$$

こうして、任意の時点の賦存量が定式化されたが、この値を得るためには、①石油生成開始時期、②単位時間（年）あたり石油生成量(G)、③単位時間（年）あたり破壊・散逸率(δ)が必要である。

このうち①については、石油は生物起源なので生物の発生（約 40 億年前）以降であるが、ここでは、生物が急増した「カンブリア爆発」の約 6 億年前を石油生成開始時期とする。事実、現在までに確認されている石油はこの時期以降のものである。

②については、地質学的・地球化学的に推定する方法もあるが、賦存量推定と同様に過小評価になる恐れがある。現在ほぼ平衡に達しているとすれば、生成量は破壊・散逸量と一致するはずで、後者は観測値から推定できる。Miller (1992) は BP 社の社内資料から、石油が生成し、在来型と非在来型を合せた「石油システム」（石油の生成・移動・集積を総合したシステム）へ流入する量を毎年 150 万バレル(1.5MMB/Y)と評価している（一方、在来型の「貯留岩システム」への流入は 0.8MMB/Y と評価している）。以下ではこの数値を使用し、取り敢えず石油の生成開始（6 億年前）から石油生成量(G)はこの値で一定だったと仮定する（後で G が変化する場合も検討する）。

③の年あたり破壊・散逸率(δ)は次のようにして推定する。ある時点(t_1)の賦存量を E_1 とする。この量は時間の経過とともに破壊・散逸により減少していく（ t_1 より後の t 時点まで残存した量を $E_1(t)$ と表現）。一方で、新たに生成される石油が賦存量に加わるが、これは E_1 起源のものとは区別できるものとし、 $E_2(t)$ と表現する。 $E_1(t)$ と $E_2(t)$ の合計が t 時点の賦存量になる。このとき、 $E_1(t)$ の時間変化（減少）は次のように表現される。

$$\frac{dE_1(t)}{dt} = -\delta E_1(t) \quad (3-10)$$

$$\frac{1}{E_1(t)} \frac{dE_1(t)}{dt} = -\delta \quad (3-11)$$

両辺を t で積分。

$$\int \frac{1}{E_1(t)} \frac{dE_1(t)}{dt} dt = \int \frac{1}{E_1(t)} dE_1(t) = -\int \delta dt \quad (3-12)$$

$E_1(t)$ は負にはならないので、次のようになる（ C は任意定数）。

$$\log E_1(t) = -\delta t + C \quad (3-13)$$

$t = t_1$ で $t - t_1 = 0$, $E_1(t) = E_1(t_1) = E_1$ なので,

$$E_1(t) = E_1 e^{-\delta(t-t_1)} \quad (3-14)$$

$t = t_2$ で E_1 起源の石油が半分 ($E_1(t_2) = E_1/2$) になっていたとすると,

$$E_1(t_2) = E_1 e^{-\delta(t_2-t_1)} = \frac{E_1}{2} \quad (3-15)$$

したがって,

$$-\delta(t_2 - t_1) = \log \frac{1}{2} \quad (3-16)$$

$t_2 - t_1 \equiv T$ とおくと, この期間 T で資源が半分になるので, これを「半減期」と呼ぶ。

$$T = \frac{\log 2}{\delta} \cong \frac{0.693}{\delta} \quad (3-17)$$

時点 t_1 で既に (ほぼ) 平衡に達しているとする, その後は賦存量 $E^* = E_1(t) + E_2(t)$ は変化しないが, その内訳, すなわち $E_1(t)$ と $E_2(t)$ の比率は変化する。時点 t_1 から半減期 T を経た時点 t_2 においては $E_1(t_2) = E_2(t_2) = E^*/2$ となる。逆に言うと, 時点 t_2 において, その時の賦存量を二分する時点 t_1 が分かれば $t_2 - t_1$ が半減期 T となる。石油の生成年代は, 根源岩および貯留岩の堆積年代よりは若く, 熱履歴に基づく石油の生成・移動のシミュレーションなどから推定できる。こうして推定した世界の石油の生成年代の中央値 (これより古い石油と新しい石油が等量) が石油の半減期 T に相当する。Miller (1992) はやはり BP 社の社内資料から, 「石油システム」の在来型と非在来型を合せた半減期を約 1 億年 (100MMY), 「貯留岩システム」の在来型の石油の半減期を 2900 万年 (29MMY) と評価しているので, 本論文ではこの数値を採用する。これらを式(3-17)に代入すれば年あたり破壊・散逸率 (δ) が求まる。ここでは在来型と非在来型を合せたものを石油の賦存量と考えているので, $T = 100\text{MMY}$ を用いて次のようになる。

$$\delta = \frac{\log 2}{T} = \frac{0.693}{1.0 \times 10^8 \text{Y}} = 6.93 \times 10^{-9} \text{Y}^{-1} \quad (3-18)$$

すなわち, 在来型 + 非在来型の百万年あたりの破壊・散逸率は 0.693%/MMY となる。

ここで, 石油生成開始時期 6 億年前 ($t = 600\text{MMY}$), 年あたり石油生成量 $G = 1.5\text{MMB/Y}$, 年あたり破壊・散逸率 $\delta = 0.693\%/MMY$ と必要な数値がそろったので (図 3-1), これらを式(3-7)および (3-9)に代入する。

$$E(t) = \frac{G(1-e^{-\delta t})}{\delta} = \frac{1.5 \times 10^6 \text{BY}^{-1} (1 - e^{-(6.93 \times 10^{-9} \text{Y}^{-1} \times 6.0 \times 10^8 \text{Y})})}{6.93 \times 10^{-9} \text{Y}^{-1}}$$

$$= \frac{1.5 \times (1 - 0.0156) \times 10^6}{6.93 \times 10^{-9}} \text{B} = 2.13 \times 10^{14} \text{B} \quad (3-19)$$

$$E_{\infty} = \frac{G}{\delta} = \frac{1.5 \times 10^6 \text{BY}^{-1}}{6.93 \times 10^{-9} \text{Y}^{-1}} = 2.16 \times 10^{14} \text{B} \quad (3-20)$$

この結果、(非在来型を含めた)石油の賦存量は式(3-19)より213兆バレルとなり、完全には平衡(216兆バレル、式(3-20))には達していないが、ほぼこれに近い値(98.6%)となった。もともと上記の石油生成量および半減期を求める過程で、現在の賦存量はすでに平衡に達していると仮定して計算しており、このモデルでの推定値は1~2%程度の誤差を含むもので、有効数字は2桁と考えられる。

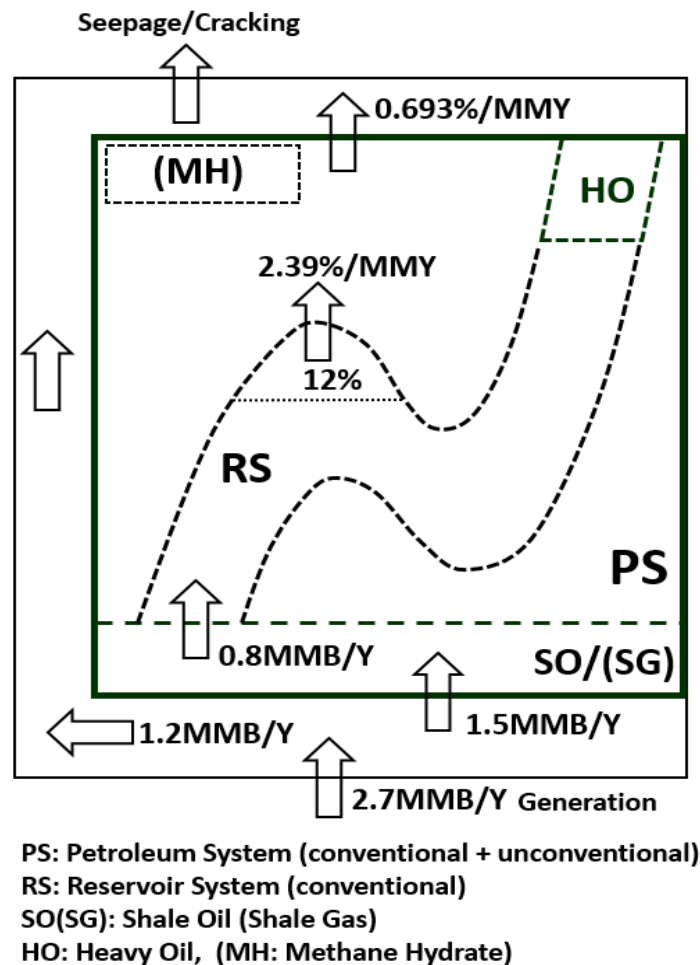


図 3-1 石油生成モデルの概要

さらに、年あたり石油生成量（破壊・散逸量から求めた）と半減期には Miller（1992）の数値をそのまま用いたが、BP 社が社内データを公表していないので、その検証は行えない。評価の精度は高くないと推定されるが、いずれも現在観測される諸事実と矛盾しない値であり、それらに基づく上記計算結果もオーダーとしては有効であると考えられる。

以下の考察では、特に断らない限り、石油の賦存量として平衡値の 216 兆バレルを用いる。この値は、先行研究の 3~4 兆バレルという資源量推定値（例えば USGS(2000)）や前章で「修正 Hubbert 曲線」から求めた 6 兆バレルという資源量（これまでの研究では例外的に大きな数値）よりも 2 桁近く大きなものである。賦存量は、その定義からも明らかのように、細かく分散して存在するなど品位が極めて低く将来的にも回収不可能な資源も含むが、数量的にはその寄与が極めて大きいことを意味する。この問題は次節および第 6 章で検討する。

3.2.1.2. 石油の生成集積シミュレーション（年あたり生成量に変化するケース）

上記のモデルでは、石油生成量 G が時代を通じて一定で、現在と同じであったと仮定していた。しかし、石油は生物起源なので、実際の石油生成量は生物量に依存していたはずである。そこで、生物の科数の変遷（Raup and Sepkoski, 1982）を参考に、石油の生成量の変遷について 3 種類のケースを設定した（図 3-2A）。現時点の年あたり生成量は、上記モデルと同じく Miller（1992）に従い毎年 150 万バレル(1.5MMB/Y)でどのケースも同じとする。ケース 1 は、上記モデルと同じで、この量が生成開始した 6 億年前（カンブリア紀）から一定とする（式 (3-19)）。ケース 2 は、生物がカンブリア紀から徐々に繁栄してきたと考え、6 億年前には 0 であった生成量が、線形で現在の値に増加してきたとする。ケース 3 は、より忠実に Raup and Sepkoski (1982) の生物の科数の変遷に石油生成量の変遷を設定した。

上記のモデルを離散系に変換して、この 3 ケースにつき、数値シミュレーションを行った。その結果を図 3-2B に示したが、左側が在来型+非在来型で、本論文の賦存量に相当する。右側には在来型（貯留岩）だけのケース（使用データは図 3-1 参照）も示している。石油は生成時期によって、古生代(Paleozoic)、中生代(Mesozoic)、新生代(Cenozoic)に 3 分した。

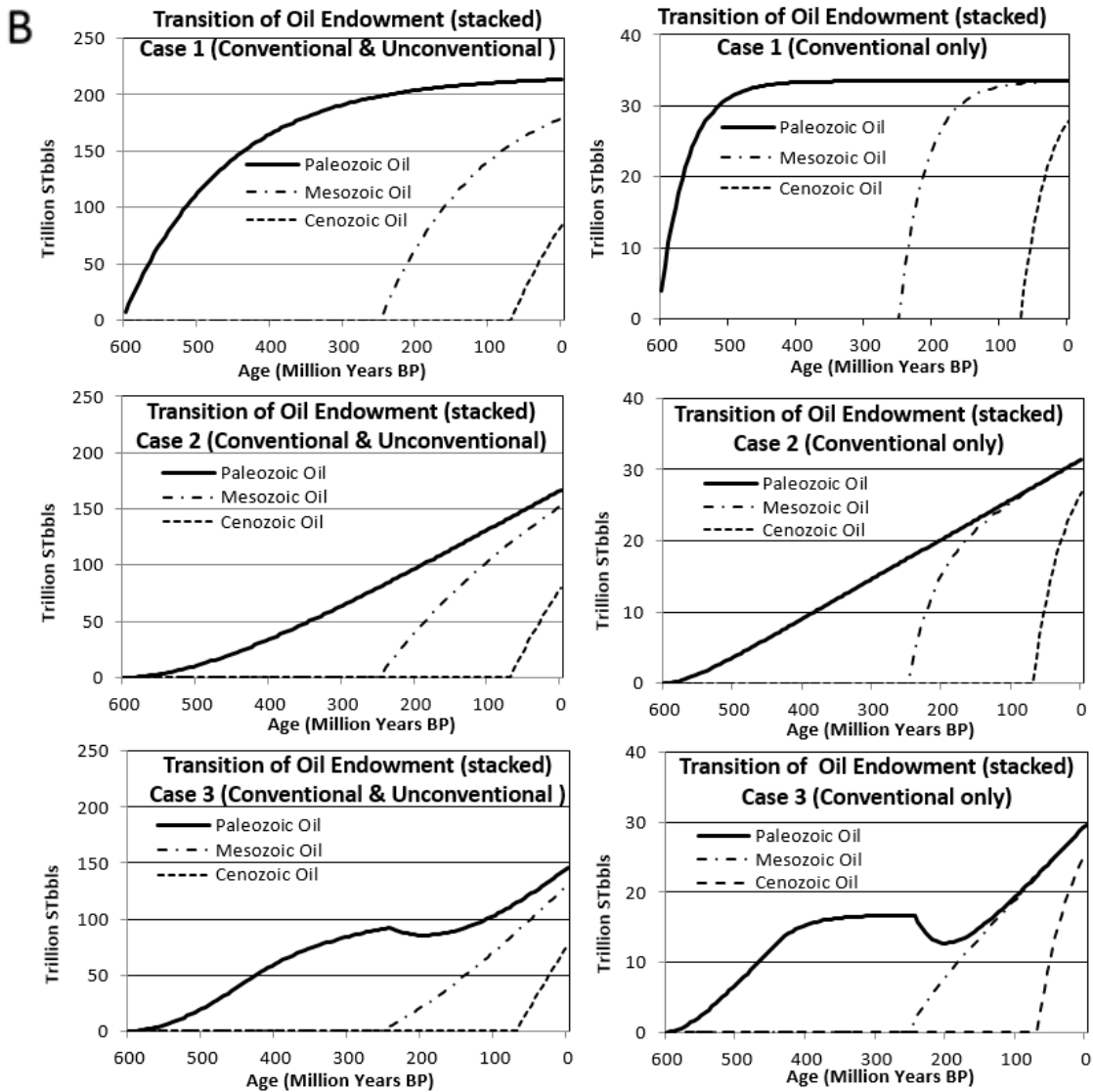
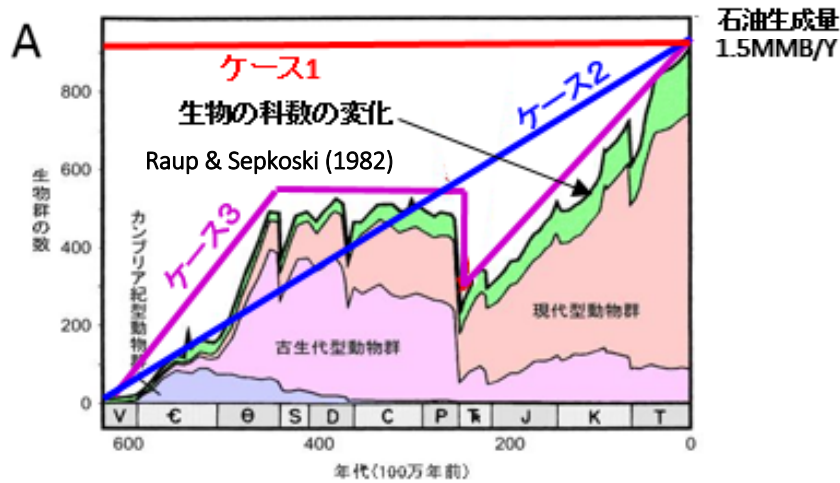


図 3-2 石油の生成量・賦存量のシミュレーション

A : 生成量の設定, B : 結果 (左 : 在来型+非在来型, 右 : 在来型)

在来型+非在来型の賦存量は、ケース1では、式(3-19)で求めたのと同じ 213 兆バレルとなり、グラフからもほぼ平衡に達していることがわかるが、古生代の石油もまだかなり残されている。ケース2では、生成量が線形に増加してきたため、賦存量は 167 兆バレルだが、現在も増加途中でまだ平衡には達していない。ケース3では、約2億5千万年前の「PT境界」（古生代と中生代の境界）での大絶滅により生物量が急減したため、その後一時、破壊・散逸量が生成量を上回った時期があり、現在の賦存量も 146 兆バレルと3ケースの中では一番少ない。このケースも平衡には達しておらず賦存量は増加中である。生物は現在大絶滅中であるが、その事実はここでの検討にはまだ反映されていない。

在来型（貯留岩）だけで見ると（右側）、非在来型を加えた賦存量に比して1桁小さいが、それでも従来の資源量評価値よりは1桁大きい数値である。また、半減期が短いため、古生代の石油はほとんど残っておらず、大半は新生代の石油である。

以上は人類による石油採取開始前までの話で、現在の石油生産量（＝消費量）の約 34,000MMB/Y は生成量(1.5MMB/Y)の2万倍以上であり、したがって、次章以降で展開する石油生産による残存賦存量・資源量の議論の際には、石油の追加生成による賦存量・資源量の増加は無視してよい。

3.2.2. 枯渇性資源の生産量・埋蔵量・資源量・賦存量と持続可能性

表3-1に主な金属と石油の、現在の生産量（年産量）・埋蔵量・賦存量および R/P（埋蔵量/生産量）・R'/P（資源量/生産量）・E/P（賦存量/生産量）を示した。比較のために太陽光（フロー/年）も示した。石油の生産量、埋蔵量は BP 統計（BP, 2017）、資源量は Miller（1992）、賦存量は上記の平衡ケースの数値をそれぞれ使用した。太陽の生産量欄には 2013 年の世界の 1 次エネルギー商業取引量を記入し、賦存量欄の地球全球の年間受光量は太陽定数（地球近辺での太陽に対する垂直断面での単位面積当たりの受光エネルギー量）、地球半径、地球-太陽間距離、アルベド 30% などから計算した。その他の資源の生産量・埋蔵量・資源量は表中に記した出典から引用し、賦存量は地殻中の存在比率（“crustal abundance”, CRC 2005）に地殻質量を掛け合わせて求めた。

“E/P”（賦存量/生産量）は、金は 4,000 年、石油と太陽光は約 7,000 年、イットリウム（レアアースの一種）は 100 億年（太陽系の残存寿命より長い）と、現在の生産量であれば物理的には（技術や経済性を無視すれば）十分な量が存在する。

しかし注意を要するのは、ここで示している賦存量は、極めて細かく分散して存在してい

たり、複雑な化合物を形成していたりして、その大部分は将来的にも資源として利用されることはないということである。太陽光についても、その大半は海洋に照射されていて将来的にも利用される可能性は低い。更に、地球の大気および水の循環や気候変動もすべて太陽エネルギーに駆動されており、水力や風力はその一部を利用するものである。この残りを、人類を含めた全生物が利用していて、木材などのバイオマスもそこに含まれる。石炭・石油・天然ガスなどの化石燃料は、こうして形成された過去のバイオマスの一部が地下に埋没し、地球内部エネルギー（地熱）と地質学的時間により熟成して形成されたものである。

表 3-1 に R/P（埋蔵量/生産量）・R'/P（資源量/生産量）・E/P（賦存量/生産量）の数値を示したが、これらは現在（表 3-1 では 2010 年または 2013 年）の生産量（P）を基準にした値である。上記したように、賦存量の大半は将来的にも資源として利用されないものなので E/P の数値はいずれも大きい。仮にこの量がすべて利用されるとしても、生産量が経済成長に呼応して増加すれば、「寿命」ははるかに短くなる。

表 3-1 枯渇性資源の生産量・埋蔵量・資源量・賦存量と「寿命」

出典：表中記載（①～⑨）以外は、USGS(2011a)に基づき計算

Element/Fuel	Production (tons2010)	埋蔵量 (R) Reserves (tons)	(R/P) R/P (yrs)	資源量 (R') Resources (tons)	(R'/P) R'/P (yrs)	賦存量 (E) Endowment ^② 地殻中 (tons)	(E/P) E/P (yrs)	Years to exhaust @different growth rate			
								2.5%	5%	10%	
iron	Fe 26	2.4×10^9 ③	8.7×10^{10} ③	36	2.3×10^{11} ③	96	1.5×10^{17}	6.3×10^7	570	299	157
aluminum	Al 13	2.1×10^8 ③	2.8×10^{10} ③	133	7.5×10^{10} ③	357	2.1×10^{17}	1.0×10^9	681	355	184
copper	Cu 29	1.6×10^7	6.3×10^8	39	3.0×10^9	185	1.6×10^{14}	9.9×10^6	497	262	138
nickel ^①	Ni 28	1.6×10^6	7.6×10^7	49	1.3×10^8	84	2.2×10^{14}	1.4×10^8	603	315	165
yttrium ^①	Y 39	8.9×10^3 ③	5.4×10^5 ③	61	NA	NA	8.9×10^{13}	1.0×10^{10}	773	401	207
gold	Au 79	2.5×10^6	5.1×10^7	20	NA	NA	1.0×10^{10}	4.0×10^3	184	106	60
uranium	U 92	5.4×10^4 ④	3.1×10^6 ⑤	58	5.4×10^6 ④	100	7.0×10^{12}	1.3×10^8	600	314	164
石油		3.2×10^{10} ⑥ (bbl)	1.7×10^{12} ⑥ (bbl)	53	4.0×10^{12} ⑦ (bbl)	125	2.2×10^{14} ⑦ (bbl)	6.9×10^3	206	117	65
太陽光 (フロー) (含:水力・風力・バイオマス)		5.3×10^{20} ⑧ (J/Y)	← 一次エネルギー消費(2013)		← 全太陽光フロー		3.9×10^{24} ⑧ (J/Y)	7.2×10^3	355 ⑨	178 ⑨	89 ⑨

太陽光は「バックストップ資源」ではない！

出典・計算方法：① ニッケルは「レアメタル」、イットリウムは「レアアース」に含まれる。

- 特記ないのは ② CRC Handbook(2005)の“Crustal Abundance”に地殻質量 2.6×10^{18} tを適用。鉄・ニッケルはUSGSの2010値 核の主成分であり、他の金属元素もマントルに存在するので、全地球ではこれより多い。
 (に基づき計算) ③ 鉄：鉄鉱石、アルミ：Bauxite、イットリウム： Y_2O_3 の値(その分E/Pは過小評価)、他は元素量。
 ④ World Nuclear Assoc.のホームページより、Resourcesは“known”(未発見含まず)。
 ⑤ Nation Master Com. ⑥ BP(2014) ⑦ Miller(1992)、“Resources”は累計生産量を含む。
 ⑧ 太陽定数 1.37×10^3 W/m²、albedo30%、および地球半径6400kmに基づき計算
 ⑨ BP(2014)の一次エネルギー消費、およびその成長値が太陽光フロー⑧に達する年数。

年生産量が、現在（または基準年）の値 P_0 から年率 g で成長すると、 t 年後の生産量は次のようになる。

$$P(t) = P_0(1 + g)^t \quad (3-21)$$

これを連続系（すなわち生産量は瞬間値）に変換する（以下では連続系で議論する）。

$$P(t) = P_0 e^{gt} \quad (3-22)$$

このとき、 T 年後までの累計生産量は次式になる。

$$\int_0^T P(t) dt = \int_0^T P_0 e^{gt} dt = \frac{P_0}{g} [e^{gt}]_0^T = \frac{P_0}{g} (e^{gT} - 1) \quad (3-23)$$

T 年後にすべての賦存量 E を生産し尽くし枯渇させるとすると、

$$E = \frac{P_0}{g} (e^{gT} - 1) \quad (3-24)$$

したがって、賦存量が枯渇する時期（ T 年後）は次式となる。

$$T = \frac{\log\left(\frac{E}{P_0}g + 1\right)}{g} \quad (3-25)$$

表 3-1 の右側 3 列は、式(3-24)の E/P_0 に E/P （賦存量/生産量）の数値、 g に 0.025, 0.05, 0.1 を代入して求めた「寿命」である。最も低い 2.5% の成長率であっても、どの資源も数百年以内に全賦存量を枯渇することになる。更に上記したように、実際に資源として利用されるのは賦存量のうちのごく一部である。数百年というのは人類の歴史に比べれば極めて短い時間であり、今後も経済成長が続き、それに応じて資源の生産（消費）量が増加するのであれば、人類文明は早晩、持続不可能な事態に陥ることになる。

さらに興味深いのは太陽光である。太陽光はフローなのでその範囲内で使用していれば（太陽の主系列星としての残余寿命の約 50 億年の間は）枯渇することはないが、使用量が増加すれば、成長率が 2.5% であっても、約 350 年で頭打ちとなり、それ以上成長できない。多くの人々が太陽光を無尽蔵なエネルギー源と考え、一部の経済学者は、技術向上と価格上昇により無限に供給できる「バックストップ資源」（Nordhaus, 1979）とみなしているが、実は太陽光の（地球表面での）持続可能年数は石油と大差がない。

したがって、数百年（人類の歴史に比べて極めて短い）を超えて人類の持続可能性を考えるには、（金属などの物質はエネルギーさえ投入すればリサイクルできるが）エネルギー消費をこれ以上成長させないことが必要である。世界のエネルギー消費は、①1 人あたりエネ

ルギー消費、および ②世界人口に依存している。現在の 1 人当たり食料消費の平均値は、基礎代謝（じっとしていても必要なエネルギー）の約 2 倍の約 2700kcal/day（約 130W）であるので（UNDESA, 2007）、現在の世界（73 億人）の 1 人あたり一次エネルギー使用量は次のようにこの 20 倍近くであり、これをどの程度に抑えられるかが ① についての鍵である（図 1-11 参照）。

$$\frac{5.3 \times 10^{20} \text{JY}^{-1}}{7.3 \times 10^9 \text{人}} = \frac{1.7 \times 10^{13} \text{W}}{7.3 \times 10^9 \text{人}} = 2.4 \times 10^3 \text{W/人} \quad (3-26)$$

一方 ② については、本川(1996)が多くの哺乳動物を調査して、生息密度 d (匹/km²) と体重 W (kg)（ここでは W は坑井数ではない）の間に次の関係を導出している。

$$d = 55W^{-0.90} \quad (3-27)$$

この式に $W = 60\text{kg}$ を代入すると、ヒトサイズの人口密度は 1.4 人/km² となる。現在の世界の人口密度はこの 10 倍（全地球表面）～35 倍（陸地）であり、日本（335 人/km²）は約 240 倍、武蔵野市（1.3 万人/km²）は約 9000 倍にも上る。しかし、日本でも鬼頭(1996)による人口を用いて計算すると、縄文～弥生時代の人口密度は 0.3～1.6 人/km² となり、これは他の生物とほぼ同じオーダーで、この自然状態が太陽エネルギーフローに対する哺乳動物の最適生息密度なのかもしれない。人口はその後、農耕やエネルギー源の多様化により増加し過密状態になってきたが、ストックである化石燃料はいずれ枯渇する運命にあるので、それに備えて最適人口に関して再考する必要がある。

本論文の主要対象は、より短い数十年単位の経済現象であるので、人類の持続可能性の問題にはこれ以上深入りせず、以下では石油などエネルギー資源の賦存量は、当面（本論文の対象である数十年）は十分であるとして議論を進める。

第3節 油田の規模分布と発見量の推定

前節で検討したように、石油の賦存量は膨大であるが、そのうち資源として最終的に使用される量、すなわち資源量はごく一部にすぎない。賦存量のうち、探鉱により発見され評価によって採算性があることが判明した量が埋蔵量となる。この過程を無限遠の将来まで延長した極限までに発見され、生産される量が資源量である。

それぞれの時点における埋蔵量が生産能力を規定し、それと需要とのせめぎあいにより生産（消費）量および価格が決定し、それが経済を駆動することになる。したがって、①今後どれだけの油が発見されるか、と②発見された量のうちどれだけが採算性があるか、が重要になる。①は（試掘数）×（成功確率）×（油田規模）で表現でき、②はそのうち採算性のある油田の比率に他ならない。採算性は、技術・需要・代替資源動向および価格にも依存し、詳細は次章で検討するが、ここではとりあえず油田（埋蔵量）規模で採算性を代表できるとして議論を進める。

本節では、地下に存在しているがまだ発見されていない油田も含めた油田規模分布（各規模の油田数）とそのうちどの油田がどの順序で発見されていくかを考察する。従来の先行研究では、堆積盆地ごとに地質学的・地球化学的分析を行い、それを積み上げて世界の資源量を評価しているが、予測が大きく外れることが多く、発見の進行過程も評価できない。例えば、最もよく引用される米国地質調査所の評価（USGS, 2000）は、各堆積盆地の地質・地球化学情報と過去の油田発見履歴を吟味した数人の地質専門家が、各人の経験に基づき評価した結果を集計したものであるが、数年後には再評価（Klett et al., 2005）が必要となった。こうした微視的な評価は「木を見て森を見ない」傾向があり、また各評価者の主観（思い入れ）が反映されやすい弊害がある。そこで本節では、全世界を一体として「マクロ経済学的」にとらえ、敢えて各堆積盆地の地質学的詳細を捨象して主観や思い入れを排除し、純粹に確率論および統計学的手法で集計データを分析する。

3.3.1. 油田規模分布の推定

3.3.1.1. 探鉱効率と油田規模分布

井上(2002)は、探鉱がランダムに行われれば累計発見量は探鉱量に比例するはずだが、こ

れが探鉱初期に急増し、その後徐々に逡減してきているのは探鉱が効果的に行われ、大規模油田から発見される傾向があるからだと述べた。一方、これとは正反対の見解もある。ダーツを投げるがごとくランダムに試掘すれば、直径が2倍(面積4倍)の大油田は4倍の確率でヒットするはずだが、カンザスの例では1.6倍程度にしか発見確率が向上しておらず、過去の探鉱努力はランダムなダーツ投げにも劣る効率であったという主張である(Deffeyes, 2001)。この主張はもっともらしく聞こえるが、実はトリックが隠されていて、どの面積規模の油田も同じ頻度で存在しているという前提が必要である。この前提が成立しているかは、地下に存在する未発見油田と既発見油田を合せた油田規模分布(以下では「究極油田規模分布」と呼ぶ)に依存しており、この問題を検討してみる。

3.3.1.2. 油田規模は対数正規分布か？

Arps and Roberts(1958)がDenver - Julesburg 盆地の既発見油田規模分布が対数正規分布で近似されることを示して以来、世界各地の既発見油田規模分布も対数正規分布で近似されることが明らかになり、油田規模は対数正規分布であるということが定説化し(例えば Kaufmam et al., 1975)、油田評価もこの前提に基づいて行われることが多い(例えば、中西, 2000)。

一般にある代表値(例えば最頻値)や特定の分布範囲を持つ分布を多数足し合わせると、「中心極限定理」に基づき、その結果は正規分布に近づく。同様の分布を多数掛け合わせると、掛け算は対数の足し算であるから、その結果は対数正規分布に近づく。通常、油田の埋蔵量値は面積、層厚、孔隙率、油飽和率、回収率などを掛け合わせて求めるため、油田規模は必然的に対数正規分布になると説明されることがある(例えば、中西, 2000)。確かに特定のプロスペクト(試掘対象構造)の埋蔵量値を推定する際には、各係数に、最もありそうな値(代表値)の両側に幅を持たせた確率分布を与え、それを掛け合わせて求めることが多く、その結果得られる埋蔵量の確率分布は当然ながら対数正規分布に近くなる。では、全世界あるいは特定の堆積盆地の究極油田規模分布も同様に対数正規分布で近似されるのだろうか？

この問題を考える際には、探鉱の結果、実際に発見されたある時点の既発見油田規模分布と、未発見(および今後も発見されることのない)油田も含めて地下に存在している究極油田規模分布の区別が重要である。後者は自然現象であり、前者はこれに経済環境、法税制、探鉱戦略、探鉱効率、統計データの不完全性などの人為的要因が加味されたものであるが、

過去の研究では、この両者を混同している例が少なくない（例えば、Davis and Chang, 1989）。ある堆積盆地の既発見油田規模は対数正規分布で近似されることが多いが、その平均値や最頻値は地域毎に大きく異なっていて、堆積盆地のタイプや地質構造のスタイルとの規則性は見出せない。例えば、地質学的に同タイプの堆積盆地でも、米国陸上と他国では、油田規模の平均値や最頻値は大きく異なり、それらが油田立地や法税制などに大きく影響されていることは明らかである。また、探鉱の進行に伴い、より小規模な油田が多く発見されるようになり、油田規模の平均値や最頻値も小さいクラスへと移っていく（例えば、Houghton et al., 1993）。探鉱熟成地域では、最頻値はその地域の採算限界のすぐ上のクラス付近に相当していることが多いが、技術進歩や油価上昇により採算限界が緩和される時には、それに呼応して最頻値もより小さいクラスへとシフトする。したがって、既発見油田の対数正規分布は、特定の堆積盆地や地質条件に固有のものではなく、探鉱熟成度や経済条件に規定された見掛け上の一時的現象であり、母集団である究極油田規模分布がこれと一致する必然性は全くない。

3.3.1.3. フラクタルとべき乗分布

一方、究極油田規模分布はべき乗分布（フラクタル）だという説がある（Turcotte, 1997, 井上, 2004）。フラクタル（自己相似）とは、地形や図を拡大すると元の図の一部に似ており、無限の入れ個構造を形成している現象をいう（高安・高安, 1988）。フラクタルが成立していると、どのスケールでも金太郎飴的に同じパターンが出現し、それを見ただけではスケール（縮尺）が全く判定できない（これを「スケール依存性がない」という）。全体が N 個の $1/a$ に縮小した相似図形によって全体が構成されている時、その図形のフラクタル次元 D は次式で定義される。

$$D = \log_a N = \frac{\log N}{\log a} \quad (3-28)$$

サイズが連続的な値をとって変化する分布のフラクタルは上式より次のようなべき乗関数で定義すると使いやすい（Turcotte, 1997）。

$$N = \frac{C}{r^D} = Cr^{-D} \quad (3-29)$$

ここで、 D はフラクタル次元、 N はサイズが r （一次元のスケールで測る、例えば「直径」）より大きな対象物の個数（すなわち「順位」）、 C は定数である。式(3-28)は N と r の両対

数グラフにおいて傾き $-D$ の直線として表現される。このようなべき乗関数で表現されるためにフラクタル分布のことを「べき乗分布」ともいう。

べき乗分布（フラクタル）は、唯一大きさ（スケール）に依存しない分布で、異なる竿尺（歩幅）で測ったときの海岸線の長さ、世界の湖の大きさ、月のクレーターの大きさ、隕石や小惑星の大きさ、岩石を破壊したときの破片の大きさ等々（図 3-4 挿入図参照）、自然界には多くの例が知られている（Turcotte, 1997）。最も良く研究されている例のひとつが地震の規模分布で、マグニチュードと発生頻度の関係を示した Gutenberg - Richter 則は実はべき乗分布を言い換えたものである（Turcotte, 1997）。

油田規模を決定する最大の要因は構造（トラップ）の規模である。地震の頻度分布がべき乗分布であることは、その原因となる断層のフラクタル性、特に破断面積のべき乗分布に起因し（茂木, 1989 ; Turcotte, 1997）、断層トラップのサイズも同様にべき乗分布となると予想される。一方、背斜トラップを形成する褶曲構造の波長には数 10km から数 mm 以下までいくつかのオーダーが認められ（Currie et al., 1962）、同一地域、同一地層であっても 1 つの特徴的スケールで代表させることはできない。孔隙率や油飽和率は、小さい値を通常カットオフをしているため、代表値を中心に散らばっていると見える場合もあるが、カットオフを行わなければ小さい方は 0%、すなわち対数軸上では無限小にまでわたっていて、これらもフラクタルであると主張する研究者もいる（Turcotte, 1997）。貯留岩となるタービダイトの層厚分布については対数正規分布説とべき乗分布説が拮抗している（中嶋, 2002）。総合すると、油田規模を決定する各パラメータの多くは特定の代表的規模を示さず、したがってそれらを掛け合わせてもその結果が対数正規分布に近づくわけではない。

油田規模は 1 千億バレルから数万バレル（またはそれ以下）まで $10^6 \sim 10^7$ 倍のオーダーにわたっていて、全堆積盆地に共通する特定の代表的スケールというものがなく、他の自然現象同様、スケールに依存しないべき乗分布である可能性は高い。ただし、べき乗分布は、概念的には無限大から無限小にまで適用可能であるが、自然界では大きくは地球や宇宙のサイズ、小さくは素粒子サイズなどによる制限があり、当然ながらその間のスケールにしか当てはまらず、地震規模の例でも知られるように、その適用範囲には上限および下限がある。油田規模分布の場合、大は堆積盆地規模、小は石油分子や砂粒子のサイズによる制限が働くと考えられ、これら両端では頻度分布がべき乗分布からはずれることが予想される。

「過去の探鉱努力はランダムなダーツ投げにも劣る」と主張した Deffeyes(2001)も実は、世界の油田規模分布は「Zipf の法則」に従うと指摘している。「Zipf の法則」とは、1 位の

数値は 2 位以下よりずっと大きく、2 位、3 位と順位に反比例して数値が小さくなるというものである。例えば、英文中の単語の頻度は「the」が最も多く、2 位の「of」の約 2 倍、3 位の「and」の約 3 倍になっている（高安・高安，1988）。「Zipf の法則」は、実はフラクタルのうち特殊なケース、すなわち両対数グラフでの直線の傾きが -1 の場合に相当する。

図 3-3 に、全世界の巨大油田および世界各地（インドネシア全土，中央スマトラ盆地，ガボン）の油・ガス田の可採埋蔵量 R （後三地域についてはガスも油換算して含めた）と油田順位 N （埋蔵量 R バレル以上の油・ガス田数）の関係を両対数グラフにプロットした。

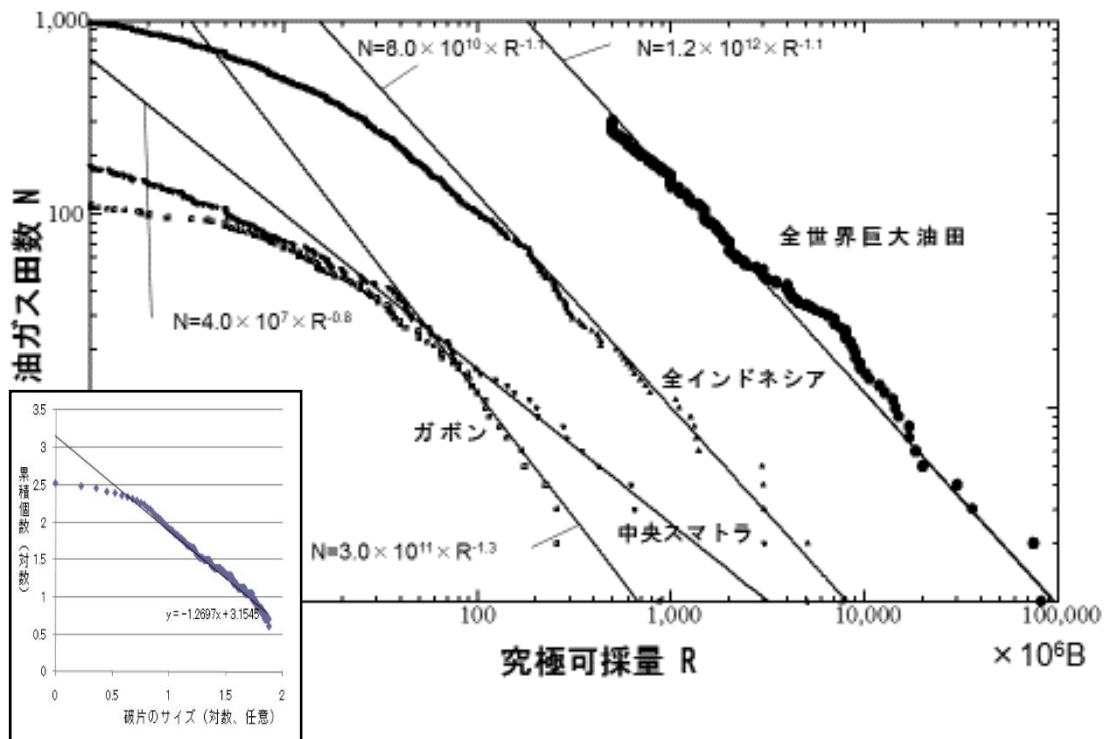


図 3-3 油ガス田規模分布の両対数プロット（データ出典：Carmalt and St. John, 1986）

左下挿入図：「はやぶさ」が回収した破片（傾き： -1.27 ）（出典：国立天文台，2010）

全世界の油田データは埋蔵量 5 億バレル以上の巨大油田に限っているが、傾き -1.1 の直線（フラクタル次元 $D=3.3$ ；埋蔵量 R は三次元なので）、ほぼ「Zipf の法則」（傾き： -1 ）に従っている。3 地域についても、あるサイズ（地域ごとに異なる）以上の油田は直線で近似されるが、その傾き（フラクタル次元）は地域によって異なっている。ただしこれら 3 地域では、小規模油田の分布はフラクタル（べき乗分布）から乖離して円弧状を示し、むしろ対数正規分布に近い形状を呈している。図 3-3 のプロットは、究極油田規模分布ではなく既

発見油田に限られ、地下の未発見油田は含まない。過去の探鉱は大規模油田狙いであり、小規模油田はいわば「間違っ」て発見されてしまったもので、地下には未発見の小規模油田が多く残されているはずである。もし、究極油田規模分布がべき乗分布（フラクタル）で近似されるのなら、直線からの乖離は未発見油田を表現していることになる。

図 3-3 には小惑星探査船「はやぶさ」が回収した破片の規模分布の両対数プロットも併せて示したが、フラクタル次元（近似直線の傾き）も含めて油田規模分布と酷似している。小規模側で直線から乖離している点も同じだが、「はやぶさ」の場合は回収や計測における脱漏の可能性が考えられる。

3.3.1.4. 究極油田規模分布の推定

油田規模を検討する際には、埋蔵量値に従っていくつかクラスに分け、各クラスの油田数の統計に基づき議論する。クラス分けは一般に、埋蔵量の対数スケールになるように設定する。本論文では次のクラス分け（1クラス上がると埋蔵量が2倍）を用いる。

表 3-1 油田のクラス分け（単位：千バレル）

<u>油田クラス</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>	<u>7</u>	<u>8</u>	<u>9</u>	<u>10</u>	<u>11</u>	<u>12</u>
埋蔵量 下限	1	2	4	8	16	32	64	128	256	512	1,024	2,048
埋蔵量 上限	2	4	8	16	32	64	128	256	512	1,024	2,048	4,096
<u>油田クラス</u>	<u>13</u>	<u>14</u>	<u>15</u>	<u>16</u>	<u>17</u>	<u>18</u>	<u>19</u>					
埋蔵量 下限	4,096	8,192	16,384	32,768	65,536	131,072	262,144					
埋蔵量 上限	8,192	16,384	32,768	65,536	131,072	262,144	524,288					
<u>油田クラス</u>	<u>20</u>	<u>21</u>	<u>22</u>	<u>23</u>	<u>24</u>							
埋蔵量 下限	524,288	1,048,576	2,097,152	4,194,304	8,388,608							
埋蔵量 上限	1,048,576	2,097,152	4,194,304	8,388,608	16,777,216							
<u>油田クラス</u>	<u>25</u>	<u>26</u>	<u>27</u>	<u>28</u>								
埋蔵量 下限	16,777,216	33,554,432	67,108,864	134,217,728								
埋蔵量 上限	33,554,432	67,108,864	134,217,728	268,435,456								

ここでは「クラス 1」が最小クラスで、その下限埋蔵量は 1000 バレルであるが、実際にはこれより小規模な集油（多くは「油田」ではなく単に「油兆」などと呼ばれる）も膨大な

数が存在し、前節で評価した賦存量の大半はそれらを集計した結果である（図 3-9 参照）。しかし、将来的にも「クラス 1」より小規模なものが商業化されるとは考えにくい。現在、米国陸上での商業限界は、シェールオイルも含めて「クラス 6」程度であり、それ以外の国では、立地や法税制などにもよるが、概ね「クラス 14」付近が商業限界である。埋蔵量 5 億バレル（「クラス 20」）以上を「巨大油田」と呼ぶ。

Arps and Roberts(1958)の古典的業績では、油田規模が対数正規分布で近似されるという点のみが注目されているが、彼ら自身は「見かけ上の対数正規分布を強調しすぎてはいけない。なぜなら右側での油田数の減少は大規模油田の数が少ないという実態を反映しているが、左側での油田数の減少は主として経済的要因に起因しているからである。」と述べていて、既発見油田規模分布と究極油田規模分布の相違を正しく認識している。彼らは、あるクラスの油田の発見確率はそのクラスの平均油田面積およびその時点で地下に残されている未発見油田数に比例するという仮定に基づき、既発見油田規模分布から究極油田規模分布を推定している。

Arps and Roberts(1958)に従い、あるクラスの追加試掘による油田発見率は集油面積および残存未発見油田数に比例すると仮定する。そのクラスの発見油田数 F は、当初の未発見油田数（以下では「究極油田数」と呼ぶ）を F_0 、試掘数を w 、そのクラスの平均集油面積を A 、対象堆積盆地面積を B （単位は A と同じ）とすると、ダーツ投げのようにランダムに試掘した場合、試掘 1 坑あたりのそのクラスの発見確率は次式で示される。

$$\frac{dF}{dw} = \frac{A}{B}(F_0 - F) \quad (3-30)$$

しかし、実際の探鉱は「ランダムなダーツ投げ」より効果的なはずで、その倍率を「探鉱効果」 θ とすると（ランダムな時は、 $\theta = 1$ ）、上式は次のように書き換えられる。

$$\frac{dF}{dw} = \frac{A\theta}{B}(F_0 - F) \quad (3-31)$$

左辺に F の関数、右辺に w の関数をまとめると、

$$\frac{dF}{F_0 - F} = \frac{A\theta}{B} dw \quad (3-32)$$

この式を F について $F = 0$ （試掘開始前）から $F = F_w$ （ W 坑試掘時のそのクラスの既発見油田数）、 w について $w = 0$ から $w = W$ まで定積分する。

$$\int_0^F W \frac{1}{F_0 - F} dF = \int_0^W \frac{A\theta}{B} dw \quad (3-33)$$

$$-[\log(F_0 - F)]_0^{FW} = \left[\frac{A\theta W}{B} \right]_0^W \quad (3-34)$$

$$\log F_0 - \log(F_0 - F_W) = \frac{A\theta W}{B} \quad (3-35)$$

$$\log \frac{F_0 - F_W}{F_0} = \log \left(1 - \frac{F_W}{F_0} \right) = -\frac{A\theta W}{B} \quad (3-36)$$

$$\frac{F_W}{F_0} = 1 - e^{-\frac{A\theta W}{B}} \quad (3-37)$$

$$F_W = F_0 \left(1 - e^{-\frac{A\theta W}{B}} \right) \quad (3-38)$$

$$F_0 = \frac{F_W}{1 - e^{-\frac{A\theta W}{B}}} \quad (3-39)$$

以上の定式化は、それぞれのクラスに対してであり、堆積盆地面積 B と坑井数 W は全クラスに共通だが、平均油田面積 A 、究極油田数 F_0 、 W 坑試掘時の既発見油田数 F_W および探鉱効果 θ はクラスごとに異なる（Arps and Roberts は探鉱効果 θ を全クラス共通としている、詳細下記）。この手順を全てのクラスに対して適用する。

Arps and Roberts(1958)は、試掘は地質解釈および地震探査に基づいて行われるので「ランダムなダーツ投げ」の2倍の効率があるとして「探鉱効果」 $\theta=2$ を一律にすべてのクラスに対して使用している（当時としても低い値だが、Denver - Julesburg 盆地の油田が把握しにくい層位封鎖型であることによると思われる）。式(3-39)と Arps and Roberts のデータ(3,705 坑試掘, 338 油田発見時)を用いて究極油田規模分布、すなわち各クラスの「究極油田数」を計算した結果を表3-3に示した。Arps and Roberts(1958)は、既発見油田規模分布が二峰性を示すのでそのまま使用せず、全体として対数正規分布に近い形にスムージングした各クラスの油田数を用いている。このため、スムージングを行わずに原データを用いた表3-3は細かい数値では彼らの結論と異なるが、大勢は一致している。3,705 坑試掘時(338 油田発見時)の既発見油田規模分布はクラス6がピークとなっているが、実はこのクラスがほぼ採算限界に相当している。式(3-39)で計算した「究極油田数」が表の右端の列である。この式は確率論に基づいているので、この列の数値は期待値であり、小数1位まで示している。上位2~3クラスでは発見が飽和に達していて、未発見油田が残されている可能

性は（ほぼ）ない。一方、より小さなクラスではまだ多くの未発見油田が残されている。「究極油田数」は小規模クラスに向けて増加しているが、クラス3が最大のピークで、それより小さいクラスでは逆に若干減少している。しかし Arps and Roberts(1958)は、これら小規模クラスは非商業規模であるため既発見油田数に漏れがあつて過小評価となっている可能性が高く、実際の究極油田規模分布は小規模側に単調に増加すると推定している。ただし彼らの推定する分布は、両対数グラフの直線、すなわちフラクタル（べき乗分布）に比べると小規模側への増加程度は小さく、グラフの左側では直線近似よりやや下に乖離している。

表 3-3 Denver - Julesburg 盆地の究極油田数の推定

（データ出典：Arps and Roberts, 1958）

堆積盆地面積(B)：5.7MM acres, 総試掘井数(W)：3,705, 探鉱効果： $\theta = 2$

クラス	埋蔵量(1000B)	平均面積(acres, A)	油田数(F_W)	究極油田数(F_0)
1	1 - 2	2.5	3	924.6
2	2 - 4	3.9	8	1581.9
3	4 - 8	6.1	14	1772.5
4	8 - 16	11.7	23	1523.7
5	16 - 32	19.4	26	1044.0
6	32 - 64	34.0	52	1202.7
7	64 - 128	54.7	36	524.5
8	128 - 256	97.3	45	378.7
9	256 - 512	178.2	38	183.8
10	512 - 1024	309.8	34	102.6
11	1024 - 2048	490.5	28	59.4
12	2048 - 4096	868.5	17	25.1
13	4096 - 8192	1306.0	10	12.2
14	8192 - 16384	2442.0	3	3.1
15 + 16	16384 - 65536	8108.0	1	1.0

この研究は、60年前のものとは思えないほど先進的で、その後これを超える研究も出ていないが、すべてのクラスに同じ「探鉱効果」 $\theta = 2$ を与えている点が問題であり、小さいクラスで究極油田数を過小評価していると考えられる。「探鉱効果」は次の理由により大きいクラスで高く、小さいクラスで低いはずである。①探鉱家はまず大物を狙い、小規模なもののはむしろ避ける（採算限界以下では「探鉱効果」は1以下）。②地震探査では面積や比高の大きなプロスペクトほど把握されやすく、小さいものは見逃しが多い。③採算限界（埋蔵

量約 3 万バレル) より小さい油田は仮に発見されていても「ドライ」(空井戸) または単に「油兆」として報告され、油田統計に含まれていない可能性が高い。したがって、究極油田数は小規模側で上表の数値より大きく、究極油田規模分布はフラクタル(べき乗分布)に近いはずである。井上(2004)は、べき乗分布の究極油田規模分布に対して「探鉱効果」を、①採算限界クラスで中立($\theta=1$)、②それより大規模油田では1クラス上がるごとに0.2向上、③採算限界以下では1クラス下がるごとに半減、として与えることにより現実の既発見油田規模分布がほぼ再現されることを示した。ただし、この「探鉱効果」の定量的根拠は示していない。

究極油田規模分布と探鉱効果という2つの観測できない要素が存在し、それらを同時かつ一意に推定することの困難さがこの問題を複雑にしている。

3.3.2 探鉱・発見過程のモデル化

上記の問題を解明するために、探鉱・発見過程をアーチェリーとのアナロジーを通してモデル化を試みる。

3.3.2.1. アーチェリーとのアナロジー

探鉱による油田発見は、地下に存在する油田の母集団(究極油田規模分布)に対するサンプリングとみなせ、これがランダムであれば標本(既発見油田)規模分布は母集団の規模分布に類似した形状になる。既発見油田規模分布が対数正規分布で近似できることを根拠に、母集団も対数正規分布と仮定する研究が多いが(例えば Kaufman et al., 1975, Lee, 2008)、探鉱には大物狙いという「バイアス」があるためランダムサンプリングとみなせず、母集団と標本が同形になる保証はない。

井上(2006c)は、試掘前の埋蔵量評価の誤差を考慮した「探鉱シミュレーション」により、母集団がフラクタル(べき乗分布)であると仮定して、高い精度で現実の発見履歴が再現できることを示した。その際、背斜・断層の規模や貯留岩の層厚などがフラクタルであることを母集団のフラクタル性の根拠としているが、データによる定量的検証は行っていない。そこで以下では、探鉱がランダムサンプリングであるか否かを検討し、油田の母集団分布を推定する方法を考察する。

「ランダムなダーツ投げ」（ダーツ投げも実際は中心など高得点を狙うが、ここではランダムサンプリングの典型とみなす）と異なり、アーチェリーでは選手は的の中心を狙う。このため、矢は的全体にランダムにではなく中心近くに多く刺さる。しかし、各種の「揺らぎ」が加わるため中心からのぶれが生じる。アーチェリー（ロンドン五輪女子個人戦、全 816 射：図 3-4 左）では各点の標的面積（母集団分布）が既知で低得点側へ線形で増加しているが（図の三角），的中数（標本）分布（図の丸）のピークは 9 点で、両者（母集団と標本）は全く異なる。これは、選手は的の中央を狙うため、逆算して求めた「面積当たりの的中数」（菱破線、10 点と同じ的面积の時の的中数）は高得点ほど高い。「面積当たりの的中数」を全射数（816）で割ったものが「面積当たりの中率」になる。

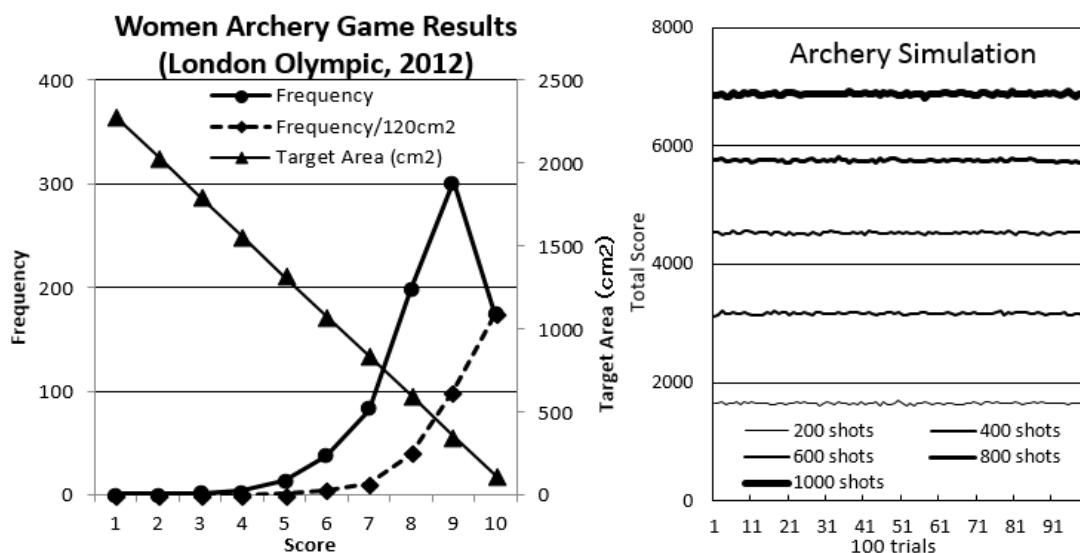


図 3-4 アーチェリーの成績（左）とモンテカルロ・シミュレーション結果（右）

石油探鉱は的から矢を抜かずにアーチェリーを行うことに相当する。競技者は真ん中の 10 点（大油田）を狙うが、種々の揺らぎにより得点は中心の周りにばらける（中小油田も発見される）。競技を続けると中央部分に残された的面积は少なくなり、低得点の的（中小油田）に当たる確率が高くなってくる。1 本の矢に要する標的的面积を一定（ここでは 3cm²）と仮定し、矢を抜かずに競技を続け、すでに矢があつて刺さらなかったときは再試技とすると仮定して（ゲームセンターなどにあるハニカム状に穴のあいた的を想像するとよい）シミュレーションを行った。1 本射るごとの各得点の的中確率は（面積当たりの中率）×（残存標的的面积）に比例する。図 3-4 右は、得点ごとの面積当たりの中率が一定で

競技中に変化しないと仮定した 1,000 射のモンテカルロ・シミュレーション（100 試行）の結果（1000 射）と途中経過（200 射ごと）だが、試行ごとの相違は小さい。これは、「大数の法則」と「補償効果」（悪い点が続いた後は良い点の的が多く残されている）による。図 3-5 はモンテカルロ・シミュレーションのうちの 10 試行例で、各試行例の上段は 200 射ごとの得点分布、下段はそれらを積み上げた累計得点分布の推移である。上段ではどれも類似しているとはいえ試行ごとの相違が認められるが、下段の累計得点分布では「大数の法則」と「補償効果」により、どの試行の結果もほぼ同じになっている。したがって、以下では確率的な揺らぎを考慮せず、期待値のみに基づいて議論する。

アーチェリーの点数推移のモンテカルロ・シミュレーション(10例)

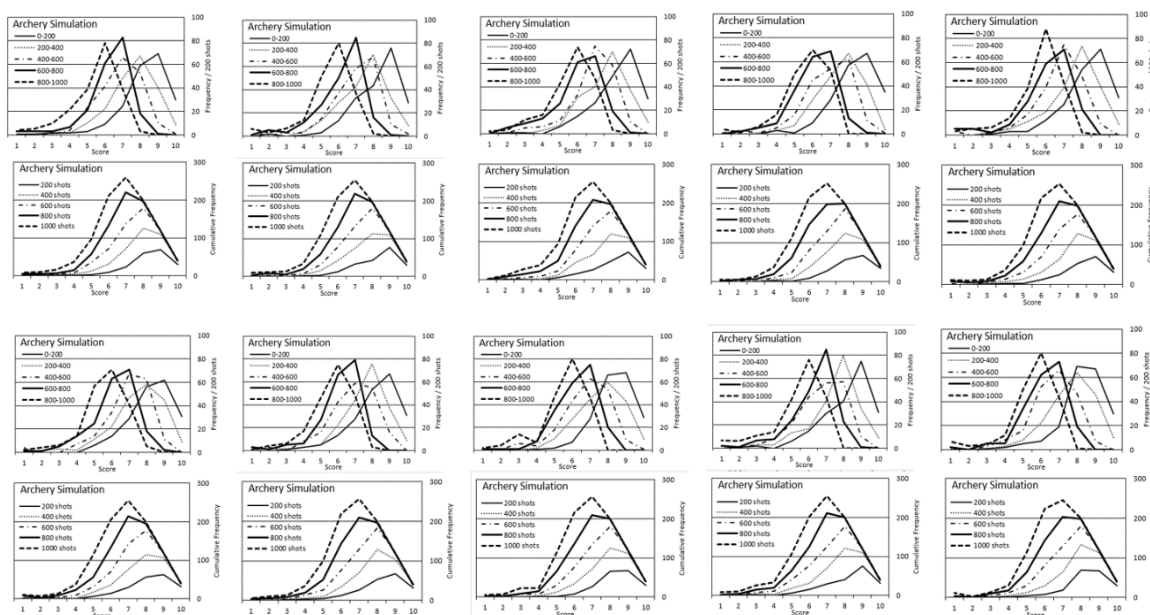


図 3-5 アーチェリーのシミュレーション結果（10 試行例：上；200 射毎，下；累計）

図 3-6 には、アーチェリーのシミュレーション結果（1 試行例）と石油探鉱の結果を対比して示した。下段は米国 48 州の石油探鉱結果で、3 期間（各期は同じ油田発見数）に分けて、油田数ではなく相対頻度（各期を 100 と表示）で表現している（データ出典：Root and Attanasi, 1993）。右側は、アーチェリーの 200 射ごとの得点分布、および、各期間の発見油田の規模分布であり、左側はそれらを積み上げた得点の累計頻度および累計油田数の推移を示している。両者の特徴はかなり一致している。右側では、各期の分布の

形状は類似しているが、時間の経過とともに、ピーク（最頻値）を含め左（低得点または小規模）側へシフトしていく。左側の累計分布の推移では、正規分布に似たパターンが上方に成長しているが、ピークが左（低得点または小規模）側へシフトしていき、右（高得点または大規模）側では徐々に飽和に達し、曲線間隔は詰まっている。下段の油田規模分布の形状は各期、累計共に正規分布に似るが、横軸の油田クラスが埋蔵量値の対数スケールに相当するので、埋蔵量に対しては対数正規分布に似ることになる。

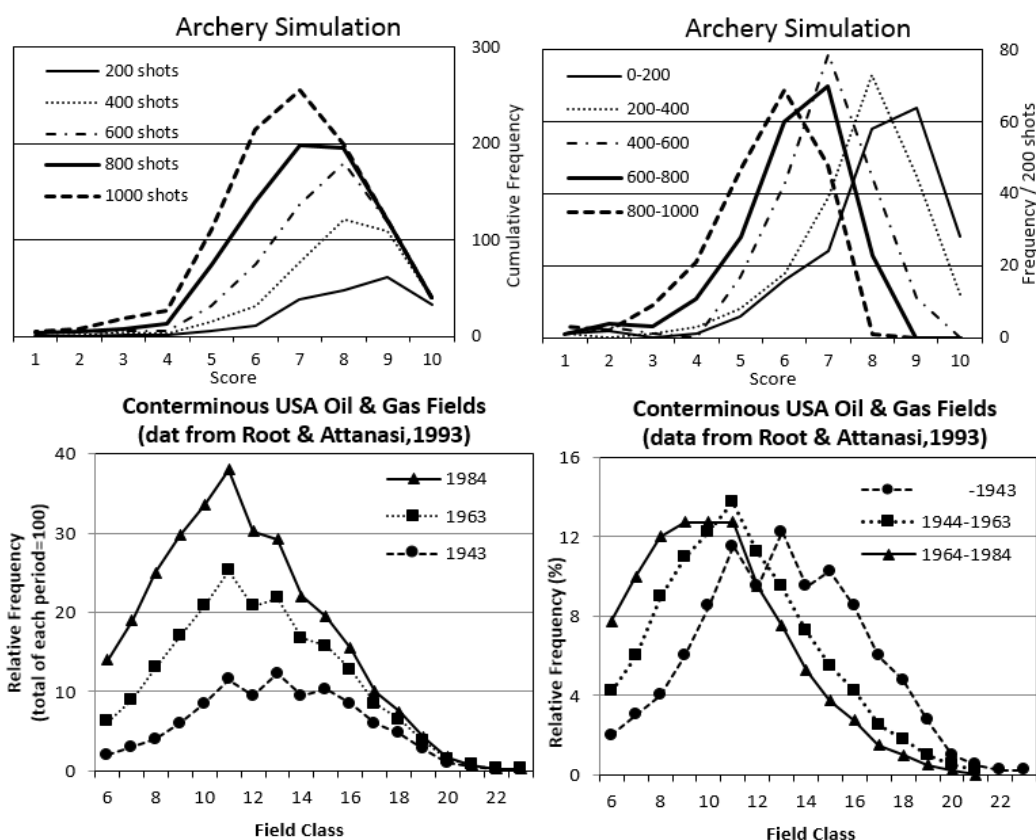


図 3-6 アーチェリー・シミュレーションと石油探鉱結果（米国 48 州）の比較

（石油探鉱結果のデータ出典：Root and Attanasi, 1993）

このようにアーチェリーのシミュレーションと石油探鉱結果が類似していることは、両者に同じメカニズムが作用していることを示唆しており、次のようにまとめられる。

- (1) 両者とも母集団に対するサンプリングと考えられる。

(2) このサンプリングはランダムではなく、より望ましいクラス（高得点または大規模油田）へのバイアス（努力）が働いている。

(3) したがって、母集団分布が標本分布に類似している必然性はなく、むしろ両者は異なったタイプである可能性が高い。

(3) 母集団の頻度は左（低得点または小規模）に向かって増加していくと考えられる。

アーチェリーでは母集団、すなわち各得点の的面積が既知であるが、油田規模の場合、母集団、すなわち究極油田規模分布が未知であり、同じく未知のバイアス（各クラスの探鉱効果）と合わせて推定する必要がある。この問題を以下で考察する。

3.3.2.2. 石油の探鉱過程の確率論的モデル化

石油探鉱では、母集団（標的面積）が既知のアーチェリーと異なり、母集団分布と各サイズの発見確率の両方を過去の発見実績から求める必要がある。1本試掘（または1油田発見）したときの結果がクラス i の油田の発見になる確率は、次式のようにそのクラスの残存油田数に比例する（連続系近似）。ただし、 $F_{i\infty}$ は母集団におけるクラス i の個数

(3.1.3における F_0 に相当)、 $F_i(w)$ は w 坑試掘（または発見）時点におけるクラス i の累計発見油田数（3.1.3における F_w に相当）、 p_i は残存1油田あたりの発見確率（下記のようにクラスごとに異なるが同一クラスでは時間を経ても一定と仮定する、この点は後で検討）。

$$\frac{dF_i(w)}{dw} = p_i(F_{i\infty} - F_i(w)) \quad (3-40)$$

各クラスの残存1油田あたりの発見確率 p_i は式(3-31)の $A\theta/B$ に相当するが、特に世界全体を対象とするとき、堆積盆地面積 B やそのクラスの平均油田面積 A を（もちろん探鉱効果 θ も）推定することは困難なので、これらをまとめてクラスごとの p_i として扱う。 p_i の中身、すなわち $A\theta/B$ のうち、堆積盆地面積 B は（油田発見による対象面積の僅かな減少を無視すれば）全クラス共通で一定であり、平均油田面積 A は油田クラスごとに異なる（埋蔵量と強い正の相関がある）が探鉱期間を通じては変化しない。探鉱効果 θ は、①そのサイズの油田の地震探査などによる把握のしやすさと、②そのサイズの油田に対する選好を反映しており、したがって油田サイズに依存する。①は技術進歩などにより若干向上する可能性があるが、②は変化しないと考えられ、ここでは発見確率 p_i は油田クラスごとに異なる値だが、時間を経ても変化しないものとして議論を進める（後で検証

するようにこの仮定はほぼ成立している)。ただし、時間の経過とともに、原油価格の上昇などにより、従来は採算限界以下で避けられていた小規模油田も積極的に試掘されるようになるため、採算限界付近の小規模油田では、発見確率 p_i は時間とともに変化（上昇）する可能性が高く、本手法はこれら限界規模油田では誤差が大きいと思われる。

発見確率 p_i の値は、以下に示すように計算で求めることができ、さらに、各クラスの究極油田数を求める際には途中で消去でき、使用する必要がない。なお、 w はもともとの議論では試掘井数であるが、ここでは $A\theta/B$ に替えて発見確率 p_i を使用するのので、 w は発見油田総数であってもよく、試掘井数の統計には漏れが多いことから、 w に発見油田総数を用いたほうが実用的である（詳細後述）。

式(3-40)を変形して、試掘数（または総発見数） $w = 0$ から $w=W$ まで（クラス i の発見油田数 $F_i(w)=F_{i0} = 0$ から $F_i(w)=F_{iW}$ まで）定積分する。

$$\int_0^W \frac{1}{F_{i\infty}-F_i(w)} \frac{dF_i(w)}{dw} dw = \int_0^{F_{iW}} \frac{1}{F_{i\infty}-F_i(w)} dF_i(w) = \int_0^W p_i dw \quad (3-41)$$

$$-[\log(F_{i\infty} - F_i(w))]_0^{F_{iW}} = [p_i w]_0^W \quad (3-42)$$

$$\log F_{i\infty} - \log(F_{i\infty} - F_{iW}) = p_i W \quad (3-43)$$

$$\log \frac{F_{i\infty}}{F_{i\infty}-F_{iW}} = p_i W \quad (3-44)$$

$$e^{p_i W} = \left(\frac{F_{i\infty}}{F_{i\infty}-F_{iW}} \right)^{\frac{1}{W}} \quad (3-45)$$

$$p_i = \frac{\log F_{i\infty} - \log(F_{i\infty}-F_{iW})}{W} \quad (3-46)$$

$$e^{-p_i W} = 1 - \frac{F_{iW}}{F_{i\infty}} \quad (3-47)$$

$$F_{iW} = F_{i\infty}(1 - e^{-p_i W}) \quad (3-48)$$

$$F_{i\infty} = \frac{F_{iW}}{1 - e^{-p_i W}} \quad (3-49)$$

この式だけでは p_i も未知数のため $F_{i\infty}$ は決定しないが、 p_i が時間を経ても一定なら、試掘数（または総発見数）が W_1 と W_2 の2時点の油田数（ F_{i1} と F_{i2} ）を用いて次式が得られる。

$$e^{p_i W_1} = \left(\frac{F_{i\infty}}{F_{i\infty}-F_{i1}} \right)^{\frac{1}{W_1}} = \left(\frac{F_{i\infty}}{F_{i\infty}-F_{i2}} \right)^{\frac{1}{W_2}} \quad (3-50)$$

この式は、 W_1 と W_2 を任意に選ぶと解析的に解くことは困難で、表計算ソフト（エクセルなど）のソルバーやゴールシークを使って数値的に解く必要があるが、 $W_2/W_1=2$ となるような時点を選んでデータを集計すれば次式のように表せる。

$$\left(\frac{F_{i\infty}}{F_{i\infty}-F_{i1}}\right)^{\frac{1}{W_1}} = \left(\frac{F_{i\infty}}{F_{i\infty}-F_{i2}}\right)^{\frac{1}{W_2}} = \left(\frac{F_{i\infty}}{F_{i\infty}-F_{i2}}\right)^{\frac{1}{2W_1}} \quad (3-51)$$

$$\left(\frac{F_{i\infty}}{F_{i\infty}-F_{i1}}\right)^2 = \frac{F_{i\infty}^2}{F_{i\infty}^2 - 2F_{i\infty}F_{i1} + F_{i1}^2} = \frac{F_{i\infty}}{F_{i\infty}-F_{i2}} \quad (3-52)$$

$$F_{i\infty}^2(F_{i\infty} - F_{i2}) = F_{i\infty}(F_{i\infty}^2 - 2F_{i\infty}F_{i1} + F_{i1}^2) \quad (3-53)$$

$$F_{i\infty}(F_{i\infty}^2 - F_{i\infty}F_{i2} - F_{i\infty}^2 + 2F_{i\infty}F_{i1} - F_{i1}^2) = 0 \quad (3-54)$$

$F_{i\infty} \neq 0$ なので、

$$F_{i\infty}(2F_{i1} - F_{i2}) - F_{i1}^2 = 0 \quad (3-55)$$

したがって $W_2/W_1=2$ の場合は、次のような簡単な式で表現できる。

$$F_{i\infty} = \frac{F_{i1}^2}{2F_{i1} - F_{i2}} \quad (3-56)$$

これにより、ある時点（例えば現在）の既発見油田規模分布と総試掘井数とその半分の時点の既発見油田分布がわかれば、発見確率 p_i が未知でも、各クラスの究極油田数 $F_{i\infty}$ 、すなわち究極油田規模分布が求められる。こうして $F_{i\infty}$ が求めれば、それを式(3-46)に代入して、各クラスの発見確率 p_i も求められる。この方法の優れた点は、究極油田規模分布の推定や過去の再現だけでなく、将来の任意の時点の油田規模分布予測が、その時点の総試掘井数（または総発見数） W を与えるだけで行えるということである。

3.3.2.3. 確率論モデルによる究極油田規模分布予測

上記の手法を世界の油田規模分布に適用して、究極油田規模分布の推定を試みる。ただし、世界全体の試掘井数は信頼できる統計がないため（試掘井の定義も国により異なる）、ここでは総既発見油田数（採算性のない極めて小規模なものも含める）を用いる。

発見数/試掘数：「成功率」（POS: Probability of Success）が一定であればどちらを使っても同等である。ただし、発見確率 p_i の持つ意味は異なってくる。 W に総試掘井数を使用しているときは、 p_i は新たに1坑試掘した時のクラス i の残存1油田あたりの発見確率で、したがって、これにクラス i の残存油田数を掛け合わせれば、その試掘に対するクラス i の油田の発見確率になる。これに対し、 W に総既発見油田数を使用すると、 p_i に

クラス i の残存油田数を掛け合わせたものは、新たに 1 油田（採算性のない極めて小規模なものも含む）発見した時、その油田がクラス i に属する確率を示す。 W に対応する油田に採算性のない極めて小規模なものも含めることが重要であるが、ここでは統計的に信頼できる下限のクラス 11 以上の総油田数を用いた（これより小さい発見は統計からの脱漏が多い）。図 3-7 に示すように統計上は、POS は徐々に上昇してきているが、試掘井数の統計は信頼性が低く、1990 年代末の POS の急上昇などは試掘数の把握漏れに起因する可能性がある。IHS 社（旧 Petroconsultants 社）の統計は最も信頼され、BP 統計などもこれに基づいているが、情報収集専門の Petroconsultants 社を IT 企業の IHS 社が 1996 年に買収して以降、公表情報のみに依存し、試掘など公表されにくいデータの劣化が懸念されている。

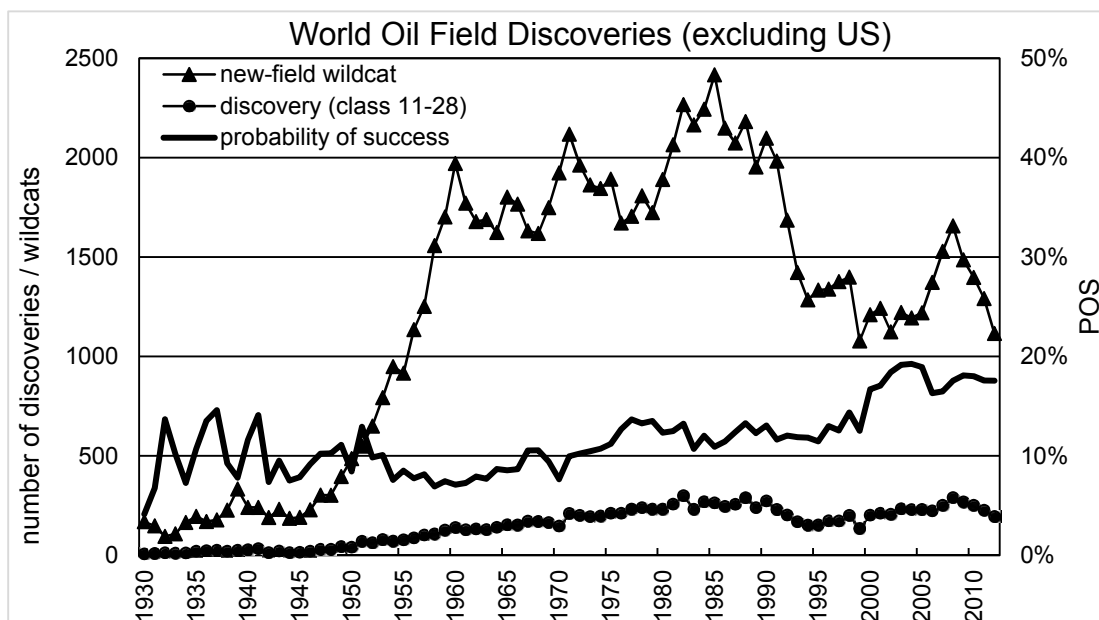


図 3-7 世界(米国を除く)の試掘数・発見数・成功率(POS)の推移(データ出典：IHS 社)

また、米国では、歴史・立地・法税制などの違いにより採算限界がクラス 6 付近にあり、油田数もそれ以外の世界全体より多く、ここでは示さないが、別々に解析する必要がある。以下はすべて米国を除いた議論である。このモデルを世界（米国を除く）の油田発見実績に適用し、2012 年末と総油田数がその半分の 1984 年、および 1/4 の 1970 年の 3 時点（2 本の式 (3-53)）について解析した。その結果を表 3-3 と図 3-8 に示す。

こうして推定した究極油田規模分布は、油田クラスに対して油田数の対数をプロットするとほぼ直線に乗り（図 3-8）、フラクタル（べき乗分布）であることを示している。したが

って、中小規模油田での実績のべき乗分布の直線からの乖離は、それらのクラスではまだかなりの未発見油田が地下に残されていることを示しており、それが探鉱ポテンシャルに他ならない。なお、発見が飽和に達した（油田数に変化がない）クラス 28～25 では究極油田数は既発見油田数と同じとなり、発見率 p_i は求まらない。3 時点のデータを比較しているので、1970-84 と 1984-2012 の 2 種類の究極油田規模分布が、式(3-56)を用いて求まる。この手法では各クラスの残存 1 油田あたりの発見確率 p_i は時間が経過しても一定であるという仮定に基づいている。もし実際には、この値が時間（探鉱の進行）と共に変化するのであれば、この過程に基づいた各クラスの究極油田数や発見確率が時期の異なる 2 種類の推定で異なるはずである。しかし、表 3-4 および図 3-8 では、2 種類の推定値の組はよく一致していて、 p_i は時間が経過してもほぼ一定であることを示している。

表 3-4 世界（米国を除く）の油田規模分布の実績と究極油田規模分布の推定

(データ出典：IHS 社)

クラス	11-28(W)	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
<u>実績</u> (F_{i1}, F_{i2})														
2012	12595	1308	1015	730	428	233	122	61	27	17	15	6	1	1
1984	6298	736	600	468	314	176	106	52	24	14	15	6	1	1
1970	3149	371	326	263	190	99	69	39	19	11	15	5	1	1
<u>究極油田数</u> ($F_{i\infty}$)														
1984-2012		3303	1946	1063	493	260	125	63	27	18	15	6	1	1
1970-1984		22940	2044	1193	547	446	149	59	26	15	15	6	1	1
<u>発見率</u> ($p_i \times 1,000,000$)														
1984-2012		40.0	58.5	92.1	161	179	300	279	330	247	-	-	-	-
1970-1984		5.2	55.2	79.1	136	79.8	198	349	424	413	-	-	-	-

ただし図 3-8 では、1970-84 年データに基づく推定ではクラス 16 が、1984-2012 年ではクラス 15 が直線から上方に外れている。現在、米国陸上以外では、概ねクラス 14 付近が採算限界だが（地域・国などにより異なるが）、探鉱が進行し残存大規模油田が減少すると、小規模油田も狙うようになる。このため後期には小規模油田の発見確率 (p_i) が上昇するため、規模別発見確率一定を仮定している本モデルでは、それらのクラスの p_i が過小評価、逆に究極油田数が過大評価になる。特にクラス 15 以下では、後期の既発見油田数が前期の

2倍を超え（残存油田数が減少したのに発見が増加），式（3-56）による $F_{i\infty}$ および p_i の解が計算上は負になる。しかし，時間の経過（探鉱の進行）と共にグラフの直線部分が左上に伸びて（過大評価が修正されて）きていて，3.1.3の定性的考察とも併せて，小規模部分も含めて究極油田規模分布はフラクタル（べき乗分布）であることを裏付けている。

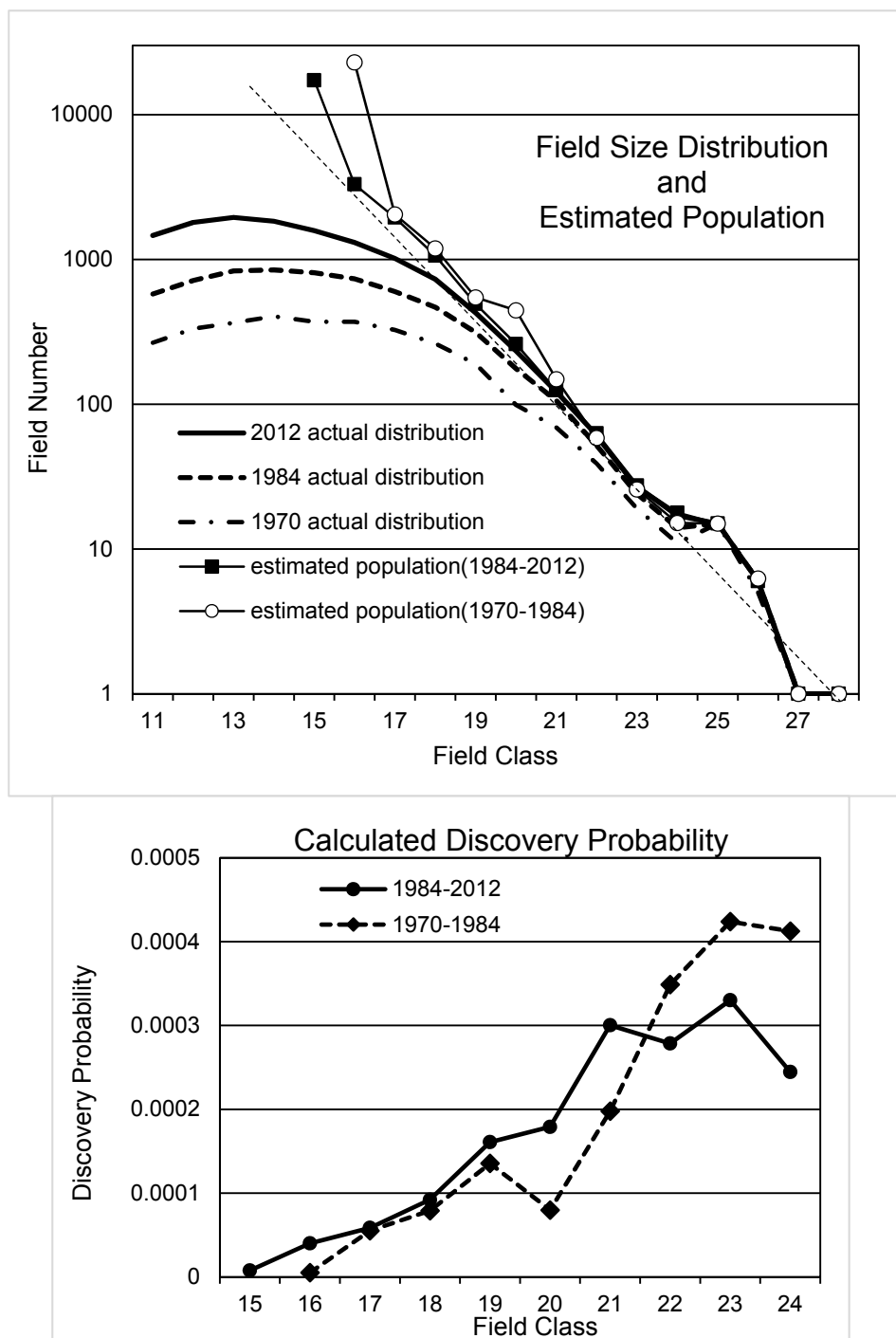


図 3-8 究極油田規模分布（上）と残存 1 油田あたり発見確率（下）の推定

なお、図 3-8 で実績の左側部分は放物線(parabola)に近い形状である。正規分布の確率密度関数は、確率変数を x , その平均を μ , 標準偏差を σ とすると、次式となる。

$$f(x) = e^{-\frac{(x-\mu)^2/2\sigma^2}{\sqrt{2\pi}\sigma}} \quad (3-57)$$

この確率密度(頻度)の対数は右辺の指数部分、すなわち x の二次関数(放物線)になる。横軸は埋蔵量の対数に相当するので、この小規模部分是对数正規分布で近似されることになる。これが、母集団が対数正規分布だという主張(Kaufmam et al., 1975, Lee, 200 ど)の根拠である。しかし、大規模部分は明らかに正規分布より頻度の高い「ファット・テール」であり、Laherrere(1996, 2000)は放物線とフラクタルの結合“parabolic fractal”と呼んでいるが、実はこの分布はフラクタルの母集団からのサンプリングで導けるのである。

なお、図 3-8 (上) で注意すべきは、このグラフでは縦軸は各クラスの油田数(の対数値)であって、図 3-3 のような順位 N (あるクラスより大規模な油田数)ではないということである。しかし、フラクタル(次元)は式(3-28)のように、順位 N で定義されているので、図 3-8 (上) のように、縦軸に油田数の対数値を取った時の直線もフラクタルであることを以下に示す。

埋蔵量は体積(三次元)なので、 $R \equiv ar^3$ と定義して(a は定数)式(3-28)に代入して書き換えると順位 N は次式になる。

$$N = C \left(\frac{R}{\alpha}\right)^{-\frac{D}{3}} = C \alpha^{\frac{D}{3}} R^{-\frac{D}{3}} \quad (3-58)$$

最大油田クラスの埋蔵量を R_0 とし、その順位を 1 とすると、次のようになる。

$$N = R_0^{\frac{D}{3}} R^{-\frac{D}{3}} = \left(\frac{R}{R_0}\right)^{-\frac{D}{3}} \quad (3-59)$$

次に、各クラスの油田数を n とし、図 3-8 (上) のようにその対数の油田クラスに対するプロットが直線となるときについて考え、これが(3-57)に対応するかを検証する。油田クラスを k (特定の値の時は K)、最大クラス(ここでクラス 28)を K_0 とし、次のようにクラスを再定義する。

$$k' \equiv K_0 - k \quad (3-60)$$

$$K' \equiv K_0 - K \quad (3-61)$$

クラス k' の油田数 $n_{k'}$ の対数の油田クラスに対するプロットが直線となる時、直線の傾

きを $-\beta$ とすると、次のように表現される。

$$\log n_{k'} = \beta k' \quad (3-62)$$

$$n_{k'} = e^{\beta k'} \quad (3-63)$$

クラス K' の順位 $N_{K'}$ (K' より大きな油田の数) と油田数 $n_{k'}$ の間の関係は次の通り。

$$N_{K'} = \sum_{k'=0}^{K'} n_{k'} \quad (3-64)$$

これを、連続系に変換し、式(3-63)を代入する。このとき各クラスは、上限および下限をクラス代表値(幾何平均)の両側に半クラスずつ離れた幅1クラスの区間とみなす。ただし、最大クラスについては、離散系ではそれより大きな油田は存在しないが、連続系ではこの区間も確率的に評価され、油田数は1未満とはいえ0ではないため、最大クラスがそれら全部を受け持つと考え、大規模側については無限大まで積算対象とする。すなわち、式(3-63)を $-\infty$ から $K'+(1/2)$ まで積分したものが、クラス K' の順位 $N_{K'}$ (K' より大きな油田の数) となる。

$$\begin{aligned} N_{K'} &= \int_{-\infty}^{K'+\frac{1}{2}} n_{k'} dk' = \int_{-\infty}^{K'+\frac{1}{2}} e^{\beta k'} dk' = \frac{1}{\beta} [e^{\beta k'}]_{-\infty}^{K'+\frac{1}{2}} = \frac{1}{\beta} \left(e^{\beta K'+\frac{\beta}{2}} - 0 \right) \\ &= \frac{e^{\frac{\beta}{2}}}{\beta} e^{\beta K'} \end{aligned} \quad (3-65)$$

式(3-61)を使ってクラス表記を戻す。

$$N_K = \frac{e^{\frac{\beta}{2}}}{\beta} e^{\beta(K_0-K)} = \frac{e^{\frac{\beta}{2}} e^{\beta K_0}}{\beta} (e^K)^{-\beta} \quad (3-66)$$

クラス K の上限と下限の幾何平均埋蔵量(単位は1000バレル)は次式で表現される。

$$R = \frac{2^K}{\sqrt{2}} \quad (3-67)$$

$$\log 2^K = K \log 2 = \log \left(2^{\frac{1}{2}} R \right) = \frac{1}{2} \log 2 + \log R \quad (3-68)$$

$$K = \frac{1}{2} + \frac{\log R}{\log 2} \quad (3-69)$$

この式を式(3-66)に代入する。

$$N = \frac{e^{\beta(\frac{1}{2}+K_0)}}{\beta} e^{-\beta(\frac{1}{2}+\frac{\log R}{\log 2})} = \frac{1}{\beta} e^{\beta K} (e^{\log R})^{-\frac{\beta}{\log 2}} = \frac{e^{\beta K_0}}{\beta} R^{-\frac{\beta}{\log 2}} \quad (3-70)$$

式(3-58)と式(3-69)を比較すると、次のように対応し、両者は本質的に同じである。

$$\frac{\beta}{\log 2} = \frac{D}{3} \quad (3-71)$$

$$\frac{e^{\beta K_0}}{\beta} = R_0^{\frac{D}{3}} \quad (3-72)$$

したがって、油田規模分布がフラクタルのときは、縦軸に各油田クラスの頻度（の対数）をとっても、順位（の対数）をとっても、ともにグラフで右下がりの直線（傾きは異なる）で近似される。ただし、正規分布のように最頻値を有する分布の場合は、直線から乖離するという点は同じだが、頻度（油田数）のグラフはピークを有し、それより左（小規模）では減少するが（図 3-8（上）の既発見油田分布）、順位は減少しないのでグラフは左へ単調に（ただし増加率は逡減しつつ）増加する（図 3-3）という点が異なる。

3.3.3. 資源量の推定

世界の究極油田規模分布がフラクタル（べき乗分布）で近似できることが明らかになった。これらは地下に存在しているので、そのすべてが発見されることは期待できないが、仮にそれらがすべて発見されたとして、その全油田数および資源量を検討する。ここで「賦存量」ではなく「資源量」と表現しているのは、各油田で技術的に回収可能な量を合計して、回収不可能で地下に残される量は含まないからである。たしかに「資源量」の定義は「未発見量を含み、将来の技術と経済環境で商業的に回収されると予想される量」であるが、とりあえず、「経済環境で商業的に」の部分は無視する、あるいは究極的には価格上昇などにより技術的に回収可能な量はすべて採取される（可能性がある）と考える。地下に存在する賦存量のうち技術的に回収できる比率を「回収率」といい、技術進歩などにより上昇してきているが、一般に、各油ガス田あたり石油は 10～60%（平均では 30～40%）、天然ガスは 60～90%（平均では 75%）程度である。

フラクタルを仮定した時の、各クラスの油田数と技術的に回収可能な資源量を表 3-5 に示す。図 3-3 および図 3-8 から、世界の究極油田分布のフラクタル次元（式(3-28)および(3-56)の D ）は 3.3（埋蔵量 vs. 順位の両対数グラフでの直線の傾き：-1.1）程度と推定される。しかしこの近似には誤差が伴うことから、表 3-5 では下限および上限として、 $D = 3.15$ （べき乗指数（両対数グラフの直線の傾き）：1.05）および $D = 3.45$ （べき乗指数：1.15）の両ケースを示した。現実の究極油田規模分布はこの両者の中間に位置するものと考えられる。

表 3-5 究極油田規模分布および資源量

クラス	中間埋蔵量 (1,000B)	べき乗指数:-1.05 (D=3.15)			べき乗指数:-1.15(D=3.45)		
		油田数	資源量(BB)	累計(BB)	油田数	資源量(BB)	累計(BB)
28	189,812,531	1	190	190	1	190	190
27	94,906,266	1.9	183	373	2.1	203	392
26	47,453,132	3.1	149	522	3.8	182	574
25	23,726,566	6.5	154	676	8.5	201	775
24	11,863,283	13.4	159	835	18.8	224	999
23	5,931,642	27.8	165	1,000	41.8	248	1,247
22	2,965,821	57.6	171	1,171	92.8	275	1,522
21	1,482,910	119	177	1,348	206	305	1,828
20	741,455	247	183	1,531	457	339	2,167
19	370,728	511	190	1,721	1,014	376	2,543
18	185,364	1,059	196	1,917	2,250	417	2,960
17	92,681	2,192	203	2,120	4,994	463	3,422
16	46,341	4,540	210	2,330	11,081	514	3,936
15	23,170	9,399	218	2,548	24,591	570	4,506
14	11,585	19,461	225	2,774	54,572	632	5,138
13	5,763	40,295	233	3,007	121,102	702	5,840
12	2,896	83,433	242	3,249	268,742	778	6,618
11	1,448	172,750	250	3,499	596,376	864	7,482
10	724	357,684	259	3,758	1,323,441	958	8,440
9	362	740,595	268	4,026	2,936,900	1,063	9,503
8	181	1,533,424	278	4,304	6,517,388	1,180	10,683
7	90.5	3,175,000	287	4,591	14,462,991	1,309	11,992
6	45.3	6,573,932	298	4,888	32,095,386	1,452	13,444
5	22.6	13,611,522	308	5,196	71,224,120	1,612	15,056
4	11.3	28,183,062	319	5,515	158,056,219	1,788	16,844
3	5.66	58,353,871	330	5,845	350,748,710	1,984	18,828
2	2.83	120,823,431	342	6,187	778,360,123	2,202	21,030
1	1.41	250,168,520	354	6,541	1,727,289,260	2,443	23,473

各クラスの「中間埋蔵量」は上限と下限の埋蔵量の間値（幾何平均）である。「油田数」は基本的には式(3-57)で求めた順位（そのクラスより大きな油田の数）に基づくが、前述した連続系と離散系の変換の際の（中間値と下限の）ズレを補正するために、ここでは、最大クラスの油田数および順位を1とし、それ以外のクラスの順位を次式で求め、各クラスの油田数を計算した(R は各クラスの「中間埋蔵量」)。

$$N = \sqrt{2} \times \left(\frac{R}{R_0}\right)^{-\frac{D}{3}} \quad (3-73)$$

「資源量」は「中間埋蔵量」×「油田数」であり、「累計」はそれらを最大クラスから順次積み上げて合算したものである（「BB」は10億バレル）。

ここで求めた究極油田規模分布の「油田数」を現実の各クラスの油田数（表3-4）と比較すると、現実は大規模油田（クラス28～23）で既に熟成に達している。特にクラス26とクラス25では、フラクタル次元の高い（ $D=3.45$ ）ケースでも、現実がモデルで計算した究極油田数をすでに上回っている（図3-3でもこれらのクラスは直線近似から上方に乖離している）。これは、究極油田規模分布がフラクタル（べき乗分布）であるというのは確率論的な話で、ここに示した「油田数」の数値は期待値に過ぎないことによる。現実の「この世界」はいわば1試技に過ぎず、常に期待値からの揺らぎが伴う。小規模クラスは油田数が多いので「大数の法則」により実現値は相対的に期待値に近づくが、油田数が少ない大規模油田ではこの揺らぎの影響が大きく、それが「この世界という試技」の実現値の「個性」となっている。

累計油田数は小規模側に急激に増加し、縦軸（左）が対数の図3-9でほぼ線形（すなわち指数関数）で増加している。フラクタル次元により異なるが、現在の採算限界付近のクラス14（下限：約800万バレル）までで約2万～5.5万油田、クラス11（下限：約100万バレル）までだと約17万～60万油田、クラス1（下限：1000バレル）までだと約2.5億～170億油田と急増する。ちなみに、2012年末現在のクラス11以上の米国を除く世界の既発見油田数は12,595油田であり、米国の採算限界（概ねクラス6、下限は約3万バレル）以上の油田数はこれより多く、2万油田を超える。

ただし、埋蔵量規模が指数の逆数で減少するため、大規模油田については両者を掛け合わせた各クラスの合計資源量は、ほぼ一定値である。これは、フラクタル次元が $D=3$ で、埋蔵量の次元（3）にほぼ等しいためである。一方、油田数の多い小規模側では、わずかとはいえ $D > 3$ なのでこれが効いて、油田数の増加が個々の埋蔵量の減少を上回り、特に高フラクタル次元（ $D = 3.45$ ）では資源量は線形を大きく上回って増加していく。この結果、資源量（採算性は無視）はクラス14までで約2.7兆～5兆バレル、クラス11までだと約3.5兆～7.5兆バレル（「修正Hubbert曲線」による究極資源量の6兆バレルに匹敵）、クラス1までだと約6.5兆～23.5兆バレルとなる。小規模油田まで考えると、フラクタル次元のわずかな違いが油田数および資源量の大きな相違に繋がることになる。

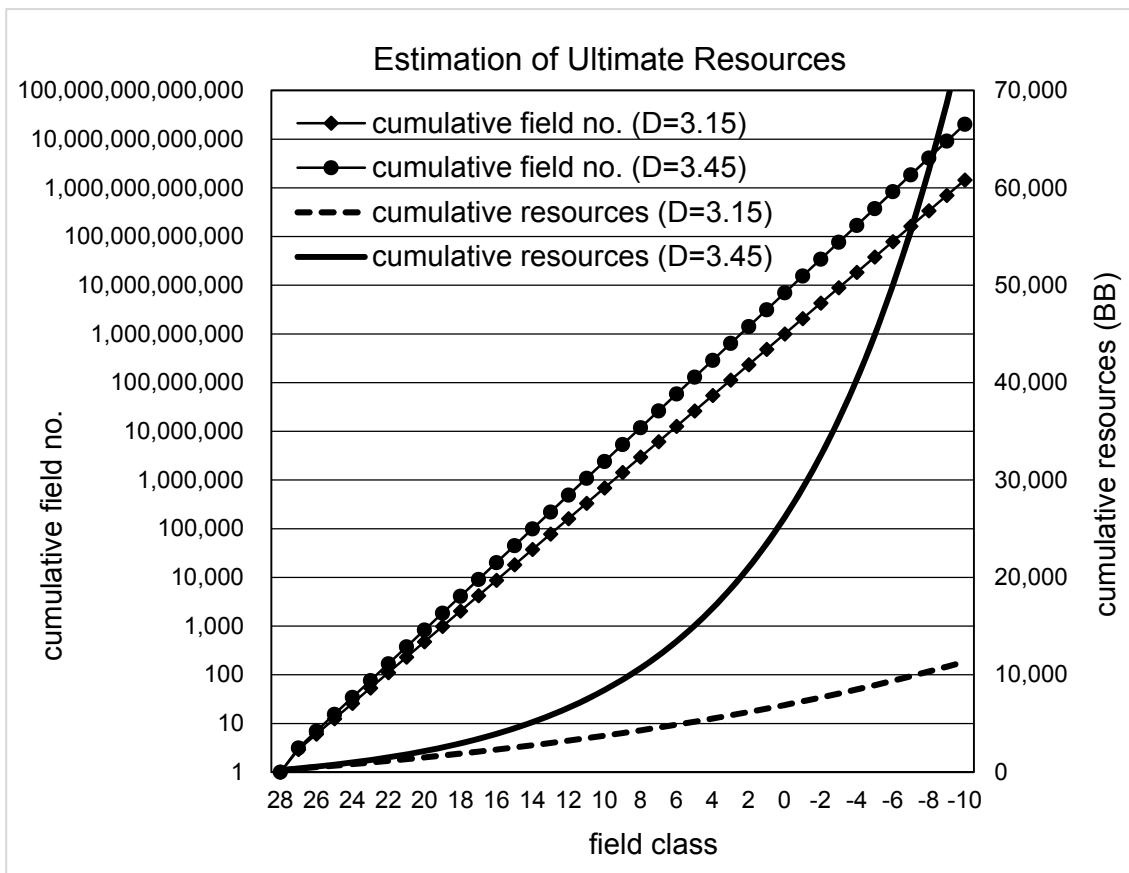


図 3-9 究極油田規模分布および究極資源量 (クラス 28 から積算した累計値)

図 3-9 は、同一のべき乗分布をさらに小さいクラス-10 (下限: 約 0.5 バレル \approx 80L, これは「油田」というより単なる「油兆」) まで延長しているが、累計油田数は約 1.5 兆~20 兆油田, 資源量 (採算性は無視) は約 11 兆~76 兆バレルとなり, フラクタル次元による相違はさらに大きい。この数値は, 前節で求めた賦存量 (146~216 兆バレル) に現存油田の回収率 (賦存量のうち技術的に回収できる比率) の平均 (30~35%) を適用した数値 (44~76 兆バレル) と調和的である (ただし, 実際には小規模油田の回収率はより低いと考えられる)。

ここでは在来型の油田データに基づいており, 統計データの信頼性などの制約から総試掘井数に替えてクラス 11 以上の総既発見油田数を W に用いているので, それより小規模の油田については外挿値に過ぎず, 推定の信頼性は低い。クラス 10 以下の油田の多くは「シェールオイル」に該当すると考えられるが, この問題は次節および第 6 章で検討す

る。

なお、この解析は 2012 年の油田データに基づき、その時点までの「埋蔵量成長」（回収率向上などによる埋蔵量評価の発見時点からの増加）はすでに加えてある。しかし、今後とも技術進歩などにより、さらに埋蔵量が「成長」すれば、それに応じて本資源量評価にも上方修正が必要になる。過去の埋蔵量成長のトレンドから将来の埋蔵量成長を予測する方法（例えば Attanasi and Root, 1994）もあるが、将来が過去の繰り返しになる保証はなく、個々の油田の発見時期に応じて煩雑な修正が必要になるため、これを行わない。

ちなみに、従来の資源量予測は、楽観的といわれ最も多く引用されている USGS(2000) が 3.0 兆バレル（累計生産量、埋蔵量、埋蔵有量成長および未発見量）で、その後の上方修正（Klett et al., 2005）などを含めても 3.3 兆バレルである。これに比べると本評価はかなり大きいですが、それを実現するには極めて多数の油田発見が必要で、積極的探鉱が要求され、必ずしも従来評価より楽観的とは言えない。

第4節 油田発見履歴の再現と未来予測

3.4.1. 油田発見シミュレーション

前節で導出したフラクタルの究極油田規模分布に対して、やはり前節でモデル化した探鉱過程を適用することにより各時点の油田規模分布を計算し、現実の油田発見履歴と比較することにより、モデルの有効性を検証するとともに、それを未来に延長適用して将来の油田発見を予測する。

究極油田規模分布としては、表 3-5 に示した 2 ケースの中間の $D=3.30$ (べき乗指数 (両対数グラフの直線の傾き) : -1.10) を採用する。最大油田 (順位 : 1) の埋蔵量 R_0 をクラス 28 の上限と下限の幾何平均の 189,812,531,000 バレルとし (実際の最大油田はサウジアラビアの Ghawar 油田で当初の埋蔵量 (累計生産量+残存埋蔵量) : 1450 億バレル), それ以下のクラスの (最後の油田の) 順位を, そのクラスの平均埋蔵量 (表 3-4 参照) R を用いて式(3-72)により計算し, それから各クラスの油田数を求める。こうして求めたものがモデル上のフラクタルの究極油田規模分布である。上記 Ghawar 油田の例でも明らかなように, 実際の油田の埋蔵量はモデルで用いる「中間埋蔵量」とは異なる。油田数の少ない大規模油田では個々の埋蔵量のばらつきの影響が大きい, ここではモデルの有効性の検証が主眼であり, あえて現実の値による補正は行わない。一方, 小規模油田では「大数の法則」が効いてくるので油田数のばらつきは無視できるが, 後で議論するように, 真の平均埋蔵量が「中間埋蔵量」より小さくなる問題がある。

この究極油田分布に対し, 任意の W (ここではクラス 11 以上の総既発見油田数) における各クラスの油田数を, 式(3-48)を用いて計算する。この際, 各クラスの発見確率 p_i は, 実績から求めた値 (表 3-4 および図 3-8 (下)) はクラスごとの変動が大きいため, 平滑化して (図 3-10 右上挿入図の破線) 用いる。任意の W に対するその時点の各クラスの油田数が計算可能であるが, 実績との比較のために, 総既発見油田数 $W = 3149, 6298$ および 12595 の時点 (それぞれ 1970 年, 1984 年および 2012 年に相当) について計算した。

その結果を対応する時点の実績と対比して図 3-10 に示した。計算結果の油田規模分布は, 実績とよく類似している。特に最近の 2012 年 (12595 油田) については, 両者はほぼ完全に (「個性」の揺らぎが顕著なクラス 25~27 を除くと) 一致している。Laherrere (1996, 2000) のいう “parabolic fractal” (放物線=対数正規分布とフラクタルの結合, 3.3.2.3 参照) は, 実はフラクタルの母集団から導けるのである。

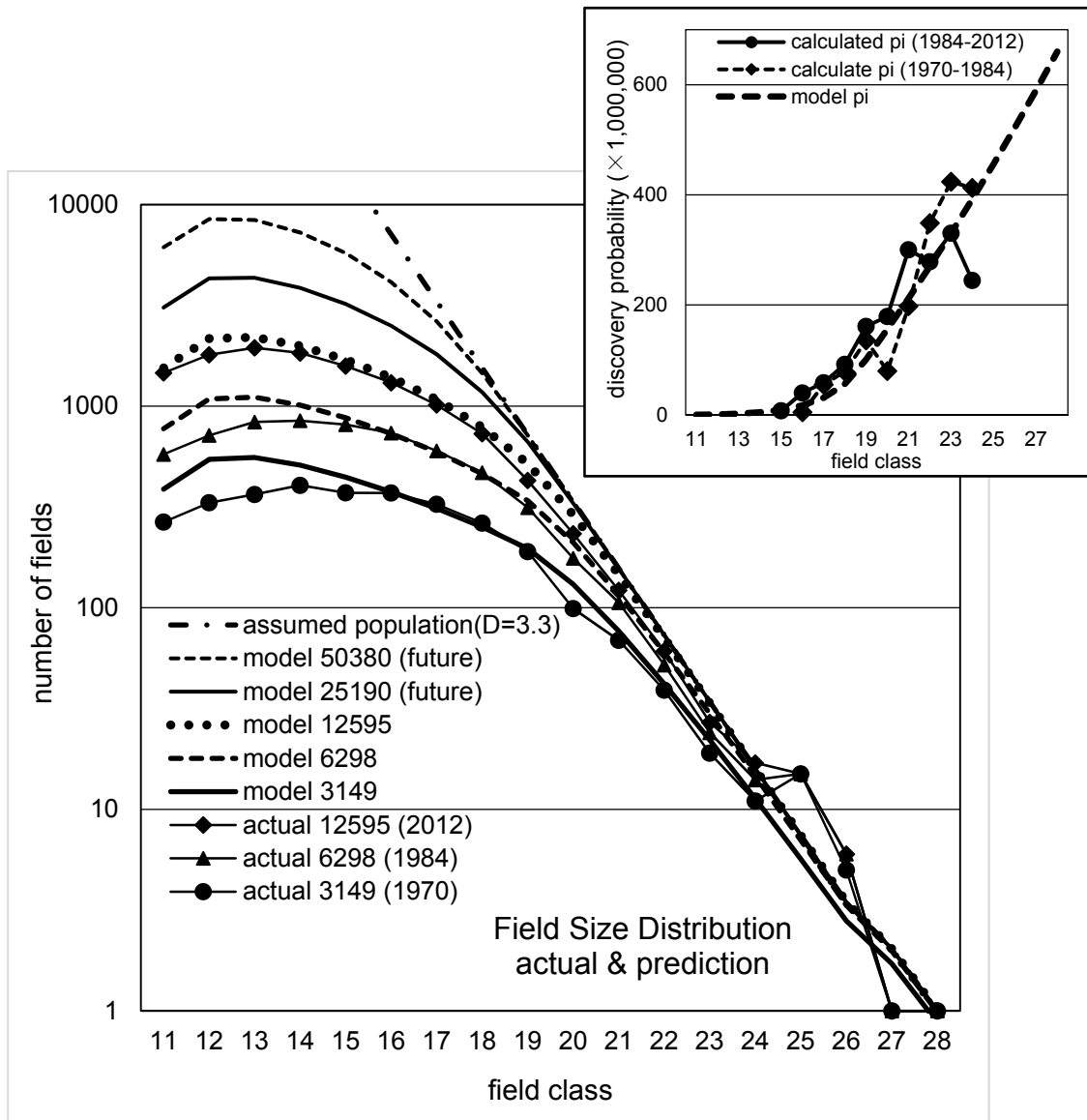


図 3-10 世界（米国を除く）の油田規模分布の変遷実績とシミュレーション結果

右上挿入図：モデルで使用した各クラスの発見確率 p_i （破線）

1970年（3149油田）および1984年（6298油田）では、小規模油田数の実績が計算結果より低い傾向があるが、これは使用した発見確率 p_i の値（図3-10の挿入図）に起因している。実績データを式(3-46)に当てはめて計算すると、実はこれらのクラスの p_i は負になってしまうのに対し、モデル（図3-10挿入図）ではほぼ0とはいえ正の値を使用しているためである。実績を式(3-46)で計算すると負になるのは、各クラスの発見確率が時間

を経ても一定であるという仮定が、これらの小規模クラスでは成立していないため、あるいはこの時期の小規模油田のデータが不完全であったためと思われる。井上(2006c)は、掘削前の油田規模推定には揺らぎが伴うことから、これを理論化してフラクタルの母集団に適用する「探鉱シミュレーター」により、現実に近い発見油田規模分布を再現している。ただし、孔隙（石油が胚胎している隙間）や分子サイズの制約があり、フラクタルは無窮小まで延長できるわけではない。極小規模油田はシェール資源に相当するが、第6章で検討するように、シェール資源のフラクタル次元は異なる可能性がある。

図3-10には将来の油田規模分布も示した。任意の総油田数（クラス11以上）の時点の油田規模分布がシミュレートできるが、ここでは2112年現在の12595油田の2倍の25190油田および4倍の50380油田時点の油田規模分布を示している。すなわち、図3-10では曲線はほぼ等間隔に見えるが、縦軸が対数表示のため、これらは上方に油田数が順次2倍になっている。

埋蔵量5億バレル以上を「巨大油田」というが、これはクラス20以上に相当する。これら巨大油田の発見はほぼ飽和に達し（残存しているは50～150油田程度）、今後の発見はほとんど見込めない。一方、これより小さい規模であれば、クラス14程度（現在の平均的採算限界）より大きいものも、今後かなりの油田数が発見されるとみられる。

究極油田規模分布がフラクタルである（式(3-73)）というシンプルな仮定と式(3-46)だけで、過去の複数時点の油田規模分布が高い精度で再現できるということは、このモデルとその前提が現実にも成立していることを示唆していると考えられる。

3.4.2. 埋蔵量増加プロセスの再現

各クラスの油田数の変遷の計算結果（図3-10）に、各クラスの埋蔵量中間値（上限と下限の幾何平均）を掛け合わせて求めた埋蔵量の計算値が増加するプロセスを示したのが図3-11である。総油田数（クラス11以上）が0の時点から現在の4倍の50380油田時点までを、クラスごとに大規模なもの（クラス28）から積み上げて累計して示している（細実線）。図3-11には、現在までに至る主要クラス分け（例えば、クラス20までが「巨大油田」）の実績も併せて示している。ここで「実績」というのは油田数だけでなく、埋蔵量についても個々の油田の実際の埋蔵量（IHS社データ）を合算している。

実績は総油田数（クラス11以上）12,595の時点（2012年）までで、その時点の実際の油田の合計埋蔵量は約2.2兆バレルである。同時点（同じ総油田数）の計算結果の合算

は、約 2.35 兆バレルで、実績より若干大きい。モデルの前提により総油田数 (W) は両者共通であるから、この差異はもっぱら使用している埋蔵量値 (個々の埋蔵量値の合算 vs. 「中間(幾何平均)」埋蔵量) に起因している。これは、油田規模分布がフラクタルであると、同一クラス内でも相対的に小規模な油田が多く、それらに引っ張られて現実の当該クラスの平均埋蔵量は小さくなるためである。この効果は油田数が多い小規模クラスで特に顕著であり、「中間埋蔵量」(上限と下限の幾何平均) を使用した計算結果は過大評価となる。逆にクラス 23 までの合算では現実がわずかに大きい。これはクラス 25 の油田数がモデルの計算結果よりかなり多いため、「この世界という試技」の「個性」の影響である。

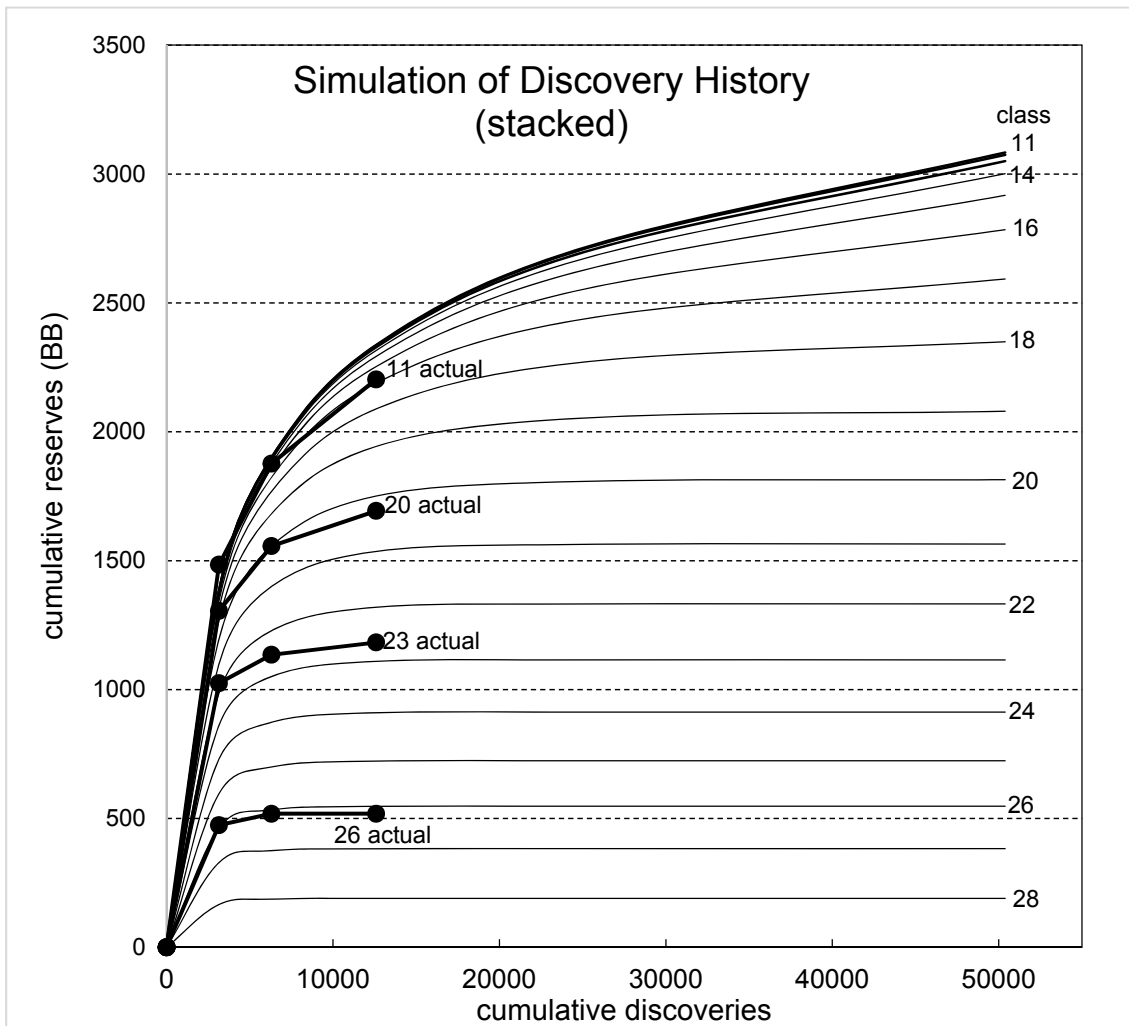


図 3-11 世界（米国を除く）の埋蔵量増加過程の変遷実績とシミュレーション結果

こうした小異は認められるが、シミュレーション結果は、全体でも、クラスごとでも、各時点でも、トレンドとしても、実績と非常に良く合致している。①究極油田規模分布がフラクタル (式(3-73))、②残存油田あたり発見確率は実績データを平滑化し外挿 (図 3-10 挿入図)、③発見油田数を「アーチェリーモデル」(式(3-48))により計算、④各クラスの間 (幾何平均) 埋蔵量を掛け合わせて合算、という極めてシンプルなモデルとプロセスでこれほどよい合致が得られるということは、本モデルが現実をよく反映している証だと考える。

図 3-11 からは、今後、油田数が現在の倍になれば 0.4~0.5 兆バレル、さらに倍 (現在の 4 倍) になればさらに 0.3~0.4 兆バレルが追加され、累計 3 兆バレルを超えることが読み取れる。この数値は決して小さくなく、楽観的といわれる USGS(2000) (および Klett et al. (2005)) の評価と整合的であるが、油田発見数あたりの埋蔵量追加は、過去 (発見開始~現在) の実績 (約 1.8 億バレル/発見) に比べて、油田数が「現在→2 倍」で約 0.3~0.4 億バレル/発見 (過去の 1.8 億バレルを 100%とすると、15~20%)、「2 倍→4 倍」では約 0.1~0.2 億バレル/発見 (5~10%) と極めて低くなる。つまり、この埋蔵量の追加は可能ではあるが、そのためには膨大な数の発見 (すなわちその数倍の試掘) が必要になる。

油田規模については、現在全埋蔵量の 3/4 以上を占めるクラス 20 以上の巨大油田 (ただし油田数は 4%未満) の発見はほぼ飽和に達していて今後の追加はほとんど望めず、その埋蔵量比率も油田数 4 倍時点では 60%以下に低下する。一方で、現時点では採算性のないクラス 13 以下の油田の発見もほとんど追加されず (図 3-11 でクラス 11 が太線に見えるのは複数の線が合わさっているため)、追加される油田は小規模とはいえ、ほとんどが採算限界よりは上である。ただし、このモデルでは油田総数をクラス 11 以上に限定し、極小規模油田での発見確率の向上を考慮していないので、採算限界の低下によりこれらのクラスの発見はもっと増える可能性がある。しかし、たとえそうであっても、これらのクラスの個々の埋蔵量は微小で、これら極小クラスに実質的な追加埋蔵量を期待するには天文学的な数の発見 (すなわち試掘) が必要になる (図 3-9 参照)。

3.4.3. 本モデルの限界と経済依存性

本モデルとその前提は、シンプルではあるが現実を反映していて、科学的・定量的に導出された結果は現状や歴史を高い精度で再現した。したがって、本モデルの信頼性は高く、未来予測ツールとしても有効であると考えられる。しかし、本モデルまたはその適用には次のような問題点や限界がある (一部はすでに指摘した点の重複)。

- (1) 本章では米国を除く世界を対象としている。これは、米国では立地（市場、諸施設、パイプラインなど）と法税制が他国と全く異なるためである。例えば後者については、米国では地主に対して僅かの地代と生産物の $1/8 \sim 1/4$ のロイヤルティーを払うだけだが、他国では石油会社の取り分は極めて低い。このため現在の採算限界油田規模は、世界（米国以外）の平均はクラス 14 付近だが、米国陸上ではクラス 6 付近と約 250 倍の差があり、油田数もそれ以外の全世界よりも多い。したがって米国については別途計算する必要がある（ただし、小規模なので資源量への影響は小さく、データの制約もあり、本論文では検討しない）。
- (2) 本来は試掘坑井数を W に用いるべきところを、データの完全性や信頼性の問題から、発見油田数で代用している。またこの発見油田数にも、できるだけ小規模な油田まで含めるべきだが、やはりデータの制約によりクラス 11 以上としている。現在の採算限界よりは十分小さく当面の解析には支障がないが、将来米国並みに経済限界が下がるケースについては信頼できる解析が行えない。
- (3) 埋蔵量の集計は、クラスごとの「中間埋蔵量」に各クラスの油田数を掛け合わせて合算している。この「中間埋蔵量」には当該クラスの上限と下限の埋蔵量の幾何平均を使用している。クラスは埋蔵量値の対数スケールに相当するので、幾何平均は算術平均より望ましいが、母集団がフラクタルだと同一クラス内であっても小規模油田数が多く、実際の平均はより下限に近くなる。この問題は母集団が特定できれば数学的に補正できるが、採算限界以上ではこの影響が小さいので、本論文では補正は行っていない。
- (4) フラクタルは理論的には無限大から無限小まで延長できるが、現実には大は堆積盆地など、小は孔隙や分子サイズなどの制約があり、有限区間に限られる。大規模部分については、頻度（油田数）が 1 より低い部分について何らかの補正が必要である（本章でも資源量算出の際には行っている）が、小規模部分の当面の対象はこの制約を受けるほど小さくない。ただし、シェール資源などの「小規模油田」ではフラクタル次元が異なる可能性があり、この問題は第 6 章で議論する。
- (5) 究極油田規模分布（母集団）がフラクタル（べき乗分布）というのは近似であって、正確にフラクタルというわけではない。いわば、多くの母集団を持つ「祖母（母の母）集団」から母集団を抽出したときその「期待集団」（母集団サンプルの平均）がフラクタルになり、現実の母集団はそのうちの 1 サンプル（「この世界という試技」）

であり、揺らぎ（「個性」）が伴う。この影響は油田数が少なく個々のサイズが大きい大規模油田で顕著であり、現実にはクラス 25 の油田数が多いという「個性」の影響が大きい。ただし、これらの大規模油田はほとんど発見済みで、今後の小規模油田の発見では「大数の法則」が働くので追加埋蔵量の将来予測ではこの問題の影響は小さい。

(6) 究極油田規模分布（母集団）からの油田の発見（サンプリング）も、やはり確率過程であるが、本モデルで導出される結果は期待値、すなわち多数の試技を行った時の平均である。しかし、現実の油田規模分布は 1 試技であり、期待値とは異なる。井上(2006) はモンテカルロ・シミュレーションを応用した「探鉱シミュレーター」でこの問題に対処している。ただし、「補償効果」（同じクラス内で相対的に大きな油田が先に発見されれば、残存油田では小さなものの比率が高まる）があり、油田の発見が飽和に向かうと収束し、一方、小規模油田では「大数の法則」が効くので、将来予測ではこの問題の影響は小さい。

(7) 本モデルでは、各クラスの残存油田あたり発見確率 p_i は時間（探鉱）が進行しても変化しないことを前提にしている。過去のデータでの検証では、この前提は採算限界以上では成立しているが（図 3-8 下）、採算限界以下では発見確率 p_i はが向上してきている証拠がある。したがって本章の結論は、採算規模以下の油田数については過小評価の可能性が高いが、それらは個々の埋蔵量が小さいので、資源量に対する影響は極めて小さい。なお、井上(2006c) は発見確率 p_i に代えて油田規模推定に伴う確率的揺らぎを導入した「探鉱シミュレーター」により現実に近い発見油田規模分布を再現しているが、その際には現実油田規模分布とのフィッティングにより確率的揺らぎを求める必要がある。

総じて、本モデルは理論もデータも既発見の「在来型」油田に依存しているので、小規模油田の将来予測については信頼性が低い。これらは個々の埋蔵量が微小なので従来の探鉱・開発方法では資源量の追加は小さいが、総量としてのポテンシャルは莫大なので、技術革新により利用できるようになればその影響は大きい。現在シェール資源の開発に用いられている“multilateral”（複数坑に枝分かれした水平坑）や“fracturing”（「水圧破碎」、圧力流体で地層に人工的な亀裂を作る技法）などは、いわばこれらの極小規模な「油田」を多数連結して実質的に油田クラスをランクアップし、商業的に開発しようというものである（これがフラクタル次元の異なる理由かもしれない、詳細は第 6 章で議論す

る)。

シェール資源が米国で開発されているのも、もともと市場や立地などにより採算限界が低いためであり、世界の他地域でもシェールオイルを含む極小規模油田が商業生産可能になるか否かは、更なる技術革新が鍵となるが、必要は発明の母であり、結局は需要および価格に依存している。また、油田が小規模になればなるほど多数の油田（およびその数倍の試掘）が必要になり、それだけの探鉱量を支えるだけの需要および価格の存否がここでも重要である。極論すれば、資源量（将来の埋蔵量の増加）は需要および価格、すなわち経済が決めているともいえる。そこで第4章で原油価格の決定機構やその探鉱活動への影響を検討し、第5章では経済と石油生産の相互のフィードバックをモデル化する。

第5節 第3章のまとめ

エネルギー資源、わけても石油の質と量に関する従来の研究は、地質学的・地球化学的観点からマイクロレベルの分析を積み上げて行われてきた。これらの研究は、個々の鉱床や地域の特性を解明することには成功したが、往々にして「木を見て森を見ない」弊害があり、度々「想定外」が生じて、例えば資源量の推定は常に上方修正を余儀なくされてきた。そこで本章では地質学的な知見・データ・理論などは原則として用いず、「マクロ経済学」に倣い、全世界の油田データの集計値に対して統計学・確率論などを適用して定量的に分析した。

こうした観点から石油の資源量や規模分布を分析した先行研究は、Miller (1992) (賦存量) および Arps and Roberts(1958)の古典的研究 (油田規模分布) に限られる。本章ではこれらの先行研究を発展させ、独自のモデルや手法を開発して適用した。その結果、従来とはかなり異なる結論が得られた。その要点を以下にまとめる。

- (1) 枯渇性資源の量は、累計生産量・埋蔵量・資源量・賦存量に分類される。このうち将来の経済予測に最も重要なのは資源量で、将来の技術と経済環境の下で最終的に生産・消費されると予想される量である。
- (2) 石油の賦存量、すなわち物理的に存在する量は、全地球を対象にした生成・破壊・散逸モデルにより、146兆～216兆バレルと推定されるが、このうち技術的・商業的に回収できる量は一部に過ぎない。この賦存量は、もし全量が回収可能と仮定すれば (実際の回収率は10～60%)、現在の生産 (消費) 量の約7,000年分に相当するが、使用量が年2.5%で成長すれば約200年、年5%成長ならば約120年で完全に枯渇する。したがって、枯渇性資源に依存した経済成長は長期的には持続不可能である。現在も石油は生成され続けているが、その量は使用量の約2万分の1で、枯渇問題を論じる際には無視できる。
- (3) 石油の資源量は今後の発見量に大きく依存し、それを評価するには地下に元々存在し、まだ発見されていない油田も含む「究極油田規模分布」(母集団) が重要である。従来は母集団を対数正規分布とする説が有力であったが、アーチェリーを模したモデルで解析した結果、フラクタル (べき乗分布) で近似できることが判明した。これに従うと、世界 (米国を除く) の「究極資源量」(技術的に回収可能な総量、過去の累計生産量を含む) は現在の採算限界以上のサイズの油田に限れば3～5兆バレル、現在は採算限界以下のシェールオイルなども総て含めれば数十兆バレル (賦存

量の 20~40%) と評価される。前者の数値は、最も楽観的な先行研究と同等またはそれより大きく、後者はさらに一桁大きい。

- (4) しかし、この資源量は試掘により発見され、埋蔵量に格上げされて初めて生産できる。発見される油田サイズの探鉱の進行に伴う変遷をシミュレートした。その結果、過去の油田発見履歴が精度よく再現されたので、同じモデルで将来予測も行った。今後、油田数が現在の倍になると埋蔵量は 0.4~0.5 兆バレル追加され、さらにその倍（現在の 4 倍）になるとさらに 0.3~0.4 兆バレルが追加され、その時点で資源量は 3 兆バレルを超える。この追加量は、現在までの累計生産量と埋蔵量の合計の約 2.2 兆バレルに比べると小さいが、従来 of 諸研究に比べると十分大きな追加量である。しかし、発見される油田規模がどんどん小さくなるので、これを達成するためには極めて多数の発見、すなわちその数倍の試掘が必要となる。
- (5) この予測を行ったモデルは、主として在来型油田の実績に基づいており、それを超える将来の資源量の追加は、シェール資源を含む極小規模の油田の開発と多数の試掘に依存している。これには更なる技術革新と豊富な探鉱量が必要であり、それらを支えるだけの需要と価格の存否に依存している。極論すれば、資源量（将来の埋蔵量の増加）は経済が決めており、この問題は第 4 章および第 5 章で議論し、シェール資源については第 6 章で検討する。

第4章 経済とエネルギーの相互作用

第1章でエネルギー消費は、経済活動により増減するが、逆に経済を助長・規制する面もあり、両者は一体となって成長した来たことを概観した。第2章では、企業や産油国の利潤最大化の観点から検討し、エネルギーの代表である石油の生産量（＝消費量）は、その時点の埋蔵量に規定されることが分かった。第3章では、石油の賦存量・資源量・埋蔵量につき検討し、石油埋蔵量の追加は経済、わけても原油価格に依存していることが判明した。そこで本章では、資源と経済のフィードバック、すなわち原油価格および生産量が埋蔵量の制約下でどのように決定されるかと、それがどのように探鉱量（ひいては、発見量、埋蔵量、生産能力）に影響するのかを検討する。

第1節 原油価格の決定メカニズム

4.1.1. 原油価格決定論のレビュー

従来の原油価格決定論は、①需給均衡（「ファンダメンタルズ」）、②地政学的要因、③投機的要因、の3種類（またはその組み合わせ）に大別される。

需給均衡論は一般には、供給に石油生産量、需要に石油消費量を使い、その両者の差が不均衡を表すと考える。この両者の差は在庫の積み上げ（負の時は減少）に他ならない。すなわち、在庫が積みあがれば原油価格は下落し、在庫が品薄になれば原油価格が上昇するというのが、従来の「ファンダメンタル理論」である。確かに一般の消費財においては製造企業内の在庫の増減が需給の不均衡を表し、在庫の過不足を解消すべく量・価格の調整がなされる。しかし石油（原油）の在庫は、消費側（原油価格決定点より下流）で将来の需要増や価格高騰などを見越して積み上げられる側面もあり、むしろ需要の一部に相当し、需給の不均衡を示すものではない。ちょうど石油危機の時、品薄懸念からトイレットペーパーが買い占められ、消費者における「在庫」が膨張したように、石油在庫の積み上げはむしろ需給逼迫予想の結果であり、供給超過を示すわけではない。

図4-1は、EIA(2017)のデータに基づき OECD の石油在庫の増減と WTI の先物の価格差（期先物－期近物）をプロットしたグラフで、両者は極めてよい相関を示し、しかも後者（先物価格）は前者に若干先行している。つまり、従来の「ファンダメンタル理論」が主張するような、在庫が多いと価格が下がり、少ないと価格が上がるという関係とは方

向も順序も全く逆で、将来価格が上昇すると予想されると在庫が積みあがり、下落すると予想されると在庫が減少するという関係にある。すなわち、将来の需給逼迫を見越して期先物の価格が上昇し、それに応じて在庫が積みあがっている。

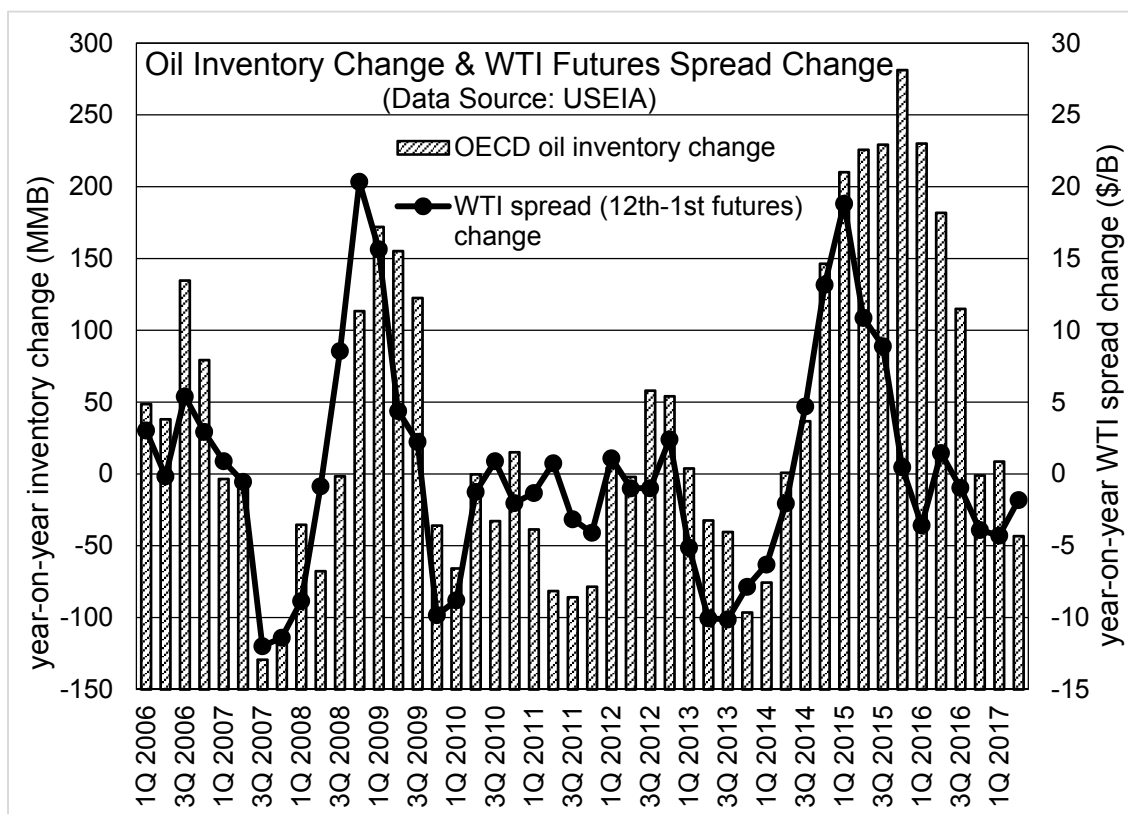


図 4-1 OECD の石油在庫の変化と WTI 先物の価格差(12 限月-1 限月)の変化

データ出典：EIA(2017)

石油（原油）の場合、在庫は価格決定よりも下流（すなわち需要）側で行われており、供給側に位置する一般消費財の在庫とは全く異なる。石油の場合、製造企業における在庫に相当するものは、地下に存在する埋蔵量およびそれに起因する生産能力である。したがって、「真のファンダメンタル理論」は石油生産能力と需要（在庫の積み上げを含む）の間の均衡を扱わなければならない。

原油価格の変動は中東諸国などの地政学的要因によるという説がある。確かに、過去の第一次および第二次石油危機は、時期的には、それぞれ第四次中東戦争とイラン革命に一致している。しかし 20 世紀以降、世界、特に中東では日常的に地政学的事変が起こっているが、そのほとんどのケースは価格高騰には繋がっておらず（図 4-2）、両者を結び付ける解釈は恣意的といえる。Barsky and Kilian(2004)も米国のマクロ経済データを検証し、

地政学的事変は原油価格高騰の主原因とはならず、従来は政変などの外生的要因により説明されていた原油価格の上昇はむしろマクロ経済変数に起因している可能性が高いと結論している。

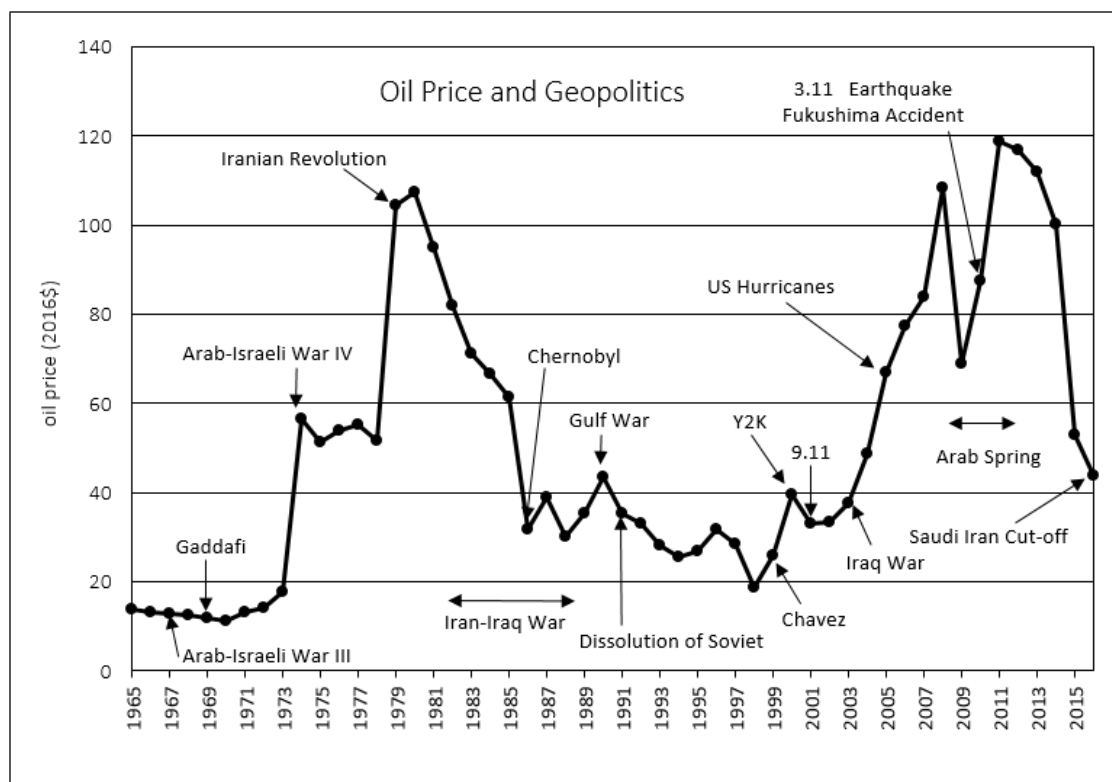


図 4-2 原油価格 (Brent) と地政学的事変 (原油価格データ出典 : BP, 2017)

需給ファンダメンタルズや地政学的事変では原油価格変動は説明しきれないとして (ただし、そのときの「需給ファンダメンタルズ」は実は在庫の増減を見ている), その原因を投機的要因に求める説も根強い (例えば, 小山・柳澤, 2011)。図 4-3 は, CME の原油先物価格 (左軸, \$/bbl) と原油先物ネットポジション (右軸, 単位 : 枚, 正 : 買い越し, 負 : 売り越し) を示している (吉田, 2015)。確かに, 投機は価格変動を増幅している可能性はあり, 短周期の価格変動は投机ポジションやその規模と連動しているようにも見えるが, 価格変動と投機のどちらが原因でどちらが結果であるかは判別できない。さらに, より長期的かつ大規模な価格変動 (例えば 2008 年央にかけての価格上昇とその後の急落) では両者の関連性は薄い。図 4-1 の解釈のように, むしろ将来の需給逼迫を予想して先物が買い込まれていると見るべきであろう。

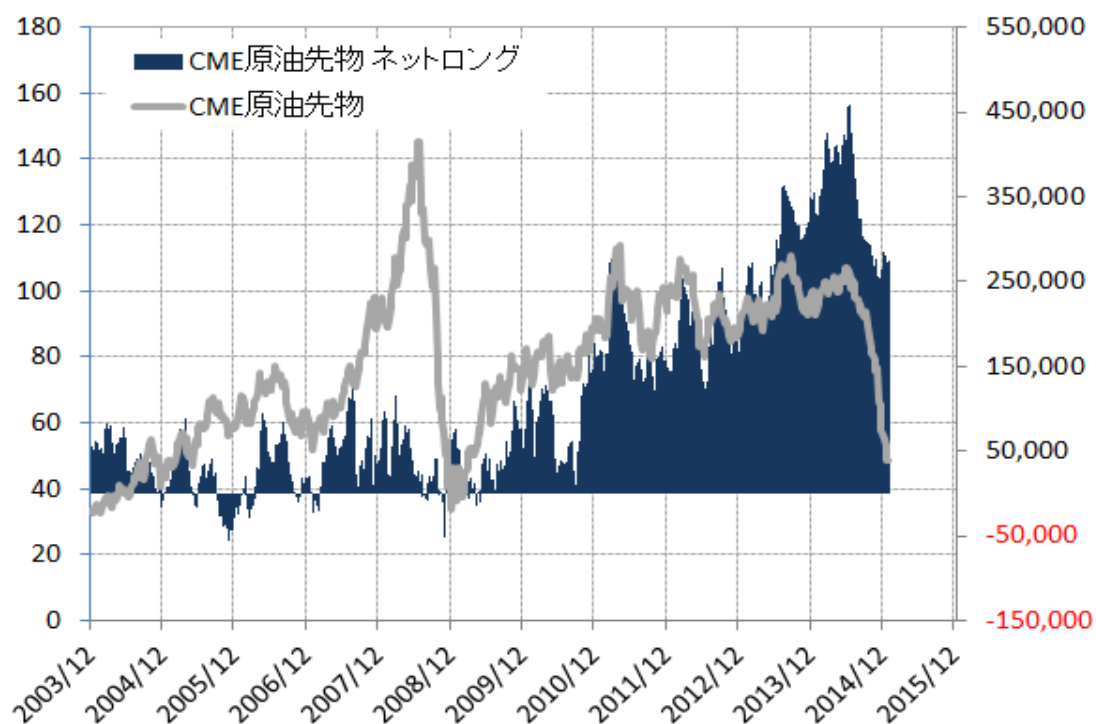


図 4-3 CME 原油先物 ネットポジションと価格

出典：楽天証券ウェブサイト(吉田, 2015)：CFTC, Bloomberg データより作成

こうして、冒頭に掲げた 3 説はすべて否定されたわけだが、需給均衡説（ファンダメンタル理論）は在庫の増減が価格を決定するという説が否定されただけで、「真の需給均衡説」ともいべき石油生産能力と需要の均衡についてはこれまで検討されてこなかった。

これは、これまで石油の生産能力は、過去の最大生産量または産油国の公表値に頼らざるを得ず、例えば後者は OPEC の生産枠が（公称の）産油能力に応じて決められていたこともあり、信頼できる情報が得られなかったことによる。しかし、第 2 章第 3 節で行ったサウジアラビアのスイング・プロデューサー放棄時の解析などにより、原油価格は需給均衡で決定している可能性が高いことが判明した。さらに、第 2 章第 2 節では、地下の産出エネルギーに基づく油田の埋蔵量規模に応じた生産能力について考察した。それらの結果に基づき、過去の埋蔵量発見履歴から生産能力の推移を推定し、実際の生産実績と比較して、以下で「真の需給均衡説」の可能性を探ってみる。

4.1.2. 需給均衡による原油価格決定機構

図 4-4 に、需要曲線と供給曲線の交点の均衡で生産量と価格が決定するという需給均衡による原油価格決定機構を示した。図 4-4(左)は基本的には図 2-4 と同じであるが、便宜的に需要曲線を直線で表現している。需要の価格弾力性は一定である可能性が高く（第 2 章第 3 節参照）、そのとき需要曲線は図 2-4 のように双曲線で近似されるが、ここでは興味の対象は供給曲線であり、本節での議論は需要曲線の形状にかかわらず成立する。

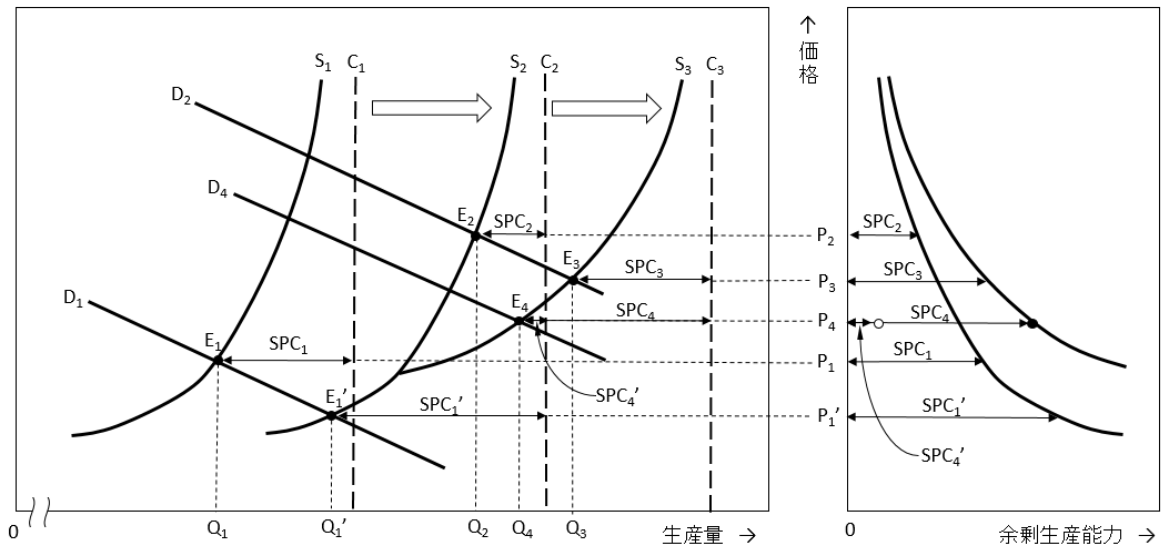


図 4-4 原油価格の決定機構 D : 需要, S : 供給, C : 最大生産能力,

SPC : 余剰生産能力, E : 均衡点, P : 価格, Q : 生産量

図 4-4(左)において、需要曲線も供給曲線も左右にシフトし、生産量と価格は均衡 (E) に決定する。第 2 章第 3 節では、需要曲線が一定とみなせる短期間（例えば、サウジアラビアがスイング・プロデューサーを放棄した 1985 年）に供給曲線がシフトするときを考え、需要曲線（およびその価格弾力性）を決定した。全く同様に、供給曲線が一定で需要曲線だけがシフトすれば、供給曲線が決定できるはずである。しかし、需要曲線のシフトは緩慢なため、その間に新油田の投入や既存油田の減退などにより供給曲線はシフトするため ($S_1 \rightarrow S_2$, $E_1 \rightarrow E_2$)、実際にこの前提が成立していた時期はない。

そこで次のように考えて、供給曲線の形状を推定する。価格が上昇すれば、従来は採算限界以下であった小規模・低品位の油田も生産可能になるため、供給曲線は右上がりとなる。しかし、供給量増加には限度があり、いくら価格が上昇してもある限度以上にはならない。図 4-4(左)ではこの限度（「最大生産能力」）を漸近線 C で示していて、実現した生

産量（均衡点 E）との距離が「余剰生産能力」（SPC）となる。供給曲線はこの形状を保ったまま、残存埋蔵量に応じて左右にシフト（平行移動）すると仮定する（例：図 4-4 左の $S_1 \rightarrow S_2$ ）。このとき余剰生産能力曲線は、漸近線（C）を固定して原点とみなして供給曲線（例： S_1, S_2 ）を左右裏返しにした図 4-4(右)になる。こうすると、供給曲線の形状さえ同じならばその位置にかかわらず、どの時点の余剰生産能力曲線も一致して 1 本に重なり、異なる時点であっても、余剰生産能力（SPC）さえ与えられれば価格（P）が一意に決定する。したがって、各時点の最大生産能力（C）が分かれば、それから実際の生産量（均衡点）を差し引いた値が余剰生産能力（SPC）となり、各時点の原油価格が推計できる。そこで以下では、過去の油田発見実績から、各時点の最大生産能力（C）の推計を試みる。

図 4-4(左)にはもう 1 本、シェールオイルによる追加分（ S_2 と S_3 の差）も含めた供給曲線（ S_3 ）が描かれている。シェール資源は価格が低いと採算が取れず全く生産されないが、価格の上昇に応じてその供給量は飛躍的に増加する（曲線の傾きが緩い：価格弾力性が大きい）。これは、シェール資源は、極めて小規模な（品位の低い）資源が莫大な数存在することと、生産開始までのリードタイムが 1 年程度と、通常（在来型）の油田（数年～20 年以上）に対して格段に短く、原油価格の上昇に応じて機敏に生産できることによる（詳細は第 6 章参照）。このため、原油価格がある程度以上になると、シェールオイルが追加され（ $S_2 \rightarrow S_3$ ）、需要が一定ならば（あるいは需要増が小さければ）、生産量は増加するが価格は低下する（ $E_2 \rightarrow E_3$ ）。これが最近起きている現象であると考えられる。

最大生産能力（C）は価格が無限大の時の供給量であるので、シェール資源では極めて大きく、したがって余剰生産能力（SPC）も大きくなり、供給曲線の形状が在来型と異なり（より緩やか）、左右裏返しにした図 4-4(右)でも在来型とは異なった位置にプロットされる。2008 年（特に 2011 年）以降はこの状態にあると考えられる。しかし、シェール資源は、価格上昇時の資源ポテンシャルが極めて大きいため、その最大生産能力（C）および余剰生産能力（SPC）を推定することはデータが不十分な現段階では困難である。

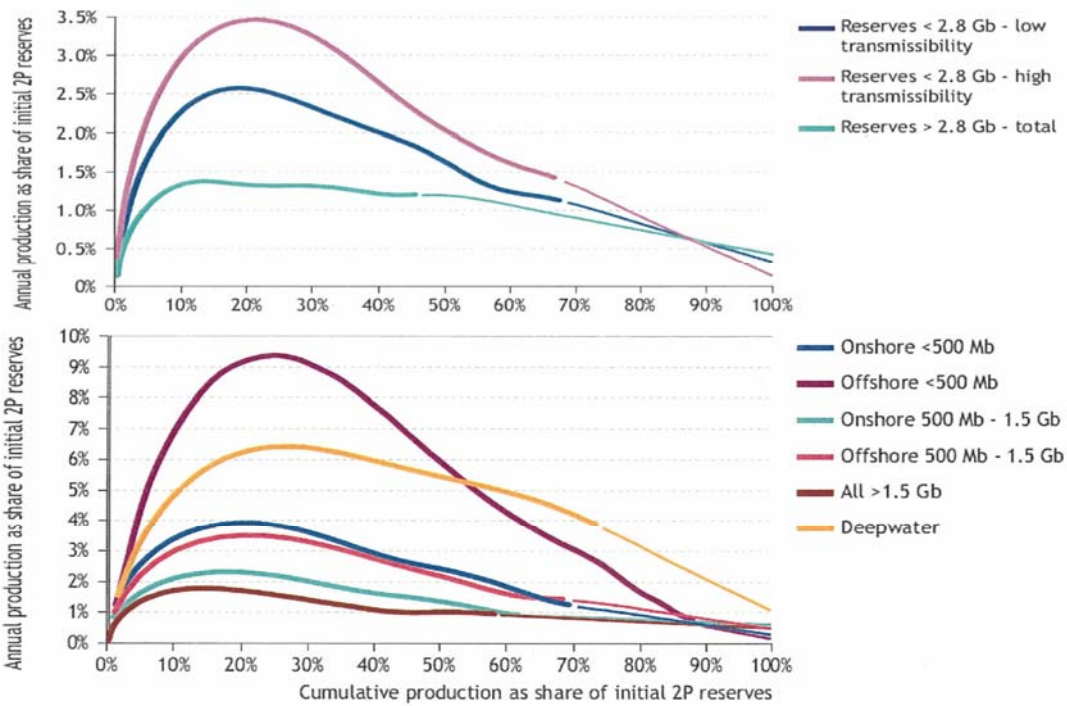
例えば、シェールを含めた供給曲線が S_3 のときに需要曲線が D_4 であると、均衡は E_4 （生産量 Q_4 、価格 P_4 ）となり、真の余剰生産能力は SPC_4 で、図 4-4(右)の黒丸にプロットされるべきである。しかし、シェールの生産能力が分からずに在来型の生産能力（最大生産量） C_2 を使うと、余剰生産能力は SPC_4' となってしまう、図 4-4(右)の白丸にプロットされる。均衡 E_3 の場合は、「見かけの余剰生産能力」（在来型の最大生産能力 C_2 との差）は負になってしまう。

4.1.3. 各時点の世界の生産能力の推定

第2章第1節および第2節での検討の結果、企業は各油田の排出能力一杯生産するのが最適であることが判明した。この排出能力は、生産井の坑数にほぼ比例し、生産の進行に伴う残存埋蔵量の減少により指数関数で減退する(詳細は第2章第2節)。このとき、最適生産井数は(当初)埋蔵量と原油価格の関数であり((式)2-136)、原油価格(実質)を一定とすれば(生産井数は原則として生産開始前に決定するので、その時点で将来の価格変化を予想することは困難)、各油田の生産プロファイルは(当初)埋蔵量によって決定する。

IEA(2008)は、全世界の油田のデータをコンパイルし、油田の埋蔵量規模に応じた生産プロファイルを報告した(図4-5上2段)。この結果は第2章第2節の結論と調和的であり、規模(埋蔵量)が大きいほど相対的な(埋蔵量に対する)生産量は小さく、したがって減退率は低く、寿命は長い。そこで、本論文では第2章第2節の検討結果に基づき、このIEA(2008)の生産プロファイルをより単純化して、油田の埋蔵量規模別に3種類の生産プロファイルを想定し(図4-5下2段)、これに基づき各時点の生産能力を推定する。

油田発見から生産開始までの評価・開発期間としては、大規模油田(クラス21以上)9年、中規模油田(クラス17~20)6年、小規模油田(クラス11~16)3年を用いる。さらに、生産開始後もすぐに最大生産量(ピーク)に達するのではなく、評価・最適化を試みながら生産井を徐々に増加していくので(掘削リグの制限にもよる)、この期間(「ビルドアップ期間」として大規模油田14年、中規模油田8年、小規模油田4年を設け、この間は坑井数に応じて、生産量は階段状に増加するが、ここでは近似的に直線で増加するものとする。ビルドアップ期間終了時に各油田の生産量(単位期間あたり)はピークに達し、その量(年あたり)は当初埋蔵量に対して、大規模油田2%、中規模油田4%、小規模油田10%とする。ピーク後の生産量は、指数減退(当初埋蔵量に対する比率は線形で低下、残存埋蔵量に対する比率は一定、詳細は第2章第2節参照)で減少していく。指数減退では厳密には無限時間を経て完全枯渇するが、実際には操業費などとの関連で、採算限界に達した時点で生産を終了する(厳密な定義では、この時点までの累計生産量が「埋蔵量」、詳細第3章参照)。生産期間(「油田の寿命」)は、大規模油田114年、中規模油田82年、小規模油田26年となる。



Note: The thick lines are derived from observed data; the thin lines show the trajectory assuming full depletion of the field.

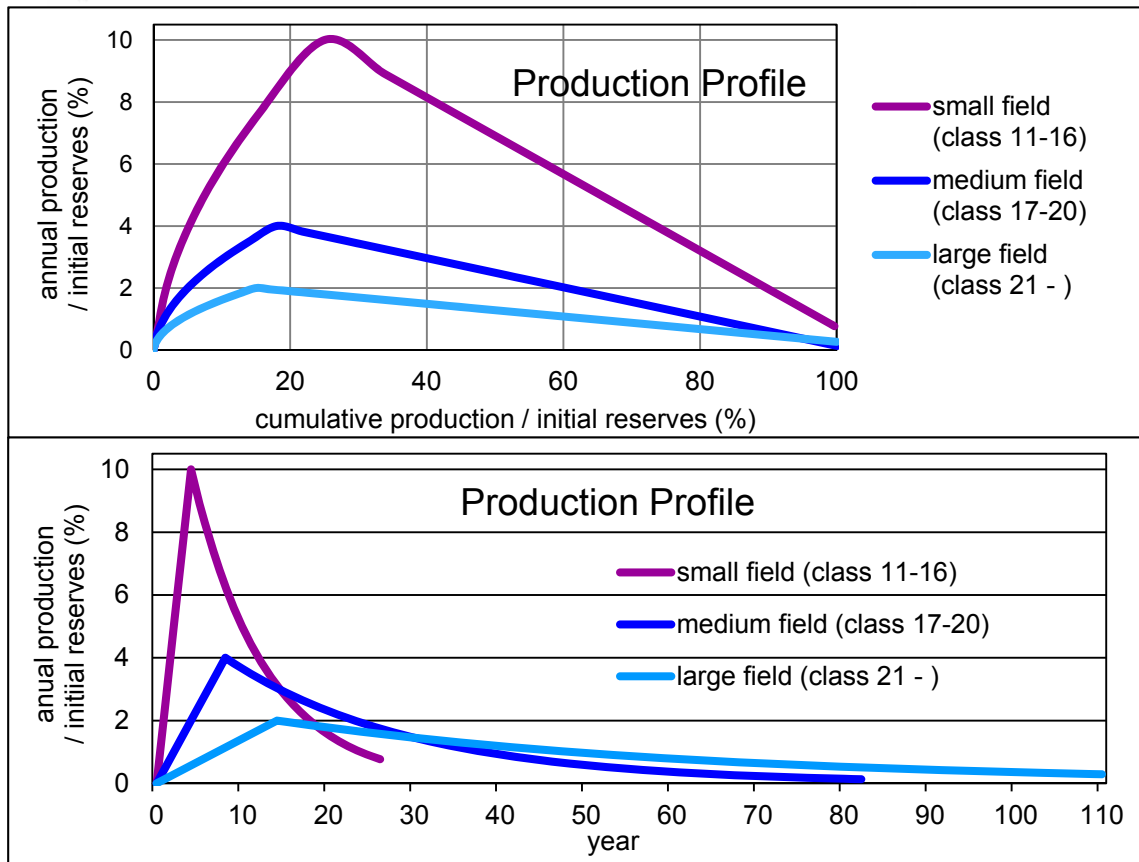


図 4-5 油田規模別生産プロファイル 上 2 段 : IEA(2008), 下 2 段 : 本論文

現実には、超巨大油田では、生産井だけでなく処理施設やインフラ（パイプライン、道路）などもピーク生産量に応じて建設する必要があるため、それらの稼働効率も勘案して想定ピークより低い生産量で長期間プラトー生産する例も多く、一方、小規模油田では、より短い評価・開発期間およびビルドアップ期間で、より高いピーク生産量（より多い生産井）で短期間に採り尽くし、早期の資金回収を図る例も少なくない（特に価格高騰時に開発された油田）。しかし、世界全体の生産能力を評価するには、ここに示した3種類の平均的な生産プロファイルを適用しても誤差は大きくないと考えられる。

前章でも使用した IHS 社のデータベース（2011 年のデータ、2010 年までの発見油田）から全世界（米国の陸上・沿海の油田を除く）の埋蔵量百万バレル（クラス 11）以上の油田（2010 年までに 13204 油田、データ時期などの違いにより表 3-3 と若干異なる）を発見年ごとに拾い出し、それに図 4-5(下 2 段)の生産プロファイルを適用してそれらを合算し、全世界の石油生産能力を算出した。従来は、生産能力については信頼できるデータがなかったが、こうして地下の産出ポテンシャルに基づく各時点の生産能力の推定が可能になる。

こうやって、2016 年までの生産能力を算出した（計算は 1900 年以降について行ったが、以下では 1965 年以降を示す）。合算においては、19 世紀に発見された 17 油田は、発見年不詳のものもあり、便宜的に 1900 年に発見されたとみなした（これらは 20 世紀前半でほぼ枯渇したので 20 世紀後半以降の生産能力にはほとんど影響しない）。また、データの制約により、2011 年以降に発見された油田は含まれない。上記の前提だと小規模油田は発見 3 年後に生産開始されるので、それらのビルドアップ期にあたる 2014 年～2016 年の生産能力はその分過小評価されるが、その影響は大きくない。実際の実績は、こうして算出した生産能力より低いので、残差は順次繰り越して次年度の生産能力に加算した。

米国の陸上・沿海油田は、ほとんどが小規模～超小規模(クラス 11 未満)だが、インフラ・市場・契約条件が世界の他地域と全く異なるため経済限界が 2～3 桁低い（第 3 章参照）。油田数が極めて多く、信頼できるデータの入手が困難なこともあり、上記の手順は使えない。そこで、米国については実際の実績を生産能力（すなわち余剰生産能力なし）とみなして、そのまま加算した（この問題は以下の（3）で議論）。

以上の議論は、原油価格一定を前提にしている。事実、多くの石油会社は実質原油価格一定の前提で採算性を検討して生産井の坑数などの開発規模を決定しており、原油価格が

大きく変動しない限り、こうして求めた生産能力は上限として有効である。しかし、過去の原油価格は何回か高騰しており、その時は新たな原油価格で再検討すると増加投資による追加井掘削などによる増産が正当化されることが多い（追加井の費用はサンクコストとなるため、逆に価格が低下しても、通常は坑井数を減らさない）。したがって、上記で求めた生産能力は価格上昇に応じた増産余地があり、必ずしも「最大」能力でない。そこで、ここでは便宜的に、上記で求めた生産能力の1.2倍を「最大生産能力」（図4-4のC）とみなすこととする。

この方法による生産能力の推定は、現実の全油田データに基づいて積み上げて計算されており、それなりに信頼性は高いが、次のような問題もある。

- (1) IHS社データは、BP統計など多くの統計や研究の基礎となっており、その網羅性に関しては定評があるが、埋蔵量数値の誤差は決して小さくない。これは、同社のデータは、油田スカウト（大手石油会社を退職したベテラン技術者を一種の産業スパイとして活用）専門のPetroconsultants社をIT企業のIHS社が1996年に買収して引き継いだものだが、その後はデータベースの管理・処理システムとネット配信などに重点が移り、最近の情報公開と守秘義務徹底（公開情報の峻別と厳格化）の潮流もあり、主として公表データのみ reliant になったことによる（3.3.2.3参照）。その後、データの質でも競争していたIEDS社などの競合他社も買収して、現在では全世界の油田データの唯一の情報源となってしまった（開発油田に関しては、金融系コンサルタントWood Mackenzie社が比較的正確な情報を提供しているが、網羅性の点で劣る）。
- (2) 上記では、3種類の生産プロファイルは埋蔵量のみ依存して決定し、それは全期間を通して変化しないとしている。第2章第3節で検討したように、生産規模を規定する最適生産井数は埋蔵量と原油価格の関数であるが（(式)2-136）、将来の価格の推定は困難なため、実質原油価格一定の想定で開発計画が策定される。このため、原油価格が安定している時期にはこの前提で問題ないが、価格が高騰すると追加井掘削が正当化される。本論文ではこうした点を考慮して、計算された生産能力の1.2倍を「最大生産能力」としているが、この数値(1.2)に理論的根拠はない。さらに、ひとたび坑井数が増加すると、その費用はサンクコストとなるため、原油価格が低下しても坑井数は減らない、いわば「ヒステリシス」（履歴効果）または「ラチェット効果」が働く。このため、長期間の間に油田の生産プロファイルは、ピーク生産量がより高

く、生産期間はより短い方向に徐々にシフトしてきている可能性がある。

(3) 上記では供給曲線の形状も一定で、単に左右にシフトするだけと仮定している。

これは、価格の上下に対する供給力の変化のパターンが時期や油田坑井にかかわらず同じであることを意味する。供給曲線の形状は、採算性に対する油田数分布に依存するが、採算性と油田クラスに一定の関係があれば、第3章で検討したように究極油田規模分布がフラクタルで、既発見油田規模分布が常に対数正規分布で近似されることから、この仮定は正当化される。ただし、ここでいう「油田規模に応じた採算性」には、①生産井などの固定費を含む油田開発時の採算性（開発・ビルドアップ期間を含めたタイムラグあり）と、②生産中の油田の操業費と利益の比較（前者のほうが高いと生産停止する）が含まれる。上記では、クラス11以上の全油田が発見後すぐに開発される前提になっていて、①のタイムラグの問題が厳密には組み込まれていない

（したがって、生産能力が若干過大評価される）が、生産能力のうち生産されなかった分（余剰生産能力）は順次繰り越されるため、その影響は小さい。②には追加生産井掘削が含まれるが、前記した「ヒステリシス」または「ラチェット効果」が働くため、原油価格高騰後には価格が低下しても供給量の低下は小さく、より急傾斜（低価格弾力性）の供給曲線となる可能性がある。さらにシェール資源は、第6章で検討するように究極油田規模分布のフラクタル次元が在来型油田より高い（小規模側への増加傾向が強い）ため、供給曲線はより緩やか（高価格弾力性）になる（図4-4, S₃）。

(4) 最も問題になるのは、米国の陸上・沿海の油田が含まれないという点である。

上記の如く、米国については実際の生産実績を生産能力（すなわち余剰生産能力なし）とみなして、そのまま加算している。米国の石油生産は1970年をピークに減退してきており（第2章第3節参照）、在来型油田の余剰生産能力は極めて小さいと考えられ、従来はこの扱いでも大きな問題はなかった。しかし、2008年(特に2011年)以降の米国のシェールオイル増産のペースは、1980年代後半にスイング・プロデューサーを放棄したときのサウジアラビアの増産ペースをも上回っている（図2-4参照）。第6章で検討するように、シェール資源のフラクタル次元は在来型より高いとみられ、価格上昇に対する莫大なポテンシャルを有していて、「最大生産能力」は現生産量の数倍に上ると推定される。図4-4に示したように異なる形状（勾配）の供給曲線および余剰生産能力曲線を描くべきだが、データが不十分な現段階ではその推定は困難であることから、以下ではこの期間は分けて検討する。

4.1.4. 余剰生産能力と原油価格の関係

4.1.4.1. 年次データでの検討

こうして求めた全世界の「生産能力」とその1.2倍（「最大生産能力」）ならびに0.8倍の推移を、現実の生産実績および実質原油価格の推移と合わせて図4-6に示した。生産量は増加基調にあるが、生産能力は1990年頃が最大で、その後徐々に低下してきていることが分かる。2011年以降はシェールオイルの生産量分の追加などにより若干上昇に転じているが、シェールオイルの生産能力は生産実績の数倍と推定されることから、この期間の生産能力は過小評価の可能性が高く、生産能力のリバウンドはもっと大きいと思われる。

図4-6では生産実績が濃緑破線（生産能力の0.8倍）を超えると原油価格が上昇し、これより下だと原油価格は低下する、または低位安定することが読み取れる。すなわち、この点は図4-4において、供給曲線の急傾斜部（低価格弾力性）と緩傾斜部（高価格弾力性）の境界付近に相当すると解釈される。

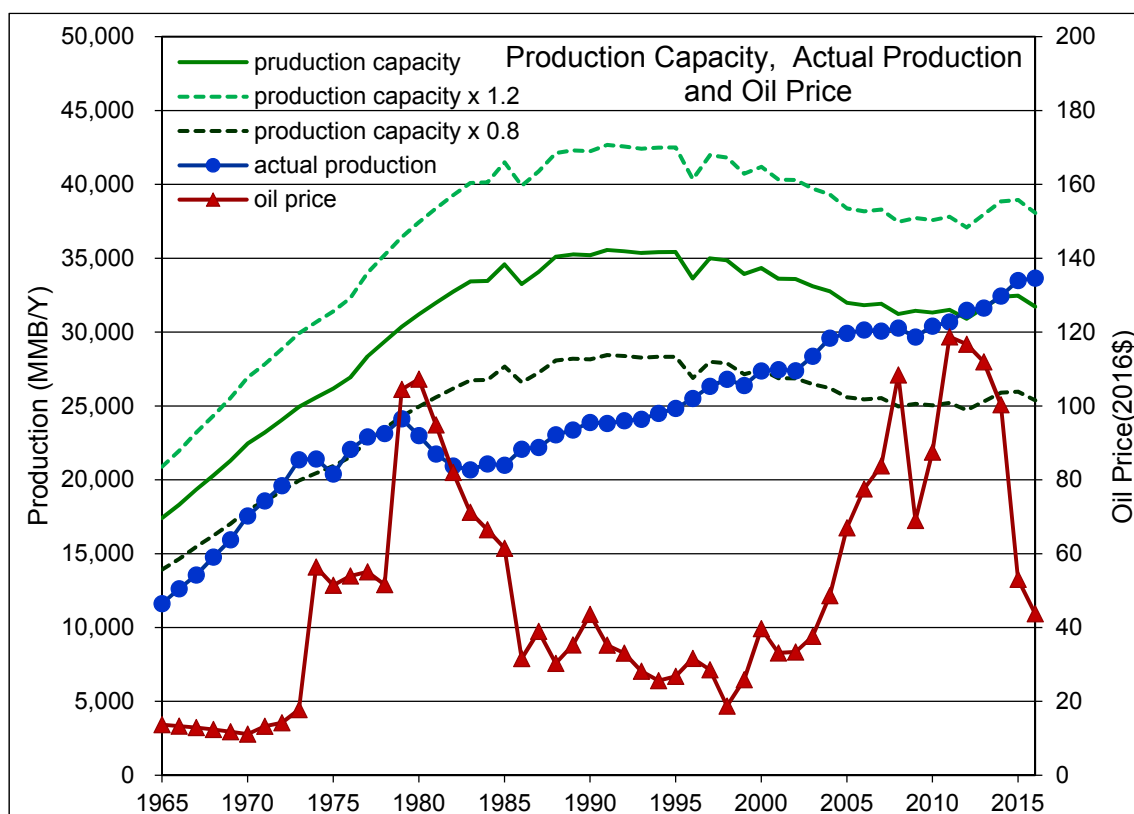


図 4-6 世界の石油生産能力、生産実績、実質原油価格の推移

生産実績・原油価格出典：BP(2017)

過去2回の石油危機、1973年と1979年の原因は一般には、それぞれ第四次中東戦争およびイラン革命で、ともに需給には問題がなかったとされている。しかし、図4-6のプロットにおいて、これらの時期には生産実績（青丸）が濃緑破線を超え、需給が逼迫していたことが読み取れ、過去の石油危機は実は需給逼迫が原因であったことが分かる。

1980年～1985年は、生産量の減少（すなわち余剰生産能力の増加）に伴い原油価格は下降トレンドを示すが、水準は高いまま（実質価格 \$60/BBL以上）であった。この期間はOPEC（主としてサウジアラビア、第2章第3節参照）による生産制限に相当し、余剰生産能力が人為的に絞られ、それが原油価格を底上げしていた。1985年にサウジアラビアがスイング・プロデューサーを放棄すると、それ以降原油価格は低位安定期に入った（第2章第3節参照）。

生産実績（青丸線）はその後徐々に上昇し、2000年頃に濃緑破線（生産能力の0.8倍）を超えたのを契機に原油価格は上昇を開始し、2008年には緑実線（生産能力）に近接または交差して、同年に記録した過去最高の原油価格（図4-11参照）は需給逼迫によるものであることが分かる。しかし上記したように、この時期には米国のシェール資源の開発が急速度で進んでいて（むしろ高原油価格がシェール資源開発の誘因）、実際の生産能力は図4-6よりもかなり高く、生産量が若干減少した2009年には原油価格が低下していて、この時期の「真の濃緑破線」（生産能力の0.8倍）は生産実績（青丸）付近にあったと推定される。さらに、2014年以降は生産量が増加しても原油価格は低下し、シェールオイルの生産能力が大幅に積み上がったことが読み取れる（図4-4のE₂→E₃に相当）。

原油価格の決定機構をより詳細に検討し、生産量から原油価格を推定するために「最大生産能力」（生産能力の1.2倍）から実際の生産量を差し引いた「余剰生産能力」に対して原油価格（Brent原油2016年実質値，\$/bbl）をプロットして、図4-7(上)に示した。

図4-7(上)ではトレンドの異なる6つの期間が認められ、それぞれを異なる色で示している。

1965年～1973年は、第一次石油危機以前のメジャーが市場を支配していた時期に相当する。図4-7(上)からは若干のトレンドが認められるが、この期間は実質価格も余剰生産能力もほぼ一定であったことが読み取れる。図4-4の考え方は基本的に自由市場での均衡を前提にしている、価格がコントロールされているときにはそのままは当てはまらない。

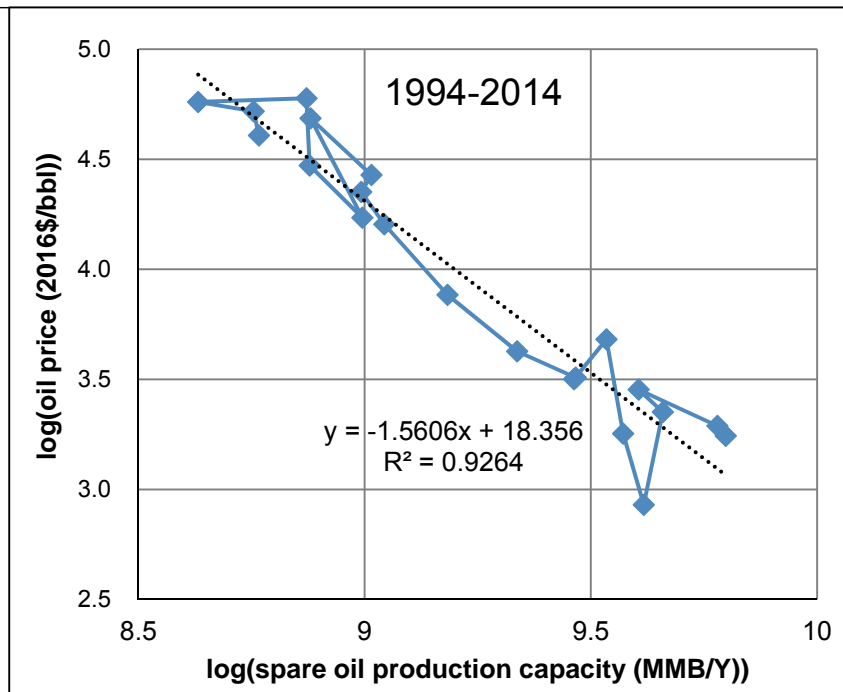
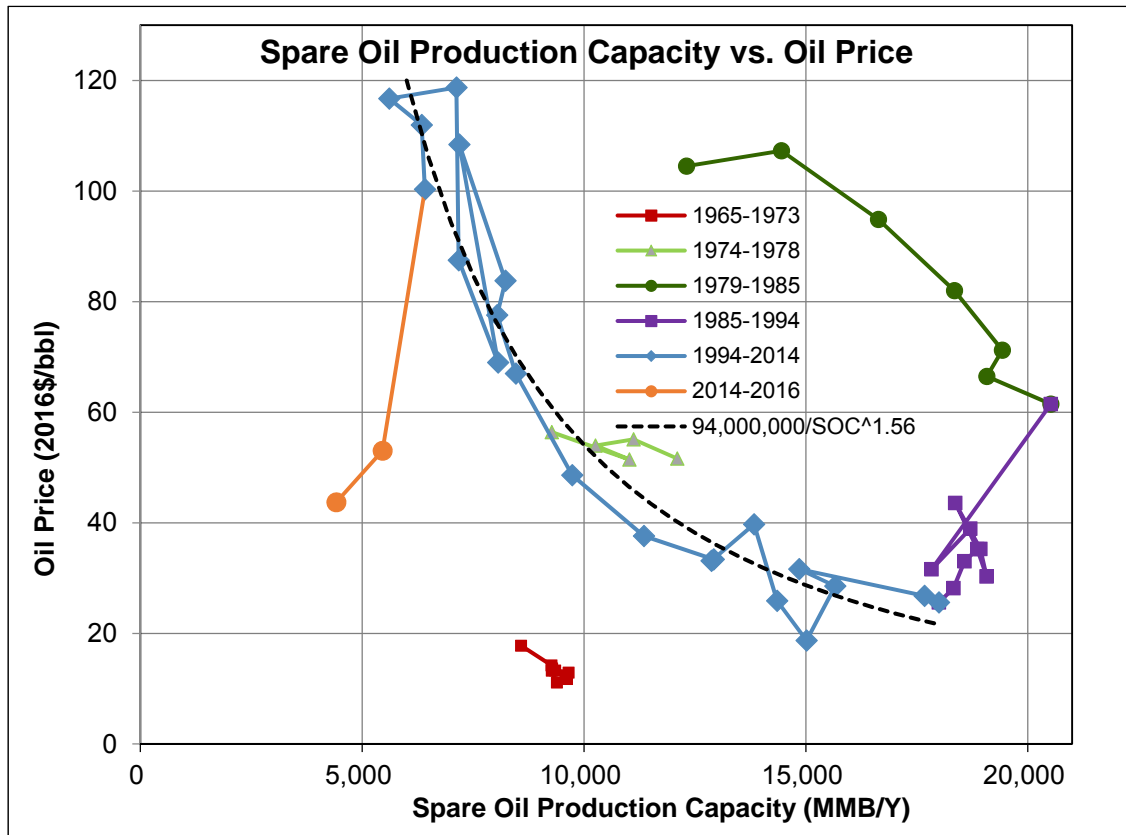


図 4-7 余剰生産能力による実質原油価格のフィッティング（年次データ）

1973年以前の石油市場は上流も下流もメジャー（「セブン・シスターズ」）にほぼ独占されており、価格も生産量も彼らにコントロールされていた。したがって、彼らの主要関心は製品価格であり、原油価格は内部での仕切り価格に過ぎない。ただし、この原油価格に応じて産油国にロイヤルティーが支払われるため、原油価格を低位に保って下流をプロフィットセンターにする誘因が存在した。

このメカニズムに産油国が気づき、Occidental社などの独立系石油会社の参入やLibyaなどの新興産油国の圧力により、原油価格（「公示価格」）決定権と石油権益の一部を産油国が獲得した。これに応じて原油価格が高騰したのが1973年の第一次石油危機である。以後、第二次石油危機まで原油価格は約\$50/bbl（2016実質価格）で安定していた。興味深いことに、この期間は図4-7(上)において、1994年以降の自由市場均衡とほぼ同じトレンド上に乗っている。

1979年には、需給の逼迫にイラン革命が重なったことにより、第二次石油危機となり、再び原油価格が高騰した。以後、1985年までは生産量は減少していき、これに応じて原油価格も下降していったが、その水準は高く、図4-7(上)では他の期間より右上の異なるトレンドを形成している。第一次～第二次石油危機の価格高騰期にはOPEC諸国による減産の証拠はないが、それに引き続くこの期間は唯一OPECの生産制限（主としてサウジアラビア、第2章第3節参照）が価格維持に有効であったと考えられる。図4-7(上)では、他の期間に比べて余剰生産能力が50～100億バレル/年程度大きいのが、サウジアラビアの生産削減は20億バレル/年程度であり、イラン・イラク戦争などの影響がこれに加わっていたと思われる。

1985年にサウジアラビアがスイング・プロデューサーを放棄すると、1994年にかけて生産量が増加するとともに価格は下落した。この間に原油取引のスポット市場が発達し、公示価格、ネットバック方式（製品価格から輸送・保険・精製などを差し引く）など多くの価格決定方式が試された時期でもある。

スポット市場に加えて先物市場も発達したため、他の取引でもこれらの価格が指標として用いられようになった。こうして、1994年以降は自由市場での均衡で生産量と価格が決定されるようになり、図4-7(上)では綺麗な弧状のトレンドが認められる。ただし、2014年～2016年は計算で求めた余剰生産能力が下落しても逆に価格が低下している。これは前記したようにシェール資源の開発によるもので、実際の余剰生産能力はずっと大きいと考えられ、「ヒステリシス」または「ラチェット効果」も加わっている可能性がある。

図 4-7(下)は、(上)で明瞭なトレンドが認められた 1994 年～2014 年のデータを両対数グラフにプロットしたもので、ほぼ直線で近似され、余剰生産能力と原油価格の間の弾力が一定であることを示している。図 4-7(上)の黒破線がこの回帰に相当する。

この最小二乗法 (OLS) による回帰 (サンプル数 21) は次のように定式化さる。

$$\log \widehat{ROPY}_t = 18.356 - 1.56 \times \log SOPCY_t$$

(19.69) (-15.46) (4-1)

(18.79) (-14.42)

Adj $R^2 = 0.922$ $DW = 1.70$

ただし、 $\log \widehat{ROPY}_t$: 対数年平均実質原油価格推計値 (単位 : 2016\$/bbl), $SOPCY_t$: 年間余剰生産能力 (単位 : 百万バレル), 式の下のカッコ内は t 値である。Durbin-Watson 統計量 (DW) は 2.0 に近く系列相関の可能性は低いが、念のため下段のカッコ内に Newey-West による修正後の t 値(HAC Standard errors & covariance)も示したが、両係数とも有意性は極めて高い。決定係数は自由度調整済み (Adj R^2) でも極めて高く、この期間については、余剰生産能力だけから原油価格がほぼ決定できることを示している。ただし、余剰生産能力は最大生産能力から生産量を差し引いたもので、前者は上記の手順で油田発見履歴から推定できるが、後者は、過去には生産実績が使えるが、将来については何らかの方法で生産量を推定して与える必要がある。生産量は図 4-4 の市場均衡で価格と同時に決定されるが、この回帰はそこでの供給曲線を示しているものであり、需要曲線 (特にその位置) は別の方法で推定する必要がある (次節および第 5 章で議論)。

この回帰に基づき、過去の生産実績から計算した余剰生産能力を用いた原油価格の推計 (“actual”) を原油価格実績 (“model”) および生産実績と比較して図 4-8 に示す。

原油生産実績は徐々に増加してきているとはいえ、その傾向は一様で直線的であるが、余剰生産能力を用いた推計では、過去の価格変動実績がほぼ再現された。特に、2005 年～2008 年は生産実績が 300 億バレル/年ではほぼ一定のプラトーであったにもかかわらず、原油価格は大きく変動し、それがかなりよく再現されている。しかし、2014 年以降は推計では価格が高騰するはずが現実には逆に下降していて、上記したシェール資源の影響が拡大してきていることが伺える。

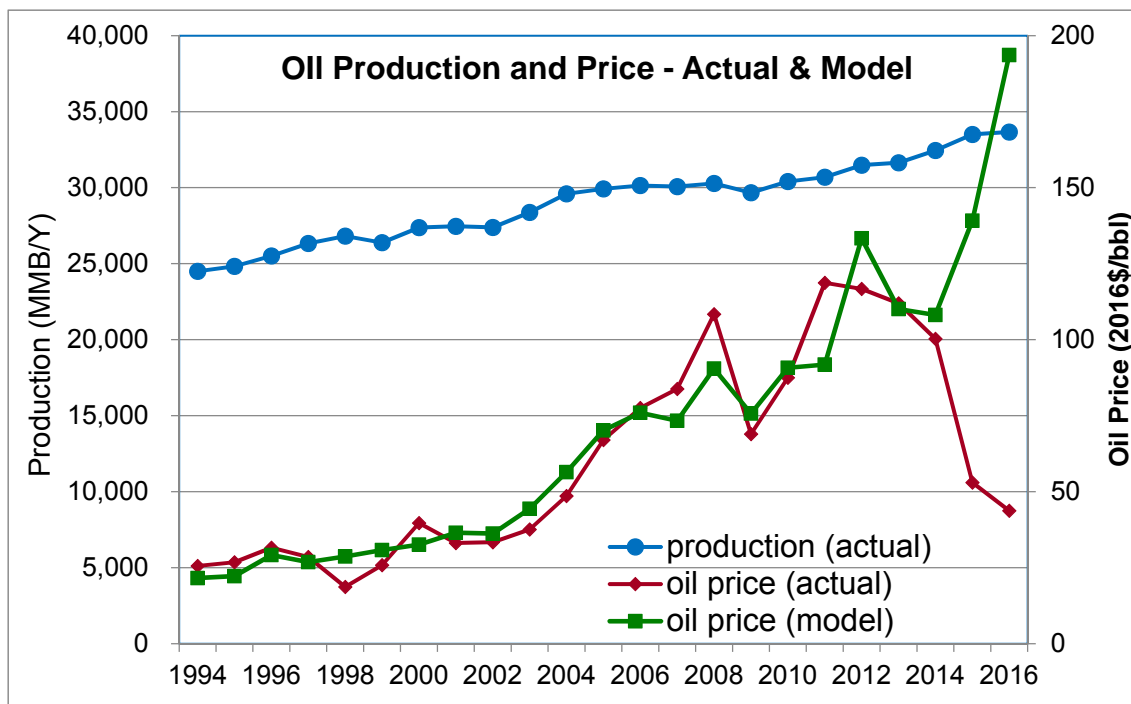


図 4-8 石油生産量，実質原油価格（実績 vs. 余剰生産能力からの推計）（年次データ）

石油生産量・原油価格実績データ出典：BP(2017)

4.1.4.2. 月次データでの検討

年次データはサンプル数が少ないので，より細かい変動や最近のシェール資源への移行などを含めて，自由市場移行後の 1994 年 1 月～2017 年 10 月の月次データ（286 サンプル）について検討を行う。データは，次のものを使用，または加工した。

石油生産量：IEA（国際エネルギー機関）の“Oil Market Report”の“World Oil Production”

の表(Table 3)の“Total Supply”の数値（月平均日産値）（3 か月後の「確定値」を採用）

IEA Home > Publications > Oil Market Report > Tables > (各月の Report) > Table 3

<https://www.iea.org/oilmarketreport/tables/>

原油価格：Brent dated の月平均，US EIA（米国エネルギー省、エネルギー情報局）

EIA Home > Petroleum & Other Liquids > Data > Prices > Spot Prices > Brent-Europe > View History (1987-2012) > Monthly

<http://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=PET&s=RWTC&f=M>

この統計は各時点の名目価格（nominal, MOD）なので，それをそのまま使用した。

年次データ（出典：BP 統計）は実質価格（2016\$）であり、それと正確には対応しない。物価指数などで実質化する手もあるが、対象期間は各国ともインフレ率は低い、または弱いデフレであり、対象国や使用する指数（CPI, CGPI, コア CPI, コアコア CPI など）の選択に恣意性が働くため、あえて実質化は行わない。

石油生産能力：生産プロファイルに基づく前記の年次データ(米国を除く)を平滑化・按分して月次データに変換し、それに米国の月次生産実績(US EIA, 下記サイト)を加算。

<https://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=PET&s=MCRFPUS2&f=M>

年次データ同様、この 1.2 倍を「最大生産能力」とみなす。この結果、数値は平滑化され細かい変動に乏しいものとなるが、大事故などが無い限り、生産能力の変化は漸進的なので、この扱いでも問題ないと考える。すなわち、余剰生産能力（ひいては原油価格）の小変動（短期）は生産実績（需要変動）に起因しており、埋蔵量に起因する生産能力は余剰生産能力（ひいては原油価格）の大変動（長期）を規定していると考えられる（したがって、ハリケーン・大事故等による供給変動は評価されない）。

その他の手順は、年次データの時と同じである。

こうして求めた月次の余剰生産能力（単位：百万バレル/日）と名目原油価格（単位：\$/bbl MOD）のプロットを図 4-9 に示した。これらのデータは 3 期間に大別される。

1994 年 1 月～2011 年 10 月（濃青+淡青+オレンジ：時期により 3 分）

2011 年 11 月～2014 年 11 月（緑）

2014 年 12 月～2017 年 10 月（紫）

1994 年 1 月～2011 年 10 月は上の線形プロットでは綺麗な弧状の、下の両対数プロットでは直線状のトレンドを呈するが、時期により 3 分され、それぞれを異なった色で示した。より細かくみると、2008 年 10 月以降のオレンジ色の点（2008 年 7 月に原油価格が最高値を記録した後の下降期とその後の再上昇期を含む）は若干左にずれてプロットされている。最上部（高原油価格）で青のトレンドと接しているが、この部分のオレンジ点は原油価格が一度下落した後再度上昇した時期のものであり、したがって青のトレンドから徐々に離れていったのではなく、オレンジ点群はより急傾斜（低価格弾力性）の別のトレンドを形成している。このより急傾斜のトレンドは、前記した価格高騰後の「ヒステリシス」または「ラチェット効果」によるものと解釈される。濃青の点群（2002 年 12 月以前）は淡青と同一トレンド上にあるが、後でこのデータだけに基づいた推計を行うので、色を変えて示している。

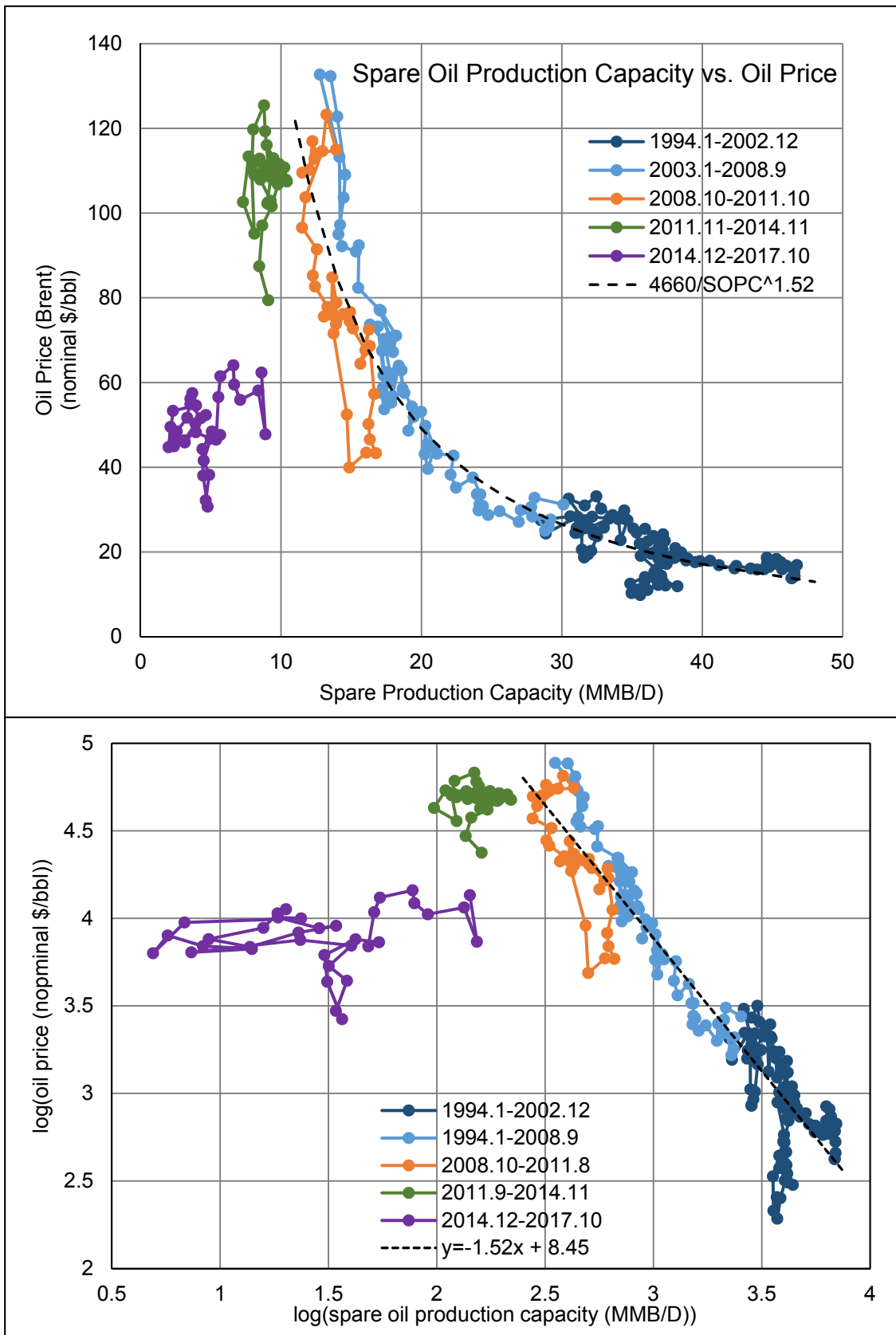


図 4-9 余剰生産能力による名目原油価格のフィッティング（月次データ）

2011年11月～2014年11月（緑）と2014年12月～2017年10月（紫）は、前者が高価格帯、後者が低価格帯という相違はあるが、ともに上記のトレンドの左側に離れて位置している。この位置は、図4-4(右)の白丸に対応し、莫大なシェール資源の生産能力が評価されておらず、余剰生産能力が大幅に過小評価されていることに起因している。在来型トレンドからの乖離は時間と共に大きくなりシェール資源の開発が急ピッチで進んだことを示している。しかし、シェール資源の坑井は生産初年度に埋蔵量の70～90%を採取し、長くても数年で枯渇する。このため、価格が低位安定すると探鉱意欲が損なわれ、新規発見が阻害されるので埋蔵量の枯渇が進み、生産能力が低下する。ただし、価格が再度上昇すれば生産能力は回復・増加し、シェール資源は生産量と価格の安定に寄与する受動的なスイング・プロデューサーの役割を果たしている。

明瞭なトレンドを呈する1994年1月～2011年10月（濃青+淡青+オレンジ）の214サンプルに対して年次データの時と同様の回帰を行い、次のように定式化した。

$$\log \widehat{NOPM}_t = 8.445 - 1.520 \times \log SOPCM_t$$

$$\begin{array}{ccc} (77.73) & (-45.59) & (4-2) \\ (39.71) & (-22.68) & \end{array}$$

$$Adj R^2 = 0.907 \quad DW = 0.223$$

ただし、 $\log \widehat{NOPM}_t$ ：対数月平均実質原油価格推計値（単位：2010\$/bbl）、 $SOPCM_t$ ：月平均余剰生産能力（単位：百万バレル/日）、式の下のカッコ内はt値である。Durbin-Watson 統計量（DW）が低く、正の系列相関の可能性があるので下段のカッコ内に Newey-West による修正後の t 値(HAC Standard errors & covariance)も示したが、両係数とも有意性は極めて高い。決定係数は自由度調整済み（Adj R^2 ）でも高く、この期間については年次データ同様、余剰生産能力だけから原油価格が推計できる。年次データと対象期間が若干異なり、名目価格を使用しているため、数値は厳密には対応しないが（単位も異なる）、両者は調和的な回帰結果である。この回帰結果を図4-9に黒破線で示した。

この回帰による価格推計を実績と比較して図4-10に示した（縦軸は原油価格の対数値）。図4-11には同じものを線形グラフにプロットし、生産実績も併せて示している。

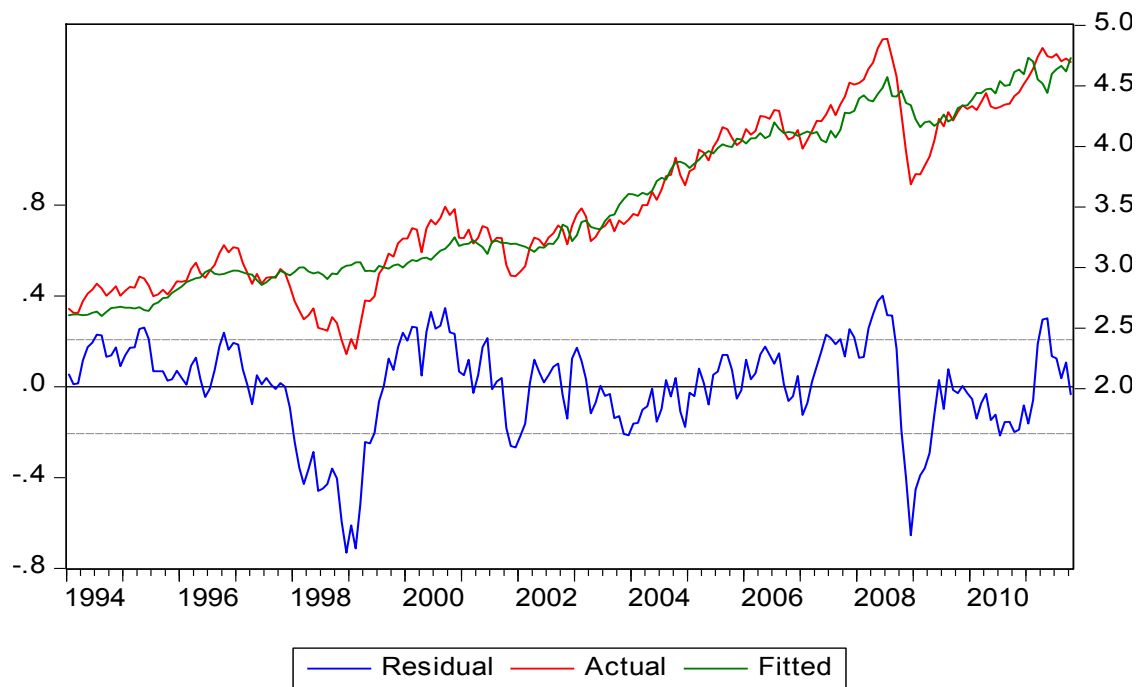


図 4-10 対数名目原油価格：実績 vs. 余剰生産能力からの推計（月次データ）

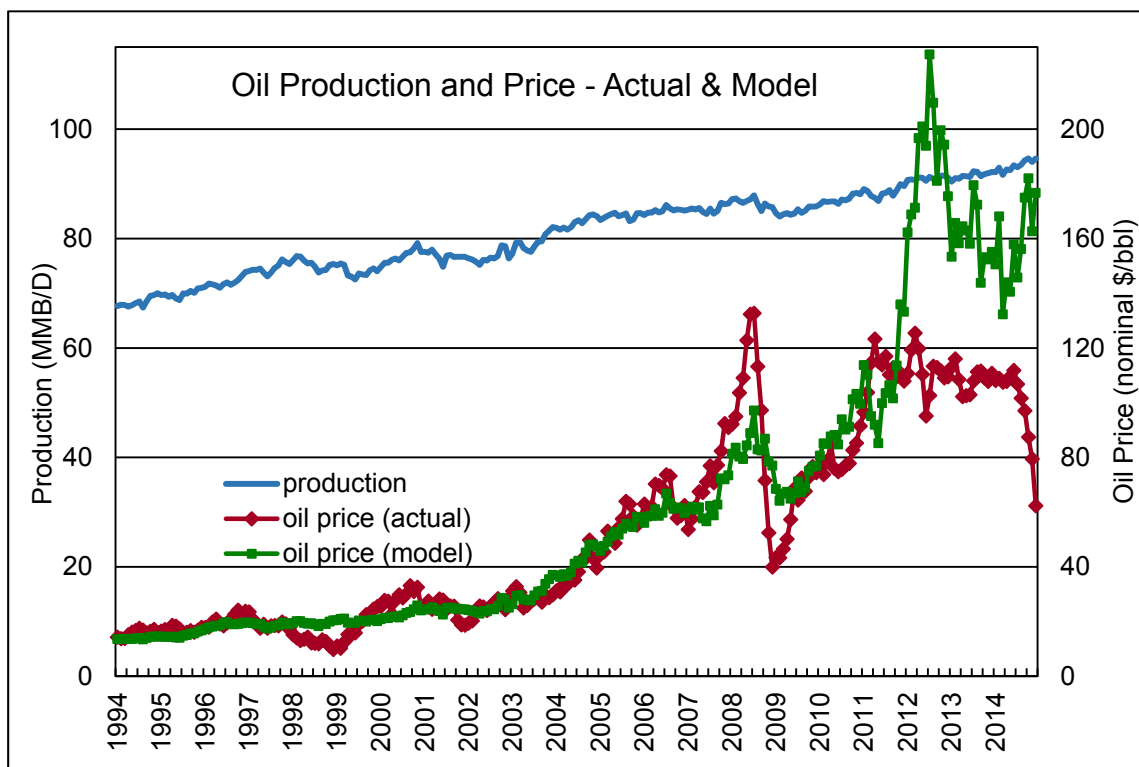


図 4-11 石油生産量，名目原油価格（実績 vs. 余剰生産能力からの推計）（月次データ）

2008年の価格高騰とそれに引き続く急落の変動幅は実績より小さいが、全体として推計結果は実績とよく一致している。一点、両者が異なるのは1998年の「アジア危機」で（低価格なので対数では差異が強調されている）、安定した原油価格を推計していて、価格低下が予測できていない。供給側（余剰生産能力）には変化が認められないため、この価格低下は需要側での変化を反映していると考えられるが、今後の検討課題である。

生産量の増加はほぼ線形であるにもかかわらず、原油価格のピークやトラフの時期と水準がかなりよく再現されている。図4-11には、回帰には用いなかった2011年12月以降についても、上記の回帰結果で推計して実績と比較しているが、その期間は推計値が大きく過大評価になっていて、前記したように、シェール資源（生産実績しか含めていない）の生産能力の過小評価が大きいことが分かる。

図4-12は、1994年1月～2011年10月のデータの回帰による2017年10月までの推計（図4-11の対数表示に相当）と1994年1月～2002年12月のデータ（96サンプル、図4-9の濃青点）の回帰による2017年10月までの推計を名目原油価格の実績と比較している。

ここで興味深いのは、1994年～2002年には原油価格は低位安定しており、めばしい価格変化は1998年の「アジア危機」による価格低下くらいであるが、そのデータによる推計で、その後の価格高騰や変動の時期などがかなりよく再現されていることである。したがって、原油価格が低迷していた2002年末に回帰を行い、ほぼ線形のプロダクション増加を当てはめれば、その後の価格変動がかなりの精度で予測できたことになる。2002年以降に発見される油田は生産能力に含められないが、ピーク生産前の開発・ビルドアップ期のリードタイムに大規模油田で23年、中規模油田でも14年かかるので、生産能力に対するその影響は小さい。

井上（2004）は上記をより単純化した手法で、「多くの機関が現在の1バレル当たり40ドル超の状態からは下落する見通し」（野神，2004）の中で、「2010年頃にかけての原油価格の上昇」を予測した。なお、2002年までのデータによる推計（図4-12の青線）は、2012～2014年の実績（赤線）の下降トレンドと価格水準をよく再現しているが、前者（下降トレンド）は正当な推計であるが、後者（価格水準）は価格推計の過小評価とシェール資源の生産能力の過小評価がたまたま相殺した結果だと思われる。

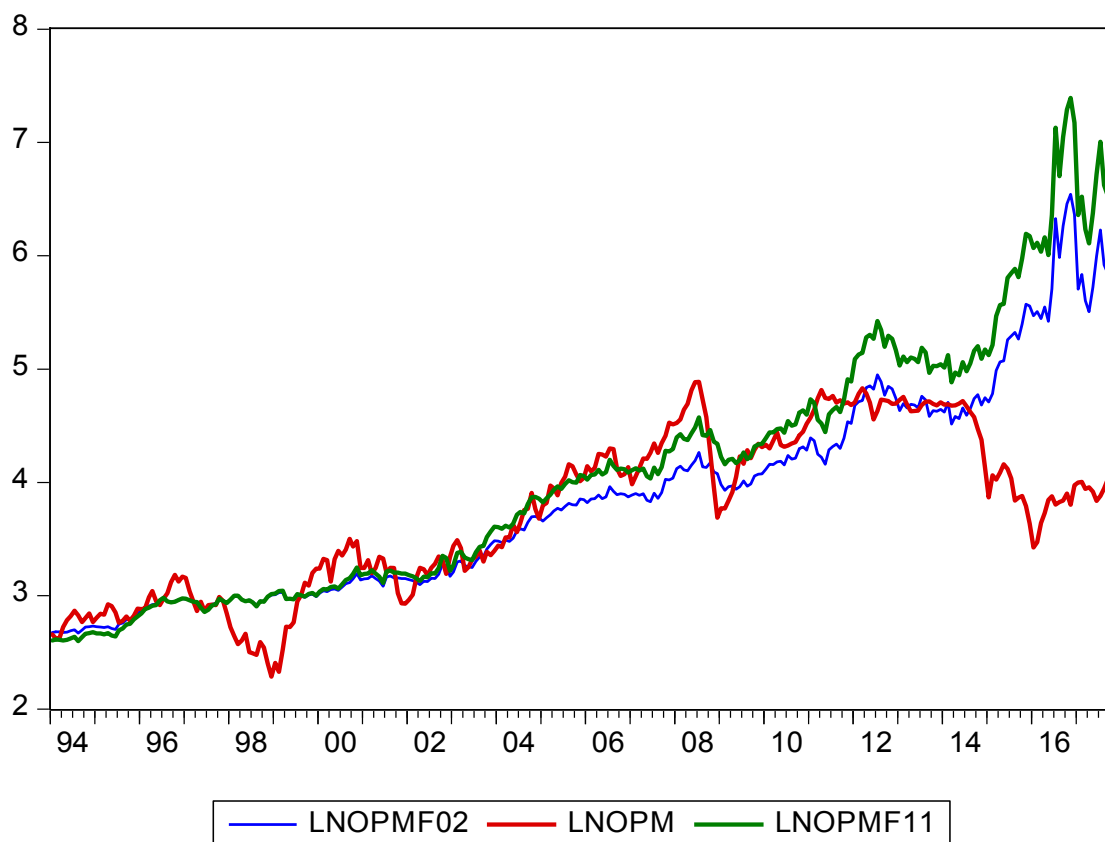


図 4-12 異なる期間のデータによる名目原油価格のフィッティング（月次データ）

LNOPM:実績, LNOPMF11 : ~2011 年による推計, LNOPMF02 : ~2002 年による推計

なお、こうした時系列データの回帰分析の場合、系列相関と定常性（単位根）の問題がある。系列相関については、年次データは Durbin-Watson 統計量(DW) が 2.0 に近く系列相関の可能性は低い、月次データは DW が低く系列相関の可能性が高い。そこで、年次データも含めて Newey-West による修正(HAC Standard errors & covariance)を適用し、その結果の t 値を式 (4-1) および(4-2) の下の段のカッコ内に示してある。 t 値は若干低下するものの、どちらの回帰でも十分有意である。

各系列の定常性の問題については、Augmented Dickey-Fuller Test による単位根検定を行い、その結果を表 4-1 に示した。余剰生産能力については、年次データ、月次データともに（対数変換後も含めて）、帰無仮説（単位根あり）の生起確率は低く、定常であると考えられる。しかし、原油価格の方は、年次データ、月次データともに単位根の可能性

は棄却できない。対数変換後の一次階差を取ると年次データ・月次データともに定常化するので、これらの系列は非定常の I(1)（1 次の和分）である可能性が高い。両系列がともに非定常であると、見せかけの回帰が生じる危険性があるが、ここでは一方が定常と解釈されるので、この問題にはこれ以上深入りしない。

表 4-1 各変数の Augmented Dickey-Fuller Test による単位根検定の結果

数値：帰無仮説（単位根あり）の生起可能性（MacKinnon(1996)の片側 p 値）

年次データ：SOPCY：余剰生産能力，ROPY：実質原油価格

月次データ：SOPCM：余剰生産能力，NOPM：名目原油価格

L…：対数値，DL…：対数一階階差，C：定数項

Augmented Dickey-Fuller Test (probability) Null Hypothesis: X has a unit root.

Annual Data

<u>SOPCY</u>	<u>LSOPCY</u>	<u>D(LSOPCY)</u>	<u>ROPY</u>	<u>LROPY</u>	<u>D(LROPY)</u>
0.0023	0.0162	0.0001	0.1851	0.2647	0.0026
SOPCY(-1)	LSOPCY(-1)	D(LSOPCY(-1))	ROPY(-1)	LROPY(-1)	D(LROPY(-1))
					D(LROPY(-1),2)
		C	C	C	
			Trend	Trend	

Monthly Data

<u>SOPCM</u>	<u>LSOPCM</u>	<u>D(LSOPCM)</u>	<u>NOPM</u>	<u>LNOPM</u>	<u>D(LNOPM)</u>
0.0001	0.0439	0.0000	0.2961	0.4051	0.0000
SOPCM(-1)	LSOPCM(-1)	D(LSOPCM(-1))	NOPM(-1)	LNOPM(-1)	D(LNOPM(-1))
					D(NOPM(-1)) D(LNOPM(-1))
		C	C	C	C
		Trend			Trend

以上の回帰は1説明変数による単純なものにもかかわらず、決定係数や有意性（Newey-Westによる修正後でも）が高く、自由市場が成立していた1994年～2011年については極めてよい当てはまりを示している。価格と余剰生産能力の間の弾力性が一定という前提はほぼ成立しており、各係数の値も安定していたと解釈される。さらに、その前半の原油価格が低位安定した期間のデータだけで回帰を行って、その結果に基づき以降について推計しても、かなりよい当てはまりを示し、2002年時点で2008年の価格高騰やその後の下落などが予測できたことになる。

しかし、2011年以降はシェール資源の開発の進行によりこの回帰からは乖離して、各プロットは異なる傾向を示し、それは拡大してきている。シェール資源については第6章で検討するが、まだデータの集積が不十分なので現時点では定量的な分析は行えず、本章では定性的な議論にとどめた。

もう一つ重要な点は、この回帰結果は供給曲線に相当し、上記では供給側の制約しか検討していないことである。実際には、この供給曲線と需要曲線との交点に原油価格と生産量が同時に決定されると考えられるので、将来の生産量（＝消費量）の推定には需要側の検討も必要である。

次節では、上記のうちいくつかの問題を回避するため、各変数の対数一階階差（成長率）をとって定常化し、需要側の指標としてOECD鉱工業生産指数を含めてVAR（ベクトル自己回帰）分析を行い、本節での結論を検証するとともに経済活動との相互作用を考察する。また、第5章では、需要を資本の関数と考えて、エネルギー（ここでは石油で代表させる）の累積消費量を用いて評価して（第1章参照）、すべてが内生的に決定する動学モデルを構築して解析する。

第2節 石油生産量・鉱工業生産・原油価格の相互作用

4.2.1. 先行研究のレビュー

Hamilton(2011) は、戦後の米国の不況と原油価格の上昇との関係を検証し、戦後の11回の不況のうち1回(1960年)を除いて原油価格上昇に伴っており、逆に12回の原油価格上昇のうち11回は不況を伴うことを示した。これに対して Labonte(2004) は、過去の多くの研究を総括し、次のような結論を導き出している。ある四半期の原油価格の10%の上昇は累積的に米国の経済成長を0.7-1.4%ポイント低下させる。この効果は、最初は小さいが何四半期かにおよぶ。原油価格の通常の変動は経済成長に微小な変動をもたらすだけだが、大規模な石油ショックでは、原油価格の上昇は数四半期続き、しばしば10%を超え、ほかの条件に変化がなければ不況をもたらす。一方で、原油価格は経済成長に対して明瞭な Granger 因果性を示さず、その効果は直截的ではなく、時代とともに逡減してきている。

Barsky and Kilian(2004) は米国のマクロ経済データを検証したところ、これまで提唱された原油価格の経済成長に対する影響を論じた諸説を支持する証拠は得られず、過去の石油ショックは米国の実質 GDP のスタグフレーションを説明するには不十分で、必要でさえないと結論付けた。逆に、従来は政変などの外生的要因により説明されていた原油価格の上昇はマクロ経済変数に起因している可能性が高いという。さらに、Kilian(2009) は、供給(石油生産量の成長率)、需要(実質船舶貨物輸送量の対数、トレンド除去)、実質原油価格(対数)の3変数からなり、供給ショック(全変数に影響)、需要ショック(同時点では供給には影響しない)および同時点では原油価格にのみ影響するショック(価格ショック)を考慮した構造 VAR(ベクトル自己回帰)モデルを構築して分析を行い、Barsky and Kilian(2004) の結論を確認した。

柳澤(2008) は原油価格の変動を説明するため、同様の構造 VAR 分析を行っている。ただし、需要として石油消費量の対前年同期伸び率、供給として石油生産量の対前年比伸び率を用いているのが異なる点である。しかし、実はこの両者の差は思惑や季節調整などのために積み上がる在庫の増減であるため、この「需要」と「供給」はほぼ同じ現象の両面を見ているに過ぎず、真の需給を反映していない可能性が強いと筆者は考える(前節参照)。事実、このモデルではショックのない時の趨勢価格(ベースライン)に需要および供給のショックを加えても(これを「ファンダメンタルな価格」と称している)現実の原油

価格変動をほとんど説明できず、その差を需給（「ファンダメンタルズ」）で説明できない「プレミアム」と解釈している。笛木ほか（2009）もほぼ同様の構造 VAR モデルにより原油価格の変動要因を分析しているが、需要に世界鉱工業指数の対数タイムトレンドからの乖離を用いている点が異なる。その結果、柳澤（2008）とは逆に、2002年以降の原油価格変動の大部分は需給ショックによって説明できるとしている。

このように先行研究は経済と原油価格の相互作用を認めているが、その内容は必ずしも明瞭ではなく、相互に矛盾する点もあり、予測ツールとしての有効性は限定的である。これは、供給として石油消費量の裏返しに過ぎない石油生産量を使用したことが一因であると筆者は考える。そこで以下では、石油生産能力の供給側への導入を試みる。

4.2.2. VAR（ベクトル自己回帰）モデルによる時系列分析

前節では余剰生産能力による原油価格の回帰を行い、1994年～2011年については当てはまりの良い結果を得た。しかし、そこには需要側の検討は含まれていなかった。そこで、上記の先行研究を参考に、需要と供給、すなわち石油生産量、原油価格および経済生産活動が相互に影響しあいながら同時決定すると考えて、構造 VAR 分析を行った。

期間としては前節で余剰生産能力と原油価格の安定的関係が見出された1994年4月～2011年8月の月次データを用いた（220サンプル、ラグ部分のデータも含む）。供給には世界の石油生産量の対数一階階差（成長率）、需要にはOECDの鉱工業生産指数の対数一階階差（成長率）、原油価格としてはDated Brentの月平均価格を米国の消費者物価指数（CPI）で2010年価値に実質化したものの対数値を用いた（名目価格を用いた前節とは厳密には対応していない）。鉱工業指数と米国消費者物価指数（CPI）は次の通りOECDサイト（<http://stats.oecd.org/index.aspx#>）より引用した。

OECD 鉱工業生産指数（月次データ，2005年基準，季節調整済み，全OECD合計）

OECD. Stat Extract > Industry and Services > Industry and Service Statistics

(MEI) > Production > Production of total industry sa, 2005=100 > OECD – Total
米国消費者物価指数（月次データ，2005年基準，全商品）

OECD. Stat Extract > Prices and Purchasing Power Parities > Prices and Price
Indices > Consumer price indices (MEI) > Consumer price - all items > Index,

2005=100（本指数は2005年を基準にしているが、原油価格を2010年価値に実質化するために、2010年を基準に変換して使用する）

これ以外のデータの出典は前節と同じである。使用した変数の水準値，対数值，対数一階階差のグラフを図 4-13 に示した。

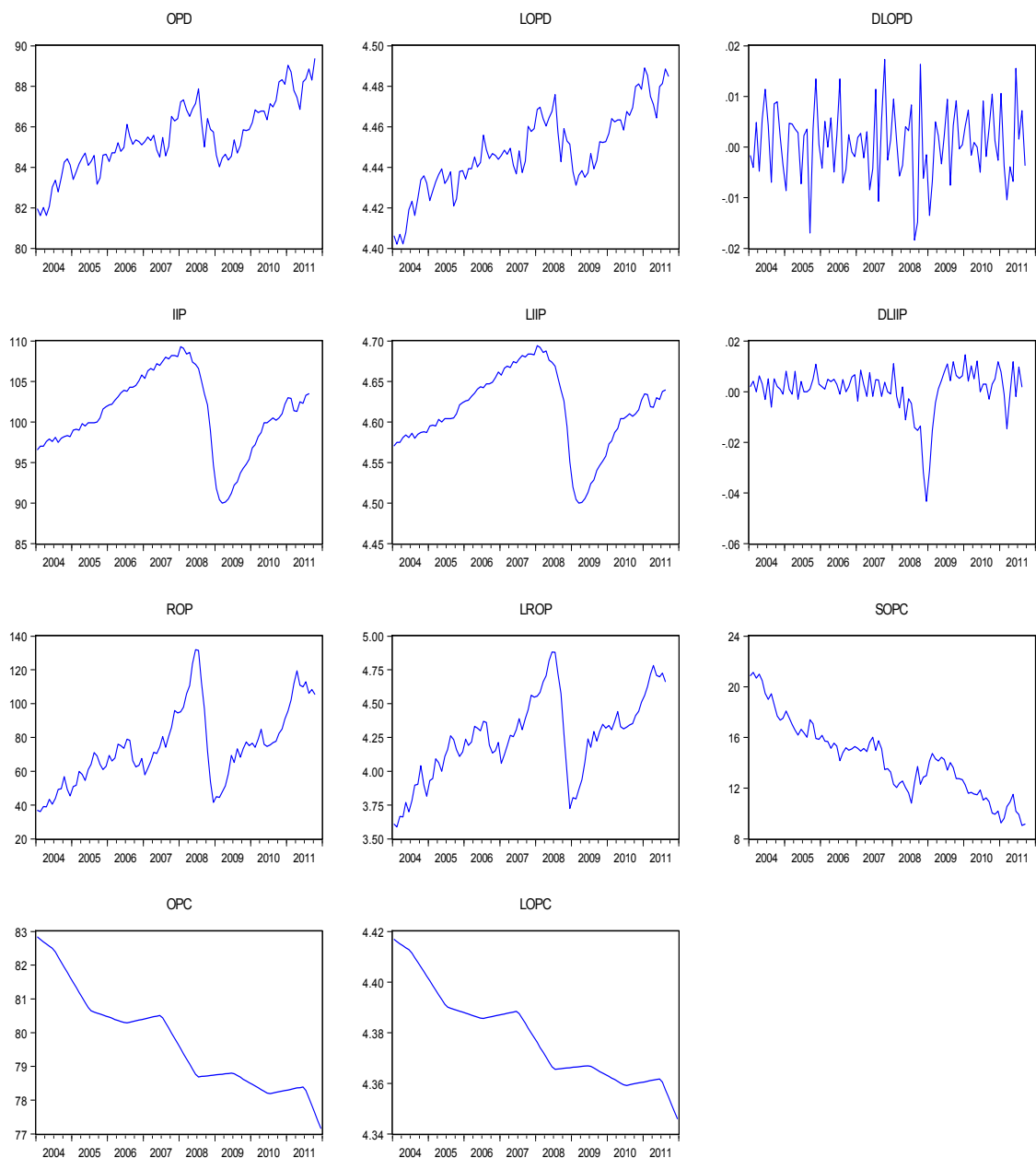


図 4-13 使用変数の水準値・対数值・対数一階階差（月次データ）

OPD：石油生産量（百万バレル/日），IIP：OECD 鉱工業生産（2005 年=100），

ROP：実質原油価格（2010\$/bbl），OPC：最大石油生産能力（百万バレル/日），

SOPC：石油余剰生産能力，L…：対数值，DL…：対数一階階差

ここで使用した構造 VAR モデルは次のような誘導形で記述できる（ベクトル・行列表示）。構造的ショックは供給，需要，価格の順に内生度が高まると考え，この順でコレスキー分解した（Kilian (2009) および笛木ほか(2009)も同じ扱いをしている）。ラグ長は情報量規準により（各種規準により最適ラグ長が異なるときは BIC(Schwarz SC)を重視）2期とした。

$$X_t = A_0 + \sum_{i=1}^2 A_i X_{t-i} + B \log OPC_t + e_t \quad (4-3)$$

各係数ベクトル・行列の内容を明示的に示すと次のようになる（ $i=1,2$ ）。

$$X_t = \begin{pmatrix} \Delta \log OPD_t \\ \Delta \log IIP_t \\ \log ROP_t \end{pmatrix} \quad A_0 = \begin{pmatrix} a_{10} \\ a_{20} \\ a_{30} \end{pmatrix} \quad A_i = \begin{bmatrix} a_{11i} & a_{12i} & a_{13i} \\ a_{21i} & a_{22i} & a_{23i} \\ a_{31i} & a_{32i} & a_{33i} \end{bmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix}$$

$$e_t = \begin{pmatrix} e_t^{OPD} \\ e_t^{IIP} \\ e_t^{ROP} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{11} & 0 & 0 \\ \phi_{21} & \phi_{22} & 0 \\ \phi_{31} & \phi_{32} & \phi_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_t^S \\ \varepsilon_t^D \\ \varepsilon_t^O \end{pmatrix}$$

ただし， $\Delta \log OPD_t$ ：t期の世界の石油生産量（百万バレル/日）の対数一階階差， $\Delta \log IIP_t$ ：t期の OECD 鉱工業生産（2005 年を基準）の対数一階階差， $\log ROP_t$ ：t期の実質原油価格（\$2010/バレル）の対数值， $\log OPC_t$ ：t期の最大生産能力（百万バレル/日）の対数值（外生変数）， e_t ：誘導形 VAR の誤差項（ e_t^{OPD} ：石油生産量の対数階差の誤差項， e_t^{IIP} ：鉱工業生産の対数階差の誤差項， e_t^{ROP} ：原油価格の対数值の誤差項）， ε_t ：構造ショック（ ε_t^S ：供給ショック， ε_t^D ：需要ショック， ε_t^O ：その他ショック）。すなわち，当該期においては，供給ショックは3内生変数のすべてに影響し，需要ショックは鉱工業生産と原油価格に影響し，その他ショックは原油価格だけに影響すると仮定している（Kilian(2009) および笛木ほか(2009)と同じ設定）。

このモデルによる推計結果を表 4-2 に示す。ラグ長は，上記したように情報量基準を用いて検討した結果，2期まで考慮している。

表 4-2 VAR モデルによる推計結果 (左：生産制約あり、右：生産制約なし)

DLOPD：石油生産量対数一階階差，DLIIP：OECD 鉱工業生産対数一階階差，

LROP：実質原油価格対数値，LOPC：最大石油生産能力対数値，C：定数項

…(-1)：1 期前、…(-2)：2 期前

Sample (adjusted): 1994M04 2011M08 Included observations: 209 after adjustments Standard errors in () & t-statistics in []				Sample (adjusted): 1994M04 2011M08 Included observations: 209 after adjustments Standard errors in () & t-statistics in []			
	DLOPD	DLIIP	LROP		DLOPD	DLIIP	LROP
DLOPD(-1)	-0.084754 (0.06769) [-1.25207]	0.037471 (0.04527) [0.82768]	0.152464 (0.70019) [0.21775]	DLOPD(-1)	-0.079784 (0.06774) [-1.17771]	0.034776 (0.04524) [0.76879]	0.008247 (0.72290) [0.01141]
DLOPD(-2)	-0.303770 (0.06743) [-4.50526]	-0.107345 (0.04509) [-2.38044]	-0.651046 (0.69745) [-0.93347]	DLOPD(-2)	-0.298034 (0.06745) [-4.41884]	-0.110455 (0.04504) [-2.45259]	-0.817501 (0.71971) [-1.13587]
DLIIP(-1)	0.255072 (0.10085) [2.52912]	0.340221 (0.06745) [5.04392]	2.050763 (1.04322) [1.96579]	DLIIP(-1)	0.262346 (0.10094) [2.59905]	0.336278 (0.06740) [4.98926]	1.839718 (1.07711) [1.70801]
DLIIP(-2)	0.056348 (0.09982) [0.56450]	0.300436 (0.06676) [4.50018]	0.957609 (1.03254) [0.92743]	DLIIP(-2)	0.083201 (0.09812) [0.84799]	0.285879 (0.06552) [4.36354]	0.178450 (1.04699) [0.17044]
LROP(-1)	-0.003018 (0.00696) [-0.43340]	0.012604 (0.00466) [2.70638]	1.048219 (0.07203) [14.5532]	LROP(-1)	-0.005452 (0.00675) [-0.80762]	0.013923 (0.00451) [3.08898]	1.118838 (0.07203) [15.5326]
LROP(-2)	0.006762 (0.00682) [0.99212]	-0.015434 (0.00456) [-3.38581]	-0.147676 (0.07050) [-2.09467]	LROP(-2)	0.006112 (0.00681) [0.89690]	-0.015081 (0.00455) [-3.31442]	-0.128810 (0.07272) [-1.77142]
C	-0.218204 (0.15761) [-1.38442]	0.122514 (0.10541) [1.16222]	6.339006 (1.63035) [3.88813]	C	-0.001172 (0.00390) [-0.30048]	0.004854 (0.00260) [1.86455]	0.041535 (0.04160) [0.99834]
LOPC	0.046531 (0.03378) [1.37740]	-0.025226 (0.02259) [-1.11651]	-1.350163 (0.34944) [-3.86383]	R-squared	0.120351	0.406458	0.975895
R-squared	0.128576	0.410117	0.977562	Adj. R-squared	0.094223	0.388828	0.975179
Adj. R-squared	0.098228	0.389573	0.976780	Sum sq. resids	0.013484	0.006012	1.535408
Sum sq. resids	0.013358	0.005975	1.429251	S.E. equation	0.008170	0.005456	0.087184
S.E. equation	0.008152	0.005452	0.084325	F-statistic	4.606171	23.05496	1363.009
F-statistic	4.236718	19.96361	1250.987	Log likelihood	711.7191	796.1271	216.9066
Log likelihood	712.7008	796.7732	224.3935	Akaike AIC	-6.743723	-7.551456	-2.008675
Akaike AIC	-6.743549	-7.548069	-2.070751	Schwarz SC	-6.631779	-7.439511	-1.896731
Schwarz SC	-6.615612	-7.420133	-1.942815	Mean dependent	0.001298	0.001586	3.710842
Mean dependent	0.001298	0.001586	3.710842	S.D. dependent	0.008585	0.006978	0.553386
S.D. dependent	0.008585	0.006978	0.553386	Determinant resid covariance (dof adj.)		1.42E-11	
Determinant resid covariance (dof adj.)		1.33E-11		Determinant resid covariance		1.28E-11	
Determinant resid covariance		1.18E-11		Log likelihood		1731.473	
Log likelihood		1739.741		Akaike information criterion		-16.36816	
Akaike information criterion		-16.41857		Schwarz criterion		-16.03233	
Schwarz criterion		-16.03477					

このモデルの特徴の一つは外生変数として最大生産能力（右辺第3項）を入れたことである。これは、前節までの検討で埋蔵量に起因する余剰生産能力が大きな規定要因となっていることが判明したからである。しかし、余剰生産能力の算出には内生変数である石油生産量が用いられており、多重共線性や系列相関などの問題を避けるため、ここでは「最大生産能力」（前節参照）を用いた。生産能力は既発見埋蔵量に依存するので、ここでの対象期間であれば既知であり、外生変数として扱える。また、生産能力は、発見埋蔵量が長い年月をかけて生産プロファイルに変換されるので、発見から生産開始までの評価・開発期間に3～9年、生産開始からピーク生産までのビルドアップ期間に4～14年を要し、生産期間は26～114年にわたる。したがって、10年程度の将来予測を行うのであれば、既に確定している既発見油田の埋蔵量だけを用いても生産能力の推定誤差は小さい。

これより遠い将来を予測する際には今後の埋蔵量追加を含めて評価する必要があるが、第3章第3節で検討したように、将来の油田発見数さえ推定できれば個々の油田の規模、ひいては追加埋蔵量は推定できる。さらに、この後議論するように、将来の油田発見数は石油生産量と原油価格からある程度推計できるので、この意味では生産能力も外生変数ではなく、むしろシステム内で決定される内生変数といえる。第5章では、この因果関係を含めて内生化し、すべての相互作用のフィードバック・ループの解明を試みる。

このモデルにより、原油価格上昇前の2003年末までのデータに基づき推計を行い、2004年以降について原油価格（対数）の条件付き予測値（ベースライン：ショックのない場合、青曲線）を求め、実績（赤線）と比較したものが図4-14である。2008年半ばの価格急騰とその後の急落などの短周期変動は正確には反映されていないが、2004年以降の価格上昇の長周期トレンドがかなり正確に再現されている。図4-15は生産能力による制約（式(4-3)の右辺第3項）を入れない場合で、こちらでは2003年以前の緩やかに上昇するトレンドが単に延長されるだけで、2004年以降の価格上昇が再現されていない。すなわち、図4-14の推計では外生変数（生産能力による制約）の導入が効果的であったことを示している。柳澤（2008）のVAR解析では、供給および需要ショックを加えても図4-15のベースラインに近い推計しか得られておらず（これを「ファンダメンタル」と称している）、価格変動（上昇）の大半はその他（価格）ショック（主として投機を想定）に起因する「プレミアム」であると解釈している。しかし、この解析では需要と供給に同一現象の表裏ともいべき石油生産量と消費量（この差は在庫増減）を使用していて、真の需給の均衡を検討していないこと（前節参照）がその原因であると考えられる。

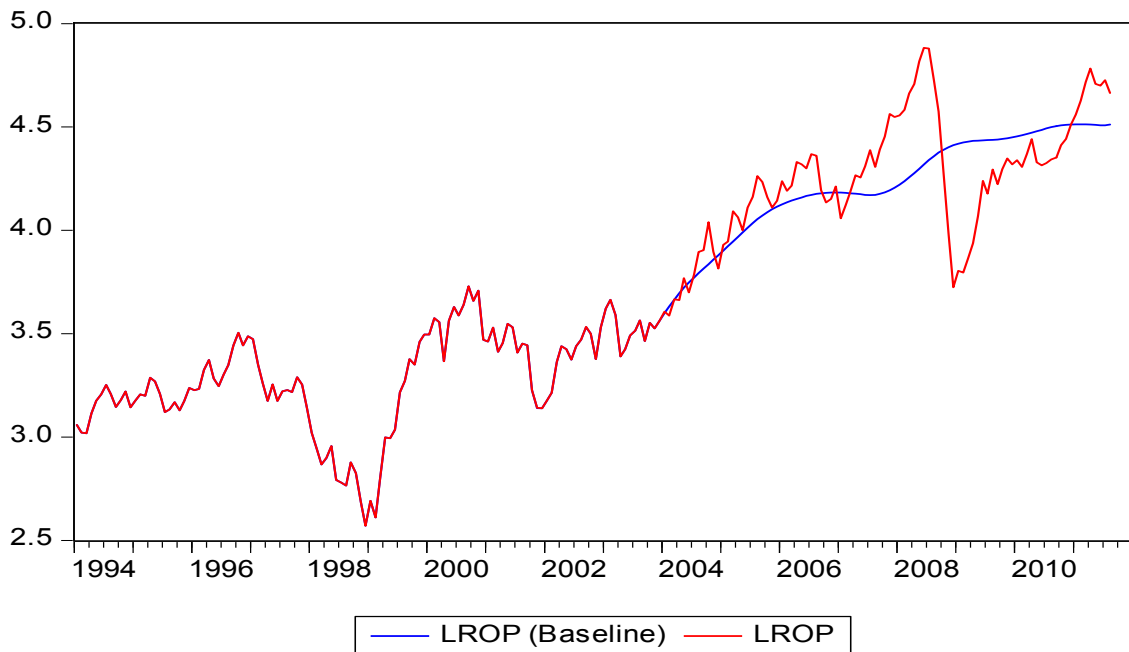


図 4-14 原油価格(対数)の条件付き予測値(ベースライン)と実績の比較(生産制約あり)

LROP(Baseline) : 条件付き予測値 (生産制約あり), LROP : 実績

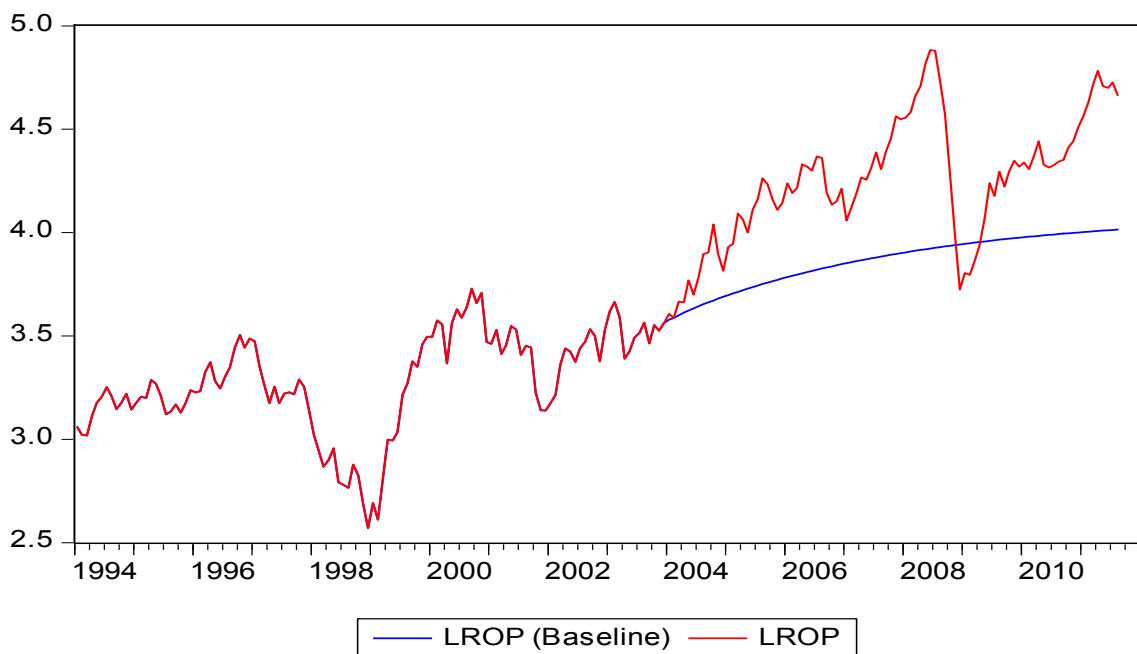


図 4-15 原油価格(対数)の条件付き予測値(ベースライン)と実績の比較(生産制約なし)

LROP(Baseline) : 条件付き予測値 (生産制約なし), LROP : 実績

2004年以降について、図4-14のベースラインと実績に前節同様の余剰生産能力の回帰結果による予測も加えて比較したのが図4-16である。生産制約を加えたVARと比較しても、余剰生産能力による回帰のほうが、2008年半ばの価格急騰とその後の急落など現実を（振幅は小さいものの）よく再現している。これは、前節の回帰では現実の生産量を外生的に使用しているのに対し、本節のVARでは生産量も推計の対象としているためである。しかし、両者の全体傾向は一致していて、この生産能力を外生変数として加えたVARによっても前節の回帰が追認されている。

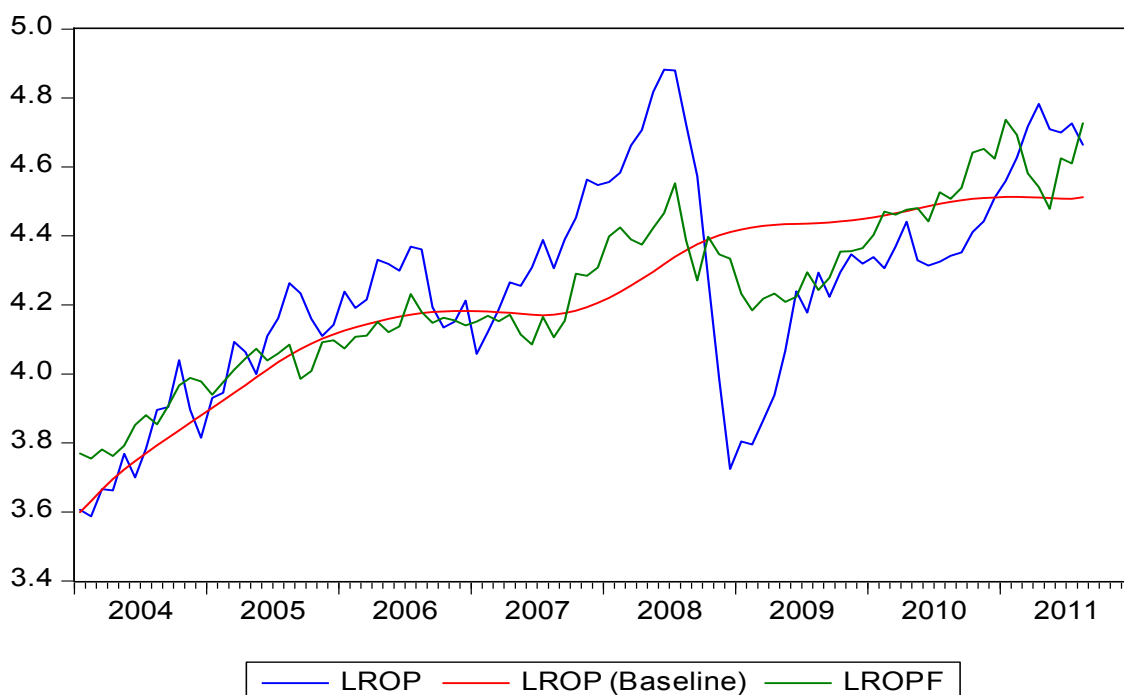


図4-16 原油価格（対数）の実績・余剰生産能力による回帰・VAR予測値（ベースライン）

LROP：実績値，LROP（Baseline）：VAR推計値，LROF：余剰生産能力による回帰

このように、過去の原油価格の長周期変動はかなりの部分が供給制約を入れた推計によって説明できるが、誤差項（各種ショック）が確率的に表現されるため、期待値（ベースライン）では、現実の価格変動より振幅が小さく、また短周期の価格変動は説明できない。このVARモデルではベースラインとの乖離を3種類の構造ショックにより説明している。図4-17は、生産制約ある場合の、これら3種類にそれぞれ1標準偏差のショック（イノベーション）が与えられた時の、それに対する各内生変数の応答を示している。先行研究に比べると一般に応答期間が短い、長周期の変動は外生変数による供給制約により既に説明されているためと解釈される。

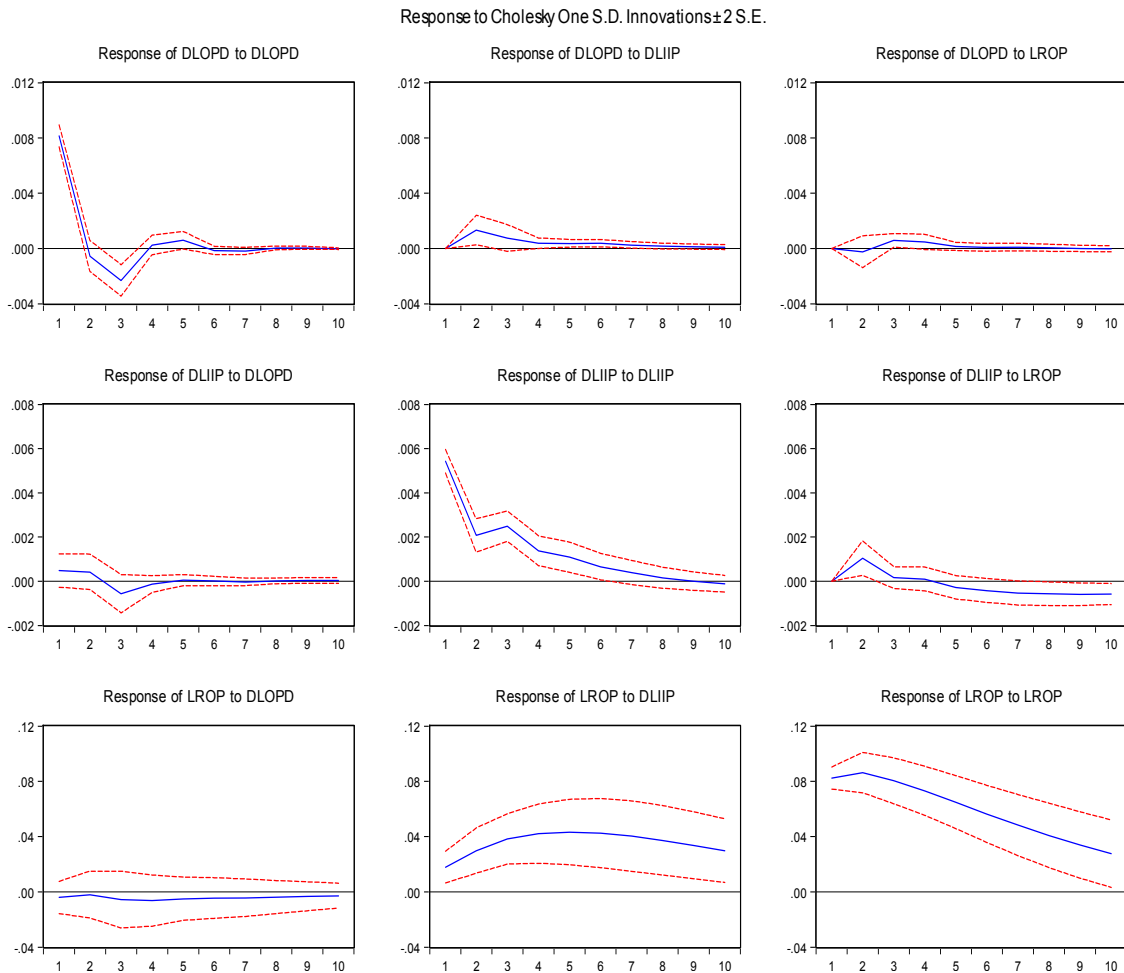


図 4-17 VAR モデルで推定した各変数の各構造ショック（1標準偏差）に対する応答

石油生産の各ショックに対する応答は、予期せぬ石油生産（供給）ショックに対しては同時点には当然ながら同方向の応答を示すが、翌期および翌々期にはむしろ逆方向の応答を示している、予期せぬ生産障害（または急増）に対して他地域などからの増産（または減産）で補填していると解釈される。需要ショックに対しては、2~4期後に同方向の応答を示している、需要の増減に対して生産が調整されている。その他（価格）ショックの影響は小さく、次節で検討するように、原油価格の石油生産への影響は極めて長期のタイムラグを伴うため、このスパンでは表現されないものと解釈される。

鉱工業生産は、供給（石油生産）ショックに対し、有意ではないものの、当初2期は同方向（正）の、その後1~2期は逆方向（負）の応答を示している、供給増による経済加速とその後の調整を表わしている可能性がある。需要（鉱工業生産）ショックへの応答は大きく、数期にわたって正の影響がある。その他（価格）ショックへの応答は2期目には正

であるが、その後は長期にわたって負の影響が継続・増大している。

原油価格は、供給ショックに長期にわたって負の応答を示している可能性があるが有意ではなく、供給制約は既に外生変数により説明済みのためだと思われる。需要（鉱工業生産）ショックに対しては長期かつ大きな正の応答を示している。その他（価格）ショックに対する原油価格の応答は正で極めて大きく、逡減しつつも長期に及んでいる。価格の変動が自らにより増幅されているわけで、市場の思惑や心理などにより価格がオーバーシュートしている可能性がある。

これらの結果は Barsky and Kilian(2004)の結果と調和的である。彼らは中でも原油価格の供給（石油生産）ショックに対する応答の小ささに注目し、原油価格が供給に支配されるという伝統的な見解は誤りであると論じている。しかし、前章でも検討したように石油生産量は、余剰生産能力を左右反転した供給曲線と需要曲線との交点に価格とともに決定される「結果」と考えるべきで、石油生産量で供給サイドを代表させることはできず、生産能力でないと供給は正当に評価できないと筆者は考える。ただし、供給サイドの短周期のショックは原油価格にほとんど影響を与えないことは筆者の結果でも確認された。

上記の VAR モデル（供給制約付き）では、2004 年以降のショックのない場合の原油価格（対数）の条件付き予測値（ベースライン）（図 4-14）と実績値との差は 3 種類の構造ショックに起因すると解釈される。この残差を 1 期ごとに下三角行列（ ϕ_{mm} ）と各ショックの積にコレスキー分解して、どのショックに起因するかを示した歴史的要因分解が図 4-18 である。このグラフは、ショックなしのベースライン（図 4-16 の赤曲線）を水準 0 の水平線としたときの各時点の実績値との差と、それが 3 種類のうちどのショックにより説明されるかの内訳を示している。

供給（石油生産）ショックの影響は、全期間を通して極めて小さく、外生的に与えた生産能力の制約によりほぼ説明し尽くされているという、図 4-17 および上記の議論が裏付けされた。このモデルによれば、2008 年後半から 2009 年にかけてのベースラインの変動を超えた大きな原油価格の下落はその大半が需要ショックに起因している。この時期は「リーマンショック」など金融に起因するとされる不況に相当している。需要ショックは価格変動に先行する傾向が認められる。一方、2008 年前半の原油価格高騰を含む、そのほかのベースラインからの乖離の多くは、主としてその他（価格）ショックに起因していて、価格変動に同期またはやや遅行している。原油価格はおもに思惑や心理的な自励起反応により価格上昇が増幅され、需要の減退ショックにより下降すると解釈できる。

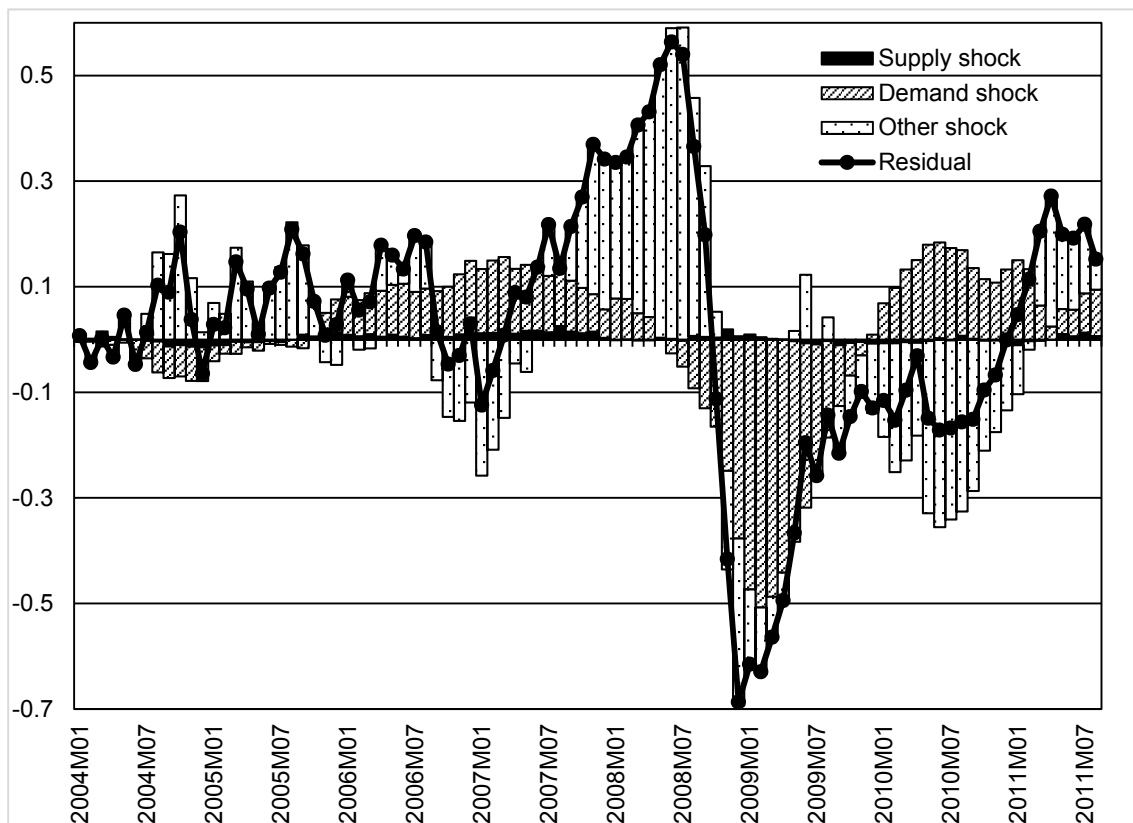


図 4-18 構造 VAR による生産制約ありのベースライン（水準 0 の水平線）と実績との乖離（残差）の歴史的要因分解

本研究では需要に OECD の鉱工業生産指数を用いていて、中国を含む BRICS など、経済発展の著しい国々が含まれていない。これらの国々については信頼できるデータが得られなかったからであるが、本モデルで原油価格が上昇時に需要ショックにあまり応答していない原因になっている可能性があり、今後の検討課題である。

第3節 石油生産量・原油価格と油田発見数の関係

本章第1節で議論したように、生産量（または需要）が与えられれば、既発見油田の埋蔵量データに基づき、過去および近い将来（10年程度）の原油価格が比較的正確に推計できる。しかし、それより遠い将来の推計には今後の埋蔵量追加を推定して与える必要がある。追加埋蔵量は、今後の油田発見数さえ与えられれば、第3章第3節で検討した方法で推定できる。油田発見数は探鉱量に依存し、探鉱量は原油価格と石油需要予測に依存すると考えられる。この関係の評価のために、石油需要を需給均衡に決定した石油生産量で代表させ、油田発見数が石油生産量および原油価格にどのように依存するかを考察する。

前節のVAR分析では、石油生産量の各種構造ショックに対する応答はせいぜい4期程度の生産調整に限定されていて、それより長期の関係は表現されていない。しかし、第2章および第3章で検討したように、需要や価格の影響が石油生産に及ぶためには、非常に長いラグタイムを要する。一般に油田は、探鉱→試掘井掘削→油田発見→埋蔵量評価・開発案策定→開発作業という数年から十数年におよぶ準備期間を経て生産開始に至り、埋蔵量はその後、数年～十数年のビルドアップ期を経て、数十年～百年を超える期間にわたって生産される。

この過程はVAR分析などでは把握困難であるが、次の理由により、長期的には石油生産量と原油価格が探鉱量を通して油田発見に影響を与え、その結果は石油生産量にフィードバックされるはずである。

- ① 第2章で検討したように、石油生産量は需要曲線と供給曲線の交点に決定される均衡なので需要情報も反映されているはずである。
- ② 埋蔵量はストック変数で、マクロ経済学における資本ストックに相当し、生産量は減耗に、発見量は投資に相当すると考えることができる。生産量が多く減耗が大きい時はそれを補うべく、投資すなわち発見量も大きい必要があり、企業は埋蔵量の補填目的で探鉱を促進し、発見油田数も増加する。
- ③ 原油価格が高くなると油田の経済限界規模が低下し、試掘対象のプロスペクト（未試掘の油田の候補）の数が増加し、試掘数ひいては発見油田数が増加する。

そこで、信頼できるデータの揃っている1952年～2011年の年次データ（石油生産量は前期、原油価格は7期前までのデータも含む）で、石油生産量および原油価格による回帰分析で発見油田数の推計を試みた。それぞれの説明変数について異なるラグ長について情

報量規準などによる当てはまりの良さの比較を行った。石油生産量については一期前の数値を使うのが最も説明力が高く、遅滞なく埋蔵量減耗の補填努力が行われていることがわかる。一方、原油価格については、短期的な変動ではなく、数期にわたる価格の水準が油田発見数に影響を与えている。しかし、異なる期の原油価格を独立の説明変数として扱うと、多重共線性などの問題が生じるため、連続する数期の値を合計したものを説明変数に選ぶと1期～7期前の合計値（平均値を使用しても、係数が異なるだけで基本的に同じ）が最も良い当てはまりを示す。この回帰による推計を実績と比較したのが図4-19で、全体の傾向はかなりよく再現されている。

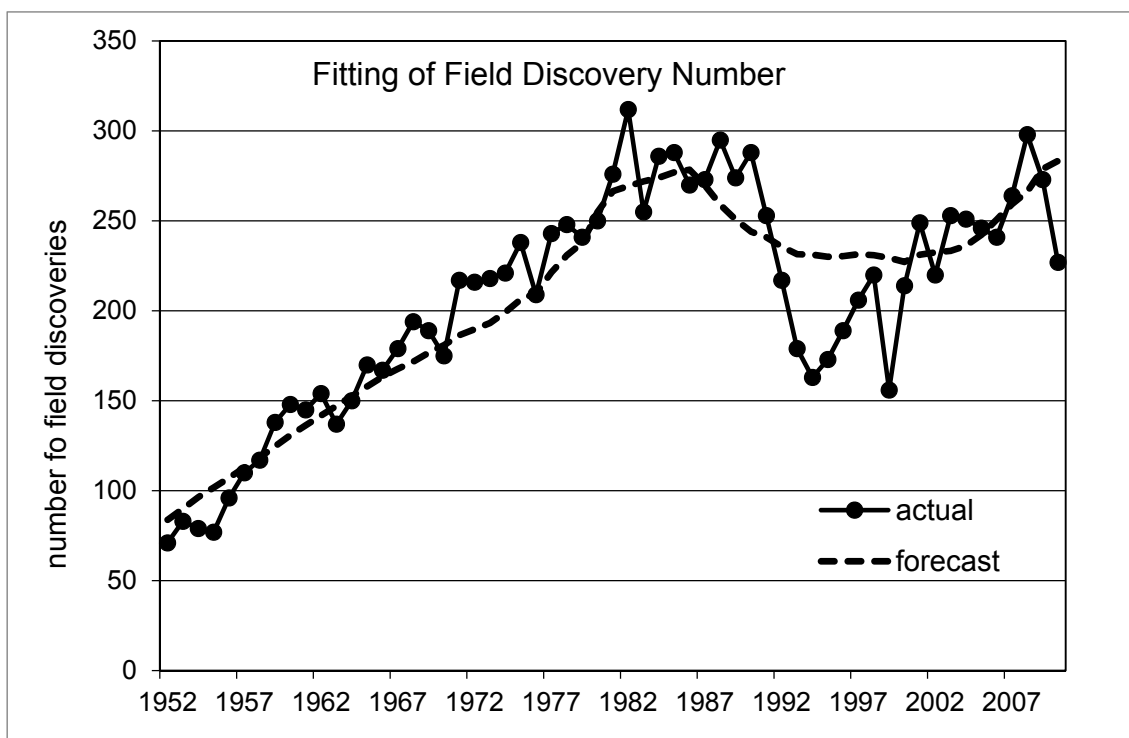


図 4-19 発見油田数の原油価格および石油生産量による回帰結果（破線）と実績（丸）

この回帰は次のように定式化される（60 サンプル）。

$$\begin{aligned}
 \widehat{DISCY}_t = & -428.6 + 61.46 \times OPDY_{t-1} + 0.179 \times \sum_{i=1}^7 ROPY_{t-i} \\
 & (-7.54) \quad (9.97) \quad (6.17) \\
 & (-6.11) \quad (7.61) \quad (5.16) \\
 \text{Adj } R^2 = & 0.823 \quad DW = 0.864
 \end{aligned}
 \tag{4-4}$$

ただし、 \widehat{DISCY}_t ：年油田発見数推計値、 $OPDY_t$ ：年石油生産量（単位：百万バレル）、 $ROPY_t$ ：年平均実質原油価格（\$ 2010/バレル）、式の下のカッコ内は t 値（下段は Newey-West による修正後の値）。

決定係数は高いが、Durbin-Watson (DW) 統計量が低く、この回帰では誤差項が正の系列相関を持ち、それが当てはまりの良い回帰の原因になっている可能性がある。そこで、Newey-West による修正 (HAC Standard errors & covariance) を適用し、その結果の t 値を下の段のカッコ内に示した。t 値は若干低下するものの十分有意である。

さらに、これらの変数は水準値を使用しているため、単位根検定 (Augmented Dickey-Fuller Test) の結果ではこれらの系列はどれも $I(1)$ (1 次の和分) と判定され、見せかけの回帰が生じている危険性がある。そこで回帰残差に単位根検定 (Augmented Dickey-Fuller Test) を施すと、その t 値は -3.7106 となる。Mac Kinnon の共和分検定臨界値表 (MacKinnon, 1991) により評価すると、危険度 5% (no trend) ならば単位根の存在が棄却され ($C(0.05)=-3.4396$)、共和分関係が成立している可能性が高く、そのときは見せかけの回帰の問題は回避される。

しかし、これらの問題は完全に解決したわけではなく、さらに以下の問題もある。

- (1) 油田発見数が石油生産量と原油価格で決定するというこのモデルは過度に単純化されており、より正確には産油国との契約条件や探鉱技術などにも依存しているはずである。
- (2) 仮に石油生産量と原油価格だけを考慮するにしても、それらの単純な線形結合で油田発見数が近似できる理論的根拠が示されていない。
- (3) 過去のデータでは比較的良い当てはまりを示しているとはいえ、それは将来もこの関係が継続することを保証するものではない。特に、過去のレンジをはみ出す（たとえばより高い原油価格の）外挿推計については信頼度が落ちる。
- (4) 2011 年以降はシェール資源の開発が進行しており、上記のような単純な推計では説明が困難である。第 3 章および本章の方法は、シェール資源に対しても有効であると考えられるが、現時点では解析を行うにはデータが不足している。

第4節 第4章のまとめ

- (1) 従来の原油価格決定論は、需給均衡説、地政学説、投機説またはそれらの組み合わせに大別されるが、実データからはこれらすべてが否定される。ただし、そのときの需給均衡説は石油の生産と消費の差(在庫増減)が価格を決定するというもので、生産能力と生産量(=消費量)を比較する「真の需給均衡説」とは異なる。
- (2) 従来は正確な生産能力は未知であったが、油田(埋蔵量)発見履歴が生産プロファイルを経て生産能力になると考えてその推移を計算し、その1.2倍を「最大生産能力」とみなした。これから実際の生産量を差し引いたものが余剰生産能力となり、その原油価格に対するプロットは、供給曲線を裏返して固定したものに相当する。
- (3) 過去のプロットからは、次の6期間で異なるトレンドが認められる。
 - (1965年)～1973年 メジャー支配
 - 1973年～1978年 産油国・独立系石油会社抬頭
 - 1979年～1985年 OPEC(主としてサウジ)生産制限
 - 1985年～1994年 自由市場への移行期
 - 1994年～2014年 自由市場均衡(2011年以降はシェール資源の影響)
 - 2014年～ シェール資源開発拡大
- (4) 上記のうち自由市場均衡期間のデータは明瞭なトレンド上に乗り、両対数プロットで直線近似され、余剰生産能力と原油価格の間の弾力性が一定であることを示している。この期間の年次および月次データについて最少二乗法で原油価格を推計する回帰を行った(月次は1994～2011)。一変数による回帰だが、決定係数は極めて高く、余剰生産能力(すなわち生産量)さえ与えられれば、原油価格はかなり正確に推計できる。
- (5) 上記の回帰(月次)を、原油価格が低位安定であった2002年までのデータだけで行って2011年まで推計しても当てはまりは良い。したがって、2003年時点で、その後の生産量を予測して(過去の生産実績はほぼ線形増加)推計を行えば、2008年頃にかけての価格高騰が予測できていたことになる。
- (6) 生産量は実際には需要と供給の均衡に(価格と同時に)決定すると考えられるが、上記検討では需要曲線は予測できていない。そこで石油生産量(供給)、鉱工業生産(需要)、原油価格の3変数で、2003年までのデータでベクトル自己回帰(VAR)

分析を行い、その結果で 2004 年～2011 年の予測を行った。この 3 係数だけだと原油価格予測は緩やかに上昇するだけで、実績との乖離は大きい。しかし、上記で求めた生産能力を外生的な制約として組み込むと、現実の原油価格の上昇トレンドが再現され、長周期的な変動は生産制約に大きく依存していることが分かった。

- (7) ただし、期待値に相当するベースライン（ショックなし）では短周期の価格変動は再現されていない。そこで実績とベースラインの残差を一期ごとに 3 種類のショックに割り当てる歴史的要因分解を行った。供給ショックはほとんど残っておらず、上記の外生的な生産制約でほぼ説明し尽くされている。価格上昇期には需要ショックが先行的に影響しており、下降期にはその他（価格）ショックがやや遅行的に効いていて、心理的な自励起反応と解釈される。
- (8) 上記（2）の生産プロファイルによる積み上げで、近い将来までの生産能力は推定できるが、遠い将来については新規発見油田の埋蔵量の影響を考慮する必要がある。第 3 章の手法により油田発見数がわかれば埋蔵量、ひいては追加生産能力が推定できる。そこで、油田発見数を生産量と原油価格で推計する回帰を検討し、前期の生産量と 7 期前までの原油価格の合計（または平均）で比較的高い精度の推計が行えることが分かった。
- (9) こうして供給側については「評価の環」が完成し、将来にわたって生産能力の推定が行え、需要さえ予測できれば将来の生産量・価格が推定できる（需要も含めた内生的モデルは次章で検討する）。しかし、これは 1994 年～2011 年の在来型石油を対象としており、2011 年以降のシェール資源の導入については、データの不足する現段階では「評価の環」に含まれていない（シェール資源および資源の遷移については第 6 章で検討する）。

第5章 石油の消費と価格の内生的動学分析

第1節 内生的力学系モデル

5.1.1. モデルの考え方

前章までの検討で、経済とエネルギー資源（特に石油）は相互に影響しあうフィードバック・ループを形成して成長してきたことが明らかになり、供給側については将来予測も合理的に行えるようになった。そこで本章ではこれに需要側も加えて全体を、すべてが内生的に決定され、それが時間と共に変化していく動学モデルを構築する。ここでは、経済をエネルギー消費量（＝生産量）で代表させ、その他の経済要因（財政・金融・物価・金利・失業・貿易・為替・税など）をすべて捨象し（ただし、エネルギー資源の相対価格（ここでは実質原油価格）は用いる）、経済とエネルギーの相互作用だけで経済は決定し、成長すると考える（第1章参照）。これは過度の単純化ではあるが、石油危機の経験や先行研究などからエネルギー（特に石油）消費量とその価格が経済変動の原因の一つとなっているのは明らかであり、一方、伝統的な経済学（例えば、経済を資本と労働の関数とみなす）では実効的な予測が行えていないことから、エネルギーと経済の関係に焦点を当てるものである。

需要は、①蓄積してきた資本が要求（または制限）する量、および②その範囲で消費者が要求する量に依存するが、ここでは②は需要曲線上で価格に応じて決定すると考える。したがって、需要曲線（の位置）は基本的に資本規模に依存するが、第1章（図1-5）で検討したように投資がエネルギー消費量（＝生産量、フロー）で代表できるので、資本は累計エネルギー消費量（ストック）で表現されると考える。

前章までに得た知見に基づくが、その法則や手法のすべてを取り込むのではなく、より単純化して、全体としての傾向、特に過去の再現と将来予測の可能性を探ることを目的とする。モデル自体は、現実とのマッチングを可能にできるよう多くの指数を入れて一般性・柔軟性を持たせてあるが、ここではあえて過去を忠実に再現することを目指さない。むしろ、ほとんどの指数に1を入れるなど、最も基本的・中立的なケースについて検討し、それにもかかわらず現実に類似した生産量（すなわち経済規模）や価格のパターンが出現するか否かの検証に重きを置いた。

前章までに検討したように、本モデルには本来は確率論的な部分も含まれる。したがって、それらの部分の揺らぎを確率分布で表現した、例えばモンテカルロ・シミュレーションを行

うべきであるが、それを行っても多くの出力を統計的に処理した確率的な結果で評価せざるを得ない。そこでここでは、煩雑化を避け、揺らぎを含まないいわば期待値（多数の試行を行った時の平均）に相当する出力（第4章第2節の「ベースライン」に相当）のみで検討を行う。揺らぎの確率分布を加えた解析は今後の課題である。

5.1.2. モデルの概要

マクロ経済学では、フローである生産の一部が消費されずに投資されてストックである資本が増加し、その資本規模に応じて生産・需要が拡大していくと考える（労働は無視する、または、1人当たりで考える、詳細は第1章）。伝統的にはGDPなど貨幣価値で計測されるが、その計測や変換などが一意的ではなく、金融等の「虚業」や一部の富者が誇張されているという批判もある（第1章参照）。エネルギーで経済を計測すると、これらの問題の一部が解消され、内生的なフィードバックで経済の変動や循環が記載できる可能性がある。そこで金額に代えてエネルギーを基準として経済を計測する。エネルギー消費フローの一部がストックとして蓄積され、これが次の需要を決定するという循環で経済が成長すると考える。金属や工業製品のみならず農作物、畜産物、漁獲などほとんどの生産には多量のエネルギー（例えば玄米1kg, 3,500kcal 栽培には石油換算0.35L, 約3,000 kcal : 文部科学省資料）の投入が必要なことを考えれば（第1章参照）、この単純化にもそれなりの正当性があり、これによりエネルギーサイクルが内生的に完結して記載できる。

この考え方にに基づき、エネルギー需要を価格と累計消費量の関数で表現し、前章までに検討した資源の可塑性、探鉱・発見過程、生産能力（減退曲線）などと結合したモデルを構築し、その中ですべてが内生的・自己完結的に決定すると考える。外生的ショックは確率的に表現可能だが、現段階では煩雑化を避けるため組み込まない。基本的に前章までの検討結果に基づくが、大幅に簡略化している。

- 1) エネルギー（ここでは石油で代表させる）の各期（年）の生産量と消費量は常に一致する。この差は在庫変動であるが、これは価格決定の下流側なので消費の一部とみなす（第4章第1節参照）。
- 2) エネルギー消費は経済規模を代表し、その一部は投資を経て資本として蓄積し、資本規模に応じてエネルギー需要が喚起されるという形で成長する。各期の経済規模はエネルギー生産量（＝消費量）で表現され、資本は累計エネルギー生産量（＝累計消費量）の関数となる。したがって、各期のエネルギー需要はそれまでの累計生産量（資本）の

関数となる。この過程で、産出の一定割合が貯蓄（消費されない部分）を経て投資になるという、ソロー＝スワンモデル（Solow, 1970）と同じ仮定が、暗黙的に組み込まれている。

- 3) エネルギー資源の賦存量は膨大で、ここで考える中期的経済活動の制約にはならないが、そのうちどれだけが資源量になるかは、技術や価格により決定され（第1章で検討したように、環境汚染は累計生産量の関数であるが、環境制約はこの段階では無視する）、資源量は価格（技術も価格に依存すると考える）により可塑的に伸縮する（資源の代替もこの延長で捉え、資源間競合は第6章で検討する）。本モデルでは賦存量の制約は明示的に入れず、資源量は価格に応じて可塑的に増減し、その程度は規模(品位)分布（特にフラクタル次元）に依存する。
- 4) 資源量はそのままでは生産には結びつかず、まず探鉱活動により発見され発見量となる。探鉱量は価格に、探鉱量当たり発見量は未発見資源量（資源量－累計発見量）に依存するため、その積である発見量は価格と未発見資源量の関数になる。ただし、実際の試掘までには地震探査などのリードタイムが必要であるため、発見量は現在の価格ではなく数年前の価格の関数になる。第4章第3節の回帰では、7年前～1年前の価格の合計(または平均)でよい当てはまりを得たが、ここでは単純化のため、ある単年度の原油価格の関数とみなす。
- 5) 発見量は評価井掘削・埋蔵量評価・政府承認・資金調達などを経て開発され、生産可能になるため、数年のタイムラグを経て埋蔵量に加算される。第4章第1節では、油田規模に応じて評価・開発期間として3～9年のタイムラグを設け、さらにピーク生産に達するまでに4～14年（ビルドアップ期間）を要するとしている。しかし、ここでは全油田平均のタイムラグとして、ある1つの期間値で代表させ（すなわち対象時点は1つ）、その値は不変とする。
- 6) 埋蔵量も最初から瞬時に全量が生産可能なわけではなく、減退曲線に従い長期間にわたって徐々に生産可能となる。このとき、放射性元素の崩壊同様、期間あたりの生産能力は地下に残存している埋蔵量に比例する（指数減退）。この際の減退率は、第4章第1節では油田規模に応じて2～10%を用いたが、ここでは全油田の平均値として1つの値で代表させ、全期間を通して不変とする。
- 7) すなわち、本モデルでは賦存量の制約は設けていないが、賦存量→資源量→油田発見→埋蔵量→開発→生産プロファイル→生産能力という過程で、原油価格などによる規制

とタイムラグが伴うことから、それらが供給に対する粘性的な制約となり、賦存量の多くは実際には生産されない（表 5-2 参照）。

8) この生産能力を上限に、価格と生産量の正の関係を表わすのが供給曲線であり、これと両者の負の関係を表す需要曲線の均衡点に、価格と生産量（＝消費量）が同時決定する。需要曲線は累計エネルギー生産（消費）量の関数であり、エネルギー効率改善や省エネも含むものとする。ここでは、供給曲線の余剰生産能力および需要曲線の生産量とともに価格弾力性が一定とする（第 2 章第 3 節および第 3 章第 1 節参照）。

9) この生産（消費）量は埋蔵量から差し引かれ、累計生産量（＝累計消費量）に加算される。この累計生産量の一部は資本形成などを通して経済成長を促し、さらに需要を増加させるという加速度効果を持つ。

5.1.3. モデルの詳細

前節で概要を記したモデルを以下の微分方程式系で表現する。微分、積分などの数学的操作が可能のように連続系で表現しているが、すべてを解析的に解くことは困難であり、データも離散的であるので、実際には離散系に変換して数値シミュレーションを行うことを念頭に置いている。

すべての変数は内生変数で、初期値を除いては方程式系の内部で決定される。各パラメータは定数で、全期間を通じて変化しないが、ケースに応じて異なる値を取ることができる。しかし、本論文では多くのパラメータを固定して単純化・規格化した。各変数の単位は任意に選択でき、したがって計算結果も絶対値にはあまり意味のない相対的な指標に過ぎないが、一応、時間 (t) は年、石油の量は 10 億バレル (BB と略記)、価格 (P) には 2016 年にデフレートした 1 バレル当たり実質価格ドル表示 ($\$/bbl$ と略記) を想定している。

(各変数は初期値およびラグを伴う時以外は時点の添え字 (t) を省略して表示)

S : 資源量(累計生産量を含む), S_0 : 当初量 ($\$/bbl$ 時) 650BB, Q : 累計消費 (生産) 量, $Q_0 = 0.1$ BB, D : 累計発見量, $D_0 = 1.0$ BB, R : 埋蔵量, U : 未発見資源量; $U = S - D$, dD/dt : 年発見量, dQ/dt : 年生産 (消費) 量, P : 原油価格 (2016 年実質価格, $\$/bbl$)

(タイムラグ (T, T') の関係で生産開始前の価格が参照されるが、その期間については便宜的に $\$/bbl$ を使用), a : 資源係数, b : 発見量係数, c : 生産量—埋蔵量感度係数, k : 減退率, m : 成長係数, α : 資源量—価格可塑指数, β : 発見量—累計生産量指数,

γ : 発見量一価格指数, δ : 供給一価格指数, μ : 需要一価格指数, φ : 需要一累計生産量指数, T : 発見待機期間, T' : 生産待機期間。

($D_0 = 1.0$ BB, $Q_0 = 0.1$ BB は, 開始させるために挿入した微小量)

5.1.3.1. 資源量 (Resources)

既述したように, 資源量は決して固定的なものではなく, その採掘事業の経済性や技術に依存して可変的なものである。資源の枯渇性を経済予測に導入したマルサス (Malthus, 1798) やローマクラブ (Meadows et al., 1972) など先人の未来予測が必ずしも成功していない理由の一つは, 資源量を固定的に捉えたことにある。ここでは, 採算性や技術は価格で代表されると見なして, 価格に応じた可塑性を導入する。資源量 (過去の累計生産量を含む) は, 採算性や技術に依存して可塑的なものであり, 次式のような価格の関数とみなす (第2章第4節では資源量を E としたが, 本章では賦存量 E との違いを強調するために S と表記する)。

$$S = a S_0 P^\alpha \quad (5-1)$$

油田の採算性は油田規模すなわち油田クラスと強い相関性があり, 油田の規模分布 (究極油田規模分布) はフラクタル (べき乗分布) で近似できること (第3章参照) から, 所与の価格に対する資源量がべき乗関数であると考えるのが自然である。ここで, 「資源量一価格可塑指数」 α は油田規模分布のフラクタル次元に対応しており, 本章では全ケースで $\alpha = 0.4$ を用いた (シェール資源については, 第6章で異なる値を用いる)。さらに, 石油生産開始前の資源量 S_0 を 0.65 兆バレル, 「資源係数」を $a = 1.0$ と設定 (aS_0 は価格が \$1.00/bbl のときの資源量に相当) した。この結果, 資源量は, 価格\$10/bbl 時には約 1.6 兆バレル, \$20/bbl 時に約 2.2 兆バレル, \$40/bbl 時に約 2.8 兆バレル, \$100/bbl 時は約 4.1 兆バレルとなり, 過去および現在の諸研究者による評価 (例えば, Masters, et al, 1994, USGS, 2000 など) と調和的である。\$200/bbl 時には約 5.4 兆バレルとなり第3章第3節の検討結果とも矛盾しない。非在来型資源は, 在来型の低品位延長と解釈され, 価格が上昇すれば自動的に評価対象に組み込まれてくる (ただし, シェール資源はフラクタル次元が異なるので別に計算する必要がある, 詳細第6章)。また, 増進回収法 (EOR) による回収率の向上などの「埋蔵量成長」もこの式に包含される。

なお, 本モデルでは賦存量には制約を設けず無限とみなしているが, その後の過程の種々の制約により, 本論文の数値シミュレーションでは, ある時点で一部の変数が定義域

外（例えば負）となり生産は停止する。その時点までの累計生産量は賦存量の推定値（第3章第2節）に比べて十分小さいので（表5-2参照）現状では問題ないが、初期条件の設定によっては賦存量の制約が必要になるかもしれない。

5.1.3.2. 未発見資源量 (Undiscovered Resources)

未発見資源量 U は、単純に資源量（累計生産量を含む）から累計発見量 D （詳細次項）を引いたものと定義する。

$$U = S - D \quad (5-2)$$

5.1.3.3. 累計発見量 (Cumulative Discovery)

累計発見量は、ある時点 t までに発見された量の総計をいい、次式の如く単位時間当たり発見量を探鉱開始時点（ $\tau=0$ ）から時点 t （ $\tau=t$ ）まで定積分したものと定義される。

$$D = \int_0^t \frac{dD}{d\tau} d\tau \quad (5-3)$$

ただし、 t 時点の発見量（単位は1年当たり）は、

$$\frac{dD}{dt} = bUQ^\beta P_{t-T}^\gamma \quad (5-4)$$

単位時間当たり発見量は、他の条件が同じであれば、未発見資源量（ U ）に比例すると考える。一方で、探鉱活動は全世界の経済（需要）規模により促進され、その効率（たとえば発見確率）は技術進歩に応じて向上し、価格変動による採算性に応じて増減する。経済規模は累計生産（消費）量の関数と考えられ（減耗は係数で考慮、後述）、探鉱の効率（技術進歩）と利潤性は価格に依存するとみなせるので、式(5-4)には累計生産量と価格も含めてある。ただし、探鉱の投資決定から発見までには既述の如くタイムラグ（「発見待機期間」 T ）があるので、価格については時点 t より前の時点 $t-T$ の値を使用する。単位時間当たり発見量が単純に累計生産量および価格に比例する保証はないので、それぞれには指数（「発見量－累計生産量指数」 β と「発見量－価格指数」 γ ）を付けてあり一般化が可能だが、本論文では基本形として全ケースで $\beta = 1$, $\gamma = 1$ を使用する。また、「発見待機期間」としては一律5年を用いた（すなわち $T = 5$ ）。参照価格には、たとえば3～7年前の価格を加重平均して使用するほうが現実的だが（前章参照）、ここではタイムラグの効果をより鮮明に分析するために単純化した。「発見量係数」 b は、 1×10^{-7} , 4.5×10^{-7} ,

5×10^{-7} , 1×10^{-6} の 4 ケースを吟味する。なお、 $D_0 = 0$, $Q_0 = 0$ は微分方程式系の自明の解で不動点であるので、システムをスタートさせるために便宜的に微小量 $D_0 = 1.0$ BB, および $Q_0 = 0.1$ BB を挿入した (全ケース共通)。

式(5-4)において、 $\beta = 1$ かつ資源量は可塑性なし (すなわち S は定数) と固定し、価格の影響を無視し (すなわち $\gamma = 0$)、発見量は即座に生産 (消費) される (すなわち $D = Q$) と極めて単純化すると、次のように書き換えられる (式展開など詳細は第 2 章第 4 節参照)。

$$\frac{dD}{dt} = b U Q = b (S - D)D \quad (5-5)$$

この微分方程式は、 S を E と読み替えれば第 2 章第 4 節の式 (2-166) に他ならず、これを解いてピーク時点 (半分産出時) を t_P とすると、次のロジスティック関数になる。

$$\frac{dD}{dt} = \frac{S^2 b e^{bS(t_P-t)}}{\{1 + e^{bS(t_P-t)}\}^2} \quad (5-6)$$

これは、約十年前に「ピークオイル論」として喧伝された「ハバート曲線(Hubbert Curve)」の発見量版 (年当たり発見量は半量発見時を頂点とするベル型曲線になる) に他ならない。左辺を dQ/dt に置き換えれば生産量版の「ハバート曲線」になる。2000～2010 年を頂点に石油生産は対称的に減少せざるを得ないというのが「ピークオイル論」であったが、上記のように極めて単純化しているとはいえ、それなりの理論的根拠はある。それにもかかわらず、現実の生産量が「ピークオイル論」の予想するように減産に転じないのは、ローマクラブなどと同様、資源量 (S) を固定的に捉えていることが最大の原因だと考える (詳細は第 2 章, 第 4 節参照)。

5.1.3.4. 埋蔵量 (Reserves)

「埋蔵量」とは既発見量のうち、現時点の技術や事業としての経済性から商業的に生産が可能な量を言う (第 3 章参照)。ここでは、さらに生産許可が得られ開発作業も進んで、明日からでも生産可能な量を言う。生産開始した油田の地下にまだ残されている量も含まれるが、すでに生産した累計生産量は差し引かれ含まれない。この点を強調するために「残存埋蔵量」(Remaining Reserves) と呼ぶこともあるが、通常「埋蔵量」というだけで残存量に限定され、次式で定義される。

$$R = \int_0^t \frac{dR}{d\tau} d\tau \quad (5-7)$$

t 時点の埋蔵量の増減（1 年あたり）は、その T' 年前の発見量から現在（当年度）の生産量を引いたものになる。

$$\frac{dR}{dt} = \left(\frac{dD}{dt} \right)_{t-T'} - \frac{dQ}{dt} \quad (5-8)$$

すなわち、発見量（ dD/dt ）はラグタイム（評価・開発期間） T' （本論説では 5 年に固定）を経て埋蔵量に追加され、生産量（ dQ/dt ）が差し引かれる。評価・開発期間（ T' ）が発見待機期間（ T ）と一致する必然性はなく、ここでも、たとえば 2~10 年の加重平均が現実的かもしれないが、発見待機期間同様、単純化した。

5.1.3.5. 生産能力（Production Capacity）

埋蔵量は即座に全量が生産できるわけではなく、長期間にわたって徐々に生産される。このとき、期間あたり生産能力は残存埋蔵量に比例すると考える（指数減退）。個々の油田の場合は、初期の増産（ビルドアップ）期や、施設や契約に制約されたプラトール生産の例もあるが、これらの効果は評価・開発期間に含まれると考える。

$$\left(\frac{dQ}{dt} \right)_P = k R \quad (5-9)$$

仮に、埋蔵量の追加（資源量からの格上げ）がなく、常に油田の生産能力一杯に生産・消費されるとすると、 $dR/dt = -dQ/dt$ となり、上式は次のように書き換えられる。

$$\frac{dR}{dt} = -k R \quad (5-10)$$

この微分方程式は次のように解ける（ R_0 は初期埋蔵量）。

$$\int \frac{1}{R} \frac{dR}{dt} = \int -k \quad (5-11)$$

$$\log R = -kt + C \quad (5-12)$$

$$R = R_0 e^{-kt}$$

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{dR}{dt} = k R = k R_0 e^{-kt} \quad (5-13)$$

すなわち、生産量は、放射性元素の崩壊同様、指数（定率）減退する。現実の油田で

は、排出メカニズムに応じてこれとは異なる生産パターン（双曲減退や調和減退）を示す例もあるが、世界全体の生産能力を評価する場合は指数減退で代表させて問題ない（第2章第2節参照）。この式の k は減退率に相当し、第4章第1節の検討では 0.02~0.1 の範囲にあるが、中東の超巨大油田では（生産割当の影響もあり）ほとんど減退しないケース（ $k \doteq 0$ ）がある一方、小規模油田では $k = 0.5$ 程度のもも少なくなく、シェールガスなどでは $k = 0.7 \sim 0.9$ である。この値は採算性（埋蔵量規模や法税制に関連）を最適化する開発方法（特に坑井数）にも依存しており、企業としての利潤最大化のメカニズムを組み込んで、埋蔵量と価格から内生的に減退率の値を決定することも可能だが、今回は複雑化を避け、パラメータとして与えた。

本論説では、「減退率」 k に対して異なる値（0.01, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5）を与えて、そのシステム全体に及ぼす影響を考察する。第4章第1節の数値（0.02~0.1）に比べ高めの数値が多いが、今後の発見油田は益々小規模（減退率 k が高い）になってくると、油田枯渇の影響をより強調したケースを評価するためである。 $k = 0.01$ のケースは自然または人為的（制度・税など）に生産量が極端に絞られる「資源保護ケース」に相当する。シェール資源を想定した $k = 0.8$ のケースは第6章で検討する。

5.1.3.6 供給曲線（Supply Curve）

こうして求めた生産能力は第4章の「最大生産能力」であり、通常はこの範囲内で価格に応じて生産量が決定される。最大生産能力から実際の生産量を差し引いた余剰生産能力と原油価格は、自由市場の成立した 1994 年以降については対数線形できわめてよい当てはまりを示す（図 4-7 および図 4-9）ので、供給曲線を次の通り定義する。

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_S = k R - \frac{c R}{P^\delta} \quad (5-14)$$

ただし、 $(dQ/dt)_S$ は所与の価格に対する供給量、 c は「生産量—埋蔵量感度係数」、 δ は「供給—価格指数」（余剰生産能力の価格弾力性に対応）である。この式は次のように余剰生産能力の式に変形できる。

$$k R - \left(\frac{dQ}{dt}\right)_S = \frac{c R}{P^\delta} \quad (5-15)$$

図 4-7 のフィッティングは $c R = 129 \text{ BB}$ 、 $\delta = 1/1.56 = 0.641$ に相当するが、ここでは過去の精確な再現が目的ではないので、「供給—価格指数」は規格化・単純化して $\delta = 1.0$

に固定し、「生産量－埋蔵量感度係数」(c)は減退率(k)との関係を考慮して、「資源保護ケース」には $c = 0.1$ を、その他のケースには $c = 4.0$ または 5.0 を与えた。

5.1.3.7. 需要曲線 (Demand Curve)

消費量 (dQ/dt) の価格弾力性が一定であると仮定し、これを「需要－価格指数」 μ とする。

$$\frac{1}{dQ/dt} \frac{d^2Q}{dt^2} = -\mu \frac{1}{P} \frac{dP}{dt} \quad (5-16)$$

両辺を t で積分する (C は任意定数)。

$$\log \frac{dQ}{dt} = -\mu \log P + C \quad (5-17)$$

これを解くと需要曲線 (の形状) になる (C' は任意定数)。

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{C'}{P^\mu} \quad (5-18)$$

一方、需要曲線のシフトを考えて、エネルギー消費 (dQ/dt) の成長率を m' (とりあえず定数と仮定、後で「成長係数」 m として再定義する) とすると、次式で表される。

$$\frac{d^2Q}{dt^2} = m' \frac{dQ}{dt} \quad (5-19)$$

$$\frac{1}{dQ/dt} \frac{d^2Q}{dt^2} = m' \quad (5-20)$$

両辺を t で積分して順次変換する (C, C' は任意定数)。

$$\log \frac{dQ}{dt} = m't + C \quad (5-21)$$

$$\frac{dQ}{dt} = C' e^{m't} \quad (5-22)$$

$$Q = \frac{1}{m'} C' e^{m't} \quad (5-23)$$

$$\frac{dQ}{dt} = C' e^{m't} = m' Q \quad (5-24)$$

したがって、生産量 (需要) は累計生産量に比例する。本論文では、前者は経済規模 (フロー、例えば GDP) を、後者は資本 (ストック) を代表しているので、式(5-24)は経

済成長論の「AKモデル」(資本の限界生産性一定)に他ならない。ただし、ここで議論しているのは需要曲線の位置なので、供給曲線のシフトがこれに追い付かなければ、実際の生産量(経済規模)は見かけ上「資本の限界生産性逓減」を示すことになる。

ここでは成長率 m' は減耗も考慮していると考え。経済規模に応じて成長が減速(または加速)する可能性もあり、また省エネ技術の向上なども考えられるので、それに対応できるように一般化する。ここでは m' は定数のままとして、代わりに「需要-累計生産量指数」 φ を導入する(例えば、 $\varphi < 1$ ならば「資本の限界生産性の逓減」が表現される)。ただし、本章で検討するケースはすべて $\varphi = 1$ とした。

$$\frac{dQ}{dt} = m' Q^\varphi \quad (5-25)$$

式(5-18)(需要曲線の形状)と式(5-24)(需要曲線のシフト)を総合して、石油の需要関数を次のように定義する。

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_D = \frac{mQ^\varphi}{P^\mu} \quad (5-26)$$

ここで、 m は、成長率 m' と価格 P (および μ) で決まる「成長係数」である(例えば $P=100$, $\mu=1.0$ で $m'=0.1$ ならば、 $m=10$ に相当)。本論説では、単純化・規格化して、「需要-累計生産量指数」 $\varphi = 1.0$ 、「需要-価格指数」(需要の価格弾力性に対応) $\mu=1.0$ (したがって、 $\mu = \delta$)、「成長係数」 $m=10$ に固定する(この時点で厳密には成長率 m' は定数でなくなる)。ただし、これらのパラメータ値の選択には確たる根拠はなく、「成長係数」 m はより低い値が現実的かもしれない。また、第2章第3節の分析では需要の価格弾力性は $\varepsilon=0.073$ と推定されたので、 $\mu=1.0$ という「需要-価格指数」(需要の価格弾力性に対応)は現実よりかなり高い。しかし、価格変動に対応した現実の生産量変動は小さく年次データ・プロットでは識別困難なこともあり、ここでは生産量変動を誇張して評価しやすくする意味も込めてこの値を使用した。

5.1.3.8. 均衡生産(消費)量と均衡価格の決定

上記で定義した供給曲線と需要曲線の交点に、均衡値としての生産(消費)量と価格が決定すると考える。本論説では $\mu = \delta$ としているので、この均衡値は容易に解ける。供給曲線(式(5-14))と需要曲線(式(5-26))に $\delta = \mu$ を代入したものが等しいとして、

$$\left(\frac{dQ}{dt}\right)_S = k R - \frac{c R}{P^\delta} = \left(\frac{dQ}{dt}\right)_D = \frac{m Q^\varphi}{P^\delta} \quad (5-27)$$

P について解く。

$$P = \left(\frac{c R + m Q^\varphi}{k R}\right)^{\frac{1}{\delta}} \quad (5-28)$$

これを、式(5-27)の P に再代入する。

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{m Q^\varphi}{P^\delta} = \frac{k m Q^\varphi R}{c R + m Q^\varphi} \quad (5-29)$$

5.1.4. モデルのまとめ

以上をまとめる ($\mu = \delta$ の場合)。

資源量： (5-1) $S = a S_0 P^\alpha$

未発見資源量： (5-2) $U = S - D$

発見量： (5-4) $\frac{dD}{dt} = b U Q^\beta P_{t-T}^\gamma$

埋蔵量の増減： (5-8) $\frac{dR}{dt} = \left(\frac{dD}{dt}\right)_{t-T'} - \frac{dQ}{dt}$

供給曲線： (5-14) $\left(\frac{dQ}{dt}\right)_S = k R - \frac{c R}{P^\delta}$

需要曲線： (5-26) $\left(\frac{dQ}{dt}\right)_D = \frac{m Q^\varphi}{P^\mu}$

需給均衡： (5-28) $P = \left(\frac{c R + m Q^\varphi}{k R}\right)^{\frac{1}{\delta}}$

$$(5-29) \quad \frac{dQ}{dt} = \frac{m Q^\varphi}{P^\delta} = \frac{k m Q^\varphi R}{c R + m Q^\varphi}$$

離散系の場合は、右辺の変数に1期前（または、ラグを遡った期）の数値を入れ、左辺の今期の変化量を求め、それを加えたものが今期の変数値となる。この手順を、順次繰り返していく。

第2節 各ケースと使用パラメータ

これらの方程式は、モデルの拡張や実績との微妙なフィッティングが可能ないように一般型にして多くのパラメータを含めているが、本論文の段階では、多くの指数を1に固定するなど、できるだけ単純化・規格化して、むしろこの方程式系の含異の把握に主眼を置いた。多くはべき乗関数（コブ・ダグラス型）なので対数線形化が可能だがタイムラグを含むため解析的には解けず、ここでは1年単位の差分方程式に変換して、いくつかのケースについて数値的に解いた。情報伝達の遅れ等を考慮すると、むしろ離散系の方が現実に近いかも知れない。

以下（表5-1）に、図5-1で結果を提示する各ケースで用いた上記方程式中の各パラメータの値をまとめる。

表5-1 使用パラメータ一覧

パラメータ	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
a : 資源係数	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
b : 発見量係数 ($\times 10^{-7}$)	10	5.0	4.5	1.0	10	10
c : 生産量—埋蔵量感度係数	4.0	5.0	4.0	5.0	5.0	0.1
k : 減退率	0.2	0.2	0.3	0.5	0.1	0.01
m : 成長係数	10	10	10	10	10	10
α : 資源量—価格可塑指数	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
β : 発見量—累計生産量指数	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
γ : 発見量—価格指数	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
δ : 供給—価格指数	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
μ : 需要—価格指数	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
φ : 需要—累計生産量指数	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
T : 発見待機期間 (年)	5	5	5	5	5	5
T' : 評価・開発期間 (年)	5	5	5	5	5	5

ここでは、主として供給側の制約（探鉱効率、減退率など）の影響を評価するため、「発見量係数」 b 、「生産量－埋蔵量感度係数」 c 、「減退率」 k しか動かさず、各指数もフラクタル次元に対応する「資源量－価格可塑指数」 α を0.4とした以外は、すべて1とした。「発見待機期間」と「評価・開発期間」は、両者とも一律5年とした。これは、まず本モデルの基本的挙動を把握するためであるが、価格および生産量の変動を若干強調して解読しやすくする意味もある。

第3節 シミュレーション結果

5.2.1. 各ケースの記載と離散系計算結果

上記微分方程式系はほとんどがべき乗関数の形をとっている所以对数線形化が可能であるが、タイムラグを含んでいることもあり、解析的に解くことは困難である。そこで、上記微分方程式系を1年単位の離散系の差分方程式と見なして数値的に解く。連続系では、タイムラグを挿入している部分を除き、各変数は同時点を表わしているが、実際には情報の伝達等に時間が掛かり、1年単位の離散系の方がむしろ実態を反映していると考えられる。

表5-1にまとめたパラメータを用いて石油生産量（青線）と実質原油価格（赤線）を計算し、1900年～2016年の実績（最上段）と比べた結果を図5-1に示した。単位には、生産量は10億バレル/年、価格は2016\$/bblを使用したが、これらは相対的なもので、図には縦軸スケールを入れておらず、実際の値はケースごとに異なる。時間スケール（年単位）も目安に過ぎないが、一応、ケース1～5は100年間、ケース6は200年間を想定して表示している。

生産量および価格の正確な数値や、峰や谷の時期が実績と完全に一致するケースはないが、多くの例で周期的な変動（特に価格）を示していて、その点では実績に類似している。これらのケースでは、ショックなどの外生的なインプットは全く与えていないが、内生的なフィードバックのサイクルだけでこうした周期的変動が生じている。これにはタイムラグ（各5年）の影響が大きいと思われるが、結果の周期は5年または10年ではなく、20～30年となっており（周期はケースごとに若干異なる）、その振幅や時期はケースごとにより異なっている。パラメータを微調整すれば、より実績に近いパターンが再現される可能性がある。

需要の価格弾力性を現実より高くとっている（ $\mu=1.0$ ）が、ケース4を除き、生産量の変動振幅は原油価格のそれより小さい。また、原油価格のピーク（高騰期）は鋭く、トラフ（低価格期）は緩やかな傾向がある（現実と同じ）。ケース4では生産量・価格変動の5つのサイクルがすべてそろっているが、それ以外のケースでは、そのうちのいくつかのサイクルは明瞭だが、それ以外は消滅または不明瞭となっている。ケース5（生産能力を極端に絞った「資源保護ケース」）では前半約100年間は生産量が低く（すなわち、経済は低水準）、後半に生産量は年400億バレル程度（現在の現実の生産量は約350億バレル/年）で安定するが、原油価格は徐々に上昇していく。

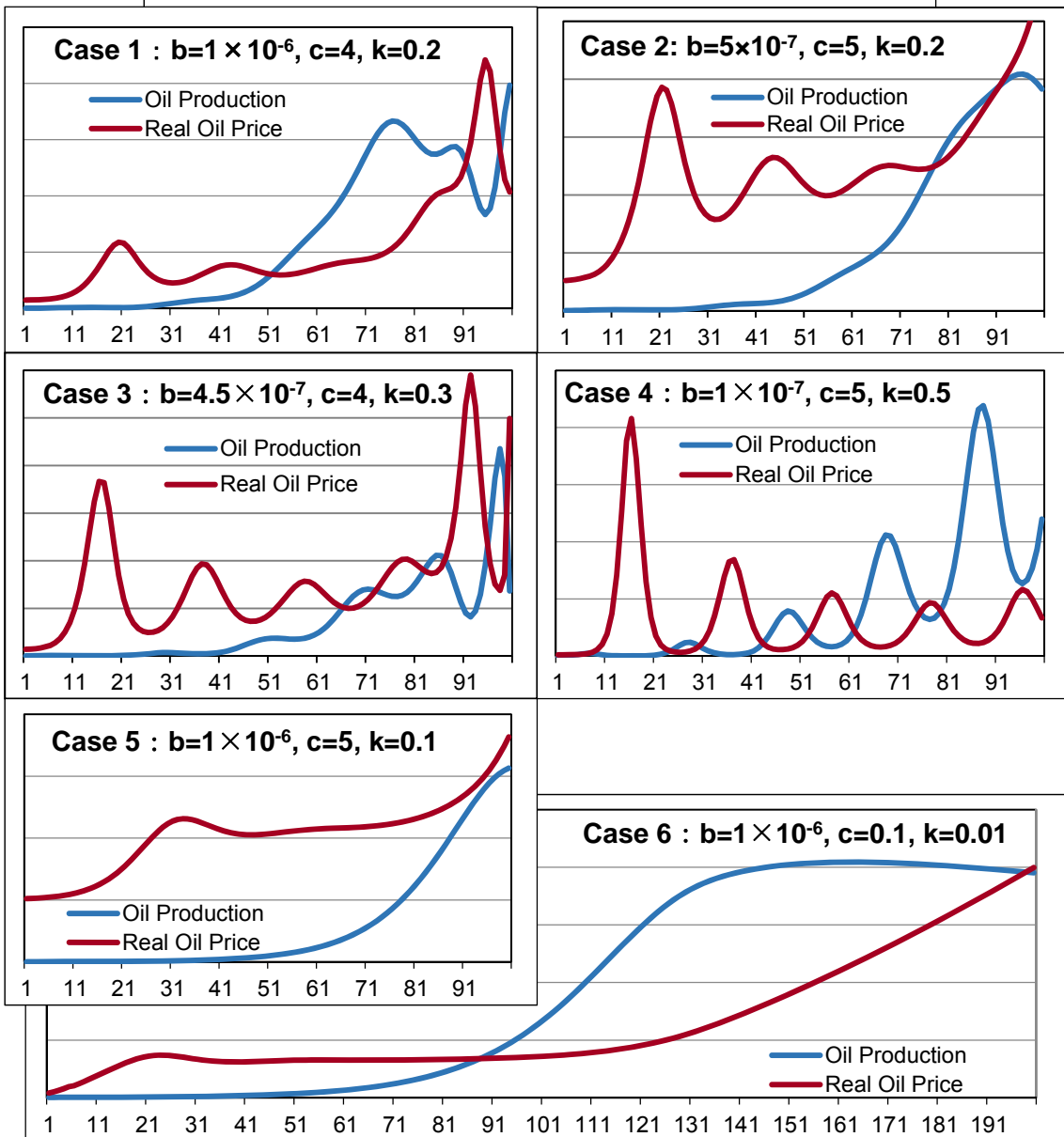
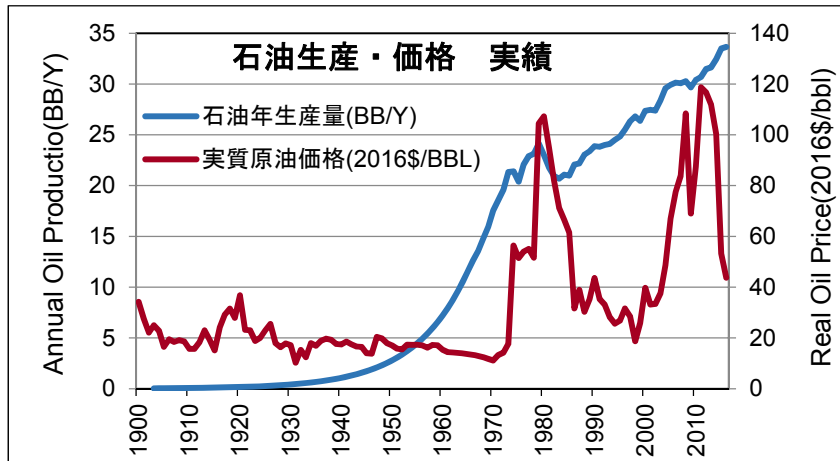


図 5-1 石油生産と原油価格の実績と離散系計算結果

なお、それぞれのケースの最終時点（ケース1～5は100年目、ケース6は200年目）までの累計生産量は表5-2のとおりである。数値自体は目安に過ぎないが、賦存量の制約はない（無限）にもかかわらず、2～7兆バレルと第3章第3節（例えば図3-9）の将来の資源量予測と調和的な数値である。ケース6は生産期間が他のケースの2倍であるが、前半の生産量が低いため、他のケースより累計生産量が多いわけではない。

表 5-2 シミュレーションの最終時点までの累計生産量

（ケース1～5：100年目、ケース6：200年目）

	<u>Case1</u>	<u>Case2</u>	<u>Case3</u>	<u>Case4</u>	<u>Case5</u>	<u>Case6</u>
最終累計生産量 (BB)	5,752	4,431	6,811	3,195	2,275	3,742

5.2.2. 位相図における各ケースの比較

図5-2は前章で検討した5ケースを、石油生産量と実質原油価格のクロスプロット（と也是对数軸）に表現した位相図である。

各ケースとも時間の経過とともに左下（低生産量・低価格）から右上（高生産量・高価格）へと移動している。期間単位は目安に過ぎないがケース1～ケース5は100年間、ケース6は200年間を想定している。横軸の生産量の単位は百万バレル/年、縦軸の実質原油価格は2016年のドル/バレルで表示しているが、これらも目安に過ぎない。しかし、ケース6（「資源保護ケース」）を除いては、黒菱形（300億バレル/年、100ドル/バレル付近）で示した現状付近を通過していて、この位置は多くのケースで3回目の価格高騰期の前の低価格期に相当している。

図5-1の時間に対する線形プロットではケースごとにかなり異なったパターンを示すが、この位相図では全ケースに共通点が認められる（ただし、ケース5は他とはやや異なる）。例えば、周期的変動の峰と谷は、図5-1ではその時期がケースごとに若干異なるとはいえ、1周期目と2周期目の位置はどのケースでも位相図上でほぼ一致している。

この図では期間を100年（または200年）に限定しているため（1年単位の離散系ではこれより長期の計算には支障が出てくる）確言できないが、この先、生産量は1000億～2000億バレル/年（現在の3～6倍）で頭打ちになり、原油価格は乱高下しつつ数百ドル/bblに高騰していくように見える。ただし、現実ではシェールなどの新資源の導入により、これらとは異なるパターンになる可能性がある（第6章参照）。

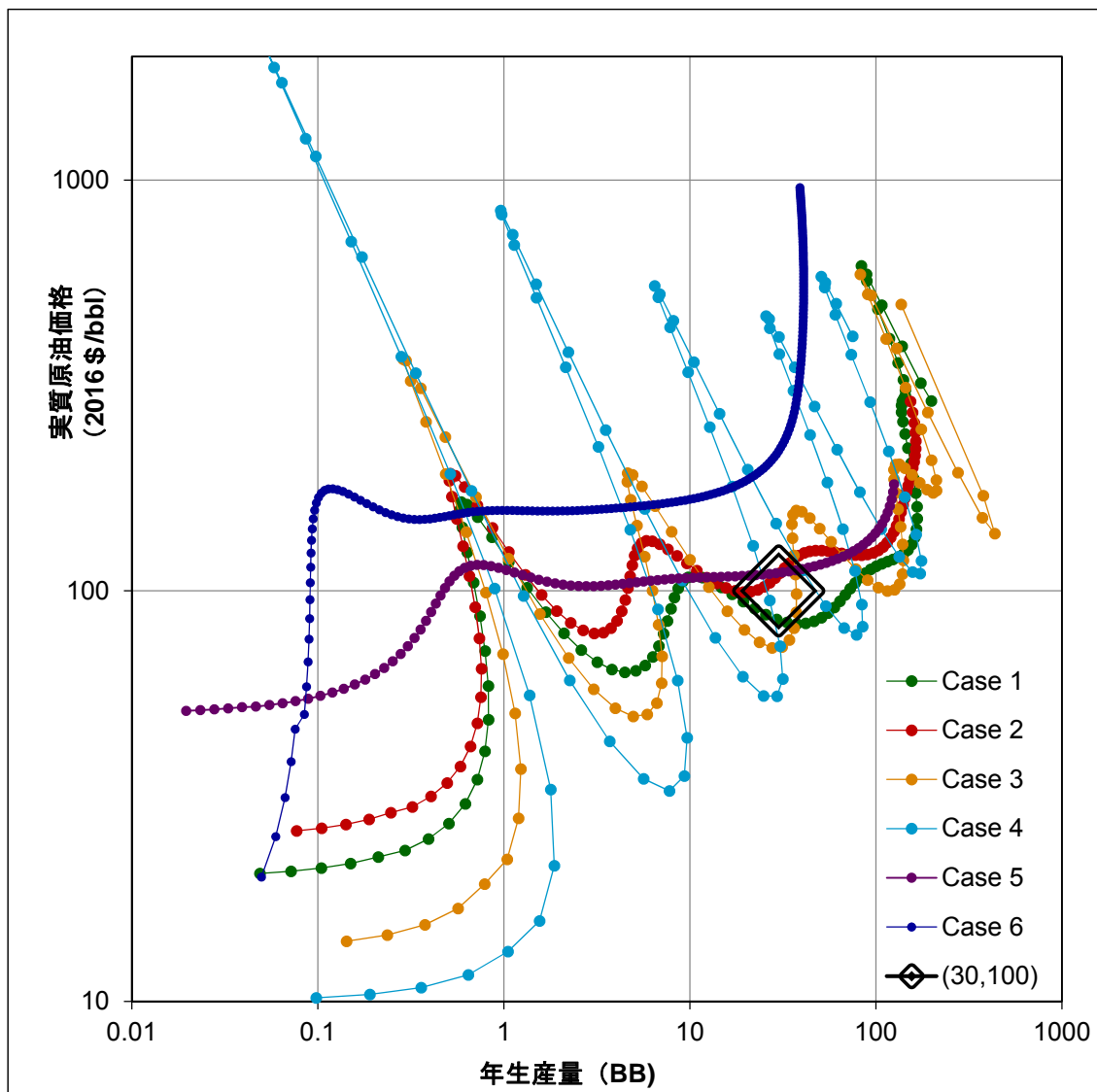


図 5-2 位相図 (両対数プロット) における各ケースの比較

第4節 第5章のまとめと課題

以上の結果とその意味するものをまとめ、今後の研究をさらに発展させるための修正点や課題を列記する。

- (1) 従来の伝統的諸研究では、経済成長を資本・労働・消費の相互作用で説明し、周期的な景気変動や急激な価格変化の原因は外生的なショックなどに求めることが多かった。これをエネルギー資源（石油で代表させる）の「可塑的制約」（枯渇制約はあるが価格上昇により量の拡大が可能）を導入して、内生的・動学的再現を試みた。
- (2) エネルギー消費で経済を代表させ、資源量の「可塑性」と探鉱・発見・開発・生産におけるタイムラグを考慮して、全世界の「経済」の挙動を内生的・動学的に記載する微分方程式系を構築し、各パラメータ値を考察・選択した。
- (3) 資源の探鉱・発見はその存在量（未発見資源量）と価格により励起され、その結果発見された油田が生産能力を規定し、その範囲内で価格と生産量を関係づける供給曲線が定まる。一方、過去のエネルギー消費量が経済の規模を規定し、その一部は資本として蓄積して成長を促し、価格と消費量を関係づける需要曲線が定まる。この両曲線の交点に、均衡値としての生産量＝消費量と価格が定まり、それらが資源量・探鉱量および経済成長を規定するというフィードバックによりすべてが内生的に決定し進行していくと考える。
- (4) この微分方程式系は解析的に解くことが困難なので、1年単位の差分方程式で近似し、離散系として数値的に解くことを試みた。実績の精確な再現ではなく、システムの挙動の特徴の把握を目的として、多くのパラメータを単純化・規格化して固定し、資源の枯渇に関連したパラメータについては異なる値に対して感度分析を行った。
- (5) その計算結果は選択するパラメータの値によりかなり異なるが、どのケースも生産量および価格は多かれ少なかれ周期的な変動を示し、それは価格においてより顕著である。変動周期は概ね20～30年であり、ラグタイムの5年（あるいはその倍の10年）とは異なる。生産量・価格・時期などの値は実績には一致しないが、パターンとしては類似しており、現状の生産量と価格は複数の計算結果の経路上の2周期目と3周期目の間付近に相当している。パラメータ値の微調整を行えば、実績はより忠実に再現される可能性がある。
- (6) したがって、景気やエネルギー価格を含む物価変動は、外生的なショックなどを導

入しなくとも、エネルギー循環とその量の可塑的制約だけで、かなりの部分が内生的に説明できる可能性がある。

- (7) ここで使用した微分方程式は、原則としてべき乗関数の積の形（コブダグラス型）または双曲線関数の形をとっていて、それなりの理論的根拠を有し、指数などのパラメータの選択によりある程度の一般化も可能である。しかし、使用しているパラメータが全期間を通して一定である保証はなく、それも諸変数の関数として変化することも考えられる。それはとりもなおさず、各微分方程式がより複雑な関数形を取ることを意味する。理論および現実とのフィッティングの両面からこの問題を検討することも必要であろう。
- (8) たとえば、本章では減退率が期間を通して一定であると仮定したが、それは油田本来の産出能力（埋蔵量の関数）以外に、開発方法（坑井数など）や経済性にも依存しており、個々の油田の埋蔵量規模や原油価格の関数でもある（第2章第2節参照）。そこで、油田規模（探鉱の熟成とともに小規模化）を累計発見量の関数とみなし、これと価格から企業の利潤を最大化する開発方法を選択し、その時の減退率を採用することも考えられる。
- (9) 本章では決定論的に変数値は一意に決定するとしているが、この内生的決定機構にも各変数には確率的ゆらぎが存在すると考えられ、ここでの結果はいわば平均（期待）値での議論である。確率的ゆらぎも含めて分析すればさらに複雑な動きも再現できる可能性がある。
- (10) 累計発見量 0、累計生産量 0 はこの微分方程式系の自明の解で不動点なので、「スターター」として、便宜的に第 0 期に微小量の発見量と生産（消費）量を挿入した。今回検討したパラメータの範囲では、この初期微小量の影響は小さかったが、生産開始初期の挙動については別途検討の要があり、石油開発が産業としてある程度定着した時点を開始点とするほうが適切かもしれない。すなわち、「近代石油産業の幕開け」ドレーク井の 1959 年、背斜説とロータリー掘削による最初の大成功スピンドルトップの 1901 年、第 2 次世界大戦終了後、探鉱が世界に拡大した 1945 年など、複数の候補のうちいつを開始時期とみなすかの問題でもある。
- (11) ここでは、石油で全エネルギーを代表させたが、異なるエネルギー資源を考え、それら間での競合を考察することも興味深い。その際、初期資源量、関数形、各パラメータなどを適宜修正することにより、人類史における何回かのエネルギー革命の波と

エネルギー資源のシフトの履歴をも再現できる可能性がある（第6章で検討する）。

- (12) 経済全体をエネルギー（石油）消費で代表させるこのモデルは経済を過度に単純化している。より現実的には、消費・貯蓄・資本形成のメカニズムや財政・金融政策、税などの効果を考慮する必要がある。また、実際には内生的要因だけでなく様々な外生的ショックが加わり、それらが相互にフィードバックし合っていており、たとえばこのモデルによる内生的予測と実績との差を外生的ショック（または確率的ゆらぎ）に起因するとして要因分析することも興味深い。
- (13) 資源の賦存量（物理的に存在する量）の制約は入れなかったが、本章で検討したケースでは、推定されている賦存量（第3章第2節参照）よりずっと少ない量を産出した時点で生産が困難になり実質的に停止するため問題とはならなかった。しかし今後は、設定によっては賦存量の制約を入れる必要が出てくるかもしれない。
- (14) 環境問題や人口の影響も考慮する必要がある。第1章で検討したように、環境汚染は累計エネルギー消費（生産）量の関数とみなせるので、本モデルの環境問題への拡張はそれほど困難ではない。特に、ここで提示した可塑的有限性を組み込んだモデルは、自然回復能力（レジリエンス、第1章参照）の評価など地球環境問題においても有効であると考えられる。

第6章 資源の遷移

これまでの章で、エネルギーと経済の関わり合いを検討し、資源供給の可塑的・粘性的な規制により経済の周期的変動の多くが内生的に説明できることが判明した。しかし、ここでは主として石油を対象としていたため、2008年（特に2011年）以降の米国でのシェール資源の急速な拡大の影響は、定性的にしか議論していなかった。そこで、本章第1節ではシェール資源（特に、データの揃っている米国のシェールガス）を概観し、第2節では前章までの議論を多資源系に拡張し、シェールを念頭に置きながら、資源間の競合やシフトを検討する。

第1節 シェール資源の特徴と量

6.1.1. シェール資源とは

石油、ガスなどの「在来型(conventional)」と「非在来型(unconventional)」に分類されることがあり、後者にはシェールオイル、オイルシェール（石油を生成する前の「根源岩」に相当し、乾留などにより石油を抽出する）、オイルサンド（重質で粘性が高いため通常の方法では採取できない石油）、シェールガス、メタンハイドレート（水分子の格子中にメタンが入った水和物）などが含まれる。「非在来型」は「通常の油田・ガス田以外から産出される」石油やガスを意味するとされるが、何が「通常」かについての明確な定義はなく、一般には従来技術では産出できないものを指し、かつては深海や僻地の石油・ガスも「非在来型」と呼ばれていたこともある。

最近では、動水学的な機構（密度差によりガスや石油が地層水と入れ替わって貯留岩中を上方に移動して、それより上にいけない背斜などの「トラップ」に集積するメカニズム）で集積した石油やガスを「在来型」と定義し、ガス、石油、水が垂直方向に重力分離して水平な界面(contact)を有することが多い。「非在来型」は「在来型」以外の総称で、界面を有さないため“continuous”と呼ばれることもある。

石油探鉱初期には、油田の形成メカニズム(動水学的集積機構)が理解されていなかったため、探鉱は非科学的ないわば「盲打ち」で、その対象は非在来型であったが、「背斜説パラダイム」の成立により探鉱対象が在来型に移行した(井上, 2002a,b, 2006b)。「背斜説パラダイム」とは、動水学的な集積機構の理解に基づき、背斜や層位封鎖などの「トラッ

プ」を狙うもので、これにより探鉱効率が大幅に向上しただけでなく、動水学的に連続しているため地層中の流動が可能で、坑井から遠く離れた石油やガスも回収できる。これは自明のようだが、原位置から移動できず露天掘りや坑道掘りが必要な石炭や金属などと比較すると優越性が明らかで、まさに「革命」であった。

「シェール革命」は、枯渇しつつある在来型から非在来型に回帰し始めた段階で、大量に賦存し水圧破砕（高圧水を地層に圧入して微細な割れ目を作り、油・ガスを流れやすくする）が有効である（割れやすく、ネットワークが作れる）場所を特定する新たな探鉱パラダイムを模索中であり、まだ真の「革命」ではない。「シェールならばどこに掘ってもよいので探鉱屋はもういない」という声を聞くが、実はどこに掘るかで結果は大きく異なり、今こそ新探鉱パラダイムの確立が求められている。

いわゆる「シェール」（頁岩）には、①厳密な定義（粘土分（粒径 1/256mm以下）67%以上、Neuendorf et al., 2005）、②粘土分比率はそれより低いが薄く剥離するもの（「シェール」、「頁岩」の語源）、③砂岩・シルト岩・炭酸塩岩などに分類すべきだがタイトなもの、が含まれる。①の定義に合致する岩石は実は少なく、一般には②の岩石が「シェール」、「頁岩」と呼ばれることが多い。シェールガスの多くは②、シェールオイルの多くは③からの産出であり、①の厳密な「シェール」からの産出はほとんどない。

非在来型は、界面を有さないため“continuous”とも呼ばれるが、実は流体はむしろ不連続で、一般には水圧破砕などを行わなければ、坑井近傍以外からは産出できない。ただし、より詳細に産状を見ると、特にシェールオイルは、移動・集積やトラップ機構の面で在来型の延長で、微細な在来型プール（トラップに捕捉されている油・ガス）の集合とみなせる（時には微細な界面が多数存在する）ことが多い（Hood and Yurewicz, 2008, Cumella and Scheevel, 2008）。この微細プールの形成はパーコレーションモデル（物質・流体の移動や現象の伝搬などを確率的に記述・解析するモデル）でよく再現できるが（Kuhn et al., 2012）、そのときのプールのクラスター規模（一部のプールは結合してより大きなプールを形成）はフラクタルで近似できることが知られている（Waldrop, 1992）。

6.1.2. 米国シェールガスの特徴と資源量

シェールオイル（上記の事情を考慮して「タイトオイル」と呼ばれることも多い）の公表データはまだ統計解析が行えるほど蓄積されていないので、それに代えてここでは EIA（米国エネルギー情報局）によるシェールガスの報告書とデータを用いて解析する。この

報告書は米国全土(アラスカを除く)の 5 地域, 19 プレイ(「プレイ」とは同一地域, または同一堆積盆地において産出層準やトラップタイプなどが共通の油ガス田の集合)のシェールガス資源量(正確には TRR, Technically Recoverable Resources: 厳密な「資源量」と異なり商業性を無視した, 将来発見され技術的に回収可能な全量)を推定したものである。実は, EIA に依頼されたコンサルタントの 2 名の地質学者が作成したもので, ほとんどが未発見でデータがないため単純化した方法(後述)で推定しており, その精度は高くはないが, 網羅性では他の報告には類を見ず, 現在でも最もよく引用されている。

同報告書には巻末に詳細なデータが添付されているので, そこから米国のシェールガスの資源量に関する基本情報を筆者が抽出・編集したものが表 6-1 である。右端の欄は同報告書中に参考として引用されている, それ以前の米国地質調査所(USGS)の推定値(ただし未発見量に限る)を転記したもので, 右から 2 列目の欄(「Inoue」)は筆者が同報告書のデータを使用して計算した TRR である(詳細後述)。右の青枠内に示した数値は TRR 最大の Marcellus shale の米国地質調査所(USGS)による未発見量の数値(P95-Mean-P5, 第 3 章第 1 節参照)である(USGS, 2011b)。また, 赤字は 2012 年, 紫字は 2013 年の EIA 自身による修正である(ともに EIA ホームページ上の報告, 前者は Marcellus shale の下方修正によるが, 詳細は不明)。それ以外の数値はすべて EIA(2011)から拾った。EIA による資源量(TRR)が全米 48 州合計で 750Tcf なのに対して, 同じデータを使用して筆者が計算した TRR は約 1,500Tcf と 2 倍になっているが(Tcf は兆立方フィート, 石油熱量等価は 1bbl \approx 6000cf), この問題は以下で議論する。

表 6-2 は, TRR が最大(全米合計の半分以上)の Marcellus play の詳細データである。同プレイの分布面積は実に日本の国土面積の約 2/3 に上り, この地域内であればどこに掘削してもガス産出の可能性はある(成功確率 70%)。開発区域(鉱区設定済)と未開発区域(鉱区未設定)に分けられ, それぞれが地層の性状(坑井の産出能力)に応じて 3 段階(best, average, below average)に区分されている。同一の区分であっても掘削された坑井の EUR (Estimated Ultimate Recovery: 商業性を無視し, 技術的に 1 本の坑井から究極的に採取可能な量, 3.1.2.参照)は同じではない。EIA(2011)は坑井の EUR を確率的に分布させ(excellent:10%, good:20%, fair:30%, poor:40%), それぞれに対して標準的な EUR の値(期待値)を示している。このデータに基づき, 筆者が各プレイの TRR を計算した結果(計算法は後述)を右から 2 列目の「Inoue(2017)」に示した。EIA 自身の数値(右端の「EIA (2011)」)の内訳は示されていないが, 両者の数値はかなり異なる。

表 6-1 米国シェールガスの堆積盆地・プレイ別資源量 (EIA データをもとに算出)

US Shale Gas Unproved Discovered Technically Recoverable Resources (data:EIA,2011)											
Region /Shale Play	Geologic System	Area (sq mi)	Well Space (well/sq mi)	Cost (\$/MM)	Depth (ft)	COS	EUR (Bcf/well)	TR Resources (Tcf)			
								EIA	Inoue	USGS(undisc.)	
Northwest								472.05	914.60	low-mean-high	
Marcellus	Lw. Devon.	94,893	8	3-4.7	6,750	0.7	9.31-0.44	410.34	141	751.99	0.8-1.9-3.7
Big Sandy	Devonian	10,670	8	0.5-3	3,800	0.86	0.86-0.12	7.40		23.85	3.9-6.3-9.6
Low Thermal Maturity	Devonian	45,844	7		3,000	0.74	1.20-0.06	13.53		71.76	1.5-2.7-4.3
Greater Siltstone	Devonian	22,914	11		2,911	0.74	0.77-0.04	8.46		36.74	0.9-1.3-1.9
New Albany	Devon.-Miss.	1,600	8	0.8-1	2,750	0.5	4.39-0.20	10.95		7.03	1.3-3.8-8.1
Antrim	Up. Devon.	12,000	7	0.3-0.5	1,400	0.95	0.77-0.11	19.93		21.77	5.9-7.5-9.7
Cincinnati Arch	Devonian	6,000	4		1,800	0.5	0.48-0.02	1.44		1.44	
Gulf Coast								99.99	224.53	Marcellus TRR USGS(2011) (Tcf) 43 - 84 - 144	
Haynesville	Up. Jurassic	9,000	8	6-10	12,000	0.75	17.29-0.56	74.71		188.08	
Eagleford	Up. Cret.	1,090	4/8	4-6.5	7,000	0.892	14.63-1.69	20.81		32.48	
Floyd/Neal-Conasauga	Up. Miss.-Camb.	2,430	2	3	8,000	0.906	2.39-0.34	4.37		3.97	
Mid-Continent								59.88	171.80		
Fayetteville	Mississippian	9,000	8	1.7-3.1	4,000	0.94	8.96-0.26	31.96		110.49	2.3-4.2-6.9
Woodford	Devon.-Miss.	4,700	4	5-8	9,500/5,000	0.9/0.86	15.92-0.75	22.21		48.84	6.1-10.1-14.0
Cana Woodford	Devon.-Miss.	688	4	4-12	12,000	0.86	20.69-3.90	5.72		12.47	
Southwest								75.52	72.29		
Barnett	Mississippian	6,459	5/8	2-4	7,500	0.95/0.75	4.26-0.45	43.38		48.09	21.7-26.2-31.5
Barnett-Woodford	Devon.-Miss.	2,690	4	6.5	10,200	0.75	7.98-1.13	32.15		24.20	
Rocky Mountain								43.03	66.14		
Hilliard-Baxter-Mancos	Up. Cret.	16,416	8	20	14,750	0.8	0.48-0.07	3.37		19.00	4.9-11.8-22.7
Lewis	Up. Cretaceous	7,506	3		4,500	0.95	4.32-0.62	11.63		32.76	8.3-10.2-12.3
Mancos(Uinta)	Up. Cretaceous	6,590	8		15,250	0.95	0.48-0.07	6.61		9.06	1.8-3.1-4.9
Williston-Shallow Niobraran	Up. Cret.	10,000	2		1,000	0.58	1.80-0.10	21.02		5.34	
Total Lower 48		270,490						665(2013)← 482(2012)← 750.38		1,449.36	

表 6-2 Marcellus Shale の資源量 (TRR) と採算性 (データ出典 : EIA,2011)

Technically Recoverable Resources Assessment - Marcellus Shale											
Area Grade	Basin Area (sq. miles)	Well Space (/sq.mile)	EUR(Bcf/well)				Success Rate	TR Resources (Tcf)			
			Excel.	Good	Fair	Poor		Inoue (2017)	EIA (2011)		
Developed(Leased, WV+PA)											
Best (30%)	3187	8	9.31	6.98	4.66	2.33	0.7	83.11			
Average (30%)	3187	8	7.00	5.25	3.50	1.75	0.7	62.47			
Below Ave. (40%)	4249	8	5.25	3.94	2.63	1.31	0.7	62.48			
								208.06	177.90		
Undeveloped(Unleased, MD+NY+OH+PA+VA+WV)											
Best (30%)	25281	8	3.06	2.30	1.53	0.77	0.7	217.03			
Average (30%)	25281	8	2.30	1.73	1.15	0.58	0.7	163.23			
Below Ave. (40%)	33708	8	1.73	1.30	0.86	0.44	0.7	163.66			
94893								543.92	232.44		
Total								751.99	410.34		
								(EIA2012Revision: 141 ←)			
Economic Limit (success;70%, well cost;50%) :								\$2/MMBTU, \$5.0MM/well : 16.62 (2.2%)			
								\$5/MMBTU, \$4.7MM/well : 191.01 (25.4%)			
								\$10/MMBTU, \$3MM/well : 685.92 (91.2%)			

表 6-2 の下段には、シェールガスの採算性の概算を示している。坑井掘削費が全費用の半分で、成功率を 70%（すなわち 30%の坑井は無駄になる）と仮定し、ガス価と坑井掘削費の組み合わせが、\$2/MMBTU と \$5MM/well（緑）、\$5/MMBTU と \$4.7MM/well（橙）、\$10/MMBTU と \$3MM/well（赤）の 3 ケースにつき検討した（BTU: 英国熱量単位、ガス 1cf は約 1000BTU）。各ケースで採算が取れるのは、表中のそれぞれ緑、橙、赤の破線の左側の資源だけであり、筆者の Marcellus の TRR 評価量（「Inoue(2017)」）の、それぞれ 2%、25%、91% に相当する。2017 年現在、米国のガス価は \$3/MMBTU 程度で推移しており、緑と橙の中間の全評価量の約 10%だけが採算が取れることになる。

表 6-3 では、表 6-2 の 1 行目（最も性状の良い区分）を例にとって TRR 計算法を示している。この計算を 6 区分すべてに行った結果が表 6-2 の「Inoue(2017)」の欄であり、それをさらに 19 プレイのすべてに行ったのが表 6-1 の「Inoue」の欄である。

表 6-3 Marcellus Shale(Developed-Best)の資源量(TRR)計算例

Region: Northwest, Play: Marcellus, Area Grade: Developed-Best				
Basin Area ①: 3187sq.miles, Well Space ②: 8/sq. mile, Success Rate ③:0.7				
Well Grade	Area Ratio ④	EUR ⑤	Well No. ⑥	TRR(Tcf) ⑦
		(Bcf/well)	①×②×③×④	⑤×⑥
Excellent	0.1	9.31	1785	16.62
Good	0.2	6.98	3569	24.91
Fair	0.3	4.66	5354	24.95
Poor	0.4	2.33	7139	<u>16.63</u>
				83.11

ここに示したように筆者の計算は EIA のデータに忠実に基づいているので、これよりかなり小さい EIA の評価は採算性などを考慮して何らかの足切を行っている可能性が高い。

1 本の坑井から究極的に採収可能な量 EUR (Estimated Ultimate Recovery) をシェールガスの「ガス田規模」とみなして、EIA (2011)のデータに基づき筆者が計算した米国 48 州合計の約 150 万坑（すなわち「150 万ガス田」）、TRR (Technically Recoverable Resources, EUR を合計した資源の量) 約 1,500Tcf を石油熱量等価 (1bbl=6000cf) で換算して表 3-2 のクラス分けを適用して (表 6-4)、その分布を図 6-1 に示した。

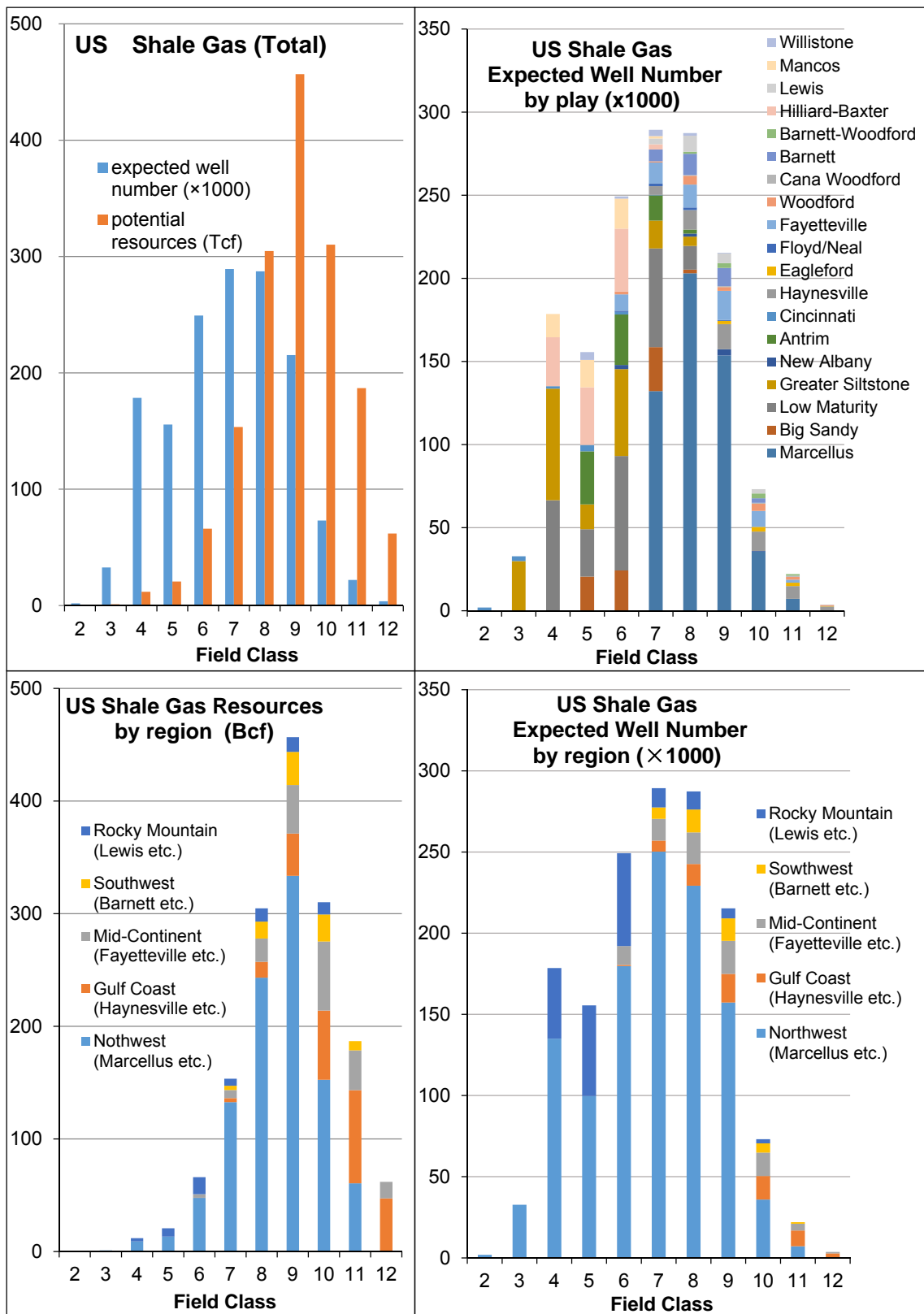


図 6-1 米国のシェール「ガス田数」と資源量の規模分布 (EIA,2011 に基づき筆者算出)

このクラス分け（EUR をガス田規模とみなし，石油熱量等価(6000cf=1bbl) で換算して表 3-2 のクラス分けに当てはめたもの）の図 6-1 に対応する範囲を表 6-4 に示した。

表 6-4 ガス田のクラス分け （単位：百万立方フィート）

ガス田クラス	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
埋蔵量 下限	12	24	48	96	192	384	768	1536	3072	6144	12288
(MMcf) 上限	24	48	96	192	384	768	1536	3072	6144	12288	24576

図 6-1 の左上のグラフの青棒は坑井（「シェールガス田」）数を，オレンジ棒は資源量（TRR）を表 6-4 の換算油田クラスに対してプロットした規模分布である。

前記したように，シェールガス，シェールオイルは微細な在来型プールの集合と見ることが出来る。在来型の場合は，一つの油田またはガス田に複数の生産井が掘られてそこから生産するのが普通で，まれに 1 坑だけから生産される場合もある。一方，シェール資源の場合は 1 坑で多数の微細プールを串刺しして生産する。このため，坑井をプールが存在する層準に沿って（水平に近いので「水平井」と呼ぶ）掘削し，さらに何本かに枝分かれして面的にひろげて（極端な時は魚の骨のような形状），できるだけ多くのプールから生産できるようにすることも多い。したがって，地質学的には個々の微細プールが油田またはガス田に相当するが，事業としてみると個々の坑井（複数のプールの集合）が油田またはガス田とみなせる。ここでは後者の立場をとっているが，それが後述するシェール資源のフラクタル次元が高い一因となっている。米国 48 州合計で，約 150 万坑（「ガス田」），約 1,500Tcf なので，1 坑(ガス田)平均 1Bcf (=1000MMcf)となりクラス 8（石油換算約 20 万バレル）に相当するが，表 6-2 の下段で検討したように，このサイズだとガス価が\$10/MMBTU（石油熱量等価換算\$60/bbl）近くにならないと商業開発は難しい（現在生産しているのは概ねクラス 10 以上）。

図 6-1 の左上のグラフのオレンジ棒の地域別内訳を左下のグラフに示し，右側のグラフには青棒の地域別（下）およびプレイ別（上）の内訳を示した。坑井（「ガス田」）数でも資源量でも，Marcellus play を含む水色の Northwest 地域（アパラチア山脈）が多いが，採算性の高いクラス 11～12 ではメキシコ湾岸地域や Southwest 地域（Barnett shale を含む）の比率が高い。第 4 章第 1 節の分析で，シェール資源の「真の余剰生産能力」は大きく，価格が上昇すると大量の供給が可能なることが示唆されたが，図 6-1 から裏付けられた。

図 6-1 では、青棒もオレンジ棒も左右対称的で、正規分布（横軸のクラス分けが埋蔵量の対数なので、埋蔵量に対しては対数正規分布）で近似される。これは、もともとの EIA の設定が EUR の小さいものほど数が多い対数正規的な分布を使用していること（表 6-2）と、中心極限定理（範囲の限定された分布を多数足し合わせると正規分布に近づく）による。しかし、さらに EUR の小さなものは多数存在しているが評価に含められていないと考えられることから、実際（地下）の規模分布は小規模なものほど多数存在するフラクタル（べき乗分布）の可能性がある。

図 6-2 に、上記青棒の米国のシェールガスの規模分布と第 3 章で検討した在来型の世界の油田規模分布および米国の油ガス田規模分布を比較して示した。

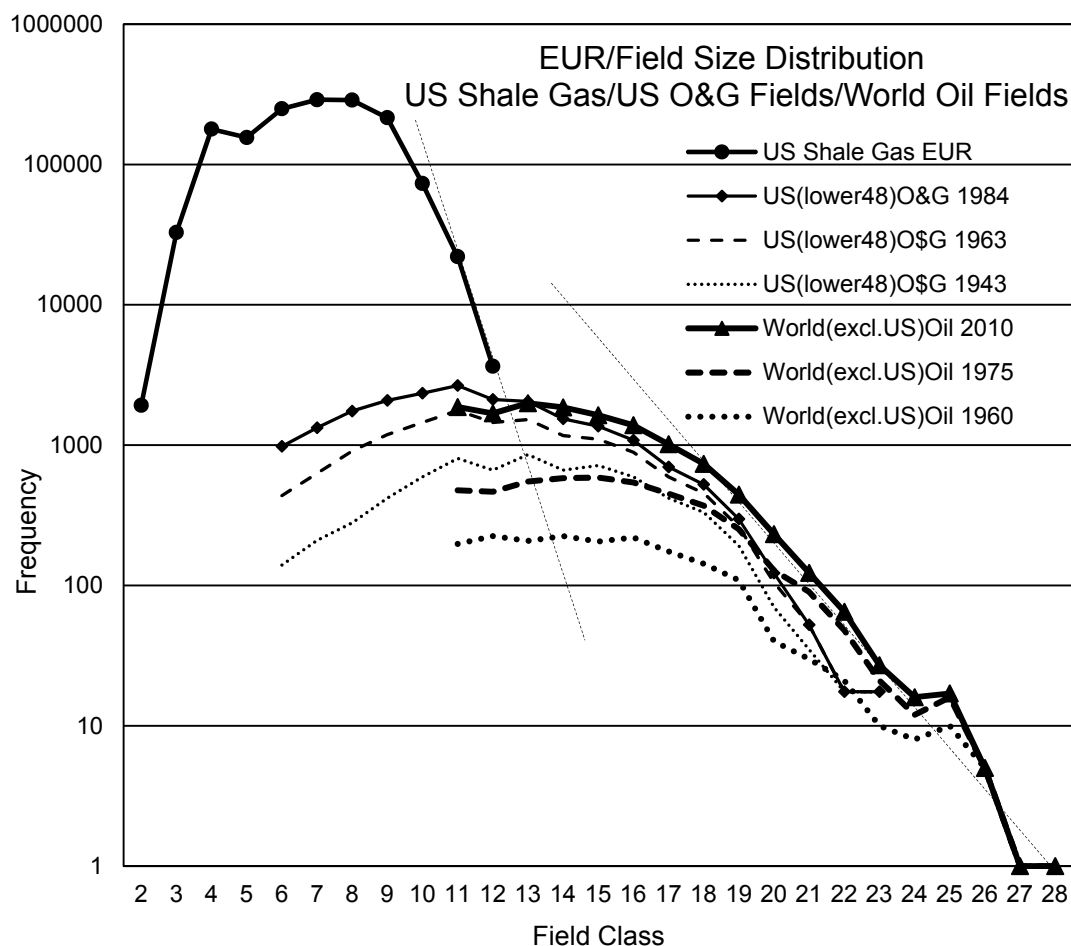


図 6-2 米国シェールガス・米国(48州)油ガス田・世界(米国以外)の油田の規模分布

データ出典：シェールガス；EIA，米国；Root and Attanasi(1993)，世界：IHS 社

シェール資源は、規模は小さいが坑井(ガス田)数が多いので、在来型とは異なった場所(左上)にプロットされるが、グラフの形状はともに放物線で近似される。このグラフは縦軸も対数スケールなので、これらは対数正規分布で近似されることを示している。しかし、第3章で判明したように、在来型油ガス田分布はべき乗分布の母集団からのバイアス付サンプリングとみなされる。これからの類推やパーコレーションモデルのクラスターがべき乗分布になること(Waldrop, 1992)などから、シェールガスの母集団もべき乗分布であり、図6-1はそこからのバイアス付サンプリングの結果であると考えられる。このとき、飽和してきている大規模部分の直線を左上に延長したもの(図6-2の点線)が母集団のべき乗分布に相当するが、米国シェールガスのそれは世界の油田や米国の油ガス田に比べて急傾斜である(フラクタル次元が高い)。これは、大規模なものは極端に少ないが、規模が小さくなると頻度が急増することを意味する。

この理由として2つ考えられる。①もともと在来型に比べてフラクタル次元が高い。貯留岩中のシェールガスはフリーガス(岩石中の孔隙に存在し、自由に動ける)と吸着ガス(粘土鉱物などの表面に吸着されていて、採取には減圧、界面活性剤などが必要)から成り、前者は在来型の延長だが、EUR(生産性)の低いシェールほど後者の比率が高く、その分が上乘せされる。②シェールガスの個々のプールの規模分布が在来型の延長であったとしても、水平井と多段水圧破砕(複数の層準で水圧破砕行う)により複数のプールが結合でき、小規模なものほどこの効果が大きい。この結果、小規模側への頻度の増加がより顕著(直線が急傾斜)になる。技術の向上により、さらに多くのプールを結合できるようになればフラクタル次元(べき乗分布の傾斜)はより大きくなる。

ただし、資源規模分布のフラクタル近似には下限がある。べき乗分布はスケールに依存しないため、理論的には無限小まで延長できるが、実際には鉱物粒子や炭化水素分子のサイズなどの制約があり、断層、褶曲、層厚、地震規模(グーテンベルグ・リヒター則)などと同様、適用範囲は限られ、第3章で検討した賦存量の制約を受ける。

また、ここでは石油熱量等価でクラス分けしていて、日本のLNGのように原油等価に近い価格の場合は適切だが、米国のガス価は現在、石油熱量等価の約1/3であり、採算性を含めた議論の際には、この点を考慮する必要がある。

第2節 エネルギー資源の変遷

第1章で概観したように、人類文明はエネルギー資源を「乗り換える」ことにより継続・発展してきた。この様子は図6-3(上)に示されているが(量ではなく比率で表示)、資源の品位分布がフラクタルで、その次元が資源の種類によって異なるという前提を置いたシミュレーションにより、この資源遷移実績と極めて似たパターンが再現される(図6-3下)。このグラフをどうやって導出したかを以下で説明する。

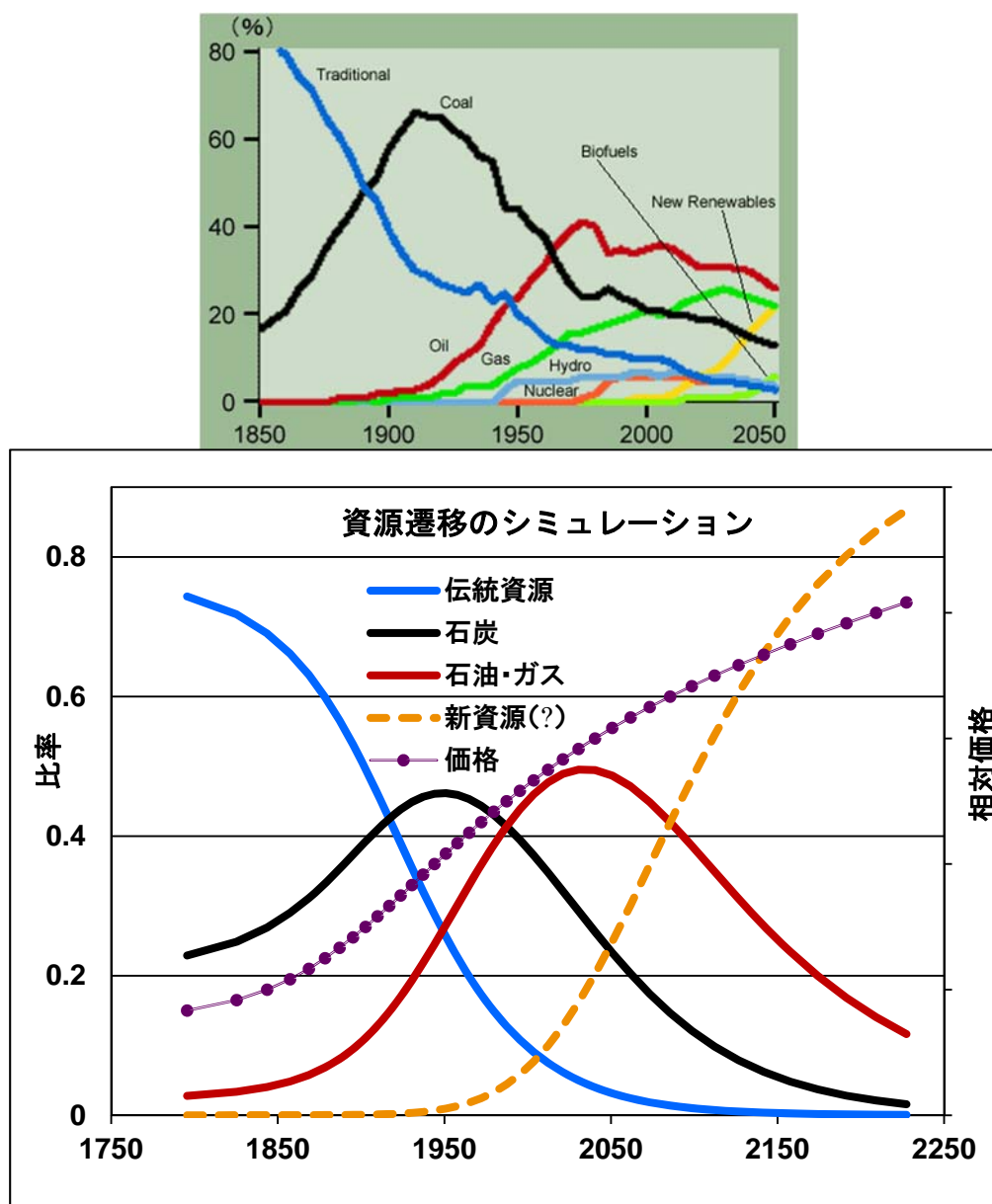


図6-3 資源遷移の実績(上:出典 Shell 社資料)とシミュレーション結果(下)

フラクタル次元の異なる数種類の資源が存在するときの生産量や価格の遷移を検討する。フラクタル次元の低いものから順に資源 1~4（1 クラス下の頻度はそれぞれ 1.6, 1.8, 2.0, 2.5 倍）を考える（図 6-4 上）。それぞれ、伝統資源（水力、木材など）、石炭、石油（+ガス）、新資源（シェール）を想定しているが、それらの実績とは必ずしも一致しない。クラス分けは品位も考慮して石油換算し、クラス 1 が石油千バレル等価、1 クラス上がるごとに 1.5 倍（これまでは 1 クラス上がると 2 倍としていたが、それとはクラス分けが異なる）とし、採算限界価格も全資源に共通とする（すなわち採算性を考慮したクラス分け）。個数は整数のはずだが、確率的現象なので期待値で議論し、1 個未満も計算対象とする。

全世界のエネルギー消費が一律年 2.5% で成長すると（価格高騰に応じた需要減少による成長低下はないと仮定）、図 6-4（中）の左上の包絡直線に従って成長する（縦軸の生産量は、ここでは特定の単位ではなく相対スケール）。この量を上位クラス（低価格）の資源から順に満たしていく。当初は資源 1 でほとんど賄えるが（木材・鯨油は石炭・石油に比べて高級品であった）、累計消費量の増加と高品位資源の枯渇に伴い、生産はより小規模・低品位のクラス（高価格）に移行し、図 6-4（上）のそのクラスの存在比率（垂直方向の按分）で、資源間の競合・分担が行われる。ここでは探鉱における揺らぎ（評価誤差など）は無視して、正確に上位クラスから順に発見・生産・枯渇していくものと考ええる。その結果、どの資源の消費量も成長を続けるが、その成長速度は、最初は上昇するが、上位クラスの枯渇により徐々に低下していく（図 6-4 中）。この資源間分担比率（図 6-4（中）の全生産量の直線を 1 としたときの各資源の比率）と各時点における生産中のクラス（価格の指標）の変遷を図 6-4 下に示した。価格は（クラスと線形逆相関と仮定すると）、当初は緩やかに、その後急激に上昇するが、資源シフトにより再び上昇は緩やかになる。極めて単純化したモデルにもかかわらず、この結果は現実のエネルギー資源の変遷履歴（図 6-3 上）に酷似しており、それは資源の規模（品位）分布のフラクタル次元の相違と価格（技術も含む）による代替効果に起因すると解釈される。この考えに基づき、図 6-4（下）の「クラス」を「相対価格」に読み替えたのが図 6-3（下）に他ならない。

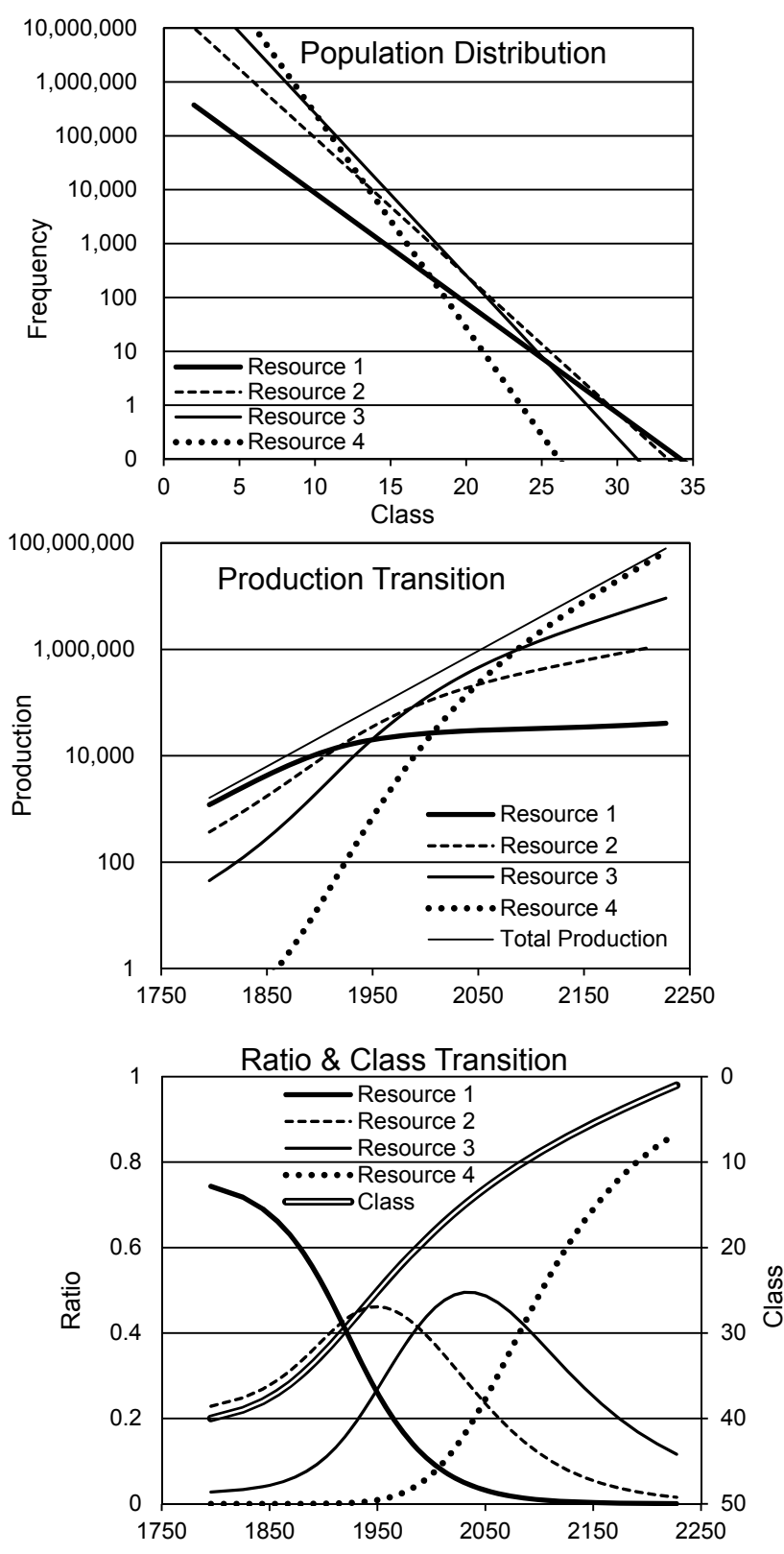


図 6-4 資源の遷移のシミュレーション

上；規模分布，中；生産量の遷移，下；生産比率とクラスの遷移

このモデルでは、量の比率および期間（時間差）には意味があるが、量や年度の絶対値は初期値などの設定に依存するため、指標に過ぎない（したがって、横軸の年度も参考値に過ぎない）。ここでは賦存量の制約がないため、資源4がどこまでも生産する一種の「バックストップ資源」（第2章第1節参照）になっているが、第3章第2節で検討したように、資源4がシェール資源であれば賦存量の制約のため、実際にはこの図の後期の増産は不可能である。また図6-4（下）で、2150年頃はクラス5から生産しているが、この規模は石油換算約5,000バレル（\$100/bblなら総収入50万ドル）であり、掘削・生産に要する投入エネルギー（およびコスト）がそれ（「逆臨界」）を超えれば、もはや資源とはみなせない（第3章第1節参照）。

このモデルは極めて単純化していて、資源量の可塑性、埋蔵量の緩衝効果（発見量が長期に分散されて生産される）と生産の減退、探鉱・生産活動における揺らぎやタイムラグ、需要に対する価格の効果などを考慮していないため、大局的な傾向の把握にとどまる。それにもかかわらず、図6-3で比較しているように、現実のエネルギー資源の遷移を極めてよく再現していて、エネルギー資源の変遷は大局的には、各資源のフラクタル次元に規制されていると解釈される。

以上では捨象していた諸要因も加えてシェール資源への遷移を検討するために、第5章で導入した力学系モデルに新資源を加えて資源のシフトを分析する。図6-5がその結果で、Aは新資源（シェール）がない場合（第5章のケース2）で、B～Dでは新資源は存在するがそのフラクタル次元が微妙に異なっている。表6-5に使用パラメータをまとめた（他は第5章と共通）。

表 6-5 使用パラメータ一覧 （その他のパラメータは表 5-1 と共通）

パラメータ	石油	新資源(シェール)		
	全ケース	CaseB	CaseC	CaseD
b : 発見量係数 ($\times 10^{-7}$)	10	5.0	5.0	5.0
c : 生産量-埋蔵量感度係数	4.0	4.0	4.0	4.0
k : 減退率	0.2	0.8	0.8	0.8
α : 資源量-価格可塑指数	0.4	1.3	1.4	1.5
T : 発見待機期間 (年)	5	1	1	1
T' : 評価・開発期間 (年)	5	1	1	1
D_0 : 初期発見量 (BB)	1	0.1	0.1	0.1
Q_0 : 初期生産量 (BB)	0.2	0.1	0.1	0.1

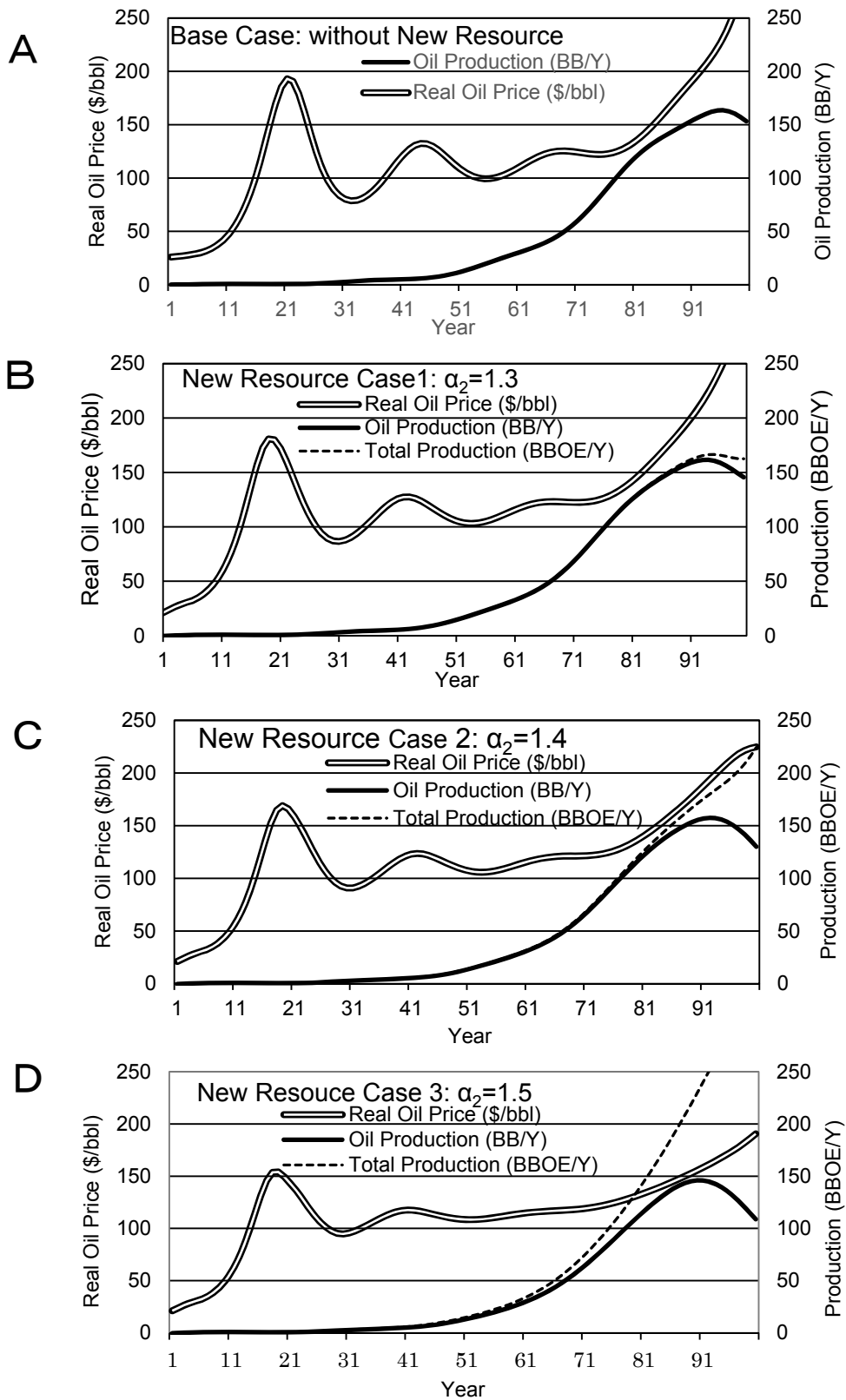


図 6-5 内生的力学系モデルによる資源の遷移と価格予測

A : 新資源なし, B~D : 新資源あり (下ほどフラクタル次元が高い)

フラクタル次元に対応する「資源量-価格可塑指数」 α は、石油の0.4に対し、新資源では1.3から1.5の間で振らせ、「減退率」に相当する係数 k は、石油の0.2に対して0.8として初年度に大半を取りつくすことにし、石油ではそれぞれ5年とっていた発見および生産開始までのタイムラグを、ともに1年とした。また、「発見量係数」 b を両資源共通で 5.0×10^{-7} 、「初期発見量」は石油が1BB、新資源が0.1BB、「初期生産量」は石油が0.2BB、新資源が0.1BBとし、それ以外のパラメータはすべて第5章と同じとした。

図6-5のB~Dが新資源(シェール)の「資源量-価格可塑指数」(α_2)をそれぞれ1.3, 1.4, 1.5としたケースである(石油の「資源量-価格可塑指数」(α_1)は0.4で全ケース共通)。B~Dの3ケースでは破線が合計生産量であり、石油生産量(太実線)との差が新資源(シェールオイル)の生産量に相当する。

新資源が代替すると、石油の生産ピークが若干低くなり、その時期も早まるが、新資源の資源係数 α の微妙な相違により資源シフトの程度が異なる。つまり、新資源へのシフトが順調に行われれば、その生産が急増するとともに価格上昇も緩やかになり、旧資源の生産ピークは早まるが、そのシフトの程度は、フラクタル次元に依存している。また、生産量が低く、新資源の比率も低かった生産初期の高騰期のピーク価格も新資源の有無とそのフラクタル次元によりかなり異なっている。現在、シェールオイルの生産量シェアは数パーセントに過ぎないが、第4章の分析でも明らかになったように、原油価格への影響が大きい、同じ現象がここでも再現されている。

現段階ではシェール資源のデータは米国など一部地域に限られるので、フラクタル次元が在来型より高いことは確実とはいえ、その詳細な数値までは正確に推定できず、在来型からのシフトが順調かつ持続的に行われるか、シェール資源の大半が結局は開発されずに放置されるかは、現時点では断言できない。しかし、それはシェール資源の規模分布の傾き(フラクタル次元)に規制されており、前節で述べたように、それを採取技術により高めることも可能で、多段水圧破碎のような技術進歩にも依存している。

第3節 第6章のまとめ

第1節では、シェール資源の定義と特徴を概観し、米国のシェールガスの資源量分布を検討した。米国に限ったのは、現在までにシェール資源が開発されているのは、実質的に米国に限られるからであり、シェールオイルではなくシェールガスを対象としたのも、シェールオイルには統計分析に耐えられるほどの実績とデータが、まだ蓄積されていないからである。しかし、シェール資源には共通性があるため、米国シェールガスの解析結果は、他国やシェールオイルにも敷衍できる。

この解析の結果、米国のシェールガスは、採算性を無視すれば、EIA(2011)の評価を大きく超える(約2倍の)1,500Tcf(米国の在来型ガス資源量に匹敵し、世界のガス資源量の約1/10に相当、ただし採算性を無視しているので厳密には「資源量」ではない)の資源があることが推定された。しかし、そのほとんどは坑井1坑での回収量(これまでの章での油田の埋蔵量に相当)が極端に小さく、現時点では採算性がない。坑井1坑での回収量を埋蔵量とみなすと、米国シェールガスの究極規模分布(地下に存在するすべてを含んだ母集団)は、油田規模分布同様フラクタルであると推定される。ただし、そのフラクタル次元は、全世界の究極油田規模分布よりかなり高いと推定される。

この理由として2つ考えられる。①もともと在来型に比べてフラクタル次元が高い。シェールガスはフリーガスと吸着ガスからなり、前者は在来型の延長だが、EUR(生産性)の低いシェールほど後者の比率が高い。②シェールガスの個々のプールの規模分布が在来型の延長であったとしても、水平井と多段水圧破碎により複数のプールが結合でき、小規模なものほどこの効果が大きい。この結果、小規模側への頻度の増加がより顕著になる。技術の向上により、さらに多くのプールを結合できるようになればフラクタル次元(べき乗分布の傾斜)はより大きくなる。

第2節ではエネルギー資源の変遷を論じた。第1章で概観したように、世界でも米国でも各種のエネルギー資源の資産量は成長するが、ある時点で資源量の制約により、その比率はピークを打ち、それ以降は減退するが、これを代替する資源が現れて取って代る。この過程を、各資源の規模(または品位)分布がフラクタルであるという前提に基づきシミュレーションした。その際、代替する資源のフラクタル次元が異なる、すなわち初期の資源は極めて大規模(または高品位)のものが存在するが小規模(または低品位)のものへの増え方は低く、一方、後期の資源は超大規模のものは存在しないが小規模側へ急速に増加する、とい

う仮定を導入すると現実の世界および米国に極めて類似した履歴パターンが再現される。

ただし、このモデルでは供給の制約がなく（次々と新しい資源があらわれ、価格さえ上昇すれば無尽蔵に供給できる）、経済は自由に成長できるとしている（ここでは 2.5%定率成長のケースを扱った）。そこで、第 5 章のモデルに、フラクタル次元の異なる新資源（シェールを想定）を導入してシミュレーションを行った。そこでは、経済状況が資源の供給能力を規定し、その供給能力が逆に経済を規定するという、相互フィードバックが生じる。この結果、今後新資源が全エネルギー供給にどの程度貢献できるかは新資源のフラクタル次元に大きく依存している。すなわち、新資源（シェール）のフラクタル次元のわずかな違いが（シェール資源の場合は、採掘技術によりフラクタル次元を高めることが可能）、将来のエネルギーの供給量と価格、ひいては人類文明の持続可能性を規定している。

第7章 まとめと今後の課題

本論文では、経済をエネルギーで記載するとともに、エネルギー資源を経済学的視点で評価して、両者を統合することにより経済動向の歴史の再現・未来予測を行い、人類文明の持続可能性をも占うことを試みた。

第1章では、世界および米国の過去のデータなどに基づき、経済がどの程度エネルギーに依存し、エネルギー資源がどのように経済に規定されているかを概観した。その結果、エネルギーで経済を計測することが可能で、客観性などの点ではGDPなど貨幣単位で計測するより優れていることが示唆された。エネルギー資源、特に石油など化石燃料は、全地球のエネルギーフローの中で地質時代を通して蓄積されてきたストックであり、有史以降それに手を付けることにより経済は発展してきた。したがって、この全地球システムの中でエネルギー資源と経済を把握することが重要であり、第2章以降でその展開を試みた。

第2章では、ゲーム理論を含むマイクロ経済学的手法により、枯渇性資源の企業および産油国にとっての最適生産経路を分析した。しかし、企業および産油国は資源を自由に生産できるわけではなく、結局最終的には発見された埋蔵量に規定される。さらに、埋蔵量も自由に産出されるわけではなく、生産能力は地下の排出エネルギーに規定される。こうした制約の中での企業や産油国にとっての最適生産経路は、結局各油田の最大生産プロファイル（能力一杯に生産する）であることが判明した。

資源の生産能力が埋蔵量に依存するため、第3章では、資源（石油）の賦存量（地下に存在する全量）・資源量（最終的に利用される総量）・埋蔵量（既発見で商業性可能な量）の評価を行った。石油の賦存量、すなわち物理的に存在する量は、全地球を対象にした生成・破壊・散逸モデルにより、146兆～216兆バレルと推定されるが、このうち技術的・商業的に回収できる量は一部に過ぎない。

アーチェリーを模したモデルで解析した結果、油田規模分布はフラクタル（べき乗分布）で近似できることが判明した。これに従うと、世界の「究極資源量」（技術的に回収可能な総量、過去の累計生産量を含む）は現在の採算限界以上のサイズの油田に限れば3～5兆バレル、現在は採算限界以下のシェールオイルなども総て含めれば数十兆バレル（賦存量の20

～40%)と評価される。前者の数値は、最も楽観的な先行研究と同等またはそれより大きく、後者はさらに一桁大きい。しかし、発見される油田規模がどんどん小さくなるので、これを達成するためには極めて多数の発見、すなわちその数倍の試掘が必要となる。ここで開発した手法を用いれば、今後の探鉱量に応じて発見される埋蔵量が予測できる。

経済は生産量に規定され、生産量は埋蔵量追加に依存し、埋蔵量追過程は結局経済に規定される、という相互のフィードバック・ループの存在が明らかになったので、第4章でこれらの要因の間の計量経済学的検討を行った。

原油価格決定論には諸説あるが、生産能力と生産量(=消費量)を比較する「真の需給均衡説」が有力であることが判明した。油田発見履歴から求めた「余剰生産能力」と原油価格の間には明瞭な関係が認められ、この回帰により原油価格の推移実績が説明される。さらに、原油価格が低位安定であった2002年までのデータだけで推計を行っても、その後の価格高騰と下落が予測できる。

ただし、この方法では需要の予測はできないので、石油生産量(供給)、鉱工業生産(需要)、原油価格の3係数で、2003年までのデータでベクトル自己回帰(VAR)分析を行い、その結果で2004年～2011年の予測を行った。この3係数だけだと原油価格予測は緩やかに上昇するだけで、実績との乖離は大きい。上記で求めた生産能力を外生的な制約として組み込むと、現実の原油価格の上昇トレンドが再現され、長周期的な変動は生産制約に大きく依存していることが判明した。

さらに、油田発見数を生産量と原油価格で推計する回帰を行い、その結果と第3章の方法を組み合わせれば、供給側については「評価の環」が完成し、将来の生産量・価格が推定できる。

従来の伝統的諸研究では、経済成長を資本・労働・消費の相互作用で説明し、周期的な景気変動や急激な価格変化の原因は外生的なショックなどに求めることが多かった。これをエネルギー資源(石油で代表させる)の「可塑的制約」(枯渇制約はあるが価格上昇により量の拡大が可能)を導入して、第5章で内生的・動学的再現を試みた。

石油の消費(生産)量と価格に基づき全世界の「経済」の挙動を内生的・動学的に記載する微分方程式系から成るモデルを構築し、シミュレーションを行った。その結果、実績に似た脈動パターンが再現され、外生的なショックなどを導入しなくとも、エネルギー循環とその

量の可塑的制約だけで、経済変動のかなりの部分が内生的に説明できる可能性がある。

以上の成果は在来型の石油に限られていたが、2010年頃から米国でのシェール資源の開発が進展し、その影響は無視できなくなってきた。そこで、第6章ではシェール資源の特徴とポテンシャルを概観し、エネルギー資源の遷移について検討した。シェールオイルには統計分析に耐えられるほどの実績とデータが、まだ蓄積されていないので、米国のシェールガスについて検討したが、シェール資源には共通性があるため、この解析結果は、他国やシェールオイルにも敷衍できる。

米国のシェールガスは、採算性を無視すれば、1,500Tcf（米国の在来型ガス資源量に匹敵し、世界のガス資源量の約1/10に相当）の資源があることが推定された。しかし、そのほとんどは坑井1坑での回収量が極端に小さく、現時点では採算性がない。坑井1坑での回収量を埋蔵量とみなすと、米国シェールガスの究極規模分布のフラクタル次元は、全世界の究極油田規模分布よりかなり高いと推定される。

各エネルギー資源の規模（または品位）分布がフラクタルであるという前提に基づきシミュレーションを行った結果、過去のエネルギー資源の遷移に極めて類似した履歴パターンが再現される。今後新資源（シェール）が全エネルギー供給にどの程度貢献できるかは、新資源のフラクタル次元に大きく依存しており、そのわずかな違い（および採取技術の向上によりどの程度フラクタル次元を高められるか）が、将来のエネルギーの供給量と価格、ひいては人類文明の持続可能性を規定している。

今回の研究は、一連のものではあるが、各章・節がある程度独立して自己完結的なものであるため、用いられた理論や手法は必ずしも整合性・統一性がない。今後は全体を統合的に連結した「大統一理論」と、それに基づく現状解釈と将来予測が必要になる。

経済全体をエネルギー（石油）消費で代表させるこの研究により、周期的な経済変動が内生的に再現できるが、経済を過度に単純化している面は否めない。より現実的には、消費・貯蓄・資本形成のメカニズムや財政・金融政策、税などの効果を考慮する必要がある。また、実際には内生的要因だけでなく様々な外生的ショックが加わり、相互にフィードバックし合って動いており、それらを確率的ゆらぎとして導入することも考えられる。

人類文明の持続可能性という点では、環境問題や人口の影響も重要である。環境汚染は累計エネルギー消費（生産）量の関数とみなせるので、本研究の環境問題への拡張はそれ

ほど困難ではない。特に，本研究で提示した可塑的有限性を組み込んだモデルは，自然回復能力（レジリエンス）の評価など地球環境問題においても有効であると考えられる。

今後はこうした課題を念頭に置いて，本研究をさらに発展させたいと考えている。

参考文献

- Arps, J. J. and Roberts, T. G. 1958: Economics of drilling for Cretaceous oil on east flank of Denver-Julesburg basin. American Association of Petroleum Geologists Bull. 42(11), 2549-2566.
- Arrow, K. J., Dasgupta, P., Goulder, L. H., Mumford K. J. and Olsen, K. 2012: Sustainability and the measurement of wealth. Environment and Development Economics. 17, 317-353.
- Attanasi, E. D., and Root, D. H. 1994: The enigma of oil and gas field growth. American Association of Petroleum Geologists Bull. 78(3), 321-332.
- Bak, P., Tang, C. and Wiesenfeld, K. 1988: Self-organized criticality. Physical Review A38, 364-374.
- Barro R, J. and Sala-i-Martin X. 2004: Economic growth (second edition). The MIT Press. 654p.
- Barsky, R. B. and Kilian, L. 2004: Oil and the macroeconomy since the 1970s. Journal of Economic Perspectives, 18(4), 115-134.
- BP 2017: BP Statistical Review of World Energy June 2017. bp.com/statisticalreview
- CRC 2005: CRC Handbook of Chemistry and Physics, 86th ed. CRC Press, 2544p.
- Campbell, C.J., 1997 a: Better understanding urged for rapidly depleting reserves. Oil and Gas Jour., Apr. 7, 1997, 51 - 54.
- Campbell, C.J., 1997 b: The coming oil crisis. Multi - Science Publishing Company & Petroconsultants S.A., 210p.
- Campbell, C.J., 2003: Industry urged to watch for regular oil production peaks, depletion signals. Oil and Gas Jour., July 14, 2003, 38 - 45.
- Carmalt, S.W. and St. John, B., 1986: Giant oil and gas fields. In Halbouty, M. T., ed., Future petroleum provinces of the world. American Association of Petroleum Geologists Memoir 40, 11 - 52.
- Conference Board, 2017: Growth Accounting and Total Factor Productivity, 1990-2016. <https://www.conference-board.org/data/economydatabase/index.cfm?id=27762>

- Cumella, S. P., and Scheevel, J. 2008: The influence of stratigraphy and rock mechanics on Mesaverde gas distribution, Piceance Basin, Colorado. In Cumella, S. P., Shanley, K. W., and Camp, W.K. eds. Understanding, exploring, and developing tight-gas sands-2005 Vail Hedberg Conference: American Association of Petroleum Geologists Hedberg Series, no.3, 137-175.
- Currie, J.B., Patnode, H.W. and Trump, R.P., 1962: Development of folds in sedimentary strata. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 73, 655 - 674.
- Daly, H. E. 1997: Forum: Georgescu-Roegen vs. Solow/Stiglitz. *Ecological Economics*, 22, 261-266.
- Dasgupta, P. and Maskin, E. 1986: The existence of equilibrium in discontinuous economic games, I: theory. *Review of economic studies* 53, 1-26.
- Davis, J. C. and Chang, T. 1989: Estimating potential for small fields in mature petroleum province. *American Association of Petroleum Geologists Bull.*73(8), 967-976.
- De Beauvoir, S. 1949: *Le Deuxième sexe*. Gallimard. (生島遼一 (1959 訳) 第二の性. 新潮社 1: 270p., 2: 322p.)
- Deffeyes, K. S. 2001: *Hubbert's peak*. Princeton Univ. Press, 208p.
- Deffeyes, K.S., 2002: World oil production peak reckoned in near future. *Oil and Gas Jour.*, Nov. 11, 2002, 46 - 48.
- Diamond, J. 2005: *Collapse: How societies choose to fail or succeed*. Viking Penguin, 592p.
- Economist, 2010: How China's next prime minister keeps tabs on its economy. *The Economist*, Dec. 9, 2010. <http://www.economist.com/node/17681868>
- EIA 2011: Review of emerging resources: U.S. shale gas and shale oil plays. U.S. Energy Information Administration, Department of Energy, 82p.
- EIA 2017: What drives crude oil prices: Balance. U.S. Energy Information Administration. <http://www.eia.gov/finance/markets>
- FAO 2012: The state of food insecurity in the world. The Food and Agriculture Organization of the United Nations, 61p.

- 笛木琢治・川本卓司 2009: 近年の原油価格の変動要因について - 構造 VAR による試算。
日銀レビュー、日本銀行 2009 年 5 月, 1-9.
- Georgescu-Roegen, N. 1971: The entropy law and the economic process. Harvard Univ. Press, 457p.
- Georgescu-Roegen, N. 1975: Energy and economic myths. The Southern Economic Journal 347-381. (小出厚之助・室田 武・鹿島信吾 (1981 訳) 経済学の神話. 東洋経済新報社, 285p.)
- Gibbons, R. 1992: Game theory for applied economists. Princeton Univ. Press, 267p.
- Gordon, R. B., Koopmans, T. S., Nordhaus, W. D. and Skinner, B. J. 1987: Toward a new iron age? Quantitative modeling of resource exhaustion. Harvard Univ. Press, 173p.
- Hamilton, J. D. 1983: Oil and the macroeconomy since World War II. Journal of Political Economy, 91, 228-248.
- Hamilton, J. D. 1994: Time series analysis. 291-350, Princeton Univ. Press.
- Hamilton, J. D. 2003: What is an Oil Shock? Journal of Econometrics, 113(2), 363-398.
- Hamilton, J. D. 2011: Historical Oil Shocks. NBER Working Paper 16790.
- Hartwick, J. M. 1977: Intergenerational equity and the investing of rents from exhaustible resources. The American Economic Review, 67(5), 972-974.
- Hood, K. C., and Yurewicz, D. A. 2008: Assessing the Mesaverde basin-centered gas play, Piceance Basin, Colorado. In Cumella, S. P., Shanley, K. W., and Camp, W.K. eds. Understanding, exploring, and developing tight-gas sands-2005 Vail Hedberg Conference: AAPG Hedberg Series, no.3, 87-104.
- Houghton, J.C., Dolton, G.L., Mast, R.F., Masters, C.D. and Root, D.H., 1993: U.S. Geological Survey estimation procedure for accumulation size distributions by play. American Association of Petroleum Geologists Bull. 77(3), 454 - 466.
- Hotelling, H. 1931: The economics of exhaustible resources. Journal of Political Economy, 39(2), 137-175.
- Hubbert, M.K., 1965: National Academy of Science report on energy reasons: reply. American Association of Petroleum Geologists Bull. 49(10), 1713 - 1720.

- Hubbert, M. K. 1966: History of petroleum geology and its bearing upon present and future exploration. American Association of Petroleum Geologists Bull. 50(12), 2504-2518.
- Hubbert, M.K., 1967: Degrees of advancement of petroleum exploration in the United States. American Association of Petroleum Geologists Bull. 51(11), 2207 - 2227.
- 井熊 均・三輪泰史 2014: 植物工場経営. 日刊工業新聞社, 175p.
- 井上正澄 2002a: 背斜説から向斜説へ? - 21 世紀の探鉱パラダイム -. 石技誌, 67(2), 143-152.
- 井上正澄 2002b: 石油探鉱におけるパラダイム変換. ペトロテック, 石油学会, 25(1), 503-507.
- 井上正澄 2004: 石油資源の将来 - 生産量推移・油田規模分布・究極資源量に関する考察. 石技誌, 69(6), 679-691.
- 井上正澄 2005: 石油の資源量と寿命. 石油天然ガスレビュー, 39(3), 1-11.
- 井上正澄 2006a: 「ピークオイル」の真実—石油資源量・生産能力・原油価格を科学する. 月刊エネルギー2006年2月号, 日本工業新聞社, 11-15.
- 井上正澄 2006b: 石油探鉱のパラダイム変換と「ピークオイル」. 地学雑誌(東京地学協会), 115(2), 236-242.
- 井上正澄 2006c: 未来の石油発見を予測する—「探鉱シミュレーター」の試み—. 石技誌, 71(3), 280-292.
- 井上正澄 2006d: 石油の過去・現在・未来—目から鱗の新資源論—. 石油天然ガスレビュー, 40(4), 81-91.
- 井上正澄 2016: .ゲーム理論で読み解く石油開発. 石技誌, 81(2), 183-196.
- 井上正澄・中東秀樹・足立原路雄・松本和彦・森山哲太郎 2008: 石油探鉱戦略の科学-熟成・競争時代を勝ち抜く技法-, 石技誌, 73(1), 7-19.
- 井上正澄・竹内 傳 2010a: 石油鉱業におけるリターンとリスク-既存リスク評価法の比較-. 石技誌, 75(3), 211-222.
- 井上正澄・竹内 傳 2010b: 石油鉱業における新リスク評価法-「RACE」の提案と探鉱戦略への応用-. 石技誌, 75(3), 223-232.
- 井上正澄・吉野博厚・江口孝夫・山科起行・佐久間広展 2015: 資源進化論-エネルギー資源の変遷・現状と未来予測-. 石技誌, 80(1), 60-73.

- International Energy Agency 2008: World Energy Outlook 2008. 221-248, International Energy Agency.
- IPCC 2013: Climate change 2013: The physical science basis. Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group I, Cambridge University Press, 1535p.
- Jevons, W. S. 1866: The coal question: An inquiry concerning the progress of the nation, and the probable exhaustion of our coal-mines. Andesite Press (2017), 528p.
- 加藤裕己 2008: 原油価格高騰とその要因. エネルギー経済, 34(2).
- Kaufman G. M., Balcer, and Kruyt, D 1975: A probabilistic model for oil and gas discovery. In Haun, J. D. ed. Methods of estimating the volume of undiscovered oil and gas resources. Studies in Geology No.1, American Association of Petroleum Geologists, 113-142.
- Kilian, L. 2009: Not all oil price shocks are alike: Disentangling demand and supply shocks in the crude oil market. American Economic Review, 99(3):1053-1069.
- 鬼頭 宏 1996: 明治以前日本の地域人口. 上智経済論集, 41(1-2), 65-79.
- Klett, T.R., Gautier, D. L. and Ahlbrandt, T. S. 2005: An evaluation of the U.S. Geological Survey World Petroleum Assessment 2000. American Association of Petroleum Geologists Bull. 89(8), 1033-1042.
- 小山 堅・柳澤 明 2011: 商品価格と投機 (上) 原油、実需分は 60 ドル程度. 「経済教室」日本経済新聞 2011 年 6 月 16 日.
- 国立天文台 2010: はやぶさ探査機の大気圏再突入の地上観測. 日本天文学会秋季年会発表 (9 月 22 日, 金沢大学) <http://pholus.mtk.nao.ac.jp/~satomk/hayabusa/result/>
- Kuhn, P.P., di Primo, R., Hill, R., Lawrence, J. R., and Horsfield, B. 2012: Three-dimensional modeling study of the low-permeability system of the Bakken Formation. American Association of Petroleum Geologists Bull. 96(10), 1867-1897.
- Laherrere, J.H. 1996: Distributions de type fractal parabolique dans la Nature. Comptes Rendus de l'Academie des Sciences 322(IIa7), 535-541.
- Laherrere, J. H. 2000: Distribution of field size in a petroleum system: parabolic fractal, lognormal or stretched exponential? Marine and Petroleum Geology 17, 539-546.
- Lee, P. J. 2008: Statistical methods for estimating petroleum resources. Oxford Univ.

- Press, 234p.
- Lippi, F. and Nobili, A. 2008: Oil and macroeconomy: A structural VAR analysis with sign restrictions. CERP Discussion Papers No.6380
- MacKinnon, J. G. 1991: Critical values for cointegration tests. In Engle, R. F. and Granger, C. W. eds. Long-run economic relationships: Readings in cointegration. Oxford University Press, 267-276.
- MacKinnon, J. G. 1996: Numerical distribution function for unit-root and cointegration tests. *Journal of Applied Econometrics*. 11(6), 601-618.
- Mäler, K.-G. 2008: Sustainable development and resilience in ecosystems. *Environ Resource Econ*. 39, 17-24.
- Mäler, K.-G., Aniyar, S. and Jansson, Å. 2009 Accountig for ecosystems. *Environ Resource Econ*. 42, 39-51.
- Malthus, T. R. 1798: An essay on the principle of population. As it affects the future improvement of society, with remarks on the speculations of Mr. Godwin, M. Condorcet, and other writers. London: printed for J. Johnson, in St. Paul's Church-yard. (斉藤悦則 2011 訳: 人口論. 光文社, 307p.)
- Marx, K. 1885: (原典はドイツ語 : 鈴木鴻一郎・日高 晋・長坂 聰・塚本 健 1973 訳: 資本論 - 経済学批判 第一巻. 世界の名著 43, 中央公論社, 722p.)
- Masters, C. D., Attanasi, E. D. and Root, D. H. 1994: World petroleum assessment and analysis. Proceedings of the 14th World Petroleum Congress. John Wiley and Sons, London, 529-541.
- 松井 信 2015: エネルギー循環システムのためのレーザープラズマ風洞を用いたアルミナ還元法. *軽金属*, 65(1), 23-27.
- 松下吉樹 2016: 小型イカ釣り漁船のエネルギー収支. *水産工学*, 52(3), 189-195.
- McCabe, P. J. 1998: Energy resources – cornucopia or empty barrel? *AAPG Bull*. 82(11), 2110-2134.
- Meadows, D. H., Meadows, G., Randers, J. and Behrens III, W. W. 1972: The limit to

- growth. A report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind. New York: Universe Books, 205p.
- Miller, R. G. 1992: The global oil system: the relationship between oil generation, loss, half-life, and the world crude oil resource. AAPG Bull. 76(4), 489-500.
- 茂木清夫 1981: 地震—その本性をさぐる. 東京大学出版会, 164p.
- 本川達雄 1996: 時間 - 生物の視点とヒトの生き方. NHK出版, 281p.
- 本村真澄 2004: ピークオイルは近づきつつあるのか? 石油天然ガスレビュー, 38(6), 1-8.
- 本村真澄・本田博巳 2007: ピークオイルの資源論的概念とその対応策について. 石油天然ガスレビュー, 41(4), 17-30.
- 室田 武 1979: エネルギーとエントロピーの経済学. 東洋経済新報社, 206p.
- 中嶋 健 2002: タービダイト層厚分布の統計的解析—その貯留岩キャラクター化への応用の可能性—. 石技誌, 67(3), 308 - 320.
- 中西健史 2000: 石油公団探鉱投融資プロジェクトにおける石油地質リスクの定量評価およびそれを反映させた経済性評価. 石技誌, 65(3), 217 - 228.
- 長沼伸一郎 2016: 経済数学の直観的方法 マクロ経済学編. 講談社, 318p.
- 長岡貞夫・平尾由紀子 1998: 産業組織の経済学. 日本評論社, 278p.
- Neuendorf, K.K.E., Mehl, J.P., Jr. and Jackson, J.A. (eds.) 2005: Glossary of geology, 5th ed., 592, American Geosciences Institute.
- 仁平尊明 2003: 日本における作物生産の投入・産出エネルギーの算定. 筑波大学人文地理学研究, 27, 13-32.
- 野神隆之 2004: 原油市場: 2005年の石油需給見通し, 2004年よりも石油需要増加率は大幅鈍化, 非 OPEC 石油供給量は概ね伸びが持続. 石油・天然ガス資源情報 2004.8.5, 独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構, 1-6.
- Nordhaus, W. D. 1979: The efficient use of energy resources. Cowles foundation for research in economics at Yale University, Monograph 26. New Haven and London Yale Univ. Press, 161p.
- 沖 大幹 2009: 地球水循環とバーチャルウォーター. 環境の世紀 15, 環境三四郎, 東京大学, 4月15日. <http://www.sanshiro.ne.jp/activity/09/k01/02-090415-1.pdf>
- 沖 大幹 2012: 水危機 本当の話. 新潮社, 331p.
- 奥井明彦 2013: シェールロックにおける油ガスの生成と移動, 現在の理解. 石技誌, 78(1),

5-15.

Pollack, H.N., Hunter, S.J. and Johnson, J.R. 1993: Heat flow from the earth's interior: analysis of the global data set. *Reviews of Geophysics*. 31(3):267-280.

Pontryagin, L.S. 1989: (原典はロシア語 : 坂本 實 2009 訳: 最適制御理論における最大値原理. 森北出版, 90p.)

Raup, D. M. and Sepkoski, J. J. Jr. 1982: Mass extinctions in the marine fossil record. *Science*. 215, 1501-1503.

Rebelo, S. 1991: Long-run analysis and long-run growth. *Journal of Political Economy*, 99(3), 500-521.

Root, D. H. and Attanasi, E. D. 1993: Small fields in the National Oil and Gas Assessment. *American Association of Petroleum Geologists Bull.* 77(3), 485-490.

Simmons, M. R. 2005: *Twilight in the desert: The coming Saudi oil shock and the world economy*. Wiley, 448p.

Smith, A. 1776: *An inquiry into the nature and causes of the wealth of nations*. (山岡洋一 2007 訳: 国富論 上. 日本経済新聞出版社, 432p.)

Society of Petroleum Engineers, American Association of Petroleum Geologists, World Petroleum Council, and Society of Petroleum Evaluation Engineers 2007: *Petroleum resources management system*. 47p.

Society of Petroleum Engineers, American Association of Petroleum Geologists, World Petroleum Council, Society of Petroleum Evaluation Engineers, and Society of Exploration Geophysicists 2011: *Guidelines for application of the petroleum resources management system*. 221p.

Solow, R. M. 1970: *Growth theory: An exposition*. Oxford University Press, 118p.

Solow, R. M. 1974: The economics of resources or the resources of economics. *Am. Econ. Rev.* 1-14.

Solow, R. M. 1997: Reply: Georgescu-Roegen vs. Solow/Stiglitz. *Ecological Economics*, 22, 267-268.

総務省統計局 2017: 労働力調査 長期時系列データ.

http://www.stat.go.jp/data/roudou/longtime/03roudou.htm#hyo_1

- Starbuck, A. 1878: History of the American whale fishery from its earliest inception to the year 1876 (1878). Published by the author (Kessinger Legacy Reprints), 767p.
- Stiglitz, J. E. 1976: Monopoly and the rate of extraction of exhaustible resources. *American Economic Review*, 66(4), 655-661.
- Stiglitz, J. E. 1979: A neoclassical analysis of the economics natural resources. In Smith V. K., ed., *Scarcity and growth reconsidered*. RFF and Johns Hopkins Press, 36-66.
- Stiglitz, J. E. 1997: Reply: Georgescu-Roegen vs. Solow/Stiglitz. *Ecological Economics*, 22, 269-270.
- Stiglitz, J. E., Sen, A. and Fitoussi, J.-P. 2009: Report by the commission on the measurement of economic performance and social progress. 291p.
- 高安秀樹・高安美佐子 1998: フラクタルって何だろう. ダイヤモンド社, 205p.
- Taylor, J., B. 1993: Discretion versus policy rules in practice. *Carnegie-Rochester Conference Series on Public Policy* 39,
- 樋田 敦 2007: 弱者のための「エントロピー経済学」入門. ほたる出版, 265p.
- Turcotte, D., L. 1997: *Fractals and chaos in geology and geophysics*. 2nd ed. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 378p.
- UNDESA 2007: *World population prospects, the 2006 revision*. United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 96p.
- UNEP 2011: *Recycling rates of metals. A status report*. United Nations Environment Programme, 44p.
- UNU-IHDP and UNEP 2014: *Inclusive Wealth Report 2014. Mesuring progress toward sustainability*. Cambridge University Press, 329p.
- U.S. Bureau of the Census 1975: *Historical statistics of the United States, colonial times to 1970*. U.S. Department of Commerce, 1200p.
- USGS 2000: *World Petroleum Assessment 2000 - Description and Results*. USGS Digital Data Series DOS - 60 Multi Disc Set Version 1.0. U.S. Geological Survey World Energy Assessment Team.
- USGS 2011a: *Mineral Commodity Summaries 2011*. U.S. Geological Survey, 198p.

- USGS 2011b: Assessment of undiscovered oil and gas resources of the Devonian Marcellus Shale of the Appalachian Basin Province, 2011. U.S. Geological Survey Fact Sheet 2011-3092.
- von Neumann, J. and Morgenstern, E. 1944: Theory of games and economic behavior. Princeton Univ. Press, 739p.
- Waldrop, M. M. 1992: Complexity: The emerging science at the edge of Order and chaos. Simon & Schuster, 384p.
- 山本博巳 2012: 基礎からわかるバイオマス資源. エネルギーフォーラム, 220p.
- 柳澤 明 2008: 高騰する原油価格の要因分析. エネルギー経済, 34(2).
- 吉田 哲 2015: 株も FX も商品も…ヒントは「CFTC」. 週刊コモディティマーケット, 2015.1.23, 楽天証券. <https://media.rakuten-sec.net/articles/-/6335>
- Zimmerman, E.W. 1964: Introduction to World Resources. 21, Harper and Row, Publishers.