

# 石油供給の絶対不足時の予測を巡る諸問題

元林 義昌

HOW TO PREDICT THE YEARS UNTIL WHEN  
THE WORLD OIL SUPPLY FAILS TO MEET THE OIL DEMAND

Yoshimasa MOTOBAYASHI

## ABSTRACT AND CONTENTS

- 1 Motivation and Definition
- 2 Outlook for the Time Perspective of Oil Shortage
- 3 Reserves and Resources
  - 3 - 1 Recovery Factors
  - 3 - 2 Statistics and Assessment
- 4 Features of Oil and Assessment
  - 4 - 1 Time Perspective of Discoveries
  - 4 - 2 Depletion Curve Theory
- 5 Estimate of the Ultimate Reserves
  - 5 - 1 Some Trials
  - 5 - 2 Geologists's Estimate
- 6 Uncertain Support for Oil Supplies
  - 6 - 1 Falls in Production Capabilities
  - 6 - 2 Explorations in Virgin Areas
- 7 Nonconventional Oil
  - 7 - 1 Resources Categories
  - 7 - 2 Assessment of Tar oil Resources
  - 7 - 3 Assessment of Shale oil Resources
  - 7の4 Nonconventional Gas Resources
- 8 World Demands for Oil
- 9 Estimate of Depletion of Hydrocarbon Resources

- 9 - 1 Assessment of Resources can be Produced
- 9 - 2 R/P values and Depletion
- 9 - 3 Accelerated falls in R/P values
- 10 Concluding Remarks

## はじめに

歴史的な視野に立って眺めると、人間社会の現代の経済、社会や生活様式を特徴づけているものは、科学技術と動力を使用した機械生産によって可能となった工業化社会とそれと対をなして全世界に広まっている近代国家枠である。工業生産の全くない地域や国家においても、そこに住む人々の生活や運命は外の工業化社会とつながっており、その影響を強く受けている。そして重要なことは、このような工業化社会の維持・発展を支えているものは大量のエネルギー消費であり、石油資源はその低価格さ利便性からみて、その中心的な位置を占め続けていることである。

世界の石油供給に限界があることへの警告は、石油の大量消費が始まった1930年代くらい度々叫ばれてきた。にも係わらず、その後、今日に至るまで現実には構造的な石油供給不足はついぞ訪れなかった。1973年から翌年にかけての第一次石油ショック、1989年から数年続いたの第二次石油ショックなどは、原油取引市場が戦争や革命の動乱などで一時的に混乱し原油価格が高騰を見せた現象であって、その後の世界の原油市場では価格の中位安定が続き石油供給能力は目下のところ需要を上回る過剰の状況にある。

されど、資源としての石油供給に限界があることが厳然たる事実である。この限界がいつ訪れるかについては、今のところ様々の論拠に立った悲観論と楽観論とが提示されている。なかでも石油地質の専門家達は、具体的な数値で未発見資源量や究極資源量の推定値を示しており、世界レベルでの石油供給の将

来を見通す手懸りとなり得る。このうち米国の地質調査所のC.D. Mastersグループが提示した数理統計学の確率分布を考慮に入れたデルフィ法に拠った地質データの積み上げ方法による推定値は、近年になって多くの専門家が確度の高いものとして注目し、多くの報告でも引用されている。そこで、この推定を基礎において、過去に加速度的な増大を続けてきた消費と照合しつつ、石油涸渇までの時間の推算がどのようにすれば可能なのかを探ることにした。

この結果、判明したことは、推算結果が予測としての有効性を持ち得るがどうかは、介在する多くの不確定要因をどのように取り扱うかにかかっており、単に使用したデータの確度よりも推算の手法そのものに大きく左右されること 特に推算の結果に大きな影響を与えているのは、今後の石油消費の年間伸び率であること 考えられる範囲内での可なり低い伸び率をとっても、石油不足の事態の到来は意外に間近に迫っていると考えざるを得ない、のことであった。

## 1 研究の目的

この研究の目的は、世界規模で予測される石油供給の絶対的な不足の時代の到来の時期を推定する手法の確立にある。さらにこの研究の社会的意義は、資源としての石油供給に限界があることが厳然たる事実であり、それへの唯一可能で現実的な対応が核汚染廃棄物の処理技術とコスト問題を克服した全く新しいタイプの原子力発電システムの技術開発にあるとの認識から、その完成までにどの程度

の時間が残されているかを確認することにある。大規模な硫酸化物の大気汚染による公害をもたらす石炭や供給量が桁違いに小さくて補助的な役割しか期待できない水力、地熱、太陽熱、風力、バイオ資源燃料などのエネルギー源は、石油の絶対的な不足の時代において、一次エネルギー供給源に期待できないのである。

なお、ここで言う「絶対的な不足」とは、世界的な規模での石油供給能力が石油の需要規模を恒久的に下回る構造的な不足の事態であり、人為的な事情による一時的なまたは地域的な供給不足を意味してはいない。

## 2 予測に立ち足る困難

石油供給の絶対不足に至るまでに残された時間の推算やその過程のシナリオの予測には数多くの要因が関連しており、全体がひとつの複雑系を構成している。しかも各要因には以下に列記する不確実性があることから、予測を著しく困難にしている。

### (石油供給の側)

公表されている石油埋蔵量の資料には以下の特徴がみられ信頼性に問題がある

- ・統計値には、出典によりかなりの開きがある
- ・油田の埋蔵量は発見後に上方修正がみられる
- ・原油価格の上昇が続くと埋蔵量は大幅に増大する

油田やガス田の発見は依然として偶然に左右されるところが大きく、発見のテンポを予測することは困難である

究極資源量をどのようにして把握するか、未発見の資源量の推定は困難である  
原油に代替するものとして期待できる他の石油資源の可能性には多くの面で不確かな点がある

特にタール・オイル、シェール・オイルなどの非在来型石油資源は、採掘された鉱石の品質により抽出油の生産コストに大きな開きがあり、資源量としてのカウントできる範囲が決めにくい

油田やガス田の生産の進行が進むにつれて表面化してくる生産能力の減退をどのように取り扱うか

### (石油の消費・需要の長期見通し側)

世界経済の成長に左右される一次エネルギー需要の予測が困難

大きな資源量が確認されている石炭資源の代替可能性の見通し

原子力を含め他の一次エネルギー源の大量利用の可能性への疑問

大気環境問題から来る化石エネルギーの利用への制約

## 3 石油埋蔵量概念に起因する問題

### 3-1 可採率(回収率)と埋蔵量

基本的に重要なことは、特に石油地質に関連した専門的な言及の場合を除き「石油埋蔵量」の用語は「石油確認可採埋蔵量」を指しており、それは発見され計算された地下にある炭化水素資源の総量を意味していないことである。つまり一般に使用される石油埋蔵量は、総て地表に取り出せる資源量ベースで計算されている「可採埋蔵量」である。地下深くに横たわる含油層の細かな空隙のなかに閉じ込められている原油やガスの全量は「原始埋蔵量」と呼ばれ、これを完全に全部地表に取り出すことは技術的に不可能である。地表に取り出せる原油の原始埋蔵量に対する率である可採率(回収率)は、含油層の物理的な性質と適用される採油方法に左右され、今日の世界平均的な値は25パーセントと推定されている。<sup>(註1)</sup>

可採率の値は今後、石油供給の不足から起きる原油価格の高騰が続くと、より高コスト

の採油方法が経済的に可能となることで最終的に上昇すると予見できる。従って、長期に及ぶ石油不足の予測や推算には、この可採率の向上に伴う埋蔵量の増加分を考慮に入れなければならない。今回の推算では、これまでに見られた最大の可採率が、全体としては少数の例外的な油田に於てではあるが50パーセントの記録のあること いろいろの前提下の石油不足時期到来が西暦2010年から2070年ぐらいと予測されること、などより判断して、全量が全期間にわたって10パーセント向上した35パーセントとなることを前提の計算を行うことにした。

### 3 - 2 埋蔵量と資源量の峻別

次に重要なことは、石油の埋蔵量統計として世上公表されているものは、総て“確認”可採埋蔵量であることである。ここで“確認”とは、油田を発見、所有する石油採掘企業が確認・公表する手持ちの埋蔵量のことを意味している。すなわち、石油会社はその資産価値の基礎としての手持ちの資源量を毎年、公表しているのである。石油会社にとって確認可採埋蔵量は、その所有する個別の、または全油田や全ガス田の設備投資や生産・販売計画の基礎であり、同時に資金借入の際に大切な資産価値としての意味をもつものであり、その算定は厳格な鉱量基準に拠るとされている。然しながらその値は、実際に算定に当たる企業の石油地質専門家の大事を採った保守的な態度や企業の経営戦略上の顧慮が原因で少なめに公表されることが多い。

このような事情があることから、各油田やガス田の埋蔵量は、生産開始後の10年以上の間は年ごとの採取（生産）による減耗を打ち消す程の上方修正が続く傾向が見られる。これは生産の過程で新たに知り得た地下の産油層の立体的な拡がりの確認や油層データの蓄積による鉱量計算の際のパラメータの見直しの結果としての鉱量の修正である。

他方、産油各国政府の発表する確認可採埋蔵量は、各石油生産企業の公表する埋蔵量の集計値である。80年代に入ると中東の産油各国政府は、相次いで突然に埋蔵量として大きな数値を公表するようになった。これは新しい油田やガス田の発見によったものではなく、確認ベースではない期待値を組み込んだベースでの埋蔵量であったと見られている。このような大規模な埋蔵量の上方修正は、原油供給が過剰の時代にあつてOPEC内部の生産割り当ての交渉を有利にするなどの様々の政治的な理由からなされたもので、「埋蔵量の成長現象」と呼ばれている。

埋蔵量統計値にはこのような事情があることから、長期に及ぶ石油供給能力の見通しの予測に当たっては、単に公表されている埋蔵量と消費量の統計値の推移から将来を予測するやり方は適当ではない。近年、専門家の間では、埋蔵量の統計値とは無関係に、石油地質的な考察を基にした究極資源量を地域ごとに把握する試みを強調する姿勢が目されるようになっており、この研究においてもこのような推定の成果を採用する方法を採ることにした。

## 4 石油発見に見られる特色

### 4 - 1 石油発見のテンポに係わる問題

油田やガス田発見のテンポが予見できない問題への解決は、結局のところ克服できないようである。このことは、恐らくは石油の探鉱と発見に認められる以下に挙げるような事情が関連していると考えられる。

- イ 石油資源の分布は、高度に地域的に偏在している
- ロ 発見された油田のサイズも高度に偏在性を見せており、資源量は少数の超巨大油田や巨大油田に集中している
- ハ 同一の堆積盆内では、サイズの大きな油田・ガス田から先に発見される傾向が

見られる

二 特にこれまで石油活動の見られなかった“ヴァージン・エリア”とも呼ぶべき堆積盆での試掘のリスクは大きい

事実、石油産業の歴史を眺めると、間欠的に見られた巨大油田の発見は全て新規に登場した産油地帯、つまりヴァージン・エリアの探鉱成果であることが分かる。また、このような発見こそが生産によって減耗する世界の石油資源手持ち量をを大きく回復してきたのであった。そして、このヴァージン・エリアでの探鉱リスクを最小にする合理的な方法は長期にわたって巨大な探鉱資金を投下することであり、それは巨大な企業のみがよく成し得るところとである。

#### 4 - 2 石油発見を予測する理論

世界的規模で見れば、油田やガス田発見のテンポが予見できない様に見える。他方、石油地質の研究者は特定の堆積盆（特定の地質年代に着目した地下の石油の堆積環境ごとの地域区分、一つのまとまった産油・ガス地帯として知られることが多い）に着目して、その中での資源発見に数学的な規則性を経験則として見つけようと試みてきた。それらは、当堆積盆における発見のテンポは予見できないにしても、各油・ガス田の規模の分布堆積極資源量についての推定に利用されている。このうち主なものを紹介する。

Hubbert 曲線（生産量推移の減退モデル）

M. King Hubbert は1956年に各堆積盆内の生産量は、究極可採埋蔵量の半分が生産された段階で生産量が減退していくベル型の生産量推移パターンを示す経験則を発見した。彼は、このパターンを「Logistic 曲線」と呼び、これを利用して長期的にみて特定推移盆内の生産能力の天井の時期の予測や、その時までの累積生産量をグラフの上から読みとることを提唱したのであった。

この試みは堆積盆内の油・ガス田の埋蔵量ではなく、生産量に着目してその時系列推移との関係に法則性を見いだそうとしたものであったが、その後の以下に紹介する様な発見埋蔵量の予測の試みに多くの示唆を与えたのであった。<sup>(註2)</sup>

#### Zipfの法則

その後、Zipf は、堆積盆内の巨大油・ガス田の埋蔵量の規模の序列（シーケンス）数とそれぞれの埋蔵量の初期値を対数尺 Display（グラフ）に表示すると右下がりの整列線が得られる、と云う経験則を発見する。

1993年になって、IFP社のN. AlazrdとL. Montadertは、この法則を利用して世界の究極資源量を求めようとする試みでいる。それによると、在来型石油資源の究極資源量推定は、原油価格を20 \$ /bとした前提で $2,200 \times 10^9$  Blsであって、これは後ほど紹介する第13回世界石油会議（1991）年でC. D. Mastersグループの提示した「修正型デルフィ法」の推定値と近似した結果となっている。この方法は、「巨大油田分布グラフによるシーケンス法」と呼ばれている。<sup>(註3)</sup>

#### 放物線フラクタル法

フランスのIPF研究所のLaherrereは「減退曲線（Depletion Model）」という統計的な法則を提唱している。それは、特定の堆積盆では各発見油田の究極的な可採埋蔵量とその規模の順位で対数尺の上にプロットする（Log-Log Size-Rank Display）と常に放物線を描き、これを利用して堆積盆ごとの新規発見油田の規模別分布と発見パターンの推定が可能である、とする手法であった。

IPFの研究所での研究歴がありその後のスイスのPetroconsultants社に転じて世界各地の石油探鉱データに接する立場にあったC. J. Campbellは、この法則やHubbert 曲線を利用して各地の未発見油田の発見量を推定してい

る。彼の得た推定値は、

究極可採埋蔵量 1,800 GBls  
 今後の発見量 350 〃  
 累積発見量 1,450 〃

であった。しかし、この結果は、それぞれに探鉱活動の技術内容と作業量密度の異なる地域を同列に扱っていることから悲観的な結論に陥っている、と批判されている。<sup>(註4)</sup>

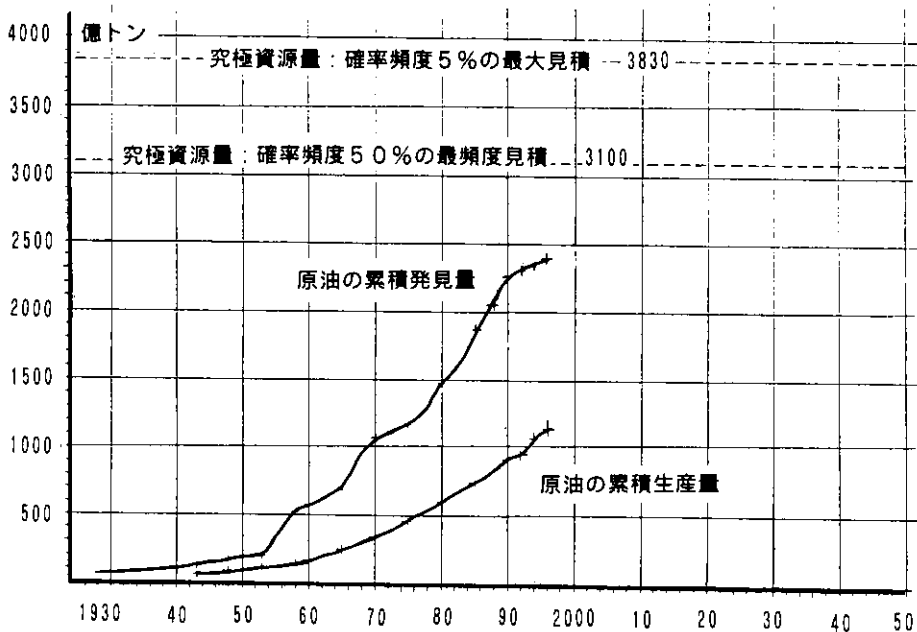
4 - 3 成長曲線による考察

石油発見のテンポの不規則性を克服するために筆者が試みた手法は、産油（産ガス）地域あるいは世界規模レベルで資源発見テンポの揺らぎを打ち消す目的で数年の間隔を置いて拾い上げた累積発見量の推移を考察するものである。グラフの上での累積発見量は、植物の生長曲線の特徴である「S曲線」が形状や周期が異なって次々とつながるパターン

で現れることに特徴がある。このようなグラフを描くことで、現時点の累積発見量の値がS曲線のパートの中のどの辺に位置しているかを確かめ、続いて以後に現れるであろうS曲線の形状を頼りにして、当面の発見のテンポと規模を予測しようとするものである。

つまり、現時点のS曲線がそのサイクルの終末を予測させる対前年増加率が0に接近している状況が見られるとなれば、その後には新しいS曲線がスタートすることを予測することができる。その大きさや形状は予測不能ではあるが、グラフの上で、後に考察する方法で決定する、究極資源量の限界値のレベルを示す線との位置関係が累積発見量の今後の予測に関してヒントを与えてくれることになる。第1図は、世界規模の累積発見量についてこの試みを示したものである。

第1図：世界の原油累積発見量の推移



## 5 究極資源量を推定する

### 5 - 1 様々の推定法

石油や天然ガスの究極資源量をどのように認知するかは、石油供給の絶対不足に至るまでのシナリオ予測を試みる際の中心的な課題である。このために石油地質の専門家達は1940年代いろいろ様々の工夫をこらしてきた。その発表してきた究極資源量の予測値は、大まかな傾向として年とともに大きくなる傾向が見られ、最近では2兆バレルに収斂している。<sup>(註5)</sup>

これまでに見られた未発見資源量の推定する手法の特色は以下の4つに大別される。

#### 地域ごとの探鉱密度の差の指摘

世界各地の堆積盆の面積とそこで掘削された試掘、開発井数とを比較することで今後に埋蔵量追加が大きく期待できる地域が浮かび上がる、と以前からよく云われてきた指摘である。

#### 堆積盆での法則からの類推法

この類推法は、先に「4 - 2 石油発見を予測する理論」で述べた、ひとつの堆積盆内で発見された資源量のサイズ分布の経験則を手懸りにして、世界規模レベルでの未発見資源量の推算に適用するものである。このやり方は本来、なにがしかの発見があった地域の資源量のサイズ分布を手懸りにして、地域内の発見量の上限を推算しようとする手法であって、発見の全く無い堆積盆の可能性の推定には効果がない。

#### 地質調査積み上げ法

これに対して各地の堆積盆ごとに得られている地質データを基礎として、各地域の石油地質的な特性の評価を考慮にいれた地質調査積み上げ法が近年、注目を集める様になっている。1983年11月、ロンドンで開催された第11回世界石油会議で米国地質調査所のC. D. Mastersグループが披露して以来、有名になり今のところ最も多く引用されている。

1987年ヒューストンで開催された第12回石油会議では、原油の他に天然ガスの資源量についても言及が加わった。さらに1991年ヴェノスアイレスで開催された第13回石油会議では、新たに油田成長要因を導入して、埋蔵量として、期待度が大きい未探鉱のProbable Reserves (推定埋蔵量)と地質的には既知だが未探査地域に存在が予想できるPossible R. (予想埋蔵量)を含めた彼等の云うIdentified Reserves (識別埋蔵量)の概念を用いている。

最近の報告は、1994年5月～6月にスタヴァンゲルで開催された第14回世界石油会議で、その内容は今後、発見される可採埋蔵量は50%の確率で550 G BIs、累積発見量は1,700 G BIsである。

#### 経済指標を基とした楽観論

この他に最初から究極資源量の概念を排除した資源論としては根拠の乏しい楽観論が石油エコノミストの間から出されている。ここで彼等が挙げている根拠には以下のようなものである。<sup>(註6)</sup>

- ・ P. Berns (Oxford Energy 研究所)  
過去の既発見の油田の埋蔵量成長が著しい  
よって、世界の生産能力はの天井は、21世紀の後半以降でないと訪れない
- ・ P. Davis (B. P. 社)  
地質評価・個別油田積み上げ法の全てが悲観的なバイアスがかかっている  
今後、数十年間に、需要増大を見込んで、資源量の天井が生産力に影響を及ぼす可能性はきわめて少ない

### 5 - 2 米国地質調査所のMasters グループの手法

マスターズ・グループの採った推定の要点は、以下の様なものである。<sup>(註7)</sup>まず、予め多くの堆積盆ごとに集められ準備された堆積環境、石油地質、物性などの基本データファイルが準備される。この際、地質的にはあ

る程度既知だが未探査地域の基本データファイルの作成に当たっては、地質的に類似しており生産実績が豊富な堆積盆の地質堆積の知見や既存の石油地質データを参考として、その集油率、試掘による資源発見レートの予測値などを類似比較をしながら全員が協議の上で作成する手順が採られる。

この同一のデータを使用して、複数の石油地質の専門家が個別に堆積盆ごとの、それぞれに資源可能性の評価は、最小値、最も確度の高いと思われる推定値、そして最大値の三ランクに分けて提出し報告することから始められる。ここで、“最小見積値は、それが発見される可能性のある実際の資源量を下回る確率が95パーセントであることを意味し、また最も可能性の高い見積値は50パーセントの確率信頼度をもった見積値であることを、そして最大見積値では5パーセントの確率信頼度をもった見積値であることを意味する”もとのとして理解される。

次に、提出された報告を集めてその一致の程度を確率頻度曲線に照らして検証する。ここで全員の回答の平均値が一致したときには、そこから作られる対数正規分布曲線による三つの推定値が妥当な推定値と見做され採用される。不一致の時には、各委員の推定値の平均が分布の最頻値(mode)の付近に、最小の推定値が確率95パーセントでの未発見資源量の付近に、そして最大の推定値が確率5パーセントでの未発見資源量の付近にほぼマッチさせるようになるまで評価をやり直す調整の手続きが続けられる。結果として調整され得られた対数正規分布曲線の最頻値と既発見埋蔵量との和が究極資源量として採用されることになる。

この推定値は、産油国別や地域別そして全世界規模でまとめられており、その数値はこれまでの様々の方法の推定値のうちで最大規模のものである。この様なことを考慮に入れて石油供給の絶対不足の時期を推定するこの

研究では、前提となる原油と天然ガスの究極資源量として1994年の第14回世界石油会議でマスターズ達が報告した推定値のうち確率頻度が50パーセントの値を採用して試算を行ってみた。

## 6 究極資源量と供給との間にあるもの

### 6-1 油田の老朽化への顧慮

大量に採取され減耗してゆく石油資源の寿命を示す際には可採年数( $R/P$ )という指標が使われている。この指標は元来、油田ごとにまた産油国ごとにあるいは世界規模での可採埋蔵量( $R$ )と現在の採取量( $P$ )の比率として求められるもので、その数値は今後、現在と同じ水準の採取・減耗が続いた場合の資源の寿命年数を示すものである。また、この $R/P$ 指標は石油供給の絶対不足の発生時期を算出する際にも、確認可採埋蔵量を未発見の期待埋蔵量を含めた資源量に対して、同様な資源の寿命年数を示すものとして利用できる。この研究報告においても、 $R/P$ 指標は石油供給の絶対不足時の推算の中で重要な指標として登場する。

ところで、現実には年々の減耗の量は経済活動の規模に応じて変化が見られるので、この指標は資源涸渇の寿命を正しく予知しているものではなく一応の目安にしか過ぎない。さらに加えて、この指標には重大な欠陥がある。それは、生産・減耗が続く油田では老朽化が起きて生産能力が低下して毎年の生産量が次第に少なくなっていくことである。つまり、 $R/P$ 指標は資源涸渇が突然に訪れるものとして生産の続く寿命を表示するが、現実には生産力の低下はそれ以前から少しずつ起るものなのである。

原油を地表へ採取するには油層内のガス圧を利用した自噴が利用されるので、原油の採取に当たっては、油層からの原油の回収量を究極的に最大にするために、地下のガス圧の



低下を最小にとどめる技術的な顧慮がきわめて重要とされている。つまり油田の採油速度には技術的な限界があり、これを無視した乱獲的な生産は、ガス圧の急激な低下や大量の油田水の侵入が始まり油層に回復不能の荒廃をもたらし、資源の急速な涸渇を惹き起こすのである。技術的な理由による油田からの生産・採取の安全な速度は、年間ベースで埋蔵量の10パーセントが上限と考えられている。つまり、油田に残っている埋蔵量が可採年数値で10年分にまで低下した後は、油層の荒廃を防ぐために採取・生産量を毎年、大幅に引き下げなければならないのである。したがって世界規模での原油供給能力を予測するときにも、同様にR/P値が示す涸渇時の10年前に採取量の確保が不可能になると考えなくてはならない。<sup>(註8)</sup>

## 6 - 2 ヴァージン・エリアへの探鉱投資

未発見の石油資源の存在が期待できるとしても、それが現実に生産力となり石油供給を支えるに至るには、その間に順調な石油発見と油田やガス田への設備投資がなくてはならない。この石油供給の絶対不足時の算定に当たっては、探鉱成果である発見のテンポが不確かです。予測できないので、やむを得ず“未発見資源が順調に発見される”との前提に立つての試算を行うことにした。

ところで、“石油が必要なときに前もって(充分な時間的な余裕をもって)必要なだけ発見される”という前提が現実的であるかどうかは、一つにかかって石油企業の探鉱投資への態度いかにあると云える。後ほど紹介するように原油と天然ガスの手持ち確認可採埋蔵量の可採年数(R/P)が60年近くある(1993年の時点で)ことになれば、今後の現況では、その手持ち量が10年以下に落ち込む前に新たな巨大産油地帯での発見が期待できないわけではない。

問題は、石油供給能力の低下が意識され、

価格が高騰してからでないとし、リスクの大きなヴァージン・エリアへの探鉱投資は始まらないことにある。このことによる遅れは、これまでの経験から見て少なくとも10年近くと考える必要がある。さらに、既に述べた様に、油田の涸渇は突然に訪れるものではなく、その10年前から生産力が減衰するという事情がある。そうすると1992年の原油の可採年数は50年分(1,505億トン÷30億トン)があるが、これより20年分を差引いた30年以内にヴァージン・エリアでの探鉱成果が見られなければ、世界に石油供給の絶対不足が訪れることになる。

## 7 代替石油資源の取り扱い

### 7 - 1 石油資源の範囲に関する問題

石油供給の絶対不足時の予測に当たっては、対象となる石油の範囲を確定しておく必要がある。人類が1930年代いらい大量に利用してきた原油が対象になることは当然のこととして、60年代の後半から特に大量に利用されるようになった天然ガスも石油の中に含めてよいだろう。同じ炭化水素である天然ガスは、地下の油層の中で高压の状態と原油と一緒に存在し、また流体であり取扱いの利便さや採取コストの低さから見てエネルギー資源として原油と対等の価値があるからである。両者の代替関係は、熱源や動力源また合成化学製品の製造に必要な装置が異なるので完全とは云えない。然しながら、どちらかが次第に不足して価格が上昇する過程では装置の追加投資が自然に進むことを考えれば、これに必要な時間は無視することができよう。これらのことから原油と天然ガスは「在来型石油資源」と呼ばれている。問題は、原油や天然ガス以外の炭化水素資源である「非在来型石油資源」と「非在来型ガス資源」である。

非在来型石油資にはタール・オイル(瀝青油)とシェール・オイル(頁岩油)がある。

これら非在来型石油資源は固体であり、いずれも地表近くに発見されている石油系炭化水素の貧鉱である。これら両資源はともに膨大な埋蔵量のほとんど全ては発見済みで、その存在量は把握されている。しかし、いずれも採掘から石油の抽出までのコストが原油に比べて可なり高くつくことから、今のところ商業的な生産には至っていない。

これらの資源から合成石油を生産する際には、石炭層や金属鉱床と同様に露天掘りや坑道掘りによる採掘が行われ、さらに石油分の抽出と精錬の工程が必要となる。またその資源量は抽出される合成油を発熱量で原油等価換算のベースで表示されることになる。然しながら、合成石油として抽出可能のものの資源量は、それぞれの鉱床の存在状態や品質の面から見て、この中のごく一部分だけである。露天掘りには採掘の経済性から一定の条件が充たされねばならないし、坑道掘りの場合には坑道内に陥没防止のための柱部分を残すことから採掘率としての0.6が適用されなければならない。また、タール・オイル資源に関しては地下の鉱床内での抽出・精錬の技術があるが、シェール・オイルの地下精錬は不可能である。さらに採取した鉱石を精製して合成油を生産する際に大量の熱を必要とするので、この際のエネルギー・回収率が考慮されていない資源量の報告も多く見られるので取扱に注意が必要である。

このように非在来型石油資源は、液体資源である在来型石油資源とは異り鉱石の品質の差が大きく、また露天掘りや坑道掘りなどの地下からの鉱石の採取、石油成分の抽出される技術レベルとコストも様々なので、利用可能な資源量についてのデータは範囲の採り方で大きな差が出ることとなる。ところが世上、資源量として公表されている数値は多くの場合、鉱石の存在状態や品質など採掘条件や精製に伴う条件への顧慮を全く欠いた粗鉱石の膨大な量をベースにしており、技術的にまた

経済的にみて利用不可能な資源量を含めてのものであって、それが期待可能な資源量と受け取られる危険がある。

## 7-2 タール・オイルの資源量

タール・オイルは、地表近くに発見された軽質の石油分が逃げ去った含油層で、砂岩の中に多少の流動性を残した超重質油を含む「ヘビー・オイル」と砂岩が崩れ去りにさらに石油分が失われて砂にタール状の石油が染み付いた「タール・サンド」(別名、「オイル・サンド」)に分けられるが、この区別は品質の程度の差にしか過ぎない。

「タール・サンド」資源のうちではカナダのアルバータ州のアサバスカスやコールドレークの資源が有望視されている。露天掘りが可能なものの条件は、被覆深度が150フィート以下で被覆層厚/油層厚比が1以下、含油率が5wtパーセント以上とされている。採掘後、熱水と苛性ソーダを加えてタール状の石油を取り出して精製する。そのときの変換効率は70パーセントとされている。深度のある鉱床では高温・高圧のスチームの圧入して液状の重質油を汲み出す油層内回収法が採られるが熱効率が悪く回収率も低い。この場合の変換効率は20パーセントとされている。<sup>(註9)</sup>

「ヘビー・オイル」のうち有望視されているのはベネズエラのオリノコ河畔の資源である。回収された固体に近い産出油に熱水と界面活性剤を加えて乳状(エマルジョン)にして重油の代用にする試みが進められている。カナダとベネズエラの両者はタール・オイル資源発見資源量の95パーセントを占めている。この研究報告の試算では、回収と熱変換率についての言及のあることから手堅い資料と考えてよい地質学者 Roadifer が近い将来の技術開発の可能性を見込んだアルバータ州とオリノコ流域の資源からの回収量として1986年の報告にある合計3,800億バレル(518億トン)を採用した。<sup>(註10)</sup>

なお、フランスの研究機関IFPのN.AlzardとL.Montadertの1983年の報告では5,400億バレル(736億トン)とされている。<sup>(註11)</sup>しかし、この差の218億トンはこの試算が採用した石油資源全体の残存資源量の6,275億トンからみれば僅か3.4パーセントにしか過ぎない。

### 7 - 3 シェール・オイルの資源量

油層や炭層の上部にある頁岩の中に炭化水素が取り込まれたもので、常圧下の乾留によってガソリンに似た軽質油が抽出される。オイル・シェール鉱床は世界中に広く分布しているが低品質のものが多い。利用可能と考えられる資源の大半は米国内にあるが、そこでの商業化の可能性のある露天掘りが可能なものは全体の15～20パーセントしかない。また、現在のところ油層内熱回収の技術は確立されていないため、坑道掘りでは層厚が3～4m以上、含油率が一定以上の資源が計算の対象とされており、その回収可能量の計算には、存在量(可採埋蔵量に相当する)に坑道掘りによる柱房率の0.6を乗じた採掘量を適用する必要がある。さらに加えて、合成油の抽出に当たっては大量のエネルギーが消費されるので、地球規模でのエネルギー・バランスを問題とする場合には、精製工程での自家消費の分を差し引かねばならない。そこで積算に当たっては乾留と精製のための熱回収率

の0.62が適用されることになる。このようにシェール・オイルは、発見された資源量は巨大であるが、生産可能な品質や採掘条件の範囲の採りかたで大きな差が出る資源である。

この研究報告では、可採埋蔵量相当値として第12回世界エネルギー会議(1983年)に提出された報告のうちで、品質の範囲を従来から米国内で生産計画が進められている25Gal(100) / t以上のものとはしないで、将来の技術レベルを考慮にいれた10Gal(40) / t以上のもので上げた集計となっている6,027億バレル(822億トン)を採用することにした。次いでこのうちの回収可能な資源量には、これに坑道掘りによる柱房率の0.6と熱回収率の0.62を乗じた2,240億バレル(306億トン)を適用している。<sup>(註12)</sup>

結局この研究報告の試算では、人類に残された石油資源量の計算に使用した非在来型石油資源の発見量のうち経済的利用可能量は合わせて820億トンとなった。

### 7 - 4 非在来型ガス資源

石油地質や石油産業の専門家達が「非在来型ガス資源」と呼んでいるものには以下に掲げた第1表に示したような様々の資源があり、この中には部分的に利用されているものもある。

第1表：非在来型ガス資源

Gas Hydrate (メタン・ハイドレート)	地下深部の地殻付近に存在が予想されるシャーベット状のガス水和物
Coal Bed Degassification	地下深部で石炭や泥炭をガス化
Oil Shale Degassification	地下深部でオイル・シェールをガス化
Biomass Gas	燃料用に栽培された作物 水棲や陸棲もの
Swamp Gas	熱帯・亜熱帯の沼沢地で発生する腐敗ガス
Tight Formation Gas	米国西部のTight sandに含まれているガス
Geo-Pressured Zone Gas	米国ガルフコーストの異常高圧地下水

これらは、その巨大な抱蔵量が時折、話題になり、エネルギー源としての利用の可能性が指摘されているが、近い将来に大量に商業生産の可能性は予測されていない。

## 8 石油消費の予測に関する問題

これまで、石油の絶対不足事態の予測に関して供給側からの検討を行ってきた。ここからは消費の側からの見通しについて検討を行うことになる。

世界規模での石油の消費は、採取量・生産量として把握するとしても、予測が困難である。石油資源の毎年の消費の成長・拡大をどの程度に見積るか、という問題に係わる困難は沢山ある。工業化社会の経済活動は中・長期的にみれば発展・成長を続けてはいるものの、その成長速度はかなりの幅で変動するものであり、世界の石油消費/生産量の動向は中・長期的には全く予測不能である。さらに、採取量が毎年の累積的に成長を遂げるとなると、それは資源涸渇への加速的な接近効果を及ぼす。これに関連して涸渇時期の算定には世界経済の年間成長率をどのように見積るかが重要な課題となる。

さらに一つの可能性として将来、石油資源の供給能力が低下して価格が高騰するようになると、石炭や原子力、その他の一次エネルギー源が価格面からの競争力を持つようになり、石油資源への需要が押さえられることが指摘される。しかし現実には、以下に述べる理由から見て、この様な代替効果が起きるとは考えられない。

石炭資源の確認埋蔵量は巨大ではあるが、その大量燃焼が大気中に排出する硫酸化物のもたらす公害が生物環境に及ぼす影響は深刻なものであるため、石油需要を圧迫するような登場は、まず考えられない

原子力利用は、その廃棄物処理の技術

が未確立な現状では、これまた石油需要を圧迫するような登場は期待できない

将来、太陽エネルギー利用、風力、地熱、波浪利用、バイオマスその他の一次エネルギー源の実用化は盛んになるではあるが、その規模は小さく到底石油資源に取って代わる役割は担えないマイナーな補助的な存在である

以上に加えて、石油消費を大きく左右するもう一つの不確定要因がある。それは、化石燃料の使用が惹き起こす大気中の二酸化炭素濃度の増大の確実な進行による地球上の生命環境の巨大な破壊であり、これを防止するための化石燃料の消費抑制の措置による石油消費への制約である。この制約は、地球の生命環境の維持にとってきわめて重要な措置ではあるが、国際的な対応として化石燃料の使用制限が実施される時点やその規模と影響などその実現の見通しは今のところ全くないので、今回この研究報告ではこれに関する考察は全く行っていない。

以上のことを踏まえて将来を予測すると、石油消費は全く新しい放射性廃棄物の処理の新技术が完成して安心して原子力利用が可能になるまではエネルギー需要を支えるべく増え続けるシナリオが最も確度が高いもの、と考えるべきであろう。石油資源の涸渇と絶対不足時の到来を視野に入れた政策の方向としては、人類はエネルギー総需要の増大を抑制し、なかんずく石油資源消費の増大を可能な限り少なくすることで絶対不足時の到来を少しでも遅らせ、この間に原子力量の新技术を完成させねばならないことになる。

この様な現実の下では、年々の石油資源消費の増大あるいは減少が極めて現実的な意味を持つことになる。この様なことから、この研究報告での石油消費の将来予測は、その予測としての正確さよりも、石油資源消費の増

大をパラメータとして扱い、石油消費の年間伸び率が資源量の減耗速度と寿命にどの程度の影響を与えるのかの方が重要な意味を持つことになる。

## 9 石油資源の減耗速度の算出

石油消費の年間伸び率と石油資源の減耗速度の関係を算出することはかなりスリリングな作業となる。まず前提となる未発見資源量を含めての残存資源量を設定し、それを現在の石油資源の年間消費量との比率である可採年数（R/P）値で表示する。実はこの指数そのものも未発見資源が順調に（ということ）は必要なときに必要なだけ発見されたとしての幸運に乗った非現実的な数字である。

次いで現実的と思われる石油消費の年間伸び率をいくつか設定して、その下での資源涸

渇までの年数を計算する。計算は等比数列の和の公式を変形して対数化する変形から導かれる。その結果は、どのような年間伸び率の下でも以下に示す様な驚くほどに縮小された寿命を弾き出す。これは、例えば長さが120センチメートルの洋羹を一片の巾が1センチメートルで切り分ければ120片が得られるのに対して、一片の巾を次々と大きくなるように切り分けた時の片数を数える様なものである。さらに困ったことに、絶対不足時はこの年数の10年前から始まるのである。

### 9 - 1 手持ちの残存資源量

以下に掲げた第2表は、これまでに検討してきた石油供給の絶対不足時の算定の基礎となった第14回世界石油会議（1944年 スタヴァンゲル）で米国の地質調査所のMastersグループの提出した報告の要旨である。

第2表：算定の基礎となった石油資源量

(1992年末)

資源のカテゴリー	原油資源		天然ガス資源		
	10 <sup>9</sup> bls.	億トン	10 <sup>12</sup> C. Ft	億トン	
累積生産量	698.6	953	1,750.2	446	
確認可採埋蔵量	1,103.2	1,505	5,136.0	1,310	
未発見資源の推定値					
最小見積（確率頻度95%）	a	292.2	399	2,903.5	741
最頻見積（確率頻度50%）	b	470.7	642	4,681.3	1,194
最大見積（確率頻度5%）	c	1,005.2	1,371	10,022.9	2,557
究極資源量					
最頻見積 Mode値	+ + b	2,272.5	3,100	11,567.6	2,951
年間採取量		22.2	30	74.4	19

(換算) 原油  $1 \times 10^9 \text{ t} = 7.33 \times 10^9 \text{ bls}$

天然ガス  $1 \times 10^9 \text{ t} = 39.2 \times 10^{12} \text{ C. Ft}$

(注1) 報告は他にNGL（井戸元で原油から分離して採れる天然揮発油）として

	10 <sup>9</sup> bls.	億トン
確認埋蔵量	90.0	123
未発見資源の最頻見積（確率頻度50%）	102.2	139

を掲載している

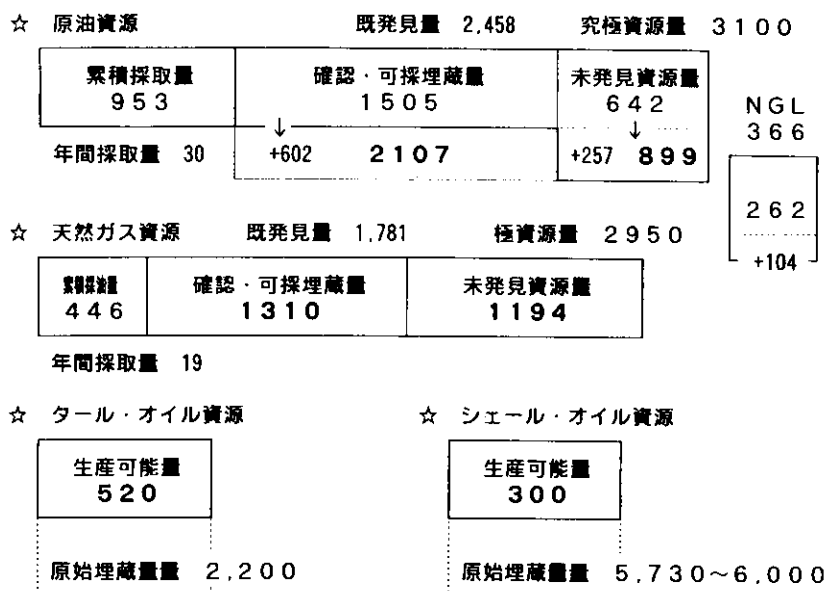
(注2) 天然ガスや非在来型石油（それから得られる抽出ベースでの）資源量は、発熱量換算の石油量として示されている

9 - 2 寿命年数で表示された資源量  
 石油供給の絶対不足時の算定は年数として示されることになるので、その計算の過程で登場する資源量も同様に可採年数 ( R / P ) の形で表現されなければならない。第 3 表は、

このための計算に必要な資源量をまとめたものである。

また第 2 図は、ここで積算された世界の石油資源量の全体像とその量の大きさの概略をともに示したものである。

第 2 図：世界の石油資源量の全体像 1992 年末 / 単位：億トン



第 3 表：石油資源の寿命の推算の過程

	概数で表示した資源量 (億トン)		年産比 (1992)
在来型石油資源			
原油	3,010	÷ 30	100 年分
	[ 確認可採埋蔵量 (1,505) + 未発見資源量 (642) ] × 35 / 25		
NGL	370		
天然ガス	2,500	÷ 19	131
(小計)	(5,880)	÷ 49	(119)
非在来型石油資源			
瀝青油	520	÷ 49	10 年分
頁岩油	300	÷ 49	6
(小計)	(820)	÷ 49	(16)
合計	6,670 億トン		136 年分

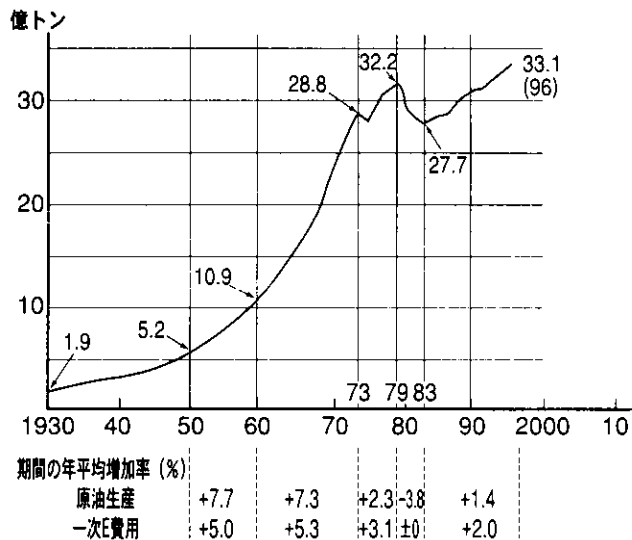
9 - 3 消費の伸びによる寿命年数の目減り

これまでの積算結果から、今後使用可能の石油資源の総量は今後も1992年の消費水準が続くとした場合に136年分であると推定できることが分かった。他方、世界の経済規模は今後も何がしかの成長が続くと見て、石油消費も毎年の増加があると考えなくてはならない。この消費の伸びによる寿命年数の目減りにをどのように推定するかが次の課題となる。問題は、どの程度の年間消費の伸びを設定するかである。第3図は、石油の大量消費が始まってから今日までの世界の原油消費の動向を示したものである。正確には天然ガスを含めての消費の動向を参考にするべきであ

ろうが、年間伸び率のおおよその動向を知るには、これで十分に役立つと考えてよい。

このグラフが示している動向から見て石油消費の年間伸び率は、多い年でも精々5パーセント以下であると考えられるが、成長の恐怖の試算のために1パーセントから10パーセントまでの合計6つの成長率について割引計算された寿命年数を計算してみた。結果は第4表に示してある。この表の中の手持ち年数は、それぞれ在来型石油資源の手持確認量、同じくこれに未発見量を加えた量であり、今後使用可能の資源量の総計の概数、に対応するものである。

第3図：世界の原油生産量の推移



第4表：年間増加率で割引計算した可採年数 (n)

年間増加率 (k)	1%	2%	3%	5%	7%	10%
手持ち年数 (N)						
136	86	66	54	42	34	28
183	104	77	63	47	38	31

計算式： $n = \log [ N ( K - 1 ) + 1 ] / \log K$   
 ただし、 $k = K / 100 + 1$  を示している

第5表：手持ち資源量の年間増加率の下での割引計算

年間増加率( k )	1 %	2 %	3 %	5 %	7 %	10 %	- 1
手持ち年数( N )							
5	4	4	4	4	4	4	5
10	9	9	8	8	7	7	10
15	14	13	12	11	10	9	16
20	18	16	15	14	12	11	22
25	22	20	18	16	33	13	28
30	26	23	21	18	16	14	35
35	30	26	24	20	18	15	42
40	33	29	26	22	19	16	50
45	37	32	28	24	21	17	59
50	40	35	30	25	22	18	68
55	44	37	32	27	23	19	79
60	47	39	34	28	24	20	91
65	50	42	36	29	25	21	104
70	53	44	38	30	26	21	119
75	56	46	39	31	27	22	137
80	59	48	41	32	27	23	160
85	61	50	42	33	28	23	188
90	64	51	44	34	29	24	229
95	67	53	45	35	30	24	298
100	69	55	46	36	30	25	e
105	72	57	48	37	31	25	e
110	74	58	49	38	31	26	e
115	76	60	50	39	32	26	e
120	79	61	51	39	33	27	e
125	81	63	52	40	33	27	e
130	83	64	53	41	34	27	e
135	85	66	54	42	34	28	e
140	87	67	55	42	35	28	e
145	90	68	56	43	35	28	e
150	92	70	57	43	36	29	e
155	94	71	58	44	36	29	e
160	96	72	59	45	36	29	e
170	99	74	61	46	37	30	e
175	101	75	61	46	38	30	e
200	110	81	65	49	40	31	e

$$n = \log [ N ( K - 1 ) + 1 ] / \log K$$

K は年間増減比

k は表の年間増加率( k )  $k = ( K - 1 ) \times 100$



## 10 見通しの持つ意味

現在、世界経済は停滞のただ中にあり経済そのものの成長は限りなくゼロに近い水準にある。にも係わらず、原油消費はここ数年間、毎年2パーセント近くの水準の増加が続いている。この現況を踏まえて考えると、今後、在来型石油資源の発見が順調に続き、原油価格が現在よりも可なり高い水準になって非在来型石油資源の利用が可能になったとしても、現在の毎年2パーセント近くの石油消費の伸びが続けば、絶対的な石油供給不足は1992年から $57 - 10 = 66$ 年後の2048年に訪れる、と考えなくてはならない。また、仮に経済不況が回復したり、この間に大人口を擁する開発途上国の近代が進むことになり伸び率が3パーセントとなれば、その時期はさらに10年早くなる、と覚悟しなければならない。

この様な試算の示す内容は、まさに1972年にローマ・クラブが「成長の限界」で指摘した警告そのものである。そこで参考までに様々のレベルの手持ち資源量の年間増加率の下での割引計算を第5表に掲げておく。

この表を見て気付くことは、意外にも手持ち資源量のレベルよりも資源採取の年間増加率の値の方が計算結果を大きく左右している

ことである。石油資源の涸渇を心配する場合には、その資源量よりも、消費水準抑制がいかに重要であるか、をこの計算結果は示しているのである。

(完)

註1 石油公団：石油の開発 '83-6 P.26 ~ 28に載せられた藤田和男の解説

註2 M. King Hubbert : Nuclear Energy and the Fossil Fuels / AAPG : DRILLING AND PRACTICE 1956

註3 石油公団：石油の開発と備蓄 '83-8 P.29 ~ 30

註4 石油 団：石油の開発と備蓄 '96-2 P.12 ~ P.15

註5 石油公団：石油の開発と備蓄 '96-2 P.13

註6 石油公団：石油の開発と備蓄 '96-2 P.7 ~ P.8

註7 藤田和男：マスタースグループ (USGS) の世界の原油・天然ガス資源評価の変遷 (石油鉱業連盟：石油開発時報 No.103, 1994.11 P.40 ~ P.59)

註8 SCIENTIFIC AMERICA 1978 日本経済新聞社「サイエンス」1978年5月P.8 ~ P.17 A.R. 777- : 世界の石油供給動向

註9 石油鉱業連盟：石油系炭化水素資源に関するスタディ (石油鉱連・技術評価ワーキンググループ報告書) 昭和61年12月 P.38 ~ P.47および関連付属資料

註10 同上 P.45

註11 石油公団：石油の開発と備蓄 '93-8 P.32

註12 註7と同じ