

## 1. はじめに

エネルギー問題は、空気の存在と同様に普段はその重要性にあまり注意が払われない。しかし、1970年代の石油危機や1991年の湾岸戦争の時のように、その供給が不安定になると、パニックに近い状態で多くの人が急にその存在に関心をもつことになる。

エネルギー消費の問題は、最近、資源の枯渇の問題、および地球環境問題、特に温暖化に関して議論される機会が増えている。ここでは、まず地球環境問題との関連を概観した後、石油を中心とした化石燃料の埋蔵量、生産量、消費量などの現状、さらに石油の枯渇に関連してその将来展望について述べたい。

## 1.1 エネルギー消費と地球環境問題

エネルギー消費は、後でも触れるように、経済成長、人口増加とともに増え続けている。Fig. 1

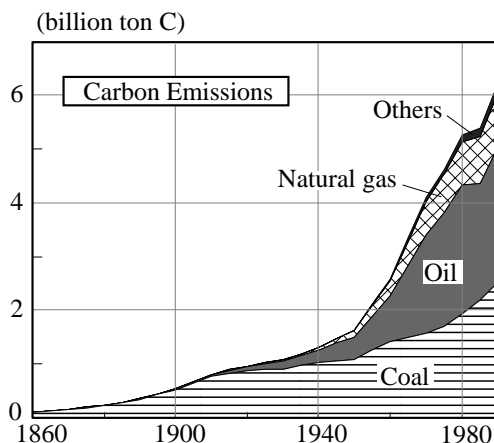


Fig. 1 The increase in global CO<sub>2</sub> emissions (1860-1990).

は炭酸ガスの排出量の年次変化を示している<sup>1)</sup>。これからも1950年以降急激に石油を中心とした化石燃料の消費が増加していることが読み取れる。一次エネルギー<sup>注1)</sup>消費の多い地域は、北米、アジア・オセアニア、欧州であり、人口比率が17%のOECD諸国が、世界の総エネルギー消費量の55%を消費している。一人当たり消費量で比較すると、OECD諸国が平均4.6トン/人、途上国が平均0.5トン/人(1993年実績)と大きな差がある<sup>2)</sup>。

もし、発展途上国がOECD諸国並みに一人当たりのエネルギー消費を増やすと、人口増加はないとしても、世界のエネルギー消費は約3倍にも増加する。

現実には、Fig. 2に示すように人口は増加し続けており、1990年に約53億人であった世界人口は、

注1) 一次エネルギー：自然から供給される化石燃料、水力、原子力、太陽エネルギー等のこと。一次エネルギーを加工、変換した石油製品、電力、都市ガスなどは二次エネルギーと呼ばれる。

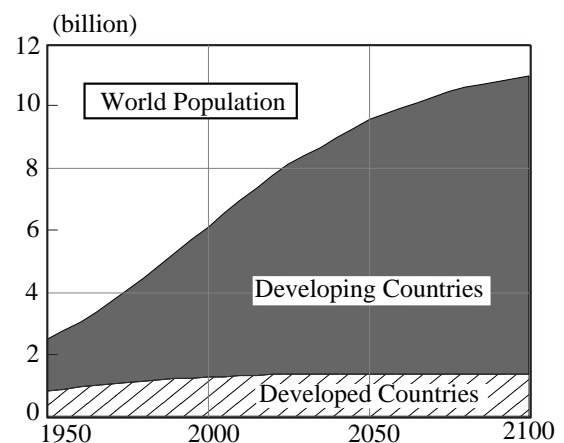


Fig. 2 World population (1950-2100)<sup>3, 4)</sup>.

キーワード

化石燃料, 石油, 地球環境, 埋蔵量, 石油枯渇, メタンハイドレート, 将来予測

2000年には61億人、2100年には110億人に達し、その増加のほとんどは発展途上国で生じると予測されている<sup>3)</sup>。したがって、世界のエネルギー消費は今後急増することが予想される。

このような化石燃料消費の増加は、地球環境を大きく変化させることが懸念されている。Fig. 1に示すような産業革命以降の人為的な炭素ガス排出量の急増は、大気中の炭酸ガス濃度を上昇させ地球温暖化を招いて地球の生態系のバランスを崩すと予想されている。IPCC（気候変動に関する政府間パネル）の第二次評価報告書<sup>5)</sup>は、19世紀末以降、地球の平均気温が0.3～0.6℃上昇し、海面も10～25cm上昇したと結論づけている。また、2100年には現在より約2℃の平均気温の上昇、約50cmの海面水位の上昇を予測している。

地球環境問題の背景には、環境保全、経済成長資源確保という3つの相矛盾する要因（トリレンマ）を含むという複雑な側面があり、もはや一国だけで解決することは難しく、世界的レベルでの協力が必要である。

1. 2 一次エネルギー消費の概要

各種一次エネルギーの消費比率は、Fig. 3に示すように地域ごとに特徴的なパターンを示す。先進国では石油が主なエネルギー源であるが、発展途上国では一般的に石炭の比率が高い。しかし、中南米は例外で、石油比率が高く、また水力も比較的高い。旧ソ連は石油比率が比較的低く、天然ガスの比率が高い。中東は石油、天然ガスの比率が圧倒的に高い<sup>6)</sup>。

一次エネルギー消費の全体像をつかむため、詳しいデータが存在するOECD諸国の傾向をまとめてFig. 4に示した<sup>7)</sup>。一次エネルギー消費は石油換算で44.6億トン（全世界で81.4億トン）で、そのうち石油が42.5%を占め、石炭（19.8%）、天然ガス（20.6%）を合わせて化石燃料の割合は82.9%になる。一次エネルギーの約35%は発電に利用され、それも含

めて、最終的に産業分野、輸送分野、民生分野で各々約10億トン（石油換算）ずつを消費している。

石油消費の多いのは、輸送分野であり、一次エネルギーとしての石油の53%を消費し、発電で7%、産業分野で16%、民生分野で13%を消費している。石炭の73%は発電に利用され、天然ガスは発電に16%、産業分野で28%、民生分野で37%が消費されている。

2. 化石燃料の現状

化石燃料は前章で述べたように、一次エネルギーの80%以上を占める主要なエネルギー源である。ここでは、石油、石炭、天然ガスの生産、消費などの現状について概説する。

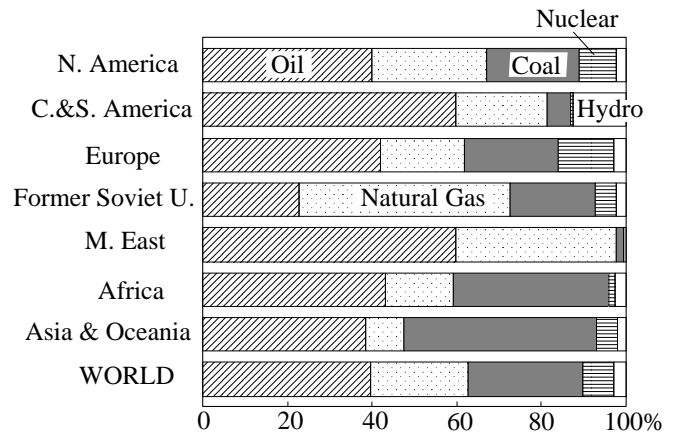


Fig. 3 Primary energy consumption pattern by area (1995).

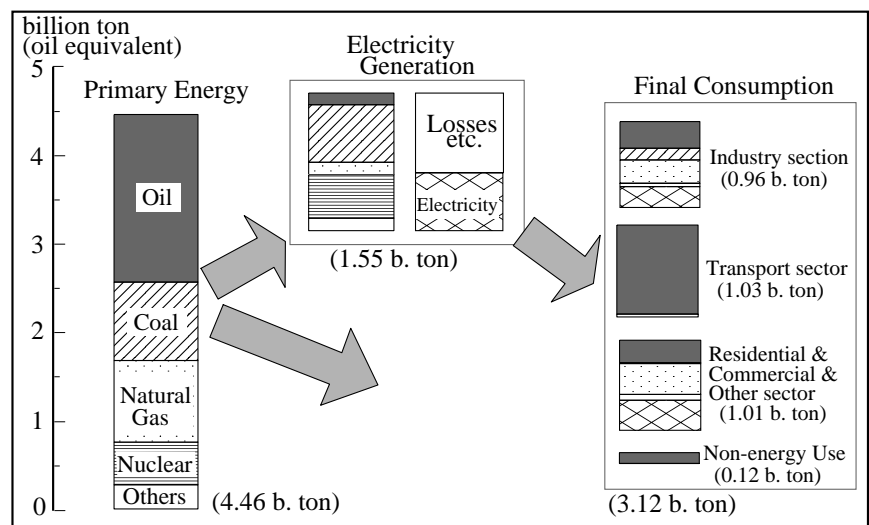


Fig. 4 Primary energy flow in OECD countries (1994).

2.1 埋蔵量，生産量，消費量

探鉱開発実績をもとに統計的手法を用いて推定されている埋蔵量はあくまでも推定値であり，その正確な把握は困難である。埋蔵量の概念については後に詳しく説明するが，既発見資源の探査等により確度高く推定されている「確認（可採）埋蔵量」でみると，Fig. 5で示すように，石炭が飛び抜けて多く，石油や天然ガスの約5倍もの量がある。また，確認埋蔵量を現在の生産量で割った「可採年数」も石油の43年，天然ガスの65年に比し，石炭は228年と長い<sup>6)</sup>。したがって，石炭はCO<sub>2</sub>，SO<sub>x</sub>，NO<sub>x</sub>排出で地球環境，大気環境の点で問題はあるものの，主要な化石燃料として見直す必要のあることがわかる。

埋蔵量の賦存地域はFig. 6に示すように，石油は中東に，天然ガスは旧ソ連，中東に偏在する。石炭は比較的広く分布している。

各地域での埋蔵量を各々の生産量と比較してみると，将来，枯渇が始まる頃にどの地域にその資源が多く残存するかが判断できる。石油の場合，現在，北米や西欧地域では埋蔵量の比率に比べて生産量が多く，一方，中東では埋蔵量に対して生産量が少ないため，将来は中東依存が高まることは必至である。天然ガスも，埋蔵量の多い旧ソ連は生産量も多いので，将来は石油と同じく中東依存が強まる。このことは，エネルギーの供給に関して，将来，現在以上に不安定になる可能性が高いことを示している。

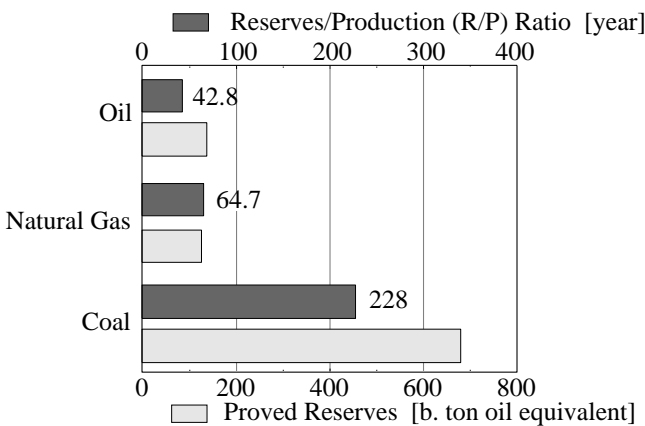


Fig. 5 Comparison of fossil fuels reserves (1995).

生産量と消費量の分布を比べると資源貿易のパターンが見えてくる。石油の場合，先進国が存在する北米，西欧，アジア・オセアニアの消費比率が高く，主として中東からの輸入で補われている。石炭，天然ガスは比較的生産，消費の比率が似かよっており，国内や地域内の消費がほとんどで地域間の貿易は少ないと言える。ただ，天然ガスは将来的にはもっと世界各地で広く利用されるようになり，地域間の貿易が増加していくと考えられている。

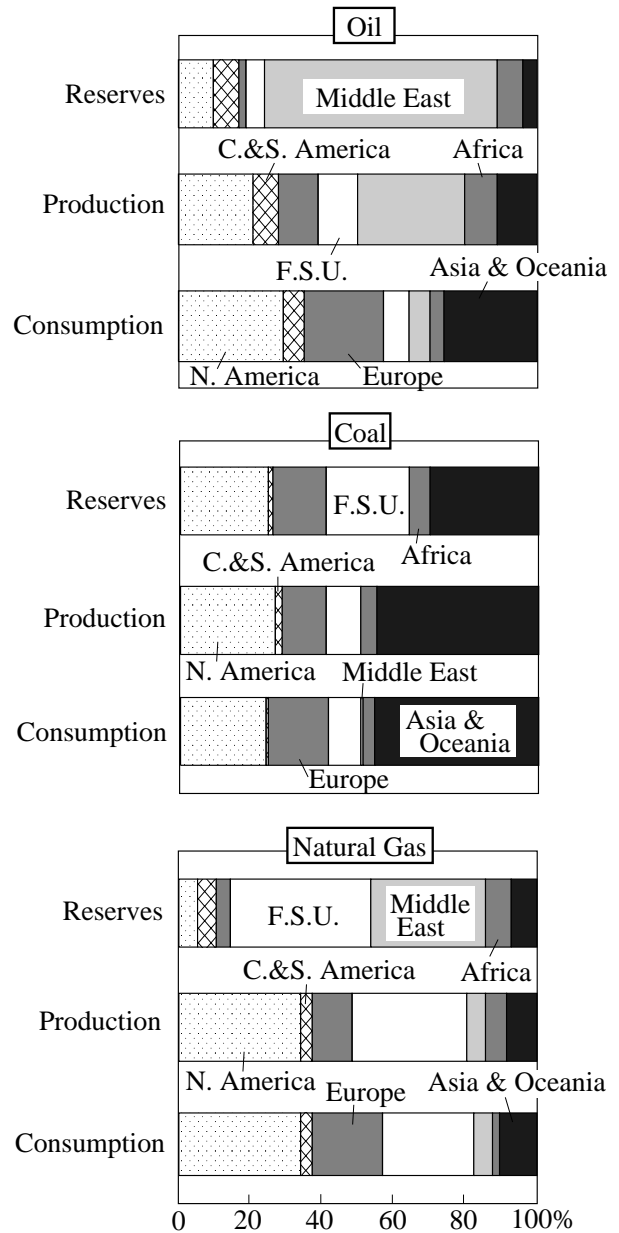


Fig. 6 Distribution of fossil fuels reserves, production, and consumption by area (1995)<sup>6)</sup>.

## 2.2 化石燃料の用途

化石燃料の用途について、アメリカ、ドイツ、日本の3ヶ国で比較してみる (Fig. 7)。

石油の場合、通常原油を精製してガソリン、ナフサ、ジェット燃料、灯油、軽油、重油などとして利用するが、その割合は国によってかなり異なっている。自動車使用の多い米国ではガソリンの比率が高く、ドイツでは軽油やジェット燃料の比率が高い。日本では、米、独に比べて重油の比率が高い<sup>8)</sup>。これは、アメリカとドイツでは、国内での自動車用消費比率が半分以上と圧倒的に高いのに対して、日本では、化学用原料、鋳工業といった産業用と電力用の比率が比較的高いためである<sup>9)</sup>。

石油の消費パターンは、産業構造、ライフスタイルなどの変化でしだいにガソリン、灯油、軽油などの軽質油の消費が増加し、重油の割合は急減している。ところが、原油から精製して得られる軽質/中間/重質の留分は原油産地にも依存するが、Fig. 8に示すように、かなりの割合で重油留分が出てくる<sup>8)</sup>。今後、ますます原油の重質傾向が強まると、需給のアンバランスが顕著になる。現在でも、重質油の分解で軽質油化をはかっているが、コスト高になっている。石油資源の有効利用という観点で、将来的にこの需給アンバランスの問題を枯渇の問題と共に真剣に考える必要がある。

天然ガスは、日本では約70%を発電用に使用するのにに対し、アメリカでは主に住宅・商業用と産業用に使用し、発電用はわずかである。ドイツは

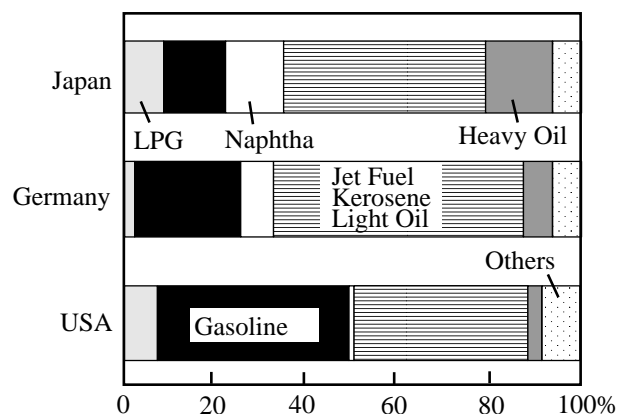


Fig. 7 Comparison of oil products consumption pattern (1995).

両国の中間的なパターンを示す<sup>9)</sup>。

アメリカ、ドイツでは、石炭の発電用使用が多く、全体の約80%を使用している。日本では、発電用と製鉄などの産業用がほぼ同程度使用されている<sup>9)</sup>。

## 2.3 非在来型資源

ここまでは、在来型の化石燃料の現状について述べたが、最後に非在来型の化石燃料にも少し触れておきたい。

石油の非在来型資源としては、オイルサンド(タールサンド)とオイルシェールがあるが、これについては後に触れる。天然ガスに関しては、最近、注目を集めているメタンハイドレートがあり、以下に簡単に説明する。

メタンハイドレートも含めたガスハイドレートは、Fig. 9に示す水分子からなる構造の中のカゴ状の空隙にガスが入り込み(包接)、固体結晶となるクラストレート(包接体)である。ガスハイドレートの構造はいくつか明らかにされているが、メタンは通常Fig. 9に示す構造Iをとり、理論化学式としては $\text{CH}_4 \cdot 5.75\text{H}_2\text{O}$ で表される(水1リットルに対し216リットルのメタンが取り込まれている。実際にはすべての空隙にガスが取り込まれることはないので、150リットル程度である)。

ガスハイドレートは常温、常圧では不安定で、低温、高圧下で安定に存在する。その安定性、構

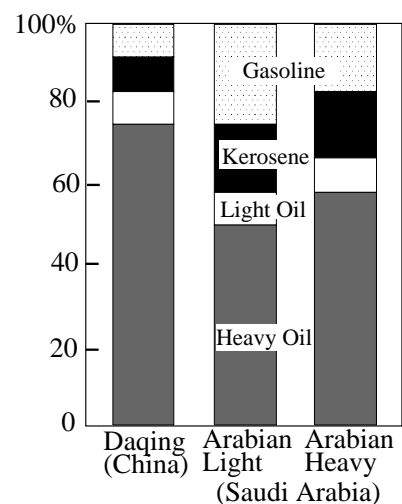


Fig. 8 Difference of oil ingredients by producing area.



造はガス組成にも依存し、また、塩水やアルコールの混入はハイドレート生成温度を下げる。

メタンハイドレートが期待される理由としては、(1)日本を含め世界各地の大陸縁辺の海底に賦存する可能性が高く、消費地に近い（低輸送コスト、中東依存脱却）、(2)結晶中に取り込まれているため、単位体積当たりのガス量が従来の天然ガス田や他の非在来型天然ガスに比較して2～5倍と多い（掘削設備投資の低減）、があげられる。

世界各地でメタンハイドレートの埋蔵が予想されている（Fig. 10）が、その「原始」埋蔵量の推定値はかなりの幅がある。陸域での埋蔵量は数十兆 $m^3$ 、海域では数百兆～数京 $m^3$ と推定されている（可採埋蔵量はこの1/10程度。世界の天然ガスの年間消費量が2兆 $m^3$ 、確認／究極可採埋蔵量が140兆／280兆 $m^3$ であるので、メタンハイドレートの資源量の大きさが理解される）。日本近海の南海トラフでの埋蔵量推定値としては4000億～4兆 $m^3$ （日本の年間天然ガス消費量は約600億 $m^3$ ）が報告されている。しかし、確認が不十分で推定値自体の信頼度は低く、今後の試錐（試掘）による確認作業が急がれる<sup>10)</sup>。

### 3．石油資源の枯渇

石油は世界のエネルギー消費の約40%を賄う重要な資源である。日本ではさらに石油依存度が高く、一次エネルギー供給の約58%を石油に頼っている。このような状態で、石油が枯渇すれば大きな問題である。ここでは、埋蔵量予測および石油消費予測のデータ解析から、「一体石油はいつまでもつのだろうか？」という問いの答を出してみたい。

#### 3．1 埋蔵量の定義

Fig. 11に示すように、石油の埋蔵量を示す用語には、地球上で生成したすべての石油の推定値：原始埋蔵

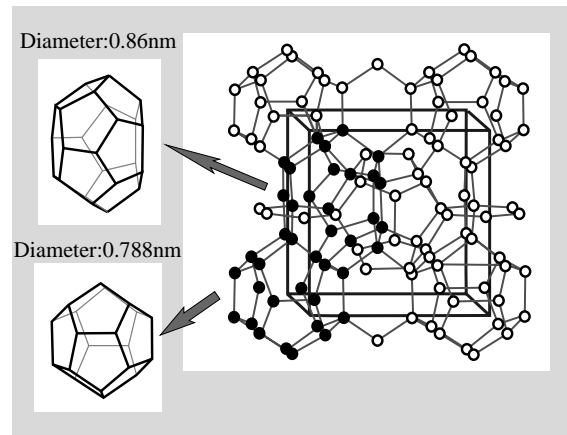


Fig. 9 Crystal structure of gas hydrate (structure I).

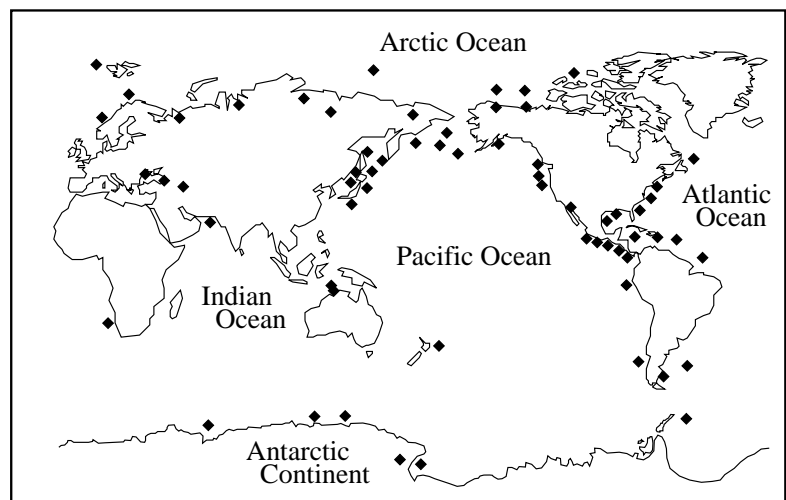


Fig. 10 Map of methane hydrate discovery.

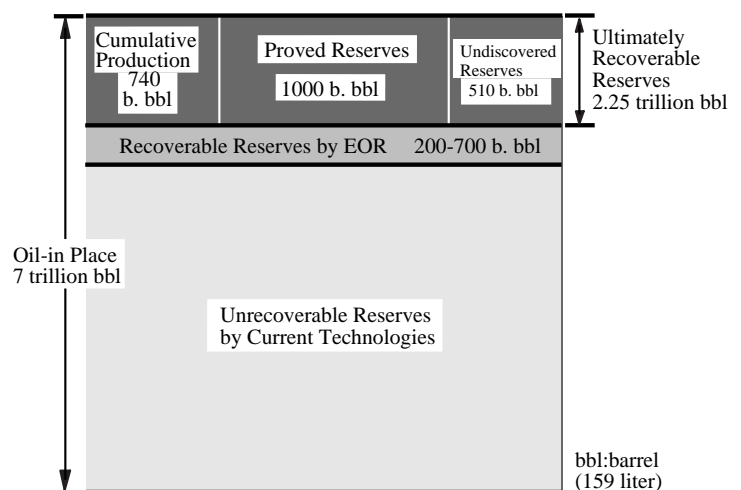


Fig. 11 The definition of oil reserves.

量，現行技術で回収可能な石油量：究極可採埋蔵量（既生産量を含む），そして，既発見油田の現行技術により経済的に回収可能な石油量：確認可採埋蔵量がある<sup>11)</sup>。これらは，確度の程度の違いはあるもののすべて推定値であり，確定した値ではないことに注意してもらいたい。

一般に埋蔵量という言葉で使われるのは，このうちの最も量の少ない「確認可採埋蔵量」であり2.1で述べたように，この数字を現在の生産量で割った値が可採年数と呼ばれるものである。

「石油が30年もつ」という時に引用されるのはこの可採年数である。1960年以降の確認可採埋蔵量と可採年数の推移をFig. 12に示す。可採年数は30～40年で推移してきていることがわかる。これは，可採年数が石油産業の経営指標的な数字であり，経営の安定のため，この数字が30～40になるように新油田開発を行っていると考えられることができる。

### 3.2 究極埋蔵量の推定

石油資源の枯渇について論じる場合には，将来発見されるであろう油田の可採埋蔵量を含めた究極可採埋蔵量を用いるべきである。

究極可採埋蔵量について，これまでに多くの専門家たちが様々な研究を行い推定値を発表してきているが，それらの値は発表時期によって，また人によってばらつきがある。1940年代の推定値は

6000億バレル程度であったが，最近では2兆バレル付近に収斂してきている（Fig. 13）。また，権威のある石油会議で1991年に出された推定値が2.2兆バレルであったため，究極埋蔵量の推定値として，2.2兆バレル（1バレル＝159リットル）がよく引用される<sup>13, 14)</sup>。

### 3.3 EORと超重質油資源

可採埋蔵量の値を左右する要素の一つに，EOR（Enhanced-Oil-Recovery）技術があげられる。EORは従来の回収法で取り残された原油について，粘性，表面張力，容積などの性質，原油と水の間の界面張力等を変化させて，原油の流動性を改善し回収率を向上させるもので，熱攻法，ガス攻法，ケミカル攻法などがある。

EORによる回収量は，その時点での石油価格や技術レベルによって，また，油田特性や原油特性によっても大きく左右され，約2000億バレル～7000億バレルと推定されている。

石油資源の延命にEORとともに期待されているのが，オイルサンド（タールサンド），オイルシェールといった超重質油資源である。

オイルサンドとは，重質油の中で特に粘性が高く，地下でほとんど流動しない炭化水素を指す場合が多い。従来の採油法では回収が不可能であり水蒸気圧入などで回収される。ベネズエラのオリノコ河周辺の賦存が有名である。

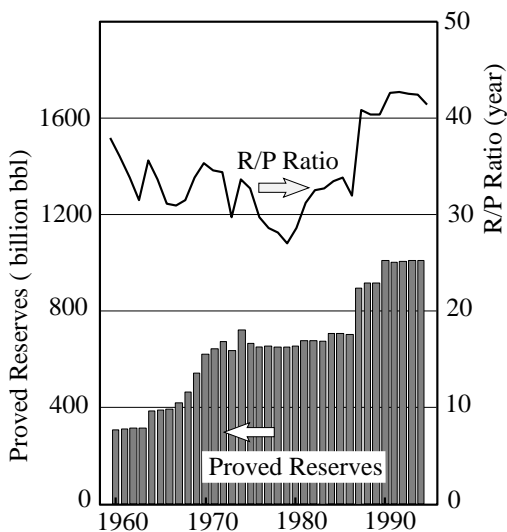


Fig. 12 Proved reserves and R/P ratio of oil<sup>12)</sup>.

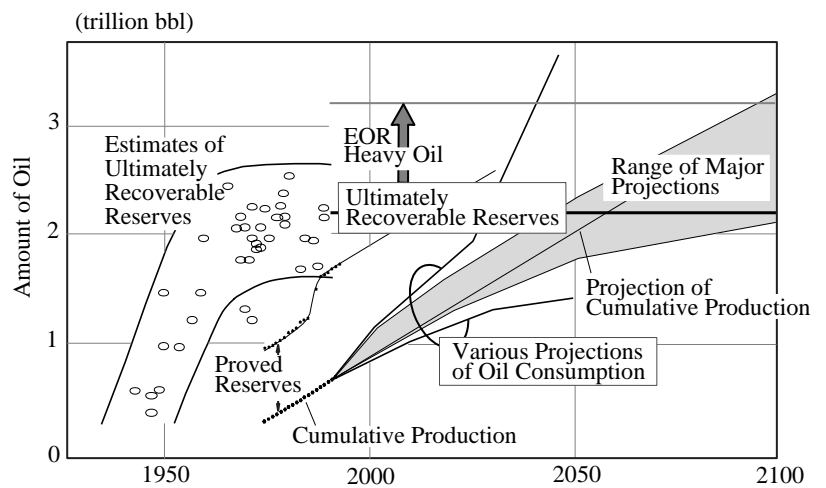


Fig. 13 Forecasting oil exhaustion by estimates of reserves, and projections of consumption and production.

オイルシェールは、藻類等が分解されてできた不溶性有機物（ケロジェン）に富む堆積岩（油母頁岩）のことで、世界に広く賦存する。岩石を乾留してシェールオイル（祖原油）を取り出す。

これらの超重質油資源について正確な埋蔵量は把握できていないが、その究極可採埋蔵量は約2～4兆バレルにもなるといわれている<sup>15)</sup>。

#### 3.4 石油資源の枯渇時期

世界のさまざまな機関によって将来の石油消費予測が出されている<sup>16)</sup>が、各種の消費予測と前述の2.2兆バレルという究極埋蔵量の値から石油資源の枯渇時期を予測してみる。

各種機関の消費予測の主なものはFig. 13の塗りつぶし部分に含まれる。この塗りつぶし部分と究極埋蔵量との交点から、従来型技術で回収できる石油は2050～2120年には使い果たすことになる。

石油資源の寿命がその後どのくらい延びるかは、前述のEOR技術の進歩、オイルサンド、オイルシェール等の開発にかかっているといえよう。仮に、1兆バレル程度の追加埋蔵量があるとすると、ほぼ21世紀中は石油はあるということになる。

ここでは、石油生産が最後の1滴まで線形的に産出されると仮定したが、現実にはしだいに生産が減少し、それにつれて価格上昇が生じる。コスト上昇があると経験的に需要が抑制されることが知られている。しかし、そのような要因まで入れた予測は複雑であるので、おおまかな枯渇の時期を知るには、上の解析で充分であろう。

#### 4. 人口増加、経済成長を基にした将来の石油消費予測

ここからは、少し視点を変えて、人口増加、経済成長を基に将来の石油消費量について予測してみる。

先にも述べたように、将来の人口は途上国を中心にまだまだ大きく伸びることが予測されている。途上国の経済成長も勘案すると、途上国でのエネルギー消費あるいは石油消費の伸びは非常に大きいと思われる。そこで、ここでは特にアジアの人口大国である中国とインドに焦点を当てて解析を進める。

予測は

- (1)GDP / 人と石油消費 / 人の関係を求め、
  - (2)将来のGDP / 人の予測、
  - (3)将来の人口予測、
  - (4)上記より将来の石油消費の計算
- という過程で行った。

#### 4.1 GDPとエネルギー（石油）消費

経済活動とエネルギー消費は密接に関係している。ここでは、先進国とアジア諸国のデータからGDP（国内総生産）とエネルギー消費量の関係について解析する。

先進国と中国やインドの一人当たりGDPを比べると、大きな格差がある。1993年の日本の一人当たり実質GDP（以下GDPと言うときは、1990年米ドル価格の実質GDPを指すことにする）は約25,000ドルであったのに対し、中国、インドの値はそれぞれ、530ドル、360ドルで、日本の1/50、1/70であった<sup>17,18)</sup>。

Fig. 14では、横軸を一人当たりGDP、縦軸を一人当たりエネルギー消費量とし、両者の経年変化をみた。先進国では、ドイツを除いて、GDPの伸びとともにエネルギー消費量も緩やかに増えている。アメリカは他の国に比べて、一人当たりエネルギー消費量が高い。アジア諸国のうち、中国、インド、タイといった低所得国では、一人当たりGDPの伸び率は低いですが、エネルギー消費の伸び率は高い。アジアNIES諸国（シンガポール、香港、台湾、韓国）では、GDPとエネルギー消費ともに

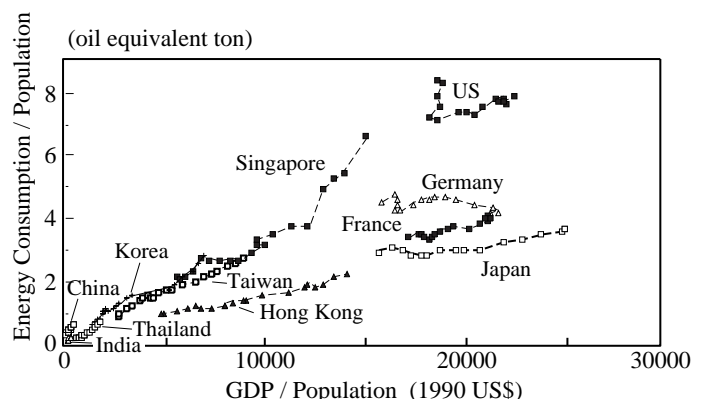


Fig. 14 Relation between primary energy consumption per capita and GDP per capita (1978-1993).

堅調に伸びており、先進国のレベルに近づつつある。

この図より、一人当たりGDPが伸びると、一人当たりエネルギー消費も増える傾向にあり、両者は正の相関関係にあることがわかる。同様な関係は、石油消費とGDPの間にもあり、世界の主要国の85～93年のデータをlog-logプロットしたのがFig. 15である。この関係を図中の曲線で近似し、以後の解析でGDPから石油消費量へ変換する関数として用いた。

#### 4.2 石油消費量予測

まず、世界全体の石油消費量を求める。一人当たりGDPの2050年までの値を、IPCC第2次報告書の3つのシナリオ<sup>19)</sup>(基準シナリオ, 低, 高成長シナリオ)の経済成長率を用いて求め、Fig. 15の曲線から一人当たり石油消費量を計算した。それにFig. 2の世界銀行の人口予測値をかけて世界全体の石油消費量を出した。

その結果は、Fig. 16に示した。世界の石油消費量は、2050年には経済成長率基準ケースで約122億トン、低成長ケースでも約80億トン、高成長ケースでは約156億トンにもなり、1990年の石油消費量の約2.5～5倍になる。

また、中国、インドの石油消費量も同様に予測

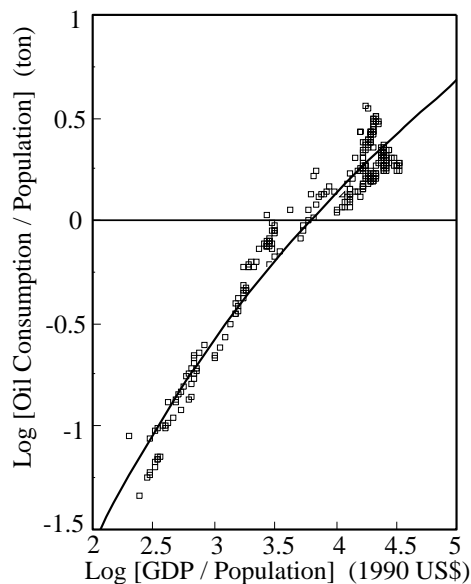


Fig. 15 Oil consumption per capita and GDP per capita.

してみた。経済成長は日本のカーブをたどると仮定してGDP/人を予測し、Fig. 15の中の曲線で石油消費/人に変換し、予測人口をかけて石油消費量を出した。

2050年における中国、インドの人口は、1990年に比較すると、各々1.4, 1.9倍に、また、GDP/人は各々49, 38倍にまで増加している。そして、その結果として、Fig. 16に示すように、2050年には、中国、インドでの石油消費量は各々31.4, 25.7億トン(1990年に比べると、各々29, 44倍)に大きく増加することが予測される。これは、1990年の世界総石油消費量に匹敵する量であり、開発途上国の経済成長による今後のエネルギー消費の急増が大きな問題となることを示唆している。

#### 5. さいごに

かつてはエネルギーの安定供給という政治的側面からエネルギー問題が議論されたが、最近では、石油の枯渇や地球温暖化に関連づけて議論されることが多くなっている。ここでは、石油を中心とした化石燃料の現状を概観し、石油の埋蔵量と将来消費予測の解析から、超重質油の存在も考慮すれば石油の供給は少なくとも21世紀中は大丈夫との結論を導いた。

しかし、近い将来、石油を中心とした化石燃料の消費は資源枯渇ではなく、地球環境の観点から考え直す必要があるだろう。Fig. 17<sup>20)</sup>に示すように、今の勢いで化石燃料を使い続けると、大気

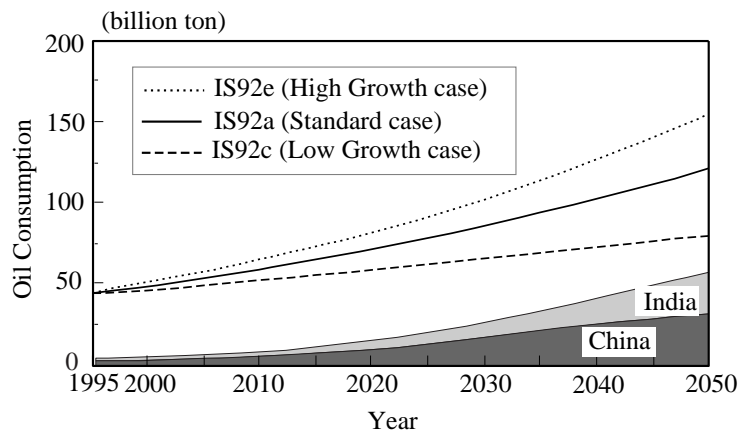


Fig. 16 Forecast of oil consumption up to 2050.



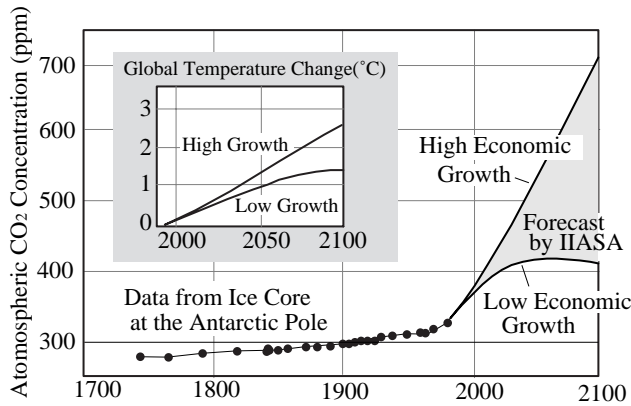


Fig. 17 CO<sub>2</sub> emissions and temperature change (IIASA).

中の炭酸ガス濃度が最大で700ppmを越え、大気温度が2.5°Cも上昇することも予想されている。このような温度上昇は、極地の氷融解、海面上昇穀物適地の北上、異常気象の多発などの取り返しのつかない状況をもたらす可能性が高い。

そのため、今から省エネ、高効率化などの対策以外にも、化石燃料から太陽光、風力、地熱、海洋などの自然エネルギーを主体とした再生可能なエネルギーへの転換を積極的に推進していく必要がある。それにつれ産業構造の変革も起きるだろうし、自動車も電気自動車や燃料電池車などのよりクリーンな車へと移行していくことになるだろう。

### 参考文献

- 1) 地球環境データブック編集委員会：ひと目でわかる地球環境データブック, (1993), 298, オーム社
- 2) エネルギー計量分析センター：エネルギー・経済統計要覧'96, (1996), 190 ~ 191 210 ~ 211 215, (財)省エネルギーセンター
- 3) Bos, Eduard., et al. : World Population Projections 1994-95, (1994), World Bank
- 4) 地球環境工学ハンドブック, (1993), 38, オーム社
- 5) 環境庁地球環境部：IPCC地球温暖化第2次レポート, (1996), 48, 中央法規

- 6) The British Petroleum Company : BP Statistical Review of World Energy, (1996)
- 7) OECD : Energy Balances of OECD Countries 1993-1994, (1996), 75
- 8) 石油情報センター：石油事情資料, (1996)
- 9) OECD : Energy Balances of OECD Countries 1993-1994, (1996), 127 147 195
- 10) 松本良, ほか2名：メタンハイドレート 21世紀の巨大天然ガス資源, (1994), 日経サイエンス社
- 11) 藤田和男："世界の石油埋蔵量評価とコスト", 石油学会資源講演会, (1996), 1 ~ 16, 石油学会
- 12) BP : BP Statistical Review of World Energy DISKETTE, (1995)
- 13) 石油鉱業連盟：石油, 天然ガス等の資源に関するスタディ, (1991), 91
- 14) 資源エネルギー庁：資源エネルギー年鑑 1995/96年版, (1995), 157, 通産資料調査会
- 15) 資源エネルギー庁：資源エネルギー年鑑 1995/96年版, (1995), 249 ~ 253, 通産資料調査会
- 16) 山地憲治, ほか7名："世界のエネルギー資源: 資源量, 需給, 経済性と関連技術動向", 電力中央研究所調査報告Y94001, (1994), 63
- 17) OECD : Energy Balances of OECD Countries 1992-1993, (1995)
- 18) OECD : Energy Statistics And Balances of NON- OECD Countries 1992-1993, (1995)
- 19) 環境庁地球環境部：IPCC地球温暖化第2次レポート, (1996), 68, 中央法規
- 20) IIASA : Working Paper WP-95-102, (1995), 26

### 著者紹介



佐藤友香 Yuka Sato

生年：1972年。

所属：調査課。

分野：エネルギー・環境分野の動向解析。

学会等：石油学会会員。



小林茂樹 Shigeki Kobayashi

生年：1947年。

所属：調査課。

分野：技術動向全般の解析。

学会等：エネルギー・資源学会会員。

Ph. D.