

エネルギーモデル

1. はじめに

国や地域において、エネルギーに関連する研究開発計画や新技術の実施計画を立てる際、環境、価格などに関する政策を立案する際、その効果をできるだけ定量的に検討し評価するための道具として使われるのがエネルギーモデルである。資源ナショナリズムの台頭や資源・環境の有限性の認識の深まりとともに、各国ともエネルギーハード技術のR&Dをより積極的に進めると同時に、それらを評価分析するためのエネルギーモデルの開発も急ぎつつあり、すでにその一部は計画立案に反映されるようになってきている。このエネルギーモデルは、当然のことではあるが、モデル分析の目的をふまえて、モデル開発のための期間、人力、資金などの範囲内で、実際の姿を十分表現したものでなければならない。

本稿では、エネルギーモデルの概念を理解してもらうため、モデルが具備すべき一般的条件と、発表されている若干のモデルについて述べるつもりである。

2. エネルギーモデルの概念

エネルギーモデルを考えるにあたってもっとも重要な点は、社会活動をどう認識するかである

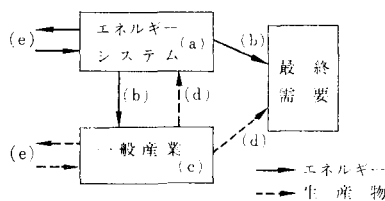


図1 エネルギーと生産物の流れ[(a)~(e)は本文と対応]

う。図1は筆者の認識をまとめたものである。すなわち、ある地域(または国)の社会活動を、エネルギーシステム、一般産業、最終需要の3つのブロックと、それらの間のエネルギーと生産物の流れとして把握している。エネルギーシステムは、電力、石油、石炭、都市ガスなどのエネルギー産業、すなわち、エネルギーの輸送、変換、貯蔵、配給などの活動とそのための諸設備を含む。一般産業ブロックはエネルギー以外のすべての産業の生産活動とその設備を含む。最終需要ブロックは、家計、政府などの活動と設備を含む。ここでエネルギー産業をことさら一般産業から分離したのは、エネルギーの流れをくわしく見たいがためである。図中の矢印はエネルギーと製品やサービスの流れをあらわしている。この他、労働や賃金、資金などの流れも考慮すべきであろうが、ここでは説明を簡単にするため省略した。

このようなエネルギーや生産物の流れは、少なくとも図2のように価格を媒介とする経済原則に支配されているし、また技術的なものなど多くの要因に支配されている。エネルギーモデルでは、このような因果関係をできるだけ内生化することが望ましく、必然的にエネルギーモデルはフィー

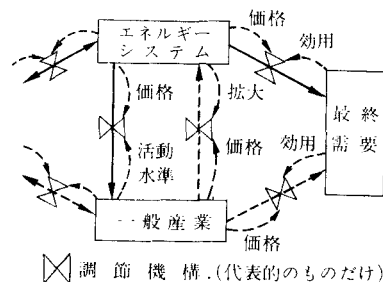


図2 経済的な決定機構

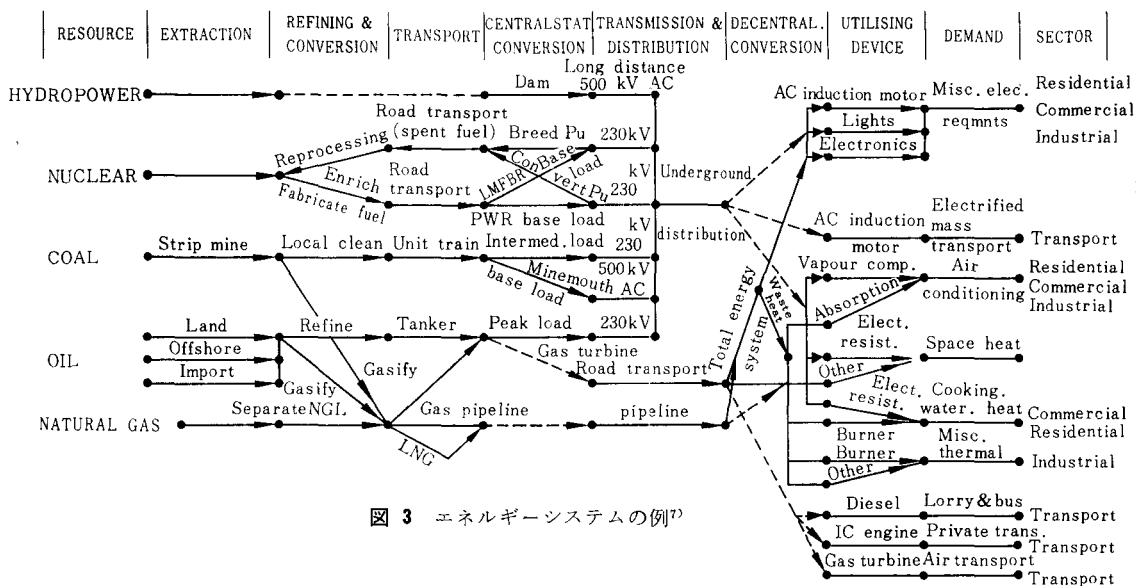


図3 エネルギーシステムの例⁷⁾

ドバックモデルにならざるを得ない。以下ではこれらの流れについて、その特徴やモデル化すべき事項などについて説明する。

2.1 エネルギーの流れ

(a) エネルギーシステム内部：種々のエネルギーの輸送，変換，貯蔵，配給のための設備を介して流れる一次，二次エネルギーと，諸設備の効率，容量，運転特性などの技術的特性や，その運転コスト，建設コストなどの経済的特性をはじめ，安全性，環境性などの諸特性を含んでいる。

図3はこの一例を示したものであり，エネルギーの流れと諸特性の関係は，たとえば，重油火力発電設備へ入る重油の量と発生する電力の比が所与の効率以下であり，また瞬時に発生する電力がその設備容量以下であることなどである。エネルギーモデルを考える際には，(i) エネルギーの貯蔵特性，輸送特性の違いによって，運転パターンやシステムの構成が異なる。(ii) 1種類のエネルギーをつくる方法が複数ある。(たとえば電力を発生するのに，水力，原子力をはじめ，重油，原油，石炭，LNGなどによる火力発電が可能) (iii) エネルギーの流れには，設備を運転するのに使うエネルギー(たとえばウラン濃縮のための電力など)もある。などの点を考慮しなくてはならぬ。

図3でも，(i) の理由から，数種類の火力発電をみついている。

(b) エネルギー需要：エネルギーの消費部門である一般産業と最終需要への各種エネルギーの流れと，消費のために各種利用設備の技術的特性(効率，容量，寿命)や経済的特性(価格，運転費)などをあらわしている。モデルを考える際に重要な点は，エネルギー需要を決定する機構のあつかいであろう。エネルギーの総消費量は，国や地域の経済活動のレベルと密接に結びついていることが知られている。たとえば，ある産業の技術や規模に変化がなければ，生産のため使うエネルギーの量は，ほぼその生産水準に比例すると考えられるし，家計のエネルギー消費は気候や習慣にもよるが，生活レベルの向上によって増加することが考えられる。さらに，エネルギーの総消費量とともに，その内訳，すなわち二次エネルギーの種類ごとの消費量も，その相対価格，利用設備の価格と寿命，使いやすさ，需要家の好みや安全性などによって影響を受けるであろう。

以上のような事実を考慮して，エネルギーシステムブロックでは，エネルギー種類ごとの相対価格が内生化されることが望ましく，一般産業，最

終需要ブロックではその需要量が種別に内生化されることが望ましい。このため、エネルギーの種類は適当に分類されていなくてはならない。

2.2 生産物の流れ

(c) 一般産業ブロック内部：製鉄、機械、サービスなどエネルギー産業以外の産業のつくり出す財のうち、原料などの中間財と生産規模の拡大や更新のための資本財などの流れと、その生産活動が関係する技術的経済的な要因をあらわしている。モデルを考える際には、①産業の部門分け、②財の尺度、などを決定する必要がある。すべての生産プロセスを陽に表現することは、その数があまりに膨大なため現実的でなく全生産プロセスまたは産業を適当に分割することが必要となる。この結果分割された個々の部門の生産物を物量であつかうか統一尺度である金額であつかうかも決めなくてはならない。各部門の生産物が1種類とはかぎらないので金額ベースであつかうのが普通であるが、モデル分析の目的によっては特定の部門だけ物量ベースであつかうことも必要となる。

モデル化する際重要な点は、(i) 中間財需要量決定の機構、(ii) 各財の(相対)価格決定の機構、(iii)資本投資決定の機構、などの表現方法である。これらの機構をモデルで内生化しようとするれば、代替性とスケールメリットに注意しなくてはならない。代替性すなわち中間財や生産技術の代替性とは、自動化の推進、高性能設備の使用、生産技術の革新などによって、同量の製品をつくる時に、使用する中間財（エネルギーも含めて）、労働力、資本の量とその割合が変化しうることである。この代替性は、財の相対価格、技術水準、法規制などによって左右されると考えられるが、設備建設の遅れなどによるある程度の慣性ももっている。もしモデル分析の目的がこの代替性に影響するような技術革新や政策の評価であれば、当然この点は内生化しなくてはならない。この代替性やスケールメリットは本質的に非線形なため表現が困難な点である。スケールメリットはある程度

以上の規模の産業部門については考慮しなくてもよいと考えられる。

(d) 非エネルギー財の需要：エネルギーシステムの稼動に必要な中間財や、その設備拡大や更新のための資本財（たとえば発電機、送電線、パイプライン、タンカー）と、最終需要ブロックにおける財の消費（たとえば、食料、衣料、テレビ、種々のサービス）や公共投資などをあらわす。モデルを考える際に重要な点は、(b)と同様に需要決定機構の表現であろう。エネルギーシステムの需要は、その生産活動や設備投資によって決まる。この点は従来あまり配慮されていないが、たとえば原子力発電のように比較的資本費（設備建設のための諸費用、原子力の場合はとくに初装荷の燃料も含めることにする）の大きい場合は、一般産業に誘発される生産量が大きく、結果的に新しくエネルギー需要がつくり出され、短期的（たとえば建設期間）に大きな需要増の原因となりうるので、モデルで内生化することが望ましい。最終需要ブロックでの需要は、相対価格、効用、製品の寿命、生活レベル、社会的習慣などで決まると考えられるが、個々の生産物需要決定について経済的な面だけで内生化することは不可能と思われる。

(e) 地域外からのエネルギーと財：輸入原油、購入電力や原料、製品の輸入など地域外からの財の購入と、そのための輸送、貯蔵設備の効率、容量、寿命や費用、安全性などの諸要因と、その購入価格や供給信頼性などが関係する部分である。モデルを考える際重要な点は、購入可能量とその価格の決定機構の表現であろうが、これは地域内だけの問題としてはあつかえず、外生化することもやむをえないと思われる。

3. エネルギーモデルの構造、方法論とその例

3.1 モデルであつかう項目

エネルギーモデルは、(i) 地域のあつかい（その規模と数）、(ii) エネルギーシステムの内部構造（エネルギーの種類や設備）、(iii) 一般産業ブロッ

クの内部構造(部門分けなど)、(iv) 最終需要ブロックの内部構造(部門分けなど)などの項目によって分類することができる。ある分析を目標にモデルをつくる時、(i)~(iv)をどの程度まで考慮するかは、以下に述べる例からもわかるように、目的によっておのずと決まる内生化するべき因果関係に左右される。

たとえば環境政策の効果を評価するのが目的であれば、環境特性はかなり局所的であるため、ある程度小さい地域を多数あつかわなくてはならず、エネルギーの輸送を検討するためにも同様である。逆に、エネルギーの技術革新やその価格に直接影響するような政策を評価するためには、地域性はある程度無視しても、エネルギーの種類ごとにその価格などの受ける効果も異なるであろうし、その結果種別の需要も変化するのであろうから、エネルギーの種類や設備は十分詳細にしなくてはならない。同時に価格による需要変動をあつかう必要から、一般産業や最終需要ブロックのあつかいもある程度詳細でなくてはならない。また、経済成長や雇用などの観点からエネルギー問題をあつかうためには、産業における生産活動と需要-価格の因果関係が重要であろうから、これらを十分表現しなくてはならない。

3.2 エネルギーモデルで使われる方法

エネルギーモデルで使われる方法は、(i) 線形計画法などの最適化手法、(ii) 投入産出分析などの経済分析手法、(iii) 計量経済的なシミュレーション手法、(iv) パラメーターによるシミュレーション手法、などに大別できる。

(i)は一般に、多数の技術係数やパラメーターを必要とし、大規模で複雑になりがちで、微細な仮定や微妙な誤差が結果に重大な影響を与える危険をもち、時点断面の静的な表現が普通で動的な問題には不向き、などの欠点をもつが、技術やエネルギー、財の代替性を表現するには適している。

(ii)はレオンチェフ流のI/O分析や、ミクロ経済学的なモデルを使う方法で、全経済の相関を包

括的にあつかうには適しているが、普通過去のデータから推定する多数のパラメーターを使うため、短期の問題には適するが、技術や産業構造の大変革をあつかうには不向きである。

(iii)はマクロ経済的なモデルによる方法で、比較的少数のパラメーターを(ii)と同様に過去のデータから推定するため長期的な問題には不向きで、技術や政策がパラメーターに与える影響も説明がむずかしいが、動的なあつかいも簡単で、(i)、(ii)と組み合わせて使うのにも適している。

(iv)は、経済の構造やメカニズムを仮定し、そのパラメーターの変化が結果におよぼす影響を検討するという方法で、確実な情報を根本としていないという欠点もあるが、簡単で自由度が多く、十分なデータが使えなくても済み、他の方法との組み合わせも容易であるなどの長所もある。

次節では、おもにこの方法論にしたがって典型的なモデルを紹介する。

3.3 エネルギーモデルの例

(1) EPAエネルギー品質モデル¹⁾

このモデルは、Battelle 研究所がEPA(米国環境保護庁)の助成でつくったもので、SOX規制が米国とその周辺のエネルギー消費パターンやその価格に与える影響を検討することを目的としている。モデルは、石炭、天然ガス、原油などの産地と精製所や発電所などの分布を考慮して、総コストの最小化をはかる線形計画によって定式化されており、前節の(i)に分類できる。地域のあつかいは非常に詳細(エネルギー需要238地域、石炭産地23地域など)で、その間のエネルギー輸送もあつかっているが、エネルギーの種類が10種類(硫黄含有率による3種の石炭、石油各製品、天然ガス、電力など)で、エネルギー需要部門は全部を1つにまとめ、運輸用のエネルギーは考えていないなど、かなり荒っぽい点もある。また総エネルギー需要は完全に外生的で(したがって価格は需要に影響しない)、エネルギー間の競合代替は発電部門と、需要部門(ただし同種のエネルギーの質

に関してだけ)であつかい、エネルギーの価格は生産コストと一定率の利潤の合計としている。

(2) Hudson-Jorgenson モデル³⁾

DRI(Data Resources Inc.)が Jorgenson 氏らを中心に開発したモデルで、Ford 財団の報告書「A Time to choose」などの基礎として使われている。このモデルは、国の経済成長とエネルギーの需要の関係を明らかにすることを目的とし、図4に示すようなサブモデルから構成されている。計量経済的な手法とI/O分析の融合をはかった

点が特長で、前節の(ii), (iii)の両面をもち、投入係数(価格ベース)も内生化されている。モデルでは米国の全経済を、4つの非エネルギー部門(①農林漁業、非エネルギー鉱業、建設、②石油精製を除く製造業、③運輸、④通信、商業、サービス)と、5つのエネルギー部門(⑤石炭、⑥原油、天然ガス、⑦石油精製、⑧電力、⑨都市ガス)に分割し、その間の経済的関係を表現している。

生産者行動モデルは、マクロ成長モデルから与えられる資本費、労働費などをもとに、投入の可分性、技術係数の不変性、完全競争などを仮定して、過去の統計データから推定された対数二次形式の価格可能関数によって、投入係数と生産物価格を決定する。マクロ成長モデルは、内生化された家計、企業ブロックと、外生的にあつかわれる政府、海外ブロックから成り、政府購入や輸出額などを定めたとき、消費支出、資本価格、労働価格などを決定する。家計、企業ブロックは、おのおのの行動方程式と、資本ストックと投資、投入額と産出額、国富、消費財価格と投資財価格、労働力などに関する恒等式から成っている。生産者行動モデルから得られるI/O係数と、マクロ成長

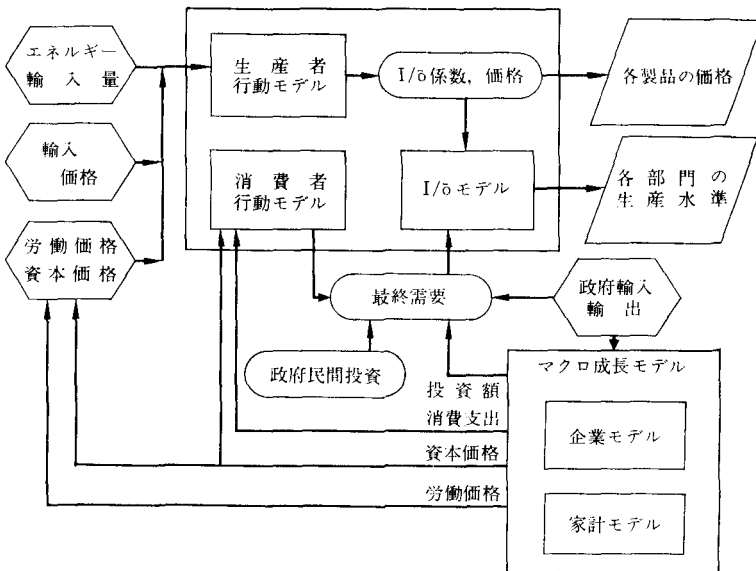


図4 Hudson-Jorgenson モデルの概略

モデルから得られる最終需要と付加価値を使って、通常のI/O分析手法によりエネルギーを含む各財の産出額と価格が決定される。従来の多くの方法と異なり、エネルギー産業も他産業と同様に価格だけがその行動を左右するとしている点が独特である。多くの外生変数を必要とし、間接的に価格に影響する政策(資源や環境の保護政策など)や技術係数を変化させる技術革新(効率の向上など)などをあつかえない点が欠点であろう。

(3) Baughman 動的エネルギーモデル⁴⁾

NSFの援助でMITのエネルギー分析計画グループが Baughman 氏を中心に開発したモデルで、米国のエネルギー生産消費における競合代替をシミュレートすることを目的とし、前節の分類では(iii), (iv)の両面をもつモデルである。エネルギーは、石炭、石油、天然ガス、電力の4種類、エネルギー需要は、家庭、商業、輸送、工業用熱源、工業用動力の5部門をあつかっている。本モデルの主要部は、エネルギー供給サブモデルと需要サブモデルである。前者は需要をもとにエネルギーの価格(電力は平均コスト、その他は限界コスト)を決定し、後者は価格をもとに需要を決定

し、収束するまでくり返される。供給モデルでは、資源量一定(価格に依存せず)、価格に依存する設備投資水準、燃料間は完全競争などの点を仮定し、建設の遅れを考慮している。需要モデルでは、各需要部門ごとの各エネルギー需要を、価格に影響される部分(利用設備の耐用年数から決まる部分と、新規の需要(外生))と、価格によって変動しない部分に二分し、前者に対しては、エネルギー種別のシェアの変化率が価格変動率に比例すると仮定して(パラメータは過去の時系列データから推定)、エネルギー種別の需要量を決定している。このモデルは、価格-需要の関係は陽に表現されているが、各部門ごとの総エネルギー需要量は価格と無関係(外生)としている点が欠点である。

(4) Kalter パラメトリック・エネルギーモデル²⁾

パラメータを使った典型的なモデルで、価格変化によって生ずる需要と供給の変動を同時に決定できる点の特徴である。その原理は、1種類のエネルギーについて、一定価格のもとでの潜在需要と潜在供給力、および需要と供給の価格弾性率を使って、価格変動を求め、これから求まる実価格と弾性率から、実需要量と実供給量(両者は当然等しい)を求める点にある。この方法は、必要なパラメータの数が少なく簡潔ではあるが、パラメータ間の因果関係や政策や技術革新の影響が直接描けないなど多くの欠点をもっている。

4. あとがき

スペースの都合でここでは紹介できなかったが、以上の他に多数のモデル^{5,6,8,9,10)}がつくられている((9)を除く全部が最適化モデル)が、社会の表現や統合・分割などの点で、まだまだ改良の余地が数多く残っていると思われる。社会の表現とは、社会の多目的性や経済的大変革などに関する問題であり、統合・分割とは、簡潔に短期間で問題を解決するため、集約形モデル(簡単化したモ

デル)と大規模モデルを相互に補い合って使えるようにすることなどである。

参 考 文 献

- 1) Battelle Columbus Laboratories, A proposal to develop energy price and availability projection; April 1973.
- 2) A. S. Cohen, K. W. Costello, Regional energy modeling; Argonne National Laboratory, June 1975.
- 3) E. A. Hudson, D. W. Jorgenson, The U. S. energy policy and economic growth, 1975-2000; The Bell J. of Economics and Management Science Aut. 1974. pp. 461-514 or Energy Modelling Conference. IIASA (May 1974).
- 4) M. L. Baughman, A model for energy environment system analysis; Energy Modelling, Oct. 1973 pp. 134-149.
- 5) Queen Mary College, World energy modelling, Pat 1, 2; Energy Modelling, Oct. 1973. pp. 70-117.
- 6) K. C. Hoffman, A model on interfuel substitution; IIASA, May 1974.
- 7) K. C. Hoffman, A unified framework for energy system planning; Energy Modelling, Oct. 1973. pp. 150-162.
- 8) C. E. Iliffe, The system approach in economic assessments of nuclear power; Energy Modelling, Oct. 1973. pp. 33-43.
- 9) R. S. Pindyck, The econometrics of US natural gas and oil markets; Energy Modelling, Oct. 1973. pp. 124-133.
- 10) D. Finon, Optimization model for the French energy sector; Energy Policy, June 1974. pp. 136-151.
- 11) 小川 洋, エネルギーシステムのモデル分析; 電気学会雑誌, Dec. 1976, pp. 1104-1111.

かわかみ・じゅんぞう 1944年生
東京大学工学部 電気工学科