

エネルギー問題に於けるモデル分析の効果

On the Energy Modeling Analysis

高 橋 亮 一*

1. モデル分析の背景

エネルギー問題はE³空間で考えねばならない。E³とはEngineering, Economy, Enviromentを意味してE-cubicと読む。最近の20年間を眺めるとエネルギー問題の主なる論点がE³空間のなかを動いている様子が分る。約20年前には石油は長い間1バレル1.80ドル程度と安価で潤沢な資源であった。さらに石油は流体燃料という物理的性質が活用されて工業先進国に於いて石炭を駆逐しつつ利用が拡大された。この流体革命は豊かな社会を建設してきたが、急激な経済成長に伴って多量のエネルギー消費をもたらした。まず環境に対するインパクトに関心が集中して環境保全の制御という側面の技術およびこれとトレードオフの関係にある経済合理性が論ぜられた。エネルギー消費が急峻になりつつあった1970年に石油価格が一挙に3倍になる時期に、ローマ・クラブによる“成長の限界”が発表されている。⁽¹⁾これはこの時期の割合で成長するには限界があり、食糧や土地を含めて資源の有限性を正のフィードバックという機構を解説しつつ、人類は既にその限界に到達しつつあるとしたものである。資源の有限性が大きい説得力をもった。安定したエネルギー供給に関心が払われているうちに、1973年秋に起きた石油危機が原因で、高い価格の石油とその不安定性によって経済が極めて大きい影響をうけ混乱が起きた。このようにエネルギー問題はE³空間のなかで主たる論点が、環境破壊、エネルギー資源の涸渇、経済への影響およびこれに伴う周辺の技術が目標とする方向も推移して来た。

現在わが国ではエネルギーの長期にわたる安定的確保と効率的利用のために政策が示され、多くの代替案が提出されている。まずわが国の状況が分析されて、

* 東京工業大学、原子炉工学研究所 助教授

エネルギー需給構造の点から見て脆弱であるために消費原単位を減少せしめる方向に産業構造を変えつつ、省エネルギー型の社会へ移行させる。石油依存度を低減させ、資源の多様化を計り石炭・LNGの利用を拡大し、原子力の推進、国内資源資源の開発などがエネルギー戦略の基本的方向として確認されている。⁽²⁾これらは開発のために膨大な資金と人員の投入が予想され、しかもそのリードタイムが大きいので時間との競走である。社会・経済・技術の推移の時定数は大きいために一種の樂觀があるが、もはやわが国では多くの代替案のなかから選択し、その順序さえも決定すべき時期であるとする認識もある。

核融合、太陽エネルギーという豊富な供給である理想の目標があつて、現在までの石炭・石油からの過渡状態に原子力とその役割を果たすとする議論がある。またエネルギー問題は本来単純なもので石炭と石油の間に原子力が分け入ってきたことが混乱を引き起しているとする評論がある。⁽³⁾本誌にもソフトエネルギー・パスに関する報告がある。とりわけ原子力の分野では高速増殖炉等の技術が資源的な制約を打開する可能性があつて、この技術の開発効果を定量的に評価する必要性がでてきている。⁽⁴⁾⁽⁵⁾それは電力を発生しつつ燃料であるプルトニウムを生産できる型式の原子炉であるためである。

このような認識・提言は、多くのエネルギー源を組合わせて実現可能な将来の自由度をできるだけ拡大する努力が必要であることを示している。かくして考察すべき因果関係は莫大なものとなってくる。モデル分析が必要となる背景がある。また、各種の提案・代替案はトレードオフの関係にある目標を必ず含んでいるので適切な調和を保たねばならない。このことは最適化問題としての問題設定が可能であり、モデル分析になじむ背景である。

2. エネルギー・モデル

エネルギーの流れを、その供給から最終需要で利用・消費されるまでのプロセスをシステムという視点から跡づけることができる。エネルギー・システムとは、この流れに沿ったプロセスで構成され、構成要素がある目標を達成するために有機的に機能するものである。⁽⁷⁾ この流れは供給から採掘、輸送、精製・精練・加工、転換・発電、貯蔵、輸送・送配電などを經由して最終消費に至る種々のパスによって構成される。供給系には石炭、石油、ウラン、水力、LNG、太陽、地熱などがある。最終需要系は大きく分類して産業用、民生用、輸送用から成っている。文献(7)、(9)に良い説明図がある。数理計画法に慣れている読者は古典的輸送問題を想起して欲しい。さてエネルギーの流れがプロセスを通過することにある効率・得率が関わりをもち、環境にインパクトを放出し、経済効果をもたらす。エネルギーの最終需要は経済に従って決定される。ここに述べたものはFuel Mix, Technology Mixの最適化問題に有効とも言うべきシステムを説明したが、これに投入・産出(産業連関, I/O)モデルなどによって経済の力学が連立している。わが国では石油を戦略物質とする国、原料炭を輸入している国、経済が密接に結びついている国などが広い意味の環境・周囲として存在する。このようなことが、エネルギー・システムのひとつの例であり、モデルの1例である。

エネルギー・システムは階層構造をもち、幾つかのサブシステムから成立している。たとえばマクロ経済成長、産業連関、電力供給、石油精製、核燃料サイクルのシステム、未来技術のシステム、NO_x、SO_x、⁸⁵Kr、粉じん、温排水などの放出システムからできている。これらが各々に内部をもち周囲・境界で分離され、互に種々の作用をしている。またエネルギー・システムはE³空間での目標あるいは目的規準をもつ。たとえば経済合理性、供給安定性、環境安全性、有効利用性などが考えられ、しかもこれらは互にトレードオフの関係にあるのが普通である。

3. モデル分析の手順

分析の対象が何であるかを決めると、その目的を考える。技術評価について問題設定されることが多い。どの時期にどうゆう技術を導入すれば、資源、環境、経済の面から安定した供給力が確保できるか、あるいはその技術導入によって望ましい状態への推移の可能

性を求める。またエネルギーの需給予測をモデル分析の目的にとる場合も多く、信頼のおける予測は種々の分野の政策決定に直ちに反映される。また経済とエネルギーの相互作用の理解を目的として、理論的背景を準備しシステムの滑らかな構造改革をさせるあるいは突然の混乱を制御する方策を考察する。

つぎに対象の広がりあるいは境界を決める。サブシステム群による階層化を明確にする。多目標の問題設定とするかあるいは単一目標とし他の側面は外生的な境界条件として与えることになるかを定める。環境放止量を制約条件式で表わしコストという単一目標を最小にする場合は、これに相当する。本来は内生変数であるものを前提・仮定を置いて外生化して境界として与えるなど操作を施す。

モデル分析の目的になじむ数学的手法を選択する。線型計画法で最適解を求める。システムダイナミクス(函数発生器、非線型要素、比較器などを装備するアナログ計算機を想定すると良い。)によって、多数回のシミュレーションを試みる。産業連関表による予測、マクロ経済の非線型連立方程式として初期値問題を解く予測する。最大原理によって最適解を得ようとする。

モデルと整合性のあるデータを作成する。文献調査・収集・分析・評価・縮約などの過程を経て数量化する。将来の技術には推定・外挿が必要にならうし、長期のタイム・スパンではコストを仮定せねばならない。

モデル分析の数学的な解は、自然科学に於ける姿勢と同じ要領で意志決定への材料としての文章化と図表化される。この場合、仮定や前提が多すぎると但し書きのついた論理の複雑な結論となり、モデルのもつ透明な分析力が損われる。これとは逆に極めて微細な因果関係まで取込んだモデルとすると、本来単純である筈の将来の選択枝が簡単な方法で取り出すのに勇気が必要になることが起こる。分析モデルの作成には独創性と洞察力が要求される理由が、ここにある。

4. エネルギー・モデル分析⁽¹⁰⁾の役割

エネルギー・モデルによる分析では、問題の解を得ることよりもエネルギー問題の枠組みの整理のほうに多くの意義がある。つまりモデルは信頼性の高い予測を示すことや望ましい状態へ移行してゆく過程を描写するのに有効であるのは当然としても、モデル作成者の考察と判断を超えるものではない。モデルを活用した者は直面する問題の理解が深まり、モデルの示すいわば理想解と現実問題の差異を吟味しつつ将来の代替

案の展開が可能となる。

モデル分析は、本質的に再現性のない社会・経済現象であるエネルギー問題に対して（たとえば石油危機の把握に対して）ある論理と主張をもった実験道具という働きをもつ。産業構造の変化の結果として、ある将来の時間断面での需給を予測し国民経済的に得策であるかどうかを考察するとして、経済成長率、GNP弾性値、1次エネルギー輸入可能量、転換設備の容量・効率などの各種の条件・制約が解に及ぼす影響やその意味が、モデル分析であるがゆえにエネルギー問題が再現されて始めに設定した論理と主張のもとで問題が十分に観察、把握される。

モデル分析の実際的な役割は問題の枠組みを整理し、将来の代替案の集合を広く示して、意志決定のために判断材料を提供することである。

この意味での外国に於けるモデル分析のうちで、エネルギー政策の立案の道具としての役割を果たした積極的なものを紹介する。Jorgenson⁽¹⁶⁾はDRIモデル（モデルの概要は文献(7)を参照のこと。）を用いて、1974年に米国のエネルギー需給の長期展望に関する報告を発表して、この国の政策分析シミュレーションの基礎データを提供している。すなわちFord財団による“A Time to Choose”であり“Project Independence Report”である。Hoffman⁽¹⁴⁾はBESOMを用いて、米国全体のエネルギー・システムの計画と新技術の評価のためのフレーム・ワークを目的とした。そのデータはエネルギー研究開発局の報告書⁽¹⁷⁾として“A National Plan for Energy R & D”に於けるエネルギー供給分析の作成に利用された。Manne⁽¹⁸⁾のETAMACROモデルは米国の高速増殖炉計画の決定分析に用いられた。国際エネルギー機関（IEA）では1979年度末までにエネルギー新技術をどのようなスケジュールで導入・稼働させてゆくかということを機関としての戦略を求めべく作業が進行している。分析作業の一部にMARKALモデルが供されている。なおエネルギー・モデルに関する調査はCharpentier⁽¹⁹⁾にあって156件が収集され、そのうちの3回目の調査はソ連のモデルに限定している。わが国のモデル調査は文献(10)(20)にある。

わが国ではモデルが問題の枠組みの整理という機能によって意志決定の判断材料を提供する場面は、最適エネルギー配置モデル（東京ガス）⁽¹⁰⁾、エネルギー需要予測計量モデル（日本エネルギー経済研究所）⁽¹⁰⁾に僅かに見られる。また総合エネルギー調査会⁽²¹⁾による長期エ

ネルギー需給の見通しなどに於いても何らかのモデルを用いているのであろうが、その分析を陽に表わす習慣がない。しかし国全体のレベルよりも、そのサブシステムになるエネルギー産業関連の企業になると、モデル分析の有効性が示されている。つまり枠組みの整理から示された選択枝は業務の遂行という明確な目的のためにモデルの解そのものを利用する者があるという理由による。

4. エネルギー・データの整備⁽¹²⁾⁽¹³⁾

エネルギー・データとはエネルギー関連の諸々のデータを意味していることにする。まずエネルギー・データのモデル従属性とモデル独立性について述べる。モデルは作成者によって個別の目的と方法論・数学的表現をもたされており、さらに各種の広がりのある対象に適応される。たとえば国全体の広がりを分析するときは、国レベルで平均した火力発電所の効率、建設コスト、NO_xの放出量などの原単位が必要となるし数量的表現も実数値型であるとか係数値型とかのどちらかが選ばれる。同様に企業のサービスエリアで平均したガス・ストーブの効率、単基発熱量が要求され、長期の広がりをもつ分析では2000年のエネルギー・プラントのコストが現時点換算で必要になる場合もある。このようなデータの状態をモデル従属ということにする。一方、石油専焼火力の国レベル平均の効率を求めようとするとき、この装置の型式、容量、稼働率、運転年数とその分布から評価・縮約して平均値が求まる可能性がある。これらデータはモデル独立である。このように多くの場合モデルの運用に便利なモデル従属データはモデル独立なものから導かれる。勿論エネルギー・経済関連のデータや未来技術のデータには、始めからモデル独立であると思倣して出発するものもある。一般的にモデル従属のデータはモデル独立のものから作成されるべきである。

現在わが国のエネルギー・データは総合エネルギー統計に見るように、輸入、生産、需要などのエネルギーの量的な面をマクロに整備されている。モデル分析に利用できる程に編集されていない。マクロ経済指向の分析に耐えるようにしたエネルギー・マトリックス⁽²²⁾が最近になって発表された。モデル分析に必要なデータはエネルギーの性質的な面の統計である。すなわちエネルギーの利用形態、変換の際の毒物放出量、需要端でいえば各種の装置における温度、圧力、電圧の範囲などのことである。エネルギーのプロセスを通過す

るときの経済的、技術的、環境的データといわばエネルギーの性質的な面のそれである。多種類のこれらのデータは測定、集積、数量化への処理を考えると大きい困難があることは事実であるが、モデル分析には必要であって緊急に準備されることが望まれる。それらのデータが現存している部分もあろうが各種の機関・研究者に散在し、互に整合性を欠いて必ずしも体系的な活用が期待できる状態ではない。

モデル独立のデータからなる共有のデータの集合体、すなわちエネルギー・データ・ベースの開発を心掛ける時期に来ていると思われる。データ・ベースの或る概念設計⁽¹²⁾⁽¹⁵⁾のうちのモデル分析に提供されるデータの作成の過程を紹介する。プロセス、資源、地域、時間などの軸上に経済・環境・技術に関するモデル独立の原始データがある。これらの一部は実測値であったり一部は加工データを原始データとして見做すもある。ともかく原始データから検索子、変換子、推定子、平均子などという機能によってある単位系で記述された数値情報が信頼度・精度を付記して出力され、同時に非数値情報としてデータの出典が得られる。また未来技術の開発進度に従って更新・改訂子が原始データをアップデートするような仕組みである。開発体制、資金、運用などの議論⁽¹³⁾もあるが省略する。

海外のエネルギー・データ・ベースを追跡してみる。まずこの種のデータ・ベースの開発の背景を述べ、ついでに（極めて悪い表現であるが）開発の努力と熱意を投入金額で示すことにする。

米国をはじめとして、この開発と利用は活発化しつつある。その理由は大量の良質データを必要とするシステム分析手法の発達と、とりわけ政策の立案・決定者のこれに対する信頼の大きいこと、大量複雑なデータ処理に関する電算機利用技術の発達、予測とか未来の技術に関して適切な研究活動が活発であること、データの交流の促進と人的資源の交流が盛んであることなどが背景にある。たとえば米国Brookhaven国立研究所には、種々の目的のためにデータ・ベースがあるが、このうちのEMDBと呼ばれるものの開発の努力を紹介する。1974～1978年に約180万ドル（5億700万円）をエネルギー省、環境保護庁などが出資して、ソフトウェア・ハウスに作業を担当させ開発したものである。国際エネルギー機関のそれは、1975～1978年にこの機関が支援し各国代表がBrookhaven研究所と西独のユーリヒ原子力研究所に集まって協力したものである。またヨーロッパ共同体のSEEDBと呼ばれるデータ・

ベースは加盟9ヶ国と共同体全体のエネルギー・システムのFuel Mixおよび投資政策の最適化を図るモデル分析をとりあえずの目的としている。その努力は1976年に着手して現在もお作業が進められているが、2ヶ年間で約380万EUA（約516万ドル）であり、各国は毎年25万ドルを投資している。

5. おわりに

現在の、また超長期のエネルギー問題に対処する政策の確定と遂行という明確な目的のためにモデルの解そのものを活用したいとする利用者がある筈である。モデル分析は、繰返しになるが、問題の枠組みを整理して問題に対する選択枝を示し意志決定の判断材料を提供するという機能をもつ。現状ではモデル分析者と、問題の解あるいは理想解の利用者が別離しているので、代替案の選択などに意志決定者自身が計画プロセスに参画することが陽に現われていないのか、あるいは全くない。このことがエネルギー問題に於けるモデル分析の有効性・限界を示す本質的部分であろう。意志決定者とモデル分析者の相互の議論とその収束が望まれるところである。この経験を積み上げる努力が必要であり、モデル分析の限界を性急に結論してはならない。

わが国よりもエネルギー自立度の高い米国でさえもEnergy Modeling Forum（EPRIが支援して、Stanford大学が運営している）といわれる会合を持ち、利用者と分析者の議論の場が多く設けられてきている。

しかしモデル分析が十分に発達したものでないのも事実である。経済・エネルギーの相互作用の把握、システムの構造決定、システムの境界条件・周辺性、理想解の導出の際に、モデル作成者は方法論に独創性を発揮し多くの試作がなされている。技術評価、エネルギー需給の予測、経済的理解、エネルギー関連業務の補助の役割を果すべく、作成者は創造性の高い論理の展開と自由な主張をモデルに含ませる努力が続いている。このようにモデルには本質的な性格があり、多くの自由度ゆえに一層の学問的発展が期待される。

モデルの出力する結果を定量的・数量的表現を与える根幹の1つにエネルギー・データ・ベースがある。しかしながらデータ・ベースについての関心は大きいものの、その開発・研究に資金と人材の投入を心掛けない現実がある。また、たとえば需給予測にモデルを用いようとする価格弾性値などのデータが不十分であるためにモデルの効用が表われない、そこで弾性値をベースにした経験的な積み上げによるアプローチに

依るという現実もある。データ・ベースの現状を下世話に言えば、長崎のオランダ通辞を訪ねて比較的少い言葉の交換で物事を推量し、結論している。極端な場合には仮定・前提を通り過ぎて結論のみが町内の長屋の隅々まで独り歩きする。市河三喜編の大英和辞典の出現が望まれつつもオランダ通辞を奇妙に権威者とみる危険をもっているというところである。ついでに大英和辞典は紙と印刷活字で作られている、その過程に英知が集約され、過程そのものが生産物である。長い期間にわたった大きい予算がこれに投入されたとの話を聞いていない。しかし活字、紙、印刷機という生産物のためには大きい資金投下があったことは知っている。ともあれモデル作成の方法論を進展させると同時に、速かにエネルギー・データ・ベースを整備せねばならない。

この報告は文献(10)~(15)などの作業に筆者が参加したときに多くの指導と示唆を受けたことによる。ここに安成弘教授(東大)、小川洋教授(電中研、現・千葉工大)、山地憲治博士(電中研)、竹野万雪氏(CRC)、立花昭氏(原電)に謝意を表わします。

文 献

- 1) Meadows, D. H. et al : The Limits to Growth, 大来訳成長の限界, タイヤモンド社 (1973)
- 2) 向坂編 : 200年のエネルギー, 総合研究開発機構刊, 日本経済新聞社 (1978)
- 3) 星野芳郎 : エネルギー問題の混乱を正す, 技術と人間社 (1978)
- 4) 山地 : 炉型選択と核燃料資源利用効率, 原子力工業, **24**, 8 (1978)
- 5) 田中 : ネットエネルギー分析による最適炉型選択, 京大修士論文 (1979)
- 6) 小川 : エネルギー・システムの分析, その1, 電気学会誌, **96**, 873(1976)
- 7) 小川 : エネルギー・システムの分析, その2, 電気学会誌, **96**, 1104 (1976)
- 8) 武井 : エネルギー・システムの分析, その4, 電気学会誌, **97**, 105(1977)
- 9) 鈴木・清瀬 : 長期エネルギー戦略のシステム分析, 原子力学会誌, **18**, 479(1976)
- 10) エネルギー・モデル開発の現状とその機能, 総合研究開発機構, NRO-53-2 (1979)
- 11) NIRAエネルギー・モデルの開発, 総合研究開発機構, NRO-53-4 (1979)
- 12) エネルギー・データの整備, 総合研究開発機構, NRC-78-3
- 13) エネルギー・データ・ベースの開発に関する提案, 総合研究開発機構 (1978)
- 14) エネルギー配分最適化プログラムの日本への適用, 総合研究開発機構 (1977)
- 15) Takeno, Nakayama, Takahashi : Japanese Energy Data Base --Concept & Conceptual Design--, Chem. Economy & Eng. Review, **11**, 7 (1979)
- 16) Jorgenson & Hudson : U. S. Energy Policy and Economic Growth, 1975-2000; Energy Modeling Conference, IIASA (1974)
- 17) ERDA-48(1975), ERDA-76-1 (1976) など。
- 18) Manne : ETA-MACRO; A Model of Energy-Economy Interactions, EPRI EA-592(1977)
- 19) Charpentier : A Review of Energy Models, No. 1, IIASA RR-74-10 (1974), No. 2 (1975)
- 20) エネルギー・モデル, 石油学会誌, **20**, 10 (1977)
- 21) 児玉 : 我が国のエネルギー政策, エネルギー資源, **12** (1980)
- 22) 日本のエネルギー・バランスのシステムとエネルギー・マトリックスの比較, 日本エネルギー経済研究所 (1979)

