

# 長期エネルギー需給展望の方法

キーワード：エネルギーモデル，エネルギー経済モデル，最適化モデル，シミュレーション型モデル，線型計画法，非線型計画法

齋藤雄志

## 〔要旨〕

電力中央研究所で昭和 56 年 3 月以来，長期エネルギー需給展望を作成し，公表しているが，本報告はその作成の方法，特にエネルギーモデルについて概説したものである。

長期エネルギー需給展望は，経済モデル（長期成長モデル，産業構造モデル）によって与えられる経済規模，産業構造を受けて作成されるが，3つのエネルギーモデルがそのために使用されている。第1は線型計画法による最適化モデル DEM-Optimal で，エネルギーシステムの総費用を最小にするようにエネルギー需給バランスを計算する。しかし最適化モデルによる解はしばしば非現実的な要素を含んでいるので，このモデルによる計算結果を補助情報としながら，総合的な判断をとり入れたシミュレーション型エネルギーモデル DEM-Parametric によって最終的なエネルギー需給シナリオが作成される。このほかに長期的，マクロ的なエネルギーと経済の相互作用をチェックするためにエネルギー経済モデル ETA-MACRO（スタンフォード大開発）も利用されている。

- |                             |                         |
|-----------------------------|-------------------------|
| 1. はじめに                     | ル DEM-Parametric        |
| 2. 長期エネルギー需給展望のための全体フレームワーク | 5. エネルギー経済モデル ETA-MACRO |
| 3. 最適化型エネルギーモデル DEM-Optimal | 6. 長期エネルギー需給展望の問題点      |
| 4. パラメトリックエネルギー需給バランスモデル    | 7. あとがき                 |

## 1. はじめに

電力中央研究所では昭和 56 年 3 月以来，長期エネルギー需給展望を作成，公表しているが，ここではその作成の方法を概説する。

電力中央研究所が作成する長期エネルギー需給展望は，2000 年あるいはそれ以降に対するものが中心となっている。それは，当研究所の技術研究所としての性格に依存している。つまり，多くの新しい主要なエネルギー・電力技術の実用化時期は 2000 年前後，あるいはそれ以

降であるために，それらをわが国のエネルギー・電力需給の中に位置づけて研究開発の方向を定めるには，2000 年あるいはそれ以降に対する長期エネルギー需給展望が必要である。いうまでもなく，将来のエネルギー需給には多くの不確定要因があり，長期のエネルギー需給を正確に「予測」することは不可能である。長期にわたる展望は，予測→検証→修正というプロセスを経ることはないので，それを「予測」であると主張しても，客観的意味を持たない。予測の結果が直接に予測者に強くフィードバックす

ることもないからである。むしろ長期的な展望は将来を計画するためのフレームワークであると考えた方が妥当である。しかし長期的将来には大きな不確定性があっても、我々はそれに関して無情報ではなく、歴史の流れの中からある一定傾向をくみとることができるかもしれないし、現時点に関する情報の中に様々な将来に関する情報が含まれていることもある。仮にこのような展望に、結果的に多少の誤りがあったとしても、将来を計画的に考えることに現時点的の意味があり、無計画性からくる無駄な社会的コストをより小さくすることが可能である。

長期的展望の方法は、その性格からいって、短期的予測の場合と異なる。明らかに過去の短い期間の時系列データに基づく計量的アプローチを利用することはできず、一定の判断基準をベースとすればどのようなエネルギー需給の形態が望ましいか、あるいは我々自身の総合的判断としてどのようなビジョンを持つことが妥当かといったことを考慮しながら展望を作成しなければならない。この意味で、長期展望は、規範的・総合的あるいは直観主義的なものにならない。

我々は展望作成とその基礎的分析のために、様々な手法を利用するが、これらの手法も上記の目的のために使用できるものでなくてはならない。そのため、現在、我々が利用する方法＝エネルギーモデルは、最適化手法と直観主義的な分析に適したパラメトリックなモデルを主体としている。

## 2. 長期エネルギー需給展望のための全体フレームワーク

電力中央研究所における長期エネルギー需給展望は、超長期エネルギー戦略研究会の作業の

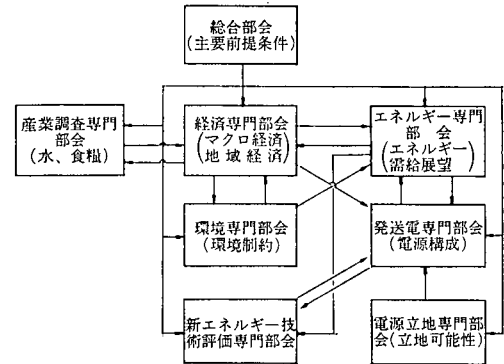


図 2.1 超長期エネルギー戦略研究会のフレームワーク

一環として図 2.1 に示すエネルギー専門部会において進められている。各専門部会とのつながりは次のようになっている。まず、経済専門部会や総合部会によって、経済成長の枠組が与えられる。方法としては、長期成長モデルやデルファイ予測等が使用される。エネルギー価格シナリオその他の展望の基本的前提条件は、総合部会によって決定され各部会に与えられる。エネルギー専門部会ではこれらを受けて、エネルギー需給展望を作成する。その一つとして作成された電力需要予測は発電電専門部会に手渡され、そこでそれに対する電源構成や将来の電気事業に関する様々な技術的問題が分析される。その分析のための一つの前提条件である電源立地問題は電源立地専門部会で調査・分析される。エネルギー専門部会、発電電部会で検討されたエネルギー・電力需給は、新エネルギー技術評価専門部会で新エネルギー技術・新電力技術を評価する基礎となる。環境専門部会その他は経済専門部会で検討する経済展望、エネルギー専門部会で作成するエネルギー需給展望の制約条件を検討する。

以下では、このうちエネルギー需給の展望に利用される各種のモデルとその相互関係について

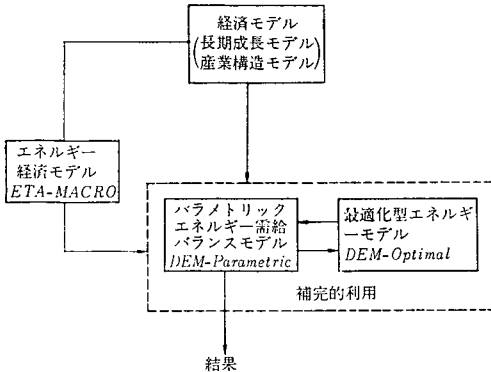


図 2.2 エネルギー需給展望のためのモデルの相互関係

て説明する。それを図 2.2 に示す。

これらのモデルのうち長期エネルギー需給の分析に中心的に利用されるのが、最適化型エネルギー需給モデル DEM-Optimal (DEM-O) とパラメトリックエネルギー需給バランスモデル DEM-Parametric (DEM-P) である。前者は LP (線型計画法) によるエネルギーモデルであり、電力・石油・石炭・都市ガスの供給部門と産業・輸送・業務・家庭の需要部門を持ち、需要、供給両部門を含む全エネルギーシステムのコストを最小にするようにエネルギー需給バランスを決定する。

最適化モデルは 1 つの目的関数からみて最も望ましい形態を分析することができるが、表 2.1 に示すように解の現実性その他の問題点を持っている。また、しばしば大型の最適化モデルはその操作性が低い。

この点を補い、長期エネルギー需給に関する様々な総合的情報をとり入れながら長期エネルギー需給分析を行いそのシナリオを作成していくのがパラメトリックエネルギー需給モデル DEM-Parametric である。これらの 2 つのモデルは、一方は最適化型であり、他方はシミュレーション型であり、短所を互に補いながら利

表 2.1 LP による最適化型エネルギーモデルの長短所

長 所	短 所
<ul style="list-style-type: none"> <li>・最小コストのシステムが構成できる</li> <li>・コストによるエネルギー競合関係が分析できる</li> <li>・限界費用が計算できる</li> <li>・シミュレーションモデルでは見落としがちなエネルギー需給のやりとりが見える</li> <li>・エネルギー技術の評価(経済性のみ)に利用できる</li> <li>・合成燃料導入問題など超長期のエネルギー需給分析に向いている(評価基準が明確であるため)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・複雑な LP 型モデルは操作性が低い</li> <li>・単純な LP 型はあまり意味をもたない</li> <li>・暴走性を有する(解の不連続性)</li> <li>・弱い制約条件は非現実的解を与える</li> <li>・強い制約条件は LP の利点を失なわせる</li> <li>・ソフトなモデルのコスト最小解は意味を失っているものが多い</li> <li>・予測やシナリオ作成には向かない</li> </ul>

ソフトなモデル…構造やパラメータにあいまいさが多いモデル

用される (DEM=Dual Energy Model)。

これらのエネルギーモデルでエネルギー需給バランスを計算するためには、その前提として経済成長や産業構造が与えられなければならない。これらに関する計算を行うのが、長期成長モデルや産業構造モデルである。

本稿ではこの 2 つの経済モデルについての説明を省略し、エネルギーモデル関連のみ概説する。

また、図 2.2 に示すエネルギー経済モデル、ETA-MACRO はマクロ的なエネルギーと経済の相互作用をチェックするために利用される。

### 3. 最適化型エネルギーモデル DEM-Optimal

最適化型エネルギーモデル DEM-Optimal は Hoffman による BESOM や IEA の MARKAL と同様に、線型計画法によってエネルギーのフローを輸送問題として定式化した

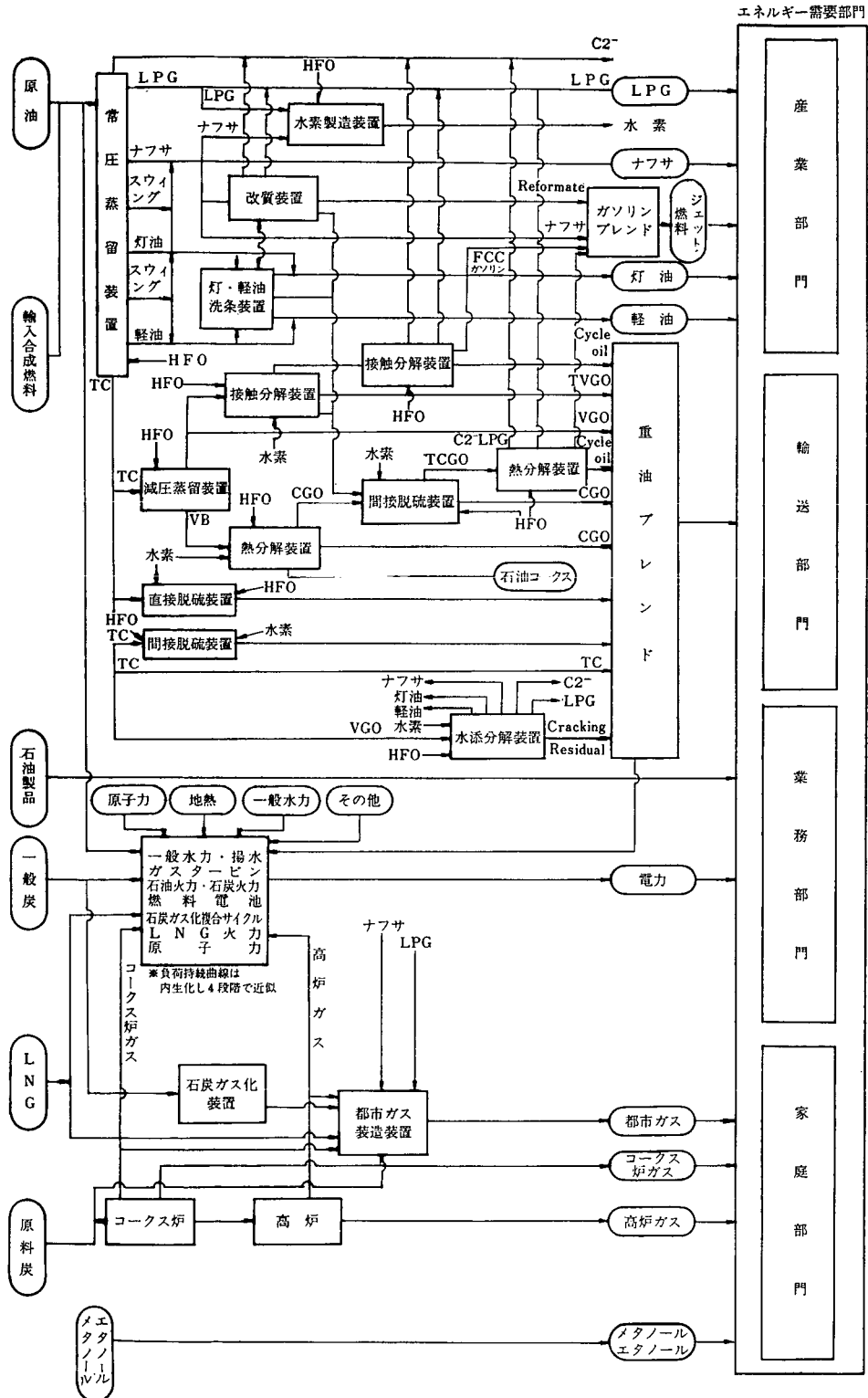
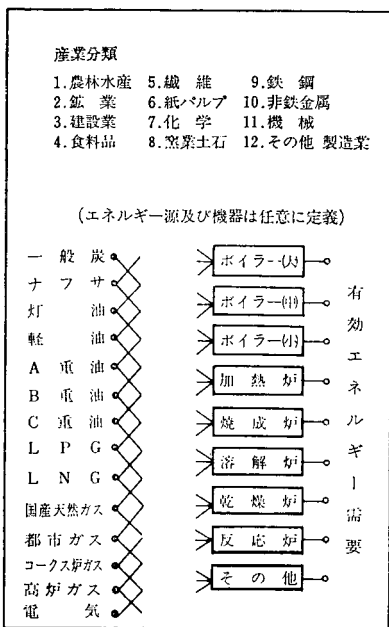
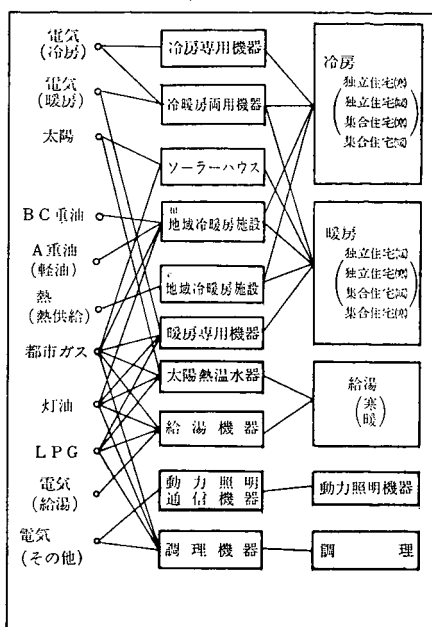


図 3.1 最適化エネルギーモデル DEM-Optimal

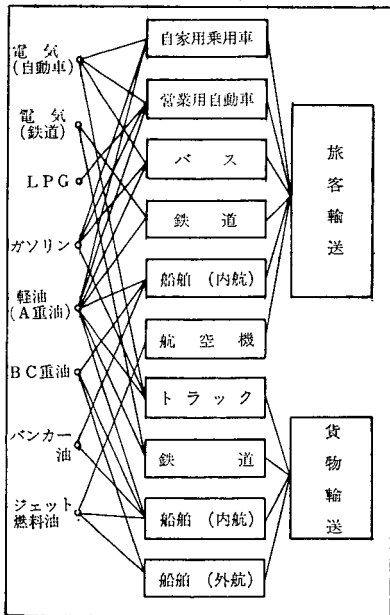
産業部門



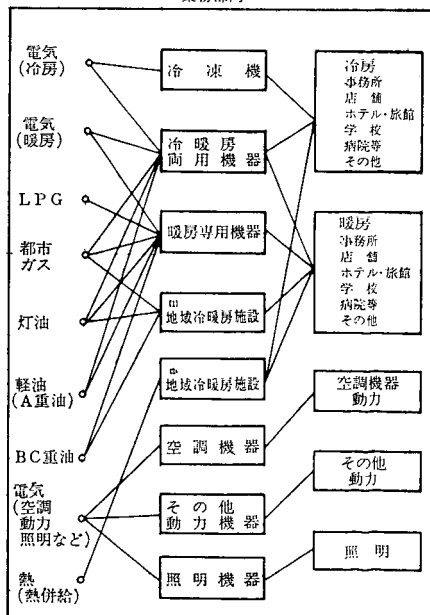
家庭部門



輸送部門



業務部門



プロセスモデルである。図 3.1 に DEM-Optimal の全体の構成を示す。

DEM-Optimal は単一年のエネルギー需給バランスのみを対象とするモデルであって、多段 LP モデルとはなっていないが、これはそのようにすることによって、単一時点のエネルギー需給バランス（特に石油部門と電力部門の相互関係）を詳細に扱う一方で、モデルの大きさを許容限度内におさえるためである。経験によれば、多段のエネルギーモデルを一段のエネルギーモデルで近似しても多くの場合、あまり大きな問題が生じないことも理由の 1 つである。

モデルは石油部門、電力部門、石炭部門、都市ガス部門等の供給部門と、産業部門、輸送部門、業務部門、家庭部門等の需要部門より成立っており、各需要部門の有効エネルギー需要が DEM-Parametric より与えられ、装置コストと輸入・国産のエネルギーコストの合計を最小にするように全体のエネルギーフローの最小化が行われる。

エネルギー供給モデルのうち石油部門は各種の原油が常圧蒸溜装置を通して各溜分に分けられ、さらに改質、分解、脱硫などのプロセスを経て石油製品として、最終エネルギー需要に供給されたり、電力や都市ガスへ原燃料として供給されるまでの間のフローをモデル化したものである。原油の油種は 11 原油で代表させてあり、石油製品としてはオフガス、LPG、ナフサ、ガソリン、ジェット燃料、灯油、軽・A 重油、B・C 重油、石油コークスに分けられている。

電力部門サブモデルは原油、石油製品、石炭、LNG、あるいは原子力、水力、地熱などのエネルギー源が各種の発電設備を介して電力需要に供給されるまでのエネルギー・フローを

モデル化したものである。発電方式は重原油火力、排脱重原油火力、石炭火力、石炭ガス化複合サイクル、石炭液化油火力、LNG 火力、ガスタービン、燃料電池 I (LNG)、燃料電池 II (水素)、揚水発電の 10 種に分けられている。更にこれらの発電設備は、需要地からの距離の相異によって遠隔型、近傍型、直結型の 3 種類に分類されている。(原子力、一般水力は外生)

石炭部門サブモデルは輸入あるいは国内で採鉱された石炭が各産業で消費されたり、あるいは発電設備、都市ガス製造設備などを介して間接的に最終エネルギー需要で消費されるまでのフローを対象としている。石炭は大きく原料炭と一般炭、そして国内産と輸入に分類されている。需要部門は主として鉄鋼部門、石炭火力(石炭ガス化複合サイクル、液化油火力を含む)、都市ガスなどである。

都市ガスサブモデルは LNG、ナフサ、LPG、石炭、国産天然ガスなどの原料が都市ガスに転換されるプロセスをマテリアル・バランスとして表現したものである。

以下では本モデルのうち、最も重要な石油部門と電力部門のみを説明する。

#### A. 石油供給サブモデル

##### (1) 原油輸入

$$cru(i) \geq CR(i) + CB(i) \quad (3.1)$$

$cru(i)$  :  $i$  原油の輸入可能量

$CR(i)$  : 精製用原油輸入量

$CB(i)$  : 電力用原油輸入量

##### (2) 製油所装置

$$cap(iu) \geq \sum_l UN(iu)(l) - UE(iu) \quad (3.2)$$

\*) 以下、基本的な線型構造を説明する。なお、ここでは大文字英字は内生変数名を表わし、小文字英字は外生変数名を表わす。

$cap(iu)$  : 装置 capacity

$UN(iu)(l)$  : 装置  $iu$  にチャージされた半製品  $l$  の量

$UE(iu)$  : 新設 capacity

$l$  : 該当する装置へチャージされる半製品コードかあるいは原油の番号になる。

[半製品を原油ごとに取り扱わなければならない場合は原油の番号になる。]

(3) 半製品バランス (常圧蒸溜装置からの場合)

- ・原油をチャージするバランス式 (常圧蒸溜装置のみ)

$$CR(i) = UN(iu)(i) \quad (iu=1) \tag{3.3}$$

$CR(i)$  : 精製用原油輸入量

$UN(iu)(i)$  :  $i$  原油が常圧蒸溜装置に入る量

$iu=1$  :  $iu=1$  は常圧蒸溜装置

- ・装置間の半製品バランス式

- ・半製品バランス式

$$\begin{aligned} \sum_{iu} yie(iu, k, i) \times UN(iu)(i) &= \sum_{iu} UN(iu)(i) && \dots\dots \textcircled{a} \\ &+ \sum_p PR(p) && \dots\dots \textcircled{b} \\ &+ \sum_{k'} SW(k)(k') && \dots\dots \textcircled{c} \\ &+ \sum_p JG(k)(p) && \dots\dots \textcircled{d} \\ &+ \sum_p (i)(k)(p) && \dots\dots \textcircled{e} \end{aligned} \tag{3.4}$$

$yie(iu, k, i)$  :  $iu$  装置から出る  $i$  原油の半製品  $k$  の収率

①  $UN(iu)(i)$  : 半製品  $k$  が装置  $iu$  にチャージされる量

②  $PR(p)$  : 製品  $p$  の量 ( $p$ =LPG, ナフサ, 灯軽油)

③  $SW(k)(k')$  : 半製品  $k$  が半製品  $k'$  にスウィングする量

④  $JG(k)(p)$  : 重油以外の製品  $p$  のための混合材  $k$  の量 ( $p$ =ジェット, ガソリン)

⑤  $(i)(k)(p)$  : 重油製品  $p$  のための  $i$  原油の混合材  $k$  の量 ( $p$ =重油)

(4) ガソリン混合制約式

- ・アロマ制約

$$ar(p) \times PR(p) \geq \sum_k ar(k) \times JG(k)(p) \tag{3.5}$$

$ar(p)$  : ガソリン製品のアロマ値

$ar(k)$  : 半製品のアロマ値

- ・オクタン価制約

$$oc(p) \times PR(p) \leq \sum_k oc(k) \times JG(k)(p) \tag{3.6}$$

$oc(p)$  : ガソリン製品のオクタン価

$oc(k)$  : 半製品のオクタン価

- ・蒸気圧制約

$$vp(p) \times PR(p) \leq \sum_k vp(k) \times JG(k)(p) \quad (3.7)$$

$vp(p)$  : ガソリン製品の蒸気圧

$vp(k)$  : 半製品の蒸気圧

- (5) ガソリン製品バランス式

$$PR(p) \leq \sum_k JG(k)(p) \quad (3.8)$$

- (6) ジェット燃料の制約

$$75.0 \times JG(03) = 25.0 \times JG(05) \quad (3.9)$$

\* 03 はナフサ, 05 は灯油であり, ジェット燃料のナフサ対灯油の混合比が 25 対 75 である事を表わす。

- (7) ジェット燃料のバランス

$$PR(p) = JG(03) + JG(05) \quad (3.10)$$

- (8) 混合制約式

- ・硫黄分制約式

$$s(p) \times PR(p) \geq \sum_k \sum_i s(k, i) \times (i)(p)(k) \quad (3.11)$$

$s(p)$  : 製品硫黄分規格

$s(k, i)$  :  $i$  原油  $k$  半製品の含有硫黄分

- ・流動点制約

$$pp(p) \times PR(p) \geq \sum_k \sum_i pp(k, i) \times (i)(p)(k) \quad (3.12)$$

$pp(p)$  : 製品流動点規格

$pp(k, i)$  :  $i$  原油  $k$  半製品の流動点

- ・比重バランス

$$sg(p) \times PR(p) \leq \sum_k \sum_i sg(k, i) \times (i)(p)(k) \quad (3.13)$$

$sg(p)$  : 製品の比重

$sg(k)$  :  $i$  原油  $k$  半製品の比重

- ・動粘度制約

$$vis(p) \times PR(p) \geq \sum_k \sum_i vis(k, i) \times (i)(p)(k) \quad (3.14)$$

$vis(p)$  : 製品の動粘度

$vis(k, i)$  :  $i$  原油  $k$  半製品の動粘度

- (9) 重油ブレンドバランス式

$$PR(p) \leq \sum_k \sum_i (i)(p)(k) \quad (3.15)$$

- (10) 水素バランス式

$$\sum_{iu} \sum_i kyd(iu, i) \times UN(iu)(i) \geq \sum_{iu'} \sum_i kyd(iu', i) \times UN(iu')(i) \quad (3.16)$$

$kyd(iu, i)$  :  $iu$  装置から発生する水素原単位

$kyd(iu', i)$  :  $iu'$  装置が消費する水素原単位



B. 電力サブモデル

電力部門サブモデルでは、我国全体のエネルギー需給システムの中で電力の需給システムがいかにあるのがトータルエネルギーシステムのコストという観点からみて望ましいかを考察しようとするものである。具体的には電力供給に関しては、発電設備を発電方式によって13種類に分類し、それを3種類の立地タイプの分類と組み合わせて、その各々の設備が各々の立地分類の中でいかに新設されるのが望ましいか、さらにはまたそれらの設備が負荷持続曲線で与えられる需要をまかなうに際して、いかなる運転形態をとってどのような燃料を消費するのが効率的であるかを求めようとしている。また電力需要に関しては、産業用電力需要が産業別、利用形態別で年負荷持続曲線の中で外生的に与えられているのに対して、家庭用、業務用、輸送用の電力需要は、これらが将来の不確定な要因を含み、かつまた燃料としても石油製品、石炭、都市ガスなどの他の燃料との競合性を有することからもモデルの中で内生的に求める形をとっている。つまり電力需要の年負荷持続曲線は、全部が外生的に与えられるのではなくて一部が内生化されているとすることができる。以上のようにして電力需給システムの将来の望ましい姿を描き出そうとすることがこの電力部門サブモデルのエネルギーモデルの中における役割である。つぎにモデルの構造について述べよう。

まず発電設備に関しては、1980年を基準年とし、この時点に建設済みであってさらに目標年である2000年でも運転可能な発電設備を既設設備と呼び、それ以外の1980年以降に建設される発電設備を新設設備と呼ぶことにする。これらの既設、新設の発電設備は発電方式によ

て重原油火力、排脱重原油火力、石炭火力、石炭ガス化火力、石炭液化火力、LNG火力、複合サイクル火力、ガスタービン、燃料電池Ⅰ、燃料電池Ⅱ、揚水、一般水力、原子力の13種類に分類されている。さらにこれらの発電設備は、その立地タイプによって遠隔型（都市から離れた遠隔地に立地され、主として遠距離送電によって都市に供給されるもの）、近傍型（主として大都市あるいは大工業地帯周辺に立地され、比較的近距离の地域に供給されるもの）、直結型（主として都市などの需要地内に立地され、その周辺地域に供給されるもの）の3種類に分類されている。これらの発電設備による電力供給によって図3.2にあるような負荷持続曲線と与えられる電力需要をまかなうわけであるが、年負荷持続曲線は発電設備の運転領域としてベース、ミドルⅠ、ミドルⅡ、ピーク（B、MⅠ、MⅡ、Pと略記する）の4負荷領域に分けられ、時間帯としては図3.2にあるように、0、Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳの5時間帯に分けられている。しかしながら0時間帯は“瞬間ピーク”を表わすものであって、電力需要が年間最大となる“時刻”を示すものとする。

各々の立地タイプにおける発電設備およびそ

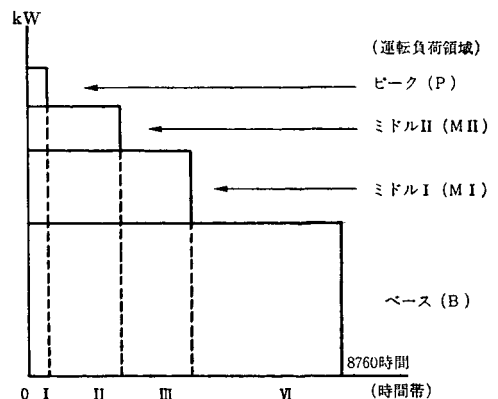


図 3.2 負荷持続曲線の概略

表 3.1 立地タイプ、発電設備、運転負荷領域、使用燃料の関連

	立地	発電設備	運転負荷領域	使用燃料
新設設備	遠隔型	重原油火力	B, MI, MII, P	重油, 原油
		排脱重原油火力	B, MI, MII, P	重油, 原油
		石炭火力	B, MI, MII, P	一般炭
		石炭ガス化複合サイクル	B, MI, MII, P	一般炭
		石炭液化火力	B, MI, MII, P	液化炭
	近傍型	重原油火力	B, MI, MII, P	重油, 原油
		排脱重原油火力	B, MI, MII, P	重油, 原油
		LNG火力	B, MI, MII, P	LNG
		複合サイクル火力	B, MI, MII, P	重油, 液化油, LPG, LNG
		燃料電池 I	B, MI, MII, P	LNG
		燃料電池 II	MI, MII, P	水素
	直結型	複合サイクル火力	MI, MII, P	重油, 液化油, LPG, LNG
		燃料電池 I	MI, MII, P	LNG
		ガスタービン	MI, MII, P	軽油
		揚水発電	MI, MII, P	
既設設備	重原油火力	B, MI, MII, P	重油, 原油	
	排脱重原油火力	B, MI, MII, P	重油, 原油	
	石炭火力	B, MI, MII, P	一般炭	
	LNG火力	B, MI, MII, P	LNG	
	ガスタービン	MI, MII, P	軽油	
	揚水発電	MI, MII, P		

これらの設備が運転する負荷領域とそれらの使用燃料との組み合わせは表 3.1 に示されるとおりである。

上に述べたような事項を大まかな前提として、電力部門サブモデルでは以下に述べるような内生変数、外生変数、入力データを用いてそれらの関係が数学的には線形の等式あるいは不等式の形で表現される。以下に 1) 変数および入力データ、2) 制約条件の順にその内容の概略を説明しよう。

1) 変数および入力データ

主要な内生変数は以下のとおりである。

- ① 各々の立地タイプ分類における各種の新設発電設備の設備容量
- ② 新設、既設を含めた各種の発電設備の負荷持続曲線の各運転負荷領域における運転出力——（各種の発電設備の運転方式を与

える）

- ③ 各種の発電設備の発電電力量とそれに対応する各種の燃料消費量——（発電設備の発電電力量は②で得られた値によって計算される）
- ④ 輸送部門における自家用、営業用の乗用車、バス、トラック、鉄道の各輸送手段別の負荷持続曲線中の時間帯別電力需要
- ⑤ 業務、家庭部門における冷房、暖房、給湯、空調・動力・照明の各利用形態別の負荷持続曲線中の時間帯別電力需要
- ⑥ 年負荷持続曲線の時間帯別電力需要の合計と瞬間ピーク需要およびこれらから得られる年負荷率

以下に掲げる量はモデルの中で外生的に与えられている。

- ① 原子力、一般水力（揚水を除く）、太陽光

発電，地熱，風力などの発電設備容量とそれらの負荷持続曲線中の時間帯別の運転出力——（特に原子力，一般水力に関しては過去のデータをもとにしてその設備容量から運転形態を設定してある）

- ② 各産業部門における負荷持続曲線中の時間帯別の電力需要——（産業別の電力需要量は各産業において利用形態別に需要モデルの中で合計量として得られるが，ここでは産業別，負荷持続曲線の時間帯別に外生的に与えられる）

入力データの主要なものは，以下のとおりである。

- ① 既設，新設を含めた各種の発電設備の運転負荷領域別の燃料消費率（燃料消費率は発電設備の年間の運転時間，つまり利用率によって異なるのを考慮している）
- ② 既設，新設を含めた各種の発電設備の運転方式別の利用可能率（設備の利用可能率の上限値が時間帯別に与えられる）
- ③ 立地タイプによる各分類別の各種の新設の発電設備の年当り資本費（設備建設費が立地条件によって異なるのを考慮している）
- ④ 供給予備率

2) 制約条件

このサブモデルで考慮されている制約条件の主要なものは以下のとおりである。

- ① 各種の発電設備の設備容量に関する瞬間ピーク時の kW 需要充足条件——（発電設備の瞬間ピーク時利用率，供給予備率，瞬間ピーク時の電力需要の関係として与えられる）
- ② 負荷持続曲線中の時間帯別需要充足条件——（各種の発電設備の運転によって負荷

持続曲線中の時間帯別の需要をまかなおうとするもので kWh の需要充足条件に相当する）

- ③ 揚水用動力，燃料水素製造用電力に関する制約——（深夜電力を用いて揚水発電のための水を上部池に上げるための電力消費，および燃料電池 II の燃料としての水素を製造するための電力消費を表わす）
- ④ 公害規制に伴う硫黄酸化物 SOx の量に関する制約
- ⑤ 発電電力量と各種の燃料消費量との関係に関する制約——（各種の発電設備の運転に伴う燃料消費を表わす制約で，電力部門サブモデルと他の石油，石炭などのサブモデルとを連結するものである）
- ⑥ 発電電力量と家庭，業務，輸送の各部門の電力需要との関係に関する制約——家庭，業務，輸送の各需要部門の用途別電力需要が負荷持続曲線中の時間帯別電力需要に分配されることを示す制約で，電力部門サブモデルを各需要部門モデルと連結するものである）

以下に上述の制約条件の各々に関して，その等式あるいは不等式表現を示す。

① 瞬間ピーク時電力需要 (kW) 充足条件

$$\sum_{i,j} \alpha_{ij} X_{ij} + \alpha_0 W \geq (1 + \delta) P_0 - \sum_j \beta_j H_j \tag{3.17}$$

- $\alpha_{ij}$  : 立地タイプ  $i$ ，発電方式  $j$  の新設設備の瞬間ピーク時の利用可能率
- $X_{ij}$  : 立地タイプ  $i$ ，発電方式  $j$  の設備の新設設備容量
- $\alpha_0$  : 揚水設備（新設分）の瞬間ピーク時の利用可能率
- $W$  : 揚水設備の新設設備容量
- $\delta$  : 供給予備率

- $P_0$  : 瞬間ピーク時の電力需要  
 $\beta_j$  : 発電方式  $j$  の既設設備の瞬間ピーク時の利用可能率  
 $H_j$  : 発電方式  $j$  の既設設備の設備容量合計

$$P_0 = \frac{1}{8760 \alpha} \sum_{i=1}^4 P_i d_i \quad (3.18)$$

- $\alpha$  : 予想される最高の年負荷率  
 $P_i$  : 第  $t$  時間帯の電力需要  
 $d_i$  : 第  $t$  時間帯の時間数

② 電力量 (kWh) 需要充足条件

- a) 発電設備別——(ここでは新設発電設備の運出力に関する制約を掲げることにする。既設設備の場合も同様にして設定される。)

$$\sum_{l \in L_{ij}} Y_{ijl} \leq \varepsilon_{ijl} X_{ij} \quad (3.19)$$

- $Y_{ijl}$  : 立地タイプ  $i$ , 発電方式  $j$  の新設発電設備の  $l$  なる運転負荷領域における運出力

- $L_{ij}$  : 立地タイプ  $i$ , 発電方式  $j$  の新設発電設備が運転されうる負荷領域の集合(表 3.1 の運転負荷領域の欄に相当する)

- $\varepsilon_{ijl}$  : 立地タイプ  $i$ , 発電方式  $j$  の新設発電設備が  $L_{ij}$  なる運転領域で運転される場合の設備利用可能率の上限値

- b) 時間帯別——(新設, 既設の発電設備の運出力の合計が時間帯別電力需要をまかなうことを示す)

$$\sum_{i,j,l} Y_{ijl} + \sum_{j,l} Z_{jl} + \sum_l U_l + \sum_l W_l \geq P_t \quad (3.20)$$

- $Z_{jl}$  : 発電方式  $j$  の既設発電設備の  $l$  なる運転負荷領域における運出力

- $P_t$  : 第  $t$  時間帯における電力需要 (内

生化された電力需要をも含む)

- ③ 揚水用動力, 燃料水素製造用電力に関する制約

$$\mu = \sum_{l=3}^4 (U_l + W_l) D_l / \{\eta(D_1 - D_2)\} \quad (3.21)$$

- $\mu$  : 揚水用動力 (kW)

- $U_l$  : 新設の揚水設備の第  $l$  運転負荷領域における運出力

- $W_l$  : 既設の揚水設備の第  $l$  運転負荷領域における運出力

- $D_l$  : 年負荷持続曲線中の第  $l$  運転負荷領域の持続時間数

- $\eta$  : 揚水発電設備の効率

$$\lambda = \sum_{l=3}^4 Y_{ijl} D_l / \{\sigma(D_1 - D_2)\} \quad (3.22)$$

- $\lambda$  : 燃料電池 II 用の燃料水素製造のための電力

- $\sigma$  : 燃料電池 II の発電効率

((3.22) 式中の添字  $i, j$  は, 各々燃料電池 II なる発電設備の立地タイプ, 発電方式を表わすものとする。)

- ④ SOx 規制に関する制約

$$\sum_{i,j} s_m (F_{ijm} + G_{jm}) \leq \Delta_m \quad (3.23)$$

- $s_m$  : 燃料  $m$  の硫黄分含有率

- $F_{ijm}$  : 立地タイプ  $i$ , 発電方式  $j$  なる新設の発電設備の燃料  $m$  の消費量

- $G_{jm}$  : 発電方式  $j$  なる既設の発電設備の燃料  $m$  の消費量

- $\Delta_m$  : 燃料  $m$  の硫黄分規制量

- ⑤ 発電用燃料消費に関する制約

- a) 新設設備分

$$\sum_{i,j,l} \varepsilon_{ijl} Y_{ijl} D_l \leq \sum_{i,j} \delta_m F_{ijm} \quad (3.24)$$

- $\varepsilon_{ijl}$  : 立地タイプ  $i$ , 発電方式  $j$  なる新設の発電設備を第  $l$  運転負荷領域で運転する場合の燃料消費率

$\delta_m$  : 燃料  $m$  の固有単位量当りの発熱量

b) 既設設備分

$$\sum_{j,l} \kappa_{jl} Z_{jl} D_l \leq \sum_j \delta_m G_{jm} \quad (3.25)$$

$\kappa_{jl}$  : 発電方式  $j$  なる新設の発電設備を第  $l$  運転負荷領域で運転する場合の燃料消費率

⑥ 各需要部門との関係を示す制約

ここでは簡単のために、産業あるいは家庭、業務、輸送の各需要部門の電力需要の用途を示すために  $k$  なる添字を用いることにする (たとえば  $k$  は、農林水産なる産業の動力・照明機器用電力需要、あるいは家庭用暖房用電力需要などを示すものとする)。

$$P_t = \sum_k V_{kt} + \sum_k EDI_{kt} \quad (3.26)$$

$V_{kt}$  :  $k$  部門の電力需要 (内生変数) の負荷持続曲線中の第  $t$  時間帯における kW 電力需要

$EDI_{kt}$  :  $k$  部門の電力需要 (外生変数) の負荷持続曲線中の第  $t$  時間帯における kW 電力需要

$$V_k = \sum_t V_{kt} (D_{5-t} - D_{6-t}) \quad (3.28)$$

$V_k$  :  $k$  部門の電力量需要 (内生変数で家庭、業務、輸送部門の電力需要がこれに相当する)

$$ED_k = \sum_t EDI_{kt} (D_{5-t} - D_{6-t}) \quad (3.29)$$

$ED_k$  :  $k$  部門の電力量需要 (外生変数で産業部門の電力需要がこれに相当する)。  $D_5=0$  とする

エネルギー供給モデルのうち、石炭、都市ガス部門は比較的簡単なマテリアルバランス式のみよりなっている (ただし、都市ガスはカロリーを外生的に与えるようになっており、原料はその条件を満たすよう選ばれる)。

需要部門は、各部門とも DEM-Parametric で計算される有効エネルギー需要を満たすよう

に機器やエネルギーのフローが選択される (詳細は文献 3)。需要部門の方程式数は全体の約半分を占めている。

#### 4. パラメトリックエネルギー需給バランスモデル DEM-Parametric

DEM-Parametric のフロー図を図 4.1 に示す。このモデルは 2 つの目的を持って作られている。第一の目的は DEM-Optimal に対して有効エネルギー需要を計算して与えることであり、需要モデルとしての役目がある。第 2 は、DEM-Optimal その他の分析結果を総合して、最終的なエネルギー需給展望のシナリオを作ることである。最適化モデルはある一定の条件のもとで「最適」なシステムを構成してくれるが、その解が現実的であるというのではなく、また総合的に望ましいということでもない。DEM-Parametric は最終的なビジョンという絵を書くキャンパスの役目を持っている。

DEM-Parametric は上記に述べた目的からいってエネルギー需要面にウェイトを持ったモデルであり、需要は比較的詳細に分けられているが、個々の需要関数は比較的シンプルであり、そのパラメータは時には過去のデータをベースにしながらも恣意的に決められる。たとえば、乗用車に占めるディーゼル車の割合、冷房面積率 (住宅の床面積の中で冷房する面積の割合)、電力シフトの割合などもその例である。

DEM-Parametric は DEM-Optimal に接続するためにエネルギー需給構造の分類は同一である。DEM-Parametric は図 2.2 に示されるように GNP や産業構造に関する情報を経済モデルから受けとり、各需要部門の需要を、省エネルギー、エネルギー代替を考慮しながら、需要→供給の順に需給構造をきめていく。この際

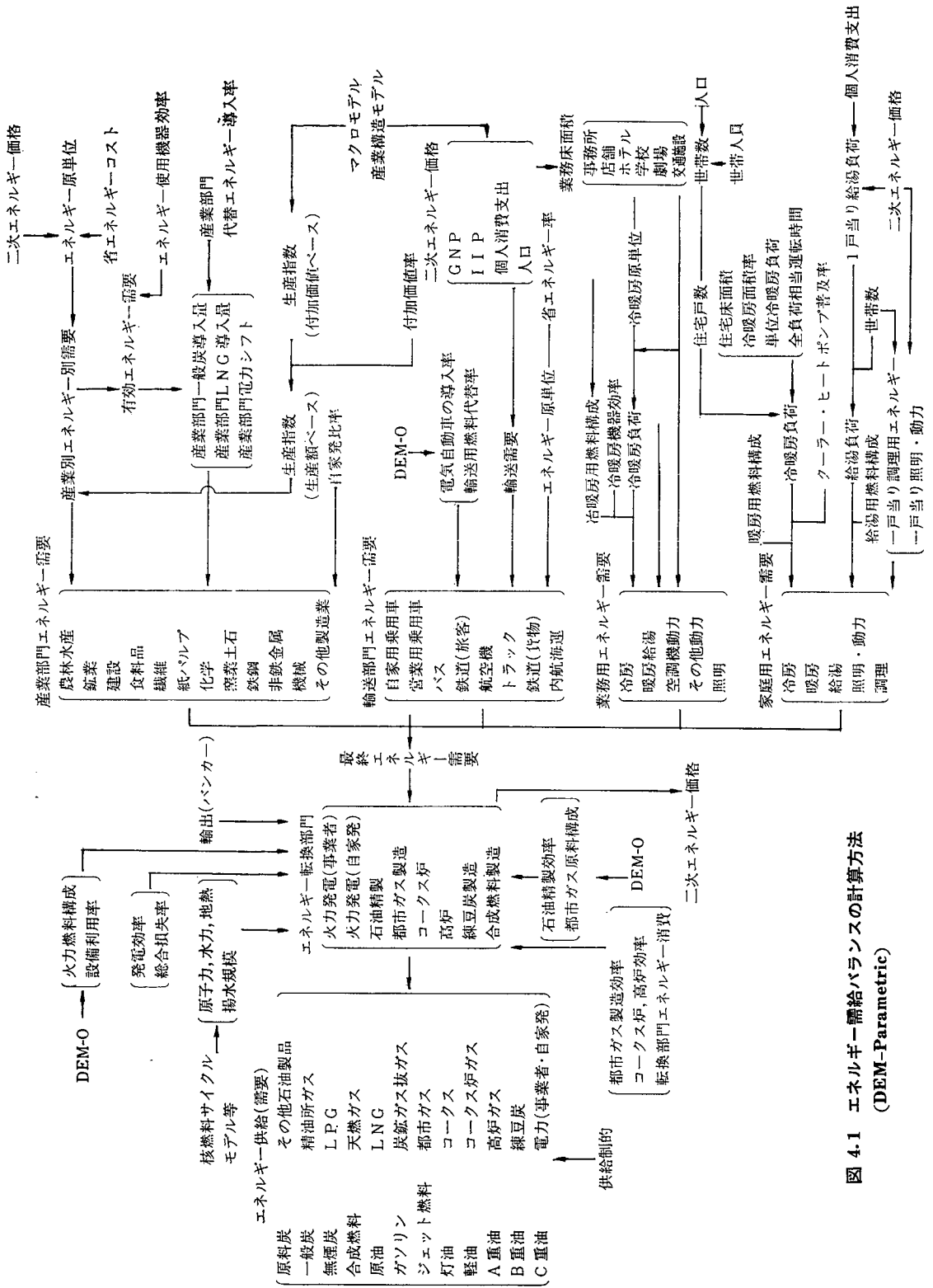


図 4.1 エネルギー需給バランスの計算方法 (DEM-Parametric)

に DEM-Optimal による情報、特にエネルギー供給構造に関する情報が折り込まれる。

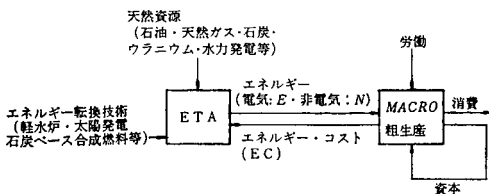
DEM-Parametric は全体的・統一的な理論枠組がないという意味でシンプルなモデルではあるが、将来におけるエネルギー需給バランスを作成していく思考プロセスそのものをモデル化したものであって、総合的な人間の判断を折り込みやすく、また操作性も DEM-Optimal にくらべるとかなり高い。

(DEM-Parametric の詳細は別途刊行の予定)

### 5. エネルギー経済モデル ETA-MACRO

ETA-MACRO は米国スタンフォード大学の A. S. Manne とそのグループによって開発されたエネルギー経済モデルである。ETA-MACRO は構造的には比較的シンプルなエネルギーモデルであるが、①エネルギーシステムとマクロ経済の相互作用が分析可能である、②目的関数は消費効用の累積最大の形で、資本、労働、電気、非電気の4つの生産要素を持つCES生産関数を介して行われる、③非線形最適化が行われている、④エネルギー技術の供給制約を内生的に決定するPG1サブモデルを有し、エネルギー技術の競合関係が評価できる等の特徴を持っている。

図 5.1 の左側の ETA (Energy Technology Assessment) モデルはエネルギーシステムを表



出所: A.S.Manne [1]

図 5.1 ETA-MACRO の概略

わすプロセスモデルであり、通常の LP タイプのエネルギーモデルと同様に線形制約条件の形でエネルギー需給バランスが定式化されている。

この ETA サブモデルは、エネルギー資源に対する供給曲線を持っており、需要の増大や一部の資源に対する供給制約がエネルギー供給コストの増大となって経済やエネルギー代替に反映されるようになっている。

しかし、ETA-MACRO の最大の特徴は、他のモデルと異なり、エネルギー転換部門や、生産部門に対する制約が内生化されていることにある。通常の LP 型のエネルギーモデルでは各変数に対する制約は直接的に入力データによって与えられるが、ETA-MACRO では、次式で示されるような形で与えられている。

$$\left( \begin{matrix} \text{各技術の容} \\ \text{量の拡張量} \end{matrix} \right) \times \left( \begin{matrix} \text{単 位} \\ \text{コスト} \end{matrix} \right) \leq \left( \begin{matrix} \text{各技術} \\ \text{の容量} \end{matrix} \right)$$

$$\times (\text{単位収益}) \times (\text{再投資率}) + (\text{外部資金})$$

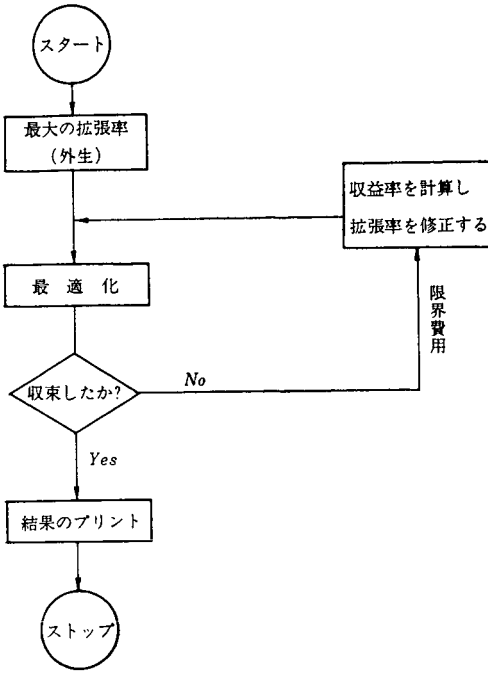
つまり、ETA-MACRO の最適化計算(消費の効用最大)の過程からエネルギー生産の限界費用が計算される。この限界費用=価格と生産のためのコストから単位収益が計算され、これと再投資率が各エネルギー技術に対する投資を制約する形となる。これは図 5.2 に示すように、モデル内でくり返し計算が行われる。

また ETA サブモデルの1つの特徴はエネルギー需要を電力と非電力の2つに統合していることである。

MACRO サブモデルは(5.1)に示すCES型の生産関数一本よりなる極めて簡単な経済モデルである。

$$Y = \left[ a(K^\alpha L^{1-\alpha})^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + b(E^\beta N^{1-\beta})^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \right]^{\frac{\sigma}{\sigma-1}} \tag{5.1}$$

K=資本, L=労働, E=電気, N=燃料, Y=粗生産,  $\sigma$ =代替弾力性



Source : A. S. Manne [ 1 ]

図 5.2 PG1 における計算の流れ

エネルギーサブモデル ETA と経済サブモデル MACRO は、図 5.1 に示すように電力需要  $E$ 、非電力需要  $N$  及びエネルギー生産コスト  $EC$  で結合されている。ETA は、エネルギー資源の供給関数を持っているため、ETA は  $E$ 、 $N$  に対する供給曲線を、MACRO は最適化プロセスによって需給曲線を発生させ、両者需給均衡する形でエネルギー需要  $E$ 、 $N$  とその価格あるいはエネルギー供給構造を決定している。

ETA-MACRO は 5 年ごと 16 期 75 年間で対象にした超長期モデルであって (5.2) に示す消費の効用の最大化によって、最適経済成長経路及びそれに対するエネルギー需給構造が決定される。目的関数はつぎのとおりである。

$$\sum_{t=0,5}^{70} \left( \frac{1}{1+\delta} \right)^t \log c(t) + \sum_{t=75,80}^{\infty} \left( \frac{1}{1+\delta} \right)^t \log [c(75)(1+g)^{t-75}] \quad (5.2)$$

ここに  $c$  は消費、 $\delta$  は割引率、 $g$  は 75 年以降の成長率を表わしている。

このモデルの目的は、エネルギー・セクターと経済セクターの相互依存的な関係をモデル化し、エネルギー需給、あるいは価格の変化等のエネルギー制約がマクロ経済指標、すなわち GNP、消費、投資等にどのようなインパクトを与えるかを評価分析することにある。これは、エネルギーの経済的インパクトの近似計算がエネルギー政策の評価を行う上で重要な役割を持つという考え方を示している。同時にマクロ経済政策にとって、エネルギー制約が大きな影響力を持つという考え方である。当然のことながら、逆にマクロ経済の GNP の成長率等の変化はエネルギー・セクターに影響を与える。もちろんモデルではこうしたマクロ経済変数の変化が、エネルギーの生産あるいは個々のエネルギー技術に与える効果の評価分析に力点が置かれている。

従来の多くのエネルギー・モデルは、どちらかといえば GNP あるいは他の経済的指標を所与として、経済セクターとは独立してエネルギー供給あるいはエネルギー政策を分析してきたといえる。この点では、ETA-MACRO モデルは、経済・エネルギー両セクターの相互的依存関係を考慮した数少ないモデルといえる。

また、モデルの目的は、長期（あるいは超長期）的なエネルギー・経済の相互関係に力点が置かれている。モデルでは、特に 2000 年以降の時期に分析の焦点が置かれている。この時期は、現在の化石燃料資源の宿命的な枯渇が深刻化し、新しいエネルギー供給資源、技術への主



要な転換を始めるべき時期にあたる。このことは、ETA-MACRO モデルが、特にエネルギー問題に関して不確実性の増大するこの時期のエネルギー、経済の諸代替計画の比較、評価をできるだけマクロ的に統合しようとする意図を持っていることを示している。その意味では、モデルはエネルギー・経済の長期的な問題に関する1つの包括的な政策シミュレーション・モデル性格が強いといえる。

## 6. 長期エネルギー需給展望の問題点

まず最初に問題にしなければならない点は、我々は長期的な将来についてどこまで情報を持っているかという点である。ことによると、エネルギー需給展望の基礎となる経済・社会条件について、実は我々は漠然としたイメージ程度の情報しか持っていないのかもしれない。たとえば、2000年以後日本の粗鋼生産量がどの程度になるのかを予測しようとしてもそれはまったく不可能なことであろう。GNPの規模、消費の水準、産業構造のどれをとっても長期的予測を正確に行うことはできないとみてよい。それどころか多くの長期エネルギー需給の前提である経済予測が短中期のところで失敗している。(もちろん、この種の経済予測は短期経済予測にくらべると理論的枠組も単純である)

むしろ、この長期エネルギー需給における経済・社会展望は将来の整合的目標もしくはビジョンを与えることに意義があるとみてよい。失業率をある水準以下におさえるためにGNPの成長率はどの程度のものが必要なのか、またそのためにわが国はどの産業が機関車の役目を果たしていくのか…等の論理がその1例である。そして全体の整合性を保つためにモデルが必要とされるといえよう。

しかし一方では、目標として作成される展望は、その時の社会経済情勢や展望作成機関の立場に左右される傾向がある。特に後者は最も重要な予測誤差の要因の一つである。

長期展望には、予測としての4つのレベルがある。精度の高い方からいえば、i) 客観的予測、ii) 信念、iii) 目標、iv) 単なるシナリオとなる。展望作成者は、「目標」よりは「信念」、「信念」よりは「予測」たらしめようと努力するが、結果は「信念」を越えることはできず、過去の例に見られるように「信念」もしばしば事実によって否定されている。

しかしまた逆に経済・社会に関して未来がまったく不確定であるという単純発想も明らかにまちがいである。人々の価値、生活様式、制度、生産技術……には巨大な慣性があり、経済や社会の基本的な部分の変化はそう簡単には生じない。明確な法則は見出し得なくとも、「信念」のある「目標」を作ることが、経済・社会展望の大きな役目である。

第二は技術予測の問題である。一般にエンジニアは技術予測に関し保守的、エコノミストその他は楽観的であるといわれる。しかし、過去の多くの予測をみていると別の特徴もあるような気がする。その一つは省エネルギーのような市場のメカニズムが強力に働く近未来の技術に対して、人々は悲観的、保守的傾向が高く、遠未来の技術に対しては楽観的予測が多いように思える。

上記の2つの特徴は統計的調査の結果でなく、著者自身のおもいちがいかもしれないし、また、ましてすべての人々がこのような特徴を持っているということでもない。しかし、もしこのことが正しいとすれば人々は未知の技術情報に関して楽観的、部分的に情報を持っている

技術に関しては保守的であるということになる。

第3は長期エネルギー需給予測の方法論である。近年の計算機や統計的手法の発達によって、各種の予測技術は大きく発展をとげ、多くの複雑なモデルが作られるようになったが、長期予測という意味では、ここ20年あまり手法上の大きな進歩はないようにも思える。

しかし一方では、展望の整合性という意味では、この種の分析の数が増えることや調査の規模の増大に従って大きな進歩が得られていると、いってよいであろう。

## 7. あとがき

本報告は、電力中央研究所で長期エネルギー需給展望のために使用しているモデルの体系とその主要な部分について概説したものである。紙数その他の関係で各モデルとも説明が不十分になっているが、詳細については昭和59年3月頃までに別途ガイドブックを作成する予定な

のでそれらを参照していただきたい。なお、ここに述べたモデルのうち DEM-Optimal は、現千葉工大教授小川洋氏の指導のもとに、大山達雄氏（現埼玉大学）、長田紘一氏（SRC 株式会社）および著者等のメンバーによって作られたものである。また本稿は参考文献 1)、2) を一部要約したものである。

### 参考文献

- 1) 斉藤, 阿波田, 内山, 長田, 伊藤: 長期エネルギー・経済モデル ETA-MACRO の構成, 電力中央研究所報告・調査報告 581013, 昭和 57 年 3 月.
- 2) エネルギー・電力需給の長期展望, 電力中央研究所報告・研究報告 Z04, 昭和 54 年 7 月.
- 3) T. Saito, T. Oyama: Outline of the Enersy Model DEM-1, 電力中央研究所 経済研究所 内部資料 No. 218, 昭和 55 年.

( さいとう たけし )  
経済部  
エネルギー研究室