

# 自家発電所の最適運用における数理計画の応用

—非線形問題のためのモデル・ビルディング・システム—

国領 茂・小野 和良

ここに紹介する「トータル・エネルギー管理システム (Total Energy Management SYSTEM: TEMSYS)」は操業条件・原料変動などの環境条件の変化に対応した、エネルギーの量ならびに質の両面からの有効利用の問題や、エネルギー授受のある複数個のプロセスからなる工場全体の省エネルギー対策をめざしたシステムであり、従来の局所的な省エネルギー対策とくらべればかなり大規模に、かつ飛躍的にエネルギーの有効利用ができるものと考えられる。

図1は工場全体の物質・エネルギーのフローとその有効利用をはかるための改善着眼点を模式的に示したものである。従来はこのような生産工程ごと、あるいはエネルギー発生装置ごとの省エネルギーが断片的に行なわれ、その結果、工場全体のエネルギー使用形態が跛行的になってしまった事例があること等をふまえると、これからの省エネルギー活動は、エネルギー利用形態を工場全体から総合的に見直しつつ推進するということが必要になってくると考えられる。

## 1. 開発の狙い

こくりょう しげる, おの かずよし  
 ㈱東洋情報システム

TEMSYS の開発に先立って、自家発電認可出力2万kW以上の99事業所のうち、約60社に対してアンケートおよび面接調査を行ない、業界のエネルギー管理の実態とニーズの把握を行なったと

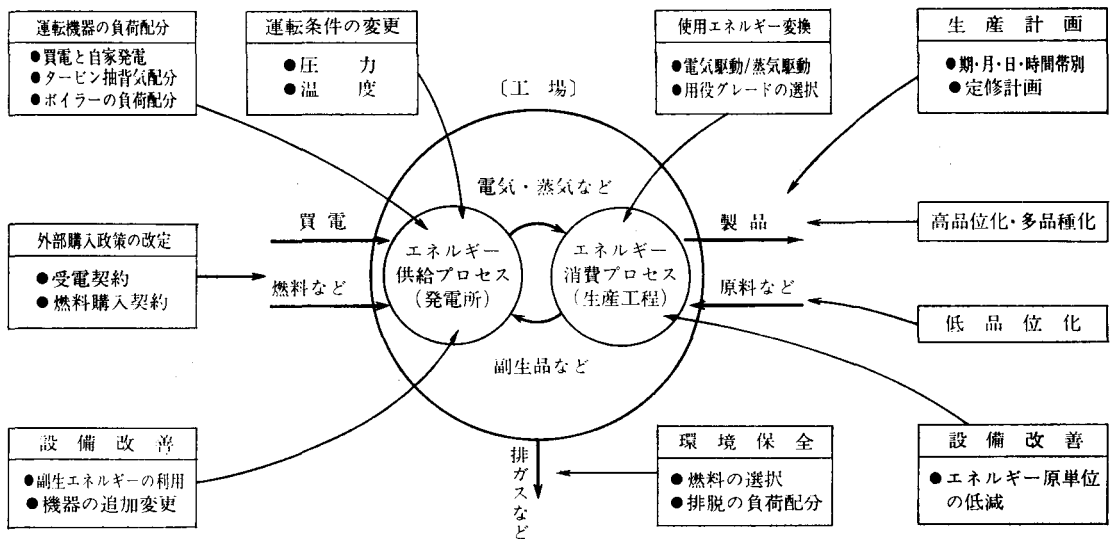


図1 工場における省エネルギー着眼点

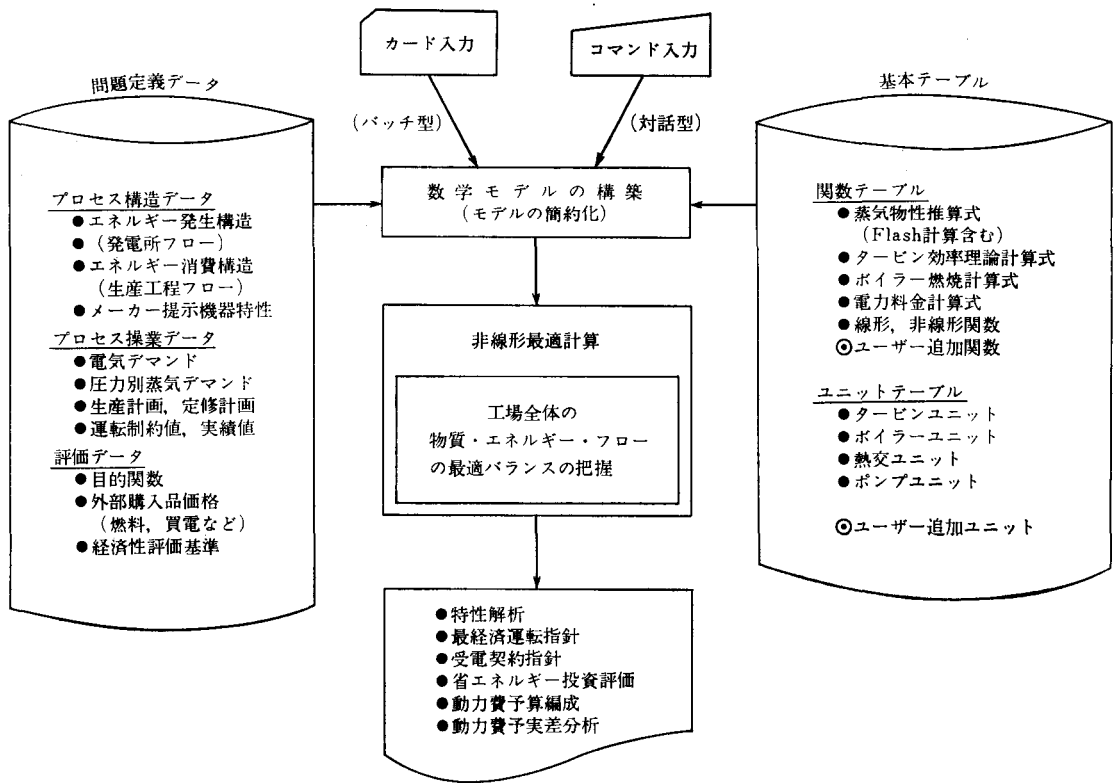


図 2 システム構成概念図

ころ、(1) 用役供給管理における最適ヒートバランスの把握、エネルギー発生・消費の利害不一致等の基礎的問題点、(2) 省エネルギー活動における動力費削減目標は、短期的には運用面で5%、中期的には設備投資をとともなる改善で10%以上、(3) 省エネルギー推進上のコンピュータの必要性とそれによる運用の最適化、エネルギー使用効率の総合把握、の3点に集約された。

## 2. TEMSYS 基本機能の設定

これらをもとに、以下に示すシステム基本機能を設定した。

- a. 最経済運用機能…エネルギー供給プロセス(発電所)を主対象としたエネルギー発生費用を最小にする運転バランス計算機能
- b. 機器特性…運転実測値にもとづく機器、工程単位の特性把握
- c. 受電契約指針…年間負荷変動、受動・燃料価格にもとづく受電契約指針

d. 省エネルギー投資評価…投資前後のエネルギー供給・消費構造に対する最経済運転費用より投資効果額と資本回収係数を算出

e. 動力費予算編成…生産計画に見合う最適エネルギー供給を基礎とした動力費予算編成資料の作成

f. 動力費予実差分析…特定要因ごとの予算値と実績値についてのケース・スタディより要因別の子実差を把握

以上の機能から外部支出費用あるいはエネルギー効果を尺度として、工場全体のエネルギー有効利用を計るための指針を容易かつ迅速に提供することができる。

## 3. TEMSYS の構成と機能

本システムの特徴を述べると以下の2つに要約することができる。

- a. 任意のエネルギーフローが、プロセス機器に対応した記号形式で、容易に扱うことができる。

表 1 関数コード一覧表

区分	関数コード	種類	形式	
			関数(注1)	副プログラム(注2)
システム用コード	1~30	線形関数	○	
	31~40	電力料金計算ルーチン		○
	41~80	非線形関数	○	
	81~100	蒸気物性推算ルーチン		○
	101~200	特殊ユニット計算ルーチン		○
ユーザード	201~900	ユーザー登録関数	○	
	901~999	ユーザー登録ルーチン		○

(注1) TEMSYS入力データを作成し、UPDATEする

(注2) オウン・コーディング・ルールに則り、UPDATEする

b. コンピュータや数理計画手法に関する知識がなくても容易に扱うことができる。

本システムの構成概念を図2に示し、以下この図にもとづいて説明する。

### 3.1 基本テーブル

最適化モデルの構築作業が容易に行なえるように関数テーブルとユニットテーブルを具備している。

#### (ア) 関数テーブル

エネルギープラントの解析に必要な関数をあらかじめ登録したものである。表1のように関数コードを割付けている。これらには同表の形式の欄に示したように関数データの形で更新できるものと、副プログラム形式で本システムのオウン・コーディングルールに則り、更新するものがある。四則演算および一般的な組込み関数の組合せ程度の関数は前者の扱いができる。このため、登録関数のアップデートは、プログラムの変更なしで行なえ、エネルギー管理の現場担当者にとって使いやすいものとなっている。

#### a. 蒸気物性推算式

エネルギー供給プロセスで取扱う主な流体である水、蒸気の物性を、1968年機

械学会蒸気表で用いている式を一部簡略化して計算する。推算する物性は、飽和温度、圧力、容積、エンタルピー、エントロピーの5種類である。また、これらの物性推算ルーチンを用いて、圧力指定の等エンタルピー、等エントロピー・フラッシュ計算を行なう。

水、蒸気以外の流体については、定圧比熱ベースで計算を進める。

#### b. タービン効率計算式

タービンの設計条件、運転条件から内部効率、排気条件、内部出力を算出する。

#### c. ボイラー燃焼計算式

与えられた温度、圧力の蒸気を発生するのに必要な燃焼量、空気量をボイラー効率特性、あるいは排ガス温度特性にもとづき計算する。

#### d. 電力料金計算式

一般契約および典型的な時間帯特約電気料金計算式である。

#### e. 線形・非線形関数

次に説明するユニットテーブルで用いられる式およびモデル構築時によく用いられる式を統合、

22		ボイラー1 (BOILER-1)																																									
<p>フローシート</p>																																											
		<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">ユニットNo</th> <th colspan="5">I/O</th> <th rowspan="2">ユニット 使用法</th> </tr> <tr> <th>G</th> <th>P</th> <th>T</th> <th>R</th> <th>H</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>I</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>O</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>O</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>S</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>O</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>T/N</td> </tr> </tbody> </table>		ユニットNo	I/O					ユニット 使用法	G	P	T	R	H	1	I					S	2	O					S	3	O					S	4	O					T/N
ユニットNo	I/O					ユニット 使用法																																					
	G	P	T	R	H																																						
1	I					S																																					
2	O					S																																					
3	O					S																																					
4	O					T/N																																					
パラメータ $C_1, C_2, C_3, C_4$																																											
<p>説明</p> <p>所要燃料量<math>G_4</math>および連続フロー量<math>G_3</math>を、主蒸気量<math>G_2</math>の1次関数 <math>G_4 = C_1 G_2 + C_2</math>, <math>G_3 = C_3 G_2 + C_4</math> から求める。</p>																																											
ユ ニ ツ ト No	計 算 式	有 効 計 算 式		関 数 コ ー ド	計 算 式																																						
	M	H																																									
		S	T/N	E	Q																																						
1	○	○				25																																					
2	○	○				23																																					
3	○	○				3																																					
$G_2 = \frac{(G_1 - G_4)}{(1 + C_3)} \quad (\because G_1 = G_2 + G_3)$ $G_3 = G_1 - G_2$ $G_4 = C_1 G_2 + C_2$																																											

図 3 ユニット仕様書 (例)

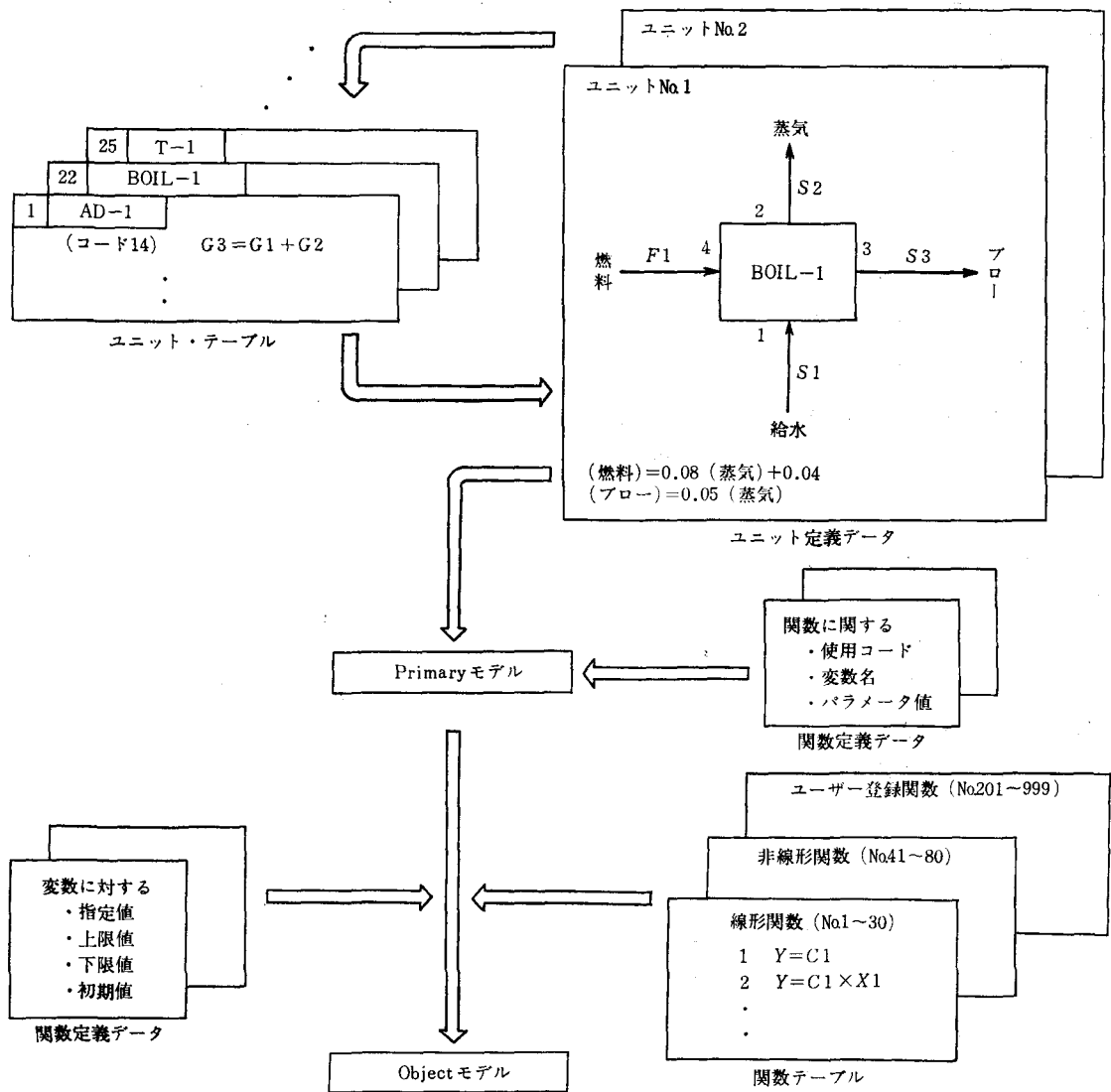


図 4 数学モデルの生成

整理したものである。

(i) ユニット・テーブル

エネルギープラントを構成する機器単位の数学モデルを登録したものであり、図3に示すような形式にまとめられている。このユニット仕様はエネルギープラントの基本的な解析に十分使用できるものである。

3.2 問題定義データ

関数テーブル・ユニットテーブルを利用して作成する解析対象プロセスにかかわるデータであ

り、解析対象プロセスの構造・特性を表わすプロセス構造データ、エネルギー供給プロセスに対する電気、圧力別蒸気に関する要求量(デマンド量)や運転制約値などを与えるプロセス操作データ、最適計算にかかわる目的関数や投資評価計算にかかわる経済性評価基準を与える評価データの3種がある。評価データの最適計算にかかわる目的関数としては外部支出費用(買電、燃料等)、動力比例費+設備コストの最小化、エネルギー効率(エンタルピー効率あるいはエクセルギー効率)、工

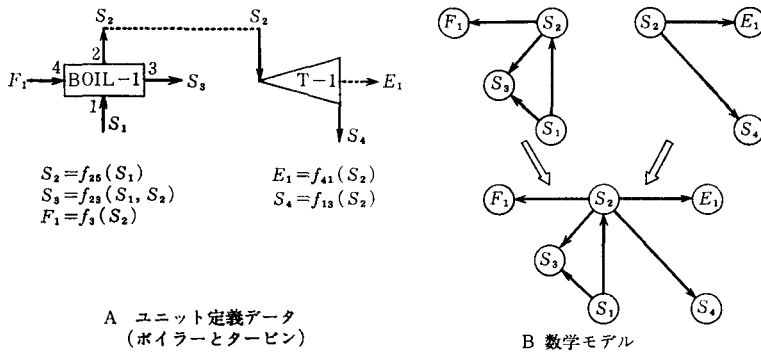


図5 部分モデルの構築

場利益の最大化といったケースが考えられ、これらは解析目的に応じて作成される。

### 3.3 処理構造

#### (ア) 数学モデルの生成

TEMSYS においては、対象工場のユニットフローを数学モデルとして表現している。図4はその数学モデルの生成方法を模式的に示したものである。以下図4に沿って説明する。

ユニットテーブルには機器ユニットの単位操作ごとに数式が登録されている。ユニット定義データとして、ユニットの接続状態を表わすデータが入力されると、入力されたユニットIDと合致するユニットテーブルの数式に入力データが与えられ Primary モデルが作成される。ユーザーが関数定義データとして数式の形でデータを入力すると、ユニットテーブルは参照されずに直接 Primary モデルが作成される。

また関数定義データは、ユニット定義データで一度作られたモデルの修正・追加を行なう際にも使用することができる。

Primary モデルができると、それにライン定義データとして入力された状態変数に対する制約条件を付加し、またユニットテーブルか関数定義データで指定されたコードナンバーを参照して関数テーブル中の数式を利用した計算が実行され、Primaryモデルを簡

略化した object モデルを生成する。この処理により、変数・制約式ともにその数を減少させることができる。

TEMSYS では、ユニット操作を記述する数式はプログラム中には記述されておらず、すべてデータとして与えられる。したがって、ユーザーがユニット

テーブルの登録・修正・削除を行なうときにはプログラムの変更なしに入力データを作成することによって実現でき、ユーザーサイドに立ったシステムとなっている。

以下に計算機内部での数学モデル生成過程を概念的に説明する。

#### a. Primaryモデル

ユニット定義データとユニットテーブルからユニットの入力ラインと出力ラインの関数関係と接続状態が得られている。たとえば図5-Aではボイラー(BOIL-1)の出力ライン $S_2$ がタービン(T-1)の入力ライン $S_2$ に接続していることをそのライン変数( $S_2$ )から知ることができる。

各ユニットのライン変数を○、変数間の対応を→で表わすと、図5-Bの数学モデルができる。この各ユニットのモデルを同一のライン変数ごとに連結させるとボイラーとタービンの接続状態を示す数学モデルが構築される。

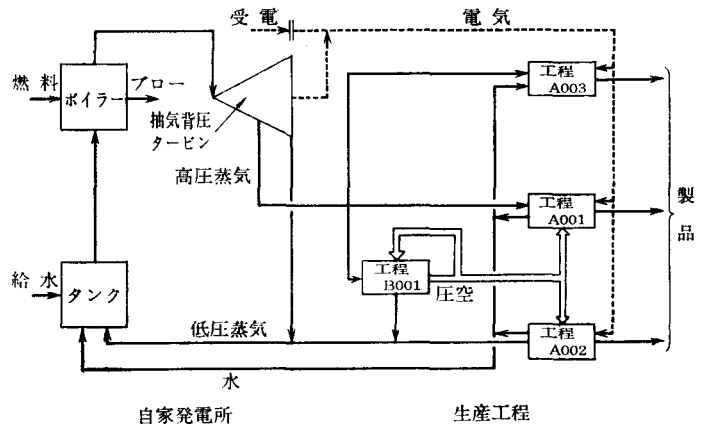


図6 対象工場 A: モデルプロセス

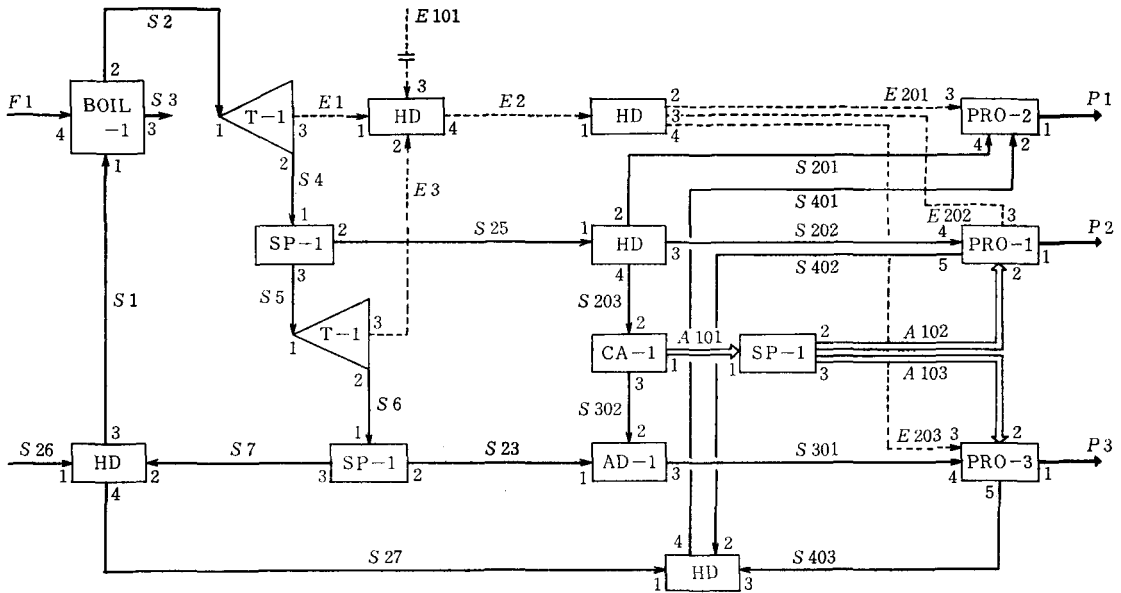


図6 対象工場 B: ユニットフロー

今、例として図6-Aのようなモデルプロセスを考える。これをTEMSYSのユニットで表現すると図6-Bようになる。このユニットフローについて数学モデル構築の操作を繰返し、図7に示す Primary モデルを得る。

b. Secondaryモデル

Primaryモデルにライン定義データによる境界条件制約を付加し、モデルの構造解析を行なう。

図7の Primary モデルにおいて、 $P_1, P_2, P_3$ の各変数は各工程での生産量として固定されており、これらの値から一意的に値の計算できる変数を探索することで新しい境界条件が決定できる。たとえば  $P_1$  からは  $A_{102}, E_{202}, S_{402}$ の値が求められる。

このように一連の処理により図8に示す Secondary モデルが得られる。

c. Object モデル

Secondaryモデルから次の2点に該当する変数および関

係式を削除し、さらにモデルを簡略化する。

- 目的関数に制約を与えない式。

本例では変数  $S_8$  とこれを計算する式が削除される。

- $y=x$ の形をした制約式。これについては  $y$  と  $x$ を同一の変数として取り扱う。

本例では  $S_4$ は  $S_2$ に、 $S_6$ は  $S_5$ に取って代わられる。

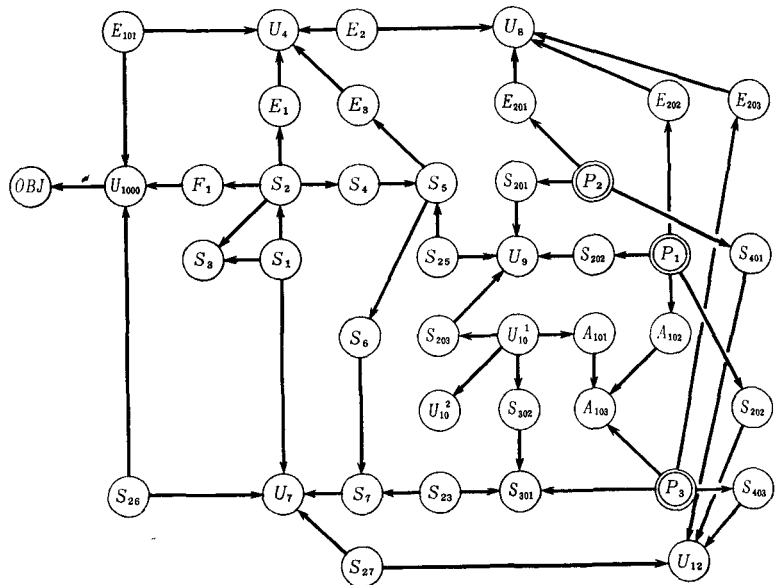


図7 Primaryモデル

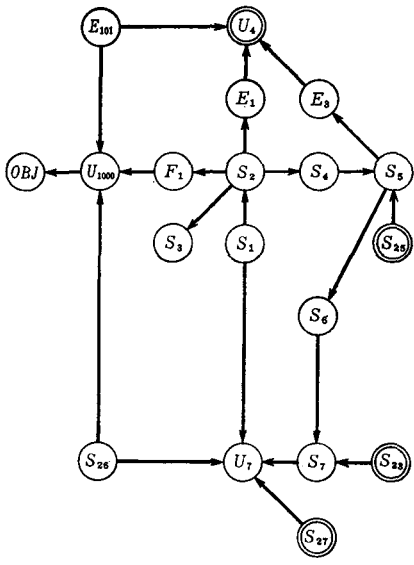


図 8 Secondary モデル

このようにして作成されるモデルが最適計算の対象となる。ちなみに本例では, Primary→Object モデルの過程で, 変数個数は41→14に, 制約式の個数は37→10に減少している。

(i) 最適化処理

TEMSYS では, 線形および非線形の最適化問題を独自の最適化ルーチンで解析する。基本的にはLPを採用しているが, 非線形問題に拡張して使えるよう局所線形化処理をほどこしている。

以下, 最適化問題の定式化と解法について述べる。

(a) 問題の定式化

生産工程における電気および圧力別蒸気に対する要求量を満たして, 燃料費・購入電力費等の外部支出費用を最小にして, 発電所を運用するための運転条件(ボイラー, タービンの負荷配分等)を求める問題を考える。

目的関数としては, 外部支出費用をとる。制約条件には等式制約と不等式制約とが考えられ, 前者には, ヒートバランス式, マスバランス式, 蒸気物性推算式, 機器特性式等が, 後者には, 機器能力, 配管流量, 燃料購入量等が解析問題に応じて組込まれる。

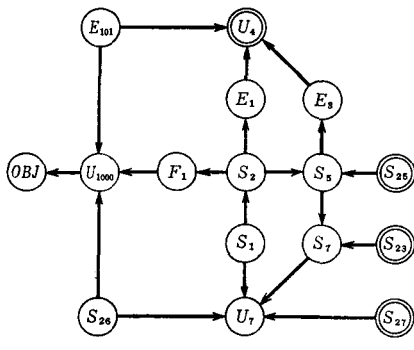


図 9 Object モデル

これらを整理すると, 一般的に以下の最適化問題を得る。

- (1) minimize  $Z=g(x_j)(j=1, \dots, n)$
- (2) subject to  $x_i=f_i(x_j)(i=1, \dots, m, j \neq i)$
- (3)  $l_j \leq x_j \leq u_j$

ここで,  $l_j, u_j$  は各々

変数  $x_j$  の下限, 上限を表わす。目的関数  $g$ , および制約式  $f_j$  は, 本解法では線形・非線形のいずれであってもよい。

(b) 基準点の設定

第1 iteration では入力された初期値あるいは下限値を, 第2 iteration 以降では前回の計算結果を基準点にとる。  $x_j$  に対する基準点を  $x_{0j}$ , これから得られる制約式(2)の左辺値を  $x_{0i}$  とする。

(c) 局所線形化処理

制約式(2), 目的関数式(1)を基準点のまわりでテイラー展開する。2次以降の高次の項は無視する。

$$(4) \Delta x_i = (\partial f_i / \partial x_1)_0 \Delta x_1 + \dots + (\partial f_i / \partial x_m)_0 \Delta x_m \quad (i=1, \dots, m)$$

$$(5) \Delta Z = (\partial g / \partial x_1)_0 \Delta x_1 + \dots + (\partial g / \partial x_n)_0 \Delta x_n$$

$(\partial g / \partial x_j)_0 = C_j, (\partial f_i / \partial x_j)_0 = A_{ij}$  とおくと, 以下の線形問題を得る。

$$(6) \text{ minimize } \Delta Z = \sum_j C_j \Delta x_j$$

$$(7) \text{ subject to } \Delta x_j = \sum_{j, j \neq i} A_{ij} \Delta x_j$$

$$(8) \Delta l_j \leq \Delta x_j \leq u_j$$

$$\text{ただし, (9) } \Delta l_j = l_j - x_{0j}$$

$$(10) \Delta u_j = u_j - x_{0j}$$

また, 偏微分項の計算は, 以下の式で行なう。

$$(11) \partial f_i / \partial x_j = [f_i \{ (1 + \epsilon_x) x_{0j} \} - f_i \{ (1 - \epsilon_x) x_{0j} \}] / 2\epsilon_x$$

ここで,  $\epsilon_x$  は正の小さな値である。

(d) 線形化許容範囲の決定

各制約式  $f_i$  に関する  $x_j$  の線形化許容範囲を  $Dx_{ij}$ ,  $f_i$  方向の線形化許容誤差を  $\varepsilon_{ij} \cdot f_i(x_{0j})$  とすると、次式を得る。

$$(12) \quad \varepsilon_{ij} \cdot f_i(x_{0j}) = 1/2 \cdot Dx_{ij}^2 f''(x_{0j})$$

上式から  $Dx_{ij}$  を計算することができる。(12)式の右辺は(4)式を導出する際に無視した2次の項、すなわち線形化許容誤差に対応する。 $\varepsilon_{ij}$  も正の小さな値であり、計算精度に応じて変更できるようにしている。

$x_j$  が1回の iteration で動きうる範囲、すなわち局所上下限は、下限については、 $(\Delta l_j - Dx_{ij})$  のうちから、上限については  $(\Delta u_j, Dx_{ij})$  のうちから、おのおの絶対値の小さなほう、換言すると範囲の狭いほうを選択する。

#### (e) 上限法 LP 計算

iteration 1 回ごとの LP 計算は、局所上下限の範囲で(6)、(7)式を解く。エネルギーフローを扱う解析問題には、上限制約つきのものが多い。また、処理効率、メモリー効率等を勘案して、線形計画法として上限法を採用した。

#### (f) 収束判定

以下のいずれかの条件を満たしたとき、繰り返し計算を終了する。

- 目的関数の変化幅が次の条件を満たしたとき、

$$\frac{|\text{今回の目的関数値} - \text{前回の目的関数値}|}{|\text{前回の目的関数値}|} < \varepsilon$$

$\varepsilon$ : ユーザー入力パラメータ

- iteration 回数  $i$  が次の条件を満たしたとき、

$$i \geq i_{\max}$$

$i_{\max}$ : ユーザー入力パラメータ

#### (g) 初期実行可能解の見つけ方

各制約式に人工変数  $\lambda_i (i=1, \dots, m)$  を導入し、LP の Phase I で  $\sum_i \lambda_i$  を最小化する問題を解き、初期実行可能解を求め、Phase II でこれを改善する方法をとる。これにより、厳密な初期値入力操作が不要になる。

TEMSYS は現在14の事業所で導入され、その効果もいくつか報告されている[2],[3],[6]。

TEMSYS はプロセスシステムの操業問題、構成問題の解決に直面するエンジニアの意思決定に役立つものであり、またその拡張性、柔軟性ゆえにプロセス・システム以外の問題の解決にも効果を発揮しうるものと思われる。今後とも省エネルギーの一助に活用されることを期待する次第である。

#### 参 考 文 献

- [1] 伊藤 周, 小野和良, 国領 茂, 鳥田芳春: 省エネルギーのための 電算機 システムと その実用例. システムと制御, 24, 7 (1980), 29-37
- [2] 河村 秀夫, 日置 孝夫: トータルエネルギー 管理システムによる省エネルギー事例. 省エネルギー, 31, 12 (1979), 13-17
- [3] 大井 敏夫: トータル エネルギー 管理システム. ソフトウェア流通, 2, 5 (1980), 90-94
- [4] Ohi, T., Itoh, H., Ono, K., Kokuryo, S., Torita, Y. and Takamatsu, T.: A Program for Computer Aided Energy Analysis & Synthesis. *International Federation of Automatic Control 8th Triennial World Congress (Preprints)*, (1981), CS-17-CS-22
- [5] 小野和良, 国領 茂, 鳥田芳春, 伊藤 周: 工場における 省エネルギー 問題の定式化と 解決手法の具体化に関する研究. 化学工学協会 秋季大会研究発表講演予稿集, (1980)
- [6] 園部 芳弘, 荻安 美恵男: 熱併給発電所における エネルギー効率改善手法の適用例. 省エネルギー, 33, 4 (1981), 27-32

#### 次 号 予 告

##### 特集 化学と OR

化学における知的システム	神沼二真
グラフ理論と化学構造表現	中山 堯・藤原 譲
構造活性相関分析	森口郁生
トップの視点	
青年期の OR	西田俊夫
解説	
構造マトリックスによる経営管理システムへのアプローチ	外山和之・飯川雅孝