

Title	組合せ最適化法に基づく熱電併給システムの計画手法に関する研究
Author(s)	横山, 良平
Citation	大阪大学, 1988, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/1655">https://hdl.handle.net/11094/1655</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

組合せ最適化法に基づく熱電併給システムの  
計画手法に関する研究

昭和63年6月

横山良平

# 目次

主要記号 .....	v
第1章 緒 論 .....	1
第2章 熱電併給システムの設計および運用計画と最適計画手法 .....	7
2.1 緒 言 .....	7
2.2 設計および運用計画における課題 .....	7
2.3 設計および運用計画に関する従来の研究 .....	10
2.3.1 船用システム .....	10
2.3.2 陸用システム .....	12
2.4 最適計画手法に関する従来の研究 .....	15
2.5 本論文の最適計画手法の基本的考え方 .....	17
2.6 結 言 .....	20
第3章 組合せ最適化法の拡張とシステム設計への適用 .....	22
3.1 緒 言 .....	22
3.2 列挙法と分枝限定法 .....	23
3.2.1 列挙法の基本的考え方 .....	23
3.2.2 分枝限定法の基本的考え方 .....	24
3.3 混合整数線形計画法 .....	27
3.3.1 分枝限定法に基づくアルゴリズム .....	27
3.3.2 分枝変数と分枝頂点の選択方法 .....	30
3.4 混合離散変数線形計画法への拡張 .....	33
3.5 混合離散変数非線形計画法への拡張 .....	36
3.5.1 一般縮小こう配法 .....	37
3.5.2 分枝限定法との結合 .....	38
3.6 変数の階層的関係を考慮した分枝限定法 .....	40

3.6.1	基本的考え方	41
3.6.2	分枝・限定操作	42
3.6.3	アルゴリズム	45
3.7	結 言	48
第4章	列挙法と混合整数線形計画法に基づく 熱電併給システムの最適設計計画手法	49
4.1	緒 言	49
4.2	最適設計計画問題の一般的定式化	50
4.2.1	機器構成	51
4.2.2	機器性能	51
4.2.3	エネルギー・バランスおよび需給関係	53
4.2.4	目的関数	53
4.3	最適設計計画問題の解法	54
4.4	設計計画事例1	56
4.4.1	LNG船蒸気タービン・システム	56
4.4.2	最適設計計画問題の定式化	57
4.4.3	最適設計計画問題の解法	61
4.4.4	検討事例	63
4.5	設計計画事例2	68
4.5.1	LNG船ディーゼル・ガスタービン複合システム	68
4.5.2	最適設計計画問題の定式化	69
4.5.3	最適設計計画問題の解法	75
4.5.4	検討事例	76
4.6	結 言	79
第5章	混合離散変数計画法に基づく 熱電併給システムの最適設計計画手法	80
5.1	緒 言	80
5.2	最適設計計画問題の一般的定式化	81
5.2.1	機器性能	81
5.2.2	エネルギー・バランスおよび需給関係	83

5.2.3	目的関数	83
5.3	線形の場合	84
5.3.1	最適設計計画問題の定式化	84
5.3.2	最適設計計画問題の解法	88
5.3.3	設計計画事例	90
5.4	非線形の場合	96
5.4.1	最適設計計画問題の定式化	96
5.4.2	最適設計計画問題の解法	98
5.4.3	設計計画事例	99
5.5	結 言	103
第6章	混合整数線形計画法に基づく 熱電併給システムの最適運用計画手法	104
6.1	結 言	104
6.2	ガスタービン発電・廃熱ボイラ方式熱電併給システム	105
6.3	最適運用計画問題の定式化	107
6.3.1	機器性能	109
6.3.2	エネルギー・バランスおよび需給関係	113
6.3.3	目的関数	115
6.4	最適運用計画問題の解法	116
6.4.1	混合整数線形計画法の適用	116
6.4.2	システム構成データの数式入力	116
6.4.3	従属変数の自動消去	118
6.5	最適運用方策算定システム	119
6.6	検討事例	121
6.6.1	対象システム	121
6.6.2	検討条件	121
6.6.3	結果および考察	125
6.7	結 言	133
第7章	結 論	135

謝 辞 .....	138
参考文献 .....	139
関連発表論文 .....	142

## 主要記号

$A$	制約条件の $u$ に関する係数行列
$a_i, b_i$	$F_B$ と $t$ の関係を表す係数
$B$	制約条件の $v$ あるいは $w$ に関する係数行列
$b$	制約条件の定数項ベクトル
$C_0, C_1, C_2$	$c(n_n)$ の近似式の係数
$C_f$	年間設備費
$C_t$	年間総経費
$C_v$	年間運用費
$c$	機器の初期設備費
$c(n_n)$	機器の初期設備費を表す関数
$c_k$	第 $k$ 規模の機器の初期設備費
$D_i$	$v_i$ あるいは $w_i$ の減少に対する $z$ の変化率
$d$	熱廃棄率
$d$	$z$ の $u$ に関する係数ベクトル
$d_i, e_i$	LNGタンク防熱材の初期設備費と $t$ の関係を表す係数
$E$	低圧電力
$E^h$	高圧電力
$e$	$z$ の $v$ あるいは $w$ に関する係数ベクトル
$F$	燃料消費量
$F_B$	ボイルオフガス発生量の設計値
$f(x)$	目的関数を表す関数
$f_0(u_0, w_0)$	目的関数の $u_0$ および $w_0$ に関する項
$f_j(w_0, u_j, w_j)$ ( $j=1, 2, \dots$ )	目的関数の $w_0, u_j$ および $w_j$ に関する項
$G$	低圧蒸気量
$G^h$	高圧蒸気量
$g(x_n^{(m)}, n_n, \delta_n^{(m)})$	機器性能を表す関数
$h$	離散変数値および係数の決定のための評価関数
$h(x)$	制約条件を表す関数
$h_0(u_0, w_0)$	$u_0$ および $w_0$ に関する制約条件を表す関数
$h_j(w_0, u_j, w_j)$ ( $j=1, 2, \dots$ )	$w_0, u_j$ および $w_j$ に関する制約条件を表す関数

J	目的関数
K	機器規模の種類数
$K_i$	( $w_i$ の候補値の数) - 1
$L^{[k]}$	第k規模の機器の入出力関係のデータ数
$\ell$	負荷率
M	運用モード数
N	機器設置台数
$\bar{N}$	機器最大設置可能台数
$N(p)$	$S_p$ に属する離散変数の数
$N_\ell(p)$	$S_p$ および $S_p$ の下位レベルのすべての集合に属する離散変数の数
$N_u(p)$	$S_p$ を分枝集合とする前に分枝変数として選択した離散変数の数
P	動力
$P_0, P_1, P_2$	$p(n_n)$ の近似式の係数
$(P_0)$	元の最適化問題
$(P_r)$	第r子問題
$(P_r')$	第r子問題の緩和問題
$PD_i$	$v_i$ あるいは $w_i$ に関する下方罰金
$PU_i$	$v_i$ あるいは $w_i$ に関する上方罰金
$p, q, r, s$	機器性能特性値
$p(n_n), q(n_n), r(n_n)$	機器性能特性値を表す関数
$p_k, q_k$	第k規模の機器の性能特性値
Q	廃熱量
$Q_0, Q_1, Q_2$	$q(n_n)$ の近似式の係数
$Q_p$	年間一次エネルギー量
$Q^c$	冷房用冷水熱量
$Q^h$	暖房用温水熱量
$Q^w$	給湯用温水熱量
R	資本回収係数
$R_0, R_1, R_2$	$r(n_n)$ の近似式の係数
$S_p$	階層レベルに分割した変数の第p番めの集合
$T^{(m)}$	第m運用モードにおける年間相当運転時間
t	LNGタンクの防熱材厚さ
$U(p)$	$S_p$ の一段上位レベルの集合の番号
$U_i$	$v_i$ あるいは $w_i$ の増加に対するzの変化率



$\mathbf{u}$	連続変数ベクトル
$\mathbf{u}_0$	上位レベルの連続変数ベクトル
$\mathbf{u}_j$ ( $j=1,2,\dots$ )	下位レベルの連続変数ベクトル
$\mathbf{v}$	整数変数ベクトル
$v_i$	$\mathbf{v}$ の第 <i>i</i> 成分
$W_1^{[k]} \sim W_4^{[k]}$	$h$ の第 <i>k</i> 規模の機器に関する重み係数
$\mathbf{w}$	離散変数ベクトル
$\mathbf{w}_0$	上位レベルの離散変数ベクトル
$w_i$	$\mathbf{w}$ の第 <i>i</i> 成分
$\mathbf{w}_j$ ( $j=1,2,\dots$ )	下位レベルの離散変数ベクトル
$w_i^{[k]}$	$w_i$ の第( <i>k</i> +1)番めの候補値
$X_0$	( $P_0$ )の実行可能領域
$\bar{X}_0, \bar{X}_1, \bar{X}_2$	$\bar{x}(n_n)$ の近似式の係数
$\underline{X}_0, \underline{X}_1, \underline{X}_2$	$\underline{x}(n_n)$ の近似式の係数
$X_r$	( $P_r$ )の実行可能領域
$X_r'$	( $P_r'$ )の実行可能領域
$\mathbf{x}$	変数ベクトル
$\bar{x}(n_n), \underline{x}(n_n)$	機器入力の上・下限値を表す関数
$\mathbf{x}_B$	基底変数ベクトル
$\bar{x}_k, \underline{x}_k$	第 <i>k</i> 規模の機器の入力の上・下限値
$\mathbf{x}_N$	非基底変数ベクトル
$x_{Ni}$	$\mathbf{x}_N$ の第 <i>i</i> 成分
$\mathbf{x}_r'^*$	( $P_r'$ )の最適解
$x_l^{[k]}, y_l^{[k]}$	第 <i>k</i> 規模の機器の入・出力に関する第 <i>l</i> 番めのデータ
$x_n^{(m)}$	第 <i>n</i> 台めの機器の第 <i>m</i> 運用モードにおける入力エネルギー量
$x_{nk}^{(m)}$	第 <i>k</i> 規模, 第 <i>n</i> 台めの機器の第 <i>m</i> 運用モードにおける入力エネルギー量
$y^{d(m)}$	第 <i>m</i> 運用モードにおけるエネルギー需要量
$y_n^{(m)}$	第 <i>n</i> 台めの機器の第 <i>m</i> 運用モードにおける出力エネルギー量
$y_{nk}^{(m)}$	第 <i>k</i> 規模, 第 <i>n</i> 台めの機器の第 <i>m</i> 運用モードにおける出力エネルギー量
$z$	目的関数
$\bar{z}$	$z$ の上界値

$z(p)$	$S_p$ および $S_p$ の下位レベルのすべての集合に属する変数に関する部分最適化問題の目的関数の値
$\tilde{z}(p)$	$z(p)$ の暫定最適値
$z^*(p)$	$z(p)$ の最適値
$z_0(p)$	$S_p$ に属する連続変数に関する目的関数の値
$z_0^*(p)$	$z_0(p)$ の最適値
$z_r$	$(P_r)$ における $z$ の下界値
$z_n^{(m)}$	$x_n^{(m)} - \underline{x}(\eta_n) \delta_n^{(m)}$
$\alpha$	買電・都市ガス単価比
$\beta$	年間省エネルギー率
$\Gamma$	関数の近似式の係数から成るベクトル
$\gamma$	年間運用費減少率
$\delta$	機器の運転・停止を表す0-1整数変数
$\delta_n^{(m)}$	第 $n$ 台めの機器の第 $m$ 運用モードにおける運転・停止を表す0-1整数変数
$\delta_{nk}^{(m)}$	第 $k$ 規模、第 $n$ 台めの機器の第 $m$ 運用モードにおける運転・停止を表す0-1整数変数
$\epsilon$	年間総経費減少率
$\xi$	一般電力系統・独立電力系統との接続を表す0-1整数定数
$\eta$	$\eta^{[k]}$ から成るベクトル
$\eta_n$	第 $n$ 台めの機器の規模を表す離散変数
$\eta^{[k]}$	第 $k$ 規模の機器に対応する $\eta_n$ の候補値
$\theta_n^{(m)}$	$\xi_n^{(m)} - \eta^{[1]} \delta_n^{(m)}$
$\kappa$	機器耐用年数
$\lambda$	縮小こう配ベクトル
$\lambda_i$	$\lambda$ の第 $i$ 成分
$\mu_{nk}$	第 $k$ 規模、第 $n$ 台めの機器の選定を表す0-1整数変数
$\nu^{(m)}$	第 $m$ 運用モードにおけるボイルオフガス発生量を表す係数
$\xi_n^{(m)}$	$\eta_n \delta_n^{(m)}$
$\rho$	年間利率
$\sum_t$	一箇月あるいは一年を通じての総和
$\varphi$	入力エネルギーの単価
$\overline{(\ )}, \underline{(\ )}$	上・下限値
$[\ ]$	ガウス記号

### 上付添字

a	補機動力
c	冷房
d	エネルギー需要
g	一般電力系統
h	暖房
i	独立電力系統
ℓ	システム内電力負荷
m	主機動力
(m)	第m番めの運用モード
w	給湯
°	連続緩和問題の最適解に対応する値

### 下付添字

A	A重油
B	ボイルオフガス発生量
BR	ボイルオフガス返送量
BS	ボイルオフガス供給量
buy	買電
C	C重油
disp	熱廃棄
gas	都市ガス
I	LNGタンク防熱材
k	第k番めの規模の機器
n	第n台めの機器
sell	逆送電力

### 機器記号(下付添字)

BA	補助ボイラ
BW	廃熱ボイラ
CE	電動ターボ冷凍機用冷却塔
CG	ガスタービン駆動ターボ冷凍機用冷却塔
CH	ハイ・デューティ圧縮機
CL	ロー・デューティ圧縮機
CS	蒸気吸収冷凍機用冷却塔
DE	ディーゼルエンジン

DG	ディーゼル発電機
EE	排ガス・エコノマイザ
GT	ガスタービン発電機
H	ヒータ
HE	暖房・給湯用熱交換器
HH	暖房用熱交換器
HP	ヒートポンプ
HW	給湯用熱交換器
M	電動機
MB	主ボイラ
ME	主エンジン
MT	主タービン
PC	冷房用冷水ポンプ
PH	暖房用温水ポンプ
PS	冷却水循環ポンプ
PW	給湯用温水ポンプ
RE	電動ターボ冷凍機
RG	ガスタービン駆動ターボ冷凍機
RS	蒸気吸収冷凍機
SH	高圧ボイラ
SL	低圧ボイラ
TG	低圧蒸気ターボ発電機
TH	高圧蒸気ターボ発電機
TR	変圧器

# 第1章 緒 論

我が国のエネルギー事情は1973年のオイル・ショックを契機に急変し、産業の高度成長期にスケール・メリットによる設備の集中化・大規模化の一途をたどってきたエネルギー供給システムに関して、逆に分散化・小規模化に向かう動きが現れてきた<sup>(1)</sup>。熱電併給システムは、エネルギー有効利用を目的として特に近年インテリジェント・ビルを始めとする個別建物を中心に数多く導入されるようになり、改めてその重要性がクローズ・アップされてきた小規模・分散形のエネルギー供給システムである。熱電併給は、「単一エネルギー源から電力または動力と有用な熱エネルギーを連続的に生産する操作」と一般的に定義されるように<sup>(2)</sup>、発電時に発生する廃熱を回収し、蒸気供給、冷暖房、給湯など有効な熱エネルギーとしてカスケード的に利用するという基本的考え方は、自然の理に適ったものである。遠隔立地の大規模発電システムにおいては送電効率も含めて総合熱効率が約35%であるのに対して、熱電併給システムにおいては需要地に設置することによるエネルギー輸送損失の低減、およびエネルギーの多目的利用による熱効率の向上が可能となり、総合熱効率が70~80%にも達すると言われている。またこのような省エネルギー技術としての特徴に加えて、燃料として天然ガスの使用による石油代替エネルギーの導入促進、大規模発電システムに対する電力需要の平準化など、熱電併給システムの普及による様々な二次的効果も期待されている<sup>(3)</sup>。

海外における民生用熱電併給システムの歴史は特に新しいものではなく、19世紀末冬期の寒さが厳しいアメリカ合衆国北部やヨーロッパ諸国における地域暖房から始まったと言われている<sup>(4)</sup>。当時火力発電所は規模が小さく、市街

地周辺に建設されていたこと、および蒸気を放出していたことが理由で、蒸気を地域的に暖房・給湯用に供給していた。一方、我が国では気候が比較的温暖であるため、民生用熱電併給システムは発達せず、産業用システムに限られていた。たとえば、各種大規模工場においては、発電とプロセス用蒸気供給のための熱電併給システムが第二次大戦以前から盛んに設置されていた<sup>(5)</sup>。また船舶では、オイル・ショック以来大形船のみならず中・小形船においても、推進動力を発生する過程で生じる熱エネルギーを船内の電力および熱エネルギー供給に利用する熱電併給システムが採用されてきた<sup>(6)</sup><sup>(7)</sup>。しかしながら、近年社会・経済レベルの向上に伴う冷暖房・給湯などエネルギー需要の多様化により、上記のような産業用システムに加え、ホテルや事務所ビルを中心とする個別建物単位の民生用熱電併給システムが急速に普及しつつある。また、地域冷暖房と結合された熱電併給システムも実現しており<sup>(3)</sup><sup>(8)</sup>、今後都市再開発の進展に伴って、地域的広がりをもつ熱電併給システムが従来の大規模発電システムを補完する形で普及してゆくものと予想される。

ところで、熱電併給システムの第一の特徴は、上述のように熱エネルギーのカスケード的利用によりシステム全体としての総合熱効率を向上させる点にあるが、そのためにはシステムの構成機器に関する個別要素技術だけではなく全体に関するシステム技術の発展も必要不可欠であると考えられる<sup>(9)</sup>。個別要素技術は各機器の高効率化という工学における永遠の目標を追及するものであり、その重要性は言うまでもない。しかしながら、熱電併給システムは種々の機器から構成されているため、各機器をいかに組合せてシステム全体を構成するかという設計計画や、構成機器をいかに組合せてシステムを運用するかという運用計画に関するシステム技術もより一層重要な課題である。その理由は、たとえ個別要素技術によって開発・改良された高効率の機器をシステム構成機器として採用しても、システム全体の設計計画や運用計画に関するシステム技

術が未熟なものであれば、各機器が有する性能を十分発揮させることができず、熱電併給システム本来の特徴であるシステム全体としての高効率化や省エネルギー化が達成不可能となるためである。また、将来ますます多様化するエネルギー需要に対応するために、コンバインド・サイクル方式<sup>(10)</sup>やチェン・サイクル方式<sup>(11)</sup>などより柔軟性の高い熱電併給システムも導入されてゆくものと思われる。その場合、熱電併給システムにおける柔軟性が増し設計や運用の自由度が大きくなるに伴って、設計計画や運用計画が一層困難なものになり、それを解決するためのより高度なシステム技術が要求されるであろう。

しかしながら、熱電併給システムの設計計画や運用計画は、基本的にシンセシスが中心となるため、非常に複雑で困難さをきわめる問題である。たとえば、システムの基本設計段階においては、エネルギー需要に適合したシステム全体の方式や規模の選定、およびシステム構成機器の規模や台数の決定などの設計計画、またシステムの運用段階においては、各システム構成機器の負荷配分の決定などの運用計画を行う必要がある。その場合、種々のシステム構成機器の候補をいかに組合せてシステム全体を構成し、またエネルギー需要の変動に対して構成機器をいかに組合せて運用するかという組合せ問題が生じ、計画の代替案がきわめて多く存在するため、代替案の中から最適計画案を選定することが非常に困難となる。したがって、計画は設計者の従来からの経験に基づく試行錯誤的方法に頼らざるをえず、計画案の合理性が十分に検討されていないのが現状である。たとえば、民生用熱電併給システムに関して過去に総合的な研究・調査が行われており、その中で設計および運用計画に関する検討もなされているが、いずれも比較的簡単なシミュレーションによる分析的方法を採用しているにすぎない<sup>(12)~(14)</sup>。このようにシンセシスの困難さのために、熱電併給システムの設計計画や運用計画に関するシステム技術は依然として未熟なものであり、十分に確立されているとは言えない。

本論文では、シンセシスの一手段として最適化法を導入し、熱電併給システム本来の目的であるシステム全体としての省エネルギー性や経済性の観点から合理的に設計および運用計画を行うための最適計画手法を構築することを目的とする。上述のように熱電併給システムの設計および運用計画においては組合せ問題的性質が強いため、本論文では計画問題を組合せ最適化問題<sup>(15)~(17)</sup>としてとらえる。また計画問題の解法として組合せ最適化法を拡張・適用し、システムの最適な機器構成や機器運用方策を決定する。以下に本論文の各章の概要を述べる。

第2章では、熱電併給システムの設計および運用計画における重要課題を考慮した最適計画手法について、基本的考え方を述べる。まず、設計および運用計画において考慮すべき重要課題を明らかにする。次に、本論文の計画事例において検討対象とする船用および陸上の民生用熱電併給システムの設計および運用計画に対して従来から採用されてきた方法、および熱電併給システムに限らず各種プラント・システムの設計および運用計画に対して従来から提案されている最適計画手法を展望し、その問題点を指摘する。最後に、本論文で提示する熱電併給システムの最適計画手法について基本的考え方を述べる。

第3章では、熱電併給システムの最適設計および最適運用計画を実行するために必要となる組合せ最適化法について、基本的考え方とその拡張方法を述べる。まず、最も基本的な方法である列挙法と本論文で中心に適用する分枝限定法について、その考え方を述べる。次に、線形計画法と分枝限定法を組合せた混合整数線形計画法のアルゴリズムを示した後、それを混合離散変数線形計画法および混合離散変数非線形計画法のアルゴリズムに拡張する。最後に、より効率よく最適化計算を行う目的で変数の階層的関係を考慮した分枝限定法のアルゴリズムを開発する。

第4章では、列挙法と混合整数線形計画法に基づく熱電併給システムの最適



設計計画手法を提示する。この手法は、最適設計計画問題を上位レベルの課題である機器構成問題と下位レベルの課題である機器最適運用計画問題に階層的に分離し、長期的経済性の観点から年間総経費を最小化するように、混合整数線形計画法により最適運用方策を考慮しながら列挙法により最適構成を決定するものである。まず、比較的簡単なエネルギー供給システムに対して最適設計計画問題の一般的定式化とその解法を示す。次に、設計計画事例として設計項目が異なる二つのLNG船熱電併給システムの設計計画に本手法を適用し、その有効性を示す。

第5章では、混合離散変数計画法に基づく熱電併給システムの最適設計計画手法を提示する。この手法は、第4章の手法と異なり、機器規模を表す離散変数を導入し、機器の性能特性や設備費をこの離散変数の関数として表すことにより最適設計計画問題を混合離散変数計画問題として定式化し、最適運用方策だけではなく最適構成も分枝限定法により効率的に決定するものである。第4章と同様に、まず比較的簡単なエネルギー供給システムに対して最適設計計画問題の一般的定式化を示した後、目的関数や制約条件が変数に関して線形関数で与えられる場合、および非線形関数で与えられる場合について、それぞれ混合離散変数線形計画法および混合離散変数非線形計画法のアルゴリズムを適用した解法を示す。またこの場合、変数の階層的関係を考慮した分枝限定法のアルゴリズムを組み込み、効率よく最適解を導出する。最後に、設計計画事例としてディーゼル船およびLNG船熱電併給システムの設計計画に本手法を適用した結果を示し、その有効性を示す。

第6章では、運用計画についてより詳細に検討するために、混合整数線形計画法に基づく熱電併給システムの最適運用計画手法を提示する。この手法は、エネルギー需要の時間的変動に伴う機器運用方策を、経済性の観点から運用費を最小化するように決定するものである。まず、ガスタービン発電・廃熱ボイ

ラ方式を計画事例として，システムの一般的機器構成に対して最適運用計画問題を混合整数線形計画問題として定式化する．次に，年間を通じてエネルギー需要の変動に対する最適運用方策を組織的に算定できるように，最適運用方策算定システムを構築する．最後に，具体的検討事例として熱電併給システムのある導入計画に本手法を適用し，最適運用方策の算定と省エネルギー性および経済性の評価を行い，本手法の有効性を示す．

第7章では，結論として本論文で得られた成果を総括する．

## 第2章 熱電併給システムの設計および運用計画と最適計画手法

### 2.1 緒 言

本章では，熱電併給システムの設計および運用計画におけるいくつかの重要課題を明らかにし，それらを考慮しながら合理的に計画を行うための最適計画手法について基本的考え方を述べる．まず，熱電併給システムの設計および運用計画における検討課題として，(a)システムの方式の選定，(b)システム構成機器の規模と台数の選定，(c)システム構成機器の運用方策の決定という階層的に異なるレベルの課題について，考慮すべき事項を述べる．次に，本論文における計画事例で検討対象とする船用および陸上の民生用熱電併給システムの設計および運用計画において，従来採用されてきた方法について述べ，その問題点を指摘する．また各種プラント・システムに対して従来提案されてきた最適計画手法についても展望する．最後に，本論文で提示する熱電併給システムの設計および運用計画に対する最適計画手法の基本的考え方を示す．

### 2.2 設計および運用計画における課題

第1章にも述べたように，熱電併給システムによる省エネルギー化の達成には，個別要素技術だけではなくシステム全体の設計および運用計画に関するシステム技術の確立がより一層重要である．本節では，熱電併給システムの設計

および運用計画におけるシンセシスの手法を構築するにあたり、まず考慮すべき重要課題を明らかにする。

一般に、熱電併給システムの基本設計段階においては、少なくとも種々のエネルギー需要を満足するように各種設計項目を決定する必要がある。しかも、システム全体としての省エネルギー性や経済性の向上を達成するよう考慮しながら合理的に設計することが重要である。その場合、以下に述べる多くの事項を考慮しておく必要がある。

まず第一に、設計計画における決定項目として次のような課題を検討する必要がある。

レベルⅠ：熱電併給システムの方式の選定

レベルⅡ：レベルⅠで選定された方式におけるシステム構成機器の規模や台数の選定

レベルⅢ：レベルⅡで選定されたシステム構成機器の運用方策の決定

これらの課題は階層的にレベルが異なるが、以下に述べるように独立に考慮することができず、総合的に検討しなければならない。最上位のレベルⅠでは、設計計画の対象の規模に応じて、何らかの方法で方式を選定する必要がある。エネルギー需要量の大きさを基準にして好適な方式を選定する方法も考えられるが、合理的な方法であるとは言いがたい。合理性に富む最適方式の選定は、各方式の経済性を比較検討し、その結果に基づいて実行する必要がある。この場合、システムの経済性はレベルⅡのシステム構成機器の規模や台数の選定によって大きな影響を受けるため、各方式の経済性を評価するにはレベルⅡの課題を同時に考慮しなければならない。また、各方式の中でできる限り経済性を向上させるようにシステム構成機器の規模や台数を選定するのが望ましい。さらに、経済性は機器構成に関連する設備費だけではなく、運用方策に関連する運用費によっても影響を受けるので、レベルⅡの機器構成の決定はレベル

IIIの運用方策を同時に考慮しながら実行する必要がある。このように上位レベルの課題の検討にはまず下位レベルの課題の検討が必要となる。その結果、設計計画を行う場合には異なるレベルの課題を総合的に検討しなければならず、熱電併給システムの設計計画はきわめて困難な課題となる。

次に、機器構成や機器運用方策において非常に多くの代替性を考慮しなければならない。一般に熱電併給システムにおいては、一つのエネルギーが幾種類かの構成機器、あるいは複数台の同種の構成機器によって供給される。したがって、各機器の規模や台数の選定、および運用方策の決定にはいくつかの代替性が存在するため、システム全体の設計計画を行う場合には、結果的に機器構成や運用方策に関してきわめて多くの代替案が生じる。この場合、部分的に代替性を考慮しながら設計計画を進めてゆく方法も考えられるが、本来の目的であるシステム全体としての省エネルギー化を達成するには、システム全体の代替性を同時に考慮する必要があるであろう。ところで、システム構成機器は通常幾種類かの標準要目の中から選定されるため、機器台数だけではなく機器規模に関しても離散性を考慮する必要がある。また機器運用方策を検討する場合、決定項目として機器の負荷レベルだけではなく運転・停止による性能特性の不連続性を考慮する必要がある。たとえば、ディーゼル発電機では低負荷運転を行うと燃焼効率が低下し、機関に汚れが生じる。そのため安定運転が行えるように、機器規模に従って運転可能な負荷レベルの範囲が定められている<sup>(18)</sup>。したがって、機器の構成や運用方策の代替性の検討は、機器の規模や台数の離散性、および性能特性の不連続性を考慮することによって組合せ問題的性質を有することになる。これも設計計画を困難なものにする要因の一つと考えられる。

最後に、エネルギー需要の変動も無視できない問題の一つである。たとえば、化学プラントのユーティリティ・システムのように長期間にわたってほとんどエネルギー需要の変動がない場合<sup>(19)</sup>、あるいは船用熱電併給システムのように

にいくつかは大別された船舶の運航状況に対してエネルギー需要量が推定される場合<sup>(20)</sup>も考えられるが、一般的にはエネルギー需要は季節的および時間的に変動する。特に民生用熱電併給システムにおいては、冷暖房・給湯による熱エネルギー需要は季節的にも時間的にも変動が激しい。このような場合、エネルギー需要の変動とは無関係に、まず第一にシステム全体として最大エネルギー需要を満足するように計画する必要がある。さらにそれに加えて、システムの運用段階だけではなく基本設計段階においても、エネルギー需要の変動に伴う機器運用方策をできる限り詳細に検討し、経済性を向上させることが重要である。

以上のように、熱電併給システムの設計および運用計画においては検討すべき課題が多く存在する。しかもそれらは互いに関連しており、総合的に検討すべき課題であるため、設計計画を非常に難しいものになっている。

## 2.3 設計および運用計画に関する従来の研究

本節では、2.2節で述べたような多くの課題が存在する熱電併給システムの設計および運用計画に対して、従来から採用されてきた方法について述べる。ここでは事例として、本論文における計画事例で検討対象とする船用および陸上の民生用熱電併給システムに関する従来の研究を紹介する。

### 2.3.1 船用システム

第1章で述べたように、船舶においては歴史的に古くから熱電併給システムが採用されており、またオイル・ショック後にも陸用に先がけて熱電併給システムの高度化が図られている。このような意味において、船用システムは熱電

併給の基本的考え方を理解する上で有効であると考えられるので、まずこれを取り上げる。

船舶においては推進用動力の需要だけではなく、照明用および各種機器動力用としての電力や、空調・給湯用および燃料予熱用としての熱エネルギーの需要も発生する。このように船用熱電併給システムの特徴は、推進用動力を発生する過程での余剰熱エネルギーを船内の電力および熱エネルギーとしてカスケード的に利用する点にある。オイル・ショック以来大形船のみならず中・小形船においても、低燃費型のディーゼルエンジンを推進機関とし、ディーゼル発電機と補助ボイラによる電力と熱エネルギーの供給に加えて、ディーゼルエンジンの廃熱を排ガス・エコノマイザによって回収し蒸気をターボ発電機への供給と熱エネルギーとして用いる省エネルギー・システムが多く採用されるようになってきた<sup>(6)(7)</sup>。しかしながら、このようなシステムの設計計画では、船内の電力および熱エネルギーの最大需要量に基づき、機器の規模や台数を試行錯誤的に決定してゆくという方法が広く採用されてきた。たとえば高木と上田は、機器の規模や台数の二、三の代替案について省エネルギー性や経済性に関する比較を行っているが<sup>(21)</sup>、それが合理性に富む計画案であるかどうかの検討を十分に行っていない。また、運用方策に関しては、常用航海中の検討は行われているが、出入港時や荷役時なども含めて総合的には検討されていない<sup>(6)</sup>。

一方、石油の代替エネルギー源の一つとして利用される天然ガスを輸送するLNG船においては、推進機関として従来蒸気タービンが採用されてきたが<sup>(22)</sup>、近年の省エネルギー化に伴って燃費の悪い蒸気タービン・システムに代り、低燃費型の他の推進システムの採用が計画されている。ところで、天然ガスは $-162^{\circ}\text{C}$ という極低温の液化状態で輸送されるため、LNGタンクから常時ボイルオフガスが発生する。ボイルオフガスの処理方法は重要な設計課題の一つであり<sup>(23)</sup>、従来の蒸気タービン・システムにおいては、ボイルオフガス

を重油とともに主ボイラで燃焼させる方式が採用されてきた。しかしながら、上記の低燃費型の推進システムの計画においては、ボイルオフガスの処理方法が異なるため、ボイルオフガスの発生量に直接影響を及ぼすLNGタンクの防熱材厚さの再検討も行われている。このような省エネルギー型推進システムに関しては、KvamsdalとKoren<sup>(24)</sup>、および山川<sup>(25)</sup>によって比較的簡単な運航経済性の試算に基づきいくつかの方式に対する比較が行われている。ところが、一つの方式に対する下位レベルの課題である構成機器の規模や台数、および運用方策に関する代替性については全く考慮されていない。

以上のように船用熱電併給システムについては、下位レベルの課題である機器の規模や台数、さらには機器運用方策に関する代替性をほとんど考慮せずにシミュレーション的にシステムの省エネルギー性や経済性が評価されているにすぎず、システムの設計計画法が十分に確立されているとは言えない。

### 2.3.2 陸用システム

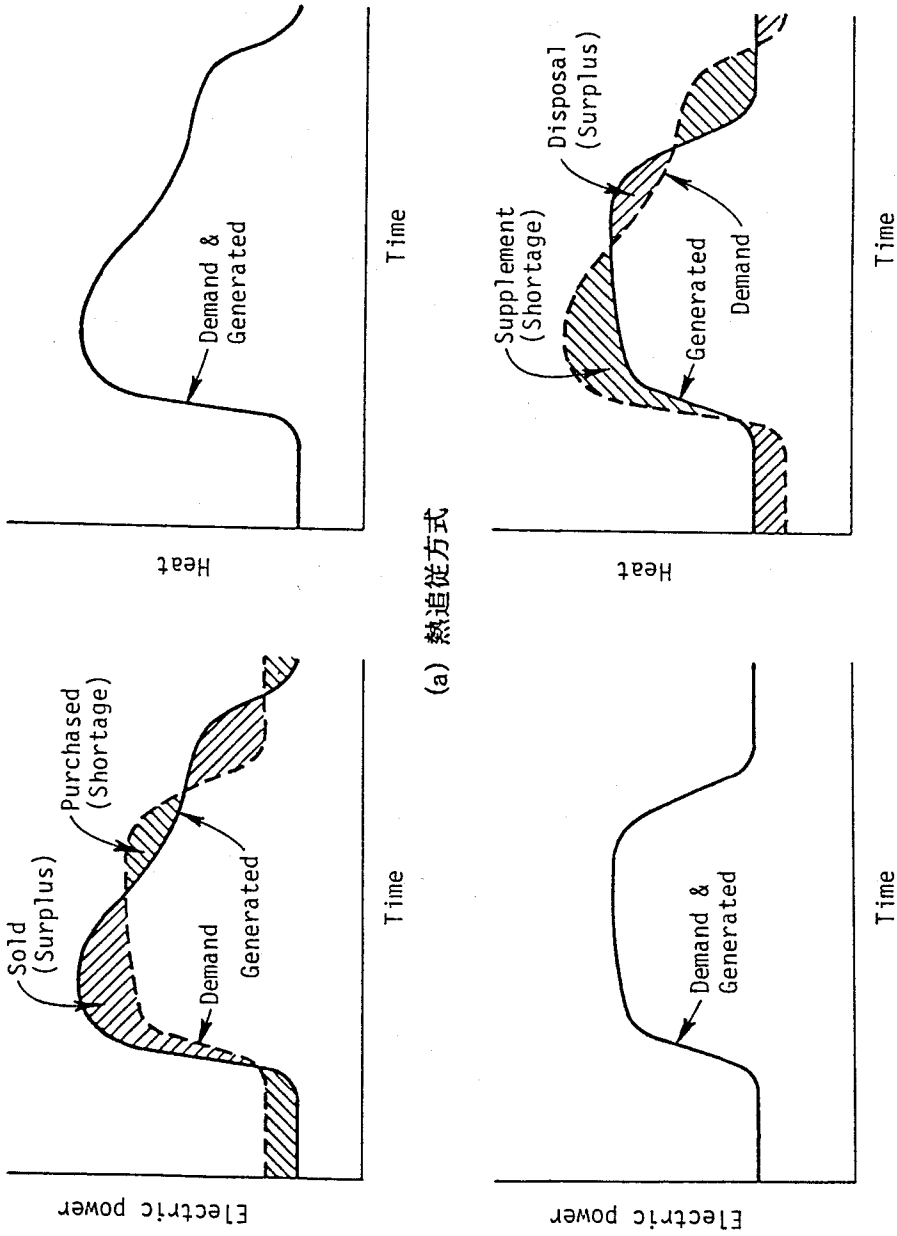
陸上の民生用熱電併給システムは、主機としてガスエンジンやディーゼルエンジンを採用した個別建物単位のシステムを中心に近年急速に普及しつつある。また、地域社会のための新しいエネルギー供給システムとして、ビル内の自家発電と地域冷暖房を組合せたより大規模なガスタービン主機とするシステムも実現しており<sup>(3)(8)</sup>、今後は都市再開発の進展とともにこのような地域的広がりをもつ熱電併給システムも普及してゆくものと思われる。

上記のような民生用熱電併給システムに関しては、過去に個別建物や具体的地域を対象とした総合的な研究・調査がいくつか行われており、その中で設計および運用計画に関する検討もなされている<sup>(12)~(14)(26)</sup>。井上・高田らは、ガスエンジン熱電併給システムについていくつかの電力需要パターンを想定し、予め決定した機器構成に対して経済性を評価し比較検討している<sup>(12)</sup>。また平



田らは、ホテル、病院、事務所ビル、店舗の個別建物に対して規模別に代表的エネルギー需要量を想定し、ディーゼルエンジンおよびガスエンジンを主機とする熱電併給システムについて省エネルギー性と経済性の評価を行っている<sup>(13)</sup>。ここではシステムの運用方策に関していくつかのルールを仮定し、比較的簡単なシミュレーションによる算定を行っている。さらに早川らは、ディーゼルエンジンおよびガスエンジンを主機とする熱電併給システムについて、エンジンの運用方策を電力の負荷に応じて変化させるモデルをいくつか設定し、それらの省エネルギー効果を算定し比較検討している<sup>(14)</sup>。しかしながら、いずれも比較的簡単なシミュレーションによる分析が中心となっており、運用方策として適用されるルールやモデルが熱電併給システム全体の省エネルギー性や経済性を考慮して構築されたものではない。したがって、適用されている運用方策が十分に合理性をもっているとは言いがたい。

一方、熱電併給システムの一つの運用方策として、図2.1(a)，(b)に示すように熱エネルギー需要、あるいは電力需要のどちらか一方の変動に応じて主機の負荷レベルを変化させる方式が提案されている<sup>(27)</sup>。それらは、それぞれ熱追従方式および電力追従方式と呼ばれており、それらの運用方策に基づくシミュレーション的方法によって省エネルギー性や経済性の評価も行われている<sup>(28)~(30)</sup>。熱追従方式あるいは電力追従方式によれば単純な機器構成の熱電併給システムに対してのみ運用方策が唯一に定まり、上記のようなシミュレーションも実行可能である。しかしながら、たとえば冷房供給機器として電動ターボ冷凍機と蒸気吸収冷凍機がともに設置されている場合、冷房需要量に応じてこれらの機器の運用方策に関するルールを定めない限り熱電併給システムに対するエネルギー需要が決定されないため、運用方策として熱追従方式や電力追従方式を適用することはできない。また図2.1(a)，(b)に示すように、熱追従方式や電力追従方式によればそれぞれ電力や熱エネルギー需要に対する供給の過不



(a) 熱追従方式

(b) 電力追従方式

図2.1 熱電併給システムに対する従来の運用方策

足が生じる恐れがあり、熱電併給本来の目的である省エネルギー性の観点からの合理性に富む運用方策とは言いがたい。

このように熱電併給システムの運用計画だけを取り上げても、十分合理性に富む計画手法は見当らない。したがって、機器の規模や台数の決定というより上位レベルの課題である設計計画に関する研究はほとんど着手されていない。たとえば、上述のようにシミュレーション的方法によっていくつかの機器構成に関する代替案に対して省エネルギー性や経済性の比較検討が行われているにすぎない。また最上位レベルの課題である熱電併給システムの方式の選定に関しては、主機となる機種 of 適用可能規模とエネルギー需要とを比較しながら判断されているのが現状であり、合理的な判断基準は特に明確に定められていない。

上述のように、陸上の民生用熱電併給システムに関して運用計画を中心に多くの研究がなされているが、いずれもシミュレーション的方法に基づくものであり、設計計画は言うに及ばず運用計画に関するシステム技術も依然未熟なものである。

## 2.4 最適計画手法に関する従来の研究

2.3節で述べたシミュレーション的方法に対して、船用および陸上の民生用熱電併給システムに限らず、各種プラント・システムの設計および運用計画に関して、シンセシスの一手段として最適化法を導入した研究もいくつか行われている。本節では、このような最適計画手法に関する従来の研究を展望する。

まず最適運用計画に関する研究として、NathとHollidayは、化学プラントのユーティリティ・システムにおけるエネルギー管理に最適化法として混合整数

線形計画法を導入している<sup>(31)</sup>。またDucrocqは、工場における蒸気タービンを主機とする熱電併給システムのエネルギー管理に混合整数線形計画法を適用したモデルを提示している<sup>(32)</sup>。三宮らは、酸素プラントの最適運用計画問題を混合整数線形計画問題として定式化し、角形構造をもつ問題を短時間で解くために分解法を適用している<sup>(33)</sup>。また小松と玉丸<sup>(34)</sup>、および加藤と鈴木<sup>(35)</sup>は、非線形計画法を用いて工場における蒸気タービンを主機とする熱電併給システムの最適運用計画を行っている。しかしながら、これらの研究においては機器の運転・停止による性能特性の不連続性を考慮していない。さらに伊藤らは、実用的なトータル・エネルギー管理システムを開発しているが<sup>(36)</sup>、最適運用計画手法は基本的には線形計画法に基づいており、機器の性能特性における不連続性を考慮していない。以上に述べた研究は、システムの運用段階において構成機器の最適運用方策を求めるためのもので、手法の提示が中心となっている。しかしながら、基本設計段階における適用、あるいは手法の適用による詳細な結果は述べられていない。

一方、最適設計計画に関する研究として、赤木らはディーゼル船の熱電併給システムに対して、4つの運用モードに対するシステム構成機器の運用方策を考慮しながら規模と台数を決定する最適設計計画手法を提示している<sup>(37)</sup>。この研究は、機器の性能特性であるエネルギーの入出力関係が線形関係で表される場合について検討しているが、伊東らは同一システムに対してエネルギーの入出力関係が非線形関係で表される場合についても検討している<sup>(38)</sup><sup>(39)</sup>。これらの研究では機器規模の離散性や性能特性の不連続性を考慮しているが、最適化計算においては機器の規模や台数、および運転・停止に関するすべての組合せを列挙しながら最適設計解を求めている。したがって、最適解の導出はあまり効率よく行われていない。また朴らは、陸上の民生用ガスタービン熱電併給システムに対して混合整数線形計画法を用いて最適設計計画を行っている

(40) . しかしながら、年間のエネルギー需要の変動をわずか5つの運用モードに集約して運用方策を検討しており、エネルギー需要の変動が激しい民生用システムに対する検討方法としては不十分であると考えられる。Caldonは、エネルギー需要の変動を詳細に考慮するために負荷累積曲線を用いて熱電併給システムの最適規模を決定する方法を提示しているが(41) , 運用方策を予め負荷累積曲線に従って決定しており、合理性がある方法とは言えない。PapouliasとGrossmannは、化学プラントにおけるユーティリティ・システムの構成機器の規模を決定する設計計画問題に混合整数線形計画法を適用している(19) . またJohnsonらは、工場の熱電併給システムの設計計画に同様の手法を適用している(42) . しかしながら、これらの研究では機器規模の離散性やエネルギー需要の変動を考慮していない点など、一般の熱電併給システムに適用できないいくつかの問題点がある。さらに対話型のプラント・システム構成計画用シミュレータも開発されているが(43) (44) , 2.2節で述べた課題は十分に考慮されていない。

以上に述べたように、各種プラント・システムの設計および運用計画に対していくつかの最適計画手法が提案されている。しかしながら、各方法について問題点を指摘したように、最適計画手法が十分に確立されているとは言えない。

## 2.5 本論文の最適計画手法の基本的考え方

本論文では、熱電併給システムの設計および運用計画に対し、2.4節で述べた計画手法と同様にシンセシスの一手段として最適化法を導入し、2.2節で挙げた諸課題を総合的に考慮した最適計画手法を基本的に構築することを目的とする。ただし、課題のうちレベルIに位置づけられる熱電併給システムの

方式の選定は、いくつかの候補に以下に述べる最適計画手法を適用して設計計画を行った後、経済性などの比較に基づいて実行できるものと判断し、方式の選定に関しては言及しない。ここでは、与えられた熱電併給システムの方式に対するレベルⅡのシステム構成機器の規模と台数の決定に関して、次のような最適設計計画手法を提案する。すなわち、長期的経済性の観点から熱電併給システムの設備費と運用費とを含む総経費を最小化するように、システム構成機器の規模と台数、ならびにエネルギー需要の変動に対するシステム構成機器の運用方を最適決定する。システムの総経費の評価には年価法<sup>(45)</sup>を採用し、年間総経費を最小化すべき目的関数とする。また、各機器の構成条件および性能特性を表すエネルギーの入出力関係、ならびに構成機器間のエネルギー・バランスおよび需給関係をそれぞれ制約条件として考慮する。ただし、上記の設計計画ではエネルギー需要の時間的変動に対して詳細にシステム構成機器の運用方を検討することが非常に困難であるため、ここではいくつかの代表的運用モードを設定し、各モードについて推定されたエネルギー需要量に対して機器運用方を決定するものとする。

本論文では、上記の最適設計計画問題を解くために次の二つの方法を採用する。

方法Ⅰ：機器の最適構成と最適運用方を階層的に決定する。

方法Ⅱ：機器の最適構成と最適運用方を同時に決定する。

2.2節で述べたように、機器構成と機器運用方は総合的に検討する必要がある。しかしながら、いったん上位レベルの課題である機器構成が決定されると、各運用モードに対してできる限り経済性に優れた、すなわち運用費を最小とする機器運用方を決定することができる。方法Ⅰはこの考え方に基づき機器の構成問題と運用計画問題を階層的に考慮するものである。すなわち、上位レベルの課題として機器構成の候補となる機器の規模や台数に関するすべての

組合せを列挙し、各組合せについて下位レベルの課題である機器の最適運用方を考慮しながら目的関数である年間総経費を求め、年間総経費を最小とする組合せを最適機器構成とする。したがって、方法Ⅰでは機器構成の各組合せについて最適運用方を算定する場合に最適化法を適用する。本論文では機器の運転・停止条件を0-1整数変数によって、また負荷レベルを連続変数によって表し、最適運用計画問題を混合整数線形計画問題として定式化する。この運用計画問題に対する考え方は、2.4節で述べた最適運用計画手法に関する従来の研究の考え方<sup>(31)~(33)</sup>と基本的に同様である。方法Ⅰでは運用モードごとに独立に最適運用方を算定できるので、最適運用計画問題の規模が小さくなり、比較的簡単に解ける。しかしながら、機器構成の決定にはすべての機器候補の組合せについて最適運用計画問題を解く必要があり、反復計算に時間を要する。特に選定可能な機器候補が多い場合に組合せ数が莫大になる恐れがある。そこで、本論文では方法Ⅱについても検討する。方法Ⅱは機器規模を表す媒介変数を導入し、最適化計算に必要な規模の異なる機器の性能特性や設備費を媒介変数の関数として表現し、方法Ⅰの機器構成に関する反復計算の代りに最適化計算を行おうとするものである。ただし、機器規模の離散性を考慮するため、上記の媒介変数は選定候補となる機器の規模に対応する離散値を取るものとする。方法Ⅱでは、すべての運用モードに対する最適運用計画問題を同時に解く必要があり、問題の規模がかなり大きくなる場合がある。しかしながら、選定候補となるいくつかの規模の機器を一つの媒介変数で表現できるので、選定候補が多い場合に特に有利であると考えられる。機器規模は整数値に対応させるだけでは不十分であり、一般的な離散値に対応させる必要がある。そこで、本論文では混合整数線形計画法のアルゴリズムを拡張して混合離散変数計画法のアルゴリズムを開発し、適用する。

設計計画事例においては、上述の最適設計計画手法をディーゼル船およびL

NG 船熱電併給システムの設計計画に適用する。2.2 節で述べたように船用システムではエネルギー需要の時間的変動が激しくなく、一般にいくつかに大別された船舶の運航状況に対してエネルギー需要量が推定される<sup>(20)</sup>。したがって、本論文でも運用モードとして船舶の航海サイクルをいくつかに区分した航海パターンを考え、各パターンについて推定されたエネルギー需要量に対して機器運用方策を検討する。

しかしながら、陸上の民生用熱電併給システムにおいてはエネルギー需要の季節的および時間的変動が激しいため、エネルギー需要をいくつかの運用モードに集約して考慮するのが困難であると考えられる。多くの運用モードを考慮しながら最適設計計画を行うことは方法論上は可能であるが、実際は最適化計算におけるメモリー上あるいは時間上の制約によりきわめて困難である。そこで、計画事例として取り上げるガスタービン発電・廃熱ボイラ方式熱電併給システムに関しては、下位レベルの課題である運用計画についてのみ検討し、システムの運用費を最小化するように構成機器の運用方策を最適決定するという、混合整数線形計画法に基づく最適運用計画手法を提案する。ただし、熱電併給システムの運用に必要な補機の動力も考慮するなど、運用計画をより詳細に検討する。またシステムの設計計画を支援するための最適運用方策算定システムを構築し、年間のエネルギー需要の変動に対する最適運用方策を組織的に算定できるようにする。

## 2.6 結 言

本章では、熱電併給システムの設計および運用計画において検討すべき重要課題を明らかにした。また、熱電併給システムの設計および運用計画に対して



従来から採用されてきた方法，および各種プラント・システムに対して従来から提案されてきた最適計画手法を示し，その問題点を指摘した．最後に，本論文で提示する最適計画手法の基本的考え方を示した．

## 第3章 組合せ最適化法の拡張と システム設計への適用

### 3.1 緒 言

本章では，2.2節で述べたように組合せ問題的性質を有する熱電併給システムの設計および運用計画を合理的に実行するために必要となる組合せ最適化法について，基本的考え方とその拡張方法について言及する．組合せ最適化法に関する研究は特にORの分野で精力的に行われており<sup>(46)(47)</sup>，種々の特殊構造を有する組合せ最適化問題を効率よく解くための方法も提案されている<sup>(15)(16)</sup>．しかしながら，本論文の対象としている熱電併給システムの設計および運用計画に適合するような方法は特に見当たらない．そこで本論文では，非常に汎用的で実用性の高い分枝限定法<sup>(48)</sup>を中心に適用する．

まず，2.5節で方法Iとして提示した最適設計計画手法に適用する最も基本的な方法である列挙法<sup>(49)</sup>，ならびに本論文で中心に適用する分枝限定法について基本的考え方を述べる．次に，線形計画法と分枝限定法を組合せた混合整数線形計画法のアルゴリズム<sup>(50)</sup>について述べる．この方法は熱電併給システムの最適運用計画手法に適用する．さらに，2.5節で方法IIとして提示した最適設計計画手法においては，機器規模を表す離散変数を未知変数として考慮するため，この手法に適用可能なように上記アルゴリズムを混合離散変数線形計画法のアルゴリズムに拡張する．また，機器の性能特性などの非線形性を考慮したより複雑な非線形問題にも適用可能なように，非線形計画法の一つである一般縮小こう配法<sup>(51)(52)</sup>と分枝限定法の有機的結合により混合離散変数

非線形計画法のアルゴリズムを構築する。最後に、より効率よく最適化計算を行う目的で変数の階層的関係を考慮した分枝限定法のアルゴリズムを開発し、それを上記の混合離散変数線形計画法および混合離散変数非線形計画法のアルゴリズムに組み込む。

## 3.2 列挙法と分枝限定法

### 3.2.1 列挙法の基本的考え方

組合せ最適化問題は、全整数計画問題あるいは混合整数計画問題として定式化される場合が多い。すべての整数変数の許容値が有限個しか存在しない限り、全整数計画問題の実行可能解は有限個しか存在しない。この場合、すべての実行可能解を列挙し、その中で目的関数を最小(あるいは最大)にするものが最適解となる。また混合整数計画問題に関しては、すべての整数変数の許容値のあらゆる組合せに対して目的関数を最小(あるいは最大)にするように連続変数を決定し、各組合せの比較によって目的関数を最小(あるいは最大)にするような整数変数の値の組合せを選定すれば、最適解が求められる。このようなきわめて基本的な方法を列挙法と呼ぶ。列挙法を適用すれば、原理的には組合せ最適化問題を必ず解くことができる。しかしながら、たとえば20個の0-1整数変数を含む問題では、 $2^{20}=1048576$ 個の実行可能解を求めて目的関数の値を比較する必要があり、大型計算機を用いるとしてもこのような大規模な問題を解くことは実際上困難である。そこで、整数変数の許容値のあらゆる組合せに対する実行可能解を調べることなく、より合理的に最適解を求めることが重要となる。次に述べる分枝限定法は、分枝・限定操作によってそれを実現するものである。本論文では基本的には分枝限定法を適用するが、熱電併給システムの最適設計

計画における方法 I では、整数変数の数の増加に伴う問題規模の増大を防ぐために、一部に列挙法を採用する。

### 3.2.2 分枝限定法の基本的考え方<sup>(53)</sup>

次の最適化問題  $(P_0)$  を考える。

$$(P_0) \begin{cases} \text{最小化} & z = f(\mathbf{x}) \\ \text{制約条件} & \mathbf{x} \in X_0 \end{cases} \dots\dots\dots(3.1)$$

ここで、 $z$  は目的関数、 $f(\mathbf{x})$  はそれを表す関数、 $\mathbf{x}$  は変数ベクトル、 $X_0$  は実行可能領域をそれぞれ示している。この問題  $(P_0)$  が直接的に解くことが困難である場合、 $X_0$  をいくつかの実行可能領域  $X_1, X_2, \dots$  に分割し、各部分実行可能領域に対する問題である子問題

$$(P_r) \begin{cases} \text{最小化} & z = f(\mathbf{x}) \\ \text{制約条件} & \mathbf{x} \in X_r \end{cases} \quad (r = 1, 2, \dots) \dots\dots\dots(3.2)$$

を考える。この場合、すべての子問題  $(P_r)$  の最適解の中で  $z$  を最小にするものが元の問題  $(P_0)$  の最適解である。 $(P_r)$  が  $(P_0)$  と同様に直接的に解けない場合には、 $X_r$  をさらにいくつかの実行可能領域に分割し、各部分実行可能領域に対する子問題を生成してゆく。分枝操作と呼ばれる上記のプロセスは、図 3.1 に示すような各子問題を頂点とする列挙木によって表現できる。分枝操作

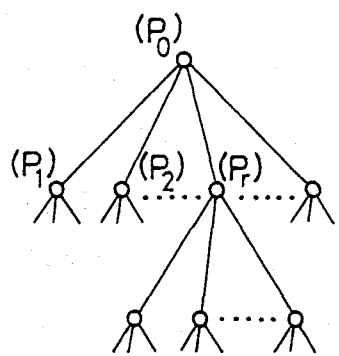


図3.1 列挙木

は部分実行可能領域に対する子問題が直接的に解くことが可能になるまで続けられる。たとえば全整数計画問題では、分枝操作は各整数変数を一つずつ整数値に固定する操作に対応する。したがって、以上の操作には特に列挙法と異なる点が見られないが、分枝限定法では次に述べる限定操作によって列挙木の生成を減少させ、効率よく最適解を探索することができる。

限定操作は、緩和問題における目的関数の最適値として求められる下界値に基づいて判断・実行される。緩和問題とは、制約条件の一部あるいは全部を緩和して、直接解くのが困難な問題を比較的簡単に解けるようにしたものである。式(3.2)の子問題( $P_r$ )の緩和問題( $P_r'$ )は次式のように表現できる。

$$(P_r') \left\{ \begin{array}{l} \text{最小化} \quad z = f(\mathbf{x}) \\ \text{制約条件} \quad \mathbf{x} \in X_r' \end{array} \right. \quad (r=1, 2, \dots) \dots\dots\dots(3.3)$$

ここで、 $X_r'$ は緩和問題における実行可能領域であり、 $X_r \subseteq X_r'$ である。この場合、( $P_r'$ )の目的関数の最適値は( $P_r$ )の目的関数の最適値以下の値になり、( $P_r$ )の目的関数の下界値 $z_r$ を与える。いま( $P_0$ )の目的関数の暫定最適値である上界値 $z$ が求められているものとする。この場合 $z_r > z$ ならば、部分実行可能領域 $X_r$ 内では目的関数の値が $z$ 以下の値になる可能性はない。したがって、( $P_r$ )が直接的に解くことが困難な問題であっても、さらに分枝操作により $X_r$ の各部分実行可能領域を決定し、新たな子問題を生成する必要がない。このような場合には、限定操作によって分枝停止とする。また( $P_r'$ )の最適解 $\mathbf{x}_r'^*$ が $\mathbf{x}_r'^* \in X_r$ を満たす場合には、 $\mathbf{x}_r'^*$ が偶然( $P_r$ )の最適解にもなっており、これ以上分枝操作を行う必要がない。ただし、この場合には暫定最適解を更新する必要がある。さらに、( $P_r'$ )が実行不可能な場合にも当然分枝停止とする。

以上の分枝・限定操作に基づく分枝限定法の一般的アルゴリズムを図3.2に示す。本項では、分枝限定法の基本的考え方について述べたが、これをより具

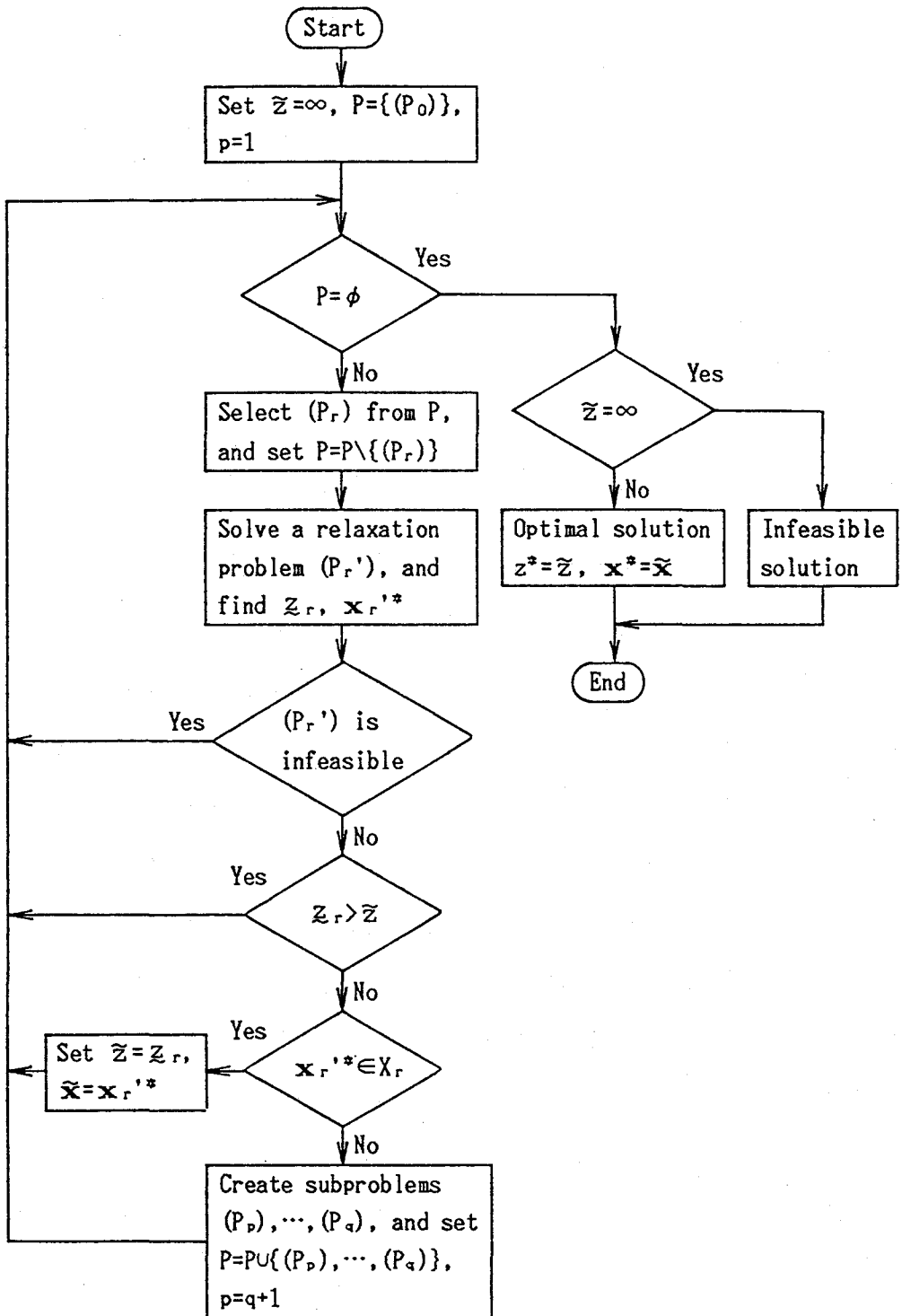


図3.2 分枝限定法の一般的アルゴリズム

体的なアルゴリズムで実現するには、(a)分枝頂点と呼ばれる子問題( $P_r$ )の選択方法、(b)緩和問題( $P_r'$ )の設定、(c)子問題の生成方法などを決定する必要がある。

### 3.3 混合整数線形計画法

#### 3.3.1 分枝限定法に基づくアルゴリズム

本論文で混合整数線形計画問題として定式化される最適運用計画問題の解法として、3.2.2項で述べた分枝限定法を適用したLand-Doigの方法<sup>(54)</sup>に基づくアルゴリズム<sup>(50)</sup>を採用する。このアルゴリズムでは、緩和問題としてすべての整数変数に対する整数制約条件を取り除いた連続緩和問題、すなわち線形計画問題を設定し、これを双対シンプレックス法<sup>(55)</sup><sup>(56)</sup>によって解くように設計されている。

まず、次の混合整数線形計画問題に対する分枝操作について述べる。

$$(P_0) \left\{ \begin{array}{l} \text{最小化} \quad z = \mathbf{d}^T \mathbf{u} + \mathbf{e}^T \mathbf{v} \\ \text{制約条件} \quad \mathbf{A} \mathbf{u} + \mathbf{B} \mathbf{v} = \mathbf{b} \\ \mathbf{u} \geq \mathbf{0}, \quad \mathbf{0} \leq \mathbf{v} \leq \bar{\mathbf{v}}, \quad v_i \in \{\text{整数}\} \end{array} \right. \dots\dots\dots (3.4)$$

ここで、 $\mathbf{u}$ はスラック変数を含む連続変数ベクトルを、 $\mathbf{v}$ は整数変数ベクトルを表す。 $\mathbf{d}$ 、 $\mathbf{e}$ は目的関数の各変数ベクトルに関する係数ベクトルを表す。また $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、および $\mathbf{b}$ は制約条件の各変数ベクトルに関する係数行列、および定数項を表すベクトルである。 $\bar{\mathbf{v}}$ は $\mathbf{v}$ の上限値を表すベクトルである。ただし式(3.4)の第2式では、スラック変数の導入により不等式制約条件を等式制約条件に変換して考慮している。子問題の生成は連続緩和問題の最適解に基づいて実行される。すなわち、連続緩和問題の最適解を求めた後、整数変数ベクトル $\mathbf{v}$

の成分  $v_s$  の中から一つの整数変数(たとえば  $v_s$ )を選び、図3.3に示すように次の二つの子問題  $(P_1)$ ,  $(P_2)$  を生成する。

$(P_1)$  : 式(3.4)の元の問題  $(P_0)$  において、 $v_s$  の上・下限制約条件を  $0 \leq v_s \leq [v_s^*]$  で置き換えた問題

$(P_2)$  : 式(3.4)の元の問題  $(P_0)$  において、 $v_s$  の上・下限制約条件を  $[v_s^*] + 1 \leq v_s \leq \bar{v}_s$  で置き換えた問題

ただし、 $v_s^*$  は  $(P_0)$  の連続緩和問題の最適解に対応する  $v_s$  の値を、 $[v_s^*]$  は  $v_s^*$  を越えない最大の整数を表す。この場合、元の問題  $(P_0)$  の最適解は子問題  $(P_1)$ ,  $(P_2)$  のうち目的関数の最適値が小さい方の問題の最適解として与えられる。ところで混合整数線形計画問題の連続緩和問題の最適解は、その実行可能領域を表す凸多面体の頂点に存在する。この場合、実行可能領域の形状から生成した子問題  $(P_1)$ ,  $(P_2)$  のうち一方が明らかに実行不可能と判断できる場合も生じる。図3.4(a)は  $(P_1)$  が実行不可能となる場合を、また図3.4(b)は  $(P_2)$  が実行不可能となる場合を示したものである。実行可能性の判断は双対シンプレックス法で用いるシンプレックス表に基づいて行うことができる。もし子問題の一方が実行不可能と判断されれば、他方の子問題のみが生成され、最適解が探索される。以上、分枝操作として子問題の生成方法について述べた

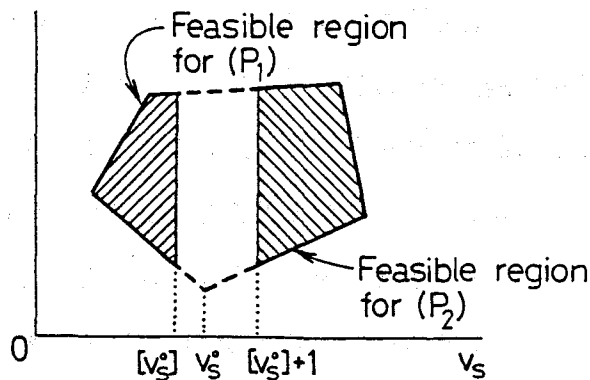


図3.3 子問題の生成



が、この方法では分枝変数  $v_s$  の選択方法が重要な問題となる。

一方、限定操作は 3.2.2 項で述べた条件が成立する場合の他に、次の場合にも実行される。双対シンプレックス法によって連続緩和問題を解く過程では、基底変数と非基底変数の置換操作であるピボット変換が逐次行われるが、目的関数の値はピボット変換のたびに増加する。そのため、ピボット変換の各ステップにおける目的関数の値は考慮中の子問題の目的関数の下界値を与える。したがって、ピボット変換の各ステップにおける目的関数の値が元の問題 ( $P_0$ ) の目的関数の暫定最適値である上界値よりも大きくなった時点で、連続緩和問題を完全に解くまでもなく分枝停止とすることができる。

連続緩和問題である線形計画問題の解法としての双対シンプレックス法の採用には、次のような利点も考えられる。双対シンプレックス法では実行不可能な基底解をピボット変換によって逐次更新してゆくので、子問題の連続緩和問題の初期基底解として元の問題の連続緩和問題の最適解を直接採用できる。したがって、子問題を生成することに特に新しい初期基底解を求める必要がなく、一つの整数制約条件の変更のみを行えばピボット変換を継続して行うことができる。

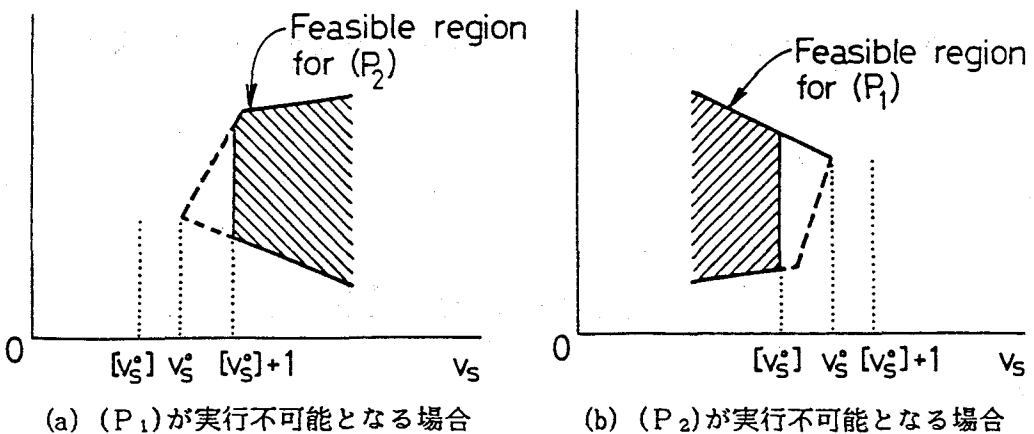


図3.4 子問題が実行不可能となる場合

### 3.3.2 分枝変数と分枝頂点の選択方法<sup>(57)</sup>

3.3.1項で述べた分枝限定法に基づくアルゴリズムにおいては、効率よく最適解を導出するために限定操作によりできる限り列挙木の生成の拡大を抑えることが重要である。そこで次のような工夫をする必要がある。

- (1) 目的関数の値が悪化して限定操作が行われる分枝頂点は、できる限り列挙木が深くないうちに出現するようにする。
- (2) できる限り早く最適解に近い暫定最適解を生成し、限定操作が行われる分枝頂点の数を多くする。

本項では、列挙木の生成に大きな影響を及ぼすと考えられる分枝変数と分枝頂点の選択方法について述べる。

まず分枝変数の選択方法に関しては、目的関数の値に与える影響の大きな変数を優先するのがよいと考えられる。このような変数を優先的に選択すると、生成される子問題の最適解が元の問題の最適解から大きくずれて目的関数値の劣化度が大きくなり、その子問題に対して限定操作を行える可能性が増加するためである。一般に変数の目的関数値への影響は局所的こう配によって判断できる。混合整数線形計画問題の連続緩和問題では、分枝変数  $v_s$  と目的関数  $z$  との関係が図3.5に示すように区分的線形関係として表される。連続緩和問題の最適解に対応する分枝変数  $v_s$  の値  $v_s^*$  から  $v_s$  を減少、あるいは増加させた

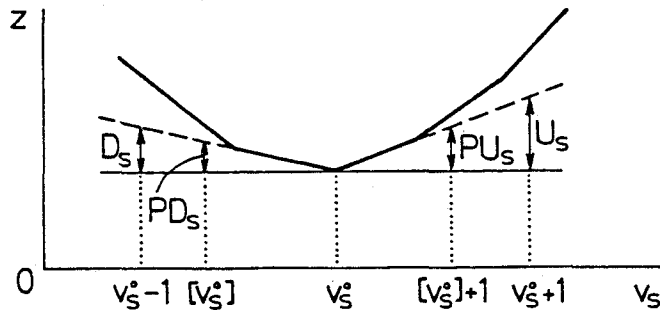


図3.5 分枝変数と目的関数の関係(線形の場合)

場合のそれぞれの目的関数の変化率 $D_s$ ,  $U_s$ は, シンプレックス表に基づき目的関数および制約条件の局所的こう配から決定される. したがって,  $v_s$ を $[v_s, \circ]$ , および $[v_s, \circ]+1$ に変化させた場合の目的関数の局所的増加量である下方罰金 $PD_s$ , および上方罰金 $PU_s$ は, それぞれ次のように表される.

$$\left. \begin{aligned} PD_s &= D_s(v_s, \circ - [v_s, \circ]) \\ PU_s &= U_s(1 - v_s, \circ + [v_s, \circ]) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3.5)$$

下方罰金および上方罰金に基づく分枝変数の選択方法として, 以下のような規則が提案されている.

(1) max-min則 :

$$\min\{PD_s, PU_s\} = \max_i \min\{PD_i, PU_i\} \dots\dots\dots(3.6)$$

に対応する変数 $v_s$ を分枝変数とする.

(2) max-max則 :

$$\max\{PD_s, PU_s\} = \max_i \max\{PD_i, PU_i\} \dots\dots\dots(3.7)$$

に対応する変数 $v_s$ を分枝変数とする.

(3) max-average則 :

$$PD_s + PU_s = \max_i (PD_i + PU_i) \dots\dots\dots(3.8)$$

に対応する変数 $v_s$ を分枝変数とする.

(4)  $|PD_s - PU_s| = \max_i |PD_i - PU_i| \dots\dots\dots(3.9)$

に対応する変数 $v_s$ を分枝変数とする.

これらの規則のうち適切なものを採用するための基準は特に存在しない. しかしながら, 分枝頂点の選択方法として奥行き優先則が用いられた場合, 上記の規則(4)を採用するのが良いという報告もあり<sup>(58)</sup>, 本論文で採用した混合整数線形計画法のアルゴリズムでは規則(4)を採用している. 双対シンプレック

分枝変数の選択優先順序を定めている。

- (1) 非基底整数変数の中から上方罰金の大きなものを選択する。
- (2) 基底整数変数の中から上方罰金と下方罰金の差の絶対値が最大となるものを選択する。

分枝変数を非基底変数の中から優先的に選択するのは、それによって生成される子問題( $P_1$ )の連続緩和問題では目的関数の最適値が変化せず、早い段階で最適解に近い暫定最適解が見つかる可能性が高いためである。

式(3.5)で与えられる下方および上方罰金は限定操作にも利用できる。すなわち、選択された分枝変数 $v_i$ によって生成される二つの子問題の連続緩和問題に対する目的関数の一つの下界値が、現時点の連続緩和問題の目的関数の最適値に下方あるいは上方罰金を加えることによって求められる。もし求められた下界値がすでに元の問題の目的関数の暫定最適値である上界値よりも大きくなっていけば、子問題の連続緩和問題を考えるまでもなく限定操作が実行される。

一方、分枝頂点の選択方法として、基本的には下界値優先則と奥行き優先則の二つが考えられる。下界値優先則は、連続緩和問題の最適解に対する目的関数の値である下界値の小さいものから順に分枝頂点を選択し、できる限り早く良い暫定最適解を見つけようとする方法である。しかしながら、良い暫定最適解が見つからなければ列挙木が横に広がり、計算途中で必要な記憶容量が増大するという欠点を持つ。奥行き優先則は、最も新しく生成した子問題を分枝頂点として選択し、限定操作が行われるか暫定最適解が見つかるまで列挙木の枝を深く延ばして探索してゆく方法である。この方法では、早い段階で良い暫定最適解が見つかる可能性が小さいが、計算途中で必要な記憶容量を最小限に抑えることができる。またアルゴリズムの構築も比較的容易である。図3.6(a),

(b)にそれぞれ下界値優先則，奥行き優先則を用いた場合の分枝頂点の選択順序の例を示す．各分枝頂点に付した番号が分枝頂点の選択順序を示している．これら二つの分枝頂点の選択方法にはそれぞれ一長一短があり，それらを組合せた方法も提案されている．本論文で用いるアルゴリズムではアルゴリズムの単純さおよび記憶容量の少なさを重視して，奥行き優先則を用いている．図3.7は奥行き優先則に基づく混合整数線形計画法のアルゴリズムを示したものである．ここでは，アルゴリズムの構造を明確に表現できる問題分析図(PAD)<sup>(59)</sup>を用いている．

### 3.4 混合離散変数線形計画法への拡張

2.5節で述べたように，方法IIとして提示した最適設計計画手法においては機器規模を媒介変数で表現し，それを最適設計計画問題の未知変数の一つとして考慮する．その場合，機器規模を整数値に対応させるだけでは不十分であり，一般的な離散値に対応させる必要がある．そこで本節では，整数変数の代りに離散的な値を取りうる変数を含む問題，すなわち混合離散変数線形計画問

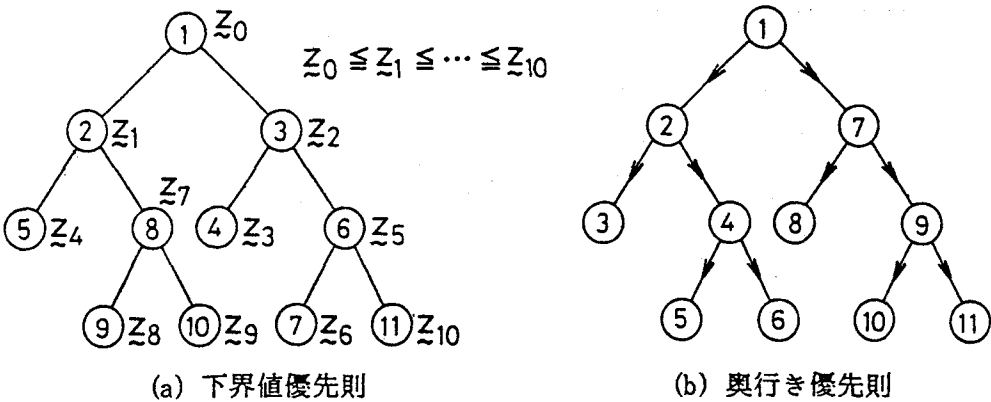


図3.6 分枝頂点の選択方法

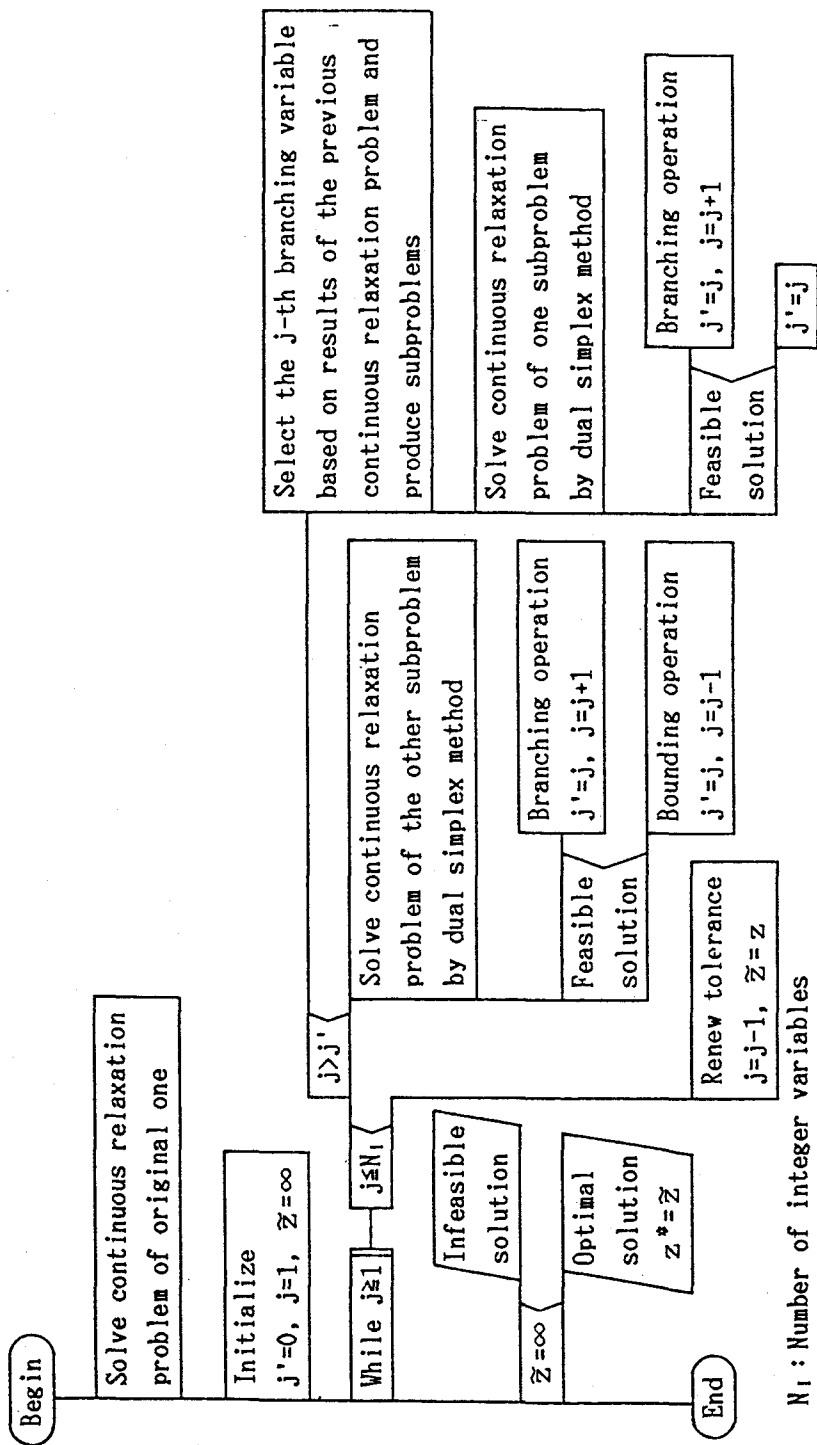


図3.7 興行き優先則に基づく混合整数線形計画法のアルゴリズム

題の最適解を導出できるように、3.3節で示した混合整数線形計画法のアルゴリズムを拡張する。

一般に混合離散変数線形計画問題は次式のように表される。

$$(P_0) \left\{ \begin{array}{l} \text{最小化} \quad z = d^T u + e^T w \\ \text{制約条件} \quad Au + Bw = b \\ \quad \quad \quad u \geq 0, \quad 0 \leq w \leq \bar{w} \\ \quad \quad \quad w_i \in \{w_i^{[0]} (=0), w_i^{[1]}, \dots, w_i^{[K_i+1]}\} \end{array} \right. \quad \dots (3.10)$$

ここで、 $w$ は離散変数ベクトルであり、各成分 $w_i$ は $(K_i+1)$ 個の候補値 $w_i^{[0]}$ ,  $w_i^{[1]}, \dots, w_i^{[K_i+1]}$  ( $w_i^{[0]} < w_i^{[1]} < \dots < w_i^{[K_i+1]}$ )のうち一つの値を取るものとする。その他の記号は式(3.4)で用いたものと同様である。混合離散変数線形計画法のアルゴリズムは、混合整数線形計画法と同様に、分枝限定法による分枝・限定操作と連続緩和問題を解くための双対シンプレックス法とを結合することによって構築できる。ただし、子問題の生成に関して次のような修正を行う必要がある。いま $w_s$ を分枝変数として選択したとすると

$$w_s^{[k]} \leq w_s^0 < w_s^{[k+1]} \quad \dots (3.11)$$

となるような $k$  ( $0 \leq k \leq K_s - 1$ )を決定し、次の二つの子問題 $(P_1)$ ,  $(P_2)$ を生成する。

$(P_1)$  : 式(3.10)の元の問題 $(P_0)$ において、 $w_s$ の上・下限制約条件を

$$w_s^{[0]} \leq w_s \leq w_s^{[k]} \text{で置き換えた問題}$$

$(P_2)$  : 式(3.10)の元の問題 $(P_0)$ において、 $w_s$ の上・下限制約条件を

$$w_s^{[k+1]} \leq w_s \leq w_s^{[K_s]} \text{で置き換えた問題}$$

また分枝変数の選択方法に関しては、3.3.2項で述べたように式(3.9)に対応する変数 $w_s$ を分枝変数とする。ただし、下方罰金および上方罰金は式(3.5)の代わりに次式によって求める。

$$\left. \begin{array}{l} PD_s = D_s(w_s^0 - w_s^{[k]}) \\ PU_s = U_s(w_s^{[k+1]} - w_s^0) \end{array} \right\} \quad \dots (3.12)$$

ここで、 $D_s$  および  $U_s$  はそれぞれ  $w_s$  を  $w_s^0$  から減少、あるいは増加させた場合の目的関数の変化率である。さらに、分枝頂点の選択方法については奥行き優先則を用いるものとし、図3.7に示す混合整数線形計画法のアルゴリズムを流用する。上述のように、混合離散変数線形計画法のアルゴリズムは、混合整数線形計画法のアルゴリズムから合理的に構築できる。

### 3.5 混合離散変数非線形計画法への拡張

熱電併給システムの最適設計計画を行う場合、構成機器の性能特性としてのエネルギーの入出力関係、あるいは性能特性値や設備費と機器規模との関係についてより複雑な非線形性を考慮する必要性も生じる。この場合、設計計画における目的関数や制約条件は未知変数に関して非線形関数として表される。本節では、目的関数や制約条件に非線形関数を含む混合離散変数非線形計画問題の最適解を導出できるように、混合離散変数非線形計画法の一つのアルゴリズムを構築する。組合せ最適化法として同様に分枝限定法を用い、非線形計画法との有機的結合を図る。非線形計画法として種々の方法が提案されているが、本論文では一般縮小こう配法<sup>(51)(52)</sup>を採用する。一般縮小こう配法は、線形計画問題に対する解法であるシンプレックス法を目的関数が非線形の場合に拡張した縮小こう配法<sup>(60)</sup>を、さらに制約条件が非線形の場合に拡張したものである。したがって、分枝限定法と双対シンプレックス法を有機的に結合したLand-Doigの方法に基づく混合整数線形計画法、および混合離散変数線形計画法のアルゴリズムは、双対シンプレックス法の代わりに一般縮小こう配法を適用することによって混合離散変数非線形計画法に無理なく拡張できると考えられる。



### 3.5.1 一般縮小こう配法<sup>(52)</sup>

まず次の非線形計画問題の一解法として一般縮小こう配法について述べる。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{最小化} \quad z = f(\mathbf{x}) \\ \text{制約条件} \quad \mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \dots\dots\dots (3.13) \\ \quad \quad \quad \underline{\mathbf{x}} \leq \mathbf{x} \leq \overline{\mathbf{x}} \end{array} \right.$$

ここで、 $\overline{\mathbf{x}}$ 、 $\underline{\mathbf{x}}$ はそれぞれスラック変数を含む変数ベクトル $\mathbf{x}$ の上・下限値を表す。また $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ は制約条件を表す関数である。一般縮小こう配法では、制約条件を考慮しながら目的関数が減少する方向に逐次次元探索を行う。次元探索では、すべて(M個とする)の制約条件式を満足させなければならないので、すべて(N個とする)の変数を独立に変化させることができない。そこで、 $\mathbf{x}$ を独立に変化させることができる(N-M)個の非基底変数から成るベクトル $\mathbf{x}_N$ と、制約条件を満たすように決定されるM個の基底変数から成るベクトル $\mathbf{x}_B$ とに分割する。この時、非基底変数 $\mathbf{x}_N$ の微小変化量 $d\mathbf{x}_N$ 、および基底変数 $\mathbf{x}_B$ の微小変化量 $d\mathbf{x}_B$ に対する目的関数の変化量 $df$ は次のように表される。

$$df = \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}_N} d\mathbf{x}_N + \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}_B} d\mathbf{x}_B \dots\dots\dots (3.14)$$

ところが、制約条件を満たすように基底変数 $\mathbf{x}_B$ を変化させるには

$$d\mathbf{h} = \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}_N} d\mathbf{x}_N + \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}_B} d\mathbf{x}_B = \mathbf{0} \dots\dots\dots (3.15)$$

が成立する必要がある。したがって、非基底変数の変化量 $d\mathbf{x}_N$ と基底変数の変化量 $d\mathbf{x}_B$ との関係は式(3.15)から

$$d\mathbf{x}_B = - \left( \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}_B} \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}_N} d\mathbf{x}_N \dots\dots\dots (3.16)$$

となる。式(3.16)を式(3.14)に代入すると

$$df = \left\{ \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}_N} - \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}_B} \left( \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}_B} \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}_N} \right\} d\mathbf{x}_N = \lambda^T d\mathbf{x}_N \quad (3.17)$$

ここで

$$\lambda^T = \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}_N} - \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}_B} \left( \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}_B} \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}_N} \quad \dots\dots\dots (3.18)$$

$\lambda$ は縮小こう配ベクトルと呼ばれ、制約条件を考慮した場合の目的関数の非基底変数に関する変化率を表している。以上から、一次元探索の方向を表す非基底変数の変化量は、 $\lambda$ に基づいて決定される。また基底変数の変化量は式(3.16)によって決定される。一次元探索は制約面  $\mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}$  の接線方向に進められながら、ニュートン法により逐次制約面上に戻される。一次元探索の途中で基底変数の一つがその上・下限値のうち一方に達した場合には、基底変数と非基底変数の再分割を行う。このプロセスは、局所的最適点に対する必要条件であるKuhn-Tucker条件<sup>(61)</sup>が成立するまで反復実行される。Kuhn-Tucker条件の成立も縮小こう配 $\lambda$ に基づいて判断される。すなわち、 $\lambda$ によってKuhn-Tucker条件を表すと

$$\lambda_i \begin{cases} \geq 0 & (\mathbf{x}_{Ni} = \underline{\mathbf{x}}_{Ni}) \\ \leq 0 & (\mathbf{x}_{Ni} = \overline{\mathbf{x}}_{Ni}) \\ = 0 & (\underline{\mathbf{x}}_{Ni} < \mathbf{x}_{Ni} < \overline{\mathbf{x}}_{Ni}) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3.19)$$

となる。ここで、 $\lambda_i$ 、 $\mathbf{x}_{Ni}$ はそれぞれ $\lambda$ 、 $\mathbf{x}_N$ の第*i*成分を表す。

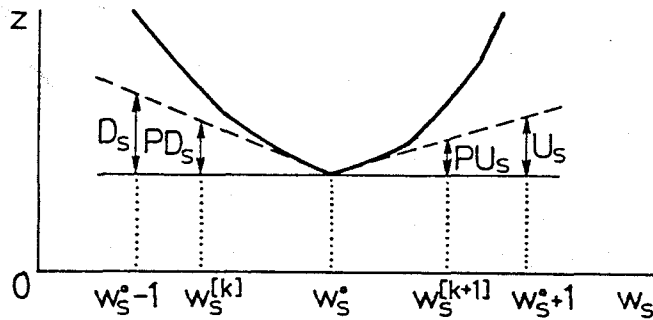
### 3.5.2 分枝限定法との結合

子問題の生成は、3.4節で述べた混合離散変数線形計画法と同様に行う。しかしながら、分枝変数の選択方法は目的関数や制約条件の非線形性を考慮し修正する必要がある。一般縮小こう配法では、式(3.18)の縮小こう配ベクトル $\lambda$ の計算の際に目的関数、および制約条件の局所的こう配の値が求められる。したがって、その値に基づいて目的関数の変化率D、およびU、を求め、式(3.12)から下方および上方罰金を計算することができる。線形の場合と大きく異

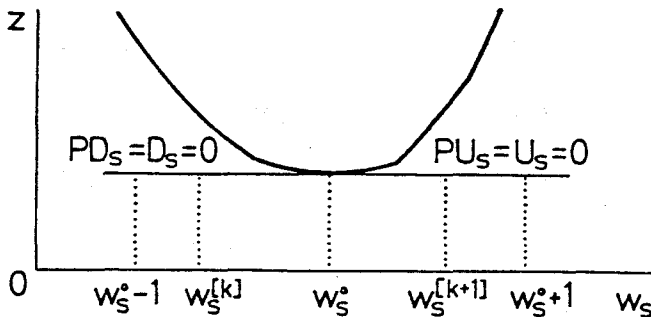
なる点は，連続緩和問題の最適点が実行可能領域の端点だけではなく内部や境界上にも存在しうることである．この点を考慮し，混合離散変数非線形計画法における分枝変数の選択優先順序を以下のように定める．

- (1) 上限値あるいは下限値をとる非基底変数から，それぞれ目的関数および制約条件を線形化した場合の下方罰金あるいは上方罰金が最大となる変数を選択する．
- (2) 上限値と下限値の間にある非基底変数から選択する．
- (3) 基底変数から，目的関数および制約条件を線形化した場合の下方罰金と上方罰金の差の絶対値が最大となる変数を選択する．

上記の(1)および(3)は，3.3.2項で述べた混合整数線形計画法における分枝変数の選択順序(1)および(2)にそれぞれ対応しており，これらは連続緩和問題



(a) 最適点の実行可能領域の端点に存在する場合



(b) 最適点の実行可能領域の内部あるいは境界上に存在する場合

図3.8 分枝変数と目的関数の関係(非線形の場合)

の最適点が実行可能領域の端点に存在する場合の選択方法を表している。一方、連続緩和問題の最適点が実行可能領域の内部あるいは境界上に存在する場合には、目的関数はある非基底変数の上・下限値間の値で極小値をとり、その非基底変数に関する縮小こう配は零となる。したがって、この最適点からその非基底変数の値を減少、あるいは増加させた場合の目的関数の変化率も零となる。そこで、できる限り早い段階で良い暫定最適解を見つけるために、基底変数からの選択に優先して上記の選択順序(2)を設定している。図3.8(a), (b)は、それぞれ連続緩和問題の最適点が実行可能領域の端点、および内部あるいは境界上に存在する場合について、分枝変数と目的関数の関係を表したものである。なお、分枝頂点の選択方法については奥行き優先則を用いるものとする。このように混合離散変数非線形計画法のアルゴリズムは、分枝限定法と一般縮小こう配法との有機的結合によって合理的に構築でき、基本的には図3.7に示す混合整数線形計画法のアルゴリズムと同様である。

### 3.6 変数の階層的関係を考慮した分枝限定法

2.5節で方法IIとして提示した最適設計計画手法では、機器の規模を表す離散変数と、運転・停止条件や負荷レベルを表す0-1整数変数および連続変数を同時に決定する必要があるが、これらの変数はそれぞれ上位レベルと下位レベルの変数であり、階層的関係をなしている。すなわち、機器規模を表す離散変数を何らかの方法で決定した場合、運用方策を表す変数は各運用モードに対する最適運用計画問題を独立に解くことによって決定できる。このように、予め定式化において変数の意味からその階層的関係を知ることができる場合には、その情報を分枝・限定操作において有効利用し、合理的に最適化計算を行うこ

とによって計算時間の短縮が可能になると考えられる<sup>(62)</sup>。本節では、方法Ⅱの最適設計計画手法に適用するために、変数の階層的関係を考慮した分枝限定法の一つのアルゴリズムを開発する。

### 3.6.1 基本的考え方

まず、基本的考え方を示すために、次の混合離散変数計画問題を考える。

$$\begin{array}{ll}
 \text{最小化} & z = f_0(\mathbf{u}_0, \mathbf{w}_0) + f_1(\mathbf{w}_0, \mathbf{u}_1, \mathbf{w}_1) \\
 & \quad + f_2(\mathbf{w}_0, \mathbf{u}_2, \mathbf{w}_2) + \cdots \\
 \text{制約条件} & \mathbf{h}_0(\mathbf{u}_0, \mathbf{w}_0) = \mathbf{0} \\
 & \mathbf{h}_j(\mathbf{w}_0, \mathbf{u}_j, \mathbf{w}_j) = \mathbf{0} \quad (j=1, 2, \cdots) \\
 & \underline{\mathbf{u}}_j \leq \mathbf{u}_j \leq \bar{\mathbf{u}}_j \quad (j=0, 1, \cdots) \\
 & \underline{\mathbf{w}}_j \leq \mathbf{w}_j \leq \bar{\mathbf{w}}_j \quad (j=0, 1, \cdots)
 \end{array} \quad \cdots (3.20)$$

ここで、 $\mathbf{u}_j (j=0, 1, \cdots)$ は連続変数ベクトル、 $\mathbf{w}_j (j=0, 1, \cdots)$ は離散変数ベクトルを示す。また $f_j (j=0, 1, \cdots)$ 、 $\mathbf{h}_j (j=0, 1, \cdots)$ はそれぞれ目的関数の各項、および各制約条件を表す関数である。式(3.20)は、変数 $\mathbf{u}_0, \mathbf{w}_0$ と変数 $\mathbf{u}_1, \mathbf{w}_1; \mathbf{u}_2, \mathbf{w}_2; \cdots$ との間に図3.9に示すような階層的関係が存在することを示している。すなわち、上位レベルの離散変数 $\mathbf{w}_0$ がある候補値に定められた場合、その他の変数は $z$ を最小化するように以下のように決定される。まず上位レベルの連続変数 $\mathbf{u}_0$ は、与えられた $\mathbf{w}_0$ に対して最適化問題

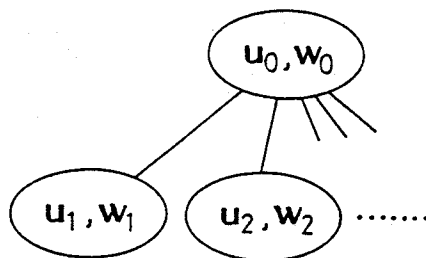


図3.9 変数の階層的関係

$$\begin{array}{|l}
 \text{最小化} \quad f_0(\mathbf{u}_0, \mathbf{w}_0) \\
 \text{制約条件} \quad \mathbf{h}_0(\mathbf{u}_0, \mathbf{w}_0) = \mathbf{0} \quad \dots\dots\dots (3.21) \\
 \mathbf{u}_0 \leq \mathbf{u}_0 \leq \bar{\mathbf{u}}_0
 \end{array}$$

の解として決定される。また下位レベルの連続変数  $\mathbf{u}_j (j=1, 2, \dots)$  と離散変数  $\mathbf{w}_j (j=1, 2, \dots)$  は、与えられた  $\mathbf{u}_0, \mathbf{w}_0$  に対してそれぞれに対応する部分最適化問題

$$\begin{array}{|l}
 \text{最小化} \quad f_j(\mathbf{w}_0, \mathbf{u}_j, \mathbf{w}_j) \\
 \text{制約条件} \quad \mathbf{h}_j(\mathbf{w}_0, \mathbf{u}_j, \mathbf{w}_j) = \mathbf{0} \quad (j=1, 2, \dots) \quad \dots\dots\dots (3.22) \\
 \mathbf{u}_j \leq \mathbf{u}_j \leq \bar{\mathbf{u}}_j \\
 \mathbf{w}_j \leq \mathbf{w}_j \leq \bar{\mathbf{w}}_j
 \end{array}$$

を独立に解くことによって決定される。したがって、式(3.20)の形で定式化されるように変数間に階層的關係が存在する場合には、分枝限定法において上位レベルの離散変数を優先的に分枝変数として選択することによって、下位レベルの変数をいくつかの部分最適化問題ごとに独立に決定することができ、効率の良い最適化計算が可能となる。

### 3.6.2 分枝・限定操作

ここでは、単に上位と下位の二段階の階層レベルではなく、図3.10に示すよ

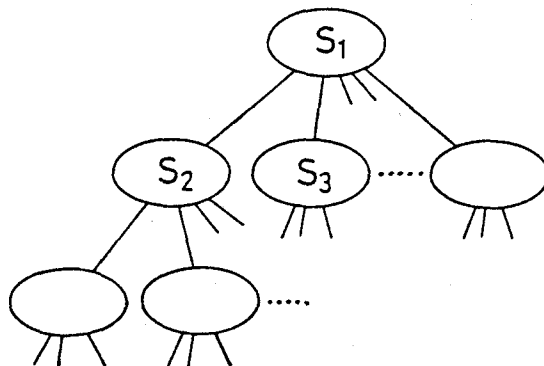


図3.10 変数の集合  $S_j$  の階層的關係

うに下位レベルの変数をさらに何段階かの階層レベルに分割できるより一般的な場合について、変数の階層的関係を利用した分枝・限定操作を考える。各階層レベルの変数が属する集合を  $S_1, S_2, \dots$  のように表す。ここでは、最上位レベルの変数の集合を  $S_1$  とし、その他の集合には適当な順序で番号を付けるものとする。このとき集合  $S_p (p \geq 2)$  の一段上位レベルの集合の番号を  $U(p)$  で表す。また、 $S_p$  および  $S_p$  の下位レベルのすべての集合に属する変数に関する部分最適化問題の目的関数の値を  $z(p)$  で表す。

まず暫定最適解がいかにかに決定されるかについて検討する。式(3.20)に示すように  $S_p$  に属する離散変数の値が決定された場合、 $z(p)$  は  $S_p$  に属する連続変数に関する目的関数の値  $z_0(p)$  と、 $S_p$  の下位レベルのすべての集合に属する変数に関する目的関数の値に分解することができ、次式のように表現できる。

$$z(p) = z_0(p) + \sum_q z(q) \dots\dots\dots (3.23)$$

ただし

$$q \in \{q \mid p = U(q)\} \dots\dots\dots (3.24)$$

である。したがって、部分最適化問題の目的関数の最適値  $z^*(p)$  は

$$z^*(p) = \min\{z_0^*(p) + \sum_q z^*(q)\} \dots\dots\dots (3.25)$$

と表される。ここで、 $z_0^*(p)$  は  $z_0(p)$  の最適値である。また、 $\min\{\}$  は  $S_p$  に属する離散変数の候補値のすべての組合せについて実行する。これより、 $S_p$  および  $S_p$  の下位レベルのすべての集合に属する変数に関する部分最適化問題の目的関数の暫定最適値  $\tilde{z}(p)$  は

$$\tilde{z}(p) = z_0^*(p) + \sum_q z^*(q) \dots\dots\dots (3.26)$$

として求められる。式(3.26)は、ある部分最適化問題の暫定最適解が一段下位レベルのすべての部分最適化問題の最適解から決定できることを示している。

したがって、上位レベルの集合から順に分枝変数を選択しながら下位レベルの部分最適化問題を考慮してゆき、下位レベルの部分最適化問題から順に最適解を決定しながら上位レベルの部分最適化問題の暫定最適解を求めてゆくのが合理的と考えられる。元の最適化問題における目的関数の最適値は、最上位レベルの最適化問題の最後に得られた暫定最適値を(1)として与えられる。

以下に、上述のような最適解の決定を実現するための分枝・限定操作に関する規則を述べる。

- (1) 分枝変数は、予め定められた集合の中から他の集合に優先して選択する。以下、分枝変数を選択中の集合を分枝集合と呼ぶことにする。
- (2) 分枝集合内の分枝変数および分枝頂点の選択には、3.3～3.5節で示した方法を用いる。限定操作も同様に行う。
- (3) 上位レベルの集合を優先的に分枝集合とする。
- (4) 上位レベルの集合に属する離散変数をすべて分枝変数として選択した場合、一段下位レベルの集合の中から分枝集合を選定する。ここでは、分枝変数の選択優先順序に基づき分枝変数として最初に選択された離散変数が属する集合を分枝集合と定める。
- (5) (3)および(4)の操作を、分枝集合が最下位レベルの集合に達するまで続ける。
- (6) 分枝集合が最下位レベルの集合となった場合、その集合に属する変数に関する部分最適化問題の最適解を求める。さらに、一段上位レベルの集合を共通とする他のすべての部分最適化問題の最適解を求め、一段上位レベルの部分最適化問題の暫定最適解を式(3.26)によって決定する。ただし、ある部分最適化問題が実行不可能であると判明した場合、一段上位レベルの集合を共通とする他の部分最適化問題を解く必要はなく、一段上位レベルの部分最適化問題へ戻る。



(7) 部分最適化問題においては、最後に得られた暫定最適解を最適解とする。

(8) (6)および(7)の操作を、最上位レベルの最適化問題の最適解を決定するまで続ける。

### 3.6.3 アルゴリズム

3.6.2項で述べた分枝・限定操作に従って構築したアルゴリズムを以下に具体的に示す。使用記号は次の通りである。

$i$  : すべての集合における分枝変数の指標

$j$  : 分枝集合における分枝変数の指標

$\ell$  : 分枝集合の階層レベル

$N(p)$  :  $S_p$ に属する離散変数の数

$N_\ell(p)$  :  $S_p$ および $S_p$ の下位レベルのすべての集合に属する離散変数の数

$N_u(p)$  :  $S_p$ を分枝集合とする前に分枝変数として選択した離散変数の数

ただし、 $N(p)$ および $N_\ell(p)$ は、 $S_p$ の要素と $S_p$ の階層的関係を与えることにより予め決定されているものとする。

ステップ1 : 混合離散変数計画問題の連続緩和問題を解き、ステップ2へ。

ステップ2 :  $\ell=1$ ,  $p=1$ ,  $i=1$ ,  $j=1$ ,  $N_u(p)=i-1$ ,  $z(p)=\infty$ とし、ステップ3へ。

ステップ3 :  $i \geq 1$ ならばステップ4へ。そうでなければステップ12へ。

ステップ4 :  $j \geq 1$ ならばステップ5へ。そうでなければステップ8へ。

ステップ5 :  $j \leq N(p)$ ならばステップ6へ。そうでなければステップ7へ。

ステップ6 :  $S_p$ から第 $j$ 番めの分枝変数を選択し、子問題の連続緩和問

題を解く。目的関数の値が暫定最適値以下であれば  $i = i + 1$ ,  $j = j + 1$  とし, ステップ4へ。目的関数の値が暫定最適値より大きいか, 問題が実行不可能であれば  $i = i - 1$ ,  $j = j - 1$  とし, ステップ4へ。

ステップ7:  $N(p) = N_\ell(p)$  ならば  $\bar{z}(p) = z(p)$ ,  $i = i - 1$ ,  $j = j - 1$  とし, ステップ4へ。そうでなければ  $\ell = \ell + 1$ ,  $p = q \in \{q \mid p = U(q)\}$ ,  $j = 1$ ,  $N_u(p) = i - 1$ ,  $\bar{z}(p) = \infty$  とし, ステップ4へ。

ステップ8:  $\bar{z}(p) = \infty$  ならば  $\ell = \ell - 1$ ,  $p = U(p)$ ,  $i = N_u(p) + N(p)$ ,  $j = N(p)$  としてステップ3へ。そうでなければステップ9へ。

ステップ9:  $N_u(U(p)) + N_\ell(U(p)) = N_u(p) + N_\ell(p)$  が成立すればステップ10へ。そうでなければステップ11へ。

ステップ10:  $p = U(p)$  として式(3.26)によって  $\bar{z}(p)$  を求め, 暫定最適値を更新する。さらに  $\ell = \ell - 1$ ,  $i = N_u(p) + N(p)$ ,  $j = N(p)$  とし, ステップ3へ。

ステップ11:  $i = N_u(p) + N(p) + 1$ ,  $j = 1$ ,  $p = q \in \{q \mid U(q) = U(p), q \neq p\}$ ,  $N_u(p) = i - 1$ ,  $\bar{z}(p) = \infty$  とし, ステップ3へ。

ステップ12:  $\bar{z}(1) = \infty$  ならば混合離散変数計画問題は実行不可能。そうでなければ  $\bar{z}(1)$  に対応する解を最適解とする。

図3.11は上記のアルゴリズムをPADを用いて示したものである。図3.11において, 細い実線で示している部分は3.3節で述べた分枝限定法に基づくアルゴリズムであり, 太い実線で示している部分は本節で追加したアルゴリズムである。

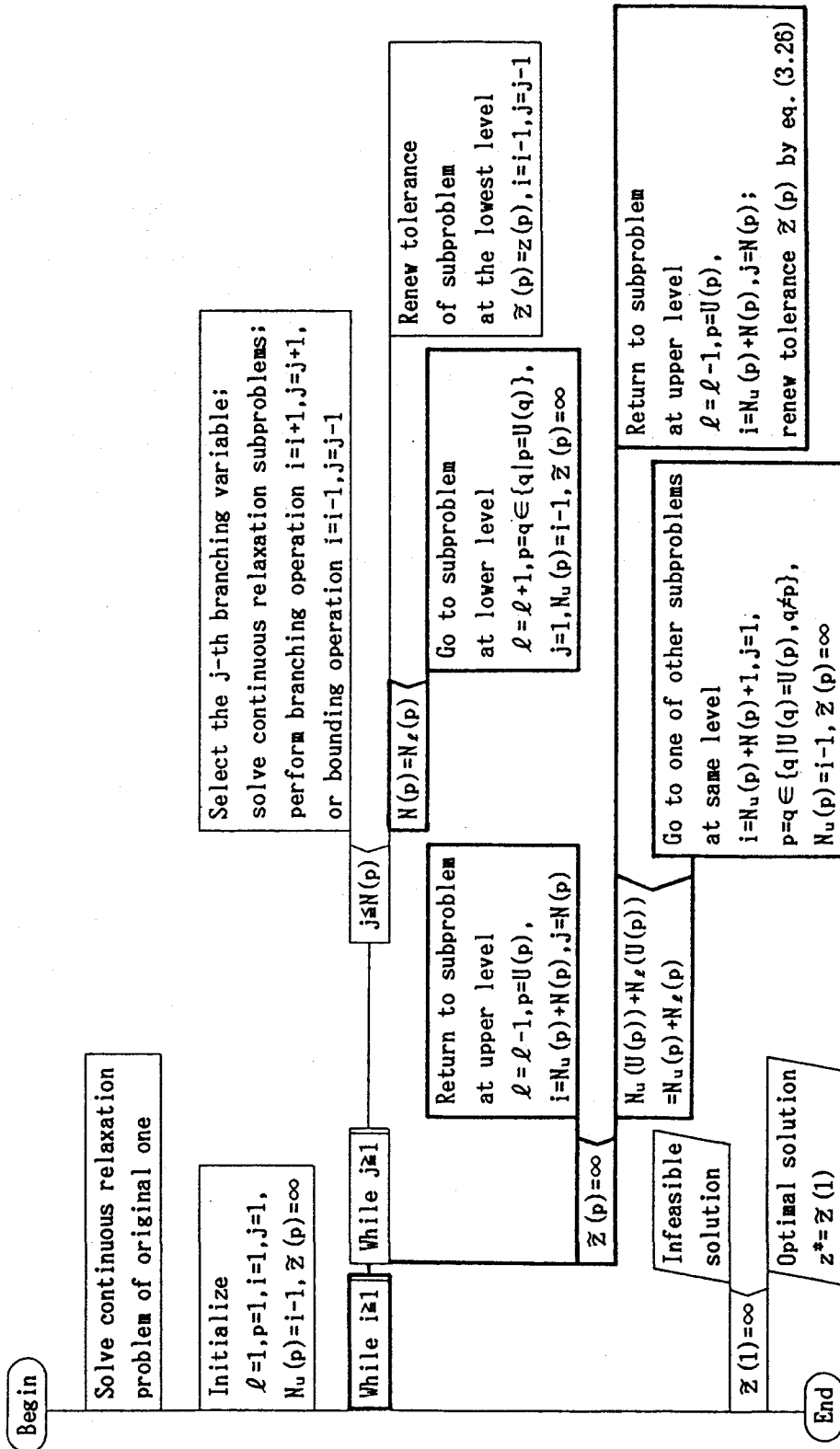


図3.11 変数の階層的関係を考慮した分枝限定法のアルゴリズム

### 3.7 結 言

本章では，熱電併給システムの設計および運用計画を合理的に実行するために必要となる組合せ最適化法について言及した．まず考え方の基礎となる列挙法と分枝限定法について述べた．次に，実際に適用する混合整数線形計画法のアルゴリズムについて述べるとともに，混合離散変数線形計画法および混合離散変数非線形計画法への一つの拡張方法を示した．さらに，変数の階層的関係を考慮した分枝限定法のアルゴリズムを開発し，効率よく最適化計算を行える可能性を示した．なお，これらのアルゴリズムは熱電併給システムの最適計画だけでなく，種々の最適化問題にも適用可能で汎用性を有していることを付記しておく．

## 第4章 列挙法と混合整数線形計画法に基づく 熱電併給システムの最適設計計画手法

### 4.1 緒言

本章では、2.5節で方法Iとして提示したように、熱電併給システムの設計計画において機器の最適構成と最適運用方策を階層的に決定する一つの最適設計計画手法を具体的に示す。まず、比較的簡単なエネルギー供給システムに対して最適設計計画問題の一般的定式化と解法を示す。ここでは、システム構成機器の候補となる機器の選定を表す0-1整数変数、運転・停止条件を表す0-1整数変数、および負荷レベルを表す連続変数を導入し、最適設計計画問題を混合整数線形計画問題として定式化する。しかしながら、この問題を直接解くには問題の規模が大きすぎるため、最適設計計画問題を機器構成問題と最適運用計画問題に分離し、それらを階層的に考慮しながら最適解を導出する。各問題の解法として、3.2.1項および3.3節で提示した列挙法と混合整数線形計画法のアルゴリズムをそれぞれ採用する。次に設計計画事例として、LNG船熱電併給システムに関する二つの設計計画について考える。一つは従来からLNG船推進システムとして多く採用されている蒸気タービン・システム<sup>(22)</sup>である。このシステムでは推進力の要求から主機の規模が決定されるので、設計対象として補機のみを考える。他の一つは、蒸気タービン・システムに代わり、LNG船推進システムの一つとして計画されているディーゼル・ガスタービン複合システム<sup>(24)</sup>である。このシステムは、ディーゼルエンジンによる出力、およびガスタービン発電機と電動機による出力によって推進力を得るものであ

り、主機の設計計画にも代替性がある。また、ボイルオフガス発生量に直接影響を及ぼすLNGタンクの防熱材厚さの再検討も行われているが、これも推進システムの設計計画に大きな影響を及ぼす。そこで、ディーゼル・ガスタービン複合システムでは補機だけではなく主機やLNGタンクの防熱材厚さも設計対象に含め、総合的に検討する。最後に、それぞれ実用規模のシステムに対する検討事例により、本最適設計計画手法の有効性を示す。

#### 4.2 最適設計計画問題の一般的定式化

本節では、最適設計計画手法を明示するために、図4.1に示すような同種類で規模が異なる最大 $N$ 台の機器 $E_1 \sim E_N$ を並列に接続したエネルギー供給システムの設計計画について考察する。また各機器は一入力および一出力をもつものとする。熱電併給システムでは、多くの種類の機器が直列あるいは並列に接続されている。また多出力を持つ機器も存在する。このようなより複雑なシステムへの拡張は、設計計画事例で示すように機器性能特性の拡張、およびエ

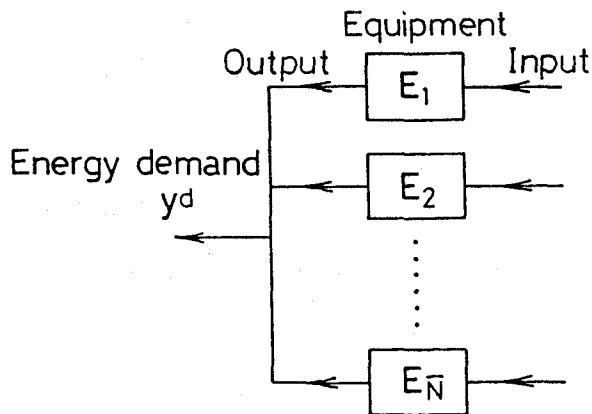


図4.1 エネルギー供給システム

エネルギー・バランスおよび需給関係などの変更により容易に行える。ここではM個の運用モードを設定し、各モードに対して機器運用方策の検討を行うものとする。ただし、第m番め(m=1~M)の運用モードを表すために各記号に上付添字(m)を付ける。また、第m番めの運用モードにおけるエネルギー需要量を $y^{d(m)}$ で表す。

#### 4.2.1 機器構成

システム構成機器は通常幾種類かの標準要目の中から選定される。ここでは、一般的にK種類の規模の機器から同規模の機器の組合せを許し複数台選定できるものとする。このとき、第k番め(k=1~K)の規模(以下、タイプkと呼ぶ)の機器をそれぞれ $\bar{N}$ 台想定し、タイプkの第n台め(n=1~ $\bar{N}$ )の機器をシステム構成機器として選定するかどうかを表す0-1整数変数 $\mu_{nk}$ を導入すると、上記の機器構成条件は次式のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \sum_{n=1}^{\bar{N}} \sum_{k=1}^K \mu_{nk} &\leq \bar{N} \\ \mu_{nk} &\in \{0, 1\} \quad (n=1\sim\bar{N}, k=1\sim K) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(4.1)$$

ここで、 $\mu_{nk}=1$ はタイプkの機器の第n台めを選定することを、また $\mu_{nk}=0$ はそれを選定しないことを表す。さらに機器構成に関する重複を避けるために、次の制約条件を考慮する。

$$\mu_{1k} \geq \mu_{2k} \geq \dots \geq \mu_{\bar{N}k} \quad (k=1\sim K) \dots\dots\dots(4.2)$$

式(4.1)、(4.2)は一般的な機器構成条件を表しているが、その他の特殊な場合の機器構成条件も0-1整数変数 $\mu_{nk}$ によって表される。

#### 4.2.2 機器性能

次に機器性能特性の一つであるエネルギーの入出力関係について定式化する。

入出力関係は蒸気タービンにおけるウィランス線<sup>(63)</sup>のように一次式で近似できることが多い。ここでは、第一次近似として入出力関係が一次式で表される場合について考察を進める。図4.2は機器性能特性の例を示したものである。図4.2に示すように、性能特性の機器規模による変化と運転・停止による不連続性を考慮する必要がある。そこで機器性能特性を次式のように表す。

$$\left. \begin{aligned} y_{nk} &= p_k x_{nk} + q_k \delta_{nk} \\ \underline{x}_k \delta_{nk} &\leq x_{nk} \leq \bar{x}_k \delta_{nk} \\ \delta_{nk} &\in \{0, 1\} \end{aligned} \right\} (n=1 \sim N, k=1 \sim K, m=1 \sim M) \quad \dots\dots\dots(4.3)$$

ここで、 $x_{nk}$ 、 $y_{nk}$ はタイプkの第n台めの機器の第m運用モードにおける入力、および出力エネルギー量を表す。 $p_k$ 、 $q_k$ はタイプkの機器の性能特性値、 $\bar{x}_k$ 、 $\underline{x}_k$ はそれぞれタイプkの機器の入力の上・下限値である。また $\delta_{nk}$ は機器の運転・停止条件を表す0-1整数変数であり、 $\delta_{nk}=0$ および $\delta_{nk}=1$ は、タイプkの第n番めの機器が第m運用モードでそれぞれ停止状態あるいは運転状

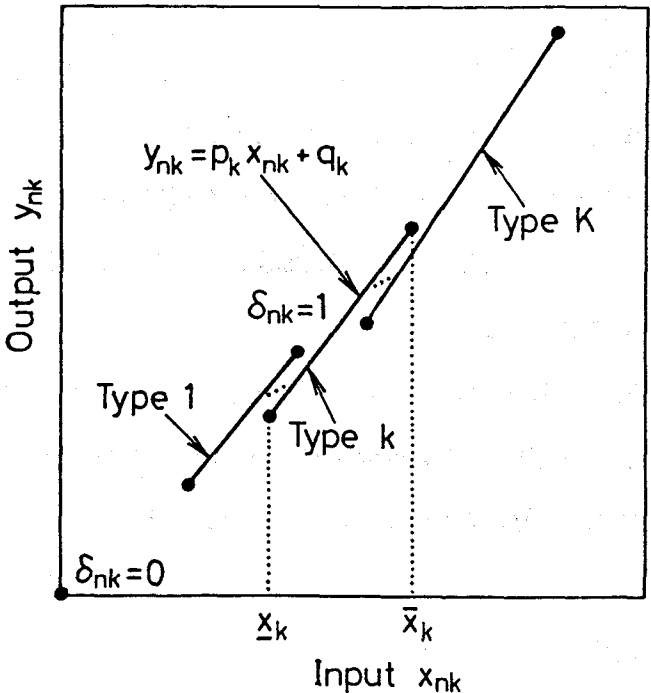


図4.2 機器性能特性



態にあることを示す。この場合、各構成機器は当然選定された場合のみ運転可能であり、

$$\delta_{nk}^{(m)} \leq \mu_{nk} \quad (n=1 \sim \bar{N}, k=1 \sim K, m=1 \sim M) \quad \dots\dots\dots(4.4)$$

を考慮する。

#### 4.2.3 エネルギー・バランスおよび需給関係

エネルギー供給量が少なくとも需要量を満たすためには、各運用モードについて

$$y^{d(m)} \leq \sum_{n=1}^{\bar{N}} \sum_{k=1}^K y_{nk}^{(m)} \quad (m=1 \sim M) \quad \dots\dots\dots(4.5)$$

が成立しなければならない。

#### 4.2.4 目的関数

最後に、目的関数について定式化を行う。2.5節で述べたように、ここでは長期的経済性の観点から設置される機器の設備費だけではなく、設定された機器耐用年数における運用費も考慮に入れ、総経費の最小化を図る。まずシステムの設備費 $C_f$ は、年価法<sup>(45)</sup>を用いて各機器の初期設備費を年間設備費に換算して評価する。すなわち

$$C_f = R \sum_{n=1}^{\bar{N}} \sum_{k=1}^K c_k \mu_{nk} \quad \dots\dots\dots(4.6)$$

ここで、 $R$ は資本回収係数であり、機器耐用年数を $\kappa$ 、年間利率を $\rho$ とすると

$$R = \rho (1 + \rho)^\kappa / \{(1 + \rho)^\kappa - 1\} \quad \dots\dots\dots(4.7)$$

で与えられる。また、 $c_k$ はタイプ $k$ の機器の初期設備費である。一方、年間に消費される入力エネルギーのコストである運用費 $C_v$ は、入力エネルギーの単価を $\phi$ 、第 $m$ 番めの運用モードの年間相当運転時間を $T^{(m)}$ とすると

$$C_v = \sum_{m=1}^M \varphi \left( \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K x_{nk}^{(m)} \right) T^{(m)} \dots\dots\dots(4.8)$$

したがって、最小化すべき目的関数である年間総経費  $C_t$  は

$$J = C_t = C_f + C_v \dots\dots\dots(4.9)$$

と表される。

結果として、図4.1のエネルギー供給システムの最適設計計画問題は、式(4.1)～(4.5)の制約条件および各連続変数の非負条件の下に、式(4.9)で与えられる目的関数を最小化するような機器の選定を表す0-1整数変数  $\mu_{nk}$ 、機器の運転・停止条件を表す0-1整数変数  $\delta_{nk}$ 、および機器の負荷レベルを表す連続変数  $x_{nk}$  と  $y_{nk}$  を決定するという一つの混合整数線形計画問題として定式化される。

### 4.3 最適設計計画問題の解法

4.2節で混合整数線形計画問題として定式化されたエネルギー供給システムの最適設計計画問題は、原理的には3.3節で述べた混合整数線形計画法のアルゴリズムによって直接解くことが可能である。しかしながら、たとえば機器の最大設置可能台数を  $N=3$ 、選定可能な機器規模の種類数を  $K=3$ 、運用モード数を  $M=8$  とすると、0-1整数変数の数は  $N \times K \times (M+1) = 81$  個にも達するため問題の規模がきわめて大きくなり、数値計算上の困難さが生じる。そこで、ここでは最適設計計画問題を機器構成問題と最適運用計画問題に分離し、それらを階層的に考慮しながら最適解を導出する。この最適化計算の手順を図4.3に示す。まず機器構成条件として式(4.1)、(4.2)を満足するように  $\mu_{nk}$  の値を決定し、機器構成を定める。次に、 $\mu_{nk}=1$  に対応する変数  $\delta_{nk}$ 、 $x_{nk}$ 、 $y_{nk}$

のみを考慮し，式(4.3)，(4.5)の制約条件の下に式(4.8)の年間運用費 $C_v$ を最小化するという最適運用計画問題を解く．この最適運用計画問題における0-1整数変数の数は $\mu_{nk}$ の値にも依存するが，最大 $N \times M = 24$ 個となり大幅に減少する．また図4.1のエネルギー供給システムのように各運用モード $m$ について独立に最適運用計画問題を解くことができる場合には，各運用計画問題について最大 $N = 3$ 個の0-1整数変数を考慮するだけでよく，効率よく最適解を導出できる．最後に，すでに決定されている機器構成から式(4.6)の年間設備費 $C_f$ を求め，最適運用計画問題の目的関数の最適値である式(4.8)の年間運用費 $C_v$ に加算し，式(4.9)の目的関数 $J$ の値を決定する．以上の計算を式(4.1)，(4.2)を満足する $\mu_{nk}$ のすべての組合せについて実行し， $J$ の値を比較することによって $J$ の最小値を求め，それに対応する解を最適解とする．この手順においては，

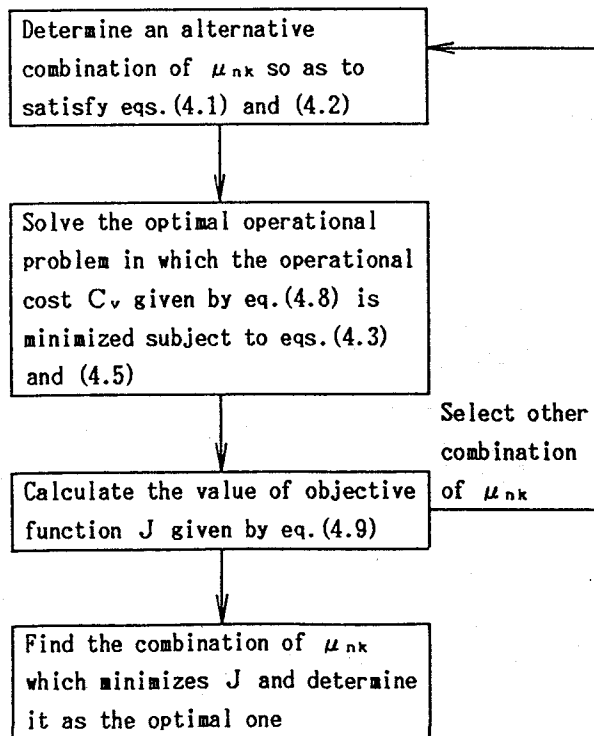


図4.3 最適設計計画問題の解法手順

機器構成の決定に3.2.1項で述べた列挙法を、また最適運用計画問題の解法として3.3節で述べた混合整数線形計画法のアルゴリズムを採用する。

#### 4.4 設計計画事例1

##### 4.4.1 LNG船蒸気タービン・システム

設計計画事例の一つとして、まず図4.4に示すLNG船蒸気タービン・システム<sup>(22)</sup>を考察の対象とする。図4.4において、機器に付した記号は以下の通りである。

- CH : ハイ・デューティ圧縮機
- CL : ロー・デューティ圧縮機
- DG : ディーゼル発電機
- H : ヒータ
- MB : 主ボイラ
- MT : 主タービン
- TG : 低圧蒸気ターボ発電機

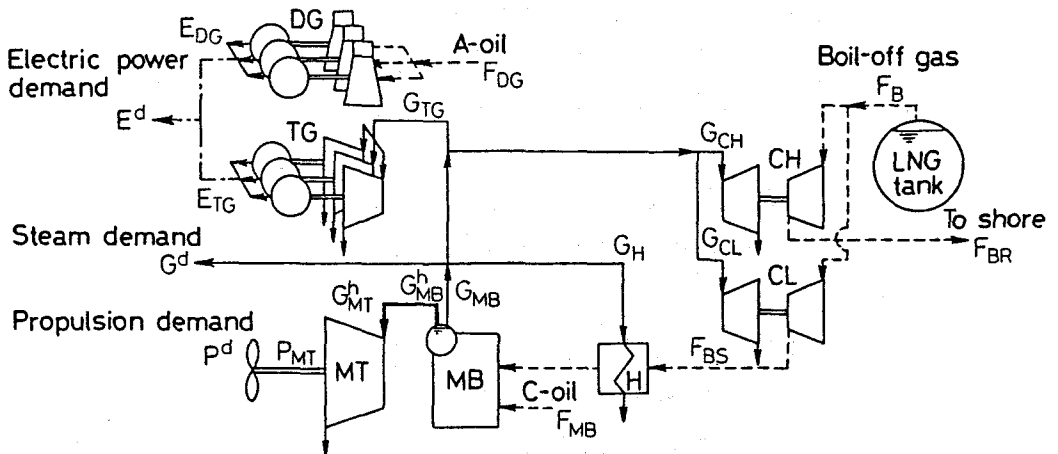


図4.4 LNG船蒸気タービン・システム

また実線は蒸気、一点鎖線は電力、破線は燃料の流れをそれぞれ示す。

このシステムでは、LNGタンクから発生するボイルオフガスは航海中はロー・デューティ圧縮機で圧縮され、ヒータで常温近くまで加熱された後、主ボイラでC重油とともに燃やされる。また積荷中はハイ・デューティ圧縮機により陸上へ圧送される。主ボイラから発生する高圧蒸気は主タービンに導かれ推進力を発生する。また低圧蒸気は、低圧蒸気ターボ発電機などの各種機器の動力、およびその他の船内の熱エネルギーとして使用される。電力は低圧蒸気ターボ発電機とA重油を燃焼させるディーゼル発電機により供給される。

#### 4.4.2 最適設計計画問題の定式化

このシステムにおいて、圧縮機とヒータの規模はボイルオフガスの最大発生量を考慮して決定する必要がある。ここでは、従来からのLNG船蒸気タービン・システムの設計に採用されているボイルオフガス最大発生量の値<sup>(24)</sup>に基づき、圧縮機とヒータの規模も予め決定されているものとする。また主タービンと主ボイラの規模は推進力によってほぼ決定される。したがって、圧縮機、ヒータ、主タービン、および主ボイラの規模の選定を設計項目から除外し、これらの機器に関しては、運用方策のみを考慮に入れる。それ以外の構成機器であるディーゼル発電機と低圧蒸気ターボ発電機はともに複数台設置できるものとし、これらの規模と台数の選定、および運用方策の決定を設計項目として考察する。

LNG船の運航状況によるエネルギー需要量の時間的変動や海象の変化によるボイルオフガス発生量の時間的変動は、定常運転中は比較的小さいと考えられる。したがって、基本設計段階では機器の動的な運用方策の検討を行わず、一般の船用熱電併給システムの設計計画に採用されている次のような方法<sup>(20)</sup>を適用する。すなわち、LNG船の航海サイクルにおいて航海、出入港、停泊、

および荷役などのようにいくつかの航海パターンを運用モードとして設定し、各パターンに対して年間相当運転時間、ならびに蒸気、電力、推進力などのエネルギー需要量とボイルオフガス発生量を推定する。また各航海パターンに対してシステム構成機器の最適運用方策を検討する。

以下に最適設計計画問題の定式化を示す。なお定式化における使用記号は次の通りである。

- エネルギー量

- E : 低圧電力
- F : 燃料消費量
- G : 低圧蒸気量
- $G^h$  : 高圧蒸気量
- P : 動力

- 下付添字

- A : A重油
- B : ボイルオフガス発生量
- BR : ボイルオフガス返送量
- BS : ボイルオフガス供給量
- C : C重油

- 上付添字

- d : エネルギー需要

その他の記号は4.2節で用いたものと同一である。また各機器に関する量は機器記号を添えて示す。

**機器構成** 設計計画の対象とするディーゼル発電機と低圧蒸気ターボ発電機については、それぞれ $K_{DG}$ 、 $K_{TG}$ 種類の規模が異なる機器の中から同規模の機器の組合せを許してそれぞれ最大 $N_{DG}$ 、 $N_{TG}$ 台まで設置可能とする。この場合、式(4.1)および式(4.2)に対応する機器構成条件は、それぞれ

$$\left. \begin{aligned}
& \sum_{n=1}^{\bar{N}_{DG}} \sum_{k=1}^{K_{DG}} \mu_{DGnk} \leq \bar{N}_{DG} \\
& \sum_{n=1}^{\bar{N}_{TG}} \sum_{k=1}^{K_{TG}} \mu_{TGnk} \leq \bar{N}_{TG} \\
& \mu_{DGnk} \in \{0, 1\} \quad (n=1 \sim \bar{N}_{DG}, k=1 \sim K_{DG}) \\
& \mu_{TGnk} \in \{0, 1\} \quad (n=1 \sim \bar{N}_{TG}, k=1 \sim K_{TG})
\end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.10)$$

$$\left. \begin{aligned}
& \mu_{DG1k} \geq \mu_{DG2k} \geq \dots \geq \mu_{DG\bar{N}_{DG}k} \quad (k=1 \sim K_{DG}) \\
& \mu_{TG1k} \geq \mu_{TG2k} \geq \dots \geq \mu_{TG\bar{N}_{TG}k} \quad (k=1 \sim K_{TG})
\end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.11)$$

と表される。

機器性能 ディーゼル発電機および低圧蒸気ターボ発電機の性能特性は、式(4.3)に従い次のように定式化される。

-ディーゼル発電機(DG)

$$\left. \begin{aligned}
& E_{DGnk} = p_{DGk} F_{DGnk} + q_{DGk} \delta_{DGnk} \\
& \underline{F}_{DGk} \delta_{DGnk} \leq F_{DGnk} \leq \overline{F}_{DGk} \delta_{DGnk} \\
& \delta_{DGnk} \in \{0, 1\}
\end{aligned} \right\} \\
(n=1 \sim \bar{N}_{DG}, k=1 \sim K_{DG}, m=1 \sim M) \dots\dots\dots (4.12)$$

-低圧蒸気ターボ発電機(TG)

$$\left. \begin{aligned}
& E_{TGnk} = p_{TGk} G_{TGnk} + q_{TGk} \delta_{TGnk} \\
& \underline{G}_{TGk} \delta_{TGnk} \leq G_{TGnk} \leq \overline{G}_{TGk} \delta_{TGnk} \\
& \delta_{TGnk} \in \{0, 1\}
\end{aligned} \right\} \\
(n=1 \sim \bar{N}_{TG}, k=1 \sim K_{TG}, m=1 \sim M) \dots\dots\dots (4.13)$$

ただし、式(4.4)に対応する制約条件として

$$\left. \begin{aligned}
& \delta_{DGnk} \leq \mu_{DGnk} \quad (n=1 \sim \bar{N}_{DG}, k=1 \sim K_{DG}, m=1 \sim M) \\
& \delta_{TGnk} \leq \mu_{TGnk} \quad (n=1 \sim \bar{N}_{TG}, k=1 \sim K_{TG}, m=1 \sim M)
\end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.14)$$

を考慮する。

上述のように、ロー・デューティ圧縮機、ハイ・デューティ圧縮機、ヒータ、

主タービン，および主ボイラの規模は他の設計条件からすでに決定されているものと仮定し，これらの機器の性能特性をそれぞれ次のように表す。

$$\left. \begin{aligned}
 F_{CS} &= \begin{cases} p_{CL}G_{CL} + q_{CL} & (G_{CL} \leq G_{CL} \leq \bar{G}_{CL}) \\
 0 & (G_{CL} = 0) \end{cases} \\
 F_{CR} &= \begin{cases} p_{CH}G_{CH} + q_{CH} & (G_{CH} \leq G_{CH} \leq \bar{G}_{CH}) \\
 0 & (G_{CH} = 0) \end{cases} \\
 F_{CS} &= p_H G_H^p \\
 P_{MT} &= \begin{cases} p_{MT}G^{h_{MT}} + q_{MT} & (G^{h_{MT}} \leq G^{h_{MT}} \leq \bar{G}^{h_{MT}}) \\
 0 & (G^{h_{MT}} = 0) \end{cases} \\
 G^{h_{MB}} + p_{MB}G_{MB} &= q_{MB}F_{CS} + r_{MB}F_{CR}
 \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} (m=1 \sim M) \\ \dots (4.15) \end{array}$$

エネルギー・バランスおよび需給関係 図4.4から各エネルギーの balan

スおよび需給関係は次のように表される。

- 動力

$$P^{d(m)} = P_{MT}$$

- 電力

$$E^{d(m)} \leq E_{CR} + E_{CR}$$

$$E_{CR} = \sum_{n=1}^{\bar{N}_{DG}} \sum_{k=1}^{K_{DG}} E_{CRnk}^{(m)}$$

$$E_{CR} = \sum_{n=1}^{\bar{N}_{TG}} \sum_{k=1}^{K_{TG}} E_{CRnk}^{(m)}$$

- 高圧蒸気

$$G^{h_{MT}} = G^{h_{MB}}$$

- 低圧蒸気

$$G^{d(m)} \leq G_{MB} - (G_{CL} + G_{CH} + G_H^p + G_{CR})$$

$$G_{CR} = \sum_{n=1}^{\bar{N}_{TG}} \sum_{k=1}^{K_{TG}} G_{CRnk}^{(m)}$$

- 燃料

$$F_{CR} = \sum_{n=1}^{\bar{N}_{DG}} \sum_{k=1}^{K_{DG}} F_{CRnk}^{(m)}$$

$$F_H^p = F_{CS} + F_{CR}$$

(m=1~M) ... (4.16)



目的関数 まず年間設備費  $C_f$  として、ディーゼル発電機と低圧蒸気ターボ発電機の設備費を考える。すなわち

$$C_f = R \left( \sum_{n=1}^{N_{DG}} \sum_{k=1}^{K_{DG}} C_{DGk} \mu_{DGnk} + \sum_{n=1}^{N_{TG}} \sum_{k=1}^{K_{TG}} C_{TGk} \mu_{TGnk} \right) \dots (4.17)$$

一方、運用費として年間にディーゼル発電機で消費されるA重油と主ボイラで消費されるC重油のコストを考える。機器の運用方策は航海パターンによって異なるので、各パターンについて運用費を求め、それらを合計して年間運用費とする。A重油およびC重油の単価をそれぞれ  $\varphi_A$ ,  $\varphi_C$  とすると、年間運用費  $C_v$  は

$$C_v = \sum_{m=1}^M (\varphi_A F_{DG}^{(m)} + \varphi_C F_{TG}^{(m)}) T^{(m)} \dots (4.18)$$

と表される。したがって、目的関数である年間総経費  $C_t$  は式(4.17), (4.18) から

$$J = C_t = C_f + C_v \dots (4.19)$$

として与えられる。

#### 4.4.3 最適設計計画問題の解法

4.4.2項で定式化された最適設計計画問題を4.3節で述べた解法に従って解く。図4.5に解法の手順を示す。まず、式(4.10), (4.11)を満足するように  $\mu_{DGnk}$ ,  $\mu_{TGnk}$  の値を決定し、ディーゼル発電機と低圧蒸気ターボ発電機の組合せを決定する。ここで、この組合せによって式(4.16)の第2式が満足される可能性があるか、換言すれば上記の発電機の組合せによる最大総発電量が最大電力需要量より小さくないかを調べ、満足される組合せについてのみ以下の計算を行う。次に各航海パターンについて、式(4.12), (4.13), (4.15)の機器性能特性、および式(4.16)のエネルギー・バランスおよび需給関係の制約条件の下に、単位時間当りに消費される燃料のコストを最小化するという最適運用

計画問題を解き、構成機器の最適運用方策を求める。最後に、すでに決定されている構成機器の年間設備費 $C_f$ とすべての航海パターンにおける最適運用方策に対応する年間運用費 $C_v$ とを求め、式(4.19)の目的関数 $J$ の値を決定する。以上の計算をディーゼル発電機と低圧蒸気ターボ発電機のすべての組合せについて実行し、 $J$ の値を比較することにより $J$ の最小値を求め、それに対応する解を最適解とする。

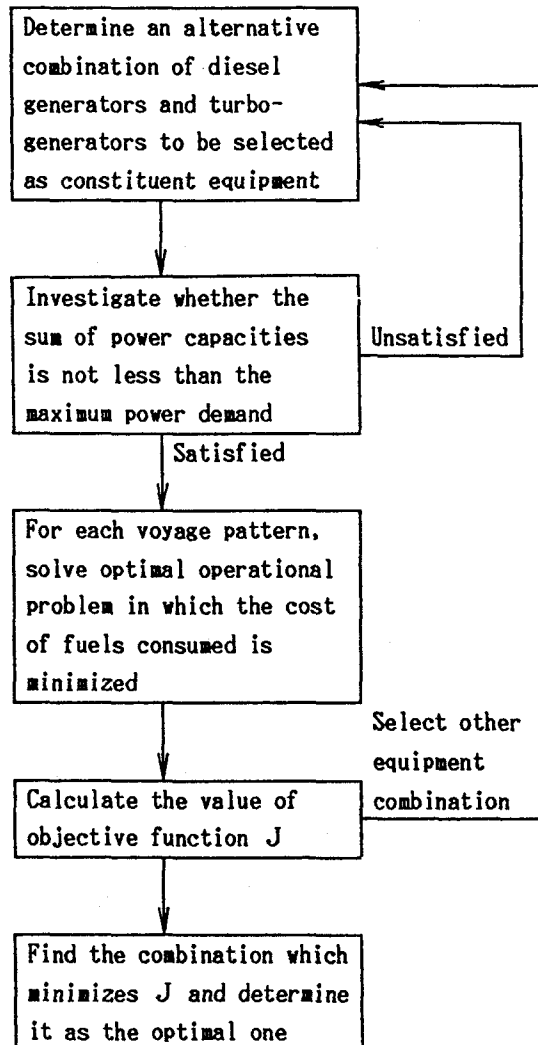


図4.5 最適設計計画の手順  
(LNG船蒸気タービン・システム)

#### 4.4.4 検討事例

本項では、4.4.2項および4.4.3項において提示した最適設計計画手法を実在規模のLNG船蒸気タービン・システムの設計計画に適用した場合の事例について述べ、本手法の有効性を検証する。

検討条件 最適化計算を行うにあたり、以下のように検討条件を設定した。

ディーゼル発電機と低圧蒸気ターボ発電機の最大設置可能台数をそれぞれ三台とする ( $\bar{N}_{DG}=3, \bar{N}_{TG}=3$ )。またそれぞれの発電機を三種類の規模が異なる機器から選定可能とする ( $K_{DG}=3, K_{TG}=3$ )。図4.6および図4.7は、それぞれディーゼル発電機および低圧蒸気ターボ発電機について選定可能な三種類の機器の性能特性を示したものである。また表4.1は各構成機器の性能特性値ならびに発電機の初期設備費を示したものである。運用モードとしてLNG船の航海サイクルを表4.2に示す8つの航海パターンに大別し ( $M=8$ )、各パターンに対して蒸気、電力、推進力の各需要量、ボイルオフガス発生量、および年間相

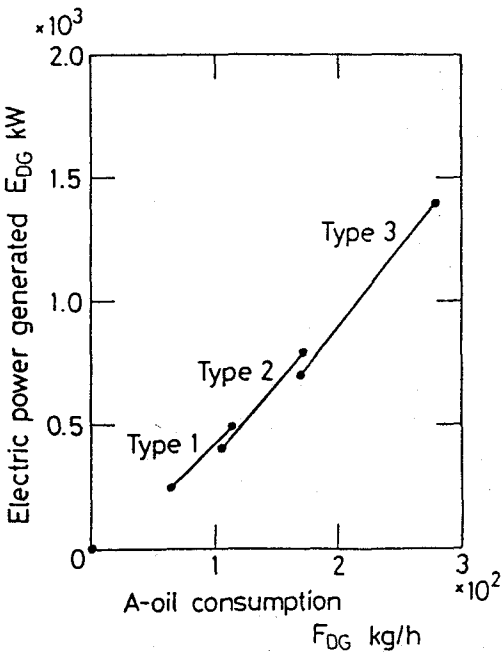


図4.6 ディーゼル発電機の性能特性

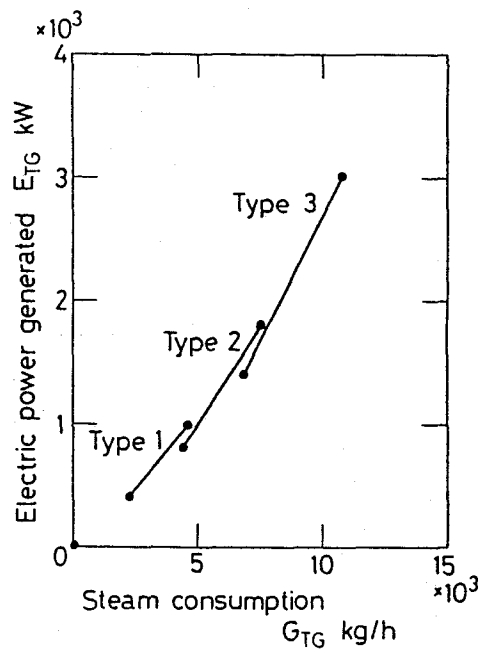


図4.7 低圧蒸気ターボ発電機の性能特性

当運転時間の推定を行った。さらに、式(4.7)における機器耐用年数を  $\kappa = 10$  年、年間利率を  $\rho = 0.09$  とし、式(4.17)の資本回収係数を  $R = 0.1558$  とした。また式(4.18)におけるC重油の単価を  $\varphi_C = 48$  円/kg、A重油の単価をケース(a)  $\varphi_A = 60$  円/kg、ケース(b)  $\varphi_A = 75$  円/kgとした。

表4.1 機器の性能特性値と発電機の初期設備費

Type k		1	2	3
Diesel generator	$P_{DGk}$ kW/(kg/h)	5.000	5.972	6.306
	$Q_{DGk}$ kW	-75.0	-226.9	-365.8
	$F_{DGk}$ kg/h	65.0	105.0	169.0
	$\bar{F}_{DGk}$ kg/h	115.0	172.0	280.0
	$C_{DGk}$ $\times 10^4$ Yen	2200	2910	4070
Turbo-generator	$P_{TGk}$ kW/(kg/h)	0.2553	0.3175	0.3441
	$Q_{TGk}$ kW	-174.5	-596.8	-957.0
	$G_{TGk}$ kg/h	2250	4400	6850
	$\bar{G}_{TGk}$ kg/h	4600	7550	11500
	$C_{TGk}$ $\times 10^4$ Yen	5320	7570	10280
Main turbine	$P_{MT}$ kW/(kg/h)	0.3871		
	$Q_{MT}$ kW	-1548		
Main boiler	$P_{MB}$	0.8595		
	$Q_{MB}$	12.25		
	$\Gamma_{MB}$	11.43		
High duty compressor	$P_{CH}$	3.031		
	$Q_{CH}$ kg/h	-2013		
Low duty compressor	$P_{CL}$	3.031		
	$Q_{CL}$ kg/h	-2013		
Heater	$P_H$	41.55		

表4.2 航海パターンとエネルギー需要  
(LNG船蒸気タービン・システム)

Voyage pattern	m	$P^{(m)}$ kW	$F^{(m)}$ kg/h	$F_{\text{総}}$ kg/h	$G^{(m)}$ kg/h	$E^{(m)}$ kW	$T^{(m)}$ h/Year
Loaded voyage at torrid zone	1	29420	5390	0	1000	2000	2832
Loaded voyage at temperate zone	2	29420	5140	0	1200	1850	912
Ballast voyage at torrid zone	3	29420	3770	0	1000	2100	2472
Ballast voyage at temperate zone	4	29420	3600	0	1200	1950	792
Departure and arrival	5	7355	0	0	1000	2650	192
Anchoring	6	0	0	0	1000	2200	480
Loading	7	0	48960	48960	900	3120	240
Unloading	8	0	0	0	1100	6050	240

**結果および考察** 表4.3は、最小年間総経費の解から5番めまでについて、システムの構成機器として選定された三種類のディーゼル発電機と低圧蒸気ターボ発電機の台数、ならびに年間の設備費、運用費、および総経費を示したものである。表4.3(a), (b)はそれぞれケース(a), (b)に対応する。また実システム<sup>(64)</sup>に近い機器構成についても示している。ただし、ディーゼル発電機と低圧蒸気ターボ発電機に対する設備費と運用費の占める割合を明確にするために、運用費を発電のための重油消費量に対する運用費 $C_{vG}$ と推進やその他のための $C$ 重油消費量に対する運用費 $C_{vR}$ に分けて示している。表4.3の結果によれば、設備費は運用費に比較して少なくなっているが、最小年間総経費の解から5番めまでの解を比較して判るように、機器構成の違いによる設備費の変化量と運用費の変化量とは同程度になっている。このことは、考察の対象としている熱

表4.3 機器構成と年間経費

(a) ケース(a)

	Numbers of constituent equipment						$C_f$ $\times 10^4$ Yen/Year	$C_{vG}$ $\times 10^4$ Yen/Year	$C_{vR}$ $\times 10^4$ Yen/Year	$C_t$ $\times 10^4$ Yen/Year
	Diesel generator			Turbogenerator						
	Type 1	Type 2	Type 3	Type 1	Type 2	Type 3				
Optimal combination	1	1	2			1	3323	22438	82355	108116
	2	1	2			1	3213	22921	82354	108488
	3		1	1		1	3518	22677	82354	108549
	4		1	2	1	1	3730	22514	82354	108598
	5	1	1	1	1		3861	22577	82354	108792
Actual combination	1					2	3546	13691	95885	113122

(b) ケース(b)

	Numbers of constituent equipment						$C_f$ $\times 10^4$ Yen/Year	$C_{vG}$ $\times 10^4$ Yen/Year	$C_{vR}$ $\times 10^4$ Yen/Year	$C_t$ $\times 10^4$ Yen/Year
	Diesel generator			Turbogenerator						
	Type 1	Type 2	Type 3	Type 1	Type 2	Type 3				
Optimal combination	1	1	2			1	3213	15650	93982	112845
	2		1	2		1	3323	13896	95852	113071
	3			1		1	3415	13878	95851	113144
	4	1				2	3546	13771	95851	113168
	5		1	1	1		3518	13903	95851	113272
Actual combination	1					2	3546	13771	95851	113168

電併給システムの設計計画においては設備費と運用費をともに目的関数に含め、長期的経済性の観点から設計計画を行う必要があることを示唆している。表4.4(a), (b)は、それぞれ表4.3(a), (b)の最小年間総経費のシステムに対して、各航海パターンにおける構成機器の最適運用方策を発電量で示したものである。またA重油およびC重油の単位時間当りの消費量も示している。ケース(a)と(b)を比較すると、機器構成はディーゼル発電機一台が異なっているだけであるが、各航海パターンにおける最適運用方策は全く異なっている。すなわち、ケース(a)の場合には、主としてディーゼル発電機が使用されており、低圧蒸気ターボ発電機は補助的な役割を果たしているにすぎない。一方ケース(b)の場合には、一部の航海パターンを除き主として低圧蒸気ターボ発電機によって

表4.4 最適機器構成に対する最適運用方策

(a) ケース(a)

m	$E_{12}$ kW	$E_{13}$ kW	$E_{23}$ kW	$E_{13}$ kW	$F$ kg/h	$F_{\text{総}}$ kg/h
1	600	1400	0	0	418.5	1491.1
2	450	1400	0	0	393.4	1767.4
3	700	1400	0	0	435.2	3184.2
4	550	1400	0	0	410.1	3376.9
5	0	1400	1250	0	536.3	2087.4
6	800	1400	0	0	452.0	75.2
7	400	1400	1320	0	652.3	1332.7
8	800	1400	1400	2450	732.0	827.3

(b) ケース(b)

m	$E_{11}$ kW	$E_{13}$ kW	$E_{23}$ kW	$E_{13}$ kW	$F$ kg/h	$F_{\text{総}}$ kg/h
1	0	0	0	2000	0.0	2137.3
2	450	1400	0	0	385.0	1767.4
3	0	0	0	2100	0.0	3852.2
4	0	0	0	1950	0.0	4012.2
5	0	0	0	2650	0.0	2875.7
6	0	0	0	2200	0.0	765.1
7	250	0	0	2870	65.0	2169.1
8	250	1400	1400	3000	625.0	947.5

発電を行い、不足分がディーゼル発電機によって補われている。ここで航海パターン  $m=2$  においてディーゼル発電機が使用されているのは、電力需要量が小さくディーゼル発電機による発電だけで需要をまかなえる場合には、低圧蒸気ターボ発電機を低負荷レベルで運転するよりもディーゼル発電機を高負荷レベルで運転する方が総合熱効率がよいためである。

実際のLNG船に設置されている機器は、2500~3000kWの比較的大形の低圧蒸気ターボ発電機二台と500~1000kWの小形のディーゼル発電機一台である<sup>(64)</sup>。この理由は、まだLNG船の建造実績が少なく、最適な機器構成に至っていないためと思われる。ここで、実システムに近い機器構成として表4.3の最下欄に示す機器構成について最適運用方策を求め、それを表4.5に示した。この最適運用方策はケース(a)、(b)ともに同一の結果となり、主として低圧蒸気ターボ発電機が使用されている。最小年間総経費のシステムと異なり、ケース(a)でもディーゼル発電機が補助的に使用されているのは、小形のディーゼル発電機と低圧蒸気ターボ発電機を並列運転して低圧蒸気ターボ発電機の負荷レベルを低下させるよりも、低圧蒸気ターボ発電機を単独に高負荷レベルで運転する方が総合熱効率がよいためである。なお、この実システムと最小年間総経費のシステムの年間総経費の比は、ケース(a)では1.046、ケース(b)では1.003

表4.5 実在機器構成に対する最適運用方策

m	$E_{DG11}$ kW	$E_{DG13}$ kW	$E_{DG23}$ kW	$F_{DG}$ kg/h	$F_{STB}$ kg/h
1	0	2000	0	0.0	2137.3
2	0	1850	0	0.0	2380.9
3	0	2100	0	0.0	3852.3
4	0	1950	0	0.0	4012.2
5	0	2650	0	0.0	2875.7
6	0	2200	0	0.0	765.1
7	250	2870	0	65.0	2169.1
8	250	3000	2800	65.0	1768.5

となっている。このように、最適設計計画手法の適用によって実システムが最小年間総経費のシステムに近いものであるのか、あるいは経済性をさらに向上させるシステムが存在するのかという検討も合理的に行うことができる。

## 4.5 設計計画事例2

### 4.5.1 LNG船ディーゼル・ガスタービン複合システム

次に図4.8に示すLNG船ディーゼル・ガスタービン複合システム<sup>(24)</sup>を考察の対象とする。図4.8において、機器に付した記号は以下の通りである。

- CL : ロー・デューティ圧縮機
- DE : ディーゼルエンジン
- DG : ディーゼル発電機
- GT : ガスタービン発電機
- H : ヒータ

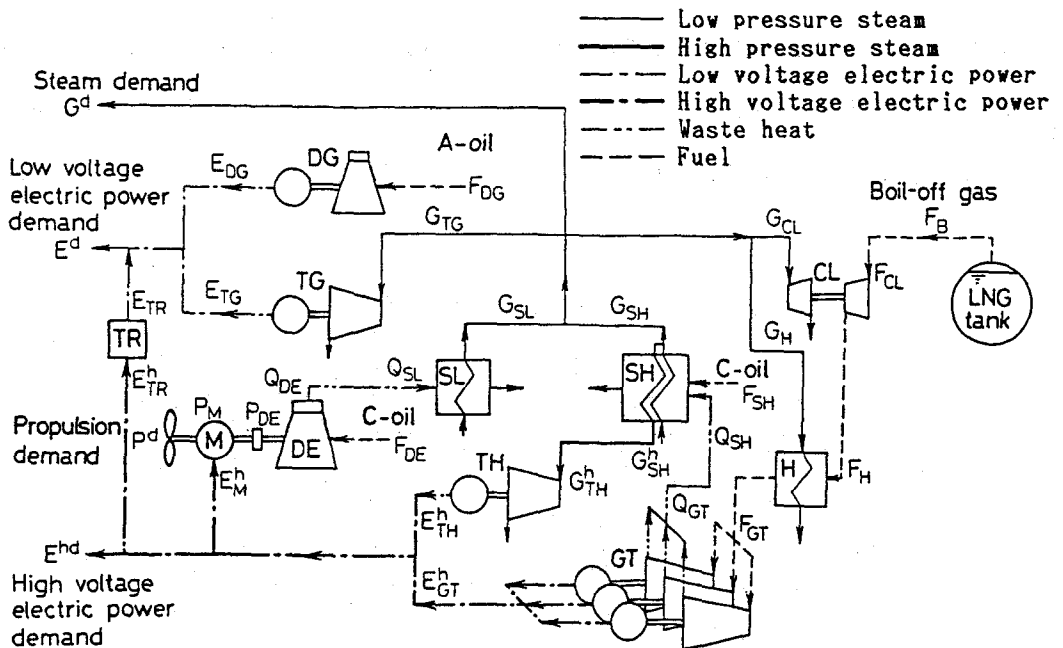


図4.8 LNG船ディーゼル・ガスタービン複合システム



M：電動機  
SH：高圧ボイラ  
SL：低圧ボイラ  
TG：低圧蒸気ターボ発電機  
TH：高圧蒸気ターボ発電機  
TR：変圧器

また実線は蒸気，一点鎖線は電力，二点鎖線は廃熱，破線は燃料の流れをそれぞれ表す。

このシステムでは，推進力はディーゼルエンジンと電動機によって得られる。電動機は，ガスタービン発電機と高圧蒸気ターボ発電機によって発生する高圧電力によって駆動される。ディーゼルエンジンはC重油を，またガスタービン発電機はLNGタンクから発生するボイルオフガスのみを燃焼させるように設計されている。また高圧蒸気ターボ発電機は，ガスタービン発電機の廃熱を利用したボイラから発生する高圧蒸気によって駆動される。さらにこのシステムでは，熱エネルギーの供給と低圧蒸気ターボ発電機，ヒータ，ロー・デューティ圧縮機などの補機の駆動をディーゼルエンジンとガスタービン発電機の廃熱を利用した二基のボイラから発生する低圧蒸気によって行う。一方，低圧電力はA重油を燃焼させるディーゼル発電機，低圧蒸気ターボ発電機，および高圧電力の一部によって供給される。またヒータとロー・デューティ圧縮機は，ボイルオフガスを加熱してガスタービン発電機に供給するために使用される。

#### 4.5.2 最適設計計画問題の定式化

ディーゼル・ガスタービン複合システムにおいては，蒸気タービン・システムと異なり電力だけではなく推進力も構成機器の並列運転によって供給されるため，各構成機器の規模の選定，および運用方策の決定に関して多数の代替案が存在する。またこのシステムでは，ボイルオフガス発生量に直接関連するLNGタンクの防熱材厚さの再検討も行われている。これもシステムの設計計画

に密接に関連する。そこで、本節では主機やLNGタンクの防熱材厚さも設計対象に含め、総合的に検討する。ここでは、長期的経済性の観点から各種構成機器とLNGタンクの防熱材の年間設備費、ならびに燃料とボイルオフガスの消費による年間運用費を考慮に入れ、年間総経費の最小化を図る。また4.4節と同様に、運用モードとしてLNG船の航海サイクルにおいていくつかの代表的な航海パターンを設定し、各パターンにおいて推定されるエネルギー需要量とボイルオフガス発生量に対して機器運用方策を考えるものとする。ただし、最適設計計画を行うにあたり、次のような仮定を設けた。

- (1) 経済性への影響が小さいと考えられるディーゼル発電機、低圧蒸気ターボ発電機、および変圧器に関しては、あらかじめ機器規模が選定されているものとし、機器運用方策だけの検討を行う。
- (2) ガスタービン発電機は、数種類の規模の機器から同規模の機器の組合せを許して複数台選定できるものとする。その他の機器の設置台数は一台とし、それぞれ数種類の規模の機器から選定する。
- (3) 機器規模に関して相互に密接な関係のある機器、すなわちディーゼルエンジン、電動機と低圧ボイラ、あるいはロー・デューティ圧縮機とヒータについては、それぞれ一対にして機器規模の選定を行う。

以下に最適設計計画問題の定式化を行う。定式化における使用記号として、4.2節および4.4節で用いた記号の他に  $E^h$  : 高圧電力,  $Q$  : 廃熱量を用いる。また各機器に関する量は機器記号を添えて示す。

**機器構成** 各機器の構成条件として次式を考慮する。まず上記の仮定(2)よりガスタービン発電機の機器構成条件は次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} 1 &\leq \sum_{n=1}^{\bar{N}_{GT}} \sum_{k=1}^{K_{GT}} \mu_{GTnk} \leq \bar{N}_{GT} \\ \mu_{GTnk} &\in \{0, 1\} \quad (n=1 \sim \bar{N}_{GT}, k=1 \sim K_{GT}) \\ \mu_{GT1k} &\geq \mu_{GT2k} \geq \dots \geq \mu_{GT\bar{N}_{GT}k} \quad (k=1 \sim K_{GT}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.20)$$

その他の機器の設置台数は一台であるので、たとえばディーゼルエンジンについては次式の機器構成条件を考慮する。

$$\left. \begin{aligned} \sum_{k=1}^{K_{DE}} \mu_{DE1k} &= 1 \\ \mu_{DE1k} &\in \{0, 1\} \quad (k=1 \sim K_{DE}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.21)$$

さらに仮定(3)より

$$\left. \begin{aligned} \mu_{DE1k} &= \mu_{SL1k} = \mu_{M1(K_M - k + 1)} \in \{0, 1\} \quad (k=1 \sim K_{DE}) \\ \mu_{CL1k} &= \mu_{H1k} \in \{0, 1\} \quad (k=1 \sim K_{CL}) \end{aligned} \right\} (4.22)$$

とする。ただし、 $K_{DE} = K_{SL} = K_M$ 、および  $K_{CL} = K_H$  である。

**機器性能** 図4.9は、一例として、ディーゼルエンジンについてエネルギーの入出力関係を示したものである。ディーゼルエンジンの性能特性は図4.9から次式のように定式化できる。

$$\left. \begin{aligned} P_{BE1k} &= P_{DEk} F_{BE1k} + Q_{DEk} \delta_{BE1k} \\ Q_{BE1k} &= r_{DEk} F_{BE1k} + S_{DEk} \delta_{BE1k} \\ \underline{F}_{DEk} \delta_{BE1k} &\leq F_{BE1k} \leq \overline{F}_{DEk} \delta_{BE1k} \\ \delta_{BE1k} &\in \{0, 1\} \end{aligned} \right\} (k=1 \sim K_{DE}, m=1 \sim M) \dots\dots\dots (4.23)$$

その他の構成機器の性能特性についても同様に定式化が可能である。

**ボイルオフガス発生量** 図4.10の破線はボイルオフガス発生量の設計値  $F_B$  と LNG タンクの防熱材厚さ  $t$  の関係を示したものである。航海中の実際の発生量は  $F_B$  より少なく、次式のように航海パターンによって変化する係数  $\nu^{(m)}$  を設計値に掛けて表す。

$$F_B^{(m)} = \nu^{(m)} F_B \dots\dots\dots (4.24)$$

また図4.10の実線で示すように、実際に計画されている値を含むように防熱材厚さの上・下限値  $\underline{t}$ 、 $\overline{t}$  を設定し、次式のようにボイルオフガス発生量を防熱材厚さの一次関数で表現する。

$$\left. \begin{aligned} F_B &= a_1 + b_1 t \\ \underline{t} &\leq t \leq \overline{t} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.25)$$

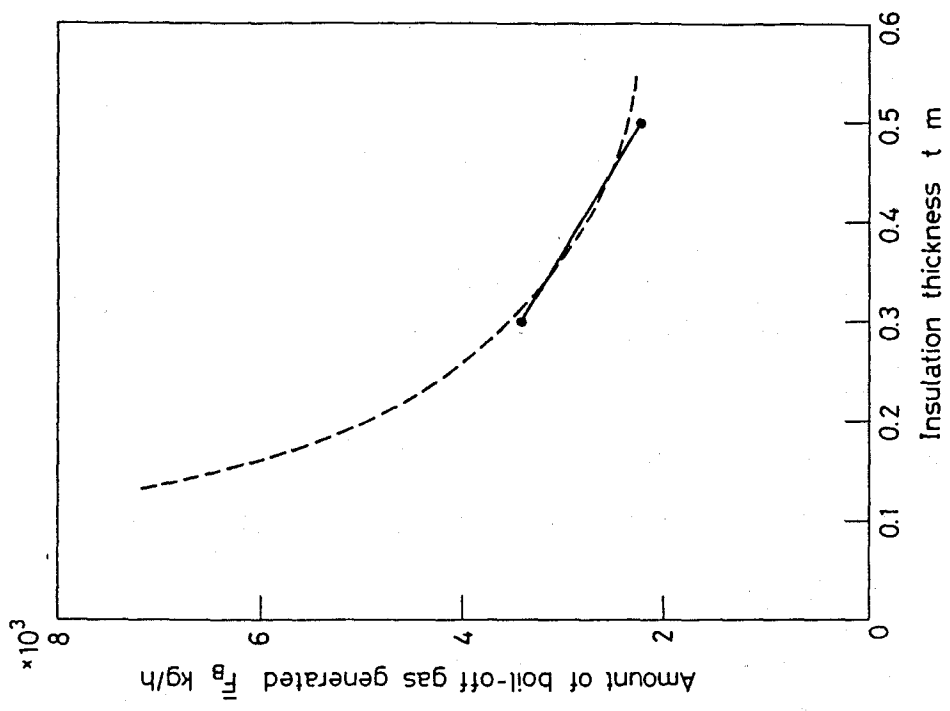


図4.10 ボイルオフガス発生量と防熱材厚さの関係

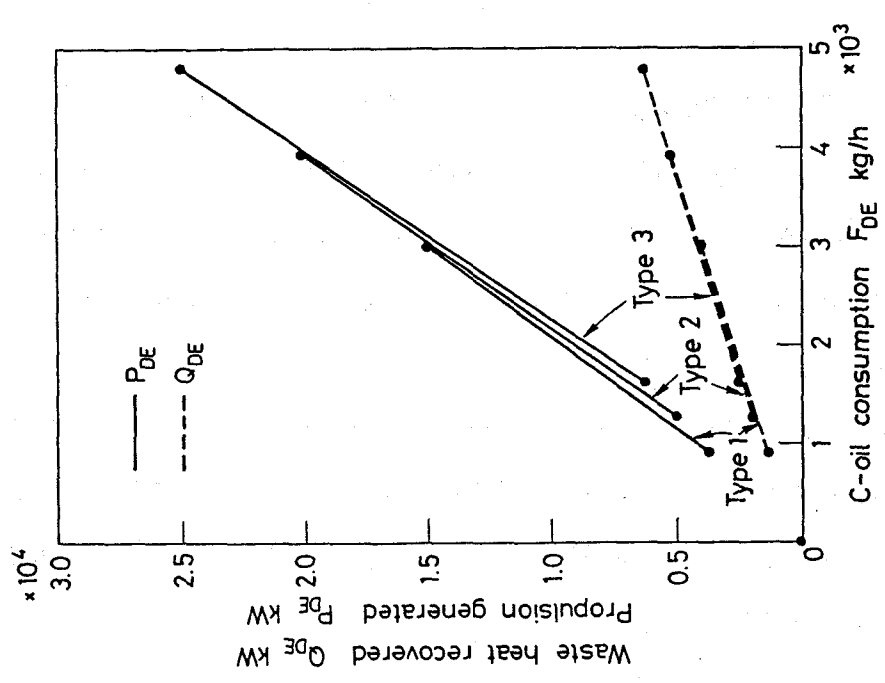


図4.9 ディーゼルエンジンの性能特性

さらに、 $F_B$ で与えられる量のボイルオフガスが発生する場合でもガスタービン発電機、ヒータ、およびロー・デューティ圧縮機によってボイルオフガスを処理できるように、次式が成立する必要がある。

$$F_B \leq \min \left\{ \sum_{n=1}^{N_{GT}} \sum_{k=1}^{K_{GT}} F_{GTnk} \mu_{GTnk}, \sum_{k=1}^{K_H} P_{Hk} \bar{G}_{Hk} \mu_{H1k}, \sum_{k=1}^{K_{CL}} (P_{CLk} \bar{G}_{CLk} + q_{CLk}) \mu_{CL1k} \right\} \dots\dots\dots (4.26)$$

エネルギー・バランスおよび需給関係      図4.8から各エネルギーのバラン

スおよび需給関係は次のように表される。

- 動力

$$P^{d(m)} = \sum_{k=1}^{K_{DE}} P_{DE1k}^{(m)} + \sum_{k=1}^{K_M} P_{M1k}^{(m)}$$

- 高圧電力

$$E^{hd(m)} \leq \sum_{k=1}^{K_{TH}} E_{TH1k}^{h(m)} + \sum_{n=1}^{N_{GT}} \sum_{k=1}^{K_{GT}} E_{GTnk}^{h(m)} - \left( \sum_{k=1}^{K_M} E_{M1k}^{h(m)} + E_{TR}^{h(m)} \right)$$

- 低圧電力

$$E^{d(m)} \leq E_{SL}^{(m)} + E_{DE}^{(m)} + E_{TR}^{(m)}$$

- 高圧蒸気

$$\sum_{k=1}^{K_{TH}} G_{TH1k}^{h(m)} = \sum_{k=1}^{K_{SH}} G_{SH1k}^{h(m)}$$

- 低圧蒸気

$$G^{d(m)} \leq \sum_{k=1}^{K_{SL}} G_{SL1k}^{(m)} + \sum_{k=1}^{K_{SH}} G_{SH1k}^{(m)} - \left( G_{TR}^{(m)} + \sum_{k=1}^{K_H} G_{H1k}^{(m)} + \sum_{k=1}^{K_{CL}} G_{CL1k}^{(m)} \right)$$

- 廃熱

$$\sum_{k=1}^{K_{SH}} Q_{SH1k}^{(m)} = \sum_{n=1}^{N_{GT}} \sum_{k=1}^{K_{GT}} Q_{GTnk}^{(m)}$$

$$\sum_{k=1}^{K_{SL}} Q_{SL1k}^{(m)} = \sum_{k=1}^{K_{DE}} Q_{DE1k}^{(m)}$$

- 燃料

$$F_B^{(m)} = \sum_{n=1}^{N_{GT}} \sum_{k=1}^{K_{GT}} F_{GTnk}^{(m)} = \sum_{k=1}^{K_{CL}} F_{CLk}^{(m)} = \sum_{k=1}^{K_H} F_{Hk}^{(m)} \quad (m=1 \sim M) \dots\dots\dots (4.27)$$

目的関数 まず機器の年間設備費  $C_{fE}$  は、年価法を用いて各機器の初期設備費を年間設備費に換算して評価する。

$$C_{fE} = R \left( \sum_{k=1}^{K_{DE}} C_{DEk} \mu_{DE1k} + \sum_{k=1}^{K_M} C_{Mk} \mu_{M1k} + \sum_{k=1}^{K_{TH}} C_{THk} \mu_{TH1k} + \sum_{n=1}^{N_{GT}} \sum_{k=1}^{K_{GT}} C_{GTk} \mu_{GTnk} + \sum_{k=1}^{K_{SL}} C_{SLk} \mu_{SL1k} + \sum_{k=1}^{K_{SH}} C_{SHk} \mu_{SH1k} + \sum_{k=1}^{K_H} C_{Hk} \mu_{H1k} + \sum_{k=1}^{K_{CL}} C_{CLk} \mu_{CL1k} + C_{TR} + C_{DG} + C_{TG} \right) \quad (4.28)$$

防熱材の年間設備費  $C_{fI}$  も年価法を用いて評価する。ただし、防熱材の初期設備費  $c_I$  は防熱材厚さ  $t$  の一次関数で表されるものとする。すなわち

$$\left. \begin{aligned} C_{fI} &= R c_I \\ c_I &= d_I + e_I t \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.29)$$

一方、年間運用費として年間に消費される A 重油と C 重油のコスト，ならびにボイルオフガスのコストを考える。A 重油，C 重油，およびボイルオフガスの単価をそれぞれ  $\phi_A$ ， $\phi_C$ ，および  $\phi_B$  とすると，A 重油と C 重油，ならびにボイルオフガスのコストはそれぞれ

$$C_{vO} = \sum_{m=1}^M \left\{ \phi_A F_B^{(m)} + \phi_C \left( \sum_{k=1}^{K_{DE}} F_{DE1k}^{(m)} + \sum_{k=1}^{K_{SH}} F_{SH1k}^{(m)} \right) \right\} T^{(m)} \quad \dots\dots\dots (4.30)$$

$$C_{vB} = \sum_{m=1}^M \phi_B F_B^{(m)} T^{(m)} \quad \dots\dots\dots (4.31)$$

となる。したがって、目的関数である年間総経費  $C_t$  は

$$J = C_t = C_{fE} + C_{fI} + C_{vO} + C_{vB} \quad \dots\dots\dots (4.32)$$

と表される。

#### 4.5.3 最適設計計画問題の解法

4.5.2項で定式化された最適設計計画問題を4.3節で述べた解法に従って機器構成問題と最適運用計画問題に階層的に分解する。また航海パターンとして航海中、出入港、停泊、荷役などを考える。このとき、4.4節の設計計画事例と異なり、設計項目の一つである防熱材厚さはボイルオフガス発生量に直接関係するので、ボイルオフガス発生がある航海中の機器運用方策と防熱材厚さを同時に決定する必要がある。したがって、ここでは図4.11に示すような最適設計計画の手順を採用する。まず各構成機器について規模を選定し、機器

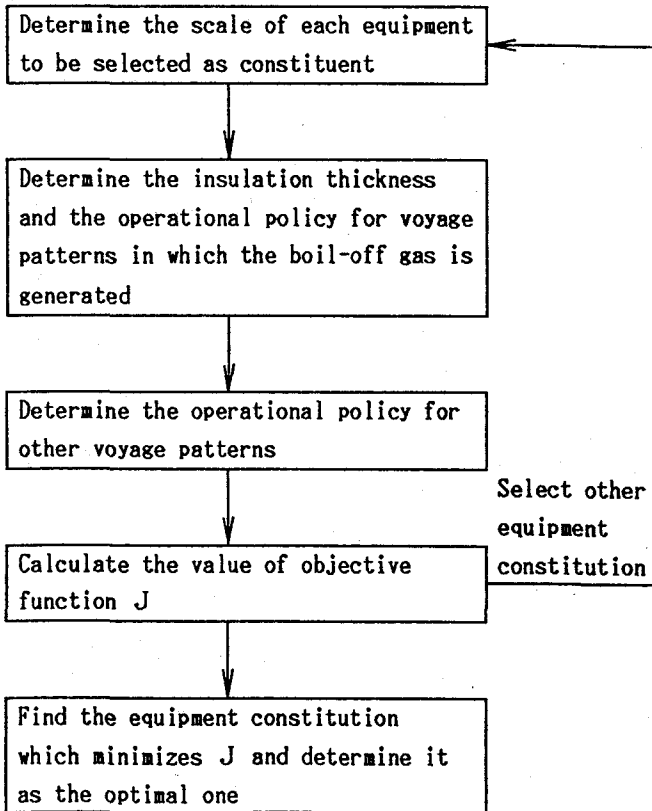


図4.11 最適設計計画の手順  
(LNG船ディーゼル・ガスタービン複合システム)

設備費  $C_{FE}$  を求める。次に、重油消費による運用費  $C_{VO}$  をボイルオフガス発生がある航海パターンに対する運用費  $C'_{VO}$  と、停泊時などのボイルオフガス発生がない航海パターンに対する運用費  $C''_{VO}$  に分け、 $C_{FI} + C'_{VO} + C_{VB}$  を最小化するような防熱材厚さとボイルオフガス発生がある航海パターンの機器運用方策を決定する。最後に、ボイルオフガス発生がない各航海パターンについて独立に最適運用計画問題を解き、 $C''_{VO}$  を最小化するような機器運用方策を求める。以上の計算をすべての機器構成について行い、式(4.32)の  $J$  の最小値に対応する解を最適解とする。

#### 4.5.4 検討事例

**検討条件** 実用規模のディーゼル・ガスタービン複合システムの設計計画を行うにあたり、以下のように検討条件を設定した。各構成機器は三種類の規模の機器から選定可能とした ( $K_{DE} = K_M = K_{SL} = K_{SH} = K_{TH} = K_{GT} = K_{CL} = K_H = 3$ )。たとえば、ディーゼルエンジンは図4.9に示すタイプ1~3から選定する。また4.5.2項で述べたように、ディーゼルエンジン、電動機と低圧ボイラ、あるいはロー・デューティ圧縮機とヒータについては、それぞれ最大出力を考慮し、一対にして機器規模を選定する。さらに、ガスタービン発電機の最大設置可能台数を三台とした ( $\bar{N}_{GT} = 3$ )。表4.6は、一部の機器および防熱材の性能特性値と初期設備費、ならびに燃料コストなどの入力データを示したものである。LNG船の航海サイクルは表4.7に示す6つの航海パターンに大別し ( $M = 6$ )、各パターンに対して推進力、蒸気、電力のエネルギー需要量、ボイルオフガス発生量を表す係数、ならびに年間相当運転時間を推定した。航海パターン  $m = 1, 2$  についてはボイルオフガス発生があるので、4.5.3項で述べたように防熱材厚さと機器運用方策を同時に決定する。また航海パターン  $m = 3 \sim 6$  についてはボイルオフガス発生がないので、各パターンについて独立に機



器運用方策を決定する。

結果および考察 表4.8は、最適化計算の結果得られたシステムの最適機器構成、最適防熱材厚さ、ならびに年間経費を示したものである。この結果によれば、防熱材厚さ $t$ は上限値に等しくなっており、防熱材経費や重油コスト

表4.6 性能特性値とコスト

Diesel engine			
Type k	1	2	3
$P_{DEK}$ kW/(kg/h)	5.409	5.640	5.896
$Q_{DEK}$ kW	-1226	-2222	-3302
$\Gamma_{DEK}$ kW/(kg/h)	1.251	1.205	1.154
$S_{DEK}$ kW	245.2	444.0	660.4
$\underline{F}_{DEK}$ kg/h	920	1280	1620
$\overline{F}_{DEK}$ kg/h	3000	3940	4800
$C_{DEK}$ $\times 10^4$ Yen	61180	72710	83120
Insulation material			
$a_i$ kg/h	5226		
$b_i$ (kg/h)/m	-5997		
$\underline{t}$ m	0.3		
$\overline{t}$ m	0.5		
$d_i$ $\times 10^4$ Yen	45000		
$e_i$ $\times 10^4$ Yen/m	525000		
Fuels			
$\varphi_A$ Yen/kg	60		
$\varphi_C$ Yen/kg	48		
$\varphi_B$ Yen/kg	70		
Capital recovery factor			
R	0.1558		

表4.7 航海パターンとエネルギー需要  
(LNG船ディーゼル・ガスタービン複合システム)

Voyage pattern	m	$P^{d(m)}$ kW	$G^{d(m)}$ kg/h	$E^{d(m)}$ kW	$E^{hd(m)}$ kW	$v^{(m)}$	$T^{(m)}$ h/Year
Loaded voyage	1	29420	1100	1900	0	0.87	3744
Ballast voyage	2	29420	1100	2000	0	0.61	3264
Departure and arrival	3	7355	1000	2650	0	0	192
Anchoring	4	0	1000	2200	0	0	480
Loading	5	0	900	3120	1500	0	240
Unloading	6	0	1100	6050	0	0	240

を増大させてもクリーン・エネルギー源として価値のあるLNGの消費量を低く抑えるような設計解となっている。この場合、ボイルオフガス発生量が少なくガスタービン発電機による発電量も小さいので、大きな推進力を得るためにタイプ3のディーゼルエンジンが設置されている。またガスタービン発電機は、設計値で与えられた量のボイルオフガスを処理できるようにタイプ2, 3の二台が設置されている。表4.9は最適運用方策として、各構成機器に関する動力や電力などの負荷レベルと重油およびボイルオフガスの消費量を示したものである。推進力は、主として機器効率の高いディーゼルエンジンによって得られ、不足分が電動機によって補われている。また低圧電力は、多量のボイルオフガ

表4.8 最適機器構成と年間経費

Equipment constitution	Diesel engine	Type 3
	Motor	Type 1
	Low pressure steam boiler	Type 3
	High pressure steam turbogenerator	Type 1
	Gas turbine generator	Type 2,3
	High pressure steam boiler	Type 1
	Low duty compressor	Type 1
	Heater	Type 1
Insulation thickness	t m	0.5
Cost of equipment	$C_{FE} \times 10^4 \text{Yen/Year}$	34310
Cost of insulation material	$C_{FI} \times 10^4 \text{Yen/Year}$	47910
Cost of heavy oils	$C_{VO} \times 10^4 \text{Yen/Year}$	184630
Cost of boil-off gas	$C_{VB} \times 10^4 \text{Yen/Year}$	81830
Total cost	$C_t \times 10^4 \text{Yen/Year}$	348680

表4.9 機器最適運用方策

m	$P_{GE13}$ kW	$P_{GE1}$ kW	$E_{HGE11}$ kW	$E_{HGE12}$ kW	$E_{HGE13}$ kW	$E_{GE}$ kW	$E_{GE}$ kW	$E_{GE}$ kW	$F_{GE13}$ kg/h	$F_{GE11}$ kg/h	$F_{GE}$ kg/h	$F_{GE}$ kg/h
1	25000	4420	750	0	5863	0	0	1900	4800	0	0	1938
2	25000	4420	1993	3885	0	800	0	1200	4800	548	172	1359
3	7355	0	1887	0	0	800	0	1850	1807	749	172	0
4	0	0	1428	0	0	800	0	1400	0	860	172	0
5	0	0	3000	0	0	800	850	1470	0	2058	172	0
6	0	0	3000	0	0	800	2310	2940	0	2814	172	0

スが発生する航海パターン  $m=1$ を除き，需要変動に伴って効率の高い機器から順に，すなわちディーゼル発電機，高圧蒸気ターボ発電機と変圧器，低圧蒸気ターボ発電機の順に優先的に使用されている。

この検討事例に示したように，本手法によってシステム構成機器の規模と運用方策，ならびにLNGタンクの防熱材厚さの決定を合理的に行うことができる。また本手法を他の方式のLNG船熱電併給システムの設計計画に適用することによって，各方式の経済性の比較検討も行えるものと考えられる。

#### 4.6 結 言

本章では，熱電併給システムの設計計画において，機器の最適構成と最適運用方策を階層的に決定する一つの最適設計計画手法を提示した。最適設計計画問題を機器構成問題と最適運用計画問題に分離し，それぞれ列挙法と混合整数線形計画法のアルゴリズムを適用し，効率よく最適解を導出できることを示した。また設計項目が異なる二つのLNG船熱電併給システムに最適設計計画手法を適用した結果，長期的経済性の観点から合理的にしかも容易に設計項目を決定することができ，最適設計計画手法の有効性を確認した。なお，本手法は熱電併給システムだけではなく，他のエネルギー供給システムの設計計画にも適用可能であると考えられる。

## 第5章 混合離散変数計画法に基づく 熱電併給システムの最適設計計画手法

### 5.1 緒 言

本章では、2.5節で方法Ⅱとして提示したように、熱電併給システムの設計計画において機器の最適構成と最適運用方策を同時に効率よく決定するための一つの最適設計計画手法を具体的に示す。まず、第4章と同様に比較的単純なエネルギー供給システムに対して最適設計計画問題の一般的定式化を行う。ここでは、構成機器に対して規模を表す離散変数を導入し、機器の性能特性と設備費をこの離散変数の関数として表すことによって最適設計計画問題を混合離散変数計画問題として定式化する。次に、特に目的関数および制約条件が変数に関して線形で与えられる場合について定式化を行い、その解法を示す。さらに、目的関数や制約条件に関してより複雑な非線形性を考慮した場合についても定式化を行い、その解法を示す。上記の線形問題および非線形問題の解法として、それぞれ3.4節、3.5節で混合整数線形計画法を拡張した混合離散変数線形計画法および混合離散変数非線形計画法のアルゴリズムを適用する。また、機器規模を表す離散変数と、機器運用方策として運転・停止条件を表す0-1整数変数および負荷レベルを表す連続変数との間には、3.6節で述べたような階層的関係が存在する。したがって、解法として変数の階層的関係を考慮した分枝限定法のアルゴリズムを組み込んだ混合離散変数計画法のアルゴリズムを適用する。最後に、ディーゼル船熱電併給システム、およびLNG船熱電併給システムの設計計画に本最適設計計画手法を適用した事例を示し、その有

効性を確認する。

## 5.2 最適設計計画問題の一般的定式化

本節では、最適設計計画手法を明示するために、第4章と同様に図4.1に示すような同種類で規模が異なる最大 $N$ 台の機器 $E_1 \sim E_N$ を並列に接続したエネルギー供給システムの設計計画について考察する。より複雑なシステムへの拡張は、設計計画事例で示すように機器性能特性の拡張、およびエネルギー・バランスおよび需給関係などの変更により容易に行える。ここでは、第 $n$ 番め( $n=1 \sim N$ )の機器の入力および出力エネルギーの量をそれぞれ $x_n$ および $y_n$ 、システムに対するエネルギー需要量を $y^d$ で表す。また $M$ 個の運用モードを設定し、各モードに対して機器運用方策の検討を行うものとする。ただし、第 $m$ 番め( $m=1 \sim M$ )の運用モードを表すために各記号に上付添字( $m$ )を付ける。

### 5.2.1 機器性能

まず機器性能特性の一つであるエネルギーの入出力関係について定式化する。図5.1は一般的な機器性能特性を示したものである。機器効率はそれぞれの規模の中で入力に応じて変化するとともに、機器効率には規模の増大によるスケール・メリットが認められる<sup>(65)</sup>。したがって、機器性能特性は機器出力を機器入力および機器規模の関数として表現することによって定式化できる。ここでは、機器規模を表す媒介変数と機器の運転・停止による性能特性の不連続性を表す0-1整数変数を導入し、機器性能特性を次式のように表す。

$$\left. \begin{aligned} y_n^{(m)} &= g(x_n^{(m)}, \eta_n, \delta_n^{(m)}) \\ \underline{x}(\eta_n) \delta_n^{(m)} &\leq x_n^{(m)} \leq \overline{x}(\eta_n) \delta_n^{(m)} \\ \delta_n^{(m)} &\in \{0, 1\} \end{aligned} \right\} (n=1 \sim N, m=1 \sim M) \dots\dots\dots (5.1)$$

ここで、 $n_n$ は第 $n$ 番めの機器の規模を表す媒介変数、 $g(x_n^{(m)}, n_n, \delta_n^{(m)})$ は機器の入出力関係を表す関数、 $\underline{x}(n_n)$ および $\bar{x}(n_n)$ はそれぞれ機器入力の上・下限値を表す関数である。また $\delta_n^{(m)}$ は機器の運転・停止条件を表す0-1整数変数であり、 $\delta_n^{(m)}=0$ および $\delta_n^{(m)}=1$ は、第 $n$ 番めの機器が第 $m$ 番めの運用モードでそれぞれ停止状態あるいは運転状態にあることを示す。したがって、 $g(x_n^{(m)}, n_n, \delta_n^{(m)})$ は停止状態 $\delta_n^{(m)}=x_n^{(m)}=0$ において $y_n^{(m)}=0$ となるように決定する必

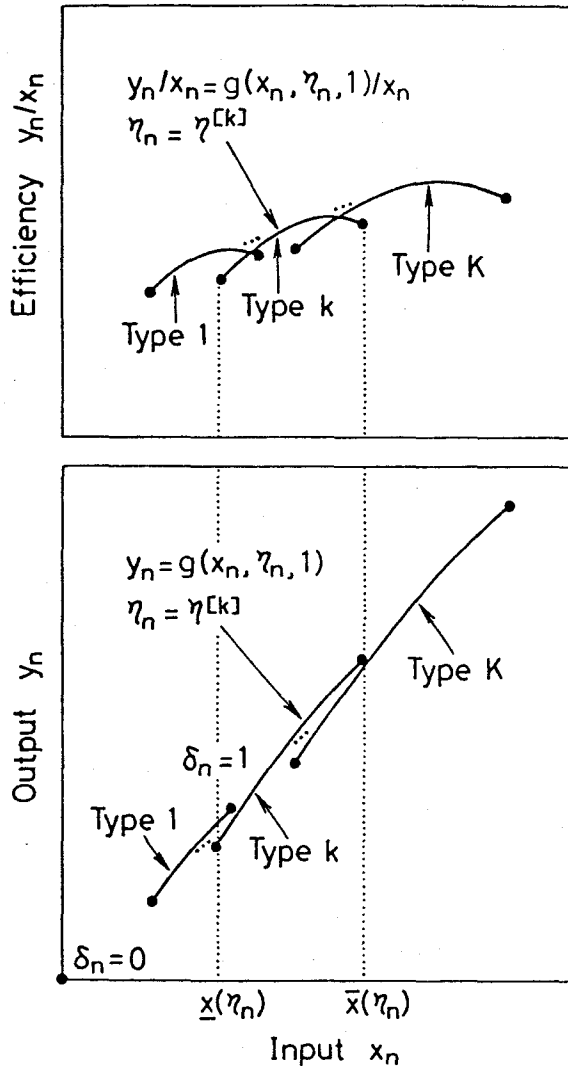


図5.1 機器性能特性(非線形性を考慮する場合)

要がある。第4章と同様に、各機器はK種類の規模の機器から選定できるものとし、機器規模を表す変数 $n_n$ は次式のように離散値をとるものとする。

$$n_n \in \{0, n^{[1]}, n^{[2]}, \dots, n^{[K]}\} \quad (n=1 \sim \bar{N}) \dots\dots\dots (5.2)$$

ここで、 $n_n=0$ は機器が選定されないことを表すものとする。また第k番め ( $k=1 \sim K$ )の規模(以下、タイプkと呼ぶ)の機器に関する量を表すために上付添字[k]を付けている。ただし

$$0 < n^{[1]} < n^{[2]} < \dots < n^{[K]} \dots\dots\dots (5.3)$$

とする。この場合、各構成機器は当然選定された場合のみ運転可能であり、式(5.3)の条件から

$$\delta_n^{(m)} \leq n_n / n^{[1]} \quad (n=1 \sim \bar{N}, m=1 \sim M) \dots\dots\dots (5.4)$$

を考慮する。

### 5.2.2 エネルギー・バランスおよび需給関係

エネルギー供給量が少なくとも需要量を満たすためには、各運用モードについて

$$y^{d(m)} \leq \sum_{n=1}^{\bar{N}} y_n^{(m)} \quad (m=1 \sim M) \dots\dots\dots (5.5)$$

が成立しなければならない。

### 5.2.3 目的関数

最後に、目的関数について定式化を行う。ここでも同様に長期的経済性の観点から総経費の最小化を図る。まずシステムの年間設備費 $C_f$ は、年価法<sup>(45)</sup>を用いて各機器の初期設備費を年間設備費に換算して評価する。すなわち

$$C_f = \sum_{n=1}^{\bar{N}} R c(n_n) \dots\dots\dots (5.6)$$

ここでRは資本回収係数である。また、 $c(n_n)$ は $n_n$ で表される規模の機器の初期設備費を表す関数であり、 $n_n=0$ 、すなわち機器を選定しない場合、初期設備費が零となる条件より

$$c(0)=0 \dots\dots\dots(5.7)$$

が成立する。一方、年間に消費される入力エネルギーのコストである年間運用費 $C_v$ は、入力エネルギーの単価を $\phi$ 、第 $m$ 番めの運用モードの年間相当運転時間を $T^{(m)}$ とすると

$$C_v = \sum_{m=1}^M \phi \left( \sum_{n=1}^N x_n^{(m)} \right) T^{(m)} \dots\dots\dots(5.8)$$

したがって、最小化すべき目的関数である年間総経費 $C_t$ は

$$J = C_t = C_f + C_v \dots\dots\dots(5.9)$$

と表される。

結果として、図4.1のエネルギー供給システムの最適設計計画問題は、式(5.1)、(5.2)、(5.4)、(5.5)の制約条件および各連続変数の非負条件の下に、式(5.9)で与えられる目的関数を最小化するような機器規模を表す離散変数 $n_n$ 、機器の運転・停止条件を表す0-1整数変数 $\delta_n^{(m)}$ 、および機器の負荷レベルを表す連続変数 $x_n^{(m)}$ と $y_n^{(m)}$ を決定するという一つの混合離散変数計画問題として定式化される。

### 5.3 線形の場合

#### 5.3.1 最適設計計画問題の定式化

本節では、機器の性能特性や初期設備費を表す関数を線形近似することによって、5.2節で一般的に定式化した最適設計計画問題を混合離散変数線形計画



問題として定式化し、より簡単に最適解を導出する。

機器の性能特性と初期設備費の近似 まず、機器の入出力関係を図5.2に

示すように線分で近似し、式(5.1)の第1式の代わりに

$$y_n^{(m)} = p(\eta_n) x_n^{(m)} + q(\eta_n) \delta_n^{(m)} \quad (n=1 \sim \bar{N}, m=1 \sim M) \dots\dots\dots (5.10)$$

を考える。ここで、 $p(\eta_n)$ 、 $q(\eta_n)$ は機器性能特性値であり、規模を表す離散変数 $\eta_n$ の関数として表現できる。またここでは、機器規模の変化の範囲を限定し、機器の性能特性値と初期設備費を表す関数を $\eta_n$ の一次関数で近似する。特に蒸気タービンやボイラの入出力関係において見られるように、式(5.10)の入出力関係のこう配 $p(\eta_n)$ は次式のように一定とする。

$$p(\eta_n) = P_0 \quad (n=1 \sim \bar{N}) \dots\dots\dots (5.11)$$

その他の性能特性値と初期設備費は以下のように $\eta_n$ の一次関数で表す。

$$\left. \begin{aligned} q(\eta_n) &= Q_0 + Q_1 \eta_n \\ \underline{x}(\eta_n) &= \underline{X}_0 + \underline{X}_1 \eta_n \end{aligned} \right\} (n=1 \sim \bar{N}) \dots\dots\dots (5.12)$$

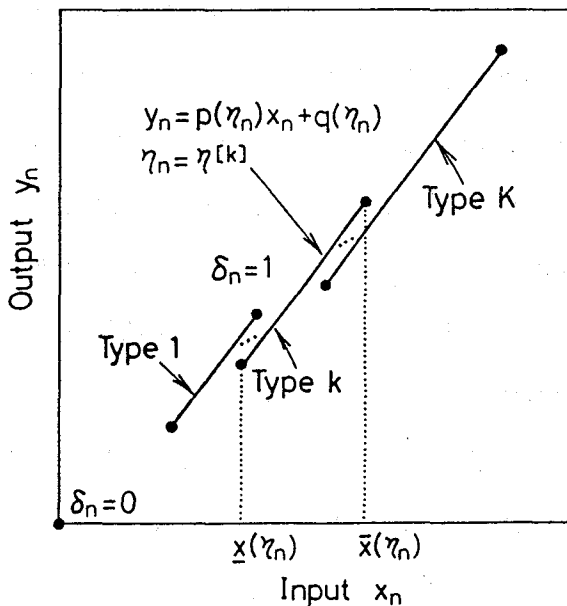


図5.2 機器性能特性の近似

$$\left. \begin{aligned} \bar{x}(n_n) &= X_0 + X_1 n_n \\ c(n_n) &= C_1 n_n \end{aligned} \right\}$$

線形計画問題への変換 式(5.12)によって機器性能特性の近似を行うと、式(5.10)および式(5.1)の第2式には  $n_n$  と  $\delta_n^{(m)}$  の積の項が現れる。ここでは、以下に示すようにこの二次の項を一次の項に変換し、最適設計計画問題を混合離散変数線形計画問題として考慮する。まず、 $n_n$  と  $\delta_n^{(m)}$  の積を次式の変数変換によって  $\xi_n^{(m)}$  に置換する。

$$\xi_n^{(m)} = n_n \delta_n^{(m)} \quad (n=1 \sim \bar{N}, m=1 \sim M) \dots\dots\dots (5.13)$$

式(5.13)の置換が可能であるためには

$$\xi_n^{(m)} = \begin{cases} 0 & (\delta_n^{(m)} = 0) \\ n_n & (\delta_n^{(m)} = 1) \end{cases} \quad (n=1 \sim \bar{N}, m=1 \sim M) \dots\dots\dots (5.14)$$

が成立する必要がある。ここで、式(5.14)は次の二つの線形制約条件によって満たすことができる。

$$\left. \begin{aligned} n^{(1)} \delta_n^{(m)} \leq \xi_n^{(m)} \leq n^{(K)} \delta_n^{(m)} \\ n_n + n^{(K)} \delta_n^{(m)} - n^{(K)} \leq \xi_n^{(m)} \leq n_n \end{aligned} \right\} \quad (n=1 \sim \bar{N}, m=1 \sim M) \dots\dots\dots (5.15)$$

すなわち、 $\delta_n^{(m)} = 0$  の場合式(5.15)の第1式から  $\xi_n^{(m)} = 0$ 、 $\delta_n^{(m)} = 1$  の場合式(5.15)の第2式から  $\xi_n^{(m)} = n_n$  となり、式(5.15)により式(5.14)は満足される。したがって、式(5.13)の置換とともに式(5.15)を制約条件の一部として追加すればよい。 $\xi_n^{(m)}$  は離散変数であるが、式(5.15)により  $\xi_n^{(m)}$  の離散変数条件が満足されるので、特にこれを考慮する必要はない。以上より、最適設計計画問題は混合離散変数線形計画問題に変換されたことになる。

制約条件数の低減 本論文で採用する混合離散変数線形計画法のアルゴリズムでは、変数の下限値を零に設定するようになっている。ここでは、式(5.1)の第2式における変数  $x_n^{(m)}$ 、および式(5.15)の第1式における変数  $\xi_n^{(m)}$  の下限値に関する制約条件を、変数の下限値が零であるという条件に変え、制約条件数

の低減を行う。変数  $x_n^{(m)}$  および  $\xi_n^{(m)}$  について、それぞれ次の変数変換を行う。

$$\left. \begin{aligned} z_n^{(m)} &= x_n^{(m)} - (\underline{X}_0 \delta_n^{(m)} + \underline{X}_1 \xi_n^{(m)}) \\ \theta_n^{(m)} &= \xi_n^{(m)} - \eta^{(1)} \delta_n^{(m)} \end{aligned} \right\} \\ (n=1 \sim \bar{N}, m=1 \sim M) \quad \dots\dots\dots (5.16)$$

式(5.16)の変換によって、 $x_n^{(m)}$  および  $\xi_n^{(m)}$  の下限値に関する制約条件を、それぞれ  $z_n^{(m)}$  および  $\theta_n^{(m)}$  の下限値が零であるという条件に変えることができる。下限値が零であるという条件は、特に制約条件として考慮する必要がなく、結果的に制約条件数の低減が可能である。

結果として、図4.1のエネルギー供給システムの最適設計計画問題は混合離散変数線形計画問題に帰着し、目的関数と制約条件は次のように表される。ただし、式(5.4)は式(5.18)の第4式から必然的に成立するので除外している。

目的関数：

$$J = \sum_{n=1}^{\bar{N}} \left[ RC_1 n_n + \varphi \sum_{m=1}^M \{ z_n^{(m)} + (\underline{X}_0 + \underline{X}_1 \eta^{(1)}) \delta_n^{(m)} + \underline{X}_1 \theta_n^{(m)} \} T^{(m)} \right] \quad \dots\dots\dots (5.17)$$

制約条件：

$$\left. \begin{aligned} y_n^{(m)} &= P_0 z_n^{(m)} + \{ (P_0 \underline{X}_0 + Q_0) + (P_0 \underline{X}_1 + Q_1) \eta^{(1)} \} \delta_n^{(m)} \\ &\quad + (P_0 \underline{X}_1 + Q_1) \theta_n^{(m)} \\ z_n^{(m)} &\leq \{ (\underline{X}_0 - \underline{X}_0) + (\underline{X}_1 - \underline{X}_1) \eta^{(1)} \} \delta_n^{(m)} + (\underline{X}_1 - \underline{X}_1) \theta_n^{(m)} \\ \theta_n^{(m)} &\leq (\eta^{(K)} - \eta^{(1)}) \delta_n^{(m)} \\ n_n + (\eta^{(K)} - \eta^{(1)}) \delta_n^{(m)} - \eta^{(K)} &\leq \theta_n^{(m)} \leq n_n - \eta^{(1)} \delta_n^{(m)} \\ \delta_n^{(m)} &\in \{0, 1\} \end{aligned} \right\} \\ (n=1 \sim \bar{N}, m=1 \sim M) \quad \dots\dots\dots (5.18)$$

$$n_n \in \{0, \eta^{(1)}, \eta^{(2)}, \dots, \eta^{(K)}\} \quad (n=1 \sim \bar{N}) \quad \dots\dots\dots (5.19)$$

$$y^{d(m)} \leq \sum_{n=1}^{\bar{N}} y_n^{(m)} \quad (m=1 \sim M) \quad \dots\dots\dots (5.20)$$

### 5.3.2 最適設計計画問題の解法

離散変数値および係数の決定 最適化計算を行う前に、式(5.19)における機器規模を表す離散変数  $n_n$  の候補値，ならびに式(5.11)，(5.12)における機器の性能特性値と初期設備費を表す近似式の係数の値を実データに基づいて決定しなければならない。ここでは最小二乗法を適用し，関数近似による値と実データの値との二乗誤差を最小化するように決定する。最小化すべき評価関数を

$$\begin{aligned}
 h = \sum_{k=1}^K \left\{ W_1^{[k]} \sum_{\ell=1}^{L^{[k]}} (P_0 x_{\ell}^{[k]} + Q_0 + Q_1 n^{[k]} - y_{\ell}^{[k]})^2 \right. \\
 + W_2^{[k]} (\underline{X}_0 + \underline{X}_1 n^{[k]} - \underline{x}_k)^2 + W_3^{[k]} (\overline{X}_0 + \overline{X}_1 n^{[k]} - \overline{x}_k)^2 \\
 \left. + W_4^{[k]} (C_1 n^{[k]} - c_k)^2 \right\} \dots\dots\dots (5.21)
 \end{aligned}$$

とする。ここで、 $x_{\ell}^{[k]}$  と  $y_{\ell}^{[k]}$  はタイプ  $k$  の機器における入力と出力の第  $\ell$  番目の対応する実データの値を，また  $L^{[k]}$  はそのデータ数を表す。 $\underline{x}_k$ ， $\overline{x}_k$  および  $c_k$  はタイプ  $k$  の機器の性能特性値と初期設備費に関する実データをそれぞれ表す。 $W_1^{[k]} \sim W_4^{[k]}$  は重み係数であり，各項の値のオーダが等しくなるように決定するのが望ましい。そこで， $W_1^{[k]} \sim W_4^{[k]}$  の初期値として，それぞれ  $1 / \sum_{\ell=1}^{L^{[k]}} y_{\ell}^{[k]2}$ ， $1 / \underline{x}_k^2$ ， $1 / \overline{x}_k^2$ ， $1 / c_k^2$  を与えて計算を行った後，改めて各項の値のオーダが等しくなるように  $W_1^{[k]} \sim W_4^{[k]}$  の値を変更し再計算を行う。式(5.21)の  $h$  が最小となるための必要条件は

$$\partial h / \partial \Gamma = \partial h / \partial \eta = 0^T \dots\dots\dots (5.22)$$

と表される。ただし

$$\left. \begin{aligned}
 \Gamma &= (P_0, Q_0, Q_1, \underline{X}_0, \underline{X}_1, \overline{X}_0, \overline{X}_1, C_1)^T \\
 \eta &= (\eta^{[1]}, \eta^{[2]}, \dots, \eta^{[K]})^T
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.23)$$

式(5.22)は非線形連立方程式となるため，図5.3に示すアルゴリズムに従って解を求める。まず  $n^{[k]} = c_k / c_1$  を満足するように離散変数の候補値  $n^{[k]}$  を決

定する。次に決定された $\eta^{[k]}$ の値 $\eta$ に対して、 $h$ を最小化するような機器の性能特性値と初期設備費を表す係数の値 $\Gamma$ を決定する。さらに、決定された $\Gamma$ に対して $h$ を最小化するような $\eta$ を決定する。以上の過程を $\Gamma$ と $\eta$ が変化しなくなるまで反復する。 $\Gamma$ あるいは $\eta$ を求める計算は線形連立方程式を解くことにより簡単に実行できる。

混合離散変数線形計画法の適用 定式化された最適設計計画問題は、3.4節で述べた混合離散変数線形計画法のアルゴリズムによって解くことができる。また式(5.17)~(5.20)から明らかなように、各変数間には図5.4に示すような階層的關係が存在する。したがって、効率よく最適化計算を行うために、

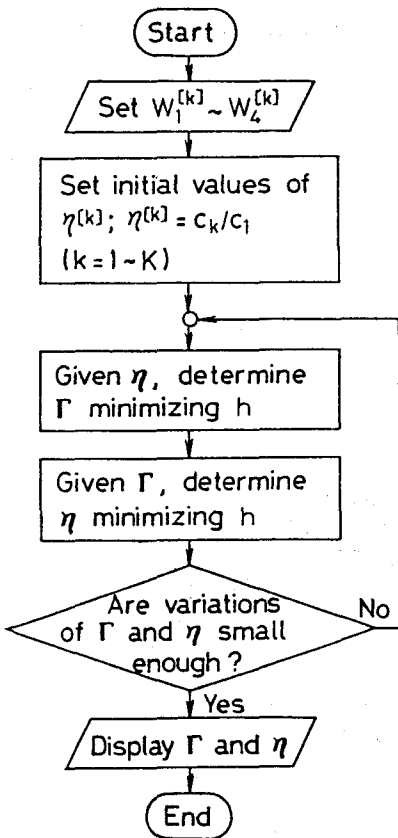


図5.3 離散変数値と係数の決定アルゴリズム

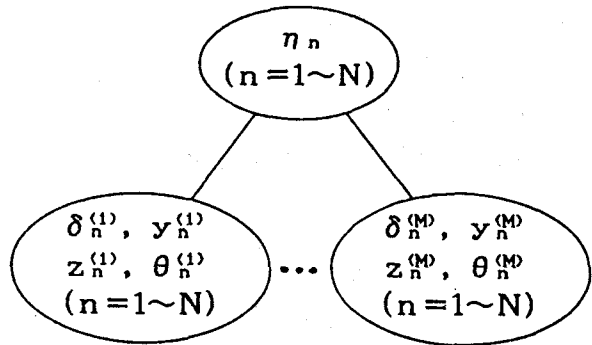


図5.4 機器規模を表す変数と機器運用方策を表す変数の階層的關係

3.6節で提示した変数の階層的関係を考慮した分枝限定法のアルゴリズムを上記アルゴリズムに組み込んで適用する。

### 5.3.3 設計計画事例

5.3.1項および5.3.2項において提示した最適設計計画手法の有効性を検証するために、ディーゼル船熱電併給システム<sup>(37)</sup>の設計計画に適用する。本章では、これまで最適設計計画手法を明示するために同種類の機器から構成されるエネルギー供給システムの設計計画について考察してきたが、ここではディーゼル発電機、低圧蒸気ターボ発電機、ならびに補助ボイラの三種類の構成機器を対象にシステムの設計計画を行う。

対象システム 図5.5は考察の対象としたディーゼル船熱電併給システムの機器構成を示したものである。図5.5において、各機器に付した記号は以下の通りである。

- BA：補助ボイラ
- DG：ディーゼル発電機
- EE：排ガス・エコノマイザ
- ME：主エンジン
- TG：低圧蒸気ターボ発電機

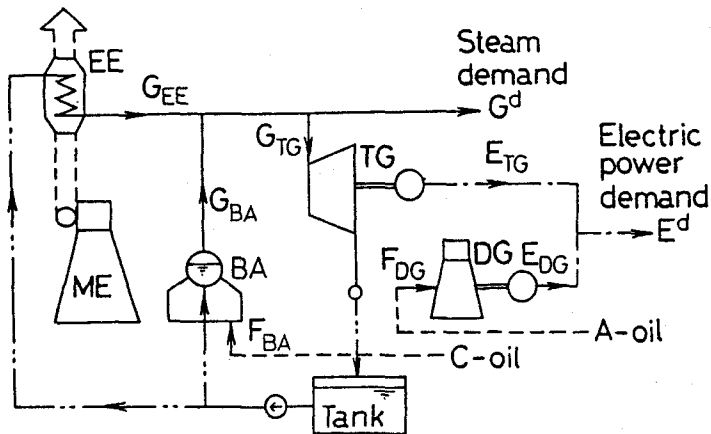


図5.5 ディーゼル船熱電併給システム

実線は蒸気，一点鎖線は電力，破線は燃料，また二点鎖線は水の流れをそれぞれ表す。またGは蒸気量，Eは電力，Fは燃料消費量をそれぞれ表し，各機器に関する量は機器記号を添えて示す。このシステムでは，蒸気は主エンジンの廃熱を利用する排ガス・エコノマイザとC重油を燃焼させる補助ボイラによって供給される。また，電力はA重油を燃焼させるディーゼル発電機と低圧蒸気ターボ発電機の並列運転によって供給される。蒸気需要量 $G^d$ および電力需要量 $E^d$ は需要算定条件から，また排ガス・エコノマイザからの蒸気発生量 $G_{EE}$ は主エンジンの負荷量からそれぞれ決定されるものとする。定式化において使用するその他の記号は，5.2節および5.3.1項で用いたものと同一であり，各機器に関する量は機器記号を添えて示す。

最適設計計画問題の定式化 まず各構成機器の性能特性は以下のように定式化できる。

-ディーゼル発電機(DG)

$$\left. \begin{aligned} E_{DGn} &= p_{DG}(n_{DGn}) F_{DGn} + q_{DG}(n_{DGn}) \delta_{DGn} \\ \underline{F}_{DG}(n_{DGn}) \delta_{DGn} &\leq F_{DGn} \leq \overline{F}_{DG}(n_{DGn}) \delta_{DGn} \\ \delta_{DGn} &\leq n_{DGn} / n_{DG} \\ \delta_{DGn} &\in \{0, 1\} \end{aligned} \right\} \quad (n=1 \sim \overline{N}_{DG}, m=1 \sim M) \quad \dots\dots\dots (5.24)$$

$$n_{DGn} \in \{0, n_{DG}^1, n_{DG}^2, \dots, n_{DG}^{n_{DG}^{max}}\} \quad (n=1 \sim \overline{N}_{DG}) \quad \dots\dots\dots (5.25)$$

-低圧蒸気ターボ発電機(TG)

$$\left. \begin{aligned} E_{TGn} &= p_{TG}(n_{TGn}) G_{TGn} + q_{TG}(n_{TGn}) \delta_{TGn} \\ \underline{G}_{TG}(n_{TGn}) \delta_{TGn} &\leq G_{TGn} \leq \overline{G}_{TG}(n_{TGn}) \delta_{TGn} \\ \delta_{TGn} &\leq n_{TGn} / n_{TG} \\ \delta_{TGn} &\in \{0, 1\} \end{aligned} \right\} \quad (n=1 \sim \overline{N}_{TG}, m=1 \sim M) \quad \dots\dots\dots (5.26)$$

$$n_{TGn} \in \{0, n_{TG}^1, n_{TG}^2, \dots, n_{TG}^{n_{TG}^{max}}\} \quad (n=1 \sim \overline{N}_{TG}) \quad \dots\dots\dots (5.27)$$

- 補助ボイラ (BA)

$$\left. \begin{aligned} G_{BA}^{\lambda n} &= p_{BA}(\eta_{BA n}) F_{BA}^{\lambda n} + q_{BA}(\eta_{BA n}) \delta_{BA}^{\lambda n} \\ F_{BA}(\eta_{BA n}) \delta_{BA}^{\lambda n} &\leq F_{BA}^{\lambda n} \leq \bar{F}_{BA}(\eta_{BA n}) \delta_{BA}^{\lambda n} \\ \delta_{BA}^{\lambda n} &\leq \eta_{BA n} / \eta_{BA}^{(j)} \\ \delta_{BA}^{\lambda n} &\in \{0, 1\} \end{aligned} \right\} \quad (n=1 \sim \bar{N}_{BA}, m=1 \sim M) \quad \dots\dots\dots (5.28)$$

$$\eta_{BA n} \in \{0, \eta_{BA}^{(1)}, \eta_{BA}^{(2)}, \dots, \eta_{BA}^{(K_{BA})}\} \quad (n=1 \sim \bar{N}_{BA}) \quad \dots\dots\dots (5.29)$$

次に、各エネルギーのバランスおよび需給関係は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} G^{d(m)} &\leq G^{(m)} + \sum_{n=1}^{\bar{N}_{BA}} G_{BA}^{\lambda n} - \sum_{n=1}^{\bar{N}_{TG}} G_{TG}^{\lambda n} \\ E^{d(m)} &\leq \sum_{n=1}^{\bar{N}_{DG}} E_{DG}^{\lambda n} + \sum_{n=1}^{\bar{N}_{TG}} E_{TG}^{\lambda n} \end{aligned} \right\} \quad (m=1 \sim M) \quad \dots\dots\dots (5.30)$$

最後に、最小化すべき目的関数となる年間総経費は

$$\begin{aligned} J = R \left\{ \sum_{n=1}^{\bar{N}_{DG}} c_{DG}(\eta_{DG n}) + \sum_{n=1}^{\bar{N}_{TG}} c_{TG}(\eta_{TG n}) + \sum_{n=1}^{\bar{N}_{BA}} c_{BA}(\eta_{BA n}) \right\} \\ + \sum_{m=1}^M \left( \varphi_A \sum_{n=1}^{\bar{N}_{DG}} F_{DG}^{\lambda n} + \varphi_C \sum_{n=1}^{\bar{N}_{BA}} F_{BA}^{\lambda n} \right) T^{(m)} \quad \dots\dots\dots (5.31) \end{aligned}$$

ここで、 $\varphi_A$ および $\varphi_C$ はそれぞれA重油とC重油の単価を表す。性能特性式には非線形項が存在するが、5.3.1項で示した方法に従って変数変換を行い制約条件を追加することによって、最適設計計画問題を混合離散変数線形計画問題として定式化できる。また5.3.1項で示した方法によって制約条件数の大幅な低減が可能となる。

**結果および考察** 図5.6は、一例として、三種類の規模の低圧蒸気ターボ発電機について性能特性を表す発電量と蒸気消費量の関係を示したものである。図5.6において、破線および白丸印は実データによる性能特性、実線および黒丸印は実データに基づいて5.3.2項で述べた方法により決定した性能特性をそれぞれ表している。図5.7は、同様に5.3.2項の方法により決定した低圧



蒸気ターボ発電機の初期設備費と機器規模を表す離散変数との関係を示したものである。また表5.1は、ディーゼル発電機、低圧蒸気ターボ発電機、および補助ボイラについて、各機器の入力の上・下限値と初期設備費、ならびに機器

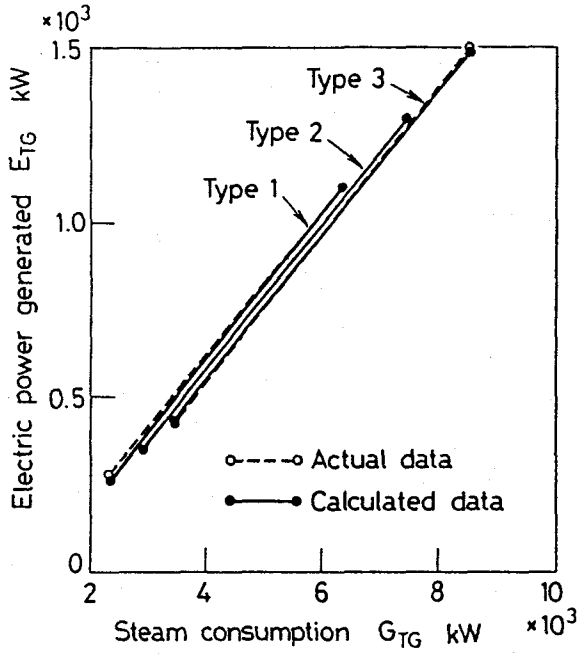


図5.6 低圧蒸気ターボ発電機の性能特性の近似

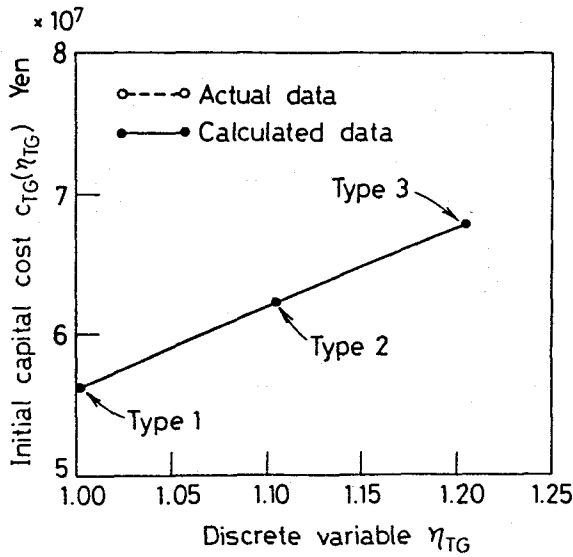


図5.7 低圧蒸気ターボ発電機の初期設備費の近似

表5.1 機器の性能特性値と初期設備費

Equipment	Type	Discrete variable	Calculated data				Actual data			
			Lower bound	Upper bound	Capital cost	Lower bound	Upper bound	Capital cost		
DG	k	$n_{DG}$	$\underline{F}_{DG}(n_{DG})$ kg/h	$\overline{F}_{DG}(n_{DG})$ kg/h	$C_{DG}(n_{DG})$ $\times 10^4$ Yen	$\underline{F}_{DG}$ kg/h	$\overline{F}_{DG}$ kg/h	$C_{DG}$ $\times 10^4$ Yen		
	1	1.000	83.0	164.3	2799	83.6	165.2	2800		
	2	1.188	113.0	219.9	3327	111.9	218.1	3330		
	3	1.304	145.7	280.6	3903	146.2	281.5	3900		
TG	k	$n_{TG}$	$\underline{G}_{TG}(n_{TG})$ kW	$\overline{G}_{TG}(n_{TG})$ kW	$C_{TG}(n_{TG})$ $\times 10^4$ Yen	$\underline{G}_{TG}$ kW	$\overline{G}_{TG}$ kW	$C_{TG}$ $\times 10^4$ Yen		
	1	1.001	2347	6419	5630	2346	6420	5630		
	2	1.106	2919	7535	6218	2920	7534	6220		
	3	1.206	3467	8603	6782	3466	8604	6780		
BA	k	$n_{BA}$	$\underline{F}_{BA}(n_{BA})$ kg/h	$\overline{F}_{BA}(n_{BA})$ kg/h	$C_{BA}(n_{BA})$ $\times 10^4$ Yen	$\underline{F}_{BA}$ kg/h	$\overline{F}_{BA}$ kg/h	$C_{BA}$ $\times 10^4$ Yen		
	1	1.010	13.4	134.4	1161	13.5	134.9	1150		
	2	1.330	22.3	222.5	1530	22.2	221.7	1550		
	3	1.747	33.7	337.0	2009	33.7	337.4	2000		

規模を表す離散変数の候補値を示したものである。いずれの機器についても、実データの値と5.3.2項の方法によって決定した値とは良く一致しており、機器規模を表す離散変数の候補値を合理的に決定することができる。

表5.2は、考察の対象とする船舶の航海サイクルにおいて設定された四つの代表的な運用モードについて、熱電併給システムに対する蒸気および電力需要量、排ガス・エコノマイザからの蒸気発生量、ならびに年間相当運転時間を推定したものである。ここでは、これらの運用モードに対する最適運用方策を考慮しながら、最適機器構成を決定する。システム構成機器は、それぞれ表5.1に示す三種類の規模の機器から選定可能とし、 $K_{DG}=K_{TG}=K_{BA}=3$ とした。また各機器の最大設置可能台数を $\bar{N}_{DG}=2$ 、 $\bar{N}_{TG}=\bar{N}_{BA}=1$ とした。さらに、資本回収係数を $R=0.1558$ 、A重油およびC重油の単価をそれぞれ $\phi_A=60$ 円/kg、 $\phi_C=48$ 円/kgとした。

表5.2 運用モードとエネルギー需要

Operational mode	m	$G^{d(m)}$ kW	$E^{d(m)}$ kW	$G_{\text{DG}}$ kW	$T^{(m)}$ h/Year
Rated load	1	1245	1590	8715	6744
3/4 load	2	1245	1690	6536	336
Departure and arrival	3	1245	2090	0	216
Anchoring	4	1245	1390	0	1464

表5.3 機器の最適構成と最適運用方策  
(ディーゼル船熱電併給システム)

Equipment constitution		DG		TG	BA
		Type 3	Type 2	Type 1	Type 1
Operational policy	m	$E_{\text{DG}1}$ kW	$E_{\text{DG}2}$ kW	$E_{\text{TG}1}$ kW	$G_{\text{BA}1}$ kW
	1	0	501	1100	0
	2	0	822	868	0
	3	1280	810	0	1245
	4	646	744	0	1245
Capital cost	$C_f \times 10^4$ Yen/Year	2184			
Operational cost	$C_v \times 10^4$ Yen/Year	9228			
Total cost	$C_t \times 10^4$ Yen/Year	11412			

表5.3は最適化計算によって得られた機器の最適構成と最適運用方策，ならびに年間経費を示したものである．運用方策に関しては，運用モード $m=1, 2$ ，すなわち排ガス・エコノマイザからの蒸気を利用できる場合，低圧蒸気ターボ発電機が中心に，またディーゼル発電機は補助的に運転され，廃熱が有効利用されている．また運用モード $m=3, 4$ ，すなわち排ガス・エコノマイザから蒸気が発生しない場合，低圧蒸気ターボ発電機より機器効率の高いディーゼル発電機が運転されている．機器構成に関しては，上記の運用方策を総合的に考慮して決定されている．たとえば運用モード $m=1$ では，タイプ1の低圧蒸気ターボ発電機は排ガス・エコノマイザからの蒸気をすべて利用することができないので，より大きな規模の低圧蒸気ターボ発電機を設置するという案も考えられる．しかしながら，低圧蒸気ターボ発電機の設定による設備費の増加よりも，ディーゼル発電機の負荷レベルを上げて運用費を増加させる方が経費の節約になり，表5.3に示す機器構成が得られている．

以上に示したように，本最適設計計画手法によれば複雑に関連し合っている機器の構成と運用方策を同時に効率よく決定することができる．また，機器規模を一つの変数によって表現しているので，選定可能な機器規模の種類数が多い場合に，本手法は特に有効であると考えられる．

## 5.4 非線形の場合

### 5.4.1 最適設計計画問題の定式化

本節では，機器の性能特性や初期設備費の実データをより精度よく表すために，それらを表す関数に高次近似を用いた場合について検討する．したがって，目的関数および制約条件は未知変数に関して非線形となり，最適設計計画問題

を混合離散変数非線形計画問題として定式化する。

機器の性能特性と初期設備費の近似 機器の性能特性を表す入出力関係については種々の関数近似が可能であるが、ここでは、各規模の機器について二次関数による近似を採用する。すなわち、式(5.1)の第1式の関数  $g$  を

$$g(x_n^{(m)}, n_n, \delta_n^{(m)}) = p(n_n) x_n^{(m)2} + q(n_n) x_n^{(m)} + r(n_n) \delta_n^{(m)} \\ (n=1 \sim N, m=1 \sim M) \dots\dots\dots (5.32)$$

とする。ここで、 $p(n_n)$ ,  $q(n_n)$ ,  $r(n_n)$  は機器性能特性値であり、規模を表す離散変数  $n_n$  の関数として表現できる。また、式(5.1)の第2式、および式(5.32)において機器性能特性値を表す関数  $\underline{x}(n_n)$ ,  $\overline{x}(n_n)$ ,  $p(n_n)$ ,  $q(n_n)$ ,  $r(n_n)$ , ならびに式(5.6)において機器の初期設備費を表す関数  $c(n_n)$  を、次式のようにそれぞれ  $n_n$  の二次関数によって一般的に表現する。

$$\left. \begin{aligned} \underline{x}(n_n) &= X_0 + X_1 n_n + X_2 n_n^2 \\ \overline{x}(n_n) &= X_0 + X_1 n_n + X_2 n_n^2 \\ p(n_n) &= P_0 + P_1 n_n + P_2 n_n^2 \\ q(n_n) &= Q_0 + Q_1 n_n + Q_2 n_n^2 \\ r(n_n) &= R_0 + R_1 n_n + R_2 n_n^2 \\ c(n_n) &= C_0 + C_1 n_n + C_2 n_n^2 \end{aligned} \right\} (n=1 \sim N) \dots\dots\dots (5.33)$$

ほとんどの機器の性能特性と初期設備費は、これらの関数によって十分精度良く近似することができる。

制約条件数の低減 本論文で採用する混合離散変数非線形計画法のアルゴリズムにおいては、変数の下限値を設定するようになっている。ここでは、式(5.1)の第2式における変数  $x_n^{(m)}$  の下限値に関する制約条件を変数の下限値が零であるという条件に変え、制約条件数の低減を行う。すなわち、変数変換

$$z_n^{(m)} = x_n^{(m)} - \underline{x}(n_n) \delta_n^{(m)} \quad (n=1 \sim N, m=1 \sim M) \dots\dots (5.34)$$

によって、 $x_n^{(m)}$  の下限値に関する制約条件を  $z_n^{(m)}$  の下限値が零であるという条件に変えることができる。下限値が零であるという条件は特に制約条件として

考慮する必要がなく、結果的に制約条件数の低減が可能である。

結果として、図4.1のエネルギー供給システムの最適設計計画問題における目的関数と制約条件は次式のように表される。

目的関数：

$$J = \sum_{n=1}^{\bar{N}} \left[ R c(\eta_n) + \varphi \sum_{m=1}^M \{ z_n^{(m)} + \underline{x}(\eta_n) \delta_n^{(m)} \} T^{(m)} \right] \quad (5.35)$$

制約条件：

$$\left. \begin{aligned} y_n^{(m)} &= g(z_n^{(m)} + \underline{x}(\eta_n) \delta_n^{(m)}, \eta_n, \delta_n^{(m)}) \\ z_n^{(m)} &\leq \{ \bar{x}(\eta_n) - \underline{x}(\eta_n) \} \delta_n^{(m)} \\ \delta_n^{(m)} &\leq \eta_n / \eta^{(1)} \\ \delta_n^{(m)} &\in \{0, 1\} \end{aligned} \right\} (n=1 \sim \bar{N}, m=1 \sim M) \quad \dots\dots\dots (5.36)$$

$$\eta_n \in \{0, \eta^{(1)}, \eta^{(2)}, \dots, \eta^{(K)}\} \quad (n=1 \sim \bar{N}) \quad \dots\dots\dots (5.37)$$

$$y^{d(m)} \leq \sum_{n=1}^{\bar{N}} y_n^{(m)} \quad (m=1 \sim M) \quad \dots\dots\dots (5.38)$$

#### 5.4.2 最適設計計画問題の解法

##### 離散変数値および係数の決定

5.4.1項で述べたような関数近似を行った

場合、式(5.33)に現れる係数の値と式(5.37)における機器規模を表す離散変数  $\eta_n$  の候補値を決定する必要がある。ここでは5.3節の線形の場合と同様に最小二乗法を適用し、関数近似による値と実データの値との二乗誤差を最小化するように決定する。すなわち、評価関数

$$h = \sum_{k=1}^K \left[ W_1^{(k)} \sum_{\ell=1}^{L^{(k)}} \{ g(x_\ell^{(k)}, \eta^{(k)}, 1) - y_\ell^{(k)} \}^2 + W_2^{(k)} \{ \underline{x}(\eta^{(k)}) - \underline{x}_k \}^2 \right. \\ \left. + W_3^{(k)} \{ \bar{x}(\eta^{(k)}) - \bar{x}_k \}^2 + W_4^{(k)} \{ c(\eta^{(k)}) - c_k \}^2 \right] \quad \dots\dots\dots (5.39)$$

を最小化するように変数ベクトル

$$\left. \begin{aligned} \Gamma &= (\underline{X}_0, \underline{X}_1, \underline{X}_2, X_0, X_1, X_2, P_0, P_1, P_2, \\ &\quad Q_0, Q_1, Q_2, R_0, R_1, R_2, C_0, C_1, C_2)^T \\ \eta &= (\eta^{(1)}, \eta^{(2)}, \dots, \eta^{(K)})^T \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5.40)$$

を決定する。この最小化問題は制約なし非線形最適化問題であり、3.5.1項で述べた一般縮小こう配法の適用によって比較的簡単に解くことができる。

混合離散変数非線形計画法の適用 定式化された最適設計計画問題は、3.5節で述べた混合離散変数非線形計画法のアルゴリズムによって解くことができる。また5.3節の線形の場合と同様に各変数間には階層的関係が存在するため、変数の階層的関係を考慮した分枝限定法のアルゴリズムを適用する。

### 5.4.3 設計計画事例

5.4.1項および5.4.2項において提示した最適設計計画手法の有効性を検証するために、図4.4のLNG船熱電併給システムの設計計画に適用する。設計条件は4.4.2項で述べたものと同一であり、ディーゼル発電機と低圧蒸気ターボ発電機を設計対象とする。

最適設計計画問題の定式化 定式化においては、4.4.2項および5.2節で用いた記号を用いる。また各機器に関する量は機器記号を添えて示す。まず、ディーゼル発電機と低圧蒸気ターボ発電機の性能特性を以下のように定式化する。

-ディーゼル発電機(DG)

$$\left. \begin{aligned} E_{DGn} &= g_{DG}(F_{DGn}, \eta_{DGn}, \delta_{DGn}) \\ F_{DG}(n_{DGn}) \delta_{DGn} &\leq F_{DGn} \leq \bar{F}_{DG}(n_{DGn}) \delta_{DGn} \\ \delta_{DGn} &\leq \eta_{DGn} / n_{DG} \\ \delta_{DGn} &\in \{0, 1\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (n=1 \sim \bar{N}_{DG}, m=1 \sim M) \dots\dots\dots (5.41)$$

$$n_{DGn} \in \{0, n_{DG}^{\{1\}}, n_{DG}^{\{2\}}, \dots, n_{DG}^{\{D_{DG}\}}\} \quad (n=1 \sim \bar{N}_{DG}) \dots\dots\dots (5.42)$$

- 低圧蒸気ターボ発電機 (TG)

$$\left. \begin{aligned} E_{FGn} &= g_{TG}(G_{FGn}, n_{TGn}, \delta_{FGn}) \\ \underline{G}_{TG}(n_{TGn}) \delta_{FGn} &\leq G_{FGn} \leq \overline{G}_{TG}(n_{TGn}) \delta_{FGn} \\ \delta_{FGn} &\leq n_{TGn} / n_{FG} \\ \delta_{FGn} &\in \{0, 1\} \end{aligned} \right\} \quad (n=1 \sim \overline{N}_{TG}, m=1 \sim M) \quad \dots\dots\dots (5.43)$$

$$n_{TGn} \in \{0, n_{FG}^{(1)}, n_{FG}^{(2)}, \dots, n_{FG}^{(k_{TG})}\} \quad (n=1 \sim \overline{N}_{TG}) \quad \dots\dots\dots (5.44)$$

機器規模が他の設計条件から決定されるロー・デューティ圧縮機，ハイ・デューティ圧縮機，ヒータ，主タービン，および主ボイラの性能特性はそれぞれ式(4.15)の各式で表されるものとし，ここでは省略する．次に，エネルギー・バランスおよび需給関係は式(4.16)の各式で添字kとkについての総和を除いたものによって表される．最後に，最小化すべき目的関数である年間総経費は

$$J = R \left\{ \sum_{n=1}^{\overline{N}_{DG}} c_{DG}(n_{DGn}) + \sum_{n=1}^{\overline{N}_{TG}} c_{TG}(n_{TGn}) \right\} + \sum_{m=1}^M (\varphi_A F_{FG} + \varphi_C F_{FG}) T^{(m)} \quad \dots\dots\dots (5.45)$$

と表される．

**結果および考察** 図5.8は，三種類のタイプのディーゼル発電機の性能特性を示したものである．4.4節では，図4.6に示すようにディーゼル発電機の性能特性として発電量-A重油消費量関係を線分で近似した．しかしながら，実際には図5.8に示すように最大負荷レベルより低い負荷レベルで最高効率を示し，それよりも低負荷レベルあるいは高負荷レベルでは効率が低下する曲線になっている．一方，実際の低圧蒸気ターボ発電機の発電量-蒸気消費量関係は，図4.7に示すようにほとんど直線として表される．これらの性能特性および設備費の実データを用い，5.4.2項で示した方法に基づき機器規模を表す離散変数の候補値と各係数の値を決定した．この例の場合，性能特性が直線や



二次曲線に近いこと、および三種類のタイプの機器を選定の候補とすることから、式(5.32)および式(5.33)の二次関数近似で十分である。

運用モードとして表4.2に示す8航海パターンを考える。しかしながら、すべての運用モードを考慮するには多大な計算時間を要するので、表4.2の運用モードのうち、年間相当運転時間が長く運用費に比較的大きな影響を及ぼすものと考えられる  $m=1, 3$  の運用モードのみを考慮に入れ、最適設計計画を行った。その他の運用モードについては、機器構成を決定後最適運用方策を決定した。ディーゼル発電機と低圧蒸気ターボ発電機は、それぞれ図5.8、図4.7に示す三つのタイプの機器から選定可能とし、 $K_{DG}=K_{TG}=3$  とした。また最大設置可能台数を  $\bar{N}_{DG}=\bar{N}_{TG}=2$  とした。さらに、資本回収係数を  $R=0.1558$ 、A重油およびC重油の単価をそれぞれ  $\varphi_A=60$ 円/kg、 $\varphi_C=48$ 円/kgとした。

表5.4は最適設計計画によって得られた機器の最適構成と最適運用方策、な

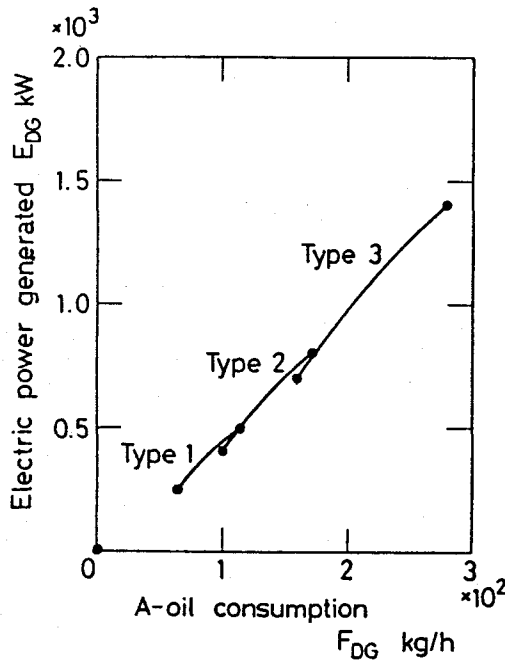


図5.8 ディーゼル発電機の性能特性  
(非線形性を考慮した場合)

らびに年間経費を示したものである。この場合の最適機器構成は、4.4.4項で述べた表4.3(a)の結果において最小年間総経費の解から三番め、すなわち機器の最大設置可能台数を  $N_{DG} = N_{TG} = 2$  とした場合の最適機器構成に一致しており、妥当な結果を与えている。ディーゼル発電機、低圧蒸気ターボ発電機ともに二台選定されているが、機器効率の高いディーゼル発電機が中心に運転されている。低圧蒸気ターボ発電機は電力需要量が多い場合にのみ運転されている。このように、機器の運転・停止条件も4.4.4項で述べた表4.4(a)の結果と同様の傾向を示している。したがって、ディーゼル発電機の性能特性の二次関数近似による機器構成に関する最適解への影響は比較的小さいと言える。これは性能特性の非線形性が小さいことに起因するものと考えられる。しかしながら、ディーゼル発電機の負荷レベルには明らかな相違が見られる。たとえば、運用モード  $m=1$  では二台のディーゼル発電機はともに中間の負荷レベルで運転されており、表4.4(a)の結果とは異なった傾向を示している。これは、図4.6の性能特性では機器効率が最大負荷レベルで最大となるのに対して、図5.8の

表5.4 機器の最適構成と最適運用方策  
(LNG船熱電併給システム)

Equipment constitution		DG		TG		F <sub>DG</sub> kg/h	F <sub>TG</sub> kg/h
		Type 3	Type 2	Type 3	Type 1		
Operational policy	m	E <sub>DG1</sub> kW	E <sub>DG2</sub> kW	E <sub>TG1</sub> kW	E <sub>TG2</sub> kW		
	1	1296	704	0	0	404.2	1491.1
	2	1199	651	0	0	375.0	1767.5
	3	1360	740	0	0	425.5	3184.3
	4	1264	686	0	0	394.1	3376.9
	5	1400	764	0	486	441.2	2280.9
	6	1400	800	0	0	452.0	75.2
	7	1400	763	0	957	441.8	1665.3
8	1400	766	3000	884	442.4	1258.2	
Capital cost	C <sub>f</sub> ×10 <sup>4</sup> Yen/Year	3518					
Operational cost	C <sub>v</sub> ×10 <sup>4</sup> Yen/Year	104460					
Total cost	C <sub>t</sub> ×10 <sup>4</sup> Yen/Year	107978					

性能特性の場合には部分負荷レベルで最大となるためである。

以上に示したように、熱電併給システムの設計計画において構成機器の性能特性などの非線形性を考慮した場合でも、本最適設計計画手法によって機器の最適構成と最適運用方策を同時に効率よく決定することができる。

## 5.5 結 言

本章では、熱電併給システムの設計計画において、機器の最適構成と最適運用方策を同時に効率よく決定するための一手法を提示した。構成機器に対して機器規模を表す離散変数を導入し、機器の性能特性と設備費をこの離散変数の関数として表すことによって、最適設計計画問題を混合離散変数計画問題として定式化した。また線形問題、および非線形問題としての定式化を示し、その解法としてそれぞれ3.4節、3.5節で提示した混合離散変数線形計画法および混合離散変数非線形計画法のアルゴリズムを適用した。その際、変数間の階層的関係に着目し、3.6節で提示した変数の階層的関係を考慮した分枝限定法のアルゴリズムを適用した。最後に、設計計画事例により本最適設計計画手法の有効性を示した。なお、本手法は熱電併給システムだけではなく、他のエネルギー供給システムの設計計画にも適用可能であると考えられる。

## 第6章 混合整数線形計画法に基づく 熱電併給システムの最適運用計画手法

### 6.1 緒 言

本章では、陸上に設置される地域エネルギー供給用の熱電併給システムの一例として、ガスタービン発電・廃熱ボイラ方式熱電併給システムに対する最適計画について検討する。ここでは下位レベルの課題である運用計画のみを取り上げ、経済性の観点から運用費を最小化するようなシステム構成機器の最適運用方策について検討する。機器運用方策においては運転・停止による機器性能特性の不連続性、および部分負荷運転による機器効率の変化を考慮に入れ、最適運用計画問題を混合整数線形計画問題として定式化する。最適化計算においては、3.3節で提示した混合整数線形計画法のアルゴリズムを適用する。また機器構成を容易に変更できるようにシステム構成データの数式入力法を、効率よく最適化計算を行えるように従属変数の自動消去法を導入する。さらに、年間を通じて組織的に最適運用方策を算定できるように、最適運用方策算定システムを構築する。最後に、ガスタービン発電・廃熱ボイラ方式熱電併給システムのある導入計画を具体的検討事例として、最適運用方策算定システムに基づき年間のエネルギー需要の変動に対するシステム構成機器の最適運用方策を算定するとともに、従来システムとの比較によってシステムの有効性の重要な評価指標である省エネルギー性や経済性の評価を行う。ここでは、買電や都市ガス料金の最適運用方策、省エネルギー性、および経済性への影響についてパラメトリックな分析を行う。また、熱電併給システムの運用方策の一つとして

従来から提案されている熱追従方式や電力追従方式<sup>(27)</sup>による結果との比較により、最適運用方策の有効性を示す。

## 6.2 ガスタービン発電・廃熱ボイラ方式熱電併給システム

図6.1は、考察の対象とするガスタービン発電・廃熱ボイラ方式熱電併給システムの一般的機器構成を示したものである。ここでは、熱電併給システム構成機器としてガスタービン発電機や廃熱ボイラだけではなく、各種冷凍機やヒートポンプ、熱交換器などの熱供給機器も考慮に入れる。また需要家による電力需要に加えて、システムの主要構成機器である電動ターボ冷凍機やヒートポンプ、その他の構成機器であるポンプや冷却塔、および各種主機に付属している補機の電力需要も考慮に入れる。図6.1において、機器に付した記号は以下の通りである。

- BA：補助ボイラ
- BW：廃熱ボイラ
- CE：電動ターボ冷凍機用冷却塔
- CG：ガスタービン駆動ターボ冷凍機用冷却塔
- CS：蒸気吸収冷凍機用冷却塔
- GT：ガスタービン発電機
- HH：暖房用熱交換器
- HP：ヒートポンプ
- HW：給湯用熱交換器
- PC：冷房用冷水ポンプ
- PH：暖房用温水ポンプ
- PW：給湯用温水ポンプ
- RE：電動ターボ冷凍機
- RG：ガスタービン駆動ターボ冷凍機
- RS：蒸気吸収冷凍機

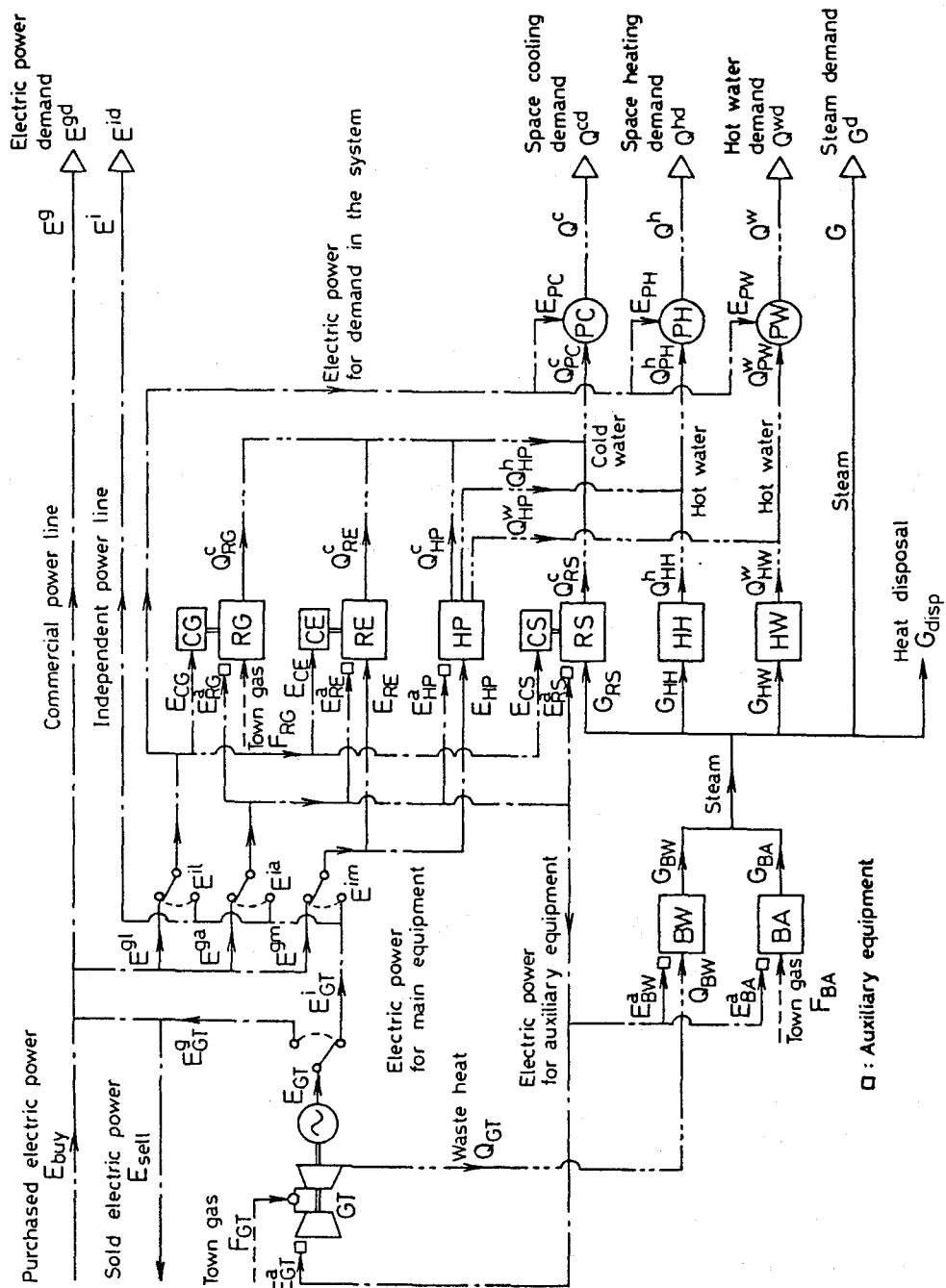


図6.1 ガスタービン発電・廃熱ボイラ方式熱電併給システムの一般的機器構成

また実線は蒸気，一点鎖線は電力，二点鎖線は熱，破線は燃料の流れをそれぞれ示す。

ガスタービン発電・廃熱ボイラ方式では，都市ガスを燃料とするガスタービン発電機と買電によって電力が供給される。電力は，システム構成機器である電動ターボ冷凍機やヒートポンプなどの主機，ポンプや冷却塔，各種主機の駆動に必要な補機の動力，および需要家への供給電力として用いられる。また，ガスタービン発電機による発生電力を電気事業者に逆送する場合も一般的に考慮する。電力回路方式には発電電力と買電との並列方式，および分離方式がある。ここでは電力系統を一般電力系統と独立電力系統に分け，ガスタービン発電機や他の構成機器と電力系統との接続状態を一般的に考慮できるようにシステム構成を行っている。

ガスタービンからの廃熱は廃熱ボイラによって回収され，熱エネルギーとしてカスケード的に利用される。熱エネルギーが不足する場合には，都市ガスを燃料とする補助ボイラによって補給される。また余剰蒸気は直接復水タンクに戻されるが，図6.1ではこれを熱廃棄として示している。冷房用冷水はヒートポンプ，電動ターボ冷凍機，ガスタービン駆動ターボ冷凍機，蒸気吸収冷凍機の並列運転によって供給される。一方，暖房および給湯用温水はボイラから発生する蒸気と熱交換を行うことによって，またヒートポンプによって供給される。さらに蒸気は廃熱および補助ボイラによって供給される。

### 6.3 最適運用計画問題の定式化

ここでは，季節的および時間的に変動する電力や熱エネルギー需要をバランスよく満足し，しかも経済性の観点からシステムの運用に必要な買電や燃料の

都市ガスのコストを最小化するような構成機器の最適運用方策について検討する。以下に、図6.1に示すガスタービン熱電併給システムに対して最適運用計画問題の定式化を行う。定式化における使用記号は次の通りである。

- エネルギー量

- E : 電力
- F : 燃料消費量
- G : 蒸気量
- Q : 廃熱量
- $Q^c$  : 冷房用冷水熱量
- $Q^h$  : 暖房用温水熱量
- $Q^w$  : 給湯用温水熱量

- その他

- J : 目的関数
- N : 機器設置台数
- p, q, r, s : 機器性能特性値
- $\delta$  : 機器の運転・停止を表す0-1整数変数
- $\xi$  : 一般電力系統あるいは独立電力系統との接続を表す0-1整数定数
- $\phi$  : 電力あるいは都市ガスの単価
- $\overline{(\ )}$ ,  $\underline{(\ )}$  : 機器の入力あるいは出力エネルギーの上・下限値

- 下付添字

- buy : 買電
- disp : 熱廃棄
- gas : 都市ガス
- n : 第n台めの機器
- sell : 逆送電力

- 上付添字

- a : 補機動力
- c : 冷房
- d : エネルギー需要
- g : 一般電力系統
- h : 暖房
- i : 独立電力系統



- $\ell$  : システム内電力負荷
- $m$  : 主機動力
- $w$  : 給湯

また各機器に関する量を機器記号を添えて示す。

### 6.3.1 機器性能

まず図6.1のシステムの構成要素である各機器の性能特性を定式化する。

#### -ガスタービン発電機(GT)

図6.2は、ガスタービン発電機の性能特性として燃料消費量と発電量、およ

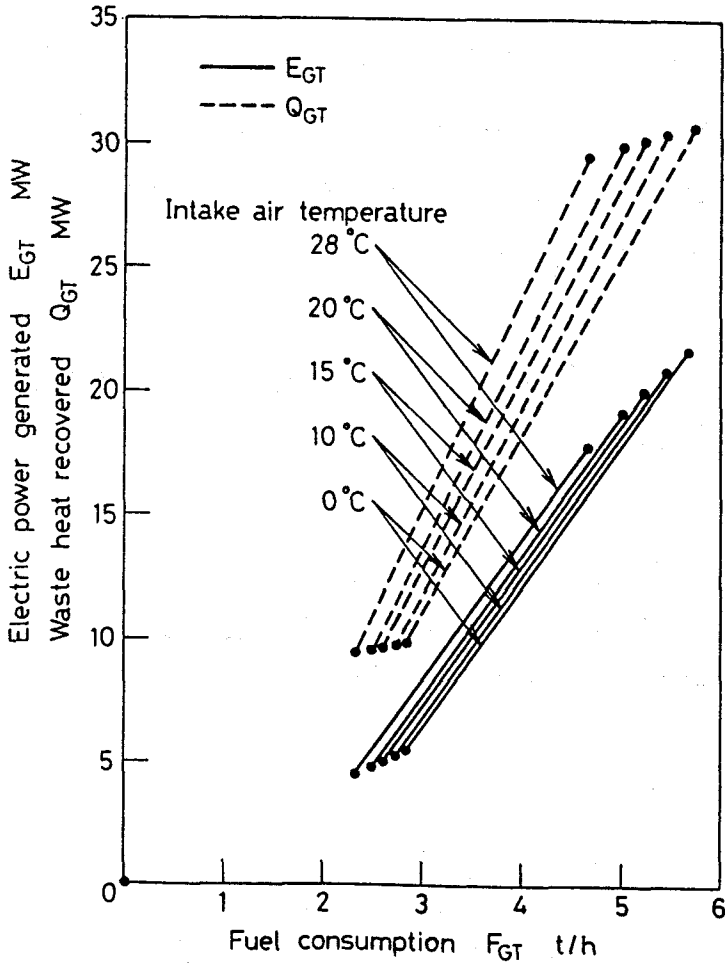


図6.2 ガスタービン発電機の性能特性

び燃料消費量と廃熱量の関係を示したものである。図6.2に示すように、ガスタービン発電機の性能特性は線分によって十分精度よく近似できる<sup>(66)</sup>。ここでは $N_{GT}$ 台のガスタービン発電機が設置されるものとし、燃料消費量 $F_{GTn}$ と発電量 $E_{GTn}$ 、および廃熱量 $Q_{GTn}$ の関係を次式で表す。

$$\left. \begin{aligned} E_{GTn} &= p_{GTn} F_{GTn} + q_{GTn} \delta_{GTn} \\ Q_{GTn} &= r_{GTn} F_{GTn} + s_{GTn} \delta_{GTn} \\ \underline{F}_{GTn} \delta_{GTn} &\leq F_{GTn} \leq \overline{F}_{GTn} \delta_{GTn} \\ \delta_{GTn} &\in \{0, 1\} \end{aligned} \right\} (n=1 \sim N_{GT}) \dots\dots\dots (6.1)$$

ここで、 $p_{GTn}$ 、 $q_{GTn}$ 、 $r_{GTn}$ 、 $s_{GTn}$ は機器性能特性値、また $\overline{F}_{GTn}$ 、 $\underline{F}_{GTn}$ はそれぞれ燃料消費量の上・下限値である。図6.2にも示すように、ガスタービン発電機の場合これらの値は吸気温度によって変化するので、吸気温度の関数として考慮する。 $\delta_{GTn}$ は機器の運転( $\delta_{GTn}=1$ )、あるいは停止( $\delta_{GTn}=0$ )を表す0-1整数変数である。さらに、ガスタービン発電機の駆動に必要な補機動力を次式で近似して考慮する。

$$E_{\hat{G}Tn} = p_{\hat{G}Tn} F_{GTn} + q_{\hat{G}Tn} \delta_{GTn} \quad (n=1 \sim N_{GT}) \dots\dots\dots (6.2)$$

その他の構成機器の性能特性についてもガスタービン発電機と同様に、以下の通り定式化を行う。

- 廃熱ボイラ (BW)

$$\left. \begin{aligned} G_{BWn} &= p_{BWn} Q_{BWn} + q_{BWn} \delta_{BWn} \\ E_{\hat{B}Wn} &= p_{\hat{B}Wn} Q_{BWn} + q_{\hat{B}Wn} \delta_{BWn} \\ \underline{Q}_{BWn} \delta_{BWn} &\leq Q_{BWn} \leq \overline{Q}_{BWn} \delta_{BWn} \\ \delta_{BWn} &\in \{0, 1\} \end{aligned} \right\} (n=1 \sim N_{BW}) \dots\dots\dots (6.3)$$

- 補助ボイラ (BA)

$$\left. \begin{aligned} G_{BA n} &= p_{BA n} F_{BA n} + q_{BA n} \delta_{BA n} \\ E_{\hat{B}A n} &= p_{\hat{B}A n} F_{BA n} + q_{\hat{B}A n} \delta_{BA n} \\ \underline{F}_{BA n} \delta_{BA n} &\leq F_{BA n} \leq \overline{F}_{BA n} \delta_{BA n} \\ \delta_{BA n} &\in \{0, 1\} \end{aligned} \right\} (n=1 \sim N_{BA}) \dots\dots\dots (6.4)$$

- ガスタービン駆動ターボ冷凍機 (RG), 冷却塔 (CG)

$$\left. \begin{aligned} Q_{RGn} &= p_{RGn} F_{RGn} + q_{RGn} \delta_{RGn} \\ E_{RGn} &= p_{RGn} F_{RGn} + q_{RGn} \delta_{RGn} \\ E_{CGn} &= p_{CGn} F_{RGn} + q_{CGn} \delta_{RGn} \\ \underline{F}_{RGn} \delta_{RGn} &\leq F_{RGn} \leq \overline{F}_{RGn} \delta_{RGn} \\ \delta_{RGn} &\in \{0, 1\} \end{aligned} \right\} (n=1 \sim N_{RG}) \dots\dots\dots (6.5)$$

- 電動ターボ冷凍機 (RE), 冷却塔 (CE)

$$\left. \begin{aligned} Q_{REn} &= p_{REn} E_{REn} + q_{REn} \delta_{REn} \\ E_{REn} &= p_{REn} E_{REn} + q_{REn} \delta_{REn} \\ E_{CEn} &= p_{CEn} E_{REn} + q_{CEn} \delta_{REn} \\ \underline{E}_{REn} \delta_{REn} &\leq E_{REn} \leq \overline{E}_{REn} \delta_{REn} \\ \delta_{REn} &\in \{0, 1\} \end{aligned} \right\} (n=1 \sim N_{RE}) \dots\dots\dots (6.6)$$

- 蒸気吸収冷凍機 (RS), 冷却塔 (CS)

$$\left. \begin{aligned} Q_{RSn} &= p_{RSn} G_{RSn} + q_{RSn} \delta_{RSn} \\ E_{RSn} &= p_{RSn} G_{RSn} + q_{RSn} \delta_{RSn} \\ E_{CSn} &= p_{CSn} G_{RSn} + q_{CSn} \delta_{RSn} \\ \underline{G}_{RSn} \delta_{RSn} &\leq G_{RSn} \leq \overline{G}_{RSn} \delta_{RSn} \\ \delta_{RSn} &\in \{0, 1\} \end{aligned} \right\} (n=1 \sim N_{RS}) \dots\dots\dots (6.7)$$

- ヒートポンプ (HP)

ヒートポンプには種々の運用モードがあるが、ここでは冷房 ( $\delta_{HPn}=1$ ), 暖房 ( $\delta_{HPn}=1$ ), あるいは給湯 ( $\delta_{HPn}=1$ ) のうち一モードを選択して運転できるものとし、性能特性を次式で表す。

$$\left. \begin{aligned} Q_{HPn} &= p_{HPn} E_{HPn} + q_{HPn} \delta_{HPn} \\ Q_{HPn} &= p_{HPn} E_{HPn} + q_{HPn} \delta_{HPn} \\ Q_{HPn} &= p_{HPn} E_{HPn} + q_{HPn} \delta_{HPn} \\ E_{HPn} &= p_{HPn} E_{HPn} + q_{HPn} \delta_{HPn} \\ E_{HPn} &= p_{HPn} E_{HPn} + q_{HPn} \delta_{HPn} \\ E_{HPn} &= p_{HPn} E_{HPn} + q_{HPn} \delta_{HPn} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned}
 \underline{E}_{HPn} \delta_{HPn} &\leq E_{HPn} \leq \overline{E}_{HPn} \delta_{HPn} \\
 \underline{E}_{HPn} \delta_{HPn} &\leq E_{HPn} \leq \overline{E}_{HPn} \delta_{HPn} \\
 \underline{E}_{HPn} \delta_{HPn} &\leq E_{HPn} \leq \overline{E}_{HPn} \delta_{HPn} \\
 E_{HPn} &= E_{HPn} + E_{HPn} + E_{HPn} \\
 E_{HPn} &= E_{HPn} + E_{HPn} + E_{HPn} \\
 \delta_{HPn} + \delta_{HPn} + \delta_{HPn} &\leq 1 \\
 \delta_{HPn}, \delta_{HPn}, \delta_{HPn} &\in \{0, 1\}
 \end{aligned} \right\} (n=1 \sim N_{HP}) \dots\dots\dots (6.8)$$

また最近、たとえば冷房および暖房などを同時に行うことができるヒートポンプが種々開発されている。このようなヒートポンプの性能特性に対しても、基本的には上述のような定式化が可能である。

- 暖房用熱交換器(HH)

$$\left. \begin{aligned}
 Q_{HHn} &= p_{HHn} G_{HHn} \\
 0 &\leq G_{HHn} \leq \overline{G}_{HHn}
 \end{aligned} \right\} (n=1 \sim N_{HH}) \dots\dots\dots (6.9)$$

- 給湯用熱交換器(HW)

$$\left. \begin{aligned}
 Q_{HWn} &= p_{HWn} G_{HWn} \\
 0 &\leq G_{HWn} \leq \overline{G}_{HWn}
 \end{aligned} \right\} (n=1 \sim N_{HW}) \dots\dots\dots (6.10)$$

- 冷房用冷水ポンプ(PC)

$$\left. \begin{aligned}
 E_{PCn} &= p_{PCn} Q_{PCn} \\
 0 &\leq Q_{PCn} \leq \overline{Q}_{PCn}
 \end{aligned} \right\} (n=1 \sim N_{PC}) \dots\dots\dots (6.11)$$

- 暖房用温水ポンプ(PH)

$$\left. \begin{aligned}
 E_{PHn} &= p_{PHn} Q_{PHn} \\
 0 &\leq Q_{PHn} \leq \overline{Q}_{PHn}
 \end{aligned} \right\} (n=1 \sim N_{PH}) \dots\dots\dots (6.12)$$

- 給湯用温水ポンプ(PW)

$$\left. \begin{aligned}
 E_{PWn} &= p_{PWn} Q_{PWn} \\
 0 &\leq Q_{PWn} \leq \overline{Q}_{PWn}
 \end{aligned} \right\} (n=1 \sim N_{PW}) \dots\dots\dots (6.13)$$

### 6.3.2 エネルギー・バランスおよび需給関係

図6.1から各エネルギーについて以下のエネルギー・バランス式および需給関係式が得られる。電力については一般電力系統と独立電力系統に分け、構成機器と電力系統との接続関係を示す定数 $\zeta$ を用いて表現する。 $\zeta=1$ は一般電力系統との接続を、また $\zeta=0$ は独立電力系統との接続を示す。図6.1では接続関係を表すスイッチを主機や補機ごとにまとめて表示しているが、ここでは構成機器やその補機一台ごとに $\zeta$ を定義する。

#### - 一般電力系統

$$\begin{aligned}
 E_{\text{buy}} + E_{\text{GT}} &= E^s + E^{\text{sm}} + E^{\text{sa}} + E^{\text{sl}} + E_{\text{sell}} \\
 E_{\text{GT}} &= \sum_{n=1}^{N_{\text{GT}}} \zeta_{\text{GT}n} E_{\text{GT}n} \\
 E^{\text{sm}} &= \sum_{n=1}^{N_{\text{RE}}} \zeta_{\text{RE}n} E_{\text{RE}n} + \sum_{n=1}^{N_{\text{HP}}} \zeta_{\text{HP}n} E_{\text{HP}n} \\
 E^{\text{sa}} &= \sum_{n=1}^{N_{\text{GT}}} \zeta_{\text{GT}n} E_{\text{GT}n} + \sum_{n=1}^{N_{\text{BW}}} \zeta_{\text{BW}n} E_{\text{BW}n} + \sum_{n=1}^{N_{\text{BA}}} \zeta_{\text{BA}n} E_{\text{BA}n} \\
 &\quad + \sum_{n=1}^{N_{\text{RG}}} \zeta_{\text{RG}n} E_{\text{RG}n} + \sum_{n=1}^{N_{\text{RE}}} \zeta_{\text{RE}n} E_{\text{RE}n} + \sum_{n=1}^{N_{\text{RS}}} \zeta_{\text{RS}n} E_{\text{RS}n} \\
 &\quad + \sum_{n=1}^{N_{\text{HP}}} \zeta_{\text{HP}n} E_{\text{HP}n} \\
 E^{\text{sl}} &= \sum_{n=1}^{N_{\text{RE}}} \zeta_{\text{CE}n} E_{\text{CE}n} + \sum_{n=1}^{N_{\text{RS}}} \zeta_{\text{CS}n} E_{\text{CS}n} + \sum_{n=1}^{N_{\text{RG}}} \zeta_{\text{CG}n} E_{\text{CG}n} \\
 &\quad + \sum_{n=1}^{N_{\text{PC}}} \zeta_{\text{PC}n} E_{\text{PC}n} + \sum_{n=1}^{N_{\text{PH}}} \zeta_{\text{PH}n} E_{\text{PH}n} + \sum_{n=1}^{N_{\text{PW}}} \zeta_{\text{PW}n} E_{\text{PW}n} \\
 E^s &= E^{\text{sd}}
 \end{aligned} \tag{6.14}$$

#### - 独立電力系統

$$\begin{aligned}
 E_{\text{GT}} &= E^i + E^{\text{im}} + E^{\text{ia}} + E^{\text{iz}} \\
 E_{\text{GT}} &= \sum_{n=1}^{N_{\text{GT}}} (1 - \zeta_{\text{GT}n}) E_{\text{GT}n}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E^{im} &= \sum_{n=1}^{N_{RE}} (1-\xi_{REn}) E_{REn} + \sum_{n=1}^{N_{HP}} (1-\xi_{HPn}) E_{HPn} \\
E^{ia} &= \sum_{n=1}^{N_{GT}} (1-\xi_{GTn}) E_{GTn} + \sum_{n=1}^{N_{BW}} (1-\xi_{BWn}) E_{BWn} + \sum_{n=1}^{N_{BA}} (1-\xi_{BA n}) E_{BA n} \\
&+ \sum_{n=1}^{N_{RG}} (1-\xi_{RGn}) E_{RGn} + \sum_{n=1}^{N_{RE}} (1-\xi_{REn}) E_{REn} + \sum_{n=1}^{N_{RS}} (1-\xi_{RSn}) E_{RSn} \\
&+ \sum_{n=1}^{N_{HP}} (1-\xi_{HPn}) E_{HPn} \\
E^{ie} &= \sum_{n=1}^{N_{RE}} (1-\xi_{CEn}) E_{CEn} + \sum_{n=1}^{N_{RS}} (1-\xi_{CSn}) E_{CSn} + \sum_{n=1}^{N_{RG}} (1-\xi_{CGn}) E_{CGn} \\
&+ \sum_{n=1}^{N_{PC}} (1-\xi_{PCn}) E_{PCn} + \sum_{n=1}^{N_{PH}} (1-\xi_{PHn}) E_{PHn} + \sum_{n=1}^{N_{PW}} (1-\xi_{PWn}) E_{PWn} \\
E^i &= E^{id}
\end{aligned}
\tag{6.15}$$

- 蒸気

$$\begin{aligned}
&\left. \begin{aligned}
&\sum_{n=1}^{N_{BW}} G_{BWn} + \sum_{n=1}^{N_{BA}} G_{BA n} \\
&= G + \sum_{n=1}^{N_{HW}} G_{HWn} + \sum_{n=1}^{N_{HH}} G_{HHn} + \sum_{n=1}^{N_{RS}} G_{RSn} + G_{disp} \\
&G = G^d
\end{aligned} \right\} \tag{6.16}
\end{aligned}$$

- 冷房用冷水

$$\begin{aligned}
&\left. \begin{aligned}
Q^c &= \sum_{n=1}^{N_{PC}} Q_{PCn} = \sum_{n=1}^{N_{RE}} Q_{REn} + \sum_{n=1}^{N_{RS}} Q_{RSn} \\
&+ \sum_{n=1}^{N_{RG}} Q_{RGn} + \sum_{n=1}^{N_{HP}} Q_{HPn}
\end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.17) \\
Q^c &= Q^{cd}
\end{aligned}$$

- 暖房用温水

$$\begin{aligned}
&\left. \begin{aligned}
Q^h &= \sum_{n=1}^{N_{PH}} Q_{PHn} = \sum_{n=1}^{N_{HH}} Q_{HHn} + \sum_{n=1}^{N_{HP}} Q_{HPn} \\
Q^h &= Q^{hd}
\end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.18)
\end{aligned}$$

- 給湯用温水

$$\left. \begin{aligned} Q^w &= \sum_{n=1}^{N_{PW}} Q_{PWn} = \sum_{n=1}^{N_{HW}} Q_{HWn} + \sum_{n=1}^{N_{HP}} Q_{HPn} \\ Q^w &= Q^{wd} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.19)$$

- 廃熱

一般にガスタービン発電機と廃熱ボイラは一体化された一組のユニットとして設置される場合が多いので、次式のエネルギー・バランス式が必要となる。

$$Q_{GTn} = Q_{BWn} \quad (n=1 \sim N_{GT}) \dots\dots\dots (6.20)$$

ただし、 $N_{GT} = N_{BW}$ である。

- 燃料

$$\left. \begin{aligned} F_{GT} &= \sum_{n=1}^{N_{GT}} F_{GTn} \\ F_{BA} &= \sum_{n=1}^{N_{BA}} F_{BAN} \\ F_{RG} &= \sum_{n=1}^{N_{RG}} F_{RGn} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6.21)$$

6.3.3 目的関数

機器運用の目的として、経済性の観点から単位時間当りの運用費、すなわち入力エネルギーである買電および都市ガスのコスト

$$J = \varphi_{buy} E_{buy} - \varphi_{sell} E_{sell} + \varphi_{gas} (F_{GT} + F_{BA} + F_{RG}) \quad (6.22)$$

を採用し、この最小化を考える。ここで、 $\varphi_{buy}$ 、 $\varphi_{sell}$ 、 $\varphi_{gas}$ はそれぞれ買電、逆送電力、および都市ガスの単価を表す。式(6.22)では逆送電力による収入を負のコストとして考慮している。

## 6.4 最適運用計画問題の解法

### 6.4.1 混合整数線形計画法の適用

6.3節で定式化された各時間におけるシステムの最適運用計画問題は、式(6.1)～(6.21)の制約条件および各連続変数の非負条件の下に、式(6.22)の目的関数を最小化するような機器運用方策を表す変数を決定するという一つの混合整数線形計画問題となる。ここでは、解法として3.3節で述べた混合整数線形計画法のアルゴリズムを適用する。また5.3.1項で示したように、各構成機器の入力量を表す変数に対して変数変換を行い、入力量の下限値に関する制約条件を変換後の変数の下限値が零であるという条件に変え、制約条件数を低減する。たとえば、ガスタービン発電機の性能特性を表す式(6.1)の第3式、すなわち燃料消費量の上・下限値に関する制約条件は、変数変換

$$F'_{GTn} = F_{GTn} - \underline{F}_{GTn} \delta_{GTn} \dots\dots\dots (6.23)$$

によって

$$0 \leq F'_{GTn} \leq (\overline{F}_{GTn} - \underline{F}_{GTn}) \delta_{GTn} \dots\dots\dots (6.24)$$

に変化する。式(6.24)の $F'_{GTn} \geq 0$ という非負条件は混合整数線形計画法のアルゴリズムに自動的に組み込まれているので、特に制約条件として考慮する必要がなく、結果的に制約条件数が一つ減少する。その他の構成機器についても、入力量を表す変数に関して変数変換を行うことによって制約条件数の低減が可能となる。

### 6.4.2 システム構成データの数式入力

ガスタービン熱電併給システムにおける機器構成には多くの代替性があり、各種機器構成について最適運用方策を検討する必要がある。その場合、混合整数線形計画法への入力データとして、システム構成から決定される目的関数



や制約条件の各変数に関する係数からなるタブローを作成する必要があり<sup>(67)</sup>，その作業は煩雑である．たとえば，変数の数が100，制約条件の数が50の場合，定数項や目的関数も含め51×101の大きさのタブローを作成し，制約条件式や目的関数式の一項ごとにタブロー上の対応する変数の位置に係数を代入しなければならない．ここでは，上記のような入力作業の煩雑さを回避するためにシステム構成データの数式入力法を導入する．すなわち，定式化された最適化問題の目的関数式，および制約条件式を直接計算機への入力とし，数式からタブロー

```
'*****
'Data for MILP model of gas turbine cogeneration system
'*****
'
'Cost of electric power and fuel
25.0EB+70.0FGT+70.0FRG+70.0FBA
'
'Performance characteristics of equipment
'----- GT1
EGT1=5.725FGT1-8.895IGT1
QGT1=7.394FGT1-9.124IGT1
FGT1<4.661IGT1
FGT1=FGT1D+2.331IGT1
EAGT1=0.0039FGT1
'----- GT2
EGT2=5.725FGT2-8.895IGT2
QGT2=7.394FGT2-9.124IGT2
FGT2<4.661IGT2
FGT2=FGT2D+2.331IGT2
EAGT2=0.0039FGT2
'-----
FGT1>FGT2
FGT1-FGT2<4.661IGT1-4.661IGT2+0.0001
      ⋮
'Energy balance and supply-demand relationships
'----- [Fuel]
FGT=FGT1+FGT2
FBA=FBA1+FBA2
FRG=FRG1+FRG2
'----- [Waste heat]
QGT1-QBW1=0
QGT2-QBW2=0
'----- [Electric power]
EGT=EGT1+EGT2
ERE=ERE1+ERE2
EAGT=EAGT1+EAGT2
EABW=EABW1+EABW2
      ⋮
```

図6.3 システム構成データ

への変換を計算機によって自動的に行う。図6.3は、システム構成データとしての目的関数式および制約条件式の例を示したものである。数式からタブローへの変換には文字処理を用い、目的関数式および制約条件式から変数とその係数を抽出し、係数からタブローを作成する。変数のリストは別途与える必要がなく、計算機によって目的関数や制約条件の各項に現れる変数を自動的に抽出することができる。また各制約条件を識別するために、制約条件に名前を付ける機能も付加している。上記の数式入力法を適用すれば、ガスタービン熱電併給システムの機器構成などの変更に対しても柔軟に対応することができる。

#### 6.4.3 従属変数の自動消去

6.3節で定式化された最適運用計画問題においては、機器の性能特性式やエネルギー・バランスおよび需給関係式に多くの等式制約条件が現れる。定式化においては、式の意味を明確に表現するために種々の物理量を表す変数を冗長的に定義し、等式制約条件によりそれらに関係づけるのが望ましい。しかしながら、最適化計算の効率の面から言えば、等式制約条件を用いて従属変数を消去し、タブローを縮小するのが望ましい。ここでは、明確に判定できる従属変数を計算機によって自動的に消去し、独立変数について最適化計算を行った後、独立変数の最適値から自動的に従属変数の最適値を求める。6.4.2項で述べた数式入力法では、

$$x_1 = a_2 x_2 + a_3 x_3 + \dots \dots \dots (6.25)$$

のように、等式制約条件の左辺に唯一の変数  $x_1$  がある場合、 $x_1$  を従属変数として判定する。

## 6.5 最適運用方策算定システム

本節では、6.3節で定式化された各時間における最適運用計画問題を年間を通じて組織的に検討するために構築した最適運用方策算定システムを示す。図6.4は、最適運用方策算定システムによる処理の流れを示したものである。各処理の概要を以下に示す。

ステップ1：システム構成データを読み込み、システムの機器構成を決定する。6.4.2項で述べたように、システム構成データは目的関数である運用費、および制約条件である機器性能特性やエネルギー・バランスおよび需給関係を数式表現したものであり、これから最適化計算に必要なタブローを作成・縮小する。

ステップ2：ガスタービン発電機の性能特性の吸気温度依存性を考慮するため、気象データとして時間ごとの外気温の値を読み込み、それに基づきガスタービン発電機の性能特性値を決定する。

ステップ3：時間ごとのエネルギー需要データ、および電力・都市ガス料金データを読み込み、これらの値、およびステップ2で求めたガスタービン発電機の性能特性値に基づきステップ1で作成したタブローを修正する。

ステップ4：混合整数線形計画法に基づく最適化計算により、構成機器の運転・停止条件や負荷レベルなどの最適運用方策を算定し、その結果を時間ごとに出力する。

ステップ5：ステップ4で得られた結果を季節や月別に、また年間で集計し、出力する。

なお、ステップ2～4は季節や月別に算定されたエネルギー需要パターンごとに、また一つの需要パターンにおける時間ごとに反復実行される。また、最適

運用方策算定システムによって決定される機器運用方策から一次エネルギー量や運用費を算出し、それらに基づいて省エネルギー性や経済性を評価する。

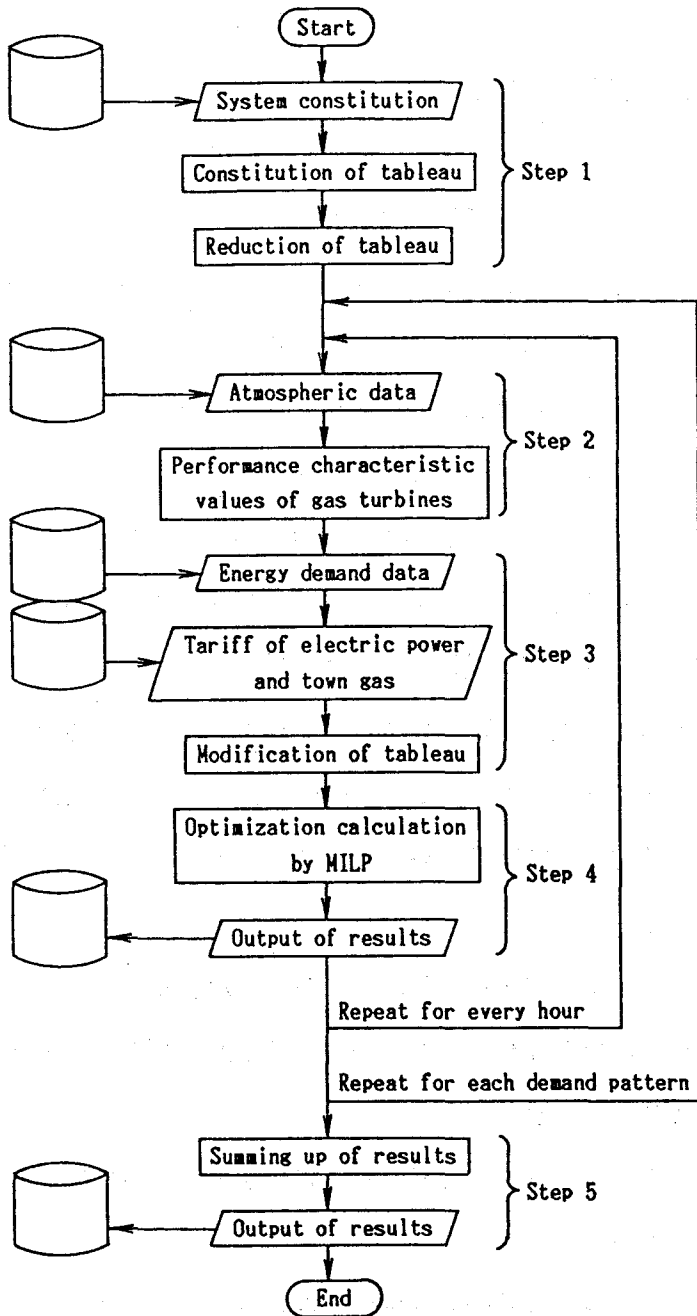


図6.4 最適運用方策算定システム

## 6.6 検討事例

### 6.6.1 対象システム

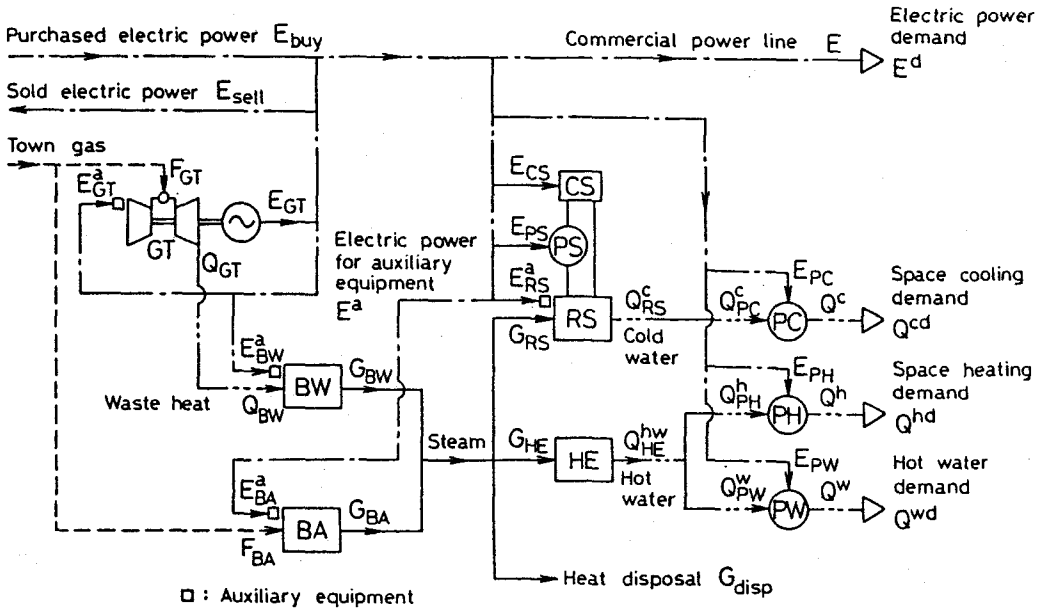
ガスタービン熱電併給システムのある導入計画事例に6.5節で提示した最適運用方策算定システムを適用し、システム構成機器の最適運用方策を算定する。また従来システムとの比較によって省エネルギー性や経済性を評価する。図6.5は対象システムの機器構成を示したものである。図6.5(a)はガスタービン発電・廃熱ボイラ方式(システムA)、図6.5(b)は従来方式(システムB)を示す。図6.5における機器記号は、HE：暖房・給湯用熱交換器、PS：冷却水循環ポンプを示している。その他の機器記号は図6.1で使用したものと同一である。また実線は蒸気、一点鎖線は電力、二点鎖線は熱、破線は燃料の流れをそれぞれ示す。

図6.1の一般的機器構成と比較して、システムAでは次の変更点がある。(a)電力回路方式を並列方式のみとする。(b)冷凍機として蒸気吸収冷凍機のみを設置する。(c)ヒートポンプを設置しない。(d)暖房用および給湯用の熱交換器として共通のものを設置する。(e)蒸気吸収冷凍機用冷却塔の動力から、冷却水循環ポンプの動力を別途取り出して考慮する。(f)蒸気需要を考慮しない。一方、システムBでは電力は買電によって、また冷暖房・給湯用の熱エネルギーは補助ボイラによってそれぞれ独立に供給される。ただし、買電の一部はポンプや冷却塔の動力、およびその他のシステム構成機器の補機動力として使用される。

### 6.6.2 検討条件

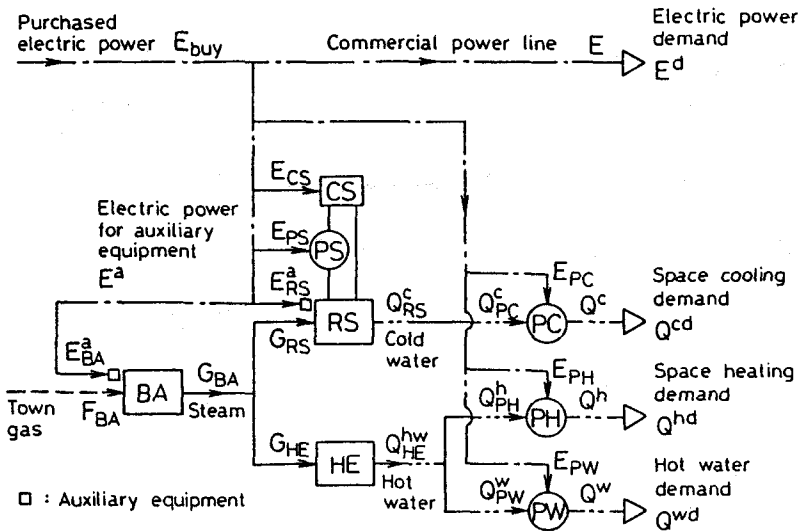
考察の対象とする電力および熱エネルギー供給対象地域は、四つの事務所ビルと二つのホテルから構成されている。ここでは、一箇月を平日、土曜日、休

日に分類して年間に36日の代表日を設定し、各代表日について一時間ごとに24時間分の電力および冷暖房・給湯の各需要量を与えるものとする。一例として、図6.6(a)~(c)にそれぞれ1月、4月、8月(平日)におけるエネルギー需要パ



□ : Auxiliary equipment

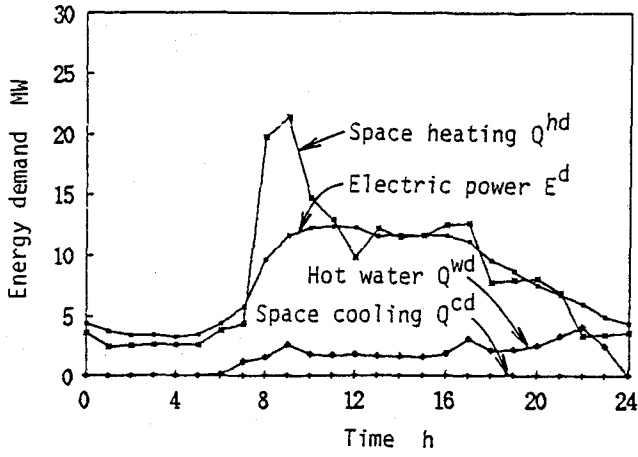
(a) ガスタービン発電・廃熱ボイラ方式(システムA)



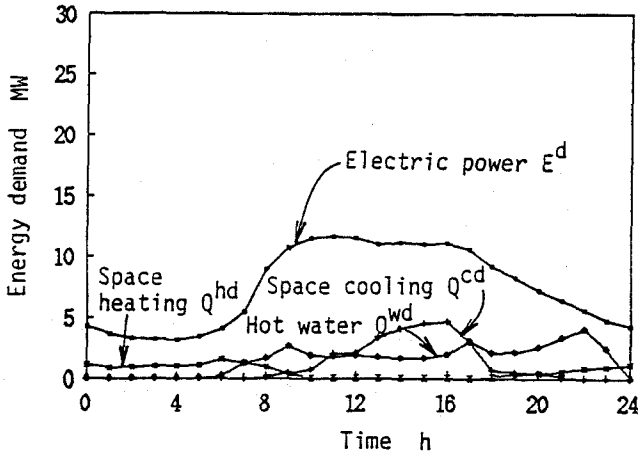
□ : Auxiliary equipment

(b) 従来方式(システムB)

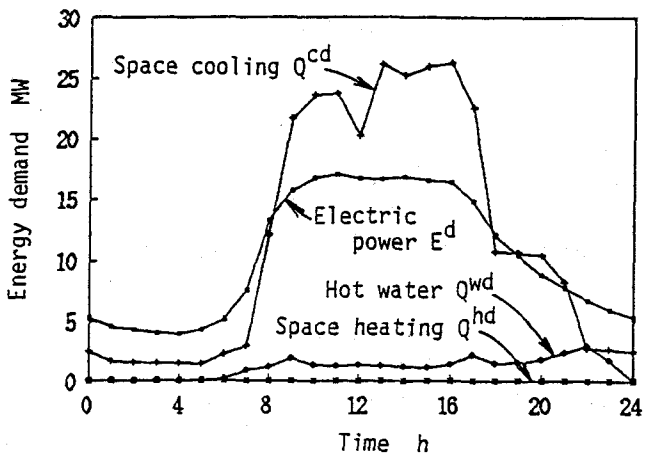
図6.5 検討対象システムの機器構成



(a) 1月(平日)



(b) 4月(平日)



(c) 8月(平日)

図6.6 エネルギー需要パターン

ターンを示す。電力需要量には年間を通して大幅な変化が見られないが、中期である4月の熱エネルギー需要量は他の季節と比較してかなり少なくなっている。上記エネルギー需要に対して二種類のガスタービン熱電併給システム(システムA1, A2)を考察の対象とし、従来方式(システムB)との比較・検討を行う。各システム構成機器の規模と台数を表6.1に示す。

最適運用方策、省エネルギー性、および経済性などの評価指標に影響を及ぼす因子として、買電と都市ガスの料金が挙げられる。買電や都市ガスの料金はその需要量によって大幅に変化するるので、買電と都市ガスの単価比を変数とし、上記の評価指標への影響について調べる。ここでは、買電と都市ガスの単価を一次エネルギー・ベースで評価し、次式のように単価比 $\alpha$ を定義する。

$$\alpha = \frac{\varphi_{\text{buy}} [\text{Yen/kWh}] \times 0.35 / 0.86 [\text{Mcal/kWh}]}{\varphi_{\text{gas}} [\text{Yen/kg}] / 11.85 [\text{Mcal/kg}]} = 4.82 \varphi_{\text{buy}} / \varphi_{\text{gas}}$$

..... (6.26)

ただし、式(6.26)に示すように買電の発電段階から使用者端までの総合熱効率を35%としている。考察の対象とするガスタービン熱電併給システムでは電気

表6.1 システム構成機器の規模と台数

		System		
		A1	A2	B
Constituent equipment	Maximum output	Number	Number	Number
Gas turbine generator (GT)	$E_{GTn}=3.45 \text{ MW}$ $Q_{GTn}=6.79 \text{ Gcal/h}$ (Intake air temp. 17.5°C)	$N_{GT}=1$	$N_{GT}=2$	-
Waste heat boiler (BW)	$G_{BWn}=10.7 \text{ t/h}^*$	$N_{BW}=1$	$N_{BW}=2$	-
Auxiliary boiler (BA)	$G_{BAN}=15.0 \text{ t/h}^*$	$N_{BA}=3$	$N_{BA}=2$	$N_{BA}=3$
Steam absorption refrigerator (RS)	$Q_{RSn}=4.84 \text{ Gcal/h}$	$N_{RS}=6$	$N_{RS}=6$	$N_{RS}=6$
Heat exchanger (HE)	$Q_{HEN}=12.6 \text{ Gcal/h}$	$N_{HE}=2$	$N_{HE}=2$	$N_{HE}=2$

\* 5 kg/cm<sup>2</sup> gauge saturated steam



事業者への逆送電力を考慮しているが、電気事業者が熱電併給事業を兼業することを想定してこの売電の単価  $\varphi_{sell}$  が  $\varphi_{buy}$  に等しいものとし、運用計画において最小化すべき目的関数である単位時間当りの運用費を、式(6.22)の代りに

$$J = \varphi_{buy}(E_{buy} - E_{sell}) + \varphi_{gas}(F_{GT} + F_{BA}) \dots\dots\dots (6.27)$$

とする。

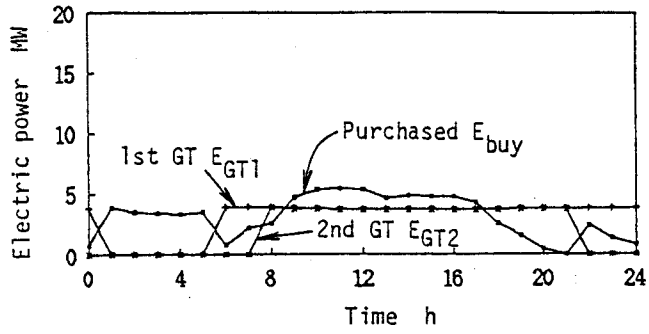
### 6.6.3 結果および考察

最適運用方策 システム構成機器の最適運用方策算定結果について述べる。

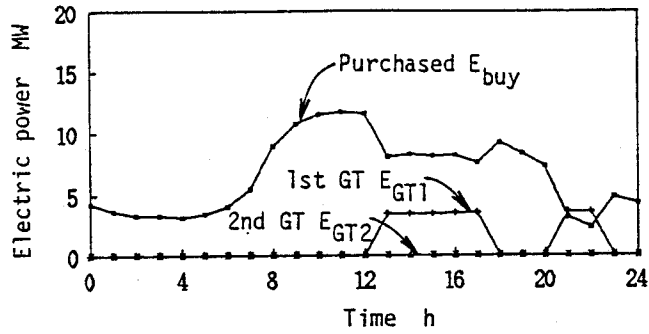
まず一例として、式(6.26)の買電・都市ガス単価比  $\alpha = 0.952$  の場合に、システムA2について算定した1月、4月、8月(平日)における買電とガスタービン発電機の最適運用パターンを、それぞれ図6.7(a)～(c)に示す。1月および8月には熱エネルギー需要量が多いため、ガスタービン発電機は夜間を除き二台とも高負荷レベルで運転されている。しかしながら、4月には熱エネルギー需要量が少いため、ガスタービン発電機は昼間の需要ピーク時に一台だけが運転されている。これより、夜間や中間期においてはガスタービン発電機の運転に伴って発生する廃熱を有効利用できないため、システムBのように電力を買電によって、また熱エネルギーを補助ボイラによってそれぞれ独立に供給する従来方式の運用方策の方が運用費が低くなることが判る。図6.8は、図6.7などの結果から、各ガスタービン発電機について次式で定義される負荷率  $l_{GTn}$  を月別に集計したものである。

$$l_{GTn} = (\sum_t E_{GTn}) / (\sum_t E_{GTn}) \times 100 \quad (n=1 \sim N_{GT}) \dots (6.28)$$

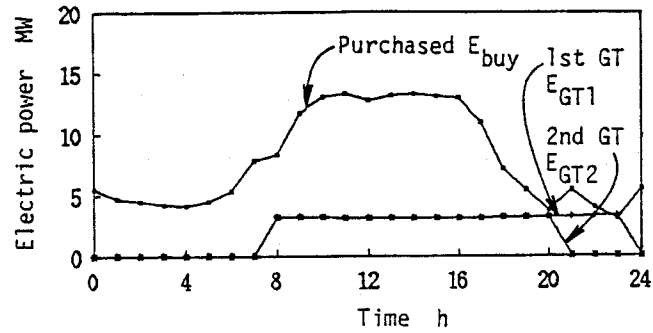
ここで、 $\sum_t$  は一箇月あるいは一年を通じての総和を示す。図6.8より、ガスタービン発電機の負荷率  $l_{GTn}$  は季節的に大きく変動することが判る。また、4月、5月、10月、11月の中間期には二台めのガスタービン発電機の負荷



(a) 1月(平日)



(b) 4月(平日)



(c) 8月(平日)

図6.7 買電およびガスタービン発電機の最適運用パターン

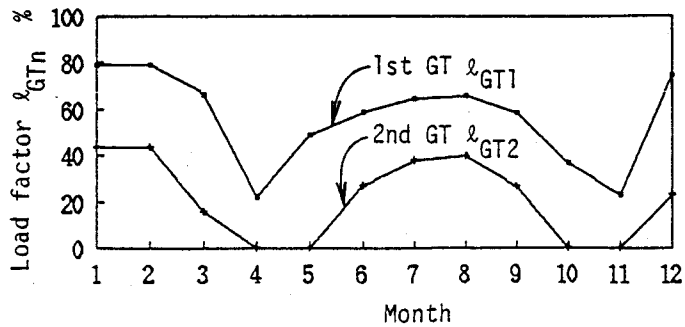
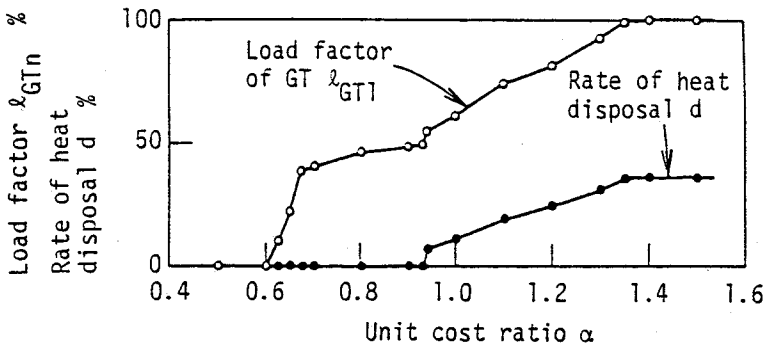


図6.8 ガスタービン発電機の負荷率の季節的变化

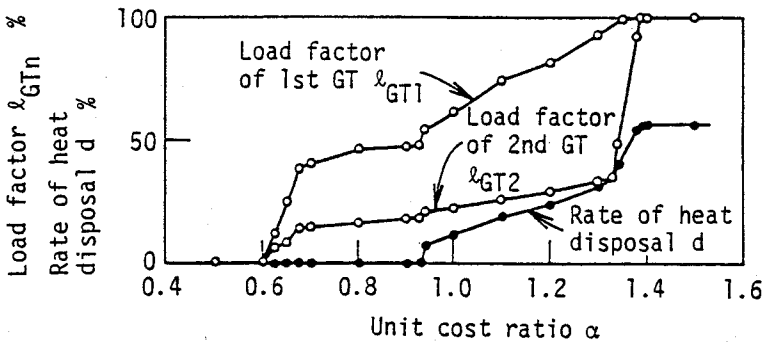
率  $\ell_{GT2}$  が零になっている。以上の結果が示すように、ガスタービン熱電併給システムの設計計画を行う場合には、エネルギー需要の季節的および時間的変動によるガスタービン発電機の負荷率の変動を十分に考慮する必要がある。

次に、買電および都市ガス単価の最適運用方策への影響について検討する。図6.9(a), (b)は、それぞれシステムA1, A2について式(6.28)で定義される年間のガスタービン発電機の負荷率  $\ell_{GTn}$ 、ならびに次式で定義される年間の廃熱回収量に対する余剰蒸気による熱廃棄率  $d$  と式(6.26)の買電・都市ガス単価比  $\alpha$  との関係を示したものである。

$$d = \left( \sum_t G_{disp} \right) / \left( \sum_t \sum_{n=1}^{N_{BW}} G_{Bwn} \right) \times 100 \dots\dots\dots (6.29)$$



(a) システムA1



(b) システムA2

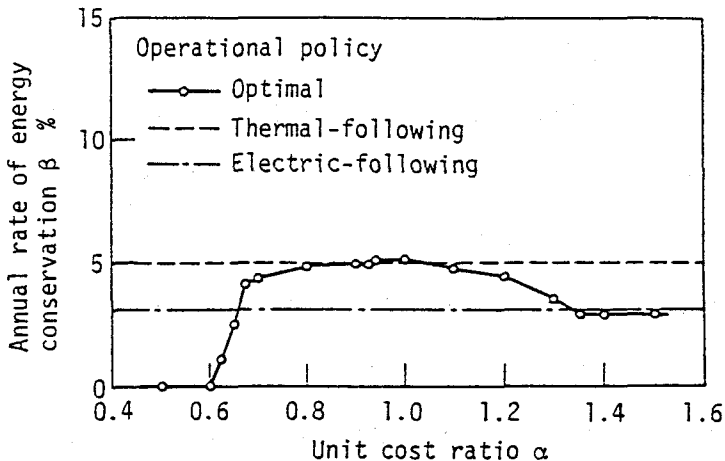
図6.9 ガスタービン発電機の年間負荷率および年間熱廃棄率と買電・都市ガス単価比の関係

システムA1においては、 $\alpha \leq 0.6$ の場合、ガスタービン発電機の負荷率 $l_{GT1}$ が零になっている。これは、買電単価が都市ガス単価と比較してきわめて低いために、従来方式の運用方策の方が得策であることを表している。 $0.6 < \alpha \leq 0.93$ の場合、 $l_{GT1}$ は増大するが、熱廃棄率 $d$ は零であり、年間を通じての結果から考えれば熱エネルギー需要に合わせた熱追従方式の運転となっている。 $0.94 \leq \alpha \leq 1.35$ の場合、熱廃棄が生じるにもかかわらず $l_{GT1}$ が増大する。この場合、熱エネルギー需要量が少ない時間帯には、熱追従方式、あるいは従来方式の運転となる。逆に熱エネルギー需要量が多い時間帯には、電力追従方式、あるいは逆送電力方式の運転となる。単価比 $\alpha$ の増大に伴い、後者の運転時間割合が増加し、その結果ガスタービン発電機の負荷率 $l_{GT1}$ および熱廃棄率 $d$ が増大する。これは、買電単価の上昇に伴って、熱廃棄量を増大させても発電を行った方が得策になることを示している。 $\alpha > 1.35$ の場合には $l_{GT1}$ が100%となり、飽和状態に達する。システムA2においては、 $\alpha \leq 1.33$ の場合、一台めのガスタービン発電機の負荷率 $l_{GT1}$ と熱廃棄率 $d$ はシステムA1の値にほとんど一致する。二台めのガスタービン発電機の負荷率 $l_{GT2}$ はかなり低く、二台めは熱廃棄をできる限り生じさせないように考慮しながら一台めを補う形で運用される。しかしながら、 $1.33 < \alpha \leq 1.38$ の範囲で二台めのガスタービン発電機の運用方策が熱追従方式から電力追従方式、あるいは逆送電力方式に切り替わり、 $l_{GT2}$ が急増する。さらに、 $\alpha > 1.38$ で二台めも飽和状態に達する。以上から、ガスタービン熱電併給システムの最適運用方策は、単価比 $\alpha$ の増大に伴って従来方式、熱追従方式、電力追従方式、逆送電力方式の順に互いに他の運転方式を部分的に採用しながら変化してゆくことが判る。

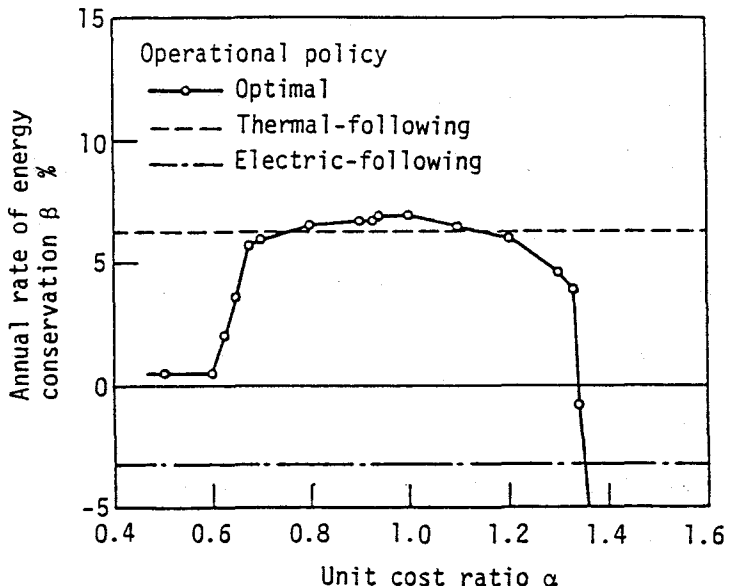
省エネルギー性      ここでは、最適運用方策をシステムの運用費を最小化するような運用方策と定義しているため、省エネルギー性の観点から最適な運用方策については別途検討する必要がある。しかしながら、省エネルギー性はシ

システムの有効性を表す重要な評価指標としてよく採用されており，ここでも得られた結果について省エネルギー性の立場から再評価をしてみる．省エネルギー性を表す量として，次式で定義されるシステムAのシステムBに対する年間省エネルギー率 $\beta$ について検討する．

$$\beta = (Q_{PB} - Q_{PA}) / Q_{PB} \times 100 \quad \dots\dots\dots (6.30)$$



(a) システムA1



(b) システムA2

図6.10 年間省エネルギー率と買電・都市ガス単価比の関係

ここで、 $Q_{pA}$ 、 $Q_{pB}$ はそれぞれシステムA、Bの運転に必要な年間の一次エネルギー量である。一次エネルギー量は、買電の発電段階に必要な入力エネルギー発熱量と都市ガスの発熱量との総和であり、次式で定義される。

$$Q_p = \sum_t \{ E_{buy} \times 0.86/0.35 + (F_{GT} + F_{BA}) \times 11.85 \} \dots\dots (6.31)$$

図6.10 (a), (b)は、最適運用方策、熱追従方式、および電力追従方式<sup>(27)</sup>によるシステムA1、A2の年間省エネルギー率 $\beta$ と単価比 $\alpha$ との関係をそれぞれ示したものである。熱追従方式および電力追従方式においては、運用方策が単価比 $\alpha$ の影響を受けず不変であるので、一次エネルギー量も不変で $\beta$ は一定となる。一方最適運用方策においては、 $\beta$ は $\alpha=1$ 付近で極大となっている。 $\alpha < 1$ の場合には、ガスタービン発電機の負荷率が低いためガスタービン熱電併給システムの寄与が小さく、 $\beta$ も低下する。一方 $\alpha > 1$ の場合には、熱廃棄率の増大により $\beta$ が低下する。 $\alpha=1$ の場合には一次エネルギー・ベースの買電と都市ガス単価が等しくなる。この時逆送電力が発生しない場合には、式(6.27)の「運用費の最小化」という目的関数は「一次エネルギー量の最小化」と等価となる。すなわち、逆送電力が発生しない場合の $\alpha=1$ における年間省エネルギー率 $\beta$ の値はシステムの最大年間省エネルギー率を表すことが判る。この事例では、 $\alpha=1$ における逆送電力量は非常に少なく、 $\alpha=1$ における $\beta$ の値はほぼその最大値を表していると考えられる。また、熱追従方式による年間省エネルギー率は最大年間省エネルギー率にほとんど等しくなっている。しかしながら、システムA2の電力追従方式による年間省エネルギー率は負となり、省エネルギー化は達成不可能となっている。

**経済性** 経済性を表す量として、まず次式で定義されるシステムAのシステムBに対する年間運用費減少率について検討する。

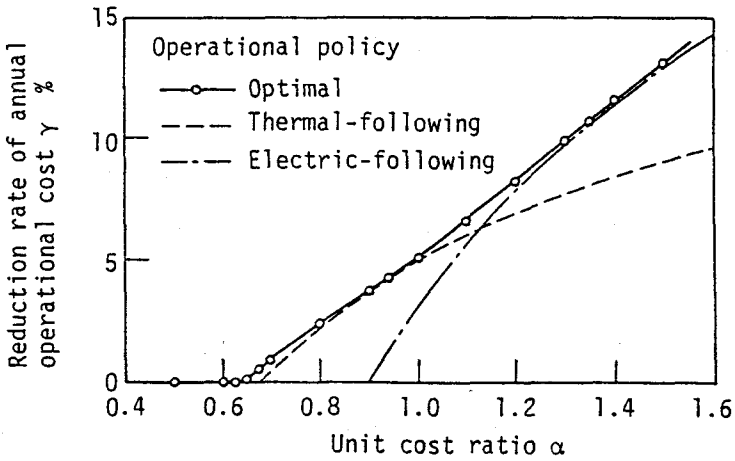
$$\gamma = (C_{vB} - C_{vA}) / C_{vB} \times 100 \dots\dots\dots (6.32)$$

ここで、 $C_{vA}$ 、 $C_{vB}$ はそれぞれシステムA、Bの年間運用費を示し、次式で定

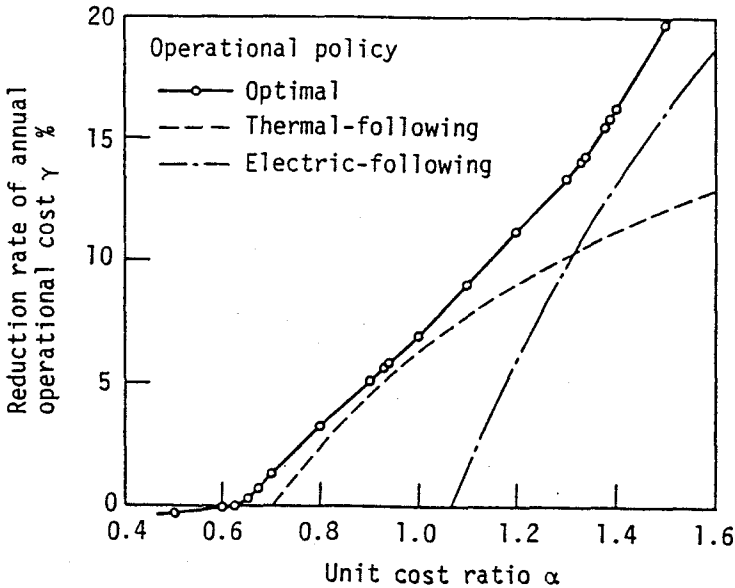
義される。

$$C_v = \sum_i J \dots\dots\dots (6.33)$$

図6.11(a), (b)は，最適運用方策，熱追従方式，および電力追従方式によるシステムA1, A2の年間運用費減少率 $\gamma$ と単価比 $\alpha$ との関係をそれぞれ示したものである。最適運用方策においては， $\alpha$ の増大に伴ってガスタービン熱電併給



(a) システムA1



(b) システムA2

図6.11 年間運用費減少率と買電・都市ガス単価比の関係

システムの寄与が増大し、 $\gamma$ も増大する。熱追従方式や電力追従方式は、上述のように各方式が最適運用方策に近づくような単価比の範囲では有効であるが、全体的に見れば最適運用方策と比較して運用費がかなり増加する。

次に長期的経済性について検討する。長期的経済性は買電や都市ガス単価、およびシステム構成機器の設備費によって大きな影響を受ける。ここでは、長期的経済性を表す量として、次式で定義されるシステムAのシステムBに対する年間総経費減少率 $\epsilon$ について検討する。

$$\epsilon = (C_{tB} - C_{tA}) / C_{tB} \times 100 \quad \dots\dots\dots (6.34)$$

ここで、 $C_{tA}$ 、 $C_{tB}$ はそれぞれシステムA、Bの年間総経費を示す。年間総経費はシステム構成機器の初期設備費と年間運用費から年価法<sup>(45)</sup>により算出する。図6.12は、一例として、最適運用方策に基づきある条件下で算出したシステムA1、A2の年間総経費減少率 $\epsilon$ と単価比 $\alpha$ との関係を示したものである。 $\alpha$ が小さい場合には、ガスタービン発電機の負荷率が低いため $\epsilon$ は負になっており、ガスタービン熱電併給システムの導入効果がないことを表している。し

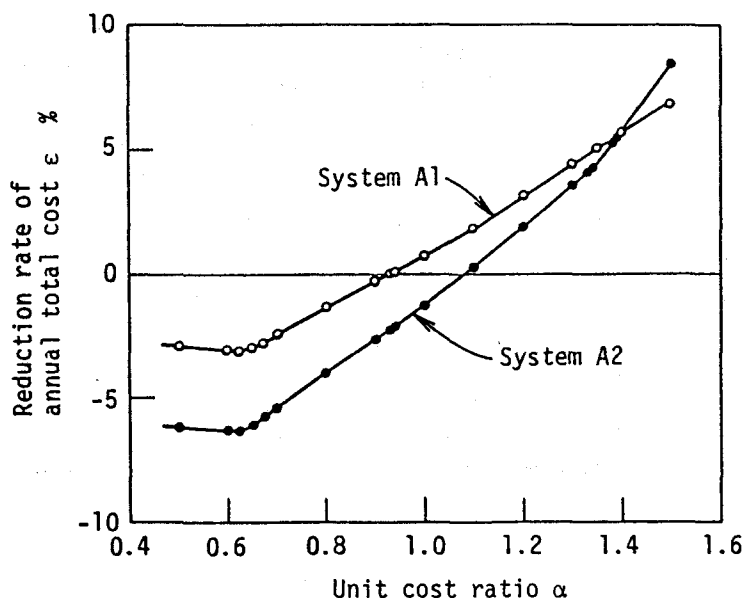


図6.12 年間総経費減少率と買電・都市ガス単価比の関係



かしながら、 $\alpha$ の増大に伴い導入効果が現れる。またこの例では、システムA2の二台めのガスタービン発電機の導入効果は、その負荷率が大幅に増大する $\alpha$ の大きな範囲で現れている。

以上、あるガスタービン熱電併給システムの導入計画事例に最適運用方策算定システムを適用し、運用方策の検討、ならびに省エネルギー性と経済性の評価を行った。その結果、上記項目の検討を合理的かつ容易に行えることが判明した。本節で得られた結果は、定性的にはその他のシステムに対しても成立すると考えられる。しかしながら、電力および熱エネルギー需要量は供給対象施設によって異なり、またそれによってシステム構成機器の規模を当然変更する必要がある。したがって、定量的な議論は各対象ごとに上述のような検討を積み重ねていった結果、可能となるであろう。また、本節では限られたシステム構成について検討したが、本最適運用方策算定システムは電動ターボ冷凍機などの他の機器を設置した場合、買電および都市ガス料金が季節的・時間的に変化する場合など、他のシステムに対する検討も行えるような柔軟性を有している。

## 6.7 結 言

本章では、ガスタービン発電・廃熱ボイラ方式熱電併給システムに対する最適運用計画手法を提示した。まず、経済性の観点からシステムの運用費を最小化するように構成機器の運用方策を決定するという最適運用計画問題を混合整数線形計画問題として定式化するとともに、年間の運用方策を詳細に検討するために最適運用方策算定システムを構築した。また、最適運用方策算定システムをあるガスタービン熱電併給システムの導入計画事例に適用し、最適運用方

策の算定，ならびに省エネルギー性および経済性の評価を行った．その結果，次の事柄が明らかになった．

- (1) 最適運用計画手法の適用によって，複雑な機器構成のシステムに対して機器運用方策を合理的かつ容易に決定できる．
- (2) 最適運用方策，省エネルギー性，および経済性は買電と都市ガスの料金によって大きな影響を受ける．
- (3) 最適運用方策は，熱追従方式や電力追従方式と比較して経済性に優れている．

なお，最適運用方策算定システムは，本章で検討対象としたシステム以外の運用計画にも適用できるような柔軟性を有している．また，実際の最適化計算において利用したシステム構成データの数式入力法，および従属変数の自動消去法は，本章の最適化問題だけではなく，一般的な問題に適用可能なものである．

## 第7章 結 論

本論文では、熱電併給システム本来の目的であるエネルギー有効利用を達成するための一つの重要課題である設計および運用計画に対して、シンセシスの一手段として最適化法を適用した計画手法を構築した。熱電併給システムの設計および運用計画においてはシステムの機器構成や機器運用方策の代替性に関する組合せ問題的性質が強く、本論文では計画問題を組合せ最適化問題として定式化し、いくつかの組合せ最適化法を適用した解法を提案した。また最適計画手法の有効性を検証するために、本手法を実際問題に適用した計画事例を示した。以下に各章で得られた成果を総括する。

まず第2章では、熱電併給システムの設計および運用計画において考慮すべき重要課題を明らかにした。また、熱電併給システムの設計および運用計画に対して従来から採用されてきた方法、および各種プラント・システムに対して従来から提案されてきた最適計画手法を展望し、その問題点を指摘した。さらに、本論文で提示する最適計画手法の基本的考え方について述べた。

第3章では、熱電併給システムの設計および運用計画を合理的かつ容易に実行するために必要となる組合せ最適化法について述べた。まず考え方の基礎となる列挙法と分枝限定法について概説した。次に、運用計画に適用する混合整数線形計画法のアルゴリズムについて述べるとともに、設計計画に適用するためにそれを混合離散変数線形計画法および混合離散変数非線形計画法のアルゴリズムに拡張した。さらに、効率よく最適化計算を行う目的で変数の階層的関係を考慮した分枝限定法のアルゴリズムを提案した。

第4章では、熱電併給システムの設計計画において、機器の最適構成と最適

運用方策を階層的に決定する一つの最適設計計画手法を提示した。最適設計計画問題を機器構成問題と最適運用計画問題に分離し、それぞれ列挙法と混合整数線形計画法のアルゴリズムを適用し、効率よく最適解を導出できることを示した。また設計項目が異なる二つのLNG船熱電併給システムの設計計画に本手法を適用した結果、長期的経済性の観点から合理的にしかも容易に設計項目を決定できることを確認した。

第5章では、熱電併給システムの設計計画において、機器の最適構成と最適運用方策を同時に決定する一つの最適設計計画手法を提示した。構成機器に対して機器規模を表す離散変数を導入し、機器の性能特性と設備費をこの離散変数の関数として表すことによって、最適設計計画問題を混合離散変数計画問題として定式化した。また線形問題および非線形問題としての定式化を示し、解法としてそれぞれ混合離散変数線形計画法および混合離散変数非線形計画法のアルゴリズムを適用した。その際、変数間の階層的關係に着目し、変数の階層的關係を考慮した分枝限定法のアルゴリズムを組み込んだ。さらに設計計画事例により、本最適設計計画手法の適用によって機器の最適構成と最適運用方策を同時に効率よく決定できることを確認し、本手法の有効性を示した。

第6章では、熱電併給システムの運用計画についてより詳細に検討するため、ガスタービン発電・廃熱ボイラ方式を計画事例として最適運用計画手法を提示した。最適運用計画問題を混合整数線形計画問題として定式化するとともに、年間の運用方策を組織的に決定するために最適運用方策算定システムを構築した。また、最適運用方策算定システムをあるガスタービン熱電併給システムの導入計画に適用し、最適運用方策の算定、ならびに省エネルギー性および経済性の評価を行った。その結果、最適運用計画手法の適用によって複雑な機器構成のシステムに対して機器運用方策を合理的かつ容易に決定できることを確認した。また最適運用方策、省エネルギー性、および経済性が入力エネルギーの

コストによっていかに影響を受けるかが判明した。さらに、最適運用方策は熱追従方式や電力追従方式と比較して経済性に優れていることが判明した。

以上のように、本論文で提示した最適計画手法の適用により、従来シミュレーション的方法などに基づき試行錯誤的に行われてきた熱電併給システムの設計および運用計画を合理的かつ容易に行うことが可能となる。また、設計条件などの変更による熱電併給システムの設計項目の決定を柔軟に支援することが可能となる。なお、本論文で提示した最適計画手法は各種プラント・システムの設計および運用計画にも適用可能なものであり、より高度なプラント・システム計画用CADシステムを開発するにあたり中心的役割を果たすものと考えられる。また、最適計画手法の一部として開発した種々の組合せ最適化法のアルゴリズムは、一般的な最適化問題にも適用可能で汎用性を有するものである。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり，終始御厚意あふれる御指導および御鞭撻を賜わりました大阪大学工学部産業機械工学科 赤木新介教授に心より深く感謝の意を表します。

本論文を作成するにあたり，御懇切な御校閲と御助言をいただきました大阪大学工学部電気工学科 鈴木 胖 教授，ならびに電子制御機械工学科 大川善邦教授，白井良明教授，木村英紀教授に深く感謝致します。

本研究を進めるにあたり，終始適切な御指導と御助言をいただきました大阪大学工学部産業機械工学科 伊東弘一助教授に深く感謝致します。

また，実システムに関して御教示いただきました三菱重工業(株)本社船舶技術部 糸山直之氏，ならびに関西電力(株)総合技術研究所 松本芳一氏ほかの各位に感謝の意を表します。

さらに，最適化計算を行うにあたり御協力いただきました大阪大学工学部産業機械工学科卒業生 武村泰夫君，曾家幹雄君，阿部裕司君を始め，システム設計工学講座の各位に感謝致します。

## 参考文献

- (1) 茅, 計測と制御, 26-1(昭62), 51.
- (2) 日本コージェネレーション研究会, コージェネレーション, 1-1(昭61), 102.
- (3) 虎頭, 空気調和・衛生工学, 61-2(昭62), 131.
- (4) エネルギー変換懇話会編, エネルギー利用工学, (昭55), 207, オーム社.
- (5) 日本ガス協会編, ガスエンジン(ガスタービン)トータルエネルギーシステム技術研究報告書, (昭59), 9, 日本ガス協会.
- (6) 田中, 日本船用機関学会誌, 15-2(昭55), 103.
- (7) 戸田, 日本船用機関学会誌, 15-2(昭55), 183.
- (8) Jo, T., ほか3名, Proc. of the 1987 Tokyo International Gas Turbine Congress, I (1987), 125.
- (9) 茅, 日本機械学会誌, 90-823(昭62), 782.
- (10) 水谷, 複合発電技術, (昭61), 1, 大阪大学特別講演資料.
- (11) Larson, E. D. and Williams, R. H., Trans. of the ASME, J. of Engineering for Gas Turbines and Power, 109-1(1987), 55.
- (12) 井上・高田編, ビルのガスエンジンシステム, (昭59), 89, 丸善.
- (13) 省エネルギーセンター編, 分散型電源システムの最適化に関する調査, (昭60), 61, 省エネルギーセンター.
- (14) 早川監修, コージェネレーションシステム, (昭60), 206, シーエムシー.
- (15) 今野, 整数計画法, (昭56), 産業図書.
- (16) 今野・鈴木編, 整数計画法と組合せ最適化, (昭57), 日科技連.
- (17) 茨木, 組合せ最適化, (昭58), 産業図書.
- (18) 西山・ほか5名, 三菱重工技報, 18-2(昭56), 214.
- (19) Papoulias, S. A. and Grossmann, I. E., Computers and Chemical Engineering, 7-6(1983), 695.
- (20) 関西造船協会造機研究委員会編, 商船機関部計画, (昭42), 51, 海文堂.
- (21) 高木・上田, 日本船用機関学会誌, 16-9(昭56), 782.

- (22) 船の科学編集部, 船の科学, 35-10(昭57), 66.
- (23) 加藤, 造船技術, 12-5(昭49), 67.
- (24) Kvamsdal, R. S. and Koren, S., Gastech 81 Conference, 1-4(1981).
- (25) 山川, 日本造船学会誌, 675(昭60), 595.
- (26) 大阪科学技術センター編, 都市トータルエネルギーシステム -ニュー・エアポート・タウンを対象とした実証的研究- (第2巻 地域熱供給システム), (昭56), 61, 大阪科学技術センター.
- (27) 牧村, コージェネレーションセミナー資料集, (昭61), 1-(1)-1, 日本コージェネレーション研究会.
- (28) 垂水・ほか3名, 建築環境工学論文集, 6(昭59), 177.
- (29) 熊谷・ほか2名, エネルギー・資源研究会第3回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集, (昭61), 227.
- (30) 猪岡, コージェネレーションセミナー資料集, (昭61), 1-(2)-1, 日本コージェネレーション研究会.
- (31) Nath, R. and Holliday, J. F., Mechanical Engineering, 107-2(1985), 44.
- (32) Ducrocq, J. C., RAIRO Automatique-Productique Informatique Industrielle, 19-4(1985), 403.
- (33) 三宮・ほか4名, 計測自動制御学会論文集, 21-7(昭60), 747.
- (34) 小松・玉丸, 三菱重工技報, 14-1(昭52), 7.
- (35) 加藤・鈴木, 電気学会研究会資料, SC-80-16(昭55), 1.
- (36) 伊藤・ほか3名, システムと制御, 24-7(昭55), 453.
- (37) 赤木・ほか2名, 日本機械学会論文集C編, 50-449(昭59), 222.
- (38) 伊東・ほか2名, 計測自動制御学会論文集, 20-1(昭59), 71.
- (39) 伊東・ほか2名, 日本機械学会論文集C編, 51-467(昭60), 1663.
- (40) 朴・ほか3名, 電気学会論文誌B, 106-3(昭61), 193.
- (41) Caldon, R., IEE Conference Publication, 233(1984), 292.
- (42) Johnson, S. M., ほか2名, CHEMECA 85, (1985), 371.
- (43) 小沢・ほか3名, 昭和57年電気学会全国大会講演論文集, (昭57), 1809.
- (44) 江原・ほか2名, 日本機械学会講演論文集, 820-13(昭57), 271.
- (45) 関根, 電力系統工学, (昭51), 274, 電気書院.



- (46) O'hEigeartaigh, M., ほか2名(Ed.), Combinatorial Optimization Annotated Bibliographies, (1985), John Wiley & Sons.
- (47) von Randow, R. (Ed.), Integer Programming and Related Areas A Classified Bibliography 1981-1984, (1985), Springer-Verlag.
- (48) Garfinkel, R. S. and Nemhauser, G. L., Integer Programming, (1972), 111, John Wiley & Sons.
- (49) 参考文献(17)の16ページ.
- (50) Kuester, J. L. and Mize, J. H., Optimization Techniques with Fortran, (1973), 66, McGraw-Hill.
- (51) Himmelblau, D. M., Applied Nonlinear Programming, (1972), 274, McGraw-Hill.
- (52) 今野・山下, 非線形計画法, (昭53), 274, 日科技連.
- (53) 参考文献(16)の18ページ.
- (54) Land, A. H. and Doig, A. G., *Econometrica*, 28-3(1960), 497.
- (55) Dantzig, G. B. (小山訳), 線形計画法とその周辺, (昭58), 301, ホルト・サウンダース.
- (56) 関根, 数理計画法, (昭51), 74, 岩波書店.
- (57) 参考文献(16)の48ページ.
- (58) 参考文献(17)の131ページ.
- (59) 川合, PADプログラミング, (昭60), 岩波書店.
- (60) Abadie, J. (Ed.), Nonlinear Programming, (1967), 121, North-Holland.
- (61) 参考文献(52)の54ページ.
- (62) 参考文献(17)の132ページ.
- (63) 日本機械学会編, 機械工学便覧, (昭52), 13-85, 日本機械学会.
- (64) 中山・ほか2名, 三菱重工技報, 21-2(昭59), 381.
- (65) 赤木, エンジニアリングシステム設計工学, (昭57), 91, 共立出版.
- (66) 浜野, コージェネレーションセミナー資料集, (昭61), 2-(1)-1, 日本コージェネレーション研究会.
- (67) 参考文献(55)の52ページ.

## 関連発表論文

- (1) 赤木・横山・伊東, 混合整数線形計画法に基づくLNG船機関部システムの最適計画, 日本機械学会論文集C編, 52-476(昭61), 1469.
- (2) 赤木・横山・伊東, LNG船推進プラントの最適計画法—ディーゼル・ガスタービン複合プラントを例として—, 関西造船協会誌, 203(昭61), 73.
- (3) 赤木・横山・伊東, 混合離散変数線形計画法に基づくプラントの最適設計計画, 日本機械学会論文集C編, 53-487(昭62), 792.
- (4) 横山・赤木・伊東, 混合離散変数非線形計画法に基づくプラントの一最適設計計画法, 日本機械学会論文集C編, 53-491(昭62), 1614.
- (5) 伊東・横山・松本・赤木, ガスタービン・コージェネレーション・システムの設計計画法 (第1報, ガスタービン発電・廃熱ボイラ方式の最適運用計画モデル), 日本機械学会論文集C編, 54-499(昭63), 773.
- (6) 横山・伊東・赤木, ガスタービン・コージェネレーション・システムの設計計画法 (第2報, 最適運用計画モデルに基づく経済性および省エネルギー性評価), 日本機械学会論文集C編, (昭63), 掲載予定.
- (7) Akagi, S., Yokoyama, R., and Ito, K., Optimal Operation of an Energy Saving Combined Plant for LNG Carriers, Proceedings of the Japan-U.S.A. Symposium on Flexible Automation, (1986), 811.
- (8) Ito, K., Yokoyama, R., Horii, S., Matsumoto, Y., and Akagi, S., An Optimal Operational Planning Model for Gas Turbine Cogeneration Plants, Proceedings of the 1987 Tokyo International Gas Turbine Congress, I(1987), 97.

- (9) Ito, K., Yokoyama, R., Akagi, S., and Matsumoto, Y., Influence of Fuel Cost on the Operation of a Gas Turbine-Waste Heat Boiler Cogeneration Plant, Proceedings of the 1988 ASME COGEN-TURBO Symposium and Exposition, (1988), To be published.
- (10) Ito, K., Yokoyama, R., Yamaguchi, T., Matsumoto, Y., and Akagi, S., Optimal Operational Planning of a Gas Turbine Combined Heat and Power Plant Based on the Mixed-Integer Programming, Proceedings of the IFAC Symposium on Power Systems, (1988), To be published.