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*

赤木新介**, 横山良平**, 伊東弘一**

An Optimal Planning Method of an LNG Carrier's Energy Supply Plant
Based on Mixed-Integer Linear Programming

by Shinsuke AKAGI, Ryohei YOKOYAMA, and Koichi ITO

The objective of this paper is to develop an optimal planning method for the initial design of an energy supply plant of an LNG carrier. With the objective of minimizing the total annual cost, both the scales and numbers of various equipment of the above plant are investigated in order to be planned optimally together with operational policies for several energy demands of steam, electric power and propulsion. This planning problem is first formulated as a mixed-integer linear programming one, by adopting zero-one integer variables indicating the equipment's selection or the on/off status of operation together with continuous variables indicating the operational level of each equipment. Then, the optimal selection and operational policies of the equipment are determined numerically by adopting the branch and bound algorithm. Lastly, the effectiveness of the planning method proposed here is ascertained through a numerical study for an energy supply plant of actual scale.

Key Words: Design Engineering, Ship, Energy Supply Plant, Mixed-Integer Linear Programming, Equipment Selection, Operational Policy, LNG Carrier

1. 緒 言

現在 LNG 船機関部システムに多く採用されている推進方式は、航海中常時タンクから発生するボイルオフガスを主ボイラの燃料として重油とともに燃焼させ、発生する蒸気を主タービンに導いて推進力を得るというものである⁽¹⁾。またこのシステムにおける各種機器への熱供給にはボイラから発生する蒸気を用い、電力供給は蒸気駆動のターボ発電機と重油を燃焼させるディーゼル発電機によって行われている⁽²⁾。

上記システムの基本計画段階における重要課題の一つは、熱、電力および推進力などのエネルギー需要を満足するように、システムを構成する各種機器の規模や台数などの設計要目を最適とすることである。しかしながら、構成機器の規模と台数の選定においては組合せに関する非常に多くの代替案を比較検討する必要があるため、その中から最適計画案を選定することはきわめて難しくなる。またこのような最適計画を行うための基準には、機器の選定によって定められる設備費と選定された機器の運転条件に依存する運用費とを合

せた総経費が用いられるのが普通である。このような場合、機器の選定にあたっては、運航状況によって変動するエネルギー需要量や海象によって変動するボイルオフガス発生量に対する機器の最適運転条件を考慮し、長期的経済性の観点からシステムの設計計画を行うことが必要である。このことも最適計画案の選定をいっそう困難なものにする要因になっている。

本研究では、上述の LNG 船機関部システムを対象とし、長期的経済性の観点から各種構成機器の運転条件を考慮しながら機器の選定を行うための最適計画手法について考察する。まず機器の選定と運転・停止条件を表すために 0-1 整数変数を導入し、この設計計画問題を混合整数線形計画問題⁽³⁾として定式化する。また分枝限定法⁽⁴⁾を適用した混合整数線形計画法⁽⁵⁾を用いて最適化を行い、最適機器構成と最適運転条件を決定する。最後に、実在規模の機関部システムに対する設計計画事例によって本手法の有効性を検証する。

2. 対象システムの記述

2.1 システム構成 図 1 に示す LNG 船機関部システムを考察の対象とする。機器に付した記号は、それぞれ MT: 主タービン, MB: 主ボイラ, DG: ディーゼル発電機, TG: ターボ発電機, CL: ローデュ

* 昭和 60 年 3 月 19 日 関西支部第 60 期定時総会講演会において講演, 原稿受付 昭和 60 年 4 月 25 日。

** 正員, 大阪大学工学部 (〒565 吹田市山田丘 2-1)。

ーティ圧縮機, CH: ハイデューティ圧縮機, および H: ヒータを示す。図 1 中の実線, 一点鎖線および破線はそれぞれ蒸気, 電力および燃料の流れを示す。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。ボイラから発生する過熱蒸気は主タービンに導かれ推進力を発生する。また緩熱蒸気は, ターボ発電機などの各種機器の動力およびその他の熱エネルギーとして用いられる。電力はターボ発電機と 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。なお図 1 に示す物理量を表す記号の意味は以下のとおりである。

E : 電力需要量 kW

E_D : ディーゼル発電機発電量 kW

E_T : ターボ発電機発電量 kW

F_A : ディーゼル発電機 A 重油消費量 kg/h

F_B : ボイルオフガス発生量 kg/h

F_{BR} : ボイルオフガスの陸上返送量 kg/h

F_{BS} : ボイルオフガスのボイラ供給量 kg/h

F_C : ボイラ C 重油消費量 kg/h

G : 蒸気需要量 kg/h

G_A : ボイラ緩熱蒸気発生量 kg/h

G_{CH} : ハイデューティ圧縮機蒸気消費量 kg/h

G_{CL} : ローデューティ圧縮機蒸気消費量 kg/h

G_H : ヒータ蒸気消費量 kg/h

G_P : ボイラ過熱蒸気発生量 kg/h

G_T : ターボ発電機蒸気消費量 kg/h

P : 推進力 kW

図 1 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, LNG タンクの防熱材厚さを一定とするとボイルオフガスの最大発生量を予測することができ, 圧縮機とヒータの規模が定められる。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, 本研究では圧縮機, ヒータ, 主タービンおよび主ボイラの規模の選定は設計項目から除外し, これらの機器の運転条件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転条件の決定を設計項目として考察する。ディーゼル発電機に関しては K_D 種類の規模が異なる機器を考え, 同規模の機器の組合せを許して最大 N_D 台まで設置可能とする。ターボ発電機についても同様に, K_T 種類の規模が異なる機器の中から最大 N_T 台まで設置可能とする。ここで第 i 番めの規模(以下, 第 i 規模と呼ぶ)のディーゼル発電機またはターボ発電機の第 j 台めをシステムの構成機器として設置するかどうかを, それぞれ 0-1 整数変数 η_{Dij} または η_{Tij} によって表すものとする。すなわち

$$\eta_{Dij} = \begin{cases} 0: \text{第 } i \text{ 規模のディーゼル発電機} \\ \quad \text{の第 } j \text{ 台めを設置しない。} & \dots (1) \\ 1: \text{上記機器を設置する。} \end{cases}$$

($i=1, 2, \dots, K_D; j=1, 2, \dots, N_D$)

$$\eta_{Tij} = \begin{cases} 0: \text{第 } i \text{ 規模のターボ発電機の} \\ \quad \text{第 } j \text{ 台めを設置しない。} & \dots (2) \\ 1: \text{上記機器を設置する。} \end{cases}$$

($i=1, 2, \dots, K_T; j=1, 2, \dots, N_T$)

このとき, 上述の機器構成条件から次式が成立する。

$$\sum_{i=1}^{K_D} \sum_{j=1}^{N_D} \eta_{Dij} \leq N_D \dots (3)$$

$$\sum_{i=1}^{K_T} \sum_{j=1}^{N_T} \eta_{Tij} \leq N_T \dots (4)$$

図 1 LNG 船機関部システム

さらに、構成機器の組合せに関する重複を除くために、次の制約条件を定める。

$$\eta_{Di1} \geq \eta_{Di2} \geq \dots \geq \eta_{DiN_D} \quad (i=1, 2, \dots, K_D) \quad (5)$$

$$\eta_{Ti1} \geq \eta_{Ti2} \geq \dots \geq \eta_{TiN_T} \quad (i=1, 2, \dots, K_T) \quad (6)$$

2.2 エネルギー需給関係 2.1 節で定義した整数変数 η_{Dij} に対応づけて第 i 規模のディーゼル発電機の第 j 台めの A 重油消費量を F_{Aij} 、発電量を E_{Dij} とする。また η_{Tij} に対応づけて第 i 規模のターボ発電機の第 j 台めの蒸気消費量を G_{Tij} 、発電量を E_{Tij} とする。このとき、図 1 のシステムの各エネルギーの需給関係は次のように表される。

緩熱蒸気：

$$G \leq G_A - (G_{CL} + G_{CH} + G_H + G_T) \quad (7)$$

$$G_T = \sum_{i=1}^{K_T} \sum_{j=1}^{N_T} G_{Tij} \quad (8)$$

電力：

$$E \leq E_D + E_T \quad (9)$$

$$E_D = \sum_{i=1}^{K_D} \sum_{j=1}^{N_D} E_{Dij} \quad (10)$$

$$E_T = \sum_{i=1}^{K_T} \sum_{j=1}^{N_T} E_{Tij} \quad (11)$$

A 重油消費量：

$$F_A = \sum_{i=1}^{K_D} \sum_{j=1}^{N_D} F_{Aij} \quad (12)$$

ボイルオフガス流量：

$$F_B = F_{BS} + F_{BR} \quad (13)$$

2.3 機器性能 構成機器の性能特性の一つを表す入出力関係は、蒸気タービンにおけるウィランス線⁽⁶⁾のように一般に一次式で近似できることが多い。本研究においても、第一次近似としてすべての機器の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 2 は入力 x と出力 y の関係の一例を示したものである。図 2 に示すように、出力が低下するにつれて出力と入力の比、すなわち機器効率が低下する場合が一般的である。また最大出力 $\bar{y}$ と最小出力 $\underline{y}$ が存在し、これらの間の出力に対する運転のみが許されるものとする。機器の停止状態は原点で表される。ここで

図 2 機器性能特性の近似

機器を運転するか、あるいは停止するかを表す 0-1 整数変数 δ を導入すると、性能特性は次式で与えられる。

$$y = px + q\delta \quad (14)$$

$$\underline{x}\delta \leq x \leq \bar{x}\delta \quad (15)$$

$$\delta = \begin{cases} 0: \text{機器を停止する。} \\ 1: \text{機器を運転する。} \end{cases} \quad (16)$$

機器構成の代替性を考慮するディーゼル発電機とターボ発電機の性能特性は、式(14)～(16)に従って以下のように設定する。

$$E_{Dij} = p_{Di}F_{Aij} + q_{Di}\delta_{Dij} \quad (17)$$

$$F_{Ai}\delta_{Dij} \leq F_{Aij} \leq \bar{F}_{Ai}\delta_{Dij} \quad (18)$$

$$\delta_{Dij} = \begin{cases} 0: \text{第 } i \text{ 規模のディーゼル発電機} \\ \quad \text{の第 } j \text{ 台めを停止する。} \\ 1: \text{上記機器を運転する。} \end{cases} \quad (19)$$

$$(i=1, 2, \dots, K_D; j=1, 2, \dots, N_D)$$

$$E_{Tij} = p_{Ti}G_{Tij} + q_{Ti}\delta_{Tij} \quad (20)$$

$$G_{Ti}\delta_{Tij} \leq G_{Tij} \leq \bar{G}_{Ti}\delta_{Tij} \quad (21)$$

$$\delta_{Tij} = \begin{cases} 0: \text{第 } i \text{ 規模のターボ発電機の} \\ \quad \text{第 } j \text{ 台めを停止する。} \\ 1: \text{上記機器を運転する。} \end{cases} \quad (22)$$

$$(i=1, 2, \dots, K_T; j=1, 2, \dots, N_T)$$

ここに、 p_{Di} と q_{Di} は第 i 規模のディーゼル発電機の性能特性の傾きと切片を、 F_{Ai} と $\bar{F}_{Ai}$ は最小出力と最大出力に対応する A 重油消費量をそれぞれ表す。同様に、 p_{Ti} と q_{Ti} は第 i 規模のターボ発電機の性能特性の傾きと切片を、 G_{Ti} と $\bar{G}_{Ti}$ は最小出力と最大出力に対応する蒸気消費量をそれぞれ表す。ただし、これらの機器はシステム構成機器として設置された場合のみ運転することができるので、次式が成立する必要がある。

$$\delta_{Dij} \leq \eta_{Dij} \quad (23)$$

$$\delta_{Tij} \leq \eta_{Tij} \quad (24)$$

また 2.1 節で述べたように、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して、これらの機器の性能特性をそれぞれ次のように表す。

$$F_{BS} = \begin{cases} p_{CL}G_{CL} + q_{CL} & (\underline{G}_{CL} \leq G_{CL} \leq \bar{G}_{CL}) \\ 0 & (G_{CL} = 0) \end{cases} \quad (25)$$

$$F_{BR} = \begin{cases} p_{CH}G_{CH} + q_{CH} & (\underline{G}_{CH} \leq G_{CH} \leq \bar{G}_{CH}) \\ 0 & (G_{CH} = 0) \end{cases} \quad (26)$$

$$F_{BS} = p_H G_H \quad (27)$$

$$P = \begin{cases} p_{MT}G_P + q_{MT} & (G_P \leq G_P \leq \bar{G}_P) \\ 0 & (G_P = 0) \end{cases} \dots\dots (28)$$

$$G_P + p_{MB}G_A = q_{MB}F_{BS} + r_{MB}F_C \dots\dots\dots (29)$$

ここで、 p, q および r は各機器の性能特性を表す係数である。また $(\underline{\quad})$ および $(\bar{\quad})$ は最小出力と最大出力に対応する値を示す。

3. 最適計画手法

3.1 最適計画問題の定式化 機関部システムの最適計画を行うためには、長期的経済性の観点からシステムの機器構成を決定することが重要である。本研究では、設置される機器の設備費だけでなく、設定された機器耐用年数の期間における運用費も考慮に入れ、総経費の最小化を計る。このような場合、LNG 船の運航状況によるエネルギー需要量の変動や海象の変化によるボイロフガス発生量の変動を考慮する必要があり、ここでは一般の船舶の機関部システムの計画に広く採用されている以下の方法⁽⁷⁾を適用する。すなわち、LNG 船の航海サイクルを航海、出入港、停泊および荷役などのようにいくつかの代表的な航海パターンに大別し、各パターンに対して年間相当運転時間ならびに蒸気、電力および推進力などのエネルギー需要量とボイロフガス発生量を推定する。ここで、各航海パターンに対して式(7)～(13)、(17)～(29)が成立する必要があるが、以下では各記号に第 (m) 番めの航海パターンであることを示す上付き添字 (m) を付け、パターンを区別する。

まず設備費 J_f は、年価法⁽⁸⁾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

$$J_f = R \left(\sum_{i=1}^{K_D} \sum_{j=1}^{N_D} C_{Di} \eta_{Dij} + \sum_{i=1}^{K_T} \sum_{j=1}^{N_T} C_{Ti} \eta_{Tij} \right) \dots\dots (30)$$

ここに、 C_{Di} および C_{Ti} はそれぞれ第 i 規模のディーゼル発電機およびターボ発電機の初期設備費を表す。また R は資本回収係数であり、機器耐用年数を a 、年間利率を ρ としたとき

$$R = \rho(1+\rho)^a / \{(1+\rho)^a - 1\} \dots\dots\dots (31)$$

として与えられる。一方、運用費として年間に消費される A 重油と C 重油のコストを考える。機器の運転条件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。第 m 番めの航海パターンの年間相当運転時間を $T^{(m)}$ とし、A 重油および C 重油の単位重量当たりのコストをそれぞれ φ_A および φ_C とすると、運用費 J_v は

$$J_v = \sum_{m=1}^M (\varphi_A F_A^{(m)} + \varphi_C F_C^{(m)}) T^{(m)} \dots\dots\dots (32)$$

となる。ただし M は航海パターン数である。したがって、目的関数である年間総経費は式(30)、(32)から

$$J = J_f + J_v \dots\dots\dots (33)$$

として与えられる。

結果として、本研究の最適計画問題は、各航海パターンに対して成立するエネルギー需要関係を表す式(7)～(13)と機器性能を表す式(17)～(29)、および機器構成条件を表す式(1)～(6)の制約条件のもとに、式(33)で与えられる目的関数 J を最小化するように、機器選定を表す 0-1 整数変数 η_{Dij}, η_{Tij} 、機器の運転・停止を表す 0-1 整数変数 $\delta_{Dij}, \delta_{Tij}$ 、および機器の運転レベルを表す種々の実数変数の値を決定するという混合整数線形計画問題⁽⁹⁾に帰着する。

3.2 最適計画問題の解法 2 章および 3.1 節で定式化された最適計画問題の解法として、本研究では分枝限定法⁽⁴⁾を適用した混合整数線形計画法を採用する。しかしながら、構成機器の数および航海パターンの数が増大するにつれて整数変数の数が大幅に増大するので、この解法を直接適用する場合には非常に計算時間がかかる。また機器選定および機器の運転・停止を表す整数変数間には式(23)、(24)で表される階層的關係が存在するにもかかわらず、最適化計算においてはこれらの変数を特別に区別することができない。このことも計算時間を増大させる一原因と考えられる。したがって、本研究では分枝限定法を直接適用せず、整数変数の階層的性質を利用し図 3 に示す手順に従って最適化計算を行う。まず、式(1)～(6)を満足する

図 3 最適計画の手順

ように η_{Dij} , η_{Tij} の値を決定し、ディーゼル発電機とターボ発電機のシステム構成を行う。ここで、このシステム構成によって式(9)~(11)が満足される可能性はあるか、換言すれば発電機の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、満足されるシステム構成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(7)~(13)および式(17)~(29)を制約条件とし、単位時間当た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、構成機器の最適運転条件を求める。最後に、すでに決定されている構成機器の設備費とすべての航海パターンにおける最適運転条件に対応する運用費とを求め、式(33)の目的関数 J の値を決定する。以上の計算を η_{Dij} , η_{Tij} の値のすべての組合せについて行うことにより J の最小値を求め、それに対応する解を最適解とする。この計算手順においては、各航海パターンについて独立に最適運用計画問題を解く際に混合整数線形計画法が適用される。

分枝限定法に基づく混合整数線形計画法には Land-Doig の方法⁽⁵⁾を適用する。分枝限定法においては分枝変数と分枝頂点の選択が計算時間に大きな影響を及ぼすことが知られている⁽³⁾。本研究で採用した方法では、ある変数をそれより大きくない最大の整数とそれより小さくない最小の整数に固定した場合の目的関数の増加量の差が最大となるような変数を分枝変数として選択する。また分枝頂点の選択には奥行き優先則⁽³⁾を用いている。その他のアルゴリズムの詳細は省略する。

4. 設計計画事例

本章では、2章および3章において提示した最適計画手法を実在規模の LNG 船機関部システムの計画に適用した場合の設計計画事例について述べ、本手法の有効性を検証する。

4.1 与条件 最適化計算を行うにあたり、以下のように与条件を設定した。LNG 船にはディーゼル発電機とターボ発電機をそれぞれ最大3台まで設置できるものとする ($N_D=3$, $N_T=3$)。またそれぞれの発電機を3種類の規模が異なる機器から選定する場合について考える ($K_D=3$, $K_T=3$)。図4および図5はそれぞれディーゼル発電機およびターボ発電機について選定可能な3種類の機器の性能特性を示したものである。また表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。LNG 船の航海サイクルは、表2に示すように八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、電力および推進力の需要量ならびにボイルオフガス発生量の推定を行った。さらに、式(31)における機器耐用年数を $\alpha=10$ 年、年間利率を $\rho=0.09$ とした。また式(32)における C 重油の単位重量当たりのコストを $\varphi_C=48$ 円/kg、A 重油のコストをケース(a) $\varphi_A=60$ 円/kg、およびケース(b) $\varphi_A=75$ 円/kg とした。

4.2 計算結果および考察 表3(a)および表3(b)は、それぞれケース(a)および(b)の場合について、システムの構成機器として選定された3種類のディーゼル発電機とターボ発電機の台数、ならびに年間

図4 ディーゼル発電機性能特性

図5 ターボ発電機性能特性

表 1 構成機器の性能特性値と初期設備費

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

に要する設備費、運用費および総経費を最小総経費の解から 5 番めまでを示したものである。また実システムの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 C 重油消費量に対する運用費 J_{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 J_{vR} に分けて示している。表 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、最小総経費の解から 5 番めまでの解を比較してわかるように、機器構成の変更に伴う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、本研究の計画問題においては設備費と運用費をともに設計目的に含め、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 (a), (b) は、それぞれ表 3 (a), (b) の最小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転条件を発電量の配分として示したものである。また A 重油および C 重油の単位時間当たりの消費量も示している。ケース (a) とケース (b)

表 2 航海パターン

Voyage pattern	n	$P^{(n)}$ kW	$F_B^{(n)}$ kg/h	$F_{BR}^{(n)}$ kg/h	$G^{(n)}$ kg/h	$E^{(n)}$ kW	$T^{(n)}$ h
Loaded voyage at torrid zone	1	29420	5390	0	1000	2000	118 × 24
Loaded voyage at temperate zone	2	29420	5140	0	1200	1850	38
Ballast voyage at torrid zone	3	29420	3770	0	1000	2100	103
Ballast voyage at temperate zone	4	29420	3600	0	1200	1950	33
Departure and arrival	5	7355	0	0	1000	2650	8
Anchoring	6	0	0	0	1000	2200	20
Loading	7	0	48960	48960	900	3120	10
Unloading	8	0	0	0	1100	6050	10

表 3 機器構成と年間経費

(a) ケース (a)

		Diesel generator			Turbogenerator			J_f	J_{vG}	J_{vR}	J
		Type 1	Type 2	Type 3	Type 1	Type 2	Type 3	$\times 10^4$ Yen	$\times 10^4$ Yen	$\times 10^4$ Yen	$\times 10^4$ Yen
Optimal combination	1		1	2			1	3323	22438	82355	108116
	2	1		2			1	3213	22921	82354	108488
	3		1	1	1		1	3518	22677	82354	108549
	4		1	2	1	1		3730	22514	82354	108598
	5	1	1	1	1		1	3861	22577	82354	108792
Actual combination		1					2	3546	13691	95885	113122

(b) ケース (b)

		Diesel generator			Turbogenerator			J_f	J_{vG}	J_{vR}	J
		Type 1	Type 2	Type 3	Type 1	Type 2	Type 3	$\times 10^4$ Yen	$\times 10^4$ Yen	$\times 10^4$ Yen	$\times 10^4$ Yen
Optimal combination	1	1		2			1	3213	15650	93982	112845
	2		1	2			1	3323	13896	95852	113071
	3			1		1	1	3415	13878	95851	113144
	4	1					2	3546	13771	95851	113168
	5		1	1	1		1	3518	13903	95851	113272
Actual combination		1					2	3546	13771	95851	113168

表 4 最適機器構成に対する最適運転条件

(a) ケース(a)

m	$E_{D21}^{(m)}$ kW	$E_{D31}^{(m)}$ kW	$E_{D32}^{(m)}$ kW	$E_{T31}^{(m)}$ kW	$F_A^{(m)}$ kg/h	$F_C^{(m)}$ 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	$E_{D11}^{(m)}$ kW	$E_{D31}^{(m)}$ kW	$E_{D32}^{(m)}$ kW	$E_{T31}^{(m)}$ kW	$F_A^{(m)}$ kg/h	$F_C^{(m)}$ 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

を比較すると、機器構成はディーゼル発電機 1 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転条件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、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ターボ発電機によって発電を行い、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、ターボ発電機を低出力で運転するよりもディーゼル発電機を高出力で運転する方が効率がよいのである。

実際の LNG 船に設置されている機器は 2500~3000 kW の比較的大形のターボ発電機 2 台と 500~1000 kW の小形のディーゼル発電機 1 台である。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 3 の最下欄に示す機器構成について最適運転条件を求め、それを表 5 に示した。この最適運転条件はケース (a), (b) とともに同様の結果となり、主としてターボ発電機が使用されている。最小総経費のシステムと異なり、ケース (a) の場合に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ターボ発電機を並列運転してターボ発電機の出力を低下させるよりも、ター

表 5 実在機器構成に対する最適運転条件

m	$E_{D11}^{(m)}$ kW	$E_{T31}^{(m)}$ kW	$E_{T32}^{(m)}$ kW	$F_A^{(m)}$ kg/h	$F_C^{(m)}$ 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

ボ発電機を単独に高出力で運転する方が総合的効率が高いためである。なお、この実システムと最小経費のシステムの総経費の比はケース (a) では 1.046、ケース (b) では 1.003 となっている。このように本手法の適用によって、実システムが最小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のかということを合理的に判断することができる。

5. 結 言

本研究では、LNG 船機関部システムの基本計画段階において重要課題となっている機器構成に関する計画問題に対して、年価法に基づき各種構成機器の運転条件を考慮しながら機器の規模と台数の選定を合理的に行うための最適計画手法を提示した。まず機器の選定および運転・停止条件を表す整数変数を導入してシステムを記述し、設計計画問題を年間総経費の最小化を設計目的とする混合整数線形計画問題として定式化した。次に整数変数間の階層的関係を考慮してこの設計計画問題を機器の選定問題と最適運用計画問題に分割し、最適運用計画問題に分枝限定法に基づく混合整数線形計画法を適用して計画問題を解く方法を示した。最後に、実在規模の LNG 船機関部システムの計画問題に本手法を適用し、システム構成機器の組合せを最適選定するとともに、各機器の最適運転条件を決定した。以上のことから、従来の試行錯誤的設計計画法と比較して、本手法によってより合理的に機関部システムの設計計画が行えることが判明した。なお本手法は他の陸上のプラントの最適計画に対しても適用可能と考えられる。

最後に、本研究を行うにあたり実システムについてご教示を受けた三菱重工業(株)本社船舶技術部の糸山直之氏ほかの各位に謝意を表する。また数値計算を行うにあたり当時大阪大学工学部学部学生 of 武村泰夫君の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

文 献

- (1) 船の科学編集部, 技術紹介, 船の科学, 35-10 (昭 57), 66.
 - (2) 中山・ほか 2 名, 新製品紹介, 三菱重工技報, 21-2 (昭 59), 381.
 - (3) 今野・鈴木編, 整数計画法と組合せ最適化, (昭 57), 9, 57, 69, 日科技連.
 - (4) 関根, 数理計画法, (昭 51), 236, 岩波書店.
 - (5) Land, A. H. and Doig, A. G., *Econometrica*, 28-3 (1960), 497.
 - (6) 日本機械学会編, 機械工学便覧, (昭 52), 13-85, 日本機械学会.
 - (7) 関西造船協会造船研究委員会編, 商船機関部計画, (昭 42), 51, 海文堂.
 - (8) 関根, 電力系統工学, (昭 51), 274, 電気書院.
-