# 水産庁納"開洋丸"の直流電気推進

D. C. Electrical Propulsion of the Ship "Kaiyomaru" Delivered to the Fisheries Agency

二 瓶 讓\* 角 田 昌 隆\*
Yuzuru Nihei Masataka Kakuta
小 松 和 郎\* 小 林 寅 雄\*
Kazuo Komatsu Torao Kobayashi

# 要旨

このたび水産庁に漁業調査船 "開洋丸"の直流電気推進用電気品を一式納入したが、これは高度の自動化を図った高性能設備である。

本論文では設備の概要,電動機の特性および構造,ならびに直流電気推進特有の問題である停止から前進,前進から後進の操作を急速に行なった場合の,電動機および船体の加減速,バックパワーによる原動機の速度上昇の問題を述べ,さらに定出力制御,主回路切換方式などの制御方式について言及する。

# 1. 緒 言

船の推進に電動機を使用した歴史は古く、またほかの原動機に比べて利点も多い。すなわち原動機と推進軸を機械的に連結する必要がなくなり、配置上便利であり、また原動機の台数を推進器の数に無関係に自由に選択することができる。しかし、これだけでは電気推進の採用に踏み切るには、十分とはいえず、操船の容易さが要求されることになろう。船の取り扱いが容易であるためには、推進器の低速回転が可能で、またすみやかに停止または逆転ができることが必要になる。ある種の船、たとえば砕氷船、しゅんせつ船、トロール船、海洋調査船などは操船の容易さが、その船の性能を決定的なものにする。ここに直流電気推進が採用される理由がある。

日立製作所では直流電気推進の開発につとめ、すでに運輸省に400kW直流電気推進,1,800kW直流電気推進を納入し、その特長を発表した<sup>(1)(2)</sup>。今回水産庁に納入した電気推進用電気品は、定出力制御を採用した高性能設備であり、独特の主回路切換方式とあいまって、すぐれた操縦性を発揮している。

# 2. 設備の概要

## 2.1 船の仕様とプロペラ特性

今回水産庁で建造した開洋丸は、調査船という特殊船であるため、その行動範囲は流氷域や熱帯を含む全海域に及び、漁労、海洋、生物、資源および漁場の研究調査を行なうもので、その外観は図1に示すとおりである。

船体の仕様は次のとおりである。

無いないのとおりでは 全 長: 92 m 幅 : 15 m 深さ(甲板まで): 9.2 m 満 載 喫 水: 5.5 m 総 ト ン 数: 3,200 t 航 行 速 力: 13.5 kt 最 大 速 力: 16.5 kt

推進馬力(1軸): 2,300 kW

一般にプロペラのトルク速度特性は図2のようになる。曲線Aは海上を前方に航走している場合(以下自由航走という)で、船速はプロペラ回転速度にほぼ比例する。曲線Bは船速がゼロ、すなわち船体係留の場合(以下係留特性という)で、トルクはやはりプロペラ速度の2乗に比例する。曲線Cは船速一定の場合のトルクープロペラ速度特性で、ロビンソン曲線と呼ばれる。図2において、a点はプ

図1 開 洋 丸

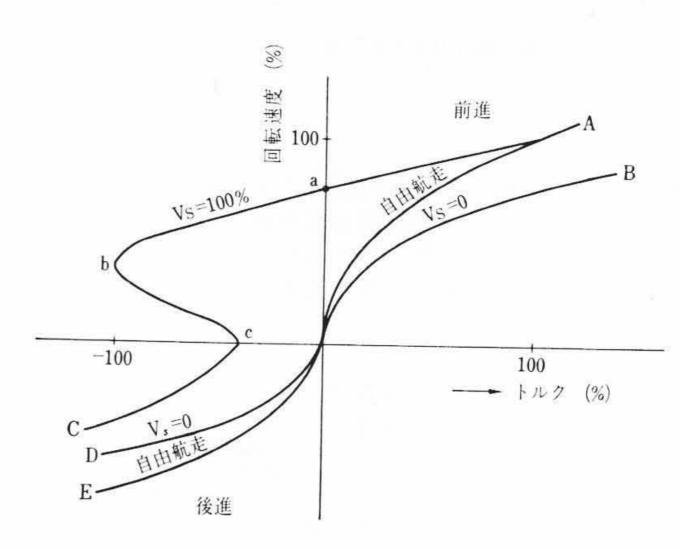


図2 プロペラ特性

ロペラ翼に対し、水の流入角がゼロになる点で、船が前進することによってプロペラが回わされている状態を示し、プロペラ軸のトルクはゼロである。 a~c 点は船が前進中にプロペラ速度を減少させるためには、制動トルクを必要とすることを示し、電気推進の場合には、回生制動運転となることが多く、レオナード用発電機は電動機となってディーゼル機関を回すことになる(以下バックパワーという)。ディーゼル機関の吸収動力(以下吸収馬力という)には限度があり、バックパワーが大きいとディーゼル機関は動力を吸収し切れず、エンジンは加速する。船の前進中に低速回転で現われるプロペラの逆方向トルクの最大値(b点)は、船速、プロペラの種類、プ

	The state of the s	
-1	主要回転機仕様一覧表	
表 1		
1	+ + + 101 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11	9
1		*

用	途	台数	形	4		爿	Ç	出力 (kW)	電 E (V)	回転速度 (rpm)	定格
主 直 流 発	電 機	4	開放			, 3	灵	620	±425	1,400	連続
推進用直流	電 動 機	1		女他:	力通	風防却器		2× 1,150	±850	±180/ 240	連続
バウラスタ用直流	流電動機	1	開	放	防	滴	形	300	425	500	1時間
トロール用直流	<b>范電動機</b>	1	開放形	女他:	力通	風防	方滴	300	$\pm 425$	±900	1時間
調査ウインチ用直	流電動機	1	75.05 Sec	女他:	力通	風防	方滴	90	$\pm 425$	±900	連続
主発電機用	励 磁 機	2	開	放	防	滴	形	7.5	$\pm 220/440$	1,800	連続
推進電動機用	励磁機	2	開	放	防	滴	形	30	220	1,800	連続
バウラスタ発電機	幾用励磁機	2	開	放	防	滴	形	2	220	1,800	連続
トロール発電機月	用励磁機	2	開	放	防	滴	形	2	$\pm 220$	1,800	連続
ウインチ発電機月	用励磁機	2	開	放	防	滴	形	1	±220	1,800	連続
定電圧電源用	励磁機	2	開	放	防	滴	形	15	220	1,800	連続
励磁機駆動用誘導	尊電動機	2	開	放	防	滴	形	65	AC440	1,800	連続
										1	

(注) 励磁機2セットの内1セットは予備機である。

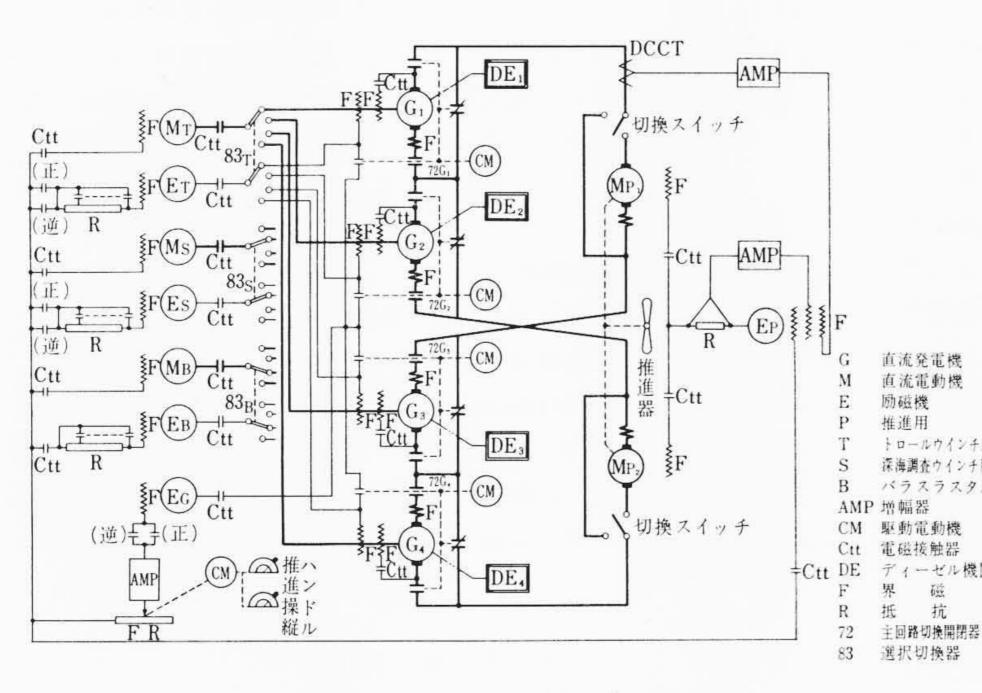


図3 主 回 路 結 線 図

ロペラ翼の角度などによって変化し、文献<sup>(3)</sup>によれば定格トルクの 50~150% の間にあり、プロペラ回転速度は 10~30% となっている。曲線 D は後進方向における係留特性、曲線 E は後進方向に自由航走する場合の特性を示す。後進の場合は同じ回転速度では前進の場合に比べトルクが増加する。

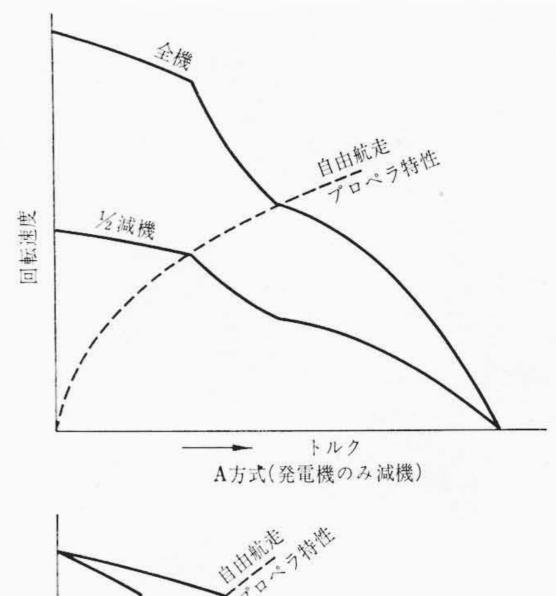
#### 2.2 電気品の仕様と回路構成

電気品の仕様を表1,主回路の結線を図3に示す。

主回路は2重電機子構造の電動機1台とディーゼル機関により駆動される直流発電機4台で構成される。主回路接続には並列と直列があるが、本船では電動機と発電機を交互に接続する直列交さ接続方式を採用している。

電動機の速度制御はレオナード方式による電圧制御によるが、船体抵抗が増加した場合には電動機界磁を強めてトルクを増加させる定出力自動制御を行ない過電流を防止している。しかし、計画された定出力制御の範囲を越えて負荷トルクが増大した場合には、電動機の界磁電流負帰還によるマイナーループ(Miner loop)制御により定出力制御の増幅率を低下させ、三界磁発電機の垂下特性で電動機の停動トルクを制限している。

主直流発電機は多目的に使用される。すなわち推進用のほかトロール用,バウスラスタ用および深海調査ウインチ用として使用される。このため航行中推進回路から運転中の発電機の一部を切り放したり、そう入したりできる主回路切換方式を採用している。



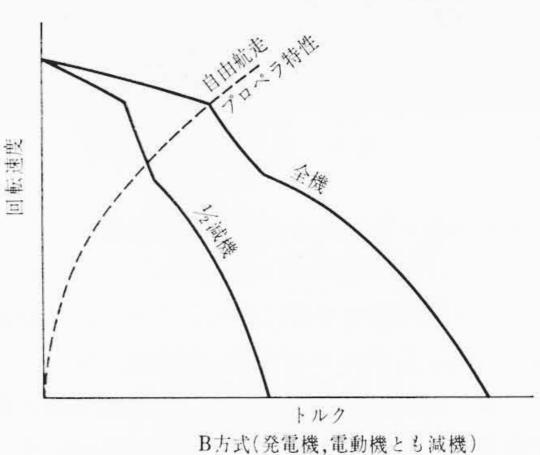


図4 発電機を減機したときの電動機特性

## 3. 回転機の特性と構造

## 3.1 発電機の外部特性

直流発電機の外部特性は停動電流が180%になるような垂下特性を持たせることが必要である。この方法として、主発電機を三界磁巻線とする方法と、励磁機に主回路電流を帰還して行なう三界磁励磁機方式があるが、速応性をよくするため主発電機に差動直巻、自励分巻および他励巻線の三界磁を備える方式を採用、流氷域航海中

の急激な負荷変動にたいして,電流の自己抑制効果が有効に働くよ う考慮してある。

#### 3.2 電動機のトルクー速度特性

電動機のトルクー速度特性は発電機の垂下特性のために,電流が 増すと速度が低下して停動に至るが,氷塊群に囲まれても電動機が 停止することなく安全に運転できるよう 180% の停動トルクを有 し,また 180~240 rpm の間界磁制御を行ない,自由航走時に弱め 界磁で高速運転され,トロール時強め界磁で大トルク低速運転され るよう計画されている。

## 3.3 主回路切換えによる電動機特性

主回路構成は図3のようになっており、主発電機は4台ある。これは、推進・トロールそのほかのレオナード発電機として多目的に用いるためと、原動機の経済運転を行なうためで、推進出力は船速のほぼ3乗に比例するから、推進出力を50%にしても約80%の船速が得られ、通常航海は半分の原動機を全負荷運転させることにより経済運航が可能である。

主発電機の切換えは、船を停止することなく、航行中に任意の台数にできることが望ましい。発電機の減機方式としては、発電機だけを減機する方式(以下A方式という)と、特定の発電機と電動機を組にして発電機・電動機をともに減機する方式(以下B方式という)があり、発電機を半分に減機したときの両者の比較を図4に示す。

A方式は強め界磁で全機運転の自由航走になるような特性を選ぶ 場合に電動機は小形になるが、 船体抵抗が増加する運転(たとえば

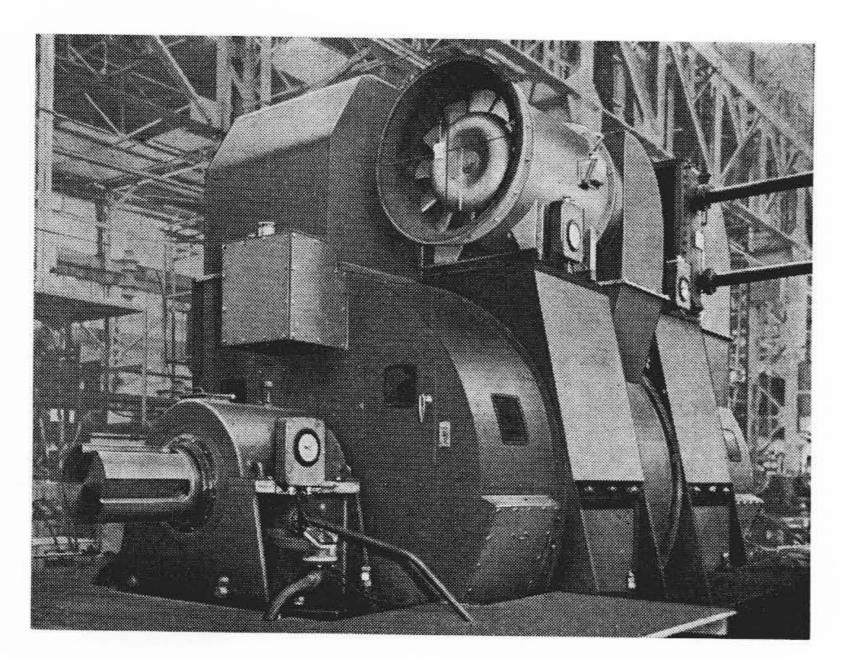


図5 推進用直流電動機

トロール・砕氷など)では全機運転で電動機が過負荷になる(推進の速度指令を下げれば過負荷にはならない)。 図 4 からわかるように、A方式では発電機を半分に減らしたときに電動機界磁を  $\sqrt[3]{2}$  × 0.5 すなわち 63% に弱めれば 80% の船速が得られる。 開洋丸では A方式を採用したが、発電機 4 台では電動機の強め界磁で自由航走に、発電機 3 台運転で電動機の強め界磁で係留特性になるように選んである。 開洋丸では通常の自由航走は 3 台の発電機で、電動機界磁をやや弱めて行ない、非常の場合のみ発電機 4 台運転を行なう計画である。発電機 3 台運転の自由航走速力は  $\sqrt[3]{3}$  すなわち91%で、これが開洋丸の経済速力である。

B方式は弱め界磁で全機運転の自由航走になるような特性を選ぶ場合に適し、発電機を半分に減機するとき、電動機界磁を 1/2 すなわち 126% に強めると 80% の船速が得られる。 界磁を強めることは電動機が大きくなることであるが、この方式を採用する砕氷船などでは、133% 程度の強め界磁で係留特性になるよう計画するのが普通で、減機自由航走によって電動機の大きさが左右されることはほとんどない。

超微速運転が必要な場合には、A方式のほうが有利で、開洋丸では発電機1台でこれを行なう計画である。

## 3.4 構 造

## 3.4.1 推進電動機の構造

推進電動機の外観写真を図5に示す。

- (1) 急速な正・逆転を得るためには、慣性モーメントの小さいことが望ましく、二重電機子構造を採用している。
- (2) 強制通風装置および空気冷却器をオンマウントしたコンパクトな構造で、冷却空気は室内より吸気され電動機を冷却したのち空気冷却器を通って室内に排気される。空気冷却器の冷却管は二重管構造で、たとえ冷却管より漏水があっても機内に浸水しないよう安全度を高めている。
- (3) 分解・組立に便利なように固定子は二つ割構造で、継鉄は 薄鋼板の積層構造である。積層継鉄とすることによって、 モノブロック継鉄の場合に比べ負荷急変時の補極磁束の応 答が早くなり、過渡時の整流が改善される。固定子の下半 部は防水構造で、ローリング・ピッチングにより船底のビ ルジが機内に浸入しない構造となっている。
- (4) 電機子巻線に重波巻方式を採用した。重波巻は特別の均圧線を必要とせず、しかも全電機子線輪についての均圧作用が有効に行なわれる特長がある。この場合普通は線輪端が長くなる傾向があるが、独特の段落し構造を採用して線輪端寸法の短縮を図っている。電機子線輪とライザの接続

- は、巻線導体をエッジワイズに折り曲げて直線部で行なう ようにし、すべてにロー付けを行なって接続不良によって 起こるブラックバーの原因を一掃している。
- (5) 整流子の精度は直接整流の良否を左右するので、シーズニング特性の良好な高級絶縁マイカを使用するなど材料の選択に十分留意したほか、特殊ターニング装置上に組み立てた整流子表面の超短波測定装置による回転中の凹凸測定を行なって整流子の精度の向上を図っている。
- (6) 軸受は強制給油方式であるが、給油系統の事故で給油が途絶しても暫時の潤滑を確保し軸受の焼損を防止するようオイルカラー給油を併用している。深海プランクトン採集など海洋・生物研究には、船の超低速運転が必要であるが、超低速での長時間運転を確実にするため、高圧油を軸受部に給油して油膜を形成させるオイルリフト方式を併用している。
- (7) 警報ならびに監視装置として軸端に回転計発信器および停動検出装置が直結されている。また冷却空気用および軸受用の警報接点付温度計や固定子巻線,軸受および冷却空気の温度検出用サーチコイルが装備されていて,保護警報と遠隔監視に万全を期している。これらはまたロガーで自動記録される。

## 3.4.2 主発電機の構造

発電機は高速ディーゼル機関で駆動される。高速機関採用のため発電機設備は小形軽量であるが、高速のための整流の考慮も必要で、タンデム形保持器が採用されている。通風方式は自己通風であるが、冷却空気は固定子にオンマウントした空気冷却器を経て室内に排出される。軸端には回転計発信器および遠心力開閉器を直結し、また各部の温度の監視・保護については電動機と同様の装備がなされている。

## 4. 運 転 特 性

# 4.1 船体の伝達関数

船体の直線運動を回転運動に置き換え,次の記号で表わす。

直	線	運	動	0	量		1 転	運	動	~	0	换	第	値
推			カ	R	(t)	有効ト	ルク(	=電	動機	1-16-5	7 × ‡	<b></b>	効率)	$T_s(t-m)$
船			速	$V_s$	$\left(m/s\right)$	船体							$N_s(r)$	F (2)
船	体	重	量	W	(t)	船体								$^{2}(t-m^{2})$

電動機出力はプロペラから船体へと伝達されるが、推進効率  $\eta_s$  は(1)式で表わされる。

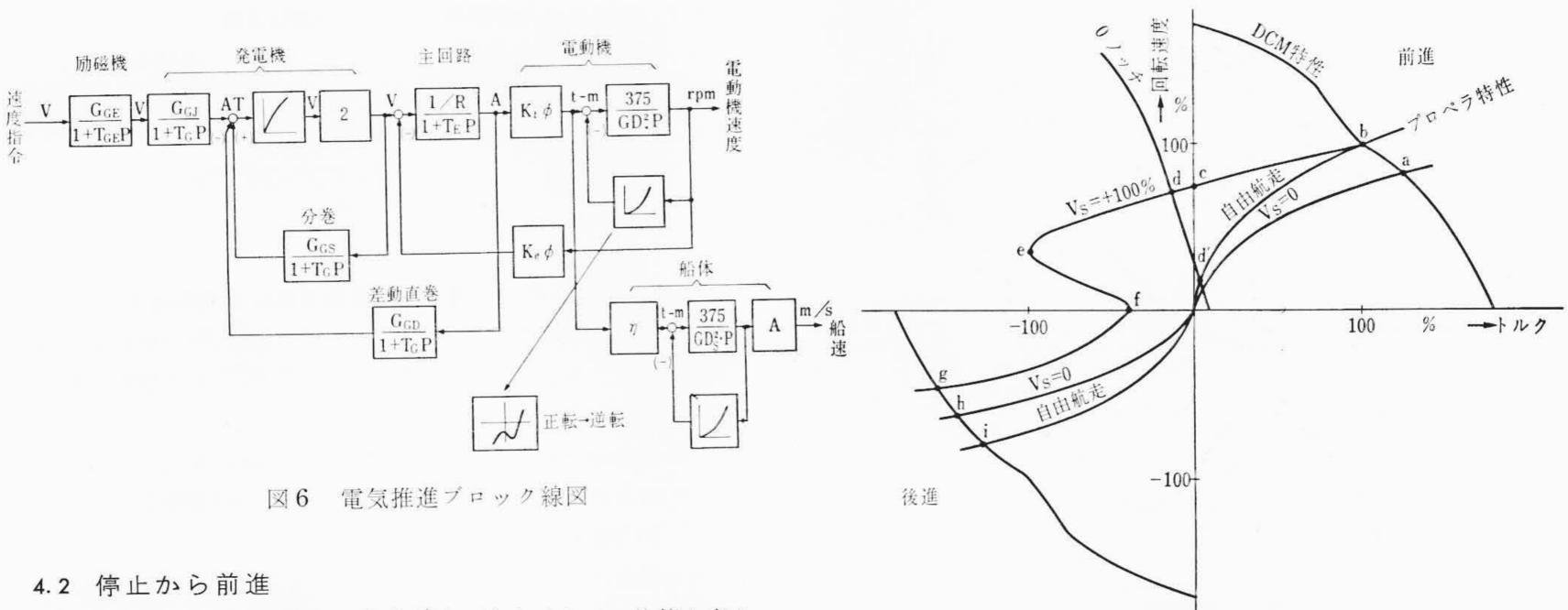
プロペラ翼のねじ面のピッチを $P_{\nu}$ とすれば、船速を回転運動の量に換算した $N_S=V_S/P_{\nu}$ は、プロペラ翼のねじ面での水のすべりを生ずるため実際のプロペラ回転速度 $N({
m rpm})$ より低くなる。また起動時間の関係からは

$$\frac{W}{9.8} \cdot V_S \cdot \frac{1}{R} = \frac{GD_S^2}{375} \cdot \frac{N_S}{T_S}$$

が成立ち、したがって船体の $GD^2$ は(2)式によって求めることができる。

$$GD_S^2 = 375 \cdot \frac{T_S}{N_S} \cdot \frac{W}{9.8} \cdot V_S \cdot \frac{1}{R} \quad \dots (2)$$

この船体の  $GD^2$  は一般に推進軸の  $GD^2$  に比較して  $100\sim200$  倍にもなる。船体を回転運動に換算して考えたときのブロック線図は図 6 となる。



船体が停止している状態から前進全速に達するまでの状態を考える。電動機の負荷トルクすなわちプロペラトルクは、電動機回転速度と船速によって定まり図7のようになるが、船体の $GD^2$ は推進軸の $GD^2$ に比し非常に大きいので、プロペラは係留特性に沿ってa点まで加速し、しかるのちに船体が加速するとしてさしつかえない。電動機の加速指令が十秒程度の場合は、電動機の加速遅れもほとんど無視できるので、 $a\sim b$ 点間の船体の加速は(3)式で与えられる。

$$\frac{GD_{s^2}}{375} \cdot \frac{dN_s}{dt} = T_s - K_1 N_{s^2} \dots (3)$$

今,簡単のため  $T_s$  を  $a\sim b$  間の平均トルクで一定とすれば

$$Z \subset V \qquad N_{\max} = \sqrt{\frac{T_S}{K_1}}$$

#### 4.3 前進から停止

船が前進全速で航行中、速度指令をゼロにすると、船の慣性が大きく、船速が低下しないうちに図7のb点からc点を通ってd点に達し、それから電動機特性に沿って船速が低下してd'点に達すると考えることができる。減速指令が十数秒程度のときは、電動機はほとんど指令に追従して減速し、以後 $d\sim d'$ 間の船速の低下が行なわれるが、わずかな電動機トルクを無視すると(5)式が成立ち、これを解くと(6)式が得られる。

$$\frac{GD_{S^2}}{375} \cdot \frac{dN_S}{dt} = -K_2 N_{S^2} \dots (5)$$

$$t = \frac{GD_{S^2}}{375} \cdot \frac{N_{S_0}}{T_{S_0}} \left( \frac{N_{S_0}}{N_S} - 1 \right) \dots (6)$$

ここに  $N_{S_0}$ : t=0 における船体回転速度 (rpm)

## 4.4 前進から後進

船が前進全速で航行中、速度指令を急速に後進にした場合、船の慣性が大きいので船速が低下しないうちにプロペラが逆転するものとすれば、図7のb点からc d e f の各点を通ってg点に達し、それから電動機特性に沿って船体は停止(h点)→後進と進みi点に達する。g→h点の船体の減速時間は(7)式を解いて(8)式で与えられる。

 $T_{s_0}$ : t=0 における有効トルク (t-m)

$$\frac{GD_{S^2}}{375} \cdot \frac{dN_S}{dt} = -T_S - K_3 N_{S^2} \dots (7)$$

$$t_1 = \frac{GD_s^2}{375} \cdot \frac{N_1}{T_s} \tan^{-1} \frac{N_{s_0}}{N_1} \dots (8)$$

ここに 
$$N_1 = \sqrt{\frac{T_s}{K_3}}$$
  $N_{s_0}$ :  $t=0$  における船体回転速度 (rpm)

図7 電動機速度一トルク特性

h→i点までの船体の加速は(4)式と同じ形で与えられる。

$$t = \frac{GD_S^2}{375} \cdot \frac{N_{\text{max}}}{2T_S} \cdot ln \frac{N_{\text{max}} + N_S}{N_{\text{max}} - N_S} \qquad .....(9)$$

ここに  $T_s$ : h $\sim$ i 点の平均トルク (t-m)

N<sub>max</sub>: 最終の船体後進回転速度 (rpm)

# 5. バックパワー

全速前進の船に逆転指令を与えて停船または後進させる場合,電 気推進では回生制動が行なわれ,バックパワーがエンジンの吸収馬 力を越えると,速度上昇が起こって余分な動力が吸収されることに なる。エンジンの吸収馬力はトルク一定の特性であるが,エンジン 速度の変動範回が 100~115% を問題にするのみなので,計算の簡 略化のため パワー 一定の特性として解析する。

## 5.1 エンジン速度の式

エンジン速度に関する運動方程式は次のようになる。

$$T_B - T_E = \frac{GD^2_G}{4} \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot N_R \cdot \frac{dN_G}{dt}$$

$$T_B = -\eta_G \frac{N_0 N}{N_R N_G} \bullet T_0 T_M$$

$$T_E = \frac{60}{2\pi} \times 10^3 \frac{P_0}{N_R N_G} \cdot \frac{1 - \eta_E}{\eta_G}$$

ここに  $T_B$ =推進電動機から発電機への返還トルク (N-m)  $T_E$ =エンジンの吸収トルク (N-m)

 $GD_{G}^{2}$ =発電機・エンジン系全体の  $GD^{2}$  (kg-m<sup>2</sup>)

 $N_R$ =発電機(エンジン)の定格回転速度 (rpm)

Nc=発電機(エンジン)の回転速度(単位法)

t =時間 (s)

η<sub>G</sub>=電動機および発電機の総合効率 (単位法)=0.8556

 $N_0$ =100% のプロペラ (電動機) 回転速度 (rpm)

N=プロペラ(電動機)回転速度(単位法)

 $T_0$ =電動機(プロペラ)の定格トルク (N-m)

T<sub>M</sub>=電動機トルク (単位法)

 $P_0 = 100\%$  の推進パワー (kW)

 $\eta_E = x y y y$  が多率 (単位法)

## 5.2 プロペラの運動方程式

プロペラの運動方程式は次のようになる。

$$T_0(T_M - T_P) = \frac{GD^2}{4} \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot N_0 \cdot \frac{dN}{dt}$$

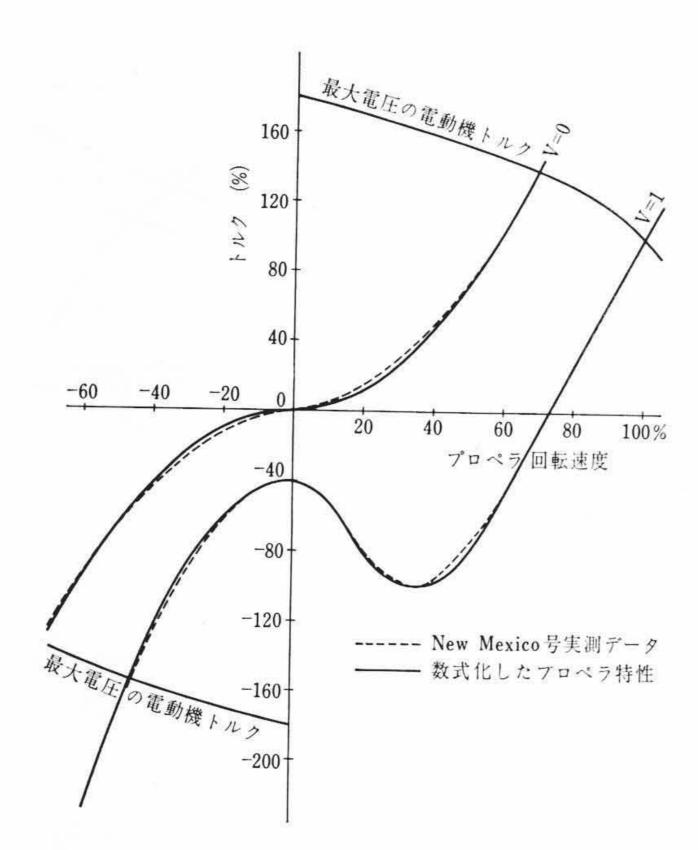


図8 アメリカ軍艦 New Mexico 号のプロペラ特性と 最大電圧の電動機特性

T<sub>P</sub>=プロペラトルク (単位法)  $GD^2$ =推進器系全体の  $GD^2$  (kg-m<sup>2</sup>)

これを変形して

$$dt = 2.7388 \times 10^{-6} \cdot GD^2 \cdot \frac{N_0^2}{P_0} \cdot \frac{dN}{(T_M - T_P)} \dots (10)$$

# 5.3 プロペラの特性

プロペラ特性として図8に示すアメリカ軍艦 New Mexico 号の 実測データを数式化すると次のようになる。

(1) 係 留 特 性

(2) 全速前進の特性

(i)  $1 \ge N \ge 0.6$ 

$$T_P = 3.7 N - 2.7 \dots (13)$$

(ii)  $0.6 \ge N \ge 0.1188$ 

$$T_P = 8.32 \, N^2 - 5.824 \, N + 0.0192 \dots (14)$$

(iii)  $0.1188 \ge N \ge 0$ 

$$T_P = -11 N^2 - 0.4 \dots (15)$$

(iv)  $0 \ge N$ 

$$T_P = -5.2893 N^2 - 0.4 \dots (16)$$

#### 5.4 三界磁制御におけるエンジン速度上昇

## 5.4.1 エンジン速度の式

(11)式をエンジン速度に関する運動方程式に代入して,エンジ ン速度とプロプラ速度の関係を求めれば次のようになる。

$$N_{G}dN_{G} = \frac{GD^{2}}{GD_{G}^{2}} \cdot \frac{N_{0}^{2}}{N_{R}^{2}} \left( -\eta_{G}T_{M}N - \frac{(1 - \eta_{E})}{\eta_{G}} \right) \frac{dN}{T_{M} - T_{P}} \dots (17)$$

三界磁制御の場合, 界磁は電動 FR 制御を行なうものとし, その 動作時間は十分長く選んであるので、プロペラの加速トルク $T_D$ を一定とみなし、最大電圧における電動機の特性曲線を図8のよ うに仮定する。また船速は前進全速に保たれるものと仮定して, エンジン速度を計算する。

$$T_D = T_M - T_P \dots (18)$$

# 5.4.2 エンジン過速開始のプロペラ回転速度

エンジン速度の上昇開始のプロペラ速度  $N_s$  (単位法)は,  $N_G dN_G = 0$  とおいて(17)式を解いて、その最大速度として与えら れる。

$$N_{S} = \underbrace{(2.7 - T_{D}) + \sqrt{(2.7 - T_{D})^{2} - 20.2168(1 - \eta_{E})}}_{7.4}$$
.....(19)

# 5.4.3 エンジンの最高速度を与えるプロペラ回転速度

エンジンの最高速度を与えるプロペラ速度  $N_H$  (単位法) は,  $N_G dN_G = 0$  とおいて(17)式を解き、 $N_H < 0.35$  として求められる。

(1) 0.35>N<sub>H</sub>≥0.1188 の場合

この場合は次の三次方程式の解として NH は与えられる。 8.32  $N_H^3 - 5.824 N_H^2 + (0.0192 + T_D) N_H + 1.366 (1 - \eta_E) = 0$ 

(2) 0.1188 ≥ N<sub>H</sub> > 0 の場合

この場合は次の三次方程式の解として NH は与えられる。  $11N_H^3 + (0.4 - T_D)N_H - 1.366(1 - \eta_E) = 0$ 

(3) N<sub>H</sub> の近似解

前記(1)(2)の三次式の近似解を求めると次表の値となる。

$T_D$ $\eta_E$	1	0.9	0.8
-0.1	0	0.166	0. 262
-0.05	0	0.172	0.27

#### 5.4.4 エンジンの到達速度

プロペラ速度  $N=N_H$  におけるエンジンの到達速度  $N_{GH}$  は,  $N=N_S$  において  $N_G=1$  の初期条件により (17) 式を解いて得ら れる。

(1) 0.35> $N_H \ge 0.1188$ 

$$N_{GH^{2}}-1=\frac{1}{-T_{D}} \cdot \frac{GD^{2}}{GD_{G}^{2}} \cdot \frac{N_{0}^{2}}{N_{R}^{2}} [(2.3101-2.1105 N_{S}) N_{S}^{2} - (3.322 N_{H}-3.5593 N_{H}^{2}-0.0164) N_{H}^{2} -0.8556 T_{D}(N_{S}^{2}-N_{H}^{2}) -2.3375 (1-\eta_{E}) (N_{S}-N_{H}) -0.1254]$$

 $0.1188 \ge N_H > 0$ 

$$N_{GH^{2}}-1=\frac{1}{-T_{D}} \cdot \frac{GD^{2}}{GD_{G}^{2}} \cdot \frac{N_{0}^{2}}{N_{R}^{2}} [-0.8556 \ T_{D}(N_{S}^{2}-N_{H}^{2})$$

$$-2.3375(1-\eta_{E}) (N_{S}-N_{H}) -0.1243$$

$$+(2.3101-2.1105 \ N_{S}) N_{S}^{2}$$

$$-(0.3422+4.7058 \ N_{H}^{2}) N_{H}^{2}]$$

## 5.4.5 開洋丸における数値計算

開洋丸における諸元を求め  $T_D = -0.1$  と仮定して計算すると  $N_S$ =0.6417 となり、エンジンの最高速度  $N_{GH}$ =1.069 となる。 この場合  $\eta_E=0.8$  とする。

この計算は、プロペラ特性が New Mexico 号と同じである と仮定して行なったものであり、プロペラ特性が異なれば当然 異なる数値になるが、エンジン速度の計算に対しては New Mexico 号のプロペラ特性は最も過酷なものと考えられる。

## 6. 制御装置と制御方式

制御装置はすべて防滴自立鋼板製キュービクルあるいは机形と し、主として中央制御室および船橋制御室に設置されている。図9 は主制御配電盤および中央制御卓の外観を示したものである。

# 6.1 制御方式の特長

開洋丸の直流電気推進の制御方式の特長は次のようなものであ る。

(1) 4台の主直流発電機は推進操作を停止することなく、遠隔

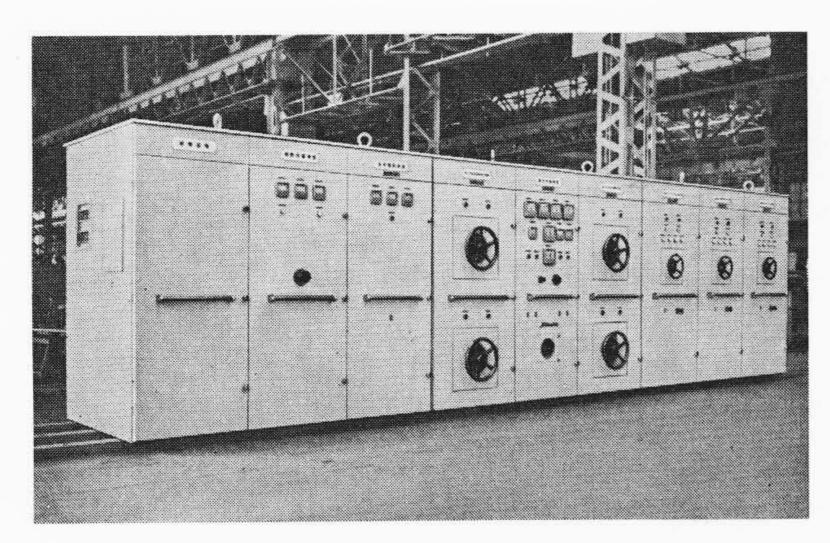


図9(a) 主制御配電盤

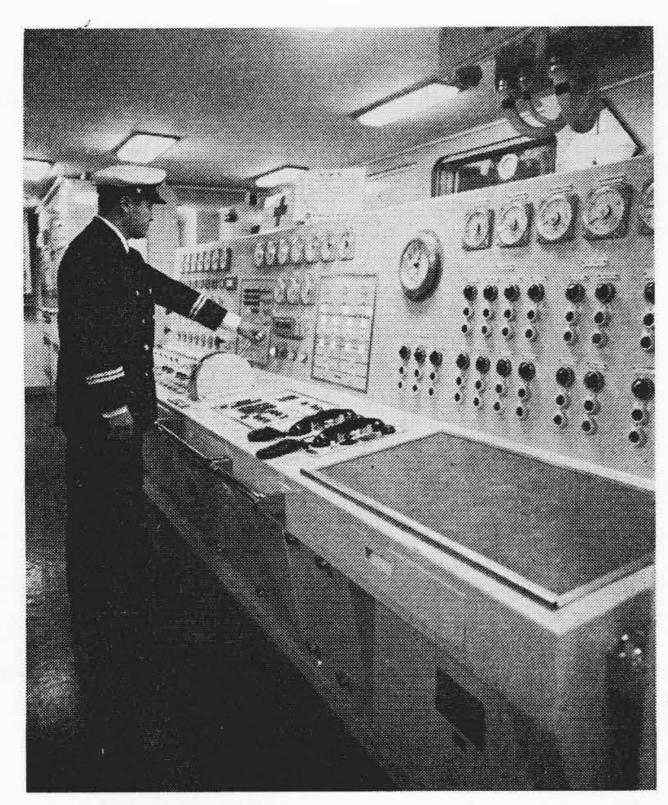


図9(b) 中央制御卓

にて任意の台数に増減できる。

- (2) 発電機の運転台数に応じて操縦ハンドルの操作範囲を変え、運転発電機台数の増加により推進電動機の回転速度が 急上昇するのを防止するとともに、励磁機の特性に合わせ て速度指令量を自動的に調整し、運転発電機台数に無関係 に推進電動機速度をノッチ目盛に対してほぼ直線的に制御 できるようにした。
- (3) 負荷が増大し主回路電流が増加する場合は、主回路電流を 検出して自動的に推進電動機の界磁調整を行ない、負荷電 流を押えて出力を一定とする定出力制御を行なっている。
- (4) 推進主回路より切り放した発電機は、トロールウインチ、 深海調査ウインチ、バウスラスタ用電動機と任意に組み合 わせ、ワードレオナード回路を形成、推進操作と平行運転 ができる。
- (5) 運転状況が1目でわかる主回路模擬盤,中央制御室と船橋制御室の連絡を確実に行なえるボタン操作方式の連絡装置,電圧・電流・回転速度・各種の温度・圧力を定期的に記録する自動記録装置などを用いて,運転・制御・監視を中央集中制御方式とし,大幅に自動化を図っている。

#### 6.2 主回路の切換

電気推進装置における主回路切換方式は最も重要な問題の一つ

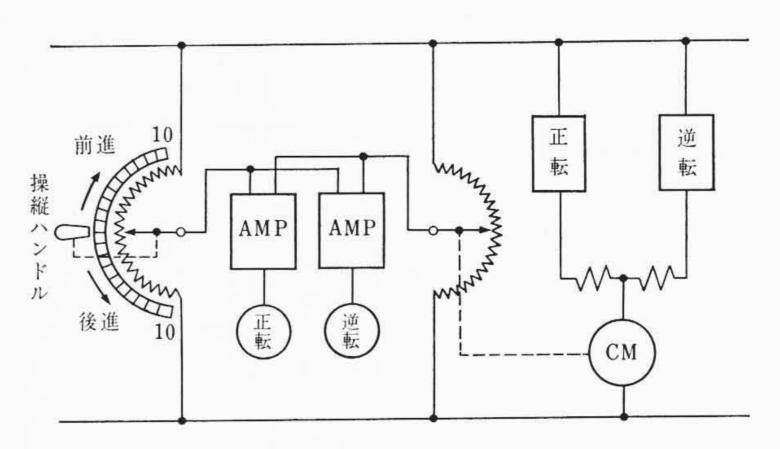


図 10 操縦ハンドル追従回路

- で、本装置の切換方式に要求される機能としては次のものがある。
  - (i) 推進操作を停止することなく遠隔にて切り換えができる こと。
  - (ii) 4台の発電機は任意の台数・任意のものに切り換えられること。
  - (iii) 切換えの際,運転中の推進主回路に衝撃を与えないこと。
  - (iv) 切換操作は短時間で完了すること。
  - (v) 切換操作は簡単·容易で、熟練を要しないこと。

これらの基本的要求事項を満足する切換方式として次のものを採用した。

発電機ごとに設けた主回路切換開閉器には、それぞれ中央制御卓または船橋推進操縦卓にて操作する「推進そう入」および「推進休止」の押ボタンスイッチを設けてあり、どれか一つのボタンスイッチを操作すれば、推進操縦ハンドルに追従していた発電機電圧制御用界磁調整器は推進操縦ハンドルの指令から離れて徐々に減圧する。

減圧し終わった点で,発電機および電動機の両界磁回路を遮断し, 発電機の界磁を逆極性に投入して残留電圧の消去を図る。これを継 電器で確認したのち主回路切換開閉器を切り換え,発電機の残留電 圧消去回路を解除して,推進回路に接続されている発電機および電 動機の界磁回路を閉路,界磁調整器を切換操作直前のハンドル位置 に復帰させると切換操作は完了する。

切換操作に要する時間は、25秒以内であり船速には全く影響がない。

主回路切換操作は、制御卓または船橋推進操縦卓のいずれか一方, あるいは主制御配電盤で手動により行なわれる。手動切換操作の場 合にも切換条件がすべて満足されていなければ切り換えられないよ う鎖錠されており、制御系統の指令が切換開閉器に連動して与えら れるため、誤操作は皆無である。

## 6.3 速 度 指 令

推進操縦は、船橋推進操縦卓または中央制御卓のどちらからでも 操縦ハンドルにより行なわれる。 界磁調整器は図 10 に示すように 常に操縦ハンドルに追従して発電機の界磁調整を行なうように配慮 してある。海上試験の結果、バックパワーは最大約8%でディーゼ ル機関の吸収馬力以内である。

操縦ハンドルの目盛は,"前進 10-0-10 後進"としてあり、各発電機の界磁調整を同一指令で行なっているが、フル運転の目盛は運転発電機台数によって操作範囲を変えるため、運転中の発電機の台数に応じた目盛以上に対してはハンドルだけが空転するようにしてある<sup>(4)</sup>。

各発電機の界磁調整は1台の励磁機によって行なわれるが,励磁 機の負荷特性を考慮して,運転発電機台数に応じた補正を切換操作 に連動して行ない,推進電動機特性をほぼ直線的なものにしてある。 日

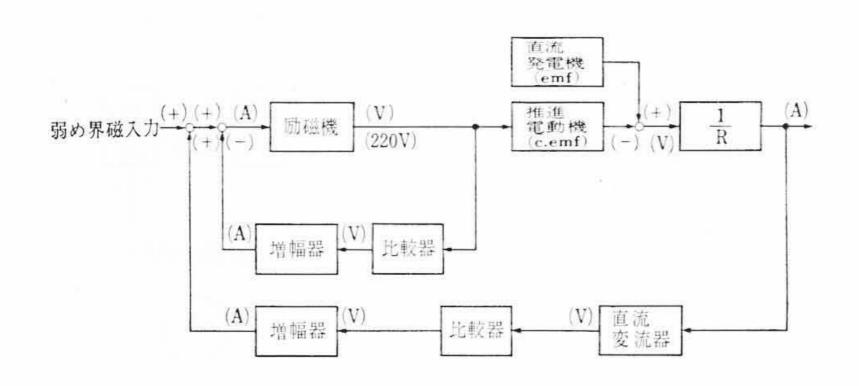


図11 定出力制御ブロック線図

## 6.4 定出力制御

図11の定出力制御のブロック線図からもわかるように,推進電動機は通常弱め界磁としてあるが,負荷が増大し主回路電流が定格値を越えると,直流変流器(DCCT)の検出電流を基準値と比較して励磁機界磁を励磁するため,推進電動機は負荷量に応じて界磁が強められ定出力制御が行なわれる。さらに負荷が増大すると励磁機出力電流を検出して基準値と比較し,励磁機界磁に負帰還させ推進電動機を定格強め界磁の垂下特性とする(5)。

この定出力制御系統は非常に有効に動作し、負荷変動に対して主 回路電流の増加は約4%である。

## 7. 試 験 結 果

据付け、調整運転を終わり海上試験が駿河湾内で行なわれたが、当初の計画とほぼ一致する特性が得られた。発電機2台運転の場合で、停止から急激に前進操作をしたときのオシロを図12に示す。加速指令8秒に対し、電動機はわずかの遅れで加速し、その後船体加速とともに電動機も徐々に加速していくことがわかる。船体の前進整定まで230秒であるが、4.2による計算値とほぼ一致する。前進10/10から後進8/10まで一挙に逆転操作をした場合のオシロを図13に示す。電動界磁調整器は24.5秒に設定されたが、電動機は指令に対しわずかの遅れで逆転し、その間船速の低下は10%程度であった。船体停止まで165秒、そのときの航行距離は672mであった。オシロよりバックパワーを求めるとディーゼルエンジン1台当たり55kWであるが、これはディーゼルエンジンの吸収馬力以内であって、ディーゼルエンジンの加速は認められなかった。

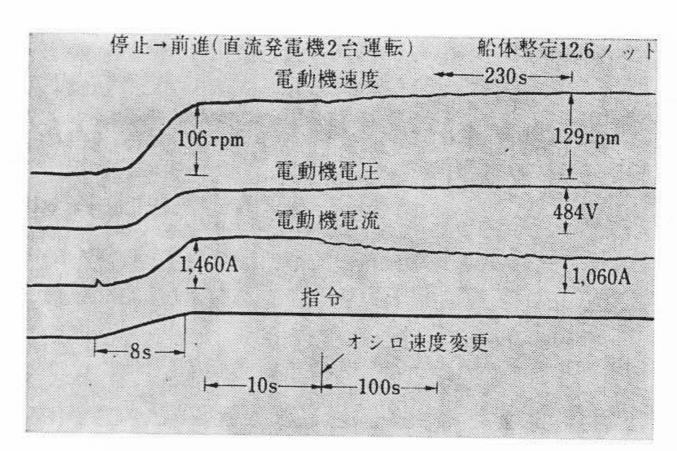


図 12 停止から前進のオシログラム

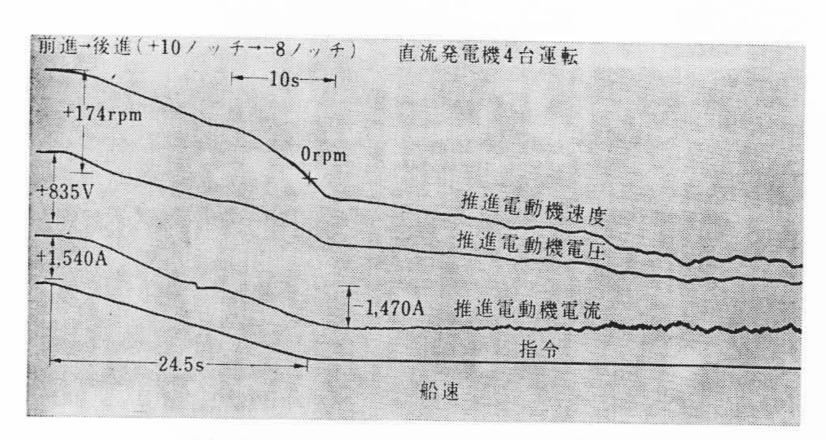


図 13 前進から後進のオシログラム

## 8. 結 言

2,300 kW 直流電気推進の概要と、電気推進特有の問題である前進→後進操作の過度特性、バックパワーによる原動機の速度上昇の問題、定出力制御、主回路切換などを中心にそれらをどのように取り扱ったかについて詳述した。関係者各位のいささかのご参考ともなれば幸いである。

終わりに水産庁,池貝鉄工株式会社,日立製作所の関係各位に多 大のご指導をいただいたことを深く感謝する。

#### 参 考 文 献

- (1) 本間,二瓶,横田,中山: 日立評論 43,521 (昭 36-4)
- (2) 横田, 白木: 日立評論 46, 441 (昭 39-3)
- (3) H. Gröbe: Schiff und Hafen Heft 1, 1~10 (1967)
- (4) 実用新案: 実願昭 41-70622
- (5) 特許: 昭 39-444548
- (6) 実用新案: 実願昭 41-44899