

海中作業実験船の自動船位保持装置

濱田 幸信^{*1} 中西 俊之^{*2} 網谷 泰孝^{*2}
久米 範佳^{*2} 野々瀬 茂^{*3} 山本喜多男^{*3}

海中作業実験船は1979年から海洋科学技術センターによって計画検討が開始されたが、本船の使命からみて定点保持システムの必要性が認識され、国産の自動船位保持システム(DPS)を搭載することとなった。本DPSの機能、性能、制御方式等に関し、学識経験者によって構成される海中作業実験船検討委員会の指導のもとに詳細な調査検討が行われた。その結果、6000 m級深海におけるDPSと共に潜水作業の安全を考慮したDPSを構成することができた。また開発したDP制御装置用の制御プログラムは、コンピュータシミュレーションを行った結果、十分満足のゆく性能を有することが確認された。

Dynamic Positioning System of the Underwater Work Test Vessel

Yukinobu Hamada^{*4} Toshiyuki Nakanishi^{*5} Yasutaka Amitani^{*5}
Noriyoshi Kume^{*5} Shigeru Nonose^{*6} Kitao Yamamoto^{*6}

A comprehensive study on the underwater work test vessel has been conducted by the Japan Marine Science and Technology Center since 1979. From the viewpoints of the mission of the vessel, the necessity of the Dynamic Positioning System was recognized and JAMSTEC decided to install a domestically made DPS. A detailed investigation of performance, function and the control system had been made in cooperation with the Investigation Committee for the vessel, which is comprised of professors, ship operators and other persons possessing technical knowledge and experience.

Following a comprehensive investigation, the DP system, taking into account the safety of diving work as well as the mode of 6,000 m water depth, could be organized. Also, following various kinds of computer simulations, the control program developed for the DP controller has been confirmed to have satisfactory capabilities.

*1 運輸省船舶技術研究所 (前深海開発技術部)

*2 深海開発技術部

*3 三井造船(株)

*4 Ship Research Institute (formerly Deepsea Technology Department)

*5 Deepsea Technology Department

*6 Mitsui Engineering & Shipbuilding Co. Ltd.

1. ま え が き

当センターが現在昭和60年5月の竣工をめざして建造を進めている海中作業実験船には、自動船位保持装置 (Dynamic Positioning System : DPS) が装備される。本船は、潜水作業技術の開発、深海底探索システムに関する研究開発、ならびに海底精査技術に関する研究開発に関連する各種海洋実験に従事することを目的とした船であり、海洋における研究開発のための基地としての使命を有する船である。したがって装備される DPS は、これら海洋実験に不可欠な装置として位置付けられ、学識経験者で構成される海中作業実験船検討委員会において、あらゆる角度から検討が行われてきた¹⁾。同委員会には特定の問題を専門に検討する部会の一つとして DPS 専門部会が設けられ、昭和55年度以降約4年間にわたり DPS のシステム全体にわたる計画検討が実施され、本船用 DPS の全体骨子ができ上がった。ここで特に重点が置かれたのは、DPS が潜水作業実験に使用されるため、潜水作業時の安全対策に関する検討、すなわちシステムの性能と信頼性および深海域における位置保持制御方式の計画検討であった。

DPS の使命は、推力装置を用いて船の位置と船首方位をある目標値に保持することである。すなわち風、波、潮流による外力にきつ抗すべく推力装置を作動させ船位を保持することである。この技術は 1960 年代にほぼ確立されたもので、その基礎技術は文献²⁾等に詳しく述べられており、本 DPS もこれを基礎に置いている。DPS を計画する上での重要な課題は、スラスト力量と制御系の決定であるが、本船の場合、まず水槽試験および風洞試験によって必要なデータを得、シミュレーションにより許容外力特性を検討し、スラスト力量が決定された。制御系についてはセンサの選定、その信号処理方式、位置や方位の制御方式、等に関し相当量のシミュレーション解析が実施され制御方式が決定された。例えば DPS のデザインポイントは、位置保持精度を向上すること、およびノイズや波の運動によって生ずるスラスト応答を低減すること、この二つの相反する要求に対して適切な妥協点を見い出すことである。これは信号処理の問題に帰結されるが、最近の DPS の

多くが kalman フィルタを採用するようになり、本 DPS でも詳細にこれを検討し採用することとした。その内容は文献³⁾に示されるものを基本にしている。

また本船は水深 6,000 m 級のいわゆる深海 DPS の必要があるが、この問題はスラストの放射雑音にマスクされ位置センサである音響測位装置の精度が低下することである。本船の水中放射雑音の低減対策は別途音響専門部会で検討されているが、スラストの放射雑音を減らす直接的な対策はスラストの運転台数を減らすことである。このような観点から絶えず外力が最小となる方向に船を立てることによってスラストの減機運転を可能とする制御方式が検討され、シミュレーションによる検討の結果これの採用が決定された。さらに近年、光ファイバによる光通信装置の船舶への採用例も多くなり実績も散見されることから、耐電気雑音性が良いという長所を生かすべく本 DPS にも採用されることとなった。

ここではこれら自動船位保持装置の概要を説明し、さらに実機用に開発した制御プログラムによって実施したシミュレーションの結果について報告する。

2. 要 求 性 能

本 DPS に対する要求性能を次に示す。

(1) 外力条件

風 : 風速 16 ノット以下、風向は任意の方向。

波 : $\frac{1}{3}$ 有義波高 1.25 m 以下、到来方向は任意の方向。

潮流 : 流速 2 ノット以下、流向は船首対向 (船首を流れに立てる)。

(2) 目標性能

水深 50 ~ 500 m の範囲において、10 m あるいは水深の 5 % のどちらか大きな値以内の誤差半径で位置を保持できるものとする。また 6,000 m の水深において 300 m 以内の誤差半径で位置を保持できるものとする。ただし位置信号が正常に受信できる場合とする。

以上のように、500 m 以浅の浅海域と水深 6,000 m までの深海域に分けて目標性能を定めたのは、前者は主に潜水作業実験を目的としており、後者は深海底探索あるいは海底精査を目的としているからであり船位保持の方法も異なる。また位置

保持性能が水深を基準にしているのは、主たる位置センサが音響測位装置であることによるものである。

すなわちDPSの位置保持精度は、主に位置センサの誤差と波による船体動揺の和で表わされ、式(1)のように表現できる。

$$\sigma_R^2 \geq \sigma_S^2 + \sigma_{WV}^2 \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで

- σ_S : 位置センサ不規則誤差
- σ_{WV} : 波による不規則動揺
- σ_R : 位置保持誤差

ここで短周期の波動揺に敏感な制御を行うことは、位置保持精度を向上させたとしても過大なスラスト応答、つまりスラストモジュレーションの増大をまねくことになり、このスラストモジュレーションはスラストの機械寿命の短縮、燃費の増大、さらには水中放射雑音の増大につながるものである。したがって良好なDPS制御とは、このスラストモジュレーションを低減することと、位置保持精度を向上させることの、二つの相反する要求に対して適切な妥協点を見いだすことのできた制御であるといえる。これについて以前には、Adaptive Control⁴⁾などが実施されたが、近年はKalmanフィルタが採用されるようになり、本DPSでもこれによって目標性能を達成しようとしている。

次に6,000m級の大深度における船位保持誤差の問題であるが、性能は位置センサの性能に大きく依存する。今、サンプリング周期 T で測定される測定値 x_n は互いに独立な確率変数で、平均値 μ 、標準偏差 σ_S の正規分布にしたがうと仮定すると、単位時間あたりに得られる $N = 1/T$ 個の測定値の平均操作によりその誤差 σ は式(2)のように与えられる。

$$\sigma = \sigma_S / \sqrt{N} = \sigma_S \cdot T^{1/2} \quad \dots\dots\dots(2)$$

したがって位置センサの性能を表わす指標の一つとして $\sigma_S \cdot T^{1/2}$ を考えるならば、この指標は値が小さいほど性能が良いことを表わしている。

本船で使用する位置センサの一つである音響測位装置の場合、性能の目安として式(3)が与えられている。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_S &= 0.01 Z \\ T &= 2Z / \text{音速} \end{aligned} \right) \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで、

Z : 水深 (m)

すなわち、音響測位装置では、 σ_S および T は水深、厳密にはスラントレンジによって変わる。一方、電波航法装置の一つであるロランCでは $\sigma_S = 60\text{m}$ 、 $T = 1$ 秒程度が得られ、性能は水深に無関係である。これらを式(2)を用いて比較すれば、3,000m以浅の海域では音響測位の方が性能が良く、3,000mを越える海域ではロランCの方が良いということがわかる。このことから、水深3,000mを越える所では位置センサにロランCを充てることとし、これによって大深度DPSを実現しようとしている。ただしロランCにはドリフト誤差が存在するため、この補正のために音響測位装置を使用する必要がある、したがってロランCと音響測位装置を併用することによって大深度DPSが実現されることになる。

3. 全体システム

図1にDPSの全体システムを示す。図中のサブシステムそれぞれについて、以下に説明する。

3.1 音響測位装置

本装置は海底に設置したトランスポンダを基準としてSSBL (Super Short Base Line) 方式およびLBL (Long Base Line) 方式による船位測定機能を備えており、次の性能を有している。

- 使用水深 :
 - 浅海…… 500m 以内
 - 深海…… 6,000m 以内
- トランスポンダ電池寿命 :
 - 低出力…… 1.2×10^6 回ピング
 - 高出力…… 2×10^5 回ピング
- 周波数範囲 :
 - 10 ~ 15KHz
- 測位誤差 :
 - SSBL…水深の1% (1σ), ただし水平レンジが水深の20%以下
 - LBL…… 5m (1σ), ただしベースラインが水深の100%以上

トランスポンダは低出力側が85dB (re 0dB = $1 \mu \text{ bar} / \text{Hz}^{1/2}$) 以上, 高出力側が94 dB 以上の送波音圧を有し, 切換によって使い分けられる。つまり浅海においては, 伝搬損失が少ないため低出力で使用し, 電池寿命を延ばすことにより長時間の潜水作業実験に耐えられるようにしている。またDPSの位置センサとして使用する場合は, SSB方式で使用し, かつ潜水作業時には最低2本のトランスポンダを海底に設置することを原則としている。

3.2 マイクロ波測位装置

本装置は主にDPS潜水作業のバックアップ位置センサとして使用されるもので, 次の性能を有している。

- ・最大レンジ : 100 km 以内
- ・測距精度 : 3 m (1σ) 以内
- ・周波数 : 主局 8960 MHz, 従局 8860 MHz

本装置は陸上に従局を最低2局離して設置し, 3角測量方式によって位置を測定するものであるが, いずれか一つのレンジが測定不能になっても測位が継続できるよう, 従局は適切な距離をおいて3局設置することを原則としている。

3.3 電波航法装置

本装置はNNS (Navy Navigation Satellite System), ロランCおよびデッカシステムを結合したハイブリッド航法機能を備え, これに前述の音響測位信号およびマイクロ波測位信号を加えた総合的な航法機能を備えている。この中のロランCの測位信号は, 深海DPSの位置センサとしても使用される。

3.4 ジャイロコンパス

方位センサとしてもDPS専用のジャイロコンパスが装備されるほか, 本船用ジャイロコンパスもバックアップセンサとして使用できる。これらは方位保持制御のセンサとして使用され, またDPS専用ジャイロコンパスはヨーイングの測定による波スペクトルの推定用センサとしても使用される。

3.5 気象観測装置

潜水作業にあってはダイバーの安全確保の意味から気象海象の変化に迅速に対応する必要があり, 気象ファクシミリ等による情報収集のほかに船上

観測が重要となる。このため風向, 風速, 気圧, 気温を測定する装置が装備されているが, この中の風向, 風速信号はDPSに供給された風圧補償制御に使用される。

3.6 2軸対水速度計

2軸 (サージおよびスウェー方向) の対水速度を測定するドプラソナー方式の対水速度計が装備されており, DPSでは深海モードKalmanフィルタの入力センサの一つとして使用される。

4. 自動船位保持装置

図2に自動船位保持装置の制御装置全体の様子を示す。

4.1 主推進機

主推進機は船首尾方向の運動制御に使用される。プロペラは可変ピッチプロペラで, 減速機を介して2台の誘導電動機で駆動される。電動機は860 kw (1,200 rpm) / 230 kw (600 rpm) の極数変換による2段速度切換方式となっており, プロペラ回転数が高速, 低速の2段に切換えられる。低速側はプロペラの発生する水中放射雑音を低減する必要がある場合に使用され, DPSではこれを使用する。この低速回転においてDPSで予定している推力は, ボラードプル状態で前進8 ton, 後進4 ton である。

4.2 スラスト

トンネル型可変ピッチプロペラ方式のスラストが合計8台, ロワーハルに装備されている。これらのスラストは正横方向の運動制御および回頭制御に使用され, 船首スラストは430 kw, 船尾スラストは250 kwの誘導電動機によって駆動されそれぞれ6.8 ton および4 ton の推力を発生する。潜水作業時のDPSではスラストは全数運転し, 深海DPSでは半数運転とすることを原則としている。この潜水作業時のスラスト全数運転は, 運転中にいずれか1台のスラストが故障停止しても残りのスラストで位置保持が継続できるという, 並列冗長による信頼性向上対策である。また深海で半数運転とするのは, 水中雑音を低減し, 音響測位装置の測位機能を継続維持させるための対策である。

4.3 船位保持装置

船位保持装置は主装置と補助装置の2系統で構

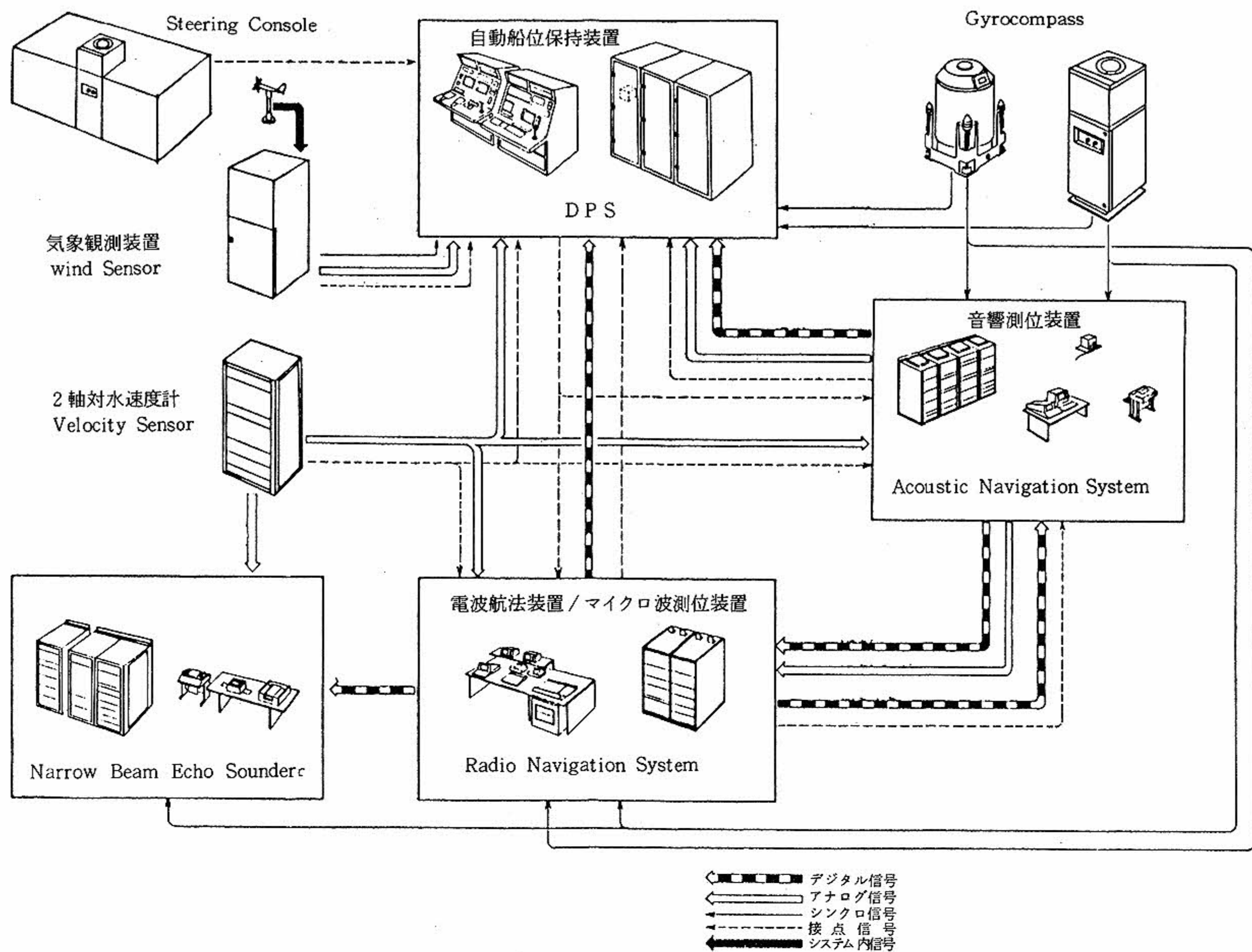


図1 DPSの全体システム
Total system of DPS

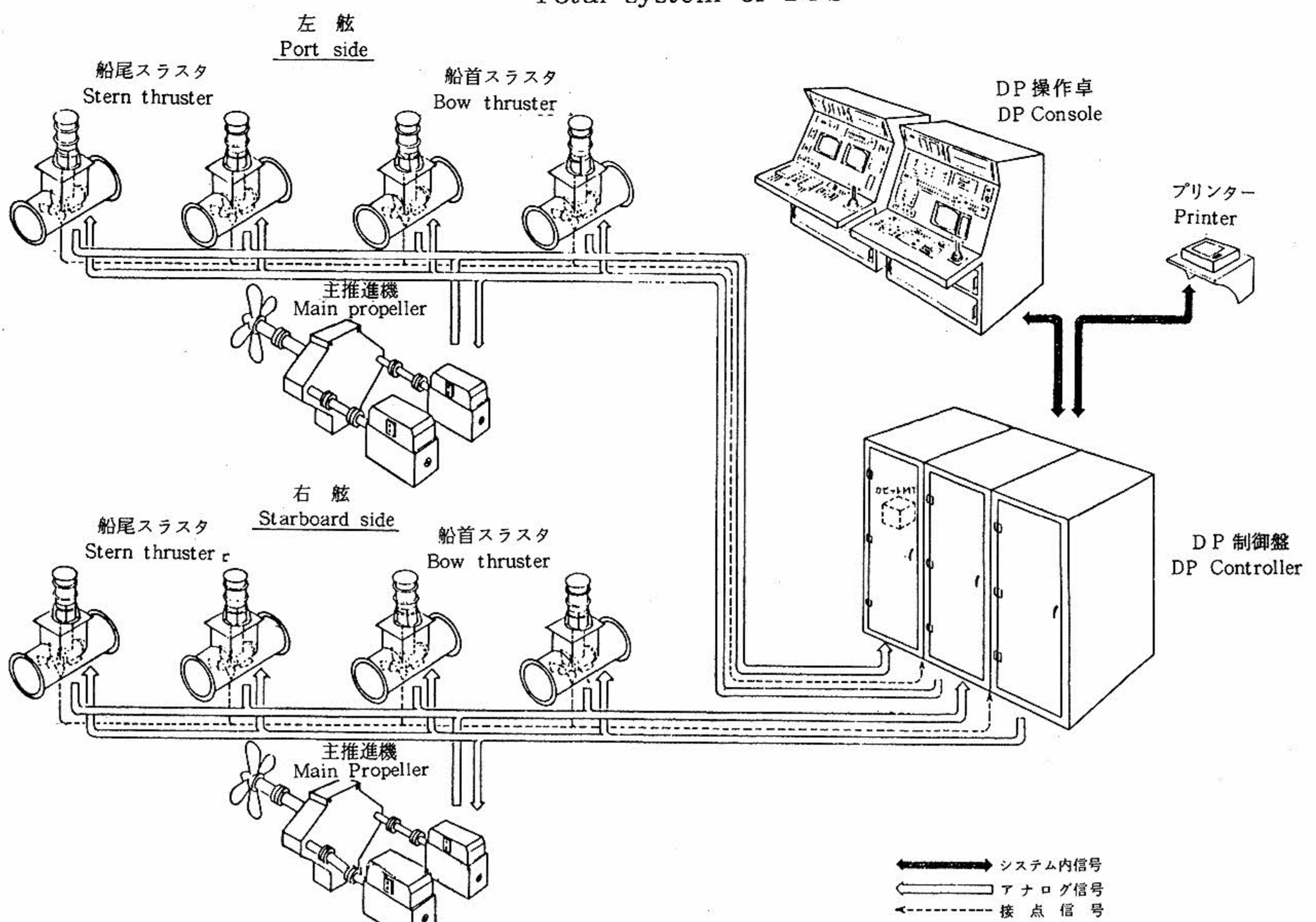


図2 自動船位保持装置
Dynamic positioning control system

成され、主装置をA型、補助装置をM型と呼称している。A型系、M型系それぞれにDP操作卓およびDP制御盤が設けられており、さらにA型にはデータ記録用のプリンタおよびカセット磁気テープ装置が付属している。この構成は潜水支援用DPS船に定められたガイドライン⁵⁾を参考にして装備されたもので、ダイバーの安全に注意を払ったものである。装置のA型およびM型の操作卓を写真1に示す。写真の右側がA型、左側がM型の操作卓である。

4.3.1 船位保持装置A型の制御機能

A型は標準モードと深海モードの二つの制御モードを備えている。標準モードにはスタンバイ、手動、半自動、自動の四つの制御機能が設けられており、深海モードにはスタンバイ、向心、深海自動の三つの制御機能が設けられている。これらの機能を次に示す。

- (1) スタンバイ：推力装置に推力零を指令する。
- (2) 手 動：位置および方位の保持をジョイスティック操作で行う。
- (3) 半自動：位置保持はジョイスティック操作、方位保持は自動で行う。
- (4) 自 動：位置および方位保持を自動で行う。
- (5) 向 心：船首を絶えず目標点に向け、目標点から一定半径離れた円周上を漂う。
- (6) 深海自動：推定した潮流方向に船首を保持しながら位置を保持する。

4.3.2 船位保持装置M型の制御機能

M型は潜水作業時におけるA型のバックアップ装置の役割をにない、スタンバイ、手動、半自動の三つの制御機能を備えている。つまりA型によって自動船位保持を行っている間は、M型を半自動で待機させておき、万一A型が故障した場合、オペレータがM型に切り換えて手動で位置保持を行うものである。M型には、A型の作動中の平均的な制御力を監視し、M型に切り換えられた場合にはA型が過去に出力していた平均制御力を引き継ぐ機能を備えており、切り換え時の船の急激な移動を防ぐ対策が施されている。

4.3.3 光通信装置

DP制御盤とDP操作卓の間の操作信号系、およびDP制御盤と各推力装置の間の指令/応答推力の信号系は光ファイバによる光通信装置で結ば

れている。前者の操作信号系はデジタル信号であり、光系は1 Mbit/秒の伝送速度である。また後者の推力信号系はアナログ信号であるが、これを光通信では12bitのAD/DA変換により1 Mbit/秒の伝送速度で伝送している。光通信を採用した主目的は耐電気雑音性の向上にある。

5. シミュレーション

DPSの制御性能データを効率的に得る手段は、コンピュータシミュレーションによる方法である。さまざまな条件下において制御性能を実海域で確認することは、時間や費用の面で不可能に近く、このため本DPSではその大半の性能確認データをシミュレーションで得ることとし、最後の機能確認を海上で行う予定で作業が進められている。ここでは本DPSの許容外力特性と、実機用に開発した制御プログラムを大型計算機(IBM 3081)にかけて実施した制御のシミュレーション結果を示す。

5.1 許容外力特性

船体が外力にきつ抗できる条件は、次の三つの式を同時に満すことである。

$$\begin{aligned} / X_{t \max} / = & / X_h(\beta, V) + X_w(\psi_w, V_w) \\ & + X_{ww}(\psi_{ww}, H) / \cdots (3.1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} / Y_{t \max} / = & / Y_h(\beta, V) + Y_w(\psi_w, V_w) \\ & + Y_{ww}(\psi_{ww}, H) / \cdots (3.2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} / N_{t \max} / = & / N_h(\beta, V) + N_w(\psi_w, V_w) \\ & + N_{ww}(\psi_{ww}, H) / \cdots (3.3) \end{aligned}$$

ここで

$X_{t \max}, Y_{t \max}, N_{t \max}$: 最大制御推力

X_h, Y_h, N_h : 流体力

X_w, Y_w, N_w : 風圧力

X_{ww}, Y_{ww}, N_{ww} : 波漂流力

式(3.1), (3.2) および (3.3) において X はサージ方向, Y はスェー方向の力であり, N はヨーイングモーメントである。ここで流体力は相対流向 β と相対流速 V , 風圧力は相対風向 ψ_w と相対風速 V_w , 波漂流力は相対波向 ψ_{ww} と波高 H の関数として表わされる。したがって許容外力特性は、これらパラメータによって多数の組み合わせ

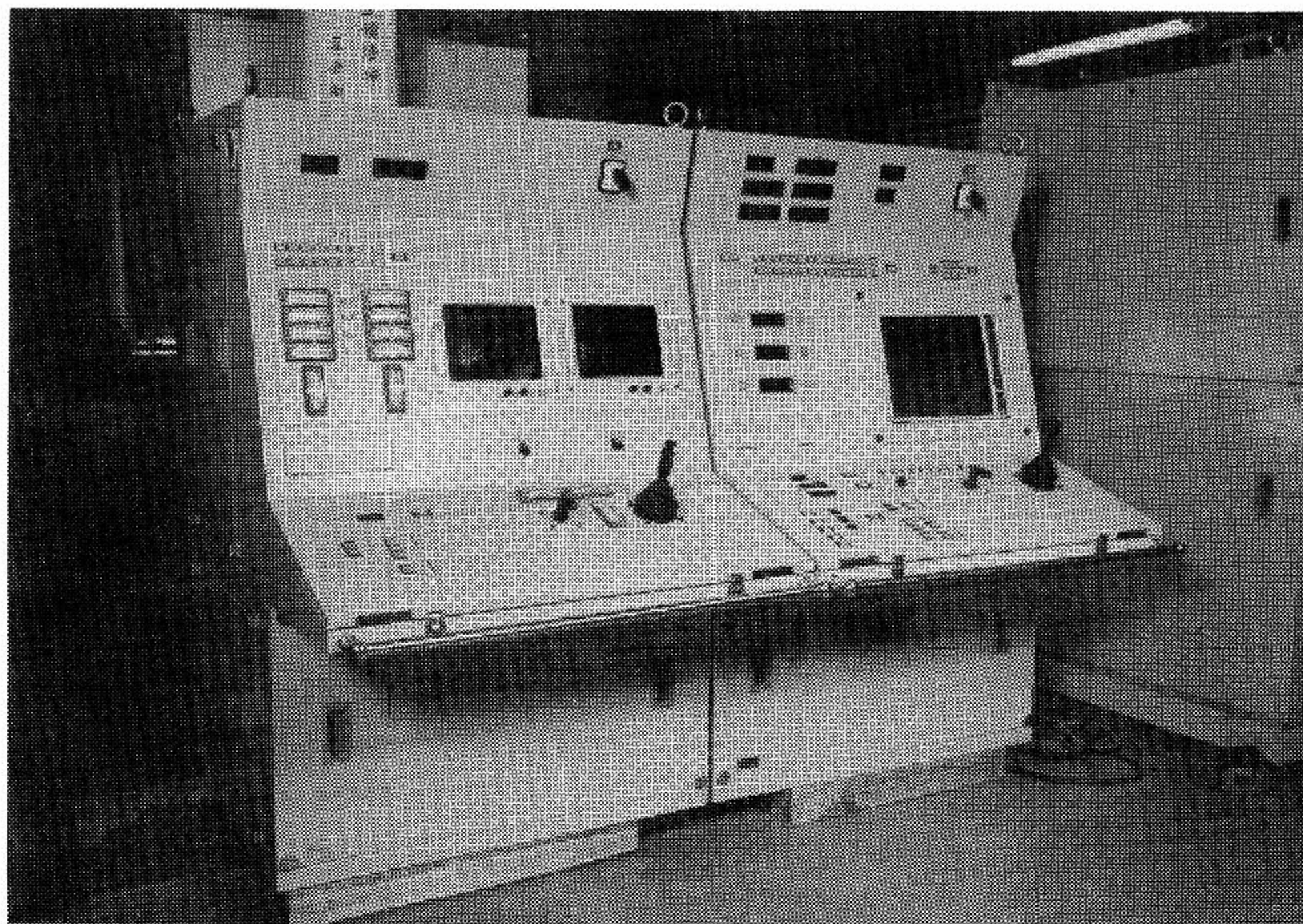


写真1 DP操作卓
DP Console

せができるが、本DPSに与えられた外力条件の場合、流体力に比較して風圧力や波漂流力は小さい。このためここではこれら風圧力および波漂流力を次のように固定した場合の許容外力特性、つまり許容流向-流速特性をシミュレーションにより求めた。

$$\begin{aligned} \text{風向 } \psi_w &= 60^\circ, \quad \text{風速 } V_w = 16 \text{ ノット} \\ \text{波向 } \psi_{wv} &= 60^\circ, \quad \text{波高 } H = 1.25 \text{ m} \\ &\quad \quad \quad (\frac{1}{3} \text{ 有義値}) \end{aligned}$$

その様子を図3に示す。図は流向 β に対し何m/秒の流速に耐えられるかを円グラフに表わしたものである。

これによれば流速を2kt (1.08m/秒)とすると、図に示すようにいずれの状態においても耐えられる流向は約 30° 以内である。

5.2 制御性能シミュレーション

シミュレーションには海中作業実験船の船体モデルを使用しており、主要目は垂線間長 $L_{PP} = 53\text{m}$ 、型幅 $B = 28\text{m}$ 、型深 $D = 10.6\text{m}$ 、吃水 $d = 6.3\text{m}$ 、排水量 3,500ton である。また想定外力は流速 2kt、流向 30° 、風速 16kt、風向 90° 、波高 1.25m、特性波周期 6.25秒であり、座標はX軸の正值を北に取った右手直交系による地球固定座標 $X_{EE} - Y_{EE}$ で表示している。

5.2.2 標準モード

標準モードにおける自動制御方式は、位置制御に比例・微分・定常力補償・風圧力補償方式を採用し、方位制御に比例・微分・積分・風圧モーメント補償方式を採用している。この制御方式におけるコールドスタート性能を以下に示す。ここでコールドスタートとは、制御装置の内部で推定する定常力が全く推定されていない状態からのスタートをいう。図4は目標点(原点)からスタートした場合の、1,400秒間の船体運動の様子を表わしたもので、スタート後に一度外力の下手に流され、やがて目標点に復帰する軌跡図である。この詳細をX軸方向の運動、Y軸方向の運動および回頭運動に分解して表わしたものが図5、図6、図7である。それぞれの図は、横軸に時間を取り、真値を○印、センサで観測した観測値を+印、Kalman フィルタで推定した値を△印でプロットしたもので、位置センサの誤差は標準偏差で5m、サンプリング周期2秒、また方位センサの誤差は標準偏差で 0.01° 、サンプリング周期1秒を想定している。図8は、船首スラストに対する指令推力を○印、それに対するスラストの機械的な応答を△印でプロットしたものであるが、遅れが小さいため、両者は重なって見える。また図9は、主

推進機に対する指令推力を○印、プロペラ翼角がこれに応答することによって実際に船体に作用した力を△印で表わしたものである。両者に差があるのは、プロペラが前進速度を持つために発生推力が低下することによる。図10は電力の消費状態を表わしたもので、○印は全電力、+印は船首スラストの合計電力、×印は船尾スラストの合計電力、△印は主推進機の合計電力である。

5.2.3 深海モード

深海モードには向心制御と深海自動の二つの制御機能があることを前述した。向心制御の制御方式は、位置制御および方位制御に比例・微分制御方式を採用しており、深海自動には比例・微分・積分方式を採用している。また kalman フィルタは、標準モードのものと違い対水速度センサの信号も入力されるようになっており、潮流の推定機能も持っている。図11は向心制御の特徴を示した

めに、非常に特異な外力条件を与えて行ったシミュレーションである。つまり目標点の東側では南向きの潮流があり、西側では北向きの潮流があるという条件である。図によれば、目標点の回りで絶えず目標点に向くという向心制御の特徴が読み取れるであろう。次に外力条件を標準モードの場合と同じに取り、位置センサはロランCを想定してその誤差を標準偏差で60m、サンプリング周期を1秒とした場合を図12に示す。図は0地点から向心制御で目標点に近づき、外力の下手で安定した後2,000秒まで向心制御を続け、2,000秒目のK点で今度は深海自動に切り替えて目標点上に達するまでを表わしたものである。

以上シミュレーション結果の一例を示したが、これら一連のシミュレーションによって、本DPSの目標性能は十分達成されることが確認された。

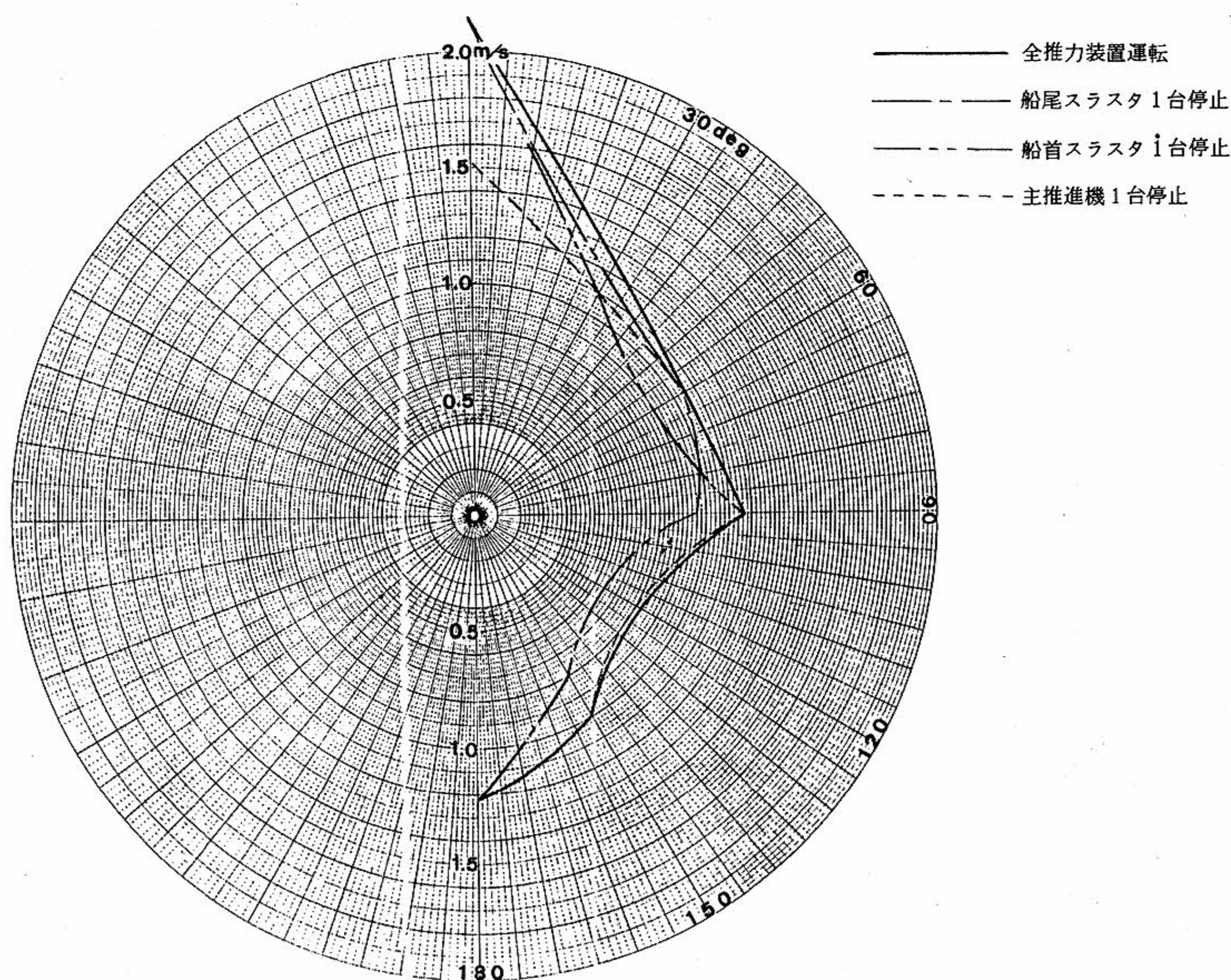


図3 許容外力特性
Operational capability

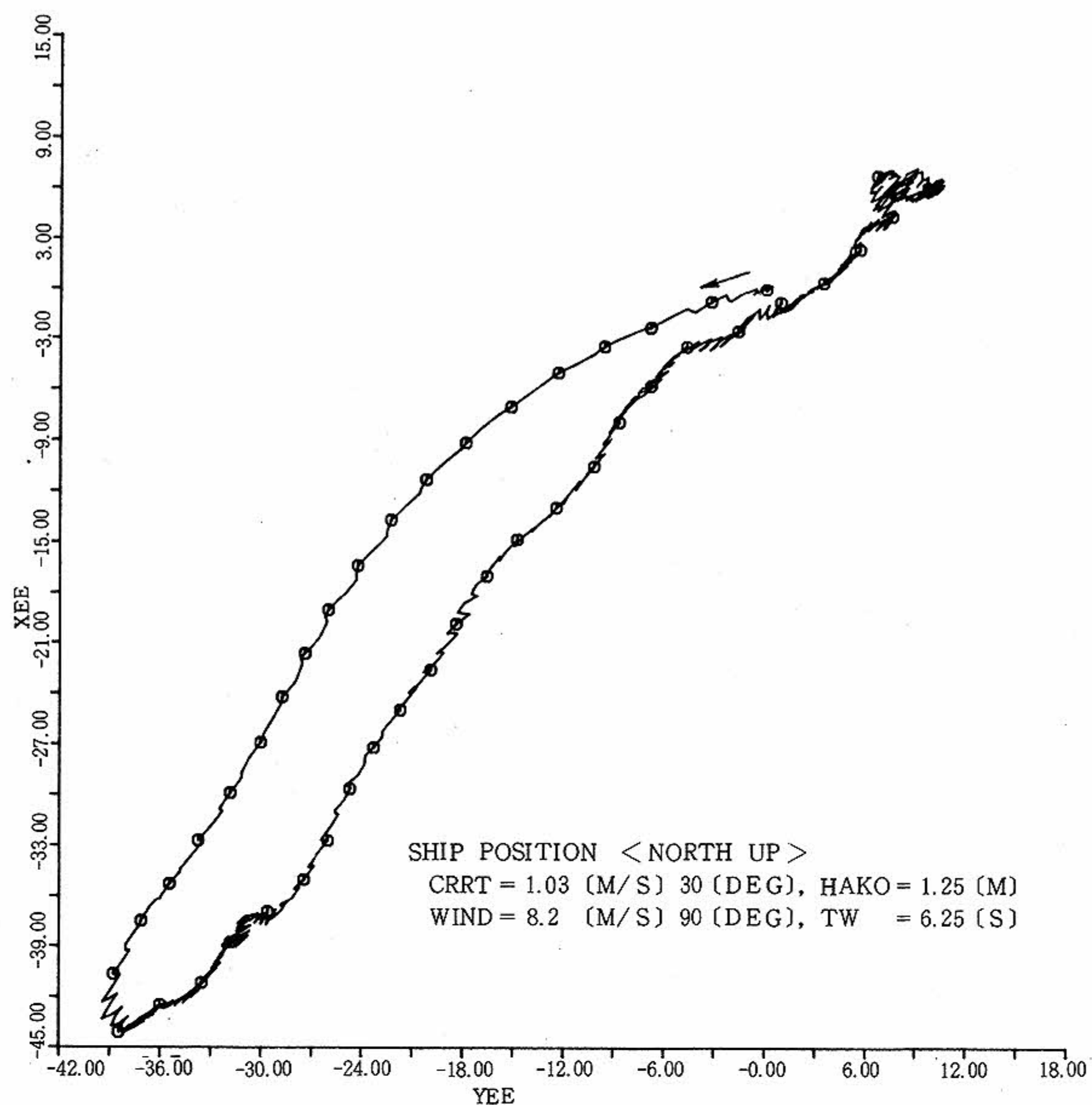


図4 船体の重心運動軌跡
 Locus of gravity center

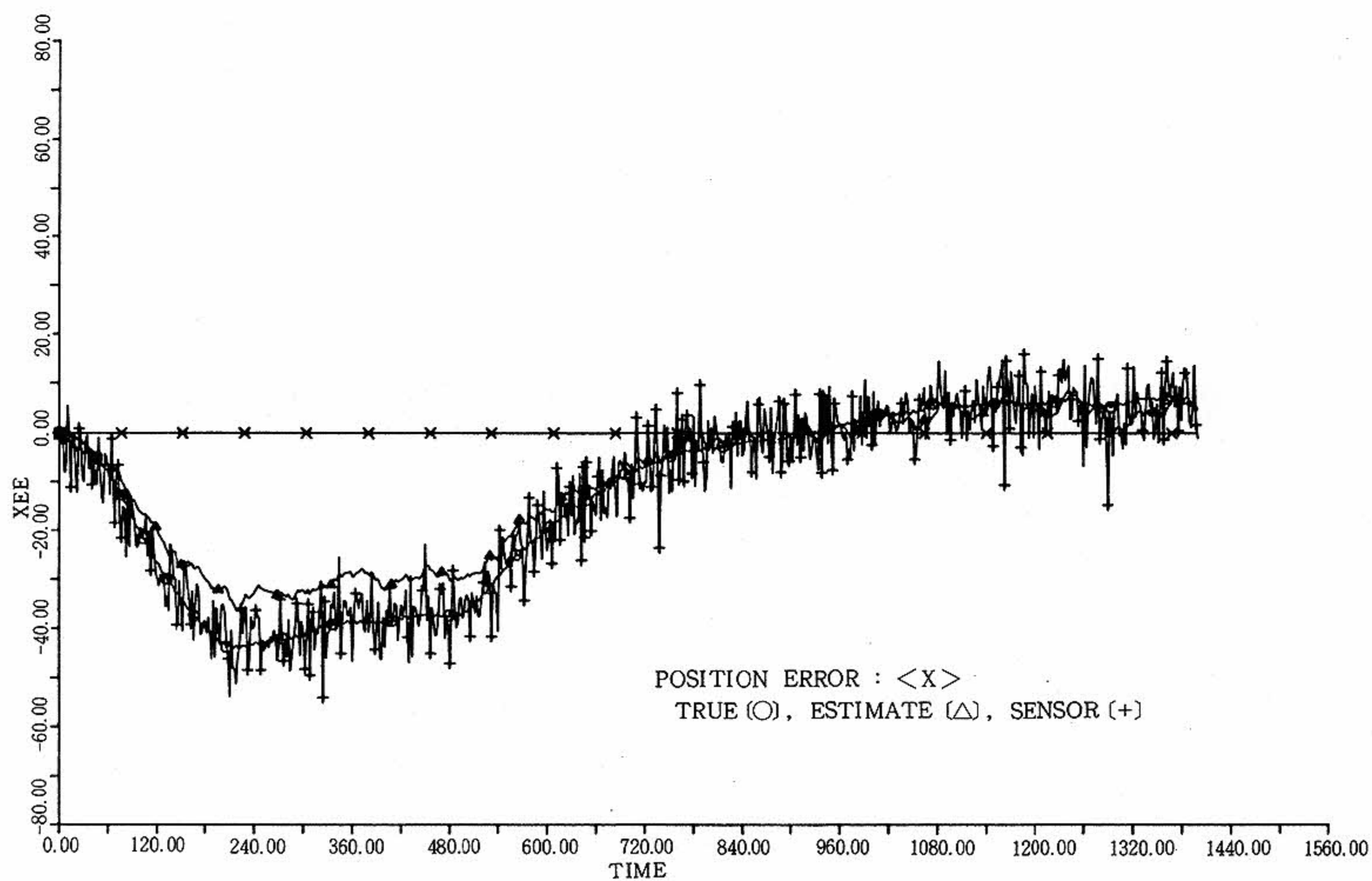


図5 X軸制御特性
 X axis control

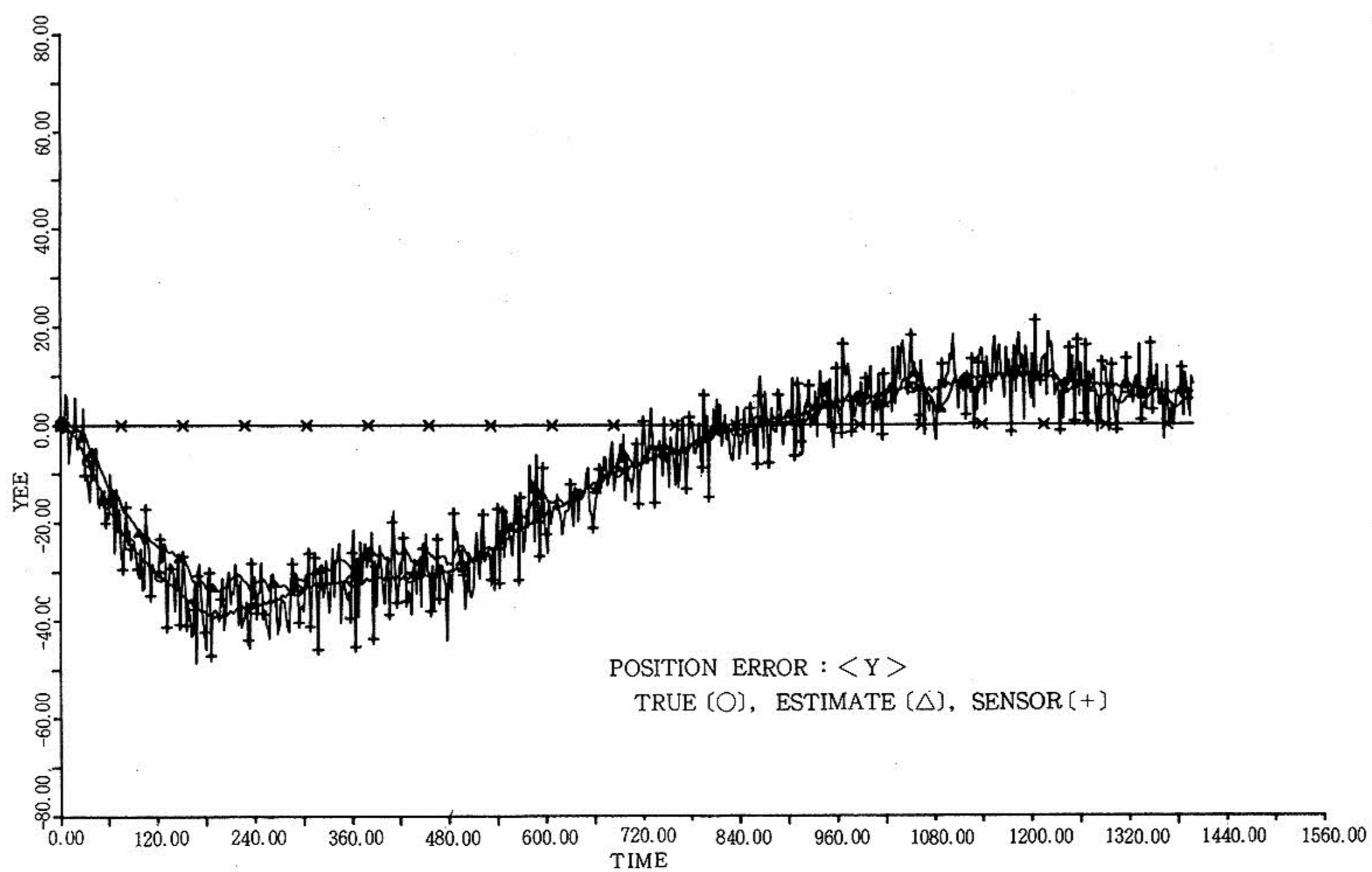


図6 Y軸制御特性
 Y axis control

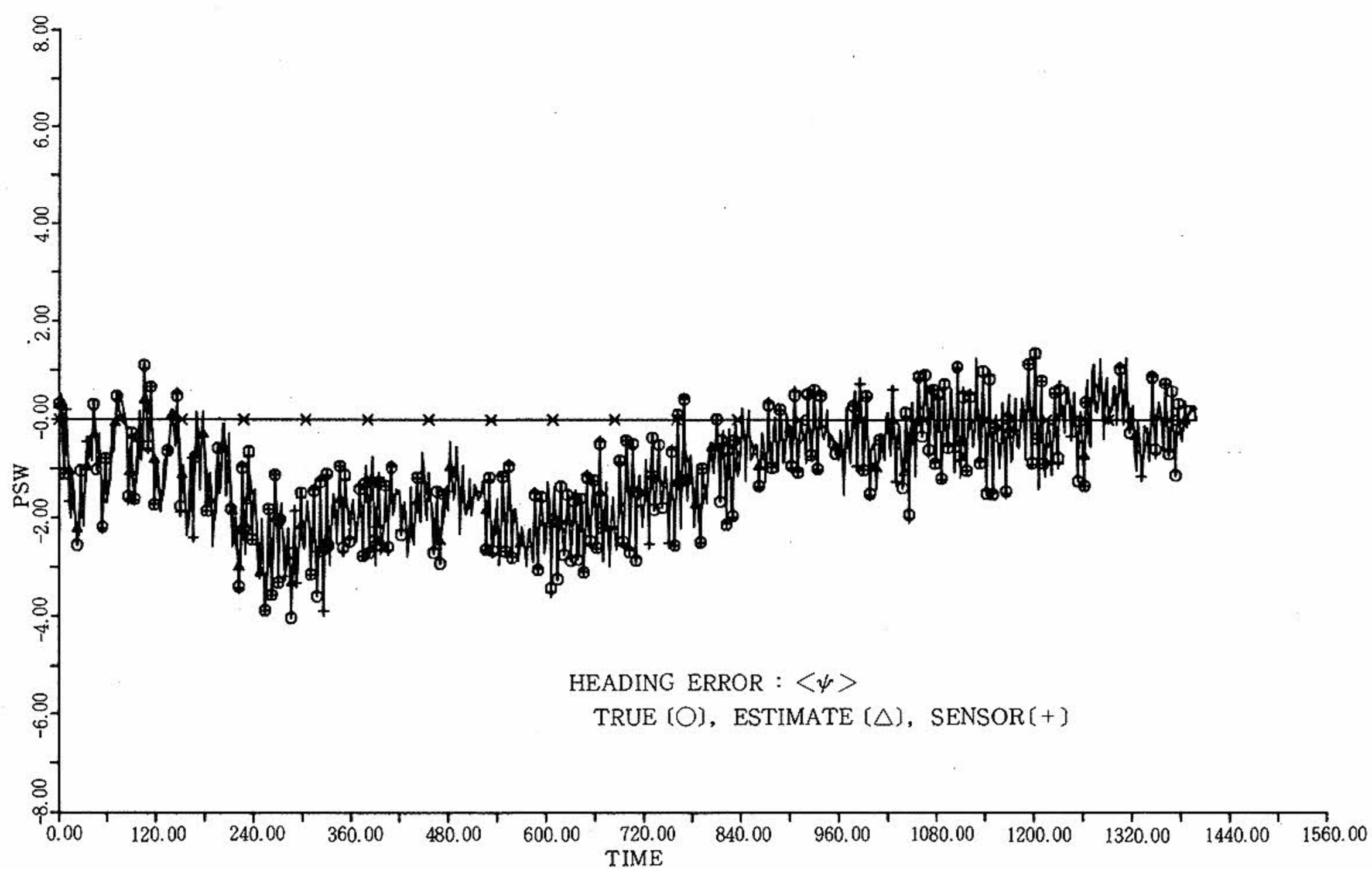


図7 方位制御特性
 Yawing control

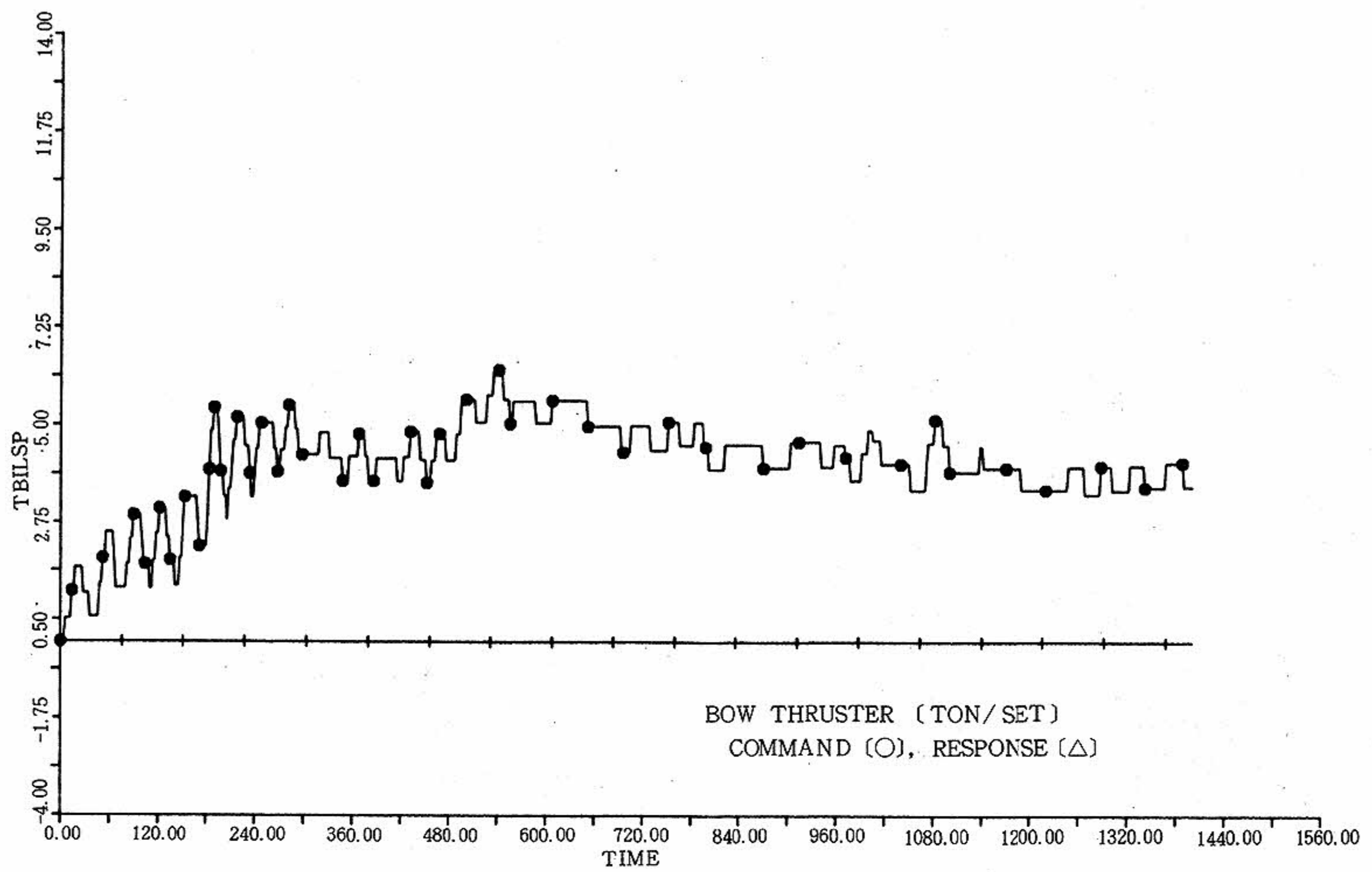


図8 船首スラスト推力
Thrust of bow thruster

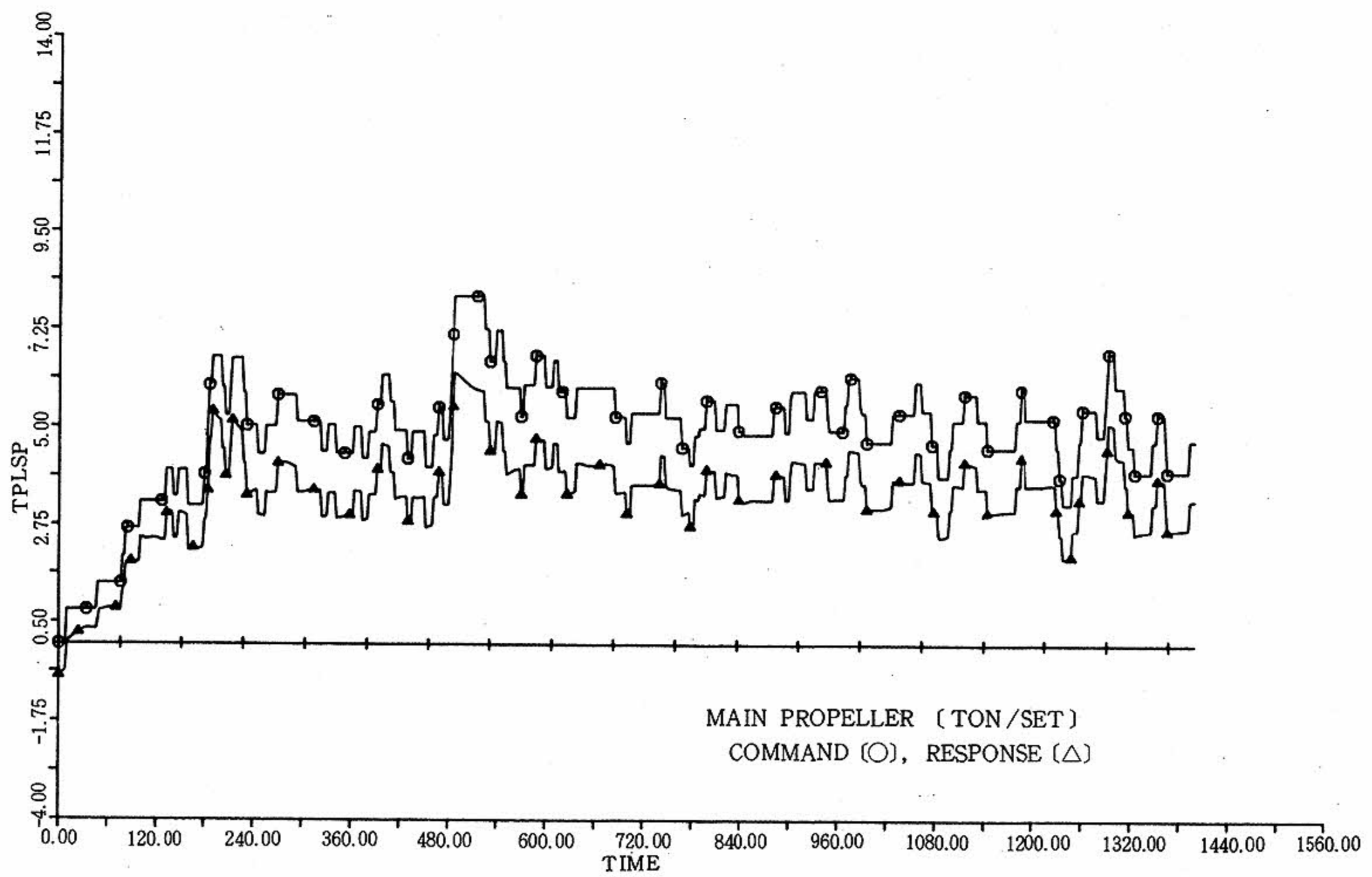


図9 主推進機推力
Thrust of main propeller

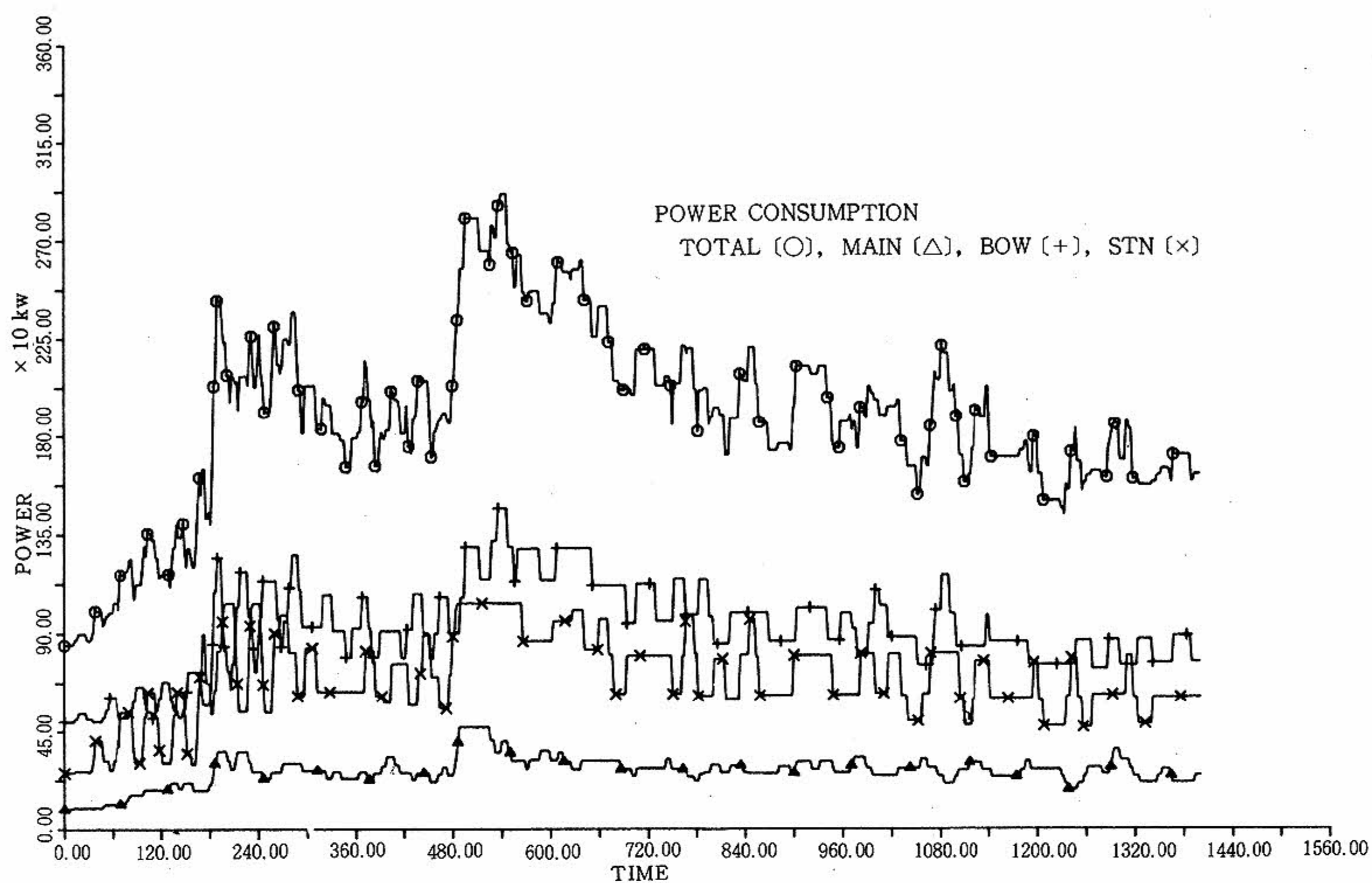


図10 電力消費
Power consumption

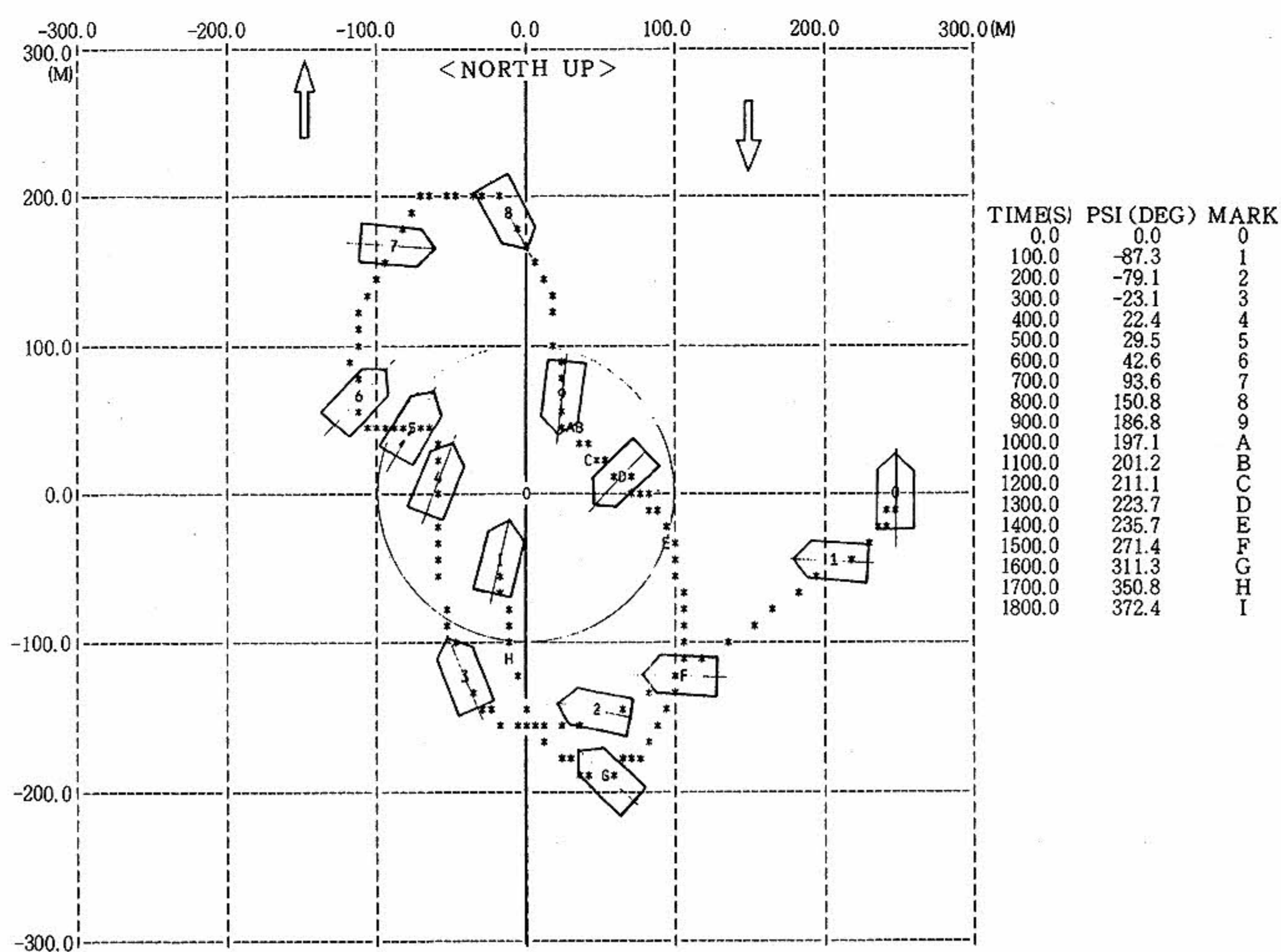


図11 向心制御
Control mode of glare at center

Houston, 1974-5, 2, 10-13 (OTC 2036)

- 5) U. K. Dept. Energy, Nor. Petro. Directorate, "Guidelines for the Specification and Operation of Dynamically Positioned Drilling Support Vessels", (1980)

- 6) Grinble, M. J. et al., "The Design of Dynamic Ship Positioning Control Systems Using Extended Kalman Filtering Techniques", Proc. OCEANS '79, San Diego, 1979-9, IEEE, 488-497