

新ジョイスティック操船システム “Super Joy” の開発

Development of Advanced Joystick Control System “Super Joy”

下 関 造 船 所 小 嶋 洋 幸*¹ 磨 田 徹*²

技 術 本 部 和 田 洋 二 郎*³

エレクトロニクス事業部 寺 田 郁 二*⁴

調査船など特殊な船舶に主として装備されてきたジョイスティックコントロールシステム (JCS) は近年、内航船を中心として操船システム近代化への気運が高まり、一般船舶への搭載も増えつつある。操船作業の省人・省力化と船舶の安全性向上を更に進めるには、外乱下での船体操縦運動、運動時のアクチュエータ推力特性などを十分考慮した操船システムとする必要がある。こういった背景の下、船体操縦運動制御とエレクトロニクスが一体となって当社の JCS “Super Joy” は開発された。ジョイスティックレバーを倒した方向へ船体移動可能とし、風及び未知外乱補償など新たな機能も加えてマンマシンインタフェースの優れたシステムとしている。

The Joystick Control System(JCS), which controls several actuators with one joystick lever and one rotating dial, is capable of making the maneuvering of a ship easier and safer. So, the JCS is expected to get more popular for survey vessels and ferries with many actuators, and domestic liners which needs to be modernized and labour-saving. According to the above background, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. has developed the “Super Joy” advanced joystick control system. “Super Joy” features the following main functions. (1) Control of the ship's moving direction in accordance with joystick operation, (2) Feed forward compensation for wind and unknown force, (3) Capability of upgrade for Dynamic Positioning System.

1. ま え が き

海洋調査船、ケーブル敷設船などにはそれぞれの目的を容易に実現するために、ジョイスティックコントロールシステム (以下 JCS と称す) が搭載されている。また、国内貨物の約 45 % の輸送を担っている内航船においても船舶の近代化が急ピッチで進められており、離・着岸システムとして JCS の採用が望まれている。離・着岸操船の概念を図 1 に示す。操船システムの近代化は“操船者とプロペラ、舵、スラスト (以下、アクチュエータと称す) とが協業しやすい環境を作ること”であり、その方策として JCS は有効である。JCS の制御能力は船舶のアクチュエータ構成に大きく左右され、アクチュエータが少数で小容量であればあるほどその制御はむずしくなる。かといって、アクチュエータを増やせば、操船はより容易になるものの、初期投資増、船体推進抵抗増などデメリットも大となる。したがって、操船システムを構築するには船舶トータルとしてバランスのとれた、コストパフォーマンスの良いシステムに造り上げる必要があると言える。船舶の建造と操縦性能解析・研究を専門とする当社が作り上げた“Super Joy”には新たな機能も盛り込まれており、操船システムの近代化にお役に立てればと考える次第である。

2. システムの概要

“Super Joy” は 1 本のジョイスティックレバーと 1 個の巡回ダイヤルにより推進プロペラ、舵、スラストなど複数のアクチュエータを制御し、船体移動、旋回などの操船を容易に実現して作業の省人・省力化と船舶の安全性向上を図るものである。

本システムの構成は次のとおりである。(図 2 参照)

- (1) マスタコントローラ 1 台
CPU, 入出力インタフェース装置などから構成され、各種

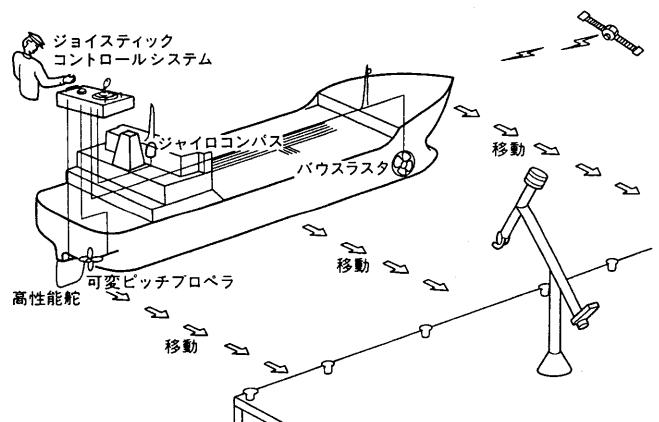


図 1 離・着岸操船概念図 船舶の離・着岸 (岸) 状況を示す。
Image of ship's maneuvering

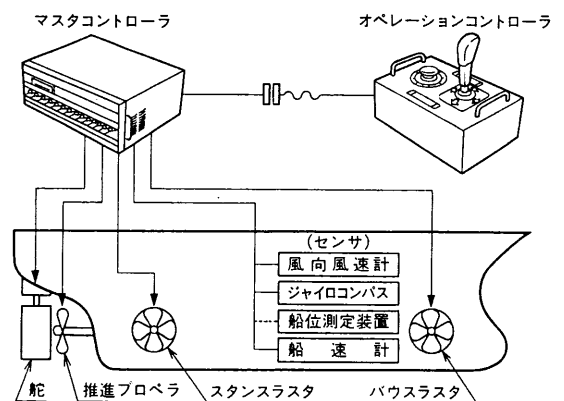


図 2 システム構成 “Super Joy” の標準的機器及びアクチュエータ構成を示す。
Outline of “Super Joy”

*1 船舶・海洋部主務

*3 長崎研究所船舶・海洋研究推進室

*2 船舶・海洋部電気・制御設計課

*4 開発・製造部制御システム二課主務

演算, 制御, 入出力信号処理を行う。

- (2) オペレーションコントローラ……………必要数
ジョイスティックレバー, 旋回ダイヤル, 通信ボードなどから構成され, 各種操作が可能である。

- (3) オペレーションコントローラ用接続コネクタ……………必要数
アクチュエータは“1-可変ピッチプロペラ (以下, CPP と称す), 1-高性能舵, 1-パワースタ (以下, B/T と称す)”を最少構成とし, “2-B/T, 1-スタンスラスタ, 2-CPP, 2-舵”といった複雑な構成まで種々対応可能である。

また, オプションとして推進合力, アクチュエータの作動状況などを表示するカラー液晶表示パネルも用意している。

本システムは“移動”“旋回”“船首方位保持”“既知外乱補償”及び“電力制限”の五つの基本機能と“船体移動位置予測”“オートトラッキング”“自動定点保持”“オートスピードコントロール”そして“未知外乱補償”の五つの拡張機能を有している。本システムの特徴は次のとおりである。

- (1) ジョイスティックレバーを倒した方向, 倒した量に応じた船体移動を実現 (最少アクチュエータ構成での真横移動が可能)
- (2) 数学モデルを使つてのシミュレーション結果により最適制御パラメータ決定
- (3) 汎用処理用 CPU と高速演算用 DSP による並列処理で高パフォーマンスを実現
- (4) システムの拡張, グレードアップが容易

3. 制御システムの構成

3.1 ハードウェア構成

本システムのハードウェアはセンサ, アクチュエータなどとの入出力信号処理を行う汎用処理用 CPU ボードと, 高速演算を行う CPU ボードから構成されており, CPU 間は高速演算用 CPU ボード上の共有メモリを介してデータの授受を行っている。

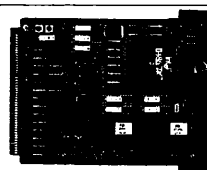
各 CPU ボードの仕様を表 1 に示す。

本システムのハードウェアの特徴は次のとおりである。

- (1) 2-CPU 構成 汎用処理用と高速演算用の 2 種類の CPU ボードにより推力配分, 外乱補償等の高速演算処理を行う部分とマンマシン系等の低速処理を行う部分に負荷を分離, 配分し, 並列処理を行っている。
- (2) 省配線 ジョイスティックレバー, 旋回ダイヤルなどの操作機器とマスタコントローラとは A/D 変換及びデジタル入出力の機能を持ったリモート入出力ボードによりシリアル通信

表 1 CPU 仕様

Specification of CPU board for “Super Joy”

CPU ボード		仕 様
汎 用 処 理 用		CPU : インテル 80486 DX クロック : 33 MHz メモ リ : ROM 512 k バイト RAM 512 k バイト 外部インタフェース : アークネット
高 速 演 算 用		CPU : テキサスインスツルメント TM 320 C30 (Digital Signal Processor) 演算速度 : 33 MFLOPS メモ リ : ROM 256 k バイト RAM 256 k バイト

で結合されている。このため, 省配線化が可能となり, システムの信頼性も向上した。

- (3) 外部インタフェース 汎用処理用 CPU ボードは伝送速度 2.5 Mbps のアークネットインタフェースを有している。構築したプログラムを CPU ボードへ高速にダウンロードでき, 動作確認用シミュレータや水槽試験, 実船試験用データロギングシステムとの結合も容易に実現できる。

3.2 ソフトウェアの構成

本システムにはその特徴である“ジョイスティックレバーを倒した方向に船体移動できる”機能のほかに, JCS による操船をより容易に行えるよう各種制御機能を設けている。制御系ブロックダイアグラムを図 3 に示す。“推力を最適に配分する機能”“風等の検出可能な外乱の影響を除去する機能”“潮流等の未検出外乱の影響を低減させる機能”“方位及び船速制御機能”“定点保持 (DPS) 機能”など要求に応じて適宜選択できるようにした。“Super Joy”の推力配分系は所定の制御力 (並進力及び回頭モーメント) が得られるように, 各アクチュエータの最大推力を勘案して推力を最適配分している。

4. 制御システムの機能

本システムは以下に示す基本機能 (4.1~4.4) と拡張機能 (4.5~4.8) を備えている。

4.1 船体運動方向フィードフォワード制御機能

ジョイスティックレバーを倒した方向と量に応じて船体を移動させる機能である。船体の運動特性と設定されたアクチュエータ

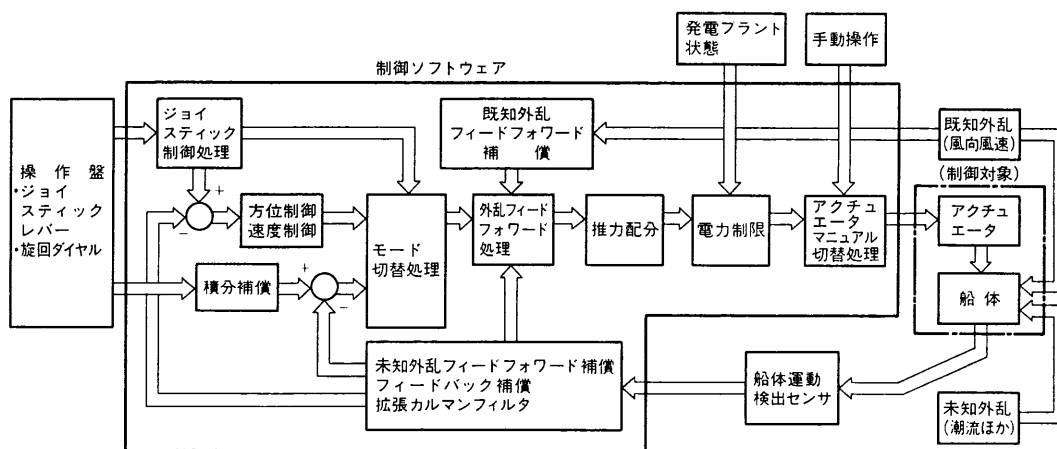


図 3 “Super Joy” 制御系ブロックダイアグラム “Super Joy” の制御系全体を表す系統図。
Block diagram of “Super Joy” control system

の仕様並びにそれらの応答特性を基にシミュレーション計算を行って船体運動補償制御系を構築し、この補償制御系から発生した信号をフィードフォワード（以下、FFと称す）信号として“Super Joy”制御系に付加している。

4.2 船首方位及び船速制御機能

船首方位及び船速制御については各々独立に制御できるPIDフィードバック（以下、FBと称す）制御系を構成している。

4.3 電力制限機能

船内発電機の負荷状態を監視し、優先遮断や停電を防止するようB/T等の推力を制限する機能である。本機能作動によりB/T等の最大推力が低下することになるが、本システムではその制限内で自動的に推力を再配分して船体運動バランスを保っている。

4.4 既知外乱補償機能（FF制御）

操船時の風による影響を風向風速計からの信号を基に船体に働く外力を演算し、その影響をFF制御により除去する機能である。

本機能により方位制御、速度制御及び定点保持制御時のFB制御系の負担を軽減させ、応答性を向上させている。

4.5 未知外乱補償機能（FF制御）

船体に働く潮流等の検出されていない外乱を船位測定装置等の信号並びに船体運動データを基に演算、推定し、制御系のFF信号として加算することにより制御性能を向上させている。

未知外乱としては潮流のほかには制御系設計時に採用した数学モデルと実機特性との違いにより生じる影響等既知外乱以外の影響すべてを等価的に扱っている。方位制御、速度制御及び定点保持制御において未知外乱による影響をFF制御にて低減することにより制御系の頑健性（ロバスト性）を高めることができる。未知外乱推定は非線形拡張カルマンフィルタにて実行させている。

4.6 オートトラッキング機能

“Super Joy”操作盤又は外部装置から入力された航路上を設定船速で航行するよう各アクチュエータを自動制御する機能である。設定された航行条件（変針点、航路幅など）に従って、予定航路からのずれ量が設定範囲内のときは船首方位を保持して航行し、ずれ量が設定範囲を超えると船首方位を予定航路に向けて航行するなど状況に応じて最適な操船を実現する。

4.7 自動定点保持（DPS）機能

潮流、風などの外乱の中で、船位測定装置からの船位信号により船体を設定目標位置に自動的に保持する機能である。リアルタイムに入力される船位信号を基に、定点保持制御に必要な状態量をカルマンフィルタにて推定し、センサからの信号と比較して船体位置FB制御系を構成して本機能を実現している。

4.8 船体移動位置予測機能

操船時の操作量と船体移動量とが風、潮流など外乱の影響を受けて合致しないことがあり、このことが操船者に熟練を求める結果になっている。本機能はジョイスティックレバーの操作量と船体運動量を基に短時間後の船体移動位置を推定し、その情報を航海情報指示装置等に提供するもので、操船者の負担を軽減し、操船の安全性向上に役立つものと考えている。

5. 操縦運動数学モデル

制御アルゴリズムの構築や制御性能の評価などを行うために船舶の操縦運動を表す数学モデルを構築し、船舶の操縦運動を水平面内の二次元運動として次のように表している。（図4参照）

$$\begin{aligned} (M+m_x) \cdot \ddot{u} - (M+m_y) \cdot v \cdot r \\ = X_H + X_P + X_R + X_S + X_A + X_E \end{aligned} \quad (1)$$

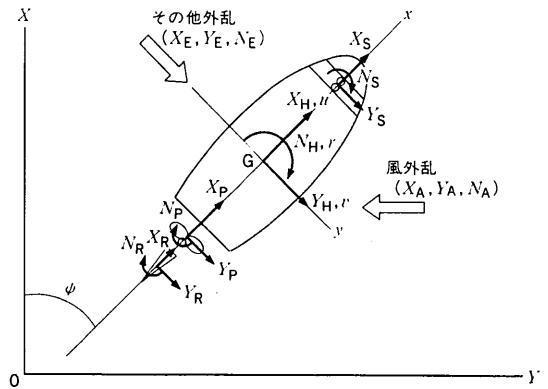


図4 船体に作用する力 船体に作用する力の定義を示す。
Co-ordinate system

$$\begin{aligned} (M+m_y) \cdot \dot{v} + (M+m_x) \cdot u \cdot r \\ = Y_H + Y_P + Y_R + Y_S + Y_A + Y_E \end{aligned} \quad (2)$$

$$(I_{zz} + J_{zz}) \cdot \dot{r} = N_H + N_P + N_R + N_S + N_A + N_E \quad (3)$$

ここに、 M , m_x , m_y : 船の質量及び前後、横方向の付加質量、 I_{zz} , J_{zz} : 船体重心回りの慣性モーメント及び付加慣性モーメント、 u , v , r : 対水船速の前後、横方向成分及び回頭角速度、 $\dot{u}$, $\dot{v}$, $\dot{r}$: 前後、横方向加速度及び回頭角加速度、 X_H , Y_H , N_H : 船体に作用する前後力・横力・回頭モーメント、 X_P , Y_P , N_P : プロペラによる前後力・横力・回頭モーメント、 X_R , Y_R , N_R : 舵による前後力・横力・回頭モーメント、 X_S , Y_S , N_S : スタスラによる前後力・横力・回頭モーメント、 X_A , Y_A , N_A : 風による前後力・横力・回頭モーメント、 X_E , Y_E , N_E : 他の外乱による前後力・横力・回頭モーメントである。

運動方程式右辺の船体に作用する流体力モデルは船の運動状態を表す状態量 u , v , r の関数として非線形項を含んだ形で表現され、拘束模型試験結果に基づくデータベースからこれらを求めている。プロペラ、舵及びスタスラが発生する流体力についても船速、回頭速度などの状態量やプロペラ回転数、舵角などの操作量の関数として表され、それぞれ単独に発生する流体力に船体との干渉や前進速度の影響を考慮している。

それらの中で、舵による流体力 X_R , Y_R , N_R は船体と舵との相互干渉も考慮して次のようにモデル化している。

$$X_R = -(1+a_x) \cdot F_N \cdot \sin \delta \quad (4)$$

$$Y_R = -(1+a_y) \cdot F_N \cdot \cos \delta \quad (5)$$

$$N_R = -(1+a_N) \cdot (x_R - x_G) \cdot F_N \cdot \cos \delta \quad (6)$$

ここに、 F_N , δ : 舵直圧力及び舵角、 a_x , a_y , a_N : 船体と舵との相互干渉係数、 x_R , x_G : 舵の圧力中心及び船体重心の X 座標である。また、舵直圧力 F_N は次式で与えられる。

$$F_N = (1/2) \cdot \rho \cdot U_R^2 \cdot A_R \cdot f_R \cdot \sin(\delta_e) \quad (7)$$

$$U_R^2 = u_R^2 + v_R^2 \quad (8)$$

$$u_R = \epsilon \sqrt{u_p^2 + 8x/(\pi \cdot n_p^2 \cdot D_p^2 \cdot K_T)} \quad (9)$$

ここに、 ρ , δ_e : 水の密度及び有効舵角、 U_R , u_R , v_R : 有効流入速度及び前後・横方向の成分、 A_R , f_R : 舵面積及び舵直圧力係数のこう配、 u_p : プロペラへの流入速度、 n_p , D_p , K_T : プロペラ回転数、直径及び推力係数、 ϵ , x : 実験係数である。

ここで、船体運動は小さいものとし、舵力に及ぼす影響の大きい、有効流入速度の前後方向成分のみを考えて、舵力の前後・横方向成分 X_R , Y_R を次のように与えている。

$$X_R = -(1/2) \cdot (1+a_x) \cdot \rho \cdot u_R^2 \cdot A_R \cdot f_R \cdot \sin^2(\delta) \quad (10)$$

$$Y_R = -(1/2) \cdot (1+a_y) \cdot \rho \cdot u_R^2 \cdot A_R \cdot f_R \cdot \sin(\delta) \cdot \cos(\delta) \quad (11)$$

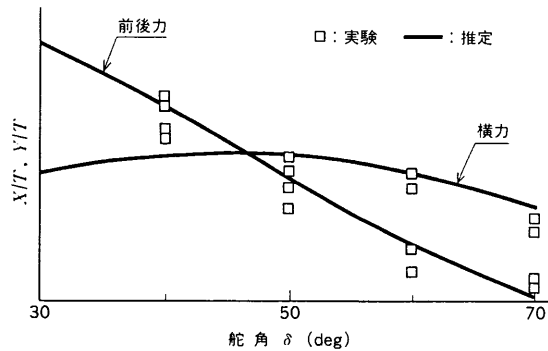


図5 プロペラ及び舵によって船体に誘起される力
舵及びプロペラによる前後及び横力を示す。
Maneuvering force by rudder

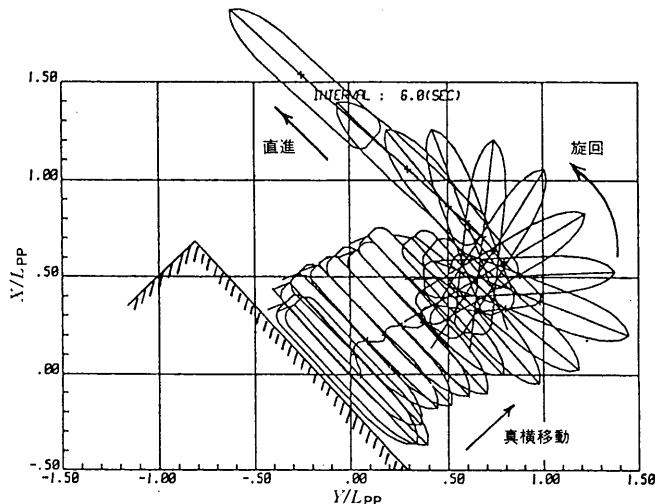


図6 水槽モデル試験での“Super Joy”による離岸操船の一例
長崎研究所で実施した水槽モデル試験での離岸操船例を示す。
Maneuvering control by “Super Joy” in experimental tank

超低速度域でプロペラと舵により船体に誘起される力を上式から推定し、舵モデル試験結果と比較した例を図5に示す。推定値はおおむね実験値と一致している。風による外力は相対風向・風速ベースの風圧力係数を用いて求めている。その他の外力としては波による定常外力（漂流力）を考慮することができ、また、潮流については潮流速を船速に加算することにより平水中の操縦運動として取扱っている。なお、操縦運動数学モデルと制御アルゴリズムの適性さを確認した水槽試験での一例を図6に示す。

6. ジョイスティック操船シミュレータ

本装置は“Super Joy”から制御信号を受け、船体かどのように運動するかをシミュレーションするものである。制御パラメータ調整のほか、ジョイスティック操船訓練などに利用できる。

本装置では以下の演算を行っている。

- (1) 船体に作用する流体力演算 船体運動により発生する流体力、各アクチュエータが発生する流体力そして風、潮流などの外乱による流体力を構築した数学モデルにより演算する。
- (2) アクチュエータの動作時間遅れ演算 プロペラ、舵、スラストへの指令信号に対し、アクチュエータが実際に動作するまでの時間遅れを演算する。
- (3) 入出力インタフェース演算 “Super Joy”からの信号をアーキネット経由シミュレータ内に取込み、演算により得られた船体運動等の情報をアーキネット経由“Super Joy”に返送する。

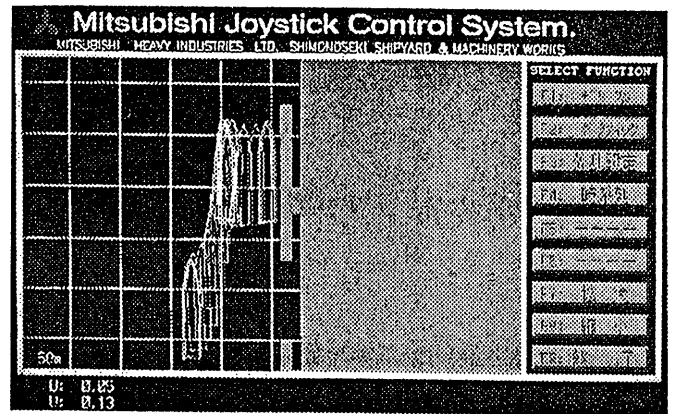


図7 シミュレーション表示例（着機状況）
Example of simulation display (Maneuvering)

- (4) 船体運動特性演算 上述の流体力により、操縦運動数学モデルを用いて船体運動を演算し、船体位置、方位、速度を求める。

また、本装置は次の機能を有している。

- (a) グラフィック表示及びロギング 港湾、海峡などの背景画面と操船状況（船体運動）をグラフィック画面にリアルタイム表示するとともに、船体運動情報、各アクチュエータへの指令値と実操作量、外乱の大きさと方向などシミュレーション条件と結果を別メニューで表示する。また、チェック用としてデータロギングも可能である。
- (b) 各種設定データの入力及び警報 船体運動確認用として、センサ、外乱などの擬似データや各種調整用パラメータの入力が行えるよう考慮している。また、操船訓練時の機橋等への衝突警報も設ける。本シミュレータによるグラフィック表示例を図7に示す。

7. む す び

“Super Joy”は操船者の負担を軽減し、比較的経験の少ない操船者でも容易に操船ができることを目指して開発された。その機能と性能についてはシミュレーション、水槽試験そして実船での海上試験にて確認している。最少アクチュエータ構成でも、真横移動も含めてジョイスティックレバー操作に応じた船体移動を可能とし、外乱補償、船体移動位置予測などマンマシンインタフェースも向上させた。

一方、システムの拡張はソフトウェア処理にて容易に実現できるよう配慮した。また、“Super Joy”と表裏一体となった、実船に近い操縦運動特性を持つシミュレータも開発し、操船者の習熟訓練に利用できるようにした。さらに、JCSを船舶全体のシステムと捕え、推進システムの在り方など船舶の基本仕様まで及んだ提言も行っていきたい。これまで述べたきた当社の考え方、そしてそこから生まれたシステムが市場で受け入れられ、操船作業の省人・省力化そして信頼性・安全性向上に貢献できれば、この上ない幸せと考える。

参 考 文 献

- (1) Kobayashi, Eiichi, A Simulation Study on Ship Manoeuvrability at Low Speeds, MTB No.180 (March 1988)
- (2) 赤坂則之ほか、ケーブル敷設船の自動操縦方式に対する最適レギュレータ理論の応用、三菱重工技報 Vol.17 No.3 (1980) p.409