

小型船舶の操縦性と制御について

中谷 俊彦*

Dynamics Analysis of a Small Training Boat and Its Control

Toshihiko NAKATANI

Abstract

This paper describes dynamics analysis of a small training boat and an application of gain map PID controller to course keeping system of the boat. After upgrading the navigational system of an actual small training boat *SAZANAMI*, in order to identify the model of the ship, Zigzag maneuver trials were carried out at various kinds of speed. It was found that Nomoto gain and time constant changed considerably according to her speed. Based on this analysis, an autopilot system was designed using the gain map PID controller in order to compensate the maneuverability changes of the boat. As results of control simulations, the proposed system had good performance compared with the conventional one.

1 まえがき

自動操舵装置 (Autopilot) は、多くの自動制御理論の試金石として利用されてきた長い歴史をもつ制御システムであり¹⁾、小型舟艇を含む多くの船舶に装備されている。長時間の航海が多い大型船では、通常航海中は制御系の再調整を頻繁に行う必要はない。しかし、小型船舶では船速の変更を頻繁に行うことも多く、それによって姿勢も大きく変化する。その結果、操縦性能も変化するため、適切な制御系の調整が必要となる。しかし、小型船舶において船速と操縦性能の関係を定量的に解析した例は少ない。そこで、本研究では富山商船高等専門学校が保有する小型船舶「さざなみ」を用いて速力毎の操縦性能を定量的に把握する。その後、その特性に基づいて速力変化に対応して制御ゲインを適切に調整する自動操舵装置の開発を行い、その効果を確認することとする。

2 小型船舶「さざなみ」

供試船である小型船舶「さざなみ」(以下、本船)、の側面図を図1に、その主要目等を表1に示す。実船実験時のデータ収集等で必要となる本船のデータ処理装置については以前報告したが²⁾、その後、本船装備のジャイロコンパス信号について遅れがあることが判明した。そこで、これを改善するため、専用のシンク

ロ信号変換器 (SD変換器) を増設した。

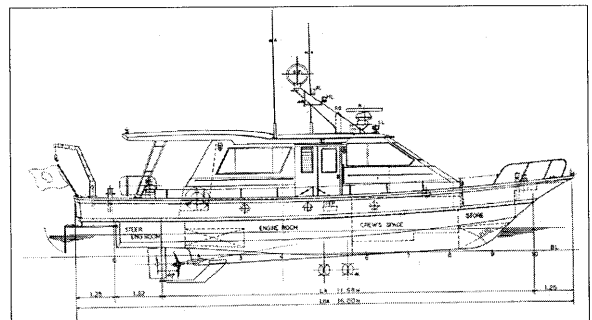


図1 「さざなみ」の側面図



写真1 シンクロ信号変換器の増設

*商船学科

表1 「さざなみ」の主要目等

全 長	16.00 m
全 幅	4.10 m
登 録 長	11.98 m
登 録 幅	3.70 m
登録深さ	1.22 m
測 度 長	13.50 m
測 度 幅	3.72 m
測度深さ	1.27 m
水 線 長	12.40 m
喫水 (満載出港状態)	約0.73 m
排水量 (満載出港状態)	約16.7 トン
総トン数	15 トン
主 機 関	ディーゼル主機関 最大 517PS 1基
速力 (試運転最大)	約20.0 kt
速力 (巡航)	約18.0 kt
航続距離	約350 海里
定 員	乗組員 2名 その他 23名
資 格	JCI 沿海

既設の舵取機操舵信号切替装置²⁾の上部に追加装備したシンクロ信号変換器を写真1に示す。装備後、船首方位信号については改めてキャリブレーションを実施した。図2にキャリブレーション試験結果を示す。この図から良好な直線性が得られたと判断し、単純な1次モデルを採用することとした。

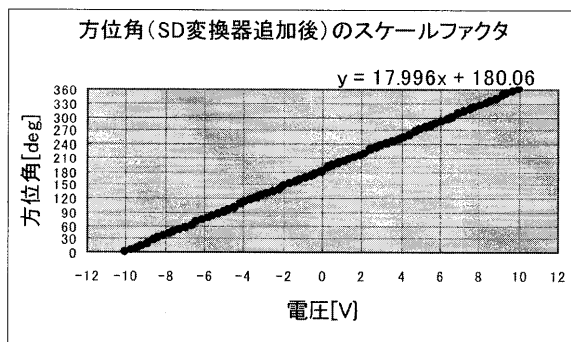


図2 船首方位の再キャリブレーション試験結果

2 操縦性の推定

2-1 操縦運動モデル

本船の航走時の姿勢は、速力の増減により大きく変化することを確認している。そのため、操縦性も大きく変化していることが予想された。船舶の操縦性を定量的に把握するために、例えば通常的大型船ではZ試験³⁾等が実施される。この試験は、(1)式のような「野本の一次モデル⁴⁾」における追従性指数Tと旋回性指数Kを求めるために実施される。

$$T \frac{dr(t)}{dt} + r(t) = K\delta(t) \quad (1)$$

$r(t)$: 旋回角速度

$\delta(t)$: 舵角

T : 追従性指数

K : 旋回性指数

しかし、本船のような小型船では、速力試験、旋回試験等の簡単な試験が実施されるのみであり、操縦性を表現する方法は特に定まっていないのが現状である。そこで、まず本船の操縦運動が(1)式で表現できると仮定し、Z試験を実行するプログラムを作動させた。図3に速力16ktにおける右10度Z試験中の旋回角速度の時系列を示す。図中の実線は光ファイバージャイロから得られた試験中の旋回角速度を、点線は試験中の舵角データから(1)式に基づいて計算した旋回角速度を表している。この図から、計算された角速度は実際に観測された角速度データを良く近似できていることがわかる。このことから、まず本船の操縦運動が(1)式で表現できると判断した。

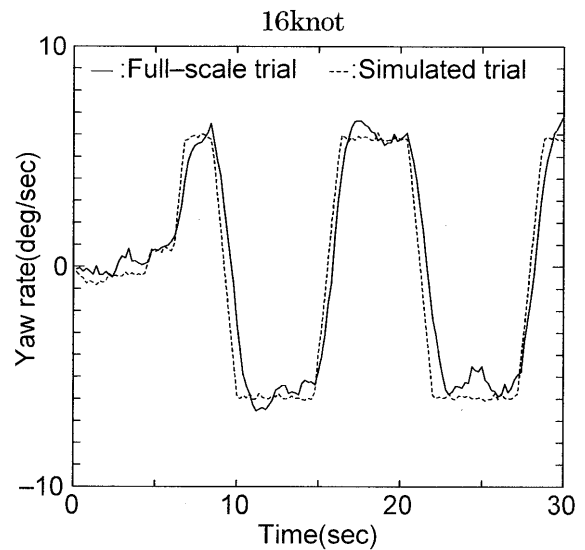


図3 旋回角速度による実験値とモデル出力の比較

2-2 各速力における操縦性

前節において本船の操縦運動モデルの妥当性を検証した。そこで、種々の速力においてZ試験を実施し、各速力における操縦性指数を算出した。算出に際しては、良く知られた最小二乗法⁴⁾を用いた。この方法は、(1)式を積分した形である

$$K \int_{t_a}^{t_b} \delta_m(t) dt + (t_b - t_a) K \delta_r + [r(t_b) - r(t_a)] T = \psi(t_b) - \psi(t_a) \quad (2)$$

- δ_m : 舵角
- δ_r : 舵角補正項
- ψ : 船首方位
- $t_b - t_a$: 積分範囲

の方程式をサンプリング毎にたて、その結果、得られる正規方程式から T, K および舵角補正項 δ_r を求めるものである⁴⁾。

ここでは、本船の航海中によく使用される 9kt, 12kt, 16kt, 18kt の 4 種類の速力で、右 10 度 Z 試験を実施し解析を行った。各速力において得られた T, K をプロットしたものを図 4 に示す。図から、速度増に伴って旋回性指数 K が大きくなり、追従性指数 T が小さくなっていることがわかる。これらの変化は T, K の無次元化処理でも吸収できない大きさであることを確認している⁵⁾。この結果、速力変化により、操縦性能が大きく変化することが定量的に明らかとなった。

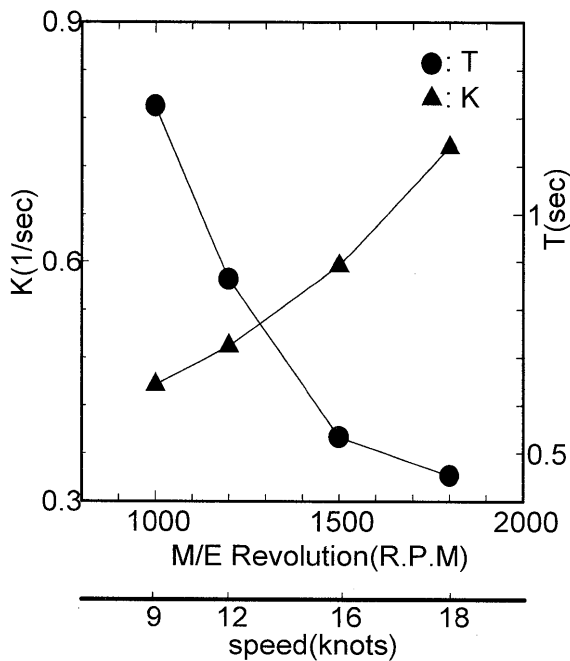


図 4 各船速における操縦性指数

3 自動操舵制御系の設計

3-1 従来方式の自動操舵

前章において本船の操縦運動が野本の一次系モデルで近似できることを示し、さらにその操縦性が船速によって大きく変化することを明らかにした。

そこで本章では、得られた操縦性指数に基づいて自

動操舵制御系を設計する。第 1 ステップとして、他の産業界でもよく用いられる PID コントローラ^{6), 7)}による自動操舵制御系を設計した。PID 型自動操舵は

$$\delta^*(t) = K_p(e(t)) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \quad (3)$$

- $\delta^*(t)$: 指令舵角
- $e(t)$: 針路偏差
- K_p : 比例ゲイン
- T_i : 積分時間
- T_D : 微分時間

に基づいて指令舵角を算出するものである。制御演算を実行するためには PID パラメータである K_p , T_i , T_D を決定しておく必要があるが、ここでは、よく知られた限界感度法⁸⁾を使ってパラメータを決定した。

表 2 各船速における PID パラメータ

Speed (kt)	M/E Rev. (R.P.M)	K_p	T_i	T_D
18	1800	3.83	1.33	0.33
16	1500	4.45	1.44	0.36
12	1200	4.49	1.84	0.46
9	1000	4.51	2.18	0.55

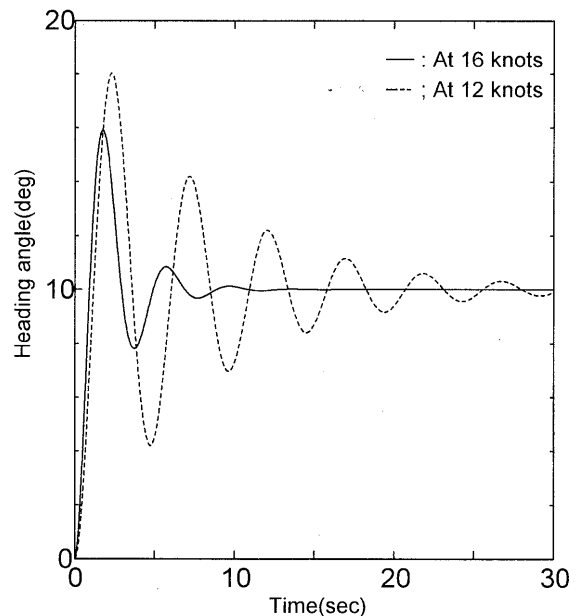


図 5 16kt に対応した PID パラメータによる 10 度変針

表 2 は、4 種類の速力毎に求めた PID パラメータである。また図 5 は、船速 16kt に対応した PID パラメータを用いて、16kt, 12kt の 2 つの船速で 10 度変針シ

シミュレーションを実施したものである。設計時の対応速度である16ktでは良好な制御特性を示しているが、12ktでは振動が持続して整定時間が長くなっている。この図から、本船のように船速変化に伴って操縦性が大きく変化する小型船では、速度ごとにPIDパラメータを再調整する必要があることがわかる

3-1 ゲインマップPID型自動操舵

前節で、指令舵角を算出する制御演算部において、PIDパラメータを船速に対応させながら適切に調整する機能が必要となった。

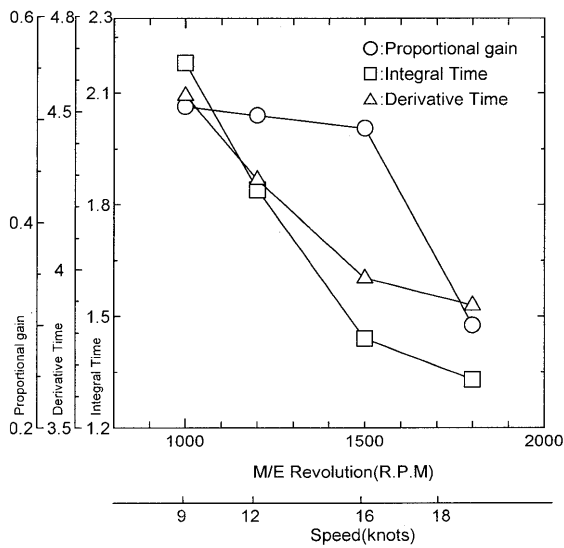


図6 PIDゲインマップ

そこで、ゲインマップを適用したPIDコントローラを設計することとした。前節の従来型コントローラでは、船体動特性は変化しないものとしているため、PIDパラメータは固定値である。それに対してゲインマップPIDコントローラでは、主機回転数信号を参照することで、船速に対応したPIDパラメータを自動調整するものである。図6は表1をマッピングしたものであり、このマップを使って、船速に対応したPIDパラメータを使って指令舵角を算出することとする。図7に保針制御系全体のブロック線図を示す。

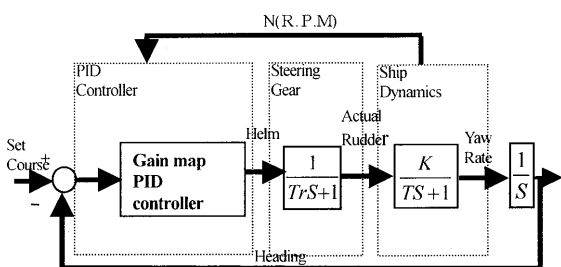


図7 ゲインマップPIDコントローラによる保針制御系

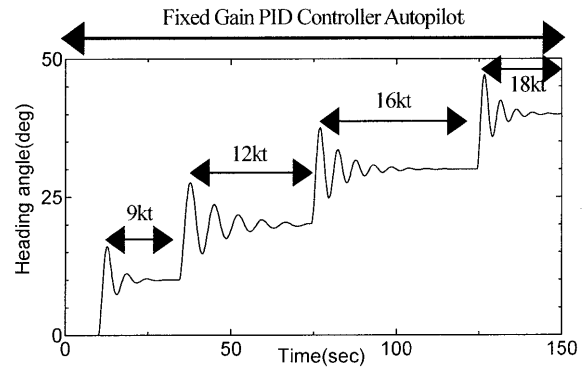


図8 固定ゲインによる各速力での変針

図8は、初期速力として設定した9ktに対応したPIDパラメータをセットし、固定ゲインのPIDコントローラにより、4種類の速力において10度変針を実施したシミュレーション結果である。この図から、速力が増えると振動が持続して整定時間が長くなることから、速力変化にうまく対応できていないことが明らかである。

それに対して、ゲインマップPIDコントローラを適用した図9では、図8と同様に速力を変化させても良好な制御特性を維持していることがわかる。

4 自動操舵制御系の評価

最後に、前章で導入したゲインマップPIDコントローラについての定量的な評価を行う。ここでは、制御系の評価に用いられる一般的な方法を使って評価を行った。具体的には図10で示されるオーバーシュートや整定時間および

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (4)$$

$e(t)$: 針路偏差

t : 評価時間

で表されるものを用いた⁹⁾。

表3は、以上の指標を使って、固定ゲインPIDコントローラとゲインマップPIDコントローラを評価したものである。評価に使用したデータは、図8、9の12ktでの10度変針シミュレーション結果である。表から、ゲインマップPIDコントローラでは、固定ゲイン型に比べて、良好な保針・変針性能が得られていることが定量的にも明らかとなった。

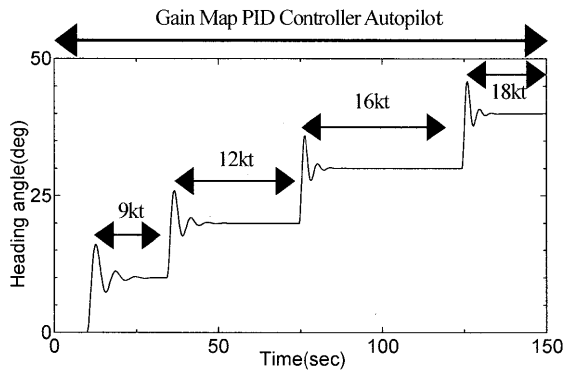


図9 ゲインマップ参照による各速力での変針

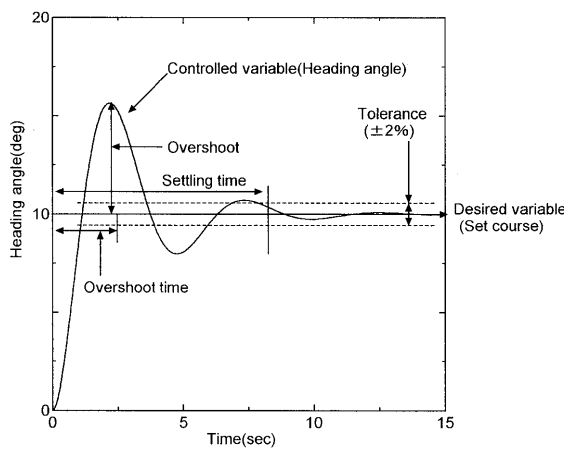


図10 制御系の評価

表3 制御系の評価結果

	Fixed Gain PID controller	Gain map PID controller
Settling time [sec]	12.38	5.00
Overshoot [deg]	18.20	15.96
Overshoot time [sec]	2.24	2.00
ITAE [sec・deg]	124.48	52.82

5 結論

本研究で得られた成果は

- ① 小型船舶の操縦運動は野本の一次モデルで近似でき、その操縦性能は船速によって大きく変化すること。
- ② 操縦性能が船速によって変化する小型船舶では、船速に対応して制御ゲインを調整する自動操舵系が必要であること。
- ③ ゲインマップPIDコントローラは、操縦性能が船速によって変化する小型船舶の自動操

舵系として有効であること。

等である。

今後は、外乱等を考慮した系統的なシミュレーションを実施したいと考えている。

最後に、実船実験で御強力頂きました実験実習第一係・小杉廣彦(元)係長、技術第一班・河原俊雄(前)班長、(元)技術補佐員・脇方直弘さん、山下恵さん、技術補佐員・井口眞司さん、東山茂勝さん、技術職員・金山恵美さん、浦恵里夏さん、図表作成でご協力を頂きました商船学科・遠藤真教授、専攻科・神田大志さんに心から感謝致します。また、改修工事で御世話になりました(株)舞鶴計器・岸幸二所長に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) N.Minorsky:Directional Stability of Automatically Steered Bodies,*Journal of ASNE*,Vol.42,No.2,pp.280-309,1992
- 2) 中谷俊彦:小型船舶のデータ処理装置について、富山商船高等専門学校研究収録、第38号、2005
- 3) Thor I. Fossen:Guidance and Control of Ocean Vehicles,WILEY,1994
- 4) 野本謙作, 藤井斉:船の操縦性, 第1回操縦性シンポジウムテキスト, 造船協会, pp.9-11/pp.15-17, 1964
- 5) 神田大志:船舶の動特性推定と制御に関する研究, 平成19年度山商船高等専門学校専攻科特別研究報告, pp.5-6, 2007
- 6) 広井和男:制御システム技術の理論と応用, 第1版, 電気書院, pp.1-18, 1992
- 7) 山本重彦, 加藤尚武:PID制御の基礎と応用, 朝倉書店, pp.53-56, 1997
- 8) J.G.Ziegler and N.B.Nichols:Optimum Settings for Automatic Controllers,*Transactions of the ASME*,Vol.64,pp.759-768,1942
- 9) 広井和男, 宮田朗:シミュレーションで学ぶ自動制御技術入門, pp33-54/pp.99-101/pp.94,2004