(昭和 62 年 5 月 日本造船学会春季講演会において講演)

波浪中における操船判断に関する実証的研究

—その 1 船体運動状態表示装置の開発—

正員 染 矢 隆 一* 正員 岡 田 裕*
 正員 有 川 彰 一* 正員 仁 藤 雅 夫**
 正員 八 木 光** 正員 国 武 吉 邦**

An Experimental Study on Ship Handling in Waves
 —1st Report Development of Ship Motion Analyzing Computer System—

by Takaichi Someya, *Member* Hiroshi Okada, *Member*
 Shoichi Arikawa, *Member* Masao Nito, *Member*
 Hikaru Yagi, *Member* Yoshikuni Kunitake, *Member*

Summary

This study is aiming at quantitative evaluation of crew's judgement for ship handling in waves.

This paper, as the first report of the study, explains the outline of the onboard monitoring equipment named Ship Motion Analyzing Computer System (SMACS) developed by the authors, being capable for recording simultaneously ship motion responses in waves, encounter waves and the reasons for ship's course and/or speed changes.

Some of the data obtained from three patrol boats of Maritime Safety Agency of Japan with SMACS are also shown in the paper.

1 ま え が き

波浪中における船舶の安全運航や経済運航においては、船舶の固有性能としての推進・運動・強度などの諸性能と併わせて、操船を行う乗員（船長）の判断が大きな影響を与える。しかしながら、現在までの造船学の視点からは、船舶の設計や性能評価のために船舶の固有性能に関する研究に重点が置かれており、操船判断に関する研究については、定量的把握あるいは評価が困難などの理由により、必ずしも十分な研究が行われているとは思えない。

近年、船舶の安全・経済運航支援を目的とする各種の船載型システムや装置の開発が進められている。これらのシステムの中で、耐航性能に係わる操船支援システムの多くは、波浪中運動応答などを各種のセンサーにより検知し、あらかじめ設定されている操船評価基準（運航限界など）と比較評価することによって、操船情報を提供しようとするものである。したがって、このような操船支援システムが実用的に機能するためにも、適切な

評価基準の設定が必要になる。

さらに、船舶の高度知能化が進展し、将来において操船の自動化・無人化が期待される場合には、現在船長が行っている操船判断のプロセスや評価基準をできるだけ定量化することが必要となる。

一方、海上保安庁船艇のように、緊急の使命達成のために極限状態に近いような海象においても運用を展開する必要がある船舶においては、船体や機関などの損傷防止を図る操船指針の確立のために、特に高波高中における船長の変針・減速の判断と船体運動応答との関係を定量的に把握することが一層重要となる。

従来、操船判断の定量化に関する研究のアプローチとしては、多数の船舶による観測資料の統計解析やプログラムデータの解析など、調査解析的な方法が代表的であり、一部、計器を用いて操船判断資料を得ようとする試みも行われていた²⁾。特に Wahab³⁾ がオランダ商船の多量の観測データから求めた変針・減速の原因および発生頻度に関する調査研究や、Aertssen⁴⁾ による実船の就航状態を観察した結果に基づく運航限界指針の提案などが発表されている。

かかる調査研究に見られるように、操船判断の定量化

* 海上保安庁装備技術部

** 三井造船株式会社

の研究は、多数の船舶を対象に大規模な調査体制を必要とするため、その後なかなか着手されなかったのが実状であろう。

しかしながら、耐航性理論の進展による精度良い運動応答推定技術の開発や、計測技術そして近年におけるコンピュータ技術の発展などにより、簡便で安価な船載型の計測システムの開発が可能になってきており、このようなシステムを利用することによって、波浪および船体運動応答と操船判断の相関の統計的な定量評価が可能になってゆく。

本研究は、波浪中における船舶の操船判断の定量化を試みることを目的としたものである。すなわち、船舶の運動応答と船長の操船原因および遭遇波浪を同時に解析・記録する装置を開発し、その装置を実船に搭載して船長の操船判断の実態を常時モニタリングすることによって、運航指針の確立を図ろうとするものである。

本論文は、その第 1 報として、著者らが開発した船体運動状態表示装置について述べると共に、本装置を海上保安庁所有の 1,000 トン型巡視船 3 隻に搭載し、実航海時において計測した事例について、その一部を報告する。

2 船体運動状態表示装置

2.1 概 要

船体運動状態表示装置 (SMACS: Ship Motion Analyzing Computer System) の開発は、

- (1) 荒天航行に対する的確な操船支援情報の提供
- (2) 荒天中の運航マニュアル作成や巡視船設計のためのデータベースの充実

を目的とし、巡視船艇の機能強化を図る塔載装置として考えられたものである。このために、巡視船の運航時における船体加速度の計測値をベースに、各種の運動応答や波浪状態を演算・表示すると共に、避航操船が行われた場合には、その操船事由と対応する運動応答データなどを磁気記録することが可能な機能をもつ船載型システム

を目標としている。

また、SMACS が巡視船の乗員のみによる長期間の継続的な計測を前提として利用されるため、できるだけ操作性を高め、乗員の作業負担軽減を図ることおよび計測機器の保守性能に十分配慮することなどを念頭にハードウェア構成を行った。さらには、多数の船艇への搭載が図れるよう経済性の高いシステムを目指した。

なお、避航操船の操船事由としては、運動性能に起因する事由の他に、強度性能や主機関の性能などに起因する事由が考えられるが、本研究では対象とする船舶が比較的小型の巡視船であり、運動性能が避航操船に最も強く影響することから判断し、運動性能を中心に考えることにした。

2.2 機 能

SMACS には、Fig. 1 に示すように、大別して二つの機能がある。第 1 は運航支援のための運動状態の現状値および予測値の表示機能である。第 2 は、操船情報を含む運航状況のデータ記録機能である。

2.2.1 船体運動表示機能

本装置の船体運動表示には、現状モードと予測モードがある。現状モードは、運航時において約 8 分間の加速度計測データから求めた各種の船体運動および波浪推定値を表示する。表示は、10 分ごとに更新される。

予測モードにおいては、現状の短期海面状態の中で針路あるいは船速の変更設定を行った場合の船体運動の推定値を現状値と比較して表示する。予測モードの利用は専用キーボードにより対話形式にて随時行うことができる。

2.2.2 運航データ記録機能

所要の運航データを記録し、陸上での詳細解析により波浪中における運航状況を把握するため、通常運航時 (現状モード) および避航操船時 (操船モード) の船体運動や波浪などの諸情報を記録する。現状モードのデータは 10 分ごとに自動的に記録され、操船モードの場合は割込入力により適時記録される。

* REASON FOR COURSE CHANGE AND/OR SPEED REDUCTION
DUE TO LARGE SHIP MOTION

Fig.1 Functions of SMACS (Ship Motion Analyzing Computer System)

Table 1 Items of display and record

ITEM	DISPLAY		RECORD	
	PRESENT MODE	PREDICTION MODE	PRESENT MODE	PREDICTION MODE
1) DATE & TIME OF MEASUREMENT	○		○	○
2) REASON FOR COURSE AND/OR SPEED CHANGE				○
3) MEASURED AND ANALYZED DATA				
● ACCELERATION (TIME HISTORY)				○
● ACCELERATION SPECTRA			○	○
● MAXIMUM ACCELERATION			○	○
● SHIP SPEED	○	○	○	○
4) ESTIMATED WAVES	○	○	○	○
5) ESTIMATED MOTION RESPONSE (1/10 MAX. AVERAGE & MAX. EXPECTED VALUE IN 10 MINUTES)	○	○	○	○

記録容量としては、8インチフロッピーディスク1枚にて、現状モードでは最大25日間の行動に対応する情報が記録可能であり、操船モードでは最大214回の記録が可能である。

2.2.3 表示および記録項目

表示および記録項目をTable 1に示す。波浪推定値は後述するように計測加速度を解析することによって求められるもので、本システムでは参考値として表示するため、「参照波高」および「参照波長」と表現している。また、運動応答推定値は下記の項目に対し、それぞれ1/10最大平均値および10分間最大期待値を表示・記録する。10分間最大期待値は、波と船の平均出会周期を用いて算出される10分間の運動発生回数に対し、期待される最大値をRayleigh分布確率を仮定して計算している。

運動応答推定項目と定義

○青波（船首相対水位）

船首相対水位の変動が船首乾舷を越える場合、その越える量を冠水量として定義し表示する。また、船首乾舷を越えない場合は、乾舷量として定義する。

○縦揺れ角

片振幅を表示する。

○横揺れ角

片振幅を表示する。

○プロペラレーシング

船尾相対水位の変動により、プロペラ先端がプロペラ直径の1/3以上、水面より露出する状態をレーシングと称する。

なお、平均値は、波と船の毎分当りの平均出会回数にレーシングの発生する確率を乗じ、 n 回/

分として表わす。

○ブリッジ上下加速度

船橋甲板室における上下加速度

○船尾相対水位

船首相対水位と同様の定義。

なお、計算はすべて常備状態に対するものである。さらに、操船事由については下記の項目をとり上げた。

- ロール
- ピッチ
- ロール/ピッチ
- プロペラレーシング
- 船体強度
- 青波
- その他

2.3 ハードウェア構成

本装置の機器構成をFig. 2に示す。また、主要機器要目をTable 2に示す。船速は、船に既設の電磁ログなどの船速計より信号を受け取る仕様になっている。

SMACSには、乗員の作業負担を軽減し、操作性を高めるために専用キーボードが用意されている。専用キーボードは、Photo 1に示すもので、装置の起動・停止キー、現状・予測選択キー、操船事由入力キー、波方向入

Fig. 2 Hardware composition

Table 2 Rough specification of SMACS components

ACCELEROMETER	MAX. $\pm 5G$ WATER TIGHT
AMPLIFIER	OUTPUT 0 - 10 V
A/D CONVERTER	12 BIT 2Hz 16 KW BUFFER MEMORY
PERSONAL COMPUTER	MICRO PROCESSOR : MN1613 (16BIT) 512 KB RAM 8" FLOPPY DISK x 2 14 " CRT x 1
KEYBOARD	TEN KEY, WAVE DIRECTION KEY "REASON" KEY, START/END KEY ETC.

Photo 1 Keyboard of SMACS

力キーのほか、テンキーと入力キーから成っている。

波方向は、目視により波（うねり）の主要成分方向を入力する。今回は目視の精度や時間変動などから考えて、全方位を 45° ずつ8等分して方位キーを設定したが、今後の解析結果しだいでは数値入力の方法も検討対象となろう。テンキー部は、予測表示に対する船速や方位変更量などの入力用としてのみ用いられる。

また、大運動中での入力作業を考慮して2ステップ入力方式の採用あるいは、夜間での使用に便利な LED 前面照光形キーなどで操作性向上を目指した。

2.4 ソフトウェア構成

SMACS のソフトウェア構成の基本的な考え方を Fig. 3 に示す。船体運動（ここでは加速度）から波浪を推定する試みは、いくつか行なわれているが^{5),6)}、本システムでは、平山らの方法と同様、船体運動スペクトラムから、波スペクトラムを直接推定する方法をとっている。すなわち、

$$S_w(\omega_e) = S_{acc}(\omega_e) / A_{acc}(\omega_e, v_s, \chi)^2 \quad (1)$$

$$S_w(\omega) = \sqrt{1 + 4v_s \cos \chi \cdot \frac{\omega_e}{g}} \cdot S_w(\omega_e) \quad (2)$$

ここに、 S_w : 波スペクトラム (m^2/sec)

S_{acc} : 計測加速度スペクトラム ($G^2 \cdot \text{sec}$)

A_{acc} : 加速度応答関数 (G^2/m^2)

ω, ω_e : 円周波数, 出会円周波数 (1/sec)

Fig. 3 Concept of software composition

Fig. 4 Comparisons of observation and calculation by SMACS

Fig 5 Location of three regional maritime safety offices

v_s : 船速 (m/sec)

χ : 波と船との出会角 (rad)

この波スペクトラムから、有義波高 $H_{1/3}$ と平均波周期 T_{01} を求めている。 A_{acc} は、NSM より求めた理論計算値を用いている。ただし、この方法が有効なのは、 $\chi \leq 90^\circ$ であるから、 $\chi > 90^\circ$ の場合については別途考慮が必要である。

一方、各種船体運動は、上記の方法で求められた有義波高に理論計算で求めた短波頂不規則波中での単位波高当りの各運動の標準偏差を乗じて得られる。

2.5 実船計測との比較 (検証)

昭和 59 年に実施された実船計測⁷⁾のデータをもとに SMACS で波浪を推定し、計測結果との比較を行った。結果を Fig 4 に示す。供試船は、1,000t 型巡視船「しきね」である(要目は後述)。図中、(BUOY)と記入してある点は、投込式波高計による計測結果である。図から明らかなように波高に関しては、目視観測とはほぼ合っているといえよう。波長については、SMACS の方が目視よりかなり大きな値を算出しているが、投込式波高計による計測結果とは、波長・波高とも目視よりかなり近い値を示している。

3 実 船 搭 載

SMACS は、昭和 61 年 1 月から 5 月にかけて、海上保安庁の 3 隻の 1,000 トン型巡視船に順次搭載された。搭載船の船名および配属地は次の通りである。

- 第 1 管区海上保安本部 釧路海上保安部「ましゅう」
- 第 3 管区海上保安本部 下田海上保安部「しきね」
- 第 9 管区海上保安本部 新潟海上保安部「やひこ」

Table 3 Principal dimensions of 1,000 ton type patrol boat

LENGTH O.A.	77.8 M
BREATH MLD.	9.6 M
DEPTH MLD.	5.3 M
DRAFT MLD.	3.4 M
DISPLACEMENT	ABT. 1300 T
MAIN ENGINE	3500 PS X 2
SPEED	ABT. 20 KTS

Fig 5 に上記の保安本部の所在地と搭載船を示す。また、Table 3 に 1,000 トン型巡視船の主要目を示す。加速度計は、前部隔壁上で上甲板より僅か下方に 1 個、船体中央近くの廊室側壁に 1 個、共に船体中心線に取り付けた。また、演算器本体はブリッジへ上る廊室の天井部分に、指示器はチャートルーム内にそれぞれ配置した。Fig 6 に加速度計の位置を、Fig 7 に演算器および指示器の設置位置を示す。

また、Photo 2, 3 は「しきね」における演算器本体および指示器の取付状況の写真である。Photo 3 で、指示器の横の壁に専用キーボードがかかっているが、これは、ブリッジ前方まで携帯して波浪状況を観測しながら波向を入力できるように長いケーブルを有している。船

Fig. 6 Location of accelerometers

Fig. 7 Arrangement of processor and display

Photo 2 SMACS main body (Shikine)

Photo 3 Arrangement of display and keyboard (Shikine)

速信号は、電磁ログから直接あるいは航路自画器を経由して SMACS に入力されている。

4 計測および解析例

3 台の SMACS は、塔載後直ちに稼働を開始しデー

タの収録を行っている。まえがきで述べたような操船判断の定量的把握作業は現在進行中であるので、結果は続報にて述べることにし、本報告では記録されたデータとその解析例の一部を示すことにする。

4.1 時系列データ

Fig. 8 に、小型漁船を救助し現場からもどる際の「しきね」で計測された最大加速度の変化を時系列で示す。これは、「現状」モードで記録された最大加速度を1時間ごとにプロットしたものである。また、算出された波高、波長の時間変化を Fig. 9 に示す。救助現場付近は有義波高が約 5m の海象であったと推定される。

4.2 避航操船事由記録

次に、避航操船事由記録時の波浪および船体運動状態を「ましゅう」と「やひこ」を例にとって、Table 4 に示す。CASE 1 と CASE 2 は、「ましゅう」のデータで、それぞれ「青波」によって減速、「ローリング」によって変針を行っている。共に有義波高が 6m 前後の海象である。「青波」の表示はブルワークを越えて打込んでくる海水の厚さを見なすことができる。CASE 1 は時おり 50~60cm の厚さで海水が打込んでくる状況である。

一方、CASE 3 は「やひこ」の避航操船時のデータである。操船事由は「ローリング」であり、本船はこの後船を波に対して立てる操船を行っている。有義波高は 6m 以上で、しかも非常に急峻な波に遭遇しており、青波の打込みも厳しい。なお、後の陸上解析のために、加

Fig.8 Measured maximum acceleration (Shikine)

Fig.9 Estimated wave length and height (Shikine)

Table 4 Examples of operation in rough sea

	CASE 1		CASE 2		CASE 3	
SHIP NAME	MASHUU		MASHUU		YAHIKO	
JUDGEMENT REASON ACTION	SHIPPING WATER(BOW) SPEED REDUCTION		ROLLING COURSE CHANGE		ROLLING COURSE CHANGE	
SHIP SPEED	7.6 KTS		9.2 KTS		5.6 KTS	
WAVE						
DIRECTION	HEAD		QUARTER		BEAM	
HEIGHT	5.6 M		6.0 M		6.2 M	
LENGTH	100 M		85 M		60 M	
SHIP MOTION	AVE.	MAX.	AVE.	MAX.	AVE.	MAX.
SHIPPING WATER						
AT BOW	-0.5 M	+0.6 M	-0.8 M	0.0 M	+0.1 M	+1.3 M
AT STERN	-0.4 M	+0.5 M	-0.4 M	+0.3 M	0.0 M	+1.0 M
PITCHING	8.2 °	10.3 °	5.9 °	7.1 °	6.9 °	8.8 °
ROLLING	6.6 °	8.4 °	19.0 °	22.8 °	16.6 °	21.0 °
PROP. RACING	20 %	39 %	20 %	39 %	30 %	52 %
VERTICAL ACC. ON BRIDGE	0.3 g	0.4 g	0.1 g	0.1 g	0.2 g	0.3 g

Fig. 10 Example of recorded acceleration spectrum

Table 5 Encounter frequency distribution of waves (Pacific Ocean, Feb. ~Mar. 1986)

速度スペクトルが記録されているが、CASE 1における記録例は Fig. 10 に示す通りであった。

4.3 遭遇波浪および波スペクトラム

Table 5, 6に「しきね」と「やひこ」が昭和61年2月～3月のほぼ同時期に遭遇した波浪の頻度分布を示す。共に1,700データの解析で頻度によってグレード分けを

Table 6 Encounter frequency distribution of waves (The Sea of Japan, Feb. 1986)

してある。縦軸は有義波高、横軸は平均波周期である。ただし、波高0.5m以下の波は記入していない。これを見ると、この時期は日本海の「やひこ」の遭遇頻度の高い波は、太平洋の「しきね」の場合と比較して波長はやや短かく、波高はやや高いものであることが分かる。

最後に、陸上解析によって求められた波スペクトラムの例を Fig. 11 に示す。「ましゅう」の例は低波高であり、「しきね」の例は高波高である。それぞれ二つの加速度計測から得られたものを左右に並べて示してある。図でも明らかなように、二つの計測加速度から別々に求めた波スペクトルの差は一般的に小さい。

また図には、ISSC 1964型スペクトラムも記入してあるが、計測加速度から得られたものとの一致度は高い。この例では低波高の「ましゅう」の例でもISSCスペクトラムと比較的良好一致しているが、一般的に「しきね」に見られるように高波高の方が一致度が高いようである。

前述したように、今後は巡視船における操船判断と船体運動、波浪の関係に焦点をおいて研究を進めてゆく予定である。

Fig. 11 Examples of analyzed wave spectrum

5 結 言

波浪中における操船判断の定量化のために、船体運動応答と遭遇波浪および乗員の操船原因とを同時に解析・記録できるコンピュータシステム船体運動状態表示装置 (SMACS) を開発し、巡視船に搭載して運用を開始した。本論文において得られる結論として次のように述べる事ができる。

(1) SMACS の利用により、乗員にあまり操作負担を与えず長期間にわたる運動応答、波浪および操船原因などのデータ収集が可能となった。

(2) 船体をセンサーとして、その上下加速度から遭遇波浪を推定する方法は、波スペクトルの推定を含め少なくとも向波から横波の範囲では十分実用になり得る。

(3) 巡視船の波浪中における操船原因と運動応答、および波浪との関係について一部の実証例を示した。今後は、さらに収集された多量のデータを解析して実態の把握を図る予定である。

最後に、本研究を進めるに当たり、釧路、下田、新潟の各海上保安部、さらに巡視船「ましゅう」、「しきね」、

「やひこ」の各船長以下乗員各位には多大の御協力を願った。また、本研究全般にわたり有益な助言をいただいた大阪府立大学の細田龍介助教授にお礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 谷沢克治：船載型安全運航支援システムについて、第 48 回船舶技術研究所研究発表会講演集、(1986)。
- 2) Dan Hoffman: The Impact of Seakeeping on Ship Operations, SNAME, (1976)。
- 3) Wahab, R.: Observations Made on Board of Dutch Ships, Report 67-090-WO, N. S. M. B., (1967)。
- 4) Aertssen, G.: Further Sea Trials on the Lubumbashi, T. I. N. A., Vol. 99, (1957)。
- 5) 川島利兵衛, 松岡達郎, 松島寛治：船体運動記録からの波予測の試み, 日本航海学会講演集, 第 69 号, (1983)。
- 6) 平山次清, 萩野芳造, 松野達夫, 渡辺憲司：航行中の船体運動による海洋波スペクトルのリアルタイム推定 一実船試験一, 関西造船協会誌, 第 198 号, (1985)。
- 7) 竹本博安, 橋爪 豊, 岡 修二：波浪衝撃荷重と船体の応答に関する実船計測 (第 1 報), 日本造船学会論文集, 第 158 号, (1985)。