船舶の遭遇海象と船体運動の実態

—自動計測記録システムの構築—

桑島 進*・萩原 秀樹*・岩坂 直人*

石塚 正則**・前島 一義*

The Actual State of Ship Encounter Waves and Ship's Motions

—A Trial Assembly of Voyage Recorder—

Susumu KUWASHIMA, Hideki HAGIWARA, Naoto IWASAKA,

Masanori ISHIZUKA and Kazuyoshi MAESHIMA

Abstract

Authors tried to assemble the on board system as a voyage recorder. The system record every one hour for ten minutes the ship encounter wave height, ship's head up-down, rolling angle, pitching angle, yawing angle rate, surging acceleration, heaving acceleration and swaying acceleration.

The system was tested on board for five months in 1990-1991's winter using a real container carrier which was put on the North Pacific line. In the period of this experiment, the system was normally operated all the time and recorded many waves and ship's motion data.

Those data made clear how the real states of encounter waves were and what the relations between waves and ship's motions were.

As the result of this on board experiment, the system is carried conviction to be very useful as a voyage recorder although it leaves a small room for improvement.

1. はじめに

船舶が大洋航行中に遭遇する海気象はその航海の能率と安全に大きな影響を及ぼしている。特に荒天域においては、波と船体運動のはっきりとした因果関係が知られていないため、船長は激しい船体運動を軽減するために手探りの操船を強いられている⁽¹⁾。

波浪中での船体運動は6自由度の複雑な運動を行っており、規則波中での部分的運動についてはいくつかの実験および理論計算により解明されている⁽²⁾ものの、実海面における不規則波中の船体運動の実態はほとんど解明されていない。

この理由としては第1に船舶の出会い波浪を計測できる手軽な船用波高計がなかったこと、第2に船体運動を計測できる簡単且つ耐久性のある船体運動測定装置がなかったこと、第3に膨大なデータを記録できる自動記録システムがなかったことなどにより航行船舶が実際に遭遇した海象および船体運動の計測記録がなかったことが大きな原因と考えられる。

ところが最近、これまでの問題点を克服した個々の測器や記録器が相次いで開発された。そこで著者らは新た

* 正会員 東京商船大学 (〒135 江東区越中島2-1-6)

** 正会員 日本郵船株式会社 (〒108 港区三田1-4-28 三田国際ビル)

に開発された個々の測器を組み合わせた「海象・船体運動の自動記録システム」を試験的に構築した。そして北太平洋に就航しているコンテナ船に設置して実際の出会い波浪およびその船体運動について計測記録を行ってみたいのでその結果について報告する。

2. 自動計測記録システム

2.1 波高計

基本的なシステムのブロックを図1に示した。本システムの特徴ある計測項目として航走出会い波浪がある。こ

図1 「海象・船体運動の自動記録システム」ブロック図

の項目を計測できる測器として新たに開発されたものがマイクロ波式波高計である⁽³⁾。この波高計の精度についてはいくつかのチェックがなされており^{(4)~(6)}、すでに50隻近い実船にも搭載されて計測が行われているところから実用的には十分と思われる。

この波高計の出力としては出合い波浪の絶対波高、有義波高、相対波高（船の喫水線に対する水面の上下変位）、船首の上下加速度、上下速度、上下変位および出合い波浪

の平均周期があるが、本「海象・船体運動の自動記録システム」へは①出合い波浪の絶対波高と②船首の上下変位のみを記録させることとした。

本波高計のセンサーは船首に設置される（写真1参照）ものの、一般に波高データの指示記録は船首から相当離れた船橋で行われるため、船首から船橋まで信号ケーブルを敷設しなければならないという設置上の大きな問題が生じる。この信号ケーブル敷設問題は荷役を行うため甲板上に不必要なケーブルを張ることを好まない既存の一般商船に対しては大問題である。そこで著者らはPCM-FM変調方式、搬送波周波数300MHz帯を利用したテレメータにより船首の計測信号を船首マストに設置したアンテナより船橋まで無線送信することとした。

2.2 船体運動測定装置

他の計測項目である船体運動は、音叉型振動ジャイロを基本としたストラップダウン方式による慣性測定装置を採用することにより、従来の回転体の角運動量を利用したジャイロが持っていた「使用(寿命)時間約2~3ヶ月」という制限を取り除くことができた。本装置はロ

ール角、ピッチ角、ヨウ角、XYZ各方向軸回りの角速度、XYZ各方向の加速度などの出力が得られるが、本研究の「海象・船体運動の自動記録システム」に対しては③ロール角、④ピッチ角、⑤ヨウ角速度、およびXYZ各方向の加速度すなわち⑥サージ加速度、⑦スウェイ加速度そして⑧ヒープ加速度を取り込むこととした。

この慣性測定装置は非常に小型（15cm×12cm×22cm）、軽量（2.8kg）であるため設置上の制限がほとんどなく、どんな場所にも手軽に設置できる。ただし、船体運動の計測という観点から言えば、できるだけ船体重心に設置することが望ましいが、本研究においては取り敢えず計測状況の記録、監視の利便から船橋に設置した。

2.3 記録処理装置

記録処理装置としてA-D変換ボードを組み込んだ一般のパーソナルコンピュータを利用することにより、収録方法をプログラム上において自由に設定できるようにした。ただし、後述の収録方法によれば収録装置の容量としては1回（10分間分）のデータだけで約50KByteの記憶容量が必要となり、1航海分では約50MByteという膨大な数となる。そこでこのような大容量の記憶装置として、最近開発されたDAT(Digital Audio Tape)を利用したデータストレージシステムを採用することとした。このデータストレージシステムは比較的、耐揺性があることから船上使用に適し、その記憶媒体であるDATは超小型のカセットテープながらも現在のところ1GBの容量があるので、後述の収録方法ならば自動的に約20航海（約2年）分のデータが収録できることになる。

写真1 波高計センサー設置状況

以上の各測定記録装置をコンパクトに収め、船橋に設置した状態を示したものが写真2である。写真に示す各装置の中で最も大きな寸法を持つものがパソコンのディスプレイであるが、これは本記録システムには本来的に不用のものであるところからシステム装置としてはさらにコンパクトにすることが可能である。

3. データの取得

3.1 計測対象船と計測時間

計測対象船として北太平洋航路に就航しているコンテナ船（約3万総トン、全長約243メートル、航海速力21ノット）を選定した。本船は日本と韓国およびアメリカ西海岸を結んでいるため1航海に約35～36日間を必要としている。

計測期間としては比較的荒天の海象が現れ易い冬の期間を対象として1990年12月から1991年4月までの4航海、約5ヶ月間連続に行った。

またデータの計測記録方法としては、「まず2節で述べた8項目のデータ信号をサンプルホールド回路により同時A-D変換してデジタルデータに0.2秒間隔で変換する。そして1ケースのデータ計測時間を10分間とし、この間一旦パソコンの作業記憶領域に保存蓄積する。次に（10分の計測終了後）この1ケース分のデータについて簡単な平均や標準偏差などの統計処理計算を行ってからその値をデータとともにDATデータストレージシステムに計測時刻の名前を付けたデータファイルとして記録させる。そしてこのケース毎の処理を1時間毎に繰り返させる。なおこの計測記録は人為的な操作は一切加えず、パソコンの時計により全て自動的に行う」などの方法を採用した。

この結果、停泊時データおよび異常データなどの不良データを除き、上述の4航海において約2000ケースのデータが得られた。

3.2 取得データの例

図2にはこれらの得られたデータの中から比較的波高の大きかった1991年1月18日13時（日本時間）の例を示した。ログブックによればこのデータの計測時、本船は39°46'N、171°43'W付近において針路088°、速力19ノットで航行していた。この時、風はほぼ真後ろから35m/sの西風が吹いており、目視による波浪は周期が9～10秒、波高が8～10mで海面はかなりの大時化であったが幸い写真3に見るように追い波であったため船体動揺は「大時化の割には激しくなかった」との乗組員の感想である。ただし、図2における各データの三分の一最大値（有義値）および最大振幅を算出してみると表1のような値となり船体運動の振幅は比較的大きな値を示している。これは図2からも想像できるように各船体運動の周期が比較的大きかったために運動の振幅は大きくても、激しさという点では必ずしも大きくなかったものと思われる。なお表1における船体運動の値は運動の全振幅の値である。

表1 波高と船体運動の有義値と最大振幅（1981.1.18.13）

	波 高	船首上下	ロール角	ピッチ角	ヨウ角速	サージ	ヒープ	スウェイ
有 義 値	7.7	11.5	9.6	6.7	0.85	0.06	0.07	0.07
最大振幅	9.4	16.4	12.2	9.8	2.10	0.15	0.16	0.16
単 位	m	m	deg.	deg.	deg/s	g	g	g

図3は上記のデータ例を含む1981年1月13日（東京出港）から1981年2月7日（東京入港）までの遭遇波高（上段）とロール角（下段）について各時間毎の最大振幅、有義振幅、平均振幅、標準偏差の記録を時系列的に描いたものである。図中、最大振幅の最大値とは各時（各ケース毎）における最大振幅値だけを取り出した時系列中の最大値を意味しており、最大振幅の平均値とは各時における最大振幅の平均を意味している。上段の波高の記録によれば図2で示した1991年1月18日13時頃がこの航海で最も波高が高かったことが一目瞭然に判るが、

写真2 システム全体

図2 計測データの例

写真3 遭遇波浪状況 (1991年1月18日13時)

図3 波高(上段)とロール角(下段)の時系列

下段のロール角の記録を見れば1月18日より、むしろ1月16日頃の方がローリングが大きかったことが判る。これは1月16日には本船はほぼ正横から風波を受けて航走していたため後述するようにローリング運動が大きく励起したためと思われる。

4. データ解析

4.1 各データ間の相関

5ヶ月間の大洋航海中における全てのデータを用いて波高および各船体運動間の相関係数を計算してみたものが表2である。

表2 遭遇波高と船体運動の相関係数表

	遭遇波高	船首上下動	ロール角	ピッチ角	ヨウ角速度	サージ加速度	ヒープ加速度	スウェイ加速度
遭遇波高	1	0.864	0.587	0.842	0.747	0.626	0.609	0.594
船首上下動		1	0.411	0.562	0.494	0.427	0.475	0.454
ロール角			1	0.617	0.736	0.381	0.578	0.854
ピッチ角				1	0.805	0.769	0.734	0.688
ヨウ角速度					1	0.713	0.617	0.751
サージ加速度						1	0.726	0.571
ヒープ加速度							1	0.841
スウェイ加速度								1

一般的に遭遇波高が大きくなればなるほど船体運動の大きさも大きくなることが予想されるが、表2によれば遭遇波高と大きな相関を示すものは船首上下動とピッチ角となっている。そして他の船体運動は波高に対して一応、正の相関を示すものの、あまり大きな相関を示していないことが分かる。参考のため図4に波高に対するピッチ角およびロール角の有義値の分布を図示した。なおピッチ、ロールの有義値とは3.2節で述べた三分の一最大値を意味している。

また表2からは各船体運動間の相関は比較的大きく、特にスウェイ加速度に対するロール角およびヒープ加速度の相関などがかなり強いことが分かる。

4.2 生起確率密度分布

5ヶ月間の大洋航海中における全てのデータを用いて波高および各船体運動の振幅（有義値）ならびに平均周期の生起確率密度分布を示したものが図5(a)および図5(b)である。図の横軸はそれぞれの値を図中に記した平均値で除することにより無次元化した値である。図5(a)によれば、波高の生起最頻値は平均波高の0.7倍程度であるのに対してロール、ピッチ、ヒープの船体運動の振幅の生起最頻値は平均振幅の0.5倍程度となっている。

また図中には定かに記されていないが波高（有義値）の生起最大値は平均波高の約3倍の8.5mであったのに対し、ロール、ピッチ、ヒープの振幅（有義値）の最大値はいずれも平均振幅の約4倍前後の値を示し、それぞれ17.6°、7.3°、0.26gであった。なお5ヶ月間の大洋航海中に記録した瞬間的な極大値としては波高が13.5m、ロール角（全振幅）24.8°、ピッチ角（全振幅）が13.5°、サージ加速度（全振幅）0.63g、ヒープ加速度（全振幅）0.39g、スウェイ加速度が0.45gであった。

一方、波周期は船との出会い周期であることから、波周期の生起確率分布形は船の針路によって大きく異なることが予想される。ただし、図5(b)によれば本計測期間における出会い周期の分布は比較的広く、種々の周期

図4 波高に対するピッチとロールの有義値の分布

図5(a) 振幅(有義値)の確率密度分布

図5(b) 周期の確率密度分布

図6 異常波浪の計測例

で波に遭遇していたことが分かる。また、船体運動のヒープの周期も比較的広い範囲に分布しているが、ロールとピッチの周期の分布は相対的に狭く、特にロールの周期は平均値周りの狭い範囲にそのほとんどが生起している。これらのことから船体運動におけるロールの運動は出会い波の大きさによってその振幅は影響されるものの運動の周期は波との出会い周期とは無関係に船の固有周期による独自の運動を行っていることが分かる。

4.3 「異常波浪」との遭遇

前節で述べた出会い波高の極大値(瞬間最大値)13.5mは1991年1月16日午前1時のデータに記録されている。この時の波高、ロール角およびピッチ角の生データを図6の時系列に再現してみると、船は横波を受けながら、10°前後のかなり大きなローリングをしながら出会い周期約10秒、波高5～6mの波に次々と遭遇しながら航行していた。ところが1時9分頃突然、10m近い大波に遭遇した後つづいて上記の最大波高13.5mの波に遭遇した。そして、その後はまた元の5～6mの波に戻っていることが分かる。

このような突然に遭遇する巨大な波は一般に「異常波浪」あるいは「Freak Wave」と呼ばれている。

「異常波浪」の生成にはいくつかの原因が考えられ

ているが⁽⁷⁾、本船の例の場合はその遭遇海域から推察して進行方向の異なるいくつかの波が偶然に重なりあっている、いわゆる巨大な三角波の一種であったことを窺わせる。なお、その時、ロール角はあまり変わらず、ピッチ角の方の変化が大きく、その変化具合から、この大波は横波ではなく、船の後方寄りからの波であったと思われる。

「異常波浪」は航行船舶にとって極めて危険な波とされており、その実態解明が望まれているが、このような異常波浪に遭遇することは確率的にも非常に少なく本船の5ヶ月間の取得データの中でもこの時だけであることから、本データはその実態を示す貴重なデータと言える。

4.4 クロススペクトル解析

異なった変動データ間の周波数別入出力関係を調べるためにFFT(高速フーリエ変換)法⁽⁸⁾によるクロス

図7(a) 出会い波高とロール角のクロススペクトル解析結果

図7(b) 出会い波高とピッチ角のクロススペクトル解析結果

ペクトル解析を行った。本解析は個々の時系列の生データ毎に各々の項目間の関係を調べることになるが、全てのデータの各項目間毎に入出力関係を調べると膨大な数となる。そこで本研究においては本質的に入出力関係の明確なデータ間、すなわち入力側と見なせる出会い波高データに対する出力側と見なせる各々の船体運動データ間の解析だけを行うこととした。また全ての計測データを対象とせずに出会い波高が大きく船体運動の激しいデータを取りあえずの解析対象とした。

図7(a)にはクロススペクトル解析の結果として図2に示した生データとほぼ同時刻の1991年1月18日14時におけるデータから解析した周波数軸に対する出会い波高とロール角のスペクトルおよび両データ間のコヒーレンスならびに位相差を示し、図7(b)には同時刻の周波数軸に対する出会い波高スペクトルとピッチ角のスペクトルおよび両データ間のコヒーレンスならびに位相差を例として示した。

図7(a)からも明らかにようにロール運動の卓越（ピーク）周波数は出会い波高とは無関係な周波数すなわち独自の固有周波数である0.07Hz付近の周波数で運動する。またコヒーレンスの値は小さいことから出会い波高とロール運動間の周波数応答は非常に少ないことが分かる。このようなロール運動の独自性を示す結果は他のデータもほとんど同じであり、また4.2で述べたロール周期の生起確率分布の結果とも一致する。

図7(b)からはピッチのスペクトルは波浪のスペクトルとほとんど一致していること、さらに周波数応答の度合を示すコヒーレンスの値が0.05Hzより低周波側で0.6以上の比較的大きな値を示していることなどが分かる。ただし、他のデータで見るとピッチの場合は出会い波高の卓越周波数に応答する部分と共に独自に0.04~0.05Hz付近にスペクトルの大きな値が見られることが多い。このことはピッチの運動は0.04~0.05Hz付近の船体固有の周波数を持つ成分と出会い波浪に応答する周波数成分の両方が生起しているものと思われる。

また例としての図は示していないもののサージ、ヒープ、スウェイそれぞれの加速度のスペクトルを見るとサージの卓越運動周波数はほとんど出会い波浪の周波数に一致しているが、ヒープとスウェイについては出会い波浪に応答する周波数成分の他にある周波数成分が同時に卓越して生起している。すなわち、ヒープの場合は0.13Hz付近、スウェイの場合は0.075Hz付近に出会い波浪周波数と異なるスペクトルのピークが見られる。ヒープの場合はこの周波数0.13Hzが本船のヒープ運動固有周波数とも考えられるが、スウェイの運動は復元力を持たない運動であることから、この周波数成分は船に固有な運動周波数ではなく、この場合は表2からも類推できるようにロール運動の影響による応答運動周波数と思われる。

5. おわりに

航海中における船の出会い波高と船体運動を常時、計測記録する「海象・船体運動の自動記録システム」の構築を目指して、試験装置を実船に搭載して5ヶ月間の自動記録を行った。その結果、装置としては波高信号を船首から船橋へ送信するテレメータ送信周波数に船内用トランシーバの周波数が混信してデータが一部異常な値を示した他はほぼ正常なデータが得られたことから実用的な本システムの構築の可能性を確かめ得た。

また、本計測期間内に得られたデータを解析した結果、この期間内における遭遇海象と共にそれに対応した船体動揺の実態をほぼ明らかにすることができた。

ただし、今後の計測項目については何が必要なのかを再考する必要がある。すなわち、単に遭遇海象と船体動揺の実態だけではなく、遭遇海象に対する船体動揺のより詳しい関連を解析するためには波向き情報が是非とも必要であり、運航能率の解析のためには船速あるいは機関推力などのデータも必要となろう。

その意味において今後は装置の不備な点を改善しつつ、GPSデータおよび風データなども加え、本システムをより完全、有意義なものにすべく実験を重ねる予定である。

最後に本研究は(株)ワンビン産業より経済的支援を受けていることを記して謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) 新世代造船システムに関する調査研究報告書：日本造船研究協会，(SR 210) 研究資料，No. 393，pp. 114，平成元年3月
- (2) 第2回耐航性に関するシンポジウムテキスト：日本造船学会，昭和52年12月
- (3) 安田明生，金居康文，桑島進：マイクロ波を用いた簡易波高計の開発，日本航海学会論文集，第69号，pp. 31-38，1981年
- (4) 桑島進他：船用マイクロ波式波高計の実船実験について，日本航海学会誌「航海」，第82号，pp. 7-12，1984年
- (5) 安田明生，桑島進：マイクロ波ドップラーレーダ式航走波高計の精度評価，東京商船大学，第36回学術講演会，pp. 13-16，1988年
- (6) 桑島進他：船舶における波浪観測について，日本航海学会誌「航海」，第96号，pp. 17-25，1986年
- (7) 桑島進，永井康平：任意個数試料のFFT算法とそのスペクトル解析への応用，港湾技研資料，No. 155，34P，運輸省港湾技術研究所，1973年

質 疑 応 答

高石敬史（日本大学）：船載波浪計を用いて耐航性の実船実験を長期間にわたり行ったのは我が国では初めての成功例で、特に波浪データは貴重である。そこで以下のような検討を行って頂ければ北太平洋の風や波の統計（データベース）を作る場合、有力なデータ検証となる。

(イ) 船のオフィサーによる目視波浪データと計測波高の相関

(ロ) 気象庁が行っている波浪予報の波高値との比較

桑島 進：ご助言を頂きありがとうございました。努力したいと思います。