

タッカー式船用波浪計に関する研究 I. 計測処理システムについて

徳田正幸* ・ 道田豊**

国立防災科学技術センター平塚支所

A Tucker type ship-borne wave recorder I. A wave measuring system with digital data processing

By

M. Tokuda

*Hiratsuka Branch, National Research Center for Disaster Prevention,
9-2, Nijigahama, Hiratsuka, Kanagawa-Ken, 254*

and Y. Michida

*Hydrographic Department, Maritime Safety Agency
of Japan, Chuo-ku, Tokyo, 104*

Abstract

Although Tucker type ship-borne wave recorder was developed in 1952, it has not been used as a practical ocean wave measuring instrument. Because the development of high quality sensor and data processing method, and calibration with high quality wave gauge have not been enough carried out. In the recent years, high quality and low cost sensor has been developed. This kind of sensor has been used in the ship-borne wave recorder analysed in this paper, but its data processing method and comparison with other wave measuring system have not fully been investigated. The data processing system used was the analyzing system based on electronic circuits. In this investigation, the digital data processing method by a digital computer has been developed. The method was applied for measured wave data during stoppage of the ship, and the results were compared with those from the analogue data processing method. The followings were concluded.

- (1) The quality of results are the same.
- (2) In the visual observation of wave, ocean waves are divided into swell and wind wave, and wave height information is given respectively. In the digital data processing, the same data analysis as visual observation can be comparatively easily carried out, but in the analogue data processing, the same method is very difficult to

* 沿岸防災第1研究室

** 海上保安庁水路部

apply.

- (3) From the comparison of results by the visual observation and digital data processing, it is necessary to correct the water pressure for the verification of wind wave component.
- (4) From the point of maintenance and minimization of cost, for the data processing wave recorder, the digital data processing is recommended rather than analogue data processing.

From the above mentioned conclusions, a new wave measuring system with digital data processing was proposed in this paper. The digital computer is introduced to the system and the output from sensor is effectively proceeded by software, and maintenance of the system is simplified. In addition to that, it is expected that the cost can be lower. In the future, a comparative observation of the proposed wave measuring system with other accurate wave recorder is ought to be carried out in order to investigate the total accuracy of Tucker type ship-borne wave recorder.

1. はじめに

船の航行、漁業等を含む沖合での活動においても、また沿岸域の海況を調べる上でも、外洋波浪の情報はもっとも重要な情報の一つと言える。外洋波浪の情報を得るためには、安定した精度の波浪計による波浪データの蓄積が必要となる。このことは精度の高い予報を行うためにも必要なことである。

波浪情報の利用者の希望する波浪の要素は波高、波向、波長(周期)であるが、特に波高に対する関心が高い。さらに波浪の場をうねりと風波に分離して、それぞれについて上記の要素の情報が必要とされる。本論文で議論するタッカー式船用波浪計(Tucker type shipborne wave recorder)は波高と周期の情報を計測するものである。今までの船舶による外洋での波浪観測は目視観測が主体であるために、定量的なデータの蓄積は進んでいない。このような状況で、タッカー式船用波浪計は外洋の波浪の波高と周期に関して定量的なデータを供給する有力な測器と言える。船に常設してあるために、荒天時の観測も容易に実行できる利点がある。

外洋波浪の計測法は、波浪の水面変動に追従するブイの運動から計測するブイ式波浪計によるものと、船をプラットフォームとする船用波浪計によるものがある。また最近、人工衛星又は航空機からのマイクロ波によるリモートセンシングで計測するものが開発されつつある。波浪計測に必要な条件はとくに外洋において、長期にわたり荒天時においても安定した精度で計測でき、かつ取り扱い(設置・回収)が簡単で、安価であることが要求される。今まで開発された波浪計でこれらの条件を満たすものはまだないと思われる。それは次に述べる計測の困難性による。第一に外洋では基準となる固定点が得られないこと。第二に波浪スペクトル分布は比較的高周波領域(0.05 Hz ~ 0.3 Hz)にエネルギーが集中していることである。

本論文は船用波浪計について議論する。波面の変位 $\eta(t)$ は船の上下変位 $Z(t)$ と、船のプラットフォームから計測された相対波面の変位 $\eta_0(t)$ によって求められる。

$$\eta(t) = Z(t) + \eta_0(t) \quad (1)$$

右辺の第一項は船に搭載されている加速度計の出力を2回積分して得られる。第二項の計測は二つの方式がある。一つは船側の海面上の一点から海面までの鉛直距離の変動から、他は船側の海面下の一点の水圧変動から求めるものである。前者については比較的新しく開発されたもので、平ら(1971)と高石ら(1976, 1983)の研究がある。後者は1952年にイギリスで開発されたもので、本論文で詳しく議論する。この方式について組織的な研究は、最近において著者が調べる限りでは、木村(1974, 1975 a, b, 1977)の研究だけである。この研究はタッカー式船用波浪計の観測を、ブイ式波浪計及び目視観測と同時にを行い、次のことを明らかにした。

(1) 加速度変位出力 $Z(t)$ と水圧変位出力 $\eta_0(t)$ の大きさ比較

$Z(t)$ は $\eta_0(t)$ に比べていつも大きい。NIOの報告(1968)によれば、1,000トン以下の船では波高出力 $\eta(t)$ のうち水圧変位出力 $\eta_0(t)$ が占める割合は約20%とある。これらのことから、波浪計として水圧センサーより加速度センサーの性能が重要となる。

(2) 波高変動出力 $\eta(t)$ のゼロレベルの変動

これは加速度から加速度変位を求めるために、積分器(電気フィルター)を使用していることから生じたもので、その特性は時定数で表される。初めに47秒の時定数を使用したために、ゼロレベルの変動が生じたが、その後8秒に短縮したためにゼロレベルの変動はほとんど無視されるものとなった。

(3) 風上舷(Weather side)と風下舷(Lee side)の観測値の比較

船体がローパスフィルターの役割を果たすために、風上舷に比べて風下舷ではすべての周波数帯にわたり減衰した。よって外洋波浪のデータとして、風上舷だけの記録を利用することが望ましい。

(4) タッカー式船用波浪計と目視観測の波高比較

波浪計の値は目視波高に比べて0.6~0.7の低い値となった。

(5) 航走時の観測値の特性

航走時はプラットフォームの移動によるドップラーシフトのために波浪スペクトル全体が高周波領域に片寄る分布となる。またそのために、高周波の成分波の計測精度が落ちる。

(6) 圧力センサーの水圧補正

船側の水面下 Z_0 mにある圧力センサーの補正係数 α を次のように置いた。

$$\alpha = K \times \Gamma \quad (2)$$

$$K = \text{Exp}(\kappa Z_0) = \text{Exp}((2\pi f)^2 Z_0 / g) \quad (3)$$

$$\Gamma = \text{Exp}\{5.5(Z_0/\lambda)^{0.8} - 2\pi(Z_0/\lambda)\} \quad (4)$$

ここで $\kappa = 2\pi/\lambda$ 、 λ は波浪の波長、 Z_0 は圧力センサーの設置水深である。K は深さ Z に対する波浪運動の水圧の減衰の水圧補正で、 Γ は測器の補正係数を表す。

本論文は拓洋(表1)のタッカー式船用波浪計で得られた停船中のデータをもとに、上述した外洋波浪計に要求される性能を満たす、より有効な解析法を明らかにし、それにもとづく新しい計測処理システムを提案する。使用した観測例の海況は表2に示した。上記の項目(1)~(4)についても議論する。項目(5)は議論しない。項目(6)については、次のように仮定した。

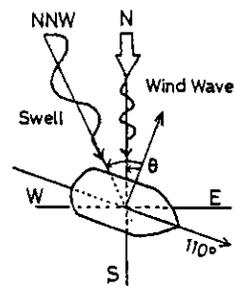
$$\alpha = K, \Gamma = 1.0 \quad (5)$$

表1 拓洋の大きさ
Table 1 Principal dimension of Takuyo.

| | |
|---------------------|-------|
| Length (m) | 90.0 |
| Breadth (m) | 14.2 |
| Draft (m) | 4.6 |
| Displ. (ton) | 3048 |
| \overline{KG} (m) | 5.54 |
| \overline{GM} (m) | 1.34 |
| Rolling Period(sec) | 10.31 |

表2 使用した観測例の海況
Table 2 Characteristics of observed waves.

観測日：1985年3月9日
 観測点：27°00'N 125°30'E
 風向風速：N 14m/s
 船首方位：110°
 目視観測：風浪 N 5階級
 うねり NNW 4階級
 (注) 風浪5階級は波がやや高い(2.5m~4.0m)の波高の風浪で、うねり4階級は中位の周期(8.1秒~11.3秒)のやや高い(2m~4m)の波高のうねりを表す。



2. タッカー式船用波浪計の概要

2.1 測定原理

タッカー式船用波浪計はよく知られているように、両船側の底に圧力センサーと、人工水面設定装置にマウントされた加速度センサーを取り付け、出会波浪の周期と波高を計測する測器である。測定原理は図1を使って説明する。船が波浪計のブイのように完全に水面変動に追従すると、式(1)より $\eta_0(t) = 0$ で $\eta(t) = Z(t)$ となる。すなわち、この場合は加速度式波浪計ブイの場合と全く同じことになり、船の鉛直方向の上下加速度だけから水面変位が得られることになる。しかしながら、船は波浪計ブイより大きいために、すべての波浪成分波の変動に追従しない。よって追従しない変動 $\eta_0(t)$ を計測する必要がある。船の上下変位 $Z(t)$ は上述したように加速度センサーからの出力を2回積分することによって求められる。この場合積分する加速度は鉛直方向の成分のみであるために、加速度センサーの姿勢を常に鉛直方向に保つ必要がある。よって加速度センサーは水平面設置装置にマウントすることになる。図1の船の動きは、このように抽出された鉛直方向の上下運動成分だけを示す。船が水面変動に追従しない運動成分、すなわち相対水面変位はタッカー式船用波浪計の場合、船側の底にあ

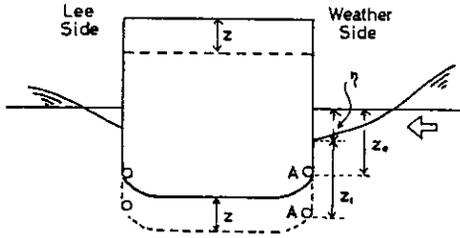


図1 タッカー式船用波浪計の波高計測原理
 Z は船の上下変位で、 Z_0 はセンサーの設置水深で、 Z_1 はセンサーの水位を表す。 η は水面変位である。

Fig. 1 Fundamentals of Tucker type ship-borne wave recorder.

る圧力センサーの変動圧力から求められる。

図1と式(1)より

$$\eta_0(t) = Z_1 - Z_0 = \frac{1}{\rho} (P_1 - P_0) \alpha \quad (6)$$

ここで、 $(P_1 - P_0)$ は水位差 $(Z_1 - Z_0)$ に対応する水圧差で、 ρ は海水の密度である。 α は式(3)で与えられる補正係数である。

波浪計センサーが両舷にある理由は次のことによると言われている。Weather sideでは入射して来る波浪は船体で一部反射されるために、入射波より高めに測定される。逆に、Lee sideでは入射波は船体を通過するので、それに伴い減衰し、低めに測定される。よって信頼のある波高を求めるために、両舷の水面変位から平均水面変位を求め、それから波高を評価するのがより良いと言われている。しかしながら、このような考え方は正しくない。第一に、このように求められた平均水面変位は物理的に意味をなさないものである。なぜなら、両舷のセンサー間の長さは波長に比べて無視されるほど小さくないことである。後述するように、両舷のセンサーから得られる水面変位間の位相差は十分に物理的に意味のあるものである。すなわちその位相差から求められた位相速度は水の波の理論値とよく対応するからである。第二に、高石ら(1983)と木村が指摘したように、タッカー式船用波浪計は常にWeather sideから得られた観測値だけから波浪情報を求める方がよいことである。

すでに述べたように、タッカー式船用波浪計は古くから開発されたものにかかわらず、精度的に信頼性が欠けるために今まであまり普及されていなかった。その原因は、次にあると思われる。第一に今まで信頼のある安価な加速度センサー及び圧力センサーが開発されていなかったことである。第二に、この波浪計はブイと異なって、船体の影響を非常に受け、本来正確な波浪計測ができないという認識(先入観)があったことである。第一に対して、最近では安定した高い性能を有する安価なセンサーが開発されたこと。第二に対して、高石ら(1983)の研究がある。彼らは第一章で述べたように、相対水位を空中から超音波式波浪計(USW)で測る船用波浪計を研究した。それとともに波浪計測における船体の影響も明らかにしている。それによると、入射波が船側に直角に入射する場合(Beam sea)、次のことを示した。

- (1) 船体の影響が顕著になる波の周期は船のローリング周期 T_R より短い周期である。
- (2) 船体の影響をそれによる反射と減衰で表すと、反射される波のエネルギーは減衰される

波のエネルギーに比べて小さい。

(3) Weather sideの波浪計を用いれば、 T_R より短い周期をもつ波に対しても船体の影響は小さい。

(4) USW波浪計はタッカー式船用波浪計とほぼ同じ程度の精度を有する。

これらに関して、今後の研究を待たねばならないが、上述したことにより、タッカー式船用波浪計について認識を新たにする必要があると思われる。

2.2 アナログ計算処理

タッカー式船用波浪計の原理は前節で示した。ここでは使用した波浪計のデータ処理について述べる。この波浪計の全体のブロック図は図2に示した。データ処理はアナログ処理とデジタル処理に分けられる。ここでのデジタル処理はアナログ処理された波高変位を単にデジタル化し、有義波高等を求めるだけのものである。この処理はすでに確立されている。一方アナログ処理は波浪計の主要な処理である。これについて詳しく議論する。

図3から分かるように出力データは各舷について、加速度(A-AV)、加速度変位(A-DV)、圧力変位(P-DV)、波高変位(D-HV)となる。これらの出力は両舷合わせて8チャンネルとなる。波高変位を求める処理はすべてが電気的回路(アナログ回路)で行われる。このアナログデータ処理は、加速度センサーからの出力を2回積分して加速度変位を求め、圧力センサーからの圧力変位と加算することによって波高変動を算出することにある。2回積分を正常に行うために、低周波のノイズをカットすることが必要である。これはローカットフィ

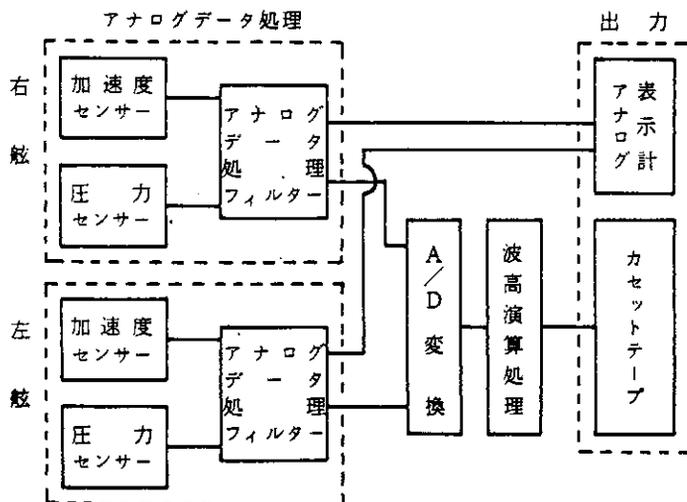


図2 現行の波浪計全体のブロック図 アナログ表示計はペンの記録計で8チャンネルの時系列が表示される。

Fig.2 Block diagram of the ship-borne wave recorder.

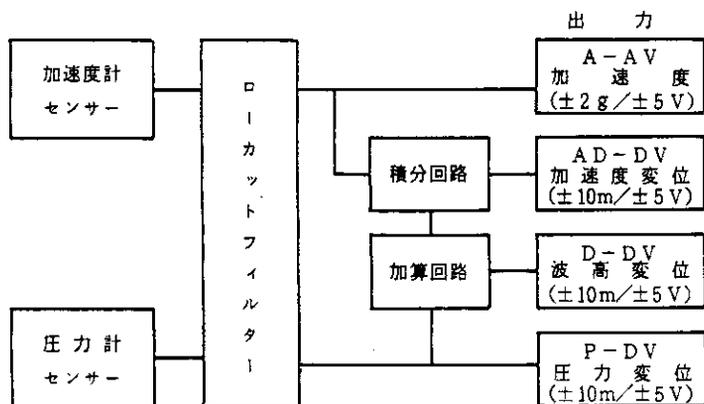


図3 アナログ計算処理システムのブロック図

Fig.3 Block diagram of analogue data processing system.

ルターの適用となる。しかしながらこれを行うと、入力波に対して保存すべき位相がシフトしてしまい、上記した加速度変位と圧力変位の加算が正常にできないことになる。このために、同じ特性のローカットフィルターを加速度ばかりでなく、圧力変位にも適用する必要がある。上述したアナログデータ処理はすべてフィルターの処理によって行うことができる。波浪計のフィルターは加速度フィルター、加速度変位フィルター、圧力変位フィルターで構成される。加速度フィルターと圧力フィルターはローカットフィルターそのものである。加速度変位フィルターはローカットフィルターの機能に2回積分の機能を加えたものとなる。次にこれらのフィルター特性を議論する。

フィルター特性を調べるために、入力波と出力波をそれぞれ添字1と2で区別し、次のように置く。ここで入力波はセンサーから出力された波で、出力波はカセット記録計に出力される波である。波の振幅、周波数、位相はそれぞれ a , f , θ とする。

$$y_1 = a_1 \cos(2\pi ft + \theta_1), \quad y_2 = a_2 \cos(2\pi ft + \theta_2) \quad (7)$$

フィルターの入出力特性は振幅のゲイン G と位相差 β で表される。

$$G = 20 \log_{10} a_2/a_1, \quad \beta = \theta_2 - \theta_1 \quad (8)$$

初めに加速度フィルターと圧力変位フィルターについて調べる。これらはローカットフィルターそのものとなり、それぞれ図4と図6の入出力特性となった。両者はよく一致する。すなわち、ゲイン G に関して周波数 $f > 0.05 \text{ Hz}$ に対して $0 \text{ dB} > G > -0.95 \text{ dB}$ となり、位相差 β に関して周波数とともに減少する特性となった。次に加速度変位フィルターについて調べる。これはすでに述べたように、ローカットフィルターと2回積分フィルターが合成されたものとなる。2回積分は理論的に入力波(式(7)の第1式)に対して、

$$\iint y_1 dt dt = (2\pi f)^{-2} a_1 \cos(2\pi ft + \theta_1 - \pi)$$

式(7)の第2式と比較して式(8)を用いると、

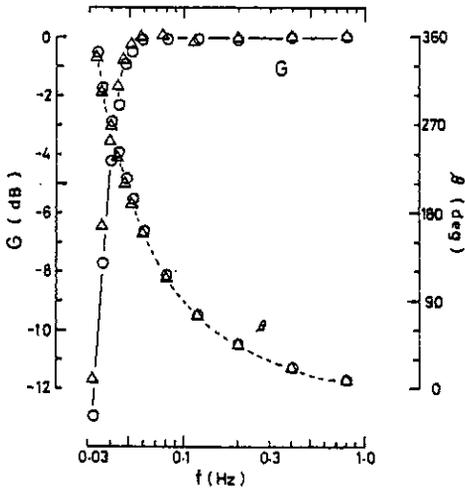


図4 加速度出力に対するフィルター特性
ゲインGは実線で、位相 β は点線と
なる。○印は右舷側で、△印は左舷
側の値である。

Fig.4 Characteristics of filter for
output of acceleration sensor

$$G = 20 \log_{10} (2\pi f)^{-2}, \quad \beta = -\pi \quad (9)$$

図5で示された入出力特性は上述したローカットフィルターに2回積分フィルター(式(9))を加えたものになっている。加速度変位フィルター(図5)とローカットフィルター(図4, 図5)について周波数 $f = 0.1 \text{ Hz}$ の波に対して具体的に調べる。位相差に関してローカットフィルターは90度に対して、加速度変位フィルターは-90度となる。一方ゲインに関してローカットフィルターはほぼゼロに対して、加速度変位は約13.5 dBとなる。この値はほぼ次のように分解される。

$$G \doteq 20 \log_{10} (2\pi f)^{-2} + 20 \log_{10} (2.0)$$

式(9)の第1式との比較により、加速度変位フィルターはゲインが2倍だけ高くなっていると言える。これは便宜的なもので、波の振幅±10mのフルスケールに対して加速度±2gの

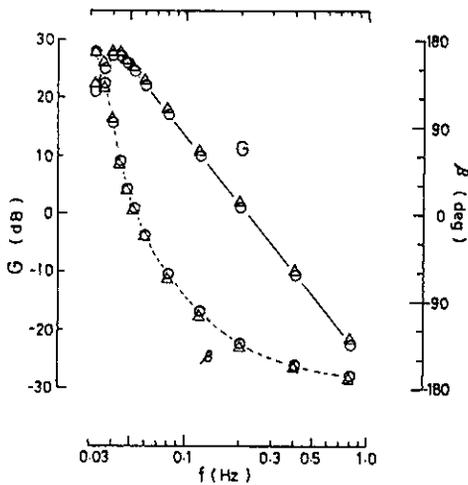


図5 加速度変位出力に対するフィルター特性
記号の説明は図4と同じである。

Fig.5 Characteristics of filter for
accelerated displacements.

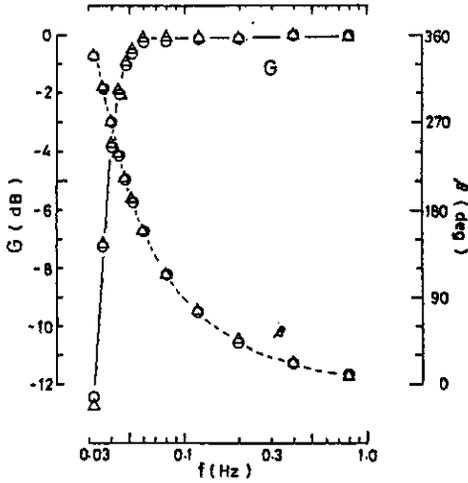


図6 圧力変位出力に対するフィルター特性
記号の説明は図4と同じである。

Fig.6 Characteristics of filter for
output of pressure sensor.

フルスケールを対応させ、それぞれ±5ボルトの出力になるようにしたためである。すなわち、(波の加速度)/g = $(2\pi f)^2(a/g) = (2\pi f)^2(a/2g) \times 2.0$ 。この2.0の値のためにゲインが2倍になっている。ここでgは重力加速度である。以上のことにより、波浪計のデータ処理すなわちフィルター特性は明らかにされた。実際のデータからの検討は次の章で行う。

最後に出力される結果について述べる。上述した8チャンネルの時系列データと有義波の計算値がカセットテープに出力される。前者についてはモニター用としてペンがきの記録用紙にも出力される。時系列データは読み取りかんかく時間0.1秒、20分間のデータとなり、1チャンネル当たり12,000個となる。有義波の計算は図7に示したzero-up-cross法で行い、平均波、1/3最大波、1/10最大波、最大波に関しての波高と周期を求めるものである。これらの計算は3つの波高変動の時系列に対して行う。3つの時系列は右舷、左舷、第2.1節で述べた両舷平均のものとなる。両舷平均の時系列はすでに議論したように物理的に意味をもたないものと言える。カセットに出力される順序は次のようになる。初めに観測した年月日、時刻、次に右舷チャンネルと左舷チャンネルの時系列データとなる。最後に右舷、左舷、両舷平均の有義波の計算値となる。

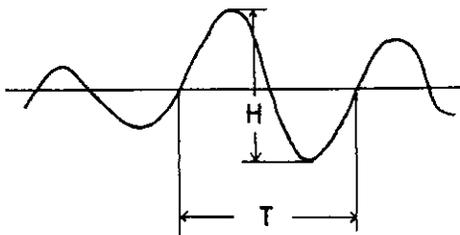


図7 Zero-up-cross 法による個々波の波高
Hと周期Tの決め方

Fig.7 Zero-up-cross method.

3. デジタル計算処理の試み

この章で議論することは、第2.2節で示されたタッカー式船用波浪計のアナログデータ処理の特性を、代表的な観測データを用いて、さらに具体的に明らかにするものである。これは、上述したアナログ処理と同じ内容の処理を計算機によるデジタル処理で試み、両者の比較により行うものである。このデジタル計算は図3で示されたカセットテープに記録された時系列データをもとに、これらをフーリエ級数で表現し、FFT法によって能率的に行う時系列補正計算にもとづくものである。計算内容は主にフィルター補正、2回積分・微分の演算、水圧補正となる。フィルター補正は上記の時系列がローカットフィルターによって処理されているので、フィルター処理前の時系列 真の時系列を得るために行うものである。計算はすべて項別に行うことができる。平ら(1971)はこのようなデジタル計算を、船首に取り付けた超音波波高計によって相対水面変位を測定する方式の解析に導入した。本研究の目的はこの方式をタッカー式船用波浪計のデータ処理に導入し、高い処理効率と精度を有する計測処理システムを開発することにある。

時系列 $y(t_i)$, $i = 1, 2, \dots, N$ は一般に次のようなフーリエ級数で表すことができる。

$$y(t_i) = a_0 + \sum_{j=1}^{N/2} \{ a_j \cos(2\pi f_j t_i) + b_j \sin(2\pi f_j t_i) \} \quad (10)$$

$$i = 1, 2, \dots, N, \quad t_i = i \Delta t, \quad f_j = j \Delta f, \quad \Delta f = 1/(N \Delta t)$$

ここでは $\Delta t = 0.5$ 秒, $N = 2048$ とした。上式より、時系列 $y(t_i)$ が与えられるなら、FFT法によって比較的容易にフーリエ係数 a_j , b_j を得ることができる。また逆に係数 a_j , b_j が分かればFFT法によって時系列 $y(t_i)$ は短い計算時間で示される。パワースペクトル密度はこれらの係数から計算できる。一次スペクトルは $\phi_1(f_j)$

$$\phi_1(f_j) = (a_j^2 + b_j^2) / (2 \Delta f), \quad j = 1, 2, \dots, N/2 + 1 \quad (11)$$

パワースペクトル $\phi(f_R)$ はラグ数 M に応じた平滑化を一次スペクトルに行うことによって得る。FFT法からパワースペクトルを求めるプログラムは力石・光易(1973)によって示されている。ラグ数 M はすべて128個(64秒)とした。周波数分解能は0.0078 Hzである。以上のことから、デジタル計算はすべてフーリエ級数の係数——成分波の振幅と位相を媒介として行うことができる。式(10)より、上述したフィルター補正、2回積分・微分の演算は容易にできる。周波数 f_j の成分波の振幅 A_j と位相 θ_j は

$$A_j = \sqrt{a_j^2 + b_j^2}, \quad \theta_j = \tan^{-1} a_j / b_j \quad (12)$$

フィルター補正計算はこの成分波の振幅と位相の補正計算となる。すなわち、振幅に関しては図8の値を、位相に関しては図4～図6の値を用いる。振幅補正值として図4～図6の値でなく図8を用いたのは次の理由による。すでにローカットされた時系列に前者の値を忠実に用いると、本来存在しなかった低周波の雑音までが非常に大きく増幅されるからである。図8は0.05 Hz以下の低周波領域に対してあまり大きくない増幅率を有し、これより高周波

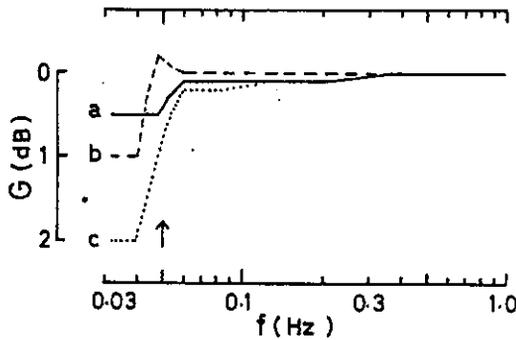


図8 デジタル計算に用いたフィルターの振幅補正

- (a) 加速度出力(A-AV)
- (b) 加速度変位出力(AD-DV)
- (c) 圧力変位出力(P-DV)

Fig.8 Characteristics of filter for amplitude of wave component used for the digital data processing method.

領域に対しては図4～図6と一致する分布である。ローカットフィルターすなわち低周波のノイズ除去に対するデジタル計算は次のような考えに基づいて行う。外洋の波浪は主に次の周波数帯にエネルギーが集中していると予想される。

$$0.05 \text{ Hz} < f < 0.3 \text{ Hz} \quad (13)$$

この周波数帯を外洋波浪の主要周波数領域と呼ぶことにする。よって波浪に無関係なノイズをカットするためには、上記の主要周波数領域を含む、少し広めの周波数領域を設定し、その周波数領域では振幅の補正係数 $\alpha_j = 1.0$ とし、それ以外の周波数領域では $\alpha_j = 0.0$ とする。位相の補正係数 β_j はすべての周波数領域でゼロとする。このように、デジタルフィルターではアナログフィルターと異なって不必要な位相変化をもたらさない。

2回積分及び2回微分の演算は項別的にできる。これによって、この計算もフィルター補正計算と全く同様に成分波の振幅と位相の補正計算となる。すなわち、前者に対して成分波の振幅に $1/(2\pi f_j)^2$ を掛け、位相に -180 度加算すればよい。後者に対してはそれぞれ $(2\pi f_j)^2$ と $+180$ 度の補正となる。

図9は上述したデジタル計算をまとめたものである。これを使ってデジタル計算の手順を説明する。初めに、入力波の時系列 y_i から複素数化された時系列を作る。これからFFT法によって、フーリエ級数の係数 a_j, b_j を求め、周波数 f_j の成分波の振幅 A_j と位相 θ_j を計算する。これらの値に対して、フィルター補正、2回積分・微分の補正係数 α_j, β_j による補正計算を行い、補正されたフーリエ級数の係数を得る。再びFFT法を用いることによって、補正された時系列 Z_i を求めることができる。これについてのパワースペクトルは補正された成分波の振幅から計算できる。補正係数 α_j, β_j は表3に、時系列から計算される項目は表4に示した。これらの計算される結果は時系列とパワースペクトルで表される。次に具体的に議論する。今後断らない限り Weather side の結果だけとする。使用した観測例に対して、Weather side は左舷で、Lee side は右舷となった。

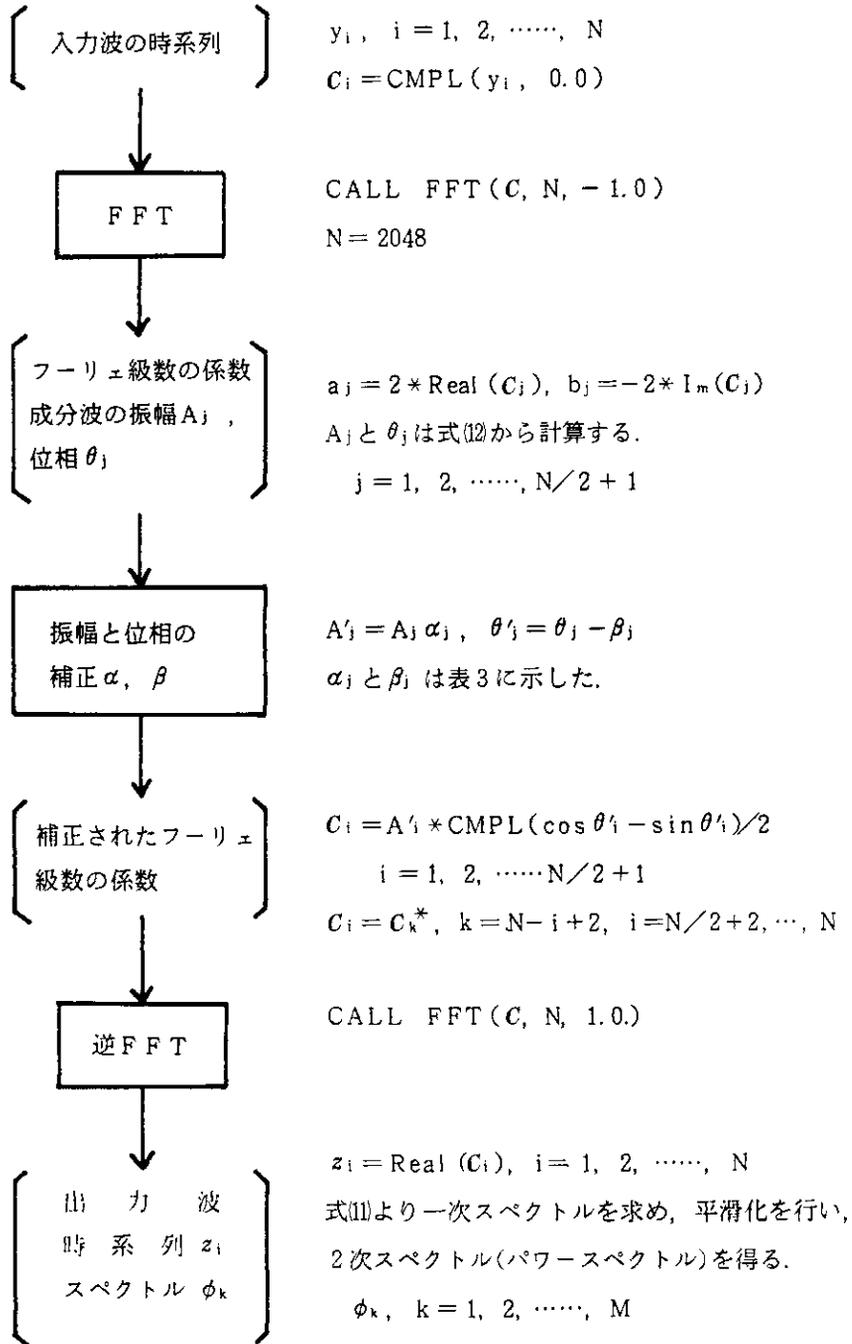


図9 時系列補正計算の流れ図

Fig.9 Steps in the software production of corrected wave records for the digital data processing method.

表 3 成分波の振幅と位相の補正

Table 3 Correction function for amplitude and phase of component wave.

| | フィルター補正 | | 変 位 補 正 | | | | | |
|--------------------|----------------------|--------------|------------|------------------------|------------|---------------------------------|------------|-------------------------------|
| | 周波数範囲 | 補正内容 | 2 回 積 分 | | 2 回 微 分 | | 水 圧 補 正 | |
| | | | 周波数範囲 | 補正内容 | 周波数範囲 | 補正内容 | 周波数範囲 | 補正内容 |
| 振幅補正 α_j | 0.032 Hz > | ゼ ロ | 0.047 Hz > | EXP ($-0.03/f_j$) | 0.333 Hz > | $(2\pi f_j)^2$ | 0.333 Hz > | 式 (3) |
| | 0.032 Hz ~ 0.8 Hz | 図 8 | 0.047 Hz < | $1/(2\pi f_j)^2$ | 0.333 Hz < | $(2\pi f_j)^2$ EXP($-f_j$) | 0.333 Hz < | 式(3)で $f_j=0.333\text{Hz}$ |
| | 0.8 Hz < | ゼ ロ | | | | | | |
| 位相補正 β_j | 0.032 Hz > | ゼ ロ | | | | | | |
| | 0.032 Hz ~ 0.8 Hz | 図 4 ~ 図 6 | 全 域 | -180° | 全 域 | 180° | 全 域 | ゼ ロ |
| | 0.8 Hz < | ゼ ロ | | | | | | |

表 4 観測例に対して計算した項目と分散値(全エネルギー- m^2s)

Table 4 Tucker type ship-borne wave recorder data summary.

| | 右 舷 | | | 左 舷 | | |
|-----------|--------|---------|------------------|--------|---------|------------------|
| | 出 力 | フィルター補正 | 変位補正 | 出 力 | フィルター補正 | 変位補正 |
| 加 速 度 | A-AV1 | A-AM1 | (2回積分) A-DM1 | A-AV2 | A-AM2 | (2回積分) A-DM2 |
| | 0.163 | 0.167 | 0.337 | 0.264 | 0.270 | 0.608 |
| 加 速 度 変 位 | AD-DV1 | AD-DM1 | (2回微分) AD-AM1 | AD-DV2 | AD-DM2 | (2回微分) AD-AM2 |
| | 0.357 | 0.357 | 0.181 | 0.626 | 0.626 | 0.284 |
| 圧 力 | P-DV1 | P-DM1 | (水圧補正) P-DP1 | P-DV2 | P-DV2 | (水圧補正) P-DP2 |
| | 0.590 | 0.605 | 0.162 | 0.251 | 0.257 | 0.680 |
| 波 高 | D-HV1 | D-HM1 | D-HP1 | D-HV2 | D-HV2 | D-HP2 |
| | 0.330 | 0.326 | 0.380 | 0.436 | 0.459 | 0.749 |

3.1 加速度出力

カセットテープに記録された第5チャンネル(左舷側)の加速度出力を用いて、図10に示された処理を図9と表3を使用して行い、加速度変位を求める。

3.1.1 正弦波による思考実験

第一に周波数0.1 Hzの正弦波を加速度出力(A-AV)とした。

$$y_i = 5.0 \cos(2\pi f \Delta t_i), \quad f=0.1, \quad i=1, 2, \dots, N \quad (14)$$

これ以後、加速度の単位は $g \times 10^{-3}$ ($g = 980 \text{ cm/s}^2$) で、変位の単位はcmとする。図11は正弦波の加速度、式(14)から計算された加速度(A-AM)と加速度変位(A-DM)の時系列とパワースペクトルの結果を示す。図示される時系列は常に記録時から最初の125秒間のものとする。初めに左図の時系列について述べる。初期のところをのぞけば、加速度は加速度出力に比べて、位相について約90度おくれ、振幅についてはほとんど変化しない。これらの特性は図4のフィルター特性に符号を換えたものと一致する。初期の変形は低周波の雑音による。

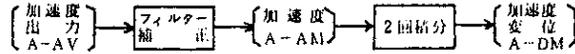


図10 加速度出力(A-AV)から加速度変位(A-DM)を求める流れ図
 Fig.10 Processing diagram of the displacement (A-AM) from the acceleration (A-AV).

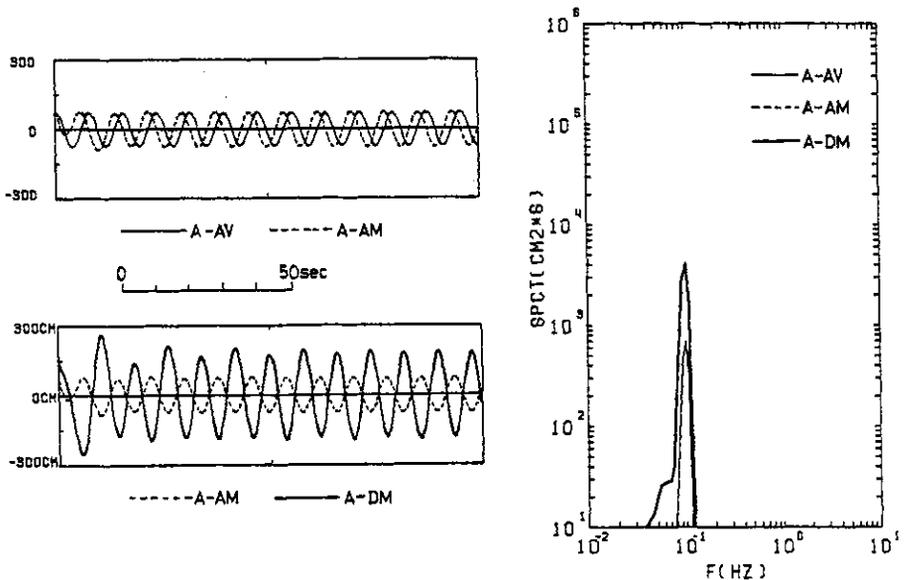


図11 周波数0.1 Hzの正弦波の加速度出力から計算した加速度変位
 Fig.11 Displacement (A-DM) calculated from sinusoidal waves (A-AV) with a frequency of 0.1 Hz.

るものである。このような変形は加速度変位にも見られ、2回積分のため変形がより大きくなる。この領域をのぞけば、加速度変位は加速度に比べて、位相については予測したように180度の遅れ、振幅は約12.4となった。この振幅の値は予測値 $5.0 \times g \times 10^{-3} / (2\pi f)^2$ と完全に一致した。次にパワースペクトルから、上述した振幅の結果が裏付けされる。スペクトル分布は0.1 Hzのピーク周波数をもつデルタ関数に近いものとなった。加速度変位の分布において、とくに低周波領域に低エネルギーの雑音が存在する。これは上述した初期の時系列に見られた変形によるものである。

第二に上記の波のかわりに周波数 $f = 100/1024 \text{ Hz}$ のみ異なる正弦波を入力波として計算し、図12の結果を得た。この入力波は上記の波に比べてわずかに周波数が異なるだけであるが、式(10)のフーリエ級数表示の100番目の周波数と完全に一致する。このためにエネルギーはこの周波数だけにとどまり、他の周波数に流れない。よって得られた結果は図11に比べて予測値により一致するものとなった。すなわち、時系列はより正確な正弦波となり、スペクトル分布はデルタ関数に非常に近いものとなった。

上述した思考実験で用いられた2回積分の振幅補正をまとめると、次のようになる。表3に示したように、この計算は周波数が低くなればなるほど高い増幅率を与えるものである。このために、次のような考えに基づいて補正係数を決定した。加速度から2回積分して得られる加速度変位は第2.1節で示したように波浪による船体の上下運動であるために、波浪の低周波の成分波に対応するものとなる。よって加速度変位のスペクトルは低周波領域で、う

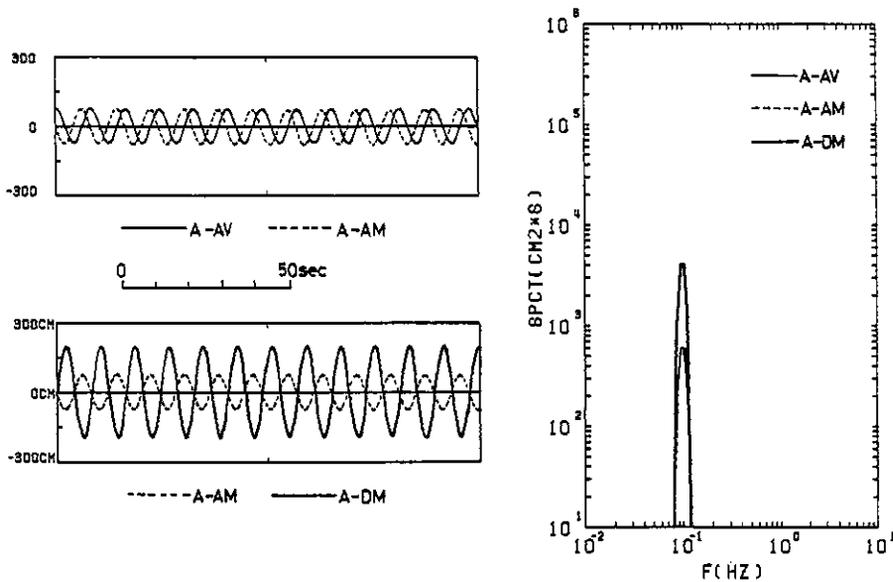


図12 周波数100/1024 Hzの正弦波の加速度出力から計算した加速度変位。
 Fig.12 Same as in Fig.11 except for a frequency of 100/1024Hz.

ねりに見られるような急激に減衰する形を持つ。このようなことから、2回積分の振幅補正 α_j は次のように仮定した。

$$\alpha_j = \begin{cases} \text{EXP}(-0.03/f_j), & f_j < 0.047\text{Hz} \\ 1/(2\pi f_j)^2, & f_j \geq 0.047\text{Hz} \end{cases} \quad (15)$$

この低周波の振幅補正は経験的に得られたもので、唯一の補正分布でない。

3.1.2 観測例

前節の思考実験により、加速度出力から加速度変位を計算する方法の妥当性が示された。ここでは外洋で観測された加速度出力のデータ解析を行う。実測された時系列は式(10)に示されるように多くの成分波の線形の重ね合わせと仮定できるので、思考実験と同様に行うことができる。計算結果は図13に示されるように、ほぼ思考実験と同様な結果となった。すなわちフィルター補正は位相変化をもたらすが、エネルギー(振幅)はほとんど増減がない。2回積分の演算は位相については180度の遅れをもたらし、エネルギーについては周波数約0.16 Hzを境に低周波領域で増幅、高周波領域で減衰となった。この周波数は $1/(2\pi f)^2 = 1$ の式を満す値となる。

以上のことにより、図9と表3で示されたデジタル計算は加速度出力から加速度変位を求める解析において、合理的な結果を示した。これ以後の解析も同様な考えに基づいて行うことができるので、思考実験を行わず直接観測データを解析することにする。

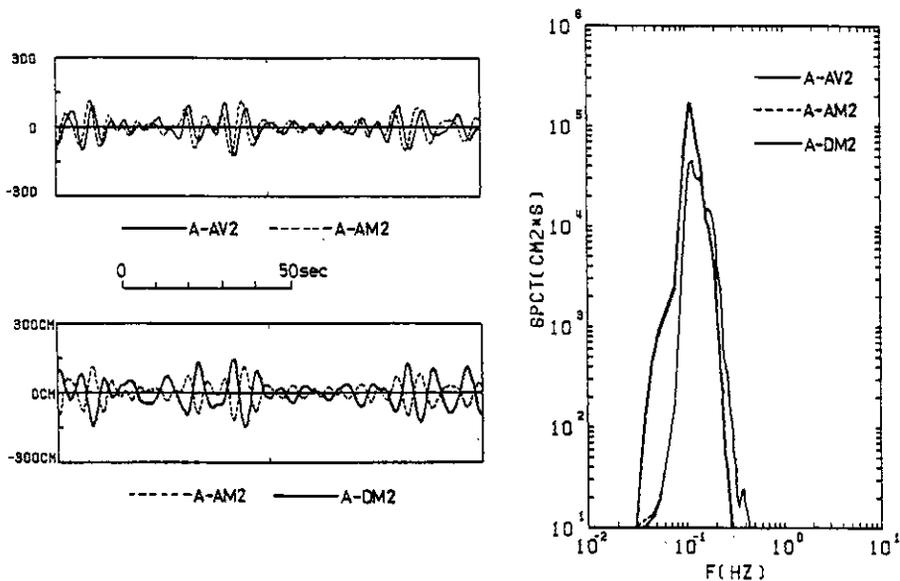


図13 観測例の加速度出力(A-AV2)から計算した加速度変位(A-DM2).
 Fig.13 Displacement (A-DM2) obtained from observed acceleration (A-AV2).

3.2 加速度変位出力

カセットテープに記録された第7チャンネル(左舷側)の加速度変位出力を、2回微分して加速度を計算する。この計算処理は前節と正反対のもので、図14に示された順序に従って図9と表3を用いて行うことができる。図15に結果を示す。それによると、フィルター補正の結果は前節と類似なものとなった。2回微分の演算は位相については180度の進みをもたらす、エネルギーについては周波数0.16Hzを境に低周波領域で減衰、高周波領域で増幅となる。よって2回微分による結果は2回積分の場合と正反対の結果となり、予測値と一致するものとなった。2回微分の振幅補正係数は高周波になればなるほど増幅されるので、外洋波浪の主要周波数領域(式(14))を考慮し、次のように経験的に仮定した。

$$\alpha_j = \begin{cases} (2\pi f_j)^2 & f_j \leq 0.333\text{Hz} \\ (2\pi f_j)^2 \text{EXP}(-f_j) & f_j > 0.333\text{Hz} \end{cases} \quad (16)$$

前節と本節の結果により、主要周波数領域において、2回積分及び微分のデジタル処理が正確であることが明らかにされた。これらの結果の比較により、波浪計のアナログ処理の精

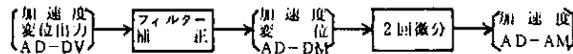


図14 加速度変位出力(AD-DV)から加速度(A-DM)を求める流れ図。

Fig.14 Processing diagram of the acceleration (A-DM) from the displacement (AD-DV).

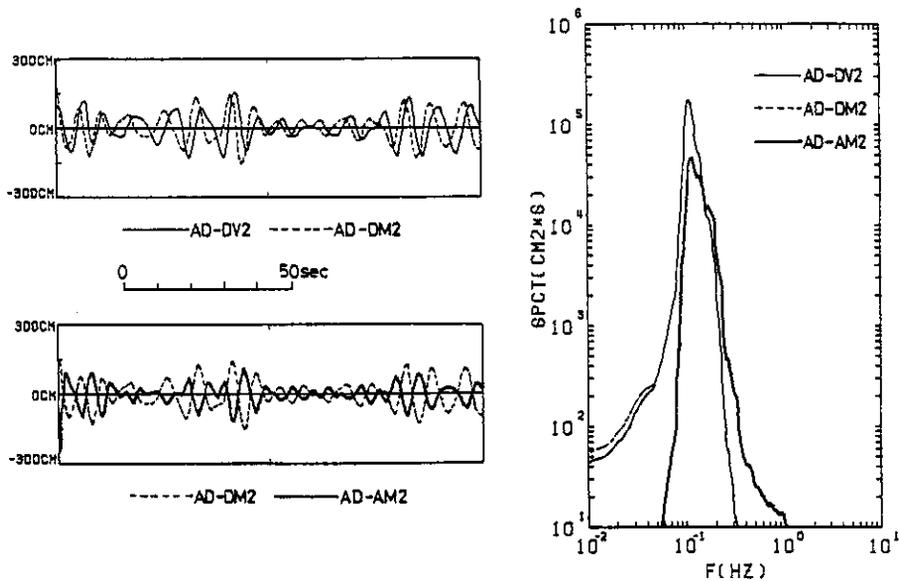


図15 観測例の加速度変位出力(AD-DV2)から計算した加速度(AD-AM2)

Fig.15 Acceleration (AD-AM2) obtained from observed displacement (AD-DV2).

度を加速度と加速度変位において調べることができる。図13と図15の比較から、加速度は図16に、加速度変位は図17に示した。これらの図から、主要周波数領域で両者とも振幅と位相においてはほぼ一致することが分かる。この周波数領域以外では雑音のために一致しない。しかしこの相違はエネルギー的に非常に小さいので、無視することができる。よって、波浪計のアナログ処理はデジタル処理とほぼ同程度の精度であると結論される。

3.3 圧力変位出力

カセットテープに記録された第6チャンネル(左舷側)の圧力出力を、水圧補正して水圧変位を求める。この計算は前節と同様に図18に示された順序に従って図9と表3を用いて行うことができる。その結果、図19を得た。この図より、フィルター補正は上述した結果と類似なものとなった。水圧補正の計算は位相の変化をもたらさず、エネルギーについては周波数

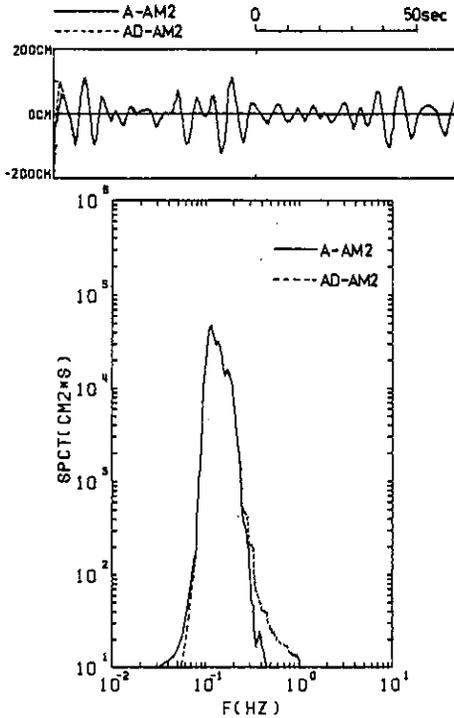


図16 加速度出力(A-AV2)から求めた加速度(A-AM2)と加速度変位出力(AD-AV2)からの加速度(AD-AM2)の比較。

Fig.16 Comparison of acceleration between (A-AM2) and (AD-AM2).

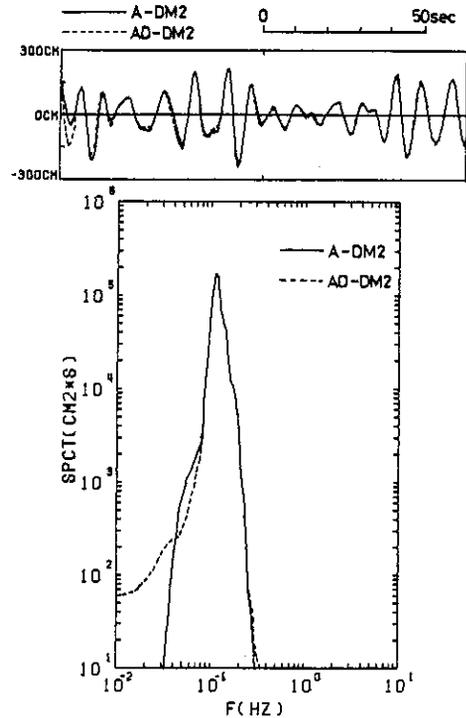


図17 加速度出力(A-AV2)から求めた加速度変位(A-DM2)と加速度変位出力(AD-AV2)からの加速度変位(AD-DM2)の比較

Fig.17 Comparison of displacement between (A-DM2) and (AD-DM2).

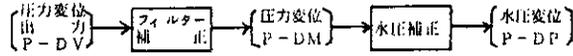


図 18 圧力変位 (P-DV) から水圧変位 (P-DP) を求める流れ図

Fig.18 Processing diagram of the displacement (P-DP) from the pressure (P-DV).

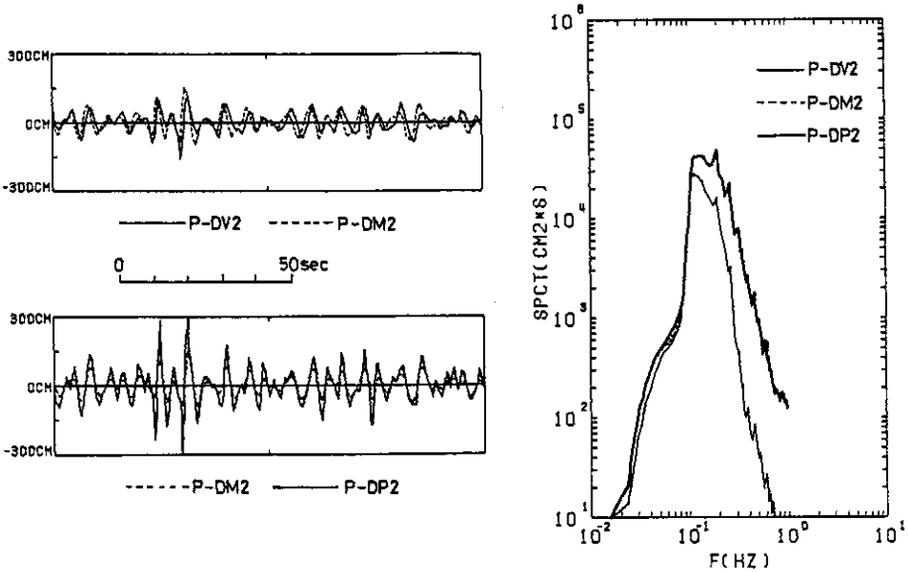


図 19 観測例の圧力変位 (P-DV2) から計算した水圧変位 (P-DP2)。

Fig.19 Displacement (P-DP2) obtained from observed pressure (P-DV2).

0.1 Hz 以上の高周波領域で増幅となる。圧力変位は第 2. 1 節で説明したように、加速度変位と異なって船体が追従しない波浪成分によるものである。この成分は低周波から高周波の波を含む。低周波成分(うねり)において、圧力変位は加速度変位に比べて非常に小さくなるが、高周波成分(風浪)においては逆に圧力変位が非常に大きくなる。このことから圧力変位は相対的に主体が高周波成分となる。この成分による変位は水深に対して大きい減衰率をもつので、圧力変位は水圧補正を必要とする。観測例に対して計算を行うと、補正された変位はもとの変位に比べてエネルギーが約 2~3 倍に増加する。このことから、水圧補正は高周波の風浪成分にとくに重要であると言える。使用している波浪計のアナログ処理には水圧補正を含んでいない。

上述したように、水圧補正された水圧変位は加速度変位に比べて、より高周波の成分波によって形成される。よって水圧補正は強風時の水圧変位の高周波領域のスペクトルの形がマイナス 5 乗になるように、次のように経験的に仮定した。

$$\alpha_j = \begin{cases} \text{EXP} \{ (2\pi f_j)^2 Z_0/g \} & f_j \leq 0.333 \text{ Hz} \\ \text{EXP} \{ (2\pi f_0)^2 Z_0/g \} & f_j > 0.333 \text{ Hz} \end{cases} \quad (17)$$

ここで Z_0 は圧力センサー設置水深 3.5 m, $f_0 = 0.333$ Hz である. 上式から分かるように, 補正係数 α_j を精度よく求めるためには設置水深 Z_0 の測定を常に行うことが望ましい. Z_0 の値が 50 cm 変化すると, α_j は周波数 0.2 Hz ~ 0.3 Hz の範囲で 1 割から 2 割の増加となる. Z_0 は船の積載重量, 動揺等によって変化する. 一般に圧力センサーの出力は変動成分だけを増幅したものである. よって, 第4章で議論する新しい計測処理システムにおいて, 圧力センサーの出力は変動成分ばかりでなく平均値 Z_0 も含むものにする.

3.4 波高変位

波高変位は加速度変位と水圧変位の和で計算される. 波高変位が求められるなら, 必要とする情報である, 外洋波浪の有義波の特性及びスペクトル密度を計算することができる. 図 20 は 3 つの波高変位を示す. これらの中で, (D-HV2) はカセット出力の第 8 チャンネルのデータである. これはアナログ処理で, あとの 2 つはデジタル処理で得られるものである. これらは次のように計算される.

$$\left. \begin{aligned} (D-HV2) &= (AD-DV2) + (P-DV2) \\ (D-HM2) &= (AD-DM2) + (P-DM2) \\ (D-HP2) &= (AD-DM2) + (P-DP2) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

(D-HM2) は (D-HV2) にフィルター補正をしたもので, 位相についてはずれるがエネルギー

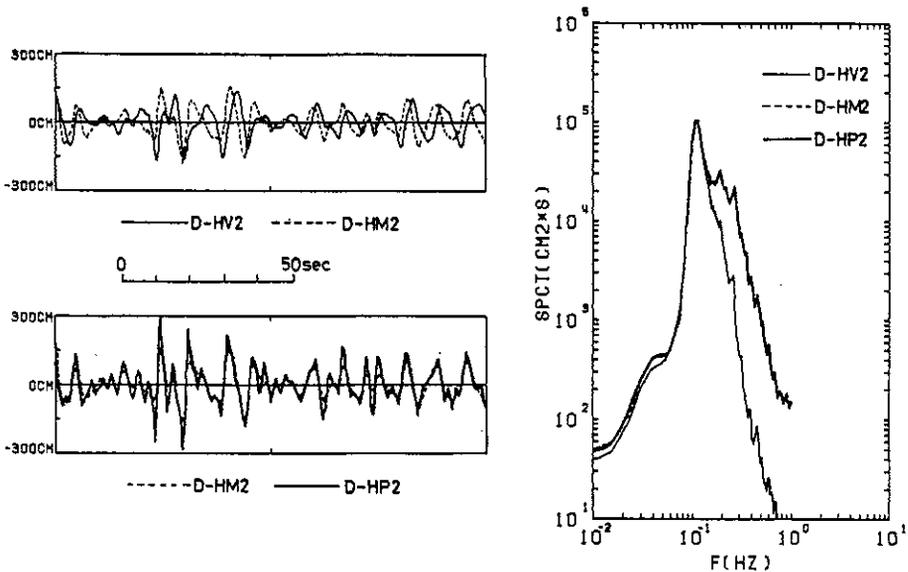


図 20 アナログ計算処理による波高変位 (D-HV2) とデジタル計算処理による波高変位 (D-HM2, D-HP) の比較.

Fig. 20 Comparison of wave records derived from the analogue data processing method, (D-HV2) and the digital data processing method, (D-HM2, D-HP)

ギー分布についてはほとんど変わらないものである。この補正は前節と類似したものである。(D-HP2)はこれらのものと比べて、水圧補正した分だけ大きいものになる。

表2に示した海況から、(D-HP2)の方が(D-HV2)及び(D-HM2)に比べて、より波浪の場を表していると言える。その理由は(D-HP2)のスペクトルは次のことを有するからである。第1に目視観測によれば高いうねりに風浪が重なり合う、2つのスペクトルピークをもつ波浪の場であること。観測されたスペクトルは約0.11 Hzと0.20 Hzの2つのピーク周波数をもつこと。第2に外洋波浪は風の作用下では高周波領域においてマイナス5乗のスペクトルの形を有することである。上記のことにより、船用波浪計で計測される波高変位は水圧変位として水圧補正を行ったものを使用すべきだと言える。

波高変位は加速度変位と水圧変位によって形成される。第2.1節で述べたように、加速度変位は相対的うねりのような低周波領域の波浪成分波に、水圧変位は風浪のような高周波領域の波浪成分波によるものとなる。これらのことは図21a, bのスペクトル分布から支持される。時系列に注目すると、次のことが分かる。加速度変位の波形はうねりに見られるような、比較的規則正しいビート波形となり、水圧変位の波形は風浪に見られるランダム変動に近い波形となることである。ここで注意すべきことは、加速度変位と水圧変位の和である波高変位はエネルギー密度において、これらの和と必ずしもならないことである。このことは

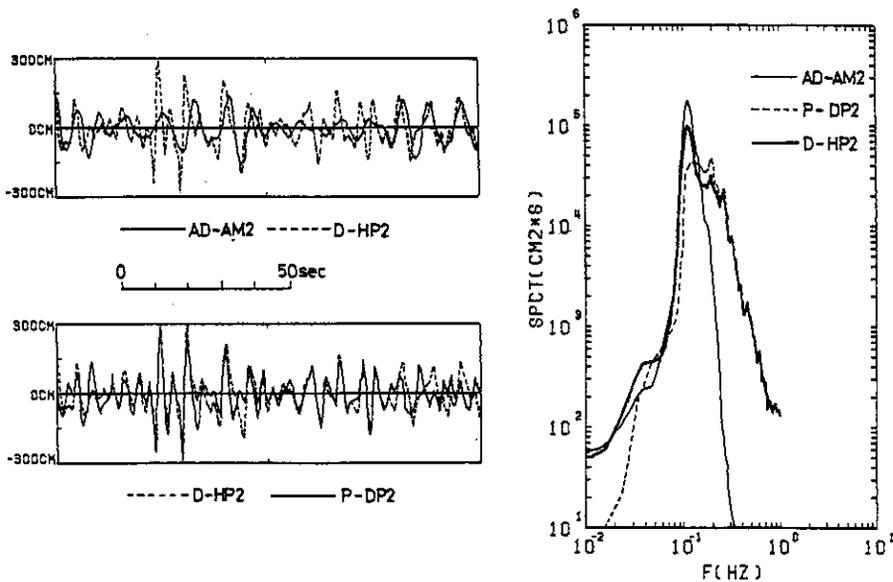


図 21a 左舷における加速度変位(AD-AM2)、水圧変位(P-DP2)、波高変位(D-HP2)の比較。
 Fig. 21a Comparison of (AD-AM2), (P-DP2) and (D-HP2) measured at the weather side.

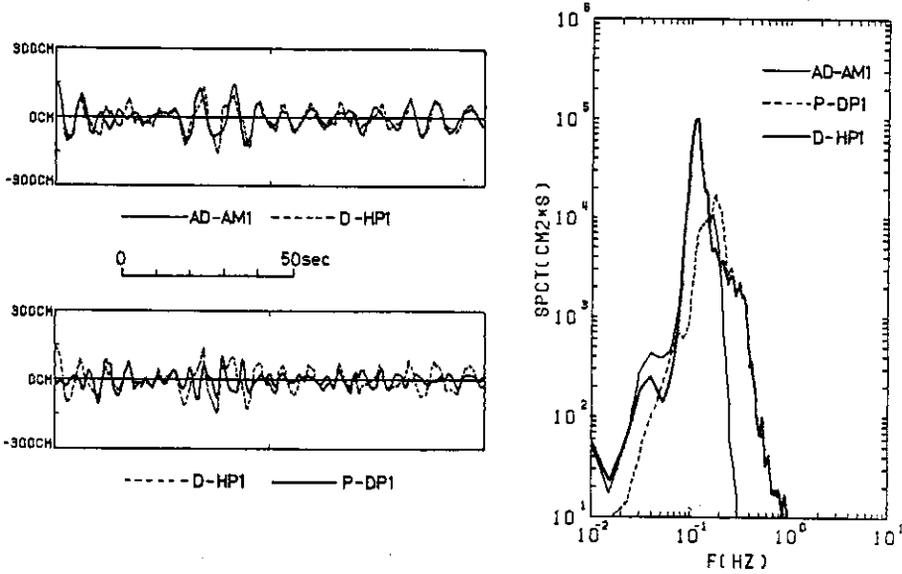


図 21 b 右舷における加速度変位(AD-AM1), 水圧変位(P-DP2), 波高変位(D-HP2)の比較.
 Fig. 21 b Comparison of (AD-AM1), (P-DP1) and (D-HP1) measured at the lee side.

図 21 a のスペクトルピーク周波数付近の分布から示される。次に加速度変位と水圧変位の比率を調べる。第 1 章で述べたように従来の波浪計の観測値では加速度変位に対する水圧変位の比は平均的に約 0.20 と言われている。表 4 に今回の観測値に対しての各変位の全エネルギーを示した。それによると、この比は水圧補正をしない場合 $(P-DM2)/(AD-DM2) \approx 0.4$ で、水圧補正を行う場合 $(P-DP2)/(AD-DM2) \approx 1.0$ となる。このように、従来と異なる結果が示された理由は、第一に解析した波浪場は比較的高周波の強い風浪が卓越した場であったこと、第二に圧力センサーの性能が向上したことによると考えられる。

デジタル処理で得られた波高変位の有効的な周波数範囲は、外洋の主要周波数領域を含むもので、次のようになる。

$$0.048 \text{ Hz} < f < 0.333 \text{ Hz}, \quad 14 \text{ m} < \lambda < 680 \text{ m} \quad (19)$$

ここで f , λ はそれぞれ周波数, 波長を示す。

3.5 右舷と左舷の特性の比較

前節までの議論は左舷側(Weather side)の観測データに基づくものであった。この節では右舷側のデータについても左舷側と同様なデジタル処理を行い、両者の結果を比較検討し波浪計の特性をさらに明らかにする。

図 22 は加速度変位の両舷の比較を示す。スペクトル密度について、右舷はとくにピーク周波数付近で左舷に比べて小さくなる。このために表 4 に示すように、右舷の全エネルギーは

左舷の約57%になる。位相については非常に特徴的なものである。すなわち、ビート波形となる変位で、もっとも波高が高いところで両者は一致し、その後で右舷の位相が左舷に比べて遅れることである。船の運動から考えると、同位相の時は船の上下運動が、位相ずれの時はローリング運動が卓越するためと推定できる。

図23は水圧変位の比較である。右舷のスペクトル密度は全周波数領域で左舷に比べて非常に小さくなる。全エネルギーにおいて、右舷は左舷の約24%になる。位相については右舷は遅れることである。

図24と図25は波高変位の比較を示す。前者は水圧補正のない場合で、後者は水圧補正を行った場合である。これらにより、エネルギー密度はピーク周波数より高周波領域において、右舷の方が左舷に比べて明らかに減衰している。このような傾向は水圧補正の波高変動の場合により強い。低周波領域においてはいずれの場合も両者はほぼ一致する。このことは非常

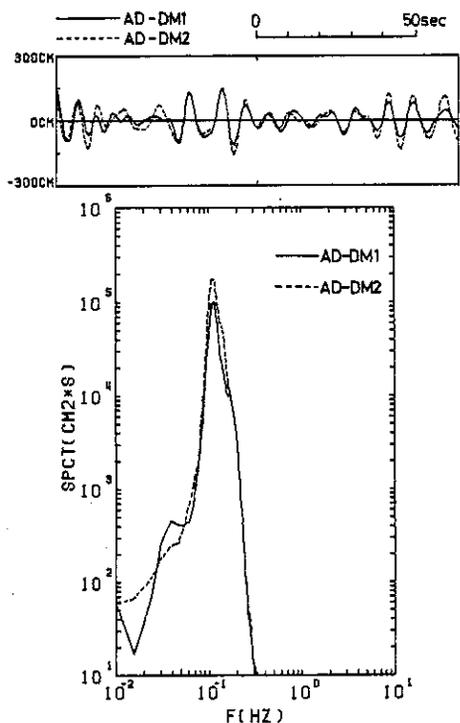


図22 加速度変位(AD-DM)に関して両舷の比較。

Fig.22 Comparison of (AD-DM1) and (AD-DM2) The former is measured at the lee side, and the latter at the weather side.

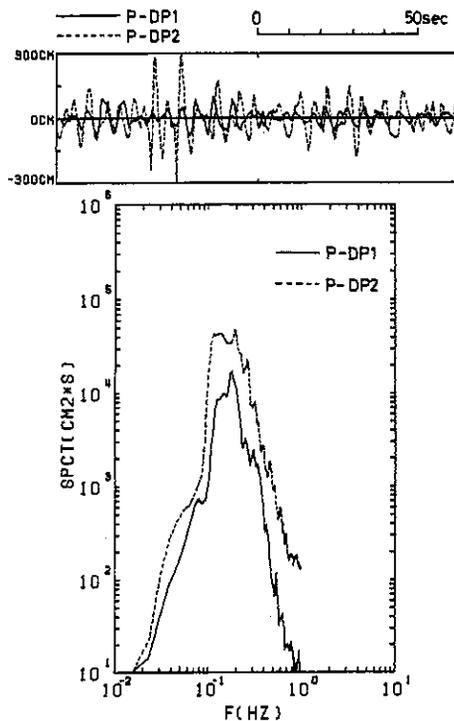


図23 水圧変位(P-DP)に関して両舷の比較。

Fig.23 Comparison of (P-DP1) and (P-DP2).

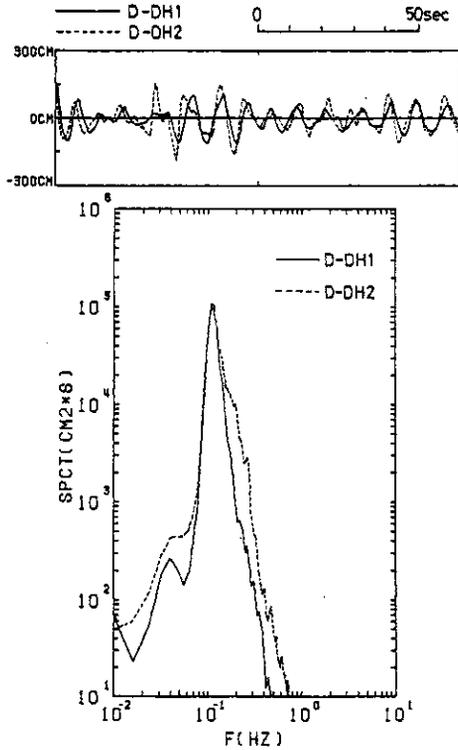


図24 波高変動(D-DH)に関して両舷の比較(水圧補正なし)

Fig.24 Comparison of (D-DH1) and (D-DH2).

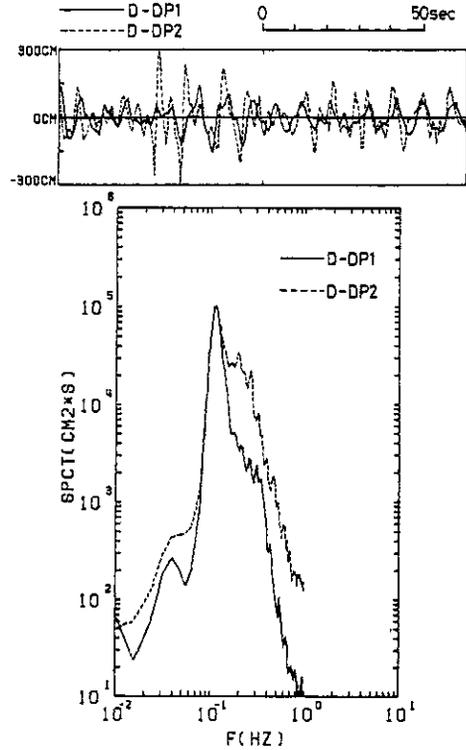


図25 波高変動(D-DH)に関して両舷の比較(水圧補正あり)

Fig.25 Comparison of (D-DP1) and (D-DP2).

に注目されることである。すなわち、加速度変位と水位変位はともに左舷の方が高いエネルギーにもかかわらず、波高変位になると両舷でほとんど等しいエネルギーになることである。位相については、右舷は左舷に比べて遅れることである。

上述した変位の解析により、次のことが推定される。両舷の位相の比較から、波浪は左舷から右舷へと明らかに伝播したことである。このことは目視観測(表2)と一致する。エネルギー密度の比較から船体通過の間に、風浪のような高周波の成分波は船体の影響を受けて減衰するが、うねりのような低周波の成分波はほとんど減衰しない。よって船体は波浪に対してローパスフィルターの役割を果たすと言える。さらに波浪の伝播状況を調べるために、両舷の加速度変位、水圧変位、波高変位について、位相速度とコヒーレンスの計算を試みた。これらの計算はクロス・スペクトルの計算から求めることができる。詳しいことは徳田ら(1984)にある。フィルター補正と水圧補正を行わない変位について図26に、補正された変位について図27に示した。コヒーレンスについて、次のことが言える。これらの補正はコヒーレンスにあまり影響を与えないことである。加速度変位は全周波数領域で非常に高い相関があるこ

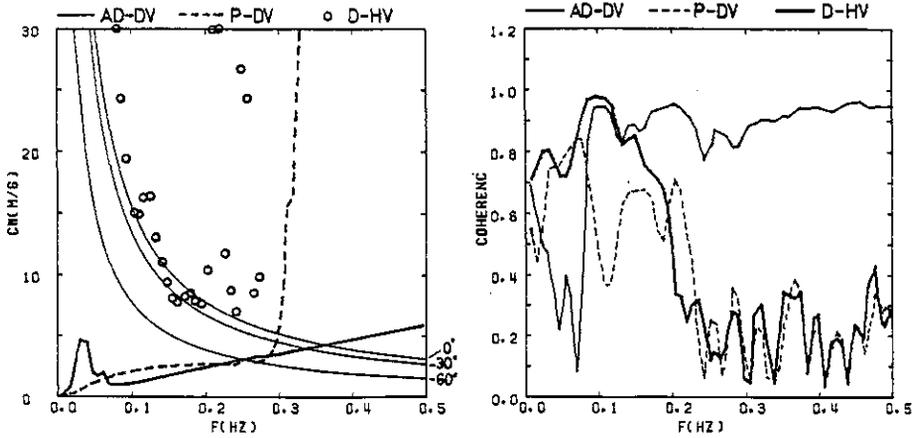


図 26 加速度変位(AD-DV), 圧力変位(P-DV), 波高変位(D-HV)の位相速度とコヒーレンス 左図において実線は入射角0度, 30度, 60度に対する理論値(式(20))を表す.

Fig. 26 Distribution of phase speed and coherence with respect to (AD-DV), (P-DV) and (D-HV).

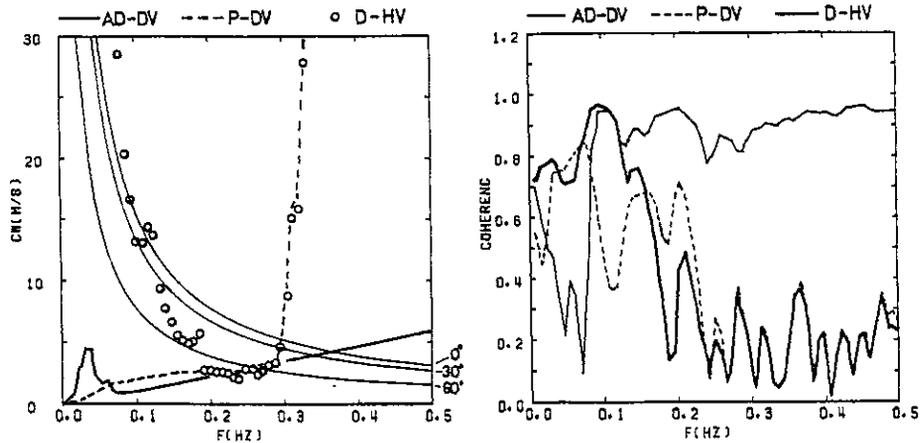


図 27 加速度変位(AD-DM), 水圧変位(P-DP), 波高変位(D-HP)の位相速度とコヒーレンス 左図において実線は図26と同じものである.

Fig. 27 Distribution of phase speed and coherence with respect to (AD-DM), (P-DP) and (D-HP).

と、水位変位と波高変位は低周波領域で若干異なるが、0.2 Hzより高周波領域ではほとんど類似な分布となる。波高変位において、意味ある相関(0.5以上)をもつ周波数範囲は約0.08 Hz~0.15 Hzの範囲となる。位相速度については、上記の補正は波高変位をのぞきほとんど影響を与えないことである。加速度変位は、位相速度が周波数に比例する特徴的な分布をもつ。これは物理的に一定の波長をもつ運動となり、第3.5節で議論した船体の運動と考え

ると、矛盾しない結果と言える。水圧変位はほとんど一定の位相速度を有するが、その理由は分らない。波高変位の位相速度は波浪の分散関係となるので、上述した意味のある相関をもつ周波数領域にある0.11 Hzのスペクトルピーク波(うねり)について、水の波の理論値(式(20))との比較を行った。

$$C = C_0 \cos \theta, \quad C_0 = g / (2\pi f) \quad (20)$$

ここで θ は入射角である。入射角は表2に示すように、船体に対する成分波の進行方位角とする。上記の2つの補正を行うと、位相速度のバラつきは少なくなり、より理論値に近い値となる。すなわち、表2の目視観測により、うねりの位相速度は入射角45度の理論値と一致しなければならない。タッカー式舶用波浪計で、上記の解析で波浪の位相速度を正確に計測できる場合は、うねりのような波長の長い波が小さい入射角で入射する場合である。

3.6 うねりと風浪の分離法

目視観測では表2に示したように、波浪の場をうねりと風浪に分離し、それぞれについて波高を評価する。外洋の波浪の情報を得るために、波浪計においても目視観測と同様なうねりと風浪の波高情報を正確に得ることが必要となる。従来の研究ではこれを行う計算法が確立していない。

前節まで議論したデジタル計算処理法を導入することによって合理的な分離法を示すことができる。この分離法は第一に波浪場の分類を行うものである。すなわち、波浪場が純粹の風浪、純粹のうねり、うねりと風浪の共存によるものかを判断する。図28から明らかなように、この分類は現場の風速とパワースペクトルの形から行うものである。前者は観測時に船上で測定された平均風速であり、後者は高周波領域でのマイナス5乗の形と、主要なスペクトルピークの数である。図28に従って分類した結果、波浪場がうねりと風浪が共存する場合にはこれらを時系列で分離する必要がある。この分離はカット周波数 f_c を見つけ、それによる分離の補正係数を決定し、図9の時

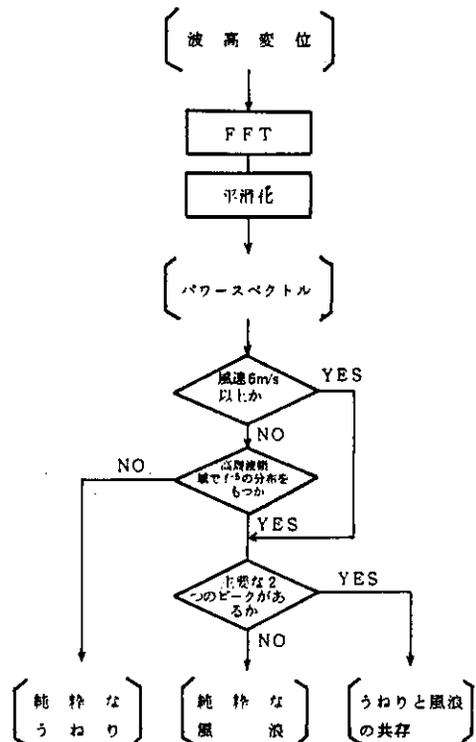


図28 うねりと風浪の分離法の流れ図
Fig.28 Flow chart of separation of swell and wind wave component.

系列補正計算によって行う。カット周波数は、スペクトル分布において主要な2つのスペクトルピーク間でもっと低いところの周波数とする。これは式(10)で表された周波数のいずれかに近似できる。それをk番目周波数 f_k とおくと、うねりの補正係数 α_j^s, β_j^s と風浪の補正係数 α_j^w, β_j^w は次のようになる。

$$\alpha_j^s = \begin{cases} 1.0 & f_j < f_k \\ 0.5 & f_j = f_k \\ 0.0 & f_j > f_k \end{cases}$$

$$\alpha_j^w = \begin{cases} 0.0 & f_j < f_k \\ 0.5 & f_j = f_k \\ 1.0 & f_j > f_k \end{cases}$$

$$\beta_j^s = \beta_j^w = 0 \quad \text{すべての周波数}$$
(21)

図29と表5は観測例に対する計算結果である。カット周波数 $f_c = 0.16 \text{ Hz}$ とした。これらの結果から、デジタル処理法は波浪の場をうねりと風浪成分に分離し、それぞれについて目視観測値と比較しうる情報を与えるものである。またこれは第3.5節で議論された右舷と左舷の特性をより明確にする。すなわち、左舷から右舷へと伝播する間、うねりの波高はほとんど減衰しないが、風浪は非常に減衰すること、しかしこれらの周期は保存されること、水圧補正を行わないと風浪は正しく評価されないことである。上記の最後のことは補正ありの

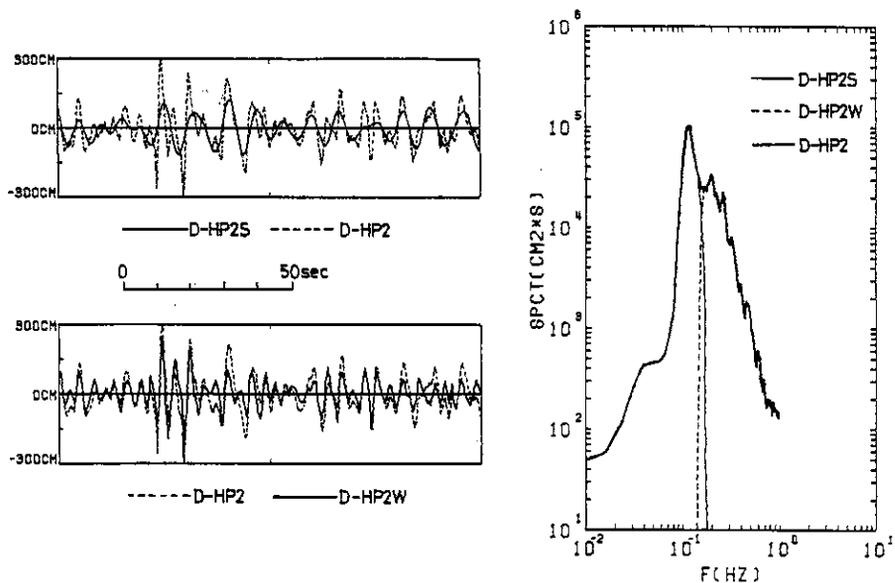


図29 観測例の波浪のうねりと風浪の分離
 Fig.29 Example of swell and wind wave records separated by the digital data processing method.

表5 分離法で得られたうねりと風浪成分の特性
Table 5 Characteristics of swell and wind wave estimated by the digital data processing method.

(a) 右舷

| | 補正なし | | | | | 補正あり | | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------------------|
| | 有義波 | | 最大波 | | 全エネルギー | 有義波 | | 最大波 | | 全エネルギー |
| | 波高(m) | 周期(秒) | 波高(m) | 周期(秒) | m ² ・秒 | 波高(m) | 周期(秒) | 波高(m) | 周期(秒) | m ² ・秒 |
| 全体 | 2.22 | 8.45 | 3.53 | 8.22 | 0.330 | 2.34 | 8.39 | 3.68 | 8.25 | 0.380 |
| うねり | 2.18 | 8.49 | 3.22 | 8.70 | 0.314 | 2.22 | 8.43 | 3.42 | 8.46 | 0.319 |
| 風浪 | 0.48 | 5.38 | 0.83 | 5.45 | 0.016 | 0.94 | 4.24 | 1.70 | 3.95 | 0.061 |

(b) 左舷

| | 補正なし | | | | | 補正あり | | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------------------|
| | 有義波 | | 最大波 | | 全エネルギー | 有義波 | | 最大波 | | 全エネルギー |
| | 波高(m) | 周期(秒) | 波高(m) | 周期(秒) | m ² ・秒 | 波高(m) | 周期(秒) | 波高(m) | 周期(秒) | m ² ・秒 |
| 全体 | 2.56 | 8.21 | 4.11 | 8.46 | 0.436 | 3.40 | 6.53 | 6.08 | 5.67 | 0.749 |
| うねり | 2.29 | 8.44 | 3.77 | 8.59 | 0.363 | 2.35 | 8.37 | 3.95 | 8.27 | 0.373 |
| 風浪 | 1.04 | 5.04 | 1.94 | 4.38 | 0.073 | 2.45 | 4.48 | 5.18 | 4.31 | 0.376 |

有義波の計算値と目視観測値(表2)と比較することによって支持される。うねりの周期と波高及び風浪の浪高について、両者の比較を行った。両者はよく一致するが、風浪の波高に対して波浪計の方がやや低めの値となった。

以上のことにより、次のことが結論される。タッカー式船用波浪計による計測は常に Weather side (風を受ける舷側)で行うこと。Local な風浪を含む信頼のある観測値を得るためには水圧補正が必要であること、そしてフィルター、2回積分、水圧補正、うねりと風浪の分離はすべて時系列補正計算で統一的に行うことができることである。

4. 新しい計測処理システム

第3章で明らかにされた時系列補正計算による新しい計測処理システムを示す。これを行う前に、デジタル処理法の結果を用いて次の議論を行う。第一の議論は、木村が指摘した第1章の項目(1)~(4)についてである。項目(1)については第3.4節で述べたように、波高変位のうち水圧変位が占める割合はとくに風浪が卓越する場合必ずしも小さくないことである。よって水圧センサーの性能は加速度センサーと同様に重要になる。項目(2)については時系列の波形及びスペクトルの低周波領域の分布から、使用したアナログ処理及びデジタル処理におい

でも、ゼロレベルの変動はほとんど無視される。項目(3)については高石らも指摘したことがあるが、第3.6節で示したことと一致する。項目(4)では、タッカー式船用波浪計は目視波高より低い値を与えると指摘しているが、用いた波浪計では第3.6節で示したようにほとんど同一の値を与えることである。この相違の原因として項目(1)においても言えることであるが、センサーの性能の向上が上げられる。それとともに、うねりと風浪を分離できる計算法が開発され、両者の定量的な比較が可能となったことによる。

第二の議論は現行のアナログ計算処理システムについてである。デジタル計算処理の結果により次のことが言える。

- (1) ローカットフィルターによる位相の遷移は加速度出力と圧力出力にはほぼ同一の特性のフィルターが適用されているので、ほとんど問題にならない。
- (2) 水圧補正を行う必要がある。
- (3) 加速度センサーと圧力センサー組は両舷にある必要はなく、Weather side にもみあればよい。

上記のことにより、現行のアナログ計算から信頼のある波浪情報を得るためには次のような計算手順で行う必要がある。使用するデータはWeather side 側の加速度変位出力(A-D-V2)と圧力出力(P-D-V2)の時系列データである。この圧力出力にデジタル計算処理法(図9, 表3)を用いて水圧補正を行い、加速度変位出力を加えることによって、波高変位を得る。これから波浪情報を計算する方法はすでに示したデジタル計算処理法を用いればよいことになる。

第三の議論はアナログ電気回路によるアナログ計算処理と計算機によるデジタル計算処理の比較についてである。両者は処理精度において第3章で述べたようにほとんど差異はないが、運用面において本質的な相違がある。すなわち、前者はハード的で、観測者の操作をほとんど必要としない。他方、後者はソフト的で、観測者と対話的に行うことができることである。前者のもっとも大きな欠点は次のことにある。波浪変動は電氣的に見れば超低周波の変動である。アナログ回路の調整は処理する変動の周期に応じた長さの時間—実時間で行わなければならない。このために回路の調整は非常に多くの時間と労力を要することである。またアナログ回路は時間の経過に伴い回路を構成した回路素子の特性が変化し、データ処理の精度の低下となる。このために1年に1回程度の定期的なメンテナンスが必要となる。このメンテナンスは回路の点検・調整になるため、上記の理由により多くの労力を要することになる。また第3.6節で示したうねりと風浪の分離計算は計算機との対話形式によってデジタル処理では容易に可能となるが、アナログ処理では非常に困難となる。以上のことにより、アナログ計算処理はコスト的に高価となり、定期的なメンテナンスも容易にできない欠点を有するものと言える。すなわち、波浪計のデータ処理は電気回路から見て長い周期の変動を取り扱い、比較的複雑な処理及び定期的なメンテナンスを要するため、ハード的(アナログ的)

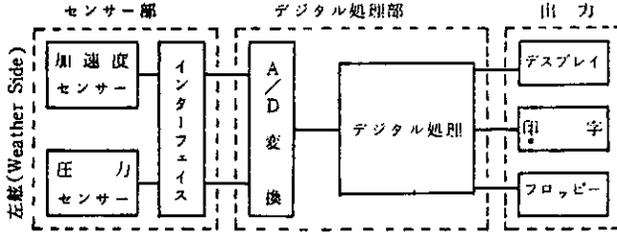


図30 新しい計測システムのブロック図
Fig.30 Block diagram of the new measuring system.

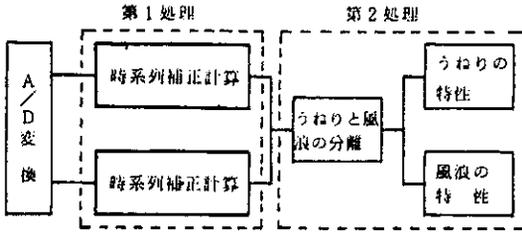


図31 デジタル処理のブロック図
Fig.31 Block diagram of the digital data processing method.

に行うより、計算機を導入してソフト的に行う方がより効率的であると結論される。

上記の議論により、時系列補正計算による新しい計測システムを示すことができる。このシステムの基本的な考え方は次のようになる。

- (1) センサーである加速度計と圧力計は片舷側だけに設置し、その舷を常にWeather side とする。
- (2) センサー部出力後のデータ処理、フィルター、2回積分、水圧補正、うねりと風浪の分離、波浪統計等及びシステム全体のメンテナンスはすべてデジタル計算機で行う。

このシステムのブロック図は図30に、使用するデジタル処理のブロック図は図31に示した。デジタル処理において、第1処理は次のようになる。加速度センサーと圧力センサーからの出力を計算機に入力する。初めにA/D変換し、加速度出力と圧力出力の時系列を作る。第1処理で使用する補正係数は表3から得る。ここで用いられるローカットフィルターは次の補正係数をもつとする。

$$\alpha_j = \left. \begin{array}{ll} 0 & f_j < 0.03 \text{ Hz} \\ 1 & 0.03 \text{ Hz} \leq f_j \leq 0.8 \text{ Hz} \\ 0 & 0.8 \text{ Hz} < f_j \end{array} \right\} \quad (22)$$

$$\beta_j = 0 \quad \text{すべての周波数領域}$$

よって加速度出力に対する、フィルターと2回積分を含む補正係数は次のようになる。

$$\alpha_j = \left. \begin{array}{ll} 0 & f_j < 0.03 \text{ Hz} \\ \text{EXP}(-0.03/f_j) & 0.03 \text{ Hz} \leq f_j < 0.047 \text{ Hz} \\ 1/(2\pi f_j)^2 & 0.047 \text{ Hz} \leq f_j \leq 0.8 \text{ Hz} \\ 0 & 0.8 \text{ Hz} < f_j \end{array} \right\} \quad (23)$$

$$\beta_j = -180^\circ \quad \text{すべての周波数領域} \quad j$$

同様に圧力出力の補正係数は次のようになる。

$$\alpha_j = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & f_j < 0.03 \text{ Hz} \\ \text{EXP} \{ (2\pi f)^2 Z_0 / g \} & 0.03 \text{ Hz} \leq f_j \leq 0.333 \text{ Hz} \\ \text{EXP} \{ (2\pi f_0)^2 Z_0 / g \} & 0.333 \text{ Hz} < f_j \leq 0.8 \text{ Hz} \\ 0 & 0.8 \text{ Hz} < f_j \end{array} \right\} \quad (24)$$

$$\beta_j = 0 \quad \text{すべての周波数領域}$$

センサー設置水深 Z_0 は第 3.3 節で述べたように、圧力変位の平均値となる。上記の補正係数を用いて図 9 の処理を行うと、加速度変位と水圧変位が計算される。これらの和により波高変位を得る。第 2 処理では第 1 処理で得られた波高変位を用いて図 28 の処理を行うと、求める波浪情報が出力される。図 28 の処理、うねりと風浪の分離の処理は上述した対話形式を用いる。すなわち、波高変位のスペクトルを計算し、その分布をディスプレイに表示してカット周波数 f_c を決定するのである。以上が波浪データ処理に関することである。

もう一つ重要なことはシステムの定期的なメンテナンスである。これはセンサー部とデジタル処理部にわけて行う。後者は第 3.1.1 節で示したように、既知の変位を入力することによって容易に行うことができる。前者は現場で行うもので、主に静的な特性の点検・保守にある。加速度センサーは重力方向に対していろいろな角度で傾斜させることによって、圧力センサーは加圧器を用いることによって、静的な特性を調べる。すなわち、センサーのキャリブレーションを行う。このデータの収集と解析はデジタル処理部で行う。もしセンサーの性能が劣化していれば、センサー部を取り外し工場で修理することになる。

最後に、上述した新しい計測処理システムに要求される計算機の能力について示す。これは記憶容量として 400 K バイトをもつ 16 ビットのパソコンクラスで十分である。計算速度の能力として FFT 計算を数秒で行う程度が望ましい。

5. まとめ

タッカー式船用波浪計は 1952 年に開発されたにもかかわらず、波浪の実用的な測器として確立されていない。その原因はセンサーの性能、計測処理法、精度の高い波高計との検定測定について十分な検討がなされていなかったことによる。最近になって高性能で低価格のセンサーが開発されるようになった。本論文で取り扱った波浪計はこのようなセンサーを用いているが、計測処理法について十分に研究されておらず、比較観測もほとんどなされていなかった。この波浪計の計測処理システムはアナログ電気回路によって、加速度変位、水圧変位そして波高変位の時系列を出力するものである。本研究はデジタル計算法を開発し、停船中に観測された代表的な、これらのデータに適用し、上記のアナログ計算処理の結果と比較

を行った。その結果、次のことが分かった。

- (1) 両者はほとんど同じ精度であること。
- (2) 目視観測は波浪の場をうねりと風浪に分離し、それぞれについて波高情報を与える。デジタル計算法は目視観測と同様な処理を比較的容易にできるが、アナログ計算処理では非常に困難なこと。
- (3) 目視観測とデジタル計算結果の比較から、風浪成分を正しく評価するためには水圧補正が必要であること。
- (4) 測器のメンテナンスの遂行、低コスト化の見地から、波浪計の計測処理システムとして、アナログ計算処理法よりもデジタル計算処理法がより効率的であること。

上記のことにより、時系列補正計算にもとづく新しい計測システムを提案した。このシステムは計算機を導入し、センサーからの出力をソフト的に効率よく処理し、メンテナンスの遂行も容易にする。その上価格的により安くなることが期待される。今後の緊急的な課題としては、上述したように高精度の波浪計との比較観測を行い、タッカー式船用波浪計の総合的な精度を調べることにあつた。

6. 謝 辞

本研究で使用したタッカー式船用波浪計について海上保安庁水路部の上野義三氏に、またデジタルフィルターの特性について当センターの木下繁夫氏に貴重な助言をいただきました。波浪計の資料の提供については協和商工株式会社の大谷明氏に御協力いただきました。ここにあわせて深く謝辞を表します。

参 考 文 献

- 1) 木村隆昭(1974): 啓風丸による波浪観測報告(1). 測候時報, 41, 255 - 260
- 2) _____ (1975 a): 啓風丸による波浪観測報告(2). 測候時報, 42, 203 - 210
- 3) _____ (1975 b): 啓風丸による波浪観測報告(3). 測候時報, 42, 319 - 328
- 4) _____ (1977): 啓風丸による波浪観測報告(4). 測候時報, 44, 54 - 59
- 5) Taira, K, A. Takeda and K. I. Shikawa (1971): A shipborne wave-recording system with digital data Processing. J. Oceanogr. Soc. Japan, 27, 175 - 186.
- 6) 高石敬史・松元尚義・吉野泰平・猿田俊彦(1965): 船載式出会波浪計の性能について — 実船及び模型船による試験結果 —, 船舶技術研究所報告, 第13巻, 第4号, 151 - 165.
- 7) 高石敬史・原口富博・猿田俊彦・大松重雄(1983): 船載式出会波浪計の性能について — 空中超音波式とTucker式の比較 —, 船舶技術研究所報告, 第20巻, 第5号, 261 - 280.
- 8) 徳田正幸・渡部 勲・堀江賢次・佐藤 浩(1984): 沿岸波浪観測システムに関する研究II. 方向スペクトルの定時観測. 国立防災科学技術センター研究速報, 第67号, 1 - 33
- 9) 力石國男・光易 恒(1973): スペクトル計算法と有限フーリエ級数. 九州大学応用力学研究所報, 第39号, 77 - 104.

(1986年5月6日 原稿受理)