

## 規則波中船型試験のデータ処理に関する予備的研究

田中 拓\* 尾股 貞夫\* 松本 憲陸\*\* 岡村 恭男\*\*

Preliminary Study of Data Processing Technique  
for Model Ship Experiments in Regular Waves

By

Hiraku Tanaka, Sadao Omata, Norimichi Matsumoto and Yasuo Okamura

As a preliminary investigation into the data processing method by a digital computer for ship model experiments in regular waves, an automatic data-handling technique derived from the Fourier Polynomial has been studied.

The authors propose in this paper that amplitudes and phase differences of ship motions and regular waves may be defined as the harmonic components correspond to the mean frequency of the encounter waves. They show also that the proposal is available, when the record is sufficiently long and continuous at the both ends of one, even if a model runs with heavy surge or meets uneven regular waves.

They have completed the on-line data processing equipments for the Mitaka No.2 Ship Experiment Tank (400 m×18 m×8 m), and made the computer program by which amplitudes and phase differences of ship motions and regular waves are automatically obtained from the records on the magnetic tape of digital type.

## 1. 緒 言

近年の定期貨物船は、高速化の傾向が顕著であるが、これに伴って、波浪中航海性能の改善による経済性の向上が一層重要視されるようになってきている。しかし、大型水槽では、波浪中における船型試験の実施にあたって、非常に多くの人手を要するため、重要性が認識されながらも、実際に波浪中の船型試験が、実施されることは比較的少なく、資料の蓄積も十分でない。

このことから、波浪中船型試験の計測および解析法を標準化してデータ処理の自動化をすすめる、波浪中の推進性能研究の実施を容易なものとすることは重要である。波浪中船型試験で最も人手を要するのは、データの読み取りであるが、本研究は、波浪中船型試験のデータ処理および標準化をすすめる手初めとして、規則波中の船型試験記録の読み取りの自動化および標準化に関するものである。

しかし、規則波中船型試験のデータ読み取りに関する問題点は、単に工数を多く要することだけではない。正弦波でなく、統計的不規則な波形でもなく、むしろ規則的であるが歪の多い記録波形の読み取りに対する、造船学的なあるいは、波形測定技術上の論点が明確にされていない所に、この問題の一つの難しさがある。波浪中船型試験のデータ処理の研究には、はじめに計測波形から振幅、位相差、平均値等を得る方法を論理的なパターンに表現しなおすことが大切で、次にこのようにして得られたデータが、造船学的に容認できるものかどうかを調べなければならないが、本報告では一応前者のみを扱い後の点にはふれていない。この報告の範囲は、読み取りの自動化に対する一つの提案と、これを実行するために必要な記録の方式、計算機プログラムおよび若干の実例に関するものである。

## 2. 規則波中船型試験のデータ読み取り

図1の太線は、規則的な向い波の中の試験で、船底圧力の計測波形を示したものである。規則波中船型試験の解析では、まずこのような波形データが数個から

\* 推進性能部

\*\* 東京芝浦電気株式会社

十数個画かれたオシログラフの記録を整理し、この中から振幅と相互の位相差を読み取り、これに計測器の calibration 常数、ゼロ点からの偏差、計測位置の違いによる位相差修正等を施す作業が行なわれる。本報告で考えているデータの読み取りもこの作業を指している。従来 図1 のような波形を手計算で読み取る場合、読み取りの基準とする考え方は明確でないが、強いていえば、「平均値」という考え方をあげることができる。すなわち、振幅については、波形のピークを結ぶ包絡線の平均を、位相差については、波形全体の平均線を波形が横切る位置の位相の平均を用いる場合が多いようである。この方法は、記録波形がきれいな場合には実用的な方法であるが、波形が正弦波に較べて歪んでいる場合、模型船の surging 等によって周期に歪がある場合等には、正しい読み取り、特に位相差の正しい読み取りが困難で、多少主観的な要素も免れない。計算機による読み取りプログラムにも、手計算における「平均値」の考え方をとり入れることは不可能でないが、単純な平均では、ノイズや波形歪に関して、従来人為的に処理されてきた要素を組みこむことが困難である事情を考慮して、後に述べるように、Fourier 級数の部分和である Fourier 多項式を用いて読み取る方針をたてた。

標準の規則波中船型試験の結果は、任意の不規則波中における実船性能推定の資料として使用する場合は

多いが、このためには、もとの記録波形が正弦波で近似できることが一つの条件となっている。したがって、計測波形を Fourier 多項式の項に分解して扱うことは、本来の目的に沿ったものといえるが、具体的な方法については若干の問題があり、次項にこれを検討する。

その前に、試みに、図1には船底圧力の波形を15周期分を取って300等分し、この間の周波数の平均を基本波周波数と考えて、2倍調波までの項に分解した例が示してある。この波形の場合、第2項まで計算してもなお3次以上の成分は、振幅にして10%以上の大きさをもっているように見える。しかしそれにもかかわらず、熟練した計測者にもとの波形の読み取りを依頼すると、数%の誤差内で基本波成分の振幅の計算値とほぼ同じ値を読みとる。このように人間の眼は、波形の読み取りに関して low pass filter の性質もっていて、基本波の振幅と位相を読み出す能力があり、これまでも手計算による読み取り結果が有効に使っている理由になっているものと思われる。また、この事が、このデータ処理のプログラムの計画に際して、Fourier 多項式を用いることの有力な支えともなった。

### 3. Fourier 多項式による記録波形の近似

記録波形を近似する Fourier 多項式は、記録の区

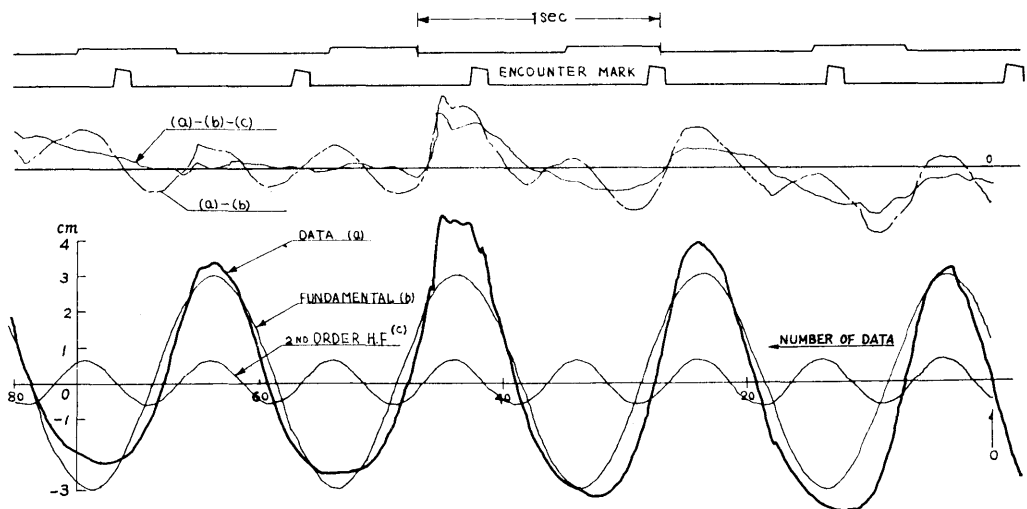


図1 規則波中試験の記録と調和分析例(向波中の船底圧力の変動)

基本波振幅  $A_1 = 30.03 \text{ mm}$   
 2次高調波振幅  $A_2 = 6.45 \text{ mm}$

切り方、項数の選び方に依じて、無数の組合せが考えられる。その中から現在の目的に適ったものとして、できる限り項数が少く、近似度の高いものを採用し、可能なら一つの項だけで全体を近似したいと考える。

このような考え方に基づくと、規則波中船型試験のデータ読み取りでは、特別の目的がない限り、記録波形の中で、波と模型船の出会い周期 ( $\omega_e$ ) と同じ周波数成分か、またはこれの高調波成分だけに着目するのが適当と思われる。このことは、記録の長さ  $T$  秒の記録波形  $F(t)$  が、Fourier 級数

$$F(t) \sim \sum_{\bar{n}} a \sin \bar{n} \left( 2\pi \frac{\bar{n}}{T} t + \varphi_{\bar{n}} \right) \dots\dots\dots(3.1)$$

で表されている時、(3.1) 式を基本周波数が  $\omega_e$  の Fourier 多項式

$$E(t) = \sum A_n \sin(\omega_e n t + \Phi_n) \dots\dots\dots(3.2)$$

で近似することに対応している。

もし、記録の長さが  $2\pi/\omega_e$  の整数倍に等しく、記録の両端で連続、

$$F(0) = F(T) \dots\dots\dots(3.3)$$

であり、さらに可能なら、高次の連続性、 $F^{(m)}(0) = F^{(m)}(T)$  をもっており、 $2\pi/\omega_e$  より長い周期の変動が小さければ、比較的少ない項数で、

$$F(t) \doteq E(t)$$

となり、目的を達することができる。

この場合の  $E(t)$  の各項の振幅と位相は、Fourier 多項式が、各項毎に、最小二乗法の意味で最良近似三角多項式であることから、 $E(t)$  と  $F(t)$  の周波数の等しい各項の係数は等しくなる。たとえば、 $E(t)$  が一つの項で示されている場合を例にすると

$$E(t) = A_1 \sin(\omega_e t + \Phi_1)$$

$A_1, \Phi_1$  は、

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial A_1} \int_0^T [E(t) - F(t)]^2 dt &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial \Phi_1} \int_0^T [E(t) - F(t)]^2 dt &= 0 \dots\dots\dots(3.4) \end{aligned}$$

を計算することによって、 $A_1 - a_m \cos(\Phi_1 - \varphi_m) = 0$ ,  $\sin(\Phi_1 - \varphi_m) = 0$  (但し、 $m = \omega_e T / 2\pi$ ) が得られるから、周波数の等しい係数どうしの値が等しくなり  $A_1 = a_m$ ,  $\Phi_1 = \varphi_m$  を得ることができる。

しかし、規則波中船型試験の記録には、波の出会い周期よりも長い周期を含む場合も少なくない。この原因

は、

- (1) 模型船の surging によるもの
- (2) 造波機によって起された波の波高の不均一によるもの

が主なもので、この他に船体運動の非線型性に基づくものも考えられるが、現在の目的からは省略し得るものと思われる。この中で、前者は、出会い周期の波(基本波)を搬送波と考えて、これを角変調(位相変調)したような形で現われ、後者は、基準の波が振幅変調されたような形で現われるのが普通である。

したがって、理論的な扱いとしては、角変調または振幅変調された正弦波を、搬送波周期を基本周期とする Fourier 多項式を用いて近似することの造船学的な適応性を検討すればよいことになる。

### 3.1 角変調された記録被形の近似

正弦波状の surging を繰返しながら、向波または追波の中を進む模型船に対する見掛の出会い波の波形を次の式で表わす。

$$F(t) = A \sin(\omega_e t + 2\pi \frac{a_s}{\lambda} \sin \omega_e t + \Phi) \dots\dots(3.5)$$

但し、 $a_s$  は、surging の振幅

$\lambda$  は、波の波長

$\Phi$  は、surging と波の位相差

情報または通信の理論で知られているように、(3.5) 式は、次式のように展開することができる、

$$\begin{aligned} F(t) &= A \{ J_0(p) \sin(\omega_e t + \Phi) \\ &+ J_1(p) \{ \sin[2\omega_e t + \Phi] + \sin(-\Phi) \} \\ &+ J_2(p) \{ \sin[3\omega_e t + \Phi] - \sin[\omega_e t - \Phi] \} \\ &+ J_3(p) \{ \sin[4\omega_e t + \Phi] + \cos[2\omega_e t - \Phi] \} \\ &\dots\dots\dots(3.6-1) \end{aligned}$$

この式を整理するかまたは(3.4)式を直接に計算して、(3.2)式の形式に変形すると、次式が得られる。

$$\begin{aligned} F(t) &= A_0 + \sum A_n \sin(n\omega_e t + \Phi_n) \\ A_0 &= -A J_1(p) \sin \Phi \\ A_1 &= A \{ J_0^2(p) + J_2^2(p) - 2J_0(p)J_2(p)\cos 2\Phi \}^{1/2} \\ A_2 &= A \{ J_1^2(p) + J_3^2(p) + 2J_1(p)J_3(p)\cos 2\Phi \}^{1/2} \\ \tan \Phi_1 &= \frac{J_0(p) + J_2(p)}{J_0(p) - J_2(p)} \tan \Phi \\ \tan \Phi_2 &= \frac{J_1(p) + J_3(p)}{J_1(p) - J_3(p)} \tan \Phi \\ p &= 2\pi \frac{a_s}{\lambda}, J_n(p) \text{ は } n \text{ 次の Bessel 関数} \\ &\dots\dots\dots(3.6) \end{aligned}$$

規則波中船型試験では、一般に surging は小さいから  $J_2(p)$  以上の Bessel 関数を含む項は、無視してもよい程度と思われる。参考までに、(3.6) 式を図表にして図 2 に示す。

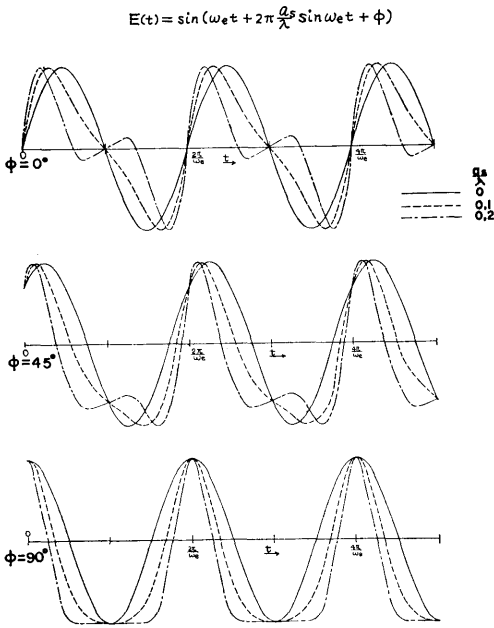


図 2 surging している模型船の出会い波形

模型船の surging が正弦的でなく直線的な場合は、当然出会い周期  $\omega_e$  の変化として現われる、他の任意の働きの場合も、正弦波の場合と同様に実用上は、比較的項数の少ない (3.2) 式の形に示すことが可能と思われる。また (3.6) 式は出会い波の例であるが、船体の縦運動等で surging に起因する位相の時間的変動に対しても同様の結論を得ることができて、いずれも記録波形は実用上 (3.2) 式で近似できることがわかる。

3.2 振幅変調された記録波形の近似

振幅変調された記録波形を、 $g(t)$  を変調波として次式で示す。

$$F(t) = A(1+g(t)) \sin(\omega_e t + \Phi) \dots\dots\dots(3.7)$$

ここで、 $g(t) = a_a \cos \omega_a t$  とすると、

$$F(t) = A \sin(\omega_e t + \Phi) + \frac{A a_a}{2} \sin[(\omega_e + \omega_a)t + \Phi] + \frac{A a_a}{2} \sin[(\omega_e - \omega_a)t + \Phi] \dots\dots\dots(3.8)$$

( 20 )

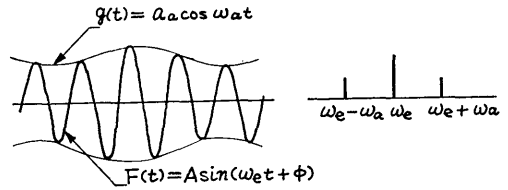


図 3 振幅変調された記録波形とスペクトルの分散

通信の理論で周知のように、図 3 のようなスペクトルに分離できる。

先に説明したように、記録波形が振幅変調されたような形で現われるのは、造波機の波の不均一によることが多い。したがって、前項の場合と異り、実験の目的からは、有害な要素であるから、以下の検討は、

(3.8) 式を (3.2) 式に表わすことと、その場合の係数と、一様な造波機の波 ( $g(t) \equiv 0$ ) の場合の係数との違いを調べて見る。すなわち、変調波  $g(t)$  を造波機の波の乱れに基づく一種の雑音と考えて、図 3 のような記録から、 $g(t) = 0$  の理想的な波による実験の結果を推定する可能性について調べて見る。

(3.7) 式で表わされる一連の記録から、基本波  $T_e = \frac{2\pi}{\omega_e}$  の  $m$  周期分をとって、 $\omega_e$  成分の Fourier 係数を求める。

$$a_1 = \frac{\omega_e}{m\pi} \int_0^{m\omega_e/2\pi} F(t) \sin \omega_e t dt$$

$$b_1 = \frac{\omega_e}{m\pi} \int_0^{m\omega_e/2\pi} F(t) \cos \omega_e t dt \dots\dots\dots(3.9)$$

を計算すると、

$$a_1 = A \cos \Phi + \frac{A a_a}{2} \cos \Phi \cdot K_1 \left( \frac{\omega_a}{\omega_e} \right) + \frac{A a_a}{2} \sin \Phi \cdot K_2 \left( \frac{\omega_a}{\omega_e} \right)$$

$$b_1 = A \sin \Phi + \frac{A a_a}{2} \cos \Phi \cdot K_2 \left( \frac{\omega_a}{\omega_e} \right) + \frac{A a_a}{2} \sin \Phi \cdot K_3 \left( \frac{\omega_a}{\omega_e} \right) \dots\dots\dots(3.10)$$

ここで  $2\pi m \frac{\omega_a}{\omega_e} = q$  ,  $2\pi m \left( 2 + \frac{\omega_a}{\omega_e} \right) = q_1$  ,

$$2\pi m \left( 2 - \frac{\omega_a}{\omega_e} \right) = q_2$$

とすると、

$$\begin{aligned}
 K_1\left(\frac{\omega_a}{\omega_e}\right) &= 2 \frac{\sin q}{q} - \frac{\sin q_1}{q_1} - \frac{\sin q_2}{q_2} \\
 K_2\left(\frac{\omega_a}{\omega_e}\right) &= \frac{1 - \cos q_1}{q_1} + \frac{1 - \cos q_2}{q_2} \\
 K_3\left(\frac{\omega_a}{\omega_e}\right) &= 2 \frac{\sin q}{q} + \frac{\sin q_1}{q_1} + \frac{\sin q_2}{q_2} \\
 &\dots\dots\dots(3.11)
 \end{aligned}$$

(3.11) 式の各項は、いわゆる標本化関数 (sampling function) および類似の関数であるから、変数が大きくなると、0への収束は速く、 $q, q_1, q_2$  は、5以下程度の値に着目すればよい。通常の実験では、出会周期の10倍以上の時間の間計測されるから、 $m > 10$ とすると、 $\omega_a/\omega_e$  の如何にかかわらず、 $K_1, K_3$  は第1項だけとれば十分であり、 $K_2$  は無視できる程度のものであることがわかる。同様な考え方で、 $m$  が大きい場合、Fourier 係数の高次の項は無視できることを示すことができ、変調波が  $a_a \cos \omega_a t$  で示される場合 (3.7) 式の近似式を (3.2) 式の形に示すと、

$$\begin{aligned}
 E(t) &= A(1 + a_a \frac{\sin q}{q}) \sin(\omega_e t + \phi) \\
 q &= 2\pi m \frac{\omega_a}{\omega_e} \dots\dots\dots(3.12)
 \end{aligned}$$

となる。 $\omega_a$  が  $\omega_e$  に較べてかなり小さい場合で、記録波形が図4のような時 (この時は、実験が過渡的な状態のもとで行なわれていることになる) を除いて、計測時間が十分長ければ  $\frac{\sin q}{q} \rightarrow 0$  となって、均一な波の中の実験の記録から読み取った値に収束することがわかる。

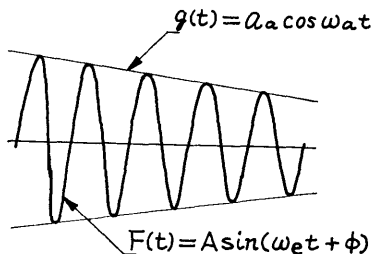


図4  $\omega_a \ll \omega_e$  の場合の波形は、定常的でないので読み取ることはできない。

### 3.3 サンプリングデータを用いた Fourier 係数の計算

長さ  $T$  の連続した記録波形  $F(t)$  を等間隔にサンプリングした値を用いて、(3.2) 式を計算する。

Fourier 係数

$$\begin{aligned}
 a_n &= \frac{2}{T} \int_0^T F(t) \sin n\omega_e t dt \\
 b_n &= \frac{2}{T} \int_0^T F(t) \cos n\omega_e t dt \dots\dots\dots(3.13)
 \end{aligned}$$

を数値計算する時、次の Euler-Maclaurin の展開式によると、

$$\begin{aligned}
 \int_0^{k\delta x} f(x) dx &= \frac{\delta x}{2} [f(0) + 2f(\delta x) + 2f(2\delta x) + \dots \\
 &+ f(k\delta x)] - \frac{(\delta x)^2}{2! B_1} [f'(k\delta x) - f'(0)] \\
 &+ \frac{(\delta x)^2}{4! B_2} [f^{(3)}(k\delta x) - f^{(3)}(0)] \dots\dots\dots \\
 &\dots\dots\dots(3.14)
 \end{aligned}$$

$\delta x$  はサンプリング間隔、 $B_1, B_2$  は Bernoulli 数を示す

記録の長さが  $\frac{2\pi}{\omega_e}$  の整数倍とし、記録の両端で高次の連続性がある場合は、 $f(0) = f(k\delta x)$ 、 $f^{(m)}(0) = f^{(m)}(k\delta x)$  であるから、(3.14) 式の第2項以下は0となり、この場合台形近似が正しい近似法としての意味をもつことになる。

$$a_n = \frac{1}{k} \sum_{r=0}^{2k-1} F\left(r \frac{T}{2k}\right) \sin n\omega_e \left(\frac{T}{2k} r\right)$$

$$b_n = \frac{1}{k} \sum_{r=0}^{2k-1} F\left(r \frac{T}{2k}\right) \cos n\omega_e \left(\frac{T}{2k} r\right)$$

$2k$  は、記録の分割数

なお  $n$  次の Fourier 多項式の係数は  $2n$  個あるから、少なくとも  $2n$  個以上のデータが必要なことは、標本化の定理としても知られている通りである。またサンプリングデータに、定常正規過程の雑音が重畳している時には、Fourier 係数も正規分布し、この場合も計測時間が長ければ、Fourier 係数は、互に独立と仮定してもよいことが証明されている。

## 4. 400 米水槽における波浪中船型試験の計測記録の概要

波浪中船型試験のような、ダイナミックな現象を取り扱うからには、アナログ電圧の形で計測して、A-D変換器を用いてデジタル化した後に磁気テープに記録し、計算機で処理するのが便利であると思われる。このために、当水槽では、波浪中船型試験に使用する計器の型を規格化して、最大出力電圧DC  $\pm 5.12$  V、出力インピーダンス 50 k $\Omega$ 以上に統一した。このような計測器の出力のデータ処理を上記の方式で行な

うために、水槽に図5に示すデータ処理のシステムを設備した(図5には、水槽用解析設備のうち、主に波浪中船型試験に関連した部分を示した)。

波浪中の試験で扱う現象の周期は、通常1サイクル程度の遅いものが多いが、特殊な実験では、プロペラの1回転中の変動に著目するもの等で300サイクル程度を要求する場合があります、記録速度の希望に幅が広い。このために、実験に先だって、現象の緩急に応じて、接続用コンセントボードにより、高速用(8チャンネル)と低速用(19チャンネル)が選択できるようになっている。高速用は毎秒500、250または125サンプリング、低速用は毎秒25、12.5または6.25回のサンプリングができるが、その詳細を表1に示す。

サンプリングされた記録データはデジタル化して磁気テープに書き

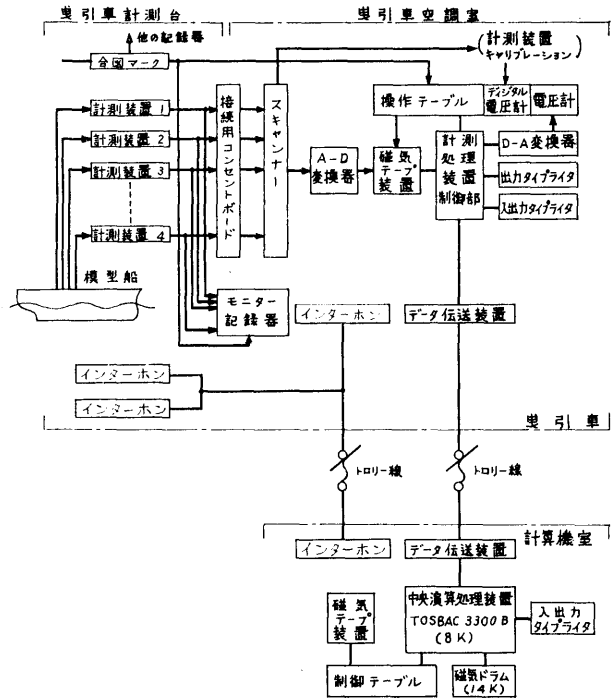


図5 波浪中船型試験の記録およびデータ処理システム

表1 磁気テープの記録速度等

テープ 記録速度 inch/sec	Sampling 速度		記録速度 data/sec	記録間隔 mm/datum	1チャンネル当り		Bit Dencity bit/mm
	c/sec	チャンネル			記録速度 data/sec	記録間隔 mm/datum	
40 (1.017 m/sec)	5,000	H	5,000	0.2	500	2	5
		L	500	2	25	40	0.5
	2,500	H	2,500	0.4	250	4	2.5
		L	250	4	12.5	80	0.25
	1,250	H	1,250	0.8	125	8	1.25
L	125	8	6.25	160	0.125		
5 (0.127 m/sec)	5,000	H	—	—	—	—	—
		L	500	0.25	25	5	4
	2,500	H	—	—	—	—	—
		L	250	0.5	12.5	10	2
	1,250	H	—	—	—	—	—
L	125	1	6.25	20	1		

註 H, 高速チャンネル L, 低速チャンネル

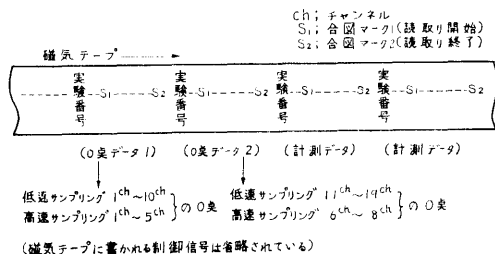


図6 磁気テープ記録形式

込まれる。図6に示すように、通常の計測記録に先立って、磁気テープには実験番号と各計測器出力のゼロ点が2組に分けて記入できるようになっている(ゼロ点の記入を2組に分けたのは、動揺計、自航動力計等性質の異なる計測器のゼロ点を多数同時に設定することの困難を避けたものである)。波浪中船型試験は、実験の性質上、計測のチャンスを的確につかまえる必要がある。従来のオシログラフ記録の読み取りと異なり、磁気テープ記録は、記録後の処理が融通性に欠け

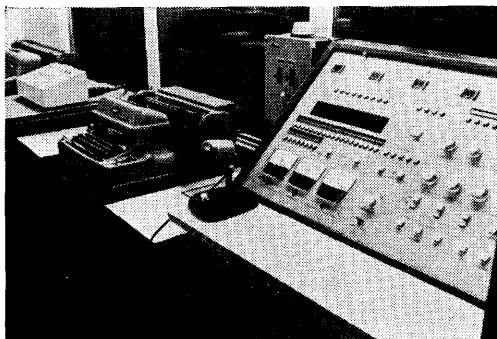


図7 操作テーブル入出力タイプライタ等  
(曳引車空調室)

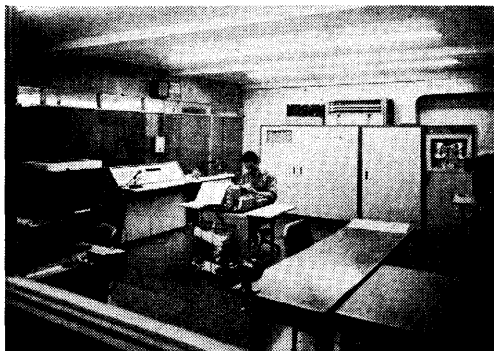


図8 計算機室  
(左端に計測用磁気テープ装置を示す)

ているので、実際の計測にさいしては、磁気テープ装置は適当な時機に作動させておき、計測者が、模型船を観測しながら押釦スイッチにより、有効な記録の範囲と無効な記録の範囲を指示できるようになっている。有効な記録の開始を合図マーク1(S<sub>1</sub>)、終りを合図マーク2(S<sub>2</sub>)と呼んでいるが、このような磁気テープ記録の形式を図6に示した。磁気テープ記録の精度は、符号1bitと数字10bits(1024)となっている。

アナログ計測は、検定が容易にできることが重要で、このため4桁の数字表示式の電圧計を操作テーブル(図7)にもち、磁気テープに書き込まれる電圧が表示できるようになっている。

このほか、磁気テープ記録は眼に見えないので、随時磁気テープの内容がチェックできるように、D-A変換器を通して電圧計またはオシロスコープで監視できるように設備した。

磁気テープに記録されたデータは、再生しながら伝送装置を通じて、研究棟にある計算機室(図8)に送ることができる。伝送は3チャンネルが一組としておこなわれ、伝送の速度は、1600ボーで、毎秒約106データの伝送速度に相当しているから、これ以上のデータが書き込まれている場合には、再生度を落とすかまたは磁気テープをはずして直接に計算機室に運び、計算機室の同型式の磁気テープ装置で再生する。曳引車から伝送した場合の計算結果は、曳引車上のタイプライターに直ちに印字され、実験の成否の判定に役立たせるようになっている。

## 5. 規則波中船型試験データ読み取りプログラム(DRRW-1)の概要

3項に説明したように、規則波中における船型試験で得られる計測データの多くは、比較的項数の少ないFourier多項式で近似することが可能で、これを用いて振幅、位相差等を得ることができる。この考え方にに基づき、前項で述べた解析設備を用いた、規則波中船型試験データの読み取りプログラム(DRRW-1)の概要を説明する。

このプログラムで最も重要なのは、有効なデータの範囲のきめ方である。先に説明したように、磁気テープ装置は、水槽曳引車の発進後適当な時機に作動を開始して記録をはじめているので、計測者は、模型船を観測しながら、計測、解析したい範囲を遠隔操作で磁気テープに書き込むことができる。しかし、3項にも述べたように記録の長さは、正確に基本周期の整数倍

で、記録の両端で連続であることが必要なので、この条件をプログラム上では、次のように設定している。(但し1次の連続性のみ)。

図9は、記録データのサンプリングのタイミング形式および以下に使用する用語の説明を示している。磁気テープに記録されたデータを、計算機のメモリーに移す作業を仮りに「読み出し」と呼ぶことにしておき、図9に関して次の用語を定義する。

- (1)  $i$  チャンネルの読み出しの開始点  $a(i)$ : 合図マーク1 ( $S_1$ ) が記録された直後で、高速チャンネルについては  $H_0$ 、低速チャンネルでは  $L_0$  の後に最初の  $i$  チャンネルのデータが記録されている時点。

- (2)  $i$  チャンネルの読み出しの終了点  $b(i)$ : 合図マーク2 ( $S_2$ ) が記録される前で、最後のチャンネルのデータが記録された時点。

- (3)  $i$  チャンネルの記録時間:  $b(i) - a(i)$ 。

- (4)  $i$  チャンネルの計測時間  $T(i)$ :  $a(i)$  が検出された直後に記録波形が平均線を下から上(正方向)に横切る時点  $t_1(i)$ 、 $b(i)$  が検出される直前に記録波形が平均線を下から上に横切る時点  $t_2(i)$  とすると、 $T(i) = t_2(i) - t_1(i)$  を計測時間とする。 $T(i)$  が真の有効なデータの範囲となる。

- (5) 基本周期  $U(i)$ : 記録波形が正方向に平均線を横切り、次に正方向に平均線を横切るまでに、データの数が  $k$  個以上あれば、これを1つの波形と見做す。 $T(i)$  中に含まれている波形の数を  $N(i)$  とする時、 $i$  チャンネルの基本周期  $U(i)$  は、

$$U(i) = T(i) / N(i)$$

で示す。ただし、 $k$  は、実験の内容に応じて指定するが、 $k$  の値の選択が、不適当で値が小さすぎると

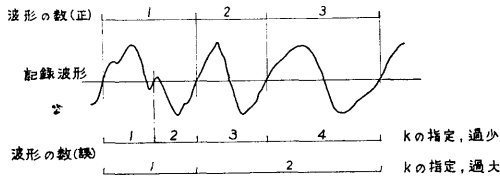


図10 計測時間中に含まれている波の数の数え方の誤り例

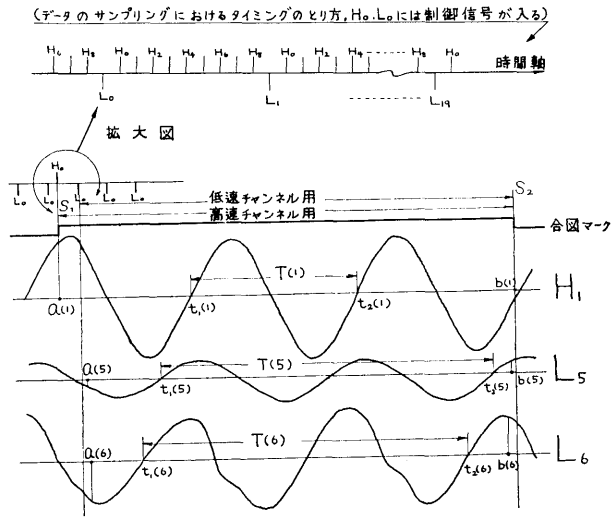


図9 磁気テープ記録データの読み取りのタイミングのとり方

ノイズを一周期と見誤り、大きすぎると、必記な波形を見落す可能性がある(図10参照)。なお基本周期は、プログラム上では、波の出会い周期を基準にとり、他のチャンネルの演算にも共通に使用している。これは、プロペラのトルクのように高調波を多く含んでいるデータでは、 $k$  の選択が困難であることによっている。

### 5.1 演算式

- (1) 計測値  $P(i, t)$

$$P(i, t) = P_0(i, t) - P_{0m}(i) \dots\dots\dots(5.1)$$

$P_{0m}(i)$  は  $i$  チャンネルの 0 点データの平均レベルを示す

$$P_{0m}(i) = \frac{\tau}{b(i) - a(i)} \sum_{t=a(i)}^{b(i)} P_0(i, t)$$

$\tau$  はサンプリング周期、 $P_0(i, t)$  は 0 点データ。

$P_1(i, t)$  は  $i$  チャンネルの記録データを示す。

- (2) 平均値  $M(i)$

$$M(i) = \left[ \frac{1}{d(i)} \sum_{t=t_1}^{t_2} P(i, t) + P_{DC}(i) \right] c(i) \dots(5.2)$$

$d(i)$  は  $T(i)$  中に含まれている記録データの数。  
 $P_{DC}(i)$  はアナログ計測の段階ですべてに除外されている直流部分の値を電圧で示したもので、たとえば potentiometer 等で直流部分をキャンセルしている



計測器に使用する。

$c(i)$  は calibration 定数。

(3) 振幅  $A_n(i)$

基本周期に対して  $n$  次の高調波の振幅を  $A_n(i)$  で示すと、

$$A_n(i) = c(i) \sqrt{I_n^2(i) + J_n^2(i)}$$

$$I_n(i) = \frac{2}{d(i)} \sum_{t=t_1}^{t_2} [P_1(i, t) - P_{1m}(i)] \times \sin \frac{2\pi}{U(1)} n(t-t_1)$$

$$J_n(i) = \frac{2}{d(i)} \sum_{t=t_1}^{t_2} [P_1(i, t) - P_{1m}(i)] \times \cos \frac{2\pi}{U(1)} n(t-t_1) \dots\dots\dots(5.3)$$

(低速 1 チャンネルに波のデータを入れる)

(4) 位相  $\phi_n(i)$

読み出しの開始点 ( $a$ ) を時間の原点,  $t=0$  と考えて, 位相を求める。基本周期に対して  $n$  次の高調波の位相を  $\phi_n(i)$  で示すと、

$$\phi_n(i) = \frac{360}{2\pi} \tan^{-1} \frac{J_n(i)}{I_n(i)} + 360 \frac{t_1(i)}{U(1)} + \phi_{0n}(i) \dots\dots\dots(5.4)$$

$\phi_{0n}(i)$  はアナログ計測の段階ですでにシフトされている位相を度で示したもの。

5.2 計算プログラム

フローチャートの概略を図11に, 計算結果のプリントのフォーマットを図12に示す。プログラムの内容、

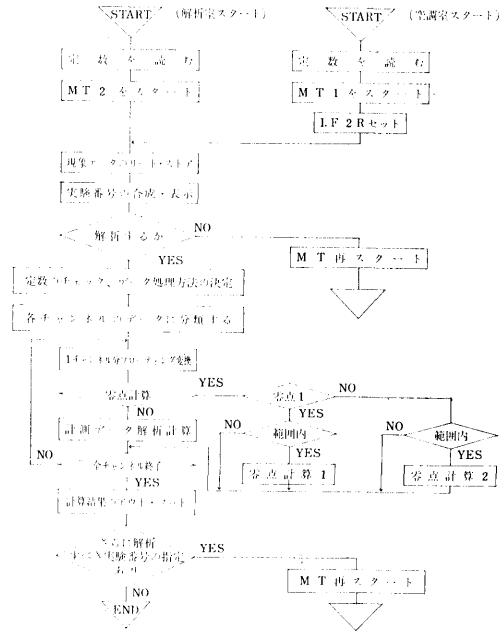


図11 規測波中船型試験データ処理プログラム (DRRW-1) の概略フローチャート

RESULTS OF EXPERIMENTS IN REGULAR WAVES														DATE 43.10.16.			
TEST NO STILL, RUN		CH	RD	ND	NC	FW	CC	MVO	DO	DO-MVO	A1	A2	A3	PS	P1	P2	P3
400		L	1	27.631	688	16.17269	.14150	8.0000	9.3412	1.3412	5.7867	.11822	.10312	.00000	596.09	1104.0	1786.3
L		2	29.353	731	17.17266	.14150	8.6695	7.9237	-6.6581	5.3134	.08847	.28727	.00000	432.06	909.00	1291.3	
402		L	1	25.242	644	15.17228	.14150	10.941	12.752	1.8111	7.7640	.30721	.14823	.00000	428.46	765.24	1290.7
L		2	24.154	602	14.17253	.14150	7.8624	3.8305	-4.0319	7.8257	.59108	.36843	.00000	954.75	1998.2	2859.4	

記号説明

記号および単位	説明	FW (sec)	基本周期, U(i)
TEST NO STILL	0点計測の実験番号	CC (×10 <sup>2</sup> )	キャリブレーション定数
TEST NO RUN	実験番号	MVO (volt, ×10 <sup>-2</sup> )	0点データの平均値, P <sub>0m</sub> (i)
CH	チャンネル番号 L 低速, H 高速チャンネル	DO (volt, ×10 <sup>-2</sup> )	計測データの平均値
RD (sec)	計測時間, T(i)	A1, A2, A3 (cm)	振幅, A <sub>1</sub> (i), A <sub>2</sub> (i), A <sub>3</sub> (i)
ND	データ数, d(i)	PS (deg)	ピックアップ取付位置の位相修正 φ <sub>01</sub> (i)
NC	T(i)に含まれている波形の山数 N(i)	P1, P2, P3 (deg)	位相差, φ <sub>1</sub> (i), φ <sub>2</sub> (i), φ <sub>3</sub> (i)

図12 計算結果のプリント例

使用法等については、プログラム使用説明書に詳しく説明されているので、ここでは省略するが、現プログラム(DRRW-1)は、3つのチャンネルのデータ処理を平行に実施できる。入力データの量は、2つのチャンネルまでを処理する場合は、1チャンネル当り1848データ以下、3つのチャンネルを処理する場合は各チャンネル当り1232データ以下である。また高調波の次数は3次以下( $n \leq 3$ )となっている。このほか、プログラムの使用法を誤った場合、データ伝送にエラーがあった場合等にその内容を指示する ERROR MESSAGE が用意されている。

### 6. 計算プログラム使用例

このデータを読み取りプログラムのテストを主目的として、次の実験を実施した。

図13のように、曳引車上に2台の超音波式の無接触波高計を、進行方向に2.5米離して取り付けて同時に造波機の波を計測した。この計測により、次の事項について検討した。

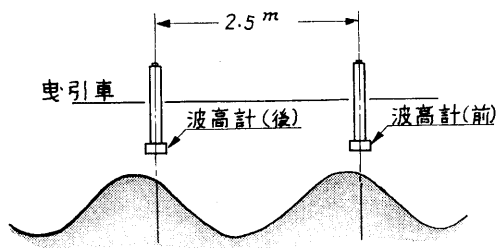


図13 規測波波形の計測例

(1) 波の振幅を計算機および手動で読み取り比較する。

(2) 前、後の波高計記録の基本波の位相差

$$\Psi = \Phi_{1aft} - \Phi_{1fore}$$

を求め、位相差の計測精度を調べるために、次の2つの関係から計算した波長を比較する、

$$\lambda_1 = \frac{360}{|\Psi|} \times (\text{波高計の間隔}) \quad \dots\dots\dots(6.1)$$

但し (波高計の間隔)  $\leq$  波長

$$\lambda_2 = \frac{g}{2\pi} T \quad \dots\dots\dots(6.2)$$

(3) 基本周期の計測結果を比較する。

(4) 波形を3次の Fourier 多項式で表わし、3次の Stokes' waves と比較する。

計測した波は、水槽使用期間の都合で、波高が波長の1/50前後のもので、周期が1.73秒波長(4.67米)と

2.44秒(波長9.27米)の2種に限定したので、実験としては十分でないが、前記の検討事項に関し次の結果を得た。なお実験は、原則として15波長を記録した。

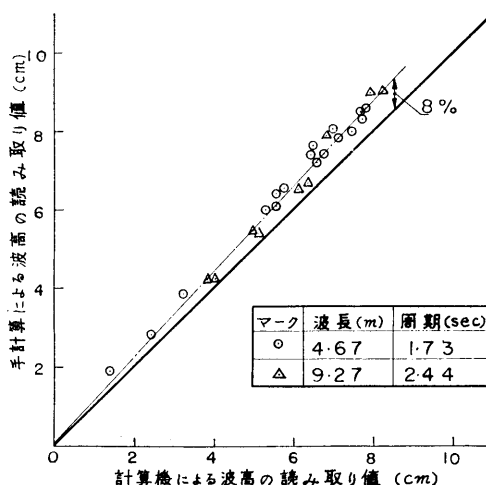


図14 規則波波形の振幅を手計算および計算機で読取った結果の比較

(1) 電磁オシログラフ記録紙から、従来の方法で求めた振幅を、本プログラムで得た振幅と比較して図14に示す。図14は、横軸に、本プログラムで得た基本波の振幅をとり、縦軸に電磁オシログラフで得た振幅をとったもので、両者はかなりよく一致しているが全体として約8%程手計算の方が大きくなっている。この傾向は別に行なった実験の結果にもほぼ共通しており、手計算では、高調波の影響が除ききれないためと思われる。

前記の(2)、(3)および(3)項等に関しては、周期が1.73秒のものについて、表2に計測結果を示した。

(2) (6.1)式で計算した波長を表2の9欄に、(6.2)式による波長を10欄に示す。両者の差は、5%以内にあるので、位相差もこの程度以上の計測精度があると思われる。

(3) 基本周期の計測精度は極めて高く、0.5%以上の精度が保証できる(表2の4欄参照)。

(4) Stokes' wave との比較については、2次および3次の高調波の振幅を基本波の振幅の比で示した。表2の11欄と13欄および12欄と14欄を比較して見ると、2次高調波については同オーダーの値を示しているが、3次高調波については、計測結果の方が約10倍程度大きくなっている。

Fourier 多項式を用いた読み取りプログラムは、記録データ中に含まれているノイズに影響されないこと

表2 規則波計測結果の例  
(周期1.73秒の場合)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
実験番号	波高計 の区別	電磁オシ ロによる幅 (cm)	計 測 結 果						周期から 計算した 波長 $\lambda'$ (m)	計 測 結 果		Stokes' waves	
			周 期 $U$ (sec)	$A_1$ (cm)	$A_2$ (cm)	$A_3$ (cm)	$\psi$ (deg)	波 長 $\lambda$ (m)		$A_2/A_1$ (%)	$A_3/A_1$ (%)	$A_2'/A_1$ (%)	$A'/A_1$ (%)
401	No. 1	6.55	1.727	5.787	.118	.103	194.03	4.64	4.66	2.1	1.8	3.9	.2
	No. 2	6.0	1.727	5.313	.088	.287			4.66	1.7	5.4	3.6	.2
403	No. 1	8.3	1.723	7.764	.307	.148	—	—	4.63	4.0	1.9	5.3	.4
	No. 2	8.6	1.725	7.826	.591	.368			4.64	7.6	4.7	5.3	.4
404	No. 1	8.0	1.721	7.484	.303	.146	—	—	4.63	4.1	2.0	5.1	.4
	No. 2	8.5	1.722	7.714	.435	.464			4.63	5.6	6.0	5.2	.4
414	No. 1	6.09	1.736	5.582	.174	.177	185.01	4.86	4.69	3.1	3.2	3.7	.2
	No. 2	6.42	1.732	5.583	.393	.127			4.68	7.0	2.3	3.7	.2
416	No. 1	7.2	1.736	6.608	.302	.148	195.60	4.60	4.69	4.6	2.2	4.4	.3
	No. 2	7.41	1.736	6.464	.391	.313			4.69	6.1	4.8	4.3	.3
418	No. 1	7.84	1.736	7.134	.303	.150	190.44	4.72	4.69	4.3	2.1	4.8	.3
	No. 2	8.08	1.734	7.027	.440	.424			4.68	6.3	6.0	4.7	.3
419	No. 1	7.40	1.735	6.783	.285	.141	194.73	4.62	4.69	4.2	2.1	4.5	.3
	No. 2	7.64	1.735	6.509	.384	.403			4.69	5.9	6.2	4.4	.3

註  $\lambda = \frac{360}{|\psi|} \times 2.5 \text{ m}$      $\lambda' = \frac{g}{2\pi} U$

を特徴としている。上記の実験では、2台の波高計の内、1台の波高計アンプよりノイズがでていたことが後にわかり、この結果、サンプリングされたデジタルデータより波形を再現すると図15のように、滑らかな波形とノイズの多い波形となったが、読み取りの結果はこの場合でも上記の通りほぼ満足な値を得ている。

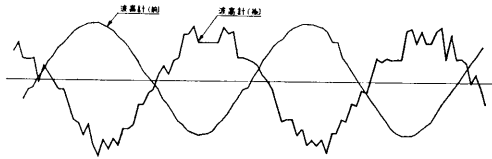


図15 波形記録例

磁気テープに記録したデジタルデータを再生したもの。波高計(前)の記録は正常であるが、波高計(後)の記録はアンプのノイズを含んでいる。

## 7. まとめ

規則波中船型試験のデータ処理を自動化するには、試験法、解析法の標準化をはじめ研究をする問題が少なくない。この手初めとして、実験と解析の間にある、データ読み取りに関する問題を調べ、Fourier多項式を用いた読み取り法を提案し、計算機プログラム(DRRW-1)を作成した。また、データ読み取りの

自動化を目標としたデジタルに記録方式を計画し、実用化した。さらに若干の実験例によりその有用性を示した。

実験例によると、基本波の振幅は、従来の方法で読み取った振幅に較べて約8%小さな値を示している。したがって、この方式によるデータ読み取りを、従来の手計算の代りに使用するためには、本方式がより合理的なものであることを裏付ける造船学的な研究が必要で、今後の課題の一つである。しかし、歪やノイズの多い記録は、これまで客観的な読み取りが困難であったが、本方式では、この処理を容易におこなえること、データの処理速度が迅速であること等多くの利点をもっている。

## 8. むすび

本研究は、三鷹第2船舶試験水槽の建設工事に際して著者が担当した水槽用解析設備(設計製作、東京芝浦電気株式会社)研究の一環として実施されたものである。なお水槽建設の指導に当たられた横尾幸一郎長、東京芝浦電気(株)杉森英夫課長、解析設備計画の船研側担当者の一人である荒井能技官をはじめ、波浪中船型試験の研究を担当してこられた田崎亮室長、北川弘光技官に有益な助言を頂いていることに心より御礼申し上げます。