

(昭和 45 年 5 月日本造船学会春季講演会において講演)

Transient Water Wave 中における 船体運動の実測例について

正員 竹 沢 誠 二*

On Testing a Ship Model in Transient Water Waves

By Seiji Takezawa, *Member*

Summary

The ship model experiment in head waves at zero speed were carried out by using transient water waves, and the time histories of wave, heave and pitch amplitude were measured. Then, the experimental results were analysed according to two criteria, that is, both frequency domain and time domain.

In consequence of the present investigation, next properties on the ship motion in transient waves were obtained.

1) Wave-ship motion system at the same position are one of the linear system. The obtained amplitude ratios and phase lags between waves and ship motions in transient water waves coincide with the measured results in regular water waves. Also, the predicted time histories of ship motions by using the measured wave time histories exactly correspond to the measured ship motion time histories.

2) Ship motion-ship motion systems between different points are equal to the wave-wave linear systems, that is, so-called the position shift systems. But, the position shift linear system can not applied in the cases that the concentrating position of transient water waves is existent between the input position and the output position.

3) The linear systems of wave height as an input and ship motion at separated position as an output come into existence. But, if the concentrating point of transient water waves exists between the considered points, the linear systems will can not adopt for these points.

From the above mentioned results, it can be considered that testing ship models in transient water waves is one of the useful method for the investigation of the ship frequency response function in waves.

1 緒 言

船型試験水槽で発生させた Transient Water Wave の特性について先に発表した論文¹⁾によると, Transient Water Wave の波形の変移特性, あるいは造波機運動と発生波形の関係はかなりの範囲にわたって線型系の適用が可能であることが判つた。したがって入力として Transient Water Wave を考え, 出力として船体運動を対応させるような線型系の成立が可能であるとの類推が生れる。このような線型系が成立すると, 過渡現象の入出力の比として船体の波浪中における周波数応答関数を一回の実験で一挙に求めることができ, Transient Water Wave 中における船型試験が実用面から注目されることになる。

このような線型系成立の仮定に立ち, Transient Water Wave 中の船体運動の理論に関して発表されたものに Breslin など²⁾, 山内博士⁴⁾の論文などがあるが, 実際に Transient Water Wave を船型試験水槽内に発生させ, その中で船体運動を測定し, Transient Water Wave と船体運動の間に線型系が成立することを確めた

* 横浜国立大学工学部

例は Davis と Zarnick の実験²⁾ のみであろう。ところが、この実験では集中性の Transient Water Wave 中での実験のみが行なわれており、また解析は周波数応答関数のみに着目して行なわれている。

本論の目的は、前論文の成果に基づき Transient Water Wave として集中性および拡散性の波を取扱うと共に、周波数応答関数に限らず、それから得られる重み関数およびさらにその結果得られるタイムヒストリーの予測値についても考え、Transient Water Wave 中における船体運動がどの程度まで線型系で説明できるかを、周波数領域、時間領域の二面から検討しようとするところにある。

2 実 験

Transient Water Wave は Fig. A に示したように、その波型が変化しながら進行する。したがって、造波機にストローク $s(t)$ を与えると、波の進行方向上の位置 A, B, C では $h_A(t), h_B(t), h_C(t)$ なる異なる波高のタイムヒストリーが得られる。また A 点に模型船の重心（測定点）を合せ、その時の船体運動を計測すると $h_A(t)$ に対応して、ヒーピング $Z_A(t)$ 、ピッチング $\theta_A(t)$ なる船体運動のタイムヒストリーが得られる。このような同一点での波と船体運動のタイムヒストリーから、波浪中の船体運動の周波数応答関数を有意義な周波数範囲にわたって一挙に求めてしまおうとするのが、Transient Water Wave 中の船型試験の“ねらい”である。

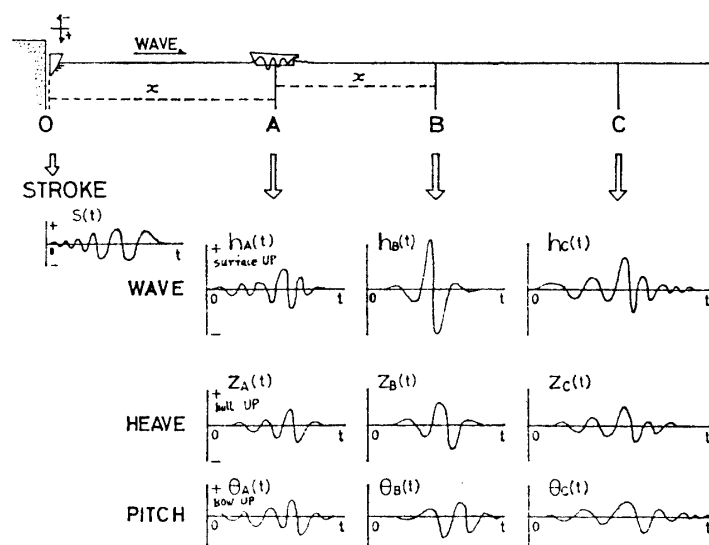


Fig. A タイムヒストリー

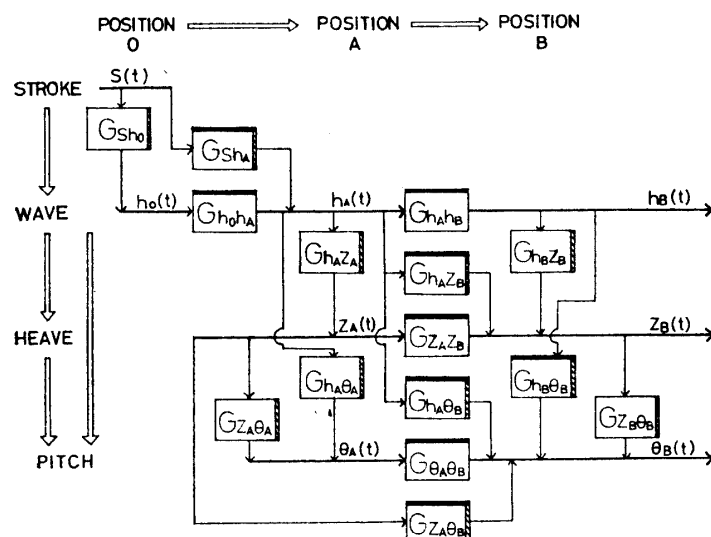


Fig. B 周波数応答関数

ところが、長水槽での波浪中船型試験では船体によつて乱されない波高を測定するために、波高計を模型船の前方に設置することを余儀なくされる。したがって、Transient Wave 中における船型試験で得られる計測値も $h_A(t), Z_B(t), \theta_B(t)$ のような離れた位置での波高記録との組合せになる場合が多い。このことから、 $h_A(t) \leftrightarrow h_B(t)$ あるいは $h_A(t) \leftrightarrow Z_B(t)$ のような離れた位置での関係の検討が必要になる。

造波機ストローク $s(t)$ と発生波高 $h_A(t), h_B(t)$ などの関係については前論文¹⁾ で検討したので、本論では波高 $h(t)$ と船体運動 $Z(t), \theta(t)$ の関係についての調査を主目的にする。

2.1 使用した波および測定位置

使用した造波機ストロークは集中性の波を発生させる $S_C(t)$ および拡散性の波を発生する $S_D(t)$ の2種である (Fig. 1 参照)。 $S_C(t)$ は $2.0 \text{ c/s} (\omega \approx 12.6)$ から $0.45 \text{ c/s} (\omega \approx 2.8)$ へ一定スweep速度で周波数が下がる信号で、そのスweep時間は 37 sec であるが水槽長 (50m) のほぼ中央で集中するようにスweep時間を選んである。一方振幅は時間と共に増大する。これは大波傾斜になりやすい高周波域の成分波の波高を押え、成分波の波くずれを防止しようとの意図に基づいている。この点で前論文¹⁾ に使用した造波信号に比し改良されている。 $S_D(t)$ は 0.45 c/s から 2.0 c/s へほぼ一定速

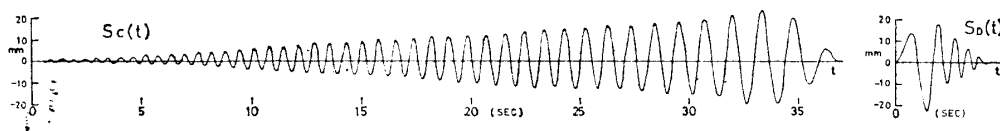


Fig. 1. 造波機ストロークのタイムヒストリー

度で周波数が上がる信号で、そのスweep時間は 4 sec であり極めて短い、振幅は逆に時間と共に減少しているが $S_C(t)$ と同様な配慮に基いている。拡散性の波では測定位置を逆波機から遠く離れた位置にするためには $S_D(t)$ のように短いスweep時間にしないと、速波機の反対側の水槽壁による反射波の影響を受ける欠点がある。一方 $S_D(t)$ のような造波機運動によつて奇麗な拡散性の波が得られるがどうかは興味ある問題であつたが Fig. 3 の $h_E(t)$, $h_F(t)$ に示されているように典型的な拡散波が得られた。

$S_C(t)$, $S_D(t)$ に対応する造波機への入力電圧信号は造波機運転用アナログ・データ・レコーダーの磁気テープ上に記憶されているが、本実験に使用した横浜国大の造波装置は任意の入力電圧信号のタイムヒストリーに比例したストロークのタイムヒストリーを発生させる機構になつていたので、磁気テープを使用して何度でも正確に $S_C(t)$, $S_D(t)$ なるストロークのタイムヒストリーを再現させることができる。このような造波機運転法による発生波の再現精度について最初に検討を行なつたが、同一位置での波高のタイムヒストリーは直記式電磁オシログラフの記録では完全に一致したので、発生波の再現性は完全であると判断した。

Table 1. 測定位置

波の状態		造波プランジャー後面よりの距離	呼称
集中性の波 [造波機ストローク $S_C(t)$]	集中前	20m 23m	A B
	集中時	25.77m	C
	集中後	30m	D
拡散性の波 [造波機ストローク, $S_D(t)$]		15m 18m	E F

今回の実験は船体停止時であること、造波の再現性が完全であること、の二点から同一任意での波と船体運動のタイムヒストリーを測定するために、予め決められた測定位置での波高の事前計測を行なうことにした。選定した測定位置および呼称を Table 1 に示してあるが、集中性の波では集中前 2 点、集中時および集中後は各 1 点とし、波の状態による特性の差および離れた位置での特性の関係を知るに便ならしめている。C 点はほぼ集中時に相当しているので、便宜上集中時と呼んでおくが、Fig. 2 の $h_C(t)$ の実測値を見ると低周波が先行していることから

厳密には集中後に相当していることが判る。拡散性の波では進行中に波の状態が変わることはないので 2 点だけにした。

各位置で得られた波のタイムヒストリーを $h_A(t)$, $h_B(t)$ ……のように名づけるが、これは前述のように模型船のない状態で事前に測定した記録である (Fig. 2, 3 参照)。このように波高 $h_A(t)$ などと船体運動 $Z_A(t)$, $\theta_A(t)$ などは同時記録でないため、2 つの記録の時間ベース (t) を後で合せる必要がある。この対策として、造波機運転用磁気テープの他のチャンネルに時刻合せ用信号 (具体的にはランダムな周波数を持つ三角波信号, ランダムな間隔で記録された矩形波信号などが使用された) を記録しておき、波高 $h_A(t)$ などおよび船体運動 $Z_A(t)$ などの記録時にこの時刻合せ信号を同時記録する方法が採られた。なお波高計は抵抗線型のものを使用した。

2.2 船体運動の測定

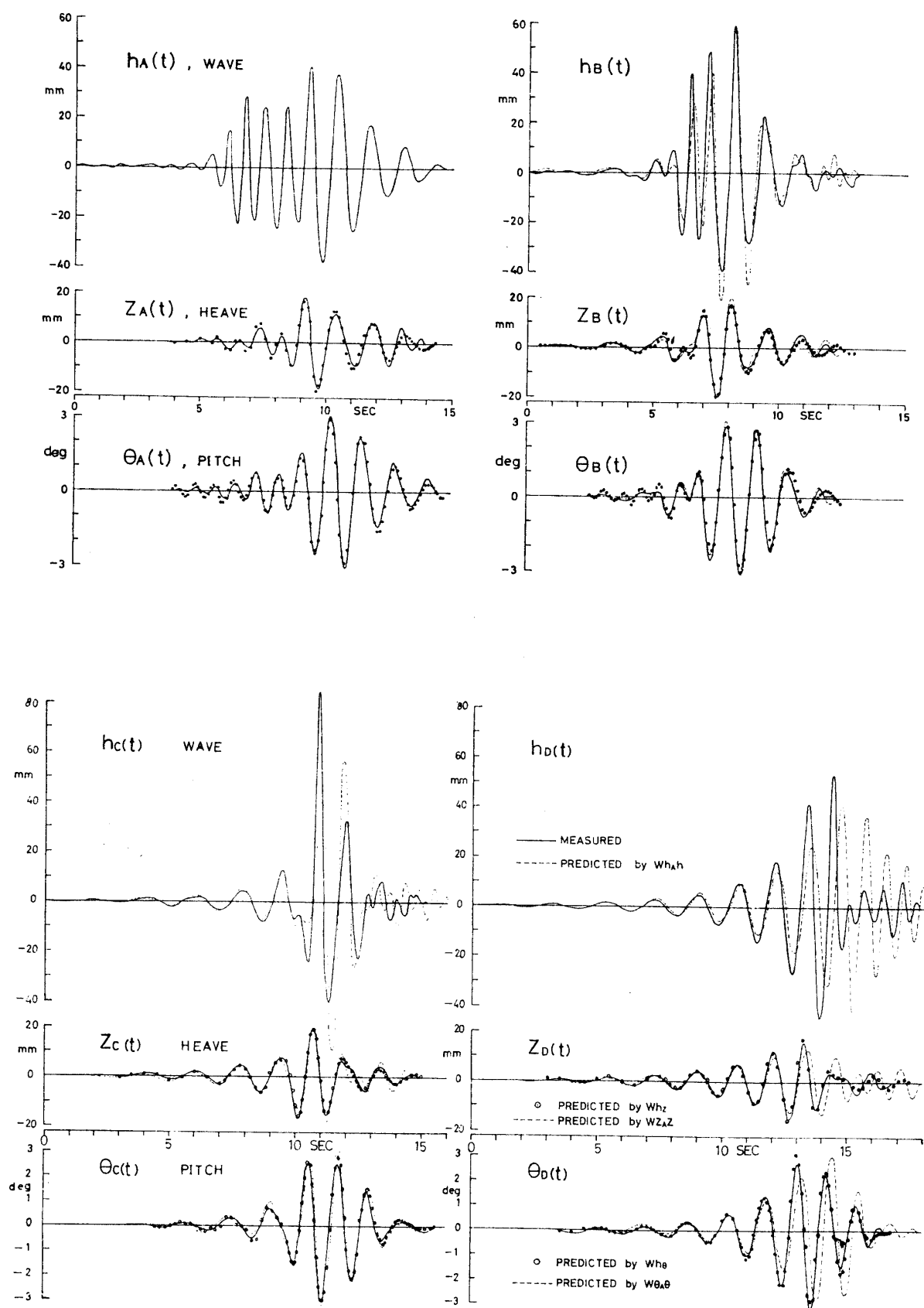
本実験の目的は試験法の検討にあるので、供試模型船は特殊なものでなければ任意の船型でよい。横浜国大船型試験水槽では、波浪中試験の模型船長の標準は 2 m とされているので、木製 2 m のバルクキャリアーの模型

Table 2. 模型船

バルクキャリアー, 木製, 付加物 なし	
$L_{PP}=2.0\text{m}$, $B=0.326\text{m}$, $d=0.124\text{m}$, $\rho=0.0638\text{m}^3$	
$C_b=0.789$, $C_p=0.793$, $C_w=0.854$, $C_x=0.994$	
$L/B=6.13$, $B/d=2.633$	
平水中での固有円周波数	ヒープ, $\omega_z=6.80\text{ rad/sec}$ ピッチ, $\omega_\theta=7.28\text{ rad/sec}$

を使用した。模型船の要目および試験状態を Table 2 に示した。

計測対象は正面向い波中における船体停止時のピッチングおよびヒービングとした。なお、船体運動のタイムストリーの予測をも調査対象に入れるため、サージングを固定し解析上の条件を簡単にした。船体運動の計測には一本棒式のサブキャリジ型ガイドのサージングを固定して使用した。なおサー



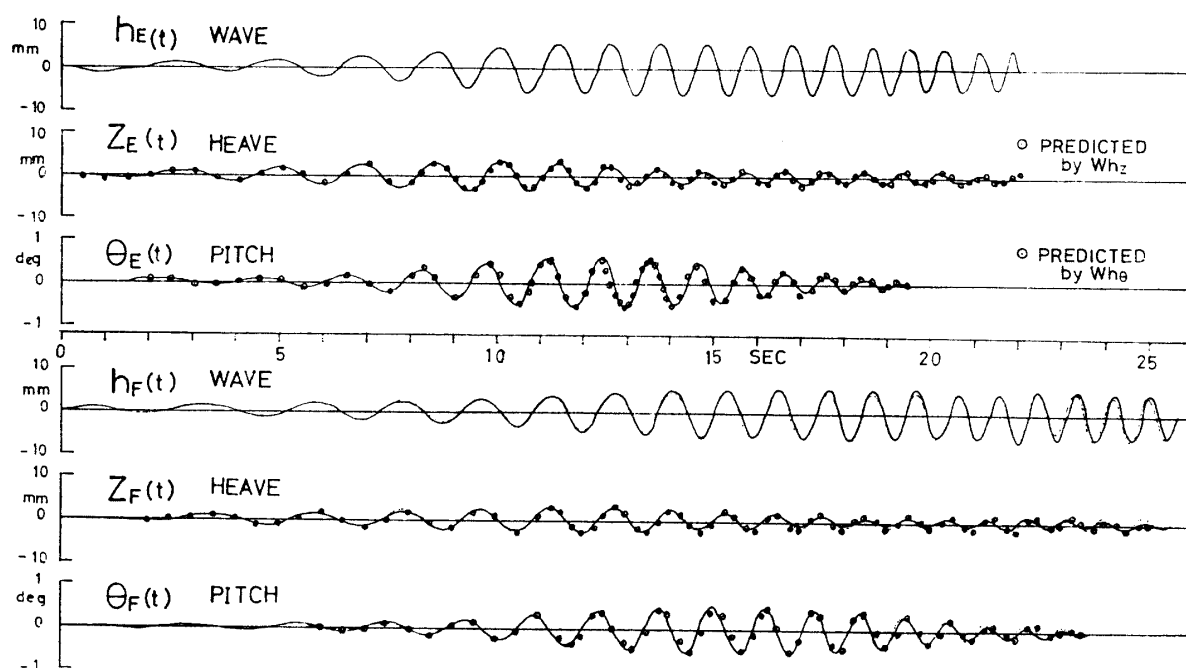


Fig. 3. タイムヒストリーの実測値（拡散性の波）

実線：実測値，○印：同じ位置の波からの予測値

ジングを固定するためにヒーピング・ロッドおよびそのガイドローラーは、遊びの少ない強固なものに取替えた。ピッチングのピックアップは回転型ポテンシオメーター、ヒーピングのピックアップは直線型ポテンシオメーターである。

船体運動および波高の記録はまず計測用アナログ・データ・レコーダに記録させ、その同時再生出力で直記式電磁オシログラフに記録させる。したがって、同一のオシログラフ記録を何回でも書かせることができる。なお、得られた磁気テープを A-D 変換器にかけ電子計算機への入力さん孔テープを作成することが計画されていたが、A-D 変換器不調のため、今回は人力によってタイムヒストリーの読み取りを 0.1 sec ごとに行なつた。

Fig. 2, 3 に本論で使用する実測のタイムヒストリーを実線で一括して示した。各位置での時間 (t) は前述の方法で時刻を合せてあるので、波と船体運動は同一位置での同時記録の型になつている。

全く同じ装置、模型船を使用して小波高時の規則波中の試験を行なつた。

3 解 析 法

前論文¹⁾の場合と同様に線型系が成立するものとして式を立て、その式に現象があてはまる場合には現象が線型系であつたと解釈する論法を採る。波と船体運動との関係について線型系が成立する場合の理論は文献 2), 3), 4) などに述べられているが、基本的には前論文とも同じであるので、前論文で使用した定義に従つて本論で使用する式を展開する。解析の順序として、実測タイムヒストリーから周波数応答関数を求め、その周波数応答関数から重み関数を求め、予測タイムヒストリーを算出するなる過程を考える。

3.1 周波数応答関数

Fig. A のように船体は停止しているものとし、正面向い波を考え、サージングは固定とし、船体運動としてヒーピングおよびピッチングのみを考える。波の進行方向上の位置 A 点における波高、ヒープ、ピッチのタイムヒストリーを $h_A(t)$, $Z_A(t)$, $\theta_A(t)$ のように表わす。測定点間の距離 x は波の進行方向がプラス、波高は表面上がり、ヒープは船体上がり、ピッチは船首上がりがプラスとする。

Fig. A の現象間の関係をすべて一入力一出力の線型系であると考え、周波数応答関数 $G(i\omega)$ によつて現象を分解してみると Fig. B を得る。入力あるいは出力として造波機ストローク $s(t)$ 、波高 $h(t)$ 、ヒープ $Z(t)$ 、ピッチ $\theta(t)$ があり、これらは位置によつて異なるタイムヒストリーを持つので Fig. B のように縦の関係（同一位置での異なる現象間の関係）および横の関係（離れた位置での同一現象間の関係）の交錯したものとなる。前論では

このうち波高の単独特性およびストロークと波高の相互特性が取扱われている。周波数応答関数で表現すると G_{hAhB} , G_{sh0} および G_{shA} について論じられている。Transient Water Wave 中の船体運動を扱う場合には波を入力とし、ヒープあるいはピッチを出力とする系（周波数応答関数では G_{hAZA} , $G_{hA\theta A}$ ）が基本になるが、船体運動のタイムヒストリーの位置による変移を考える場合には G_{ZAZB} , $G_{\theta A\theta B}$ も必要になる。また位置 A の波と位置 B の船体運動のタイムヒストリーの関係を考える場合には G_{hAZB} , $G_{hA\theta B}$ が問題になる。

一般に Fig. A, B の横の関係は波高の位置による変移特性に基因するものであるから、波高は減衰しないで進行するものとすれば、周波数応答関数は位相差特性のみとなる。すなわち前論文に示されているように、 A , B なる 2 点間の波高の周波数応答関数 G_{hAhB} は 2 点間の距離を x とすれば、次式で与えられる。

$$G_{hAhB}(i\omega) = e^{-i\omega|x|/g} \equiv G_{hh}(i\omega) \quad (1)$$

船体運動のタイムヒストリーについても波高と同様に 2 点間でフーリエ変換の振幅部分は等しく、位相部分のみが変わると考えてよい。ところが、その位相部分が変化するのは波高の位相部分が変化することのみにあるから、2 点 A, B における船体運動の周波数応答関数は波高の場合と全く同様に次式で表わされる。

$$G_{ZAZB}(i\omega) = G_{\theta A\theta B}(i\omega) = e^{-i\omega|x|/g} \equiv G_{ZZ}(i\omega) \equiv G_{\theta\theta}(i\omega) \quad (2)$$

一方、Fig. A あるいは B の縦の関係では前論文の造波機ストロークと造波機位置での発生波形の関係と同様に、周波数応答関数 $G(i\omega) = \bar{A}(\omega) \cdot e^{-i\phi(\omega)}$ における振幅比 $\bar{A}(\omega)$ 、位相差 $\phi(\omega)$ の両者ともに考えなければならない。造波機ストロークを入力とし、造波機位置での発生波を出力と考える場合には

$$G_{sh0}(i\omega) = \bar{A}_{sh0}(\omega) \cdot e^{-i\phi_{sh0}(\omega)} \quad (3)$$

A 点での波高を入力とし、 A 点でのヒープを出力と考えると

$$G_{hAZA}(i\omega) = \bar{A}_{hAZA}(\omega) \cdot e^{-i\phi_{hAZA}(\omega)} \quad (4)$$

同様に A 点での波高を入力とし、ピッチを出力と考えると

$$G_{hA\theta A}(i\omega) = \bar{A}_{hA\theta A}(\omega) \cdot e^{-i\phi_{hA\theta A}(\omega)} \quad (5)$$

(3) 式については前論文で詳細に検討されている。(4), (5) 式の $\bar{A}(\omega)$, $\phi(\omega)$ を求めることが Transient Wave 中における船型試験の主目的であることは申すまでもない。 A 点におけるタイムヒストリー $h_A(t)$, $Z_A(t)$, $\theta_A(t)$ が測定されていると、これらをフーリエ変換して、それぞれのフーリエ変換の振幅部分 $A_{hA}(\omega)$, $A_{ZA}(\omega)$, $A_{\theta A}(\omega)$ および位相部分 $\phi_{hA}(\omega)$, $\phi_{ZA}(\omega)$, $\phi_{\theta A}(\omega)$ が求められ、 $\bar{A}_{hAZA} = A_{ZA}/A_{hA}$, $\bar{A}_{hA\theta A} = A_{\theta A}/A_{hA}$ によつて振幅比 $\bar{A}(\omega)$; $\phi_{hAZA} = \phi_{hA} - \phi_{ZA}$, $\phi_{hA\theta A} = \phi_{hA} - \phi_{\theta A}$ によつて位相差 $\phi(\omega)$ が得られる。

ところが、(4), (5) 式で求められる G_{hAZA} , $G_{hA\theta A}$ は船体固有の特性であるから、入力である波高のタイムヒストリーが種々に変化しても、系が線型系であるかぎり不変である。したがつて

$$G_{hZ} \equiv G_{hAZA} = G_{hBZB} = \dots \quad (6)$$

$$\bar{A}_{hZ} \equiv \bar{A}_{hAZA} = \bar{A}_{hBZB} = \dots$$

$$\phi_{hZ} \equiv \phi_{hAZA} = \phi_{hBZB} = \dots$$

$$G_{h\theta} \equiv G_{hA\theta A} = G_{hB\theta B} = \dots \quad (7)$$

$$\bar{A}_{h\theta} \equiv \bar{A}_{hA\theta A} = \bar{A}_{hB\theta B} = \dots$$

$$\phi_{h\theta} \equiv \phi_{hA\theta A} = \phi_{hB\theta B} = \dots$$

なる関係が成立する範囲で G_{hZ} , $G_{h\theta}$ なる共通の線型周波数応答関数を持つことが判明する。本論では集中性の波に関して、位置の変化によつてこの関係がどこまで成立するかを検討するが、入力波高の振幅を大にした場合については取扱われていない。

物理現象とは無関係に A 点でのヒープを入力としピッチを出力とする系を仮想すると、次の周波数応答関数が得られる。

$$G_{ZA\theta A}(i\omega) = \bar{A}_{ZA\theta A}(\omega) \cdot e^{-i\phi_{ZA\theta A}(\omega)} \quad (8)$$

また、そのような系が成立するかどうかは別として (4), (5), (8) 式の入力と出力を交換すると

$$G_{ZAhA}(i\omega) = \bar{A}_{ZAhA}(\omega) \cdot e^{-i\phi_{ZAhA}(\omega)} = (\bar{A}_{hAZA})^{-1} \cdot e^{-i(-\phi_{hAZA})} = [G_{hAZA}(i\omega)]^{-1} \quad (9)$$

$$G_{\theta AhA}(i\omega) = (\bar{A}_{hA\theta A})^{-1} \cdot e^{-i(-\phi_{hA\theta A})} = [G_{hA\theta A}(i\omega)]^{-1} \quad (10)$$

$$G_{\theta AZA}(i\omega) = (\bar{A}_{ZA\theta A})^{-1} \cdot e^{-i(-\phi_{ZA\theta A})} = [G_{ZA\theta A}(i\omega)]^{-1} \quad (11)$$

のような周波数応答関数が形式的に得られる。

Fig. A, B での斜めの関係の周波数応答関数は前論文の G_{shA} のように縦の応答関数と横の応答関数の積で表

わされる。造波機ストローク $s(t)$ を入力とし A 点の波高 $h_A(t)$ を出力と考えると

$$G_{sh_A}(i\omega) = G_{sh_0}(i\omega) \cdot G_{h_0h_A}(i\omega) = \bar{A}_{sh_0}(\omega) \cdot e^{-i(\phi_{sh_0} + \omega^2 x/g)} \quad (12)$$

ここに、造波機と A 点の距離は x であり、波高は減衰しない ($\bar{A}_{h_0h_A} = 1$) としている。

同様な関係で、 A 点での波高 $h_A(t)$ を入力とし、 B 点でのヒープ $Z_B(t)$ を出力とする場合を考えてみると、 AB 間の距離を x とし次式を得る。

$$G_{h_AZ_B}(i\omega) = G_{h_AZ_A}(i\omega) \cdot G_{Z_AZ_B}(i\omega) = \bar{A}_{h_AZ_A} \cdot e^{-i(\phi_{h_AZ_A} + \omega^2 x/g)} \quad (13)$$

ただし、 $\bar{A}_{Z_AZ_B} = 1$, $\phi_{Z_AZ_B} = \frac{\omega^2 x}{g}$ なる (2) 式の関係を使用している。また、次のようにも考えることができる

$$G_{h_AZ_B}(i\omega) = G_{h_Ah_B}(i\omega) \cdot G_{h_BZ_B}(i\omega) = \bar{A}_{h_BZ_B} \cdot e^{-i(\phi_{h_BZ_B} + \omega^2 x/g)} \quad (14)$$

ただし $\bar{A}_{h_Ah_B} = 1$, $\phi_{h_Ah_B} = \omega^2 x/g$ なる (1) 式の関係を使用している。(6) 式の関係が A, B 点で成立する場合 (13), (14) 式は等しくなり、一般に

$$G_{h_AZ_B}(i\omega) = \bar{A}_{h_Z} \cdot e^{-i(\phi_{h_Z} + \omega^2 x/g)} \quad (15)$$

のように書ける。

全く同様に、 A 点での波高 $h_A(t)$ を入力とし B 点でのピッチ $\theta_B(t)$ を出力と考えると

$$G_{h_A\theta_B}(i\omega) = \bar{A}_{h\theta} \cdot e^{-i(\phi_{h\theta} + \omega^2 x/g)} \quad (16)$$

また、 A 点でのヒープ $Z_A(t)$ を入力とし、 B 点でのピッチ $\theta_B(t)$ を出力と仮想すると

$$G_{Z_A\theta_B}(i\omega) = \bar{A}_{Z\theta} \cdot e^{-i(\phi_{Z\theta} + \omega^2 x/g)} \quad (17)$$

を得る。

3.2 重み関数

周波数応答関数のフーリエ逆変換によつて重み関数 (Weighting Function) あるいはインパルス応答と呼ばれるタイムヒストリーの予測に必要な関数が得られる。本論のこの関数の値は負の時間域でも有義な値を持ち、物理的にインパルス応答なる表現からは理解し難いので重み関数なる表現の方をとる。

前論文に示されているように、 A 点での波高 $h_A(t)$ と B 点での波高 $h_B(t)$ に関する重み関数 $W_{h_Ah_B}$ は次式で与えられる。

$$W_{h_Ah_B}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_{h_Ah_B}(i\omega) \cdot e^{i\omega\tau} \cdot d\omega = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \cos\left(\omega\tau - \frac{\omega^2 x}{g}\right) d\omega \equiv W_{hh}(\tau) \quad (18)$$

同様に A, B 点での船体運動に関しては (2) 式により

$$W_{Z_AZ_B}(\tau) = W_{\theta_A\theta_B}(\tau) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \cos\left(\omega\tau - \frac{\omega^2 x}{g}\right) d\omega \equiv W_{ZZ}(\tau) \equiv W_{\theta\theta}(\tau) \quad (19)$$

同一位置での異なる現象間の重み関数は (4), (5), (8) 式から、次式をうる。

$$W_{h_AZ_A}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G_{h_AZ_A}(i\omega) \cdot e^{i\omega\tau} \cdot d\omega = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \bar{A}_{h_Z}(\omega) \cdot \cos(\omega\tau - \phi_{h_Z}) \cdot d\omega \equiv W_{h_Z}(\tau) \quad (20)$$

$$W_{h_A\theta_A}(\tau) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \bar{A}_{h\theta}(\omega) \cdot \cos(\omega\tau - \phi_{h\theta}) \cdot d\omega \equiv W_{h\theta}(\tau) \quad (21)$$

$$W_{Z_A\theta_A}(\tau) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \bar{A}_{Z\theta}(\omega) \cdot \cos(\omega\tau - \phi_{Z\theta}) \cdot d\omega \equiv W_{Z\theta}(\tau) \quad (22)$$

(9), (10) 式のように船体運動を入力とし波高を出力と仮想した場合には

$$W_{Z_Ah_A}(\tau) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} [\bar{A}_{h_Z}(\omega)]^{-1} \cdot \cos(\omega\tau + \phi_{h_Z}) \cdot d\omega \equiv W_{Zh}(\tau) \quad (23)$$

$$W_{\theta_Ah_A}(\tau) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} [\bar{A}_{h\theta}(\omega)]^{-1} \cdot \cos(\omega\tau + \phi_{h\theta}) \cdot d\omega \equiv W_{\theta h}(\tau) \quad (24)$$

のようになる。

(15), (16) 式のように、離れた位置での異なる現象間の重み関数は次式のようになる。

$$W_{h_AZ_B}(\tau) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \bar{A}_{h_Z}(\omega) \cdot \cos\left(\omega\tau - \phi_{h_Z} - \frac{\omega^2 x}{g}\right) \cdot d\omega \quad (25)$$

$$W_{h_A\theta_B}(\tau) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \bar{A}_{h\theta}(\omega) \cdot \cos\left(\omega\tau - \phi_{h\theta} - \frac{\omega^2 x}{g}\right) \cdot d\omega \quad (26)$$

3.3 タイムヒストリーの予測

一般に入力のタイムヒストリーが与えられると、出力のタイムヒストリーの予測は重み関数を使用して次の畳

み込み積分 (Convolution Integral) で行なわれる。いま、与えられたタイムヒストリーを点 A での波高 $h_A(t)$ とし、 B 点での波高タイムヒストリー $h_B(t)$ を予測する場合には

$$h_B(t) = \int_{-\infty}^{\infty} W_{hh}(\tau) \cdot h_A(t-\tau) \cdot d\tau \quad (27)$$

なる式が使用されることは前論文にも示されている。以下の式は(27)と全く同じ型式の式であるが、後で説明に必要なになるので式を羅列しておく。

入力と同一現象の異なる位置での予測はヒープ、ピッチに対してそれぞれ次式で与えられる。

$$Z_B(t) = \int_{-\infty}^{\infty} W_{ZZ}(\tau) \cdot Z_A(t-\tau) \cdot d\tau \quad (28)$$

$$\theta_B(t) = \int_{-\infty}^{\infty} W_{\theta\theta}(\tau) \cdot \theta_A(t-\tau) \cdot d\tau \quad (29)$$

ここに $W_{hh} = W_{ZZ} = W_{\theta\theta}$ であることは(18), (19)式に示されている。

入力と同一位置での異なる現象の予測は(20), (21), (22)式の重み関数に対応して次式で与えられる。

$$Z_A(t) = \int_{-\infty}^{\infty} W_{hZ}(\tau) \cdot h_A(t-\tau) \cdot d\tau \quad (30)$$

$$\theta_A(t) = \int_{-\infty}^{\infty} W_{h\theta}(\tau) \cdot h_A(t-\tau) \cdot d\tau \quad (31)$$

$$\theta_A(t) = \int_{-\infty}^{\infty} W_{Z\theta}(\tau) \cdot Z_A(t-\tau) \cdot d\tau \quad (32)$$

また、(23), (24)式の重み関数を使用して、次式の予測が形式上は行ない得る。

$$h_A(t) = \int_{-\infty}^{\infty} W_{Zh}(\tau) \cdot Z_A(t-\tau) \cdot d\tau \quad (33)$$

$$h_A(t) = \int_{-\infty}^{\infty} W_{\theta h}(\tau) \cdot \theta_A(t-\tau) \cdot d\tau \quad (34)$$

入力と異なる位置での異なる現象を予測する場合には(25), (26)式のような重み関数となつて次式を得る。

$$Z_B(t) = \int_{-\infty}^{\infty} W_{hAZB}(\tau) \cdot h_A(t-\tau) \cdot d\tau \quad (35)$$

$$\theta_B(t) = \int_{-\infty}^{\infty} W_{hA\theta B}(\tau) \cdot h_A(t-\tau) \cdot d\tau \quad (36)$$

以上の畳み込み積分は例えば(35)式に対して

$$\int_{-\infty}^{\infty} W_{hAZB}(\tau) \cdot h_A(t-\tau) \cdot d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} W_{hAZB}(t-\tau) \cdot h_A(\tau) \cdot d\tau$$

なる関係があるから

$$Z_B(t) = \int_{-\infty}^{\infty} W_{hAZB}(t-\tau) \cdot h_A(\tau) \cdot d\tau \quad (37)$$

のような型にも書ける。Transient Water Wave 中の船体運動を扱う場合には入力 $h_A(t)$, $\theta_A(t)$, $Z_A(t)$ などは有限時間のタイムヒストリーである特色がある。この意味から(37)式の型が積分領域を決め易い。また重み関数が Fig. 7, 8 のように有限である場合には、(35)式の型でも積分領域が容易に決定できる。

3.4 数値計算

数値計算には主として横浜国大の電子計算機 (NEAC-2230 型) が使用されたが、一部の計算に東大計算センターの電子計算機 (HITAC-5020 型) を使用した。インプットデーターは使用計算機的能力および人力でデータ読み取りを行なつた事から 0.1 sec 間隔にせざるを得なかつた、このため高周波数領域での算出精度は良いとは言えない。

周波数応答関数を求めるためのフーリエ解析は $\Delta\omega = 0.5$ として $\omega = 0.5 \sim 15$ の範囲で行なわれたが、 ω の大なる範囲での精度は悪い。重み関数算出のためのインプットデーターは $\Delta\omega = 0.1$ とし、アウトプットデーターは $\Delta\tau = 0.1$ sec となつている。タイムヒストリーの予測にはこの 0.1 sec 間隔の重み関数の数列をインプットデーターとして使用したが、重み関数に高周波数の変動のある場合には $\Delta\tau = 0.1$ sec は十分な精度を保証する値とは言えない。積分はすべてシンプソンの公式で計算した。

以上のように、高周波域で問題が残されているが、本論で扱う系の有意な周波数領域では十分な精度を持つ

との判断のもとに数値計算が行なわれた。なお、実測値と比較するため計算はモデルスケールの有次元値で行なわれた。

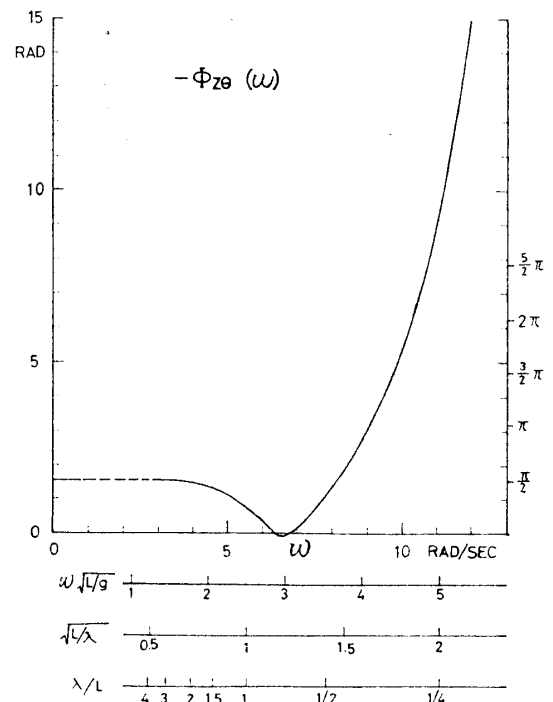
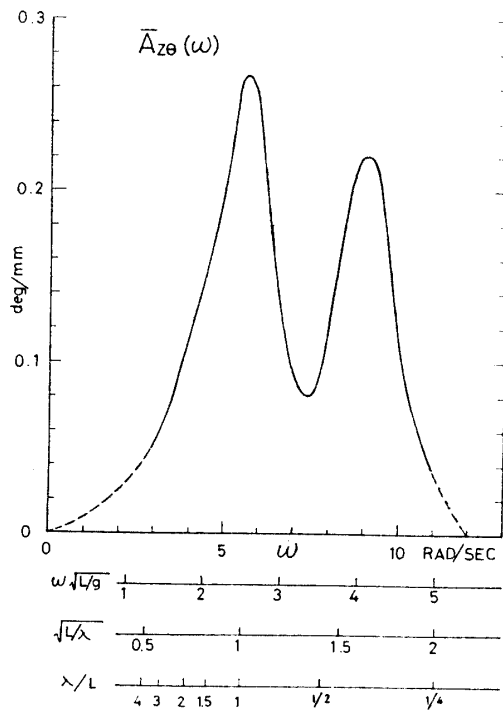
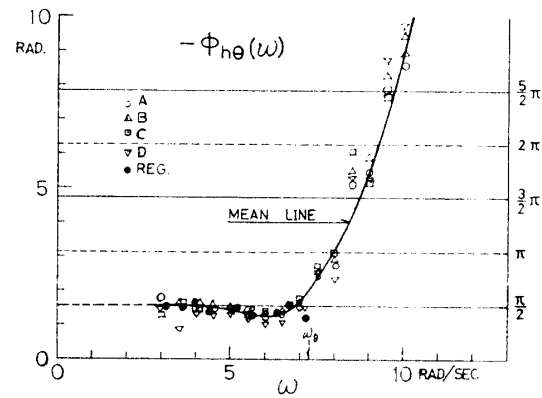
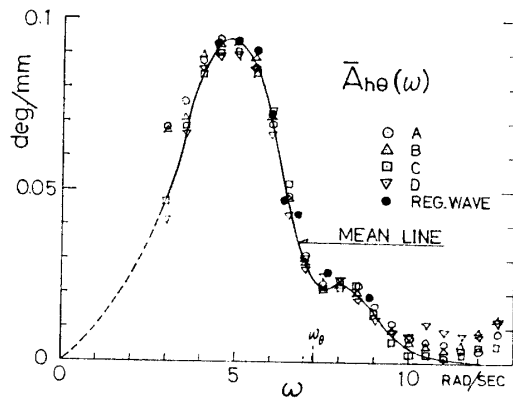
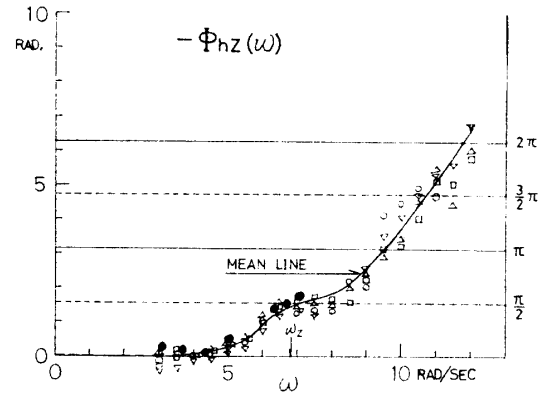
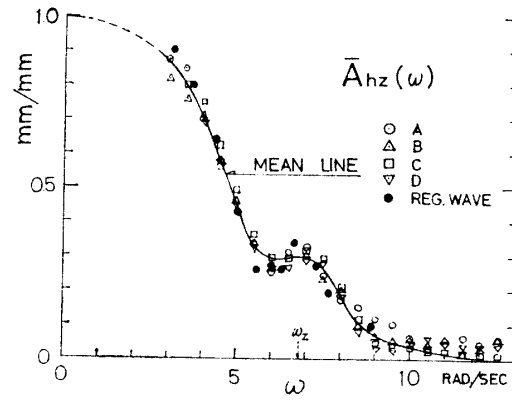


Fig. 4. 同一位置での振幅比

Fig. 5. 同一位置での位相差

4 実測値の解析と考察

4.1 周波数応答特性

4.1.1 同じ位置での周波数応答関数 Fig. 2, 3 に実線で示されている実測タイムヒストリーをフーリエ変換し、各現象の振幅部分、位相部分が求まる。この値から 3.1 に示した各種の周波数応答関数 $G(i\omega)$ を算出できるが、まず (6), (7) 式の関係を検討するために、同一位置での波高を入力としピッチあるいはヒープを出力とする周波数応答関数を集中性の Transient Wave を使用した場合について計算した。すなわち (4), (5) 式の $G(i\omega)$ を Table 1 の A, B, C, D 点について求めその結果を Fig. 4 に振幅比, Fig. 5 に位相差についてまとめてプロットしておいた。Fig. 4, 5 に実線で示されているのはこれらの算出値の平均線で以後の計算に使用した値である。

まず, Fig. 4 の振幅比について考えてみよう。 $\omega < 3$ および $\omega > 10$ では波高のフーリエ変換の振幅部分 A_h , 運動の振幅部分 A_z, A_θ ともに小となり、小なる値を小なる値で割るため振幅比 $\bar{A}_{hz}, \bar{A}_{h\theta}$ の算出精度が悪くバラツキが大である。特に $\omega < 3$ の領域ではこの傾向が著しかったので、図上へのプロットは省略した。図中の平均線はこれらの領域に関しては推定線である。 $\omega > 10$ の領域では $\omega = 12$ で振幅比が 0 になるように線を引いている。図中には規則波中の実験結果も ●印で記入しておいたが、Transient Wave 中の試験結果とよく一致している。規則波中の試験は $\lambda/L = 0.5 \sim 3.0$ よりも広範囲に行なわれているので、通常の規則波中試験で求める周波数領域を十二分にカバーしている。一方この領域での Transient Wave 中の結果のバラツキは少なく、規則波中の結果との一致も良好であることから、波浪中の振幅特性を求めるための手段として Transient Water Wave 中の試験は有用な方法であることの証拠の一例が示されたと云えよう。

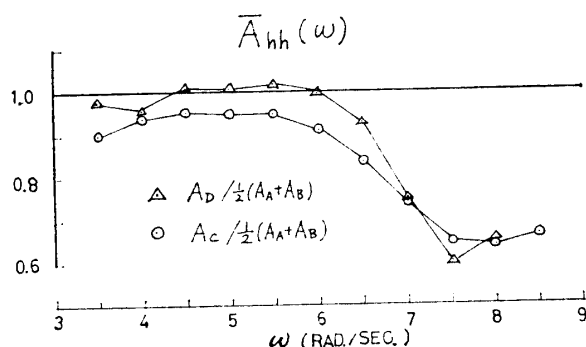


Fig. 6. 集中前の波と集中後の波の振幅比

いても、発生してしまった波の中での船体周波数応答の振幅比は同一であることが Fig. 4 から推測される。この事実は Transient Water Wave 中の船体運動は波の生因とは無関係に、同一点での波と船体運動のタイムヒストリーの相互関係のみを考えればよいことを明らかにしている。換言すると、波と船体運動は波と波の線型系とは別に線型系を形成すると考えてよいことを示すものである。もちろん、この系についても成立する限界があり、限界を決める主要要素は波高であると考えられるが、本論では小波高の場合のみを取り扱っており、波高の影響については触れられていない。

模型船より前方の位置で波高を測定し、その波高と重心点で測定した船体運動の関係から周波数応答関数を求めるのが船型試験では実用的な方法である。いま、振幅比のみについて着目してみると、これらのタイムヒストリーをそのままフーリエ変換し、振幅比特性が求められるが、重心位置での波が集中前の波である場合には正しい振幅比と同じ値を与える。しかし、波高計の位置が集中前であり、重心位置が集中後であるような場合には Fig. 6 のように減衰した波高に対する船体運動になつていたので、この計算結果は正しい振幅比を与えないことになる。したがって Transient Wave 中の船型試験では、波高測定位置および船体重心位置が共に集中前の波の位置になるように特に注意せねばならない。

ヒープを入力としピッチを出力と仮想した振幅比 $\bar{A}_{z\theta}$ は $\bar{A}_{h\theta}, \bar{A}_{hz}$ の平均線を使用し $\bar{A}_{z\theta} = \bar{A}_{h\theta} / \bar{A}_{hz}$ なる計算から得られたものであるが、 $\omega > 11$ では $\omega = 12$ で 0 になるように推定線が引いてある。

Fig. 5 の位相差について検討してみよう。位相差特性は高周波数領域で特にまとめにくい。 $\phi_{hz}, \phi_{h\theta}$ の平均

ここで特に注意したいことは、Fig. 4 に使用した A, B 位置は集中前、C はほぼ集中時、D は集中後の状態である。したがって前論文で示されたように A, B での波と C および D での波の間には変化があると考えられる。本論の例の波と波の振幅比を Fig. 6 に示したが、C, D では $\omega > 6$ の領域で振幅の減衰があることが明らかに判る。このことは今回の実験の場合も波の変移に関して線型系の成立するのは集中前のみであり、集中時および集中後は初めの波と異なる特性になつてしまつてしまつていていることを示している。

このように、その位置での波の生因には変化が起つ

線を高周波域で単調増加の型に推定した理由として、距離による位相差 $\omega^2 x/g$ と型を合せると解析上便利であること、 ω の大なる領域での位相差は不確実であることを表わすためには単調増加型の線がある値に終結する線より適していること、の2点が上げられる。図から判るように、 $\omega > 8$ の領域でのバラツキは大であるが、振幅比が大なる値を持つ $3 < \omega < 8$ ではバラツキが比較的小であり、規則波中の結果ともほぼ一致している。ちなみに $\lambda/L=0.5$ は $\omega=7.8$ に相等するが、この周波数以上での位相差の測定は規則波中試験でも困難であつた、このように高周波域での位相差の物理的意味にも疑点が残されている。振幅比を $\omega=12$ で0にしたので $\omega > 12$ の位相差には意味がなくなる。本例の場合には $\omega=12$ までの位相差特性が振幅比との関連から必要であつたが、平均線の推定に無理のある高周波域での位相差特性がタイムヒストリー予測へおよぼす影響は小であることが振幅比特性と対比してみると判る。

ヒープとピッチの位相差曲線 $-\phi_{Z\theta}$ は $-\phi_{h\theta}$, $-\phi_{hz}$ の平均線の差として求めたものである。

4.1.2 離れた位置での周波数応答関数 (15), (16), (17) 式の離れた位置での異なる現象間の $G(i\omega)$ は (1), (2) 式の離れた位置での同じ現象間の周波数応答関数 G_{hh} あるいは G_{ZZ} , $G_{\theta\theta}$ が成立すれば、4.1.1 によつて G_{hz} , $G_{h\theta}$, $G_{Z\theta}$ が実験で求まっているので、簡単に算出できる。 G_{hh} の検討は既に前論文で試みられているが、 G_{hh} , G_{ZZ} , $G_{\theta\theta}$ は位相差特性のみとなるので、精度の良い検討は期待できないので、本論では $G_{hh}=G_{ZZ}=G_{\theta\theta}=e^{-i\omega|\omega|z/g}$ が成立すると仮定してタイムヒストリーの位置の移動を行ない、実測値と比較することによつて上記の関係の成立を逆検算してみることにした (4.4.1 参照)。後に示されているように (1), (2) 式の関係は集中前の波を入力とし、集中前の波を出力とする場合および拡散波中では完全に成立すると考えられるので、 G_{hAZB} , $G_{hA\theta B}$, $G_{ZA\theta B}$ は (15), (16), (17) 式で示されることが明らかである。これらの検算もタイムヒストリーの予測によつて行なわれた (4.4.2 参照)。

4.2 重み関数の計算

Fig. 4, 5 の平均線として求めた周波数応答関数を $\Delta\omega=0.1$ rad/sec とし読み取り、重み関数を計算した。

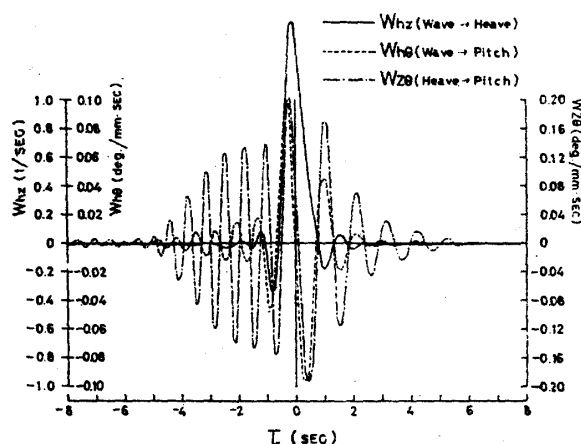


Fig. 7. 同一位置での重み関数

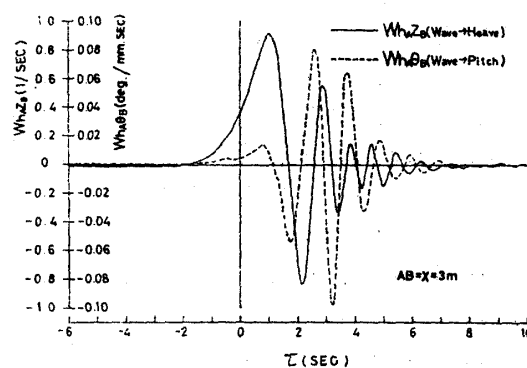


Fig. 8. 離れた位置の重み関数

$G_{hAZA}=G_{hBZB}=G_{hZC}\dots\dots\equiv G_{hz}$, $G_{hA\theta A}=G_{hB\theta B}\dots\dots\equiv G_{h\theta}$ としてよいことが、実証されているので、(20), (21), (22) 式によつて同一位置での異なる現象間の重み関数 W_{hz} , $W_{h\theta}$, $W_{z\theta}$ が求まる。積分範囲は $\bar{A}_{hz}$, $\bar{A}_{h\theta}$, $\bar{A}_{z\theta}$ が0になる $\omega=12$ までとなる。その算出値は τ に関して 0.1sec ごとであるが算出点を結んで曲線の型で Fig. 7 に比較して示した。

離れた位置での異なる現象間の重み関数 W_{hAZB} , $W_{hA\theta B}$ は (25), (26) 式によつて算出したが、 $x=3m$ の場合を Fig. 8 に示しておいた。 $x=3m$ は Table 1 に示されているように $A \rightarrow B$, $E \rightarrow F$ の場合に対応している。なおこの場合にも $\bar{A}_{hz}$, $\bar{A}_{h\theta}$, $-\phi_{hz}$, $-\phi_{h\theta}$ は Fig. 4, 5 の平均線が使用されている。したがつて積分範囲は $\omega=12$ までになる。

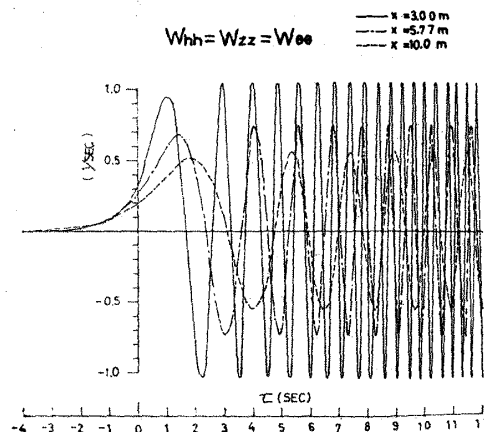


Fig. 9. 位置移動の重み関数

離れた位置での同じ現象間の重み関数（位置移動の重み関数）は(18), (19)式で示されているように $W_{hh} = W_{zz} = W_{\theta\theta}$ となるが、この計算には前論文で使用した展開式を用いた。 $x=3, 5.77, 10\text{ m}$ の場合についてその算出値の一部を Fig. 9 に示した。この数列の使用によつて本例のすべてのタイムヒストリーの波の進行方向への位置の移動が可能である。

Fig. 7 を見ると負の時間域に有義な値を持つことが目立つ、船体重心にインパルスが作用した時の応答という物理的解釈でこの結果を見ると、この傾向は理解できない。ここで算出された値は波浪中の実験によつて得られた周波数応答関数を使用して求められた値であることを思い出すと、実験で求めた周波数応答関数の換算値にすぎないことに気がつく。故に現実インパルス波が船体重心に作用した時の応答と直接関連のある関数ではないと考えられる。一方、波浪中の船体運動では重心に波が到達する前に船体は波の作用を受ける、すなわち重心位置（測定点）に関して負の時間で既に船体は波に反応していることになる。この傾向が実験で求めた周波数応答関数の中に既に含まれているので、その換算値であるインパルス応答は負の時間域で有義な値を持つものと推察される。このように、本論ではこの算出値をインパルス応答と称するには物理的意味との関連に難点があるので、重み関数（Weighting Function, 比重関数, 荷重関数とも訳されている）なる別名を採用した。Fig. 7 を Fig. 4, 5 の周波数応答関数のフーリエ逆変換として、Fig. 4, 5 と対比して見ると興味深い。

位置移動の重み関数 Fig. 9 と Fig. 7, 8 の重み関数を比較すると Fig. 9 の W_{hh} は無限時間続くこと、その間振幅が一定であることが特色になつていくことに気がつく。この原因は Fig. 9 では振幅比 $\bar{A}_{hh}(\omega) = \bar{A}_{zz}(\omega) = \bar{A}_{\theta\theta}(\omega) = 1$ であるため、その逆フーリエ変換である重み関数にも振幅の減衰が現われないところにある。これに対し、Fig. 7, 8 では $\bar{A}_{hz}, \bar{A}_{h\theta}, \bar{A}_{z\theta}$ を $\omega=12$ で 0 としたため、重み関数の高振動部分が 0 になり、有限時間でその特性が表わされてしまう。この傾向は数値計算にとつて非常に有利な条件であり、次のような利点をもたらす。すなわち有限時間であるから $\Delta\tau$ を小にして算出精度を上げることができる、高振動部分が小なる値しか持たないので逆に $\Delta\tau$ を極端に小にする必要がないとも云える、タイムヒストリー予測計算における積分範囲が小になる。

このように振幅比と重み関数の関係について考えを進めて行くと、 $[\bar{A}_{h\theta}]^{-1}, [\bar{A}_{h\theta}]^{-1}, [\bar{A}_{z\theta}]^{-1}$ なる逆数の振幅比を使用して重み関数が計算される(23), (24)式あるいは(9), (10), (11)式のような入出力を交換した物理的意義に疑問のある線型系では、Fig. 4 から判るように $\omega=12$ あるいは $\omega=0$ 近くで振幅比が ∞ になることになり、重み関数がこのままの形式では算出できない。このように数値計算技術上からも $G_{zh}, G_{\theta h}, G_{\theta z}$ なる逆の線型系には無理があることが判明する。

一方、Fig. 9 の逆の線型系 $G_{hzh}, G_{z\theta h}, G_{\theta\theta h}$ などでは距離 x が $-x$ になるだけであるので、計算可能である。この線型系が成立することは前論文で検討されている。

4.3 同じ位置でのタイムヒストリーの関係

4.3.1 波から船体運動の予測 波のタイムヒストリーが実測されているとき、その位置でのヒーピングのタイムヒストリーは Fig. 7 の W_{hz} を使用し (30)式から、ピッチングは Fig. 7 の $W_{h\theta}$ を使用して(31)式から予測することができる。この予測値を Fig. 2, 3 のすべての $h(t)$ を使用して算出し、Fig. 2, 3 の実測の船体運動のタイムヒストリーの所に○印でプロットした。これらの予測値は全般的に実測値とよく一致しているが、この計算に使用した重み関数 $W_{hz}, W_{h\theta}$ は $G_{hz}, G_{h\theta}$ から導びかれたものであり、その $G_{hz}, G_{h\theta}$ はいま使用したタイムヒストリーを入出力として求めた値の平均値であるから、一致するのが当然のことである。しかしこれらの実測タイムヒストリーの関係がただ一つの $W_{hz}, W_{h\theta}$ で精度よく説明できたことは、ただ一つの $G_{hz}, G_{h\theta}$ がこれの現象の共通特性として正しかつたことを意味しており、この事からも波の生成の過程が線型仮定から外れても、その波とその波の中での船体運動は線型系を形成し得ることが判る。

4.3.2 一つの船体運動から他の船体運動の予測 この予測を行なうには、Fig. B の説明のように例えばヒープを入力としピッチを出力とする線型系の成立が前提となる。ところが、船体運動相互の間に一つを入力とし他を出力とする様な系を仮想することにはその物理的意義に疑問が残されている。一方、船体周波数応答特性の表現にはピッチとヒープの振幅比あるいはピッチとヒープの位相差がよく使用されている。この事はヒープを入力としピッチを出力とするような線型系を考えることとは直接の関連を持つてなされていることではないが、この特性を形式的に流用すると Fig. B の $G_{z\theta\theta}$ のような周波数応答関数が得られていることになり、このような線型系を仮定し、一つの船体運動から他の船体運動を予測してみたい。

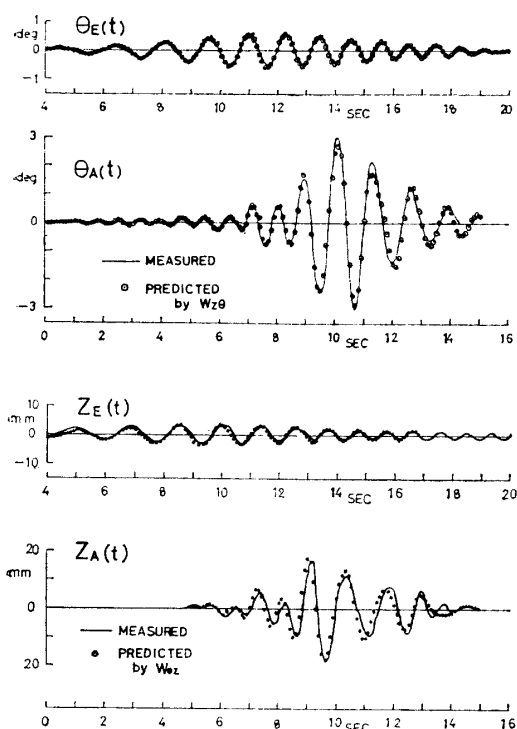


Fig. 10. ヒーピングからピッチング, ピッチングからヒーピングの予測

Fig. B のように $G_{ZA\theta A}$ を考えてみることにすると, この値は既に Fig. 4, 5 に $\bar{A}_{Z\theta}$, $-\phi_{Z\theta}$ の値で示されており, それを使用して求めた重み関数 $W_{Z\theta}$ も Fig. 7 に記入してある。この値を使用して(32)式で実測ヒーピングからピッチングを予測した結果の例を Fig. 10 に実測値と比較してプロットしたが, 予測精度は良好であることがわかる。

この逆の場合, ピッチを入力としヒーブを出力と見る場合には $G_{\theta Z}$ の振幅比 $\bar{A}_{\theta Z}$ に ∞ になる点が生じ,

重み関数の算出に難点があることは4.2述べた通りであるが, 物理的にはピッチを入力としてもヒーブを入力としても同等であるので, ヒーブを入力とする系だけが成立することは理解できない。重み関数算出上の難点はある ω の範囲を仮定し, 積分範囲をその範囲内に限つてしまえば, 形式上解決される。そこで $W_{\theta Z}$ の計算を $[\bar{A}_{Z\theta}]^{-1}$ を振幅比とし $3 \leq \omega \leq 9$ の範囲で積分して求め, ピッチからヒーブを予測してみた。結果は Fig. 10 に示されているように良いと云える。上記の ω の範囲は $\lambda/L \approx 3.5 \sim 0.3$ に対応するので周波数応答の有意な範囲を包括していると云えるが, 一方 Fig. 4 の $\bar{A}_{Z\theta}$ を見るとこの様な表現に対しては特に高周波域で大幅なカットであることが判る。しかし $\bar{A}_{Z\theta}$ の算出源である $\bar{A}_{hZ}$, $\bar{A}_{h\theta}$ でみるとカット部分が小なることを考えると物理的意義が優先して上記の近似で予測計算が成立したものと考えられる。

以上のような近似は他の予測計算でも成立すると推測されるので, $\bar{A}_{hZ}$, $\bar{A}_{h\theta}$ を同様に ω の3以下, 9以上の部分をカットして W_{hZ} , $W_{h\theta}$ を求め, Fig. 2 の○に相当する予測を行なつてみたが, 近似を行なつていない○の値とよく一致した。これらの事は有意義な周波数域で周波数応答, および重み関数の算出を考えればよいことを示唆している。

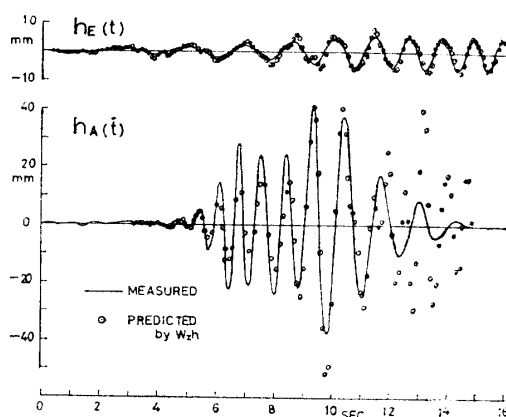


Fig. 11. ヒーピングから波の予測

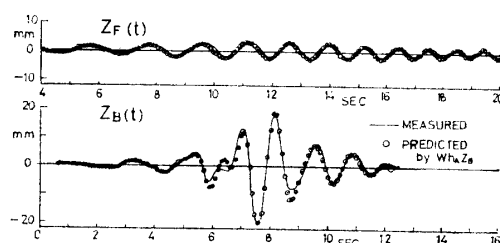


Fig. 12. 離れた位置の波からピッチ, ヒーブの予測

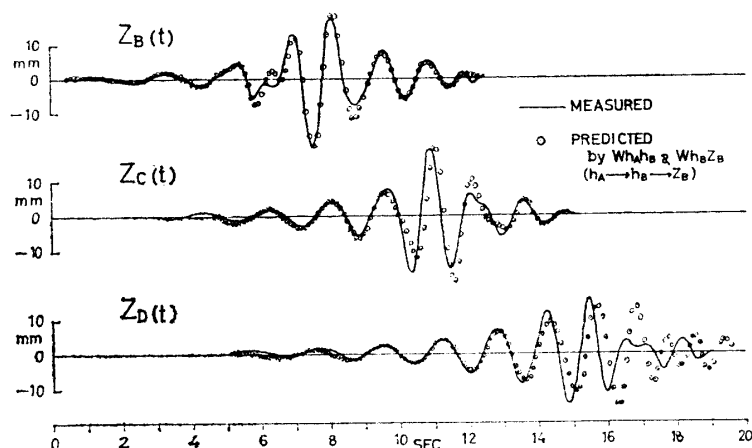


Fig. 13. 入力波高を位置移動し、その予測波高を使用して
ヒープを予測（集中前集中後の比較）

考えるときには、波の変化の激しいタイムヒストリーが Fig. 4 の特性を持つフィルターを通して船体運動の出力となるので、船体運動のタイムヒストリーは変化がなだらかになっている。この逆を考えると、いわば情報量の少ないタイムヒストリーから情報量の大きなタイムヒストリーを予測するのであるから予測精度は計算過程に無理がなくても悪いことが推察される。前述のように逆の系では重み関数の算出に難点があるので、4.3.2 の場合と同様に近似を用いて計算を試みてみる。ただし積分範囲は広くとり $\omega = 0.5 \sim 11$ にした。重み関数 W_{zh} , $W_{\theta h}$ を算出できれば形式的に (33), (34) 式を適用してヒーピングおよびピッチングから波高が予測される。結果を Fig. 11 に例示したが推察の通り予測と実測は全く合わない、 $h_E(t)$ では一見一致しているかのように見えるが、計算法から推測されたことであるが高周波成分の影響が現われ滑らかな波になっていない。ここには図示しなかつたがピッチから波の予測ではさらに精度が悪くなった。以上のように、船体運動から波を予測することは物理的にも数値計算上からも無理があることが判る。

4.4 離れた位置でのタイムヒストリーの関係

4.4.1 同一現象の予測 ある位置の波高のタイムヒストリーが与えられているとき、ある距離 x だけ離れた位置での波高のタイムヒストリーを予測することは、前論文で取り扱われた、その結論によると集中前の波から集中時あるいは集中後の波を (27) 式によつて予測すると実測値と一致しない。したがって船体運動に関しても、例えば集中前の波の中でのヒーピングのタイムヒストリーから異なる位置の集中前の波の中でのヒーピングの予測はできるが、集中時あるいは集中後の波に相当する位置でのヒーピングの実測タイムヒストリーは予測値と一致しないことが類推できる。

波高、船体運動のタイムヒストリーを離れた位置へ移すには (27), (28), (29) 式が使用されるが、その時に使う位置移動の重み関数 $W_{hh} = W_{zz} = W_{\theta\theta}$ は Fig. 9 に示してある。この計算は $A \rightarrow B$, $A \rightarrow C$, $A \rightarrow D$ および $E \rightarrow F$ についてなされたが、結果を Fig. 2, 3 に細い点線で示した。集中前 (B) および拡散波 (F) では波、船体運動とも予測値と実測値はほぼ完全に一致しており、(1), (2) 式の周波数応答関数が正しいことが確認されたと云える。

一方、集中後 (D) では各現象とも予測値と実測値は不一致である。これは波高の変移に関する非線型性を再確認するとともに、集中後の波の中での船体運動は、集中前の波の中での船体運動から予測できないことも新しく確認するものであろう。集中時 (C) のピッチ、ヒープでは予測値と実測値がほぼ一致している。これは Fig. 6 に示されているように集中時および集中後の波高の減衰は $\omega > 6$ で現われるが、Fig. 4 を見るとこの範囲での本船型の振幅比は小であるので、波高の減衰による船体運動振幅の減少は小であることに基因している。このように考えると D における船体運動での実測値と予測値の差は主として集中後の波の位相差の変化に基因していることが判る。

4.4.2 異なる現象の予測 模型船より前の位置に設置された波高計で実測される模型船によつて乱されない波高のタイムヒストリーから、模型船重心位置での船体運動のタイムヒストリーを予測することのように、離れた位置での入力と異なる現象の予測は (35), (36) 式のような関係で算出される。この計算を A 点の波高を入力

4.3.3 船体運動から波の予測

船体運動から波を予測することは、Fig. B の線型系の入力と出力を入れ換えることと同じであり、このような物理現象はそのままでは存在し得ない。一般に波を入力とし船体運動を出力とする場合には、Fig. 4 の振幅比特性に示されているように減衰系である。このことは逆の系を仮定するとその系は増幅系になることを意味している。特に正の系で減衰の甚だしい高周波域で著しい増幅作用があるということである。タイムヒストリーについて考えると、Fig. 2 に示されているように波を入力とし船体運動を出力と

とし B 点のヒーピングおよびピッチングを予測する場合 ($A \rightarrow B$) および $E-F$ について行なってみた。使用した重み関数 W_{hAZB} , $W_{hA\theta B}$ は Fig. 8 に示されているものである。

Fig. 12 にこの予測値と実測値を比較して示したが、予測精度は満足すべきものであることがわかる。4-1 の周波数応答の項で示された、拡散波中あるいは離れた 2 点がともに集中前の波の中にあれば、入力波高から離れた位置での船体運動との間にも線型系が成立することが、タイムヒストリーの関係で証明されたものと云えよう。実用上は、実測 $h_A(t)$, $Z_B(t)$, $\theta_B(t)$ から $G_{hBZB}(i\omega)$, $G_{hB\theta B}(i\omega)$ を求めるのが船型試験の目的である。いま証明された関係から、 h_A , θ_B , Z_B から直接求める $G_{hAZB}(i\omega)$, $G_{hA\theta B}(i\omega)$ における振幅比 $\bar{A}_{hAZB}$, $\bar{A}_{hA\theta B}$ は (15), (16) 式における $\bar{A}_{hZ}$, $\bar{A}_{h\theta}$ に等しいから、船体固有の特性としての振幅比が直ちに求まる。同様に (15)

(16) 式から位相差 $\phi_{hAZB} = \phi_{hZ} + \frac{\omega^2 x}{g}$, $\phi_{hA\theta B} = \phi_{h\theta} + \frac{\omega^2 x}{g}$ であるから、 $-\frac{\omega^2 x}{g}$ だけ修正すれば求める位相差 ϕ_{hZ} , $\phi_{h\theta}$ が得られる。

以上の場合、Fig. A, B の斜めの関係を使用して、 W_{hAZB} などによつて入力波高タイムヒストリーから予測船体運動タイムヒストリーを一挙に求めているが、Fig. A, B で、横→縦、縦→横と直角に回り道して求める方法が考えられる。

(a) $h_A \rightarrow h_B \rightarrow Z_B$

(27) 式によつて $h_A \rightarrow h_B$ の予測を行ない、得られた h_B の予測数列を使用して、(30) 式の $h_B \rightarrow Z_B$ の予測をする方法。

(b) $h_A \rightarrow Z_A \rightarrow Z_B$

(30) 式によつて $h_A \rightarrow Z_A$ を予測し、得られた Z_A の予測数列を使用して、(28) 式の $Z_A \rightarrow Z_B$ の予測をする方法。

(b) の方法における $h_A \rightarrow Z_A$ の計算は $h_A \rightarrow \theta_A$ の予測も含め Fig. 2, 3 にて既に計算済みであるが実測値とよく一致する。実測値を使用した $Z_A \rightarrow Z_B$ の予測も Fig. 2, 3 に示されているが、2 点間に集中時が存在しない場合には予測精度がよいことが判っている。したがって今回は計算を行なっていないが Z_A に算出数列を使用しても同じ結果を得るであろう。ちなみに、Fig. 2 の $Z_B(t)$, $\theta_B(t)$ の細い点線と Fig. 12 の予測点を比較するとよく一致する。

(a) の方法で、 $h_A \rightarrow h_B$, $h_A \rightarrow h_C$, $h_A \rightarrow h_D$ は Fig. 2, 3 に細い点線で記入済みである。この算出数列を使用して、 $h_B \rightarrow Z_B$, $h_C \rightarrow Z_C$, $h_D \rightarrow Z_D$ を予測した場合を Fig. 13 とした。この図の予測点は原理的には (b) 法による予測点に等しい、ここでは Fig. 2 の細い点線を (b) 法による予測値として代用して Fig. 13 の予測点と比較するとほぼ一致することがわかる。また当然のことであるが、Fig. 13 の $Z_B(t)$ の予測点は Fig. 12 の $Z_B(t)$ の予測点と一致した。

Fig. 13 から集中後においては集中前の波から予測した船体運動は実測と一致しないことがわかる。つまり (15), (16) 式の G_{hAZB} , $G_{hA\theta B}$ は集中前および拡散波にしか適用できないことが明らかになった。

以上のように、算出経路に関係なく予測値は当然等しくなるが、数値計算技術の面から考えると、波のタイムヒストリーの位置の移動が一番誤差を伴ない易いので位置の移動はピッチあるいはヒーブで行なうのがよい。離れた位置の波からピッチ、ヒーブを予測することは実用的価値に乏しいと思われるが、この算出精度は意外によい。この理由は重み関数 W_{hAZB} , $W_{hA\theta B}$ などは Fig. 8 に示されているように適度の時間帯を持ち適度の振動をしているので、 $\Delta\tau$ を小さくとも算出精度が期待できることにある。これに対し、位置移動の重み関数は Fig. 9 のように振幅が一定、時間が無限、時間と共に振動数が高くなることから、 $\Delta\tau$ を極めて小にしなければ特性を精度よく表現できない。従つて精度を高めるには莫大な数列になる欠点を持つている。波高の位置移動では高周波域まで精確に表現できていないと予測精度が落ちるのに対し、ピッチ、ヒーブではもともと高周波成分をカットした形になっているので波高に比し精度を上げやすい。同一位置での重み関数 W_{hZ} , $W_{h\theta}$ などでは $\tau=0$ 附近にパルス状波を持つ。このことは $\Delta\tau$ を小にせねばならないことを意味するが持続時間が短いので数値計算上は余り問題にならない。

5 結 言

波浪中における船体運動の定常応答としての周波数応答特性が、線型系の考え方を適用することによつて過渡的な水波中の実験から求められるのではないかと発想に基いて、前論文¹⁾ でまずこのような船型試験に適した

過渡的な水波の特性を検討し、今回その結果明らかにされた Transient Water Wave の特性を利用しつつ、船体停止時の正面向い波中の場合の Transient Water Wave による船型試験を試み、その実測値の解析を周波数領域、時間領域の2面から行なってきたが得られた結果を以下に要約する。

1) 拡散性の波、集中前の波では、波形の変移特性に関して、波高を入力としある距離(x)離れた位置の波高を出力とする線型系の適用が可能で、その線型系の振幅比は1であり位相差は $\omega^2 x/g$ である。ただし集中前の波を入力とし集中後の波を出力とするこのような線型系は成立しない(前論文の結果の再確認)。

2) 船体運動のタイムヒストリーの測定位置による変化(船体運動の変移特性)は1)に記した事実のみ原因があるので、拡散性の波、集中前の波の中における船体運動には波の変移特性の場合と全く同じ線型系が成立する。すなわち位置移動の重み関数は波でも船体運動でも同じものでよい。集中後の波の中での船体運動は1)と同様に集中前の波の中での船体運動を入力とした位置移動の線型系からは説明できない。

3) 同一位置での波高を入力とし船体運動を出力とする線型系は、その波が集中後の波であつても成立した。この系の振幅比および位相差は規則波中試験で求めた値と一致した。

4) Transient Water Wave 中の船型試験では生の実測値はタイムヒストリーのみで、与えられるので本論では線型系成立の仮定に立つタイムヒストリーの予測に関してさまざまな場合について特に詳しく検討したが、実際に周波数応答の場合で線型系が成立すると考えられる場合には予測されたタイムヒストリーは実測値によく一致した。

5) 使用する Transient Water Wave が集中性の波の場合には、波高計の設置位置および模型船の位置が共に集中前の波の状態にあるときに測定を行なわねばならない。

本論ではタイムヒストリーの検討に重点を置いたため航走中の実験結果の紹介を割愛したが、本論と同一模型を使用した本学での実験⁵⁾によると航走中の周波数応答関数の振幅比特性は規則波中の実験結果と一致する。これは Davis と Zarnick²⁾ の結論とも一致しているので、これらの結論と本論の結論とを併慮すれば Transient Water Wave 中の船型試験の有用性が立証されたと云えよう。今後、本法が広く実用されることを期待したいと思うが、一方大波高時の検討、大動揺時の検討、サージング、スウェーイングの影響、加速度の測定など研究課題は種々残されている。

本研究の実施にあたり、数値解析に関しては笠原和子助手、実験には宮川清助手の協力に負うところが多い。また、本論に使用した実験は昭和43年度卒業研究⁶⁾として大川豊君、村上喜宥君が行なつたものである。以上の諸君に心から謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 竹沢誠二、福原正彦、山下誠也：船型試験水槽で発生させた Transient Water Wave の特性について、日本造船学会論文集、124号、昭和43年12月
- 2) M.C. Davis, E.E. Zarnick: "Testing Ship Models in Transient Waves" 5th Symposium Naval Hydrodynamics, Sept. 1964, O.N.R., ACR-112
- 3) J.P. Breslin, D. Savitsky, S. Tsakonas: "Deterministic Evaluation of Motions of Marine Craft in Irregular Seas" 5th Symposium Naval Hydrodynamics, Sept. 1964, O.N.R., ACR-112
- 4) 山内保文：船の波浪中動揺応答の解析法について(その1)、造船協会論文集、109号、昭和36年6月
- 5) 清野宏文、早坂貞彦：Transient Wave 中の船体運動について、横浜国大造船工学科、昭和43年度卒業論文
- 6) 大川豊、村上喜宥：Transient Wave 中の船体運動解析と運動の予測について、横浜国大造船工学科、昭和43年度卒業論文