

(昭和 46 年 11 月日本造船学会秋季講演会において講演)

強制動揺法による横方向運動方程式 の係数の計測結果

正員 藤 井 齊* 正員 高 橋 雄*

Measurement of the Derivatives of Sway, Yaw and Roll Motions
by the Forced Oscillation Technique

by Hitoshi Fujii, *Member* Takeshi Takahashi, *Member*

Summary

As a step of improvement of the calculation of lateral motion (sway, yaw and roll) of a ship in waves, the coefficients of equations of motion were determined by the forced oscillation technique. Experiments made it possible to know the effects of frequency, advance speed and bilge keels on ship motions.

The experimental values were compared with the calculated values by the strip method. For the main terms of sway, yaw or roll, except roll damping term, the results show a fairly good agreement.

For the coupling terms of sway-yaw, yaw-roll or roll-sway, there are fair correspondences.

For the prediction of the roll damping term, a proper method of approximation which includes the effects of viscous damping, advance speed, bilge keels and frequency of motion should be developed.

1 は し が き

波浪中における船体の縦方向運動すなわち Heave, Pitch については、いわゆる Strip 法による計算の適用性が認められ、各所で計算プログラムが作成されて実用に供されつつある。まだ研究すべき事項が多く残されていて、一層の精密化が試みられているが、実用的見地からは一段落した観がある。現在同じ手法を用いた Sway, Yaw, Roll の横方向運動の計算法の確立あるいはその実用化について研究が進められているが、横方向運動については縦方向運動のように多くの実験データがないので、計算法の適用性について十分確認されたとはいえない状態にある。

理論計算法を実用に供するためには、運動方程式の組立てに従って a) 運動方程式の係数, b) 波強制力の項, c) 運動振幅 の各項目について、計算値を実験によって確認し理論計算法の修正を行なっていく必要がある。このためには、

項 目	試 験 方 法	水 槽
a) 運動方程式の係数の検討	平水中強制動揺試験	曳航水槽
b) 波強制力の項の検討	拘束模型による波強制力計測試験	耐航性能水槽
c) 運動振幅の検討	波浪中動揺試験	耐航性能水槽

の各種試験が必要であるが、長崎水槽では a) 項について検討を行なうために強制動揺試験装置を製作し、数船型について運動方程式の係数を実験的に求め、理論計算結果と比較してみたので、その概要を報告する。

* 三菱重工・長崎研究所

2 強制動揺試験装置

強制動揺試験を行なうためには、航走中の模型船に定められた周期で定められた振幅の Sway, Yaw, Roll あるいはそれらの連成運動を行なわせるための駆動機構、およびそのときの流体反力を計測するための検力機構を備えた試験装置が必要である。製作した強制動揺試験装置の概念図を Fig. 1 に示す。

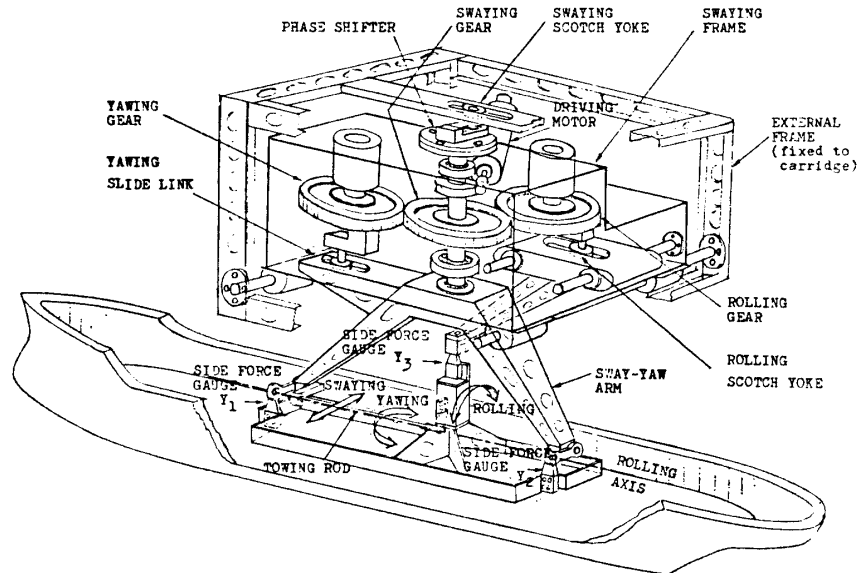


Fig. 1 Forced oscillation dynamometer of the lateral motions (sway, yaw, roll)

この装置は、曳引車に固定される外枠の中に左右に摺動する Swaying frame があり、その上に駆動用モーターおよび Sway, Yaw, Roll 用の3枚のギヤが入っている。それぞれのギヤには偏心機構が取付けられていて、Swaying frame の運動の上に Yaw あるいは Roll の運動を重ねることができる。Sway 用ギヤ軸の上部には位相設定板が取付けてあつて、Sway と Yaw あるいは Sway と Roll の位相を 15° 毎に変更することができる。流体力は3枚のゲージバネ Y_1, Y_2, Y_3 によつて横方向の力として計測される。したがつて Sway force, Yaw moment ならびに Roll moment はこれらの力を合成して求められる (Fig. 2 参照)。

$$\text{Sway force} \quad Y = Y_1 + Y_2 + Y_3$$

$$\text{Yaw moment} \quad N = Y_1 l_1 - Y_2 l_2$$

$$\text{Roll moment} \quad L = Y_3 l_3$$

なお、前後方向は Towing rod で拘束してある。

3 横方向強制動揺試験法

横方向運動 Sway, Yaw, Roll の連成運動の線形化された運動方程式を、高木⁴⁾の Strip 法にしたがつて次のような形に書いておく。

$$\begin{aligned} a_{11}\ddot{y} + a_{12}\dot{y} + a_{13}y + a_{14}\ddot{\psi} + a_{15}\dot{\psi} + a_{16}\psi + a_{17}\ddot{\phi} + a_{18}\dot{\phi} + a_{19}\phi &= Y \\ a_{21}\ddot{y} + a_{22}\dot{y} + a_{23}y + a_{24}\ddot{\psi} + a_{25}\dot{\psi} + a_{26}\psi + a_{27}\ddot{\phi} + a_{28}\dot{\phi} + a_{29}\phi &= N \\ a_{31}\ddot{y} + a_{32}\dot{y} + a_{33}y + a_{34}\ddot{\psi} + a_{35}\dot{\psi} + a_{36}\psi + a_{37}\ddot{\phi} + a_{38}\dot{\phi} + a_{39}\phi &= L \end{aligned}$$

第1式は Sway, 第2式は Yaw, 第3式は Roll の運動方程式, y, ψ, ϕ はそれぞれ Sway, Yaw, Roll の変位, Y, N, L はそれぞれ Sway force, Yaw moment, Roll moment である。

船体に既知の運動 y, ψ, ϕ を与えて、そのときの流体反力 Y, N, L を計測する強制動揺試験法により、運動方程式の係数 a_{ij} を実験的に定めることができる。ここでは与えるべき既知の運動として、現実の運動の基本と考えられる周期的正弦運動を与え、計測される流体反力を位相解析することによつて、加速度 (角加

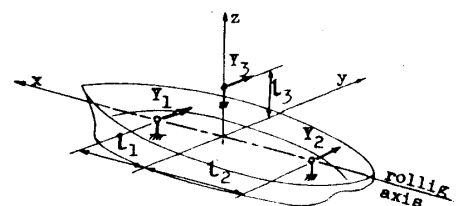


Fig. 2 Forces and levers

速度)に比例する項(慣性項), 速度(角速度)に比例する項(減衰項)を分離して, 運動方程式の係数を求めることとした。

a) Pure Sway 試験

船体中心線を直進前進方向に向けたまま重心を強制的に船幅方向に正弦運動 $y = y_A \sin \omega t$ させる。このときの流体反力を

$$Y = Y_A \sin(\omega t + \varepsilon_Y)$$

$$N = N_A \sin(\omega t + \varepsilon_N)$$

$$L = L_A \sin(\omega t + \varepsilon_L)$$

とすると, $\ddot{\psi} = \dot{\psi} = \psi = 0$, $\dot{\phi} = \phi = 0$ であるから, Sway 運動の主要項の係数 a_{11} , a_{12} および Yaw, Roll への連成項の係数 a_{21} , a_{22} , a_{31} , a_{32} は次のように与えられる。

$$a_{11} = -\frac{Y_A \cos \varepsilon_Y}{y_A \omega^2} : \text{Sway 見掛け質量}$$

$$a_{12} = \frac{Y_A \sin \varepsilon_Y}{y_A \omega} : \text{Sway 減衰力係数}$$

$$a_{21} = -\frac{a_{22}}{\omega^2} = -\frac{N_A \cos \varepsilon_N}{y_A \omega^2}, \quad a_{22} = \frac{N_A \sin \varepsilon_N}{y_A \omega} : \text{Sway-Yaw 連成項係数}$$

$$a_{31} = -\frac{L_A \cos \varepsilon_L}{y_A \omega^2}, \quad a_{32} = \frac{L_A \sin \varepsilon_L}{y_A \omega} : \text{Sway-Roll 連成項係数}$$

b) Pure Yaw 試験

空間重心軌跡を正弦波上に拘束し, 船体中心線方向が常にこの軌跡の接線となるように運動させる。船体運動は位相基準を合わせて, $\psi = \psi_A \cos \omega t$ とすると, $\dot{y} = \dot{y} = y = 0$, $\dot{\phi} = \phi = 0$ であるから, Yaw 運動の主要項の係数および Sway, Roll への連成項の係数は次のように与えられる。

$$a_{24} = -\frac{a_{25}}{\omega^2} = -\frac{N_A \sin \varepsilon_N}{\psi_A \omega^2}$$

: Yaw の見掛け慣性モーメント

$$a_{25} = -\frac{N_A \cos \varepsilon_N}{\psi_A \omega}$$

: Yaw の減衰モーメント係数

$$a_{14} = -\frac{Y_A \sin \varepsilon_Y}{\psi_A \omega^2}, \quad a_{15} = -\frac{Y_A \cos \varepsilon_Y}{\psi_A \omega}$$

: Yaw-Sway 連成項係数

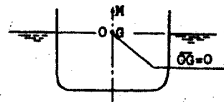
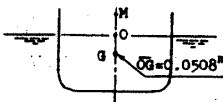
$$a_{34} = -\frac{L_A \sin \varepsilon_L}{\psi_A \omega^2}, \quad a_{35} = -\frac{L_A \cos \varepsilon_L}{\psi_A \omega}$$

: Yaw-Roll 連成項係数

c) Pure Roll 試験

船体中心線は直進前進方向を向けたまま, 船体を水面軸(0点)まわりに正弦的に Roll させる。 $\phi = \phi_A \sin \omega t$ とすると, $\dot{y} = \dot{y} = y = 0$, $\dot{\psi} = \dot{\psi} = \psi = 0$ であるから, Roll の主要項の係数, Sway, Yaw への連成項の係数は次のように与えられる。

Table 1 Characteristics of the tested models

Ship	Container ship	Tanker
Scale	1/59,333	1/103,333
Lpp	3.000 ^m	3.000 ^m
B	0.4464 ^m	0.4719 ^m
d	0.1632 ^m	0.1828 ^m
Δ	121.8 ^{kg}	220.6 ^{kg}
L.C.B.	-0.7385 ^m	0.0104 ^m
KM	0.1851 ^m	0.1917 ^m
GM	0.0219 ^m	0.0597 ^m
k_{22}/Lpp	0.2190	0.2323
k_{22}/B	0.3062	0.3108
Appendages	Bilge keels (with, without)	Bilge keels (with, without) Rudder
Rolling axis		

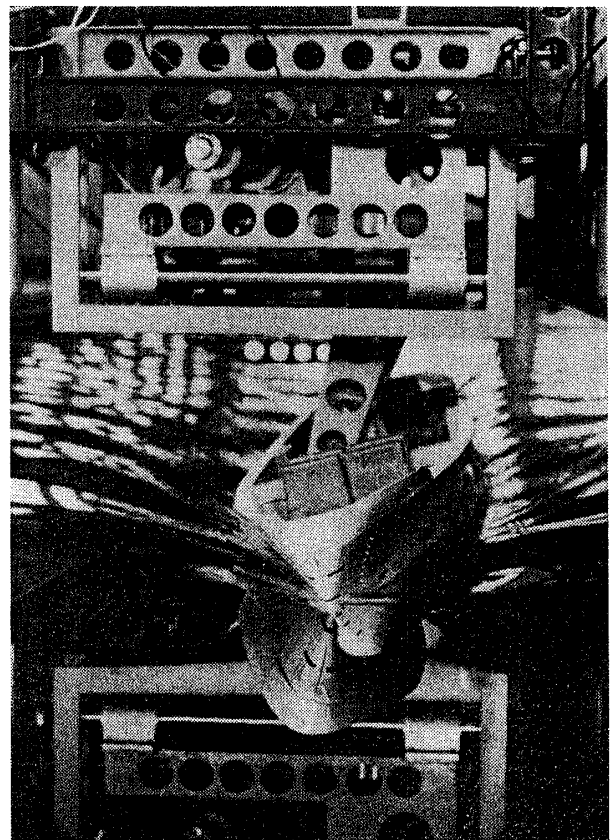


Fig. 3 Forced rolling test of a container ship model

$$\begin{aligned}
 a_{37} &= -\frac{L_A \cos \varepsilon_L}{\phi_A \omega^2} + \frac{a_{39}}{\omega^2} : \text{Roll の見掛け慣性モーメント} \\
 a_{38} &= \frac{L_A \sin \varepsilon_L}{\phi_A \omega} : \text{Roll の減衰モーメント係数} \\
 a_{17} &= -\frac{Y_A \cos \varepsilon_Y}{\phi_A \omega^2}, \quad a_{18} = \frac{Y_A \sin \varepsilon_Y}{\phi_A \omega} : \text{Roll-Sway 連成項係数} \\
 a_{27} - \frac{a_{29}}{\omega^2} &= -\frac{N_A \cos \varepsilon_N}{\phi_A \omega^2}, \quad a_{28} = \frac{N_A \sin \varepsilon_N}{\phi_A \omega} : \text{Roll-Yaw 連成項係数}
 \end{aligned}$$

4 水槽試験

4.1 供試模型

代表的な2種の船型すなわち荷型船型の代表としてコンテナ船, 肥大船型の代表としてタンカーを選び水槽試験を行なった。供試模型船の要目, 試験状態を Table 1 に示す。試験の目的の一つが Strip 法による計算値との対応を調べることにあるため, なるべく計算の仮定に近い状態で試験をすることとし, 裸殻抵抗状態とした。プロペラ作動の影響は別に調査する必要がある。

Bilge Keel は Rolling に対する影響が大きいため, これを調査するため Rolling 試験は Bilge Keel あり・なしの2状態について実施し比較することとした。

4.2 試験範囲

(1) 運動モード

Pure Sway, Pure Yaw, Pure Roll の3種を基本とした。Rolling 軸は重心を通る軸とする方が解析上都合がよく, さらに回転軸を静止水面0点に一致させる方が計算との対比を調べる上から都合がよい。普通は0点を回転軸としているが, タンカーではこのようにすると GM が小さくなり過ぎるので, 現実的な GM として, G 点まわりに Rolling させた。

(2) 運動周波数

波浪中における波との出会い周期から試験の周波数範囲が決められる。真横波としたときの $\lambda/L=0.5 \sim 5.0$ の範囲を基準とした。

(3) 運動振幅

Sway, Yaw の場合は Heave, Pitch の場合と同様, 動揺振幅に対する線形性がほぼ成立するものと考えられるので, 動揺振幅は小振幅の1種としたが, Roll については減衰に対する粘性の影響があり, 動揺振幅に対する非線形性が大きいので大振幅の場合を加え2種とした。

(4) 前進速度

Strip 法による計算結果との対比を調べる上で基本となる $F_n=0$ のほかに, 前進速度影響を調べるため数点 F_n を変更した。

コンテナ船型についての強制 Rolling 試験の状況写真を Fig. 3 に示す。

5 試験結果

タンカー船型についての試験結果を Fig. 4 以下に示す。Roll の見掛け慣性モーメント a_{37} および Roll の減衰モーメント係数 a_{38} については, コンテナ船型の結果も示す。

5.1 試験結果の表示法

試験結果は次のように無次元化して示す。

(1) 運動方程式の係数

$$\begin{aligned}
 \hat{a}_{11} &= \frac{a_{11}}{\rho V} & \hat{a}_{24} &= \frac{a_{24}}{\rho V L^2} & \hat{a}_{37} &= \frac{a_{37}}{\rho V B^2} \\
 \hat{a}_{12} &= \frac{a_{12}}{\rho V} \sqrt{\frac{B}{2g}} & \hat{a}_{25} &= \frac{a_{25}}{\rho V L^2} \sqrt{\frac{B}{2g}} & \hat{a}_{38} &= \frac{a_{38}}{\rho V B^2} \sqrt{\frac{B}{2g}} \\
 \hat{a}_{14}, \hat{a}_{21} &= \frac{a_{14}, a_{21}}{\rho V L} & \hat{a}_{27}, \hat{a}_{34} &= \frac{a_{27}, a_{34}}{\rho V L B} & \hat{a}_{17}, \hat{a}_{31} &= \frac{a_{17}, a_{31}}{\rho V B}
 \end{aligned}$$

$$\hat{a}_{15}, \hat{a}_{22} = -\frac{a_{15}, a_{22}}{\rho \nabla L} \sqrt{\frac{B}{2g}} \quad \hat{a}_{28}, \hat{a}_{35} = -\frac{a_{28}, a_{35}}{\rho \nabla LB} \sqrt{\frac{B}{2g}} \quad \hat{a}_{18}, \hat{a}_{32} = -\frac{a_{18}, a_{32}}{\rho \nabla B} \sqrt{\frac{B}{2g}}$$

$$\hat{a}_{23} = -\frac{a_{23}}{\rho g \nabla} \cdot \frac{B}{2L} \quad \hat{a}_{29} = -\frac{a_{29}}{\rho g \nabla (2L)}$$

(2) 運動の円周波数

$$\hat{\omega} = \omega \sqrt{\frac{B}{2g}}$$

(3) 前進速度

$$F_n = \frac{U}{\sqrt{Lg}}$$

ただし L : 船長 (L_{PP}) ρ : 流体密度
 B : 船幅 g : 重力の加速度
 ∇ : 排水容積 U : 前進速度

5.2 計算値と実験値の比較

高木の Strip 法による各係数 a_{ij} の値を求め、強制動揺試験で得られた値とを比較してみる。
 a_{ij} は次のように与えられている⁴⁾。

$$\begin{aligned} a_{11} &= M_0 + \int m_y dx \\ a_{12} &= \int N_y dx, \quad a_{13} = 0 \\ a_{14} &= \int m_y (x - x_G) dx + \frac{U}{\omega^2} \int N_y dx \\ a_{15} &= \int N_y (x - x_G) dx - U \int m_y dx, \quad a_{16} = 0 \\ a_{17} &= \int m_y (l_y - \overline{OG}) dx \\ a_{18} &= \int N_y (l_W - \overline{OG}) dx, \quad a_{19} = 0 \\ a_{21} &= \int m_y (x - x_G) dx \\ a_{22} &= \int N_y (x - x_G) dx + U \int m_y dx \\ a_{23} &= U \int N_y dx \\ a_{24} &= I_{zz} + \int m_y (x - x_G)^2 dx + \frac{U}{\omega^2} \int N_y (x - x_G) dx \\ a_{25} &= \int N_y (x - x_G)^2 dx + \frac{U^2}{\omega^2} \int N_y dx \\ a_{26} &= U \int N_y (x - x_G) dx - U^2 \int m_y dx \\ a_{27} &= \int m_y (l_y - \overline{OG}) (x - x_G) dx \\ a_{28} &= \int N_y (l_W - \overline{OG}) (x - x_G) dx + U \int m_y (l_y - \overline{OG}) dx \\ a_{29} &= U \int N_y (l_W - \overline{OG}) dx \\ a_{31} &= \int m_y (l_y - \overline{OG}) dx \\ a_{32} &= \int N_y (l_W - \overline{OG}) dx, \quad a_{33} = 0 \end{aligned}$$

$$a_{34} = \int m_y (l_y - \overline{OG}) (x - x_G) dx + \frac{U}{\omega^2} \int N_y (l_W - \overline{OG}) dx$$

$$a_{35} = \int N_y (l_W - \overline{OG}) (x - x_G) dx - U \int m_y (l_y - \overline{OG}) dx,$$

$$a_{36} = 0$$

$$a_{37} = I_{xx} + \int (m_y l_y l_\phi - 2\overline{OG} m_y l_y + \overline{OG}^2 m_y) dx$$

$$a_{38} = \int N_y (l_W - \overline{OG})^2 dx$$

$$a_{39} = M_0 g \cdot GM$$

ただし

M_0 : 船の質量

I_{zz} : z 軸まわりの質量慣性モーメント

I_{xx} : x 軸

x_G : 艀と重心の距離

l_W : 減衰モーメントレバー

m_y : 断面の付加質量

N_y : 断面の減衰力係数

l_y : 付加質量モーメントレバー

l_ϕ : "

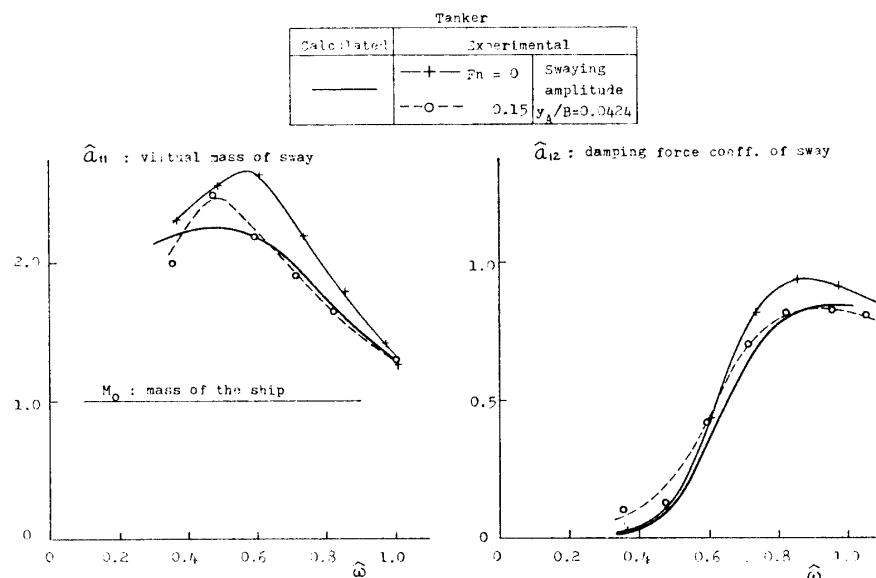


Fig. 4 Sway main terms

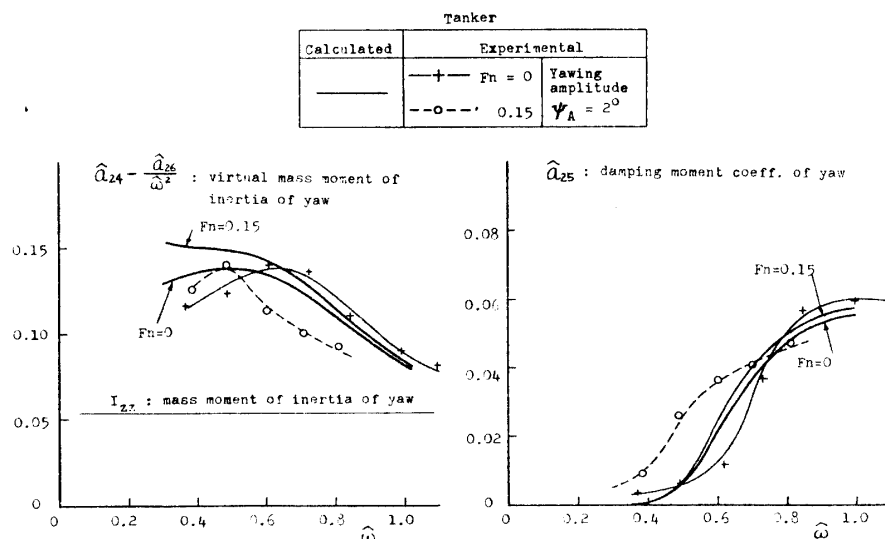


Fig. 5 Yaw main terms

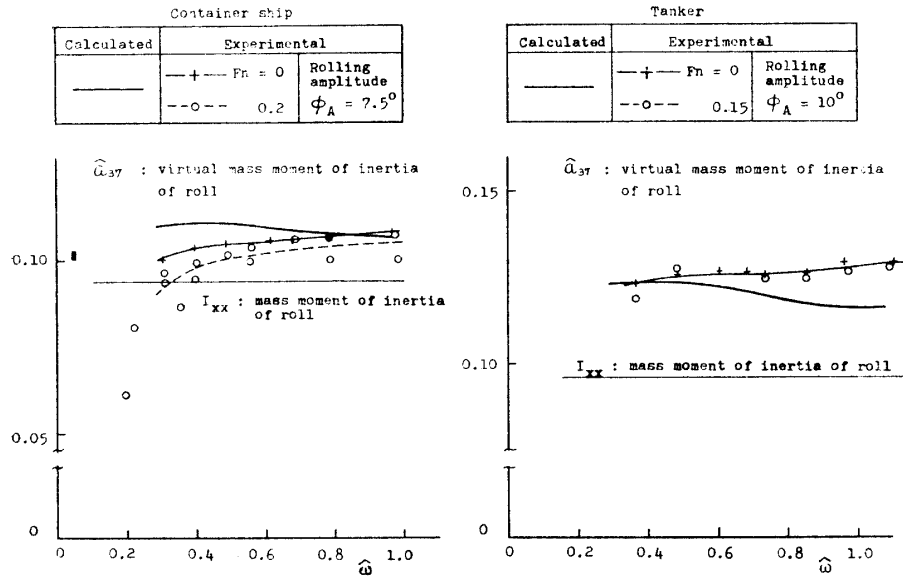


Fig. 6 Roll main terms (1)

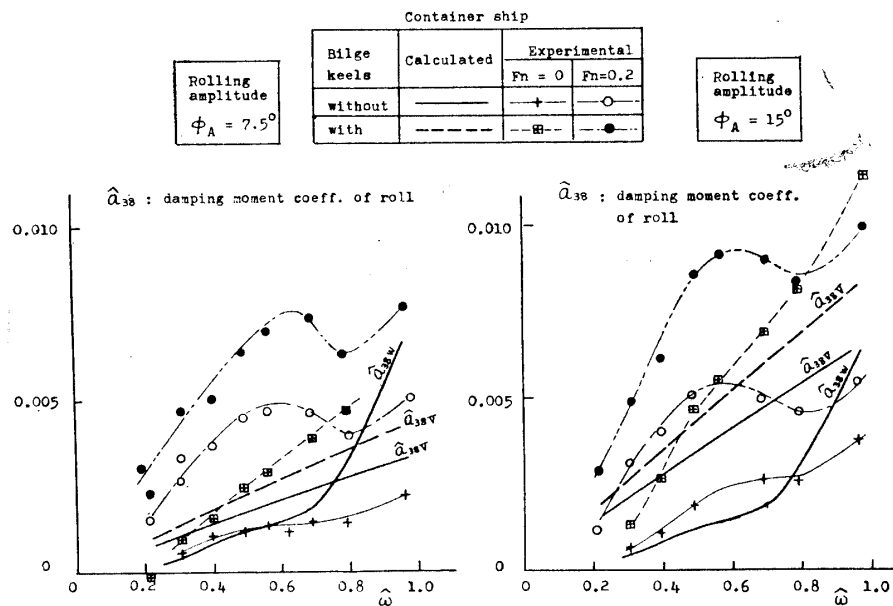


Fig. 7 Roll main terms (2)

(1) Sway 主要項 (Fig. 4)

a_{11} の計算値はほぼ実験値に一致している。実験値には前進速度影響が認められ速度とともに付加質量が減少する傾向があるが、その量は全量に比べて小さいので修正の必要はないと考えられる。

a_{12} の計算値は実験値とよく一致しているが、実験値には前進速度影響が見られるので、田才の方法あるいは非定常翼理論の応用により修正した方がよいようである。

(2) Yaw の主要項 (Fig. 5)

$a_{24} - a_{26}/\omega^2$ の計算値はほぼ実験値と一致している。 a_{11} ほどには一致度が良くないのは、 $(x - x_G)^2$ により 3 次元影響や船首尾部の Lewis 断面との不一致などの端部影響が強調されるためであろう。

a_{25} は a_{12} と同様ほとんど造波減衰といつてよい。前進速度影響が比較的大きいので考慮すべきである。

(3) Roll の主要項 (Fig. 6, 7, 8)

a_{37} の計算値はほぼ実験値に合っている。実験値と多少の差が見られるが a_{37} 全体に占める割合は小さい。

a_{38} は最も問題の多い項である。Roll に対する造波減衰は Linear potential theory で計算されるが、これを

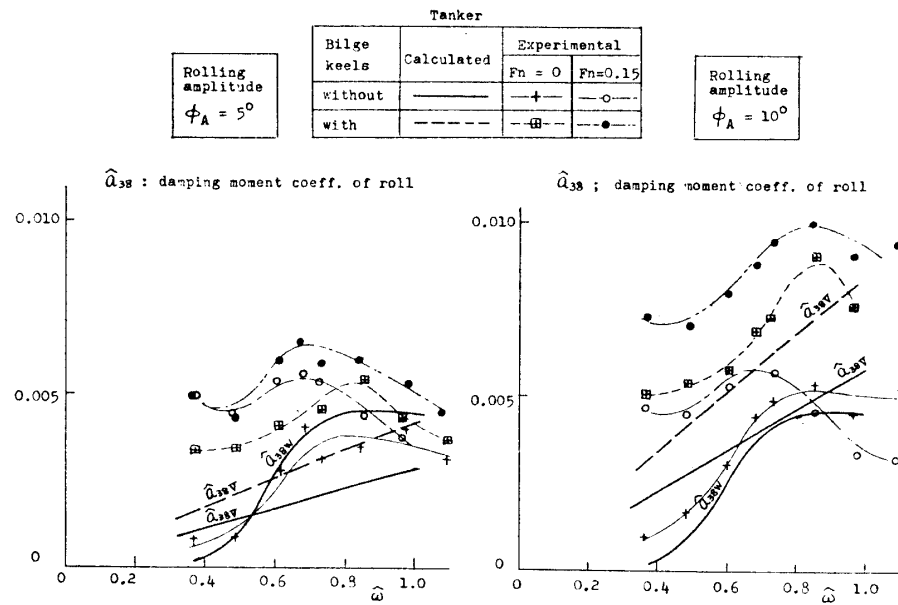


Fig. 8 Roll main terms (3)

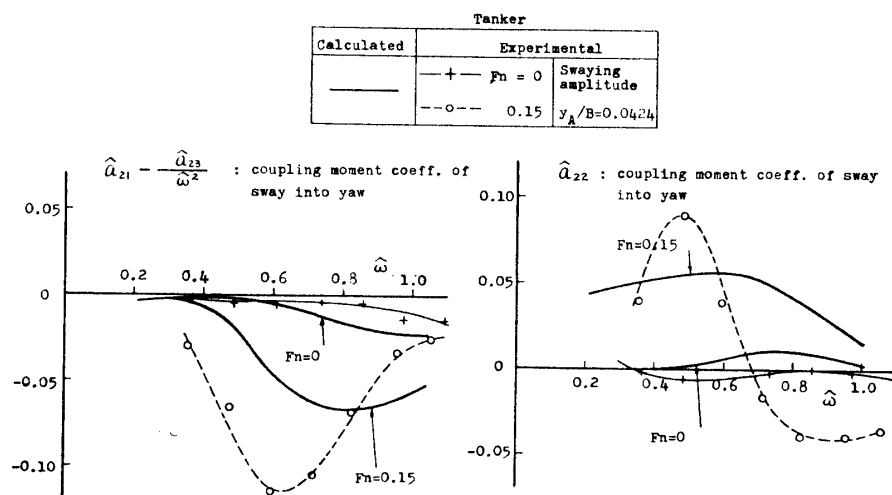
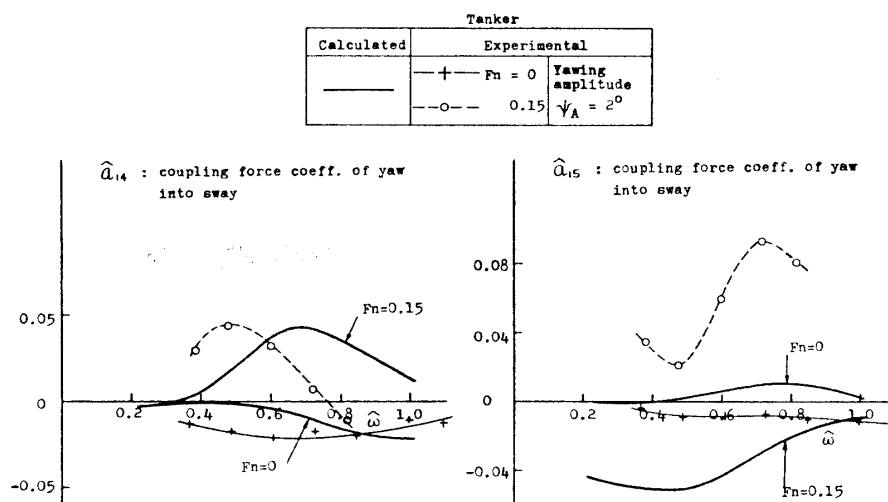


Fig. 9 Sway-yaw coupling terms

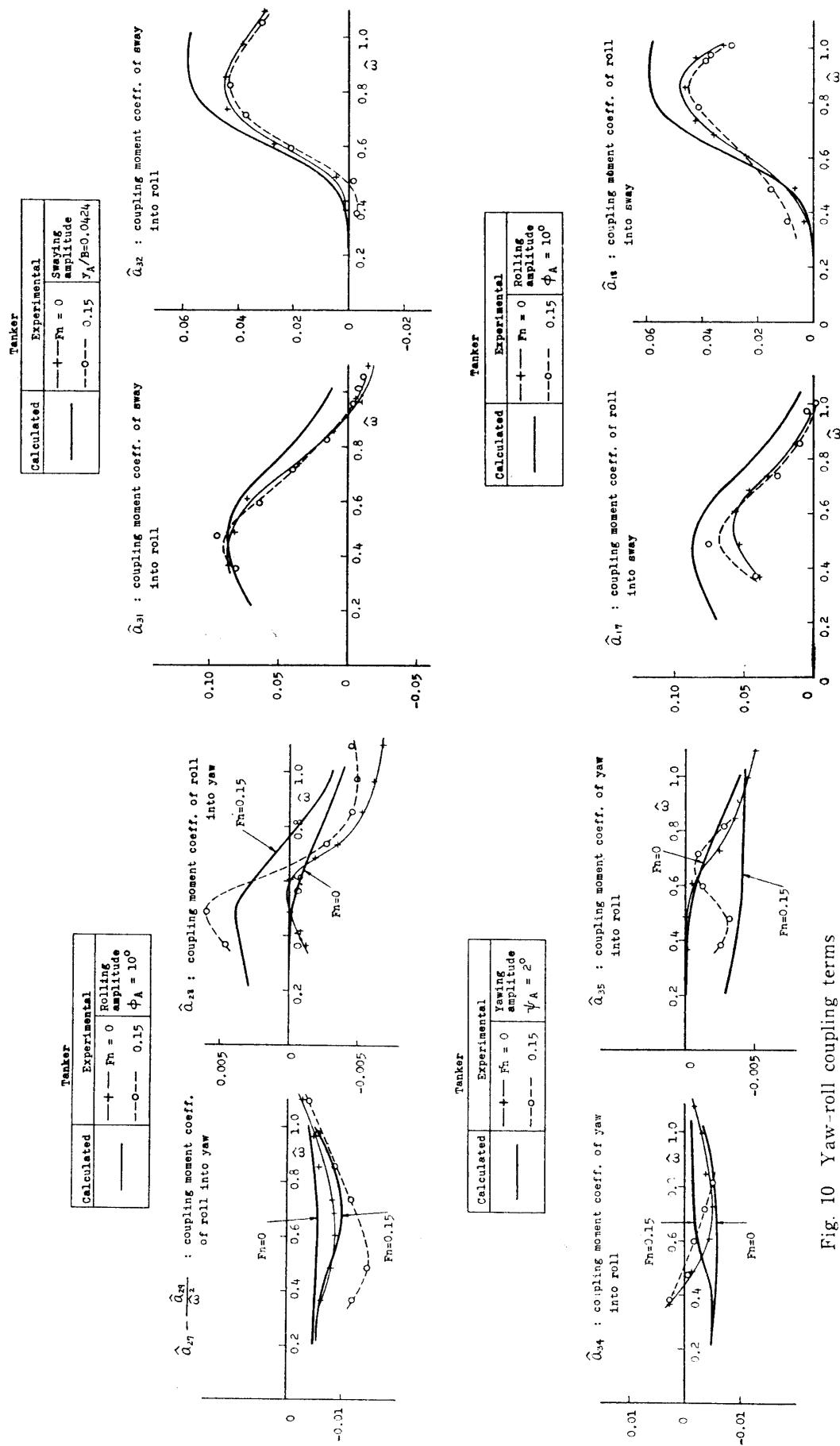


Fig. 11 Roll-sway coupling terms

Fig. 10 Yaw-roll coupling terms

そのまま用いると一般に Rolling angle が過少に計算される。また非線形性も大きいので何らかの形で粘性影響を取り入れる必要があり、これに前進速度影響まで含めた合理的な Roll 減衰モーメントを求めることが必要である。

ここでは参考値として、

i) Strip 法で計算される造波減衰モーメント係数

$$a_{38W} = \int N_v (l_W - OG)^2 dx$$

および

ii) N 係数から推定される粘性減衰モーメント係数

$$a_{38V} = \frac{2}{\pi} \omega \phi_A \cdot a_{37} \cdot b$$

$$\text{ただし} \quad N = \frac{4\theta}{\theta_m^2} = \frac{a\theta_m + b\theta_m^2}{\theta_m^2} = \frac{a}{\theta_m} + b$$

とおき、 b 係数について田才の方法⁴⁾に従い周波数の影響を考慮した。

の両者を示しておいた。

(4) 連成項 (Fig. 9, 10, 11)

Sway-Yaw 連成項の計算値は実験値とかなり大幅に異なっている。連成項の速度影響項については、いわゆる OSM (Ordinary Strip Method) では対称性に欠けているところがあるが、高木の方法による Strip 法、あるいは, Salvesen, Tuck and Faltinsen による Strip 法⁶⁾では、係数間に (反) 対称性があり、実験結果から見てもこれを考慮すべきと判断される。例えば OSM では a_{23} は存在しないが、高木の方法に従って a_{21} に対する速度影響項として a_{23} を考慮すると、かなり実験値に近づく。

また Sway-Roll 連成項においては、計算上は $a_{17} = a_{31}$, $a_{18} = a_{32}$ であるが、実験上は必ずしもこの関係が成立していない。

6 あ と が き

斜波中の横方向運動計算プログラムを実用化することを目的として、現在運動関係の研究で最も有力な手段の一つと考えられている強制動揺試験法を用い、横方向運動 Sway, Yaw, Roll について実験的に研究を行なった。この結果を Strip 法による計算値と比較して、

- 1) 主要項については Roll 減衰モーメントの係数 a_{38} 以外は、Strip 法による値を用いてもほぼ満足すべき値の得られること。
- 2) a_{38} については、造波、粘性、前進速度影響を含んだ合理的な計算法を求める必要のあること。
- 3) 連成項は $F_n = 0$ ではほぼ実験値に近い値を得ることができるが、前進速度影響についてはまだ検討すべき点が多いこと。

などがわかった。

運動方程式の右辺の波強制力の項の計算法についても同様の確認を行ない、計算法を改良して行く必要があると考えられる。

最後に、ご指導ご助言を賜った九州大学福田教授に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 田才福造：“斜波中の Sway, Yaw, Roll の運動について” 西部造船会会報 No. 32 (1966)
- 2) 田才福造：“Oblique Wave 中の Sway, Yaw, Roll に関するメモ (I)”, 西部性能委員会 (25) 資料 (1965)
- 3) G. Van Leeuwen: “The Lateral Damping and Added Mass of Horizontal Oscillating Ship Model” TNO Report No. 65 S (1964)
- 4) 田才福造：“Short Crested Wave 中における Sway, Yaw, Roll の運動について” JTTC 第2部会資料 (1971)
- 5) J. H. Vugts: “The Hydrodynamic Coefficient for Swaying, Heaving and Rolling Cylinders in a Free Surface” ISP Vol. 15, No. 167 (1968)
- 6) Nils Salvesen, E. O. Tuck, Odd Faltinsen: “Ship Motions and Sea Loads” SNAME (1970)