

## 風と波が併存する場合の船体運動：その1：船体傾斜と漂流速度

慎, 燦益  
長崎総合科学大学工学部：助教授

稲田, 勝  
九州大学応用力学研究所：文部技官

<https://doi.org/10.15017/4743678>

---

出版情報：応用力学研究所所報. 57, pp.545-561, 1982-10. 九州大学応用力学研究所  
バージョン：  
権利関係：



## 風と波が併存する場合の船体運動（その1） —船体傾斜と漂流速度—

慎 燦 益\* 稲 田 勝†  
(大楠 丹紹介)

### 概 要

船の安全性を論ずる場合、風波浪中での船の運動特性を明らかにすることは大変重要である。波浪中の船が横風をうけると、場合によっては大角度横傾斜状態で運動を強いられ危険な状態となる。しかし、現在、風と波が併存する場合の船体運動を合理的に推定する方法はない。本論文ではこの問題の基礎的段階として、送風装置により水面上に定常風を発生させ、そのとき船体に働く風圧力およびその着力点と、静水面上で船を横方向へ曳行するときの横抵抗とその着力点を計測し、それらの結果を用いて、風と波が併存する場合の船体傾斜と漂流速度を推定する方法について示した。

**Key words:** Wind force, Inclined angle of ships, Drifting velocity of ships.

### 1. 緒 言

海洋を航行する船は風波浪によって動揺をするが、激しい波浪中では大きな運動を余儀なくされたり、強い横風をうける場合は大角度で傾斜したままの運動を強いられる。このような運動状態では甲板上への海水打込みや荷崩れ等が起りやすく、場合によっては復原力喪失のため転覆、沈没に至ることさえある。したがって波浪中あるいは風が伴うときの船の運動を論ずることは船の安全性を考える場合に大変重要である。

船の転覆現象と直接大きな関わりをもつ波浪中の横運動、特に横揺れは W. Froude<sup>1)</sup> 以来多くの研究が行われており、その結果現在では大角度横揺れを除けばストリップ法<sup>2)</sup> によって比較的良好にその運動特性が推定できる。

一方、船の運動に及ぼす風の影響についても多くの研究がある。これらの研究の中で、岡田<sup>3)</sup> および菱田他<sup>4)</sup> は水面上の船体に働く風圧力および風圧モーメントを用いて船の安全性を論じている。定兼<sup>5)</sup> は風洞に波と船の模型を置いて模型船まわりの風圧の特性を調べている。小林<sup>6)</sup> および著者<sup>7)8)9)</sup> は一定の傾斜角で風圧モーメントと復原モーメントが釣合っていると仮定して風による傾斜状態の船の運動を論じており、更に、同状態における甲板上への海水打込みについても考察している<sup>10)11)</sup>。田宮<sup>12)</sup>、田才<sup>13)</sup>、猿田他<sup>14)</sup> は波浪中で運動している船に直接風をあて、そのときの運動特性を調べている。

\* 長崎総合科学大学講師工学部船舶工学科

† 九州大学応用力学研究所文部技官

風と船の転覆の関係を直接論じた研究もある。田宮他<sup>15)</sup>は風による定常傾斜モーメントに等しいモーメントを船体を与え、田宮<sup>16)17)18)</sup>は模型船に直接風をあて転覆条件と限界を求めている。

以上の研究結果により、船体運動および転覆現象に及ぼす風の影響は非常に大きく、重要な問題であることがわかる。しかしながら、現段階において、風と波とが併存する場合の船体運動を説明する合理的な方法はない。

本論では、風と波が併存する場合の船体運動（その1）として、水面上の船体に働く風圧力および風圧モーメントと、静水中で船を横方向へ曳行するときの横方向抵抗および定常傾斜モーメントを求める実験方法、並びに実験結果を用いて風と波が併存する場合の船体傾斜と漂流速度を推定する方法について論ずる。今後、波浪中で運動する船に直接風が作用する場合の流体力に及ぼす風の影響について調べ、その結果から運動特性を推定し、風と波が併存する場合の船体運動を明らかにしたい。

## 2. 座標系および諸定義

座標系を図1のように定める。すなわち、 $O-xyz$ は、横漂流する船と一緒に、平均漂流速度  $v_0$  で  $y$  方向に移動する座標系であり、 $x$  軸は船の平均位置と一致し、 $z$  軸は鉛直下向きに、 $xy$  平面は静止自由表面に一致しているものとする。また、 $O-x_1y_1z_1$  は船体固定座標で、 $z_1$  軸が船の中心線に一致し、上向きを正とする。

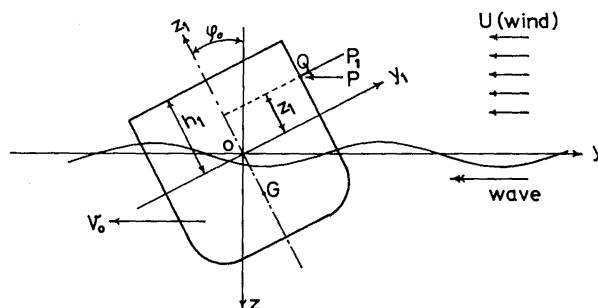


図 1 座 標 系

入射する表面波を  $\zeta = \zeta_A \cos(Ky + \omega_e t)$  とおく。但し、 $\zeta_A$  = 波振幅、 $\omega_e$  = 出会円振動数 =  $\omega(1 - v_0/g)$

風速を  $U$  とすれば、船は  $\varphi_0$  の傾斜角で傾斜した状態で、風と波とによって動揺しながら横漂流しているとする。このときの横傾斜角  $\varphi_0$  は、時計まわりを正とする。

図1で、 $y_1$  軸上の  $z_1$  の高さにある風上側の船側点  $Q$  点に働く風圧  $P_1$  は次式によって与えられる。

$$P_1 = \frac{1}{2} \rho_w C_D (U_1 - u_1) |U_1 - u_1| \quad (1)$$

但し、 $\rho_w$  = 空気密度、 $C_D$  = 抗力係数、(1) 式の  $U_1$  は船体側面に直角な風速成分で、平均的に、

$$U_1 = U \cos \varphi_0 \quad (2)$$

である。また、 $u_1$  は船体動揺による  $Q$  点の  $y$  方向の速度  $u$  の船側に直角な速度成分であり、

$$u = \left\{ (\overline{OG} + z_1) \cos \varphi_0 - \frac{B}{2} \sin \varphi_0 \right\} \dot{\varphi} + \dot{y} \quad (3)$$

$$u_1 = u \cos \varphi_0 \quad (4)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} \varphi' &= \varphi_0 + \varphi \\ &= \varphi_0 + \varphi_A \cos(\omega_e t - \varepsilon_\varphi) \\ y &= y_A \cos(\omega_e t - \varepsilon_y) \\ z &= z_A \cos(\omega_e t - \varepsilon_z) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

とおく。但し、 $B$  は船幅、 $\varphi_A, y_A, z_A$  および  $\varepsilon_\varphi, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  は横揺れ、左右揺れ、上下揺れの振幅および位相、 $\overline{OG}$  は  $G$  が水面下にある場合が正である。

### 3. 風圧力および風圧モーメント

船の乾舷を  $f(x)$ 、上部構造物の高さを  $h(x)$  とし、

$$f(x) + h(x) = h_1(x) \quad (6)$$

とおけば、 $h_1(x)$  は船の長さ方向の任意の位置  $x$  における  $x_1 y_1$  面上の高さを表わす。

風速  $U$  は、 $z$  方向に変化するが、一様分布と仮定して計算する。

$Q$  点での船側に直角方向の相対風速は、

$$\begin{aligned} U_1 - u_1 &= \left[ U - \left\{ (\overline{OG} + z_1) \cos \varphi_0 - \frac{B}{2} \sin \varphi_0 \right\} \dot{\varphi} - \dot{y} \right] \cos \varphi_0 \\ &= \left[ U + (\overline{OG} + z_1) \varphi_A \omega_e \cos \varphi_0 \sin(\omega_e t - \varepsilon_\varphi) \right. \\ &\quad \left. - \frac{B}{2} \varphi_A \omega_e \sin \varphi_0 \sin(\omega_e t - \varepsilon_\varphi) \right. \\ &\quad \left. + y_A \omega_e \sin(\omega_e t - \varepsilon_y) \right] \cos \varphi_0 \end{aligned} \quad (7)$$

風の影響は風速が大きく、 $U_1 \gg u_1$  の場合が重要である。このときは、

$$(U_1 - u_1) |U_1 - u_1| = U_1^2 - 2 U_1 u_1 + u_1^2 \doteq U_1^2 - 2 U_1 u_1 \quad (8)$$

であるから (7) 式を用いれば (8) 式は次式のようになる。

$$\begin{aligned} (U_1 - u_1) |U_1 - u_1| &= [U^2 + 2 U (\overline{OG} + z_1) \varphi_A \omega_e \cos \varphi_0 \sin(\omega_e t - \varepsilon_\varphi) \\ &\quad - U B \varphi_A \omega_e \sin \varphi_0 \sin(\omega_e t - \varepsilon_\varphi) \\ &\quad + 2 U y_A \omega_e \sin(\omega_e t - \varepsilon_y)] \cos^2 \varphi_0 \end{aligned} \quad (9)$$

(9) 式を用いると (1) 式の圧力  $P_1$  は、

$$P_1 = \frac{1}{2} \rho_w C_D [U^2 + 2 U (\overline{OG} + z_1) \varphi_A \omega_e \cos \varphi_0 \sin(\omega_e t - \varepsilon_\varphi)$$

$$\begin{aligned}
 & -UB \varphi_A \omega_e \sin \varphi_0 \sin(\omega_e t - \varepsilon_\varphi) \\
 & + 2U y_A \omega_e \sin(\omega_e t - \varepsilon_y)] \cos^2 \varphi_0
 \end{aligned} \quad (10)$$

船体傾斜側面の  $Q$  点に働く風圧力  $f_{y1}$  は,  $P_1$  が側面に直角に働くので,

$$f_{y1} = - \int_{h_2}^{h_1} P_1 dz_1 \quad (11)$$

但し, 
$$h_2 = z + \frac{B}{2} \varphi' - \zeta$$

で得られる.

したがって, 風速  $U$  で, 横傾斜角  $\varphi_0$  で釣合っているとき,  $Q$  点に働く  $y$  方向の風圧力  $f_y$  は, (11) 式を用いて次式で得られる.

$$f_y = - \int_{h_2}^{h_1} P_1 dz_1 \cos \varphi_0 \quad (12)$$

(10) 式を (12) 式に代入して, 風圧力  $f_y$  を求めると,

$$\begin{aligned}
 f_y = & \frac{1}{2} \rho_w C_D \left[ U^2 \left( h_1 - z - \frac{B}{2} \varphi_0 - \frac{B}{2} \varphi + \zeta \right) \right. \\
 & + 2U \left( h_1 - z - \frac{B}{2} \varphi_0 - \frac{B}{2} \varphi + \zeta \right) \left\{ \overline{OG} + \frac{1}{2} \left( h_1 + z + \frac{B}{2} \varphi_0 + \frac{B}{2} \varphi - \zeta \right) \right\} \\
 & \times \varphi_A \omega_e \cos \varphi_0 \sin(\omega_e t - \varepsilon_\varphi) \\
 & - UB \left( h_1 - z - \frac{B}{2} \varphi_0 - \frac{B}{2} \varphi + \zeta \right) \varphi_A \omega_e \sin \varphi_0 \sin(\omega_e t - \varepsilon_\varphi) \\
 & \left. + 2U \left( h_1 - z - \frac{B}{2} \varphi_0 - \frac{B}{2} \varphi + \zeta \right) y_A \omega_e \sin(\omega_e t - \varepsilon_y) \right] \cos^3 \varphi_0
 \end{aligned} \quad (13)$$

となる. ここで,  $y, z, \varphi, \varphi_0$  および  $\zeta$  は 1 次の微小量であり, (13) 式中の 2 次以上の微小量を省略すると,

$$\begin{aligned}
 f_y = & -\frac{1}{2} \rho_w C_D \left[ U^2 \left( h_1 - \frac{B}{2} \varphi_0 \right) - U^2 \left\{ z_A \cos(\omega_e t - \varepsilon_z) \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{B}{2} \varphi_A \cos(\omega_e t - \varepsilon_\varphi) - \zeta_A \cos \left( K \frac{B}{2} + \omega_e t \right) \right\} \right. \\
 & + 2U h_1 \left( \overline{OG} + \frac{h_1}{2} \right) \varphi_A \omega_e \cos \varphi_0 \sin(\omega_e t - \varepsilon_\varphi) \\
 & \left. + 2U h_1 y_A \omega_e \sin(\omega_e t - \varepsilon_y) \right] \cos^3 \varphi_0
 \end{aligned}$$

$f_y$  を次式のようにおく.

$$\begin{aligned}
f_y = & -\frac{1}{2} \rho_w C_D U^2 \left( h_1 - \frac{B}{2} \varphi_0 \right) \cos^3 \varphi_0 \\
& + \frac{1}{2} \rho_w C_D U^2 \overline{D} \cos^3 \varphi_0 \cos(\omega_e t - \delta)
\end{aligned} \quad (14)$$

但し,

$$\begin{aligned}
\overline{D} \cos \delta = & z_A \cos \varepsilon_z + \frac{B}{2} \varphi_A \cos \varepsilon_\varphi - \zeta_A \cos K \frac{B}{2} \\
& + \frac{2h_1}{U} \left\{ \left( \overline{OG} + \frac{h_1}{2} \right) \varphi_A \omega_e \cos \varphi_0 \sin \varepsilon_\varphi + y_A \omega_e \sin \varepsilon_y \right\} \\
\overline{D} \sin \delta = & z_A \sin \varepsilon_z + \frac{B}{2} \varphi_A \sin \varepsilon_\varphi + \zeta_A \sin K \frac{B}{2} \\
& - \frac{2h_1}{U} \left\{ \left( \overline{OG} + \frac{h_1}{2} \right) \varphi_A \omega_e \cos \varphi_0 \cos \varepsilon_\varphi + y_A \omega_e \cos \varepsilon_y \right\}
\end{aligned} \quad (15)$$

船体に働く  $y$  方向の風圧力  $\overline{F}_y$  は,

$$\overline{F}_y = \int_0^L f_y dx \quad (16)$$

である。ここで,

$$\int_0^L h_1 dx / L = h_e \quad (17)$$

但し,  $L$  は船長

を用い,  $C_D$  は  $x$  に無関係に一定であると仮定し, (14), (15) 式中の  $h_1$  を  $h_e$  でおきかえれば,  $\overline{F}_y$  は, 近似的に次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
\overline{F}_y \doteq & -\frac{1}{2} \rho_w C_D U^2 L \left( h_e - \frac{B}{2} \varphi_0 \right) \cos^3 \varphi_0 \\
& + \frac{1}{2} \rho_w C_D U^2 \overline{DL} \cos^3 \varphi_0 \cos(\omega_e t - \delta)
\end{aligned} \quad (18)$$

次に, 重心  $G$  まわりの風圧モーメント,

$$m_\varphi = - \int_{h_2}^{h_1} P_1 (\overline{OG} + z_1) dz_1 \quad (19)$$

を求める。(10) 式の  $P_1$  を (19) 式に代入し,  $m_\varphi$  を求め,  $f_y$  と同様 2 次以上の微小量を省略すると,

$$\begin{aligned}
m_y \doteq & -\frac{1}{2} \rho_w C_D \left( \overline{OG} + \frac{h_1}{2} \right) \left[ \left( h_1 - z - \frac{B}{2} \varphi_0 - \frac{B}{2} \varphi + \zeta \right) U^2 \right. \\
& \left. + 2 U h_1 \left( \overline{OG} + \frac{h_1}{2} \right) \varphi_A \omega_e \cos \varphi_0 \sin(\omega_e t - \varepsilon_\varphi) \right]
\end{aligned}$$

$$+2Uh_1y_A\omega_e\sin(\omega_e t-\varepsilon_y)\Big]\cos^2\varphi_0 \quad (20)$$

(20) 式は, (15) 式を用いて次式のように表わすことができる.

$$\begin{aligned} m_\varphi \doteq & -\frac{1}{2}\rho_w C_D U^2 \left(h_1 - \frac{B}{2}\varphi_0\right) \left(\overline{OG} + \frac{h_1}{2}\right) \cos^2\varphi_0 \\ & + \frac{1}{2}\rho_w C_D U^2 \overline{D} \left(\overline{OG} + \frac{h_1}{2}\right) \cos^2\varphi_0 \cos(\omega_e t - \delta) \end{aligned} \quad (21)$$

$\overline{F}_y$  の場合と同様に  $C_D$  を一定とし,  $h_e$  を用いれば, 風圧力によって船全体に働くモーメント  $\overline{M}_\varphi$  は近似的に次式で求められる.

$$\begin{aligned} \overline{M}_\varphi \doteq & -\frac{1}{2}\rho_w C_D U^2 \left(\overline{OG} + \frac{h_e}{2}\right) \left(h_e - \frac{B}{2}\varphi_0\right) L \cos^2\varphi_0 \\ & + \frac{1}{2}\rho_w C_D U^2 \overline{D} \left(\overline{OG} + \frac{h_e}{2}\right) L \cos^2\varphi_0 \cos(\omega_e t - \delta) \end{aligned} \quad (22)$$

(22) 式は (18) 式を考慮に入れると,

$$\overline{M}_\varphi = \overline{F}_y \left(\overline{OG} + \frac{h_e}{2}\right) / \cos\varphi_0 \quad (23)$$

のように表わすことができる. (23) 式は,  $z$  方向の風圧分布が一定であるとする仮定により, 風圧力  $\overline{F}_y$  の着力点, 所謂風圧中心が船体側面における風圧面の平均高さ ( $h_e$ ) の  $1/2$  にあることを示している.

模型船に働く風圧力および風圧モーメントには, 船体の風上側側面のみならず, 船体上面および風下側側面の負圧等が寄与する<sup>5)</sup>. したがって,  $\overline{F}_y$  およびその着力点と  $\overline{M}_\varphi$  は, (18) および (22) 式で得られる値と異なるものと考えられる.

今, これらの影響を表わす係数  $\alpha_y, \beta_y$  を導入する. すなわち,  $C_D$  の代りに用いられる  $\alpha_y$  および  $\beta_y$  は, 船に対する有効抗力係数とでも名付けられるものである.

更に, 定常流と変動流中の抗力係数は異なるという考え方に従い, 模型船に働く  $\overline{F}_y$  と  $\overline{M}_\varphi$  を次式のようにおく.

$$\begin{aligned} \overline{F}_y = & -\frac{1}{2}\rho_w \alpha_y U^2 \left(h_e - \frac{B}{2}\varphi_0\right) L \cos^3\varphi_0 \\ & + \frac{1}{2}\rho_w \beta_y U^2 \overline{D} L \cos^3\varphi_0 \cos(\omega_e t - \delta) \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \overline{M}_\varphi = & -\frac{1}{2}\rho_w \alpha_y U^2 \left(h_e - \frac{B}{2}\varphi_0\right) \left(\overline{OG} + l_w\right) L \cos^2\varphi_0 \\ & + \frac{1}{2}\rho_w \beta_y U^2 \overline{D} \left(\overline{OG} + l_w\right) L \cos^2\varphi_0 \cos(\omega_e t - \delta) \end{aligned} \quad (25)$$

但し,  $l_w$  は風圧中心の  $z_1$  座標

ここで導入した  $\alpha_y, \beta_y$  および  $l_w$  を理論的に求めることは大変困難であるので適当な方法による模型

実験によって求めねばならない。

#### 4. 風波併存時の強制外力の定義

風と波が併存する場合の船体に働く強制外力は、風圧強制力と波浪強制力より成るので運動方程式の強制外力の項は次のように表わすことができる。

$$\left. \begin{aligned} F_{ye} &= F_{yw} + F_{yw0} + F_y + F_{y0} \\ F_{ze} &= F_{zw} \\ M_{\phi e} &= M_{\phi w} + M_{\phi w0} + M_{\phi} + M_{\phi0} \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

但し、 $F_{yw}$ ,  $F_{zw}$ ,  $M_{\phi w}$  は周期的な波浪強制力およびモーメント

$F_{yw0}$ ,  $M_{\phi w0}$  は漂流力および定常傾斜モーメント

$F_y$ ,  $M_{\phi}$  は風圧による周期的な強制力およびモーメント

$F_{y0}$ ,  $M_{\phi0}$  は風圧による定常力および定常傾斜モーメント

(24), (25) 式を用いれば、風圧による  $F_{y0}$ ,  $F_y$ ,  $M_{\phi0}$ ,  $M_{\phi}$  は夫々次式で与えられる。

$$F_{y0} = -\frac{1}{2} \rho_w \alpha_y U^2 \left( h_e - \frac{B}{2} \varphi_0 \right) L \cos^3 \varphi_0 \quad (27)$$

$$F_y = \frac{1}{2} \rho_w \beta_y U^2 \overline{D} L \cos^3 \varphi_0 \cos(\omega_e t - \delta) \quad (28)$$

$$M_{\phi0} = -\frac{1}{2} \rho_w \alpha_y U^2 \left( h_e - \frac{B}{2} \varphi_0 \right) (\overline{OG} + l_w) L \cos^2 \varphi_0 \quad (29)$$

$$M_{\phi} = \frac{1}{2} \rho_w \beta_y U^2 \overline{D} (OG + l_w) L \cos^2 \varphi_0 \cos(\omega_e t - \delta) \quad (30)$$

#### 5. 定常風による有効抗力係数 $\alpha_y$

静水中の模型船を  $\varphi_{0i}$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) の角度に傾斜させ、風速  $U_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) の横風をあてる。

そのときの  $U_j$  に対して船体に働く  $F_{y0}$  と  $M_{\phi0}$  を計測すると、(27) 式より  $\alpha_y$ 、(27), (29) 式より風圧力の着力点  $l_w$  を求めることができる。

$F_{y0}$ ,  $M_{\phi0}$  を計測する際に、静水面上には定常風による表面吹送流と風波が発生する。このような条件下で計測した  $F_{y0}$ ,  $M_{\phi0}$  には表面吹送流と風波との影響が含まれており、したがって、 $\alpha_y$ ,  $l_w$  はこれらの影響を含んだものであるといえる。

#### 6. 船体横抵抗係数 $\alpha_{yv}$

静水中で  $\varphi_{0i}$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) の角度に傾斜させた模型船を横方向に速度  $v_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) で曳行し、

そのときの船体横抵抗  $R_{yv}$  と船体傾斜モーメント  $M_{\phi v}$  を計測する。この  $R_{yv}$ ,  $M_{\phi v}$  を

$$R_{yv} = -\frac{1}{2} \rho \alpha_{yv} d L v |v| \quad (31)$$

$$M_{\varphi v} = -\frac{1}{2} \rho \alpha_{yv} (\overline{OG} + l_R) d L v |v| \quad (32)$$

とおけば、実験による  $R_{yv}, M_{\varphi v}$  の値を用いて、(31), (32) 式より、 $\alpha_{yv}$  および  $R_{yv}$  の着力点の  $z_1$  座標  $l_R$  を求めることができる。但し、 $\rho$  は水の密度、 $d$  は吃水である。

## 7. 定常風による静水面上での漂流速度と定常傾斜角

### 7.1. 漂流拘束時の定常傾斜角 $\varphi_{0s}$

与えられた風速  $U$  に対する重心まわりの傾斜モーメント  $M_{\varphi 0}$  は有効抗力係数  $\alpha_y$  と  $l_w$  を用いて (29) 式より求めることができる。漂流を拘束された船が、風速  $U$  の横風をうけて  $\varphi_{0s}$  の定常傾斜をする場合の平衡式は、得られた  $M_{\varphi 0}$  を用いれば、次式で与えられる。

$$W \cdot \overline{GZ} + M_{\varphi 0}(\varphi_{0s}) = 0 \quad (33)$$

但し、 $W \cdot \overline{GZ}$  は静復原力

したがって、(33) 式より定常傾斜角  $\varphi_{0s}$  を求めることができる。

### 7.2. 定常傾斜角 $\varphi_{0v}$ と漂流速度 $v_{0v}$

風速  $U$  によって、静水面上を  $\varphi_{0v}$  の定常傾斜をし、 $v_{0v}$  の速度で横漂流する場合の、船体に働く定常力および傾斜モーメントを  $F_{y0v}, M_{\varphi 0v}$  とすれば、そのときの平衡式は次式で与えられる。

$$F_{y0v} + R_{yv} = 0 \quad (34)$$

$$M_{\varphi 0v}(\varphi_{0v}) + M_{\varphi v}(\varphi_{0v}) + W \cdot \overline{GZ} = 0 \quad (35)$$

ここで、 $F_{y0v}$  は (27) 式に対応して次式のように求めることができる。

$$F_{y0v} = -\frac{1}{2} \alpha_{y0v} (U - v_{0v})^2 \left( h_e - \frac{B}{2} \varphi_0 \right) L \cos^3 \varphi_0 \quad (36)$$

風速  $U$  と、それによる漂流速度  $v_{0v}$  とでは、 $U \gg v_{0v}$  であるから (36) 式において、 $U - v_{0v} \div U$  においても差し支えない。故に、 $\alpha_{y0v} \div \alpha_y$  とおける。したがって、(34) 式は、

$$F_{y0} + R_{yv} = 0 \quad (37)$$

となり、(35) 式の  $M_{\varphi 0v}(\varphi_{0v})$  は、 $M_{\varphi 0v} \div M_{\varphi 0}$  となる。これを (35) 式に代入すると、(29), (32) 式より (35) 式は、

$$W \cdot \overline{GZ} + F_{y0}(l_w - l_R) = 0 \quad (38)$$

とおける。

以上の関係より、(37), (38) 式を満足させる定常傾斜角  $\varphi_{0v}$  と漂流速度  $v_{0v}$  を求めることができる。

## 8. 風波併存時の平均傾斜角 $\varphi_0$ と漂流速度 $v_0$

風と波が併存する場合に、船体に働く定常力および傾斜モーメントの平衡式は、次式のようになる。

$$F_{yv} + F_{yw0} + R_{yv} = 0 \quad (39)$$

$$W \cdot \overline{GZ} + M_{\varphi w0} + F_{yv}(l_W - l_R) = 0 \quad (40)$$

風波が併存する場合には、風速  $U$  と風波による漂流速度  $v_0$  とでは、風速が十分大きく、 $U \gg v_0$  であるときが重要であるから、このような条件下では、

$$F_{yv} \doteq F_{y0} \quad (41)$$

とおける。したがって、波による漂流力  $F_{yw0}$  および定常傾斜モーメント  $M_{\varphi w0}$  を理論的に求めれば、(39)、(40) 式を満足させる平均傾斜角  $\varphi_0$  と漂流速度  $v_0$  が得られる。

## 9. 模型実験

実験は九州大学応用力学研究所大水槽（ $L \times B \times D = 80 \text{ m} \times 8 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ ）で行われた。また水面上の風は図 2 および写真 1 に示すような送風装置を用いて発生させた。

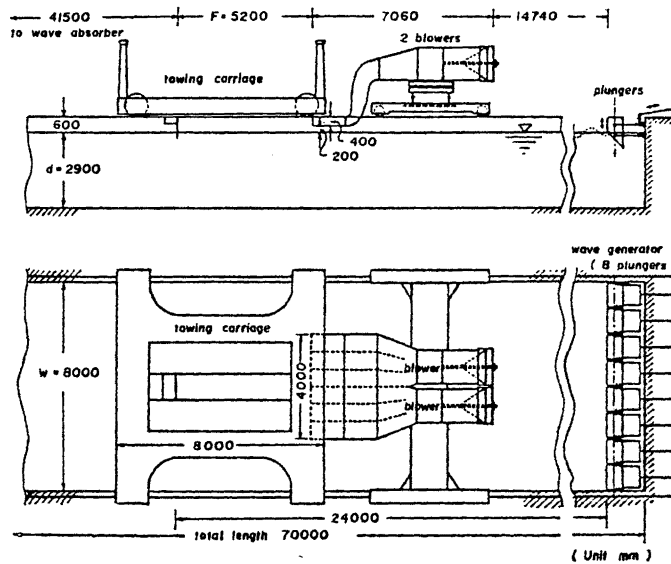


図 2 送風装置

### 9.1. 供試模型

供試模型船は SR-108 コンテナ船の 3 m 相似模型船でその主要目を表 1 に示す。水面上に働く風圧力および風圧モーメントを計測するために図 3 に示すような上部構造物を取付けた。また、横方向の抵抗実験は舵を取付けた状態で行った。

### 9.2. 風速分布

送風装置によって発生させた風の水面上での風速分布はピトー管を用いて測定した。図 4 に一例として、Fetch=5.5 m, 水面上 30 cm, Position C での風速分布を示す。

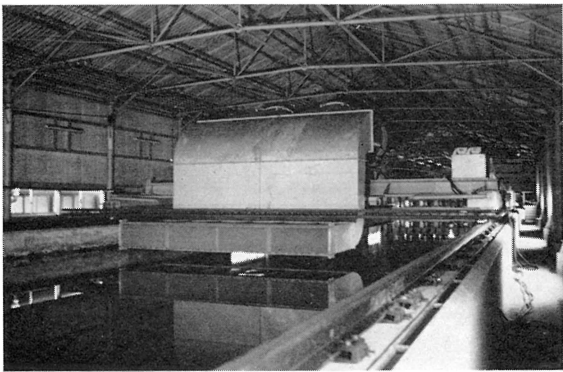


写真 1 送風装置の全景

表 1 模型船主要寸法

|       |                 |          |
|-------|-----------------|----------|
| 船 長   | $L_{pp}$        | 3.0 m    |
| 幅     | $B$             | 0.4354 m |
|       | $d_f$           | 0.1371 m |
| 吃 水   | $d_m$           | 0.1454 m |
|       | $d_a$           | 0.1543 m |
| 排 水 量 | $\Delta$        | 106.9 kg |
|       | $\overline{GM}$ | 0.1755 m |

表 2 送風実験範囲

| 傾 斜 角 | 平 均 風 速   | 計 測                         |
|-------|-----------|-----------------------------|
| 0°    | 2.039 m/s | $F_{y0}$<br>$M_{\varphi 0}$ |
| 5°    | 3.795 m/s |                             |
| 10°   | 5.452 m/s |                             |
| 15°   | 7.135 m/s |                             |
| 20°   |           |                             |

表 3 曳行実験範囲

| 傾 斜 角 | 曳 行 速 度  | 計 測                  |
|-------|----------|----------------------|
| 0°    | 6 cm /s  | $R_{yv}$<br>$M_{yv}$ |
| 3°    | 10 cm /s |                      |
| 6°    | 15 cm /s |                      |
| 10°   | 20 cm /s |                      |
| 15°   | 25 cm /s |                      |
| 20°   |          |                      |

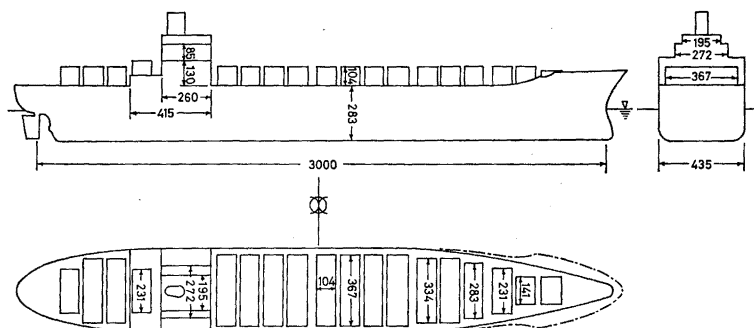


図 3 模型船上部構造物概略図

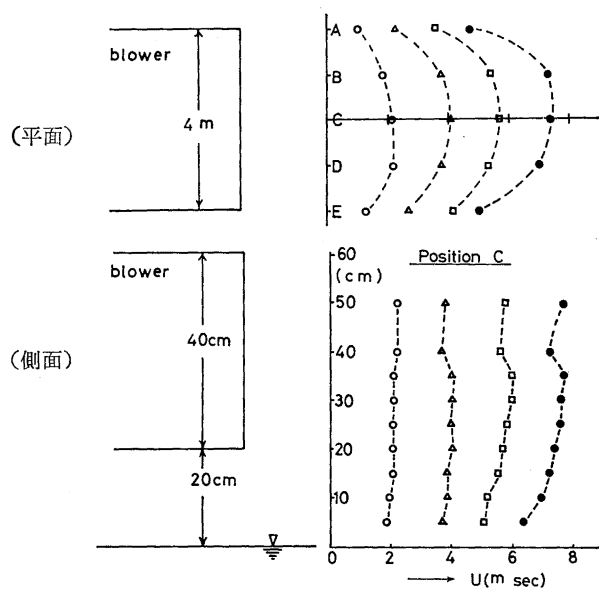


図 4 水面上の風速分布一例

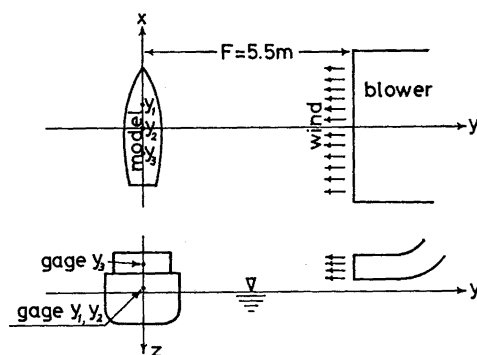


図 5 風圧力と風圧モーメント計測状態

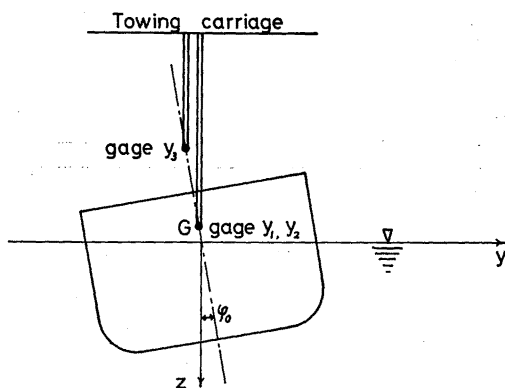


図 6 横抵抗計測状態

### 9.3. 計測項目および計測状態

$\varphi_0$  の定常傾斜をさせた模型船に横風をあて、そのとき船体に働く風圧による定常力  $F_{y0}$  および定常傾斜モーメント  $M_{\varphi 0}$  を計測した。  $F_{y0}, M_{\varphi 0}$  の実験範囲を表 2 に、計測状態を図 5 に示す。

また、模型船を静水中で横方向へ曳行し、船体横抵抗  $R_{yv}$  および船体傾斜モーメント  $M_{\varphi v}$  を計測した。その実験範囲を表 3 に、計測状態を図 6 の概略図に示す。

更に、静水面上に定常風を発生させ模型船の漂流拘束時の定常傾斜角  $\varphi_{0s}$  を計測した。

## 10. 実験結果と考察

### 10.1. 定常風による有効抗力係数 $\alpha_y$

図 7 に有効抗力係数  $\alpha_y$  の計測結果を示す。  $\alpha_y$  は図 7 が示すように、定常傾斜角  $\varphi_0$  による影響は少く、ほぼ一定であることがわかる。図 8 は風圧力の着力点を示しており、風速の大きさによる多少の変化はあるが、  $\varphi_0$  の大きさによる影響が大きく現われている。図 7 と図 8 より、風圧による定常力の大きさは、船の傾斜角とは無関係にほぼ一定であるが、その着力点の位置は傾斜角に比例して変化するという。

### 10.2. 船体横抵抗係数 $\alpha_{yv}$

$\alpha_{yv}$  および船体横抵抗の着力点を図 9～14 に示す。これらの図より、一定の横傾斜  $\varphi_0$  に対して、  $\alpha_{yv}$  およびその着力点は横方向の曳行速度に無関係にほぼ一定であるといえる。しかし、  $\varphi_0$  の変化に対しては、図 15 より明らかなように、  $\varphi_0 = 0^\circ \sim 10^\circ$  までは  $\alpha_{yv}$  の大きさに顕著な差異はみられないが、  $\varphi_0 = 15^\circ, 20^\circ$  では  $\varphi_0 = 10^\circ$  までの  $\alpha_{yv}$  より大きく、更に傾斜方向と曳行方向との差異も明らかに現われている。これらの原因はまだ不明である。

### 10.3. 漂流拘束時の定常風による傾斜角 $\varphi_{0s}$

図 7 および図 8 より風圧力の着力点  $I_w$  を求めて、図 7 の  $\alpha_y$  と (29) 式に代入すれば各傾斜角  $\varphi_0$  と風速  $U$  の関係からそれぞれに対応した  $M_{\varphi 0}$  を求めることができる。この  $M_{\varphi 0}$  を (33) 式に入れると  $\varphi_{0s}$  が得られる。図 16 に (33) 式の図式解法を示す。船の静復原力曲線  $W \times GZ$  と定常風  $U$  に対

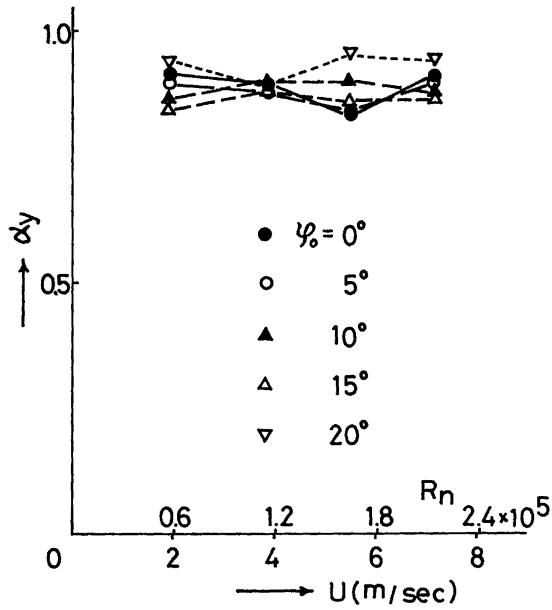


図 7 有効抗力係数

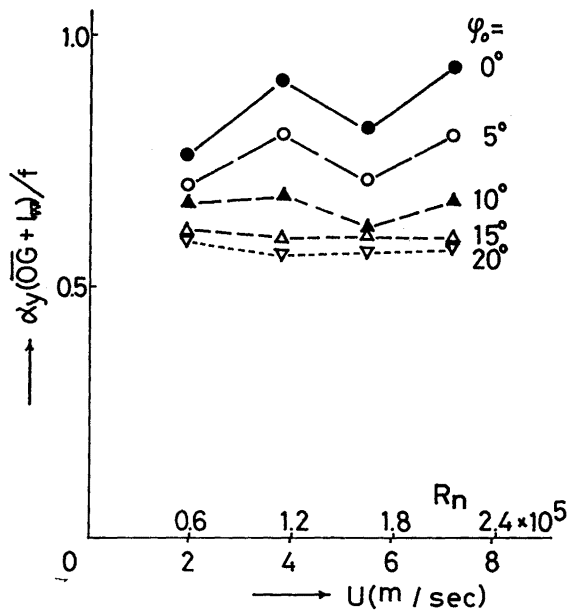


図 8 風圧力の着点

する各  $\varphi_0$  での  $M_{\varphi_0}$  の曲線の交点が定常風  $U$  による傾斜角  $\varphi_{0s}$  である。図 17 の実線が上述のよう  
にして得られた値である。模型船の横漂流を拘束し、定常風をあて、重心まわりの定常傾斜角  $\varphi_{0s}$  を

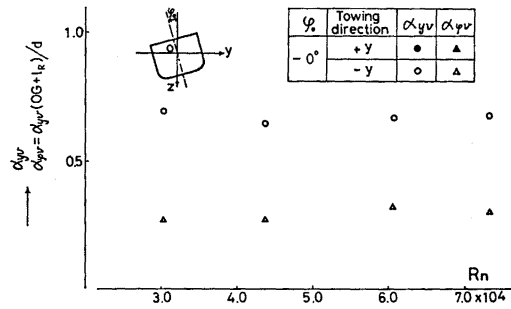


図 9 横抵抗係数および抵抗着力点

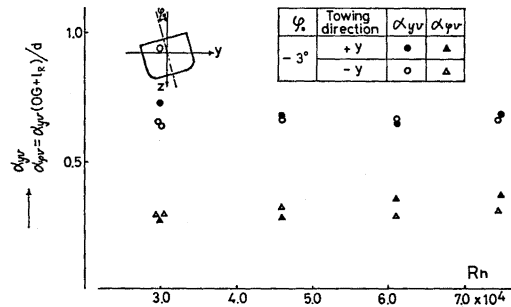


図 10 横抵抗係数および抵抗着力点

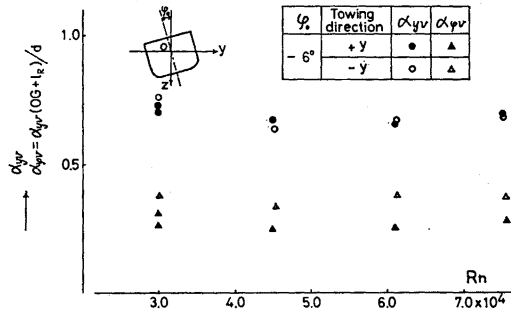


図 11 横抵抗係数および抵抗着力点

計測したのが図 17 の○印である。推定値と計測値の一致度は比較的によく、有効抗力係数  $\alpha_y$  の導入は有効であるといえる。

## 11. 結 言

風と波が併存する場合の船体運動を論ずる場合に必要の風の船に対する有効抗力係数  $\alpha_y$  と風圧力の着力点  $l_w$ 、船体の横方向抵抗係数  $\alpha_{yv}$  と抵抗の着力点  $l_R$  を実験的に調べ、更にこれらの結果を用いて、風による船の定常傾斜および漂流速度を求める方法についての研究結果、次のような結論が得られ

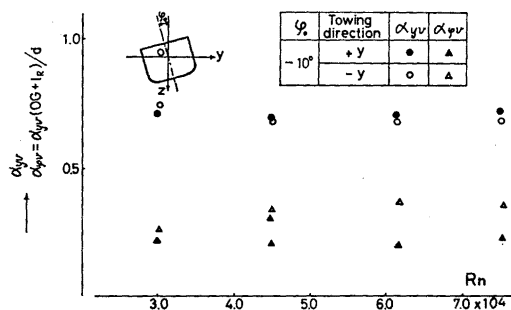


図 12 横抵抗係数および抵抗着力点

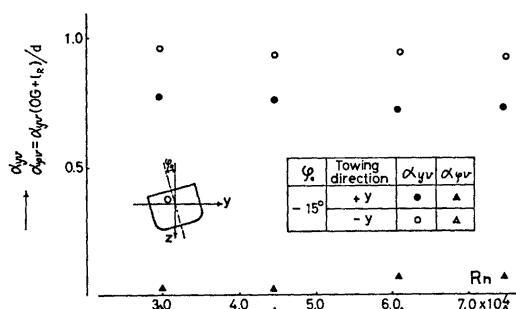


図 13 横抵抗係数および抵抗着力点

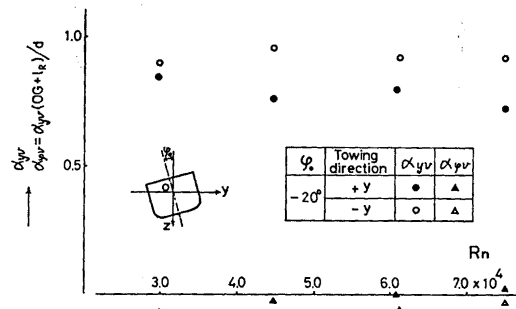


図 14 横抵抗係数および抵抗着力点

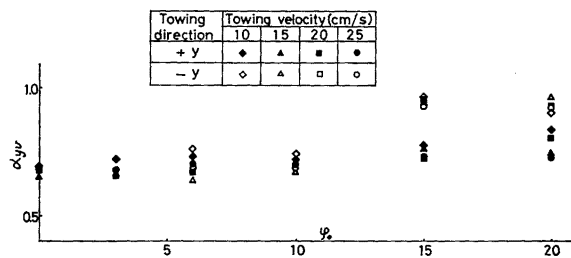


図 15 横抵抗係数

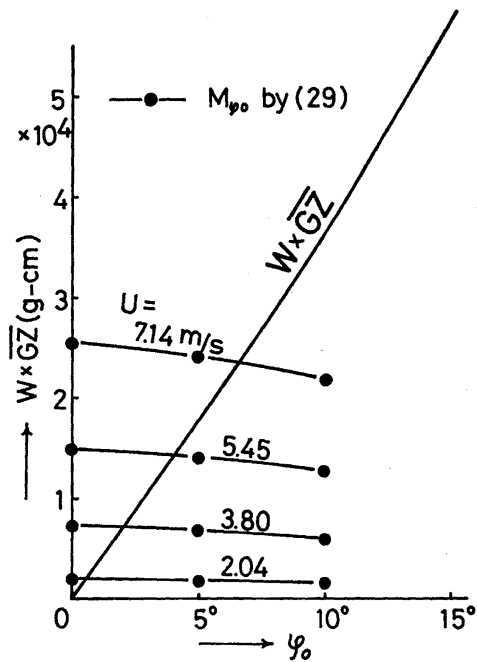
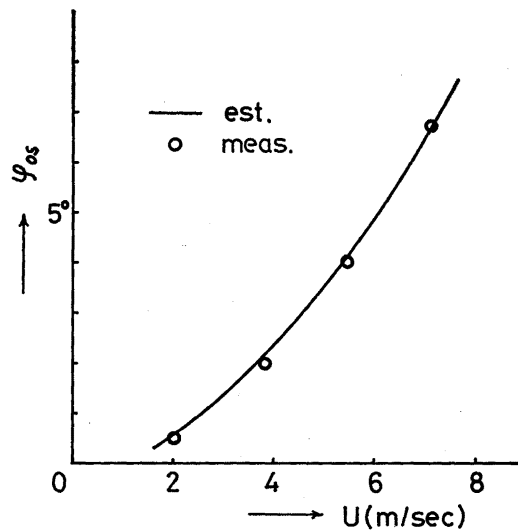
図 16  $\varphi_{0s}$  の図式解法

図 17 横漂流拘束時の定常傾斜角

た。

- 1) 風の有効抗力係数  $\alpha$  は、風速および船体傾斜角に無関係にほぼ一定であり、風圧力の着力点  $l_w$  は、風速には無関係に一定であるが、船体傾斜角に比例して変化する。

- 2) 船体横抵抗係数  $\alpha_{yv}$  および抵抗着力点  $I_R$  は曳行速度に無関係にほぼ一定であるが、船体傾斜角に比例して変化する。
- 3) 漂流拘束時の定常風による傾斜角の推定法は妥当である。

本研究は、故田才福造教授の生前の御指導に基づいて行ったものであり、生前の先生の懇切なる御指導と御鞭達に対し深く感謝するとともに先生の御冥福をお祈り致します。

また、本研究を遂行するにあたっては大楠丹教授の懇切で適切な御指導を頂きました。ここに感謝の意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) Froude, W., On the Rolling of Ships, Trans. INA, 1861.
- 2) 田才福造, Short crested wave 中における sway, yaw 及び roll の運動について, 西部造船会会報, 第 42 号, 1971.
- 3) 岡田正次郎, 小型船舶に対する風圧に因る傾斜モーメントについて, 日本造船協会論文集, 第 92 号, 1952.
- 4) 菱田敏男他, 規則波上の風圧モーメント, 造船協会論文集, 第 108 号, 1960.
- 5) 定兼広行他, 波上の風圧モーメント, 関西造船協会誌, 第 178 号, 1970.
- 6) 小林正典, 船体傾斜時の波浪中の運動について, 西部造船会会報, 第 51 号, 1975.
- 7) 慎燦益, 非対称横揺について (その 4), 長崎造船大学研究報告, 第 16 号, 第 1 号, 1975.
- 8) 慎燦益他, 傾斜した二次元柱状体の規則的横波中の運動について, 長崎総合科学大学紀要, 第 21 卷, 第 1 号, 1980.
- 9) 慎燦益, 傾斜船の横波中の運動について, 西部造船会会報, 第 63 号, 1982.
- 10) 慎燦益, 傾斜した二次元柱状体甲板上への海水打込み限界波高について, 西部造船会会報, 第 60 号, 1980.
- 11) 慎燦益, 横波中にある傾斜船の甲板上への海水打込み限界波高について, 西部造船会会報, 第 64 号, 1982.
- 12) 田宮真, Ship Motions in Beam Seas and Winds, 11 TH, I. T. T. C., Written Contribution.
- 13) 田才福造, 波浪中の船体運動に関する風の影響, 耐航性委員会資料, 1966.
- 14) 猿田俊彦他, 漁船の横揺特性 (その 2) 風と波が併存する場合, 昭和 56 年度 秋季 船舶技術研究所研究発表会講演集, 1981.
- 15) 田宮真他, S. N. A. J. 60 TH ANNIVERSARY SERIES, Volume 6, Chapter 6.
- 16) 田宮真, 非対称横揺れの性質について (その 2), 造船協会論文集, 第 120 号, 1966.
- 17) 田宮真他, 転覆に関する実験, 日本造船学会論文集, 第 125 号, 1969.
- 18) 田宮真他, 箱型船の転覆限界, 日本造船学会論文集, 第 128 号, 1970.

(昭和 57 年 5 月 31 日受理)