

波浪中を航行する二艘旋網漁船に働く 流体力と船体動揺の計算

第1報：二艘旋網漁船に働くラディエーション流体力

升也 利一*

Calculations of hydrodynamic forces acting on a pair of purse seiners and their ship motions sailing in waves

1st report : Radiation forces acting on a pair of purse seiners

Toshikazu Masuya*

* 水産工学研究所: National Research Institute of Fisheries Engineering

Abstract

The ship motions of a pair of purse seiners in waves are taken up and studied. A pair of purse seiners sail with side by side in the vicinity, therefore the wave interaction occurs between two ships. In this paper, the method estimating the radiation forces and moments acting on a pair of ships were formulated through the extending method for the catamaran. The obtained formulae showed that the radiation forces and moments between two ships are coupling, and the ship motion equations except surge motion have 10 degrees of freedom in total of two ships.

Numerical examples of the hydrodynamic coefficients were calculated for a couple of purse seiners using in the Kujuukuri fishery cooperative. The results showed several peaks for frequency when the interaction effects were considered.

1 緒言

千葉県の大九里地域では、浅海面に適した二艘旋網によるカタクチイワシ漁が行われているが、東日本大震災からの復興[1]に際しては、水産工学研究所として積極的な技術支援を行ってきている。二艘旋網漁では Photo 1 に示すように、2 隻の網船が船長の 1/2 程度の間隔を保ちながら船尾空中に網を吊下した状態で併走する。このような航行状態では、平水中においては、単船で航行す

る場合よりも船体の摩擦抵抗、造波抵抗などの増加が予想されるため、同航する運搬船との造波干渉を利用して船団全体で造波抵抗を低減し、省エネルギーを図れる可能性があり、検討が進められている[2], [3]。波浪中においては、2隻の網船は独立に動揺するため、双胴船とは状態が異なるものの、双胴船の場合と同様に、2隻は流体を介して互いに干渉し合っていることが推測される。

本研究では、このような特徴的な航行形態をもつ二艘旋網漁船の波浪中の問題を取り上げ、波浪中で船体に働く流体力と船体の動揺の性質を理論計算によって考察する。理論、計算と並行して実験による検討を行うことが望ましいが、既存の施設、計測装置はここで取り上げるような問題に対応するように計画されておらず、実験による検証は極めて困難であるため、本研究では、理論計算を主軸に検討し、その物理的なメカニズムを明らかにすることとした。

まず本論文では、併走する2隻の網船について、2隻の間に働く造波干渉流体力を含めたラディエーション問題を取り上げ、流体力の定式化と数値計算を行い、単船の場合との比較によって二艘旋網漁船に働くラディエーション流体力の特性の把握を試みる。

網船2隻の間に生じる造波干渉の問題は、両船の距離が半船長程度になることから、本来なら3次元的な取り扱いが必要である。しかし、次章に詳述するように、この問題は極めて煩雑であり、かつフルード数の高い漁船に対しては、他に適当な方法が無いため、今回はストリップ法と同じ動揺周波数の高い場合を想定した2次元的な取り扱いを行い、その性質を把握することとした。



Photo 1. A pair of purse seiners arriving at the Iioka fishing port.

2 定式化

2つの断面間の造波干渉を考慮した2次元断面流体力の計算法には、双胴船に対して文献[4]及び[5]に示した「計算法1」と基本的に同じ手法を用いる。今回取り上げる問題は、双胴船の問題に類似しているようにみえるが、2隻の間に流場

の対称/反対称性が存在しないこと、2 隻が連結されていないため独立に動揺することなどが双胴船の場合とは異なる。そこで、内部問題を左右の船の近傍で独立に考え、遠方場での振る舞いは外部問題により表して、両者の解を接合して速度ポテンシャルの合成解を確定する。このような手法で求めた速度ポテンシャルを用いて、船全体の流体力はストリップ法[6], [7]に従って定式化する。

なお、以下では記述の簡便のため、右側船に関係する量には上付添え字 R 、左側船に関係する量には L を付け、ラディエーション問題に関連する量には下付添え字 R を、次報で述べるディフラクション問題に関連する量には D を付して表す。両船に共通する量の場合は、 $\xi_j^{R,L}$ のようにまとめて表記する。また、特に必要な場合以外、 x 座標と time factor $e^{i\omega_e t}$ の表記は記述の簡便のため省略する。

最初に単船の場合の船体横断面内の 2 次元流れを定義する。断面内の 2 次元 j モード動揺 ($j=1$:sway, 2 :heave, 3 :roll) に対するラディエーションポテンシャルを、動揺速度を $\dot{\alpha}_j$ 、動揺角周波数を ω_e として、次のように定義する。

$$\phi_j(y, z; x) = \dot{\alpha}_j \varphi_j(y, z; x) \quad (1)$$

このとき φ_j は単位振幅速度ポテンシャルになり、 $z \leq 0$ の領域に対して、2 次元 Laplace 方程式

$$\frac{\partial^2 \varphi_j}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi_j}{\partial z^2} = 0 \quad \text{in } z \leq 0 \quad (2)$$

と、動揺の波数 $K_e (= \omega_e^2 / g)$ に対する線形自由表面条件

$$K_e \varphi_j - \frac{\partial \varphi_j}{\partial z} = 0 \quad \text{on } z = 0 \quad (3)$$

および断面外周 s 上で次の船体表面条件

$$\frac{\partial \varphi_j}{\partial n} = n_j, \quad (j=1 \sim 3) \quad \text{on } s \quad (4)$$

を満足するものとする。ここで、 n_j は断面外周上外向きに立てた法線ベクトルを $n = (n_y, n_z)$ とするとき、次式で定義される広義の法線ベクトルの成分である。

$$(n_1, n_2, n_3) = (n_y, n_z, n_y y - n_z z) \quad (5)$$

この他、 φ_j は適当な放射条件を満足するものとする。

船体は左右対称なので、ここでは φ_j を次のように表す。

$$\varphi_1 = \mu_1 Q_1, \quad \varphi_2 = \sigma_2 P_2, \quad \varphi_3 = \mu_3 Q_3 \quad (6)$$

$$P_j = G + \text{wave free potential}, \quad Q_j = H + \text{wave free potential} \quad (7)$$

G , H は座標原点に置かれた吹出しおよび 2 重吹出しを表し、 E_1 を積分指数関数として次のように書ける。

$$G(y, z) = -\lim_{\mu \rightarrow +0} \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{e^{nz} \cos(ny)}{n - K_e + i\mu} dn = -\frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \left[e^{K_e(z+iy)} E_1 \{ K_e(z+iy) \} \right] + i e^{K_e(z-iy)} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} H(y, z) &= -\frac{1}{K_e} \frac{\partial}{\partial y} G(y, z) \\ &= -\frac{1}{\pi} \operatorname{Im} \left[e^{K_e(z+iy)} E_1 \{ K_e(z+iy) \} - \frac{1}{K_e(z+iy)} \right] - \operatorname{sgn}(y) e^{K_e(z-iy)} \end{aligned} \quad (9)$$

以上の定義を用いて、網船2隻の造波流体力を定式化する。Fig. 1のように、2隻の網船の中心に座標原点 o をもつ全体座標系 $o-xyz$ を、個々の網船にもその平均位置に座標系 $o^R-x^Ry^Rz^R$ 、 $o^L-x^Ly^Lz^L$ をとる。両船は同型船とし、重心位置 $G(x_G, 0, z_G)$ も同じであると仮定する。本論文では扱わないが、入射波として角周波数 ω 、振幅 ζ_a 、出会い角 χ 、波数 $K(=\omega^2/g)$ の規則波を考え、2隻の網船は中心線間の平均距離 P を保ち平均速度 U で航行しながら、出会い角周波数を $\omega_e(=\omega - UK \cos \chi)$ 、 j モードの動揺振幅を ξ_j^R 、 ξ_j^L ($j=2$: sway, 3 : heave, 4 : roll, 5 : pitch, 6 : yaw)で、船の重心 $G^{R,L}(x_G^{R,L}, 0, z_G^{R,L})$ 周りに動揺しているものとする。

ここでは動揺は全て入射波振幅に対して線形であると仮定する。単胴船の場合、rollを線形化することには疑問が存するが、rollによって造られる波は小さく、それによる造波干渉も小さいと考えられるので、動揺を線形として取り扱った場合も、造波流体力全体としては、その影響は小さいものと考えられる。

実船の航行状態から、2隻の網船の中心線間距離 P は船の長さ L に対して $P/L=O(1)$ となるので、遠場近似(far field approximation) [8], [9]に基づいて左右の船体間の造波干渉を考慮する。2隻の網船は独立して動揺するので、双胴船のような $x-z$ 面に対する流場の対称性/反対称性は存在しない。このため本論文では、対称、反対称全ての動揺モードを含む形の内部解を設定する。

$x^R = x^L = x$ の断面内の流体運動を取り上げ、この断面内での2次元ラディエーション問題を考える。 $x_b = x - x_G$ と置き、Fig. 2に示すように右側船の断面を R 、

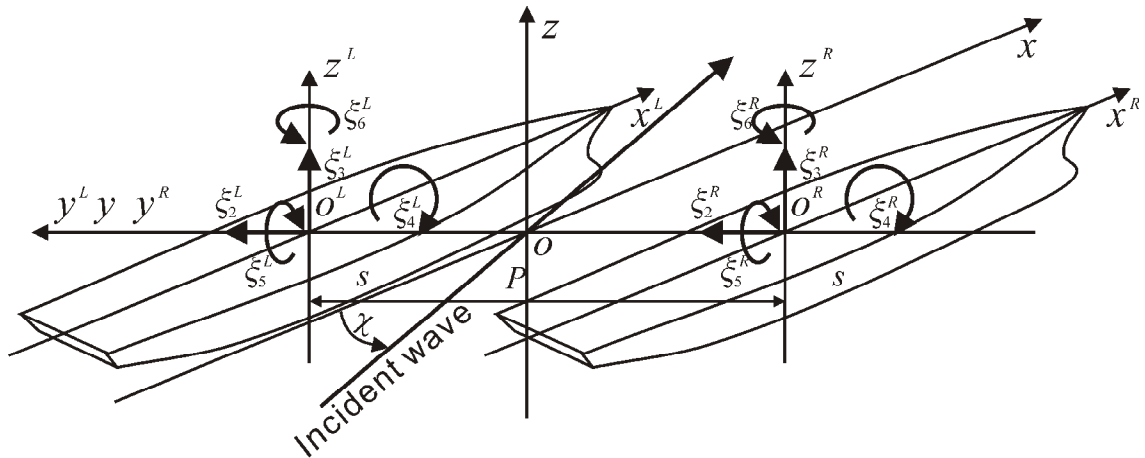


Fig. 1. Coordinate systems and variable definitions.

左側船の断面を L とし、断面 R , L の j モード方向の 2 次元動揺速度を $\dot{\alpha}_j^{R,L}$ と書くと、船体の動揺速度と断面の動揺速度の間には次の関係がある。

$$\begin{aligned}\dot{\alpha}_1^{R,L} &= \left(i\omega_e - U \frac{\partial}{\partial x} \right) (\xi_2^{R,L} + x_b \xi_6^{R,L}) = i\omega_e \xi_2^{R,L} + i\omega_e \left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \xi_6^{R,L}, \\ \dot{\alpha}_2^{R,L} &= \left(i\omega_e - U \frac{\partial}{\partial x} \right) (\xi_3^{R,L} - x_b \xi_5^{R,L}) = i\omega_e \xi_3^{R,L} - i\omega_e \left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \xi_5^{R,L}, \\ \dot{\alpha}_3^{R,L} &= \left(i\omega_e - U \frac{\partial}{\partial x} \right) \xi_4^{R,L} = i\omega_e \xi_4^{R,L}\end{aligned}\quad (10)$$

となる。これらを入射波波面の速度 $\dot{\zeta}_a (= i\omega \zeta_a)$ で無次元化して次のように置く。

$$\eta_j^{R,L} = \dot{\alpha}_j^{R,L} / \dot{\zeta}_a \quad (j=1,2,3) \quad (11)$$

$$\eta_1^{R,L} = \frac{\omega_e}{\omega} \left\{ \frac{\xi_2^{R,L}}{\zeta_a} + \left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \frac{\xi_6^{R,L}}{\zeta_a} \right\}, \quad \eta_2^{R,L} = \frac{\omega_e}{\omega} \left\{ \frac{\xi_3^{R,L}}{\zeta_a} - \left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \frac{\xi_5^{R,L}}{\zeta_a} \right\}, \quad \eta_3^{R,L} = \frac{\omega_e}{\omega} \frac{\xi_4^{R,L}}{\zeta_a} \quad (12)$$

造波干渉を考慮した速度ポテンシャルを右側断面の近傍では ψ_R^R と書き、無次元動揺速度 $\eta_j^{R,L}$ を含む次のような形に置く。

$$\psi_R^R = \eta_1^R \phi_1 + \eta_2^R \phi_2 + \eta_3^R (\phi_3 + z_G \phi_2) + C_R^R (\phi_2 - \bar{\phi}_2) + D_R^R (\phi_1 - \bar{\phi}_1) \quad (13)$$

ここで、 $\bar{}$ は複素共役を表す。 $\eta_j^{R,L}$ は未定であり、船体運動方程式を解くことにより確定する。(13)式右辺第 4, 5 項は船体間の造波干渉によって生じる流れを表し、第 4 項は対称流場、第 5 項は反対称流場に対応する。 $C_R^{R,L}$, $D_R^{R,L}$ は造波干渉の強さを表す未定係数であり、外部解との接合によって確定する。

(13)式の右側断面近傍での展開を考える。(13)式に(6)式を代入すると、

$$\psi_R^R(y^R, z^R) = \eta_2^R \sigma_2 P_2 + C_R^R (\sigma_2 P_2 - \bar{\sigma}_2 \bar{P}_2) + \eta_1^R \mu_1 Q_1 + \eta_3^R (\mu_3 Q_3 + z_G \mu_1 Q_1) + D_R^R (\mu_1 Q_1 - \bar{\mu}_1 \bar{Q}_1) \quad (14)$$

さらに変形して、

$$\begin{aligned}\psi_R^R(y^R, z^R) &= \eta_2^R \sigma_2 P_2 + C_R^R (\sigma_2 - \bar{\sigma}_2) P_2 + C_R^R \bar{\sigma}_2 (P_2 - \bar{P}_2) \\ &\quad + \eta_1^R \mu_1 Q_1 + \eta_3^R (\mu_3 Q_3 + z_G \mu_1 Q_1) + D_R^R (\mu_1 - \bar{\mu}_1) Q_1 + D_R^R \bar{\mu}_1 (Q_1 - \bar{Q}_1)\end{aligned}\quad (15)$$

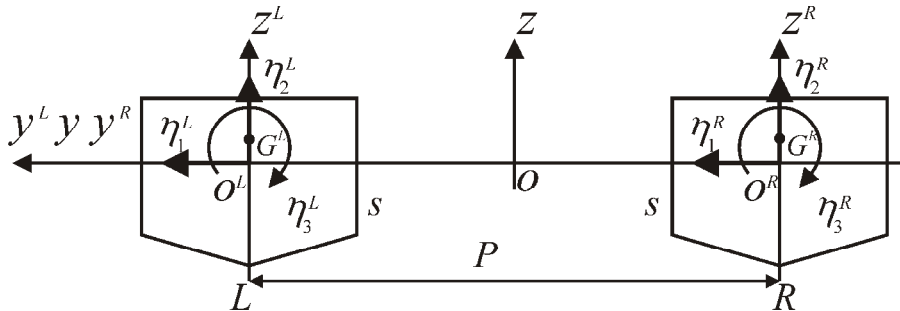


Fig. 2. Coordinate systems and variable definitions in cross sections.

ここで, $r_0 = |z - iy|$ と置くと, P_j, Q_j は $K_e r_0$ が大きいとき,

$$P_j(y, z) \sim G(y, z) \sim -\frac{1}{\pi} \frac{K_e z}{(K_e r_0)^2} + i e^{K_e(z - i|y|)}, \quad Q_j(y, z) \sim H(y, z) \sim -\text{sgn}(y) e^{K_e(z - i|y|)} \quad (16)$$

と近似できるから,

$$P_j(y, z) - \bar{P}_j(y, z) \sim 2i e^{K_e z} \cos K_e y, \quad Q_j(y, z) - \bar{Q}_j(y, z) \sim 2i e^{K_e z} \sin K_e y \quad (17)$$

と表せる。これを(15)式に代入すると,

$$\begin{aligned} \psi_R^R(y^R, z^R) \sim & \{\eta_2^R \sigma_2 + C_R^R(\sigma_2 - \bar{\sigma}_2)\} G(y^R, z^R) + 2i C_R^R \bar{\sigma}_2 e^{K_e z^R} \cos K_e y^R \\ & + \{\eta_1^R \mu_1 + \eta_3^R(\mu_3 + z_G \mu_1) + D_R^R(\mu_1 - \bar{\mu}_1)\} H(y^R, z^R) + 2i D_R^R \bar{\mu}_1 e^{K_e z^R} \sin K_e y^R \end{aligned} \quad (18)$$

さらに z^R, y^R について展開すると,

$$\begin{aligned} \psi_R^R(y^R, z^R) \sim & \{\eta_2^R \sigma_2 + C_R^R(\sigma_2 - \bar{\sigma}_2)\} G(y^R, z^R) + 2i C_R^R \bar{\sigma}_2 (1 + K_e z^R) \\ & + \{\eta_1^R \mu_1 + \eta_3^R(\mu_3 + z_G \mu_1) + D_R^R(\mu_1 - \bar{\mu}_1)\} H(y^R, z^R) + 2i D_R^R \bar{\mu}_1 K_e y^R \end{aligned} \quad (19)$$

が得られる。同様に, 左側断面近傍では速度ポテンシャル ψ_R^L を,

$$\psi_R^L = \eta_1^L \phi_1 + \eta_2^L \phi_2 + \eta_3^L(\phi_3 + z_G \phi_1) + C_R^L(\phi_2 - \bar{\phi}_2) + D_R^L(\phi_1 - \bar{\phi}_1) \quad (20)$$

と書くと, 左側断面近傍での展開は,

$$\begin{aligned} \psi_R^L(y^L, z^L) \sim & \{\eta_2^L \sigma_2 + C_R^L(\sigma_2 - \bar{\sigma}_2)\} G(y^L, z^L) + 2i C_R^L \bar{\sigma}_2 e^{K_e z^L} \cos K_e y^L \\ & + \{\eta_1^L \mu_1 + \eta_3^L(\mu_3 + z_G \mu_1) + D_R^L(\mu_1 - \bar{\mu}_1)\} H(y^L, z^L) + 2i D_R^L \bar{\mu}_1 e^{K_e z^L} \sin K_e y^L \end{aligned} \quad (21)$$

と表され, 右側断面と同様に, z^L, y^L について展開すると次式が得られる。

$$\begin{aligned} \psi_R^L(y^L, z^L) \sim & \{\eta_2^L \sigma_2 + C_R^L(\sigma_2 - \bar{\sigma}_2)\} G(y^L, z^L) + 2i C_R^L \bar{\sigma}_2 (1 + K_e z^L) \\ & + \{\eta_1^L \mu_1 + \eta_3^L(\mu_3 + z_G \mu_1) + D_R^L(\mu_1 - \bar{\mu}_1)\} H(y^L, z^L) + 2i D_R^L \bar{\mu}_1 K_e y^L \end{aligned} \quad (22)$$

次に外部解を考える。外部解は両船の攪乱を表すので ψ_R と書く。外部解は, x^R, x^L 軸上の吹出し強さ $\Sigma_R^{R,L}$, 2重吹出し強さ $M_R^{R,L}$ によって次のように表される。

$$\psi_R(y, z) = \Sigma_R^R G(y + P/2, z) + M_R^R H(y + P/2, z) + \Sigma_R^L G(y - P/2, z) + M_R^L H(y - P/2, z) \quad (23)$$

右側断面への内部展開は, $y^R/P, z^R/P \ll 1$ として展開すると,

$$\psi_R(y^R, z^R) = \Sigma_R^R G(y^R, z^R) + M_R^R H(y^R, z^R) + \Sigma_R^L G(y^R - P, z^R) + M_R^L H(y^R - P, z^R) \quad (24)$$

ここで,

$$\begin{aligned} G(y^R - P, z^R) & \sim (1 + K_e z^R) g_S^R + K_e y^R g_A^R, \\ H(y^R - P, z^R) & \sim (1 + K_e z^R) h_S^R + K_e y^R h_A^R \end{aligned} \quad (25)$$

$$g_S^R = -\frac{1}{\pi} \operatorname{Re}[e^{-iK_e P} E_1(-iK_e P)] + i e^{-iK_e P} \quad (26)$$

$$g_A^R = \frac{1}{\pi} \left\{ \operatorname{Im}[e^{-iK_e P} E_1(-iK_e P)] - \frac{1}{K_e P} \right\} - e^{-iK_e P} \quad (27)$$

$$h_S^R = -\frac{1}{\pi} \left\{ \operatorname{Im}[e^{-iK_e P} E_1(-iK_e P)] - \frac{1}{K_e P} \right\} + e^{-iK_e P} = -g_A^R \quad (28)$$

$$h_A^R = -\frac{1}{\pi} \left\{ \operatorname{Re}[e^{-iK_e P} E_1(-iK_e P)] - \frac{1}{(K_e P)^2} \right\} + i e^{-iK_e P} = g_S^R + \frac{1}{\pi} \frac{1}{(K_e P)^2} \quad (29)$$

以上をまとめると、(23)式の右側断面近傍への内部展開は次のように表される。

$$\begin{aligned} \psi_R(y^R, z^R) \sim & \Sigma_R^R G(y^R, z^R) + \Sigma_R^L \{(1 + K_e z^R) g_S^R + K_e y^R g_A^R\} \\ & + M_R^R H(y^R, z^R) + M_R^L \{(1 + K_e z^R) h_S^R + K_e y^R h_A^R\} \end{aligned} \quad (30)$$

(19)式と(30)式を比較すると、右側断面近傍について次の接合条件が得られる。

$$\begin{cases} \eta_2^R \sigma_2 + C_R^R (\sigma_2 - \bar{\sigma}_2) = \Sigma_R^R \\ \eta_1^R \mu_1 + \eta_3^R (\mu_3 + z_G \mu_1) + D_R^R (\mu_1 - \bar{\mu}_1) = M_R^R \\ 2iC_R^R \bar{\sigma}_2 = \Sigma_R^L g_S^R + M_R^L h_S^R \\ 2iD_R^R \bar{\mu}_1 = \Sigma_R^L g_A^R + M_R^L h_A^R \end{cases} \quad (31)$$

同様に、(23)式の左側断面近傍への内部展開を座標系 $o^L - x^L y^L z^L$ について、 $y^L/P, z^L/P \ll 1$ として展開すると、

$$\psi_R(y^L, z^L) = \Sigma_R^R G(y^L + P, z^L) + M_R^R H(y^L + P, z^L) + \Sigma_R^L G(y^L, z^L) + M_R^L H(y^L, z^L) \quad (32)$$

このとき、(26)～(28)式より、

$$G(y^L + P, z^L) \sim (1 + K_e z^L) g_S^L + K_e y^L g_A^L, \quad H(y^L + P, z^L) \sim (1 + K_e z^L) h_S^L + K_e y^L h_A^L \quad (33)$$

$$g_S^L = -\frac{1}{\pi} \operatorname{Re}[e^{iK_e P} E_1(iK_e P)] + i e^{-iK_e P} = g_S^R \quad (34)$$

$$g_A^L = \frac{1}{\pi} \left\{ \operatorname{Im}[e^{iK_e P} E_1(iK_e P)] + \frac{1}{K_e P} \right\} + e^{-iK_e P} = -g_A^R \quad (35)$$

$$h_S^L = -\frac{1}{\pi} \left\{ \operatorname{Im}[e^{iK_e P} E_1(iK_e P)] + \frac{1}{K_e P} \right\} - e^{-iK_e P} = -h_S^R \quad (36)$$

$$h_A^L = -\frac{1}{\pi} \left\{ \operatorname{Re}[e^{iK_e P} E_1(iK_e P)] - \frac{1}{(K_e P)^2} \right\} + i e^{-iK_e P} = h_A^R \quad (37)$$

となる。これらから(32)式の左側断面近傍への内部展開は次のように表される。

$$\begin{aligned} \psi_R(y^L, z^L) \sim & \Sigma_R^L G(y^L, z^L) + \Sigma_R^R \{(1 + K_e z^L) g_S^L + K_e y^L g_A^L\} \\ & + M_R^L H(y^L, z^L) + M_R^R \{(1 + K_e z^L) h_S^L + K_e y^L h_A^L\} \end{aligned} \quad (38)$$

(22)式と(38)式を比較すると、左側断面近傍について次の接合条件が得られる。

$$\begin{cases} \eta_2^L \sigma_2 + C_R^L (\sigma_2 - \bar{\sigma}_2) = \Sigma_R^L \\ \eta_1^L \mu_1 + \eta_3^L (\mu_3 + z_G \mu_1) + D_R^L (\mu_1 - \bar{\mu}_1) = M_R^L \\ 2i C_R^L \bar{\sigma}_2 = \Sigma_R^R g_S^L + M_R^R h_S^L \\ 2i D_R^L \bar{\mu}_1 = \Sigma_R^R g_A^L + M_R^R h_A^L \end{cases} \quad (39)$$

(31), (39)式から $\Sigma_R^{R,L}$, $M_R^{R,L}$ を消去すると, $C_R^{R,L}$, $D_R^{R,L}$, $\Sigma_R^{R,L}$, $M_R^{R,L}$ に対する次のような連立方程式が得られる。

$$\begin{cases} C_R^R 2i \bar{\sigma}_2 - C_R^L (\sigma_2 - \bar{\sigma}_2) g_S^R - D_R^L (\mu_1 - \bar{\mu}_1) h_S^R = \eta_2^L \sigma_2 g_S^R + \eta_1^L \mu_1 h_S^R + \eta_3^L (\mu_3 + z_G \mu_1) h_S^R \\ D_R^R 2i \bar{\mu}_1 - C_R^L (\sigma_2 - \bar{\sigma}_2) g_A^R - D_R^L (\mu_1 - \bar{\mu}_1) h_A^R = \eta_2^L \sigma_2 g_A^R + \eta_1^L \mu_1 h_A^R + \eta_3^L (\mu_3 + z_G \mu_1) h_A^R \\ C_R^L 2i \bar{\sigma}_2 - C_R^R (\sigma_2 - \bar{\sigma}_2) g_S^L - D_R^R (\mu_1 - \bar{\mu}_1) h_S^L = \eta_2^R \sigma_2 g_S^L + \eta_1^R \mu_1 h_S^L + \eta_3^R (\mu_3 + z_G \mu_1) h_S^L \\ D_R^L 2i \bar{\mu}_1 - C_R^R (\sigma_2 - \bar{\sigma}_2) g_A^L - D_R^R (\mu_1 - \bar{\mu}_1) h_A^L = \eta_2^R \sigma_2 g_A^L + \eta_1^R \mu_1 h_A^L + \eta_3^R (\mu_3 + z_G \mu_1) h_A^L \end{cases} \quad (40)$$

上式を $C_R^{R,L}$, $D_R^{R,L}$ について解くと,

$$\begin{aligned} C_R^R &= \frac{1}{2} \{ \mu_1 w_{12}^R \eta_1^R + \sigma_2 w_{22}^R \eta_2^R + (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{12}^R \eta_3^R + \mu_1 w_{32}^R \eta_1^L + \sigma_2 w_{42}^R \eta_2^L + (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{32}^R \eta_3^L \}, \\ D_R^R &= \frac{1}{2} \{ \mu_1 w_{11}^R \eta_1^R + \sigma_2 w_{21}^R \eta_2^R + (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{11}^R \eta_3^R + \mu_1 w_{31}^R \eta_1^L + \sigma_2 w_{41}^R \eta_2^L + (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{31}^R \eta_3^L \}, \\ C_R^L &= \frac{1}{2} \{ \mu_1 w_{12}^L \eta_1^L + \sigma_2 w_{22}^L \eta_2^L + (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{12}^L \eta_3^L + \mu_1 w_{32}^L \eta_1^R + \sigma_2 w_{42}^L \eta_2^R + (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{32}^L \eta_3^R \}, \\ D_R^L &= \frac{1}{2} \{ \mu_1 w_{11}^L \eta_1^L + \sigma_2 w_{21}^L \eta_2^L + (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{11}^L \eta_3^L + \mu_1 w_{31}^L \eta_1^R + \sigma_2 w_{41}^L \eta_2^R + (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{31}^L \eta_3^R \} \end{aligned} \quad (41)$$

となる。ここで, 上式の $w_{ij}^{R,L}$ は以下のように定義される関数である。

$$\begin{cases} w_{11}^R = 2(m_{23} h_S^L + m_{24} h_A^L), & w_{12}^R = 2(m_{13} h_S^L + m_{14} h_A^L) \\ w_{21}^R = 2(m_{23} g_S^L + m_{24} g_A^L), & w_{22}^R = 2(m_{13} g_S^L + m_{14} g_A^L) \\ w_{31}^R = 2(m_{21} h_S^R + m_{22} h_A^R), & w_{32}^R = 2(m_{11} h_S^R + m_{12} h_A^R) \\ w_{41}^R = 2(m_{21} g_S^R + m_{22} g_A^R), & w_{42}^R = 2(m_{11} g_S^R + m_{12} g_A^R) \end{cases} \quad (42)$$

$$\begin{cases} w_{11}^L = 2(m_{41} h_S^R + m_{42} h_A^R), & w_{12}^L = 2(m_{31} h_S^R + m_{32} h_A^R) \\ w_{21}^L = 2(m_{41} g_S^R + m_{42} g_A^R), & w_{22}^L = 2(m_{31} g_S^R + m_{32} g_A^R) \\ w_{31}^L = 2(m_{43} h_S^L + m_{44} h_A^L), & w_{32}^L = 2(m_{33} h_S^L + m_{34} h_A^L) \\ w_{41}^L = 2(m_{43} g_S^L + m_{44} g_A^L), & w_{42}^L = 2(m_{33} g_S^L + m_{34} g_A^L) \end{cases} \quad (43)$$

m_{ij} の具体的な関数形は付録1に示す。さらに, (26)～(29), (34)～(37)式から,

$$g_S^R = g_S^L, \quad g_A^R = -h_S^R = -g_A^L = h_S^L, \quad h_A^R = h_A^L \quad (44)$$

の関係があることがわかり, 付録1に示す m_{ij} には,

$$\begin{aligned} m_{11} &= m_{33}, & m_{12} &= -m_{34}, & m_{13} &= m_{31}, & m_{14} &= -m_{32}, \\ m_{21} &= -m_{43}, & m_{22} &= m_{44}, & m_{23} &= -m_{41}, & m_{24} &= m_{42} \end{aligned} \quad (45)$$

の関係があるので、結局、次式が成立することがわかる。

$$w_{ij}^R = w_{ij}^L \quad (46)$$

このため、以下では R 、 L の添え字を省略して w_{ij} と書くことにする。

(41)式では造波干渉係数 $C_R^{R,L}$ 、 $D_R^{R,L}$ が左右の船体動揺の関数となっており、船体の運動方程式を解いて、初めて造波干渉の強さも定まることがわかる。

これらを(13)式に代入すると、右側船断面の速度ポテンシャルは、

$$\begin{aligned} \psi_R^R = & \eta_1^R \phi_1 + \eta_2^R \phi_2 + \eta_3^R \phi_3 \\ & + \frac{1}{2}(\phi_2 - \bar{\phi}_2) \{ \mu_1 w_{12} \eta_1^R + \sigma_2 w_{22} \eta_2^R + (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{12} \eta_3^R \\ & + \mu_1 w_{32} \eta_1^L + \sigma_2 w_{42} \eta_2^L + (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{32} \eta_3^L \} \\ & + \frac{1}{2}(\phi_1 - \bar{\phi}_1) \{ \mu_1 w_{11} \eta_1^R + \sigma_2 w_{21} \eta_2^R + (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{11} \eta_3^R \\ & + \mu_1 w_{31} \eta_1^L + \sigma_2 w_{41} \eta_2^L + (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{31} \eta_3^L \} \end{aligned} \quad (47)$$

上式を無次元動揺速度 η_j^R 毎に整理すると、次のように表される。

$$\begin{aligned} \psi_R^R = & (\phi_1 + \mu_1 \lambda_1) \eta_1^R + (\phi_2 + \sigma_2 \lambda_2) \eta_2^R + \{ \phi_3 + (\mu_3 + z_G \mu_1) \lambda_1 \} \eta_3^R \\ & + \mu_1 \lambda_3 \eta_1^L + \sigma_2 \lambda_4 \eta_2^L + (\mu_3 + z_G \mu_1) \lambda_3 \eta_3^L \end{aligned} \quad (48)$$

同様に、(20)式の左側船近傍の速度ポテンシャルは、無次元動揺速度 η_j^L 毎に整理すると次のように表される。

$$\begin{aligned} \psi_R^L = & (\phi_1 + \mu_1 \lambda_1) \eta_1^L + (\phi_2 + \sigma_2 \lambda_2) \eta_2^L + \{ \phi_3 + (\mu_3 + z_G \mu_1) \lambda_1 \} \eta_3^L \\ & + \mu_1 \lambda_3 \eta_1^R + \sigma_2 \lambda_4 \eta_2^R + (\mu_3 + z_G \mu_1) \lambda_3 \eta_3^R \end{aligned} \quad (49)$$

ここで、 λ_i ($i=1,2,3,4$) は次式で定義された関数である。

$$\lambda_i = \frac{1}{2} \{ (\phi_1 - \bar{\phi}_1) w_{i1} + (\phi_2 - \bar{\phi}_2) w_{i2} \} \quad (50)$$

流体圧力は次式で計算される。

$$P_R^{R,L} = -\rho \zeta_a \left(i\omega_e - U \frac{\partial}{\partial x} \right) \psi_R^{R,L} \quad (51)$$

断面に働く力 $f_{Ri}^{R,L}$ は、 i 方向について、

$$f_{Ri}^{R,L} = -\rho \zeta_a \left(i\omega_e - U \frac{\partial}{\partial x} \right) \int_s n_i \psi_R^{R,L} ds \quad (52)$$

と書ける。断面周上の積分を、

$$a_{ij} + \frac{b_{ij}}{i\omega_e} = \int_s n_i \phi_j ds \quad (53)$$

と書くと、(52)式の外周上の積分は右側船について次のように表される。

$$\begin{aligned}
 \int_s n_i \psi_R^R ds = & \left(a_{i1} + \frac{b_{i1}}{i\omega_e} + \mu_1 \Lambda_{i1} \right) \eta_1^R + \left(a_{i2} + \frac{b_{i2}}{i\omega_e} + \sigma_2 \Lambda_{i2} \right) \eta_2^R \\
 & + \left\{ a_{i3} + \frac{b_{i3}}{i\omega_e} + z_G \left(a_{i1} + \frac{b_{i1}}{i\omega_e} \right) + (\mu_3 + z_G \mu_1) \Lambda_{i1} \right\} \eta_3^R \\
 & + \mu_1 \Lambda_{i3} \eta_1^L + \sigma_2 \Lambda_{i4} \eta_2^L + (\mu_3 + z_G \mu_1) \Lambda_{i3} \eta_3^L
 \end{aligned} \quad (54)$$

左側船については次のようになる。

$$\begin{aligned}
 \int_s n_i \psi_R^L ds = & \left(a_{i1} + \frac{b_{i1}}{i\omega_e} + \mu_1 \Lambda_{i1} \right) \eta_1^L + \left(a_{i2} + \frac{b_{i2}}{i\omega_e} + \sigma_2 \Lambda_{i2} \right) \eta_2^L \\
 & + \left\{ a_{i3} + \frac{b_{i3}}{i\omega_e} + z_G \left(a_{i1} + \frac{b_{i1}}{i\omega_e} \right) + (\mu_3 + z_G \mu_1) \Lambda_{i1} \right\} \eta_3^L \\
 & + \mu_1 \Lambda_{i3} \eta_1^R + \sigma_2 \Lambda_{i4} \eta_2^R + (\mu_3 + z_G \mu_1) \Lambda_{i3} \eta_3^R
 \end{aligned} \quad (55)$$

ここで、(54)、(55)式中の Λ_{ij} は次のように定義された関数である。

$$\Lambda_{ij} = \frac{1}{i\omega_e} (b_{i1} w_{j1} + b_{i2} w_{j2}) \quad (56)$$

(54)式に(12)、(56)式を代入し、両辺に入射波波面の速度 $\dot{\zeta}_a$ を乗じる。断面形状が左右対称な場合、流体力係数 a_{ij} 、 b_{ij} は $i+j$ が奇数の場合はゼロとなることを考慮すると、動揺方向 ($i=1,2,3$) 毎に以下のように表される。

$$\begin{aligned}
 \dot{\zeta}_a \int_s n_1 \psi_R^R ds = & i\omega_e \left\{ \left[a_{11} + \frac{b_{11}}{i\omega_e} (1 + \mu_1 w_{11}) \right] \left\{ \xi_2^R + \left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \xi_6^R \right\} \right. \\
 & + \frac{b_{11}}{i\omega_e} \sigma_2 w_{21} \left\{ \xi_3^R - \left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \xi_5^R \right\} \\
 & + \left\{ a_{13} + \frac{b_{13}}{i\omega_e} + z_G \left(a_{11} + \frac{b_{11}}{i\omega_e} \right) + \frac{b_{11}}{i\omega_e} (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{11} \right\} \xi_4^R \\
 & + \frac{b_{11}}{i\omega_e} \mu_1 w_{31} \left\{ \xi_2^L + \left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \xi_6^L \right\} + \frac{b_{11}}{i\omega_e} \sigma_2 w_{41} \left\{ \xi_3^L - \left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \xi_5^L \right\} \\
 & \left. + \frac{b_{11}}{i\omega_e} (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{31} \xi_4^L \right] \quad (57)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{\zeta}_a \int_s n_2 \psi_R^R ds = & i\omega_e \left[\frac{b_{22}}{i\omega_e} \mu_1 w_{12} \left\{ \xi_2^R + \left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \xi_6^R \right\} \right. \\
 & + \left\{ a_{22} + \frac{b_{22}}{i\omega_e} (1 + \sigma_2 w_{22}) \right\} \left\{ \xi_3^R - \left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \xi_5^R \right\} + \frac{b_{22}}{i\omega_e} (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{12} \xi_4^R \\
 & + \frac{b_{22}}{i\omega_e} \mu_1 w_{32} \left\{ \xi_2^L + \left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \xi_6^L \right\} + \frac{b_{22}}{i\omega_e} \sigma_2 w_{42} \left\{ \xi_3^L - \left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \xi_5^L \right\}
 \end{aligned}$$

$$\left. + \frac{b_{22}}{i\omega_e} (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{32} \xi_4^L \right] \quad (58)$$

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_a \int_s n_3 \psi_R^R ds = i\omega_e \left\{ \left[a_{31} + \frac{b_{31}}{i\omega_e} (1 + \mu_1 w_{11}) \right] \left\{ \xi_2^R + \left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \xi_6^R \right\} \right. \\ + \frac{b_{31}}{i\omega_e} \sigma_2 w_{21} \left\{ \xi_3^R - \left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \xi_5^R \right\} \\ + \left\{ a_{33} + \frac{b_{33}}{i\omega_e} + z_G \left(a_{31} + \frac{b_{31}}{i\omega_e} \right) + \frac{b_{31}}{i\omega_e} (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{11} \right\} \xi_4^R \\ + \frac{b_{31}}{i\omega_e} \mu_1 w_{31} \left\{ \xi_2^L + \left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \xi_6^L \right\} + \frac{b_{31}}{i\omega_e} \sigma_2 w_{41} \left\{ \xi_3^L - \left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \xi_5^L \right\} \\ \left. + \frac{b_{31}}{i\omega_e} (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{31} \xi_4^L \right] \quad (59) \end{aligned}$$

これらを用いると、船全体の流体力は以下のように得られる。まず、sway 方向の流体力は、次のように表される。

$$\begin{aligned} F_{R2}^R = -\rho i\omega_e \dot{\xi}_a \int_{-L/2}^{L/2} \left(1 - \frac{U}{i\omega_e} \frac{\partial}{\partial x} \right) \int_s n_1 \psi_R^R ds dx \\ = \rho \omega_e^2 \xi_2^R \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} \left\{ a_{11} + \frac{b_{11}}{i\omega_e} (1 + \mu_1 w_{11}) \right\} dx - \frac{U}{i\omega_e} \left[a_{11} + \frac{b_{11}}{i\omega_e} (1 + \mu_1 w_{11}) \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\ + \rho \omega_e^2 \xi_3^R \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{11}}{i\omega_e} \sigma_2 w_{21} dx - \frac{U}{i\omega_e} \left[\frac{b_{11}}{i\omega_e} \sigma_2 w_{21} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\ + \rho \omega_e^2 \xi_4^R \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} \left\{ a_{13} + \frac{b_{13}}{i\omega_e} + z_G \left(a_{11} + \frac{b_{11}}{i\omega_e} \right) + \frac{b_{11}}{i\omega_e} (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{11} \right\} dx \right. \\ \left. - \frac{U}{i\omega_e} \left[a_{13} + \frac{b_{13}}{i\omega_e} + z_G \left(a_{11} + \frac{b_{11}}{i\omega_e} \right) + \frac{b_{11}}{i\omega_e} (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{11} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\ + \rho \omega_e^2 \xi_5^R \left\{ - \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \frac{b_{11}}{i\omega_e} \sigma_2 w_{21} dx + \frac{U}{i\omega_e} \left[\left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \frac{b_{11}}{i\omega_e} \sigma_2 w_{21} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\ + \rho \omega_e^2 \xi_6^R \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \left\{ a_{11} + \frac{b_{11}}{i\omega_e} (1 + \mu_1 w_{11}) \right\} dx \right. \\ \left. - \frac{U}{i\omega_e} \left[\left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \left\{ a_{11} + \frac{b_{11}}{i\omega_e} (1 + \mu_1 w_{11}) \right\} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\ + \rho \omega_e^2 \xi_2^L \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{11}}{i\omega_e} \mu_1 w_{31} dx - \frac{U}{i\omega_e} \left[\frac{b_{11}}{i\omega_e} \mu_1 w_{31} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \rho \omega_e^2 \xi_3^L \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{11}}{i\omega_e} \sigma_2 w_{41} dx - \frac{U}{i\omega_e} \left[\frac{b_{11}}{i\omega_e} \sigma_2 w_{41} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\
 & + \rho \omega_e^2 \xi_4^L \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{11}}{i\omega_e} (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{31} dx - \frac{U}{i\omega_e} \left[\frac{b_{11}}{i\omega_e} (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{31} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\
 & + \rho \omega_e^2 \xi_5^L \left\{ - \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \frac{b_{11}}{i\omega_e} \sigma_2 w_{41} dx + \frac{U}{i\omega_e} \left[\left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \frac{b_{11}}{i\omega_e} \sigma_2 w_{41} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\
 & + \rho \omega_e^2 \xi_6^L \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \frac{b_{11}}{i\omega_e} \mu_1 w_{31} dx - \frac{U}{i\omega_e} \left[\left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \frac{b_{11}}{i\omega_e} \mu_1 w_{31} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \quad (60)
 \end{aligned}$$

Heave 方向の流体力は、次のように表される。

$$\begin{aligned}
 F_{R3}^R &= -\rho i \omega_e \zeta_a \int_{-L/2}^{L/2} \left(1 - \frac{U}{i\omega_e} \frac{\partial}{\partial x} \right) \int_s n_2 \psi_R^R ds dx \\
 &= \rho \omega_e^2 \xi_2^R \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{22}}{i\omega_e} \mu_1 w_{12} dx - \frac{U}{i\omega_e} \left[\frac{b_{22}}{i\omega_e} \mu_1 w_{12} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\
 &+ \rho \omega_e^2 \xi_3^R \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} \left\{ a_{22} + \frac{b_{22}}{i\omega_e} (1 + \sigma_2 w_{22}) \right\} dx - \frac{U}{i\omega_e} \left[a_{22} + \frac{b_{22}}{i\omega_e} (1 + \sigma_2 w_{22}) \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\
 &+ \rho \omega_e^2 \xi_4^R \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{22}}{i\omega_e} (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{12} dx - \frac{U}{i\omega_e} \left[\frac{b_{22}}{i\omega_e} (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{12} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\
 &+ \rho \omega_e^2 \xi_5^R \left\{ - \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \left(a_{22} + \frac{b_{22}}{i\omega_e} (1 + \sigma_2 w_{22}) \right) dx \right. \\
 &\quad \left. + \frac{U}{i\omega_e} \left[\left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \left(a_{22} + \frac{b_{22}}{i\omega_e} (1 + \sigma_2 w_{22}) \right) \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\
 &+ \rho \omega_e^2 \xi_6^R \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \frac{b_{22}}{i\omega_e} \mu_1 w_{12} dx - \frac{U}{i\omega_e} \left[\left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \frac{b_{22}}{i\omega_e} \mu_1 w_{12} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\
 &+ \rho \omega_e^2 \xi_2^L \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{22}}{i\omega_e} \mu_1 w_{32} dx - \frac{U}{i\omega_e} \left[\frac{b_{22}}{i\omega_e} \mu_1 w_{32} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\
 &+ \rho \omega_e^2 \xi_3^L \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{22}}{i\omega_e} \sigma_2 w_{42} dx - \frac{U}{i\omega_e} \left[\frac{b_{22}}{i\omega_e} \sigma_2 w_{42} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\
 &+ \rho \omega_e^2 \xi_4^L \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{22}}{i\omega_e} (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{32} dx - \frac{U}{i\omega_e} \left[\frac{b_{22}}{i\omega_e} (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{32} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\
 &+ \rho \omega_e^2 \xi_5^L \left\{ - \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \frac{b_{22}}{i\omega_e} \sigma_2 w_{42} dx + \frac{U}{i\omega_e} \left[\left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \frac{b_{22}}{i\omega_e} \sigma_2 w_{42} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\}
 \end{aligned}$$

$$+ \rho \omega_e^2 \xi_6^L \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \frac{b_{22}}{i\omega_e} \mu_1 w_{32} dx - \frac{U}{i\omega_e} \left[\left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \frac{b_{22}}{i\omega_e} \mu_1 w_{32} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \quad (61)$$

Roll 方向の流体力は、次のように表される。

$$\begin{aligned} F_{R4}^R &= -\rho i \omega_e \dot{\xi}_a \int_{-L/2}^{L/2} \left(1 - \frac{U}{i\omega_e} \frac{\partial}{\partial x} \right) \int_s n_3 \psi_R^R ds dx \\ &= \rho \omega_e^2 \xi_2^R \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} \left\{ a_{31} + \frac{b_{31}}{i\omega_e} (1 + \mu_1 w_{11}) \right\} dx - \frac{U}{i\omega_e} \left[a_{31} + \frac{b_{31}}{i\omega_e} (1 + \mu_1 w_{11}) \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\ &\quad + \rho \omega_e^2 \xi_3^R \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{31}}{i\omega_e} \sigma_2 w_{21} dx - \frac{U}{i\omega_e} \left[\frac{b_{31}}{i\omega_e} \sigma_2 w_{21} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\ &\quad + \rho \omega_e^2 \xi_4^R \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} \left\{ a_{33} + \frac{b_{33}}{i\omega_e} + z_G \left(a_{31} + \frac{b_{31}}{i\omega_e} \right) + \frac{b_{31}}{i\omega_e} (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{11} \right\} dx \right. \\ &\quad \left. - \frac{U}{i\omega_e} \left[a_{33} + \frac{b_{33}}{i\omega_e} + z_G \left(a_{31} + \frac{b_{31}}{i\omega_e} \right) + \frac{b_{31}}{i\omega_e} (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{11} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\ &\quad + \rho \omega_e^2 \xi_5^R \left\{ - \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \frac{b_{31}}{i\omega_e} \sigma_2 w_{21} dx + \frac{U}{i\omega_e} \left[\left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \frac{b_{31}}{i\omega_e} \sigma_2 w_{21} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\ &\quad + \rho \omega_e^2 \xi_6^R \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \left\{ a_{31} + \frac{b_{31}}{i\omega_e} (1 + \mu_1 w_{11}) \right\} dx \right. \\ &\quad \left. - \frac{U}{i\omega_e} \left[\left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \left\{ a_{31} + \frac{b_{31}}{i\omega_e} (1 + \mu_1 w_{11}) \right\} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\ &\quad + \rho \omega_e^2 \xi_2^L \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{31}}{i\omega_e} \mu_1 w_{31} dx - \frac{U}{i\omega_e} \left[\frac{b_{31}}{i\omega_e} \mu_1 w_{31} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\ &\quad + \rho \omega_e^2 \xi_3^L \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{31}}{i\omega_e} \sigma_2 w_{41} dx - \frac{U}{i\omega_e} \left[\frac{b_{31}}{i\omega_e} \sigma_2 w_{41} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\ &\quad + \rho \omega_e^2 \xi_4^L \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{31}}{i\omega_e} (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{31} dx - \frac{U}{i\omega_e} \left[\frac{b_{31}}{i\omega_e} (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{31} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\ &\quad + \rho \omega_e^2 \xi_5^L \left\{ - \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \frac{b_{31}}{i\omega_e} \sigma_2 w_{41} dx + \frac{U}{i\omega_e} \left[\left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \frac{b_{31}}{i\omega_e} \sigma_2 w_{41} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\ &\quad + \rho \omega_e^2 \xi_6^L \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \frac{b_{31}}{i\omega_e} \mu_1 w_{31} dx - \frac{U}{i\omega_e} \left[\left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \frac{b_{31}}{i\omega_e} \mu_1 w_{31} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \quad (62) \end{aligned}$$

Pitch 方向の流体力は、次のように表される。

$$F_{R5}^R = \rho i \omega_e \dot{\xi}_a \int_{-L/2}^{L/2} x_b \left(1 - \frac{U}{i\omega_e} \frac{\partial}{\partial x} \right) \int_s n_2 \psi_R^R ds dx$$

$$\begin{aligned}
 &= \rho \omega_e^2 \xi_2^R \left\{ - \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b + \frac{U}{i\omega_e} \right) \frac{b_{22}}{i\omega_e} \mu_1 w_{12} dx + \frac{U}{i\omega_e} \left[x_b \frac{b_{22}}{i\omega_e} \mu_1 w_{12} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\
 &+ \rho \omega_e^2 \xi_3^R \left\{ - \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b + \frac{U}{i\omega_e} \right) \left\{ a_{22} + \frac{b_{22}}{i\omega_e} (1 + \sigma_2 w_{22}) \right\} dx \right. \\
 &\quad \left. + \frac{U}{i\omega_e} \left[x_b \left\{ a_{22} + \frac{b_{22}}{i\omega_e} (1 + \sigma_2 w_{22}) \right\} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\
 &+ \rho \omega_e^2 \xi_4^R \left\{ - \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b + \frac{U}{i\omega_e} \right) \frac{b_{22}}{i\omega_e} (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{12} dx + \frac{U}{i\omega_e} \left[x_b \frac{b_{22}}{i\omega_e} (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{12} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\
 &+ \rho \omega_e^2 \xi_5^R \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b^2 + \frac{U^2}{\omega_e^2} \right) \left\{ a_{22} + \frac{b_{22}}{i\omega_e} (1 + \sigma_2 w_{22}) \right\} dx \right. \\
 &\quad \left. - \frac{U}{i\omega_e} \left[x_b \left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \left\{ a_{22} + \frac{b_{22}}{i\omega_e} (1 + \sigma_2 w_{22}) \right\} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\
 &+ \rho \omega_e^2 \xi_6^R \left\{ - \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b^2 + \frac{U^2}{\omega_e^2} \right) \frac{b_{22}}{i\omega_e} \mu_1 w_{12} dx + \frac{U}{i\omega_e} \left[x_b \left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \frac{b_{22}}{i\omega_e} \mu_1 w_{12} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\
 &+ \rho \omega_e^2 \xi_2^L \left\{ - \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b + \frac{U}{i\omega_e} \right) \frac{b_{22}}{i\omega_e} \mu_1 w_{32} dx + \frac{U}{i\omega_e} \left[x_b \frac{b_{22}}{i\omega_e} \mu_1 w_{32} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\
 &+ \rho \omega_e^2 \xi_3^L \left\{ - \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b + \frac{U}{i\omega_e} \right) \frac{b_{22}}{i\omega_e} \sigma_2 w_{42} dx + \frac{U}{i\omega_e} \left[x_b \frac{b_{22}}{i\omega_e} \sigma_2 w_{42} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\
 &+ \rho \omega_e^2 \xi_4^L \left\{ - \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b + \frac{U}{i\omega_e} \right) \frac{b_{22}}{i\omega_e} (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{32} dx + \frac{U}{i\omega_e} \left[x_b \frac{b_{22}}{i\omega_e} (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{32} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\
 &+ \rho \omega_e^2 \xi_5^L \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b^2 + \frac{U^2}{\omega_e^2} \right) \frac{b_{22}}{i\omega_e} \sigma_2 w_{42} dx - \frac{U}{i\omega_e} \left[x_b \left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \frac{b_{22}}{i\omega_e} \sigma_2 w_{42} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\
 &+ \rho \omega_e^2 \xi_6^L \left\{ - \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b^2 + \frac{U^2}{\omega_e^2} \right) \frac{b_{22}}{i\omega_e} \mu_1 w_{32} dx + \frac{U}{i\omega_e} \left[x_b \left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \frac{b_{22}}{i\omega_e} \mu_1 w_{32} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \quad (63)
 \end{aligned}$$

Yaw 方向の流体力は、次のように表される。

$$\begin{aligned}
 F_{R6}^R &= -\rho i \omega_e \dot{\xi}_a \int_{-L/2}^{L/2} x_b \left(1 - \frac{U}{i\omega_e} \frac{\partial}{\partial x} \right) \int_s n_1 \psi_R^R ds dx \\
 &= \rho \omega_e^2 \xi_2^R \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b + \frac{U}{i\omega_e} \right) \left\{ a_{11} + \frac{b_{11}}{i\omega_e} (1 + \mu_1 w_{11}) \right\} dx - \frac{U}{i\omega_e} \left[x_b \left\{ a_{11} + \frac{b_{11}}{i\omega_e} (1 + \mu_1 w_{11}) \right\} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\
 &+ \rho \omega_e^2 \xi_3^R \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b + \frac{U}{i\omega_e} \right) \frac{b_{11}}{i\omega_e} \sigma_2 w_{21} dx - \frac{U}{i\omega_e} \left[x_b \frac{b_{11}}{i\omega_e} \sigma_2 w_{21} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \rho \omega_e^2 \xi_4^R \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b + \frac{U}{i\omega_e} \right) \left\{ a_{13} + \frac{b_{13}}{i\omega_e} + z_G \left(a_{11} + \frac{b_{11}}{i\omega_e} \right) + \frac{b_{11}}{i\omega_e} (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{11} \right\} dx \right. \\
 & \quad \left. - \frac{U}{i\omega_e} \left[x_b \left\{ a_{13} + \frac{b_{13}}{i\omega_e} + z_G \left(a_{11} + \frac{b_{11}}{i\omega_e} \right) + \frac{b_{11}}{i\omega_e} (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{11} \right\} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\
 & + \rho \omega_e^2 \xi_5^R \left\{ - \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b^2 + \frac{U^2}{\omega_e^2} \right) \frac{b_{11}}{i\omega_e} \sigma_2 w_{21} dx + \frac{U}{i\omega_e} \left[x_b \left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \frac{b_{11}}{i\omega_e} \sigma_2 w_{21} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\
 & + \rho \omega_e^2 \xi_6^R \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b^2 + \frac{U^2}{\omega_e^2} \right) \left\{ a_{11} + \frac{b_{11}}{i\omega_e} (1 + \mu_1 w_{11}) \right\} dx \right. \\
 & \quad \left. - \frac{U}{i\omega_e} \left[x_b \left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \left\{ a_{11} + \frac{b_{11}}{i\omega_e} (1 + \mu_1 w_{11}) \right\} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\
 & + \rho \omega_e^2 \xi_2^L \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b + \frac{U}{i\omega_e} \right) \frac{b_{11}}{i\omega_e} \mu_1 w_{31} dx - \frac{U}{i\omega_e} \left[x_b \frac{b_{11}}{i\omega_e} \mu_1 w_{31} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\
 & + \rho \omega_e^2 \xi_3^L \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b + \frac{U}{i\omega_e} \right) \frac{b_{11}}{i\omega_e} \sigma_2 w_{41} dx - \frac{U}{i\omega_e} \left[x_b \frac{b_{11}}{i\omega_e} \sigma_2 w_{41} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\
 & + \rho \omega_e^2 \xi_4^L \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b + \frac{U}{i\omega_e} \right) \frac{b_{11}}{i\omega_e} (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{31} dx - \frac{U}{i\omega_e} \left[x_b \frac{b_{11}}{i\omega_e} (\mu_3 + z_G \mu_1) w_{31} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\
 & + \rho \omega_e^2 \xi_5^L \left\{ - \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b^2 + \frac{U^2}{\omega_e^2} \right) \frac{b_{11}}{i\omega_e} \sigma_2 w_{41} dx + \frac{U}{i\omega_e} \left[x_b \left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \frac{b_{11}}{i\omega_e} \sigma_2 w_{41} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \\
 & + \rho \omega_e^2 \xi_6^L \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b^2 + \frac{U^2}{\omega_e^2} \right) \frac{b_{11}}{i\omega_e} \mu_1 w_{31} - \frac{U}{i\omega_e} \left[x_b \left(x_b - \frac{U}{i\omega_e} \right) \frac{b_{11}}{i\omega_e} \mu_1 w_{31} \right]_{-L/2}^{L/2} \right\} \quad (64)
 \end{aligned}$$

(60)～(64)式は、動揺変位毎に、中括弧内の実部が付加質量または付加慣性モーメント、虚部を ω_e で除したものが造波減衰係数となる。同様にして、 F_{Ri}^L は(60)～(64)式の上付き添え字 R を L に、 L を R に置換することによって得られる。

(60)～(64)式を、付録2に示す流体力係数を用いて表すと次式となる。

$$F_i^R = - \sum_{j=2}^6 \{ (\omega_e^2 A_{ij} - i\omega_e B_{ij}) \xi_j^R + (\omega_e^2 D_{ij} - i\omega_e E_{ij}) \xi_j^L \}, \quad (i=2 \sim 6) \quad (65)$$

$$F_i^L = - \sum_{j=2}^6 \{ (\omega_e^2 A_{ij} - i\omega_e B_{ij}) \xi_j^L + (\omega_e^2 D_{ij} - i\omega_e E_{ij}) \xi_j^R \}, \quad (i=2 \sim 6) \quad (66)$$

(65)、(66)式右边に、慣性力と復原力を加えたものが2隻の網船の船体運動方程式の左辺になる。両式から2隻の船体動揺は造波干渉を介して連成することがわかり、二艘旋網漁船の船体運動方程式は surge を除くとき、5自由度ずつ2隻に対する10自由度連成運動方程式となる。

3 流体力係数の計算結果と考察

造波干渉を考慮しない場合の2次元速度ポテンシャル、流体力係数などは、文献[10]に掲載されたプログラムを利用した。また、前章では式変形の簡単のため、(6)、(7)式に示すように多重極展開法の表現を用いて定式化を行ったが、実際の漁船船型に対しては特異点分布法の方が適しているため、(6)式の μ_1, σ_2, μ_3 は船体外周上の速度ポテンシャルから次式によって求めた。

$$\mu_1(x), \sigma_2(x), \mu_3(x) = \int_{c(x)} \left(\frac{\partial \phi_j}{\partial n} - \phi_j \frac{\partial}{\partial n} \right) e^{K_e(z+iy)} dc, \quad (j=1,2,3) \quad (67)$$

計算対象とした旋網船の概略線図を Fig. 3 に、主要目を Table 1 に、実船の写真を Photo 2 に示す。Table 1 において Δ は排水量、 L_{pp} は垂線間長、 L_{wl} は水線長、 B は水線最大幅、 d は喫水、 C_{mid} は中央断面係数、 C_p は柱形係数、 C_b は方形係数、 x_G は船首側を正としたミッドシップからの長さ方向の重心位置、 x_G/L_{pp} は L_{pp} で除したその無次元値である。なお、高さ方向の重心位置 z_G は実船の値が不明であるため、今回の計算ではゼロと仮定した。前後喫水についても、網の乾燥時と含水時では大きく異なるため、今回はトリムゼロの計画満載喫水とした。また、2船間の距離 P は、実際の航行条件を参考に10mとした。

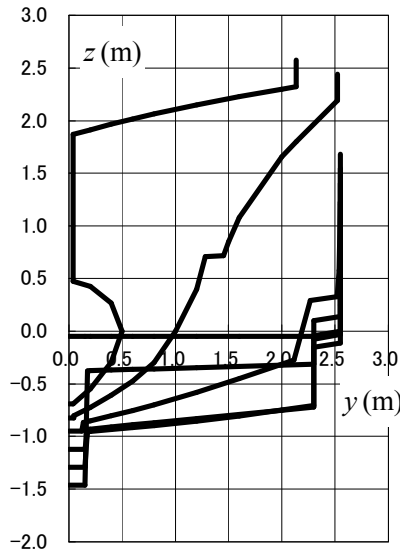


Fig. 3. Body plan of the target purse seiner.



Photo 2. The target purse seiners for calculation.

Table 1. Principal dimensions of the target purse seiner.

Δ (t)	L_{pp} (m)	L_{wl} (m)	B (m)	d (m)
80.432	20.500	22.550	5.100	1.000
C_{mid}	C_p	C_b	x_G/L_{pp}	z_G/d
0.869	0.691	0.600	-0.017	0.0

流体力係数は動揺5方向に対して各20項、合計100項と極めて多数になるため、以下では動揺方向として sway 方向と heave 方向のみ取り上げ、この2つの方向の動揺による各動揺方向の流体力係数の計算結果を示すこととした。2次元流体力において、roll は sway と略同傾向の値をとり、pitch は heave に、yaw は sway に、それぞれ重心位置からの船長方向のレバーをかけたものであるから、反対称運動の代表として sway を、対称運動の代表として heave を調べておけば、それ以外の動揺モードについても大凡の傾向を知ることができる。

以下の Fig. 4 と 5 では、船長方向 j モードの動揺による i モードの流体力係数は、 ρ を流体の密度として以下の定義に基づいて無次元化した値を示している。

$$a_{ij} = \frac{A_{ij}}{\rho \nabla}, \quad b_{ij} = \frac{B_{ij}}{\rho \nabla \sqrt{g/L}}, \quad d_{ij} = \frac{D_{ij}}{\rho \nabla}, \quad e_{ij} = \frac{E_{ij}}{\rho \nabla \sqrt{g/L}} \quad (68)$$

$$a_{ij} = \frac{A_{ij}}{\rho \nabla L}, \quad b_{ij} = \frac{B_{ij}}{\rho \nabla L \sqrt{g/L}}, \quad d_{ij} = \frac{D_{ij}}{\rho \nabla L}, \quad e_{ij} = \frac{E_{ij}}{\rho \nabla L \sqrt{g/L}} \quad (69)$$

$$a_{ij} = \frac{A_{ij}}{\rho \nabla L^2}, \quad b_{ij} = \frac{B_{ij}}{\rho \nabla L^2 \sqrt{g/L}}, \quad d_{ij} = \frac{D_{ij}}{\rho \nabla L^2}, \quad e_{ij} = \frac{E_{ij}}{\rho \nabla L^2 \sqrt{g/L}} \quad (70)$$

ここで、(68)式は i, j 両モードとも並進運動 ($i, j = 1$:surge, 2:sway, 3:heave) の場合の無次元化、(69)式は i モード、 j モードの何れか一方が回転運動 ($i, j = 4$:roll, 5:pitch, 6:yaw) の場合の無次元化、(70)式は、 i, j 両モードとも回転運動の場合の無次元化にそれぞれ用いる。

Fig. 4 及び 5 の横軸には無次元角周波数 $\omega_e \sqrt{L/g}$ をとり、図の凡例において、2 船間の造波干渉を考慮した流体力係数は at_{ij} のように t を付けて表し、干渉を考慮しない、即ち単船の場合の流体力係数は a_{ij} と示す。図の縦軸は、凡例に示される流体力係数となる。

Fig. 4 及び 5 の各図では、フルード数 0.0 と 0.3 の場合について、2 隻の間の造波干渉を考慮した流体力係数と、単船航行の場合に相当する干渉を考慮しない流体力係数とを示している。船体は左右対称であるので、2 章で述べた通り、 $i+j$ が奇数となる流体力係数は、造波干渉を考慮しない場合にはゼロとなるが、2 隻の間の造波干渉を考慮した場合には、それらの流体力係数も有意な値を持っている。また、流体力係数 d_{ij} と e_{ij} も値を持っており、これらは全て 2 隻の間の造波干渉を考慮したことによって生じたものである。なお、船首端は F.P. としてエンドタームは船首尾端部両方を考慮したが、 b_{22} や et_{22} などでは前進速度の影響は顕著ではなく、グラフ上はフルード数 0.0 と 0.3 の結果が重なっている。

フルード数 0.3 の場合に特に顕著に示されているが、造波干渉を考慮した流体力係数は、造波干渉を考慮しない場合の流体力係数の周りに振動しており、

主要な流体力係数に関しては、その振幅は周波数が低くなるにつれて大きくなる傾向が見られる。また、正值にしる負値にしる、そのピーク値は何れの流体力係数でも同じ周波数で発生しており、このことからこれらの周波数では、船体の造った波が2船間において共振を起こしていることが推測される。

双胴船の断面流体力の計算において現れた波無し周波数は、3次元船体に対する積分値であることから計算結果には明瞭には現れていないが、対応する波浪強制力の推定法は双胴船の場合と同じ取り扱いとなるため、波向きや船速、動揺周波数によって、局所的には波無し状態が生じているものと考えられる。

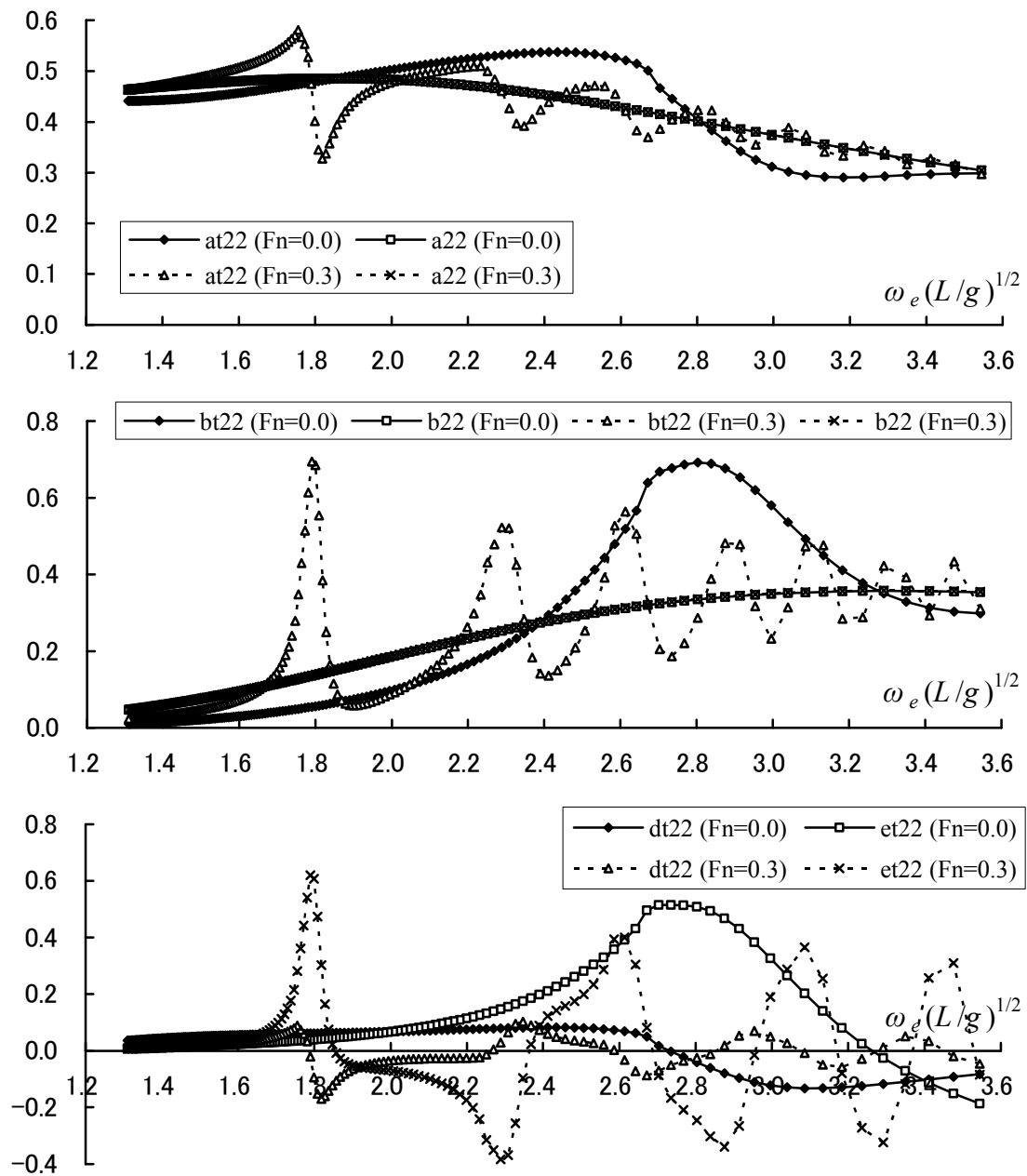


Fig. 4. Hydrodynamic coefficients due to sway motion.

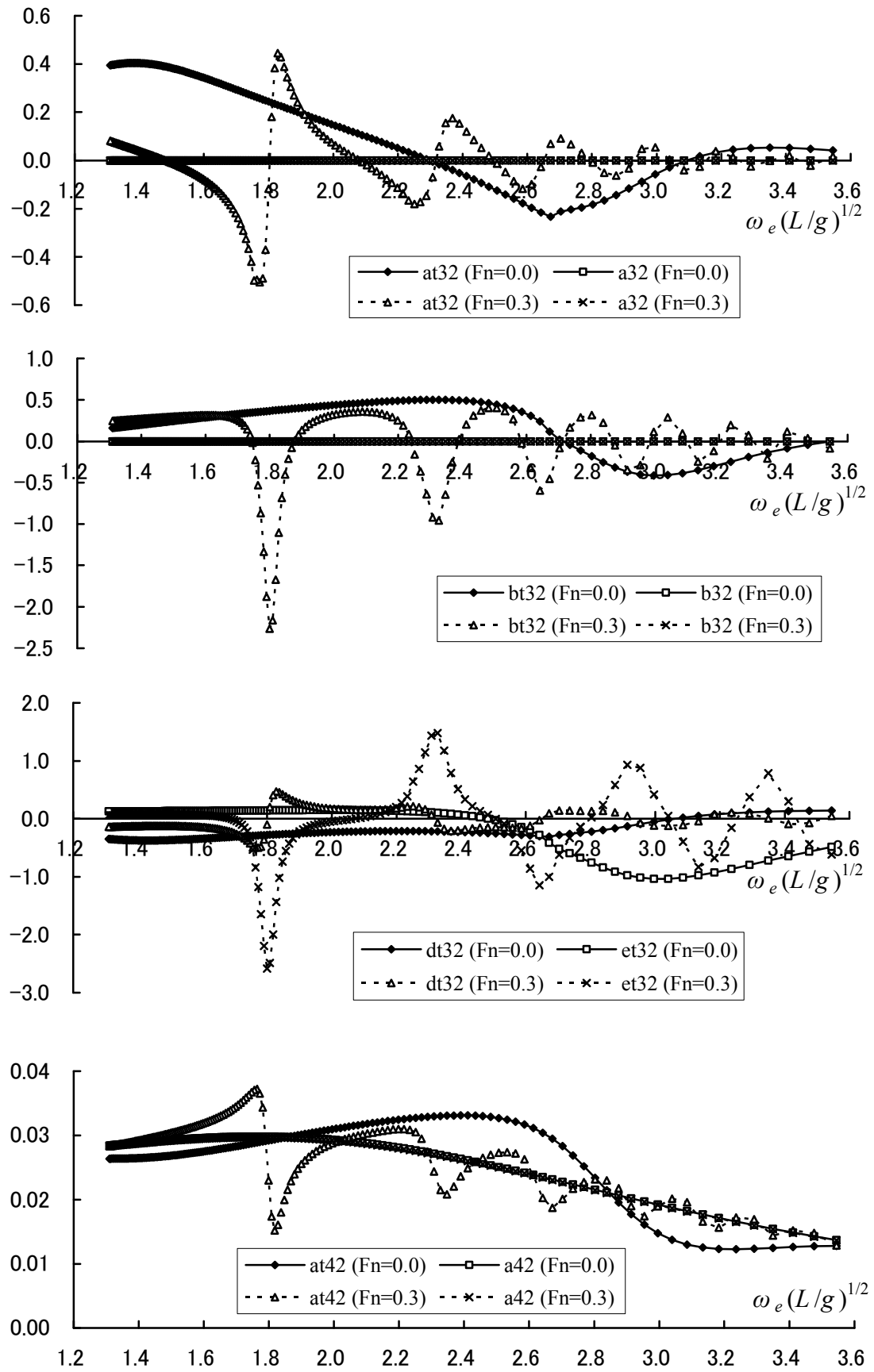


Fig. 4 (cont.). Hydrodynamic coefficients due to sway motion.

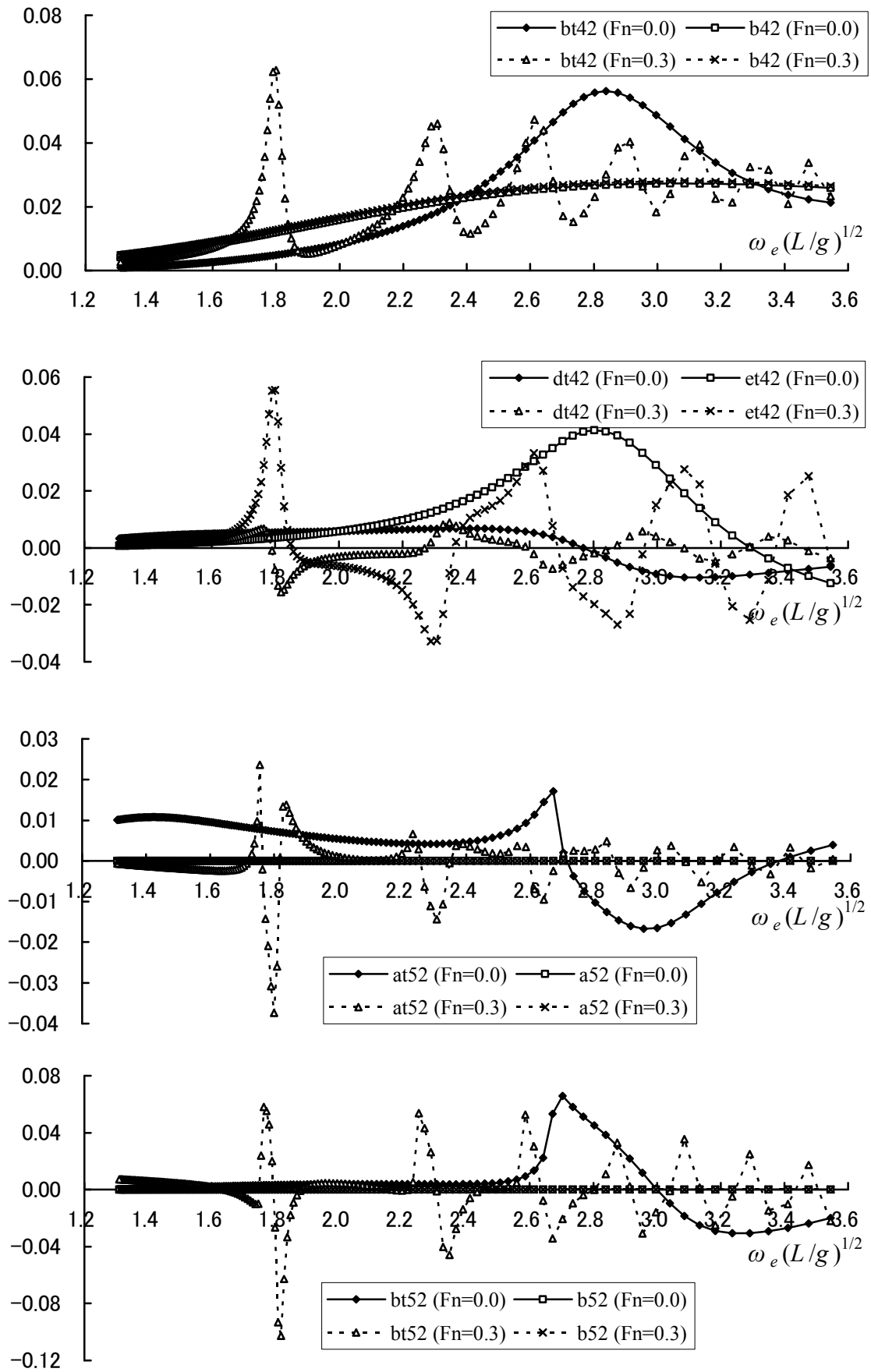


Fig. 4 (cont.). Hydrodynamic coefficients due to sway motion.

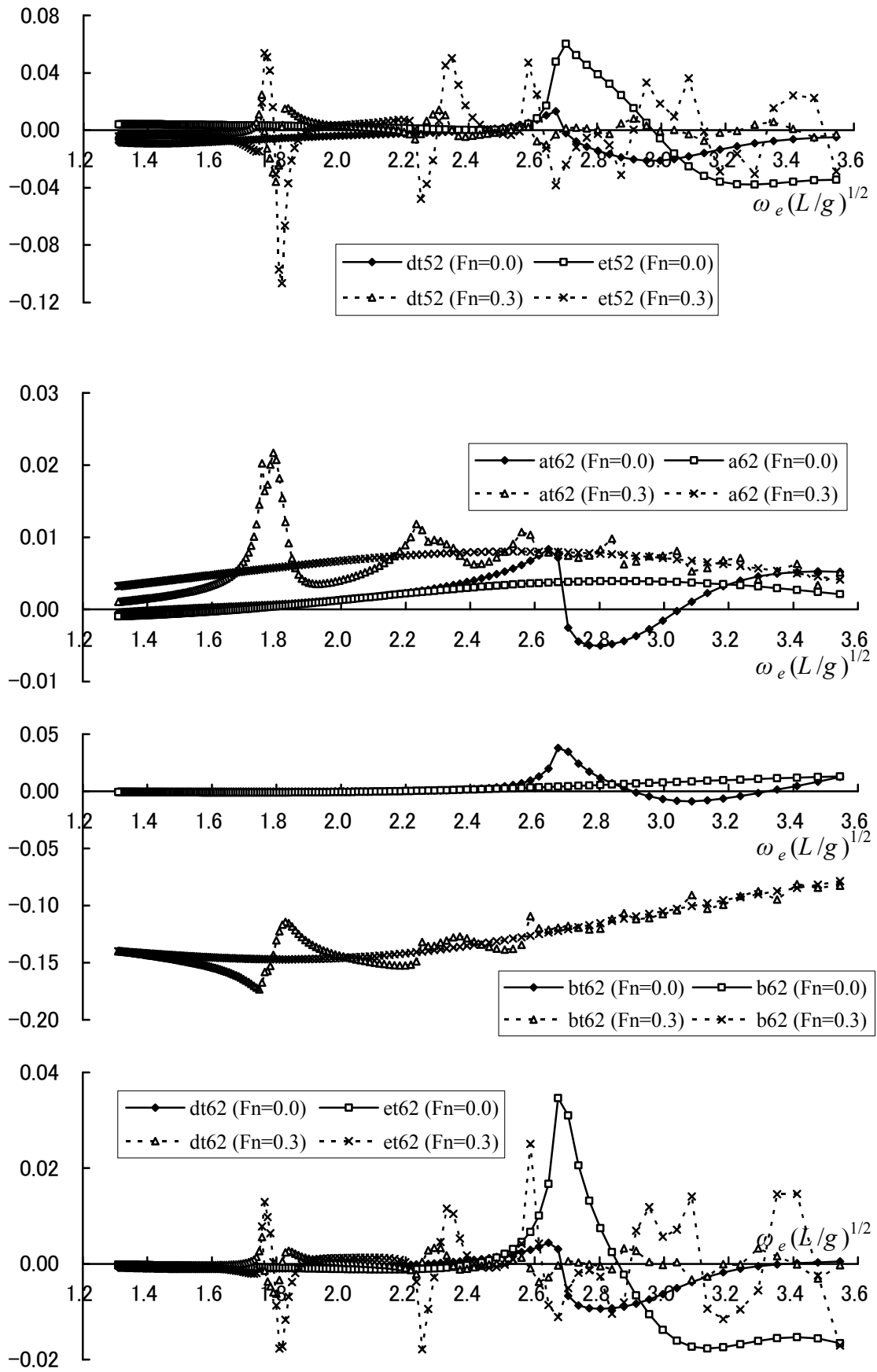


Fig. 4 (cont.). Hydrodynamic coefficients due to sway motion.

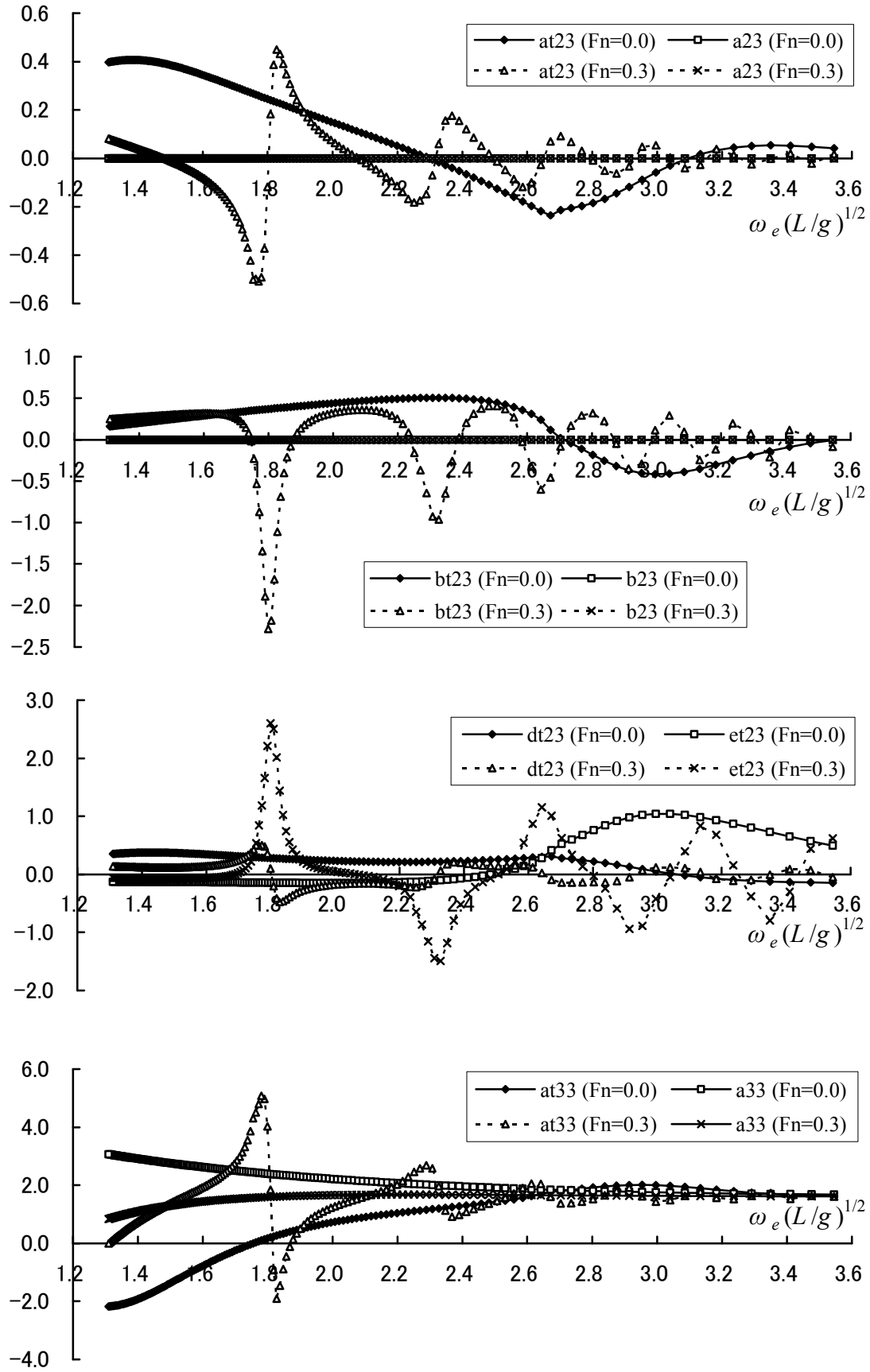


Fig. 5. Hydrodynamic coefficients due to heave motion.

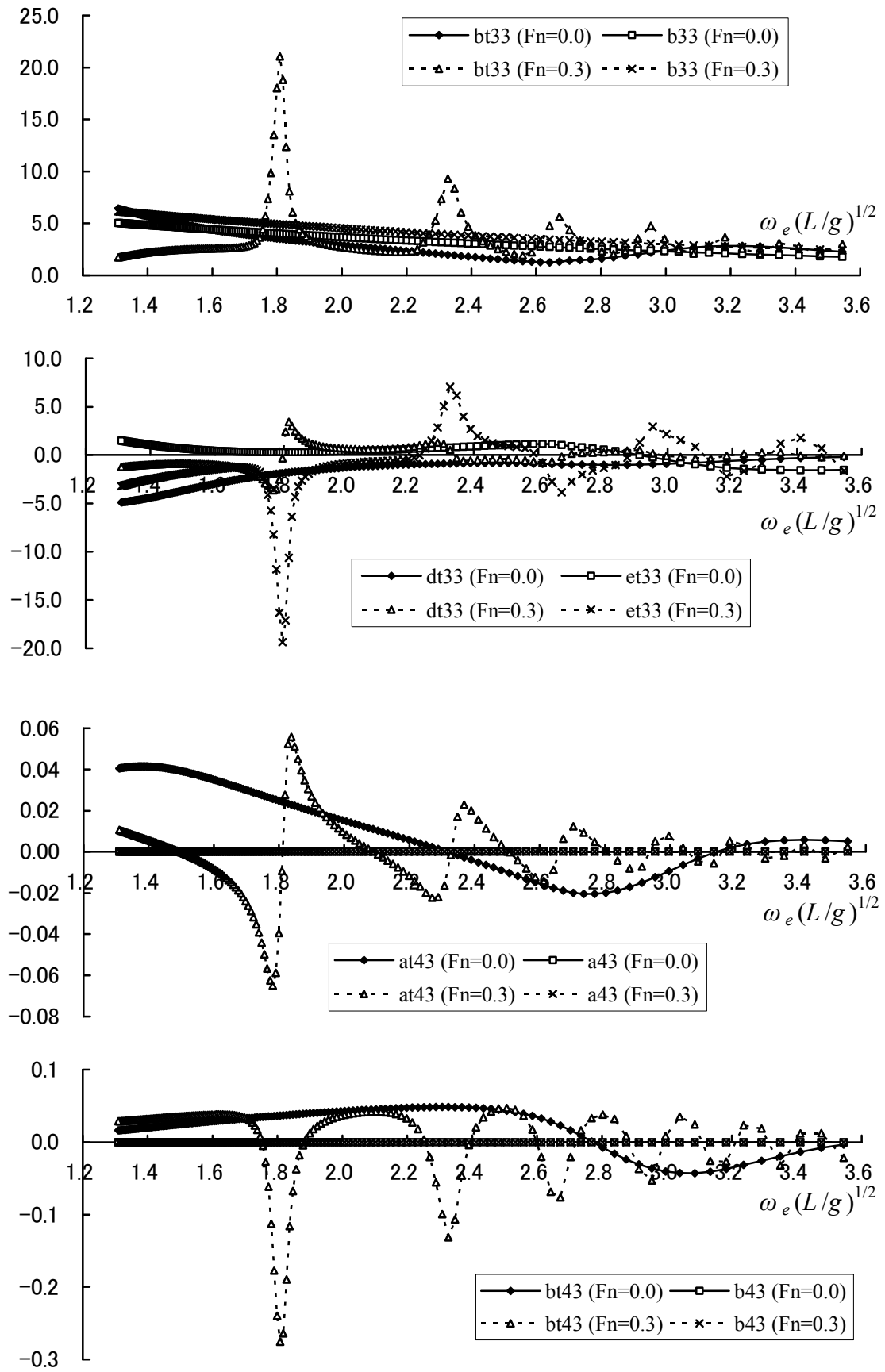


Fig. 5 (cont.). Hydrodynamic coefficients due to heave motion.

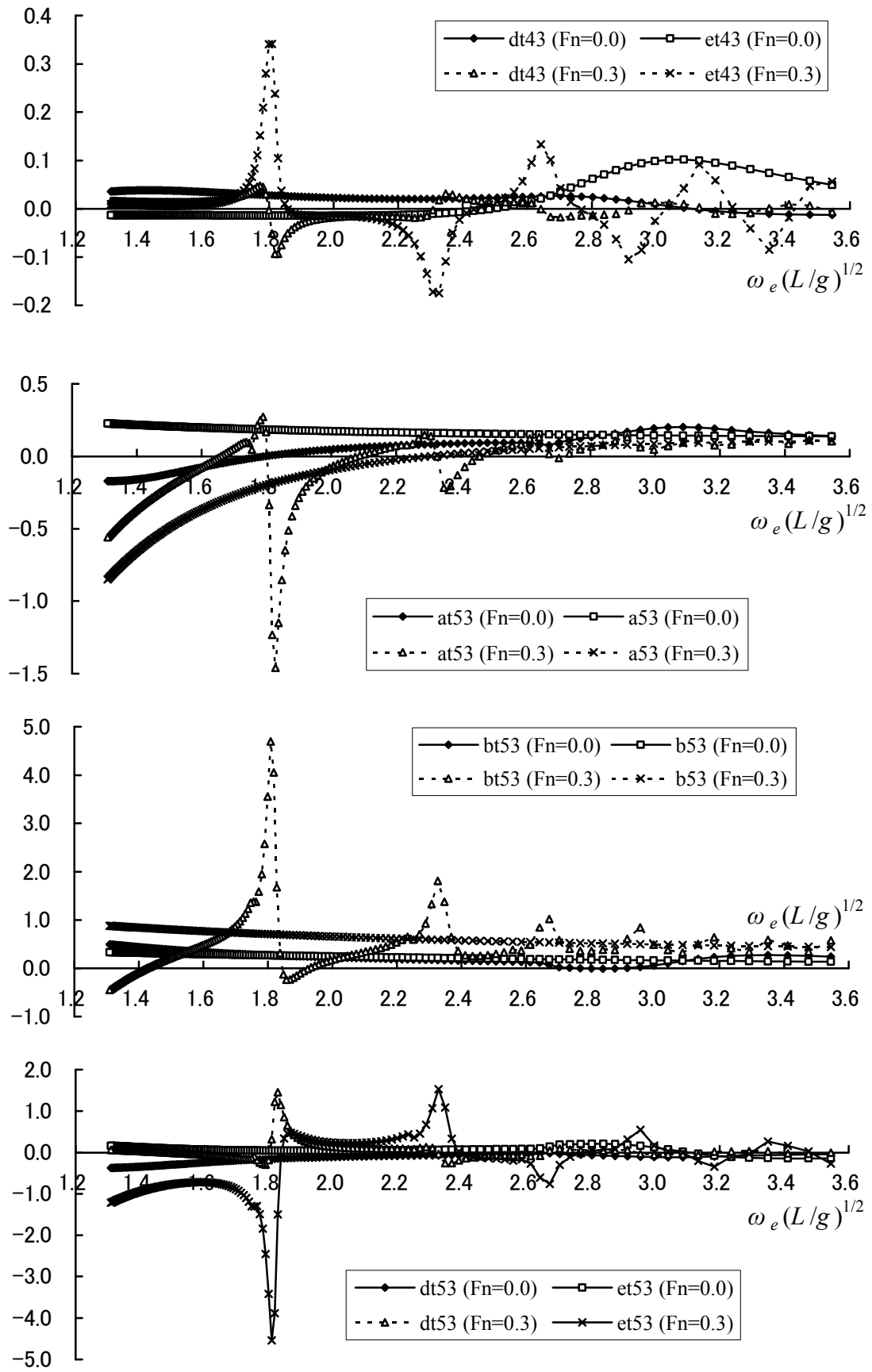


Fig. 5 (cont.). Hydrodynamic coefficients due to heave motion.

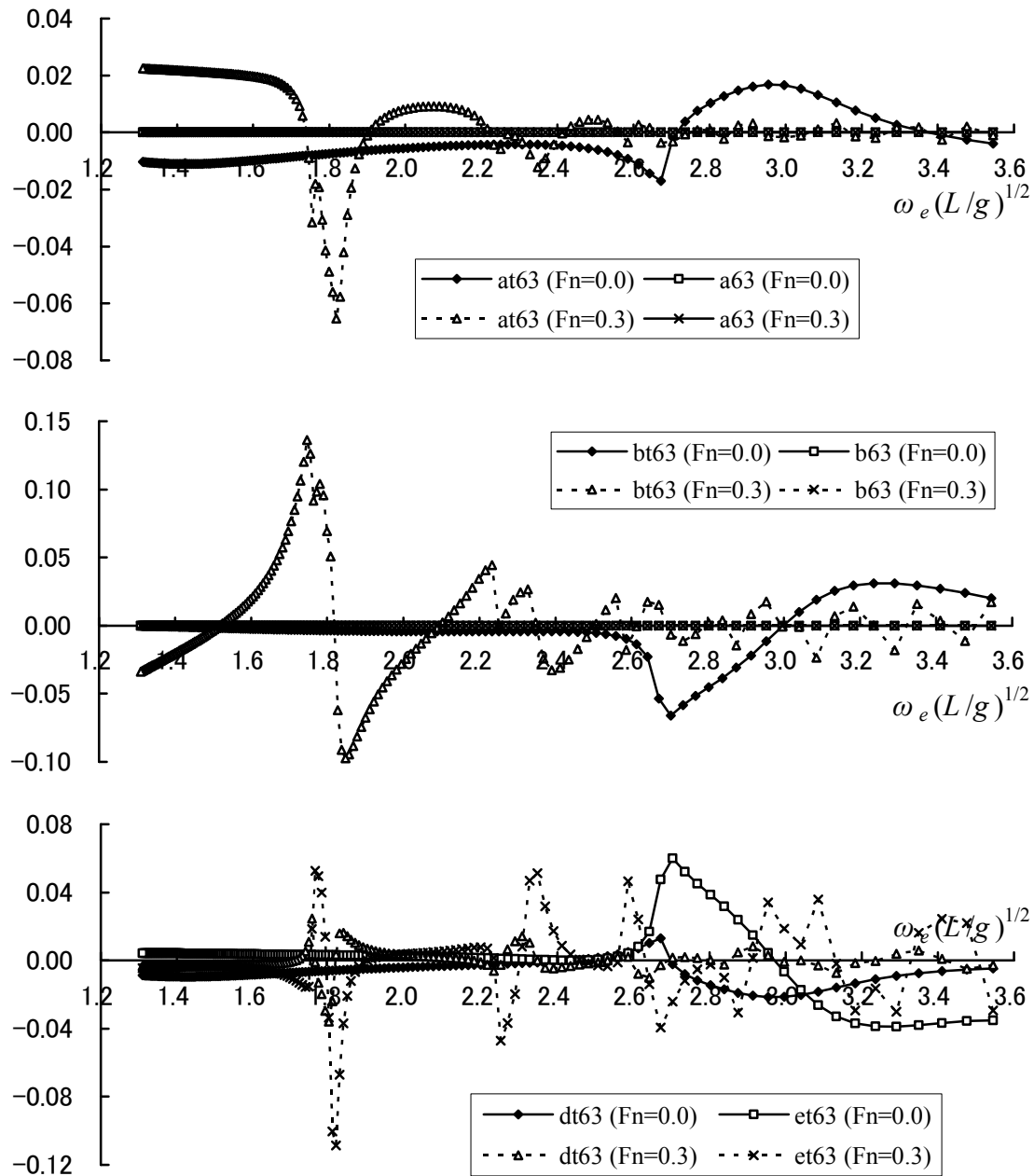


Fig. 5 (cont.). Hydrodynamic coefficients due to heave motion.

Fig. 4 および 5 において, at_{32} と at_{23} , bt_{32} と bt_{23} , dt_{32} と dt_{23} , et_{32} と et_{23} は, それぞれ絶対値が有効数字 2 桁目まで一致しており, これらの流体力係数に対称性または反対称性が成立していることがわかる。付録 2 に示す計算式を見ると, これらの流体力係数は全く異なる式になっているが, 相反定理を用いることによって, これらの対称/反対称関係を証明することができるものと考えられる。今後, 他の流体力係数についても検討し, 別報にて詳細を報告したい。

4 結言

二艘旋網漁船を対象に、両船間の造波干渉を2次元的に考慮したラディエーション流体力の計算法を示し数値計算を行った。2隻の網船は独立して動揺するため、全ての動揺モードを同時に扱うようにしたところ、造波干渉係数は船体の動揺をパラメータとして含む表現となり、2隻それぞれ5自由度の船体動揺は、流体を介して相互に連成する10自由度の運動方程式となった。計算された流体力係数には、2船間での波の共振と思われるピークを示す周波数が複数現れ、それは前進速度がある場合に特に顕著にみられた。なお、双胴船の場合[4]、[5]と同様に、本論文で展開した計算法では、船体表面上の圧力分布を求めることが可能である。

次報ではディフラクション流体力を扱うが、ディフラクション流体力は双胴船と同じ取り扱いとなる。このとき、文献[7]などで提案されたディフラクション問題の近似的な取り扱いが、離れた2船間の造波干渉を扱う場合に、どのような特徴をもつかに重点を置いて検討を進める。さらに今後、船体動揺、波浪中で船体に働く定常力(抵抗増加、定常横力、定常回頭モーメント)、最後に船尾に吊下する網の影響について、逐次検討を進める予定である。

謝辞

本論文の執筆にあたり、水産工学研究所 東照雄漁業生産工学部長より、懇切かつ丁寧なご指導を賜りましたことに感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 千葉県地域漁業復興プロジェクト漁業復興計画書（九十九里地域まき網漁業復興部会）、千葉県水産振興公社、(2012)。
- [2] 升也利一：漁船配置の適正化による船団全体の造波抵抗低減について－第1報：粒子群最適化による最適漁船配置の計算－、2013年度数理水産学会学術講演会要旨集、(2013)、12-13。
- [3] 升也利一：漁船船団の航行時最適配置について－第2報：粒子群最適化による最適配置の計算－、水工学会講演論集、(2014)、153-156。
- [4] 升也利一：高速沿岸双胴漁船の開発研究(第2報：双胴間の造波干渉を考慮した2次元流体圧力の計算)、水工研技報、**22**、(2000)、69-100。
- [5] Masuya, T. : Calculation of the hydrodynamic pressures acting on catamaran's cross sections with wave interaction, *Math. Phys. Fish. Sci.*

7 (2009), 1-19.

[6] 小林正典, 島田潔: 第3章 半没水型双胴船, 高速船型の耐航性能シンポジウム, 日本造船学会, (1990), 49-80.

[7] 渡辺巖, 土岐直二, 伊藤章雄: 第2章 ストリップ法, 耐航性理論の設計への応用シンポジウム, 日本造船学会, (1994), 167-203.

[8] Breit, S.R., Sclavounos, P.D.: Wave interaction between adjacent slender bodies, *J. Fluid Mech.* **165** (1985), 273-296.

[9] 柏木正: 波浪中を航走する双胴船の双胴間干渉流体力の研究(その1 Radiation問題), 船論 **173** (1993), 119-131.

[10] (社)日本造船学会海洋工学委員会性能部会編: 実践浮体の流体力学【前編】—動揺問題の数値計算法—, 成山堂書店, 2003.

[11] 升也利一: NSMCAT2000マニュアル(NSMに基づく双胴船の耐航性能推定計算プログラム), (独)水産総合研究センター 水産工学研究所, 2000.

付録1 造波干渉影響を表す m_{ij}

本文(36), (44)式を連立させ, $C_R^{R,L}$, $D_R^{R,L}$ に対する4元連立1次方程式と見なし係数行列の逆行列を求めると, 逆行列の各項 m_{ij} は以下のように得られる。

$$m_{ij} = \frac{q_{ij}}{p} \quad (\text{A1})$$

$$\begin{aligned} q_{11} &= 2i(\mu_1 - \bar{\mu}_1) \{ \bar{\sigma}_2(\mu_1 - \bar{\mu}_1) h_A^R h_A^L + \bar{\mu}_1(\sigma_2 - \bar{\sigma}_2) g_A^R h_S^L \} + 8i\bar{\sigma}_2 \bar{\mu}_1^2, \\ q_{12} &= -2i(\mu_1 - \bar{\mu}_1) \{ \bar{\sigma}_2(\mu_1 - \bar{\mu}_1) h_S^R h_A^L + \bar{\mu}_1(\sigma_2 - \bar{\sigma}_2) g_S^R h_S^L \}, \\ q_{13} &= (\sigma_2 - \bar{\sigma}_2)(\mu_1 - \bar{\mu}_1)^2 (g_S^R h_A^R - g_A^R h_S^R) h_A^L + 4\bar{\mu}_1^2 (\sigma_2 - \bar{\sigma}_2) g_S^R, \\ q_{14} &= -(\sigma_2 - \bar{\sigma}_2)(\mu_1 - \bar{\mu}_1)^2 (g_S^R h_A^R - g_A^R h_S^R) h_S^L + 4\bar{\sigma}_2 \bar{\mu}_1 (\mu_1 - \bar{\mu}_1) h_S^R, \\ q_{21} &= -2i(\sigma_2 - \bar{\sigma}_2) \{ \bar{\sigma}_2(\mu_1 - \bar{\mu}_1) h_A^R g_A^L + \bar{\mu}_1(\sigma_2 - \bar{\sigma}_2) g_A^R g_S^L \}, \\ q_{22} &= 2i(\sigma_2 - \bar{\sigma}_2) \{ \bar{\sigma}_2(\mu_1 - \bar{\mu}_1) h_S^R g_A^L + \bar{\mu}_1(\sigma_2 - \bar{\sigma}_2) g_S^R g_S^L \} + 8i\bar{\sigma}_2^2 \bar{\mu}_1, \\ q_{23} &= -(\sigma_2 - \bar{\sigma}_2)^2 (\mu_1 - \bar{\mu}_1) (g_S^R h_A^R - g_A^R h_S^R) g_A^L + 4\bar{\sigma}_2 \bar{\mu}_1 (\sigma_2 - \bar{\sigma}_2) g_A^R, \\ q_{24} &= (\sigma_2 - \bar{\sigma}_2)^2 (\mu_1 - \bar{\mu}_1) (g_S^R h_A^R - g_A^R h_S^R) g_S^L + 4\bar{\sigma}_2^2 (\mu_1 - \bar{\mu}_1) h_A^R, \\ q_{31} &= (\sigma_2 - \bar{\sigma}_2)(\mu_1 - \bar{\mu}_1)^2 (g_S^L h_A^L - h_S^L g_A^L) h_A^R + 4\bar{\mu}_1^2 (\sigma_2 - \bar{\sigma}_2) g_S^L, \\ q_{32} &= -(\sigma_2 - \bar{\sigma}_2)(\mu_1 - \bar{\mu}_1)^2 (g_S^L h_A^L - h_S^L g_A^L) h_S^R + 4\bar{\sigma}_2 \bar{\mu}_1 (\mu_1 - \bar{\mu}_1) h_S^L, \\ q_{33} &= 2i(\mu_1 - \bar{\mu}_1) \{ \bar{\sigma}_2(\mu_1 - \bar{\mu}_1) h_A^R h_A^L + \bar{\mu}_1(\sigma_2 - \bar{\sigma}_2) h_S^R g_A^L \} + 8i\bar{\sigma}_2 \bar{\mu}_1^2, \\ q_{34} &= -2i(\mu_1 - \bar{\mu}_1) \{ \bar{\sigma}_2(\mu_1 - \bar{\mu}_1) h_A^R h_S^L + \bar{\mu}_1(\sigma_2 - \bar{\sigma}_2) h_S^R g_S^L \}, \\ q_{41} &= -(\sigma_2 - \bar{\sigma}_2)^2 (\mu_1 - \bar{\mu}_1) (g_S^L h_A^L - h_S^L g_A^L) g_A^R + 4\bar{\sigma}_2 \bar{\mu}_1 (\sigma_2 - \bar{\sigma}_2) g_A^L, \\ q_{42} &= (\sigma_2 - \bar{\sigma}_2)^2 (\mu_1 - \bar{\mu}_1) (g_S^L h_A^L - h_S^L g_A^L) g_S^R + 4\bar{\sigma}_2^2 (\mu_1 - \bar{\mu}_1) h_A^L, \\ q_{43} &= -2i(\sigma_2 - \bar{\sigma}_2) \{ \bar{\sigma}_2(\mu_1 - \bar{\mu}_1) g_A^R h_A^L + \bar{\mu}_1(\sigma_2 - \bar{\sigma}_2) g_S^R g_A^L \}, \\ q_{44} &= 2i(\sigma_2 - \bar{\sigma}_2) \{ \bar{\sigma}_2(\mu_1 - \bar{\mu}_1) g_A^R h_S^L + \bar{\mu}_1(\sigma_2 - \bar{\sigma}_2) g_S^R g_S^L \} + 8i\bar{\sigma}_2^2 \bar{\mu}_1 \end{aligned} \quad (\text{A2})$$

$$\begin{aligned}
 p = & -(\sigma_2 - \bar{\sigma}_2)^2 (\mu_1 - \bar{\mu}_1)^2 (g_s^R h_A^R - g_A^R h_s^R) (g_s^L h_A^L - g_A^L h_s^L) \\
 & - 4\bar{\sigma}_2 \bar{\mu}_1 (\sigma_2 - \bar{\sigma}_2) (\mu_1 - \bar{\mu}_1) (g_A^R h_s^L + h_s^R g_A^L) \\
 & - 4\{\bar{\sigma}_2^2 (\mu_1 - \bar{\mu}_1)^2 h_A^R h_A^L + \bar{\mu}_1^2 (\sigma_2 - \bar{\sigma}_2)^2 g_s^R g_s^L + 4\bar{\sigma}_2^2 \bar{\mu}_1^2\}
 \end{aligned} \tag{A3}$$

付録2 流体係数

流体力係数は本文中で述べた通り，左右の船で同一となり，具体的に示すと以下ようになる。

1) Sway mode

$$A_{22} = \int_{-L/2}^{L/2} a_{11} + \frac{b_{11}}{\omega_e} \text{Im}[\mu_1 w_{11}] dx + \frac{U}{\omega_e^2} [b_{11} + b_{11} \text{Re}[\mu_1 w_{11}]]_{-L/2}^{L/2},$$

$$B_{22} = \int_{-L/2}^{L/2} b_{11} + b_{11} \text{Re}[\mu_1 w_{11}] dx - U \left[a_{11} + \frac{b_{11}}{\omega_e} \text{Im}[\mu_1 w_{11}] \right]_{-L/2}^{L/2},$$

$$A_{23} = \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{11}}{\omega_e} \text{Im}[\sigma_2 w_{21}] dx + \frac{U}{\omega_e^2} [b_{11} \text{Re}[\sigma_2 w_{21}]]_{-L/2}^{L/2},$$

$$B_{23} = \int_{-L/2}^{L/2} b_{11} \text{Re}[\sigma_2 w_{21}] dx - \frac{U}{\omega_e} [b_{11} \text{Im}[\sigma_2 w_{21}]]_{-L/2}^{L/2},$$

$$\begin{aligned}
 A_{24} = & \int_{-L/2}^{L/2} a_{13} + z_G a_{11} + \frac{b_{11}}{\omega_e} \text{Im}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{11}] dx \\
 & + \frac{U}{\omega_e^2} [b_{13} + b_{11} z_G + b_{11} \text{Re}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{11}]]_{-L/2}^{L/2},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B_{24} = & \int_{-L/2}^{L/2} b_{13} + b_{11} z_G + b_{11} \text{Re}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{11}] dx \\
 & - U \left[a_{13} + z_G a_{11} + \frac{b_{11}}{\omega_e} \text{Im}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{11}] \right]_{-L/2}^{L/2},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{25} = & - \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{11}}{\omega_e} \left\{ x_b \text{Im}[\sigma_2 w_{21}] + \frac{U}{\omega_e} \text{Re}[\sigma_2 w_{21}] \right\} dx \\
 & - \frac{U}{\omega_e^2} \left[b_{11} \left(x_b \text{Re}[\sigma_2 w_{21}] - \frac{U}{\omega_e} \text{Im}[\sigma_2 w_{21}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B_{25} = & - \int_{-L/2}^{L/2} b_{11} \left\{ x_b \text{Re}[\sigma_2 w_{21}] - \frac{U}{\omega_e} \text{Im}[\sigma_2 w_{21}] \right\} dx \\
 & + U \left[\frac{b_{11}}{\omega_e} \left\{ x_b \text{Im}[\sigma_2 w_{21}] + \frac{U}{\omega_e} \text{Re}[\sigma_2 w_{21}] \right\} \right]_{-L/2}^{L/2},
 \end{aligned}$$

$$A_{26} = \int_{-L/2}^{L/2} x_b a_{11} + \frac{U}{\omega_e^2} b_{11} + \frac{b_{11}}{\omega_e} \left(x_b \text{Im}[\mu_1 w_{11}] + \frac{U}{\omega_e} \text{Re}[\mu_1 w_{11}] \right) dx$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{U}{\omega_e^2} \left[x_b b_{11} - U a_{11} + b_{11} \left(x_b \operatorname{Re}[\mu_1 w_{11}] - \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[\mu_1 w_{11}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2}, \\
 B_{26} = & \int_{-L/2}^{L/2} x_b b_{11} - U a_{11} + b_{11} \left(x_b \operatorname{Re}[\mu_1 w_{11}] - \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[\mu_1 w_{11}] \right) dx \\
 & - U \left[x_b a_{11} + \frac{U}{\omega_e^2} b_{11} + \frac{b_{11}}{\omega_e} \left(x_b \operatorname{Im}[\mu_1 w_{11}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Re}[\mu_1 w_{11}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2}, \\
 D_{22} = & \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{11}}{\omega_e} \operatorname{Im}[\mu_1 w_{31}] dx + \frac{U}{\omega_e^2} [b_{11} \operatorname{Re}[\mu_1 w_{31}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 E_{22} = & \int_{-L/2}^{L/2} b_{11} \operatorname{Re}[\mu_1 w_{31}] dx - \frac{U}{\omega_e} [b_{11} \operatorname{Im}[\mu_1 w_{31}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 D_{23} = & \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{11}}{\omega_e} \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{41}] dx + \frac{U}{\omega_e^2} [b_{11} \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{41}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 E_{23} = & \int_{-L/2}^{L/2} b_{11} \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{41}] dx - \frac{U}{\omega_e} [b_{11} \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{41}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 D_{24} = & \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{11}}{\omega_e} \operatorname{Im}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{31}] dx + \frac{U}{\omega_e^2} [b_{11} \operatorname{Re}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{31}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 E_{24} = & \int_{-L/2}^{L/2} b_{11} \operatorname{Re}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{31}] dx - \frac{U}{\omega_e} [b_{11} \operatorname{Im}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{31}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 D_{25} = & - \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{11}}{\omega_e} \left(x_b \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{41}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{41}] \right) dx \\
 & + \frac{U}{\omega_e^2} \left[b_{11} \left(x_b \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{41}] - \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{41}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2}, \\
 E_{25} = & - \int_{-L/2}^{L/2} b_{11} \left(x_b \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{41}] - \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{41}] \right) dx \\
 & + \frac{U}{\omega_e} \left[b_{11} \left(x_b \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{41}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{41}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2}, \\
 D_{26} = & \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{11}}{\omega_e} \left(x_b \operatorname{Im}[\mu_1 w_{31}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Re}[\mu_1 w_{31}] \right) dx \\
 & + \frac{U}{\omega_e^2} \left[b_{11} \left(x_b \operatorname{Re}[\mu_1 w_{31}] - \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[\mu_1 w_{31}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2}, \\
 E_{26} = & \int_{-L/2}^{L/2} b_{11} \left(x_b \operatorname{Re}[\mu_1 w_{31}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[\mu_1 w_{31}] \right) dx \\
 & - \frac{U}{\omega_e} \left[b_{11} \left(x_b \operatorname{Im}[\mu_1 w_{31}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Re}[\mu_1 w_{31}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2}
 \end{aligned}$$

(A4)

2) Heave mode

$$\begin{aligned}
 A_{32} &= \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{22}}{\omega_e} \text{Im}[\mu_1 w_{12}] dx + \frac{U}{\omega_e^2} [b_{22} \text{Re}[\mu_1 w_{12}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 B_{32} &= \int_{-L/2}^{L/2} b_{22} \text{Re}[\mu_1 w_{12}] dx - \frac{U}{\omega_e} [b_{22} \text{Im}[\mu_1 w_{12}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 A_{33} &= \int_{-L/2}^{L/2} a_{22} + \frac{b_{22}}{\omega_e} \text{Im}[\sigma_2 w_{22}] dx + \frac{U}{\omega_e^2} [b_{22} + b_{22} \text{Re}[\sigma_2 w_{22}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 B_{33} &= \int_{-L/2}^{L/2} b_{22} + b_{22} \text{Re}[\sigma_2 w_{22}] dx - U \left[a_{22} + \frac{b_{22}}{\omega_e} \text{Im}[\sigma_2 w_{22}] \right]_{-L/2}^{L/2}, \\
 A_{34} &= \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{22}}{\omega_e} \text{Im}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{12}] dx + \frac{U}{\omega_e^2} [b_{22} \text{Re}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{12}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 B_{34} &= \int_{-L/2}^{L/2} b_{22} \text{Re}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{12}] dx - \frac{U}{\omega_e} [b_{22} \text{Im}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{12}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 A_{35} &= - \int_{-L/2}^{L/2} x_b a_{22} + \frac{U}{\omega_e^2} b_{22} + \frac{b_{22}}{\omega_e} \left(x_b \text{Im}[\sigma_2 w_{22}] + \frac{U}{\omega_e} \text{Re}[\sigma_2 w_{22}] \right) dx \\
 &\quad - \frac{U}{\omega_e^2} \left[x_b b_{22} - U a_{22} + b_{22} \left(x_b \text{Re}[\sigma_2 w_{22}] - \frac{U}{\omega_e} \text{Im}[\sigma_2 w_{22}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2}, \\
 B_{35} &= - \int_{-L/2}^{L/2} b_{22} x_b - U a_{22} + b_{22} \left(x_b \text{Re}[\sigma_2 w_{22}] - \frac{U}{\omega_e} \text{Im}[\sigma_2 w_{22}] \right) dx \\
 &\quad + U \left[x_b a_{22} + \frac{U}{\omega_e^2} b_{22} + \frac{b_{22}}{\omega_e} \left(x_b \text{Im}[\sigma_2 w_{22}] + \frac{U}{\omega_e} \text{Re}[\sigma_2 w_{22}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2}, \\
 A_{36} &= \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{22}}{\omega_e} \left(x_b \text{Im}[\mu_1 w_{12}] + \frac{U}{\omega_e} \text{Re}[\mu_1 w_{12}] \right) dx \\
 &\quad + \frac{U}{\omega_e^2} \left[b_{22} \left(x_b \text{Re}[\mu_1 w_{12}] - \frac{U}{\omega_e} \text{Im}[\mu_1 w_{12}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2}, \\
 B_{36} &= \int_{-L/2}^{L/2} b_{22} \left(x_b \text{Re}[\mu_1 w_{12}] - \frac{U}{\omega_e} \text{Im}[\mu_1 w_{12}] \right) dx \\
 &\quad - \frac{U}{\omega_e} \left[b_{22} \left(x_b \text{Im}[\mu_1 w_{12}] + \frac{U}{\omega_e} \text{Re}[\mu_1 w_{12}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2}, \\
 D_{32} &= \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{22}}{\omega_e} \text{Im}[\mu_1 w_{32}] dx + \frac{U}{\omega_e^2} [b_{22} \text{Re}[\mu_1 w_{32}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 E_{32} &= \int_{-L/2}^{L/2} b_{22} \text{Re}[\mu_1 w_{32}] dx - \frac{U}{\omega_e} [b_{22} \text{Im}[\mu_1 w_{32}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 D_{33} &= \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{22}}{\omega_e} \text{Im}[\sigma_2 w_{42}] dx + \frac{U}{\omega_e^2} [b_{22} \text{Re}[\sigma_2 w_{42}]]_{-L/2}^{L/2},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_{33} &= \int_{-L/2}^{L/2} b_{22} \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{42}] dx - \frac{U}{\omega_e} [b_{22} \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{42}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 D_{34} &= \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{22}}{\omega_e} \operatorname{Im}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{32}] dx + \frac{U}{\omega_e^2} [b_{22} \operatorname{Re}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{32}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 E_{34} &= \int_{-L/2}^{L/2} b_{22} \operatorname{Re}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{32}] dx - \frac{U}{\omega_e} [b_{22} \operatorname{Im}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{32}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 D_{35} &= - \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{22}}{\omega_e} \left(x_b \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{42}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{42}] \right) dx \\
 &\quad - \frac{U}{\omega_e^2} \left[b_{22} \left(x_b \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{42}] - \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{42}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2}, \\
 E_{35} &= - \int_{-L/2}^{L/2} b_{22} \left(x_b \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{42}] - \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{42}] \right) dx \\
 &\quad + \frac{U}{\omega_e} \left[b_{22} \left(x_b \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{42}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{42}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2}, \\
 D_{36} &= \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{22}}{\omega_e} \left(x_b \operatorname{Im}[\mu_1 w_{32}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Re}[\mu_1 w_{32}] \right) dx \\
 &\quad + \frac{U}{\omega_e^2} \left[b_{22} \left(x_b \operatorname{Re}[\mu_1 w_{32}] - \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[\mu_1 w_{32}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2}, \\
 E_{36} &= \int_{-L/2}^{L/2} b_{22} \left(x_b \operatorname{Re}[\mu_1 w_{32}] - \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[\mu_1 w_{32}] \right) dx \\
 &\quad - \frac{U}{\omega_e} \left[b_{22} \left(x_b \operatorname{Im}[\mu_1 w_{32}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Re}[\mu_1 w_{32}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2}
 \end{aligned} \tag{A5}$$

3) Roll mode

$$\begin{aligned}
 A_{42} &= \int_{-L/2}^{L/2} a_{31} + \frac{b_{31}}{\omega_e} \operatorname{Im}[\mu_1 w_{11}] dx + \frac{U}{\omega_e^2} [b_{31} + b_{31} \operatorname{Re}[\mu_1 w_{11}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 B_{42} &= \int_{-L/2}^{L/2} b_{31} + b_{31} \operatorname{Re}[\mu_1 w_{11}] dx - U \left[a_{31} + \frac{b_{31}}{\omega_e} \operatorname{Im}[\mu_1 w_{11}] \right]_{-L/2}^{L/2}, \\
 A_{43} &= \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{31}}{\omega_e} \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{21}] dx + \frac{U}{\omega_e^2} [b_{31} \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{21}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 B_{43} &= \int_{-L/2}^{L/2} b_{31} \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{21}] dx - \frac{U}{\omega_e} [b_{31} \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{21}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 A_{44} &= \int_{-L/2}^{L/2} a_{33} + z_G a_{31} + \frac{b_{31}}{\omega_e} \operatorname{Im}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{11}] dx \\
 &\quad + \frac{U}{\omega_e^2} [b_{33} + b_{31} z_G + b_{31} \operatorname{Re}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{11}]]_{-L/2}^{L/2},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B_{44} &= \int_{-L/2}^{L/2} b_{33} + b_{31} z_G + b_{31} \operatorname{Re}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{11}] dx \\
 &\quad - U \left[a_{33} + z_G a_{31} + \frac{b_{31}}{\omega_e} \operatorname{Im}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{11}] \right]_{-L/2}^{L/2}, \\
 A_{45} &= - \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{31}}{\omega_e} \left(x_b \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{21}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{21}] \right) dx \\
 &\quad - \frac{U}{\omega_e^2} \left[b_{31} \left(x_b \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{21}] - \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{21}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2}, \\
 B_{45} &= - \int_{-L/2}^{L/2} b_{31} \left(x_b \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{21}] - \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{21}] \right) dx \\
 &\quad + \frac{U}{\omega_e} \left[b_{31} \left(x_b \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{21}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{21}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2}, \\
 A_{46} &= \int_{-L/2}^{L/2} x_b a_{31} + \frac{U}{\omega_e^2} b_{31} + \frac{b_{31}}{\omega_e} \left(x_b \operatorname{Im}[\mu_1 w_{11}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Re}[\mu_1 w_{11}] \right) dx \\
 &\quad + \frac{U}{\omega_e^2} \left[x_b b_{31} - U a_{31} + b_{31} \left(x_b \operatorname{Re}[\mu_1 w_{11}] - \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[\mu_1 w_{11}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2}, \\
 B_{46} &= \int_{-L/2}^{L/2} x_b b_{31} - U a_{31} + b_{31} \left(x_b \operatorname{Re}[\mu_1 w_{11}] - \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[\mu_1 w_{11}] \right) dx \\
 &\quad - U \left[x_b a_{31} + \frac{U}{\omega_e^2} b_{31} + \frac{b_{31}}{\omega_e} \left(x_b \operatorname{Im}[\mu_1 w_{11}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Re}[\mu_1 w_{11}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2}, \\
 D_{42} &= \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{31}}{\omega_e} \operatorname{Im}[\mu_1 w_{31}] dx + \frac{U}{\omega_e^2} [b_{31} \operatorname{Re}[\mu_1 w_{31}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 E_{42} &= \int_{-L/2}^{L/2} b_{31} \operatorname{Re}[\mu_1 w_{31}] dx - \frac{U}{\omega_e} [b_{31} \operatorname{Im}[\mu_1 w_{31}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 D_{43} &= \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{31}}{\omega_e} \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{41}] dx + \frac{U}{\omega_e^2} [b_{31} \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{41}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 E_{43} &= \int_{-L/2}^{L/2} b_{31} \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{41}] dx - \frac{U}{\omega_e} [b_{31} \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{41}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 D_{44} &= \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{31}}{\omega_e} \operatorname{Im}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{31}] dx + \frac{U}{\omega_e^2} [b_{31} \operatorname{Re}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{31}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 E_{44} &= \int_{-L/2}^{L/2} b_{31} \operatorname{Re}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{31}] dx - \frac{U}{\omega_e} [b_{31} \operatorname{Im}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{31}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 D_{45} &= - \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{31}}{\omega_e} \left(x_b \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{41}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{41}] \right) dx
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{U}{\omega_e^2} \left[b_{31} \left(x_b \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{41}] - \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{41}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2}, \\
 E_{45} = & - \int_{-L/2}^{L/2} b_{31} \left(x_b \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{41}] - \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{41}] \right) dx \\
 & + \frac{U}{\omega_e} \left[b_{31} \left(x_b \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{41}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{41}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2}, \\
 D_{46} = & \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{31}}{\omega_e} \left(x_b \operatorname{Im}[\mu_1 w_{31}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Re}[\mu_1 w_{31}] \right) dx + \frac{U}{\omega_e^2} \left[b_{31} \left(x_b \operatorname{Re}[\mu_1 w_{31}] - \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[\mu_1 w_{31}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2}, \\
 E_{46} = & \int_{-L/2}^{L/2} b_{31} \left(x_b \operatorname{Re}[\mu_1 w_{31}] - \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[\mu_1 w_{31}] \right) dx - \frac{U}{\omega_e} \left[b_{31} \left(x_b \operatorname{Im}[\mu_1 w_{31}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Re}[\mu_1 w_{31}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2} \\
 & \quad \quad \quad (A6)
 \end{aligned}$$

4) Pitch mode

$$\begin{aligned}
 A_{52} = & \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{22}}{\omega_e} \left(x_b \operatorname{Im}[\mu_1 w_{12}] - \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Re}[\mu_1 w_{12}] \right) dx + \frac{U}{\omega_e^2} [x_b b_{22} \operatorname{Re}[\mu_1 w_{12}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 B_{52} = & \int_{-L/2}^{L/2} b_{22} \left(x_b \operatorname{Re}[\mu_1 w_{12}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[\mu_1 w_{12}] \right) dx - \frac{U}{\omega_e} [x_b b_{22} \operatorname{Im}[\mu_1 w_{12}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 A_{53} = & \int_{-L/2}^{L/2} x_b a_{22} - \frac{U}{\omega_e} b_{22} + \frac{b_{22}}{\omega_e} \left(x_b \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{22}] - \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{22}] \right) dx \\
 & + \frac{U}{\omega_e^2} [x_b b_{22} + x_b b_{22} \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{22}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 B_{53} = & \int_{-L/2}^{L/2} x_b b_{22} + U a_{22} + b_{22} \left(x_b \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{22}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{22}] \right) dx \\
 & - U \left[x_b a_{22} + x_b \frac{b_{22}}{\omega_e} \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{22}] \right]_{-L/2}^{L/2}, \\
 A_{54} = & \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{22}}{\omega_e} \left(x_b \operatorname{Im}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{12}] - \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Re}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{12}] \right) dx \\
 & + \frac{U}{\omega_e^2} [x_b b_{22} \operatorname{Re}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{12}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 B_{54} = & \int_{-L/2}^{L/2} b_{22} \left(x_b \operatorname{Re}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{12}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{12}] \right) dx \\
 & - \frac{U}{\omega_e} [x_b b_{22} \operatorname{Im}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{12}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 A_{55} = & - \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b^2 + \frac{U^2}{\omega_e^2} \right) \left(a_{22} + \frac{b_{22}}{\omega_e} \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{22}] \right) dx \\
 & - \frac{U}{\omega_e^2} \left[x_b (x_b b_{22} - U a_{22}) + x_b b_{22} \left(x_b \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{22}] - \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{22}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B_{55} &= - \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b^2 + \frac{U^2}{\omega_e^2} \right) (b_{22} + b_{22} \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{22}]) dx \\
 &\quad + U \left[x_b \left(x_b a_{22} + \frac{U}{\omega_e^2} b_{22} \right) + x_b \frac{b_{22}}{\omega_e} \left(x_b \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{22}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{22}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2}, \\
 A_{56} &= \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b^2 + \frac{U^2}{\omega_e^2} \right) \frac{b_{22}}{\omega_e} \operatorname{Im}[\mu_1 w_{12}] dx + \frac{U}{\omega_e^2} \left[x_b b_{22} \left(x_b \operatorname{Re}[\mu_1 w_{12}] - \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[\mu_1 w_{12}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2}, \\
 B_{56} &= \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b^2 + \frac{U^2}{\omega_e^2} \right) b_{22} \operatorname{Re}[\mu_1 w_{12}] dx - \frac{U}{\omega_e} \left[x_b b_{22} \left(x_b \operatorname{Im}[\mu_1 w_{12}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Re}[\mu_1 w_{12}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2}, \\
 D_{52} &= \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{22}}{\omega_e} \left(x_b \operatorname{Im}[\mu_1 w_{32}] - \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Re}[\mu_1 w_{32}] \right) dx + \frac{U}{\omega_e^2} [x_b b_{22} \operatorname{Re}[\mu_1 w_{32}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 E_{52} &= \int_{-L/2}^{L/2} b_{22} \left(x_b \operatorname{Re}[\mu_1 w_{32}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[\mu_1 w_{32}] \right) dx - \frac{U}{\omega_e} [x_b b_{22} \operatorname{Im}[\mu_1 w_{32}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 D_{53} &= \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{22}}{\omega_e} \left(x_b \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{42}] - \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{42}] \right) dx + \frac{U}{\omega_e^2} [x_b b_{22} \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{42}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 E_{53} &= \int_{-L/2}^{L/2} b_{22} \left(x_b \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{42}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{42}] \right) dx - \frac{U}{\omega_e} [x_b b_{22} \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{42}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 D_{54} &= \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{22}}{\omega_e} \left(x_b \operatorname{Im}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{32}] - \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Re}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{32}] \right) dx \\
 &\quad + \frac{U}{\omega_e^2} [x_b b_{22} \operatorname{Re}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{32}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 E_{54} &= \int_{-L/2}^{L/2} b_{22} \left(x_b \operatorname{Re}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{32}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{32}] \right) dx \\
 &\quad - \frac{U}{\omega_e} [x_b b_{22} \operatorname{Im}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{32}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 D_{55} &= - \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b^2 + \frac{U^2}{\omega_e^2} \right) \frac{b_{22}}{\omega_e} \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{42}] dx - \frac{U}{\omega_e^2} \left[x_b b_{22} \left(x_b \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{42}] - \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{42}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2}, \\
 E_{55} &= - \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b^2 + \frac{U^2}{\omega_e^2} \right) b_{22} \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{42}] dx + \frac{U}{\omega_e} \left[x_b b_{22} \left(x_b \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{42}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{42}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2}, \\
 D_{56} &= \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b^2 + \frac{U^2}{\omega_e^2} \right) \frac{b_{22}}{\omega_e} \operatorname{Im}[\mu_1 w_{32}] dx + \frac{U}{\omega_e^2} \left[x_b b_{22} \left(x_b \operatorname{Re}[\mu_1 w_{32}] - \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[\mu_1 w_{32}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2}, \\
 E_{56} &= \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b^2 + \frac{U^2}{\omega_e^2} \right) b_{22} \operatorname{Re}[\mu_1 w_{32}] dx - \frac{U}{\omega_e} \left[x_b b_{22} \left(x_b \operatorname{Im}[\mu_1 w_{32}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Re}[\mu_1 w_{32}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2}
 \end{aligned}
 \tag{A7}$$

5) Yaw mode

$$\begin{aligned}
 A_{62} &= \int_{-L/2}^{L/2} x_b a_{11} - \frac{U}{\omega_e} b_{11} + \frac{b_{11}}{\omega_e} \left(x_b \operatorname{Im}[\mu_1 w_{11}] - \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Re}[\mu_1 w_{11}] \right) dx \\
 &\quad + \frac{U}{\omega_e^2} [x_b b_{11} + x_b b_{11} \operatorname{Re}[\mu_1 w_{11}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 B_{62} &= - \int_{-L/2}^{L/2} x_b b_{11} + U a_{11} + \frac{b_{11}}{\omega_e} \left(x_b \operatorname{Re}[\mu_1 w_{11}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[\mu_1 w_{11}] \right) dx \\
 &\quad - U \left[x_b a_{11} + x_b \frac{b_{11}}{\omega_e} \operatorname{Im}[\mu_1 w_{11}] \right]_{-L/2}^{L/2}, \\
 A_{63} &= \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{11}}{\omega_e} \left(x_b \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{21}] - \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{21}] \right) dx + \frac{U}{\omega_e^2} [x_b b_{11} \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{21}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 B_{63} &= \int_{-L/2}^{L/2} b_{11} \left(x_b \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{21}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{21}] \right) dx - \frac{U}{\omega_e} [x_b b_{11} \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{21}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 A_{64} &= \int_{-L/2}^{L/2} x_b (a_{13} + z_G a_{11}) - \frac{U}{\omega_e^2} (b_{13} + z_G b_{11}) \\
 &\quad + \frac{b_{11}}{\omega_e} \left(x_b \operatorname{Im}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{11}] - \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Re}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{11}] \right) dx \\
 &\quad + \frac{U}{\omega_e^2} [x_b (b_{13} + b_{11} z_G) + b_{11} \operatorname{Re}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{11}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 B_{64} &= \int_{-L/2}^{L/2} x_b (b_{13} + b_{11} z_G) + U (a_{13} + a_{11} z_G) + b_{11} \left(x_b \operatorname{Re}[\mu_1 w_{11}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[\mu_1 w_{11}] \right) dx \\
 &\quad - U \left[x_b (a_{13} + z_G a_{11}) + \frac{b_{11}}{\omega_e} \operatorname{Im}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{11}] \right]_{-L/2}^{L/2}, \\
 A_{65} &= - \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b^2 + \frac{U^2}{\omega_e^2} \right) \frac{b_{11}}{\omega_e} \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{21}] dx - \frac{U}{\omega_e^2} \left[x_b b_{11} \left(x_b \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{21}] - \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{21}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2}, \\
 B_{65} &= - \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b^2 + \frac{U^2}{\omega_e^2} \right) b_{11} \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{21}] dx + \frac{U}{\omega_e} \left[x_b b_{11} \left(x_b \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{21}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{21}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2}, \\
 A_{66} &= \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b^2 + \frac{U^2}{\omega_e^2} \right) \left(a_{11} + \frac{b_{11}}{\omega_e} \operatorname{Im}[\mu_1 w_{11}] \right) dx \\
 &\quad + \frac{U}{\omega_e^2} \left[x_b (x_b b_{11} - U a_{11}) + x_b b_{11} \left(x_b \operatorname{Re}[\mu_1 w_{11}] - \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[\mu_1 w_{11}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2}, \\
 B_{66} &= \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b^2 + \frac{U^2}{\omega_e^2} \right) (b_{11} + b_{11} \operatorname{Re}[\mu_1 w_{11}]) dx \\
 &\quad - U \left[x_b \left(x_b a_{11} + \frac{U}{\omega_e^2} b_{11} \right) + x_b \frac{b_{11}}{\omega_e} \left(x_b \operatorname{Im}[\mu_1 w_{11}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Re}[\mu_1 w_{11}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D_{62} &= \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{11}}{\omega_e} \left(x_b \operatorname{Im}[\mu_1 w_{31}] - \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Re}[\mu_1 w_{31}] \right) dx + \frac{U}{\omega_e^2} [x_b b_{11} \operatorname{Re}[\mu_1 w_{31}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 E_{62} &= \int_{-L/2}^{L/2} b_{11} \left(x_b \operatorname{Re}[\mu_1 w_{31}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[\mu_1 w_{31}] \right) dx - \frac{U}{\omega_e} [x_b b_{11} \operatorname{Im}[\mu_1 w_{31}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 D_{63} &= \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{11}}{\omega_e} \left(x_b \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{41}] - \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{41}] \right) dx + \frac{U}{\omega_e^2} [x_b b_{11} \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{41}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 E_{63} &= \int_{-L/2}^{L/2} b_{11} \left(x_b \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{41}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{41}] \right) dx - \frac{U}{\omega_e} [x_b b_{11} \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{41}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 D_{64} &= \int_{-L/2}^{L/2} \frac{b_{11}}{\omega_e} \left(x_b \operatorname{Im}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{31}] - \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Re}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{31}] \right) dx \\
 &\quad + \frac{U}{\omega_e^2} [x_b b_{11} \operatorname{Re}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{31}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 E_{64} &= \int_{-L/2}^{L/2} b_{11} \left(x_b \operatorname{Re}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{31}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{31}] \right) dx \\
 &\quad - \frac{U}{\omega_e} [x_b b_{11} \operatorname{Im}[(\mu_3 + z_G \mu_1) w_{31}]]_{-L/2}^{L/2}, \\
 D_{65} &= - \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b^2 + \frac{U^2}{\omega_e^2} \right) \frac{b_{11}}{\omega_e} \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{41}] dx - \frac{U}{\omega_e^2} \left[x_b b_{11} \left(x_b \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{41}] - \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{41}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2}, \\
 E_{65} &= - \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b^2 + \frac{U^2}{\omega_e^2} \right) b_{11} \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{41}] dx + \frac{U}{\omega_e} \left[x_b b_{11} \left(x_b \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{41}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{41}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2}, \\
 D_{66} &= \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b^2 + \frac{U^2}{\omega_e^2} \right) \frac{b_{11}}{\omega_e} \operatorname{Im}[\mu_1 w_{31}] dx - \frac{U}{\omega_e^2} \left[x_b b_{11} \left(x_b \operatorname{Re}[\mu_1 w_{31}] - \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Im}[\mu_1 w_{31}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2}, \\
 E_{66} &= \int_{-L/2}^{L/2} \left(x_b^2 + \frac{U^2}{\omega_e^2} \right) b_{11} \operatorname{Re}[\mu_1 w_{31}] dx + \frac{U}{\omega_e} \left[x_b b_{11} \left(x_b \operatorname{Im}[\mu_1 w_{31}] + \frac{U}{\omega_e} \operatorname{Re}[\mu_1 w_{31}] \right) \right]_{-L/2}^{L/2} \quad (A8)
 \end{aligned}$$

(A4)～(A8)式において $w_{ij} = 0$ と置くと、通常NSM(New Strip Method)の流体力係数に一致する。また、双胴船に対する流体力係数[11]と比較すると、船体断面が非対称な場合や双胴間の造波干渉を考慮した場合に生じる対称運動と反対称運動間の2次元連成流体力係数は、

$$\begin{aligned}
 a_{12} &= \frac{b_{11}}{\omega_e} \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{21}], \quad b_{12} = b_{11} \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{21}], \quad a_{21} = \frac{b_{22}}{\omega_e} \operatorname{Im}[\mu_1 w_{12}], \quad b_{21} = b_{22} \operatorname{Re}[\mu_1 w_{12}], \\
 a_{23} &= \frac{b_{22}}{\omega_e} \operatorname{Im}[\mu_3 w_{12}], \quad b_{23} = b_{22} \operatorname{Re}[\mu_3 w_{12}], \quad a_{32} = \frac{b_{31}}{\omega_e} \operatorname{Im}[\sigma_2 w_{21}], \quad b_{32} = b_{31} \operatorname{Re}[\sigma_2 w_{21}] \quad (A9)
 \end{aligned}$$

となっていることがわかる。

受付日 2014年9月5日

受理日 2015年1月7日

著者略歴

1983 横浜国立大学工学部船舶海洋工学科卒業

1986 東京大学大学院工学系研究科修士課程船舶工学専門課程修了

1986 水産庁 水産工学研究所 漁船工学部 船体性能研究室

1995 同上 漁船工学部 主任研究官

1997 同上 漁船工学部 海洋測器研究室長

1998 同上 漁業生産工学部 船体研究室長

2010 同上 漁業生産・情報工学部 漁船工学グループ 船体研究チーム長

2011 同上 漁業生産工学部 漁船工学グループ 主幹研究員

研究対象:船舶・海洋構造物の造波問題, 水棲生物の音響散乱モデル

所属学会:日本船舶海洋工学会, 日本水産工学会, 数理水産科学会