

曳船・被曳船の波浪中 6 自由度運動に関する実用計算法

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2023-05-18 キーワード (Ja): キーワード (En): Towing Systems, 6-DOF Wave-Induced Motions, Frequency Response 作成者: 中山, 喜之, 安川, 宏紀, 平田, 法隆, YASUKAWA, Hironori, HIRATA, Noritaka メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.15053/0000000139

【論文】

曳船・被曳船の波浪中6自由度運動に関する実用計算法

中山 喜之¹ 安川 宏紀² 平田 法隆²

A Practical Calculation Method of 6-DOF Motions of Tow and Towed Ships in Regular Seas

Yoshiyuki Nakayama¹, Hironori Yasukawa², Noritaka Hirata²

Abstract

A practical calculation method for 6-DOF motions of tow and towed ships in regular seas is presented. The present method can calculate both maneuvering and wave-induced motions of tow and towed ships in time domain by separating the basic motion equations into 2 groups where one is for low frequency maneuvering motion problem and the other is for high frequency wave-induced motion problem. In order to validate the calculation method, 6-DOF motions of tow and towed ships in various wave lengths and directions were calculated and the calculated results were compared with the model test results. As a result, we found that the present method can roughly capture both 6-DOF wave-induced motions of tow and towed ships in beam seas and grasp qualitative tendencies of those motions in head and oblique waves.

Keywords: Towing Systems, 6-DOF Wave-Induced Motions, Frequency Response

1 緒言

曳航は、海上構造物の移設、タグバージシステムによる海上物流、自力航行が不能となった船舶による衝突や乗揚げといった二次災害を防ぐための海難処理等、幅広く実施されているものであるが、曳船と被曳船とが曳航索により拘束されるという性格上、その作業には常に危険が伴う。具体的には、曳船、被曳船同士または他の第3船との衝突事案、曳船の操船能力不足による被曳船の乗揚げ事案、被曳船に発生する振れ回り運動に起因する曳航索破断、さらには荒天下における曳船もしくは被曳船の転覆事案など、その危険性は多岐に渡り、操船者はこれらに注意しながら、適時的確に操船を行うことが求められている。

曳航作業の安全性向上という観点から、曳航時の曳船・被曳船の挙動に関する問題については、既に多くの研究がなされており、代表的なものとしては、被曳船の運動問題を初めて取り扱った Strandhagen 等¹⁾ に始まり、索張力の推定式を用いて曳航問題を議論した貴島等²⁾³⁾⁴⁾、道本等⁵⁾⁶⁾、MMG モデルに基づき、索張力の推定式を必要としない曳航運動モデルを提案した重廣⁷⁾、重廣の手法を発展させ、曳航索の動的な挙動を含めた曳船・被曳船の操縦運動シミュレーション法を提案した安川等⁸⁾⁹⁾ などが挙げられる。しかしながら、これらは全て静水面上での操縦運

動や針路安定性について検討したものであり、荒天下等を対象とした波浪中における曳航問題について議論した例は少ないというのが現状である。波浪中曳航問題を取り扱った例として、定兼等¹⁰⁾、原等¹¹⁾ による実験的研究があるが、どちらも理論計算法の構築には至っていない。また、Fang 等¹²⁾ は、不規則波中を航行する曳船・被曳船の運動シミュレーション法を提案したが、索張力の推定に静的なカタナリー理論を用いる方法を採用しているため、索の動的な影響を考慮することができず、さらには実験による検証が行われていないため、その計算法の精度は未だ不明な状態であると言わざるを得ない。

著者等は、以上の現状を踏まえ、正面向波中における曳船・被曳船の船体運動シミュレーション法¹³⁾ を提案し、各船の縦方向波浪動揺 (surge, heave, pitch) 及び索張力に関する数値計算結果を水槽試験結果と比較することで、その計算法が実用上の精度を有することを示した。本論文では、その計算法を拡張し、曳船・被曳船の波浪中6自由度運動に関する実用計算法を提案することを目的とする。

波浪中における曳船・被曳船の6自由度波浪動揺のみならず、各船の操縦運動をも同時に計算できる理論計算法を構築するためには、まず、ベースとなる単独船状態での計算法が必要となる。ここでは、安川が提案した、単独船が波浪中において旋回運動を行う際の操縦運動・波浪動揺とともに計算することができる統合運動シミュレーション計算法¹⁴⁾¹⁵⁾ に基づいて、理論計算法を構築することとした。本計算法の特徴は、操縦運動を扱う低周波数の運動方程式

Received May 29, 2015

¹ 海上保安大学校 y-nakayama@jcga.ac.jp² 広島大学大学院工学研究院

と波浪動揺を扱う高周波数の運動方程式を完全に分離させ、それぞれを別個に解くことによって、波浪中に航行する曳船・被曳船に関する 6 自由度運動計算を可能とする点にある。定式化にあたり、次の仮定を設ける。

- 曳航索は、重さの無い 1 本のトラス要素として取り扱い、曳航索のねじり、伸びは無視する。
- 海洋波は微小振幅波 (規則波) で表現できるものとする。
- 各船の運動及び曳船のプロペラ後流による波浪場の変化は小さく、2 船間の流体力学的相互干渉については考慮しない。

本計算法では、演算時間の観点から、曳航索を 1 本のトラス要素 (各曳航点においてピン接合されており、荷重等によってたわみが発生しないもの) として取り扱うこととしたため、索自体の自重による変形、索が水面下に没した際に索が水から受ける抵抗、索の張り・弛みが各船の運動に及ぼす動的な影響等については考慮することはできないが、重廣⁷⁾の計算法と同様、索張力に関する推定式を必要としないことから曖昧さを排除でき、一貫した理論を構築することが可能となっている。また、通常曳航時の曳船・被曳船間の距離は十分に離れているという実用的な見地から、流体力学的相互干渉については考慮していない。

本計算法に基づき、2 軸 POD 船 (曳船)、コンテナ船 (被曳船) を対象として、波浪中曳航時の曳船・被曳船の操縦運動・波浪動揺を考慮した 6 自由度船体運動シミュレーション計算を実施し、水槽試験結果と比較した。なお、水槽試験では、向波・横波・斜波の各状態において、波長船長比を変えながら試験を実施し、曳船・被曳船の 6 自由度運動を同時に計測することに成功している。比較の結果、向波・斜波時の計算結果については、精度の面で未だ改善の余地はあるものの、水槽試験結果が示す傾向を定性的に捉えることができ、横波時の計算結果については、水槽試験結果と良い一致を示した。

2 曳船・被曳船の波浪中運動に関する理論計算法

2.1 座標系

座標系として、図 1 に示すような空間固定座標系 $O-XYZ$ と、船の操縦運動とともに移動し、船体の動揺平均位置に固定された座標系 $o-x_iy_iz_i$ を考える¹⁴⁾。添え字の i は、 $i=1$ が曳船、 $i=2$ が被曳船を意味する。 $X-Y$ 平面ならびに x_i-y_i 平面は静水面に一致させ、 z_i 軸は船の重心 G_i を通るものとし、重心の高さを z_{G_i} とする。そのとき、 $O-XYZ$ と $o-x_iy_iz_i$ の各座標系の間には次のような関係がある。

$$\left. \begin{aligned} X &= x_i \cos \psi_i(t) - y_i \sin \psi_i(t) + X_i(t) \\ Y &= x_i \sin \psi_i(t) + y_i \cos \psi_i(t) + Y_i(t) \\ Z &= z_i \end{aligned} \right\} \quad (i=1,2) \quad (1)$$

ここで、 $X_i(t)$ 、 $Y_i(t)$ 、 $\psi_i(t)$ は各船の平均的な位置ならびに方位を意味し、 t は時間を表す。規則波は X 軸と χ なる角度を持って進行するものとし、その速度ポテンシャルは、次のように表される。

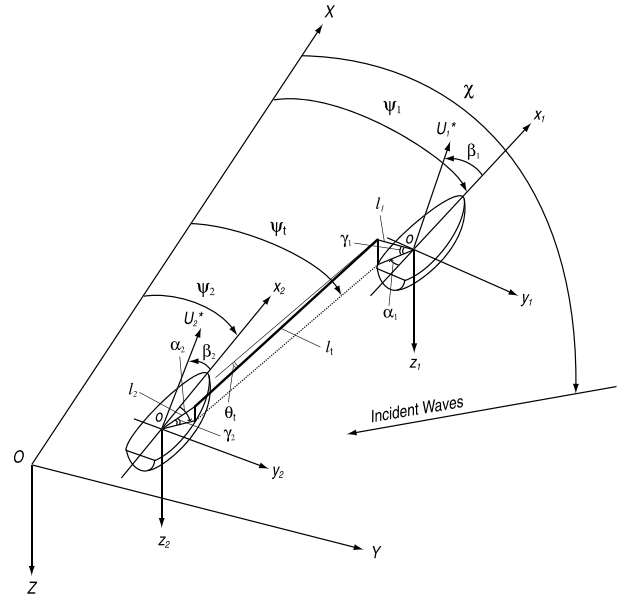


図 1 基礎となる座標系

$$\begin{aligned} \phi_{I_i} &= \operatorname{Re} \left\{ \frac{gA}{i\omega} \exp[-\nu(Z - iX \cos \chi - iY \sin \chi) + i\omega t] \right\} \\ &= \operatorname{Re} \left\{ \frac{gA}{i\omega} P_i(t) \exp[-\nu \{z_i - ix_i \cos(\chi - \psi_i) - iy_i \sin(\chi - \psi_i)\} + i\omega t] \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

$$P_i(t) = \exp[i\nu \{X_i(t) \cos \chi + Y_i(t) \sin \chi\}] \quad (3)$$

式中、 $P_i(t)$ は各船の位置が変化することによる入射波の位相変化を表し、 A 、 ν 、 ω は入射波の振幅、波数、波周波数を意味する。ここで、各船の平均的な方位変化は準定常的に取り扱えるとの仮定を加え¹⁴⁾¹⁶⁾、各船に対する出会い周波数 ω_{ei} は、近似的に次のように表されるものとする。

$$\omega_{ei} = \omega + \nu (\dot{X}_i \cos \chi + \dot{Y}_i \sin \chi) \quad (4)$$

2.2 曳船・被曳船の運動方程式

ここでは、浜本等¹⁷⁾により提案された Horizontal Body Axes(HBA)系 $o'-x'_iy'_iz'_i$ に基づき、運動方程式を構築することを考える。先に述べた $o-x_iy_iz_i$ 系とは異なり、 $o'-x'_iy'_iz'_i$ 系では、常に $x'_iy'_i$ 平面が静水面と平行、 z'_i 軸が鉛直下向きとなっている点に注意が必要である。つまり、本座標系は静水面に対して垂直に上下揺れしながら回頭するが、縦揺れ及び横揺れはしない。船の縦揺れ及び横揺れ運動については、本座標系の横軸及び縦軸周りの回転運動として記述することになる。HBA 系で定義される船の速度成分を U_i 、 V_i 、 W_i 、オイラー角を ϕ_i 、 θ_i 、 ψ_i とおく。 θ_i が小さいときの HBA 系における船の 6 自由度の運動方程式¹⁷⁾に索張力による外力項を付加することで、曳船・被曳船に関する運動方程式は次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} m_i(\dot{U}_i - V_i\dot{\psi}_i) &= F_{xi} + X_{Ti} \\ m_i(\dot{V}_i + U_i\dot{\psi}_i) &= F_{yi} + Y_{Ti} \\ m_i\dot{W}_i &= F_{zi} + Z_{Ti} \\ I_{xxi}(\ddot{\phi}_i - \dot{\theta}_i\dot{\psi}_i) &= M_{xi} + K_{Ti} \\ I_{yyi}\ddot{\theta}_i + I_{xxi}\dot{\phi}_i\dot{\psi}_i &= M_{yi} + L_{Ti} \\ I_{zzii}\ddot{\psi}_i - I_{xxi}\dot{\theta}_i\dot{\phi}_i &= M_{zi} + N_{Ti} \end{aligned} \right\} \quad (i=1,2) \quad (5)$$

式中、 m_i は船の質量、 I_{xxi} 、 I_{yyi} 、 I_{zzii} は船体固定座標系で定義される慣性モーメントである。また、 X_{Ti} 、 Y_{Ti} 、 Z_{Ti} 、

K_{Ti} , L_{Ti} , N_{Ti} は索張力による力とモーメントの項であり、索の軸方向に働く張力を T_S として定義すると、それぞれの力及びモーメントは以下のように表される。

$$\left. \begin{aligned} X_{T1} &= -T_S \cos \theta_t \cos(\psi_t - \psi_1) \\ Y_{T1} &= -T_S \cos \theta_t \sin(\psi_t - \psi_1) \\ Z_{T1} &= T_S \sin \theta_t \\ K_{T1} &= -\ell_{y1} T_S \sin \theta_t - \ell_{z1} T_S \cos \theta_t \sin(\psi_t - \psi_1) \\ L_{T1} &= \ell_{x1} T_S \sin \theta_t + \ell_{z1} T_S \cos \theta_t \cos(\psi_t - \psi_1) \\ N_{T1} &= \ell_{x1} T_S \cos \theta_t \sin(\psi_t - \psi_1) \\ &\quad - \ell_{y1} T_S \cos \theta_t \cos(\psi_t - \psi_1) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} X_{T2} &= T_S \cos \theta_t \cos(\psi_t - \psi_2) \\ Y_{T2} &= T_S \cos \theta_t \sin(\psi_t - \psi_2) \\ Z_{T2} &= -T_S \sin \theta_t \\ K_{T2} &= -\ell_{y2} T_S \sin \theta_t + \ell_{z2} T_S \cos \theta_t \sin(\psi_t - \psi_2) \\ L_{T2} &= \ell_{x2} T_S \sin \theta_t - \ell_{z2} T_S \cos \theta_t \cos(\psi_t - \psi_2) \\ N_{T2} &= \ell_{x2} T_S \cos \theta_t \sin(\psi_t - \psi_2) \\ &\quad - \ell_{y2} T_S \cos \theta_t \cos(\psi_t - \psi_2) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \ell_{x1} &= \ell_1 \cos \gamma_1 \cos \alpha_1, \quad \ell_{x2} = \ell_2 \cos \gamma_2 \cos \alpha_2 \\ \ell_{y1} &= \ell_1 \cos \gamma_1 \sin \alpha_1, \quad \ell_{y2} = \ell_2 \cos \gamma_2 \sin \alpha_2 \\ \ell_{z1} &= z_{G1} + \ell_1 \sin \gamma_1, \quad \ell_{z2} = z_{G2} + \ell_2 \sin \gamma_2 \end{aligned}$$

本モデルでは、曳航索を重さの無い長さ ℓ_t の1本のトラス要素として表現しており、 θ_t , ψ_t はそれぞれ曳航索の傾斜角及び方位角を意味する。また、曳船側曳航点は船体固定座標系における点 $(-x_{T1}, -y_{T1}, -z_{T1})$ であり、被曳船側曳航点は $(x_{T2}, y_{T2}, -z_{T2})$ である。そのとき、

$$\begin{aligned} \ell_1 &= \sqrt{x_{T1}^2 + y_{T1}^2 + z_{T1}^2}, \quad \ell_2 = \sqrt{x_{T2}^2 + y_{T2}^2 + z_{T2}^2} \\ \alpha_1 &= \tan^{-1}(y_{T1}/x_{T1}), \quad \alpha_2 = \tan^{-1}(y_{T2}/x_{T2}) \\ \gamma_1 &= \tan^{-1}(z_{T1}/\sqrt{x_{T1}^2 + y_{T1}^2}), \\ \gamma_2 &= \tan^{-1}(z_{T2}/\sqrt{x_{T2}^2 + y_{T2}^2}) \end{aligned}$$

として表される。また、 γ_1, γ_2 については、図1に示す通り、曳航点が静水面よりも上方に位置している場合、それらの値はともに正と定義した。一方、 $F_{xi}, F_{yi}, F_{zi}, M_{xi}, M_{yi}, M_{zi}$ は索張力以外の外力による力とモーメントの項であり、その表示法等については後に示す。

2.3 被曳船の従属運動及び索張力の表示式

被曳船の運動は、曳航索により拘束された状態で行われるため、被曳船の運動変数 (U_2, V_2, W_2) は曳船の運動変数 (U_1, V_1, W_1, ψ_1) と独立でなく、曳航索の傾斜角 θ_t 、方位角 ψ_t 及び被曳船の方位角 ψ_2 を介した従属変数となる(被曳船運動に対する曳船の pitch, roll による影響は非常に小さいと仮定した)。まず、図1に示す空間固定座標系における被曳船の重心位置 (X_2, Y_2, Z_2) 及びその時間微分項は、曳船の重心位置 (X_1, Y_1, Z_1) を起点として次のように示される。

$$\left. \begin{aligned} X_2 &= X_1 - \ell_1 \cos \gamma_1 \cos(\psi_1 + \alpha_1) \\ &\quad - \ell_t \cos \theta_t \cos \psi_t - \ell_2 \cos \gamma_2 \cos(\psi_2 + \alpha_2) \\ Y_2 &= Y_1 - \ell_1 \cos \gamma_1 \sin(\psi_1 + \alpha_1) \\ &\quad - \ell_t \cos \theta_t \sin \psi_t - \ell_2 \cos \gamma_2 \sin(\psi_2 + \alpha_2) \\ Z_2 &= Z_1 - z_{G1} - \ell_1 \sin \gamma_1 + \ell_t \sin \theta_t \\ &\quad + \ell_2 \sin \gamma_2 + z_{G2} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{X}_2 &= \dot{X}_1 + \dot{\psi}_1 \ell_1 \cos \gamma_1 \sin(\psi_1 + \alpha_1) \\ &\quad + \dot{\theta}_t \ell_t \sin \theta_t \cos \psi_t + \dot{\psi}_t \ell_t \cos \theta_t \sin \psi_t \\ &\quad + \dot{\psi}_2 \ell_2 \cos \gamma_2 \sin(\psi_2 + \alpha_2) \\ \dot{Y}_2 &= \dot{Y}_1 - \dot{\psi}_1 \ell_1 \cos \gamma_1 \cos(\psi_1 + \alpha_1) \\ &\quad + \dot{\theta}_t \ell_t \sin \theta_t \sin \psi_t - \dot{\psi}_t \ell_t \cos \theta_t \cos \psi_t \\ &\quad - \dot{\psi}_2 \ell_2 \cos \gamma_2 \cos(\psi_2 + \alpha_2) \\ \dot{Z}_2 &= \dot{Z}_1 + \dot{\theta}_t \ell_t \cos \theta_t \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

続いて、空間固定座標系と船体固定座標系との関係式は、

$$\left. \begin{aligned} \dot{X}_1 &= U_1 \cos \psi_1 - V_1 \sin \psi_1 \\ \dot{Y}_1 &= U_1 \sin \psi_1 + V_1 \cos \psi_1 \\ \dot{Z}_1 &= W_1 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} U_2 &= \dot{X}_2 \cos \psi_2 + \dot{Y}_2 \sin \psi_2 \\ V_2 &= -\dot{X}_2 \sin \psi_2 + \dot{Y}_2 \cos \psi_2 \\ W_2 &= \dot{Z}_2 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

として表すことができるので、(9)~(11) 式より、被曳船の運動変数 (U_2, V_2, W_2) をその他の運動変数を用いて規定することが可能となる。つまり、 $(U_1, V_1, W_1, \psi_1, \theta_t, \psi_t, \psi_2)$ に関して解が求まれば、それらを用いて被曳船の運動変数 (U_2, V_2, W_2) が一義的に決まるので、これら3つの変数は解くべき未知数から除外することができる。

次に、張力 T_S の表示式を(5)式(i=2)から誘導することを考える。被曳船の surge, sway, heave に関する運動方程式は、(7)式に示す外力を用いて、次のように表される。

$$m_2(\ddot{U}_2 - V_2 \dot{\psi}_2) = F_{x2} + T_S \cos \theta_t \cos(\psi_t - \psi_2) \quad (12)$$

$$m_2(\ddot{V}_2 + U_2 \dot{\psi}_2) = F_{y2} + T_S \cos \theta_t \sin(\psi_t - \psi_2) \quad (13)$$

$$m_2 \ddot{W}_2 = F_{z2} - T_S \sin \theta_t \quad (14)$$

ここで、(12)式に $\cos(\psi_t - \psi_2)$ 、(13)式に $\sin(\psi_t - \psi_2)$ を乗じ、これらの和をとると、

$$\begin{aligned} &m_2(\ddot{U}_2 - V_2 \dot{\psi}_2) \cos(\psi_t - \psi_2) \\ &+ m_2(\ddot{V}_2 + U_2 \dot{\psi}_2) \sin(\psi_t - \psi_2) \\ &- F_{x2} \cos(\psi_t - \psi_2) - F_{y2} \sin(\psi_t - \psi_2) \\ &= T_S \cos \theta_t \end{aligned} \quad (15)$$

となる。さらに、(14)式に $-\sin \theta_t$ 、(15)式に $\cos \theta_t$ を乗じ、これらの和を取ると、張力 T_S は以下のように示される。

$$\begin{aligned} T_S &= m_2(\ddot{U}_2 - V_2 \dot{\psi}_2) \cos \theta_t \cos(\psi_t - \psi_2) \\ &+ m_2(\ddot{V}_2 + U_2 \dot{\psi}_2) \cos \theta_t \sin(\psi_t - \psi_2) \\ &- m_2 \ddot{W}_2 \sin \theta_t - F_{x2} \cos \theta_t \cos(\psi_t - \psi_2) \\ &- F_{y2} \cos \theta_t \sin(\psi_t - \psi_2) + F_{z2} \sin \theta_t \end{aligned} \quad (16)$$

よって、各船の運動変数等について解が求まれば、それらを(16)式に代入することにより、張力 T_S を求めることが可能となる(張力 T_S に関する推定式等は必要なし)。

最後に、(12)(13)式から T_S を消去した式を導出しておく。(12)式に $\sin(\psi_t - \psi_2)$ 、(13)式に $-\cos(\psi_t - \psi_2)$ を乗じ、これらの和をとると、

$$\begin{aligned} &m_2(\ddot{U}_2 - V_2 \dot{\psi}_2) \sin(\psi_t - \psi_2) \\ &- m_2(\ddot{V}_2 + U_2 \dot{\psi}_2) \cos(\psi_t - \psi_2) \\ &= F_{x2} \sin(\psi_t - \psi_2) - F_{y2} \cos(\psi_t - \psi_2) \end{aligned} \quad (17)$$

が得られる。(17)式は解くべき運動方程式の1つとなる。

2.4 運動方程式の解法及び簡略化 (分離)

ここで、本計算法において解くべき運動方程式及び未知数について整理する。まず、解くべき運動方程式は、(5) 式 ($i=1$) の 6 個、(5) 式 ($i=2$) における surge, sway に関する運動方程式を除いた 4 個に (17) 式を加えた計 11 個となる。次に、解くべき未知数については、前節で示した通り、被曳船の運動変数 (U_2, V_2, W_2) を含まなくてよいので、

$$U_1, V_1, W_1, \phi_1, \theta_1, \psi_1, \phi_2, \theta_2, \psi_2, \theta_t, \psi_t$$

の計 11 個として考えればよい。よって、解くべき運動方程式の数と未知数の数は一致している。得られた解より、曳船の 6 自由度運動及び曳航索の傾斜角、方位角が決まり、また、併せて (9)~(11) 式を用いることにより被曳船の 6 自由度運動が、(16) 式からは索張力が求められる。

次に、解くべき運動方程式を簡略化することにより、それらを運動の周波数成分毎に分離することを考える。まず、曳船・被曳船の運動変数及び曳航索の傾斜角、方位角は、以下のように表現できるものと仮定する。

$$\left. \begin{aligned} U_i &= U_{i\ell} + U_{ih}, & V_i &= V_{i\ell} + V_{ih}, & W_i &= W_{ih} \\ \phi_i &= \phi_{i\ell} + \phi_{ih}, & \theta_i &= \theta_{ih}, & \psi_i &= \psi_{i\ell} + \psi_{ih} \\ \theta_t &= \theta_{t\ell} + \theta_{th}, & \psi_t &= \psi_{t\ell} + \psi_{th} \end{aligned} \right\} \quad (i=1, 2) \quad (18)$$

添え字 ℓ の付いたものは、低周波数成分 (操縦運動成分) に関する量であり $O(1)$ とする。一方、添え字 h の付いたものは操縦運動に重畳された高周波数成分 (波浪動揺成分) に関する量であり $O(\varepsilon)$ と仮定する (ε は微量を意味する)。なお、曳航運動に伴い曳船・被曳船に生じる定常的なトリムは非常に小さいとして、 $\theta_{1\ell}, \theta_{2\ell}$ については考慮していない。また、そのとき、曳航索の傾斜角の低周波数成分 $\theta_{t\ell}$ は、 $\theta_{t\ell} = \sin^{-1} \{(z_{T1} - z_{T2})/\ell_t\}$ として与えられる。さらに、

$$\frac{\partial}{\partial t} = O(\sigma) \quad \text{for} \quad U_{i\ell}, V_{i\ell}, \phi_{i\ell}, \psi_{i\ell}, \psi_{t\ell} \quad (i=1, 2) \quad (19)$$

という仮定を追加し、 $\varepsilon < \sigma$ とする (σ も微量を意味するが、 ε よりはオーダーが大きい)。これは、船の操縦運動及び曳航索の方位角がゆっくり変化すると仮定したことに相当する。

(18) 式を (5) 式 ($i=1$) に代入し、曳船運動の低周波数成分について、並進運動については $O(\sigma)$ の項まで、回転運動については $O(\sigma^2)$ の項まで考えると、次式が得られる (ただし、船体沈下及びトリムに関する式は考慮しない)。

$$\left. \begin{aligned} m_1(\dot{U}_{1\ell} - V_{1\ell}\dot{\psi}_{1\ell}) &= F_{x1\ell} + X_{T1\ell} \\ m_1(\dot{V}_{1\ell} + U_{1\ell}\dot{\psi}_{1\ell}) &= F_{y1\ell} + Y_{T1\ell} \\ I_{xx1}\ddot{\phi}_{1\ell} &= M_{x1\ell} + K_{T1\ell} \\ I_{zz1}\ddot{\psi}_{1\ell} &= M_{z1\ell} + N_{T1\ell} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

(20) 式は通常用いられる操縦運動方程式に、索張力による外力項の低周波数成分 ($X_{T1\ell}, Y_{T1\ell}, K_{T1\ell}, N_{T1\ell}$) が付加された形となっている。また、索張力以外の流体力等による外力項の低周波数成分 ($F_{x1\ell}, F_{y1\ell}, M_{x1\ell}, M_{z1\ell}$) は、添え字 1ℓ の付いた諸量だけで表されるので、平水中の操縦運動シミュレーション計算において用いられる流体力成分を用いれば良い。ただし、波浪の影響として、波漂流力成分だけは考慮しなくてはならないことに注意が必要である¹⁸⁾。

一方、曳船運動の高周波数成分について、 $O(\varepsilon)$ の項まで考えると次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} m_1(\dot{U}_{1h} - V_{1h}\dot{\psi}_{1h}) &= F_{x1h} + X_{T1h} \\ m_1(\dot{V}_{1h} + U_{1h}\dot{\psi}_{1h}) &= F_{y1h} + Y_{T1h} \\ m_1\dot{W}_{1h} &= F_{z1h} + Z_{T1h} \\ I_{xx1}\ddot{\phi}_{1h} &= M_{x1h} + K_{T1h} \\ I_{yy1}\ddot{\theta}_{1h} &= M_{y1h} + L_{T1h} \\ I_{zz1}\ddot{\psi}_{1h} &= M_{z1h} + N_{T1h} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

ここで、 $o-x_i y_i z_i$ 系で定義される動揺成分 $\xi_{ih}, \eta_{ih}, \zeta_{ih}$ を導入し、HBA 系で定義された (21) 式を書き換えることを考える。それらの加速度成分は、

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\xi}_{ih} &= \dot{U}_{ih} - V_{ih}\dot{\psi}_{ih} + O(\sigma\varepsilon) \\ \ddot{\eta}_{ih} &= \dot{V}_{ih} + U_{ih}\dot{\psi}_{ih} + O(\sigma\varepsilon) \\ \ddot{\zeta}_{ih} &= \dot{W}_{ih} \end{aligned} \right\} \quad (i=1, 2) \quad (22)$$

と表されるので、(21) 式は、

$$\left. \begin{aligned} m_1\ddot{\xi}_{1h} &= F_{x1h} + X_{T1h} \\ m_1\ddot{\eta}_{1h} &= F_{y1h} + Y_{T1h} \\ m_1\ddot{\zeta}_{1h} &= F_{z1h} + Z_{T1h} \\ I_{xx1}\ddot{\phi}_{1h} &= M_{x1h} + K_{T1h} \\ I_{yy1}\ddot{\theta}_{1h} &= M_{y1h} + L_{T1h} \\ I_{zz1}\ddot{\psi}_{1h} &= M_{z1h} + N_{T1h} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

と表記される。この (23) 式が曳船の波浪動揺問題に関する最終的な運動方程式であり、通常用いられる運動方程式に索張力による外力項の高周波数成分 ($X_{T1h}, Y_{T1h}, Z_{T1h}, K_{T1h}, L_{T1h}, N_{T1h}$) が付加されていることがわかる。索張力以外の流体力等による外力項の高周波数成分 ($F_{x1h}, F_{y1h}, F_{z1h}, M_{x1h}, M_{y1h}, M_{z1h}$) は、添え字 $1h$ の付いた諸量に関する線形の流体力として表され、 $o-x_1 y_1 z_1$ 系におけるストリップ法¹⁹⁾ をベースに計算される。

続いて、被曳船の運動についても同様の手法を用いて簡略化 (分離) する。(18) 式を (5) 式 ($i=2$) の heave, roll, pitch, yaw に関する運動方程式に代入すると、

低周波数成分

$$\left. \begin{aligned} I_{xx2}\ddot{\phi}_{2\ell} &= M_{x2\ell} + K_{T2\ell} \\ I_{zz2}\ddot{\psi}_{2\ell} &= M_{z2\ell} + N_{T2\ell} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

高周波数成分

$$\left. \begin{aligned} m_2\ddot{\xi}_{2h} &= F_{x2h} + Z_{T2h} \\ I_{xx2}\ddot{\phi}_{2h} &= M_{x2h} + K_{T2h} \\ I_{yy2}\ddot{\theta}_{2h} &= M_{y2h} + L_{T2h} \\ I_{zz2}\ddot{\psi}_{2h} &= M_{z2h} + N_{T2h} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

として得られる。さらに、(18) 式を解くべき運動方程式の 1 つである (17) 式に代入して整理すると、

低周波数成分

$$\begin{aligned} &m_2(\dot{U}_{2\ell} - V_{2\ell}\dot{\psi}_{2\ell}) \sin(\psi_{t\ell} - \psi_{2\ell}) \\ &- m_2(\dot{V}_{2\ell} + U_{2\ell}\dot{\psi}_{2\ell}) \cos(\psi_{t\ell} - \psi_{2\ell}) \\ &= F_{x2\ell} \sin(\psi_{t\ell} - \psi_{2\ell}) - F_{y2\ell} \cos(\psi_{t\ell} - \psi_{2\ell}) \end{aligned} \quad (26)$$

高周波数成分

$$\begin{aligned} &m_2\ddot{\xi}_{2h} \sin(\psi_{t\ell} - \psi_{2\ell}) - m_2\ddot{\eta}_{2h} \cos(\psi_{t\ell} - \psi_{2\ell}) \\ &= F_{x2h} \sin(\psi_{t\ell} - \psi_{2\ell}) - F_{y2h} \cos(\psi_{t\ell} - \psi_{2\ell}) \\ &+ (\psi_{th} - \psi_{2h}) F_{x2\ell} \cos(\psi_{t\ell} - \psi_{2\ell}) \\ &+ (\psi_{th} - \psi_{2h}) F_{y2\ell} \sin(\psi_{t\ell} - \psi_{2\ell}) \end{aligned} \quad (27)$$

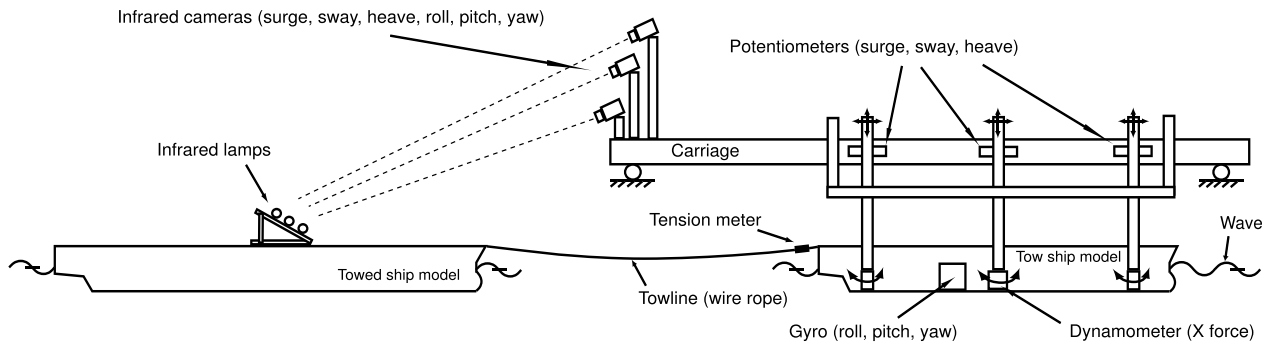


図 2 曳船・被曳船の6自由度運動計測システム

となる。以上が、簡略化により運動の周波数成分毎に分離された曳船・被曳船の運動方程式となる。また、索張力による外力項の低周波数成分及び高周波数成分の表記については、同様に(18)式を(6)(7)(16)式に代入して整理すれば得られるので、ここでは省略する。一方、索張力以外の流体力等による外力項の低周波数成分及び高周波数成分については、安川¹⁴⁾の表記法を各船毎に適用することとした。詳細については文献を参照されたい。なお、先に示した通り、外力項の高周波数成分についてはストリップ法をベースに計算されるが、そのときの各船毎の出会い周波数 ω_{ei} については、(4)式を用いて計算している。

まとめると、低周波数成分(操縦運動成分)については、(20)(24)(26)式の計7個の運動方程式を、高周波数成分(波浪動揺成分)については、(23)(25)(27)式の計11個の運動方程式を解き、(9)~(11)式及び(16)式といった補助方程式を使用しながら、それぞれについて足し合わせることで、波浪中における曳船・被曳船の6自由度運動計算を時刻歴ベースで行うことが可能となっている。

3 水槽試験の概要

本計算法の精度を検証するため、向波、横波、斜波中曳航時の曳船・被曳船の船体運動ならびに索張力に関する水槽試験を、三菱重工長崎研究所耐航性能水槽にて実施した。以下に、水槽試験の概要について説明する。

3.1 対象船

曳船として2軸POD船、被曳船としてSR108型コンテナ船の模型船を採用した。表1に、それぞれの想定した実船と模型船の主要目について示す。表中、 L は垂線間長、 B は幅、 d_f 、 d_m 、 d_a はそれぞれF.P., midship, A.P.における喫水、 Δ は排水容積、 C_b は方形係数、 x_G は浮心の前後位置座標、 k_{yy} は慣動半径、 KG は基線からの重心高さ、 GM は重心からのメタセンタ高さ、 T_ϕ は横揺れ動揺周期を意味する。曳船には2機のPOD推進器を首振り角0度の状態で設置し、喫水は等喫水とした。表中、 D_P はPOD推進器のプロペラ直径、 p はプロペラピッチ比である。一方、被曳船は、実験中の振れ回り運動を抑制するため、舵を設置するとともに喫水は船尾トリムとした。表中、 H_R は舵高さ、 B_R は舵コード長を示す。

表 1 曳船・被曳船の主要目

	Tow ship		Towed ship	
symbol	Fullscale	Model	Fullscale	Model
L (m)	26.55	2.655	30.00	3.000
B (m)	5.23	0.523	4.35	0.435
d_f (m)	1.66	0.166	1.20	0.120
d_m (m)	1.66	0.166	1.63	0.163
d_a (m)	1.66	0.166	2.06	0.206
Δ (m ³)	185.00	0.185	122.00	0.122
C_b	0.799	0.799	0.572	0.572
x_G (m)	-0.67	-0.067	-1.41	-0.141
k_{yy}/L	-	0.278	-	0.239
KG (m)	1.24	0.124	1.73	0.173
GM (m)	1.99	0.199	0.19	0.019
T_ϕ (s)	-	1.19	-	2.36
D_P (m)	0.80	0.080	—	—
p	0.8	0.8	—	—
H_R (m)	—	—	1.32	0.132
B_R (m)	—	—	0.72	0.072

3.2 波浪中曳船・被曳船試験の概要

向波、横波、斜波中における曳船・被曳船の6自由度運動及び曳船側曳航点に作用する索張力を計測する。図2に水槽試験の計測システム図を、図3に実際の実験状況を示す。曳船については、ガイドで曳引車に拘束されているため、どの方向からの波の中でも、ほとんど船首方位を変えることなく直進航行が可能である。ただし、波浪動揺については全て自由にしているので、それらの運動計測は可能となっている。surge, sway, heaveの並進運動についてはポテンシオメーターにより、roll, pitch, yawの回転運動についてはジャイロによって計測した。また、曳船に作用する抵抗についても、動力計を用いて計測している。一方、被曳船については、曳航索を介して曳航点でのみ拘束されている状態としたため、非接触な運動計測法により運動計測を行わねばならない。本実験では、モーションキャプチャーシステムを使用し、6自由度の運動計測を試みた。被曳船に設置されている3個の赤外線ランプを角度・位置の異なる3台の赤外線カメラで撮影し、対象物の変位を演算によって求めるのがモーションキャプチャーシステムである。カメラを3台使用しているため、広範囲の撮影が可能となっており、そのシステムにより被曳船の6自由度運動はもとより、曳船の位置を基準とした被曳船の相対位置についても

図 3 実際の実験状況（向波： $\chi=0\text{deg}$ ）

演算から求めることが可能である。また、曳航索の模型については、直径 2.0mm、単位長さ当たりの重量 35.0gf/m のワイヤーロープを採用した。曳船側曳航点に作用する索張力は、そのワイヤーロープの先端部に設置した張力計によって計測される。なお、被曳船側曳航点にはブライドルを設けることとしたが、振れまわり運動の抑制効果を高めるため、そのブライドル部の長さを索長の約 1/2 と設定した。

曳船の曳航速度は 0.8m/s と設定し、POD 推進機のプロペラを ship point で回転させることとした。これは平水中において、曳船が被曳船を実船換算で約 4.9kn にて曳航することに相当する。また、左右の POD 推進機による推力についても計測を行っている。曳船側曳航点は船体中心線上 ($y_{T1}=0\text{m}$) に設定し、模型船の構造を考慮して、 x_{T1} は A.P. から後方 0.140m の位置、 z_{T1} は静水面上 0.280m とした。一方、被曳船側曳航点については、ブライドルを設けることとしたため、船体中心線上から左右舷それぞれに ($y_{T2}=\pm 0.260\text{m}$) の位置に設定し、 x_{T2} は F.P. の位置、 z_{T2} は静水面上 0.255m とした。曳航索長については、計測機器の制約上、3.0m で一定とした。これは被曳船の船長と同じ長さである。また、この索長は洋上で実施される曳航作業において通常推奨される索長（被曳船の船長の 2～3 倍）よりも短い、近距離輸送における台船やバージの曳航では、しばしば使用される索長と言える。波は規則波のみを取り扱い、その方向は向波 ($\chi=0\text{deg}$)、横波 ($\chi=90\text{deg}$)、斜波 ($\chi=30\text{deg}$) の 3 パターンを選んだ。波振幅 ζ_A は 12.5mm を目標とする。波長船長比は被曳船長 (L_2) をベースとして定義し、 $\lambda/L_2=0.5, 0.8, 1.1, 1.4, 1.7, 2.0$ の 6 種類とした。加えて、曳航索による拘束力の有無が各船の運動に及ぼす影響を把握するため、各船が単独で向波 ($\chi=0\text{deg}$)、横波 ($\chi=90\text{deg}$)、斜波 ($\chi=30\text{deg}$) 中を航走した場合の船体運動についても計測を行っている。その際の運動計測は、上述の曳船の運動計測と同様のシステムによって実施し、併せて前後方向における波浪中抵抗増加についても計測した。

4 シミュレーション計算結果と水槽試験結果の比較

4.1 計算条件

本計算法は、各船の操縦運動と波浪動揺の両方を考慮した計算法であるので、シミュレーション計算には、各船の操縦運動に関する流体力係数、波漂流力係数及び波浪動揺

に関する各種係数が必要となる。ただし、本実験においては、曳船はガイドで固定されており、直進航行しか行うことができないため、曳船の操縦流体力微係数、操舵に関する流体力係数、及び干渉係数等に関する表記はここでは省略する。また、曳船の直進航行に関するプロペラ推力、曳船・被曳船の平水中抵抗の計算に必要な各種流体力係数については、著者等の研究¹³⁾で示した値をそのまま使用することとした。まず、表 2 に、被曳船の操縦流体力微係数を示す。なお、 z_{H2}/d_2 は、船体に作用する横力の作用点高さの無次元値（推定値）を意味する。加えて、シミュレーション計算に必要な各船のその他の流体力特性を示したものが表 3 である。付加質量係数 ($m'_{xi}, m'_{yi}, J'_{zzi} : i=1,2$) は元良チャートによる推定値であり、 J'_{xx1}, J'_{xx2} も推定値である。また、その他の係数は全て模型船での計測値をベースに決めたものとなっている。 $N_{10}^{(1)}, N_{10}^{(2)}$ は N 係数であり、各船の横揺れ減衰係数を計算するのに使用する。

表 2 被曳船の操縦流体力微係数

symbol	value	symbol	value
$X'_{\beta\beta 2}$	-0.0248	$Y'_{\beta\beta r 2}$	1.5925
$X'_{rr 2}$	-0.0105	$N_{\beta 2}$	0.0425
$X'_{\beta r 2} - m'_{y 2}$	-0.1142	$N'_{r 2}$	-0.0427
$Y_{\beta 2}$	0.3170	$N_{\beta\beta\beta 2}$	-0.0968
$Y'_{r 2} - m'_{x 2}$	0.1087	$N_{\beta\beta r 2}$	-0.7905
$Y'_{\beta\beta\beta 2}$	1.3541	z_{H2}/d_2	0.5

表 3 曳船・被曳船の各種流体力係数

symbol	value	symbol	value
m'_{x1}	0.0077	k_{zz1}/L_1	0.277
m'_{y1}	0.1730	k_{xx1}/B_1	0.325
J_{zz1}	0.0076	k_{zz2}/L_2	0.238
J_{xx1}	0.0004	k_{xx2}/B_2	0.305
m'_{x2}	0.0044	z_{G1}/d_1	0.253
m'_{y2}	0.1299	z_{G2}/d_2	-0.061
J_{zz2}	0.0077	$N_{10}^{(1)}$	0.0140 (1/deg)
J_{xx2}	0.0001	$N_{10}^{(2)}$	0.0129 (1/deg)

次に、波漂流力係数は、理論計算により予め計算しておき、それをデータベースとして、入射波の周波数と波方向のパラメータに関する補間計算を行うことによって適宜求めることとした。 C_{XW} (抵抗増加係数) については、各船の船速がゼロの場合と目標曳航速度である 0.8m/s の場合における 2 つの抵抗増加係数のテーブルを用意しておき、船速影響を考慮した上で適宜線形補間で求めた。船速が 0.8m/s の場合の C_{XW} は、ストリップ法をベースに船体動揺を計算し、丸尾の理論²⁰⁾に高橋²¹⁾の反射波の影響を考慮して求めた。一方、船速がゼロの場合の C_{XW} は、特異点分布法²²⁾で計算した。 C_{YW}, C_{NW} については、船速による影響は無いものと仮定し、同じく特異点分布法で求めた。図 4 に、以上の方法で求めた波漂流力係数の計算結果と三菱重工業長崎研究所耐航性能水槽で実施した水槽試験結果の比較を示す。水槽試験では、各船が単独で向波 ($\chi=0\text{deg}$)、横波 ($\chi=90\text{deg}$)、斜波 ($\chi=30\text{deg}$) 中を船速 0.8m/s で航走した

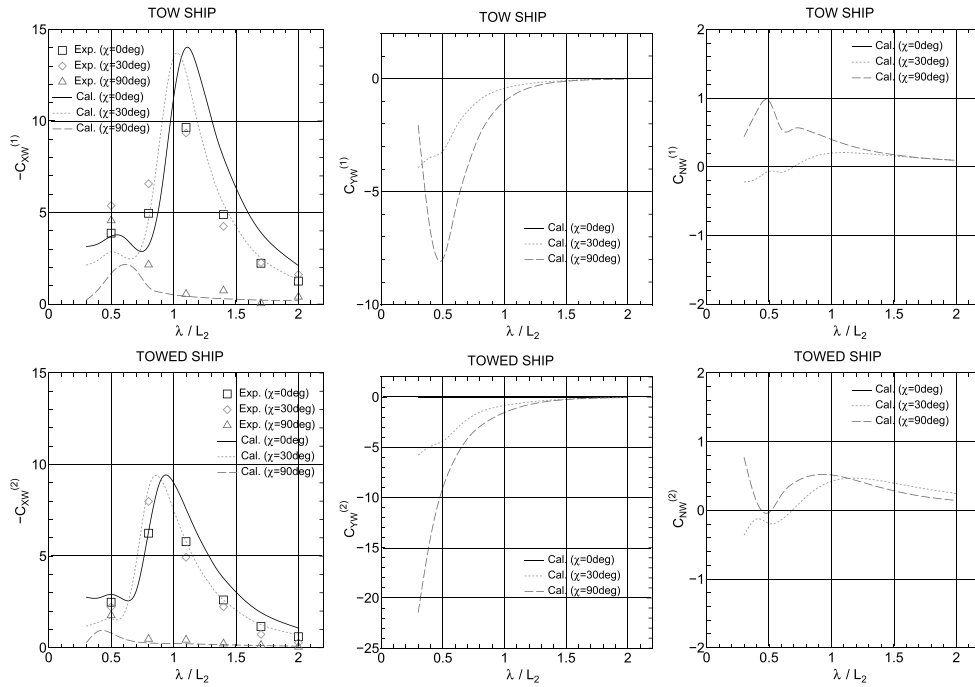


図 4 曳船・被曳船の波漂流力係数に関する計算結果と水槽試験結果との比較

場合の C_{XW} のみを計測している。図 4 から、 C_{XW} の計算結果は、およそ水槽試験結果と一致していることがわかった。また、 C_{YW} 、 C_{NW} については、計測機器の関係上、計測することが叶わなかったが、同様の方法で計算した C_{YW} 、 C_{NW} が水槽試験結果と良い一致を示していると安川は報告している¹⁵⁾。よって、ここで示した波漂流力係数の計算法を用いることに、実用上、大きな問題は無いと判断した。なお、各船の船体に作用する波漂流力は、上記から得られた波漂流力係数を用いて、次式より求められる。

$$\left. \begin{aligned} X_{W(1,2)} &= \rho g \zeta_A^2 B_{(1,2)}^2 / L_{(1,2)} \cdot C_{XW}^{(1,2)} \\ Y_{W(1,2)} &= \rho g \zeta_A^2 B_{(1,2)}^2 / L_{(1,2)} \cdot C_{YW}^{(1,2)} \\ N_{W(1,2)} &= \rho g \zeta_A^2 B_{(1,2)}^2 \cdot C_{NW}^{(1,2)} \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

最後に、各船の radiation 流体力に関する付加質量及び造波減衰係数、復原力係数、ならびに波強制力といった波浪動揺に関する諸係数については、前述のとおりストリップ法に基づいて計算した。また、船速、曳航点の座標等については、水槽試験の値と一致するように値を設定している。ただし、被曳船側の曳航点について、本来であればブライドル部の頂点を曳航点として設定すべきであるが、その水面からの高さについて幾何学的に決定することが困難であったため、実用面を考慮し、被曳船の船体中心線上、F.P. の位置から曳航されているものと仮定して計算を実施した。

以上で示した流体力係数等を用いて、安川の表記法¹⁴⁾に基づき、索張力以外の流体力等による外力の低周波数成分及び高周波数成分が計算され、最終的には、各船の 6 自由度船体運動が時刻歴ベースで計算されることとなる。

4.2 周波数応答での船体運動比較

各船の波浪中 6 自由度船体運動に関する計算結果を時刻歴ベースで水槽試験結果と比較したところ、被曳船の運動について、両者の位相に関する結果に差異が生じる場合が

あることがわかったが、本計算法は水槽試験結果をおおよそ捉えることができるようである。ここでは、各種条件下における時刻歴計算の結果から、曳船・被曳船の船体運動振幅について求め、それらの結果を水槽試験結果と比較する、いわゆる周波数応答での比較について示すことで、本計算法の精度を検証する。

4.2.1 向波 ($\chi=0\text{deg}$) における船体運動比較

はじめに、図 5 及び図 6 に向波 ($\chi=0\text{deg}$) の場合における曳船ならびに被曳船の船体運動振幅に関する比較結果を示す。各グラフの横軸には被曳船長ベースの波長船長比を、縦軸には船体運動振幅の無次元値を取っている。なお、各船の surge, sway, heave 運動については波振幅 ζ_A により、roll, pitch, yaw 運動については波傾斜 $k\zeta_A$ (k : 波数) により無次元化を行った。数値計算結果が、曳航索の有無による各船の運動の差異を捉えることができているか確認するため、各図には単独航走時及び曳航時における水槽試験結果、数値計算結果の両方が記載されている。ここでは、向波を取り扱っているため、各船の横運動 (sway, roll, yaw) に関する計算結果は、単独航走時、曳航時ともにほぼゼロとなっており、それらは水槽試験結果が示す傾向と同じである。よって、以下では、縦運動 (surge, heave, pitch) に関する結果について順次考察を行っていくこととする。

まず、図 5 及び図 6 に示す surge 運動に関する水槽試験結果について着目すると、曳航時の各船の surge 運動は単独航走時のそれよりも小さくなる傾向があるようである。曳航時の各船の surge 運動に関する本計算結果は、単独航走時の計算結果よりも小さくなっていることから、定性的にはその傾向を捉えていると言えるが、長波長域において振幅の減少の度合いが過大となっていることがわかる。これは、曳航索を 1 本のトラス要素として取り扱っているため、各船の surge 運動が直接的に作用し合ってしまったこ

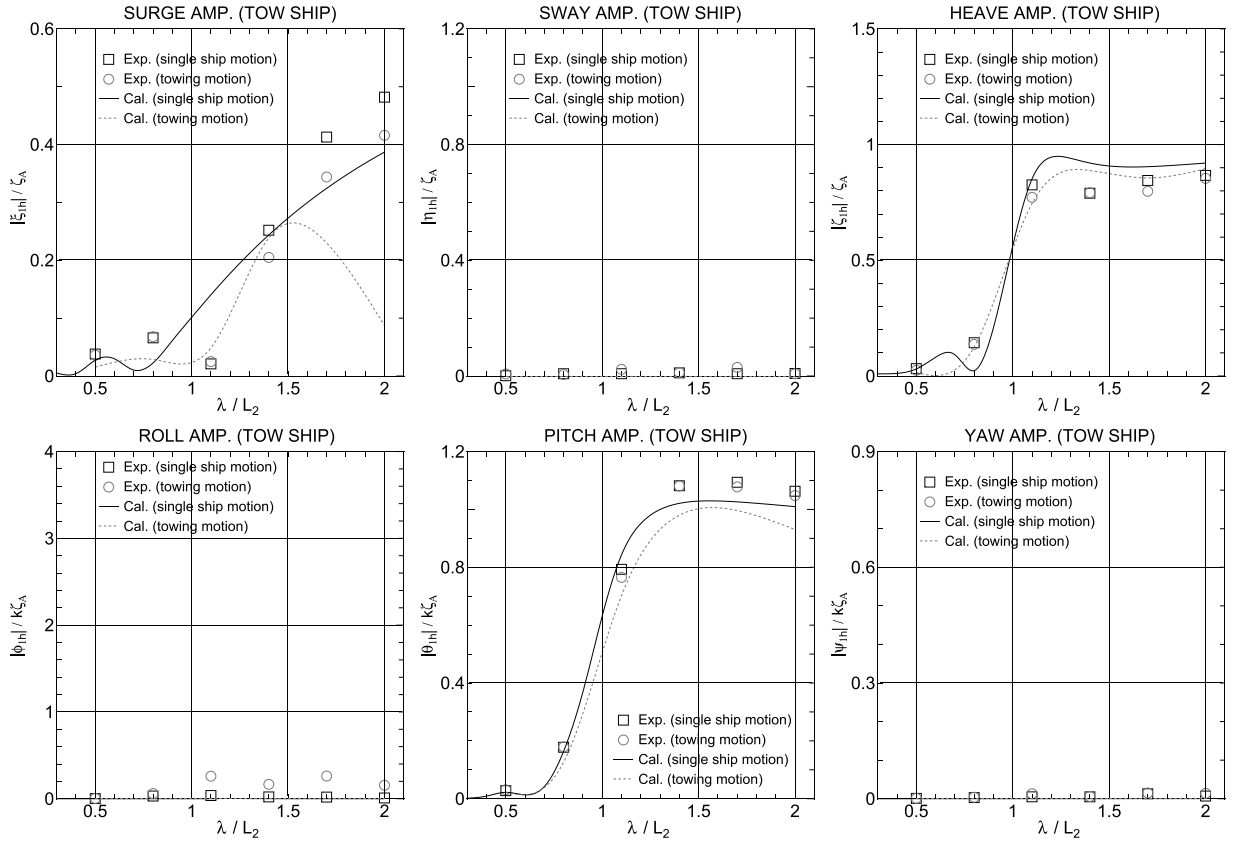


図 5 曳船：周波数応答での船体運動比較 (向波： $\chi=0\text{deg}$)

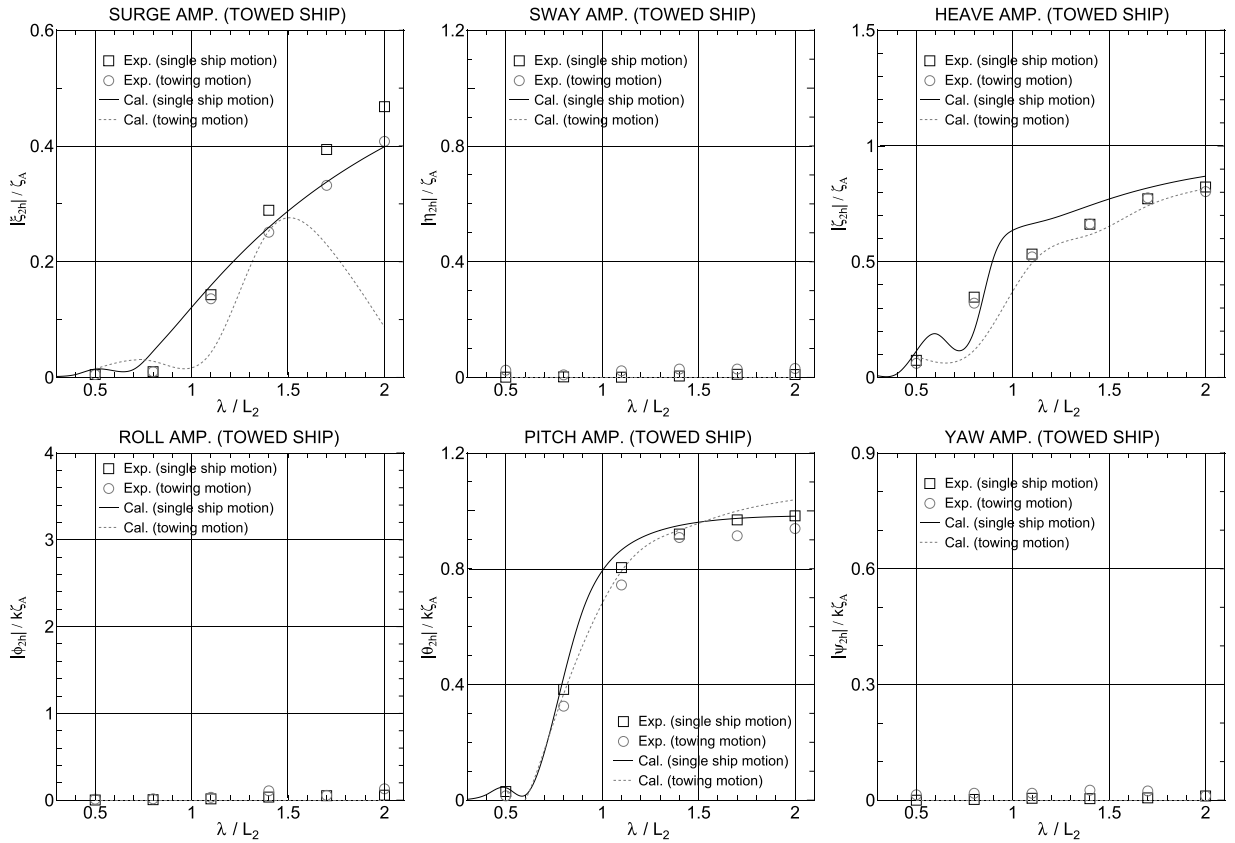
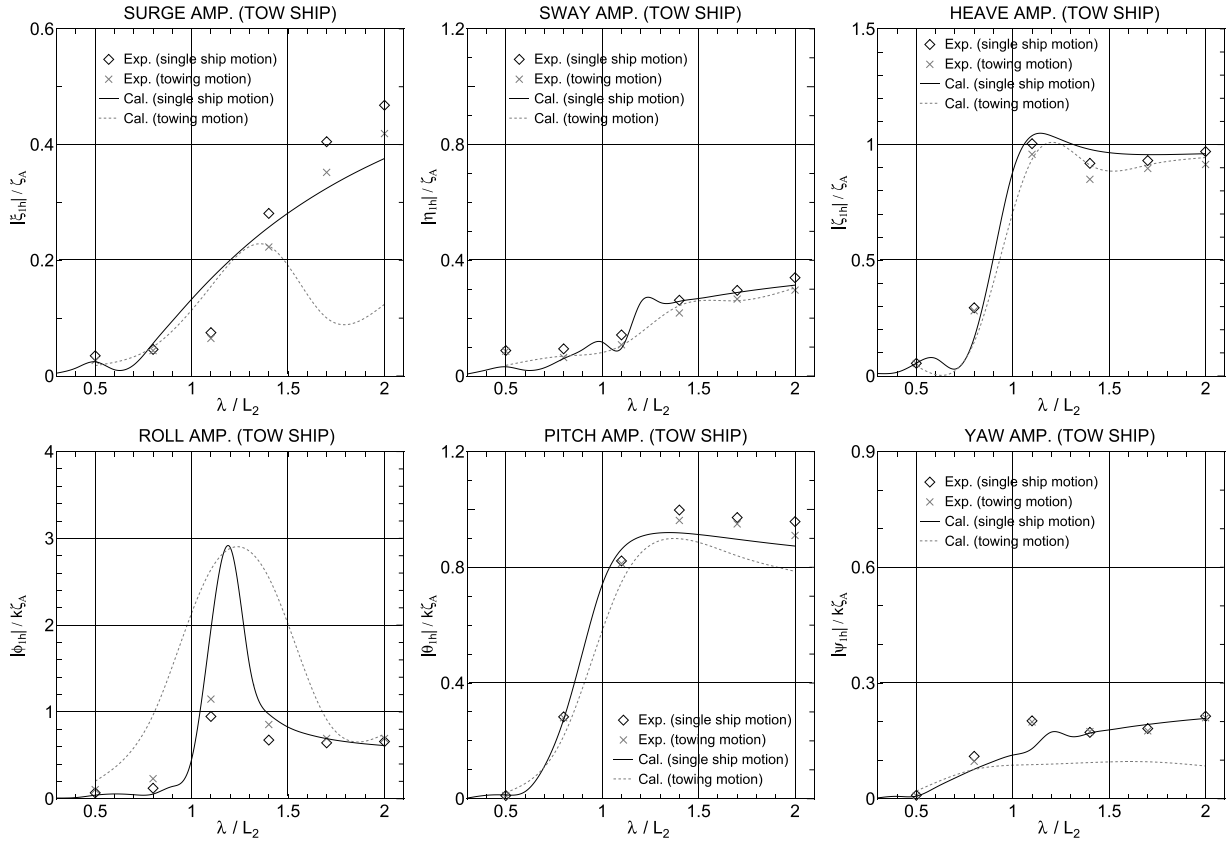
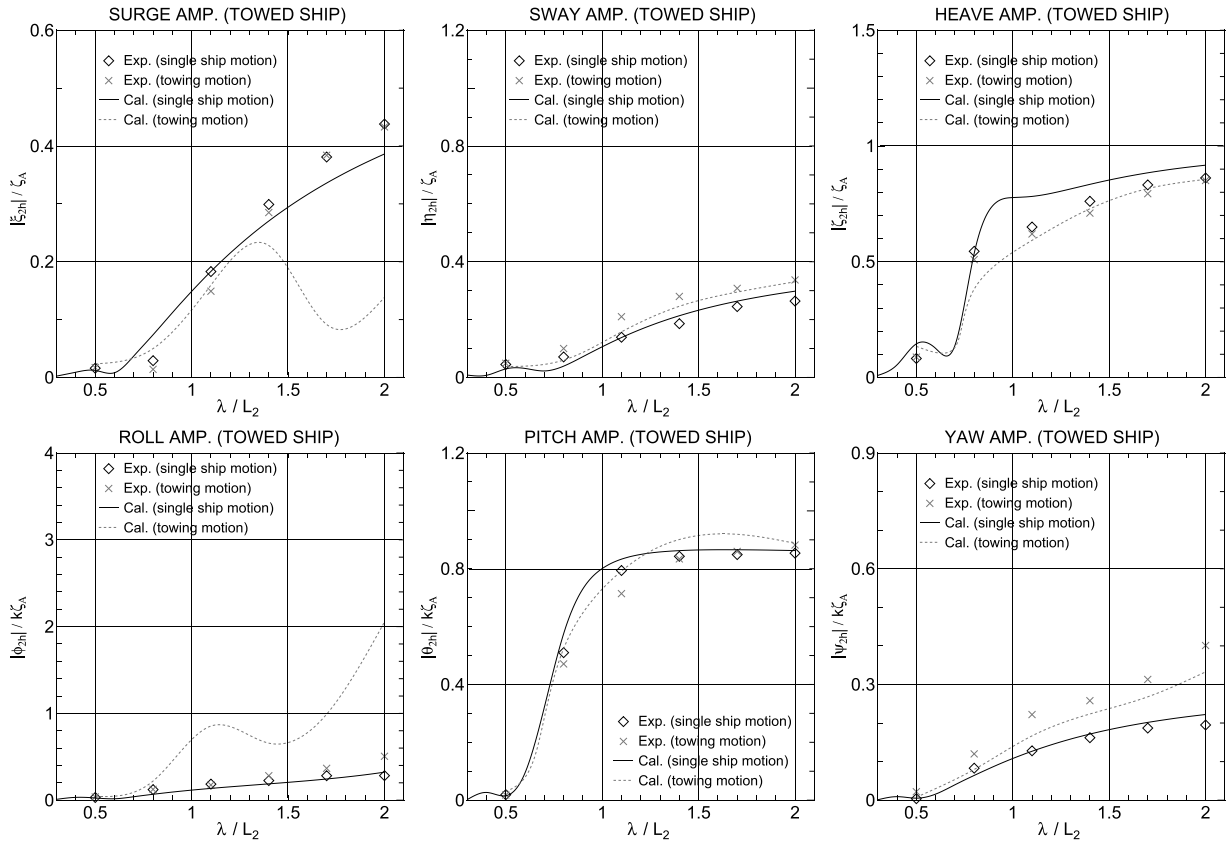


図 6 被曳船：周波数応答での船体運動比較 (向波： $\chi=0\text{deg}$)


 図 7 曳船：周波数応答での船体運動比較 (斜波： $\chi=30\text{deg}$)

 図 8 被曳船：周波数応答での船体運動比較 (斜波： $\chi=30\text{deg}$)

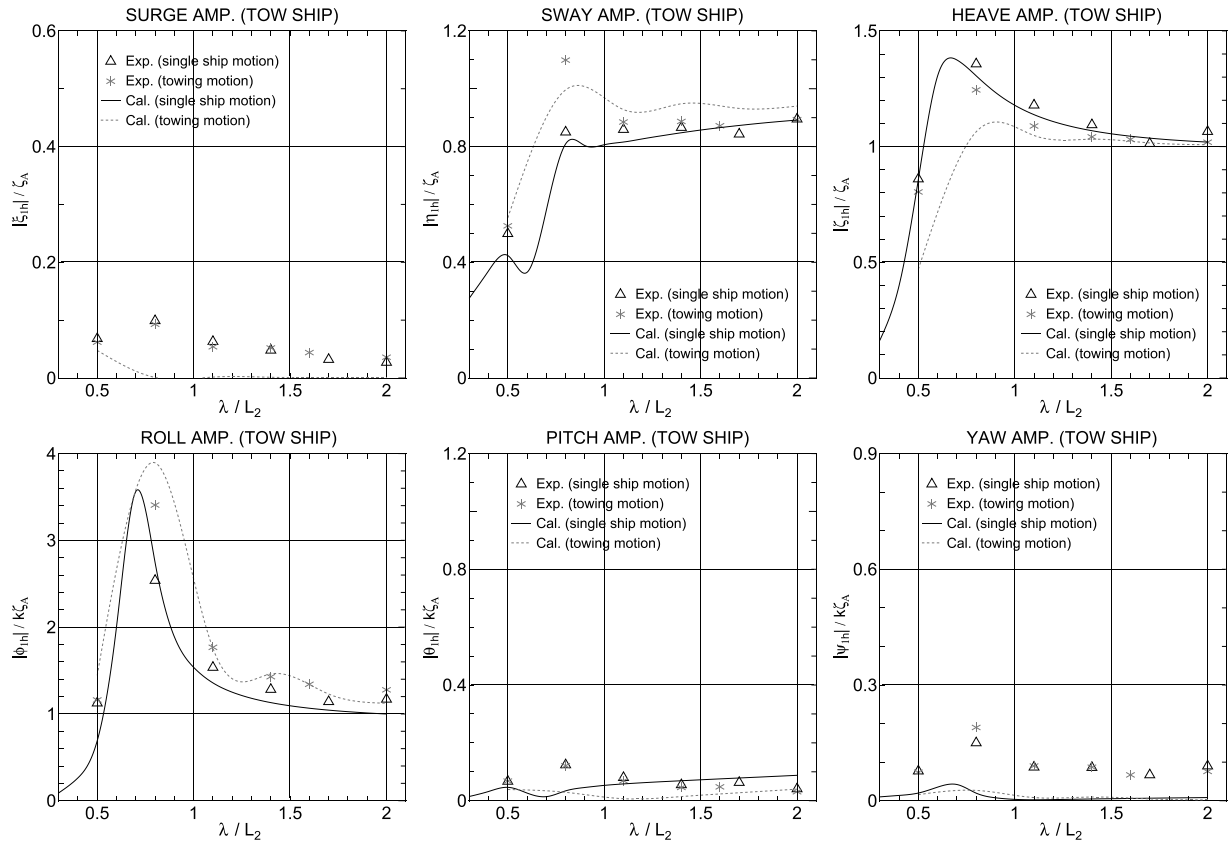


図 9 曳船：周波数応答での船体運動比較 (横波： $\chi=90\text{deg}$)

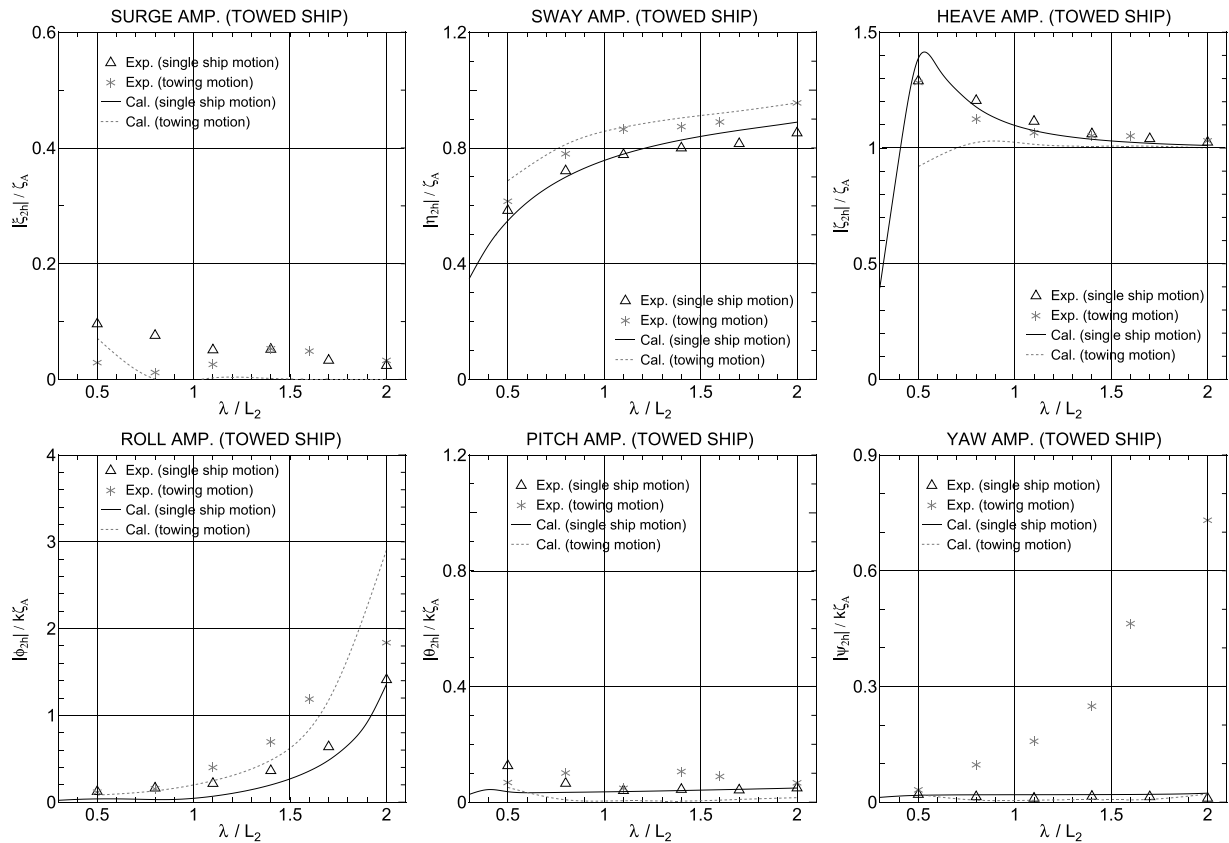


図 10 被曳船：周波数応答での船体運動比較 (横波： $\chi=90\text{deg}$)

とが原因であると考えられる。よって、各船の surge 運動が大きくなる波浪条件においては、本計算法では精度良く各船の運動を推定することが難しいと言わざるを得ない。次に、曳航時の各船の heave 運動ならびに曳船の pitch 運動に関する本計算結果は、単独航走時の計算結果よりも小さくなっており、水槽試験結果が示す傾向と定性的に一致しているようである。ただし、surge 運動と同様、その減少の度合いは計算結果の方が大きくなっている。最後に、曳航時の被曳船の pitch 運動に関する本計算結果は、基本的に単独航走時の計算結果よりも小さくなっており、水槽試験結果が示す傾向と定性的に一致するようであるが、長波長域においては、その傾向が逆転してしまうことがわかった。以上から、向波状態を取り扱う場合、本計算法は、水槽試験結果が示す傾向を定性的には捉えることができたと言えるが、各船の surge 運動が大きくなる長波長域においては、その精度が劣るということがわかった。ただし、各船の heave 運動に関する計算結果については、どの波浪条件においても水槽試験結果が示す傾向と定性的に一致しており、実用上の精度を有するようになると思われる。

4.2.2 斜波 ($\chi=30\text{deg}$) における船体運動比較

同様に、斜波 ($\chi=30\text{deg}$) の場合における曳船ならびに被曳船の船体運動振幅に関する比較結果を、図 7 及び図 8 に示す。曳航時の各船の縦運動に関する本計算結果は、向波の場合と同様、水槽試験結果が示す傾向を定性的には捉えていると言えるが、各船の surge 運動が大きくなる長波長域においては、その精度が劣るということがわかった。ただし、各船の heave 運動については、どの波浪条件においても水槽試験結果が示す傾向とおおよそ一致するようである。一方、各船の横運動に関する本計算結果は、水槽試験結果が示す傾向を定性的に捉えているものと思われる。曳航時の曳船の sway 及び yaw 運動が単独航走時のそれらよりも減少すること、曳船の roll 運動ならびに被曳船の全ての横運動が単独航走時のそれらよりも増加することという傾向が計算結果においても再現されている。ただし、各船の roll 運動については、増加の度合いをやや過大に見積もっているように思われる。この理由は、定常曳航状態において曳船に作用する索張力による横揺れモーメントの大きさが、計算結果と水槽試験結果とは異なっていることにあると考えられる。

以上から、斜波状態を取り扱う場合、本計算法による縦運動の計算結果に関する精度は向波状態におけるものと同程度であるが、横運動に関しては実用上の精度を有しているものと思われる。

4.2.3 横波 ($\chi=90\text{deg}$) における船体運動比較

最後に、横波 ($\chi=90\text{deg}$) の場合における曳船ならびに被曳船の船体運動振幅に関する比較結果を、図 9 及び図 10 に示す。曳船・被曳船の 6 自由度運動に関する本計算結果は、各船ともに水槽試験結果が示す傾向を十分に再現していることがわかる。曳航時の被曳船の yaw 運動の水槽試験結果が、単独航走時のそれよりも大きくなっており、この

点だけが本計算結果と異なるが、水槽試験結果から得られる被曳船の yaw 運動振幅は有次元値で 1.0deg 程度であるため、この傾向の差異は実用的には大きな問題とはならないように思われる。よって、横波状態を取り扱う場合、本計算法の精度は、実用上十分であると言えるであろう。

4.2.4 曳船・被曳船の波浪中運動に関する考察

ここで、曳航時における各船の船体運動と単独航走時のそれらとの差異について、水槽試験結果に基づき、考察した結果を以下にまとめる。曳船・被曳船の波浪中運動に関するメカニズムを解明するところまでは未だ至っていないが、現象の理解は深まったように思われる。

- 向波中曳航時の曳船・被曳船の縦運動は、単独航走時のそれらよりも小さくなる。曳船の surge 運動については、被曳船の surge 運動に起因する索張力の変動成分が曳船の surge 運動を減衰させる方向に作用したことが原因である。それ以外の運動については、曳航索の拘束による影響が主たる要因と考えられる。
- 向波中曳航時の曳船・被曳船の横運動は、単独航走時と同様、大きく発達することは無い。ただし、被曳船の定常位置が曳船の船体中心線上からずれた状態となると、各船に若干量ではあるが roll 運動が生じる。
- 斜波中曳航時の曳船・被曳船の縦運動は、向波の場合と同様、単独航走時のそれらよりもやや小さくなる。
- 斜波中曳航時の曳船の sway 及び yaw 運動は、単独航走時のそれらよりも小さくなる。これは、被曳船があたかもシーアンカーのように作用し、それらの運動を抑制した結果であると考えられる。
- 斜波中曳航時の曳船の roll 運動ならびに被曳船の全ての横運動は、単独航走時のそれらよりも大きくなる。これは、波漂流力により、被曳船の定常位置が曳船の船体中心線上からずれた状態となることによって、各船に作用することとなる索張力による横力・モーメントの変動成分が原因であると考えられる。
- 横波中曳航時の曳船・被曳船の surge 及び pitch 運動は、単独航走時と同様、大きく発達することは無い。
- 横波中曳航時の曳船・被曳船の heave 運動は、単独航走時のそれらよりも小さくなる。
- 横波中曳航時の曳船・被曳船の横運動は、単独航走時のそれらよりも大きくなる。これは、斜波中と同様の理由により、各船に作用することとなる索張力による横力・モーメントの変動成分が原因であると考えられる。

5 結言

本論文では、波浪中における曳船・被曳船の操縦運動及び 6 自由度波浪動揺の両方を総合的に取り扱うことのできる実用的なシミュレーション計算法を提案した。本計算法は、操縦運動を扱う低周波数の運動方程式と波浪動揺を扱う高周波数の運動方程式を完全に分離させ、それぞれを別個に解くことによって、波浪中を航行する曳船・被曳船に

関する 6 自由度運動計算を可能としている。本計算法による数値計算結果と水槽試験結果とを比較することで、本計算法には以下の特徴があることがわかった。

- 向波・斜波中曳航時の各船の運動振幅については、各船の surge 運動が大となる領域を除き、本計算法は水槽試験結果が示す傾向を定性的に捉えることができる。
- 横波中曳航時の各船の運動振幅については、どの波浪条件においても、本計算法は水槽試験結果が示す傾向を捉えることができる。
- 横波中曳航時の各船の運動については、その位相を含め、時刻歴ベースで良好に再現することが可能である。

今後の課題として、理論計算法の改良を行い計算精度の向上を目指すということ、併せて、様々な曳航条件における数値計算を実施することが必要と考える。特に、曳航索長については、その長さが変われば 2 船の位置関係が変わり、波浪動揺の位相も変化することが考えられるため、本論文で示した結論と同様の傾向が得られるかについては、さらに慎重な検討が必要であろう。以上を通じ、曳航時に起こりうる現象やそのメカニズムに関する理解をさらに深め、曳航作業の安全性向上のための対策を提案することが本研究の最終的な目標となる。

また、本論文においては、本計算法による各船の操縦運動に関する数値計算結果についての検討が十分でないため、続報等でその精度・実用性等について検証していきたい。

謝 辞

本研究は、文部科学省科学研究費（基盤研究 (B)23360386）の補助を受けたことを記し、関係各位に謝意を表す。また、水槽試験の実施に御協力いただいた三菱重工業長崎研究所耐航性能水槽の方々に深く御礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) Strandhagen,A.G., Schoenherr,K.E. and Kobayasi,F.M., The Dynamic Stability on Course of Towed Ships, Trans.SNAME, Vol.58 (1950), 32-46.
- 2) 貴島勝郎, 和田洋二郎, 風圧下における被曳船の針路安定性, 日本造船学会論文集, 第 153 号 (1983), 117-126.
- 3) 貴島勝郎, 前川和義, 田中浩一郎, 浅水域における曳船・被曳船系の針路安定性, 西部造船会々報, 第 84 号 (1992), 85-95.
- 4) 貴島勝郎, 古川芳孝, 狭水域における曳船の曳航法について, 西部造船会々報, 第 89 号 (1995), 167-177.
- 5) 道本順一, 日當博喜, 寺本定美, 田中 明, 荒天下における曳船と被曳船の運動に関する研究 (その 3, 曳航索の形状変化を考慮した索張力変動の計算), 海上保安大学校研究報告 理工学系, 第 44 号 第 1 号 (1998), 13-24.
- 6) 道本順一, 日當博喜, 寺本定美, 佐名信治, 荒天下における曳船と被曳船の運動に関する研究 (その 4, 変針時の運動および曳航索張力変動の計算), 海上保安大学校研究報告 理工学系, 第 47 号 第 1 号 (2003), 11-24.

- 7) 重廣律男, 曳航・被曳航船系の操縦運動モデル, 関西造船協会誌, 第 230 号 (1998), 153-164.
- 8) 安川宏紀, 平田法隆, 中村暢昭, 松本之良, 被曳船の振れまわり運動シミュレーション, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 4 号 (2006), 137-146.
- 9) Yasukawa,H., Nakamura,N., Hirata,N. and Koh,K.K., Maneuvering Simulations of Tow and Towed Ships in Still Water, International Conference on Towing & Salvage of Disabled Tankers (2007), 73-82.
- 10) 定兼廣行, 李 成壽, 向い波中箱型台船の曳航抵抗と索張力: 曳航台車による模型実験, 日本航海学会論文集, 第 108 号 (2003), 211-217.
- 11) Hara,S. and Yamakawa,K., Study on the Towline Tension During Towing: 2nd Report: Behavior of the Towline in Waves, 関西造船協会誌, 第 220 号 (1993), 233-247.
- 12) Fang,M.-C. and Ju,J.-H., The Dynamic Simulations of the Ship Towing System in Random Waves, Marine Technology, Vol.46 No.2 (2009), 107-115.
- 13) 中山喜之, 安川宏紀, 平田法隆, 正面向波中における曳船・被曳船の船体運動シミュレーション, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 15 号 (2012), 91-100.
- 14) 安川宏紀, 旋回する船の波浪動揺シミュレーション, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 4 号 (2006), 117-126.
- 15) 安川宏紀, 波浪中における船の操縦運動シミュレーション (第 1 報: 旋回運動), 日本船舶海洋工学会論文集, 第 4 号 (2006), 127-136.
- 16) 小林英一, 影本 浩, 古川芳孝, 第 2 章 操縦運動の数学モデル, 操縦性研究の設計への応用, 運動性能研究委員会 第 12 回シンポジウム, 日本造船学会 (1995), 78-84.
- 17) 浜本剛実, 金 潤洙, 波浪中の操縦運動を記述する新しい座標系とその運動方程式, 日本造船学会論文集, 第 173 号 (1993), 209-220.
- 18) 野中晃二, 波浪中の操船運動について, 西部造船会々報, 第 80 号 (1990), 73-86.
- 19) 渡辺 巖, 土岐直二, 伊東章雄, 第 2 章 ストリップ法 耐航性理論の設計への応用, 運動性能研究委員会 第 11 回シンポジウム, 日本造船学会 (1994), 167-187.
- 20) Maruo,H., Wave Resistance of a Ship in Regular Head Seas, Bulletin of the Faculty of Eng., Yokohama National Univ., Vol.9 (1960), 73-91.
- 21) 高橋 雄, 波浪中抵抗増加の実用的推定法とその船型計画への応用, 西部造船会々報, 第 75 号 (1988), 75-95.
- 22) 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-動揺問題の数値解法」, 成山堂書店, 2003.