

損傷船舶の曳航に関する研究 (第2報)

正員 岸 本 隆*

正員 貴 島 勝 郎**

On the Towing System for Disabled Ships (2nd Report)

by Takashi Kishimoto, *Member* Katsuro Kijima, *Member*

Summary

Ships disabled from marine disasters are generally towed by tug-boat. Issues concerning tug-towed ship systems are factors such as the length of the towing rope, the location of towing points and the conditions of the disabled ships. Up to the present time, these important factors have been entrusted to the knowledge and the experience of towing operators, and under their supervision, many accidents may occur because there isn't an effective method to tow disabled ships, towing operators are forced to use their own method, creating inconsistency and errors in methodology.

In view of the development of the optimum towing method, we estimated the course stability of the tug-towed ship systems including various towing conditions. Furthermore, we examined the manoeuvring performance of the tug and the towed ship systems by using the numerical towing simulations considering wind and wave effects. The towing simulations systematically need to be done which take into account various towing conditions, and which will ultimately lead to guidelines for the safe towing operations.

1. 緒 言

近年、タンカーの座礁事故による原油流出をはじめ、様々な形態の海難事故が世界各地で多発している。特に自力航行不能な状態に陥った損傷船が漂流し、沿岸に座礁する事故も数多く発生しており、これに伴う原油流出は深刻な環境汚染を引き起こすため、大きな社会問題となっている。船舶の座礁による原油流出を未然に回避するためには、漂流中の損傷船舶を安全な海域まで迅速に撤去することが望ましく、その手法としてはタグボートによる曳航が一般的である。ここで、曳航作業に最も大きな危険性を及ぼす現象の一つに、被曳船の振れ回り運動が挙げられる。この振れ回り運動時には、曳航索に急激な張力変動が生じ、タグボートが舵効きを失い操縦不

能に陥ったり、索が破断に至る事例も少なくない。そこで、曳航作業を安全に行うためには、曳航索の長さやその取り付け位置、曳航速度といった曳航時において曳船および被曳船の運動に大きな影響を及ぼすと思われる諸要素について慎重に検討を行い、両船の針路安定性を確保することが非常に重要である。しかし、曳航作業の安全性に関する理論的な研究が行われた例は極めて少なく、曳航方法の詳細についてはオペレーターの経験や勘に頼っているのが現状である。従って、迅速かつ安全な曳航作業を行うためには、やはり理論的な手法による曳航方法の検討が不可欠であると考えられる。

著者らは第1報¹⁾で、損傷船舶を平水中において曳航する際の曳船・被曳船系の針路安定性について検討を行い、曳航索の長さやその取り付け位置等が両船の運動特性に及ぼす影響を調べた。ここで、船舶が自力航行不能な状態に陥るような状況では、一般に厳しい海象条件の下での曳航作業を強いられる場合も考えられるため、本報告では曳航シミュレーション計算において、風圧力と

* 九州大学大学院工学研究科

** 九州大学大学院工学研究院

原稿受理 平成14年1月8日

春季講演会において講演 平成14年5月15, 16日

波強制力を導入し、両船の運動特性について検討を行うものとする。また、曳航シミュレーション計算では、被曳船の振れ回り運動に伴う曳航索の張力変動について調べ、曳航作業の安全性についても検討を行った。

2. 曳船・被曳船の連成運動

2.1 運動方程式

曳船・被曳船の連成運動については、Fig.1 に示すような座標系の下で検討を行う。まず、空間固定座標系 $o-x_0y_0$ に、曳船 ($i=1$)、被曳船 ($i=2$) のそれぞれの船体重心位置 G_i を原点とし、船首方向に x_i 軸、右舷方向に y_i 軸をとる。両船は、船速 U_i 、回頭角速度 r_i を伴って運動するものとし、 X_i と Y_i は船首方向、右舷方向に作用する力、 N_i は重心まわりの回頭モーメントを示している。また、斜航角 β_i 、回頭角 ψ_i 、曳航角 ε_i (船体と曳航索の成す角度) はそれぞれ図中に示す方向を正としている。曳船・被曳船のそれぞれの重心位置 G_i において成立する運動方程式は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} (m_i + m_{xi}) (\dot{U}_i \cos \beta_i - U_i \dot{\beta}_i \sin \beta_i) + (m_i + m_{yi}) U_i r_i \sin \beta_i &= X_i \\ -(m_i + m_{yi}) (\dot{U}_i \sin \beta_i + U_i \dot{\beta}_i \cos \beta_i) + (m_i + m_{xi}) U_i r_i \cos \beta_i &= Y_i \\ (I_{zzi} + i_{zzi}) \dot{r}_i &= N_i \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ただし、

- m_i, m_{xi}, m_{yi} : 船の質量および x_i, y_i 軸方向の付加質量
 I_{zzi}, i_{zzi} : 船の慣性モーメントおよび付加慣性モーメント

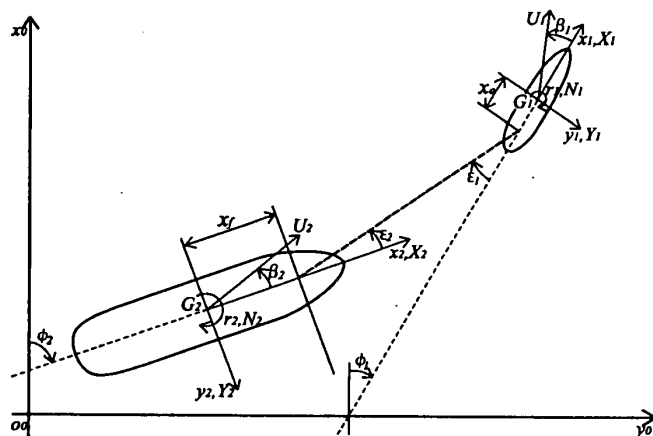


Fig.1 Coordinate systems

2.2 外力の表現

(1) 式の右辺を構成する力 X_i, Y_i とモーメント N_i については、標準的な形式として用いられている MMG の考え方に従うものとする。まず、曳船については、

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= X_{H1} + X_{P1} + X_{R1} + X_{T1} + X_{W1} + X_{E1} \\ Y_1 &= Y_{H1} + Y_{R1} + Y_{T1} + Y_{W1} + Y_{E1} \\ N_1 &= N_{H1} + N_{R1} + N_{T1} + N_{W1} + N_{E1} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

となる。ここで、上式の添字 "H", "T", "W" および "E" はそれぞれ主船体に作用する流体力と曳航索の張力、風圧力および波強制力による項を表している。これらについては後に述べる。また、"P", "R" は、それぞれプロペラ推力、舵に作用する流体力を表しており、これらの表現方法については、文献²⁾と同様であるのでここでは説明を省略する。さらに、本研究では被曳船を損傷船として取り扱うので、操舵装置の故障、或いは主機関が停止している状態を想定し、プロペラと舵に作用する流体力を無視出来るものと仮定する。従って、被曳船に作用する外力は次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} X_2 &= X_{H2} + X_{T2} + X_{W2} + X_{E2} \\ Y_2 &= Y_{H2} + Y_{T2} + Y_{W2} + Y_{E2} \\ N_2 &= N_{H2} + N_{T2} + N_{W2} + N_{E2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

2.3 主船体に作用する流体力

本研究では、タグボートが損傷船を船首方向に曳航する場合と、船尾方向に曳航する場合の両状態を考慮するものとし、損傷船に作用する流体力に関しては、船首方向運動時と船尾方向運動時について拘束模型試験を行い、 X_{H2}, Y_{H2} および N_{H2} の計測を行った。また、被曳船の損傷状態として、VLCC が大きな傾斜角を伴う場合を想定し、Table 1 と Fig.2 にそれぞれ実験で用いた模型船の主要目とその傾斜状態を示している。なお、ここでは船尾トリムを正として取り扱っている。Fig.2 において、Heeled condition および Heeled & trimmed condition については、いずれも右舷側に 10° 傾斜した状態であり、-7.9%、-10.4% trimmed condition は船首部分が没水した状態を示している。ここで、船の運動特性に大きな影響を及ぼすものと考えられる Y_{H2}, N_{H2} に関しては、離散渦法を適用した理論的な手法による推定も合わせて行った。船首方向運動時には、田中³⁾の手法にならい、船体 frame line 形状に沿って渦点を配置し、船体表面から発生する剥離流れを離散的な自由渦を放出させることで、各船体横断面まわりの 2 次元流れを数値的に表現した。このようにして得られた流場に運動

Table 1 Principal dimensions of model ship (VLCC)

Length L_2 (m)	2.500
Breadth B_2 (m)	0.4077
Draft d_2 (m)	0.1696
Block coef. C_{b2}	0.8299

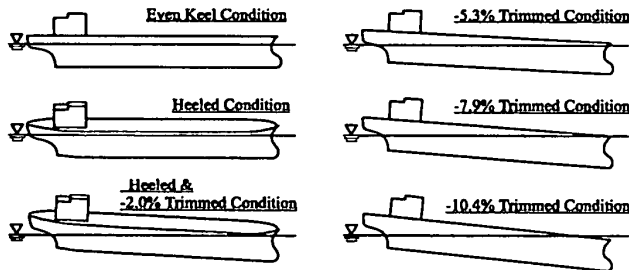
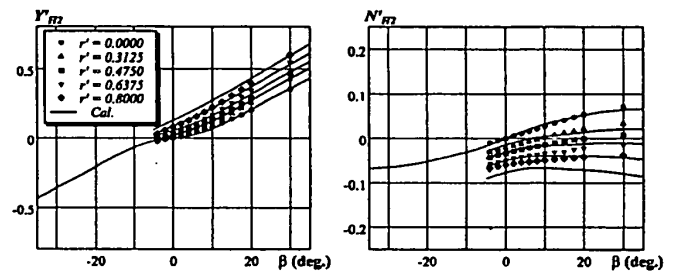


Fig. 2 Conditions for towed ship

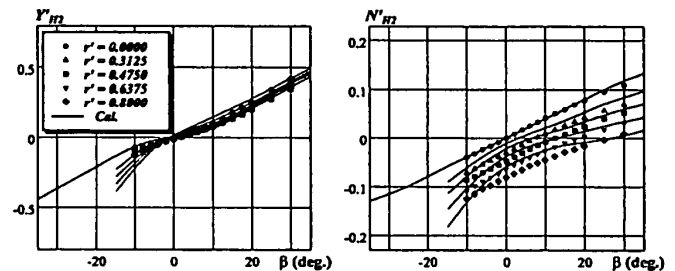
量保存則を適用することで船体に作用する流体力の推定を行った。Fig. 3 (a)(b) に例として、離散渦法によって推定した計算値と実験結果の比較を示している。図はいずれも船首方向運動時における even keel 状態と -5.3% trimmed condition での船体に作用する横力 Y_{H2} と回頭モーメント N_{H2} について示したものであり、いずれも横軸に斜航角 β 、縦軸には横力と回頭モーメントの無次元値 Y'_{H2}, N'_{H2} をとっている。図中の各シンボルは、回頭角速度の無次元値 $r'_2 (= r_2 L_2 / U_2)$ を多様に変化させた時の実験結果を表しており、それに対応する実線は計算結果を示している。なお、横力と回頭モーメントの無次元化は次式に従うものとする。

$$Y'_{H2} = \frac{Y_{H2}}{\frac{1}{2} \rho L_2 d_2 U_2^2}, \quad N'_{H2} = \frac{N_{H2}}{\frac{1}{2} \rho L_2^2 d_2 U_2^2} \quad (4)$$

図を見ると、横力、回頭モーメント共に傾斜状態に対応して精度良く、計算結果が実験結果に一致していることが分かる。一方、船体が後進運動する場合においては、離散渦法を適用した各船体横断面まわりの2次元流れを考える手法では、精度よく流体力を推定することが出来なかった。これは、船体まわりの流場が、前進運動時と比べ非常に複雑になるためであると考えられる。従って、船体が後進運動する場合においては、高品⁴⁾の手法にならない、実験結果を基に船体に作用する流体力を Fourier 級数で近似する手法を用いた。Fig. 4 (a)(b) に、例として船体が後進運動する場合の実験結果と Fourier 級数によって表現した結果の比較を示している。図を見ると、Heeled & trimmed condition、-10.4%L trimmed condition のいずれも実験結果が斜航角 β や回頭角速度 r' の推移に伴い、複雑な変化を示していることが分かるが、実線で示された Fourier 級数による近似表現は、

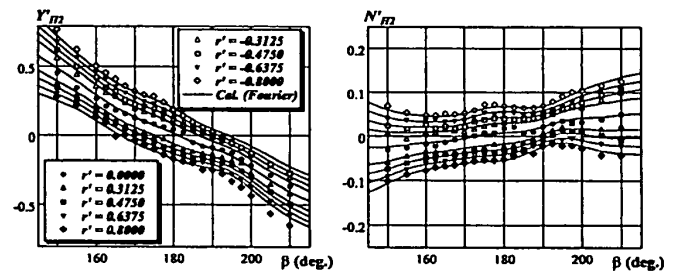


(a) Even keel

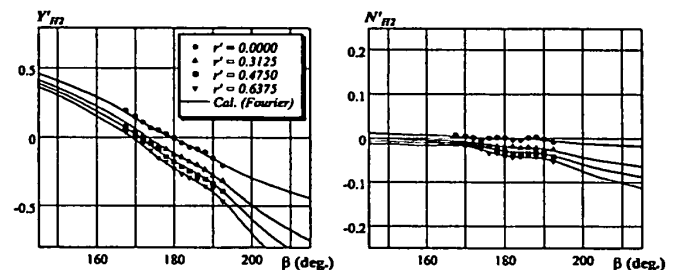


(b) -5.3%L trimmed condition

Fig. 3 Hydrodynamic force acting on ship's hull



(a) Heeled & trimmed condition



(b) -10.4%L trimmed condition

Fig. 4 Hydrodynamic force acting on ship's hull

複雑な流体力特性をよく表現しているように思われる。

2. 4 曳航索の張力

一般に、曳航索は自重の影響により垂下し catenary 曲線を形成する。ここで、曳航索の取り付け位置において、船体に作用する索張力の水平方向成分については、Irvine⁵⁾の示している表現に従うものとする。

$$H_D = \frac{T_H L_R}{EA} + 2 \frac{T_H}{w} \sinh^{-1} \left(\frac{w L_R / 2}{T_H} \right) \quad (5)$$

ここで、

- H_D : 曳航索の取り付け位置の水平方向間隔
 T_H : 索張力の水平方向成分
 E : 曳航索の Young 率
 A : 曳航索の断面積
 w : 曳航索の単位長さ当たりの重量
 L_R : 曳航索の長さ

2.5 船体に作用する風圧力

船体に作用する風圧力については、藤原ら⁹⁾の示した手法に従い、次式のように表現する。

$$\left. \begin{aligned} X_{Wi} &= 0.5 \rho_a A_{Li} V_{Wi}^2 C_{WXi} \\ Y_{Wi} &= 0.5 \rho_a A_{Li} V_{Wi}^2 C_{WYi} \\ N_{Wi} &= 0.5 \rho_a L_{OAi} A_{Li} V_{Wi}^2 C_{WNI} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ただし、

- ρ_a : 空気の密度
 V_{Wi} : 相対風速
 L_{OA} : 船の全長
 A_{Li} : 水面上の側投影面積
 C_{WXi}, C_{WYi} : x_i, y_i 軸方向の風圧力係数
 C_{WNI} : z_i 軸まわりの風圧モーメント係数

ここで、風圧力係数 $C_{WXi}, C_{WYi}, C_{WNI}$ は、船体に対する風の相対風向 χ_i の関数として表される。藤原らの手法に従い、-5.3%, -7.9%, -10.4% trimmed condition の VLCC 船型に対する $C_{WX2}, C_{WY2}, C_{WN2}$ を計算した結果を Fig.5 に示している。横軸に示す χ_2 が 0 deg. の時、船尾から船首方向へ風が吹くことを示しており、90 deg. の時、左舷から右舷方向に風が吹くことを示している。これを見ると、船首トリムが増大すると共に、横風による風圧力係数 C_{WY2} が大きくなっていることが分かる。これは船橋を含む船尾部分が水面から高い位置に移動することで風の影響を受けやすくなったためであると考えられる。また、風圧モーメント C_{WN2} も左舷後方から風を受ける場合 ($\chi_2 = 45$ deg. 付近) において、傾斜状態の違いによる差が明確に現れていることが分かる。

2.6 船体に作用する波強制力

船体に作用する波強制力については、船体の frame line 上に吹き出しを分布させて、各船体横断面でのポテンシャル ϕ_R を数値的に表現することによって求めるという前田⁷⁾の提案した特異点分布法を適用した。ここでは、波強制力の Froude-Krylov 力成分については、入射波の速度ポテンシャル $\phi_{\omega 0}$ を船体表面で積分することによって求められ、diffraction 力成分については、各船体横断面での radiation ポテンシャルから求めることが

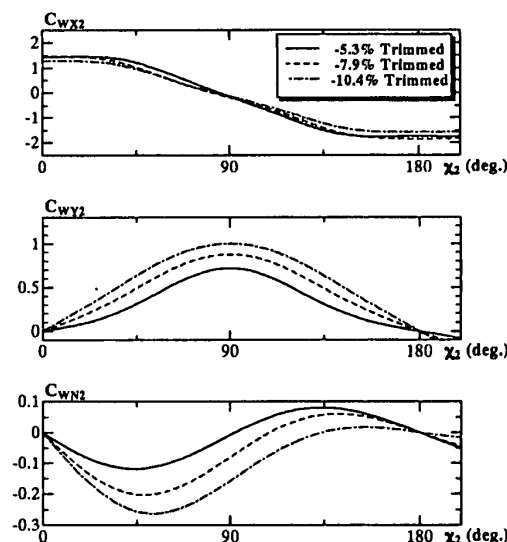


Fig.5 Calculated results of $C_{WX2}, C_{WY2}, C_{WN2}$

出来る。ここで、各船体横断面に作用する波強制力の y_i 軸方向成分 $f_{Ey}(x_i)$ は次式のように表される。

$$f_{Ey}(x_i) = -i\rho\omega_0 \int_{S_H} \phi_{\omega 0} \cdot n_y ds - \rho \int_{S_H} \phi_R \frac{\partial}{\partial n} \phi_{\omega 0} ds \quad (7)$$

ただし、

- ω_0 : 入射波の円周波数
 S_H, ds : frame line に沿う積分路とその線素
 n_y : 船体表面に立てられた外向き法線ベクトル $\vec{n}$ の y_i 軸方向成分

従って、船体全体に作用する波強制力の y_i 軸方向成分 Y_{Ei} と z_i 軸まわりの回頭モーメント N_{Ei} は、

$$\left. \begin{aligned} Y_{Ei} &= \int_{L_i} f_{Ey}(x_i) dx_i \\ N_{Ei} &= \int_{L_i} f_{Ey}(x_i) \cdot x_i dx_i \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

となる。一方、 x_i 軸方向成分 X_{Ei} については、一般に船体は細長体であるので、Froude-Krylov 力が主要となり、diffraction 力成分は無視することが出来る。

$$X_{Ei} = \iint_{H_i} p_{\omega 0} \cdot n_x dH_i = \rho \iint_{H_i} \frac{\partial \phi_{\omega 0}}{\partial t} \cdot n_x dH_i \quad (9)$$

ただし、

- $p_{\omega 0}$: 入射波中の圧力
 H_i, dH_i : 船体表面とその面素
 n_x : 船体表面に立てられた外向き法線ベクトル $\vec{n}$ の x_i 軸方向成分

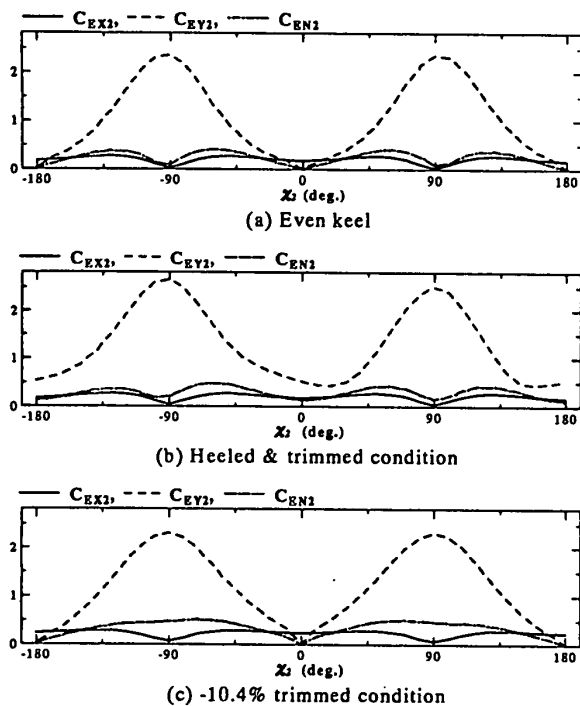


Fig.6 Wave exciting force and moment
($\lambda/L_2 = 1.0$)

Fig.6にVLCC船型に作用する波強制力の数値計算例を示している。横軸は風の風向と同様に波の入射角 χ_2 を表しており、縦軸は船体に作用する波強制力を無次元化した値 C_{EX2} , C_{EY2} , C_{EN2} を表している。ただし、波強制力の無次元化は次式に従っている。

$$\left. \begin{aligned} C_{EX2}, C_{EY2} &= \frac{|X_{E2}|, |Y_{E2}|}{2\pi \cdot W \cdot \zeta_A / \lambda} \\ C_{EN2} &= \frac{|N_{E2}|}{2\pi \cdot L_2 \cdot W \cdot \zeta_A / \lambda} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

ここで、 W は船の排水量、 ζ_A は入射波の振幅を表しており、 λ は入射波の波長を示している。図はいずれも、波長と船長の比 λ/L_2 を1.0と一定値として計算を行った例である。まず、図中の(a)に示している even keel 時の船体に作用する波強制力においては、 C_{EY2} が横波の時($\chi_2 = \pm 90$ deg.付近)に極大となり、追い波、或いは向い波の時($\chi_2 = \pm 0, \pm 180$ deg.)で極小となっていることが分かる。また、図中の(b)に示している Heeled & trimmed condition においては、入射角 $\chi_2 = 0$ deg.を基軸として波強制力の左右非対称性が現れていることが分かる。これは、Heeled & trimmed condition においては船体が右舷側に10 deg.の傾斜角を有しており、波が船体の右舷側から入射する場合と左舷側から入射する場合で、船体に及ぼす入射波の影響が異なるためであると考えられる。図中の(c)は、-10.4% trimmed

condition における計算結果を示している。これを見ると、横波($\chi_2 = \pm 90$ deg.付近)においても、船体に比較的大きな回頭モーメントが作用していることが分かる。これは、船首側の船体が水面下に没水した一方で、船尾側ではその大部分が水面から露出したため、波によって作用する力が船首側へ大きく偏ったためであると考えられる。

3. 曳船・被曳船系の針路安定性

3.1 針路安定判別の手法

本研究では、両船の運動において特に針路安定性に及ぼす影響が大きいと考えられる横力 Y_i と回頭モーメント N_i に着目し、Routh-Hurwitzの判別条件を適用することで曳船・被曳船系の針路安定性の検討を行う。まず、曳船・被曳船の操縦運動は小さいという仮定の下で、(1)式に示した運動方程式の斜航角 β_i 、回頭角 ψ_i 、回頭角速度 $\dot{r}_i$ および曳船側の曳航角 ε_1 に関する式によって得られる連立一次微分方程式の線形化を行い、次式のように表現することを考える。

$$\begin{bmatrix} \dot{r}_1 \\ \dot{r}_2 \\ \dot{\psi}_1 \\ \dot{\psi}_2 \\ \dot{\beta}_1 \\ \dot{\beta}_2 \\ \dot{\varepsilon}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} & k_{17} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} & k_{27} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} & k_{36} & k_{37} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} & k_{45} & k_{46} & k_{47} \\ k_{51} & k_{52} & k_{53} & k_{54} & k_{55} & k_{56} & k_{57} \\ k_{61} & k_{62} & k_{63} & k_{64} & k_{65} & k_{66} & k_{67} \\ k_{71} & k_{72} & k_{73} & k_{74} & k_{75} & k_{76} & k_{77} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \psi_1 \\ \psi_2 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \varepsilon_1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

ここで、 $k_{11} \sim k_{77}$ の各要素で表される行列の固有値を求め、固有値の実部の符号が全て負であれば、曳船・被曳船系は針路安定である。

3.2 計算条件

本研究では、曳船として船長85mのOcean Tugを想定し、Table 2に示すような主要目を持つ船を計算対象とする。被曳船については、Table 1に示したVLCC船型を対象とし、実船 scale における主要目をTable 3に示している。

Table 2 Principal dimensions of tug-boat

Length L_t (m)	85.000
Breadth B_t (m)	12.3757
Draft d_t (m)	4.616
Block coef. C_{bt}	0.5717

Table 3 Principal dimensions of towed ship

Length L_2 (m)	325.000
Breadth B_2 (m)	53.000
Draft d_2 (m)	22.050
Block coef. C_{b2}	0.8299

また、曳航索については、一般に Ocean Tug に備えつけられている曳船用ワイヤーロープを想定し、その直径が 63mm、破断荷重が 198ton-f のものを計算対象とする。さらに、曳船の操舵方法については、次式に示すような比例操舵を考える。

・船首方向曳航時

$$\delta = K_1(\psi_0 - \psi_1) + K_2(\psi_0 - \psi_2) \quad (12)$$

・船尾方向曳航時

$$\delta = K_1(\psi_0 - \psi_1) + K_2(\psi_0 + \pi - \psi_2) \quad (13)$$

ここで、 K_1, K_2 は比例定数であり、それぞれ 5.0, 1.0 で一定とした。また、目標回頭角 ψ_0 を 0 deg. とし、風、波等の外乱の無い平水中において、曳船が被曳船を直進曳航する場合の針路安定性を検討する。

3.3 曳船・被曳船系の針路安定性

Fig.7 に曳船・被曳船系の平水中における針路安定性を計算した結果を示している。いずれも、横軸に曳航索の長さとの比 L_R/L_2 をとっており、縦軸は被曳船側の曳航索の取り付け位置を被曳船の船長で無次元化した値 x_f/L_2 を示している。なお、曳船側の曳航索の取り付け位置については、船体重心位置のやや後方の $x_a = 0.1L_1$ に固定して計算を行った。まず、Fig.7 (a) は even keel 時の被曳船を船首方向に曳航する場合と船尾方向に曳航する場合の計算結果である。図中の実線は安定領域と不安定領域の境界を示しており、これを見ると船首方向曳航時においては、 x_f/L_2 が大きい範囲、或いは L_R/L_2 が小さい範囲で安定領域が現れていることが分かる。一方、被曳船を船尾方向に曳航する場合では、全領域で針路安定となっている。従って、VLCC 船型のように単船として針路不安定であると考えられる船型を曳航する場合には、針路安定性の観点からは船尾方向に曳航するほうが望ましいと考えられる。Fig.7 (b) は、-5.3% trimmed condition における被曳船を曳航する場合の計算結果を示している。図を見ると、このような極端な船首トリムを伴う船体に対しては、船尾方向に曳航する場合のみにおいて、両船の針路安定が確保出来るものと考えられる。

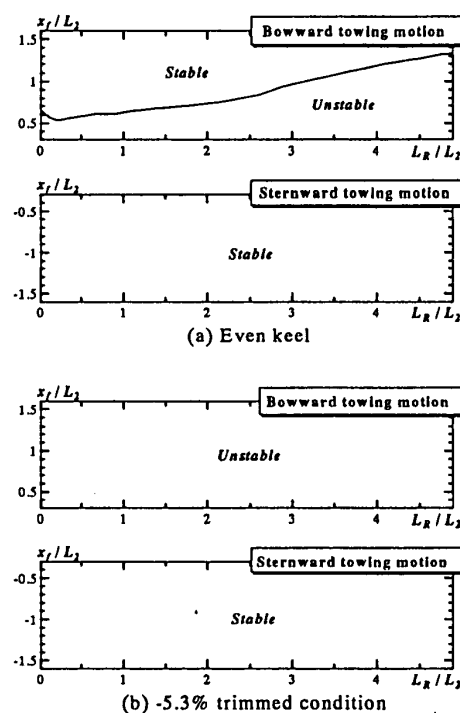


Fig.7 Course stability

4. 波浪中における曳船・被曳船系の運動特性

4.1 計算条件

ここでは、前節で Table 2 と Table 3 に示したタグボートと被曳船を計算対象とし、曳航シミュレーション計算を行うことにより、様々な曳航状態における両船の運動特性について検討する。シミュレーション計算における曳船・被曳船の初期状態については Fig.8 に示すように、曳船の x_0 軸方向の初期変位を $x_1(0) = L_2/2$ 、 y_0 軸方向の初期変位を $y_1(0) = L_2/2$ と設定した。また、両船の初期船速 $U_1(0)$, $U_2(0)$ は共に微速 (1.0 knot) とし、風・波の入射方向 χ_0 を図に示す方向に定義している。なお、タグボートの操舵については (12), (13) 式に従い、目標とする曳航速力 U_0 を維持するために、タグボートのプロペラ回転数を次式に従い、制御を行うものとする。

$$n(t + \Delta t) = n(t) + \Delta n \cdot (U_0 - U_1 \cos \beta_1) \cdot \Delta t \quad (14)$$

ここで、 $n(t)$ は時刻 t におけるプロペラ回転数であり、 Δn は単位時間当たりのプロペラ回転数の増減率を表している。

4.2 数値計算例

Fig.9~Fig.12 に曳航シミュレーションの計算結果の例を示している。図はいずれも、(a) 両船の航跡、(b) 両船の回頭角の時系列、および (c) 索張力の時系列を示し

ており、風速 V_W が 8m/sec.、波高 H_W 1.36m、波長 λ が 200m の規則波中で計算を行った結果である。

Fig.9 は、 L_R/L_2 が 2.0、 x_f/L_2 が 0.5 という曳航条件の下で、even keel 状態の被曳船を船首方向に曳航した場合の計算結果を示している。この時、Fig.7(a)に示すように、平水中において曳船・被曳船は針路不安定であり、Fig.9(a)の両船の航跡を見ると、原針路から徐々に左方へ逸れていく様子が分かる。一方、 L_R/L_2 を 1.5、 x_f/L_2 を 0.75 と設定した場合、両船は針路安定側に転じ、Fig.10 に示しているように両船は原針路を保持出来ていることが分かる。

Fig.11 は、-5.3% trimmed condition における被曳船を船首方向に曳航した場合の計算結果である。この場合、Fig.7(b)からも分かるように、平水中において曳船・被曳船系は針路不安定である。これを見ると被曳船の回頭角 ψ_2 は、著しく変動し大きな振れ回り運動が生じており、これに伴って索張力が徐々に増大し、曳航開始から約 200 分後に破断に至っていることが分かる。これに対して、同様の曳航条件の下で被曳船を船尾方向に曳航すると、Fig.12 に示すように、被曳船の振れ回り運動は抑えられ、両船の回頭角、索張力共に終始安定していることが分かる。従って、安全な曳航作業を行うためには、まず、平水中での曳船・被曳船系の針路安定を確保することが重要であると考えられる。

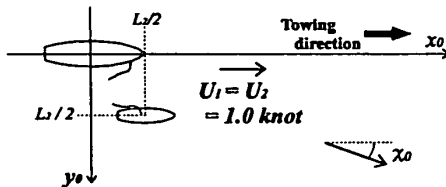


Fig.8 Initial condition for towing simulations

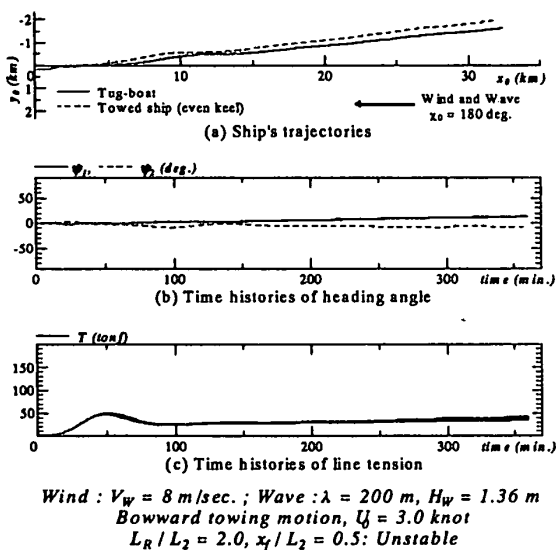


Fig.9 Time histories and ship's trajectories

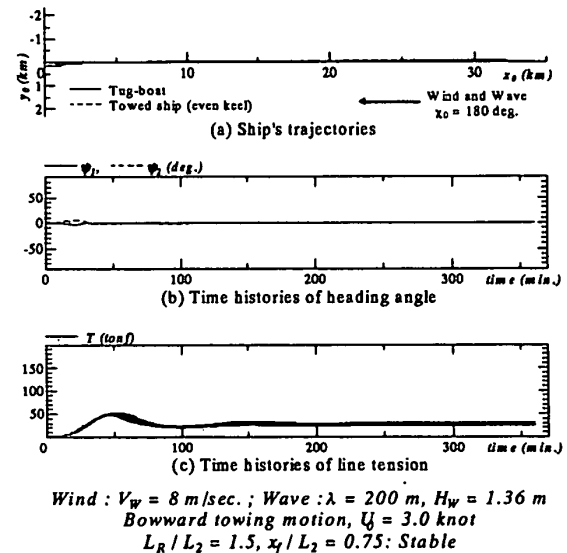


Fig.10 Time histories and ship's trajectories

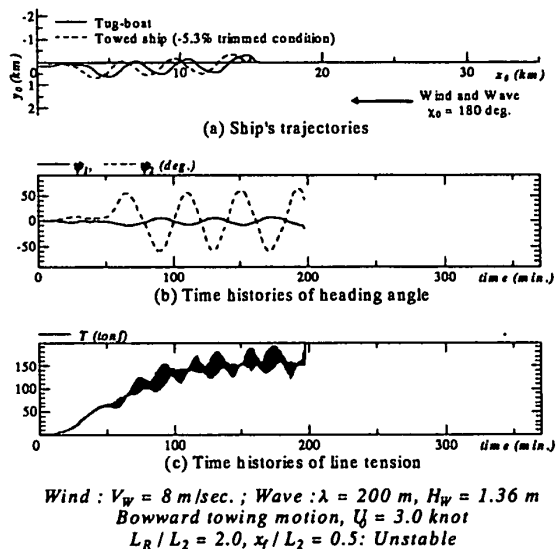


Fig.11 Time histories and ship's trajectories

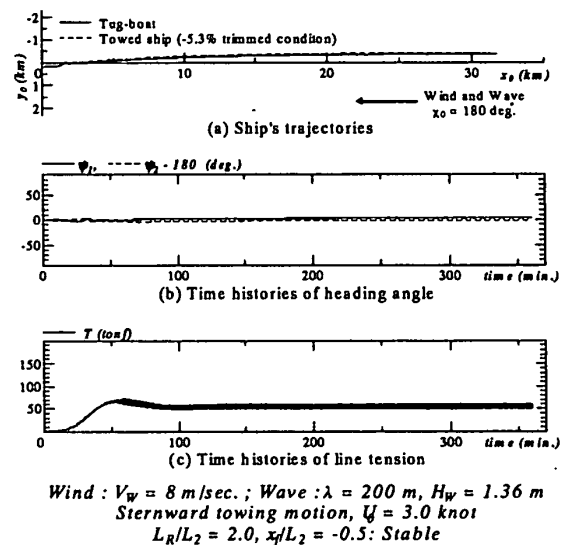


Fig.12 Time histories and ship's trajectories

4.3 曳航作業の安全性確保

本研究では、様々な曳航状態、海象条件の下で系統的に曳航シミュレーション計算を行い、安全に曳航作業を行うための指針を導くことを目的とし、曳航作業の安全性について検討を行った。ここでは、被曳船の振れ回り運動と曳航索の張力変動に着目し、様々な曳航条件の下でシミュレーション計算を行った結果、振れ回り運動が小さい場合、索張力は小さい範囲で安定し、通常の曳航速度（2～5 knot）では被曳船が大型船の場合であっても曳航索が破断する危険性が低いことが分かった。一方、被曳船の振れ回り運動が大きくなるような場合、索張力は一般に増大する傾向にあるが、被曳船に横傾斜を伴う場合や側方からの外乱影響を受ける場合等のように、曳船の方位角と曳航索が一定の角度を保持しながら釣り合い状態となり、索張力も比較的小さな範囲で安定する結果も見られた。従って、被曳船の振れ回り運動量と索張力の変動を考慮し、曳航作業の安全性を評価するパラメータ S_E を次のように積の形で定義する。

$$S_E = \frac{1}{T_S} \int_0^{T_S} w_T \cdot \frac{T}{B_R} \times w_E \cdot |\varepsilon_I| dt \quad (14)$$

ここで、

- T_S : シミュレーション計算時間
- B_R : 曳航索の破断荷重
- w_T, w_E : 重み係数

(14)式中の係数 w_T, w_E については、曳航作業の従事者に経験⁹⁾を基に Table 4 のように設定した。また、曳航作業の安全性については、パラメータ S_E の値によって次のような5段階評価を与えるものとした。

- $S_E \leq 0.1$: 安全 ... ◎
- $0.1 < S_E \leq 0.3$: ほぼ安全 ... ○
- $0.3 < S_E \leq 0.6$: やや危険 ... △
- $0.6 < S_E$: 危険 ... □
- 索の破断、或いは操船不能 : 極めて危険 ... ×

Fig.13 に、曳航速度の違いが曳航作業の安全性に及ぼす影響について検討を行った結果を示している。図は even keel 時の被曳船に対して L_R/L_2 が 3.0、 x_f/L_2 が 0.6 という曳航状態の下で、船首方向に曳航する場合の結果であり、横軸に曳航速度 U_0 、縦軸に風速 V_W と波高 H_W をとっている。これを見ると、風速や波高が大きい場合、曳航速度が小さな範囲で、×印が示されている。これは、波浪中においてタグボートが操船不能に陥ったことを表している。ところが、タグボートが操船可能な速度まで加速することで、◎印に転じていることが分かる。また、風速・波高が小さな範囲においても、曳航速

Table 4 Weight coefficients w_T, w_E

	w_T
$T/B_R \leq 1/6$	1.0
$1/6 < T/B_R \leq 1/4$	3.0
$1/4 < T/B_R$	5.0

	w_E
$ \varepsilon_I \leq 5.0^\circ$	1.0
$5.0^\circ < \varepsilon_I \leq 15.0^\circ$	3.0
$15.0^\circ < \varepsilon_I $	5.0

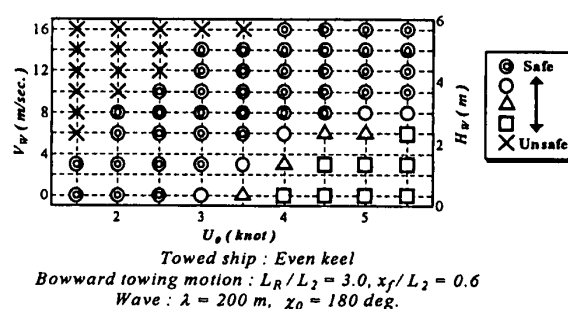


Fig.13 Critical towing speed

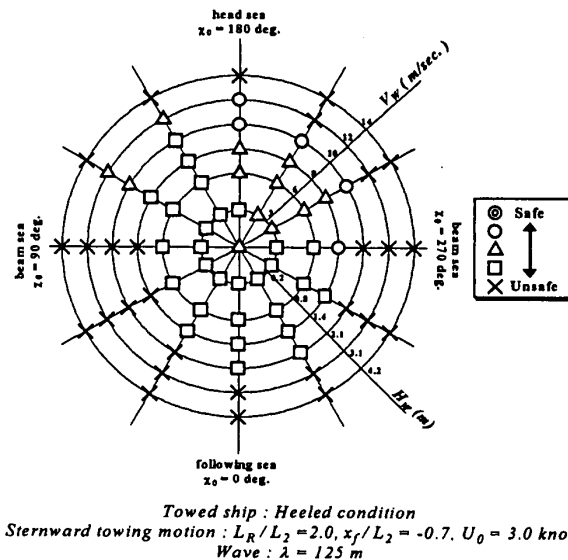


Fig.14 Critical angle of incidence

力の増加と共に、パラメータ S_E の評価が徐々に危険側に推移している。これは曳航速度に伴う索張力の増加によって、曳航索の破断する危険性が大きくなっていることが表されたものである。

Fig.14 に、風と波の入射角 x_0 の違いが曳航作業の安全性に及ぼす影響について検討を行った結果を示している。図は、Heeled condition における被曳船を船尾方向に曳航する場合に、波長 λ を 125m、曳航速度 U_0 が

3knot の下で検討を行った結果であり、風速 V_W と波高 H_W の変化を $V_W = 0$ m/sec.、 $H_W = 0$ m の時を中心とする同心円の半径で表している。これを見ると風・波の入射角 χ_0 が 180 deg. から 360 deg. の範囲における右半平面内でのパラメータ S_E は、左半平面内のそれよりも比較的、安全側の評価を与えていることが分かる。従って、右舷側に傾斜した船体を船尾方向に曳航する際には、風・波が船体の左舷側から入射する場合において、曳航作業が比較的容易になるものと考えられる。

5. 結 言

本研究では、自力航行が不能な状態に陥った損傷船を安全に曳航するために、曳船・被曳船系の針路安定性と風圧下、波浪中における両船の運動特性に着目し、理論的な手法による曳航方法の検討を行った。本手法は様々な曳航状態や海象条件に応じて、曳航作業の安全性を評価することが可能であり、安全に損傷船を曳航するための指針を導く一手法として有用であると考えられる。

謝 辞

本研究の遂行に際し、九州大学大学院工学研究院 古川芳孝助教授に多大なる御助言、御指導を賜りました。ここに、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 貴島勝郎, 古川芳孝, 岸本隆 : 損傷船舶の曳航に関する研究, 日本造船学会論文集, Vol.188, pp.191-199, 2000.
- 2) Kijima, K., Katsuno, T., Nakiri, Y. and Furukawa, Y. : On the Manoeuvring Performance of a Ship with Parameter of Loading Condition, Jour. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.168 (1990), pp.141-148
- 3) 田中進 : 大きな斜航角を伴う船の操縦流体力に関する研究, 平成8年度学位論文, 1996.
- 4) 高品純志 : タグによる操縦運動とその計算法について, 日本造船学会論文集, Vol.160, pp.93-102, 1986.
- 5) Irvine, M. : Cable Structures, Cover Publication, Inc., New York, 1981.
- 6) 藤原敏文, 上野道雄, 二村正 : 船体に働く風圧力の推定, 日本造船学会論文集, Vol.183, pp.77-90, 1998.
- 7) 前田久明 : 任意船型におよぼす波の強制力について, 日本造船学会論文集, Vol.132, pp.137-146, 1972.
- 8) 三橋甲子 : 船舶曳航実務, 成山堂書店, 1988.