操舵しながら近接航行する2船の流体干渉に関する基礎研究

正会員 佐野 将昭* 正会員 安川 宏紀*
吉田 聖子**

A Study on Hydrodynamic Mutual Interaction between Two Ships with Rudder in Close Proximity

by Masaaki Sano, *Member* Hironori Yasukawa, *Member*
Seiko Yoshida

Summary

Nowadays the larger tanker ships sometimes face the difficulty to access the port inside since the infrastructure such as water depth, berth length and port area is not suitable for the ship size. Ship-to-Ship (STS) transfer either offshore or inshore could be helpful for that problem, which is known as a lightering operation. In the stage of berthing, the larger ship maintains the steerage on a constant heading, and the smaller ship maneuvers alongside. On completion of mooring, a cargo transfer starts while two ships are underway, anchored or drifting. Although STS operation might be established, two ships in close proximity have high potential collision risks so the hydrodynamic force characteristics including the interaction among hulls and rudders should be more examined.

In this study, those characteristics between two Wigley parabolic hulls were investigated experimentally and numerically. Captive model tests were conducted to measure the hydrodynamic forces acting on two hulls and two rudders, changing lateral and longitudinal distance between ships, hull drift angle and rudder angle. The experimental results were compared with numerical analysis using a nonlinear lifting body theory. We found that when a ship steered, the circulation was induced to the other ship hull due to the interaction. It results in causing the additional lateral force and moment. When a ship is in oblique towing, we see the other ship hull suffers from the interaction force and moment and they change complexly depending on the hull drift angle. Those interactions become stronger as two ships become closer. The lifting-body based calculation method can capture such hydrodynamic force characteristics between two ships with a rudder.

1. 結 言

一般に係留岸壁の耐用年数は船舶のそれよりも長く、湾内の浚渫作業が労力・費用の面で容易ではない事もあり、急伸する船型サイズに相応した港湾整備の徹底は難しい課題の一つとなっている。過去には係留岸壁長が不足する場合の船体運動の推定¹⁾など、幾つかの検討もなされてきた。他方、港湾にアプローチする船型サイズを一時的に小さくするという考え方に基づき、洋上で満載の大型タンカーからバラスト状態の中・小型タンカーに積荷を移し替えて運搬する洋上荷役オペレーション (Ship to ship transfer-lightering)²⁾が知られている。一説には1960年代後半にメキシコ湾域のVLCCを対象に始まったとされ、アメリカに輸入される原油の約25%が同オペレーションを介して輸送されているとのデータ³⁾もある。昨今ではLPG/LNGといった液化ガス専用船への適用もなされ、2船間の洋上荷役が十分に確立された安全な手段である事をうかがわせるが、その反面、依然として船長やムアリングマスターの経験に依存して行われている⁴⁾。

洋上荷役を行う際、通常は錨泊している大型船に中・小型船が接舷する方法が採用される。しかし水深が深くて投錨が困難な場合など、2船が並走しながら一方が接舷する方法が採られる事がある。国際海運協議会 (ICS) 及び石油会社国際海事評議会 (OCIMF) が発行している接舷操船手順を示したガイドライン²⁾によると、針路を保持して低速航行している大型船 (5ノット以下) に、中・小型船が右舷後方から接近し、並走後に操縦して接舷する方法が推奨されている。しかしながら、一定時間、極めて接近して航行する状況が、衝突リスクと背中合わせの緊張局面である事に変わりはなく、近接する2船を取り巻く現象を操船者が熟知しておく事が、安全性の確保の為の第一歩になると考えられる。

そこで本研究では、一連の洋上荷役オペレーションの内、片側の船が操舵・斜航しながら他船に接舷する状況を念頭に、2組の主船体と舵間の流体干渉について基礎的な考察を実施した。対象船型は同型の数式船型として、深水域平水中で曳航試験を実施すると共に、厚翼計算法の一つであるSQCM⁵⁾に基づく計算を行い、比較を行った。例えば1隻の場合の主船体および舵の流体干渉はよく知られており、藤野等⁶⁾の非線形揚力面理論に基づく研究等がある。また2隻の主船体間の流体干渉を扱った例としては、線形的取扱いを前提に主船体を吹き出しと束縛渦で表し、かつ2船間の有効距離を補正する簡易計算法を示した湯室⁷⁾の研究等が挙げら

* 広島大学大学院工学研究院

** 広島大学大学院工学研究科 (研究当時)

れる．一方で接舷操船のようなケースを対象に，片側の船が操舵をした場合に自船の主船体のみならず，近接する相手船にどのような影響が及ぶのか，そこまで含めて流体干渉の問題を論じた例は見当たらない．併せて接舷や離舷過程において，1 隻が斜航した場合の 2 船間の流体干渉についても十分な知見があるとは言い難く，本研究ではそれらのメカニズム等を明らかにする事を目的とした．

2. 拘束模型試験の概要

2.1 模型船主要目と計測項目

広島大学曳航水槽で，全運動拘束模型試験を実施した．今回は揚力干渉が主要因になるとの予測から，薄い船であっても目的を達せられると考え，同型の Parabolic Wigley 船を供試船に用いた．2 隻を副電車の旋回装置にマウントを介して取り付け，横方向・縦方向の重心間距離，舵角および斜航角を種々変更した試験を行った．船体と舵の主要目を Table 2.1 と 2.2 に，また配置関係図を Fig.2.1 に，試験時の様子を Photo.2.1 に示す．

各主船体の重心位置に 3 分力計を取り付けて前後力 X (本論では議論しない)，横力 Y ，および回頭モーメント N を計測した．ここで計測された各流体力には舵力成分が含まれている事に注意が必要である．別途，それぞれの舵にも検力計を取り付けて舵直圧力 F_N を計測した．添字 i ($=1,2$) は船番号を表し，流体力の符号は次章の座標系 Fig.3.1 に従うものとする．また ρ を流体密度， U を船速として，計測結果は次式で無次元化した．以下，' が無次元値であることを表す．

$$X'_i, Y'_i, F'_{Ni} = \frac{X_i, Y_i, F_{Ni}}{(1/2)\rho L d U^2}, \quad N'_i = \frac{N_i}{(1/2)\rho L^2 d U^2} \quad (2.1)$$

2.2 実験条件

進行方向右側の船 2 が接舷・離舷操船を行う船と仮定し，拘束模型試験を実施した．以下の 3 種類の試験において，船速は特に断らない限りフルード数 $F_n=0.1$ 相当で実施した．

a) 舵角試験

2 船を直進に並走させた状態で，船 2 の舵角を 5° 間隔で $\pm 15^\circ$ 操舵させた．主流と垂直方向の重心間距離 (船体間隔) は， $y_0/B=1.5, 2.0, 3.0$ の 3 パターンを基本とした．また船速影響を調査する為， $y_0/B=1.5$ ，両舵角 0° の状態のみ， $F_n=0.15, 0.2$ でも試験を実施した．

b) 斜航試験

船 2 の斜航角を 5° 間隔で $\pm 10^\circ$ 変化させた．船体間隔は $y_0/B=2.17$ と 3.0 の 2 パターンとした．これは舵検力計を設置する都合上， $y_0/B=2.17$ が斜航試験時に設定可能な最小船体間隔であった事に因る．本試験では，舵角は共に 0 とした．

c) 前後間隔変更試験

船 2 を $x_0/L=0.25, 0.5$ (x_0 : 主流方向の重心間距離) だけ，船 1 より後方にずらした試験を行った．船体間隔は $y_0/B=$

Table 2.1 Principal dimensions of ship model

Length	L	1200 (mm)
Depth	D	200 (mm)
Breadth	B	120 (mm)
Draft	d	75 (mm)
Volume	V	0.0048 (m^3)
Block Coefficient	C_b	0.444

Table 2.2 Principal dimensions of rudder

Wing section	NACA0020
Chord length	50 (mm)
Span length	150 (mm)
Aspect ratio (Below W.L.)	1.5
Gap between rudder and hull	5 (mm)

Fig.2.1 Arrangement of Wigley hull model

Photo.2.1 A scenery of captive model test

1.5 とし，舵角と斜航角は共に 0 とした．

3. 数値計算法の概要

理想流体を仮定し，定常境界値問題を考える．Fig.3.1 に右手座標系 $G\text{-}xyz$ を示す．原点を船 1 の重心位置に置き，主流方向逆向きに x 軸，その垂直方向に y 軸をとる．また xy 平面は静止水面として剛体壁とみなした．主船体と舵は斜航角 β と舵角 δ を有して，一様流れ U (船速に相当) の中に置かれているとする．以下，二重模型流れを想定し，式中，添字 i が船番号を，添字 $S_{H,R}$ 及び $C_{H,R}$ が鏡像面を含む各境界面 (後述) を表す．

3.1 境界値問題

簡便な厚翼計算法の一つとして知られる SQCM⁵⁾ の考え方に基づき定式化を行った．まず任意の流場点 $P(x,y,z)$ における流速ベクトルを次のように定義する．

$$\vec{V}(P) = (-U, 0, 0) + \sum_i^2 (\vec{V}_{S_H}^{(i)} + \vec{V}_{S_R}^{(i)} + \vec{V}_{C_H}^{(i)} + \vec{V}_{C_R}^{(i)}) \quad (3.1)$$

総和記号内の第 1, 2 項が主船体表面 S_H および舵表面 S_R に

Fig.3.1: Coordinate system and definition of force and moment, hull drift angle and rudder angle

配置する強さ σ の吹き出しによる誘導速度を表し、次式で定義する。

$$\vec{V}_{S_{H,R}}^{(i)}(P) = -\nabla \iint_{S_{H,R}^{(i)}} \sigma \frac{1}{r} dS \quad (3.2)$$

ここで両表面は矩形パネルに分割し、吹き出し強さは各パネル上で一定とした。単位強さ当たりの誘導速度は Hess and Smith 法で計算する。また r は次のように書き表せる。

$$r = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2} \quad (3.3)$$

ここで特異点の位置を $Q(\xi, \eta, \zeta)$ とした。続いて総和記号の第 3, 4 項が主船体中心面 C_H および舵キャンバー面 C_R に配置する束縛渦と自由渦（馬蹄渦）による誘導速度を表しており、離散式は次のように書き表せる。

$$\vec{V}_{C_{H,R}}^{(i)}(P) = \frac{\pi a}{2N} \sum_{k=1}^M \sum_{m=1}^N \gamma_{k,m} \overrightarrow{v_{\gamma_{k,m}}} \sin\left\{\frac{(2m-1)\pi}{2N}\right\} \quad (3.4)$$

M, N は、各境界面の深さ方向、長さ方向のパネル分割数である。また a は主船体中心面を分割する時には船長を、舵表面の場合には舵のコード長をとる。 $\overrightarrow{v_{\gamma}}$ は 1 個の単位渦強さ当たりの馬蹄渦による誘導速度ベクトルを表し、1 本の束縛渦と一対の自由渦を構成する渦線分の誘導速度ベクトルの和である。それらは Biot-Savart の法則に従い計算される。そして γ が馬蹄渦の強さを表す。

境界条件としては、まず物体表面を貫かない条件を与える。

$$\vec{V}(P) \cdot \overrightarrow{n_{S_{H,R}}^{(i)}} = 0 \quad P \text{ on } S_{H,R}^{(i)} \quad (3.5)$$

ここで $\vec{n}$ は各境界面の法線ベクトルを表し、境界面から流体の内向きを正と定める。また別途、船体中心面と舵キャンバー面を流れが貫かない条件を考慮する。安川⁸⁾によると、この種の境界条件は翼の揚力特性を決定する為に追加された式と解釈できる。

$$\vec{V}(P) \cdot \overrightarrow{n_{C_{H,R}}^{(i)}} = 0 \quad P \text{ on } C_{H,R}^{(i)} \quad (3.6)$$

(3.6) 式を課す長さ方向の標点位置は、Lan の QCM⁹⁾に基づき、次のような式で与えられる。

$$s_{C_{H,R}}^{(i)} = \frac{a}{2} \left\{ 1 - \cos\left(\frac{j\pi}{N}\right) \right\} \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (3.7)$$

ここで s は各境界面上の局所座標軸とし、船首端（舵前縁）を原点に船尾（舵後縁）方向を正とした。(3.7)式より船尾端及び舵後縁に標点が配置されることから、(3.6)式を満たす事で伴流に関する Kutta の条件を満足できる事が分かる。

以上、(3.5), (3.6)式の計 8 つの境界条件を満足するように、各船の主船体・舵表面に配置した吹き出し強さ、船体中心面・舵キャンバー面上の束縛渦の強さを求めればよい。水面下の主船体と舵に働く横力の総和 Y 、主船体重心周りのモーメント N 、舵直圧力 F_N は、船体・舵表面上の誘導速度を決定後、圧力積分を用いて次式により算出した。

$$2Y_i = -\left(\iint_{S_H^{(i)}} p n_{yS_H}^{(i)} dS + \iint_{S_R^{(i)}} p n_{yS_R}^{(i)} dS \right) \cos \beta_i + \left(\iint_{S_H^{(i)}} p n_{xS_H}^{(i)} dS + \iint_{S_R^{(i)}} p n_{xS_R}^{(i)} dS \right) \sin \beta_i \quad (3.8)$$

$$2N_i = -\iint_{S_H^{(i)}} p \{ n_{yS_H}^{(i)} (x - x_G^{(i)}) - n_{xS_H}^{(i)} (y - y_G^{(i)}) \} dS - \iint_{S_R^{(i)}} p \{ n_{yS_R}^{(i)} (x - x_G^{(i)}) - n_{xS_R}^{(i)} (y - y_G^{(i)}) \} dS \quad (3.9)$$

$$2F_{Ni} = -\iint_{S_R^{(i)}} p n_{yS_R}^{(i)} dS \cos(\delta_i - \beta_i) + \iint_{S_R^{(i)}} p n_{xS_R}^{(i)} dS \sin(\delta_i - \beta_i) \quad (3.10)$$

式中の 2 は、 $S_{H,R}$ が鏡像面を含む事に因る。ここで n_x, n_y は各境界面における法線ベクトルの x, y 方向成分を意味する。また (x_G, y_G) は o -xyz 系の各主船体の重心座標である。 p は流場点 P における流れの圧力であり、無限遠方の静圧を 0 とみなすと、Bernoulli の定理により次式で計算できる。

$$p = \frac{1}{2} \rho \{ U^2 - \vec{V} \cdot \vec{V} \} \quad (3.11)$$

3.2 数値解法の概要

まず水面下の境界面上の特異点分布について述べる。船体表面は片面 30（船長方向）×15（深さ方向）分割とし、各パネル内で一定強さの吹き出しを配置した。一方、船体中心面には 60×15 個の束縛渦を置き、斜航時には束縛渦を置いた位置から直ちに斜航角の 1/2 の角度で無限遠方まで流出するような自由渦を仮定した。舵表面は片面 20（コード方向）×15（スパン方向）のパネルに分割して吹き出しを配置し、キャンバー面には 40×15 個の束縛渦を置いた。自由渦はキャンバー面に対して $\beta/2 - \delta$ の角度、すなわち主船体からの自由渦と同方向へ後縁から流出させた。なお自由渦の流出方向は船体と舵の相互干渉を平板翼で検討した藤野⁶⁾を参考にしている。Fig.3.2 にパネル分割の様子を示す。

現実には主船体による粘性伴流などの影響によって、舵への流入速度は船速（曳航速度）よりも減少していると考えられる。同形状の Wigley 船型の伴流計測（但し $L=2.5m, F_n=0.18$, 曳航方向の流速を計測）を実施した中武等¹⁰⁾のプロペラ面

内の公称伴流率（同文献 Fig.6）を参考にすると、直進時で 0.3, 斜航角 5, 10° の時にはおよそ 0.2 である。今回はこれらの値を参考に、主船体軸方向の舵流入速成分にのみ伴流率 0.3($\beta=0$), 0.2($\beta=\pm 5, 10$)を仮定した。その間の斜航角については、それらを線形補間した伴流率を用いた。

Fig.3.2: Panel arrangement of hulls and rudders

4. 結果と考察

4.1 吸引力とバウアウトモーメント

2 船が近接して並走する時、互いに引き合う横力（吸引力）とそれに基づくモーメントが作用する事が知られている。これは 2 船間の流速が大きくなる為、船体表面内側で圧力の低下を生じる事に因る。Fig.4.1 に、直進並走時 ($F_n=0.1$, $\beta=\delta=x_0=0$) の Y' と N' の絶対値、および前後方向の横力平

均着力点の無次元値 $x_s' (=x_s/L)$ を船体間隔 y_0/B に対してプロットした。いま 2 船の絶対値は本来同じとなるべきであるが、小型模型船かつ低速な為に計測された干渉力自体が小さく実験値がばらつく傾向にあった。そこで 2 船の平均値も併せてプロットし、それベースでの議論とする。同図より、2 船の間隔が狭まるに連れて大きな吸引力および船首開きのバウアウトモーメントが作用している。特に y_0/B が 2 以下になると、吸引力、バウアウトモーメント共に急増する様子が見て取れる。また N' を Y' で除して求めた着力点は、船体間隔の影響をあまり受けずに、概ね船尾付近に一定であった。なお $y_0/B=3$ では Y_2' が 0 に近く発散気味に評価された為、同図からは省いた。計算結果は、船体間隔に応じた吸引力の変化を捉えているが、全体的に実験結果よりも大きく評価された。一方モーメントは特に船体間隔が小さい場合に過小評価されており、結果として平均着力点にも差が見られた。前述通り、2 船が接近して並走する場合、船体表面内側の流速は大きいと思われ、直進状態であっても、自由渦の流出角が 0° ではなかった可能性が考えられる（付録参照）。

F.g.4.2 には、 $y_0/B=1.5$ の船体間隔における Y' , N' 及び x_s' の船速変化を示す。船速が増すと、吸引力の無次元値は減少する一方、バウアウトモーメントの無次元値に大きな変化は見られない。その結果、平均着力点は船尾方向にシフトする事が分かる。今回は模型船を完全に拘束した状態で実験を行っており、姿勢変化は起こらない。よって船速影響として造波影響があったと推測される。

Fig.4.1: Suction force and bow-out moment acting on two ships in close proximity and acting point of the suction force versus the lateral distance between two ships ($F_n=0.1$, $\beta=\delta=x_0=0$)

Fig.4.2: Suction force and bow-out moment acting on two ships in close proximity and acting point of the suction force versus Froude number ($y_0/B=1.5$, $\beta=\delta=x_0=0$)

Fig.4.3: Lateral force, yawing moment and rudder normal force acting on Ship2 when Ship2 steers versus the rudder angle of Ship2

Fig.4.4: Lateral force, yawing moment and rudder normal force acting on Ship1 when Ship2 steers versus the rudder angle of Ship2

4.2 舵角試験結果

$y_0/B=1.5, 2.0, 3.0$ の3つの船体間隔につき、操舵する船2に働く流体力を Fig.4.3 に、その際、船1に作用する流体力を Fig.4.4 に示す。いずれも横軸は、船2の舵角 δ_2 である。なお値が小さい F_{N1} については割愛する。

4.2.1 船2の操舵時に各船に作用する流体力

まず実験結果に着目すると、 Y_2' は船体間隔に応じた吸引力(負の横力)が作用する結果、狭い間隔ほどプロット点全体が負の方向へシフトしている。 N_2' もバウアウトモーメント(正のモーメント)の増加により、正方向へプロット点のシフトが見られる。一方、各流体力の勾配に対する船体間隔の影響は顕著とはいえない。また F_{N2}' は、船体間隔に依らず概ね一定であった。続いて計算結果と比較すると、 F_{N2}' は実験結果と良い一致が見られた。 Y_2' と N_2' は、定性的な傾向を概ね捉える事ができているが、舵角に対する勾配が実験結果より若干大きい。また前節 Fig.4.1 に示した吸引力、バウアウトモーメントの実験結果との差が、グラフ切片の差として現れている。

次に船2が操舵した時に船1に作用する流体力 Y_1' と N_1' を考察する。まず船体間隔に応じた吸引力(正の横力)とバウアウトモーメント(負のモーメント)が作用する点は同じである。また計測流体力が小さくばらつきはあるが、船体間隔が狭い場合($y_0/B=1.5$)、船2が船1側に操舵($\delta_2<0^\circ$)すると、船1の吸引力及びバウアウトモーメントが減少し、

逆側に操舵($\delta_2>0^\circ$)すると増加する傾向が見られる。そして船体間隔が広がると($y_0/B=2.0, 3.0$)、 Y_1' 、 N_1' の δ_2 に対する傾きは小さくなる事が分かる。計算結果は、船2の操舵角に応じて船1に働く流体力が変化する様子を定性的に捉えているが、前節 Fig.4.1 のバウアウトモーメントの実験と計算結果の差に起因して、特に N_1' の切片に差が目立った。

Fig.4.5 は、 $\delta_2=0, \pm 15^\circ$ の時に各主船体に働く横力の実験値(絶対値)をその平均着力点位置に描いた模式図である。併せて舵力横成分も舵軸位置に描いた。いずれも数値は無次元値である。この図より、船2が船1の逆側に操舵($\delta_2=+15^\circ$)した時に互いの船尾を近づけようとする力が強まり、操船上、危険が伴う事が直感的に理解される。

4.2.2 操舵時の相互干渉についての考察

一般に船が操舵をすると主船体と舵との相互干渉の結果、主船体には干渉横力及びモーメントが作用する事が知られている。そこでまずは船舶操縦数学モデル¹¹⁾の流体力表現を参考として、2船が直進並走時に操舵する側の船2に作用する横力と回頭モーメントの無次元値を次式で表現する。

$$Y_2' = -Y_0' - (1 + a_{H2})F_{N2}' \cos \delta_2 \quad (4.1)$$

$$N_2' = N_0' - (x_R' + a_{H2}x_{H2}')F_{N2}' \cos \delta_2 \quad (4.2)$$

右辺第1項が、船体間隔によって決まる吸引力 $Y_0(>0)$ とバウアウトモーメント $N_0(>0)$ である。そして右辺第2項の a_{H2} と

Fig.4.5: Schematic diagram of experimental lateral force acting on Ships when Ship2 steers ($y_0/B=1.5$)

x_{H2} が操舵によって船 2 に誘起される横力成分の増加率とその着力点を表す。ここで Y_0 , N_0 は解析上一定値として取り扱い, Fig.4.3 より, $\delta_2=0^\circ$ で F_{N2} はほぼ 0 とみなせることから, 操舵無し時の値と考える。

Table 4.1 の上表に a_{H2} と x_{H2}' を船体間隔 y_0/B に対してまとめた。同表には単独航行時 (1 隻) の値も掲載してある。まず実験結果に着目すると, 若干バラつきはあるものの相手船の影響は顕著ではなく, 概ね舵力横成分の 30% 程度の干渉横力が船尾付近に作用した事が分かる。一方, 計算結果の a_{H2} は過大評価, x_{H2}' の絶対値はわずかに小さく見積もられる傾向にあった。2 船が近接する事による影響が大きい点とは同じであった。

続いて, 船 2 が操舵した時に, 船 1 に作用する横力と回頭モーメントの無次元値を次式で表現する事を考える。

$$Y_1' = Y_0' - a_{H1} F_{N2}' \cos \delta_2 \quad (4.3)$$

$$N_1' = -N_0' - a_{H1} x_{H1}' F_{N2}' \cos \delta_2 \quad (4.4)$$

ここで各式の右辺第 2 項が船 2 の操舵によって船 1 に誘起される干渉横力とモーメントを意味し, a_{H1} と x_{H1}' が, それぞれ船 2 の舵力横成分に対する割合と, 干渉横力の着力点を表している。Table 4.1 の下表に a_{H1} と x_{H1}' を船体間隔 y_0/B に対してまとめた。実験結果より, 2 船が近づくと干渉横力が増大し, $y_0/B=1.5$ の時には, 船 2 の舵力横成分の約 5% の横力が作用した事が分かる。計算結果の a_{H1} は過大評価しているものの, 船体間隔に依る変化を定性的には捉えている。着力点 x_{H1}' については, 小さな a_{H1} で除算して求める必要があり評価が難しい面はあるが (実際 $y_0/B=3.0$ の実験値は, 発散気味に評価された為に, 表からは除いた), 実験・計算結果の双方を合わせて考えると, 2 船が近接するにつれて, 着力点は船尾方向にシフトすると考えられる。

こうした相互干渉の主な背景に, 主船体と舵の翼特性に基づく翼間干渉があると推測され, そこで Fig.4.6 に, 船 2 が

Table 4.1: List of coefficients of interaction force acting on Ship1 and Ship2 when Ship2 steers and its application point

y_0/B	Experiment		Calculation	
	a_{H2}	x_{H2}'	a_{H2}	x_{H2}'
1.5	0.349	-0.424	0.531	-0.417
2.0	0.309	-0.392	0.525	-0.417
3.0	0.281	-0.442	0.522	-0.417
1 ship	0.336	-0.402	0.520	-0.417

y_0/B	Experiment		Calculation	
	a_{H1}	x_{H1}'	a_{H1}	x_{H1}'
1.5	0.051	-0.636	0.091	-0.468
2.0	0.048	-0.196	0.057	-0.454
3.0	0.010	-	0.028	-0.420

Fig.4.6: Contour lines of the strength of bound vortices distributed over the center plane ($y_0/B=1.5$, $\delta_2=+15^\circ$)

15° 操舵した時の各主船体中心面上の渦強さ γ のコンター図を描いた。ここで同図は QCM⁹⁾ による計算結果とした点に注意を要する。QCM では主船体, 舵の厚みを扱わず, 舵角ゼロの直進状態であれば 2 船近接時でも渦は生じない。この為, 操舵時に誘起される渦の強さをゼロからの変化として捉えられ, 理解が容易であった事がその理由である。船 2 が船 1 の逆側に舵をきった事で, まず自船の船尾付近に反時計回り ($\gamma > 0$) の渦分布が見られる。結果的に, 船 2 の主船体には舵と同方向の循環が誘起される事になり, 2 船間の内向き方向の揚力が生じる事になる。一方, 渦強さの符号から推測すると, 船 1 の主船体中心面の船尾付近では, 船 2 とは逆回転の渦が分布している事が分かる。結果として, 船 2 の舵の循環方向とは逆向きの循環が船 1 の主船体には生じ, 船 1 にも 2 船間の内向き方向の揚力が生じる事が分かる。船 2 の舵を船 1 側にきいた際には, 両船の主船体には相互干渉による外向きの揚力が作用し, Fig.4.5 に図示したように, 見かけ上は吸引力が弱まると推測される。

4.3 斜航試験結果

$y_0/B=2.17, 3.0$ の 2 つの船体間隔につき, 斜航する船 2 に働く流体力を Fig.4.7 に, その際, 船 1 に作用する流体力を Fig.4.8 に示す。いずれも横軸は, 船 2 の斜航角 β_2 である。また本試験の F_{N1}' も値が小さかった事から割愛する。

4.3.1 船 2 の斜航時に各船に作用する流体力

まず Y_2' に着目すると, 船体間隔に応じて殆ど差が見られない。また斜航する向きに因る絶対値の違いも小さく, 近接する船 1 の影響が限定的であった事がうかがえる。実験結果と計算結果の整合性も良い。一方 N_2' は, 自船の船尾が船 1 に近づく方向に斜航する時 ($\beta_2 > 0$), より大きなモーメント

Fig.4.7: Lateral force, yawing moment and rudder normal force acting on Ship2 when Ship2 is in oblique towing versus hull drift angle of Ship2

Fig.4.8: Lateral force, yawing moment and rudder normal force acting on Ship1 when Ship2 is in oblique towing versus hull drift angle of Ship2

を示しており、その値は船体間隔が狭まると若干大きくなっている。計算結果は、実験の傾向を再現できているものの、大きさについては特に $\beta_2 > 0$ の場合に低く見積もられた。また F_{N2}' については、 $\beta_2 = 5 \rightarrow 10^\circ$ に変化する時の実験値の変化が目立って大きい反面、船体間隔による違いは本結果のみからは定かではなかった。計算結果は全般的に小さな値となっており、斜航時の舵位置での粘性伴流のモデル化等が十分ではなかった点が一因に挙げられる。

次に船2が斜航した時に船1に作用する流体力 Y_1' と N_1' を考察する。船2の船首が船1に接近するにつれて($\beta_2 < 0$)、吸引力は増大し、またバウアウトモーメントから船首同士を引きつけようとするバウインモーメントへと変化する事が分かる。 $\beta_2 = -5, \pm 10^\circ$ の時に主船体に働く横力の実験値(絶対値)をその平均着力点位置に描いた模式図をFig.4.9に示す。 $\beta_2 = -5 \rightarrow -10^\circ$ に変化する時、船1に作用する吸引力が増大し、その平均着力点が重心を跨いで船首方向へシフトする様子を見て取れる。一方、両船尾を近づける向きに船2が斜航する時($\beta_2 > 0$)、Fig.4.8より、 $\beta_2 = 5^\circ$ 程度を境に吸引力から反発力へ変化している。またバウアウトモーメントは、 $\beta_2 = 0 \sim 5^\circ$ 付近で最大値をとり、更に斜航しても同程度

もしくは若干減少する傾向にあった。Fig.4.9に示した模式図からは、 $\beta_2 = 10^\circ$ の時、反発しあう方向の力が船1の主船体前方に作用する様子を確認できる。船体間隔の影響について

Fig.4.9: Schematic diagram of experimental lateral force acting on Ships when Ship2 is in oblique towing ($y_0/B=2.17$)

では、 β_2 の全範囲にわたり、船体間隔が狭いほど Y_1' と N_1' の絶対値は大きかった。計算結果は、特に定量値に差が認められるが、船体間隔による違いを含め、実験結果の傾向を推定できている。

4.3.2 斜航時の相互干渉についての考察

4.2.2と同様に、ここでも主船体中心面上の渦強さの分布から、流体力の変化について考察する。 $\beta_2 = \pm 10^\circ$ における渦強さのコンター図(QCMによる計算結果)をFig.4.10に示す。まず $\beta_2 = -10^\circ$ の時、斜航している船2には船首近傍に強い渦の分布を確認できる。斜航の向きからして、これは結果的に反時計回りの循環を生じさせる為、吸引方向に揚力が発生する事になる。一方、渦強さの符号から判断すると、船1には時計回りの循環が誘起されると思われ、やはり吸引方向に揚力が働くと考えられる。また $\beta_2 = 10^\circ$ の場合、船2には時計回りの循環が作用する事になる。船1には船首および接近部に船2とは逆向きの渦分布が見られる事から、反時計回りの循環が働くと推測される。よって2船共に反発し合う方向に揚力が作用する事になる。以上より、船2の斜航の向きに応じて、船1の横力方向が反転する背景を理解できる。

Fig.4.10: Contour lines of the strength of bound vortices distributed over the center plane ($y_0/B=2.17$, above: $\beta_2=-10^\circ$, below: $\beta_2=10^\circ$)

4.4 前後間隔変更試験の結果

追い越し時等の流体干渉は制限水路中で取り上げられる事が多いが¹²⁾、洋上荷役の接舷、離舷時にも類似の状況となる。そこで船1に対する船2の相対前後位置 $x_G^{(2)}/L$ を横軸にとり、各位置で船2に作用する流体力 Y_2' と N_2' をFig.4.11に示す。舵角、斜航角は共に0である。また実験は、 $x_G^{(2)}/L = -0.25, -0.5$ の状態でのみ実施しており、図上、 $x_G^{(2)}/L = 0.25, 0.5$ の値は、この時の船1に作用した Y_1' と N_1' をプロットした。まず $x_0/L=0$ 付近(並走位置)で吸引力が急増する事が分かる。一方、 N_2' は $x_0/L=0.25$ 付近(船2が船1よりも少し前方に位置)でバウアウトモーメントがピークに達している。計算結果は、2船の前後位置関係に応じた流体力の変化を捉えており、船2が船1に接近して離れる過程で、反発力→吸引力→反発力、バウイン→バウアウト→バウインモーメントと変化する様子が見て取れる。

Fig.4.11: Lateral force and yawing moment acting on Ship2 with respect to the relative distance from Ship1

洋上荷役オペレーション時の接舷・離舷操船を念頭に、操舵あるいは斜航しながら近接して航行する際、2船間に働く流体干渉について基礎的な検討を行った。具体的には、舵付きのParabolic Wigley船型を2隻用いて水槽試験を実施すると共に、簡便な厚翼計算法(SQCM)に基づく数値計算を行い結果の比較を試みた。本研究結果を以下にまとめる。

- 操舵による流体干渉は、近接して航行する船にも及び、例えば船体間隔 $y_0/B=1.5$ の場合、操舵力の横方向成分の約5%程度の干渉横力が、近接船の船尾付近に生じる。その向きは操舵方向に応じて逆転する。
- 斜航する船が、近接して航行する船に及ぼす複雑な流体干渉を明らかにした。バウアウト側に斜航する時、近接船には吸引力が作用するが、ある斜航角を境に反発力へと変化する。またその船に働くバウアウトモーメントは減少する。一方、バウイン側に斜航する時、近接船には吸引力が作用し、モーメントは斜航角の増加に伴い、バウアウト→バウインへと変化する。
- 2船がほぼ真横に並走時に最大吸引力が作用し、また相手船より四半船長ほど前方に位置した時に最大バウアウトモーメントが働いた。但し、これらは2船の船体形状に依存すると思われる。
- 一連の流体干渉は、船体間隔が狭いほど強まる傾向にある。
- 計算結果は、2船近接時の流体力を定性的に再現できる事を示した。これは、2船近接時の主船体と舵の揚力干渉を捉えられる事に因る。2船近接時の渦流出角の取扱いは、今後の検討課題である。

謝 辞

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金(若手

5. 結言

研究(B) : 24760676) の助成を受けて行われた．ここに記して関係者各位に謝意を表す．

参考文献

- 1) 久保雅義, 斎藤勝彦, 榊原繁樹 : 係留岸壁長が不足する場合の船体運動に関する実験的研究, 日本航海学会論文集, 第 80 号, 1989, pp.37-44.
- 2) ICS/OCIMF : Ship-to-Ship Transfer Guide (Petroleum), 4th edition, 2005.
- 3) National research council : Oil spill risks from tank vessel lightering, National academy press, 1998.
- 4) 榊原繁樹, 若林正, 山田周 : 船体動揺シミュレーションを用いた洋上 2 船体間荷役における防舷材の設計手法の提案, 日本航海学会論文集, 第 114 号, 2006, pp.109-118.
- 5) 中武一明, 安東潤, 片岡克己, 吉武朗 : 簡便な一厚翼計算法, 西部造船会々報, 第 88 号, 1994, pp.13-21.
- 6) 藤野正隆, 沼田敏晴, 元良誠三 : 舵と船体の相互干渉に関する基礎的研究, 日本造船学会論文集, 第 146 号, 1979, pp.213-221.
- 7) 湯室彰規 : 操縦流体力における 2 船間干渉に関する近似計算, 関西造船協会誌, 第 212 号, 1989, pp.113-121.
- 8) 安川宏紀 : 「簡便な厚翼計算法」の基礎式に関する考察, 西部造船会々報, 第 106 号, 2003, pp.157-166.
- 9) Lan, C. E. : A Quasi-Vortex-Lattice Method in Thin Wing Theory, Journal of Aircraft, Vol.11, No.9, 1974, pp.518-527.
- 10) 中武一明, 吉武朗, 下道雄一郎, 山本武史 : 斜航中の模型船舶尾における伴流計測, 西部造船会々報, 第 90 号, 1995, pp.11-20.
- 11) 小瀬邦治, 湯室彰規, 芳村康男 : III. 操縦運動の数学モデルの具体化—船体・プロペラ・舵の相互干渉とその表現, 第 3 回操縦性シンポジウム, 1981, pp.27-80.
- 12) Vantorre, M., Verzhbitskaya, E. and Laforce, E. : Model test based formulations of ship-ship interaction forces, Ship Technology Research, Vol.49, 2002, pp.124-141.

付 録

2 船が接近して並走する場合, 直進状態であっても各船の左右舷で流場は同じではなく, 特に相手船に近い側の船体表面の幅広い領域で流れが加速されていると思われる. この為, 当該状況下では, 自由渦が少なからず 2 船間の内側に角度を持って流出している事態が考えられる. そこで本付録では,

直進並走時の自由渦の流出方向を, 主船体中心面の各束縛渦の位置から 2 船間の内側向きに $\theta_0=1, 3$ 度と補正した上で試計算を行った. (3.2 節で述べた自由渦の流出モデルでは, 直進時の流出角は 0° である). Fig.A1 にイラストを示す. ここで流出角は, 主船体中心面上の位置および 2 船の船体間隔に応じて変化させない簡易的な取扱いとした. また舵からの自由渦も各主船体と同方向に流出させた.

Fig.A2 に, Y' と N' の絶対値を船体間隔 y_0/B に対してプロットした (Fig.4.1 に相当). 計算結果は, 自由渦を 2 船間の内側方向に流出させると, 吸引力, モーメント共に実験結果との一致度が改善される方向にある事が分かる. このことから, 自由渦の流出角に対する 2 船の干渉影響は比較的大きな可能性があり, 今後, CFD 計算や可視化実験により, 本現象の裏付けを行う予定である.

Fig.A1: Image of the correction of the angle of free vortex shedding from the center-plane of each hull

Fig.A2: Effect of the angle of free vortex shedding on the calculation results of the suction force and bow-out moment acting on two ships in close proximity ($F_n=0.1$, $\beta=\delta=x_0=0$)