2船並走時の舵と船体の流体力学的干渉に及ぼす浅水影響

佐野 将昭¹・安川 宏紀¹・吉田 聖子²

Shallow Water Effect on Hull to Rudder Interactions between Two Ships Alongside

Masaaki SANO, Hironori YASUKAWA and Seiko YOSHIDA

Abstract

Ship is under way side by side in close proximity to the other ship in the case of meeting/overtaking in a narrow waterway or ship to ship transfer operation. Since it is required to understand the hydrodynamic force characteristics for safe navigation, a lot of studies on them have been done so far. However there have been few studies on the hull to rudder interactions between two ships alongside except for the previous study by authors.¹⁾

This study is a continuous work and the shallow water effect on them is discussed. Captive model tests were conducted in shallow water, i.e. the depth/draft ratio 1.2 and 1.5, with variations in the lateral clearance between hulls, hull drift angle and rudder angle. The authors found, for example, when a ship steered, the lift interaction force acted not only on the self-ship but also on the other ship moving side by side in close proximity. It turned in the opposite direction and its acting point was also shifted with decrease of water depth. The experimental results were compared with the numerical analysis based on a nonlinear lifting body theory and it was able to capture the tendency of the shallow water effect on those hydrodynamic force characteristics.

Keywords : *Two ships, Hydrodynamic interaction, Shallow water effect, Steering, Oblique towing*

キーワード: 2船, 流体力学的干渉, 浅水影響, 操舵, 斜航

1. 緒言

1.1 背景と目的

2 船並走時の相互干渉問題は、航行の安全上、古くから重要なテーマとして注目されてきた。しかしこれまで船体間の相互干渉を研究した例²⁾³⁾⁴⁾は多数あっても、2 船の舵と船体の干渉という観点から検討した例は無い。このため著者等の先行研究¹⁾では、深水域において、1 隻の船が操舵・斜航しながら他の船の傍を並走する状況を想定し、2 船の舵と船体間に起こる流体力学的干渉について基礎的な検討を行った。その成果の一つに、操舵による干渉影響が、舵をとった側の船の船体のみならず、近くを並走する船にもおよび、その船尾付近に付加流体力を発生させる事を示した。この状況は、洋上荷役オペレー

ション時の接舷・離舷操船を念頭においたものであったが、同様の観点から浅水域での干渉問題を考察する事は、狭水路における行き会いや追い越し時など、船舶同士が接近せざるを得ない操船局面でも役立つと思われる。

1 隻の場合の舵と船体間の流体力学的干渉に及ぼす浅水影響の検討例としては、藤野等の非線形揚力面理論に基づく研究⁵⁾が挙げられ、操舵によって船体に誘起される付加流体力が、水深の減少に伴い顕著に増加する事が示されている。この為、同様のメカニズムで発生する 2 船並走時の舵と船体の流体力学的干渉もまた浅水影響を受けて変化すると考えるべきであり、場合によっては、1 隻の船が舵を取ると、近くを走る船に大きな付加流体力が働く事態も

¹ 正会員 広島大学大学院工学研究院 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1) masaaki-sano@hiroshima-u.ac.jp

² 非会員 日揮株式会社 (研究当時: 広島大学大学院生)

考えられる。

そこで本研究では、過去に知見が無い同干渉作用に及ぼす浅水影響を実験により明らかとする事を目的とする。併せて理論計算結果を示す事で実験点を補間すると共に、各船体に生じる循環の強さ・向きを考察して現象の理解に役立てる。加えて今回は、1隻が斜航する状況の実験も行っており、同場面で起こる2船間の相互影響についても考察を行う。

1.2 先行研究¹⁾の概要

以前に著者等は、深水域で並走する2船の舵と船体の流体力学的干渉の基礎的な検討を行った。2船を並走させた水槽試験および理論計算の結果、例えば進行方向に向かって右側の船2が右舵をとると、2組の舵と船体という揚力体相互の流体力学的干渉により、いずれの船体にも、2船間内向き方向に付加的な横力（揚力）が生じる事を明らかにした。左に位置する船1が受ける付加横力の大きさは、狭い船体間隔 $y_0/B=1.5$ （記号は次章を参照）の場合でも、船2の舵力横方向成分の5%程度と必ずしも大きいとは言えなかったが、浅水域では変化する可能性があり、調査が必要と思われる。

そこで本研究では同様の観点から、浅水域での舵と船体の流体力学的干渉について検討を行う。

2. 拘束模型試験の概要

2.1 浅水域用の仮床の設置

広島大学曳航水槽内には6基の空気タンク式の昇降台が設置しており、その上に仮床を敷く事で浅水域を実現できる。本研究では、Fig. 2.1 に示すような18(m)×5(m)の仮床を敷いた。水深 h は、喫水 d との比で $h/d=1.5$ と1.2に設定した。

2.2 模型船主要目と計測項目

供試船は、先行研究¹⁾と同じく同型のParabolic Wigley 船型である。2隻を副電車の旋回装置に取り付け、船体間隔、舵角および斜航角を種々変更した試験を行った。2船の運動は完全に拘束した状態で実施した。船体と舵の主要目をTable 2.1と2.2に、配置関係図をFig. 2.2に示す。また試験時の様子をFig. 2.3に示す。

各船体のミッドシップに3分力計を、舵位置には舵検力計を取り付けて、前後力 X （本論では議論しない）、横力 Y 、回頭モーメント N および舵直圧力 F_N を計測した。ここで、3分力計で計測された

流体力には舵力成分が含まれている点に注意が必要である。

計測結果は次式に基づき無次元化した。 ρ は流体密度、 U は船速であり、プライム記号が無次元値を意味する。

$$X', Y', F'_N = \frac{X, Y, F_N}{(1/2)\rho L d U^2}, \quad N' = \frac{N}{(1/2)\rho L^2 d U^2} \quad (2.1)$$

以後、進行方向に向かって左側の船を船1、右側を並走する船を船2と称し、各船の諸量は、船番号を表す添字 $i(=1, 2)$ を付けて区別する。

Fig.2.1 Scenery of shallow water area in Hiroshima University towing tank

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 model

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.2.2 Arrangement of Wigley hull model with rudder

Fig.2.3 Photo of captive model test

2.3 実験条件

フルード数 $F_n=0.1$ の船速で、舵角試験と斜航試験を実施した。以下、各試験の詳細を述べる。

2.3.1 舵角試験

2 船を直進に並走させた状態で、進行方向に向かって右側の船 2 に、 5° 間隔で最大 15° まで一定舵角を取らせた。船体間隔(重心間距離)は、 $y_0/B=1.5$ 、 2.0 、 3.0 の 3 パターンとした。

2.3.2 斜航試験

船 2 の斜航角を 5° 間隔で、最大 10° まで変化させた。船体間隔は $y_0/B=2.17$ と 3.0 の 2 通りとした。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。本論では同船体間隔の結果のみを載せる。また試験時の 2 船の舵角は共に 0 とした。

3. 定式化および数値解法

理想流体を仮定し、定常境界値問題を考える。船体固定座標系を Fig. 3.1 に示す。水深 h の浅水域に、船体と舵が斜航角 β と舵角 δ を有して、船速相当の流速 U の一様流れの中に置かれているとする。船長方向に x 軸、幅方向に y 軸をとり、 xy 平面は静止水面で剛体壁とみなした。

3.1 流速の定義

簡便な厚翼計算法の一つとして知られる SQCM⁶⁾ の考え方にに基づき定式化を行った。低速な為に造波を無視すると、水面と水底という 2 つの剛壁に囲まれた状況となる。そこで Fig. 3.2 に図示される通り、深さ方向に二重模型の無限鏡像を考慮する事で、同流場をモデル化する。

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。

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

総和記号内の第 1、2 項が、二重模型の船体表面 S_H および舵表面 S_R に配置する強さ σ の吹き出しによる誘導速度を表し、次式で定義する。

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

ここで l は二重模型の無限鏡像番号である (Fig. 3.2 参照)。各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⁷⁾ で計算する。また r_l は次のように書き表せる。

Fig.3.1 Ship fixed coordinate systems and definition of forces and moments, hull drift angle and rudder angle

Fig.3.2 Sketch of infinite mirror images of the double model consisting of the hull and rudder

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

ここで実像 ($l=0$) の特異点位置を $Q(\xi, \eta, \zeta)$ とした。続いて (3.1) 式の総和記号の第 3、4 項が、二重模型の船体中心面 C_H および舵キャンバー面 C_R に配置する馬蹄渦による誘導速度を表し、離散式は次のように書き表せる。

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

M, N は、 $C_{H,R}$ の深さ方向および長さ方向のパネル分割数である。また a は船体中心面を分割する時には船長を、舵キャンバー面の場合には舵のコード長をとる。ベクトル $\vec{v}_{\gamma_{l,k,m}}$ は鏡像 l の (k,m) 番目の馬蹄渦 (単位強さ) による誘導速度ベクトルを表し、1 本の束縛渦と一对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 $\gamma_{k,m}$ が馬蹄渦の強さを表す。

なお舵への流入速度は、船体による粘性伴流の影

響を受けて減少すると考えられる。ここでは船体軸方向の舵流入速成分にのみ伴流率 0.3(直進時)を仮定した。後述の Fig. 4.2 で、舵直圧力の計算値と実験値を比較するが、推定精度は悪くなく、設定した値は概ね妥当と思われる。また斜航時には舵位置の流速が回復する事を踏まえて、伴流率 0.2($\beta \pm 5, 10\text{deg}$)を仮定し、その間の斜航角では線形補間した値を用いた。

3.2 境界値問題の定式化

(3.1)式は、剛壁の水面条件および水底条件を既に満足している。そこで残りの境界条件の内、まず物体表面を流れが貫かない条件を考える。

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

ここでベクトル 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。

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

(3.6)式を課す長さ方向の標点位置は、Lan の QCM⁸⁾に基づき、次のような式で与えられる。

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

ここで s は、船体中心面および舵キャンバー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事から、(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。

以上より、(3.5)、(3.6)式の計8つの境界条件を満足するように、吹き出しと馬蹄渦の強さを解く事になる。そして船体・舵表面上の流速を決定後、流体力は圧力積分により算出した。

3.3 数値解法の概要

3.3.1 パネル分割数と鏡像数

二重模型の船体表面を 20(深さ方向)×50(水線方向)、舵表面を 20×30 分割とし、各パネル内で一定強さの吹き出しを配置した。船体中心面と舵キャンバー面には、それぞれ 20×50(=M×N)と 20×30 個の束縛渦を置いた。

また鏡像数に関しては、深さ上下方向にそれぞれ 30 個の計 60 個の鏡像を考え、(3.2)と(3.4)式の $I = \pm 30$ で計算を打ち切った。Fig. 3.3 に、鏡像数を変えて浅水域 $h/d=1.2$ の斜航計算(1隻)を行った結

Fig.3.3 Dependence of the number of mirror images on the convergence of the lateral force Y' acting on a ship in oblique towing in shallow water i.e. $h/d=1.2$

果を示すが、60 の鏡像数で横力無次元値 Y' が収束している事を確認できる。

3.3.2 自由渦の流出角度

斜航時、船体中心面の束縛渦を置いた位置から、直ちに一定角度で無限遠方まで流出する自由渦を仮定した。浅水域の場合、自由渦の流出角度 θ が深水域と比べて大きくなる事が知られている。今回は安川⁹⁾の補正にならい、 $h/d=1.5$ と 1.2 の浅水域において、それぞれ $\theta/\beta=0.69$ と 0.93 を設定した。深水域は $\theta/\beta=0.5$ で計算を行った。一方、舵キャンバー面上の束縛渦の位置から放出した自由渦は、船体の自由渦と同方向へ後縁から流出させた。

また2船並走時は、船体間で流れの圧力が低くなる為、直進状態であっても自由渦は少なからず2船の内側に角度を持って流出していると考えられる。流出角が流体力に及ぼす影響は先行研究¹⁾の付録でも検討したが、3°つけるだけでも、実験値との一致度が改善される傾向にあった。簡易的ではあるが、ここでも一律 3° と仮定した。

4. 結果と考察

4.1 吸引力とバウアウトモーメント

舵角 0° の舵角試験結果に基づき、直進並走時の吸引力とバウアウトモーメントを検討する。Fig. 4.1 に各船に作用する無次元化した横力 Y'_i と回頭モーメント N'_i の絶対値を、水深喫水比の逆数 d/h に対して示す。ここで $d/h=0.02, 0.67, 0.83$ が、それぞれ深水域(水深 $h=3.5\text{m}$)、 $h/d=1.5$ 及び 1.2 に相当する。実験点は、各船で計測された値の平均値をプロットしてある。

深水域から水深が減少すると吸引力およびバウアウトモーメントが徐々に大きくなる事が分かる。そして水深が $h/d=1.5$ ($d/h=0.67$) より浅くなると、強

い浅水影響を受けてバウアウトモーメントが急激に増加する様子が見られ、計算結果もその傾向を捉えている。一方、この時の吸引力の実験結果は同程度もしくは若干減少するというものであり、計算結果とは差が開いた。一つの理由として、 $h/d=1.2$ (同0.83)程の浅水域では運動の履歴影響も強く複雑な流場になっていたとも考えられ、今後の詳細な流場計測やCFDによる可視化が望まれる。

また2船の間隔が狭いほど、いずれの水深でも大きな吸引力とバウアウトモーメントが作用した。

Fig.4.1 Steady suction force $|Y_{1,2}'|$ and bow-out moment $|N_{1,2}'|$ acting on each ship alongside versus the draft/depth ratio i.e. d/h

4.2 舵角試験の結果

4.2.1 船2に作用する流体力

浅水域で2船が並走した状況において、船2が舵を取る時に、船2に作用する流体力を検討する。まず $y_0/B=1.5$ における舵角 δ_2 と舵直圧力無次元値 F_{N2}' の関係を Fig.4.2 に示すが、後述の船体流体力 (Fig.4.3) と比較して水深による差は大きくない。一般に浅水域では水底に関する舵の鏡像効果の為に、単独時の直圧力は増大すると思われる。しかし船体背後に置かれた場合、舵と船体の相互干渉は舵力を低下させる事が知られており¹⁰⁾、浅水域ではその効果もまた強まるからと推測される。計算結果は、舵直圧力勾配を実用上の精度で捉えている。

Fig.4.2 Rudder normal force F_{N2}' of Ship2 versus rudder angle δ_2 in the case of $y_0/B=1.5$

Fig.4.3: [a] Lateral force Y_2' and yawing moment N_2' acting on Ship2 due to Ship2 steering in the case of $h/d=1.5$ and 1.2. [b] Water depth effect on the interaction force parameters i.e. a_{H2} and x_{H2}'

続いて無次元化した横力 Y_2' とモーメント N_2' の結果を Fig. 4. 3a に示す。実験結果に着目すると、船体間隔に応じて、Fig. 4. 1 で図示した大きさの吸引力（負の横力）とバウアウトモーメント（正のモーメント）が作用する為、 Y_2' と N_2' のプロット点全体がその分だけ縦軸方向にスライドしている。勾配は、水深が浅いほど大きくなる様子が見られた。計算結果は、特に $h/d=1.2$ での吸引力の差が Y_2' のグラフ切片の差として現れているが、 Y_2' と N_2' とともに定性的な傾向は捉えている。

ここで操舵による流体力学的干渉について考察する。MMG の考え方¹¹⁾を参考に、直進並走時、船2が舵を取る時に、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。

$$Y_2' = Y_{02}' - (1 + a_{H2}) F_{N2}' \cos \delta_2 \quad (4.1)$$

$$N_2' = N_{02}' - (x_R' + a_{H2} x_{H2}') F_{N2}' \cos \delta_2 \quad (4.2)$$

右辺第1項は船体間の吸引力とバウアウトモーメントに関係し、解析上、例えば Y_{02}' は、 Y_2' を $F_{N2}' \cos \delta_2$ に対して線形近似した際の切片とみなせる。そして第2項が舵の寄与を表す。 a_{H2} は、操舵によって船2に誘起される横力成分の増加率であり、 $x_{H2}' (=x_{H2}/L)$ は、その付加横力の船長方向着力点の無次元値を意味している。 $x_R' (= -0.5)$ は舵位置である。

これらの干渉係数を、 d/h に対して Fig. 4. 3b に示す。まず a_{H2} の実験結果は、水深が $h/d=1.5$ ($d/h=0.67$) より浅くなると急増しており、 $h/d=1.2$ (同 0.83) では船体間隔が狭いほど大きな値を示している。例えば $y_0/B=1.5$ の場合、深水域の 2.94 倍の大きさとなった。計算結果は過大評価な傾向にあるが、水深が浅くなると a_{H2} が急増する傾向は現れている。

次に着力点位置 x_{H2}' に着目すると、実験結果より、水深の減少に伴い船尾付近からミッドシップ方向へ移動する事が分かる。船体間隔の影響に関しては、明瞭な傾向は見られなかった。また計算結果は、水深による x_{H2}' の変化を概ね再現できると思われる。

4.2.2 船1に作用する流体力

船2が舵を取る時に、並走する船1に作用する流体力の無次元値を次式で表す。

$$Y_1' = Y_{01}' + a_{H1} F_{N2}' \cos \delta_2 \quad (4.3)$$

$$N_1' = N_{01}' + a_{H1} x_{H1}' F_{N2}' \cos \delta_2 \quad (4.4)$$

右辺第1項は船体間の吸引力とバウアウトモーメ

ントに起因し、右辺第2項が、船2の操舵により船1に付加的に作用する横力とモーメントを意味する。 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、付加横力の着力点の無次元値を表している。

ここで船2の操舵による流体力学的干渉に焦点を当てる為、舵角 δ_2 に対する $Y_1' - Y_{01}'$ と $N_1' - N_{01}'$ の結果を Fig. 4. 4 と 4. 5 に示す。各図において上段が実験結果、下段が計算結果である。今回、模型船サイズを大きくできず、計測された干渉力が比較的小さかったことから、実験点にバラつきがみられた。特に $[h/d=1.2, y_0/B=1.5, \delta_2=10, 15^\circ]$ の計測値が十分な精度になかったと判断し、以後の解析から外した。また傾向の把握を容易にするべく、実験結果には線形近似直線を重ねて描いてある。

まず $Y_1' - Y_{01}'$ の実験結果に着目する。深水域では近似直線の傾きが正であり、船2の右舵 ($\delta_2 > 0$) により船1には吸引方向の付加横力が作用し、左舵 ($\delta_2 < 0$) では反発方向に力が働く事が分かる。しかし水深が浅くなると、その勾配が徐々に負へと変化し、力の向きが逆転している。

一方、 $N_1' - N_{01}'$ の結果より、船2が右舵をとると船1にはバウアウトモーメントが作用し、左舵ではバウインモーメントを受ける事が分かる。また水深が浅くなると、モーメントの向きは変化しないが勾配は急となり、大きな干渉モーメントを受ける様子うかがえる。定量値に差はあるが、水深に応じた一連の傾向は、計算結果においても再現できている。

Fig. 4. 6 に各干渉係数を d/h に対してプロットした。なお(4.4)式より、解析上 x_{H1}' は a_{H1} で除して求める為、 a_{H1} が0に近い場合は無限大となる点に注意を要する。Fig. 4. 4 から予想されたように、 a_{H1} は深水域において正の値をとるが、水深が浅くなると負に転じている。 $y_0/B=1.5$ の場合、 a_{H1} は深水域で 0.05、浅水域 $h/d=1.2$ ($d/h=0.83$) では -0.065 であり、それぞれ船2の舵力横成分の 5.0% と 6.5% の大きさの付加横力が作用する事が分かる。また計算結果を基に検討すると、 a_{H1} は、船体間隔が狭いほど水深変化に伴う変化の幅が大きいと思われる。一方、 x_{H1}' の結果より、深水域ではミッドシップ後方にあった着力点、浅水域では前方に移動する様子うかがえる。

続いて、干渉流体力がこのように水深に応じて複雑に変化する背景を考察する。Fig. 4. 7 に、各水深において $y_0/B=1.5$ の船体間隔で船2が 15° の右舵を取った時の両船体中心面上の渦強さ γ のコンター図を描いた。ここで $\gamma > 0$ が反時計回りの渦分布を意味

Fig.4.4: Additional lateral force $Y_1' - Y_{01}'$ acting on Ship1 due to Ship2 steering in deep water and shallow water i.e. $h/d=1.5$ and 1.2 . Experimental values are plotted with the fitting lines on the above figures and calculated results are shown on below them

Fig.4.5: Additional yawing moment $N_1' - N_{01}'$ acting on Ship1 due to Ship2 steering in deep water and shallow water i.e. $h/d=1.5$ and 1.2 . Experimental values are plotted with the fitting lines on the above figures and calculated results are shown on below them

Fig.4.6: Water depth effect on the interaction force parameters i.e. a_{HI} and x_{HI}'

する。なおコンター図は QCM[®] による計算結果とした。QCM では船体、舵の厚みを扱わず、舵角ゼロの直進状態であれば 2 船並走時でも渦は生じない。この為、舵を取ると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。

船体中心面に分布する渦の回転方向 (γ の符号) に着目すると、まず深水域では、右に位置する船 2 が右舵をきる場合、船 2 の船体には反時計回りの渦分布 ($\gamma > 0$)、すなわち反時計回りの循環が作用し、船 1 の船体には、時計回りの循環が作用する様子うかがえる。つまり互いを引き寄せ合う方向に付加横力 (揚力) が作用する。一方、浅水域では、船尾付近に深水域と同方向の渦分布がそれぞれ誘起される点は同じであるが、船 1、2 共に船首付近に反時計回りの強い渦分布が見られた。この傾向は水深が浅いほど顕著であり、浅水域になると 2 船のみならず鏡像翼を含めた複数翼間で複雑な流体力学的干渉が起こるからと思われる。船 1 の場合は、結果的に周方向の流速を積分して得られる循環が反時計回りとなり、遂には付加横力が反発方向に転じたものと推測される。

4.3 斜航試験の結果

4.3.1 船 2 に作用する流体力

2 船間隔が $y_0/B=2.17$ の状況で船 2 が斜航する時に、船 2 に作用する流体力の無次元値 Y_2' と N_2' を Fig. 4.8 に示す。横軸は斜航角 β_2 である。

Fig.4.7: Contour lines of the strength of bound vortices distributed over the hull center plane ($y_0/B=1.5$, $\delta_2=+15^\circ$)

まず実験結果に着目する。水深が浅いほど Y_2' の大きさが増加しており、典型的な浅水影響が見られる。 $h/d=1.2$ の浅水域では、左右の斜航時で横力に若干の差が現れているが、総じて傍を並走する船 1 が船 2 の斜航横力に及ぼす影響は小さいといえる。

一方、回頭モーメント N_2' は、船 2 の船尾が船 1 側に近づく場合 ($\beta_2 > 0$) に、より大きな値を示した。これはバウアウト方向のモーメントであり、2 船の船尾を更に接近させる方向である事から、衝突の恐れがある危険な状態といえる。同傾向は水深が浅くなるほど顕著に現れており、浅水域において並走する船 1 の影響が強まる様子うかがえる。

4.3.2 船 1 に作用する流体力

前節の船 2 が斜航する状況下で、並走する船 1 に作用する流体力 Y_1' と N_1' を Fig. 4.9 に示す。横軸は船 2 の斜航角 β_2 である。実験結果より、船 2 の船首が船 1 側に回頭すると ($\beta_2 < 0$)、吸引力 ($Y_1' > 0$) が増大する事が分かる。その勾配は、 $h/d=1.5$ より浅くなると急激に大きくなっている。一方、船 2 の船首が船 1 の逆側に回頭する場合 ($\beta_2 > 0$)、その斜航角の増加と共に船 1 に働く吸引力は減少し、反発力へ転じている。特に $h/d=1.2$ の浅水域において、大きな反発力が働く様子うかがえる。

また N_1' に関して、 $\beta_2 < 0$ の場合、 $h/d=1.2$ の浅水域では、吸引力 Y_1' の増加に呼応してバウアウトモーメント ($N_1' < 0$) の増加が見られた。一方、 $\beta_2=10^\circ$ において、船 1 は上述通り反発力を受けるようになるが、回頭モーメントは水深に依らずバウアウト方向に作用している。これは斜航する船 2 の影響を受

けて、着力点の位置がミッドシップ前方にシフトしたからと推測される。

なお一連の計算結果は、浅水影響ならびに2船間の流体力学的干渉を受けた各船の流体力の傾向を、概ね説明できる事が分かる。

Fig.4.8: Lateral force Y_2' and yawing moment N_2' acting on Ship2 in oblique towing of Ship2 ($y_0/B=2.17$)

Fig.4.9: Lateral force Y_1' and yawing moment N_1' acting on Ship1 in oblique towing of Ship2 ($y_0/B=2.17$)

5. 結言

2 隻の船が並走する状況は緊張局面の一つであるが、その場合の舵と船体の流体力学的干渉は明らかではない。そこで深水域を検討した先行研究¹⁾に引

き続き、浅水域で実験を行い、同干渉に及ぼす浅水影響について基礎的な検討を行った。今回得られた主な知見をまとめる。

- 水深が減少すると、舵を取る事で自船の船体に作用する付加的な横力は増大する。船体間隔の影響は $h/d=1.5$ より浅くなると明瞭に現れ、船体間隔が狭い程、大きな付加横力が働く。
- 並走状態で片方の船が舵を取ると、他方の船(他船)もまた付加的な横力を受ける。その向きは水深に応じて変化し、例えば進行方向右に位置する船が右舵をとる場合、深水域では他船に吸引方向の付加横力が作用するが、水深の減少と伴に向きが逆転する。一方、他船に働く付加横力の着力点はミッドシップを跨いでシフトすると思われ、それによる付加回頭モーメントの向きに変化は無い。
- 舵を取る船の舵力横成分に対して、他船が受ける付加横力の大きさ(絶対値)は、船体間隔 $y_0/B=1.5$ の場合、深水域で約 5%、浅水域 $h/d=1.2$ でも 6.5%程度であった。この為、項目(a)とは異なり、他船に働く付加横力の大きさが、浅水域で顕著に増加する事は無いと思われる。

続いて並走時に1隻が斜航する状況で実験を行い、次の知見を得た。

- 並走状態で一方の船がバウアウト側に斜航する時、逆斜航時と比較して、その船にはより大きな回頭モーメントが作用する。同状況下では他方の船にも、バウアウトモーメントが作用する。それらの大きさは、水深が浅いほど大きい。

また本研究では併せて理論計算結果を示し、現象のメカニズムを考察した。特に項目(b)で述べた他船が受ける付加横力の水深に応じたユニークな変化の傾向を捉えた一方、定量的な精度には課題を残した。各船体から流出される自由渦の流出角は、傍を並走する船の影響を受ける可能性がある。この為、一つの改善策としては、湯室¹²⁾のように渦強さに加え流出角をも未知数として扱い、反復法により解く方法が考えられる。引き続き、精度改善を検討したい。

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します。

参考文献

- (1) 佐野将昭・安川宏紀・吉田聖子：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,
日本船舶海洋工学会論文集, 第 16 号, pp. 59-67,
2012.
- (2) Tuck, E. O. and Newman, J. N. : Hydrodynamic
interactions between ships, Proc. 10th Symp.
on Naval Hydrodynamics, Cambridge, pp. 35-70,
1974.
- (3) Vantorre, M., Verzhbitskaya, E. and Laforce,
E. : Model test based formulations of ship-
ship interaction forces, Ship Technology
Research, Vol. 49, pp. 124-140, 2002.
- (4) 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.
- (5) 藤野正隆・加納敏幸・元良誠三：舵と船体の相
互干渉に関する基礎的研究 (第 2 報), 日本造船
学会論文集, 第 147 号, pp. 136-143, 1980.
- (6) 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,
pp. 13-21, 1994.
- (7) Hess, J. L. and Smith, A. M. O. : Calculation of
nonlifting potential flow about arbitrary
three dimensional bodies, Journal of Ship
Research, Vol. 8, No. 2, pp. 22-44, 1964.
- (8) Lan, C. E. : A Quasi-Vortex-Lattice Method in
Thin Wing Theory, Journal of Aircraft, Vol. 11,
No. 9, pp. 518-527, 1974.
- (9) H. Yasukawa : Shallow water effects on
hydrodynamic characteristics of a turning
thin ship, 西部造船会々報, 第 85 号, pp. 57-69,
1993.
- (10) 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, pp. 213-221, 1979.
- (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, pp. 27-80, 1981.
- (12) 湯室彰規：斜行平板の自由渦流出角に及ぼ
す側壁影響, 関西造船協会誌, 第 232 号,
pp. 47-53, 1999.