

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760676

研究課題名(和文) 低速並走しながら行う2船間洋上荷役オペレーションの安全性評価

研究課題名(英文) Research on the safety of ship to ship transfer operations from the view point of maneuverability of ships

研究代表者

佐野 将昭 (Sano, Masaaki)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：40582763

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：水深制限で入港できない大型船に対し、小型船を並走させながら接舷させて積荷を移し替える洋上荷役が行われている。本研究では、同オペレーションの安全性を船の操縦性能の観点から評価するべく、水槽模型試験やシミュレーション計算に基づき、従事する2船の流体力特性や運動性能を明らかにした。まず大型船が小型船を横付けした航走状態を水槽試験で再現し、操縦流体力を評価した。そして変針時の旋回性や保針性を明らかにした。また2船間の干渉流体力を考慮して接舷操船シミュレーション計算を行い、載荷状態が接舷操船時の運動性能に及ぼす影響を明らかにした。加えて、2船並走時の舵と船体の流体力学的干渉についても検討を行った。

研究成果の概要(英文)：Nowadays the lightering operation in which the crude oil is transferred from a large ship to small one is commonly conducted in worldwide scale. In the case of lightering offshore, the cargo transfer is carried out with the two ships under power which is called as underway transfer. The purpose of this study is to understand the characteristics of hydrodynamic forces acting on those ships and maneuverability of them during the operation. Three topics are included in this study. First, the yawing ability and course stability of the combined ship engaged in underway transfer were discussed based on the results of captive model test in the towing tank and maneuvering simulation. Next, the berthing operation was simulated in consideration of the interaction forces between two ships. The effect of loading condition on the maneuvering motions in berthing was evaluated. Third, the hull to rudder interactions of ships in close proximity were also studied both in deep and shallow water.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：洋上荷役 操縦性能 2船 相互干渉 接舷操船

1. 研究開始当初の背景

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。この解決策の一つに洋上荷役オペレーション (Lightering) が挙げられ、沖合で、バラスト状態の小型油槽船を満載状態の大型油槽船に接舷させ、積荷を移し替える作業が行われている。特に昨今では順鞘 (コンタンゴ) 市場に伴う沖合での原油貯蔵といった市場要因に加え、LPG/LNG といった液化ガス専用船への適用もみられ、オペレーション数は増加している。一方これとは逆に、満載状態の小型船を大型船に接舷させて、積荷を大型船へと積み替える作業は、Reverse Lightering と呼ばれ、入港できない大型船を沖合で満載にする為に行われている。近い将来、北西ロシア地域の油田・ガス田開発が進むと、氷海域の外まで小型のアイスクラス仕様の耐氷船で輸送し、通常仕様の (大型) 船へ積み替えて欧米市場に輸送する事が予想され、こうした洋上荷役の需要は今後も増えると言われている。

洋上荷役オペレーションが日常的に行われている現状を鑑みると、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、以前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現実があり、実際に接触事故や原油流出の事例もある。一定時間、極めて近い距離を並走する状況が、海洋汚染を招き兼ねない事故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、洋上荷役に従事する 2 船を取り巻く現象を解明し、十分な理解を深めておく事が、安全性確保の為の礎になるとと思われる。

2. 研究の目的

本研究では、洋上荷役オペレーションの安全性を評価するべく、水槽試験とシミュレーション計算に基づき、従事する 2 船に働く流体力特性ならびに運動特性を明らかにする。

(1) 係留固定ユニット船の操縦性能の解明

沖合では水深が深くて錨泊できない為、低速で並走しながら積荷を移し替えるタイプの洋上荷役 (Underway Transfer) が行われる。その際、2 船は接舷後に係留固定され、小型船側は舵角を 0 に戻し、主機を止める。実質、大型船の片舷で曳航される状態となり、それ以後の操船および危険回避は大型船に任される。いわゆる前後・左右非対称な“係留固定ユニット船”であり、船の航走状態としては興味深い。しかし各船の載荷状態の組み合わせに応じて大幅に変化するであろうユニット船の操縦性能は情報が乏しい上に、操船者是不慣れな操船を強いられる事から、その緊張は想像に難くない。そこで本研究では、洋上荷役の同実施形態に焦点を当て、ユニット船に作用する操縦流体力ならびに操

縦運動性能を評価する。

(2) 接舷操船時の操縦運動シミュレーション
2 船が並走しながら接近する場合、船体間の流体力学的相互干渉の結果として、各船に吸引力や回頭モーメントが働く事が知られており、接舷操船を難しくする一因となっている。特に満載状態の小型船が (ヘビー) バラスト状態の大型船に接舷する Reverse Lightering では、接舷エネルギーの増大や、満載小型船を所定の位置に接舷させる難しさが危惧される。現状は経験則に依存した運用がなされていると推測される為、接舷に至るまでの 2 船の操縦運動を再現できる計算法を構築し、各種ケーススタディを机上で検討できるようになれば、接舷操船の安全性向上に寄与できると思われる。そこで本研究では、干渉流体力を考慮した操縦運動数学モデルを解いて、Lightering 及び Reverse Lightering を想定した接舷操船シミュレーションを実施する。そして載荷状態の差異による接舷操船時の運動特性の変化を明らかにする。

(3) 2 船並走時の舵と船体の相互干渉の解明
舵と船体間の流体力学的相互干渉はよく知られているが、2 船並走状態で片側の船が操舵をした場合に、相手船にどのような影響が及ぶのかは分かっていない。そこで本研究では、片側の船が操舵して接舷する状況を念頭に、2 組の舵と船体間の相互干渉について基礎的な検討を行い、その発生メカニズムを明らかにする。また同干渉に及ぼす浅水影響についても検討する。

3. 研究の方法

(1) 係留固定ユニット船の操縦性能の解明

洋上荷役に従事する船型の組み合わせとして、大型船に VLCC (KVLCC2) を、小型船にアフラマックスタンカーを想定し、それぞれ 1/110 スケール模型船を使用する。ユニット船の載荷状態としては、洋上荷役開始直後で、満載の大型船にバラスト状態の小型船が接舷している状態 (F-B)、2 回程度の洋上荷役終了間際で、ヘビーバラスト状態の大型船に満載の小型船が接舷している状態 (HB-F) を考える。加えて満載・ヘビーバラスト状態の大型船単体 (F, HB) の計 4 状態を実験対象とする。操船を担う大型船に着目すると、(複数回の) 洋上荷役を経る過程で航走状態は、 $F \rightarrow F-B \rightarrow HB-F \rightarrow HB$ へと変化する事から、計 4 つの航走状態の結果を比較する事で、洋上荷役の進捗に応じた運動特性の変化を把握する事ができる。

広島大学曳航水槽で、抵抗/自航試験、舵角試験、斜航/CMT 試験を実施する (図 1)。船速はフルード数 0.055 (実船 6kt 相当) の低速とする。大型船のミッドシップ位置に 3 分力計を設置し、別途、自航動力計と舵検力計を設置する。そして一連の計測データに基

づき、4つの航走状態ごとに各流体力微係数や干渉係数を同定する。

続いて運動シミュレーション計算を実施する。今回は主要目が大きく異なる2船の係留固定ユニット船を対象としており、前後および左右形状は非対称となる。そこで先立って、曳船となる大型船のミッドシップ位置に原点を置く船体固定座標系を基準に、ユニット船の運動方程式を導く。その際、式中に現れる付加質量等は、3次元パネル法を用いて、前後、左右、回頭運動間の連成項を含めて算出しておく。以上の準備を経て、90度変針操船や逆スパイラル試験を模擬した操縦運動シミュレーション計算を実施し、洋上荷役時に、ユニット状態で航走する場合の変針（旋回）性や保針性について検討する。

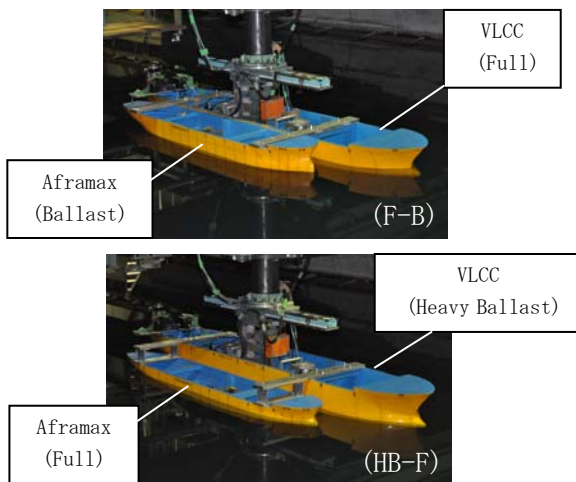


図1 並走型洋上荷役(Underway transfer)を模擬した曳航水槽実験の様子

(2) 接舷操船時の操縦運動シミュレーション

基礎となる近接して航行する2船の操縦運動方程式は、安川(2003)が理論展開した式を採用する。同式は操縦運動が準定常的であるとの仮定から導かれており、2船の方位や位置関係に応じて変化する相互干渉力は、ポテンシャル理論に基づき3次元パネル法で時々刻々求める事になる。一方、船体減衰力およびプロペラと舵による強制力は、通称MMGモデルに従い、船体、舵、プロペラの単独特性をベースに、各部位の干渉力を取り入れる方法で表現する。ここで同モデルに使用される一連の流体力微係数と干渉力係数は、各船の荷役状態ごとに水槽試験に基づき推定する必要がある。VLCCに関しては、研究項目(1)で既に同定済みである為、アフラマックスタンカーについて満載・ヘビーバラストの2状態で水槽模型試験を実施し、必要なデータを取得する。

接舷操船シミュレーションは、LighteringとReverse Lighteringという2船の荷役状態が異なる組み合わせで行い、干渉流体力や接舷操船時の操舵角・方位角等を評価する。

(参考) 安川宏紀(2003): 近接して航行する2船の操縦運動, 西部造船学会々報, 第105号。

(3) 2船並走時の舵と船体の相互干渉の解明
対象船型はWigley船型とし、並走させた状態で片側の船が舵を取った場合に、相手船に作用する流体力学的相互干渉を検討する。深水域と浅水域における実験結果と揚力体理論に基づく計算結果を突き合わせて、その発生メカニズムを考察する。本項目は、先行研究の成果を踏まえて実施する。

4. 研究成果

(1) 係留固定ユニット船の操縦性能の解明

図2に、斜航/CMT試験で計測されたユニット船主船体に作用する横力と回頭モーメントの無次元値(Y_H' , N_H')を、3次の多項式に基づく回帰流体力のフィッティング結果と重ねて示す。横軸は斜航角 β である。同図より、洋上荷役の進捗(荷役状態の変化)に応じて、操縦運動時の流体力特性が大きく変化する様子がうかがえる。ユニット状態“F-B”及び“HB-F”であっても、運動が小さな場合は、左右斜航時($r'=0$)の流体力に顕著な非対称性は見られない。しかし斜航角が10度以上に大きくなると非対称性が現れており、特に“F-B”の Y_H' と“HB-F”の N_H' には、強い非対称性を確認できる。また“HB-F”では、左右の斜航旋回時の回頭モーメント係数に大きな差が認められる。

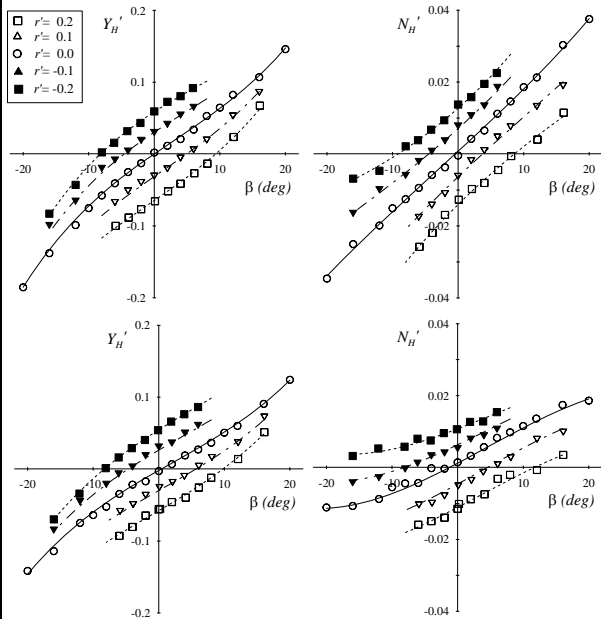


図2 CMT試験で計測された横力と回頭モーメントの無次元値(上段:F-B, 下段:HB-F)

変針時の操縦性能を明らかにする為に、±90度変針運動シミュレーション計算を実施した。なお洋上荷役中には大舵角を用いて大きな操縦運動をする事はないと思われ、±10度の操舵を想定した。航走状態による旋回縦距(AD)と旋回横距(TR)の比較を図3に示す。”HB-F”の場合、図2で示した通り、斜航旋回時の回頭モーメントに強い非対称性が現れており、舵角 $|\delta|=10$ 度変針相当の

$|r'|=0.2$, $|\beta|=10$ 度付近の運動状態であれば、左変針時の方が大きな減衰モーメントが作用する。この為、他の航走状態と事なり、左変針時に、より大きな縦距・横距が必要になる事が分かる。

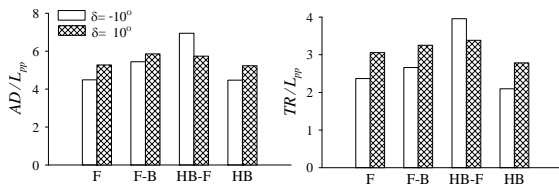


図3 ±90度変針操船時の縦距と横距の比較

逆スパイラル試験の計算結果を図4に示す。満載状態“F”にのみヒステリシス・ループが現れているが、ループ幅は狭く、針路不安定の度合いは比較的小さい。また“F-B”と“HB-F”のユニット船において針路安定性に改善が見られた。検討の結果、“F”と比較して sway 運動時の減衰力の着点点が船首側からミッドシップ付近へ大幅にシフトした事が一因と思われる。ユニット状態で航走する事は保針性を向上させ、安定かつ安全な洋上荷役オペレーションに寄与しているといえる。またいずれの航走状態も整流係数の差およびユニット船の場合は非対称流体力に起因して、左右の旋回性が非対称である。

次に保針に要する当舵角と斜航角を図4から読み取り検討する。“F”については針路不安定である為、議論から外す。まず“HB”では、自航回転数が低くプロペラスリップが小さい事もあり、当舵はほぼ無いようである。一方、ユニット船の場合、図2の結果より、直進航行時には時計回りの回頭モーメントが作用すると思われる。“F-B”状態では約1度、“HB-F”状態では3度程度の大き目の当舵が必要となっている。しかしこうした並走型洋上荷役で、小型船を大型船の側壁に係留して航走する状況であっても、極端に大きな当舵を取る必要は無いとも解釈できる。加えて保針時の斜航角は“F-B”、“HB-F”状態共に1度以下であり、比較的小さな斜航状態で保針可能と思われる。

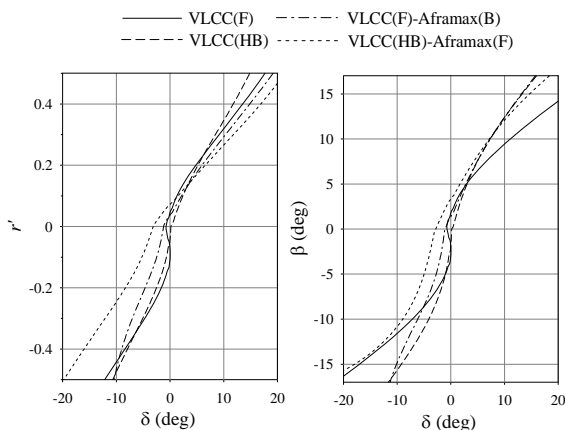


図4 スパイラル特性の比較 (左図: 定常旋回角速度の無次元値, 右図: 定常斜航角)

(2) 接舷操船時の操縦運動シミュレーション

2船間の干渉流体力は、船体の位置関係や載荷状態に応じて変化する。そこで VLCC の重心位置に対するアフラマックスタンカーの相対的な重心位置を (x_{GG}, y_{GG}) とし、直進並走時、その相対位置にあるアフラマックスタンカーに作用する干渉横力と回頭モーメント(無次元値)のコンター結果を図5に示す。各小図の両軸は VLCC の船長 $L_{pp}^{(1)}$ で無次元化してあり、 y 軸上端は、防舷材を介した時の最接近距離 0.167 である。上段が Lightering 時、下段が Reverse Lightering 時の結果である。

満載のアフラマックスタンカーが接舷する Reverse Lightering 時では、Lightering 時よりも大きな吸引力が同船体に作用する様子が見られる。吸引力は、2船のミッドシップ位置が並んだ状態において最大値を示す。一方、干渉回頭モーメントは、アフラマックスタンカーが VLCC のミッドシップ前方に位置する場合、船首を外側に向けるバウアウトモーメントが作用し、後方に位置する場合には、バウインモーメントが作用している。また Reverse Lightering 時において、干渉回頭モーメントの大きさが増加する様子を確認できる。

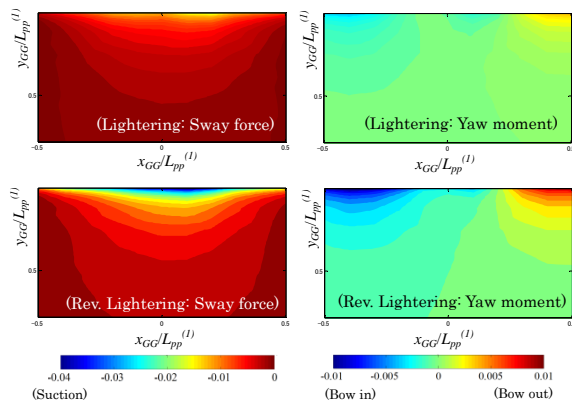


図5 直進並走時、相対位置に応じて変化するアフラマックスタンカーに働く干渉流体力

一定針路を保持して 6kt で航行する VLCC に、90m 離れて並走するアフラマックスタンカーが接舷するシナリオを考える。接舷操船は、方位角(P)、角速度(D)、横距離の目標値からの偏差にフィードバック制御をかけて、時々刻々の舵角を制御する事で行う。ここで載荷状態問わず、PDゲインは6、横距離のゲインは1に設定した。なお防舷材はモデル化しておらず、船体同士が接触した時点で計算を打ち切った

VLCC の初期位置を $(0, 0)$ とする空間固定座標系 (x, y) を定義し、航跡を図6に示す。Reverse Lightering 時には、接舷までにより長い航走距離・時間が必要になる事が分かる。これは排水量や付加質量、横運動の減衰力が大きく、運動が発達しなかった事が理由といえる。オペレーションには、より広い海域が必要とも解釈できる。また図7に、各オペレ

ーション時の VLCC の航跡を比較する．一定針路($\psi=0$)を保持すべき VLCC が，Reverse lightering 時にはアフラマックスタンカー側にわずかながら引き寄せられ，保針針路を次第に外れる様子がうかがえる．これは VLCC の減衰力が小さかった事，加えて強い干渉流体力が作用した結果といえる．

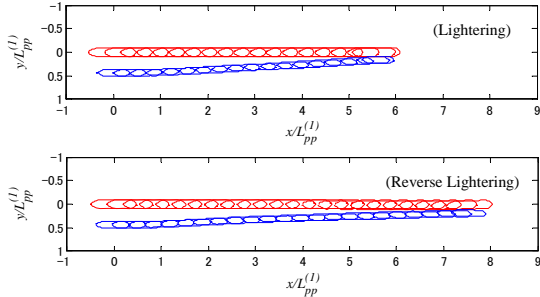


図 6 接触に至るまでの 2 船の航跡図

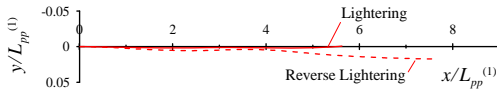


図 7 接触に至るまでの VLCC の航跡の比較

接触アプローチ中の各船の方位角と舵角の時系列結果を図 8 に示す．横軸は時間 t の無次元値である．方位角 ψ に着目すると，載荷状態によらず，アフラマックスタンカーは，最初，船首を VLCC 側に向けて ($\psi < 0$) 横距離を縮めていく様子が分かる．そして VLCC に接近すると，船首が外側に向く．これは干渉影響によるバウアウトモーメントを受ける為であり，Reverse Lightering 時の方が船首の振れ角が大きい．一方，同状況では VLCC も接触間際に船首がアフラマックスタンカーとは逆向きに振られており，理想的とされる平行接触がより困難になる事態が想定される．舵角 δ の結果からも，Reverse Lightering 時にはより大きな操舵が求められる事が読み取れ，載荷状態に応じて VLCC の保針操船，アフラマックスタンカーの接触操船時の操舵法に留意する必要がある．

防舷材選定には，接触時の運動エネルギーが指標となり，横方向の接触速度や付加質量の評価が重要となる．そこで各オペレーション時の sway 方向の速度 v' と付加質量 m_y' の時系列結果を図 9 に示す．Lightering 時と比較して，Reverse Lightering 時には，アフラマックスタンカーの吸引加速度が減少している．その反面，VLCC は吸引方向に加速しており，接触間際の相対速度に大きな差は無かった．各船の Sway 方向の付加質量に着目すると，接触直前に増加している事が分かる．アフラマックスタンカーの付加質量は排水量が大きい Reverse Lightering 時に大きく，今回の計算結果では，接触時の付加質量が Lightering 時との比で 3 倍超増加すると試算された．この為，防舷材選定に際して注意を払う必要があると思われる．

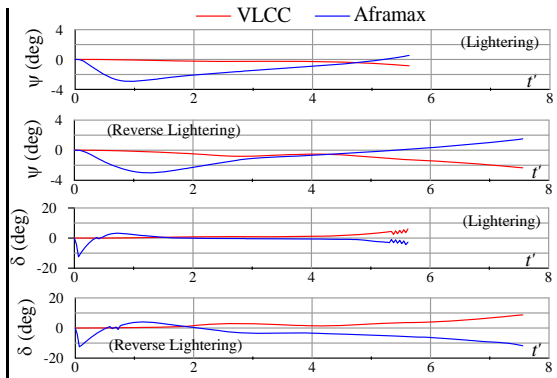


図 8 接触操船中の舵角と方位角の時系列

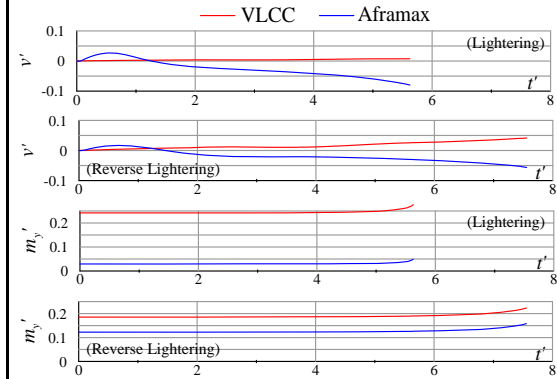


図 9 接触操船中の Sway 速度と Sway 方向の付加質量の時系列

(3) 2 船並走時の舵と船体の相互干渉の解明
2 隻の Wigley 船 (数式船型) が，船幅 0.5 倍の船体間隔を空けて並走している状況を考える．図 10 に，進行方向に向かって右側の船が舵を左右に 15 度取る時に，各主船体に働く横力の実験値をその平均着力点位置に描いた．いずれも数値は無次元値である．操舵しない状況 (真ん中の図) を基準に考えると，右舵を取った時に互いの船尾を近づけようとする吸引力が強まり，操船上，危険が伴う事が直感的に理解される．数値で見た場合，操舵力の横方向成分の約 5% 程度の干渉横力が，近接する船の船尾付近に生じる．またその向きは操舵方向に応じて逆転し，左舵を取る場合には，船体間の吸引力を相殺し，

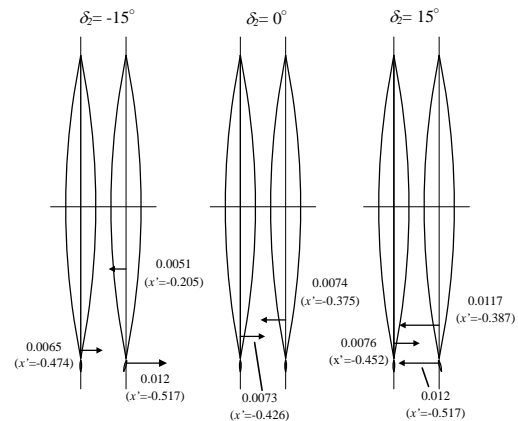


図 10 2 船並走時，操舵による干渉横力が各船に働く様子を描いた模式図

見かけ上、吸引力が減少する様子が分かる。

相互干渉の背景を考察するべく、図 11 に、右に 15 度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（計算結果）を示す。まず船 2（操舵船）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、その主船体には舵と同方向の循環が誘起され、2 船間内向き方向の揚力が生じる。一方、渦強さの符号から推測すると、近接する船 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。結果的に、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、同船にも 2 船間の内向き方向の揚力が生じたと思われる。以上が、相互干渉の発生メカニズムである。

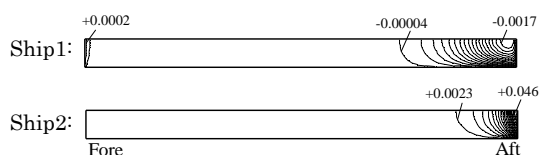


図 11 2 船並走時、操舵により各船の船体中心面に誘起される束縛渦強さのコンター図

引き続き、同流体力学的干渉に及ぼす浅水影響について基礎的な検討を行った。船 2 の操舵により、船 1 に働く干渉横力の舵力横成分に対する割合 a_{HI} と、その着力点の無次元値 x_{HI}' （ミッドシップ原点）を図 12 に示す。横軸は喫水と水深の比である。

$h/d=1.2$ ($d/h=0.83$) の浅水域で、船体間隔が船幅の 0.5 倍 ($y_0/B=1.5$) の狭いケースであっても、干渉横力の大きさは、船 2 の舵力横成分の約 6.5% と必ずしも大きくはない。但し a_{HI} の符号より、水深が浅くなると干渉横力の向きが逆転するというユニークな結果が得られた。一方、 x_{HI}' 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が、浅水域では前方に移動する様子が見られる。一連の現象の背景に、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推測される。

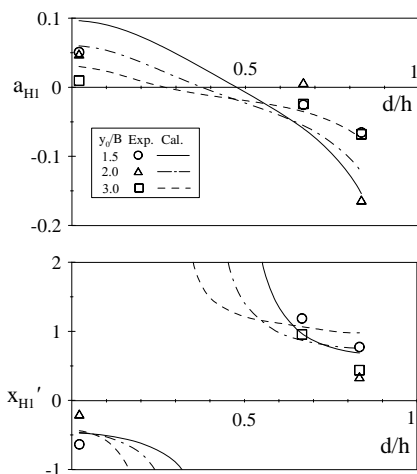


図 12 操舵による干渉横力の大きさと着力点位置の水深に応じた変化

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 2 件）

1. 佐野将昭, 安川宏紀, 吉田聖子, 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, 日本航海学会論文集, 第 130 巻, 査読有, 2014. 【掲載確定】
2. 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, 査読有, pp.59-67, 2012.

〔学会発表〕（計 3 件）

1. 佐野将昭, 北川幸紀, 安川宏紀, 並走しながら接舷する 2 船の操縦運動に関する研究, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 18 号, pp.231-234, 仙台, 2014. 5.26-27.
2. Kitagawa K., Sano M., Yasukawa H., Analysis of ship to ship interaction based on maneuvering simulation, Proc. of the Int. Conf. on Marine Safety and Environment (IMSE 2013), pp.53-59, Johor Bahru, Malaysia, 2013.11.12-13.
3. Sano M., Yasukawa H., Kitagawa K., Yoshida S., Shallow water effect on the hydrodynamic interaction between two ships with rudder in close proximity, Proc. of the 3rd Int. Conf. on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water, pp.113-121, Ghent, Belgium, 2013.6.3-5.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐野 将昭 (MASAAKI SAN0)
 広島大学・大学院工学研究院・助教
 研究者番号： 40582763

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし