

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420866

研究課題名(和文) 浅水域航行船舶に作用する操縦流体力推定法の開発

研究課題名(英文) Development of an estimation method of hydrodynamic forces acting on maneuvering motion ships in shallow water

研究代表者

西尾 茂(Nishio, Shigeru)

神戸大学・海事科学研究科(研究院)・教授

研究者番号：30208136

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：研究は、港湾などの浅い水域を航行する船舶に作用する操縦流体力や、潮流が係留船舶に作用する漂流力などの特性を明らかにすることを目的とし、水槽実験による流体力特性の調査と数値計算(CFD)による流場解析を行ったものである。本研究の調査の結果、模型船スケールでは水深/喫水比 $H/d=1.2$ 以下の領域で、従来報告されてきた浅水影響に比べて大きな特性変化が生じる可能性を指摘した。また、この特性変化が「塞き止め効果」と呼ばれる船底での粘性作用による圧力損失が関わっていることをCFDの流場解析を用いて明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The behavior of hydrodynamic forces acting on a ship at lateral motion was investigated. Force measurement in towing tank and numerical simulation on viscous flow field were made, and correlations of hydrodynamic forces with flow field around ships were examined. A large flow pattern change at extreme shallow water case such as water depth/draft ratio $H/d < 1.20$ was observed in model scale, and it causes serious characteristics change of lateral force. Present characteristics change could be caused by the pressure loss at the gap between sea bottom and ship bottom, which may be referred by 'retaining effect', and that generates the upstream flow pattern and separation pattern change.

研究分野：船舶海洋流体力学

キーワード：推進・運動性能 船舶海洋流体力学 浅水域 操縦流体力 流場解析 塞き止め効果

1. 研究開始当初の背景

近年の急速な船舶の大型化は、港湾内を航行する船舶の水深/喫水比 H/d を著しく低下させ、想定していなかった大きな操縦特性の変化をもたらすことがある。港湾域での操縦性能を検討する上での浅水影響考慮の必要性は早くから指摘され、多くの研究がなされてきた。操縦性能の推定は、PMM 試験などの実験結果を基に数学モデルを構築して行われるのが一般的である。浅水域における操縦性能の変化は、共通の数学モデルが確立する以前から注目され、MMG 型数学モデルの成立当初でも、重要な課題としての位置付けがなされていた。

その後も、浅水域における操縦特性に関する研究は継続的に行われ、日本船舶海洋工学会プロジェクト研究委員会 P-34「船舶操縦性予測モデルの高度化に関する研究会」でも課題の一つとして取り上げられ、第28期 ITTC、Maneuvering Committee でも継続課題として取り掲げられている。また近年は、大規模な粘性流場の解析が比較的容易になったことを受けて、操縦運動中の流場解析への応用も広がり、浅水域での流場構造についても研究が行われるようになってきた。このような背景の基、本研究では浅水域を航行する船体に作用する流体力特性、特に低速横移動船舶の横力特性の極浅水域での挙動について、実験と数値シミュレーションにより、流体力学的なメカニズムを含めた説明を目指したものである。

2. 研究の目的

これまで行われてきた浅水影響に関する研究は、港湾内での一般的な航行状態や係留を想定し、主に水深/喫水比 $H/d=1.2\sim 2.0$ の範囲での流体力特性の調査が主流であった。一方、近年の船舶の大型化は、この範囲を越えた運航や水底堆積物による想定外の状態の発生が懸念され、 $H/d=1.2$ 以下の極めて浅い水域を含めた操縦流体力特性の検討が必要とされていた。研究者らは、この極めて水深が浅い領域では、流体力特性の非線形性が従来に比べて更に強くなることが予測され、詳細な調査が必要であると考えた。そこで本研究では、流体力計測とともに数値シミュレーションによる粘性流場の解析を実施し、流体力特性分析と挙動変化のメカニズム説明を目指したものである。

3. 研究の方法

(1) 実験概要

本研究では、新たに製作したタンカー船型模型を使用し、曳航水槽における流体力計測を行い、極浅水域における流体力特性変化のメカニズム説明を目指した。Table 1 に模型の主要目および主な実験条件を示す。実験は神戸大学浅長水槽 (幅 $B_{TT}=6.0\text{m}$) で行い、模型船は曳航装置に完全固定の状態で行い、運動により船体まわりの圧力場が変化す

ることによる姿勢変化は考慮されていない。また、本研究で行う実験および数値計算の対象船型には、舵およびビルジキールは装着されていないが、極浅水域における流体力特性の基本挙動と剥離流場との相関説明に研究目的の主眼を置き、ビルジキールを装着しない状態での検討を行うこととした。また、舵については数値シミュレーションのデータとの整合性から、装着しない状態での実験とした。

Table 1 Experimental condition.

Model	
Length: L_{pp} (m)	3.17
Breadth: B (m)	0.57
Draft: d (m)	0.19
Block coefficient: C_b	0.82
Midship coefficient: C_m	0.997
Measurement condition	
Towing speed: V (m/s)	0.04
Froude number: Fn	7.35×10^{-3}
Reynold's number: Rn	1.42×10^5
Water depth/ draft ratio: H/d	1.05~4.00
Restrict ratio: B_{TT}/L_{pp}	1.89

計測においては、模型を水槽長さ方向に曳航したために水槽幅/船長比が $B_{TT}/L_{pp}=2.0$ 以下となり、閉塞影響が無視できなくなった。本研究では無限水路における浅水影響を研究対象としているので、次節で述べる数値シミュレーションの結果を用いて閉塞影響を推定し、実験値の補正を行った。曳航速度は $V=0.04\text{m/s}$ を基準としたが、これは OCIMF が規定する係留力に関するガイドラインで指定されている条件と、フルード数が一致するように設定したものである。計測における水深/喫水比は、 $H/d=1.03\sim 5.00$ と広範囲で変化させ、特に $H/d=1.20$ 以下を極浅水域と呼び、この領域での流体力特性の調査を中心に行った。

(2) 数値計算概要

本研究では、流場構造の変化と流体力特性との因果関係を明らかにすることを目的として、数値シミュレーションによる流場解析を実施した。計算には OpenFOAM コードを用い、解法ならびに計算条件は Table 2 に示すものを用いた。いわゆる RANS 法を用いて船体まわりの流場推定を行う場合、乱流モデルを用いるのが一般的である。しかし、本研究の対象流場で発生する大規模剥離では、乱流モデルによる渦拡散の推定精度に課題が残ると言われている。本研究では、模型実験スケールではレイノルズ数が比較的低いこともあり、乱流モデルは使用せず、層流として計算を実行した。

Fig.1 に計算における境界条件および計算格子の概要を図で示す。本研究では船舶の横

移動を想定しているため、船体を空間に固定した上で、水底境界は想定する船体の移動速度、すなわち上流境界における一様流速度で移動する滑りなしの壁として与えている。計算における水路幅は $B_{TT}=30.0\text{m}$ とし、船長の約 10 倍として側壁影響が無視できる条件での計算を実施した。また、実験と同じ $B_{TT}=6.0\text{m}$ での計算を実施し、実験における側壁影響の推定に用いた。計算格子数は対象船型により異なるが、計算環境の制約から概ね 200~400 万セルで計算を行った。

Table 2 Principal dimension of target hull forms.

Computation codes	
Main source code	OpenFOAM Ver.2.1.1
Turbulence model	N/A
Solvers	SIMPLE, PISO
Number of cells	Up to 4.0×10^6
Calculation conditions	
Uniform flow speed: V (m/s)	0.04
Reynold's number: Rn	1.42×10^5
Water depth/draft ratio H/d	1.05~5.00
Channel width: B_{TT} (m)	6.0, 30.0
Boundary conditions	
Bottom	Non slip wall with advance speed
Load water plane/ Side wall	Slip wall
Inlet	Uniform flow
Outlet	Free gradient

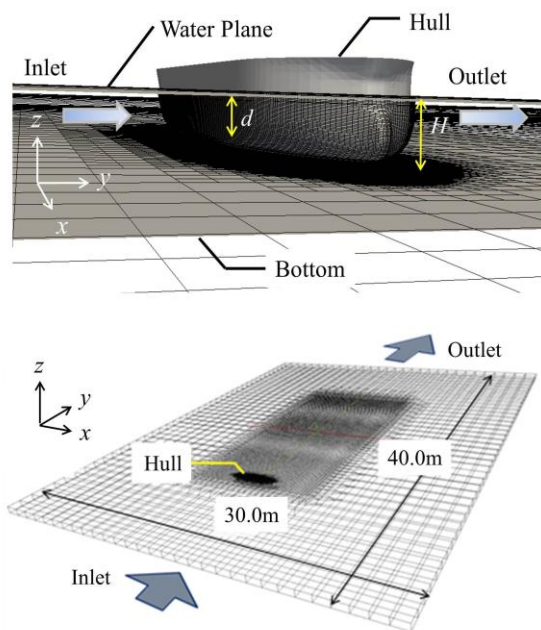


Fig.1 Boundary conditions and a schematic view of generated computational grids.

(3) 側壁影響の推定

本章(1)節でも述べたが、流体力計測は曳航水槽において行ったため、閉塞影響が無視できなくなった。本研究では、極浅水域における流体力特性変化の基礎メカニズムの調査を目的としていることから、計測結果から側壁影響を除く補正を行った。Fig.2 に、実験から得られた計測結果と数値シミュレーション (SIMPLE 法) で得られた計算結果の比較を示す。計算は $B_{TT}/L_{pp}=1.89, 9.46$ の 2 条件で行ったが、 $B_{TT}/L_{pp}=1.89$ の結果は水槽実験の条件であり、数値計算結果は実験結果とほぼ一致する。また、無限水路相当の $B_{TT}/L_{pp}=9.46$ との比較では、 $H/d=1.1$ 付近において流体力が側壁影響により約 2 倍になっていることが分かる。本研究では、計算で得られた 2 条件の流体力の比を基に計測結果を補正し、側壁影響の推定と除去を行った。Fig.2 に補正後の計測結果を Δ で示す。

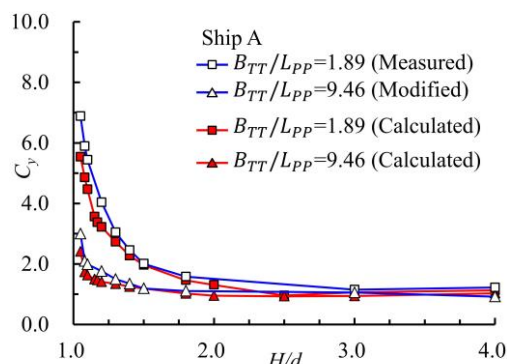


Fig.2 Comparisons of lateral force coefficients in open water and restricted channel.

4. 研究成果

(1) 模型実験と数値シミュレーションの相関

一般に知られているように、横移動船舶に作用する流体力は、浅水域において増大する。Fig.3 に、本研究で実施した流体力計測および数値計算の結果比較を改めて示す。比較は、無限水路相当 ($B_{TT}/L_{pp}=9.46$) の条件で行っている。数値計算による流場解析は、定常流を対象にした解法である SIMPLE 法と、非定常にも対応できる PISO 法の 2 種類の解法での計算を行った。Fig.3 に示した計算結果のうち、 \diamond と実線で示す結果は SIMPLE 法で得られた結果であり、 Δ は PISO 法の結果である。SIMPLE 法は、非定常性が強く現れると予測される本研究の対象流場では、信頼性の低下が懸念された。しかし、Fig.3 では PISO 法とは大きな差は見られず、SIMPLE 法でも十分に対応できていることが分かった。

実験値と数値計算結果は概ね良好な一致を示しており、 $H/d > 1.20$ の計算結果との差異は 10% 以内となっている。一方、本論文で議論の中心となる $H/d < 1.20$ の領域では、最大 20% の差異が現れる。これは、実験における過渡応答時定数の増大による推定定常値の不確かさ幅の拡大や、数値計算における格子数の限界に起因する解像度不足と精度限界

により、比較的大きな差が発生したと考えられる。しかし、この差異は本研究で目的とする H/d に対する流体力特性に関する議論を覆すほどの大きさではなく、定性的には特徴を捉えていると考えられる。そこで、ここでは、より条件の変更が容易な SIMPLE 法の計算結果を基に、水深に対する流体力特性の検討を進めた。

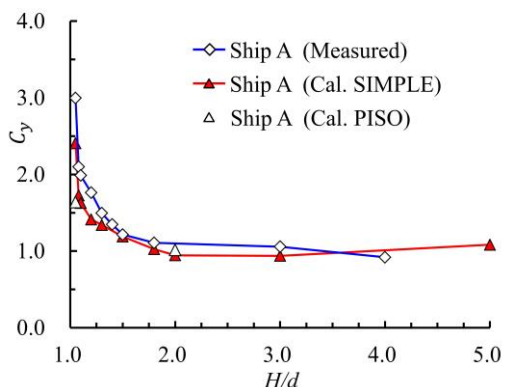


Fig.3 Comparison of lateral force coefficient changes according to water depth/draft ratio.

横力特性を詳細に検討すると、 $H/d=1.50$ 以上では横力係数はあまり変化せず、ほぼ一定の値を示すが、 $H/d=1.50$ 以下では水深の減少とともに横力は急激に増加し、 $H/d=1.10$ 以下では流体力は深水域での値の2倍以上に達する。ここで示す流体力特性は、模型船スケールでの結果であるが、 $H/d=1.20$ 以下の極浅水域において大きな特性変化があり、流場構造に変化が生じていることが推察される。次節以降で、この流体力特性の変化を発生させる流場構造の変化について、計算結果を基にして分析結果を示す。

(2) 時間平均圧力場と流体力特性の相関

Fig.4 に、SIMPLE 法で得られた時間平均流場における、船体表面圧力分布の変化を示す。ここでは、 $H/d=1.10, 1.30, 1.50, 1.80$ における比較を行った。一般的な傾向として、正面側船側では船体中央付近を中心に高压領域が広がり、背面側では大規模剥離に起因する低压領域が現れる。また、正面側での圧力勾配の方向に着目すると、 H/d が比較的大きい時にはガース方向に勾配が現れるのに対して、 H/d が小さくなると水平方向に勾配が変わり、特に船首尾付近で勾配が強くなる傾向が見られる。

船底平面部と曲率が大きいビルジ部を有する本船型では $H/d=1.80$ の場合には正面側ビルジ部に沿って、低压領域が現れる。この低压領域は船底剥離と連動していると考えられるが、 H/d が小さくなるに従って目立たなくなる。また、 $H/d=1.10$ のように極端に船底間隙が小さい場合には、船底におけるビルジ部に沿った低压領域は見られなくなる。研究者らは、この低压領域の消失が流場構造の大きな変化に深く関与し、その結果として前

節で述べた極浅水域における流体力特性をもたらしっていると考えている。

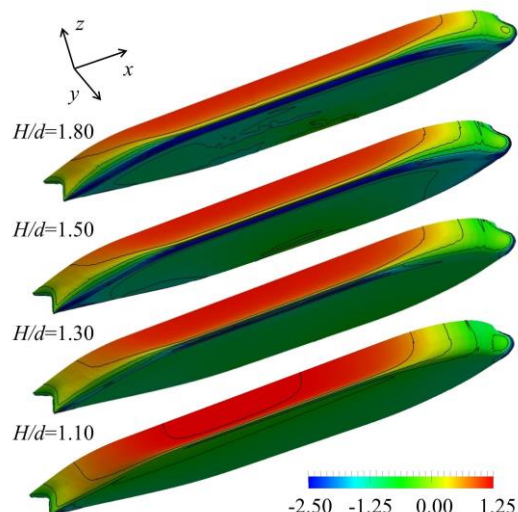


Fig.4 Comparison of surface pressure distributions.

(3) 流体力特性と流場構造の関係

次に、PISO 法の計算結果に基づき、流体力特性と流場構造の関係についての分析結果を示す。PISO 法の計算負荷は大きい、非定常流場に対応した解法であるので、SIMPLE 法では検討が難しかった剥離渦の構造の詳細などを分析することができる。PISO 法では、 $t=0$ (sec) において全域で一様流を与えて計算を開始し、時系列での剥離渦の発達過程を得ることができる。本研究では、船体に作用する横力のうち、定常成分を検討対象としているので、剥離渦が十分に発達し、安定した時刻の渦構造を対象とする必要がある。ここでは、 $t=300$ (sec) 付近での計算結果を示すが、これらは計算開始から船体の移動距離が船幅比で $l=20B$ となる時刻である。

Fig.5 に正面側流線分布の水深による変化を示す。ここで流線の色は、流速(絶対値)の大きさを表している。Fig.5(a)は、 $H/d=2.00$ で得られた結果であるが、正面側船側の流れは概ねガース方向に流れ、船底を通り抜けて背面側に流れ込むのが分かる。Fig.4 に示した圧力分布で観察された正面側ビルジ部に平行に現れる低压領域は、この流れが曲率の大きいビルジ部を回り込むときに発生するものであり、船底剥離の原因にもなっている。一方、Fig.5(b)に示す $H/d=1.05$ の場合には、船底を通る流線の数が減り、船底の流れが制約されていることが分かる。また、船側における流れは、水平方向が主となり、船首尾を回り込む流れが顕著となる。船底における流れの制約は、「塞き止め効果」と呼ばれる現象であり、船底における圧力損失が増大して発生すると考えられる。Fig.4 で観察された $H/d=1.10$ における船底の低压領域の消失や Fig.5(b)で見られる上流側での流れのパターンの変化は、この塞き止め効果と連動しており、次節で述べる背面剥離領域の大きな変化をもたらししている。

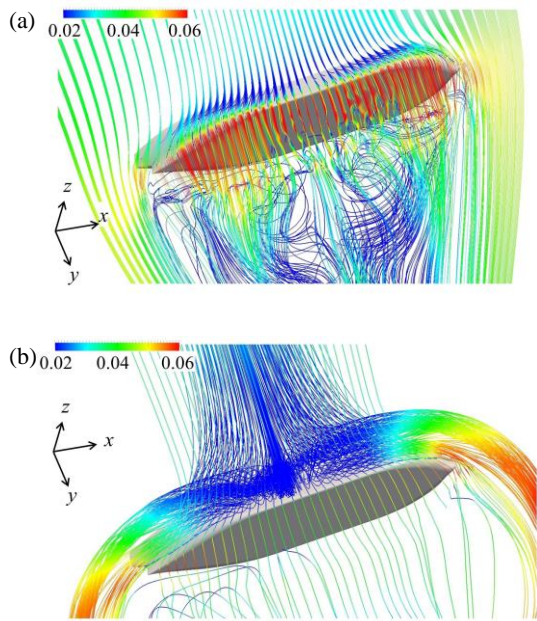


Fig.5 Upstream flow pattern change, (a) $H/d=2.00$, (b) $H/d=1.05$.

(3) 船体背面剥離渦構造の変化

Fig.6 に背面に形成される剥離渦構造の変化を示す。Fig.6(a)は $H/d=2.00$ の場合であるが、背面船側では剥離渦は船体に平行な x 方向に軸をもつ渦が主となり、背面全体では船首尾から発生する z 軸方向の軸をもつ渦と複合して、3 次元的な剥離流場が形成される。剥離領域の大きさは y 方向に船幅の 2~3 倍程度であり、渦構造は安定しており、計算時刻を進めても渦はこれ以上には大きく発達しない。

Fig.6(b)は $H/d=1.05$ の場合であるが、前節で述べたように船底塞き止め効果により、背面側への流入は船首尾をまわり込む流れが主となる。したがって、背面の渦構造は船首尾で発生する剥離渦が支配的になり、2 次元的な渦構造が形成される。Fig.6(c)に、 $H/d=1.05$ の場合の背面渦構造の全容を示す。本結果は、 $t=285$ (sec) ($l=20B$) の渦構造であるが、船体背面に大規模な双子渦が形成されており、剥離領域の後端の目安となる流線の結節点の位置までの y 方向距離は約 $15B$ に達する。背面渦構造は、この状態で一旦安定するが、時間を更に進めると、やがて周期的な渦放出へと移行する。

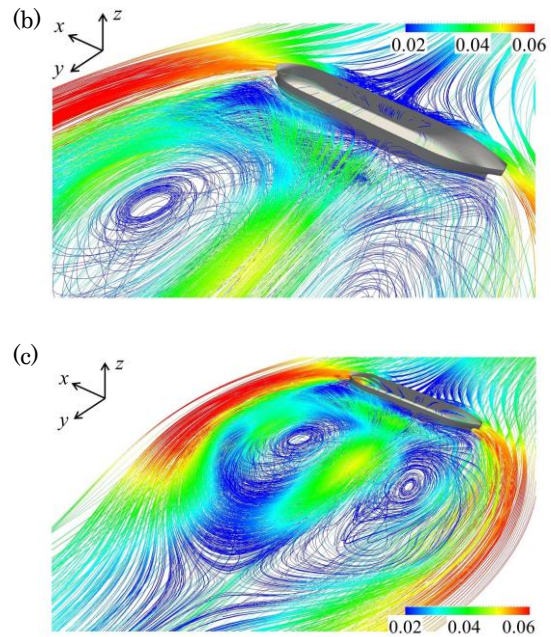
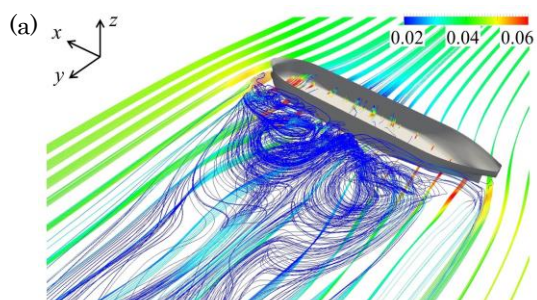


Fig.6 Downstream flow pattern change, (a) $H/d=2.00$, (b) $H/d=1.05$, (c) $H/d=1.05$ (overview).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

1. 中村梓乃, 西尾 茂, 勝井辰博, 尾崎瑠菜, 極浅水域における横移動船舶に作用する流体力の特性変化, 日本船舶海洋工学会講演論文集, Vol. 17, pp. 311-314, 2013 年 11 月. 審査無
2. 尾崎瑠菜, 勝井辰博, 西尾 茂, 中村梓乃, 極浅水域における横移動船舶に作用する流体力の特性変化 第 2 報: 船型要素が及ぼす影響について, 日本船舶海洋工学会講演論文集, Vol. 18, pp. 351-354, 2014 年 5 月. 審査無
3. 勝井辰博, 西尾 茂, 尾崎瑠菜, 中村梓乃, 極浅水域における横移動船舶に作用する流体力の特性変化に関する研究, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 22 号, pp. 67-73, 2015 年 12 月. 審査有

[学会発表] (計 3 件)

1. 中村梓乃, 西尾 茂, 勝井辰博, 尾崎瑠菜, 極浅水域における横移動船舶に作用する流体力の特性変化, 日本船舶海洋工学会秋季講演会, 2013 年 11 月 21 日-22 日, 大阪.
2. 尾崎瑠菜, 勝井辰博, 西尾 茂, 中村梓乃, 極浅水域における横移動船舶に作用する流体力の特性変化 第 2 報: 船型要素が及ぼす影響について, 日本船舶海洋工学会春季講演会, 2014 年 5 月 26 日-27 日, 仙台.
3. 高松賢一, 西尾 茂, 勝井辰博, 次世代曳航水槽における高度試験管理法の構築に関する研究 - 模型プロペラに起因する高次不確かさの抽出と解析 -, 日本船舶海洋工学会講演論文集, Vol. 20,

pp. 259-262, 2015年5月25日-26日, 神戸.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西尾 茂 (NISHIO SHIGERU)

神戸大学・大学院海事科学研究科・教授

研究者番号：30208136

(2) 研究分担者

勝井辰博 (KATSUI TOKIHIRO)

神戸大学・大学院海事科学研究科・准教授

研究者番号：80343416