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

正会員 勝 井 辰 博* 正会員 西 尾 茂*
正会員 尾 崎 瑠 菜** 正会員 中 村 梓 乃***

Behavior of Hydrodynamic Force Acting on Lateral Motion Ships in Extreme Shallow Water

by Tokihiro KATSUI, *Member* Shigeru NISHIO, *Member*
Runa OZAKI, *Member* Shino NAKAMURA, *Member*

Summary

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 $H/d < 1.20$ 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.

1. 緒 言

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。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解明を目指した。

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¹⁾²⁾、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。³⁾⁴⁾ MMG 型数学モデルにおいて浅水影響を考慮する場合、流体力微係数の変化として取り扱うのが最も合理的であるとの研究成果⁵⁾や、それに必要な各要素の流体力特性の変化⁶⁾⁷⁾とともに、前進速度に対

して横流れや回頭運動が卓越する場合の数学モデルの改善⁶⁾が精力的になされ、現在では実用上の精度が確保されるに至っている。

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」⁸⁾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⁹⁾¹⁰⁾も広がり、浅水域での流場構造についても研究¹¹⁾が行われるようになった。本研究は、タグ操船¹²⁾や係留船舶に対する潮流力¹³⁾の推定など応用範囲が広く、流場構造の解明とともに研究の進展が望まれている。

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 $H/d=1.2\sim 2.0$ 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る。著者らは、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。そこで前報¹⁴⁾において、通常の航行状態を越えた条件での運航を想定し、極浅水域を含めた水域での流体力特性の試験法について検討を行ってきた。本論文は、これを更に進め、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解明を目指したものである。

* 神戸大学大学院海事科学研究科

** ジャパンマリユナイテッド株式会社
(研究当時、神戸大学大学院在学)

*** 川崎重工工業株式会社(研究当時、神戸大学大学院在学)

原稿受理 平成 27 年 2 月 25 日

2. 模型実験および数値計算の概要

2.1 実験概要

本研究では、Table 1 に主要目を示すタンカー船型について曳航水槽における流体力計測を行い、次節で述べる数値シミュレーション結果と合せて、極浅水域における流体力特性変化のメカニズム解明を目指した。実験は神戸大学浅長水槽（幅 $B_{TT}=6.0\text{m}$ ）で行い、計測装置は既報¹⁴⁾と同じものを用いた。模型船は曳航装置に完全固定の状態で計測を行い、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。従って、実際の運航状態におけるヒープ、ロール、ピッチが生じることによる流体力挙動変化は、別途調査する必要がある。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。ビルジキールの有無は、低速横移動時の操縦流体力に少なからず影響を及ぼすことが予測されるが、実船との対応において境界層厚さとビルジキール高さの関係やビルジキールからの剥離渦の船体表面への再付着など、不確定な要素が多数混在する。そこで本研究では、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解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。舵およびビルジキールや、その他の付加物の影響は、実船運航時のタグ操船の必要馬力の推定などにおいて尺度影響とともに重要な課題であるので、これらについても別途検討する必要がある。

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。本論文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、2.3 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。

流体力計測の実験条件を、Table 1 に示す。曳航速度は $V=0.04\text{m/s}$ を基準としたが、これは OCIMF¹⁵⁾ 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行った。

Fig. 1 A sample of towing speed and measured hydrodynamic force at $H/d=1.08$.

Fig.1 に、 $H/d=1.08$ において計測された流体力の時系列変化の一例を示す。船体に作用する横力は、(1)式で定義する横力係数 C_y で評価した。本実験では、曳航速度が極めて低く、通常の曳航台車では安定した曳航速度の管理が難しいため、高精度の速度制御が可能な微速曳航装置を用いて実験を行った。微速曳航装置においては、曳航距離が制約され、極低速の $V=0.04\text{ m/s}$ の場合でも計測時間は20秒以下に限定される。このため、Fig.1 に示すように H/d が小さく、過渡応答成分の減衰が遅くなる場合には、単純な時間平均処理では計測値の推定精度に問題が生じた。具体的には、Fig.1 で見られるように、計測値には周期5秒程度の変動があり、しかも過渡応答成分が計測値後半でも残存しているため、区間平均をとるだけでは計測値は大きくばらつく。そこで、慣性力の減衰も考慮した上で、不要な振動成分の除去ができるよう、(2)、(3)式で計測値の過渡応答を近似し、定常値の推定を行うこととした。(2)式では、計測値が定常成分と過渡応答成分に分離できると仮定し、(3)式では過渡応答成分は線形挙動の仮定から導かれる指数関数で近似できるとした。

$$C_y = \frac{F_y}{\rho U^2 L d / 2} \quad (1)$$

$$C_y(t) = C_{y0} + C_a(t) \quad (2)$$

$$C_a(t) = M \exp(-\beta t) \quad (3)$$

関数近似の妥当性は、近似曲線まわりの計測値のばらつきで評価できる。計測値の近似曲線まわりの分散値は(4)式で与えられるが、近似曲線の推定精度は(5)式で評価できる¹⁶⁾。

ここで、 N は使用する計測値の数、 M は近似曲線に含まれるパラメータ数であり、本解析では $M=2$ となる。本論文での計測結果では、相対値で5%以下の精度を有している。

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-M} \sum_{i=1}^N \{C_y(t) - \tilde{C}_y(t)\}^2 \quad (4)$$

$$\bar{\sigma}^2 = \frac{\sigma^2}{N} \quad (5)$$

2.2 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。本論文では、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。

Table 2 Principal dimension of target hull forms.

Computation codes	
Main source code	OpenFOAMVer.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.2 に計算における境界条件および計算格子の概要を示す。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。

Fig. 2 Boundary conditions and a schematic view of generated computational grids.

2.3 側壁影響の推定

2.1 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.3 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.3 に補正後の計測結果を△で示す。

Fig. 3 Comparisons of lateral force coefficients in open water and restricted channel.

3. 流体力特性の浅水影響による変化

3.1 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.4 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 ($B_{TL}/L_{pp}=9.46$) 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.4 に示した計算結果のうち、◇と実線で示す結果は SIMPLE 法で得られた結果であり、△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.4 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。

Fig. 4 Comparison of lateral force coefficient changes according to water depth/draft ratio.

また、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、この差異は本論文で目的とする 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、本論文では、より条件の変更が容易な数値計算結果を基に、水深に対する流体力特性の検討を進めた。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。

Fig. 5 Comparison of surface pressure distributions.

3.2 時間平均圧力場と流体力特性の相関

Fig.5 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圧領域が広がり、背面側では大規模剥離に起因する低圧領域が現れる。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。

船底平面部と曲率の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、低圧領域が現れる。この低圧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、船底における低圧領域は見られなくなる。著者らは、この低圧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ていると考えた。

4. 流体力特性と流場構造の関係

4.1 流場構造変化と流体力特性の関係

本節では、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 法は計算負荷は大きい、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 $t=20B$ となる時刻である。

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

Fig. 6 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. 6(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. 5 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圧領域は、この流れが曲率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. 6(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. 5 で観察された $H/d=1.10$ における船底の低圧領域の消失や Fig. 6(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ている。この流場変化をより明確に表すことを目的として、Fig. 7 に中央縦断面における y 方向の流速成分 v の分布を示す。Fig. 7 においては、一様流速 ($V=0.04$ m/s) を基準に加速域がどこに現れるかを分析することで、流場構造の変化を定量的に把握することができる。Fig. 7(a) は $H/d=2.00$ の場合であるが、加速域は主に船底に現れ、Fig. 6(a) で観察された船底をまわり込む流れを明示的に示すことができています。一方、Fig. 6(b) は $H/d=1.05$ の場合であるが、加速域は船首尾に広がり、Fig. 6(b) で示した流場構造の変化を定量的に捉えることができる。Fig. 7(b) において観察される船首尾を回り込む流れは、ここで剥離を発生させ、次節で述べる背面側の渦構造の大規模な変化の原因となっている。

4.2 船体背面剥離渦構造の変化

Fig. 8 に背面に形成される剥離渦構造の変化を示す。Fig. 8(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. 8(b) は $H/d=1.05$ の場合のものであるが、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. 8(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) ($t=20B$) 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. 7 Comparisons of velocity distributions of cross flow component at longitudinal center plane. (a) $H/d=2.00$, (b) $H/d=1.05$.

Fig. 8 Downstream flow pattern change.
(a) $H/d=2.00$, (b) $H/d=1.05$, (c) $H/d=1.05$ (overview).

5. 結言

浅水域において低速横移動する船舶に作用する横力の特性について、模型実験ならびに数値シミュレーションにより、流場構造の変化との関係を調査した。特に $H/d=1.20$ 以下の極浅水域での挙動に着目すると、船長 3m 程度の模型船スケールでは流場構造が大きく変化し、流体力が急激に増加することを示した。また、この特性変化は、船底と水底の間の間隙流れにおいて圧力損失により発生する塞き止め効果を発端として、背面剥離流場の構造が大きく変化することによることを数値シミュレーションによる流場解析により明らかにした。本研究で得られた成果は模型スケールで得られた知見であるが、極浅水域における大きな特性変化の可能性を示唆する基礎データが得られたと考えられる。

本論文を終えるにあたり、模型製作ならびに数値シミュレ

ーションの実施に必要な船型データの提供をいただいた、ジャパンマリニュナイド株式会社の関係者に感謝申し上げます。なお、本研究の一部は、科研費 25420886 の助成を受けたものです。支援をいただいた関係各位に、感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 井上正祐, 村上紘二, 浅水中を旋回する船の微係数の計算について, 西部造船会々報, 第 37 号, 1968, pp.73-85.
- 2) 貴島勝郎, 浅水域において Yawing しつつ前進する矩形板に働く力の計算, 西部造船会々報, 第 43 号, 1971, pp.45-54.
- 3) 平野雅祥, 湯室彰規, 野中晃二, 小林弘明, 浅水域における操縦性能の推定, 日本造船学会誌, 第 668 号, 1985, pp.45-57.
- 4) 貴島勝郎, 芳村康男, 深澤塔一, 浅水域および低速時における操縦特性, 第 4 回運動性能研究委員会シンポジウム「操縦性能の予測と評価」, 日本造船学会, 1987, pp.133-189.
- 5) 芳村康男, 浅水域の操縦運動数学モデルの検討 — MMG モデルの浅水域への適用について —, 関西造船協会誌, No.200, 1986, pp.41-51.
- 6) 芳村康男, 浅水域の操縦運動数学モデルの検討 (第 2 報) — 低速操船時, 主船体に働く流体力について —, 関西造船協会誌, No.210, 1988, pp.77-84.
- 7) 藤野正隆, 石黒 剛, 浅水域における操縦数学モデルの検討 — とくに舵利きパラメータに対する浅水影響 —, 日本造船学会論文集, No.156, 1984, pp.180-192.
- 8) P34 船舶操縦性予測モデルの高度化に関する研究会報告書, 日本船舶海洋工学会, 2014.
- 9) C.D. Simonsen, F. Stern, RANS Maneuvering Simulation of Esso Osaka with Rudder and a Body-Force Propeller, Jour. of Ship Research, 2005, Vol.49, No.2, pp.98-120.
- 10) P.M. Carrica, F. Ismail, M. Hyman, S. Bhushan, F. Stern, Turn and zigzag maneuvers of a surface combatant using a URANS approach with dynamic overset grids, Jour. of Marine Science and Technology, 2013, Vol.18, Issue 2, pp.166-181.
- 11) 李 允石, 戸田保幸, 定兼廣行, 低速横移動下の船体に働く流体力に関する研究 — IV — 3 次元 CFD 法を用いた浅水域の計算 —, 日本航海学会論文集, No.108, 2003, pp.59-66.
- 12) 高品純志, タグによる操船運動とその計算法について, 日本造船学会論文集, No.160, 1986, pp.93-102.
- 13) 小保方準, 佐々木紀雄, 永島実郎, 模型試験による船体に働く潮流力の推定, 関西造船協会誌, No.180, 1981, pp.47-57.

- 14) 松田識史, 西尾 茂, 志道敏雄, 高木俊宏, 離着岸時における非定常流体力解析法の開発 ―曳航水槽における低速横移動試験法の提案―, 日本船舶海洋工学会論文集, 2009, No.10, pp.153-158.
- 15) OCIMF, Prediction of Wind Current Loads on VLCC's, 2nd Edition, 1994.
- 16) JCGM 100: Evaluation of Measurement Data –Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, 2008, p.10; p.72.