



岸壁係留船の津波来襲時の安全性に関する研究

米田, 翔太

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2018-03-25

(Date of Publication)

2019-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第7220号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1007220>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博士論文

岸壁係留船の津波来襲時の安全性に関する研究

平成 30 年 1 月

神戸大学大学院海事科学研究科

米田 翔太

目次

| | |
|----------------------------------|----|
| 第1章 緒言 | 3 |
| 1.1 研究背景 | 3 |
| 1.2 研究目的 | 6 |
| 第2章 津波予測 | 8 |
| 2.1 津波伝播シミュレーション | 8 |
| 2.2 鹿島港 | 9 |
| 2.3 大阪港 | 11 |
| 第3章 緊急離岸時に船舶に働く岸壁影響 | 14 |
| 3.1 模型船 | 14 |
| 3.2 実験装置 | 14 |
| 3.3 実験条件 | 15 |
| 3.4 基礎方程式 | 16 |
| 3.5 実験結果 | 17 |
| 3.5.1 一定速度の横移動実験 | 17 |
| 3.5.2 浅水影響 | 18 |
| 3.5.3 基礎方程式の妥当性 | 20 |
| 3.5.4 一定加速度の横移動実験 | 22 |
| 3.6 岸壁影響 | 27 |
| 3.7 岸壁影響の定量化 | 27 |
| 3.8 岸壁影響の定式化 | 30 |
| 3.9 緊急避難シミュレーション | 31 |
| 3.10 結論 | 33 |
| 第4章 岸壁係留船が受ける流体力に関する実験的研究 | 35 |
| 4.1 係留中船舶を襲う津波流 | 35 |
| 4.2 岸壁模型と実験装置 | 35 |
| 4.3 実験条件 | 37 |
| 4.4 座標系 | 37 |
| 4.5 実験結果 | 38 |
| 4.5.1 岸壁なし | 38 |
| 4.5.2 岸壁有り | 40 |
| 4.5.3 模型船の取り付け位置の影響 | 41 |

| | | |
|-------|----------------------------|----|
| 4.5.4 | 固定岸壁との比較..... | 44 |
| 4.5.5 | 模型船の取り付け角度の影響..... | 46 |
| 4.6 | CFD..... | 56 |
| 4.6.1 | 計算手法概要..... | 56 |
| 4.6.2 | 計算格子..... | 57 |
| 4.6.3 | 計算結果..... | 59 |
| 4.6.4 | 考察..... | 60 |
| 4.7 | 考察と提案..... | 69 |
| 4.7.1 | 岸壁影響の大きさの目安..... | 69 |
| 4.7.2 | 係留強化への利用方法..... | 69 |
| 4.7.3 | 横傾斜への影響..... | 71 |
| 4.8 | 結言..... | 72 |
| 第5章 | 結論..... | 73 |
| | 謝辞..... | 75 |
| | 参考文献..... | 76 |
| | 付録..... | 78 |
| | VLCC 岸壁係留船が受ける流体力実験結果..... | 78 |
| | 実験装置及び実験条件..... | 78 |
| | 岸壁あり実験結果..... | 78 |
| | 固定岸壁との比較..... | 81 |

第1章 緒言

本研究は、津波来襲時の岸壁係留船に対する避難行動や安全性評価に関する基礎研究である。

1.1 研究背景

日本列島は、4枚のプレートの境界付近に位置している世界でも有数の地震多発地域である。駿河湾から四国沖にかけての海底には南海トラフと呼ばれるプレートの境界があり、100～150年周期で大規模な地震と共に大きな津波を引き起こしている。また、2011年3月11日には東北宮城沖を震源とした東北地方太平洋沖地震により、それに伴う巨大津波によって大きな被害が発生した。

この巨大津波は、陸域にのみ注目されてきた地震津波対策だけでなく、沿岸や船舶への津波対策の必要性を示した。巨大地震によって引き起こされた巨大津波は、地震被害との関連が少ないと見られていた港湾内の船舶をその強力な水平流によって漂流させ、大きな水位変動により船を陸に乗り上げさせ、大きな被害[1-6]を発生させた。Fig. 1に地震に伴う巨大津波によって茨城県鹿島港の岸壁係留船舶が漂流した事例のAIS受信データを元に描いた航跡図を示す。

このことから、船舶が地震津波による被害を拡大させることがあり、津波の来襲が予想された場合には速やかに港湾から避難することが望ましいと思われる。その考えを支持するように、漂流による被害拡大だけでなく、津波の来襲を適切に予測し、港外への避難を行うことで、安全に津波をやりすごした船があったこともAIS受信データは示している。Fig. 2は鹿島港において避難操船を開始した時刻と、図中右上赤線で示したラインを通過した時刻を示している。主には中小型船ではあったが、地震後の津波の来襲を予測して未然に避難できており、震源の位置や港湾の特性、船舶の特性によっては安全に津波来襲前に港外への避難が可能であったことがわかる。

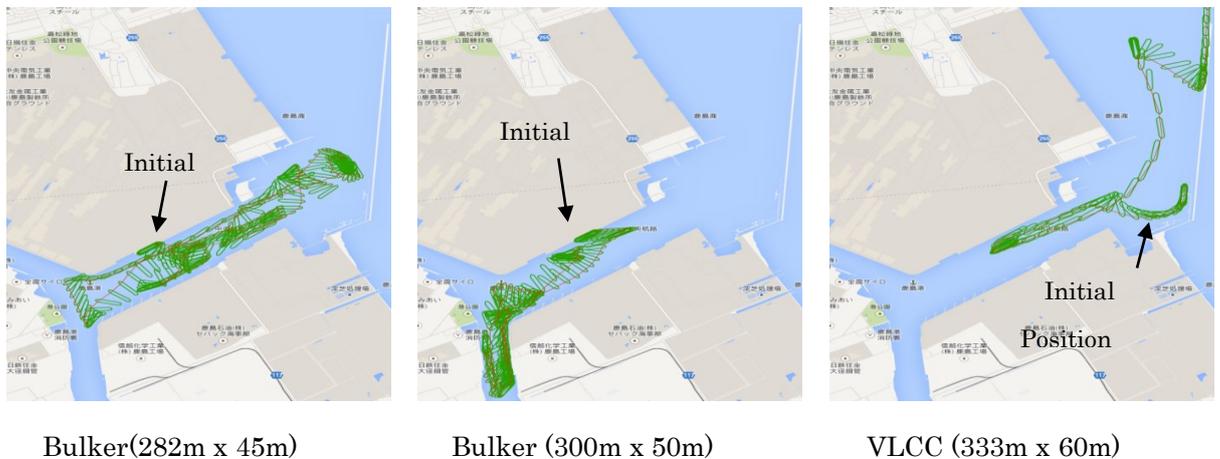


Fig. 1 Drifting ship behavior under tsunami attack at Kashima Port

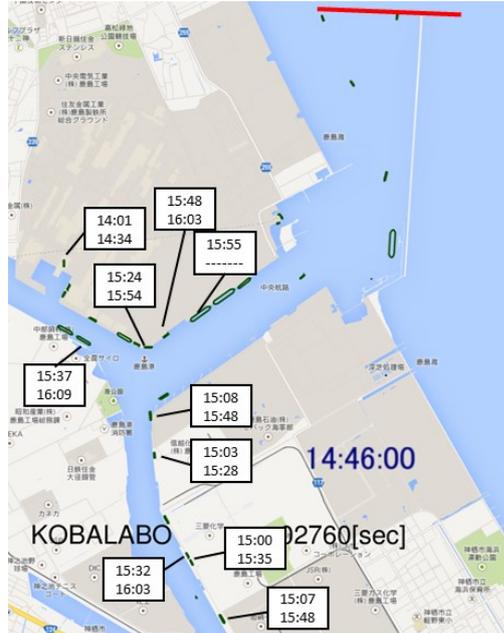


Fig. 2 Actual evacuation time at Kashima port

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震の発生以前は、主として南海トラフでの地震津波が注目されており、大規模な近代港である神戸港・大阪港を有し、津波来襲までに時間的な余裕がある大阪湾について、船舶の津波対策についての研究[7][8]が行われてきた。この当時の南海トラフ地震の想定規模に従った津波の予測下では、港内の船舶だけでなく湾内の船舶においても友が島水道や明石海峡を通過して大阪湾の外へ避難することを想定した検討を行っていた。しかし、想定外と言われた東北地方太平洋沖地震が発生して以降は、南海トラフでの地震・津波の最大規模が大幅に見直された。そのため、新たな地震想定と、津波被害の経験を踏まえた対策が必要となっている。

これをうけ、港湾事業者等による津波避難マニュアルや、そのマニュアル作成の手引き[3-5]などが整備されてきている。それらのマニュアルに共通している重要な指針は、まず情報収集を行い、次に各船の状況に応じて港外避難や係留強化を行うとなっている。しかし、船の個別の状態から港外避難までにはさまざまな時間的な制約があり、それを一つのマニュアルだけで示すことは難しい。また、被害報告書[1][2]にもあるように、船舶が避難しようと離岸したが、その直後に津波を受けて港内を漂流した事例もある。これは津波来襲直前まで陸側の作業者が作業に従事していたことを示す危険な状態であり、係留していれば漂流することなく津波をやりすごせた可能性もある。

このことから、津波避難行動には津波来襲までの時間に大きな制約があるため、当初の地震規模に対応した対策と、その後の刻々と迫る津波状況も加味した危険状況と対応指針を示すことが重要である。以上より、津波来襲までの時間が刻々と変化する中で船舶の動態にも対応できる船舶避難用の津波リアルタイムハザードマップの提案を行う。Fig. 3に提案するコンセ

プトチャートを示す。このハザードマップを作成・運用するためには、事前に様々なデータを作成しておく必要がある。特に港湾管理データベース内の避難必要時間については、大型船の港外避難の可否判断として特に重要なデータのの一つである。また、津波対策としての係留強化については、地震・津波の規模が非常に大きい場合を除いては、港外避難よりも係留強化のみで津波対策を行う方が低コストであり、その後の復旧も容易であると考えられるため、注目度が高まっている。

以上より、船舶に対する総合的な津波対策の視点から、岸壁に係留している大型船舶に対する避難の可否判断と、津波来襲中の係留強化の評価が急務となっている。

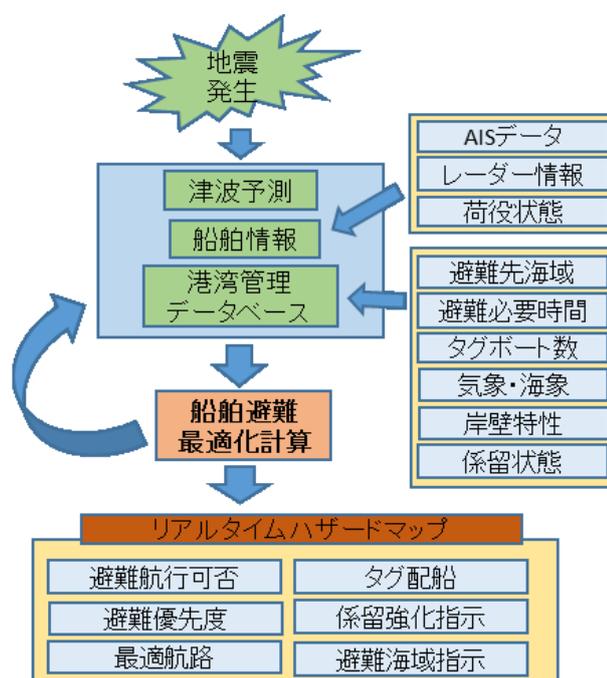


Fig. 3 Concept of real-time tsunami hazard map for ships

しかし、これらの評価を正確に行うためには、基礎データが不足している。まず、大型船舶の港外への避難の可否判断については、「時間」に基づく情報が必要となる。津波来襲時のような非常時ではなく、十分な準備・手配が容易な平常時の港外への航行に要する時間については、AIS(自動船舶識別装置)の受信データを用いることで得ることができる。ただし、これは陸上側にも必要な人員が配置されており、パイロットによって、十分なタグボートの支援のもとに得られる最速の航行時間となる。そのため、特にタグボートの支援が十分に得られない状況については、操縦シミュレーションによる推定が必要となる。

津波下においても船舶が通常に近い航走状態にある場合については、その計算手法は概ね確立されている[8]。しかしながら、岸壁に係留された船舶が緊急離岸する際の船舶と岸壁の相互作用である岸壁影響については、広く知られた船舶と海底の相互作用である浅水影響に比べて研究例が乏しいのが現状である。特に、離岸時に船舶に働くサクション力として知られる岸壁

影響が津波避難のための緊急離岸に及ぼす影響については検討例がないようである。船舶の港外避難に要する時間の正確な推定は、避難マニュアル策定やダイナミックハザードマップの作成に欠くことのできない課題であるにも関わらず、緊急時の避難時間への影響が懸念される岸壁影響についての検討やサクション力を簡便に推定可能な推定式の提案が十分になされていないことは問題である。

次に、港外避難を行わずに岸壁に係留された状態で港湾に留まる船舶に対して、津波の強い流れが来襲した際にどのような力が船舶に作用するかを検討した例は少ない。

岸壁係留船に対する既存の研究としては、増田ら[9][10]が粒子法のひとつである MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法を用いて、岸壁係留中の船舶に巨大津波が襲来した際のシミュレーションを行っている。粒子法は、船舶が岸壁に乗り揚げるような極端な状況予測に対しては非常に有効であるが、港湾内を船舶が漂流する場合や岸壁付近での船体に働く流体力推定に対しては、その限りではない。極端に水位変動の大きい巨大津波を除けば、水位変動よりも水平流に注目して係留強化を議論するのが自然である。この点については、岸壁係留ではなく沖棧橋係留が行われた VLCC の鹿島港の事例について、榊原ら[11][12]によって研究されており、船舶に働く流体力については、模型船の浅水斜航試験から得られる抵抗係数が主に用いられている。沖棧橋は津波による流れをあまり阻害しないため、相互作用を無視することで船体に作用する流れを一樣流とみなすことができるが、岸壁に係留している船舶に津波のような強い流れが作用する場合には、このような方法を用いることができない。そのため久保ら[13]によって、岸壁の影響も考慮したストリップ法の拡張が行われている。しかし、津波のような長周期の現象については、流体现象を「波」ではなく「流れ」とみなす方が自然であると考えられる。岸壁付近での流れや流体力の研究に関しては、操縦性の問題として知られている側壁影響の研究[14]が過去に多く行われている。しかし、これは岸壁と船舶との相対速度がゼロとなる津波下での係留状態とは環境が異なるため、従来の固定壁と移動船舶に対する側壁影響の成果をそのまま津波現象に用いることは早計であろう。また、井関ら[15]の回流水槽の側壁を用いた研究は、係留船舶と津波現象に似た実験環境ではあるが、操縦性に主眼を置いているため、側壁との船舶の間に距離がある。

このように、岸壁係留船に津波の強い水平流が作用する場合の流体力については、十分に研究が行われていないのが現状である。

1.2 研究目的

本研究は、海上における津波防災・減災の観点から、特に岸壁に係留している船舶についての研究を行うことを目的とする。

はじめに、岸壁影響として知られるサクション力について、模型船を用いた水槽試験により岸壁から離岸する際に船舶に働く流体力の計測を行い、岸壁影響の抽出を行った。また、離岸時の岸壁影響を推定するための実務的なモデル構築を行った。さらに、岸壁影響が津波来襲時

の緊急港外避難に要する時間に及ぼす影響について検討を行った。

次に、岸壁に係留している船舶に津波のような強い水平流が作用する場合に、船体にどのような流体力が発生するかを明らかにするため、模型船と岸壁を模した垂直壁の位置関係を保ったままで両者を同時に曳航する水槽試験を実施し、船体に作用する流体力の計測を行った。さらに、計測された流体力の解析結果をもとに、津波対策としての係留強化を議論するために、一般的な強風対策との比較検討を行った。

第2章 津波予測

2.1 津波伝播シミュレーション

はじめに，東日本大震災において鹿島港を襲った津波及び，南海トラフ地震の発生で想定されている津波が大阪港にどのように来襲するかについて，流速と流向に着目して検討を行った。

東日本大震災における津波波源モデルについては，佐竹・藤井ら[16]のモデルとし，内閣府提供の海底地形データを用いて馬場ら[17]が作成したJAGURS[18]を用いて，非線形分散波論に基づき遡上を含めた津波伝播シミュレーションを鹿島港に対して行った。ただし，防波堤については，海底地形として含まれている情報のみを用いることとし，特別な処理は行わない。

大阪港については，東北地方太平洋沖地震以降に内閣府[19]が作成した南海トラフでの断層モデル(11ケース)の中から大阪湾に最も巨大な津波が襲来すると想定されるケース3を用いて，鹿島港と同様のシミュレーションを行った。Fig. 4に南海トラフにおける初期水位変動を，Fig. 5に東北沖の初期水位変動を示す。図中の横軸縦軸は計算原点からの距離をメートル単位で示している。

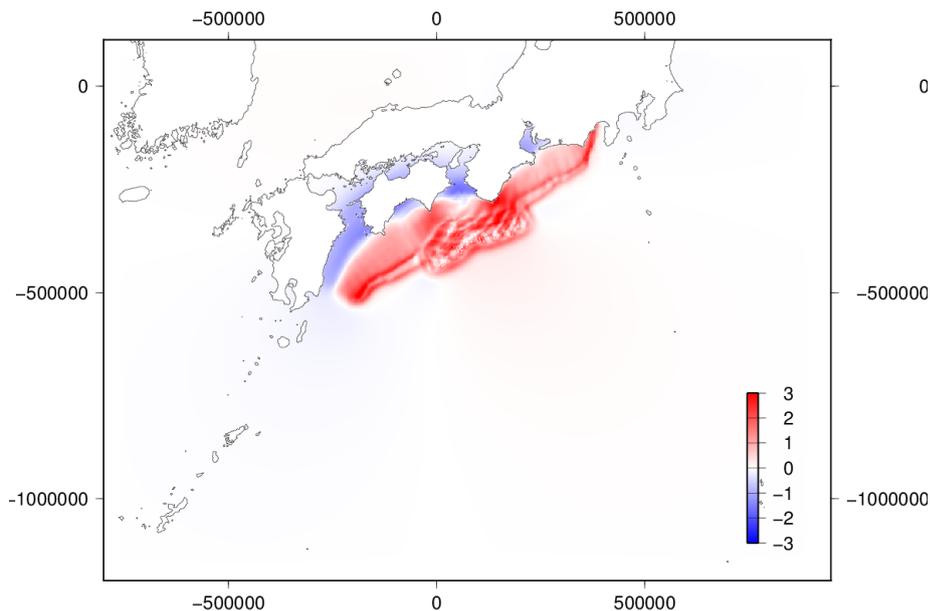


Fig. 4 Distributions of initial tsunami height models in Nankai-trough (after 210sec)

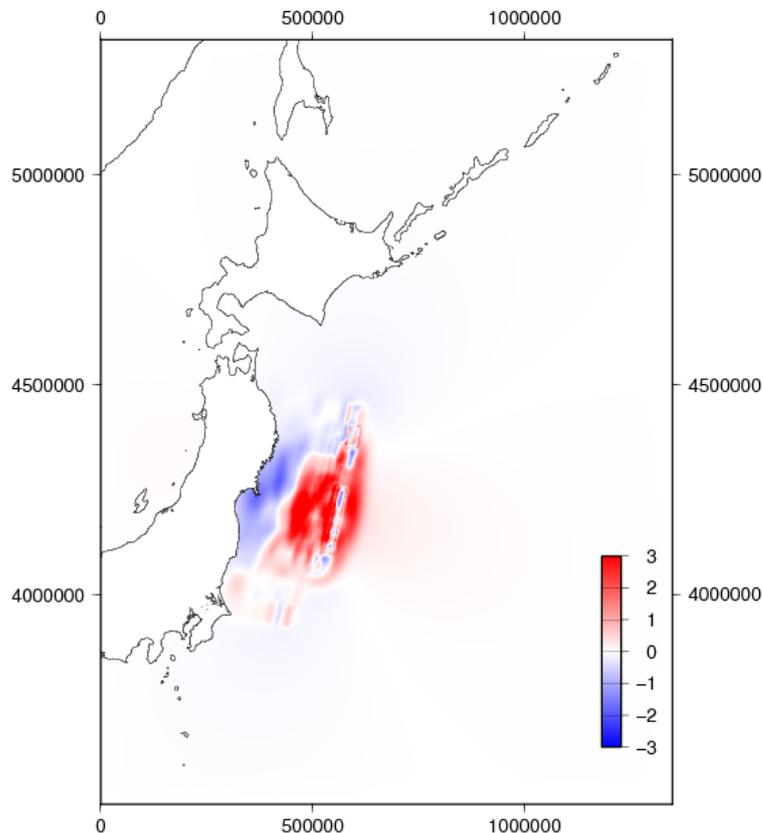


Fig. 5 Distributions of initial tsunami height models in Tohoku (after 300sec)

2.2 鹿島港

50[m]メッシュで計算を行った鹿島港の津波伝播シミュレーション結果について、地震後約4000秒で発生した強い引き波を Fig. 6 に示す。また、地震発生後の8000秒間に現れた最大流速の分布を Fig. 7 示す。この分布図より、鹿島港における最大流速は約4.5[m/s]と推測される。水路部の中央では流速が早くなり、岸壁近傍では流速がやや遅くなる傾向がある。次に流れの方向をみると、港湾の奥部や角部を除くと、大型船が係留されるエリアでは、岸壁の方向とほぼ平行に流れが発生していることがわかる。

Fig. 8 に Fig. 1 のバルカーが岸壁係留されていた場所の中央部における流速および水位変動の時刻歴の計算結果を示す。これをみると、鹿島港へ大きな水位変動と強い水平流れが襲ったのは地震発生後約3000秒であり、荷役中や停泊中の船舶の主機をスタンバイし、操船によって港外へ安全に避難するためには、時間的な余裕がほとんどなかったことがわかる。そのため、結果論ではあるが、適切な係留強化を行ったうえで港内に留まる方策が最善であった可能性がある。

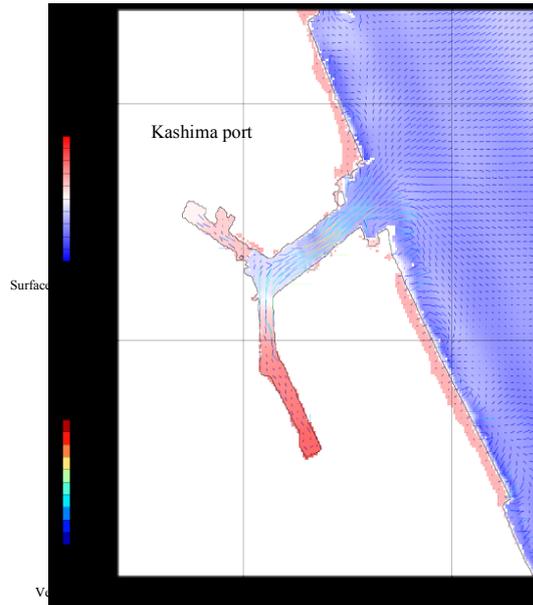


Fig. 6 Water elevation and velocity vector of tsunami at Kashima port (abt.4000 sec).

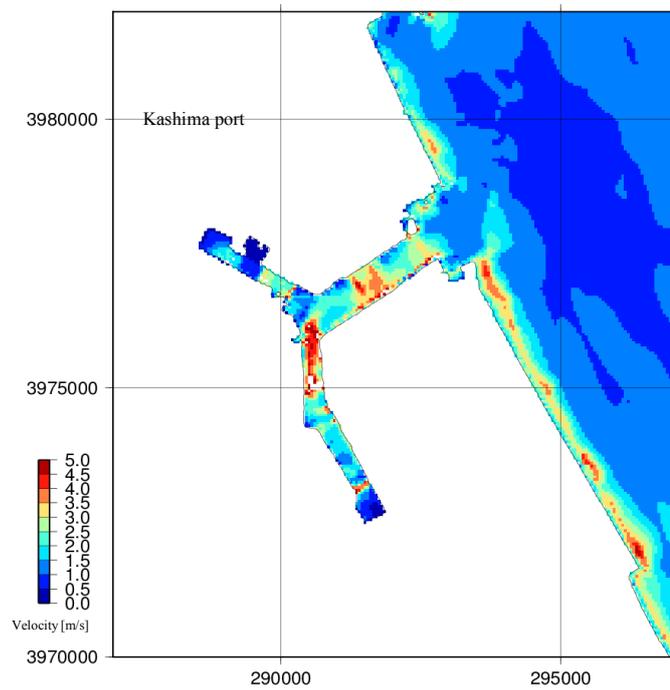


Fig. 7 Maximum magnitude of flow velocity at Kashima port.

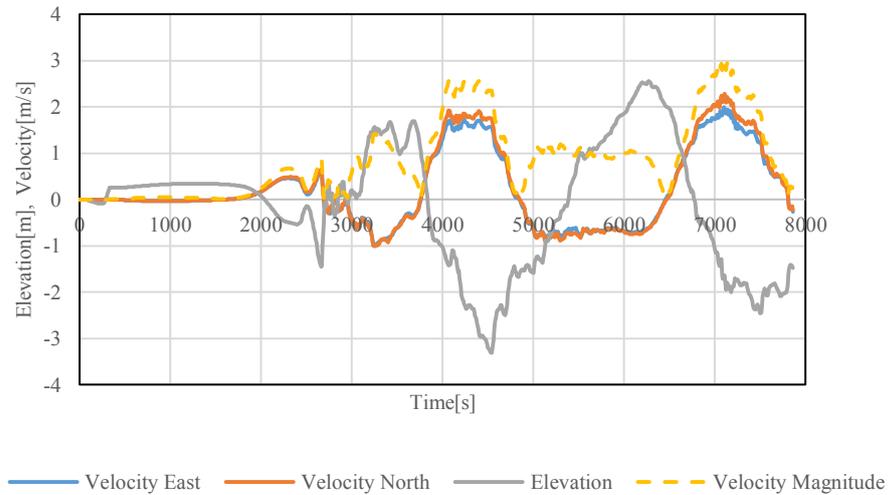


Fig. 8 Time history of water level and flow velocity due to the tsunami at center point of Kashima port.

2.3 大阪港

30[m]メッシュで計算を行った大阪港の津波伝播シミュレーション結果について、地震後約7500秒での第一波の押し波を Fig. 9 に示す。また、地震発生後の10000秒間に現れた最大流速の分布を Fig. 10 に示す。夢洲-咲洲間の防波堤の間を通過する津波の流速は約4[m/s]であり、咲洲北側の岸壁付近では局所的に早い流速も発生している。天保山の南側の狭隘な水路部では5[m/s]以上の流れが発生している。

Fig. 11 に夢洲南東側のコンテナバース付近における計算結果を示す。これをみると、大阪港へ大きな水位変動と強い水平流れが襲ったのは地震発生後約7000秒であり、荷役中や停泊中の船舶であっても、素早く避難行動を開始して操船すれば港外へ安全に避難することができる可能性が十分になる。ただし、離岸操船のためのタグボートの支援有無によっては必要な避難操船に必要な所要時間が異なってくる。

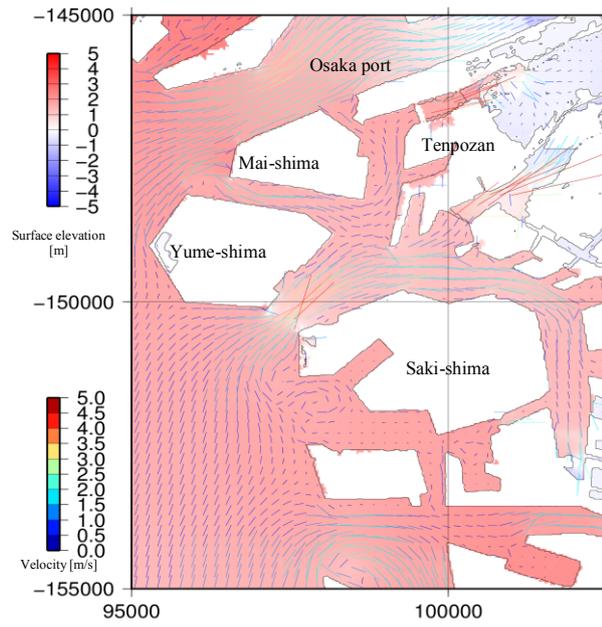


Fig. 9 Water elevation and velocity vector of tsunami at Osaka port (abt.7500 sec).

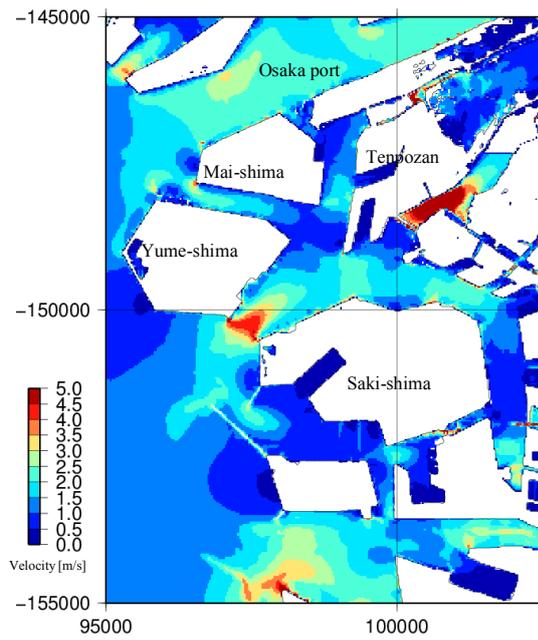


Fig. 10 Maximum magnitude of flow velocity at Osaka port

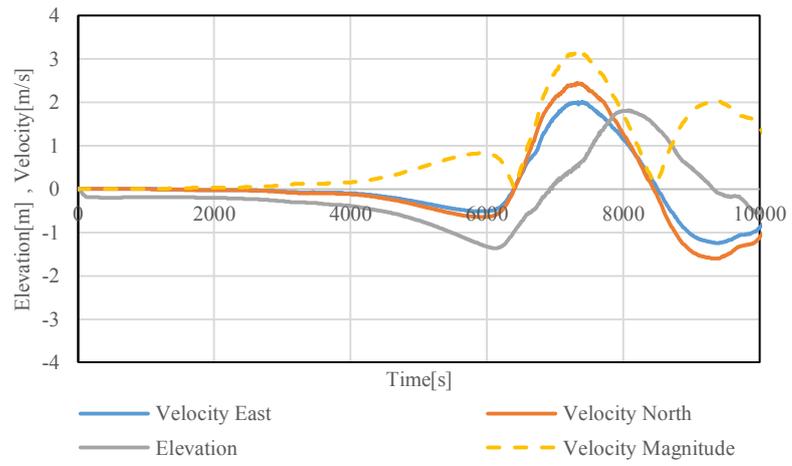


Fig. 11 Time history of water level and flow velocity due to the tsunami at Osaka port.

第3章 緊急離岸時に船舶に働く岸壁影響

3.1 模型船

津波来襲時の港内漂流時の危険が懸念される大型船の代表として、VLCC とコンテナ船を取り上げた。Table 1 および Table 2 に対象船とした VLCC とコンテナ船の主要目を示す。実際には VLCC が固定岸壁に停泊することは考えにくい、大型バルクキャリアを念頭にその類似の船型として VLCC (ESSO OSAKA) を用いた。コンテナ船は荷役の都合上、岸壁係留が必要であり、荷役中に地震が発生した場合には緊急離岸の判断が困難であると想像される。また、流体力学的な観点からは、岸壁影響は岸壁と船体とが接する平行部の大きさに依存すると考えられるため、方形係数 C_B が大きく異なる両船型を用いた。なお、コンテナ船にはビルジキールが取り付けられているが、VLCC には取り付けられていない。

Table 1 Principal particulars of subject VLCC

| | Model | Full scale |
|-------------------|-----------|-------------|
| Length[m] | 2.50 | 325.0 |
| Breadth[m] | 0.408 | 53.0 |
| Depth[m] | 0.238 | 31.0 |
| Draught[m] | 0.167 | 21.7 |
| Displacement | 141.3[kg] | 311425[ton] |
| Block coefficient | 0.83 | 0.83 |

Table 2 Principal particulars of subject container ship

| | Model | Full scale |
|-------------------|-----------|------------|
| Length[m] | 2.62 | 262.0 |
| Breadth[m] | 0.4 | 40.0 |
| Depth[m] | 0.245 | 24.5 |
| Draught[m] | 0.117 | 11.7 |
| Displacement | 76.02[kg] | 76020[ton] |
| Block coefficient | 0.59 | 0.59 |

3.2 実験装置

模型実験は水深可変の神戸大学の浅水槽(長さ 60[m]×幅 6[m])において、本実験用に設計・製作した一定加速度の並進装置を用いて実施した。並進装置、模型船および岸壁を模した仮設岸壁の設置の様子および並進装置と模型船の取り付けの様子を Fig. 12 に示す。並進装置はボ

ールねじを用いて軸回転運動を並進運動に変換する仕組みとなっており、電動モータの回転数を制御することで模型船を一定加速度で移動させることができ、最大ストロークは 0.8[m]である。並進装置に使用している AC サーボモータは定格 100[W], 3000[rpm], 0.317[Nm]である。

模型船の横向き移動方向は水槽の長手方向とした。長手方向とすると水槽側壁の影響により、特に浅水域では抵抗係数に影響を受けることが定兼ら[20]によって示唆されている。しかしながら、静止状態から加速する際の岸壁付近の非定常流れを論ずる本実験では、側壁による閉塞影響や反射波の影響[21]は無視できると判断し、長手方向を採用した。

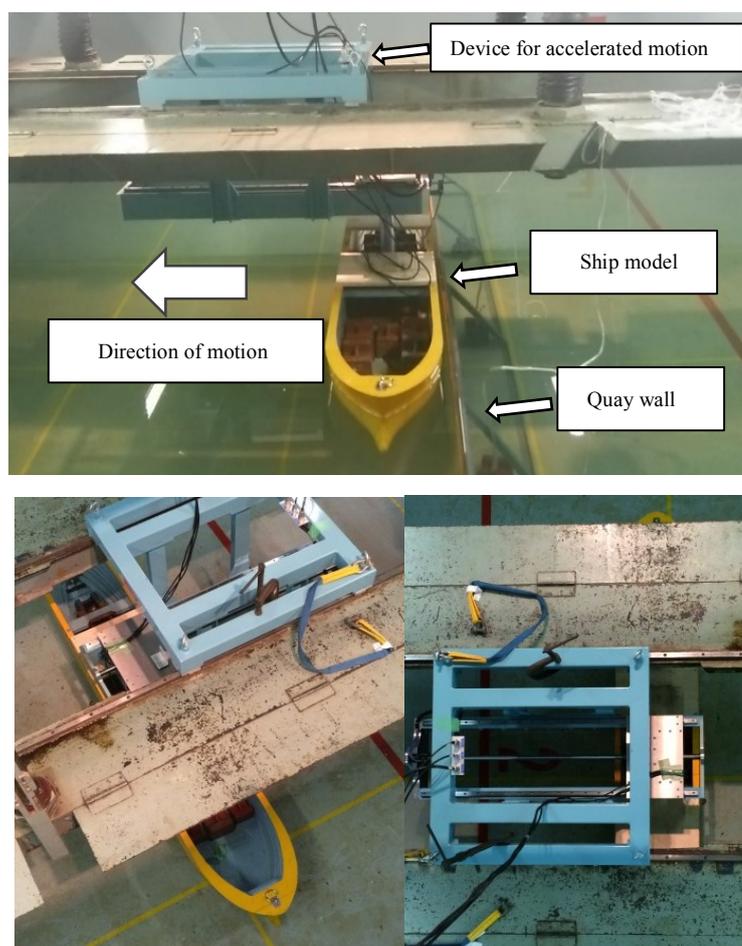


Fig. 12 Experimental setup

3.3 実験条件

実験に用いる加速度は 0.0005, 0.0010, 0.0015[m/s²]とした。VLCC の場合、使用した加速度にて全幅と同距離だけ離岸するのに要する時間は実船スケールで 260~460[s]である。津波来襲時の緊急離岸時には十分なタグボート支援が得られない可能性が高く、低加速度での実験が望ましいが、極端に加速度が小さい場合には慣性力が微小となり過ぎるため、定格出力 100[N]の検力計にて解析に必要な力が検出できる範囲で加速度を選んだ。なお、一定加速度の

実現精度についてはレーザ距離計を用いて確認を行っている。

水深 H と喫水 d の比については、過去に実施された斜航試験[22]に倣った。津波の引き波を想定した場合 H/d が 1.2 未満となるような極端な浅水状態も考えられるが、このような状況下での港外避難は現実的に不可能であると考えられるため除外した。実験条件の一覧を Table 3 に示す

Table 3 Experimental condition of water depth.

| H/d | H [mm] (VLCC) | H[mm] (container ship) |
|-----------|------------------|---------------------------|
| >5 (deep) | 900 | 900 |
| 2.0 | 334 | 246 |
| 1.5 | 251 | 184 |
| 1.2 | 201 | 147 |

3.4 基礎方程式

本実験において検力計で計測される力を式(1)で表わすこととする。この基礎方程式を用いて解析を行い、岸壁影響および浅水影響を推定する。過去の研究事例[20]によれば、浅水影響は付加質量の変化として表現できるため、実際の解析には式(2)を用いた。また、浅水影響と岸壁影響は流体力学的には類似の事象と考えられるため、岸壁影響についても付加質量の変化として表現している。なお、付加質量に関する係数はいずれも船の質量で除した無次元値を使用する。

$$F = - \left\{ m(1 + m'_a)y'' + \frac{1}{2}C_D(Re, H/d)LDy'^2 + F_{shallow} + F_{wall} \right\} \quad (1)$$

$$F = - \left\{ m(1 + m'_a + m'_{shallow}(H/d) + m'_{wall}(H/d))y'' + \frac{1}{2}C_D(Re, H/d)Ldy'^2 \right\} \quad (2)$$

| | |
|----------------|---|
| F | Measured force [N] |
| m | Ship mass [kg] |
| m'_a | Coefficient of added mass |
| C_D | Drag coefficient |
| Re | Reynolds number |
| $F_{shallow}$ | Force due to shallow water effect [N] |
| F_{wall} | Force due to wall effect [N] |
| $m'_{shallow}$ | Coefficient of added mass due to shallow water effect |
| m'_{wall} | Coefficient of added mass due to wall effect |
| y', y'' | Lateral velocity [m/s] and acceleration [m/s ²] |

3.5 実験結果

3.5.1 一定速度の横移動実験

本実験は速度ゼロからの加速度運動であるため、層流から乱流への遷移が生じるレイノルズ数域を含んだ実験となる。検力計では摩擦抵抗を含んだ力が検出されるため、岸壁影響として議論すべき力を抽出するためには、各速度における粘性抵抗を正しく差し引く必要がある。実験に使用した模型船の船幅もしくは喫水を代表長さとしてレイノルズ数を求めると 10^5 付近となり、流れに垂直に置かれた無限円柱の抵抗係数が、層流から乱流への遷移によって急激に変化する領域とほぼ一致する。実際、抗力係数を一定とみなした解析では実験結果を合理的に説明することができなかつたため、式(1)のように抗力係数を速度(レイノルズ数)に応じて連続的に変化させる必要がある。そこで低速域での定速度横移動試験を各水深喫水比で繰り返し実施することにより、抗力係数の速度変化を求めた。VLCC の結果を Fig. 13 に、コンテナ船の結果を Fig. 14 に示す。

VLCC, コンテナ船のいずれも, H/d や横移動速度に対する抗力係数の傾向は同じであるが, VLCC の深水状態では低速度域($0.02\sim 0.04$ [m/s])にて抗力係数が急激に増加している。この原因としては, VLCC 模型船にはビルジキールがなく, 横断面の船型勾配も滑らかであるために乱流促進が起きず, 遷移の有無による差が顕著に表れたと考えられる。これに対して, コンテナ船は船型勾配が大きいだけでなく, ビルジキールが取り付けられていることにより, 乱流促進がなされたものと考えられる。

今回の実験では曳引車の仕様により, 0.02 [m/s]未満の計測はできていないが, このような超低速度域での加速運動では慣性力が支配的と仮定して, 0.02 [m/s]での抵抗係数を用いることとした。なお, レイノルズ数の変化に伴う遷移現象は模型実験ではその影響を無視できないが, 実船では離岸初期の低速状態でも十分にレイノルズ数が高いことから, 各 H/d での抵抗係数を一定とみなして差し支えない。

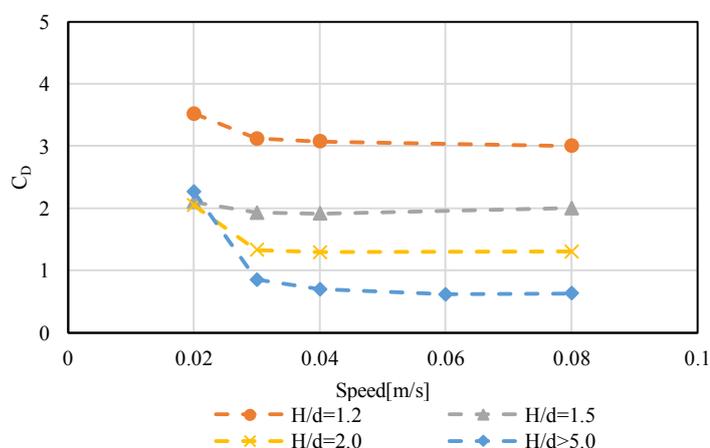


Fig. 13 Measured drag coefficient (VLCC)

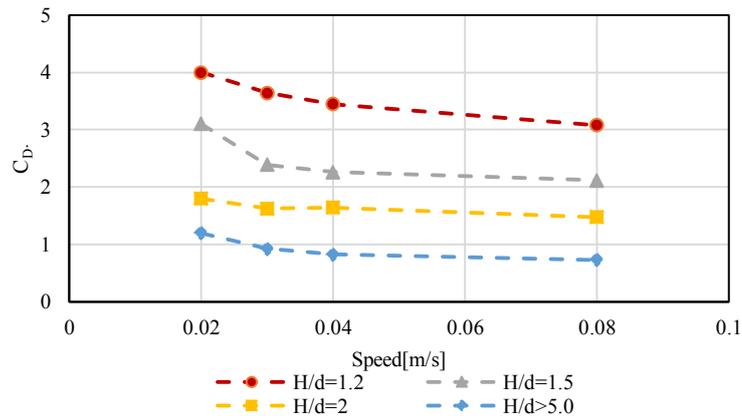


Fig. 14 Measured drag coefficient (Container ship)

3.5.2 浅水影響

初めに深水かつ岸壁無しの実験結果から付加質量係数を求めた．実験初期(時刻 0~5 秒)では速度が十分に小さく慣性力が卓越するため，式(2)中の粘性抵抗，岸壁影響および浅水影響をゼロとして既知の加速度と船体質量を用いて解析を行った．Fig. 15 は計測結果の一例で，運動開始時の立ち上がる力から付加質量係数を求めた．その結果，各加速度に対する平均値として VLCC は 0.89，コンテナ船は 0.75 と求まった．

次に岸壁を置かない状態で実施した一定加速度の横移動試験結果より，浅水影響を付加質量係数の変化として求めた．付加質量係数と同様に，速度が十分に小さい実験初期の計測結果から，粘性抵抗と岸壁影響をゼロとして，既知の加速度と質量および先に求めた付加質量を用いて解析を行った．Fig. 16 は Fig. 15 と水深以外は全く同じであるが，明らかに力が大きく計測されている．この増加分を浅水影響による見掛けの質量増とみなした．これらをまとめた結果を Fig. 17 に示す．

Fig. 17 より，浅水影響として求めた付加質量係数は，加速度によって変化せず，H/d のみに依存する結果となった．これは浅水影響が慣性力すなわち付加質量と加速度の積で表されることを意味しており，過去の文献 [20] と同等の結果である．慣性力が支配的とはならない大きな速度域での浅水影響については検討していないが，本論文では離岸時の岸壁影響の検討を主目的としており，低速域のみを取り扱う．

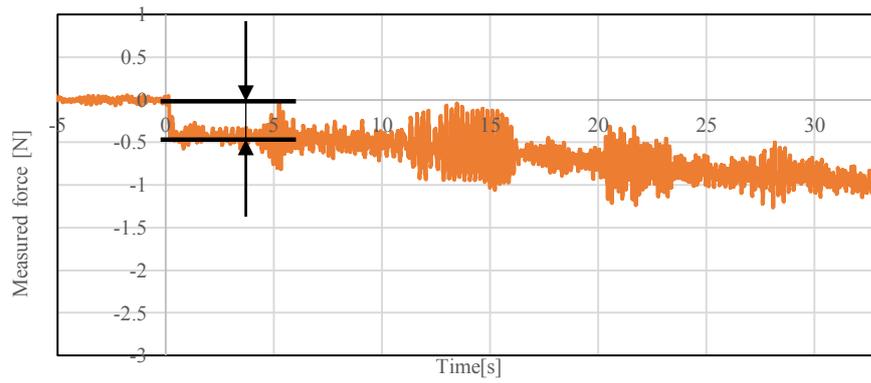


Fig. 15 Measured force for add mass coefficient.
 ($H/d > 5$ acc.= $0.0015[m/s^2]$ VLCC)

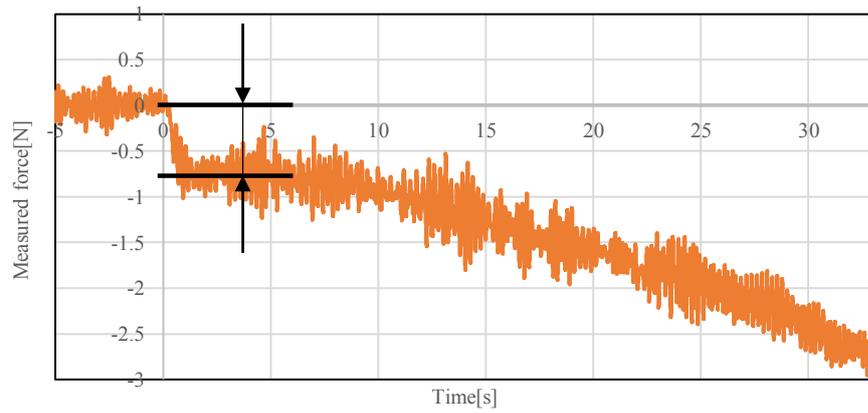


Fig. 16 Measured force for add mass coefficient with shallow water effect.
 ($H/d = 1.2$ acc.= $0.0015[m/s^2]$ VLCC)

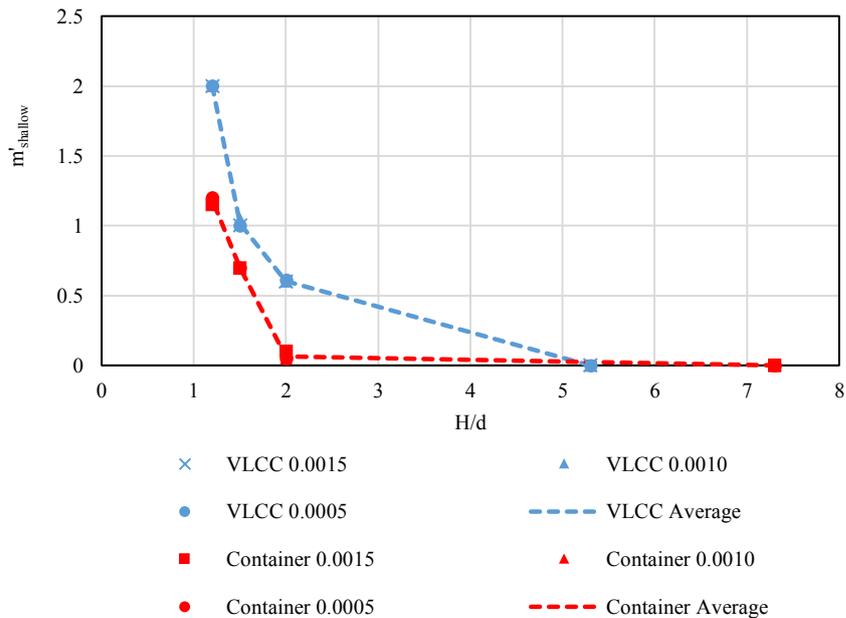


Fig. 17 Shallow water effect in form of added mass coefficient

3.5.3 基礎方程式の妥当性

岸壁影響がない条件での模型実験結果と式(2)の基礎方程式による計算結果の比較を行った。設定加速度 $0.0015 \text{ [m/s}^2\text{]}$ での各 H/d における比較を Fig. 18 および Fig. 19 に示す。図中の実線は実験結果であり、破線は式(2)に既知のパラメータを代入して推定した結果である。この比較結果より、基礎方程式ならびに抵抗係数等のパラメータは実験結果を良好に表しているといえるが、時間が経過し速度が大きくなると推定値が実験値を過小評価する傾向にある。ただし、半船幅だけ離岸するのに要する時間は、模型スケールで VLCC が 16.5 秒、コンテナ船が 16.3 秒であり、岸壁影響が顕著となる慣性力が支配的な領域では概ね合致しており、以降の岸壁影響の検討に使用することとした。

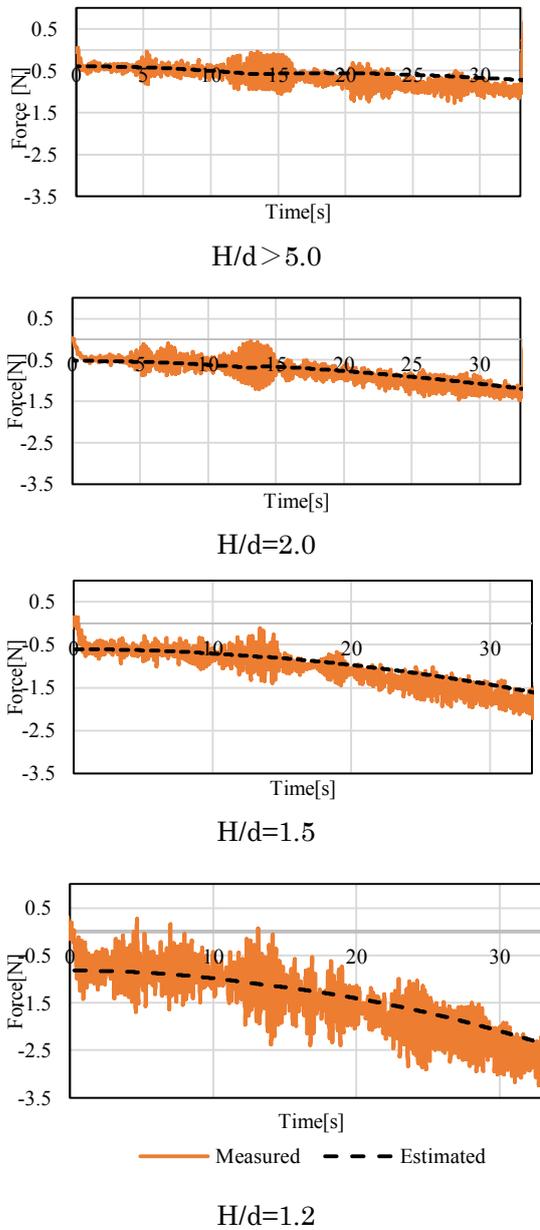


Fig. 18 Measured and estimated force without wall (VLCC)

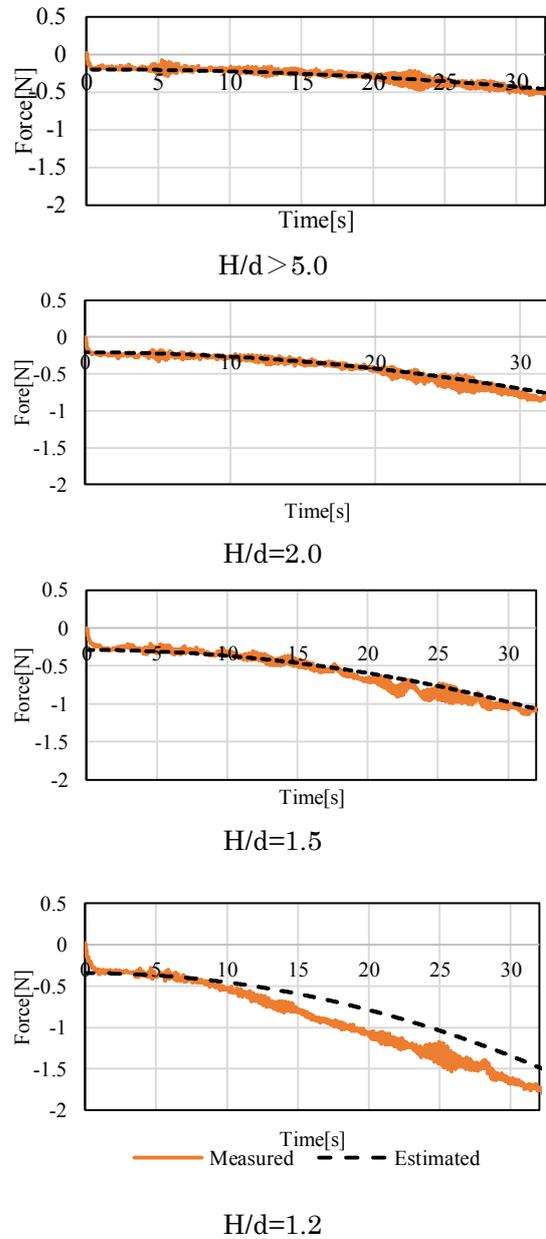


Fig. 19 Measured and estimated force without wall (container ship)

3.5.4 一定加速度の横移動実験

岸壁として水槽内に垂直壁を設置し、模型船の船体中央位置での舷側との距離を系統的に変更しながら計測を行った。実験条件を Table 4 に示す。ここで、10, 20, 40, 80[mm]は模型船幅の 1/40, 1/20, 1/10, 1/5 に相当する。

Table 4 Initial gap between ship and wall

| | H/d=1.2-2.0 | H/d=Deep |
|---------------------|-------------|----------|
| Initial Gap [mm] | 3 | - |
| | 5 | 5 |
| | 10 | 10 |
| | 15 | 15 |
| | 20 | 20 |
| | 40 | 40 |
| | 80 | 80 |
| | 100 | 100 |
| | 200 | 200 |

Fig. 20 と Fig. 21 に $H/d=5.3$ 加速度= $0.0015 \text{ [m/s}^2\text{]}$ における壁なしと壁あり（初期距離 5 [mm]）での計測結果の比較を示す。両者の差が岸壁の存在による影響であると考え、壁を設置した状態での計測結果と壁なしの計測結果の差をとることで岸壁の存在による影響をとらえることができると考えた。しかし両者は多くのノイズを含んでいるため、計測結果から直接差をとることはできない。そのため、比較的ノイズの少なくなだらかな変化であった壁なしの結果を関数近似してから差をとった。その結果を Fig. 22 から Fig. 27 に示す。ただしこの図の横軸は岸壁との距離である。

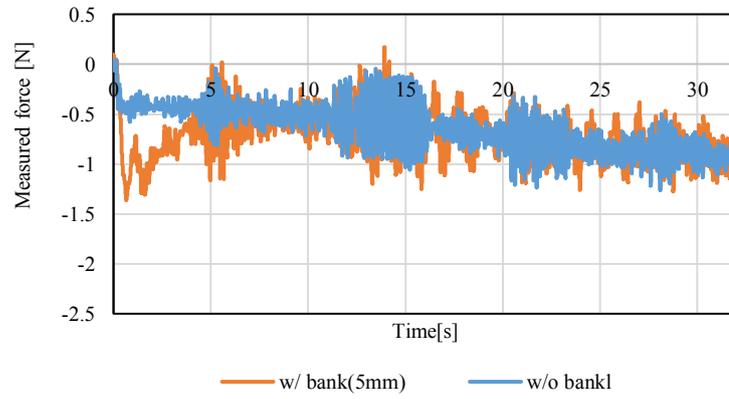


Fig. 20 Measured forces with and without wall (VLCC 5mm)

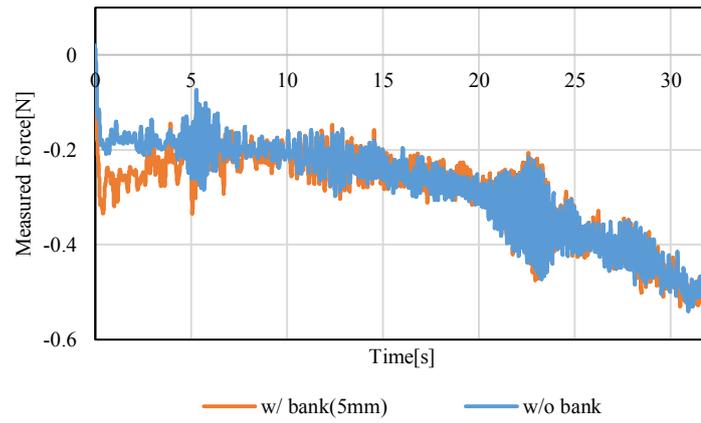


Fig. 21 Measured forces with and without wall (Container ship 5mm)

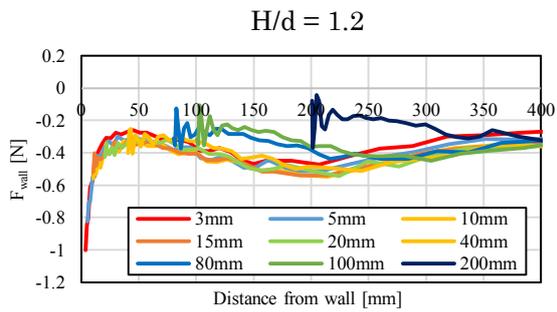
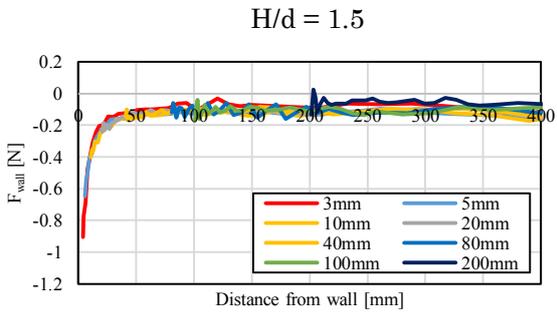
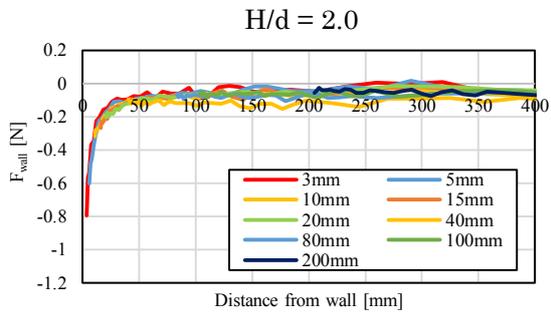
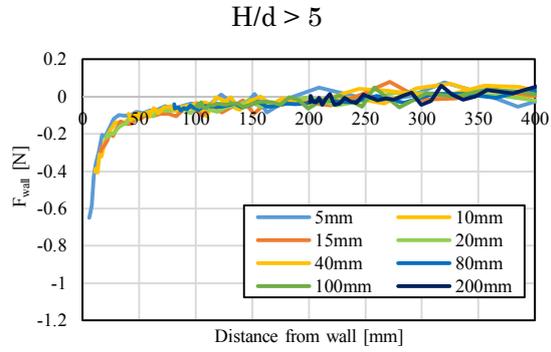


Fig. 22 Force due to wall effect (VLCC)
Acc. = 0.0015[m/s²]

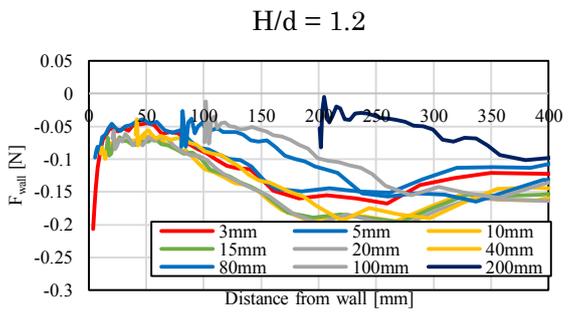
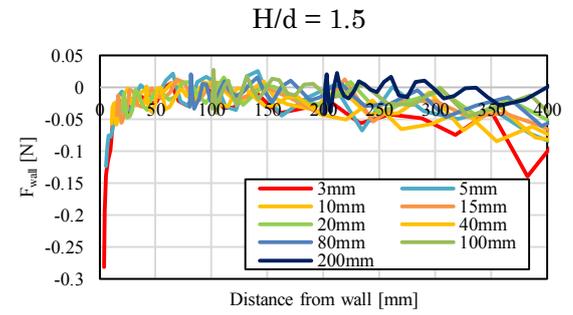
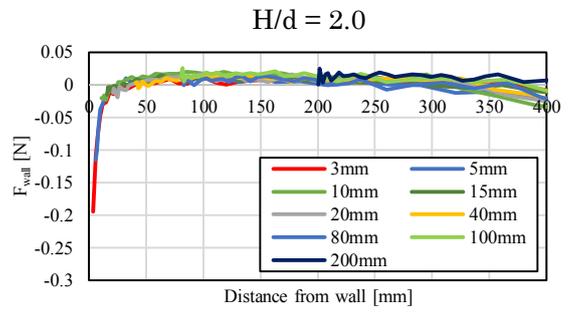
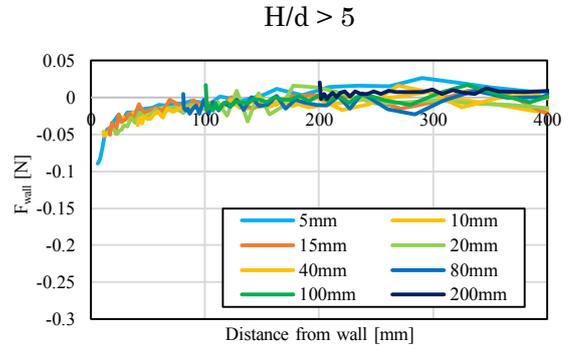


Fig. 23 Force due to wall effect (Container ship)
Acc. = 0.0015[m/s²]

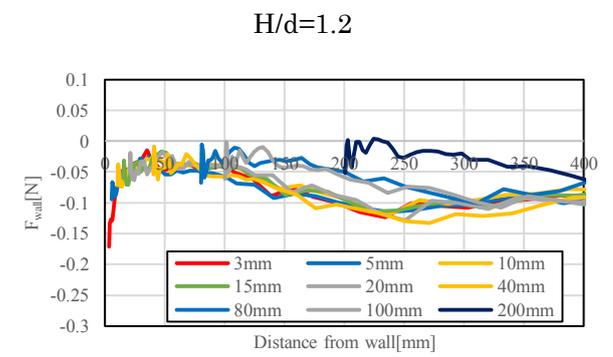
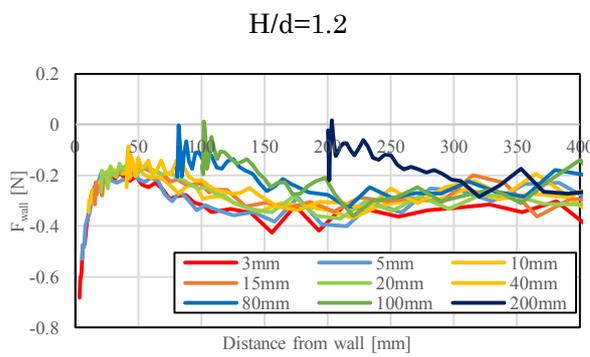
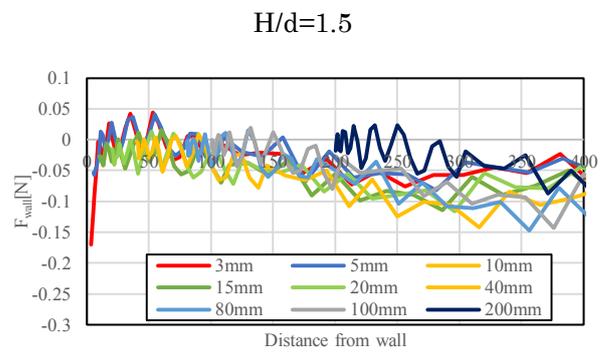
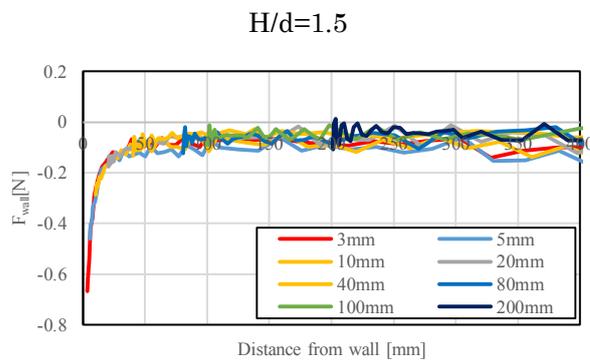
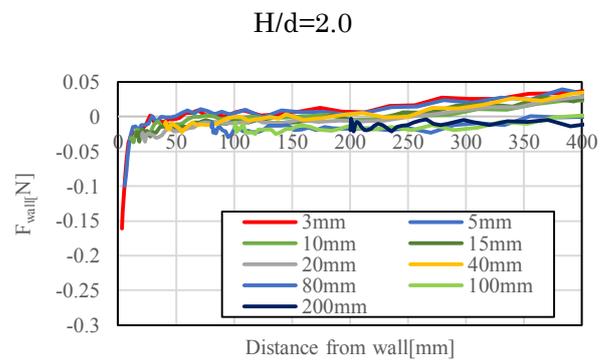
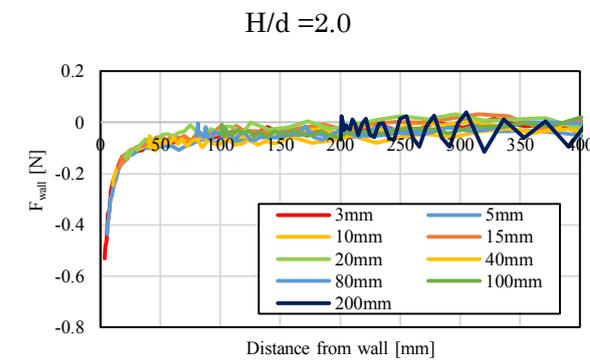
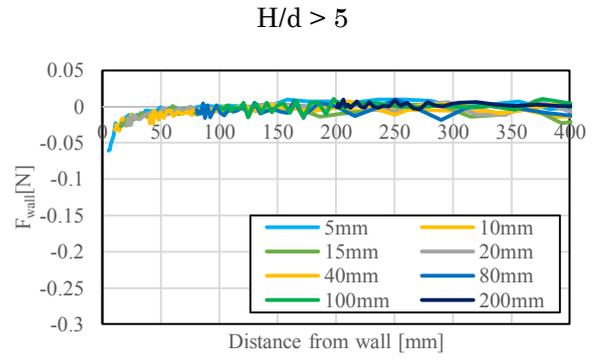
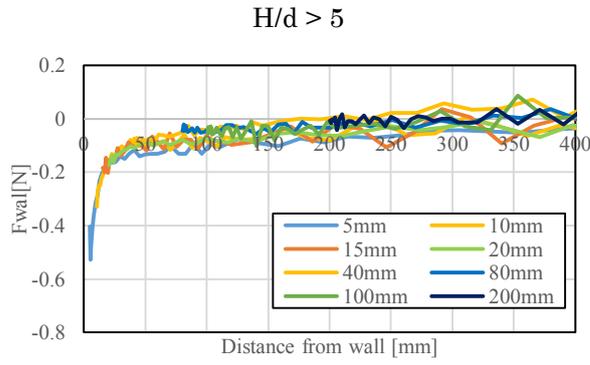


Fig. 24 Force due to wall effect (VLCC)

Acc. = 0.0010[m/s²]

Fig. 25 Force due to wall effect (Container ship)

Acc. = 0.0010[m/s²]

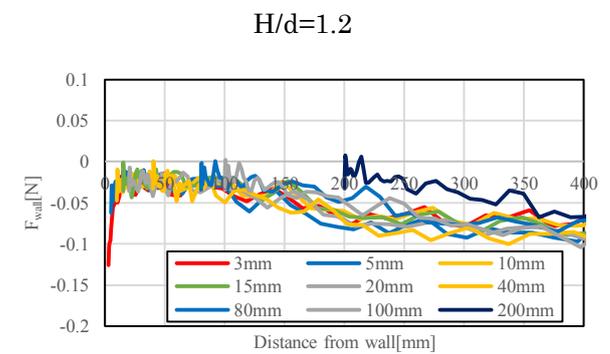
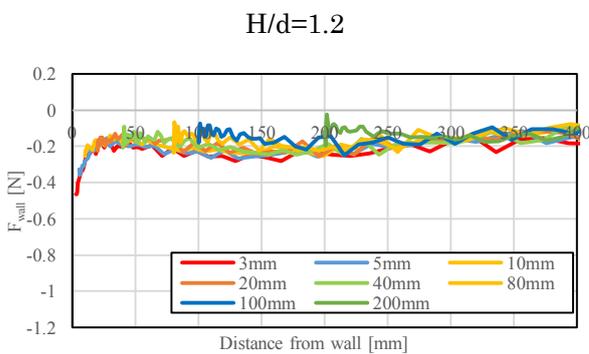
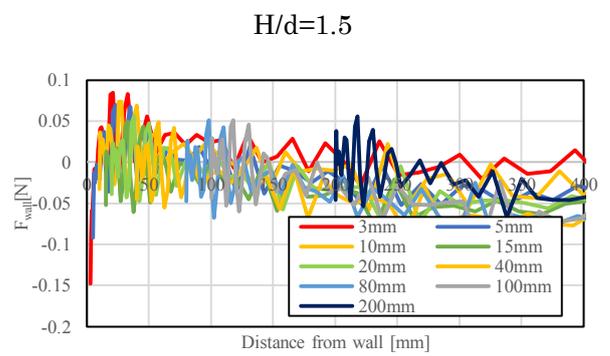
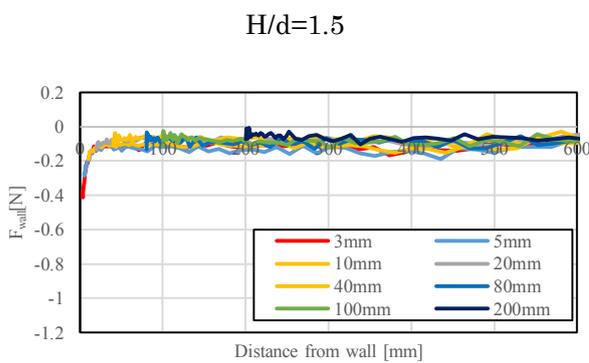
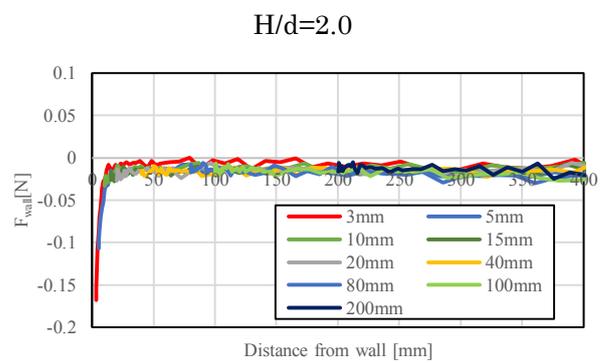
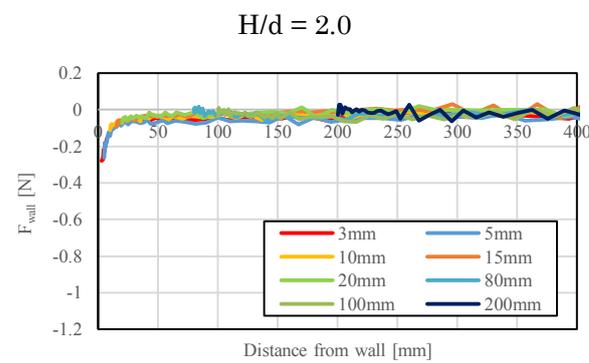
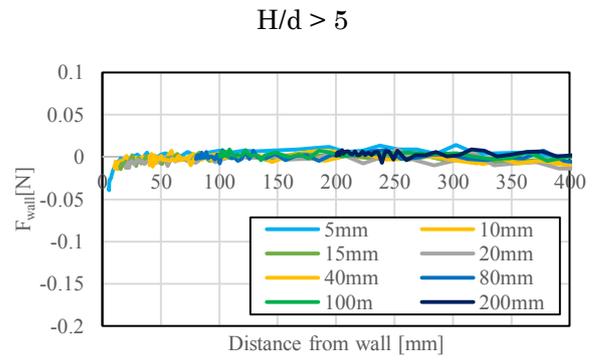
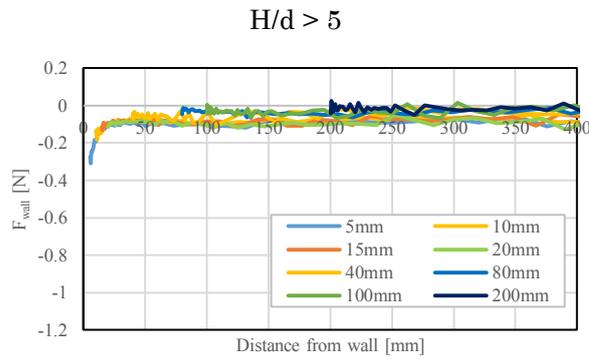


Fig. 26 Force due to wall effect (VLCC)

Acc. = 0.0005[m/s²]

Fig. 27 Force due to wall effect (Container ship)

Acc. = 0.0005[m/s²]

3.6 岸壁影響

Fig. 22 から Fig. 27 に示した岸壁からの距離に応じたサクシヨン力の比較結果より, $H/d=1.2$ を除くと初期距離の違いに寄らず同等の結果が得られていることから, 岸壁影響は過去からの履歴影響が小さい現象と考えられる. また, 岸壁近傍でのサクシヨン力は H/d が小さくなるにつれて大きくなることも読み取れる. これは船体を加速度運動させた際に背面に周囲から水が流れ込むが, 岸壁だけでなく水底によっても流れが制限されるため, 流速が大となって岸壁と船体間の圧力が急激に低下することが原因と考えられる. VLCC とコンテナ船の比較では VLCC の方が顕著なサクシヨン力を受けることが分かる. これは C_B 値の大きい VLCC の方が背面への流れ込みの制限が大きいためであろう. なお, 岸壁影響はいずれの船型でも $1/4B(100[\text{mm}])$ 程度でほとんど無くなり, $1/2B(200[\text{mm}])$ ではほぼ消えている.

$H/d=1.2$ の結果をみると, 岸壁近傍では他の実験結果と同様である. しかしながら, 壁との初期間隔に寄らず, 計測開始から約 $100[\text{mm}]$ 移動した時に何らかの影響を強く受けている. 岸壁影響のない Fig. 18 および Fig. 19 の $H/d=1.2$ のグラフにおいて, 約 $100[\text{mm}]$ 移動した 11.5 秒付近をみても特段の変化は見られないことから, 岸壁を設置したことによる影響であり広義の岸壁影響と思われる. これは, H/d が非常に小さいため, 加速方向に対して垂直方向の流れが顕著となったことによる側壁影響や船首尾からの大きな剥離渦による影響などが考えられるが, 詳細については更なる検討が必要である.

3.7 岸壁影響の定量化

一定加速度で離岸する際に船体に働くサクシヨン力の計測結果をもとに, 岸壁影響についての定量化を行う. 履歴影響が見られない岸壁影響は, 岸壁からの距離に応じて変化する付加質量係数として扱うことができると仮定し, Fig. 22 から Fig. 27 で得られるサクシヨン力を設定加速度と質量で除することで Fig. 28 と Fig. 29 のように見掛けの質量係数の距離変化を求めた. 他のグラフと対比しやすいように便宜的にマイナス表示としている. 但し $H/d=1.2$ における広義の岸壁影響は考慮していない.

Fig.10,11 より岸壁影響による見掛けの質量変化は, 船種や H/d に関わらず, 加速度に比例することが分かる. したがって, 式(1)中の F_{wall} は岸壁からの距離によって変化する見掛けの質量係数として表現することができる. $H/d>5.0$ では, 岸壁影響が最も大きくなる岸壁近傍での最小初期距離が $3[\text{mm}]$ ではなく $5[\text{mm}]$ であるため, 他の H/d と比較してピーク値の違いが見られるが, 岸壁近傍での変化量を外挿して考えると, ピーク値に大きな違いはないと思われる. $H/d=1.5\sim 2$ について, その変化は岸壁近傍でのピーク値を除けばほぼ等しく, 岸壁の影響範囲は $200[\text{mm}]$ 程度までであることがわかる. VLCC の $H/d=1.2$ における変化は他の H/d と異なっており, 前述の広義の岸壁影響とあわせて更なる検討が必要である.

船型間の違いに着目すると, 岸壁影響が及ぶ範囲については違いが見られないが, 岸壁近傍での最大値については約 2 倍の差が生じており, 船型に大きく依存することが分かる.

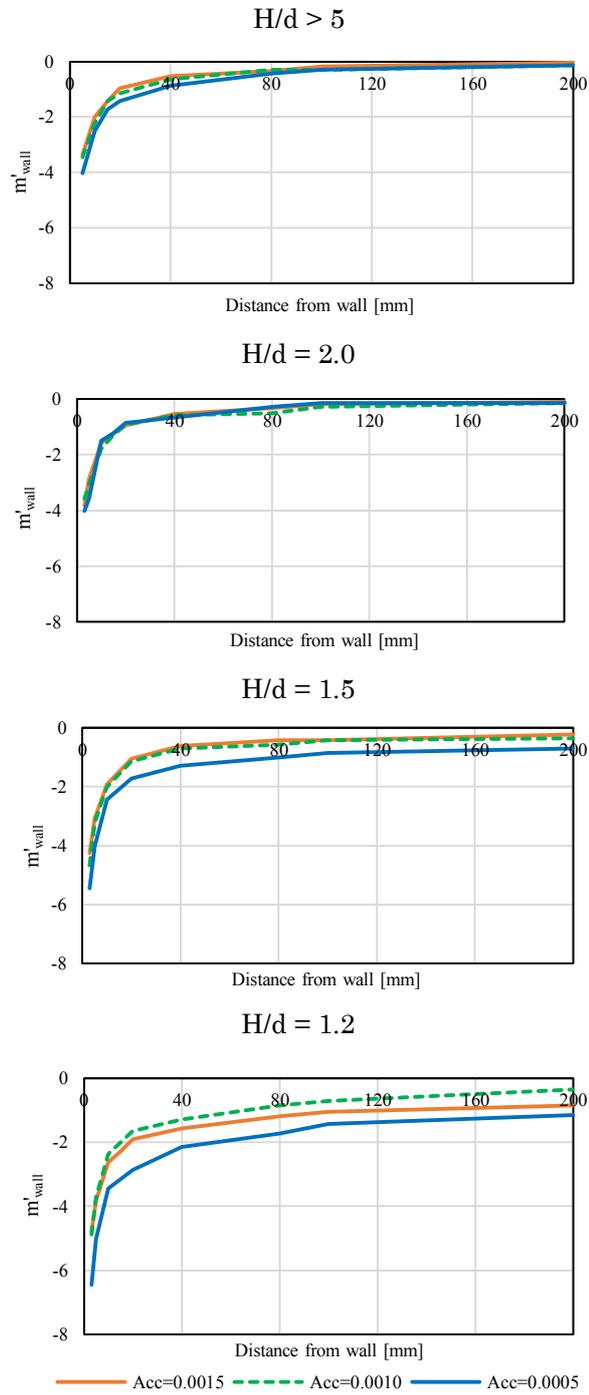


Fig. 28 Wall effect in the form of non-dimensional added mass coefficient (VLCC)

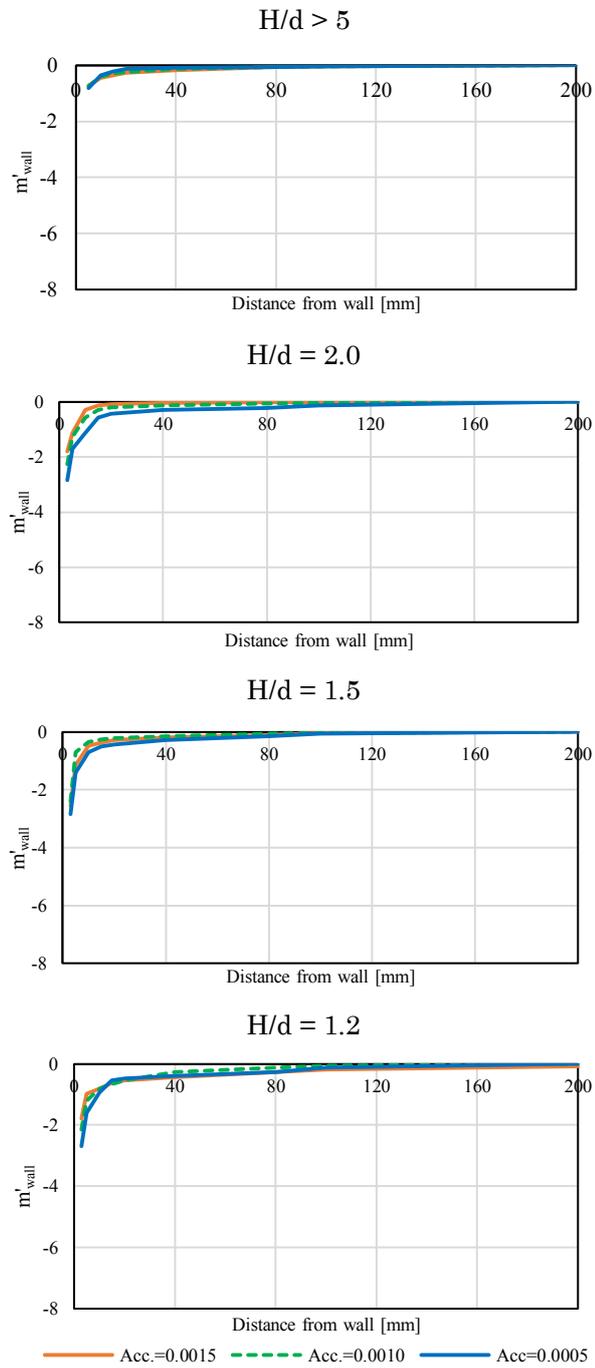


Fig. 29 Wall effect in the form of non-dimensional added mass coefficient (Container ship)

3.8 岸壁影響の定式化

前節で得られた岸壁影響について、港内からの津波避難シミュレーションへの組み込みや他船型に対する推定のために実用的な定式化を試みる。

まず、岸壁影響は岸壁に面する船体平行部の面積に概略比例するものと考えられる。つまり、水面下の船体横投影面積に占める船体の平行部の割合が重要となる。その一方、船幅は岸壁影響に及ぼす影響が小さいものと推察される。次に使用した2船型の違いを表す代表的なパラメータは C_B であり、これは体積的な肥大度を示す数値であるが、実質的には船体横投影面積における船体平行部の割合を表すものと考え、岸壁影響の大きさについては C_B を用いて定式化を行う。また、岸壁と船舶が接触している状態での実験値は得られていないが、過去の報告[22]から、際立った大きさにはならないこと、大型船の着岸においては必ず防舷材を使用することから、実質的にゼロ距離を用いることはないため、岸壁影響の最大値は岸壁近傍での変化率から求めた。

次に岸壁影響が及ぶ範囲については、船型及び H/d に対してほとんど差がないため、船幅の $1/2$ の距離でゼロに漸近するものとする。さらに、実利用の観点から、岸壁影響を考慮すべき大型船が着岸する港湾の水深を念頭に、 H/d の違いを陽には考慮せず、 $H/d=1.5$ を代表値として各加速度の実験結果から平均線を求めて式(3)のような定式化を行った。この推定式では、壁近傍での急激な変化とそれ以遠の緩やかな変化の両方に対応するために、指数関数と二次曲線の組み合わせを用いている。しかし、そのパラメータは二次曲線の係数に C_B を用いただけで表すことができた。

Fig. 30 に岸壁影響としての無次元付加質量を C_B で除した実験値と提案式を用いて実験範囲外の外挿も含めた値の比較を示す。提案式は傾向として岸壁から離れた領域では過小評価する傾向にあるが、重要な岸壁近傍についてはよく表している。また、 C_B の変化に対しては、実験を2船型でしか行っていないが、内挿および外挿を行った結果に対してもよく表していると思われる。ただし、 $C_B < 0.5$ の痩せ型船については直接用いることができないが、その場合は岸壁影響の考慮自体が不要であろう。

本推定式は限られた実験結果に基づくものであり、使用した供試船と大きく異なる船型に対する適用性については別途検討が必要である。しかしながら、本研究で想定している津波襲来時の大型船緊急離岸の検討には十分に利用可能であると思われる。

$$m'_{wall} = C_B \times \left[C_1 \exp \left\{ \frac{(y'_{wall}/C_2 - C_3)^2}{C_4} \right\} + C_5 (y'_{wall} - C_6)^2 \right] \quad (3)$$

| | | | |
|-------|---------|-------|--------------------|
| C_1 | 3.76E-5 | C_4 | 0.067 |
| C_2 | 0.309 | C_5 | 24.17 C_B -12.06 |
| C_3 | 0.895 | C_6 | 0.50 |

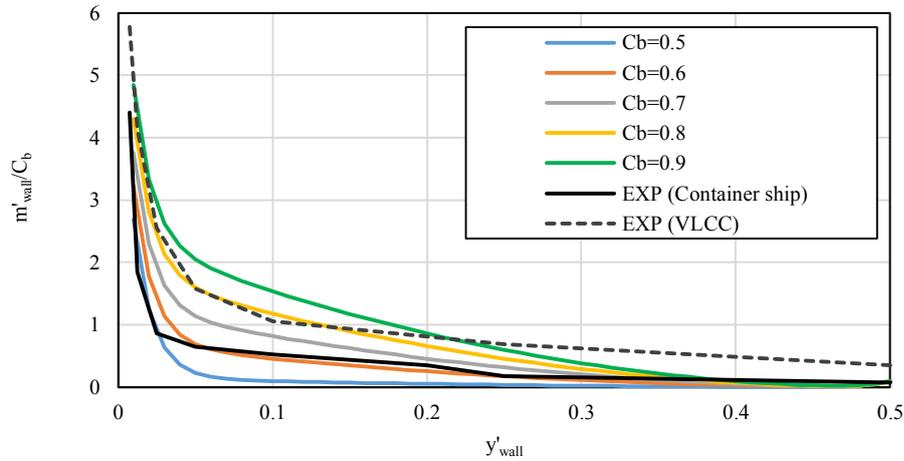


Fig. 30 Wall effect estimated by proposed formula

3.9 緊急避難シミュレーション

ここまでの実験解析で得られた岸壁影響を用いて，船舶緊急離岸時の試計算と提案式の精度確認を行った．VLCC が $H/d=1.5$ の港内に係留している状態を想定し，岸壁との初期距離を $0.4[m]$ (模型スケールで $3[mm]$)として， 3100 馬力級のタグボート一隻($292[kN]$)による一定曳航力による平行離岸を行い， $100[m]$ (約 $2B/3L$)離岸するのに必要な時間を岸壁影響の有無の比較を行った．船舶の緊急離岸時の状況を考えると，緊急時に用意できるタグボートが一隻である可能性は高く，また通常の離岸手順である船尾側から先に離岸させる方法は，複数のタグボートもしくはスラスターを装備した船舶では可能となるが，VLCC やバルカーといった船種では装備している可能性が低く，緊急時の離岸手順として，ある程度の距離まで岸壁と平行に離岸することが十分に考えられる．また，平行離岸の場合に岸壁影響が最大となり最も安全側の評価を与えるため，安全性評価という観点からは都合が良い．

具体的なシミュレーション方法については，式(2)に対して，岸壁影響部分を前項までに判明した付加質量が岸壁との距離によって変化するという式(3)を用いて置き換え，タグボートの曳引力との釣り合いをとった式(4)とし，既知のパラメータを用いて微分方程式を数値的に解いた．また，フルスケールでの問題であるため，抵抗係数は，レイノルズ数によって変化することなく，Fig. 13 の最高実験速度での値を用いて一定とした．

$$m(1 + m'_a + m'_{shallow} + m'_{wall}(y))y'' + \frac{1}{2}C_D Ldy'^2 = F_{tugboat} \quad (4)$$

Fig. 31 に VLCC の実験結果から得られる岸壁影響および提案式を用いた結果と，岸壁影響が無い状態での計算結果を示す．Fig. 32 にシミュレーションで計算された岸壁影響の付加質量変化を示す．Fig. 31 より，岸壁影響を考慮せずに $100 [m]$ を平行離岸するのに必要な時間

は 733 秒であったのに対して、実験結果を用いた結果が 869 秒であり、式 (4) に各パラメータを用いた結果は 861 秒であった。岸壁影響の有無の差は約 130 秒であり、非常事態を想定した場合には無視できない時間増であることから、津波来襲を想定した緊急離岸シミュレーションでは岸壁影響を考慮することが望まれる。なお、提案式と VLCC 実験値とのシミュレーション結果の差は約 7 秒であった。

同様のシミュレーションをフルスケールのコンテナ船に行うと、岸壁影響がないときは 359 秒に対して岸壁影響を考慮すると 381 秒であり、その差は 22 秒であった。VLCC と比べると、タグボートの能力に対するコンテナ船の重量は軽く、そのため岸壁から素早く離れることで岸壁影響を大きく受ける時間が短くなり容易に離岸できるため、相対的に岸壁影響の度合いが小さくなったと考えられる。

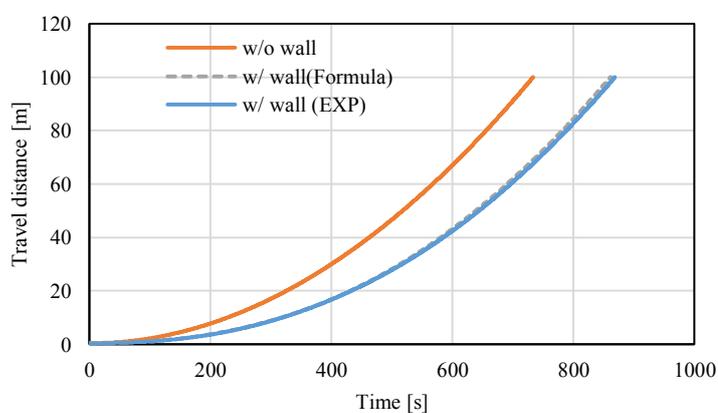


Fig. 31 Influence of wall effect in emergency unberthing (VLCC)

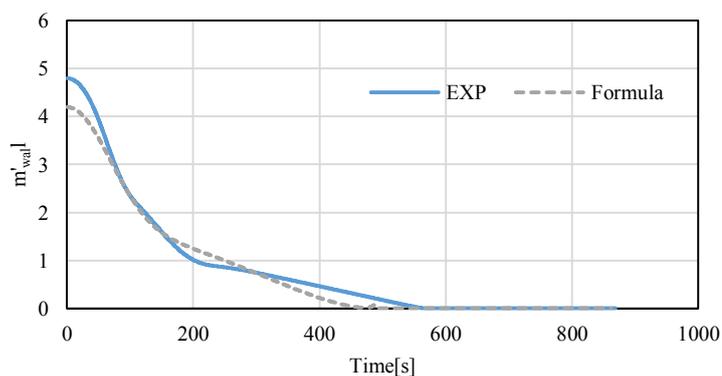


Fig. 32 Time-variation of wall effect (VLCC)

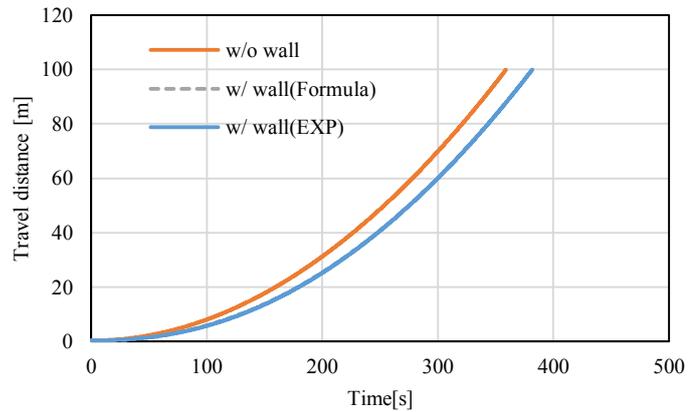


Fig. 33 Influence of wall effect in emergency unberthing (container ship)

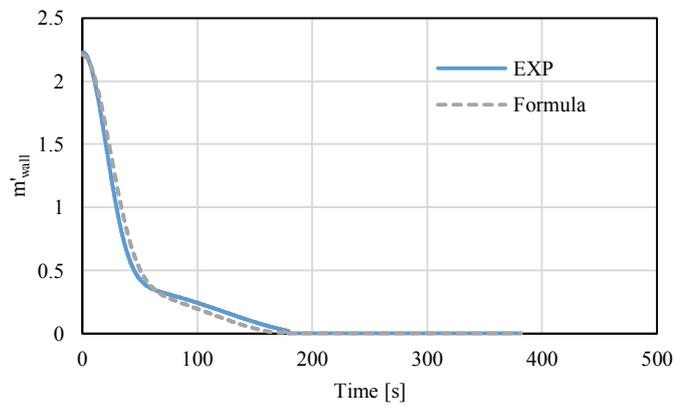


Fig. 34 Time-variation of wall effect (container ship)

3.10 結論

本章では岸壁係留中の船舶が離岸するときの岸壁影響を調べるため、一定加速度での横移動実験を実施し、実験結果をもとに岸壁影響の定量化を行った。主要な結論は以下の通りである。

- 岸壁影響として知られるサクション力は加速度に比例することから、浅水影響と同じく付加質量係数の変化として扱うことが可能である。その最大値は、肥大船についてはその質量の4~6倍であり、細長船については2~3倍であった。
- 岸壁影響は岸壁から舷側までの距離が $1/4 \sim 1/5B$ を超えるまでの範囲で主に作用し、 $1/2B$ を超えるとほぼ無視できる。そして加速度の影響は小さく、また履歴影響も小さく、岸壁との距離のみで決まる。
- 計測結果にもとづき、方形係数を唯一のパラメータとする岸壁影響の簡易推定式の提案を

行った.

- 津波避難を想定した緊急離岸のシミュレーションを行い、タグボート支援が十分に得られない場合には離岸時間に及ぼす岸壁影響が無視できない場合があることを示した.

本実験で示した岸壁影響について、付加質量係数の変化として取り扱えることから、尺度影響はほとんどなく、実船へも適用できるものと考えられる。また、肥大船と細長船の代表となる VLCC とコンテナ船型を用いての実験結果であるため、津波来襲時に緊急避難を行う大型船についての重要な基礎データとなったと思われる。

第4章 岸壁係留船が受ける流体力に関する実験的研究

4.1 係留中船舶を襲う津波流

2章の津波伝播シミュレーションの結果から、岸壁係留の船舶に作用する津波の流れについて考察する。

流れの方向については、岸壁にほぼ平行に往復することが分かる。大型船の係留は主に入船であるため、港外からの津波を船尾から受ける状態を考慮すれば良いと思われるが、鹿島港の Fig. 2 の事例より、強い引き波が作用する可能性もあるため、前後両方の流れを考慮しなければならない。なお、岸壁の端部に係留すると、船舶に対して斜め方向から流れが作用する可能性もあるが、これは非常に複雑な流れとなり、実験での再現が難しいため、本研究では岸壁に平行な流れのみを取り扱う。

次に、流れの流速については、Fig. 6 及び Fig. 9 の結果から、大型船が係留するエリアの沖側の水路中央部では最大で約 4.5[m/s]の流れが現れる。シミュレーション結果を見ると岸壁近傍になると流速が幾分下がるようであるが、これは 50[m]及び 30[m]のメッシュによる計算結果であり、さらにナビエストークス方程式を 3 次元的に計算したものではなく、長波近似を用いた計算結果であるため、岸壁付近の流速分布の詳細については不明である。さらに、この計算結果は、防波堤の影響を過小評価する傾向にあり、より狭まった水路を津波が伝播すると局部的に速い流速が発生することも考えられるため、模型実験で使用する基準流速は 4.5[m/s]と定めた。

4.2 岸壁模型と実験装置

岸壁係留船に津波が来襲した場合の流体力を議論するため、神戸大学の浅水槽(長さ 60[m]×幅 6[m])にて岸壁模型と模型船を用いた模型実験を行った。岸壁係留船の代表として、前章で用いたコンテナ船の模型船を使用した。

岸壁模型は長さ 5.25[m]、厚さ 0.1[m]、高さ 0.65[m]の塩化ビニル製である。岸壁の長さは模型船の垂線間長の 2 倍、水面下の深さは模型船の喫水の 4 倍を確保し、岸壁両端は角部からの剥離渦の低減のため丸みをもたせてある。この岸壁模型を浅水槽の曳航台車に吊り下げる形で取り付けた。実験では模型船と岸壁との距離を変化させる必要があり、前章で使用した一定加速度の横移動装置を使用することとした。3 分力計(定格 100[N], 10[Nm])は模型船の前後重心位置に取り付け、模型船を完全固定の状態にて曳航した。

Fig. 35, Fig. 36, Fig. 37 に岸壁模型と模型船を曳航台車に取り付けた様子と 3 分力計の設置状況を示す。さらに、操縦性分野における一般的な側壁影響を計測するために、約 6 [m]の垂直側壁を水槽中に設置した様子を Fig. 38 に示す。

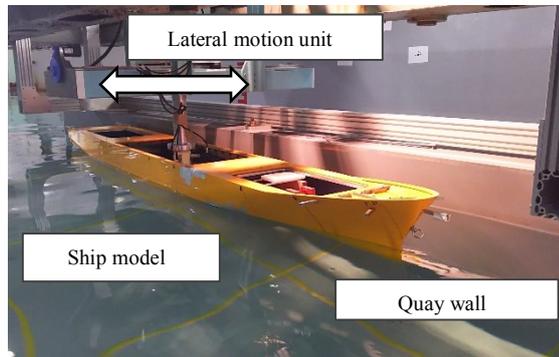


Fig. 35 Ship model and vertical wall imitating quay wall.

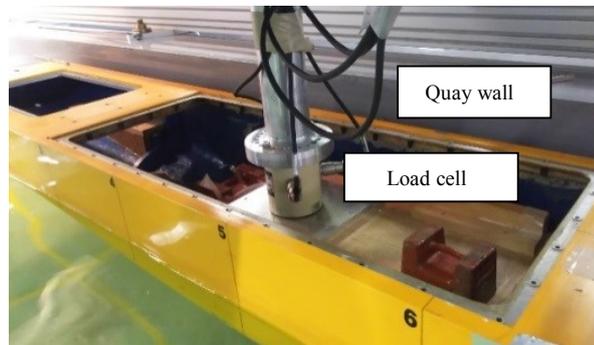


Fig. 36 Load cell for measurement of hydrodynamic force.

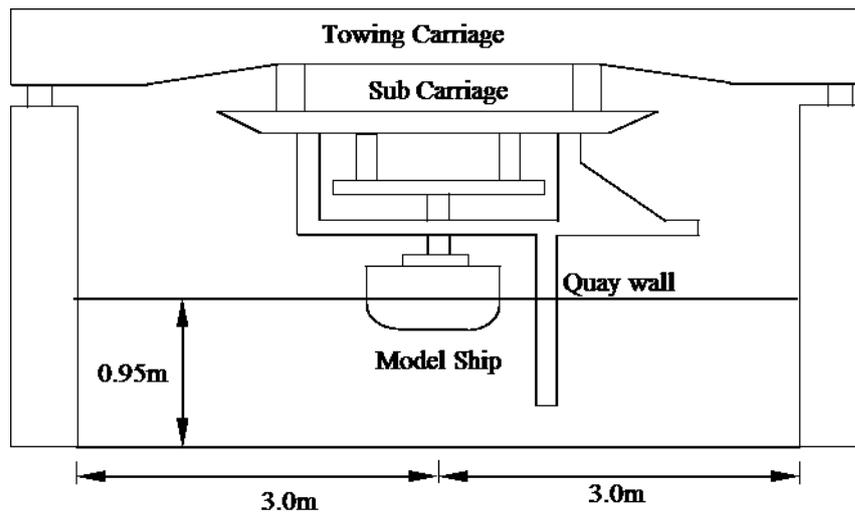


Fig. 37 Overview of experimental setup

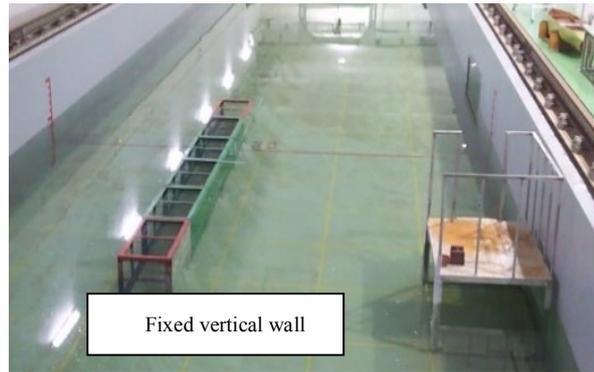


Fig. 38 Fixed quay wall.

4.3 実験条件

曳航速度は、4.1節の検討に従って4.5[m/s]を基準とした。模型船スケールでは0.45[m/s]に相当する。この速度を基準とし、0.5倍の0.225[m/s]と1.5倍の0.675[m/s]の3種類を用いた。水深は、一般に水深影響が十分に小さいとみなせる深さとなるように、 $H/d > 5$ である0.95[m]とした。実際には港湾内の岸壁に係留されている船舶は船底と海底面が近い浅水状態にあるが、海底面までを再現した巨大な模型を曳航台車に取り付けて曳引することは困難であるため、本研究では浅水影響を含まない純粋な岸壁影響を対象とした。

模擬岸壁から模型船の側面までの距離については、防舷材や岸壁の構造によって様々であり、また岸壁係留状態から離岸や漂流シミュレーションも視野に入れて、5[mm]を最接近距離とし、横移動装置のストロークの最大値である550[mm]までとした。その間については計測結果の距離による変化の大小に応じて適宜設定した。前節の検討によって、港湾内に来襲する津波流は岸壁に対して平行な流れが主流と確認できたので、今回は、曳航岸壁の長手方向と模型船の曳航方向（津波が来襲する方向）を一致させた状態のみの実験であり、岸壁に対して角度を持つ流れは取り扱わない。本論文では、前進方向とは船の船首方向から後方への津波を受ける状態を表し、後進方向とは船の船尾方向から前方への津波を受ける状態を表す。しかし、船舶が係留状態から津波等の外力により漂流状態となり、岸壁に対して角度をもつことも考えられる。そのため、流入角をある程度持った状態での曳航実験も行う。

4.4 座標系

本実験および解析で使用する諸量および座標系を Fig. 39 に示す。曳航岸壁は船舶の左舷側に取り付けた。長手方向の取り付け位置は、曳航岸壁の中央と模型船の重心とを一致させた。横方向の位置は、岸壁と船体重心位置との距離 d_w を船幅 B で除した無次元値を用いている。また曳航方向と模型船とが成す角度を流入角とし α とする。

さらに、計測された流体力 (F_x, F_y, M_z) の方向は船体固定座標系ではなく流入角 α に関わらず曳航方向を基準にしており、式(5)を用いて無次元化した。さらに、岸壁が存在することによる影響だけを抽出するために、式(6)のように曳航岸壁を設置しない状態での流体力を差し引き、

解析では式(7)で無次元化した値を用いる.

$$C_X, C_Y = \frac{F_X, F_Y}{\rho L d U^2}, \quad C_{M_Z} = \frac{M_Z}{\rho L^2 d U^2} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Delta F_X &= F_{Xwall} - F_X, \\ \Delta F_Y &= F_{Ywall} - F_Y, \\ \Delta M_Z &= M_{Zwall} - M_Z \end{aligned} \quad (6)$$

$$\Delta C_X, \Delta C_Y = \frac{\Delta F_X, \Delta F_Y}{\rho L d U^2}, \quad \Delta C_{M_Z} = \frac{\Delta M_Z}{\rho L^2 d U^2} \quad (7)$$

| | |
|--------------------------|---|
| ρ | Water density [kg/m ³] |
| d | Ship mean draught [m] |
| U | Towing speed [m/s] |
| F_X, F_Y | Measured force in X and Y direction without quay wall [N] |
| M_Z | Measured moment around Z direction without quay wall [Nm] |
| F_{Xwall}, F_{Ywall} | Measured force in X, Y direction with quay wall [N] |
| M_{Zwall} | Measured moment around Z direction with quay wall [Nm] |
| $\Delta F_X, \Delta F_Y$ | Force of wall effect in X, Y direction [N] |
| ΔM_Z | Moment of wall effect around Z direction [Nm] |

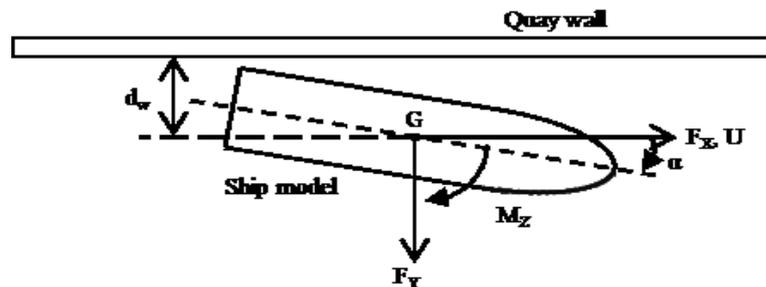


Fig. 39 Coordinate system.

4.5 実験結果

4.5.1 岸壁なし

本章の目的は、岸壁の有無による影響を調査するものであり、最も基本的なデータとなる岸壁を設置していない状態での試験を初めに行った。曳航岸壁を取り付けずに行った斜航試験の結果を式(5)を用いて無次元化し、各速度と斜航角ごとにプロットした結果 Fig. 40 に示す。凡例中の速度が正の場合は前進方向、負の場合は後進方向の実験結果を意味する。また斜航角と Fig. 39 の流入角とは、本質的に同じである。

Fig. 40 を見ると、全体的には斜航角が 10° まではほぼ直線的な変化をしているため線形とみなせるが、 15° では非線形性が無視できない。また、設定速度ごと の変化は無次元化するとほぼみられなかった。前進・後進の違いに注目すると、前後力及び横力の向きは逆であるが、大きさはほぼ同じであった。また、回頭モーメントについては、船型の前後非対称性のために着力点が異なるため、大きな差が生じる結果となっている。

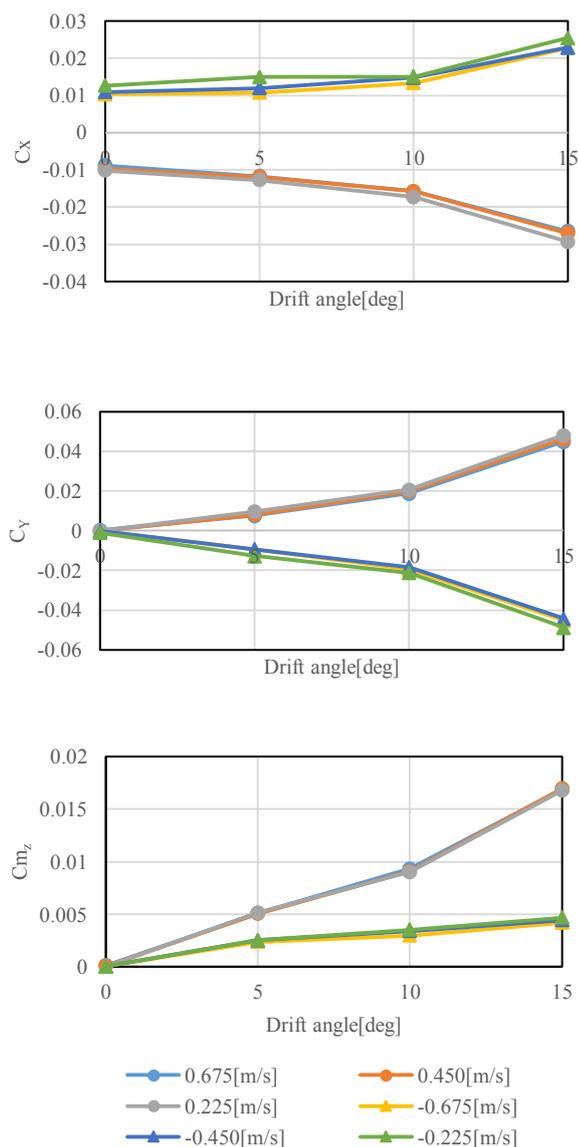


Fig. 40 Measured hydrodynamic force without quay wall.

4.5.2 岸壁有り

模型船を水槽の幅方向の中心に設定し、曳航岸壁に対して平行かつ船体中央が曳航岸壁の中央に位置するように模型船を取り付けて、模型船と岸壁との距離を変化させながら曳航試験を行った。岸壁の存在によって引き起こされた流体力の無次元値を Fig. 41 に示す。模擬岸壁と船側との最接近距離は $5[\text{mm}] (d_w/B = (5+B/2)/B = 0.5125)$ であり、再大距離は $550[\text{mm}] (d_w/B = 1.875)$ であった。

設定速度の違いによる変化については、 $0.45[\text{m/s}]$ と $0.675[\text{m/s}]$ ではよく一致しているが、 $0.225[\text{m/s}]$ の結果は異なる傾向となっている。これは、模型船と曳航台車を完全に固定しており、台車側のノイズを拾い易く、さらに低速では流体力が小さくなるために S/N 比が悪くなり、幾分信頼性に欠ける計測結果となった可能性がある。また、低速での計測結果は他の計測結果よりも大きい値となる傾向があり、流れのレイノルズ数影響が含まれている可能性も懸念されるため、 $0.225[\text{m/s}]$ の結果は割り引いて考えるべきであろう。

前後方向の力については、計測した距離の範囲内では距離に依存せずほぼ一定の力が働いていることがわかる。計測されたトータルの力に対する岸壁影響の割合は、約 25% であった。

横方向の力については、前進・後進方向ともに計測結果が負であることから、岸壁側に押し付ける向きに力が生じており、距離が近いほど大きくなる傾向にある。前進時の最大値は距離 $d_w/B = 0.525$ 、後進時の最大値は距離 $d_w/B = 0.55$ で発生しているが、それよりも近い距離では逆に横力は小さくなっている。これは曳航岸壁と模型船側との隙間が狭すぎて、この隙間への流入が著しく妨げられるため、流体现象に変化が生じたものと思われる。

回頭モーメントの結果をみると、岸壁との距離が近いほど大きなモーメントが発生しており、その向きは、津波が流入してくる側が岸壁から離れる方向に作用することがわかる。その最大値は、前進後進に関わらず $d_w/B = 0.525$ で発生している。

以上のことから、岸壁係留中の船舶に津波の強い流れが作用した場合、流体力は岸壁に対して船舶を押し付ける方向に作用し、流れの上流側が離岸する方向に回頭モーメントが働くことがわかった。

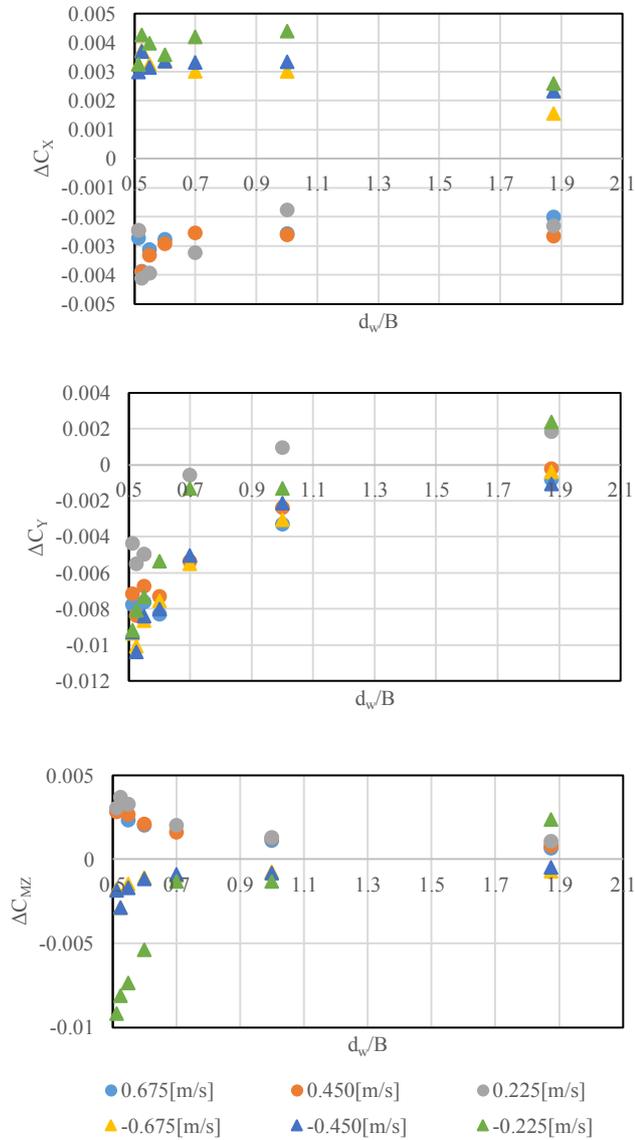


Fig. 41 Hydrodynamic force due to existence of quay wall.

4.5.3 模型船の取り付け位置の影響

前項では模型船を曳航岸壁の中央に取り付けた実験を行ったが、ここでは模型船の取り付け位置を前後方向に 1[m]変化させることで、取り付け位置の影響調査を行った。前後に 1[m]移動させても、船首船尾は曳航岸壁からはみ出ることはない。

船首尾および岸壁からの造波が顕著となる最大の曳航速度 0.675[m/s]の実験結果について、前進方向を Fig. 42 に、後進方向を Fig. 43 に示す。凡例の f1 は模型船を前方に 1[m]、b1 は後

方に 1[m]移動させた結果であり、cは既出の中央位置での結果を示している。前進方向・後進方向ともに、中央に設置した結果に対して多少の増減はあるものの、変化の傾向はほぼ一致する結果となっている。この傾向は設定速度を変更しても同様であった。これらの結果から、模擬岸壁を曳引した際の航走波の影響や船尾流れと模擬岸壁の干渉影響などはあまり小さくなく、今回使用した岸壁の長さは妥当であったといえる。

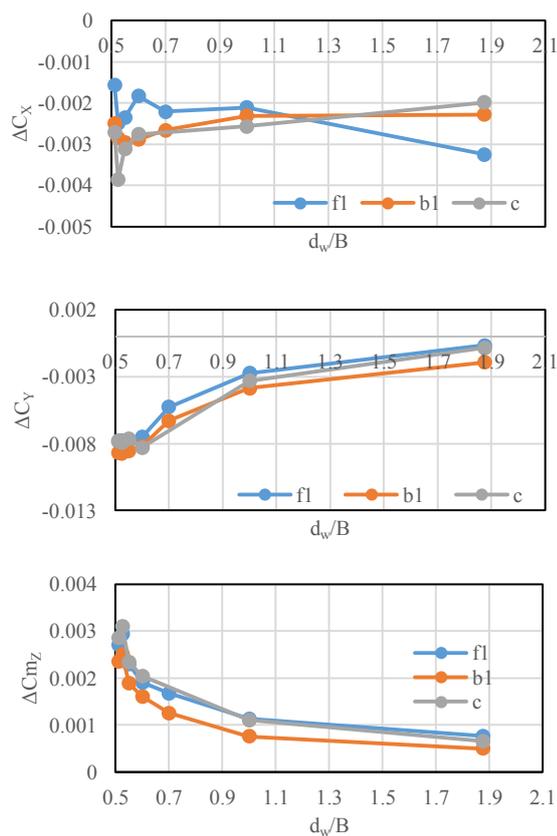


Fig. 42 Influence of mount position of ship at 0.675[m/s] (forward).

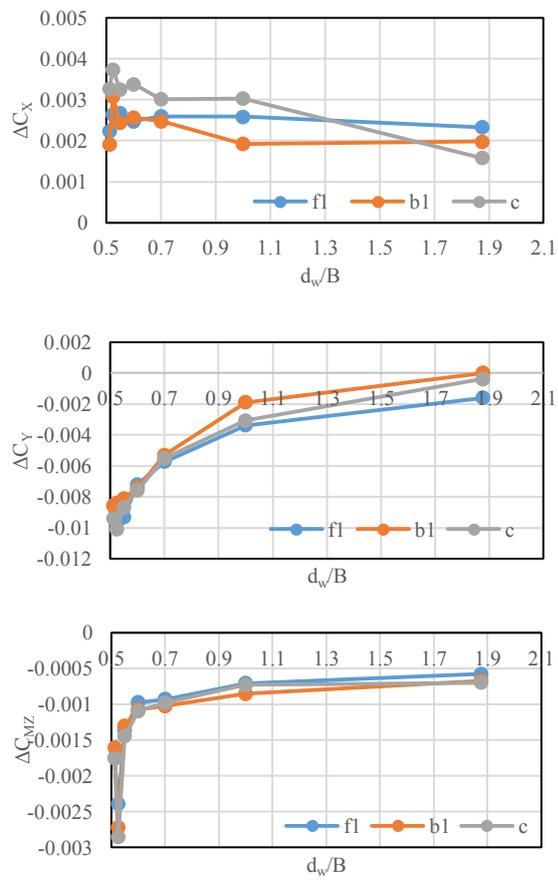


Fig. 43 Influence of mount position of ship at 0.675[m/s] (backward).

4.5.4 固定岸壁との比較

Fig. 38 に示した水槽内に固定した岸壁を用いて、操縦性分野において側壁影響を計測する場合と同様に船舶と岸壁との相対速度がある状態での実験を行った。設定速度を前述した実験と同一にして、曳航台車が固定岸壁外から加速し、一定速度になった後に固定岸壁中央を通過する2秒間の計測結果の平均値を側壁影響としてまとめた。最接近距離は、模型船が固定岸壁通過時に瞬間的に大きな力を受けて移動する恐れがあったため、 $d_w/B=0.55(20[\text{mm}])$ とした。

Fig. 44 に実験結果の一例として、速度 $0.45[\text{m/s}]$ で $d_w/B=0.55$ のモーメントの計測結果を示す。用いた固定岸壁が短いので、計測結果を見る限り、ノイズは大きい計測区間ではある程度の一定となった結果が得られている。Fig. 45 に前進方向、Fig. 46 に後進方向の実験結果を示す。比較のために曳航岸壁の実験結果の $0.45[\text{m/s}]$ と $0.675[\text{m/s}]$ の各距離における平均値をプロットした。ただし、4.5.2 章と同じ理由により、 $0.225 [\text{m/s}]$ の結果は含めていない。

前進方向の解析結果について、曳航岸壁と固定岸壁の結果には岸壁との距離に関わらず一定の差が生じている。これは両方で船体周りの流速分布の差が大きいことを示しており、岸壁と船体の相対速度の有無が重要であることを意味している。次に横力に注目すると、岸壁近傍では曳航岸壁を用いた場合よりも大きい解析結果となっている。最後に回頭モーメントに注目すると、固定壁を用いた結果は曳航岸壁に対して距離によらず過小評価する結果となった。

次に後進方向の結果をみると、全体的な傾向としては前進方向と同様の傾向が得られた。特に回頭モーメントについては、固定岸壁を用いた実験ではかなり過少評価する結果となった。船体形状の前後非対称性により大きな差が生じたが、実際の港では入船係留がほとんどであるため、外洋側から侵入してくる津波は本実験における後進方向となる。したがって、固定壁を用いた過去の側壁影響に関する実験結果や知見を用いると、回頭モーメントを過小評価する危険があることがわかった。

以上より、岸壁係留船舶に津波が来襲した場合の安全性評価を行う場合には、岸壁と船側の間に相対速度を持つ操縦性分野の側壁影響をそのまま適用することは困難であることが示された。

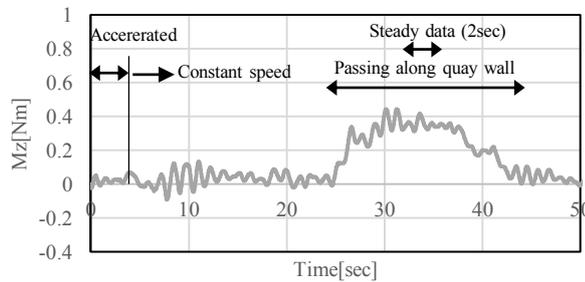


Fig. 44 Time history of the measured moment

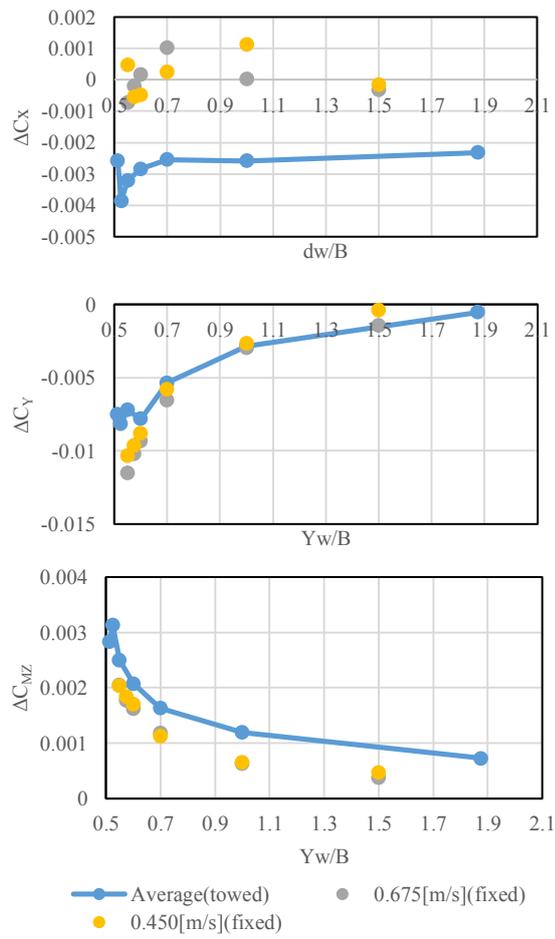


Fig. 45 Comparison of hydrodynamic force between towed and fixed walls (forward).

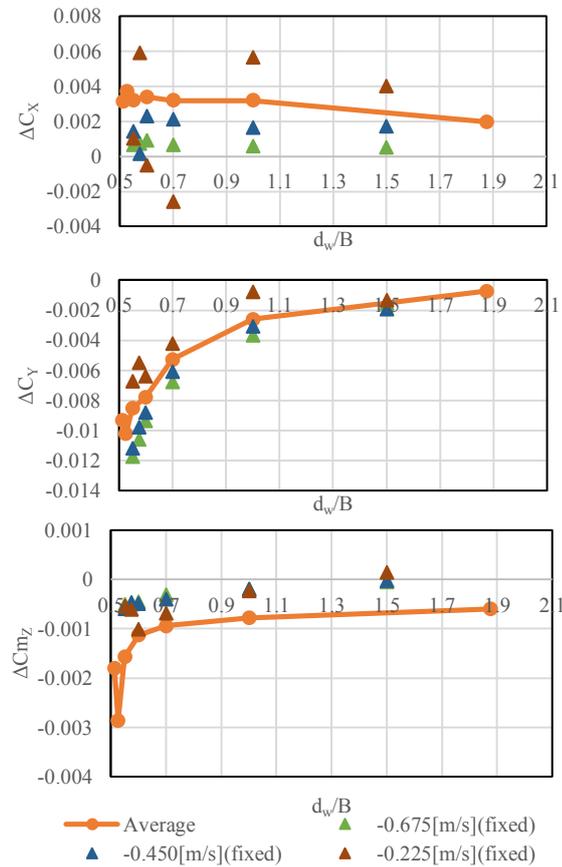


Fig. 46 Comparison of hydrodynamic force between towed and fixed walls (backward).

4.5.5 模型船の取り付け角度の影響

曳航岸壁は流れに対して平行に配置したまま、模型船に斜航試験と同じ流入角(±5, ±10度)を与えた実験を行った。模型位置は曳航岸壁の中央である。ただし、模型船に流入角を持たせると、船首もしくは船尾部が曳航岸壁と接触するため、曳航岸壁と模型船甲板面との最接近部に20[mm]以上の距離を持たせた実験を行った。そのため、船首船尾部がオーバーハングして岸壁側に飛び出すような極端な状態の実験は行っていない。模型船を上方から見て右回りに流入角をつけた場合の結果を Fig. 47 から Fig. 50 に示す。

これまでの解析結果と大きく異なり、流入角をつけた状態では、岸壁と船体の相互干渉に強い前後非対称性が生じる傾向がみられる。特に前後力と回頭モーメントにおいて、非対称性が顕著に表れている。解析結果をみると、流入角が無い場合の解析結果と比べて、距離による顕著な違いは見られない。これは、流入角がついた状態では曳航岸壁と船側との距離が一定以上

離れていることが原因であろう。したがって、流入角がある状態では、距離にはあまり依存しないことがわかる。特に船首側が岸壁に接近している後進方向のモーメントの実験結果は、斜航試験の結果と同等であることがわかる。

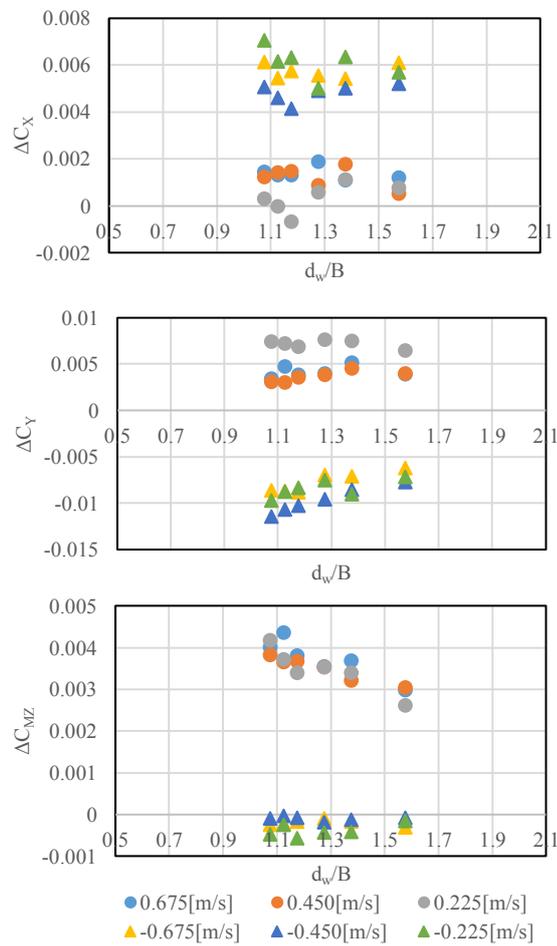


Fig. 47 Measured hydrodynamic force at mount angle of ship of +10 degrees.

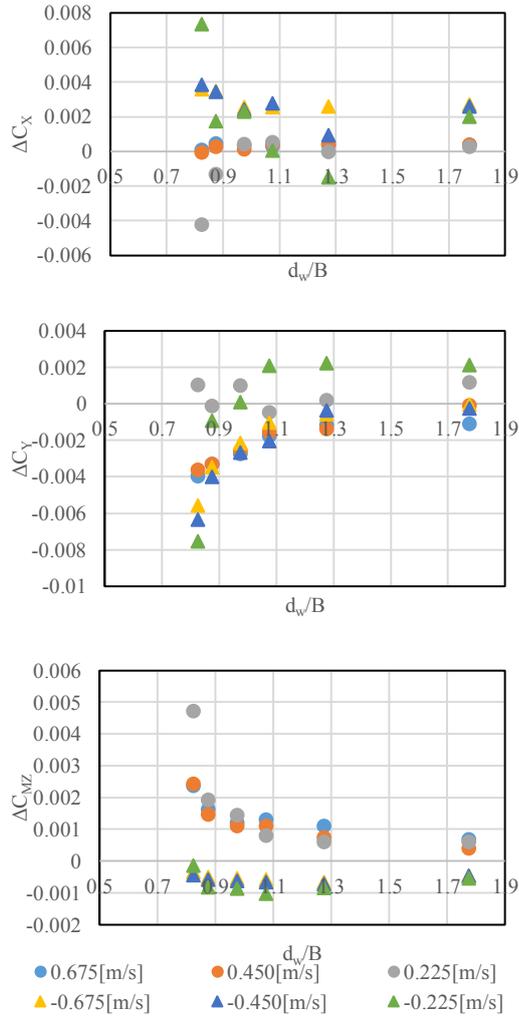


Fig. 48 Measured hydrodynamic force at mount angle of ship of +5 degrees.

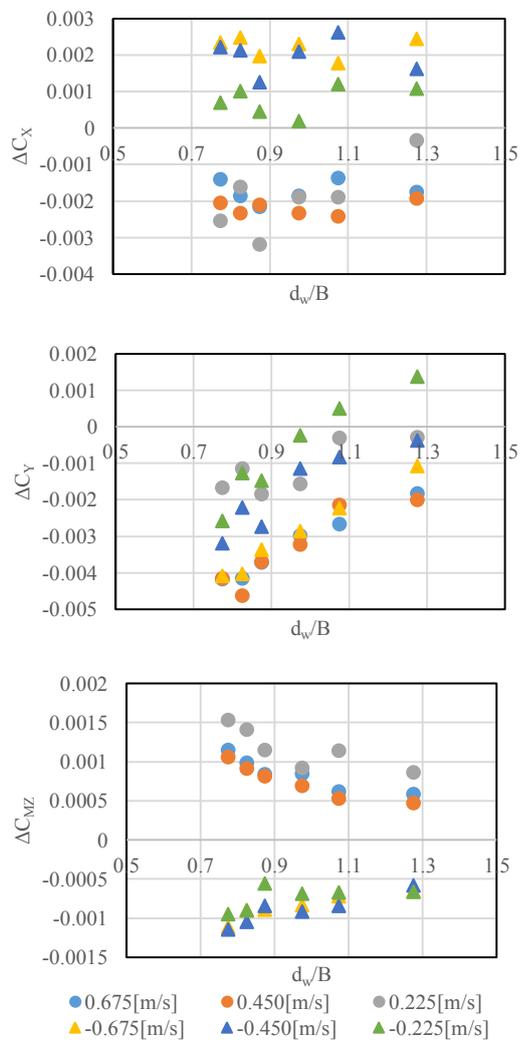


Fig. 49 Measured hydrodynamic force at mount angle of ship of -5 degrees.

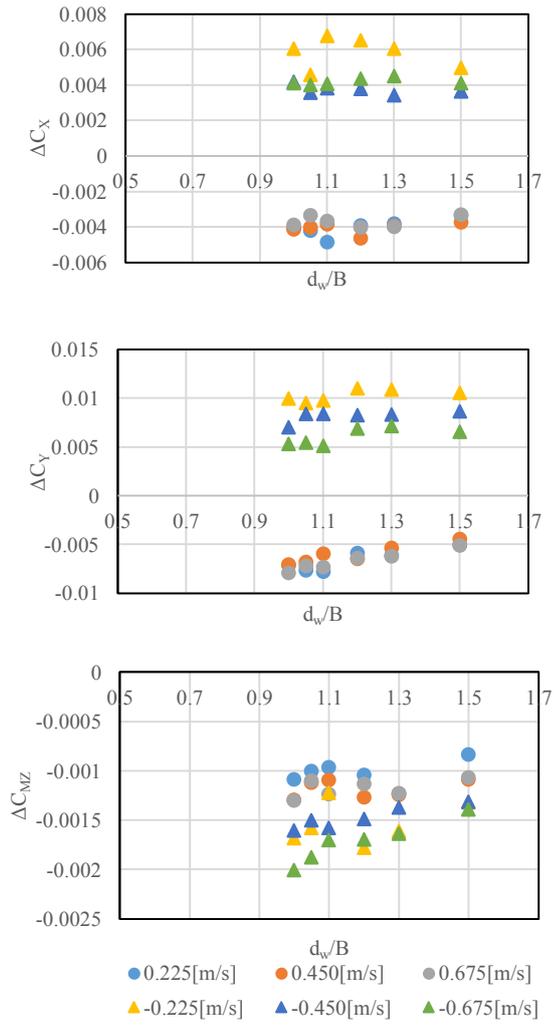


Fig. 50 Measured hydrodynamic force at mount angle of ship of -10 degrees.

これらの実験結果をまとめて取り付け角度ごとにどのような影響があったかを調査する。**Fig. 51**に前進方向、**Fig. 52**に後進方向で、各取り付け角度ごとにどのような力が計測されたかを示す。これらのグラフは、各流入角度において、速度 0.45[m/s]と 0.675[m/s]の二つの平均値を用いている。

Fig. 51 の前進方向の実験結果をみると、横力と回頭モーメントについては±5度での解析結果が0度での解析結果の線に乗っていることから、岸壁との距離への依存は0度とほぼ同じであり、斜航試験結果に対して線形な結果になることがわかる。次に±10度の結果は0度の結果から大きく離れていることから、±5度以上になると岸壁との距離だけで議論できないことがわかる。次に、**Fig. 52** の後進方向の実験結果をみると、前進方向の結果と同様に横力と回頭モーメントは関数近似しやすいようであるが、前後力については複雑な変化となっている。

前進、後進の結果ともに、前後力については、船型の前後非対称性から、船体に角度をつけて取り付けたときに、岸壁に近づいた側の形状の影響が大きく、一見シンプルなグラフに見えるが角度ごとの傾向が異なるため複雑な変化となっている。

以上のことから、係留索によって運動がかなり拘束されている係留船舶が津波の襲来を受ける場合の安全性評価を行う場合は、斜航角が5度程度までの結果と、流入角0度での岸壁影響の距離に対する変化の足し合わせによって、ある程度表現できることがわかった。ただし、係留状態からの漂流シミュレーションを行うような場合には、±10度の結果を踏まえると複雑な表現方法が必要であることがわかった。

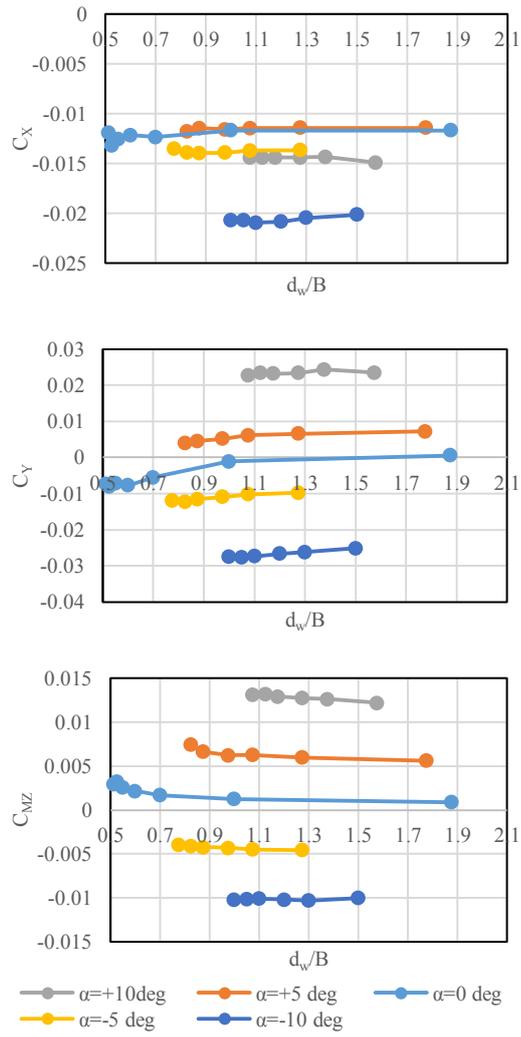


Fig. 51 Measured forces and moment on mount angle of ship (forward).

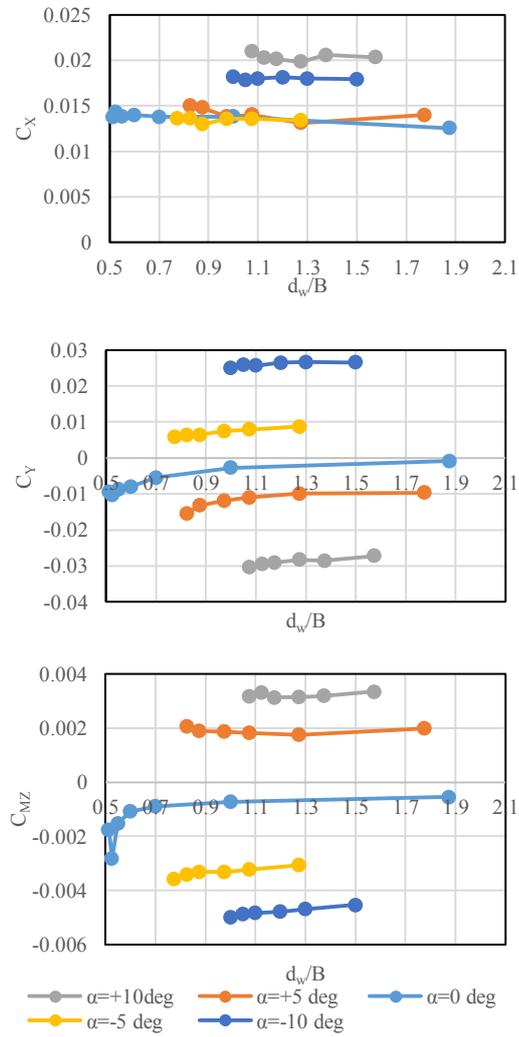


Fig. 52 Measured forces and moment on mount angle of ship (backward).

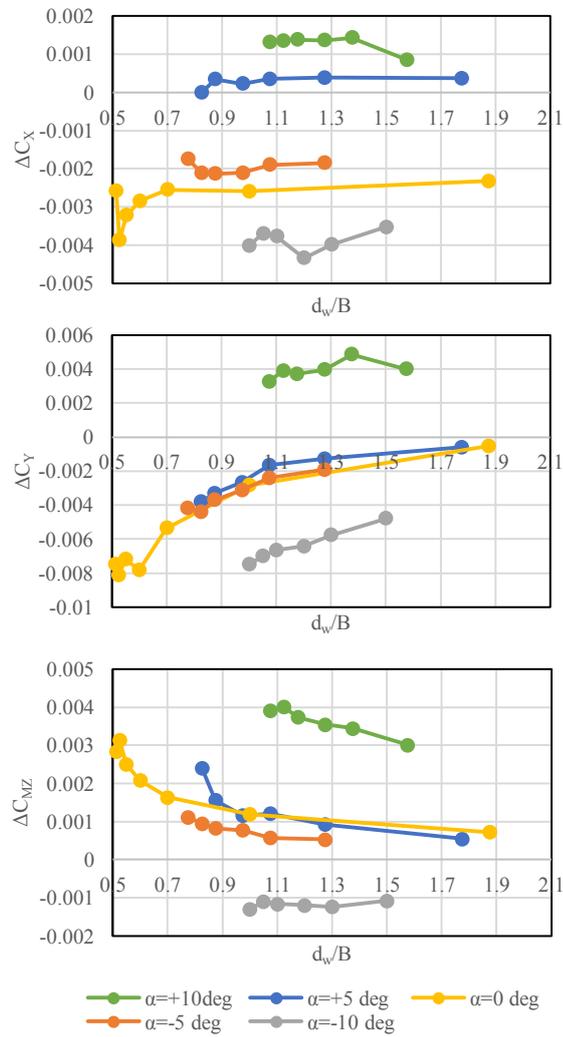


Fig. 53 Influence of mount angle of ship (forward).

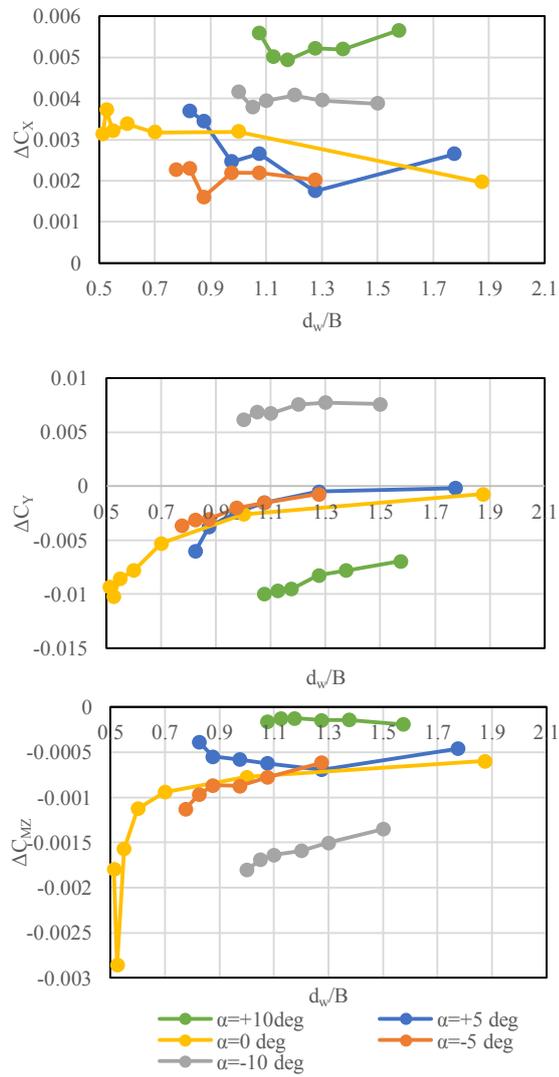


Fig. 54 Influence of mount angle of ship (backward).

4.6 CFD

ここでは、前節までに示した実験結果に対して CFD を援用することで、岸壁と船舶間の流れ場の解析と考察を行う。さらに、岸壁に加えて海底を含む L 型の巨大模型を作成して曳航試験を行うことは難しいため、CFD を用いて実施が困難な状態での実験結果の補完を行うことを目的とする。この岸壁模型実験の類似問題としては、操縦運動性の 2 船体問題として知られているが、船体に比較して大きな構造物がこれほど近くに配置した計算例は少ない。

4.6.1 計算手法概要

本研究で使用した CFD ソルバーは、アイオワ大学・水理学研究所(IIHR)の非定常レイノルズ平均ナビエストークス方程式法(Unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes equation method: 以下 URaNS 法), CFDSHIP-Iowa Version 4[23][24]である。主な特徴としては、船体の姿勢変化を容易に考慮できる重合型計算格子への対応機能, 自由表面の強非線形性を考慮できるレベルセットタイプ・自由表面捕獲型解法, 加えて平水中ならびに入射波浪中の 6 自由度船体運動の予測機能などが挙げられる。

流場の支配方程式は 3 次元・非定常・非圧縮の URaNS 方程式ならびに連続の式, 加えて Blending $k-\epsilon/k-\omega$ 乱流モデルと自由表面決定時に使用するレベルセット関数の輸送方程式である。方程式の離散化には非直交曲線座標系への変換と高次有限差分法を使用し, 速度場・圧力場結合には Predictor-Corrector ステップを骨子とする PISO 型アルゴリズムを用いている。構造格子の適用を基本とする本手法では, 重合格子型・領域分割解法の採用によって複雑物体への対応と計算効率の向上, ならびに船体動揺問題への適用性向上が図られている。加えて MPI プロトコル並列計算コーディングが基幹アーキテクチャーとなっており, それを有効活用するための高効率連立方程式ソルバー/PETSc[25]や, 重合格子情報処理モジュール/SUGGAR[26]も採用している。なお船体運動の予測においては, 6 自由度連成運動方程式を陰解法的もしくは陽解法的に解く。

CFDSHIP-Iowa の精度検証の一例として, Fig. 55 に追波中を高速航行する瘦せ型船の拘束模型試験を模した CFD 計算の結果を示す。この図から, 出会い波周波数が非常に小さな条件下において, 自由表面の変形を含む船体周りの複雑な流れや水面変化に伴う船体運動を高精度にシミュレート可能であることが確認できる。その他の種々の船型や条件下における検証例については, IIHR の論文を参照されたい。

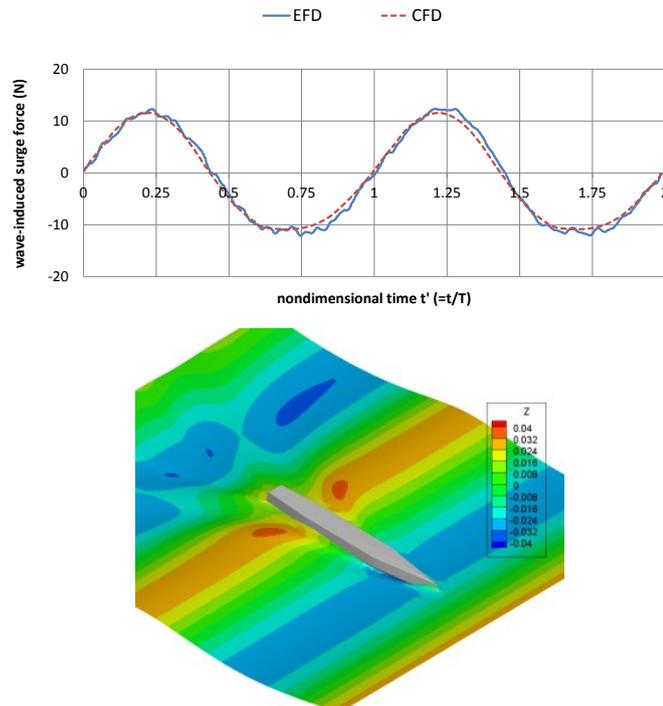
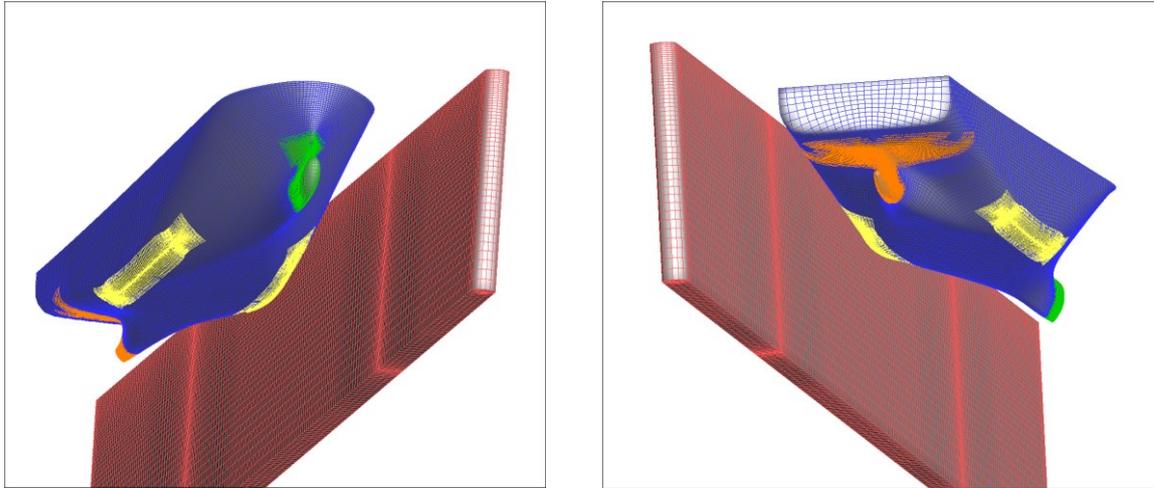


Fig. 55 Example of CFD result by CFDship-Iowa.
($H/\lambda=1/20$ and $Fn=0.35$)

4.6.2 計算格子

計算行使の生成には Pointwise V18.3[27]を用いた。計算格子の概観とブロック構造を Fig. 56 に示す。計算格子は船体の左舷側・右舷側を覆う物体適合ブロックと船首船尾の複雑な形状に対応したグリッド及びビルジキール、岸壁模型を模したグリッドと背景格子から成る。岸壁と船体平行部との距離は模型スケールで 20[mm]($d_w/B=0.55$)から 200[mm]($d_w/B=1.0$)までの計算を行った。Table 5 にグリッド数を示す。境界条件[28]は船体表面および岸壁模型表面は non-slip とし、他は Fig. 57 に示す。底面は、この実験を模擬する上で水槽底面の影響を無視できないと考えて、不浸透性[28]とした。

この初期位置から、計算を開始し、流場が落ち着くまでの計算を行った。



Fore side

Aft side

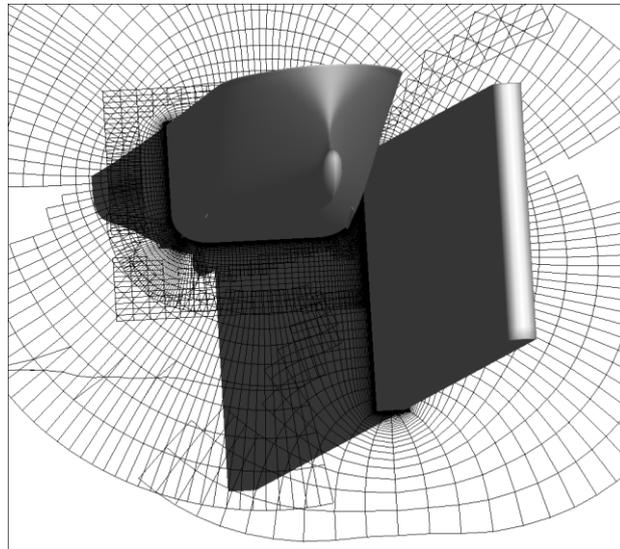


Fig. 56 Overview of computation grid

Table 5 Number of grid points

| Item | i*j*k directions | Grids |
|-----------------|------------------|-----------|
| Hull(P/S) | 144x61x67x2 | 1,177,056 |
| Bow(P/S) | 28x56x34x2 | 106,624 |
| Stern(P/S) | 51x55x33x2 | 185,130 |
| Bilge Keel(P/S) | 147x55x47 | 379,995 |
| Wall(P/S) | 211x61x56x2 | 1,441,552 |
| Refinement | 220x61x71 | 952,820 |
| Background | 131x110x75 | 1,080,750 |
| Total | | 5,323,927 |

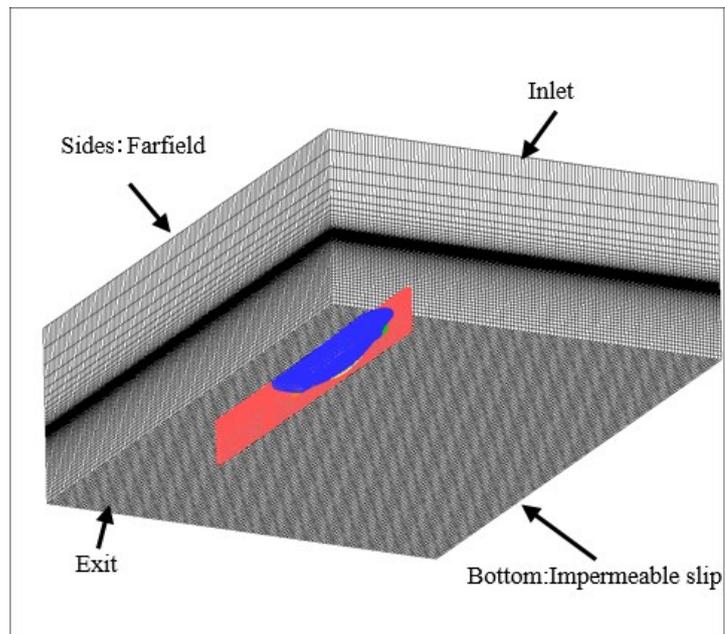


Fig. 57 Boundary conditions

4.6.3 計算結果

Fig. 58 に CFD の計算結果と実験結果との比較を示す。

前後力に注目すると非常に良い一致を示している。横力については、前進方向については約半分の過小評価をしているが、後進方向については非常によい一致が見られた。また、岸壁影響による力の方向および岸壁との距離に対する傾向は一致している。最後に回頭モーメントについては横力が一致していないことから、回頭モーメントの大きさとしてはあまり一致していない。ただし、横力と同様に岸壁との距離に対する変化の傾向はとらえることができている。

以上の比較結果から、今回の CFD の結果は、流体力の定量的精度には改善すべき余地があるが、流体力の定性的傾向や、岸壁との距離による船体周辺の流場の変化は捉えているものと判断し、以下では CFD の計算結果にもとづき詳細な考察を行う。

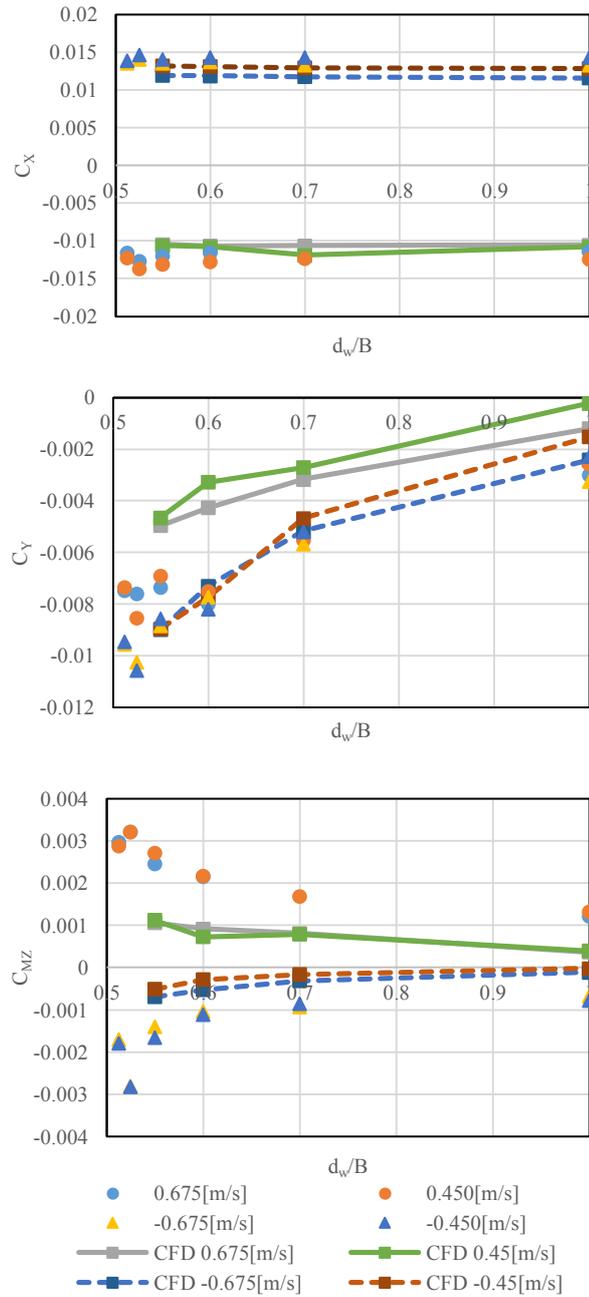


Fig. 58 Comparison of CFD and experiment

4.6.4 考察

4.6.3 節の実験結果との比較に基づき、主に横方向力について考察を行う。横力は船体左右に働く圧力差の総和であるため、CFDによる船体表面圧力の分布を岸壁側と反対側で比較する。この比較は岸壁との距離ごとに行う。Fig. 59に前進方向、Fig. 60に後進方向のCFDの結果の比較を示す。まずは外側の圧力分布に注目すると、前進方向・後進方向ともに岸壁との

距離の違いによる圧力分布の違いは無いようである。次に岸壁側の圧力分布に注目すると、岸壁との距離が近いほど、船体中央の平行部と船底で大きな負圧が発生している。また、岸壁と船体が十分に離れた $d_w/B=1.0$ の条件では、圧力分布の左右差はほとんど見られなくなる。

次に、横力は船体左右の圧力差の総和であるが、平水中を航行している状態であっても船体表面には圧力変化が現れているため、単純に表面圧力のコンター図を描いてもその特徴を捉えることは難しい。そこで、CFDらしい解析として、船体左右の表面圧力の差を抽出してその分布を求めた。この結果を Fig. 61 に示す。前進方向および後進方向ともに岸壁から離れるにつれて、左右差が小さくなることが確認された。前進方向の解析結果の船体中央の負圧の変化をみると距離が離れるにつれて負圧の領域が小さくなっている。後進方向も同様に船体中央の負圧の変化が読み取れる。

船長方向の分布に注目すると、特に後進方向は船体重心から遠い船尾管の周辺で強い正圧が発生していることから、これが、強い回頭モーメントを発生させたと推察される。それに対して、前進方向は船首側の水面付近と船尾側で船長方向に広く正圧が発生しているが、互いに打ち消しあうために回頭モーメントを弱める方向に働いたと考えられる。

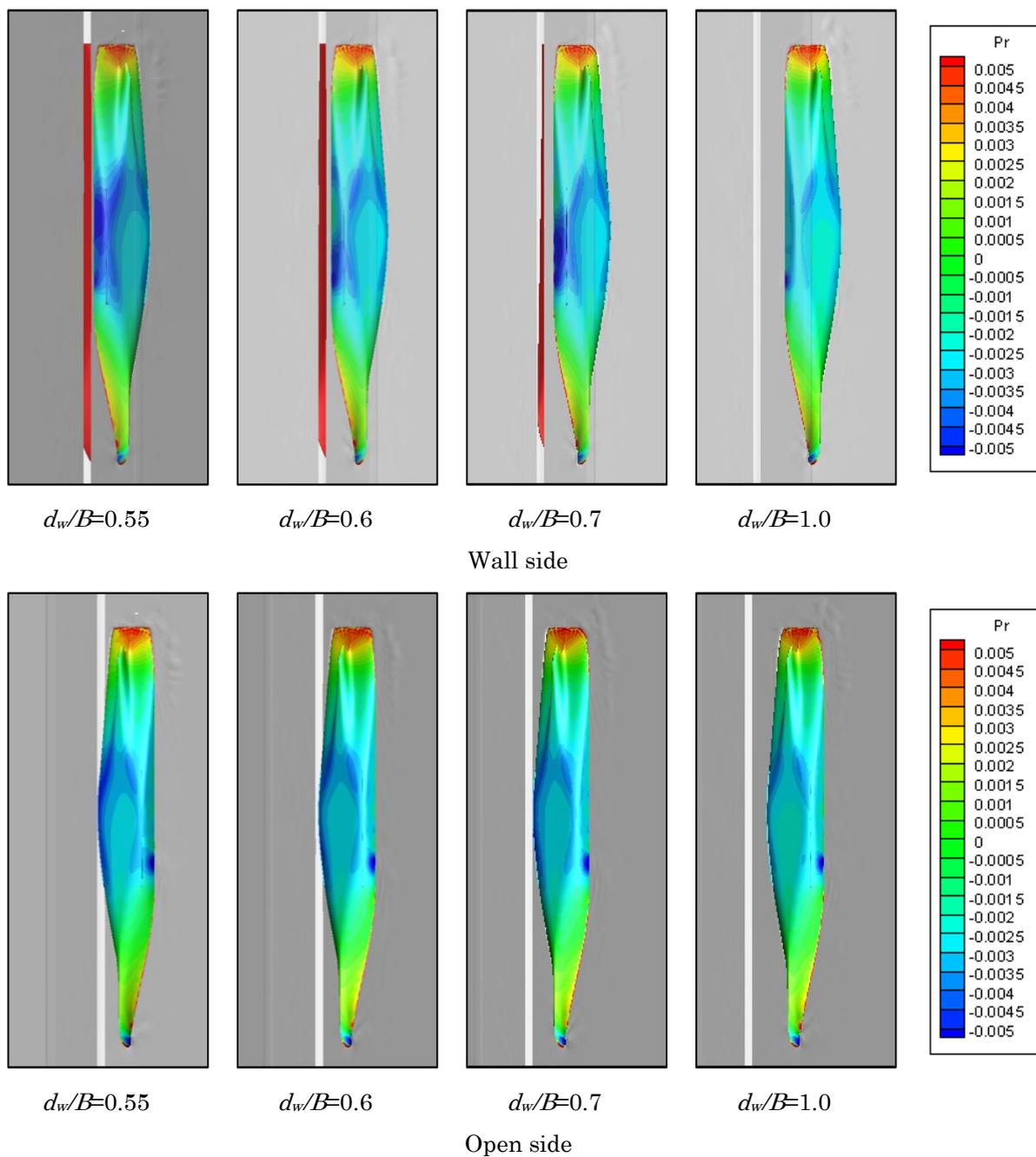


Fig. 59 Pressure distribution (Forward)

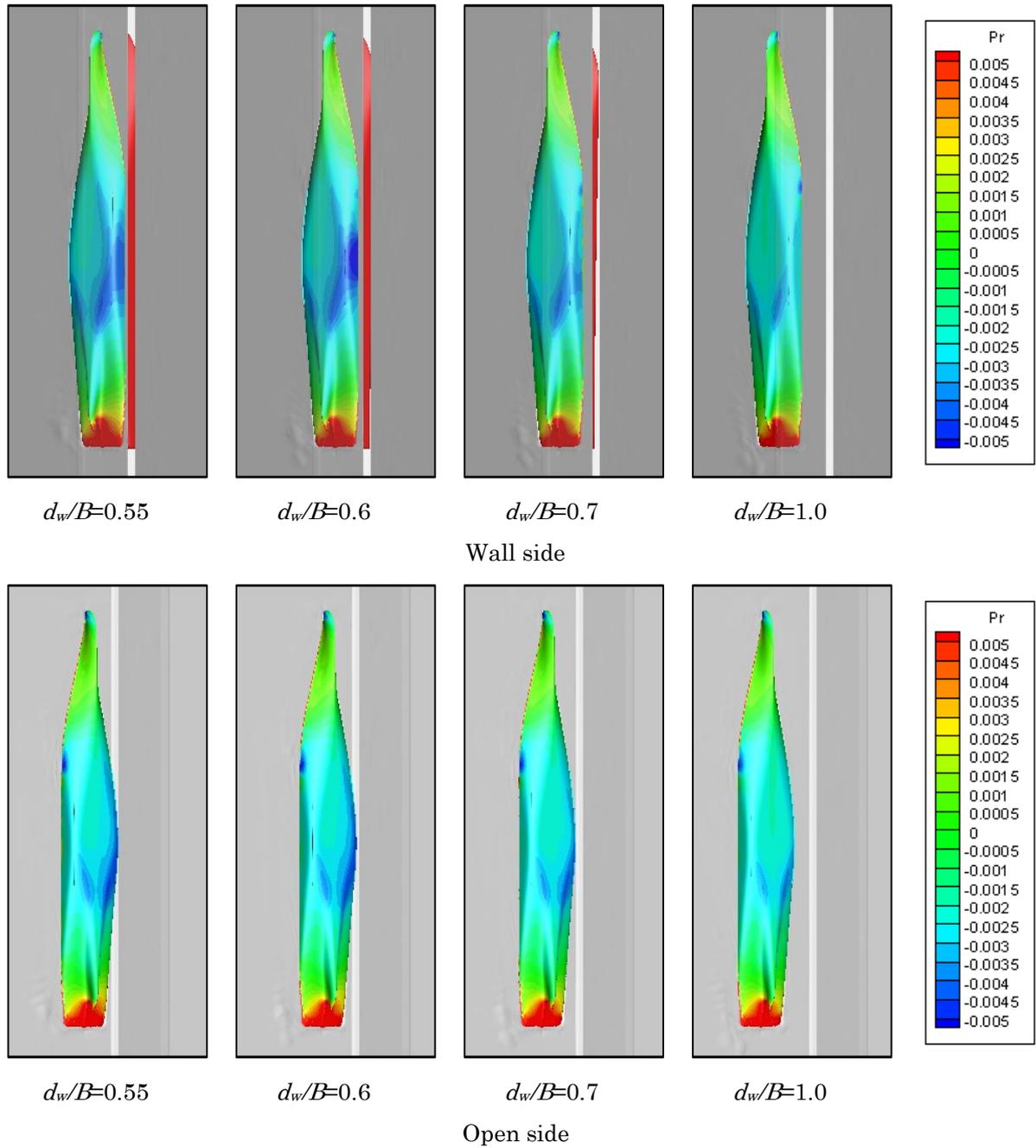


Fig. 60 Pressure distribution (Backward)

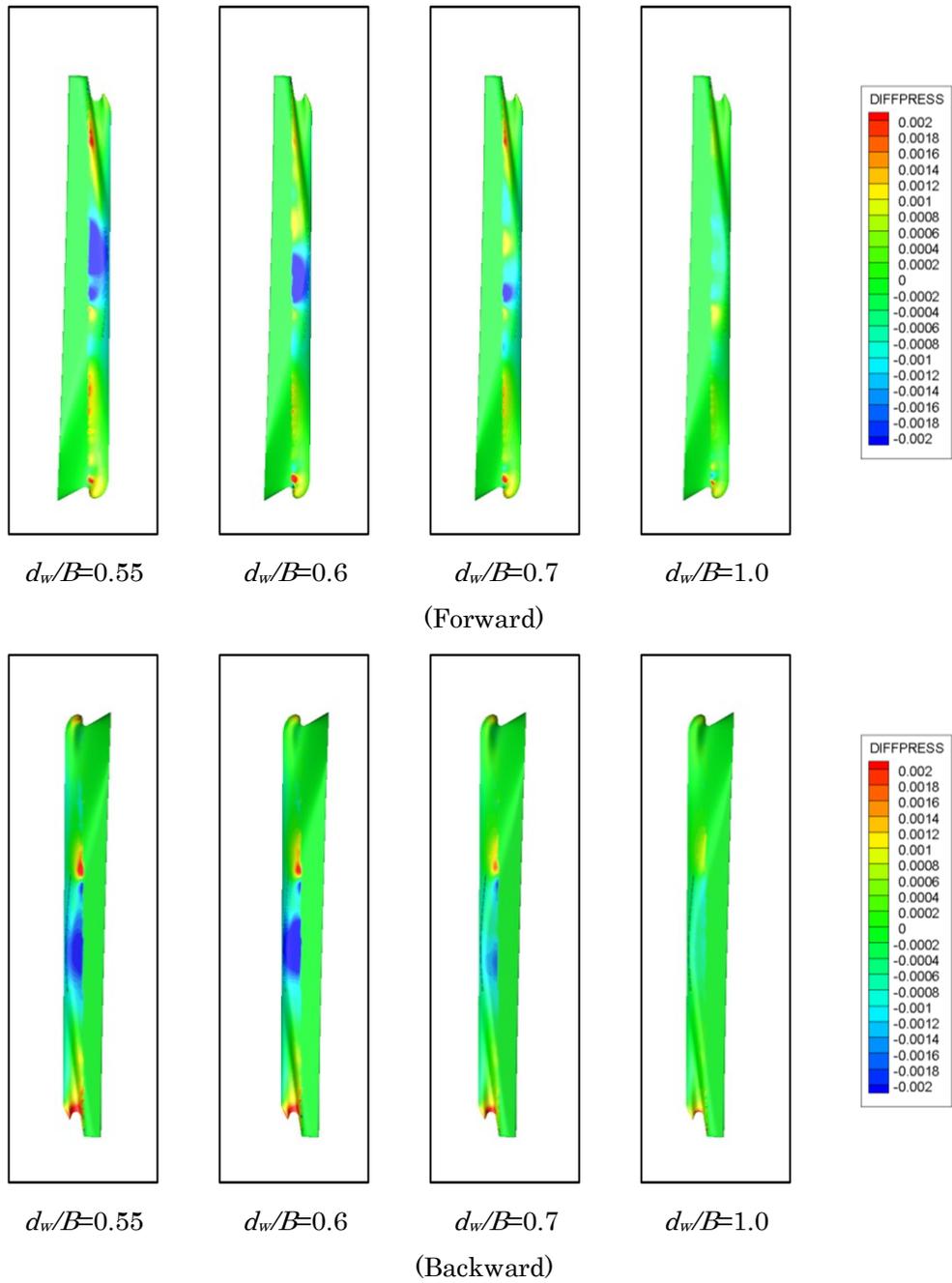


Fig. 61 Extracted pressure distribution due to wall existence
(wall side)

次に、岸壁側に発生する負圧の発生要因についての解析を行った。

Fig. 62 に前進方向における特に負圧発生部分に注目した船体表面圧力と流線を示す。流線の色は流速の絶対値を表し、特徴的な負圧発生部分については圧力(-0.005)の等値面を示している。岸壁と反対側のオープンサイドの船底及び船側の負圧が発生しているのは、船体平行部の前後であり、このエリアは船体の形状の変化が大きく流線の方向が大きく変化するためである。まず、船側の船体平行部の前方の負圧は両舷ともにほぼ同じ位置で同じ大きさであるため、岸壁による影響ではなく船体形状による負圧であることは明らかである。次に、岸壁側を見ると、船体形状による負圧の領域がより大きく発達しているように見える。さらに、Fig. 63 が示すように、岸壁側の流速は、前方から流入した流れが岸壁に遮られたため船底に回り込んだため早くなっており、周辺に比べて圧力が低下している。さらに、この船底側で発生した負圧は、周辺からの流れによって弱められるはずであるが、船体と岸壁との間は前方からの流れが遮られているため船底方向に流れを供給できず、強い負圧が発生したものと思われる。これは、船側を通過する流束が船体中央部を通過するとき広がっていることからわかる。

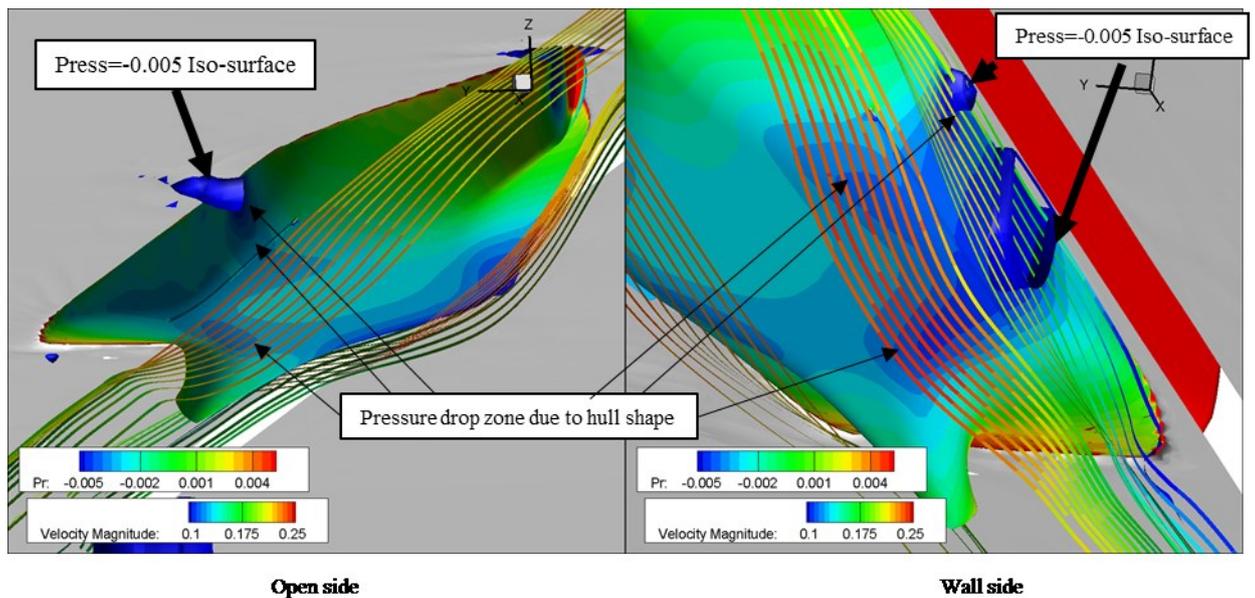
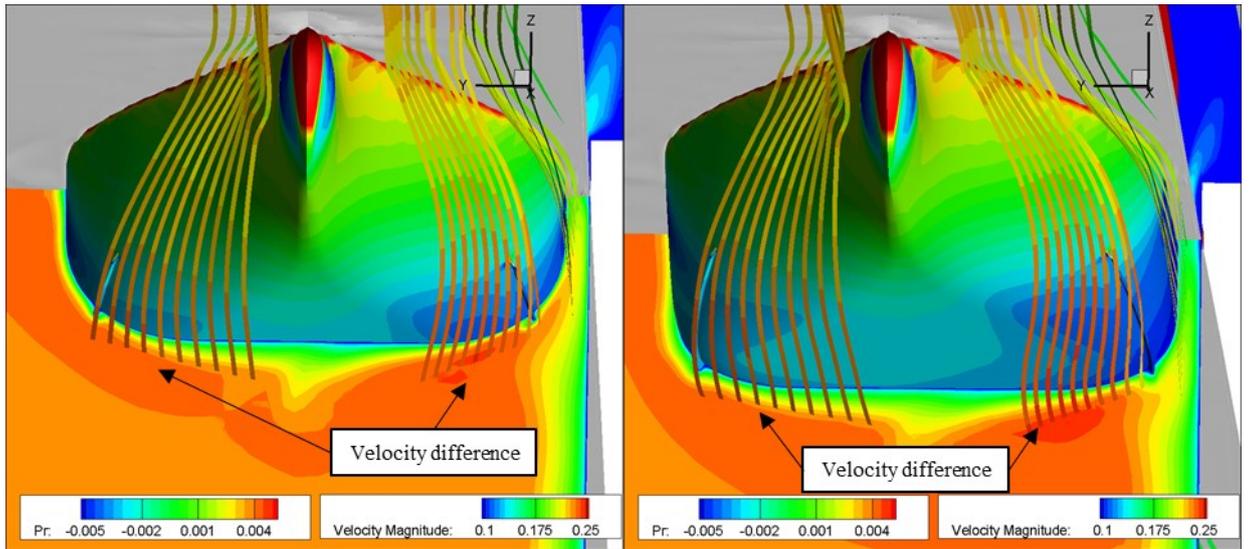


Fig. 62 Pressure contour on the hull and stream line around the hull with velocity contour
($d_w/B=0.55$ $U=0.45$ [m/s])



Fore of parallel part

Aft of parallel part

Fig. 63 Slice contour of velocity magnitude

($d_w/B=0.55$ $U=0.45$ [m/s])

同様の解析を後進方向についても行った。

Fig. 64 に前進方向と同様に圧力分布及び流線と、Fig. 65 に船体並行部前後での流速の絶対値の断面図を示す。Fig. 64 のオープンサイドの圧力分布をみると、船体形状による負圧は、船底の平行部の後端と船側の平行部の前方にしか発生していない。これはFig. 67に示すように、オープンサイドは、後方から船側を通ってきた流れが船体平行部の前部で剥離が発生するほどの流れの変化があるが、岸壁側の流れは岸壁と船体の間を流れる過程でかなり減速しており、ストールに伴う剥離という二つの異なる剥離が発生していると見て取れる。

岸壁側の船底と船側をみると、前進方向と同様のメカニズムによって船体平行部で大きな負圧を発生したことがわかる。また、負圧の領域および強さは前進方向の方が大きくて強いこともわかる。しかし横力の計算結果はFig. 58 で明らかなように、前進方向の方が圧倒的に小さい。このため、この船体平行部で発生した負圧だけではこの計算結果を説明することはできない。そこで、もう一度、Fig. 61 に注目して船長方向の圧力差の特に正圧の分布をみると、前進方向は船首船尾で多く発生しているのに対して、後進方向ではほぼ見られず、この差が横方向の計算結果の違いとして現れたと思われる。この違いは、船体平行部の後端では船体形状に従って流れ方向が変わっているが、Fig. 66 に示すように流線の形状は左右対称に近いが、流速が全く異なるため、船体表面の圧力が異なり大きな差を生んだと推察される。これに対して、後進方向はFig. 67にあるように、オープンサイドは明らかに流れの剥離が発生しており、岸壁側は流速の低下に伴う失速と剥離が発生しており、船首部で大きな圧力差が生じなかったものと思われる。

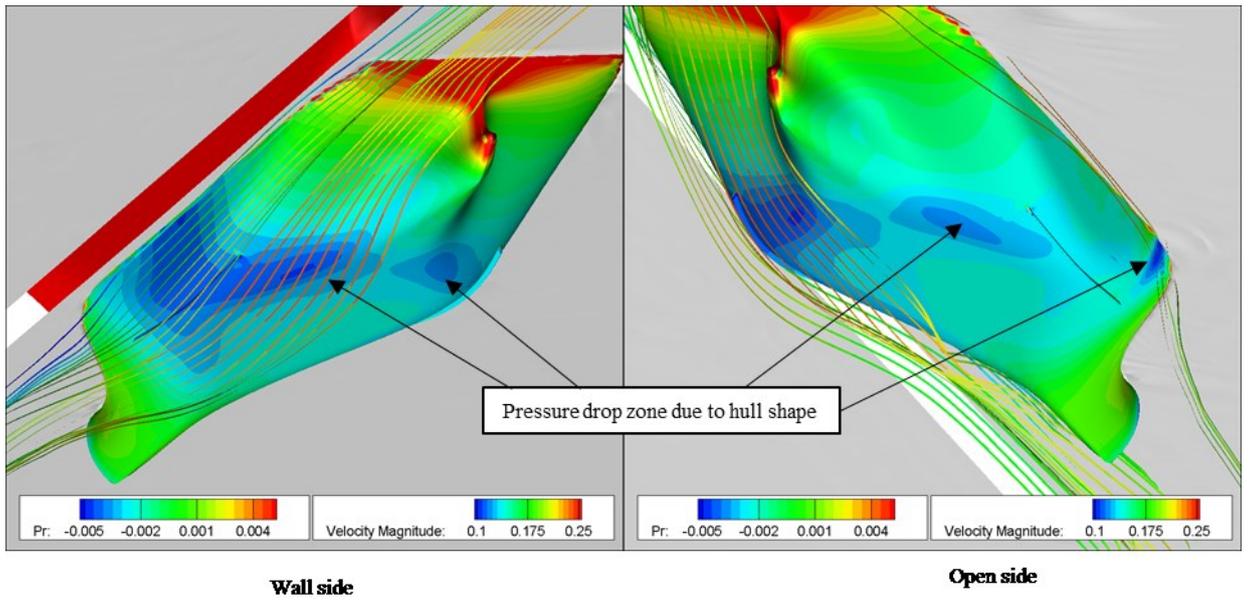


Fig. 64 Pressure contour on the hull and stream line around the hull with velocity contour
 ($d_w/B=0.55$ $U=-0.45$ [m/s])

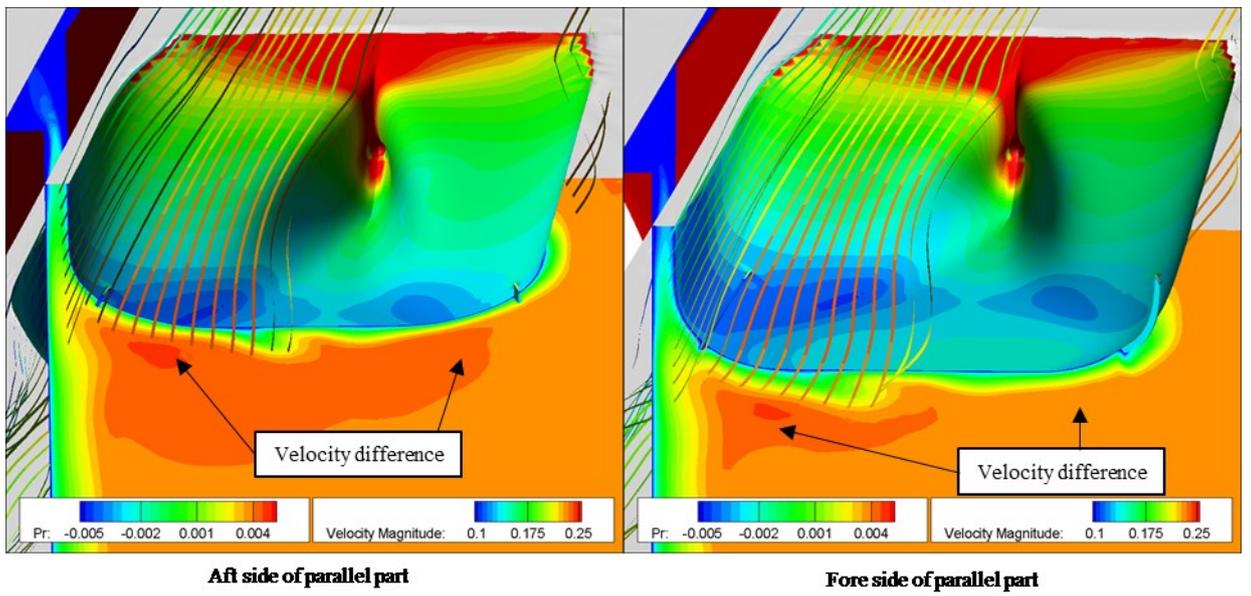


Fig. 65 Slice contour of velocity magnitude
 ($d_w/B=0.55$ $U=-0.45$ [m/s])

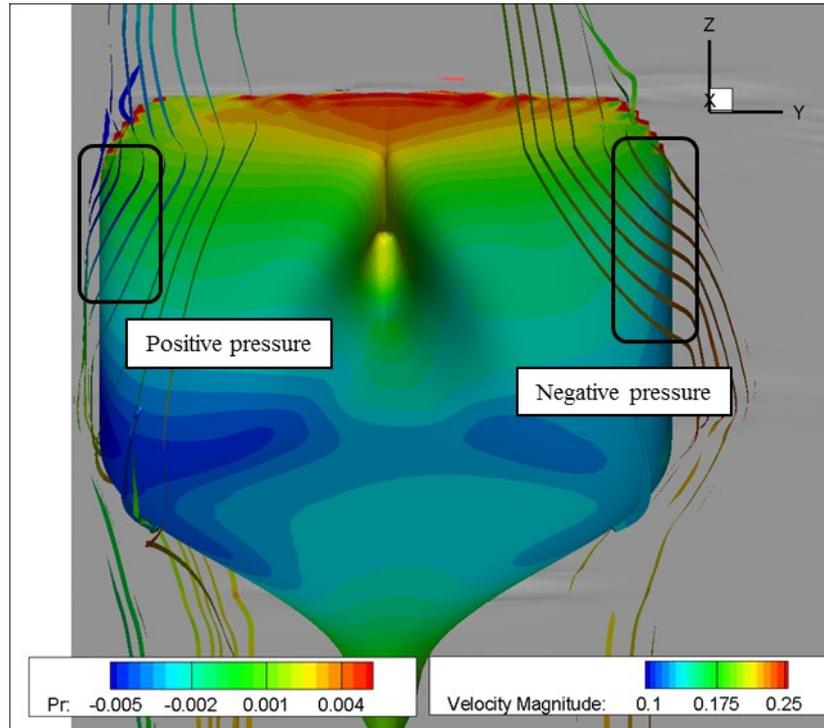


Fig. 66 Flow separation and its points ($d_w/B=0.55$ $U=0.45$ [m/s])

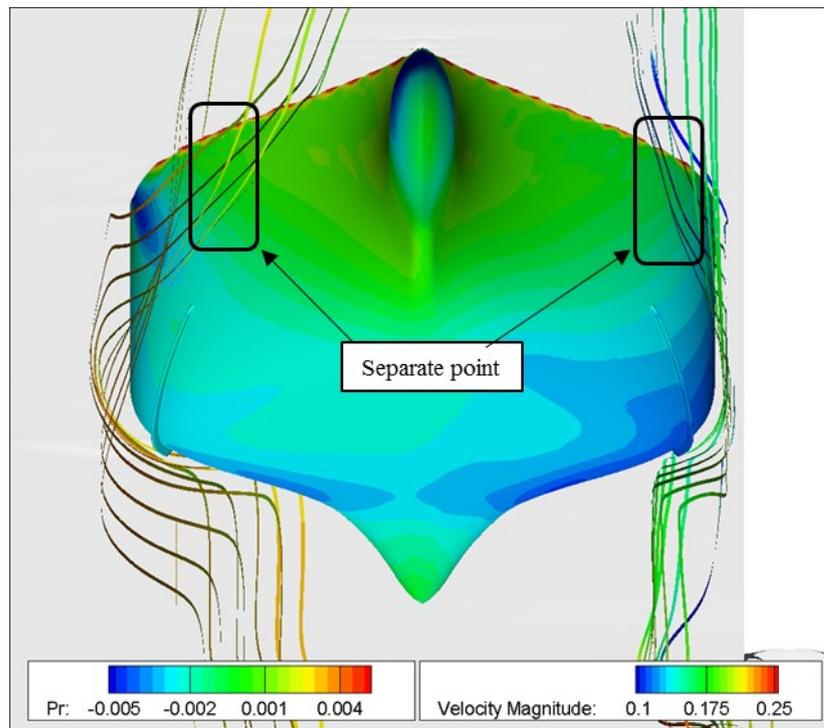


Fig. 67 Flow separation and its points ($d_w/B=0.55$ $U=-0.45$ [m/s])

4.7 考察と提案

4.7.1 岸壁影響の大きさの目安

4.5 章では、岸壁係留船舶に津波を想定した強い水平流れが作用した場合の流体力について、トータル力ではなく、岸壁が無い状態での実験結果を差し引いた岸壁の存在による影響を議論していた。しかし、実用的な観点からみると、岸壁影響が一般的な岸壁無しでの斜航試験の結果に対してどの程度の割合であるかを知ることは大きな目安となる。そこで、Fig. 53 および Fig. 54 に示した 0.45[m/s] と 0.675[m/s] の平均値について、各角度における絶対値の最大値を抜き出し、Fig. 40 の斜航試験の結果に対する割合を求めた。その結果を Table 6 および Table 7 に示す。限られた計測範囲内での最大値(主には最接付近での値)の比較ではあるが、斜航流体力に対して最大で 60% 超に及ぶことが分かる。したがって、岸壁係留船舶の津波来襲時の安全性評価を行う際には、本論文で述べた岸壁影響の考慮が必要であると考えられる。

Table 6 Percentage of quay wall effect to drift effect (Forward).

| | X-direction [%] | Y-direction [%] | Around Z [%] |
|----------|--------------------|--------------------|-----------------|
| 0[deg] | 41.4 | - | - |
| +5[deg] | 3.3 | 48.8 | 47.3 |
| +10[deg] | 9.1 | 24.9 | 43.5 |
| -5[deg] | 18.1 | <u>56.2</u> | 21.8 |
| -10[deg] | 27.5 | 38.6 | 14.0 |

Table 7 Percentage of quay wall effect to drift effect (Backward).

| | X-direction [%] | Y-direction [%] | Around Z [%] |
|----------|--------------------|--------------------|-----------------|
| 0[deg] | 30.1 | - | - |
| +5[deg] | 32.5 | <u>63.4</u> | 28.3 |
| +10[deg] | 40.2 | 52.8 | 5.9 |
| -5[deg] | 20.2 | 38.5 | 46.1 |
| -10[deg] | 29.6 | 40.9 | 56.5 |

4.7.2 係留強化への利用方法

係留に及ぼす津波の影響を考慮する場合、港湾ごとに想定される津波が異なるため、津波に対する汎用的な係留強化策を示すことは難しい。津波を考慮しない場合、岸壁に大型船舶を係留する際には、港湾内の風、波浪、潮流等を複合的に考慮して係留索の配置等が決められる。

しかし、本研究が対象としている岸壁係留は、防波堤内であるため波浪の影響は小さく、潮汐の影響も小さいと考えられる。この場合、岸壁係留船舶の安全性は、主として風の影響を考慮するのが妥当と考えられる。そこで、4.5章までに示した岸壁と平行に係留された状態での模型実験結果と風の影響を対比させることで、実用的な係留強化の指針とすることを試みる。

風の影響の推定に際しては、藤原ら[29]によって導かれた風圧力係数を用いる。ただし、対象船であるコンテナ船は藤原らの実験に用いられた船型と類似性が高く、推定式を用いずに Table 8 に示した満載コンテナ船の実験結果を直接用いた。

次に、風圧力と岸壁係留船舶が津波から受ける流体力が釣り合う点を調べた。ここでは、力の大きさのみに着目しており、方向については無視している。特に Y 方向については津波によって生じる横力が岸壁に押し付ける方向となっているため安全側の評価となる。Fig. 68 は、実験結果および風圧力の有次元化を行い、各津波速度に対応する風速を求めて近似曲線を描いたものである。前後方向については、津波の流速が 4.5[m/s]であった場合、風速に換算すると約 35[m/s]相当となる。ただし、岸壁のペンドル等との摩擦力を考慮していないため過大評価の傾向があろう。横方向については、津波と岸壁による影響は岸壁に押し付ける方向となるため、仮に津波の流速が 4.5[m/s]であった場合には約 15[m/s]の風が離岸する方向に吹かなければ、船が離岸することはない。回頭モーメントについては、津波流速 4.5[m/s]の場合、約 22[m/s]の風が斜め船尾側から吹いたときと同じ力となる。

以上のことから、流速が 4.5[m/s]の津波を想定した場合、風速 22[m/s]の風に耐えるだけの係留力を保持していれば、津波来襲時にも係留破断により漂流することはないといえる。ただし、津波襲来時に港湾内に風が吹いている場合は両者が重畳するため、Fig. 68 から津波の最大流速を入力値として求まる相当風速に対象とする港湾で見込まれる最大風速を加えた値の風速に耐えるだけの係留が必要となる。

Table 8 Maximum wind force coefficient [29].

| | X-direction | Y-direction | Around Z |
|---|-------------|-------------|----------|
| Incident angle of maximum wind force [deg] | 160 | 90 | 130 |
| Wind force coeff. | 1.05 | 0.94 | 0.125 |

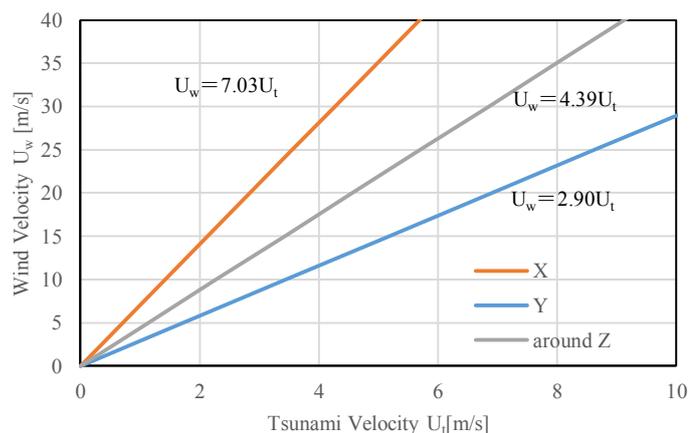


Fig. 68 Relation between tsunami and wind forces with respect to each velocity.

4.7.3 横傾斜への影響

ここでは、津波により生じる横傾斜について考える。岸壁係留船舶に対して前後から津波を受けた場合、横方向の流体力が生じるが、この着力点は水面下にあり、重心位置は一般的に水面上にあるため、横傾斜モーメントが発生する。また、横方向の力は係留索に作用する張力によって相殺されているものと仮定すると、係留による横傾斜も考慮する必要がある。これらの和として求めた横傾斜モーメントに釣り合うだけの復原力が生じる横傾斜角を求めることで、津波によって岸壁係留船舶に生じる横傾斜を議論することができる。

簡単のため、流体力の着力点を喫水の半分の位置とし、係留索の着力点を上甲板高さとする。そのうえで、実験を行った条件の中で最大の横傾斜モーメントが生じる条件を抽出し、復原力曲線[30]との交差点から釣り合う角を求めた。なお、メタセンタ高さには設計値である1.965[m]を使用した。

検討結果を Table 9 に示す。±10度の結果については、岸壁からかなり離れた状態であるにも関わらず、15度付近まで横傾斜することがわかる。しかし、復原力としては十分に余裕がある状態であり、本研究にて対象としたコンテナ船については、津波襲来時に復原性上の危険は生じないようである。

Table 9 Result of roll angle

| Attack angle [deg] | -10 | -5 | 5 | 10 |
|---------------------|------|-------|-------|-------|
| d_w/B | 1.3 | 1.275 | 1.775 | 1.375 |
| Flow velocity [m/s] | -4.5 | -4.5 | 4.5 | 4.5 |
| Heel angle [deg] | 14.3 | 4.8 | 4.0 | 12.8 |

4.8 結言

津波襲来時の岸壁係留船舶の安全性評価を目的として、岸壁と模型船を同時に曳航する水槽試験を実施することにより、津波が岸壁係留中の船舶に生じさせる流体力を実験的に求めた。また CFD の計算結果をもとに実験結果の考察に取り組んだ。その結果を以下にまとめる。

- 曳航岸壁と模型船を平行に配置した曳航実験では、岸壁に近いほど大きな力が作用する。その力の向きは、横力は船を岸壁に押し付ける方向であり、回頭モーメントは流れの流入方向側が離岸する方向である。
- 岸壁側では負圧が発生するが、これは前方から流入した流れが岸壁に遮られて船底に回り込み、周辺に比べて流速が早くなるためである。
- 固定岸壁を用いた実験結果と曳航岸壁を用いた実験結果は一致せず、特に回頭モーメントの評価に大きな差が生じる。
- 岸壁に対して流入角を持たせて模型船を取り付けた場合の流体力が得られ、その横力と回頭モーメントは定式化が可能と思われる変化であった。
- 斜航試験で得られる斜航流体力に対して、岸壁の影響は最大で約 60%であり、安全性評価および動的なシミュレーションの際に無視できない大きさである。
- 津波により生じる流体力について、相当風速への換算式を導くことにより、港湾に応じた係留強化策を議論することが可能となった。
- 津波により生じる横傾斜は最大で 15 度未満であり、復原性に関して危険は生じない。

本研究で行った実験は、コンテナ船に対して得られた結果であり、同じく岸壁係留を要するばら積み貨物船についても同様の検討が望まれる。また、実験上の制約から、水深影響については未検討であり、4.6 章にて述べたような CFD を用いた数値実験による検討が望まれる。今後は、今回の研究成果に基づき、係留系（係留索やアンカー）を含めた動的なシミュレーションや水位変動の影響評価などを通じて、さらに高度な津波対策の検討を行う予定である。

第5章 結論

本論文では、岸壁係留された船舶の津波来襲時の防災・減災の観点から、岸壁と船舶の相互作用をとりあげて、主として模型実験による調査を行った。

はじめに、大型船舶が離岸する際に働くサクシヨン力としての岸壁影響を模型実験により明らかにした。その実験結果を定式化して考慮した緊急離岸シミュレーションでは、岸壁影響の考慮の有無により一分一秒を争うような緊急時には有意な差が表れることを示した。岸壁影響について、 C_B を用いて定式化したことにより、今回対象とした船型以外への適用も容易であるため、津波防災計画の検討への使用が期待される。

今後の課題としては、実際の緊急離岸に対するシナリオの考察である。本研究では、最も単純なシナリオとして、垂直岸壁に対して平行に離岸する場合に対する実験を行ったが、通常の離岸操船では、船尾を先に離岸させ、船の主機による後進力も利用することが多い。また、単純な垂直壁ではない岸壁に対する検討も必要であろう。しかしながら、垂直岸壁および平行離岸を想定した本研究成果は最も安全側の評価を与えるものであり、安全性評価の観点からは実用に供することができるであろう。本論文では、岸壁影響に関する流体力学的な詳細解析は行わず、実際の津波避難計画への応用に重点を置いて、岸壁影響を船体平行部の投影面積と関係が深いと思われる C_B 値を用いて定式化を行った。より詳細な流場解析にもとづく検討を行うならば、この現象が付加質量の変化として扱えることから、ポテンシャル理論に基づいた考察を慎重に行えば、さらに汎用性の高い推定式を求めることができると思われる。さらに、近年は大型旅客船が日本に入港することが多く、これらの船は、多数のバウ/スターンスタスタを有するだけでなくポッド推進であることも多い。これは、離岸時に岸壁と船との間に水を供給する役割があるため、サクシヨン力をかなり弱めることが予想されるため、その影響度合いについて今後検討する必要がある。

次に、岸壁係留中の船舶に津波のような強い流れが作用する際の、岸壁の有無による流体力の違いについて模型実験による検討を行った。計測結果から、岸壁係留中の船舶に強い流れが襲った場合に作用する力を求め、岸壁係留の安全性の評価として一般的な風力との比較を行った。流体現象としては複雑であるが、どの程度の係留強化が必要であるかについて、実務者が理解しやすい相当風速に換算する式を提案したことは、今後の津波防災に貢献するものと思われる。また、CFDを用いた流場の解析を通じて、模型実験では得られない詳細な流れ場情報にもとづく実験結果の考察を行うことができた。CFDはこのような実験結果の物理的解釈を行う際の重要なツールとなる。

今後の課題としては、コンテナ船以外の船型についても検討を行うことである。そこで、VLCC 船型についても同様の実験を一部行い、その結果および考察、さらになぜ本論で取り扱わなかったかの理由も含めて付録に記載している。また、実験がさらに困難とあることが予想される海底面も含めた影響については、CFDのさらなる活用が必要となる。また、本論文では岸壁と津波流の流れ方向が平行である状態でしか実験を行っていないが、港湾の形状や係留状

態，津波の流れ方向が変わる瞬間などには，平行ではない可能性があるため，さらなる調査が必要であろう。

応用の課題としては，上下水位の変動や船体の運動なども考慮した動的な解析が挙げられる。本研究では強風との静的な力のつり合いのみを考慮したが，より詳細に係留船舶に対する津波安全性の調査を行うためには，係留索にかかる力は船体の運動に伴う伸縮によって発生するものであり，津波来襲中の船舶の挙動を正確にシミュレーションしなければならない。本論文の成果によって，流れと岸壁の作用による力については得られているが，運動を伴う場合のサクシオン力に得られた係数をそのまま用いることができるのか，津波の流れが付加質量の取り扱いに影響を及ぼすかなど，不明な点も残されている。

以上のように，岸壁係留船の津波来襲時の安全性に対して，細かいシナリオを突き詰めるとまだまだ必要な研究は数多くある。しかし，今回の研究を通して，津波襲来時の岸壁係留船舶に関する最も基本的なデータが得られたと確信している。この成果が今後の津波防災・減災に生かされることを切に願う。

謝辞

本研究を進めるにあたり，多大なるご支援，ご助言をくださった神戸大学大学院海事科学研究科 橋本博公准教授と小林英一名誉教授に厚く御礼を申し上げます。また，本論文の副査を引き受けていただいた，古莊雅生教授と三村治夫教授にも厚く御礼申し上げます。

CFD ソルバーに関しての多くの知識や示唆をいただいた海上技術安全研究所の田原裕介様に心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 国土交通省港湾局海岸・防災課：港湾における地震・津波に対する取り組みについて，平成 24 年 5 月.
- [2] 日本海難防止協会：3.11 巨大地震と大津波の教訓を伝える，平成 24 年 3 月.
- [3] 国土交通省 海事局：船舶運航事業者における津波避難マニュアル作成の手引き,津波発生時の船舶避難態勢の改善に向けた検討会,平成 26 年 3 月.
- [4] 国土交通省 海事局：旅客船事業における津波避難マニュアルの作成の手引き,津波発生時における旅客避難マニュアル検討会,平成 25 年 3 月.
- [5] 国土交通省近畿運輸局：船舶運航事業者における津波避難マニュアルの作成の手引き，平成 26 年 5 月.
- [6] 国土交通省関東地方整備局・茨城県土木部：鹿島港における東日本大震災の復旧・復興方針,平成 23 年 8 月.
- [7] 小林英一，米田翔太，越村俊一：津波来襲時の LNG 船の避難シナリオについて，日本船舶海洋工学会講演会論文集 (4), pp.277-278, 2007.
- [8] 小林英一,越村俊一,久保雅義：津波による船舶の漂流に関する基礎研究,関西造船協会論文集, 第 243 号, pp.49-56, 2005 年.
- [9] 増田光弘，庄司邦昭，南清和，増田光一：係留船舶の津波中挙動シミュレーションに対する 3 次元 MPS 法の適用，日本航海学会論文集，第 125 号, pp.175-182, 2011.
- [10] 増田光弘，南清和，増田光一：津波来襲時における岸壁に係留された船舶の防災・減災対策に関する研究(その 1)，日本航海学会論文集，第 128 号, pp.29-37,2013.
- [11] 榊原繁樹，阿部郁男，津金正典，久保雅義：東北地方太平洋沖地震津波来襲時の係留 VLCC の挙動再現について，日本航海学会論文集，第 127 号, pp.57-68, 2012.
- [12] 榊原繁樹，阿部郁男，津金正典，久保雅義：港内係留船舶のかく坐による津波対策に関する基礎的研究，日本航海学会論文集，第 128 号, pp.251-260, 2013.
- [13] 久保雅義，斎藤勝彦，榊原繁樹：岸壁全面係留船の船体運動へのストリップ法の拡張，海岸工学講演会論文集, Vol.35, pp.682-686, 1988.
- [14] Norrbin, N. H.: Wall Effects on a Ship Moving Through a Short Dredged Channel, Proceedings of the 10th ONR Symposium on Naval Hydrodynamics, pp. 71-88, 1974.
- [15] 井関俊夫，川村大輔：側壁影響下の操船限界に関する実験的研究，日本航海学会論文集，第 128 号, pp.161-166, 2013.
- [16] Satake, K., Fujii, Y., Harada, T. and Namegaya Y. :Time and Space Distribution of Coseismic Slip of the 2011 Tohoku Earthquake as Inferred from Tsunami Waveform Data, Bulletin of the Seismological Society of America,Vol.103 No.2B, pp.1473-1492, 2013.

- [17] Baba, T., Takahashi, N., Kaneda, Y. et al. :Parallel Implementation of Dispersive Tsunami Wave Modeling with a Nesting Algorithm for the 2011 Tohoku Tsunami, Pure Appl. Geophys. ,Vol. 172, pp.3455-3472, 2015.
- [18] <https://github.com/jagurs-admin/jagurs>
- [19] 内閣府:南海トラフの巨大地震モデル検討会(第二次報告) 津波断層モデル編, 平成24年8月.
- [20] 定兼廣行, 金沢正則: 浅水域を横移動する船体に働く横力と水槽側壁影響, 日本航海学会論文集 (85), pp.135-141, 1991.
- [21] 松田識史, 西尾茂, 志道敏夫, 高木俊宏: 離着岸時における非定常流体力解析法の開発, 日本船舶海洋工学会(10), pp.153-158, 2009.
- [22] Yasuhiro Kimura, Eiichi Kobayashi, Yusuke Tahara, Shunichi Koshimura : A study on estimation of hydrodynamic forces acting on a ship hull in shallow water by CFD, Conference proceedings of 2nd International Conference on Ship Maneuvering in Shallow and Confined Water: Ship to Ship Interaction, pp.193-202, 2011.
- [23] P. M. Carrica, R.V. Wilson, R. Noack, T. Xing, M. Kandasamy, J. Shao, N. Sakamoto, F. Stern : A Dynamic Overset, Single-Phase Level Set Approach for Viscous Ship Flows and Large Amplitude Motions and Maneuvering, 26th Symposium on Naval Hydrodynamics, 2006.
- [24] Y. Tahara, R.V. Wilson, P.M. Carica, F. Stern : RANS Simulation of a Container Ship Using a Single-Phase Level Set Method with Overset Grids and Prognosis for Extension to Self-Propulsion Simulator, J. Marine Science and Technology, 11(4), 2006, pp.209-228.
- [25] <http://www.mcs.anl.gov/petsc/>
- [26] Noack R : Enabling Large Amplitude and Relative Motions Through Overlapping Grids, 9th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, August 5-8, Ann Arbor, Michigan, USA, 2007.
- [27] <http://www.pointwise.com/>
- [28] Eric G. Paterson, Robert V. Wilson, and Fred Stern: GENERAL-PURPOSE PARALLEL UNSTEADY RANS SHIP HYDRODYNAMICS CODE: CFDSHIP-IOWA, IIHR Technical Report No. 432
- [29] 藤原敏文, 上野道雄, 二村正:船体に働く風圧力の推定,日本造船学会論文集, Vol.183, pp.77-90, 1998.
- [30] M. Levadou, R. vant Veer : Parametric Roll and Ship Design, Proceedings of the 9th International Conference of Ships and Ocean Vehicles, pp.191-206, 2016.

付録

VLCC 岸壁係留船が受ける流体力実験結果

ここでは本論で用いたコンテナ船型の模型船ではなく、VLCC 模型船での実験結果について取り扱い、本論に含めずに付録にする理由も含めて述べる。

実験装置及び実験条件

使用模型船は、Table 1 に示した VLCC 模型を用い、模擬岸壁は第 4 章と同じものを使用した。そのため、模擬岸壁の長さが船長の 2 倍超であることは同じであるが、取り付け装置の都合から、水面下の深さは模型船喫水の約 2 倍であった。実験速度はコンテナ模型船と同様に、実船スケールでの津波流速の基準は $4.5[\text{m/s}]$ とし、模型船スケールでは $0.4[\text{m/s}]$ を基準とした。よって実験曳航速度は、 $0.2[\text{m/s}]$ 及び $0.4[\text{m/s}]$ と $0.6[\text{m/s}]$ とした。

コンテナ船型では、流れに対して平行な岸壁に対して、角度をつけた実験を行ったが、VLCC 船型では行わなかった。

岸壁あり実験結果

岸壁模型に対して平行かつ船体中央が岸壁の中央に位置するように模型船を取り付けて、模型船と岸壁との距離を変化させながら曳航試験を行った。岸壁の存在によって引き起こされた流体力の無次元値を Fig. 69 に示す。速度 $0.4[\text{m/s}]$ での実験結果は特に多くの岸壁距離での実験を行った。これは、この一連の実験において初めて計測を行ったため、傾向の変化を得るために特に多くの実験を行ったものである。

Fig. 69 と Fig. 41 の比較を行う。まず x 方向成分の岸壁との距離の変化に対する傾向は、前進方向についてはほぼ同じであるが、後進方向については、岸壁近傍で急激に立ち上がっていることから、船型の前後非対称性による違いが非常に大きいことがわかる。また、その最大値はコンテナ船の約 5 倍であった。次に y 方向をみると、コンテナ船では岸壁との距離に関わらず力の方向は岸壁に押し付ける方向であったが、VLCC では力の向きが変わるほどの大きな変化であった。特に岸壁に近いとその力の向きは離岸させる方向であり安全性の観点から非常に重要なパラメータとなる。最後に回頭モーメントをみると、 y 方向と同様に、岸壁近傍では力の向きが反転する傾向があり、これは特に後進方向で顕著であった。その反転が発生する距離は、 $d_w/B=0.57$ であり、模型スケールで岸壁との隙間が $30[\text{mm}]$ 、フルスケールで $3[\text{m}]$ であった。また、その力の最大値をおおまかに比較すると、コンテナ船の 2 倍から 5 倍の力であった。

速度ごとの結果をみると、コンテナ船ほどの違いはあまり見られなかった。

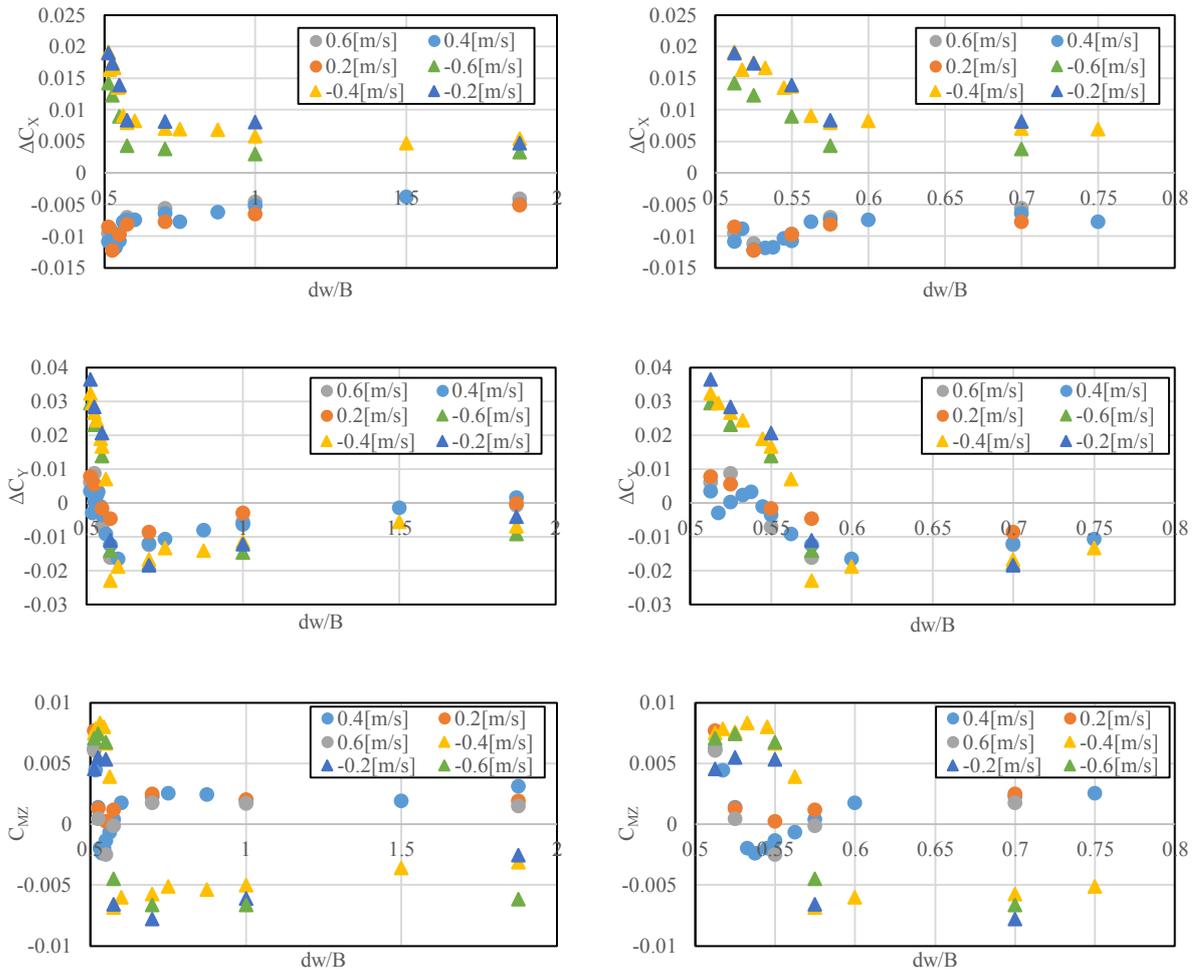


Fig. 69 Hydrodynamic force due to existence of quay wall.

(Left: All Right: Zoom Up)

次に、これらの岸壁との距離にしたがって力の向きが反転する現象について考察する。Fig. 70 に VLCC 模型船での曳航中の計測結果で、モーメントが他の距離と反転した計測結果の一例を示す。Fig. 71 は比較のためにほぼ同じ条件で実験を行ったコンテナ船の結果を示す。この図は横軸 0 秒から曳航台車が加速をはじめ、約 5 秒後に設定速度に達する。その後、約 30 [m] 走行後に減速を開始しており加速減速時には大きなモーメントがノイズとして載っている。実験結果の代表値は減速開始前の約 10 秒間の平均値を用いている。

Fig. 71 のコンテナ船の結果をみると、計測されたモーメントは加速時から減速前まで同じ力の方向で、ほぼ一定力であるのに対して、VLCC の計測結果については、加速時との力の方向と収束後の力の方向が反転しており、収束するのに必要な時間も長いように見える。このような、加速時に発生したモーメントと収束後のモーメントが反転する結果が得られる条件は、Fig. 69 の岸壁近傍での横方向および回頭モーメントが反転している実験結果の条件とほぼ一致している。

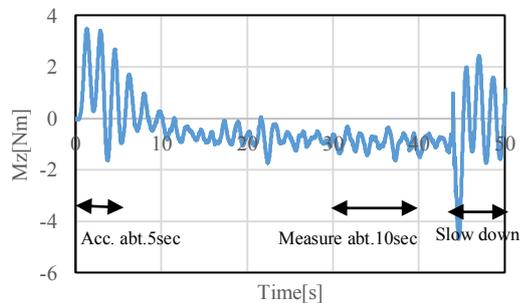


Fig. 70 Time history of measured yaw moment
(VLCC $U=0.4$ [m/s] $d_w=220$ [mm])

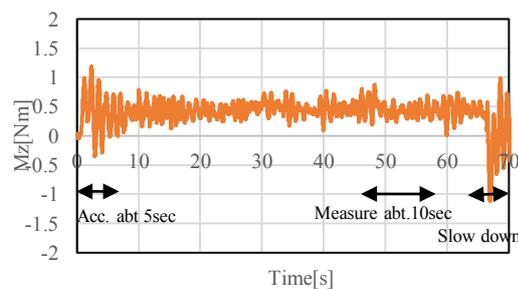


Fig. 71 Time history of measured yaw moment
(Container $U=0.45$ [m/s] $d_w=220$ [mm])

この現象は、曳航方向に関わらずに発生しているため、船型の前後対称性に起因するものではなく、おそらく肥大船型に起因するものと推察される。離岸時のサクション力と同様に、岸壁と相対する船体の平行部がコンテナ船と比較して大きいため、津波流が岸壁との間で狭まる領域も大きくなる。さらに、岸壁模型の深さがコンテナ船に比べて相対的に浅いため、岸壁下側を回り込むような流れが発生している可能性もある。この場合は、L字型(海底面も含めた)の岸壁模型による実験が必要となるがその実施は容易ではない。

また、津波現象は Fig. 6 や Fig. 11 が示すように、長周期の波であり時々刻々と流速が変化する点からも、この実験結果の扱いを困難にしている。コンテナ船のように、すぐに計測結果が収束するようであれば、津波来襲中に岸壁係留船に対して発生する流体力を一定として取り扱うことに問題はないであろう。ただし、VLCC の結果のように計測結果が収束するまで時間を必要とする場合、速度が刻々と変化して流場が変化すると Fig. 70 の計測結果のどこを代表値として用いるかによって、安全性評価にとりわけ重要な横力とモーメントの力の方向が反転してしまう。

さらに、この反転現象が発生する岸壁と船舶の距離が実船スケールで 3[m]であることから、岸壁水面下の形状やペンドル等の状況によっては、係船状態としては十分にあり得る距離に近く、岸壁係留船舶の動的な評価に取り組む場合、特異点のように作用する可能性すらある。

以上のことから、VLCC 船型（肥大船）に対しての岸壁係留の安全性評価を行う場合には、さらなる検証実験等が必要となるため本文中では取り扱わなかった。

固定岸壁との比較

VLCC 模型船に対しても、固定岸壁を用いた計測を同様に行った。Fig. 72 に前進方向を、Fig. 73 に後進方向での実験結果を示す。

前進方向の実験結果について、前後力は、岸壁との距離に関わらずあまり差がないが、実験速度によって結果のばらつきが大きい。次に横力に注目すると、岸壁近傍では曳航岸壁を用いた場合よりも大きい実験結果となっている。最後に回頭モーメントに注目すると、固定壁を用いた結果は曳航壁に対して距離によらず過小評価する結果となった。よって、力の傾向を確認することは可能なようである。

次に後進方向の結果をみると、全体的な傾向としては実験速度によって結果のばらつきがかなり大きい。これは前項でも述べたが、VLCC 船型の特に後進方向は流れが複雑となり、計測結果が収束するまで時間が必要であるにもかかわらず、たった 6[m]の固定岸壁では正しい実験計測ができていないと思われる。そのためここで示した実験結果を信頼して結論を下すことは難しい。

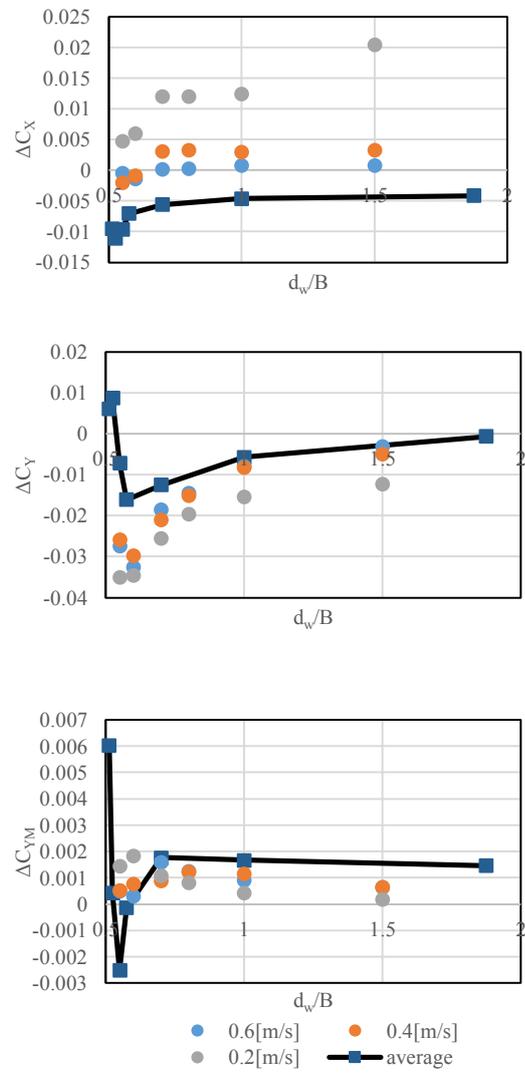


Fig. 72 Comparison of hydrodynamic force between towed and fixed walls (forward).

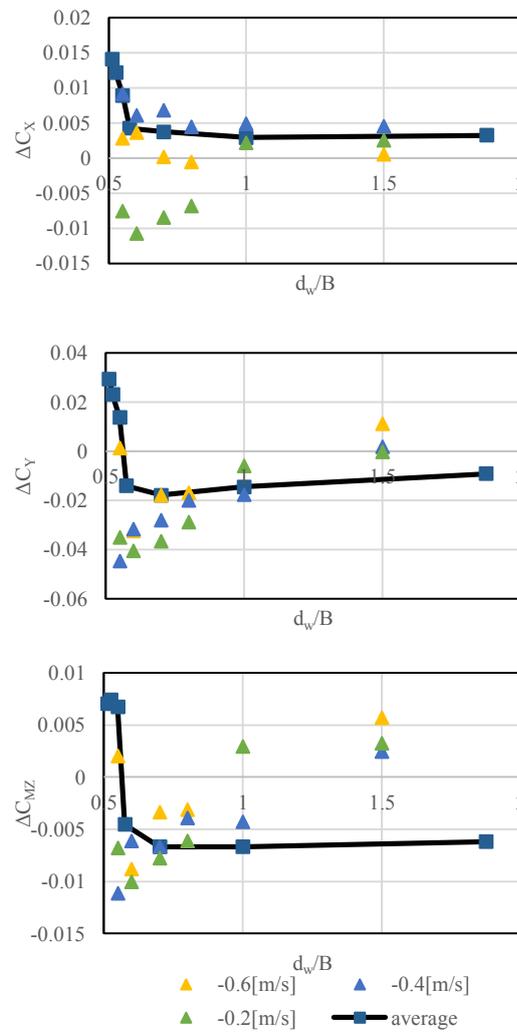


Fig. 73 Comparison of hydrodynamic force between towed and fixed walls (backward).