



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	船舶操縦性能に及ぼす横傾斜影響と4自由度操縦運動モデルの研究
Author(s)	福井, 洋
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(水産科学)
Dissertation Number	甲第13093号
Issue Date	2018-03-22
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k13093
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/70016
Type	doctoral thesis
File Information	Yo_Fukui.pdf



船舶操縦性能に及ぼす横傾斜影響と
4 自由度操縦運動モデルの研究
(4-DOF Mathematical Model including
Effect of Roll Angle on Ship Manoeuvrability)

北海道大学大学院水産科学院
海洋生物資源科学専攻
Graduate School of Fisheries Sciences Division of
Marine Bioresource and Environmental Science

福 井 洋

Yo Fukui

平成 30 年 (2018)

目 次

第 1 章 緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究内容	5
1.3 論文構成	5
第 2 章 自由航走模型実験による横揺れと操縦運動の連成把握	7
2.1 自由航走模型試験	7
2.1.1 供試船型	7
2.1.2 実施施設・実験装置	7
2.1.3 実験方法	10
2.2 実験結果、及び横傾斜が操縦運動に及ぼす影響	11
2.2.1 35° 旋回試験	11
2.2.2 旋回試験、逆スパイラル試験によるスパイラル特性	11
2.2.3 20° Z 試験	12
2.3 まとめ	12
第 3 章 拘束模型実験による操縦流体力特性の把握	38
3.1 4 自由度操縦運動数学モデル	38
3.1.1 運動方程式	38
3.1.2 プロペラ・舵の流体力数学モデル	40
3.1.3 主船体の流体力数学モデル	42
3.2 拘束模型試験	43
3.2.1 供試模型・実験施設	43
3.2.2 実験方法	43
3.2.2.1 拘束模型試験 (CMT)	43
3.2.2.2 直進・斜航角付き舵角試験	44
3.2.3 試験解析	44
3.2.3.1 船体流体力の無次元化	45
3.2.3.2 拘束旋回試験 (主船体流体力) の解析	45
3.2.3.3 干渉係数の解析	50
3.3 4 自由度操縦運動シミュレーション	53
3.3.1 横傾斜を含んだ 4 自由度操縦運動数学モデル	53
3.3.2 自由航走模型試験とシミュレーションの比較	56
3.3.2.1 35° 旋回試験	56
3.3.2.2 旋回試験、逆スパイラル試験によるスパイラル特性	57
3.3.2.3 20° Z 試験	57

3.4	まとめ	57
第4章	漁船船型を対象とした模型試験と操縦運動シミュレーション	88
4.1	自由航走模型試験	88
4.1.1	実験方法	88
4.1.2	実験結果、及び横傾斜が操縦運動に及ぼす影響	89
4.2	拘束模型試験	89
4.2.1	実験方法	89
4.2.2	試験解析	90
4.3	横傾斜を含めた4自由度操縦運動シミュレーション	91
4.3.1	操縦運動モデル	92
4.3.2	シミュレーション結果	92
4.4	まとめ	93
第5章	CFDによる操縦流体力に与える横傾斜影響とその船型要因の検討	107
5.1	計算手法	108
5.2	計算条件・解析結果	108
5.2.1	計算条件	108
5.2.2	前後力・横力・回頭モーメント	108
5.2.3	横傾斜モーメント	110
5.3	横傾斜による流場現象の把握、及び船型要因の検討	111
5.3.1	横傾斜による横力、モーメント発生 of 流場現象	111
5.3.2	KCS、フェリーの2船型間の差異	113
5.3.1	船首バルブ影響	114
5.3.1	トリム影響	115
5.4	まとめ	116
第6章	結論	164
6.1	水槽試験と4自由度操縦運動シミュレーションモデルの構築	164
6.2	漁船船型の横傾斜影響について	165
6.3	CFDによる横傾斜を伴った操縦運動時の流場の把握	165
6.4	今後の展望	166
	謝辞	167
	参考文献	168

第1章 緒論

1.1. 研究背景

船舶の操縦性能を把握することは、その船が安全に航行するために重要なことである。船の操縦性能が正確に把握できていないと、障害物回避等に際して操船を行った際に、想定したように船が動かないなど安全航行に支障をきたす恐れがある。このような船舶の安全性の観点から、国際海事機関（International Maritime Organization : IMO）では船舶の設計・建造にあたっての操縦性基準が定められており、各造船所ではそれを満たすように設計を行わなくてはならない。また船舶設計における操縦性能の正確な把握は、操船時の安全確保のためだけでなく、適正な舵の選定による推進性能の改善等のためにも重要なことである。

我が国では、船舶の操縦性能の把握のためには、過去の類似船型の実績等から、或いは模型船を用いた水槽試験を行うことで、その船の操縦流体力の特性を求め、その値を用いた操縦運動シミュレーションを行うことが一般的である。この際の船舶の操縦運動の取扱いは、前後運動・左右運動・回頭運動の3自由度で表されることが基本になっており、横傾斜のような横揺れ運動等の影響は副次的に捉えられてきた。しかし、コンテナ船やフェリーのような中高速船、またフェリー以上に航走時のフルード数が高い漁船のような船については、回頭運動の発達に伴って、船体に大きな横傾斜が発生することがある。この運動が更なる回頭運動を誘起することが知られており、このような横傾斜の影響によって海難事故につながったと推測される以下のような事例がある。

1) 2009年11月13日 フェリー「ありあけ」¹⁾

三重県熊野灘沖にて、フェリー「ありあけ」が航行中に左舷後方から波を受けたことで、右方向に大きく横傾斜し、その後、左に急旋回して、漂流、座礁して横倒し状態となった。直接的な原因は、積荷の固縛方法が不適切であったため、回頭運動に伴って積荷が横移動することで船体に横傾斜を増大させたが、この横傾斜によって船が急激な左旋回状態となり、更に横傾斜を大きくし、被害を拡大させたと推測される。

2) 2014年4月16日 フェリー「セウォル号」

韓国全羅南道珍島郡の観梅島沖にて、フェリー「セウォル号」が針路変更を行おうと右旋回した際に、転覆・沈没に至った。事故の原因などは公表されていないが、改造により船の重心が高くなっていたことに加え、当日の運航に際しては船底のバラスト水を抜いて過剰な載貨を行っていたため、旋回によって積荷の横移動が発生し、その際に船が大きく横傾斜したことで急旋回が発生したことが事故原因の一つとして考えられる。

3) 2000 年 9 月 11 日 沖合底曳き網漁船「第五龍寶丸」²⁾³⁾

北海道襟裳岬沖にて、沖合底曳き網漁船「第五龍寶丸」が大量の漁獲物の入った網を甲板上へ引き揚げたままの状態に急発進して、操舵旋回を行った際に、船体が大きく横傾斜をしたことで、更なる急旋回を引き起こし、転覆・沈没に至った。この事故は、横傾斜の増大とともにコッドエンドがインナーブルワークを越えて移動したことにより、開口部から海水が流入、船内の滞留水が増加し、復原力を失ったことで転覆に至ったと報告されているが、大きな横傾斜による急旋回の発達が事故の一因であると考えられる。

このようにコンテナ船やフェリーなどの中速船では、船速による遠心力の影響に加え、デッキ上の構造物や積荷の重量が大きく、重心が高くなりやすい傾向があるため、回頭運動中に発生する横傾斜が大きくなりやすい。漁船についても、漁獲物や漁労機械などの積荷が多く、乾舷の低い船が多いことから、復原力が小さいにも関わらず、重心が上がった状態で航行し、横傾斜しやすくなる傾向があるため、横傾斜が操縦運動に及ぼす影響は少なくない。

2008 年に開催された国際水槽試験会議（International Towing Tank Conference : ITTC）の操縦性技術委員会が中心になり開催された操縦性能推定ワークショップ（Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Methods : SIMMAN2008）⁴⁾においては、ベンチマーク船型であるコンテナ船（KCS）の自由航走模型試験による旋回試験の旋回圏等の結果に比べ、各研究機関が通常の操縦性能推定法で推定した結果は大きく、実際の模型の旋回性能の方が強く表れる結果が示されている。これは本船が小さな GM で横傾斜しやすい船であり、これが旋回性能に影響を及ぼした可能性が高い。

横傾斜が操縦性能に及ぼす影響についての研究は、特に高速コンテナ船や RO/RO 船（RO/RO 船：トレーラ等の車両が自走で搭載（ロールオン）・揚陸（ロールオフ）できる船であり、コンテナ船と同様に船速が速く瘦せ形の船型）の出現以来、種々の検

討が行われてきたが、操縦運動に横傾斜運動が入ることでダイナミクスが複雑になる他、流体力にもこの影響が現れる。このため、船体流体力には斜航角と旋回角速度に加えて横傾斜角のパラメータを追加挿入する方法が提案されてきた。Eda⁵⁾は操舵によって生じる横傾斜の影響によって船体没水部の形状が左右非対称となり、その非対称性が操縦流体力に少なからず影響を与え、自動操舵における針路安定性を低下させることを指摘した。Hirano⁶⁾らは RO/RO 船を対象として、拘束模型試験と数値シミュレーションを行い、高速航行中に横傾斜が大きくなると旋回半径が小さくなることを指摘した。孫・野本⁷⁾は SR-108 コンテナ船を対象に横傾斜を付けた拘束模型試験を行い、小さな GM と船速の増加によって横傾斜が大きくなり、針路安定性が低下する傾向があることを指摘した。芳村ら⁸⁾は横傾斜を伴う大型帆装船の流体力を数多くの多項式で表現することを試みた。Oltmann⁹⁾はパナマックスコンテナ船の操縦性基準について、従来は操縦性能に与える影響は少ないと言われてきたフルード数 0.3 未満の範囲においても、その船速影響は大きく、船速の増加によって針路安定性が低下することを指摘した。これらの文献でも扱われている操縦運動流体力はもともと非線形性が強いことから、3 自由度でも斜航角と旋回角速度の組合せによる数多くの高次の項が既に数学モデルに存在し、これに横傾斜角の影響を全て取り入れると、流体力を表す数学モデルの項数は一挙に膨れあがることになる。Oltmann⁹⁾の文献では各流体力に 60 数個もの項が使用されている。項数が多いと推定精度は上がるが、計算が煩雑な他、何よりもそれら係数の特定が困難である。孫ら⁷⁾の研究はこの点に関して、斜航・旋回・横傾斜角をパラメータとした 3 乗多項式モデルを提案し、4 自由度数学モデルの基礎を築いた。近年でも、芳村¹⁰⁾は線形の仮定のもと、操舵に対する回頭運動の応答モデルを導入し、横傾斜による船舶の左右非対称性によって発生する横力と回頭モーメントの操縦流体力微係数が、フルード数が大きく、かつ GM が小さく横傾斜しやすい状態における針路安定性や旋回性能に及ぼす影響を理論的に明らかにした。安川¹¹⁾は孫・野本のモデルをベースに横揺れ定常近似を採用し、線形化された運動方程式を導いて、芳村¹⁰⁾と同様の結果を導いた。また安川ら¹²⁾は CMT によって詳細に流体力を計測し、このデータを基に横傾斜の操縦性への影響を解析・検討した。このように長年を経て多くの研究が行われてきた一方で、これらの研究は拘束模型試験が斜航試験のみであるものや、運動の範囲が限られているものもある他、自由航走模型試験による検証まで一貫して行っただけで、試験結果とモデルによる推定結果を比較した研究も少ないため、モデルの妥当性までは十分には確認されていない。

また船舶設計の視点から述べると、このような実験的な操縦性能の検討は、推進性能や機器配置等ある程度設計が固まった段階で模型船を製作し、時間と費用をかけて実施する必要がある。横傾斜を含めた性能を把握するためにはさらに多くのコストを要するが、その船の操縦性能が判明する段階では既に他の性能の検討が終わっており、操縦性基準さえ満たしていれば、得られた操縦性能に関するデータが設計に反映されないことも少なくない。そのため、船舶性能の向上、設計コストの低減につなげるためには設計の初期段階でこのような検討が精度よく行えることも重要になる。また横傾斜の影響を考慮した船体設計を行うには、傾斜時の船体まわりの流場現象を把握する必要があるが、従来の模型実験による解析だけでは労力も多大でありどのように流場が変化し、流体力特性となって表れている等の力学的な解明までは至っていないのが実情である。この点で船体まわりの流場を詳細に解析できる効果的な手法のひとつとして数値流体力学（Computational Fluid Dynamics：CFD）がある。

操縦運動中の船体に働く流体力の計算に関する研究では、過去にはポテンシャル理論に基づいた非線形揚力面理論¹³⁾や細長体理論^{14) 15) 16)}、またパネル法¹⁷⁾等に基づいた推定が行われてきたが、Navie-Stokes 方程式等を離散化しコンピュータで計算を行う CFD が発展してきてからは CFD の研究が多くの研究機関で行われ、現在は造船所でも船体設計に実用的に利用されている。CFD を用いた操縦性能推定の研究例として、大森ら¹⁸⁾¹⁹⁾²⁰⁾は東京大学で平水中の船体まわりの造波粘性計算コードとして開発された CFD コードを、平水中 3 自由度操縦運動へ拡張し、斜航、旋回時の船体まわり流場を明らかにし、CFD により船体形状による操縦流体力の差異を表せることを示した。野中ら²¹⁾はより短時間で精度よく操縦流体力を推定できるよう、自所で開発した高効率なソルバーを定常での操縦運動が計算できるよう拡張し、実験と計算の比較から CFD コードの有効性を確認した。また著者²²⁾もホーン付き舵を装備した船体を対象に、定常操縦運動中の計算を実施し、操縦運動時の流体力の実験値との比較、及びホーン有無による舵力の変化を示した。このように CFD による研究も行われてきているが、まだ船型開発における CFD の利用は推進性能分野や耐航性能分野での利用が主であり、操縦性能分野では研究段階では広く行われるようになっているが、実用の面では十分には検討されていない。こうした背景から、横傾斜を含めた操縦運動時の計算についてはまだほとんど検討されていないのが現状である。

1.2. 研究内容

このような横傾斜影響を含めた船舶操縦性能推定法の現状を踏まえ、本研究ではまずは実験的な検討として複数の船型を対象に、横傾斜角を付けた拘束模型試験で詳細に流体力を計測し、この実験結果を基に 4 自由度操縦運動数学モデルの基本構造を検討する。具体的には、従来の 3 自由度操縦運動モデルの流体力微係数の横傾斜角に対する影響を詳細に定量化し、これを数式化する。この際、横傾斜の影響度合いを精査し、従来の 3 自由度モデルから付加すべき係数を感度解析結果に基づいて絞り込み、4 自由度操縦運動の数学モデルの導入を試みる。また、この数学モデルの妥当性を確認するため、自由航走模型試験を実施し、シミュレーションの妥当性を検証する。この際、横傾斜が操縦性に及ぼす影響をより明確にするため、操縦運動による横傾斜を大きく左右する GM や船速を変えて確認する。

また横傾斜しながら操縦運動する船体の操縦流体力の特徴を明らかにするため、拘束模型試験と同条件で定常運動させた船の船体まわり流場を、CFD を用いて計算する。流体力については、横傾斜モーメントに大きく寄与するが、実験では計測できない上下方向の流体力成分を合わせて解析することにより、横力・上下力と横傾斜モーメント、着力点などの関係を明確にすることで、横傾斜が操縦流体力に及ぼす影響を確認する。さらに CFD により横傾斜時の船体流体力、流場の分布を可視化することで、船体没水部の横傾斜による形状変化が操縦流体力の変化と関係しているという従来から指摘されているような理論との整合性を明らかにし、またバルブ形状やトリム等の姿勢変化による横傾斜影響の差異を確認することで、現象の物理的背景を解明する。

1.3. 論文構成

本論文は 6 章より構成される。論文の前半では実験的アプローチからの横傾斜による船舶操縦性能に与える影響の把握、横傾斜影響を含めた 4 自由度の操縦性能推定手法の開発について述べる。論文の後半では CFD 計算に基づく横傾斜による船舶操縦性能に与える影響の可視化、横傾斜影響の現象解明の検討について述べる。各章の概要は以下のとおりである。

第 1 章では、本論文の研究背景及び、目的を述べる。

第 2 章では、2 船型の商船船型を供試模型船として自由航走模試験を実施し、横傾斜角の変化が操縦運動に与える影響を実験的に明確にする。

第 3 章では、横傾斜が操縦流体力に与える影響を実験的に明らかにするため、2 章と同じ供試模型船について横傾斜付きの拘束模型試験を行い、各傾斜角の操縦流体力微係数を解析する。また得られた微係数をもとに 4 自由度の操縦運動シミュレーションモデルを構築し、このモデルで運動シミュレーションを行い、第 2 章で計測した自由航走模型試験の結果と比較することで妥当性を確認する。

第 4 章では、漁船船型を対象として、同じく実験によって求めた操縦性能特性と流体力を示すとともに、第 3 章で構築したシミュレーションモデルへの適用を検討する。

第 5 章では、CFD によって操縦運動時の流体力を解析し、実験結果との比較により精度確認を行うとともに、操縦流体力におよぼす横傾斜影響を明らかにする。また CFD 計算結果から船体流体力や流場の分布の可視化、また船体形状や船体姿勢を変更した CFD 計算を実施し、船体没水形状の影響を明確にし、横傾斜が操縦性能に与える影響の物理的背景について検討する。最後に、本論文の結論を第 6 章に要約する。

第2章 自由航走模型実験による横揺れと操縦運動 の連成影響の把握

横傾斜が操縦性能に与える影響については過去より多数の研究が行なわれてきたが、その研究の多くは特定の船型に対するもので、複数の船型について、横傾斜角の変化とそれに伴う操縦性能の変化について、自由航走模型実験で確認したものは少ない。

本章ではコンテナ船型とフェリー船型について、横傾斜の変化による影響を明確に見るため GM や船速を数ケース変化させた自由航走模型実験を実施した。

2.1 自由航走模型試験

2.1.1 供試船型

模型試験の供試船型は比較的横傾斜が発生しやすい中高速船とした。一つは ITTC 等のベンチマーク模型として広く使われている KCS コンテナ船型であり、実際に転覆事故を起こしたフェリーと同型の 2 軸 1 舵フェリーを対象とした。コンテナ船は一般に重心が高く旋回時に大きく横傾斜することが知られている。KCS コンテナ船は想定実船の 1/105 のスケール、フェリーは 1/64 のスケールとし、ともに 2m 程度の模型を製作し、万一転覆しても差し支えが無いようようセッティングを行った。両船ともに舵はマリナー舵で、ホーン部は船体側に固定されている。供試模型船の主要目、及びプロペラ、舵の要目を Table 2.1 に、模型船の写真を Fig.2.1、及び Fig.2.2 に示す。その他副部として、フェリーはビルジキールを装備しているが、KCS コンテナ船には付いていない。

2.1.2 実験施設・実験装置

実験は、北海道大学函館キャンパスの水泳プール（長さ×幅×深さ：25m×12m×1.2m（一部 3m））、及びジャパン マリンユナイテッド(株)の運動性能水槽（長さ×幅×深さ：70m×30m×3m）で実施した。これら試験施設の写真を Fig.2.3、及び Fig.2.4 に示す。

模型船には自由航走試験が出来るよう各種制御装置、計測装置を搭載した。なお一部装置は船外に設置している。各装置は以下のとおりである。

(a) 自航モータ、自航モータ制御装置

模型船は自航するためにプロペラを装備しており、プロペラは船内に搭載された 60WDC モータによって駆動させた。また同じく搭載された電源供給が DC24V のモータ制御装置により、モータに付いているタコジェネレータ、もしくはロータリーエンコーダによって計測された回転数をフィードバックすることで、回転数を所定の値に保持することが可能となっている。自航モータ、及びモータ制御装置の写真を Fig.2.5、及び Fig.2.6 に示す。

(b) 操舵機、操舵制御装置、舵検力計、舵検力アンプ

模型船の舵は模型船尾部に搭載された直流サーボ式操舵機とこれを駆動制御する操舵制御装置によって操舵させた。操舵制御装置はアナログ PDI 制御回路によるサーボ方式で、操舵速度や時定数を実船の操舵機と相似にすることができる。電源は上記と同じ DC24V である。また操舵機の回転部分の上部の舵軸取付部には中空型の 2 分力検出装置 (FF-2H2K) を取り付け、これを小型の歪アンプにより舵の前後方向の力と直圧力を計測することができる。操舵機、及び操舵制御装置、舵検力計、舵検力アンプの写真を Fig.2.7～2.10 に示す。

(c) 6 軸慣性ジャイロ、ファイバ・オプティック・ジャイロ

模型船の方位角、及び回頭角速度、またヒール等の船体姿勢は 6 軸慣性ジャイロ (crossbow, AHR5400) とファイバ・オプティック・ジャイロ (JAE, JG-35FD) を用いて計測した。6 軸慣性ジャイロは x, y, z 軸方向加速度、x, y, z 軸角速度 (roll rate, pitch rate, yaw rate)、x, y, z 軸回転角 (roll, pitch, yaw) を計測することができる。ただし、yaw 角度は地磁気をフィードバックする方式のため、屋内では誤差が生じやすく、精度を要する yaw 角度の計測は 1 軸のファイバ・オプティック・ジャイロを併用した。本ジャイロにはバイアス補正機能、角度リセット機能がついており、バイアス補正機能は温度変化による角度ドリフトや地球の自転により生じる誤差を補正することができる。また、角度リセット機能で方位角をゼロリセットすることができ、試験開始前の初期方位角を 0 に設定可能となっている。6 軸慣性ジャイロ、及びファイバ・オプティック・ジャイロの写真を Fig.2.11、及び Fig.2.12 に示す。

(d) 自動操縦装置（無線操縦装置）、無線送信機

模型船の操船は自動操縦装置を内蔵した無線操縦装置により行った。自動操縦装置はモータ制御装置、操舵制御装置、ジャイロに接続しており、各試験条件に合わせた自動操舵が可能である。また陸上側に無線操縦装置と通信が可能なラジコン送信機を用い、試験前後のアプローチ等の操船に関しては手動操船が可能となっている。自動操縦装置、及び無線送信機の写真を Fig.2.13、及び Fig.2.14 に示す。

(e) ジャンクションボックス、データロガー

モータ回転数や舵角、ジャイロのアナログデータはケーブルを通じてジャンクションボックスに集約されて、データロガー（キーエンス, NR-2000）に転送される。データロガーには液晶画面、収集ソフト、内蔵メモリ等が搭載されており、データロガー本体でのアナログ電圧やロジック信号等のデータの観測や、収集したデータを後にパソコンで解析することも可能となっている。データロガーのサンプリング周波数は 20Hz として計測を行った。ジャンクションボックス、及びデータロガーの写真を Fig.2.15、及び Fig.2.16 に示す。

(f) LiPo バッテリ

計測装置の電源には 6 セル型リチウムポリマーバッテリー（24V5Ah）を用いた。上記の船内に搭載される全ての装置の駆動、データの計測に必要な電源は本電池 1 台で賄うことが可能である。LiPo バッテリの写真を Fig.2.17 に示す。

(g) 船位計測装置、360° プリズム、プリズム昇降装置

船体位置や船速に関しては、船内に搭載した装置では計測ができないため、自動追尾機能付きトータルステーション（トプコンソキアポジショニングジャパン, PS-103MC）を用いて計測した。トータルステーションは従来、測量等で用いられる装置であり、内部にある水準器を従って水平に設置することで、水平面を XY 座標、鉛直方向を Z 座標として捉えることができる。本装置は本体からレーザー光を照射し、模型船中央に設置した 360° プリズムで反射したレーザー光を捉えることで、模型船の動きを自動追尾することが可能となっており、同時に対象物との距離、水平角度、上下角度を計測することで、対象物の座標を数 mm の

精度で求めることができる。自動追尾モードのサンプリング周波数は 20Hz であり、時々刻々の模型船の 3 次元空間座標を計測し、また位置座標の時間微分によって船速を求める。トータルステーション、及び 360° プリズムの写真を Fig.2.18、及び Fig.2.19 に示す。またトータルステーションによる計測では対象物との直線上に障害物がないことが望ましいため、北大水泳プール、運動性能水槽では模型船の移動範囲が全てカバーできる適切な場所に設置している。それぞれの場所におけるトータルステーション設置位置の概略図を Fig.2.20、及び Fig.2.21 に示す。

また模型船内でデータロガーによって計測されたデータと、陸上でトータルステーションによって計測されたデータは計測開始点を一致させることができないため、両時系列データの時刻同期が必要となる。そこで本試験ではプリズム昇降装置を製作し、実験開始の第一操舵でプリズムを上下方向に動かすことで、トータルステーションの計測データに上下方向の変位を与え、模型船の自動操舵開始点を同時刻に合わせることで両データの時刻同期を行っている。プリズム昇降装置、及びその制御装置の写真を Fig.2.22、及び Fig.2.23 に示す。

試験計測は以上の計測装置を用いて行った。本試験では復原力を実船以上に弱めるケースもあり、試験時に模型が転覆する可能性があるため、デッキをアクリル板で水密にし、デッキ上の装置類は防水容器に収納することによって防水対策をしている。計測機器を搭載した模型船全体のアレンジを Fig.2.24 に示す。船内データのサンプリング周波数は船位計測装置と同じく 20Hz とした。

2.1.3 実験方法

自由航走模型実験では旋回試験、逆スパイラル試験、及び 20° Z 試験を実施した。各船型の速力、重心高さを含めた試験状態を Table 2.2、及び Table 2.3 に示す。船速は実船の航海速力、及び半速程度の速力とし、KCS コンテナ船は $F_n = 0.26$ 、及び 0.156、2 軸 1 舵フェリーは $F_n = 0.268$ 、及び 0.188 の各 2 船速で行った。重心高さは計画満載状態の排水量、喫水は変更せず、船の重心高さを変えて、GM の値を変えた。GM は実船換算にして、KCS コンテナ船は $GM = 2.5m$ 、及び 0.6m、0.5m、0.3m で、2 軸 1 舵フェリーは $GM = 1.87m$ 、及び 1.30m、0.8m で行った。

2.2 実験結果、及び横傾斜が操縦運動に及ぼす影響

2.2.1 35° 旋回試験

KCS コンテナ船の船速毎の GM の変化による $\pm 35^\circ$ 旋回試験の航跡の比較を Fig.2.25 に、また旋回運動時の回頭角速度、及び横傾斜角等の時系列を Fig.2.26 に示す。2 軸 1 舵フェリーについても、航跡の比較、及び船体運動データの時系列を Fig.2.27、Fig. 2.28 にそれぞれ示す。

KCS コンテナ船の航跡について見ると、 $Fn=0.26$ 、及び $Fn=0.156$ のどちらの船速においても、GM が小さくなるのに伴い、旋回圏が小さく、旋回性能が強くなっていることが確認できる。これは船速が速い $Fn=0.26$ でより顕著に表れており、 $Fn=0.156$ についてはその差は僅かなものとなっている。また定常旋回時の横傾斜角を見ても、GM が小さくなるとともに横傾斜が大きくなっていることが確認できるが、 $Fn=0.26$ でも $GM=2.5m$ の場合や、 $Fn=0.156$ の場合は $GM=0.6m$ 程度となっても、大きくは横傾斜しないことがわかる。

2 軸 1 舵フェリーについて見ると、船速、GM の変化に伴う操縦運動の変化は KCS と同じ傾向を示しており、 $Fn=0.268$ 、及び 0.188 のどちらの船速においても、GM が小さいほど旋回圏が小さくなり、また船速が速いほど旋回径が小さくなることが確認できる。

2.2.2 旋回試験、逆スパイラル試験によるスパイラル特性

KCS コンテナ船の船速毎の GM の変化によるスパイラル特性の比較を、横軸に舵角、縦軸に無次元回頭角速度をとったスパイラル特性カーブとして、Fig.2.29、Fig.2.30 に示す。また 2 軸 1 舵フェリーについても、スパイラル特性カーブの比較を Fig.2.31、Fig. 2.32 にそれぞれ示す。KCS コンテナ船について見ると、 $Fn=0.26$ 、及び $Fn=0.156$ のどちらの船速においても、GM が小さくなると、大舵角時の r' は大きくなっており、不安定ループ幅や不安定ループ高さについても大きくなることが確認できる。船速による違いを見ても、船速が速い方が r' は大きくなる傾向が確認でき、船速が速く、GM が小さくなるほど、旋回性能は強く、針路安定性は低下していることがわかる。2 軸 1 舵フェリーについては、スパイラル特性も KCS コンテナ船ほど顕著ではないが、同じ傾向を示しており、船速が速く、GM が小さくなるほど、旋回性能は強く、針路安定性は低下している。

2.2.3 20° Z 試験

KCS コンテナ船の船速毎の GM の変化による 20° Z 試験の舵角、方位角、横傾斜角の時系列の比較を Fig.2.33、Fig.2.34 に示す。また 2 軸 1 舵フェリーについても、船速毎の 20° Z 試験の時系列の比較を Fig.2.35、Fig. 2.36 にそれぞれ示す。KCS コンテナ船について見ると、 $F_n=0.26$ 、及び $F_n=0.156$ のどちらの船速においても、GM が小さくなるとともに横傾斜角が大きくなり、多少ばらつきはあるが、1st オーバーシュートも大きくなっていることが確認できる。2 軸 1 舵フェリーについても KCS コンテナ船と同様に、 $F_n=0.268$ 、及び 0.188 のどちらの船速においても、GM が小さくなると横傾斜角は大きくなり、1st オーバーシュートも大きくなっている。これらの傾向からも、KCS コンテナ船、2 軸 1 舵フェリーはともに、船速が速く、GM が小さくなるほど、針路安定性が低下することが確認できる。

2.3 まとめ

第 2 章では、KCS コンテナ船、及び 2 軸 1 舵フェリー船型を対象に、船速、重心高さを種々変更した自由航走模型実験を実施し、横傾斜が操縦運動に与える影響を実験的に把握することを試みた。以下に本章をまとめる。

- 1) 船速、重心高さを変更して 35° 旋回試験を実施した結果、KCS コンテナ船、2 軸 1 舵フェリーの両船型ともに、船速の増加、GM の減少とともに、横傾斜角が大きくなり、旋回圏が小さくなることが確認できた。
- 2) 旋回試験、スパイラル試験を実施した結果から、スパイラル特性カーブを解析し、両船型ともに船速の増加、GM の減少とともに、不安定ループ幅、不安定ループ高さが大きくなることを確認できた。
- 3) 20° Z 試験の結果から、両船型ともに、実験を行った 2 船速で、GM の減少とともに横傾斜が大きくなり、1st オーバーシュートが大きくなることが確認できた。船速が遅い条件についてはその差は小さく、また KCS コンテナ船と比較すると、2 軸 1 舵フェリーの方がその差は小さくなることが確認できた。
- 4) 1)~3)の試験結果から、KCS コンテナ船、及び 2 軸 1 舵フェリーの両船型について、船速が増加するのに伴い、また GM の減少に伴い、横傾斜角は大きくなること、

また発生した横傾斜の影響により、両船型ともに旋回性能が強く、針路安定性は悪くなることが確認された。

- 5) 船速や重心高さの関係から操縦運動中に横傾斜の変化を伴う船舶については、正確な操縦性能推定のためには横傾斜影響を考慮することが重要であることを確認した。

Table 2.1 Principal particulars of ship models

		KCS Container Ship	
		Full Scale	Model(1/105)
L_{pp}	m	230.000	2.1905
B (molded)	m	32.200	0.3067
d (molded)	m	10.800	0.1029
BL.trim	m	0.000	0.0000
Initial trim	m	0.800	0.0000
∇	m ³	52030.0	0.0449
$x_G(=-L_{cb})$	m	-3.404	-0.0324
KM	m	14.946	0.1423
D_p	m	7.900	0.0756
P/D_p		0.997	1.1032
A_R	m ²	45.282	0.0042
H	m	10.000	0.0955
aspect ratio		2.208	2.1683
		Passenger Ferry	
		Full Scale	Model(1/64)
L_{pp}	m	150.000	2.3438
B (molded)	m	22.800	0.3563
d (molded)	m	6.416	0.1003
BL.trim	m	0.000	0.0000
Initial trim	m	1.200	0.0188
∇	m ³	11608.9	0.0443
$x_G(=-L_{cb})$	m	-6.370	-0.0995
KM	m	11.940	0.1866
D_p	m	4.800	0.0756
P/D_p			1.1032
A_R	m ²	20.443	0.0050
H	m	5.450	0.0860
aspect ratio		1.453	1.4697

Table 2.2 Parameter of turning test and zig-zag test conditions

		KCS Container Ship		Passenger Ferry	
Fn		0.26	0.156	0.268	0.188
GM(m)		2.5,0.6,0.5,0.3	0.6,0.5,0.12	1.87,1.3,0.8	1.87,1.3,0.8,0.63
turning test δ (deg)	± 35	○	○	○	○
	± 30	○			
	± 20	○	○	○	
	± 10	○	○	○	
zig-zag test δ (deg)	+20	○	○	○	○

Table 2.3 Parameter of reverse spiral test conditions

		KCS Container Ship		Passenger Ferry	
Fn		0.26	0.156	0.268	0.188
GM(m)		2.5,0.6,0.5,0.3	0.6,0.5,0.12	1.87,1.3,0.8	1.87,1.3,0.8,0.63
r (deg/s)	0	○	○	○	○
	± 1.0			○	○
	± 1.5	○	○	○	
	± 2.0			○	
	± 3.0	○	○	○	○
	± 4.0			○	
	± 5.0	○	○	○	○
	± 6.0			○	
	± 7.0			○	



Fig.2.1 Ship model for model tests (KCS Container Ship)



Fig.2.2 Ship model for model tests (Passenger Ferry)



Fig.2.3 Swimming pool (Hokkaido University)



Fig.2.4 Seakeeping & maneuvering model basin (Japan Marine United)



Fig.2.5 60W DC motor



Fig.2.6 Motor control device



Fig.2.7 Steering gear



Fig.2.8 Steering gear control device



Fig.2.9 Rudder dynamometer



Fig.2.10 Amplifier of rudder dynamometer



Fig.2.11 6DOF inertial gyro



Fig.2.12 Fiber optic gyro



Fig.2.13 Autopilot system



Fig.2.14 Radio control transmitter



Fig.2.15 Junction box



Fig.2.16 data logger



Fig.2.17 Lithium polymer battery



Fig.2.18 Total station



Fig.2.19 360 ° prism

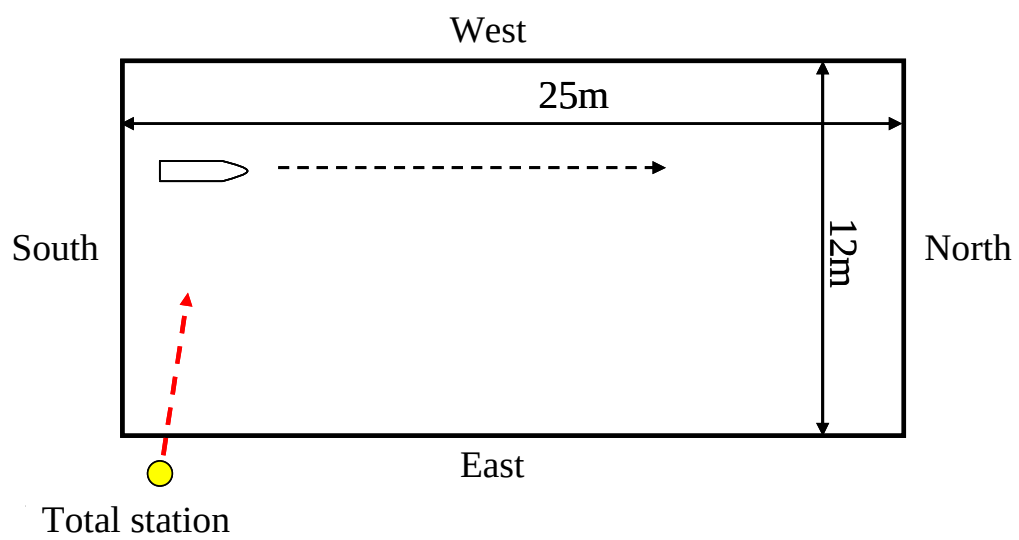


Fig.2.20 Arrangement of Total Station in swimming pool (Hokkaido University)

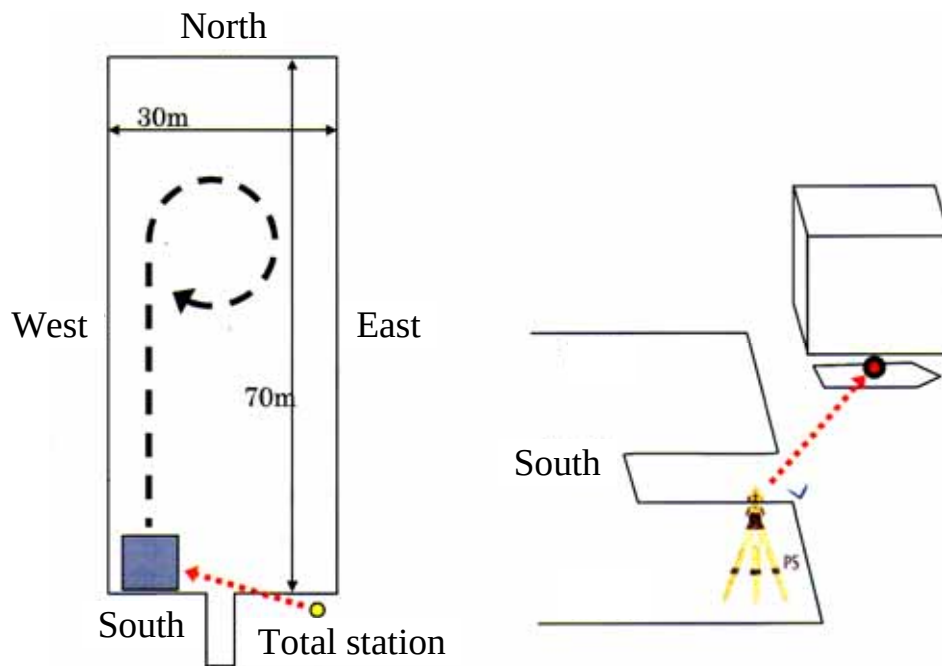


Fig.2.21 Arrangement of total station in seakeeping & maneuvering model basin (Japan Marine United)



Fig.2.22 Elevator machine for prism



Fig.2.23 Elevator machine control device



Fig.2.24 Arrangement of model ship with all devices

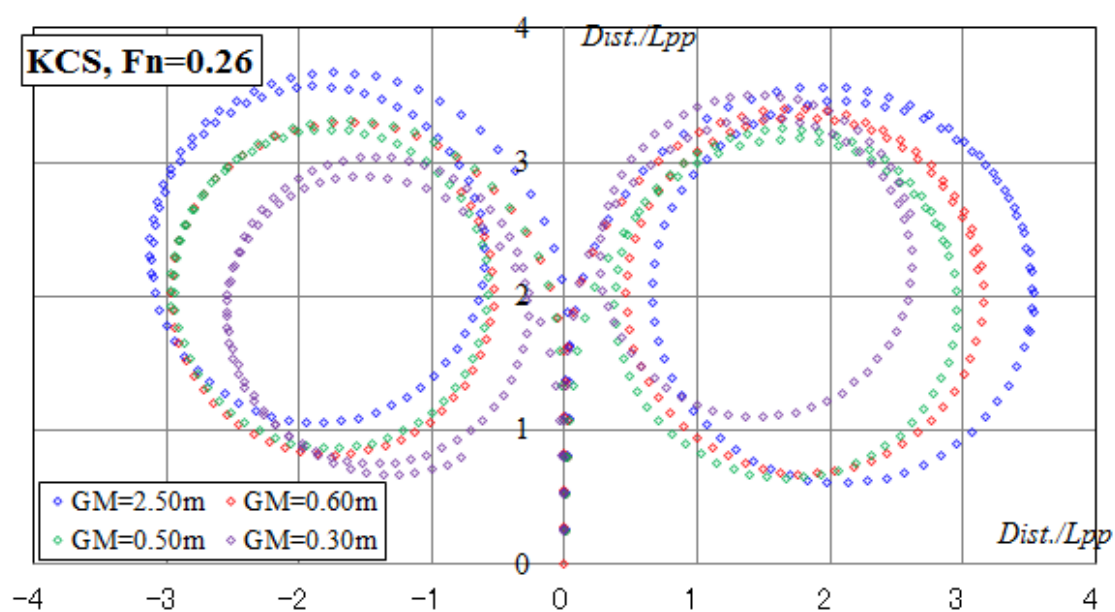


Fig.2.25(a) Comparison of $\pm 35^\circ$ rudder angle turning motion trajectory, between GM (KCS Container Ship, $Fn=0.26$)

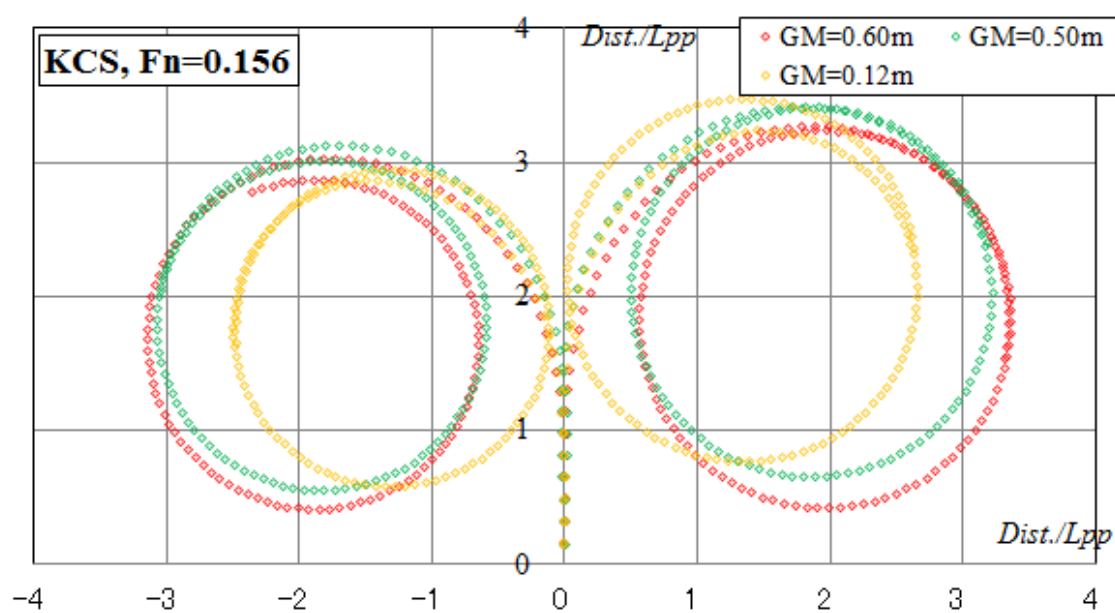


Fig.2.25(b) Comparison of $\pm 35^\circ$ rudder angle turning motion trajectory, between GM (KCS Container Ship, $Fn=0.156$)

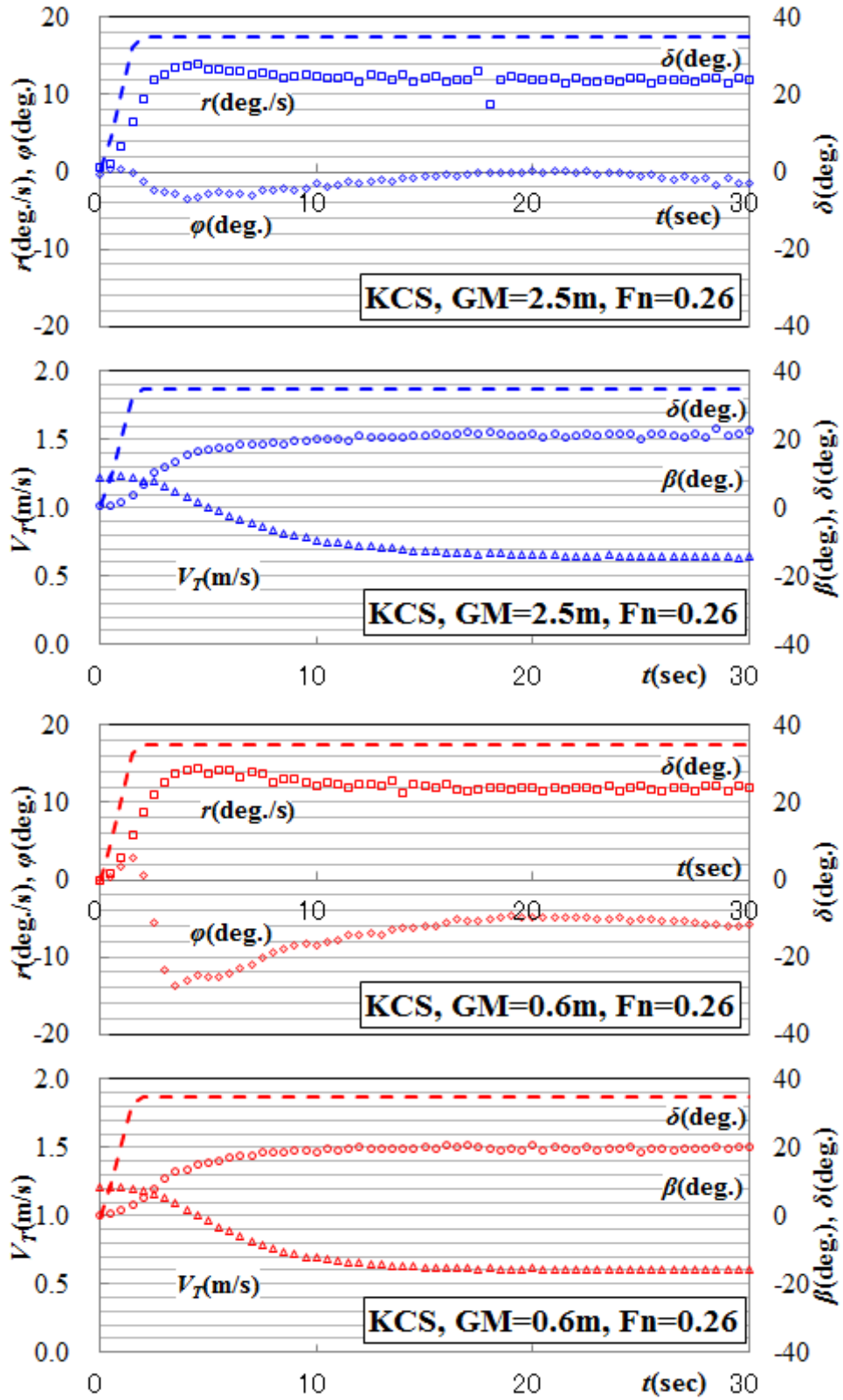


Fig.2.26(a) Comparison of $\pm 35^\circ$ rudder angle turning motion time history, between GM (KCS Container Ship, $F_n=0.26$)

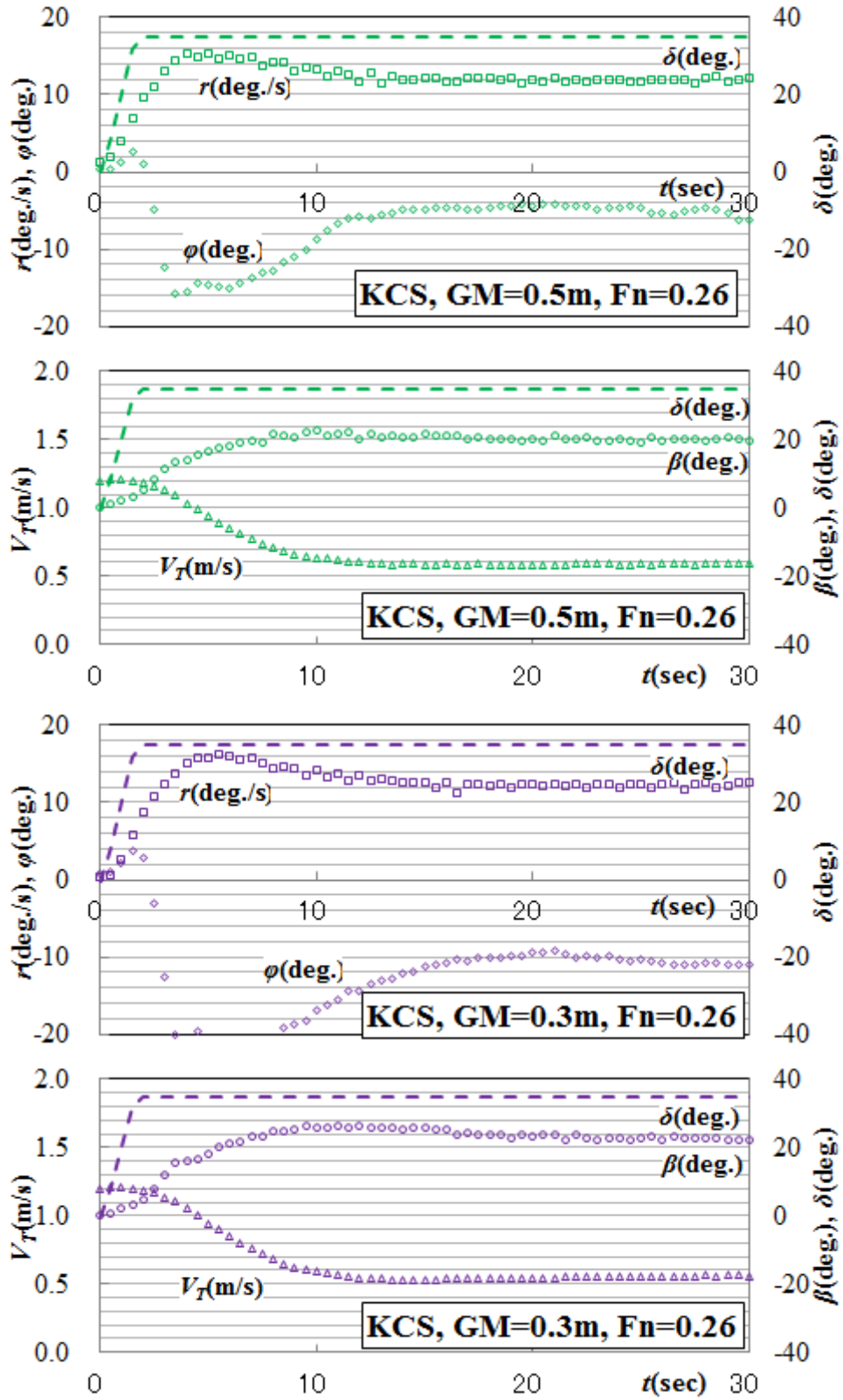


Fig.2.26(a) Comparison of $\pm 35^\circ$ rudder angle turning motion time history, between GM (KCS Container Ship, $F_n=0.26$)

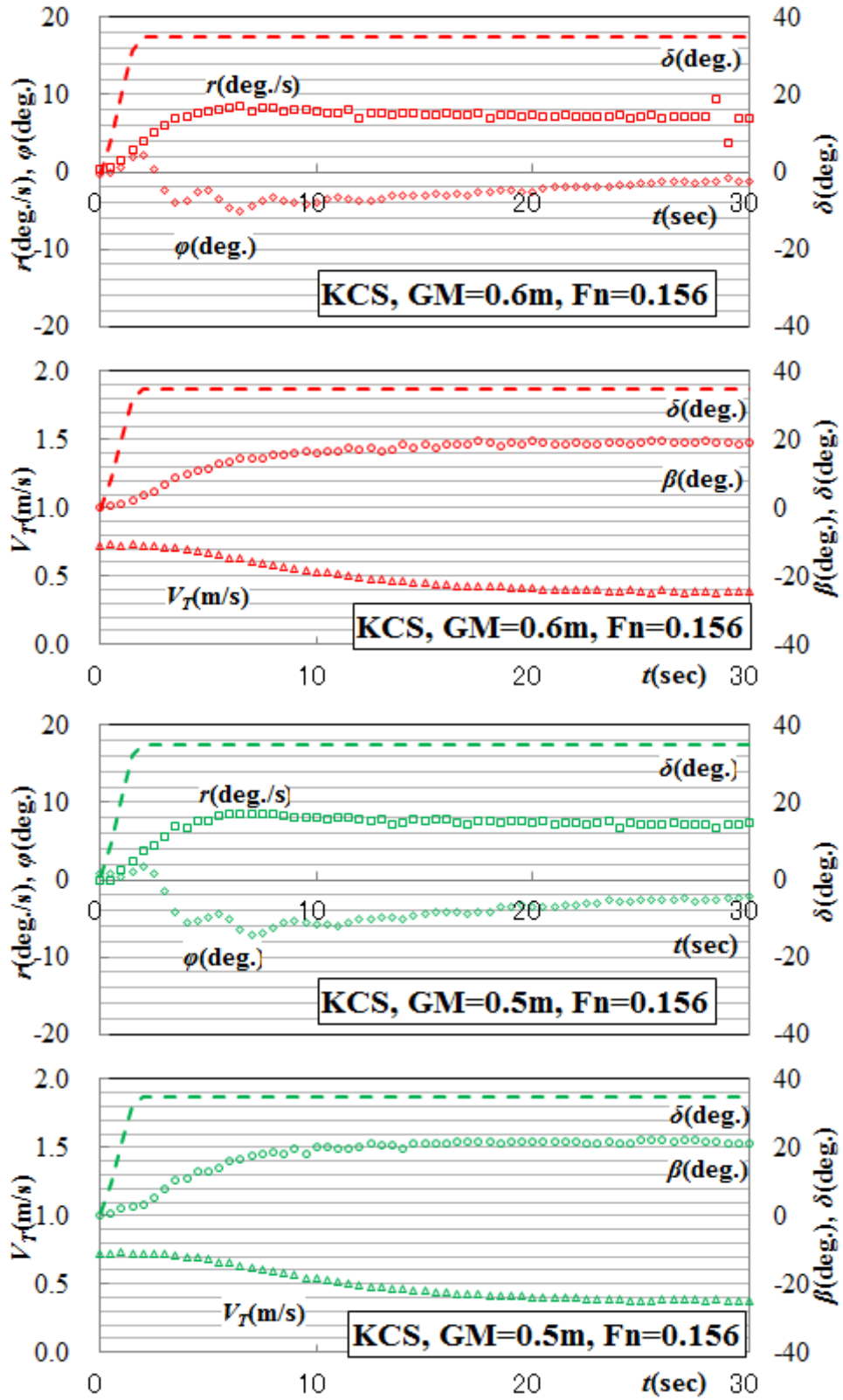


Fig.2.26(b) Comparison of $\pm 35^\circ$ rudder angle turning motion time history, between GM (KCS Container Ship, $F_n=0.156$)

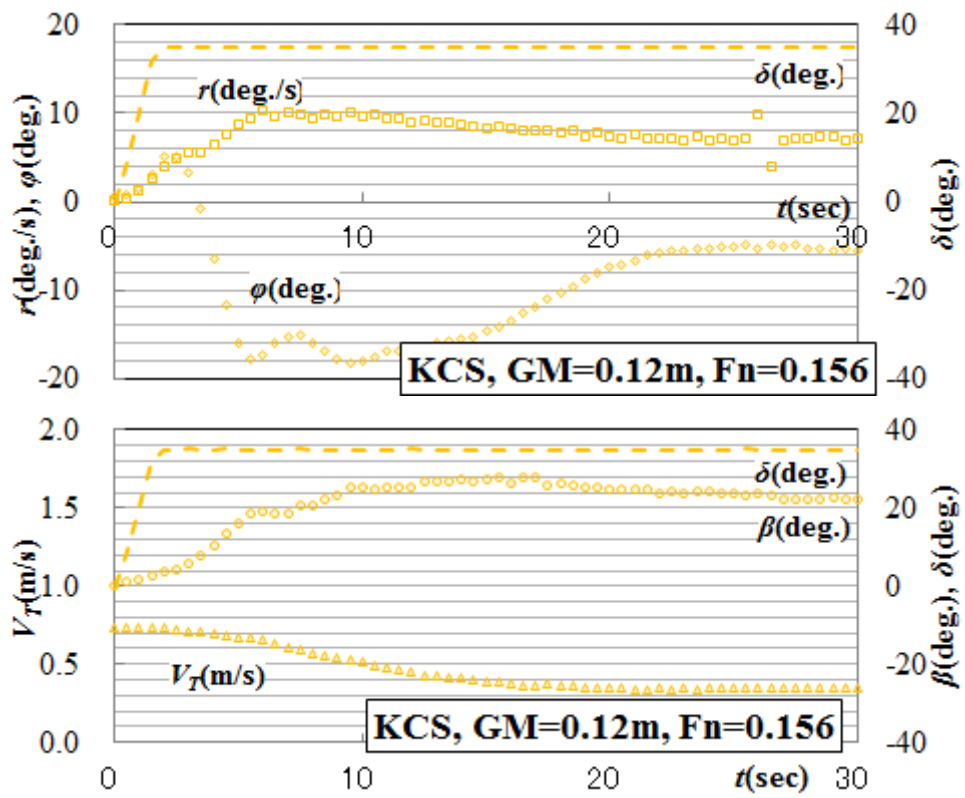


Fig.2.26(b) Comparison of $\pm 35^\circ$ rudder angle turning motion time history, between GM (KCS Container Ship, $F_n=0.156$)

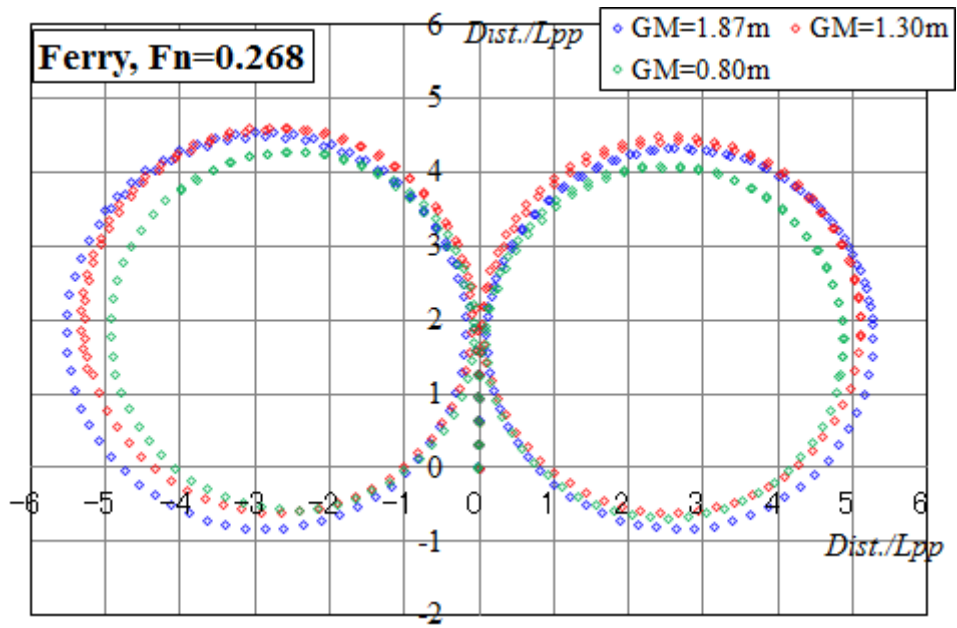


Fig.2.27(a) Comparison of $\pm 35^\circ$ rudder angle turning motion trajectory, between GM
(Passenger Ferry, $F_n=0.268$)

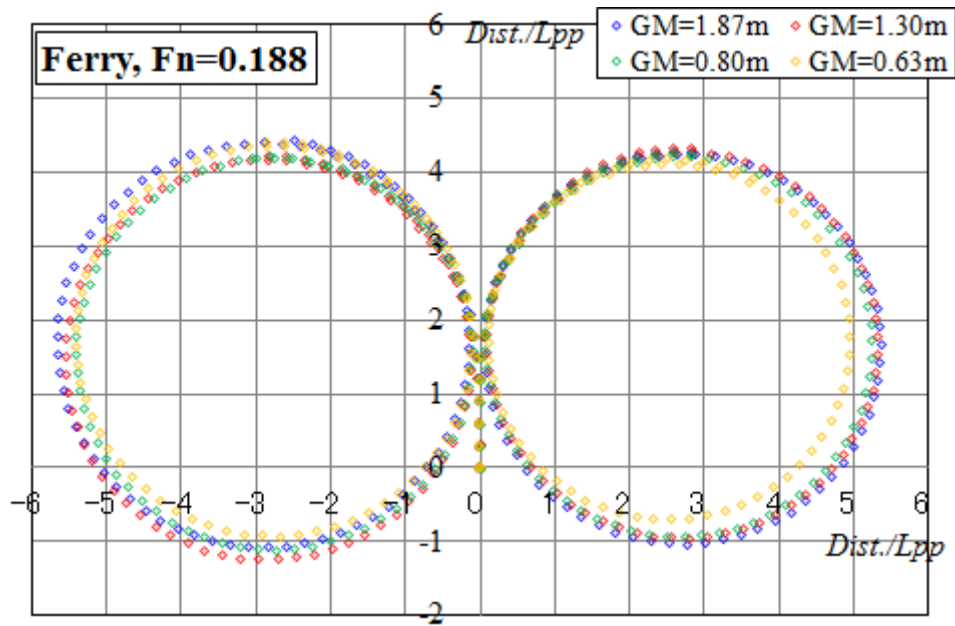


Fig.2.27(b) Comparison of $\pm 35^\circ$ rudder angle turning motion trajectory, between GM
(Passenger Ferry, $F_n=0.188$)

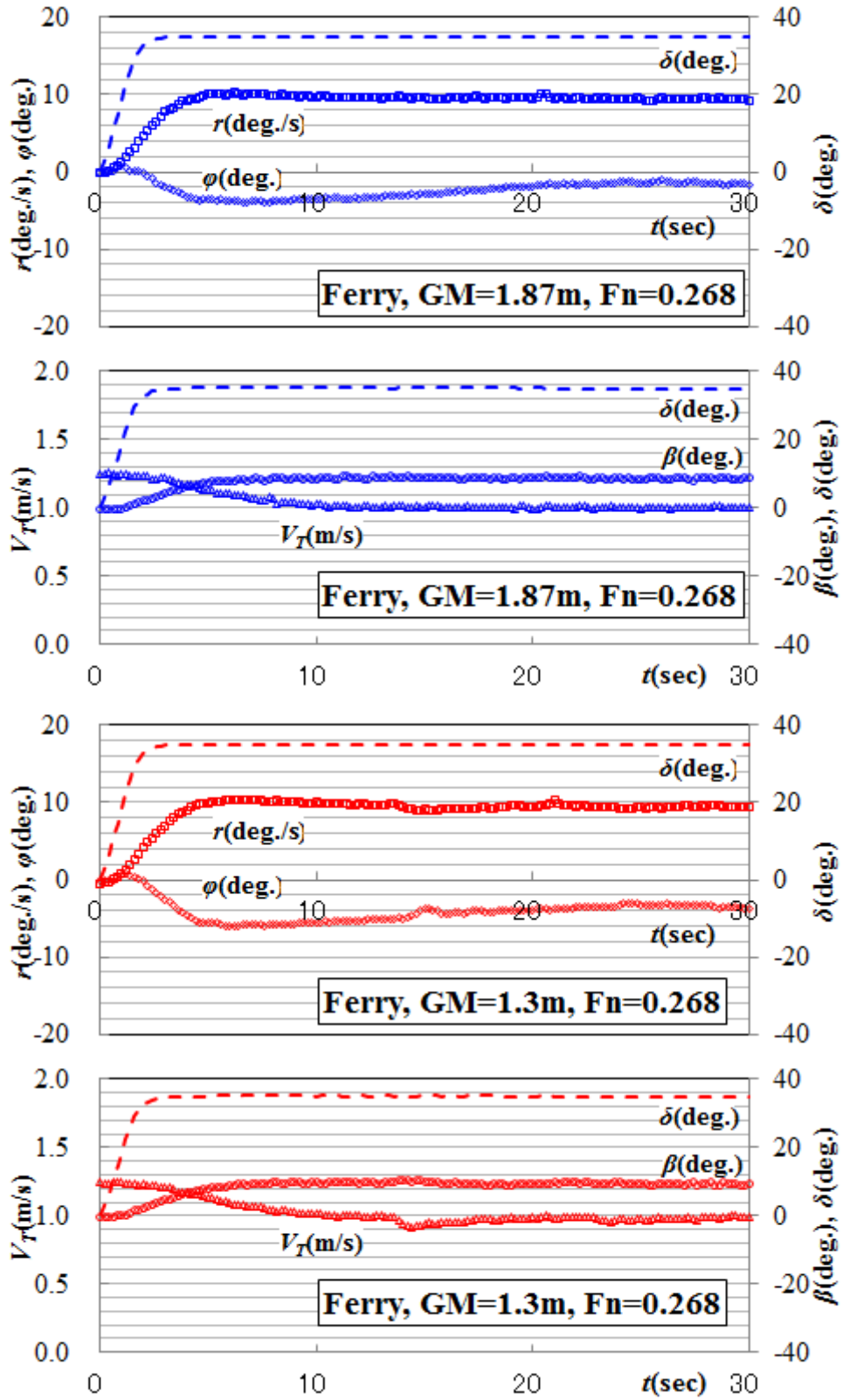


Fig.2.28(a) Comparison of $\pm 35^\circ$ rudder angle turning motion time history, between GM (Passenger Ferry, $F_n=0.268$)

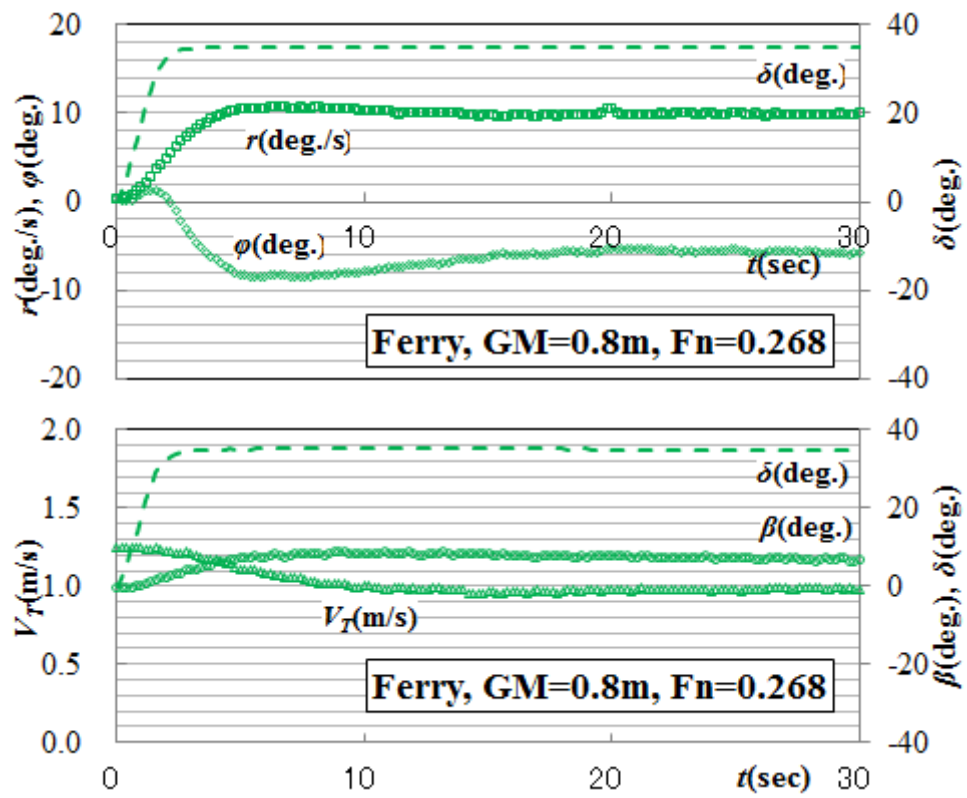


Fig.2.28(a) Comparison of $\pm 35^\circ$ rudder angle turning motion time history, between GM (Passenger Ferry, $Fn=0.268$)

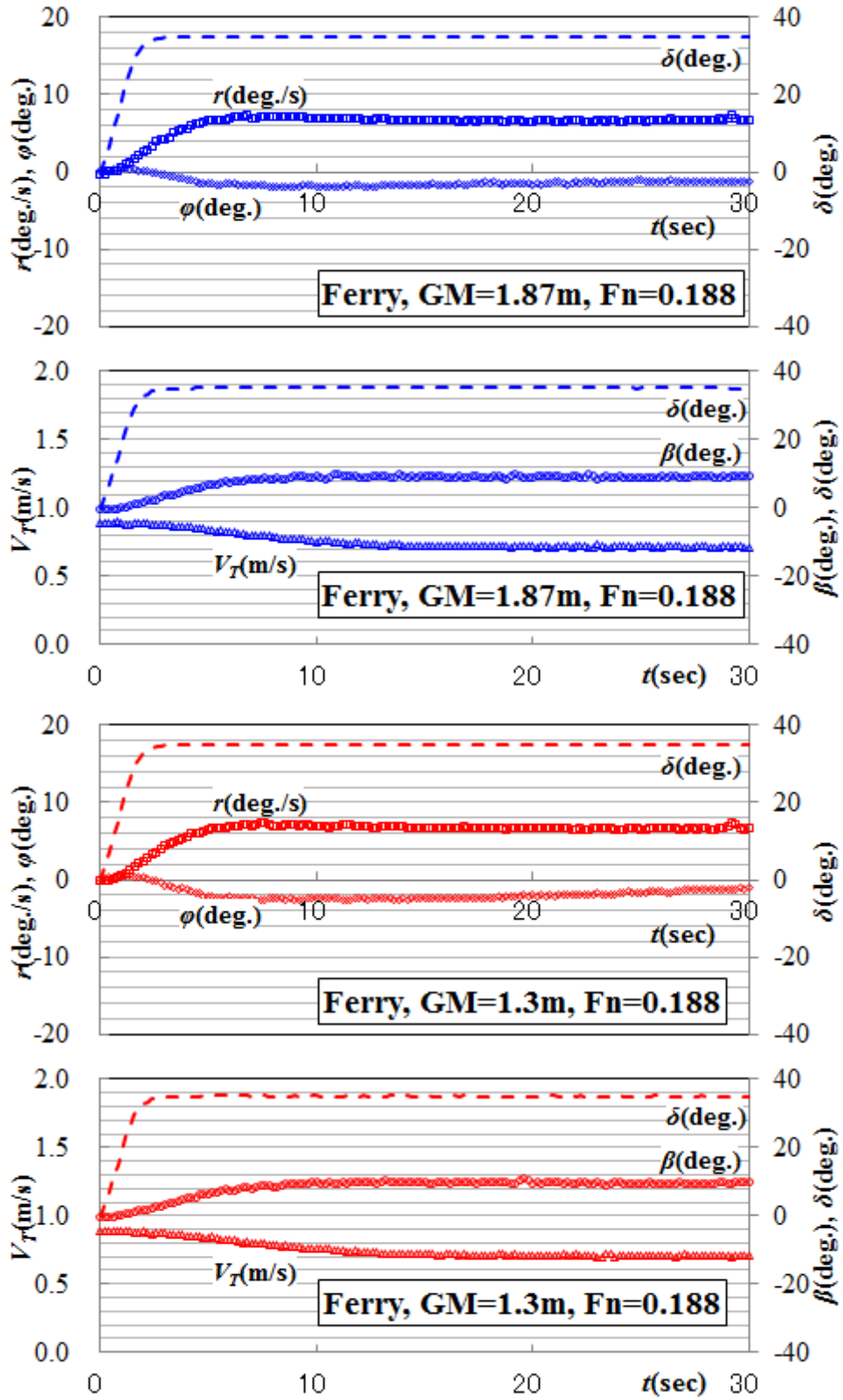


Fig.2.28(b) Comparison of $\pm 35^\circ$ rudder angle turning motion time history, between GM (Passenger Ferry, $F_n=0.188$)

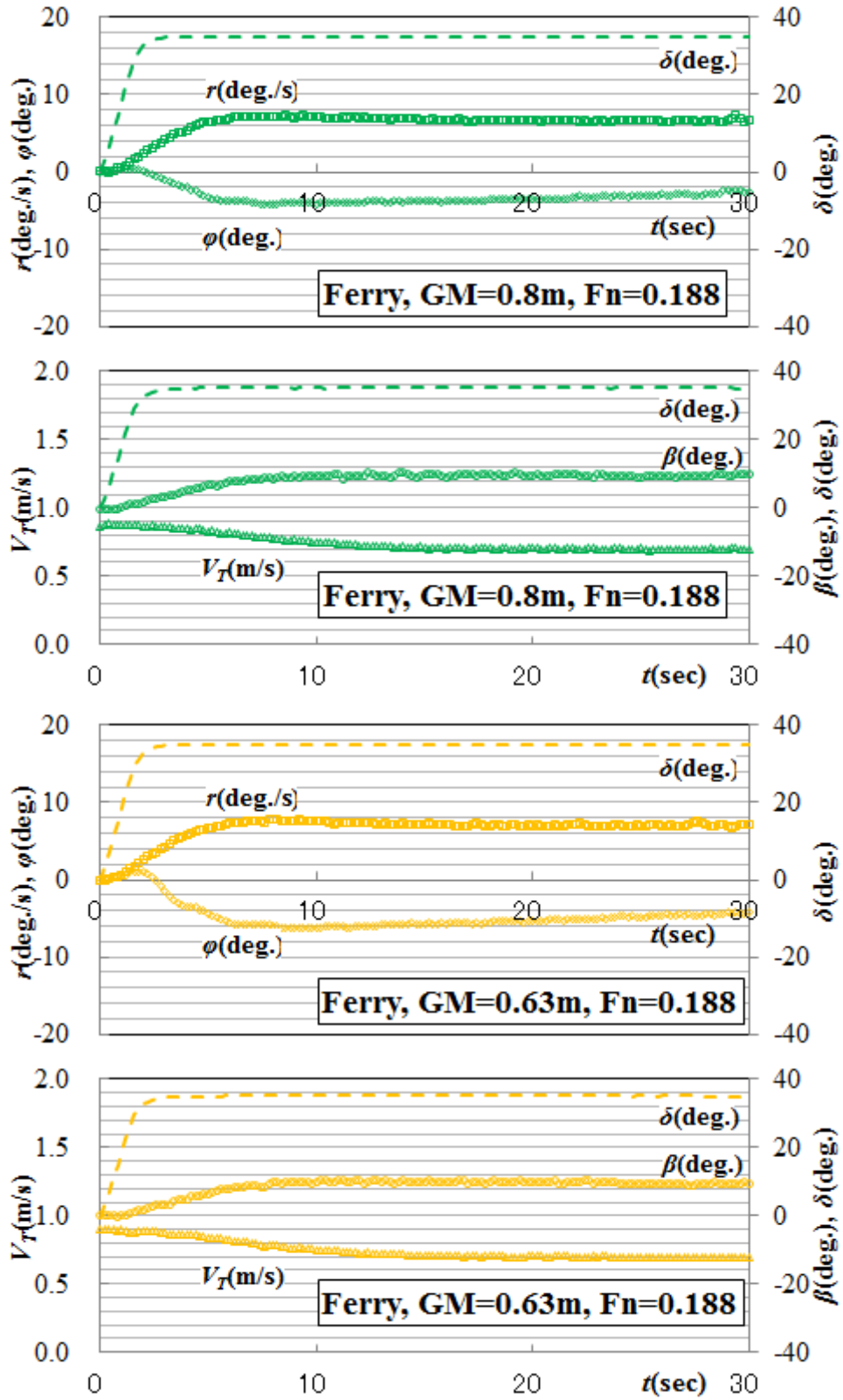


Fig.2.28(b) Comparison of $\pm 35^\circ$ rudder angle turning motion time history, between GM (Passenger Ferry, $F_n=0.188$)

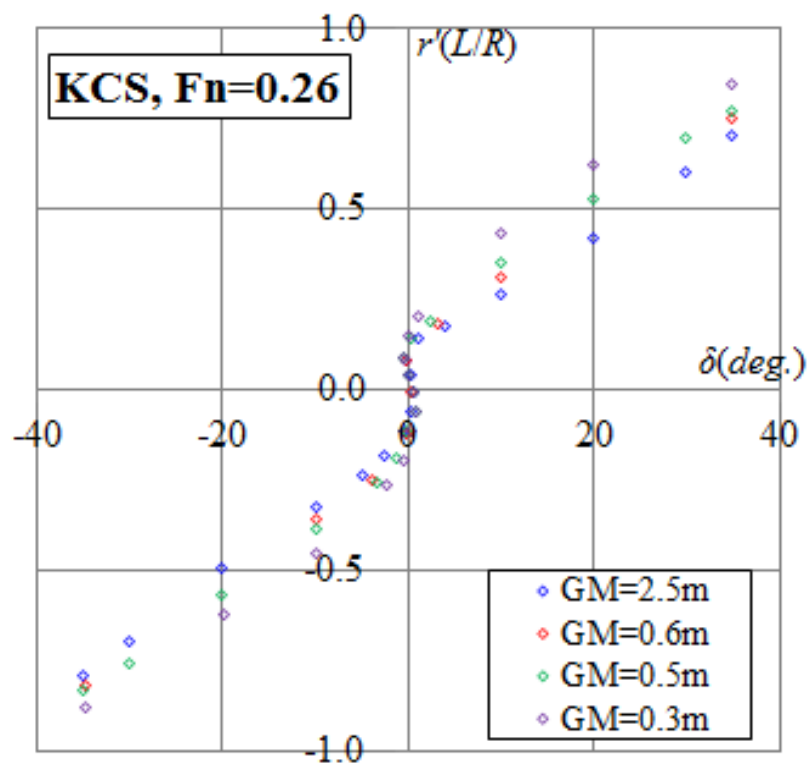


Fig.2.29 Comparison of spiral curve, between GM (KCS Container Ship, Fn=0.26)

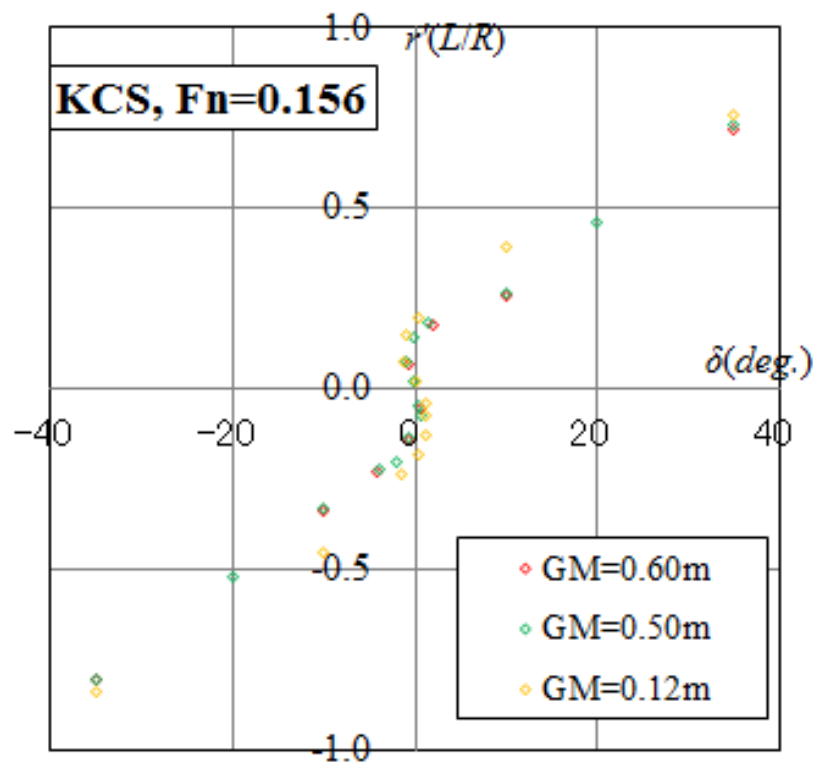


Fig.2.30 Comparison of spiral curve, between GM (KCS Container Ship, Fn=0.156)

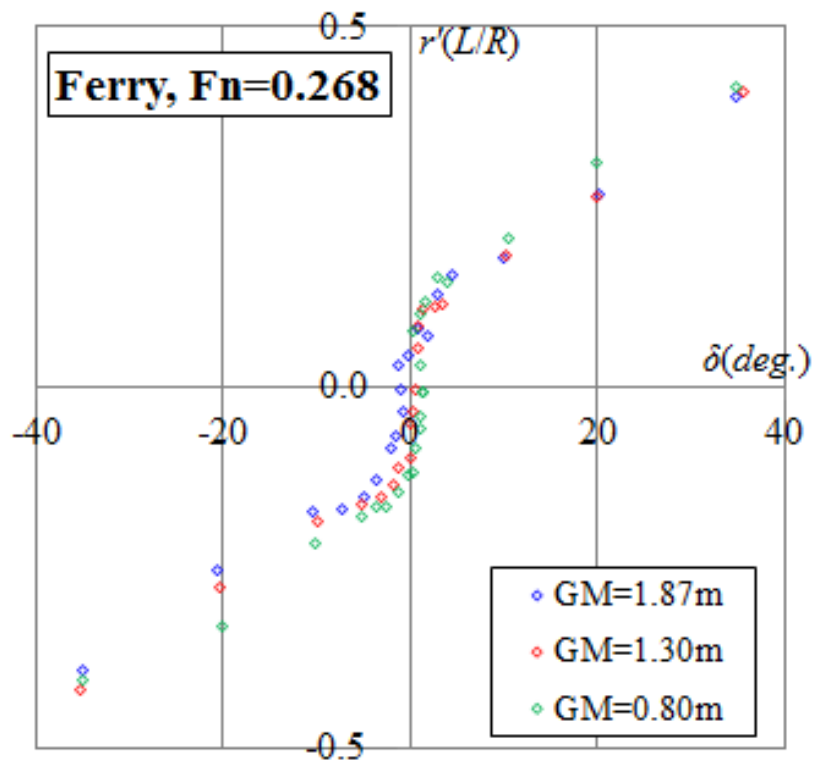


Fig.2.31 Comparison of spiral curve, between GM (Passenger Ferry, Fn=0.27)

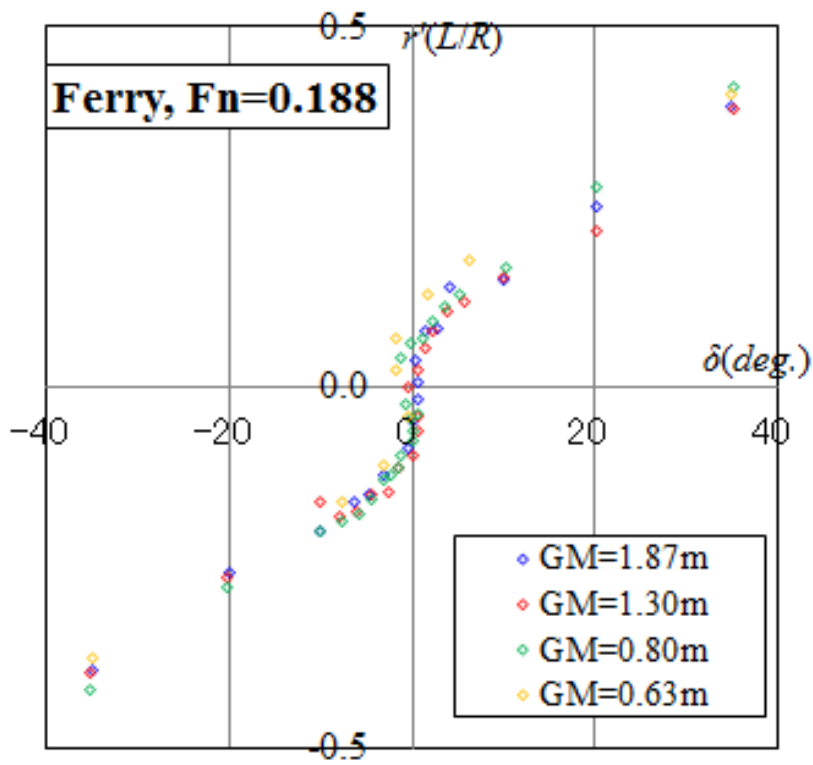


Fig.2.32 Comparison of spiral curve, between GM (Passenger Ferry, Fn=0.188)

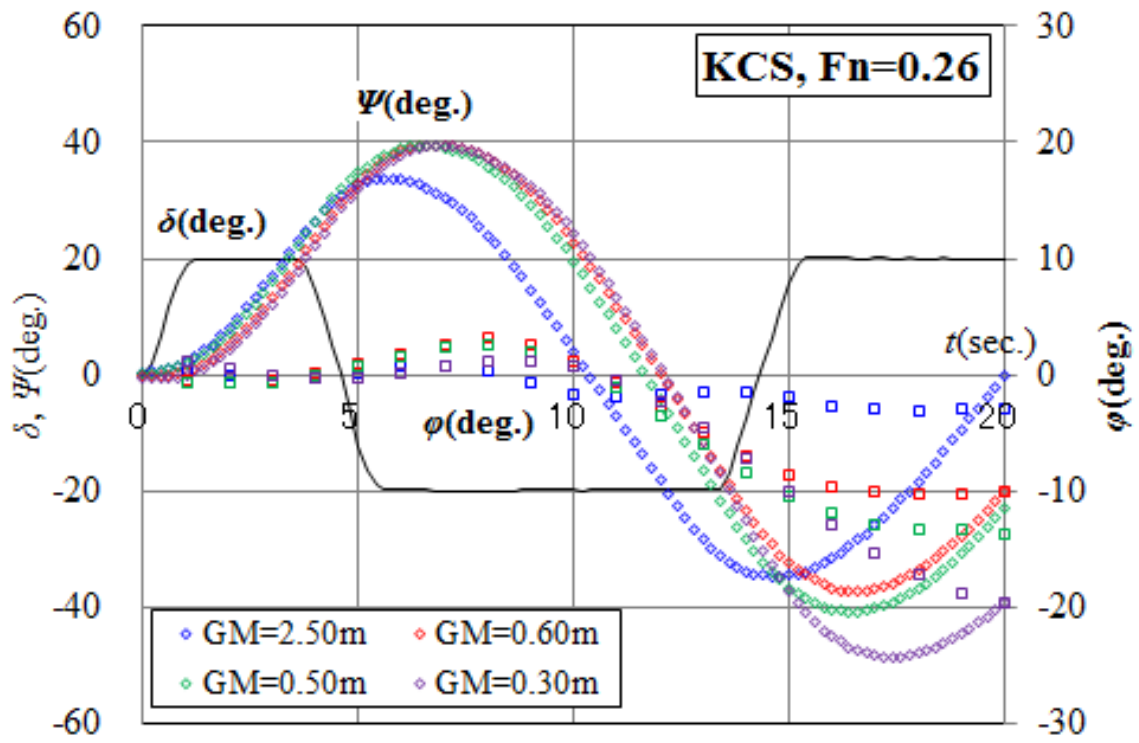


Fig.2.33 Comparison of 20°-20° Z tests time history, between GM (KCS Container Ship, $F_n=0.26$)

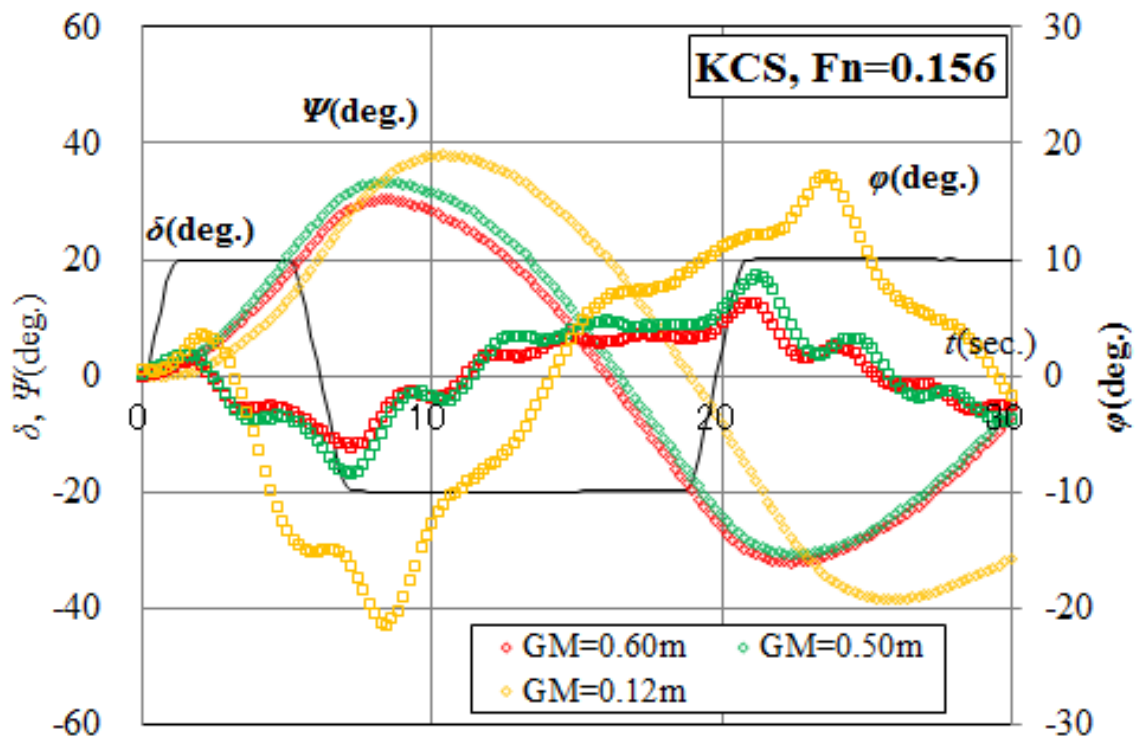


Fig.2.34 Comparison of 20°-20° Z tests time history, between GM (KCS Container Ship, $F_n=0.156$)

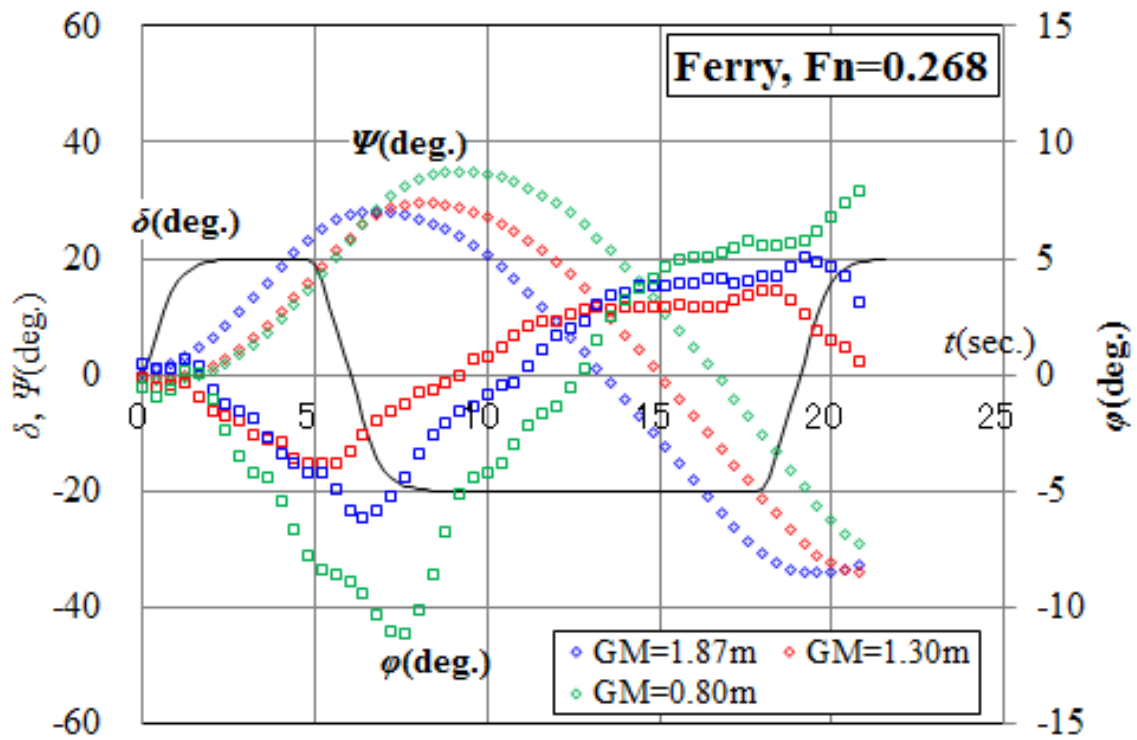


Fig.2.35 Comparison of 20°-20° Z tests time history, between GM (Passenger Ferry, $F_n=0.27$)

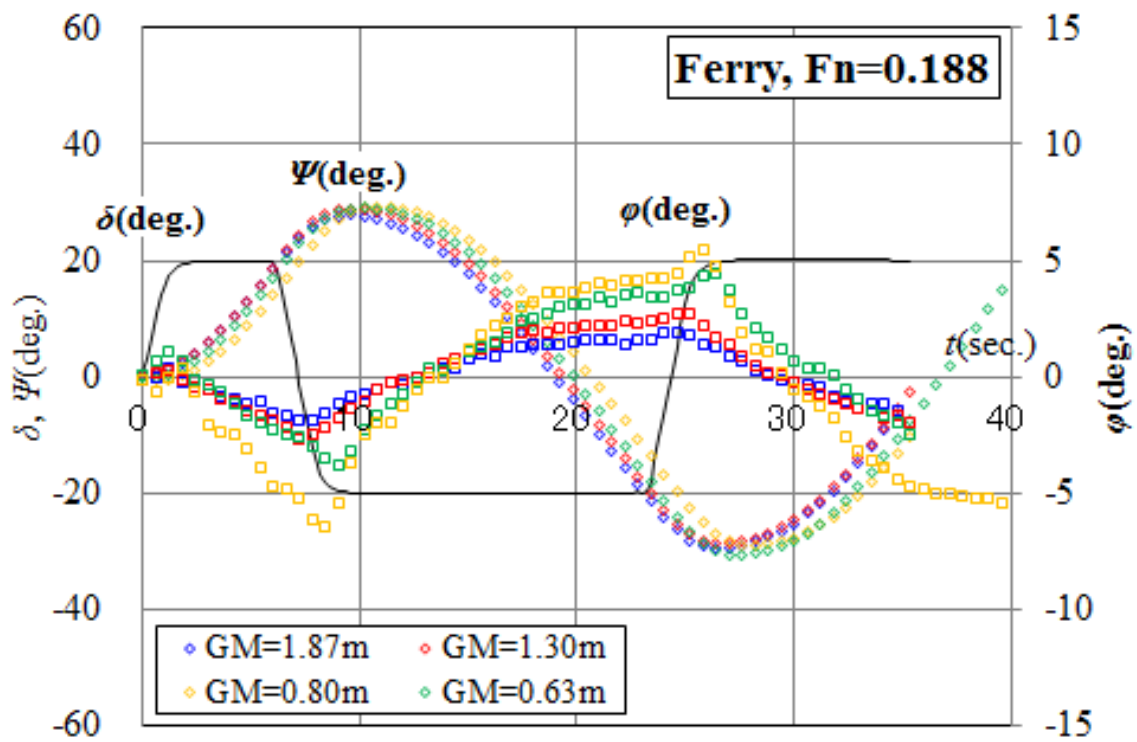


Fig.2.36 Comparison of 20°-20° Z tests time history, between GM (Passenger Ferry, $F_n=0.188$)

第3章 拘束模型実験による操縦流体力特性の把握

操縦運動における横傾斜影響について、4自由度の操縦運動モデルは過去にも幾つか提案されているが、その数学モデルについて横傾斜影響を正確に取り入れた研究は少ない。本章では横傾斜を含めた操縦シミュレーションを行うために、必要な流体力微係数やプロペラ・舵に関する干渉係数を求めるため、試験水槽にて横傾斜角度を数ケース変化させた拘束模型試験を実施した。また、これらの試験により求めた係数を用いて、横傾斜影響を正確に推定できるよう、4自由度操縦運動数学モデルの検討をするとともに、4自由度操縦運動シミュレーションを行い、横傾斜を考慮した操縦運動の理論的推定の妥当性について検討を行った。

3.1 4自由度操縦運動数学モデル

船体の横傾斜を含めた操縦運動を流体力学的観点から考察するため、拘束模型試験で得られた流体力や各種係数を用いて、操縦運動シミュレーションを行う。ここではシミュレーションに用いる4自由度操縦運動数学モデルについて示す。

3.1.1 運動方程式

船体の運動方程式は船体重心原点として固定した座標系を用いて、(3.1)式のように表せる。

$$\left. \begin{aligned} m(\ddot{x}_G - v_G r_G) &= X_{GA} + X_{GS} \\ m(\ddot{y}_G + u_G r_G) &= Y_{GA} + Y_{GS} \\ I_{zz} \ddot{\phi}_G &= N_{GA} + N_{GS} \\ I_{xx} \ddot{\psi}_G &= K_{GA} + K_{GS} \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

ただし、 m : 船体質量
 I_{zz} : 旋回運動の慣性モーメント
 I_{xx} : 横揺れ運動の慣性モーメント
 u_G, v_G : 船体重心における前後，横方向の速度
 r_G : 船体重心における回頭角速度
 ϕ_G : 船体重心における横傾斜角
 X_G, Y_G : 重心に働く船体前後方向，横方向の流体力
 N_G, K_G : 重心まわりの回頭，横傾斜モーメント

船体流体力、モーメントの添字 A は加速度成分に依存する流体力成分、S は速度成分に依存する定常流体力を表している。加速度に依存する流体力は(3.2)式のように表せる。

$$\left. \begin{aligned} X_{GA} &= -m_x \ddot{\phi}_G + m_y v_G r_G \\ Y_{GA} &= -m_y \ddot{\phi}_G - m_x u_G r_G \\ N_{GA} &= -J_{zz} \ddot{\phi}_G \\ K_{GA} &= -J_{xx} \ddot{\phi}_G - (z_H - z_G) Y_{GA} \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

ただし、 m_x, m_y : 船体前後方向・横方向の付加質量
 J_{zz}, J_{xx} : 旋回運動・横揺れ運動の付加慣性モーメント
 z_H, z_G : 船体横力のZ軸方向作用位置・重心のZ軸方向位置

速度成分に依存する流体力は、MMG の考え方に従って船体・プロペラ。舵の力に分離して(3.3)式のように表せる。

$$\left. \begin{aligned} X_{GS} &= X_S = X_H + X_R + X_P \\ Y_{GS} &= Y_S = Y_H + Y_R \\ N_{GS} &= N_S - x_G Y_S = N_H + N_R - x_G (Y_H + Y_R) \\ K_{GS} &= K_S + z_G Y_S = K_S + z_G (Y_H + Y_R) \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

流体力、モーメントの添字 H は船体成分、P はプロペラスラスト成分、R は舵力成分を表している。ここで添字に G がつかない流体力、及びモーメントは Fig.3.1 に示した

ような船体中央の水面高さを原点として表している。また、横傾斜モーメントについてはさらに(3.4)式のように表される。

$$\begin{aligned} K_{GS} &= K_S + z_G(Y_H + Y_R) \\ &= K_H + K_R + z_G(Y_H + Y_R) - B_{44}\phi - C_{44}\phi \end{aligned} \quad (3.4)$$

ただし、 $B_{44} = gm\overline{GM}$: 横揺れ減衰係数

$$C_{44} = \frac{2a_0}{\pi} \sqrt{gm\overline{GM}(I_{xx} + J_{xx})}: \text{横傾斜復原モーメント}$$

g : 重力加速度

$\overline{GM}$: 重心・メタセンタ距離

a_0 : 横揺れ減減曲線の線形係数

3.1.2 プロペラ・舵の流体力学モデル

プロペラの力については船体前後方向推力が主となるため船体前後方向のスラストのみを考慮し、推力減少係数を用いて次式で表現する。

$$X_P = (1 - t_P) \rho K_T n_P^2 D_P^4 \quad (3.5)$$

ただし、 ρ : 水の密度

n_P, D_P : プロペラ回転数、プロペラ直径

K_T : スラスト係数（前進常数 J の関数）

$$J = (1 - w)u / (n_P D_P)$$

$1 - w$: 有効伴流率

t_P : 推力減少係数

プロペラ推力は操舵や旋回・斜航によって変化するが、操舵による変化は後述する舵力の前後方向の干渉と合わせて表現する。また、旋回・斜航が大きくなると有効伴流率は 1.0 に近づき、推力が減少する傾向にあるが、ここでは運動に対する変化は無視して簡略化する。

舵の力、モーメントについては横傾斜による水平成分を考慮し、(3.6)式で表される。

$$\left. \begin{aligned} X_R &= -(1-t_R) \left(\frac{\rho}{2} L d U^2 \right) F'_N \sin \delta \cos \phi \\ Y_R &= -(1+a_H) \left(\frac{\rho}{2} L d U^2 \right) F'_N \cos \delta \cos \phi \\ N_R &= -(x'_R + a_H x'_H) \left(\frac{\rho}{2} L^2 d U^2 \right) F'_N \cos \delta \cos \phi \\ K_R &= -z_R Y_R \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

ただし、 L : 船の垂線間長(= L_{pp})

d : 船の平均喫水

U : 船速

δ : 舵角

t_R, a_H, x'_H : 舵と船体の干渉係数

x'_R : 舵の x 方向座標位置

F'_N : 無次元舵直圧力

z_R : 舵横力の Z 軸方向作用位置

また、無次元直圧力は舵の有効流速と有効流向を用いて、次式で表される。

$$F'_N = \frac{A_R}{Ld} f_\alpha U'_R \sin \alpha_R \quad (3.7)$$

ただし、 $U'_R = \sqrt{u'^2_R + v'^2_R}$: 舵の無次元有効流速

$\alpha_R = \delta - \tan^{-1} \left(\frac{-v'_R}{u'_R} \right)$: 舵の有効流向

$f_\alpha = 6.13\Lambda / (2.25 + \Lambda)$: 藤井の式による舵単独の直圧力勾配係数

A_R : 舵可動部面積

Λ : 舵のアスペクト比

舵の有効流速の船体前後方向成分、横方向成分は次式で表され、横方向成分については横揺れ角速度成分を考慮した形で表される。

$$\left. \begin{aligned} u'_R &= \varepsilon(1-w) \sqrt{\eta \left\{ 1 + \kappa \left(\sqrt{1 + 8K_T / \pi J^2} - 1 \right) \right\}^2 + (1-\eta)} \\ v'_R &= -\gamma_R \left\{ \beta - l'_R r' + (\phi(z_R - z_G) / U) \right\} \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

ただし、 $\eta = D_p/H$ (H : 舵高さ)
 $\kappa = k_x/\varepsilon$ (k_x : プロペラ後流の増幅率)
 ε : 有効伴流係数比 ($= (1-w_R)/(1-w_P)$)
 w_R : 舵位置での伴流係数
 w_P : プロペラ位置での伴流係数
 β : 斜航角
 γ_R : 船体の整流係数
 l'_R : 旋回角速度に対する係数

3.1.3 主船体の流体力数学モデル

3 自由度の主船体の流体力数学モデルは船の操縦運動のパラメータである β, r' の多項式で表現されるのが一般的である。これは横傾斜 ϕ の影響を加えた 4 自由度の数学モデルの場合も同様であり、主船体流体力の表現については実績のある 3 自由度の操縦運動数学モデルをベースに横傾斜 ϕ の影響を合理的に取り入れる必要がある。本研究でベースとして用いる 3 自由度の流体力数学モデルを(3.9)式に示す。

$$\begin{aligned}
X_H &= \frac{\rho}{2} L d U^2 \\
&\times \left\{ X'_0 + X'_\beta \beta + X'_r r' + X'_{\beta\beta} \beta^2 + (X'_{\beta r} - m'_y) \beta r' + X'_{rr} r'^2 + X'_{\beta\beta\beta} \beta^3 \right\} \\
Y_H &= \frac{\rho}{2} L d U^2 \\
&\times \left\{ \begin{aligned} &Y'_0 + Y'_\beta \beta + (Y'_r - m'_x) r' \\ &+ Y'_{\beta\beta} \beta^2 + Y'_{\beta r} \beta r' + Y'_{rr} r'^2 \\ &+ Y'_{\beta\beta\beta} \beta^3 + Y'_{\beta\beta r} \beta^2 r' + Y'_{\beta rr} \beta r'^2 + Y'_{rrr} r'^3 \end{aligned} \right\} \\
N_H &= \frac{\rho}{2} L^2 d U^2 \\
&\times \left\{ \begin{aligned} &N'_0 + N'_\beta \beta + N'_r r' \\ &+ N'_{\beta\beta} \beta^2 + N'_{\beta r} \beta r' + N'_{rr} r'^2 \\ &+ N'_{\beta\beta\beta} \beta^3 + N'_{\beta\beta r} \beta^2 r' + N'_{\beta rr} \beta r'^2 + N'_{rrr} r'^3 \end{aligned} \right\}
\end{aligned} \tag{3.9}$$

上式は左右対称な船型の 3 自由度モデルでは基本的に存在しない左右非対称性を表す微係数を含んだ表現となっている。左右非対称性を表す微係数としては、 X'_β 、 X'_r 、

$Y'_{\beta\beta}$ 、 $Y'_{\beta r}$ 、 Y'_{rr} 、 $N'_{\beta\beta}$ 、 $N'_{\beta r}$ 、及び N'_{rr} 等の項がある。これらは船体が横傾斜することで船体の没水形状が左右非対称となることから、4 自由度の流体力数学モデルを検討するうえで必要となる。本式に横傾斜影響を取り入れた流体力数学モデルの表現、及び横傾斜モーメントの表現については、次節で模型試験の結果と合わせて記載する。

3.2 拘束模型試験

ここでは横傾斜による操縦運動時の流体力、モーメントや船体・舵・プロペラ間の干渉影響を明確に見るため、横傾斜角度を数ケース変化させて実施した拘束模型試験について示す。

3.2.1 供試模型・実験施設

模型試験の供試船型は第 2 章と同様に KCS コンテナ船、及び 2 軸 1 舵フェリーを対象とした。供試模型船の主要目についても前章に示したとおりである。

また実験は、北海道大学函館キャンパスの長水槽（長さ×幅×深さ：50m×3.5m×1.2m）、及びジャパン マリンユナイテッド㈱の運動性能水槽（長さ×幅×深さ：70m×30m×3m）で実施した。北海道大学長水槽の施設写真を Fig.3.2 に示す。運動性能水槽については前章に示したとおりである。

3.2.2 実験方法

3.2.2.1 拘束旋回試験（CMT）

横傾斜時の模型船の船体流体力微係数、及び微係数の横傾斜による変化を把握するため、横傾斜を付けた拘束旋回試験を実施した。拘束旋回試験は一定速度で特定の斜航角 β 、または回頭角速度 r' 、或いはその連成運動を与えた状態で、試験水槽の曳引車を用いて模型船を曳航し、定常操縦運動時に船体に働く流体力を求める試験である。試験状態は船体と舵付きとし、プロペラは装備していない状態とした。

模型船の運動、及び船体流体力については、水線面上の船体中央に原点を固定し、 y 軸方向を水平にとる horizontal body axis に基づいて行っており、旋回・斜航による模型船、及び検力計の慣性力は解析の段階でこれらを全て控除した。

模型船はヒープ、ピッチの 2 方向を自由とし、ロール方向は所定の横傾斜角を設定し、固定した。検力計は一点ゲージ方式の 4 分力計 (X, Y, N, K) を用いており、平面

は船体中央、高さ方向は模型船の水線面高さに近づけたが、完全に一致させることは困難であったため、解析の段階で補正を行っている。また検力計の各方向力の干渉についても、事前に詳細に検定を行ったうえで、解析の段階で補正を行った。4 分力計の写真を Fig.3.3 に示す。

舵の力は第 2 章で示した小型操舵機とその舵軸に取り付けられた 2 分力計で舵直圧力と舵長手方向の力を船体流体力と同時に計測した。舵直圧力は横傾斜による重力成分を除いた後、Fig.3.1 の座標系に基づいて水平方向成分に換算した。

試験は横傾斜角 ϕ の設定値を 10° 、 0° 、 -10° 、 -20° の 4 状態とし、横傾斜による左右非対称流体力を正確に求めるため、試験のパラメータはそれぞれの横傾斜角に対して、斜航角 β 、及び無次元回頭角速度 r' を左右の旋回で対称になるよう組み合わせで行った。試験パラメータの組合せ表を Fig.3.4 に示す。舵角は基本的に中央で固定としたが、幾つかの試験状態で操舵を行い、運動状態における舵の有効流速と迎角を計測した。

試験船速は両模型ともに 1.0m/s (KCS : $Fn=0.216$ 、Ferry : $Fn=0.209$) とした。

3.2.2.2 直進・斜航角付き舵角試験

横傾斜影響を含めた推力減少係数(1-t)、有効伴流係数(1-w)、舵に関する干渉係数(1- t_R)、 a_H 、 x_H 、舵・プロペラ位置での伴流係数比 ε 、修正係数 κ および整流係数 γ_R を求めるため、ここでは横傾斜を付けた直進舵角試験、及び斜航角付き舵角試験を実施した。模型船は舵、プロペラ付きの状態とし、プロペラは模型船の自航点の状態を基準とした。船体流体力、及び舵力の計測方法は拘束旋回試験と同じであるが、本試験では舵の力は舵直圧力のみの計測とした。プロペラ推力は小型の自航動力計を用いて計測し、2 軸 1 舵フェリーに関しては 2 台の自航動力計を用いて、各軸の推力を計測した。プロペラ推力についても舵同様に水平方向成分として解析を行った。小型自航動力計の写真を Fig.3.5 に、2 軸の自航動力計のセッティングの様子を Fig.3.6 に示す。

試験は横傾斜角 ϕ の設定値を 10° 、 0° 、 -10° 、 -20° (一部 20°) とし、各船型ともに 3 種類のプロペラ荷重度で直進舵角試験、及び斜航角付き舵角試験を実施した。プロペラ荷重度は船速を 1.0m/s としたまま、回転数を変更して設定した。

3.2.3 試験解析

3.2.3.1 船体流体力の無次元化

試験で計測した流体力は(3.10)式のように無次元化した。

$$\left. \begin{aligned} X' &= X / \left(\frac{\rho}{2} L d U^2 \right) \\ Y' &= Y / \left(\frac{\rho}{2} L d U^2 \right) \\ N' &= N / \left(\frac{\rho}{2} L^2 d U^2 \right) \\ K' &= K / \left(\frac{\rho}{2} L d^2 U^2 \right) \\ F'_N &= F_N / \left(\frac{\rho}{2} L d U^2 \right) \\ T' &= T / \left(\frac{\rho}{2} L d U^2 \right) \quad or \quad K_T = T / (\rho n_p^2 D_p^4) \end{aligned} \right\} \quad (3.10)$$

ただし、 T :プロペラスラスト

3.2.3.2 拘束旋回試験（主船体流体力）の解析

本試験は舵付きの状態で行っているため、MMG の取り扱いに従って、同時に計測された舵直圧力、及び舵・船体間の干渉力を含めてこれらに含まれる舵力成分を控除した。船長方向、横方向、及び旋回方向の船体流体力・モーメントの計測結果は(3.9)式に示したとおり、 β と r' の左右非対称項を含めた数学モデルを用いて、それぞれの横傾斜角について最小自乗法により一括解析した。KCS コンテナ船の主船体流体力の解析結果を Table 3.1 に、2 軸 1 舵フェリーの解析結果を Table 3.2 に示す。

$$\left. \begin{aligned}
& X_H = \frac{\rho}{2} L d U^2 \\
& \times \left\{ X'_0 + X'_\beta \beta + X'_r r' + X'_{\beta\beta} \beta^2 + (X'_{\beta r} - m'_y) \beta r' + X'_{rr} r'^2 + X'_{\beta\beta\beta} \beta^3 \right\} \\
& Y_H = \frac{\rho}{2} L d U^2 \\
& \times \left\{ \begin{aligned}
& Y'_0 + Y'_\beta \beta + (Y'_r - m'_x) r' \\
& + Y'_{\beta\beta} \beta^2 + Y'_{\beta r} \beta r' + Y'_{rr} r'^2 \\
& + Y'_{\beta\beta\beta} \beta^3 + Y'_{\beta\beta r} \beta^2 r' + Y'_{\beta r r} \beta r'^2 + Y'_{rrr} r'^3
\end{aligned} \right\} \\
& N_H = \frac{\rho}{2} L^2 d U^2 \\
& \times \left\{ \begin{aligned}
& N'_0 + N'_\beta \beta + N'_r r' \\
& + N'_{\beta\beta} \beta^2 + N'_{\beta r} \beta r' + N'_{rr} r'^2 \\
& + N'_{\beta\beta\beta} \beta^3 + N'_{\beta\beta r} \beta^2 r' + N'_{\beta r r} \beta r'^2 + N'_{rrr} r'^3
\end{aligned} \right\}
\end{aligned} \right\} \quad (3.9 \text{ 再})$$

操縦運動時の流体力に働く横傾斜角の影響について考えると、定常旋回時を想定した場合、右旋回で β, r' がともにプラスの時、 ϕ はマイナスとなり、左旋回ではこれらの極性が逆転する。従って、左右対称型の 3 自由度数学モデルの各微係数の横傾斜 ϕ に対する変化は全て $|\phi|$ もしくは ϕ の偶関数で表記される必要がある。本論文ではこれを解析の容易な前者の $|\phi|$ で表す。

一方で(3.9)式にも示したとおり、船の横傾斜によって船体没水形状が左右非対称となることで現れる左右非対称な流体力があり、 X_H の β, r' に比例する項、 Y_H, N_H の定数項にあたる Y'_0, N'_0 、及び $\beta\beta, \beta r, rr$ 等の項がこれに相当する。これらの流体力の変化は ϕ の奇関数で表記される必要がある。本論文ではこれを単純に ϕ の一次関数で表す。こうした点を踏まえて流体力微係数の横傾斜影響を検討する。

(a) 前後方向の流体力

左右対称型の微係数 X'_0 、及び $X'_{\beta\beta}, X'_{\beta r}, X'_{rr}, X'_{\beta\beta\beta}$ の横傾斜角の絶対値 $|\phi|$ に対する変化を Fig.3.7 に示す。グラフの横軸は横傾斜角の絶対値 $|\phi|$ を示しており、縦軸は各微係数の横傾斜角が 0 の時の微係数からの変化の比率を表している。グラフ内の色のついていないプロットは横傾斜角がプラス側の時の微係数であり、実線と破線はそれぞれ KCS コンテナ船、及び 2 軸 1 舵フェリーの微係数の近似直線を示す。

X'_0 は直進抵抗係数に相当するが、両船型ともに $|\phi|$ によって多少減少する傾向があるがその変化は小さい。非線形微係数のうち $X'_{\beta r}$ についても $|\phi|$ に対する変化は少ないが、 $X'_{\beta\beta}$ 、 X'_{rr} は $|\phi|$ に対する変化がやや大きく、 $|\phi|$ に対して線形的に変化している。このことはこれらの微係数は $|\phi|$ を考慮した微係数として表現する必要があることを示しており、 $X'_{\beta\beta}(1 + c_{x\beta\beta}|\phi|)\beta^2$ のような形で表現できる。 $X'_{\beta\beta\beta}$ は横傾斜角 $|\phi|$ の変化に対して大きくばらつき、微係数の変化の傾向をつかむことは困難である。

次に左右非対称型の微係数 X'_β 、 X'_r の横傾斜角に対する変化を Fig.3.8 に示す。こちらについてはグラフの横軸は横傾斜角 ϕ を示しており、縦軸は各微係数の値を表している。 X'_β の横傾斜角 ϕ に対する変化は少ないため、変化の傾向も明確に表れていないが、 X'_r は両船型ともに ϕ に比例している。これは $X'_{r\phi}$ のような横傾斜を考慮した微係数が必要となる可能性があることを示しており、 $X'_{r\phi}\phi$ のような形で表現できる。

(b) 横方向の流体力、旋回モーメント

左右対称型の微係数のうちの線形微係数 Y'_β 、 Y'_r 、 N'_β 、 N'_r の横傾斜角の絶対値 $|\phi|$ に対する変化を Fig.3.9 に示す。どの微係数も $|\phi|$ に対して概ね線形的に変化しており、前後方向の微係数と同様に $Y'_\beta(1 + c_{y\beta}|\phi|)\beta$ のような形で表現できる。またそれぞれの微係数の変化の傾向として、 Y'_β は KCS コンテナ船では $|\phi|$ に対してやや増加する傾向であるが、フェリー船型では減少する。これに対して N'_β は両船型ともに $|\phi|$ に対して大きく増加していることから、斜航流体力の作用位置は $|\phi|$ の増加とともに船体前方に移動し、針路安定性が低下する方向となり、この変化はフェリー船型の方が大きい。一方で旋回の微係数 Y'_r 、 N'_r はもともと値が小さいため変化はばらつくが、両船型ともに $|\phi|$ に対して減少する傾向である。また N'_r も同じく $|\phi|$ に対して減少する傾向であるため、旋回による流体力の作用位置は $|\phi|$ の増加とともに船体後方に移動し、針路安定性が低下する方向となる。

左右対称型の非線形微係数 $Y'_{\beta\beta}$ 、 $Y'_{\beta r}$ 、 Y'_{rr} 、 Y'_{rrr} 、 $N'_{\beta\beta}$ 、 $N'_{\beta r}$ 、 N'_{rr} 、 N'_{rrr} の横傾斜角の絶対値 $|\phi|$ に対する変化を Fig.3.10 に示す。これらの項の変化はやや複雑であり、 $Y'_{\beta\beta}$ 、 $Y'_{\beta r}$ 、 $N'_{\beta r}$ 、 N'_{rr} 等は $|\phi|$ に対する変化が認められるが、 Y'_{rrr} 、 N'_{rrr} 等は一定の変化の傾向がつかみ難い。これらの微係数はもともと高次のものであり、横傾斜に対する変化を加えるには慎重を要し、実用的には無視できる可能性もあると考えられる。

横力、及び旋回モーメントの左右非対称型の微係数の代表的なものは Y'_0 、 N'_0 であり、横傾斜角に対する変化を Fig.3.11 に示す。これらの項も横傾斜角 ϕ に対して概ね線形的

に変化をしているが、その特性には船型による差が見られる。KCS コンテナ船では ϕ の増加に対して、 Y'_0 は傾斜とは反対方向の力が発生しているが、フェリー船型ではKCSとは逆方向に力が発生している。 N'_0 の変化は両船ともに横傾斜角 ϕ に対して負の向きになっており、その勾配はKCS コンテナ船よりフェリー船型の方がやや大きくなっている。これらの特性からは Y'_ϕ 、 N'_ϕ のような形で表される微係数が必要になり、これらは横傾斜が針路安定性に影響を及ぼす重要な係数になる。

また定数項以外の左右非対称型の微係数 $Y'_{\beta\beta}$ 、 $Y'_{\beta r}$ 、 Y'_{rr} 、 $N'_{\beta\beta}$ 、 $N'_{\beta r}$ 、 N'_{rr} の横傾斜角 ϕ に対する変化を Fig.3.12 に示す。これらの微係数は ϕ に対してかなり線形的に変化する実験結果となっており、4 自由度流体力として $Y'_{\beta\beta}\beta^2\phi$ 、 $N'_{\beta r}\beta r'\phi$ のような形で表現できることを示している。

(c) 横傾斜モーメント

横傾斜モーメント K'_H は操縦運動で発生する横力によって発生するため、横力 Y'_H との関係をまず確認する。本試験の横傾斜角 0 の状態で計測された横力と横傾斜モーメントの関係を Fig.3.13 に示す。グラフは横軸が横力 Y'_H 、縦軸が横傾斜モーメント K'_H として単純斜航状態、単純旋回状態、及び斜航付き旋回状態に分けてプロットされており、 Y'_H に対する K'_H の傾きが喫水 d で無次元化したモーメントレバー z'_H となる。グラフから KCS コンテナ船とフェリー船型ではこの傾きが同じ傾向となることが確認できるが、操縦運動の状態によって異なっていることがわかる。単純斜航状態では傾きはマイナスで z'_H は大きい値となり、両船ともに水面下 0.65 d 程度となる。単純旋回状態では傾きはプラスとなり、横力の作用位置が水面上にあることを示している。斜航付き旋回状態では運動に応じて上記の範囲で変化していることがわかる。この結果は解析対象とする運動状態によって横力の作用中心が異なっているため、モーメントレバー z'_H を一定として、横傾斜モーメントを横力の関数とするような簡便な取り扱いが困難であることを示している。運動状態によってモーメントレバーが異なる原因としては、船底の圧力分布が操縦運動の状態によって異なっており、この圧力差が K'_H の成分となって、鉛直方向のモーメントレバーを変化させる原因となっていると推測されるが、模型試験によるこのような力の計測は困難である。この点については第 5 章で論じる。

以上の結果から、横傾斜モーメント K'_H についても個別に運動変数で表記する数学モデルで表す必要があることがわかる。この場合、 Y'_H や N'_H と類似の数学モデルが必要

であり、 K'_H においても横傾斜角の影響は前述した前記の Y'_H や N'_H の物理的特性と同様に左右対称型の微係数の横傾斜 ϕ に対する変化は $|\phi|$ の偶関数で、左右非対称型の微係数は ϕ の奇関数でモデル化される必要がある。

以上の知見より、横傾斜モーメントに及ぼす横傾斜の影響を調べるため、(3.9)式と同様の左右非対称性を含んだ数学モデルを X_H 、 Y_H 、 N_H と合わせて(3.11)式のように示し、この数学モデルを用いて解析を行った。横傾斜モーメントについても、 β と r' の左右非対称項を含めた数学モデルを用いて、それぞれの横傾斜角について最小自乗法により一括解析した結果を、Table 3.1、Table 3.2 に示している。

$$\left. \begin{aligned}
 X_H &= \frac{\rho}{2} L d U^2 \\
 &\times \left\{ X'_0 + X'_\beta \beta + X'_r r' + X'_{\beta\beta} \beta^2 + (X'_{\beta r} - m'_y) \beta r' + X'_{rr} r'^2 + X'_{\beta\beta\beta} \beta^3 \right\} \\
 Y_H &= \frac{\rho}{2} L d U^2 \\
 &\times \left\{ \begin{aligned}
 &Y'_0 + Y'_\beta \beta + (Y'_r - m'_x) r' \\
 &+ Y'_{\beta\beta} \beta^2 + Y'_{\beta r} \beta r' + Y'_{rr} r'^2 \\
 &+ Y'_{\beta\beta\beta} \beta^3 + Y'_{\beta\beta r} \beta^2 r' + Y'_{\beta rr} \beta r'^2 + Y'_{rrr} r'^3
 \end{aligned} \right\} \\
 N_H &= \frac{\rho}{2} L^2 d U^2 \\
 &\times \left\{ \begin{aligned}
 &N'_0 + N'_\beta \beta + N'_r r' \\
 &+ N'_{\beta\beta} \beta^2 + N'_{\beta r} \beta r' + N'_{rr} r'^2 \\
 &+ N'_{\beta\beta\beta} \beta^3 + N'_{\beta\beta r} \beta^2 r' + N'_{\beta rr} \beta r'^2 + N'_{rrr} r'^3
 \end{aligned} \right\} \\
 K_H &= \frac{\rho}{2} L d^2 U^2 \\
 &\times \left\{ \begin{aligned}
 &K'_0 + K'_\beta \beta + K'_r r' \\
 &+ K'_{\beta\beta} \beta^2 + K'_{\beta r} \beta r' + K'_{rr} r'^2 \\
 &+ K'_{\beta\beta\beta} \beta^3 + K'_{\beta\beta r} \beta^2 r' + K'_{\beta rr} \beta r'^2 + K'_{rrr} r'^3
 \end{aligned} \right\}
 \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

左右対称型の微係数のうちの線形微係数 K'_β 、 K'_r の横傾斜角の絶対値 $|\phi|$ に対する変化を Fig.3.14 に示す。 Y_H や N_H と異なり、これらの微係数については横傾斜角に対してばらついており、変化に一定の傾向を見つけることが難しい。特に K'_r については絶対値も小さいことからばらつきが大きく現れている。 K'_β も $|\phi|$ に対して線形的には変化せず、

両船型ともに $\phi=20^\circ$ ではアップライトの時と同程度の値に戻るなど、変化は複雑である。

左右対称型の非線形微係数 $K'_{\beta\beta\beta}$ 、 $K'_{\beta\beta r}$ 、 $K'_{\beta rr}$ 、 K'_{rrr} の横傾斜角の絶対値 $|\phi|$ に対する変化を Fig.3.15 に示す。これらの項についても線形微係数と同じく変化がやや複雑であり、 $|\phi|$ に対する変化の傾向を捉えることは難しい。これらの微係数は Y_H や N_H でも同様であったが、もともと高次のものであり、横傾斜に対する変化は実用的には無視できる可能性も考えられる。

横傾斜モーメントの左右非対称型の微係数 K'_0 、 $K'_{\beta\beta}$ 、 $K'_{\beta r}$ 、 K'_{rr} の横傾斜角 ϕ に対する変化を Fig.3.16 に示す。これらの微係数はアップライトで 0 であり、横傾斜に対して線形的に変化する実験結果となっており、フェリー船型ではばらつきが大きい、横傾斜角に比例する項として $K'_{\beta\beta\phi}\beta^2\phi$ 、 $K'_{\beta r\phi}\beta r'\phi$ 、 $K'_{rr\phi}r'^2\phi$ のような形で表現できることを示している。なお K'_0 の ϕ に対する変化は船速がある場合の付加的な復原力として作用している項を表している。

3.2.3.3 干渉係数の解析

直進中の船の前後力は $X=X_0+(1-t)T$ であるから、計測された X' と K_T を用いて、推進性能と同じ解析方法で推力減少率 $(1-t)$ 、有効伴流率 $(1-w)$ が得られる。なお 2 軸フェリー船型に関しては、前進常数 J 、プロペラ単独特性が変わらないように補正して、1 軸とみなして解析した。すなわち、前進常数 J は 2 軸と 1 軸で等しいと考え、次式のよう

$$J = \frac{V}{nD_p} = \frac{V}{n^* D_p^*} \quad (3.12)$$

ただし、 n^* : 補正した回転数
 D_p^* : 補正したプロペラ直径

この式から 1 軸の場合はプロペラ推力は(3.13)式のようになり、2 軸の場合は(3.14)式のように表せる。

$$T = \rho K_T D_p^4 n^2 \quad (3.13)$$

$$2T = \rho K_T D_p^{*4} n^{*2} \quad (3.14)$$

(3.12)～(3.14)式より、1 軸と 2 軸のプロペラ特性の間には(3.15)式のような関係が得られる。

$$\left. \begin{aligned} n^* &= (1/\sqrt{2})n, \\ D_p^* &= \sqrt{2}D_p \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

この関係から、2 軸 1 舵フェリーについては、プロペラ回転数を $(1/\sqrt{2})$ 倍、プロペラ直径を $\sqrt{2}$ 倍とし、1 軸船として解析した。

プロペラの力を一部含んだ状態の舵による力やモーメント X_R 、 Y_R 、 N_R は(3.16)式のように舵角を δ 、舵直圧力を F_N として表せる。舵直圧力の $\sin\delta\cos\phi$ 成分や $\cos\delta\cos\phi$ 成分に対して X'_R 、 Y'_R 、 N'_R はほぼ直線となり、これらのグラフの傾きからプロペラ・舵と船体の干渉係数を求めた。

$$\left. \begin{aligned} X'_R &= -(1-t_R)F'_N \sin\delta\cos\phi \\ Y'_R &= -(1+a_H)F'_N \cos\delta\cos\phi \\ N'_R &= -(x'_R + a_H x'_H)F'_N \cos\delta\cos\phi \end{aligned} \right\} \quad (3.16)$$

ただし、 $(1-t_R)$ の中には操舵による推力変化分を含む。

舵直圧力特性は舵面積を A_R 、舵への有効流速を u_R とすると、直進舵角試験中は舵の流入角は舵角そのものであるから、舵直圧力は(3.17)式となり、舵角に対する直圧力係数の原点傾斜を求め、舵単独の直圧力係数勾配 f_α を藤井の式で近似できると仮定すると、 u'_R が(3.18)式のように得られる。

$$\left. \begin{aligned} F'_N &= \frac{1}{2} \rho A_R f_\alpha U_R^2 \sin\delta \\ f_\alpha &= \frac{6.13\Lambda}{2.25 + \Lambda} \quad (\text{藤井の式}) \end{aligned} \right\} \quad (3.17)$$

$$u'_R = \sqrt{\frac{(dF'_N/d\delta)}{(A_R/Ld)f_\alpha}} \quad (3.18)$$

u'_R は前節で示した(3.8)式のように表すことができ、次式において ε 、 κ を種々変更して、プロペラ荷重度を変更した直進舵角試験によって得られる u'_R に最も一致するような ε 、 κ を求めた。

$$u'_R = \varepsilon(1-w) \sqrt{\eta \left\{ 1 + \kappa \left(\sqrt{1 + \frac{8K_T}{\pi J^2}} - 1 \right) \right\}^2 + (1-\eta)} \quad (3.19)$$

一方で、舵角付き斜航試験の結果から舵直圧力が零となる舵角 δ 、及びこの舵角付近の舵直圧力係数の傾斜を求めた。次に船体前後方向成分 u_R については(3.19)式より求められ、船体横方向成分 v_R については $\delta_R = -\tan^{-1}(v_R/u_R)$ となるので、 δ_R と u_R から次式で求められる。

$$v'_R = -u'_R \tan(\delta_R) \cong -u'_R \delta_R \quad (3.20)$$

一方で v_R は整流係数 γ_R を用いて一般的に(3.20)式のように表されるので、この関係式から整流係数 を求めた。

$$v'_R = \gamma_R (\beta - t'_R r') \quad (3.21)$$

解析したプロペラ・舵に関する干渉係数に及ぼす横傾斜角の影響を検討した結果を以下に示す。まず自航要素である(1- t)、(1- w)の横傾斜角による変化を Fig.3.18 に示す。(1- t)は 10° 傾斜すると $\pm 5\%$ 程度増減し、(1- w)は $\pm 1\%$ 程度変化するが、操縦運動の推定にはこの程度の変化は無視して差し支えないと考えられる。またプロペラ後流を含めた舵有効流速のパラメータである ε 、 κ についても、横傾斜角による変化を Fig.3.19 に示すが、横傾斜角による変化は(1- w)と同じオーダーになっているため、無視できるものとする。

次に操舵による干渉係数(1- t_R)、 a_H 、($x'_R + a_H x'_H$)の横傾斜角による変化を Fig.3.20 に示す。抵抗増加に関する係数(1- t_R)は 10° の傾斜に対して 10% 程度減少し、旋回モーメン

トに関する係数($x'_R + a_H x'_H$)は 2%程度の減少傾向が見られるが、この変化も操縦運動の推定においては無視できる程度の変化である。一方で横力に関する係数 a_H は横傾斜角に対して偶関数的に変化し、傾斜角が大きくなると減少する傾向が見られる。

整流係数に関する係数の横傾斜角による変化を Fig.3.21 に示す。整流係数 γ_R は横傾斜角に対して偶関数的に変化し、横傾斜が大きくなると減少するが、 l'_R は若干増加する傾向がある。

以上の結果をまとめると、全般にプロペラ・舵に関する流体力係数の横傾斜影響は変化が見られるものもあるが、比較的小さく、操縦運動数学モデルを過度に複雑にしないためにも、これらの係数は敢えて横傾斜の関数としない方が望ましいとも考えられ、ここでは針路安定性に強く関与する γ_R についてのみ(3.8)式で示したように横傾斜角影響を取り入れるものとした。

3.3 4 自由度操縦運動シミュレーション

模型試験等を通して得られた流体力と理論から本論文で用いられる船型の 4 自由度操縦運動を表現するのに最適な操縦運動モデルを検討し、そのモデルを用いたシミュレーションと自由航走試験の結果を比較し、操縦運動モデルの妥当性を確認した。

3.3.1 横傾斜を含んだ 4 自由度操縦運動数学モデル

主船体の流体力モデルについては以上の解析結果を基に検討を行い、横傾斜角の影響が強く表れる微係数は出来るだけ横傾斜角の関数とするが、シミュレーションで計算する場合、できるだけシンプルなモデルが実用的な面から優れているため、過度に高次になる項やシミュレーション計算結果への影響が少ない項は横傾斜影響を反映することを避けることとする。具体的には前述の流体力微係数の横傾斜角に対する変化を全て取り入れた操縦運動モデルを作成し、このモデルに横傾斜角影響として横傾斜角に対する微係数の変化係数をそれぞれの微係数毎に単独で入力したシミュレーションを実施する一種の感度解析結果を基に、横傾斜角影響を反映する微係数決定する。感度解析は 35° 浅海試験の旋回圏、及び 10° Z 試験の第 1 オーバーシュート角を対象に行い、結果を Fig.3.22 に示す。シミュレーションの際の GM は横傾斜が旋回で大きく現れるよう、KCS コンテナ船型は GM=0.6m、フェリー船型は GM=0.9m とした。横軸は(3.11)式の微係数とし、各微係数に対して横傾斜影響を単独で与えた場合の変化量

を縦軸に%で表す。変化のベースとなるのは、横傾斜影響を全く入れていない 3 自由度操縦モデルによるシミュレーション結果となる。この感度解析の結果から、以下のことが指摘できる。

- 1) 両船型の旋回圏、オーバーシュートアングルのいずれの指標も、旋回モーメントに関する微係数の横傾斜影響の感度が圧倒的に高く、船体横力の微係数、船体前後力の微係数の横傾斜影響の順で感度が低くなる。Z 試験の第 1 オーバーシュート角では全体前後力の微係数による変化の影響はほとんど見られない。
- 2) 船体前後方向の力で β^4 の微係数、横力や旋回モーメントに関する β と r の 3 乗の非線形微係数の横傾斜影響が旋回圏の感度に現れるが、全般にこれらの感度は低い。

以上の感度解析の結果を反映し、船体前後力については感度の低い X'_β の微係数自体を削除する。また $(X'_{\beta r} - m'y)$ 、及び $X'_{\beta\beta\beta\beta}$ の横傾斜影響も感度が低いため採用しないこととする。 X'_θ も同様であるが、漁船などのチェーン付き船型では横傾斜角の影響が考えられるため、この影響は残しておくものとする。船体横力、旋回モーメントの微係数については、 β と r の 3 乗の非線形微係数の横傾斜影響の感度が全般に低く、工事の関数ともなることから採用しないこととする。なお横傾斜モーメントについては、上記の船体横力、旋回モーメントと同様の取扱いとするが、 β と r の線形微係数の横傾斜影響は Fig.3.14 から拘束模型試験結果から明確になっていないため、割愛する。このような考え方で決定した主船体数学モデルを(3.22)式に示す。

$$\left. \begin{aligned}
X_H &= \frac{\rho}{2} L d U^2 \\
&\times \left\{ X'_0 (1 + c_{x0} |\phi|) + X'_{r\phi} r' \phi + X'_{\beta\beta} (1 + c_{x\beta\beta} |\phi|) \beta^2 + (X'_{\beta r} - m'_y) \beta r' \right. \\
&\quad \left. + X'_{rr} (1 + c_{xrr} |\phi|) r'^2 + X'_{\beta\beta\beta} \beta^3 \right\} \\
Y_H &= \frac{\rho}{2} L d U^2 \\
&\times \left\{ Y'_\phi \phi + Y'_\beta (1 + c_{y\beta} |\phi|) \beta + (Y'_r - m'_x) (1 + c_{y r} |\phi|) r' \right. \\
&\quad \left. + Y'_{\beta\beta\phi} \beta^2 \phi + Y'_{\beta r\phi} \beta r' \phi + Y'_{rr\phi} r'^2 \phi \right. \\
&\quad \left. + Y'_{\beta\beta\beta} \beta^3 + Y'_{\beta\beta r} \beta^2 r' + Y'_{\beta r r} \beta r'^2 + Y'_{rrr} r'^3 \right\} \\
N_H &= \frac{\rho}{2} L^2 d U^2 \\
&\times \left\{ N'_\phi \phi + N'_\beta (1 + c_{n\beta} |\phi|) \beta + N'_r (1 + c_{nr} |\phi|) r' \right. \\
&\quad \left. + N'_{\beta\beta\phi} \beta^2 \phi + N'_{\beta r\phi} \beta r' \phi + N'_{rr\phi} r'^2 \phi \right. \\
&\quad \left. + N'_{\beta\beta\beta} \beta^3 + N'_{\beta\beta r} \beta^2 r' + N'_{\beta r r} \beta r'^2 + N'_{rrr} r'^3 \right\} \\
K_H &= \frac{\rho}{2} L d^2 U^2 \\
&\times \left\{ K'_\phi \phi + K'_\beta \beta + K'_r r' \right. \\
&\quad \left. + K'_{\beta\beta\phi} \beta^2 \phi + K'_{\beta r\phi} \beta r' \phi + K'_{rr\phi} r'^2 \phi \right. \\
&\quad \left. + K'_{\beta\beta\beta} \beta^3 + K'_{\beta\beta r} \beta^2 r' + K'_{\beta r r} \beta r'^2 + K'_{rrr} r'^3 \right\}
\end{aligned} \right\} \quad (3.22)$$

ただし、 $c_{x0}, c_{x\beta\beta}, c_{xrr}, c_{y\beta}, c_{yr}, c_{n\beta}, c_{nr}$

: 左右対称型微係数の $|\phi|$ に対する影響係数

$X'_{r\phi}, Y'_\phi, Y'_{\beta\beta\phi}, Y'_{\beta r\phi}, Y'_{rr\phi}, N'_\phi, N'_{\beta\beta\phi}, N'_{\beta r\phi}, N'_{rr\phi}, K'_\phi, K'_{\beta\beta\phi}, K'_{\beta r\phi}, K'_{rr\phi}$

: 左右非対称型微係数の ϕ に対する影響係数

一方、プロペラ・舵の流体力は基本的に 3 自由度数学モデルのままとするが、針路安定性に強く関与する整流係数については、次式のように取り入れる。

$$\gamma_R = \gamma_{R(\phi=0)} (1 + c_\gamma |\phi|) \quad (3.23)$$

ただし、 c_γ : 整流係数の $|\phi|$ に対する影響係数

以上の解析結果から得られた供試模型船の 4 自由度船体流体力モデルの各係数を Table 3.3、及び Table 3.4 に示す。またその他の設定値として、付加質量、及び付加慣

性モーメントは元良チャートより、横揺れ減減曲線の線形係数 a_0 は走行時の自由横揺れ試験より解析し、 $a_0 = 0.36$ とした。

3.3.2 自由航走模型試験とシミュレーションの比較

第 2 章に示した自由航走模型試験の結果と前述の 4 自由度操縦運動数学モデルを用いて行った操縦運動シミュレーションの結果を比較し、本モデルの妥当性を検証する。

3.3.2.1 35° 旋回試験

KCS コンテナ船の舵角 $\pm 35^\circ$ 旋回試験における船速毎の GM の違いによる自由航走試験結果とシミュレーション結果の航跡の比較を Fig.3.23 に、また旋回運動時の舵角、及び回頭角速度、横傾斜角、斜航角等の時系列を Fig.3.24 に示す。2 軸 1 舵フェリーについても、航跡の比較、及び船体運動データの時系列を Fig.3.25、Fig.3.26 にそれぞれ示す。以降のグラフ内の自由航走模型試験の結果は全てプロットで、シミュレーションの結果は曲線で示している。

KCS の航跡について見ると、 $F_n=0.26$ 、 $F_n=0.156$ のどちらの船速においても、GM が小さくなると、横傾斜角が大きくなり、また旋回圏が小さくなる様子が見られ、旋回性能が強くなる模型試験の傾向を、シミュレーション結果でも正確に表せていることが確認できる。時系列結果を見ると、回頭角速度の発達や船速低下の様子も試験結果とシミュレーション結果はよく一致しているが、斜航角については GM が小さくなると、試験結果に比べ少し大きく推定する結果となっており、この原因は自由航走模型試験における斜航角の計測精度を含めて検討の余地がある。

2 軸 1 舵フェリーについても、船速、GM の変化に伴う操縦運動の変化は KCS コンテナ船と同様にシミュレーション結果でもよく捉えられている。

横傾斜に対する旋回性能の変化については、芳村による線形解析の研究¹⁰⁾があり、これによれば、横傾斜が伴う場合の旋回性能の変化は (F_n^2/GM) に依存することが示されている。そこで、上記の旋回圏の変化を (F_n^2/GM) に対してプロットしたものを Fig.3.27 に示す。ただし、GM は実船換算値である。このグラフから、両船型とも船速 F_n に関わらず、旋回圏は (F_n^2/GM) の増加に従って減少していることがわかる。なおフェリー船型の旋回圏が全体に大きくなっているのは、2 軸 1 舵のため、旋回時の舵力が小さくなっているためである。

3.3.2.2 旋回試験、逆スパイラル試験によるスパイラル特性

KCS コンテナ船の船速毎の GM の違いによる自由航走試験、シミュレーション結果から求めたスパイラル特性の比較を Fig.3.28 に、2 軸 1 舵フェリーの比較を Fig.3.29 にそれぞれ示す。

両船型ともにどちらの船速についても、GM が小さくなり、横傾斜が大きくなるのに伴い、大舵角時の r' が大きくなる傾向が見られ、これはシミュレーション結果でもよく捉えられている。また舵中央付近で見られる、GM が減少し、横傾斜しやすい状態になることで、不安定ループ高さ、不安定ループ幅が大きくなり、針路不安定傾向となる様子もシミュレーションで表すことができている。

3.3.2.3 20° Z 試験

次に Z 試験の結果の比較を示す。KCS コンテナ船の船速毎の GM の違いによる 20°-20°Z 試験の自由航走試験とシミュレーションの舵角、方位角、横傾斜角の時系列の比較を Fig.3.30 に、また 2 軸 1 舵フェリーについても Fig.3.31 にそれぞれ示す。

これについても両船型ともに、どちらの船速においても、GM が小さくなるにつれて、横傾斜が大きくなると同時に第 1 オーバーシュート角が大きくなり、針路安定性が悪くなる傾向をシミュレーション結果でも定性的に捉えられていることがわかり、船速変化等の傾向もシミュレーションにより試験結果がよく表せている。

また 3.4.2.1 で述べた線形解析の研究において、横傾斜を伴う場合の針路安定性の変化は (Fn^2/GM) に依存することが示されており、上記のオーバーシュート角の変化を (Fn^2/GM) に対してプロットしたものを Fig.3.32 に示す。操舵速度は船側に関わらず一定で、低速時には船の運動に対して操舵速度が相対的に大きくなるため、Z 試験のオーバーシュート角は小さくなる。この量は船速によって異なるが、同一船速でも (Fn^2/GM) の増加に従って針路安定性が低下し、これにより Z 試験のオーバーシュート角が大きくなる様子がシミュレーションでも確認できる。

3.4 まとめ

本章では KCS コンテナ船、2 軸 1 舵フェリーを供試船型とし、横傾斜をパラメータに加えた拘束模型試験を系統的に実施し、この結果を基に 4 自由度操縦運動数学モデルの検討を行った。さらに第 2 章で示した自由航走模型試験結果と本モデルによるシミュレーション結果の比較により、その妥当性を確認した。以下に本章の結果をまとめる。

拘束模型試験について

- 1) 横傾斜をすることにより、船体に働く流体力、モーメントは変化するが、その変化の基本は、左右対称型の微係数については横傾斜角 ϕ に対しては偶関数、左右非対称型の微係数については奇関数とすべきで、その数学モデルを(3.22)式に導入した。この際、横傾斜影響の採択については感度解析によって計算結果への影響が強い項を選別し、また過度に高次になる項を除くことで、実用的なできる限りシンプルなモデルとした。
- 2) 舵、プロペラに関する流体力係数は全般に横傾斜の影響を受けにくいことを確認し、その中では船体の整流係数の横傾斜影響の他、横揺れ角速度に伴う横方向の舵有効流速への横傾斜影響による変化を考慮する必要がある。
- 3) KCS コンテナ船とフェリー船型では ϕ の増加に対する Y_0 の力の発生方向が異なっているなどの船型差が確認でき、船型によって横傾斜した際の水面下形状の差などが関係していると考えられる。
- 4) 上記のように数学モデルの各係数について横傾斜影響を考慮することによって、横傾斜が操縦性能に与える影響を適切に表現した数学モデルが構築でき、本モデルの船体流体力モデルについては(3.22)式の各項で $|\phi| \approx \phi^2$ と見なすと、概ね孫ら⁷⁾の数学モデルに一致することから、経験的に提案されてきた数学モデルの妥当性を再確認した。ただし、詳細に比較すると、 X_H においては $r\phi$ 、 $\beta^2\phi^2$ 、 $r^2\phi^2$ などの項、 Y_H 、 N_H 、 K_H においては $\beta r\phi$ の項がそれぞれ必要となることを指摘できる。

4 自由度操縦運動シミュレーションについて

- 5) 横傾斜による微係数、係数の変化を考慮したシミュレーションを実施し、35°旋回、スパイラル特性、20°Z 試験について、自由航走模型試験と比較した結果から GM の減少、または船速の増加に伴って横傾斜角が大きくなることで、旋回性能が強く

なる、また針路安定性が低下する様子が、シミュレーション結果でも捉えられており、試験結果とも定量的に一致している。

- 6) 本章で検討した数学モデルが KCS コンテナ船型、フェリー船型等の操縦性能特性を推定するにあたり、十分に妥当なものとなっていることが確認でき、今後も操縦運動時に横傾斜を伴う船舶について横傾斜付きの拘束模型試験を行うことで3自由度モデルより高い精度での操縦性能推定が可能となると考えられる。

Table 3.1 Derivatives of KCS Container Ship hull force with each roll angle

roll angle	10.16	0	-10.24	-19.94
Surge force				
X'_0	-0.0174	-0.0183	-0.0177	-0.0178
X'_β	0.0075	0.0062	0.0077	0.0048
X'_r	0.0037	0.0014	-0.0035	-0.0098
$X'_{\beta\beta}$	-0.0945	-0.0603	-0.0926	-0.1001
$X'_{\beta r}-m'_y$	-0.1087	-0.1218	-0.1132	-0.1187
X'_{rr}	-0.0252	-0.0162	-0.0284	-0.0354
$X'_{\beta\beta\beta}$	0.1222	-0.0760	0.0809	0.2776
Sway force				
Y'_0	-0.0014	-0.0005	-0.0007	0.0016
Y'_β	0.2159	0.2162	0.2175	0.2213
$Y'_r-m'_x$	0.0217	0.0245	0.0220	0.0117
$Y'_{\beta\beta}$	0.0221	-0.0256	-0.1119	-0.1449
$Y'_{\beta r}$	0.0654	-0.0040	-0.0351	-0.1070
Y'_{rr}	-0.0242	-0.0145	-0.0008	0.0088
$Y'_{\beta\beta\beta}$	1.7133	1.7028	1.7794	1.9806
$Y'_{\beta\beta r}$	-0.5181	-0.5658	-0.5609	-0.7837
$Y'_{\beta rr}$	0.8147	0.8564	0.8416	0.7835
Y'_{rrr}	-0.0116	-0.0105	-0.0167	-0.0026
Yaw moment				
N'_0	-0.0022	-0.0007	0.0005	0.0011
N'_β	0.1228	0.1172	0.1212	0.1256
N'_r	-0.0444	-0.0443	-0.0420	-0.0371
$N'_{\beta\beta}$	-0.0507	0.0016	0.0409	0.0842
$N'_{\beta r}$	0.0338	0.0094	-0.0122	-0.0263
N'_{rr}	-0.0042	-0.0016	0.0010	0.0018
$N'_{\beta\beta\beta}$	0.1457	0.1710	0.1937	0.1642
$N'_{\beta\beta r}$	-0.5304	-0.5602	-0.5609	-0.5189
$N'_{\beta rr}$	0.0214	0.0200	0.0338	0.0388
N'_{rrr}	-0.0329	-0.0369	-0.0352	-0.0353
Roll moment				
K'_0	-0.0061	0.0018	0.0051	0.0102
K'_β	-0.1549	-0.1367	-0.1152	-0.1402
K'_r	0.0159	0.0085	-0.0016	0.0128
$K'_{\beta\beta}$	0.1330	0.0166	0.0134	-0.0305
$K'_{\beta r}$	0.0184	-0.0059	-0.0200	-0.1532
K'_{rr}	-0.0085	0.0032	0.0062	0.0191
$K'_{\beta\beta\beta}$	-1.2501	-1.4352	-1.7637	-1.0266
$K'_{\beta\beta r}$	1.0790	1.1636	1.4075	0.7182
$K'_{\beta rr}$	-0.3899	-0.4233	-0.5303	-0.3656
K'_{rrr}	0.0235	0.0363	0.0782	0.0479

Table 3.2 Derivatives of Passenger Ferry hull force with each roll angle

roll angle	10.3	0	-9.88	-19.8
Surge force				
X'_0	-0.0206	-0.0212	-0.0213	-0.0211
X'_β	0.0023	0.0046	0.0058	0.0029
X'_r	0.0010	0.0002	-0.0020	-0.0036
$X'_{\beta\beta}$	-0.0715	-0.0348	-0.0280	-0.0575
$X'_{\beta r}-m'_y$	-0.0841	-0.0957	-0.0943	-0.0865
X'_{rr}	-0.0116	-0.0070	-0.0130	-0.0153
$X'_{\beta\beta\beta}$	0.3594	-0.0018	0.0754	0.1532
Sway force				
Y'_0	0.0039	0.0010	-0.0007	0.0014
Y'_β	0.2516	0.2501	0.2443	0.2343
$Y'_r-m'_x$	0.0349	0.0346	0.0378	0.0217
$Y'_{\beta\beta}$	-0.0612	0.0367	0.1071	0.0883
$Y'_{\beta r}$	0.1271	-0.0147	-0.1213	-0.2047
Y'_{rr}	-0.0300	0.0020	0.0137	0.0155
$Y'_{\beta\beta\beta}$	2.4706	2.6087	2.4591	2.0476
$Y'_{\beta\beta r}$	-1.6172	-1.7091	-1.6101	-1.0502
$Y'_{\beta rr}$	1.0669	1.1682	1.0896	0.8317
Y'_{rrr}	-0.0436	-0.0461	-0.0610	-0.0447
Yaw moment				
N'_0	-0.0014	0.0005	0.0024	0.0031
N'_β	0.0995	0.0966	0.0983	0.1055
N'_r	-0.0471	-0.0513	-0.0457	-0.0396
$N'_{\beta\beta}$	-0.0497	0.0088	0.0518	0.0821
$N'_{\beta r}$	0.0228	-0.0048	-0.0190	-0.0143
N'_{rr}	-0.0056	-0.0002	0.0022	0.0035
$N'_{\beta\beta\beta}$	0.4106	0.4218	0.3985	0.2918
$N'_{\beta\beta r}$	-0.8057	-0.8629	-0.7956	-0.6390
$N'_{\beta rr}$	0.1416	0.1459	0.1391	0.1177
N'_{rrr}	-0.0439	-0.0439	-0.0507	-0.0395
Roll moment				
K'_0	-0.0113	-0.0069	0.0005	-0.0030
K'_β	-0.2340	-0.2586	-0.2220	-0.2514
K'_r	-0.0058	0.0532	0.0316	0.0100
$K'_{\beta\beta}$	0.0737	-0.1157	-0.1250	-0.0513
$K'_{\beta r}$	0.1705	0.0962	-0.0229	-0.1033
K'_{rr}	-0.0085	-0.0080	-0.0197	0.0496
$K'_{\beta\beta\beta}$	-1.0340	-0.7293	-0.9926	-0.7689
$K'_{\beta\beta r}$	1.1998	1.1474	0.9884	0.3568
$K'_{\beta rr}$	-0.2858	-0.3351	-0.3027	-0.2225
K'_{rrr}	0.1207	-0.0132	0.0140	0.0489

Table 3.3 Derivatives of hull force and effects of roll angle

	KCS Container Shp		Passenger Ferry	
		roll effect		roll effect
Surge force				
$X'_{0,}$ c_{x0}	-0.0183	-0.1203	-0.0212	-0.0229
$X'_{r\phi}$		0.0258		0.0092
$X'_{\beta\beta,}$ $c_{x\beta\beta}$	-0.0603	2.3090	-0.0348	2.0970
$X'_{\beta r-m'_y}$	-0.1218		-0.0957	
$X'_{rr,}$ c'_{xrr}	-0.0162	3.5008	-0.0070	3.7357
$X'_{\beta\beta\beta\beta}$	-0.0760		-0.0018	
Sway force				
Y'_ϕ		-0.0052		0.0053
$Y'_{\beta,}$ $c_{y\beta}$	0.2162	0.0516	0.2501	-0.1375
$Y'_{r-m'_x,}$ c_{yr}	0.0245	-1.1975	0.0346	-0.6131
$Y'_{\beta\beta\phi}$		0.3352		-0.2979
$Y'_{\beta r\phi}$		0.3123		0.6308
$Y'_{rr\phi}$		-0.0642		-0.0854
$Y'_{\beta\beta\beta}$	1.7028		2.6087	
$Y'_{\beta\beta r}$	-0.5658		-1.7091	
$Y'_{\beta rr}$	0.8564		1.1682	
Y'_{rrr}	-0.0105		-0.0461	
Yaw-moment				
N'_ϕ		-0.0063		-0.0086
$N'_{\beta,}$ $c_{n\beta}$	0.1172	0.2120	0.0966	0.2235
$N'_{r,}$ c_{nr}	-0.0443	-0.3209	-0.0513	-0.6188
$N'_{\beta\beta\phi}$		-0.2532		-0.2510
$N'_{\beta r\phi}$		0.1152		0.0722
$N'_{rr\phi}$		-0.0120		-0.0172
$N'_{\beta\beta\beta}$	0.1710		0.4218	
$N'_{\beta\beta r}$	-0.5602		-0.8629	
$N'_{\beta rr}$	0.0200		0.1459	
N'_{rrr}	-0.0369		-0.0439	
Roll-moment				
K'_ϕ		-0.0299		-0.0185
K'_β	-0.1367		-0.2586	
K'_r	0.0085		0.0532	
$K'_{\beta\beta\phi}$		0.2819		0.2229
$K'_{\beta r\phi}$		0.2997		0.5374
$K'_{rr\phi}$		-0.0487		-0.0928
$K'_{\beta\beta\beta}$	-1.4352		-0.7293	
$K'_{\beta\beta r}$	1.1636		1.1474	
$K'_{\beta rr}$	-0.4233		-0.3351	
K'_{rrr}	0.0363		-0.0132	

Table 3.4 Coefficients regarding to propeller and rudder force

	KCS Container Shp		Passenger Ferry	
	3D model	roll effect	3D model	roll effect
$1-t$	0.822		0.859	
$1-w$	0.647		0.806	
$1-t_R$	0.559		0.857	
a_H	1.232		1.403	
x'_H	-0.711		-0.646	
γ_R, c_γ	0.412	-0.36	0.394	-0.53
l'_R	-0.774		-0.795	
ε	0.900		0.740	
κ	0.713		0.810	
η	0.792		0.140	

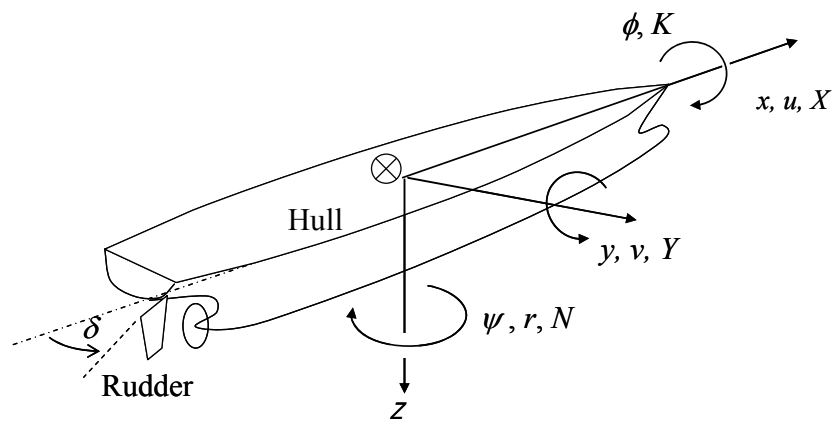


Fig.3.1 Co-ordinate system



Fig.3.2 Ship model basin (Hokkaido University)



Fig.3.3 Load cell for four component forces

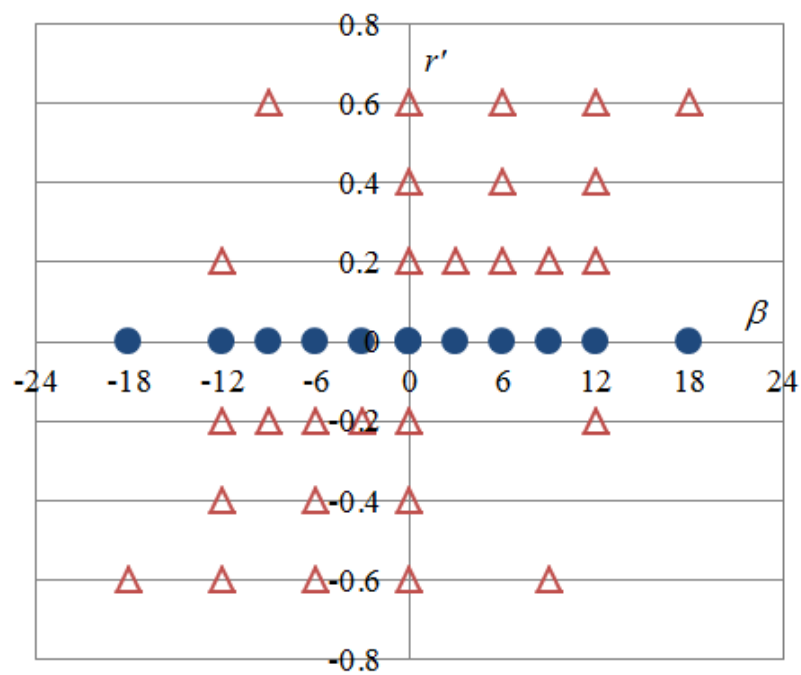


Fig.3.4 Test parameter of β and r' in CMT with roll angle



Fig.3.5 Self-propulsion dynamometer



Fig.3.6 Setting of self-propulsion dynamometer for two axle Ferry

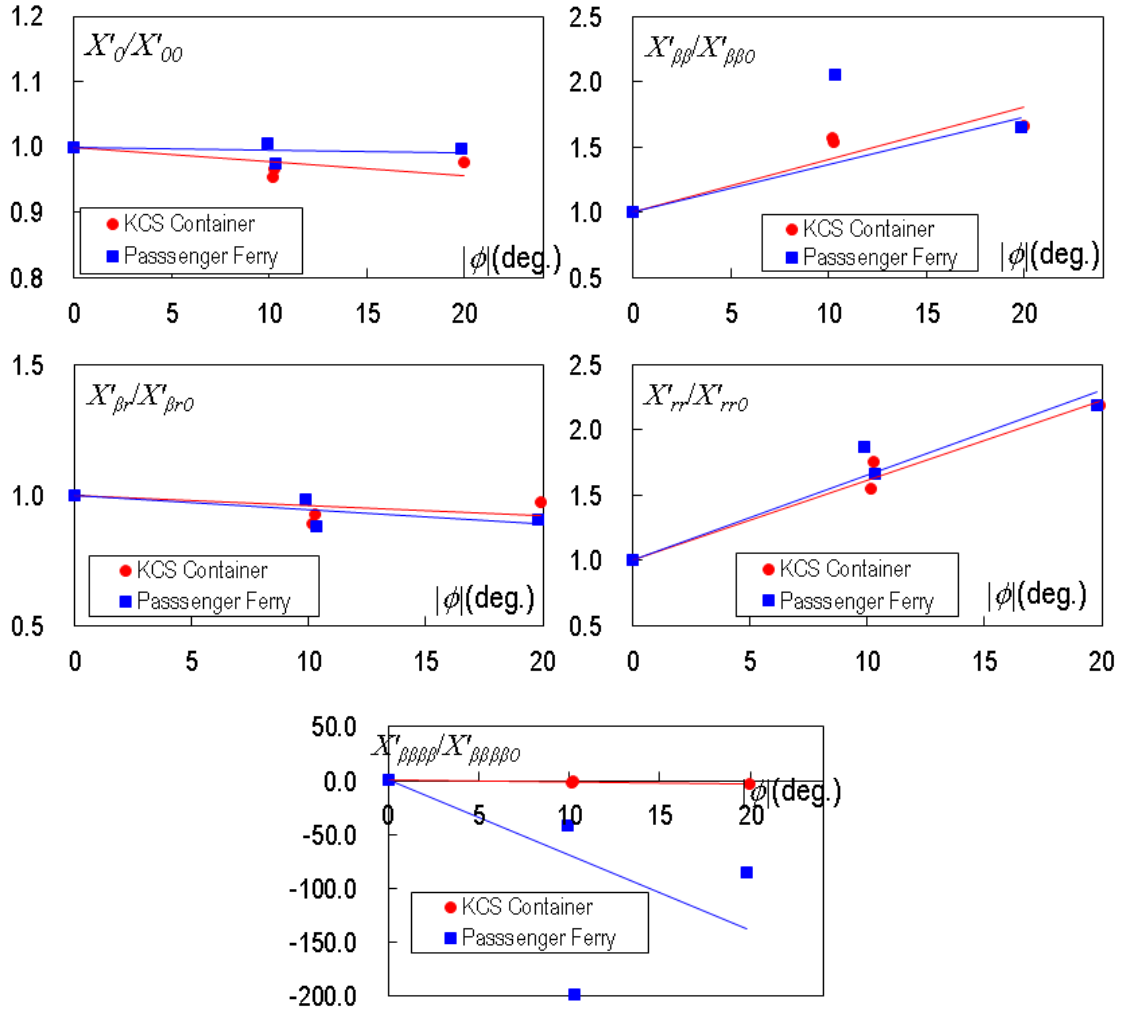


Fig.3.7 Effects of roll angle on X'_0 and X'_β , $X'_{\beta\beta}$, X'_{rr} , $X'_{\beta\beta\beta\beta}$

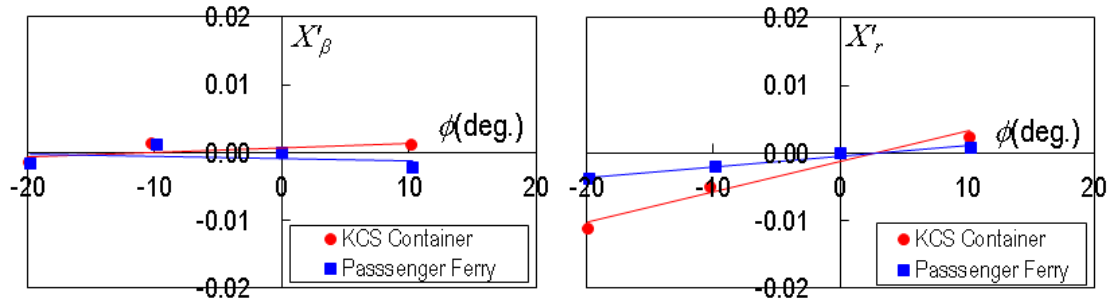


Fig.3.8 Effects of roll angle on X'_β and X'_r

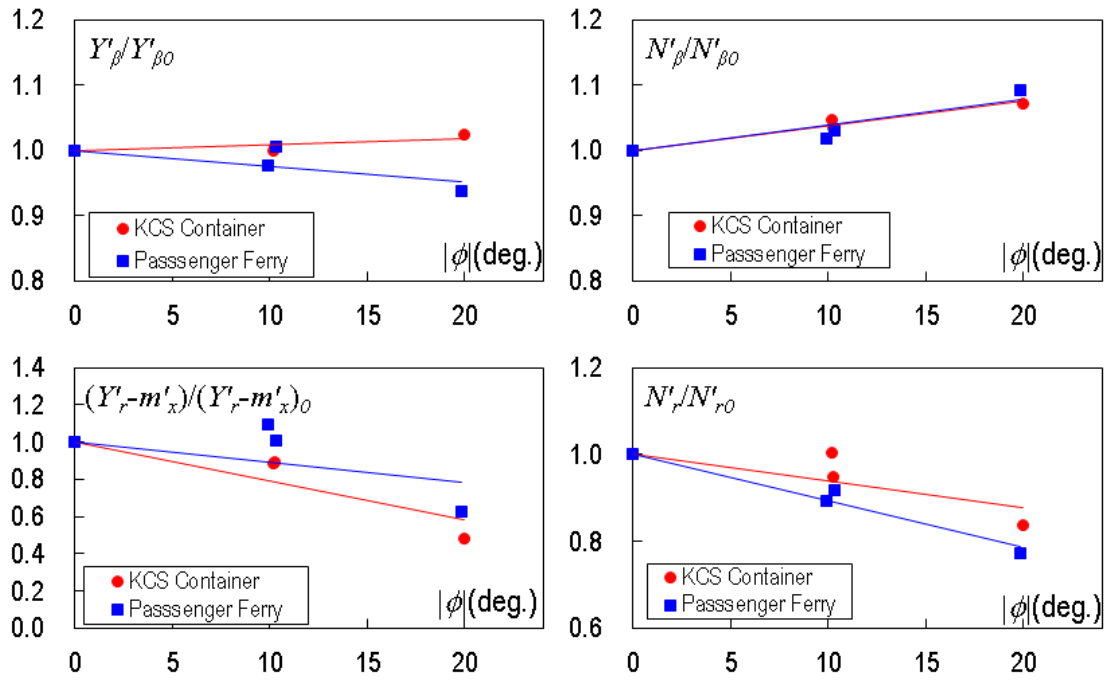


Fig.3.9 Effects of roll angle on Y'_β and $Y'_r - m'_x$, N'_β , N'_r

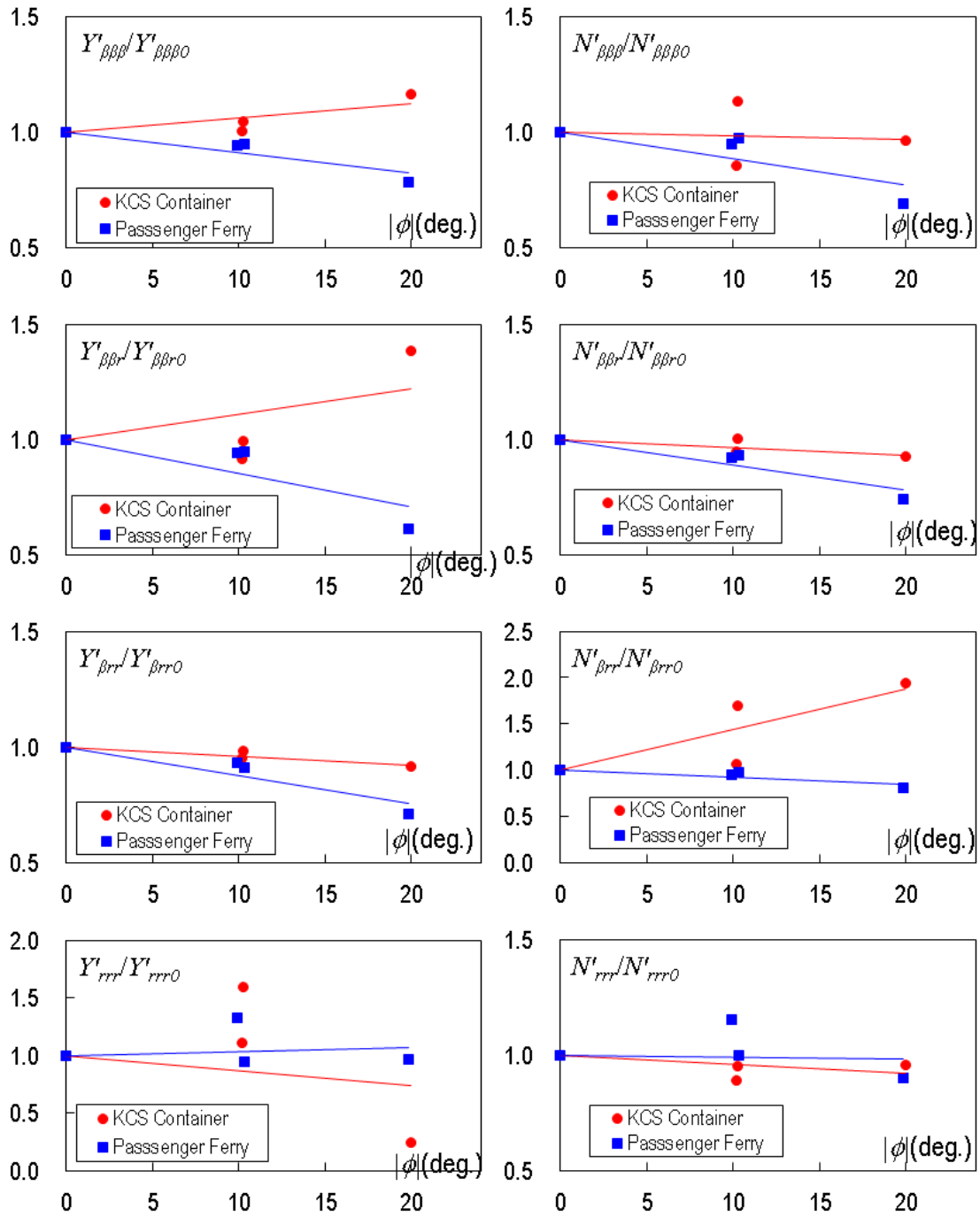


Fig.3.10 Effects of roll angle on non-linear derivatives of Y'_H and N'_H in the conventional 3-D model

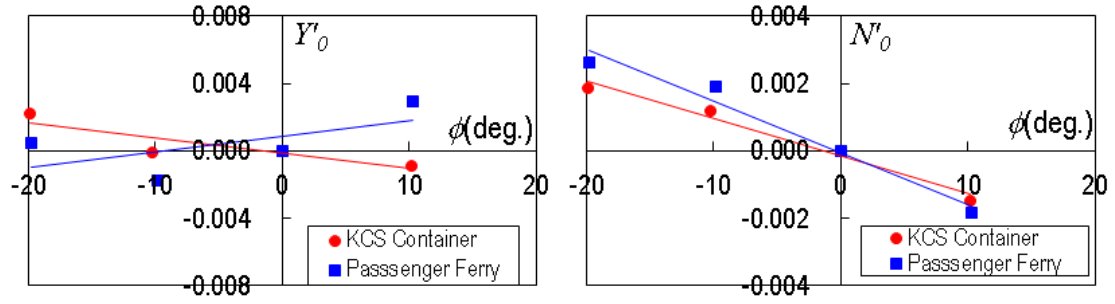


Fig.3.11 Effects of roll angle on Y'_0 and N'_0

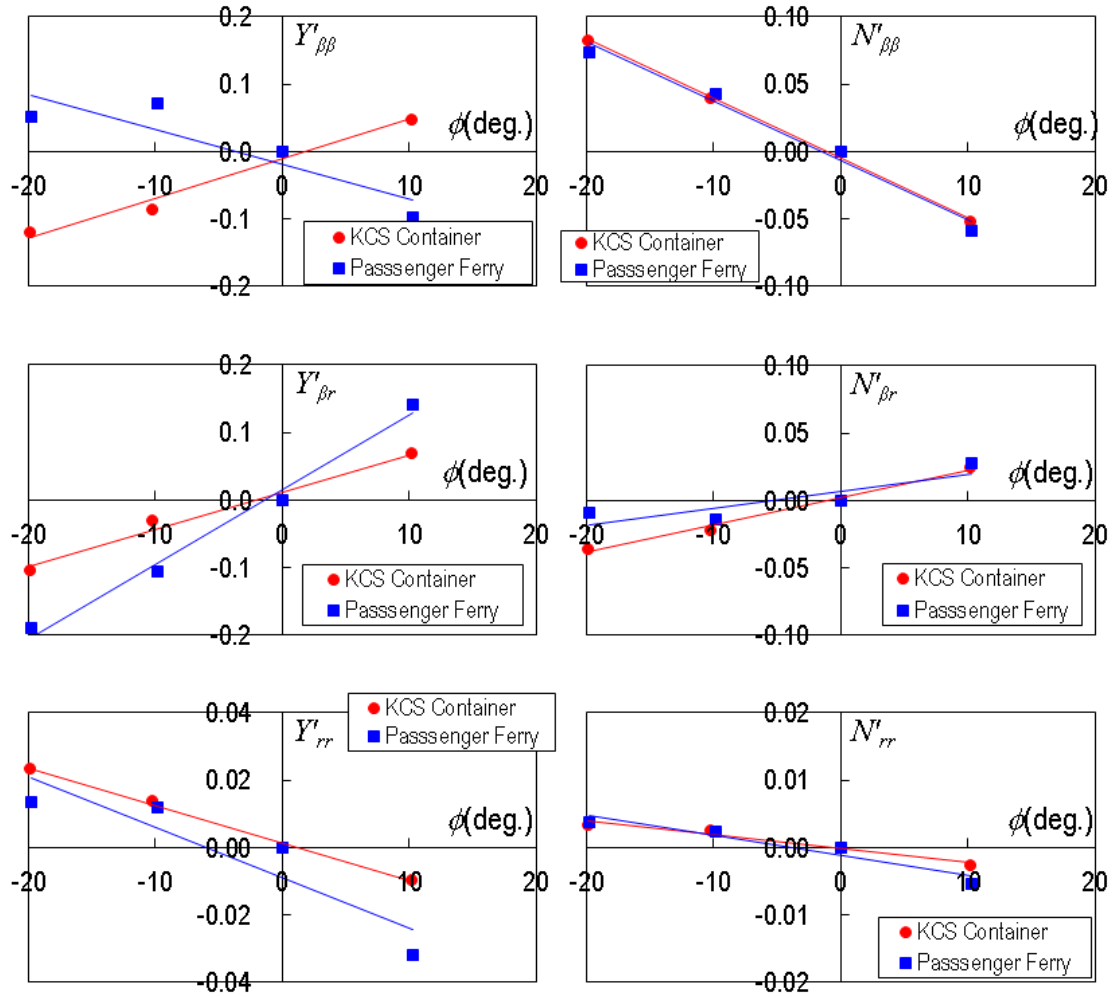


Fig.3.12 Effects of roll angle on non-linear asymmetric derivatives of Y'_H and N'_H in the 3-D model

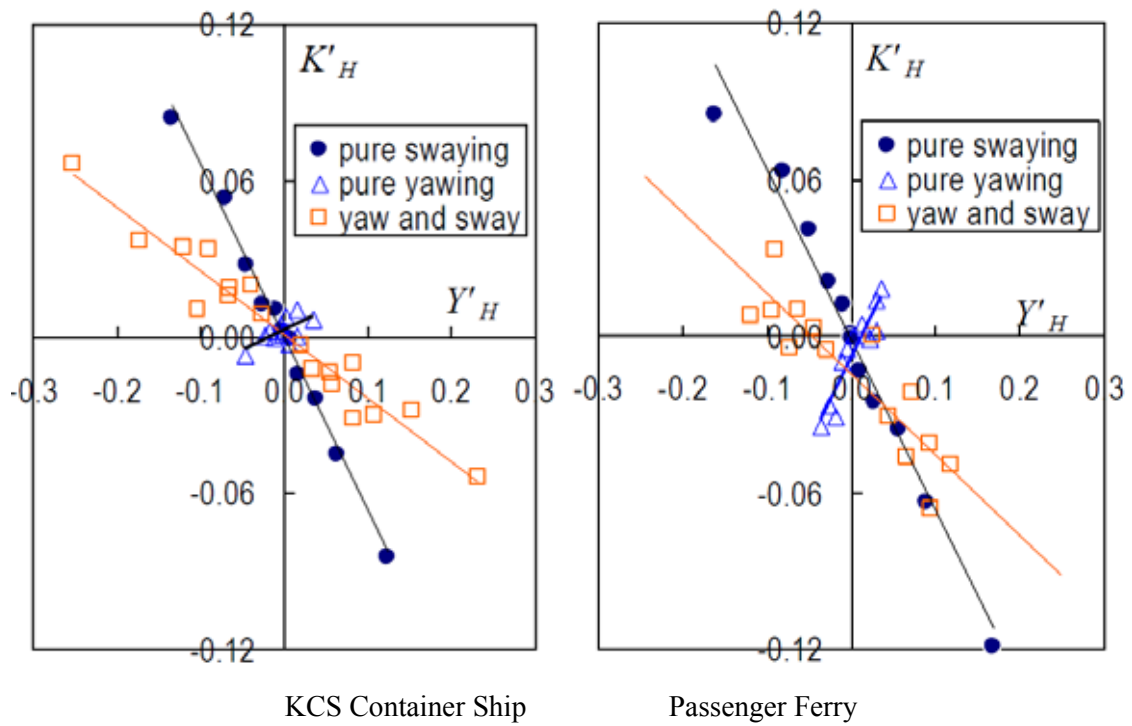


Fig.3.13 Relation between Y'_H and K'_H

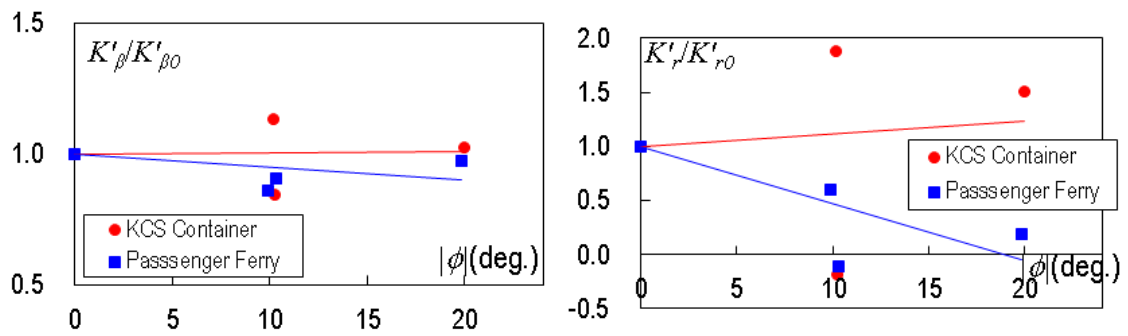


Fig.3.14 Effects of roll angle on K'_β and K'_r (KCS Container Ship)

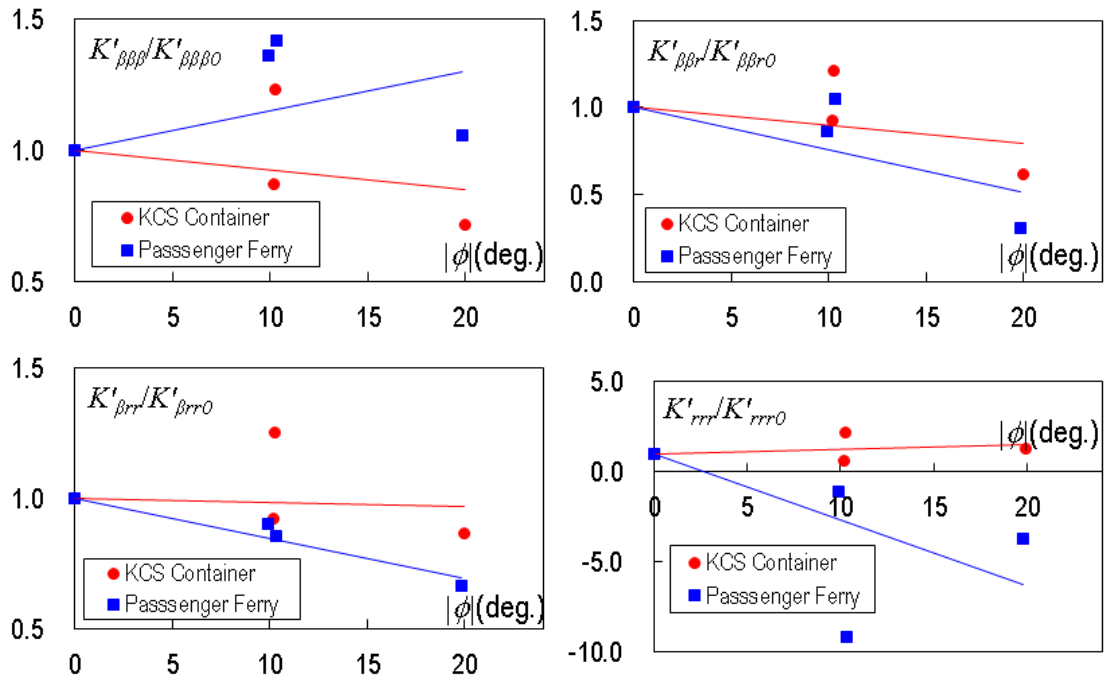


Fig.3.15 Effects of roll angle on non-linear derivatives of K'_H in the conventional 3-D model (KCS Container Ship)

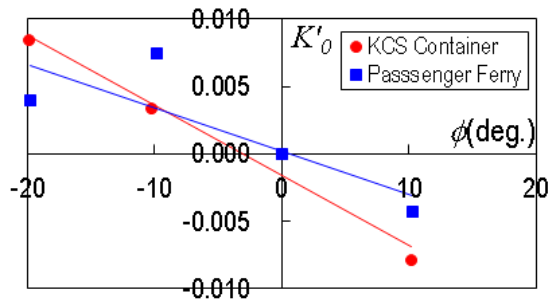


Fig.3.16 Effects of roll angle on K'_o (KCS Container Ship)

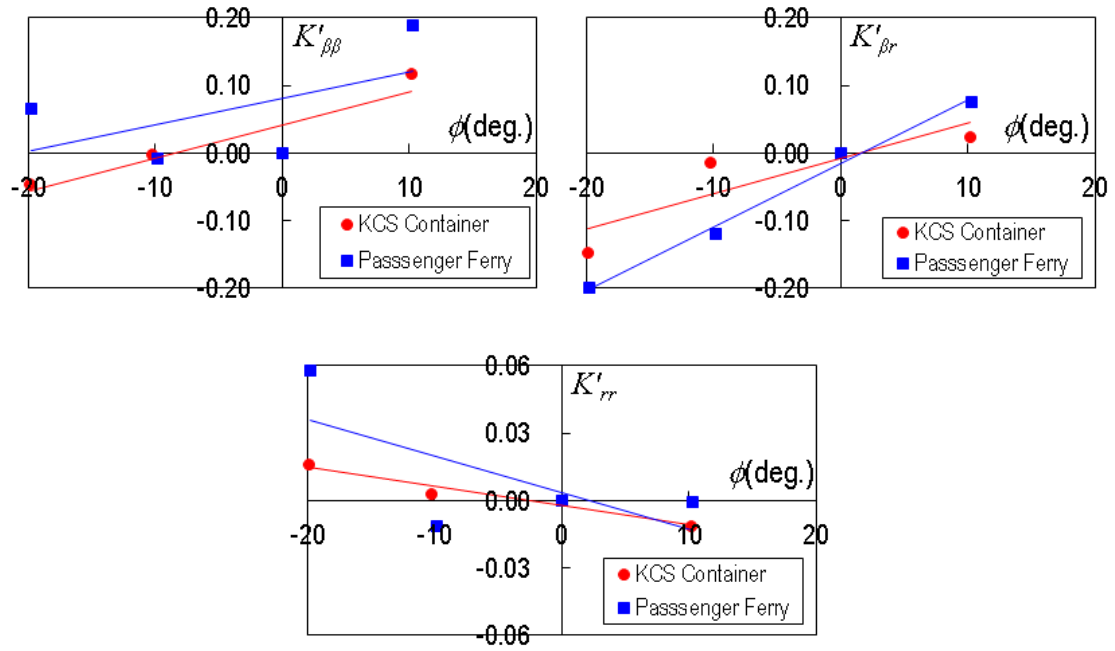


Fig.3.17 Effects of roll angle on non-linear asymmetric derivatives of K'_H in the 3-D model (KCS Container Ship)

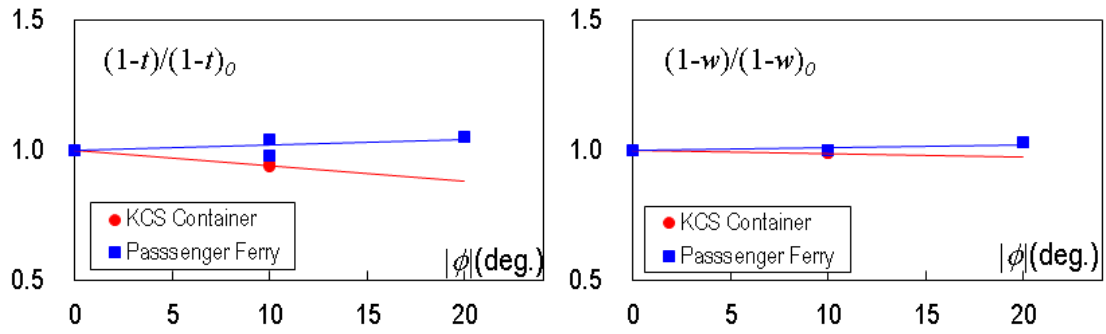


Fig.3.18 Effects of roll angle on $(1-t)$ and $(1-w)$

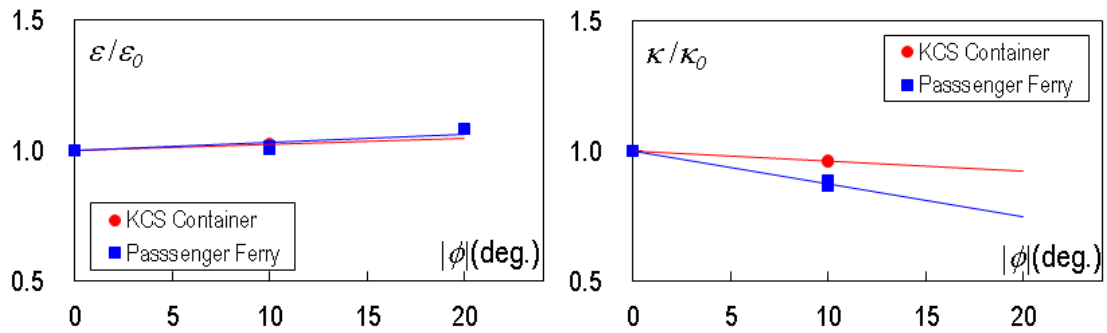


Fig.3.19 Effects of roll angle on ϵ and κ

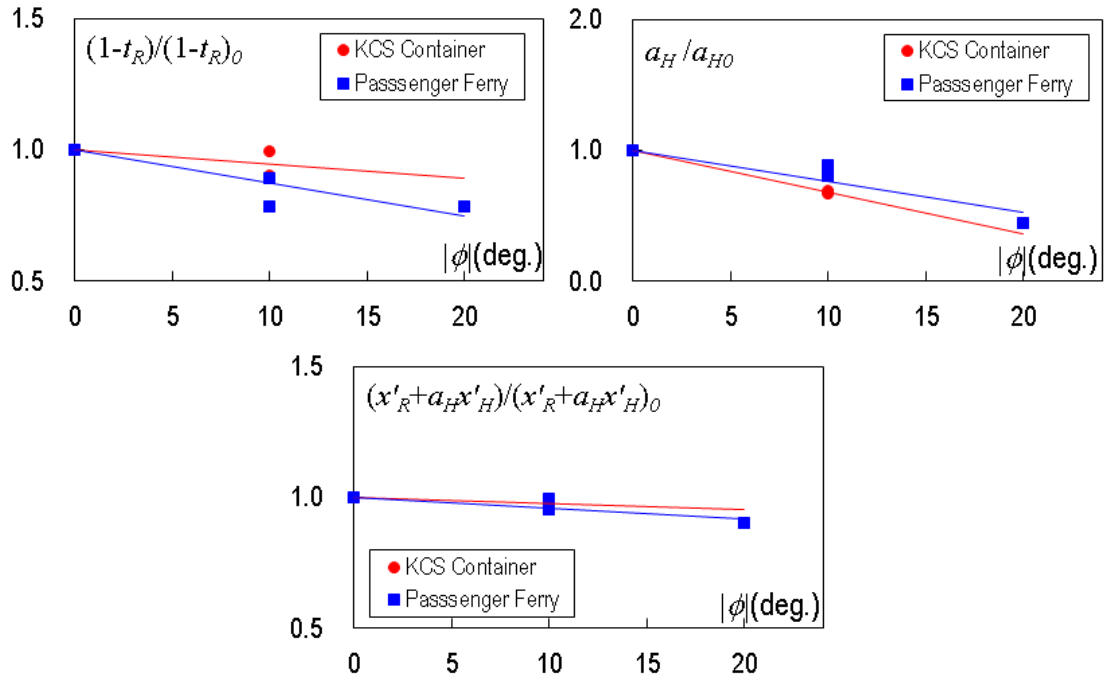


Fig.3.20 Effects of roll angle on $(1-t_R)$, a_H and $(x'_R+a_H x'_H)$

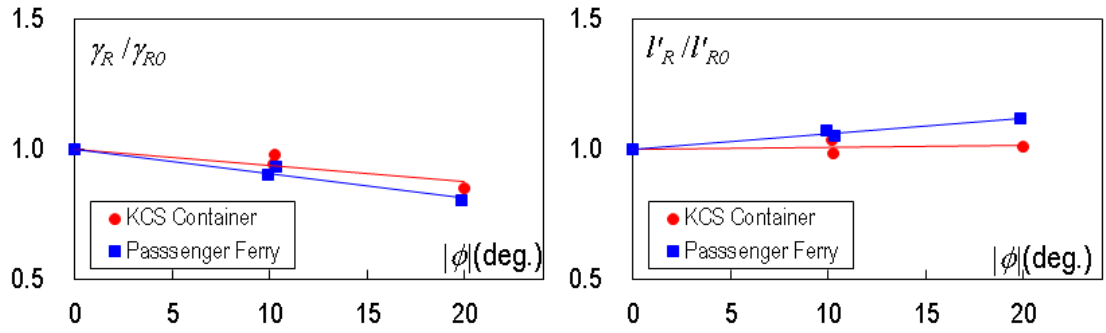


Fig.3.21 Effects of roll angle on γ_R and l'_R

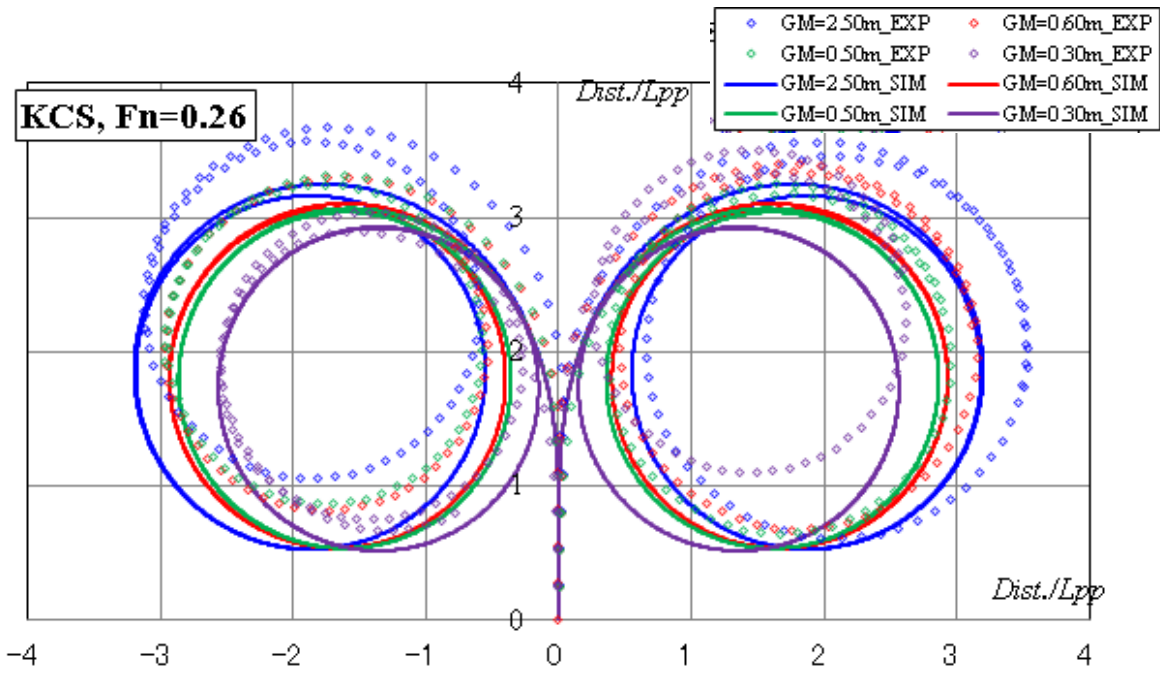


Fig.3.23(a) Comparison of $\pm 35^\circ$ rudder angle turning motion trajectory, between measured and simulated (KCS Container Ship, $F_n=0.26$)

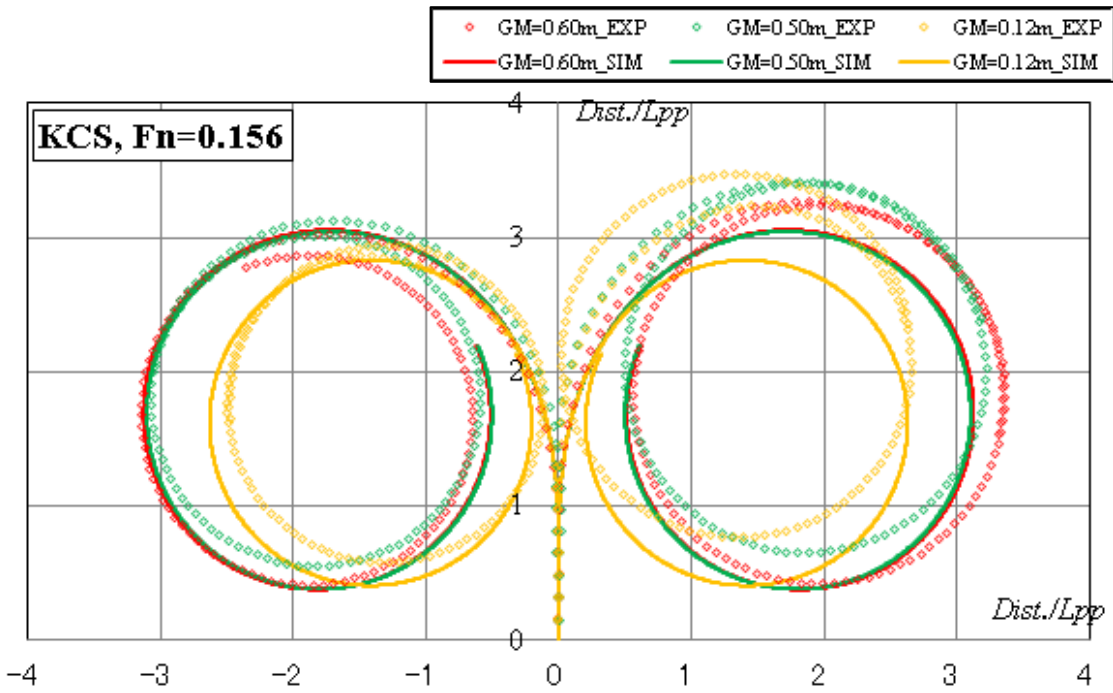


Fig.3.23(b) Comparison of $\pm 35^\circ$ rudder angle turning motion trajectory, between measured and simulated (KCS Container Ship, $F_n=0.156$)

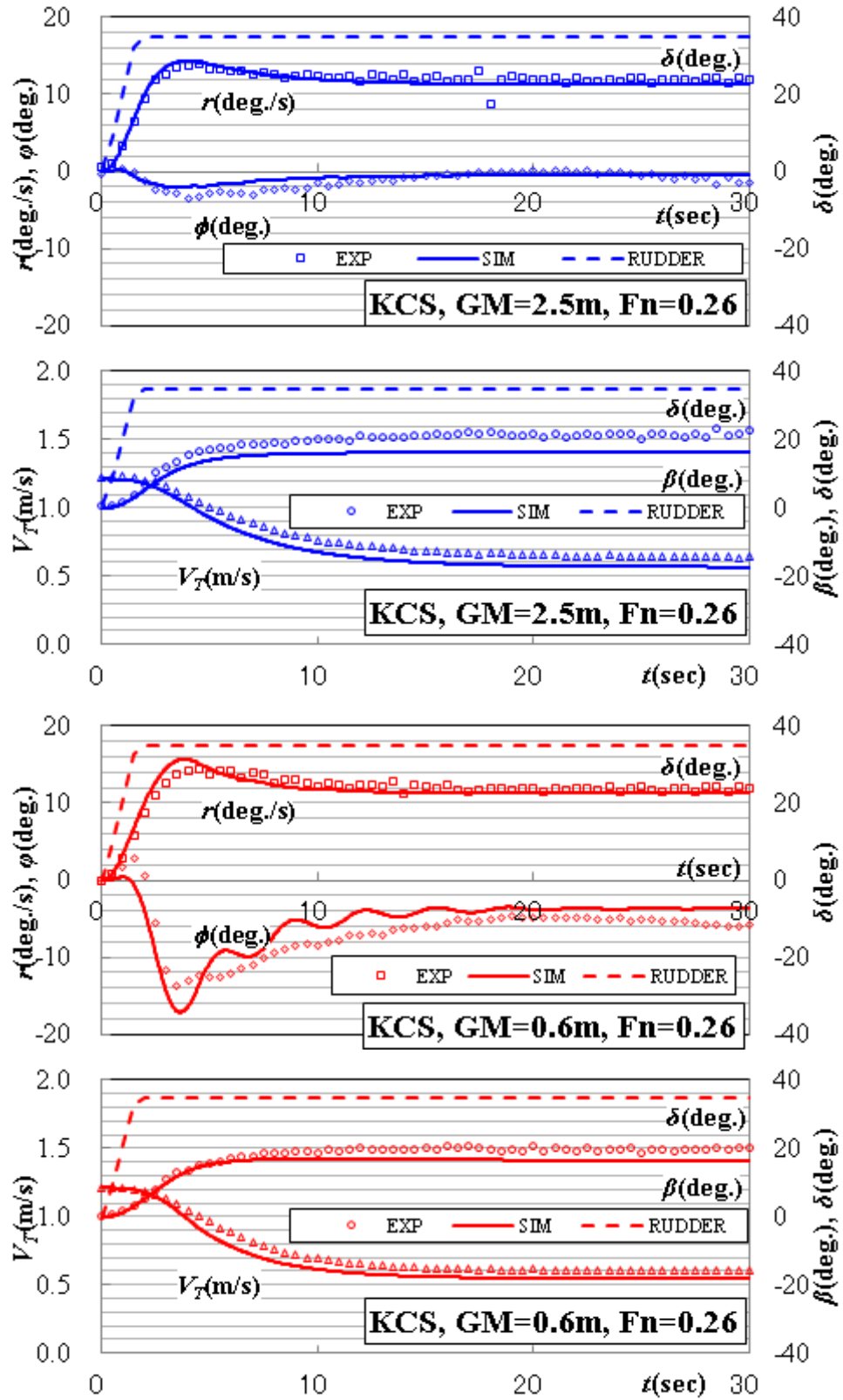


Fig.3.24(a) Comparison of $\pm 35^\circ$ rudder angle turning motion time history, between measured and simulated (KCS Container Ship, $F_n=0.26$)

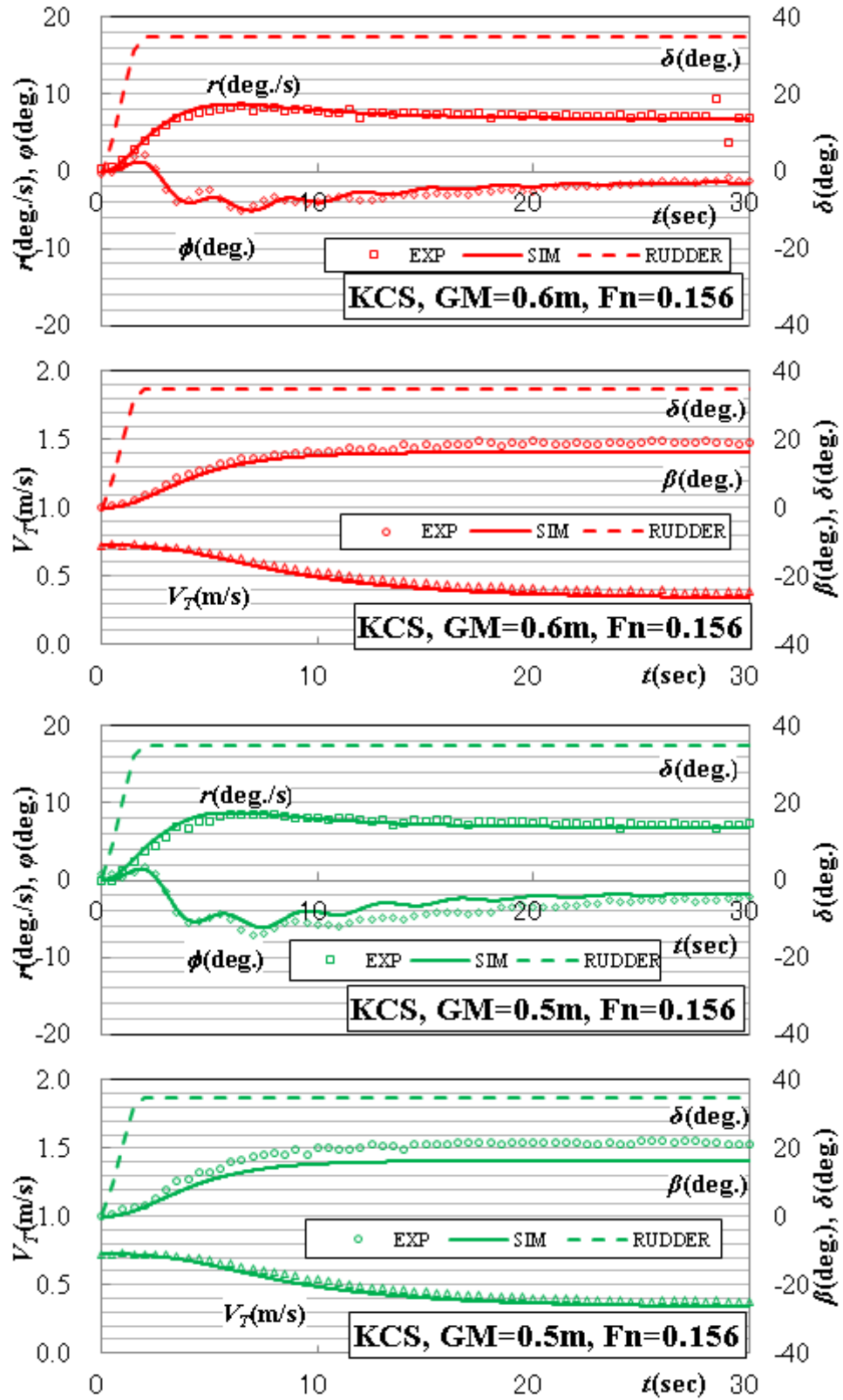


Fig.3.24(b) Comparison of $\pm 35^\circ$ rudder angle turning motion time history, between measured and simulated (KCS Container Ship, $F_n=0.156$)

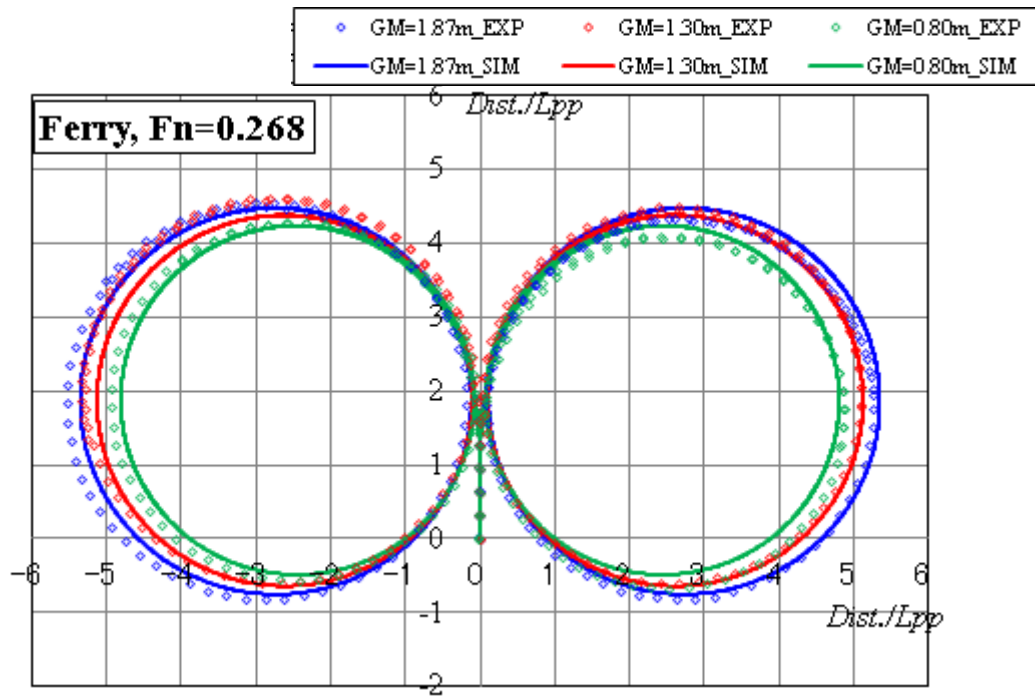


Fig.3.25(a) Comparison of $\pm 35^\circ$ rudder angle turning motion trajectory, between measured and simulated (Passenger Ferry, $Fn=0.268$)

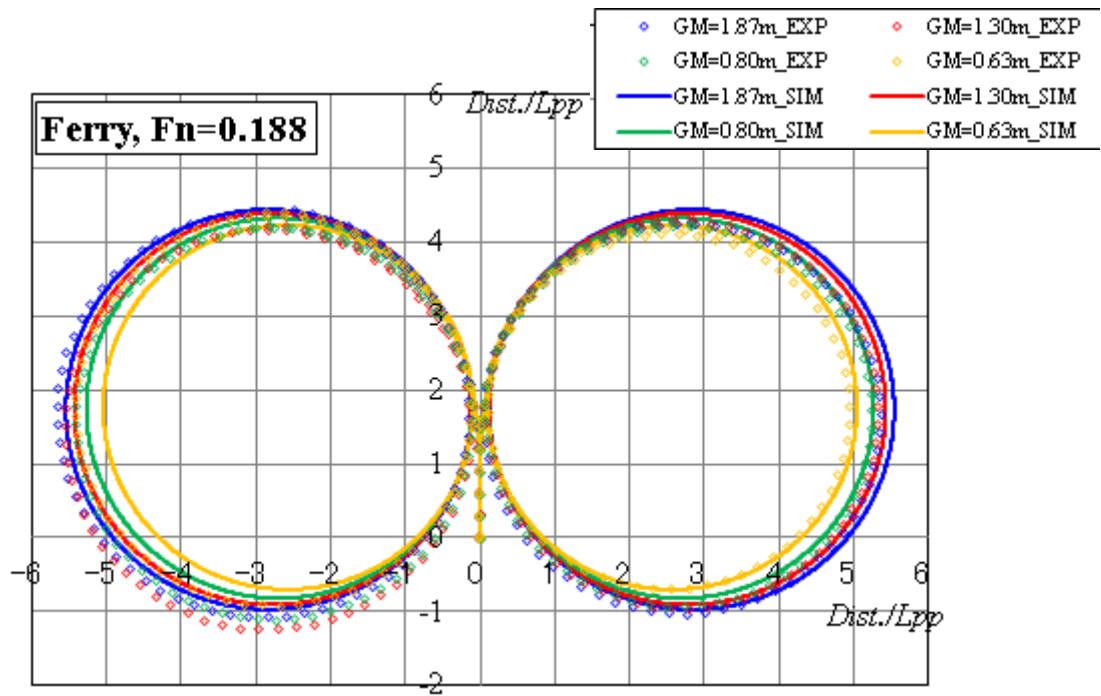


Fig.3.25(b) Comparison of $\pm 35^\circ$ rudder angle turning motion trajectory, between measured and simulated (Passenger Ferry, $Fn=0.188$)

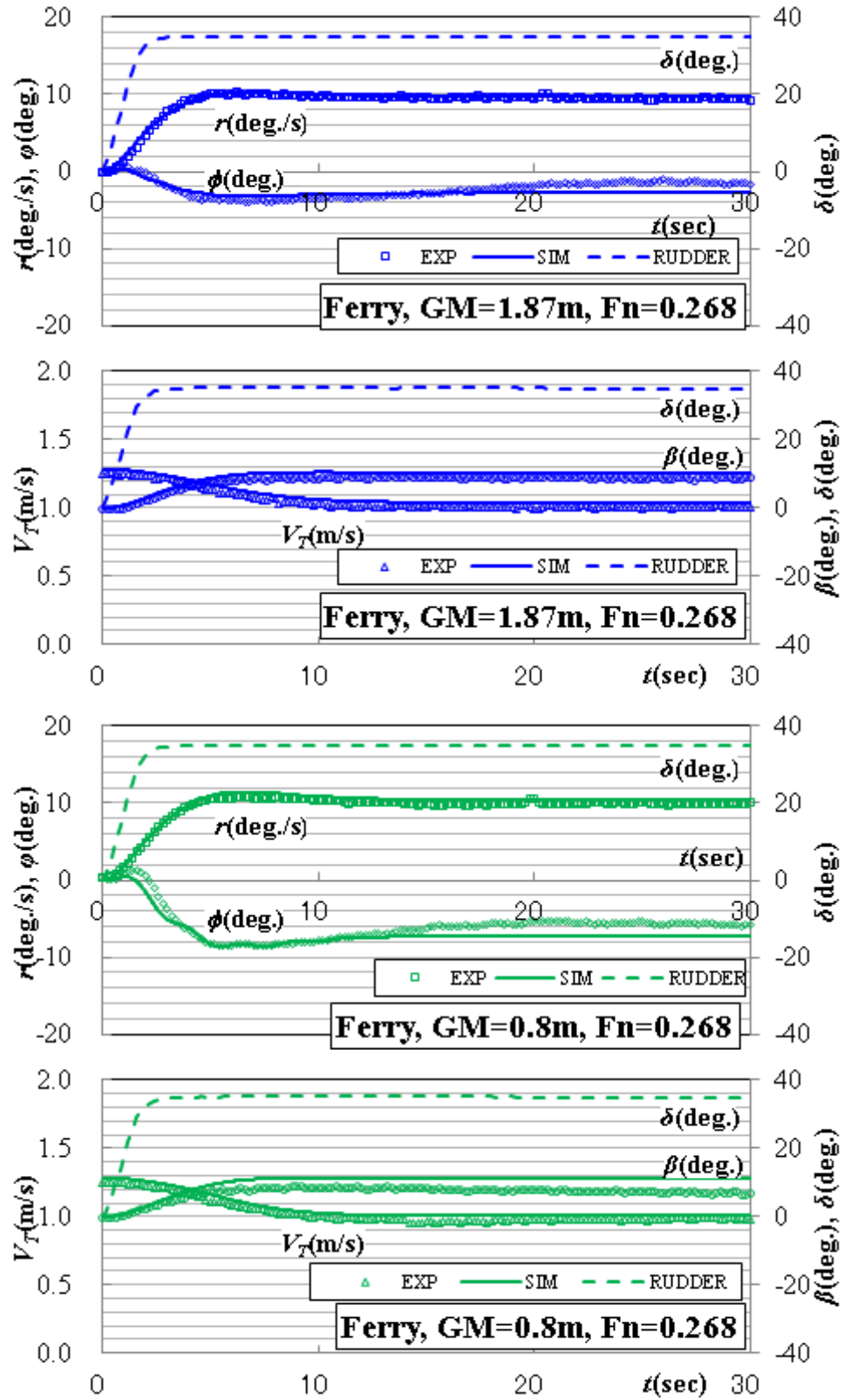


Fig.3.26(a) Comparison of $\pm 35^\circ$ rudder angle turning motion time history, between measured and simulated (Passenger Ferry, $F_n=0.27$)

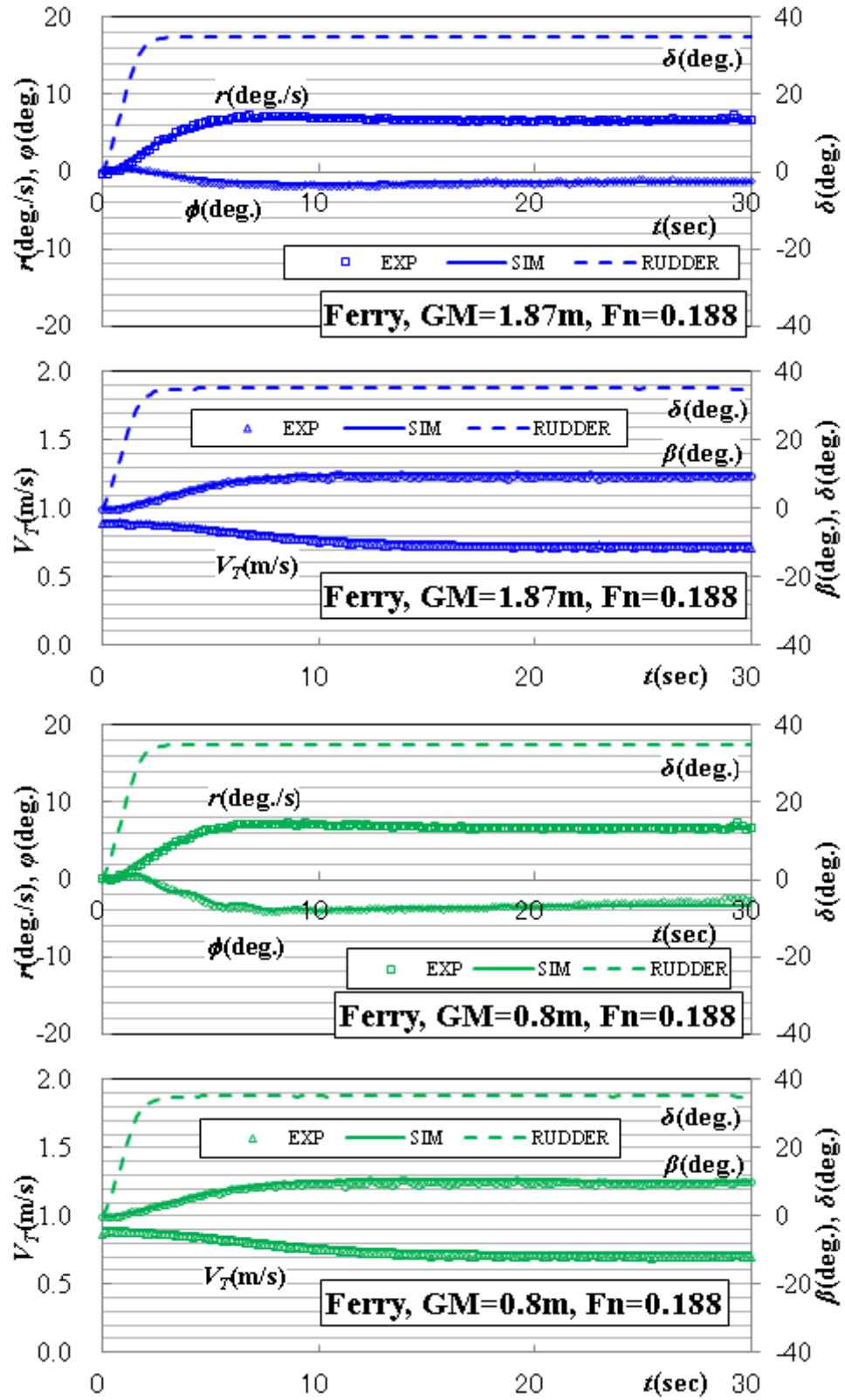


Fig.3.26(b) Comparison of $\pm 35^\circ$ rudder angle turning motion time history, between measured and simulated (Passenger Ferry, $F_n=0.188$)

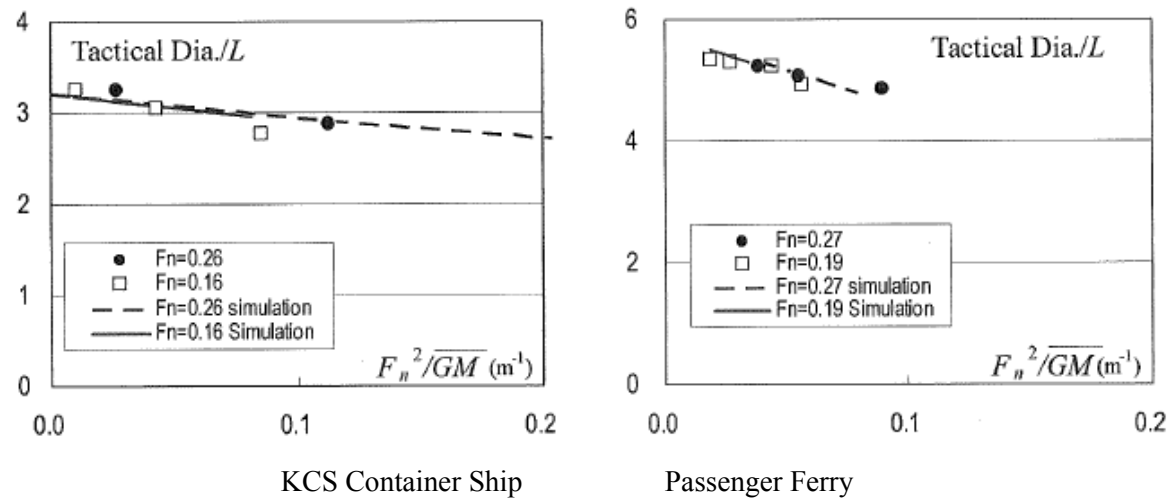


Fig.3.27 Comparisons of tactical diameters for various GM and Fn, between measured and simulated

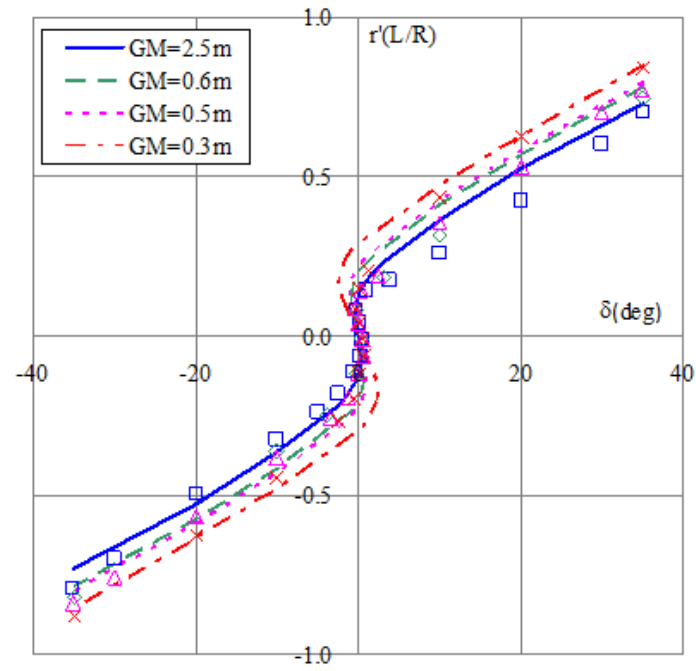


Fig.3.28(a) Comparison of Spiral Curve, between measured and simulated (KCS Container Ship, $F_n=0.26$)

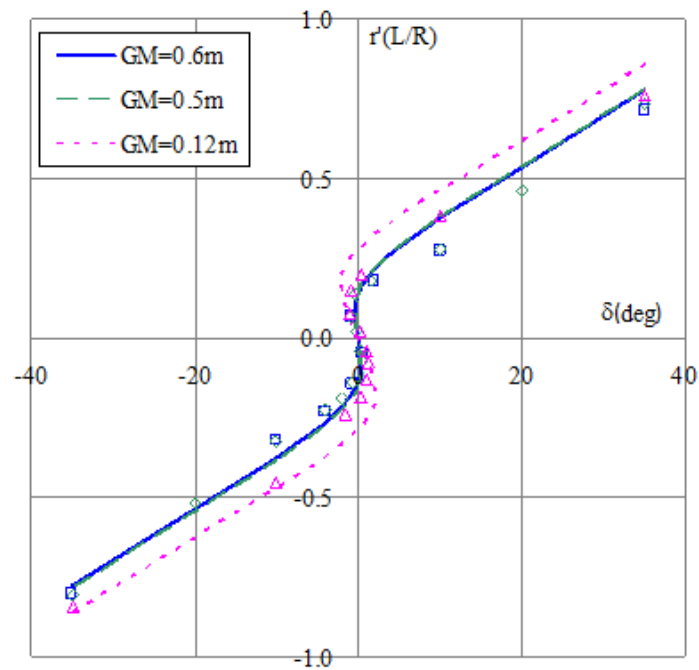


Fig.3.28(b) Comparison of Spiral Curve, between measured and simulated (KCS Container Ship, $F_n=0.156$)

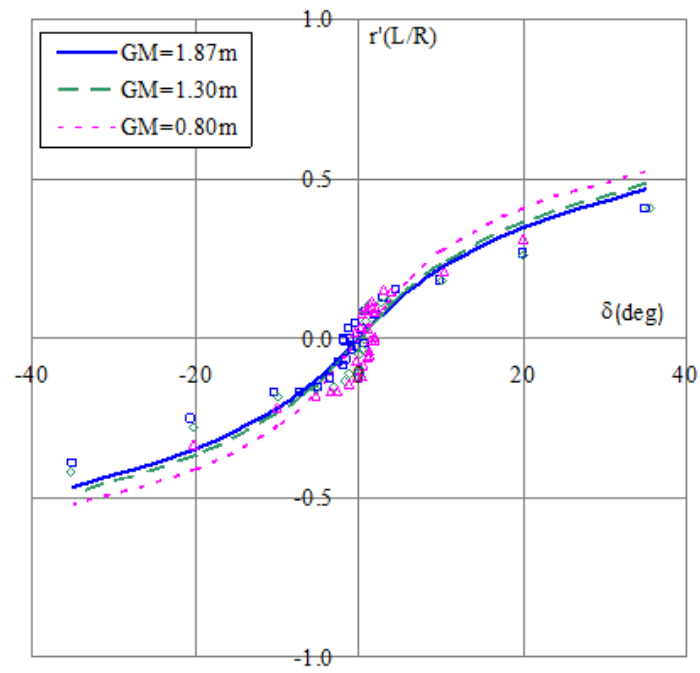


Fig.3.29(a) Comparison of Spiral Curve, between measured and simulated (Passenger Ferry, $Fn=0.27$)

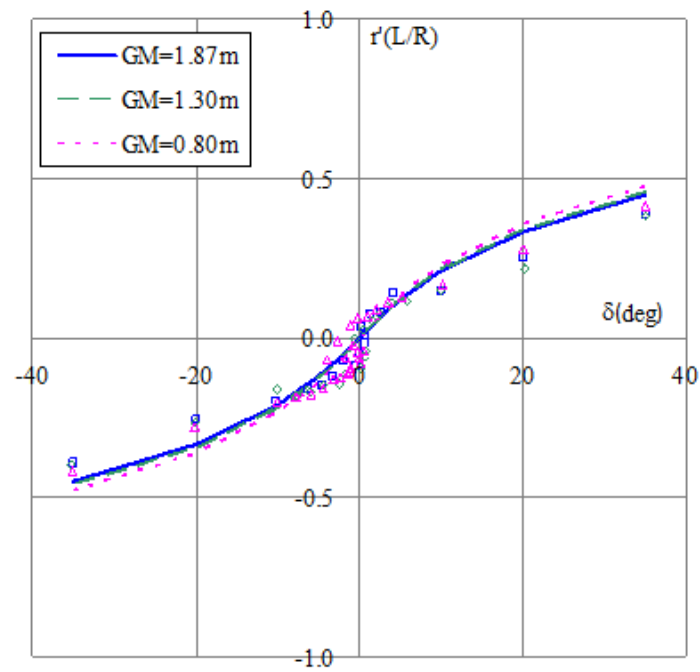


Fig.3.29(b) Comparison of Spiral Curve, between measured and simulated (Passenger Ferry, $Fn=0.188$)

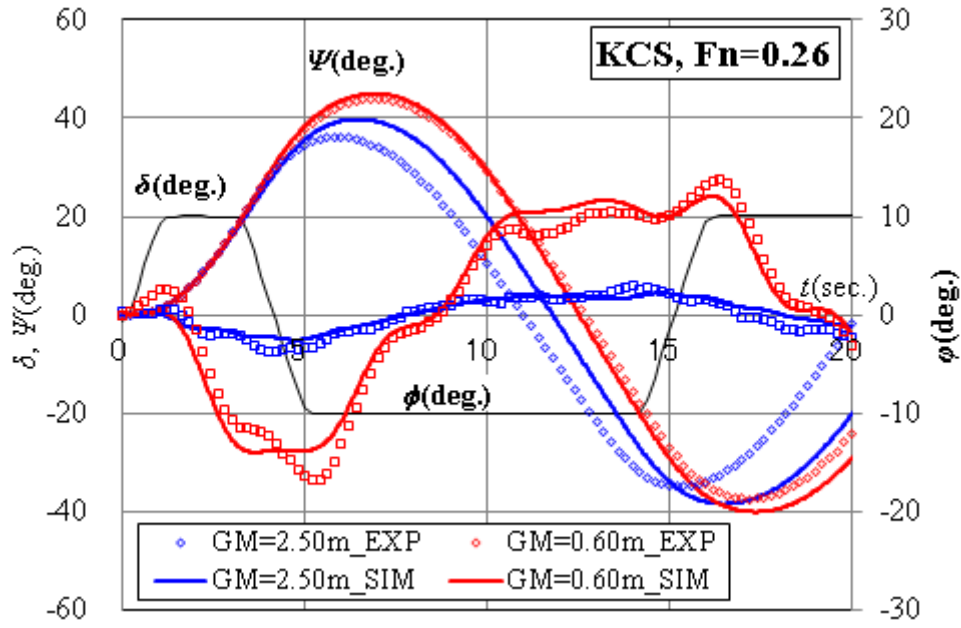


Fig.3.30(a) Comparison of 20°-20° Z tests time history, between measured and simulated (KCS Container Ship, $F_n=0.26$)

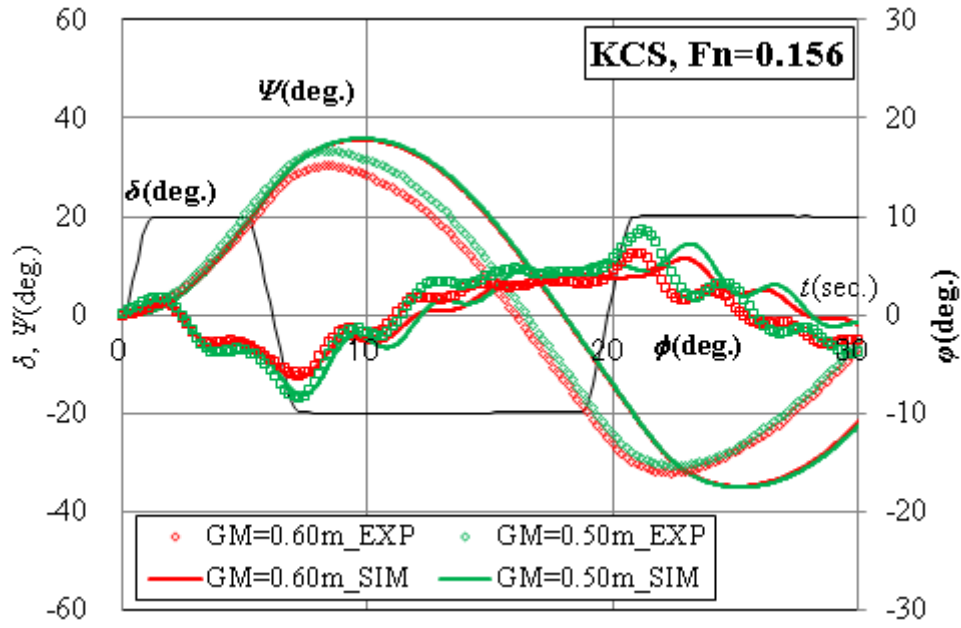


Fig.3.30(b) Comparison of 20°-20° Z tests time history, between measured and simulated (KCS Container Ship, $F_n=0.156$)

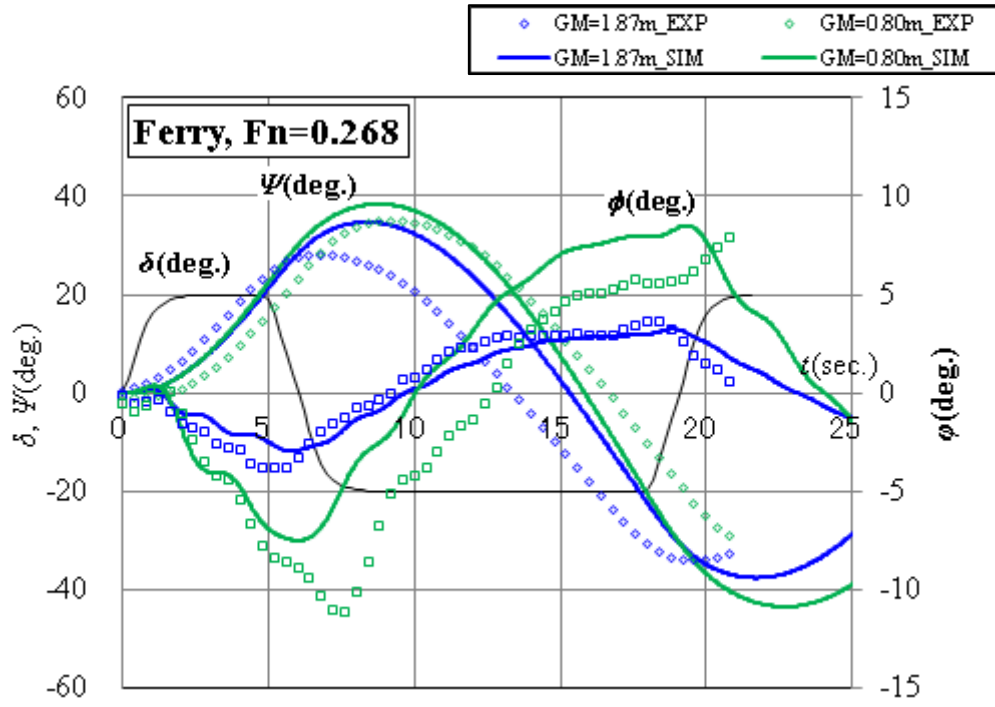


Fig.3.31(a) Comparison of 20°-20° Z tests time history, between measured and simulated
(Passenger Ferry, $F_n=0.268$)

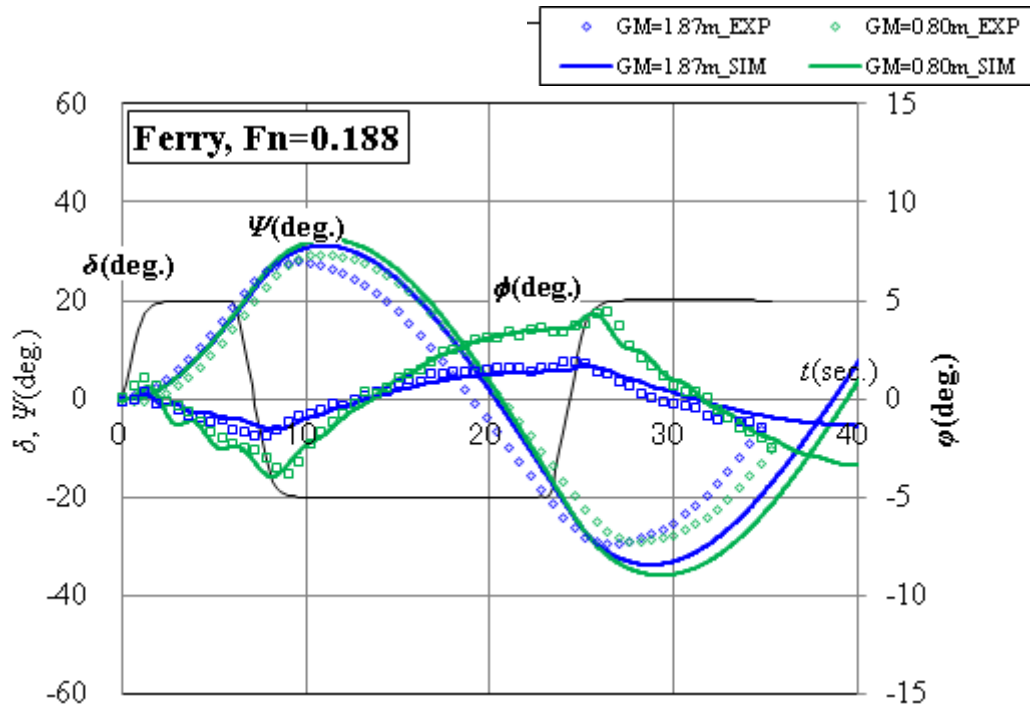


Fig.3.31(b) Comparison of 20°-20° Z tests time history, between measured and simulated
(Passenger Ferry, $F_n=0.188$)

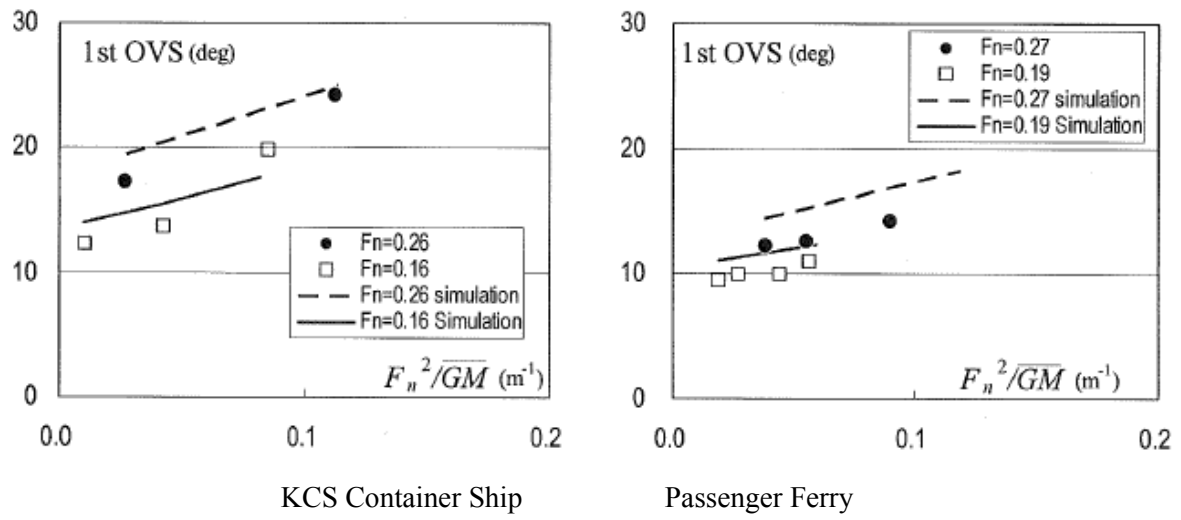


Fig.3.32 Comparisons of 1st overshoot angle of 20°-20° Z tests for various GM and Fn, between measured and simulated

第4章 漁船舶型を対象とした模型試験と操縦運動

シミュレーション

前章までに船の横傾斜角の変化とそれに伴う操縦性能の変化について、模型試験、及び4自由度の操縦シミュレーションを用いて検討を行ってきたが、これらの船型以外に、フルード数が高く、重心が上がった状態で航行し、横傾斜影響を受けやすい船型として漁船が挙げられる。漁船は一般的に大舵を装備していることで旋回が強く、網を曳きながら航行することから操縦運動時に横傾斜影響を受けやすく、また横傾斜が直接的に転覆、海難事故に繋がりやすい。このため漁船では横傾斜影響を含めた4自由度モデルを用いた操縦性能の推定がより重要なものとなる。本章では135GT型旋網漁船について、横傾斜が操縦性能に与える影響について、実験と理論から検討した。

4.1. 自由航走模型試験

横傾斜が漁船の操縦性能に与える影響を直接調べるためにGM、およびフルード数を変更した自由航走模型試験を実施した。

4.1.1. 実験方法

模型試験の供試船型は135GT型旋網漁船であり、本船は漁労作業等により重心が上がった状態で航行することもあることが知られている。模型は実船の1/20のスケールとし、1.85m程度の模型を製作した。供試模型船の主要目をTable 4.1に、模型船の写真をFig.4.1に示す。

実験は、2章の自由航走模型試験でも示した北海道大学函館キャンパスの水泳プール（長さ×幅×深さ：25m×12m×1.2m（一部3m））で実施した。また自由航走試験を実施するための各種制御装置、計測装置についても2章で示したのと同じものを使用している。

自由航走模型実験では旋回試験、逆スパイラル試験、及び $20^\circ Z$ 試験を実施した。また試験は重心高さ、及び船速を変更した試験を行っており、船速は $F_n = 0.3$ 、及び 0.2 で行った。重心高さは計画満載状態の排水量、喫水は変更せず、GMの値を変化さ

せるものとし、実船スケールで $GM=1.47m$ 、及び $0.7m$ 、 $0.2m$ で行った。試験を実施した速力、重心高さの概要を含めた各試験状態を Table 4.2 に示す。

4.1.2. 実験結果、及び横傾斜が操縦運動に及ぼす影響

(a) 35° 旋回試験

漁船舶型の各 F_n での GM の変化による $\pm 35^\circ$ 旋回試験の航跡の比較を Fig.4.2 に示す。航跡を見ると、 GM が小さくなるのに伴い、旋回圏が小さく、旋回性能が強くなっていることが、また船速が速くなるのに伴い、同様に旋回圏が小さく、旋回性能が強くなっていることが確認できる。

(b) $20^\circ Z$ 試験

漁船舶の船速毎の GM の変化による $20^\circ Z$ 試験の第一オーバーシュート角の変化を Fig. 4.3 に示す。この結果から、どちらの船速においても、 GM が小さくなるとともに横傾斜角が大きくなり、1st オーバーシュートアングルも大きくなっていることが確認できる。船速の増加によっても差は小さいが同様の傾向が見られ、針路安定性が低下することが確認できる。

上記のような自由航走模型試験の傾向は KCS コンテナ船、2 軸 1 舵フェリーでも見られ、船速が速く、 GM が小さくなるほど針路不安定となる。

4.2. 拘束模型試験

横傾斜による操縦運動時の流体力、モーメントや船体・舵・プロペラ間の干渉影響を確認するため、横傾斜角度を変化させた拘束模型試験について示す。

4.2.1. 実験方法

供試模型は自由航走模型試験と同じ 1/20 スケールの 135GT 型旋網漁船である。実験は、3 章と同様にプロペラ無しの状態についてはジャパン マリンユナイテッド(株)の運動性能水槽で、プロペラ付きの状態については北海道大学函館キャンパスの長水槽で実施した。

実験手法についても第 3 章と同様であり、模型船の運動、及び船体流体力については、Fig.3.1 に示した座標系に従っており、拘束模型試験では横傾斜時の模型船の船体

流体力微係数、及び微係数の横傾斜による変化を把握するため、横傾斜角 ϕ の設定値を 10° 、 0° 、 -10° 、 -20° の4状態として拘束旋回試験を実施し、船体流体力を求めた。斜航角 β 、及び無次元回頭角速度 r' の試験パラメータの組合せ表についても、Fig.3.4に示したものと同様である。試験船速は 1.0m/s ($\text{Fn}=0.225$)とした。

4.2.2. 試験解析

試験で計測した船体流体力、及び船体・舵・プロペラの干渉影響を解析した。流体力の無次元化式、及び解析手法は3章に示した方法に従って行った。

本試験は舵付きの状態であるので、MMGの取り扱いに準じて、同時に計測された舵直圧力、及び舵・船体間の干渉力を含めてこれらに含まれる舵力成分を控除した。船長方向、横方向、及び旋回方向の船体流体力・モーメントの計測結果は(3.9)式に示したとおり、 β と r' の左右非対称項を含めた数学モデルを用いて、それぞれの横傾斜角について最小自乗法により一括解析した。X、Y、Nの各微係数の値をTable 4.3に示す。

$$\left. \begin{aligned} X_H &= \frac{\rho}{2} L d U^2 \\ &\times \left\{ X'_0 + X'_\beta \beta + X'_r r' + X'_{\beta\beta} \beta^2 + (X'_{\beta r} - m'_y) \beta r' + X'_{rr} r'^2 + X'_{\beta\beta\beta} \beta^3 \right\} \\ Y_H &= \frac{\rho}{2} L d U^2 \\ &\times \left\{ \begin{aligned} &Y'_0 + Y'_\beta \beta + (Y'_r - m'_x) r' \\ &+ Y'_{\beta\beta} \beta^2 + Y'_{\beta r} \beta r' + Y'_{rr} r'^2 \\ &+ Y'_{\beta\beta\beta} \beta^3 + Y'_{\beta\beta r} \beta^2 r' + Y'_{\beta r r} \beta r'^2 + Y'_{rrr} r'^3 \end{aligned} \right\} \\ N_H &= \frac{\rho}{2} L^2 d U^2 \\ &\times \left\{ \begin{aligned} &N'_0 + N'_\beta \beta + N'_r r' \\ &+ N'_{\beta\beta} \beta^2 + N'_{\beta r} \beta r' + N'_{rr} r'^2 \\ &+ N'_{\beta\beta\beta} \beta^3 + N'_{\beta\beta r} \beta^2 r' + N'_{\beta r r} \beta r'^2 + N'_{rrr} r'^3 \end{aligned} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (3.9 \text{ 再})$$

流体力微係数の横傾斜影響を検討する。前後力の左右対称型の微係数 X'_0 、及び $X'_{\beta\beta}$ 、 $X'_{\beta r}$ 、 X'_{rr} 、 $X'_{\beta\beta\beta}$ について、横傾斜角の絶対値 $|\phi|$ に対する変化をFig.4.4に示す。ここには直進抵抗係数 X'_0 や付加質量成分となる $X'_{\beta r}$ の項が含まれるが、これらについては横傾斜に対する変化は少ないことが確認できる。

前後力の左右非対称型の微係数 X'_{β} 、 X'_r について、横傾斜角に対する変化を Fig.4.5 に示す。これらは ϕ に比例して変化している。

横力、及び旋回モーメントの左右対称型の線形微係数 Y'_{β} 、 $Y'_r - m'_x$ 、 N'_{β} 、 N'_r の横傾斜角の絶対値 $|\phi|$ に対する変化を Fig.4.6 に示す。これらの微係数は $|\phi|$ に対してほぼ線形的に変化する傾向にある。このうち、斜航流体力の着力点について見ると、横傾斜角の増大に対してやや短くなり、針路安定性がよくなる方向にある点が前章の KCS コンテナ船型、フェリー船型とは異なっている。

左右対称型の非線形微係数 $Y'_{\beta\beta}$ 、 $Y'_{\beta r}$ 、 Y'_{rr} 、 Y'_{rrr} 、 $N'_{\beta\beta}$ 、 $N'_{\beta r}$ 、 N'_{rr} 、 N'_{rrr} の横傾斜角に対する変化を Fig.4.7 に示す。これらの項の変化は概ね $|\phi|$ に対して線形的に変化する傾向にあり、KCS 船型等では傾向が捉えられていない、或いは変化が微小であった項についても横傾斜影響は大きく現れている。ただし、これらの微係数は 3 章でも記載したとおり、実用的には無視できる可能性もあると考えられる。

横力、及び旋回モーメントの左右非対称型の微係数について見ると、代表的な微係数である Y'_0 、 N'_0 の横傾斜角に対する変化を Fig.4.8 に示す。これらの項は横傾斜角 ϕ に対してほぼ線形的に変化をしている。またその特性は 3 章で示した KCS コンテナ船と似たものとなっており、 ϕ の増加に対して、 Y'_0 は傾斜とは反対方向の力が発生する。 N'_0 の変化は横傾斜角 ϕ に対して負の向きになっており、傾向は KCS コンテナ船と同じだが、傾きはかなり大きいものとなっている。またこれらの特性から $Y'_0\phi$ 、 $N'_0\phi$ のような形で表される微係数が必要となる。

また定数項以外の左右非対称型の微係数 $Y'_{\beta\beta}$ 、 $Y'_{\beta r}$ 、 Y'_{rr} 、 $N'_{\beta\beta}$ 、 $N'_{\beta r}$ 、 N'_{rr} の横傾斜角 ϕ に対する変化を Fig.4.9 に示す。これらの微係数は ϕ に対してかなり線形的に変化する実験結果となっている。

次にプロペラ・舵付き状態で実施した斜航試験、及び舵付きの CMT における舵角試験において計測した舵直圧力から、横傾斜に対する舵の有効迎角の特性を調べ、解析した γ_R と l'_R について、横傾斜角に対する変化を示したのが Fig.4.10 である。

これより、 l'_R の横傾斜に対する変化はほとんど見られないが、 γ_R は横傾斜の増加に対して若干小さくなる傾向があり、これは前章で示したコンテナ型船やフェリー船型の傾向と同様である。

4.3. 横傾斜を含めた 4 自由度操縦運動シミュレーション

第 3 章に示した数学モデル、及び 4.3 に示した拘束模型試験結果を用いて横傾斜を含めた 4 自由度の操縦運動を計算し、4.2 の自由航走模型試験結果と比較して操縦運動シミュレーションによる理論的推定の妥当性を検討した。

4.3.1. 操縦運動モデル

漁船舶型の流体力微係数の変化は第 3 章で示した船型とは異なる傾向も見られたが、傾向のことなる高次の項等は横傾斜影響を考慮していないなどの点からも、第 3 章のモデルで概ね表現できるものと考えられる。ただし、本章では解析の関係から横傾斜モーメント K'_H は微係数解析を行っていないため、横田、矢野の修士論文で用いられているような横傾斜モーメントを横力で表現するモデルで計算を行った。本章で用いた横傾斜方向の運動方程式を(4.1)式のように示す。

$$(I_{xx} + J_{xx})\ddot{\phi}_G - z_H(m_y \dot{\phi}_G + m_x u_G r_G) = -z_H Y_H - B_{44}\dot{\phi} - C_{44}\phi - z_R Y_R \quad (4.1)$$

4.3.2. シミュレーション結果

(a) 旋回性能

漁船の舵角 35° 旋回に関する自由航走模型試験とシミュレーション結果について、航跡の比較を Fig.4.11 に、旋回圏、及び定常横傾斜角の比較を Fig.4.12、Fig.4.13 に示す。Fn=0.30、及び Fn=0.2 について比較しており、旋回圏の比較は GM=1.47m の時の値を 1.0 として GM による旋回圏の変化を示している。自由航走模型試験結果は記号で示し、シミュレーション結果は曲線で示している。この結果から、第 3 章で示した KCS コンテナ船やフェリーと異なり、漁船におけるシミュレーションは GM の減少や Fn が増加してもほとんど変化せず、横傾斜が大きくなると旋回圏が小さくなって、旋回性能が強くなるという自由航走模型試験の傾向を上手く表せていないことがわかる。

(b) 針路安定性

漁船の $20^\circ/20^\circ Z$ 試験の時系列について、自由航走模型試験とシミュレーション結果の比較を Fig.4.14 に、第一オーバーシュート角、及び転舵直前の横傾斜角を Fig.4.15、Fig.4.16 に示す。オーバーシュート角については GM が最大の時の値を 1.0 として、GM による変化を示している。この結果より漁船においても、自由航走模型試験、シ

ミュレーションとともに GM の減少や F_n の増加によって横傾斜が大きくなり、第一オーバーシュート角が大きく、針路安定性が低下する傾向がみられる。シミュレーションによって自由航走模型試験の結果が定性的に捉えることができた。

4.4. まとめ

第 4 章では 135GT 型旋網漁船について、横傾斜をパラメータに加えた拘束模型試験を実施し、横傾斜が種々の操縦流体力に及ぼす影響と特徴を解析した横傾斜が操縦性能に与える影響を確認した。またその結果を用いた 4 自由度操縦運動シミュレーションと自由航走模型試験の結果を比較し、操縦モデルの妥当性を検討した結果から、以下のことが確認された。

模型試験について

- 1) 自由航走模型試験において、GM の減少や F_n の増加によって横傾斜が大きくなり、旋回性能が強く、針路安定性が低下することを確認した。
- 2) 横傾斜をすることによって、主に Y'_{ϕ} 、 N'_{ϕ} の微係数が発生するが、本模型船では Y'_{ϕ} 、 N'_{ϕ} はともにマイナスとなり、 N'_{ϕ} は KCS コンテナ船よりかなり大きい等、前章で扱った商船との船型差が見られた。
- 3) 線形微係数の変化はコンテナ船やフェリー同様に少ないが、 Y'_{β} はやや増加し針路安定性が上記とは逆に良くなる傾向となった。
- 4) 船体の整流係数はやや横傾斜の影響を受け、横傾斜の増加とともに整流係数が低下し、舵による針路安定効果はやや減少する傾向となった。

4 自由度操縦運動シミュレーションについて

- 5) 横傾斜を含めた操縦運動シミュレーションでは、旋回性能については試験結果に比べ、横傾斜影響による変化が小さく、傾向をうまく捉えられていない部分もあるが、Z 試験結果による針路安定性の変化については試験結果と定性的に一致しており、第 3 章の結果と合わせて、概ね 4 自由度操縦運動モデルの妥当性、及び漁船船型についても適用可能であることが確認できた。
- 6) 4 自由度モデルを用いた操縦性能推定が重要なものとなる漁船の検討にあたっては、シミュレーション精度向上のため、本章の結果から数学モデルの内容も含めて、漁船の横傾斜時の流体力特性の更なる検討を行う必要がある。

Table 4.1 Principal particulars of ship

		135GT fisher boat	
		Full Scale	Model(1/105)
L_{pp}	m	37.000	1.850
B (molded)	m	7.900	0.395
d (molded)	m	2.900	0.145
BL.trim	m	0.000	0.000
Initial trim	m	2.470	0.124
∇	m ³		0.059
$x_G(=-L_{cb})$	m	-1.840	-0.092
KM	m	14.946	0.1423
D_p	m	2.900	0.145
P/D_p			0.775
A_R	m ²		0.0103
H	m		
aspect ratio		2.208	2.1683

Table 4.2 Parameter of free running test conditions

		135GT fisher boat	
		0.3	0.2
	Fn		
	GM(m)	1.47,0.7,0.2	1.47,0.7,0.2
turning test δ (deg)	± 35	○	○
	± 30	○	
	± 20	○	○
	± 10	○	○
zig-zag test δ (deg)	$+20$	○	○
Spiral test r (deg/s)	0	○	○
	± 1.0		
	± 1.5	○	○
	± 2.0		
	± 3.0	○	○
	± 4.0		
	± 5.0	○	○
	± 6.0		
	± 7.0		

Table 4.3 Derivatives of 135GT fisher boat hull force with each roll angle

roll angle	10.16	0	-10.24	-19.94
Surge force				
X'_0	-0.0318	-0.0304	-0.0317	-0.0321
X'_β	0.0049	-0.0025	-0.0147	-0.0171
X'_r	0.0062	-0.0030	-0.0097	-0.0131
$X'_{\beta\beta}$	-0.2069	-0.2020	-0.1755	-0.1850
$X'_{\beta r}-m'_y$	-0.1515	-0.1500	-0.1559	-0.1418
X'_{rr}	-0.0171	-0.0185	-0.0174	-0.0265
$X'_{\beta\beta\beta}$	1.7449	1.7139	1.2663	1.4025
Sway force				
Y'_0	-0.0007	0.0024	0.0061	0.0091
Y'_β	0.5438	0.5166	0.5518	0.5696
$Y'_r-m'_x$	0.1647	0.1571	0.1562	0.1532
$Y'_{\beta\beta}$	0.0111	0.0260	0.1263	0.1474
$Y'_{\beta r}$	0.0353	-0.0142	-0.0763	-0.1552
Y'_{rr}	-0.0237	-0.0048	0.0166	0.0283
$Y'_{\beta\beta\beta}$	1.8487	2.2479	1.5621	1.6642
$Y'_{\beta\beta r}$	-0.3531	-0.4914	-0.2509	-0.1290
$Y'_{\beta rr}$	0.5826	0.6203	0.5870	0.4730
Y'_{rrr}	-0.0186	-0.0147	-0.0129	0.0060
Yaw moment				
N'_0	0.0000	0.0006	0.0015	0.0033
N'_β	0.0500	0.0543	0.0513	0.0513
N'_r	-0.0756	-0.0731	-0.0758	-0.0766
$N'_{\beta\beta}$	-0.0365	0.0159	0.0634	0.0937
$N'_{\beta r}$	0.0491	-0.0152	-0.0696	-0.0839
N'_{rr}	-0.0054	0.0024	0.0077	0.0076
$N'_{\beta\beta\beta}$	0.2207	0.1233	0.2521	0.2816
$N'_{\beta\beta r}$	-0.6348	-0.6650	-0.6404	-0.5333
$N'_{\beta rr}$	0.0933	0.0961	0.0905	0.0685
N'_{rrr}	-0.0395	-0.0425	-0.0406	-0.0323



Fig.4.1 Ship model for model tests (135GT fisher boat)

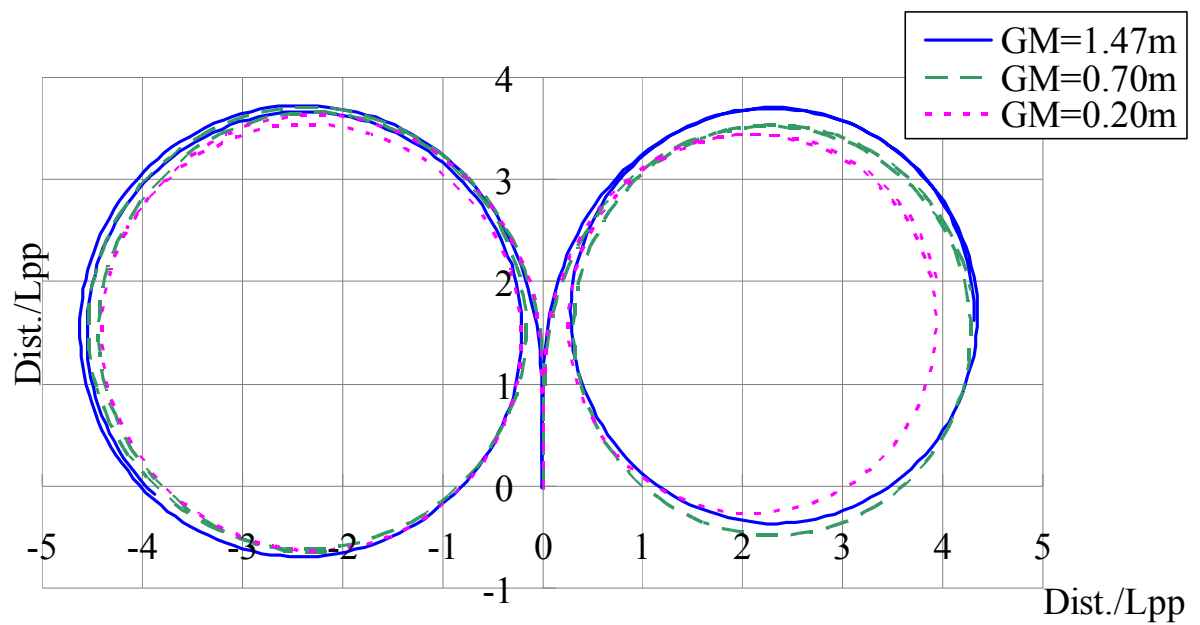


Fig.4.2(a) Comparison of $\pm 35^\circ$ rudder angle turning motion trajectory, between GM (135GT fisher boat, $F_n = 0.3$)

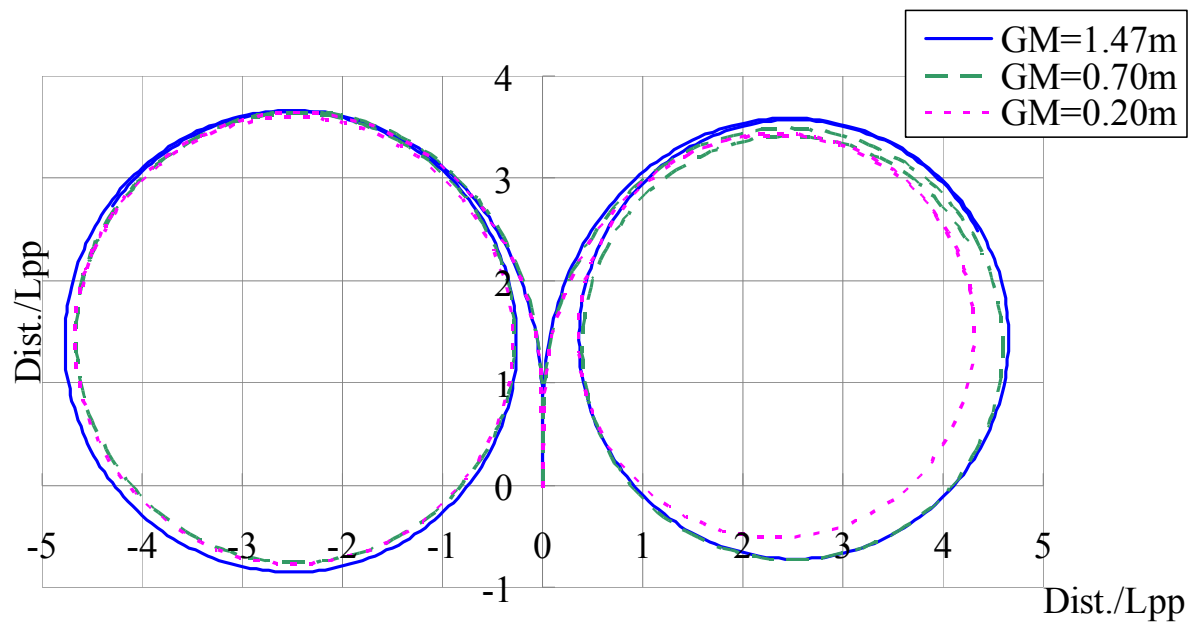


Fig.4.2(b) Comparison of $\pm 35^\circ$ rudder angle turning motion trajectory, between GM (135GT fisher boat, $F_n=0.2$)



Fig.4.3(a) Comparison of 20° - 20° Z tests time history, between GM (135GT fisher boat, $F_n=0.3$)

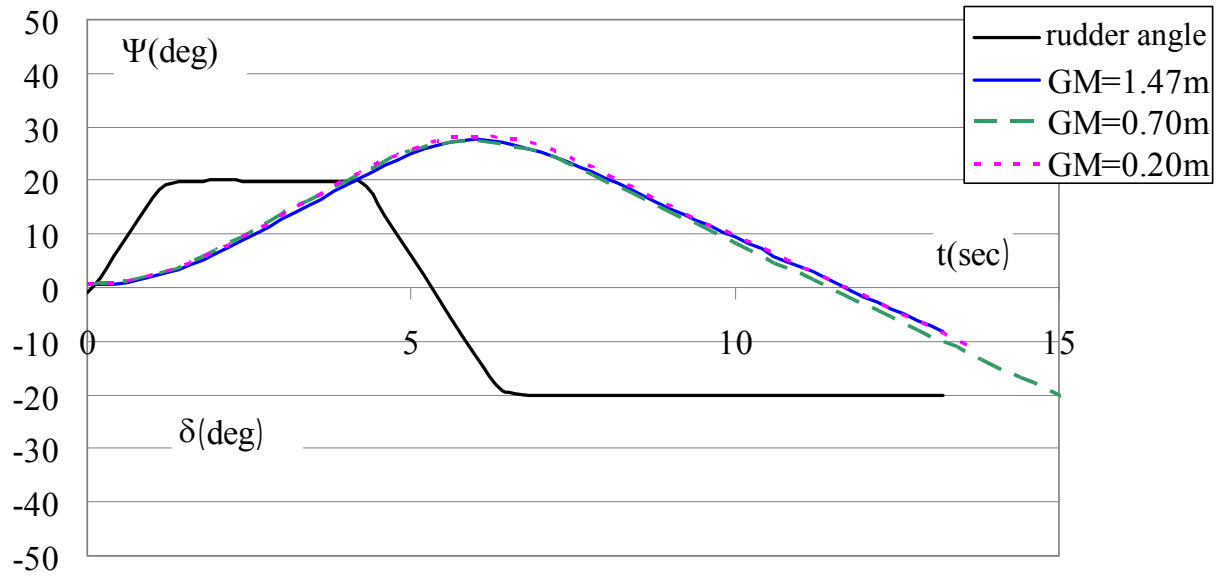


Fig.4.3(b) Comparison of 20°-20° Z tests time history, between GM (135GT fisher boat, $F_n=0.2$)

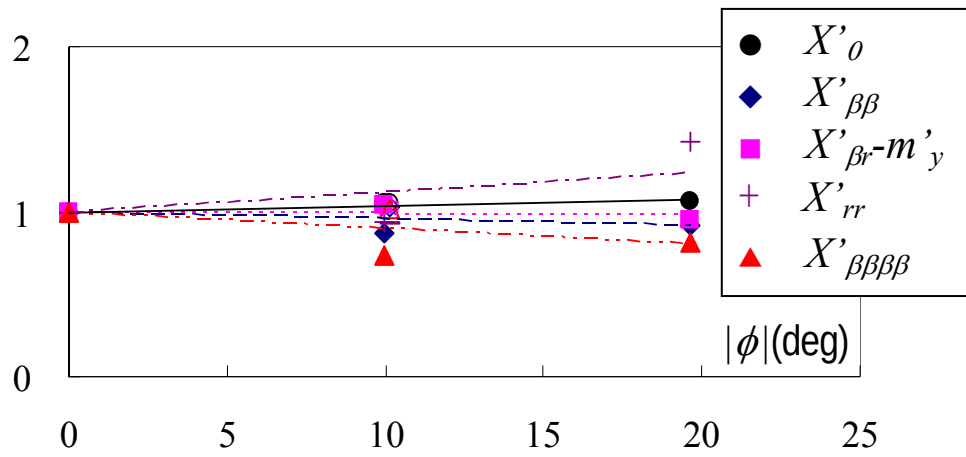


Fig.4.4 Effects of roll angle on X'_0 and $X'_{\beta\beta}$, $X'_{\beta r}$, X'_{rr} , $X'_{\beta\beta\beta\beta}$

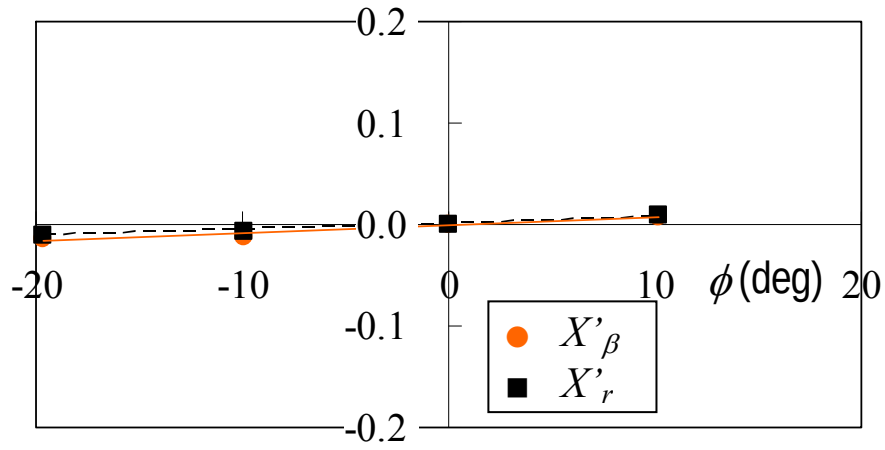


Fig.4.5 Effects of roll angle on X'_β and X'_r

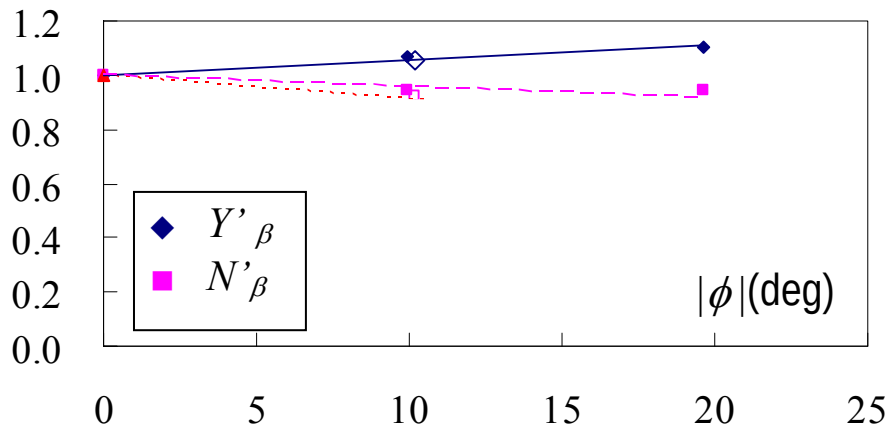
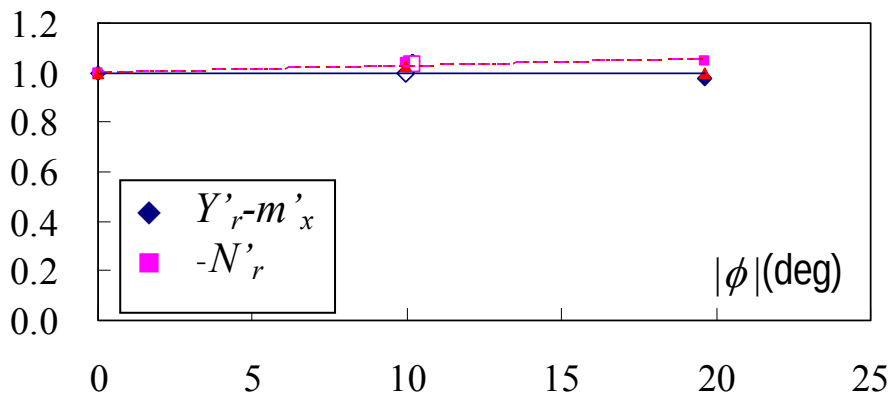


Fig.4.6 Effects of roll angle on Y'_β and $Y'_r - m'_x$, N'_β , N'_r

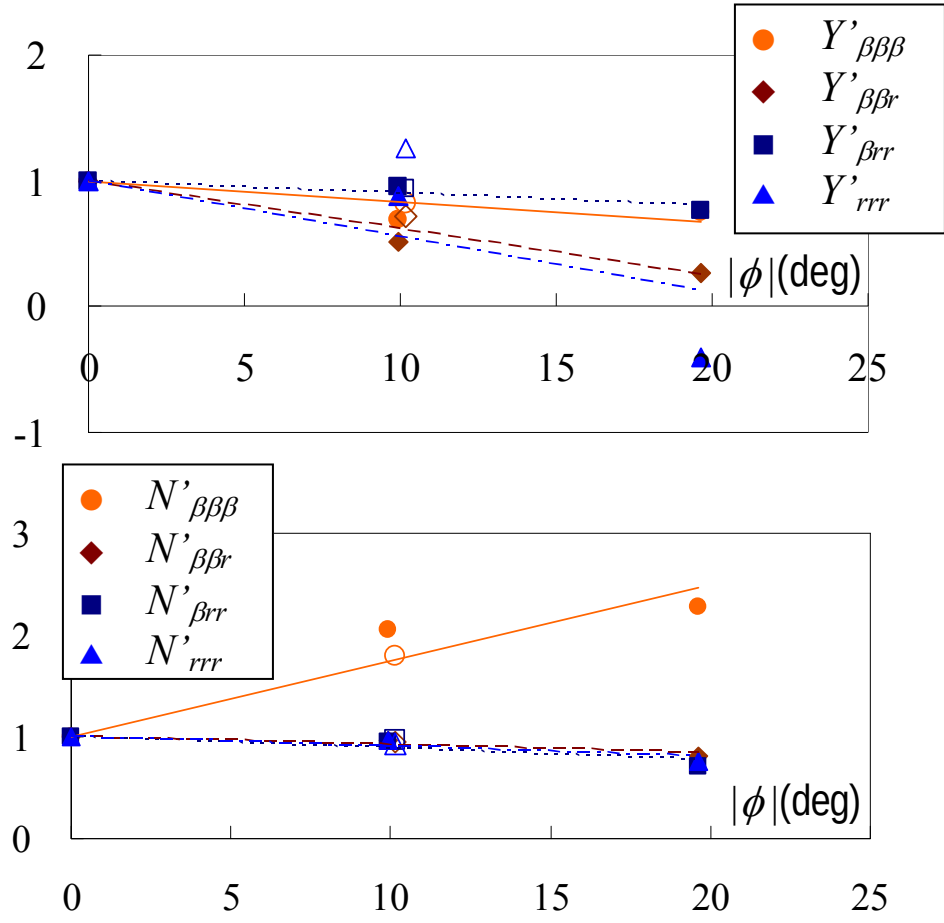


Fig.4.7 Effects of roll angle on non-linear derivatives of Y'_H and N'_H in the conventional 3-D model

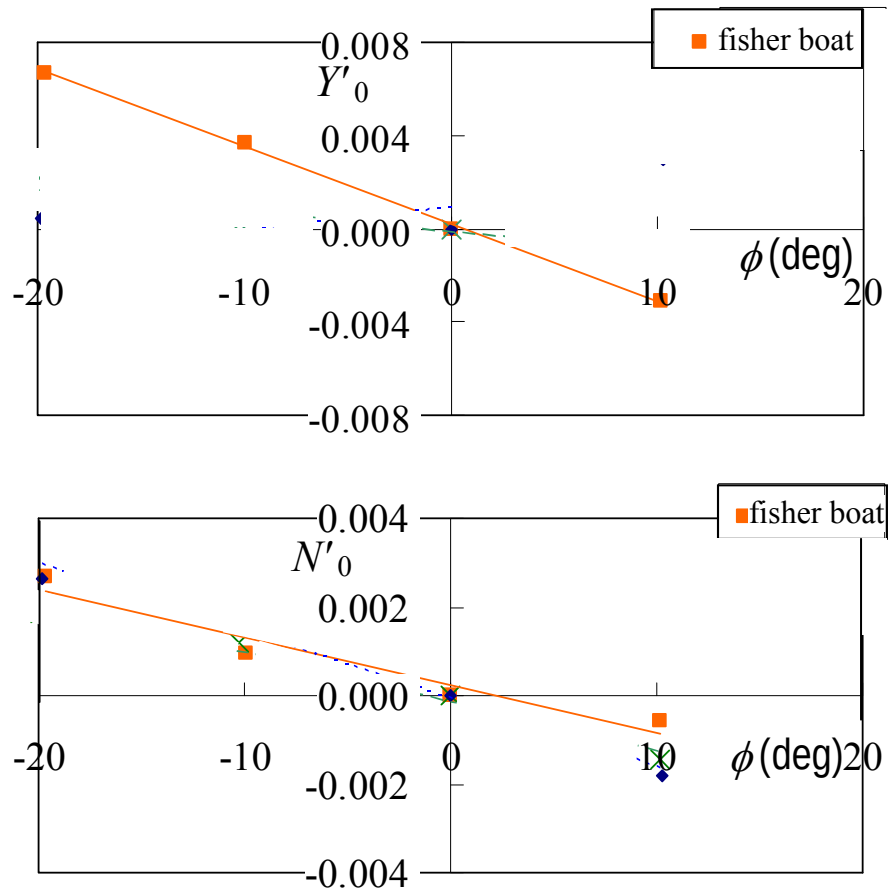


Fig.4.8 Effects of roll angle on Y'_0 and N'_0

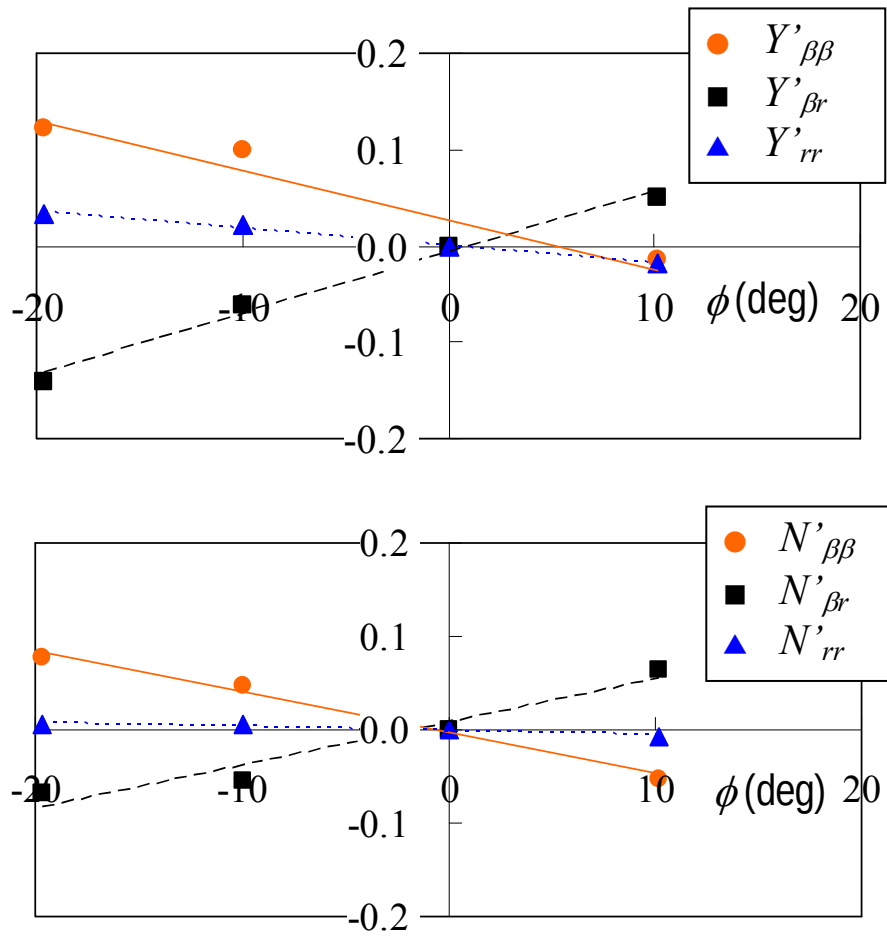


Fig.4.9 Effects of roll angle on non-linear asymmetric derivatives of Y'_H and N'_H in the 3-D model

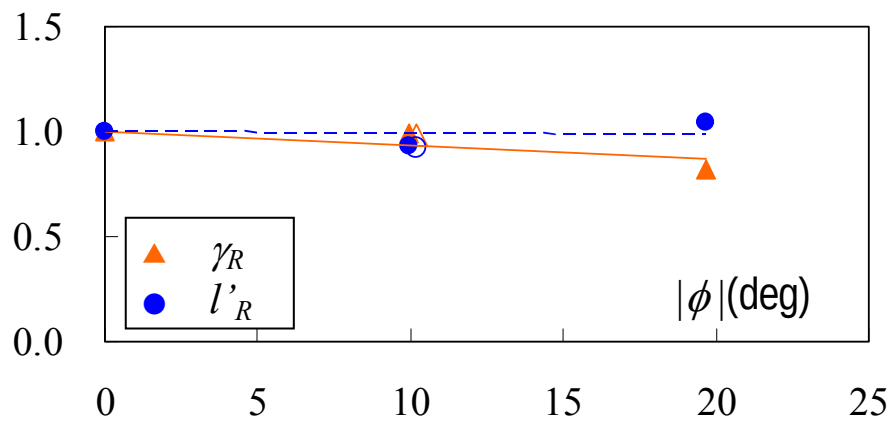


Fig.4.10 Effects of roll angle on γ_R and l'_R

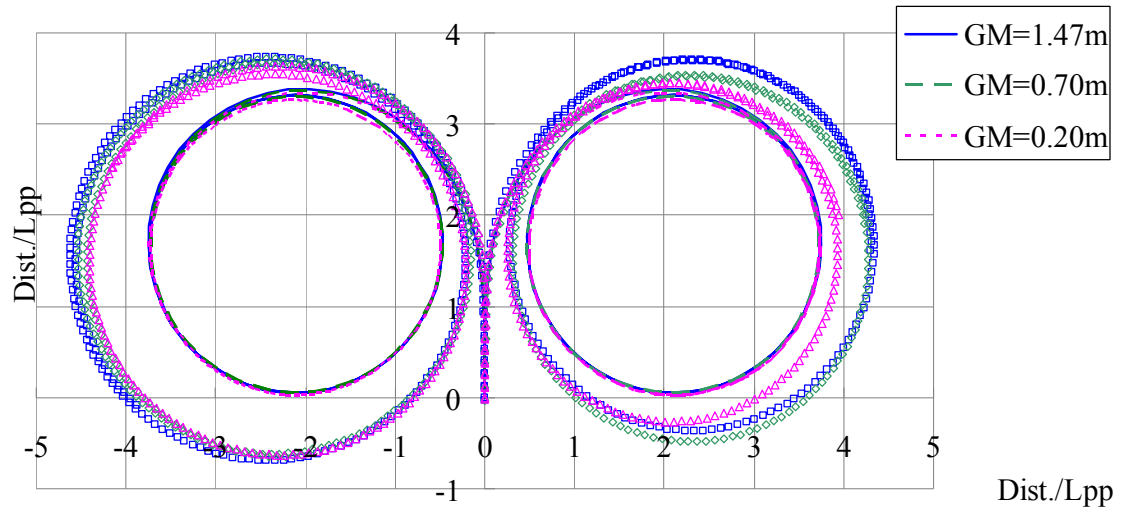


Fig.4.11(a) Comparison of $\pm 35^\circ$ rudder angle turning motion trajectory, between measured and simulated ($F_n=0.3$)

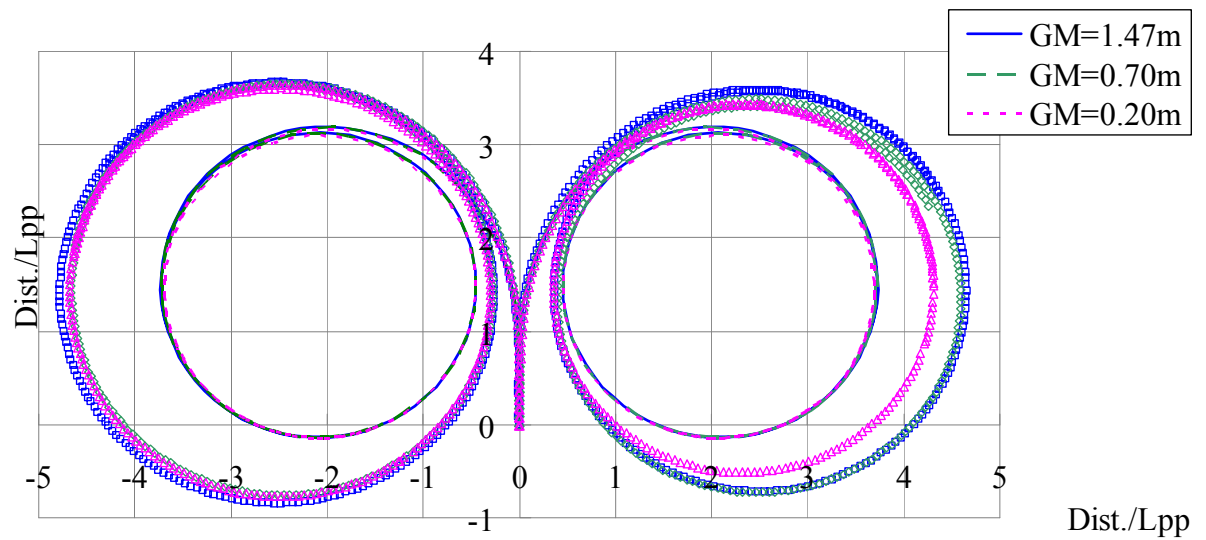


Fig.4.11(b) Comparison of $\pm 35^\circ$ rudder angle turning motion trajectory, between measured and simulated ($F_n=0.2$)

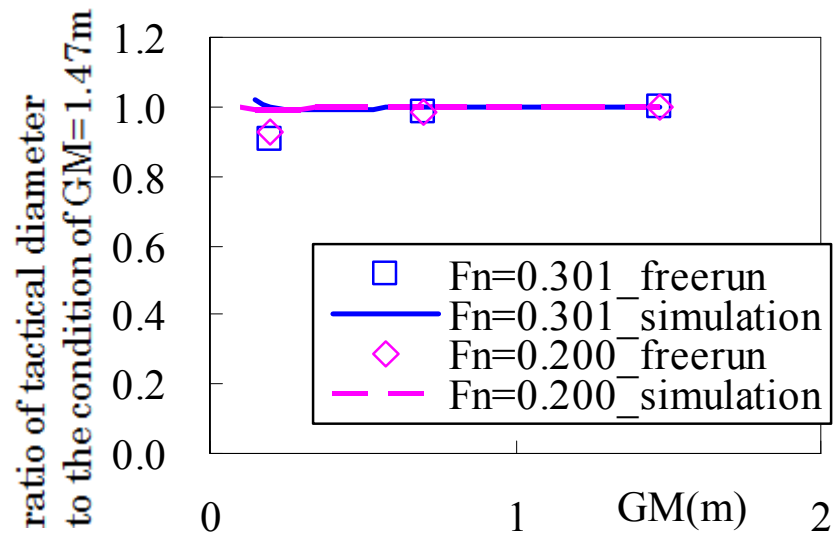


Fig.4.12 Comparison of tactical diameter at $\pm 35^\circ$ rudder angle turning motion, between measured and simulated

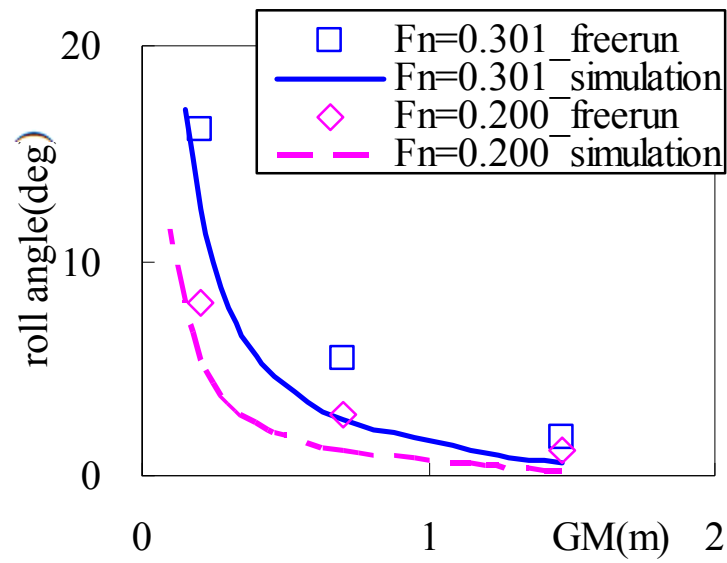


Fig.4.13 Comparison of steady roll angle at $\pm 35^\circ$ rudder angle turning motion, between measured and simulated

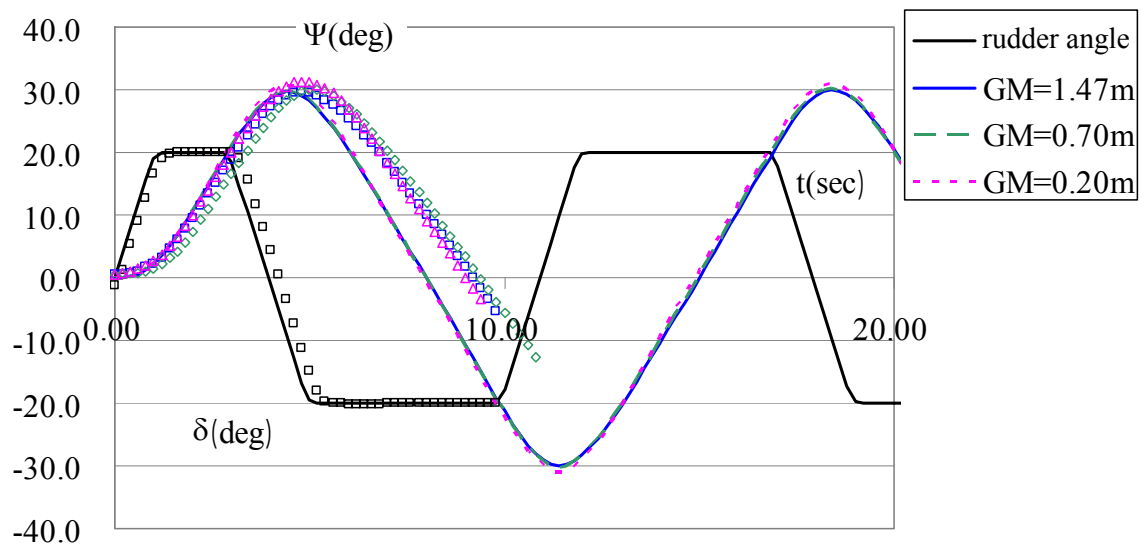


Fig.4.14(a) Comparison of 20°-20° Z tests time history, between measured and simulated
($F_n=0.3$)

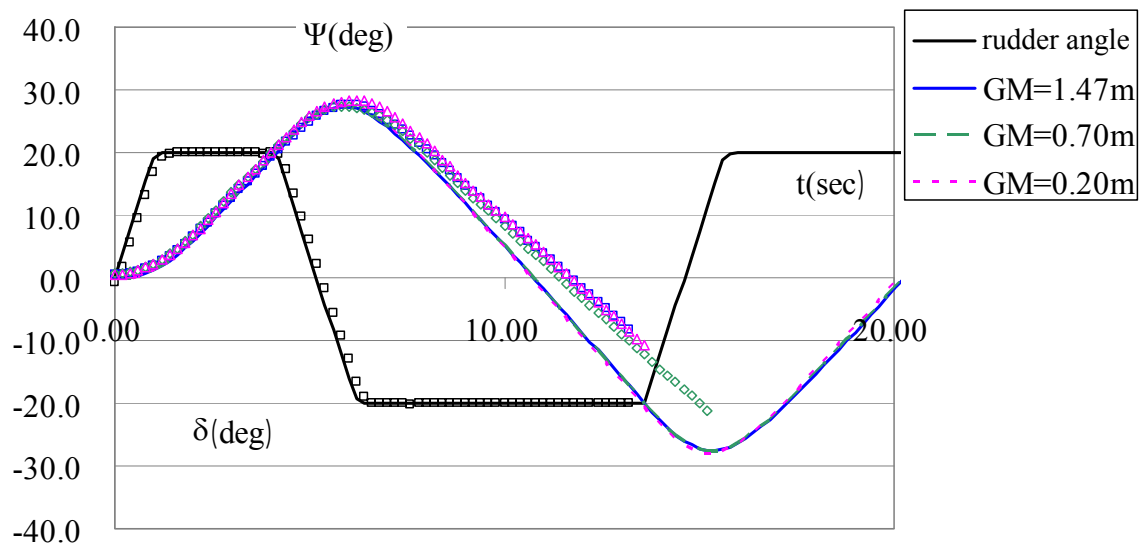


Fig.4.14(b) Comparison of 20°-20° Z tests time history, between measured and simulated
($F_n=0.2$)

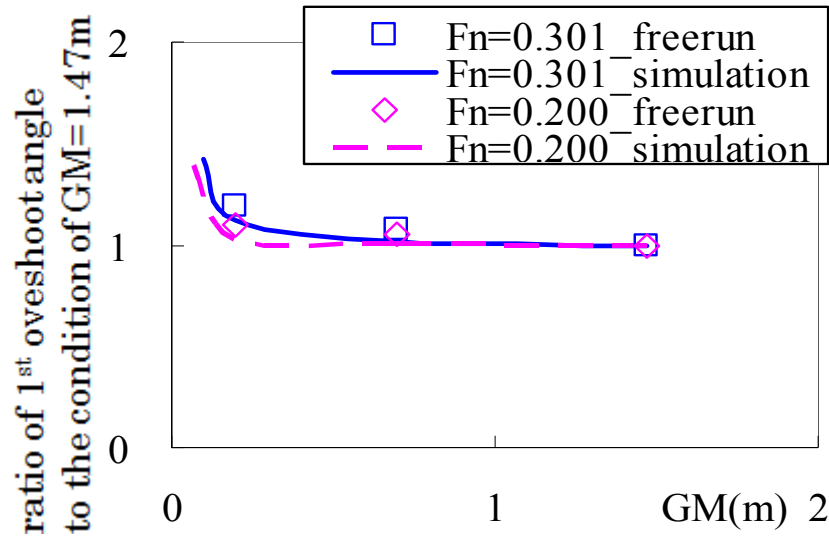


Fig.4.15 Comparison of 1st overshoot angle at 20°-20° Z tests, between measured and simulated

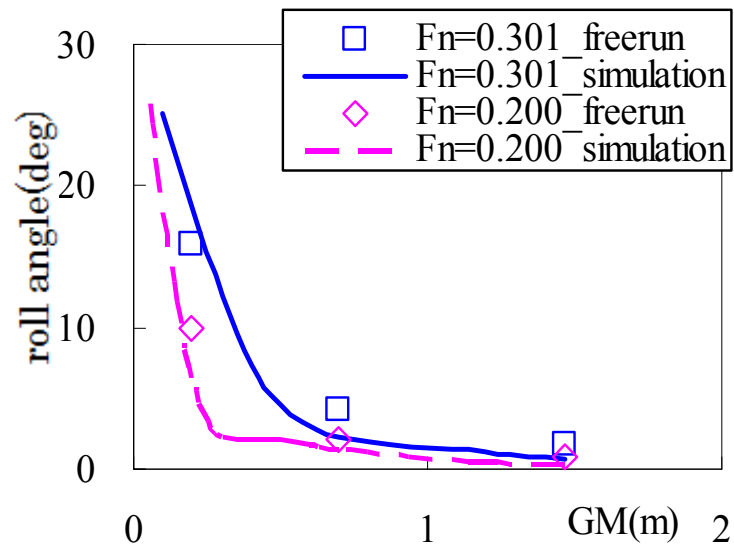


Fig.4.16 Comparison of steady roll angle at the start of 20° Z steering, between measured and simulated

第5章 CFDによる操縦流体力に与える横傾斜影響 とその船型要因の検討

前章までは船の横傾斜に伴う操縦運動、及び操縦流体力の特徴について実験的に確認してきた。これまで確認してきた3船型については、横傾斜による操縦運動の挙動に与える影響は似た傾向を示している一方で、船体に働く流体力の傾向が船型によって異なっていたり、操縦運動によって横傾斜モーメントの着力点が変化したりする等の現象も見られたりと、横傾斜時の操縦運動の影響にはまだ未解明な現象もある。このような現象は、上下方向の流体力の影響や船体に働く流体力分布、流場が横傾斜によって変化することが要因と考えられるが、実験的なアプローチでこのような流体力や流場の詳細を捉えることは難しく、分割模型や圧力、流場計測等を行えば計測できなくはないが、多大な時間と費用、手間が必要となるため、実験に代わって、横傾斜しながら操縦運動を行う船体まわりの流場を評価するツールが求められる。

船体まわりの流場を詳細に評価する手法としては、CFDを用いた流場計算が挙げられる。CFDによる船体まわり流場の推定は推進性能分野では既に広く用いられており、船型による性能差や細かな副部まわりの流場も精度よく推定できることが知られており、造船会社等では船型開発にも用いられている。船体の操縦性能推定におけるCFDの利用は、推進性能分野に比べると検討が遅れてはいるが、定常操縦運動時の計算等は、筆者もCFDを用いて舵付き船体の操縦運動時の流体力計算²²⁾を実施しており、SIMMAN等のワークショップにおいても報告され、定常計算では操縦性流体力が実験で計測された流体力とよく一致することが確認されている等、研究分野では一般的なものとなっている。一方で実用の面ではまだ十分には検討されておらず、横傾斜を含めた操縦運動時の計算等まだほとんど検討されていない。

本章では、第2、3章で扱ってきたKCSコンテナ船型、及びフェリー船型を対象に、CFDを用いた操縦運動時の船体流体力の検討を横傾斜した状態の船体に適用し、横傾斜影響による流場の変化を検討した。また2船型の船型差、バルブ有無の計算による船体形状、トリム等の姿勢による横傾斜影響の変化について検討した。本章では本論で用いられるCFDツールによる流場計算法の概要を説明、及びその計算結果と横傾斜時の流場と流体力の特性について論ずる。

5.1. 計算手法

本計算には CFD コードとして（独）海上技術安全研究所で開発されている SURF²⁴⁾を、計算格子作成は商用ソフトである Gridgen を用いて行った。船体に働く流体力に着目し、計算対象は裸殻船体のみとした船体格子を作成しており、格子簡単化のため船体からプロペラシャフトが出てくるボス部は船体に合わせて丸めて作成している。またホーン部分を含めた舵、及びプロペラやビルジキール等の副部、フェリー船型に関してはシャフトブラケットも再現していない。船体のアップライト時から横傾斜時の計算を実施するため、横傾斜角 ϕ を 0° 、 -10° 、 -20° と変化させた状態の格子をそれぞれ両舷格子として作成している。水面は鏡像を考えたダブルモデルとし、格子トポロジーは H-O Type、最小格子間隔は境界層方向で 2.0×10^{-6} 、格子点数は両舷で 160 万点とした。Fig.5.1 に格子の概略図を示す。

5.2. 計算条件・解析結果

第 3 章で計測した拘束模型試験の結果と比較することで、CFD による計算結果の妥当性を確認する。

5.2.1. 計算条件

CFD の計算条件は、レイノルズ数 Rn は第 3 章で示した拘束旋回試験の試験条件である模型スケールでの船速 1.0m/s に合わせて、KCS コンテナ船は $Rn=1.923 \times 10^6$ 、フェリー船型は $Rn=2.058 \times 10^6$ とし、乱流モデルには $k-\omega$ SST モデルを用いた。Table 5.1 に格子要目、及び計算条件を示す。

また運動条件として、斜航角 β 、及び無次元回頭角速度 r' をパラメトリックに組み合わせて計算を実施しており、その組み合わせは Fig.3.4 に示した拘束旋回試験で計測を行った試験パラメータと同じ条件とし、斜航角 β は $\pm 18^\circ$ の範囲、無次元回頭角速度 r' は ± 0.6 の範囲で変更し、斜航旋回の連成運動部分を含め、左右の旋回で対称になるよう組み合わせた。

5.2.2. 前後力・横力・回頭モーメント

Fig. 5.2 に KCS コンテナ船について、横傾斜角 ϕ 毎の CFD と拘束模型試験の裸殻流体力を比較した結果を示す。グラフは前後力、及び操縦運動に関わる横力、回頭モーメントの無次元値 X' 、 Y' 、 N' をそれぞれ縦軸に、無次元回頭角速度 r' を横軸にとっており、色付きのプロットが模型試験、中抜きのプロットが CFD の結果を示す。またそれぞれのプロットは同じ斜航角 β の条件のものを近似曲線で結んでおり、 Y' 、 N' については原点付近を通るプロット群が $\beta=0$ の結果、縦軸上 ($r'=0$) で Y' 、 N' ともに正方向の力が発生しているのが、 β が正の運動となる。

まずそれぞれのグラフの $\phi=0^\circ$ の結果を見ると、CFD で計算された流体力は実験で計測されたものより小さく推定される傾向となっていることがわかる。前後力 X' については値が小さいため差が大きく見えるが、特に横軸外側の無次元回頭角速度 r' が大きい運動の範囲で差が大きく出ていることがわかる。横力 Y' 、回頭モーメント N' についても、 $\beta=0$ の単純旋回、または縦軸上に乗っている $r'=0$ の単純斜航の結果は比較的良好に合っているが、 β 、 r' の複合条件では CFD で計算された流体力は実験値より小さくなる傾向が確認できる。これは水槽試験では運動の大きい範囲ほど造波の影響が大きくなり、また運動中のトリム、シンケージ等の姿勢変化が発生するが、本研究の CFD では自由表面を考慮していないため造波による流体力や姿勢変化が発生せず、それがこの差の一因となっていると考えられる。この傾向は $\phi=-10^\circ$ 、 -20° でも同様の傾向が確認できるが、負方向に横傾斜角 ϕ が大きくなるとともに流体力が変化している様子は CFD でも捉えられていることが確認できる。

次に CFD で得られた横傾斜角 ϕ による流体力の変化を操縦性微係数の変化で確認する。横傾斜することで船体の没水形状は左右非対称となり、直進している船体に働く流体力も左右非対称となることから、はじめに直進状態の試験、計算から得られた横力 Y'_0 、回頭モーメント N'_0 の ϕ に対する変化にあたる Y'_ϕ 、 N'_ϕ について検討する。 Y'_ϕ 、 N'_ϕ は KCS コンテナ船、及びフェリー船型の両船型について、Fig.5.3、5.4 に直進計算で求めた船体横力、及び回頭モーメントの横傾斜に対する変化を、Table 5.2、5.3 にその数値の表を、実験結果と比較して示す。KCS コンテナ船について見ると、負（左方向）の横傾斜が付くと、横力 Y' 、回頭モーメント N' はともに大きくなる傾向となることがわかる。フェリー船型については、負（左方向）の横傾斜が付くとともに、横力は小さくなり、回頭モーメントは大きくなる傾向となっており、これは第 3 章でも確認したとおりである。CFD で求めた横力、回頭モーメントは、 Y' の傾きは小さいが、

傾向的には実験結果と一致していることから、CFD でも船型による横傾斜影響の差を捉えることが可能と考えられる。

その他の操縦性微係数についても、横傾斜角毎に各運動状態の計算結果から模型試験の際と同様に最小二乗法を用いて一括で求めている。Fig.5.5～5.9 に、KCS コンテナ船について、CFD により求めた操縦性微係数の横傾斜に対する変化量を実験結果と比較して示す。なお、ここでは各微係数のうち、4 自由度モデル内で横傾斜による変化を考慮する係数のみを示している。結果を見ると、操縦運動において重要である Y' 、 N' は定量的には一致していなかったが、定性的には横傾斜角に対する変化は CFD によっても実験と近い傾向が捉えられていること、特に重要な一次の微係数でもその正負の傾向が捉えられているが確認できた。

5.2.3. 横傾斜モーメント

横傾斜モーメントについても、操縦性微係数を横傾斜角毎に各運動状態の計算結果から最小二乗法を用いて一括で求めた結果を Fig. 5.10 に示す。グラフを見ると、 K' の操縦性微係数の横傾斜角に対する変化については、正負の傾向は一致しているが、 Y' 、 N' に比べ、傾きの大きさまでは捉えられていない。この点については、後節の流場現象の解明と合わせ、明確にしていく必要がある。

横傾斜モーメントの値については定量的には実験と一致していないが、横力に起因して発生しているモーメントである点から相対的な関係性はある程度捉えられていると考え、第 3 章でも検討した横傾斜モーメント K'_H と横力 Y'_H との関係についても CFD 結果から検討する。CFD で計算された横傾斜角 0 の状態での KCS コンテナ船の横力と横傾斜モーメントの関係を Fig.5.11 に、Fig.3.13 で示した実験結果と合わせて示す。グラフは横軸が横力 Y'_H 、縦軸が横傾斜モーメント K'_H として単純斜航状態、単純旋回状態、及び斜航付き旋回状態のそれぞれがプロットされ、 Y'_H に対する K'_H の傾きが喫水 d で無次元化したモーメントレバー z'_H である。実験結果ではこの傾きが、単純斜航状態では傾きはマイナスで z'_H は水面下 $0.65d$ 程度、単純旋回状態では傾きはプラスとなり z'_H は水面上に、斜航付き旋回状態では運動に応じて上記の範囲で変化していたように、操縦運動の状態によって異なった結果となることが確認されていた。CFD による結果を見ると、傾斜具合に差はあるものの、これも実験結果と同じように操縦運動状態によって傾きが異なっていることがわかる。次に Fig.5.12 に CFD で得られた流体力

を成分分離し、横傾斜モーメントの横力、上下力成分のうち、横力成分のみを取り出した値 K'_{Hy} と横力 Y_H との関係を示す。この結果を見ると、単純斜航状態と斜航付き旋回状態の傾きは近いものとなり、 z'_H は水面下 $0.5d$ 程度となることが確認できた。それぞれのプロットのばらつきもほとんどなくなっている。単純旋回状態は元々の値が小さいため、定量的には一致しないが、傾きはマイナスとなり z'_H が水面上にあるというような結果にはならないことがわかる。この結果から、横傾斜モーメントの中には無視できない程度の上下力の影響が働いていることが確認でき、CFD の結果を用いて横傾斜モーメントに対する横力のモーメントレバーの大きさは喫水の半分程度と捉えることができたといえる。ただし、船体の操縦運動を推定する際には、航走中の船体に働く横傾斜モーメントはこの上下力成分を含んだものとして検討する必要がある、実験においてもこれらの分離が難しいことから、第 3 章で述べたとおり、モーメントレバー z'_H を一定として、横傾斜モーメントを横力の関数とするような簡便な取り扱いは困難であり、横傾斜モーメント K'_H についても個別に運動変数で表記する数学モデルで表す必要があることについては変わらないといえる。

5.3. 横傾斜による流場現象の把握、及び船型要因の検討

前節で CFD によっても、横傾斜による船体に働く流体力の変化への影響を確認したが、ここでは CFD の結果を用いて、より詳細な横傾斜影響、流場現象の変化を確認する。

5.3.1. 横傾斜による横力、モーメント発生 of 流場現象

Eda⁵⁾は横傾斜による船体の各 Section での重心位置の傾斜していない状態の船体中心線からの変化の様子を翼のキャンバーラインとして表現しており、そのキャンバー付き翼としての効果が横傾斜した際の横力、回頭モーメントの変化の要因となること、船首から船尾までの左右非対称性によりその傾向がより強く表れることを示している。同様に Fig.5.13 に今回 CFD で用いた船型データを基に、KCS コンテナ船について横傾斜角毎の面積重心位置、及び仮想翼厚を示したグラフを、Fig.5.14 にフェリー船型についてのもを示す。翼厚は各 Section の断面積を、面積重心を通る垂線で左右に分割し、 $\phi=0^\circ$ での横断面積で無次元化した値とした。これらの図から本研究で検討した船型についても、横傾斜とともに各 Section の面積重心はキャンバーラインのように変化し、

左右非対称形状となっていることが確認できる。ただし、図からもわかるとおり、両船型ともに船首尾端で極端なキャンバーが付いているが、これは船首バルブや船尾端部等の翼スパンが極小で無視できる Section が傾斜によって左右に移動することで重心位置の変化が大きく見えている部分であり、船体全体の流体力に占める割合は小さいと考えられることから、単純にキャンバーライン形状と揚力の関係から横傾斜による流体力変化を検証することは難しい。

そこでより詳細に横傾斜による流体力の変化を確認する。船体に働く横傾斜モーメントと各流体力成分の関係を確認するため、ここでは横傾斜角 ϕ を 0° 、 -10° 、 -20° の条件で直進状態の計算をした船体について、船体流体力分布の解析と船体表面圧力、流線の可視化を行うことで、横傾斜モーメントの発生原理を確認する。KCS コンテナ船、及びフェリー船型について、船首から船尾までを特定数の Section に区切り、各 Section の横力、上下力、横傾斜モーメント、及び横力成分と上下力成分に分離したロールモーメントの断面積分値の分布を横傾斜角で比較したものを、Fig.5.15、5.16 に示す。グラフは横軸が船長の無次元値を表し、-0.5 が F.P.、0.5 が A.P.位置に相当する。縦軸はそれぞれの流体力、横傾斜モーメントであり、正負の値はそれぞれ座標系と一致しているので、横力の正の値は右舷方向の力、横傾斜モーメントの正の値は船体を右舷方向に傾ける力を表す。流体力分布のグラフから、KCS コンテナ船、フェリー船型の横力発生の傾向は似たものとなっており、横傾斜がつくとともに船首後方で正方向の力が発生し、その後ろから船体中央付近までに負方向の力が働く。船体中央から後方では再び正方向の力が発生し、船尾端では負方向の力となっている。両船型では全体の傾向としては一致しているが、その山谷の大きさが異なっており、これが上述の船毎のキャンバーラインの左右非対称性の違いによるところとして、Fig.5.3、5.4 で示した横傾斜角に対する船体に働く横力の変化の傾向の違いとなっていると考えられる。

船体に働く横力と上下力とを比較すると、上下力の値が 2、3 倍程度大きいことがわかる。上下力は静止状態では船体の排水量と釣り合っており、また $\phi=0^\circ$ の upright 状態では左右舷の力が打ち消しあうため、ロールモーメントは発生しない。しかし、船体が横傾斜角を持った状態となると、左右の上下力に差が現れるため、上下力によるロールモーメントが発生する。このグラフからも横傾斜角によるロールモーメントへの影響は横力に比べ上下力で大きく変化する様子が確認でき、ロールモーメントについては上下力の影響が小さくはないことがわかる。

次にそれぞれの状態の船体表面圧力分布図について、KCS コンテナ船の船首付近の分布図を Fig.5.17 に、船尾付近の分布図を Fig.5.18 に、フェリー船型の船首付近の分布図を Fig.5.19 に、船尾付近の分布図を Fig.5.20 にそれぞれ示す。Fig.5.15、16 で確認した横力の変化の傾向については船体表面圧力分布からも確認でき、船首後方では船体に流入する流場が肩部分の拡がりによって流速が低下するため、特に幅広の船側方向に向けて正圧が発生する。これが負方向、左舷側に横傾斜することで、沈む左舷側ではより大きな面積に正圧が発生する一方で、右舷側では肩張りの部分が水面上に出て、流速低下が起こりにくくなるため、左舷から右舷に押す正方向の横力が発生すると考えられる。一方で肩を越えたあたりからは船側部では回り込みにより流場が加速されることで負圧が発生し、これも同様に横傾斜によって船底方向に流れる右舷側は流れが緩やかになり、左右でその発生面積にも差が現れる結果、左舷方向に引っ張る負の横力が発生している。船体後半部では前方の流れから続き船体全周に渡っての負圧となっており、また船体が細くなるとともに、特に船底付近で流れが剥離することで強い負圧が発生している。船底付近の負圧は左舷方向に横傾斜することで右舷方向へ引っ張る力となり、正方向の横力となる。船尾端付近は CFD では格子作成上の都合から船尾端を滑らかに水面まで繋げるよう作成しているが、実際の船、模型船ではトランサム端でカットされ、存在しない部分も含まれるため、参考程度とする。このように CFD の結果から、横傾斜に伴う流体力の発生時の流場現象と圧力分布の変化が確認できた。上下力の変化については、船首から船底方向への流れによって船底の負圧が発生しているが、横傾斜による変化はあまり大きくなく、ロールによる上下力差は小さい。

5.3.2. KCS、フェリーの 2 船型間の差異

次に 2 船型間の横傾斜に伴う流体力変化の差異について、検討を行う。2 船型の流体力、モーメントには絶対値としての差はあるが、とりわけ明確な差は Fig.5.3、5.4 で示した傾斜しながら直進運動を行った際の横力の変化の正負に見られる。そこで船首、船尾側で発生する横力については前述のとおりのであるが、上述の Fig.5.15～20 のグラフ、及び Fig.5.21～26 に示す船体まわり流場の等高線図を合わせて、その全体のバランスについて確認する。KCS コンテナ船では横傾斜によって船体中央付近から船尾側で右舷方向へ働く横力は、midship より前方から表れていることがわかる。正方向に

働く流体力の割合が大きいことから、全体の横力を積分すると KCS コンテナ船は負方向の横傾斜とともに、正方向の横力が発生する船となっており、また横傾斜とともに発生する船首尾端の横力がそれぞれ回頭モーメントを大きくする方向に働くため、これは Fig.5.3 で見られる横力、回頭モーメントの傾向と一致している。一方でフェリー船型について見ると、船型的に肩張りがなだらかなため、KCS に比べ船首の正圧部は小さく、また肩は-0.1 付近まで後ろにずれるため、左舷方向の横力のピークも-0.1 付近まで後方となる。その結果、船尾側で発生する横力については midship 以降で右舷方向の力となり、その範囲も小さい。また KCS に比べ船底が平面ではないため、左舷側船底で発生している負圧の横傾斜による力の向きが KCS コンテナ船と異なっており、これが 2 船型における横傾斜時の定常横力の符号が異なる原因と考えられる。またフェリー船型については、船底に元々船首上げ方向のイニシャルトリムが付いているため、船首船底の負圧の発達が小さい傾向等が見られるが、横傾斜による横力の変化に与える影響はあまり大きくなく、また上下力の差に与える影響も小さい。

以上の結果から、横傾斜することで船体に働く流体力については船首付近で働く正圧、肩部で働く負圧、船体中央付近から後方で船底付近に働く負圧、船尾付近で船底、船側に働く負圧といった圧力分布の傾向は 2 船型ともに共通であるが、肩張りの位置や船側の平行部、船底の平面部の多い船と丸みを持った船等の差によって、船体中央付近での横力等には差が現れることを確認した。また船首の正圧、船尾の負圧分布が横傾斜によって没水側で強く働くことで、船体全体としては横傾斜と逆方向の回頭モーメントを強める方向となる傾向についても共通で見られるが、この点も漁船船型等の船尾の水面付近で形状が横傾斜によって大きく変化する船では傾向が変わってくる可能性が考えられる。

5.3.3. 船首バルブ影響

芳村²⁵⁾が文献の中で述べているように、横傾斜による流体力、回頭モーメントの変化は船首バルブの有無を含めた船首形状の影響に大きく左右されることが過去にも指摘されている。そこで本研究では CFD により船首バルブによる横傾斜影響についても検討した。今回はバルブの有無による変化を確認するが、本研究で扱ってきた船型はどれも船首バルブがついた船型であるため、KCS の船体データから船首バルブをなくした格子を作成し、横傾斜させた場合の計算結果を示す。計算条件は 5.2 で示した

CFD と同条件としているが、バルブ有無による排水量の変化は考慮せず、喫水は同じとして計算している。Fig.5.27 にバルブ無し格子の船首の拡大図を、Fig. 5.28 にバルブ有無格子の比較図を示すが、船首形状変更は Ord.8 1/2 付近の断面を幅方向に縮小しながら船首に滑らかに繋げるような手法で行った。

Table 5.4 に各横傾斜付き格子を用いた直進運動時の横力と回頭モーメントについて、船首バルブ有無の計算結果の比較を示す。また Fig.5.29 には流体力のプロットを示す。Fig.5.29 から船首バルブの有無によって、横傾斜に対する横力、回頭モーメントの変化はどちらもほとんど表れていないことがわかる。これは Fig.5.16 でも確認できたように、船首バルブは常に没水しており、横傾斜角がついてもその水中形状に大きな変化がないため、バルブに働く流体力も全周で見ると大きな左右でのバランスの変化は表れていないこと、またバルブ後方の流場の変化についても、バルブ形状よりは船体の肩張りなどの形状の影響が大きいと言え、横傾斜による流体力変化に与える船首バルブの影響は大きくないと考えられる。

5.3.4. トリム影響

これまで横傾斜時の船体まわりの流場解析を行ってきた、船体の水面下の形状が船体表面の圧力分布等に大きく影響していることは確認している。また本研究で扱っているフェリー船型については、上述したが船底に元々船首上げ方向のイニシャルトリムが付いているなど、船体姿勢等が横傾斜影響の船型差に寄与している可能性が考えられる。そこで本節ではこれまで扱ってきた KCS コンテナ船型、及びフェリー船型について、横傾斜角 ϕ を -10° 付けた格子にさらに強制的なトリム変化を与えた格子を作成し、流体力の変化を確認する。計算条件は前節同様に 5.2 で示した CFD と同条件とし、トリム変化は $\pm 1^\circ$ （+が船尾沈、-が船首沈側のトリム）としたが、排水量の変化は考慮せず、船体中央の喫水は同じとして計算している。Fig.5.30 にトリム付き格子の比較図を示す。

Table 5.5、5.6 に KCS コンテナ船型、及びフェリー船型それぞれの -10° の横傾斜と $\pm 1^\circ$ トリムが付いた格子を用いた直進運動時の横力と回頭モーメントの計算結果を示す。また Fig.5.31、5.32 には横軸にトリム角度をとった流体力のプロットを示す。横傾斜が付いていない場合、没水形状は左右対称となるため、直進時の Y'_0 、 N'_0 は 0 となるので、プロットされた値が横傾斜なしの各状態からの流体力の変化量となる。また両船

型について、船首から船尾までの各 Section の横力、上下力、横傾斜モーメント、及び横力成分と上下力成分に分離したロールモーメントの積分値の分布をトリム角で比較したものを、Fig.5.33、5.34 に示す。

KCS コンテナ船型について見ると、トリムがつくことによって Y'_0 は正負が変化していることが確認できる。一方で N'_0 は傾斜が大きくなるとともに値が大きくなる傾向はこれまでと変わっていないが、トリムの違いによってその変化量が変わっており、船首が沈む-1°トリムでより大きく変化し、針路不安定傾向が増していることがわかる。横傾斜により発生する横力が、船首トリムが付くことによってビルジ縦渦が弱まるため船尾圧力回復が早まり、回頭モーメントを強めていると考えられるが、これは Fig.5.33 の横力分布の傾向とも一致している。一方でフェリー船型について見ると、トリムに対する Y'_0 の変化は KCS に比べて小さく、また常にマイナス方向の横力となっているところはトリムなしの結果と変わっていないことが確認できる。 N'_0 についてはさらに変化量が小さく、トリムに対してほぼ横ばいとなっている。Fig.5.34 の流体力分布を見ると、横力は KCS と同様に船体後半部のトリムによる差は表れているが、船尾トリム時に水面付近で発生する渦が急激に強くなる等、ここにも船型による違いが確認できる。Fig.5.35～5.38 は、横傾斜-10°、トリム付き船体の船体まわり流場の圧力、及び X Vorticity の分布である。トリム 0°の図については Fig.5.22、5.25 に示したとおりである。船体後半部の圧力分布を見ると、2 船型ともに船底を中心に船体全周に渡って負圧となっているが、船首沈側のマイナストリムが付くことで船底側の渦が小さく、相対的に船側側の渦が強くなるとともに、トリムにより横傾斜と逆側の船側部が水面上に出るため、トリムによる横力に変化が現れていることが確認できる。また KCS コンテナ船型とフェリー船型では前述のとおり、ガース方向の船体形状の立ち上がりの差が船型差として現れていると考えられる。本計算の結果ではトリム変化による船側部やオーバーハングの浮き沈みが大きく流体力変化に影響を与えていると考えられる。漁船船型等の水面付近で形状が大きく変化する船等では横力、回頭モーメントの傾向が変化する可能性も考えられ、それについては追加検討が必要と考えられる。

5.4. まとめ

第5章では、KCS コンテナ船、2軸1舵フェリーを対象とし、横傾斜を付けた定常操縦運動のCFD計算を実施し、この結果から横傾斜によって発生する流場現象、操縦性能、流体力に与える影響について検討を行った。以下に本章をまとめる。

- 1) CFDによって横傾斜付きの操縦運動計算を実施し、 Y' 、 N' 等の流体力は定性的には捉えられており、流体力微係数の横傾斜角に対する変化はCFDによっても実験と近い傾向が得られ、横傾斜影響を検討するにあたりCFDをツールとして用いることの有効性を示した。
- 2) 横傾斜モーメントについては実験結果を定量的に捉えることはできていないが、横力、上下力成分の分離により横傾斜モーメントに寄与する上下力が無視できないことを明らかにし、本検討結果から横傾斜モーメントを数学モデルで表す場合には個別に運動変数で表記する必要があることを改めて確認した。
- 3) CFDの結果から、船体長手方向の船体形状変化に伴った圧力分布が、横傾斜による左右バランスが変化することに起因している等、流体力発生時の流場現象を明らかにし、また肩張りの位置や船底平面部の違いにより2船型における横傾斜時の定常横力の符号が異なる原因となること等、横傾斜影響の船型差についてもその現象の違いを示した。また、船首形状について当初は、船首バルブの影響が強いと推測されたが、この影響は大きくないことを確認した。
- 4) 姿勢影響については、トリム変化による縦渦の強弱や圧力回復等による圧力分布の変化と、没水形状の変化が操縦流体力に影響を与えることを確認した。
- 5) CFDを用いた横傾斜付き計算により、実験的手法では明確にされていなかった横傾斜時に船体まわりの流場現象の船型や船体形状、姿勢による変化を明らかにし、また横傾斜モーメントの着力点の上下力を含めた考え方等、前章までで検討した4自由度数学モデルの妥当性を裏付けすることができた。

Table 5.1 Principal of computational grid and computed conditions

Grid topology	H-O
Minimum grid space	2.0×10^{-6}
The number of Grid	1,600,000 (Both sides)
Reynolds number	KCS : 1.923×10^6 Ferry : 2.058×10^6
Turbulent model	k- ω SST

Table 5.2 Hydrodynamic force and moment of EXP and CFD in straight motion with roll angle (KCS Container Ship)

EXP	design	ϕ [deg.]	10.16	0.00	-10.24	-19.94	
		Y'_0	-0.00144	-0.00054	-0.00065	0.00164	
		N'_0	-0.00217	-0.00071	0.00048	0.00114	
CFD	design	ϕ [deg.]	0.00	-5.00	-10.00	-15.00	-20.00
		Y'_0	0.00000	0.00018	0.00018	0.00030	0.00041
		N'_0	0.00000	0.00063	0.00129	0.00182	0.00228

Table 5.3 Hydrodynamic force and moment of EXP and CFD in straight motion with roll angle (Passenger Ferry)

EXP	design	ϕ [deg.]	10.30	0.00	-9.88	-19.80		
		Y'_0	0.00392	0.00099	-0.00074	0.00143		
		N'_0	-0.00137	0.00046	0.00236	0.00309		
CFD	design	ϕ [deg.]		0.00	-5.00	-10.00	-15.00	-20
		$Y'0$		0.00000	-0.00058	-0.00076	-0.00087	-0.00042
		$N'0$		0.00000	0.00100	0.00175	0.00230	0.00252

Table 5.4 Hydrodynamic force and moment of CFD in straight motion with roll angle (KCS Container Ship without bulbous bow)

CFD	Design	ϕ [deg.]	0.00	-5.00	-10.00	-15.00	-20.00
		Y'_0	0.00000	0.00018	0.00018	0.00030	0.00041
		N'_0	0.00000	0.00063	0.00129	0.00182	0.00228
	w/o bulbous bow	ϕ [deg.]	0.00	-5.00	-10.00	-15.00	
		Y'_0	0.00000	0.00023	0.00023	0.00039	
		N'_0	0.00000	0.00059	0.00123	0.00172	

Table 5.5 Hydrodynamic force and moment of CFD in straight motion with trim and -10deg. roll angle (KCS Container Ship)

CFD	ϕ -10deg	trim [deg.]	-1.00	0.00	1.00
		Y'_0	-0.00096	0.00018	0.00075
		N'_0	0.00184	0.00129	0.00089

Table 5.6 Hydrodynamic force and moment of CFD in straight motion with trim and -10deg. roll angle (Passenger Ferry)

CFD	ϕ -10deg	trim [deg.]	-1.00	0.00	1.00
		Y'_0	-0.00101	-0.00076	-0.00169
		N'_0	0.00192	0.00175	0.00193

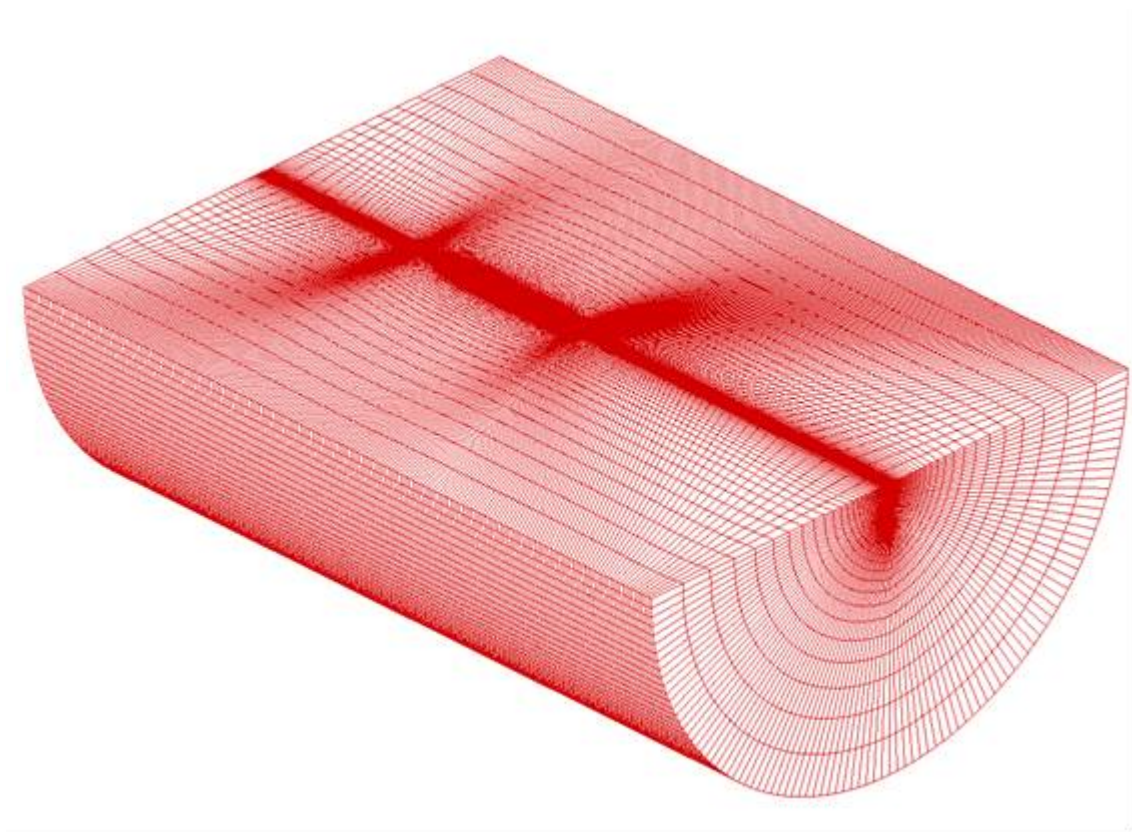
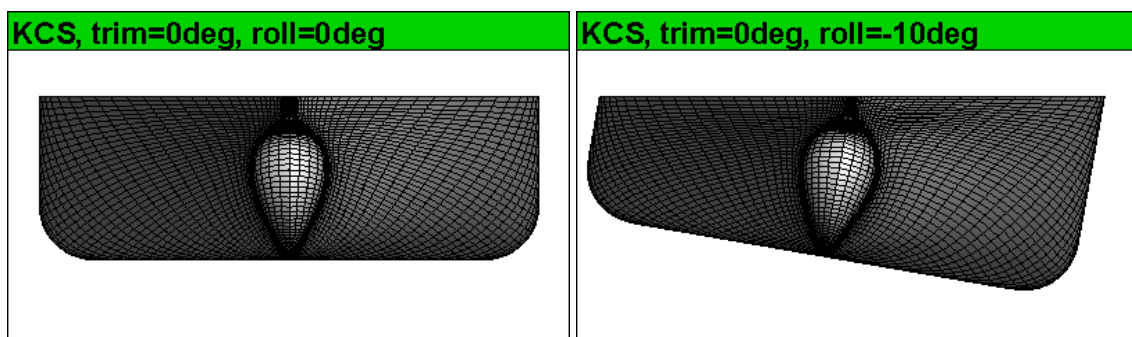


Fig.5.1 Computational grid

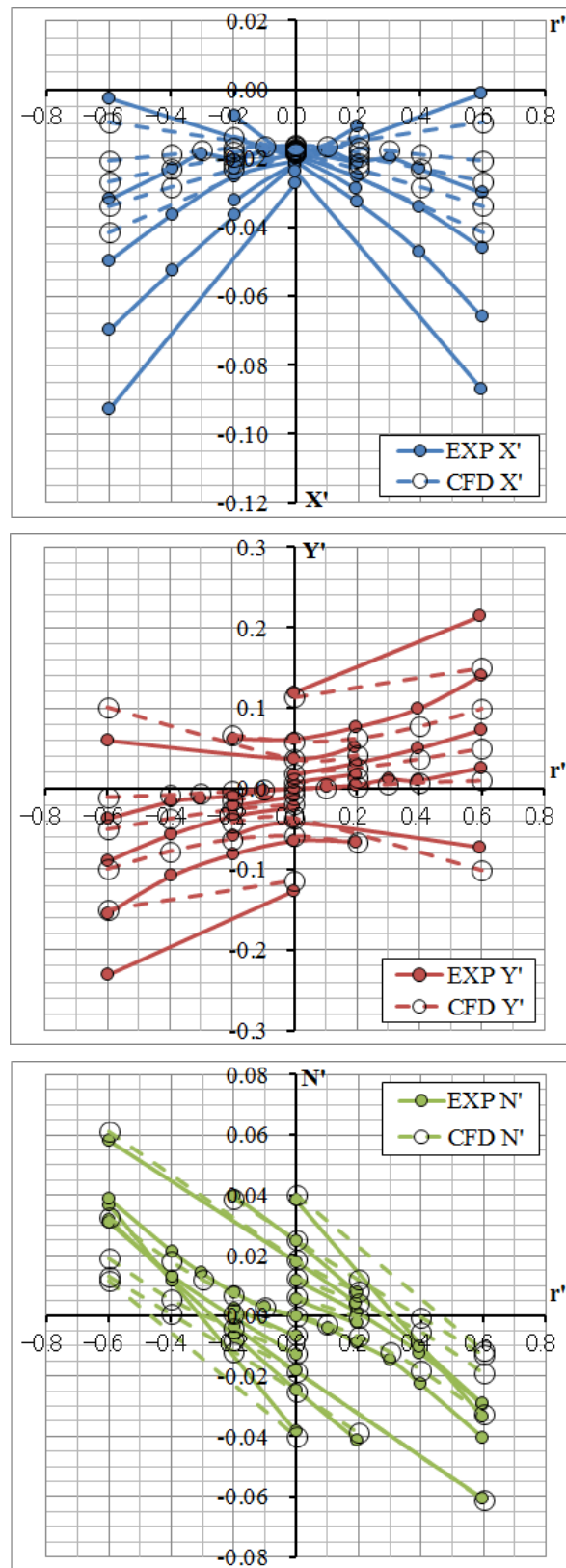


Fig.5.2(a) Comparison of hydrodynamic forces and angle moment, between measured and calculated (KCS Container Ship, $\phi=0\text{deg.}$)

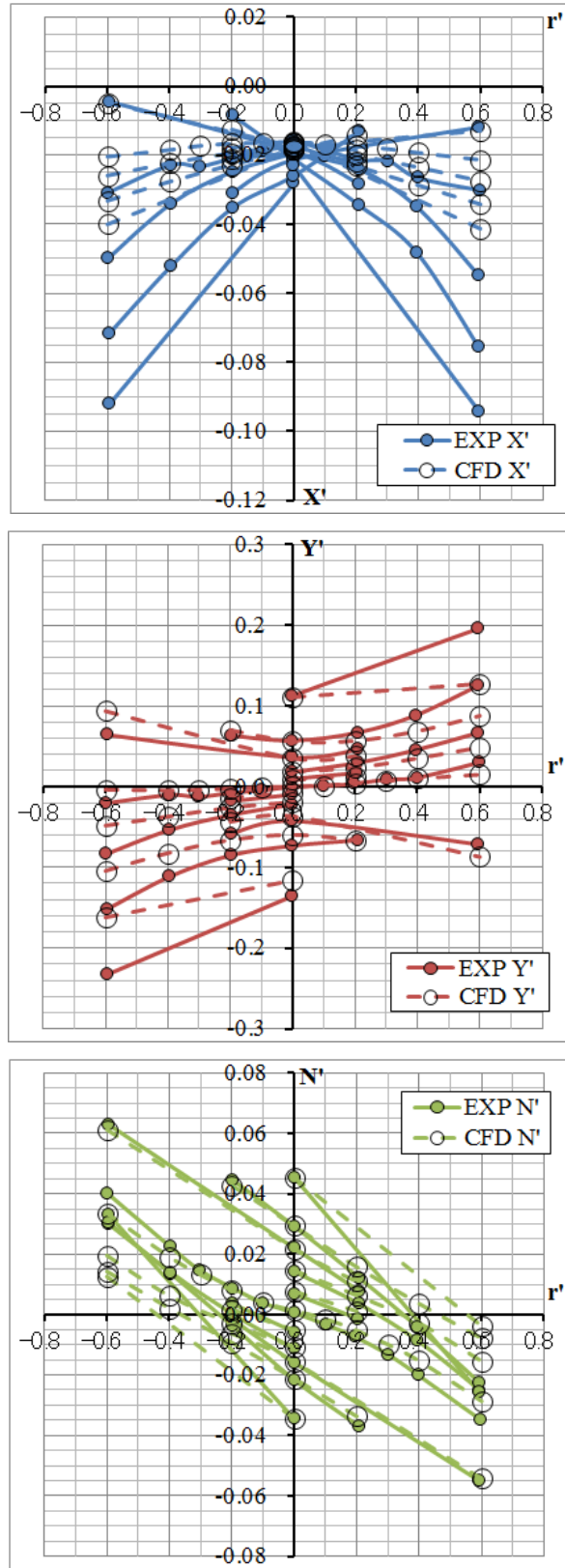


Fig.5.2(b) Comparison of hydrodynamic forces and angler moment, between measured and calculated (KCS Container Ship, $\phi=-10\text{deg.}$)

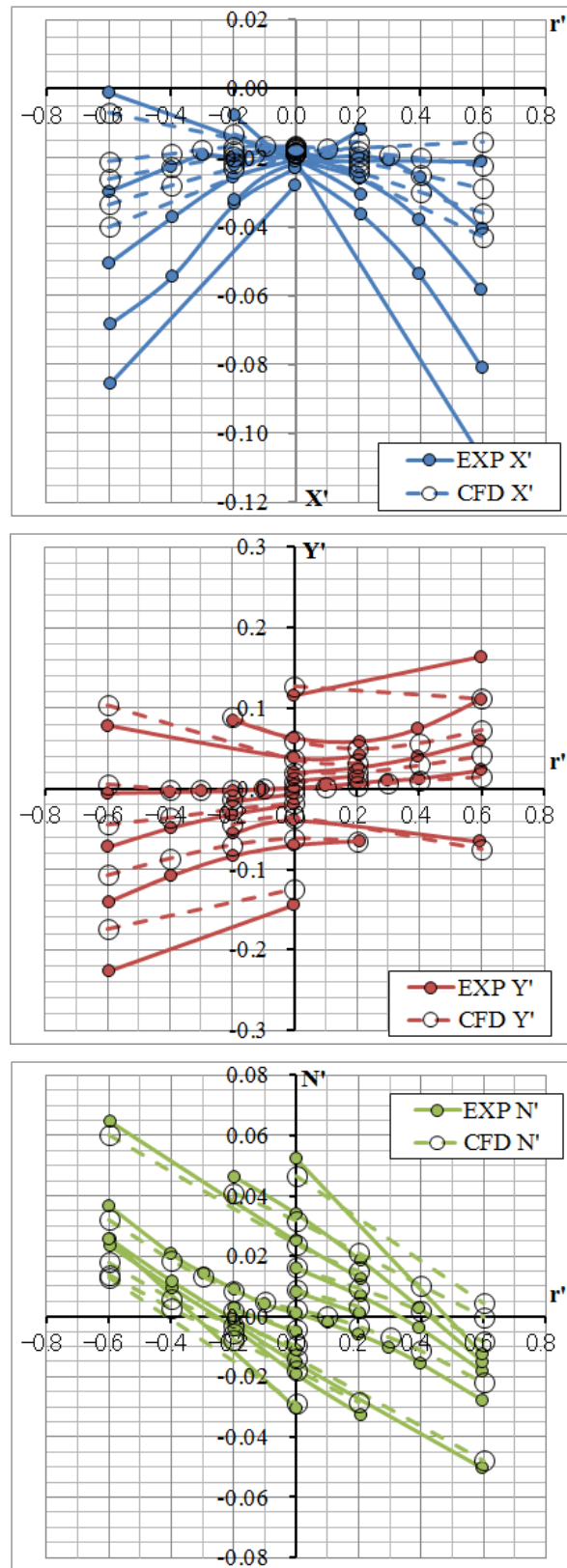


Fig.5.2(c) Comparison of hydrodynamic forces and angler moment, between measured and calculated (KCS Container Ship, $\phi=-20\text{deg.}$)

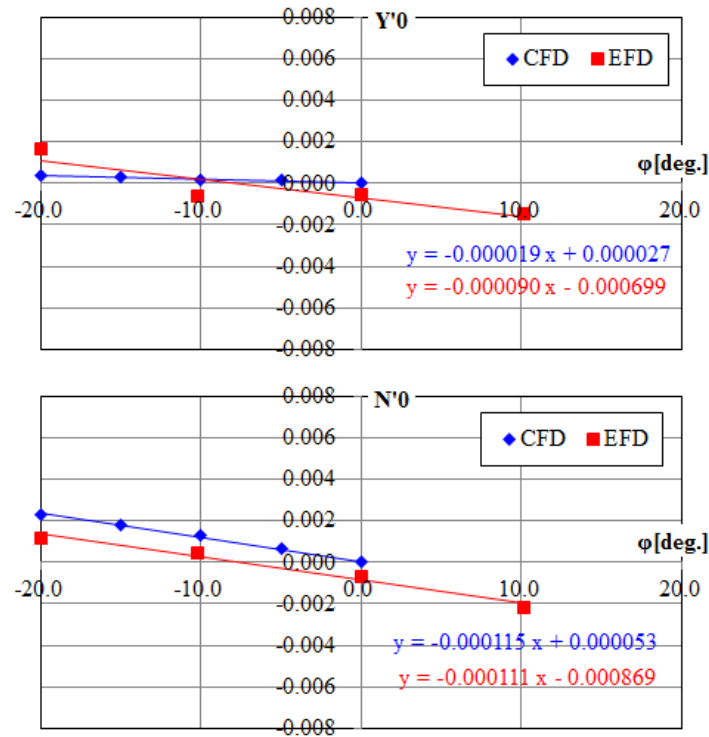


Fig.5.3 Comparison of lateral force and angular moment, between EXP and CFD (KCS Container Ship)

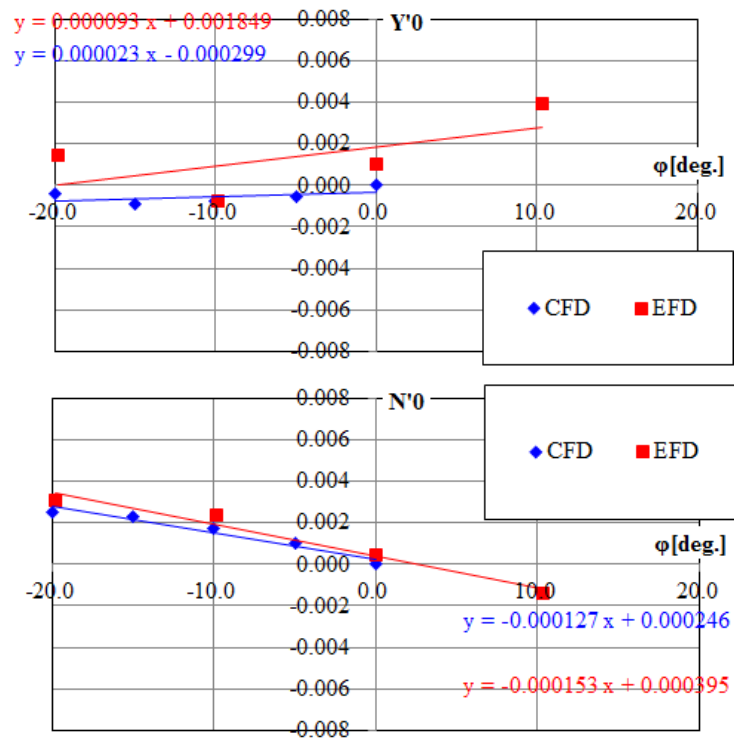


Fig.5.4 Comparison of lateral force and angular moment, between EXP and CFD (Passenger Ferry)

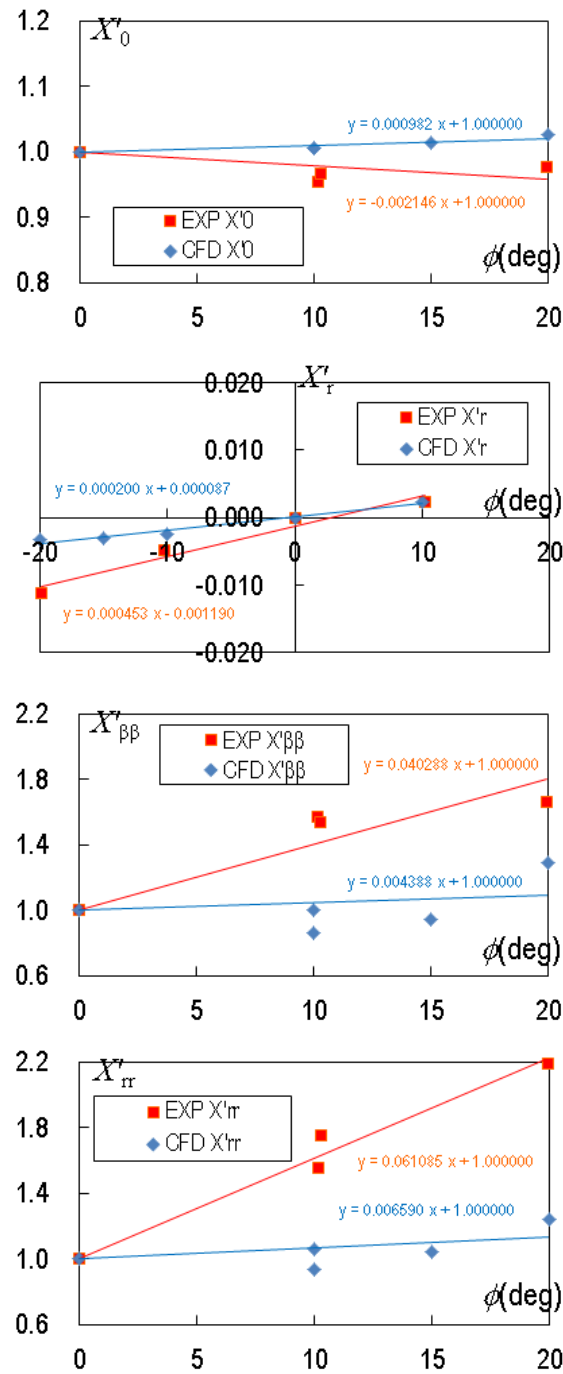


Fig.5.5 Comparison of effects of roll angle on X'_0 and X'_r , $X'_{\beta\beta}$, X'_{rr} (KCS Container Ship)

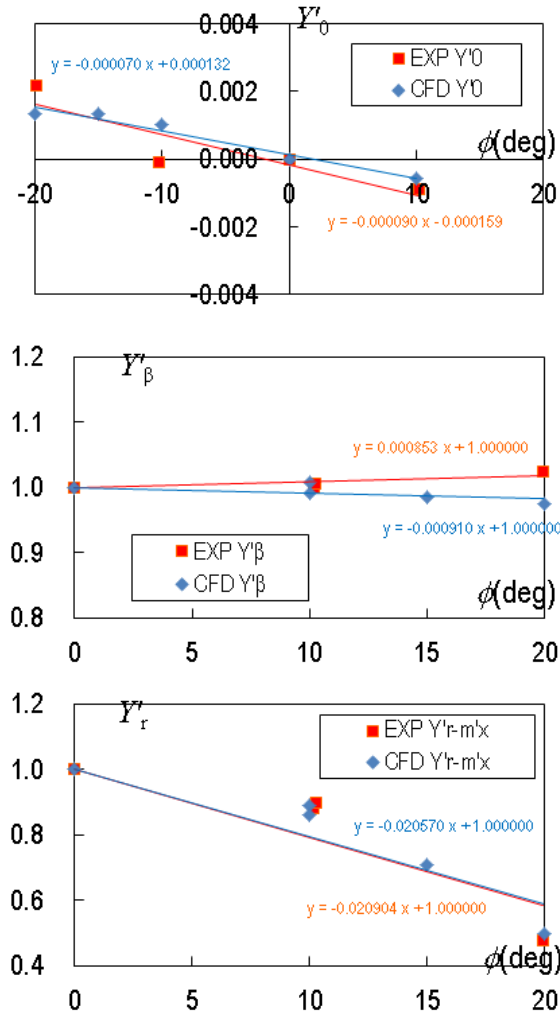


Fig.5.6 Comparison of effects of roll angle on Y'_0 and Y'_β , Y'_r - m' (KCS Container Ship)

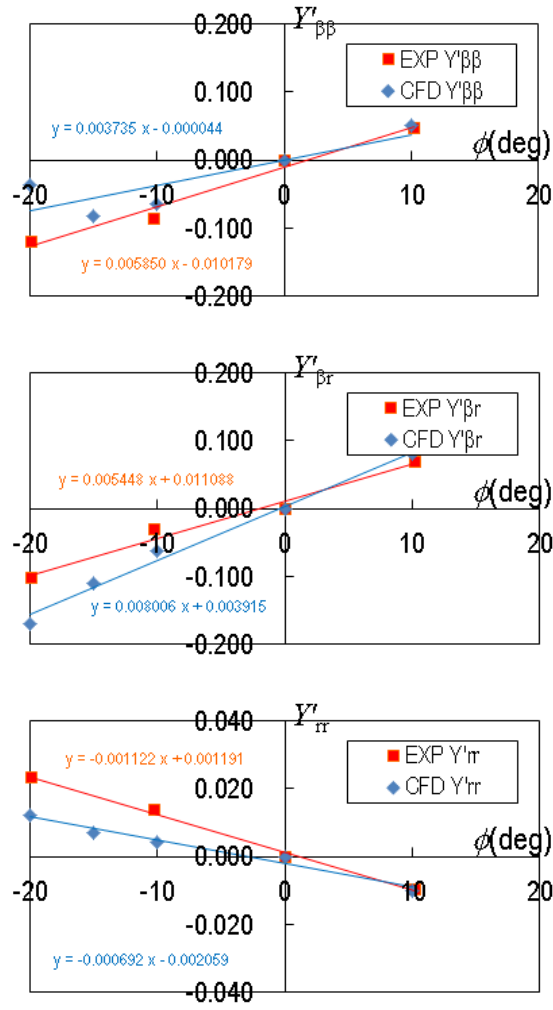


Fig.5.7 Comparison of effects of roll angle on $Y'_{\beta\beta}$ and $Y'_{\beta r}$, Y'_{rr} (KCS Container Ship)

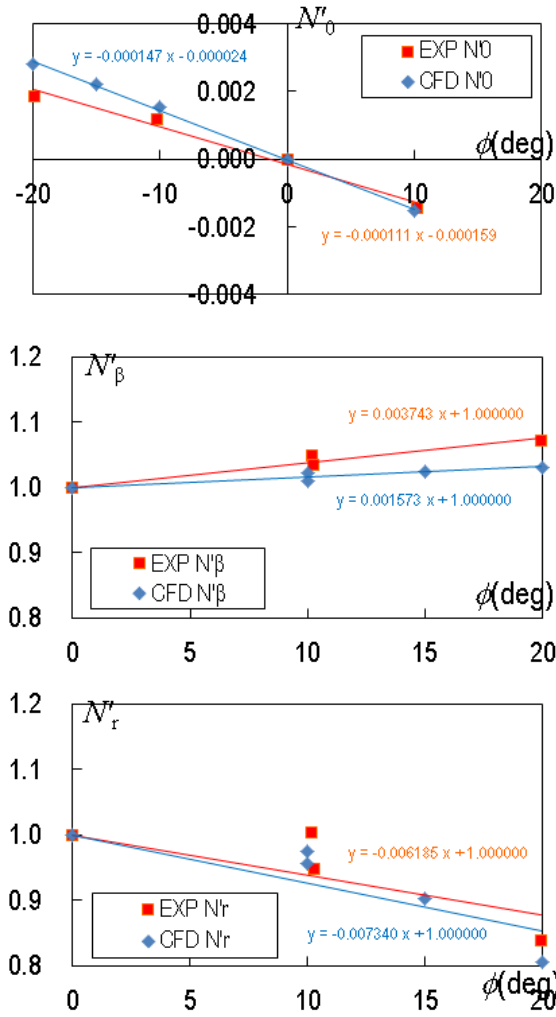


Fig.5.8 Comparison of effects of roll angle on N'_0 and N'_β , N'_r (KCS Container Ship)

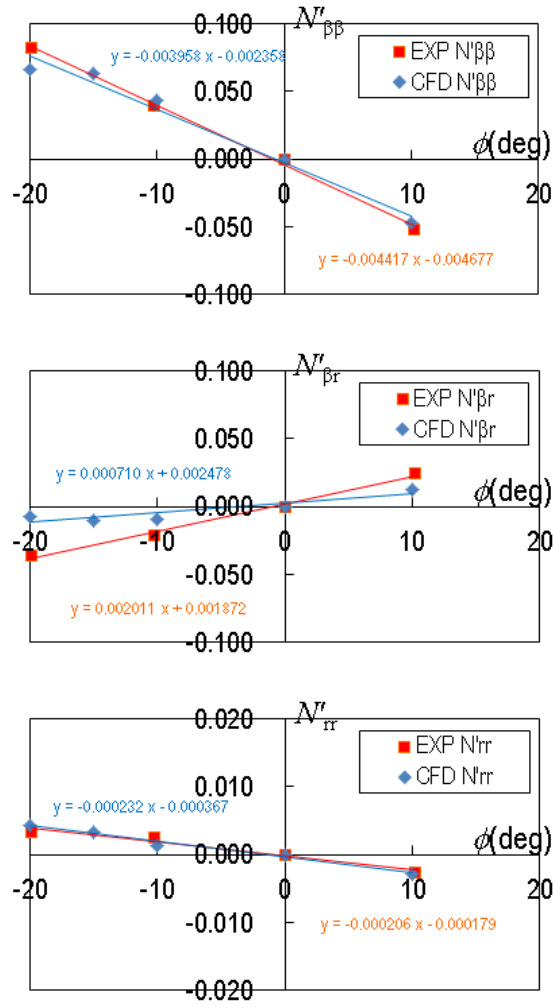


Fig.5.9 Comparison of effects of roll angle on $N''_{\beta\beta}$ and $N''_{\beta r}$, N''_{rr} (KCS Container Ship)

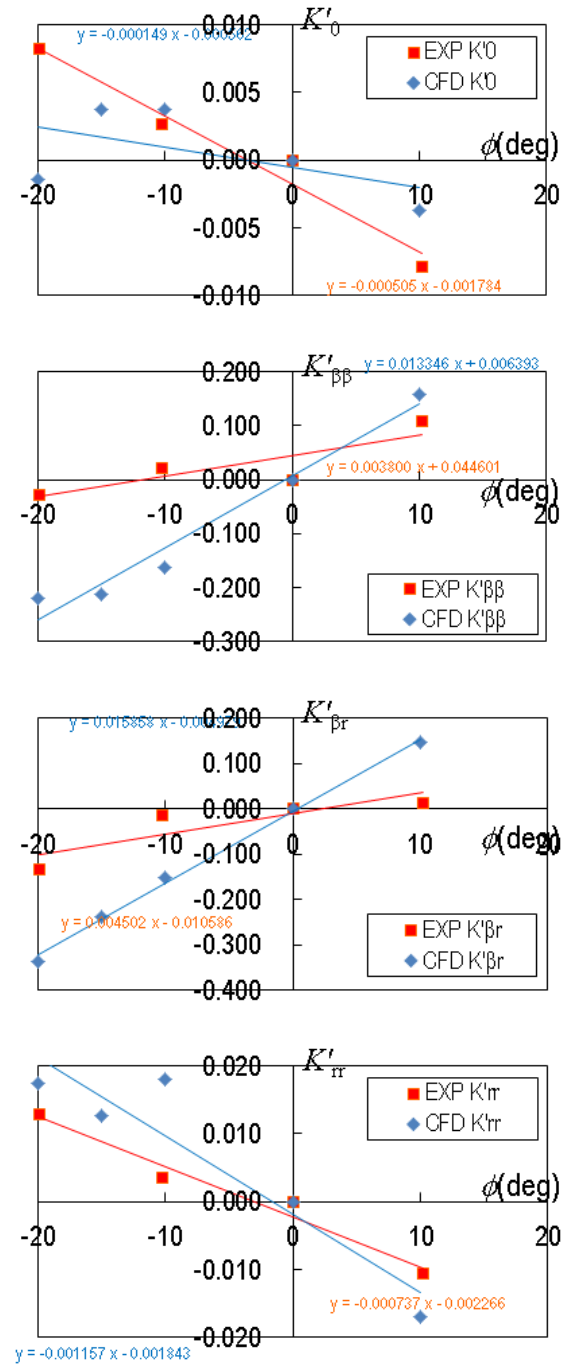


Fig.5.10 Comparison of effects of roll angle on K'_0 and $K'_{\beta\beta}$, $K'_{\beta r}$, K'_{rr} (KCS Container Ship)

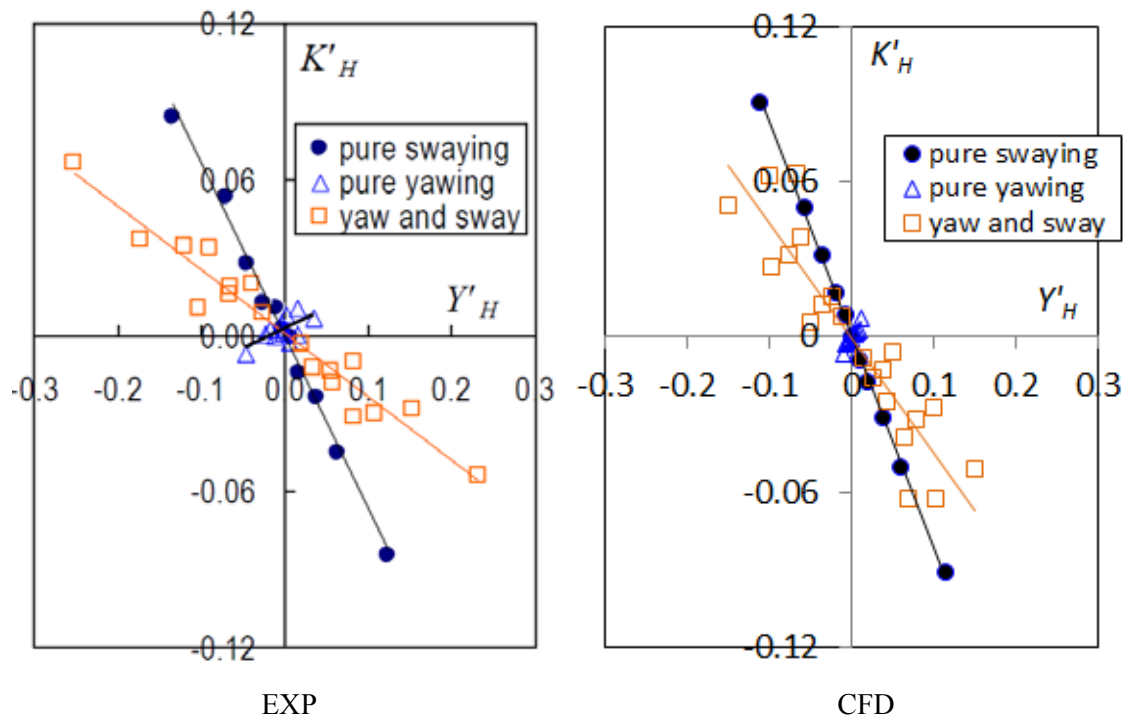


Fig.5.11 Relation between Y'_H and K'_H of KCS Container Ship

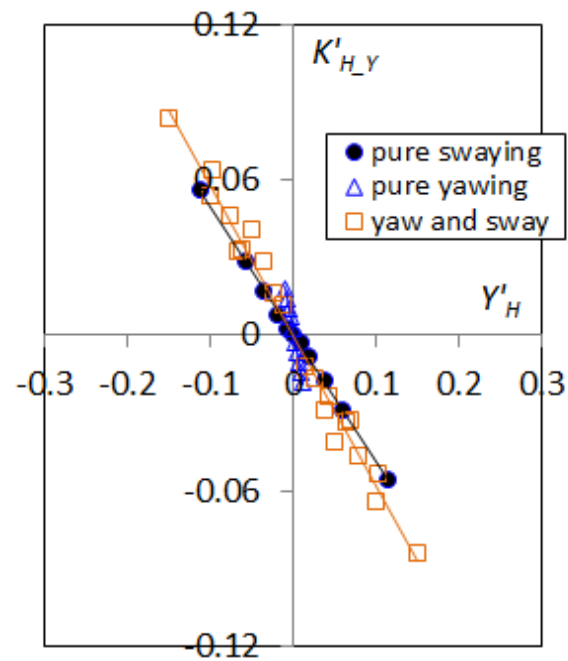


Fig.5.12 Relation between Y'_H and Lateral force component of roll moment K'_{H_y} of KCS Container Ship

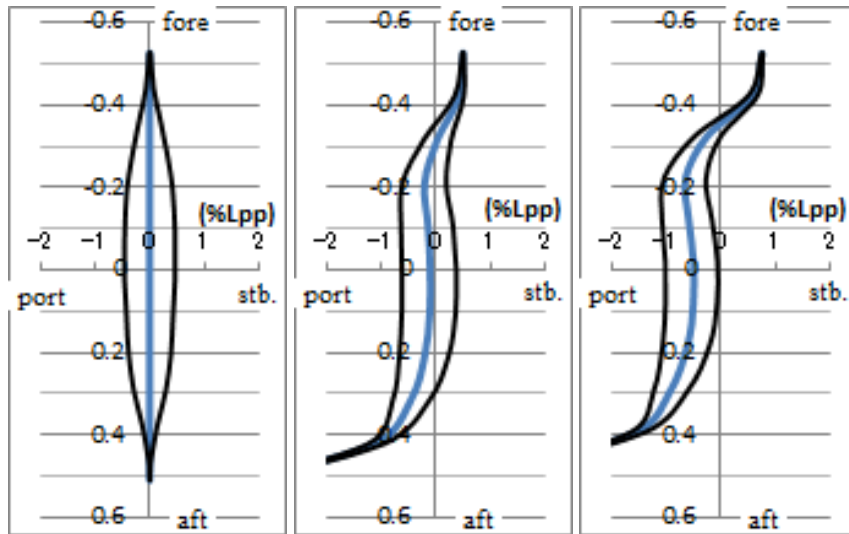


Fig.5.13 Longitudinal asymmetry of hull form camberline due to roll angle (KCS Container Ship)

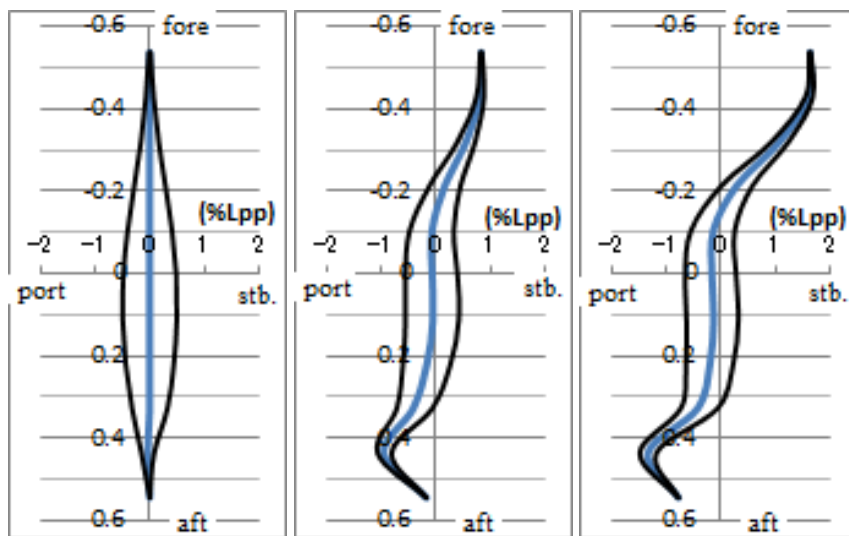


Fig.5.14 Longitudinal asymmetry of hull form camberline due to roll angle (KCS Container Ship)

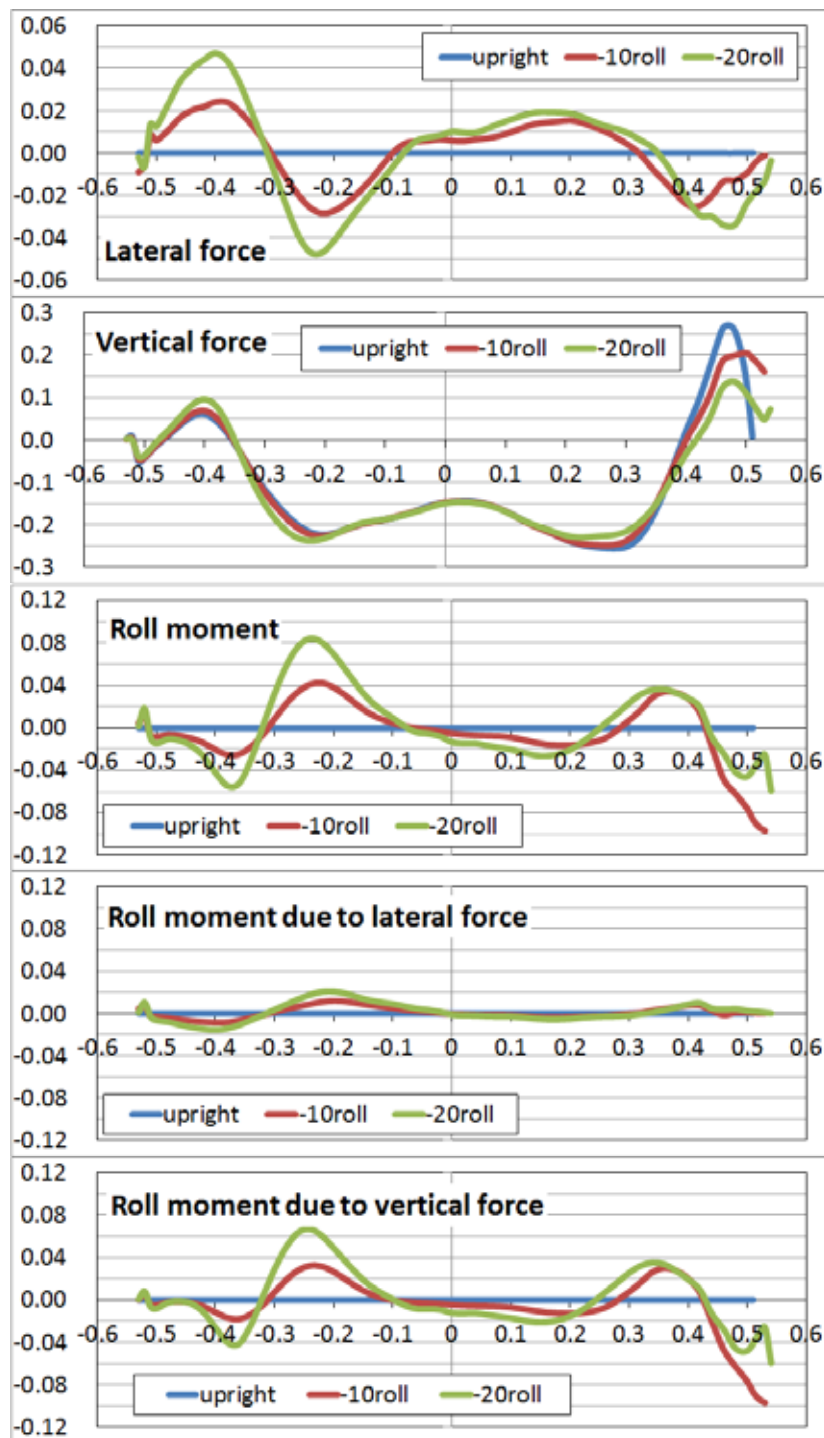


Fig.5.15 Distribution of hydrodynamic forces and roll moment, between conditions of roll angle in steady straight course (KCS Container Ship)

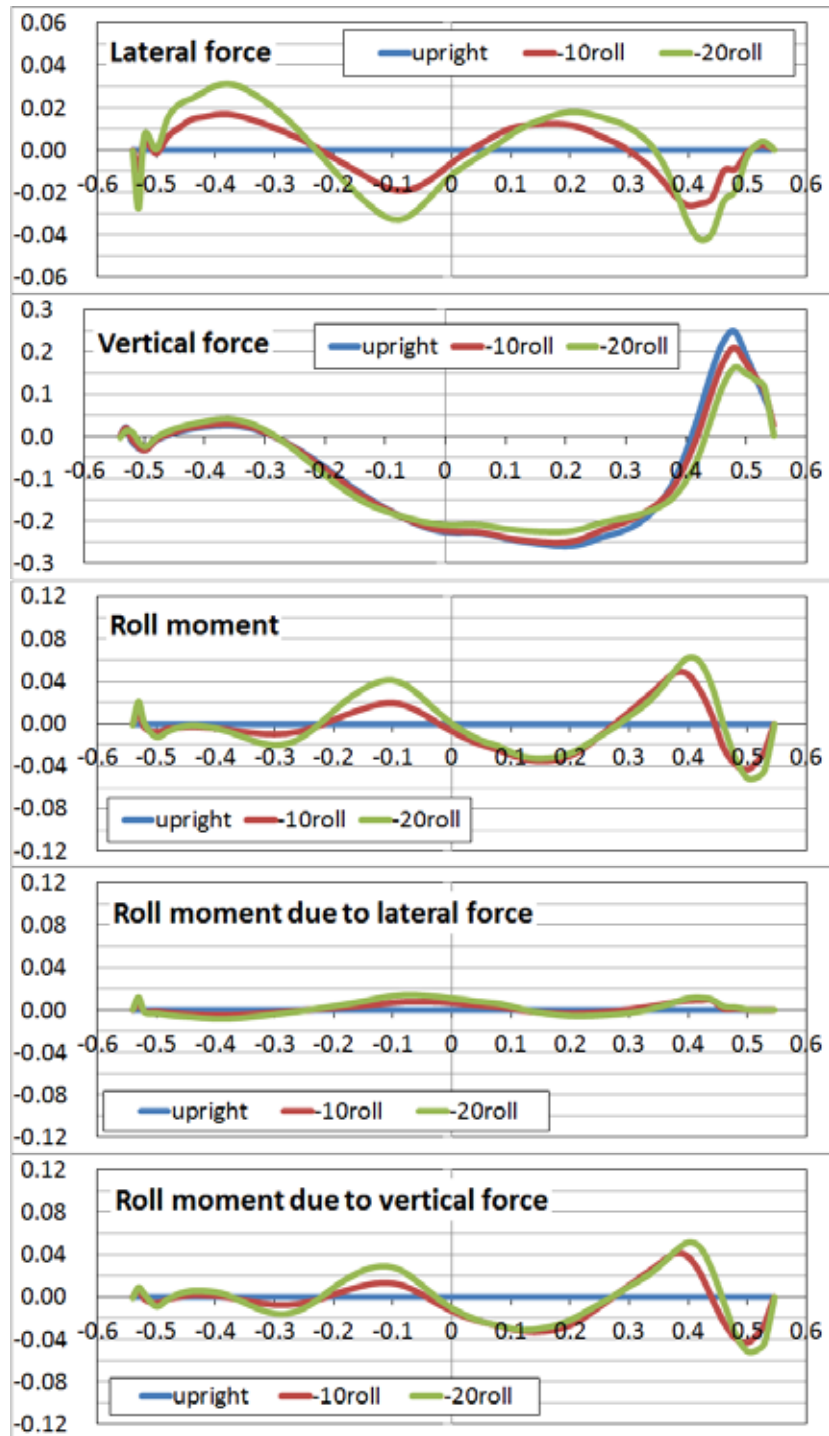


Fig.5.16 Distribution of hydrodynamic forces and roll moment, between conditions of roll angle
(Passenger Ferry)

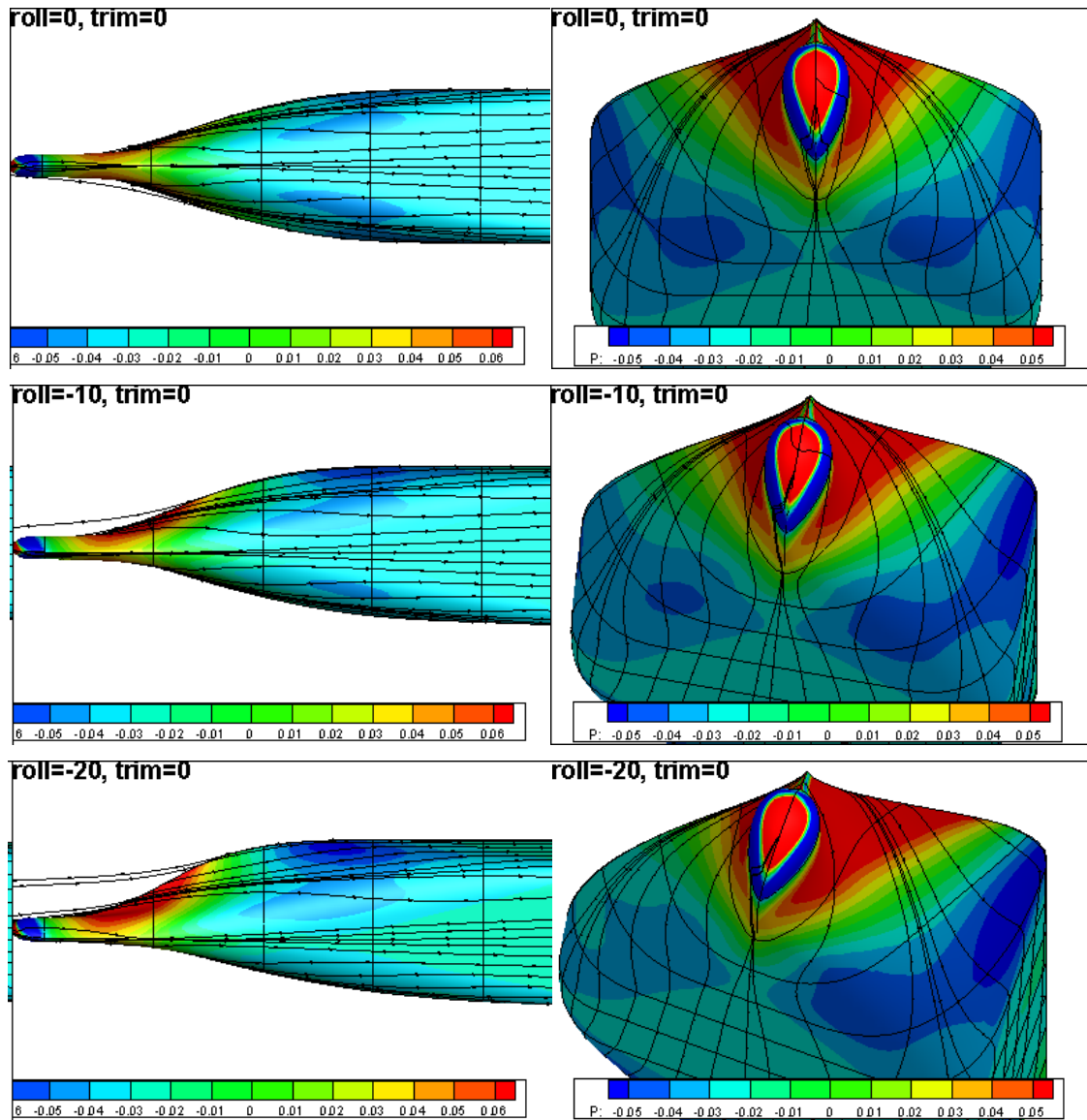


Fig.5.17 Contour of pressure on fore hull (KCS Container Ship)

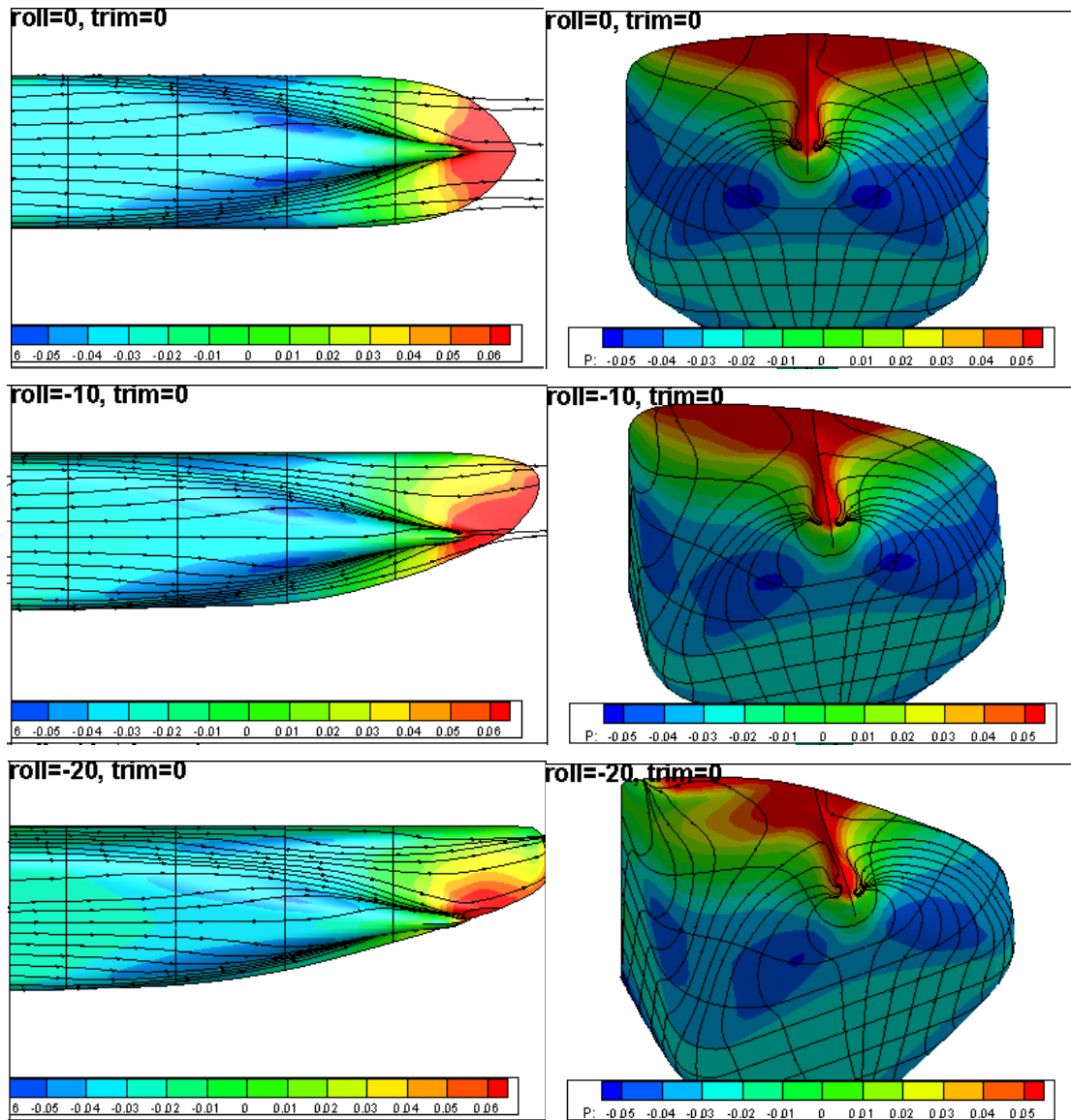


Fig.5.18 Contour of pressure on aft hull (KCS Container Ship)

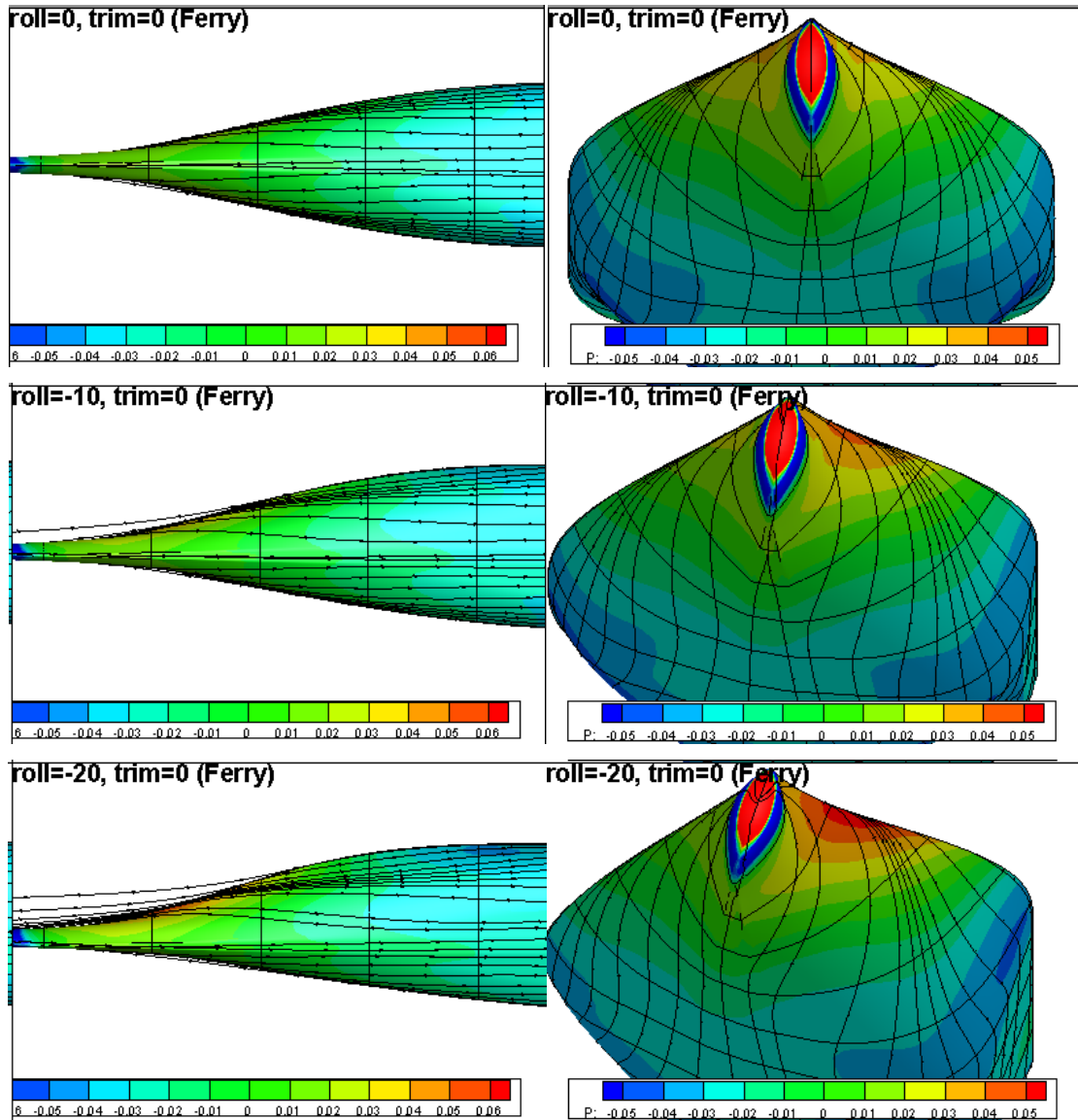


Fig.5.19 Contour of pressure on fore hull (Passenger Ferry)

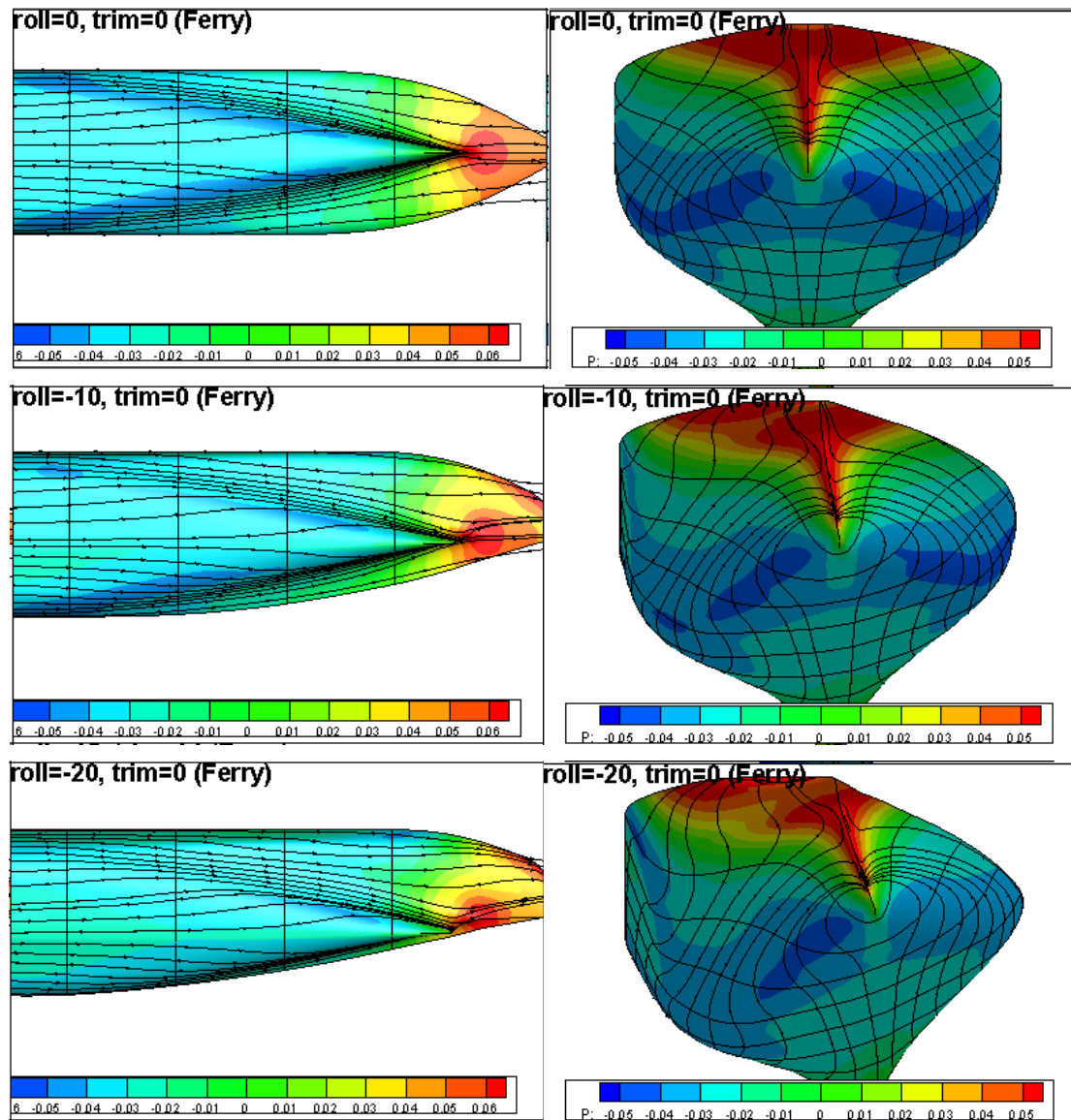


Fig.5.20 Contour of pressure on aft hull (Passenger Ferry)

roll = 0, trim = 0

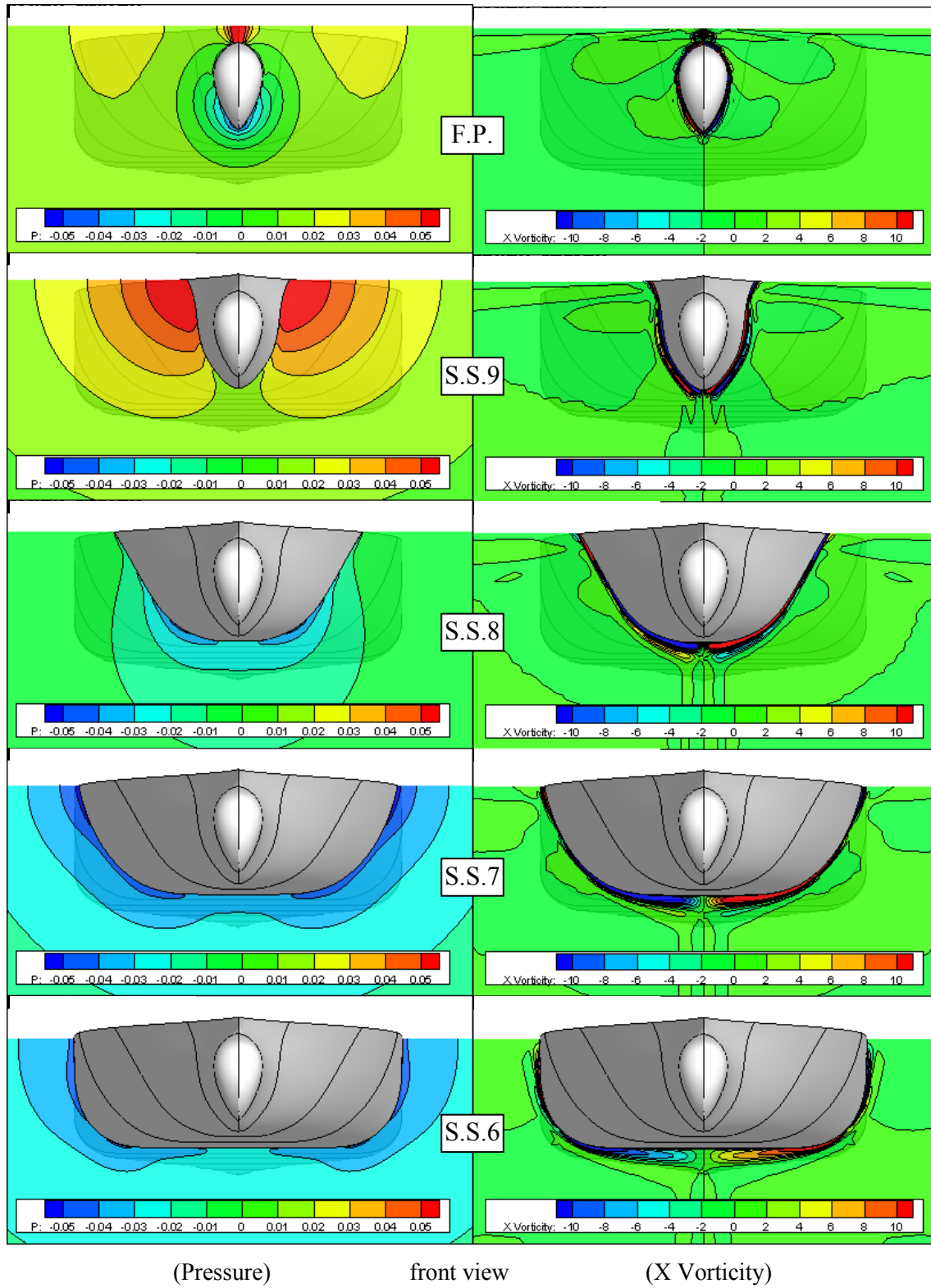


Fig.5.21(a) Contour of pressure and X vorticity on slices of flow around foreside of ship (KCS Container Ship, $\phi=0\text{deg.}$)

roll = 0, trim = 0

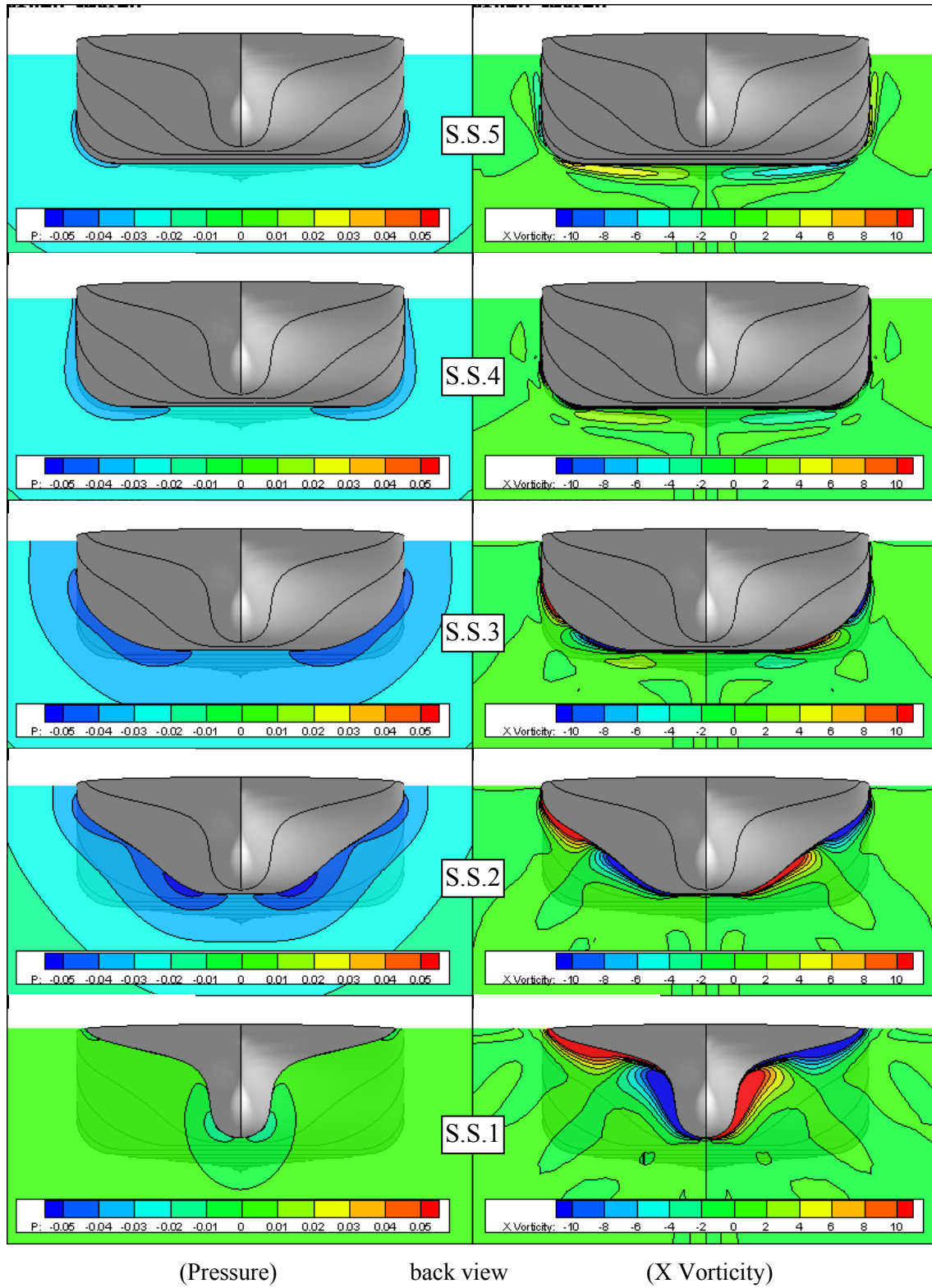


Fig.5.21(b) Contour of pressure and X vorticity on slices of flow around foreside of ship (KCS Container Ship, $\phi=0\text{deg.}$)

roll = -10, trim = 0

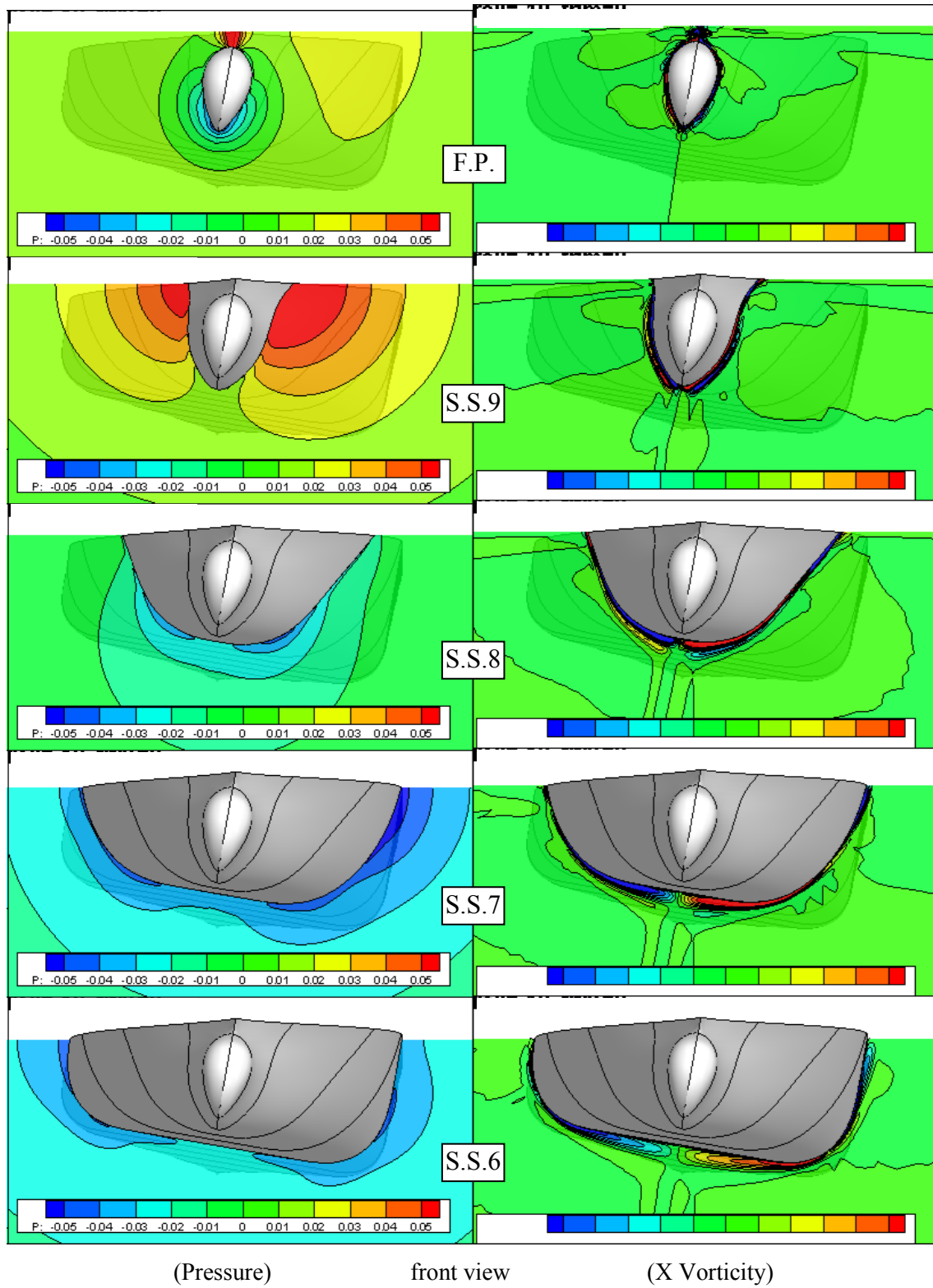


Fig.5.22(a) Contour of pressure and X vorticity on slices of flow around forebody of ship (KCS Container Ship, $\phi = -10^\circ$.)

roll = -10, trim = 0

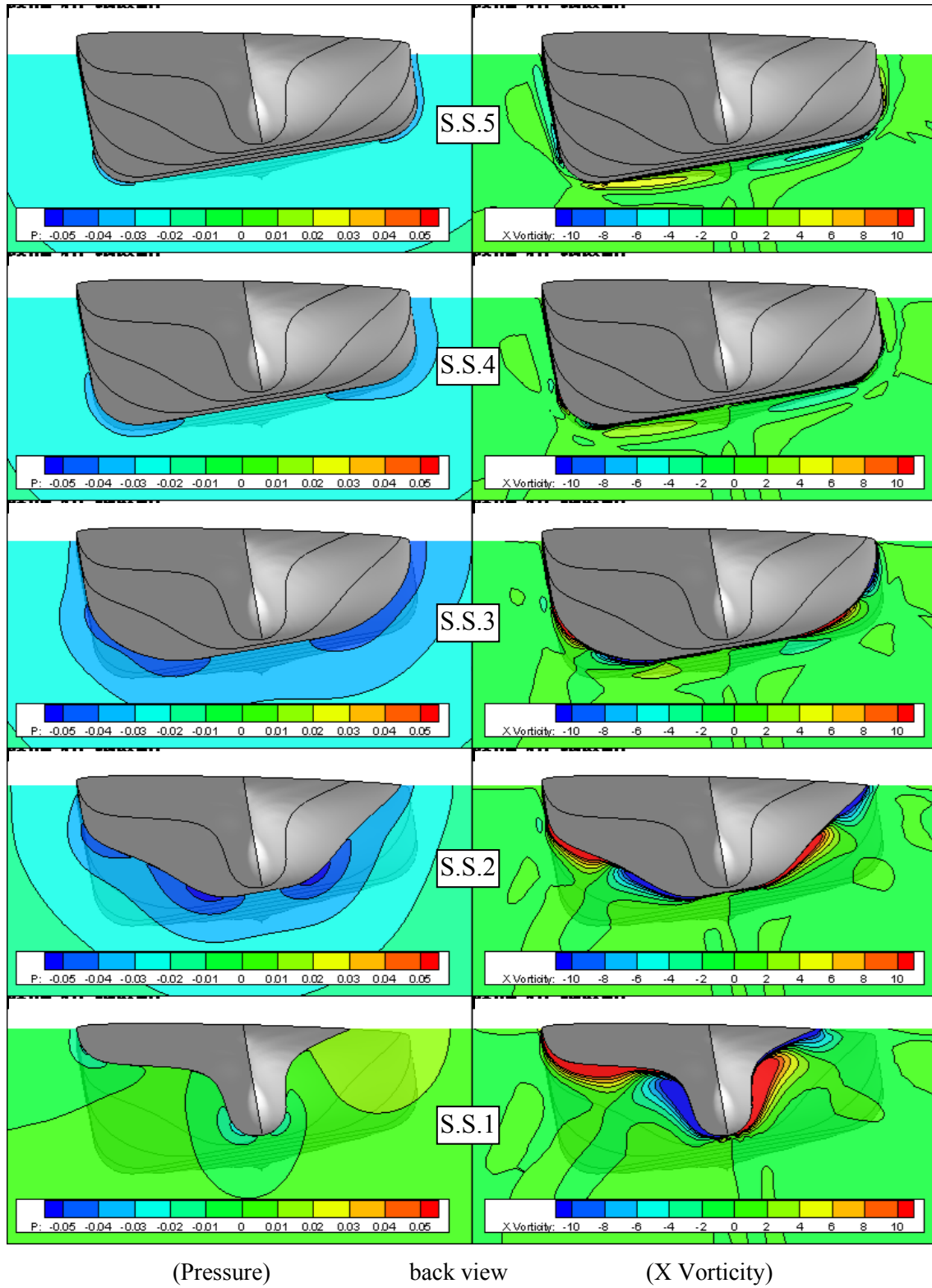


Fig.5.22(b) Contour of pressure and X vorticity on slices of flow around foreside of ship (KCS Container Ship, $\phi=-10\text{deg.}$)

roll = -20, trim = 0

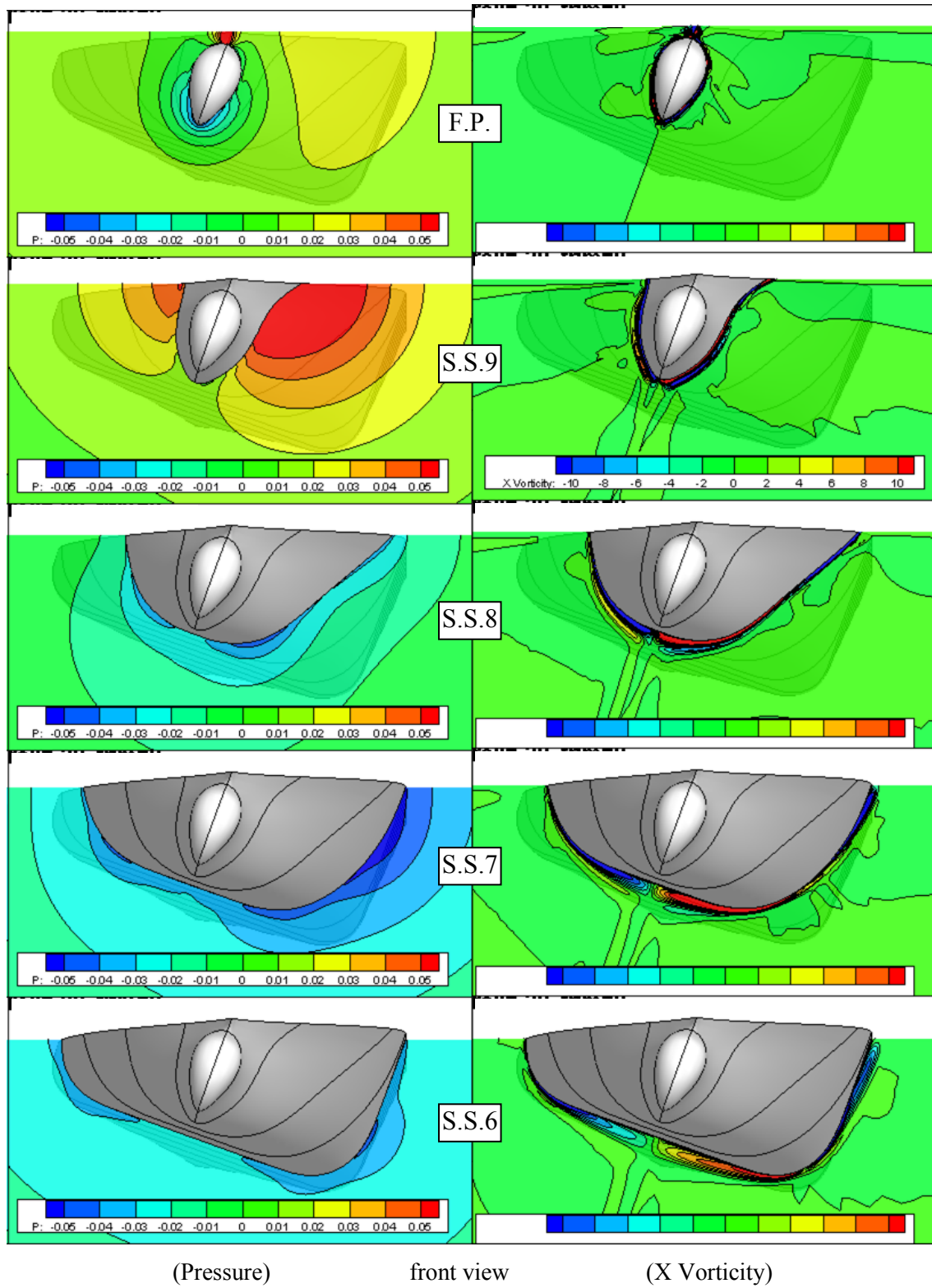


Fig.5.23(a) Contour of pressure and X vorticity on slices of flow around foreside of ship (KCS Container Ship, $\phi = -20^\circ$.)

roll = -20, trim = 0

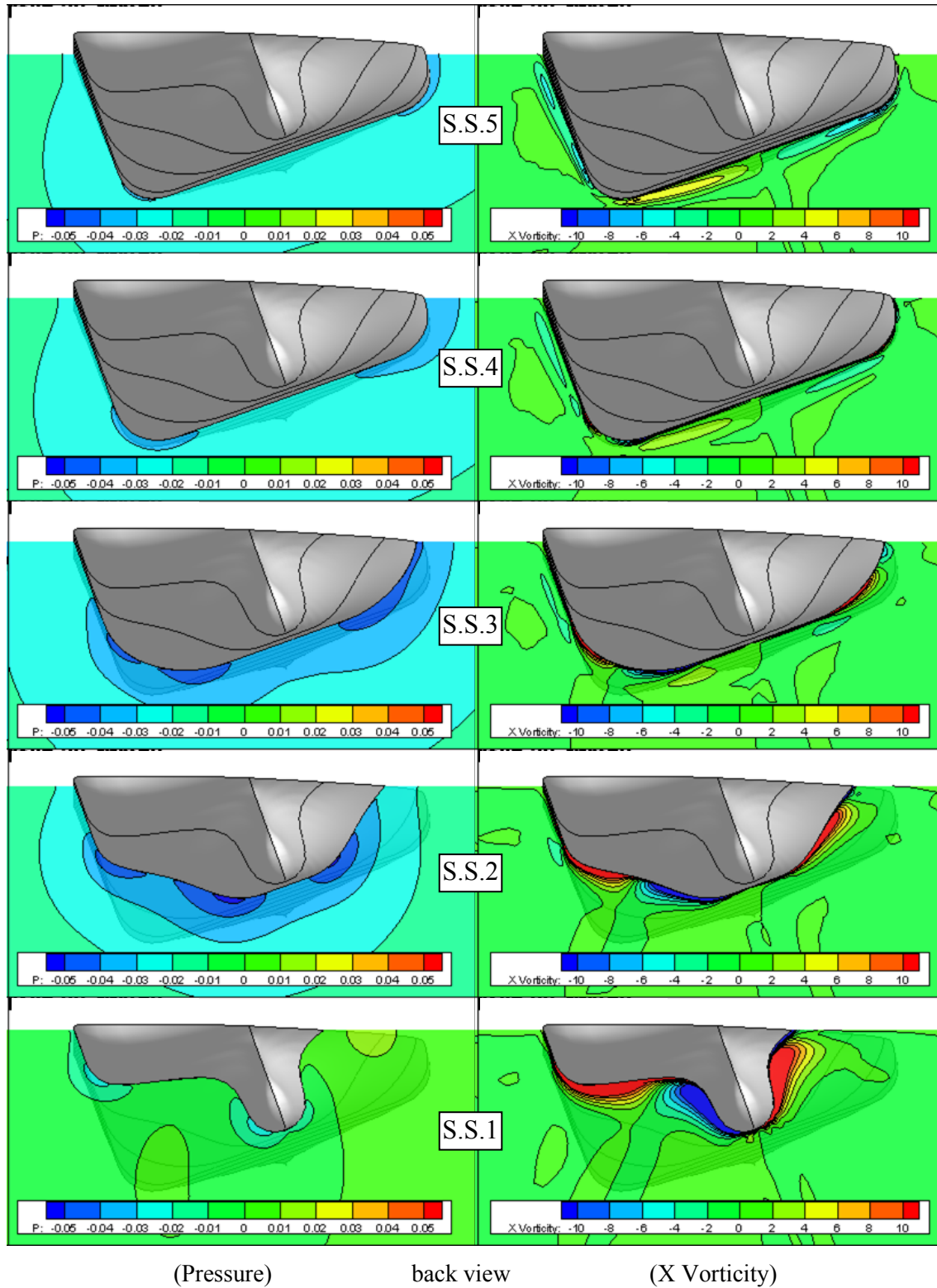


Fig.5.23(b) Contour of pressure and X vorticity on slices of flow around foreside of ship (KCS Container Ship, $\phi=-20\text{deg.}$)

roll = 0, trim = 0

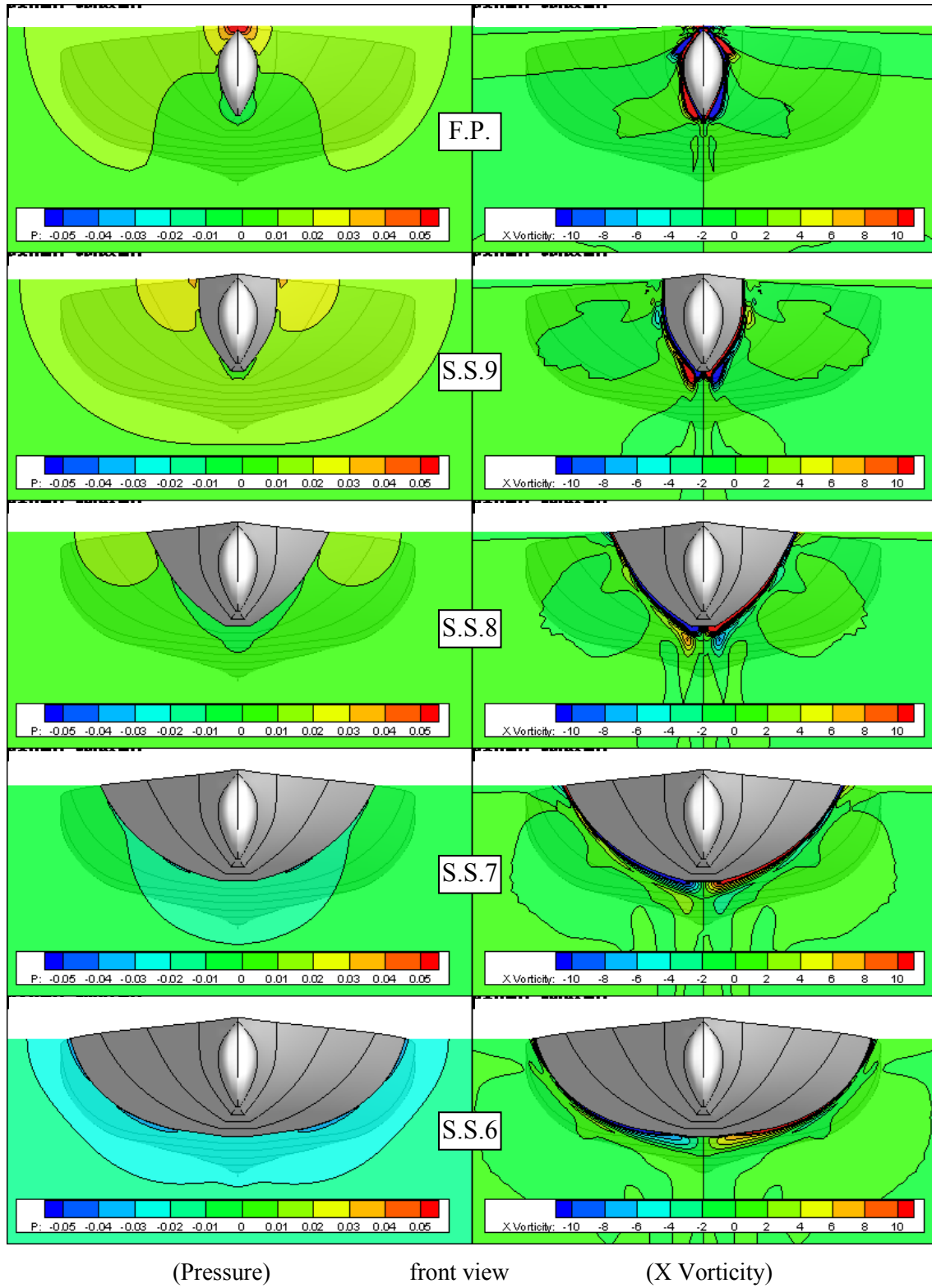


Fig.5.24(a) Contour of pressure and X vorticity on slices of flow around foreside of ship
(Passenger Ferry, $\phi=0\text{deg.}$)

roll = 0, trim = 0

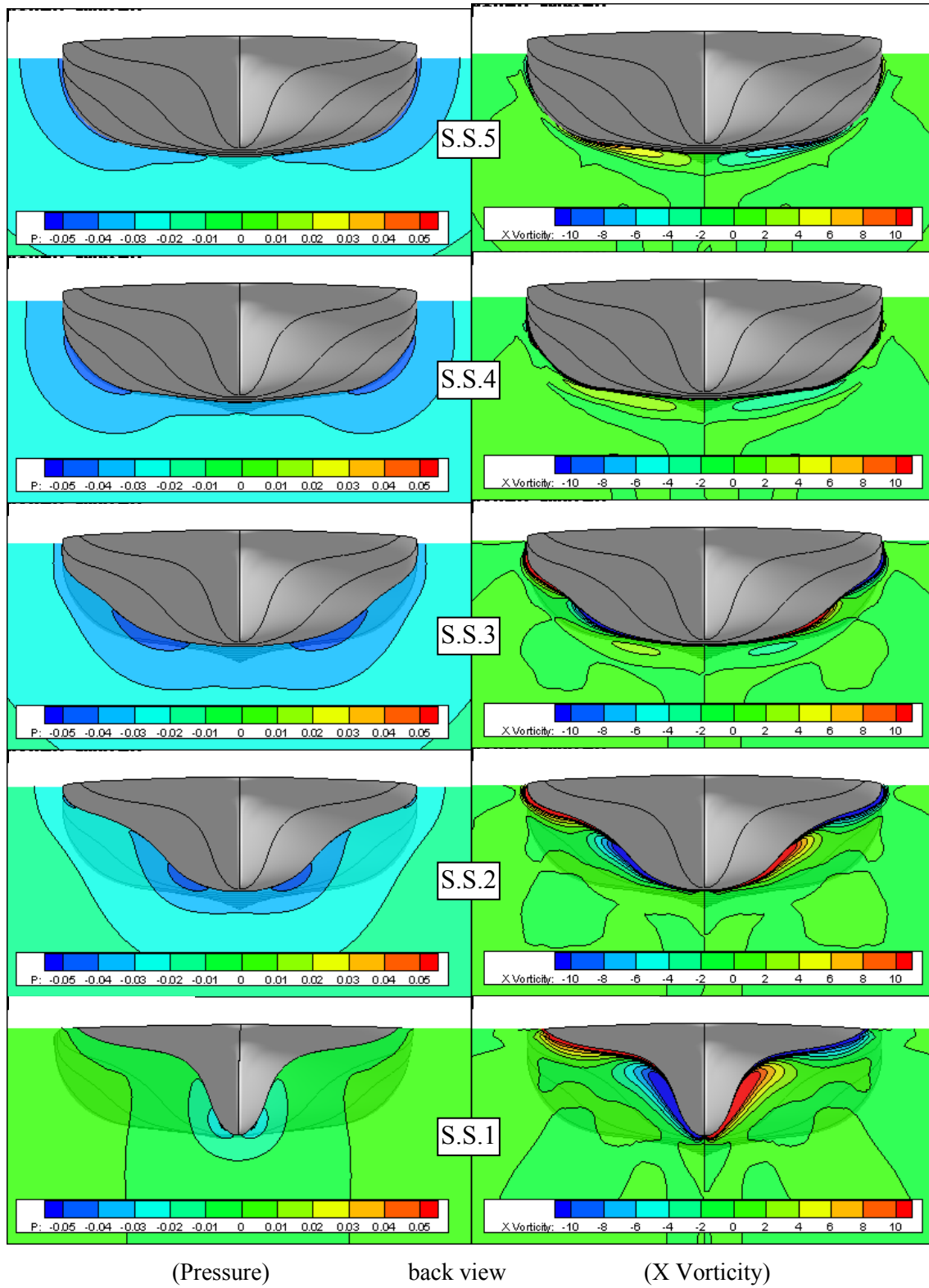


Fig.5.24(b) Contour of pressure and X vorticity on slices of flow around foreside of ship
(Passenger Ferry, $\phi=0\text{deg.}$)

roll = -10, trim = 0

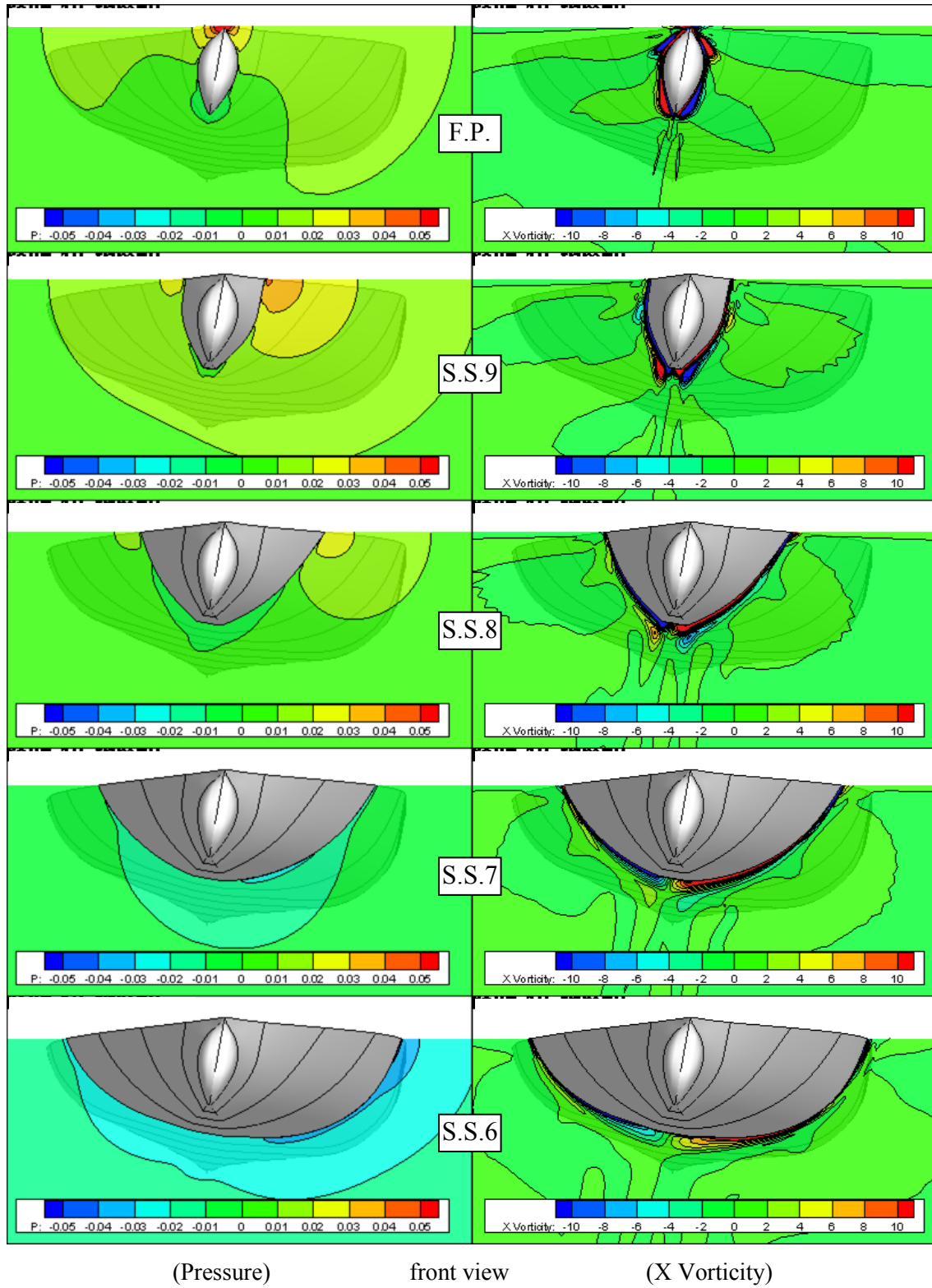


Fig.5.25(a) Contour of pressure and X vorticity on slices of flow around foreside of ship
(Passenger Ferry, $\phi = -10\text{deg.}$)

roll = -10, trim = 0

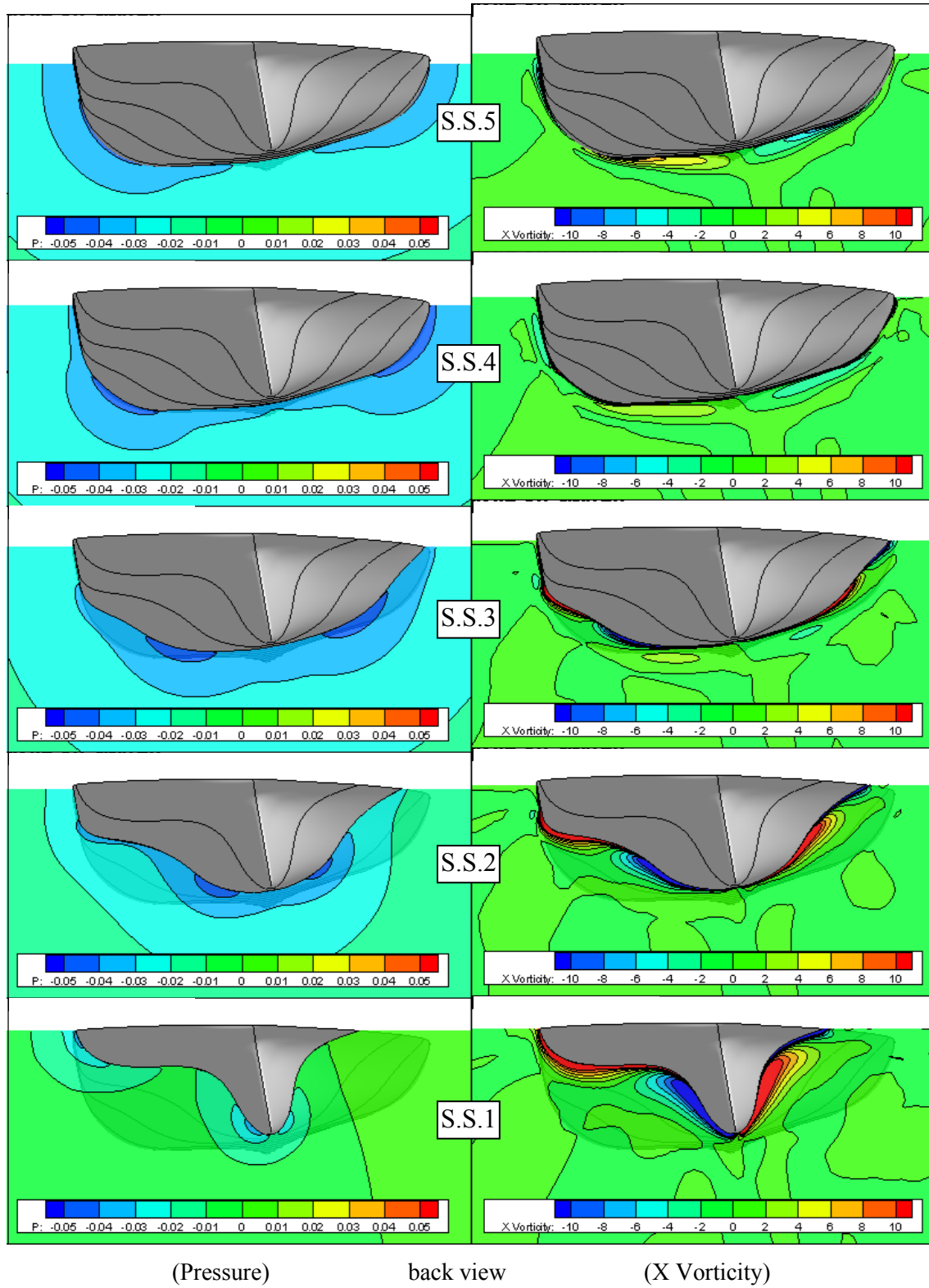


Fig.5.25(b) Contour of pressure and X vorticity on slices of flow around foreside of ship
(Passenger Ferry, $\phi = -10^\circ$.)

roll = -20, trim = 0

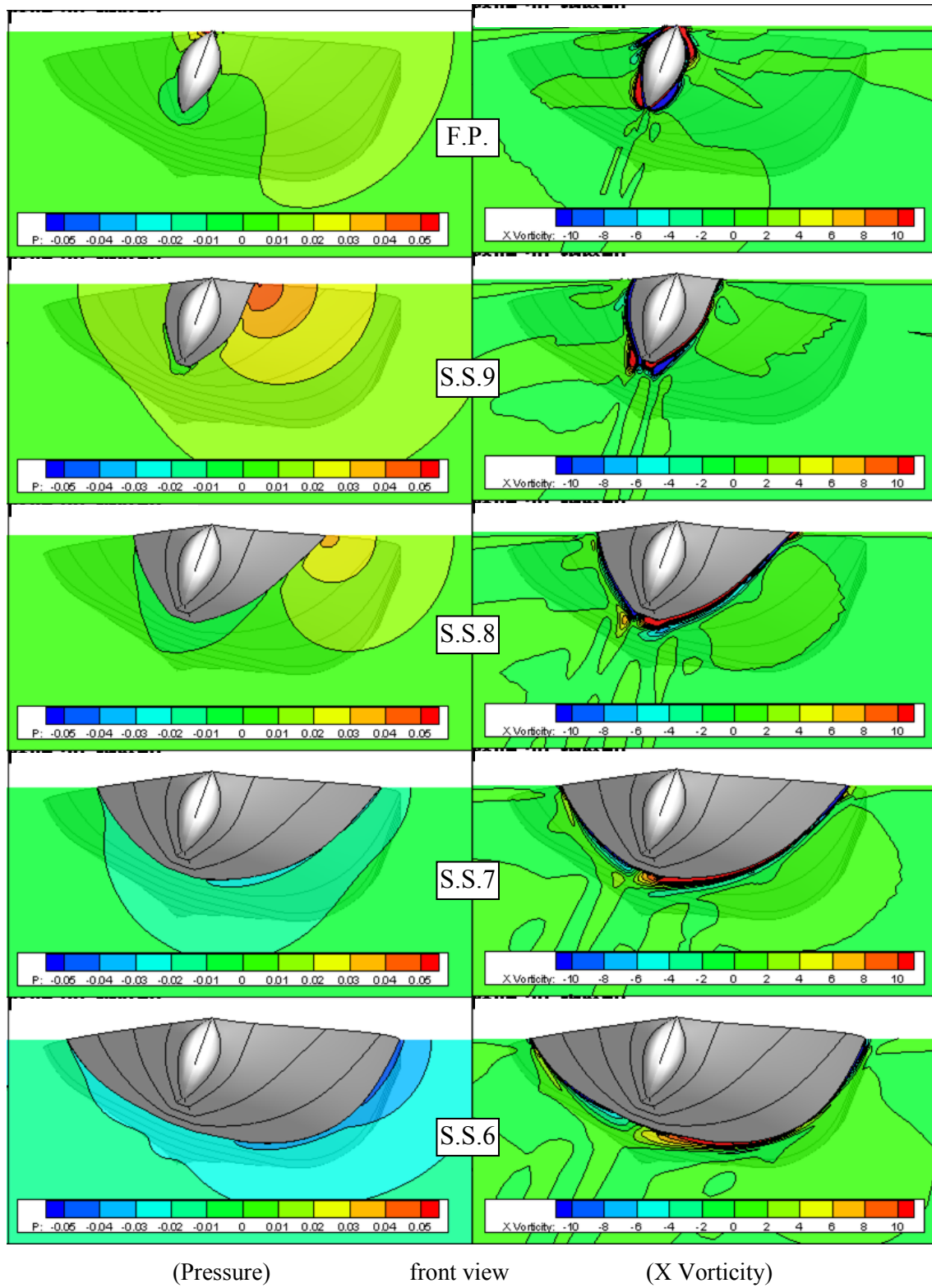


Fig.5.26(a) Contour of pressure and X vorticity on slices of flow around foreside of ship
(Passenger Ferry, $\phi=-20\text{deg.}$)

roll = -20, trim = 0

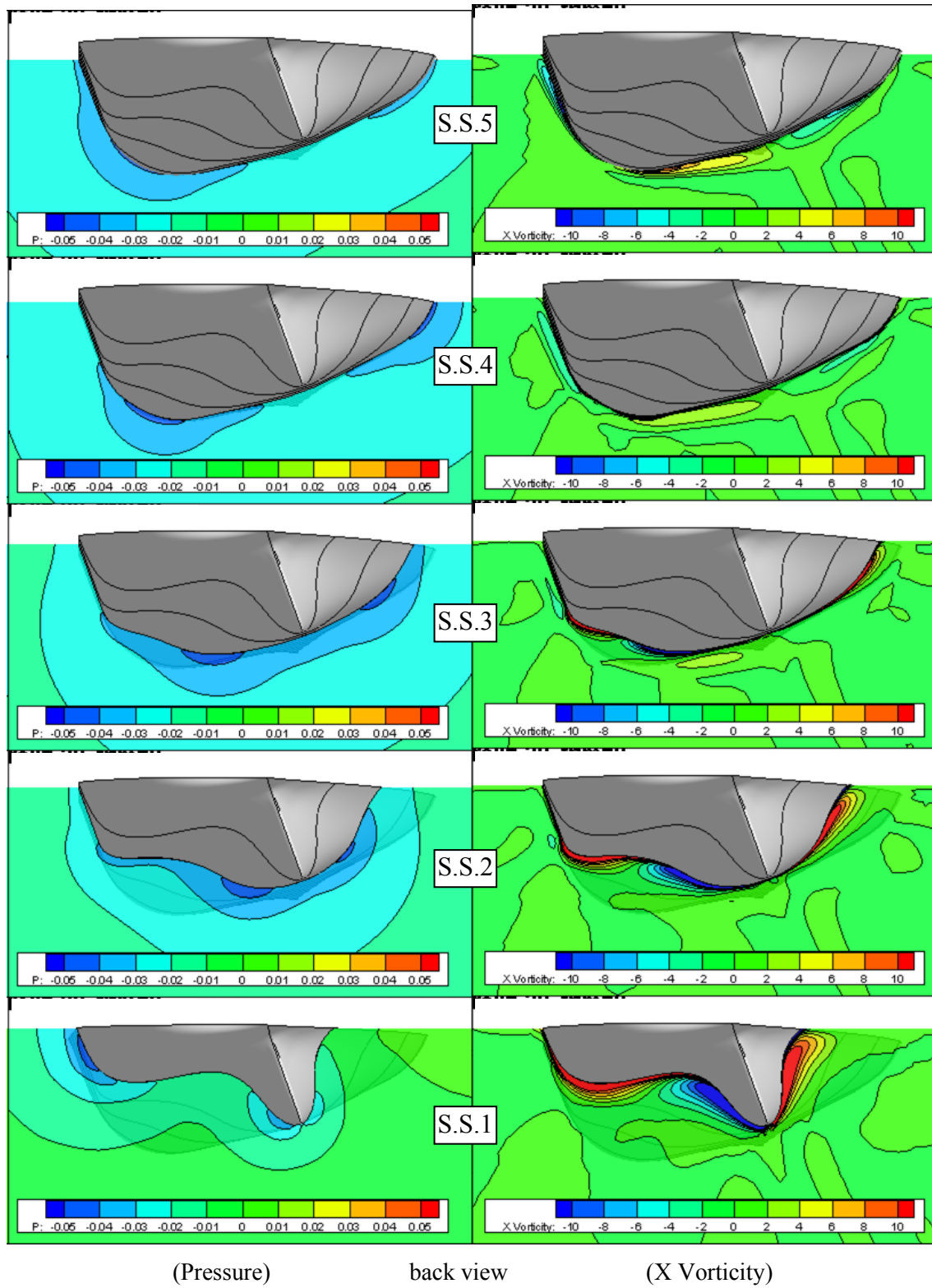


Fig.5.26(b) Contour of pressure and X vorticity on slices of flow around foreside of ship
(Passenger Ferry, $\phi=-20\text{deg.}$)

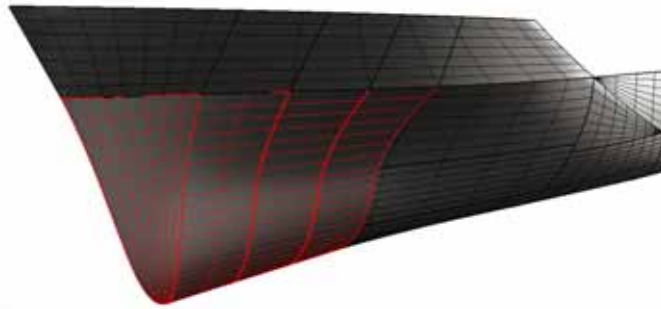


Fig.5.27 Computational grid of KCS without bulbous bow

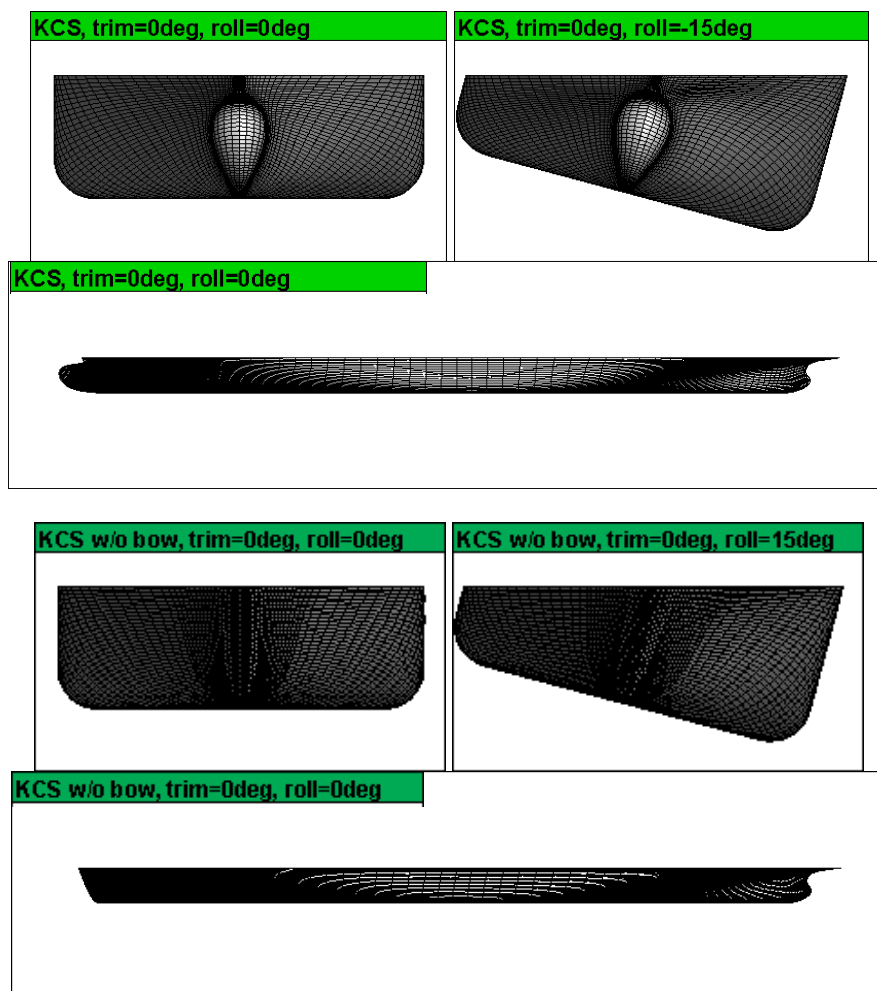


Fig.5.28 Comparison of computational grids between with and without bulbous bow (KCS Container Ship)

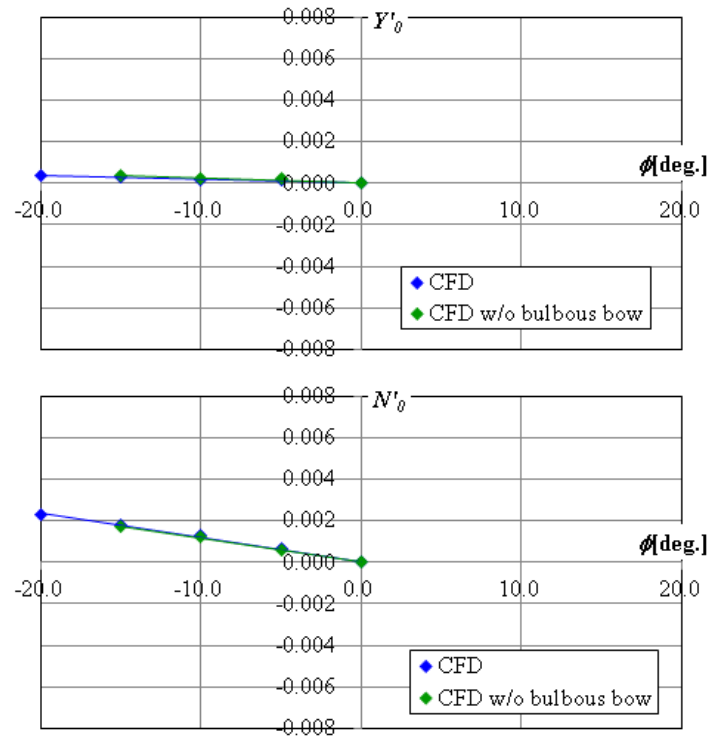


Fig.5.29 Comparison of lateral forces and angler moment of ship body, between with and without bulbous bow (KCS Container Ship)

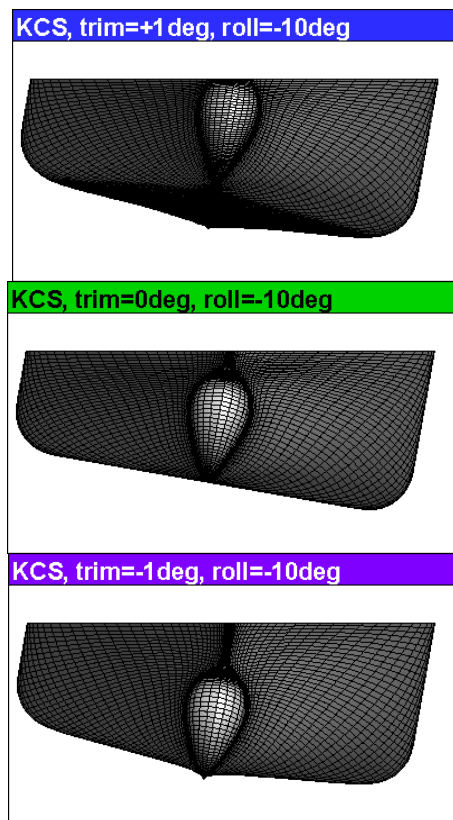
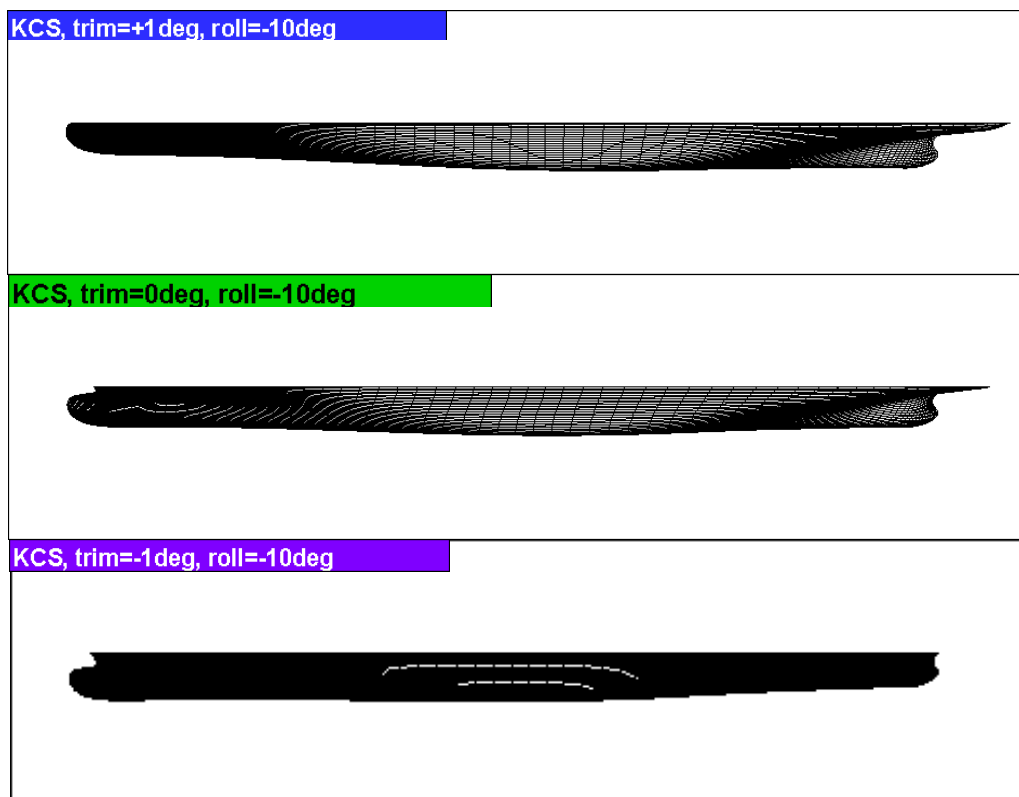


Fig.5.30 Comparison of computational grids between trim angle (KCS Container Ship)

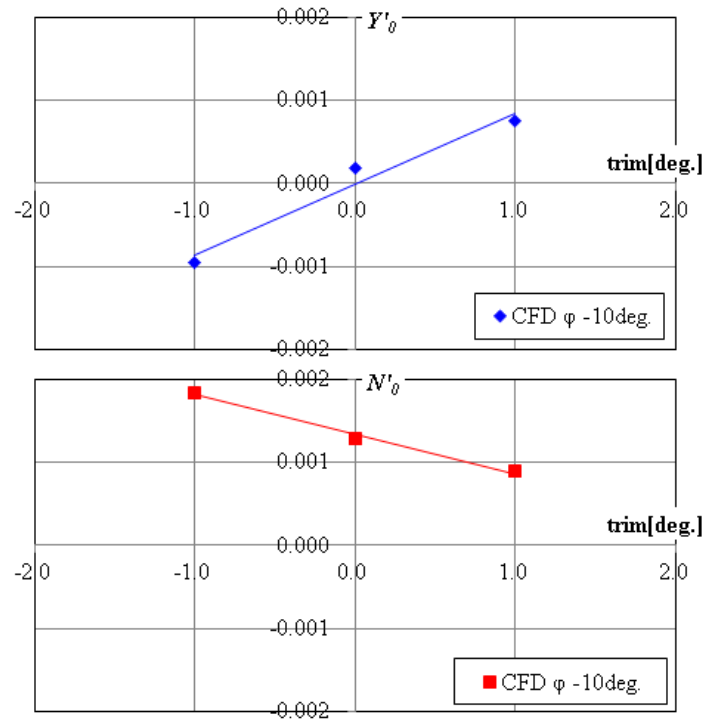


Fig.5.31 The change of lateral forces and angler moment of ship body with -10deg. roll angle against trim (KCS Container Ship)

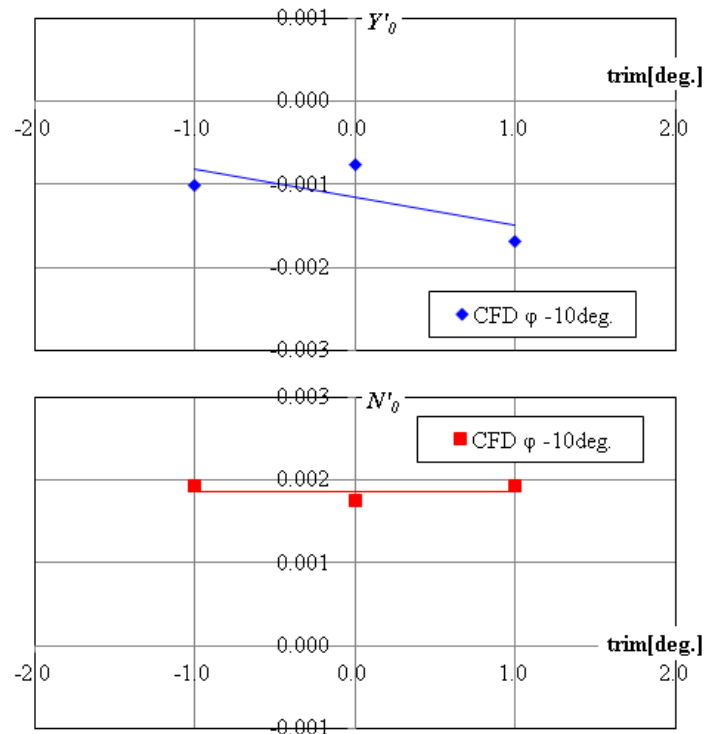


Fig.5.32 The change of lateral forces and angler moment of ship body with -10deg. roll angle against trim (Passenger Ferry)

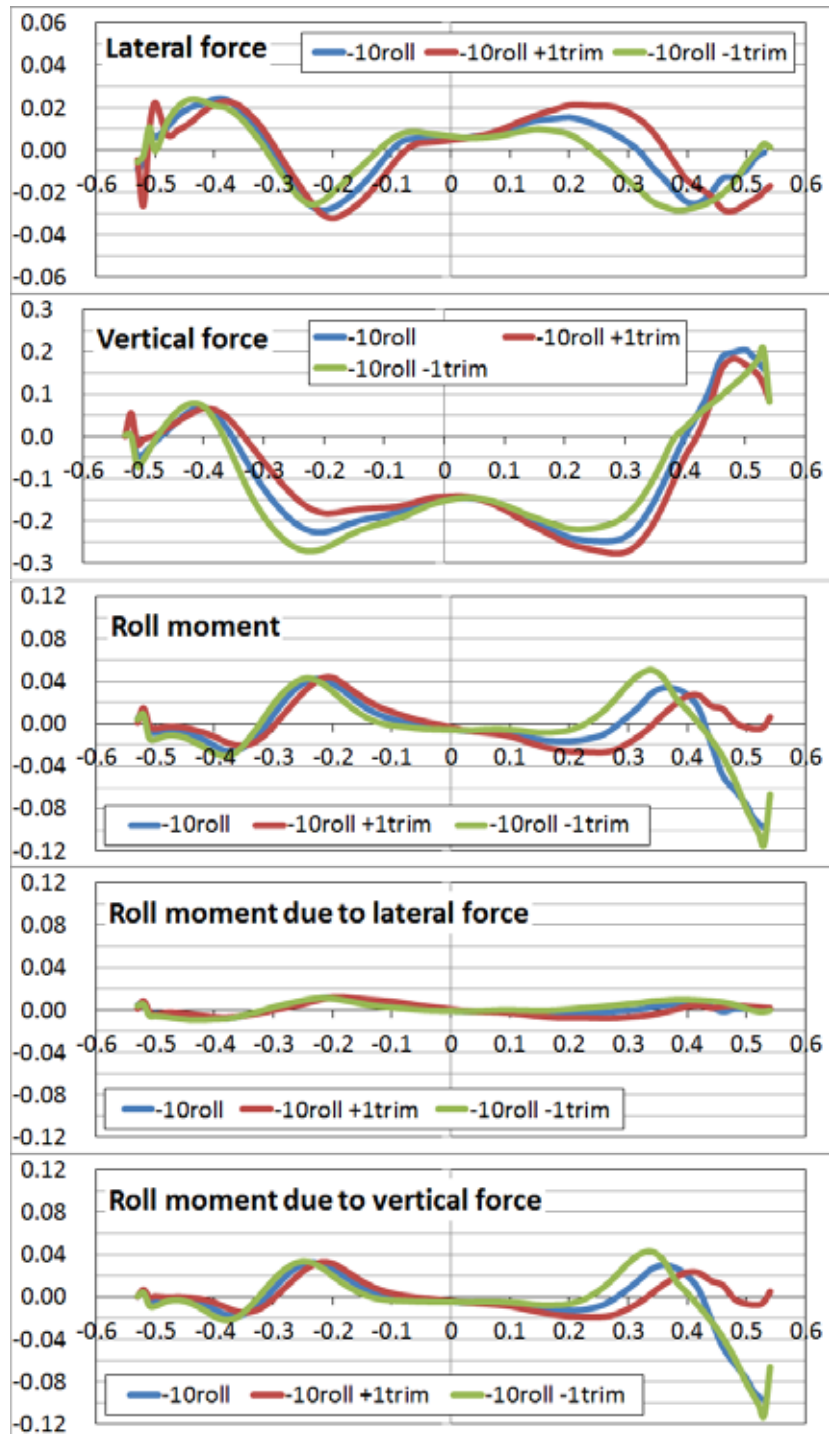


Fig.5.33 Distribution of hydrodynamic forces and roll moment, between conditions of trim angle (KCS Container Ship)

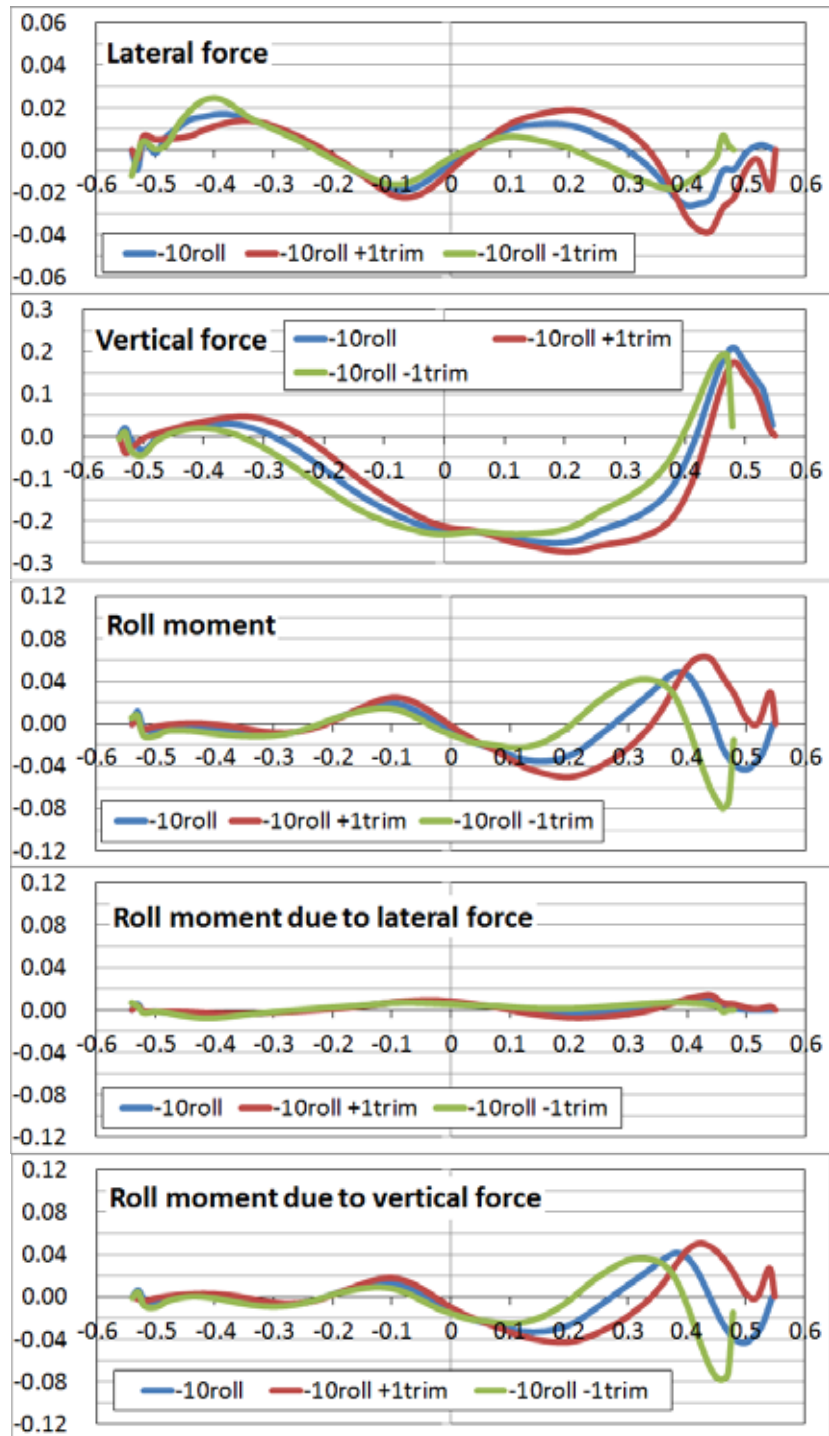


Fig.5.34 Distribution of hydrodynamic forces and roll moment, between conditions of trim angle (Passenger Ferry)

roll = -10, trim = +1

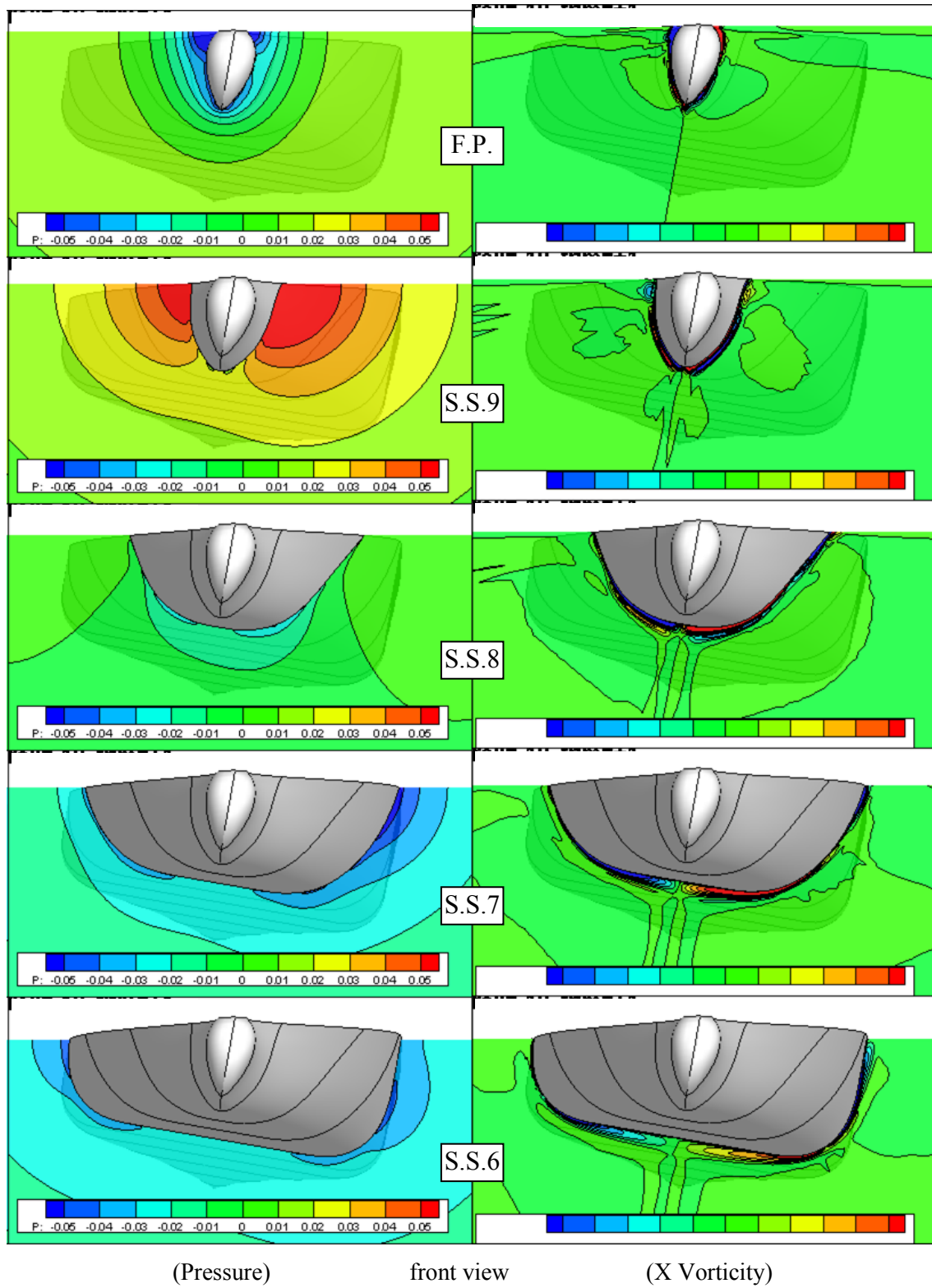


Fig.5.35(a) Contour of pressure and X vorticity on slices of flow around forebody of ship (KCS Container Ship, $\phi=-10\text{deg.}$, trim=+1deg.)

roll = -10, trim = +1

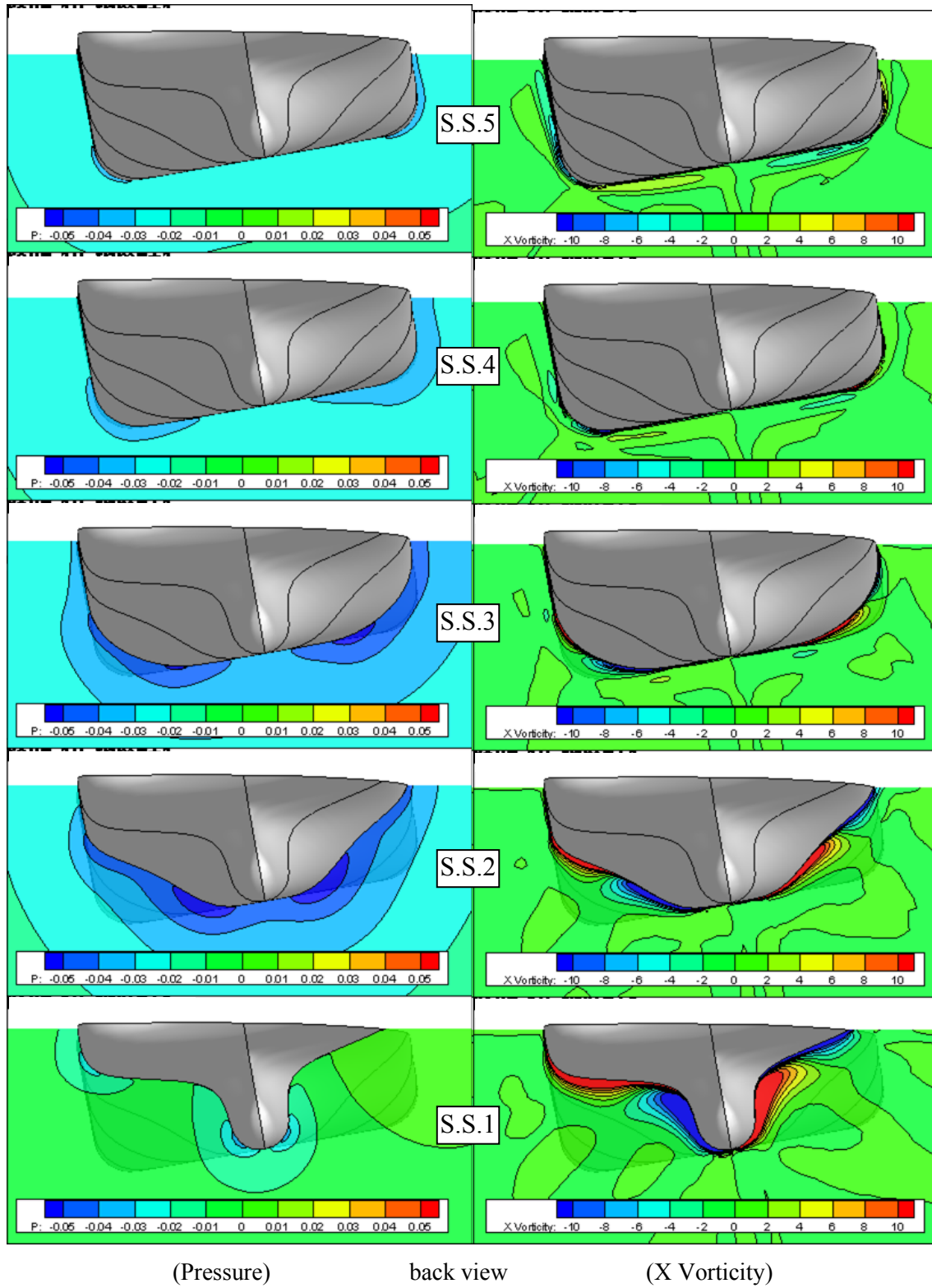


Fig.5.35(b) Contour of pressure and X vorticity on slices of flow around foreside of ship (KCS Container Ship, $\phi=-10\text{deg.}$, trim=+1deg.)

roll = -10, trim = -1

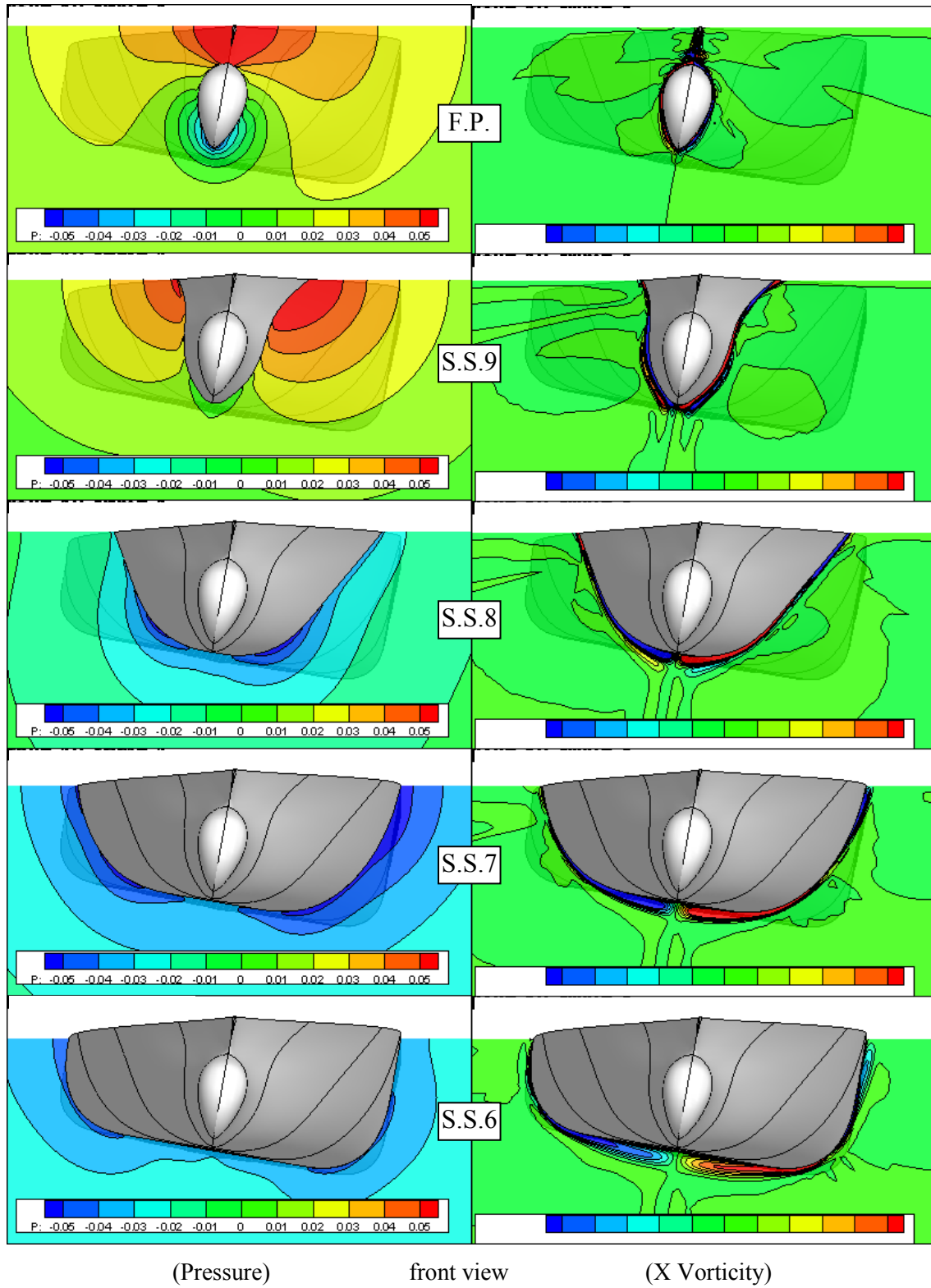


Fig.5.36(a) Contour of pressure and X vorticity on slices of flow around forebody of ship (KCS Container Ship, $\phi=-10\text{deg.}$, trim=-1deg.)

roll = -10, trim = -1

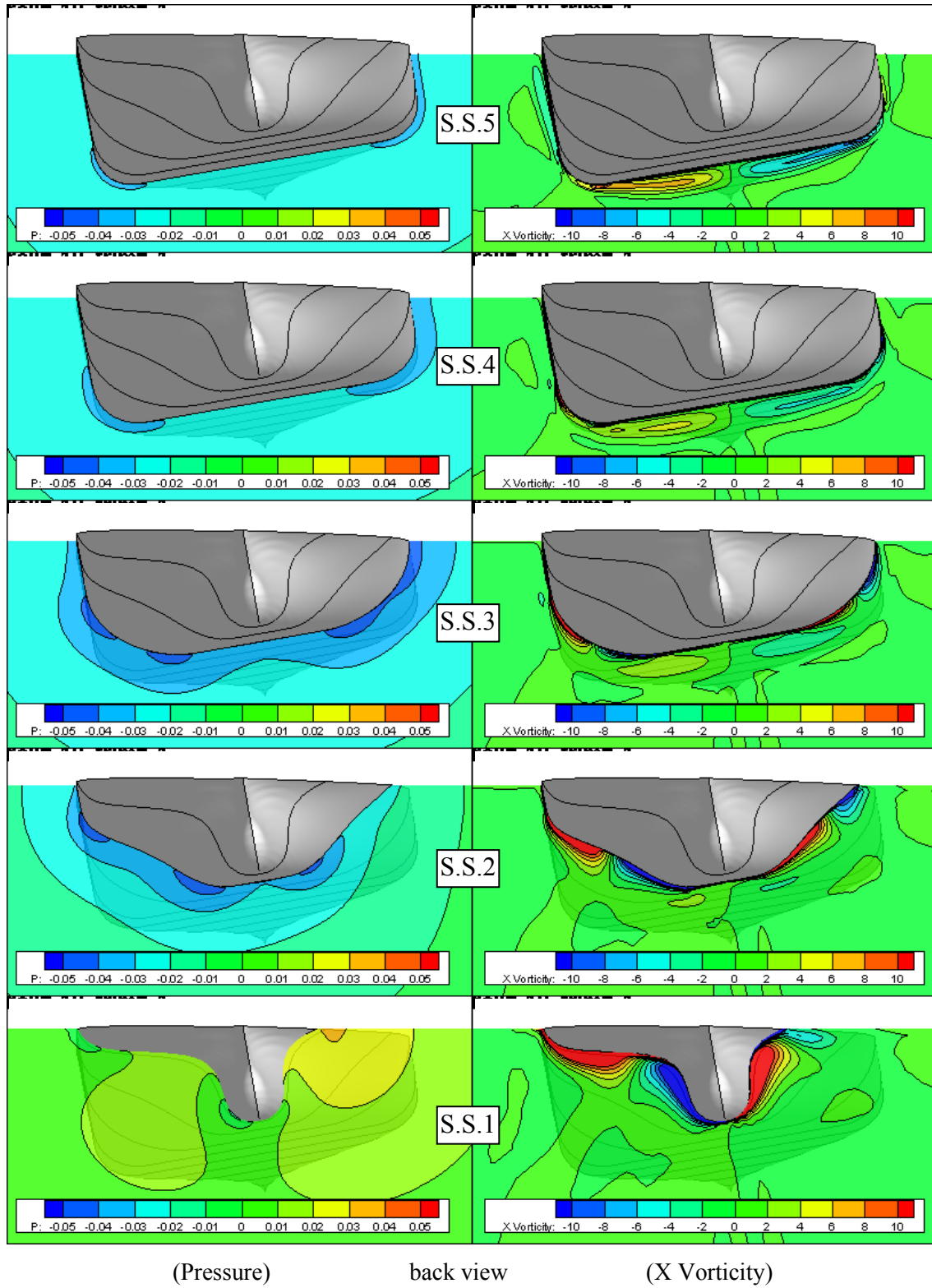


Fig.5.36(b) Contour of pressure and X vorticity on slices of flow around foreside of ship (KCS Container Ship, $\phi=-10\text{deg.}$, trim=-1deg.)

roll = -10, trim = +1

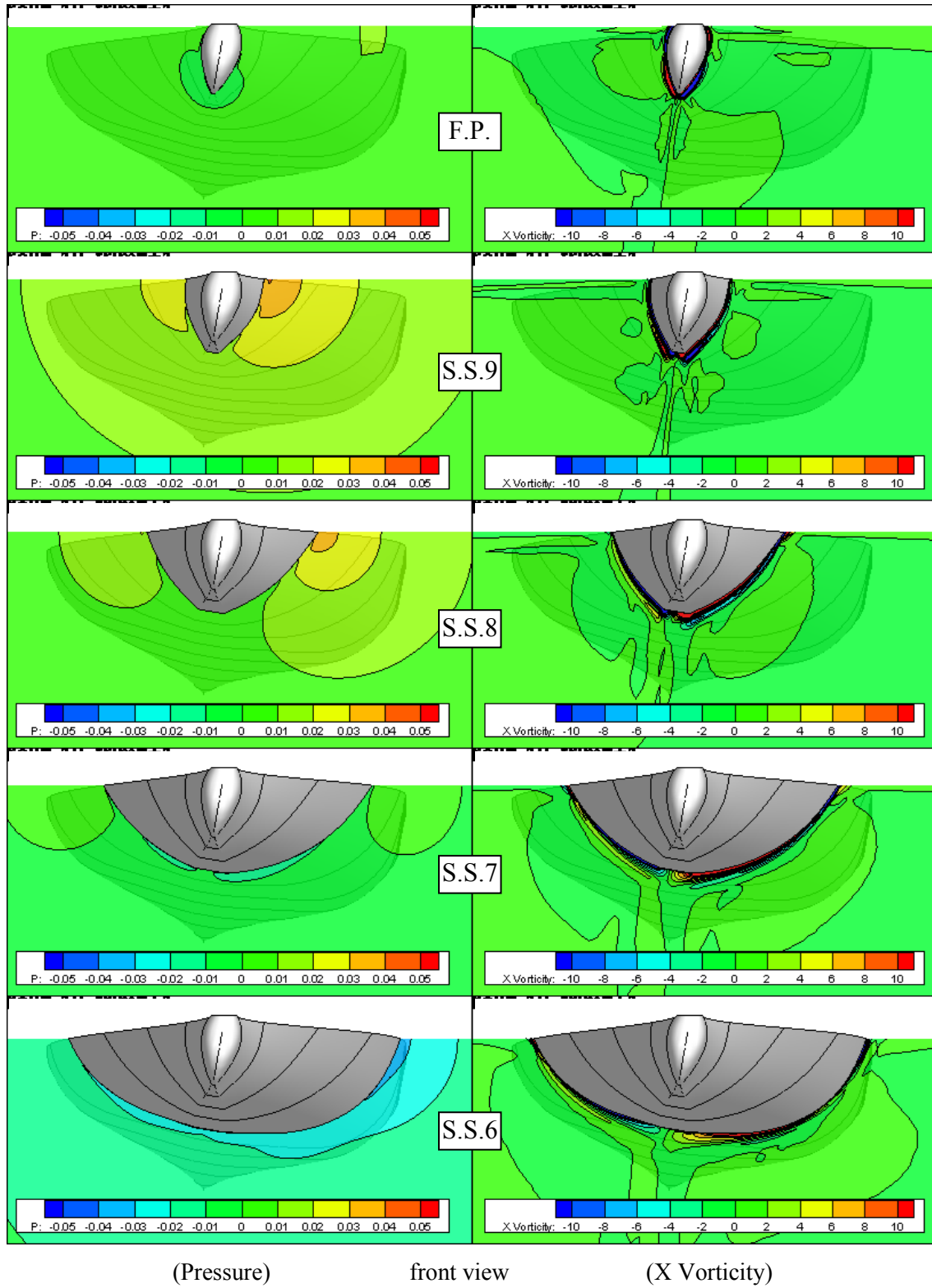


Fig.5.37(a) Contour of pressure and X vorticity on slices of flow around foreside of ship
(Passenger Ferry, $\phi=-10\text{deg.}$, trim=+1deg.)

roll = -10, trim = +1

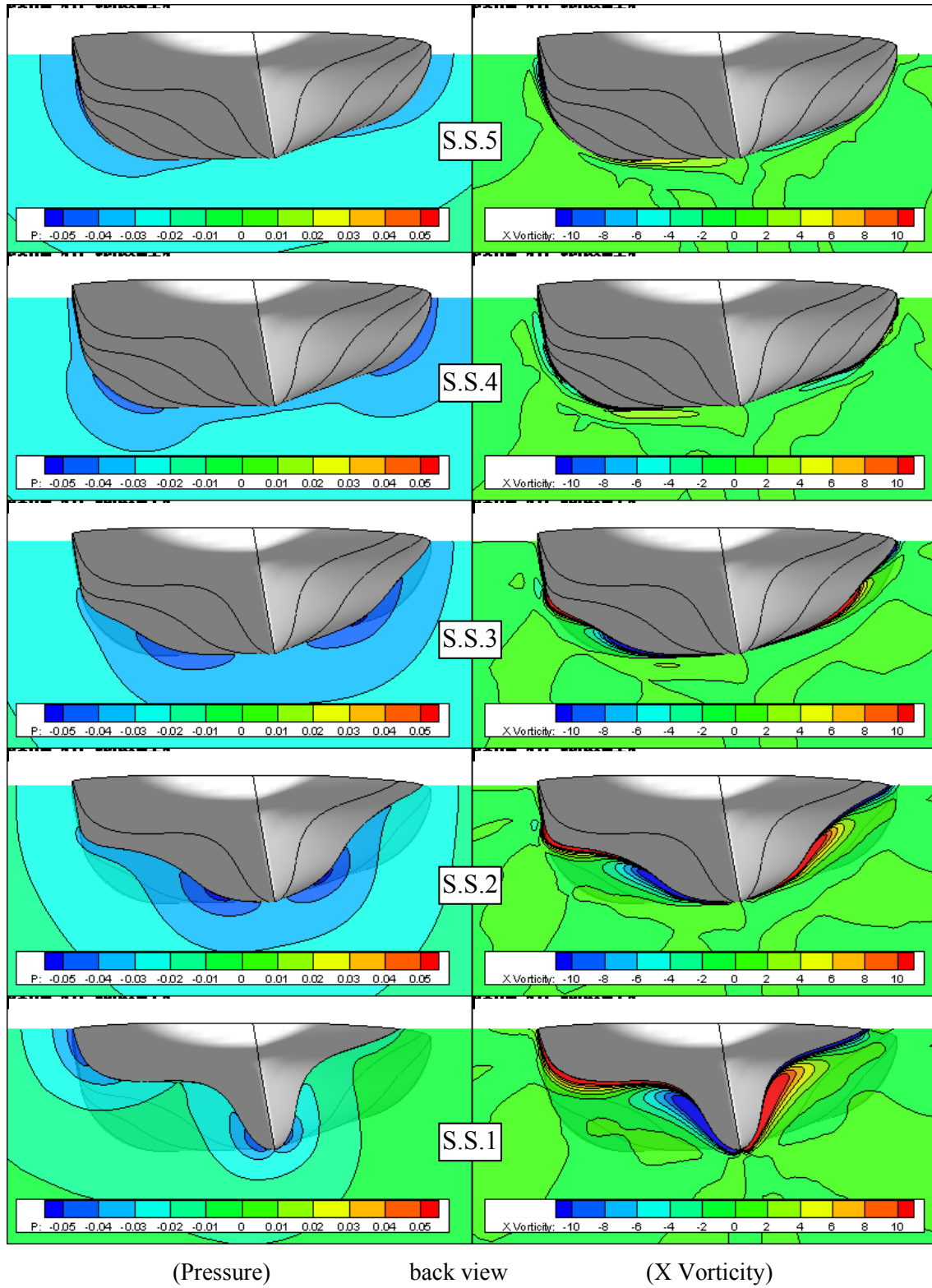


Fig.5.37(b) Contour of pressure and X vorticity on slices of flow around foreside of ship
(Passenger Ferry, $\phi=-10\text{deg.}$, trim=+1deg.)

roll = -10, trim = -1

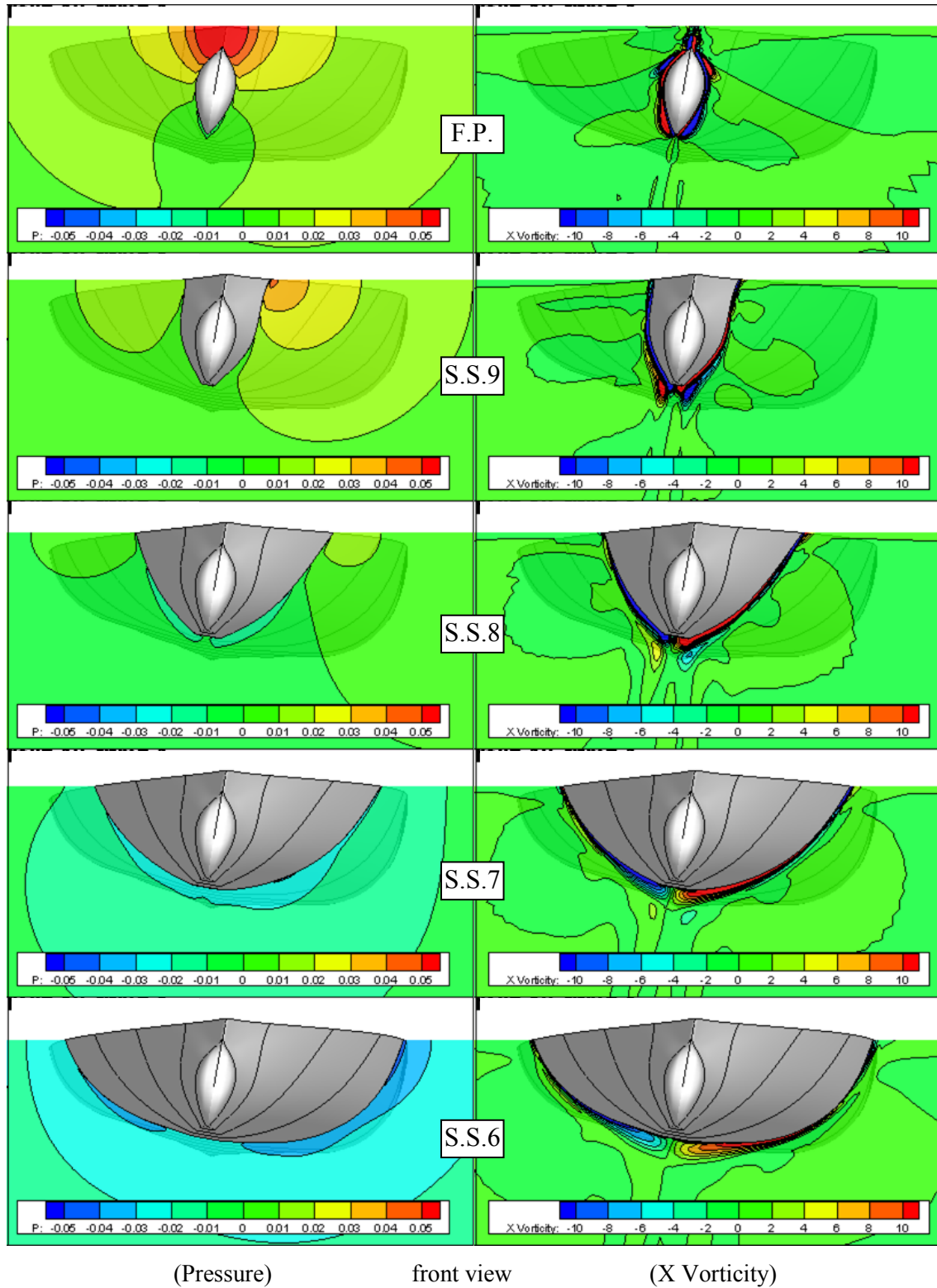


Fig.5.38(a) Contour of pressure and X vorticity on slices of flow around foreside of ship
(Passenger Ferry, $\phi=-10\text{deg.}$, trim=-1deg.)

roll = -10, trim = -1

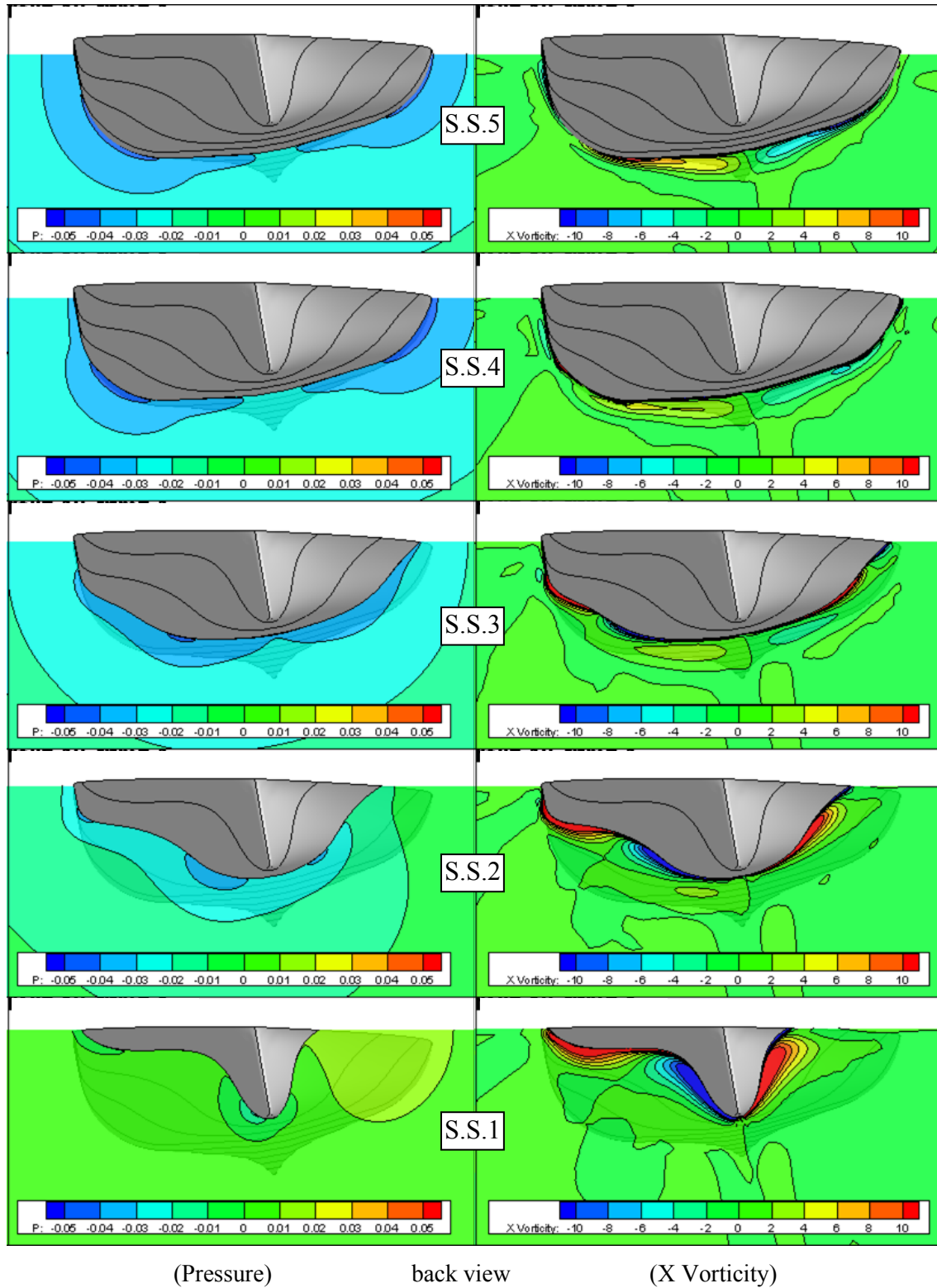


Fig.5.38(b) Contour of pressure and X vorticity on slices of flow around foreside of ship
(Passenger Ferry, $\phi=-10\text{deg.}$, trim=-1deg.)

第6章 結 論

本研究では、横傾斜を伴った操縦運動を行う船舶の操縦性能の正確な推定と把握を目的とし、実験的なアプローチから横傾斜による操縦運動の特性を確認するとともに、操縦運動シミュレーションに横傾斜影響を含めた 4 自由度操縦運動数学モデルの導入を行い、試験結果と比較することでその妥当性を確認した。また CFD を用いた数値計算的アプローチによって、横傾斜を伴った操縦運動を行う船舶まわりの流場解析から横傾斜による操縦運動に与える影響の現象について詳細に検証した。

以下に、本研究から得られた結果をまとめる。

6.1. 水槽試験と 4 自由度操縦運動シミュレーションモデルの構築

本論の第 2 章、第 3 章では横傾斜を伴った操縦運動の特性を確認するため、比較的横傾斜しやすい中高速船である KCS コンテナ船型、フェリー船型を供試模型船として、船速、重心高さ (GM) を変更した自由航走試験を実施し、横傾斜角の変化と操縦運動への影響を確認した。また横傾斜角をパラメータに加えた拘束模型試験を実施し、横傾斜が操縦流体力に与える影響についても確認するとともに、拘束模型試験の結果を基に 4 自由度操縦運動の数学モデルの検討、構築を行った。さらにその操縦運動モデルの妥当性を自由航走模型試験の結果と比較することによって確認した。

自由航走試験から操縦運動の特性として、対象とした 2 船型ともに船速の増加、GM の減少とともに横傾斜角が大きく発達することで、旋回運動の旋回圏は小さく、スパライルカーブの不安定ループ幅、高さが大きくなる様子が確認でき、Z 試験のオーバーシュートアングルは大きくなることから、横傾斜角の増加に伴って旋回性能が強く、針路不安定な傾向となることが確認でき、船速や重心高さの関係から操縦運動中に横傾斜の変化が大きくなる船舶については、操縦性能推定において横傾斜影響を考慮することは重要であることが確認できた。拘束模型試験からは、横傾斜を伴うことによって船体に働く流体力が変化し、その変化の基本は左右対称型の流体力微係数については横傾斜角 ϕ に対して偶関数的に、また左右非対称型の微係数については奇関数的な変化とすべきことを確認し、その数学モデルを本論で導入した。この船体流体力モデルを表した(3.22)式は式内各項で $|\phi| \approx \phi^2$ と見なすと、概ね孫ら⁷⁾の数学モデルに一致し、経験的に提案されてきた数学モデルの妥当性を再確認することとなったが、詳細に比

較すると X_H においては $r\phi$ 、 $\beta^2\phi$ 、 $r^2\phi$ などの項、 Y_H 、 N_H 、 K_H においては $\beta r\phi$ などがそれぞれ必要なことを指摘できる。舵、プロペラに関する流体力係数は全般に横傾斜の影響を受けにくいことが確認でき、その中で整流係数に関しては横傾斜影響の他、横揺れ角速度に伴う横方向の舵有効流速の変化を考慮する必要があることを確認した。以上の各係数の変化を考慮し、操縦運動シミュレーションを行った結果は船速の増加、GM の減少に伴って横傾斜が大きくなり、旋回性能が強く、針路安定性が低下することを確認し、自由航走試験結果ともよく一致することから、構築したモデルが横傾斜を伴う操縦運動の推定に対して有用なものであることを確認した。

6.2. 漁船船型の横傾斜影響について

第 4 章では漁船船型についても横傾斜影響を検討するため、135GT 型旋網漁船を供試模型船として同じく模型試験によって求めた操縦性能特性と流体力を示すとともに、4 自由度操縦運動数学モデルへ適用した。漁船船型についても、船速増加、GM 減少に伴った横傾斜の増大によって、旋回性能が強く、針路安定性が低下することを確認した。横傾斜による操縦特性の変化として、横力、旋回モーメントの左右非対称型の代表的な微係数である Y'_ϕ 、 N'_ϕ について見ると、KCS コンテナ船型と同傾向の変化を示しているが、横傾斜に伴って N'_ϕ については KCS よりかなり大きく変化し、左右対称型の線形微係数 Y'_β はやや増加するなど針路安定性が良くなる方向に変化する傾向があるなどの船型差を確認した。

6.3. CFD による横傾斜を伴った操縦運動時の流場の把握

第 5 章では第 2、3 章で対象とした KCS コンテナ船型、フェリー船型を供試模型船として、実験で得られた各流体力成分に与える横傾斜影響を計算で再現できるかについて CFD による操縦流体力計算を実施した。また実験では実施できなかった船体形状やトリムなどの姿勢変化が操縦流体力に及ぼすに対する影響を明らかにするために、船体まわりの流場の可視化や船体形状、姿勢を変更した計算を実施した。

まず供試模型船の同じ実験状態における横傾斜付きの操縦運動計算結果から、横力、旋回モーメント等の流体力特性は定性的には捉えられ、流体力微係数の横傾斜角に対する変化は CFD によっても実験と近い傾向が捉えられることを確認した。横傾斜モーメントについては実験結果を定量的に捉えられていないが、成分分離により横傾斜モ

ーメントに寄与する上下力が無視できない程度に大きいことを確認し、第 3 章で示した横傾斜モーメントを数学モデルで表す場合には個別に運動変数で表記する必要があることを改めて確認した。これら異なる供試船の計算結果から、横傾斜による操縦流体力への影響については、肩張り部や平行部等の船長方向の船体の形状変化に伴った圧力変化が働く船体表面が、横傾斜によって左右舷のバランスが変化することによっていることを確認した。2 船型の船型差については、肩張りの位置や船底の丸みや平面部の違いによって、横傾斜時の定常横力の符号が異なる原因となることを確認した。

船の姿勢や船首形状を変えた CFD 計算結果からは、横傾斜による流体力変化に与える船首バルブの影響は大きくないことを確認した一方で、トリム変化については、縦渦の強弱や圧力回復等による圧力分布の変化と、力が働く没水形状の変化が操縦流体力に影響を与えることを確認した

6.4. 今後の展望

本論では、船舶の操縦運動時における横傾斜影響を検討した。模型試験による検討から、操縦性能に与える横傾斜影響は、横傾斜が大きくなりやすいコンテナ船、フェリーなどの中速船で現れやすく、こうした船型の操縦性能推定を行うためにも考慮しなくてはならないことを確認した。このことから造船所における船型設計においても横傾斜影響を含めた操縦性能推定が求められるが、拘束模型試験や CFD による検討から、横傾斜影響には船型による差や姿勢影響があることが確認され、これらの影響を正確に把握するためには模型実験が不可欠であるが、これを実験的に行うことは多大な労力と費用が必要となる。本研究では CFD によって、実験に代替して操縦流体力の変化を推定することも検討したが、現時点では定性的傾向は捉えられても、定量的には捉えられない部分もあり、更なる CFD 推定精度の向上が必要である。また本研究では KCS コンテナ船型、フェリー船型、135GT 旋網漁船船型を対象に検討を行ってきたが、操縦性能に与える横傾斜影響には船体形状の差が大きく寄与することが研究結果からも確認できた。従って、高速で傾斜しやすい船として艦船・調査船や漁船のような船型についても、対象船型を拡げ、CFD による流場解析を行っていく必要があり、対象船を増やすことによって操縦流体力に及ぼす横傾斜影響のキーポイントを掴むことができれば、船の主要目から横傾斜影響を推定できることが期待できる。

謝辞

本研究の遂行にあたり、北海道大学名誉教授 芳村康男先生には博士後期課程の研究全般にわたって熱心なご指導を賜り、研究完成に至るまでに多大なご支援をいただきました。芳村先生には博士後期課程入学前から船舶操縦性の基礎や水槽試験法などの様々な知識、技術をご指導いただき、それが現在の私の研究の基礎となっておりますことをここに改めて記し、厚くお礼申し上げます。

研究途中より、指導教官としてご指導いただきました北海道大学水産化学研究院教授 木村暢夫先生には、非常に丁寧なご指導と論文作成へのご助言をいただき、学位論文作成への道筋をつけていただきましたこと、深く感謝いたします。

また学位論文審査にあたり、主査を引き受けてくださいました北海道大学水産科学研究院教授 高木力先生、副査を引き受けていただきました北海道大学水産科学研究院准教授 安間洋樹先生にも、適切なご指導とアドバイスをいただきましたこと、心から感謝申し上げます。

本研究の実験による部分は、博士後期課程入学前から著書が所属するジャパン マリンユナイテッド株式会社の試験水槽にて北海道大学との共同研究等の形で実施しており、実験実施にあたっては北海道大学水産科学院水産工学講座に当時在籍されていた中村充博氏、横田大武氏、矢野大行氏、近藤匡寿氏、中野智文氏をはじめとした多くの学生の方々に、試験準備から解析に至るまで尽力いただきましたことお礼申し上げます。

本研究は、著者がジャパン マリンユナイテッド株式会社に在職しながら、北海道大学大学院の博士後期課程に社会人入学して実施したものであり、多くの会社関係者のご支援もとに実現したものであり、研究への従事にあたっては、業務のサポートから論文へのご指導と貴重なご助言をいただきました。これらのことを含め、多大なご協力をいただきましたジャパン マリンユナイテッド株式会社 技術研究所の関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 運輸安全委員会：船舶事故調査報告書, MA2011-2, 2011
- 2) (財)海難審判協会：漁船第五龍寶丸転覆事件, 函審第 61 号, 2000
- 3) 田口春邦, 石田茂資, 渡辺 巖, 沢田博史, 辻本 勝, 山越康行, 馬 寧：漁船「第五龍寶丸」転覆事故要因に関する検討, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 2001, pp.217-225.
- 4) Comparison of Results for System Based Methods KCS, Workshop Proceedings of SIMMAN2008 Vol.2, 2008.
- 5) Eda, H.: Rolling and steering performance of high speed ships, 13th O.N.R. Symposium, session IV-4, 1980.
- 6) Hirano, M., Takashina, J. : A Calculation of Ship Turning Motion Taking Coupling Effect due to Heel into consideration, 西部造船会々報, 59, 1980, pp.71-81.
- 7) 孫景浩, 野本謙作：高速コンテナ船の操縦運動と横揺れとの連成挙動について, 日本造船学会論文集, 150, 1981, p.232-244.
- 8) 芳村康男, 田辺 穰, 大杉 勇, 雨宮伊作, 多田納久義：大型練習帆船の帆走性能の推定, 日本航海学会論文集, 84, 1991, pp.19-27.
- 9) Oltman, P.: On the influence of speed on the manoeuvring behaviour of a container carrier, Proceeding of MARSIM'96, 1996, pp.515-528.
- 10) 芳村康男：横傾斜を含む線形応答モデルによる船舶操縦性の検討, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 13 号, 2011, pp11-18
- 11) 安川宏紀：船の操縦性に及ぼす横揺連成影響に関する一考察, 日本航海学会論文集 第 123 号, 2010, pp153-158
- 12) 安川宏紀, 平田法隆：横傾斜状態で航行する船の流体力微係数と操縦性, 日本船舶海洋工学会論文集, 17, 2013, pp.19-29.
- 13) Inoue, S., Hirano, M., Kijima, K.: Hydrodynamic Derivatives on Ship Manoeuvring, Inter. Shipbuilding Progress, Vol. 28, No. 321, 1981, pp112-125
- 14) 不破健：斜航中の船体に働く流体力について, 日本造船学会論文集, 第 134 号, 1973, pp135-147
- 15) 松本憲洋, 末光啓二：操縦運動時に船体に働く流体力, 関西造船協会誌, 第 190 号, 1983, pp35-44

- 16) 浜本剛実：細長体に働く揚力とその流れ模型, 関西造船協会誌, 第 196 号, 1985, pp49-58
- 17) 楊建民, 松井志郎, 玉島正裕, 山崎隆介：斜航する船の船体とプロペラ, 舵システムの干渉について, 西部造船会会報, 第 87 号, 1993
- 18) 大森拓也, 藤野正隆, 宮田秀明, 金井誠：肥大船の操縦運動中の流場に関する研究(第一報斜航状態), 日本造船学会論文集, 第 176 号, 1994, pp241-250
- 19) 藤野正隆, 大森拓也, 宇佐見修吾, 江口純弘, 宮田秀明：肥大船の操縦運動中の流場に関する研究(第二報定常旋回中の船体流体力と圧力分布), 日本造船学会論文集, 第 177 号, 1995, pp13-28
- 20) 大森拓也, 藤野正隆, 巽圭司, 川村隆文, 宮田秀明：肥大船の操縦運動中の流場に関する研究(第三報定常旋回中の流場), 日本造船学会論文集, 第 179 号, 1996, pp125-137
- 21) 野中晃二, 原口富博, 上野道雄, 二村正, 藤原敏文, 宮崎英樹, 児玉良明, 日野孝則, 牧野雅彦, 平田信行：船舶の操縦性能評価技術に関する研究, 海上技術安全研究所報告 3(2), 2003
- 22) 福井洋：CFD を用いた操縦運動時の舵干渉影響の研究, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 14 号, 2012, pp471-474