

CFD技術の高度化と水槽試験データ利用の研究

日野 孝則*、日夏 宗彦**、平田 信行*、児玉 良明**
 竹子 春弥**、久米 健一**、塚田 吉昭**、堀 利文**
 佐藤 陽平*、牧野 雅彦**、小林 寛*、長谷川 純**

Study on Advancement of CFD Technology and Utilization of Tank Test Data

by

Takanori HINO, Munehiko HINATSU, Nobuyuki HIRATA,
 Yoshiaki KODAMA, Haruya TAKESHI, Kenichi KUME,
 Yoshiaki TSUKADA, Toshifumi HORI, Yohei SATO,
 Masahiko MAKINO, Hiroshi KOBAYASHI, Jun HASEGAWA

Abstract

National Maritime Research Institute (NMRI) has made efforts in research of CFD (Computational Fluid Dynamics) and has developed various CFD software including Navier-Stokes solvers and pre- and post-processors. These codes have been distributed to the shipbuilding industries in Japan and are being used as practical design tools. In 2002, NMRI established Center for CFD Research in order to enhance CFD research activities and to promote the spread of NMRI's CFD software.

Center for CFD Research carried out the research project "Study on Advancement of CFD Technology and Utilization of Tank Test Data", which was carried out in the fiscal years 2003 and 2004. The project consists of development and enhancement of the CFD software for distribution and the holding of the international workshop on CFD validation, namely, CFD Workshop TOKYO 2005. In addition, the tank tests were performed for a VLCC ship hull in oblique tow conditions to acquire the flow field data for the comparison at the Workshop. In this paper, the outline of the present project is presented.

目次

1. まえがき	25	4. CFD Workshop TOKYO 2005	30
2. CFD技術の高度化	26	4.1 概要	30
2.1 HullDES	26	4.2 テストケース	31
2.2 NEPTUNE	26	4.3 Workshopのまとめ	37
2.3 SURF	27	5. あとがき	38
3. 水槽試験	28	参考文献	38
3.1 目的および供試模型	28		
3.2 計測項目	28		
3.3 計測結果	28		

1. まえがき

CFD(Computational Fluid Dynamics: 計算流体力学)は、流体運動を支配するナビエ・ストークス方

* CFD研究開発センター、** 流体部門

原稿受付 平成19年4月10日

審査済 平成19年6月20日

程式を数値的に解く手法である。船舶分野のCFD研究は1980年代に始まり、海上技術安全研究所(海技研)は、その黎明期から精力的に研究に取り組み、世界最先端の技術を開発してきた。研究成果であるCFDソフトウェアは様々な共同研究の場を通じて、日本の造船業界に提供され、船型設計における実用レベルに到達すべく、精度向上と高機能化が図られてきた。

2002年に海技研はCFD技術開発の推進とCFDソフトウェアの普及促進を目的として、CFD研究開発センターを設立した。センターは、より使いやすく実用的なCFD手法の開発を進め、2005年には、ユーザサポートを付加したCFDプログラムの有償提供を本格的に開始している。一方、世界各国の水槽機関や大学においても船舶CFDの技術開発が活発に行われていることから、その現状を評価し将来の開発課題を明確にすることも必要である。そこで、船舶CFDに関する国際ワークショップ(CFD Workshop TOKYO 2005)を企画し、2005年3月に海技研で開催した。

本研究は2003年度から2004年度にかけて実施した指定研究であり、CFDソフトウェアの有償提供を視野にいたしたCFD技術の高度化および上記ワークショップの開催が目的であった。また、ワークショップにおいて検証データとして用いるために、水槽試験によって流場計測を行った。

ここではそれらの概要について報告する。

2. CFD技術の高度化

海技研は研究成果の社会への還元の一環として、長年にわたって開発してきたCFDソフトウェアの外部への提供を決定した。しかし、これらは最先端の計算手法を組み込んだ高度なソフトウェアではあるが、研究目的で開発されてきたという経緯もあり、必ずしも外部ユーザにとって使いやすいソフトウェアではなかった。そこで、実用目的を念頭に機能強化を行うとともに、ユーザインターフェースを付加してシステム化を推進し、あわせてマニュアル等も整備した。

2.1 HullIDES

海技研が開発し、共同研究などの場を通じて外部に提供してきたCFDプログラムにナビエ・ストークス・ソルバーNICE¹⁾と格子生成ソフトGMESH²⁾がある。GMESHは格子点分布に対する種々の幾何的な要請を定式化しこれを陰的に解くことで格子点分布を求める手法である。船体形状データとして一般的なオフセットから出発して、船体および舵表面の格子生成を行った後、計算領域内の体積

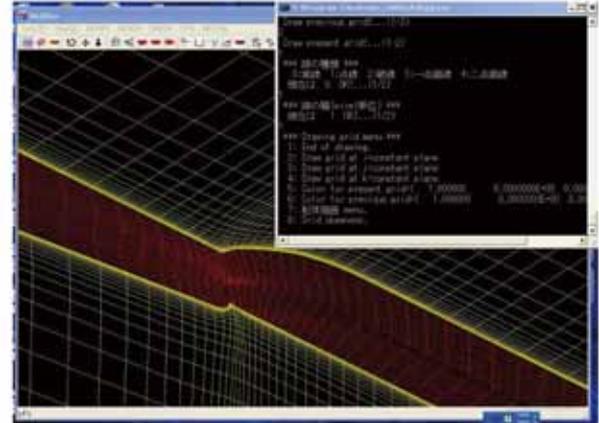


図-1 HullIDESによる格子生成

格子生成までを行うことができる、非常に実用性の高いソフトウェアである。

GMESHは国内の造船業界で広く使われていたが、開発のベースが当時のエンジニアリング・ワークステーションであったこともあり、GUI(グラフィカル・ユーザ・インターフェース)の部分にポータビリティがなかった。そこで、GMESHにPC用のWindows GUIを付加し、(有)エイ・シー・ティーと共同で開発したソフトウェアがHullIDESである。

HullIDESはGMESHのGUIとしてのフロントエンド機能の他にも、CADデータを読み込み、GMESH用の入力データを生成する機能やCADデータを変形して要目などを変更する設計機能などを備えている。

またGMESHについても、自由表面流れ計算用の格子生成機能などいくつかの機能拡張を行っている。

図-1にHullIDESの作動画面を示す。

2.2 NEPTUNE

NEPTUNE (“Newton-relaxization scheme for Pseudo-compressibility based Turbulent Navier-Stokes Equations”)は上述のNICEに変わる、海技研の主力ナビエ・ストークス・ソルバーとして開発されたCFDソフトウェアであり、以下のような特徴を有している³⁾。

- 疑似圧縮法を用いた非圧縮NS計算
- 流体変数はCell-centredに配置
- 有限体積法による離散化
- 非粘性項にはRoe法で評価したMUSCL型3次風上差分を使用
- 粘性項には2次中心差分を使用



図-2 NeptuneBoardによるパラメータ設定

- 時間積分には1次Euler後退差分を使用
- sGS収束計算に基づく準Newton法
- 収束加速にはマルチグリッド法(FAS)と局所時間法を使用
- 乱流モデルとして、Baldwin-Lomax(BL)モデル、修正BL(MBL)モデル、Spalart-Allmaras(SA)モデル、修正SA(MSA)モデルが選択可能
- 自由表面計算には、界面適合型を使用

外部提供に伴い、GUIとしてNeptuneBoardプログラムを作成した(図-2)。NeptuneBoardはNEPTUNEの計算パラメータ設定、NEPTUNEの起動および計算履歴の表示などの機能を持っている。

また、CFDの機能強化として、大規模な剥離を計算できるように乱流モデルの改良を行った。図-3に18度で斜航するタンカー船型の船体表面圧力と流線を示す。ここでは、修正Spalart-Allmaras乱流モデル⁴⁾を用いており、レイノルズ数は $Rn = 4 \times 10^6$ である。ビルジ部で大きく流れが剥離している様子が見える。

さらに、自航状態の計算が可能になるように、簡易プロペラ理論⁵⁾によるプロペラ体積力モデルを導入した⁶⁾。図-4は船の後ろで作動しているプロペラの後流の計算結果である。レイノルズ数は $Rn = 1.8 \times 10^6$ であり、自由表面影響は考慮していない。プロペラ影響による軸方向速度の加速および旋回流成分の生成がシミュレートされている。

2.3 SURF

複雑形状へのアプリケーションを念頭に新たに開発されたナビエ・ストークス・ソルバー

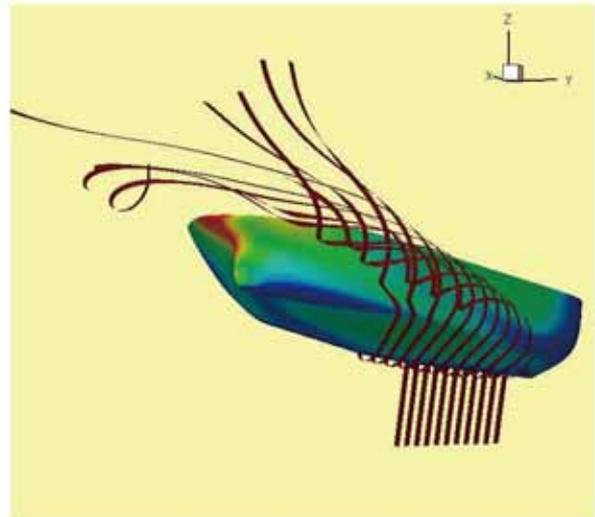


図-3 斜航角18度で曳航されるタンカーの表面圧力と流線

がSURF (“Solution algorithm for Unstructured RaNs with EVM”)であり、以下のような特徴を有している⁷⁾。

- 非圧縮性レイノルズ平均ナビエ・ストークス方程式を用い、擬似圧縮性を仮定して定常解を求める手法
- 二重模型流れおよび非線形自由表面条件による自由表面流れを計算可能
- 空間離散化には非構造格子を用い、Cell-centeredの変数配置による有限体積法によって評価
- 対流項はFlux-Difference-Splittingに基づく2次風上差分(MUSCL type)、拡散項は2次中心差分を使用
- 乱流モデルとして、Spalart-Allmaras modelおよび修正Spalart-Allmaras modelの2種類が選択可能
- 局所時間刻みおよびマルチグリッド法による収束加速

外部提供に伴い、Neptuneboardと同様のGUIフロントエンド、SURFboardを開発した(図-5)。

NEPTUNEとは異なり、SURFの自由表面の扱いはレベルセット関数による界面捕獲法である。自由表面の大きな変形も扱うことができるという特徴を有しており、図-6にプラントな船首のまわりの波のシミュレーション結果を示す⁸⁾。フルード数およびレイノルズ数はそれぞれ0.3834と 3.4×10^6 である。船首および船側の波面の大きな変形が計算されている。

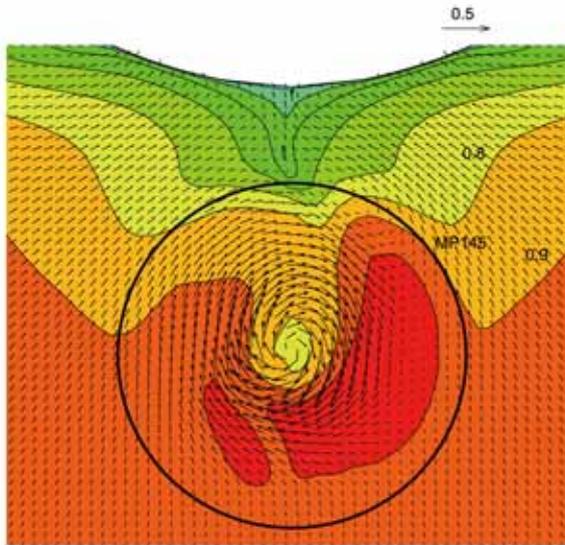


図-4 自航状態の流速分布(等値線は u/U 、ベクトルは $(v/U, w/U)$)

また、NEPTUNEと同様のプロペラモデルをSURFにも組み込むことで自航状態の計算を可能にした。

さらに、マルチグリッド法による収束加速法⁹⁾を組み込むことで計算時間の短縮を図った。図-7はKVLCC2という肥大船まわりの計算の収束履歴である。レイノルズ数は 4.6×10^6 であり、計算格子は $256 \times 48 \times 64$ である。4段階の多重格子を適用することにより、収束が加速されていることが分かる。

3. 水槽試験

3.1 目的および供試模型

船舶の性能評価におけるCFDの利用は直進状態における抵抗推進性能にとどまらず、斜航状態や旋回状態などの操縦性能評価に拡大しつつある。しかし、CFD計算結果検証のための斜航や旋回状態の流場計測データは直進状態に比べてその数が限られている。斜航・旋回状態では、船体まわりで大規模な剥離が見られることから、流場構造が複雑になり、流場計測にも十分な精度が求められる。

本研究では、斜航状態のCFD計算検証のための実験データの取得を目的として、VLCC船型を対象に流場計測を行った¹⁰⁾。計算結果の検証に用いるため、計測に際しては不確かさ解析も行った。

供試模型は、CFD Workshop TOKYO 2005におけるテストケースとして用いた、KVLCC2船型であ

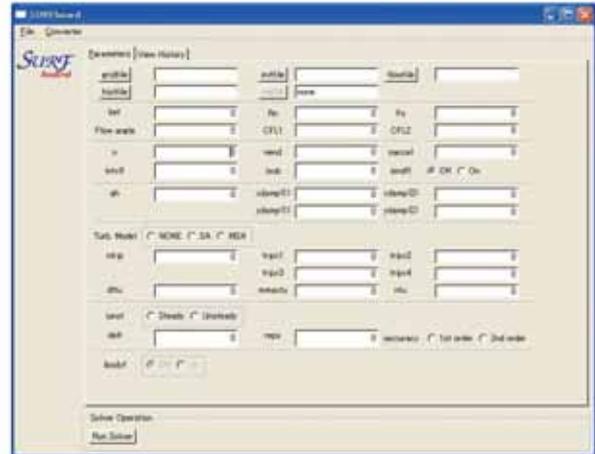


図-5 SURFBoardによるパラメータ設定

る。模型船は $L_{pp} = 4.97\text{m}$ のパラフィン製であり、S.S. $9\frac{1}{2}$ および船首バルブの中央部に乱流促進スタッドを装着した。図-8に実験時の写真を示す。

3.2 計測項目

計測項目は以下の通りである。まず、斜航角 β は、0度、6度、12度とし、それぞれについて流体力とモーメントを前後2個のロードセルを用いて計測した。船体表面圧力は、船体にあけた約400点の圧力孔と半導体圧力計をビニールチューブで結んで計測した。伴流分布は $x/L_{pp} = 0.48$ を中心とする船体の曳航方向に垂直な断面(図-9参照)において、8孔ピトー管を用いて計測した。

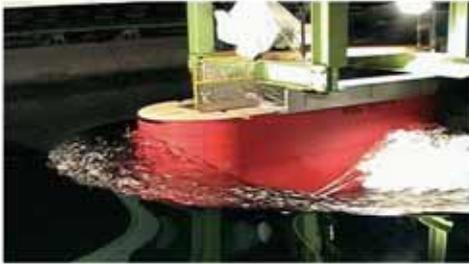
全ての計測は海技研400m水槽(長さ \times 幅 \times 水深 $= 400 \times 18 \times 8[\text{m}]$)で行い、船速は、フルード数で $Fn = U/\sqrt{gL_{pp}} = 0.1424$ とし、レイノルズ数は計測時の水温によって変化するが、概ね $Rn = UL_{pp}/\nu = 4 \sim 5 \times 10^6$ であった。

3.3 計測結果

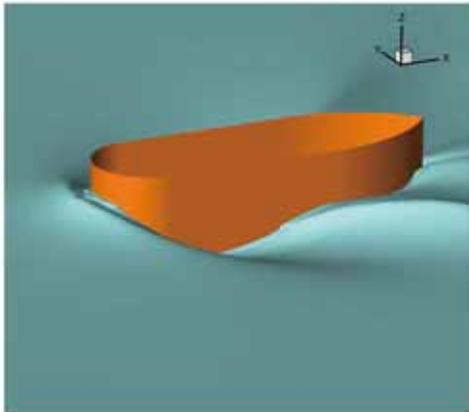
ここでは、斜航角12度における計測結果を示す。全ての計測結果は文献¹⁰⁾を参照されたい。

図-10は斜航角12度における船体表面圧力の計測結果である。左前方から一樣流が流入するため、船首では左舷に高い圧力、右舷に低い圧力が現れる。また、左舷の船首ビルジ部にも低圧部がある。船尾部では逆に右舷下方に低圧部があり、大きな回頭モーメントを生み出している。

図-11は計測した圧力分布をガース方向に積分することにより求めた、横方向に働く流体力の分

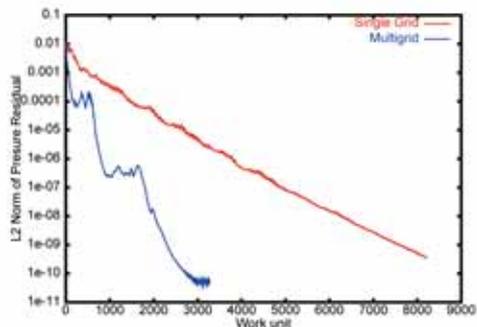


Experiment

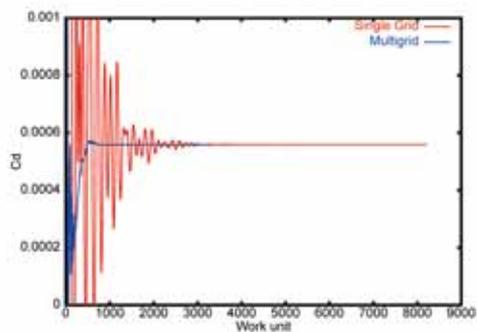


Simulation

図-6 プラントな船首まわりの造波計算



L2 Norm of Pressure Residual



Total Drag

図-7 KVLCC2 船型まわりの計算の収束履歴(赤:多重格子なし、青:多重格子)

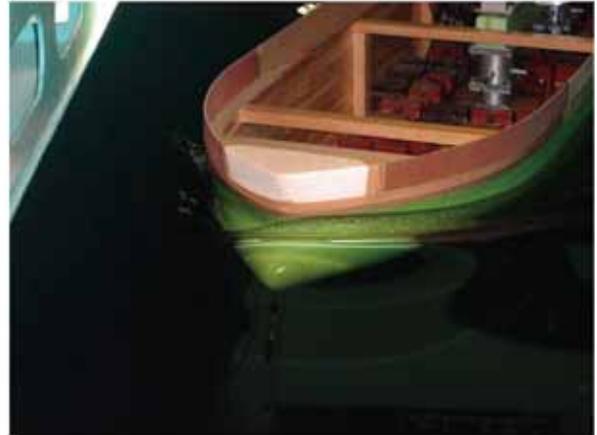


図-8 KVLCC2M 模型

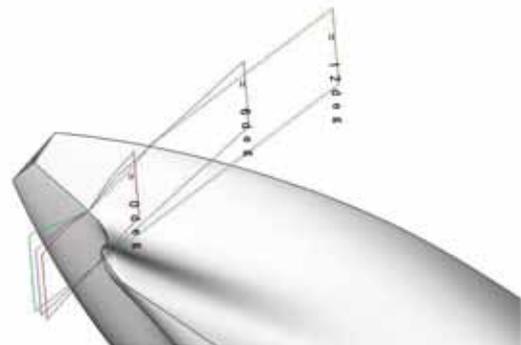


図-9 伴流計測断面

布である。CFDの検証に用いるためには、流体力やモーメントの総量に加え、この例のような詳細な流場計測に基づく流体力分布などの情報が極めて有用である。

図-12は同じく斜航角12度における伴流分布の計測結果である。船体前半で生じた渦が右舷側に流されている様子が見える。また船体中心部近くにも強い旋回流が生じている。このように船体各所から放出された渦が複雑な流場を形成している。

図-13は、上記と同じ断面における $z/L_{pp} = -0.0348$ の線上の速度分布である。計測結果と計算結果の速度分布の定量的な比較のために用いられる。

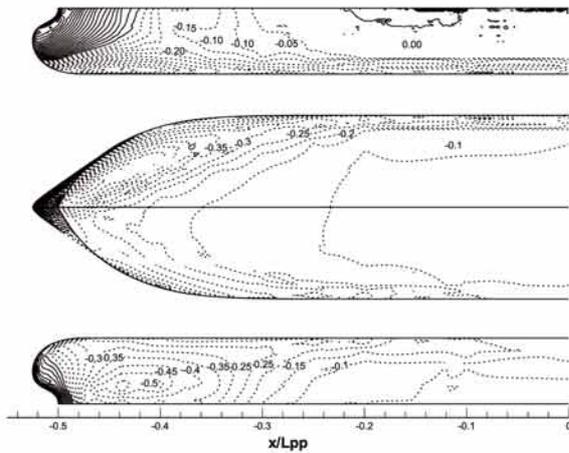


図-10 斜航角 $\beta = 12 \text{ deg.}$ における船体表面圧力 ($C_p = P/0.5\rho U^2$)、実線は正圧、点線は負圧

4. CFD Workshop TOKYO 2005

4.1 概要

CFD Workshop TOKYO 2005 は、2005年3月9日から11日にかけて海技研で開催された。ワークショップでは、共通の計算条件を定めて参加者が計算結果を持ち寄り、実験結果などと比較することにより、技術の現状を評価する。船舶CFDに関するワークショップは1980年に始まり、1990年、1994年、2000年とほぼ5年毎に開催されてきた。海技研は1994年のワークショップを主催しており、今回が2回目のホスト役となる。

計算対象となる船型は前回のワークショップ(11)から引き継いだものであり、図-14に示すように、

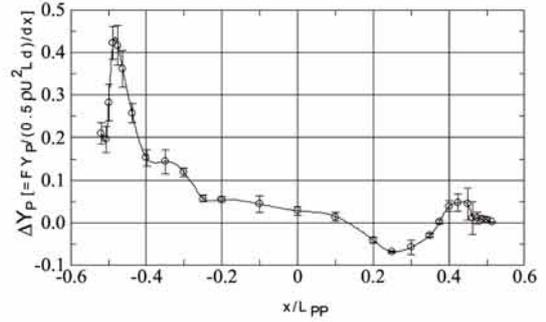


図-11 船体に働く横力分布(斜航角 $\beta = 12 \text{ deg.}$)

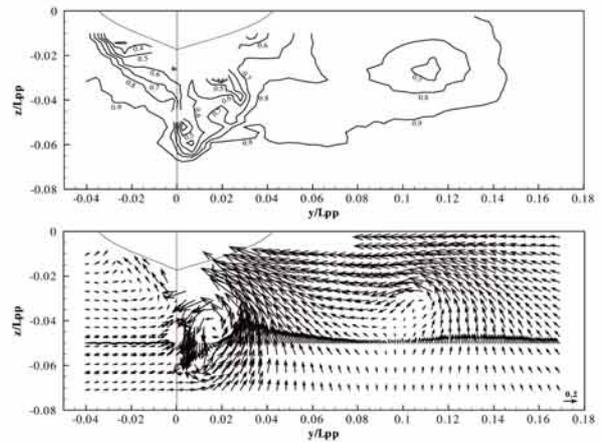
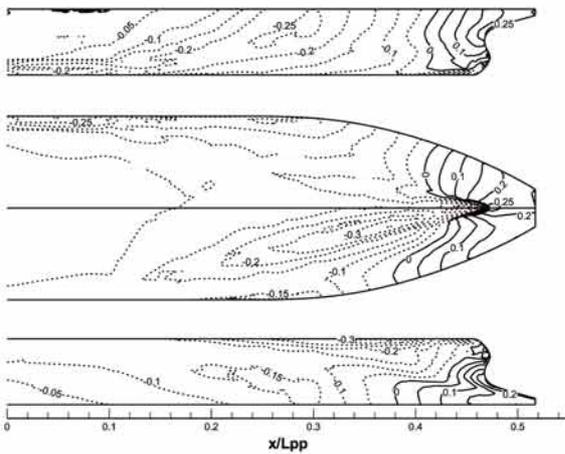


図-12 斜航角 $\beta = 12 \text{ deg.}$ における流速分布(断面位置は図-9を参照))

DTMB 5415、KRISO Container Ship(KCS)、KRISO VLCC(KVLCC2M)の3船型が選定された。また計算状態については、CFD計算に対するニーズの広がりや反映して、これまで行われてきた抵抗性能や自航性能の解析に加えて、操縦性能や耐航性能のシミュレーションも新たな対象とした。また、計算結果の検証方法の確立に向けて、共通の計算格子を用いた計算結果の比較も行われた。計算結果との比較を行うために、これまでに蓄積された実験データを収集しただけではなく、前節で述べたように本ワークショップのための新たな実験(KVLCC2M斜航状態)も海技研水槽において実施された。

メールおよびWebベースでの参加募集を行った結果、計算データを提出した機関は20(日3、米3、欧11、アジア3)、論文数が27篇、出席者66名(日20、米8、欧26、アジア12)となり、大盛況であつ

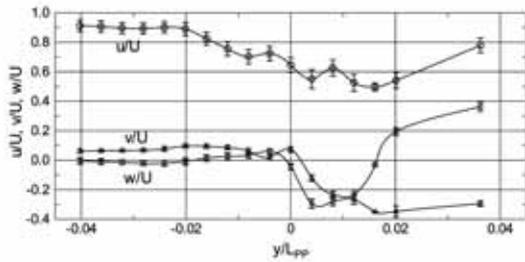


図-13 $z/Lpp = -0.0348$ の流速分布 (斜航角 $\beta = 12$ deg.) (断面位置は図-9を参照)

た。図-15に参加者の集合写真を示す。会議の前刷集は膨大な計算データと実験データをまとめたもので、600ページを超えるボリュームとなった¹²⁾。この前刷集を用いた討論は、のべ6時間におよぶ活発かつ詳細なものであった。会議の論文集は、計算データの解析および会議における討論内容を含め、CD-ROMとともに刊行した。



図-14 ワークショップ計算対象船型

4.2 テストケース

以下のテストケースについて、計算結果相互および実験結果との比較が行われた。

(1) 平水中曳航状態

- 1.1) KCS (KRISO Container Ship) 自由表面付き、姿勢固定
- 1.2) 5415 (DTMB 5415) 自由表面付き、姿勢固定
- 1.3) 5415 自由表面付き、姿勢フリー
- 1.4) KVLCC2M (Modified KRISO VLCC2) 自由表面なし

(2) 平水中自航状態

KCS 自由表面付き、姿勢固定

(3) 平水中斜航状態

KVLCC2M 自由表面なし

(4) 入射波中曳航状態 (diffraction 問題)

5415 自由表面付き、姿勢固定

(5) 共通格子による平水中曳航状態

KVLCC2M 自由表面なし

以下に、計算結果比較の概要を述べる。

4.2.1 KRISO Container Ship

— テストケース 1.1 および 2 —

積分量

曳航状態の抵抗計算(ケース1.1)については、11機関より結果が寄せられた。全抵抗係数 $C_T (= R_T / 0.5\rho U^2 S)$ 、 S は浸水面積の実験値、 3.56×10^{-3} に対し計算値の平均は 3.60×10^{-3} となり、約1%高くなった。標準偏差が 0.15×10^{-3} であることを考慮すると、実験と計算の一致度は良好である。

プロペラ影響のあるケース2については、4機関が参加した。抵抗状態の全抵抗は、上と同様に一致度は良好である。しかし、二重模型流れ計算の結果から求めた形状影響係数 $1+K$ は、実験値より3%大きい。また公称伴流 $1-w_n$ についても、約3.6%大きく計算されている。自航状態の計算では、プロペラのスラスト係数 K_T は実験とよく合っている。スラストは船体抵抗とバランスするように計算されるため、抵抗に関する良好な計算精度を反映している。一方でトルク係数 K_Q の計算値にはばらつきが見られる。このことからプロペラ効率比 η_R もばらついている。自航要素の計算精度も十分ではなく、プロペラモデルの改良が必要と考えられる。

伴流

KCSは痩せ型船型なので肥大船の場合のように、伴流の中の縦渦は顕著ではない。そのため、曳航状態の伴流の計算結果(プロペラ面)も一般的に実験結果とよく合うパターンとなっている。しかし、より詳細に比較すると、船体中心近くの軸方向流速に関して実験値と定量的に合わない部分が見られる。これは格子の解像度不足または、乱流モデルの不備が原因と思われる。

自航状態における、プロペラ後流の流場の比較の例を図-16に示す。(実験は海技研、計算はボツダム水槽による)。プロペラ作動による面内流速ベクトルや非対称に加速された軸方向速度分布などが、計算で再現されている。しかし、詳細な比較を行うとプロペラ中心近くで計算と実験の差が大



図-15 CFD Workshop TOKYO 2005 参加者

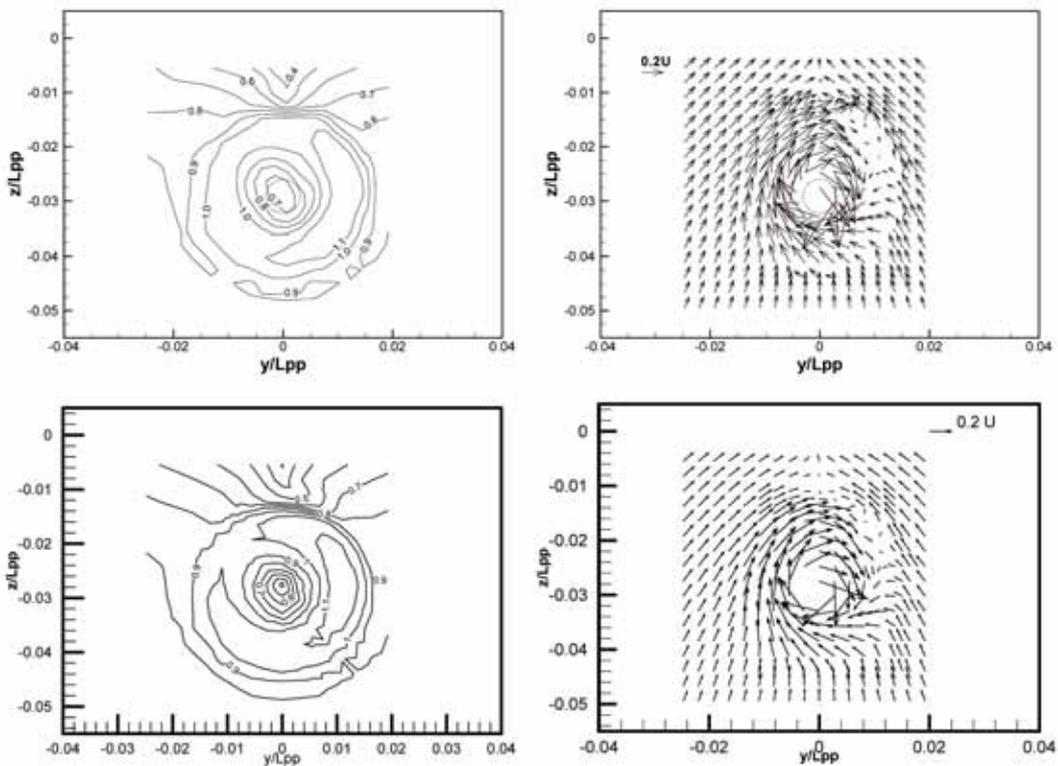


図-16 KCS船型のプロペラ面の流速分布(上:実験(海技研)、下:計算(ポツダム水槽))

きい。計算では、プロペラハブの影響を考慮していないことも原因の一つと思われる。

船体表面圧力

曳航状態、自航状態とも船体表面圧力分布の実

験結果と計算結果はよく一致しており、計算結果相互の差も小さい。

自由表面

自由表面の計算手法については、かつては計算

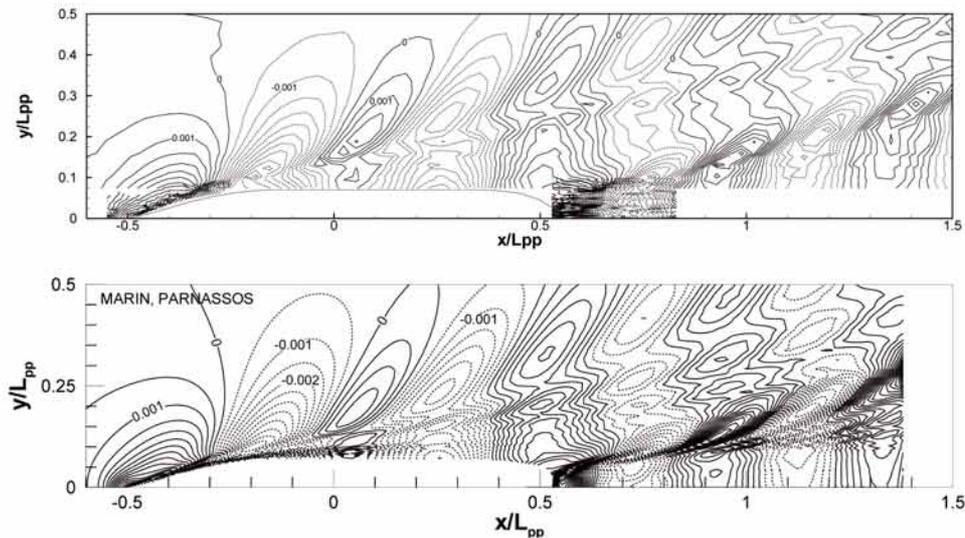


図-17 KCS船型の波紋(上:実験(KRISO)、下:計算(MARIN))

格子が波面の移動変形に追従する界面適合法が主体であったが、近年は格子を空間に固定し、マーカー関数によって自由表面位置を計算する界面捕獲法の採用が増えている。今回の参加機関11のうち3機関のみが界面適合法による計算であり、残りは界面捕獲法を用いている。

船側波形で見ると、船首船尾部を除き実験と計算の一致度はよい。特に、トランサムスターン後方の波は前回のワークショップ時に比べ、精度が向上している。計算精度そのものの向上もさることながら、O-Oトポロジの格子を採用することで、トランサム形状を実際に近い形でモデル化できるようになったことも原因の一つであろう。

また、波形を精度良く計算するために必要な格子解像度などについて、活発な意見が交わされた。また、計算手法についても、新たなアプローチにより高精度の結果を得た例が発表された。一方で、造波抵抗算定に必要な格子の密度は波形を精度良く計算するための格子密度とは異なるのではないか、という議論もあった。

図-17はKCSの波紋の比較($F_n=0.26$, $R_n=1.2 \times 10^7$)の例である。KRISOによる実験結果に対し、MARINの計算結果は定量的にかなりの一致度を見せている。

4.2.2 DTMB5415(1)

— テストケース 1.2 および 1.3 —

船側波形

曳航状態のケース1.2に対しては、11機関がデータを提出した。上のKCSの場合と同様に計算された船側波形は実験結果と良好な一致を見せてい

る。船首部では若干の差が見られるが、計測も難しい箇所であるので、実験値の不確かさもかなり大きく、定量的な議論は難しい。

縦切り波形

テストケース1.1に比べると、実験と計算の一致度は悪い。位相は合っているものの、振幅は小さく(40%近く小さい場合もある)計算されている。特にトランサムスターンで形成される船尾波の振幅は実験値よりも大幅に小さい。前回のワークショップの結果からの改善はほとんど見られなかった。

波紋

波高そのものは減衰しており、急峻さが足りないものの、船首からのいわゆるケルビンパターンは、どの計算結果でも良好に再現されている。格子点数の増加や、複数の格子を重ねる重合格子法の採用などが、計算結果の精度向上に寄与していると考えられる。

船首の波形は実験値の精度が不足していることから、定量的な比較が困難であり、実験データのより一層の整備が求められる。また、船尾波は剥離流れの中であって非定常であり、時間精度のある解法で計算して比較する必要があることが指摘された。また、トランサムでの波の「切れ」をどう扱うかも議論となった。計算手法については、特に界面捕獲法の場合の空間離散化手法について意見が交わされた。

図-18は計算結果の波紋($F_n=0.28$, $R_n=1.26 \times 10^7$)の例(海技研)である。

伴流

この船型も痩せ形船型であり、プロペラ面の伴流分布は計算によってよく再現されている。より

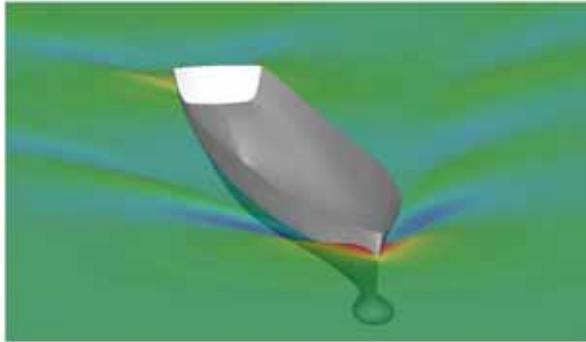


図-18 DTMB5415船型の計算波形(海技研、SURF)

高精度のシミュレーションのためには、船首ソナードームで生じた渦の影響を正しくとらえることが重要であり、その意味では乱流モデルがキーとなるという議論があった。

積分量

計算された抵抗値の一般的に実験値とよく合っている。細かい格子で格子数が増大したときの計算取束の問題が話し合われた。ある計算例では、伴流を精度良く計算するためには、80万点程度の計算格子が必要であるが、抵抗算定はもっと少ない格子でも可能であることが示されている。

4.2.3 KVLCC2M(1)

— テストケース 1.4 および 5 —

積分量

KVLCC2Mに限らず、全てのケースについて抵抗の推定は実験値とよい一致を示している。計算手法や使用している乱流モデルは異なるものの、計算値の平均と実験値との差は約2%である。したがって、抵抗の予測そのものは高い精度で可能になっているものと思われる。一方で、標準偏差は約5%であり、計算手法によるばらつきは依然として解消していない。

KVLCC2Mの曳航状態については、13機関が参加している。抵抗係数 C_T の実験値は 4.26×10^{-3} であるのに対し、計算値の平均は 4.262×10^{-3} であり、非常に高い精度で計算されている。

テストケース5では、計算結果の検証に関する新たな試みとして、共通の格子を用いた計算結果の比較を行った。KVLCC2M船型を対象として、表-1および図-19に示すような、密度の異なる5種類の格子(格子数で16万程度から960万程度まで)を作成し、参加者に配布した。これらの格子は、同一のソフトウエアにより、格子数と格子間隔以外は同じパラメータになるように作成した。このような共通の格子を用いることにより、計算手法の特性の

表-1 共通格子

grid name	im	jm	km	Δ_{\min}
GRID1	513	97	193	1.674×10^{-6}
GRID2	361	69	137	2.369×10^{-6}
GRID3	257	49	97	3.188×10^{-6}
GRID4	181	35	69	4.545×10^{-6}
GRID5	129	25	49	6.124×10^{-6}

違いがより明確に分析できることが期待される。

7機関から11種類の結果が提出された。図-20は、全抵抗の比較である。横軸は格子密度であり、左にいくほど格子が細かい。多くの計算結果は実験結果の近傍に分布している。格子数を増やすにつれて、抵抗計算値の標準偏差は小さくなるが、成分(図には示されていない)で見ると、圧力抵抗が減少し、摩擦抵抗が増加する傾向を示している。おそらく、粗い格子では境界層の厚みが大きめに計算されているためと思われる。また、格子数が数十万点程度の計算結果は格子密度と共に変化しており、格子密度に依存しない解を得る場合には、さらに高密度の格子が必要であることを示唆している。

伴流

用いる乱流モデルによって、結果は大きく異なる。縦渦に伴う、いわゆるフック形状を再現するためには、スタンダードな乱流モデルでは限界があり、修正モデルを使わざるを得ない。

図-21はKVLCC2Mのプロペラ面における伴流分布(二重模型、 $Rn=3.945 \times 10^7$)の比較である。計測値(海技研)では、肥大船の伴流の特徴である縦渦の形成とフック状の伴流分布形状が明瞭に見える。修正Spalart-Allmarasモデルによる計算(海技研)でもその傾向はある程度まで再現されている。しかし、より汎用的な伴流予測に関しては、物理現象を反映した乱流モデルの開発が必要とされている。

4.2.4 KVLCC2M (2)

— テストケース 3 —

積分量

KVLCC2Mの斜航状態の計算については、9機関から16種類のデータが提出された。斜航状態の計算は、CFDによる操縦性の評価への期待もあって、各国の関心が高い。

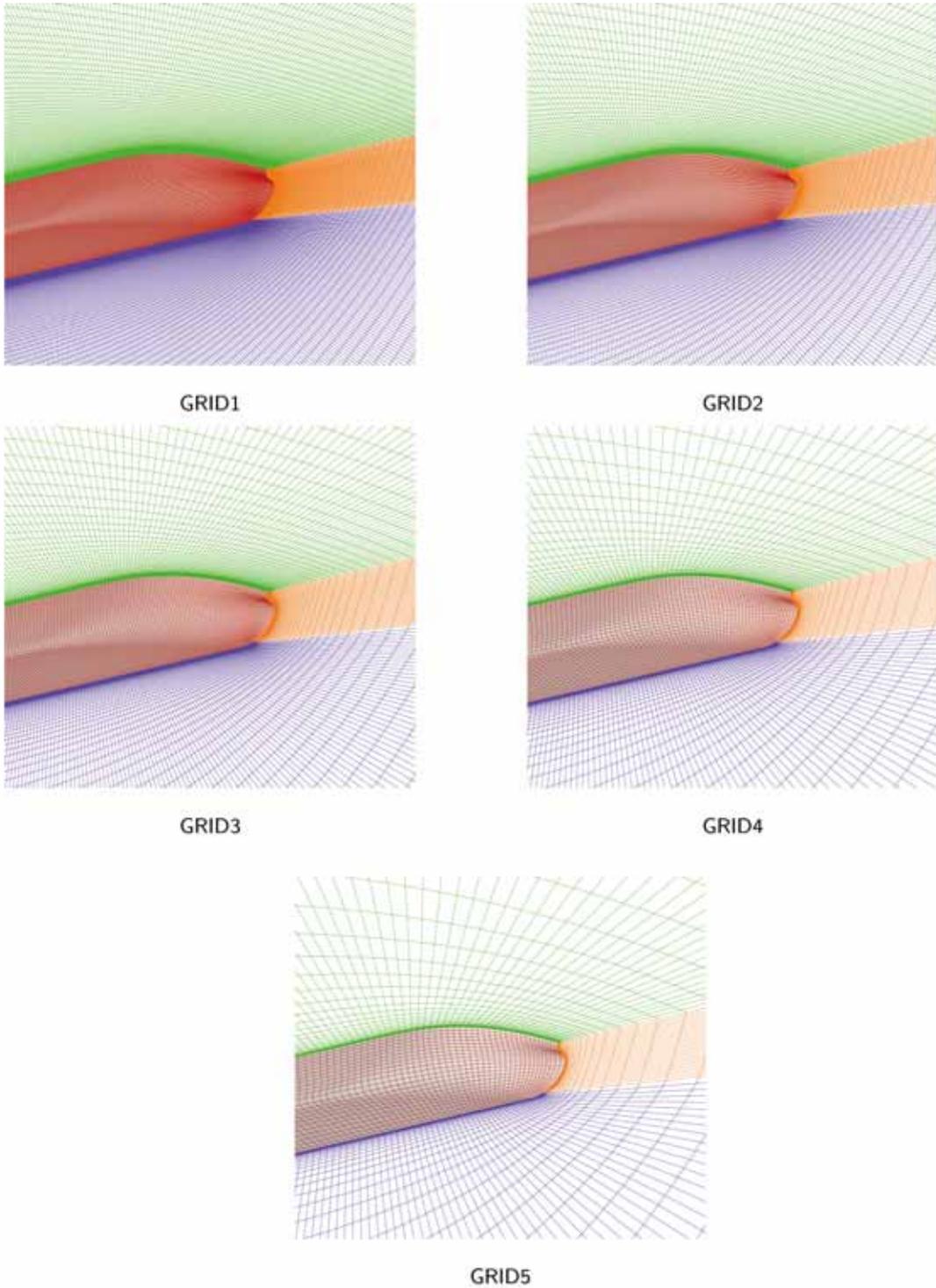


図-19 KVLCC2船型の共通格子

まず、直進状態は、テストケース1.4と同一条件であるが、用いる格子が異なるため、抵抗(x 方向の流体力)の計算結果の標準偏差も1.4が6.2%に対して、本ケースは8.5%と異なる結果となっている。

斜航角を増加させても、抵抗のばらつきは殆どかわらないが、横力およびモーメントは絶対値が大きくなるため、標準偏差としては小さくなる。

図-22はKVLCC2Mの斜航時の流体力の比較であ

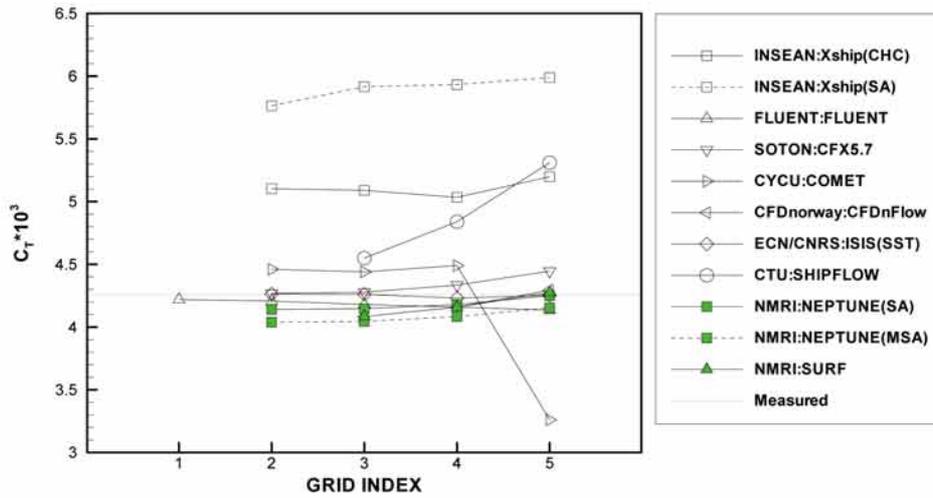


図-20 KVLCC2M船型の共通格子による抵抗計算

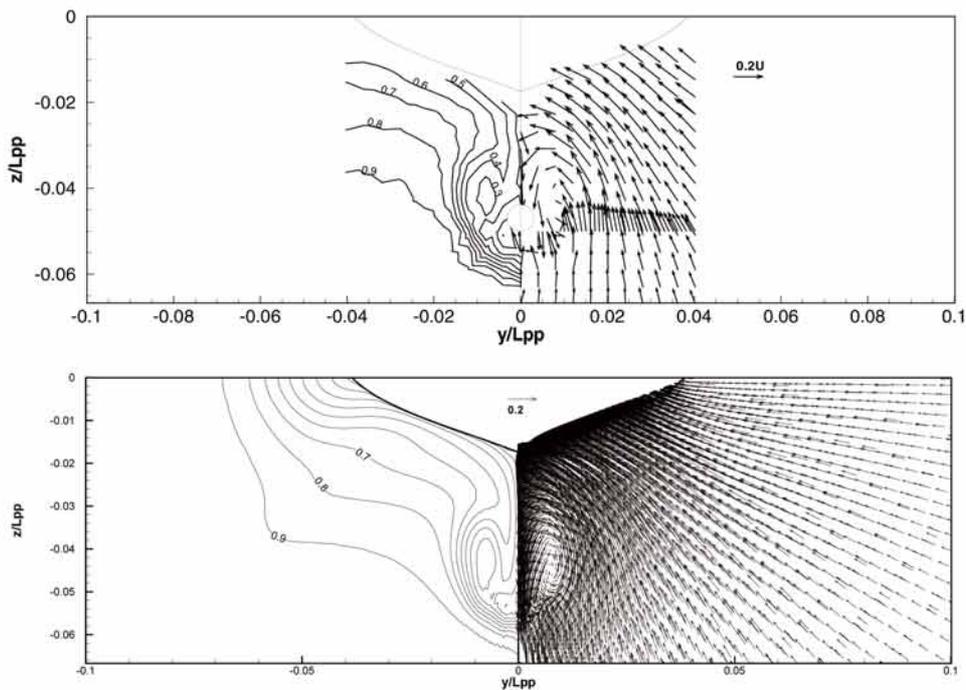


図-21 KVLCC2M船型のプロペラ面の流速分布(上:実験(海技研)、下:計算(海技研、NEPTUNE))

る(実験、計算ともに海技研。計算は、二重模型流れ、 $Rn=3.945 \times 10^7$)。横軸は斜航角である。横力および回頭モーメントについては、斜航角12度まで比較的精度よく計算されているが、着力点の精度はそれほどよくない。着力点は横力/モーメントで計算されるため、微小な誤差が増幅することになる。操縦性能の評価のためには、さらなる計算精度の向上が必要である。計算領域を十分広く

とり、計算格子点数も数百万点規模が必要となるであろう。乱流モデルについてはレイノルズ・ストレス・モデルが良い結果を与えるようである。自由表面影響あるいは流れの非定常性についても意見が交わされた。

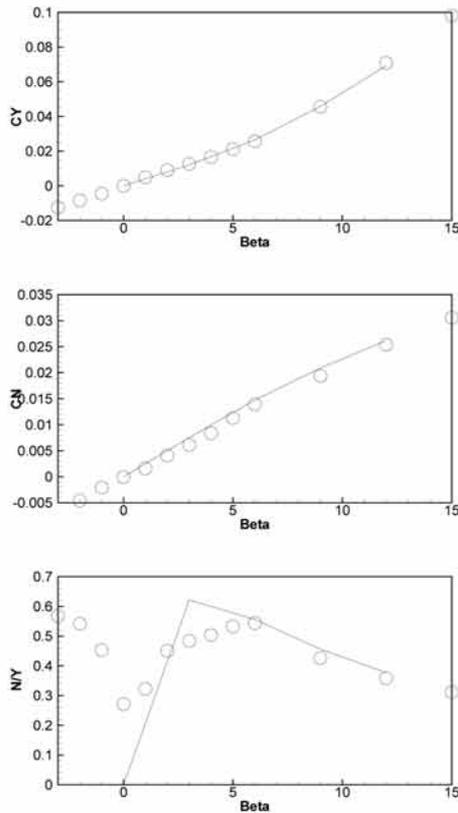


図-22 KVLCC2M船型の斜航時の流体力(線:実験(海技研)、○:計算(海技研)、上:横力(CY)、中:回頭モーメント(CN)、下:着力点(N/Y))

4.2.5 DTMB5415 (2)

—テストケース 4—

計算法など

テストケースの設定は、DTMB 5415 船型が $Fn=0.28$ 、 $Rn=4.861 \times 10^6$ で向い波中を航行するものである。波長および波振幅は $\lambda/Lpp = 1.5$ 、 $2\pi A/\lambda = 0.025$ であり、船体は固定されている。このDiffraction問題に対しては4機関がデータを提出した。自由表面の扱いの内訳は、レベルセット法2機関、VOF法1機関、界面適合格子法1機関である。格子点数は100万から300万程度であり、時間刻み幅は0.001から0.02の間にある。非定常なデータを扱う初めてのケースであり、比較方法についてのノウハウの蓄積が必要であるという議論があった。

積分量

抵抗の0次と1次の振幅は実験と計算でよく合っているものの、位相についてはあまり合わない。また、ヒープ力(z方向の力)についても全般的にはよく合っている。

流場

波形についても実験値とよく一致しているが、界面適合法を用いたものは格子解像度の問題もあり、船体から離れたところで波が減衰している。波面の計算精度は時間刻み幅と格子間隔にも依存しているので、自由表面の扱いの違い(界面捕獲法と界面適合法)を直接的に比較することは困難である。また、非定常な流れ場の特性を把握するためにはアニメーションで実験と計算を比較することも有用であるという意見があった。非定常な流場を初めて扱ったが、結果は有望であり、さらなる研究の進展が期待される。

図-23に波紋の周期変化の例を示す。実験、計算ともにアイオワ大学による結果である。入射波の位相と船体造波の干渉による波紋変化の定性的な傾向は捉えられている。

4.3 Workshop のまとめ

抵抗予測の精度は前回のワークショップとほぼ同様であったが、自由表面の計算精度は向上した。自由表面の扱い方も界面適合法が主流であった前回までの傾向から界面捕獲法が主流へと変化した。また、重合格子法などの新しい手法も多用されるようになってきた。

一方で、伴流予測についてはあまり進展がなかった。乱流モデルの開発に進展がなかったためと考えられる。

自航状態の計算例はまだ多くなく、プロペラモデルの多くは体積力モデルである。プロペラ作動時の流場は定性的に計算できているが、自航要素などの計算精度は十分ではない。今後さらに研究が必要である。

斜航状態の計算には多くの参加者があり、操縦性分野へのCFD適用の期待の高さがうかがえる。流体力やモーメントは実験値と定性的にはよく合っているが、定量的な一致度は十分ではない。大規模な剥離渦の挙動を正確に再現できているかどうかは、今回のような単純なプロットでは判断できない。より高度な後処理法を適用する必要がある。

耐航性もCFD適用が期待される分野である。今回はその第一歩として、船体を固定したDiffraction問題を扱った。自由表面形状および伴流について、定性的には実験値とよく合う計算結果が得られた。実用段階に進むためには、今後、さらに定量的な評価を行う必要がある。

共通格子による計算結果の相互比較により、抵抗の計算値は格子数を増やすと収束値に近づくことが確認された。同時に、異なった乱流モデルに

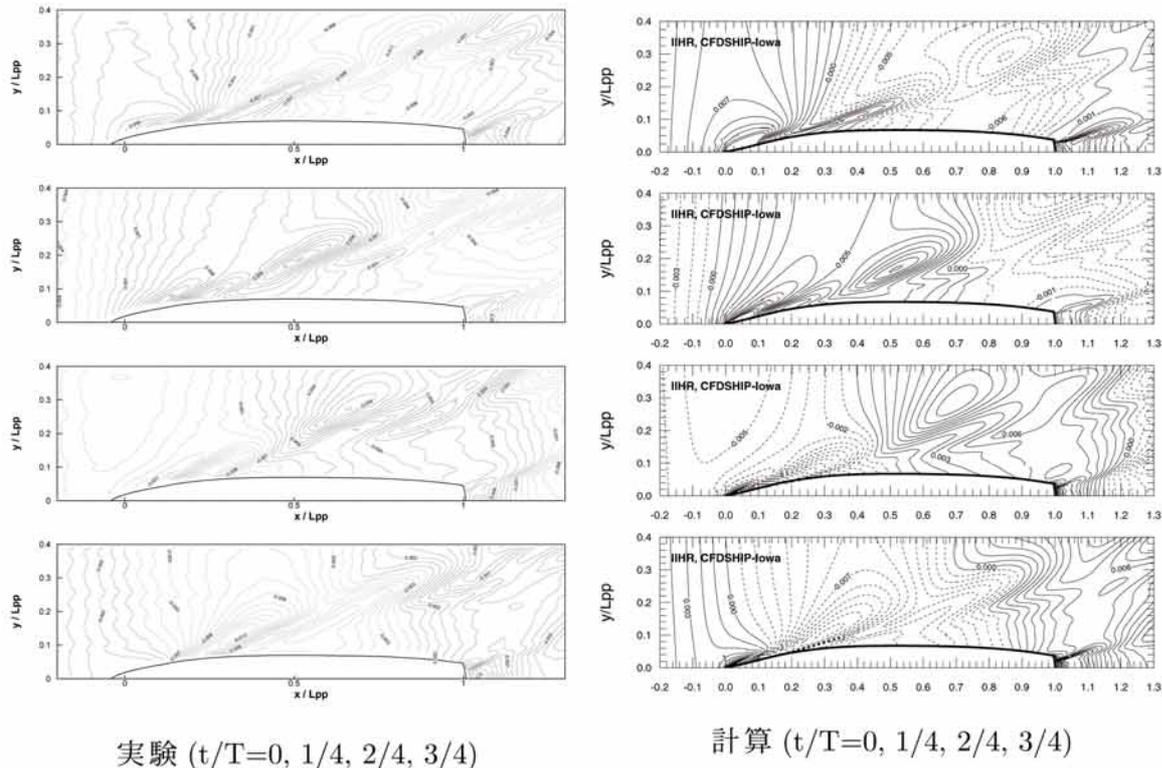


図-23 DTMB5415船型の波浪中の波紋(左:実験(IIHR)、右:計算(IIHR))

よる流場の相違は、格子数を増やしても縮まらないことも明らかになった。

5. あとがき

2003年度から2004年度にかけて実施した指定研究「CFD技術の高度化と水槽試験データ利用の研究」の概要を報告した。

外部提供のための技術開発を終えたCFDソフトウェアは、2005年より本格的に外部提供を開始し、国内の主要な造船各社などにおいて利用されている。

また、2005年3月に開催したCFD Workshop TOKYO 2005によって船舶CFDのstate-of-the-artが明らかとなり、今後の研究開発の方向性を定めることができた。今後も船舶CFDの研究開発を継続し、ソフトウェアの外部提供によって産業競争力の維持に貢献する所存である。

参考文献

- 1) Kodama, Y. : “Computation of Ship’s Resistance Using an NS Solver with Global Convergence - Flat Plate and Series 60 ($C_b=0.6$) Hull -, 日本造船学会論文集、第172号、1992.
- 2) Kodama, Y. : “Grid Generation around a Practical Ship Hull Form Using the Implicit Geometrical Method”, 日本造船学会論文集、第169号、1991.
- 3) Hirata, N. and Hino, T. “An Efficient Algorithm for Simulating Free-Surface Turbulent Flows around an Advancing Ship”, J. the Society of Naval Architects, Japan, 185, 1-8, 1999.
- 4) Hirata, N. and Hino, T. , “A Comparative Study of Zero- and One-Equation Turbulence Models for Ship Flows”, J. of Kansai Society of Naval Architects, Japan, No.234, pp.1-8, 2000.
- 5) 森山、 “プロペラ性能の近似計算法について”、船研報告第16巻第6号 pp.361-376、1979.
- 6) Ohashi, K., Hirata, N. and Hino, T., “A Comparative Study of Body Force Models Representing Effects of Contrarotating Propellers”, Trans. West-Japan Society of Naval Architects, No.105, pp.55-64, 2003.
- 7) Hino, T., “ A 3D Unstructured Grid Method for Incompressible Viscous Flows”, J. of the Society of

- Naval Architects, Japan, Vol.182, 1977, pp.9 – 15, 1997.
- 8) Hino, T., “Numerical Simulations of Breaking Waves around an Advancing Ship by an Unstructured NS Solver”, Proc. of the 25th Symp. on Naval Hydro., 2004.
 - 9) Hino, T. and Hirata, N., “Unstructured Multigrid Method for Ship Flows”, Proc. of Numerical Towing Tank Symposium, 2002.
 - 10) Kume, K. et al., “Measurements of hydrodynamic forces, surface pressure, and wake for obliquely towed tanker model and uncertainty analysis for CFD validation”, J Mar. Sci. Technol. Vol 11, pp.65-75, 2006.
 - 11) Larsson, L. et al. Ed.: Gothenburg 2000 A Workshop on Numerical Ship Hydrodynamics Proceedings, Chalmers University of Technology, Gothenburg, 2000.
 - 12) Hino, T. Ed.: Proceedings of CFD Workshop TOKYO 2005, National Maritime Research Institute, TOKYO, 2005.