

船舶計算流体力学の現状と展望

CFD 研究開発センター *日野 孝則 平田 信行 竹子 春弥
佐藤 陽平 小林 寛

1. まえがき

船舶分野のCFD(計算流体力学)研究は1980年代に始まり、海上技術安全研究所(海技研)は、東京大学とともに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、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た。

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おり、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。本稿では、このワークショップの概要を報告して、船舶CFDのstate-of-the-artを概観するとともに、それを踏まえた今後の技術開発の展望について述べる。

2. CFD Workshop TOKYO 2005

2.1 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、共通の計算対象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¹⁾から引き継いだものであり、図-1に示すように、

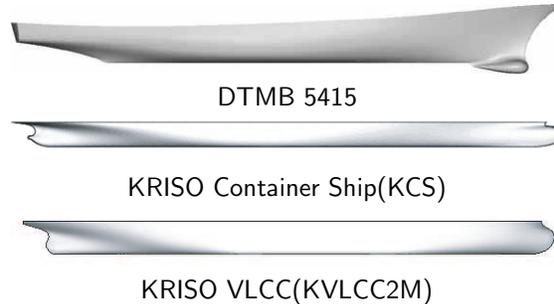


図-1 計算対象船型



図-2 CFD Workshop TOKYO 2005 参加者

DTMB 5415、KRISO Container Ship(KCS)、KRISO VLCC(KVLCC2M)の3船型が選定された。また計算条件については、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、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、図-2)となり、大盛況であった。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²⁾。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の形で刊行する予定である。

2.2 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。

2.2 曳航状態の計算

テストケース (1) の曳航状態の計算のうち、1.3) の姿勢フリーの計算は参加者が 1 機関のみであった。CFD による姿勢推定のニーズは高いので、今後の開発に注力する必要がある。抵抗計算値の定量評価に関しては、前回ワークショップの時点 (2000 年) から一般的に計算精度が向上しているものの、さらなる計算精度向上が必要とされた。

図-3 は KCS の波紋の比較 ($F_n=0.26$, $R_n=1.2 \times 10^7$) 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。他の計算結果においても、波紋の計算精度は前回のワークショップから向上している。格子数が増加したことが主要な理由と思われる。

図-4 は KVLCC2M のプロペラ面における伴流分布 (二重模型、 $R_n=3.945 \times 10^7$) 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。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。伴流予測に関しては、乱流モデルに大きな進展がなかったこともあって、前回とほぼ同様の計算精度であった。

2.3 自航状態の計算

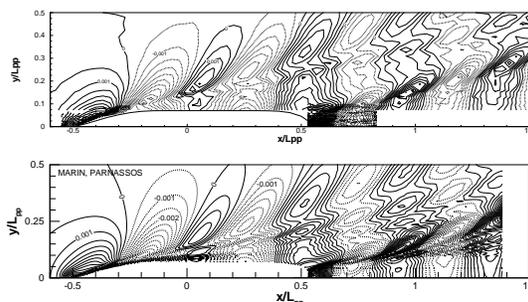


図-3 KCS 船型の波紋 (上: 実験 (KRISO)、下: 計算 (MARIN))

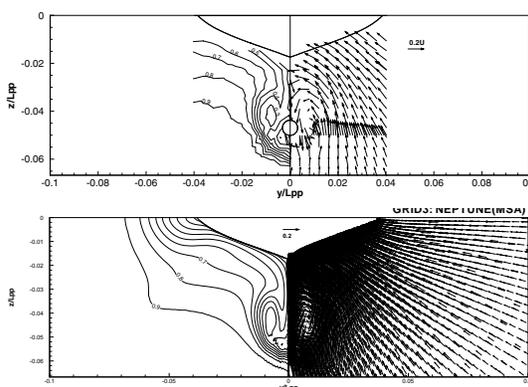


図-4 KVLCC2M 船型のプロペラ面の流速分布 (上: 実験 (海技研)、下: 計算 (海技研))

プロペラ影響を考慮した自航計算は、前回のワークショップでも計算されたが、まだ計算の数が少なく (今回は 4 機関)、精度評価を含めこれからの展開が期待される分野である。

図-5 は KCS のプロペラ後方の流場の比較である (実験は海技研、計算はポツダム水槽による)。プロペラの作動による軸方向速度の加速や旋回流れの発生などの特徴はよく再現されている。自航要素の算定については、流場が複雑になること、曳航状態と自航状態の流体力の差分が必要となることなどにより、定量的な計算精度は必ずしも十分ではない。また、船型の違いによる性能差を、どの程度まで評価できるかという点についても検討する必要がある。

2.4 斜航状態の計算

斜航状態の抵抗計算については、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。実験と計算の定性的傾向は一致するものの、定量的な評価にはばらつきがあり、さらなる改良の余地がある。

図-6 は KVLCC2M の斜航時の流体力の比較である (実験、計算ともに海技研。計算は、二重模型、

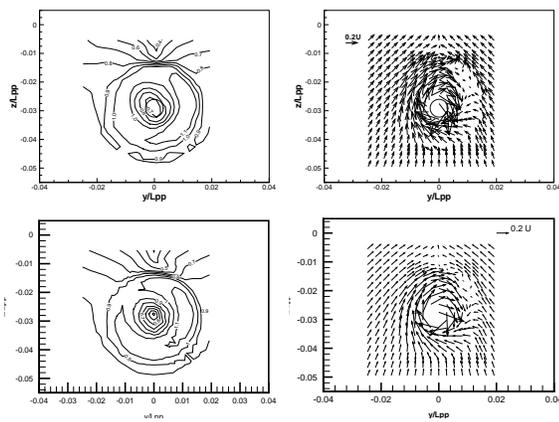


図-5 KVLCC2M 船型のプロペラ面の流速分布 (上: 実験 (海技研)、下: 計算 (ポツダム水槽))

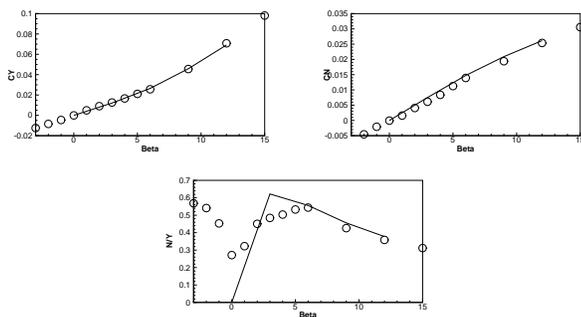


図-6 KVLCC2M 船型の斜航時の流体力 (線: 実験 (海技研)、○: 計算 (海技研)、上左: 横力 (CY)、上右: 回頭モーメント (CN)、下: 着力点 (N/Y))

$Rn=3.945 \times 10^7$ 。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ろう。

2.5 波浪中状態の計算

波浪中の抵抗計算については、最近研究が進展しており、今回のワークショップで初めてテストされた。まだ精度が十分とは言えず、今後の研究の進展が期待される。

テストケースの設定は、DTMB 5415 船型が $F_n=0.28$, $Rn=4.861 \times 10^6$ で向い波中を航行するものである。波長および波振幅は $\lambda/L_{pp} = 1.5$, $2\pi A/\lambda = 0.025$ であり、船体は固定されている。図-7 に波紋の周期変化を示す。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。

2.6 格子依存性

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 に示すような、5 種類の密度の異なる格子 (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。同一の格子を用いることにより、計算手法の特性の違いがより明確に分析できるようになった。流れ場の詳細なデータも収集されているが、ここでは抵抗値の分析結果を示す。図-8 は、全抵抗の比較である。横軸は格子密度であり、左に行くほど格子が細かい。11 機関から寄せられた結果をプロットしているが、多くの計算結果は実験結果の近傍に分布している。しかし、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。とはいえ、960 万点の格子による計算結果を提出したのは 1 機関のみであり、実用的な観点から計算効率と計算精度のバランスを考える必要がある。

3. CFD 技術開発の展望

今後、それぞれの適用分野において、今回のワークショップにおける意見交換・知見の共有により、計算手法が高度化され、精度が向上するであろうと期待される。

今回のワークショップの参加者は CFD コードの開発者がほとんどであり、討論も開発サイドからの意見が中心であった。海技研で開発している CFD 手法は、船型設計において用いることを想定しており、その意味では CFD を使う側からのニーズを把握し、それに応えることも重要である。

海技研では、今回のワークショップにおいて明らかになった CFD 技術の現状や開発課題に加え、セミナーやヒアリングなどで得たユーザからの要望などを踏まえて、今後のソフトウェア開発の戦略を立案している。

当面の開発課題としては、自航状態のシミュレーション技術の確立および操縦性能評価への適用拡大に取り組もうとしている。一方で、耐航性シミュレーションのためには、非定常流れ計算が必須であり、多大な計算資源を要求するので、研究目的の開発は継続するものの、設計現場で用いるための実用コード開発の中では優先度を下げる。

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}

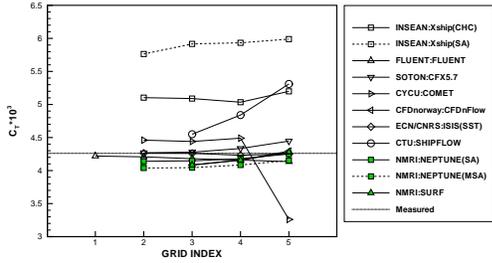


図- 8 KVLCC2M 船型の共通格子による抵抗計算

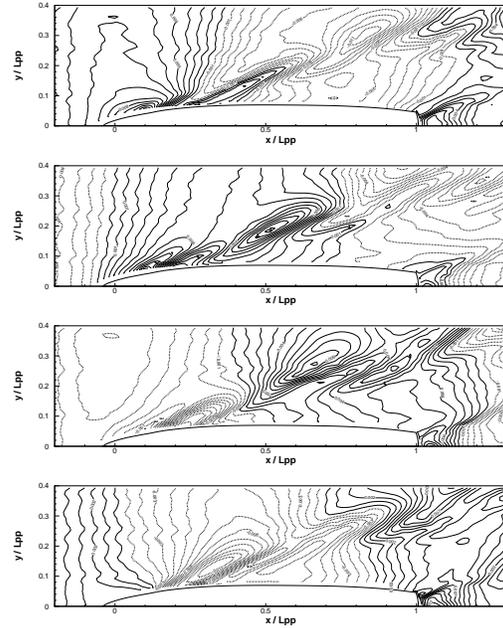
また、ユーザからのニーズに応えるため、航走姿勢の推定および船首バルブやトランサムスターンまわりの自由表面流れの計算技術の開発を進める。さらに、抵抗や波紋などに関する計算精度の向上は全てのベースとなる開発事項であり、今後も改良を継続する所存である。

4. あとがき

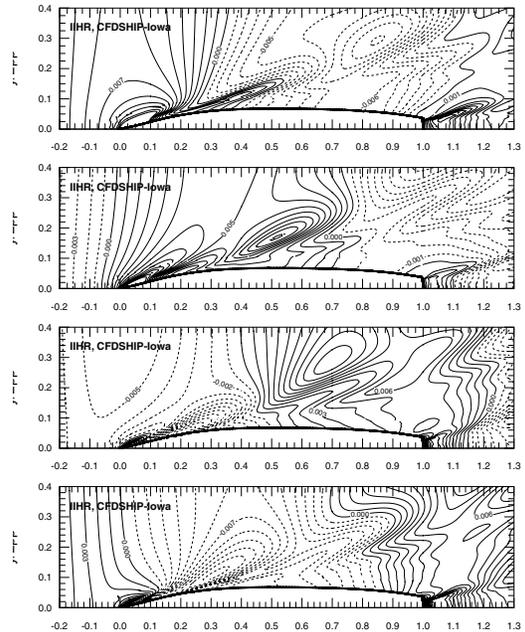
2005年3月に開催したCFD Workshop TOKYO 2005の概要を報告し、計算比較を行ったテストケースについてCFD技術の現状をレビューした。また、ワークショップにおける討論やユーザからのニーズを踏まえて、海技研における今後のCFD技術開発の展望について述べた。

参考文献

- 1) Larsson et al. Ed.: Gothenburg 2000 A Workshop on Numerical Ship Hydrodynamics Proceedings, Chalmers University of Technology, Gothenburg, 2000.
- 2) Hino, Ed.: Proceedings of CFD Workshop TOKYO 2005, National Maritime Research Institute, TOKYO, 2005.



実験 (t/T=0, 1/4, 2/4, 3/4)



計算 (t/T=0, 1/4, 2/4, 3/4)

図- 7 DTMB5415 船型の波浪中の波紋 (上: 実験 (IIHR)、下: 計算 (IIHR))