

CFD解析のスマート化

小林 寛*

Developments for Smart Use of CFD Simulation

by

KOBAYASHI Hiroshi

Abstract

Numerical simulation by means of CFD (Computational Fluid Dynamics) technology is commonly used to predict ship performance since it can directly compute non-linear viscous flows around arbitrary geometries. An analysis of CFD simulation mainly consists of mesh-generation, flow computation and post-processing(visualization) and it is essential to carry each step in a careful manner and smoothly for achieving reliable computed results efficiently. NMRI CFD, which is a CFD software package released by NMRI (National Maritime Research Institute, Japan) provides special features dedicated to smart use of CFD simulation such as hull form modification coupled with optimization scheme based on discrete SQP method, input support in script editor for overset mesh generation, full multigrid approach to accelerate convergence of flow computation, serial calculation of different configurations and post-processing tool for making brief report of computed results in terms of naval architecture. The features contribute efficient and precise analysis of ship performance in ship design.

* 流体性能評価系 CFD 研究グループ

原稿受付 令和 2年 1月 28日

審査日 令和 2年 2月 12日

目 次

1. まえがき	10
2. 船型変形のスマート化	10
3. 重合格子生成のスマート化	11
4. 流場計算のスマート化	12
5. 後解析のスマート化	13
6. おわりに	16
参考文献	16

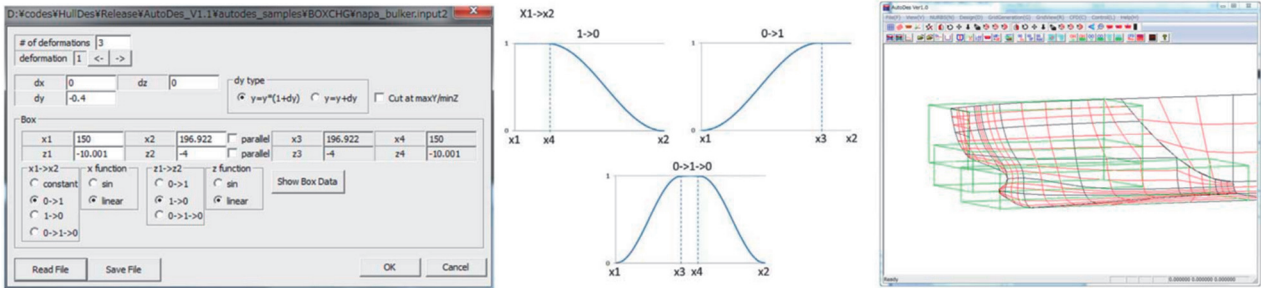
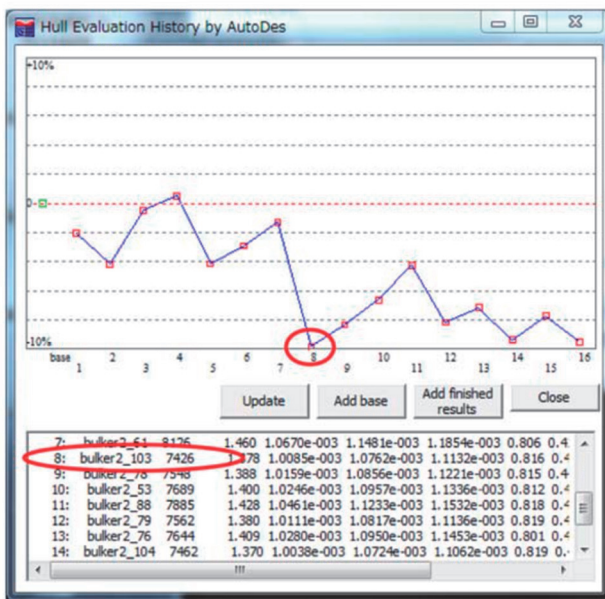
1. まえがき

計算流体力学 (CFD : Computational Fluid Dynamics) は, 運動量保存則である Navier-Stokes 方程式 (NS 方程式) を数値的に求解する手法である. 流体解析に CFD を用いる利点は, 粘性影響を直接的に考慮できることや, 適切な格子を生成することにより任意の形状について流れ場を求めることができること等が挙げられ, 船体周りの流場解析に広く用いられている. 一方で, 船体周りの流れの特徴は, 外部流であること, 流体力に関して粘性影響が大きいこと, 界面 (自由表面) が存在すること等があり, これらの特徴に対して適切に対処可能な計算手法や計算条件 (境界条件設定, 格子解像度, 乱流モデル, 自由表面モデル等) を用いることが必要である.

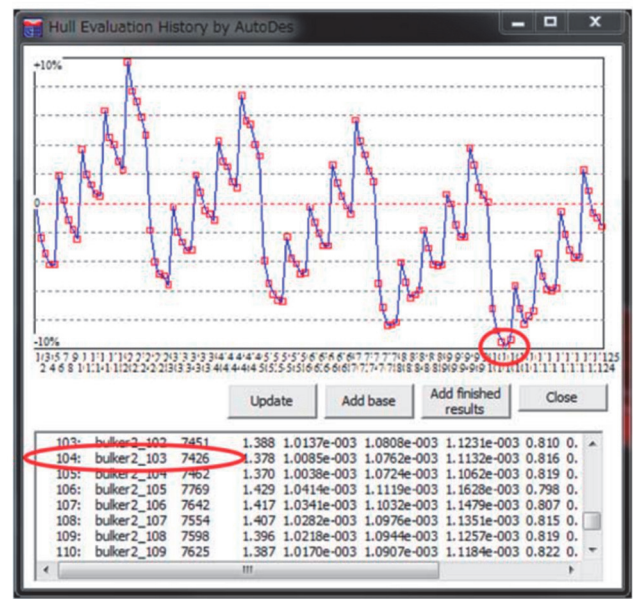
船体周り流れの CFD 解析は, (1)対象とする形状を元にした計算格子の生成, (2)流場計算, (3)可視化等計算結果の後解析の 3つのステージに大略分けられる. 海上技術安全研究所 (以下, 海技研) では, それぞれステージについて, (1)AutoDes, HullDes, UP_GRID, (2)NEPTUNE, SURF, NAGISA, (3)ARGO を, また UP_GRID, NAGISA の操作とレポート作成機能を統合した GUI 環境である NagisaBoard を開発し, 統合してパッケージソフトウェア NMRI CFD として外部提供している. 近年は, CFD 解析に直接必要な機能だけでなく, 船型変形の機能や(1)~(3)の自動実行等の要望も多く, それらの機能も追加され, NMRI CFD の機能向上が図られている. そのなかから本稿では, 船型変形のスマート化(AutoDes), 重合格子生成のスマート化(UP_GRID), 流場計算のスマート化(NAGISA), 後解析のスマート化(NagisaBoard)について紹介する.

2. 船型変形のスマート化

AutoDes は, (有)エイシーティールと共同開発を行っており, 船体周りの構造格子生成ソフト HullDes をベースに, 船型変形・最適化機能や格子生成機能の強化を実装したソフトウェアである. 本章では AutoDes の自動変形機能と離散型 SQP 法を組み合わせた最適化計算例^{1),2)}について紹介する. これは 3つのステップから構成されており, 最初のステップでは変形領域を BOX で定義し, x, y, z 方向の変形量と変形分布(図 1 の中央図)を与える(図 1 の左図)ことにより, 領域内部でどのように船型を変形させるかを指定する. BOX(図 1 の右図の緑線)は複数定義可能である. 変形の定義が決まったらその内容を保存し, 次のステップで, 当該定義を用いて変形量を範囲内で何通りか設定し, 形状を変更した複数の船型を出力する. 最後のステップで離散型 SQP 法を用いて最適化を行い, 目的関数が最小の船型を探索する. この 3つのステップで行う, 変形, 格子生成, 流場計算, BHP 評価まですべてが自動化されている. 図 2 は BHP を目的関数にした探索例で, 右側の図は全ケース計算をおこなった場合で, この例では 125 通りの計算が必要であったが, 左側の離散 SQP では 16 ケースの計算で全ケース計算と同じ探索結果が得られた. このように, 変形する領域と変形法を指定することで, CAD データ(IGES)ベースでの船型変形と, 離散型 SQP 法によって変形範囲内での最適船型の探索を包括的に行うことが可能となっている.

図1 パラメータ設定・box 変形定義²⁾

SQP法による最適化→bulker2_103が最適値



全船型計算→bulker2_103が最適値

図2 離散型 SQP 法による最適化と全ケース計算例²⁾

3. 重合格子生成のスマート化

省エネデバイス等の付加物周りの流場を計算したいというニーズを受け、海技研では複数の格子をオーバーラップ（重合）させて計算を行う重合格子法の開発を進めている。UP_GRID (User-oriented and Practical overset GRID system)³⁾は、格子生成・格子修正・重合格子（補間情報）生成を行うソフトウェアであり、それぞれに対応して格子生成(UP_WING)、格子の修正・配置(UP_MOD)、重合格子の生成(UP_OVS)の3つのプログラムから構成されている。それぞれのプログラムは、パラメータや専用のコマンドを記述したパラメータファイル / スクリプトファイルを読み込んで動作する。この中で格子の修正・配置を行う UP_MOD は、単なるアフィン変換（平行移動や回転）の様な修正だけでなく、接合面の切り取り、格子の分割・結合、IGES ファイルの処理等格子修正に関する様々な処理が可能である。反面、コマンドの種類や各コマンドのオプションパラメータの数も多く、スクリプトファイルの記述に労力を要するようになっていた。

このため、UP_MOD では、NagisaBoard による GUI 操作で、コマンド名やオプションパラメータの入力を支援する機能が実装されている。ユーザはメニューの中から行いたい操作名を選択することで、オプションパラメータを入力するポップアップウィンドウが開き、適宜オプションの選択や値の入力が可能である。図3は、特定のインデックス方向の格子点数を変更するコマンド(regrid)を行う際の画面の例である。変更するインデックス、変

更する範囲の両端の格子点位置, 新しいセル数等を GUI 上で設定でき, ”Insert”を選択することでスクリプトとして反映される. オプションのパラメータについては, デフォルト値を参照しつつ, 変更の必要があるものだけを選択して設定可能であり, また **Manual** ボタンから, 当該コマンドのマニュアルを開くことが可能で, 文書ファイル内を探ることなくマニュアルの参照が可能となっている. この入力支援機能によって意図した格子の修正に即したスクリプトを対話的に入力することが可能になった.

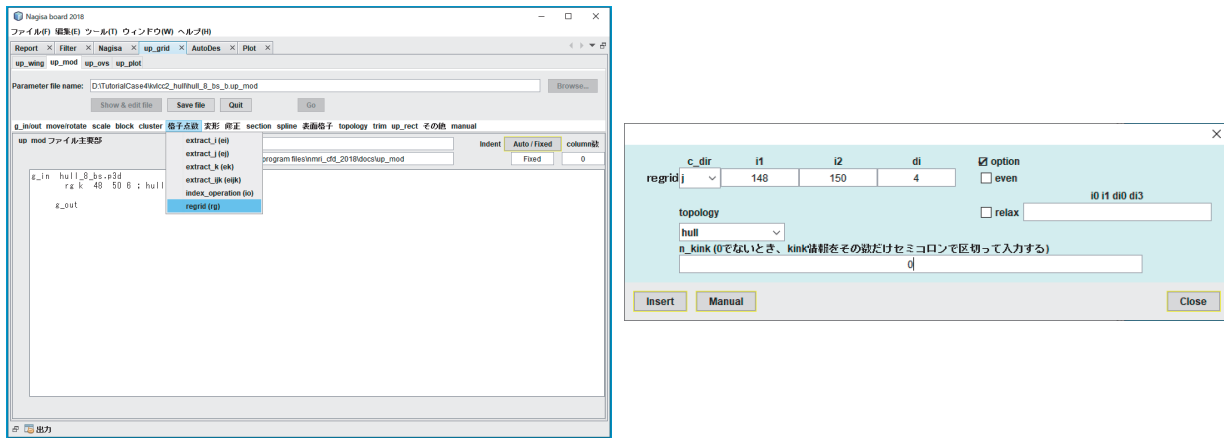


図 3 UP_MOD コマンドの対話型入力例

4. 流れ場計算のスマート化

NAGISA⁴⁾は, 重合格子に対応した構造格子による有限体積法ベースの RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes)方程式を解くソルバーである. 界面捕獲法の一つである Level-set 法⁵⁾による自由表面計算や, 代数応力モデルを含む複数の乱流モデルが利用可能であり, 平水中の抵抗・自航計算だけでなく, 入射波中の船体運動計算や上部構造物の風圧抵抗計算等も可能である. 擬似圧縮性に基づく圧力と流速のカップリングにより, アスペクト比が極めて高いセルでの計算が可能で, 境界層流れの計算に適している. 一方で収束を早めるために, 解像度の粗い格子を併用するマルチグリッド法の適用が必要である. さらに収束解を早く求めるためには, 粗い格子で初期流れを計算しそれを元に細かい格子で流れの計算を行うフルマルチグリッド(FMG)が有効である. しかし, 単一格子と異なり, 重合格子では解像度を粗くした場合, 重合関係が成り立たない(補間情報を構築できない)ことが多く, このことが FMG 導入の壁となっていた. NAGISA では, これを解決するため, 重合格子での粗い格子による流れ場計算でも, 元々の細かい解像度の格子(Fine 格子)における重合情報(補間情報)を利用することで, 初期流れの計算を可能にした. 補間を行っている重合領域では近似的な補間になるが, 計算目的そのものが初期流れという近似解であるため, 特に問題はなく, 重合格子においても FMG の利用が可能になることで, 必要な計算ステップ数や計算時間を大幅に短縮することが可能となった. 図 4 は総セル数 300 万程度の付加物付船体周りの抵抗計算⁴⁾での圧力の残差(左図)と計算時間(右図)の違いで, 赤線が 3 段階の FMG を使用した場合で, 黒線が使用しない場合である. 図 4 左図から, FMG では 300 及び 600 ステップで格子レベルが切り替わり, 600 ステップ以降の Fine 格子計算では使用しない場合(最初から Fine 格子計算)に比べて少ないステップ数で収束に至っていることが分かる. FMG での 600 ステップまでの計算時間は, Fine 格子での計算時間に比べて短時間であり(図 4 右図), 計算時間のオーバーヘッドは僅かである.

また, 設計時等における CFD 解析では, 複数の形状についての計算や, 船速等の計算条件の値を何通りか振り分けて計算を行うことが多いが, 計算機リソースの効率的な利用という観点で, 複数の計算機で並行して計算を行う, あるいは複数の計算を同じ計算機上で自動的に連続実行するという処理が有効である. NAGISA の GUI インターフェースである NagisaBoard では, 後者の連続実行をサポートしている. 図 5 にあるように, 連続計算を行いたい計算ケース数を指定してそれぞれのケースについてパラメータファイルを入力した後に計算を実行す

ることで、ひとつのケースについて計算が終了したら自動的に次のケースの計算を行うことで、指定されたケースの計算が自動的に実行されるため、一定の期間内で計算機リソースを有効的に利用して計算を行うことが可能である。

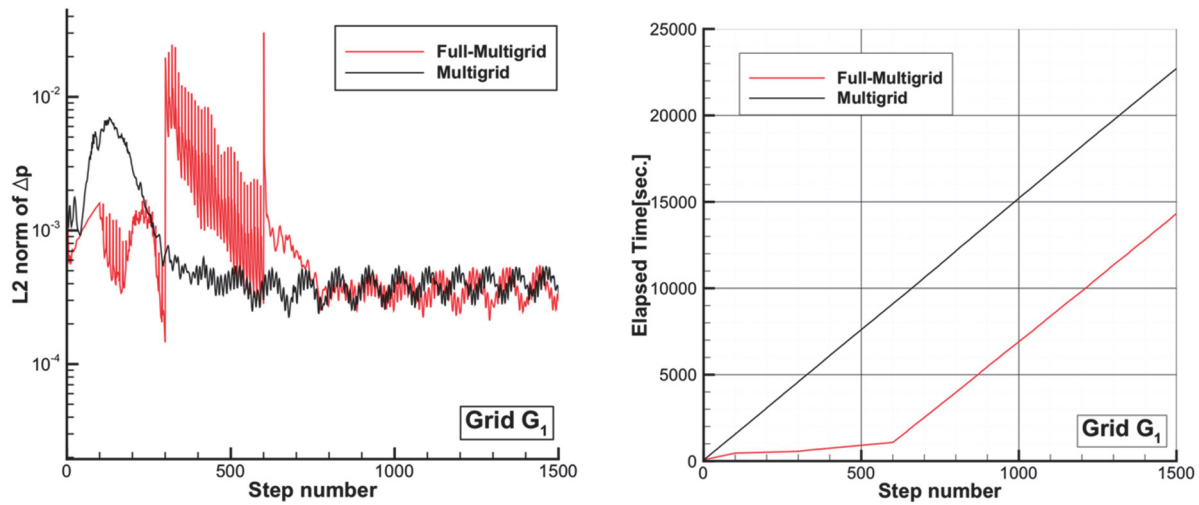


図4 フルマルチグリッド(FMG)の有無による計算時間の違い⁴⁾

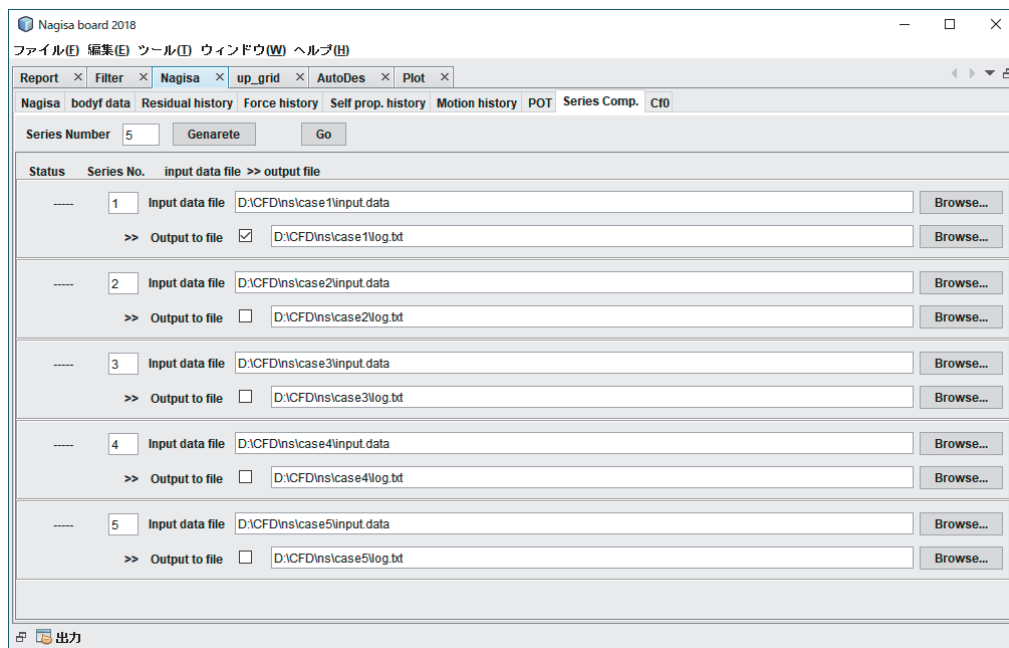


図5 連続計算の設定画面

5. 後解析のスマート化

流場計算そのものは、与えられた計算格子と境界条件に基づき支配方程式を数値的に解くものであり、得られる結果はいわゆる数値の塊に過ぎないため、工学的に意味のある情報を引き出すためには後解析が不可欠である。後解析は、物体表面上の応力積分によって物体に働く力を求めたり、流場を可視化して流速や圧力分布を確認するといった基本的な事項に加えて、対象計算の属する専門分野の知識が必要な事項があり、例えば船舶流体力学計算においては、形状影響係数の決定、外挿法による有効出力の推定、自航要素の推定、波紋図や応力の船

首尾方向分布等があげられる。これらは計算結果や計算履歴が所在すれば演繹的に求めることが可能ではあるが、必要とされる作業量は場合によっては煩雑となり、また一方で船型間での結果比較等の用途から定型的な処理が求められる。これらに対処するため、NagisaBoard では、GUI 処理による計算結果のレポート作成が可能である。単一格子、重合格子のどちらにも対応し、形状影響係数、有効出力、自航要素等の算出や、Paraview®, Tecplot®と連携した流場の可視化（伴流分布、波紋図、船体表面圧力分布等）を HTML 形式のレポートとして出力することが出来る。GUI の画面を図 6 に示す⁶⁾。

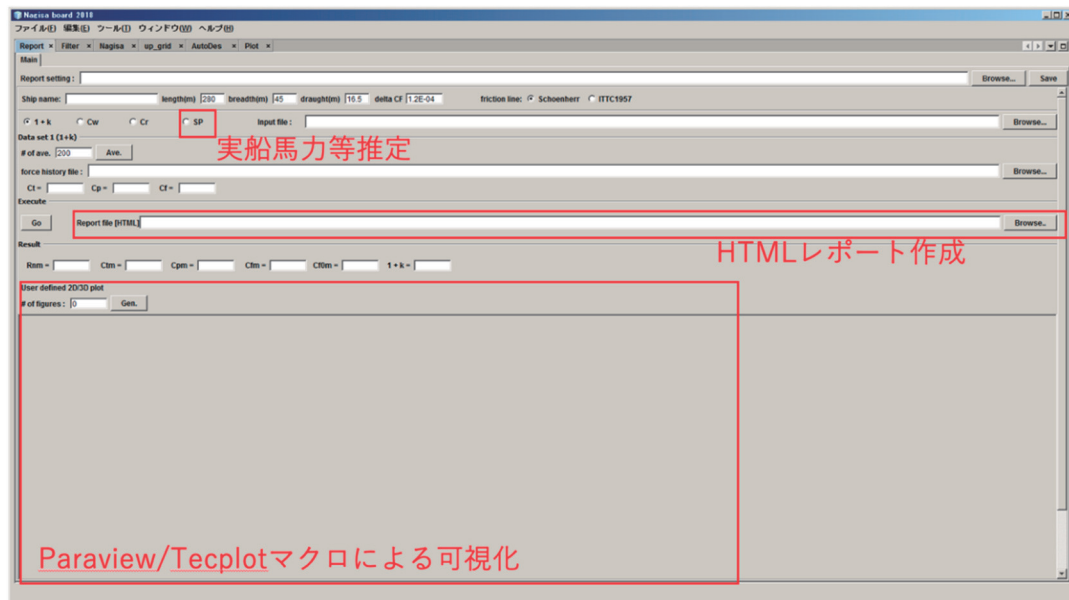
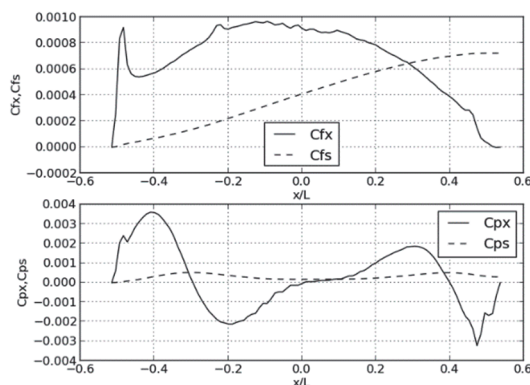


図 6 NagisaBoard レポート作成の GUI

解析項目として形状影響係数、造波抵抗係数、剰余抵抗係数、実船馬力(図 6 の赤字)が網羅されている。必要な計算結果や入力項目は各解析対象によって異なるが、所定の情報を与えて HTML レポートファイル名を指定することで、HTML 形式のレポートが作成される。可視化された図については、Paraview®や Tecplot®のマクロを指定することで描画された図がレポートに挿入される。マクロは典型的なもの（伴流分布や波紋図）については用意されており、またユーザが独自に作成したものも利用可能である。図 7 の左図は、抵抗計算時の摩擦抵抗と圧力抵抗の船首尾方向分布、図 7 右図は図 6 で実船馬力等推定を選択して馬力推定を実施した場合の馬力等の算出結果である。図 8 は Paraview®を利用して抵抗計算での公称伴流を可視化した例である。解析条件のパラメータ等は、設定ファイルとして保存することができるので、その設定を見込むことで他の計算結果を同じ様式のレポートに簡単に出力することが可能である。



計算結果

Ctm	5.812e-03	1-t	0.8361
Cpm	1.231e-03	1-wtm	0.5535
Cfm	4.582e-03	EtaR	1.0077
Cf0m	4.409e-03	EtaOm	0.4873
1+k	1.3181	n'	47.9724
Cw	0.000e+00	Ei	1.2030
Cf0s	1.376e-03	1-wts	0.6659
delta CF	0.000e+00	Kt/J2	0.7317
Rns	2.430e+09	J	0.4619
Cts	1.814e-03	Ns(rps)	1.5431
PE(kW)	20149	EtaOs	0.5561
		EtaD	0.7036
		PD(kW)	28638

図 7 馬力推定のレポート出力例

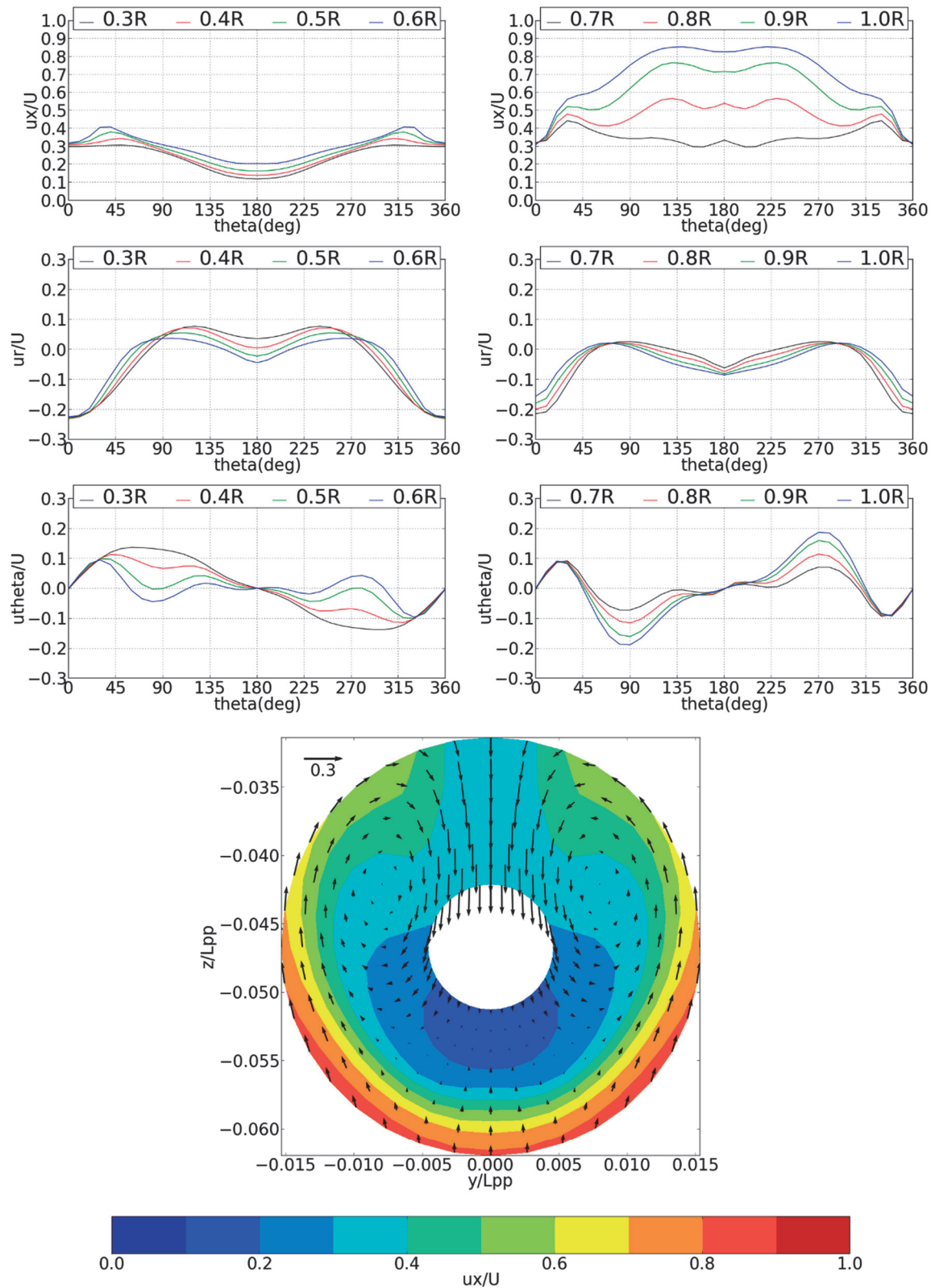


図 8 公称伴流の可視化例

6. おわりに

船型設計等の用途で、CFD 解析をより効率的かつ精緻に行うために、海技研 CFD ソフトウェア NMRI CFD で取り組んでいる内容を報告した。AutoDes による自動変形機能と SQP 法を組み合わせた最適化例、UP_GRID の格子修正プログラム UP_MOD のスクリプトファイルを記述する際の入力支援、NAGISA のフルマルチグリッド法による収束加速法と連続計算機能、計算結果から必要な情報を出力するレポート機能を紹介した。今後も NMRI CFD において、格子生成や流場計算の機能及び適用範囲拡大に向けた開発に加え、利用者が意図する数値解析をより効率的に行うための機能についても向上させていく予定である。

参考文献

- 1) 金井亮浩, 田原裕介: 自由変形機能と離散型 SQP 法による最適船型設計法の開発, 日本船舶海洋工学会講演会論文集 17(2013), pp. 349-352.
- 2) 金井亮浩: AutoDes Ver1.15, 第 13 回 CFD セミナー(2019) .
- 3) Hiroshi Kobayashi and Yoshiaki Kodama : Developing Spline Based Overset Grid Assembling Approach and Application to Unsteady Flow Around a Moving Body, Journal of Mathematics and System Science Vol.6 (2016) pp.339-347, DOI:10.17265/2159-5291/2016.09.001, 2016.
- 4) Kunihide Ohashi, Takanori Hino, Hiroshi Kobayashi, Naoyuki Onodera, Nobuaki Sakamoto : Development of a structured overset Navier-Stokes solver with a moving grid and full multigrid method, Journal of Marine Science and Technology, <https://doi.org/10.1007/s00773-018-0594-7>, 2018.
- 5) Mark Sussman, Peter Smereka and Stanley Osher : A Level Set Approach for Computing Solutions to Incompressible Two-Phase Flow, Journal of Computational Physics, Vol. 114, Issue 1(1994), pp. 146-159.
- 6) 坂本信晶: Nagisa board 2018 レポート機能について, 第 13 回 CFD セミナー(2019) .