

局所的に細分化された非構造六面体格子を用いた双胴船尾船型の流れ解析 Flow Analysis for Twin-Skeg Type Ship on Locally Refined Unstructured Hexahedral Grids

○ 久米 健一, 海上技術安全研究所, 〒181-0004, E-mail: kume@nmri.go.jp
平田 信行, 海上技術安全研究所, 〒181-0004, E-mail: hirata@nmri.go.jp
Kenichi KUME, National Maritime Research Institute, 6-38-1 Shinkawa, Mitaka, Tokyo
Nobuyuki HIRATA, National Maritime Research Institute, 6-38-1 Shinkawa, Mitaka, Tokyo

It is very hard to generate structured grids properly around twin-skeg type ship using a single-block method, since it has complicated stern shape. However, even though a multi-block method is used, a number of high-aspect-ratio cells are generated behind the skeg. In this paper, a hexahedral unstructured mesh system with a reputation for complicated geometries is adopted for the analysis of a twin-skeg type ship, and compared the results to the ones obtained with a structured mesh system and from the tank test.

1. はじめに

双胴船尾 (ツインスケグ) を有する船型に対し, CFD 手法に基づく研究⁽¹⁾⁽²⁾がいくつか公表されているが, いずれも構造格子を用いたものである。双胴船尾船型に対し構造格子の生成を行う場合, 大きくゆがんだスケグ部のガースラインを適切に解像するにはマルチブロック法を適用することとなる。その際, スケグの後方の縦切断面がブロック間の1つの境界面となり, 船体は中心線側(トンネル内)と外側, 2つのブロックに分かれる。船体表面の境界層を捉えるために生成した密度の高い格子は, この2つのブロックの境界面に沿って下流側へ続く。この手法で生成した構造格子を用いた自由表面計算では上述の境界面のスケグ後方付近で計算が発散することが多い。その原因は, 計算格子の急激な密度変化を有する境界面を横切る自由表面流れが, 計算を不安定化しているためと考えられる。

本研究では双胴船尾船型を対象に, 複雑形状に定評のある非構造六面体格子を採用した CFD 解析⁽³⁾⁽⁴⁾を行い, 構造格子ベースのマルチブロック法では難しかった自由表面流れ解析を試みるとともに, 二重模型流れ解析の結果も含め, 構造格子を用いた CFD 計算結果や実験結果⁽⁵⁾との比較を行ったので報告する。

2. 対象船型および計算格子

計算対象船は, 船尾が双胴型になっておりスプリットスターン船型やツインスケグ船型とも呼ばれる。この船型の主要目を Table1 に示す。

Table1 Principal particulars of ship model

Length between perpendiculars	L _{pp}	270.0 m
Breadth	B	45.0 m
Draft	d	12.0 m
Block coefficient	C _B	0.7025
Wetted surface area	S ₀	15,200 m ²

非構造六面体格子生成には NUMECA 社の HEXPERSSTM, 構造格子生成には FIELDVIEW 社の GRIDGENTM を用いた。

(1) HEXPERSSTM

HEXPERSSTM で生成される非構造格子はすべて六面体であり, 粗い初期格子を段階的に細分化する。細分化の最大回数や船体表面上のセルの大きさの目標値を指定することができる。また, 船首尾部や船体付加物近傍, 自由表面近傍等は特に解像度を高めた箇所であるが, 直方体による領域(box)指定により, 局所的な細分化設定も可能である。境界層領域では, 物体表面と交差する直方体の格子が消去され, その空隙に物体形状に沿った形状の格子

が生成される。1層目の格子厚さは指定でき, 境界層を解像するための層数は任意指定または格子間隔の拡大率を維持するよう決定される。

今回の計算領域の形状は直方体であり, 対称性を考慮し左舷側のみを計算を行った。船首(F.P.)における静止水面位置を原点とし, 長さは全て垂線間長 L_{pp} で無次元化している。計算領域は Table2 に示すように, $-1 < x < 3$ ($x(\text{F.P.})=0$, $x(\text{A.P.})=1$), $-2 < y < 0$, 二重模型流れ解析の場合は $-2 < z < 0$, 自由表面流れ解析の場合は $-2 < z < 0.04$ であり, 船は x 方向に進むものとしている。

初期格子の間隔は x, y, z 全方向ともに 0.167 とした。船体表面での目標セルサイズは, 後述する GRIDGENTM による格子密度に極力近いものとするため全方向とも 0.005 としたが, これは初期格子の5回分割に相当する。境界層格子の層数は 50 層, 1層目の厚さは 1.76×10^{-6} , 拡大率は 1.1 とした。さらに自由表面計算時は, 波形を十分に解像するために x 方向 0.167, y 方向 0.167, z 方向 0.0015 とする局所細分化領域(box)を, $-1 < x < 3$, $-2 < y < 0$, $-0.015 < z < 0.04$ の範囲に設定した。

このようにして生成した計算格子を Fig.1 と Fig.2, および Fig.4 と Fig.5 に示す。セル数は二重模型流れ解析用で約 125 万セル, 自由表面流れ解析用で約 283 万セルであった。自由表面流れ解析用格子のセル数は, 自由表面近傍に設定した細分化領域により二重模型流れ解析用格子の約 2 倍になる結果となったが, 増加分の大半は静止水面上方の $0 < z < 0.04$ の領域が占めている。自由表面より上部の空気層では N-S 計算が行われないため, セル数の増加に比して計算負荷はあまり高くない。

(2) GRIDGENTM

GRIDGENTM では x 方向の格子間隔を, 船首部で 0.005, 船尾部で 0.003, 船体中央部で 0.028 とした。格子のトポロジーは H-O 型であり, 計算領域は $-1 < x < 3$, $-2 < y < 0$, $-2 < z < 0$ とした。

Table2 Computational grids

	Double model flow	Free surface flow
Number of cells	1.25 mil. (HEXPRESS TM) 1.12 mil. (GRIDGENT TM)	2.83 mil. (HEXPRESS TM)
Minimum spacing on solid wall	1.76×10^{-6}	
Solution domain	$-1 \leq x \leq 3$ ($x(\text{F.P.})=0$, $x(\text{A.P.})=1$), $-2 \leq y \leq 0$, $-2 \leq z \leq 0$	
Damping zone	$x > 2, y < -1$	

x, y, z 方向のセル分割数は $140 \times 100 \times 80$ で、セル数は 112 万である。境界層を解像するため、船体に隣接するセル 1 層目の厚さは 1.76×10^{-6} とした。

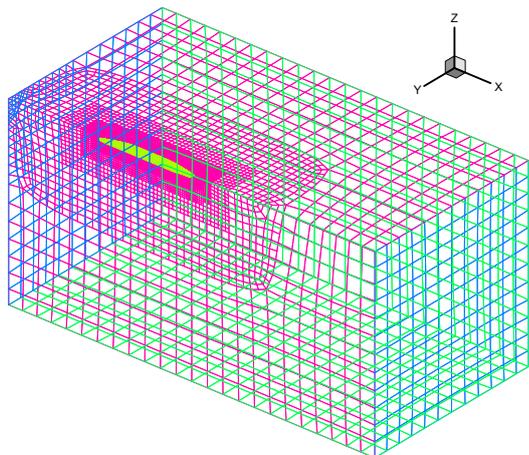


Fig. 1 Unstructured hexahedral grid for double model flow analysis generated by HEXPRESS™

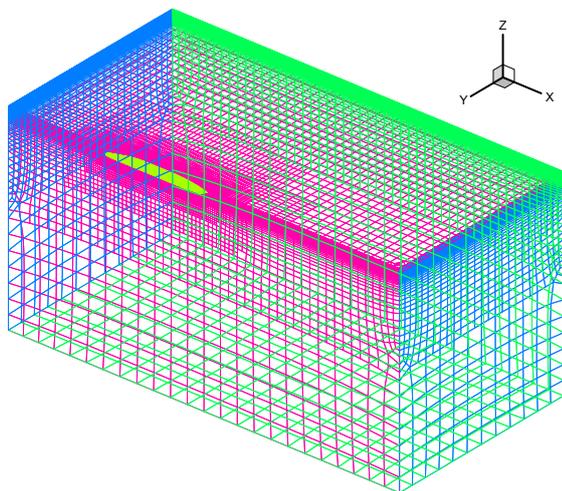


Fig. 2 Unstructured hexahedral grid for free surface flow analysis generated by HEXPRESS™

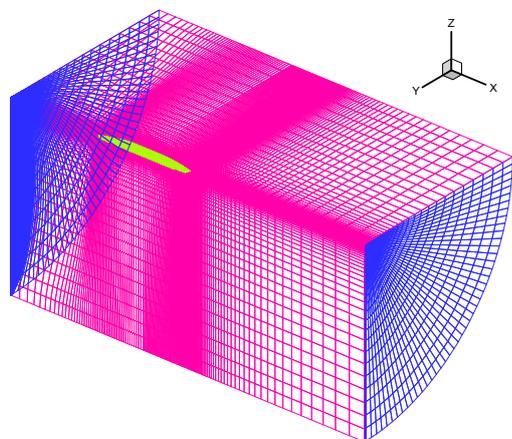


Fig. 3 Structured grid for double model flow analysis generated by GRIDGEN™

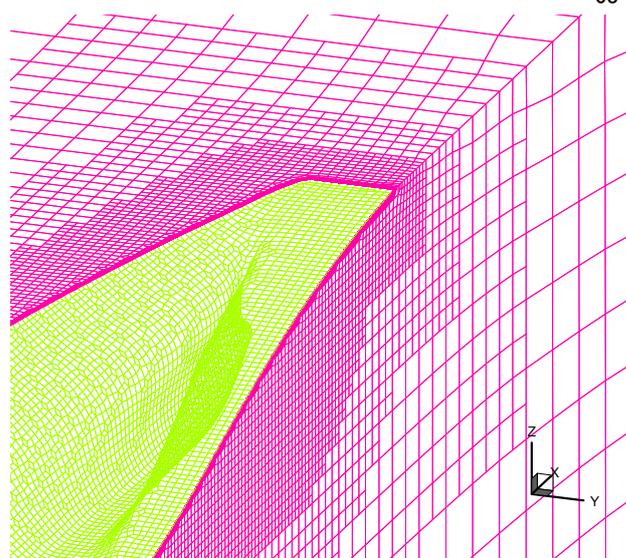


Fig. 4 Local grid distribution around stem for double model flow analysis generated by HEXPRESS™

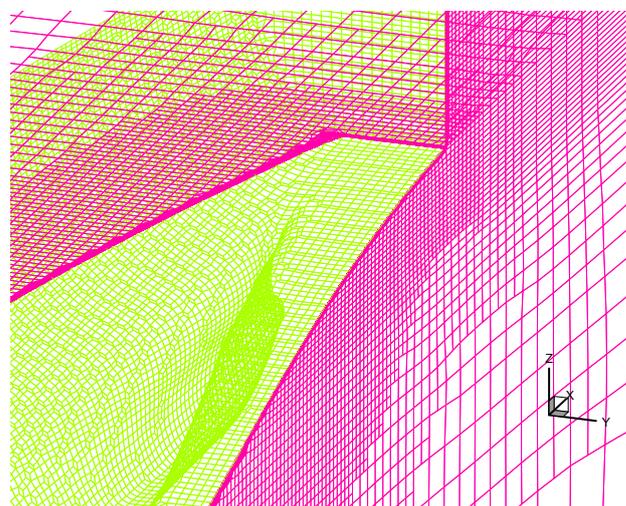


Fig. 5 Local grid distribution around stem for free surface flow analysis generated by HEXPRESS™

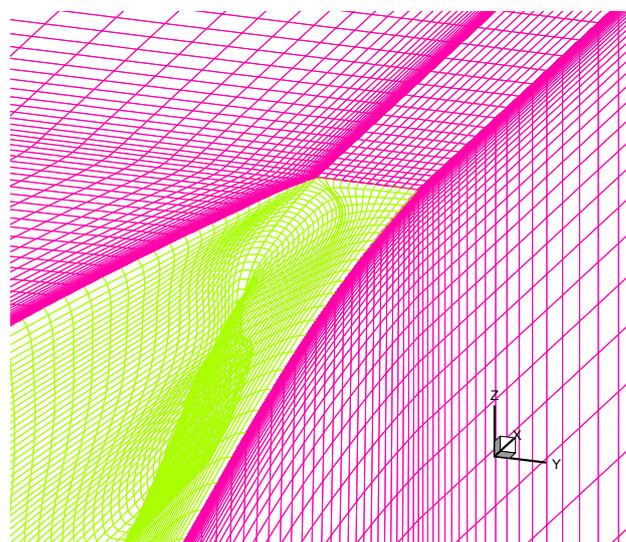


Fig. 6 Local grid distribution around stem for double model flow analysis generated by GRIDGEN™

3. 計算法

数値解析には海上技術安全研究所で開発を進めている非構造格子対応の粘性流体解析ソフト SURF[®]を使用した。SURF の特徴を以下に示す。

- ・ 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、疑似圧縮性を導入して定常解を求める手法である。
- ・ 疑似時間と実時間の二つの時間刻みを導入することにより非定常流れの計算が可能である。
- ・ 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が計算可能である。
- ・ 空間離散化には非構造格子ベースの有限体積法を用い、変数配置は Cell-centered である。
- ・ 対流項は Flux-Difference-Splitting に基づく 2 次風上差分 (MUSCL type), 拡散項は 2 次中心差分を用いる。
- ・ 乱流モデルとして, Spalart-Allmaras モデルおよび修正 Spalart-Allmaras モデルの 2 種類が組み込まれている。
- ・ 行列反転には対称ガウス・ザイデル法を用いる。
- ・ 時間微分は, 定常流れの場合は 1 次後退差分で近似し (陰的解法), 非定常流れの場合は, 疑似時間は 1 次後退差分, 実時間は 1 次または 2 次の後退差分で評価する。
- ・ 局所時間刻み, 多重格子 (マルチグリッド) 法による収束加速を行う。

4. 計算条件

計算条件を Table3 に示す。フルード数 0.21 は航海速度 21.0(kt) に相当する。

Table3 Computational conditions

	Double model flow	Free surface flow
Solver	SURF6.391	
Reynolds number, Rn	8.07 × 10 ⁶	
Froude number, Fn	0.0	0.21
Turbulence model	Spalart-Allmaras	
Transition	0.01 (x(F.P.)=0, x(A.P.)=1)	

5. 計算結果

(1) 抵抗性能

二重模型流れ解析で得られた Schoenherr Line ベースの形状影響係数 K, 自由表面流れ解析で得られた造波抵抗係数 C_w と全抵抗係数 C_t の実験値との比較を Table4 に示す。K に関しては非構造六面体格子と構造格子による計算結果はほぼ一致しており、水槽試験結果に比べて多少大きめではあるが、格子の種類による影響は見られない。また、造波抵抗は実験結果とよく合っている。

Table4 Comparison of resistance performance

	K	C _w × 10 ³	C _t × 10 ³
Experiment	0.17	0.78	4.25
CFD(with HEXPRESS TM)	0.24	0.73	4.48
CFD(with GRIDGEN TM)	0.24	-	-

(2) 船体表面圧力

非構造六面体格子と構造格子を用いて得られた船体表面圧力分布をそれぞれ Fig.7 と Fig.8 に、正圧と負圧の圧力係数 C_p のピーク値の比較を Table5 に示す。船首部や船尾双胴部における圧力分布と負圧のピーク値はよく合致しており、格子の種類による影響は見られない。正圧のピークは船首バルブ先端に発生しており、格子の種類によって数値に違いが見られるが、その原因は構造格

子の x 方向格子密度が相対的に低く、圧力のピークを捉えきれていないためと考えられる。

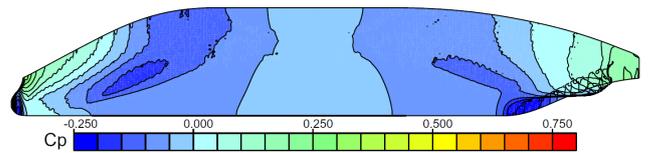


Fig.7 Computed hull surface pressure on unstructured hexahedral grid by HEXPRESSTM (ΔCp=0.05)

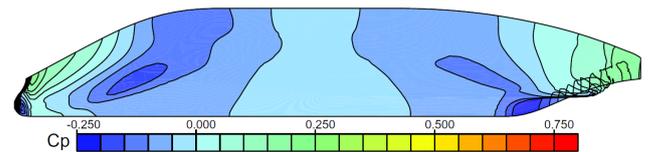


Fig.8 Computed hull surface pressure on structured grid by GRIDGENTM (ΔCp=0.05)

Table5 Comparison of peak values of pressure coefficient on the hull

	Min.	Max.
CFD(with HEXPRESS TM)	-0.26	0.96
CFD(with GRIDGEN TM)	-0.25	0.73

(3) 伴流分布

非構造六面体格子と構造格子を用いて得られた伴流分布および実験結果をそれぞれ Fig.9 から Fig.11 に、プロペラ位置における y-z 断面とスケグ中心の x-z 断面の計算格子を Fig.12 と Fig.13 に示す。プロペラ断面における格子密度は非構造六面体格子よりも構造格子の方が高く、プロペラ面上方の伴流分布は構造格子による計算結果の方が実験結果に近いものとなっている。非構造六面体格子の船尾スケグ近傍に局所細分化領域(box)を設定すれば、格子の種類による差異は減少すると考えている。

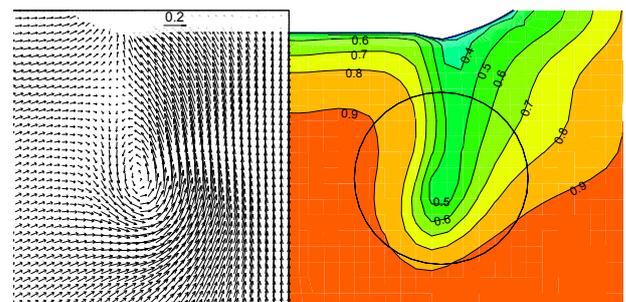


Fig.9 Computed wake distribution on unstructured hexahedral grid by HEXPRESSTM

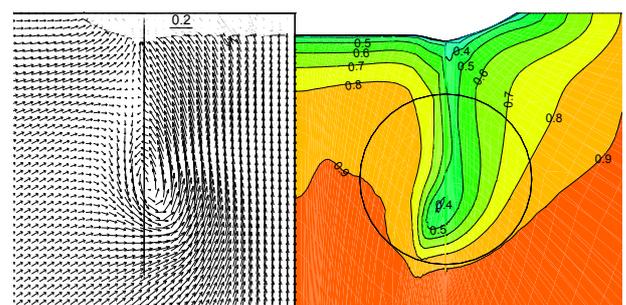


Fig.10 Computed wake distribution on structured grid by GRIDGENTM

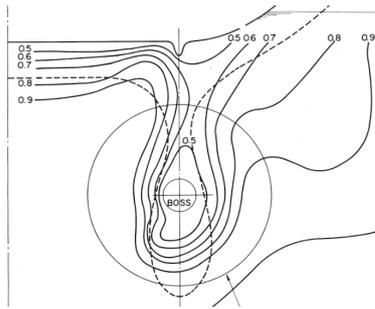


Fig. 11 Measured wake distribution of experimental result

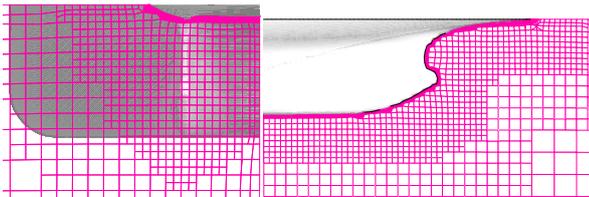


Fig. 12 y-z and skeg-centered x-z sections of computational grid around stern for double model flow analysis generated by HEXPRESS™

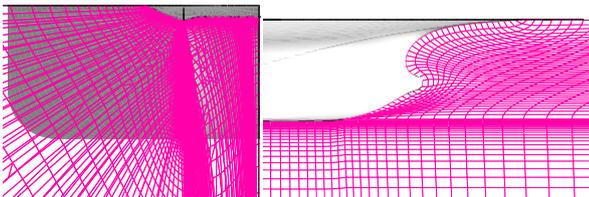


Fig. 13 y-z and skeg-centered x-z sections of computational grid around stern for double model flow analysis generated by GRIDGEN™

(4) 船体周り波高分布および船側波形

船体周り波高分布の CFD による計算結果を Fig.14 に示す。本計算の非構造六面体格子は自由表面近傍に局所細分化領域を設定したもの、z 方向の細分化のみであり x-y 方向の格子サイズは船体から離れるにしたがい急激に大きくなるため、波が減衰していると考えられる。

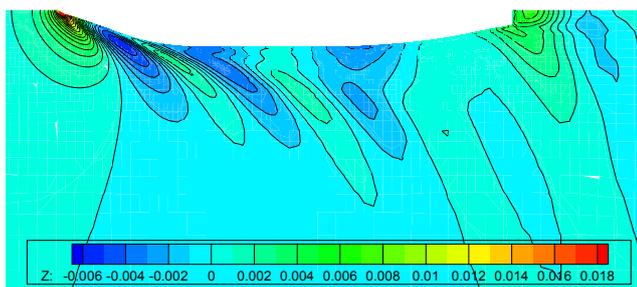


Fig. 14 Computed wave-elevation contours on unstructured hexahedral grid by HEXPRESS™

6. まとめ

構造格子の適用が比較的難しい双胴船尾型 2 軸船に対し、局所的に細分化された非構造六面体格子を適用し、船体周りの二重模型流れ解析および自由表面流れ解析を実施した。形状影響係数は水槽試験結果に比べて多少大きめの値となったが、同程度の格子密度を有する構造格子を用いた計算結果とよく合っている。また、構造格子では計算できなかった自由表面計算も実行でき、造波抵抗係数は実用上十分な精度で推定できた。

参考文献

- (1) Kim, H.-T. Lee, P.-K. and Kim, H.-T., "A Numerical Study of Turbulent Flow Around a Twin-Skeg Container Ship Model with Appendages," Journal of Ship and Ocean Technology, (2006), pp. 12-23.
- (2) Park, D.-W. and Chun, H.-H., "Design practice for the stern hull form of a twin-skeg ship," Journal of Marine Science and Technology, (2009), pp. 310-321.
- (3) 浦野, 平田, 日野, "局所的に細分化された非構造六面体格子を用いた船体周りの自由表面流れ解析," 第 22 回数値流体力学講演論文集, (2008), F10-4
- (4) 浦野, 平田, 日野, "局所的に細分化された非構造六面体格子を用いた船体周りの流れ解析における格子依存性," 日本船舶海洋工学学会講演会論文集, (2009), pp. 287-290.
- (5) 川上, 柳原, 堀ほか, "Twin-skeg stem 船型の推進性能に関する実験的研究," 船舶技術研究所報告, 第 18 巻, 第 6 号, (1981), pp. 283-314
- (6) Hino, T., "Navier-Stokes Computations of Ship Flows on Unstructured Grids," Proceedings of the 22nd Symposium on Naval Hydrodynamics, (1998)