格子種類の違いにおける数値流体解析の比較

Comparison of Computational Fluid Dynamics for different grid types

北海道大学工学部	〇学	学生会員	若原巧実	(Takumi	Wakahara)
北海道大学大学院工学研究	究院	正会員	清水康行	(Yasuyuk	ti Shimizu)
北海道大学大学院工学研究	充院	フェロー	岩崎理樹	(Toshiki	Iwasaki)

1. はじめに

近年,地球温暖化による気候変動により水害が激甚化 している.水害の被害を特定し治水対策を行うために, 河川氾濫解析が世界各地で行われている.日本では, iRIC が広く用いられており,メッシュは構造格子によ るものである.一方、欧米では HEC-RAS¹⁾, MIKE+Flooding²⁾, Delft3D FM³⁾などが公開されておりこ れらは非構造格子によるモデルとなっている.構造格子 は,格子の生成が容易であることや計算が容易であると いったメッリトがある反面,デメリットとして複雑な地 形に対応できないといった特徴を有している.一方,非 構造格子は構造格子と反対の特徴を持ち,複雑な地形に 対応することが出来るが,格子生成や計算が困難である.

以上のように構造格子と非構造格子の特徴は示されて いるが、同じ条件での解析によって明確な比較が行われ ていないのが実情である.

本研究では、有限体積法における構造格子と非構造格 子を用いた数値流体解析を対象とし、①単相流、②混相 流における単純なモデル化を行い、自由水面を持つ流れ やそうでない流れなどのケースを複数設定して数値解析 を行う.これらの結果から、構造格子と非構造格子にお ける解析結果の違いや、解析コストの比較を定量的に行 い、数値流体解析において格子を適切に選択できる要因 を明らかにすることを目的としている.

2. 手法

3次元領域のモデリングには、FreeCADを用いた.

本研究では, 偏微分方程式を有限体積法で解く OpenFOAM を用いる. OpenFOAM は, 2004 年以来, OpenCFD 株式会社によって開発されたソースコードが 公開されている流体解析モデルであり, 熱伝達を伴う複 雑な流れや多相流などの用途に応じたソルバを有してお り, 広範囲な機能を備えている.⁴⁾

①単相流においては非定常乱流解析ソルバである pimpleFoamを用いて解析を行う. ②混相流では VOF 法 による2層混相流解析ソルバである interFoam を用いて 解析を行う.このモデルは、川崎ら1)により自由表面 解析の妥当性に関する検討に活用されており、再現性が 確認されている.以上の2つの流れをモデル化し、単純 化した条件を設定し複数の格子サイズと比較することで、 解析結果の差異や解析コストの比較を行った.

また,3 次元領域におけるキャビティ内の流れについては,加藤保真ら かによって得られた数値解が信頼できる結果として参照されているので本件においてもこれを

モデル検証用のデータとする.

基礎方程式は、以下に示す連続式(1)と非圧縮性流体の Navier-Stokes 方程式(2)である.

Ω

$$\cdot u = 0$$
 (1)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (uu) = -\nabla p + \nabla \cdot (\nu \nabla u) + \nabla \cdot [\nu \left\{ (\nabla u)^T - \nabla \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot ul \right\}]$$
(2)

ここで、∇は三次元領域におけるベクトル微分演算子, p は密度で割られた圧力、νは動粘性係数、右辺第3項 の発散の中は陽的に計算される。⁶

同ソルバでは、上式を有限体積法によって離散化し、 PISO(Pressure Implicit with Splitting of Operators)法を用い て流速と圧力を計算している.気液界面の追跡には、 VOF(Volume Of Fluid)法を用いている.一般的な VOF 法 の移流方程式を次式に示す.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha u) = 0 \tag{3}$$

ここで、 α は流体の体積率を表す VOF 値($0<\alpha<1$), u は液相の流速である. VOF 法においては、川崎ら ⁷に よって高い再現性が確認されている.

2.1 解析条件(①単相流)図-1に、3次元の計算領域を示す.



図-1 ①単相流の解析領域

①では、計算領域全体に流体を満たした状態で、上壁 に速度を付け移動させる. ②では、計算領域の左側に貯 水部を設け、計算開始と同時に貯水部を解放する.計算 条件は表-1 に示す. クーラン数は、0.5 以下とし、同じ タイムステップ 0.01s において計算格子間隔(一要素の 大きさ)は、0.05m、0.04m、0.03mの3種類を用いて数 値解析を行い比較検討した.

各ケースの構造格子は,汎用メッシュ生成ソフトの Cfmesh を用いた. また, 非構造格子の生成には, Delaunay 法による汎用メッシュ生成ソフトの Gmsh を 用いている. ①単相流における解析条件としては表-1 の通りである.また、計算格子間隔 0.05m の表面の格 子形状を図-2に示す.

表-1 ①単相流の解析条件

計算格子間隔		0.05,0.04,0.03m
計算時間間隔		0.01s
動粘性係数 v		1.0×10 ⁻⁶ m ² /s
密度 ρ		1000kg/m ³
乱流モデル		k-omegaSST
境界条件	壁面	no-slip 条件
	上面	u=1m/s



構造格子

図-2 0.05m の各格子形状

2.2 解析条件(②混相流)

図-3に、3次元の計算領域を示す.

②混相流では、計算領域の左側に貯水部を設け、計算 開始と同時に貯水部を解放する. 貯水部の右側には,橋 脚に見立てた半径 0.02m の円柱が3本配置されている. ②における解析も①と同様に格子を生成し、セル数が等 しいもの同士で比較検討を行う. 各格子の生成ソフトも ①と同様のものを用いる.

②混相流における解析条件としては、表-2の通りで ある.また,計算格子間隔 0.01m の表面の格子形状を 図-4 に示す.



図-3 ②混相流の解析領域

表−2	②混相流の解析条件

計算格子間隔		0.01,0.008,0.006m	
計算時間間隔		0.005s	
動粘性係数v	空気	1.6×10 ⁻⁵ m ² /s	
	水	1.0×10 ⁻⁶ m ² /s	
密度 ρ	空気	1.0kg/m ³	
	水	1000kg/m ³	
乱流モデル		k-omegaSST	
境界条件		no-slip 条件	



構造格子





3. ①単相流における結果と考察

3.1 解析コストの評価

表-3に、各ケースにおける解析時間の比較を示す.



表-3 ①単相流の解析コスト比較

なお,解析時間は計算プログラムを実行した時点を 0s とする.同図より,メッシュサイズが 0.05m と粗い 際は,解析時間に大きな差はない.しかし,メッシュサ イズが小さくなるに伴って,構造格子と非構造格子の解 析時間に大きな開きが生ずる.

以上から,非構造格子は構造格子に比べ,解析コストが 多大であると分かる.これは,非構造格子のランダム性 が影響していると考えられる.

3.2 結果の差異(流速ベクトル)

図-5 に, メッシュサイズ 0.05m における t=80s, y=0.5m の結果を示す. 図中の矢印は, 流速ベクトルを 示す.

同図より,速度を持つ壁面付近に着目すると,構造格 子と非構造格子では,流体のコントラストが大きく違う ことが分かる.また,壁面速度uによって発生する渦の 位置が,構造格子はやや右寄りにある一方で,非構造格 子では,中心に位置していることが分かる.渦の発生位 置は,圧力の計算方法である隣接セルの数や格子のラン ダム性などが影響しているのではないかと考えられる. 加藤保真ら³の研究では,渦が時間経過と共に中心やや 右よりに遷移していくと報告されている.本研究におけ る結果より,構造格子はその遷移の様子と相似である.



構造格子 非構 造 ™ 図−5 t=80s, y=0.5mの結果

4. ①混相流における結果と考察

4.1 解析コストの評価

表-4 に,各ケースにおける解析時間の比較を示す. 単相流と同様に,解析時間は計算プログラムを実行した 時点を 0s とする.

同表より、メッシュサイズが小さくなるにつれ、解析 時間に開きが出ていることが分かる. ①単相流ほど顕著 ではないが、①単相流と同様の結果が得られたため、非 構造格子の解析コストは、構造格子のそれと比較して大 きい.

表-4 ①混相流の解析コスト比較



4.2 結果の差異(液体率)

図-6 にメッシュサイズ 0.01m における 0.2s の結果を示す. 流体のコントラストは,移流方程式における流体率 α を示しおり, α =1 で液相, α =0 で気相となっている.





図-6 t=0.2sの解析結果

同図より、気液層の境界や流体が円柱衝突後に発生す る壁への遡上で構造格子と非構造格子で違いが見られる. 気液層の境界では、構造格子の方が黄色・緑のコントラ ストがくっきりしている.また、円柱衝突後の遡上では、 構造格子は、円柱に沿った流れが確認できるが、非構造 格子は、明瞭ではない. 混相流における解析では、VOF 法を用いているため, 気相と液相の表面を体積率によって表現する方法となっ ている.同図より,構造格子は規則的に配置されている ため,境界の滑らかさを表現することが出来ている.一 方,非構造格子は,格子がランダムに配置されているた め,境界の滑らかさを表現できないことからこの結果が 得られたと考えられる.また,円柱に衝突した液相の表 現も構造格子の方が,鮮明であり同じ格子サイズの場合, VOF 法は構造格子に有利な解析方法であることが分か る.

ここで,粗い構造格子と細かい非構造格子の結果を比較することで,解析結果に違いがあるかを確認するため,図-7 にメッシュサイズ 0.006m, t=0.2s における非構造格子の結果を示す.



図-7 非構造格子 0.006m, t=0.2s の結果

同図の結果と、図-6 における構造格子の結果を比較 すると、気液層境界のコントラストが等しい.また、円 柱に衝突した場所の流れや、通り過ぎた後の流れについ ても遡上を同じ場所で確認することが可能であり、両結 果は等しいことが分かる.このことから、粗い格子サイ ズである構造格子と、細かい格子サイズである非構造格 子の結果が同様であり、構造格子と非構造格子において 同様の解析精度を得るには、構造格子の方が解析コスト の点で大きく優れていることが分かる.表-4 における 解析時間では、0.01mの構造格子が 94s に対して、0 同 じ結果をもたらす 0.006m の非構造格子では、3092s の 時間がかかるため、同表からもコストが大きいことが確 認できる.

5. おわりに

本研究では、3次元数値流体力学ツール OpenFOAM を 用いて、①単相流及び②混相流の解析を構造格子と非構 造格子を用いて格子サイズが等しいときの解析・比較を 行った.その結果,得られた結論を以下にまとめて示す. ①単相流

- (1)構造格子と非構造格子の解析コストは、格子サイズが大きい場合は、大きな差がない.しかし、格子サイズが小さくなるにつれ、非構造格子のコストが非常に大きくなる.
- (2)非構造格子は格子がランダムに配置されていることから、流速のコントラストを詳細に表現できることを確認した.しかし、渦の位置やコントラストの違いなどは、圧力計算の違いが影響していると考えられる.加藤らの研究と比較すると、本研

究における構造格子の結果と類似しており信頼で きる結果となっている.

②混相流

- ①単相流の結果と同様、メッシュサイズが小さい 場合、解析コストの差は小さいが、メッシュサイ ズが小さくなると解析コストの差が大きくなる。
- (2) VOF 法において格子が粗い場合、メッシュが規 則的に並ぶ構造格子の方が、境界の滑らかさの表 現に適しており、解析コストについても優れてい る.
- (3)非構造格子でもメッシュサイズを小さくすれば境 界を詳細に表現することが可能なため、把握した い現象に応じて、格子の種類やメッシュサイズを 決定することが重要である。
- (4)構造格子と非構造格子において同程度の精度(結果の相似)を得るためには、非構造格子のメッシュサイズを小さくする必要があり、非構造格子のコストはさらに大きくなることが確認できた.

以上より,構造格子及び非構造格子の解析の特徴は 様々であるが,規則的に並ぶ構造格子は,計算コストが 小さく,一定の解析精度を得られることが分かった. 数値流体解析を行う際は,検証したい現象に応じて適切 な格子を選択していく必要がある.

今後は、より河川に近いモデルでの流れや、VOF 法 以外の自由水面解析を行い、格子の特性を正確に把握 したい.

参考文献

1)HEC-RAS: https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/(閲覧日 2021 年 12 月)

2) Delft3D Flexible Mesh Suite-Deltares :

https://www.deltares.nl/en/software/delft3d-flexible-meshsuite/ (閲覧日 2021 年 12 月)

 MIKE+Floding-MIKE Powered by DHI : https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mikeplus/flood ing/(閲覧日 2021 年 12 月)

 川崎浩司,松浦翔,坂谷太基.3 次元数値流体力学 ツール OpenFOAM における自由表面解析手法の妥当性 に関する検討,土木学会論文集 B3, Vol 69, pp.748-753, 2013.

5) 加藤保真,棚橋隆彦. 三次元立方体キャビティ内の 高レイノルズ数渦渡流れ(Re=5000の場合). ターボ機 械. 1990年,第18巻,第2号, pp.36-42.

6)加藤保真,棚橋隆彦.三次元立方体キャビティ内の 高レイノルズ数渦渡流れ(Re=5000の場合).ターボ機 械.1990年,第18巻,第2号,pp.36-42.

7) 川崎浩司,松野哲弥,坂谷太基,有光剛.オイラー 表記に基ずく自由表面単相流・他層流解析モデルの比較 検討,土木学会論文集 B2, Vol 69, pp.026-030, 2013.