

浮力流れの数値流体力学解析に対するメッシュ形状の影響



安全研究センター 熱水力安全研究グループ

背景

- シビアアクシデント時における原子炉格納容器内熱水力挙動把握を目的としてROSA-SA (Rig of Safety Assessment-Severe Accident)プロジェクトを実施中。
- 格納容器内での3次元的水素挙動を評価する上で、数値流体力学(CFD)解析は非常に有力。水素は非常に軽いため、浮力の影響が大きい。
- 浮力を有する流れを解析する際に、三角形メッシュ(四面体メッシュ)を適用した場合、解析結果の精度が低いことが既往研究で指摘されていた。
- 本研究では三角形メッシュ・四角形メッシュ(六面体メッシュ)を用いて、浮力流れを解析し、メッシュ形状の影響について検討を実施した。メッシュ形状の影響が出る原因として、メッシュの非直交性の影響が考えられるので、非直交補正の影響について検討した。
- 解析にはオープンソースコードOpenFOAMを用いた。

改良型ソルバの実装 (続き)

上式と質量保存式 $\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = -\partial \rho / \partial t$ より圧力方程式が得られる。

$$\frac{\delta}{\delta x} \left[\frac{\rho_P}{A_P} \left(\frac{\delta p_{rgh}}{\delta x} \right)_P \right] = \frac{\delta}{\delta x} \left[\rho_P \frac{H}{A_P} - \frac{\rho_P}{A_P} (\mathbf{g} \cdot \mathbf{x}) \left(\frac{\delta \rho}{\delta x} \right)_P \right] + \frac{\partial \rho_P}{\partial t}$$

上式では密度のラプラシアン項が含まれる。

$p = p' + \rho_c \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}$ (ρ_c は定数) で圧力方程式を書き換える。

$$\frac{\delta}{\delta x} \left[\frac{\rho_P}{A_P} \left(\frac{\delta p'}{\delta x} \right)_P \right] = \frac{\delta}{\delta x} \left[\rho_P \frac{H}{A_P} \right] + \frac{\partial \rho_P}{\partial t}$$

密度のラプラシアン項が含まれない(←浮力項に対する非直交性の影響を緩和できると考えられる)。この圧力方程式により、圧力を計算するソルバを実装し、既存ソルバと比較。

解析結果

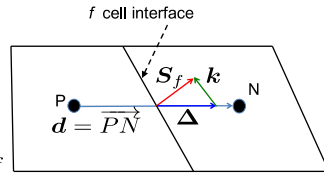
- 試験解析として、高温ジェットを容器下部中央から低温流体に貫入させるケースを解析。
- 四角形メッシュと三角形メッシュを適用。四角形メッシュはより詳細なメッシュの解析結果と比較し妥当性を確認済み。四角形メッシュの結果をリファレンスとして比較。
- 三角形メッシュを適用したケースでは、以下の各ケースを比較。
 1. 既存ソルバ・非直交補正適用なし
 2. 既存ソルバ・非直交補正適用あり
 3. 改良ソルバ・非直交補正適用あり
- 三角形メッシュを用いて、非直交補正を適用しないと非対称な流れとなるが、非直交補正により、四角形メッシュの結果とほぼ一致する。
- 改良ソルバでもメッシュの非直交性の影響を緩和できた。また、高速に計算できた。(解析時間: 既存ソルバ3300秒, 改良ソルバ2500秒)

非直交補正

- 多くのCFDコードでは、有限体積法により基礎方程式を離散化。OpenFOAMも有限体積法を用いる。
- メッシュが直交しない場合、ラプラシアン項の評価に対して補正が必要となる。これが非直交補正。

ラプラシアン項の離散化

$$\int_V \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) dV = \int_S \Gamma \nabla \phi \cdot d\mathbf{S} \approx \sum_f \Gamma_f \nabla \phi_f \cdot \mathbf{S}_f$$



セル界面の法線ベクトル \mathbf{S}_f の分解 $\mathbf{S}_f = \Delta + \mathbf{k}$

$\mathbf{S}_f \perp \mathbf{k}$ を満たすように Δ を定義する。 $\Delta = \frac{|\mathbf{S}_f|^2}{\mathbf{d} \cdot \mathbf{S}_f} \mathbf{d}$

以上から次式が得られる。

$$\nabla \phi_f \cdot \mathbf{S}_f = \nabla \phi_f \cdot \Delta + \nabla \phi_f \cdot \mathbf{k} = \frac{\phi_N - \phi_P}{|\mathbf{d}|} |\Delta| + \nabla \phi_f \cdot \mathbf{k}$$

第2項が補正項として陰的に計算される。

改良型ソルバの実装

- 代表速度が音速に対して十分小さく、温度差が大きい場合、低Mach数近似を用いて、解く場合が多い。
- OpenFOAMの低Mach数近似を用いた既存ソルバに対して、定式化を変更し、非直交性の影響を緩和するソルバを実装。より高速な計算が可能かを検証。

浮力を考慮したNavier-Stokes方程式(基礎方程式の1つ)

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \frac{\mu}{3} \nabla D + \rho \mathbf{g} \quad D = \nabla \cdot \mathbf{u}$$

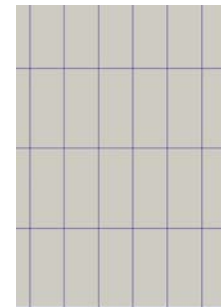
上式を変形

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla(p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}) + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \frac{\mu}{3} \nabla D - (\mathbf{g} \cdot \mathbf{x}) \nabla \rho$$

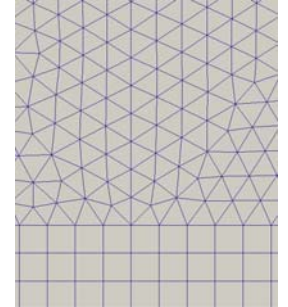
上式を、セルPとその周囲セルNの量で離散化。 $p_{rgh} = p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}$

$$\frac{A_P}{\rho_P} \rho_P u_P + \sum_N A_N u_N = - \left(\frac{\delta p_{rgh}}{\delta x} \right)_P - (\mathbf{g} \cdot \mathbf{x}) \left(\frac{\delta \rho}{\delta x} \right)_P$$

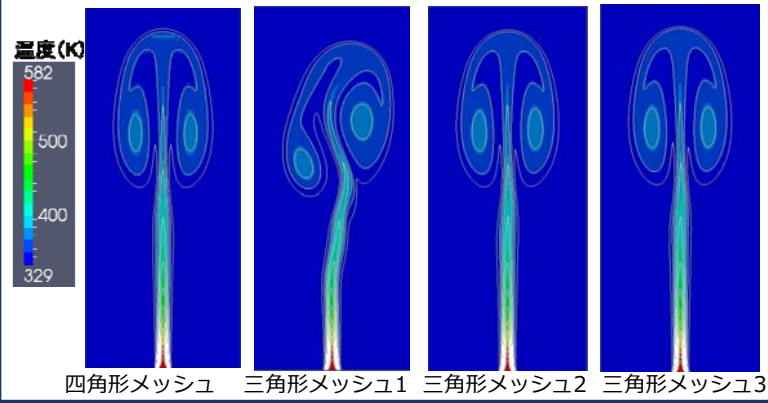
$$\Leftrightarrow \rho_P u_P = \rho_P \frac{H}{A_P} - \frac{\rho_P}{A_P} \left(\frac{\delta p_{rgh}}{\delta x} \right)_P - \frac{\rho_P}{A_P} (\mathbf{g} \cdot \mathbf{x}) \left(\frac{\delta \rho}{\delta x} \right)_P$$



四角形メッシュ (一部)



三角形メッシュ (一部)



四角形メッシュ 三角形メッシュ1 三角形メッシュ2 三角形メッシュ3

まとめと今後の計画

- 浮力流れに対するメッシュの非直交性および非直交補正の影響について検討した。
- 実機体系での浮力流れの解析を実施。