

前処理法による凝縮流体・構造連成シミュレーション

Preconditioning Method for Condensate Fluid and Structure Coupling Problems

新山大輔, 東北大院, 仙台市青葉区荒巻字青葉 01, E-mail: daisuke@caero.mech.tohoku.ac.jp
山本 悟, 東北大工, 仙台市青葉区荒巻字青葉 01, E-mail: yamamoto@caero.mech.tohoku.ac.jp
Daisuke NIIYAMA, Dept. of Aeronautics and Space Eng., Tohoku Univ., Sendai 980-8579, Japan
Satoru YAMAMOTO, Dept. of Aeronautics and Space Eng., Tohoku Univ., Sendai 980-8579, Japan

Abstract: A numerical method for simulating condensate fluid and structure coupling problems is presented. This is based on the preconditioning method, Roe's Riemann solver, the 4th-order compact MUSCL extrapolation, and the LU-SGS scheme. The fundamental equations for governing condensate flows with homegeneous and heterogeneous nucleations are transformed to the preconditioned equations. The same equations with zero-velocity can solve thermal conduction in solid, too. Therefore, additional equations for the solid is not necessary. Compressible flows and natural convections with condensation and structure are preliminary simulated.

1. 緒言

著者らは最近, 高解像差分スキームに基づく非平衡凝縮を伴う圧縮性流れの数値解法に前処理法を適用し, 凝縮を伴う低マッハ数流れならびに自然対流問題の数値解法を提案した⁽¹⁾⁽²⁾. この際, 既存の計算コードを簡単に前処理型コードへ拡張する目的で, 新たに前処理型流束分離式を導出している. これにより既存の Roe スキーム⁽³⁾ならびに LU-SGS スキーム⁽⁴⁾も前処理型スキームへと簡単に再構築することができる. 結果的に, いわゆる Stiff 問題が完全に解決されたのに加えて, 前処理型 LU-SGS スキームを使用することにより解の収束を大幅に加速することに成功した.

前処理法においては, 速度がきわめて遅くなるにつれて圧縮性流れの支配方程式が非圧縮性流れの支配方程式に変換されることが知られている. 加えて, 圧縮性流れの特性速度がすべて対流速のオーダーに変換されるため, 局所的に限らず全領域的に速度がゼロになっても, 特性速度の非線形項に伴う特異点は存在しない. したがって, 対流の存在しない場についても計算は破綻しない⁽⁴⁾. この際に解かれている方程式は, 前処理に伴い導出される熱伝導方程式に帰着されることから, 速度場を強制的にゼロとおき, かつ熱伝導係数を固体のものに変更することにより, 圧縮性流れと固体の熱伝導問題が同じ計算アルゴリズムで同時に解けることが容易にわかる.

現在, 流体・構造連成問題は様々な方法により解析されているが, そのほとんどは, 流体と構造を別々のアルゴリズムにより計算するか, もしくは構造体内の熱伝導は考慮されていないものである. そんな中で, 本論文の考え方は特に圧縮性流れの流体・構造連成問題を効率良く解析する上で一つの有用な方法であるといえる. 本論文においては, 簡単な流体・構造連成問題を対象に流体ならびに固体の熱伝導を同時に解析し, 本数値解法の有用性を示す. また, さらに凝縮を伴う問題についても解析を行う.

2. 基礎方程式

凝縮流体の基礎方程式は, 混合気体の質量保存則, 運動量保存則, エネルギー保存則, 蒸気の質量保存則, 液相の質量保存則, 液滴の数密度保存則からなる. これに浮力項を加え, 前処理型に変換した基礎方程式は一般曲線座標系で以下のように表される.

$$\Gamma \frac{\partial \hat{Q}}{\partial t} + L(\hat{Q}) = \Gamma \frac{\partial \hat{Q}}{\partial t} + \frac{\partial F_i}{\partial \xi_i} + S + H = 0 \quad (1)$$

ただし,

$$\hat{Q} = J \begin{bmatrix} p \\ u_1 \\ u_2 \\ T \\ \rho_v / \rho \\ \beta \\ n \end{bmatrix}, \quad F_i = J \begin{bmatrix} \rho u_i \\ \rho u_i U_i + \partial \xi_i / \partial x_i p \\ \rho u_2 U_i + \partial \xi_i / \partial x_2 p \\ (E + p) U_i \\ \rho_v U_i \\ \rho \beta U_i \\ \rho n U_i \end{bmatrix}$$

$$S = -J \frac{\partial \xi_i}{\partial x_j} \frac{\partial}{\partial \xi_i} \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{1j} \\ \tau_{2j} \\ \tau_{kj} u_k + \kappa \partial T / \partial x_j \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad H = -J \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ (\rho_s - \rho) g \\ (\rho_s - \rho) u_2 g \\ -\Gamma_c \\ \Gamma_c \\ \rho l \end{bmatrix}$$

ここで, $p, u_i (i=1,2), T, \rho_v, \beta, n$ はそれぞれ静圧, 物理速度成分, 静温, 蒸気の密度, 液相の質量分率, ならびに液滴の数密度である. さらに, $\rho, U_i (i=1,2), E, \tau_{ij} (i,j=1,2), \kappa$ はそれぞれ, 密度, 反変速度成分, 全内部エネルギー, 粘性応力テンソル, ならびに熱伝導率である. また ρ_s, g, Γ_c, l はそれぞれ, 規準流体密度, 重力加速度, 液相の質量生成率, ならびに核生成率である. また Γ は前処理行列であり, 局所マッハ数が非常に小さい場合に, 圧縮性方程式を非圧縮性方程式に変換するもので, Weiss ら⁽⁵⁾の方法に基づき次のように定義する.

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \theta & 0 & 0 & \rho_T & 0 & 0 & 0 \\ \theta u_1 & \rho & 0 & \rho_T u_1 & 0 & 0 & 0 \\ \theta u_2 & 0 & \rho & \rho_T u_2 & 0 & 0 & 0 \\ \theta H - 1 & \rho u_1 & \rho u_2 & \rho_T H + \rho C_p & 0 & 0 & 0 \\ \theta \rho_v / \rho & 0 & 0 & \rho_T \rho_v / \rho & \rho & 0 & 0 \\ \theta \beta & 0 & 0 & \rho_T \beta & 0 & \rho & 0 \\ \theta n & 0 & 0 & \rho_T n & 0 & 0 & \rho \end{bmatrix}$$

ここで, $H = (E + p) / \rho$, また θ は前処理パラメータであり次式で定義される.

$$\theta = (1/U_r^2 - \rho_T / \rho C_p)$$

U_r は、スイッチングパラメータで、通常の圧縮性流れでは音速に等しい。一方、極めて遅い流れの時には対流速度と同じオーダーの値になる。 ρ_T は温度 T による密度 ρ の偏導関数を与える。

固体熱伝導では、上記の基礎方程式において、場の速度を全域ゼロとして解く。

3. 数値解法

筆者らがすでに提案している前処理型流束分離スキームを用いて基礎方程式を離散化する。空間差分には、4 次精度 Compact MUSCL スキーム⁽⁶⁾と前処理型 Roe スキームを用い、時間積分には、時間最大 2 次精度前処理型 LU-SGS スキームを用いる。

4. 計算結果

流体・構造連成問題への本解法の有用性を示すために中空円管の熱伝導を考慮した中空円管周りの非定常圧縮性流れ(CASE 1)と自然対流(CASE 2)を計算した。

4. 1 中空円管周りの非定常圧縮性流れ(CASE 1)

最近、圧縮性流れの流体・構造連成問題の計算例が多く報告されるようになってきた。これらにおいては、構造体内の熱伝導を計算するために熱伝導方程式を流れの方程式とは独立に計算するのが通例である。本論文では本解法の実現性を検証するために、まず内壁温度が固定された中空円管の熱伝導と中空円管周りの非定常圧縮性流れを前処理を施した同一の支配方程式により同時に計算した。計算条件として、大気温度 293K、中空円管内壁温度 325.5K、一様流マッハ数 0.45、相対湿度 0% (乾燥空気)、レイノルズ数 $1.1E5$ を与え、中空円管の熱伝導係数は大気の 10 倍であると仮定した。計算格子は格子点数が 180×130 の O 型格子を用いた。

Fig. 1 に計算された中空円管周りの瞬間等マッハ数分布を示す。なお、非定常解を得るために、時間最大 2 次精度の LU-SGS スキームで時間積分し、ニュートン反復を 3 回行った。円管後流域にカルマン渦列が形成されていることが示されており、渦構造は実験により可視化された結果と定性的に良い一致を示している⁽⁷⁾。

Fig.2(a)(b)に中空円管内外の瞬間温度分布を示す。円管周りのみならず円管内にも温度分布が同時に示されているのがわかる。円管内では内壁からの加熱により円管が熱せられて円管外壁へと滑らかに温度が降下し、最終的に円管外壁で円管周りの温度場が繋がっている。このことから、本解法が構造体内熱伝導も考慮した圧縮性流れの流体・構造連成問題の計算に活用できる可能性が示唆される。

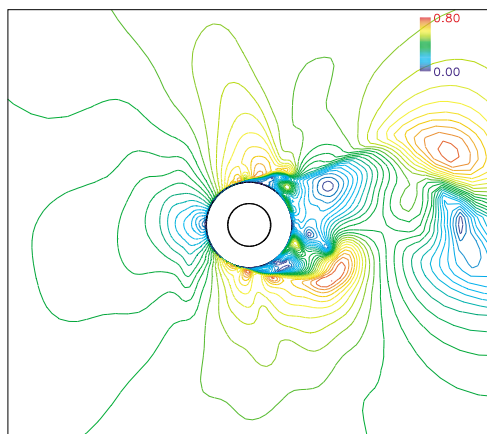
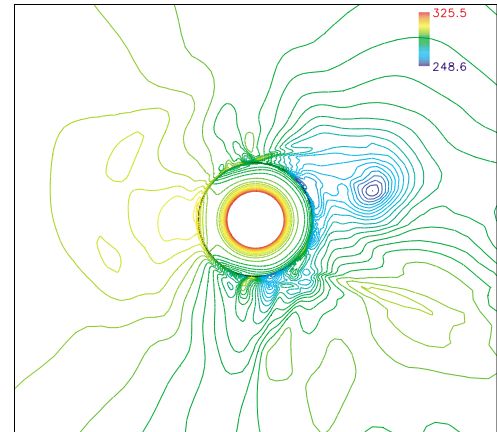
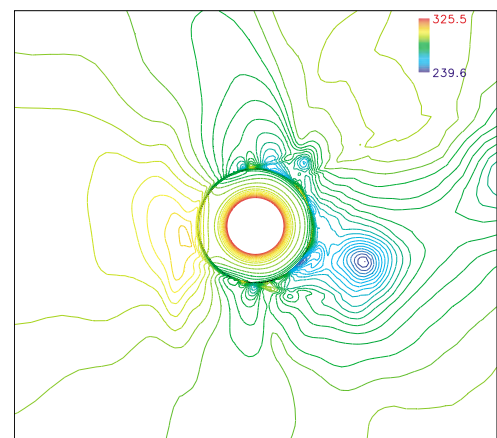


Fig.1 Instantaneous Mach number contours.



(a) $t=t_1$



(b) $t=t_2$

Fig.2 Instantaneous temperature contours.

4. 2 中空円管周りの自然対流問題(CASE 2)

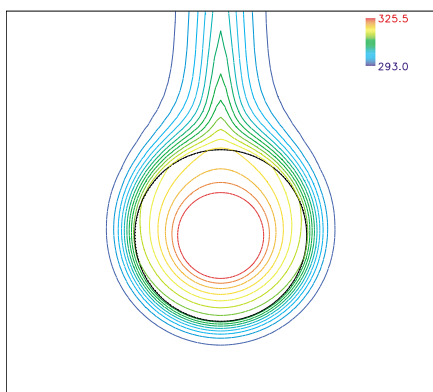
著者らはすでに、レイリー数 $1.0E5$ における円柱周りの自然対流問題を数値解析し、実験結果との比較を行い、良い一致を得ている⁽²⁾。ここでは内壁温度が固定された中空円管の熱伝導と中空円管周りの自然対流問題を計算した。計算格子は格子点数が 180×79 の O 型格子を用いた。計算条件として、大気温度 293K、中空円管内壁温度 325.5K、一様流ゼロ、相対湿度 0% (乾燥空気)、レイリー数 $1.0E5$ を与えた。

Fig.3(a)-(c)に円管の熱伝導率を大気の 5 倍、10 倍、20 倍とした場合の等温度分布を示す。また、Fig.3(d)には円管内部の温度を 325.5K に固定した場合の等温度分布を示す。いずれの計算結果においても円管周りでは円管外壁で加熱された空気が浮力の効果により円管表面に沿って上昇している様子がわかる。一方、円管内にも温度分布が示されているが、熱せられた空気が円管上方へ移動して円管上方の温度が上昇するに伴い、円管内も上部ほど温度が相対的に高くなっていることがわかる。Fig.3(a)-(c)を比較すると、円管の熱伝導率が大気より大きいほど円管外壁の温度は高くなり、円管内部の温度勾配が疎になることが示されている。ただし、円管の熱伝導率が変化しても、円管周りの温度場の広がり(温度境界層の厚さ)にはほとんど違いが見られない。これはいずれの場合もレイリー数を $1.0E5$ として計算しているためであると考えられる。

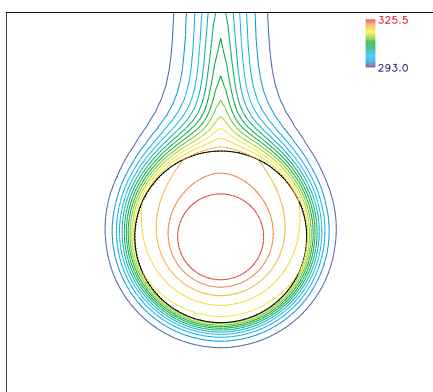
次に、凝縮を伴う場合の計算結果を示す。

計算条件として、大気温度 293K、円管内壁温度 253K、一様流ゼロ、円管の熱伝導率を大気の 10 倍、レイリー数 $3.1E5$ を与えた。

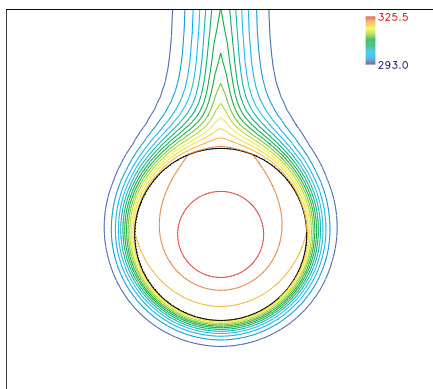
Fig.4(a)-(c)に、相対湿度を 0% (乾燥空気)、50%、70%とした場合の等温度分布を示す。また、Fig.5(a)(b)に相対湿度を 50%、70%とした場合の液相の質量分率分布を示す。円管を冷却しているので、前述の結果とは逆に冷却された空気が円管表面に沿って下降し、円管内も下方ほど温度が相対的に低下している様子がわかる。相対湿度が 50%、70%の場合には凝縮により潜熱が放出されるために、乾燥空気の場合と比較して円管周囲の温度が相対的に高くなっていることが示されている。また Fig.5(a)(b)から、液相領域は、湿度を増加するにつれて広がっていることがわかる。なお、この場合においても、レイリー数が同じであるために、温度境界層の厚さに顕著な違いは見られない。



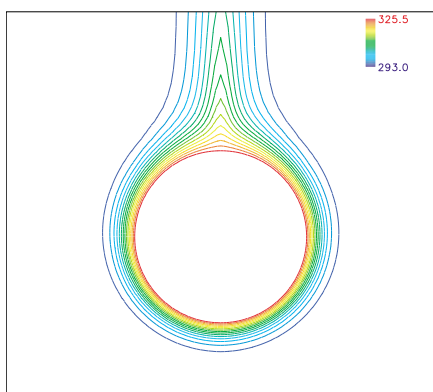
(a) 5 times.



(b) 10 times.

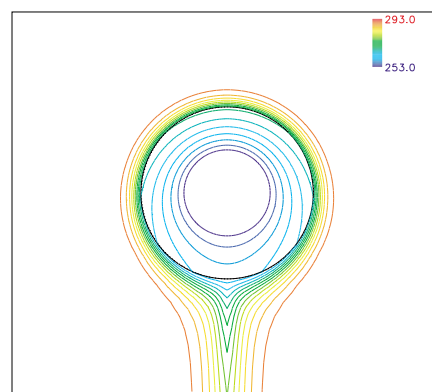


(c) 20 times.

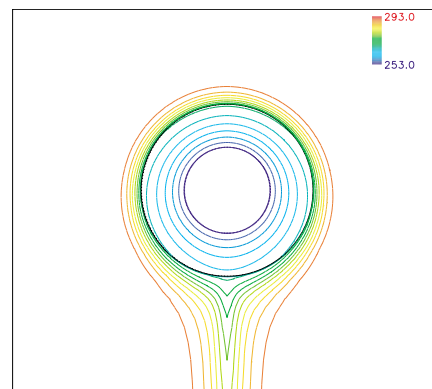


(d) constant temperature in cylinder.

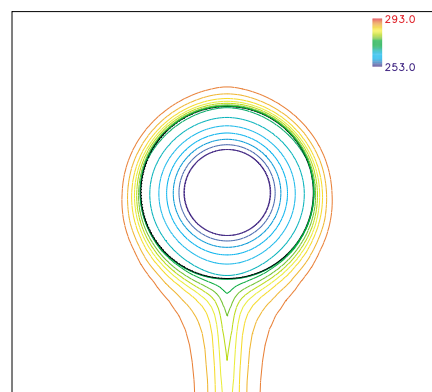
Fig.3 Temperature contours.



(a) dry air.

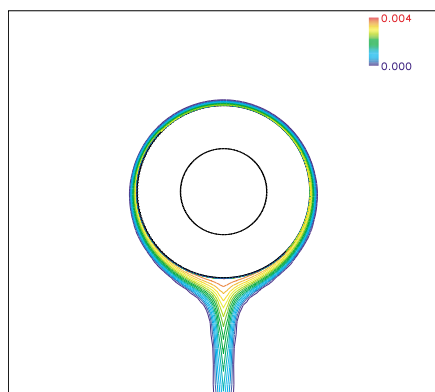


(b) 50% relative humidity.

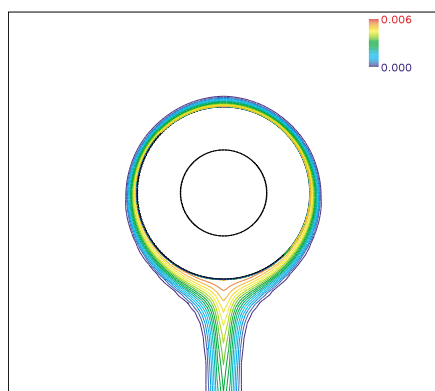


(c) 70% relative humidity.

Fig.4 Temperature contours.



(a) 50% relative humidity.



(b) 70% relative humidity.

Fig.5 Condensate mass fraction contours.

5. 結言

中空円管内の熱伝導を考慮した円管周りの非定常圧縮性流れと凝縮を伴う自然対流問題の数値解析を行い、前処理法を用いることにより、流体・構造連成問題が同一の支配方程式で同時に計算できることを示した。今後はより具体的な問題へ本数値解法を拡張し、実験結果などとの比較を行う予定である。

参考文献

- (1) S.Yamamoto, B.-R.Shin,, Proc. of 2nd Int. Conf. on Computational Fluid Dynamics-Sydney, (2002), Springer, in press.
- (2) 山本悟, 新山大輔, 申 炳録, 日本機械学会論文集 B 編, (2003), 掲載予定.
- (3) P.L.Roe, J.Comp.Phys., **43**(1981), 357-372.
- (4) S.Yoon and A.Jameson, AIAA J., **26**(1988), 1025-1026.
- (5) J.M.Weiss and W.A.Smith, AIAA Journal, **33**(1995), 2050-2057.
- (6) S.Yamamoto and H.Daiguji, Computers and Fluids, **22**(1993), 259-270.
- (7) M.Van Dyke, An Album of Fluid Motion, Parabolic Press, (1982), 130.