

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K17552

研究課題名(和文) 圧縮性流体・固体の熱連成現象に対する多相場解析手法の改良と実用問題への適用

研究課題名(英文) Improvement and application of multiphase computational method for thermal interactions between solid and compressible fluid

研究代表者

鳥生 大祐 (Torii, Daisuke)

京都大学・学術情報メディアセンター・助教

研究者番号：60772572

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、研究代表者らが提案した圧縮性流体と固体の熱連成計算手法について、例えば気体と金属のように物性値が大きく異なる場合や、固体が移動する場合に適用すべく改良を行った。提案した手法では、圧縮性流体と固体から構成される多相場を1つの流体と仮定し、計算セルに含まれる各相の体積割合に基づいて平均化された基礎方程式に対して低マッハ数の非等温流れを高速に計算可能な圧縮性流体解法を適用する。以上の提案手法について、流体と固体の基礎方程式を個別に解いて得られた既往の計算結果と比較して多相場の平均化手法の妥当性を確認した。また、回転する歯車状の固体周りの熱対流を計算して手法の適用性を確認した。

研究成果の概要(英文)：In this study, our proposed multiphase computational method for thermal interactions between solids and compressible fluids was improved to consider the differences of physical properties between phases and the movement of the solid object. The mixture model was adopted in the proposed method, and the phase-averaged governing equations for multiphase fields, which are derived on the basis of the volume fractions of the phases in each computational cell, are solved by a compressible fluid solver which can be applied to non-isothermal low Mach number flows. The validity of the phase-averaging method was confirmed through the comparisons with the calculated results by the computational method which treats fluid and solid phases individually. In addition, the proposed method was applied to the heat transfer around a rotating gear-shaped solid object and its applicability was shown.

研究分野：数値流体力学

キーワード：流体・固体熱連成 圧縮性流体 多相場解法

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 流体と固体の熱連成現象の解明と予測は工学分野における重要な研究課題の1つである。このため、これまでに多くの数値解析手法が提案されているが、その多くは流体の非圧縮性を仮定している。しかし、大きな温度差によって高浮力流れが発生する場合や、密閉性の高い領域が急激に加熱される場合には流体の密度変化が顕著となるため、流速が音速に比べて十分遅い流れ（低マッハ数流れ）の場合でも、現象を妥当に再現するためには流体の圧縮性を考慮する必要がある。

以上のような背景から、本研究では圧縮性流体と固体の熱連成問題に対する計算手法について検討を行った。

(2) 工学上の実用問題では、複雑な形状の固体が移動する場合や、例えば金属と気体のように、固体と流体の物性値（密度、比熱、熱伝導率など）が数百倍から数千倍程度異なる場合がある。このような熱連成を伴う移動境界問題に対し、比較的取り扱いの簡単な直交構造格子を用いて妥当な計算結果を得られる手法を構築できれば、複雑な現象を解明し、予測するための有効な手段と成り得る。

(3) 上記のような研究背景に基づき、研究代表者らはこれまでに直交構造格子を用いた圧縮性流体と固体の熱連成計算手法を提案している。この手法では、計算セル内に含まれる各相の体積割合に基づいて平均化された多相場の基礎方程式を用いるため、相間に境界条件を設定する必要がなく、複雑な多相場の熱連成現象を比較的簡単な手順で計算できる。また、提案手法では非等温の低マッハ数流れに対し、基礎方程式の各項を分離して部分段階的に変数を更新する圧縮性流体解法を用いる。特に圧力項を陰的に扱うことで音速に基づく計算の時間刻み幅の制限を緩和し、高速な計算を可能としている。

以上のような計算手法を提案し、既往の実験結果等に適用して計算結果の妥当性を確認している。一方で、提案手法では多相場をモデル化する際に固体は静止し、比熱や熱伝導率は空間で一様と仮定している。したがって、先に述べた理由から工学上の実用問題に適用するためには固体が移動する場合や、固体と流体で物性値が異なる場合にも適用できるように手法を改良する必要がある。

## 2. 研究の目的

(1) 研究代表者らが提案した直交構造格子を用いた圧縮性流体と固体の熱連成計算手法について、固体が移動する場合や、固体と流体で物性値が異なる場合にも適用できるように改良を行う。

(2) 改良した手法について、多相場のモデル化手法の妥当性と実用問題への適用性を確認する。

## 3. 研究の方法

(1) 直交構造格子を用いた圧縮性流体と固体

の熱連成計算手法の改良：

提案した計算手法では、相平均された多相場の基礎方程式の移流、拡散、圧力及び外力項を分離し、部分段階的に変数を更新する。また、固体が流れ場に与える影響は各相の運動量を平均化して多相場の運動量とすることで考慮される。本研究では、これらの計算段階のうち、熱伝導項の計算および運動量を平均化する段階においてのみ固体の物性値を考慮して導出された基礎方程式を用いる手法を検討する。これにより、流体とは異なる物性値を有する固体周りの流れと固体内部の熱伝導を簡単な計算手順で安定に計算可能な手法を構築する。

上記の改良に加え、移動する固体の運動量を適切に流れ場へ反映するために、運動量の平均化手順の再検討を行う。また、任意形状の移動固体を扱うために、固体を2次元の場合は三角形、3次元の場合は四面体要素の集合体として表現し、計算セルをさらに細かく分割したサブセルがそれらに含まれるかを判定して各計算セルにおける固体の体積割合を推定する手法[2]を導入する。

(2) モデル化手法の妥当性と適用性の確認：

提案手法における多相場のモデル化（平均化）手法の妥当性を確認するために、流体と固体の境界面に適合する計算格子を用い、各相の基礎方程式を個別に解く既往の計算手法による計算結果との比較検討を行う。また、複雑な形状の移動物体周りの熱対流について数値実験を行い、温度や密度分布などの計算結果から提案手法の適用性を確認する。

## 4. 研究成果

(1) 正方形固体周りの自然対流計算（流体と固体の基礎方程式を個別に計算する手法との比較）：

提案手法における多相場の平均化手法の妥当性を確認するために正方形固体周りの自然対流計算を行い、流体と固体の境界面に適合する計算格子を用いた既往の計算手法[1]と加熱面におけるヌセルト数  $Nu$  を比較した。

計算領域を図-1に示す。図-1に示されるように、計算領域内には正方形の固体が設置され、底面と上面をそれぞれ温度一定で加熱、冷却し、側面は断熱条件とした。流体および固体の物性値については、既往研究[1]に合わせてそれぞれ異なる値を設定し、レイリー数  $Ra$  が  $10^3$ 、 $10^4$ 、 $10^5$ 、 $10^6$  の条件で計算を行った。なお、流体と固体が混在する計算セルでの計算が妥当に行われているかを確認するために、提案手法では正方形固体の表面と計算セルの境界面が一致しないように設定した。

図-2に提案手法によって得られた定常状態の等温線を示す。図-2に示されるように、 $Ra$  が  $10^3$  の場合は熱伝導が支配的となり、上下左右に対称な温度分布が得られた。一方、 $Ra$  が  $10^4$  以上の場合には底面を加熱されたことで時計周りの循環流が発生し、固体周りの流れと固体内部の熱伝導により温度分布が変化

していく様子が再現された。また、表-2 に底面での  $Nu$  について既往研究[1]と比較した結果を示す。表-2 から分かるように、提案手法と既往の計算結果はよく一致しており、計算セル内に占める各相の体積割合に基づいて平均化した基礎方程式を用いて計算が妥当に行われていることを確認した。

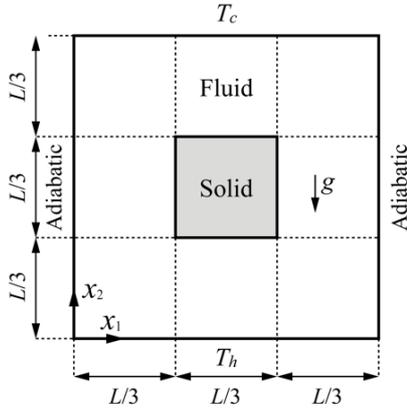


図-1 正方形固体周りの自然対流の計算領域

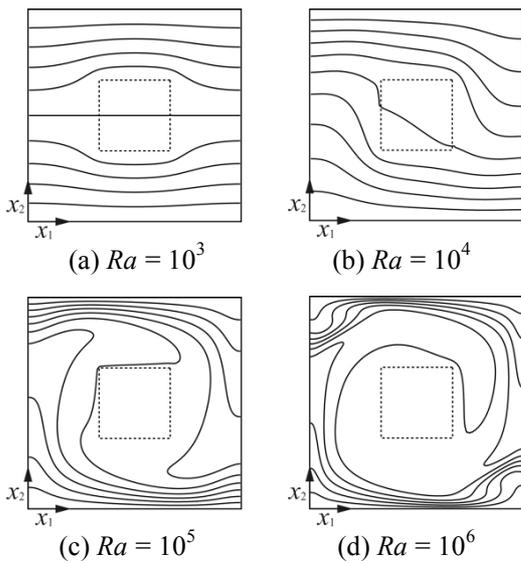


図-2 各レイリー数における等温線

表-1 既往研究[1]とのヌセルト数の比較 ( $Ra$ : レイリー数,  $Nu$ : 加熱壁面でのヌセルト数)

$Ra$	$Nu$			
	$10^3$	$10^4$	$10^5$	$10^6$
Present	1.29	1.53	4.04	6.32
Lee and Ha [1]	1.28	1.55	3.96	6.31

(2) 回転する歯車周りの熱対流計算 (数値実験):

複雑な形状の移動物体周りの熱対流に対する提案手法の適用性を確認するために、放熱フィン付きの回転円筒を模擬した歯車状の固体周りの熱対流を計算した。

計算領域を図-3 に示す。図-3 に示されるよ

うに、計算領域内には時計周りに回転する歯車状の固体が設置され、その中心部は一定の温度  $T_h$  で加熱される。なお、計算は2次元で行い、固体は図-4 のように三角形要素の集合体として表現される。流体は空気、固体はアルミニウムを仮定し、計算領域の全ての境界面は一定の温度  $T_c$  で冷却される。なお、 $T_h$  と  $T_c$  の差 ( $T_h > T_c$ ) は 100 [K] とし、温度変化による流体の密度変化が顕著となる条件で計算を行った。

図-5 と図-6 に各時刻における温度  $T$  と無次元密度  $D'$  の時間変化を示す。なお、 $D'$  は  $D' \equiv \rho / \rho_0$  と定義され、 $\rho$  は密度、 $\rho_0$  は密度の初期値である。図-4 より、計算開始と共に固体の中心部から等方的に熱が伝わったのち、固体の表面付近で温められた周囲の流体が固体の回転と密度変化により生じた浮力によって対流する様子が確認できる。また、図-5 からは計算領域内の温度変化によって流体の密度が変化しており (最大で約 15% 程度)、本計算条件では流体の圧縮性を無視できないことが分かる。

以上の結果より、提案手法では流体の圧縮性を考慮しつつ、移動する固体周りの非等温流れと固体内部の熱伝導を単純な直交構造格子を用いて安定に計算可能であることを確認した。

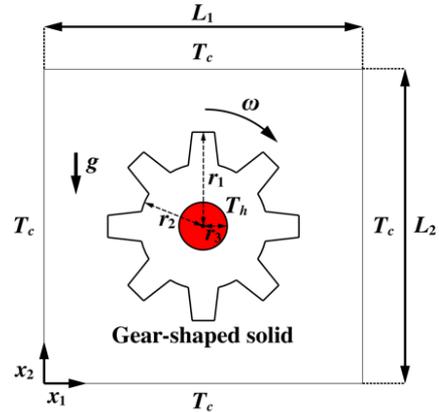


図-3 回転する歯車周りの熱対流の計算領域

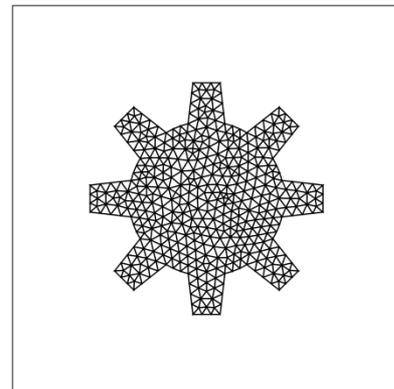
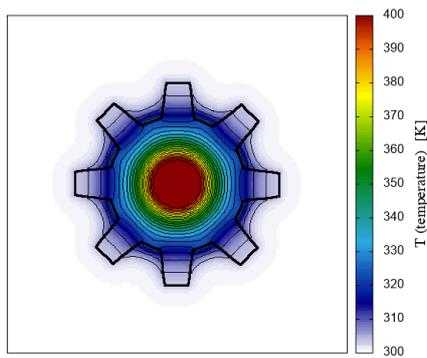
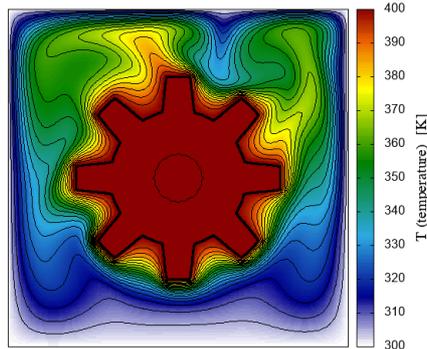


図-4 固体を構成する三角形要素

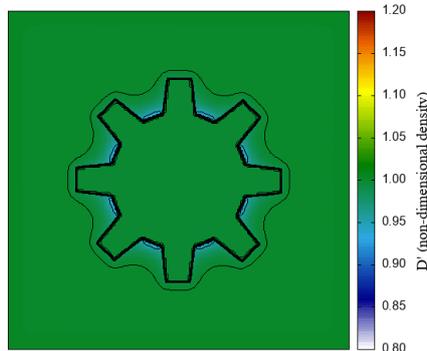


(a)  $t = 0.25$  [s]

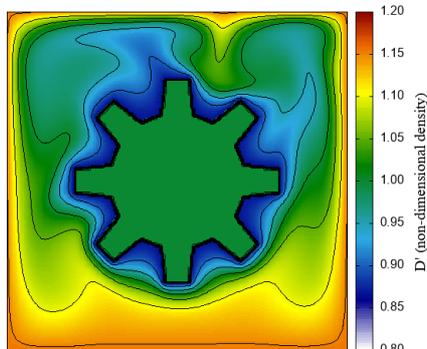


(b)  $t = 25$  [s]

図-5 各時刻における温度のコンター図



(a)  $t = 0.25$  [s]



(b)  $t = 25$  [s]

図-6 各時刻における無次元密度のコンター図

参考文献：

[1] Jae Ryong Lee, Man Yeong Ha, Numerical simulation of natural convection in a horizontal enclosure with a heat-generating conducting body, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 2684-2702, 2006.

[2] 牛島 省, 牧野 統師, 禰津 家久, 四面体サブセル法を用いる市街地に流入する氾濫流の3次元数値計算, 水工学論文集, Vol.51, pp. 787-792, 2007.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

① 鳥生 大祐, 牛島 省, 混合体モデルに基づく圧縮性流体と移動する固体の熱連成計算手法, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.73, No.2, I\_143-I\_152, 2017. (査読有)  
(DOI: [https://doi.org/10.2208/jscejam.73.I\\_143](https://doi.org/10.2208/jscejam.73.I_143))

② Daisuke Toriu, Satoru Ushijima, Multiphase computational method for thermal interactions between compressible fluid and arbitrarily shaped solids, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Early View, 2018. (査読有)  
(DOI: <https://doi.org/10.1002/flid.4495>)

〔学会発表〕(計3件)

① Daisuke Toriu, Satoru Ushijima, Application of computational method for thermal interactions between compressible fluids and solids to natural convection around circular cylinders, WCCM XII & APCOM VI, MS102B-5 (150376), Seoul, Korea, 2016.

② 鳥生 大祐, 牛島 省, 異なる物性値を有する圧縮性流体と固体の熱連成問題に対する多相場解析手法, 土木学会第20回応用力学シンポジウム, C000053, 京都, 2017.

③ Daisuke Toriu, Satoru Ushijima, Computations of non-isothermal compressible gas flows around moving solid object, CMFF'18, Budapest, Hungary, 2018 (accepted). (査読有)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕該当なし

〔その他〕該当なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鳥生 大祐 (TORIU Daisuke)  
京都大学・学術情報メディアセンター・助教  
研究者番号：60772572

(2) 研究協力者

牛島 省 (USHIJIMA Satoru)

京都大学・学術情報メディアセンター・  
教授  
研究者番号：70324655