

jh250008

電気モータ直接冷却の除熱量定量評価のための大規模数値解析

金田 昌之 (大阪公立大学)

電動自動車に用いられているモータは小型化・超高速回転化が志向されており、それゆえステータコイルの発熱密度の増大が懸念されている。発熱増大はコイルの焼損や効率低下を招くため、ステータコイルの効果的な冷却が必要とされる。コイル冷却には冷却液を直接流下する方法 (DLC) がとられているものの、冷却液の流れる箇所の除熱量は多数のパラメータに依存し、また現象の複雑さから学術的な指標は存在しない。また冷却液に濡れていない箇所での熱輸送 (主に自然対流) も詳らかにしない限り系全体の冷却を理解することはできない。本課題では前者に対してこれまで取り組んできた二相熱流動解析の問題解決に取り組み、懸案となっていた異常温度場の生成要因を明らかにできた。また別のアプローチとしてハイブリッド手法も実装し精度を検証した。また後者の自然対流解析においては開放系における境界条件を改良することで、物理的に妥当な熱流動場を解析することができた。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同利用・共同研究を実施している拠点名

東京科学大学 情報基盤センター

(2) 課題分野

大規模計算科学課題分野

(3) 参加研究者一覧と役割分担

金田昌之：代表者，研究総括

青木尊之：副代表者，二相流解析手法の開発

須賀一彦：混相流解析

杉本真：混相流 AMR

瀬田剛：混相流熱的境界の開発

渡辺勢也：混相流ならびに温度場 AMR 実装手法の開発

桑田祐丞：局所細密格子 AMR 実装

森本大稀：混相流温度場改良 AMR 実装

植村祐介：自然対流解析

中務茂樹：混相流境界条件実装

佐藤心亮：混相流解析の実施

2. 研究の目的と意義

本研究では、将来求められる電動モータの高性能化に寄与できる知見、とりわけコイルの冷却性能を予測するための单相および混相熱流解析手法を開発・解析することを目的とした。

【背景】温室効果ガスの排出量削減の取り組みから輸送部門では原動機から電気自動車 (EV) へのシフトが進められている。その中で EV やハイブリッド自動車 (HV) 用モータの小型化・高出力化が求められており、熾烈な開発競争が繰り広げられている。トルクを稼ぐために高速回転化が希求されている (50,000rpm を想定)。そのためステータコイルのジュール熱・ロータの鉄損増大による熱密度の増大が懸念されており、適切なサーマルマネジメントが求められる。現状では発熱部であるステータコイルを電気絶縁性の冷却液 (オイル) により直接冷却する、もしくはモータ内に流路を設け密閉水流で除熱する、などの方法がとられているが、いずれに

せよ高効率化が必要である。

ここで冷却液の流下による「直接冷却」に着目した研究は対象構造の複雑さから学術的知見が少ない。熱交換を直接解析するには数値解析が有効なツールであり、複雑構造へ低速で通過する二相流現象に加えて温度場解析を必要とすることから直接解析が望ましい。申請者らはこれまでの jhpcn 課題において二相流の安定的解析、温度場の安定的解析手法を構築し、その改良まで取り組んできた。自動車用モータに用いられる冷却液は一般に高プラントル数流体 ($Pr=100-600$: 温度に大きく依存) であり、通常の解析手法では温度境界層を解像できない。また LBM へ実装した場合、気液界面の移動に伴い異常な温度場をきたすことがわかっている。前年度でこの問題点の解決とまではいかないまでも、発現要因についてある程度の知見を得た。異常温度場の生成を回避することで混相熱流動の高精度解析手法のめどが立ったものの、根本的な解決には至らなかった。

他方で研究代表者は除熱量の妥当性評価のための実験も進めてきた[1]。その結果、数値解析にせよ実験にせよ、除熱量を高精度に評価するためには系全体の熱収支の観点からその周辺の伝熱現象も考慮する必要があるとの結論に至った。すなわち、コイルでのジュール加熱の熱量は、冷却液での除熱+コイルからの熱伝導+濡れていない箇所での自然対流+輻射を考えるべきであり、実験の経験上自然対流の影響は無視できないことが分かっている(一方で冷却液流下時のコイル温度はかなり下がるため輻射の影響は小さい)。

【目的】以上より、以下を具体的な目標と定めた。

- ① 二相系熱流動 LBM の温度異常のメカニズム解明ならびに問題解決
- ② 上記への AMR 実装
- ③ 簡素化コイル構造からの自然対流伝熱解析

【意義】本研究は学術的には混相流による伝熱問題ならびに複雑構造体からの自然対流伝熱問題の解明に帰着する。前者は二相熱流動流 LBM 解析により液体物性および構造特性に起因した熱交換特性を明らかにすることを意味する。後者はこれまで単純系でのみ議論されてきた現象を複雑構造に展開することを意味し、特定構造でしか議論されない現象から構造特性の影響を考慮し一般式を得られれば、自然対流の貴重なデータベースとなる。両者とも電気機器などのサーマルマネジメントに資する研究であり、大規模直接数値解析が求められる課題といえる。以上より本研究テーマは学術的のみならず社会的にも貢献できる研究といえる。

3. 当拠点の公募型共同研究として実施した意義本課題(二相熱流動, 自然対流)では複雑形状の取り扱いの容易さや乱流解析の解析精度が担保されていることから格子ボルツマン法(LBM)を解析手法として用いた。LBMは陽的な解析手法であり、用いる分布関数の局所性が強いため、GPUによる大規模並列計算に向いている。しかしながら各解析ノード点における離散方向速度成分ごとに分布関数を持つため、メモリの使用量が多い。今年度本研究ではいずれの解析でも1ノード当たり19または27の速度成分を持つ分布関数を用いた。実際には速度、秩序変数(相の識別)、温度を解析するため最大3種類の分布関数が必要となった。これほどの大規模解析に対応するためには複数GPUがMPI接続される東京科学大のTSUBAMEは最適といえる。また、計算科学の面から多くの知見を有する東京科学大 青木教授ならびにその関連の研究者たちと研究できたことも大いに意義のあったことと考える。
4. 前年度までに得られた研究成果の概要 該当なし

5. 今年度の研究成果の詳細

①②二相系熱流動 (AMR) LBM の温度異常メカニズム解明ならびに問題解決

これまで参考としてきた Phase-field 法を素地とした LBM 解析アルゴリズムについて詳細な議論おこなった。これまで使用してきたモデルは広く引用されている Hu et al. の手法 [2] を参考に開発したものである。支配方程式である格子ボルツマン方程式は密度分布関数の時間発展方程式で記述されており、圧力、秩序変数、エネルギーの分布関数を用いる。これらが混相の熱流体挙動をつかさどる連続の式、運動方程式、秩序変数の輸送方程式ならびにエネルギー方程式を満たすかは Chapman-Enskog (CE) 展開により確認することができる。温度異常は明らかにエネルギー分布関数の時間発展方程式に由来するので、文献調査をしつつ CE 展開をおこなった。その結果、以下のことがわかった。CE 展開により熱エネルギーの移流項は $\nabla \cdot (Tu)$ と導出される。これを分解すると $T\nabla \cdot u + u\nabla T$ が得られるが弱圧縮性を有する格子ボルツマン方程式 (LBE) では諸物性 (密度・比熱・熱伝導率) の変化する界面付近で $T\nabla \cdot u$ の非ゼロが顕著となり誤差を生みやすいことがわかった。直交直線座標系では曲率界面の法線方向への諸物性変化に誤差が生じることからさらに温度異常が顕著となると理解できる。さらに、従来手法では温度の平衡分布関数に速度を含むため、界面張力のモデル化により生じる Spurious current により温度場輸送が過大評価されていることも原因の一つであることが理解できた。

これらの問題を解消したモデル [3] を実装して解析した二次元界面近傍の温度場を図 1 に示す。ここで Model A が従来手法、Model B が改良手法の結果であり、これらには 4 層の AMR を実装済みである。Model A では界面の外側 (気相側) の温度が上昇しており、非物理

的であることがわかる。一方 Model B では、温度分布が参照データ (速度場を強制的に 0 として純粋な熱伝導計算にしたもの) とおおむね一致していることから、混相熱流動場解析手法が大幅に改善できたことがわかる。

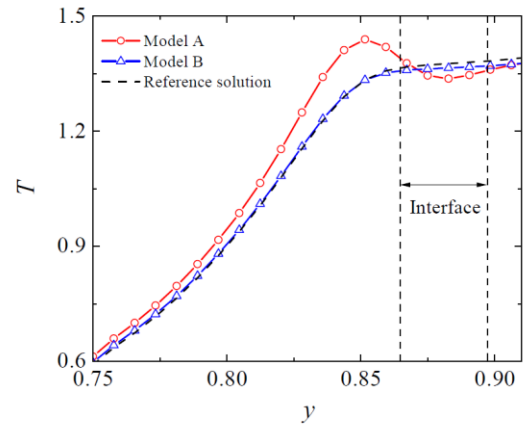


図 1 : 初期温度 $T_g=0.0$, $T_l=1.6$ の円形液界面近傍の熱伝導解析温度分布。 $Pr_g=0.72$, $Pr_l=10$, 気液の (ρC_p) 比 = 1355. Model A (従来手法) では界面近傍の非物理的な分布が生じるのに対し、Model B (改良手法) では参照データとも良好に一致していることがわかる。

次に、プラントル数依存性についての議論をおこなった。これは実機で冷却液として用いられている ATF を最終的なターゲットとしているためであり、そのプラントル数は温度に依存するため 100-600 と幅広い値をとる。これまでの解析条件に倣い液体側のプラントル数 $Pr_l=310$ として解析した結果を図 2 に示す。ここでも Model B の優位性が確認できたものの、両モデルとも参照データからの誤差が大きいことがわかる。AMR による界面付近の局所細密格子を導入しているとはいえ、格子解像度不足も考えられるが、これは主に高プラントル数の解析において移流の影響が大きくなる (ペクレ数増大) ことに起因する。本解析では表面張力を考慮しているため弱いながらも Spurious current が生じる。この流れに温度場が影響を受けた結果、高プ

ラントル数での結果は参照値からずれていると考えられる。換言すれば非物理的な Spurious current は高プラントル数解析において不都合であるともいえる。

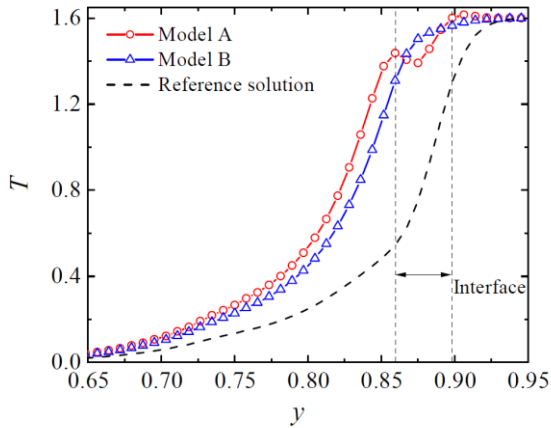


図 2：初期温度 $T_g=0.0$, $T_l=1.6$ の円形き液界面近傍の熱伝導解析温度分布. $Pr_g=0.72$, $Pr_l=310$, 気液の (ρCp) 比=1355. ModelB (改良手法) の妥当性は確認できたものの、参照データからの剥離が大きい。これは高ペクレ数 ($Pe=PrRe=uL/\alpha$) では Spurious current の影響が顕在化するためと考えられる。

以上より温度場に LBM を用いた場合の手法改良および高プラントル数解析の課題を明らかにできた。次に、温度場解析を LBM ではなく他の手法で実施した場合の精度について検証した。流れ場ならびに秩序変数は引き続き LBM を用い、温度場のみを有限差分法で解析した。解析系全体の温度場を図 3 に示す。なおここでは AMR は実装していないことを付記する。結果から温度場は妥当に解析できていると考えられるが、上記手法と比較した際に高プラントル数での結果が若干異なったため、今後、式の見直しも含めて詳細な検討が必要であるとの結論に至った。

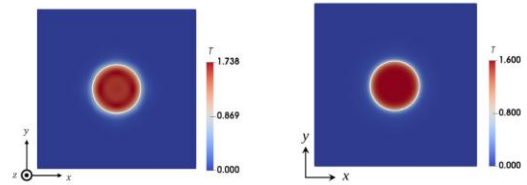


図 3：(左) 従来手法での温度場 (右) 温度場解析に有限差分法を実装したハイブリッド手法の結果. 両者とも解析条件は $Pr_g=0.72$, $Pr_l=310$, 気液 (ρCp) 比=1355.

以上より、LBM 混相熱流動における課題が改善できた共に、ハイブリッド手法のコード構築まで完成できた。ただし、これらの結果には AMR の粗密格子界面における誤差も数%含まれることを付記しておく。

③簡素化コイル構造からの自然対流伝熱解析

モータコイルからの発熱を議論するうえで、冷却液に濡れていない箇所からは自然対流伝熱が支配的になる。しかしながらコイルの複雑形状はおろか角柱群における自然対流伝熱の知見も存在しない(フィン列や円柱列は存在する)。そこで角柱群列からの自然対流伝熱数値解析コードの開発をおこなった。開放系の自然対流は解析領域の広いほうが望ましいが解析領域は有限であるため、適切なドメイン境界条件が求められる。一般的な数値解析における開放端の境界条件は以下で与えられる

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = const.$$

これは伝熱問題ではいわゆる断熱条件であり、フラックス 0 を意味する。LBM でもほかの手法でもこれでおおむね問題ないが、本課題のような加熱物体が解析ドメインの中心に設置されている場合は状況が異なる。図 4 に 2 次元発熱角柱からの自然対流を解析した結果を示す。温度場は角柱上部で高温部が表れているために妥当と考えられるが、高温

部から誘起される上昇流がそれに伴っていないことがわかる。これは速度境界条件由来の問題であり、どれだけ解析領域を大きくしても解消しない。

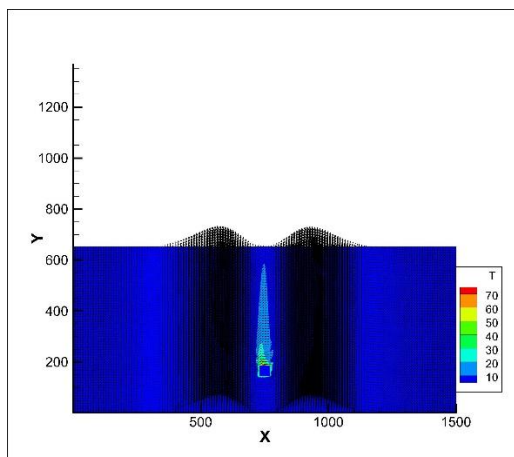


図 4: 正方形角柱からの自然対流数値解析結果。解析ドメイン境界によく用いられるゼロフラックス境界条件を課すと、速度場に非物理的な結果をきたす。これは解析系に応じてドメイン速度境界条件が不適切であることを意味する。

文献等の調査をおこない、この境界条件の改良に取り組んだ。その結果、全圧一定条件で解消できることの情報を得た[4]。これを LBM へ実装するにあたり、いくつかの注意を要した。LBM は分布関数の時間発展方程式で構成されることから、分布関数レベルの境界条件が求められた。工夫としてはまず全圧を定義し、 $\partial u / \partial y = \partial v / \partial y = 0$ の仮定の下で境界面上の動圧を求める。これらを用いて局所平衡分布関数の式から境界面上の分布関数を与える方法を考案した。

結果を図 5 に示す。解析系全体において上昇流は角柱上部にのみ発現していることから妥当な流れ場を表現できたといえる。ただし、ドメイン底部において同じ境界条件を実装すると解析が不安定になり発散することから、底面のみ固体壁条件を採用したことを付記しておく。

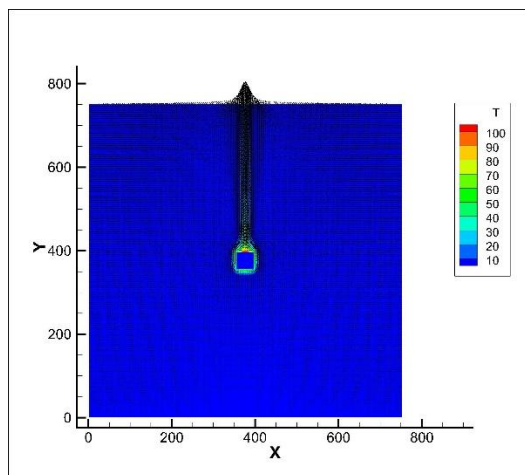


図 5: 底面以外に全圧一定条件を課した場合の結果。自然対流の妥当な流れ場を表現することができた。

以上の検証から、単一角柱および水平角柱群からの自然対流数値解析を実施した。単一角柱においては木村らの実験結果[5]と突き合わせて熱伝達率の妥当性を評価するために用いた。その際、解析ドメインの広さについての検証も実施した。解析ドメインは角柱寸法に対してかなり広めにとる必要があったため、大規模解析装置は有用であったといえる。

図 6 に加熱量 (Ra^* : 修正レイリー数) に応じた角柱の平均ヌセルト数の結果を示す。図からおおむね妥当な一致が見られることがわかった。高 Ra^* で実験結果との剥離が生じているのは、実験では流れ場が乱流遷移し三次元性が顕在化することに起因しており[5]、これを今回の二元数値解析では表現できないためである。したがって三次元化も必要となるが、その前に二次元系でコイル形状や加熱条件の影響を詳らかにする必要があると考える。

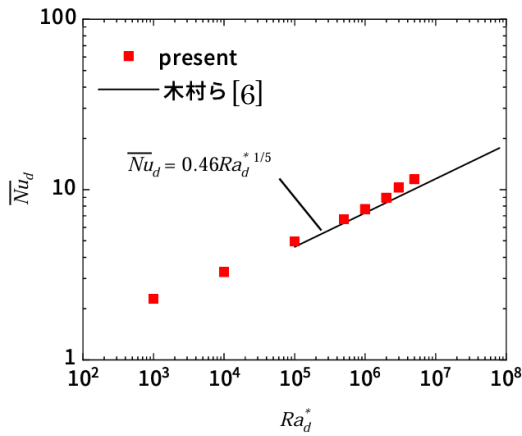


図 6：単一角柱からの平均ヌセルト数. 加熱量 (Ra^*) の上昇に伴いヌセルト数も情報する. 木村らの実験結果との整合性がとれていることから解析の妥当性を示せた.

次に水平角柱群での解析を実施した, 一例を図 7 に示す. 解析条件として加熱量 (Ra^*), 角柱本数, 角柱間隔が挙げられ, ここでは 10 本の場合で間隔の異なる場合の結果を示す. 角柱群では単一の場合と比較してヌセルト数, すなわち熱伝達が大きくなることが確認できた. これは既往の円柱群での研究結果と定性的に一致する. G/d が大きくなる, つまり間隔が広がることでヌセルト数は大きくなるが, ある程度以上は変化が小さくなるのがわかる. これらはステータコイルの設計に資するデータといえる.

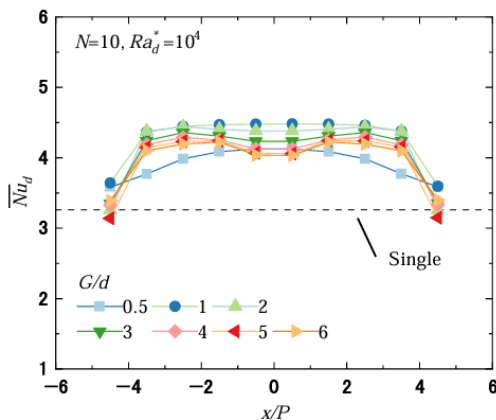


図 7：水平角柱群（10 本）の各角柱からの平均ヌセルト数分布. 単一角柱との違いや角柱間隔の影響が理解できる

参考文献

[1] M. Kaneda, S. Yano, Y. Uemura, Z. Li, K. Suga, Direct liquid cooling performance of electrically heated coils: experimental evaluation and heat-balance analysis, Applied Thermal Engineering, Vol. 296, 130626 (2026).

[2] Y. Hu, D. Li, X. Niu, S. Shu, A diffuse interface lattice Boltzmann model for thermocapillary flows with large density ratio and thermophysical parameters contrasts, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 138, pp.809–824 (2019).

[3] L. Yue, Z. Chai, H. Wang, B. Shi, Improved phase-field-based lattice Boltzmann method for thermocapillary flow, Physical Review E, Vol. 105, 015314 (2022).

[4] 九州大学下山先生とのパーソナルコミュニケーション

[5] 木村文義, 藤本慎也, 北村健三. 水平加熱正方形角柱まわりの自然対流の流動と伝熱—空気の場合—. 実験力学, Vol. 22, No. 4, pp. 260-264 (2023).

[6] 北村健三, 光石暁彦, 鈴木孝司. 同一水平面上に等間隔配置された水平加熱円柱列まわりの自然対流の伝熱特性. 日本機械学会論文集, Vol. 80, No. 815, pp. TEP0201-TEP0201 (2014).

6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

本年度課題では, これまで懸案であった混相 LBM の温度場解析における課題を根本から明らかにし, 解決指標を示すことができた. またコイル冷却に資する自然対流解析を実施し基礎的な伝熱特性を把握することができたと考える. 以上の二点を踏まえて, かなりの進捗があったと考える.

今後, 前者においては冷却液によるコイルの

除熱を評価するために必要なコイル内熱伝導を含む共役伝熱の実装をおこない、後者についてはコイルのアスペクト比を含めた伝熱特性の影響を明らかにすることを予定している。

これらを明らかにすることで、電動モータの冷却特性を明らかにできるとともに、効率的な除熱に資する知見を得ることができるものと考えている。

※7. 研究業績はウェブ入力です