

TSUBAME 共同利用 令和4年度 学術利用 成果報告書

電気コイル隙間内に流れ込む冷却液挙動に関する大規模数値解析
英文: Large-scale computing of pouring coolant on the electric coil利用課題責任者 金田 昌之
First name Surname Masayuki Kaneda所属 大阪公立大学
Affiliation Osaka Metropolitan University
URL <https://www.omu.ac.jp/eng/htmlab/staff/kaneda.html>

邦文抄録(300 字程度)

電動自動車などに搭載されているモータの電気コイルを冷却するために、冷却液を直接流下する手法がとられている。液体の濡れ広がりや除熱の関係を明らかにするため、これまで開発してきたフェーズフィールド LBM 大規模二相流数値解析手法に温度場解析の実装を試みた。その結果解析不安定や非物理的な温度場を呈することがわかったため、LBM の時間発展方程式を改良し、安定解析できる手法へと発展させた。本手法を用いて、簡易化ステータコイル構造を対象とし、流下温度及び流量が除熱に及ぼす影響を定性的に明らかにした。さらに電動モータのロータ・ステータ間流れに着目し、大規模乱流解析を行うことで構造が及ぼす影響について明らかにした。

英文抄録(100 words 程度)

A direct liquid cooling is used to cool the electric coils of motors installed in electric vehicles. To clarify the relationship between the liquid wetting spreading on the coil and heat removal, we implemented a temperature field analysis into the phase-field LBM large-scale two-phase flow numerical code we have developed. The results showed that the analysis was unstable and the temperature field was unphysical, so the time evolution equations of the LBM were improved and the method was developed into a stable analysis method. Using this method, the effects of flow temperature and flow rate on heat removal were qualitatively clarified for a simplified stator coil structure.

Keywords: Cooling of electric devices, two-phase flow, phase-field lattice Boltzmann method, thermal simulation, Taylor-Couette flow

背景と目的

近年の温室効果ガス削減目標に向けて、内燃機関の電動化が促進されており、そのパワートレインである電動モータの小型高効率化への要請が高まっている。これはモータのコイル部分からの発熱密度の上昇を意味しており、その効果的な除熱が課題となっている。実際の自動車用のモータでは、非電気伝導性の冷却液を発熱する電気コイル部分に直接流下することで冷却している。この場合、冷却液がまんべんなくコイル内を浸潤して流下することが求められるのはいうまでもない。しかしながら冷却液の濡れと交換熱量の関連は明らかにされておらず、それを予測するためのツールもないのが現状である。冷却液の挙動と除熱の関連が明らかになれば、今後の機器設計のヒントとなる。

しかしながら、実際のコイル形状は大変複雑な構造をしているため、実験的に明らかにするには実機を用いて経験的なアプローチしかできない。数値解析による

検討は、複雑構造を取り扱える手法に限られ、さらに二相流の解析スキル及び伝熱工学の知識が必要となる。一般商用ソフトである程度解析することは可能であるが、解析安定性を重視しており、複雑構造二相流流動解析の精度がどの程度担保されているかは不明である。一方で我々は、複雑構造を通過する二相流を解析できる数値解析コードの開発を行ってきた。

一方で自動車用モータの高速回転化が模索されており、特にロータ・ステータ間で生じる流体摩擦の低減を議論する段階に来ている。しかしながら電磁場の最適化のために設けられている内外円筒の溝構造が流れ場に及ぼす影響までは検討されていない。

そこで本プロジェクトでは、前者についてはこれまでに開発してきたコードを改良し、温度場解析も可能とすることを目的とした。フェーズフィールド格子ボルツマン法(PELBM)に温度場解析用の分布関数を追加し、解析安定性を担保できる手法を開発した。後者について

は直接数値解析を実施することで溝が回転トルクに及ぼす影響を議論した。

概要

これまで簡易モデルを対象とし、その流動特性をフェーズフィールド格子ボルツマン法(PFLBM)による二相流解析により解明してきた。今年度は継続課題として、簡易化ステータコイル構造の熱問題解析手法を構築した。そのため温度場解析用のLBMの分布関数を追加したものの、既存の方法では解析が発散したり、非物理的な温度場を呈するなどした。そこで高密度比解析で問題となる、速度場の時間発展方程式に着目して検討したところ、速度場の解析の不安定さが非物理的な温度場を誘発していると考えた。文献調査を行い安定解析が報告されている組み合わせを実装することで、最終的に速度場温度場ともに安定的に解析できる手法へとたどり着いた。解析対象を図1に示す。

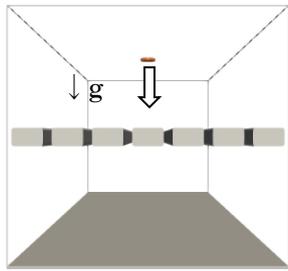


図1 二相熱流動解析の解析対象

またロータ・ステータ間の流れ場については、上記のLBMを改良して効率的に解析できる手法へと発展させた。ロータ・ステータにはそれぞれ溝が設けられており、そこで誘起される流れが回転トルクへ影響を及ぼすと考え、乱流単相直接数値解析を実施し、既往の溝無しの場合と比較した。ステータのみに溝を設置した構造を図2に示す。

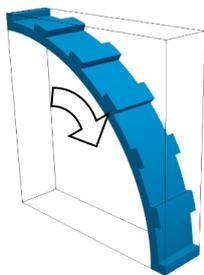


図2 溝付きロータ・ステータ間流れ構造

結果および考察

二相流熱流動場解析の一例として、解析領域を上面から見た濡れおよび液体の温度分布を示す。温度は構造体近傍の水平面の分布のため、流体が流下してくぼんでいる箇所は表示していない。詳細は省略するが、流速に応じて妥当な温度場が形成されていることが確認できた。

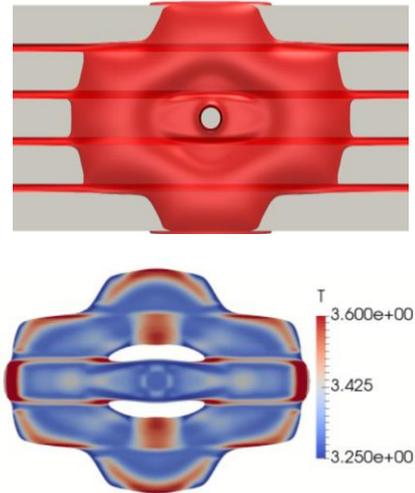


図3 二相熱流動解析結果

ロータ・ステータ間流れの速度分布を図4に示す。溝内部の速度分布も精度良くとらえることができた。トルクについては溝無しの場合と比較して40%以上上昇することが確認できた。

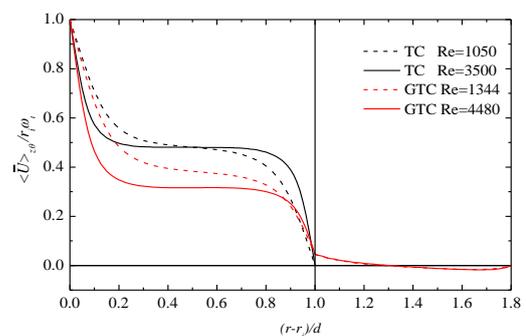


図4 溝付きロータ・ステータ間流れ解析の速度分布

まとめ、今後の課題

二相流熱流動解析を安定に実施できるコードを作成し、大規模解析を行うことで交換熱量を予測することができた。また溝付きのロータ・ステータ間流れの直接乱流解析により、トルクに及ぼす影響まで明らかとなった。今後は各種パラメータでの解析及び超高速回転を考慮した解析を展開していく。