

jh230007

## モータ高出力化の課題解決に資する混相・乱流熱流動解析

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近年小型化・高回転化が志向されており、ステータコイルの発熱密度の増加やロータ・ステータ間の流動により回転トルク損失の増大が懸念されている。ステータコイルの冷却は冷却液を直接流下するため、冷却能力を予測するツールが必要とされる。そこで安定に解析できる気液二相熱流動 LBM 解析のコードを開発したものの、温度異常が生じることが分かった。その発現条件までは明らかにできたが解決にまでは至らなかった。一方でロータ・ステータの溝構造が回転トルク損失に及ぼす影響を検討するために、直接数値解析 (DNS) に加えてラージ・エディ・シミュレーション (LES) も実施した。DNS ではロータ側、ステータ側のどちらか片側にのみ溝を有する場合の高精度三次元大規模並列数値解析を実施した。その結果、現状の回転数領域では溝によるトルク損失の影響は小さいが、将来的に目標としている回転数ではトルク損失が増大することが明らかとなった。LES ではさらに高い回転数での高精度な結果を得ることができた。

### 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  
東京工業大学 学術国際情報センター

- (2) 課題分野  
大規模計算科学課題分野

- (3) 共同研究分野 (HPCI 資源利用課題のみ)  
超大規模数値計算系応用分野

- (4) 参加研究者の役割分担  
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：乱流解析手法の開発  
杉本真：二相流開発手法の開発  
瀬田剛：温度場解析手法の構築  
渡辺勢也：二相流解析 LBM の開発  
武田滉平：テイラー・クエット乱流解析  
桑田祐丞：テイラー・クエット乱流解析手法の開発

阿久根啓汰：二相熱流動解析

天野由視：テイラー・クエット熱流動解析

### 2. 研究の目的と意義

電気自動車 (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いる。省スペースの観点から小型高出力化すれば発熱密度が上昇する。また出力を上げるためには高速回転化が求められる (現行最大 20,000rpm から将来的には 50,000rpm が志向されている)。そのため以下の問題が顕在化すると考えられる。①ステータコイルのジュール熱・鉄損増大：現状では冷却は電気絶縁性の冷却液 (オイル) による直接冷却やモータ内の伝導伝熱を密閉水流で除去する方法がとられているが除熱の高効率化のための知見がない。②高速回転時のトルク損失増大：ロータ・ステータ間は電磁力最適化のため溝構造を有している。高速回転化によりこの構造に起因する乱流強度が増大し、回転トルクの損失増大およびコイルの熱がロータ側により伝播する恐れがある。

そこで本研究は以下を目的とした。①複雑構造に適用できる三次元二相熱流動解析コードを開発し、構造・濡れの特徴量から交換熱量を関連付けられるような学術的データベースを取得する。②超高速回転（目標 40,000rpm）する溝付きテイラー・クエット流れの LBM 熱流動乱流解析コードを直接解析（DNS）だけでなく LES でも精度を検証しながら実施し、内円筒回転トルク損失および熱輸送に支配的な因子を解明する。

本研究の意義は詳細の自動車などへの応用だけにとどまらず、①ステータコイルでの二相流伝熱は液体物性（高 Pr 数，流下 Re 数，気液密度粘度比，熱拡散率），構造特性（角棒寸法，配置間隔，加熱量）および固気液のインタラクション（接触角）が冷却液の濡れ広がりや交換熱量に及ぼす影響を学術的に明らかにできる。②溝付き円筒の高速テイラー・クエット熱流動場であり，現象の複雑さから未知の部分の多い領域に踏み込むことで新しい知見を得ることができる，と考えた。

3. 当拠点の公募型共同研究として実施した意義  
本解析（二相熱流動，溝付きテイラー・クエット乱流熱流動）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る。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，とりわけ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 ノードあたり 27 の速度成分を持つ分布関数を用いた。二相熱流動解析では速度，気液二相のオーダーパラメータ，温度を解析するため 3 つの分布関数，溝付きテイラー・クエット流れでは速度，温度の 2 つの分布関数が必要となる。所属研究室にも複数台のワークステーションを保有しているが，これほどの大規模解析には到底対応できるものではない。その点では複数 GPU が MPI 接続される東工大 TSUBAME は最適といえる。また，二相 LBM や LBM 乱流解析における知見を多く有する東工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  
新規課題のため該当なし
5. 今年度の研究成果の詳細

#### 1. 二相熱流動解析手法の開発

これまで開発してきた二相熱流動解析手法を詳細に検証したところ，気液界面の非物理的な発熱が生じ，熱収支を崩すことが判明した。そこで，気液の拡散界面における物性を再定義し再検証したところ，図 1 の左に示すように一見発熱が抑えられたように見られた。

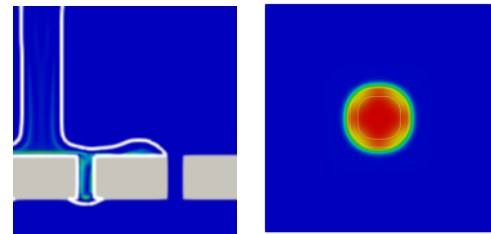


図 1：左）流下液体の温度分布（非加熱）。右）温度異常の一例。色は温度を示す。

しかしながらその後の検証で，相対的な発熱量自体はさほど変わらず，異常発熱が生じることが確認された。そこで将来的な発展を目指して既存の気液二相 AMR コードに温度場解析実装作業と並行して進めた。AMR 実装は二次元場で完成し，対象となる熱流動場でも実績を得られた（図 2）。しかし時間の経過とともに温度異常が無視できなくなる問題がここでも確認された。そこで温度異常にあらためて注目し，その発現条件を探索した。表面張力や界面での諸物性値の変化量が原因と考え，格子解像度や LBM の衝突項に起因する解析安定性の可能性も検証したが，界面張力，気液の温度差，曲率（界面形状）のいずれかまたは両者が非ゼロの場合で異常が発生することが分かった。つまり，界面張力から生じる spurious current も共役伝熱問題の熱物性値の変化も影響を及ぼしており，定式化から見直す必要があると結論付けた。

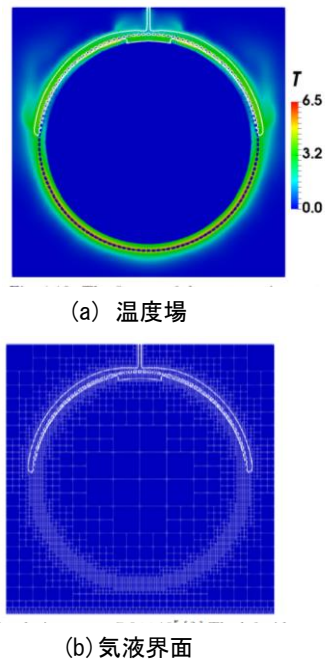


図 2: 二相系 LBM の熱流動への AMR 実装結果の一例。ステータコイルの上から冷却液を流下した際のスナップショット。濡れた個所で温度場が変化していることがわかる。

## 2. 溝付きテイラー・クエット流れの熱流動解析

### 直接解析 (DNS)

本課題では、高速回転を主眼に置いているため、まず溝無しのテイラー・クエット流れ(内円筒が回転、外円筒は静止)を比較的高速な回転域 ( $Re=10500$ ) で直接解析 (DNS) を実施し、解析コードの妥当性を確認した。その後、ロータ側もしくはステータ側に溝のある場合の解析の準備として、ロータ側に溝を有する場合に静止座標系では溝が移動境界となることから解析精度が落ちる。そこで回転座標系へと座標変換することで相対的に溝のないステータが回転する系に置き換え、コリオリ力を考慮した。その際の検証としてまずは溝無しのテイラー・クエット流れで比較したところ、回転壁側(ここではステータ壁面)の速度分布が理論値とずれていることを見出した。これは実は静止座標系のロータ壁でも生じており、LBM でよく生じる圧力波に起因することを見出した。そこで回転壁面近傍の半径方向速度成分を修正することで解決を図った。その結果、高速回転時の解析精度を高めることができた。

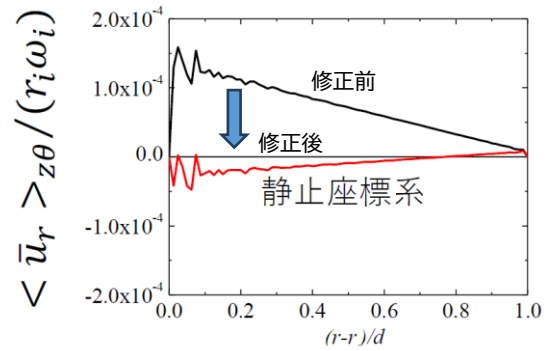
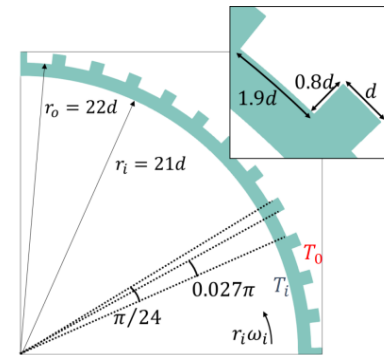
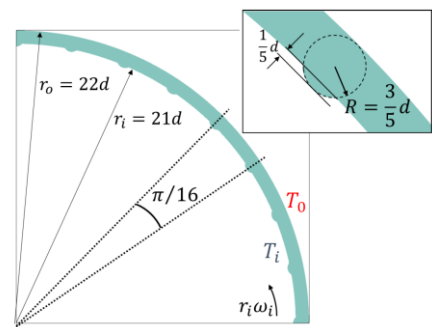


図 3: 回転壁の境界条件修正の一例。修正後、理論解である半径方向速度=0 に近づけることができた。

その後、溝付き流れについて解析を実施した。構造の 1/4 周期分を対象として周期境界条件を適用した。解析系の概要を図 4 に示す。



(a) ステータ側に溝のある構造



(b) ロータ側に溝のある構造

図 4: DNS 解析系概要

解析条件として、半径比  $\eta=0.955$ 、プラントル数 0.71 とした。回転数をあらかず無次元数テイラー数は  $Ta = 3.21 \times 10^4 - 1.16 \times 10^8$  で、これは実機形状において 560-34000rpm に相当する。なおテイラー数の定義は次式で与えられる。

$$Ta = (1 + \eta)^6 Re^2 / 64\eta^4$$

直接数値解析により得られたトルク損失特性ならびに伝熱特性を図 5 に示す。TC は溝無し of テイラー・クエット流れ、OGTC は外側 (ステータ) にのみ溝を有する場合、IGTC は内側 (ロータ) にのみ溝を有する場合を意味する。トルク損失特性は層流のトルク損失で無次元化した。定義を以下に示す。

$$G^{\omega} = \frac{\tau}{4\pi\rho L_z v r_i^2 r_o^2 \omega_i / (r_o^2 - r_i^2)}$$

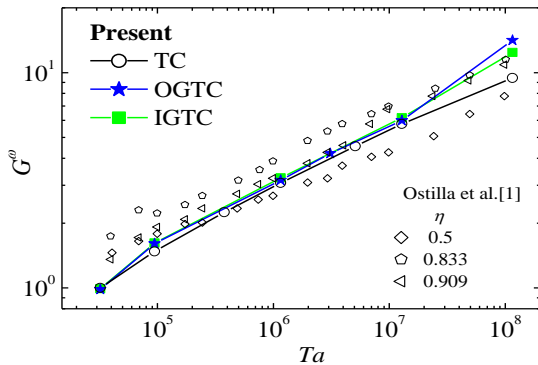


図 5 : DNS 解析によるトルク特性

図より、 $Ta < 10^7$  においては溝無し、ステータにのみ溝有り、ロータにのみ溝有りの三者とも同じ傾向であることがわかる。これはある程度の回転数までは溝はトルク損失に影響を及ぼさないことを意味している。したがって、現在採用されているモータの回転領域では溝の影響は小さいと判断できる。

一方で、 $Ta > 10^7$  では溝付きの場合で明らかにトルク特性が変化することが分かった。すなわち、将来目指している高速回転領域では溝によるトルク損失が顕在化することが示唆された。

ステータ側の熱がロータに伝わることを想定して、伝熱性能をヌセルト数で評価した。図 6 に結果を示す。温度場はパッシブスカラーなので、トルク特性に倣った形となり、やはり  $Ta > 10^7$  において伝熱特性が上昇することが分かった。これはモータにおいてはロータ側に熱が輸送されることを意味し、高温を嫌うロータには好ましくない。したがって、溝付き構造を付した場合の高速回転領域での駆動は、トルク損失のみならずサーマルマネジメントの観点からも好ましくないことが明らかとなった。

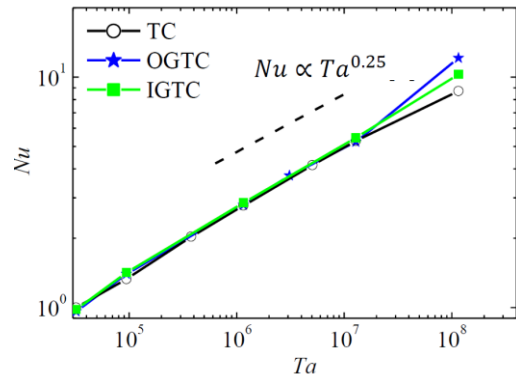
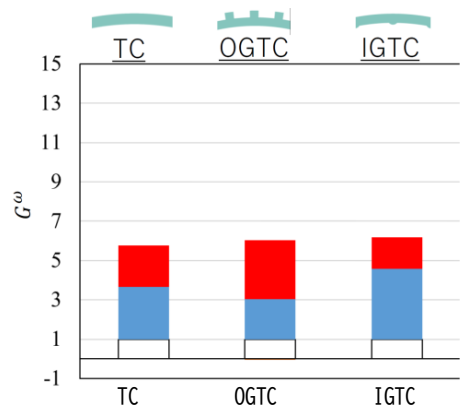
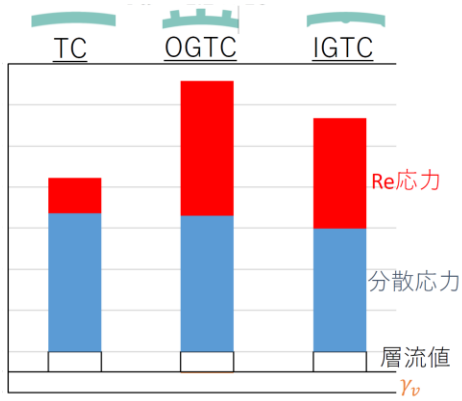


図 6 : ロータ・ステータ間の伝熱特性

さらに詳細に議論するため、傾向が変化する閾値前後での乱流成分について調査した。ここでは Fukataga らの提唱する FIK 恒等式 (Fukataga et al., 2002) を用いた。 $Ta = 1.3 \times 10^7$  ならびに  $Ta = 1.2 \times 10^8$  の結果を図 7 に示す。図より、高回転 (= 高テイラー数) 領域では溝付きの場合のいずれにおいてもレイノルズ応力成分が上昇していることが分かった。また、伝熱特性においても同様の評価を行った結果を図 8 に示す。ここでも、テイラー数の閾値を超えた場合では溝付きの場合の乱流熱流束の成分が上昇することが明らかとなった。また以上の結果から、外側の溝のほうがトルク損失や伝熱性能に影響が大きくなることが分かった。ただし、実機形状に即した溝構造のため、現状の構造に限った傾向であることを付記しておく。つまり、ロータ側ではなくステータ側の溝を優先して解消するほうが性能向上に資することを意味する。

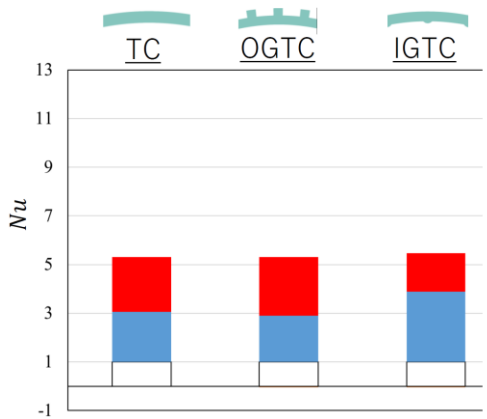


(a)  $Ta = 1.3 \times 10^7$

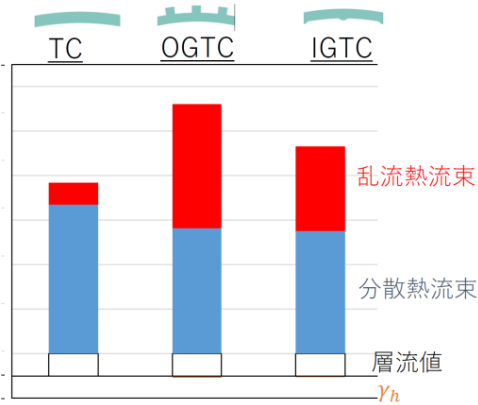


(b)  $Ta = 1.2 \times 10^8$

図 7 : FIK 恒等式によるトルク損失特性の評価



(a)  $Ta = 1.3 \times 10^7$



(b)  $Ta = 1.2 \times 10^8$

図 8 : FIK 恒等式による伝熱性能評価

ラージ・エディ・シミュレーション (LES)  
 直接数値解析である程度の高回転領域を解析できたものの、目標とする 40,000rpm を解析しようとする  
 と非常に大きな計算資源を必要とする。そのため LBM  
 コードに LES (Shear-improved Smagorinsky) を実装  
 した。まずは精度検証のため、前述の直接解析で得

られた結果 ( $Re \sim 10500$ ) と比較した。図 9 に示すよ  
 うに良好な結果を得るとともに、格子解像度 (= 計  
 算コスト) を格段に下げることが成功した。

次に溝付きの場合についても検証を実施した。ここ  
 では外側だけに溝を有する場合を対象として、先ほ  
 どと同等の解析を実施した。結果は図 10 に示すよ  
 うに、ここでも良好な一致を得た。なお回転トルクで  
 DNS と比較した結果から、数パーセントの誤差範囲  
 で収まる程度の格子解像度を採用した。この議論は  
 温度場についても同様に実施したことを付記してお  
 く。

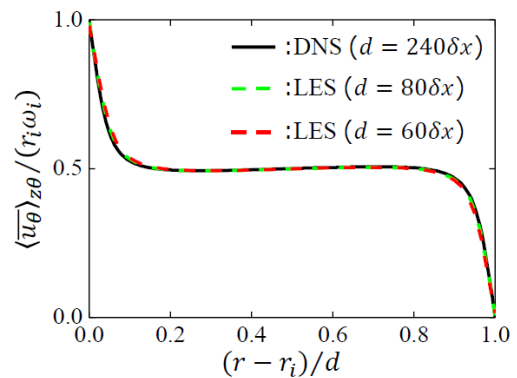


図 9 : テイラー・クエット流れにおける周方向平均速  
 度分布。LES では格子解像度を格段に減らしても DNS  
 と同等の精度を有していることが確認できた。

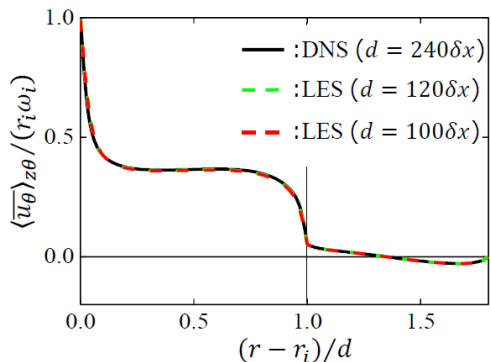


図 10 : ステータ側に溝を有する場合のテイラー・ク  
 エット流れ周方向平均速度分布。LES では  $d = 120 \delta x$   
 程度の格子解像度で十分であることが分かった

以上の検証を踏まえて LES で解析精度を担保しつつ  
 解析コストの低減ができた。そこで目標とする高速  
 回転領域での解析を実施した。計算資源の制約上、  
 ステータ側だけに溝を有する構造を対象とした。テ

イラー数は最大で  $4.628 \times 10^8$  とした。これは約 5 万 rpm に相当し、この数値は自動車メーカが目指している目標値といわれている。

さらにここでは、溝構造の影響を議論するために、ステータ側の溝の数を減らした解析も実施した。これはモータの小型化に伴って構造上生じる可能性を考慮したためである。解析系の詳細を図 11 に示す。溝付きの両者の構造において溝の体積は同じとした。

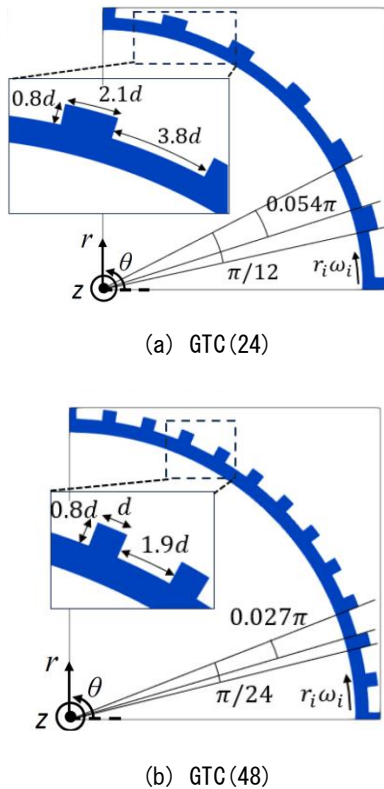


図 11 : LES の解析系

解析結果を図 12 ならびに図 13 に示す。ここでも先と同様の傾向が得られた。やはり、高回転領域においてはある閾値を境にスケール指数が大きくなり溝無しの場合よりもトルクが大きくなる。さらにトルク特性においては溝の数の少ない場合 (GTC(24)) ではその閾値が  $Ta$  数の低いほうにシフトすることも分かった。また高  $Ta$  に行くにつれて溝有りの両者の結果は漸近することも明らかとなった。

一方で伝熱特性については溝の数によらず  $Ta=10^7$  付近からスケール指数が大きくなることが確認できた。速度場と温度場で閾値近傍の傾向が多少異なるが、その原因は不明である。

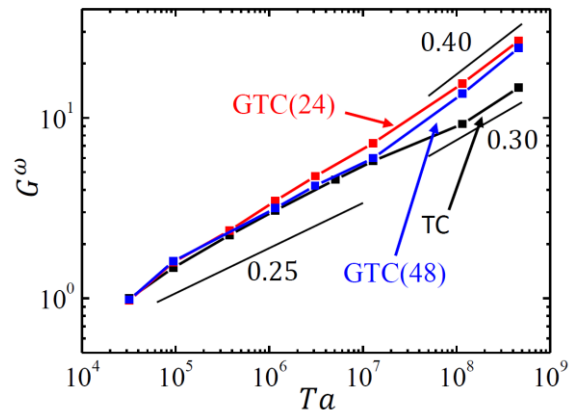


図 12 : ステータ側のみに溝がある場合のトルク特性。

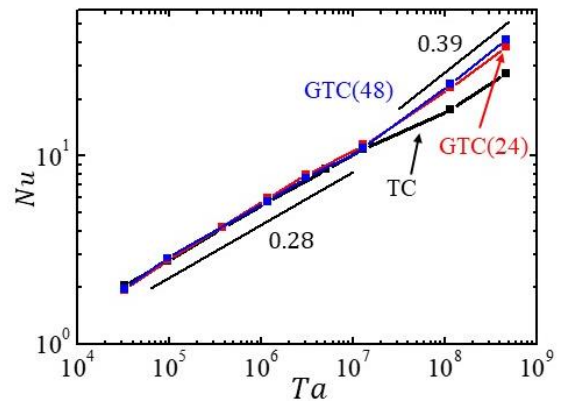


図 13 : ステータ側のみに溝がある場合の伝熱特性。

以上より、テイラー・クエット流れにおいて溝構造が高回転領域での熱流動特性に及ぼす影響を明らかにできた。

## 6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

申請時に設定した目的と対比しながら以下記す。

①簡易化ステータコイル構造の三次元二相熱流動場を解析できる LBM コードの開発  
温度場も解析できる二相 LBM 解析コードの開発そのものは達成できた。課題となっていた非物理的な流動や解析の発散を抑えた安定化までは実現できたが、新たに非物理的な温度場を呈するという課題が生じた。したがって、物理パラメータから交換熱量を予測するまでには至らなかった。また二次元系ではあるが AMR への実装も完了した。ここでも温度場の異常は生じていることから、気液界面の格子精度が原因とは言えない。

以上より①の自己評価としては 7 割程度の達成率と判断した。今後の展望として LBM の定式化も含めた

議論が必要であることがわかった。定式化で解決できない場合は温度場を他の手法で実行する必要もあると考える。

②超高速回転（目標 40,000rpm）する溝付きテイラー・クエット流れの熱流動 LBM 解析を LES 実装で実施

DNS でのロータ側溝付き流れを構築していく中で、回転境界条件の精度が低いことを見出し、それを修正できる手法を開発できた。したがって、ステータ側とロータ側のどちらかに溝がある場合の解析を実施できた。その際の温度場解析も実装できた。また、ある回転数でトルクや熱伝達のスケールリング指数が変化して増大することを発見した。その前後での詳細な分析によりそれらの増大の支配要因を特定できた。この結果は国際学会で発表し、精選論文に選出された（現在査読中）。

並行して LES の実装とその精度検証ができたことから、目標としていた回転数より高い領域での解析に取り組むことができた。その結果、当初目標の回転数よりも高い場合の解析も実施することができた。傾向としては DNS と同一であるが、今後の解析に有用なツールができた。さらにここでは溝の数が及ぼす影響までを明らかにすることができた。

以上より②の自己評価としては、予想以上に成果が出たと考える。超高速回転ともいえる領域での解析が安定かつ高精度に実施でき、そこから得られた知見は将来のモータの設計指針に資することができる。今後の展望としては、ロータ・ステータの両側に溝を有する構造での現象を解明したい。しかしながらこの場合はどちらかの溝で移動境界問題を生じることから、LBM で課題となる圧力波が生じる可能性があり、高回転時に安定解析できるかは未知数である。

## 7. 研究業績

### (1) 学術論文（査読あり）

なし

### (2) 国際会議プロシーディングス（査読あり）

K. Takeda, Y. Kuwata, M. Kaneda, K. Suga, Direct numerical simulation for turbulent heat transfer in Taylor-Couette flows with a stationary grooved

outer cylinder, THMT10（精選論文に選出）

### (3) 国際会議発表（査読なし）

なし

### (4) 国内会議発表（査読なし）

武田, 桑田, 金田, 須賀, 溝付き回転二重円筒内の乱流伝熱解析, 第 60 回日本伝熱シンポジウム

阿久根, 杉本, 金田, 安定解析可能な気液二相熱流動解析手法の開発およびステータコイル直接冷却解析への応用, 混相流シンポジウム 2023.

天野, 桑田, 金田, 須賀, 溝付きテイラー・クエット流れにおける乱流熱流動のラージ・エディ・シミュレーション, 熱工学コンファレンス 2023.（講演者の天野がフェロー賞受賞）

武田, 桑田, 金田, 須賀, 溝付き回転二重円筒内乱流熱流動のトルク・伝熱特性に関する直接数値解析, 第 37 回数値流体力学シンポジウム

### (5) 公開したライブラリなど

なし

### (6) その他（特許, プレスリリース, 著書等）

なし