

jh240042

## 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。本研究では継続課題として引き続き気液二相熱流動 LBM 解析のコードの温度異常問題にアタックし発現条件を明らかにすることで、現象を回避することで冷却性能を予測した。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も引き続き検討し、溝の構造や半径比がトルクや伝熱性能に及ぼす影響をより詳細に議論した。その際、局所細密構造を導入し超高速回転域での解析結果を得ることができた。移動協条件の実装により両溝構造に関する研究も進め、乱流域での検証まで実施した。

### 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：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

桑田祐丞：テイラー・クエット乱流解析手法の開発

天野由視：テイラー・クエット熱流動解析

佐藤心亮：両溝解析のための埋め込み境界法の実装

阿久根啓汰：二相熱流動解析

森本大稀：3次元 AMR 熱実装

### 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

50,000rpm)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。さらに解析コストを減らすための工夫と両溝解析への足掛かりを得る。

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。

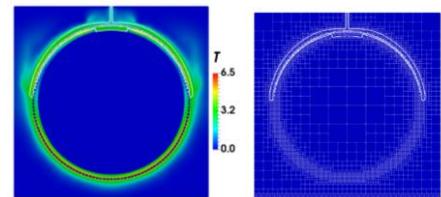
3. 当拠点の公募型共同研究として実施した意義本解析 (二相熱流動, 溝付きテイラー・クエット乱流熱流動) は複雑形状の取り扱いの容易さや乱流解析の解析精度が担保されていることから格子ボルツマン法 (LBM) を解析手法として用いる。LBM は陽的な解析手法であり、用いる分布関数の局所性が強いいため、GPU による大規模並列計算に向いている。しかしながら各解析ノード点における離散方向速度成分ごとに分布関数を持つため、とりわけメモリの使用量が多い。今年度本研究ではいずれの解析でも 1 ノード当たり 27 の速度成分を持つ分布関数を用いた。二相熱流動解析では速度, 気液二相のオーダーパラメータ, 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。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, 二相 LBM や LBM 乱流解析における知

見を多く有する東京科学大 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

##### 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では, 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。その発現条件を探索したところ, 界面張力, 気液の温度差, 曲率 (界面形状) のいずれかが非ゼロの場合で異常が発生することが分かった。並行して気液二相 AMR コードに温度場解析実装作業を二次元場で完成させた, AMR においても上記の温度異常を確認した。



(a) 温度場

(b) 気液界面

図 1: 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)

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した。

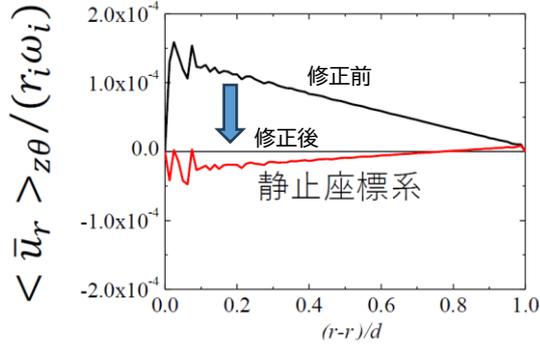
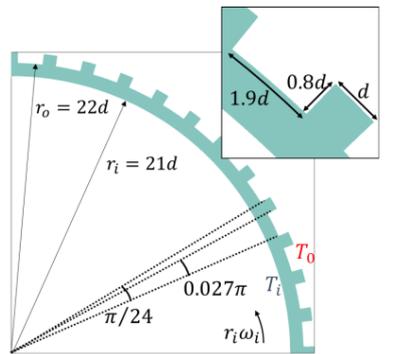
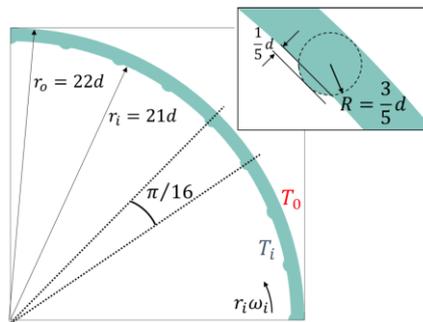


図 3 : 回転壁の境界条件修正の一例。修正後、理論解である半径方向速度  $\bar{u}_r = 0$  とできた。

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 は溝無しの場合、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。

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

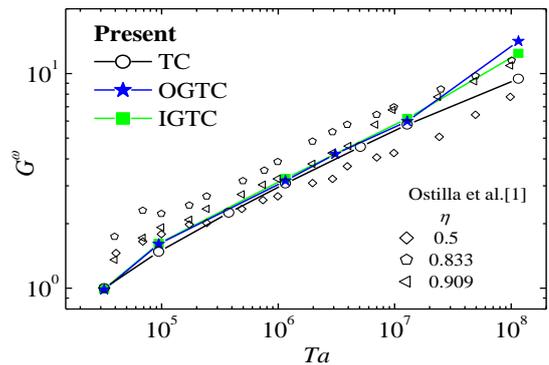


図 5 : DNS 解析によるトルク特性

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。

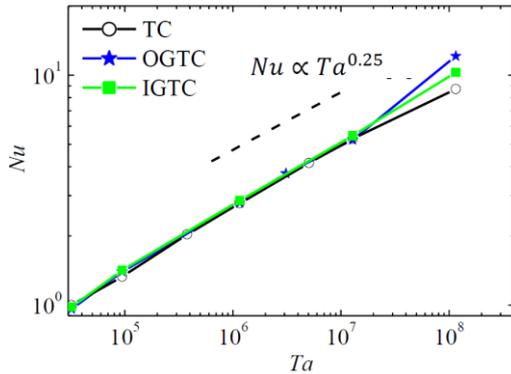
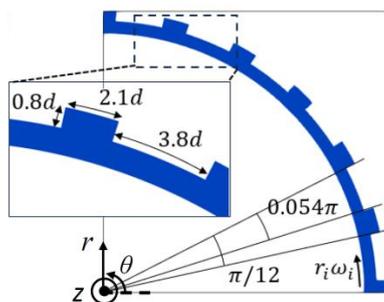


図 2：ロータ・ステータ間の伝熱特性

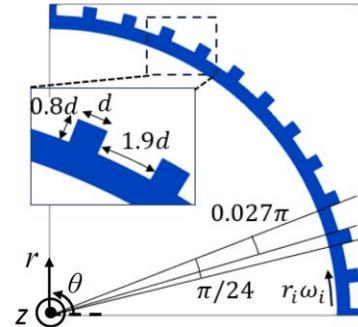
### ラージ・エディ・シミュレーション (LES)

目標とする 40,000rpm を解析する際の計算コストを抑えるために、LBM コードに LES (Shear-improved Smagorinsky) を実装した。溝無し、溝付きの場合について精度検証を実施し速度場温度場共に DNS と良好な一致を得た。次に目標とする高速回転領域 ( $Ta = 4.628 \times 10^8$ ) での解析を実施した。これは約 5 万 rpm に相当し、この数値は自動車メーカーが目指している目標値といわれている。

さらに、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 3 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。



(a) GTC(24)



(b) GTC(48)

図 3：LES の解析系

解析結果を図 4 ならびに図 5 に示す。ここでも先と同様の傾向が得られた。やはり、高速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  $Ta$  数の低い側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のが確認できた。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。

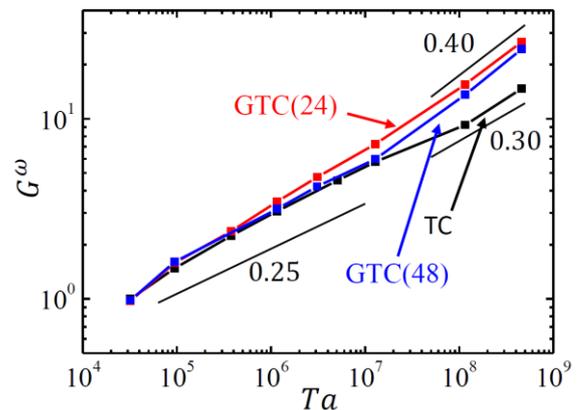


図 4：ステータ側のみに溝がある場合のトルク特性。

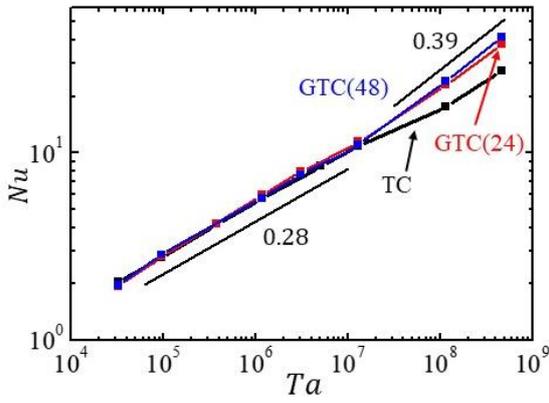


図 5 : ステータ側のみに溝がある場合の伝熱特性.

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。

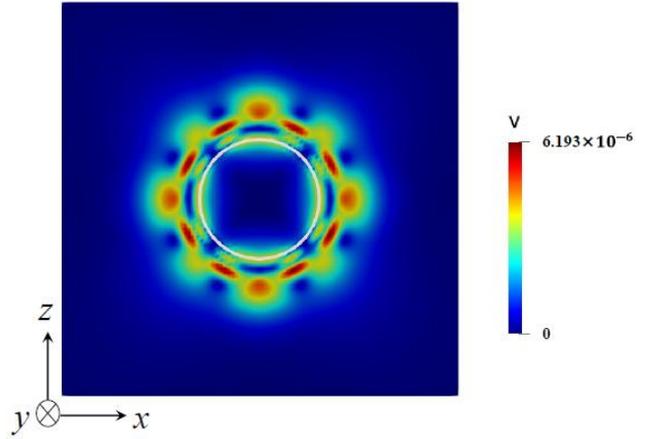
## 5. 今年度の研究成果の詳細

### 1. 気液二相混相流解析による発熱体の除熱量評価

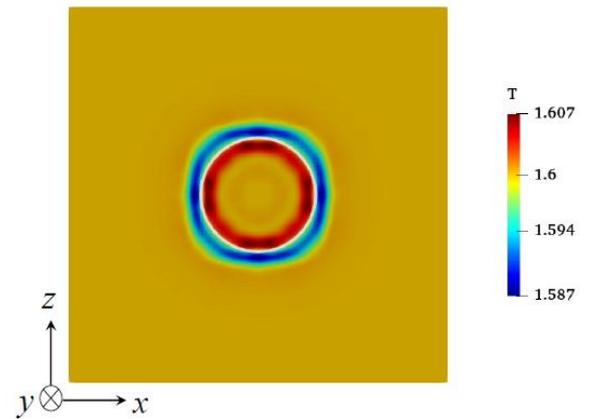
上述の異常温度場解消に向けて引き続き調査を行った。その結果、図 6 に示すように気液界面が格子線に対し法線方向に移動する際に異常発熱が生じている可能性が示唆された。このことは浮遊液滴の解析で界面張力係数が非ゼロの場合に spurious current 界面が生じ、特に 3 時、6 時、9 時、12 時方向の気液界面で生じる格子線法線方向の微小な速度分布から異常発熱が生じることからも裏付けられた。

しかしこれでは格子線をまたぐ、すなわち界面変形を伴う場合の温度場解析が良好に行えないことを意味する。

そこでこの問題を回避するために、おおよそ定常な流れ場が形成されたのちに、その速度場を用いて温度場解析を開始することとした。



(a) 速度コンター



(b) 温度場

図 6 浮遊液滴における Spurious current と温度異常

以上を踏まえて一様発熱角柱群からの除熱量を評価するための解析を実施した。解析系を図に示す。これは昨年度と同様の構造であり、角柱間隔  $L_{gap}$  を角棒幅  $L_h$  に対し 0.2~0.4、流下液体のノズル入り口流速は  $Re=220, 287$  として解析をおこなった。

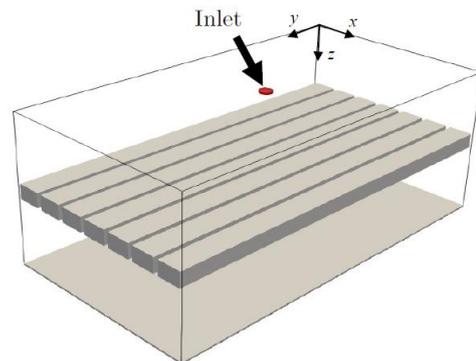


図 7 解析系

各格子点での濡れによる除熱量は流入時からの温度差で評価した。結果を図 8 に示す。横軸が角柱群全体の表面積で無次元化した濡れ面積、縦軸が全加熱量で無次元化した除熱量である。濡れ面積と比例して除熱量が比例しほぼ線形の関係があることがわかった。

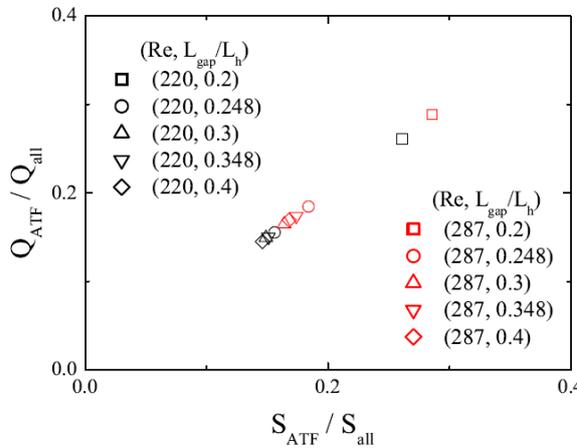


図 8 濡れ面積と除熱量の関係

また、局所的な熱伝達率を考察するため、代表的な解析例における局所ヌセルト数分布を図 9 に示す。流下地点のヌセルト数が最も高いことは直感的にも予測できるが、その周囲で局所的に低い場所が現れることがわかった。これは局所液膜厚さの高くなる箇所であり、二相流による伝熱現象を明らかにするためには単純系を対象として基本的な議論が必要なことを示唆している。

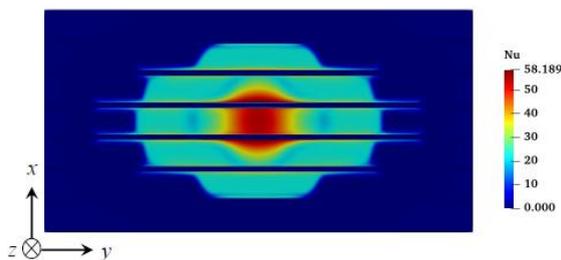


図 9 局所ヌセルト数分布

以上より、異常発熱を回避しながら除熱量の評価を実施することはできた。今後は妥当性検証を行う必要があるが、そのためには発熱体内部の熱伝導をも考慮した共役伝熱問題

に拡張する必要がある。事実、並行して実施した実験で得た除熱量は解析のそれよりも大きいことが確認できている。

## 2. 三次元気液二相流解析の温度場解析への AMR 実装

昨年度 2 次元系で実装した温度場解析を 3 次元に拡張することを試みた。しかしながら MPI 実装にてこずったのと、粗密格子境界での温度異常が認められたことから完成には至らなかった。

## 3. 溝付きテイラー・クエット熱流動解析

高回転領域での解析を効率よく進めるために、局所細密格子の実装を行った。格子配置を図 10 に示す。

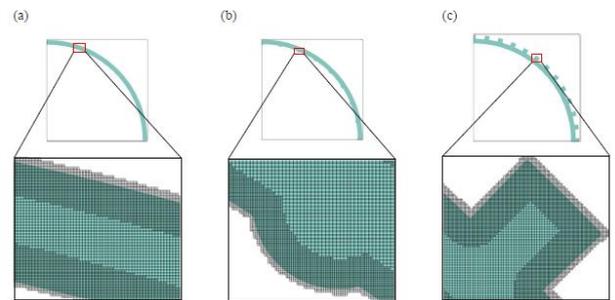


図 10 局所細密格子配置図

この解析格子を採用した結果を追加したものを図 11 に示す。その結果、ステータ溝あり (048) とロータ溝あり (Case 132) で遷移の仕方に違いがあることが確認された。  $4 \times 10^7 < Ta < 10^8$  において、048 の傾きは急峻に増加することに対し、132 の傾きは緩やかに増加し、  $Ta > 10^8$  で傾きの変化は収束することが確認できた。伝熱特性についてもトルク特性に倣った形で変化することがわかる。また、TC 流れの参考文献データ (Tachibana et al., 1960) ならびに外側溝付き構造での文献データ (Bouafia et al., 1998) をみても、傾きが同様に収束することから本解析の妥当性を確認できた。

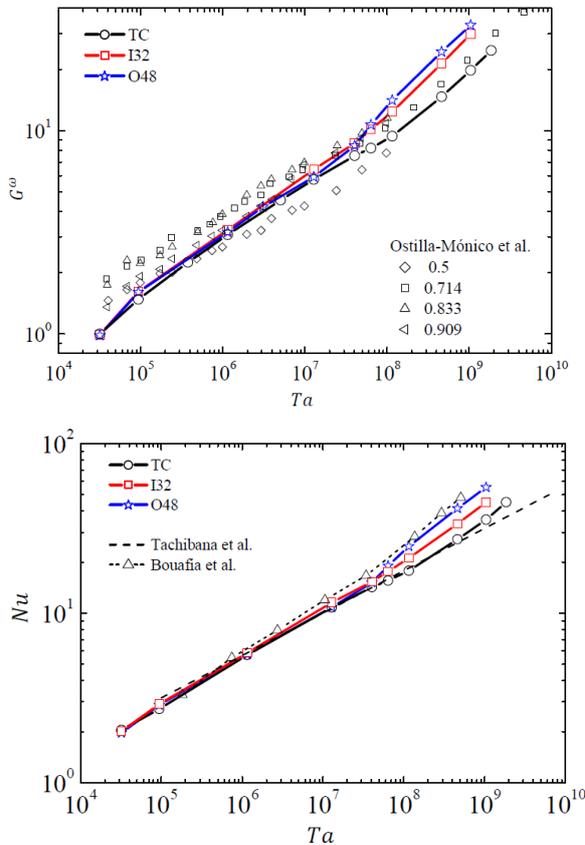


図 11 局所細密格子での結果を追加した既存形状での (a) トルク特性 (b) 伝熱特性

さらに、将来の実用化が期待される高半径比 ( $\eta=0.983$ ) での解析も実施した。結果を図 12 に示す。参考としてほぼ同様の半径比 ( $\eta=0.985$ ) での実験結果 (Zhu et al.,) を併記する。彼らは溝無し TC 流れおよびステータ側溝付き流れの実験データを取得している。なお、溝のサイズならびに個数は本研究とは異なることを付記しておく。図 12 より高半径比データは概ねトルクが下がることがわかった。詳細図は省略するが、高半径比における解析結果を概観すると、 $Ta \approx 10^7$  では溝の有無によらずトルクの値がおおよそ一致するが、 $Ta \approx 10^8$  では溝付きのケースで溝なしと比較して傾きが増加した。これは既存形状の解析データと同様に  $10^7 < Ta < 10^8$  で溝なし TC 流れからの遷移が起こることを意味しており、傾きの大きさについても、ステータ側溝付き流れでは傾きが急峻であるのに対し、ロータ側溝付き流れでは緩やかで

ある。Zhu et al. の溝付きの場合のトルクは  $Ta \approx 10^7$  においても溝なしのケースに対し大きくなる。これは彼らの構造では一周当たり 54 個の溝が存在し、本研究とは溝形状が異なるためである。したがって本研究における溝形状・溝数においては溝付きのケースでのトルクの増加は  $Ta \approx 10^7$  で見られなかったが、溝形状・溝数に依存することが示唆された。

また伝熱特性についてもトルク特性と同様の傾向を示していることが確認できる。すなわち、半径比が高い場合はステータからロータへの伝熱も抑制される、外側溝付き構造での伝熱のほうがより大きく、やはりステータ側の溝構造は将来的に見直した方が良いことが示唆された。

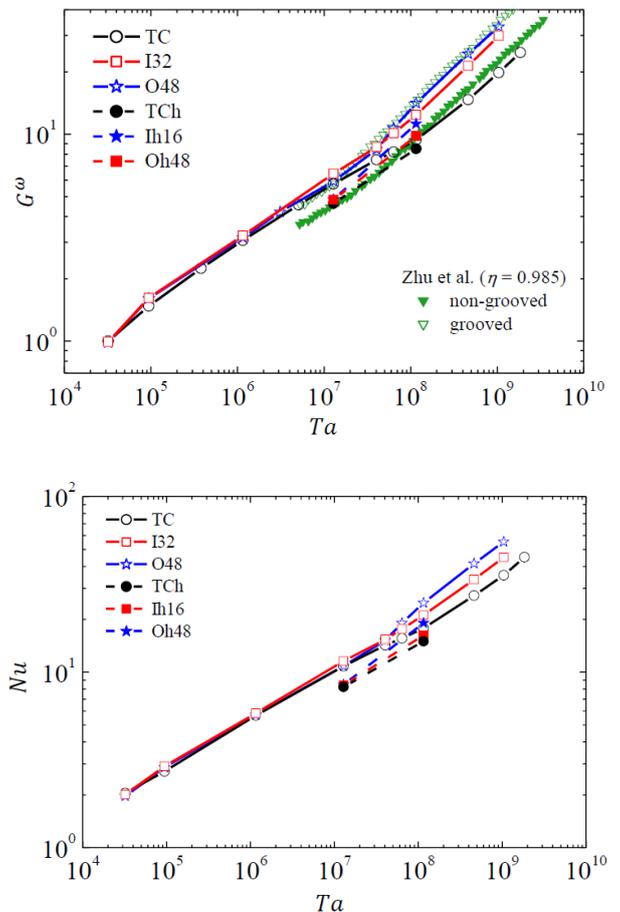
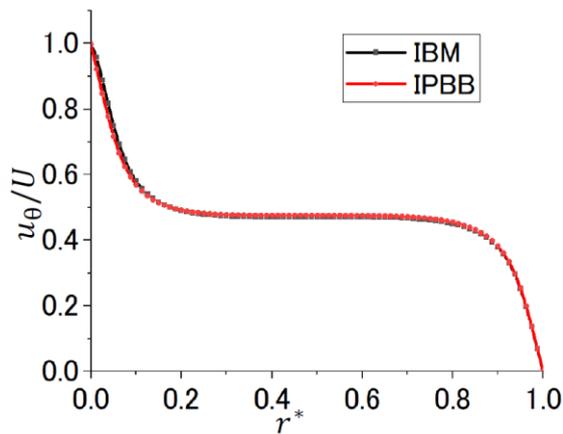


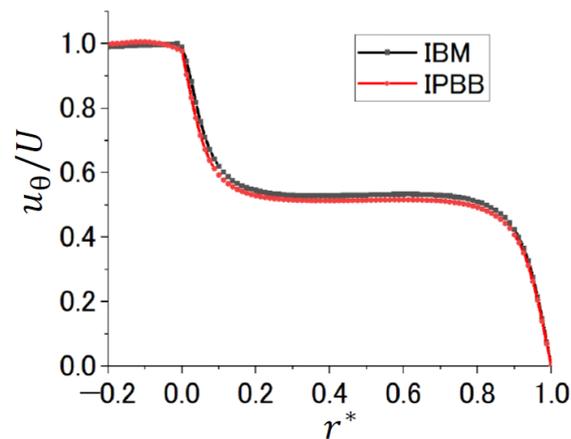
図 12 高半径比の解析結果

また両溝解析を実現するにあたり、埋め込み境界法 (IBM) を TC 流れに実装した場合の周

方向平均速度分布を図 13 に示す。ここでは、ロータ側 ( $r^*=0$ ) に IBM を適用し、既往形状半径比 ( $\eta=0.955$ )、乱流域 ( $Re=3500$ ) での TC 流れ及び内側溝付き構造での解析を実施した。比較対象として、従前より採用してきた滑らかな壁面を二次精度で表現できる Interpolated Bounce-Back (IPBB) Scheme を併載した。図からも分かるように、おおよそ同様の速度分布を示すことは確認できたが、IBM は IPBB より精度の面でやや劣り、特に  $r^*=0$  では誤差が確認された。



(a) 溝無し TC 流れ



(a) ロータ側溝ありの TC 流れ

図 13 半径方向平均速度分布。ロータ側に IBM を用いた解析を IPBB と比較。

温度異常が生じるという知見を得た。また除熱量評価はできたが、共役伝熱条件の実装が不可欠であることもわかった。一方で AMR の熱実装にはまだ時間を要する。

②溝付きのテイラー・クエット流れについては超高速回転域までの解析を実行できた。それには局所細密格子の実装が奏功した。また将来的に志向される高半径比形状でも解析を実施、それらのトルク特性および伝熱特性まで明らかにできたことから、十分な成果を上げることができたと考える。

※7. 研究業績はウェブ入力です

## 6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

上記より自己評価としては、

①混相流における除熱量評価コードはおおよそ完成した。その過程で、界面移動により