

TSUBAME 共同利用 令和5年度 学術利用 成果報告書

溝付き超高速テイラー・クエット乱流の大規模数値解析  
Large-scale turbulence computation of grooved Taylor-Couette flow金田 昌之  
Masayuki Kaneda大阪公立大学  
Osaka Metropolitan University  
<https://www.omu.ac.jp/eng/htlab/staff/kaneda.html>

電動自動車に用いられているモータにはロータ・ステータに溝構造を有する。そのためロータの回転の際にロータ・ステータ間に誘起される流動が回転トルク損失に影響を及ぼす影響がある。申請者らは格子ボルツマン法(LBM)を用いて、ロータもしくはステータの一方に溝がある場合の直接解析(DNS)コードを開発してきており、今年度は特に自動車メーカーが将来目指している高速回転領域でのトルク損失を解析した。ここでDNS解析に加えてラージ・エディ・シミュレーション(LES)を実装し、解析コストを下げつつさらなる高速回転数領域での解析をも実施した。その結果、現状で採用されている回転数領域ではロータ側、ステータ側の溝の影響はほとんど見られないことを確認した。しかしながら、ある閾値を境にして、回転トルクが増大し、それに応じてステータ側からロータ側への熱輸送も増大することが確認できた。

In the electric motors used in the electric vehicles, rotor face and stator face respectively have grooves. These grooves may increase the rotating torque and enhance the heat transfer. In this study, a large-scale parallel turbulence computation was conducted to clarify the effect of the grooves on them. The lattice Boltzmann method was employed for the computation, and the grooves on rotor or stator were respectively considered. It was found that the torque vs rotating speed relation changes from the threshold rotating speed. The heat transfer from the stator to rotor correspondingly increases.

*Keywords:* Taylor-Couette flow, Grooves, Rotating torque, Heat transfer, Lattice Boltzmann method

## 背景と目的

2016年に発効したパリ協定にともない、わが国でも数値目標が定められている。それを達成するために運輸部門の取り組みとして燃費改善や次世代自動車の普及を掲げている。これらを達成するための一つの手段として電気自動車(EV)やハイブリッド自動車(HV)の普及があげられる。これらは駆動用のモータを有しており、モータには省スペース化として小型化、高効率化、高速回転化が求められている。小型・高速化はステータコイルの発熱密度上昇を招く。高速回転化に至っては、現行の最大回転数が20,000rpmといわれており、これが将来的に50,000rpmを求められている。

モータのロータ、ステータには電磁界最適化のため溝構造が設けられている。回転に伴いロータ、ステータ間には乱流が誘起され、またステータコイルからの熱がロータに輸送される。ロータに設置されている磁石は高温を嫌う。また発熱体であるステータコイルは非電気

伝導性の流体で直接冷却される。

将来的な小型高速回転化を目指すにあたり、以下の問題が顕在化すると考えられる。1.ロータの回転トルクは回転数に依存して大きくなる。ここでロータ、ステータの溝構造が回転トルクに影響を及ぼすことで、回転トルクが増大する(トルク損失)。2.ロータ・ステータ間の熱伝達が溝構造により促進され、ロータへの熱輸送が増大する。ロータ・ステータ間の流れは、壁面溝付きのテイラー・クエット流れに近似でき、学術的な意義も大きい。

しかしながら、現状の溝構造が及ぼす影響については議論されておらず、学術的な知見もない。実機の溝構造がメーカーによって異なり、また高速回転実験のコストも高いことから実機試験は限られた範囲でしか行えない。数値解析による学術的なアプローチは可能であるが、ロータ・ステータ間の狭隘流れを高精度に解析するには解析コスト(解析格子解像度、乱流統計量、解析メ

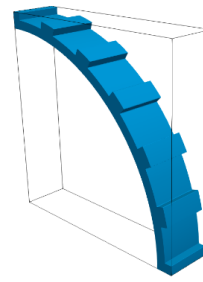
モリ, 解析時間)が大きくなる. また将来目指している高速回転領域ではさらにその計算コストが膨大となる.

そこで, 複雑構造内の大規模並列熱流動解析を可能にする格子ボルツマン法 (Lattice Boltzmann Method: LBM) を用い, 乱流熱流動を実施した. TSUBAME は高速な GPU を複数枚備えたスパコンであり, MPI により大規模解析領域を担保でき, 並列性に優れた LBM との相性が良い. 乱流解析には当初高精度だが計算コストの高い直接数値解析 (Direct Numerical Simulation: DNS) にてある程度の回転数までを解析した. 並行して, 将来的に志向されている高速回転領域の解析を実現するため, 解析コストが比較的低い Large Eddy Simulation (LES) を実装した. 解析精度は DNS と比較することで検証し, 高速回転領域の解析を実行することで, その領域における溝の影響を明らかにした.

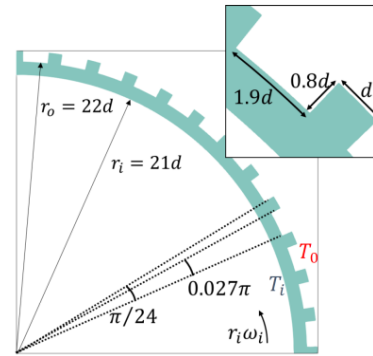
## 概要

LBM は一般に矩形格子に解析領域を設けるため, ロータ, ステータ間のような狭隘流れでは流体相に比して解析対象ではない固相領域が占める割合が大きくなる. これは解析コストの無駄になるので, 流体相のみを効率的に解析できるようにデータの一次元配列化を施している. 今年度のプロジェクトでは, 溝付きのテイラー・クエット流れを高精度に実施するために, ロータもしくはステータの片側にのみ溝を設けた構造を対象とした. これは両側に溝があるとどちらかは構造が解析格子を横切る, いわゆる移動境界問題となり, 現状では解析アルゴリズムや解析精度が懸念されたためである. ロータ側に溝を有する場合は, 移動境界問題を回避するため, 回転座標系に変換してコリオリ力を考慮した. なおこれらの溝構造は実機を参考にした.

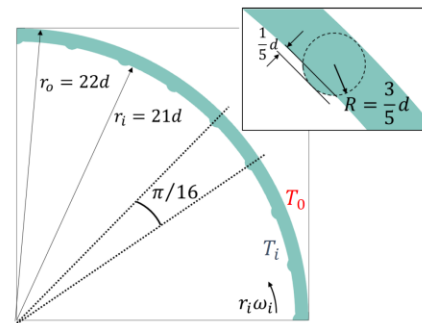
DNS ではこれら両方の構造を対象として現状の回転数およびそれより高い領域の解析を実施した. 解析は複数 GPU を MPI 接続して行った. LES は解析精度の検証からスタートし, ステータ側にのみ溝を有する構造を対象とした. DNS よりも高速な回転領域での解析に成功し, さらに溝の数の影響も議論した.



(i) 解析系全体イメージ



(ii) ステータ側に溝を有する場合



(iii) ロータ側に溝を有する場合

図 1: 溝付きテイラー・クエット流れ解析の概要

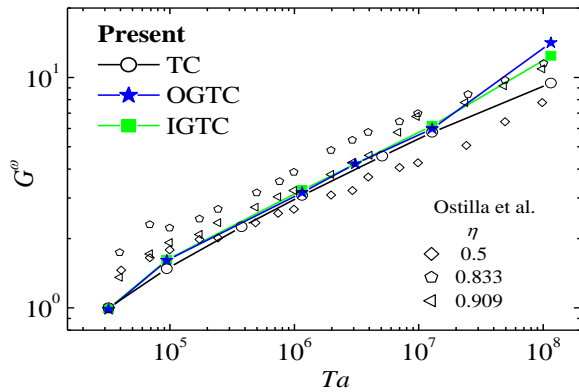
## 結果および考察

(結果と考察を記載してください. 図や表の利用を図って分かり易く記載して下さい.). 溝なしのテイラー・クエット流れ (TC), ステータ側にのみ溝を有する構造 (IGTC), ロータ側にのみ溝を有する構造 (OGTC) それぞれにおいて得られた, テイラー数 (回転数に相当する無次元数) と回転トルクおよびヌセルト数 (ステータ側からロータ側への伝熱量の無次元数) を図 2 に示す. 図より, ある程度のテイラー数までは 3 者のトルク特性並びに伝熱特性に大きな違いは見られない. しかしながら  $Ta > 10^7$  あたりを閾値として溝付き構造でのトルク特性や伝熱特性が上昇していることが分かった. これは溝により乱流構造が変化し, レイノルズ応力ならびに

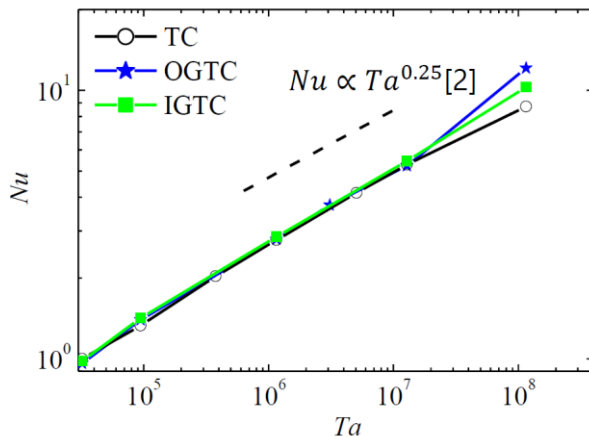
乱流熱流束が増大したことが主な原因と結論付けられた。これは将来目指している高速回転領域において回転トルクの損失が大きくなること、またロータ側への伝熱量が増大することからサーマルマネジメントの観点からも好ましくないことを意味する。さらに現状の構造ではステータ側の溝のほうがより大きなトルクを必要とすることから、今後の設計指針としてステータ側の構造を優先的に検討する必要があると示唆された。

の設計指針の一部となる結果であり、溝構造をなるべく減らすことが肝要といえる。

しかしながら、今回のプロジェクトでは片側にのみ溝を有する構造を対象としたため、実機のようなロータ、ステータ側両方に溝を有する構造での検討は行えなかった。そのためには移動境界を高精度に、かつ境界が高速に移動(解析格子を跨ぐ)しても精度が担保できる手法を開発し、検証する必要がある。LBMでの移動境界問題は非物理的な圧力波を生じることが以前より知られており、これを緩和することが重要である。埋め込み境界法の実装などからスタートして進めていく予定である。



(i) 回転トルク特性



(ii) 伝熱特性

図 2: 解析結果

#### まとめ、今後の課題

今年度のプロジェクトでは溝付きテイラー・クエット流れを対象として、ロータ側、ステータ側の溝構造がモータの回転トルクならびに伝熱特性に及ぼす影響を調査した。その際、将来的に求められる高速回転領域まで高精度に解析することができた。その結果、現状の回転数では溝構造の影響は小さいものの、将来的な高速回転領域では溝によるトルク損失が増大し、ロータ側への伝熱量も増大することが示唆された。これはモータ