jh220040

二相流により熱交換される複雑構造体の熱流動解析ツールの開発ならびにその現象解明

金田昌之(大阪公立大学)

概要

昨年度に引き続き複雑構造体の気液二相流による熱交換現象を詳細に解 析するための解析手法の開発に取り組んだ.フェーズフィールドモデル を素地とした二相系格子ボルツマン法を改良し,非定常の気液二相流で も温度場を安定に解析できる手法の開発に成功した.これを用いてモー タに用いられる電気コイルの一部を想定した水平角柱群に流下した液体 の濡れ広がり解析を実施し,濡れと除熱に関する一定の知見を得ること ができた.並行して昨年度二次元系で実装した AMR の三次元化を実施 し,流れ場のみではあるが実装に成功した.さらに,電気モータのロー タ・ステータ間構造における熱流動現象を解明すべく単相乱流直接数値 解析コードを開発した.格子ボルツマン法による大規模熱流動数値解析 を実施し,回転トルクと熱伝達特性に関しての知見を得ることができ 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 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,GPU チューニング 須賀一彦:気液二相流解析 桑田祐丞:CAD データからの構造作成 杉本真:熱流動解析 宮崎巽也:二相流解析,AMR 実装 武田滉平:テイラー・クエット単層流れ解析 長谷川雄太:カーネル作成,AMR 実装 渡辺勢也:D3Q19 モデルの GPU 実装 瀬田剛:熱的境界条件構築

2. 研究の目的と意義

近年,自動車用モータや電子機器の小型化・ 高効率化が求められている.小型化に伴いモ ータの超高速回転化への要請もあり,大電流 の流れるステータコイル部分の発熱密度の 上昇が問題となる.

ステータコイルは複雑な構造であり、そこで 生じる熱の効率的な除去方法が模索されて いる.例えば電動自動車のモータでは、上部 ノズルから電気絶縁性の冷却液を直接流下 することで冷却する.冷却液はその後モータ のロータとステータ間の狭隘部分を流れて から下部に流れ落ちる.ステータコイルでの 冷却液挙動は複雑構造内を通過する二相流 であり、さらに熱輸送を伴うことから、既存 の手法では数値的な予測が難しい.液の挙動 や除熱量はコイル構造や液の物性や温度依存性,狭隘部の間隔などに影響されることは容易に想像がつくことから,流体力学と伝熱学を併せた学術的な知見に基づいた包括的な現象解明が求められる.

昨年度,これまで開発してきた混相流解析コ ードを改良し二相流熱流動場解析に取り組 んだが,非物理的な温度場を呈することがわ かった.これはいわゆる refill 問題だけで なく,接触線付近の熱的境界条件が適切に反 映されないことも原因と考えられた.

そこで今年度は継続課題として,相の移流や 変形を伴う二相流の熱解析手法を見直し妥 当な解析が実行できるコードを開発するこ とを目的とした.

また近年,輸送機器の電動化への流れや省エ ネルギーへの要請があり,モータの高効率化 が求められている.高速回転するロータとス テータ間には電磁場の最適化のための溝や 窪みがあり,これが回転トルクおよび伝熱性 能に影響を及ぼす可能性がある.ロータ・ス テータ間は溝付きのテイラー・クエット流れ に近似でき,我々のグループの計算ノウハウ を有効活用できると考え,大規模数値解析に よる現象解明を試みた.

3. 当拠点の公募型研究として実施した意義

本解析は複雑形状の取り扱いの容易さから 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.今年度本研究では二相流熱流 動解析ならびに単層熱流動解析それぞれに おいて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,温度を解析するため3つの分布関 数,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,LBM や AMR 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

昨年度 jhpcn 課題 (jh210028-NAH) では水平 角柱群 (単層および積層構造) への二相流解 析を実施し,濡れ面積に及ぼす諸条件のキャ ラクタリゼーションができた.温度場解析の 実装も試みたが,相の移動・変形がある状況 での温度場解析は非物理的な温度場を呈し, 残念ながらそのままでは利用できなかった. そこで気液界面に境界条件を付与すること で液相のみの解析に特化した形となった.

一方で AMR については,二次元二相流解析での実装に成功し,参加研究者の一人である宮崎が学会賞を取るに至った.

溝付きテイラー・クエット流れについては大 規模乱流の直接数値解析により、トルク特性 への影響を議論することができた.

学会発表や学術論文(2件)も含め、おおむ ね良好な進捗といえるものであったと考え る.

う年度の研究成果の詳細 二相熱流動場の解析手法構築

これまでの解析の経験から問題点を精査す るため,温度場解析には密度比などを生成項 として考慮した Hu et al. (2019)を参考にし た.しかしながら異常な温度場を呈すること から,流れ場の解析手法の変更に着手した. 二相流の速度場をより安定に解析するため に,まず衝突項に Central moment model の 手法 (Gruszczyński et al., 2020)を導入 した.結果を図1に示す.解析領域上部から 冷却液が水平角柱群に流下する三次元解析 系を想定している.結果より,解析領域上部 の冷却液流入エリアであきらかに不安定な 速度場及び温度場を呈することがわかった.











温度場 図1二相流熱流動解析トライアルその1(密 度比706).分布に異常が見受けられる.

このような高密度比解析や高プラントル数 流体の解析は発散した.密度比を下げて確認 したが,やはり異常な温度場は改善しなかっ た.

そこで改めて情報収集を行い,副代表者の青 木教授の論文(Sitompul and Aoki, 2019) で用いられている Cumulant model を流れ場 解析の衝突項に実装し,検証を行った. さら に温度場をより安定に解析できるようにす るために,上述のHu et al.の手法(SRT)を 改良して重み付き MRT モデルに発展させた. 結果を図2に示す.速度場は流下している箇 所で最大となり,流下液体の影響を受けてき そうでも速度場が生じていることが確認で きた.また温度場は気液の比熱比により,流 体の温度は角柱群の熱を吸収してもそれほ ど大きくなることはなく,角柱群の裏側で温 度が上昇するなど,凡そ妥当な結果を得るこ とができた.



温度場

図 2 二相流熱流動トライアルその 2 (密度比 706)

手法の開発に一定の目途が立ったため、冷却 液による発熱構造体からの除熱量の評価を 実施した. 除熱量は構造体流下前後の温度差, 冷却液の質量流量及び比熱の積で求めた.冷 却液が一定温度条件の場合,除熱量は冷却液 流量および初期温度(=粘度),冷却液と角柱 群の間の濡れ性(=接触角),角柱群構造(= 角柱寸法,間隔)および角柱群加熱量に依存 すると考えられる. ここでは流下温度を 50℃ と想定し、流量ならびに加熱量による評価を 行った. 流量 500mL/min において上面から見 た速度場並びに温度場を図3に示す. 冷却液 は角柱群の隙間から流下するため局所的な 流速が高いことがわかる.また角柱群上で濡 れ広がった液体にも温度分布が生じており, 温度が低い箇所の局所熱伝達が良好である ことを示している.濡れ広がりの外縁部は流 速が低いため局所温度が高い一方で,比較的 流速の高い箇所でも局所受熱量が高くなっ ていることから, 流れと熱の現象をより詳細 に理解する必要があることがわかった.なお, 角柱上に分布する流体の厚さが局所的に異 なるため,相の輸送も議論に加える必要があ る.

前述の 50℃を流下した際の流量, 加熱量が除 熱量に及ぼす影響を表1に示す. ここでは数 字の詳細は示せないが, 除熱量の定性的な傾 向は妥当なものとなった. すなわち, 1. 流量 の増加に伴って除熱量は上昇する. また 2. 加 熱量が増えると流体への伝熱量も増えるた めに除熱量も増加する, ということである.







角柱群表面近傍の水平面温度分布 図3冷却液流下時の鉛直方向速度コンターお よび表面温度分布(密度比700).白色箇所は 流体が隙間部分でくぼんでいるためデータ が存在しない.

表1 徐熱量の評価

流量	加熱量	除熱量
500	30	13
650	60	21

以上の結果より,密度差のある熱流動二相流 解析コードの開発にこぎつけることができ たと考える.

本解析の改良については参加研究者の杉本 らが地道に手法を検証し進めることでなし えたものであり,今後は発展的な解析も期待 できる.

課題点としては,気相の温度場も解析できる ものの,自然対流の影響(浮力)までは実装 できていない.これは解析領域の大きさなら びに解析領域の熱的境界条件の設定が議論 できていないためであり,今後熱収支を正確 に見積もるためには必要な議論と考えてい る.

AMR 実装

前年度実装に成功した二次元 AMR Phasefield LBM の計算結果を検証したところ,全 体の解析時間こそ短縮できたものの,格子の 張替えに多大な時間を要することから改良 が必要であることがわかった.そこで三次元 拡張を進めながら解析時間のボトルネック の解消を進めた.

三次元拡張の例としてダムブレイク問題の スナップショットを図4に示す.図に示すよ うに、複数 GPU を MPI で接続して二相流を 解析できるコードを開発できた.また、各 GPU のロードバランスも考慮して、均等な メモリ使用量になっていることも確認でき る.格子張替えに時間を要している点につい ては、データの配列方法を工夫するなどして 少しずつ改良を施した.

本件については参加研究者間の情報交換に よる賜物であり、また担当した宮崎のプログ ラミングスキルが大きく寄与したことを付 記しておく.



GPU0 GPU1 GPU2 GPU3 図4三次元ダムブレイク解析のAMR 実装スナ ップショット.各 GPU の負荷を色付けしてあ る.

以上より三次元 AMR 実装は一応の完成を見る ことができた.課題としては,温度場実装が 残されている点ならびに後継者の不足であ る.

テイラー・クエット流れ

昨年度から開始した三次元テイラー・クエッ ト流れ解析の拡張を実施した.ハイブリッド 車などで使用されている電動モータにはロ ータ側,ステータ側にそれぞれ電磁気力を最 適化するための溝が存在しており,流体力学 的にみれば回転トルクの増大を招くことが 予想される.そこで昨年度開発した D3Q27 モデルの単相 MRTLBM コードに溝を付与 した構造を構築した.構造概要を図5に示す. 計算資源の節約のため,解析領域は全体の4 分の1とし,周期境界条件を課した.本解析 では狭隘流路となるため計算に必要な格子 数を削減する必要があった.ここでもデータ の1次元配列化を施し,複数 GPU での解析 を行うため MPI を実装した.



図5 テイラー・クエット流れの解析領域

周方向の平均速度分布を図6に示す. 横軸は 内外円筒間の長さで無次元化された半径方 向長さであり,0は内円筒表面,1.0以上は溝 の部分を示す. 溝有りの場合,バルクの平均 速度が低下し,溝内部で生じる渦により負の 速度成分が生じることが確認された. また, 二次渦であるテイラー渦の生成を確認でき たことから,基本的な流れの性質は変わらな いこともわかった.



図6溝の有無における周方向平均速度分布

次に回転トルク特性に及ぼす溝の影響について検討した.無次元トルク分布を図7に示す.横軸は無次元回転数であるテイラー数,縦軸は層流のトルクで無次元化した.縦軸が

対数表示になっているため顕著な差がない ように見受けられるが,溝有りの場合は 40 パーセント以上のトルク上昇が確認された. その際,溝無しテイラー・クエット乱流の結 果と同一のスケーリング測があることが分 かった.今回はステータにのみ溝を有する場 合ではあるが,理想的には溝のない構造のほ うが好ましいことが明らかとなった.



図7溝付きテイラー・クエット流れにおけ る無次元トルク

ひきつづき、温度場解析の実装にも取り組ん だ. 温度場も LBM で解析したため分布関数 を追加した. ここでは温度場の安定解析を検 討した結果, D3Q19 正規化 LBM を実装し た. 温度境界条件はステータ側壁面を等温加 熱、ロータ側壁面を等温冷却とした、したが って,ステータコイルの発熱がステータ部材 を伝導してロータ・ステータ間の流れでロー タ側に輸送されることを意味する. 都合上詳 細な温度分布は省略し,加熱壁面の熱輸送の 指標であるヌセルト数を図8に示す. 横軸の 定義は図7と同様である.図中の丸印が溝無 しテイラー・クエット流れの結果であり、参 考文献との傾向が一致していることから解 析結果の妥当性を確認できる. 星印の溝付き テイラー・クエット流れでは、ややヌセルト 数の上昇が確認できたものの、溝無しのテイ ラー・クエット流れでのスケーリング則から 大きく逸脱することはなかった. トルク, ヌ セルト数でみられたこれらの傾向は, 溝無し の場合の流れ場からの変化がそれほど大き くないことを示唆している.実際に流れ場を 確認したところ,溝有り構造でもいわゆるテ イラー渦が生成されていることを確認した.



図8溝付きテイラー・クエット流れにおける 伝熱性能の比較.

6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

各事項についての自己評価及び今後の展望 は以下の通りです.

二相熱流動解析コードの開発

CFD 的にシビアな解析対象を安定に二相熱 流動解析を実施するコードを開発すること ができたことは大きい.特に複雑構造に変形 しながら流出入する二相流の解析を比較的 高い密度比およびプラントル数で実現でき た点は大きい. しかしながら, 計算資源の制 限の都合もあり, 温度境界層の解析精度の検 証をはじめ、 パラメータを振った解析までは 十分にできなかった.また,気相の浮力を考 慮しておらず, 系全体の熱収支を評価するま ではできていない.また,流速分布と温度分 布を論理的に説明できるための検討が必要 である.これらは引き続きの課題としたい. これらが可能となれば,加熱構造の液冷性能 を高精度に予測することが可能となり, 電動 自動車をはじめとしたモータ駆動のデバイ スの高性能化に資することができる.

三次元 AMR 実装

二次元で実装した AMR を三次元に拡張し,

複数 GPU による MPI 実装までを完成できた.実施年度途中で発覚した解析時間のボトルネックについても大幅な改善ができたことから成功といってよいと考える.

今後の展望としては,熱場の解析を実現する ために LBM の分布関数ならびに境界条件を 追加することを考えているが,プログラミン グスキルを継承できるかが課題となる.

テイラー・クエット流れ

実機を模擬できる溝付きテイラー・クエット 流れに取り組み,ステータ側の溝が回転トル クに及ぼす影響について明らかにできた.ま た,ロータ・ステータ間の伝熱現象について も解析ができたことから,予想以上の進捗が あったと考える.しかしながら,乱流の直接 数値解析であることから,乱流統計量を得る ために予想以上に計算資源を消費したため, ほかの解析に充てる資源との調整に苦慮し た.

今後の展開としては、社会的要請の高い超高 速回転時のトルク特性について検証するこ とで、将来のものづくりへの指針を提示する ことが想定できる.

- 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) <u>M. Kaneda</u>, Z. Li, <u>M. Sugimoto</u>, <u>T. Miyazaki</u>, <u>K. Akune</u>, <u>K. Suga</u>, Wetting characterization of the liquid poured onto the square rod array, 11th International Conference on Multiphase Flow, Kobe, Japan, Apr.2023.

<u>Y. Okada, Y. Kuwata, M. Kaneda, K. Suga,</u> Lattice Boltzmann DNS of turbulent Taylor-Couette flows with a stationary grooved outer cylinder, Workshop Direct and Large-eddy Simulation 13, Udine, Italy, Oct. 2022.

(3) 国際会議発表 (査読なし)

(4) 国内会議発表 (査読なし)

 宮崎巽也,杉本真,金田昌之,須賀一彦,濡れ
 性境界条件を有する Phase-field LBM への
 AMR 法の実装,第27回計算工学講演会,秋
 田,2022年6月
 武田滉平,岡田佳久,金田昌之,須賀一彦,格
 子ボルツマン法による溝付きテイラー・クエ
 ット流れの直接数値解析,日本機械学会2022

年度年次大会,富山,2022年9月 <u>岡田佳久,武田滉平,桑田祐丞,金田昌之,須</u> <u>賀一彦</u>,溝付きテイラー・クエット流れの乱 流数値解析,日本流体力学会年会2022,京都, 2022年9月

武田滉平, 桑田祐丞, 金田昌之, 須賀一彦, 溝 付きテイラー・クエット流れにおける乱流熱 伝達の直接数値解析, 日本機械学会熱工学コ ンファレンス 2022, 東京, 2022 年 10 月

- (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