

jh210028-NAH

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 (大阪府立大学)

概要

昨年度に引き続き複雑構造体の熱交換現象を詳細に解析するために、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・浸潤挙動解析を実施した。その結果、これまで直感的にしか理解できていなかった、濡れ広がり面積に及ぼす角柱群間隔および温度の影響を無次元数により評価することができた。同様の手法で積層角柱群への浸潤体積を評価できることも明らかにした。温度場解析については共役熱伝達問題として取り組んだものの、非物理的な温度場を呈することが判明し、固液問題として取り扱うことで足がかりとなるコードを構築した。これらの高精度化につながる二相流解析の適合細分化法については二次元コードへの実装に成功した。さらに、電気モータのロータ・ステータ間の流れ場を LBM により高速に解析する手法を構築し、参照データと良好に一致することを確認した。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

東京工業大学

(2) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野

(3) 参加研究者の役割分担

金田昌之：研究総括

青木尊之：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：気液二相流解析・熱 LBM 実装

宮崎巽也：AMR 実装・熱 LBM 実装

岡田佳久：テイラー・クエット流れ解析

長谷川雄太：カーネル作成

渡辺勢也：GPU 実装, AMR 実装

瀬田剛：熱的境界条件構築

2. 研究の目的と意義

近年の電子機器は性能向上に比例して熱密度が上昇しており、効率的な徐熱方法が求められ

ている。たとえば自動車は電動化が推進されており、電気モータの小型化・高出力化が求められている。その結果、モータの電気コイルの冷却の高効率化が喫緊の課題となっている。

現状ではコイル上部から冷却液を直接流下して冷却している。理想としては冷却液がまんべんなくコイルを濡らしながら流下することが求められ、そのためには様々な支配因子が存在する。ノズル側では流下穴径、ノズルの向き、個数、位置、流量などのパラメータは経験に基づいており、またコイル側ではコイルの断面形状、巻き方、隙間などによっても冷却液の挙動が異なることは明白である。あまりにパラメータが多すぎるため、これまで詳細な流動メカニズムやそれによる熱交換（伝熱）の観点からの最適化が十分に議論されているとはいえない。また、コイル内を浸潤した冷却液の一部はロータ・ステータ間の狭隘部分に到達し、回転するロータの影響を受けながら移動する。こちらについても現象の理解が進まず、実験での研究も困難である。

以上の背景より、本研究計画全体の目的として、

①複雑構造における二相流解析が可能なフェーズフィールド LBM を用いて、コイル構造を簡略化した構造で、濡れとその支配因子を明らかにする。②同手法で温度場解析を実施することで、交換熱量を支配する因子を明らかにする。③ロータ・ステータ間の流れ場と温度場を解析し、熱輸送について理解することを掲げている。また解析の高効率化を目指し、④AMR の実装も視野に入れている。

昨年度、①については解析コードを構築し、精度検証を実施した。②では解析の困難さから気液界面の蒸発モデルの構築と実装を行った。③は今年度の新内容、④は基礎的な理解程度で終わっていた。

2021 年度は①流動解析を実施してその濡れ広がり及び影響因子を解明する。②温度場解析の実装を実施。③解析コードの作成と精度検証を実施した。④AMR の実装については 2 次元で取り組んだ。

3. 当拠点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 は各ノード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。特に今年度本研究では 1 ノード当たり 27 の速度成分を持つ分布関数を 2 種類 (密度および二相解析のための秩序変数) 使用した。これに温度場の解析が加わるとさらに分布関数が増える。所属先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 を MPI で構成される TSUBAME は最適といえる。事実本解析では、解析対象とした水平角柱群の積層構造への二相流解析では液の濡れ広がりから比較的大きな解析ドメインが必要であったし、現象の対称性から解析領域を半分にしてもなお解像度を求められる解析を実施する必要があった。以上より、東工大 TSUBAME での共同研究は十分意義の

あることといえる。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

初年次であった 2020 年度 JHPCN 課題 (jh200039-NAH) では、二相流流体挙動解析において課題であった条件 (気液の密度比、流体流速) を解決し、水ならびに実機の冷却液での解析で液体挙動が妥当な結果となることを確認できた。さらに気液間の蒸発に伴う相体積の減少モデルを LBM のフレームワークで実装することに成功した[1]。これは既存の研究で解決できていなかった問題を解消できた点でも有意義であった。

5. 今年度の研究成果の詳細

①水平角柱群への冷却液流動解析とそのキャラクター化

昨年度開発したコードを運用し、水平角柱群に流下する冷却液挙動の数値解析を実施した。本解析には三次元 27 速度モデルのフェーズフィールド LBM を採用した。対象とした単層構造ならびに積層構造を図 1 に示す。角柱に対する流下ノズルの大きさも図示している通りである。いずれの場合も解析領域の中心から流下したものであるが、解析格子数の制限などにより実際には対象となる領域で格子を細かくした場合の解析も実施したため、格子数は条件により異なる。

①-1: 単層構造

単層構造では表層の濡れ広がり調査するために角柱間隔、角柱の濡れ性 (接触角) ならびに冷却液粘度 (温度に依存) を解析パラメータとして、解析を実施した。ここでは、代表的な結果として、流量一定条件において角柱間隔を変えた結果を図 2 に示す。

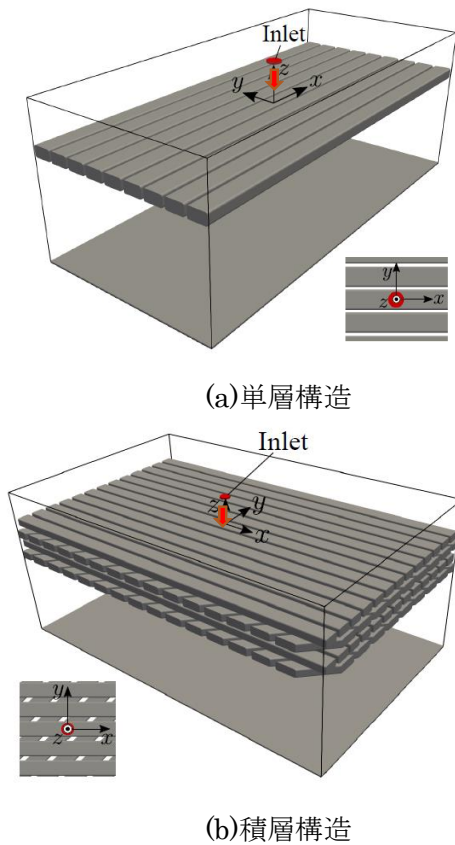


図 1：角柱群への液体流下解析モデル

図 2 の結果より，角柱間隔が狭いと液体は流下しないために角柱の軸方向ならびに横断方向へ濡れ広がる．ついには解析領域全体へ濡れ広がってしまう．角柱間隔が広くなると徐々に円形から角柱軸方向への濡れ広がりへ遷移する．これらは直感的にわかるが，隣接する角棒が無い場合（図 2 (f)）の軸方向濡れ長さよりも隣接角棒がある場合（図 2 (e)）の濡れ長さが短くなることは興味深い結果となった．おそらく角柱間の液体による何らかの力学的作用によるものと考えられる．また角柱間で保持されている液体の濡れ長さに着目すると，角柱間隔がある程度以上広がるとその長さが短くなる，つまり角柱間で保持されにくくなることも分かった．なお角柱間で濡れ広がったメニスカスのような箇所では液体流動はほとんど起こらず，本研究の目的である熱交換にはあまり寄与しないであろうことが予測された[2]．

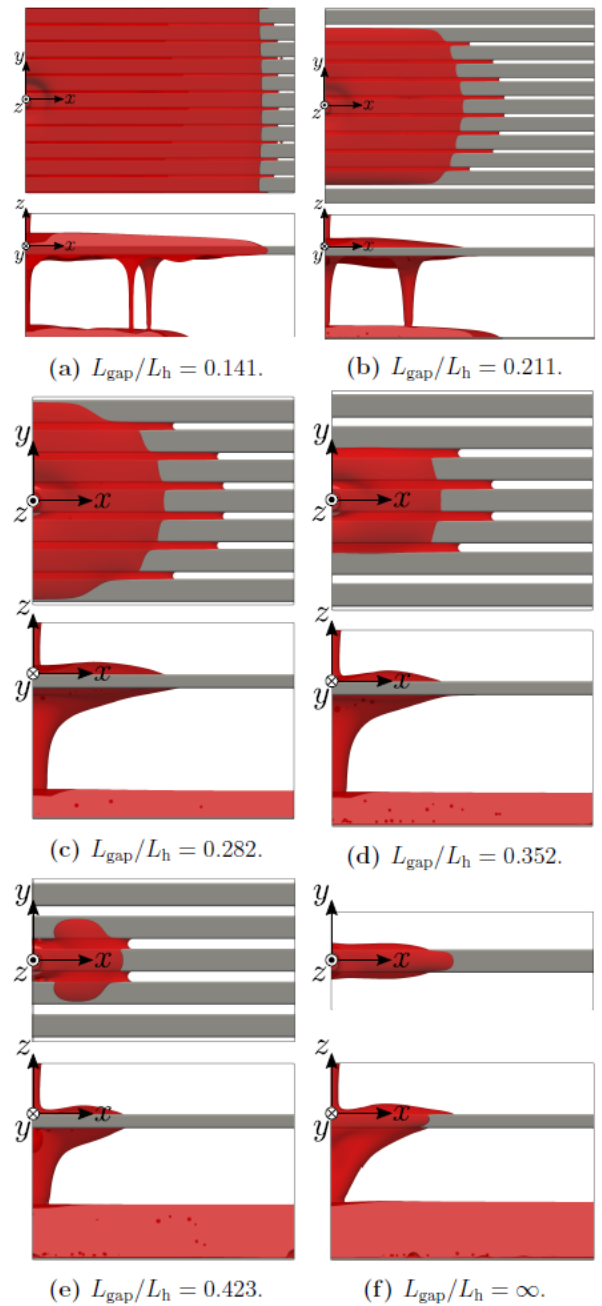
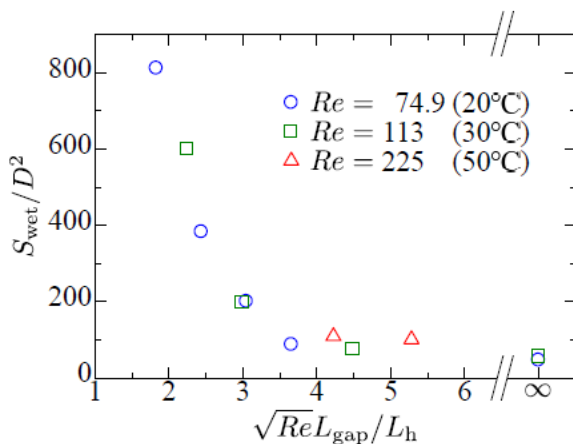


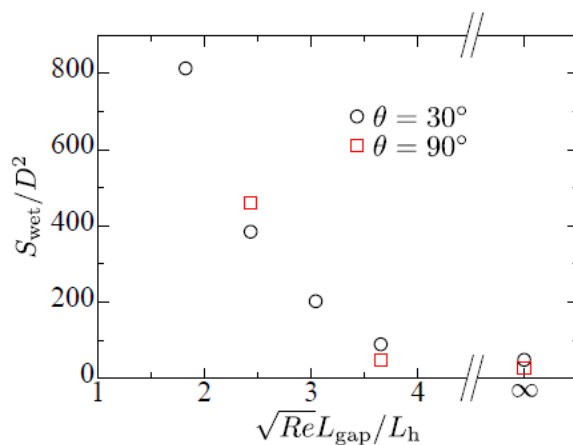
図 2：流量一定条件における単層構造上の液体の濡れ広がり（接触角 30° ）．表層では定常な濡れとなっているが，流下する箇所は液体の不安定性から流下位置が変動する場合がある．

濡れ面積は角柱間隔，粘度，濡れ性に依存するため，これらを特徴づけられる無次元数を議論し，図 3 にまとめた．横軸には液体粘度を反映するレイノルズ数と角柱間隔と角柱幅の比を採用した．縦軸は濡れ面積をノズル径で無次元化したものである．図 3 より，横

軸の値が大きくなるにつれて、すなわち粘度が低く角柱間隔が広くなるにつれて濡れ面積が減少することがわかった。横軸が無限大のところは単一角柱での濡れとなるため一定値となるが、複数の角柱に濡れている場合はおよそ反比例的の関係が得られた。これは流体の速度境界層厚さがレイノルズ数の平方根に反比例するという事実に鑑みると理解できる相関といえる。また接触角が異なる場合でも同様の相関が得られていることから、この相関図から濡れ面積を予測できることがわかった。



(a)液体粘度と角柱間隔の影響



(b)接触角を変えた場合の結果

図 3：濡れ面積に及ぼす支配因子との関係

①-2：積層構造

実機のステータコイルは何層にも積層されている。その場合、上部から流下した冷却液は各層を浸潤しながら最後は流下する。この

濡れ広がり調査のために、実機を参考にして各層の軸方向を 45 度ずつ交差した 4 層構造を対象として流動解析を実施した。この場合、解析領域が大きくなるために、軸対象となる領域半分を解析対象とした。また、非定常な現象であるため、気液を示す秩序変数や速度場のデータは時間・空間的に間引くことで、全体の現象理解を優先した。

定常な濡れにおいて、角柱間隔が異なる場合の結果を図 4 に示す。図では各層の液体をそれぞれ色付けしている。図からもわかるように、各層では角棒軸方向への濡れが下層の濡れに影響を与え、それが繰り返されることがわかる。角柱間隔が広いと単層と同様に表層での濡れ広がり面積は小さくなり、それが下層の濡れに影響することが分かる。

各層の濡れ面積を担当の場合と同様に無次元数で評価したものを図 5 に示す。やはり反比例の相関が見て取れ、下層に行くにつれて上にシフトしていることが分かった[3]。

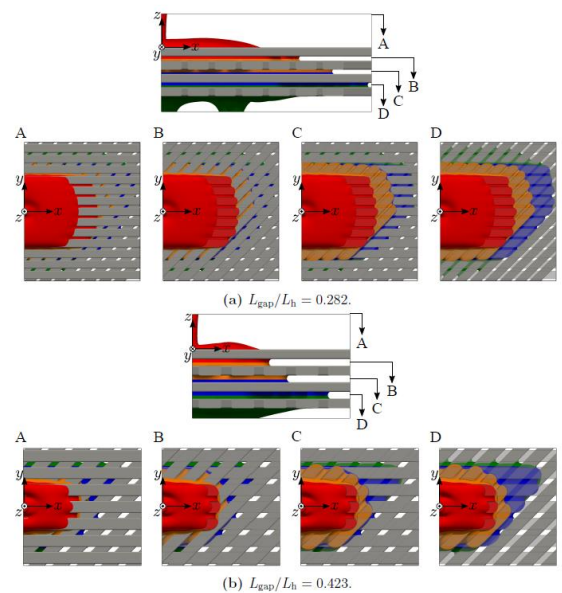


図 4：積層構造における濡れ（定常状態）。下層に浸潤するにつれて各層の軸方向へ濡れ広がる。

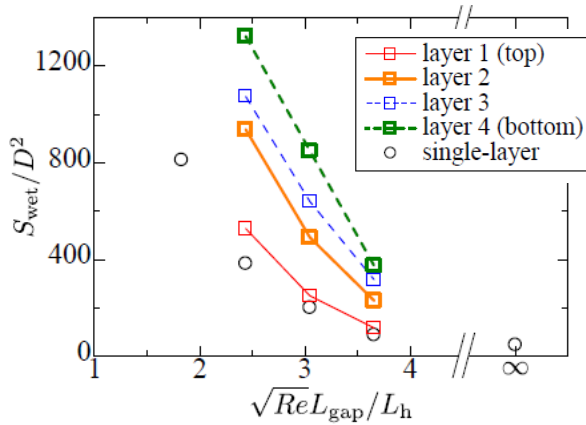


図 5：各層の濡れ面積と無次元数の相関

②温度場解析の実装

温度場解析も同様にフェーズフィールド LBM を採用した。まず研究室のワークステーションレベルでの検証が必要であったことから、使用メモリの少ない三次元 19 速度モデルを採用した。気液の共役伝熱を参考にして二相流解析にそのまま適用してみたものの、図 6 に示すように非物理的な温度場を呈することが判明した。

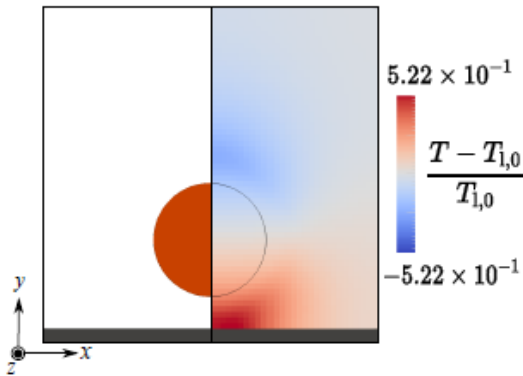


図 6：気液共役伝熱解析を落下液滴に適用した。発熱する条件は課していないにもかかわらず無視できない程度の温度変化が生じた。

そこで、熱輸送の支配的な箇所は固液であることに着目して、気相を一定温度と仮定して液相側に反映させる方法を試した。(なお気液界面を断熱条件にした場合の結果も良好ではなかった。) 平板に流下する液体に適用した結果を図 7 に示す。温度変化は生じないことが確認されたが、今後固体との温度差を

解析する際に、気相の温度一定条件が不利に作用することから、今後も検討していく必要がある。研究全体の目的が熱輸送についての議論であるため、今後の最重要課題と位置付けている。

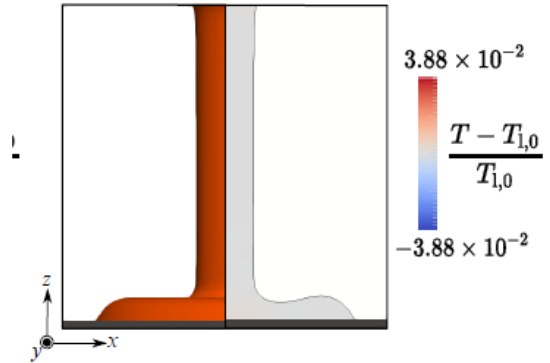


図 7：気相温度一定条件に変更して流下する液相内の温度を解析した結果。非物理的な温度は抑制できたが、これでは気液界面で等温条件を課していることになるため、そのままでは使えない。

③ロータ・ステータ間流動解析コードの作成と精度検証

2021 年度から新たに加えた内容として、回転するロータとその周辺のステータの間の狭隘部分における流動解析コードを構築した。一般的にテイラー・クエット流れと呼ばれるものである。しかしながら矩形格子で構成される格子ボルツマン法で解析しようとする流体部分の割合が小さいため、計算資源と時間を無駄に消費する。そこでデータの一次元配列化と GPU 実装に取り組んだ。解析モデルを図 8 に示す。二重円筒の内側が一定速度で回転し、外側の円筒は静止している。したがって、内円筒は移動境界条件を課した。解析ドメイン側面は周期境界条件とした。

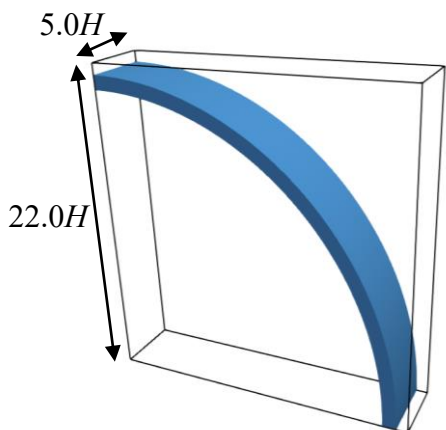


図 8：三次元テイラー・クエット流れの解析ドメイン

ロータの回転数を考慮し、乱流解析が行えるコードを作成した。ここでは精度検証としてレイノルズ数 1050 と 3500 の場合の周方向の速度分布と乱流エネルギーを図 9 に示す。なお、いわゆる層流におけるレイノルズ数で解析した結果は解析解と良好に一致したことを付記しておく。

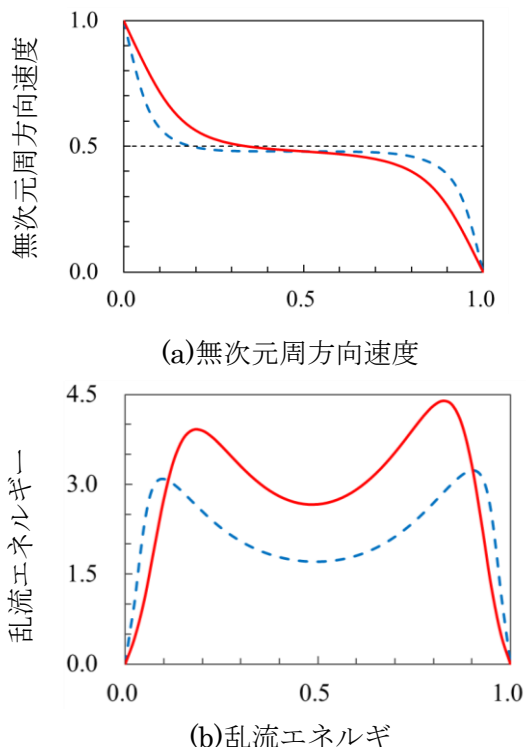


図 9：テイラー・クエット流れの解析結果。横軸は無次元化された内円筒から外円筒までの半径を示す。赤線が $Re=1050$ 、青線が $Re=3500$ の結果を示す。

④AMR 実装

メンバー間での情報交換をしながら、二次元解析系における AMR の実装を完成させた。混相流の AMR については物理量の補間が重要で、既往の方法では非物理的な相体積の増減を誘発する。ここでは格子ボルツマン法の式を確認しながら定式化を行い、簡略化したロータ・ステータ間の冷却液シミュレーションの結果を図 10 に示す。なお、液相の激しい挙動によって解析が不安定になることが判明したため、次年度は安定性を向上させた手法を開発する予定である。

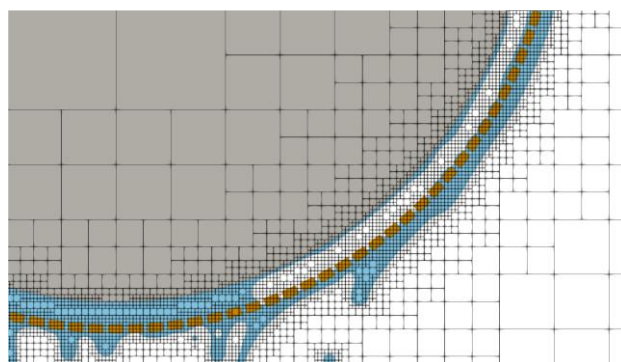


図 10：AMR 実装の一例。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

当初案の計画から比較すると、角柱群への二相流解析では目的はおおむね達成できた。しかしながら、相の移動変形がある状況での温度場解析が想像以上に困難であった。また、テイラー・クエット流れは良好な結果を得た。研究業績としても、学会発表から推薦された学術論文(2件)もあり、おおむね良好な進捗といえる。これらはメンバーの一人である杉本真氏の学位論文の一部となっている。AMR については二次元系ではあるが、二相系 LBM に実装できた。今後の展望としては、二相系 LBM の温度場解析の改良が必要である。テイラー・クエット流れにおいては実機に存在する溝の影響を検討する予定である。AMR については上述の通り、激しい液滴の飛散などで解析が破綻することが確認できており、その原因についても概ね判明

していることから、今後は格子ボルツマン法の衝突項に安定性を向上させた手法を組み合わせる予定である。

7. 研究業績一覧

(発表予定も含む。投稿中・投稿予定は含まない)

(1) 学術論文 (査読あり)

[1] M. Sugimoto, Y. Sawada, M. Kaneda, K. Suga, 'Consistent evaporation formulation for the phase-field lattice Boltzmann method', *Physical Review E*, Vol. 103, 053307, 2021.

[2] 杉本真, 宮崎巽也, 李澤林, 金田昌之, 須賀一彦, '水平角柱群に流下した液体挙動に関する数値解析', *混相流*, 第 36 巻 1 号, pp.128-135, 2022

[3] M. Sugimoto, T. Miyazaki, K. Suga, 'Coolant Wetting Simulation on Simplified Stator Coil Model by the Phase-Field Lattice Boltzmann Method', *Entropy*, Vol. 24, 219, 2022

(2) 国際会議プロシーディングス (査読あり)

M. Sugimoto, T. Miyazaki, Z. Li, M. Kaneda, K. Suga, 'Lattice Boltzmann simulation of liquid falling on horizontal rectangular pillar arrays', *Proceedings of ICCHMT 2021*.

(3) 国際会議発表 (査読なし)

M. Sugimoto, T. Miyazaki, Z. Li, M. Kaneda, K. Suga, 'Numerical simulation of the behavior of liquid flowing onto horizontal rectangular pillar arrays', *74th APS DFD*, 2021.

(4) 国内会議発表 (査読なし)

[1] 宮崎巽也, 杉本真, 金田昌之, 須賀一彦, '水平角柱群に流下した冷却液挙動に関する数値解析', *日本混相流学会混相流シンポジウム 2021*.

[2] 杉本真, 宮崎巽也, 李澤林, 金田昌之, 須賀一彦, '二相系格子ボルツマン法による水平角柱群への液の浸潤解析', *日本機械学会関西支部第 97 期定時総会講演会*, 2022

[3] 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*, 2022 年 6 月 (発表予定)

(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