

jh200039-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

複雑構造体の熱交換現象を詳細に解析するために、当研究グループで開発してきた相体積保存性の良い二相系格子ボルツマン法を用いて、表面張力が支配的な現象から慣性支配の現象を解析できるように改良した。実際の複雑構造への二相流れと比較して、定量的に良好な一致を確認できたことから、流れ場の解析についてはその妥当性を明らかにできた。温度場解析ツールを構築するにあたっては、その前に気液界面の蒸発を正確に考慮できるモデルの開発に取り組んだ。従来手法では LBM における気液界面の蒸発モデルを正確に考慮できておらず、他の解析手法とのハイブリッド化で対応していることから、LBM のフレームワークで解析できるようにする必要があった。蒸発モデルを実装した支配方程式の定式化から出発してモデル式を導出し、その妥当性を評価した。その結果、こちらでも定量的な一致を確認できる高精度なモデルを構築することができた。

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：気液二相熱流解析

和田賢伍：熱的条件の実装

長谷川雄太：カーネル作成

渡辺勢也：D3Q19 モデルの GPU 実装

瀬田剛：熱的境界条件構築

落ちる。

そこで対象物に冷却液を上から直接流下して冷却する方法、すなわち二相流を用いる方法がとられる。実際に自動車のモーターの電気コイル部の徐熱においてはケーシング内で冷却液を上部のノズルから流すことで冷却する方法がとられる。しかしながら、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。流体の分布を直接実験により可視化する方法も考えられるが、構造内部を撮影するための X 線や中性子線は実機への透過性が低く、構造内の液体の画像を取得することはできない。そこで数値解析となるが、複雑構造体に流下する二相流の挙動解析にくわえて、熱移動とその関連現象についても考慮する必要がある。

我々のグループでは、昨年度の JHPCN 課題 (jh190032) において申請者らは、多孔体に浸潤する液滴に関する高精度解析ツールを開発

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。現状では单相流の強制対流冷却が筆頭に挙げられるが、構造体の透過率が小さいと流体駆動に多大な力を要するうえ作動流体がスムーズに通過できず、よどみ点では伝熱係数が

し、液滴挙動を支配する要因を明らかにしてきた。本ツールは二相系格子ボルツマン法 (LBM) で課題となっていた相体積の保存性を解決し、さらに滑らかな物理界面において相体積保存性と併せて液体の濡れ性を適切に表現することができる。特に、凸部においては従来型の階段状近似と比較して飛躍的な精度向上が確認でき、物理界面に起因する相体積現象の影響も無視できるほど小さい (杉本, 金田, 須賀, 「Phase-field LBM による等方多孔体への微小液滴浸潤数値解析」, 日本機械学会論文集 2020)。そこで、このツールを拡張して比較的流祖のおおきい現象を解析することができれば、流下する液体の解析へと展開し複雑構造へ浸潤する液体挙動を解析できると考えた。さらに、温度場の解析を組み入れることができれば熱流動問題に展開することも可能となり、複雑形状の物性 (空隙率・透過率・屈曲度・濡れ性・熱拡散率) と液側の物性と条件 (粘度, 熱拡散率, 流速) における交換熱量の関係をも模索できるのではないかと考えた。そうすることで工業製品の熱設計にも寄与できる指標が明らかになる。以上より、二相系 LBM による複雑界面流動解析ならびに熱流動解析ツールの開発に着手した。

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 (密度および秩序変数) 使用した。このような大規模解析には研究室のワークステーションでは到底対応できるものではなく、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。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

該当なし

5. 今年度の研究成果の詳細

【流動解析】

本課題では流下する液体を解析対象とするため、昨年度の液滴の場合と様相が異なる。つまり、表面張力支配の現象から慣性支配の現象に軸足が変わるため、解析の可否について検討した。ここでは電子機器の代表的なものとして電気コイルを対象とするが、始めに現象理解のために解析系を単純化し、水平に並んだ矩形柱群の上から液体が流下する現象を対象とした。解析系の概要図を図 1 に示す。

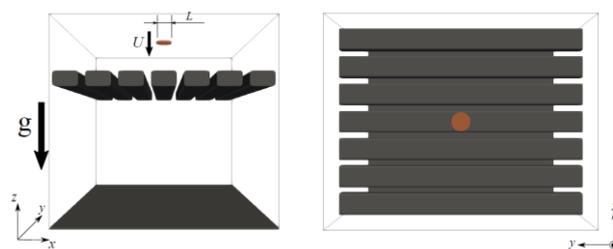


図 1 : 角柱群への液体流下解析モデル

このように角柱が水平に多数配列されており、ノズルから流下した液体が角柱群に流下する。流体の流入口 (図中上部中央) や流出条件が不適切な場合、内部の圧力が急上昇して解析が発散することが判明した。これは本解析では二相を同時に解析するため、両方の相体積の総和が常に一定であることが必要なためである。特に流出条件について様々な手法を試行錯誤して本問題を解決した。

解析は上述の通り二相系格子ボルツマン法を用いた。D3Q27 モデルの Phase-field LBM を採用し、修正 Allen-Cahn 方程式に帰着する相の移流方程式を、複数 GPU で解析し MPI で通信することで大規模解析に対応した。LBM の場合、

解析ドメインの大きさのみならず速度モデルと分布関数の数によっても必要とされるメモリ (GPU, メインメモリ) が異なる. ここでは解析精度を訴求するために速度成分の多いモデルを使用した.

解析に際しての作動流体の選定は, 物性値 (密度, 粘度, 表面張力) が容易に参照でき解析に組み入れやすく実現象と比較しやすい水と, 一部物性は不明であるが実機で用いられる冷却液 (ATF) とした (類似物質の物性を参照した).

ここで二相流解析に必要な情報として固液界面のインタラクションである接触角が挙げられる. 解析では動的接触角までは考慮できていないため, 参照値の取得のためにそれぞれの液体の微小液滴を角柱素材 (金属) に滴下して静的接触角を計測した. その結果, 水は比較的高い接触角であったためそのまま解析に導入することができた. 一方冷却液では油であるため角棒との濡れが非常によく, 一般的な二相流解析の解析可能範囲より低いことがわかった. そこで発散しない程度の接触角で検証し, さらに複数の接触角で解析することで現象への影響を検討した ($30^{\circ} \sim 90^{\circ}$). なお, 実機を参考にして角柱群の幅は 3.5 mm, 隙間を 1 mm とした. 流下する際のノズル径は 2.8mm とし, 角棒直上に 500ml/min で流下するとした.

水の解析結果の一例を下図に示す. 水は単一の角棒上を濡れ広がり, 複数への濡れ広がりには観察できなかつた. 角棒の隙間の水はそのまま下部へ流下した. これは水の粘性が比較的低く表面張力が高いことが主要因であり, 冷却の観点から考えるとこのような物性は不適であることが本解析から明らかとなった.

冷却液を流下した際の解析結果を図 3 に示す. 冷却液は複数の角柱群に濡れ広がることがわかった. さらに, 角柱群の隙間にもメニスカスとして存在できることがわかった. これは冷却液の粘性は水よりも高く, 表面張力は水よりも低いことが主要因であり, かつ接触角が低い

ため角柱群の隙間にも定在できることが明らかとなった.

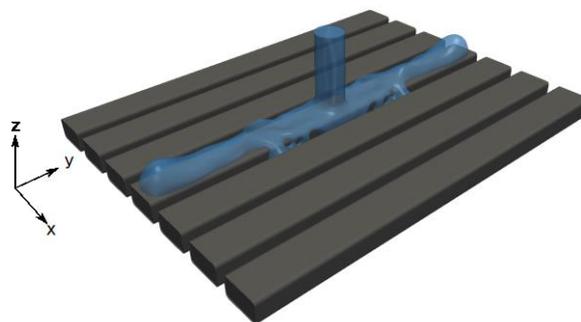


図 2 : 水の流下解析

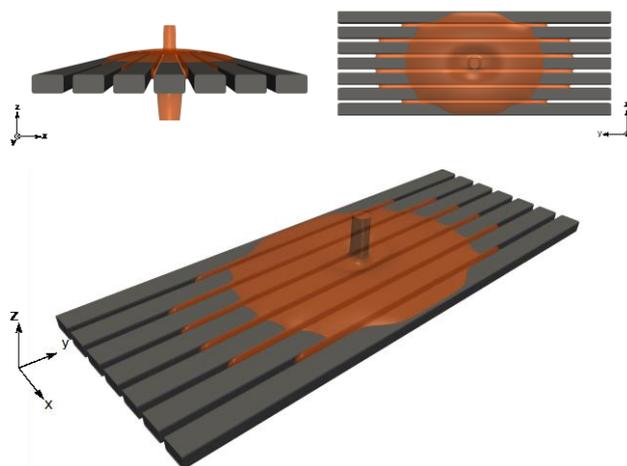


図 3 : 冷却液の流下解析

なお, 濡れ広がり本数に関して別途実施した実験で確認したところ, 水, 冷却液双方において定量的によく一致することがわかった. 以上から濡れ広がり現象を正確にとらえることのできるツールが完成した. また, 冷却液の流下解析において接触角の影響について調査した. 角柱上部に分布した液体のスナップショットを図 4 に示す. 図が示すように, 接触角が小さいほど濡れ広がる角棒の本数が増えることがわかる. この現象を詳細に調査するために, 濡れ広がり面積の継時変化を図 5 に示す. ここでも同様の傾向がみられ, 濡れ本数が増えた (= 隣接する角柱に濡れ広がる) 際に急激に濡れ面積が大きくなることがわかる.

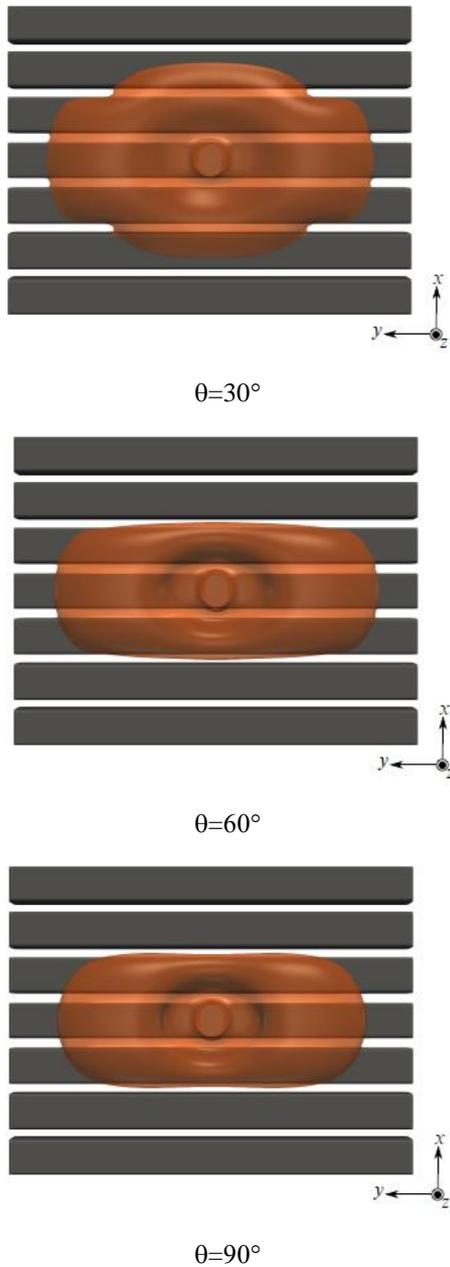


図 4：冷却液挙動のスナップショット
($t=2.25 \times 10^5 \delta t$)

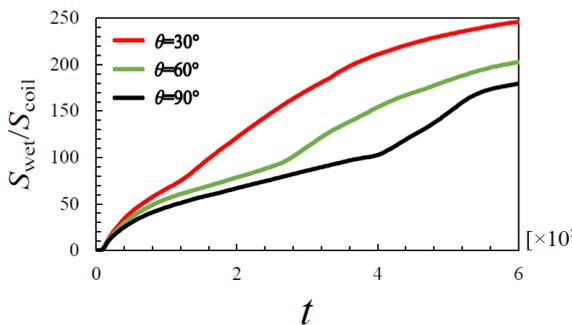


図 5：冷却液の濡れ広がり面積の経時変化

以上より、流体が柱群表面を濡れ広がりながら隙間より流下する解析を高精度に実施することができた。

【相変化モデルの開発】

二相系 LBM に温度場解析を実装する前に、気液界面で生じる蒸発を考慮できるモデルを開発した。元来他の流動解析手法では様々な報告があるが、LBM での報告は少なく、しかも蒸発速度を過剰に見積もる (Safari et al., 2014) ために、熱流動解析においては流動のみ LBM で解析し温度場は他の手法で解析するといったハイブリッド手法を採用している例が多い。このままでは大規模解析の強みを生かせないことから、蒸発を考慮した移流拡散方程式に帰着できる LBM の定式化を実施した。上記の論文の定式化手法で考慮できなかった箇所を正しく考慮し、格子ボルツマン方程式に付加項を追加することで、相変化による収縮および蒸発速度を正確に見積もることのできるツールを開発した。検証のため、平坦な界面からの蒸発を想定した場合の解析解と本手法とを比較した結果を図 6 に示す。既往の手法 (図中の Δ) では横軸の界面比湿が大きくなると蒸発フラックスが大きすぎていたが、今回の改良により、解析解と良好に一致する結果を得ることができた。

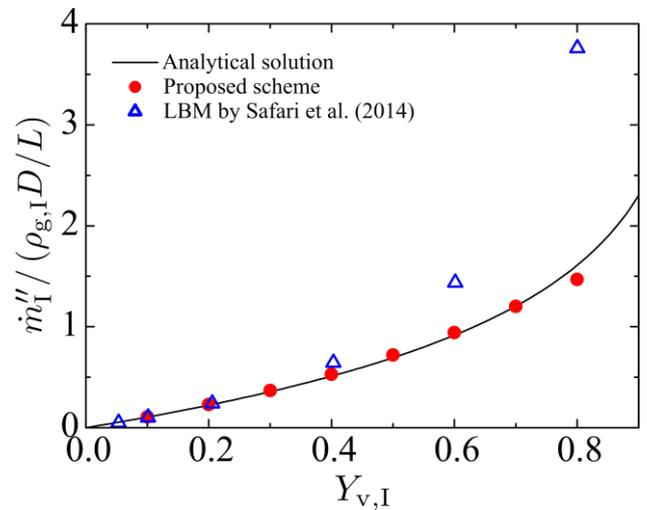


図 6：界面比湿に応じた界面からの蒸発フラックス。今回の手法 (○) が解析解と良好に一致。

次にこのアルゴリズムを蒸発液滴に展開した。図7に液滴まわりを拡大した解析系を示す(実際の解析系は初期液滴径の50倍の長さの解析ドメインを与え、気相の溶媒分布が蒸発速度に影響を及ぼさないだけの十分な領域を確保している)。

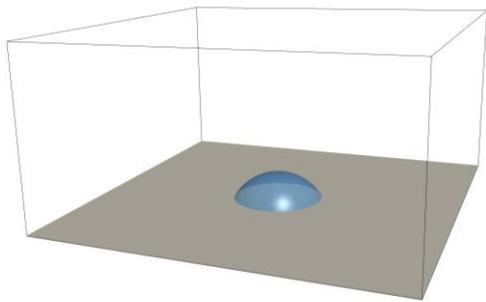


図7: 液滴解析(拡大図)

液滴体積の継時変化を下図に示す。接触角に応じて気液界面の蒸発速度分布が異なるため、液相体積の減少速度が異なること確認できた。

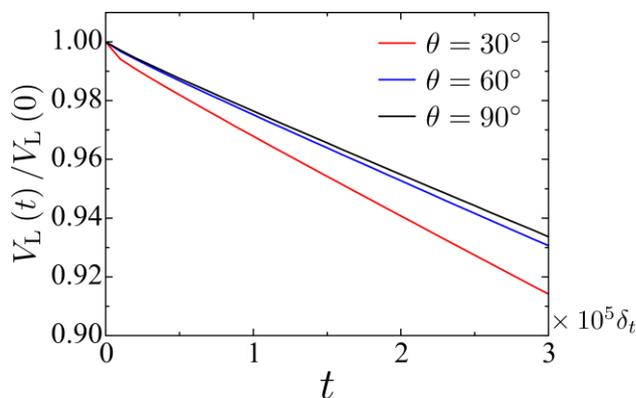
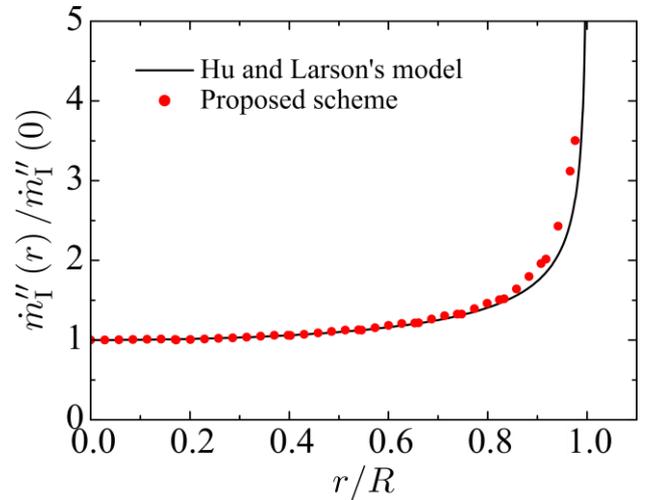


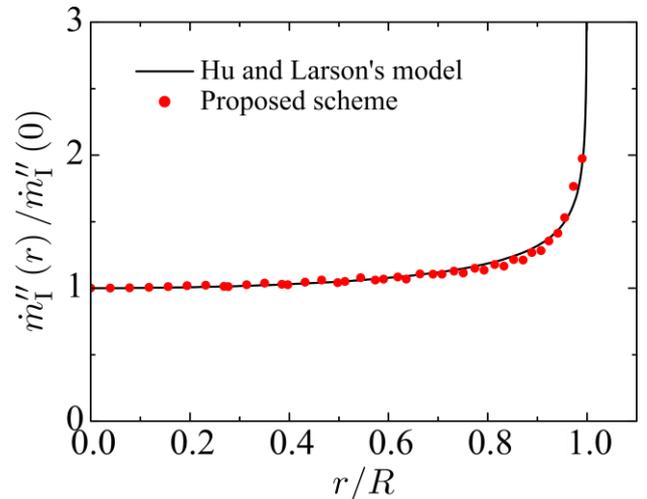
図8: 界面蒸発による液滴体積の継時変化

気液界面の蒸発速度分布についても議論した。図9に液滴の濡れ系に対する蒸発速度分布を示す。液滴の接触角が低くなると、接触線に向かって蒸発速度が大きくなることが知られており(Hu and Larson,),これが液滴蒸発後の成膜形状に影響を及ぼすことが知られている(Deegan et al.). 本解析においても蒸発速度分布を高精度に表現できた。これは今後の

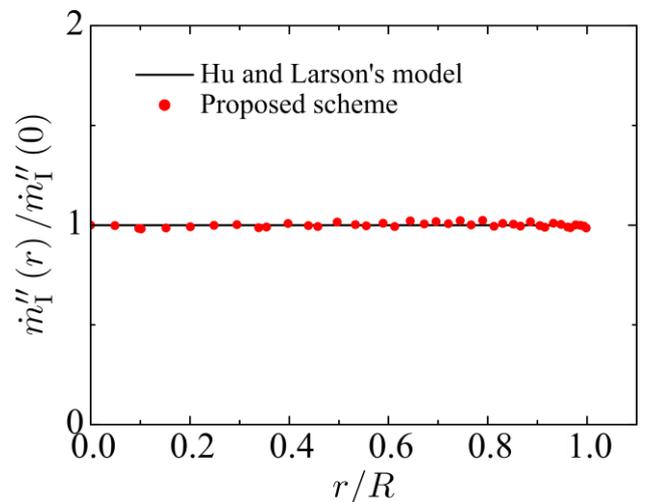
熱実装に向けての弾みとなるものであり、蒸発による熱輸送をも考慮できるツールへと拡張できる。



(a) 接触角 30°



(b) 接触角 60°



(c) 接触角 90°

図9: 気液界面の蒸発速度分布

さらに本解析では気相中の溶媒の分布とその移流拡散についても解析が可能となった。これは蒸発後の成膜形状など、様々な製造プロセスで課題となっていることを直接数値解析で説明できる可能性を秘めている。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

【今年度の進捗状況】

当初計画していた内容としては流下する二相流れの解析、複雑構造内の流れの解析、熱解析の実装と解析を挙げていた。今年度は熱解析の実装こそできなかったものの、角柱群に流下しつつ濡れ広がる解析については異なる作動流体においても定量的な一致を達成できた。本解析では濡れ性や粘度などのパラメータに依存して現象が変化するところまでを確認できた。また気液界面の蒸発モデルに関しては既知の手法の問題点を明らかにし、高精度なモデルを開発した。本内容を英文雑誌に投稿し、先ごろ掲載可となった。今後の展望としては、①熱解析の実装、表面張力対流の検討②濡れ広がり挙動のメカニズム解明（どのように隣接角棒に濡れ広がり、どのような支配パラメータが存在するのかを明らかにする。また角柱間の力のバランスを検討することで濡れ挙動への寄与を明らかにする）を考えている。

7. 研究業績一覧

(1) 学術論文（査読あり）

M. Sugimoto, Y. Sawada, M. Kaneda, K. Suga, 'Consistent evaporation formulation for the phase-field lattice Boltzmann method', Physical Review E., accepted.

(2) 国際会議プロシーディングス（査読あり） 該当なし

(3) 国際会議発表（査読なし）

M. Sugimoto, T. Okada, M. Kaneda, K. Suga, Phase-field lattice Boltzmann simulation for wetting phenomena in low capillary number,

SWEP WORKSHOP IN BRIGHTON, June, 2020.

(4) 国内会議発表（査読なし）

澤田 祐太, 杉本 真, 金田 昌之, 須賀 一彦, Phase-Field LBM への蒸発モデルの実装, 第 57 回日本伝熱シンポジウム (2020 年 6 月)

杉本 真, 澤田 祐太, 金田 昌之, 須賀 一彦, 蒸発を考慮した保存形 Allen-Cahn 方程式に基づく二相系格子ボルツマン法の開発, 日本流体力学会 年会 2020 (2020 年 9 月)

杉本 真 Phase-Field LBM への蒸発モデルの実装, 第 57 回日本伝熱シンポジウム優秀プレゼンテーション賞オンラインセッション (2020 年 9 月) 【優秀プレゼンテーション賞受賞】

杉本 真, 澤田 祐太, 金田 昌之, 須賀 一彦, 界面蒸発モデルを改良した二相系格子ボルツマン法の開発, 日本機械学会 関西支部第 96 期定時総会講演会 (2021 年 3 月) 宮崎 巽也, 杉本 真, 李 澤林, 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, 混相流シンポジウム 2021, (2021 年 8 月)

(5) 公開したライブラリなど

特になし

(6) その他(特許, プレスリリース, 著書等)

特になし