

jh180051

埋め込み境界法に基づく大規模混相流解析法の高度化と工学応用

高橋俊（東海大学）

本研究では、固気混相流、気液・固気液混相流の大規模解析手法の構築と工学応用によりメーカーや研究機関の研究開発に資する事を目的としている。固気混相流解析の応用先はショットピーニング加工におけるショット周りの非圧縮性流体解析、ロケット排気中の金属・水滴微粒子周りの圧縮性流体解析である。また固気液混相流解析においてはエンジンシリンダーピストン周囲のエンジンオイルの挙動予測解析、薄い水膜上を走行するタイヤの摩擦係数予測、ヒートパイプ内部の流動現象の調査である。これらはそれぞれ自動車メーカー、タイヤメーカー、研究機関との共同研究で取り組んでおり、これらにレベルセット法に基づく大規模固気液混相流解析手法を活用して今後の数値予測モデルの開発や物理現象の解明に取り組む。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

本共同研究は東北大学を共同研究拠点として東北大学の計算機・設備を利用して実施している。

(2) 共同研究分野

- 超大規模数値計算系応用分野
- 超大規模データ処理系応用分野
- 超大容量ネットワーク技術分野
- 超大規模情報システム関連研究分野

(3) 参加研究者の役割分担

本共同研究は、東海大学、東北大学、東北大学サイバーサイエンスセンター、東北大学流体科学研究所、金沢工業大学で共同研究を実施した。研究内容と研究機関の役割分担は以下の通りである。

東海大学：大規模混相流解析用ソルバ開発，検証

東北大学：検証用比較データ取得，理論解析

東北大学サイバーサイエンスセンター：超大規模解析用プログラム最適化，超大規模混相流解析

金沢工業大学：大規模非圧縮性流体解析

2. 研究の目的と意義

本研究の目的は、メーカーや研究機関の研究開発のための固気混相流、気液・固気液混相流の大規模解析手法の構築と応用である。固気混相流解析の応用先は非圧縮性流体解析によるショットピーニング加工におけるショットの詳細挙動予測、圧縮性流体解析によるロケット排気中の金属・水滴微粒子の挙動予測が目的であり、それぞれ複雑な加工面の高効率加工と、ロケット発射場を設計する際の発射時圧力波予測に用いる。一方で固気液混相流解析はエンジンシリンダーピストン周囲のエンジンオイルの挙動予測解析、薄い水膜上を走行するタイヤの摩擦係数予測、ヒートパイプ内部の流動現象の調査を目的としており、これらはそれぞれ自動車メーカー、タイヤメーカー、研究機関との共同研究で取り組んでいる。実際の工学応用という観点から本研究の意義は大きく、さらに大規模解析の応用例という観点でも非常に重要であると考えられる。

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

申請者は今まで東北大学サイバーサイエンスセンターと複数の共同研究を実施してきており、SXシリーズをこれまで使用してきた経験を有している。それにより、プログラム最適化の知識等も持

ち合わせており，工学応用が目的の出口型の研究では効率的な開発が求められることから，過去の経験を有しておりスピードある開発を実施できると考えて東北大学サイバーサイエンスセンターを拠点とした共同研究として申請した。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

前年度までに，固気混相流解析では図 1 のようなショットピーニングを模擬した 1000 個の微粒子を含む微粒子の運動—流体連成シミュレーションを実施し，定性的に我々の解析手法がショットピーニングの現象を模擬できることを示した。

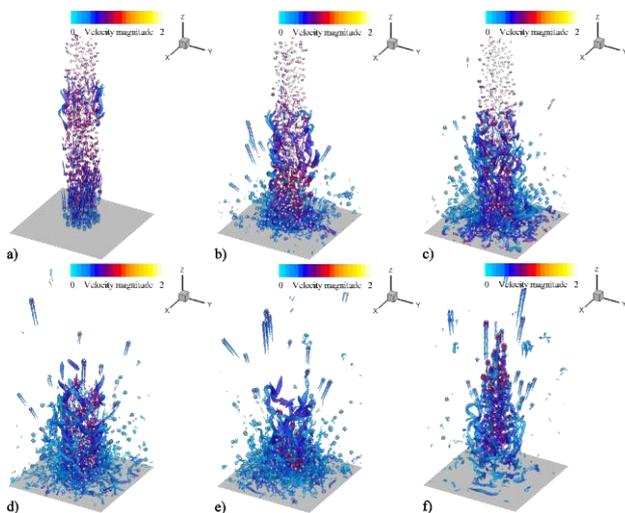


図 1 1000 個のショットの固気混相流解析

また圧縮性の固気混相流解析の例として，ロケット後流に含まれる微粒子周りの流れ場を解析して図 2 のように可視化した。非圧縮性の固気混相流解析の研究例は世界的にも数多く見られるが（その中でも本研究では世界最大級の微粒子数を解析可能であるが），圧縮性流体解析による固気混相流解析の研究例は未ださほど多くなく，今後はさらに粒子数と解像度を上げた大規模解析を実施することでロケット後流から生じる圧力波の影響と乱流促進効果を調査する必要がある。

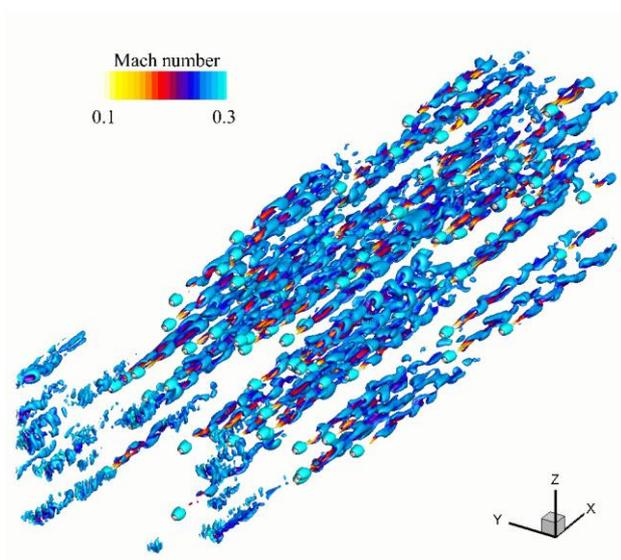


図 2 ロケット後流を模擬した圧縮性固気混相流解析

また気液二相流の解析例としてはエンジン内部のピストン周りのエンジンオイルの解析が図 3 のように実施された。こちらは戦略的イノベーション創造プログラムに基づいた解析例であるが，レベルセット法を用いたエンジンオイルの流動予測は世界的にも初めてと言ってよい解析例である。VOF 法による解析例は数少ないながら存在するものの，VOF 法ではピストンと流れの慣性力によって界面が一気に不明瞭となるため，エンジンオイルの流れが予測できないという弱点がある。そこで本研究ではレベルセット法に基づく解析を応用してエンジンオイルの流動挙動を定量的に予測しようとしている。

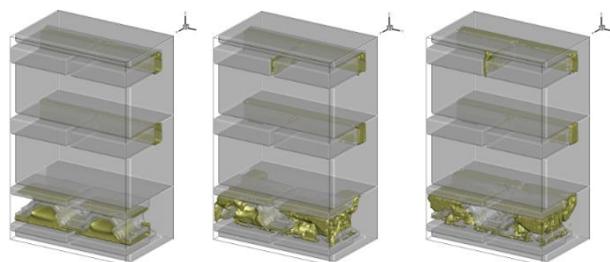


図 3 エンジン内部ピストン周りのエンジンオイルの気液二相流解析

5. 今年度の研究成果の詳細

今年度は図 1 から図 3 の解析をさらに進めるべ

く計算資源を申請したが、付与された計算資源が小さく図 1 から図 3 の解析を進めることは不可能であった。そこで現在までにはそれぞれのプログラムの性能比較やより高効率な手法を検討できないかを模索した。その結果、今年度はアルゴリズムの検証と高効率化を図り、またこれまでの結果に基づく論文執筆を行った。以下に非圧縮性解析と圧縮性解析手法を用いて SX-ACE によるストロングスケーリングを調査した領域配置と結果をそれぞれ図 4 と図 5 に示す。

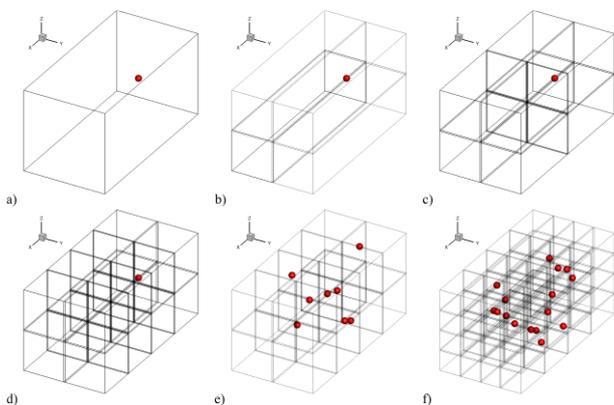


図 4 ストロングスケーリング調査の領域

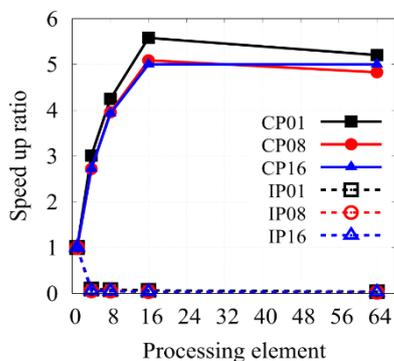


図 5 ストロングスケーリングの調査結果

図 4 のように、全領域に一つの微粒子を配置した場合と、各領域内部に一つの微粒子を配置した場合について調査を行った。図 5 の凡例は CP が圧縮性流体解析、IP が非圧縮性流体解析を指しており、圧縮性流体解析の方が 16 並列まである程度の速度向上率を示しているのに対して、非圧縮性流体解析の並列化効率が並列化に伴って一気に劣化していることが判る。これは非圧縮性流体解析

のアルゴリズム中には Poisson 方程式の内部反復が 50 回あるのに対して、圧縮性流体解析の方では Runge-Kutta の 3 回の内部反復であるために生じていると考えられる。今年度の計算資源はこれらのデータ取得によって大半が無くなりつつあるため、今後はこれをさらに向上させる方策等について検討を進め、今後の超大規模解析に活かせる知見を集める。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

今年度の調査によって非圧縮性流体解析を Poisson 方程式を用いて解析する従来型の手法で反復計算を行ない、かつ全ての反復において情報交換を行なった場合には並列化効率が非常に低下することが明らかになったことから、今後は新たなアルゴリズムを開発するか、もしくは情報交換の隠蔽か低減を図ることで並列化効率の向上に取り組む。

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

Y. Mizuno, S. Takahashi, K. Fukuda, S. Obayashi, “Direct Numerical Simulation of Gas–particle Flows with Particle–wall Collisions using Immersed Boundary Method”, Applied Sciences 8(12), 2018

(2) 国際会議プロシーディングス

Y. Kawamoto, S. Takahashi, M. Ochiai, “Numerical Simulation of Two-phase Flow around Piston Ring using Sharp Interface Method”, Proc. of Tenth International Conference on Computational Fluid Dynamics (ICCFD10), 2018

Y. Mizuno, T. Kubota, S. Takahashi, K. Fukuda, “Coupled Simulation of Flow–particle–structure Interaction of Shot Peening Process by Immersed Boundary Method and Finite Element Method”, Proc. of Tenth International Conference on Computational Fluid Dynamics (ICCFD10), 2018

(3) 国際会議発表

Y. Mizuno, T. Kubota, S. Takahashi, K. Fukuda, “Flow-Structure Coupled Simulation of Particle-Structure collision using Immersed Boundary Method and Finite Element Method”, International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences (ICCES), 2018

(4) 国内会議発表

川本裕樹, 佐々木竜一, 赤間勇太, 高橋俊, 落合成行, “自動車エンジン内部におけるピストンリングまわりの混相流数値解析”, 第 50 回流体力学講演会/第 36 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 2018

高橋俊, 川本裕樹, 佐々木竜一, 赤間勇太, 落合成行, “気液二相流解析によるピストンリング周りのエンジンオイル潤滑の解析”, トライボロジー会議春, 2018

水野裕介, 高橋俊, 野々村拓, 永田貴之, 福田紘大, 大林茂, “埋め込み境界法を用いた圧縮性・非圧縮性気液混相流解析の並列性能比較,”第 32 回数値流体力学シンポジウム, 2018

(5) その他（特許, プレス発表, 著書等）

水野裕介, 高橋俊, 福田紘大, “Euler-Euler 型解法を用いた多数運動微粒子周りの数値流体解析,” LABO ART, 日本機械学会誌, 第 121 巻, 第 1197 号, 42 頁, 2018 年 8 月