

jh140038-NA21

機械工学分野におけるシミュレーション科学の新展開

滝沢寛之（東北大学）

概要

機械工学分野では様々な数値シミュレーション技術が研究されているにもかかわらず、そのソフトウェア開発技術やスーパーコンピューター利用技術が共有されていると言いはない。また、スーパーコンピューターの利用技術は近年ますます高度化しており、機械工学分野の研究者がスーパーコンピューターの演算能力を引き出すために要する労力は年々増大している。本研究の目的は、現在上記の理由からスーパーコンピューターの本格的な利用に至っていない機械工学分野の先進的・萌芽的な数値シミュレーションを対象とし、スーパーコンピューターを有効利用した場合の性能向上とさらなる高度化・高性能化に必要な課題を明確にすることである。また、平成 26 年度には東北大学サイバーサイエンスセンターに新システムが導入される予定であることから、その先進的なシステム向けの高速度化技法を実アプリケーションに基づいて調査することは、計算機科学の観点から重要な課題である。すなわち、機械工学の研究者および計算機科学の研究者の双方にとって有意義な共同研究である。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

東北大学サイバーサイエンスセンター

(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

本研究代表者の滝沢や東北大学サイバーサイエンスセンター所属の共同研究者は、スーパーコンピューター利用技術やアプリケーション高速化支援に取り組んでおり、特にベクトル型スーパーコンピューターに関する研究成果は学術的に高く評価されている。その知見を活用して、機械工学分野の先進的・萌芽的シミュレーションコードのスーパーコンピューターへの移植や利用支援を行い、計算機工学分野の研究課題の発掘を行う。

共同研究者の福西らは、乱流中の階層的な渦構造の抽出を試み、その動力学の解明に取り組んでいる。

共同研究者の岡部は、熱硬化性樹脂による炭素繊維強化複合材料の成形および損傷を解析するために数値シミュレーションを活用している。

共同研究者の茂田らは、機能性ナノ粒子群の集団的成長過程の数理モデルと計算アルゴリズムの構築に成功し、それまで未解明であった粒子形成メカニズムに加え、実験において不均一な粒径組成分布が得られる理由も明らかにした。

以上のように、機械工学の共同研究者らはそれぞれの分野で非常にアクティブに活躍している第一線級の研究者ばかりであり、これまでに実用的な数値シミュレーションコードを開発してきた実績もある。しかし、様々な要因でスーパーコンピューターの本格利用には至っていない先進的・萌芽的な数値シミュレーションコードも依然として数多く持っていることから、本研究ではそのようなコードをスーパーコンピューターの本格利用につなげるモデルケースを積み重ねていくことで、計算機工学として検討すべき課題を模索・明確化する。

2. 研究の目的と意義

現在、スーパーコンピューターの理論演算性能は指数関数的に向上し続けており、その性能向上が機械工学分野で求められる数値シミュレーションの高度化・高性能化にも重要な貢献を果たしている。しかしながら、この急速な性能向上を継続するためにスーパーコンピューターは超並列化・

複雑化し続けており、その理論演算性能に見合うシミュレーション実行性能を引き出すためには計算機科学の高度な知識が必要不可欠となっている。本研究では、機械工学分野で特に重要な数値シミュレーションのスーパーコンピューター利用による高度化・高性能化の可能性を検討する。

本研究で対象とする数値シミュレーションは、それ自身が以下の観点から有意義な成果を期待できる重要な数値シミュレーションであるが、先進的・萌芽的研究段階であるためにスーパーコンピューターの本格利用には現在至っていない。このため本研究を遂行することにより、機械工学分野におけるスーパーコンピューターの利用促進とその結果として数値シミュレーションの高度化・高性能化の両方が期待される。

特に、平成 26 年度には東北大学サイバーサイエンスセンターに新システムが導入される予定となっている。その先進的なシステム向けの高速化技法を実アプリケーションに基づいて調査することは、計算機科学の観点から重要な課題である。

以上より、本研究課題は機械工学の研究者および計算機科学の研究者の双方にとって有意義な共同研究と考えている。

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

スーパーコンピューター利用技術の高度化により、機械工学分野におけるシミュレーション科学のさらなる発展には、構成拠点に所属する計算機科学分野の研究グループ、研究者の協力が必要不可欠である。本研究では、先進的あるいは萌芽的な手法に基づく数値シミュレーションを対象としており、本研究を遂行することによってスーパーコンピューターの本格利用につながることを大いに期待できる。また、研究代表者および大半の共同研究者が所属する東北大学機械系と同大学サイバーサイエンスセンターとは物理的に近く、頻繁に議論することができることから、密な連携を期待できる。

本研究を遂行することにより、機械工学分野におけるスーパーコンピューターの利用促進とその

結果として数値シミュレーションの高度化・高性能化が期待でき、機械工学の研究者および計算機科学の研究者の双方にとって有意義な共同研究と考えている。東北大学サイバーサイエンスセンターでは、長期にわたって継続的に利用者のアプリケーションの高速化支援を行ってきた実績がある。本研究においてもこれまで蓄積してきたノウハウを十分に活用して萌芽的研究を支援し、機械工学分野での成果につながることを期待できる。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

平成 25 年度には、当初計画の通り萌芽的シミュレーションコードの解析と高速化支援を成功裏に行うことができた。この短い期間内では各コードの大規模な修正を伴う MPI 化までを行うことはできなかったが、課題申請書に書かれた当初の期待どおり、SX-9 システムの比較的大きな計算ノードの活用により大幅な速度向上率を達成することができた。並列化を強く意識せずに書かれたコードをベクトル化とスレッド並列化のみで高速化したことを考えると、十分に高い速度向上率であると考えている。

平成 25 年度前半には対象シミュレーションコードの現状把握と性能解析を主目的とし、共同研究者の希望するすべてのシミュレーションコードをスーパーコンピューターで実行してコスト分析を行った。同年度後半には、その分析結果に基づいて、従来よりも大幅な高速化を期待できるコードとして、共同研究者 伊澤のコードおよび茂田のコードを選別し、その高速化支援を行った。

茂田のシミュレーションコードで最も高コストのサブルーチンでは、SOR 法による反復計算が行われている。SX-9 へ移植して高性能を達成するために、そのサブルーチンに対してベクトル化およびスレッド並列化を促進するコード修正を行った。カーネルループの改変により、作業配列の利用、OpenMP の指示行範囲の変更、および条件分岐回数の削減を行い、当該サブルーチンの約 6.9 倍の性能向上を達成した。これは、プラズマ近傍の渦の相互作用やナノ粒子群の空間輸送といった現実的な物理を工学的に有意な時間スケールを以ってシ

ミュレートするための大きな進展と言える。

一方、伊澤のシミュレーションコードの実行時間の大部分は高速フーリエ変換(FFT)に費やされており、研究室のパソコンレベルでの計算では Intel Math Kernel Library (MKL) が使われている。HPC Challenge Benchmark の Global FFT において、地球シミュレータ 2 が好成績を残してきた例からもわかる通り、ベクトル型スーパーコンピュータには FFT の実行において高い実効性能を期待できる。このため、本共同研究では、伊澤のコードの SX-9 向けチューニングを行った。FFT ライブラリを MKL から NEC 社製 ASL に変更するところから移植作業を始め、ベクトル化やスレッド並列化を進めることにより、従来の実行環境で達成していた性能の 76 倍の速度向上を達成することができた。この飛躍的な速度向上の意義は、単なるプログラム実行の高速化にとどまらず、乱流遷移を含む乱流現象の解明に関する研究の進捗を高速化するという観点からも有意義であると考えている。

本研究で対象とする数値シミュレーションは、それ自身が有意義な成果を期待できる重要な数値シミュレーションである。本研究で行う高速化支援と並行して、それぞれの分野でも成果を残している。

平成 25 年度に共同研究者であった東北大学の山本悟らは、蒸気タービンの効率やタービン翼の壊食に直接影響を与える因子である蒸気の湿りの絶対値の評価ならびに最大値の位置を把握することによって、蒸気タービンのさらなる高効率化ならびに高信頼化を目指している。本研究では、まず数値タービンの並列処理効率を検証するため、蒸気タービン最終三段静動翼列の非定常湿り蒸気流れについて全周を仮定して計算した場合の計算加速率を算出した。その結果、計算ノードを増加させるだけでは高速化の効果が限定的であることから、周方向の流動が周期的であると仮定して、翼列流路 13 ブロックに簡略化した計算格子に対して非定常解が求まるまで計算した。そのシミュレーションから、凝縮により生成された液滴は下流に行くに従って成長し、三段目動翼下流域では

最大 4.8% の湿り度が得られた。また、湿り度は各翼列の後流の影響を受けながら増加していることも示されている。

共同研究者の岡部らは、分子シミュレーションを用いて硬化反応シミュレーションおよび引張シミュレーションを行うことにより、エポキシ樹脂の機械特性を調査した。分子シミュレーションは、大規模系(分子数が多い)であるほど高精度であるが、その反面一般的なパソコンでは計算時間がかかることが課題であった。そこで、本研究ではスーパーコンピュータ Express5800 を用いて、大規模系で分子シミュレーションを行いエポキシ樹脂の機械特性を調査してきた。オープンソースコード LAMMPS を用い、スーパーコンピュータ Express5800 を使用しエポキシ樹脂の引張シミュレーションを行った結果、計算時間が大幅に短縮され、大規模系の構造で短時間に多くのサンプルを得ることが出来た。大規模系により詳細に分子構造を議論できるだけでなく、計算時間の短縮化により多くの計算結果(サンプル)を取り機械特性の傾向を比較・考察することが可能となった。

共同研究者の福西、伊澤らは、境界層遷移及び乱流素過程の動力学明らかにすることを目指している。平成 25 年度には、まず境界層遷移についてバイパス遷移が起こる際に現れるストリーク構造とこれらが発達して形成される局所的な乱流領域(乱流斑点)の関係に着目し、人為的に発生させた低速のストリークに対して壁面から噴流を吹くことで流れ場がどのように変化するのかについて調べ、乱流斑点が生成しやすい“外部刺激”の条件について探った。また、乱流の研究については、スーパーコンピュータを利用して大規模乱流の直接数値計算(DNS)データの解析を進めた。乱流はスケールの異なる渦の集合体であり、個々の渦の運動を議論するためには、まずスケールの分離を行わねばならない。しかし、一般に渦の抽出に用いられる単純なフーリエバンドパスフィルタでは、渦は波動として扱われるため、議論の際には注意が必要である。この研究では、渦度の各成分に対して直交する面内にもみフーリエバンドパス

フィルタを適用することで渦の実態に即したスケール分離を試み、階層的な渦の相互干渉について調査を行った。その結果、慣性小領域にある渦は、乱流レイノルズ数に関わらず自身の 2 倍程度大きいスケールの渦が作る速度場によって引き伸ばされる傾向があることに加えて、自身より小さい渦は引き伸ばしには寄与しないことが明らかになった。

平成 25 年度、共同研究者の茂田らは、プラズマトーチ内の 3 次元流動現象を明らかにするための数値シミュレーションを行った。その結果得られた熱流動場の温度分布や流線から、プラズマトーチ内は 3 次元的で複雑な熱流動場となっており、しばしば仮定される軸対称 2 次元の場とは程遠いものとなっていることが示された。

5. 今年度の研究成果の詳細

共同研究者伊澤らの乱流の研究については、前年度に引き続き、大規模乱流の階層的な渦運動の解析を進めている。解析にあたっては、東北大学サーバーサイエンスセンター技術支援担当職員の手によって高速化されたシミュレーションコードを活用しながら行った。慣性小領域における渦の本数やアスペクト比、またその幾何学的な位置関

係といった情報がレイノルズ数に依存しないことが明らかになった。このことは、乱流中の階層的な渦構造には自己相似性があることを意味しており、乱流を特徴づけているエネルギーカスケードを理解するうえで重要な手掛かりである。

同じく伊澤らが行っている平板境界層の受容性と乱流遷移に関する研究では、低速ストリークに対して噴流を噴射することでバイパス遷移させた境界層を取り上げ、乱流がどの地点からどのように始まったのかについて解析を行っている。現在までのところ、境界層中で渦が伸長しはじめると渦構造の体積も増加に転じることがわかっており、詳細についてさらに調べを進めているところである。

共同研究者の岡部らは、分子シミュレーションを用いて硬化反応シミュレーションおよび引張シミュレーションを行うことにより、熱硬化性樹脂の

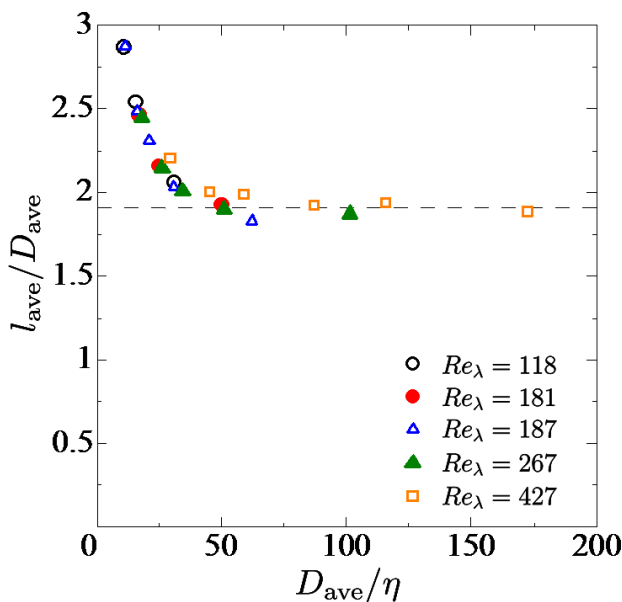


図 1 渦の大きさとアスペクト比

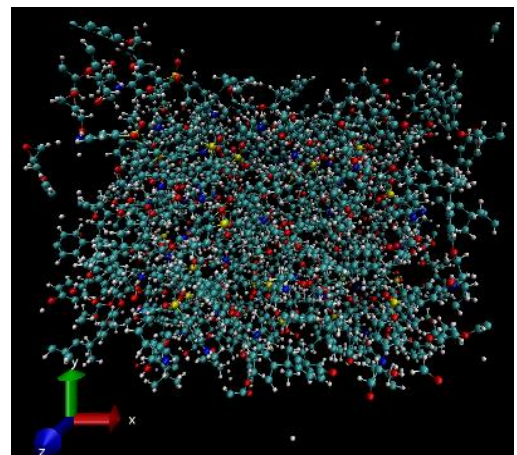
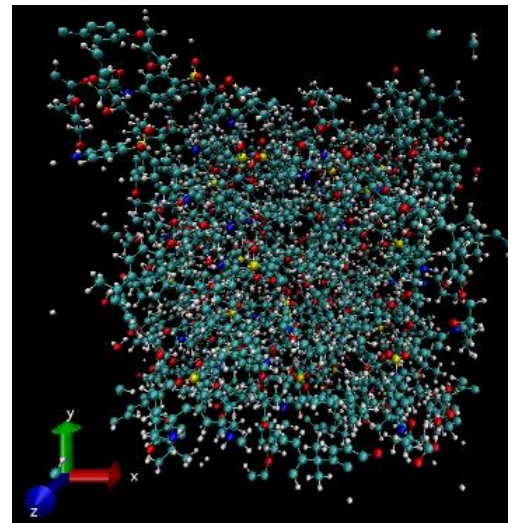


図 2 単軸引張シミュレーションにおける分子構造の変化 (a)ひずみが 0% (b)ひずみが 30%

機械特性を調査している。熱硬化性樹脂の機械特性は、それを構成する高分子の種類、組み合わせにより大きく影響される。これを実験的に予測することは多大な時間的・金銭的コストを浪費する。そのため、分子シミュレーションを用いてその特性を予測できれば樹脂開発の低コスト化、短時間化に大きく貢献できる。分子シミュレーションにおいては通常 $10^3 \sim 10^5$ 個の粒子が用いられる。これらに対し二体間相互作用のポテンシャルエネルギーの計算を行うため、その計算回数は膨大である。また、通常分子シミュレーションで使用される時間はフェムト秒で記述されるため、1 ナノ秒というごく小さな時間の計算でさえ 10 万回もの反復試行が必要になる。これらの理由により分子シミュレーションの計算においては高度に並列化され高速化されたスーパーコンピュータの使用が必須である。

本年度前半には、使用する高分子の種類を変えた 2 パターンのエポキシ樹脂をコンピュータ上で作成した。これらに対し単軸引張シミュレーション(図 2)、せん断シミュレーションを行い、その機械特性を予測した。これらの結果は実験結果を定性的にはあるが再現した。

また、複合材料中の樹脂の応力状態を再現する三軸引張シミュレーション(図 3)も行った。そ

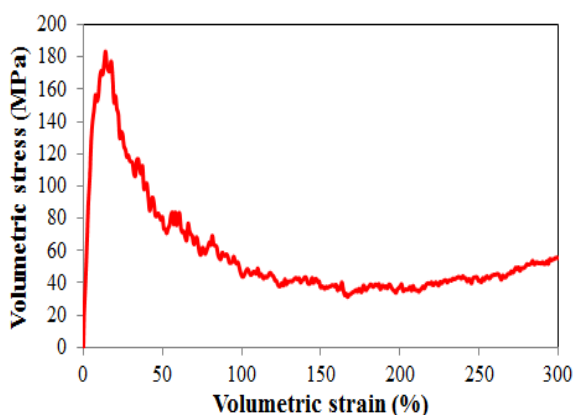


図 3 三軸引張シミュレーション 応力ひずみ線図

の結果、応力ひずみ線図は明確な降伏点を示した。この三軸引張シミュレーションはトランスバース荷重下の炭素繊維複合材のマトリクス樹脂の応力状態を再現しており、炭素繊維複合材の破壊予測の鍵となると考えている。

本年度後期では、前期に用いた樹脂 2 種類に新たに 2 種類の樹脂を加えた計 4 種類の樹脂の硬化特性と密度や弾性率といった機械特性を評価した。その結果、図 4 に示すように実験と解析において非常に類似した硬化曲線の形状および各樹脂の硬化しやすさを再現することができた。密度の評価においては誤差 2%以内という非常に高い精度でこれを予測した。弾性率も誤差 10%以内という精

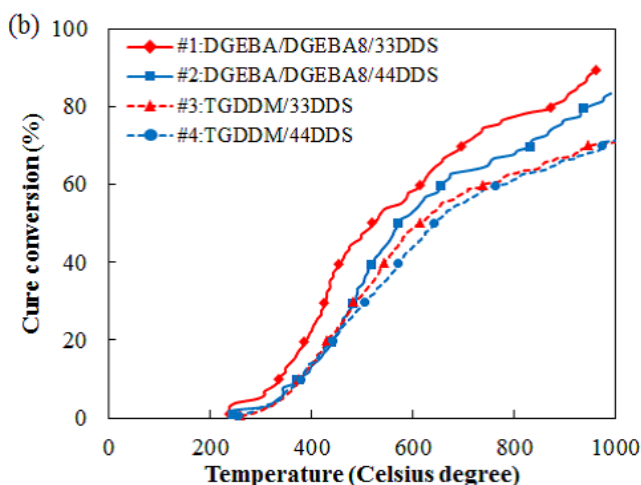
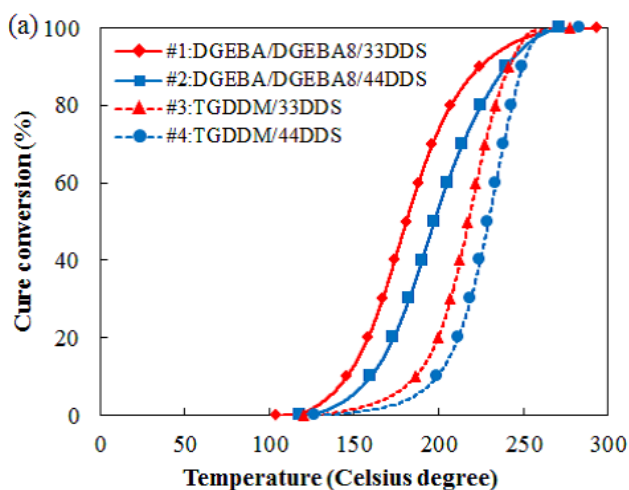


図 4 硬化曲線 (a)実験 (b)解析

度で予測を行うことができた。これらの特性の予測に加えて、密度や弾性率がどのような要因によって左右されるかを調べた。その結果、これらの値はファンデルワールス力やクーロン力といった非結合の相互作用力に大きな影響を受けていることがわかっており、今後はその詳細について調べをすすめているところである。

共同研究者の茂田が取り組んでいるプラズマジェットを利用したナノ粒子創製プロセスは、材料蒸気から核生成・凝縮・凝集を経る相変化過程にあるナノ粒子の集団が 1 万°C を超えるプラズマと周囲の非電離気体の混合流動場において移流-拡散輸送される非常に複雑なプロセスである。

図 5 にノズルから右方向に噴出されたアルゴンプラズマジェットによる鉄ナノ粒子の集団形成と輸送プロセスの瞬間像を示す。高温のプラズマジェットが周囲の低温の非電離気体を巻き込み、下流域で崩壊することでより複雑に混合することがわかる。この混合による温度低下領域においてプラズマジェットと共に輸送された鉄蒸気はナノ粒子群へと相変化するため、その空間分布も複雑なものとなる。本計算により、ナノ粒子濃度の低い領域において粒子サイズが大きくなることが示されており、ナノ粒子形成において凝集による合体成長プロセスも重要な役割を果たしていることが示唆されている。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

本年度前半は、年度内に運用開始予定の SX-ACE システムへの速やかな移行を見据えながら、東北大学サイバーサイエンスセンターで運用されていた SX-9 における対象アプリケーションの最適化に取り組んだ。

サイバーサイエンスセンターで運用されていた SX-9 は大規模 SMP 構成 (16CPU, 1TB) となっており、その大規模な SMP をコンパイラの自動最適化機能によって効率的に利用可能であった。一方、平成 26 年度 2 月に運用を開始した SX-ACE では、1 ノードが 1CPU, 64G となっており、SX-9 に比べて小さな SMP 構成となっている。このため、大規模な実

行のみならず、これまで利用してきた SX-9 の 16CPU と同等、それ以上の性能を得るためには、MPI を用いたプロセスレベル並列化が必須となる。また、SX-ACE は SX-9 と同様に強力なベクトル命令を有することから、ベクトル化率の向上は双方のシステムの潜在能力を引き出すためには必須の最適化である。このようにシステム構成が大きく変化したことから、平成 26 年は特にベクトル化をはじめとするノードレベルの性能最適化、および SX-ACE で必須となる MPI 並列化に向けた検討を行った。

共同研究者茂田のシミュレーションコードに関しては、昨年度に引き続き、現状のコードのノードレベルの最適化と、3 次元解析版の並列化の検討等を行った。特にノードレベルの最適化においては、シミュレーションコード実行時間の 43.5% を占めるサブルーチンにおいて、スカラ変数を配

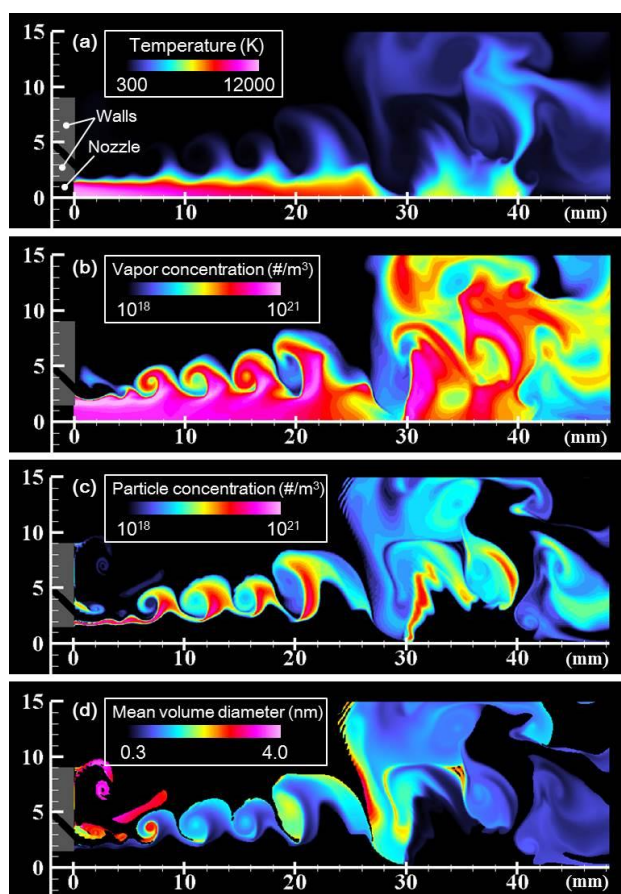


図 5 プラズマジェットによる鉄ナノ粒子の集団形成と輸送プロセスの瞬間像:(a) 温度場, (b) 鉄蒸気濃度, (c) 鉄粒子濃度, (d) 平均粒子径。

列に置き換える最適化を行い、当該サブルーチンのベクトル化率を 26.13%から 99.58%に向上させることができた。その結果として、当該サブルーチンの実行時間を 1/12、シミュレーションコード実行時間における当該サブルーチン実行時間の占める割合を 4.9%と大幅に削減することができた。この最適化は SX-ACE においても有効であることから、シミュレーションコードの高度化を進める上でも有意義である。平成 26 年度後期には、本コードの SX-ACE へ向けた最適化を行った。SX-ACE のメモリ容量は SX-9 と比較して小さいため、本コードを動作させるためには MPI による並列化が必要不可欠である。このため、本コードの MPI 並列化を行い、結果出力部分を除いて MPI 並列化作業が完了している。この MPI 並列化されたコードを用いることにより、従来よりも大規模なシミュレーションを実行することが可能となった。その結果として、機械工学分野での今後の成果を大いに期待することができる。

共同研究者伊澤らのシミュレーションコードの実行時間の大部分は高速フーリエ変換 (FFT) に費やされており、これまでにスレッド並列化、SX-9 向け ASL ライブラリを用いることで、大幅な性能向上を達成してきた。本年度前期は問題サイズに応じた適切な FFT 関数の検討を取り組み、SX-9 における実行効率約 30%を達成できることを確認した。また、当該コードにおいて、3 次元 FFT が適用されるのは $2,048 \times 2,048 \times 2,048$ の複素配列であり、その容量は 128G バイトとなる。さらに、本シミュレーションコードが対象としている乱流現象の解明のためには、問題サイズを現在の 64 倍とすることが求められている。このため、ノード当たりのメモリ容量が 64G バイトとなる次期システムにおいて、これらのシミュレーションを実行するためには MPI 化が必須である。本年度前半には、シミュレーションコード全体の MPI 化に先駆けて、実行時間の割合の大きい FFT 部分の MPI 化を試みた。その結果、マルチノード環境での 3 次元 FFT 演算の動作確認を行うことができた。さらに、平成 26 年度後期には並列化の基本方針について議

論を重ね、その方針を決めることができた。

これまで、伊澤らの研究グループは高性能計算システムの利用に消極的であったが、本研究課題を進展させることにより、自らが代表となって JHPCN に応募し、採択されるに至った。今後はシステム規模の大きい SX-ACE での実行を対象として考え、本シミュレーションコードの超並列化の支援を引き続き行っていく予定である。

以上のような高速化支援を行ってきた経験から、頻出するコード最適化のパターンがいくつか存在することが明らかになっている。平成 26 年度はそれらの頻出パターンを文書としてまとめ、同じ SX-ACE を運用する情報基盤センター間で共有するための準備を行った。

また研究代表者らは、コード最適化のノウハウをコンピュータで利用可能な形式で表現するための研究開発も JST CREST 「進化的アプローチによる超並列複合システム向け開発環境の創出」において行っている。平成 26 年度には、本研究課題を遂行することによって得られた頻出パターンのいくつかを、コンピュータで再利用可能な XML 形式で記述できることを確認した。今後、そのような頻出パターンのデータベースを整備していくことにより、高速化支援に関する集合知の蓄積、共有、および教育に貢献できるものと考えている。

7. 拠点及び共同研究先のセンターへの要望

東北大学サイバーサイエンスセンターにて高速化支援に精力的に従事している、東北大学情報部情報基盤課共同利用支援係の山下毅氏、東北大学情報部情報基盤課共同研究支援係の佐々木大輔氏および森谷友映氏に感謝の意を表す。

8. 研究成果リスト

- (1) 学術論文
- (2) 国際会議プロシーディングス

1. Masaya Shigeta: Fluid-dynamic simulation of growing nanoparticle transport in plasma synthesis, Abstracts of International Union of Materials Research Science - The 15th

IUMRS International Conference in Asia (IUMRS-ICA2014), Fukuoka, Japan, (August 24-30, 2014), CD-ROM, D2-028-003.

2. Masaya Shigeta: 3D fluid dynamic modelling of induction thermal plasmas, Abstracts of International Conference on Microelectronics and Plasma Technology 2014 (ICMAP2014), Gunsan, Korea, (July 8-11, 2014), HEP-FrM-4 (招待講演).
3. Yoshihisa Kobayashi, Masato Hirota, Yu Nishio, Seiichiro Izawa and Yu Fukunishi: Mutual interaction of multi-scale vortices in homogenous isotropic turbulence, 6th International Conference on Vortex Flows and Vortex Models, Nagoya, Japan, (November 17-20, 2014), CD-ROM.
4. Joe Yoshikawa, Yu Nishio, Seiichiro Izawa and Yu Fukunishi: Identification of Local Turbulent Regions in a Transitional Boundary Layer Using Wavelet Transformation, 11th International Conference on Flow Dynamics, 2014.
5. Yoshihisa Kobayashi, Masato Hirota, Yu Nishio, Seiichiro Izawa and Yu Fukunishi: Mutual interaction of multi-scale vortices in homogeneous isotropic turbulence, 6th International Conference on Vortex Flows and Vortex Models, Nagoya, Japan, (November 17-20, 2014), CD-ROM.
6. Masaya Shigeta: Numerical investigation of axial magnetic field effect on nanopowder formation around a thermal plasma jet, Proceedings of 7th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma2015)/8th International Conference on Plasma-Nano Technology & Science (IC-PLANTS2015), Nagoya, Japan, (March 26-31, 2015), C1-0-01.

(3) 国際会議発表

1. Masaya Shigeta: Numerical Schemes for Thermal Plasma Flow Dynamics, (招待講演) Gordon Research Conference (ゴードン研究会議), Plasma Processing Science "Many Scales, Many Applications, One Discipline", (July 29, 2014), Smithfield (RI), USA.
2. Joe Yoshikawa, Yu Nishio, Seiichiro Izawa and Yu Fukunishi: Wavelet-based identification of localized turbulent regions in a transitional boundary layer, The 67th Annual Meeting of the American Physical Society's Division of Fluid Dynamics (DFD), San Francisco, USA, (November 23-25, 2014), p.68.
3. S. Izawa, Y. Kobayashi, Y. Nishio, Y. Fukunishi: Extraction of hierarchical vortices from turbulent field using component-dependent filter, Japan-Russia Workshop on Supercomputer Modeling, Instability and Turbulence in Fluid Dynamics (JR SMIT2015), Moscow, Russia, (March 4-6, 2015).
4. Ryusuke Egawa, "Code Optimization Activities toward Sustained Simulation Performance," 20th Workshop on Sustained Simulation Performance, Dec. 15-16, 2014. (招待講演)
5. Hiroyuki Takizawa, "What can we do to fight with system diversity?," 21st Workshop on Sustained Simulation Performance, Feb. 18-19, 2015. (招待講演)
6. K. Tanabe, Y. Oya, T. Okabe: Evaluation of mechanical properties of epoxy resin by molecular dynamics simulation, Next Generation Transport Aircraft Workshop 2015, Seattle, USA, (March 20, 2015).

(4) 国内会議発表

1. 茂田 正哉: 熱プラズマプロセスにおけるナノ粒子群の集団成長および輸送過程の簡易非平

衡モデル, 第 63 回理論応用力学講演会 講演論文集, 東京, (2013 年 9 月 27 日発表), OS05-02-03, USB メモリ.

2. 茂田 正哉: 熱プラズマジェットに輸送されるナノ粒子群の集団的形成過程の数値シミュレーション, 日本流体力学会 年会 2014 USB メモリ講演論文集, 仙台, (2013 年 9 月 17 日発表), 122, USB メモリ.
3. 茂田 正哉, 田中 学: プラズマ流への外気巻き込み過程を捉えるための数値計算手法の提案, 溶接学会 平成 26 年度秋季全国大会 講演概要 第 95 集, 宇奈月温泉, (2014 年 9 月 10 日発表), pp. 200-201.
4. 吉川 穰, 西尾 悠, 伊澤 精一郎, 福西 祐: 遷移境界層中の乱流初生領域における渦構造, 第 92 期流体力学部門講演会講演論文集, (2014-10), USB メモリ.
5. 小林 吉久, 廣田 真人, 西尾 悠, 伊澤 精一郎, 福西 祐: 非等方バンドパスフィルタによる乱流中の渦構造抽出とその解析, 日本流体力学会年会 2014, USB メモリ講演論文集 (2014-9).
6. 吉川 穰, 西尾 悠, 伊澤 精一郎, 福西 祐: 遷移境界層中の乱流初生領域における渦構造, 第 92 期日本機械学会流体力学部門講演会講演論文集, (2014-10), USB メモリ.
7. 茂田 正哉: 熱プラズマ流を利用したナノ粉末量産プロセスにおける諸現象のモデリング, 日本機械学会関西支部第 15 回秋季技術交流フォーラム, (2014 年 11 月 1 日), 姫路. (基調講演).

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)