

JH130002-NA02

鉄鋼材料におけるマイクロ組織形成マルチフェーズフィールドシミュレーションの大規模 GPU 計算技術の構築

山中晃徳（東京農工大学）

概要

本研究では、極めて高い演算性能とメモリバンド幅を有する GPU を多数使用し、マルチフェーズフィールド(MPF)法による金属材料のマイクロ組織形成シミュレーションの高速化および大規模計算を実現することを目的とした。中間報告時までには、計算と並列計算のためのデータ通信を非同期実行するためのオーバーラッピング法を適用した MPF 法の計算手法を TSUBAME2.5 スーパーコンピュータに実装し、多結晶粒成長シミュレーションにおいて良好なスケーリング性能が得られ、大規模シミュレーションを実行することに成功した。本最終報告書では、その成果を整理するとともに同計算手法が合金元素の拡散を伴う実用鉄鋼材料中でのマイクロ組織形成シミュレーションにおいても有効であり、当初計画の目的を達成したこと示す。

1. 研究の目的と意義

高い燃費性能を有するハイブリッド自動車や航空機などの開発には、革新的な材料の開発が不可欠である。特に、鉄鋼材料は安価でありながらも高強度で加工性が良いため、社会を支える基盤材料として広く使用されている。したがって、従来よりも軽量で高強度な鉄鋼材料の作製が可能となれば、社会に非常に大きなインパクトを与えることになる。

鉄鋼材料の強度や延性などの機械的特性は、材料内部のマイクロ組織 (μm オーダーの結晶粒や析出物など) の分布状態や形態に大きく影響され、製鉄工程の温度や変形を制御することで様々な特性を有する材料を作ることができる。鉄鋼材料の研究開発は、極めて長い間行われているが、鉄鋼材料中のマイクロ組織は、あらゆる金属材料の中でも極めて複雑であると言え、長年蓄積された知見をもってしても、マイクロ組織の形成機構について未だ明らかになっていない点も多い。したがって、無限の組み合わせがある製鉄プロセスの条件から材料中に作り込まれるマイクロ組織や機械的特性を実験的なアプローチのみで理解し、それを予測することは、事実上不可能であると言える。

したがって、近年では数値シミュレーションを援用して、材料中のマイクロ組織形成を解析し、実験では観察や分析が難しい現象を理解するための

技術開発が活発に行われている。実際に、米国では、マテリアルゲノムイニシアティブプロジェクトが実施され、日本でもマテリアルズインフォマティクスの潮流が生まれている。

近年、材料中のマイクロ組織形成過程の数値シミュレーションを行うための計算手法のなかでも、金属材料のマイクロ組織形成過程を解析する強力な方法としてフェーズフィールド法が注目されている。今日では、フェーズフィールド法は材料中で生じる凝固、再結晶、結晶粒成長、相変態、析出など様々なマイクロ組織形成過程のシミュレーションに適用されている。なかでも下川辺らは、フェーズフィールド法による金属凝固組織形成シミュレーションの大規模 GPU 計算を TSUBAME2.0 で行い、2011 年ゴードンベル賞特別賞を受賞した。この成功は、材料工学分野にも極めて大きなインパクトを与えた。

一方で、実用金属材料のほとんどで観察される多結晶構造を有するマイクロ組織の形成過程を数値解析するための方法として MPF 法がいま最も注目されている。しかしながら、MPF 法は複雑な非線形項を含んだ複数の偏微分方程式を解く必要があるため、演算とメモリの両面で計算コストが大きいことが問題となっている。

そこで本研究では、筆者らがこれまで研究してきた GPU を用いたフェーズフィールド法の超高速

計算技術を応用し、MPF 法による鉄鋼材料中のマイクロ多結晶組織形成の数値シミュレーションを複数 GPU で高速かつ大規模に計算するための数値計算技術・可視化技術を開発することを目的とした。

中間報告の段階では、オーバーラッピング法(計算とデータ通信の非同期実行アルゴリズム)を適用した MPF 法の複数 GPU 計算手法を東京工業大学のスーパーコンピューターTSUBAME2.5 に実装し、金属多結晶粒成長のシミュレーションにおいて良好なスケーリング性能が得られることを確認した。本報告においては、その成果を整理するとともに同計算手法を用いて、Fe-C 合金中で生じる拡散型相変態であるオーステナイト→フェライト変態の MPF シミュレーションの大規模計算を行い、合金元素の拡散を伴うようなマイクロ組織形成過程のシミュレーションにおいても、本研究で開発した計算法が有効であることを示す。

2. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

(1) 共同研究を実施した拠点名

東京工業大学学術国際情報センター

(2) 役割分担

東京農工大学 山中晃徳(役割：研究統括)

東京農工大学 岡本成史(役割分担：小規模 GPU クラスタへの実装評価およびデバッグ)

東京農工大学 橋本圭右(役割分担：プログラム構築およびデバッグ)

東京工業大学 下川辺隆史(役割分担：大規模計算のためのプログラムチューニングおよび TSUBAME への実装評価)

東京工業大学 青木尊之(役割分担：超高速化のためのノード間通信のチューニング)

(3) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野

(4) 当公募型共同研究ならではの事項

本研究では、多数の GPU を用いた並列計算によって、MPF 法の超高速・大規模計算技術を開発することを目的とした。東京工業大学の TSUBAME2.5 は、世界最高性能を誇る GPU クラスタ型スーパーコンピューターであり、本研究

を遂行するうえでは、申し分無く最適な計算機環境である。また、GPU 計算を用いた高性能計算機シミュレーションの世界的研究者である青木教授と下川辺博士との共同研究を行うことで、極めて効率的にプログラムチューニングやスーパーコンピューターへの実装を行うことが可能となった。

3. 研究成果の詳細と当初計画の達成状況

(1) 研究成果の詳細について

3.1 マルチフェーズフィールド法

本研究では、Steinbach らによって 1999 年に提案された MPF 法を採用する。フェーズフィールド法は、系の全自由エネルギーを基礎におく計算方法であり、本研究では全自由エネルギーは次式で表される。

$$G = \int_V \left[\sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N (W_{ij} \phi_i \phi_j) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N \left(-\frac{a_{ij}}{2} \nabla \phi_i \cdot \nabla \phi_j \right) + g_{\text{chem}} \right] dV$$

ここでは、異なる N 個の結晶粒からなる材料を考え、結晶粒 i ($i = 1 \sim N$) の存在確率を表す秩序変数として、フェーズフィールド変数 $\phi_i(\mathbf{r}, t)$ (以後、簡単のため (\mathbf{r}, t) を省略して ϕ_i と表記する) を定義する。ここで、 \mathbf{r} は空間座標、 t は時刻を表す。たとえば、番号 1 の結晶粒(結晶粒 1 と呼ぶ)が存在する座標では ϕ_1 の値を 1、結晶粒 1 が存在しない座標では ϕ_1 の値を 0 と定義する。また、結晶粒 1 と他の結晶粒との界面は、有限の長さを有するものとし、その界面領域内の座標では ϕ_1 は 0 から 1 へと滑らかに変化するものと定義される。また、全自由エネルギーの右辺の被積分項の第一項はポテンシャルエネルギー項、第二項は勾配エネルギー項、第三項は、バルクの化学的自由エネルギーを表している。

全自由エネルギーの時間に対する単調減少を仮定すると、 ϕ_i の時間発展方程式は、以下の式で与えられる。

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial t} = -\frac{2}{n} \sum_{j=1}^n M_{ij}^{\phi} \left[\sum_{k=1}^n \left\{ (W_{ik} - W_{jk}) \phi_k + \frac{1}{2} (a_{ik}^2 - a_{jk}^2) \nabla^2 \phi_k \right\} \right]$$

$$\left. -\frac{8}{\pi} \sqrt{\phi_i \phi_j} \Delta E_{ij} \right]$$

また、Fe-C 合金におけるオーステナイト→フェライト変態の MPF シミュレーションにおいては、合金元素である炭素原子の拡散による炭素濃度 C の変化を計算する必要あるため、次式の炭素拡散方程式を解く。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\sum_{i=1}^N \phi_i D_i \nabla C \right)$$

なお数値シミュレーションにおいては、上記の ϕ_i および C の時間発展方程式を離散化し、ステンシル計算を行う。本研究では、三次元直交格子 (x, y, z) を用いて、空間微分については二次精度の有限差分法、時間積分には、一次精度のオイラー法で離散化した。

3.2 Active Parameter Tracking 法の導入

MPF 法では、 N 個すべての結晶粒ではなく、任意座標に存在する結晶粒数 n を表す秩序変数 ϕ_i について時間を計算する。したがって、全ての計算格子点上で N 個すべての ϕ_i の値や結晶粒番号 i の値をメモリ上に保存しておく必要はない。一般に、各格子点において多結晶組織の時間発展に寄与している ϕ_i の数は多くても 5 個ほどである。よって、数値シミュレーションにおいては、1 格子点あたり 5~8 個の ϕ_i の値を保存できる配列を用意すれば良い。本研究では、上記のようなメモリ効率化手法として、Active Parameter Tracking (APT)法を用いる。本研究のように、多結晶組織形成の三次元シミュレーションを行う場合には、非常に多くの秩序変数を扱うことになるため、メモリアクセス数やデータ通信量を低減するためにも、APT 法は必須の方法であるが、これを導入することにより、計算アルゴリズムは煩雑になる。以下では APT 法の処理のうち、格子点 (x, y, z) におけるデータのみで APT 法の処理が可能な処理を“APT 1”と呼び、隣接差分格子点のデータを必要とする処理を“APT 2”と呼ぶことにする。

3.3 オーバーラッピング法の適用

中間報告時に、MPF シミュレーションを複数 GPU と複数 CPU を用いて計算する場合には、CPU と GPU の数を増やすほど GPU-CPU 間の通信と CPU 間のデータ通信のオーバーヘッドが発生することを示した。そこで、CUDA4.0 以降より使用可能となった GPU 上での複数カーネルの非同期実行機能と GPU-CPU 間の非同期通信機能、およびこれらの同時実行機能を利用して、計算と通信を CPU と GPU の両方で実行し、データ通信のオーバーヘッドを隠蔽するための非同期実行アルゴリズム(オーバーラッピング法)を開発した。

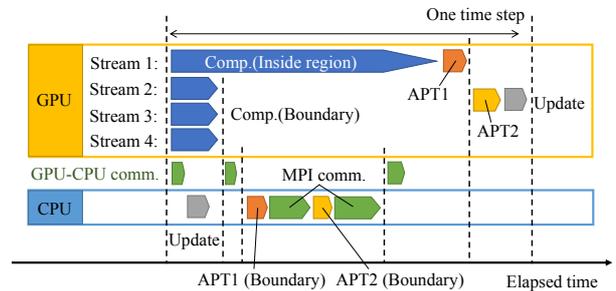


Fig. 1 Calculation diagram of multiple-GPU computing of polycrystalline grain growth simulation using the overlapping method.

Fig.1 に、開発したオーバーラッピング法を適用した多結晶粒成長の MPF シミュレーションの計算ダイアグラムを示す。本方法では、GPU で行う計算を 4 つの stream (stream1~stream4)として用意する。まず、stream1 では、各 GPU に割り当てられたサブ領域内部に対して時間発展方程式の計算 APT1 の処理を行う。これと並行して stream2~4 では、stream1 において領域分割した計算領域内部に対する APT 2 の処理を行うために必要な、袖領域の秩序変数を計算する。これらの stream2~4 での計算が終わり次第、グローバルメモリからホストメモリへのデータ転送を cudaMemCpyAsync を用いた非同期通信で行う。

一方、CPU 側では前ステップにおいて GPU で計算された袖領域のデータをグローバルメモリから cudaMemCpyAsync により受け取った後、stream2~stream4 の処理が完了するのを待機し、袖領域について APT1 と APT2 の処理および MPI 通

信を行う。さらに、CPU で計算された袖領域のデータを `cudaMemCpyAsync` によりグローバルへ転送する。そして、全ての stream の実行完了を確認してから、GPU で袖領域内部に対して APT 2 の計算と次の計算ステップのための更新を行い、1 計算ステップが完了する。なお、ホストメモリ上のデータの更新は、stream1~4 を実行している間に行う。

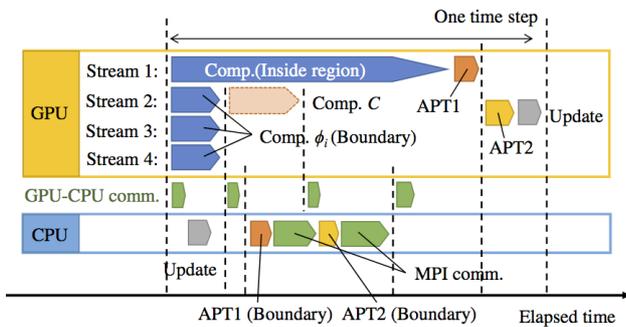


Fig.2 Calculation diagram of multiple-GPU computing of austenite-to-ferrite transformation in Fe-C alloy using the overlapping method.

Fig.2 に、中間報告後に開発した Fe-C 合金におけるオーステナイト→フェライト変態の MPF シミュレーションの計算ダイアグラムを示す。オーステナイト→フェライト変態の MPF シミュレーションでは炭素の拡散を扱うため、Fig.1 に示した多結晶粒成長の MPF モデルの計算ダイアグラムに炭素原子の拡散方程式の計算を加える。すなわち、多結晶粒成長の MPF モデルと同様に、stream (stream 1~stream 4)を用意する。ここでも、stream 1 では、各 GPU に割り当てられたサブ領域内部に対してフェーズフィールド変数の時間発展方程式を計算して、時刻 Δt におけるフェーズフィールド変数の値を求めた後、APT 1 の処理を行う。これと並行して stream 2~4 では、stream 1 においてサブ領域内部に対する APT 2 の処理を行うために必要な、境界領域の時刻 Δt におけるフェーズフィールド変数を計算する。ここで、stream 2~4 での計算が終わり次第、グローバルメモリからホストメモリへ `cudaMemCpyAsync` で計算結果の通信と炭素原子の拡散方程式の計算を同時に開始する。炭素の拡散方程式の計算は stream 2 で行っており、

計算が終了次第、計算結果を `cudaMemCpyAsync` で CPU へ送る。一方、CPU では、多結晶粒成長の MPF モデルと同様の処理を行うが、2 回目の MPI による CPU 間通信の前までにグローバルメモリからホストメモリへ、stream 2 による炭素原子の拡散方程式の計算結果を `cudaMemCpyAsync` で受け取る。

3.4 オーバーラッピング法を適用した複数 GPU 計算の性能評価

本研究で開発したオーバーラッピング法と MPF 法の複数 GPU 計算の有効性を検証するため、小規模な GPU クラスタ上で多結晶粒成長の MPF シミュレーションを実施し、スケーリング性能を調査した。

まず、弱スケーリング性能を評価するため、各 GPU が計算する計算領域の差分格子点数を 288^3 、結晶粒数を 1728 で一定とし、500 ステップのシミュレーションの所要時間を測定した。Fig.3 に弱スケーリング性能を示す。このとき計算領域は、z 方向に 1 次元等分割とした。オーバーラッピング法を適用していない複数 GPU 計算では、CPU もしくは GPU の数を増加させるほど、データ通信時間がオーバーヘッドとして現れることがわかった。

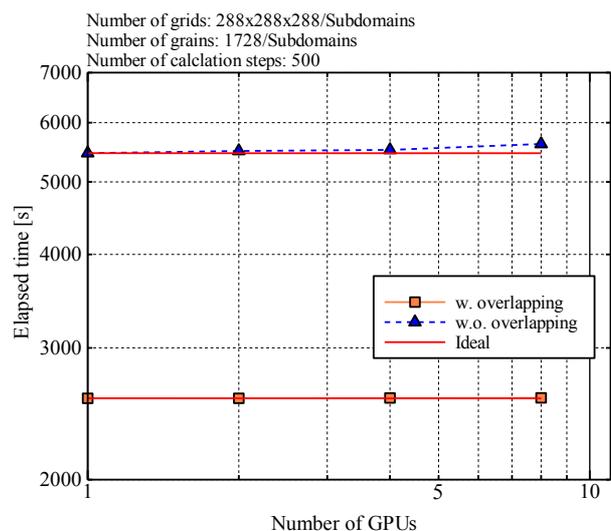


Fig. 3 Weak scaling results of multiple-GPU computing of polycrystalline grain growth simulation with and without the overlapping method.

一方、オーバーラッピング法を導入した複数 GPU 計算では、GPU の数を増やしてもシミュレーションの所要時間は一定であり、データ通信によるオーバーヘッドを計算に要する時間で完全に隠蔽できていることがわかる。また、シミュレーションの所要時間は、オーバーラッピング法を適用していない場合の約 50% となり、良好な弱スケール性能を示した。

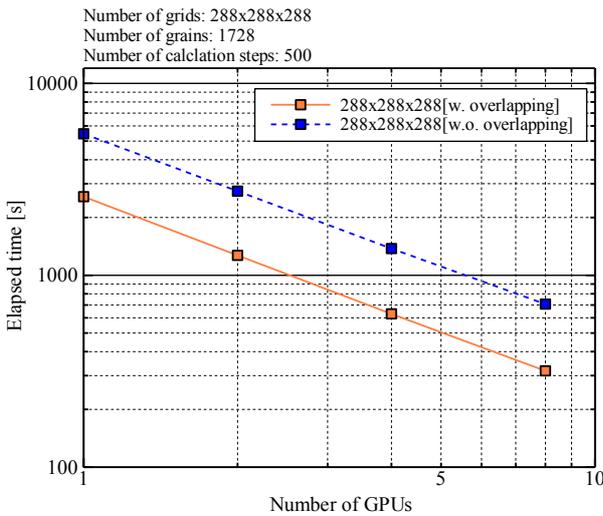


Fig. 4 Strong scaling results of the multiple-GPU computing of polycrystalline grain growth simulation with and without the overlapping method.

次に、強スケール性能を評価するため、計算領域の差分格子点数を 288^3 、結晶粒数を 1728 とし、500 ステップのシミュレーションの所要時間を測定した。このときの領域分割は、z 方向に 1 次元等分割である。Fig.4 に示すように、オーバーラッピング法を適用していない複数 GPU 計算でも、GPU の数を増やすほど分割数に見合った計算時間の短縮がなされ、良好な強スケール性能を示すことがわかる。しかしながら、オーバーラッピング法を適用することで、良好な強スケール性能が得られるのみならず、シミュレーションに要する時間は約半分となり、さらなる高速化が達成された。

さらに、Fig.5 に 288^3 の格子点数あたりに含まれる結晶粒数を 1728 で一定とし、計算領域を 288^3

とその 8 倍の 576^3 にした条件で、500 ステップのシミュレーションを行ったときの実行性能を FLOPS 値で示す。GPU 数の増加に伴い、FLOPS 値は線形に増加している。さらに、オーバーラッピング法を導入することにより、FLOPS 値はほぼ倍増していることがわかる。さらに、8GPU を用いた計算においては、格子点数を 288^3 とした計算と 576^3 とした計算で、同じ FLOPS 値となっていることから、1GPU で計算する格子点数が増加しても良好な強スケール性能を示すことがわかる。

以上の結果より、MPF 法に必要な計算とメモリ操作(APT 法)と並列計算のためのデータ通信を非同期に行うオーバーラッピング法を適用することで MPF シミュレーションの複数 GPU 計算において良好な実行性能が得られることを実証した。

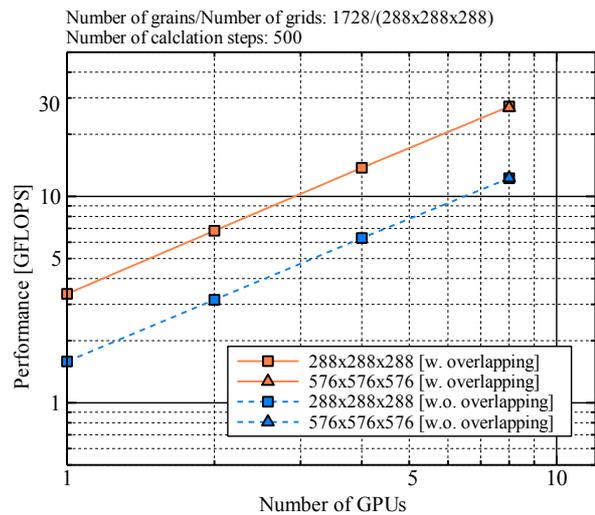


Fig. 5 Strong scaling results of multiple-GPU computing of polycrystalline grain growth simulation with and without the overlapping method using 288^3 and 576^3 grids.

3.5 TSUBAME2.5 への実装と性能評価

3.5.1 多結晶粒成長の超大規模 MPF シミュレーション

3.4 節では、小規模 GPU クラスタを用いたオーバーラッピング法を適用した MPF 法の複数 GPU 計算法の性能評価を行い、良好なスケール性能が得られることを示した。そこで、同計算手法を東京工業大学の GPU スーパーコンピュー

ターである TSUBAME2.5 に実装し、MPF シミュレーションの超大規模計算における実行性能の評価を行った。

多結晶粒成長シミュレーションの超大規模計算における弱スケーリング性能の評価のために、計算規模を 256^3 格子あたり 512 結晶粒で一定として、使用する GPU の台数を変えた時の実効性能の変化を Fig. 6 に示す。オーバーラッピング法の導入の有無にかかわらず、いずれも良好なスケーリング性能が得られているが、オーバーラッピング法を導入したことで、GPU 数によらず、実行性能は全体的に 3~4 倍に向上する。この結果、729 GPU という非常に多数の GPU を用いて、計算格子点数 2304^3 、結晶粒数 373248 の超大規模計算が実現し、1.9 TF の実行性能が得られた。

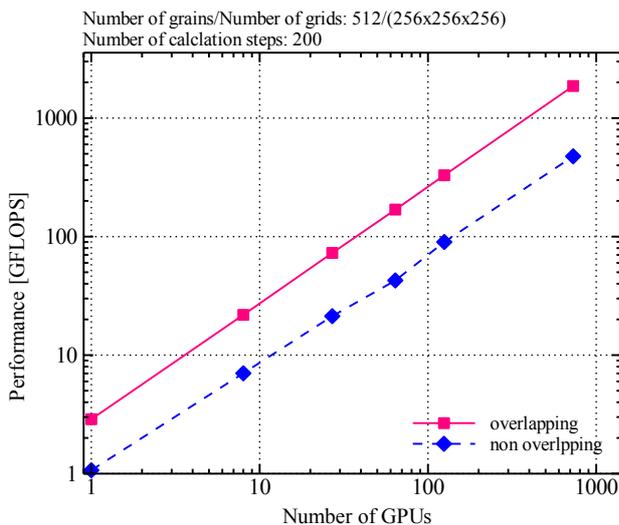


Fig.6 Weak scalability of multiple-GPU computing of polycrystalline grain growth simulation on TSUBAME 2.5 supercomputer.

次に、中間報告時には測定していなかった強スケーリング性能についても評価するために、結晶粒数を 256^3 格子あたり 512 個で一定とし、全計算領域を分割する GPU の台数を増やすときの実効性能の評価を行った。分割数は条件毎に最適な分割を行っており、通信速度は演算速度よりも遅いため、GPU 側の計算時間の短縮よりも CPU 間通信の隠ぺいを優先して行うように領域分割の最適化を行った。

全計算領域を 256^3 格子、 512^3 格子および 1024^3 格子として、強スケーリング性能の評価を行った結果を Fig. 7 に示す。GPU 数に対して線形的に FLOPS は増加し、良好なスケーリング性能が得られているが、 256^3 格子の計算領域を 128 分割した場合の結果のように、分割数が大きすぎると、実行性能が低下する。これは、分割数を大きくするとともに、GPU 当たりの計算領域が小さくなり、GPU 側の処理時間が CPU 側の通信などの処理よりも短くなることで通信時間の隠ぺいができなくなってしまっているためである。しかし、 512^3 格子および 1024^3 格子を用いた計算では、この実行性能の低下は GPU 当たりの計算領域を大きくすることで回避することができ、スケーラビリティが保証されることがわかる。

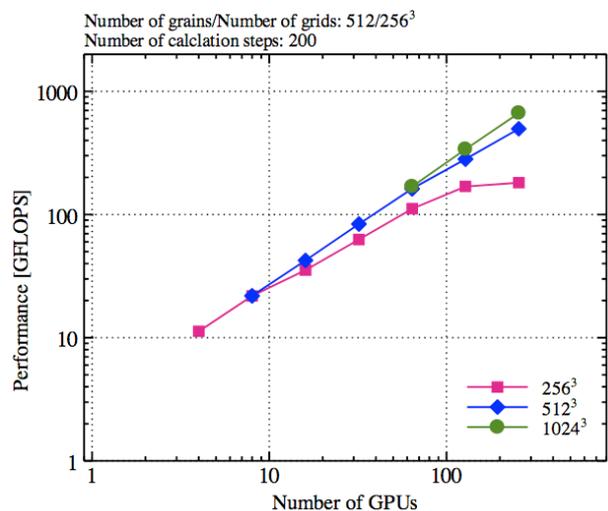


Fig.7 Strong scaling of multiple-GPU computing of polycrystalline grain growth simulation using 256^3 , 512^3 and 1024^3 computational grids on TSUBAME2.5 supercomputer.

Fig. 8 は、 1024^3 格子において 32768 個の結晶粒をランダムに初期配置した多結晶粒成長の超大規模シミュレーションを行って得られた多結晶粒成長挙動である。同図においては、結晶粒ごとに色付けを行い可視化している。シミュレーション結果より、時間の経過とともに、系のエネルギーの総和を減少させるように、サイズの比較的大きい結晶粒のみが粗大化していく過程が良好に再現でき

ている。また、界面エネルギーが釣り合うように結晶粒界が湾曲しており、精度の高い計算ができていることが確認でき、大規模計算においても適切な計算結果が得られている。このような大規模マルチフェーズフィールドシミュレーションを行うことで、非常に多数の多結晶組織の変化を解析可能であり、これにより初めてマイクロ組織の統計学的に正しい評価が可能となる。

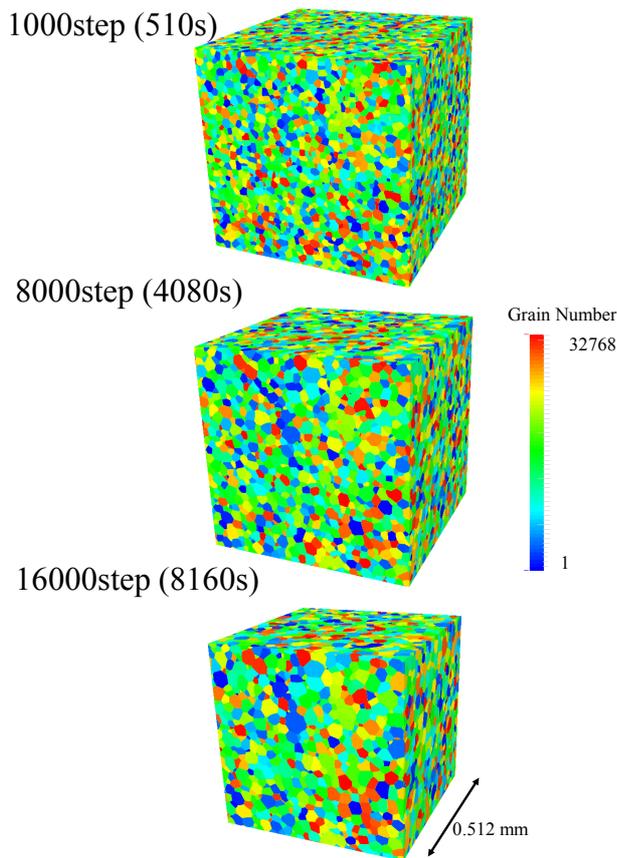


Fig.8 Polycrystalline growth behavior simulated by large-scale multi-phase-field simulation using 1024^3 computational grids and 32768 crystal grains on TSUBAME2.5 supercomputer.

3.5.2 Fe-C 合金におけるオーステナイト→フェライト変態の超大規模 MPF シミュレーション

Fig.2 で示した計算手法を TSUBAME2.5 に実装し、Fe-C 合金中のオーステナイト→フェライト変態の超大規模シミュレーションを行い、複数 GPU 計算の有効性を評価した。

強スケーリング性能を評価するために、計算領

域を一辺 $5.12 \mu\text{m}$ の立方体とし、 512^3 格子で分割した。計算領域内には 4096 個のオーステナイト粒と 512 個のフェライト粒を分布させた。MPF シミュレーションの経過時間と計算に使用した GPU 数の関係を Fig.9 に示す。128GPU を用いたときの経過時間を基準としたとき、256GPU を使用することで約 4100s 経過時間が短縮されている。さらに、512GPU まで増加すると経過時間は約 8200s 短縮されており、時間の短縮の割合は 256GPU のときのさらに 2 倍となる。したがって、Fe-C 合金中のオーステナイト→フェライト変態の MPF シミュレーションにおいても良好なスケーラビリティが得られることがわかる。

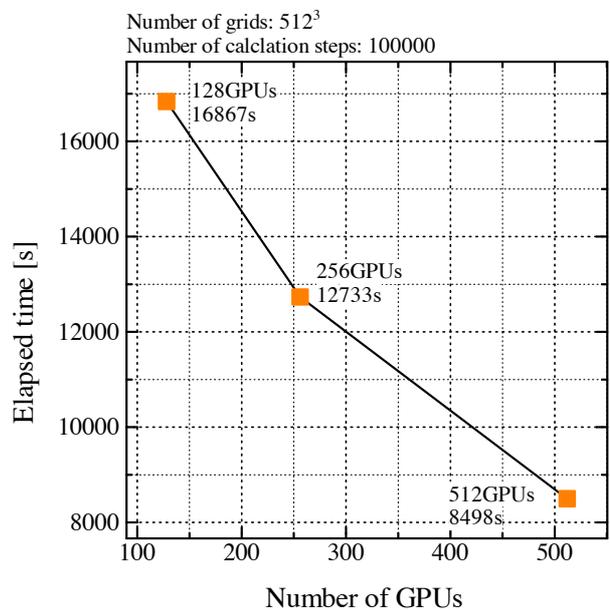


Fig.9 Strong scaling result of multiple-GPU computing of large-scale multi-phase-field simulation of austenite-to-ferrite transformation in a Fe-C alloy on TSUBAME2.5 supercomputer.

さらに、Fig. 10 に、計算格子数を 1024^3 格子とし、オーステナイト粒を 32768 個、フェライト粒を 4096 個として行ったオーステナイト→フェライト変態のシミュレーション結果(炭素濃度変化)を示す。時間とともに、フェライト相(図中の青い結晶粒)が炭素原子を吐き出して成長していく挙動が良好に再現されていることがわかる。このシミュレーションでは、結晶粒を 3 万個以上用い

ており、計算領域も mm オーダーという、従来の計算方法では不可能であった世界最大規模の MPF シミュレーションである。本研究で提案する複数 GPU 計算を適用することで、現実的な計算時間(約 16 時間)で実施することが可能となった。

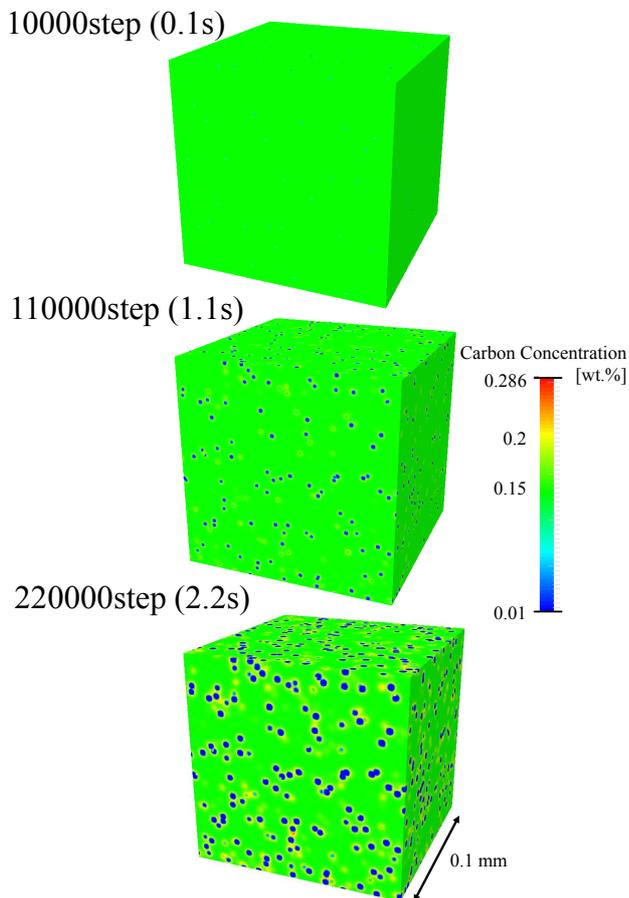


Fig.10 Variation of carbon concentration during austenite-to-ferrite transformation in Fe-C alloy simulated by large-scale multi-phase-field simulation performed on TSUBAME2.5 supercomputer.

(2) 当初計画の達成状況について

本研究の当初計画では、金属材料の多くに見られる多結晶組織の形成過程を解析するための強力なツールとして注目を集めている MPF 法を、複数の GPU で高速にかつ大規模に計算するための計算技術を開発することを目的とした。上記で示したように、目的はほぼ達成することができたと考えている。特筆すべき成果としては、MPF シミュレーションの計算と並列計算のためのデータ通信を非同期に実行し、データ通信によるオーバーヘ

ッドを隠蔽するためのオーバーラッピング法を開発することで複数 GPU 計算において良好な実行性能が得られることを実証した。また、開発した計算手法を大規模 GPU クラスタである TSUBAME2.5 に実装し、金属材料でみられる多結晶粒成長挙動のみならず実用鉄鋼材料中で合金元素の拡散を伴うようなマイクロ組織形成過程の MPF シミュレーションの超大規模計算を実現した。

本研究で確立した MPF シミュレーションの複数 GPU 計算技術は、実際の材料開発に貢献することはもちろん、今後も日本が材料開発の国際競争において先頭に立ち、世界のイチシアティブをとるうえで極めて大きな意義があると考えられる次第である。

4. 今後の展望

鉄鋼材料などの金属材料では、材料内部の結晶粒の大きさ(結晶粒径)や結晶粒径の統計的分布状態が強度および延性を決定づける。実際の材料開発の現場では材料中に分散粒子を形成させることで、結晶粒径を非常に精緻に制御している。現在の最新の材料製造技術をもってすれば、分散粒子の形成位置やその数を高精度に制御できるが、それでもなお、材料中に 3 次元的に存在する分散粒子の大きさや分布状態を実験的に測定することは極めて大きな困難を伴う。したがって、次年度の研究では材料メーカーとも協力し、本研究で開発した MPF 法の高速計算技術を活用して、分散粒子のサイズ、体積率、分布状態とマイクロ組織形成機構を明らかとしたい。また、高速化や並列計算の実行性能のみを追求するのではなく、新しい材料開発や材料制御技術に繋がる有益な知見を提供できる計算結果を生み出すことが、今後の最も重要な課題である。

5. 研究成果リスト

(1) 学術論文

岡本成史, 山中晃徳, 下川辺隆史, 青木尊之, マルチフェーズフィールド法による多結晶粒成長シミュレーションの複数 GPU 計算, 日本

計 算 工 学 会 論 文 集 , Vol.2013, (2013),
p.20130018

(2) 国際会議プロシーディングス
なし

(3) 国際会議発表

M. Okamoto, A. Yamanaka, T. Shimokawabe, T. Aoki, Large-scale Multi-Phase-Field Simulation of Austenite-to-Ferrite Transformation in Fe-C Alloy using GPU-cluster Computer, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013), December, 2013, Singapore

(4) 国内会議発表

岡本成史, 山中晃徳, 下川辺隆史, 青木尊之, 多結晶粒成長の大規模マルチフェーズフィールドシミュレーション ～GPU スパコン TSUBAME 2.0 への実装～, 日本機会学会第 26 回計算力学講演会, 2013, 佐賀大学.

岡本成史, 山中晃徳, TSUBAME2.5 スーパーコンピューターを用いた Fe-C 合金中で生じるオーステナイト→フェライト変態挙動の大規模マルチフェーズフィールドシミュレーション, 日本鉄鋼協会第 167 回春期講演大会, 2014, 東京工業大学.

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

なし