

令和 5 年 5 月 23 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04261

研究課題名（和文）DNS解析法による乱流と凝固組織の相互作用のメカニズム解明と残留応力の予測法開発

研究課題名（英文）Clarification of mechanism of the interaction between turbulence and solidification structure and development of prediction methods for residual stress by DNS

研究代表者

太田 貴士（Ohta, Takashi）

福井大学・学術研究院工学系部門・准教授

研究者番号：10273583

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：乱流の直接数値シミュレーションと固液相変化を予測するためのフェーズフィールド法を組み合わせ、過冷却凝固する乱流の高精度数値解析を実現した。その結果をデータベースとして整理し、流動する液体と固体の相互作用を伴う複雑現象のメカニズムを解明することに取り組んだ。そのメカニズムに基づいて、乱流の変調を予測するための乱流モデルであるラージエディシミュレーション解析法を開発するとともに、凝固後の固体内部に形成される材料力学的な欠陥の組織構造を予測するための方法を調べた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

乱流の直接数値シミュレーションの技術を発展させて、流動現象の予測から固体内部の欠陥の構造の予測と制御を実現するために、相変化を伴う固液相に関する複雑現象のメカニズムの解明に取り組んだ。その結果として、材料力学的な問題を解決するために、流体の複雑現象を予測する乱流モデルの改良の指針が得られた。さらに、凝固組織構造の観察に関する実験成果を援用することによって、流体工学と材料力学の研究分野の協力と今後の新しい複合的研究分野のきっかけとなった。

研究成果の概要（英文）：By combining direct numerical simulation of turbulent flow and the phase field method for predicting solid-liquid phase changes, we achieved high-precision numerical analysis of supercooled solidifying turbulence. We then organized the simulation results into a database of flow fields and worked to understand the mechanism of complex phenomena involving the interaction of flowing liquids and solids. Based on the mechanism, we developed a large eddy simulation analysis method, that is, a turbulence model to predict the modulation of turbulence, and also investigated the method to predict the microstructure of the material-mechanical defects formed inside the solid after solidification.

研究分野：流体工学

キーワード：乱流 液体金属 凝固 溶融 非ニュートン粘性流体 直接数値シミュレーション データベース 乱流モデル

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

レーザー溶接の溶融池内部のように、溶融している液体金属は、熱的要因によるレイリー・ベナール対流やマランゴニ対流が発生して、低粘度条件で乱流状態、あるいは、それに近い非定常状態になる。そのような場では、複雑流動に関わりつつ凝固する場合に、非等方な分布形状の凝固組織が形成される。また、凝固組織によって乱流が変調されて、その結果として、乱流状態の液相と凝固組織との間に相互作用がある。そして、不均一性によって、凝固した材料内に残留応力が発生する可能性がある。同様の物理現象が関わる工学的状況として、アルミ casting、プラスチック成形、半導体製造などがある。そのような状況で発生する残留応力は、材料の欠陥になるので、品質に影響することになり、工業的に重要な解決すべき問題である。

固液界面の壁に沿う液体乱流には、速度ストリークや縦渦のような乱流構造が含まれており、その構造は、壁近くの流れの条件である粘性長さによって特徴付けられることが知られている。すなわち、乱流の空間的な特徴は、流れ場の形状ではなく、流れの条件によって決められることになる。また、各瞬時構造の分布はランダムであり、一般的に、凝固が始まるときの凝固組織の発生空間的な特徴を予測することは非常に困難である。

そこで、乱流の直接数値シミュレーションで乱流構造の時間変化を予測しながら、固液相変化を予測できるフェーズフィールド法によって、乱流の影響を受けつつ凝固する固液混相場の現象を再現する数値シミュレーションを実現する。その結果から現象のメカニズムを解明することを期待できる。

2. 研究の目的

乱流の直接数値シミュレーションと凝固組織形成のフェーズフィールド法を組み合わせ、凝固しつつある液体乱流の数値シミュレーションを実現して、その結果より、乱流と凝固組織の相互作用のメカニズムを解明する。そして、残留応力発生を予測する手法を構築する。このとき、例えば、予測手法の実用的な利用のために、直接数値シミュレーションの結果から得られた成果に基づいた乱流モデルの開発が考えられる。

さらに、本研究の将来の発展として、乱流に関わって発生した残留応力を抑制する制御法の実現の可能性も検討する。そのために、乱流やその組織的構造が制御対象であることが考えられる。あるいは、乱流と凝固組織形成の相互作用メカニズムに対する操作によって実現できる可能性もある。

3. 研究の方法

本研究では、直接数値シミュレーションとフェーズフィールド法を組み合わせた新しい数値シミュレーション技術を使い、溶融金属の乱流の数値シミュレーションを実現する。大規模数値シミュレーションを実行して、乱流として流動する溶融金属の凝固現象を伴う3次元非定常固液混相場のデータベースを構築する。そして、シミュレーション結果を可視化して観察し、研究協力者と情報を共有しつつ、結果の精度を検証する。乱流構造と凝固組織形成の相互作用を観察することによって、予測法を開発できるように、凝固後の材料内に残留応力が発生するメカニズムを明らかにする。そのメカニズムに基づいて、ラージエディシミュレーション解析法による予測法の構築に取り組む。さらに、残留応力の発生を抑制するために、固液混相場に対する制御方法を開発する。また、将来の研究の発展のために、制御法の開発に向けた指針を得られるように、研究成果をまとめる。

4. 研究成果

液体金属の乱流の予測と同時に、過冷却凝固で凝固組織構造を形成する現象をフェーズフィールド法で再現する直接数値シミュレーションを実行した。定量的フェーズフィールド法の手法に限らず、安定に数値シミュレーションを実行できる数値解析法を利用して、非定常の3次元現象を高解像度な計算格子で高精度に予測できることを確かめた（図1）。さらに、複数の流れの条件で大規模数値シミュレーションを実行して、流れ場と凝固組織構造に関するデータベースを構築した。

その結果として、乱流のような流体の複雑流動に起因して、凝固材料の欠陥および残留応力の予測と制御を実現するために、特定の条件によらない普遍的なメカニズムを解明することに取り

組んだ。さらにその後、乱流変動を予測するためのラージエディシミュレーション解析法の開発に取り組んだ。そして、固液界面付近の非ニュートン流体の特性を考慮した乱流モデルと凝固組織構造による粗面効果を考慮した乱流モデルの開発につなげた。このように、本研究プロジェクトの成果の応用範囲を拡大することを目指して、既存の数値解析法の大規模な改良を試みた。

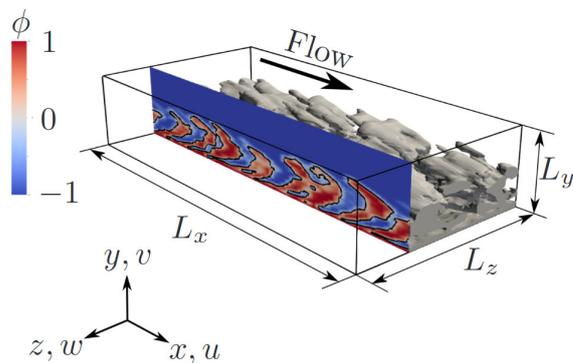


図1: Instantaneous distributions of solidification element and phase field variable

本研究プロジェクトの解析対象と対比させて物理現象を詳細に調査するために、乱流に関わる固液界面の一樣溶解現象の特徴を調べるための直接数値シミュレーションも実行した(図2)。溶解現象における乱流エネルギーの増加と流れ場の条件との関係を、研究協力者が提供する実験データを対応付けて、メカニズムの解明に取り組んだ。その結果として、複雑流動現象のメカニズムに基づいて、将来の乱流モデルの開発に向けた知見が得られた。

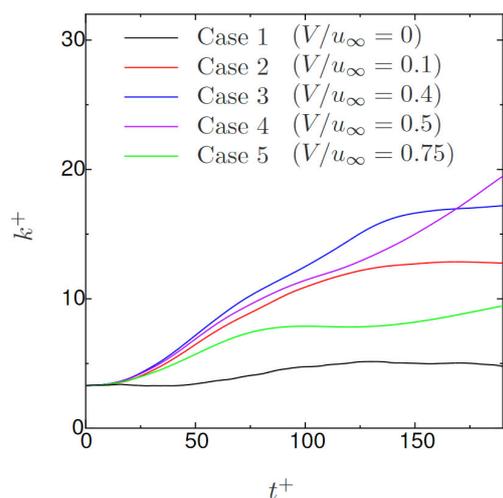


図2: Temporal variations of turbulent kinetic energy in the cases of wall Melting

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ohta Takashi, Hayashi Akihiro, Tsuzuki Shogo	4. 巻 309
2. 論文標題 A novel LES method for predicting drag reduction in viscoelastic fluid based on the time period of turbulence structures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 104924 ~ 104924
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jnnfm.2022.104924	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ohta Takashi, Nakatsuji Keisuke	4. 巻 22
2. 論文標題 Spatial-scaling method and modified large eddy simulation to examine rough-wall turbulence	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Turbulence	6. 最初と最後の頁 413 ~ 433
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/14685248.2021.1915494	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ohta Takashi, Eguchi Daiki, Hayashi Akihiro	4. 巻 21
2. 論文標題 Calibration and evaluation of a spatial scaling method for the near-wall turbulent flow of viscoelastic fluids	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Turbulence	6. 最初と最後の頁 607 ~ 631
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/14685248.2020.1819541	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 OHTA Takashi, ICHIYANAGI Takafumi, TANAKA Taisei	4. 巻 6
2. 論文標題 Direct numerical simulation of solidifying liquid turbulence using the phase-field model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Letters	6. 最初と最後の頁 20-00327
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/mel.20-00327	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 皆本 慧, 太田 貴士
2. 発表標題 過冷却凝固しつつある液体における乱流構造と凝固要素の関係の解明
3. 学会等名 日本機械学会 北陸信越支部 2023年合同講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 道坂 大介, 太田 貴士
2. 発表標題 粘塑性流体乱流のDNSの実現と乱流構造の観察
3. 学会等名 日本機械学会 北陸信越支部 2023年合同講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 都築 昇悟, 太田 貴士
2. 発表標題 粘弾性流体乱流のためのミニマルフローユニットにおける時間スケールリングに基づくLESモデル
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 都築 昇悟, 太田 貴士
2. 発表標題 DNSに基づく粘弾性流体乱流のためのLESモデルの提案と検証
3. 学会等名 日本機械学会 北陸信越支部 2022年合同講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中 大誠, 太田 貴士
2. 発表標題 フェーズフィールド法を用いた液体乱流の凝固組織成長と乱流変調のメカニズム解明
3. 学会等名 日本流体力学会 年会 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 林 晃弘, 太田 貴士
2. 発表標題 DNS による粘弾性流体およびニュートン流体乱流のための時間スケールリング法の導出
3. 学会等名 流体工学シンポジウム (第66回北陸流体工学研究会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関