

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 5 月 25 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06149

研究課題名（和文）凝固組織を含む非等方性流体乱流の特性解明とシミュレーションによる予測法の開発

研究課題名（英文）Characterization of anisotropic fluid turbulence including solidification structure and development of prediction method

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） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：フェーズフィールド法を用いることによって、固液相変化を伴う固体壁に沿う液体乱流の直接数値シミュレーションを実現した。そのシミュレーションの結果から、デンドライトのような凝固組織が成長する様子を観察できるようになった。凝固組織は、壁面近傍の乱流構造による局所的な温度分布揺らぎによって、非一様に成長していた。また、凝固組織の成長によって、乱流構造が消滅して、層流化していた。特に、高速ストリークが存在していた領域で凝固組織が成長していることから、結果として、乱流構造と凝固組織の相互作用は、乱流の層流化を促進することがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で実現した直接数値シミュレーションの結果より、凝固組織の空間的分布の特徴が乱流組織構造に起因していることがわかった。凝固組織の存在により、固体内部に発生する残留応力が形成されることになる場合には、材料力学的な欠陥の予測が、流体力学の乱流の知見によって予測されることになる。本研究の成果は、乱流研究の応用範囲を拡大して、機械工学分野の横断的協調による、社会安全性向上に貢献することになる。

研究成果の概要（英文）：Direct numerical simulations of the turbulent flow of liquid along a solid wall with phase change between liquid and solid was realized by combining the phase-field model. From the simulation, solidification structures such as dendrite were growing from the wall surface toward the flow field. These solidification structures started growing non-uniformly depending on the local flow patterns and temperature distribution formed by turbulence structures close to the wall surface. Then, owing to the growth of the solidification structures, the turbulence structures such as velocity streaks and quasi-streamwise vortices started to disappear, making the turbulent flow tend to be laminar. In particular, it was found that the local interaction between turbulence structures and solidification structures promoted the laminarization of turbulent flow.

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

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、研究者個人に帰属されます。

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に見られる溶融、凝固を伴う熱輸送現象において、低粘度の液体金属で、レイノルズ数が約3000を越えると、溶融池内対流は乱流に遷移することが明らかにされていた。一般的に、固液相変化を伴う乱流場では、各相境界面付近における流体の粘度変化と、凝固組織構造(デンドライト)が配向分布する非等方性流体層がある。その結果、特に、凝固過程で固相内に残留応力が発生して、レーザー溶接後の強度や耐久性に強く影響することになる。それに対して、レイノルズ平均モデルによる定常解析の試みはあったが、それ以後、その予測と制御の方法は確立されていない。同一媒質の固液相が接しつつ、境界で溶融と凝固を伴う状況は、高分子材料の流動輸送や成形加工、水と氷のように、工業的に多く見られる。内部流動の予測が困難な流体機械の設計段階における最適化のためには、学術的な立場から、非等方性流体の乱流特性の解明と実用的な予測法としての乱流モデルの開発が望まれていた。

2. 研究の目的

本研究では、固液境界付近にデンドライトが存在する乱流場の直接数値シミュレーション(DNS)を実現する。その結果により、溶融液体内に発生する乱流場のデータベースを構築する。そして、データベースを用いて、固液境界付近の乱流の壁漸近挙動を観察して、乱流の組織的構造の普遍性を抽出する。さらに、溶融液体内で乱流場が発生、維持するメカニズムを解明する。以上により、乱流機構を解明し、開発した予測法の信頼性と有用性を明らかにする。

3. 研究の方法

第1段階として、レーザー溶接の溶融池内のような溶融金属の流れにおいて、固液相変化と凝固組織構造(デンドライト)の形成を含む乱流場を再現するDNSを実現し、乱流場のデータベースを構築する。第2段階として、データベースを解析することにより、乱流の発生および維持のメカニズムを解明する。そして、第3段階として、DNS解析の結果に基づいて、乱流の予測法を開発する。このとき、粘性応力に非等方性を考慮した解析法であることが重要である。最終段階では、DNSで再現された凝固による流動特性の変調、乱流抵抗と熱伝達の変化を予測して、本研究による予測法の信頼性と有用性を確かめる。

4. 研究成果

(1) フェーズフィールド法を利用して、固液相変化を伴う乱流境界層のDNSを実現できた。そして、発達した乱流場の中で形成される凝固組織と、その凝固組織の影響を受けて変調する乱流場を観察できるようになった。乱流場のデータベースから見積もられた乱流統計量より、固液相界面が流れ場に向かって成長していくに従って、乱流が弱まることがわかった。その際に、例えば、図1のA部分のように、速度ストリークが入れ替わり、このメカニズムによって、乱流場の層流化が促進されていた。さらに、流れ場の瞬時構造の観察から、乱流の擾乱によって初期の凝固組織が発生していた。その後、主流によって下流に移流しながら、壁面形状が上流に成長していた。以上のことから、壁付近の乱流に存在する流れの瞬時構造に対応した凝固組織が生成され、生成された凝固組織によって乱流構造が変化することが明らかになった。

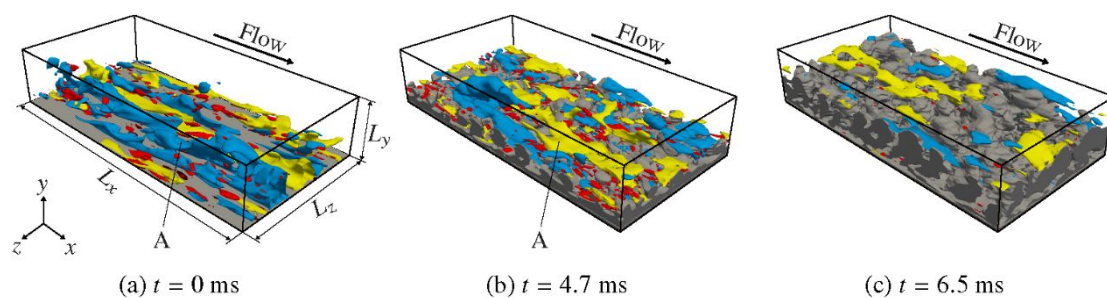


図1: Instantaneous distributions of high- and low-speed regions, quasi-streamwise vortices, and solid phase (yellow: $u'^+ = 3$, blue: $u'^+ = -3$, red: $\omega_x^+ = \pm 0.3$, gray: $\phi \geq 0$)

(2) 凝固組織の初生に注目するために、高解像度な流れ場の再現結果における壁近くの凝固過程を観察した。図2に、各瞬間における流れ場と固体壁面の断面を流れ方向から見た様子の例を示す。壁乱流の高速ストリークでスイープ現象がある場所で、壁面近傍の温度分布が影響を受けて、温度勾配が大きくなり、凝固現象の科学的駆動力が強くなることによって、凝固速度が相対的に大きくなった。その後、凝固組織は非一様に成長して、その結果として、凝固が遅れた部分で高速領域が見られるようになった。この過程において、乱流構造に起因した凝固組織の成長が乱流構造を変調させることになり、凝固現象による粘度の増加や運動量の損失だけではなく、乱流場の層流化に対して、ポジティブフィードバックの効果が働いていた。それに対して、各瞬間において、凝固組織が成長した高さより遠方の流れ場では、乱流統計量の観点からは、乱流の変化は見られなかった。

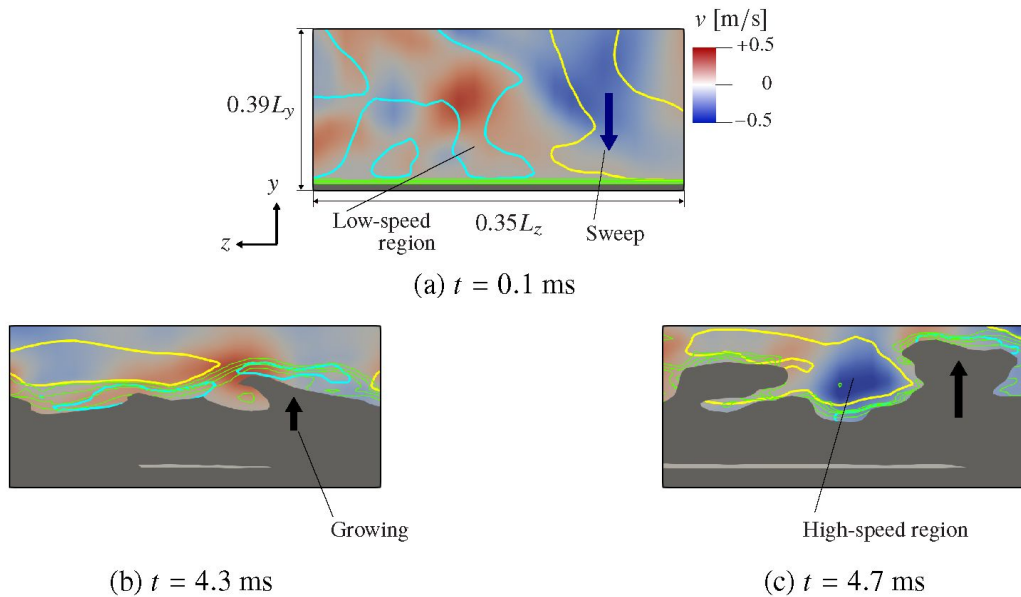


図2: Instantaneous distributions of high- and low-speed regions, solid phase, wall normal velocity, and isolines of temperature on a $y-z$ plane

(3) 過冷却凝固する液体流れにおける乱流場の影響を受けながら形成される凝固組織構造の特徴に注目したところ、以下の結果が得られた。第一に、主流方向にくの字に折れ曲がるという凝固組織要素の形状の特徴は普遍的であったが、各部分の長さや角度は主流速度に対応して変化していた。そのとき、固液相界面内の粘度分布が変化すると、凝固組織上端に発生する渦の形状が変化し、それによって凝固組織要素の成長方向が定まっていた。また、凝固組織の成長速度は、乱流に関する流れ条件に依存していた。第二に、凝固組織要素の主流方向の分布の特徴は、粘性長さに基づいて見た場合、流れ条件に依存しなかった。以上のことから、凝固組織の構造と成長速度が、流れ条件と相関関係にあることがわかった。凝固組織内の残留応力の分布は、凝固組織構造に対応していると考えられることから、凝固組織内の残留応力の分布が、流れ条件と相関関係にあることが明らかになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Akihiro Hayashi, Takashi Ohta
2. 発表標題 Investigation of Temporal Variations of Turbulence in Viscoelastic Fluid by DNS
3. 学会等名 2019 International Symposium on Advanced Mechanical and Power Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Ohta, Takafumi Ichiyangi, Taisei Tanaka
2. 発表標題 Direct Numerical Simulation of Wall Turbulence of Liquid Solidifying on Wall Surface
3. 学会等名 The Second Pacific Rim Thermal Engineering Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 太田貴士, 一柳隆史, 田中大誠
2. 発表標題 液体乱流のDNSにおける凝固組織構造と乱流変調の予測
3. 学会等名 日本流体力学会 年会 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中辻佳祐, 太田貴士
2. 発表標題 粗面乱流境界層のための空間スケージングおよびそれに基づく LES 解析法の提案
3. 学会等名 流体工学シンポジウム (第64回北陸流体工学研究会)
4. 発表年 2019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による過冷却凝固する液体乱流における凝固組織構造の観察
3. 学会等名 日本機械学会 北陸信越支部 第57講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大西祐太, 太田貴士
2. 発表標題 水素予混合燃焼を伴う壁乱流DNSによる渦構造変調の観察
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中辻佳祐, 太田貴士
2. 発表標題 粗面乱流境界層における乱流構造の観察とその予測
3. 学会等名 日本機械学会 2018年度年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大坂文哉, 太田貴士
2. 発表標題 クエット乱流における渦構造とキャピテーションの相互作用の観察
3. 学会等名 第32回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 — 柳隆史, 太田貴士
2. 発表標題 乱流境界層における凝固しつつある液体流れのDNS
3. 学会等名 流体工学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐竹駿弥, 太田貴士
2. 発表標題 乱流境界層における音源構造の流れ条件への依存性
3. 学会等名 日本機械学会 北陸信越支部 第56講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 林晃弘, 太田貴士
2. 発表標題 粘弾性流体乱流における乱流構造の時間的特徴
3. 学会等名 日本機械学会 北陸信越支部 第56講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Ohta, Daiki Eguchi
2. 発表標題 Modification of the Spatial Scaling for Turbulent Flow of Viscoelastic Fluids
3. 学会等名 The Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 楠神 裕貴, 太田 貴士
2. 発表標題 溶融, 凝固する壁面乱流境界層の予測
3. 学会等名 日本機械学会 2017年度年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 一柳隆史, 太田貴士
2. 発表標題 壁乱流中を浮遊する高粘度流体塊の観察
3. 学会等名 第31回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 片桐佑麻, 太田貴士
2. 発表標題 DNS による乱流境界層から壁面への力学的影響の予測
3. 学会等名 日本機械学会 北陸信越支部 第 55講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中辻佳祐, 太田貴士
2. 発表標題 DNS による粗面乱流境界層の予測と観察方法の提案
3. 学会等名 日本機械学会 北陸信越支部 第 55講演会
4. 発表年 2018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
--	---------------------------	-----------------------	----