

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420104

研究課題名(和文) シミュレーション技術を用いた熔融液体内に生じる乱流機構の解明と予測法の開発

研究課題名(英文) Investigation of sustaining mechanism and development of prediction methods for turbulence of melting fluid by using simulation technology

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) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：固体相から熔融しつつある境界層および固体相に凝固しつつある境界層中に生じる乱流の発生維持機構を解明し、乱流構造の特徴に基づく乱流モデルの開発と改良に応用することを目指して、液体金属流れを想定した乱流の直接数値シミュレーションを実現した。その結果、固体相が熔融する際に、乱流構造の拳動によって乱流生成が促進されて、乱流拡散効果が増大することを発見した。また、凝固する際には、凝固速度によって、乱流が再層流化する可能性があることがわかった。さらに、壁面摩擦速度のように、壁表面の相変化の条件によっては見積もることが困難な指標を必要としないことから、ダイナミックモデルの優位性があることが確かめられた。

研究成果の概要(英文)：We realized direct numerical simulations of turbulent flow considering liquid metal flow in order to investigate the sustaining mechanism of turbulence with the effect of melting or solidification in a boundary layer. The results can be applied to development and improvement of turbulence models based on the characteristics of turbulent structures. Thereby, it was found that, in the case of melting, a behavior of the turbulent structures promoted turbulence production. To the contrary, in the case of solidification, the flow tended to be laminar depending on the solidification velocity. In addition, since it was not necessary to estimate parameters like the wall friction velocity which were difficult to define in principle in these flows, we could validate an advantage of modified dynamic models.

研究分野：流体力学

キーワード：乱流 熔融 非ニュートン粘性流体 直接数値シミュレーション ラージエディシミュレーション

### 1. 研究開始当初の背景

レーザー溶接時に発生する溶融池内部の固液界面など、物質が相変化することによって境界面の位置が変化する現象は、身近な生活面や工業機械に関わる場面において存在する。一方で、自然界の流れ、工業製品に関係する大半の流れは乱流であり、相変化が伴う流体内部もその例外ではなく、乱流場が存在する可能性が高い。乱流現象は、流れの抵抗の増加や、運動量や熱の輸送量の増加など、工学的には重要な現象であり、ときには乱流を抑制させ、またあるときには乱流を制御し、有効活用してきた。乱流の種類の一つである壁乱流は、壁の上に乱流境界層が存在する乱流現象であり、壁表面の状態が変化すると、その上を流れる乱流場の特性も変化すると考えられる。流体と固体壁が同じ媒質である場合、流体と固体壁の境界は、壁と同等に扱うことができると仮定すると、壁が溶け出して固体から流体に相変化する場合は、乱流場に運動量を持たない流体が壁から供給される。逆に流体が凝固して流体から固体に相変化する場合は、固体壁の一部となり、乱流場の運動量が奪われることになる。

このような境界面の位置が変化する場合の流れを調べる例として、溶接棒が溶けて固まる様子のメカニズムを調べる場合を考えると、流体は液体金属のため、表面上の流れ以外を目視、計測することは非常に困難である。また、調べる目標とする流体が、高温、高圧の環境下にある場合、計測自体が危険になる場合も考えられる。したがって、近年のコンピュータの高精度化に伴う数値シミュレーションによる予測は、圧力や密度など実験では計測することができないパラメータの計測が可能である点、実験条件の変更が容易な点などから、有効な手段である。

### 2. 研究の目的

本研究では、一様に固体壁が溶融、または流体が凝固する壁に沿う乱流境界層の挙動を数値シミュレーションで再現して、乱流統計量と乱流の瞬時構造の特徴を相変化がない場合と比較する。そして、溶融、または凝固に伴う乱流境界層の変化とそのメカニズムを解明する。さらに、得られた知見を基に本研究への既存の乱流モデルの適用性を評価するとともに、メカニズムに基づいた乱流モデルの改良点の提示を目指している。

### 3. 研究の方法

溶融、凝固を伴う壁面に沿う乱流境界層の計算領域および境界条件を、本研究で解析対象とする。流動を記述する基礎方程式は、非圧縮性流れの連続の式と Navier-Stokes の運動方程式である。溶融と凝固の効果を考慮するために、壁面上の速度に関する条件を設定した。この基礎方程式に従って、コロケート格子を用いて DNS を実行した。空間微分は 4 次

精度中心差分で近似し、時間積分のために、対流項と粘性項に 2 次の Adams-Bashforth 法を、圧力項と連続の式に Backward Euler 法を用いた Fractional Step 法を採用した。流れの数値シミュレーションを実行するに、ベクトル型並列計算機を利用して、大規模計算を効率よく実行できた。

### 4. 研究成果

溶融、凝固する乱流境界層の再現 本計算では、流れ場を乱流に遷移させ、十分に時間が経過した準定常状態になってから、壁が一様に溶融し始める場合、流体が一様に凝固し始める場合、引き続き、溶融も凝固もない場合（静止壁面）について、同じ経過時間の計算結果を比較した。時間経過による乱流エネルギーの時間変化を図 1 と図 2 に示す。また、乱流の瞬時構造を可視化した様子を図 3 に示す。壁が溶融する場合には、溶融速度に関係なく、乱流エネルギーは時間経過とともに増加し続け、図 3(a)では、乱流構造の特徴である縦渦も多く存在している。壁乱流の乱流構造が、境界面から離れて、速度勾配が小さくなくても、乱流が減衰せずに発達することから、壁面が溶融することが、乱流の発達を促進する働き、または独自の機構を持つことがわかった。一方、流体が凝固する場合、乱流エネルギーがゼロになる、または漸近することから、本研究の設定では、渦やストリークを形成している乱流構造が存在する領域が、時間経過とともに壁に取り込まれて固相の一部となり、流れ場は次第に再層流化することが、図 3(b)からも予測できる。しかし、凝固速度が最も遅い Case S1 の場合、更に時間経過を追って観察すると、ある程度時間が経過すると乱流エネルギーが一定の値に収束し、再層流化しなかった。これは、乱流構造が凝固する現象と同時に、独自に乱流を維持するメカニズムが存在する可能性を示唆している。

壁が溶融する場合、静止壁面と比べて、生成項は大きくなっていた。また、境界面の近くで生成は無く、生成が最大になるバッファ層と境界面側で一様に増加していた。それに対して、粘性散逸項は、境界面の近くで弱くなっていて、その他の領域では変化がない。さらに、乱流エネルギーの増加に直接寄与するレイノルズせん断応力と平均速度の関係性に注目した。両方を時間ごとに比較すると、レイノルズせん断応力と平均速度分布では挙動が違うことがわかった。壁が溶融して、境界面の位置が移動しても、平均速度分布は境界面に追従せず、一方で、レイノルズせん断応力の分布は、境界面に追従する挙動になった。この挙動の違いによって、速度勾配の大きな領域と、レイノルズせん断応力の大きな領域が重なり、その結果乱流エネルギーの生成が大きくなっていることがわかった。さらに、壁面付近のレイノルズせん断応力の挙動

のメカニズムを調べるために、レイノルズせん断応力を4象限分解によって成分分解して観察した。壁が溶融し始める場合、スイープ現象だけが境界面に追従していた。スイープが境界面近くで起こると、境界面との摩擦が増大し、乱流エネルギーの発生源になるため、壁が溶融することによる乱流エネルギーの増加の原因は、境界面近くでスイープによって起こる強いレイノルズせん断の応力の発生であることがわかった。

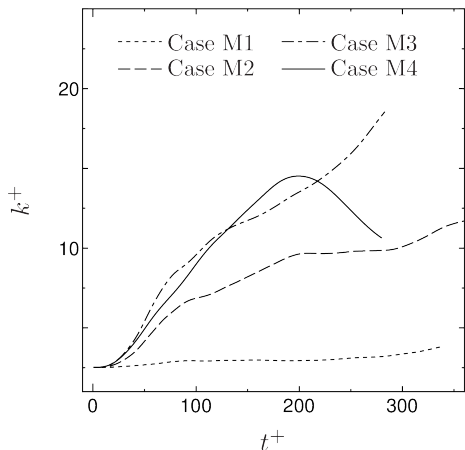


図 1. Turbulent kinetic energy of wall melting

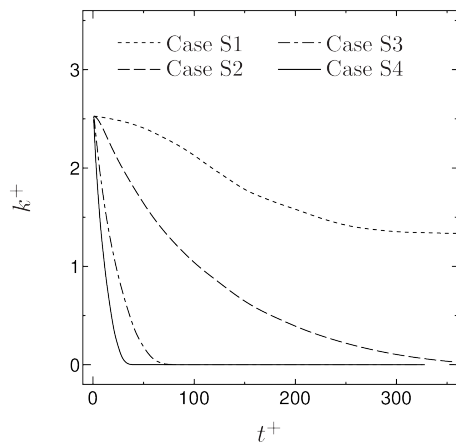
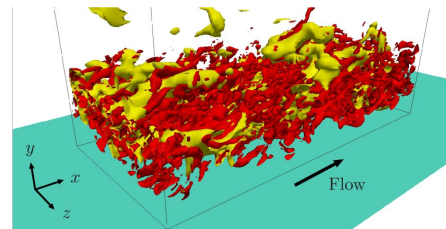


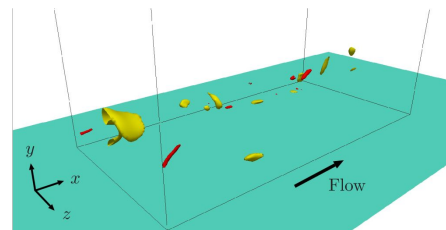
図 2. Turbulent kinetic energy of solidification

凝固する場合のエネルギーの収支では、静止壁面に比べて生成項が小さい。そして、境界面が移動することによる付加項と、粘性散逸項が境界面付近で急激に大きくなり、境界面付近で乱流エネルギーの生成と散逸が活発に起こっていた。これは、流体の凝固により乱流構造と境界面が接近すると、境界面との粘性作用で変動成分が抑えられ、境界面直上にある変動成分との間に大きな勾配ができるためであり、変動成分の勾配は、乱流エネルギーの生成と散逸の両方の効果を持ち、流体を凝固しながら境界面近傍で非常に大きな生成と散逸を同時に起こし、その結果、乱流エネルギーは減少し、流れ場は再層流化へ向かう。しかし、凝固速度が遅い Case S1 の場合、境界面上の速度勾配は、時間経過して

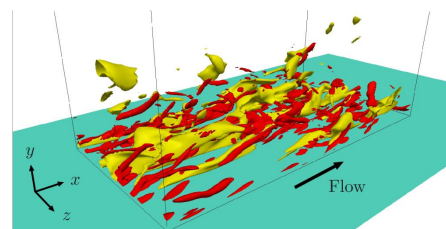
も一定の分布のまま変化せず、レイノルズせん断応力と分布の重なりによって乱流エネルギーを生成した。それに対して、乱流エネルギーの散逸は、レイノルズ応力の勾配が大きく影響するが、一定の値に収束するため、結果的に乱流エネルギーの生成と散逸は平衡状態になり、再層流化しなかった。したがって、流れ場の再層流化は、経過時間よりも、境界面近傍の速度勾配の挙動が重要であり、流れ場が再層流化の是非は、エネルギー収支の釣り合う項を見ることで予測できる。



(a) In the case of wall melting



(b) In the case of solidification



(c) In the case of static wall

図 3. Instantaneous structures in turbulent flow

以上のことから、溶融、凝固を伴う壁面に沿う乱流境界層では、原理的に見積もることが困難な壁面摩擦速度のような壁面付近の乱流スケールを評価するパラメーターが重要であると考えられる。また、実用的な状況における乱流予測法の応用のために、そのことを考慮した乱流モデルの実現が必要である。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

T. Ohta, M. Miyashita, DNS and LES with an extended Smagorinsky model for wall turbulence in non-Newtonian viscous fluids, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 査読有, Vol.206, (2014), pp.29-39.

[学会発表](計10件)

一柳隆史、太田貴士、非ニュートン粘性隆太乱流へのLESダイナミックモデルの適用性、日本機械学会北陸信越支部第54期講演会、2017/3/9、金沢

島田雄仁、太田貴士、圧縮性乱流境界層における圧縮性大規模構造発生抽出と観察、第94期隆太工学部門講演会、2016/11/12、山口

江口大樹、太田貴士、DNSによる粘弾性流体乱流の空間的及び時間的特徴の解明、第64回レオロジー検討会、2016/10/28、大阪

T. Ohta, N. Akiyama, Simulation of Turbulent Boundary Layers of Melting Liquid Metal Flow with a Mushy Layer, 1st Pacific Rim Thermal Engineering Conference, 2016/3/13, Hawaii

江口大樹、太田貴士、直接数値シミュレーションによる粘弾性流体乱流の瞬時構造の観察、日本機械学会北陸信越支部第53期講演会、2016/3/5、長野

大石恭輔、太田貴士、DNSによる壁面粗さ効果と乱流構造の空間的特徴の予測、第93期流体工学部門講演会、2015/11/7、東京

宇都宮啓紀、太田貴士、圧縮性乱流せん断層における多流体混合の直接数値シミュレーション、日本流体力学会年会2015、2015/9/26、東京

秋山直登、太田貴士、熔融液体金属で形成される乱流境界層の予測、日本流体力学会年会2015、2015/9/26、東京

T. Ohta, K. Yamada, Sweeping with the turbulent boundary layer along a melting wall, 8th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, 2015/9/15, Sarajevo

堀部真司、太田貴士、壁面上に半溶融層を伴う乱流を想定した直接数値計算、第28回数値流体力学シンポジウム、2014/12/9、東京

## 6. 研究組織

### (1) 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