

## 論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲 第 13146 号
------	---------------

氏 名 张 欣羨

### 論 文 題 目

Direct numerical simulation on turbulent/non-turbulent interface  
in compressible turbulent boundary layers  
(圧縮性乱流境界層中の乱流・非乱流界面に関する直接数値計  
算)

### 論文審査担当者

主査	名古屋大学	教授	長田 孝二
委員	名古屋大学	准教授	森 浩一
委員	名古屋大学	教授	酒井 康彦
委員	名古屋大学	教授	辻 義之

## 論文審査の結果の要旨

張欣羨君提出の論文「Direct numerical simulation on turbulent/non-turbulent interface in compressible turbulent boundary layers (圧縮性乱流境界層中の乱流・非乱流界面に関する直接数値計算)」は、圧縮性乱流境界層の乱流と非乱流界面近傍の構造とそれに及ぼす圧縮性の影響、ならびに界面を通しての流体とスカラの取り込み現象を明らかにしている。本論文は7章で構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第1章は緒論であり、本研究の背景と目的について述べられている。

第2章では、数値計算手法と解析条件について述べられている。本研究においては流体運動の支配方程式であるナビエ・ストークス方程式を直接解く直接数値計算を用いる。直方体の計算領域の下壁面をマッハ数 $M=0.8$ および1.6で動かし、下壁面上に生成される時間発展乱流境界層を計算する。過去の乱流境界層研究で用いられている格子解像度に加え、乱流・非乱流界面近傍での格子解像度が十分高くなるように調整した格子解像度の二種類について計算を行い、格子解像度の影響も調べることが説明されている。

第3章では、平均流速分布や速度変動rms値の分布等の基本特性が示され、運動量厚さに基づくレイノルズ数が同程度の過去の研究データとの比較が行われた。Van Driest変換を用いた平均流速分布と密度加重平均を用いた速度変動rms値の分布は非圧縮性乱流境界層に対する過去の研究データとよい一致を示した。このことは、圧縮性の影響は流体の熱物性特性に影響を与えるものの、乱流境界層の構造を変化させないことを示している。また、これらの平均およびrms値に関しては格子解像度の違いはほとんど見られなかった。これらの結果は、本数値計算の妥当性ならびに壁面乱流境界層内部の構造を調べるための従来の格子解像度設定が十分であることを示している。

第4章では、まず乱流・非乱流界面の検出方法について述べられ、格子解像度の影響と圧縮性の影響について調べられた。乱流・非乱流界面はある閾値をもつ渦度の大きさの等値面として検出され、さらに、渦度輸送方程式の各項からviscous super layer, turbulent sublayerの厚さが評価された。これらの厚さの比較と乱流・非乱流界面の可視化画像から、過去の乱流境界層研究で用いられている格子解像度は乱流・非乱流界面の構造を調べるには不十分であることを明らかにし、適切な格子解像度を提案した。乱流・非乱流界面においては、流体はviscous super layer内では膨張、turbulent sublayer内では圧縮されることがわかった。マッハ数 $M$ が大きい場合には圧縮性の影響が大きくなるが、 $M=1.6$ の場合においても乱流・非乱流界面におよぼす圧縮性の影響は小さく、平均密度に対する密度変動の大きさは1%程度であることがわかった。

第5章では、乱流・非乱流界面を通しての流体とスカラの取り込み機構について検討を行った。界面は粘性の影響により非乱流側に頻りに移動するが乱流側への移動は少ないこと、界面では界面垂直方向の物質流束が大きいが、流体が取り込まれた後はturbulent sublayer内で接線方向の物質流束が卓越すること、viscous super layerとturbulent sublayerの境界でスカラ散逸が極大値を持つこと、スカラ散逸はリーディングエッジ側で大きくトレイリングエッジ側で小さいことがわかった。

第6章では、実世界データ循環学リーダー人材養成プログラムと本研究との関連について述べられている。

第7章では、本研究の結論ならびに将来の課題と展望が述べられている。

以上のように本論文では、圧縮性乱流境界層の乱流と非乱流界面近傍の構造とそれに及ぼす圧縮性の影響、ならびに界面を通しての流体とスカラの取り込み現象を明らかにしている。これらの評価方法並びに得られた結果は、航空分野でみられる圧縮性乱流境界層の構造解明と数値モデルの改良・開発に重要であり、工学の発展に寄与するところが大いだと判断できる。よって、本論文の提出者である張欣羨君は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格があると判断した。