

令和 2 年 6 月 19 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06160

研究課題名(和文) 時間平均を中間生成量とする5成分分割による乱流 - 非乱流エネルギー変換機構の解明

研究課題名(英文) Energy Exchange Mechanism on the Turbulent and non-turbulent Interface by means of Intermediate Mean Kinematic Energy Based on 5-component Decomposition

研究代表者

望月 信介 (Mochizuki, Shinsuke)

山口大学・大学院創成科学研究科・教授

研究者番号：70190957

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)：乱流境界層の外層における乱流 - 非乱流界面を実験的に調べた。乱流と非乱流領域間の運動量とエネルギーの変換機構を特定のための方程式を得た。実験を主流速度が加速する二次元平衡境界層において行った。対数速度分布の修正法は順圧力勾配下においても有用であることを確認した。一方、外層における後流強さは消失することを見だし、乱れエネルギー拡散の抑制を確認した。生成項の調査から、変換に寄与する運動を検出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

乱流境界層は航空機や自動車、ダクト内に広く存在し、エネルギー効率を左右する。これを理解することは、抵抗や騒音の低減を導き、CO2削減も可能とする。本研究はエネルギー消費の源であるエントレインメントを力学的に調査する方法の開発に焦点を当てた。平衡境界層という最適な条件を設定し、高精度の速度と壁面せん断応力の測定の下で研究した。エントレインメントを引き起こす具体的な乱流運動の検出に成功した。エネルギー消費の源になる運動を特定できた成果は、摩擦抵抗や騒音の低減などの流れの制御技術の開発に役立つものである。

研究成果の概要(英文)：The turbulent-nonturbulent interface in the boundary layers has been investigated experimentally. Five-component decomposition of the fluctuating velocities are introduced and equations for momentum and kinematic energy of turbulent and nonturbulent fluids are derived to discuss energy convert mechanisms. The experiment was made in an equilibrium turbulent boundary layer subjected to accelerating free stream velocity. The correction to the logarithmic velocity profile considering non-parallel streamline works well under the favorable pressure gradient. The wake component in the outer layer disappears without entrainment. The diffusion in the turbulent kinematic energy equation is strongly suppressed in the outer layer. The interaction between turbulent and nonturbulent fluids can be examined with the aid of convert terms involved the equation derived from five-component decomposition. Motions contributing energy convert can be detected by investigating the production terms.

研究分野：流体工学

キーワード：乱流境界層 エントレインメント 壁面せん断応力 エネルギー変換 エネルギー散逸

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 乱流境界層はディフューザ内部や航空機翼面上に存在し、その特性が流体機器の性能を左右する。乱流境界層の役割は外部からの運動量を取り込み、乱流運動によって壁近くに輸送することである。外部からの運動量を取り込みはエントレインメントと呼ばれる。エントレインメントは乱流と非乱流とが混在する領域に存在する大規模渦に支配されていると考えられているが、明確な定義に基づく定量化は行われていない。

(2) 乱流境界層の構造の普遍的な表現は古典的力学に基づいてされてきた。壁近くにおける壁法則は壁面せん断応力と統計量との普遍的な関係を表現し、様々な外力に対して実用的な指標として用いられている。一方、エントレインメントが生じる外層においては、後流法則が提案されている。壁面せん断応力と統計量との関係を定式化するものであるが、外層の性質は外力に敏感であり、一定の法則が見いだされていない。

(3) この理由は、乱流と非乱流間の運動量の交換を力学的に考察する明確な方程式が存在しないことである。そのため、エントレインメントは定性的概念として説明されるのみで、定量的吟味ができていない。また、エントレインメントを左右する管理された外力の作用下において、壁面せん断応力が精度よく計測できていないことがもう一つの原因である。

2. 研究の目的

(1) 上記背景の中、境界層に負荷した外力が明確にできること、外力作用下において壁面せん断応力が高精度に計測できること、エントレインメントを方程式に基づき力学的に議論すること、の3点を目標として研究を実施した。外力はエントレインメントを大きく左右する圧力勾配とし、その効果を明確にするために慣性力との比が一定となる平衡条件が採用された。壁面せん断応力の計測には、圧力勾配下においても正確な計測が可能なサブレイヤープレート法を開発し、応用した。

(2) エントレインメントの定量化については、乱流と非乱流領域の領域平均、時間平均、不規則成分という5つの分割を導入し、それらの運動方程式に基づいて考察が行われる。運動エネルギーについては、乱流領域と非乱流領域間の変換が方程式に含まれる項により明らかにする。この領域平均運動エネルギーの輸送方程式により実験データを吟味することで、エントレインメント機構を明確にする。

3. 研究の方法

(1) 研究は風洞を用いた実験により行った。順圧力勾配下において、平均速度分布が自己相似になる二次元平衡境界層を構築した。壁面せん断応力は直接測定に加え、独自に開発されたサブレイヤープレートを用いて計測された。平均速度分布およびレイノルズ応力分布は自作の熱線プローブを用いて計測された。局所相似性である壁法則および後流法則について、ゼロ圧力勾配下との比較により、順圧力勾配の影響を吟味した。ゼロ圧力勾配下の乱流境界層においては標準的な統計量が取得されており、流れ場の状態と計測技術の精度は保証されていることを確認した。

(2) 乱れエネルギーの輸送方程式における生成項、散逸項および乱流拡散項を調査した。外層においてはエントレインメントと乱流拡散項とが密接に関係していることが予想されるため、後流成分の大きさの変化と乱流拡散項との関係に注目した。

(3) 外層については、乱流 - 非乱流の識別方法を確立した。渦度を考慮した変動速度の時間微分を指標とする方法を提案し、ゼロ圧力勾配下の標準的乱流境界層において報告されている結果を参照することで、手法の妥当性を確認した。乱流 - 非乱流領域について、変動速度の2成分分割に基づく輸送方程式を導いた。乱流および非乱流領域の運動エネルギーの変換項に着目した。領域間の運動エネルギー変換、つまりエントレインメントを左右する統計量を見出し、メカニズムを考察した。エントレインメントに寄与する運動を推測した。

4. 研究成果

(1) 圧力勾配のある流れ場において壁面せん断応力の正確な計測法の確立を行った。本研究で採用した方法は著者らが開発した直接測定とサブレイヤープレート法である。サブレイヤープレート法は同様の順圧力勾配の作用下にある二次元チャンネル流において精密な計測精度の確認を行った。図1は二次元チャンネル内において、従来から知られているサブレイヤーフェンス法と測定感度を比較したものである。両者ともに直線底層内の速度を利用することから、圧力勾配に独立な計測値をえることが期待できる。サブレイヤープレート法はシンプルな構造を持ち、セ

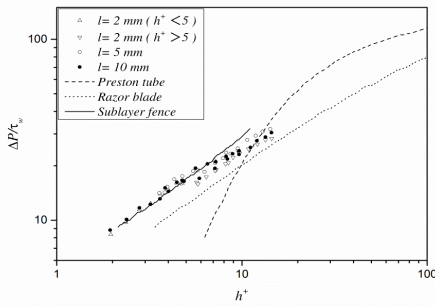


図1 サブレイヤ プレートの感度

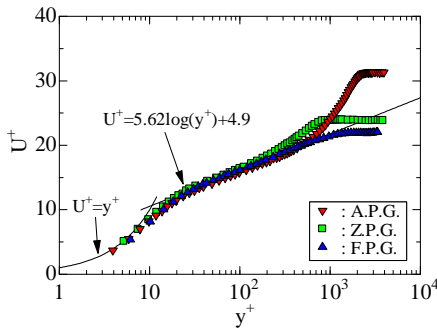


図2 対数速度分布の比較

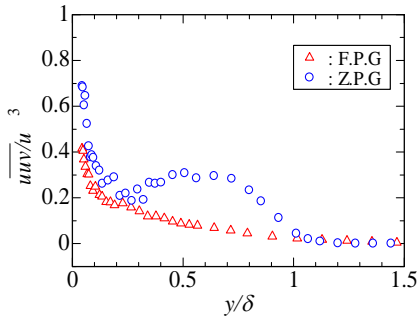


図3 変動速度の三乗積の変化

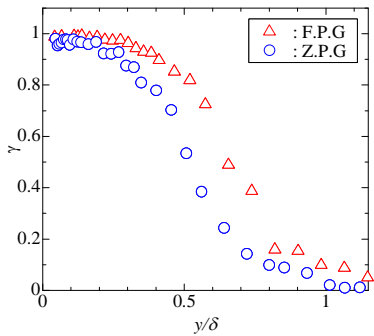


図4 間欠係数分布の比較

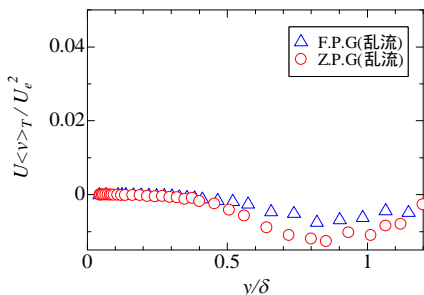


図5 乱流 非乱流速度相関

ンサのバラツキが無く、サブレイヤーフェンスと同程度の高い感度が得られた。適切に設定された直接測定装置はサブレイヤープレート法とほぼ同じ壁面摩擦抵抗を取得し、局所相似性議論のための壁面せん断応力を高精度で取得できた。

(2) 得られた壁面せん断応力を用い、局所相似性に基づく統計量の特性を確認した。図2は対数速度分布を表している。図中には当該研究者が圧力勾配のある境界層について、流線の傾きを考慮して修正した対数法則が描かれている。順圧力勾配下においても修正法は有効に機能し、対数層の存在を示すことができる。一方、外層においては順圧力勾配下の流れにおいて、後流強さが消失した。エントレインメントと後流強さとの密接な関係が確認された。

(3) 乱れエネルギー収支が評価された。内層において乱れの生成項と散逸項は卓越し、ほぼバランスしている。このことは対数領域の存在を保證する一理由となる。外層において、拡散項に圧力勾配の影響が顕著にみられる。外層における対流項および拡散項は、生成項および散逸項と同程度の寄与をなす。対数分布から逸脱する後流成分が拡散項の大小に関係づけることが可能と考えられる。順圧力勾配により、拡散項は抑制されている。図3は拡散項の主たる成分である変動速度の三乗積を比較した分布である。変動速度の三乗積は乱れエネルギーの輸送フラックスと解釈される。順圧力勾配による拡散の減少は、変動速度の三乗積、すなわち乱れエネルギーの輸送フラックスの抑制が原因であることが確認された。

(4) 乱流と非乱流との識別を行い、外層における間欠構造を調査する準備を行った。乱流と非乱流とを変動速度の時間微分値に基づく識別法を確立した。図4は間欠係数の分布を比較したものである。順圧力勾配により外層領域の乱流の割合が高い。順圧力勾配による流れ方向伸張運動が乱流領域を拡大させたと解釈される。

(5) 変動速度の5成分分割に基づき輸送方程式が導かれた。輸送方程式を導出することで、通常的时间平均による平均速度の勾配が寄与することが判明した。非乱流領域と乱流領域との運動エネルギーの変換を意味する成分は、時間平均速度と領域平均速度との相関に速度勾配を掛け合わせた下式(1)の4つの成分である。

$$\begin{aligned}
 -U <v>_T, & \quad -<u>_T V, \\
 -<u>_T <v>_T, & \quad -<u'_T v'_T>_T \quad (1)
 \end{aligned}$$

添え字Tによる<*>成分は乱流領域における平均、大文字は時間平均を意味する。この中でエントレインメントに最大の寄与が期待される第1番目の成分を図5に比較した。時間平均と領域平均速度の相関については、乱流領域で領域平均速度の下降流により時間平均運動量を輸送する成分、非乱流領域で領域平均速度の上昇流による時間平均運動量の輸送を意味する成分が運動エネルギーの変換に寄与することが判明した。エントレインメントに寄与する乱流運動の特定が、力学的方程式に基づいて達成された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Hua Dan, Suzuki Hiroki, Mochizuki Shinsuke	4. 巻 56
2. 論文標題 Shear Stress Vector Measurement Using a Circular Sublayer Plate with Multiple Pressure Taps	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIAA Journal	6. 最初と最後の頁 2138 ~ 2144
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.J056794	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 望月信介、亀田孝嗣	4. 巻 37
2. 論文標題 壁乱流研究における壁面せん断応力の計測	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ながれ	6. 最初と最後の頁 261 ~ 266
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Mizukami Suyako, Suzuki Hiroki, Mochizuki Shinsuke
2. 発表標題 Energy transport mechanisms in the outer layer of the turbulent boundary
3. 学会等名 The 7th Joint Conference on Renewable Energy and Nanotechnology (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中山大輔, 鈴木博貴, 望月信介
2. 発表標題 サブレイヤープレートを用いた壁面せん断応力計測法の開発
3. 学会等名 日本機械学会第68期流体工学部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 望月信介, 鈴木博貴, 亀田孝嗣
2. 発表標題 圧力勾配下の乱流境界層に関する実験的研究
3. 学会等名 第22回日本流体力学会中四国・九州支部講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Dan Hua, Hiroki Suzuki, Shinsuke Mochizuki
2. 発表標題 Local Wall Shear Stress Measurement with a Rectangular Plate Submerged in the Sublayer
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 水上須弥子, 鈴木博貴, 望月信介
2. 発表標題 順圧力勾配下に発達する乱流境界層の外層における構造
3. 学会等名 日本機械学会第97期流体工学部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 望月信介, 鈴木博貴
2. 発表標題 乱流境界層のエントレインメント機構に関する考察
3. 学会等名 第24回日本流体力学会中四国・九州支部講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 引田優大, 鈴木博貴, 望月信介
2. 発表標題 圧力勾配下の乱流境界層におけるエンTRAINメント機構の解明
3. 学会等名 日本機械学会中国四国支部第58期通常総会講演会
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
研究分担者	鈴木 博貴 (Suzuki Hiroki) (10626873)	山口大学・大学院創成科学研究科・助教 (15501)	