

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17969

研究課題名(和文) 圧力・速度勾配同時測定プローブの開発および噴流の乱流構造の解明

研究課題名(英文) Development of pressure-velocity gradient measurement probe and clarification of the turbulent mechanism of jet

研究代表者

岩野 耕治 (Iwano, Koji)

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：20750285

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、乱流中の乱れの等方化過程を直接捉えるために圧力と速度勾配を同時に測定することが可能なプローブを開発した。レイノルズ応力の収支から求めた圧力-速度勾配相関と開発したプローブによる直接計測から求めた圧力-速度勾配相関の値は二次元噴流の速度半値幅の内側でよく一致し、開発したプローブの測定精度の高さが確認された。また、ウェーブレット解析を用いることにより、乱れの等方化の際にはスケール間のインタラクションが存在することが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed new probes that can simultaneously measure pressure and velocity gradient in order to directly investigate the process of Reynolds stress disappearance in turbulent flow, that is, the isotropization process of turbulence. The values of the pressure-velocity gradient correlation obtained from the Reynolds stress balance and that obtained from the direct measurement by the developed probes agree well inside the velocity half-width of the planer jet, and the measurement accuracy of the developed probes was confirmed. In addition, by using wavelet analysis, it became clear that there is interaction between scales in the isotropization process of turbulence.

研究分野：流体工学

キーワード：圧力・速度勾配相関 噴流 乱流 レイノルズ応力

1. 研究開始当初の背景

近年、ガスタービン等の流体機器開発にはコンピュータを用いた流れの数値シミュレーションが頻繁に用いられている。ほとんどの流体機器内の流れは乱流状態となっているため、機器内の流れをより正確に予測するためには、乱流輸送現象のメカニズムを解明し、数値シミュレーションにおける乱流モデルを改良することが必要である。乱流の構造を調査する際に工学的に一般的に用いられるものに2次の相関量であるレイノルズ応力テンソルの輸送方程式をモデル化して解くレイノルズ応力方程式モデルがある。そのモデル化の中で特に重要とされているのが圧力変動と速度勾配変動からなる圧力-速度勾配相関項である。この項は各方向の乱れのエネルギーの再配分とレイノルズ応力の消失、すなわち乱れの等方化に深く関係している。これが正確にモデル化できれば、どのようにレイノルズ応力生じ、輸送や圧力への変換を経て散逸していくかを詳細に予測することが可能となる。しかしながら、過去にこの圧力-速度勾配相関項の直接計測に成功した例はない。そこで、本研究では圧力-速度勾配相関項を直接計測することが可能な圧力-速度勾配同時測定プローブを開発することを目的とした。圧力-速度勾配相関項の直接測定が可能となれば乱れの等方化のメカニズムが明らかとなるだけでなく、レイノルズ応力方程式モデルによる乱流の数値シミュレーションにおいてこれまで用いられてきた乱流モデルの検証をより詳細に行うことが可能となり、数値計算の精度向上が期待される。

2. 研究の目的

上述の背景のもと、本研究では、圧力と速度勾配を同時に測定可能なプローブの開発を目的とした。さらに、開発したプローブを用いた計測により、二次元噴流中の乱れの等方化のメカニズムを明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 圧力-速度勾配同時測定プローブの製作およびプローブ特性の調査：局所で圧力と速度勾配を同時に捉えられるような圧力-速度勾配同時測定プローブを製作した。検定実験を行うことにより、圧力測定と速度勾配測定用プローブ同士の干渉が生じず、かつ検査体積が最も小さくなるようなプローブ構造とした。図1に本研究で製作した圧力-速度勾配同時測定プローブの概略図を示す。本研究では主流方向と垂直方向の速度勾配を測定するために2種類のプローブを製作した。プローブは2本の熱線流速計プローブと極細静圧管からなる構造となっている。熱線はそれぞれのプローブごとに直径が5 μ mと1 μ mのものを用いた。静圧管の直径は0.3mmであり、静圧管の内部には20kHzの応答性を持つマイクロホンを入れている。どちらのプ

ローブも空間分解能は0.7mm以下である。

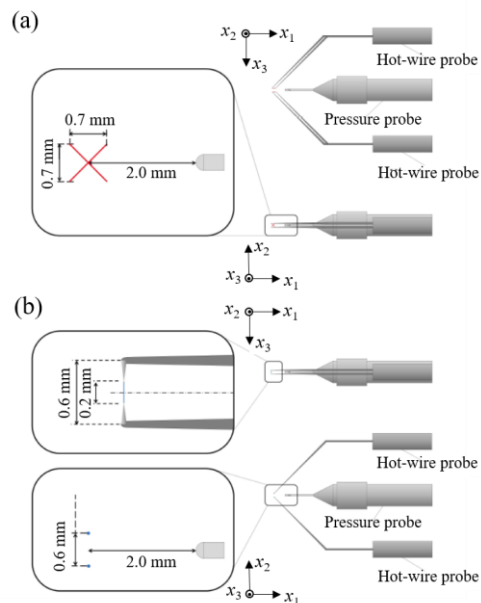


図1. 圧力-速度勾配同時計測プローブ概略図. (a)主流方向速度勾配測定用, (b)垂直方向速度勾配測定用.

(2) 圧力-速度勾配同時測定プローブを用いた二次元噴流中の乱流輸送メカニズムの解明：上記(1)で製作した圧力-速度勾配同時測定プローブを用いて、二次元噴流中の乱流の計測を行い、圧力変動と速度勾配変動の関係を調査した。図2に本実験で使用した二次元噴流風洞および座標系を示す。実験は噴流出口幅を基準としたレイノルズ数を10000として行った。また、空間的な乱れの構造を把握するために、噴流中の複数の位置で計測を行った。

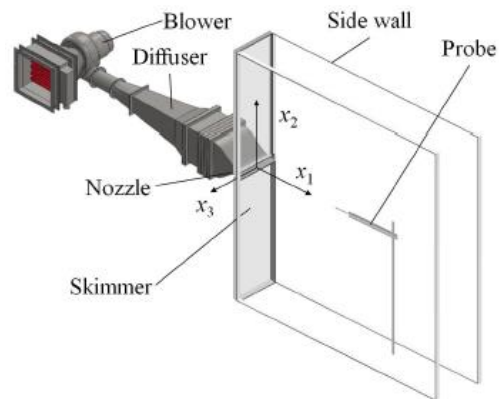


図2. 二次元噴流風洞概略図.

4. 研究成果

二次元噴流では、定常状態のレイノルズ応力 $\overline{u_1' u_2'}$ の輸送方程式は、境界層近似の適用により以下の様になる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{u_1' u_2'}}{\partial t} &= C_{12} + P_{12} + \Phi_{12} + D_{12} + \varepsilon_{12} = 0 \\ C_{12} &= -U_1 \frac{\partial \overline{u_1' u_2'}}{\partial x_1} - U_2 \frac{\partial \overline{u_1' u_2'}}{\partial x_2} \\ P_{12} &= -\overline{u_2'} \frac{\partial U_1}{\partial x_2} \\ \Phi_{12} &= \left(\frac{p'}{\rho} \frac{\partial u_1'}{\partial x_2} + \frac{p'}{\rho} \frac{\partial u_2'}{\partial x_1} \right) \\ D_{12} &= -\frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{1}{2} \overline{u_1' u_2'^2} + \frac{1}{\rho} \overline{u_1' p'} - \nu \frac{\partial \overline{u_1' u_2'}}{\partial x_2} \right) \\ \varepsilon_{12} &= -2\nu \left(\overline{\left(\frac{\partial u_1'}{\partial x_1} \frac{\partial u_2'}{\partial x_1} \right)} + \overline{\left(\frac{\partial u_1'}{\partial x_2} \frac{\partial u_2'}{\partial x_2} \right)} + \overline{\left(\frac{\partial u_1'}{\partial x_3} \frac{\partial u_2'}{\partial x_3} \right)} \right) \end{aligned}$$

ここで、下付き添え字はそれぞれ座標系の軸の方向と対応しており、 C_{12} は対流項、 P_{12} は生成項、 Φ_{12} は圧力-速度勾配相関項、 D_{12} は拡散項、 ε_{12} は散逸項と呼ばれる。さらに、拡散項は第一項の乱流拡散項、第二項の圧力拡散項、第三項の粘性拡散項に分けられる。圧力-速度勾配相関と散逸項の和は、対流項 C_{12} 、生成項 P_{12} 、拡散項 D_{12} を計測し分布を求めたうえでの残差として値を見積もることができる。さらに、局所等方性を仮定すると $\varepsilon_{12} \sim 0$ であり、残差は圧力-速度勾配相関とみなすことができる。

図 3(a)に実際に計測された $x_1/d = 40$ における各項の噴流垂直方向分布を示す。ここで、 d は噴流出口幅、 $U_{1,c}$ は $x_1/d = 40$ における噴流中心主流方向平均流速、 b_u は速度半値幅である。図中の圧力-速度勾配相関項 Φ_{12} は上述の応力収支から求めた。図より、レイノルズ応力 $\overline{u_1' u_2'}$ の輸送に大きくかかわるのは生成項 P_{12} と圧力-速度勾配相関項 Φ_{12} であることがわかる。図 3(b)に開発したプローブにより直接計測された圧力-歪速度相関の $x_1/d = 40$ における噴流垂直方向分布を示す。また、図 3(a)で示したレイノルズ応力収支から求めた圧力-歪速度相関の分布を併せて示す。図 3(b)より、速度半値幅 b_u より内側において、直接計測により得られた分布は収支から得られた分布にかなり近いものとなっている。このことから、本研究で開発した圧力-速度勾配同時計測プローブが高い測定精度を有することがわかる。半値幅より外側では直接計測による値は大きくずれているがこれは噴流外縁の乱れ強度が大きいため、熱線流速計の測定限界を超えているためである。また、半値幅より内側の領域では圧力-速度勾配相関のうち、 $\overline{(p'/\rho)(\partial u_2'/\partial x_1)}$ が支配的で、 $\overline{(p'/\rho)(\partial u_1'/\partial x_2)}$ の値はかなり小さいことがわかる。

図 4(a)に u_1' と u_2' の、図 4(b)に p' と $\partial u_2'/\partial x_1$ のウェーブレットコスプレクトルを示す。ウェ

ーブレットを用いるとフーリエ変換では捉えること難しい間欠的な現象を捉えることができる。図よりレイノルズ応力は約 50 Hz 以下の周波数で生成されていることがわかる。一方、圧力-速度勾配相関は 50 Hz よりも高周波数で大きな値を持つことがわかる。すなわち、低周波で発生したレイノルズ応力が高周波で消失するというメカニズムがわかる。また、圧力-速度勾配相関は 100 Hz~2000 Hz の周波数帯で同じタイミングで大きな値を取っており、乱れの等方化は各スケールで独立して起こるのではなく、スケール間のインタラクションが存在することが明らかとなった。

以上のように、本研究では圧力と速度勾配を同時計測することが可能なプローブを開発し、二次元噴流中で圧力-速度勾配相関の特性の調査を行った。レイノルズ応力収支との比較により、開発したプローブは直接計測として十分な精度を有することがわかった。また、直接計測することでしかわからない圧力-速度勾配相関のスケール間インタラクションの存在が明らかとなった。これらの知見は将来的にレイノルズ応力輸送方程式モデルの精度向上に寄与するものであると考えられる。

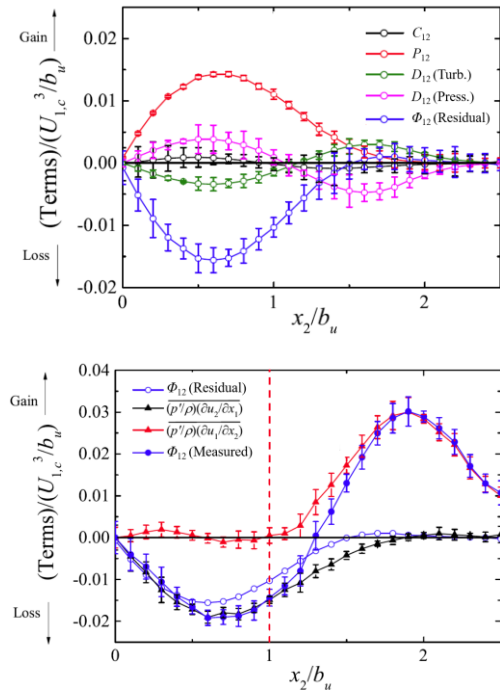


図 3. (a) $x_1/d = 40$ におけるレイノルズ応力収支. (b) 直接測定により得られた圧力-速度勾配相関.

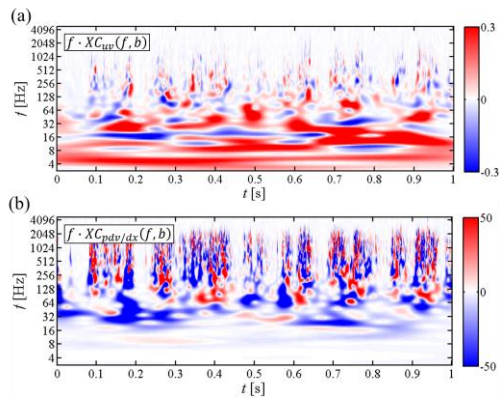


図4. (a) u_1' と u_2' のウェーブレットコスペクトル. (b) p' と $\partial u_2/\partial x_1$ のウェーブレットコスペクトル.

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)

- ①三浦 健介, 伊藤 靖仁, 酒井 康彦, 岩野 耕治, 長田 孝二, 半デルタ翼形状を有するボルテックスジェネレータによる軸対称噴流の制御に関する研究 (第 1 報: 速度場の統計量による評価), 査読有, 日本機械学会論文集, 2015, 15-00306. DOI:10.1299/transjsme.15-00306

[学会発表] (計 5 件)

- ①高橋 護, 岩野 耕治, 酒井 康彦, 伊藤 靖仁, 二次元噴流における圧力および歪速度の同時計測, 日本機械学会 第 94 期 流体工学部門 講演会, 2016 年 11 月 12 日, 山口大学工学部 (宇部市).
- ②高橋 護, 岩野 耕治, 中村 悟, 酒井 康彦, 伊藤 靖仁, 二次元噴流における圧力-歪相関・圧力-温度勾配相関の計測, 日本機械学会 2016 年度年次大会, 2016 年 09 月 12 日, 九州大学伊都キャンパス (福岡市).
- ③高橋 護, 岩野 耕治, 酒井 康彦, 伊藤 靖仁, 二次元噴流における乱流熱輸送機構に関する実験的研究, 日本機械学会東海支部 第 63 期総会・講演会, 2016 年 3 月 17 日, 愛知工業大学 (名古屋市).
- ④村松 空, 岩野 耕治, 酒井 康彦, 伊藤 靖仁, 式田 光宏, 熱式マイクロセンサによる壁面せん断応力の計測, 日本機械学会流体工学部門講演会講演, 2015 年 11 月 07 日, 東京理科大学 (東京都).
- ⑤Koji Iwano, Sora Muramatsu, Yasuhiko Sakai, Yasumasa Ito, Koji Nagata, Measurement of the Wall Shear Stress by the Micro Hot-film Sensor in Wall Jet, 12th International Conference on Flow Dynamics, 2015 年 10 月 27 日, Sendai

International Center (仙台市).

[その他]

ホームページ

<http://www.mech.nagoya-u.ac.jp/sfe/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩野 耕治 (IWANO, Koji)

名古屋大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 20750285