

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04237

研究課題名（和文）マイクロ風向風速センサによるレイノルズせん断応力の高精度計測

研究課題名（英文）High-Accuracy Measurement of Reynolds Shear Stress by a Micro Flow-Direction and Velocity Sensor

研究代表者

保浦 知也（Houra, Tomoya）

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：00324484

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）：乱流中における熱および物質の輸送を定量的に予測するためには、レイノルズせん断応力を始めとする物理量を計測する必要がある。本研究は、新しい原理で動作する熱線流速計を開発し、レイノルズせん断応力の高精度計測を実現した。新開発した平行二線式熱線流速計は、定温度型で駆動される同一形状の二つのI形熱線センサを流れの垂直方向にわずかに離して平行に配置した形状となる。このセンサは風速と風向を連続的に検知することが可能である。円柱後流の乱流場を対象としてその測定精度を検証した結果、平均速度と変動の乱れ強さだけでなく、レイノルズせん断応力や動的特性についても十分に信頼できる測定結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

身の周りの空気や水の流れのほとんどは時間的・空間的に乱れた状態にある。このとき熱や汚染物質はこの乱流運動によってその大半が運ばれるため、これを予測し制御するには、乱流を精密に計測することが重要である。本研究で対象としたレイノルズ応力とは、乱流によって流体にはたらく見かけの応力であり、さまざまな状況においてこれを測定することが必要とされている。常温常圧の気相乱流場に対して、これまで種々の計測方法が開発されているが、本研究成果は新しい原理にもとづく計測法を提案するものである。小スケールの連続的な乱流変動をレーザなどの装置を用いずに計測可能となったことからその意義は大きいと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In order to quantitatively predict the transport of heat and mass in turbulent flow, it is necessary to measure physical quantities such as Reynolds shear stress. In this research, we have developed a hot-wire anemometry that operates on a new principle and realized high-precision measurement of Reynolds shear stress. The newly developed parallel two hot-wire anemometer has a shape in which two I-shaped hot-wire sensors of the same shape driven by a constant temperature type are arranged in parallel with each other slightly separated in the vertical direction of the flow. This sensor can continuously detect the wind speed and the wind direction. As a result of verifying the measurement accuracy of the turbulent field of the cylindrical wake, we obtained sufficiently reliable measurement results not only for the average velocity and turbulence intensities of fluctuations, but also for the Reynolds shear stress and dynamic characteristics.

研究分野：熱流体工学

キーワード：乱流 レイノルズ応力 熱線流速計 抵抗線温度計 風向風速計

1. 研究開始当初の背景

身の周りの流れのほとんどは乱流状態にあり、時々刻々と変動する乱流による熱や物質の移動を定量的に予測することは非常に難しいことが知られている。熱流体機器の設計・開発など、工業的には平均的な流れの状態が分かれば十分な場合が多いため、統計的な性質だけでも明らかにすることが必要とされている。しかし、乱流状態にある流体の平均速度、平均温度および平均濃度がどのように分布するかは、より高次の相関量である、レイノルズせん断応力、乱流熱流束、乱流物質流束の分布を知ることと等価であり、相関量の測定が必要となる。

平板上を発達する境界層や管内流などの標準的な乱流であり、かつレイノルズ数が低い流れについてはコンピュータによる直接数値シミュレーション (DNS) を実施することにより平均量や相関量が得られる。しかし、現実のより複雑な乱流においては、これらの統計量を実際に測定するしか、その性質を明らかにする方法は無い。

実験的にレイノルズせん断応力を計測するには、2方向の速度変動を同一空間座標で同時刻に測定する必要がある。常温常圧の気相乱流場に対して、これまで種々の計測方法が開発されている。その代表例は、2本の加熱された直径 $5 \mu\text{m}$ 程度の金属細線 (熱線) を X 形に組み合わせた熱線流速計、2色レーザ光を用いるレーザドップラー流速計 (LDA)、シート状のレーザ光を利用する粒子画像流速計 (PIV) である。一般にレーザを用いた計測では、流れの中に粒子を入れる必要があるが、この粒子が温度や濃度を計測するセンサを汚して応答を悪化させるために、変動量の計測が困難になるという問題がある。一方、熱線流速計による速度計測では、粒子を混入する必要が無いため、温度変動や濃度変動といった他の物理量を同時に計測する際の制約は小さく、時系列信号をスペクトル解析することも可能である。

しかし熱線流速計には、2つの大きな欠点がある。1つ目の欠点は、熱線流速計は熱線の冷却に関わる速度の大きさを計測しているため原理的に逆流を計測できないことである。2つ目の欠点は、通常の熱線の長さが 1mm 程度であり空間分解能が低いことと、X形で利用する際に2本の熱線間の干渉を防ぐために 0.5mm 程度離れていることが原因でかたより誤差を生じることである。現在のところ、2つ目の欠点に対しては、微細加工技術を利用し X 形熱線流速計のサイズを従来の $1/10$ まで小さくして解決する方法が試されている。1つ目については、熱線を時間的にパルス状に加熱し前後に配置した温度センサで熱的後流の流下方向を検知することで逆流を計測するパルスワイヤ法が 45 年以上前に研究されていたが、逆流を含む 2 方向速度成分の同時計測は実現されなかった。

熱線流速計がもつこれらの欠点を克服し、瞬時速度ベクトルの大きさと角度を高精度に計測できれば、適用範囲が格段に広がる可能性がある。そこで、これまでとは全く異なる測定原理を用いた熱線流速計によりレイノルズせん断応力を高精度に計測することが必要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、マイクロ風向風速センサを用いて、レイノルズせん断応力の高精度計測を実現することである。新しいセンサにより 2 方向速度を測定する具体的なアイデアは下記の通りである。このセンサは、図 1 に示すように、1本の熱線流速計 (○、直径 $5 \mu\text{m}$ のタングステン線) とその周りに配置した複数の抵抗線温度計 (●、直径と材質は熱線と同様、この例では 5 本) から構成される。熱線流速計は速度ベクトルの大きさを計測するとともに風向検知のための熱源としても利用する。この熱線の下流に複数の抵抗線温度センサ (抵抗線群) を配置し、熱線により暖められた気流の熱的後流が変動する様子を各抵抗線の温度上昇として検出する。最大温度となる角度を探索することで、瞬時速度ベクトルの角度を高精度に測定する。このようなセンサが実現されれば、その発展形として、上流側にも抵抗線群を配置することで、逆流方向を含む速度 2 成分を計測することが原理的に可能である。また、抵抗線群を構成する抵抗線温度計の数や配置を最適化すれば、X 形熱線では困難とされている乱流境界層の壁近傍におけるレイノルズせん断応力を測定できる可能性もある。

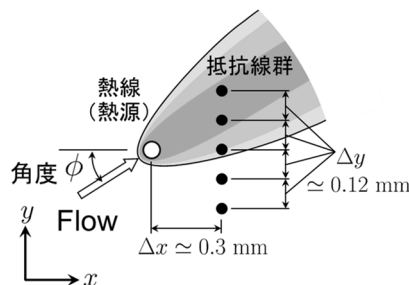


図 1 マイクロ風向風速センサ

3. 研究の方法

本研究では、この新しい原理に基づくマイクロ風向風速センサを作成し、熱線流速計の適用範囲を広げることを試みる。熱線や抵抗線の配置は種々の可能性を検討し、流れの中に設置された円柱の背後にできる後流における乱流 (円柱後流) や、平板上を発達する乱流境界層流れにおいて他の計測方法との結果を比較するための検証実験を実施する。

4. 研究成果

(1) 抵抗線の本数をこれまでの5本から2本に減らして、熱線の熱的後流を2つの抵抗線で検知して得られる温度上昇の差から、速度ベクトルの角度を検出する方法を提案し、平板乱流境界層における乱流諸量の測定精度を検討した。その理由は抵抗線の本数が多い場合には、流れをせき止める効果により測定対象の流れ場が変異することが懸念されるためである。そこで、熱的後流の角度を検知するために使用していた抵抗線の本数を従来の5本から2本に減らしても角度検知が可能かを調べた。その結果、2本の抵抗線で検知される温度の差を用いれば、角度が±15°の範囲で線形関係となるため十分な精度で角度検知が可能であることが明らかとなった。さらに、温度差と角度の関係は速度の依存性が低く抑えられることが明らかとなった。この方法を用いて、平板乱流境界層における乱流諸量の測定精度を調べたところ、従来の同等以上の測定結果が得られることが明らかとなった。さらに、数値流体力学を援用してその動作原理を検証した。具体的には、熱線の熱的後流を2本の抵抗線のみで検知して得られる温度上昇から速度ベクトルの角度を検出する方法について差分法による直接数値シミュレーションにより検証した。平板上を発達する乱流境界層内に熱線を模擬した点熱源を配置し、その熱的後流が乱流中をどのように移流するかを明らかにし、下流において温度を検出する点の空間的配置に関するいくつかの示唆を得ることができた。

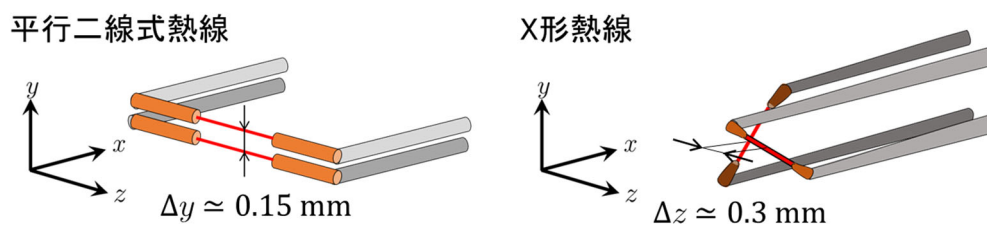


図2 新開発した平行二線式熱線（左）と従来のX形熱線（右）。センサ部（赤色）は、タンダステン線（線径5 μm、線長1mm）であり、銅メッキ部（橙色）が支持部（灰色）と接続する。

(2) 2方向速度変動を2本の熱線流速計のみにより計測する方法として、平行二線式熱線流速計の開発を進めた。これは、図2（左側）に示すように2本の熱線流速計を互いに平行かつごく近傍に配置することでより高い空間分解能を期待したものである。具体的には、定温度型熱線流速計で駆動される同一形状の二つのI形熱線センサを、流れ（主流）の垂直方向にわずかに離して平行に配置した。このとき、各熱線のごく近傍には温度境界層が発達して互いに熱的な干渉が発生すると考えられる。特に低流速の場合には、センサ間隔が広いときに比べて熱的干渉がより顕著に現れる。主流に対して垂直な方向の速度成分が存在する場合には、その速度ベクトルの大きさと方向によって二つの熱線センサが受ける熱的干渉の程度に差異が生じるため、その影響がそれぞれの熱線出力に現れる。そこで、各熱線の出力をX形熱線（図2右側）の場合と同様に検定すれば、主流とそれに垂直な方向の速度成分を測定できると期待される。円柱後流の乱流場を対象としてこの計測法の可能性と測定精度を調査・検証したところ、流れ方向と垂直方向の平均速度、変動の乱れ強さは、従来のI形やX形熱線流速計による結果とよく一致することが確認できた。また、主目的であるレイノルズせん断応力（図3）やクロススペクトル（図4）といった動的特性についても十分に信頼できる結果を得ることができた。

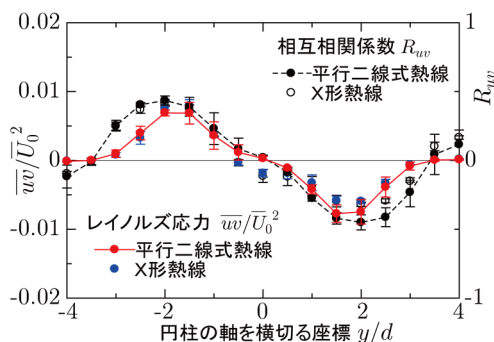


図3 円柱後流におけるレイノルズ応力とその無次元量である相関係数の測定結果

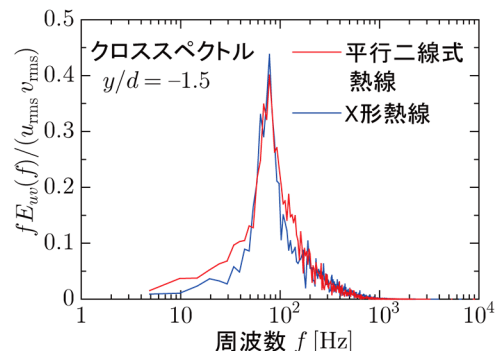


図4 円柱後流におけるクロススペクトル。渦放出の周波数に対応したピークを捉えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0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 田川正人, 保浦知也	4. 巻 50
2. 論文標題 乱流における流体温度変動計測の高精度化を目指して - 抵抗線プローブの応答遅れと空間分解能の影響 -	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 計測技術	6. 最初と最後の頁 28-35
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 無
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12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 保浦知也, 稲穂達也, 服部博文, 田川正人
2. 発表標題 平行に配置した二線式熱線流速計による2方向速度変動計測の試み
3. 学会等名 日本機械学会東海支部第71期総会・講演会（日本機械学会東海支部）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 羽場皓平, 保浦知也, 服部博文, 田川正人
2. 発表標題 乱流温度変動計測における細線温度センサの空間分解能と応答補償
3. 学会等名 日本機械学会熱工学コンファレンス2020（日本機械学会熱工学部門）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 羽場皓平, 成井礼, 保浦知也, 田川正人
2. 発表標題 サブミクロン冷線による壁乱流変動温度場の高精度測定
3. 学会等名 日本機械学会2019年度年次大会（日本機械学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塚本真理恵, 小川美沙, 保浦知也, 田川正人
2. 発表標題 マイクロ風向風速センサによる乱流境界層内変動速度計測の試みと有用性の検証
3. 学会等名 日本機械学会2019年度年次大会(日本機械学会)
4. 発表年 2019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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------