

令和 2 年 5 月 24 日現在

機関番号：22604

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18939

研究課題名(和文)高レイノルズ数乱流実験に適したサブミクロン熱線風速計センサの開発と性能評価

研究課題名(英文)Development of submicron hot-wire sensor for experiments of high Reynolds number turbulence

研究代表者

浅井 雅人 (ASAI, Masahito)

首都大学東京・システムデザイン研究科・客員教授

研究者番号：00117988

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,800,000円

研究成果の概要(和文)：高レイノルズ数乱流実験に必須のサブミクロン薄膜型熱式風速計センサ(厚さ125nm,長さ0.1mm)を薄膜のトランスファプリント技術を用いて作成し,同時に開発した低ノイズ・高周波数応答のコンパクト定温度型熱線風速計を用いてその性能を確認した.また,熱線センサの空間分解能を上げる際の大きな制約となる「センサアスペクト比(l/d)が200以上」という過去の実験に基づく推奨値の妥当性を詳細な実験により調べ,この制約を大幅に緩和できる(l/d を100程度まで減じて精度が保証される)ことを示す結果を得た.

研究成果の学術的意義や社会的意義

乱流構造に関する信頼できる実験データを得るためにはセンサの時間・空間分解能を保証することが重要であり,サブミクロン薄膜型熱式センサの製作技術は特に高レイノルズ数域の乱流実験の研究者の要望するものであり,本研究はそれに応えるものである.同時に開発した低ノイズかつ高周波数応答のコンパクト熱線風速計システムは乱流だけでなく流体実験に広範囲に利用できる高性能の熱線風速計システムである.また,長年にわたり推奨されてきたセンサアスペクト比(センサ径/長さ)200以上という制約条件を半分程度にまで緩和できることを綿密な実験により示したことは実験流体力学に対する大きな貢献と言える.

研究成果の概要(英文)：Submicron hot-wire sensor (125 nm thick, 0.1 mm long) which is responsible for experiments on high-Reynolds-number turbulence was produced using a transfer-printing technique. The sensor response to velocity fluctuations was tested using a newly-developed low-noise constant-temperature hot-wire anemometer (CTA) to verify its performance. In addition, we reconsidered the criterion on the sensor aspect ratio (l/d) for accurately measuring velocity fluctuations, based on careful experiments using specially-designed hot-wire probes, and concluded that the criterion (l/d not less than 200) could be mitigated significantly.

研究分野：流体力学,航空宇宙工学

キーワード：流体工学 熱線風速計 乱流計測 熱線風速計センサ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高レイノルズ数域での乱流変動は境界層厚さ程度のスケールの大規模渦から粘性特性スケールまでスペクトルが 10^4 以上の広範囲の波数域に広がるため、現在の計算機能力での直接数値計算のみならず、実験においても粘性特性スケールまで捉えることは困難である。さらに摩擦抵抗低減が期待される微小ラフネス(粗面)での実験では、壁面粗度のスケールまでの観察が、粗度効果のメカニズム解明に不可欠であるが、センサの分解能に阻まれ十分なデータが得られていない。そのため、粗さ要素の分布・幾何学形状に摩擦がどのように依存するかは明らかでなく、壁面摩擦係数の予測に大きな誤差が含まれる要因となっている。このような、粗面を含む高レイノルズ数領域の壁乱流の研究は、実験流体力学において大きな挑戦課題である。近年、米国プリンストン大学のスーパーパイプの建設など、今後 10 年の計算機能力の著しい進展を先取りした高レイノルズ数壁乱流の実験研究が行われている。また欧州では、壁せん断乱流の微小渦を既存のセンサでも測定できるようにするため、大直径円管を用いた高レイノルズ数乱流実験施設の建設が行われている。さらに、高レイノルズ数の壁乱流においては壁近傍縦渦構造のみならず、それらに比べて遥かに大きなスケールの大規模乱流構造が摩擦抵抗に重大な影響を与えることが示唆されており、その大規模乱流構造と摩擦抵抗の直接原因である壁近傍縦渦構造との相互作用の解明と、その成果を活かした摩擦抵抗低減手法の開発も大きな挑戦課題である。また、航空分野において常に問題になるのは、実験室レベルと実機レベルのレイノルズ数の大きな違いである。一方、大規模乱流シミュレーションと並行して、高レイノルズ数域まで乱流構造・特性を実験的に明らかにするには、従来の計測技術の限界を克服する極小センサの開発が必要とされるが、近年のマイクロナノ加工技術の発展により可能な状況にある、実際、プリンストン大学のグループでは高レイノルズ数実験風洞の建設と共にサブミクロンセンサの開発も同時に進めている。また、集積回路(IC)の高性能化・小型化により乱流変動計測に必須の低雑音・高周波数応答性能を持つ熱線流速計システムの実現も期待できる状況にある。本研究は、このような背景を踏まえて行うものである。

2. 研究の目的

高レイノルズ数の壁面せん断乱流においては、乱流変動(渦)は境界層厚さ程度のスケールの大規模渦から粘性特性スケールまでスペクトルが 4 桁以上の広い波数帯にわたって広がるため、現在の計算機能力での直接数値計算のみならず、実験においても、既存の流速計センサの分解能に限界があり、最小スケール微細渦(粘性特性スケールの 10 倍程度)までの乱流変動を捉えることは容易でない。本研究では、粘性特性スケールが 10 ミクロン程度の高レイノルズ乱流に対して、微細渦スケール(粘性特性スケールの 10 倍程度)までの乱流変動を捉えることが出来るサブミクロン熱線センサの作成を行うとともに、高レイノルズ数域の壁乱流計測において信頼できる実験データを得るに十分な、高周波数応答・高空間分解能の熱線計測技術の開発・実証を行なうことを目的とする。

3. 研究の方法

本研究は、(1)サブミクロン熱線センサの試作、(2)高周波数応答の熱線流速計の開発と実証試験、ならびに、乱流計測におけるセンササイズの大きな制約となっている(3)センサアスペクト比の規範に関する実験研究からなる。

(1)金薄膜のサブミクロン熱線センサ(膜厚 125 nm)を、IC 製作に用いられるトランスファプリント技術により作成し、気流の速度変動計測に適用して熱線流速計センサとしての動作試験を行う。

(2)電磁気ノイズの原因であるセンサケーブルを可能な限り短くし、ケーブルリアクタンスが無視できる小型熱線流速計回路を設計し、低ノイズ・高周波数応答の熱線流速計システムを開発する。

(3)乱流変動の熱線計測には、センサの空間分解能だけでなくセンサアスペクト比も強い影響を与えと言われてきた。熱線計測に対するセンサアスペクト比の効果を明らかにするため、センサの空間分解能の影響を除外できる二次元カルマン渦列の速度場を対象として速度変動計測を行い、センサアスペクト比の周波数応答に対する影響のみを評価する。

4. 研究成果

高レイノルズ数乱流計測用のサブミクロン薄膜型熱線センサならびに低ノイズ・高周波数分解能の熱線流速計の開発を行い、また、熱線センサで乱流渦構造を正確に捉えるための指針となる熱線センサのアスペクト比(センサ長/センサ径: l/d)が速度変動測定に及ぼす影響を実験結果に基づき検討した。

(1)微小熱線センサの開発と性能評価

薄膜型熱線センサの仕様を、長さ $100 \mu\text{m}$ 、幅 $25 \mu\text{m}$ 、厚さ 125 nm とし、薄膜のトランスファプリント技術を応用して両持ち梁型の金薄膜センサを作成した。スタンプからの離型性を高めるために、コリメータスパッタ成膜法を採用するとともに、スタンプ専用のマスクもあわせて装着した。同手法により、金(Au)薄膜の両もち梁構造の作製率を向上させることに成功した。一方で、基板側の導電性を向上させるため、下地となる Au または ITO

薄膜の膜厚を増加させた．図 1 は，試作センサの顕微鏡写真である．試作センサについては，新規開発した熱線風速計を用いて動作試験を行い，図 2 の例が示すように，乱流速度変動を計測できることを確認した．

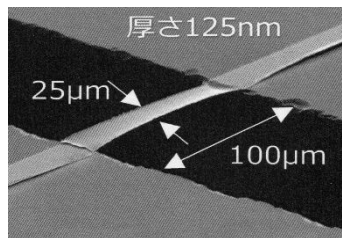


図 1 Au 薄膜サブミクロン熱線風速計センサ．

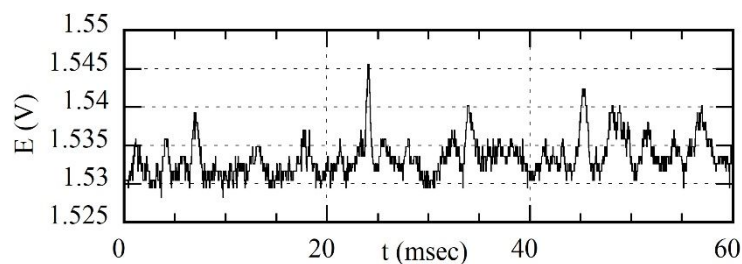


図 2 金薄膜センサで計測した噴流の速度変動の熱線風速計出力信号．

(2) 高周波数応答の熱線風速計の開発

低ノイズ・高周波数分解能の熱線風速計開発に関しては，熱線風速計回路をプローブサポート内に実装し，センサケーブルのリアクタンスを無視できるレベルにすることにより，高周波帯域まで電磁気ノイズを遮蔽しかつ増幅器ノイズも低減する手法を考案した．図 1 は，考案手法に基づき新規開発したプローブサポート・回路一体型のコンパクト熱線風速計である．風洞実験により，熱線風速計回路の増幅器ノイズ以外の電気・電磁波ノイズは全く現れないことを確認している¹⁾．なお，この熱線風速計の基本技術は特許出願(特願 2019 - 205548)された．

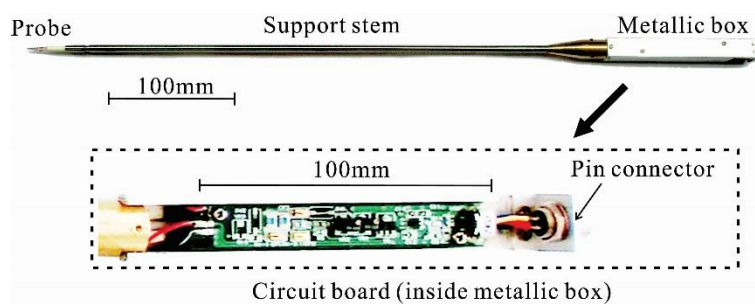


図 3 プローブサポート内に回路を内装した低ノイズコンパクト熱線風速計¹⁾．

(3) センサアスペクト比に関する規範の検証と見直し

乱流計測に対するセンサアスペクト比 (l/d) の影響に関して，センサの空間分解能の影響を排除するために，低レイノルズ数円柱後流におけるカルマン渦列を対象に， l/d が計測速度変動に及ぼす影響に関する実験を行った．図 3 は $l/d = 80, 120, 150, 200$ のセンサで測定したレイノルズ数 $Re = 80$ のカルマン渦列の速度変動の実効値分布とスペクトル(最大実効値 y 位置で測定)を比較している．これまで，Ligrani と Bradshaw²⁾の実験結果に基づき， l/d が 200 以上の熱線センサが推奨されてきたが，この制約条件を $l/d = 80$ まで緩和しても，

8 kHz 以上の速度変動信号の S/N 比が僅かに低下するだけで、変動実効値のみならず周波数帯域でスペクトルも $l/d=200$ の場合とほとんど全く変わらないという結果が得られた。これは、直径 $0.5\mu\text{m}$ のサブミクロンセンサ ($l/d=200$) を、同じ空間分解能をもつ直径 $1\mu\text{m}$ の熱線センサ ($l/d=100$) で代替可能であることを示すものであり、乱流計測の自由度を広げる特筆すべき成果である。

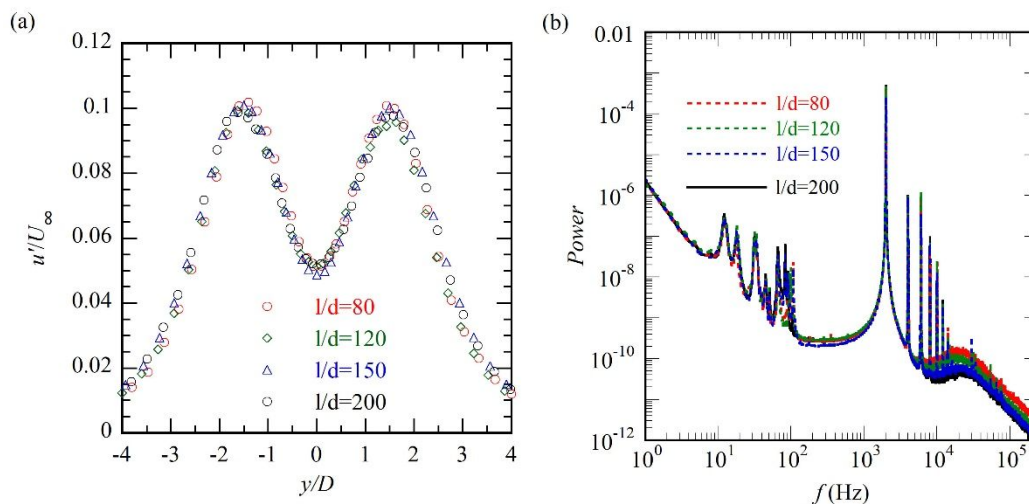


図3 円柱後流 ($Re=80$) の二次元カルマン渦列の速度変動の (a) 実効値分布と (b) スペクトルの比較³⁾。

引用文献

- 1) A. Inasawa, S. Takagi and M. (2020) Asai: Improvement of the signal-to-noise ratio of the constant-temperature hot-wire anemometer using the transfer function, Measurement Science and Technology, 31, 055302.
- 2) P. Ligrani, P. and P. Bradshaw (1987) Subminiature hot wire sensors: development and use. Journal of Physics. E.: Scientific Instruments, 20, 323—332.
- 3) 稲澤、高木、浅井、熱線のセンサ長と直径の比が周波数応答特性に及ぼす影響に関する実験的研究、日本流体力学会年会 2019、講演論文集。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Ayumu Inasawa, Shohei Takagi, Masahito Asai	4. 巻 31
2. 論文標題 Improvement of signal-to-noise ratio of the constant-temperature hot-wire anemometer using transfer function	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Measurement Science and Technology	6. 最初と最後の頁 55302
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） doi.org/10.1088/1361-6501/ab6916	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4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Shohei Takagi, Ayumu Inasawa, Masahito Asai
2. 発表標題 A simple method for determination of the frequency response of the constant-temperature hot-wire anemometer
3. 学会等名 5th International Conference on Sensors and Electronic Instrumentation Advances (SEIA) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高木正平, 稲澤歩, 浅井雅人
2. 発表標題 定温度型熱線風速計の広帯域周波数応答特性を求める簡易手法
3. 学会等名 日本流体力学会年会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 稲澤歩, 高木正平, 浅井雅人
2. 発表標題 熱線のセンサ長と直径の比が周波数応答特性に及ぼす影響に関する実験的研究
3. 学会等名 日本流体力学会年会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高木正平, 川田大典, 稲澤歩, 浅井雅人
2. 発表標題 乱流計測に求められる熱線センサのアスペクト比と空間分解能
3. 学会等名 日本流体力学会2018
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 熱式流速計	発明者 高木正平, 浅井雅人, 稲澤歩	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019 - 205548	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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	高木 正平 (TAKAGI Shohei) (10358658)	首都大学東京・システムデザイン研究科・特任教授 (22604)	
研究分担者	稲澤 歩 (INASAWA Ayumu) (70404936)	首都大学東京・システムデザイン研究科・准教授 (22604)	
研究分担者	金子 新 (KANEKO Arata) (30347273)	首都大学東京・システムデザイン研究科・准教授 (22604)	