

〔技術賞受賞記念解説〕

# 低雑音化を実現したプローブ・ブリッジ回路一体型 コンパクト熱線風速計

合同会社 Pantec      高 木 正 平\*  
東京都立大学      稲 澤        歩  
東京都立大学      浅 井 雅 人

## Ultralow-Noise Hot-Wire Anemometer with Integrated Probe and Bridge Circuit

\* Shohei TAKAGI, Pantec LLC

Ayumu INASAWA, Tokyo Metropolitan University

Masahito ASAI, Tokyo Metropolitan University

\*E-mail: pantaka@pantec.tokyo

### 1 はじめに

この度は、表題の技術に対して2020年度技術賞をいただくことになり、受賞者一同この上なく光栄に思います。また、乱流遷移や乱流の実験研究に長年携わってきた者として、乱流計測の重要なツールであり続ける熱線風速計の技術発展に光を当てていただいたことに感謝いたします。

熱線風速計は、細い金属線をセンサとしてジュール加熱し、流体から奪われる熱量と流体速度を結びつけたKingの式を用いて流体速度を求める計測器です。この計測器は、平均的な流体速度のみならず速度変動に対して高速応答特性を持つことから、乱流現象を解明する研究に多く使われています。熱線風速計の動作方式として、熱線を定電流で加熱する方式と本受賞の対象となった熱線の動作抵抗を一定に保つ定温度方式が知られていますが、現在では応答特性に優れた後者が主流を占めています。以下では、定温度型熱線風速計(Constant-Temperature Hot-Wire Anemometer)をCTAと略記します。

CTAの動作原理や動特性はほぼ確立していますが、風速計の電気雑音、特に高周波帯域の誘導性電磁ノイズやCTAブリッジ回路固有の雑音評価はまだ十分とは言えません。本技術では熱線プローブとCTAブリッジ回路を一体化することで、電磁ノイズの遮断と回路固有の雑

音特性や速度変動に対する出力の周波数特性（伝達関数）が評価可能になりました。その結果、風速計からの速度変動出力のダイナミックレンジが一桁改善されました。この新規技術は特許申請中<sup>1)</sup>です。まず、一体化に至った経緯と背景を説明します。

### 2 開発の経緯

#### 2.1 小型無人機搭載型CTAの開発

著者の一人が室蘭工業大学航空宇宙機システム研究センター在職時（2009-2014）に小型無人機に搭載可能な小型CTAを開発し、飛行試験も実施しました。熱線風速計出力は流れの方向を識別できないので、順流と逆流を検知する剥離検出センサと剥離を防止する小型小翼列機構を主翼に同時に搭載しました（詳細は文献<sup>2)</sup>）。小型機のペイロードと搭載容積が極めて小さいことから、(i) 小型軽量、(ii) 電源はプロペラ駆動電源7.4Vと共有、(iii) モータからの電気ノイズの汚染対策の3つの条件を満たす必要がありました。従来の汎用CTAブリッジ回路は、±15Vの両電源で駆動されていましたが、条件(ii)は、低電圧かつ片電源動作という前例のない厳しい要求で苦勞の連続でした。この条件を克服したのち、条件(i)はリード線付部品の表面実装小型部品への置き換えで、条件(iii)は周知の電磁シールドで達成しました。搭載したCTA基板は40×20×9mm<sup>3</sup>、重量は3.8gfでした。

## 2.2 高レイノルズ数乱流計測に向けて

壁乱流はレイノルズ数が高くなるにつれて、熱線センサの空間分解能と高周波帯域における電気雑音の問題が顕在化します。一般に、センサの長さ  $l$  と直径  $d$  との比  $l/d$  を 200 以上に保つことが推奨されており<sup>3)</sup>、空間分解能を高めるためには自ずと熱線の太さに制限が課されます。また、空中から飛来する誘導性電磁ノイズは狭帯域のライン成分で高周波帯域の変動計測には大きな障害となります。 $l/d$  の問題については後で例を示すこととし、この節では特に CTA の高周波帯域における電気雑音の評価とその防止対策について解説します。

CTA ブリッジ回路は高周波帯域でライン性の電気雑音に悩まされます。その由来は、CTA ブリッジ回路に供給する直流電源線経由で混入したり、あるいは計測で使う機器類等から放射される誘導性電磁ノイズを熱線ケーブルが拾うことです。前者は良質な直流電源ないしは電池を使うことで概ね回避できますが、後者は電磁遮蔽効果が大きい低雑音型の熱線ケーブルを用いても改善には限界があります。

そこで電磁遮蔽をより完全にするため、熱線ケーブルを限りなく短くして、ケーブルと CTA 回路を電磁遮蔽効果の大きい金属製の容器に収納する考えが浮上しました。すなわち、熱線プローブと CTA ブリッジ回路を一体化し、金属ケースに収納することです。この一体化に役立ったのが、無人機搭載型 CTA 回路技術でした。熱線ケーブルを短くした効果は、電磁ノイズの低減だけでなく、CTA ブリッジの動特性とその固有の電気雑音を評価するのに有利に働きました。すなわち、熱線ケーブルが短いとそのリアクタンス (Reactance: Inductance + Capacitance) を無視することができるので、CTA ブリッジ回路の伝達関数は、従来の 4 次<sup>4)</sup> ないし 5 次<sup>5)</sup> から 2 次式にまで単純化され、これによって、後述する CTA ブリッジ回路の伝達関数の重要な 3 つのパラメータが簡単な手法により求まり、その結果を用いると CTA ブリッジ回路固有の電気雑音特性を評価できます。その結果、ブリッジ出力から電気雑音を差引くことが可能となり、ダイナミックレンジの拡大に繋がるだけでなく、CTA ブリッジ回路の応答特性を評価できることから、振幅応答帯域を一桁以上拡張することが可能となりました<sup>6)</sup>。

次に、本技術賞の対象となった熱線プローブと CTA ブリッジ回路が一体化したシステムの紹介、それに続いて CTA ブリッジ回路の伝達関数の導出とその 3 つのパラメータの決定法について述べます。

## 3 熱線プローブと CTA ブリッジ回路の一体化

熱線プローブと CTA ブリッジ回路を一体化した風速計の外観を図 1 に示します。図 1a は Tube 型と呼んでい

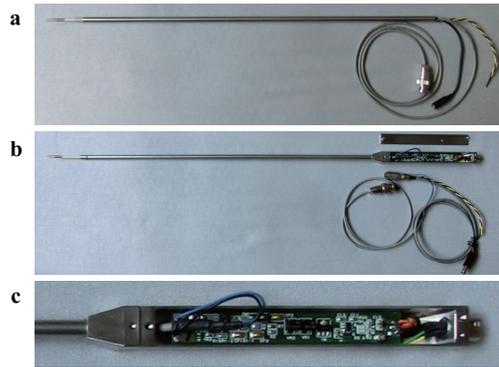


図 1 コンパクト熱線風速計の外観. a; Tube 型, b; Slim 型, c; 内臓ブリッジ回路 (Slim 型).

る風速計で、熱線プローブを支える外径 6mm のステンレスサポート管に CTA ブリッジ回路 (基板長 100 mm) が収納され、直流電源入力、矩形波入力、ブリッジ出力が下流端からのケーブルを通じてなされます。矩形波応答は管に開けられた微細孔から必要に応じて調整しますが、基本設計は初心者を念頭に置いて無調整を謳っています。図 1b は Slim 型で外径 6 mm のサポート下流端に断面 14 mm 角で長さ 130 mm のステンレス製小箱に CTA ブリッジ回路基板 (図 1c) を収納し、加熱比設定や内臓矩形波で応答調整できます。箱の下流端のソケットにより入出力線が着脱できます。標準の熱線プローブはセラミック製ですが、高電圧を扱うプラズマアークチューエータ等の実験にはステンス管のプローブも用意してあります。詳細は合同会社 Pantec のホームページ<sup>7)</sup> を参照ください。

## 4 CTA ブリッジ回路の静的・動的応答特性

### 4.1 CTA ブリッジの静的応答特性

図 2 は、単純化した CTA の基本回路で、熱線センサを含んだ Wheatstone ブリッジ、利得  $A$  を持つサーボアンプ (演算増幅器) およびサーボアンプのゼロ点電圧 ( $\Delta E$ ) 調節用の可変抵抗器で構成されています。また、ブリッジに外部信号  $e_t$  として矩形波や白色雑音等を 1 つの抵抗を介して注入すると、ブリッジの応答特性を評価することができます。一様な流れの中の熱線を含む Wheatstone ブリッジの静的平衡式を導いてみましょう。

式 (1) に見られるように、熱平衡に達した熱線は理想的な平衡状態 ( $\tilde{R}_W = R_A R_C / R_B$ ) から  $\Delta R_W$  だけ小さな抵抗値にずれますが、アンプの利得  $A$  を十分大きく設定すればこのずれを小さく抑えることができます (式 (2))。ここで、 $\Delta R_W$  は不平衡抵抗と呼ばれ、その符号は負で、 $\Delta E$  とブリッジ出力電圧  $E_o$  の関数です。 $\Delta R_W$  が負、すなわち  $\Delta E$  が負の場合、後述するように CTA ブリッジ回路 (負帰還) は微小な速度変動に対し



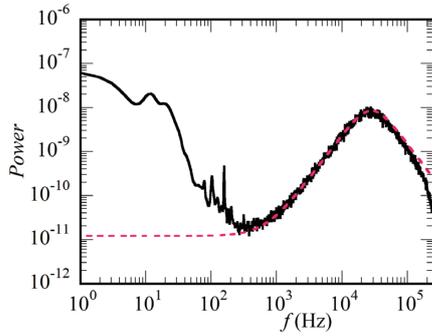


図4  $e_t$ として白色雑音を入力した時のブリッジ出力のパワースペクトル(—)と式(7)(---)との比較. 速度変動パワーで比較.

となります. ここで,  $T_r = 1/\omega_r$  です. 式(11)で注目すべき点が2つあります. まず, 指数関数の冪 $\zeta$ が負の時, 解は時間的に発散するので,  $R_W$ を一定に保つ定温度動作は実現されず回路は発散します. 前出の式(9)の分子の中で  $\mu/M \approx 0.001$  であることから定温度動作を実現するためには,  $K\delta + 1 > 0$  の条件が必須となります. この条件は式(2)と(9)で示されているように, ゼロ点調整機能を使って,  $\Delta E > 0$  とすればよいことがわかります. もう1つは, 最終項の係数  $M/T_r$  は50–100であり, 他の項に比べて突出して大きいことです. このため, 矩形波入力試験では他の項は省略され, この突出項だけが実測応答波形と比較され減衰係数 $\zeta$ が調整されているのが実情です. しかし, 式(11)に含まれる3つの変数,  $M$ ,  $\zeta$ および $T_r$ は, 応答波形にベストフィットさせることで精度よく求めることができます. このようにして求めた3変数の速度依存性については既報<sup>6)</sup>に譲りますが, 風速に対する応答波形の一例を図3に示します. 風速20 m/sで減衰係数 $\zeta$ を設定した状態で風速を12 m/s, 8 m/sに下げると, 応答波形の回復に時間がかかるようになり, 風速計の応答特性は劣化します. これは,  $\Delta E$  (サーボアンプ・ゼロ点電圧)が一定のまま, ブリッジ出力電圧  $E_0$  が減少するため, 式(2)と(9)から $\zeta$ は増加し, 式(7)から変動に対する応答特性は低下します.

以上のカーブフィッティング法で得られた3つの変数の妥当性を確認するために  $e_t$ として矩形波に代えて白色雑音を入力し, ブリッジ出力をスペクトル解析した結果を図4に示します. 300 Hz以下の成分は風洞気流に残留する速度変動で, これより高い周波数帯にみられる盛り上がりは注入した白色雑音によるものです. 破線は図3で得られた3つの変数を代入した式(7)において,  $u=0$ として振幅分布を示したもので, 最大値を実測値に一致させています. この比較より, カーブフィッティング法の妥当性を確認できます. ただし, 100 kHz

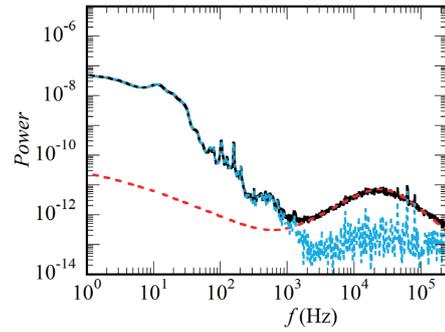


図5 外部入力のないブリッジ出力のパワースペクトル(—)およびサーボアンプ雑音(---)を差し引いたスペクトル(.....). 速度変動パワーで比較.

以上でのずれは計測においてエイリアシング防止で用いた低域通過フィルタによるものです. なお,  $\omega_r$ における振幅と低周波の振幅比の平方根は, ほぼ  $M/T_r = M\omega_r$  になることは式(7)から明らかです.

次に, 熱線を風速20 m/sの様な流れの中に置いたまま, 外部からの入力信号がない条件 ( $e_t = 0$ ) で, ブリッジ出力をスペクトル解析した結果を図5に示します. 1 kHzより低周波成分は風洞気流変動ですが, およそ30 kHzを中心とした山状の盛り上がりはCTAブリッジ回路固有の電気雑音に由来しています. すなわち, 外部信号入力はないが, サーボアンプ入力部の固有雑音があたかも白色雑音のように振る舞っているように見えます. ここで注目すべき点は, 速度変動が極めて小さい1 kHz以上の周波数帯域にはライン性の電気ノイズが皆無であり, ほぼ完全な電磁遮蔽が達成されていることです. 破線は, 本CTAで採用したサーボアンプの入力雑音スペクトル(カタログで公開)と式(7)の振幅との積で, 1 kHz以上の周波数帯域で黒の実測分布とよく一致しています. このように, 矩形波入力の応答波形に解析解をベストフィットさせることで得られた式(7)の3つの変数によって, 流れの中で動作しているCTA固有の電気雑音の評価ができたこととなります. これにより, 実測値から風速計固有の電気雑音を差し引くことが可能になり, 図5の点線で示すように, CTAの計測周波数帯域は1 kHzから3 kHzまで拡張され, ダイナミックレンジも1桁向上します.

CTA風速計の応答限界の目安は通常  $f_r (= \omega_r/(2\pi))$  ですが, 本CTAのように式(7)の伝達関数が完全に求まっていれば, スペクトル解析した各成分に伝達関数の逆数を掛けることで収録波形の有効な周波数帯域まで拡張できます(図5では250 kHzまで).

#### 4.4 更なるCTA回路の低雑音化

センサとCTA回路を一体化することで, CTA固有の電気雑音評価とほぼ完全な電磁遮蔽が可能となったこ

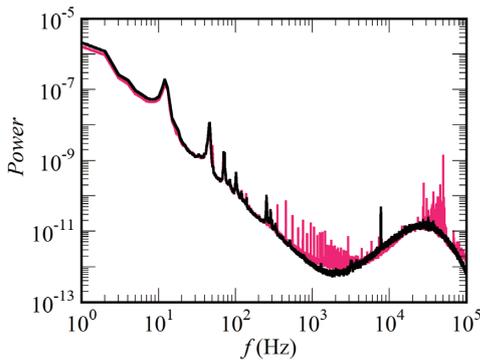


図6 本CTA (Pantec Slim, —) と市販の最高性能CTA (Dantec Streamline Pro, —) で計測された風洞残留流れのパワースペクトルの比較。

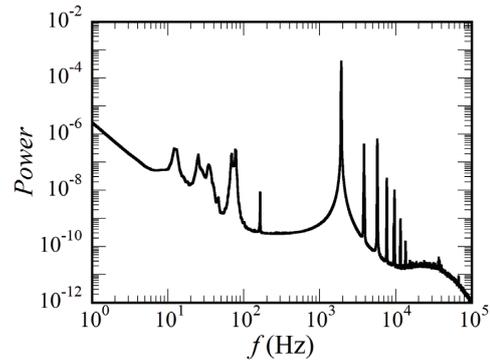


図8 円柱下流 ( $x/D, y/D$ ) = (8.5, 1.5) におけるカルマン渦列 ( $Re = 77, U_\infty = 3.8$  m/s) の速度変動のパワースペクトル。

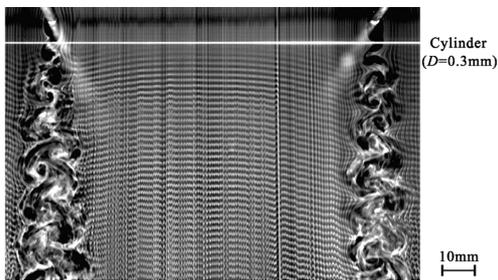


図7  $Re = 77$  における円柱後流の煙による可視化。  $U_\infty = 3.8$  m/s, 円柱直径  $D = 0.3$  mm. 円柱の両脇に直角に円柱を挿入して後流の二次元性を確保。

から、もう一步低雑音化を進めました。具体的には、これまで用いていた片電源動作のサーボアンプを、市販オペアンプの中で最も低雑音化が達成されかつ高速応答のAD797に置換しました。このアンプは両電源仕様ですが、工夫により基板サイズを変えることなく実装できました。風速 8 m/s の一様流中に置かれたCTAブリッジ出力をスペクトル解析した結果を図6に示します。400-500 Hzより低周波変動は気流の残留変動で、それより高周波帯域 ( $f \sim 30$  kHz) の盛り上がりはCTA固有の電気雑音に由来します。高周波帯域には全くライン状の雑音成分は観測されず電磁シールドは完全に達成されています。また、図には市販されている低雑音型汎用CTA (Dantec Streamline Pro) での計測結果も比較のため表示しています。盛り上がった高周波帯の電気雑音レベルは本CTAと同程度ですが、熱線ケーブル長 4 m の市販CTAでは多数のライン状の雑音成分が重畳しています。

## 5 低雑音CTAを用いた実験例

この低雑音熱線風速計を用いた流体力学実験の実施例<sup>8)</sup>として、 $Re = 77$  の円柱後流のカルマン渦列 (図

7) の速度変動計測を紹介します。計測されたこのカルマン渦列の速度変動スペクトルを図8に示します。計測は円柱直径 ( $D = 3$  mm) の 8.5 倍下流の剪断層内で行なわれています。200 Hzより低い成分は風洞乱れに起因する変動で、それより高い周波数帯にはライン状の電気雑音は全く観察されず、狭帯域のカルマン渦列の基本波 (1.9 kHz) から第7高調波 (13.3 kHz) までしっかりと計測されているのがわかります。図9には、基本波から第6高調波までの振幅 (実効値) 分布を示しています。高周波域まで電気雑音を低減した本CTAにより、一様流速の 0.1% 以下の最大振幅の高次高調波成分の分布まで見事に計測できることがわかります。なお、第6高調波 (11.4 kHz) の分布には、前述のサーボアンプ雑音 (図8のスペクトルにおける盛り上がり) の影響が僅かに見られますが、 $|y/D| > 2$  の分布の値から評価すると、そのレベルは 0.01% 程度です。

この実験ではまた、乱流計測において問題となる熱線センサのアスペクト比  $l/d$  の影響について高精度な実験データが得られています。乱流計測における  $l/d$  の制約は、センサの空間分解能とは別の規範であって、 $l/d$  が 200 より小さくなると、センサからその保持部への熱伝導による応答特性への影響が無視できなくなり、乱流強度の計測値が小さく評価されると言われていて、 $l/d \geq 200$  が広く推奨されています<sup>3)</sup>。しかしながら、センサ保持部への熱伝導による応答特性の変化以外にも、センサの方向特性、プローブと流れの干渉、さらにCTAの伝達関数に対する減衰係数  $\zeta$  の影響なども計測値に影響を与える可能性があり、最近の関連研究<sup>9,10)</sup>においても、 $l/d < 200$  のCTAの応答特性に対するセンサ保持部への熱伝導効果についての説明は十分とは言えません。そこで、プローブの幾何学形状を可能な限り揃え (センサ径  $d = 5 \mu\text{m}$ , 保持針の直径と間隔は 0.3 mm および 5 mm), センサ受感部以外は銅メッキを施

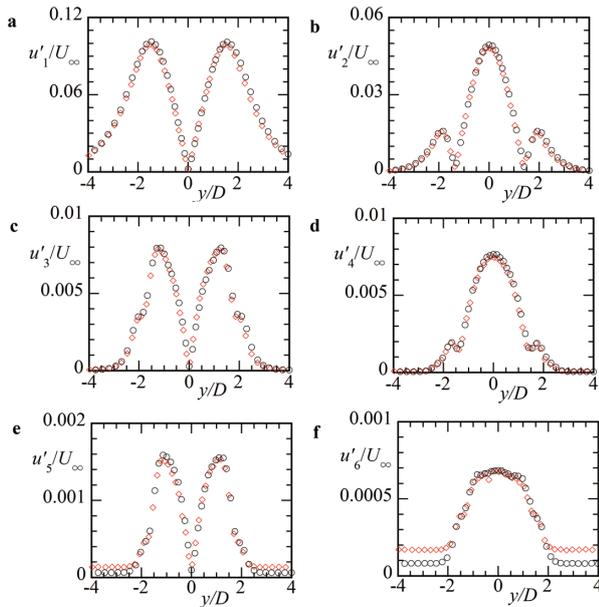


図9  $l/d = 80$  と  $200$  のプローブで計測されたカルマン渦列の基本波  $u_1$  (図 a) から第 6 高調波  $u_6$  (図 f) までの振幅  $y$  分布の比較 ( $x/D = 8.5$  位置). センサアスペクト比  $l/d = 200$  (○) と  $80$  (◇) で計測.

し、メッキ部を支持針にハンダ付けして  $l/d = 80, 120, 150, 200$  の 4 プローブを準備しました. CTA の減衰係数  $\zeta$  は全て  $0.7$  に揃え、その結果、伝達関数 (式 (7)) は  $6 \text{ kHz}$  まではほとんど完全にフラットです. センサの空間分解能や方向特性の寄与は、二次元カルマン渦列を計測対象とすることにより無視することができます.

図 9 に、 $l/d = 80$  の熱線センサで計測した第 6 高調波成分までの振幅分布を通常の  $l/d = 200$  のセンサでの計測結果と比較していますが、両者の違いは、第 5 および第 6 高調波成分が  $|y/D| > 2$  の範囲を除き、ほとんど見分けられない程度です. なお、第 5 および第 6 高調波成分に対する  $|y/D| > 2$  の範囲での振幅増加は、 $l/d$  の減少につれて S/N 比が劣化するためです. 基本波 ( $1.9 \text{ kHz}$ )、第 2 高調波 ( $3.8 \text{ kHz}$ ) および第 3 高調波 ( $5.7 \text{ kHz}$ ) の最大実効値を比較すると、 $l/d = 120$  までは、計測値の低下はほとんど見られず、センサ保持部への熱伝導効果による乱流強度の計測値の低下は、従来言われていたものよりかなり小さく、 $l/d = 80$  でも  $2.5\%$  程度です. 詳細な結果は論文<sup>8)</sup>を参照ください.

## 6 むすび

熱線プローブと CTA ブリッジ回路をコンパクトに一体化し、電磁シールド対策を施すことでライン状の電磁ノイズを大きく低減させることができました. また、センサケーブルを短くすることで速度変動に対する CTA ブリッジ回路の伝達関数が矩形波注入と応答波形に解析解をベストフィッティングさせることで求まりました.

この結果を使って、CTA ブリッジ回路固有の電気雑音解析的に求め、CTA 出力から電気雑音を除去することで、出力のダイナミックレンジが一桁改善されて、世界トップクラスの性能が実現されました.

$Re = 77$  の二次元カルマン渦列の第 6 高調波までの速度成分の計測結果から低雑音 CTA の性能をご理解いただけたと思います. また、この新規技術を用いた最新の研究として、熱線センサ長  $l$  と直径  $d$  のアスペクト比  $l/d$  に課されている条件 ( $l/d \geq 200$ ) を再評価する研究に適用した例を紹介しました.

最後に、熱線プローブと CTA ブリッジ回路を一体化した超低雑音の風速計は壁乱流研究に限らず、小型軽量で可搬性・搭載性にも優れているので様々な流体分野の研究や計測に貢献できるものと期待しています.

## 引用文献

- 1) 高木正平, 稲澤歩, 浅井雅人: 熱式流速計, 特願 2019-205548.
- 2) Takagi, S., and Ueda, Y.: Active control of flow separation on an airfoil wing with the use of a row of vortex generators, *Proc. 14th Asian Cong. Fluid Mech.*, Hanoi and Halong, (2013).
- 3) Ligrani, P. M., Bradshaw, P.: Spatial resolution and measurement of turbulence in the viscous sublayer using subminiature hot-wire probe, *Exp. Fluids* 5 (1987) 407-417.
- 4) 西岡通男, 熱線風速計 (4), *流れの計測* 3 (2) (1985) 24-34.
- 5) Bonnet, J. P., Roqueforte, T. A.: Determination and optimization of frequency response of constant temperature hot-wire anemometers in supersonic flows, *Rev. Sci. Instrum.* 51(2), (1980) 234-239.
- 6) Inasawa A., Takagi S., Asai M.: Improvement of signal-to-noise ratio of the constant-temperature hot-wire anemometer using transfer function. *Meas. Sci. Tech.* 31(5) (2020) 055302.
- 7) 合同会社 Pantec ホームページ: <https://pantec.tokyo>.
- 8) Inasawa A., Takagi S. and Asai M.: Experimental investigation of the effects of length-to-diameter ratio of hot-wire sensor on the dynamic response to velocity fluctuations. *Exp. Fluids* 62 (2021) 92.
- 9) Hutchins N., Monty J. P., Hultmark M., Smits A. J., A direct measure of the frequency response of hot-wire anemometers: temporal resolution issues in wall-bounded turbulence, *Exp. Fluids* 56 (2015) 18.
- 10) Samie, M., Hutchins, N. and Marusic, I., Revisiting end conduction effects in constant temperature hot-wire anemometry, *Exp. Fluids* 59(9) (2018) 133.