

定温度型熱線風速計

Tube 型と Slim 型

熱線風速計は、流体中に置かれた金属細線（センサ）を Joule 加熱し、金属線の強制冷却特性に基づき流体流速を電氣的に求める装置です。

Tube 型と Slim 型は、いずれもセンサの加熱温度（抵抗）を一定に保つ定温度方式を採用することで、流速変動に対する応答特性は極めて優れています。一般にこの方式の風速計は CTA (Constant-Temperature Anemometer) と呼ばれています。

Fig.1 に示した Tube 型は、熱線風速計を使った経験のない方々にも安心して使えるよう無調整を実現しました。また、熱線サポートである外径 6mm のステンレス円管内に制御回路を全て収納したので、使い勝手は抜群です。

一方 Fig.2 の Slim 型は、計測精度を追及されるユーザにお勧めの風速計で、センサの加熱比設定や応答特性調整のための矩形波など必要最小限度の電気回路一式が熱線サポート下流端の小さな金属ケースに内蔵されているので、調整が容易です。またブリッジ出力に加えて、変動成分を 10 倍した出力も兼ね備えているので、A/D 変換の際に S/N 比を一桁向上させることができます。

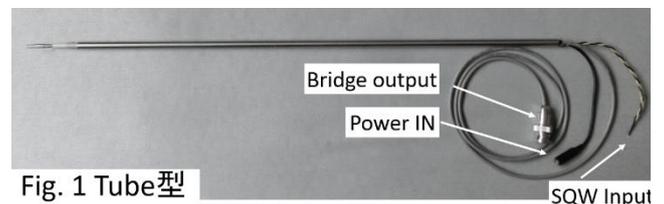


Fig. 1 Tube型

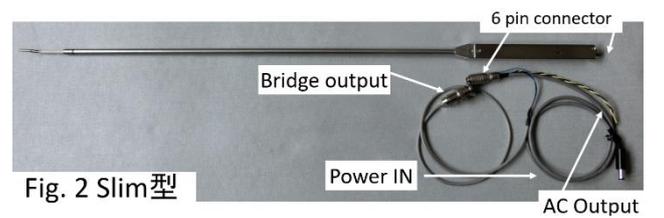


Fig. 2 Slim型

◇ 特徴

- Tube 型も Slim 型も PC の USB 電源の単電源で動作
- USB 電源を乾電池 4 本ないしはニッケル水素電池に変えれば超低雑音特性を達成
- センサから制御回路まで金属ケースに内蔵、電源ハムや外来誘導ノイズは皆無
- 熱線プローブの支持針間隔を 3mm 確保、独自設計の流れを乱さない流線形状
- 熱線プローブの支柱(prong)は直径 0.8mm ステンレスバネ材を採用しているので堅牢で不銹
- 独自の特殊ソケット採用で熱線プローブの抜き差しは極めて簡単
- 熱線ケーブルが短く、そのリアクタンスを無視できるので、熱線風速計固有の電気雑音を容易に除去可能で S/N 比はさらに向上（末尾 Fig.8 と 9 参照）

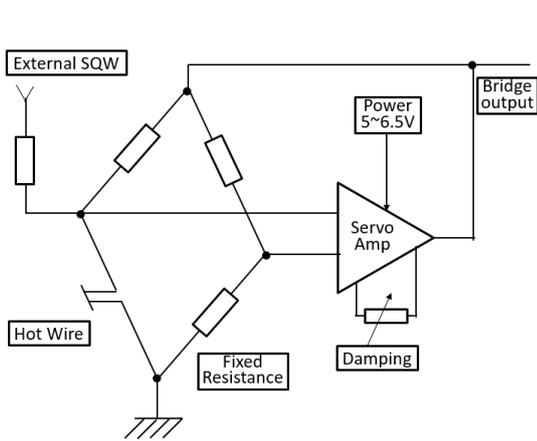


Fig.3 Tube 型 CTA の等価回路

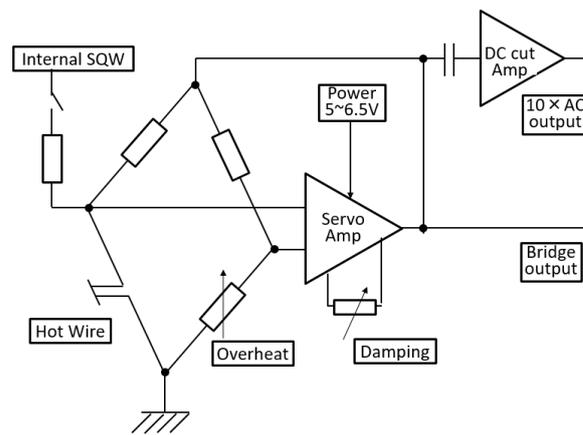


Fig.4 Slim 型 CTA の等価回路

◇ 設計思想

Fig.3 と 4 は、Tube 型と Slim 型 CTA の等価回路、SQW は矩形波で、前者は外部から注入でき、また後者には 1kHz 矩形波が組み込まれています。ブリッジ出力は、流速に対して良く知られた King の式に従うので、出力電圧は流速に比例しません。しかし昨今のデータ収録装置の利便性を有効活用することを前提に、データ収録後にユーザが線形化を行って頂きます。それ故、CTA 回路操作の簡便さと容易さを極限まで追求し、そして計測で最も重要な未踏の低雑音化に挑み、達成しました (図 9 を参照)。以下、その共通の仕様と性能です。

◇ Tube-Slim 共通仕様

適合プローブ・・・直径 5 μ m 線で動作抵抗値は 5.7 Ω (Tube)

・・・直径 5 μ m 線で設定動作抵抗値は 2-20 Ω (Slim)

測定流体・・・空気や窒素など不活性ガス

流速測定範囲・・・0.5m/s-65m/s

応答特性・・・30kHz at 20m/s

電気雑音・・・流速換算 0.0025%(0.1-1kHz 帯域), 0.07%(1Hz-250kHz 帯域) at 20m/s

出力電圧・・・~4.7V

供給電源・・・5V-6.5V, 0.1A 以上

また、Tube 型 CTA と Slim 型 CTA の詳細は次ページ以降を参照頂き、上記条件を満たさない仕様や電気雑音を誘導する環境 (プラズマアクチュエータなど) で有効な熱線プローブの碍子をステンレス管で覆った特殊プローブなど下記までご相談下さい。

高木正平 (合同会社 Pantec 代表)

〒186-0003 東京都国立市富士見台 4-39-5-507

URL: <https://pantec.tokyo> e-mail: pantaka@pantec.tokyo ☎080 1136 0245

Tube 型 CTA

Tube 型 CTA は小型ながら、卓上型あるいはラックマウント型の熱線風速計の性能上回っています。外部から単一の電源で、しかも USB ケーブルをつなぐだけで動作することから、使い勝手は抜群です。指定範囲の抵抗値の熱線プローブを使えば**無調整**です。応答特性を正確に把握・調整したい場合には、外部から矩形波を注入し、サポートに設けられた穴から **Damping** 調整も可能です。また、低雑音計測が必要な場合には、USB 電源から安定化した直流電源や、さらに低雑音計測を望む場合にはピンジャックケーブル付きの乾電池を用いた駆動をお勧めします。直流電源ケーブルと電池ケース付きのケーブル(B-1)は別途用意されています。

Tube-I と Tube-II の CTA 基本構成

- 1) CTA 組込外径 6mm の熱線サポート (Tube-II : 熱線プローブをピンバイスで固定)
(Tube-I : 熱線プローブサポートソケットに挿入のみ)
- 2) 入出力ケーブル : サポート下流端から、
 - ・長さ 1.5m のブリッジ出力 BNC ケーブル
 - ・長さ 0.5m の電源供給用のピンプラグ (Pin Plug)+USB ケーブル (C-1 付属)
 - ・振幅±1V、周波数 200Hz-1kHz の矩形波注入線 (ユーザが外部信号源と結線)
- 3) A4 版の取扱い説明書
- 4) 熱線プローブは付属していません。下記別売りリストより選択下さい

価格

・ Tube-I CTA	熱線プローブはサポートに挿入・固定	157 千円
・ Tube-II CTA	熱線プローブはピンバイスで固定	177 千円

別売り品価格 (Tg: タングステン)

・ 熱線プローブ P-1	センサ径 5 μ m の銅メッキ Tg 線	4 千円
・ 熱線プローブ P-2	銅メッキ Tg 線(室温抵抗値 3.6 \pm 0.5 Ω)	5 千円
・ 熱線プローブ P-3	P-2 を低温焼鈍*した銅メッキ Tg 線	6 千円
・ 熱線プローブ P-4	銀被覆の Wollaston 白金 5 μ m 線	6 千円
・ 熱線プローブ P-5	ステンレスボディーの銅メッキ Tg 線	6.5 千円
・ ケーブル付 電池ケース B-1	ピンジャック付き電池ケース (電圧降下警告灯付) 電池は付属していません。(ケーブル長 1.5m)	3 千円
・ 電源ケーブル C-2	ピンジャック-バナナプラグケーブル(長さ 1.5m)	2.5 千円

*低温焼鈍(Tempering)することで熱線抵抗値の経時変化を低減できます。

Slim 型 CTA

Slim 型 CTA のサポート下流の小さな金属ケースには、熱線センサとして抵抗値のばらつきの大きいタングステン線を想定して、以下の機能が搭載されています。

センサの加熱比設定用の可変抵抗器、周波数 1kHz の矩形波と Damping 調整機能
これらにより、CTA を最適な条件に設定することで、高精度な平均速度並びに速度変動計測が可能となります。

Slim-I と Slim-II の CTA 基本構成

- 1) 外径 6mm の熱線サポートと CTA を収納した金属ケース (14mm×14mm,長さ 120mm)
(Slim-II: 熱線プローブをピンバイスで固定)
(Slim-I: 熱線プローブサポートソケットに挿入のみ)
- 2) 入出力ケーブル: Hirose の 6 ピンソケット付きケーブル
 - ・長さ 1.5m のブリッジ出力 BNC ケーブル
 - ・長さ 0.5m の電源供給用のピンプラグ (Pin Plug)+USB ケーブル (C-1 付属)
 - ・10 倍増幅した変動出力線 (ユーザが外部信号源と結線)
- 3) A4 版の取扱い説明書
- 4) 熱線プローブは付属していません。下記別売りリストより選択下さい

価格

- ・ Slim-I CTA 熱線プローブはサポートに挿入し簡易固定 248 千円
 - ・ Slim-II CTA 熱線プローブはピンバイスで固定 270 千円
- 上記いずれのタイプにも、熱線プローブ P-1 1 本と 6Pin ケーブルが付属します。

別売り品価格 (Tg: タングステン)

- ・ 熱線プローブ P-1 センサ径 5 μ m の銅メッキ Tg 線 4 千円
- ・ 熱線プローブ P-2 銅メッキ Tg 線(室温抵抗値 3.6 \pm 0.5 Ω) 5 千円
- ・ 熱線プローブ P-3 P-2 を低温焼鈍*した銅メッキ Tg 線 6 千円
- ・ 熱線プローブ P-4 銀被覆の Wollaston 白金 5 μ m 線 6 千円
- ・ 熱線プローブ P-5 ステンレスボディーの銅メッキ Tg 線 6.5 千円
- ・ ケーブル付
電池ケース B-1 ピンジャック付き電池ケース (電圧降下警告灯付) 3 千円
電池は付属していません。(ケーブル長 1.5m)
- ・ 電源ケーブル C-2 ピンジャック-バナナプラグケーブル(長さ 1.5m) 2.5 千円

熱線プローブ、支持棒及び CTA ケースの外形

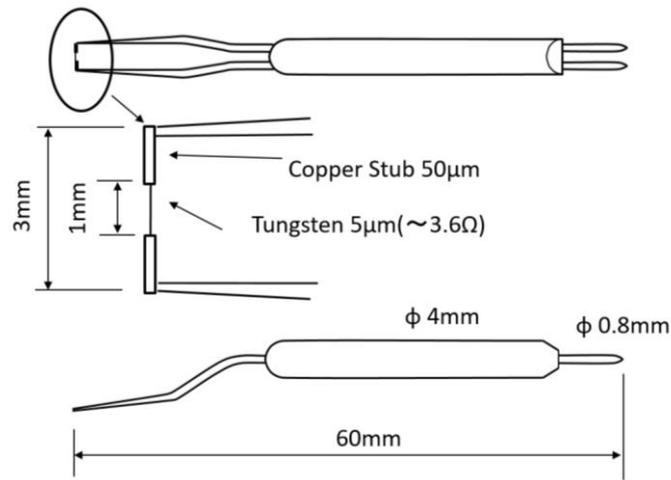
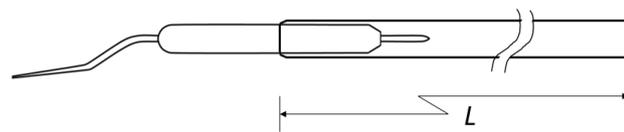
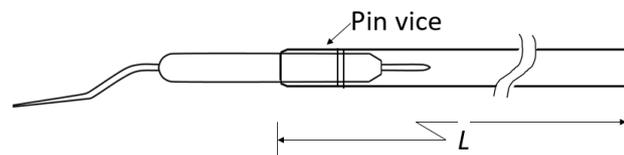


Fig.5 熱線プローブ モデル P-1~P-5

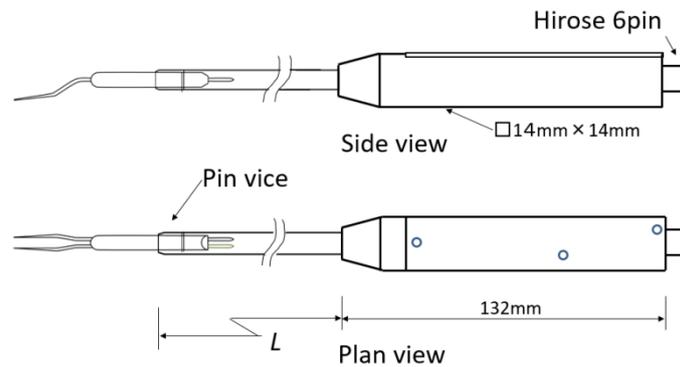


Tube-I(Probeをソケットに簡易挿入で固定)



Tube-II(ProbeをPin viceでしっかり固定)

Fig.6 Tube 型熱線風速計(サポート長 $L=400\text{mm}$)



Slim-II(ProbeをPin viceでしっかり固定)

Fig.7 Slim 型熱線風速計($L=400\text{mm}$ 、Slim-I 形もあります)

Slim-II を用いた計測結果例

Fig.8 は、吹出し式低乱風洞測定部断面(600mm×300mm)中央部に下流から上流に向けて Slim-II 型風速計を設置し、気流速度が 20m/s 時において気流に残留している速度変動のパワースペクトル解析した結果 (黒線) を示しています。周波数 1kHz より低い帯域は残留変動ですが、それより高い帯域の 30kHz を中心とした山状のスペクトル分布は、CTA 固有の電気雑音です。矩形波テストから定温度ブリッジの共振周波数 (Fig.8 ではピーク周波数)、熱線の時定数、さらに定温度ブリッジの減衰係数 $\zeta (=0.75)$ が得られるので、定温度ブリッジのサーボアンプ雑音特性 (公表されたカタログ値) からこの動作条件における CTA の電気雑音を緑の実線で示すように推定することができます。この推定雑音を黒線のスペクトルから差し引くことで、CTA 雑音を差し引いた気流変動スペクトラム (赤線) を求めることができます。このような処理で、熱線風速計のダイナミックレンジは 1kHz から 3-4kHz 広がったこととなります。以上の結果から、仕様の項に記したように、電気雑音は流速換算で 0.0025%(0.1-1kHz 帯域)で、周波数帯域を 1Hz-250kHz まで広げても 0.07%に過ぎません。もう 1つ重要な指摘は、電源ハムや高周波帯域の誘導雑音は皆無であることが分かります。

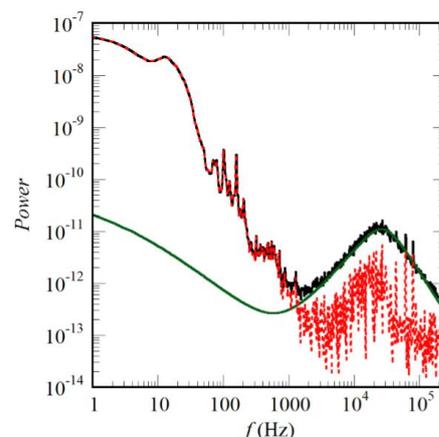


Fig.8 気流に残留する速度変動計測例²⁾

Slim-II の雑音特性を他社の風速計と比較した例

Fig.9 に市販 CTA との比較結果を示します。比較に用いた風速計は Dantec Streamline Pro です。熱線センサの動作抵抗は室温抵抗値の約 1.8 倍、当社のそれは約 1.6 です。流れの速度は、 $U = 8 \text{ m/s}$ で、上記の風洞を用いています。橙色線は Streamline Pro、黒線は当社の Slim-II を用いた結果です。100-300Hz 帯域における速度返答両者は良く一致していますが、定温度ブリッジの共振周波数は Slim-II がやや上回っています。300Hz 以上の帯域における CTA 固有の電気雑音は Streamline Pro がやや低いことを示しています。しかしながら、矩形波テストから推定した CTA の固有の電気雑音を差し引いた連続的な雑音レベルは、ほぼ同程度とみなせるでしょう。ただ、Streamline Pro にはライン性の電源ハムや高周波帯域の誘導雑音が多数観察されていることが分かります。なお、Fig.8 と Fig.9 は文献²⁾より引用しました。

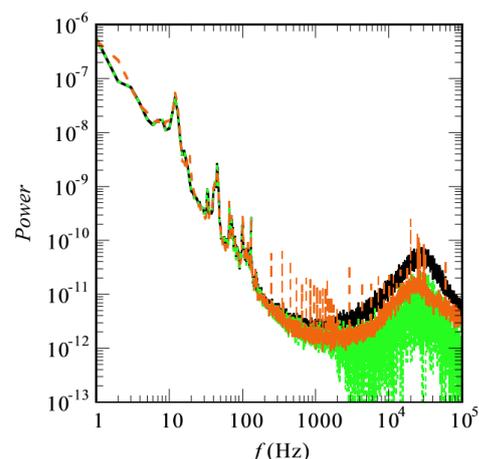


Fig.9 Slim 型と Streamline Pro 風速計の電気雑音比較²⁾

参考文献

- 1) 高木, 稲澤, 浅井, 日本流力学会年会 2019、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.
- 2) Inasawa, A., Takagi, S. and Asai, M., Improvement of signal-to-noise ratio of the constant-temperature hot-wire anemometer using transfer function, accepted by Science Measurement and Technology, in press.