

温度流速計における低周波特性検定装置の製作

渡部 英昭, 小原 裕樹*, 嶋宮 貴洋**

Making of an Examining Device for Low-frequency Response Characteristics of a Thermo Anemometer

Hideaki WATANABE, Yuki OBARA* and Takahiro SHIMAMIYA**

(2003年12月10日受理)

Thermo anemometer is used for simultaneous measurements of fluctuating velocity and temperature in flow field. This instrument is composed of a constant current thermometer and a constant temperature hot wire anemometer. In using the constant current thermometer, low frequency attenuation of temperature signals is caused by a thermal inertia of the prongs. When the accurate measurements are to be made, it is necessary to compensate for the thermal lag by using of a compensating circuit. To decide the characteristic time constant of the circuit, the frequency response of the probe must be confirmed experimentally. In this paper, we made a device for checking the thermal lag of probes. The device is made smaller and lighter compared with conventional one, and it has a sufficiently large range of frequencies (10mHz~8Hz). Due to the probes that attached to the device are inserted into and oscillated in the flow field with a linear temperature gradient, the low frequency characteristics of the probes are actually verified.

1. 緒言

流れ場内で生じている現象を実験的に解明する場合、最も一般的に用いられている計測装置は定温度型熱線流速計である。定温度型熱線流速計は、温度一定の流れ場内での計測においては多くの長所を有する計測装置である⁽¹⁾。一方、温度変動と速度変動の両方を伴う流れ場では、両者が相互に干渉し合うため、計測原理上、正確な測定が行えないという欠点がある⁽²⁾。

しかし、自然界において温度一定の流れ場はむしろ稀であり、対流流れに代表されるように、通常は流れ場の中に温度変動を持つ例がほとんどを占める。よって自然界で生じている全ての流れ現象を正確に解明しようとする場合、温度一定の流れ場を定温度型熱線流速計で測定するだけでは限界があると考えられ、温度変動を持つ流れ場を対象にせざるを得ないことになる。

著者らは、100℃以上の高温に加熱された円柱もしくは加熱格子を常温の流れ場内に置き、その加熱物体後流中で生じる熱・運動量輸送機構の解明を研究テーマに選んでいる。温度一定の流れ場において流れの諸現象の原動力となるのは、主に圧力差によって生じる運動エネルギーであるが、上記のような大きい温度差を有する流れ場においては、圧力差の他に、温度差が原因となって生じる浮力も運動エネルギー源として無視し得ない。すなわちこのような流れ場では、速度変動のほかに温度変動もエネルギー授受に影響を及ぼしていると考えられ、前述のように定温度型熱線流速計では測定を行うことができない。

これに対し蒔田ら⁽³⁾は、流れ場内に挿入した金属細線の温度変化により生じる抵抗値変化を電圧に変換することにより、流れ場の瞬間的温度変動を計測できる定電流型温度計と、前記定温度型熱線流速計とを組み合わせた二線式温度流速計を開発した。そして、速度変動と温度変動を有する流れ場における両者の計測を行った。この装置は、両信号を用いて相互に補償し合う機構を有しており、従来の計測技術において最大の難点であった温度変動と速度変動

* 秋田高専卒業生（現北海道大学学生）

** 秋田高専卒業生（現岩手大学学生）

の相互干渉による測定精度低下の問題を完全に解決したものである。

しかし定電流型温度計を用いて温度変動を測定した場合、温度検知部分であるプローブが持つ熱容量により低周波領域で温度信号が減衰する低周波特性とよばれる現象が生じる⁽⁴⁾ため、減衰分を電子回路等により瞬時的に補償しなくては正確な測定ができない。よって本研究では、温度プローブの低周波特性を検定する装置を設計・製作し、その装置を用いて実際に温度プローブの低周波特性を検定することを目的とする。

2. 低周波特性検定装置の必要性

図1に二線式温度流速計のブロックダイアグラムを示す⁽⁵⁾。①は定温度型熱線流速計、②は定電流型温度計、③は高周波位相補償回路、④は低周波位相補償回路、⑤は遅延補償回路、⑥は温度補償用演算回路である。定温度型熱線流速計からの速度信号Uおよび $U^{0.45}$ を使って、定電流型温度計内での各種補償を行い、同時に温度計からの温度信号 $\Delta\theta_{comp}$ を流速計側に入力することにより、速度信号の温度補償を行っている。以上の補償により、温度変動と速度変動を有する流れ場においても、両者を完全に分離した上で同時に計測することが可能であり、相互干渉による誤差は生じない。

図2に、通常使用される温度プローブを示す。プローブは、プローブと呼ばれる直径0.3~0.7mm程度、長さ30mm程度の2本の鋼製針と、それらの先端間に電気溶接された直径2.5 μ m、長さ2mm程

ダイアグラム

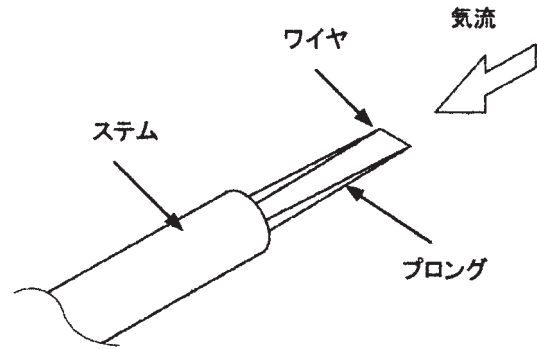


図2 使用した温度プローブ

度のタングステンワイヤ、これらを支えるステム(絶縁部材)から成る。

温度変動を持つ気流中に温度プローブを挿入した場合、温度検知部であり熱容量の十分小さいワイヤの温度が気流温度の変化に追従して電気抵抗値が変化するため、ワイヤに一定電流を流し続けることにより、気流温度の変化を電圧に変換することができる。しかしワイヤより、体積すなわち熱容量が10万倍以上大きいプローブの温度はその変化に追従できず、両者間に温度差が生じる。その結果、両者間に生じる熱伝導によりワイヤ温度が変化するため、実際の気流温度とワイヤ温度との間に誤差が生じ、温度変動の大きさを示す温度信号の振幅が、変動周波数の増加とともに減衰する。この現象は10mHz~数Hzという低周波領域で起きるため、プローブの低周波特性と呼ばれている。よって測定精度を向上させるためには、使用されるプローブの低周波特性を計測前に正確に検定し、その結果を元に、前記補償回路などで温度信号を補正する必要がある。

プローブの低周波特性を検定する手段として、蒔田らは鉛直方向にリニアな温度勾配を持つ流れ場を形成し、その中で図3に示す装置⁽⁶⁾に取り付けた温度プローブを一定周期で上下に振動させる方法を開発した。この装置において、速度可変モータで制御された回転は、カップリングを介して減速部であるギヤボックスに伝達され、異なる歯数を有するタイミングプーリにタイミングベルトを掛け替えることにより減速比を変化させた後、再度カップリングを介して揺動部のクランク部に伝達される。ここで回転運動が上下方向の往復運動に変換された後、プローブを保持するホルダに伝達され、プローブは一定周期で上下に往復運動を行う。

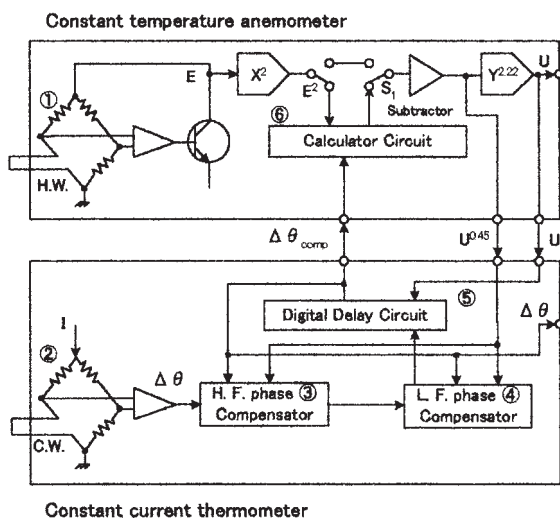


図1 二線式温度流速計ブロックダイアグラム

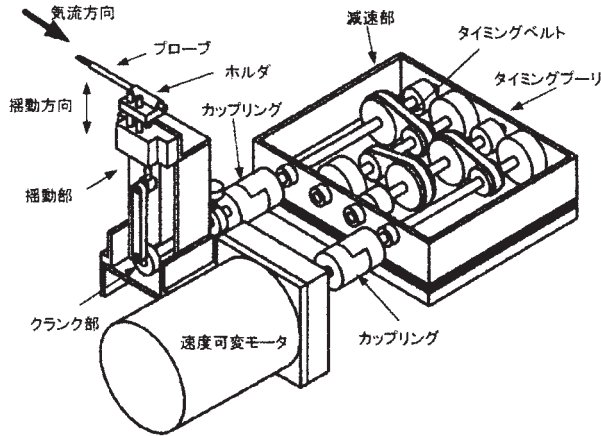


図3 従来の検定装置

この装置に取り付けたプローブをリニアな温度勾配を有する流れ場に挿入し、一定の周期で上下動させることにより、プローブ周囲の気流温度を高温から低温まで一定周期で連続的に変化させることができる。この方法により、正弦波状に変化する電流を流すことにより電氣的にワイヤを加熱する、などのような擬似的な手段を用いる必要がなくなり、プローブの低周波特性を正確に検定できる。

3. 低周波特性検定装置の製作

蒔田らの装置では、可変周波数領域が0.001~30 Hz と十分広く、また正確な周波数の設定も容易である。しかし、①モータの振動がプローブに伝播しないよう、両カップリングを介してモータ、揺動部、減速部が完全に分離されており、装置を移動する際、これらを別々に持ち運んで組み立てなくてはならず、設置に時間がかかっていた。また、②装置の占める面積が大きいため（約250mm×400mm程度）、設置できる場所が限定されていた。さらに、③振動対策の目的もあって装置自体の重量が大きいため（約10kg）、持ち運びによる移動が困難であった。

著者らが検討を行った結果、プローブの低周波特性を検定する際に必要な振動周波数範囲としては0.1~10Hz程度では十分と思われる、またこの程度の周波数においてはモータ等から発生する振動も十分に小さいと考えられる。よって著者らは、本装置における振動の伝播が検定結果に与える影響はごく小さいものであると判断し、①従来の装置のような分割型ではなく一体型とすることにより、移動・設置時の組み立て時間を削減することとした。また装置の移動および設置場所の確保を容易ならしめるため、②設置面積、③重量をそれぞれ極力小さくする

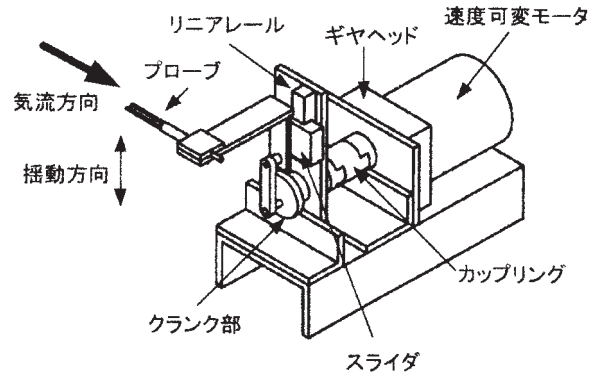


図4 新しい検定装置

こと、などを念頭に置いて設計を行った。

今回設計・製作した低周波特性検定装置の概略を図4に示す。70~1400rpmの範囲で制御される速度可変モータからの出力は、モータに装着されたギヤヘッドにより減速された後カップリングを介してクランク部に伝えられる。ここで回転運動を上下方向の往復運動に変換され、ロッドを介してリニアレール上のスライダを20mmのストロークで上下に振動させる。スライダにはホルダによりプローブが固定されているため、モータを回転させることによりプローブを一定周期で上下に揺動させることができる。

本装置では、従来の装置において大型・重量増の原因の一つとなっていた減速部を廃止し、代わりに小型・軽量で着脱式のギヤヘッド（日本サーボ製。減速比1/100, 1/30, 1/3。形式：IHT6H100N~IHT6H3N）を使用した。本装置に装着する際、これらのヘッドはモータに対して4本のビスで固定する様、取扱説明書には記載されている。しかし、本装置における振動が十分に小さいこと、装置の構造上、使用中にギヤヘッドがずれたり脱落したりする可能性が全くないこと、ビスの本数が少ない程ヘッド着脱時の所要時間を短縮できること、などの理由により、本装置においては固定用ビスを2本だけ使用している。カップリングとしては、2個のハブと1個のスペーサから構成されているオルダムカップリング⁶⁾を自作して使用した。2つのハブはそれぞれクランク軸とギヤヘッド軸に装着されており、スペーサを介して回転が伝動される。本カップリングは、構造上、円周方向の動きに関してのみ拘束されており軸方向に関しては着脱自在であるため、ハブを装着したヘッドを軸方向にスライドさせるだけでクランク部との連結、切り離しが容易に行われる。そして使用される全てのヘッドに予めハブを装着しておくことにより、ヘッド交換に要する時間を20秒

程度に短縮することができた。

さらに、従来の装置における重量増の大きな原因として、装置駆動に最低限必要なトルクを大きく上回るモータの使用が挙げられる。本装置、従来の装置を問わず、低周波特性検定時にはモータ回転数が必ず減速されるため、最大のトルクを要するのは減速比 1/3 のヘッドを使用した時である。よって本装置においては、このヘッドを用いた際に装置を駆動できる最小限のトルクをわずかに上回る出力を有する、市販の速度制御インダクションモータ（日本サーボ製 IHT6P3N）を選定した。また、クランク部、ホルダ等の重量が大きいと装置駆動に余分なトルクが必要となるため、それらの部材の形状を工夫し軽量化を図った。さらに、装置全体の一層の軽量化を実現するため、装置を構成する主な部材を全てアルミ材とした。

以上のような方法により、本装置における小型化（190mm×80mm）、軽量化（1.5kg）を実現できた。

4. 低周波特性の検定

気流温度20℃につき 1V 出力するよう定電流型温度計を校正した後、温度プローブの低周波特性を検定した。今回検定に使用したプローブは、ブロング直径を0.3, 0.5, 0.7mm の3種類とし、ワイヤ直径および長さはいずれも2.5μm, 2mm に統一した。

始めに、加熱風洞⁷⁾の出口において鉛直方向にリニアな温度勾配を持つ気流を形成した。その時の温度分布を図5に示す。この流れ場における平均温度勾配は約4500K/m、気流流速は5m/sとなっている。図5より、今回形成された流れ場の温度勾配はほぼリニアになっていると言えるが、上下動するプローブのストローク中における上死点付近（Y軸123～128mm位置）では勾配が若干きつくなっており、下死点付近（Y軸107～111mmの位置）では逆に若干ゆるくなっていることがわかる。

次に本装置を風洞出口直下流に設置し、流れ場内にプローブを挿入した。モータの回転数を70～1400rpmの範囲内で変化させ、同時に、減速比1/100～1/3のギヤヘッドを使用することにより、10mHz～約8Hzまでプローブの振動周波数を変化させた。そして、定電流型温度計より出力された温度信号の波形から、振幅、周波数をそれぞれ調べた。

それらの内、ブロング直径0.7mmのプローブを本装置に取り付け、周波数10.96mHzで振動させたときの波形を図6に示す。縦軸に温度計からの出力電圧、横軸に時間をとっている。本来、この波形は

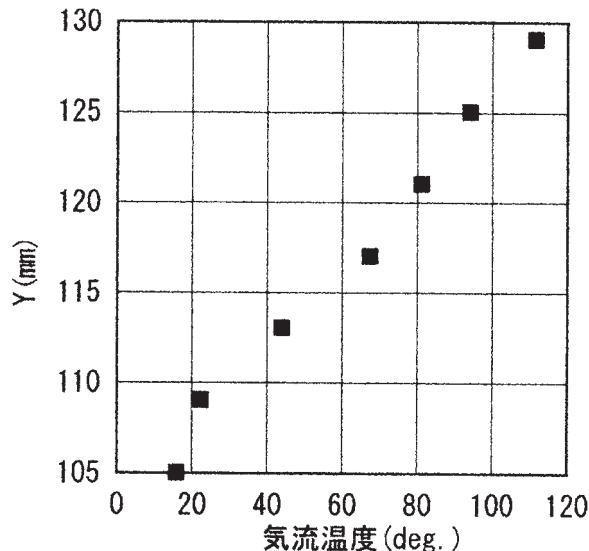


図5 風洞出平均温度分

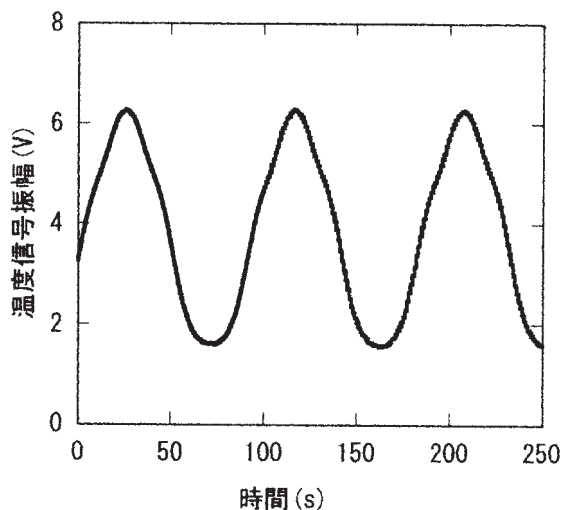


図6 温度計からの出力波計（10.96mHz）

完全な正弦波となるべきであるが、図に示された波形はほぼ正弦波に近いとは言えるものの、上側のピーク（上死点付近）はややとがり、下側のピーク（下死点付近）は逆に若干鈍っている。これは、図5に示した温度勾配が、厳密にはリニアでなかったことが原因である。すなわち勾配がきつい上死点付近では、高さ方向単位長さ当たりの位置変化に対し温度が急激に変化するため波形がとがり、勾配がゆるい下死点付近では、その逆の現象が生じていると考えられる。

次に、図6と同じプローブを用いて周波数だけを1000mHzに変えた場合の波形を図7に示す。周波数が100倍程度異なるため両図における横軸のスケー

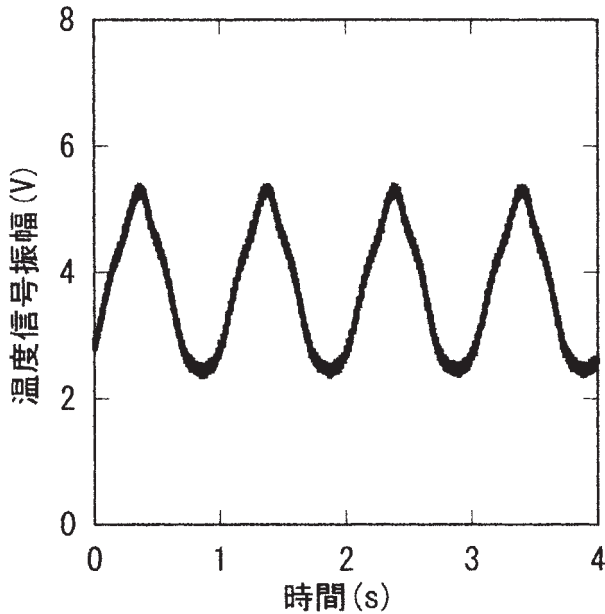


図7 温度計からの出力波形 (1000mHz)

ルは異なるが、同じスケールを持つ縦軸のみについて比較すると、周波数1000mHzの波形の方が、10.96mHzと比較し振幅が約0.6倍となっている。これは、プローブの振動周波数が増加したことにより、気流温度の変化にプロング温度が追従し切れなかったためである。すなわち気流中で最も温度が高い上死点にプローブが達した時、ワイヤは瞬間的にその温度に追従できるが、熱容量が大きいプロングの温度はまだ低いままである。そして、両者間の熱伝導により高温側であるワイヤの熱量が低温側であるプロングへ移動する。そのためワイヤ温度は気流温度より低くなり、温度計から出力される電圧は小さくなる。よって波形の上側ピーク位置は本来の位置より下になる。次に、気流中で最も温度の低い下死点にプローブが達した時、ワイヤ温度はそれに追従して低くなるが、プロング温度がまだ高いままであるため、高温側であるプロングの熱量が低温側であるワイヤへ移動し、ワイヤ温度が気流温度より高くなり、温度計出力電圧は大きくなる。よって波形の下側ピーク位置は本来の位置より上になる。以上の現象により、信号の振幅が減衰し、低周波特性の影響が現れたと考えられる。

さらに、前記したプロング直径 $\phi 0.3$, 0.5 , 0.7 の、3種類のプローブを使用し、それぞれの周波数を10mHzから約8Hzまで変化させ、10mHz時の振幅を基準にしてゲインの変化を調べた結果を図8に示す。縦軸にゲインをdB表示したもの、横軸に周波数をとっている。いずれのプローブにおいても、数

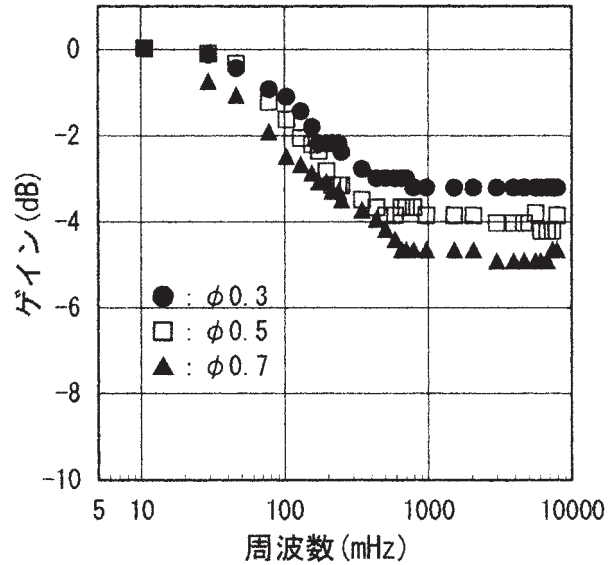


図8 プロング直径の違いによる低周波の特性の変化

百 mHz までは周波数の増加とともに温度信号が減衰し、それ以上の周波数ではほぼ一定値を示すことがわかる。プローブごとに比較すると、プロング直径が小さいほどゲインの減衰量、減衰勾配、減衰後ゲインが一定値に達する周波数、等が小さくなること、減衰が始まる周波数は逆に大きくなること、などが分かる。これはプロング直径が小さいほど熱容量が小さくなるため、温度変動に対するプロングの追従速度が向上するためであると考えられる。

5. 結論

本検定装置を設計・製作し、実際に温度プローブの低周波特性を検定した結果、以下の結論が得られた。

- ① 減速部を廃止し、代わりに市販の小型軽量ギャヘッドを採用したこと、装置駆動に最低限必要なトルクを有する小型の速度制御モータを選定したこと、装置を構成する主な部材を全てアルミ材にしたこと、などにより、装置を一体化することができ、また設置面積、重量共に従来の装置の約1/7にすることができた。その結果、装置の移動、設置が大変容易になり、設置時間も大幅に短縮することができた。
- ② 減速比の異なる3種類のギャヘッドを用いることにより、プローブの低周波特性を検定するのに十分な10mHzから8Hzまでの周波数範囲を実現できた。
- ③ 本装置を用いて、実際に温度プローブの低周波

特性を検定することができた。

6. 参考文献

- (1) 蒔田, 実験流体力学 (EFD) 流れの計測技術の基礎と応用, 日本機械学会, 1993, pp21~pp30.
- (2) 蒔田, 流れの計測, Vol.12, No.16, 1995, pp3~pp17.
- (3) 蒔田, 森, 澤田, 日本機械学会論文集, 58-545, B, 1992, pp90~pp97.
- (4) Paranthoen, P., Petit, C., Lecordier, J. C., J. Fluid Mech., Vol.124, 1982, pp457~pp473.
- (5) 蒔田, 澤田, 森, 日本機械学会論文集, 58-554, B, 1992, pp154~pp161.
- (6) FA 用メカニカル標準部品カタログ, ミスミ, 2001, pp367
- (7) 渡部, 秋田工業高等専門学校研究紀要 Vo.38, 2002, pp13~pp18.