

高応答性7孔管の開発

～使いやすい変動流れ場計測装置について～

Development of High Response Seven-Hole Probe

赤坂 剛史
Takeshi AKASAKA

川田工業(株)航空・機械事業部
製品開発部

進藤 章二郎
Shojiro SHINDO

前川田工業(株)技術研究本部顧問

原 幸久
Yukihisa HARA

川田工業(株)技術研究本部
技術開発室

これまで70°近く傾いた3次元流れに対して計測可能な7孔管を開発・販売し、翼後流等の流れ場の計測実績を挙げてきたが、非定常流れ計測には応答性能が不足していたので不向きであった。そこで圧力センサを本体に内蔵することにより非定常流れ場計測にも対応した高応答性7孔管を新たに開発した。そしてこの高応答性7孔管に対して姿勢角特性・温度特性・振動特性を検討し、計測データに対する補正方法を得た。また翼端渦を計測し、従来の7孔管と同等の性能を有しながら計測時間を大幅に短縮できることを確認した。さらに非定常流れである角柱後流を計測し、熱線流速計と同等の性能を有しながら熱線風速計に比べて非定常な流れ場計測を非常に容易に行えることがわかった。

本論文では開発した高応答性7孔管の性能について評価し、非定常流れの計測に有効であることを報告する。

キーワード：7孔管，熱線流速計，非定常流計測，風洞試験

1. はじめに

流れの速度や偏角を計測する主な方法として、(1) 5孔管、(2) 熱線流速計、(3) LDV (Laser Doppler Velocimeter)、(4) PIV (Particle Imaging Velocimeter)、(5) PTV (Particle Tracking Velocimeter) などが挙げられる。(1)(2) は流れ場に直接入れて計測する古典的な方法であり、(3)(4)(5) は流れ場に対して非接触で計測する方法である。これらの中で、取り扱いが容易で安価である5孔管は多くの適用例が報告され広く使われている。

非定常流れ場の計測について、5孔管先端部に圧力センサを内蔵して航空機のエアデータ計測用に開発したものもあるが¹⁾、一般的な非定常流れ場の計測には熱線流速計が用いられてきた。しかし熱線流速計はプローブ先端が微細で壊れやすく、熱による影響もあり、その取り扱いには大変な注意が必要である。

一方、5孔管は多孔管の一種で計測範囲が $\pm 40^\circ$ 程度に限定されるが、その欠点を補うため7孔管、13孔管²⁾、20孔管³⁾などが考案され、7孔管は $\pm 70^\circ$ 、13孔管は $\pm 135^\circ$ 、20孔管は $\pm 180^\circ$ の計測範囲を持つと報告されている。なお13孔管、20孔管については製品化にいたっていない。

これまでに航空・機械事業部製品開発部では較正装置

を内蔵した汎用性7孔管を製品化してきた。7孔管は図1に示すように、先端部に7つの圧力孔(中央に1つ、周囲に6つ)を配し、その形状は円錐状であり、7つの圧力値から流速と流れの傾角(迎角、横滑り角)を算出するものである。較正装置内蔵7孔管は、従来の7孔管に較正装置として中空モータを内蔵することを特徴とし、これによって較正試験が容易になった。

計測精度は、3次の較正多項式を用いると⁴⁾、流れの角度が $\pm 70^\circ$ の範囲の流れ場に対し速度誤差2%以内、角度誤差 2° 以内の精度である。

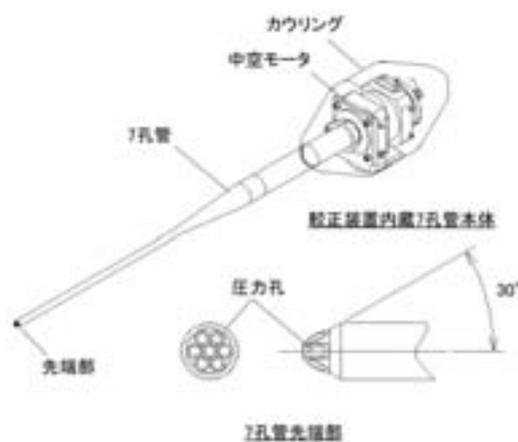


図1 較正装置内蔵7孔管

この7孔管は、圧力チューブを介して圧力計測を行うため、測圧管（検出孔から圧力センサ受圧面までの導圧管）が長く定常流れ場計測に適していた。新たに開発した高応答性7孔管は、圧力センサを内蔵することにより測圧管が短くなり、高応答性を有し非定常な流れ場の計測を行うことができるようになった。

ここでは写真1に示す新たに開発した高応答性7孔管の特性について評価し、定常流れ計測のみならず非定常流れの計測に有効であり、また熱線流速計よりも簡易に計測が可能な流速計であることを報告する。



写真1 較正装置を内蔵した高応答性7孔管

2. 構造

従来の7孔管の構造は、7つの圧力管が束ねられ、一方が先端部に位置する7つの圧力孔、他方が後方に位置して圧力チューブとの接続部になっていた。高応答性7孔管の構造は図2に示すように、7つの圧力管の一方が先端部に位置する7つの圧力孔となっており、他方が内蔵された圧力センサのポートに接続されている。圧力センサは差圧タイプを使用しており、他方のポートは高応答性7孔管の後方から差圧チューブを出している。また圧力センサ用電気配線も後方から出している。



図2 高応答性7孔管の構造

3. 性能

(1) 基本特性

a) 圧力センサ

高応答性7孔管が内蔵する圧力センサはHoneywell社の差圧タイプ40PC001B1Aであり、圧力範囲が ± 6 kPa、無負荷時の出力が2.5 V出力、出力が3.33 kPa/Vである。

b) 姿勢角特性

高応答性7孔管の軸方向への偏角（ロール角変化）と圧力センサ出力に相関が見られる場合にはロール角補正を多用する較正試験データに対してロール角補正をする必要があり、また傾角（ピッチ角変化）と圧力センサに相関が見られる場合には取り付け角度によってピッチ角補正をする必要があるため、それぞれの角度変化に対する圧力センサ出力を調べた。

図3にロール角を $\pm 180^\circ$ 回転したときの圧力センサ出力を示す。値はおおむね ± 0.0005 V内にある。これは ± 1.67 Paに相当し、ばらつき誤差のような小さな出力変化であり、ロール角変化に対する相関は見られない。

またピッチ角を $\pm 90^\circ$ 変化させたときの圧力センサ出力を計測したが、ロール角変化と同様のばらつきが変動幅内にあり、傾き角に対する相関も見られなかった。

したがって、姿勢角（ロール角変化、ピッチ角変化）に対する影響は無視でき、姿勢角補正は行わなくてよい。

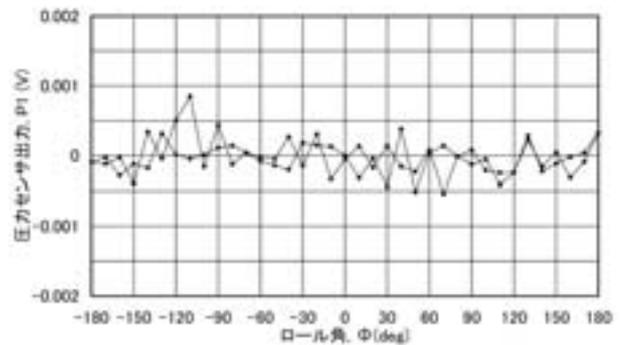


図3 ロール角特性

c) 温度特性

高応答性7孔管を運用する温度によって圧力センサ出力が変化する場合には温度補正をする必要があるため、温度に対する圧力センサ出力を調べた。図4に温度変化に対する無負荷時の出力（初期値）および1.47 kPa加圧時における圧力センサ出力の変化量を示す。

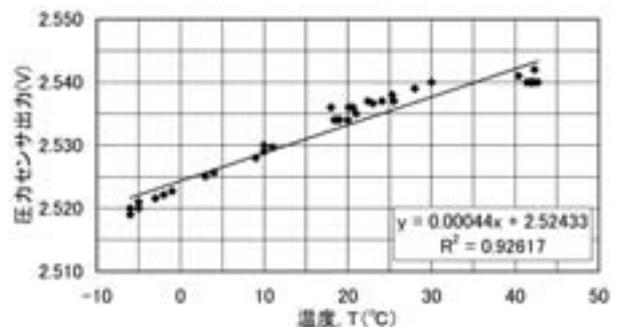


図4a) 温度特性：初期値変化

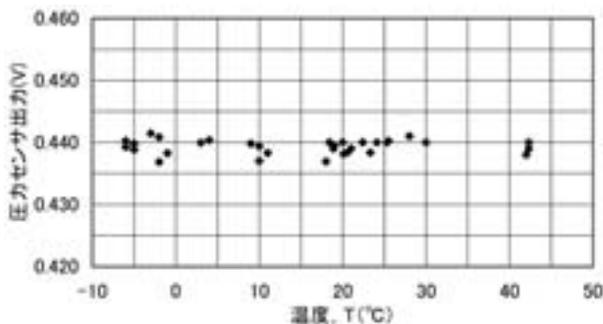


図4b) 温度特性：1.47 kPa加圧

初期値は温度変化に対して傾向があり、直線近似すると単位温度あたり約0.00044 V上昇する。これは単位温度あたり1.47 Pa上昇したものに相当し、大きな温度変化がある場合には無視できない。

圧力センサに1.47 kPa加圧した状態で温度変化したときの圧力センサ出力は図4b)より平均0.439 Vで±0.002 Vの範囲内にあり、ばらつき誤差と見られる小さな量であり、温度変化に対する相関は見られない。

したがって、温度変化に対しては初期値を補正する必要がある。しかし加圧時の出力は補正しない。なお加圧時の圧力センサ出力については、速度・角度算出アルゴリズム内で圧力センサ出力の各々の差を用いるため、圧力センサ間で一定の温度ドリフトが生じているならばその時点で補正されることになる。

d) 振動特性

高応答性7孔管運用時はトラバース装置等を用いて流れ場内を計測するが、非定常流れでは特にその流れ場によって高応答性7孔管がトラバース装置ストラットとともに振動する可能性がある。そこで高応答性7孔管をトラバース装置に取り付けて振動させたときの圧力センサ出力を調べた。

軸方向の前後振動および横方向の振動について試験し、結果として振動による圧力センサ出力の傾向は見られなかったため振動による影響は無視できる。

e) 応答特性

圧力管で圧力を計測する場合、測圧管がローパスフィルタの役割を果たすため、圧力センサは高周波の圧力変動を検出できない。そこで高応答性7孔管の応答性を調べるため、風船を用いた破膜試験を行った。試験では、内蔵しているものと同型の圧力センサを高応答性7孔管先端部に取り付け（センサ出力Pr）、測圧管が最も短い圧力センサ出力P1と、測圧管が最も長い圧力センサ出力P7とを比較することにより応答性を検討した。

図5に7孔管先端部から15 mmの位置で破膜したときの圧力センサ出力Prと、高応答性7孔管圧力センサ出力P1、P7との時間履歴を示す。図のサンプリング周波数は6

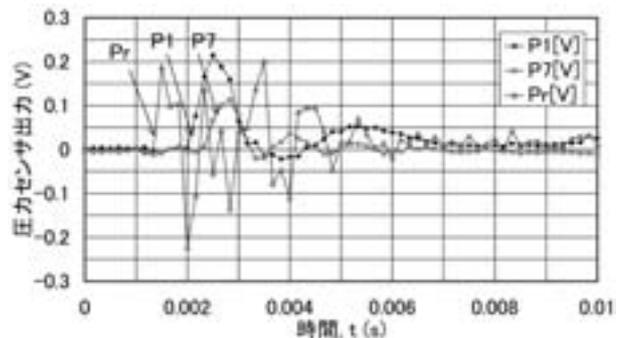


図5 応答特性

kHzである。

破膜によって先端圧力センサPrが圧力変動を検出してから圧力センサP1が検出するまで0.7 msの遅れがあり、さらに圧力センサP7が検出するまで1.0 msの遅れがある。また圧力センサP1、P7は、先端圧力センサPrに見られる高周波の振動を検出できていない。測圧管による影響と思われる。

圧力センサが立ち上がる時間を約1.0 msとすると、応答時間は2.0 msすなわち500 Hzの応答性能となる。

(2) 精度

a) 較正多項式

高応答性7孔管が7つの圧力データから速度・角度を推算するために、本稿では4次の較正多項式を用いた。較正試験は風速30 m/sで、高応答性7孔管のロール角とヨー角（水平面に対する回転角）を偏角して行う。本稿で用いる較正係数はヨー角 = ±70°以内のデータから算出した。

誤差についてはそれぞれ

$$\text{速度誤差 (\%)} = \frac{\text{推算値} - \text{真値}}{\text{真値}} \times 100$$

$$\text{角度誤差 (deg)} = \text{推算値} - \text{真値}$$

とした。図6に設定角度ベクトルの大きさ $((\alpha^2 + \beta^2)^{1/2})$ に対する高応答性7孔管のフィッティング誤差を示す。ここで α は上下方向の流れ傾角、 β は左右方向の流れ傾角である。なお同図は圧力センサの差圧孔をカウリング内に開放した場合のものである。設定角度が±70°の計測範囲において、速度誤差は±2%以下、角度誤差は±2°以下である。

次に風洞風速を5～40 m/sの範囲で変化させたときの高応答性7孔管の速度推算精度を検討した。ここで流れの傾角 θ をともに0°に設定した。図7に風洞ピトー静圧管風速に対する速度推算値を示す。20 m/s以上の風速で誤差2%以下である。低速域においては推算精度が悪くなっている。

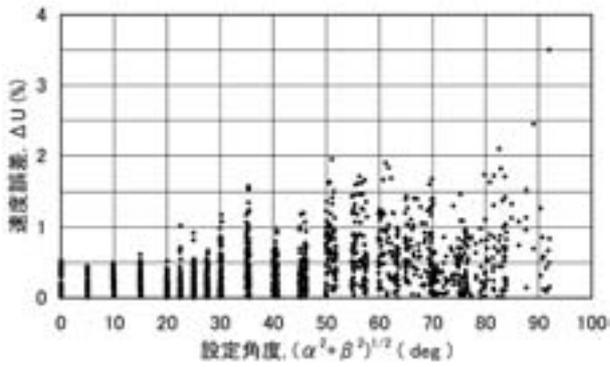


図6a) 設定角度に対する誤差：速度誤差

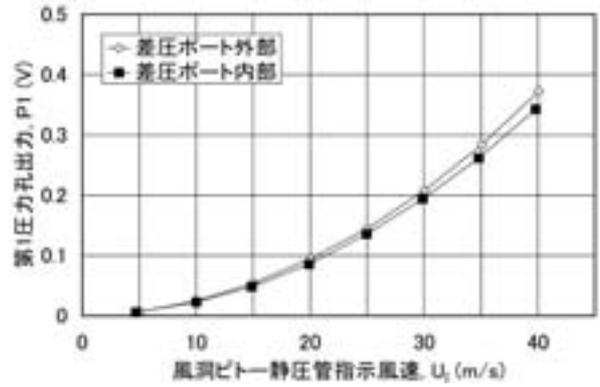


図8a) 差圧ポート内外による比較：圧力センサ出力P1

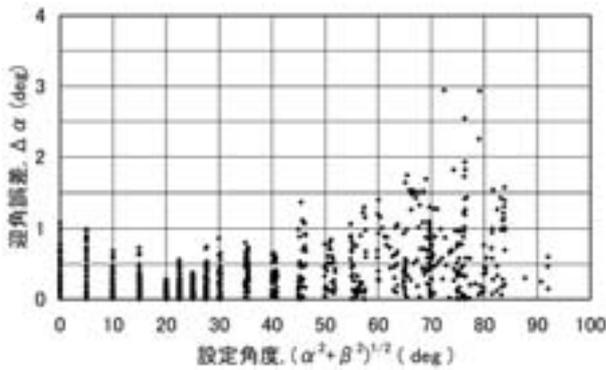


図6b) 設定角度に対する誤差：迎角誤差

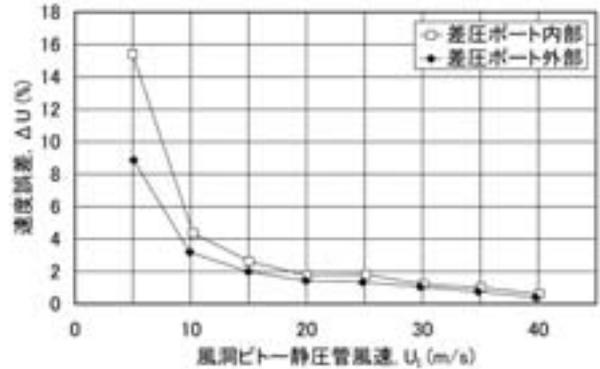


図8b) 差圧ポート内外による比較：風速誤差

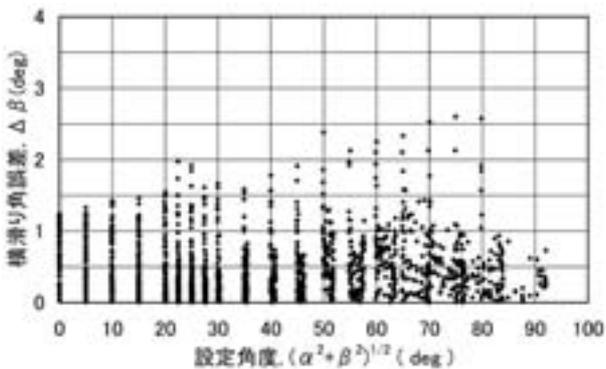


図6c) 設定角度に対する誤差：横滑り角誤差

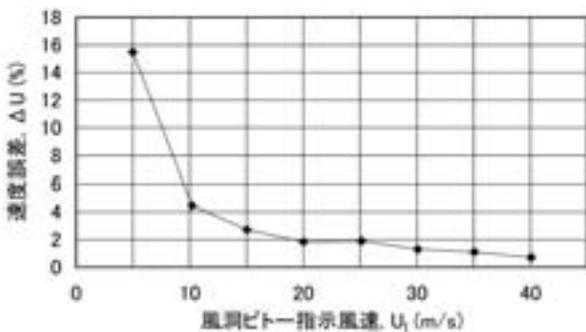


図7 速度誤差

b) 差圧孔

圧力センサの差圧孔を7孔管のカウリング内部に開放する場合と、風洞流れ場の外部に開放する場合における速度推算値について、風洞風速を5～40 m/sの範囲で検討した。なお両者の較正係数は、それぞれの差圧孔の開放位置で較正試験を行い算出したものを用いている。

図8a) にそれぞれの差圧孔開放場所における中央圧力孔の圧力センサ出力P1を示す。差圧孔はカウリング内部に開放するよりも流れの外部に開放したときのほうが圧力センサ出力は大きいことが見てとれる。カウリング内部の圧力が流れの外部圧力よりも高くなっているためと思われる。速度推算値は、図8b) に見られるように差圧孔を流れの外部に出したもののほうが誤差は小さい。差圧孔が外部のほうが圧力センサ出力が大きいために解像度が向上したものと思われる。

4. 他の流速計と比較

(1) 汎用性7孔管との比較

定常流れにおける高応答性7孔管の計測性能を検討するため、汎用性7孔管と高応答性7孔管を用いて翼端渦計測を行い、結果を比較する。汎用性7孔管は航空・機械事業部製品開発部で製品化したものであり、その圧力計測にはスキャニバルブを用いた。

図9に、翼模型のスパン方向に対して鉛直方向にそれぞれの7孔管をトラバースして流れを計測したときのスパン方向速度 v とその鉛直方向計測位置を示す。計測位置は翼模型後縁から翼弦長の16倍後方である。スパン方向速度の正負のピークは翼端渦のコア境界を示しており、スパン方向速度、コア直径に関して両者ともよく一致していることから、高応答性7孔管は汎用性7孔管と同等の性能を有している。

なお汎用性7孔管はスキャニバルブの特性から7つの圧力孔を1つずつ順番に計測するが、高応答性7孔管は7つの圧力孔を同時に計測するために、計測時間は従来の1/7に短縮された。

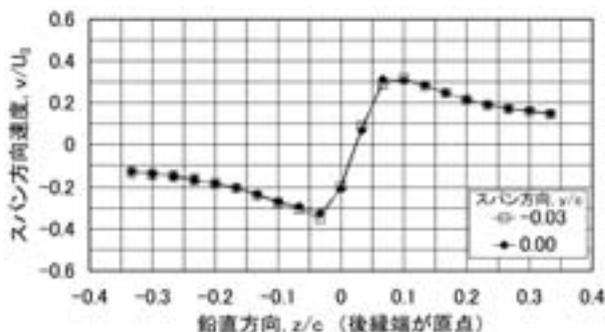


図9a) 翼端渦計測結果の比較：汎用性7孔管にて計測

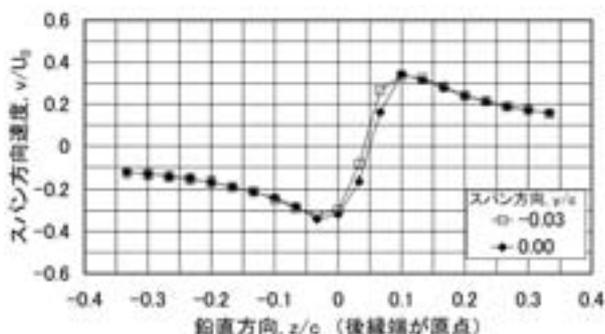


図9b) 翼端渦計測結果の比較：高応答性7孔管にて計測

(2) 熱線流速計との比較

高応答性7孔管の非定常流れにおける計測性能を検討するため、熱線流速計と高応答性7孔管を用いて角柱後流の計測を行い、結果を比較する。角柱は75 × 75 mmの

大きさである。計測時には風速を6～36 m/sまで変化させた。

図10に、一例として風速30 m/sにおいて高応答性7孔管と熱線流速計で計測した角柱後流における主流方向速度 u と鉛直方向速度 w の時間履歴を示す。両者とも同じような周波数と振幅を持った波形を計測していることが見てとれる。

風速を6～36 m/sまで6 m/sごとに变化させたときの高応答性7孔管と熱線流速計における計測値の流れの傾角に対するスペクトル密度と乱れ強さは図11のようになり、両者における10～60 Hzのピーク周波数と乱れ強さはほぼ一致した。なお乱れ強さは変動風速の標準偏差/平均主流速度 U で算出したものであり、低速における乱れ強さの両者の不一致は平均主流風速 U の誤差であり、これがばらつきを持つと、計算上、乱れ強さに影響を与える。

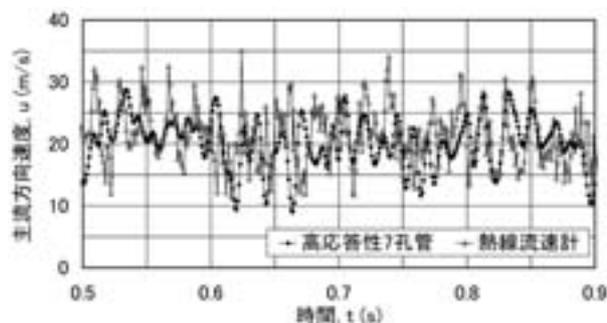


図10a) 角柱後流の時間履歴：主流方向速度 u

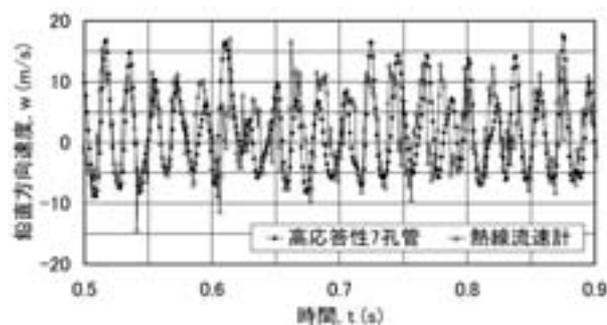


図10b) 角柱後流の時間履歴：鉛直方向速度 w

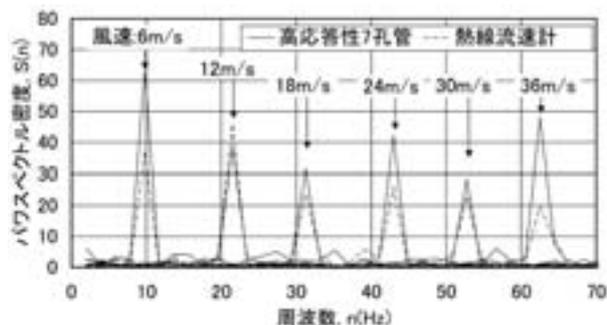


図11a) スペクトル密度

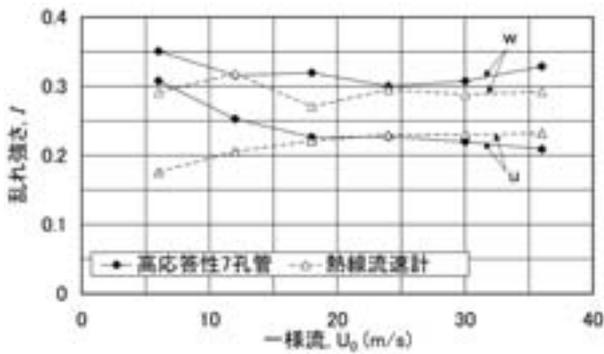


図11b) 乱れ強さ

図12に無次元スペクトル密度と無次元周波数の関係を示す。高応答性7孔管と熱線流速計との計測結果が一致していることは、同図の曲線が一致していることからわかる。なお無次元周波数が0.2を越えてから両データが急激に減少しているのは、高応答性7孔管および熱線流速計のデータに100 Hz以上の高周波に対するフィルタ処理をしているためである。なおスペクトル密度算出には自己回帰モデルを用いた。

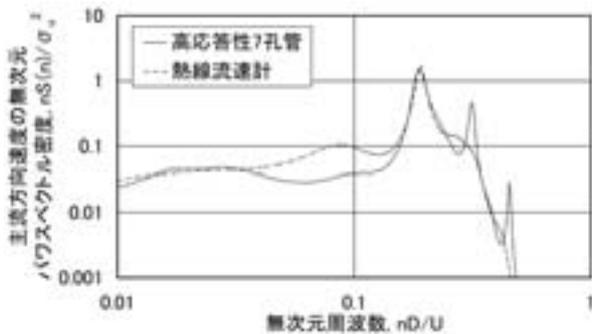


図12a) 風速36 m/sにおけるパワースペクトル：主流方向速度u

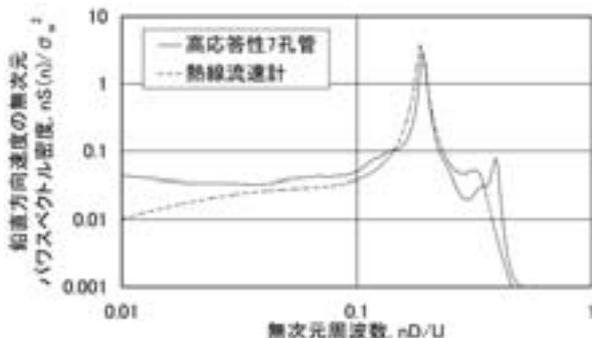


図12b) 風速36 m/sにおけるパワースペクトル：鉛直方向速度v

5. まとめ

新たに開発した高応答性7孔管の特性をまとめると次のとおりである。

姿勢特性：依存性は小さく無視できる。

温度特性：初期値が影響するため補正を行う。

振動特性：依存性は小さく無視できる。

応答特性：約500 Hz応答性能。

静特性：流れ傾角 $\pm 70^\circ$ に対し、速度誤差 $\pm 2\%$ 以内、角度誤差 $\pm 2^\circ$ 以内。20 m/s以上の風速変化に対し、速度誤差 $\pm 2\%$ 以内。差圧孔は外部圧を使用。汎用7孔管と同等の性能を有する。

動特性：100 Hzの非定常流れまで計測可能（100 Hzのフィルタ使用）。熱線流速計より使いやすい。

低速での計測精度を高めるとともに、さらなる高周波の非定常流れを計測することで性能実績をあげ、またより小さな渦計測ができるように高応答性7孔管の先端直径を細くすることが今後の課題であり、回転翼の吹き下ろし等に見られる非定常3次元流れの解析に役立つであろう。

本論文に用いた翼端渦データは、共同研究中である（独 航空宇宙技術研究所の渦発生装置模型渦計測結果の一部をお借りした。厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 坂井, 稲垣: 球形五孔型ピトー管の特性, 航空宇宙技術研究所報告971号, 1988.
- 2) 山口, 小野, 高木, 栗島, 守: 新開発の13孔ピトー管による車両模型の逆流を含む後流の計測, 日本機械学会第73期全国大会講演論文集(), 1995.
- 3) 吉田: 20孔ピトー管による車体周りの3次元流れ計測, (社)自動車技術会学術講演会前刷集, No.83, 1988.
- 4) Rediniotis, Hoang and Telionis: The Seven-Hole Probe; Its Calibration and Use, FED-VOL.152, Instructional Fluid Dynamics Experiments, ASME, 1993.