

2009年8月28日作成

TRS 新流速計測システムの開発 ～ 7孔ヨーメータの開発～

筑波大学 システム情報工学研究科
構造エネルギー工学専攻
修士1年 勝山 聡

筑波大学 第三学群工学基礎学類
物性工学主専攻
4年 小松 卓史

法政大学 工学研究科 機械工学専攻
修士1年 園田晃彦

監修 ツクバリカセイキ 株式会社

目 次

- 1 . 緒言
- 2 . 原理 , 理論
- 3 . 開発の経緯 , 手順
- 4 . 予備試験
 - (1) 実験装置概略
 - (2) 全圧管の特性
 - (3) 側圧管の特性
 - (4) 予備実験の結果と開発方針の決定
 - (5) 予備実験 方向の校正
- 5 . ヨーメータ製作
- 6 . 製品の先端形状比較
- 7 . 実験結果
 - (1) 実験概要
 - (2) 実験方法
 - (3) データ整理
 - (4) 考察
- 8 . 7孔ヨーメータの計測手順
- 9 . 実験結果のまとめ

1. 緒言

ピトーヨーメータは、静圧、流速と流向を同時に計測できる流体計測機器である。二次元、三次元の流れの解析に使用でき、二次元には3孔ヨーメータ、三次元には5孔ヨーメータ等を用いる。多孔ヨーメータの先端部は精密な仕上がりが要求され、量産が難しいため、普及に至っていないのが現状である。

本開発の目的は、流向、流速係数に再現性のある機械加工を前提とした多孔ピトー管の製作を可能とし、圧力計測点は5孔ヨーメータより2点増えるが、製作コスト、校正コストを大幅に削減可能な7孔ピトー管を試作し、そのデータを取得し、性能を評価することにある。製品ライフサイクルとしての衰退期にあるヨーメータのイノベーションとして導入コストの安い7孔ヨーメータを提案することで標準計測法としての普及を目指す。

2. 原理、理論

5孔ピトー管を回転させ、対角どうしの静圧を均圧し、流れ角 θ を決定し、流れに水平な3孔を使って、角度係数から角度 θ をもとめ、対応する角度 θ 点の流速係数から流速をもとめる通常の、均圧法による5孔ピトー管の測定方法がある。一方、5孔ヨーメータにおいて、任意の方向に向けられた流れに対して、5孔ピトー管を固定し、5個の孔の圧力から任意の θ 、 ϕ 角を算出する方法を固定法による5孔ピトー管の測定方法と呼ぶ。今回、軸周りの角度 θ を6個の圧力孔の値からスプライン法等で圧力分布の最高点の位置により決定する。この最高点圧力と、180度ずれた位置の最低点圧力及び中心孔の圧力の3点で、校正済みの角度係数と流速係数から立体角 θ と流速 V を求める。

7孔ヨーメータは、7本のパイプをまとめて7孔のヨーメータとし、7つの圧力から流向と流速を計測するものである。周囲の6つの圧力孔は、頭部を円錐台状に加工されていて、中央の圧力孔とはそれぞれ異なる圧力が計測される。中心との圧力差から、流向と流速を算出する。7本のパイプを最密にまとめると、孔の中心を結んだ図形は正確に正三角形になる。このことより、互いの孔の位置関係をより安易かつ精密に設置することができる。詳細な、計測手順については、7項に述べる。

3. 開発の経緯, 手順

流体の計測は速度、圧力、流向などを測定するのが一般的で、従来流体の計測にはピトー管が使用されてきた。しかしながら PIV 法, PTV 法などの可視化法により流向、流速をピトー管のみに頼ることなく測定することが主流となっている。

多孔ヨーメータによる測定は比較的簡単であるが校正は、非常に複雑で計算も煩雑となる。これは多孔ヨーメータのヘッドが製作上の微細な誤差により圧力係数が大幅に変化し、製作品1本ごとに多大な時間をかけて校正が必要となるためである。このため導入コストが高価となり製品の普及を妨げる要因となっている。

今回開発するのは側圧管 6 個の 7 孔ヨーメータで 3 孔、5 孔に比べ側圧孔が亀の甲羅状に配置できる為、切削加工も単純な旋盤加工で済む、そのため制作コストが従来のヨーメータより大幅に抑えることが出来、安価で量産可能な流体計測方法の提案が可能となる。また製品のライフサイクルの観点から衰退期にあるヨーメータのイノベーションにつながり、ヨーメータの普及にもつながると期待される。

実際の開発の手順としては以下のように行った。

1. 予備実験（全圧管と側圧管を単管で用いた実験）
2. 形状決定（先端角度）
3. 加工法決定（切削加工法, 溶接法など）
4. 対称性に基づいた校正法の検討
5. 性能評価（製品のばらつきと精度など）

4. 予備試験（予備実験）

(1) 実験装置概略

実験に用いた風洞は，断面 $200\text{mm} \times 200\text{mm}$ で最大風速 30m/s 風速分布，乱れ率共に 1% 以下のものを使用した．

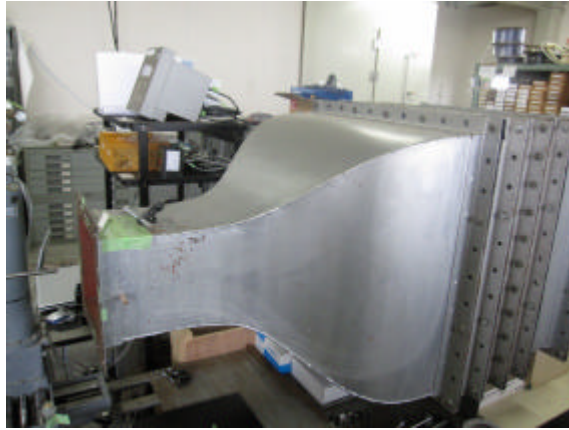


図1 風洞全景

図1に風洞の全景を図2に台座を示す．実験装置は，風洞本体，基準ピトー管，測定用の各種パイプ，パイプを支持する台座，ピトー管切り替え器，圧力計，表示機，各種センサーで構成される．試験するパイプは，方向に -59° から 90° 程度，方向に 0° から 180° まで可変させることのできる台座にとりつけた．



図2 台座

(2)全圧管の特性

7孔のうち中心孔となる全圧管の、流向及び流速への依存性を確認した。

今回使用するパイプの直径は 1.6 であり、それに対するレイノルズ数は風速 6m/s と 20m/s でそれぞれ 700, 2200 の遷移領域で検討した。流向は 5° ピッチで変化させて全圧係数（全圧と基準ピトー管の差圧の比）を測定した。

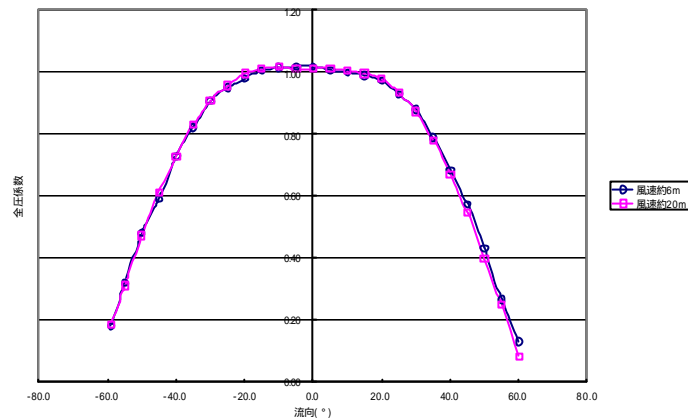


図3 全圧係数と流向の関係

図3は、風速 6 (m/s) と 20 (m/s) の場合の全圧係数と流向の関係を示したものである。2つの曲線がほぼ一致していることから、特性は風速 (Re 数) によってはほぼ変化しないことが分かった。また、流向が $\pm 20^\circ$ の範囲では、ほとんど流向に依存しないことが分かった。

(3)側圧管の特性 (2種類の角度と流速で検討)

ヨーメータに流入する流れの角度が変わるとそれに伴い測定できる圧力も変化する。過去の研究で先端の形状によって特性が変化することが確かめられている。しかし、先端に傾斜を付けた管に対する研究結果はなく、実際に確かめることが必要となる。

本実験では中心軸に対して斜め方向からの流れを想定して、5孔ヨーメータの側圧管の先端角度に近い 45° とそれより平滑で、かつ定規等で角度の精度をだしやすい 30° の先端を採用し比較検討した。予備実験に使用するこれらパイプの先端は、三角定規を用いて角度を定め、金属ヤスリによって手作業で削りだした。

流れに向かって正面を向いている時を 0° 、反時計回りの角度変化を正として、側圧管の角度を変化させ、全圧係数と流向の関係を考察する。傾斜をつけた側圧管先端部の向きは、軸周りの角度(方向)を考えず、主流方向に対して、スパン方向の角度変化を見るため、 0° において先端の傾斜角がそれぞれ 30° 、 45° となるように設置した。(図参照；

図は後から作成する)これは、測定機器の配置上、時計周り方向に 60° 以上回転させられなかった為である。そこで、剥離がより大きな角度で起こると予測される向きを半時計方向になるように調節した。

流速は、引き続き 6 m/s と 20 m/s の2種類とし、計測角度は -59° から 90° の範囲とした。

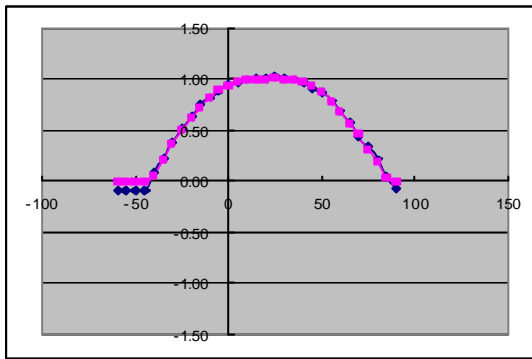


図4 先端角度が 30° の場合の側圧と流向の関係

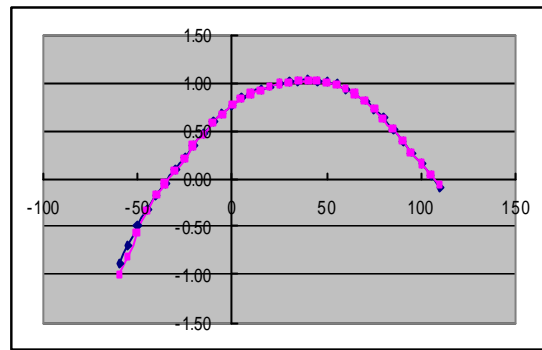


図5 先端角度が 45° の場合の側圧と流向の関係

図4に先端角度が 30° の場合の側圧と流向の関係，図5に 45° の場合の関係を示す。

図4，図5から速度の違いによる側圧と流向の関係に変化がないことがわかる。

また，両者は図3に対して，グラフの頂点がそれぞれ 30° ， 45° ずれていることができ，グラフが対称でないことも確認できる。これは，先端の傾斜角度と同じ流向になった場合圧力がもっとも高くなるからであり，グラフの非対称性も先端の形状が流向に対して非対称であることから推測できる。

(4) 予備実験の結果と開発の方針の決定

計測結果から流速係数 C を算出し，どちらの角度がよりふさわしいか検討する。

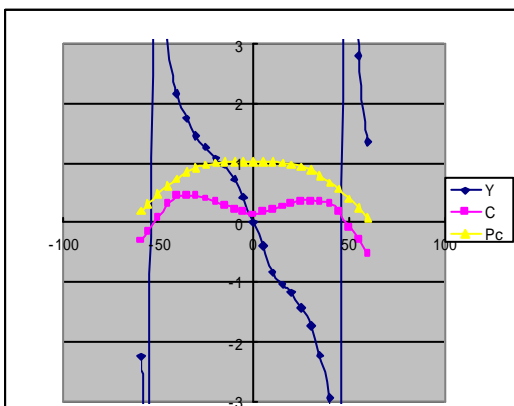


図6 先端角度が 30° の場合の検定曲線

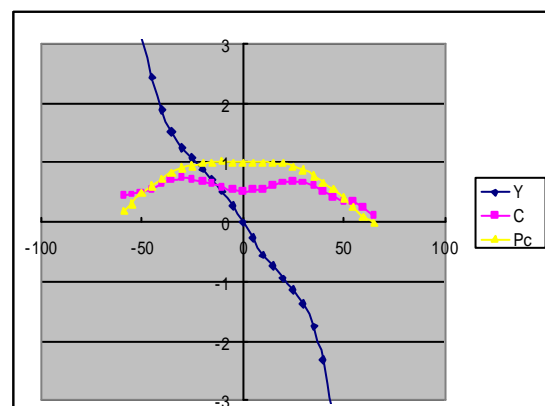


図7 先端角度が 45° の場合の検定曲線

側圧管で、流れがはく離してしまうと圧力計測が困難になってしまう。そのためできれば、先端角度は45°より浅い30°が適切であると考えられた。しかし、計測の結果30°では、逆に浅すぎて全圧管との差圧が取れにくいことがわかった。その為、今回は45°の傾斜角度を採用した。

5. ヨーメータの製作

実験で使用するヨーメータの製作は、協力工場である茨城県阿見町にある山崎電気にて行った。製作する7孔ヨーメータは、6-5の外管内に1.6-1.0のパイプを7本、亀の甲羅状に配置したもので構成される。また、管の間にできる隙間を埋める対策として、パイプと共に厚さ0.05mmのステンレス板を挿入した。パイプを固定するため、外管の両端を半田づけし、方端を45度の円錐台状に旋盤加工した。先端は中心孔に対して、60度ピッチで6個の孔が配置された構造となる。旋盤加工後は、バリによって孔がふさがれてしまうので、1.0のドリルで再度孔を開け、プロアによって内部の塵を除去し、仕上げとした。ステンレス管の切り出し、半田付け、仕上げは我々が行い、先端の切削加工のみ山崎電気の工場長に加工を依頼した。今回製品の生産性と性能の個体差を比較検討するために3基製作した。製品は製作した順番に1号、2号、3号とした。図8に7孔ヨーメータの設計図を示す。

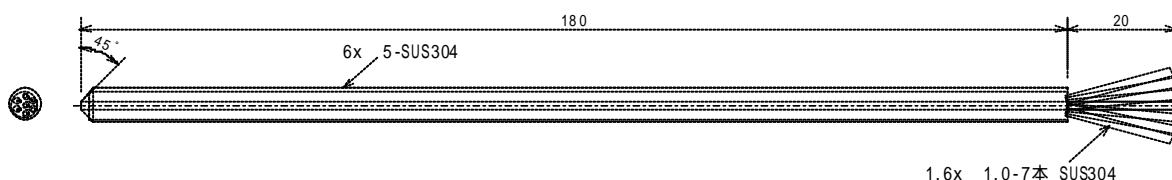


図8 7孔ヨーメータ設計図



図9 製作したヨーメータ

6. 製品の先端形状比較

7孔ヨーメータ製作の手順と量産性の評価の為、製品先端を真正面からカメラで撮影しパソコンに取り込み中央の全圧管と周辺の側圧管の位置関係に関して比較検討した。

図9, 図10, 図11にそれぞれ、7孔ヨーメータ1号, 2号, 3号の先端部の写真を示す。

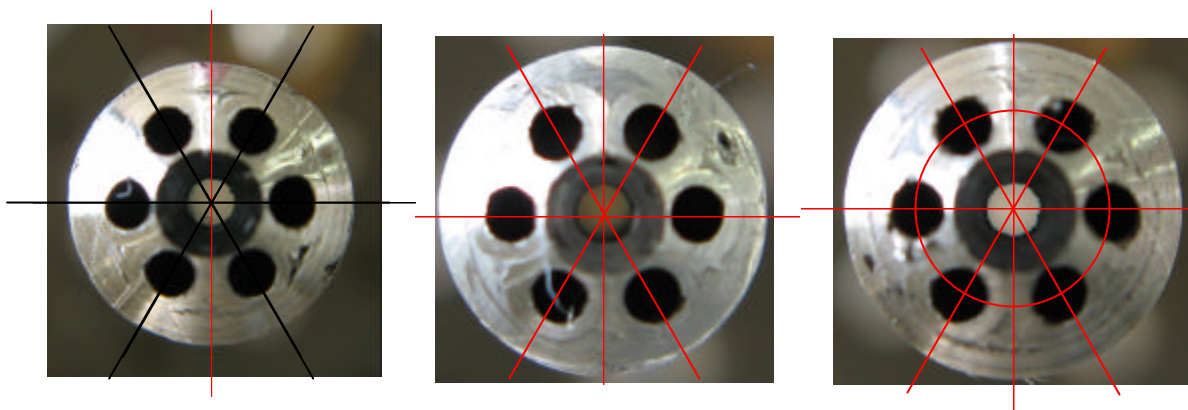


図10 1号先端部正面の写真

2号先端部正面の写真

3号先端部正面の写真

1号の側圧孔の位置関係はほぼ均一に60°ピッチで配置されていることがわかる。2号では孔5, 2番に相当する側圧孔と他の孔との位置関係がわずかにずれており、各側圧孔の中心を結んだ線が、中央で交わらなくなっている。

この他、実験中に3号に関して前方の孔の位置と後方の圧力センサにつなぐパイプの位置関係が60°分ずれていた。計測に問題はなかったが、外管にパイプを挿入する際にパイプがねじれたのではないかと考えられる。また、今回先端に無数の傷があることが確認され、今後この部分の仕上げも精度に影響するのではないかと考えられる。

7. 実験結果

(1) 実験概要

試作した各ヨーメータの流速, 流向の値から個体差やばらつき具合を調べる。

(2) 実験方法

2-1) 試作したヨーメータ3本を風洞に立体角を30°に固定し, 時計角を0°から180°まで30°ピッチで回転させて圧力を実際に測定する。流速は20[m/s]とする。以下に測定図を示す。

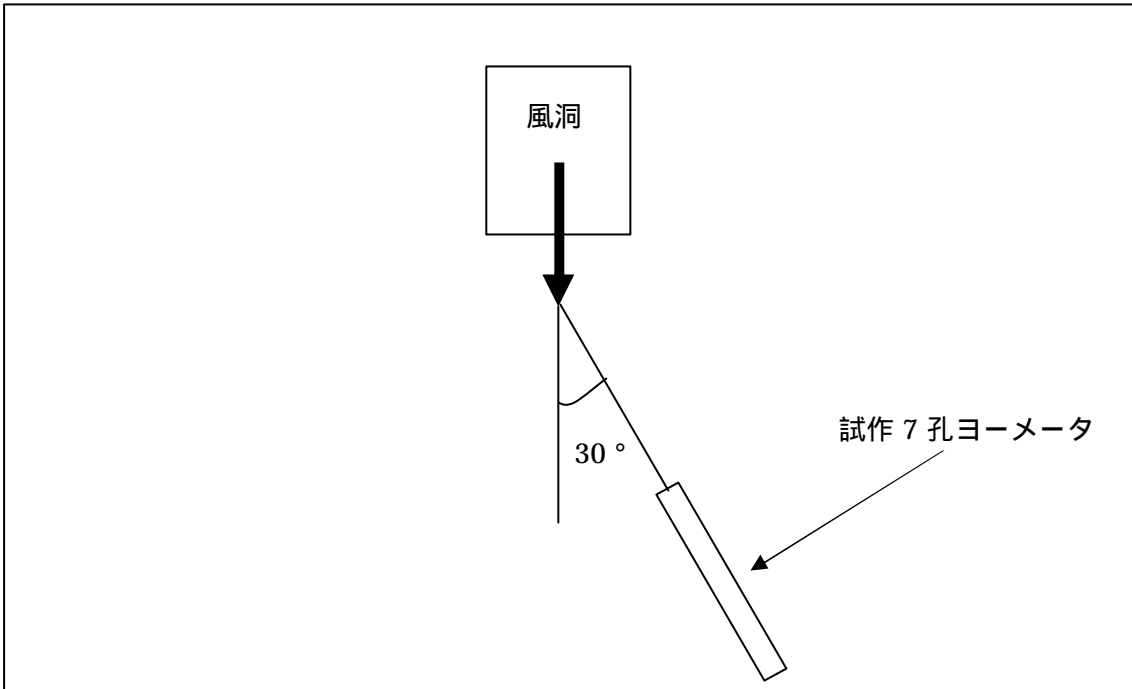


図.11 測定図

2-2) 試作 3 号の立体角 を -50° から 50° まで 5° ピッチで移動させ各孔の圧力を測定する．その際立体角 に平行になるよう 7 孔中，中心孔を含み対角となる 2 孔を水平にしてヨーメータを設置する．これにより流速，流向の決定に必要な角度検定曲線，流速係数を事前に得ておく．

以下に 2-2)により求められた校正曲線を図 12 に示す．

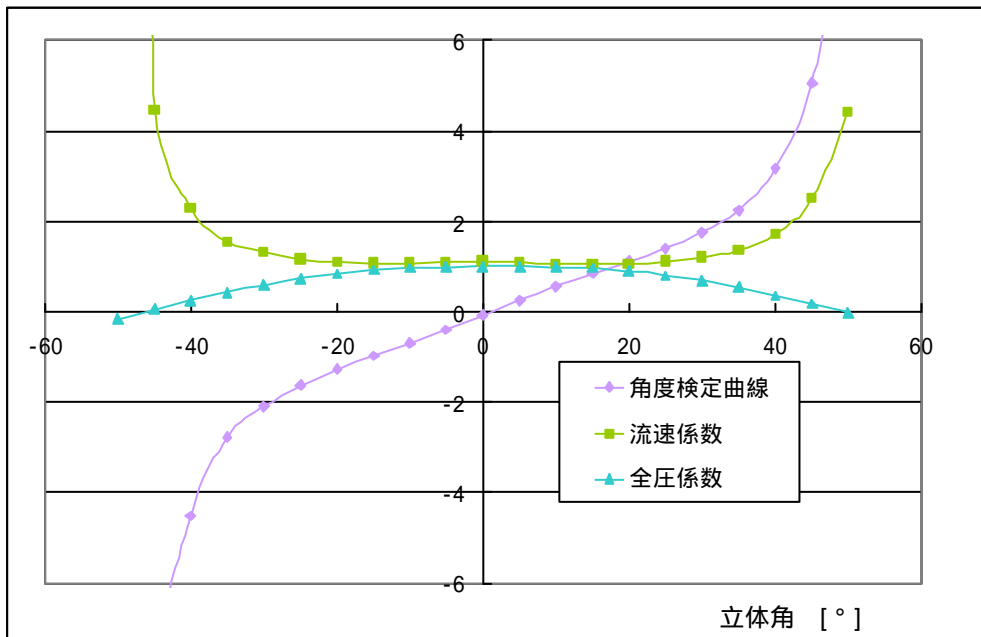


図 12 各校正曲線

(3) データ整理

3-1) 実験方法 1) で得られたデータを 2) の校正を使用して各時計角 における流速，流向をヨーメータ 3 本それぞれについて決定する．

3-2) 求めた各流速，流向について平均，標準偏差を算出し検討する
以下表 1 に得られた各平均，分散，標準偏差の値を示す．

表.1 標準偏差

	立体角	流速[m/s]
平均値	33.67	21.37
分散	2.01	0.08
標準偏差	1.15	0.60

(4) 考察

3 本のヨーメータから得られた各標準偏差の値から立体角では約 1° ，流速は約 0.60 [m/s] ばらつくことがわかる．

測定に使用した風洞の流速が基準ピトー管より風速が 20.2 [m/s]，立体角 30° なので流速は 5%、立体角 3 度ほど全体的にずれて計測されている。

今回は母集団が少ないために断定は出来ないものの標準偏差を 3 倍したもののなかにほとんどの製品が分布すると考えられる．

8. 7 孔ヨーメータの計測手順と比較

(1) 7 孔ヨーメータの計測システム

7 孔ヨーメータで流向，流速を求める際に用いる記号を，図のように定義する．

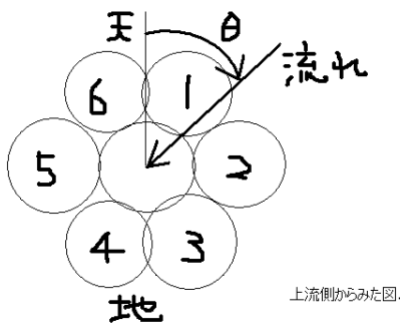


図 13

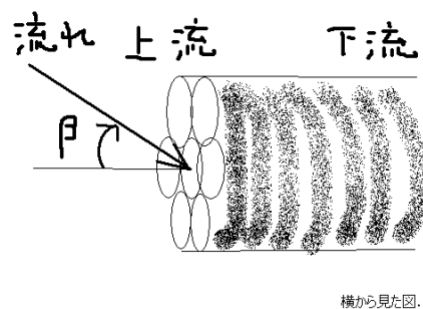


図 14

側圧孔 1, 2, ... と時計角 $= 30^\circ, 90^\circ, \dots$ とが対応している．

に対して測定した側圧をプロットし，近似曲線をかき．

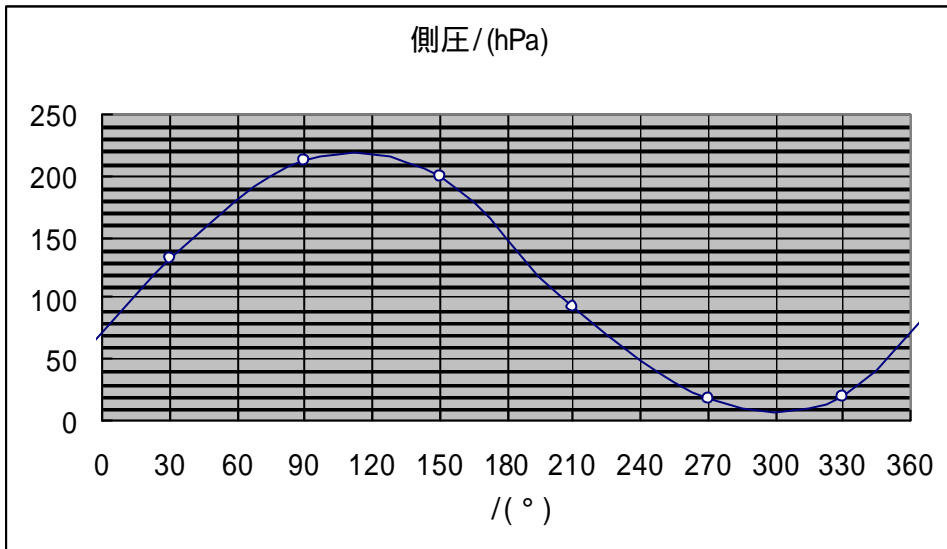


図 15

側圧が最大となるような θ が、求める流向の時計角である。

このとき、最大側圧を P_G 、最小側圧を P_L とする。

上で求めた P_G 、 P_L から角度係数を算出し、角度検定曲線から角度 θ を求める。

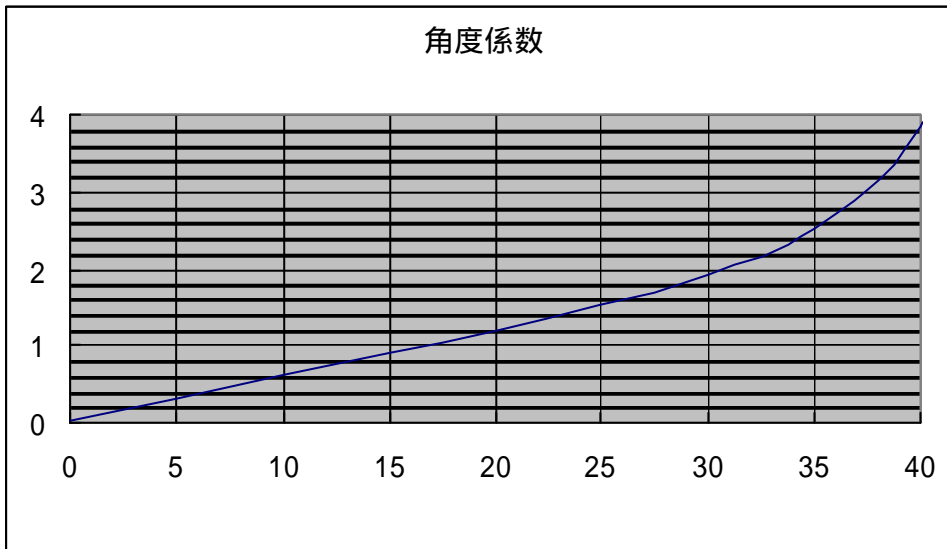


図 16 角度係数と角度 θ の関係

角度係数と対応する角度 θ が、求める流速ベクトルとヨーメータとのなす角である。

次に、速度検定曲線から流速係数を求める。

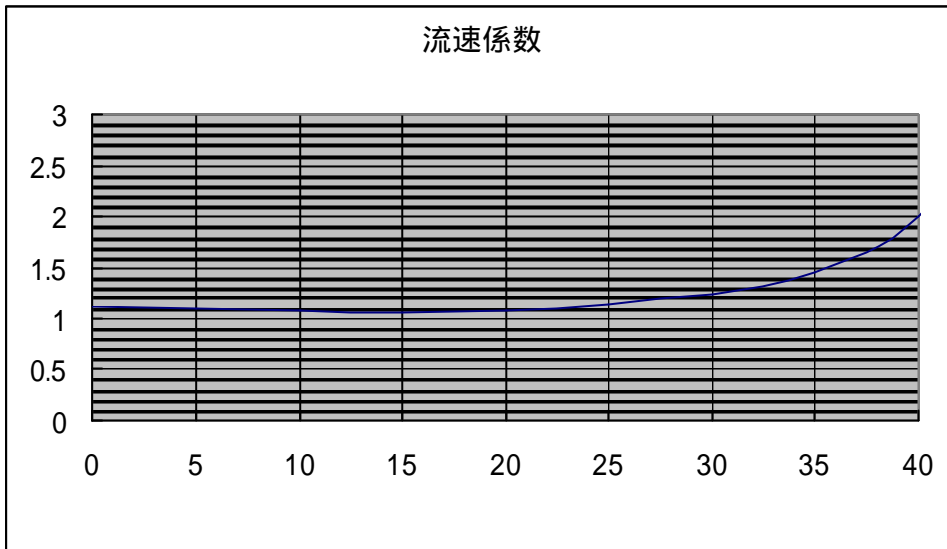


図 17 角度 と流速係数の関係

上で求めた角度 と対応する流速係数から，流速を算出する．

(2) 角度係数，流速係数の校正

孔 2, 5 を目分量で水平に合わせ，水平面上で回転させつつ 7 孔と基準ピトー管の圧力を測定した．この結果から角度係数 Y と流速係数 Y_v を算出し， $\theta = 90^\circ, 270^\circ$ の場合の角度検定曲線，流速検定曲線を作成した．図 18，図 19 に示す．

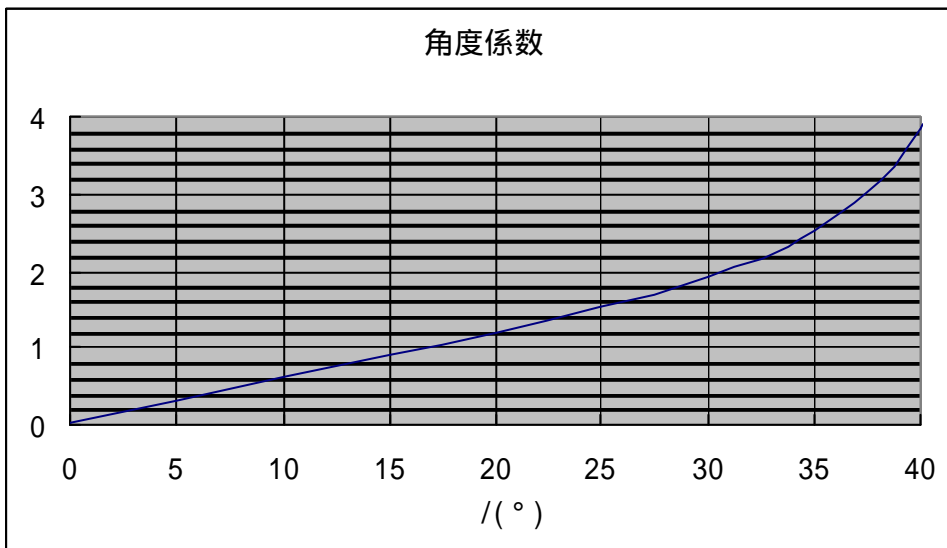


図 18 角度検定曲線

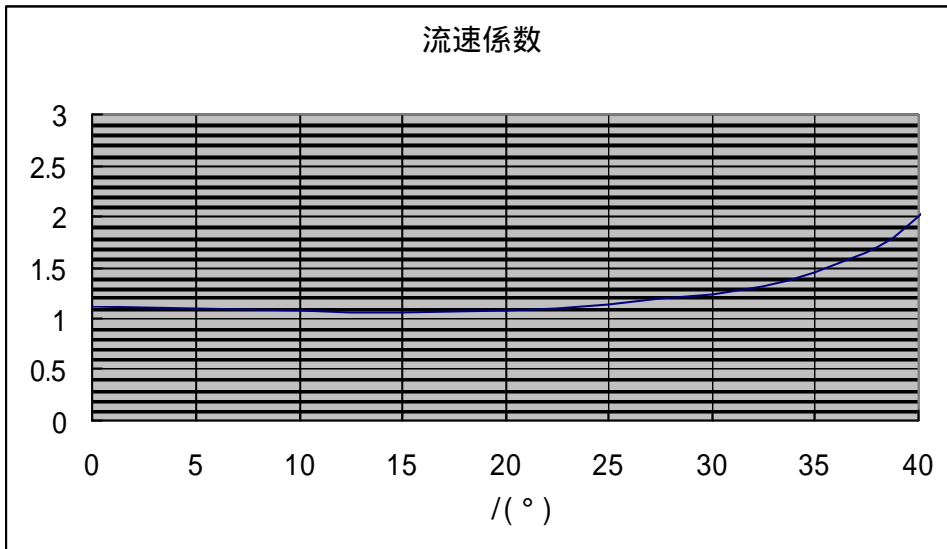


図 19 流速検定曲線

6つの側圧孔は6回対称である。つまり、この検定曲線を使えば、流向のなす角 θ が側圧孔に対応する $30^\circ, 90^\circ, 150^\circ, 210^\circ, 270^\circ, 330^\circ$ のときには、中心孔の圧力 P_C と、側圧孔の圧力のうち最大のもの P_G 、最小のもの P_L から流向、流速を求めることができる。

θ が上記の6つの値以外的时候には、 P_G, P_L を直接測定できない。このとき、6つの側圧から P_G, P_L を求めることができれば、同様に検定曲線を使って流向、流速を求めることができる。

今回は $\theta = 120^\circ, 300^\circ$ として測定した。 θ に対して側圧をプロットし、滑らかに結んだものを図 20 に示す。

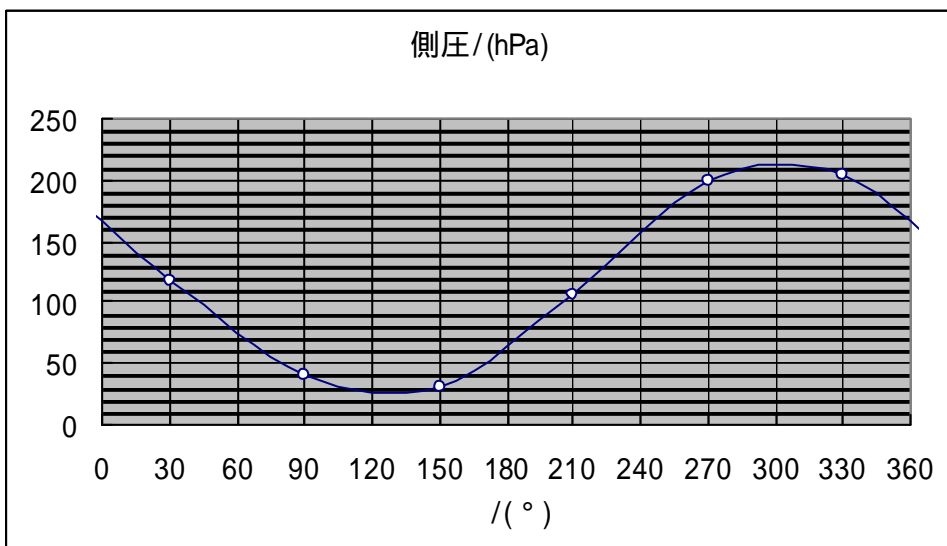


図 20 $\theta = 300^\circ, \alpha = 15^\circ$ での側圧。流速 20.3m/s で測定

平滑線 図 20 から、側圧が最大値をとるのは、 $\theta = 300^\circ$ のときであることがわかる。したがって、側圧の平滑線が最大となるような θ と、流向の時計角は一致する。

また、平滑線から P_G, P_L を読み取り、角度係数 Y を算出した。角度検定曲線 図 18 を使って、 Y と対応する角度 θ を求めた。

結果は、 $\theta = 15^\circ$ となった。したがって、平滑線から読み取った P_G, P_L から求まる角度 θ と、流速ベクトルとヨーメータとのなす角は一致する。

さらに、流速検定曲線 図 19 を使って、求めた θ と対応する流速係数 Y_v を求めた。 Y_v から流速 v を算出した。

結果は、 $v = 20.4 \text{ m/s}$ となった。基準ピトー管の動圧から算出した流速は 20.3 m/s であり、これとほぼ一致した。

9 実験結果のまとめ

以上の結果を表 22 に示す。

表 2 平滑線から求めた圧力から算出した場合と直接測定した圧力から算出した場合の比較。

		Y		Y_v	v
平滑線から	300°	0.847	15°	1.06	20.4 m/s
測定値から	300.0°	0.8384	15°	1.059	20.3 m/s

側圧孔が対応しない時計角方向からの流れも、平滑線による近似値から流向、流速を高い精度で計測できることがわかった。結果として、本手作りの 3 本のヨーメータは、各々校正せずに使用しても、ある程度の精度を出すことができた。

今後、多点圧力変換器と組み合わせて実際の計測システムを構築し、7 孔ヨーメータの実証を進めていきたい。