

ピトー管式微風速計

KASKA 微 の開発

2010年8月12日

筑波大学 数理物質科学研究科 物理学専攻

博士前期課程1年 豊田 行紀

筑波大学 システム情報工学研究科 コンピュータサイエンス専攻

博士前期課程1年 北村 苑美

法政大学 工学部 機械工学科

4年 春日 憲人

筑波大学 理工学群 工学システム学類

4年 馬場 達哉

監修 ツクバリカセイキ株式会社

目次

1. 序言	2
1.1 本研究の概要と利用分野	2
1.2 開発の目的、期待される効果	2
1.3 ツクバリカセイキ株式会社における開発の意義	3
2. 原理/理論	5
2.1 ピトー管と配管系に関する原理	5
2.2 差圧測定に関する理論	6
3. 開発の経緯と手順	8
3.1 開発の経緯と手順	8
3.2 予備実験	10
3.3 本試験	14
3.4 実験でやり残した課題	17
4. 実験結果のまとめ	18
5. 補足	19
5.1 ASP1400 の圧力計としての実力	19
5.2 配管系を含めた差圧計測のシミュレーション	23
5.3 微風速風洞の作り方	28
5.4 微風速風洞による圧力の校正	28

1. 序言

1.1 本研究の概要と利用分野

本研究では、ピトー管を用いて微風速を検知するシステムを開発する。

微風速の計測が必要になるのは、主に室内での風速測定である。風速測定がおこなわれる場所としては、例えばクリーンルームなど、衛生面に考慮が必要な場所が挙げられる。ここでは、室内のわずかな空気の流れも環境に影響する可能性があるため、微風速を検知するシステムが不可欠である。また、もっと一般的な利用方法として、室内の空調管理のために風速を計測することがある。室内の微風速を計測することにより、例えば住宅に設置されたエアコンの空調効率を向上させる事に利用できる。空調はほとんどすべての場所で使用されているため、その利用範囲は広いと考えられる。一般的な住宅や社屋のほか、車内や冷蔵庫内の空調管理にも応用できる。

現行の風速計には、ピトー管を用いるもののほかに、風杯型、風車型、熱線式、超音波式など、さまざまな方法で計測を行うものがある。この中で、屋内用風速計として微風速の計測に用いられているのは、主に熱線式の風速計である。熱線式の風速計は、微風速を正確に測定するのに向いている。しかし一方、コスト面では、ピトー管に比べればはるかに劣っている。

これに対して本研究では、ピトー管を用いて微風速の計測を行う。この方式で正しく微風速を計測することができれば、従来の微風速計よりもはるかに安価な計測システムを開発できると期待される。

しかし、ピトー管による微風速測定装置は今まで開発されていない。本来ピトー管が多く用いられているのは航空機分野であり、特に風速や圧力が大きい場合の検知に用いられてきた。そのため、微風速を計測するためには、通常のピトー管や圧力計が使えない場合が多い。また、微風速の計測にピトー管を用いた場合にどのような挙動が得られるか、これまでデータとしてまとめられたものはない。さらに、そのような微風速をどのように実現し、どういった装置で校正するのも、確立した手法は存在していない。

そこで本研究では、ピトー管による計測に対するこういった不安について、実際にはどうなるか実験により検証する。また、検証結果をもとにして、精度の高い微風速計の開発を検討する。

1.2 開発の目的、期待される効果

ピトー管による微風速計測システムが開発されれば、低いコストで微風速の計測が行われるようになるため、微風速計の設置される場所が増えると期待できる。前述の通り、

微風速計は室内の空調管理に役立てる事が出来る。しかし現在、室内の風速を測定することによる空調管理システムはあまり広く利用されていない。その理由の一つとして、風速計の購入や設置のコストが高い事が考えられる。今回の研究により、低コストの微風速計が開発されれば、このうち購入のコストが減少し、メーカーにとっては微風速計が手に入りやすくなる。

特に現在、微風速計の導入が期待されているのが、自動車における空調管理である。車内のわずかな空気の流れを測定することで、空調がどのように車内全体に影響していくか調査することができる。そういった試験の場で微風速計がもっと手軽に入手できるようになれば、空調の効率向上が進むと期待される。

1.3 ツクバリカセイキ株式会社における開発の意義

また、ピトー管による微風速計の開発は、ツクバリカセイキ株式会社の今後を考えるうえでも、重要な役割を果たすのではないかと考えられる。

図 1 は、工業製品におけるライフサイクルと、各段階に対応するツクバリカセイキの製品を重ねたものである。

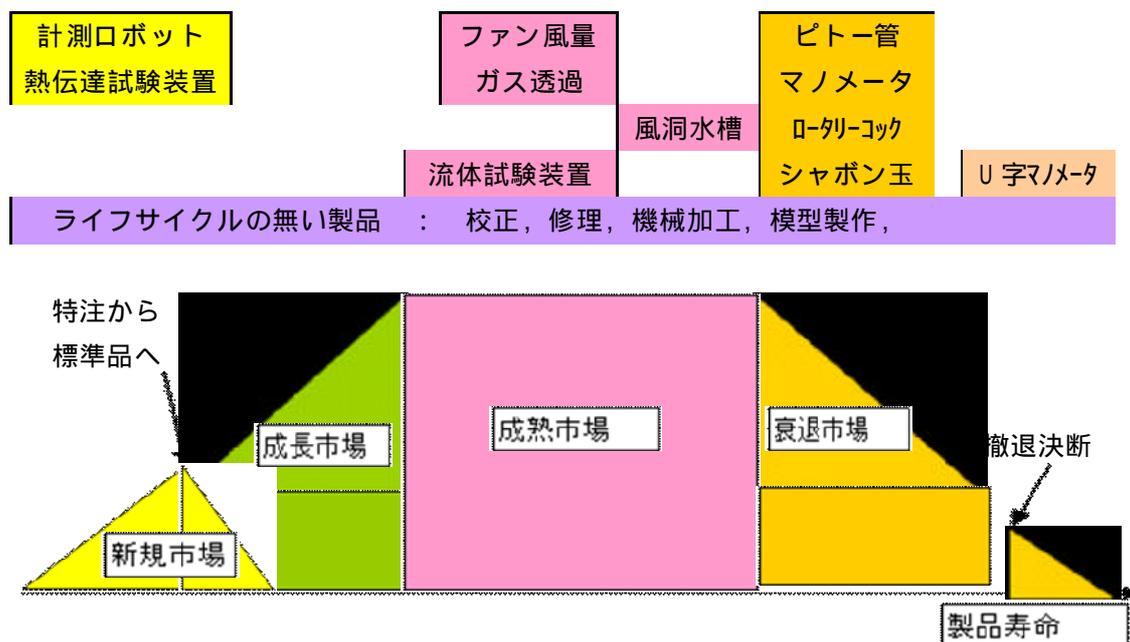


図 1. 工業製品のライフサイクルとツクバリカセイキ

この図を見ると、ツクバリカセイキの主要な製品は成熟市場と衰退市場に大きく偏っている。特にピトー管は技術がすでに確立しているもので、生産は安定しているものの先が続

かない可能性がある。一方で、新規市場を支える試験装置やロボットも生産しているが、これから先安定した生産が期待できるような成長市場には製品が展開されていない。

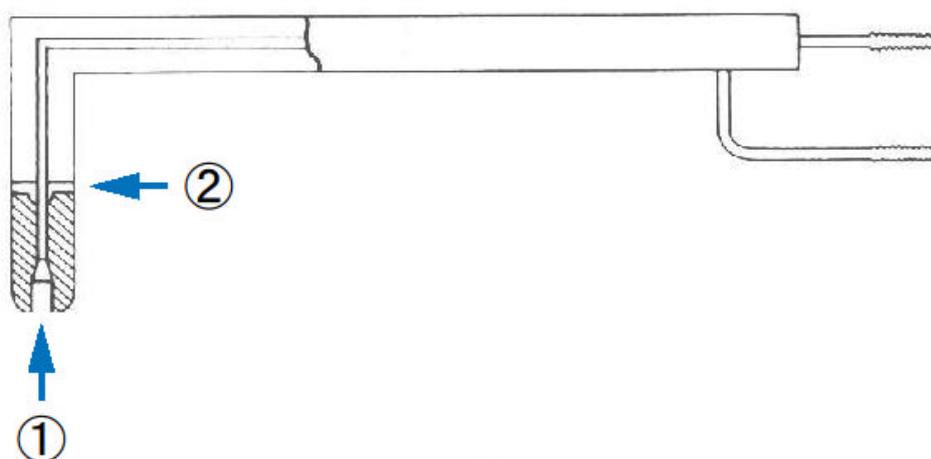
ツクバリカセイキの今後を考えるならば、新たなイノベーションによって成長市場に対応した商品売り出すことが必要であると考えられる。そこで本研究で期待されるのが、ピトー管という完成された技術を新しい用途に利用し、新しい価値を生み出すイノベーションである。

微風速計の開発が成功し、標準製品として売り出す事が出来れば、成長市場に新たな商品を送り出す事が可能となる。これにより、展開製品のない市場が存在しない事になるので、ツクバリカセイキが会社としてさらに安定する事を期待する事が出来る。

2. 原理/理論

2.1 ピトー管と配管系に関する原理

本研究では、ピトー管を用いた非常に遅い流れの測定を目的としている。ピトー管とは流れの速さを測定する計測機器で、概略図は以下ようになる。



P_k [Pa] : にかかる動圧

P_s [Pa] : にかかる静圧

L [m] : ピトー管の全長

D [m] : 管の半径

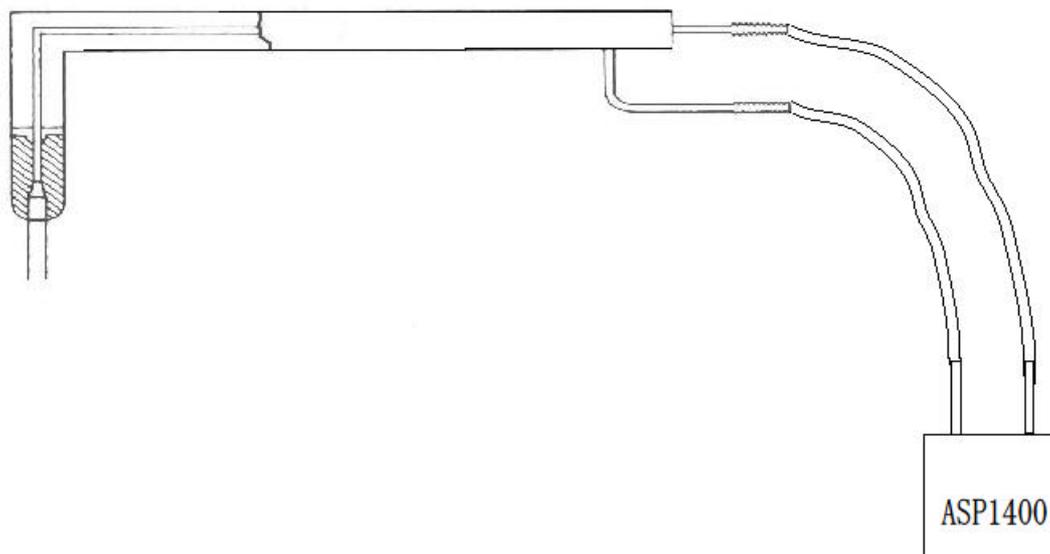
ρ [kg/m^3] : 空気密度

とすると、測定される流速 v はベルヌーイの定理より

$$v = \sqrt{\frac{2(P_k - P_s)}{\rho}} \quad [\text{m/s}]$$

と書くことができる。したがって流速を測定するためには圧力センサーが必要で、通常はダイアフラムが用いられる。しかし高い圧力（速い流速）でしか正確な値を示さず、低い圧力（遅い流速）は測定することができなかった。今回使用する ASP1400 はマスフローメーターの原理を用いて、微小な圧力差を測定することが可能である。これをピトー管の圧力センサーに用いることで遅い流速の正確な測定を目指す。

測定系の全体図は以下ようになる。



ここで注意しなければならないのは、ASP1400 は原理的に圧力損失を生じてしまうことである。マスフローメーターの原理より自身の漏れ流量を圧損として差圧を測定するので、その分測定される圧力は低下する。したがって流速は正しい値よりも低く測定される。この低下する圧力 P を評価し、校正することで、ASP1400 を用いたピトー管が正しい流速を測定できるようにする。

ASP1400 のカタログによると、測定の際に漏れる流量 Q は 100 Pa で

$$Q = 0.4 \text{ [ln/min]} \quad (\text{ln} = 1 \text{ norm liter/min} = 1 \text{ liter/min at } 0 \text{)}$$

$Q \propto P$ という比例関係があるので、1 Pa において

$$Q = 0.004 \text{ [l/min]}$$

$$= \frac{2}{3} \cdot 10^{-9} \text{ [m}^3 \text{ / s]}$$

と書くことができる。

2.2 差圧測定に関する理論

系を通過する流量 Q が既知のとき、 Q を用いて流速 v 、レイノルズ係数 Re 、摩擦係数、圧力損失(配管抵抗) P はそれぞれ次のように書ける。

$$v = \frac{Q}{D^2} [\text{m}^2/\text{s}]$$

$$\text{Re} = 70vD \quad (\text{標準大気での簡略式})$$

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} \quad (\text{Re} \ll 2000 \text{ の場合})$$

$$\Delta P = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2} [\text{Pa}]$$

ここでLは系の配管の長さ、Dは系の管の半径としている。2つの配管が連結している場合は

$$?P = ?_1 \frac{L_1}{D_1} \frac{v_1^2}{2} + ?_2 \frac{L_2}{D_2} \frac{v_2^2}{2} [\text{Pa}]$$

となる。このとき2つの管の流量は保存するので、

$$v_1 D_1^2 = v_2 D_2^2$$

という関係が成り立つ。空気密度は流速の関数だが、流速の差がよほど大きくない限りはほぼ定数と見なすことができる。二つの管の連結部分からくる影響、表面の粗さ等は無視している。圧力損失 P と測定される圧力 DP より、真の圧力 P は

$$P = P + DP$$

となる。以上より、系に流れる真の流速 vt は

$$vt = \sqrt{\frac{2P}{\rho}}$$

となる。

3. 開発の経緯と手順

3.1 開発の経緯と手順

3.1.1 開発の経緯

近年、微風速域での風速を測定する市場ニーズが高まってきている。しかし、微風速域における風速測定は、通常の圧力計、ピトー管を用いた方法では圧力が小さすぎるため、測定することが難しいことがわかっている。

そこで、今回は安価で、カタログ上 0.001Pa の分解能を持つ圧力センサーを用いた測定器を開発するための問題点を、微風速風洞を使って検証した。

今回使用した圧力センサーは、SENSIRION 社製の「ASP1400 双方向差圧センサー」という製品である。

SENSIRION
THE SENSOR COMPANY

Data Sheet

ASP1400

双方向差圧センサー



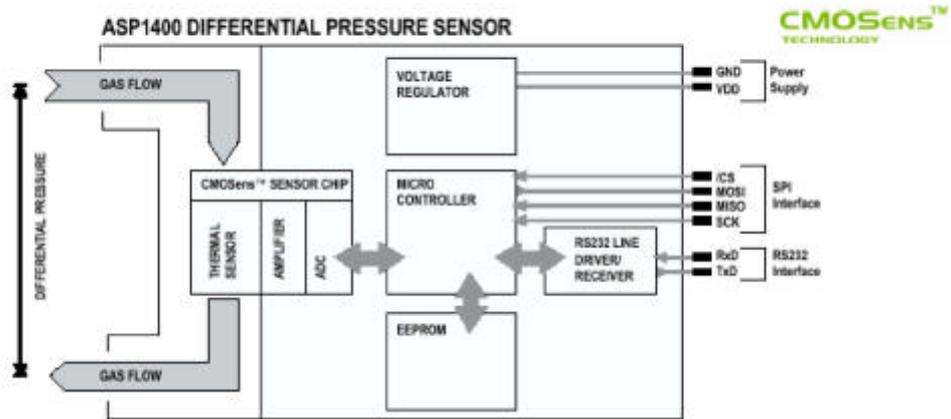
- 超高感度差圧センサー（100Pa から 0.002Pa まで）
- ゼロドリフト、オフセットフリー
- 高精度・高分解能
- 超高速レスポンス
- 完全キャリブレーション、温度補償済
- デジタル出力

ASP1400 製品概要

ASP1400 はバイパス技術により、ガスの超微差圧の測定や正確なマスフローの測定に特に適しています。ASP1400 のシリコン微細加工によるセンサエレメントは、卓越した長期安定性とオフセットフリーの測定を実現しました。その先端機能は Sensirion 社の CMOSens™ テクノロジーに基づくものです。CMOSens™ テクノロジーで、オンチップセンサー素子に増幅及び A/D 変換回路が集積されています。その結果最低の消費電力で、優れた分解能、高速レスポンス及び大きなダイナミックレンジが実現しています。測定データは全て内部マイクロコントローラにて完全にキャリブレーション、温度補償されます。頑強で化学的にも不活性の PBT ハウジングに実装さ

れた ASP1400 は広範囲のアプリケーションに適用することができます。例えば、クリーンルームのモニタリングや侵入検知、また医療用途のみならずプロセス制御やビルディング制御においてもほとんど制限のないバイパス技術が適用することができます。バイパス技術により正確なマスフロー計測ができます。センサーハウジングは差圧を測定するための 2 つの測定ポートを備え、標準耐圧は 2bar (29psi) です。ASP1400 の供給電圧は 7VDC~18VDC で、RS232C インターフェースにより測定データを出力します。

Figure 1 CMOSens™技術による ASP1400 差圧センサーのブロック図



http://www.sensirion.co.jp/pdf/doc_center/04_differential_pressure/02_digital_sensors/01_ASP1400/jp/ASP1400_datasheet_J.pdf

3.1.2 実験の手順

(1) 予備実験

1. ASP1400 の 0 点圧力時間変動測定
2. ピトー管とチューブを用いた ASP1400 の圧力測定（校正圧力計と比較）
3. チューブのみを用いた ASP1400 の圧力測定（校正圧力計と比較）
4. ASP1400 のみで、チューブを外した状態での圧力測定（静圧側は内径 9mm のチューブ）
5. ASP1400 の全圧側に内径 9mm のチューブをつけ、流れが無い環境での圧力測定（静圧側はチューブなし）

(2) 本試験

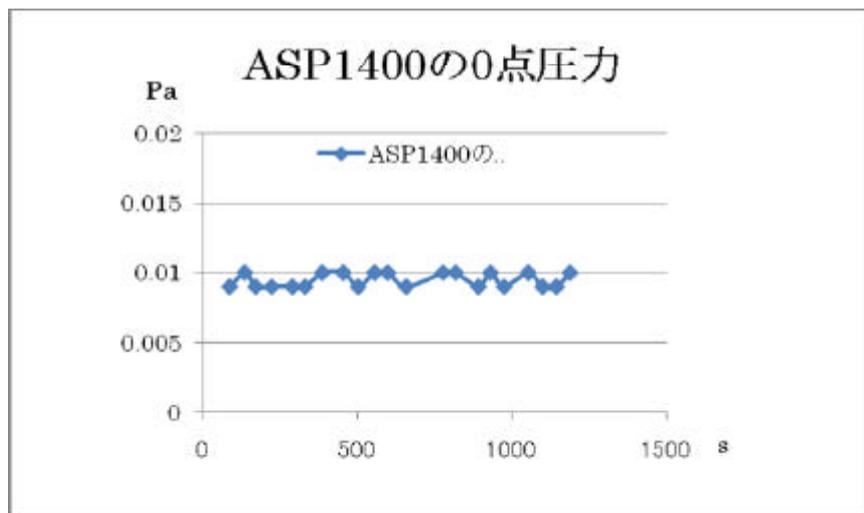
内径 140mm のノズルを試験風洞出口につけて、風洞の中にあるノズル径を切り替えながら、内径 140mm のノズル出口に内径 10 mm の金属管を取り付けた ASP1400 を固定し、圧力を測定した（これを以後、全圧管とよぶ）。

1. 内径 140 mm のノズル出口の圧力分布を調べた。
2. 本試験 1 の結果から、圧力分布がノズル中央付近では一定であることが確認されたので、全圧管を内径 140 mm のノズル中央に固定し、風洞内部の圧力を変えたときの ASP1400 の圧力を測定した。
3. 全圧管を、内径 140mm のノズル出口に対して角度が変化できる固定器具に取り付け、10° ずつ角度を変化させて圧力を測定した。

3.2 予備実験

3.2.1 ASP1400 の 0 点圧力時間変動測定

ASP1400 の圧力測定孔をチューブでつなげ、1 分毎の圧力データを測った。
計測時間は約 20 分である。



0 点圧力は環境によって差がでてしまうため、多少のバラつきがみられたが、おおむね 0.01(Pa)で、編差は 0.009 ~ 0.010(Pa)になった。

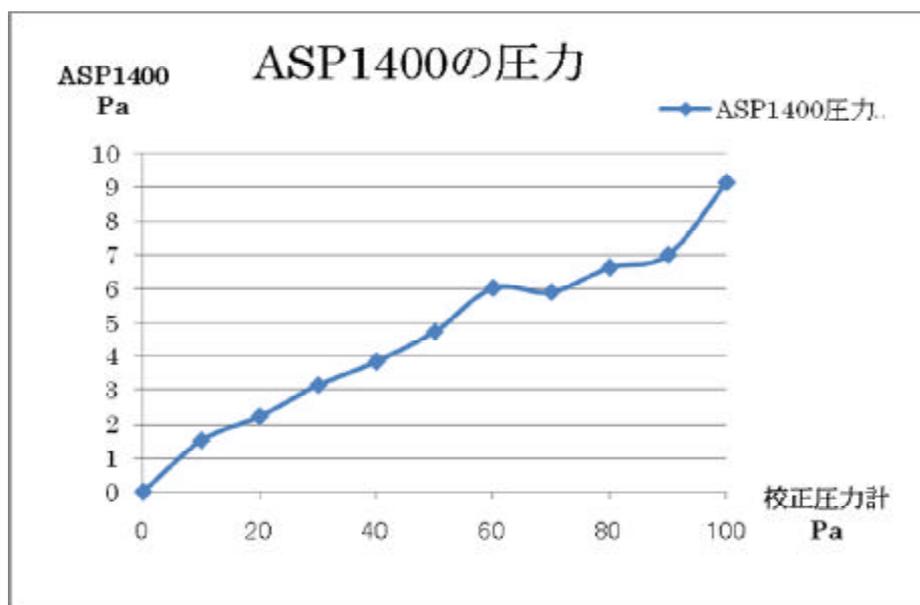
この結果、ゼロ点の時間変動は無視できるオーダーであるが、ゼロではなくある値を持っていることが分かった。そのため、以後の実験ではゼロ点での値を差し引く必要がある。

3.2.2 ピトー管とチューブを用いた ASP1400 の圧力測定（校正圧力計と比較）

ASP1400 の全圧側にピトー管をチューブで接続した。静圧側も全圧側と同じチューブを接続した。このとき使用したピトー管は、ツクバリカセイキ製の 9 標準ピトー管である。

校正圧力計と ASP1400 を同じピトー管に接続し、校正圧力計の圧力を 100Pa から 10Pa ずつ下げていき、そのときの ASP1400 の圧力を測定した。

なお、ASP1400 と校正圧力計はロータリーコックで圧力を切り替えてそれぞれ測定した。

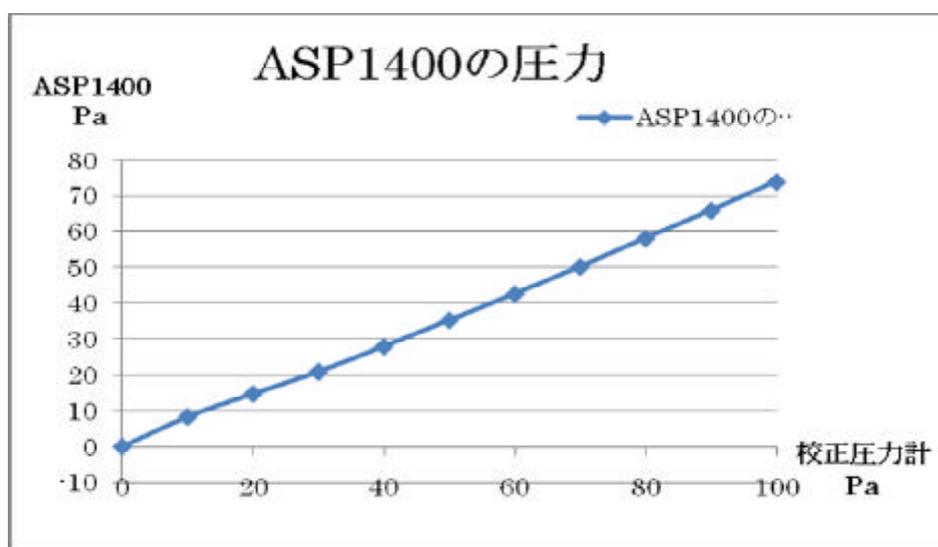


二つの圧力計で表示される数値には、10 倍近い差があることがわかった。校正圧力計の圧力より ASP1400 の圧力が小さいのは、ピトー管とチューブで圧損が生じているためである。

また、校正圧力計に対する ASP1400 の表示は、70Pa 以上では少し乱れがあるが、グラフからある程度線形であることがわかった。

3.2.3 チューブのみを用いた ASP1400 の圧力測定（校正圧力計と比較）

3.2.2 のピトー管を取り外し、それ以外は 3.2.2 と同じ条件で、ASP1400 の圧力を測定した。



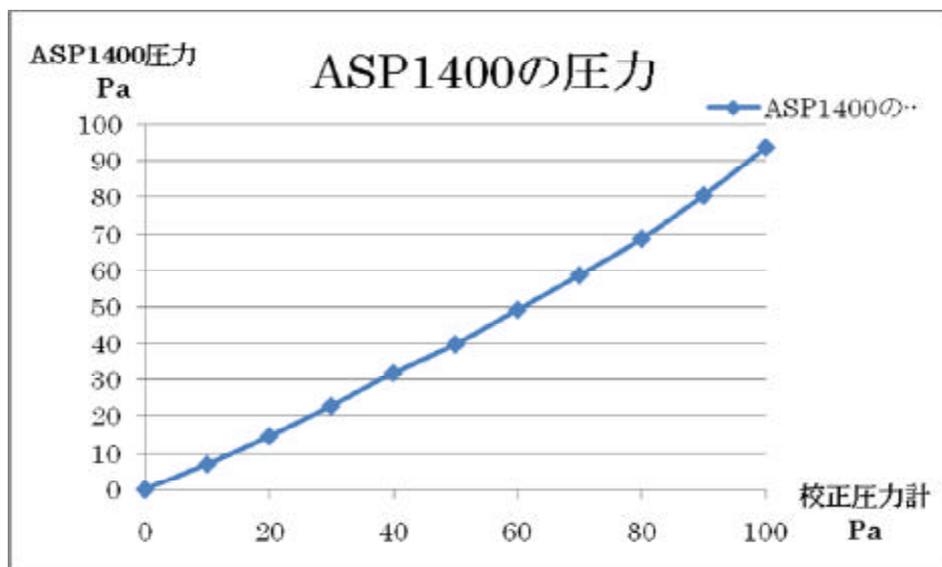
校正圧力計と ASP1400 の圧力はほぼ線型になった。

3.2.2 と同様に ASP1400 の圧力が低いのは圧損が生じているためである。

3.2.2 より ASP1400 の圧力が高くなっている。これはピトー管による圧損がなくなったためであると考えられる。

3.2.4 ASP1400 のみで、チューブを外した状態での圧力測定（静圧側は内径 9mm のチューブ）

3.2.3 の全圧側チューブを取り外し、静圧側には内径 9mm のチューブを接続してそれ以外は 3.2.3 と同様に圧力を測定した。



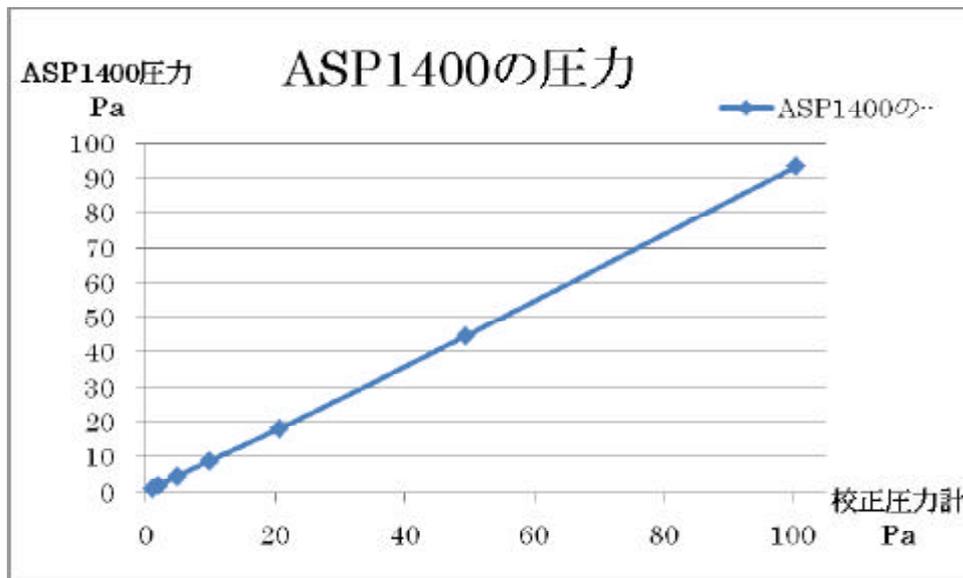
若干 2 次曲線的であるが、ほぼ線型な結果になった。

ピトー管、チューブによる圧損がないため、校正圧力計とほぼ同じ圧力になっている。

校正圧力計より少し低い圧力であるのは、センサー内部の圧損があるためであると考えられる。

3.2.5 ASP1400 の全圧側に内径 9mm のチューブをつけ、流れが無い環境での圧力測定（静圧側はチューブなし）

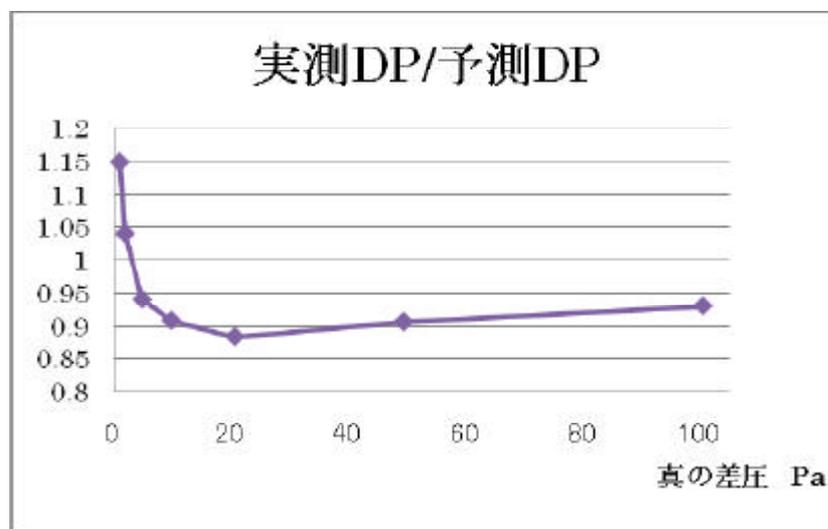
ASP1400 の全圧側に内径 9mm のチューブをつけ、出口を塞ぎ流れがない風洞にチューブを差し込み、校正圧力計の圧力が 100Pa、50Pa、20Pa、10Pa、5Pa、2Pa、1Pa のときの ASP1400 の圧力を測定した。ASP1400 の静圧側は何も取り付けず大気開放。



ほぼ線型な結果となった。

校正圧力計に比べ、若干 ASP1400 の圧力が低い。

この結果から、ASP1400 の圧力の値は実際の圧力より低く出力されることがはっきりした。



10Pa 程度まで線型なグラフが得られるため、精度が保たれていると判断できる。

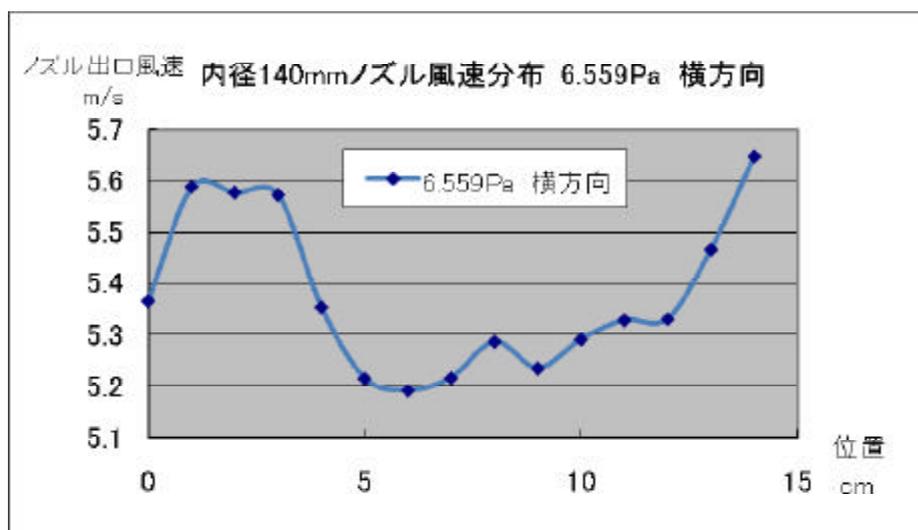
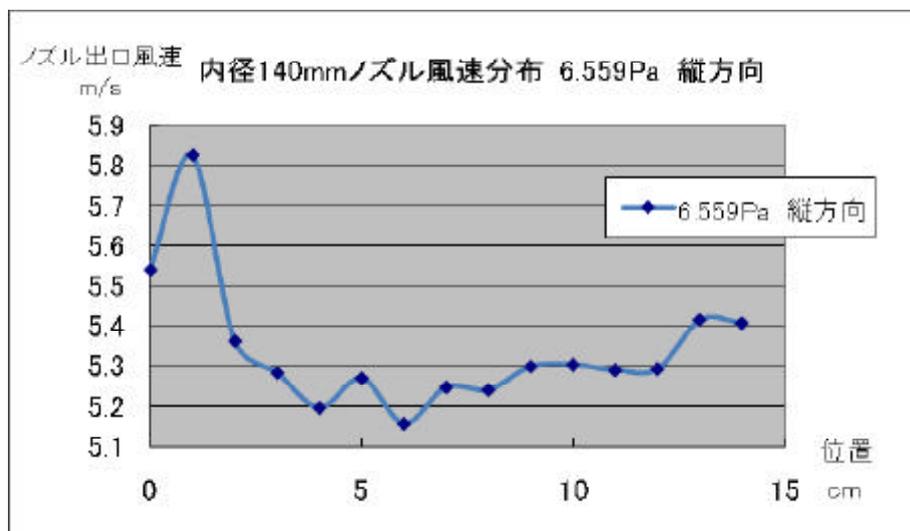
3.3 本試験

内径 140mm の大ノズルを試験風洞出口につけて、風洞の中にある小ノズル経を切り替えながら、大ノズル出口に内径 10 mmの全圧管を取り付けた ASP1400 を固定し、圧力を測定した。

3.3.1

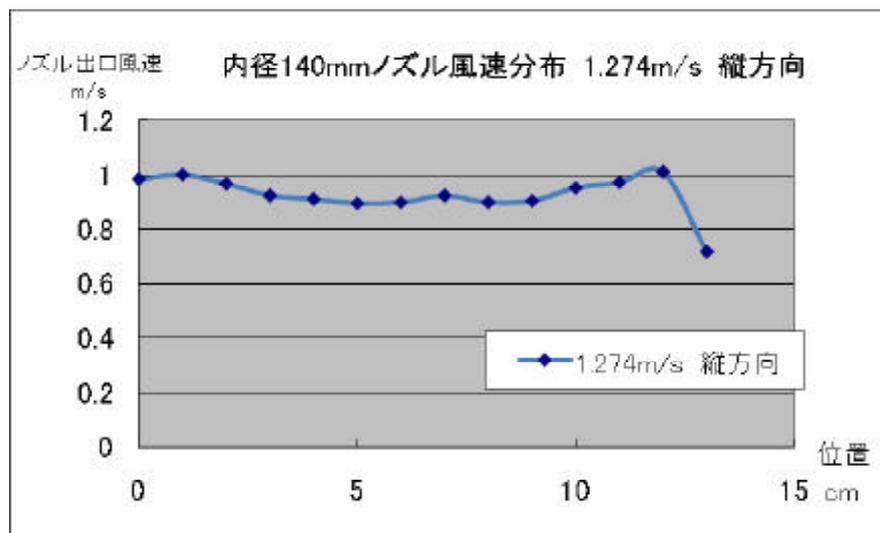
大ノズル出口の圧力分布を調べるため、流量は一定にして、上下左右に ASP1400 の位置を 10 mmずつ変えながら圧力を測定した。

1 回目



1回目では風洞の中にあるノズルから出た空気を整流しきれず、大ノズルから出る圧力分布は一定にならなかった。

2回目は試験風洞の中に、四隅を切り落とした正方形の板を固定し、大ノズル出口の圧力分布が一定になるよう試みた。

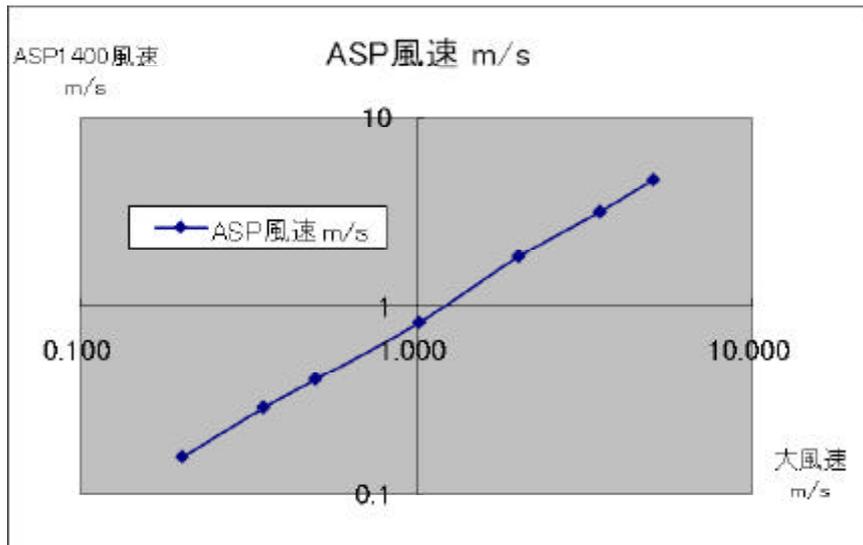


圧力分布を測定し、風速を計算したところ、ほぼ一定の圧力分布が得られた。

3.3.2

圧力分布一定が確認できたので、ASP1400 を大ノズルの中央に固定し、風洞内部の圧力を校正圧力計で測定し、その圧力を変えたときの ASP1400 の圧力を測定した。

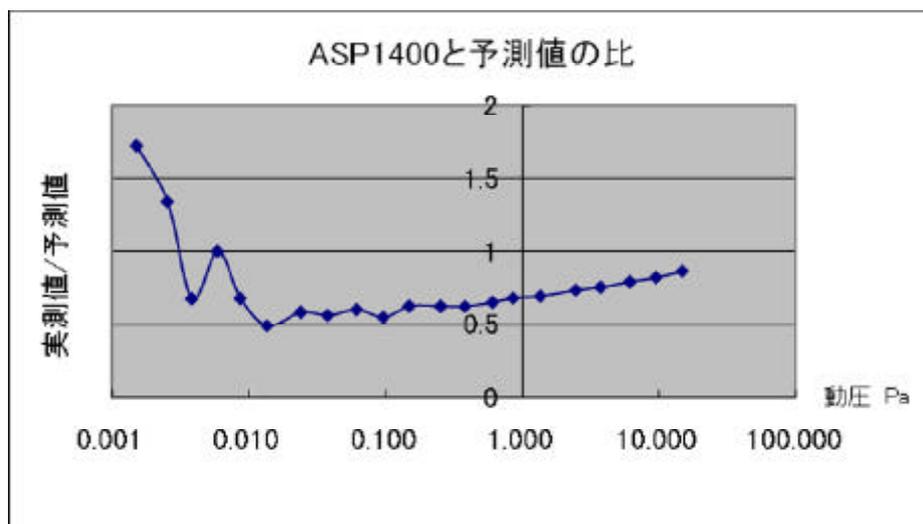
その結果をもとに、校正圧力計値から計算できる大ノズル出口の風速の予測値と、ASP1400 の圧力値から計算できる大ノズル出口の風速を対数グラフで表した。



グラフはほぼ線型になった。

予測値に比べ、ASP1400 で求めた風速のほうが全体的に低い値になっている。

これは、ASP1400 が実際の圧力より低い圧力値を出力しているためであると考えられる。

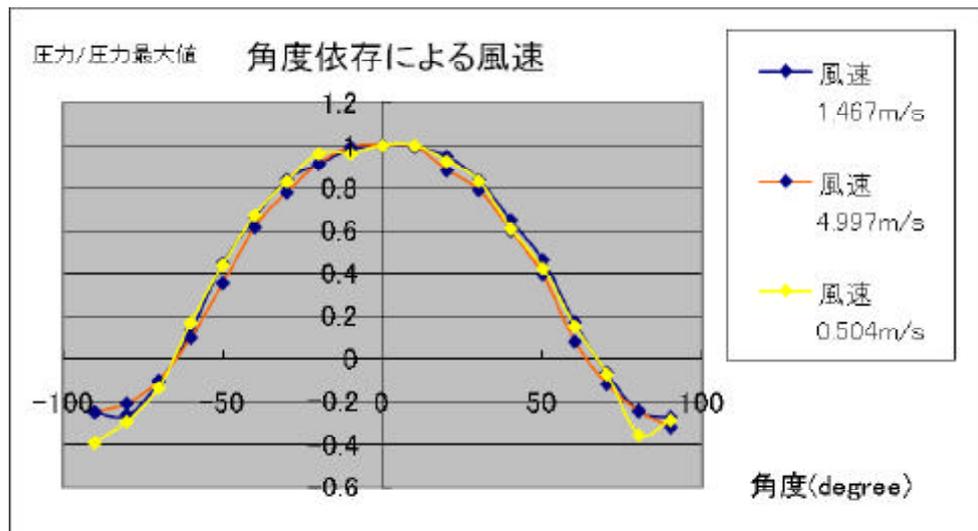


0.01Pa 程度まで線型なグラフが得られるため、精度が保たれていると判断できる。

3.3.3

ASP1400 を角度が変化できる固定器具に取り付け、 10° ずつ角度を変化させて圧力を測定した。

風洞内部のノズルが、60 mm、40 mm、24 mm の 3 パターンを測定した。



± 75 度の範囲では、左右対称な圧力分布の結果が得られた。

また、風速によって依存しないということもわかった。

3.4 実験でやり残した課題

ASP1400 の正確な漏れ量がわからないと、配管の圧損を正確に計算することができない。

また、ASP1400 で 1000 分の 1 の分解能があったとしても、大きな圧損があると実際の圧力を測定する上では 100 分の 1、10 分の 1 の分解能しか得ることができない。

よって、全圧管をこの実験よりもさらに細くするには漏れ量を正確に測定し、圧損をシミュレーションする必要がある。

漏れ量を正確に測る方法としては、微風量を正確に測れる風量計で測定する方法、ボイルシャルルの法則から密閉した容器を使用して求める方法などがある。

4. 実験結果のまとめ

まず ASP1400 をチューブ、ピトー管をつないで行った実験結果から、計測圧力と圧力損失は比例関係にあることが判明した。また ASP1400 は漏れ流量から差圧計測を行う特性上、チューブ、ピトー管内での圧損が非常に大きくなることが実験結果から確認された。

次に ASP1400 の全圧側を風の向きに、静圧側を内径の大きいチューブをつなぐことで圧損がほぼ無い状態で実験を行ったところ、圧損は大きく減少したが真値とのずれが発生しており、ASP1400 自体の精度に問題があることが明らかとなった。特に風速が小さくなるにつれて理論値とのずれが増大し、特に 0.1m/s 以下では理論値との相関がとれていないことが観測された。つまり微風速のとき何かしらの流れの遷移があることが予測される。すなわち測定値と理論値とのずれを解析し測定値を校正する必要があるが、また ASP1400 は微風速の測定を目的としているため微風速で起こっている現象を認識しなければならない。また、流れのある状態と流れの無い状態の測定圧力を比較するとほぼ同様の測定結果が得られるため、ASP1400 は流れのある状態での圧力測定が可能であることがわかる。

ASP1400 の角度依存性について、風速が小さいとき (0.5m/s) と大きいとき (5m/s) とではほぼ一致した角度依存性が見られた。ただし風速が大きいとき風向に対して角度が ± 70 度より外側では風速が小さいときと比べてずれが生じる。これは流れが計測機器にぶつかったときの剥離が原因であると考えられる。この結果として ASP1400 は風速を計るだけでなく、風向を計るヨーメータとして使用することも可能である。

ASP1400 の精度が保たれる圧力の下限は、3.2.5 の実験ではおよそ 10Pa 程度まで保たれるが、3.2.6 の実験では 0.01Pa まで保たれるという結果が得られた。その原因として、校正微差圧計の低圧での測定精度の低下が考えられるが、その検討は行っていないため今後の課題とする。

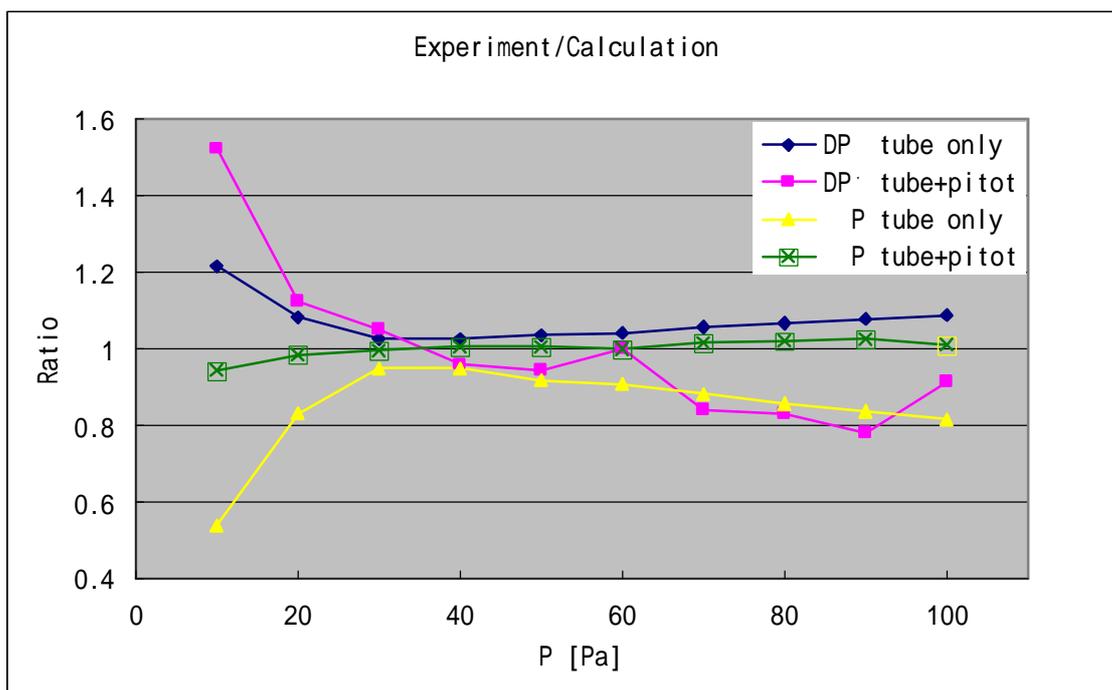
ASP1400 を小型化するにあたり、チューブ径、チューブ長を変化させたときの ASP1400 の分解能評価、校正を考慮しなければならない。そこでカタログにある漏れ流量 (0.004 L/min/Pa) が正確な値であるかを実験を通して確認する必要があるが、これは今後の課題とする。例としてチューブ径を 1.5mm、チューブ長を 100mm としたとき、ASP1400 の分解能が 0.001Pa であってもシステム全体の分解能の予測は約 0.0125Pa となってしまう。ASP1400 の分解能を小さく保つためには、小型化の過程でできるかぎりチューブ径を大きく、チューブ長を小さく設定する必要がある。

5. 補足

5.1 ASP1400 の圧力計としての実力

本研究の要である ASP1400 の実力について考察する。

予備実験では本体にチューブを接続した場合と、チューブにさらにピトー管をつなげた場合の測定値が得られた。これらの値に ASP1400 の圧損の補正を加え、計算された値と真の圧力(実験値)を比較し、予測の精度を考察する。



上の図は横軸が真の圧力、縦軸がそれぞれの実験値 ÷ 計算値となっている。真の圧力とはツクバリカセイキ製の圧力測定器から得られた値である。

P(チューブ+ピトー管)の比はどの圧力でも1付近で、実験値と計算値はほぼ等しい。しかるに P - P で求められる DP(チューブ+ピトー管)の比は1から大きく外れ、計算と実験に乖離があることになる。これは計算値、実験値ともに P に対して P の割合が大きく、その分 DP の割合が小さいため、小さな値の DP においてはわずかな誤差が比率に大きく影響してしまうためである。参考としてそれぞれの計算値、実験値をのせておく。

P	calculation			
	DP(tube)	P(tube)	DP(tub+pit)	P(tub+pit)
100	68.04	31.96	10.0153086	89.98469136
90	61.236	28.764	9.01377778	80.98622222
80	54.432	25.568	8.01224691	71.98775309
70	47.628	22.372	7.01071605	62.98928395

60	40.824	19.176	6.00918519	53.99081481
50	34.02	15.98	5.00765432	44.99234568
40	27.216	12.784	4.00612346	35.99387654
30	20.412	9.588	3.00459259	26.99540741
20	13.608	6.392	2.00306173	17.99693827
10	6.804	3.196	1.00153086	8.998469136

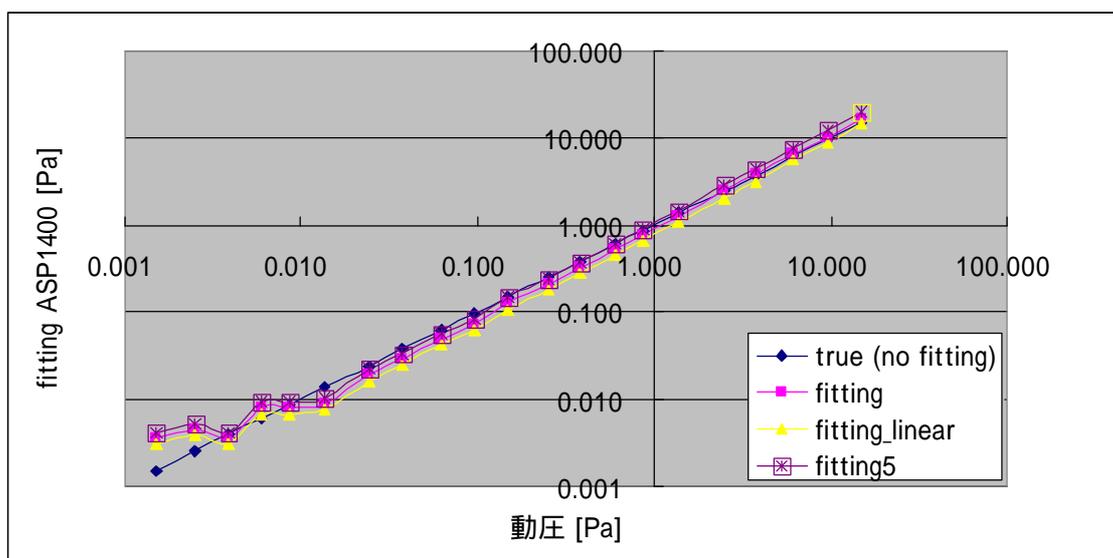
experiment				
P	DP(tube)	P(tube)	DP(tub+pit)	(tub+pit)
100	73.91	26.09	9.155	90.845
90	65.92	24.08	7.006	82.994
80	58.096	21.904	6.637	73.363
70	50.246	19.754	5.903	64.097
60	42.56	17.44	6.02	53.98
50	35.3	14.7	4.737	45.263
40	27.903	12.097	3.848	36.152
30	20.891	9.109	3.152	26.848
20	14.703	5.297	2.246	17.754
10	8.272	1.728	1.527	8.473

ratio				
tube		tube+pitot		
P	DPexp/cal	Pexp/cal	DPexp/cal	Pexp/cal
100	1.08627278	0.816332916	0.91410064	1.009560611
90	1.07649095	0.837157558	0.77725457	1.024791597
80	1.06731335	0.85669587	0.8283569	1.019103901
70	1.05496767	0.882978723	0.84199673	1.017585786
60	1.04252401	0.909470171	1.00179971	0.999799692
50	1.03762493	0.919899875	0.94595188	1.006015564
40	1.0252425	0.946260951	0.96052956	1.004393065
30	1.02346659	0.950041719	1.0490607	0.994539538
20	1.08046737	0.828692115	1.12128347	0.986501133
10	1.21575544	0.540675845	1.52466594	0.941604608

全体的に 30 ~ 40 [Pa] で比が 1 に近く、そこから離れるにつれて計算値と実験値の差は大きくなっていく。とくに 10 [Pa] で差が最も大きく、目的とする低風速域では誤差が大きすぎる。原因としては ASP1400 そのものの圧力損失が無視できないほど大きい、漏れる流量 Q がカタログ値と違う等が考えられる。このままチューブやピトー管を加えた上で値を校正するのは難しいと思われる。

そこで ASP1400 のみの測定系を組み、100 ~ 1 [Pa] での測定値から真の圧力を計算する Fitting 関数を求めた。本試験で得られたマルチノズル風洞の微風速(15 ~ 0.002 [Pa])に対してこの Fitting 関数を適用し、真の圧力を再現することができれば、ASP1400 の特性を評価できたと言えるだろう。

実際に Fitting した値のグラフと、真の圧力と ASP1400 の Fitting 値の比をのせたグラフは以下ようになる。



true (no fitting) : 小ノズルの差圧から計算した動圧(真の圧力) P [Pa]

fitting : 多項式(3次)で近似し、0次の項を省いた Fitting 関数

$$y = 1.3412 * x - 0.002148 * x^2 - 8.7161 * 10^{-6} * x^3$$

fitting5 : 多項式(5次)で近似し、0次の項をはぶいた Fitting 関数

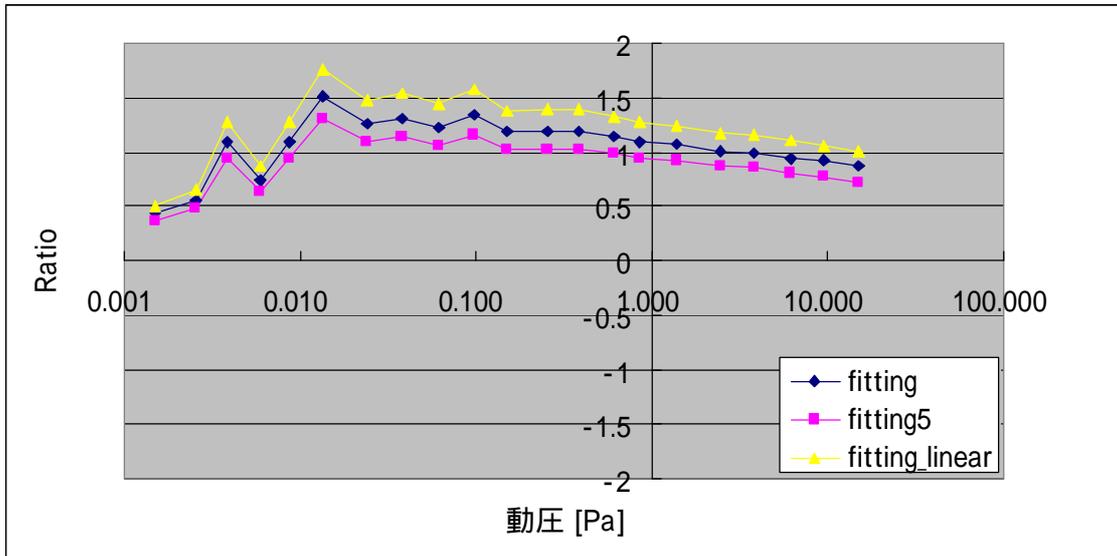
$$y = 1.5518 * x - 0.0017561 * x^2 + 0.00039626 * x^3 - 4.4251 * 10^{-6} * x^4 + 1.7149 * 10^{-8} * x^5$$

fitting_linear : 上の2つの関数と違い、流れが無い環境での測定から得られた圧力に対する Fitting 関数、多項式(2次)で近似し、0次の項を省いている

$$y = 1.1474 * x - 0.00073377 * x^2$$

横軸が動圧、縦軸が ASP1400 の表示値に Fitting 関数を掛けたものである。両軸とも対数表示となっている。すべての近似式で 0 次の項を省いたのは、この項がゼロでなければ

動圧がゼロのときも値をもってしまうためである。



動圧と ASP1400 を Fitting した値の比。横軸は動圧で対数表示となっていて、縦軸は各 Fitting の比である。多項式(5次)が一番よく近似できているが、低圧(0.038 [Pa])以下では乱れが大きい。これは、低い圧力を測定しようとする则表示値が大きく上下していたためと思われる。値がぶれる領域では同じ圧力に対して何度も測定し、平均することで、このノイズのようなぶれはある程度縮まるだろう。低圧以外の領域では、圧力に対する比は若干右下に傾いた直線のように見える。1 付近でまとまっているようにも見えるが、再現性があるとは言えない。しかし、測定系があまり厳密ではなかったので、許容範囲と言えるかもしれない。

結論としては、ASP1400 の低速領域での実力は測ることができず、校正もうまくいったとは言いがたい。これらを調べるためには、より精度の高い測定系を組み上げ、内部のキャピラリーの径などを詳しく調べる必要があると考える。

5.2 配管系を含めた差圧計測のシミュレーション

5.2.1 ASP1400 の特性による圧力損失

今回の実験で使用する圧力計 ASP1400 は、ガスフローを ASP1400 の中に通すことによって圧力を測定しているため、必ず空気の漏れが発生する。この空気の漏れによって圧力の損失が発生すると考えられる。

圧力の損失に影響するものには、ASP1400 そのものに加えて、空気を ASP1400 に送り込む際の配管の長さ・内径がある。これは、ある流速を持つ空気が管の中を通る事による管との摩擦が、圧力を下げる原因となるからである。また、これによる圧力損失は、ASP1400 に流入する配管と、ASP1400 から流出する配管との両方に発生する。摩擦は常に、空気の流れに反発する方向に発生するため、配管系全体の圧損は、流入側の配管出の圧損と流出側の配管での圧損との和になる。

ここで、差圧が大きいほど漏れ量も大きくなるので、損失する圧力は差圧に比例するといえる。真の差圧が大きいほど、圧力は多く損なわれる。

5.2.2 シミュレーションに使用する数値・数式

ASP1400 の仕様書にある数値が正しいと仮定した際に、どのくらいの圧損が発生するかをシミュレーションする。

まず、計算のために、使用する数値・数式を整理する。

・ 使用する数値

- 仕様書によると、空気の漏れ量は差圧 100Pa の時に 0.4ln/min。漏れ量は差圧に比例するので、1Pa のとき 0.004ln/min になる。
- 標準大気密度 は 1.2kg/m^3 。

・ 使用する数式

- 配管内での空気の流量が分かっている時、その流速は流量を配管の面積で割れば求められる。
- レイノルズ数 Re は、標準大気中であれば簡略的に求める事が出来る。配管系の長さを $L(\text{m})$ 、内径を $D(\text{mm})$ で表した時、 $Re = 70 * V * D$ である。
- レイノルズ数が 2000 未満の時、管摩擦係数 は簡略的に $\frac{64}{Re}$ と表せる。
- 管摩擦係数が分かっている時、管摩擦抵抗(圧損) $P(\text{Pa})$ は、 $\lambda * \frac{L}{D} * \frac{\rho V^2}{2}$ となる。

ここで L は、配管全体の長さ(流入側の管の長さ+流出側の管の長さ)である。

- 二種類以上の、径の異なる管を用いる場合は、それぞれの管について P を求めたうえで、和をとれば全体の圧損が得られる。

以上の数式を用いることにより、ASP1400 で真の差圧を計測するためには、ASP1400 が表示する圧力に、計算した P を足せばよいとわかる。

5.2.3 具体的な状況における P のシミュレーション

前述の数値と数式を用いて、具体的な圧損がどのような式で与えられるかシミュレーションする。

5.2.3.1 ASP1400 に接続する配管が一種類だけの場合

すなわち、ASP1400 に接続した流入側のチューブを直接風洞に向ける場合である。使用する文字は以下の通り。また、その具体的な意味合いを下図に示す。

DP: 真の差圧。(Pa)

DP': ASP1400 で計測される、減圧を含む差圧の値。(Pa)

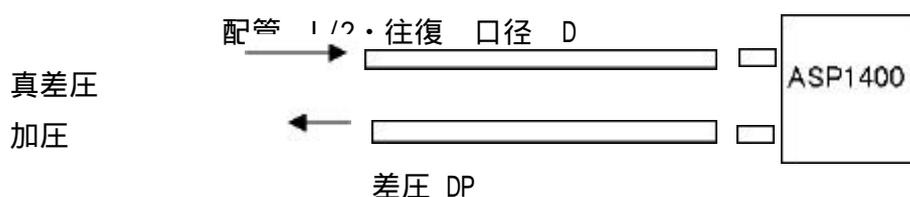
P : DP- DP' で求められる、配管系全体の圧力損失。(Pa)

v : チューブ内を通る空気の流れの速度。(m/s)

D: チューブの内径。(mm)

L: チューブの長さ。(mm)

Q: チューブ～測定器を通る(漏れる)空気の流れの量(l/min/Pa)



流れ Q

圧損 P

真差圧 = DP + 圧損 P

これらを用いて、5.2.2 で示した手順で P を求める。

まず、 v を求めるには、流量をチューブの面積で割る。

(1) 流量 Q の割合 : 0.004 l/min/Pa これを $m^3/sec/Pa$ に直す。

$$1l = \frac{1}{1000} \text{ m}^3 \text{ より、 } 0.004 \text{ , } 1000 \text{ , } 60 \text{ (m}^3/\text{sec/Pa)}$$

よって、差圧が DP の時の漏れ流量は、 $(0.04 \div 1000 \div 60) * DP$

(2) チューブの面積：D が mm 単位なので、 m^2 の単位で面積を出すには 1000 で割る。

$$\text{面積は、 } 3.14 * \left(\frac{D}{1000} \right)^2$$

$$\text{よって、 } v = \frac{(0.004 \div 1000 \div 60) * DP}{3.14 * \left(\frac{D}{1000} \right)^2} \cong \frac{0.085 DP}{D^2}$$

次に、レイノルズ数 Re の計算式をもとに、管摩擦係数 を求める。

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} = \frac{64}{70 * v * D}$$

最後に、これをもとに、 P を求める。

$$P = \lambda \left(\frac{L}{D} \right) * \frac{\rho v^2}{2} = \frac{64}{70 * \left(\frac{0.085 DP}{D^2} \right) * D} * \frac{L}{D} * \frac{\rho \left(\frac{0.085 DP}{D^2} \right)^2}{2} \cong \frac{0.047 L}{D^4} * DP$$

よって、この式に D、L、DP の値を代入すれば、 P の値をシミュレーションすることができる。

5.2.3.2 ASP1400 に接続する配管が二種類の場合

すなわち、ASP1400 に接続した流入側のチューブに、さらにピトー管など別の管を連結して風洞に向ける場合である。

使用する文字としては、 P、DP、DP' は 1 と共通に与えられる。さらに、新しく次の文字を追加する。

P1: 一種類目のチューブで発生する圧力損失。(Pa)

P2: 二種類目のチューブで発生する圧力損失。(Pa)

D1: 一種類目のチューブの内径。(mm)

D2: 二種類目のチューブの内径。(mm)

L1: 一種類目のチューブの長さ。(mm)

L2: 二種類目のチューブの長さ。(mm)

よって、このとき、 P は、 P1+ P2 であらわせる。

この場合の P に関するシミュレーションを行う。

まず、3.1を参考に、 $P1$ と $P2$ を求める。

$$P1 \cong \frac{(0.047)L1}{D1^4} DP \quad , \quad P2 \cong \frac{(0.047)L2}{D2^4} DP$$

そして、 P はこれらの和で表される。

$$P \cong 0.047 \left(\frac{L1}{D1^4} + \frac{L2}{D2^4} \right) DP$$

このように、二種類の配管を使用する場合でも、 P の予測値は比較的簡単に求める事が出来る。

5.2.4 P の予測値から求められる数値

5.2.4.1 DP' 、 DP の予測値

$DP = DP' + P$ より、ある差圧を与えた場合にASP1400がどのような数値を表示するか、すなわち DP' の予測値を次のように計算することができる。

$$DP' = DP - P$$

実際の実験の際には、この DP' の予測値と、実際に表示された DP' の値を比較することができる。

また、実際の場面を想定したとき、 DP' から真の差圧 DP を求めるためには、前述の通り $DP' + P$ を計算する。ここまでのシミュレーションが正しければ、この計算で DP を求める事が出来る。

5.2.4.2 誤差率

P の予測値が求められるようになったので、真の差圧 DP とASP1400の表示する数値 DP' との間にどのくらいの差異が生じるか、その誤差率を予測する事が出来る。

ここでの誤差率は、「真の差圧に対して、誤差がどのくらいの割合で出るか」と定義する。このとき、誤差率は P/DP で表す事が出来る。

まず、管が一種類の場合、次のような式となる。

$$P/DP \cong \frac{(0.047)L}{D^4} DP \div DP = \frac{(0.047)L}{D^4}$$

管が二種類の場合も、同様に求める。

$$P/DP \cong 0.047 \left(\frac{L1}{D1^4} + \frac{L2}{D2^4} \right) DP \div DP = 0.047 \left(\frac{L1}{D1^4} + \frac{L2}{D2^4} \right)$$

このように、どちらの場合も誤差率はチューブの内径と長さのみ影響されるので、真の差圧の値にかかわらず一定の誤差率になることが期待できる。

さらに、どちらの場合でも、誤差率の式は $0.047 \frac{L}{D^4}$ (または $\frac{L1}{D1^4} + \frac{L2}{D2^4}$) をかけたものになっている。そのため、 $\frac{L}{D^4}$ や、 $\frac{L1}{D1^4} + \frac{L2}{D2^4}$ がそれぞれ 1 以下であれば、誤差率は 0.05 以下に収まるとわかる。

すなわち、チューブが一種類の場合は、 $\frac{L}{D^4} \leq 1$ となり、長さが内径の 4 乗より小さければよいとわかる。

5.2.4.3 風速

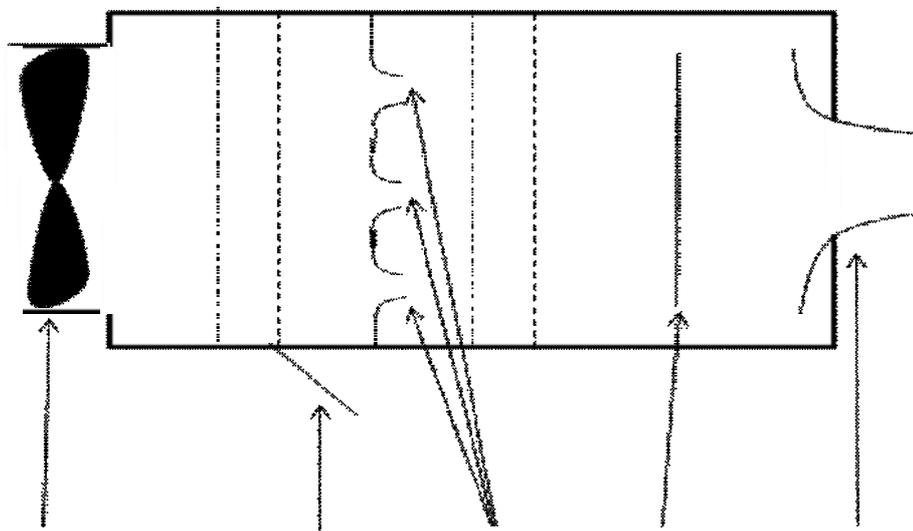
以上の数式によって求めた DP をもとに、風洞からの風速を求めるには、ベルヌーイの定理を用いる。

すなわち、 $V = \sqrt{\frac{2DP}{\rho}}$ を解けばよい。

5.3 微風速風洞の作り方

送風機の内側に可変（径が 12、17、24、40、60mm）の小ノズルを配置し、出口に径が 160mm の大ノズルを取り付ける。このとき出口の圧力は質量保存則から小ノズルと大ノズルの面積比の二乗、小ノズル出口での圧力に比例する。つまり小ノズルの径を 2 分の 1 倍、3 分の 1 倍としたとき、出口の風速は風洞内の風速の 4 分の 1 倍、9 分の 1 倍となっていく。この原理を使って送風機のみ出力からさらに微弱な風を生み出すことが出来、微風速風洞を実現している。

5.4 微風速風洞による圧力の校正



ファン 小ノズル変更用扉 小ノズル 四隅を切った板 大ノズル
線部は
整流網

図 試験で使った微風速風洞の構造

小ノズルを通過する流速を v (m/s)、大ノズルを通過する流速を V (m/s)、小ノズルの断面積を S_1 (m^2)、大ノズルの断面積を S_2 (m^2)、小ノズルの動圧を dp_1 、空気の密度を ρ (kg/m^3) とすると

$$VS_2 = vS_1$$

$$v = \frac{S_1}{S_2} V$$

$$v = \frac{S_1}{S_2} \sqrt{\frac{2dp_1}{\rho}} \quad (\text{m/s})$$

となる。

大ノズルの動圧を dp_2 とすると、

$$dp_2 = \frac{\rho v^2}{2} \quad (\text{Pa})$$

小ノズル径を d_1 (mm)、小ノズルのレイノルズ数 Re は、

$$Re = \frac{v d_1}{\nu} = \frac{d_1}{\nu} \sqrt{\frac{2dp_1}{\rho}}$$

となる。