

# 航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-678

キールチューブ付5孔ヨーメータを用いた  
速度ベクトルの測定におけるデータ処理法

室 田 勝 一 ・ 野 中 修  
近 藤 洋 史 ・ 林 良 生

1995年3月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

## 目 次

1. 記 号 .....	1
2. まえがき .....	2
3. 多角錐台型ヨーメータによる速度ベクトルの測定原理 .....	2
3. 1 基本式の導出 .....	2
3. 2 校正係数の確定方法 .....	4
3. 3 速度ベクトルの算出方法 .....	4
4. キールチューブ付4角錐台型ヨーメータによる速度ベクトルの測定 .....	4
4. 1 キールチューブ型総圧計測孔 .....	5
4. 2 速度ベクトルの算出 .....	5
4. 3 校正係数の決定 .....	6
5. キールチューブ付5孔ヨーメータの特性 .....	7
5. 1 ヨーメータの構造 .....	7
5. 2 総圧計測孔の特性 .....	8
5. 3 校正係数 .....	9
5. 4 動圧及び速度の測定精度 .....	10
5. 5 風向の測定精度 .....	11
6. あとがき .....	11
参考文献 .....	12

# キールチューブ付5孔ヨーメータを用いた 速度ベクトルの測定におけるデータ処理法\*

室田 勝一\*<sup>1</sup> 野中 修\*<sup>1</sup>  
近藤 洋史\*<sup>1</sup> 林 良生\*<sup>1</sup>

## An Improved Data Reduction Method in the Measurement of Velocity Vector by a 5-hole Yaw-meter With a Kiel Tube\*

Katsuichi MUROTA\*<sup>1</sup> Osamu NONAKA\*<sup>1</sup>  
Hirofumi KONDO\*<sup>1</sup> Yoshio HAYASHI\*<sup>1</sup>

### ABSTRACT

An attempt was made to improve the data reduction process of a 5-hole yaw-meter with a Kiel tube. A new system of equations to replace the old one<sup>2-4</sup> is proposed, which is used to derive the magnitude and directions of the local flow velocity vectors. This system is simpler compared with the old one because fewer terms are used.

As a result, the time to solve the system of equations by an iteration method is reduced. Also, the way of giving the initial values to start the iteration is improved.

The measurement accuracy of the velocity and velocity angles by the present method is the same as by the old method.

**Key words :** yaw-meter, yaw-meter data reduction, flow velocity vector measurement

### 概 要

キールチューブ付5孔ヨーメータによって、速度ベクトルを求める場合の基本式を提案した。本基本式は従来の方法<sup>2-4</sup>に比べて、校正係数が少なく、繰返し法によって解く場合の初期値の与え方を改善して、計算ステップ数を少なくし、圧力計測から風向、風速を求めるまでの計算処理時間を短縮した。

本方法による風向、風速の測定精度は従来の方法と同程度であることが実験的に示された。

1. 記 号			
		$P_s$	静圧
		$V$	速度ベクトル
$A_i^k, B_i^k, C_i^k$	基本式(9), (10)式の校正係数	$V$	速度ベクトルの大きさ
$C_1, C_2$	(5)式の定数	$V_N, V_T$	速度ベクトル $V$ の成分, (図1参照)
$C_p$	圧力係数 = $(H - P_\infty) / q_\infty$	$V_{NN}, V_{NT}$	速度ベクトル $V_N$ の成分, (図3参照)
$C_{p\alpha}, C_{p\beta}$	圧力係数, (19)式参照	$X, Y, Z$	座標系, (図1参照)
$f_1^k(\gamma), f_2^k(\gamma)$	$\gamma$ の多項式	$Z_h, Z_v$	座標軸, (図1参照)
$H$	総圧計測孔の示す圧力		
$P^k$	$k$ 番目の風向計測孔の示す圧力		

\* 平成6年11月28日 受付 (received 28 November 1994)

\*<sup>1</sup> 空力性能部 (Aircraft Aerodynamic Division)

$q$	動圧, $q=1/2\rho V^2$
$q_{NT}$	速度 $V_{NT}$ による動圧, $q_{NT}=1/2\rho V_{NT}^2$
$q_{NN}$	速度 $V_{NN}$ による動圧, $q_{NN}=1/2\rho V_{NN}^2$
$\alpha$	迎角, (18式参照)
$\beta$	横滑角, (18式参照)
$\gamma$	速度ベクトル $V$ とプローブ軸 $X$ 軸のなす角, (図1参照)
$\delta^k$	校正係数, (9式参照)
$\rho$	空気密度
$\lambda_0, \lambda_1$	係数, (18式参照)
$\mu_0, \mu_1$	係数, (18式参照)

## 2. まえがき

低速気流の速度ベクトル（風向，風速）を測定する装置として，航技研の大型低速風洞では，回転式速度ベクトル測定装置<sup>1)</sup>が用いられてきた。この装置のセンサ・プローブは，先端の楔角が異なる2本のパイプを張り合せ，張り合せ線を回転軸として回転させ，異なる3つ以上の回転角における2本のパイプの圧力計測値から，速度ベクトルを求めるものである。しかしながら，この方法は以下の欠点をもっていた。

- (1) センサ・プローブを軸回りに回転させる機構が必要となり，装置の規模が大きくなる。そのため測定すべき流れ場を乱してしまうおそれがある。
- (2) 3つの回転角における圧力値は一定の時間をおいて計測されるため，速度ベクトルの時間平均値しか求められない。

これらの欠点を補うために，航技研の中谷他により多角錐台型ピトー管型ヨーメータ<sup>2)</sup>が考案・試作された。このプローブの先端は一般に市販されている5孔ヨーメータと同様，中心の1孔とその回りの4孔で構成されている。市販品の5孔ピトー管と異なる点は以下の通りである。

- (1) 一般に市販されている5孔ピトー管のプローブ先端形状が球面形状であるのに対して，本ヨーメータは4角錐台形状をしている。
- (2) 一般に市販されている5孔ピトー管では速度の大きさや静圧を測定するために，静圧孔があるのに対して，本ヨーメータには静圧孔がない。
- (3) 本ヨーメータの総圧孔は，2重の同心円筒孔（キールチューブ<sup>3)</sup>と呼ばれている）となっているのに対して，市販の5孔ピトー管は1重円筒孔である。
- (4) 一般に市販されている5孔ピトー管では，速度を求めるのに総圧孔と静圧孔との差，風向を求めるのに周囲4孔のそれぞれ対称に位置する圧力孔の差圧

が用いられる。本ヨーメータでは総圧は中央の総圧孔より動圧，風向については5孔の圧力計測値を用いて校正式を解いて求められる。また，静圧は総圧と先に求められた動圧の差によって求められる。

本ヨーメータの構造は，総圧孔（キールチューブ部）の構造を除けば一般に市販されている5孔ピトー管にくらべて簡単であり，キールチューブ部の形状が適切であれば，総圧孔の気流方向依存性が鈍く，計測可能な風向範囲が広くなるという利点をもっている。しかしながら，圧力孔から速度ベクトルを求めるための校正式は，他の校正式<sup>9), 10)</sup>にくらべて複雑なため，初期値を与えて繰返し計算をする必要がある。式が複雑になる分だけ処理時間がかかり，オンラインで使用される風向・風速計には不利である。さらに，プローブ軸と同一方向の速度ベクトルの場合には，解が不定になる等の特異点をもっている。

本報告では，中谷他が考案した4角錐台型ヨーメータの校正式を改善し，速度ベクトルを求めるまでの繰返し計算のステップ数を減らすと共に，繰返し計算に用いる初期値の与え方を改善する方法について述べ，併せて本プローブの特性試験の結果について報告する。

## 3. 多角錐台型ヨーメータによる速度ベクトルの測定原理

### 3.1 基本式の導出

多角錐台型ヨーメータのプローブと測定対象となる速度ベクトル  $V$  の相対的な位置関係及び速度ベクトルの成分  $V_T$ ,  $V_N$  の関係を図1に示す。プローブ軸を  $X$  軸とし，それに直交する軸を  $Y$ ,  $Z$  軸とする。プローブ軸を含む多角錐台の  $K$  番目の側面に垂直な平面を  $XOZ_K$  とし， $OZ_k$  と  $OZ$  のなす角を  $\phi^k$  とする。また，速度ベ

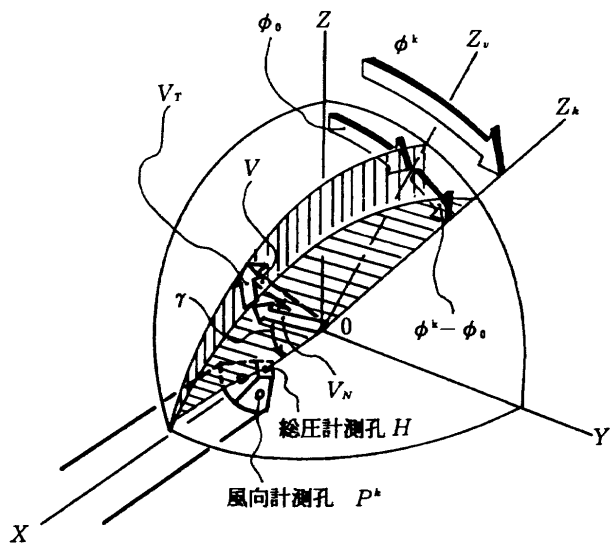


図1 プローブと速度ベクトルの関係

クトル  $V$  は  $XOZ_v$  面内にあり、速度ベクトル  $V$  の  $XOZ_k$  面への斜影を  $V_N$  とし、 $XOZ_k$  に垂直な面への斜影を  $V_T$  とする。 $V_N$  は総圧計測孔と多角錐台の  $K$  番目の圧力孔を含み多角錐台の側面に垂直な面内の速度ベクトルの成分であり、 $V_T$  は多角錐台の  $K$  番目の側面に接する面内の速度成分である。速度ベクトルの大きさ  $V$  とその成分  $V_N$ 、 $V_T$  の間には (1) 式が成立する。

$$\begin{aligned} V_N &= V \cos(\phi^k - \phi_0) \\ V_T &= V \sin(\phi^k - \phi_0) \end{aligned} \quad (1)$$

多角錐台前面の圧力孔が示す圧力を  $H$  とし、多角錐台の  $K$  番目の側面の圧力孔が示す圧力を  $P^k$  とする。両者の差圧  $H - P^k$  は、多角錐台側面に垂直な速度ベクトル  $V_N$  と面に接する方向の速度ベクトル  $V_T$  による圧力の和として表すことができ、(2) 式が成立する。速度ベクトルの成分  $V_N$ 、 $V_T$  とプローブの位置関係を図 2 に示す。

$$H - P^k = (V_N \text{ による圧力}) + (V_T \text{ による圧力}) \quad (2)$$

図 3 に示すように、多角錐台側面に垂直な面内の速度ベクトル  $V_N$  は、多角錐台面に垂直すなわちプローブ軸

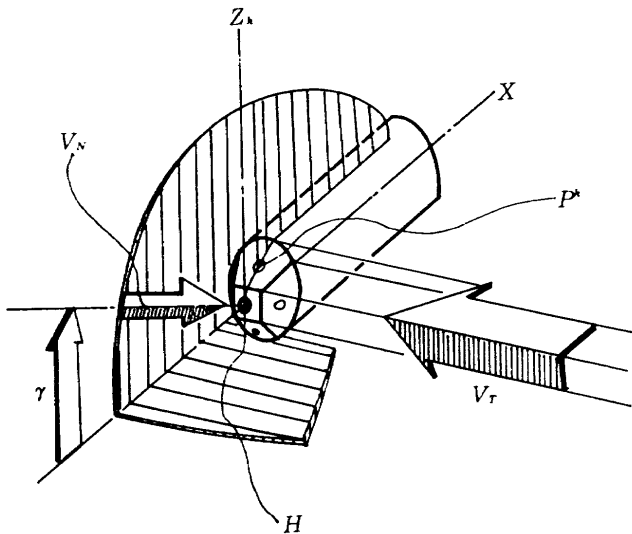


図 2 プローブ軸と速度ベクトルの関係

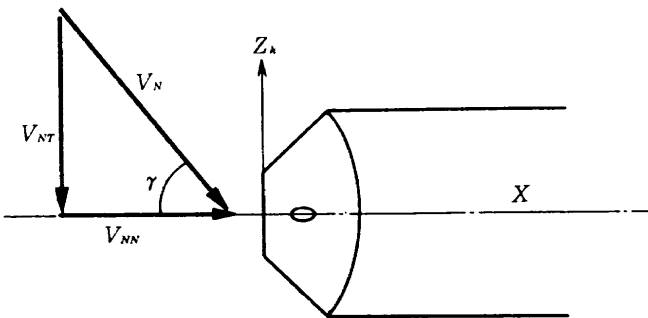


図 3 速度ベクトル  $V_N$  の成分

( $X$  軸) 方向の成分  $V_{NN}$  と多角錐台面に接する  $Z_k$  方向の成分  $V_{NT}$  に分解される。速度ベクトル成分  $V_N$ 、 $V_{NN}$ 、 $V_{NT}$  は  $K$  番目の圧力孔のプローブ軸まわりの回転角  $\phi^k$  及び速度ベクトル  $V_N$  とプローブ軸のなす角度  $\gamma$  を用いて (3) 式のように表すことができる。

$$\begin{aligned} V_{NN} &= V \cos(\phi^k - \phi_0) \cos \gamma \\ V_{NT} &= V \cos(\phi^k - \phi_0) \sin \gamma \end{aligned} \quad (3)$$

(2) 式の右辺第 1 項を  $V_{NN}$  と  $V_{NT}$  によるものに分解すると (4) 式が成立する。

$$\begin{aligned} H - P^k &= (V_T \text{ による圧力}) + (V_{NN} \text{ による圧力}) \\ &\quad + (V_{NT} \text{ による圧力}) \end{aligned} \quad (4)$$

(4) 式の右辺の各項は、速度ベクトルの各成分に基づく動圧に比例すると考えられる。右辺第 1 項は総圧計測孔、風向計測孔の双方の面に接する方向の速度ベクトルに依存する項であり、各圧力孔への圧力寄与分は動圧に依存するが、動圧が大きくなれば逆に圧力寄与分は小さくなると思われる。しかしながら、プローブ製作上の問題から面の状態が同一ではないので、風向  $\gamma$ 、 $\phi_0$  の影響を受けるものと考えられるが、物理的に影響の小さい  $\phi_0$  の効果を見捨て  $\gamma$  の多項式と動圧  $q$  の積として表す。

右辺の第 2、3 項は図 3 に示すように多角錐台の各平面の法線方向に、ある角度をもつ速度ベクトルによる動圧に比例すると考えられる。以上により (4) 式は速度成分  $V$ 、 $V_{NN}$ 、 $V_{NT}$  で作られる動圧  $q$ 、 $q_{NN}$ 、 $q_{NT}$  を用いて (5) 式で表すことができる。

$$H - P^k = f^k(\gamma) q + C_1 q_{NN} + C_2 q_{NT} \quad (5)$$

(5) 式右辺の第 2、第 3 項の動圧成分は、(3) 式において  $V$  の代わりに  $q$  と置き替えれば、 $q$ 、 $\phi_0$ 、 $\gamma$  の関数として表すことができ、更に、 $\gamma$  の正弦及び余弦関数を  $\gamma = 0$  のまわりに級数展開すれば (6) 式が得られる。

$$\begin{aligned} q_{NN} &= q \cos(\phi^k - \phi_0) \cos \gamma \\ &= q \cos(\phi^k - \phi_0) \left(1 - \frac{\gamma^2}{2} + \dots\right) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} q_{NT} &= q \cos(\phi^k - \phi_0) \sin \gamma \\ &= q \cos(\phi^k - \phi_0) \left(\gamma - \frac{\gamma^3}{6} + \dots\right) \end{aligned}$$

(6) 式を (5) 式に代入して、 $\gamma$  の多項式を  $f_1^k(\gamma)$ 、 $f_2^k(\gamma)$  とおけば、(7) 式が得られる。

$$\frac{H - P^k}{q} = f_1^k(\gamma) + f_2^k(\gamma) \cos(\phi^k - \phi_0) \quad (7)$$

(7) 式は一般的多角錐台型ヨーメータから速度ベクトルを求めるための基本式である。総圧計測孔、風向計測孔の圧力を計測し、(7) 式を解くことによって動圧  $q$  と速度ベ

クトルの方向 $\gamma$ 、 $\phi_0$ を求めることができる。 $\phi^k$ は $K$ 番目の風向計測孔の回転角を示すもので、多角錐台の $K$ 番目の側面の法線のプローブ軸まわりの回転角である。(7)式の未知数は動圧 $q$ 及び風向 $\gamma$ 、 $\phi_0$ であるので、原理的には独立した3本の式が得られれば解を得ることができる。このことは $k=1\sim 3$ の3角錐台のプローブであれば速度ベクトルの測定ができることを意味する。

(7)式に含まれる $\gamma$ の多項式を3次の項までとり、各項の係数を $A_i^k$ 、 $B_i^k$ 、とすれば、(8)式が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{H-P^k}{q} &= A_1^k + A_2^k \gamma + A_3^k \gamma^2 + A_4^k \gamma^3 \\ &+ (B_1^k + B_2^k \gamma + B_3^k \gamma^2 + B_4^k \gamma^3) \cos(\phi^k - \phi_0) \end{aligned} \quad (8)$$

(8)式右辺の余弦関数を加法定理によって展開し、 $B_i^k \cos \phi^k$ を改めて $B_i^k$ とし、 $\tan \phi^k = \delta^k$ と置けば、(8)式は(9)式となる。

$$\begin{aligned} \frac{H-P^k}{q} &= A_1^k + A_2^k \gamma + A_3^k \gamma^2 + A_4^k \gamma^3 \\ &+ (B_1^k + B_2^k \gamma + B_3^k \gamma^2 + B_4^k \gamma^3) \\ &(\cos \phi_0 + \delta^k \sin \phi_0) \end{aligned} \quad (9)$$

これまで中谷によって用いられてきた基本式<sup>3), 4)</sup>は、(8)式右辺の余弦関数を加法定理により $\cos \phi_0$ と $\sin \phi_0$ の項に分解し、 $\cos \phi^k$ 、 $\sin \phi^k$ と $\gamma$ の多項式の各項と $\cos \phi^k$ と $\sin \phi^k$ の積からなるそれぞれの項を改めて係数 $B_i^k$ 、 $C_i^k$ と置きかえた式(10)が用いられた。

$$\begin{aligned} \frac{H-P^k}{q} &= A_1^k + A_2^k \gamma + A_3^k \gamma^2 + A_4^k \gamma^3 \\ &+ (B_1^k + B_2^k \gamma + B_3^k \gamma^2 + B_4^k \gamma^3) \cos \phi_0 \\ &+ (C_1^k + C_2^k \gamma + C_3^k \gamma^2 + C_4^k \gamma^3) \sin \phi_0 \end{aligned} \quad (10)$$

(9)式と(10)式をくらべると、(9)式の校正係数は $A_i^k$ 、 $B_i^k$ 、 $\delta^k$ の $9 \times k$ 個、(10)式の校正係数は $A_i^k$ 、 $B_i^k$ 、 $C_i^k$ の $12 \times k$ 個で、センサ・プローブとして最低限の3角錐台プローブであっても、(10)式を用いると校正係数は25%増となり、校正試験時のデータ数を多く必要とする。

また、基本式を解いて速度ベクトルを求める場合の繰返し計算の演算回数は、校正係数が多い分だけ多くなり、圧力計測値から基本式を解いて速度ベクトルを算出するまでの計算処理時間が長くなる。しかしながら、校正係数が多いほど、基本式のあてはめ精度は高くなり、測定精度は高くなると思われる。基本式(9)または(10)いずれを用いた方が良いかは、本センサ・プローブの使用目的による。本報告で述べる(9)式を用いる方法は、演算処理

時間を短くすることを目的としたものである。

### 3. 2 校正係数の確定方法

3.1項では、多角錐台型ヨーメータによって速度ベクトルを求めるための基本式(9)式を導いた。基本式(9)式には、 $A_i^k$ 、 $B_i^k$ 、 $\delta^k$ という校正係数が合計 $9 \times k$ 個含まれている。校正係数を決めるには、あらかじめプローブを風洞に入れ、校正試験を実施する必要がある。変角装置に取付けられたプローブを風洞に入れ、風洞気流の動圧、変角装置の角度を変えて $9 \times k$ ケース以上の校正試験を行って、総圧計測孔と風向計測孔の差圧を計測する。

校正試験において風洞気流の動圧 $q$ 、変角装置により風向 $\phi_0$ 、 $\gamma$ が設定され、 $H-P^k$ が計測されるので、(9)式を解いて未知数である校正係数を決定することができる。(9)式は校正係数に関して線形結合された形になっていないので、初期値を与え繰返し計算の方法によって求めることとなる。

### 3. 3 速度ベクトルの算出方法

(9)式において、風向は風洞試験でなじみの薄い $\gamma$ 、 $\phi_0$ で表現されている。風向は一般に風洞試験で使用されている風洞気流と機体のなす角 $\alpha$ 、 $\beta$ で表現するのが便利である。プローブ軸( $X$ 軸)を機体軸の $X$ 軸と考えれば、図14より $\alpha$ 、 $\beta$ と $\gamma$ 、 $\phi_0$ の間には(11)、(12)の関係が成立する。

$$\cos \gamma = \cos \alpha \cos \beta \quad (11)$$

$$\tan \phi_0 = \sin \beta / \tan \alpha \quad (12)$$

更に、流れが比圧縮流と仮定すれば、風速 $V$ と動圧 $q$ の間は(13)式が成立する。

$$V = \sqrt{2q / \rho} \quad (13)$$

校正試験によって、プローブ固有の校正係数 $A_i^k$ 、 $B_i^k$ 、 $\delta^k$ が求まっているので、総圧計測孔と風向計測孔の差圧 $H-P^k$ を測定して、(9)式を用いて動圧 $q$ と風向 $\gamma$ 、 $\phi_0$ を求めることができる。(9)式において未知数 $q$ 、 $\gamma$ 、 $\phi_0$ は線形結合となっていないので、初期値を与えて、繰返し計算法によって解かれる。速度 $V$ 、風向 $\alpha$ 、 $\beta$ を求める場合には(11)~(13)式が用いられる。

## 4. キールチューブ付4角錐台型ヨーメータによる速度ベクトルの測定

3章では、一般の多角錐台型ヨーメータを用いて、速度ベクトルを求める場合の基本式の導出、校正係数の確定方法及び速度ベクトルの測定原理について述べ、多角錐台としては3角錐台型で必要十分であることを示した。本章では、3章で述べた方法を中谷他により考案さ

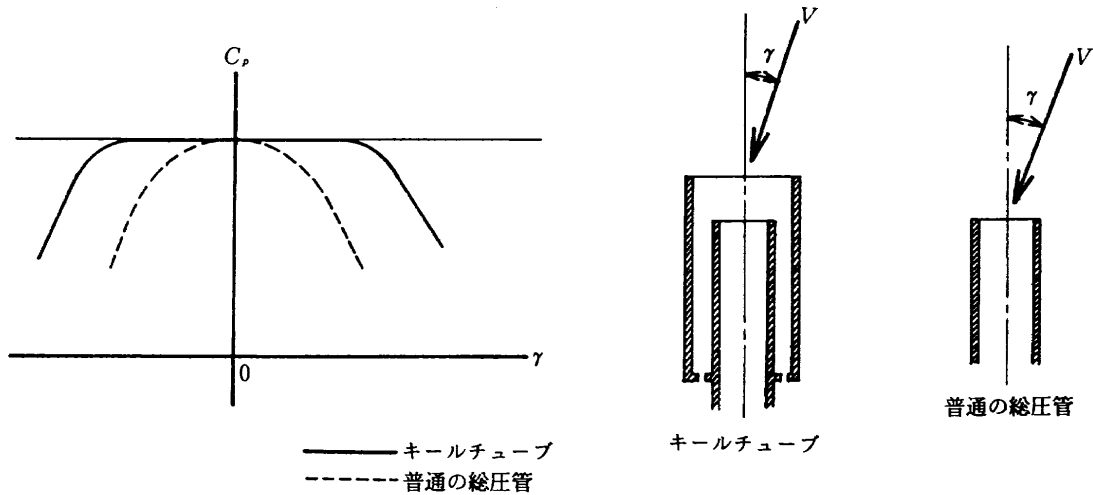


図4 キールチューブ型総圧管の角度特性

れたキールチューブ付の4角錐台型ヨーメータに適用した場合の、基本式、校正係数を求める方法及び速度ベクトルを求める方法について述べる。

#### 4.1 キールチューブ型総圧計測孔

4角錐台型ヨーメータの中央の総圧計測孔は、キールチューブ型の圧力孔となっている。キールチューブ型圧力孔とは、図4に示すように、圧力孔が同心円筒状の2重のチューブで構成され、外筒は小穴で外気と通じている。内筒は総圧計測孔として、圧力変換器に通じている。このような2重円筒形状の圧力孔は、風向依存度が鈍くなり、プローブ軸と速度ベクトルのなす角が大きくなっても、真の総圧を示し、ヨーメータとして計測可能な風向範囲( $\gamma$ の範囲)を大きくすることができるという特徴<sup>9)</sup>をもっている。

キールチューブの総圧管としての特性に最も大きな影響を与える形状パラメータは、内筒の深さ(図5のd)であり最適値が存在するようである。中谷は $d/D$ を変えた実験を行って、最適値を求めた。我々はプローブ径は異なるが、彼等が特性実験に試作したものと同一 $d/D$ の値をもつものを作った。しかしながら、我々が製作したものは、径が小さいうにパイプの肉厚が薄く、2重円筒が同心円筒にならなかったり、先端部の加工状態が悪く、滑らかな軸対称性が実現されないなど、風向の非依存性が悪いうに、総圧の軸対称性が悪かった。

本4角錐台型ヨーメータには、キールチューブ型の総圧計測孔が採用されているので、一般の多角錐台型ヨーメータに適用される(9)式の総圧孔が示す圧力は、プローブ軸と速度ベクトルのなす角がある範囲内であれば、真の総圧を示すこととなる。非圧縮流の場合には、総圧=動圧+静圧となるので、総圧計測孔で計測された総圧 $H$ と(9)式を解いて求められる動圧 $q$ の差から、(14)式を用

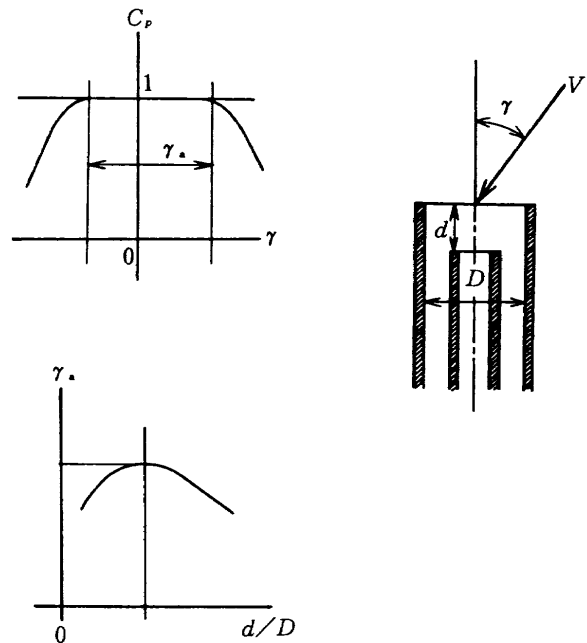


図5 キールチューブの総圧測定可能範囲

いて静圧を求めることができる。キールチューブ付4角錐台型ヨーメータでは、一般の5孔ピトー管がもっている静圧孔は不要となるばかりでなく、4角錐台前面の圧力孔が示す圧力は総圧そのものである。

$$P_s = H - q \tag{14}$$

#### 4.2 速度ベクトルの算出

4角錐台の5面にある5個の圧力孔の圧力を計測し、(9)式で示される4本( $k=1 \sim 4$ )の基本式を最小自乗法を用いて解くことによって、動圧 $q$ 、風向 $\gamma$ 、 $\phi_0$ の3つの未知数を求めることができる。未知数 $q$ 、 $\gamma$ 、 $\phi_0$ は線型結合とはなっていないので、初期値を与えて繰返し法によって解く必要がある。

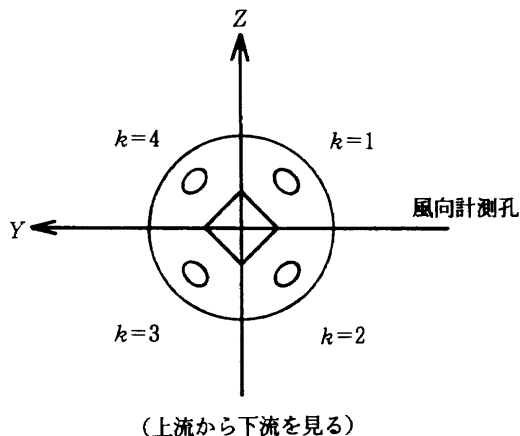


図6 圧力孔の番号

中谷の方法では(10)式を解くことになるが、その時の初期値は以下のように決められた。プローブ先端形状が正4角錐台であれば、錐台側面の法線方向は、互いに90°づつ傾いている。また、4角錐台の面と圧力孔が正確に作られていれば、校正係数 $A_i^k, B_i^k$ は*i*にかかわらず同一の値をもつ。 $k=1, 3$ とおいた(10)式の辺々の差の式と、 $k=2, 4$ とおいた(10)式の辺々の差の式の比をとることによって、 $\phi_0$ は風向計測孔の圧力 $P^k$ のみの関数として(15)式によって表すことができる。

$$\tan \phi_0 = \tan^{-1} \left( \frac{P^2 - P^4}{P^1 - P^3} \right) \quad (15)$$

$k=1, 2, 3, 4$ とおいた(10)式の辺々の和の式と、 $k=1, 2$ とおいて辺々の和をとった式と、 $k=3, 4$ とおいて辺々の和をとった式の、辺々の差の式の比をとることによって未知数 $q$ が消去でき、 $\gamma$ と $\phi_0$ の関係式が得られる。この関係式において、 $\gamma$ の2次以上の項を微少項として省略すれば、 $\gamma$ は圧力計測値 $H, P^k$ と先に求めた $\phi_0$ によって、(16)式で求められる。

$$\gamma = 2 \frac{A_1 \{P^1 + P^2\} - (P^3 + P^4)}{B_1 \{4H - (P^1 + P^2 + P^3 + P^4)\} (\cos \phi_0 + \sin \phi_0)} \quad (16)$$

動圧 $q$ は、 $k=1, 2, 3, 4$ とおいた(10)式の辺々の和の式を作ることによって、(17)式から求められる。

$$q = \frac{4H - (P^1 + P^2 + P^3 + P^4)}{4(A_1 + A_1 \gamma + A_1 \gamma^2 + A_1 \gamma^3)} \quad (17)$$

このように、中谷の方法は、(15)~(17)式を順に解いて、 $\phi_0, \gamma, q$ の初期値とする方法であり、複雑な計算を実行しなければならないという欠点をもっている。

ここでは、一般の5孔ヨーメータで風向を求める時に採用しているのと同様な、風向計測孔の差圧を用いて初期値を設定する方法について述べる。図6に示すように、

風向計測孔1, 2の圧力差と4, 3の圧力差の平均値を求め、総圧 $H$ で無次元化した圧力係数を定義して $\Delta C_{p\alpha}$ とする。同様に風向計測孔1, 4の圧力差と2, 3の圧力差の平均値を求め、総圧 $H$ で無次元化した圧力係数を定義して $\Delta C_{p\beta}$ とする。実験によると、 $\Delta C_{p\alpha}$ は $\alpha$ の一次関数、 $\Delta C_{p\beta}$ は $\beta$ の一次関数となり、いずれも動圧の依存性が小さい。

$$\alpha = \lambda_0 + \lambda_1 \Delta C_{p\alpha} \quad (18)$$

$$\beta = \mu_0 + \mu_1 \Delta C_{p\beta}$$

$$\Delta C_{p\alpha} = \{(P^1 - P^2) + (P^4 - P^3)\} / 2H \quad (19)$$

$$\Delta C_{p\beta} = \{(P^1 - P^4) + (P^2 - P^3)\} / 2H$$

(18)式における $\lambda_1, \mu_1$ は定数で(9)式の校正係数を求める時のデータを用いてあらかじめ求められ、確定される。

さて、本方法で速度ベクトルを算出する場合の繰返し計算の初期値は、以下の手順で求められる。風向計測孔の圧力 $P^1 \sim P^4$ 及び総圧 $H$ が計測されるので、(19)式から $\alpha, \beta$ の圧力係数 $\Delta C_{p\alpha}, \Delta C_{p\beta}$ が求められる。これを(18)式に代入すると $\alpha, \beta$ が求まる。 $\alpha, \beta$ を(11), (12)式に代入して $\gamma, \phi_0$ を求め、更に、(17)式によって $q$ を求める。こうして、繰返し計算に必要な全ての未知量の初期値が決定される。

繰返し計算を行う場合、収束値に近い初期値を与えることができれば、その分、繰返し回数が少なくなり、短い時間で解を求めることができる。その意味で初期値の与え方は重要である。速度ベクトルを繰返し法で求める場合に、最も収束が悪いものは $\phi_0$ である。 $\phi_0$ の収束が悪いというのは、いいかえれば、風向に対する感度が $\gamma$ にくらべて $\phi_0$ が鈍いことを意味する。従って、初期値として $\phi_0, \gamma$ を与える代わりに、風向に対する感度の高い $\alpha, \beta$ で与える方が有利であるといえる。本方法による初期値は、中谷が用いた初期値より収束値に近いこと、風向に対する感度が高い $\alpha, \beta$ を使用している点で優れている。

#### 4.3 校正係数の決定

(9)式の校正係数は、あらかじめ実施される校正試験によって求められる。変角装置に取付けられたプローブを風洞に入れ、プローブと気流のなす角度、風速(動圧)を変え、総圧計測孔と風向計測孔の圧力差 $H - P^k$ を計測し、設定値 $q, \gamma, \phi_0$ に対して(9)式を解いて、 $A_i^k, B_i^k, \delta^k$ の9個の校正係数が求められる。

校正係数は線形結合となっていないので、初期値を与えて繰返し法によって求められる。校正係数を繰返し法で求める場合、初期値は次のように与えられた。(9)式の代わりに(10)式を用いる。(10)式は、校正係数 $A_i^k, B_i^k, C_i^k$ に関して一次結合となっているので、最小自乗法を用い



てマトリックス計算によって解くことができる。

$B_i^k, C_i^k, \delta^k$ の間には  $B_i^k \delta^k = C_i^k$  の関係がある。 $k$  について辺々の和をとれば (20)式が得られ、(20)式を解いて  $\delta^k$  が求められる。

$$\delta^k = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 (C_i^k / B_i^k) \quad (20)$$

以上のように校正係数  $A_i^k, B_i^k, \delta^k$  が求められたので、これを初期値として繰返し計算法によって(19)式の校正係数が決定される。

### 5. キールチューブ付5孔ヨーメータの特性

#### 5.1 ヨーメータの構造

風洞試験において、模型後流の流れ場をしらべるために、第4章で述べた4角錐台型ヨーメータを製作した。ヨーメータの構造は、中谷により考案されたもの<sup>2),3)</sup>と同一であるが、4角錐台の側面の風向計測孔は1つの面に各1個であり、彼等の多孔の風向計測孔とは異なっている。

4角錐台の楔角は、速度ベクトルの測定範囲(プローブ軸と速度ベクトルのなす角)及び風向に対する感度(風向計測誤差に対応)に影響するものであり、使用目的によって決められるものである。我々は、STOL実験機「飛鳥」模型の尾翼位置に取付け、その付近の吹下し角、動圧等の流れ場をしらべる目的で作ったので、吹下し角が30°程度になることを想定して、楔角を45°とした。

プローブ形状を図7に示す。プローブの先端の外径は4mm、風向計測孔は4角錐台の4つの側面上2.2mm径に配置されている。総圧計測孔はキールチューブ式の2重円筒形状であり、その外径は1mmである。圧力取

出しパイプを含めたプローブの全長は270mmで、先端60mmを残して後方は強度等を考慮して、9mm径とした。総圧計測孔の内筒の深さは、中谷のプローブの最適値にならない  $d/D=0.5$  とした。さらに総圧計測孔の外筒及び内筒の先端は、共にロート形状に面取り加工し、総圧計測孔の風向依存性を鈍くした。

プローブは5本をくし形に配置して使用するために、予備を含めて7本を製作したが、先端形状の加工が悪く、

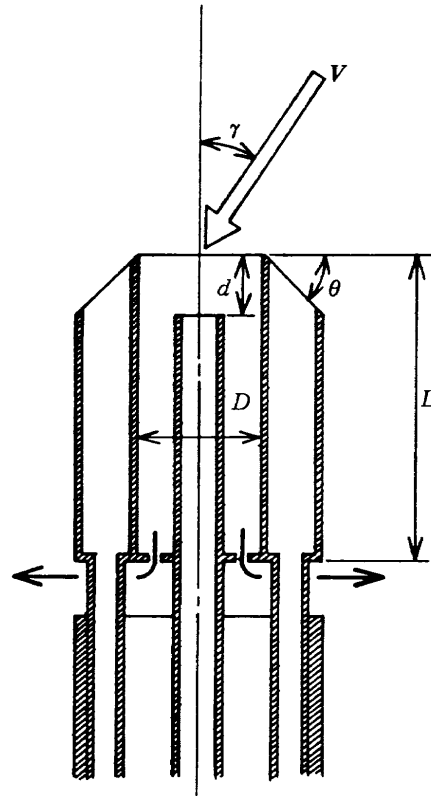


図8 キールチューブ付5孔ヨーメータの先端形状

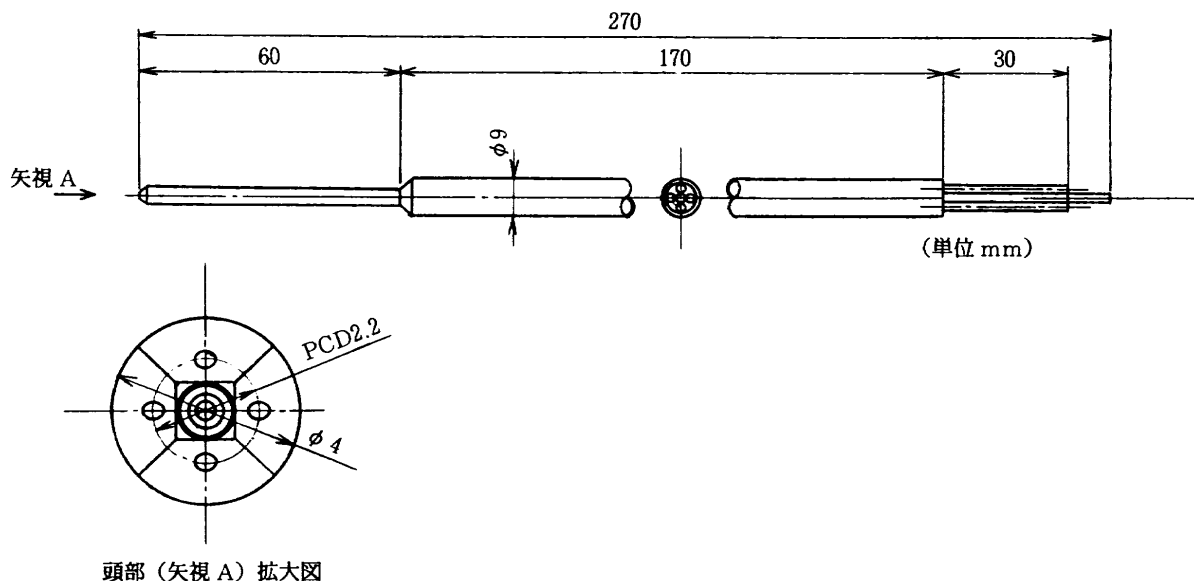


図7 キールチューブ付5孔ヨーメータ

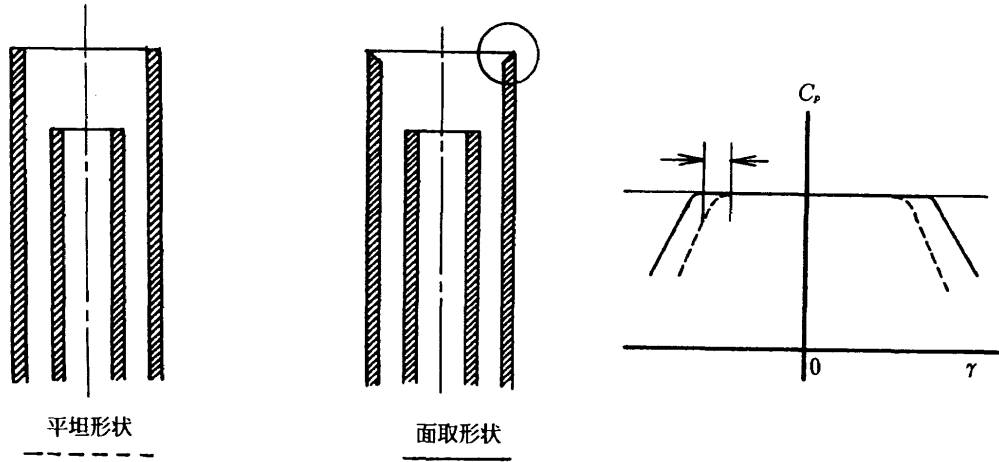


図9 総圧計測孔の先端形状による角度特性

総圧計測孔の軸対称性や風向計測孔の表面が滑らかにでき上がらなかったりして使用に耐えられるものは7本中5本であった。中谷のプロープと同様に作ったにもかかわらず、後述するように、その性能（測定可能範囲の大きさ、圧力計測値の軸対称性等）が悪かった。ヨーメータの全体形状を図8に、総圧計測孔の先端形状による角度依存性を図9に示す。

5.2 総圧計測孔の特性

総圧計測孔の特性を図10に示す。7本のプロープのうち最も対称性の良いNo.7プロープの結果を示す。圧力係数  $C_p$  は、本プロープの総圧計測孔で計測された総圧と風速設定に用いられている標準ピトー管の静圧との差を標準ピトー管の動圧で無次元化した値である。

図からわかるように  $-15^\circ \le \alpha \le 15^\circ$  の範囲であれば、本プロープの総圧計測孔は真の総圧を示すことがわかり、風速の計測可能範囲（プロープ軸と風速ベクトルのなす角  $\gamma$ ）が  $15^\circ$  であることを示している。中谷により製作

されたプロープの計測可能範囲  $\gamma = 25^\circ$  にくらべて、本プロープの計測可能範囲  $\gamma = 15^\circ$  は悪い。製作されたプロープによっては、 $-15^\circ \le \alpha \le 30^\circ$  というものであったが、よくしらべてみると、総圧計測孔の内筒が偏り、同心同筒でないことがわかった。

図10からキールチューブ型総圧管は、風向に依存するだけでなく、速度にも依存することがわかる。この現象はプロープ軸と風速ベクトルのなす角が大きくなると現れる。プロープ軸と風速ベクトルのなす角が大きくなるに従って、プロープ先端から気流の剥離が発生する。剥離は粘性によるもので、レイノルズ数に影響する。プロープ先端形状が球形の普通の5孔ヨーメータの中央の総圧孔が示す圧力がほぼ  $\cos \alpha$  に従って変化するのも、プロープ先端の気流の剥離位置が風向と速度に依存して徐々に変化するからに他ならない。

多角錐台型ヨーメータの場合は、先端に角があり、そこに剥離点が固定されるため、プロープ軸と速度ベクトルとのなす角がある値になるまでは、総圧管の圧力指示

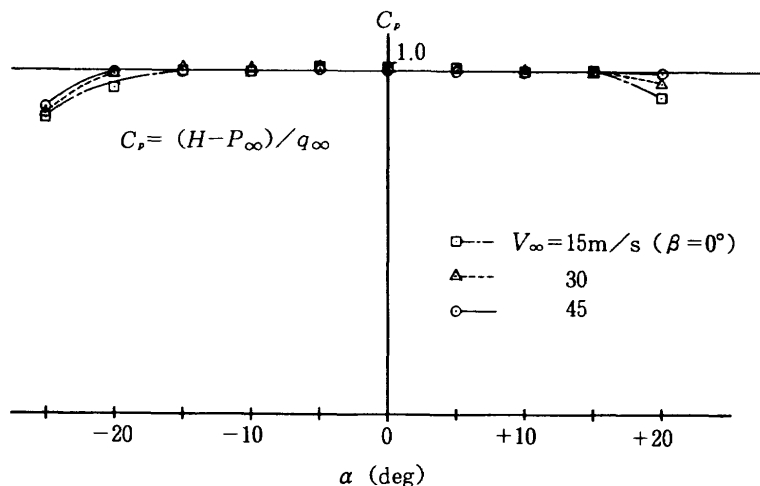


図10 総圧計測特性 (No.7プロープ)

値は低下しないが、それ以上の角度になると、急に角から気流が剥離し、総圧管の圧力指示値が急激に変わるとの推定される。

製作されたプローブの中には、風向測定範囲が、非対称であったり、もう少し範囲の広いものもあったが、いずれのプローブも最低 $\gamma \leq 15^\circ$ の範囲を満足していることがわかった。すなわち、プローブ先端に半頂角 $15^\circ$ で開く円錐内に入る速度ベクトルならば、本プローブで測定が可能であることを示している。

### 5.3 校正係数

#### (1) (9)式の校正係数

(9)式に含まれる合計9個の校正係数 $A_i^k, B_i^k, \delta^k$ を求めるために、プローブを風洞内に入れ、プローブと気流のなす角 $\alpha, \beta$ と、風洞の気流速度 $V$ を変え、ヨーメータの5孔の圧力計測を行った。速度は15, 30, 45 m/sと変え、風向 $\alpha, \beta$ はそれぞれ $-15^\circ$ から $+15^\circ$ までの5度おきに変化させて校正試験を実施した。

データ数としては、 $3(V) \times 7(\alpha) \times 7(\beta) \times 2(\text{回数}) =$

294であったが、294点のデータの中には、 $\alpha, \beta$ の組合せから $\gamma$ を計算すると、測定可能範囲内の $15^\circ$ を越えるものや、明らかに圧力計測の失敗と思われるケースもあり、一定の基準を設けてデータを選択した。その結果、校正係数を求めるために用いたデータ数は、プローブによって異なるが、それぞれのプローブについて約200点であった。校正係数はプローブによって異なるとともに、プローブ設置状態( $\phi^k$ の値の違いとして現れる)によって異なるが、本試験では $\phi^1 = 45^\circ$ になるよう設定した。

得られた校正係数の一例を表1に示す。 $i$ が2, 3, 4の係数については、それぞれ $\gamma, \gamma^2, \gamma^3$ の積として(9)式では評価される。 $\gamma$ の値は最大 $15^\circ (0.26\text{rad.})$ で、 $i$ が大きくなるに従って、(9)式の高次項は小さくなり、 $\gamma$ の高次項を省略したあてはめ式として、基本式(9)は妥当なものといえる。また、 $\delta^k$ については $\phi^1 = 45^\circ, k$ が2以上については $90^\circ$ づつが加算されているので、 $\delta^k = 1$ が理想的な値となるはずである。表1で $\delta^k = 1$ であることはそのことをうらづけている結果といえよう。

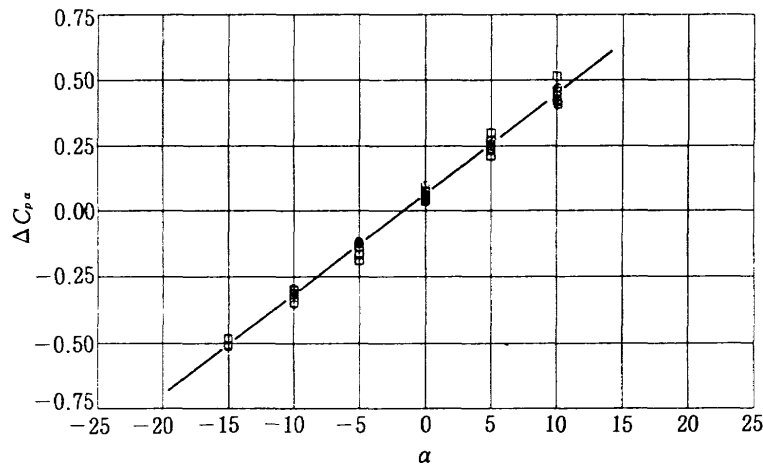


図11(a) (18)式の係数(α)

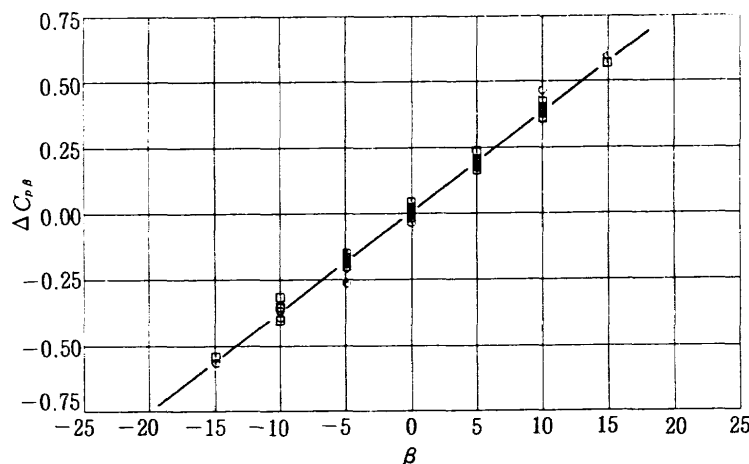


図11(b) (18)式の係数(β)

表1 (9)式の係数 (No.6 プローブ)

	$k/i$	1	2	3	4
$A_i^k$	1	0.5746	-0.8653	1.750	-13.89
	2	0.4277	0.6122	-1.656	2.801
	3	0.4676	-0.8188	6.437	-9.919
	4	0.5231	-0.3887	4.382	-7.908
$B_i^k$	1	-0.0405	2.087	-3.564	4.238
	2	0.0360	-1.617	2.865	-4.019
	3	-0.0374	-0.2522	-4.285	5.898
	4	-0.0152	1.688	-1.178	0.326
$\delta_k$		0.9267	-1.1287	1.104	-0.955

表2 (18)式の係数 (No.6 プローブ)

	0	1
$\lambda$	-1.9079	23.209
$\mu$	0.6525	21.857

いずれにせよ、本校正データは繰返し計算のための初期値として必要なもので、 $\Delta C_{pa}$ 、 $\Delta C_{p\beta}$  がそれぞれ、 $\beta$ 、 $\alpha$  に依存していても、また、 $\alpha$  にオフセットがあっても、速度ベクトルや風向の算出精度に影響はない。精度が影響するのは(11)式のあてはめ精度である。

(2) (18)式の校正係数

(9)式を繰返し法で解くには、 $\gamma$ 、 $\phi_0$  の初期値が必要となるが、それらの初期値は4.2節で述べた手順により(18)式で求められる。前述の校正試験のデータから $\Delta C_{pa}$ 、 $\Delta C_{p\beta}$  を求め、それぞれ $\alpha$ 、 $\beta$  についてプロットしたものを図11に示す。

図11にはいくつかのシンボルが示されているが、図11(a)については異なった $\beta$ の値が、図11(b)については異なった $\alpha$ の値がプロットされている。これらの全てのデータを最小自乗法で直線近似したものが図11の実線である。そのようにして得られた(18)式の係数 $\lambda_i$ 、 $\mu_i$  を表2に示す。図11の同一シンボルを直線近似すると、実線とは異なった直線が得られるが、これは、 $\Delta C_{pa}$  が多少 $\beta$ に、 $\Delta C_{p\beta}$  が $\alpha$ に依存していることを示している。また、 $\Delta C_{pa}$  の実線が $\alpha = 0$ で $\Delta C_{pa} = 0$ の点を通っていないのは、プローブの軸対称性とプローブ設置時に $\alpha$ にオフセットが存在することによる。

5.4 動圧及び速度の測定精度

校正試験のデータを用いて校正係数を求めると、基本式(11)式が確定する。この確定した(11)式に、校正試験で得られたデータ $H$ 、 $P^k$ を与え、逆に速度ベクトルを求め、本プローブの測定精度を評価した。結果を図12に示す。横軸は風洞に設置された標準ピトー管で計測した動圧の真値を示し、縦軸は、本ヨーメータから求められた測定値である。本図はNo.6プローブの結果を示しており、風洞気流とプローブ軸のつくる角 $\gamma$ が異なっているデータ約60点を集積したものである。45°の線(実線)にのっていれば精度が良いことを示す。動圧測定誤差の標準偏差 $\sigma = 1.65 \text{ mmAq}$ であり、相対誤差は1.2%であった。

得られた動圧から(13)式を解き、速度の大きさを求めて、速度の測定精度を評価した。結果を図13に示す。横軸は標準ピトー管で求めた設定風速で真値を示す。縦軸は本ヨーメータで測定された速度である。データは図12と同一で、約60点である。図12と同様45°の直線(実

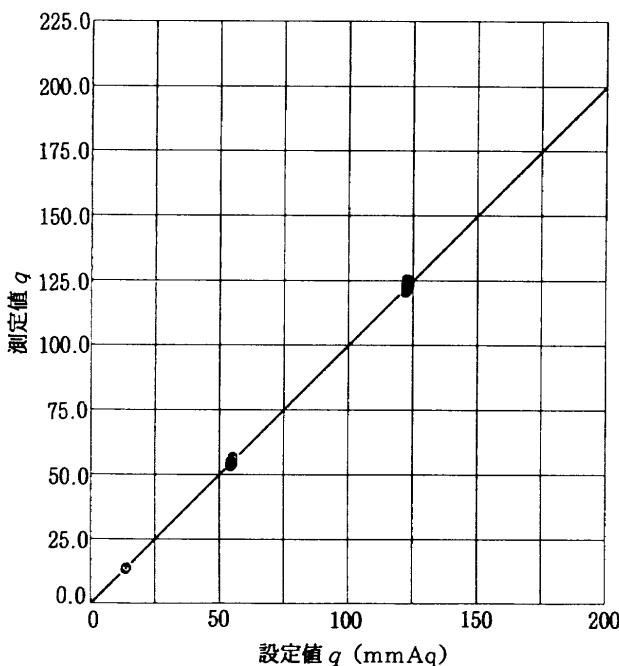


図12 動圧測定精度

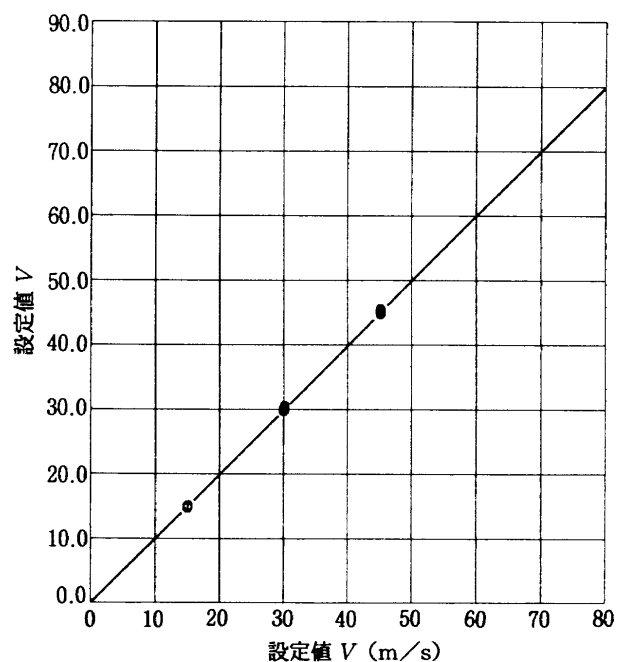


図13 風速測定精度

線) によっていけば精度が良いことを示す。風速測定誤差の標準偏差は0.18m/sで、相対誤差は0.6%であった。

5. 5 風向の測定精度

図15に風向 $\alpha$ ,  $\beta$ の測定結果を示す。風向は基本式(9)から $\gamma$ ,  $\phi_0$ として求められるが, (11), (12)式を用いて校正試験で設定されたプローブと風洞気流のなす角度 $\alpha$ ,  $\beta$ に変換された。横軸は設定された角 $\alpha$ ,  $\beta$ の真値であり, 縦軸は本ヨーメータで測定された値である。(a)図は $\alpha$ , (b)図は $\beta$ の結果である。いずれも45°の直線(実線)によっていけば精度が高いことを示す。図15に示されている測定点は, 図12, 13にプロットされているデータと同じで約60点が示されている。風向測定誤差につ

いて,  $\alpha$ の測定誤差の標準偏差は0.39°,  $\beta$ の標準偏差は0.29°であった。

6. あとがき

STOL実験機「飛鳥」模型の尾翼付近の流れ場をしらべるために, 中谷他が考案したキールチューブ付4角錐台型ヨーメータと同一形状の5孔ヨーメータを作り, 流れ場測定に使用する前にその特性をしらべた。本研究の成果は以下にまとめることができる。

(1) 中谷は多角錐台ヨーメータのうち, キールチューブ付4角錐台型ヨーメータにつき, その測定方法, 校正方法について述べ, 実機搭載用のものを作り実用化した。本報告では, キールチューブ付でない一般的な多角錐台ヨーメータに適用できる基本式を導き, 多角錐台としては3角錐台型で必要十分であることを示した。

(2) 中谷が用いた基本式には, あらかじめ決めなければならない校正係数が12個ある。一方, 本報告では校正係数を9個に減らした基本式を提案した。その結果速度ベクトルを求めるための繰返し計算ステップを減らすことができた。

(3) 中谷は, 当人が提案した基本式を繰返し法で解く場合に, 初期値としてある仮定のもとに基本式を単純化して得られたものを用いた。また, 風向の初期値には収束の遅い $\phi_0$ が含まれている。それに対して, 我々は一般の5孔ヨーメータで風向を求める際に用いられる圧力差に関する校正実験データを用い, 風向の初期値としては収束の速い $\alpha$ ,  $\beta$ を用いた。

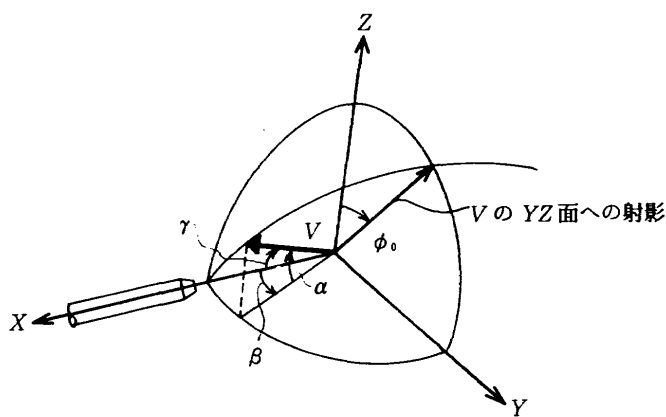


図14 風向( $\alpha$ ,  $\beta$ )

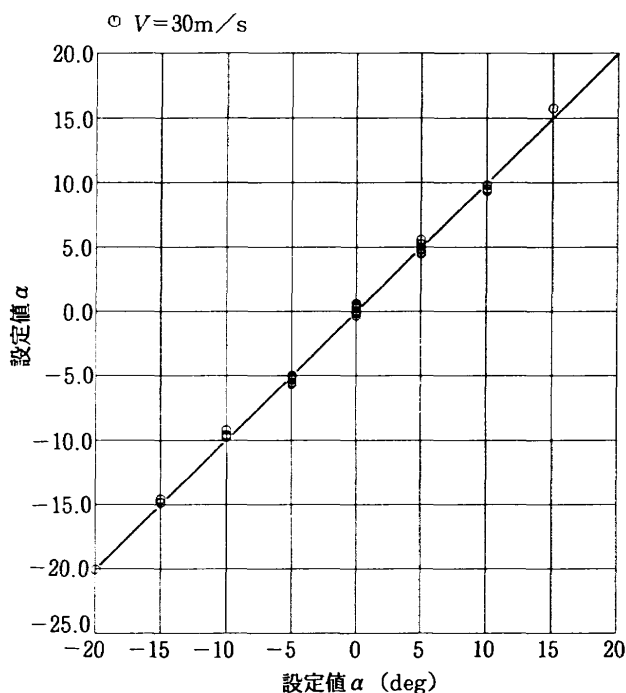


図15(a) 風向( $\alpha$ )測定精度

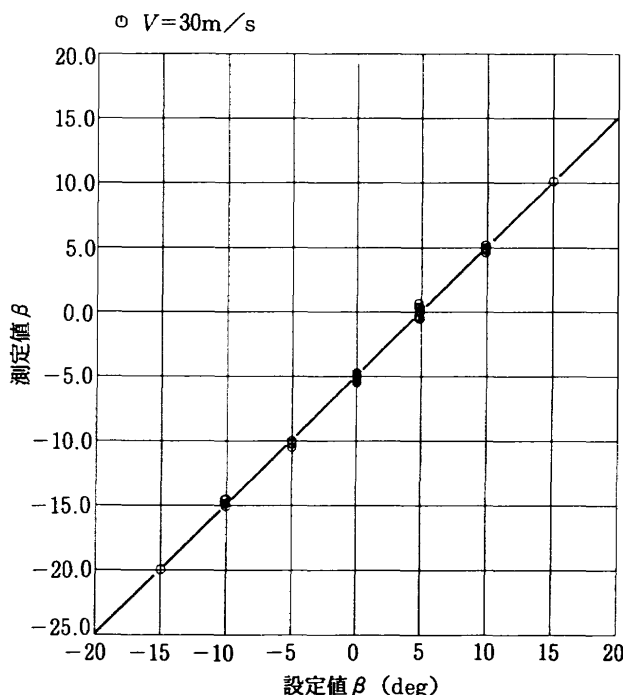


図15(b) 風向( $\beta$ )測定精度

この方法は、中谷の方法にくらべ、収束解に近い初期値を与えることとなった。実際、本論文で提案した基本式を解くのに中谷と同じ計算方法で初期値を与え繰返し計算を行ったが、収束解が得られないケースも生じた。

(4) 本報告で述べたキールチューブ付5孔ヨーメータの動圧、速度、風向の測定精度は、校正係数の少ない基本式を用いたにもかかわらず、中谷の方法にくらべて悪くはない。

基本式を解いて速度ベクトルを算出するに要する時間について比較をしたわけではないが、初期値がより収束解に近いものとなっていること、基本式の項数が少なく計算ステップ数が減少していることを考えると、おそらく計算処理時間は短縮されていると思われる。

キールチューブ付5孔ヨーメータの製作にあって、重要な形状パラメータについては、中谷が考案して成功を納めたのと同じの値を用いたが、パイプの太さ、錐台側面と圧力孔の位置、大きさまで相似形にしなかった上に、総圧計測孔の加工が悪く、軸対称性が確保できなかったことにより、測定可能な風向範囲は狭くなった。

この種のプローブ製作上の問題は製作精度を高めることにより解決する問題であり、注意深く製作することによって、本報告で述べた以上の性能が得られるものと確信している。

本研究において、キールチューブ付5孔ヨーメータの製作にあたって、形状パラメータの開示を含め、製作のノウハウを数えていただいた空力性能部主任研究官の中谷輝臣氏に敬意を評します。

## 参考文献

- 1) 中谷輝臣他；回転式速度ベクトル測定装置，航技研報告 TR-674 (1981/6).
- 2) 中谷輝臣他；特許「多角錐台型ピトー管型プローブ」，PAT.1454343 .
- 3) 中谷輝臣他；航空機の世界速度ベクトル計測用ピトー管（第1報），日本航空宇宙学会第23期年会講演会前刷（1992/4）.
- 4) 中谷輝臣他；航空機の世界速度ベクトル計測用ピトー管（第2報），第30回飛行機シンポジウム前刷（1992/9）.
- 5) 斎藤隆司他；航空機の世界速度ベクトル計測用ピトー管（第3報），第30回飛行機シンポジウム前刷（1992/9）.
- 6) 中谷輝臣他；実機搭載型飛行速度ベクトル計測装置の開発，第49回風洞研究会議（1992/11）.
- 7) 遠藤 浩；風洞概論，航技研技術資料 N-23 (1977/2).
- 8) 遠藤 浩；風洞概論（続編），航技研技術資料 N-34 (1985/11).
- 9) 益田重明；ピトープローブ法，日本機械学会第606回講演会教材，(1985/10).
- 10) R.H. Wickens, C.D. Williams, NAE Aeronautical Note NAE-AN-29 (1985/7).

---

## 航空宇宙技術研究所資料678号

平成7年3月発行

発行所 航空宇宙技術研究所  
東京都調布市深大寺東町7-44-1  
電話 三鷹(0422)47-5911(大代表) ㊎182  
印刷所 株式会社 共 進  
東京都杉並区久我山5-6-17

---