- Rand Corp. Rep., RM-1543, Aug. 24, (1955).
- 16) CAMEL, A. B.: Plasma Physics and Magnetofluid-mechanics, McGraw-Hill Inc., (1963).
- 17) LIN, S.-C., RESLER, E. L. and KANTROWITZ, A.: Electrical Conductivity of Highly Ionized Argon Produced by Shock Waves, J. Appl. Phys., Vol. 26, No. 1, (1955), pp. 95-109.
- 18) CAMEL, A. B., ANDERSON, T. P. and SLAWSKY, M. M.: Magnetohydrodynamics, Northwestern University Press, Evanston, (1962), pp. 67-88.
- 19) 岩崎松之助, 元吉照明: 二次元衝撃波の離脱距離におよぼす磁場の影響について, 電磁流体力学シンポジウム論文集, 東大宇航研, (1967年2月20日~21日), pp. 153-173.

高亜音速における円柱型風向風速計の特性

(その2: 傾斜角のある場合)*

The Characteristics of a Cylindrical Probe at High Subsonic Speeds

(Part 2: The Case having Inclination Angles)

橋本孝明**・大塚新太郎**・二日市 宅**

Takaaki HASHIMOTO, Shintaro OTSUKA and Sadamu FUTSUKAICHI

Abstract

In measuring high subsonic internal flows which are observed in high speed turbomachines such as transonic or supersonic compressors, authors planned to use a cylindrical probe which was supported at both ends, and got satisfactory results in the case of zero inclination angle.

Furthermore, the inclination characteristics of this probe were investigated experimentally and it was revealed that the yaw angle of flow could be easily obtained independently of both Mach number M_∞ and inclination angle α . It was also revealed that the flow component normal to the axis of the probe (total pressure $\bar{P}_0$, Mach number $\bar{M}_\infty$) could be obtained with a fair accuracy from the characteristics of zero inclination angle within the range of not too large inclination angles (about ± 15 degrees).

1. ま え が き

著者らは、遷音速または超音速圧縮機のような高速圧縮機の高亜音速内部流を計測するために、円柱型風向風速計を両持型で使用することを考え、傾斜角 0° の場合についてその高速特性を調べ満足すべき結果を得た¹⁾。

しかし、現実の回転機械内の流れは、たとえ軸流型といえども半径方向の成分を持ち、したがってこのような傾斜した流れに対する円柱型風向風速計の特性を知る必要がある。

一般に、円柱型風向風速計は、その軸に垂直な面内の流れを感知するには好都合であるが、傾斜角を持つ流れに対しては不都合であろうと予想される。しかし、傾斜角に対する特性を実験的に調べてみると、傾斜角のあまり大きくない範囲 ($\pm 15^\circ$ 程度) においては、風速計の軸に垂直な方向の流れの成分が求められることが明らかとなった。したがって傾斜角のあまり大きくない流れの計測には、この円柱型風向風速計は非常に有用であることがわかった。

2. 記 号

M_∞ : 一様流 Mach 数

$\bar{M}_\infty$: 風向風速計の軸に垂直な流れの成分の Mach 数 ($= M_\infty \cos \alpha$) (第2図参照)

P : 一孔プローブの圧力

P_0 : 気流の総圧

$\bar{P}_0$: 風向風速計の軸に垂直な流れの成分の総圧 (第2図参照)

P_s : 気流の静圧

P_A, P_B, P_C : 風向風速計の3つの圧力孔の圧力 (第2図参照)

Y_θ : 方向係数

Y_s : 静圧係数

* 昭和47年11月20日。日本航空宇宙学会第9回中部関西支部合同秋季大会において講演。昭和47年12月8日原稿受理。

** 名古屋大学工学部航空学教室。

Y_T : 総圧係数 $\bar{Y}_T$: P_0 の代わりに $\bar{P}_0$ を使った総圧係数

ΔY_s : 基準 Mach 数の Y_s と他の Mach 数の Y_s との差

 $\Delta Y_{S\text{mean}}$: 種々の θ に対する ΔY_S の平均値 α : 傾斜角 (迎角) ($^{\circ}$) θ : Yaw Angle ($^{\circ}$)添字 b : 基準の Mach 数における値

m : 種々の Mach 数に対する平均値

3. 実験装置

この実験に使われた風洞略図を第1図に示す。吹き出し面積は200mm×25mm (Nozzle I) と100mm×50mm (Nozzle II) の2種類である。供試風向風速計を第2図に示す。傾斜角変化には第3図の装置を使い、ターン・テーブルの回転中心と風向風速計の圧力孔は一致させてある。

4. 予備実験

実用上の見地からは、風向風速計の検定は、回転機械内に近似した風洞ノズル固定壁内で行なわれるのが望ましい。しかし技術面から考えると、ノズル内で傾斜角を連続的に変化させることは難しいので、風洞ノズル外のジェット気流中で実験を行なわざるを得な

第1図 風洞略図

第2図 供試風向風速計

第3図 傾斜角変化装置

第4図 円柱まわりの圧力分布

て、両位置におけるそれが同一であることを確かめておく必要がある。

そこで Nozzle I および II 両者とも、吹き出し面の外 24mm を円柱挿入位置とし、Nozzle I の風洞ノズル内挿入位置（本論文、その 1¹⁾ の挿入位置と同じ、第 1 図の a 位置）の円柱まわりの圧力分布との同一性を調べた。なお円柱をノズル内に挿入した際の流れの Mach 数 M_∞ は文献 (1) の方法により、またジェット気流中の場合は、円柱を挿入せずに吹き出し面上流の壁圧 (Nozzle I は 10 mm, Nozzle II は 50 mm 上流、第 1 図の b 位置) と挿入位置の静圧との関係をもとに求め、円柱を挿入したときにもこの関係が成り立つとして壁圧を補正して、ジェット気流中挿入位置の静圧を求め、Mach 数 M_∞ を計算した。

結果を第 4 図に示す。yaw angle θ を $\pm 60^\circ$ 以内に限れば、Nozzle I のノズル内の円柱まわりの圧力分布と Nozzle II のジェット気流中のそれとはほとんど一致する。Nozzle I の風洞内外で差が大きいのは吹き出し面 (200mm×25mm) のアスペクト比が小さいためと思われる。

以上から同一 Mach 数 M_∞ においては、Nozzle I のノズル内とはほぼ同じ流れが Nozzle II のジェット気流中で得られると考えられ、Nozzle II のジェット気流中 (吹き出し面外 24mm) で円柱型風向風速計の傾斜特性を調べることとした。

5. 実験経過

流れの Mach 数 M_∞ は 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, および 0.82 の 7 種類とし、各 Mach 数につき傾斜角 α (第 2 図, 第 3 図参照) は -30° から $+30^\circ$ まで 5° おきに、yaw angle θ は -20° から $+20^\circ$ まで 2° おきに变化させた。風洞は前述のとおり Nozzle II を使い、予備実験の結果より、吹き出し面外 24 mm のところに風向風速計の圧力孔がくるようにセットし

た。ターン・テーブルの回転中心と圧力孔のあるヨーメーター円柱断面の円の中心が一致させてある。

6. 結果と考察

風向風速計の特性は次の係数の形にまとめた。これらは総圧係数を除いて文献 (1) と同じである。真の流れは、風速計に対し傾斜角と yaw angle を持った

第5図 (a) $Y_\theta, Y_T \sim \theta$ 第5図 (b) $Y_\theta, Y_T \sim \theta$

流れであるが、3つの圧力孔に主たる影響を及ぼすのは風向風速計の軸に垂直な流れ成分であろうと予測されるため、総圧係数については、風速計の軸に垂直な流れの成分の総圧を取って定義した。

$$\text{方向係数 } Y_\theta = \frac{P_B - P_C}{D} \quad (1)$$

$$\text{総圧係数 } \bar{Y}_T = \frac{\bar{P}_0 - P_A}{D} \quad (2)$$

第5図 (c) $Y_\theta, \bar{Y}_T \sim \theta$ 第5図 (d) $Y_\theta, \bar{Y}_T \sim \theta$

$$\text{静圧係数 } Y_s = \frac{(P_s - P_B) + (P_s - P_C)}{2D} \quad (3)$$

$$D = 1/2 \{ (P_A - P_B) + (P_A - P_C) \} \quad (4)$$

上の各係数の yaw angle θ に対する変化を、傾斜角 α をパラメーターとして、一様流 Mach 数ごとにみたものが第5図 (a), (b), (c), (d) 第6図 (a), (b), (c), (d) である。 (α は (-) を、また M_∞ の一部を割愛)

〔1〕 方向係数 Y_θ 方向係数 Y_θ は低 Mach 数を除いて、Mach 数 M_∞ および傾斜角 α に対してほとんど変化しない。したがって Y_θ は傾斜角のある流れにおいても、 α にかかわらず一本のカーブで表わせる。本実験において得られた平均のカーブを第7図に示す。(このカーブは $\alpha = 0^\circ$ における種々の Mach 数における値の平均値である)

〔2〕 総圧係数 $\bar{Y}_T$ 総圧係数 $\bar{Y}_T$ も Mach 数 M_∞ および傾斜角 α に対してほとんど変化しない。したがって $\bar{Y}_T$ は一本のカーブで表わせる。本実験において得られた平均のカーブを第7図に示す。(このカーブも $\alpha = 0^\circ$ における種々の Mach 数における値の平均値である)

第6図 (a) $Y_s \sim \theta$ 第6図 (b) $Y_s \sim \theta$ 第6図 (c) $Y_s \sim \theta$ 第6図 (d) $Y_s \sim \theta$

第7図 $Y_{\theta m}, Y_{Tm}, Y_{sb} \sim \theta$

〔3〕 静圧係数 Y_s 文献(1)において傾斜角が 0° の場合については、ある基準の Mach 数における値からの差 ΔY_s を考え、逐次近似によって一様流 Mach 数 M_∞ と静圧 P_s とを同時に求める方法を述べた。

傾斜角のある場合についても、これと同様の方法が使えないかと考えた。第6図より Mach 数一定のときには、静圧係数 Y_s の傾斜角 α に対する変化は、平行移動とみなすことができ、かつ傾斜角 α を一定にした時の Mach 数 M_∞ に対する変化も平行移動に近い。そこで、ある Mach 数(ここでは $M_\infty = 0.795$)と傾斜角(ここでは $\alpha = 0^\circ$)における静圧係数 Y_s を基準とし、他の Y_s との差を調べた。(第8図(a),(b),(c),(d))

$$\text{すなわち } \Delta Y_s = Y_s - Y_{sb} \quad (5)$$

$$\text{ただし } Y_{sb} = Y_s(M_\infty = 0.795, \alpha = 0^\circ)$$

低 Mach 数 ($M_\infty = 0.402$) では $|\theta| < 15^\circ$ 、高 Mach 数では $|\theta| < 20^\circ$ の範囲で、 ΔY_s はいずれの傾斜角 α についても θ に対してほぼ一定といえる。そこで傾斜角 α ごとに、上の範囲の θ における値の平均値で、各 yaw angle における ΔY_s を代用させることができる。これを $\Delta Y_{s\text{mean}}$ とする。

さて傾斜角のある場合には前述のように風速計が感知し得る流れは、軸に垂直な方向の流れ成分であろうと思われるので、真の Mach 数 M_∞ の代わりに、軸に垂直な方向の Mach 数 $\bar{M}_\infty$ に対して $\Delta Y_{s\text{mean}}$ をプロットすれば、滑らかな一本のカーブになるのではないかと期待される。これを調べたのが第9図であ

第8図 (a) $\Delta Y_s \sim \theta$ 第8図 (b) $\Delta Y_s \sim \theta$ 第8図 (c) $\Delta Y_s \sim \theta$ 第8図 (d) $\Delta Y_s \sim \theta$ 第9図 $\Delta Y_{s\text{mean}} \sim \bar{M}_\infty$

る。

結果は、傾斜角 α が大きくなるにつれて $\alpha = 0^\circ$ の特性からずれる。これは風速計によって感知される流れが完全に軸に垂直な成分のみでなく、平行成分もあるからと考えられる。しかし傾斜角 α の小さな範囲(大体 $|\alpha| < 15^\circ$)では $\alpha = 0^\circ$ の特性で代用できると思われる。

以上得られた係数から、流れの方向 θ 、総圧 $\bar{P}_0$ 、Mach 数 $\bar{M}_\infty$ および静圧 P_s は次のようにして求められる。

〔1〕 方向 θ と総圧 $\bar{P}_0$ (1)式と第7図から θ はすぐに求まり、同時に $\bar{Y}_T$ もわかるので(2)式から $\bar{P}_0$ が簡単に出る。

〔2〕 Mach 数 $\bar{M}_\infty$ と静圧 P_s 風向風速計を使用して実際に流れを計測する場合、傾斜角 α は未知である。したがって静圧特性が前二者と同様、傾斜角 0°

の場合と同じであれば非常に好都合であるが、前述のように完全にそうであるとはいえない。しかし傾斜角 α が小の時には 0° の特性で代用可能とも考えられ、各傾斜角の場合について 0° の特性を用い、Mach 数 $\bar{M}_\infty$ と P_s を求めたところ、 $|\alpha| < 15^\circ$ の範囲では $\bar{M}_\infty$ がほぼ 0.01 の精度で求められることがわかった。

$\bar{M}_\infty$ と P_s を求めるには文献(1)と同様逐次近似を使う。さきに求めた θ から第7図を読み、 Y_{s0} が求まる。次に $\bar{M}_\infty$ を仮定し、第9図より ΔY_s を求め(5)式から Y_s を出す。さらに(3)式より P_s がわかるから、この P_s とさきに求めた $\bar{P}_0$ とで $\bar{M}_\infty$ を求める。この操作を $\bar{M}_\infty$ が収束するまで繰り返せば $\bar{M}_\infty$ と P_s が得られる。

7. 結 論

高亜音速における円柱型風向風速計の、傾斜角のある場合について、次のことが明らかとなった。

〔1〕 流れの方向は Mach 数および傾斜角に関係なく、すぐに求まる。

〔2〕 真の総圧 P_0 は求まらないが、風向風速計の軸に垂直な方向の速度に対応する総圧 $\bar{P}_0$ が Mach 数および傾斜角に関係なく求まる。

〔3〕 静圧係数は Mach 数 M_∞ とさらに傾斜角 α の関数となる。しかし $|\alpha| < 15^\circ$ ならば $\alpha = 0^\circ$ の場合の特性を用いることによって、かなりの精度で静圧 P_s と風向風速計の軸に垂直な Mach 数成分 $\bar{M}_\infty$ が求められる。

なおこの研究を行うにあたり、学生鹿島教昭君には実験を手伝っていただき、感謝しております。

参 考 文 献

- 1) 大塚新太郎, 橋本孝明, 二日市宅, 横井信哉: 高亜音速における円柱型風向風速計の特性その1: 傾斜角 0° の場合; 日本航空宇宙学会誌 19 巻 210 号 1971.
- 2) S. OTSUKA and T. HIKI: The Character of Three Hole Cylindrical Probe at Inclined Position; Report of Transportation Technical Research Institute No. 28, March 1958.
- 3) E. OWER and R.C. PANKHURST: The Measurement of Airflow, Pergamon Press Ltd., London, 1966.