

多孔ヨーメータによる動圧および 静圧勾配のある流れの測定

On the Flow Measurement in Dynamic and Static Pressure Gradients
by means of a Multi-hole Yawmeter

田代 伸一*・吉識 晴夫*
Shinichi TASHIRO and Haruo YOSHIKI

1. はじめに

多孔ヨーメータは各受圧孔の間の差圧を測ることにより、ヨーメータの設置方向に対する流れの角度や静圧、動圧を知るのだが、このために前もって静圧や動圧が既知である流れの中で検定し、各受圧孔の方向特性を線図にしておく必要がある。このための検定流には一般に全圧分布が一樣な平行流を用いるが、実際の測定では静圧や速度が一樣でないことが多く、検定結果をそのまま用いたのではかなりの誤差を生ずる。筆者らは測定結果をもとにした繰返し計算による補正を行い、拡大管内の旋回流れに適用して従来と同種の実験と比較して非常に精度の良い測定結果を得たので、その補正方法について報告する。

2. 一樣流中での方向係数の決定

例として5孔アローヘッド型ヨーメータについて述べる。図1のようにヨーメータ頭部の方向に対して、流れのヨー角、ピッチ角がそれぞれ θ 、 δ である場合の各受圧孔の方向係数 K_n ($n=1\sim 5$)は次式で与えられる。

$$K_n(\theta, \delta) = (p_n - p_0) / (\rho q_0^2 / 2) \quad (1)$$

ここで、 p_0 、 q_0 はそれぞれ流れの静圧および速度で、 p_n は n 番目の受圧孔の観測する静圧であり、 ρ は流体密度である。また流れの全圧を P_0 とすると、

$$P_0 = p_0 + \rho q_0^2 / 2 \quad (2)$$

であるから、一樣流中では式(1)は次のように書ける。

$$K_n(\theta, \delta) = 2 \{ (P_0 - p_0) - (P_0 - p_n) \} / (\rho q_0^2) \quad (3)$$

この K_n を P_0 、 p_0 、 q_0 が既知である検定流中で、既知の θ 、 δ に対して求めておけば以下の手順で未知の流れの θ 、 δ 、 P_0 、 p_0 、 q_0 を求めることができる。

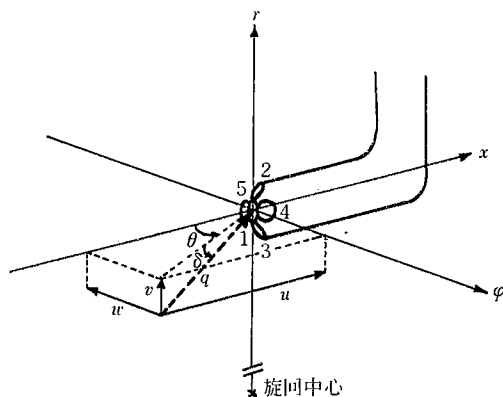


図1 5孔ヨーメータと流れの方向 (数字は受圧孔の番号)

① 各受圧孔の指示圧力から Δp_{15} 、 Δp_{23} 、 Δp_{54} を求める (Δp_{mn} は m 番と n 番の受圧孔の差圧、 $p_m - p_n$ を表す。番号は図1参照)。 $K_n(\theta, \delta)$ を K_n と略記すると、

$$\Delta p_{mn} = (p_m - p_0) - (p_n - p_0) = (K_m - K_n) \rho q_0^2 / 2 \quad (4)$$

$$\xi = \Delta p_{45} / \Delta p_{15} = (K_4 - K_5) / (K_1 - K_5) \quad (5)$$

$$\eta = \Delta p_{23} / \Delta p_{15} = (K_2 - K_3) / (K_1 - K_5) \quad (6)$$

となる。この (ξ, η) は (θ, δ) と1対1に対応し検定で対応関係を線図にしておけば、それを用いて、得られた (ξ, η) から (θ, δ) を知ることができる。

② 式(4)より、流れの動圧は、

$$\rho q_0^2 / 2 = \Delta p_{mn} / (K_m - K_n) \quad (7)$$

であるから、検定で (θ, δ) に対する、 $K_m - K_n$ (たとえば $K_1 - K_5$)を線図にしておけば、①で求めた (θ, δ) における $K_m - K_n$ を知ることができ、上式により速度 q_0 がわかる。これより円柱座標系各方向速度成分は次のように求められる。

*東京大学生産技術研究所 第2部

$$\left. \begin{aligned} u &= q_0 \cdot \cos \delta \cdot \cos \theta && (\text{軸方向}) \\ v &= q_0 \cdot \sin \delta && (\text{半径方向}) \\ w &= q_0 \cdot \cos \delta \cdot \sin \theta && (\text{周方向}) \end{aligned} \right\} (8)$$

③ 式(1), (2)と(4)より流れの静圧 p_0 および全圧 P_0 は次のように得られる。

$$p_0 = p_m - K_m \frac{\Delta p_{mn}}{K_m - K_n} \quad (9)$$

$$P_0 = p_m + (1 - K_m) \frac{\Delta p_{mn}}{K_m - K_n} \quad (10)$$

以上からわかるように、5孔ヨーメータの場合、必要な線図は、 $\langle (\theta, \delta) \rightarrow (\xi, \eta) \rangle$, \langle 各 (θ, δ) に対する $K_m >$ および \langle 各 (θ, δ) に対する $K_m - K_n >$ の3つである(筆者らは、 m として1, n として5を用いた。また図2, 図3に線図の例を示す)。なお既に述べたように各受圧孔を通る流線の動圧と静圧が一樣であることが前提である。

3. 動圧および静圧勾配による誤差

動圧や静圧の勾配がある流れでは前述の前提が崩れるので補正が必要となる。境界層内や薄翼の後流のように静圧は一樣に近く、動圧のみに勾配がある場合の補正法は既に、生井・井上¹¹⁾によって導かれている。筆者らの方法はこれを拡張し、拡大管(円錐ディフューザ)内の旋回流で動圧も静圧も半径方向に大きな勾配をもつ流れに適用したものである。

今、全圧勾配のある方向に、受圧孔3, 1, 2が図1のようにあるとする。各受圧孔の中心を通る流線の全圧静圧、速度をそれぞれ $P_{0n}, p_{0n}, q_{0n} (n=1 \sim 3)$ とすると、

$$P_{0n} = p_{0n} + \rho q_{0n}^2 / 2 \quad (11)$$

である。また各受圧孔個別には全圧 P_{0n} の一樣流れと近似すれば、式(1)から n 番目の受圧孔の方向係数は、

$$K_n = (p_n - p_{0n}) / (\rho q_{0n}^2 / 2) \quad (12)$$

と表せる。したがって指示圧力 p_n は、

$$p_n = p_{0n} + K_n \cdot \rho q_{0n}^2 / 2 \quad (13)$$

となる。この関係を受圧孔2と3に用いると、そのみかけの差圧は次のように書ける。

$$\begin{aligned} \Delta p_{23} &= p_2 - p_3 \\ &= \left(K_2 \cdot \frac{\rho}{2} q_{02}^2 + p_{02} \right) - \left(K_3 \cdot \frac{\rho}{2} q_{03}^2 + p_{03} \right) \\ &= (K_2 - K_3) \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{\rho}{2} q_{02}^2 + \frac{\rho}{2} q_{03}^2 \right) \\ &\quad + \frac{1}{2} (K_2 + K_3) \left(\frac{\rho}{2} q_{02}^2 - \frac{\rho}{2} q_{03}^2 \right) \\ &\quad + (p_{02} - p_{03}) \end{aligned} \quad (14)$$

上式の最終辺はみかけの差圧をもたらす因子を表して

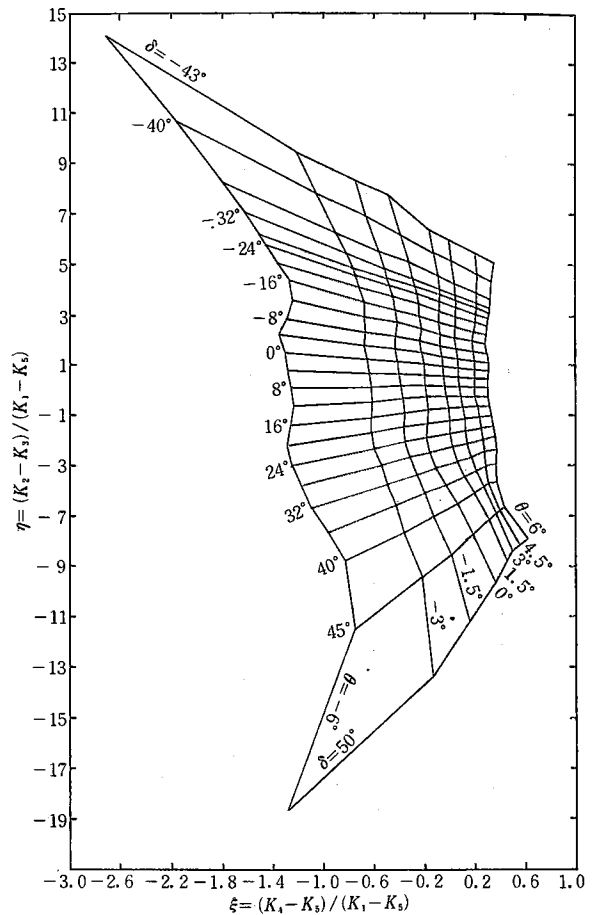


図2 (θ, δ) と (ξ, η) の関係(一樣流)

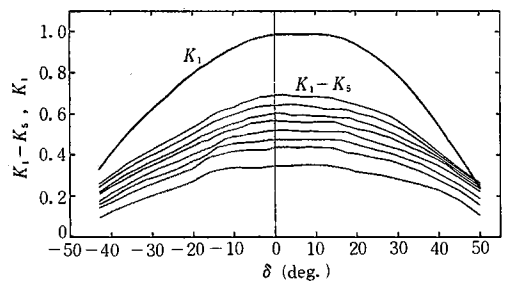


図3 (θ, δ) と $K_1, K_1 - K_3$ の関係(一樣流)
 $(K_1 - K_3$ は上から $\theta = 6^\circ, 4.5^\circ, 3^\circ, 1.5^\circ, 0^\circ, -1.5^\circ, -3^\circ, -6^\circ$; K_1 は θ によっては変化が小さいので1本の線で示した)

いる。ここで、

$$\frac{1}{2} \left(\frac{\rho}{2} q_{02}^2 + \frac{\rho}{2} q_{03}^2 \right) \approx \frac{\rho}{2} q_{01}^2 \quad (15)$$

とみなせば、第1項は式(7)より、ヨーメータの中心(受

研究速報

圧孔1)を通る流れによる、2と3との間の真の差圧 (Δp_{23})を表す。第2項は2と3との動圧勾配が存在するために生ずる付加的な差圧、第3項は同じく静圧勾配に起因する差圧である。したがってヨーメータ中心の流れの全圧、動圧、静圧を知るためには第2、3項を除かなければならない。式(14)を、受圧孔2、3の距離 Δr が小さいとみなして書き直すと、真の差圧 Δp_{23} は、

$$\Delta p_{23} = \Delta p'_{23} - \left\{ \frac{1}{2} (K_2 + K_3) \cdot \frac{d}{dr} \left(\frac{\rho}{2} q_{01}^2 \right) + \frac{d}{dr} (p_{01}) \right\} \Delta r \quad (16)$$

と書ける。上式からわかるように、補正のためには検定時に (θ, δ) と $K_2 + K_3$ との関係を示す線図も得ておかなければならない。また動圧と静圧の勾配は未知なので、測定値から出発した繰り返し計算が必要である。

4. 円錐ディフューザ内の旋回流れの測定

円錐ディフューザ内の旋回流れは、動圧、静圧とも半径方向に大きな勾配があり、精度の良い測定が非常に難しい流れである。従来の実験報告では、測定で得た軸方向速度分布を積分すると10~20%に及ぶ流量誤差を生じている。筆者らはこの流れに対して前節の補正を施しながら測定を行った。

図4に示すように、旋回の安定化のために心棒(直径28mm)を設置した円錐ディフューザに上流で自由渦タイプの旋回を与えた空気を流し、広がり部の上流200mm

の断面(ST.1)、入口面積の約2倍の面積の断面(ST.2)および約3倍の面積の断面(ST.3)で、3孔ないし5孔ヨーメータを用いて半径方向にトラバースして測定を行った。

用いたディフューザは片側広がり角(ϕ)が4°, 7°, 10°および15°の4種で、図5に $\phi=7^\circ$ の場合の各断面における全圧分布の例を示す(補正後の値)。ここで旋回の強さは、次式で示す m_1 で表している。

$$m_1 = \frac{2\pi \int_{R_{i1}}^{R_{o1}} uwr^2 dr}{R_{o1} \cdot 2\pi \int_{R_{i1}}^{R_{o1}} u^2 r dr} \quad (17)$$

R_{i1} は心棒の半径、 R_{o1} は ST.1 の半径、 \bar{P}_{d1} は ST.1 での流量平均動圧である。

補正の手順は以下のようなものである。

① ヨーメータの設置方法はステムが管軸に垂直になるようにしており、また流れは軸対称とみなせるので周方向に位置する3つの受圧孔1、4、5の指示圧力は一

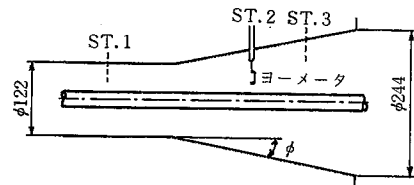


図4 測定方法

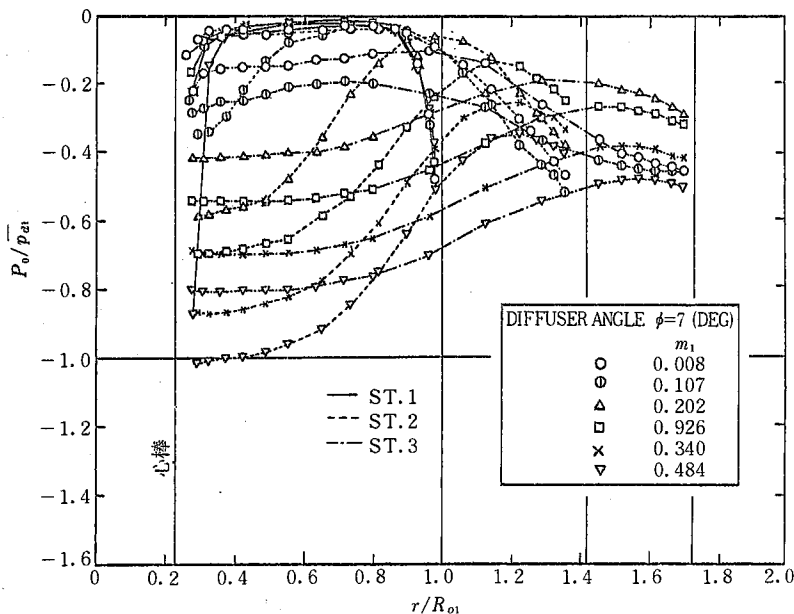


図5 全圧分布の例

様流とくらべて誤差はないとして、 Δp_{23} (図1参照) に対する補正のみを行う。

② 補正に際して、管壁および心棒上の静圧は真の値とみなす。

③ 各受圧孔の指示圧力から、一様流での検定線図を用いて各測定点における、 θ , δ , p_0 , P_0 , K_2+K_3 , u , v , w を求める。これらの値を第0回目の値としてたとえば、 $\theta^{(0)}$, $p_0^{(0)}$ などと書く。

④ 次に管壁に最も近い点に対する補正を行う。このとき、式(16)の補正項の静圧勾配は管壁上の静圧と当該点に隣接する内側の測定点の $p_0^{(0)}$ とから得る中心差分におきかえる(間隔は必ずしも均一ではない)。動圧勾配も同様だが管壁上の動圧を0とするのではなく、内側の2点からの外挿値を管壁上の値とする(このとき、この外挿値と壁面静圧の和が、当該点の $P_0^{(0)}$ より大きくなってしまふ場合は、内側の2点の $P_0^{(0)}$ による外挿値から壁面静圧を引いた値を管壁上の動圧とする)。みかけの差圧 $\Delta p_{23}'$ からこの補正項を引いた値を $\Delta p_{23}^{(1)}$ とし、

$$\eta^{(1)} = \Delta p_{23}^{(1)} / \Delta p_{15} \quad (18)$$

により各線図から $\theta^{(1)}$, $\delta^{(1)}$, $p_0^{(1)}$, ……を求める。

⑤ 順次内側の点に対して同様の補正を行うが、このとき当該点の外側の測定点の値には1回目の値(たとえば $p_0^{(1)}$)を用いる。この手続きを進めて心棒に最も近い点となったときには、内側の静圧の値には心棒上の静圧、動圧の値には心棒に隣接する2点による外挿値を用いる。

⑥ 次に外側に向かって補正を行い $\theta^{(2)}$, $\delta^{(2)}$, $p_0^{(2)}$, ……などを求める。

⑦ n 回目に求めた $\Delta p_{23}^{(n)}$ と $\Delta p_{23}^{(n-1)}$ との差が断面内のすべての点で水柱 0.1 mm 以下になるまで④~⑥を繰り返す。

以上の手続きは補正の各回ごとに線図に戻らなければならぬので手計算では非常に大変だが、筆者らは各線図を大型計算機に記憶させて行った。本実験の場合、管壁上と心棒上の静圧が信頼できるので繰返し回数は強い旋回の場合でも7~10回程度ですむ。

図6に補正前後の軸方向速度成分と静圧分布の例を示す。とくに管壁および心棒の近傍での補正の重要性が明瞭に表されている。とりわけ管壁近傍は旋回が強い場合測定値そのままでは動圧を過大に、静圧を過小に示す傾向があり、このため積分流量が実際より大きくなるのであると考えられる。

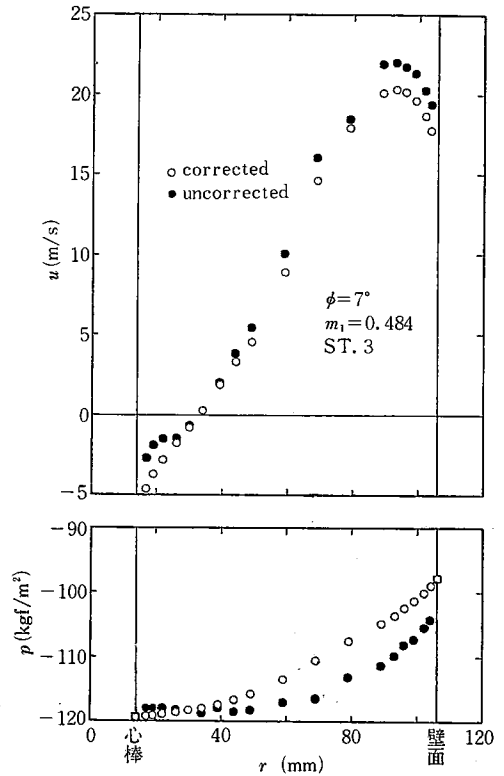


図6 補正の効果

5. む す び

本補正法は、測定誤差の主因が動圧および静圧勾配である場合には非常に有効である。また、管壁や心棒上の静圧という信頼できる値がある場合は繰返しの収束が速い。したがって、測定誤差の主因が異なる場合、たとえばヨーメーターのステムの影響、流れの乱れによる場合などは別の補正法と併用するか測定方法自体を変える必要がある。また適用例は軸対称流だが一般の3次元流では4, 5番間の勾配も考慮する必要がある。なお、本補正法は測定値の多少のばらつきは滑らかにするという利点もある。(1981年6月29日受理)

参 考 文 献

- 1) 生井武文・井上雅弘：「速度および圧力勾配のある流れの方向計測(1),(2)」, 機械の研究, Vol. 22, No. 2; No. 3