

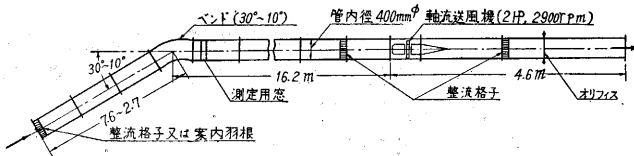
# ピトー管による水車流量測定法の基礎研究

—水圧管内の流れにおよぼすベンドの影響—  
 A Study of Measurement of the Turbine Discharge by Pitot-tube.  
 —The Effect of Bends on Flow in a Penstock.—

古 屋 七 郎

**緒言** ピトー管による水圧管内の流速測定から水車流量を求めるピトー管法は、わが国ではかなり広く行なわれているが、この場合水圧管の曲がりの部分（ベンド）によって誘起されるうずや、その他なんらかの原因によって生じた旋回成分が、ピトー管の指示にどのような影響を与えるか、あるいはそれらの旋回成分の減衰の程度、したがってまたベンドより流速測定位置までの必要距離等の点についてはあまり明らかにされていない。本報告はピトー管による管内流量測定の基本的研究として、ベンドによる流れの方向偏位および管壁の各点の静圧変化を空気を用いて実験的に調べたものである。

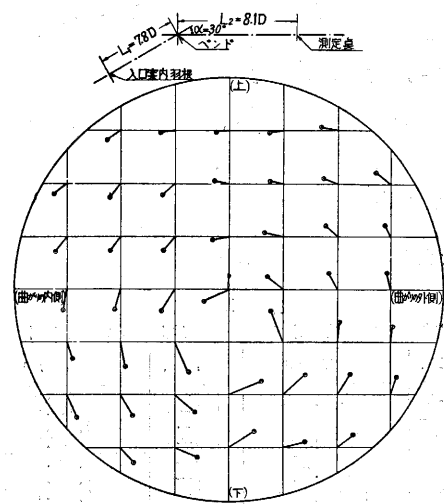
**実験装置および実験方法** 第1図に使用した実験装置の概略を示す。ダクトは 0.8 mm 厚、内径  $D=400\text{ mm}$ 、全長約 25 m、ベンドはその方向変化の角度  $\alpha$  が  $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$  の3種でいずれもその中心軸の長さが等しいものである。流れの方向の測定には、管内に格子状にはった鋼線に結んだ細い糸（長さ 30 mm）の先端に近い位置を垂直および水平の2方向から同時に窓を通してカセットメータで測定した。静圧測定には管壁の上下左右4ヶ所の静圧孔（口径  $0.4\text{ mm}$ ）による静圧をゲッチングン型精密圧力計を用いて測定した。  $30^\circ$  のベンドを用い



第1図 実験装置

た場合について、これらの測定管をベンドの上下流に移動して同様の測定を行ない、ベンドから測定点までの距離と流れの方向変化および静圧変化との関係を調べた。また以上の測定をベンド上流の流れが平行流（ダクト入口に整流格子を置いたとき）、および旋回流（ダクト入口に案内羽根を設置したとき）の二つの場合について測定を行なった。実験中の管内平均流速はほぼ  $10.5\text{ m/s}$ （平行流）、および  $8.5\text{ m/s}$ （旋回流）であり、レイノルズ数  $Re = vD/\nu$  はそれぞれ  $2.8 \times 10^5$ 、 $2.3 \times 10^5$  であった。（ $\nu$  は空気の動粘性係数）。

**実験結果** 流れの方向測定結果の1例を第2図に示す。これはカセットメータで読みとった糸の変位を、比較に便なるように、すべて糸長 20 mm の場合に換算して

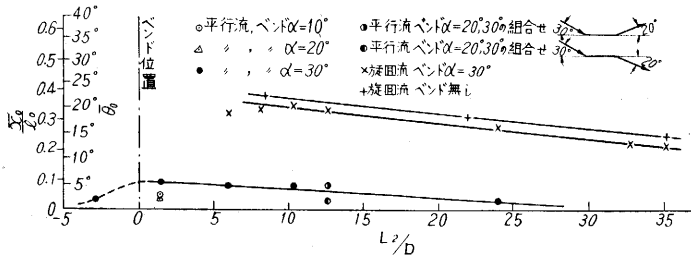


第2図 流れの方向測定結果の1例（旋回流）

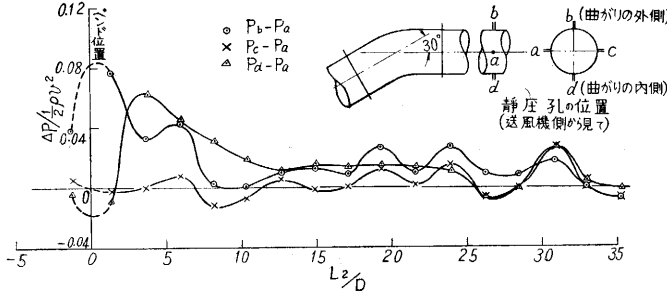
送風機側より眺めた図に改めたものである。第3図はそれぞれの測定断面内の各糸の変位の平均値  $\bar{x}_0$  とベンド中心からの距離（下流に向かって+）との関係を示したものである。図中

$$\bar{x}_0 = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{0i}^2/i)}, \quad \bar{\theta}_0 = \sin^{-1}\left(\frac{\bar{x}_0}{l_0}\right), \quad l_0 = 20\text{ mm}$$

で、 $x_{0i}$  は糸長 20 mm の点の軸方向からの変位の水平成分、 $i$  は測定断面内の位置を表わす。変位の垂直成分には重力による糸の垂れ下りの影響（糸長 20 mm の位置ではほぼ  $0.5 \sim 1.0\text{ mm}$  程度）を含んでいるので、水平成分のみの平均値を旋回の大さを示す目安とした。第3図からわかるように方向変化が  $30^\circ$  以下のベンドのみによる流れ（ベンド上流は平行流）の方向変化はベンド直後でもかなり小さな値  $\bar{\theta}_0 \approx 5^\circ$  であり、 $L_2/D$  に対してほぼ直線的に  $\bar{x}_0/l_0$  の値が減少している。またベンドより上流には余り影響を与えていない。2種のベンド ( $\alpha = 20^\circ, 30^\circ$ ) を直列に用いた時では  $20^\circ + 30^\circ = 50^\circ$  の場合は、 $\alpha = 30^\circ$  のみに比べて、流れの方向変化は大きい。  $30^\circ - 20^\circ = 10^\circ$  すなわち両ベンドの軸方向変化を反対にとりつけた場合には、 $\alpha = 30^\circ$  の場合に較べて、かなり旋回成分が減少するともうかがわれる。ベンド上流の流れが旋回流の場合には旋回の程度 ( $\bar{x}_0/l_0$ ) は平行流の場合より極めて大きく、ベンドより  $35D$  離れた下流においても  $\bar{\theta}_0 = 12^\circ$  の大き



第 3 図 ベンドによる流れの方向偏位



第 4 図 静圧指示値の相違 (平行流)

な値を示している。旋回成分の減少の割合は平行流の場合とほぼ等しい。なおこの場合平行流と異なりベンド付の方が旋回の割合が小さい。第 4 図は静圧分布測定結果の 1 例で、管壁の同一断面内の上下左右 (送風機側より見て) 4 ヶ所の静圧孔による静圧測定値の相違を調べるために、上部の静圧孔を基準にとり、これと他の 3 孔との差圧を測定し、その差圧をその時の管内平均流速ヘッドで割った無次元数で表わしてある。平行流の場合ベンド中心より 10D 程度下流から各静圧値はほぼ等しくなるが、それでも両静圧孔とも上部静圧孔よりいくぶん高い指示を与える傾向があるようである。ベンド出口に近いところで (1.4D)、曲がりの内側の静圧が急に減少しているのは流れの剝離によるものであろう。なおベンドの上流側におよぼす影響は流れの方向変化と同様に極めて小さい。旋回流の場合には、平行流の場合に比して各静圧孔による測定値の相違がはなはだしく、しかもその相違の程度がベンドの距離によって急激に変化している。これは特にベンド下流約 22D 付近まで著しいが、この原因は流れの方向測定結果と対比してみて、旋回流の渦の中心の偏りが原因と思われる。したがって旋回成分がある場合には、管壁における静圧測定位置に十分注意しなくてはならない。

**吟味** 以上の結果から、管内流量をピトー管で測定する場合のベンドの影響を調べてみる。流れが管軸と測定点とを含む平面に対して  $\theta^\circ$  傾いて (旋回して) いる場合の真の流量  $Q$  に対する測定流量  $Q'$  の誤差  $\epsilon$  は

第 1 表 ピトー管による水車流量測定誤差の推定 ( $\alpha=30^\circ$ )

ベンド上流	$L_2/D$	$\bar{\theta}$	$\cos \bar{\theta}$	$\zeta_\theta/\zeta_0$	$(\Delta P / \frac{1}{2} \rho v^2)_{\max}$	$\epsilon_\theta (\%)$	$\epsilon_{\max} (\%)$
平行流	5	4.7°	0.997	1.000~0.985	$\pm 0.054$	-0.5~+0.3	-3.2~+3.0
"	10	3.2°	0.998	1.000~0.990	$\pm 0.029$	-0.3~+0.2	$\pm 1.8$
"	20	2.2°	0.999	1.000~0.995	$\pm 0.022$	-0.1~+0.1	$\pm 1.2$
旋回流	10	19.8°	0.941	0.845~0.975	$\pm 0.253$	-2.3~+4.8	18~-15
"	20	16.2°	0.960	0.907~0.998	$\pm 0.170$	-0.9~+4.1	13~-9
"	30	13.6°	0.969	0.933~1.000	$\pm 0.082$	-0.2~+3.2	7.6~-4.2

$$\epsilon = \frac{Q' - Q}{Q} = \frac{1}{\cos \theta} \sqrt{\frac{\zeta_\theta}{\zeta_0}} \left( 1 - \frac{1}{2} \frac{\Delta H_s}{v^2 / 2g} \right) - 1$$

で表わされる。(簡単のため一測定点の値で代表した)。ここに  $\zeta_0, \zeta_\theta$  はそれぞれ  $\theta = 0$  および  $\theta = \theta$  の時のピトー管係数、 $v$  = 流速 [m/s]、 $\Delta H_s$  = 管壁静圧孔と測定点の真の静圧との差 [ $m A_r$ ] である。 $\Delta H_s = 0$  の時の  $\epsilon = \epsilon_\theta$  とし、 $\Delta H_s$  に同一断面の各管壁静圧孔による測定値の差の最大値を用いた時の  $\epsilon = \epsilon_{\max}$  と記す。前述の結果 (第 3, 4 図) から  $\epsilon_\theta, \epsilon_{\max}$  を算出した例を第 1 表に示す ( $\zeta_\theta/\zeta_0$  の値は各種のピトー管の実測値からその範囲を求めた。なお簡単のため  $\theta = \bar{\theta}$  とした)。この表から平行流の場合ベンドによる方向変化のみの流量測定におよぼす影響はきわめて少ないが、静圧孔の位置の相違による影響が比較的大きいことがわかる。ベンド上流が旋回流の場合には、流れの旋回がピトー管係数におよぼす影響よりも静圧孔の違いによる影響が特に大きい。たとえばベンドより 10D 下流 (流れの方向の傾き  $\bar{\theta} \approx 20^\circ$ ) でも  $(\epsilon_\theta)_{\max} = 4.8$

%であるのに反し、静圧孔の相違による影響を加えた誤差の最大値 ( $\epsilon_{\max} = 18\%$ ) にも達するし、30D 下流でもこの値は 7.6%~4.2% を示している。水車水管の入口にはこの実験に用いたような案内羽根はないが、水が上水槽から旋回しながら水管内に流入するような場合には、入口に案内羽根がある場合と同様な流れの状態を示すことが予想される。流速測定点の真の静圧を知ることにはかなり困難である。管壁における静圧孔の位置の流量測定におよぼす影響が上述のように大きいことから、ベンド上流に旋回流成分の存在する時には測定値に高い精度が望めない。

**結語** レイノルズ数が相違すると、ベンドにおける流れの剝離点が異なり、流れの方向および管壁の静圧もいくぶん相違するから、実際の水管で同様な実験を行なうことが望ましいが、この実験範囲では、ベンド上流に旋回成分がない場合のピトー管による流速測定位置として、上流側にはほぼ 5D、下流側にはほぼ 15~20D 必要であるといえよう ( $\alpha \leq 30^\circ$ )。旋回成分が存在するときは測定流量に高い精度は望めない。本研究にあたり終始ご指導をいただいた当研究所石原智男助教授、井田富夫研究員に深く感謝申し上げる。この研究は東京電力 KK の委託研究費による。 (1959. 9. 28)

(注) 1)  $45^\circ \sim 180^\circ$  のベンドの水頭損失および静圧分布については下記論文がある。

伊藤英光: 東北大学高速力学研究所報告 11 巻 (1955), 109 号; 12 巻 (1956) 113 号。