

熱線による非定常逆流域の流速測定法

溝田, 武人
九州大学応用力学研究所 : 助手

岡島, 厚
九州大学応用力学研究所 : 助教授

<https://doi.org/10.15017/4743563>

出版情報 : 應用力學研究所所報. 45, pp.353-367, 1976-11. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :



熱線による非定常逆流域の流速測定法

溝 田 武 人*
岡 島 厚**

概 要

非流線型物体のまわりの流れのように逆流を含んで周期的に変動する2次元非定常流の流速ベクトルを特殊な熱線流速計を使って定量的に計測する方法を調べた。まず過去において開発された逆流を感知する特殊な熱線プローブを概観しその中で1次元非定常流の測定に使われてきたタンデム型熱線プローブがこの種の2次元非定常流の計測に発展的に適用できる可能性があることをのべた。次に実際に試作したタンデム型熱線プローブの応答周波数特性、直線性および方向特性を調べた。そして2次元非定常流の性質から本プローブで流速ベクトルが測定できることを示し、実際に風洞実験によって、正方形角柱のまわりの流速の定常成分を調べた。その結果剝離領域の時間平均的な大きさ、および後縁近くの逆剝離領域の存在が明らかになった例を示した。また断面比1/2, 1/4角柱後流の速度プロファイルを本プローブと単線式熱線で測定し、その結果を比較して、後者の欠点を指摘した。本プローブを使って流速を測定するために熱線プローブ精密トラバース装置を試作した。

1. ま え が き

円柱や角柱等の非流線型物体のまわりのいわゆる剝離した流れについては古くから多くの人々によって興味深い研究が続けられている。さらに最近においてはこれらの鈍い物体に関するうず励振、ギャロッピング、振りフラッタなどの空力弾性的不安定現象の研究が進められているが、この種の物体一流体系の不安定現象の流体力学的解明を試みるために、物体が静止および振動状態にあるときの周囲の流れの挙動を知ることが流体力学的に重要であるように思われる。しかしながら、これらの物体に空力弾性的不安定現象が発生する場合、周囲の流れのレイノルズ数は比較的高く流れは剝離して後流にはカルマン渦列が形成され、流速ベクトルは空間的にも時間的にもきわめて大きく変化し、逆流を生じている領域もあって定性的にも複雑な様相を呈している。このような物体まわりの流速ベクトルの定常および非定常成分を定量的に測定するためにまず問題になるのは流速計である。従来から使われているピトー管は定常なベルヌーイの定理を応用したものであり、流速の定常成分に比較して非定常成分が充分大きい場合には使うことができない。また周波数応答特性の良い流速計として利用されている単線式の熱線は方向特性を持たないので逆流のない流速ベクトルの絶対値のみ検出するには有効であるが、物体近くなどで逆流が生じている部分では無力である。従って、熱線で測定した平均速度分布は逆流域で反転(W-Shaped¹⁾)されて現われたり、さらに非定常成分が重畳されて平均流速が零を示さない場合や逆流のた

* 九州大学助手, 応用力学研究所

** 九州大学助教授, 応用力学研究所

めに得られた信号の物理的な意味が不明確になる場合がある²⁾、物体近くの流速の測定には限界があった。このような理由で、本研究は2次元の鈍い物体まわりの流れのように逆流を含む流速ベクトルの定常および非定常成分を定量的に測定する方法を開発することを目的とし、試作した特殊な熱線プローブと精密トラバース装置を使って流速ベクトルを測定する方法を述べたものである。

2. 従来開発された特殊な熱線プローブ

逆流を含む非定常流速を計測できる特殊な熱線プローブは現在までに数種試作されている。このような流速を定量的に検出できるプローブが具備すべき条件として、周波数応答特性が高いこと、レイノルズ数の依存度が少なく広い風速範囲で良好な出力直線性が得られること、プローブ自身またはその支持部分により流れを乱さないこと、プローブの製作が簡単で検出用の電気回路を含めて雑音やドリフトが少なく出力が安定していること、などが挙げられる。これらの条件から、試作されたプローブはいずれも単線式の熱線を組み合わせて逆流を検出できるように工夫されている。以下、ほぼ開発された順に概観する。

浅沼ら³⁾は自動車用機関の燃料流量の測定を噴射管系内で行うために、流れの方向を識別でき、しかもステップ流に対する応答の時間おくれが2~3 msec というタンデム熱線形の燃料流量計を試作した。これは従来から使われている単線式熱線を2本タンデムに配置し、2本の熱線の間を絶縁塗料で被覆したものでその断面は、ほぼ、1:5の厚み比の楕円形(長径約60 μ)をしている。そして楕円形の長軸を流れ方向に平行に配置すれば、前後縁にうめ込まれた熱線から周囲流体への強制熱伝達量が大きく相違する。そこで、この2本の熱線をブリッジ回路に組み込むことによって管内1次元流または剝離した翼の表面近く⁴⁾のようなほぼ平行流と考えられる場合のかなり激しい逆流域を含む流れの場の流速の測定を行なった。この流量計は、燃料流量の測定に高い安定性があると報告している。

Bradbury ら⁵⁾は逆流を含んで大きく乱れた流速の場の性質を調べるために、pulsed-wire を試作した。これは、1本の熱線(pulsed-wire)をはさんで、それに直交させて近距離に2本の熱線(sensor wires)を配置させた形状である。そして流れの中でpulsed-wireに適当なパルス電圧を印加すると加熱された後流は、流れ自身がトレーサーとなって一方のsensor-wireに感知される。この時間遅れを検出して流速の絶対値を求め、感知したsensor-wireのpulsed-wireに対する相対的な位置関係によって流れの方向を知ることができる。欠点として、信号は本質的に不連続量であるので、これをほぼ連続量にするために電気回路が複雑になること、pulsed-wireに対する流れの流入角度が大きくなると出力の直線性が保証されないこと、などがあげられる。

Dowing⁶⁾は正逆流がある1次元の非定常流を調べるために、1本の主熱線(anemometer hot wire)に対してその両側に直交状に各々0.8 mm 間隔で抵抗温度計(resistance thermometer)として作動する2本の細線を配置させたプローブを試作した。主熱線は、流速の絶対値を検出すると同時に、流れの中にわずかにだけ加熱された後流を生み出すので、これを2本の抵抗温度計のうち的一方で検出すれば流れの方向がわかる。逆流が生じている場合には、この信号を使って、流速の絶対値を電氣的に反転させれば、流速は、ほぼアナログ量として出力する。このことがBradbury らのPulsed-wire と違う

点である。このプローブは流速± 20 m/sec. 振動数 50 Hz の 1 次元定非常流の計測に良好な結果を得たが、流れ方向の変化に対する出力が連続的に変化することは期待できない。

さらに、辰野ら⁷⁾は、円柱後方の逆流域の大きさを水槽実験により測定するために、細いニクロム線の両側に白金線を 2 本平行に並べ、ニクロム線を加熱して、その熱後流を白金線で感知させて、正逆流を知るプローブを開発した。そしてレイノルズ数 50~10⁴ の広い範囲における円柱後方の逆流域の大きさを調べた。このプローブは、流速の絶対値は計測できないが、時間平均的に流速が零となる wake stagnation point を検出するためには有効である。

種子田ら⁸⁾は、風洞実験により振動平板まわりの非定常流を調べるために、簡単な熱線プローブを試作した。まず直径 1 mm 程度の金属棒の両側に約 1 mm 間隔で 2 本の熱線を金属棒に平行に張る。金属棒の上流側と下流側の冷却効果に差が生ずるので、この熱線の各々をホイートストブリッジの二辺に入れることによって、流れの正逆を検出することが可能である。原理が簡単で定性的には、良い信号を得ることができるが、流れ方向が変化すると下流側の熱線が金属棒の後流からはずれて、2 本の熱線の出力の差が生じなくなること、風速が 5 m/sec 以上では、流れのレイノルズ数が約 300 を越え、下流側の熱線が大きく乱れた後流の中に埋没して良好な信号を得られない。

Günkel ら⁹⁾は強く乱れた流れを調べるための流速計として shielded hot-wire probe を提唱した。また、Cook ら¹⁰⁾は最近建物の模型のまわりの流れを調べる目的で shielded dual-sensor hot-wire probe を試作した。両方法は、全く同様な原理に基くものである。このプローブは 2 本の熱線を近距離 (0.5 mm 程度) に平行に張って流れ方向の正逆に応じて、一方に他方の熱後流を感知させ、流れ方向と絶対値を検出するものである。しかし、流れの水平迎角がわずかでも変化すると、後方の熱線が前方の熱線の熱後流からはずれてしまい、2 本の熱線の出力が、ほぼ、同一値を示し、流れの方向を判別できない。そこで、2 本の熱線の外部を円筒状のパイプで覆い、その中に円筒の中心軸方向の 1 次元流を作って後流側の熱線が熱後流から、比較的はずれ難くなるように改良を加えた。しかしながら、Cook の検定結果によると、水平迎角の変化に対する出力は、2 m/sec 以下の流速では安定、4~6 m/sec 以上では ghost 信号が生じ最高使用流速は 6 m/sec 以下と限定される。また、2 本の熱線のまわりに円筒状のパイプを付けるので、直径が 5 mm 程度となり、物体の壁面近くは測定できないこと、そのパイプによって、流れが一部乱されることなどの欠点がある。

3. 試作したタンデム型熱線プローブ

以上のべたように現在までに種々開発された熱線プローブのうち、浅沼ら³⁾および種子田ら⁸⁾の方法以外は原理的には、いずれも 1 本の熱線によって作られた熱後流を他の熱線で感知する方法を採用している。また、浅沼らの方法以外は使用する熱線の間に障壁がないために流れの水平迎角を変化させた場合、後流を別の熱線で感知することが、困難になる。それを避けるために種々の工夫がなされていたり、または適用範囲が 1 次元非定常流の測定にのみ限定されている。しかしながら、浅沼らの方法は、基本的に他の方法と異なり、極めて小さい楕円形をしたプローブ (長径 60 μ 程度) 表面の流れの中におけ

る強制熱伝達量に場所的な差があることを利用している。従って、水平迎角の変化に対して、ほぼ、連続的な出力を得ることが期待できる。一方、ここで計測しようとしている 2 次元の鈍い物体まわりの流れは、剝離点の近く、剪断層 (shear layer) 付近、物体近くの剝離域内部などの比較的狭い部分で、流速ベクトルの絶対値と偏角が場所的にも、時間的にも激しく変化すると考えられる。従って流速測定用のプローブは特にその方向特性が連続性を有し、各方向について出力の直線性が保証されている必要がある。このような理由から、浅沼らが試作したタンデム熱線形の流速計プローブを 2 次元の非定常流の流速測定に適用させることを試みた。

まず、試作したタンデム型熱線プローブの略図を図 1 に示す。4 本の熱線支柱の先端に、直径 $d=5\mu$ のメッキタングステンの熱線を 2 本平行にハンダ付する。熱線の間隔は約 0.5 mm で直径の約 100 倍程度である。2 本の熱線の間には流体の流通がないように薄い膜を張る。熱線の作動温度は空気中において $100^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{C}$ であるので熱的にこれに耐えかつ、多少の風圧や、機械的な振動にも、比較的強く絶縁効果の良い膜として、簡単に張ることができるゲージ接着剤 (使用温度 $-50^{\circ}\sim 170^{\circ}\text{C}$) を利用する。膜の厚さは顕微鏡観察の結果、膜面の中央部で 5μ 以下であった。

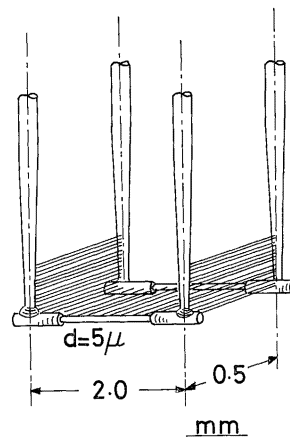


図 1 タンデム型熱線プローブ

ここで本プローブの出力を検出する電気回路のブロック図を図 2 に示す。2 本の熱線からの信号は、各々独立の流速計、直線化器を経て、両信号のゲインを一致させるために、一方だけ直流増幅器を通し、引算回路でそれらの差を作る。流速の定常成分は、直接ビシグラフなどに記録し、非定常成分はデータレコーダー、または、ビシグラフに記録する。なお、本プローブは、後述のトラバース装置および、迎角変更装置によって必要な位置、および角度に設定する。

次に本プローブの諸特性であるが、熱線流速計の電気的および、プローブの熱的応答特性を調べるために、静止空気中で、矩形波試験を行なった。その結果時定数 0.001 sec を得た。また、流体力学的な応答特性を推定するために、本プローブの流速検出部は弦長 $C=0.5\text{ mm}$ の平板で近似できるとし、かつ、そのまわりの流れが過渡的な流れから、ほぼ定常に達する時間で応答時定数が決まると仮定する。一

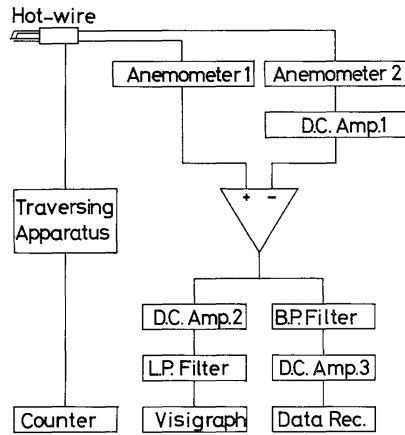


図 2 流速検出用ブロック図

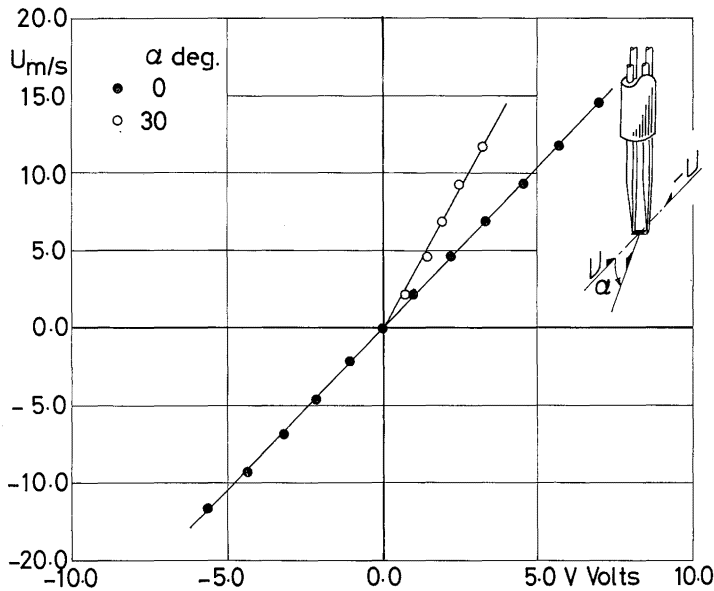


図 3 出力の直線性

方迎角を持った平板のまわりの流れが、ほぼ、定常に達する無次元時間 $\tau = Ut/C$ は、例えば、出発流れの場合、 $\tau = 10$ であるから、流速 $U = 10 \text{ m/sec}$ で本プローブの時定数 $t = 0.0005 \text{ sec}$ を得る。これに対して、後述する 1 辺 15 cm の正方形角柱背後に生ずるカルマン渦の周期 t は、流速 $U = 10 \text{ m/sec}$ で、 $t = 0.12 \text{ sec}$ である。従って、本プローブの時定数は計測目的の現象の周期に対して充分、短いことがわかる。

次に、一様流中における本プローブの出力直線性を図 3 に示す。実験は $U = -12 \text{ m/sec} \sim +15 \text{ m/sec}$

の範囲で行なわれ、本プローブの水平迎角 α が 0° 、 180° の場合、直線性は充分良いことを示している。同図には、 α が $+30^\circ$ の場合も合わせて示す。さらに、高風速の範囲においても、直線性の良い特性を得るものと考えられる。

同じく一様流中において、本プローブの水平迎角 α を変化させた場合の方向特性曲線を図 4 に示す。 α は $-\pi/2 \sim 3\pi/2$ の間で変化させたが、 $\alpha = -\pi/2$ または $3\pi/2$ 付近では本プローブが支柱自身の後流に入るために、測定不可能な範囲である。この角度付近以外では、ほぼ、連続的な出力を示すことがわかる。ここで、改めて本プローブの方向特性を明確に示すために、本図をプローブ出力と水平迎角 α

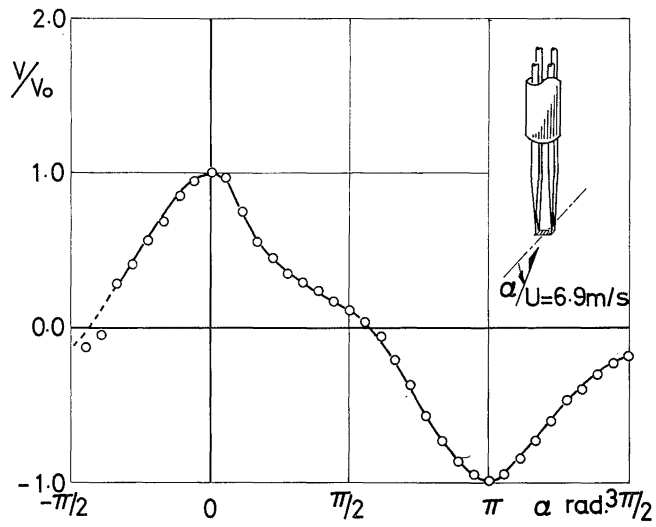


図 4 方向特性曲線 その 1

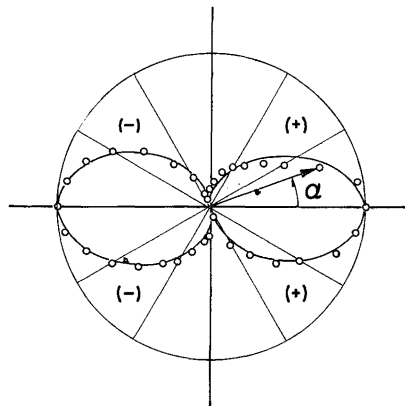


図 5 方向特性曲線 その 2

の平面極座標に書き直して図5に示す。図中 α は本プローブの水平迎角を示し、ベクトルの長さはその時のプローブ出力の大きさを表わす。ただし、右半面では正值、左半面では負値の出力を表わすものとする。図5から本プローブの方向特性は、ほぼ、原点对称を示していることがわかる。

4. 定常及び非定常流速ベクトル

今、問題にしている計測対象である非定常流速とは、出発 (impulsive start) 流れや、一様加速 (uniform acceleration) 流れなどの過渡的な状態を示すのではなく、例えば、物体後方に周期性のあるカルマン渦列が形成されていたり、物体自身が周期的な運動をくり返すことによって物体のまわりの流速ベクトルがある基本周期を持って変化している場合を考える。そして、この速流ベクトルの高周波成分および、乱流状態は省略でき、さらに、このベクトルは2次元で表現できるものと仮定する。すなわち、流れの中の各点における流速ベクトルが場所と時間の一意的な関数として表わされる広義の層流を考える¹¹⁾。この時、空間に固定した直交座標を (x, y) とし、時刻 t に (x, y) 点を通過する流速ベクトルの x, y 軸方向の成分を U, V とし、その定常成分を U_s, V_s 、非定常成分の振幅を u_u, v_u とすれば U, V は

$$U = U_s + u_u \cdot \sin 2\pi f \cdot t \tag{1}$$

$$V = V_s + v_u \cdot \sin(2\pi f \cdot t + \varphi) \tag{2}$$

となる。ただし、 f は非定常成分の基本波の振動数、 φ は非定常成分間の位相差とする。①②式から時刻 t を消去すると U, V に関する楕円の一般式を得るので、これを流速のベクトル図として、図6に示す。本図に示すように、 U, V は定常成分 U_s, V_s の合ベクトル (絶対値 W_s 、偏角 β とする) まわりに、 U 軸と、ある角度 θ だけ傾斜した長軸を持つ楕円状の軌跡を書く。この楕円の長径、短径の大きさを各々 $2u_m, 2v_m$ とすれば u_m, v_m は θ および $\theta + \pi/2$ 方向の非定常成分の振幅であると同時に (x, y) 点における非定常成分の最大値、および最小値を示している。

そこで次に、これらの $W_s, \beta, u_m, v_m, \theta$ を実際に3節でのべたタンデム型熱線流速計を使って、実験的に求める方法をのべる。先に図5に示したように本タンデム熱線プローブの方向特性は、ほぼ、原点对称性を有する。一方、非定常成分の合ベクトルは楕円状の軌跡を描くので、それによる本プローブ

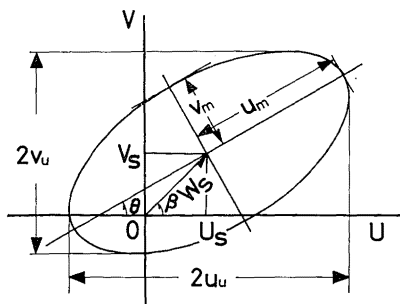


図6 流速成分のベクトル

からの出力を時間平均すれば、非定常成分は零になって、定常成分のみ検出できる。従って本プローブの方向を変化させながら定常流が最大値を示す偏角と、最大値を求めれば、それが β と W_s である。次に、非定常流の各成分を求めるために、同じように本プローブの方向を変化させ、非定常流の最大振幅の値とその角度、および、最小振幅を求めれば、それらは各々 u_m , θ , v_m となる。以上により、定常流の絶対値 W_s , 偏角 β , および非常流の最大値 u_m , 最小値 v_m , また、非定常流ベクトルの画く軌跡である楕円の長軸の傾斜角 θ を本プローブで求めることが可能であることがわかった。一方これらの各々の値と、①②式に示されている、定常成分 U_s , V_s , 非定常成分の振幅 u_u , v_u と位相差 φ が次式で関係付けられることは簡単にわかる。

$$U_s = W_s \cdot \sin \beta \quad (8)$$

$$V_s = W_s \cdot \cos \beta \quad (4)$$

$$u_u = (u_m^2 \cdot \cos^2 \theta + v_m^2 \cdot \sin^2 \theta)^{1/2} \quad (5)$$

$$v_u = (u_m^2 \cdot \sin^2 \theta + v_m^2 \cdot \cos^2 \theta)^{1/2} \quad (6)$$

$$\varphi = \sin^{-1}\{(u_m \cdot v_m)/(u_u \cdot v_u)\} \quad (7)$$

なお、ここでは簡単のために流速ベクトルの非定常成分は、その基本波のみで表現できると仮定したが、この仮定をゆるめて一般に高調波成分を含む場合については、各々の成分の高次の項ごとに非定常流ベクトルの画く軌跡を考慮すれば、それらも各々楕円状になることが予想できる。従って、流速ベクトルの定常成分は、基本波のみ考慮した場合と同様な方法で求めることができる。また、非定常流の高調波成分の振幅を求めるには、各高調波毎のバンドパスフィルターを用いて必要な成分を求めることができる。

5. 熱線プローブトラバース装置

すでに3節で述べたような特性を持つ、試作したタンデム型熱線プローブを使って流速ベクトルを測定する方法を4節で説明した。そこで示したように流速ベクトルを測定するためには、まず、本プローブを風洞内の所定の位置に設定しなければならないので、そのために試作した2次元トラバース装置について説明する。次に、図6において示したように流速ベクトルの定常成分および非定成分の振幅を検出するには、本プローブを θ および β の方向に向けなければならない、そのために試作した熱線プローブ迎角変更装置について述べる。

まず、2次元トラバース装置は、九州大学応用力学研究所津屋崎実験所の加振風洞内の測定部（高さ×幅×長さ=3.0 m×0.7 m×2.0 m）の内壁に設置してある。略図を図7に示す。まず、 x 方向への移動のために、モーター①を回転させ、ウォーム・ウォームホイールギヤを介して伝導軸②をまわし、上下二組のバックラッシュの少ない振り傘歯車で、上下2本の主送りネジ③を回す。その主送りネジによってリニャーモーションベアリングを付けた x 方向台車④が上下2本の主軸⑤に沿って同時に x 方向へ移動する。次に、 y 方向への移動のために、まず上方の台車④に取り付けたモーター⑥を回転させウォーム・ウォームホイールギヤを介して鉛直の主送りネジ⑦を回転させる。主送りネジ⑦は y 方向台車⑧を2本の主軸⑨に沿って y 方向へ移動させる。台車⑧には後述の熱線プローブ迎角変更装置を取り付

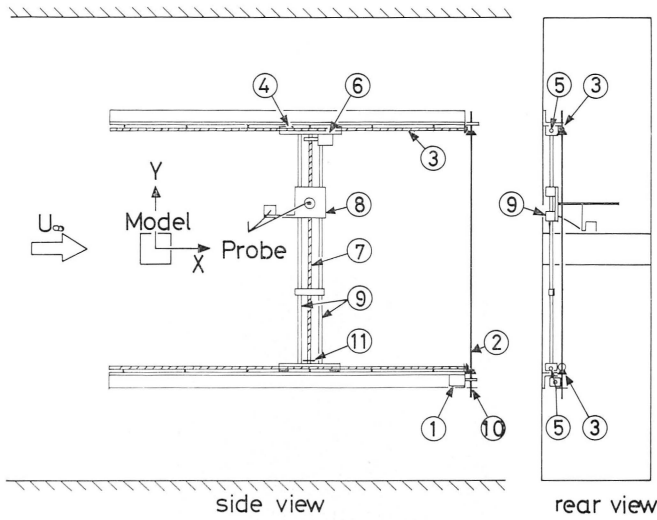


図 7 2次元トラバース装置

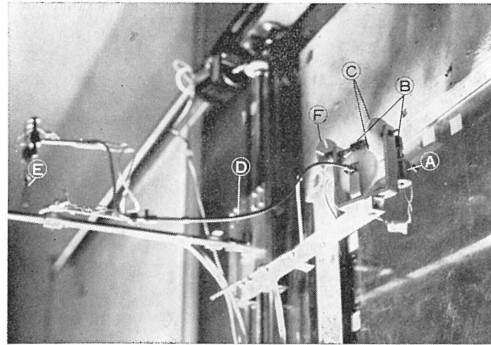


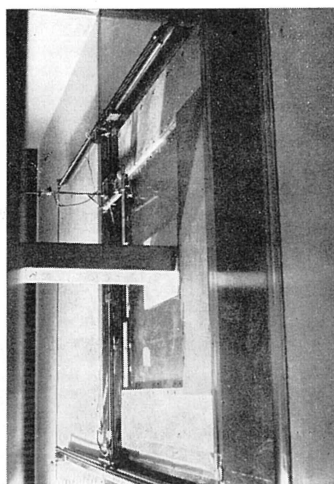
写真 1 熱線プローブ迎角変更装置

ける。熱線プローブの設定位置 (x, y) を検出するために、各々伝導軸 ②，送りネジ ⑦に取り付けたスリット付円板 ⑩，⑪を回転させ、スリットの通過数を光学的に読み取り電磁パルスカウンターに表示させる。

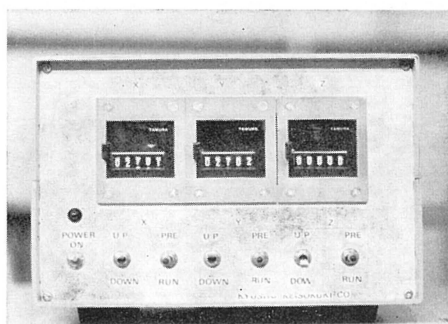
次に、熱線プローブ迎角変更装置を写真 1 に示す。小型モーター ④の回転速度をウォーム ⑤，ウォームホイールギア ⑥により 2 段減速し、ケーブルワイヤー ⑦を回転させ、熱線プローブ ⑧をその先端の検出部を中心として回転させる。設定角度の検出は、スリット付円板 ⑩を回転させ、パルス数を電磁パルスカウンターで表示させて行なう。トラバース装置および熱線プローブ迎角変更装置の諸性能をまとめて、表 1 に示す。トラバース装置、熱線プローブ迎角変更装置および模型を風洞内に設置して、風洞上流の縮流部から撮影した所を写真 2 で示す。次にトラバース装置などの駆動電源部と位置を表示する電磁パルスカウンターを写真 3 で示す。この位置制御部を風洞の外部から操作して、熱線プローブの位置の設定と検出を行なうことができる。

表 1 トラバース装置の諸性能

	最 大 移 動 量	位 置 設 定 最 小 単 位	設 定 速 度
X 方 向	2.5m	0.1mm	1.5mm/sec
Y 方 向	1.5m	0.1mm	1.5mm/sec
プローブ迎角	360° 以上	1°	5°/sec



写 真 2 風洞, 模型, トラバース装置



写 真 3 トラバース装置駆動部

6. 測定法および計測例

以上のように試作したタンデム型熱線プローブとトラバース装置, 迎角変更装置を使った本プローブの諸特性の検定法および実際に, 角柱まわりの流速ベクトルを測定する方法と 2, 3 の計測例を述べる。

6.1. 検定および測定法

先に、図3、5で示した本プローブの出力の直線性および迎角特性の検定は次のように行なう。まず、出力の直線性を吟味するために迎角変更装置を使って、一様流中において本プローブの水平迎角を 0° 、 180° の2種に変化させ、ある任意の流速（本実験では 6.9 m/sec で行なった）に対して、両出力の絶対値を図2のAMP. 1で調整して、ほぼ一致させた後、流速を変化させて各々の出力を得る。次に、迎角特性の検定は、一様流速を固定し、迎角変更装置で本プローブの水平迎角を $0^\circ\sim 360^\circ$ 、 10° 毎に変化させて行なう。

実際に流速ベクトルの定常成分を測定する場合は、本プローブをトラバース装置で角柱周囲の適当な位置 (x, y) （ $(0, 0)$ は角柱の中央）に設定し、その点におけるプローブ出力の非定常成分を、図2に示したローパスフィルターでカットしながら迎角変更装置によって本プローブを回転させ、定常流成分の合ベクトルが最大値 W_s を示す角度 β を電磁パルスカウンターから、その W_s をビシグラフから、各々読み取ることを行なう。

次に、流速ベクトルの非定常成分の測定は迎角変更装置で本プローブの方向を変化させながら、非定常流成分のみシンクロスコープなどに出力させ、その振幅が最大値 u_m となる値とその方向 θ 、最小値 v_m となる値とその方向 $\theta+\pi/2$ を求めることを行なう。

6.2. 角柱まわりの定常流成分

このようにして求めた2次元一様流中にある、迎角 0° 1辺15cmの正方形角柱のまわりの流速ベクトルの定常成分を図8に示す。本図でわかるように角柱の側面から背後には、定常剝離渦が形成され

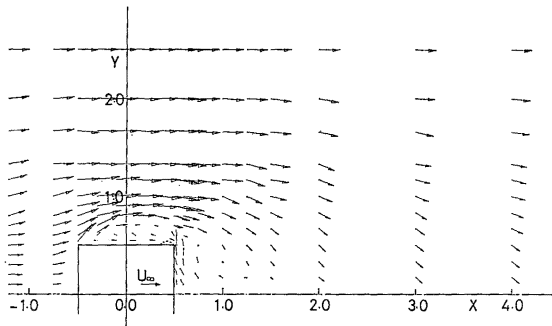


図8 正方形角柱まわりの流速ベクトル ($U_\infty=6.9\text{ m/sec.}$)

ている。その大きさは角柱中央から1辺の約1.5倍の後方におよんでいる。さらに、角柱の背後に逆流があることによって、後縁部に角柱の1辺の1/10程度の小さな定常剝離渦が形成されている。すなわち、正方形角柱のまわりの時間平均流れは、大きな定常剝離渦の中に、局所的で、それと逆符号の循環を持った定常剝離渦がある。二重構造になっていることがわかる。

6.3. タンデム型熱線プローブと単線式熱線による測定結果の比較

次に流速ベクトルの定常成分の絶対値を、 $1/2$ および $1/4$ 角柱の後流について本プローブと単線式熱線で求め各々比較する。なお、本プローブで測定した結果は単線式熱線の測定値との比較のために、流速ベクトルの絶対値 W に U_∞ の符号を付けて表わす。まず、逆流がある例として図9に $1/2$ 角柱の2倍後方の結果を示す。 $y/h < 1.0$ では両測定法による結果は大きく違い、本プローブの出力が零または逆流を示してもなお単線式熱線は、非定常流の存在のために、 $0.5 \times U_\infty$ の大きな値を示す。ここで簡単のために定常流速が零で、正弦波状に変動する1次元の非定常流がある場合を考える。この場合でも、単線式熱線の出力の時間平均値は、零ではなくてその正弦波の r. m. s. 値 $\times 2\sqrt{2}/\pi$ である。従って、このような逆流のある場所における単線式熱線の出力は、物理的意味を持たない。このように物体の近傍の流速を単線式熱線で計測することは、きわめて危険であると云えよう。しかしながら、本図において、 $y/h > 1.0$ 、 $1/4$ 角柱では図10に示すように3倍後方の $y/h > 0.8$ 、6倍後方では $y/h > 0.0$ の全計測範囲で、両測定法による結果はほぼ一致している。この範囲では非定常流成分を含めて逆流が発生していないことが、その理由であろう。

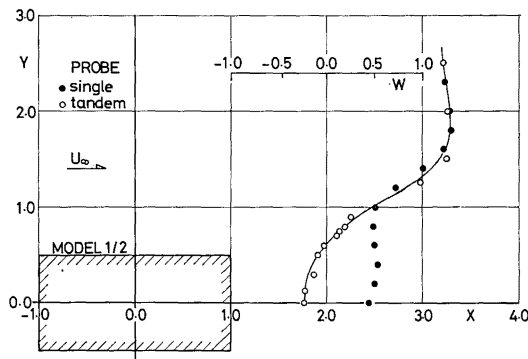


図 9 タンデム型プローブと単線式プローブの計測結果の比較 ($1/2$ 角柱後流)

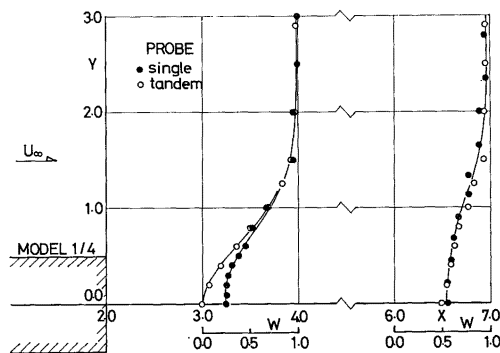


図 10 タンデム型プローブと単線式プローブの計測結果の比較 ($1/4$ 角柱後流)

6.4. 非定常流速の測定例

流速ベクトルの非定常流成分の振幅の r. m. s. 値を測定した結果の 1 例を図 11 に示す。本図は正方形角柱側面のごく近く（1 辺の 2%）の場所の値である。この付近では流速ベクトルは、ほぼ壁面の方向を示すと考えられるので、本プローブの水平迎角は零度に設定してある。このように剝離した内部の壁近くにおいても非定常成分はかなり大きな値を示し、かつ前縁付近から後縁に向かってほぼ、直線的に増加していることがわかる。

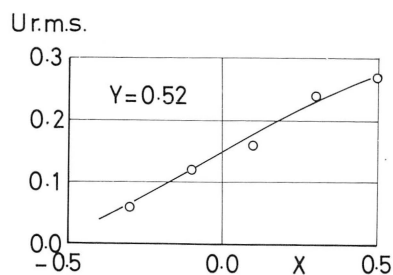


図 11 正方形角柱側面の非定常流

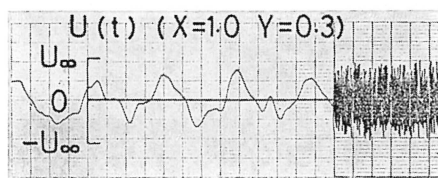


図 12 タンデム型プローブの出力波形

次に本プローブによる非定常流の出力波形の具体例を図 12 に示す。図は定常流成分がほぼ、零になる位置の波形であって、プローブの水平迎角は零度に設定してあり、また、電気的には 40 Hz 以上の高周波成分のみ切断しているので、必ずしもこの位置における非定常流成分の最大値を示す信号ではないが、逆流を含めて、きわめて大きな振幅を持つ非定常流速が出力されていることがわかる。

7. ま と め

非流線型物体のまわりの流れのような逆流を含む 2 次元の強い非定常流速ベクトルの定常および非定常成分を風洞実験により計測する方法を調べた。過去において試作された数種の熱線プローブの中でタンデム型熱線プローブがこのような流速ベクトルの測定に充分適していることをのべた。試作したプローブの特性の主要なものは以下の 3 点である。

- 1) 直線性は検定した $-12 \sim +15$ m/sec の流速範囲で非常に良く、さらに高流速域でも良い直線性が得られると思われる。
- 2) 応答時定数は流体力学的には充分短いと考えられる。一方熱および電気的時定数は約 0.001 sec

である。従って周波数特性は 1 kHz 程度である。

- 3) 水平迎角の変化に対する出力はほぼ原点对称を示す。

次に計測例として

- 1) 正方形角柱まわりの流速ベクトルの定常成分。
- 2) 本プローブと単線式熱線プローブの両方式による、断面比 1/2, 1/4 角柱後流の速度プロファイルの計測結果の比較。
- 3) 本プローブによる正方形角柱の側面近くの流速ベクトルの非定常成分

の 3 点をのべた。その結果正方形角柱まわりの剝離領域の時間平均的な大きさ、および後縁付近の逆剝離の存在を含めて流速ベクトルの定常成分が明確にわかった。また単線式熱線による流速測定の限界を指適した。

以上により、従来 2 次元の非定常流域における流速ベクトルの定常および非定常成分の定量的測定は不可能であったが本測定法によって可能になった。なお本方法によって調べた角柱まわりの流速ベクトルの定常流成分に関する結果の詳細は別報¹¹⁾を参照されたい。

謝 辞

本研究に際し、種々御討議していただいた中村泰治教授に厚くお礼申し上げる。また種子田定俊教授、水野信二郎助教授、本地弘之助教授、同室の友成義正助手、九州大学工学部博士課程吉村健大学院生に有益な討議をしていただいたことを深く感謝する。

なお実験の一部は、文部省科学研究費（昭和 50 年度奨励研究 A 課題番号 075362）によって援助を受けた。あわせてここに感謝の意を表する。

文 献

- 1) Nishioka, M. and Sato, H., Measurements of velocity distributions in the wake of a circular cylinder at low Reynolds numbers, *J. Fluid Mech.*, Vol. 65, part 1, 1974, pp. 97-112.
- 2) 小林敏雄, 佐賀徹雄: 流れに直角に置かれた円柱後流の性質, 機械学会講演論文集, No. 750-4, 1975, 流体工学, 流体機械, pp. 37-40.
- 3) 浅沼 強, 山川八郎, 早川日出雄: ダンデム熱線形の燃料流量計について, 機械学会誌, Vol. 73, No. 617, 1970, pp. 832-840.
- 4) 浅沼 強: 非定常流れにおける計測, 機械学会誌, Vol. 76, No. 660, 1973, pp. 1385-1392.
- 5) Bradbury, L. J. S. and Castro, I. p., A pulsed-wire technique for velocity measurements in highly turbulent flows, *J. Fluid Mech.*, Vol. 49, part 4, 1971, pp. 657-691.
- 6) Dowling, P. M., Reverse flow sensing hot wire anemometer, *J. Phys. E, Scientific Instruments*, Vol. 5, 1972, pp. 849-851.
- 7) 辰野正和, 種子田定俊: Reynolds 数 $50 \sim 10^4$ における円柱後方の逆流域の測定, 九州大学応用力学研究所所報, 第 31 号, 1969, pp. 29-44.
- 8) 種子田定俊, 天本 肇, 石井幸治: 非定常運動を行う平板まわりの流れ (II), 九州大学応用力学研究所所報, 第 43 号, 1975, pp. 1-10.
- 9) Günkel, A. A., Patel, R. P. and Weber, M. E., A shielded hot-wire probe for highly turbulent flows and rapidly reversing flows, *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, Vol. 10, 1971, pp. 627-631.

- 10) Cook, N. J. and Redfearn, D., Calibration and use of a hot-wire probe for highly turbulent and reversing flows, J. Industrial Aerodynamics, Vol. 1, 1975/76, pp. 221-231.
- 11) 巽友正: 乱流, 新物理学進歩シリーズ 6, 槇書店, 1967, pp. 3.
- 12) 溝田武人: 角柱まわりの流れ, 一平均流の測定一, 九州大学応用力学研究所所報, 第 45 号, 1967, pp. 369-384.

(昭和 51 年 6 月 7 日 受理)