

はく離流中における非定常流速測定法の研究

A TECHNIQUE FOR MEASURING UNSTEADY FLOW
VELOCITIES IN THE SEPARATED REGION溝 田 武 人*
By Taketo MIZOTA

1. ま え が き

円柱や角柱等の非流線形物体のまわりのいわゆるはく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, ねじりフラッタ等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-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は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, 流れははく離して物体後方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, 応答時定数が大きいので, 短い周期で変化する変動流速の測定には使うことができない。また, 周波数応答特性のよい単線式の熱線流速計には方向特性がない。これを使って, 物体近くなどで逆流が生じていると考えられる部分の流速を計測しても, 得られた信号は実際の流速をどのように正確に表わしているのか疑問があり, その物理的意味が不明確であった。すなわち, この流速計を物体近くの伴流領域の流速の測定に用いるには従来より限界があった。

のような理由で, 本研究は構造物やその部材によく使われる非流線形物体のまわりの流れのように逆流を含む2次元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おのおのの流速ベクトルを測定し, 単線式熱線による測定結果と比較検討したものである。

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, 周波数応答特性がよいこと, 広い流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, 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¹⁾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, しかも出発流れ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(付図-1参照)。これは従来から使われている単線式熱線を2本平行に配置し, 2本の熱線の間を絶縁塗料で被覆したもので, その断面はほぼ厚み比 1:5 の楕円形(長径 $\phi=60\mu$)である。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2本の熱線をブリッジ回路に組み込むことによって, 検出プローブを作り管内1次元流またははく離した翼の表面近く²⁾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³⁾している。

Bradburyら⁴⁾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 流速計を試作した(付図-2参照)。これは, 1本の熱線(pulsed-wire)を

* 正会員 工修 九州大学助手 応用力学研究所

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、などが挙げられる。

Dowing⁹⁾ 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おおの0.8 mm 間隔で抵抗線温度計(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(付図—3 参照)。主熱線は、流速の絶対値を検出すると同時に、流れの中にわずかだけ加熱された後流を生み出すので、これを2本の抵抗線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、流速の符号を電気的に反転させれば流速はほぼアナログ量として出力される。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次元非定常流の計測に良好な結果を得たが、流れの方向が2次元的に変化する場合は、その出力を連続的に変化させることは期待できない。

さらに、辰野⁶⁾ 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(付図—4 参照)。そしてレイノルズ数 $50 \sim 10^4$ 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⁷⁾ 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(付図—5 参照)。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り、一定電流を流しておく。金属棒の上流側と下流側ではそれらの2本の熱線の周囲の流体流速が異なり、熱伝達量に差が生ずるので、この熱線のおおのをホイートストン・ブリッジの2辺に入れることによって、1次元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、よい信号を得ることができるが、流れ方向が2

次元的に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、流速が 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⁸⁾ は強く乱れた流れ場を調べるための流速計として shielded hot-wire probe を提唱した(付図—6 参照)。また、Cook ら⁹⁾ は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。両方法はまったく同様な原理に基づくものである。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是づれにく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取付けるので、直径が 2.5~5.0 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¹⁾および種子田⁷⁾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、浅沼の方法は、基本的に他の方法と異なり、きわめて小さい楕円形をしたプローブ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。したがって、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、はく離点の近く、せん断層(shear layer)付近、物体近くのはく離領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。したがって、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。浅沼らが試作したタンデム熱線形の流速計プローブは、逆流を含む1次元非定常流の計測に有効であるが、本研究はこのプローブの基本的原理を利用して、逆流を含み、周期的に変動する2次元非定常流の計測に応用することを試みたものである。

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熱線 A, B 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入がないように薄い膜を張る ($X'-Z'$ 平面)。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、絶縁効果のよい膜として簡単に張ることができるゲージ接着剤(ポリエステル系、使用温度範囲 $-50^\circ\sim +180^\circ\text{C}$) を利用した。膜の厚さは顕微鏡観察の結果、中央部で 5μ 以下である。2本の熱線 A, B を含む $X'-Z'$ 平面を構成する平板は、 Z' 軸を中心に回転できる。そこで主流が X' 方向に向くような角度に回転すれば、熱線Aは平板の前

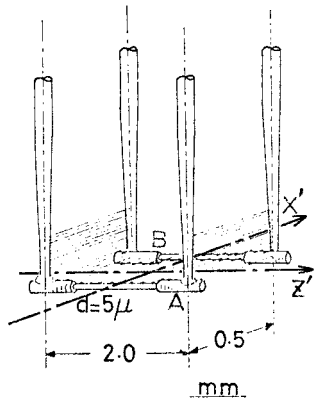


図-1 試作したタンデム型熱線プローブ

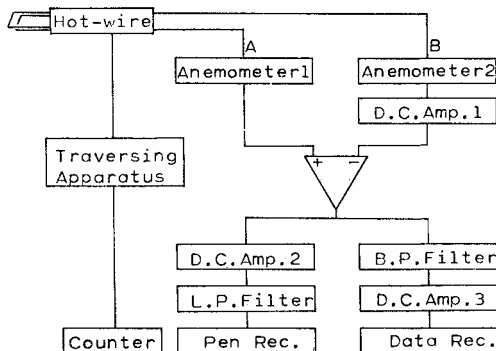


図-2 流速検出用ブロック図

縁にBは後縁になり、おのおのの熱線から周囲流体への強制熱伝達量はAが大きくBが小さい³⁾。したがって、引算回路でそれらの信号の差を作れば流れの方向を検出することができる。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 A, B の信号はおのおのの独立に Anemometer 1, 2 を経た後直線化され、B の信号だけ D.C. Amp. 1 (直流増幅器) を通し A, B の信号のゲインを一致させ、引算回路でそれらの差を作る。流速の定常成分は直接ペンレコーダーなどに記録し、非定常成分はデータレコーダー、またはペンレコーダーに記録する。なお本プローブは風洞内壁に設置した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、まず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する。応答時定数は、そのまわりの流速や流れの方向が急に变化した直後の過渡的な流れの影響がなくなる時間で決まると考えられる。一方、傾斜平板の出発流れの数値計算¹⁰⁾を参考にすれば、無次元時間 $\tau=Ut/C\approx 10.0$ から近似的にその応答時定数を知ることができる。すなわち、流速 $U=10.0\text{ m/sec}$ で本プローブの応答時定数 $t=0.0005\text{ sec}$ 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 $U=10.0\text{ m/sec}$ で $t\approx 0.12\text{ sec}$ である。したがって、本プローブの時定数は計測目的の現象の周期に対して十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の直線性を図-3に示す。図中 α は、図-1において $-X'$ の方向と流れの方向のなす角度である。 $\alpha=0, \pi$ の場合直線性は十分よい。同図には $\alpha=\pi/6$ の場合も合わせて示す。本

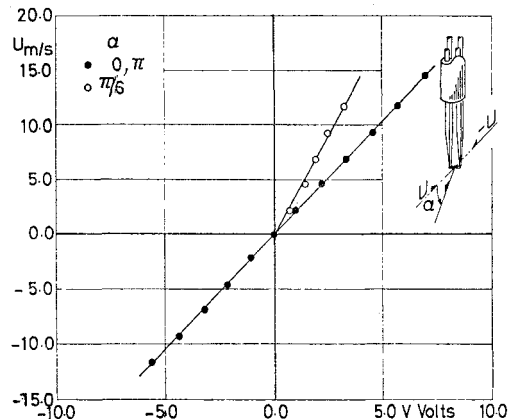


図-3 出力の直線性

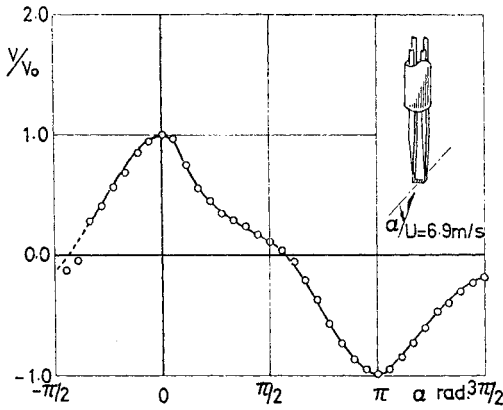


図-4 方向特性曲線, その 1

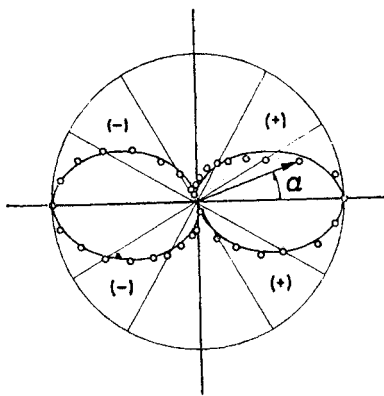


図-5 方向特性曲線, その 2

プローブの作動原理はいわゆる熱線流速計と同一で、おのおの熱線表面から周囲流体への熱伝達量が流速に比例することを利用したものであるから、さらに高い流速の範囲においても、直線性のよい特性を得るものと考えられる。図-3の特性は図-2のD.C. Amp. 2を1倍に設定して求めた結果である。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。 $\alpha = -\pi/2, 3\pi/2$ 付近では検出部が支柱自身の後流に入るため測定不可能となる範囲である。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。ここでさらに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 の平面極座標に書き直して図-5に示す。図中ベクトルの長さは、水平迎角 α の時のプローブの出力の大きさを表わす。ただし、右半面では正値、左半面では負値の出力を表わすものとする。このように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. 定常および非定常流速ベクトルと測定法

いま、問題にしている計測対象である非定常流速と

は、物体まわりの出発 (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、たとえば、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もって変化している場合を考える。そしてこの流速ベクトルの高調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せる広義の層流を考える¹¹⁾。このとき、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、

$$U = U_s + u_u \cdot \sin 2\pi f t \dots \dots \dots (1)$$

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

となる。ただし、 f は非定常成分の基本振動数、 φ は非定常成分間の位相差とする。流速はすべて無限上流の流速 U_∞ で無次元化する。式(1),(2)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)まわりに、 U 軸とある角度 θ だけ傾斜した長軸をもつ楕円状の軌跡を描く。この楕円の長径、短径の大きさをおのおの $2u_m, 2v_m$ 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。

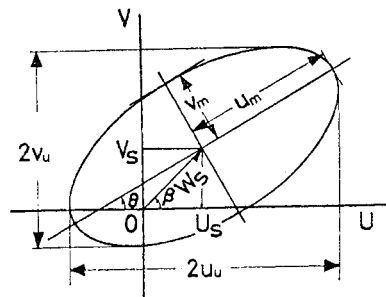


図-6 2次元流速ベクトルのリサージュ波形

そこで次に、これらの $W_s, \beta, u_m, v_m, \theta$ の値を実際に3.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。さきに図-5で示したように本プローブの方向特性は、ほぼ原点对称性(8字特性)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。

したがって、本プローブの方向を図-1のZ'軸まわりに回転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値を示すプローブの角度、および最小振幅を求めれば、それらはおのおの 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 、および非定常流の最大値 u_m 、最小値 v_m 、また、非定常流ベクトルの描く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、これらのおのおのの値と、式(1),(2)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 が次式で関係づけられることは簡単にわかる。

$$U_s = W_s \cdot \cos \beta \dots\dots\dots (3)$$

$$V_s = W_s \cdot \sin \beta \dots\dots\dots (4)$$

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

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

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

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、おのおのの成分の高次の項ごとに非定常流ベクトルの描く軌跡を考慮すれば、それらもおのおのの楕円状になることが予想できる。したがって、流速ベクトルの定常成分は、さきののべた方法でそのまま検出できる。また、非定常流の高調波成分の振幅を求めるには、各高調波ごと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. 測定法および計測例

実際に風洞実験によって、模型のまわりの定常、非定常流速ベクトルを測定するために、熱線プローブ・トラバース装置、迎角変更装置を製作し、これを使って種々の断面比を有する角柱のまわりの流速ベクトルを求めた。実験には、高さ×幅×長さ=3.0m×0.7m×2.0mの測定部断面をもつ風洞を使用した。供試模型の大きさは0.15m×0.15m×0.7m(正方形), 0.15m×0.30m×0.7m(1/2)である。短辺の長さ $h=0.15$ m、一樣流速 $U=6.9$ m/sec、流れのレイノルズ数 $Re=hU/\nu=7.14 \times 10^4$ である。ただし、 ν は空気の動粘性係数とする。以下の測定結果について、流速は $U=6.90$ m/secで、実際の長さは $h=0.15$ mでおのおの無次元化する。はじめに、図-7(a),(b)に1/1, 1/2角柱背後の近い部分における速度分布を示す。同図は単線式熱線と本プローブの両者による測定結果を比較したものである。そのため、本プローブによる定常成分 W_s の符号は U_s のそれに一

致させ、非定常成分は最大変動流速 u_m の実効値を記した。本図でわかるように、角柱背後において単線式熱線の示す結果と本プローブの示す結果は大きく相違している。当然のことながら単線式熱線では逆流の存在を示すことができない。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次の非定常流速の時間平均値を単線式熱線で検出することを考える。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その正弦波の振幅の実効値 $\times \{2\sqrt{2}/\pi (\approx 0.90)\}$ である⁵、さらに2次元的に変動する非定常流速の時間平均値を単線式熱線で検出することを考える。簡単のため式(1),(2)で $U_s=V_s=0, u_u=v_u, \varphi=\pi/2$ の場合を考える。したがって、図-6に示すリサージュ波形は原点を中心にもつ半径 u_u の円になる。このとき単線式熱線の出力を時間平均した値は零ではなく、正弦波の振幅の実効値 $\times \sqrt{2}$ にも及ぶ。図-7における両プローブの測定結果の大きな相違を上記のような理由だけですべて定量的に説明できるわけではないが、単線式熱線プローブが示す値はこのような逆

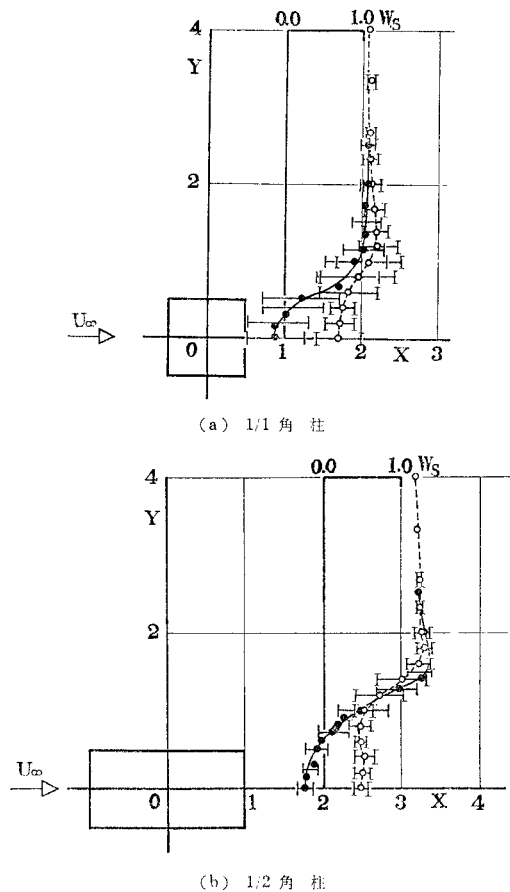


図-7 角柱後方の定常、非定常流速分布

(○) 単線式熱線, (●) タンデム型熱線

流域においては物理的な意味が不明確であることが理解できる。次に図-8に1/1角柱まわりの W_0 の測定結果を示す。角柱の前縁ではく離れた流れは上面から背後にかけてはく離渦を形成し、その大きさは角柱中央から約1.5倍の後方に及んでいる。はく離域内部においては上面近くおよび中心軸上の逆流や、背面を沿う上方への流れが明確にわかる。一方、1/1角柱の後縁近くの流れは複雑で図-9にその詳細を示す。図中実線は図-8から求めた流線で ψ は流れ関数の値であり、 $\psi = \int_0^Y U_s dY$ として求める。後縁近くの流線は流速ベクトルをもとに描いた推定線である。この付近は全体として前縁からのは

く離領域に埋没して逆流域にあるが、 $X=0.4\sim 0.5$ の上面近くの流れは正の方向を示している。すなわち、後方からの逆流によって後縁においてさらに時間平均的にははく離していると考えられる。また、点線は $X=0.4, Y=0.5\sim 0.7$ における速度分布の U 成分、1点鎖線は後縁近く速度零の部分を、おのおの示す。次に図-10には1/1角柱まわりの広い範囲にわたる時間平均流線を求めた例を示す。本図から一様流中にある1/1角柱の時間平均的なはく離領域の大きさ、およびその内部の循環流の複雑な形状がよくわかる。これらの流線が示すフローパターンは、 R_0 数は低い($R_0=590$)、水槽による1/1角柱まわりの可視化実験¹¹⁾の結果と定性的にはよく一致しており、妥当性が確認できる。Kovácszay¹²⁾は低い R_0 数($R_0=34, 56$)における円柱まわりの定常流れの流速分布を単線式熱線で測定し、近似的に流線を描いている。しかし、円柱背後のはく離領域(双子渦)の内部の逆流域や、流速ベクトルの変化が大きいところについては流線を描くことができず、逆流(reverse flow)と記して斜線によって表わしている。この付近が、従来の単線式熱線による計測の限界であった。次に図-11には、本プローブで求めた1/1角柱まわりの非定常流線を示す。本図は、静止角柱まわりの各点における非定常流速の振幅と、角柱に加わる非定常揚力からの位相差を本プローブで測定した結果から求めた非定常流線である。いま、角柱には上向き最大の揚力が働いている瞬間の流線で、角柱に固定した静止観察座標系からみたフローパターンに相当する。上面の前縁から出た流線 $\psi=0$ は上面と背面におおの1個の循環流を取り囲んで背面の下方で閉じている。下面の前縁から出た $\psi=0$ の流線は角柱後方の無限遠方に連続している。

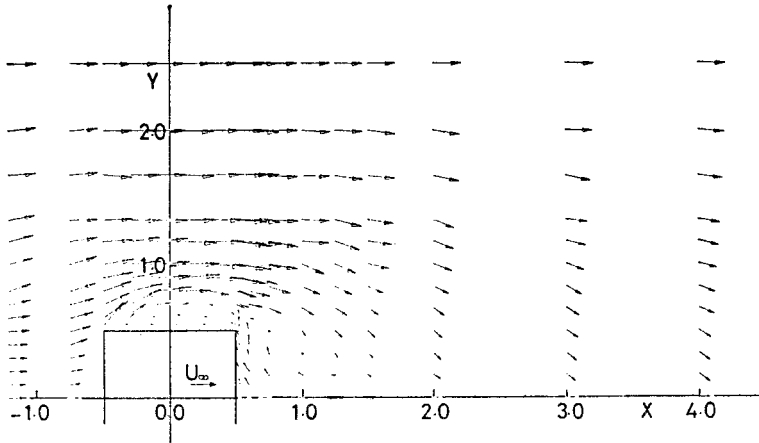


図-8 1/1 角柱まわりの時間平均流速ベクトルの分布

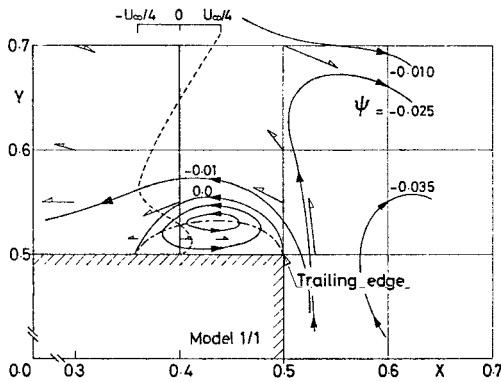


図-9 1/1 角柱後縁付近の流れ

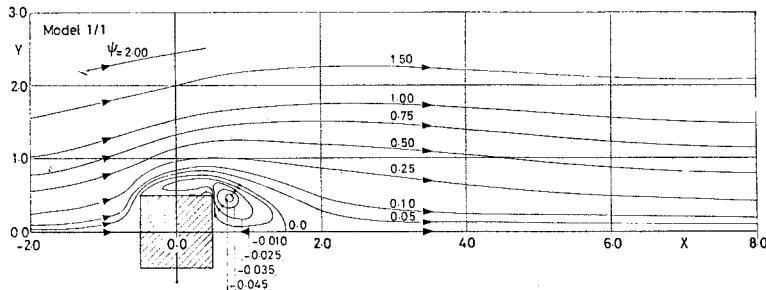


図-10 1/1 角柱まわりの時間平均流線

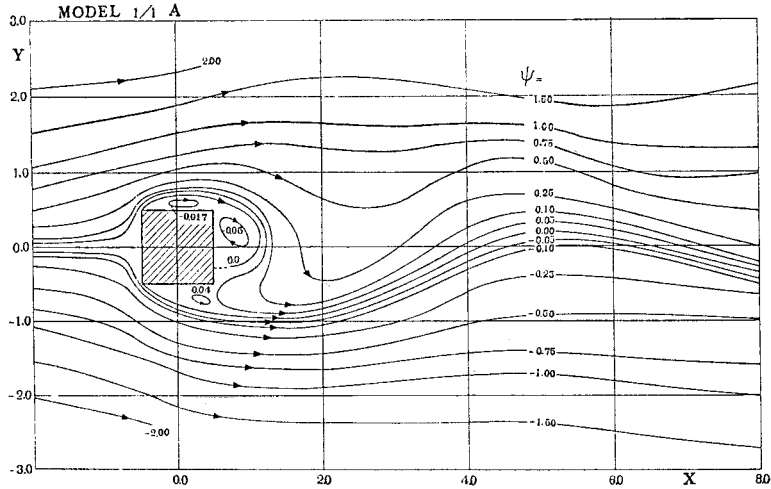


図-11 1/1 角柱まわりの非定常流線 (上向き最大揚力の瞬間)

6. 結 語

本論文においては地上または海中構造物のような非流線形物体まわりのはく離流を実験的に調べる目的で、逆流を含む2次元の流速ベクトルを測定する方法を新しく開発した結果をのべた。主要な結論は以下のとおりである。

- (1) タンデム型熱線プローブの出力直線性は十分よく、方向特性は連続的であり、電気的、流体学的応答時定数も短い。
- (2) タンデム型熱線プローブによって2次元流速ベクトルの定常、非定常成分を求めることが可能になった。
- (3) 物体まわりの非定常逆流域における速度分布を単線式熱線とタンデム型熱線プローブの両者で測定し、前者による測定結果が物理的に意味がないことを指適した。
- (4) タンデム型熱線プローブによる流速の測定結果から1/1角柱まわりの時間平均流線、非定常流線を描いて流れの場を示した。

このような流速測定法によって得られる結果は、本論文の中でも一部触れたが、角柱の断面比や迎角を変化させた場合^{14), 15)}や、振動する角柱のまわりの定常、非定常流れに関する実験結果の詳細は、別途稿を改めて報告する予定である。

謝 辞：本研究を進めるにあたり、種々ご助言くださった九州大学応用力学研究所 中村泰治教授、岡島厚助教授および友成義正助手に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

1) 浅沼 強・山川八郎・早川日出雄：タンデム熱線形の燃

料流量計について，機械学会誌，Vol. 73, No. 617, pp. 832~840, 1970.

2) 浅沼 強：非定常流れにおける計測，機械学会誌，Vol. 76, No. 660, pp. 1385~1392, 1973.

3) Asanuma, T., H. Yamakawa and H. Hayakawa: Tandem type hot-wire flowmeter for measuring intermittent fuel flow, J. Society of Automotive Engineers, Vol. 76, pp. 1781~1799, 1970.

4) Bradbury, L.J.S. and I.P. Castro: A pulsed-wire technique for velocity measurements in highly turbulent flows, J. Fluid Mech., Vol. 49, part 4, pp. 657~691, 1971.

5) Dowling, P.M.: Reverse flow sensing hot wire anemometer, J. Physics E: Scientific Instruments, Vol. 5, pp. 849~851, 1972.

6) 辰野正和・種子田定俊：Reynolds 数 50~10⁴ 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，43 第 31 号，pp. 29~44, 1969.

7) 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，pp. 1~10, 1975.

8) Günkel, A.A., R.P. Patel and M.E. Weber: A shielded hot-wire probe for highly turbulent flows and rapidly reversing flows, Ind. Eng. Chem. Fundam., Vol. 10, pp. 627~631, 1971.

9) Cook, N.J. and D. Redfearn: Calibration and use of a hot-wire probe for highly turbulent and reversing flows, J. Industrial Aerodynamics, Vol. 1, pp. 221~231, 1975/76.

10) Sarpkaya, T.: An inviscid model of two-dimensional vortex shedding for transient and asymptotically steady separated flow over an inclined plate, J. Fluid Mech., Vol. 68, part 1, pp. 109~128, 1975.

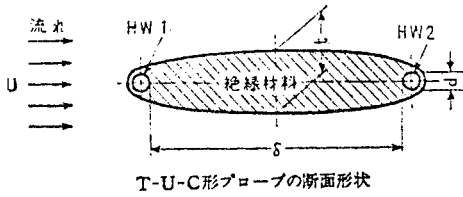
11) 巽 友正：乱流，新物理学進歩シリーズ 6，樞書店，p. 3, 1967.

12) 友成義正・中村泰治：矩形断面柱まわりの流れの観察，日本航空宇宙学会第 8 回講演会予稿集，東京，1977.

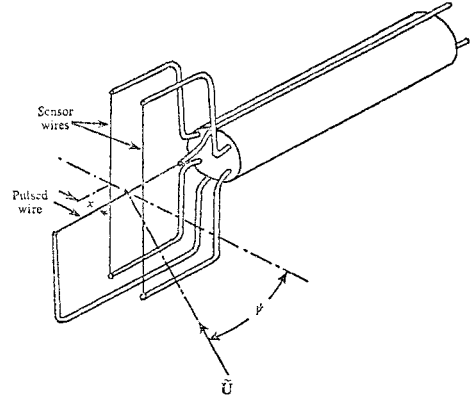
13) Kovátsznay, L.S.G.: Hot-wire investigation of the wake behind cylinders at low Reynolds numbers, Proc. Roy. Soc. A, Vol. 198, pp. 174~190, 1949.

14) 溝田武人：角柱まわりの流れ，土木学会第 31 回年次学術講演会講演概要集，I-200, pp. 342~343, 1976.

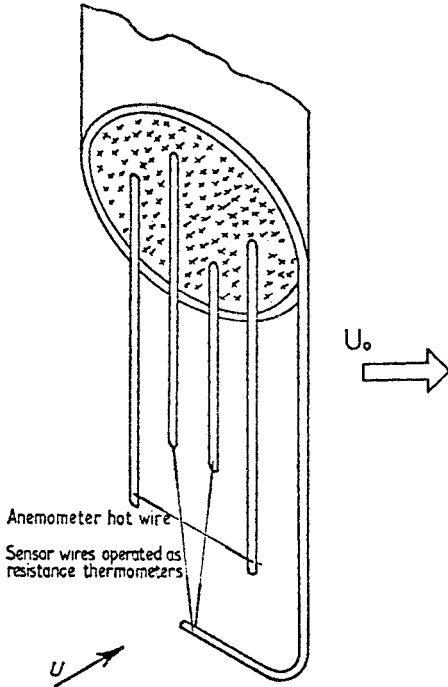
- 15) 溝田武人：角柱まわりの流れ(Ⅱ)，土木学会第32回年次
 学術講演会講演概要集，I-103, pp. 189~190, 1977.
 (1977.11.30・受付)



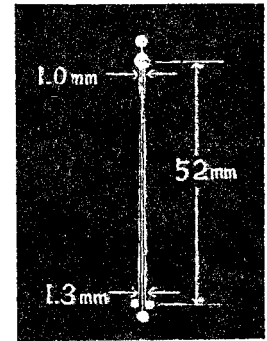
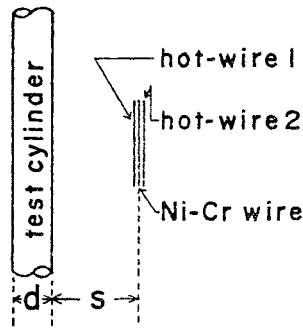
付図-1 タンデム熱線形プローブ (文献 1)



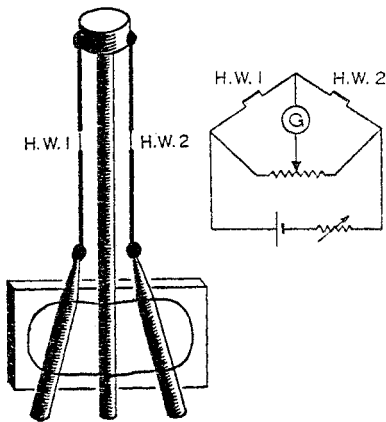
付図-2 pulsed-wire probe (文献 4)



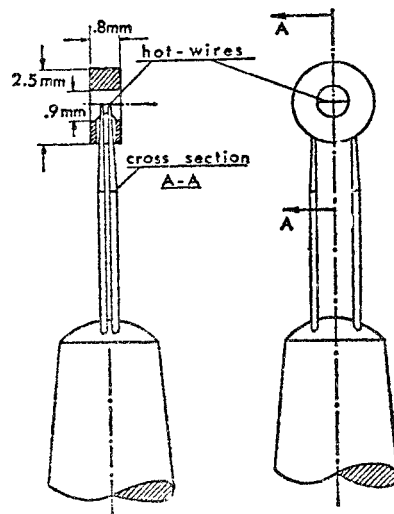
付図-3 Anemometer hot wire probe (文献 5)



付図-4 辰野らの熱線プローブ (文献 6)



付図-5 種子田らの熱線プローブ (文献 7)



付図-6 Shielded hot-wire probe (文献 8)