

角柱まわりの流れⅢ：非定常流速の測定

溝田，武人
九州大学応用力学研究所：助手

<https://doi.org/10.15017/4743583>

出版情報：應用力學研究所所報．46，pp.147-158，1977-09．九州大学応用力学研究所
バージョン：
権利関係：



角柱まわりの流れ (III)

—非定常流速の測定—

溝 田 武 人*

概 要

一様流中で静止させた断面比 1/1 角柱のまわりで周期的に変動する非定常流速をタンデム型熱線プローブを使って風洞実験により調べた。角柱近傍の逆流域を含めて広い範囲における非定常流速の実効値、位相差を測定し、角柱まわりの等変動流速分布図および非定常流線図を画いた。主要な結果は以下のとおりである。

- 1) 変動流速が最も激しくなる部分は角柱まわりの 2 個所の部分に分れて存在する。
- 2) 角柱に加わる変動揚力に対応した瞬間の非定常流線を求め、角柱背後におけるカルマン渦が形成される過程を調べた。

1. ま え が き

前報^{1),2)}までにおいては、地上又は海中構造物やその部材を構成する基本的断面形状である角柱のまわりの平均流速をタンデム型熱線プローブによって実験的に調べた。その結果から平均流線求めて、特に空力弾性的不安定現象の中でもギャロッピング振動に関する基礎的な研究として角柱断面比や水平迎角の変化に基づく平均流れの性質について調べた。

一様流中にある非流線型物体のまわりの非定常流れは、物体近傍におけるカルマン渦生成の問題や渦励振現象³⁾に関連して、きわめて重要な問題を数多く含んでいる。しかし現在までに物体の背後でカルマン渦がどのようなメカニズムで形成されるかという観点から調べたものは少く^{4),5)}、うず生成の現象はまだ良く判っていないと云われている⁶⁾。特に工学的に重要であると思われる比較的高いレイノルズ数範囲では物体近くの非定常流れについては不明な点が多い。

本研究は、角柱近傍の逆流領域を含めて非定常流れの特性を明らかにすることを目的とし、はじめに二次元一様流中で静止させた水平迎角零度の 1/1 角柱を例に、角柱近傍を含む後流の比較的広い範囲における非定常流速をタンデム型熱線プローブで測定した。

本報告は、特に角柱まわりの非定常流線を変動揚力との関連において求め、角柱背後でカルマン渦が形成される過程を始めとする静止角柱まわりの周期的流れの性質を調べたものである。

2. 実 験 方 法

タンデム型熱線プローブで検出する流速の非定常成分はバンドパスフィルター (0.24~10 Hz) を通

* 九州大学助手，応用力学研究所

し, r.m.s. メーターの出力を X-Y レコーダーに記録して求め, 一様流速で無次元化する (r.m.s. 値). 又, 本実験においては静止角柱後方に生じるカルマン渦による非定常揚力を角柱の中心軸であるアルミ製の中空パイプに貼った歪ゲージから出力する. そして, 非定常揚力と非定常流速の間の位相差 ϕ は, 2 信号の極性相互相関係数を歪波測定器によって求め, ペン書きオシロスコープに記録することによって算出する. 実験において, 一様流速は 6.9 m/sec に設定した. 供試角柱の寸法は 150 mm×150 mm×700 mm であり, 流れのレイノルズ数は 7.14×10^4 である.

物体まわりの流速の非定常成分の測定法や, タンデム型熱線プローブの特性等の詳細はすでにのべた⁷⁾ が, その方法の概略を簡単に記す. すなわち流れの場の中でプローブの方向を変化させて, 流速ベクトルの画く楕円状のリサージュ波形の長軸および短軸に相当する流速成分 u_m , v_m を各々測定し, それらの値から, 主流方向 (X) 成分 u_u , 主流と直交方向 (Y) 成分 v_u を計算で求める. ここで, 角柱断面の中央を $X=Y=0$ とする. X, Y は実際の距離を角柱の代表長 (150 mm) で無次元化する. もしプローブの方向特性が完全な余弦波であれば, プローブを X 方向に設置したとき, その出力は常に u_u に相当する値が示される. しかし実際にはその方向特性は 90 度付近では多少余弦波からずれていることが判っている. 非定常成分の振幅を r.m.s. 値によって調べる場合にはこのずれが結果に影響を及ぼすことが考えられる. そこでまず, 1/1 角柱のまわりの流れについて, 先にのべた楕円状のリサージュ波形の長軸, 短軸に相当する流速の r.m.s. 値 u_m , v_m を測定して, u_u の r.m.s. 値を計算で求めた結果と, プローブを水平に設置して直接 r.m.s. 値を求めた結果を比較して各々図 1 に示す. 図中 $\bullet$, $\circ$ 印は各々 u_m ,

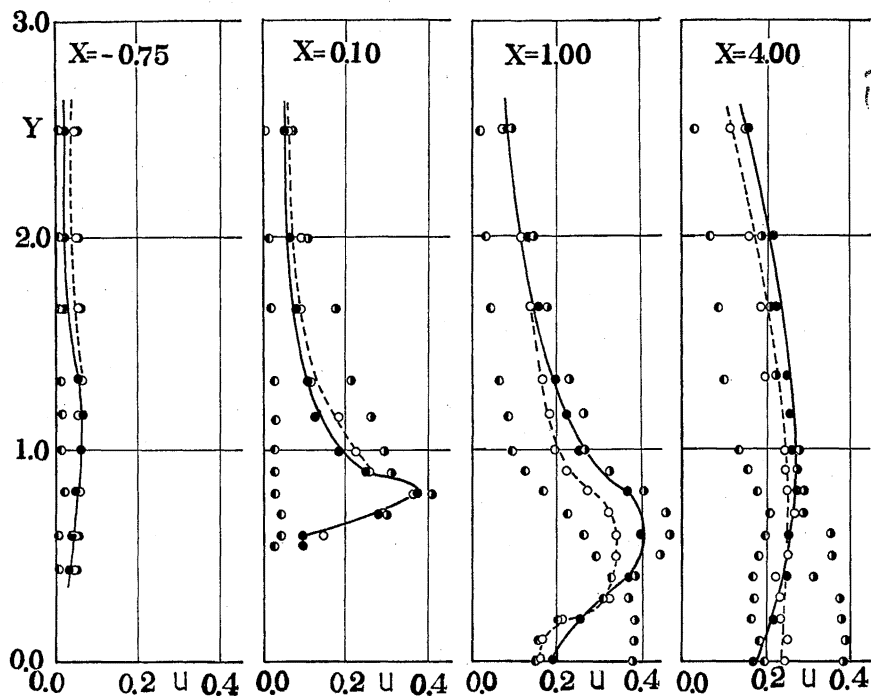


図 1 2つの測定法による結果の比較

v_m で、---○---印はその値から求めた u_u (図中 u) である。又、—●—印はプローブを水平に設置して直接求めた u_u である。両者は、角柱の前方、上面側および後方で部分的には違いが生じているが、ほぼ同一の傾向を示している。そこで以下の測定値は、等変動速度分布図を求めたとき以外はすべてプローブを水平を設置して得られた結果による。

3. 実験結果

以上のべた方法により、迎角零度の $1/1$ 角柱まわりの非定常流速の振幅の r.m.s. 値(以下 u) および変動揚力からの位相差 ϕ を測定し、等変動速度分布図、非定常流線等を求めた結果を順を追ってのべる。

3.1. 非定常流速と位相分布

はじめに u , ϕ を角柱まわりの種々の部分について求めた結果を図 2 a ~ 2 b に示す。まず u の変化であるが角柱の前方においてその変化は小さい。しかし前縁から剥離して角柱の上面側の中央部を過ぎる付近から鋭いピークを生じて急激に発達し、角柱後縁付近から $X=1.00$ では最大 $u=0.40$ にも達する。 $X=1.50$ より後方において、 u は次第に減少し Y 方向にも一様化する傾向がある。 $X=6.0, 8.0$ では、 Y 方向にも X 方向にもほとんど変化していない。

次に位相差 ϕ の変化の様子をのべる。図 2 a に示すように逆流域を除くと前縁剥離点付近の位相が最も進んでおり、それから前方 ($X < -0.5$)、後方 ($X > -0.5$) および上方 ($Y > 0.5$) にわたって位相が遅れており流れ場の中で角柱まわりに変動が伝播する様子がわかる。図 2 b, 2 c のような角柱近傍の

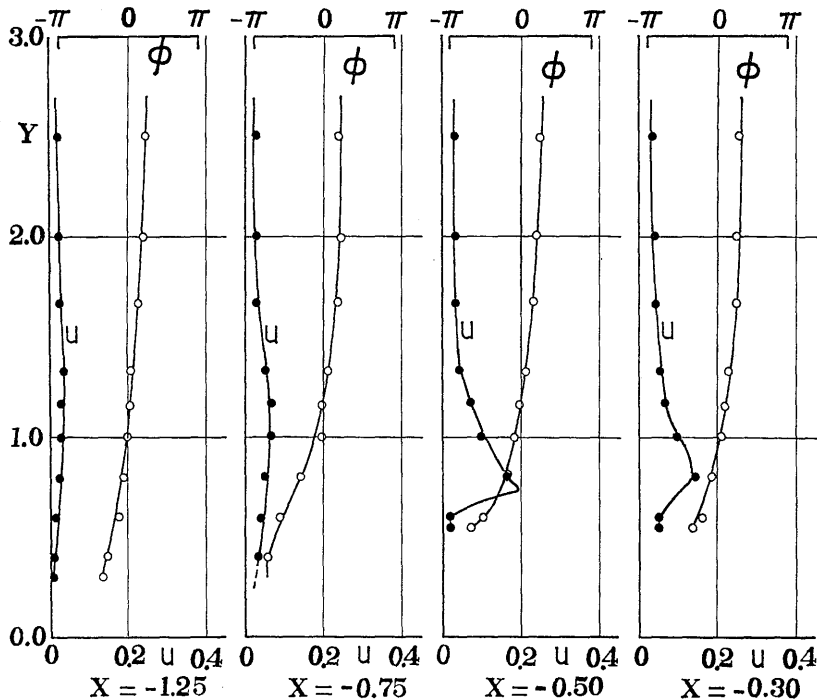


図 2 a 非定常流速の振幅と位相 ($X = -1.25 \sim -0.30$)

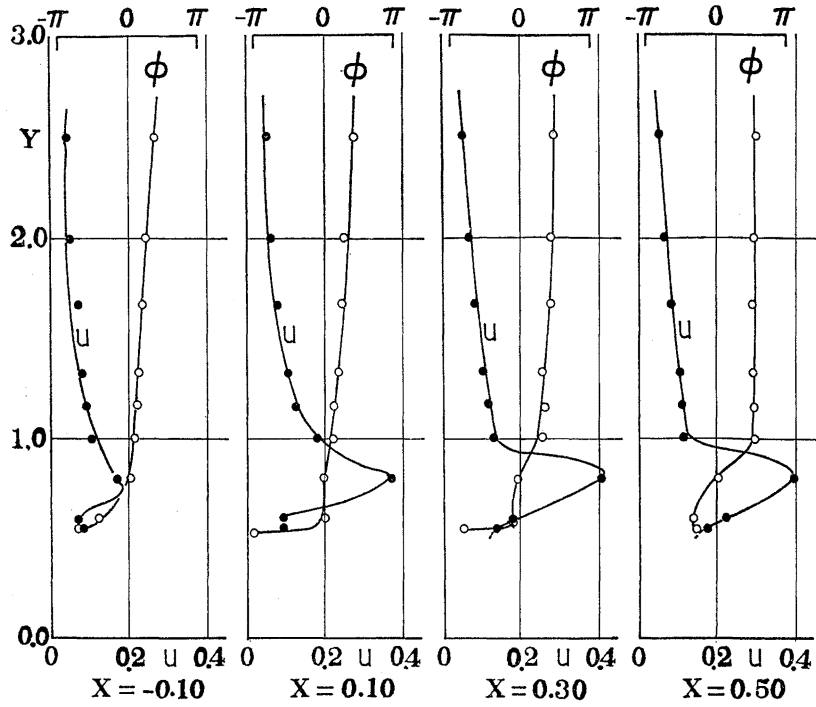


図 2 b 非定常流速の振幅と位相 ($X = -0.10 \sim 0.50$)

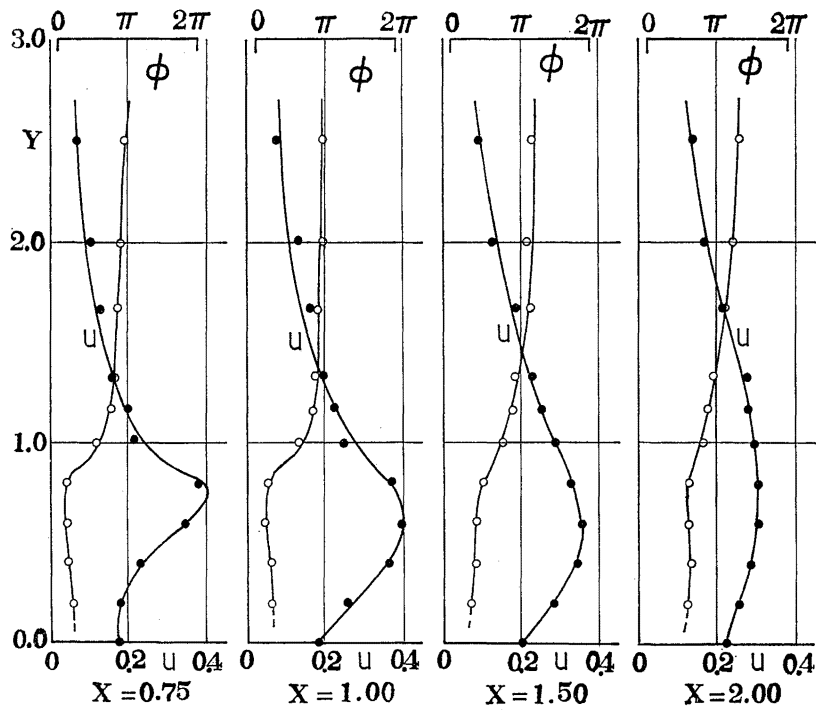
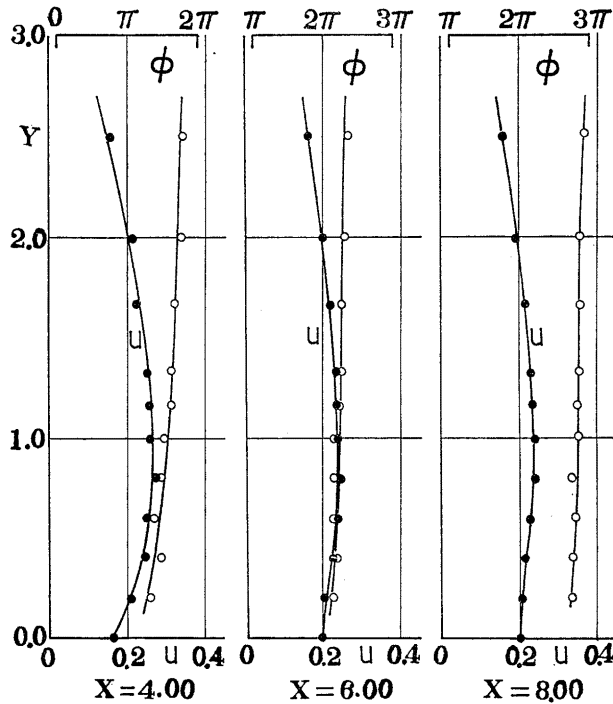


図 2 c 非定常流速の振幅と位相 ($X = 0.75 \sim 2.00$)

図 2 d 非定常流速の振幅と位相 ($X=4.00 \sim 8.00$)

剝離域内部ではいずれも位相が激しく変化している。しかし、 $X=4.0, 6.0, 8.0$ のような角柱の後方においては、図 2 d に示すように Y 方向の変化は次第に少くなり全体として位相は揃ってくる。

3.2. 等変動流速分布

次に、角柱まわりの任意の点における最大変動流速 u_m を求めた結果に基づき、等変動流速分布を求めて $Y>0$ について図 3 に示す。同様な分布図は、円柱のまわりの変動流速を単線式熱線にて測定して得られた例⁹⁾があるが円柱の背後において逆流の存在等のため、単線式熱線は流れの方向を弁別しない⁹⁾から、その付近は意味の無い信号による分布図と考えられる。Cook ら⁹⁾は逆流域においてもほぼ有意な流速成分を測定できる shielded hot-wire probe を使って正方形断面の 3 次元角柱まわりの変動流速 (u, v) を測定し、等 u 、等 v 分布図を求めている。その図を合成すると図 3 とほぼ同様な結果になることがわかる。このように最も激しい流速の変動を行す領域は 2 つに分れて存在している。すなわち一方は角柱後縁の上方で $u \approx 0.5$ を示す所で、ここは前縁で剝離した自由剪断層が角柱背後のいわゆるカルマン渦の形成領域 (formation region¹⁰⁾¹¹⁾) と考えられる部分へと巻き込みを行いながら大きな流速の変動を示す部分である。他方は $X \approx 1.4 \sim 2.7$ の Y 軸上を中心とした比較的広い領域であって、角柱の上下の剪断層が相互に干渉し合うことによって大きな流速変動を生ずる所である。この附近では u_m (最大変動流速) を示す方向は Y 方向である。この等変動流速分布図は次項で示す非定常流線と比較するとより理解し易いが、角柱まわりの広い範囲において等しい変動流速を示す領域が良く判る。

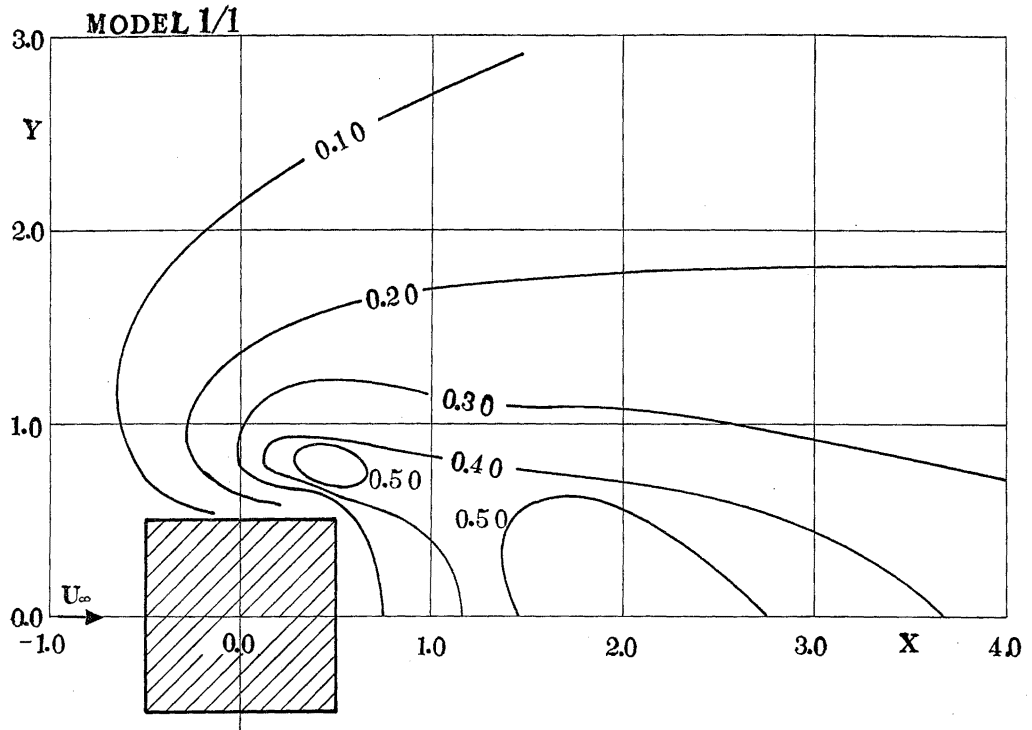


図3 等変動流速分布図

3.3. 非定常流線

角柱まわりの非定常流速の振幅 u と変動力からの位相差 ϕ を2節でのべた方法で測定し、すでにのべた平均流速 U_0 と重ね合わせて、角柱まわりの流速の X 方向成分の瞬時値を変動揚力からの適当な位相関係において求めることができる。角柱後流の中心軸上については別に非定常流速の振幅の Y 方

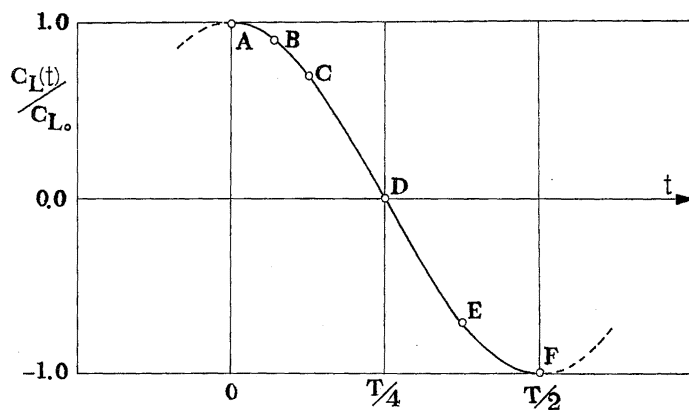


図4 図5 の位相角

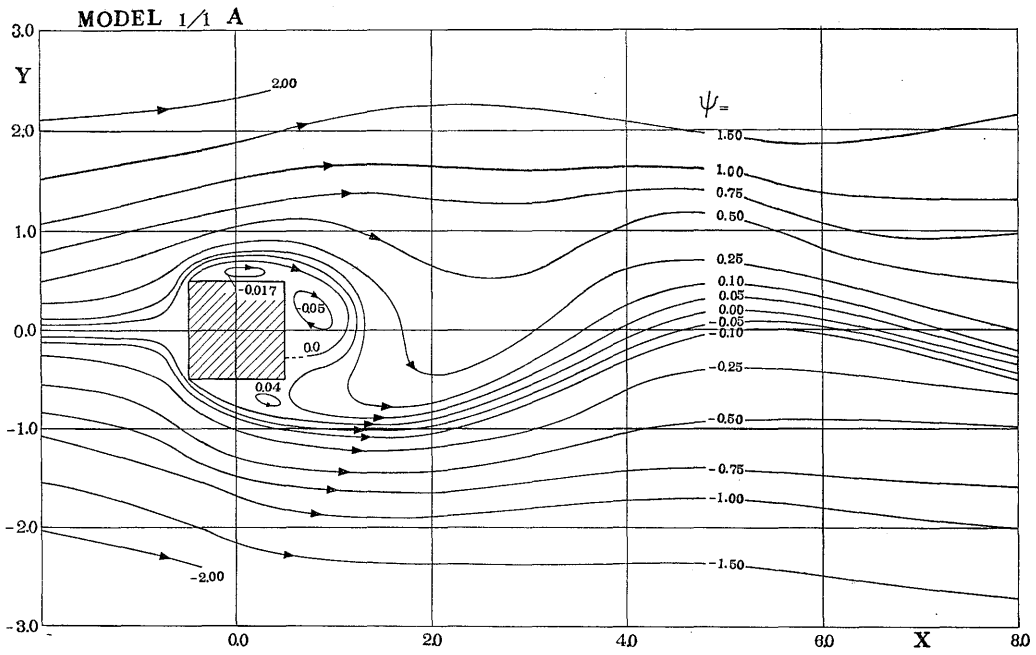


図5 A 非定常流線 (0度)

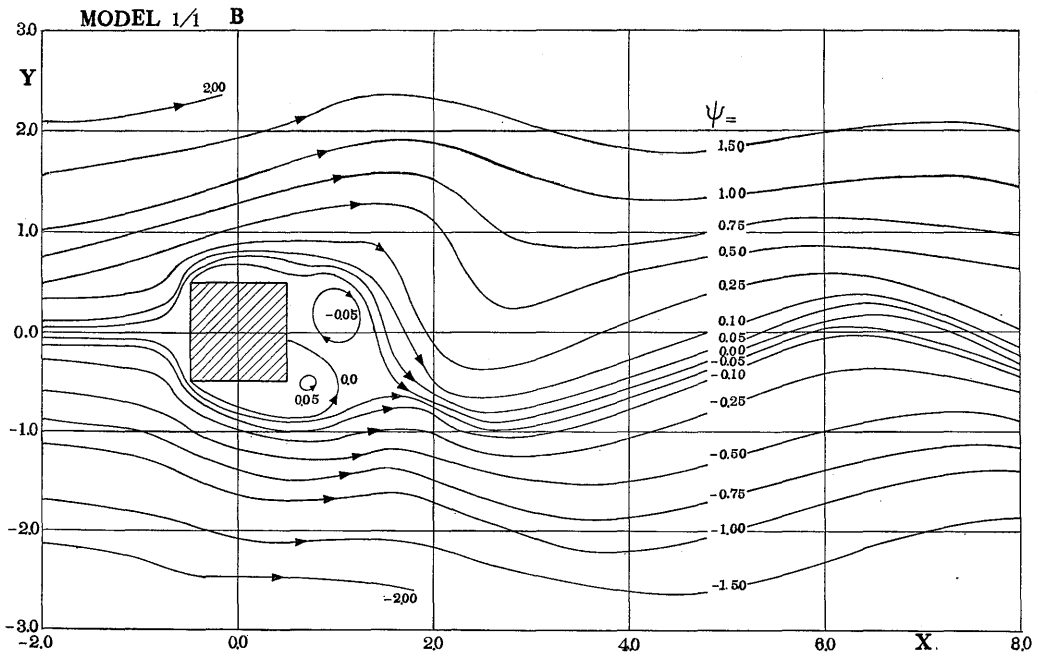


図5 B 非定常流線 (25度)

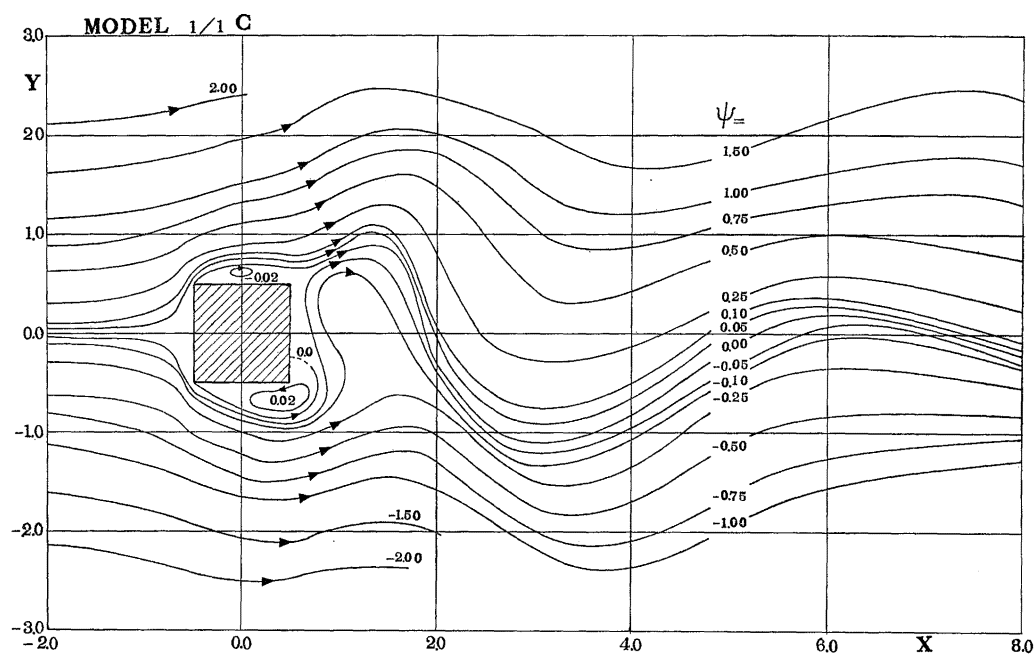


図 5 C 非 定 常 流 線 (45 度)

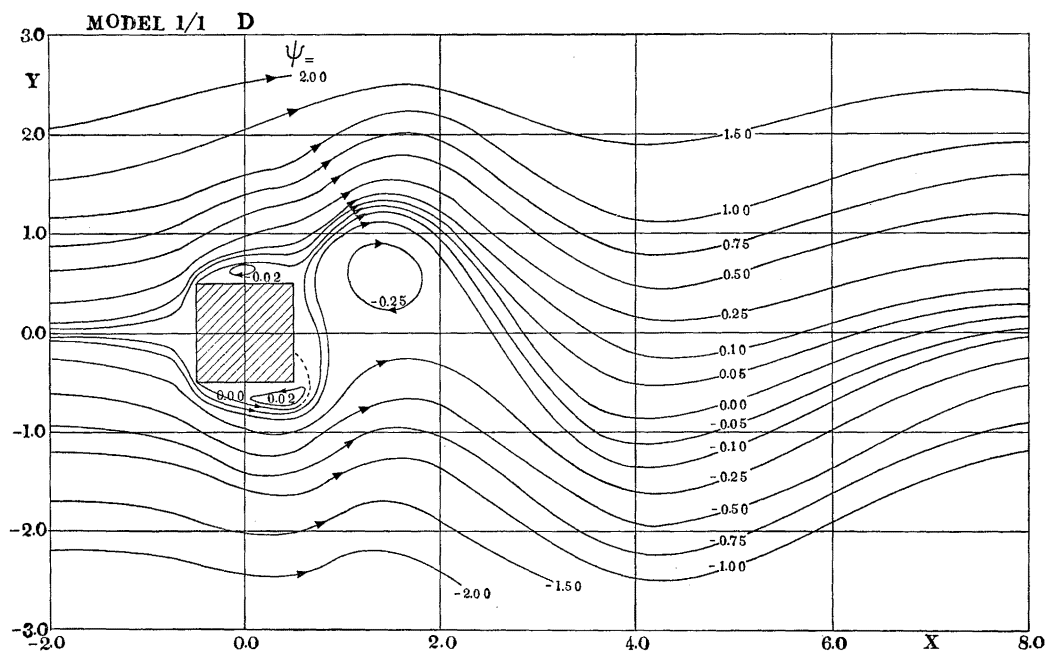


図 5 D 非 定 常 流 線 (90 度)

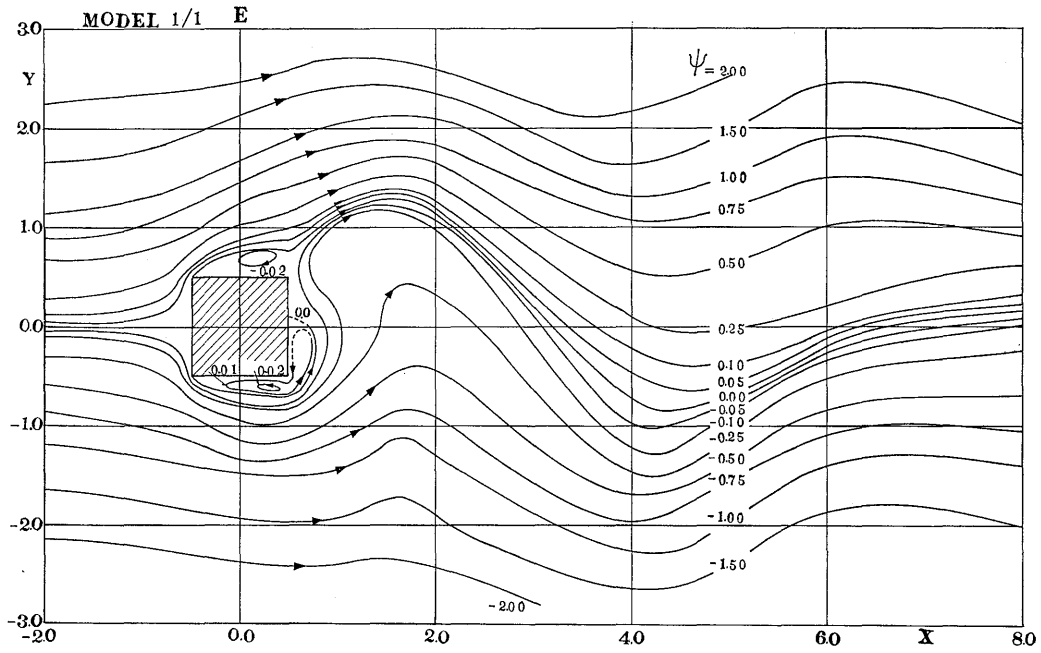


図 5 E 非定常流線 (135 度)

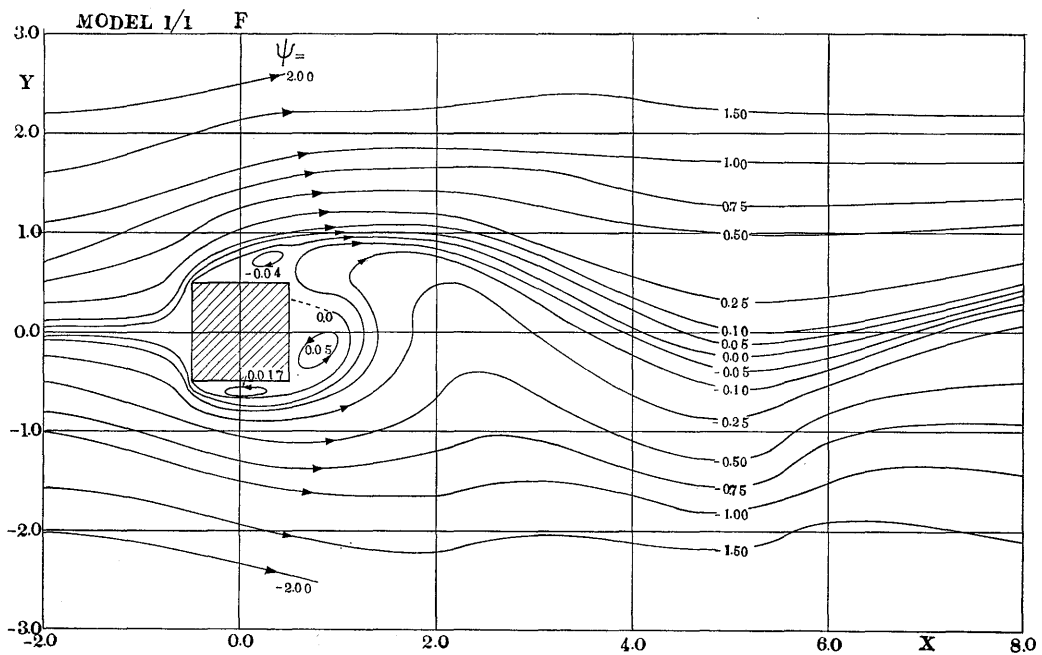


図 5 F 非定常流線 (180 度)

向成分 v と ϕ を別に求めておく。これらの測定値によって、先に平均流線を求めるためのベタ方法とまったく同様に、角柱まわりの非定常流線 ψ を画くことができる。観察座標系は角柱に固定したものとす。この方法によって画く流線は流速の変化をアンサンブル平均化して求めたことと等価である。したがって、一様流中にある物体のまわりのような周期的な変動流れを平均化して表現するにはきわめて有効である。以下図 4 のように余弦波状に変化する変動揚力に対応した瞬間の非定常流線を図 5 A ~ F として示す。図 4 で、各々の記号は次式による。すなわちカルマン渦による変動揚力係数 $C_L(t)^{9)}$ は

$$C_L(t) = C_{L0} \cdot \cos 2\pi f_K t$$

と表わせる。ここで t は時間、 f_K はカルマン渦の振動数で本実験においては、 $f_K = \frac{1}{T} \doteq 5.75 \text{ Hz}$ 、 C_{L0} は変動揚力係数の振幅で、 $C_{L0} \doteq 1.414$ である。流れは半周期表現する。

まず図 5 A は上向き最大の揚力が生じている瞬間の流線である。前縁の上部の角から出る $\psi=0$ の流線は、上面および背面側の渦を 2 個取り囲んで背面の下方で閉じている。前縁の下部の角から出る $\psi=0$ の流線は後方に連続している。下面側にも 1 個の渦が生じている。次に図 5 B は、図 5 A から 25 度揚力が遅れた瞬間の流線である。上向き最大揚力を示す流れ（図 5 A）から、本図までへの流れの変化が著しい。すなわち角柱上面側の $\psi=0$ の流線は、角柱背面で閉じていたが、本図の位相では、この流線は後方に連続し、背面付近の渦がわずかに離れる。逆に前縁の下部から出た $\psi=0$ の流線が、下面後縁付近の渦を取り囲んで背面中央付近で閉じている。さらに揚力が遅れて、45 度の場合の流れが図 5 C である。下面側の $\psi=0$ の流線が囲む部分は縮少し、背面付近にあった渦もさらに後方に移動しもはや循環流としては存在しない。しかし上面側には小さな循環流 ($\psi=-0.02$) が生じている。さらに、丁度 1/4 周期だけ揚力が変化して、 $C_L(t)=0$ の流れが図 5 D である。下面側の $\psi=0$ の流線が囲む領域はさらに小さくなり、45 度でいったん消えた循環流が角柱背後の流れの複雑な変化とともに、この瞬間では再び観察される。さらに下向きに揚力が作用し始めた流れとして 135 度の場合が図 5 E である。下面側の $\psi=0$ の流線は再び拡大して、角柱側 $\psi=0$ の流れはさらに拡大してよどみ点はほぼ上面後縁付近に達して、下向き最大の揚力を生ずる流れになり、半周期 (180 度) を終え、図 5 A と丁度 X 軸に対して対称な流れになる。

さらに図 5 A から図 5 B の間は、最大揚力が実現された後にその変化は、揚力においてはわずかであるが、流れの変化は著しいことが挙げられる。

ここで揚力変動の半周期間において、カルマン渦が角柱から離れ、渦列へと編成される過程をまとめておく次のようになる。まず上面側においては、中に渦を持って閉じた流れが（図 5 A）、短い時間が経過した後（図 5 B）、その渦を角柱背後に放出し、下面側でも比較的大きな閉じた流れが形成される。先に放出された渦との相互作用によって、下面側の閉じた流れ自身は、いったんその領域を狭くする（図 5 C, D）。放出された渦はさらに遠ざかり後流の渦列へと編成される（図 5 E）。その過程で下面側の $\psi=0$ の領域は次に放出される渦として、下面と背面の間で発達しながら、ついには内部の渦が 2 個に分離されて（図 5 F）、背面側の渦が成長して流れの半周期を終える。

4. 結 論

風洞実験により迎角零度で静止させた $1/1$ 角柱まわりの非定常流速の振幅と、変動揚力からの位相差をタンデム型熱線プローブで測定した。その結果から静止角柱まわりの周期的に変動する非定常流れに関する基本的な性状をのべた。主な結論は次のとおりである。

1) 角柱まわりで、最も激しい変動流速は一様流の 50 % にも達し、角柱後縁付近と後流の中心線上 $X \div 1.4 \sim 2.7$ の 2 個所で、実現する。

2) 変動揚力の半周期間における角柱まわりの非定常流線を求め、角柱からカルマン渦が放出され渦列に編成される過程をのべた。

このように、物体まわりの非定常流に関する基礎的な研究として、非定常流線を求めることができた。今後さらに、物体が振動するときを含めて、物体背後における渦の形成、および後流における渦列の問題を、特に渦励振現象に関連してのべる予定である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、種々御助言いただいた中村泰治教授に厚くお礼申し上げる。また数々の議論を行って下さった岡島厚助教授ならびに友成義正助手に深く感謝する。

データー解析の一部は、九州大学応用力学研究所電子計算機 FACOM 230-48 によった。

文 献

- 1) 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，1976，pp. 396-384.
- 2) 溝田武人：角柱まわりの流れ (Ⅱ)，一平均流および平均圧力の測定一，九州大学 応用力学研究所所報，第 46 号，1977，pp. 129-145.
- 3) Nakamura, Y., and Mizota, T., Unsteady lifts and wakes of oscillating rectangular prisms, J. Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 101, No. EM 6, Proc. Paper 1181, 1975, pp. 855-871.
- 4) Nayler, J. L. and Frazer, R. A., Vortex motion. (i) Preliminary, report upon an experimental method of investigating, by the aid of kinematograph photography, the history of eddying flow past a model immersed in water., Advisory Committee for Aeronautics, R. & M., No. 332, 1917.
- 5) Zdravkovich, M. M., Smoke observations of the formation of a Kármán vortex street, J. Fluid Mech., Vol. 37, part 3, 1969, pp. 491-496.
- 6) 葉山真治：カルマン渦による振動 (補足)，機械学会企画運営部会流体関連振動研究会資料，1976，pp. 1-13.
- 7) 溝田武人，岡島厚：熱線による非定常逆流域の流速測定法，九州大学応用力学研究所所報，第 45 号，1976，pp. 353-368.
- 8) Hanson, F. B., and Richardson, P. D., The near-wake of a circular cylinder in crossflow, J. Basic Eng., Trans. ASME., Series FE, Vol. 90, No. 2, 1968, pp. 476-484.
- 9) 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.

- 10) Gerrard, J. H., A disturbance-sensitive Reynolds number range of the flow past a circular cylinder, J. Fluid Mech., Vol. 22, part 1, 1965, pp. 187-196.
- 11) Bloor, M. S., The transition to turbulence in the wake of a circular cylinder, J. Fluid Mech., Vol. 19, part 2, 1964, pp. 290-304.

(昭和 52 年 6 月 15 日 受理)