

一様流中で正弦振動する円柱まわりの流れ*

(第1報, 同期現象下の渦の放出機構)

永田 拓**, 林 一也***, 河合正昌****
Hiroshi NAGATA, Kazuya HAYASHI, Masaaki KAWAI

Key Words: Unsteady Flow, Separated Flow, Vortex, Synchronization Phenomena, Vortex Shedding, Vorticity Flux, Separation Point

1. は し が き

一様流中の円柱背後からは、周期的に渦が放出され、下流にはカルマン渦列が形成される。この渦の放出サイクルに近い振動数で、円柱を流れと直角方向に振動させると、円柱の振動に同期して渦が放出される。この現象は「同期現象」と呼ばれ、抵抗係数の増大や速度変動の同期化など興味ある問題が含まれている。工学の分野でも、これに関連した問題は多く、Den Hartog⁽¹⁾以来振動円柱に関する多数の研究があり、従来の研究の経過は Sarpkaya の総説⁽²⁾にまとめられている。

しかし、これらの研究は、円柱から遠く離れた後流中の渦や円柱全体に作用する抗力などに関するものがほとんどであり、渦の生成や放出機構に直接関連する円柱表面近傍と円柱直後の流れに関する実験的研究はほとんど見当たらない。

最近 Zdravkovich⁽³⁾は、振動円柱まわりの可視化写真を解析し、円柱の振動に同期して渦が放出される時期(振動位相)を調べ、渦放出に二つのモードがあることを明らかにした。しかし、解析した写真は、水面に散布した Al 粉末をトレーサとしたもので、円柱表面近傍の流れの詳細や三次元的な流れの発生などについての知見は得られていない。

関連する研究として、Sarpkaya らは「渦点法」を用いた数値解析によって、円柱の振動に同期して渦が放出される機構を調べている⁽⁴⁾。はく離せん断層を多数の渦点の配列によって近似するこの解法では、はく離

点から流出する渦点の数や強さの設定や、渦が円柱背面から放出される発端を与える非対称性の導入については、確定した方法はなく現実の流れをよりよく近似するための手法が模索されている。したがって、「渦点法」による結果は、実験的に検証される必要があり、渦点法をより有効な方法にするためにも、円柱表面近傍の流れに対する信頼できる実験事実の蓄積が望まれる。

本研究では、一様流中で正弦振動する円柱表面近傍と円柱直後の流れについて詳細な可視化実験を行い、前方よどみ点およびはく離点の移動、はく離点を通過する渦度流束、円柱直後の渦の形状などの時間変化を調べ、円柱の振動に同期して渦が放出される機構を明らかにした。

2. 実験の装置と方法

2・1 装置の概略 回流水槽(幅 580 mm, 深さ 225 mm)内の一様流中で、流れと直角方向に正弦振動する円柱まわりの流れを観察するための装置を製作した。図 1 に、その概略を示す。供試円柱②(直径 $D=50$ mm, 長さ 220 mm)は、カメラ④と同一の台車③に取付けられている。台車は、流れと直角方向に設置したレール⑥上を滑動し、スコッチヨーク機構をもつ駆動装置①によって正弦的に振動させることができる。以後、円柱の変位を $Y=A \sin \omega t$ 、円柱の速度を $U_c=\dot{Y}$ (A : 振幅, ω : 角振動数, t : 時間) で表す。また、円柱は水平面に直角な面内で振動しているが、説明の便宜上 $\omega t=90^\circ$ および 270° の円柱の位置をそれぞれ「上死点」、「下死点」と呼ぶ。

2・2 可視化と写真撮影の方法 主として、水面下約 30~40 mm の水平面に平行な面内の流れを、電解沈殿法と水素気泡法により可視化した。電解沈殿法としては、前報⁽⁵⁾⁽⁶⁾で詳述した方法——すなわち、導

* 昭和 59 年 3 月 22 日 関西支部第 59 期定時総会講演会において論文講演として講演、原稿受付 昭和 58 年 10 月 26 日。

** 正員、岐阜大学工学部 (〒501-11 岐阜市柳戸 1-1)。

*** 学生員、岐阜大学大学院。

**** 正員、一宮工業高等学校 (〒482 一宮市千秋町)。

電性塗料を円柱表面に塗布し、これを発色電極とする方法を適用した。この方法によれば、水素気泡法との併用が容易になり、流脈とともに流跡、および時間線 (time line) が鮮明に可視化できる。写真の一例を図2に示す。この写真で円柱表面から伸びる白色の線が、電解沈殿法によるもので、円柱表面に隣接した流体粒子の流脈を示す。この流脈の形状から円柱表面で生成された渦度の輸送状況の概略を知ることができる⁽⁷⁾。また、水素気泡を発生させる細線が、円柱の上流に1本と円柱表面から放射状に4本張られていて、これからパルス的に発生する気泡は、写真に見られるように、鮮明な流跡と時間線を示している。前報⁽⁸⁾で用いた方法によって流跡の長さや露光時間から流速が精度良く求まり、時間線からは円柱表面近傍の微小な流れの方向がわかる。

写真撮影は、光電スイッチとモータ駆動カメラの組合せによって円柱の振動に同期させ、カメラのX接

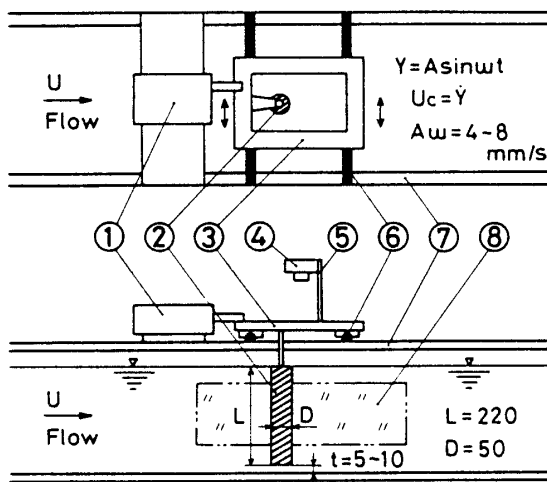
点からの信号を記録し、撮影時期と円柱の振動位相との関係を明確にした。

3. 同期の範囲と実験条件の設定

渦領域に乱流部分を含みかつ詳細な可視化実験が可能であることから、本実験ではレイノルズ数 $Re = UD/\nu$ (U : 一様流速度, ν : 動粘性係数) が 10^3 程度の流れに注目した。この程度の Re の振動円柱については、同期現象に関する実験結果は見当たらない。そこで、まず同期現象の存在とその範囲を調べることにした。

渦の放出周波数を可視化実験から求めることは難しいので、風洞実験を行った。風洞 (断面: 幅 300 mm, 高さ 200 mm) の中央に、直径 $D=10$ mm, 20 mm の円柱を水平に設置し、これをクランク機構によって上下に振動させ、円柱の後流の変動速度を熱線流速計で測定した。円柱の振幅 A を、 $A/D=0.2$ に固定して、後流の変動速度のリサージュ図形から渦の放出周波数を求めた。

図3は、こうして求めた渦の放出周波数と円柱の振動数の関係を示す。縦軸は、渦の放出周波数と円柱の振動数との比 S_v/S_c 、横軸は、円柱の無次元振動数 $S_c = f_c D/U$ ($S_v \equiv f_v D/U$, f_c : 円柱の振動数, f_v : 渦の放出周波数) である。この図3で、 S_v/S_c が 1.0 を示す S_c の範囲が同期の範囲を示す。図に見られるように Re が 600~2500 の場合にも、 $Re=100$ の Taneda の結果と同様に、 $S_c=0.1\sim0.2$ の範囲に同期現象が明確に認められる。このように同期現象の存在が確認されたので、本実験では、Zdravkovich の渦放出の二つのモード⁽³⁾が混在しないように、円柱の



1. Scotch Yoke Mechanism 2. Test Cylinder
3. Carriage 4. Camera 5. Camera Stand
6. Guide Rails 7. Water Tank 8. Window

図1 実験装置の概略

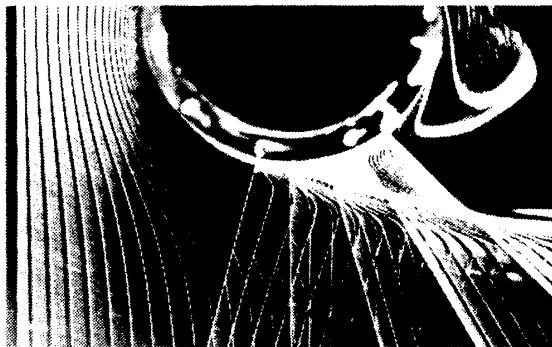


図2 はく離点近傍の流れ
($Re=1100$, $S_c=0.20$, $A/D=0.20$, $\omega t=327$)

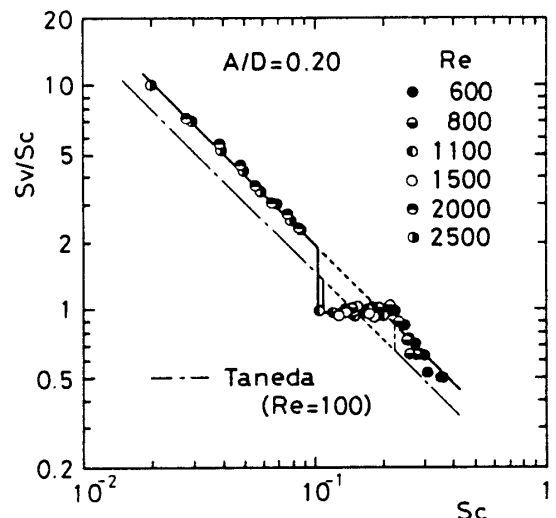


図3 円柱の振動数と渦の放出周波数の関係

振動数は同期範囲の上限に近い $Sc=0.2$ に固定して、主として $A/D=0.2$, $Re=1100$ の場合の渦の放出機構を調べることにした。

4. 実験の結果と考察

4.1 前方よどみ点の移動 水素気泡法を用いて、円柱の前方よどみ点近傍の流れを可視化した。一例を図4に示す。図5はこのような写真から測ったよどみ点の位置 θ_{st} と円柱の振動位相 ωt との関係を示す。 θ_{st} は静止円柱の場合の前方よどみ点を起点として、反時計方向に測った角度である。図5中、一点鎖線は円柱に乗った座標から見た主流の流入角度 α (迎え角) を示す。図5にみられるように、 θ_{st} は、わずかな位相差 (約 10°) で α と同様な正弦変化を示す。

4.2 はく離点の移動

4.2.1 はく離の判定条件 流れが定常であれば周知のとおり、壁面せん断応力 τ_0 の消失点、すなわち

$$\tau_0 = \mu \frac{du}{dy} \Big|_{y=0} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

を満たす点から境界層ははく離する (μ : 粘性係数, u : 速度, y : 壁面からの距離)。そして、はく離点の下

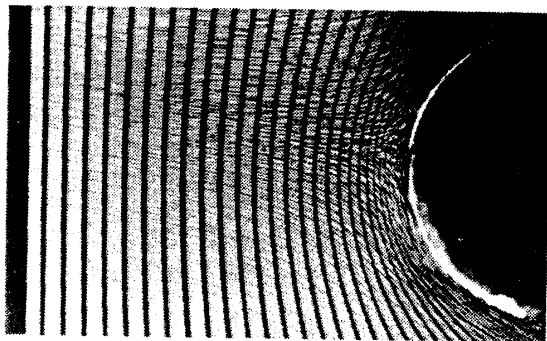


図4 前方よどみ点に向かう流れ ($Re=1100$, $Sc=0.20$, $\omega t=52$)

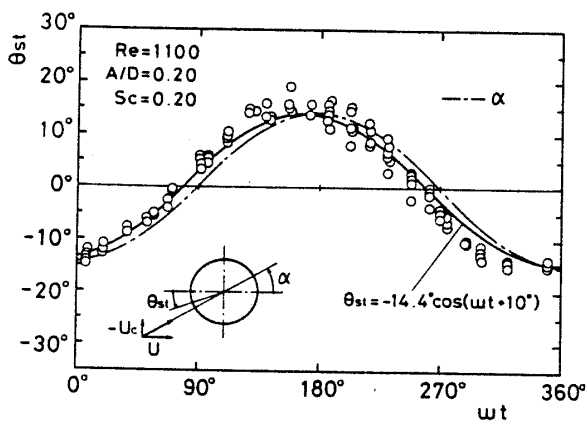


図5 よどみ点の時間変化

流では逆流が生ずるので、定常な境界層のはく離点は逆流開始点と一致する。しかし、非定常流においては式(1)が満たされても、境界層ははく離するとは限らない。非定常境界層のはく離については不明な点が多く、はく離の判定条件についても定説がない。

本実験では、Taneda⁽⁹⁾が提案している「はく離の判定条件」すなわち

「物体表面から流体粒子がはがれる点」……(2)

をはく離点とみなすことにした。この判定条件を満たす点は、円柱表面を電極とする電解沈殿法によって、円柱表面から溶出する色素が円柱表面からはがれる点として観察し測定することができる。さらにこの色素の軌跡 (以後色素線という) は観察座標系に依存しないので、条件(2)は非定常流のはく離に対する判定条件として妥当であるように思われる。

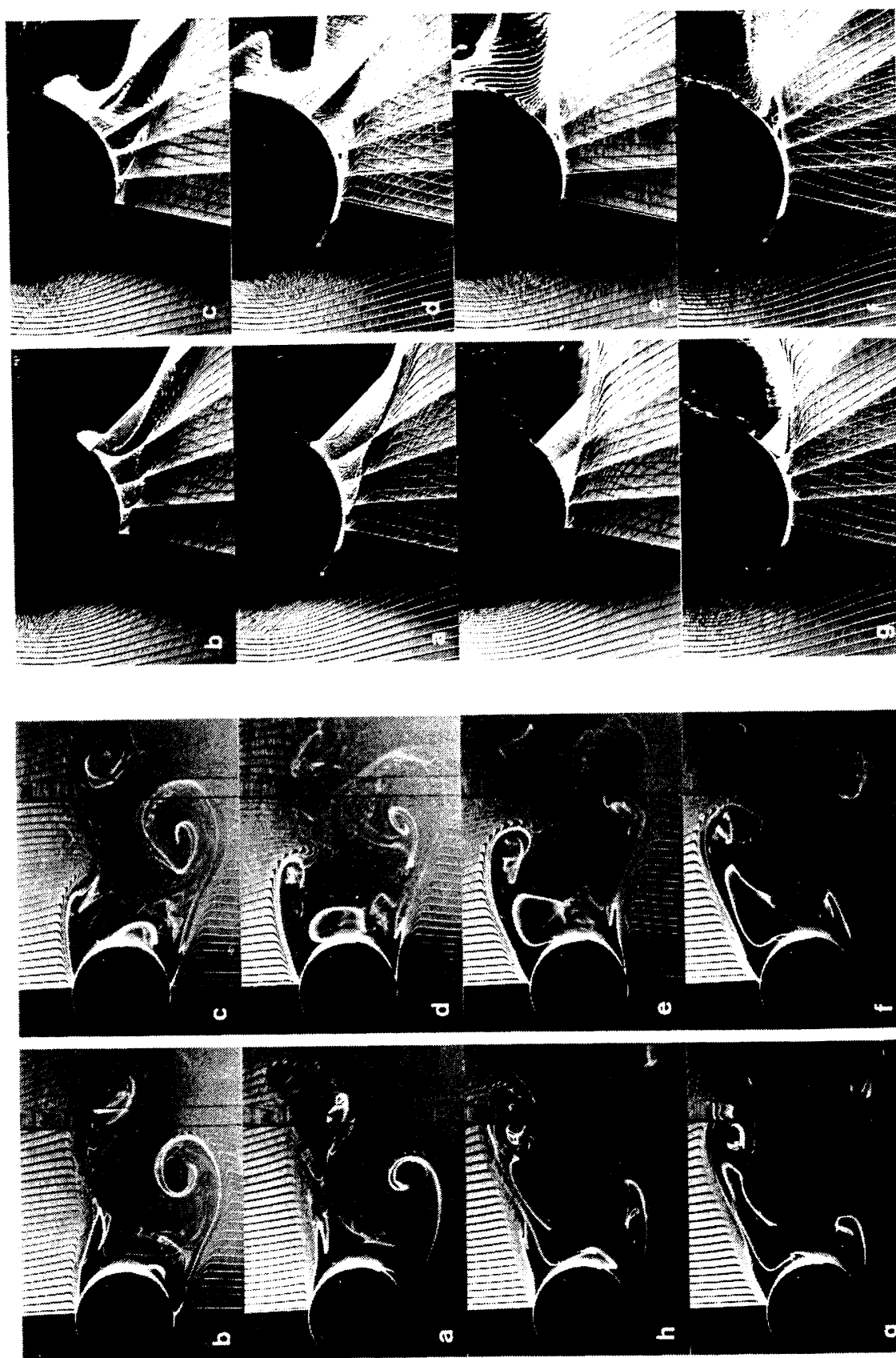
4.2.2 電解沈殿法が示すはく離点の移動 図6は円柱背後の流れの時間経過を示す。写真(I), (II)の配列は、いずれも、円柱の移動位置に対応させてあり、図の上下の端がそれぞれ上死点、下死点に対応していて、写真を時計まわりに見れば流れの時間変化がわかる。

まず写真(I)は、電解沈殿法と水素気泡法を併用して、はく離点を含む円柱近傍の流れを可視化したものである。いずれの位相においても、円柱表面から色素線がはがれる点が明確に認められる。また、静止円柱の場合には認められない「第3のはく離点」が通常の二つのはく離点にはさまれた円柱の背面に存在することがわかる。

図7は、このような一連の写真からはく離点の移動状況を調べた結果である。縦軸は、下死点側のはく離点の位置 θ_{s1} および第3のはく離点 θ_{s3} (図8参照)、横軸は、振動円柱の位相角 ωt である。図7中実線は二つのはく離点の測定位置 θ_{s1} , および θ_{s3} に正弦曲線をあてはめたものである。破線は円柱が静止している場合 ($Sc=0$) のはく離点の位置を示す。

振動円柱の第1のはく離点 θ_{s1} は、静止円柱のはく離点 ($\theta_{s1} \approx 93^\circ$) よりやや下流の $\theta \approx 96^\circ$ のまわりに正弦的に変動しており、振幅はよどみ点の振幅よりわずかに小さい。第1, 2のはく離点 θ_{s1} と θ_{s2} の位相は互いに 180° ずれているので、二つのはく離点のはさむ角度は一定で常に約 150° である。

第3のはく離点 θ_{s3} は、円柱の振動速度 ($U_c = A\omega \cos \omega t$) と同位相で $\theta = 180^\circ$ のまわりに振動していて、振幅は大きく、第1, 2のはく離点 θ_{s1} , θ_{s2} , 前方よどみ点 θ_{st} の変動幅の約2倍である。このような θ_{s3} の移動状況は、このはく離点の生成機構を反映している。

図 6 振動する円柱周辺の流れ ($R_e = 1100$, $A/D = 0.2$, $S_c = 0.2$)

すなわち、円柱が静止していれば、二つのはく離点にはさまれた円柱背面近傍の流れはほとんどよどんでいる(死水域)が、円柱の振動によって壁面との相対速度が発生し、渦度の生成とはく離が起こる。したがって、第3のはく離点は、第1, 2のはく離点の移動とは独立して、円柱の振動と同期して大きく移動する。この場合、円柱表面で生成される渦度の符号が円柱の移動方向に対応して変わるので、この点を通して供給される渦度は、渦の放出機構に重大な影響を及ぼすと考えられる。

4・2・3 はく離点と逆流領域 定常流中のはく離点の下流には逆流領域が形成されるので、はく離点は表面に沿う流れが順流から逆流に変化する点として測定することができる。本実験の場合には、流れは非定常であるので、逆流開始点とはく離点は必ずしも一致しないことが予想される。

図6の写真(II)はこの関係を明らかにするために、主流を横切る気泡発生細線に加えて、色素線が示すはく離点の前後に5本の細線を円柱表面から放射状に張り、これからも気泡をパルス的に発生させ、渦領域の生成過程を可視化したものである。図中の θ_w は細線の設置位置を示す方位角である。この一連の写真の気

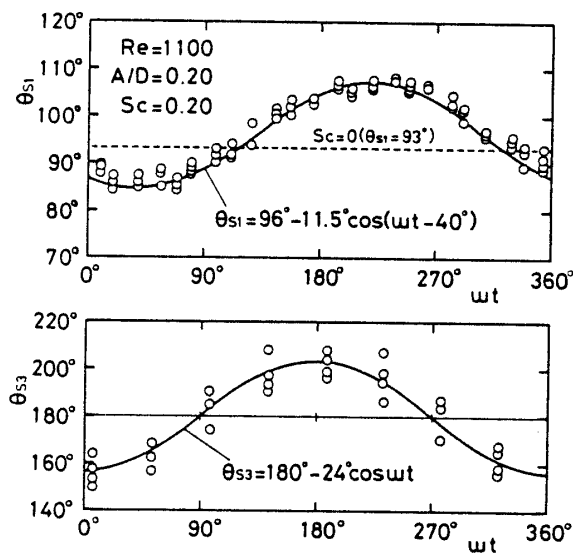


図7 はく離点(θ_{S1} , θ_{S3})の移動

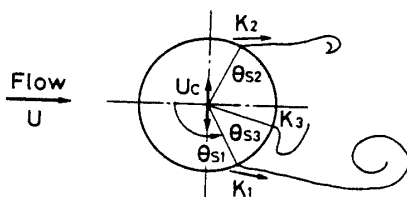


図8 はく離点と渦度流束の記号の説明図

泡発生細線とこれから発生する気泡列(時間線を示す)との相対的な位置から、はく離点近傍の速度場の時間変化を知ることができる。

まず、円柱が上死点に向かう $\omega t=270\sim 90^\circ$ の写真(g)~(b)では、はく離点の下流には逆流領域の発達が認められる。これに対して、円柱が下死点に向かう(c)~(e)の写真では、はく離点(色素線のはかれる点)の下流の円柱表面近傍の流れには、逆流はまったく認められない。これは静止円柱の場合には見られない振動円柱に特有な現象である。

図9は、この現象に注目して、このような一連の写真から、はく離点前後における逆流の存在と円柱の振動位相角 ωt との関係を調べたものである。縦軸は、円柱表面の位置を示す方位角 θ 、横軸は、位相角 ωt である。逆流の有無は、円柱表面に沿う逆流層の厚さ S (図9中の説明図参照)の有無で判断し、それぞれ黒丸印と白丸印で示している。また、破線は、色素線から求めたはく離点を示す。はく離点の下流に逆流が認められない状態、すなわち、図中の斜線部 $S=0$ の領域は、一周期の約1/3に相当する $\omega t=90\sim 210^\circ$ の範囲にわたっている。これ以外の位相では、逆流開始点と色素線から求めたはく離点とはほぼ一致している。

このように、はく離点の下流に逆流が存在しないのは、円柱の振動によって生ずる円柱背面と流れの相対速度が原因であると考えられる。すなわち、円柱の背面には、円柱の運動方向と逆の相対速度が重ね合わさるので、円柱の運動方向側のはく離点の下流には、順流が重畳され逆流が消滅する可能性がある。この順流は、はく離せん断層を円柱に近づける効果があり、はく離点近く of せん断層と円柱表面がはさむ領域は小さい。円柱が下死点に近づくに従って、重畳される順流速度は小さくなり、やがて、せん断層に集中している渦度によって誘起される逆流が卓越してくる。このため、逆流の存在しない期間は、上述の $\omega t=90\sim 210^\circ$

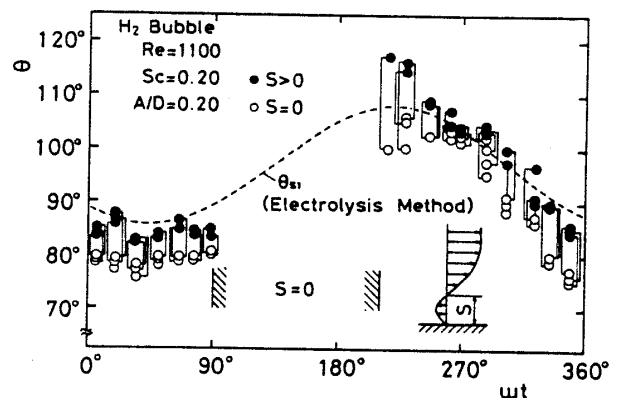


図9 逆流層の存在とはく離点の移動

に限られるものと考えられる。また、前述の第3のはく離点は、この順流がはく離する点である。

逆に、円柱の運動方向の反対側のはく離点の下流には逆流が重ね合されるので、はく離点の下流に順流が存在する可能性はなく、むしろ、円柱の運動は、円柱からはく離せん断層を引き離す(置き去りにする)傾向を助長すると考えられる。

4.3 はく離点を通過する渦度流束 円柱背後の渦領域は、円柱表面で生成された渦度がはく離点を通して輸送されることによって形成される。したがって、上述の三つのはく離点 θ_{s1} , θ_{s2} , θ_{s3} (図8)を通過する渦度流束は、いずれも渦の形成過程に対して本質的な意味をもつと考えられる。

はく離点からの無次元渦度流束 K は、はく離点が移動しない場合には近似的に次式で表される。

$$K = \int_0^\delta \omega \cdot u dy / U^2 \approx \frac{1}{2} U_s^2 / U^2 \dots\dots\dots (3)$$

ここで ω : 渦度, u : 速度, y : 壁面に垂直方向の距離, U_s : はく離点近傍の境界層外縁の速度, δ : 境界層厚さである。前述したように本実験の場合には、はく離点は円柱の振動に伴って移動しているので、式(3)は渦度流束を評価する式としては不十分である。実効的な無次元渦度流束 K^* は、Sears⁽¹⁰⁾に従ってはく離点の移動速度 U_{ss} を考慮して、

$$K^* = \int_0^\delta \frac{\omega(u - U_{ss})}{U^2} dy \approx K - \frac{U_s U_{ss}}{U^2} \dots\dots\dots (4)$$

とすべきである。

そこで、水素気泡法による写真(例えば図2)から、三つのはく離点(θ_{s1} , θ_{s2} , θ_{s3})近傍の境界層外縁の速度を測定し、式(3), (4)から渦度流束 K および K^* を求めた。渦度流束と円柱の振動位相角の関係を図10に示す。図10には、はく離点の下流に逆流が存在しない期間が $S=0$ として示され、はく離点とよみ点の移動状況が併記されている。

はく離点の移動速度を考慮した実効的な渦度流束 K_1^* , K_2^* , K_3^* は、いずれも平均値のまわりに正弦的に変化している。ここで注目したいのは、記号 Δ 印で示す $-(K_1^* + K_2^*)$ と $\bullet$ 印の K_3^* がほとんど一致していることである。これは符号まで考慮した渦度流束 K_1^* , K_2^* , K_3^* の和が、円柱の全振動位相角にわたってほとんど零であることを示し、この場合も拡張されたクッタの条件⁽¹¹⁾が成立していることを意味している。さらに、この条件の成立は、測定結果の信頼性と、円柱表面からの渦度の供給は、実効的な渦度流束 K_1^* , K_2^* , K_3^* で良く近似できることを示している。また第3のはく離点から供給される実効的な渦度流束 K_3^* は、 K_1^* , K_2^*

に比して無視しうるほどには小さくなく、符号まで含めて時間的に大きく変化するので、渦の放出現象に重大な影響を及ぼすと考えられる。

4.4 渦の放出機構 図11は、円柱表面からの色素線[例えば図6の写真(I)]が示すはく離せん断層の平均的な形状のスケッチ(図11中の①)^{*}と4.3節までに述べた主要な実験事実の概略をまとめたものである。図11には、よみ点 θ_{st} , はく離点 θ_{s1} , θ_{s3} の移動状況(②), 無次元渦度流束 K_1^* , K_3^* の時間変化(③)およびはく離点 θ_{s1} 直後の逆流(θ_{s1} に下流から近づく流れ)の有無(④)が含まれている。

以下この図11にもとづき、円柱の振動に同期して渦が放出される機構を明らかにする。

4.4.1 はく離せん断層の形状 まず下死点側の渦に注目して、円柱が下死点($\omega t = 270^\circ$)から上死点($\omega t = 90^\circ$)に向かう流れの時間変化を見る。図11の①に示すスケッチ(g)→(b)に見られるように、この期間には、渦は成長期にあり渦の放出は認められない。ついで、円柱が上死点から下死点に向かうと、スケッ

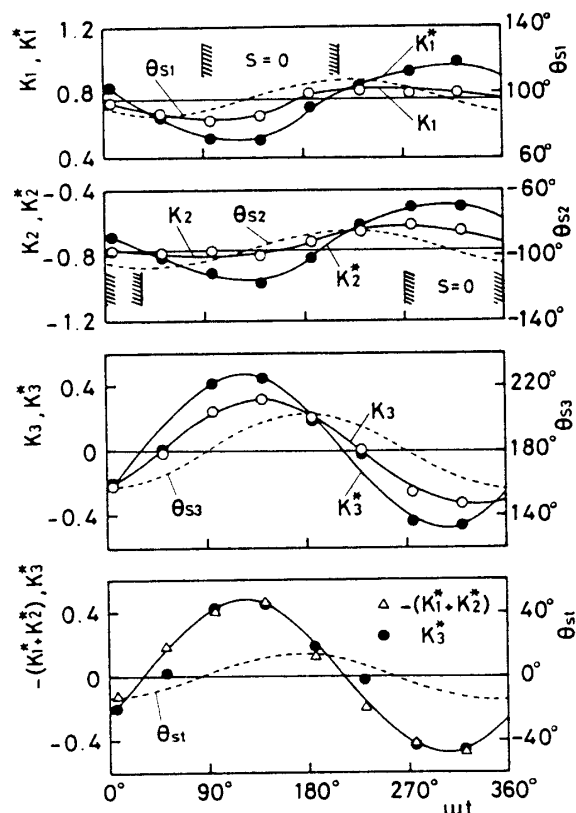


図10 渦度流束とはく離点の時間変化

^{*} はく離せん断層は乱れを伴い、その形状に完全な周期性はない。スケッチ①は、多くの可視化写真をもとに、概周期的な現象としてとらえた描像である。

チ(c)に示すようにはく離せん断層は屈曲し(図中矢印)、渦領域は乱れる。はく離せん断層の屈曲は円柱の移動とともに強調され ωt が 180° 近くになると、流れは三次元的な乱れを伴い、渦領域における渦度の集中部分が二つに分かれるように見える[(d)(e)]。さらに、円柱が下死点に近づくと[(e)~(f)],屈曲したはく離せん断層ははつきりと巻き込みを開始し、この部分に独立した渦の存在が認められる。渦領域の二分化とともに、渦度を持たない下死点側の外部流れが上死点側の渦領域に侵入し上側の渦中心を円柱から遠ざける。

このように、渦の放出は突発現象ではなく、しかも渦の放出には乱れの発生を伴うので、渦放出の一時期を明示することは困難である。あえて一時期を示すとすれば、実効的な渦度流束 K_1^* が最小値を示す時期と見なすことができる。 K_1^* は ωt が 120° 近くで最小値を示すが、この時期は上述のはく離せん断層の屈曲が顕著になる時期とほぼ一致している(図10,11)。

4.4.2 渦の放出機構 渦放出は、4.4.1項で述べたように、はく離せん断層の屈曲に始まる渦領域の分断現象と見なすことができる。換言すれば、渦中心にピークをもつ単峰性の渦度分布が維持できなくな

り、渦度分布の2極化が進行する現象であると考えられる。この渦度分布の変化を引き起こす主要因としては、

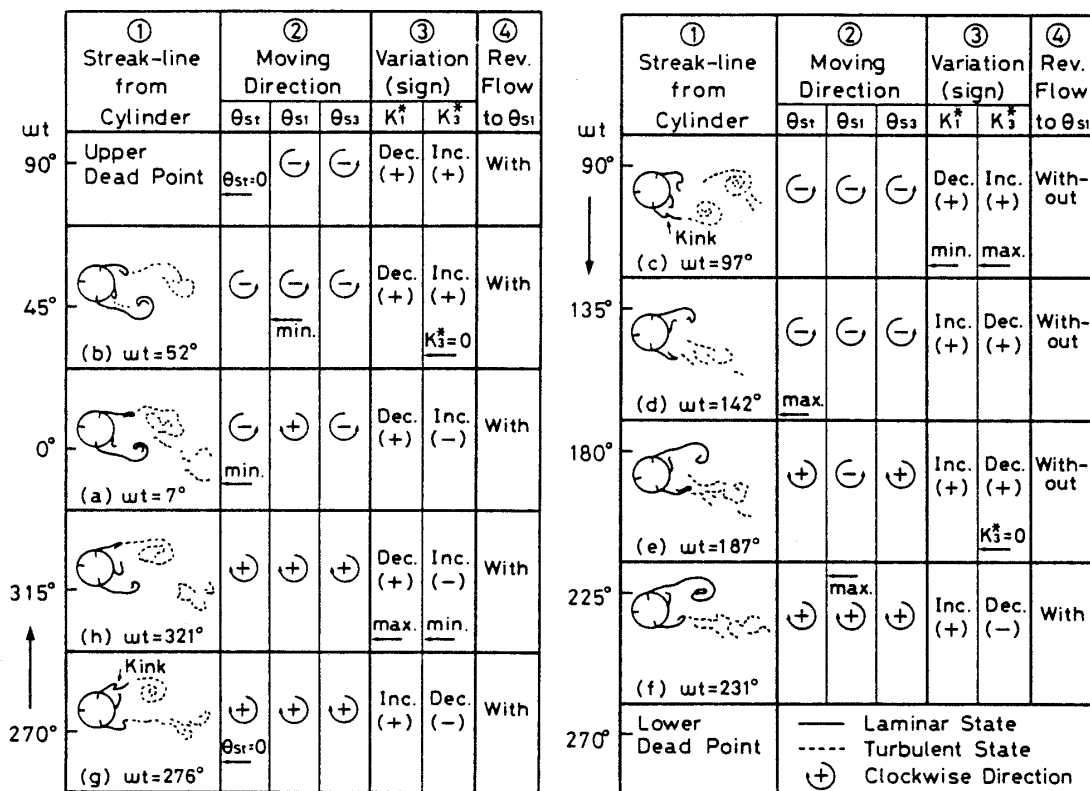
(1) 4.4.1項および4.1.3項で述べた円柱の移動にもとづくはく離せん断層の円柱の相対的な位置の変化や、渦度分布に対応する自らの誘導速度によって渦領域の渦度分布が変化すること

(2) はく離点から供給される渦度の量が変化すること

(3) 渦の回転方向と逆向きの渦度をもった流体粒子の近接や混合によって渦度が相殺されることなどが考えられる。これらの要因(1)~(3)は、独立事象ではなく、それぞれが原因であり結果であるが、ここでは、要因(2)と(3)に注目して渦の放出機構を考察することにする。

要因(2)については、すでに述べた。すなわち、渦度流束 K_1^* が最小値を示す時期($\omega t \approx 120^\circ$, 図10)に下死点側の渦領域は二分化されるように見え、渦の回転方向と同じ方向の渦度の供給量の低下が渦放出と密接に関連していることがわかった。

渦の回転と逆向きの渦度が存在すると、局所的に渦度が相殺されるばかりでなく、乱れを誘発し渦度が消



①: はく離せん断層の形状変化, ②: よどみ点とはく離点の移動,
③: 渦度流束の変化, ④: はく離点 θ_{S1} に近づく逆流の有無

図11 渦の放出機構の説明図

散する可能性がある⁽⁶⁾ので、要因(3)は重要である。

下死点側の渦に注目すると、この渦と逆向きの渦度はもう一方のはく離点 θ_{s2} と、前述の第3のはく離点 θ_{s3} から供給される。単位時間当たりのこれらの供給量の時間経過は、前述の図10の K_2^* , K_3^* として測定されている。このうち K_2^* は、はく離せん断層の形で「上側の渦領域」に巻き込まれるので、今注目している「下側の渦領域」に直接混合する量は少ない。これに対して K_3^* は、前述したようにその値は K_1^* , K_2^* に比して無視できない大きさをもち符号も変化するので、いずれか一方のはく離せん断層に逆符号の渦度を供給し、渦領域の分断を促す可能性がある。この見地から第3のはく離点 θ_{s3} からの色素線の形状と無次元渦度流束 K_3^* の時間変化に注目する。

図10および図11を参照すると、 K_3^* の符号が下死点側のせん断層の渦度と逆になるのは、図11のスケッチで言えば(f)から(a)に至る期間であり、その値が最も大きくなるのは(h)に近い $\omega t \approx 320^\circ$ である。しかし、この(f)～(a)の期間には、渦の回転方向と逆の渦度をもった流体粒子が下死点側のせん断層と混合することなく、渦の放出もない。この混合が明確に認められるのは、スケッチ(b)から(c)にかけてである。この回転方向が逆の渦度の混合は、乱れの発生とも関連して偶発的な側面をもつが、スケッチ(c)以後の $\omega t \approx 100 \sim 120^\circ$ において顕著になり、下死点側のはく離せん断層は屈曲し、乱れの発生を伴って渦領域は分断されるように見える。また、この第3のはく離点は、円柱と同期して振動しているのので、この点から周期的に供給される渦度が、渦領域の分断(渦の放出)と円柱の振動の同期化を確定的なものにしていると考えられる。

4.4.3 渦の放出機構についての Sarpkaya の記述

Sarpkaya⁽⁴⁾は渦点法を用いてせん断層の巻き込み状況を計算している。そしてこの結果にもとづいて、渦が放出される状況を次のように述べている。

「円柱が上死点に向かうときは、下死点側のはく離せん断層は慣性のため下側に残り残される。そのため、円柱の瞬間中心を通る後流の軸は時計方向に回転する。その間、主流の方向も時計方向に回転するので、下側のはく離点は上流に移行し渦度流束 K_1 が急激に減少する。そして、 K_1 が最小値を示す頃、渦放出が始まる。」⁽²⁾

はく離点の移動、円柱とはく離せん断層との相対的な位置およびせん断層の形状に注目すると、Sarpkaya の記述は、円柱の振動位相との関係が不明確であるが、図11に示した本実験結果とほぼ対応してい

る。しかし、本研究で明らかにした渦の放出現象に対して最も本質的な意味をもつ「第3のはく離点」についての記述はなく、渦度流束 K_1 , K_2 だけが渦度の供給源として論じられている。前述したように、第3のはく離点を通過する渦度流束も含め、はく離点の移動速度を考慮した渦度流束 K_1^* , K_2^* , K_3^* を渦度の供給源と見なすべきである。本実験で明らかにされたこのような渦度の供給機構を導入すれば、渦点法の解はさらに現実の流れに近いものに改善されると思われる。

5. 結 言

一様流中の振動円柱に比較的近い領域の流れに注目して、詳細な可視化実験を行い、円柱の振動に同期して渦が放出される機構を解明した。主要な実験結果は、次のようにまとめられる。

(1) 円柱表面近傍の流れ(よどみ点とはく離点の位置、はく離点近傍の境界層外縁の速度、はく離せん断層の形状など)の時間変化が明らかにされた。

(2) はく離点の下流に逆流が認められない期間が存在し、この円柱表面に沿う順流は、もう一方のはく離点に到達する前にはく離し、「第3のはく離点」を形成する。この第3のはく離点の移動は円柱の振動と同期していて、この点から供給される渦度が、いずれか一方のはく離せん断層近傍に輸送され混合することによって、渦度は相殺され局所的な渦度の低下が起こり渦領域は分断され、渦の放出が促進される。

(3) 第1,2および第3のはく離点から供給される実効的な(はく離点の移動速度を考慮した)渦度流束 K_1^* , K_2^* , K_3^* の和は零であり、拡張されたクッタの条件が満たされている。

本研究は、文部省科学研究費〔一般研究(C)〕の補助を受けたことを付記し、謝意を表します。

文 献

- (1) Den Hartog, J. P., *Proc., 4th Int. Cong. Appl. Mech.*, (1934), 36.
- (2) Sarpkaya, T., *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, **46**-1 (1979), 241.
- (3) Zdravkovich, M. M., *Trans. ASME, J. Fluid Eng.*, **104**-4 (1982), 513.
- (4) Sarpkaya, T. and Shoaff, R. L., *Tech. Rep. Naval Postgraduate School, Monterey, Calif.*, (1979).
- (5) 永田・船田, 流れの可視化, 1-2 (昭56), 207.
- (6) 永田・ほか3名, 流れの可視化, 3- (昭58), 221.
- (7) 永田・ほか3名, 機論, **51**-463, B (昭60), 9.
- (8) 永田・ほか2名, 機論, **45**-397, B (昭54), 1298.
- (9) Taneda, S., *Prog. Aerospace Sci.*, **17**-2 (1977), 287.
- (10) Sears, W. R., *AIAA J.*, **14**-1 (1975), 216.
- (11) Thwaites, B. 編, *Incompressible Aerodynamics*, (1960), 177, Oxford Univ. Press.

討 論

〔質問〕 木 谷 勝〔北海道大学工学部〕

振動円柱のまわりの流れに対して、精密な可視化実験を行われたことに敬意を表す。

実効的な渦度流束 K_1^* , K_2^* , K_3^* の一周期にわたる変化を示されたこと, K_3^* の存在と重要性を指摘されたことは大きな寄与と考える。渦点法などによると計算方法の改良に有益な資料を提供されるものであるが、計算の便宜上からいえば式(4)よりも式(3)を用いる

ほうが簡単である。その意味で、式(3)の K と式(4)の K^* の間には定量的にどの程度の差があるものかで教示願いたい。

〔回答〕 図10に見られるように、本実験では K_1 , K_2 , K_3 のいずれについても、 K と K^* の差は高々0.2程度であり、 K_1 と K_2 については K^* のほうが周期性が顕著（山と谷が明確）になっている。