

はく離せん断層の励起を伴う柱状物体まわりの流れ

Flow around a cylinder with the separated shear layer excitation

正 小里 泰章 (岐阜大) 正 菊地 聡 (岐阜大) 正 今尾 茂樹 (岐阜大) ○学 山田 泰史 (岐阜大院)

Yasuaki KOZATO, Gifu University, 1-1, Yanagido, Gifu-shi, Gifu, 501-1193

Satoshi KIKUCHI, Gifu University, 1-1, Yanagido, Gifu-shi, Gifu, 501-1193

Shigeki IMAO, Gifu University, 1-1, Yanagido, Gifu-shi, Gifu, 501-1193

Yasushi YAMADA, Graduate School of Gifu University, 1-1, Yanagido, Gifu, 501-1193

This study is concerned with the flow around a triangular cylinder in the uniform flow exposed to a simple and high frequency acoustic excitation as the periodic disturbance. The mean pressure field on the cylinder surface and the velocity field around it are carefully investigated. When the disturbance related to the separated shear layer instability is added, the diffusion of the shear layer is changed and the vortex shedding characteristics are affected.

Key Words: Triangular Cylinder, Periodic Disturbance, Separated Shear Layer, Receptivity

1. 緒言

一様流中の柱状物体まわりの流れに関して、カルマン渦に代表される周期渦の発生には、物体表面よりはく離れた境界層（はく離せん断層）が関与しており、急激な速度勾配に起因した流体力学的不安定性から、かく乱に対して非常に不安定で、特定の周波数の外乱だけを選択的に増幅させる性質があることが知られている。この性質は、不安定変動が外乱を吸収し、それを元に乱れを成長させるなどの変化を与えることから受容性とも呼ばれる。

このはく離せん断層の受容性を利用することで、たとえ微弱なかく乱であっても物体近傍の流れを励起し、その後方の流れ場を制御することができるという考えに基づき、柱状物体の代表例である円柱について、はく離せん断層を音響かく乱によって刺激する試みがなされている^{(1)~(7)}。これらによれば、不安定性に関連する特定の周波数のかく乱が付加されると、はく離せん断層の拡がりや乱れの分布が変化し、カルマン渦放出特性が影響を受け、特に渦放出に伴う変動力など空力特性が変化することが報告されている。著者らは、この変化に至るメカニズムが、はく離せん断層内の不安定変動の構造と主渦の相互干渉によるものと考えているが、未だその機構は明らかにはされていない。

そこで本研究では、上記に至るメカニズムを解明するため、はく離点が角部に固定され、せん断層の不安定変動が円柱に比べ鮮明に現れると考えられる三角柱を対象とし、一様流中の三角柱まわりの流れに対し、外部のスピーカーから単一周波数の周期的かく乱を付加した場合について、三角柱に作用する流体力および流れ場の変化を明らかにするとともに、速度場の詳細な測定により、その変化に至る過程を明らかにすることを目的とする。

2. 実験装置および方法

実験は、測定部が $500 \times 500 \text{ mm}$ の正方形断面を有する回流式風洞にて実施された。図1は、測定部の概略および主な記号を示す。実験に用いた三角柱は、底辺の長さ $H=38 \text{ mm}$ 、頂角 $\alpha=30^\circ$ のアクリル樹脂製で、測定部入口より 750 mm 下流の断面中央に水平に取り付けられた。図2は、実験に用いた三角柱の詳細を示す。三角柱には、スパン中央部に直径 0.5 mm の圧力測定孔が11個設けられ、測定部外部の圧力変換器により、時間平均圧力が測定される。

速度の測定には単線形熱線プローブと定温度型熱線流速計が用いられ、A-D変換（分解能：16bit、サンプリング周波数：20kHz、観測時間：約26s）された出力がパーソナルコンピュータで計算処理された。

かく乱源である音響は、ファンクションシンセサイザにて生成された正弦波信号がアンプで増幅され、風洞上部のスピーカーにより発生された。また、かく乱の大きさは、三角柱中心位置に置かれた騒音計の音圧レベルが、各周波数で一定になるように調整された。

実験は、かく乱の大きさ（音圧レベル）が $SPL=115 \text{ dB}$ （無風時）、一様流の速度が $U_0=15 \text{ m/s}$ の条件で行われ、三角柱底辺の長さに基づくレイノルズ数は約37000であった。

3. 実験結果と考察

はじめに、任意の周波数のかく乱が、三角柱表面の時間平

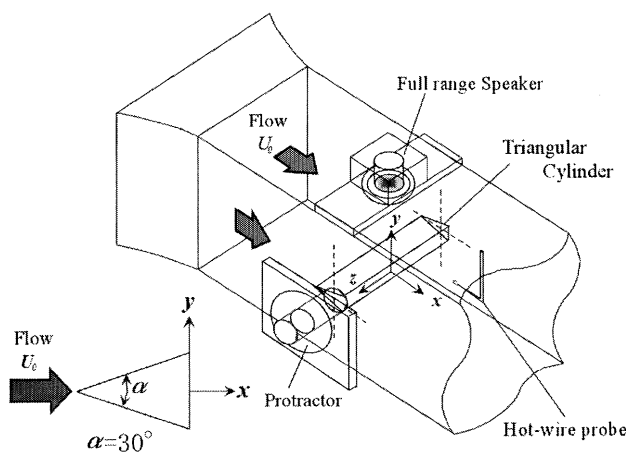


Fig.1 Experimental setup and main notations

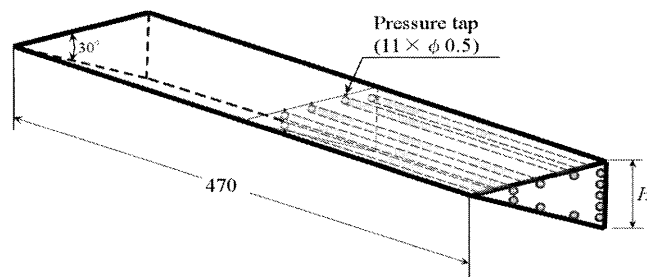


Fig.2 Details of triangular cylinder

均圧力に及ぼす影響について示す。図3は、三角柱の背圧 ($x = y = 0$ における表面圧力) の変化を示す。縦軸は、かく乱を付加しない場合の背圧 p_{b0} にて無次元化した時間平均背圧を示す。図より、特定の周波数のかく乱を与えることにより、背圧は変化し、非励起の場合に比べ、圧力が増加もしくは減少することが分かる。

図4は、背圧が最も増加あるいは減少した周波数のかく乱を付加した場合および非励起の場合 (Base) の三角柱表面の圧力分布を示す。縦軸は、時間平均圧力を一様流の動圧にて無次元化した圧力係数 ($C_p = p / (1/2 \rho U_0^2)$) であり、横軸は、後方よどみ点 ($x = y = 0$) より三角柱に沿って測った周長 l を三角柱の底辺の長さ H で無次元化した値である。いずれの条件においても、表面圧力は前方から後方に向かって減少し、背面 (底辺上) ではほぼ一定の値になり、斜辺上では励起の有無に関わらず圧力分布に差はみられない。しかし、背面 ($l/H = 0.5 \sim -0.5$) においては、各条件下で圧力分布に差が見られ、非励起の場合に比べ、背圧が最小となる周波数 ($f_{ex}=1.6\text{kHz}$) にて励起した場合には圧力は低く、逆に背圧が最大となる周波数 ($f_{ex}=4.1\text{kHz}$) で励起した場合には圧力が高くなる。この結果から、周期的かく乱は三角柱背面の圧力にのみ影響を与えることが分かり、この圧力変化は三角柱に作用する抗力を変化させることを示唆する。

次に、上述の圧力分布の変化は、三角柱後流の流れの変化に起因すると考えられるため、ここからは、三角柱後流の速度場について検討する。特徴的な事象を明らかにするため、かく乱のない場合と圧力が減少、増大する励起の場合について議論する。なお、本実験においては、平均速度、乱れ強さ

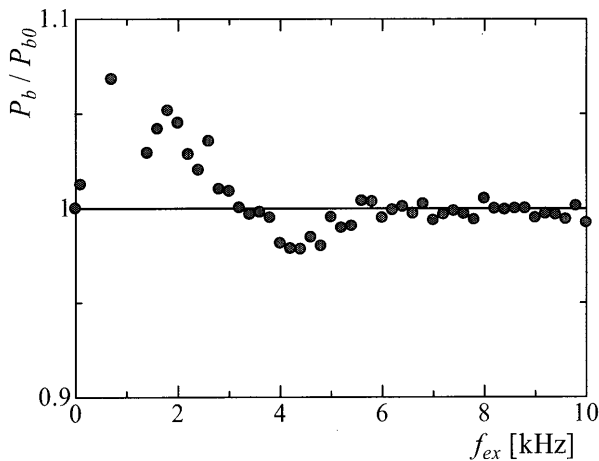


Fig.3 Variations of the cylinder base pressure

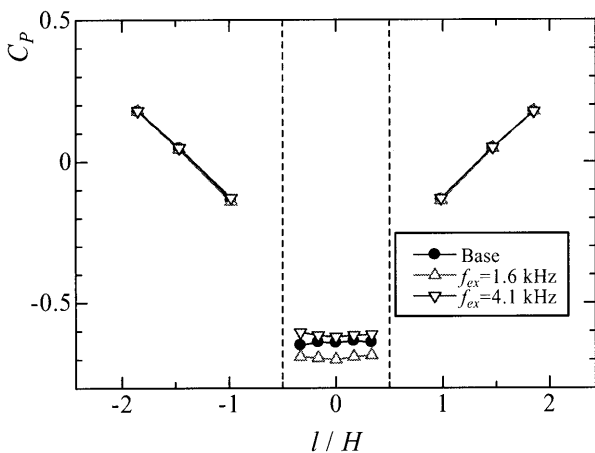


Fig. 4 Pressure distributions on the cylinder surface

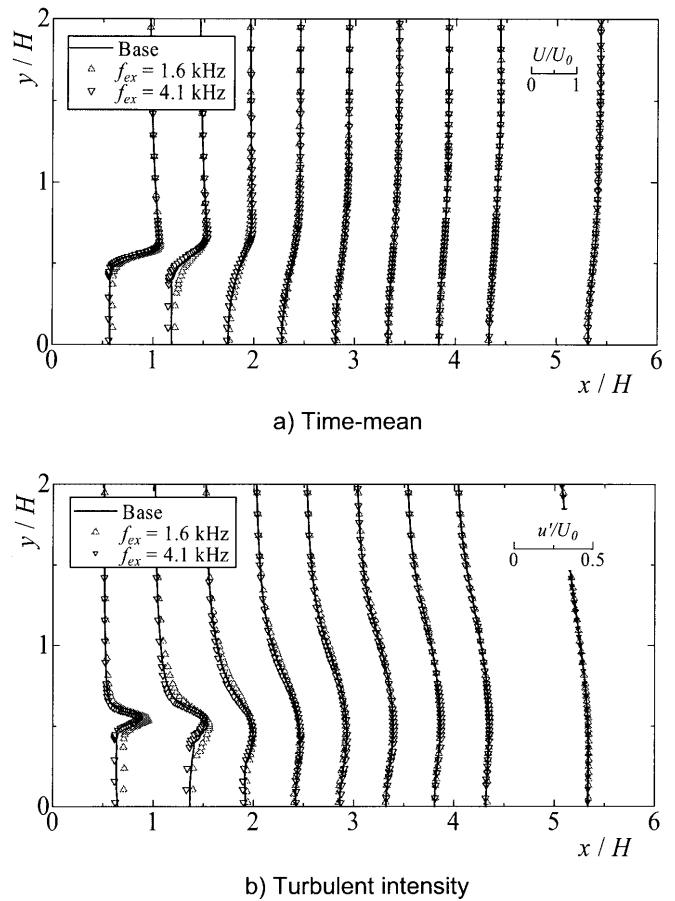


Fig. 5 Velocity distributions of the cylinder wake

ともに三角柱の主流方向中心軸に対して対称な分布を示したため、主に三角柱上部についてのみ記述する。

図5はそれぞれ、三角柱近傍の時間平均速度と乱れ強さの分布の下流方向への変化を示す。縦軸は、後方よどみ点からの鉛直方向距離 y を三角柱の底辺の長さ H で無次元化したものを表し、横軸は、後方よどみ点からの下流方向の距離 x を H で無次元化したものおよび無次元時間平均速度 U/U_0 と乱れ強さ u'/U_0 を表す。図5 a) より、平均速度分布に関しては、かく乱のない場合と比べて、背面圧力が減少する低い周波数 ($f_{ex}=1.6\text{kHz}$) にて励起した場合には、はく離せん断層内の y 方向への速度勾配が小さく、背面圧力が増大する高い周波数 ($f_{ex}=4.1\text{kHz}$) で励起した場合には、はく離せん断層内の y 方向への速度勾配は大きくなる。また、図5 b) より、 $y/H=0.55$ 付近の乱れ強さが急激な変化を示す部分において、非励起の場合と比べて、低い周波数で励起した場合には、乱れ強さが大きくなり、高い周波数で励起した場合には、乱れ強さは小さくなる。

そこで、上記の変化が生じる要因を明らかにするため、主渦であるカルマン渦の変化について調べる。

図6は、カルマン渦の放出に同期して抽出した位相平均速度分布の一例を示す。各図中の色の違いは位相平均速度を一様流の速度 U_0 で無次元化した値を示す。図より、背面圧力が減少する低い周波数 ($f_{ex}=1.6\text{kHz}$) にて励起した場合には、三角柱背後に見られる高速領域が相対的に原点側に位置するとともに、 y 方向での高速域・低速域の速度差が小さいのに対し、背面圧力が増大する高い周波数 ($f_{ex}=4.1\text{kHz}$) で励起した場合には、高速域・低速域の速度差が比較的大きく、同じ流速域の部分が下流方向に保たれる傾向を示す。これより、低い周波数のかく乱が付加されると、せん断層の巻き込みが促

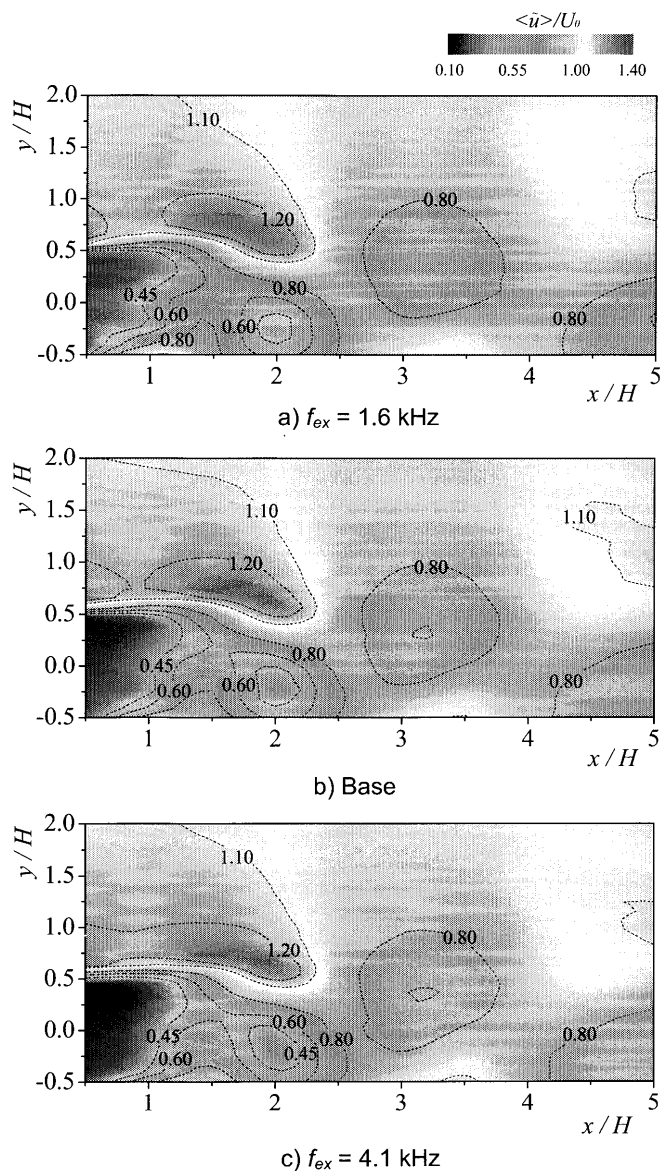


Fig. 6 Phase averaged velocity distributions

進され、渦の放出が早くなり、乱れが大きくなるが、高い周波数のかく乱が付加されると、せん断層の巻き込みが抑制されて渦の放出位置も下流方向に移動すると考えられる。

図 7 は、はく離せん断層外縁における変動速度のパワースペクトル分布の下流方向への変化を示す。縦軸はパワースペクトル密度 $P(u)$ を主流速度 U_0 の二乗で無次元化したものを示し、横軸は変動速度の周波数 f を示す。図より、低い周波数で励起した場合には、カルマン渦放出周波数に対応する周波数のエネルギー成分がやや大きく、高い周波数の励起では渦放出成分がやや小さくなるのが分かる。さらに、三角柱の近傍 ($x/H=0.5$) では、非励起の場合には、せん断層の不安定変動と見られるやや周期性のある間欠的な変動が現れるのに対し、かく乱が付加された場合には、かく乱の周波数と同じ変動成分だけでなく、約 $1/2$ と $1/4$ の周波数の変動成分が増幅される。このことは、かく乱の導入により、自然に増幅される不安定変動に代わって、新たなスケールの変動が現れ、それは流下に伴い乱れの空間的なスケールを大きくしていくことを連想させる。

最後に、図 8 は、せん断層外縁において、固定プローブと移動プローブの 2 点間の距離を変化させて測定した変動速度の相互相関係数の変化を示す。ここで、固定プローブは、せ

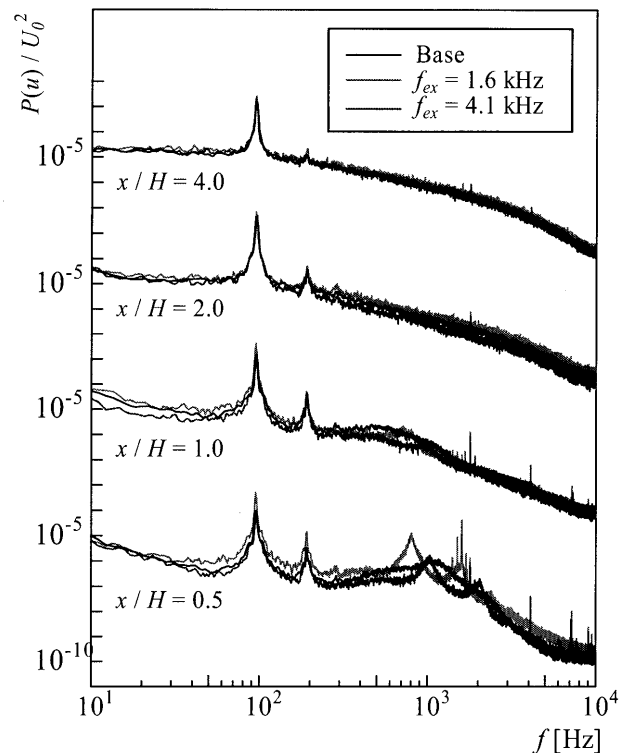


Fig. 7 Power spectra of the fluctuating velocity

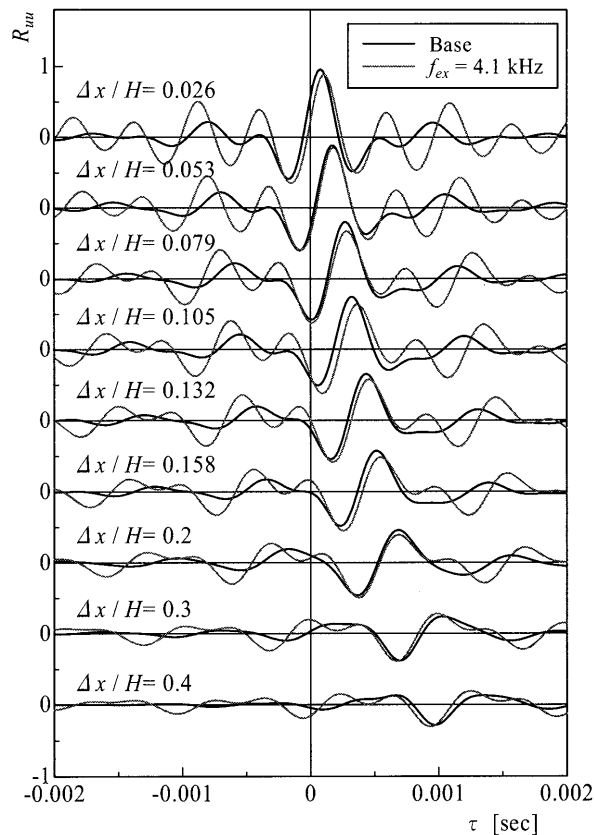


Fig. 8 Variations of the cross-correlation coefficient

ん断層内に発生する不安定変動が明瞭に現れる点として $x/H=0.3$, $y/H=0.57$ の位置に固定された。また Δx は、固定プ

ローブと移動プローブ間の x 方向距離を表す。図より、かく乱の有無にかかわらず、プローブ間距離の増加に応じて、相関値と時間遅れは変化し、せん断層内で発生した構造がせん断層外縁に沿って下流方向に移動するだけでなく、その移動速度に変化はないことも分かる。しかし、高い周波数のかく乱が付加された場合には、流下に伴うスケールの変化が非励起の場合に比べて遅れるように見える。このスケール変化の遅れが、カルマン渦の形成に影響を与える要因ではないかと予想される。

4. 結 言

一様流中の三角柱まわりの流れに外部より単一周波数の音響かく乱を付加した場合について、三角柱表面の平均圧力と三角柱後流の速度場を測定し、以下の結論を得た。

- (1) 三角柱表面の平均圧力場は、ある特定の周波数のかく乱を付加することにより変化し、主に三角柱背面の圧力が、非励起の場合に比べ増加・減少する。
- (2) はく離せん断層内の速度場は、付加するかく乱により変化し、三角柱の背面圧力が減少する周波数で励起された場合には、乱れが大きくせん断層の拡がりが早くなり、流れの巻き込みが促進されるが、背面圧力が増加する周波数の励起では、はく離せん断層内の流れの乱雑化が抑制される。

参考文献

- [1] Peterka, J.A. and Richardson, P.D.: Effect of sound on separated flows, *J. Fluid Mech.*, **37**(2), pp. 265-287, (1969).
- [2] Hsiao, F.B. et al.: Experimental study of an acoustically excited flow over a circular cylinder, *Transport Phenomena in Thermal Control* (ed. G.J. Hwang), New York, Hemisphere, pp. 537-546, (1989).
- [3] Zobnin, A.B. and Sushchik, M.M.: Influence of a high-frequency sound field on vortex generation in the wake of a cylinder, *Sov. Phys. Acoust.*, **35**(1), Jan.-Feb., pp. 37-39, (1989).
- [4] Hsiao, F.B. and Shyu, J.Y.: Influence of internal acoustic excitation upon flow passing a circular cylinder, *Journal of Fluids and Structures*, **5**, pp. 427-442, (1991).
- [5] Sheridan, J. et al.: The Kelvin-Helmholtz instability of the separated shear layer from a circular cylinder, *Proc. of IUTAM Symp. on Bluff-Body Wakes, Dynamics and Instabilities* (ed. H. Eckelmann et al.), Berlin, Springer-Verlag, pp. 115-118, (1992).
- [6] Kozato, Y. and Imao, S., Flow around a Circular Cylinder with Periodic Disturbance, *Proc. of the Tenth Asian Congress of Fluid Mechanics*, Peradeniya, Sri Lanka, B01 (CD-ROM), (2004).
- [7] Kozato, Y. and Imao, S., Flow around a Circular Cylinder with Excitation to the Separated Shear Layer, *Proc. of the Sixth KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference*, Jeju, Korea, EB.04 (CD-ROM), (2005).