

周期的攪乱を付加した円柱まわりの流れに関する実験的研究*

小 里 泰 章^{*1}, 今 尾 茂 樹^{*1}
濱 地 清 市^{*2}, 大 野 貴 史^{*3}

Flow around a Circular Cylinder with Periodic Disturbance

Yasuaki KOZATO^{*4}, Shigeki IMAO,
Seiichi HAMAJI and Takashi OHNO^{**}Department of Mechanical and Systems Engineering, Gifu University,
1-1 Yanagido, Gifu-shi, Gifu, 501-1193 Japan

The flow around a circular cylinder in the uniform flow exposed to a simple and high frequency acoustic excitation as a minute disturbance are studied. In order to clarify the effect of the disturbance on the force exerted by a fluid and to examine its mechanism, mean and fluctuating pressure distributions on the cylinder surface and the velocity field of the cylinder vicinity are carefully investigated. When the periodic disturbance close to the frequency of the transition wave in the separated shear layer is added, the diffusion of the shear layer is promoted or restrained and the fluctuating force associated with the Karman vortex shedding increases or decreases as compared with the case of no excitation.

Key Words: Flow Control, Fluid Force, Wake, Circular Cylinder, Periodic Disturbance, Separated Shear Layer, Transition Wave

1. 結 言

円柱などの空力的に鈍い断面形状を持つ物体が流れの中に置かれると、物体には定常的に作用する空気力とともに、物体表面からはく離して放出される渦の作用により周期的な変動力が作用する。この変動する流体力の原因である周期渦は、空力弾性振動や空力音発生の原因ともなり、構造部材の疲労破壊を招いたり、人間に不快感を与えるなど深刻な被害をもたらす可能性がある。

円柱の後流に形成されるカルマン渦に代表される周期渦の発生には、物体表面からはく離した境界層（はく離せん断層）が深く関与している。このはく離せん断層は、物体近傍の急激な速度勾配に起因した流体力学的な不安定性を有し、かく乱に対してきわめて不安定であるため自由流中の乱れや音などの外乱の影響を強く受け、特定周波数の外乱だけを選択的に増幅する性質があることが知られている⁽¹⁾。また、この不安定変動は遷移波と呼ばれ、カルマン渦放出周波数の数倍～数十倍のオーダーであることも知られている^{(2), (3)}。

このような性質を利用して、比較的微小な外乱でも増幅効果により強い変動成分を励起し、円柱周囲の流れ場の特性を変化させることが可能であると考え、はく離せん断層を音響攪乱にて刺激する試みがなされている^{(4)~(8)}。これらによれば、不安定性に関する特定周波数の音響を付加することにより、円柱後流のカルマン渦の放出特性や円柱の定常空力特性が変化することが報告されている。しかしながら、作用する流体力の制御効果（特に、変動力に及ぼす影響）やそのメカニズムについては、未だ明らかにされていない。

そこで本研究では、一様流中の円柱に外部のスピーカーから単一周波数の周期的攪乱を付加した場合について、円柱に作用する流体力の制御効果を明らかにし、はく離せん断層内を中心とした円柱周囲の流れ場の測定から、変化に至る過程を実験的に解明することを目的とする。

2. 実験装置および方法

実験には、測定部が500×500mmの正方形断面を有する回流風洞が使用された。図1は、測定部の概略および座標系を示す。実験に使用した円柱は、直径 $D = 40, 60, 80$ mmの樹脂製パイプで、測定部入口より750mm下流の断面中心部に水平に取り付けられた。各円柱には、スパン中央部に直径0.4mmの圧力測定孔が

* 原稿受付 2004年3月22日。

^{*1} 正員、岐阜大学工学部(〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)。^{*2} アイシン・エィ・ダブリュ(株)(〒444-1192 安城市藤井町高根10)。^{*3} (株)東海理化電機製作所(〒480-0195 愛知県丹羽郡大口町豊田3-260)。

E-mail: kozato@cc.gifu-u.ac.jp

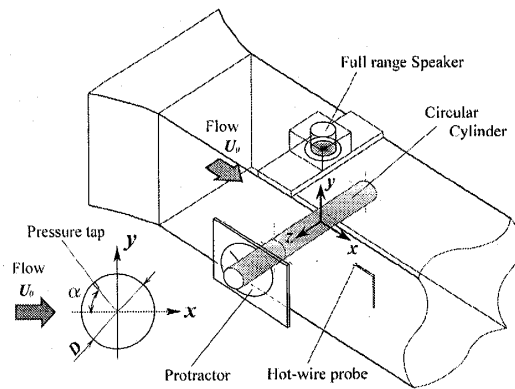


Fig.1 Experimental setup and main notations

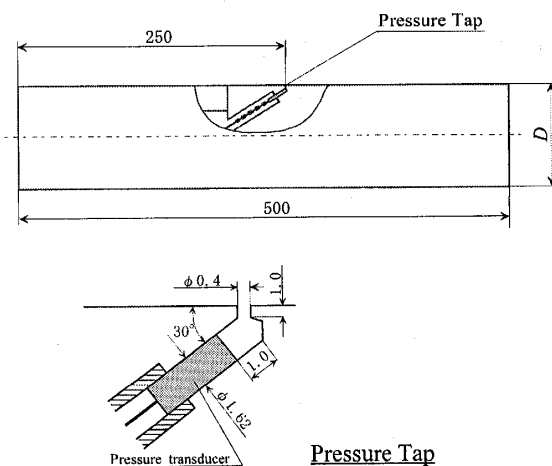


Fig.2 Detail of cylinder

設けられ、円柱内部に挿入された小型の圧力変換器 (kulite 製 XCS-062-5D) により、平均・変動圧力が測定される。また、この圧力測定孔は円柱を回転させることにより、任意の迎え角 α に設定される。図 2 は、実験に用いた円柱の詳細を示す。ここで、設計寸法に基づく圧力測定孔の固有周波数は約 10kHz と見積られ⁽⁹⁾、音響攪乱との共鳴などによる圧力測定値への影響は少ないと考えられるが、本研究では加工誤差などを考慮し、1kHz のローパスフィルタにより高域の変動を除去した。

速度の測定には、単線形および X 形熱線プローブと定温度型熱線流速計が用いられ、直線化された流速計出力と直流アンプにて増幅された圧力変換器出力を A-D 変換 (分解能: 12 bit, サンプル周波数: 20 kHz, 観測時間: 約 13 s) し、パーソナルコンピュータにて計算処理された。

次に、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、円柱中心軸上部に設置されたスピーカーにより発

生された。また、かく乱の大きさは、円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 $SPL = 120$ dB (無風時)、一様流の速度が $U_0 = 10 \sim 20$ m/s の条件で行われ、円柱直径に基づくレイノルズ数は、約 27000 ~ 110000 の間で変化した。

3. 実験結果と考察

はじめに、任意の周波数のかく乱が、円柱背圧 ($\alpha = 180^\circ$ における円柱表面圧力) に及ぼす影響を調べた。その結果、特定の周波数を中心とした周波数帯において、単一周波数の周期的かく乱を与えることにより、平均・変動背圧ともに無励起の場合に比べ、増加や減少することが確認された。

図 3 は、円柱背圧に変化の見られた励起周波数にてかく乱を与えた場合の円柱表面上の圧力分布を示す。各図の縦軸は、時間平均圧力および変動圧力の実効値を主流速度の動圧 ($1/2 \rho U_0^2$) で無次元化した圧力係数を示す。なお、図の上部には、平均圧力分布より算出した圧力抗力係数を示す。図 a) より、かく乱の影響

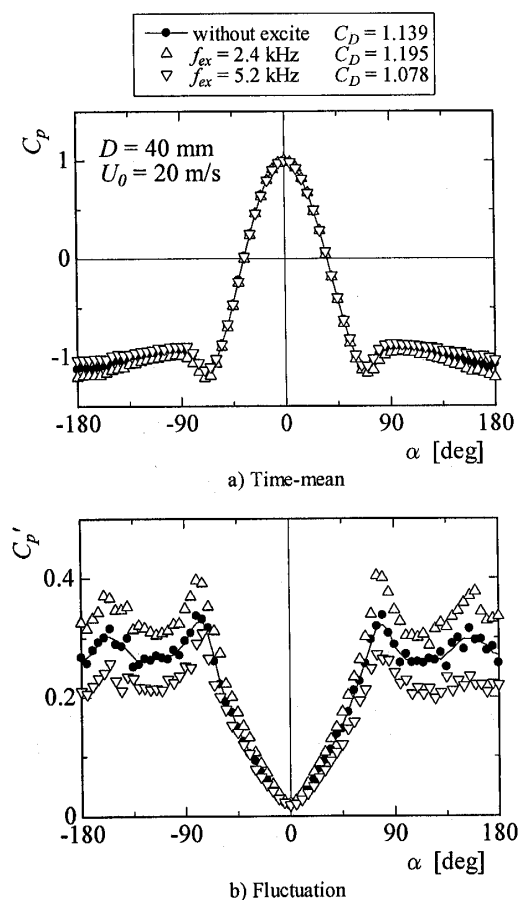


Fig.3 Pressure distributions on the cylinder surface

は円柱背部 ($\alpha = \pm 180^\circ$ 近傍) に現れ, 抗力係数にも若干ではあるが変化を与えることが分かる. さらに図 b) より, 変動圧力に対しては, 流れのはく離位置近傍から後方 ($|\alpha| > 70^\circ$) でかく乱による効果が顕著になり, 増加・減少の度合いが大きく, 変動力にさらに大きな変化を生じさせることが予想される.

図 4 は, 円柱表面上の圧力場にかく乱の影響が見られる周波数の変化を示す. 図の縦軸は, 平均圧力抗力が増加・減少した励起周波数の中心値 f_{α}^* をカルマン渦放出周波数 f_s にて無次元化した値を示す. 図中の実線と破線は, それぞれ Bloor⁽²⁾ と Wei⁽³⁾ により測定されたはく離せん断層内における遷移波の無次元周波数 f_i/f_s の実験式を示す. また●印は, 後述する本実験結果より推定される遷移波の周波数 (図 9 中の T.W.) を示す. 図より, 圧力場の変化に効果のある励起周波数は, 遷移波の周波数に関連が深く, 抗力が増加する励起周波数は Bloor による測定結果, 減少する周波数は Wei の実験結果に対応することが分かると同時に, 遷移波の周波数は実験条件や定義方法に影響を受けやすく変化することも理解される.

次に, カルマン渦の放出に伴う変動力の変化に及ぼ

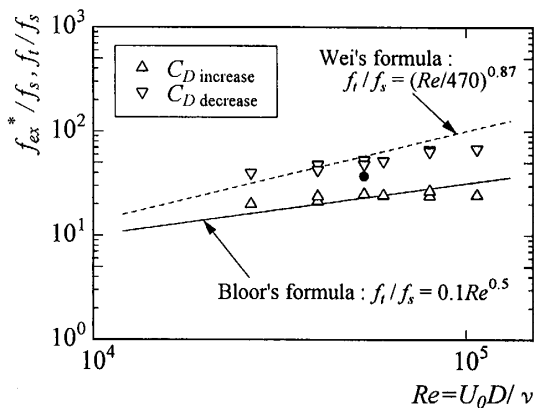


Fig.4 Effective frequencies

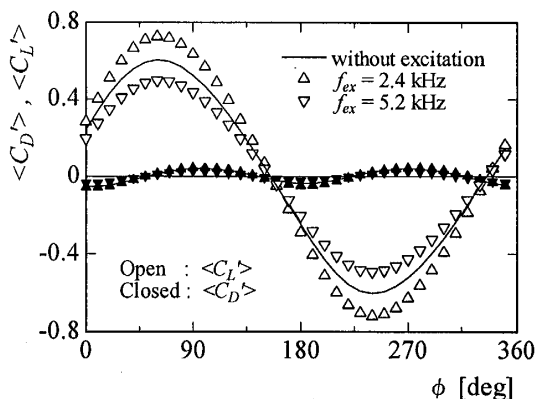


Fig.5 Phase averaged fluctuating drag and lift forces
($D = 40 \text{ mm}$, $U_0 = 20 \text{ m/s}$)

すかく乱の影響を調べるため, 円柱表面圧力と円柱後流速度の同時測定を行い, 速度変動波形を位相参照信号として, 渦放出に対応した円柱表面圧力を抽出し, 位相平均処理がなされた. 図 5 は, 各位相における円柱表面の圧力分布より求める抗力係数および揚力係数の変化を示す. また, 表 1 は各励起条件における算出値の標準偏差 (狭義の変動抗力・揚力係数と呼べる) を示す. これらの結果より, 遷移波に近い周波数の音響かく乱を付加することにより, 変動する流体力 (特に, 変動揚力) は, 定常力以上に影響を受け, 非励起の場合に比べ, 約 15 ~ 20% の変化が生じることが分かる. このことは, 主渦であるカルマン渦の形成にも影響を及ぼしていることを予想させる.

そこで, 主渦の形成過程に与えるかく乱の影響を調べるため, 上記とは逆に, 圧力変動波形を位相参照信号とすることによる円柱後流における位相平均速度の

Table 1 Coefficients of fluctuating drag and lift force

	$\sigma_{\langle C_D \rangle}$	$\sigma_{\langle C_L \rangle}$
without excitation	0.031	0.420
$f_{ex} = 2.4 \text{ kHz}$	0.034	0.504
$f_{ex} = 5.2 \text{ kHz}$	0.020	0.344

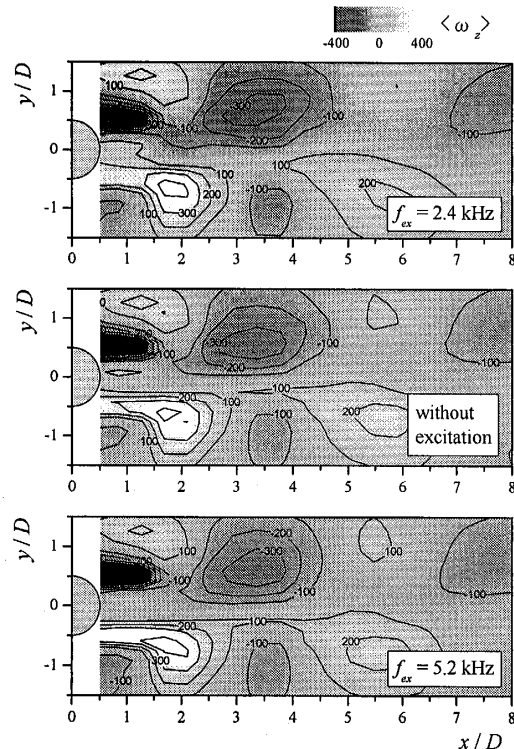


Fig.6 Phase averaged vorticity distributions
($D = 40 \text{ mm}$, $U_0 = 20 \text{ m/s}$)

測定がなされた。図6は、位相平均速度の x , y 成分より算出される位相平均渦度分布の一例を示す。図の濃淡は、 z 軸に対する位相平均渦度 $\langle \omega_z \rangle$ を表す。図より、いずれの励起条件においてもカルマン渦の放出に対応した渦度の分布領域が確認できるが、渦の流下に伴い、渦度の集中領域の占める割合（渦度の値が同じである領域の大きさ）が変化するとともに値の減衰の程度も異なり、流体力が増加する励起の場合には、下流方向および y 方向への渦度の減衰が早く、他の場合より早く渦構造が周囲流と混合するが、流体力が減少する励起では、渦度の拡散が抑制され、下流方向に長く渦構造を維持する傾向を示すことが分かる。この変化の兆候は、円柱背後より見られるため、付加された周期的かく乱は、放出された渦に直接影響を与えている訳ではなく、渦放出に至る前のはく離せん断層に作用しているものと考えられる。

以上のことから、はく離せん断層に見られる遷移波の周波数に近い周期的かく乱を加えることにより、放出されるカルマン渦の形成過程が操作され、渦の発達が影響を受けることになり、その結果、円柱に作用する流体力（特に、周期的に変化する変動力）が増加や減少するものと思われる。

そのため、以降では、上記に至るメカニズムを解明するため、はく離せん断層内の速度場について、単線形熱線プローブによる測定結果に基づき検討する。

図7は、それぞれ円柱極近傍のはく離せん断層内における時間平均速度および変動強度の下流方向への変化を示す。なお、本実験においては、平均速度・変動

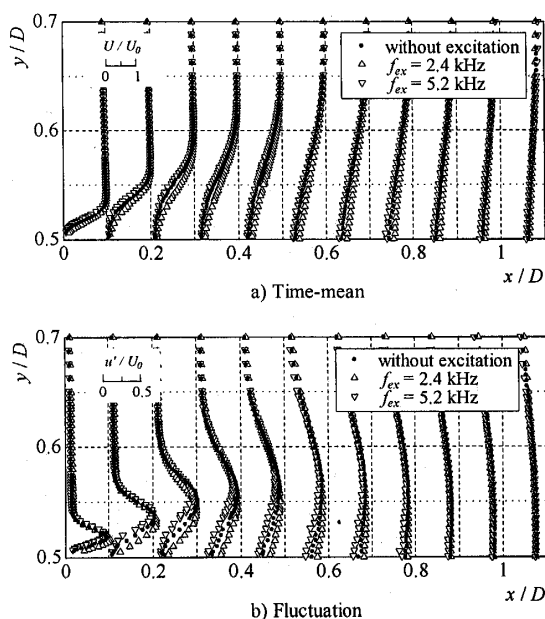


Fig.7 Velocity distributions in the separated shear layer ($D = 40$ mm, $U_0 = 20$ m/s)

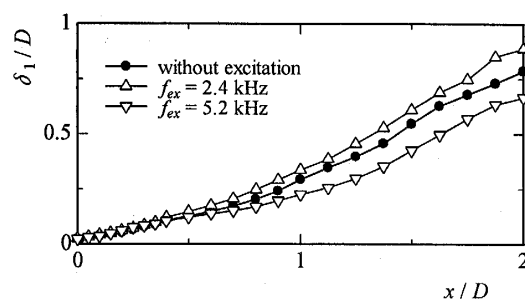


Fig.8 Thickness of the separated shear layer

強度とともに円柱中心 ($y = 0$) に対して対象な分布を示したため、ここでは円柱上部についてのみ記述する。図より、流体力が変化する周波数にて励起すると、せん断層内の y 方向への速度勾配が変化するとともに、せん断層中心付近での乱れ強さと分布の広がりが増加し、流体力が増加する場合には、せん断層の広がりが促進され、流体力が減少する場合には、周囲流との混合が抑制されることが分かる。

図8は、はく離せん断層の厚さの変化を示す。ここで、はく離せん断層厚さは、せん断層内縁から外縁までの距離を示すが、本研究では、単線形熱線プローブによる測定であり逆流を伴う低速域の測定が困難であることを考慮して、変動強度が y 方向分布において最大となる位置（せん断中心に相当）を内縁とし、最大速度を示す位置を外縁とした。図より、せん断層厚さは励起条件に応じて変化し、非励起の場合に比べ、せん断層における周囲流との混合が早められたり遅らされていることが分かる。

そこで、このせん断層に変化が生じる機構を明らかにするため、変動速度場の詳細について考察する。

図9は、各励起条件におけるはく離せん断層外縁付近の変動速度パワースペクトルの下流方向への変化を示す。各図の縦軸は、振幅スペクトル密度を主流速度で無次元化した $P(u)/U_0$ を、横軸は、変動速度の周波数をカルマン渦の放出周波数で無次元化した f/f_0 を表す。図より、非励起の場合には、はく離直後の $x = 0$ 付近において、渦放出周波数の数十倍の周波数領域に、層流から乱流へ移行する際、乱れに先立って現れる遷移波と見られる微少な周期的変動が存在し、流下に伴ってその周囲の周波数成分の変動とともに自然に増幅されることが分かる。これに対し、流体力が変化する励起の場合には、上記の遷移波と思われる微少変動は、非励起時ほどは明瞭ではなくなり、励起周波数周辺の速度変動成分が増幅され、下流に移行するに従い、さらに広い範囲の周波数成分が増幅される。なお、この遷移波の周波数は、流体力が増加・減少するかく乱の

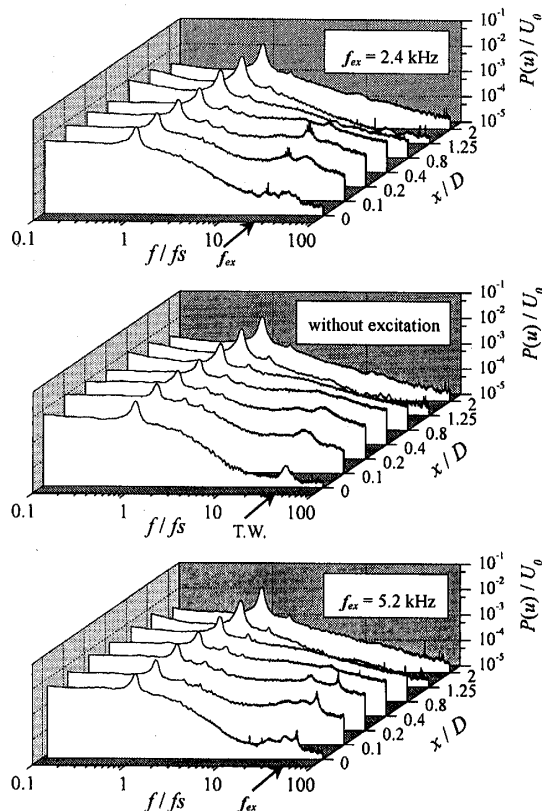


Fig.9 Power spectrum of the fluctuating velocity inside the separated shear layer

周波数の中間であることも分かる。

はく離せん断層内の速度変動には、主渦の発生に起因する変動と遷移波を含めた流れの乱雑化に関係すると見られる高周波の変動に特徴があるため、これらの変化について調べる。図10および図11は、それぞれ渦放出に伴う変動速度成分と乱雑化成分の変動強度の等値線を示す。各図の色の濃淡は、それぞれカルマン渦放出周波数前後10%の周波数の変動成分のRMS値 u'_{fs} と渦放出周波数 f_s の高調波成分以上の変動成分のRMS値 u'_{hf} を主流速度 U_0 にて無次元化したものを表す。図10より、流体力が増加する周波数にて励起された場合ほど、渦放出により誘起される強い速度変動が生じる領域が広く、さらに円柱表面側に高い乱れを生じ、より円柱に近い位置にて渦の巻き込みが起こるものと思われる。また、図11より、高周波数の乱雑化成分は、流体力が増加する励起の場合ほど、乱れが大きい傾向を示し、 y 方向への分布の広がりも大きく、乱雑化を早めているように思われる。

最後に、上記の結果をもとに、はく離せん断層の変化の様子をより定量的に表すため、以下のように定義される乱れエネルギーについて検討する。

$$E = \int_1^2 u'^2 / U_0^2 d(y/D)$$

ここで、積分範囲は、本研究にて定めたはく離せん断層の厚さとした。

図12および図13は、それぞれ乱れエネルギーの渦放出に伴う変動成分と乱雑化成分の変化を示す。各図の縦軸は、図10、図11の変動強度を用いて算出した乱れエネルギー $E(u'_{fs})$, $E(u'_{hf})$ を表す。図12より、渦放出周波数成分の乱れエネルギーは、流体力が増加する励起の場合には、より上流側でエネルギーの増加が見られるとともに、最大値を示す位置が前方に位置するのに対し、流体力が減少する場合には、エネルギーの値も小さく、後方でピークを示す傾向にある。さらに、図13より、乱雑化成分の乱れエネルギーは、流

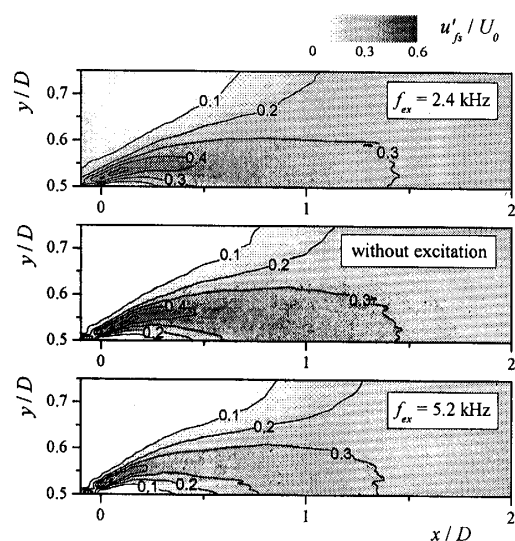


Fig.10 Fluctuating velocity components of vortex shedding ($D = 40$ mm, $U_0 = 20$ m/s)

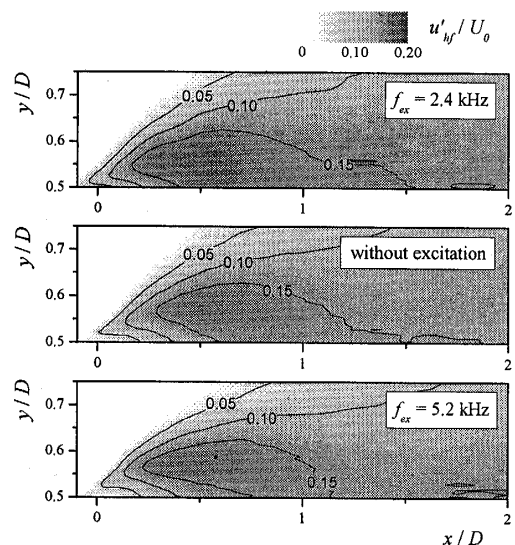


Fig.11 Fluctuating velocity components of transition ($D = 40$ mm, $U_0 = 20$ m/s)

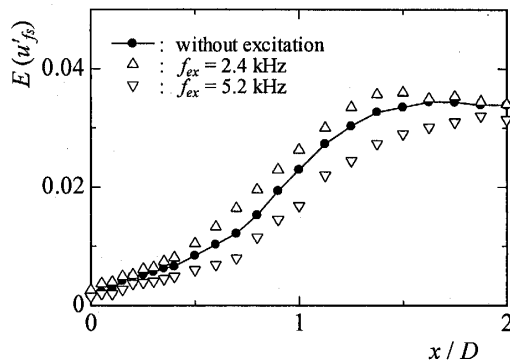


Fig.12 Turbulent energy components of vortex shedding

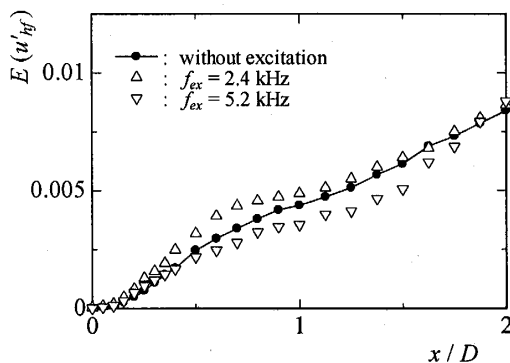


Fig.13 Turbulent energy components of transition

体力が増加する励起の場合には、非励起の場合に比べ、一時的にエネルギーが増加し、その後同様な変化を示すが、流体力が減少する場合には、一時的にエネルギーの増加が抑えられた後、非励起の場合と同様な増加を示す。

以上の結果より、遷移波の周波数に近いかく乱を付加することにより、はく離せん断層内の渦（遷移波）が流下に伴い合体を繰り返すことにより乱雑化（渦放出周波数以外の速度変動の増幅）していく過程が促進もしくは抑制され、せん断層が広がる度合いが変化し、渦の巻き込みに影響することとなり、結果的に、主渦であるカルマン渦の放出位置を前後させるとともに、渦の強さを変化させるものと考えられる。

4. 結 言

一様流中の円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、円柱に作用する流体力の変化とその要因となる円柱近傍の流れ場の変化を測定し、以下の結論を得た。

- (1) はく離せん断層内に現れる遷移波に近い周波数のかく乱を付加することにより、円柱表面上の平均・変動圧力場は変化し、円柱に作用するカルマ

ン渦放出に伴う変動力は、非励起時に比べ増加・減少する。

- (2) 流体力を変化させる励起周波数は、カルマン渦の放出周波数とレイノルズ数に依存し、流体力が増加する周波数の約2倍の周波数のかく乱付加により流体力は減少する。
- (3) はく離せん断層内の速度場は、付加するかく乱の条件により、渦放出により誘起される速度の変動が変化し、周囲流との混合が促進あるいは抑制される。
- (4) 流れの乱雑化に先立って現れる遷移波は、はく離後の円柱極近傍で比較的明瞭な周波数の変動を示し、これよりやや低い周波数にて励起することにより、はく離せん断層内の乱雑化が早まり、やや高い周波数の励起では乱雑化が遅れる。

終わりに、本研究の遂行にあたって、財団法人越山科学技術振興財団より助成を受けたことを付記し、ここに謝意を表す。

文 献

- (1) 浅井雅人, 西岡通男: 前縁剥離流の受容性, *ながれ*, **10** (1991), 35-46.
- (2) Bloor, M. S., The transition to turbulence in the wake of a circular cylinder, *J. Fluid Mech.*, **19** (1964), 290-304.
- (3) Wei, T. and Smith, C.R., Secondary vortices in the wake of circular cylinders, *J. Fluid Mech.*, **169** (1986), 513-533
- (4) 山中晤郎・安達 勤, 円柱からの渦発生に及ぼす音響の干渉, *日本音響学会誌*, **27-5** (1971), 246-256.
- (5) 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** (1989), Jan.-Feb., 37-39.
- (6) 岡本 覚, 円柱からの渦流出に及ぼす音響の干渉—円柱軸に直角方向に音響的かく乱を加えた場合—, *空気調和・衛生工学会論文集*, **44** (1990), 1-10.
- (7) Hsiao, F.B. and Shyu, J.Y., Influence of internal acoustic excitation upon flow passing a circular cylinder, *J. Fluids and Structures*, **5** (1991), 427-442.
- (8) Sheridan, J., Soria, J., Wu Jie and Welsh, M.C., 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.), 1992, Berlin, Springer-Verlag, 115-118.
- (9) 日本機械学会編, 流体計測法, 1985, 日本機械学会, 108.