

# 音響攪乱による円柱の渦励振制御に関する 実験的研究

比江島慎二<sup>1</sup>・木村吉郎<sup>2</sup>・藤野陽三<sup>3</sup>・野村卓史<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 工修 東京大学大学院 工学系研究科土木工学専攻 (〒113 東京都文京区本郷7-3-1)

<sup>2</sup>正会員 Ph.D. 東京大学講師 工学系研究科土木工学専攻

<sup>3</sup>フェロー会員 Ph.D. 東京大学教授 工学系研究科土木工学専攻

<sup>4</sup>正会員 工博 日本大学助教授 理工学部土木工学科

単一周波数の音響攪乱により円柱まわりの流れを変化させ渦励振を制御する手法について、円柱直径を代表長とするレイノルズ数 $Re=2.2 \times 10^4 \sim 6.3 \times 10^4$ の範囲で風洞実験を行うことにより検討した。音響は模型下流の側壁に設置したスピーカによって円柱軸方向に加え、音響の強さと周波数を変化させた。実験の結果、円柱まわりの剥離せん断層中の遷移波とほぼ同じ周波数の音響により刺激することが、渦励振に対して効果的であることが明らかとなった。また音響の強さが一定の場合、無音響時の渦励振振幅が大きいほど制御効果は低下する。しかし無音響時の渦励振振幅が大きい場合でも音響の強さを大きくすることで制御効果を高くできる。

**Key Words :** *acoustic excitation, circular cylinder, experiment, instability, shear layer, transition wave, vortex-induced vibration, wind engineering*

## 1. はじめに

円柱などの空力的に鈍い物体が流れの中に置かれると物体表面から剥離した渦の作用により物体には周期的な変動空気力が作用し、物体の固有振動数と一致すると振幅が著しく大きくなる。この現象がいわゆる渦励振である。渦励振は限定振幅振動であり、瞬時に構造物の破壊につながる恐れは少ない。しかし渦励振の発生風速域が比較的低いことから頻繁に出現して疲労破壊を起こしたり、また構造物内にいる人間に対して心理的・生理的不快感を与える可能性がある。

渦励振に対する従来の制振対策としては、断面形状を工夫して渦放出そのものを抑える、軸方向の渦の発生の相関性を低減させる（例えば煙突に付けられたらせん帯）などの空力的手段のほかに、構造物の剛性増加による共振風速の上昇、構造減衰や質量の増加による渦励振振幅の低減、TMDやATMDなどの装置による減衰付加等がとられている。またこれらの空力的手法や構造力学的手法に代わる新たな制御法として、物体まわりのフローパターンを能動的な手法により変化させ物体に作用する変動空気力をコントロールする方法が検討されている。例えば物

体隅角部でのローター回転<sup>1)</sup>、物体表面からのジェット噴出<sup>2)</sup>、物体振動の位相にあわせて物体表面より出入するゲート<sup>3)</sup>などがそれである。

ところで渦励振などの空力的不安定振動には、物体表面から剥離した境界層（剥離せん断層）が深く関与しているが、これは攪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ることが知られている<sup>4)</sup>。例えば剥離せん断層に特定の周波数の音響を送り込むと、剥離せん断層内に微小な変動（変動の種）が発生し、発生した微小変動は剥離せん断層の不安定性により流下とともに増幅されやがては孤立渦に巻き上がる。これらの孤立渦は、主流の運動量を物体表面近くまで輸送し、物体表面からの境界層の剥離を抑制したりする。このような音響による効果を利用して航空の分野では、静止翼や静止円柱の剥離構造の制御や定常空気力特性を改善する試みがなされている<sup>5)-19)</sup>。制御には剥離せん断層内において最も増幅されやすい周波数の音響が選ばれ、その周波数は物体後流に形成されるいわゆるカルマン渦放出周波数より数倍～数十倍程度高い。

渦励振などの空力的振動現象に対する音響の適用例としては、Matsumoto<sup>20)</sup>が橋桁断面の渦励振特

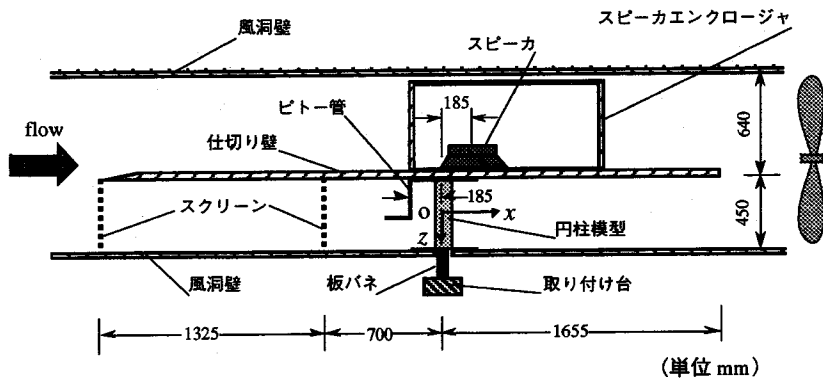


図-1 実験装置 (風洞内平面図)

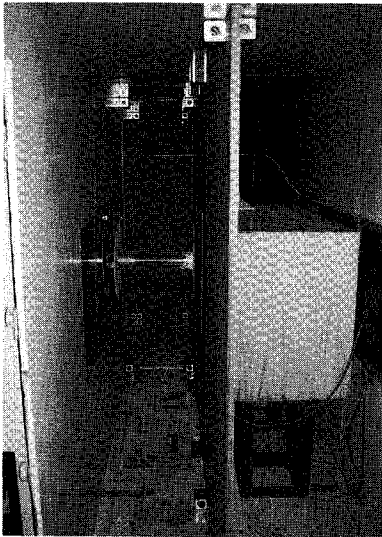


写真-1 模型後流側から見た実験装置

性の把握等に音響を用いた例がある。しかし渦励振を制振する目的で音響を用いた研究は見られない。音響攪乱のような微弱な制御力を用いて振動する物体まわりの流れを変化させられるならば、渦励振などの空力的不安定振動を従来の制振手法に比べより効率的・経済的に制御できる可能性がある。そこで本研究では音響攪乱による流れ制御法を円柱の渦励振に適用し、その制振効果の特性を風洞実験により検討した。

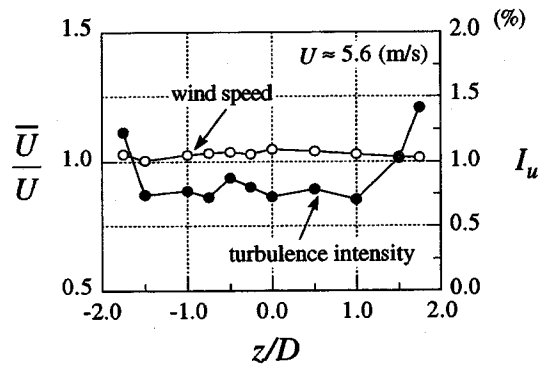


図-2 円柱位置における平均風速・乱れ強さのz方向分布 (無音響時)

## 2. 実験装置および方法

実験装置の概略を図-1および写真-1に示す。座標系は気流方向をx、円柱模型の軸方向をz、それらに直交する方向をyとして原点は円柱模型スパン中央断面中心にとった。風洞内は仕切り壁によって、模型を設置する測定用風路 (幅450mm、高さ1800mm) とスピーカ設置部とに分離した。測定用風路内の境界層の発達を抑えるため、仕切り壁の上流先端部をくさび状に鋭くとがらせた。また模型の上流には2枚の整流用スクリーンを設けた。測定用風路内の気流の一様性を確認するため、円柱位置において平均風速 $\bar{U}$ と乱れ強さ $I_u (= (u_{r.m.s.}/\bar{U}) \times 100)$ の分布を熱線風速計によって測定した結果を図-2に示す。なお $U (\approx 5.6 \text{ m/s})$ は測定用風路内のピトー管位置での主流速度である。模型端部付近では気流の乱れが見られるが、およそ2%以内に乱れを抑えることができた。

模型および音響発生用スピーカ部の概略を図-3に

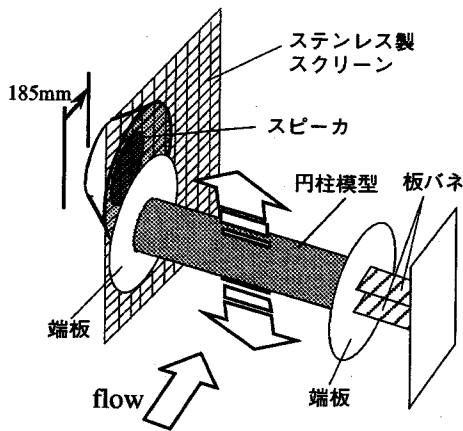


図-3 円柱模型およびスピーカ

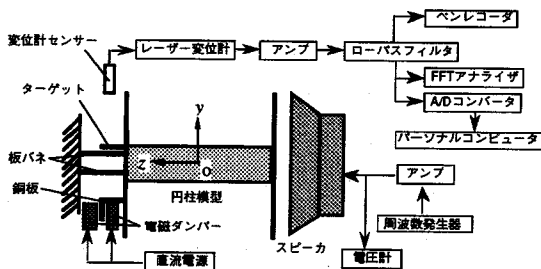


図-4 測定方法

示す。模型（総重量989gf）は直径 $D=100\text{mm}$ 、スパン $L=400\text{mm}$ の亚克力製の円柱で、両端には直径 $d=400\text{mm}$ のバルサ製の端板を取り付けた。後流の2次元性を確保するには端板の直径が小さめであるが<sup>21)</sup>、端板を大きくしすぎるとスピーカから発生した音が端板で遮られてしまい音の効果が出にくいと考えられること、測定用風路内の境界層発達を抑えるなどして測定用風路に2次元風路としての役割を持たせておりある程度2次元性は確保されていると考えられることなどから今回は上記寸法の端板を使用した。模型は平行な2枚のリン青銅製の板バネにより片端だけを支持し他端は自由とした。なお板バネは取り付け台と端板のそれぞれに剛結しているため、模型はロッキングを起こさず鉛直方向（ $y$ 軸方向）に並進振動する。音響は風洞内仕切り壁に設置した直径400mmのコーン形スピーカ（フォステクス社製FW405）によって円柱軸方向（ $z$ 軸方向）に発生させた。なおスピーカから発生した音が端板で遮られるのを防ぐため、スピーカは中心を円柱模型の中心軸から185mm下流にずらして設置した。またスピーカ前面はステンレス製のスクリーンで覆い、ス

ピーカ面の凹凸によって気流が乱されるのを防いだ。

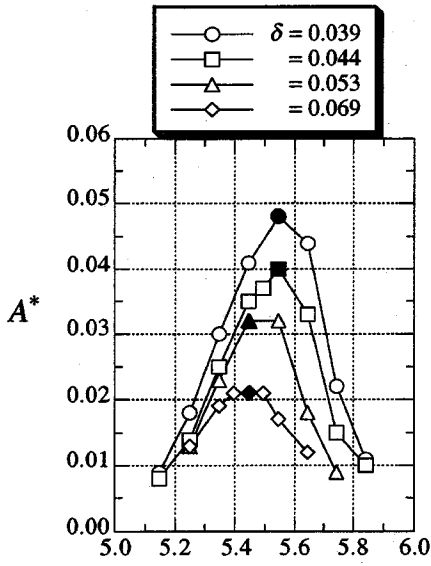
測定方法の概略を図-4に示す。模型の変位は端板に取り付けたターゲットの動きをレーザー変位計（オムロン社製3Z4M-J12）でとらえ、FFTアナライザで周波数解析を行った。またレーザー変位計の出力は、A/D変換（サンプリング周波数：500Hz、サンプリング時間：300sec）してr.m.s値を求め、このr.m.s値に $\sqrt{2}$ を乗じたものを渦励振時の振幅として定義した。周波数発生器によって発生させた単一周波数の信号はオーディオアンプ（Panasonic社製RAMSA）で増幅してスピーカに入力した。なおスピーカに入力される信号がスピーカの許容量を超えないように電圧計によって監視した。また模型の構造減衰は電磁ダンパーを用いて連続的に変化できるようにした。

### 3. 実験結果および考察

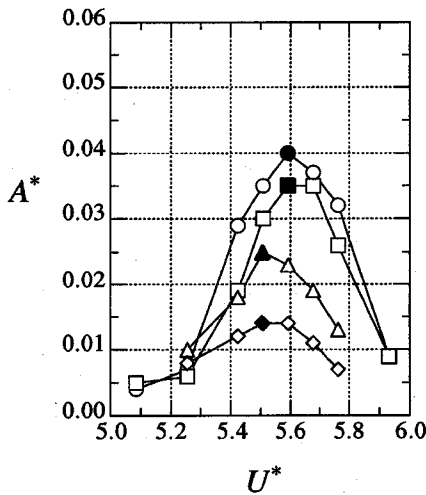
#### (1) 音響を付加しないときの渦励振特性および音響を付加したときの風洞内の音場

本実験では固有振動数の異なる2種類の模型（固有振動数 $f_n$ はそれぞれ10.1Hzおよび5.9Hz）を用い、対数構造減衰率を $\delta=0.039, 0.044, 0.053, 0.069$ の4通りに変化させた。それぞれの模型について音響を付加しないときの換算風速-無次元振幅図（ $U^*=U/(f_n D)$ ,  $A^*=A_o/D$ ）を図-5に示す。なお図中で黒くプロットした点は渦励振の振幅が最大となった点を示す。

また模型を設置した状態で無風時にスピーカによって音響を発生させ、風洞内の円柱模型付近に生じる音場の一部を測定したのが図-6である。図中のいずれの周波数の音響もスピーカへの入力パワーを78.1Wとして発生させた。風洞壁や模型の存在によって音響モードを生じ（図-6(b)）、風洞内の音場性状が複雑に変化している様子がうかがえる。一般に風洞内で音響を発生させると、風洞の天井と床、壁と壁、天井と模型表面、ハニカムと風洞吹き出し出口などの間を特性長とする音響モードが発生し<sup>22)</sup>、その固有周波数域では風洞内音響の強さが著しく大きくなることがある。さらに音響を円柱の片側だけから放射することによる円柱軸方向の音場の非一様性（図-6(a)）や端板付近での音響の回折現象によって、模型周辺の音場の性状はより複雑に変化する。音場の特性が渦励振の制御にどのように影響するかは明らかでないが、渦励振制御に効果のある音響周波数の特性などは、測定部側方が開放型で風洞寸法が異なるため音場が異なる風洞において行った予備実験<sup>23)</sup>に



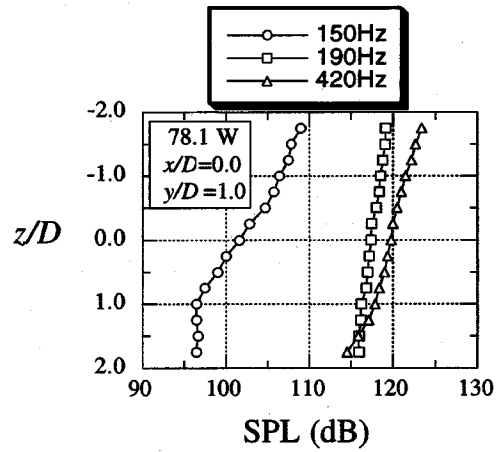
(a)  $f_n=10.1\text{Hz}$



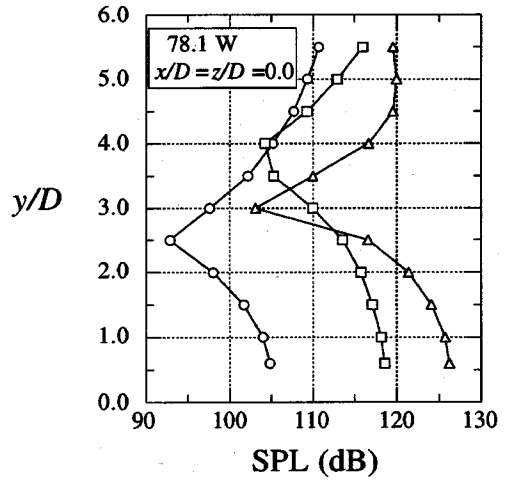
(b)  $f_n=5.9\text{Hz}$

図-5 音響を付加しないときの渦励振特性

おいても変わらないことを確認している。すなわちこうした基本的な特性に対しては音場の影響は小さいと考えられる。よって今回は模型まわりの音場の詳細な分布や有風時における音場の分布等については測定をしておらず、音場に影響されると考えられる応答振幅の低減効果等については定性的な検討に



(a) 円柱軸方向

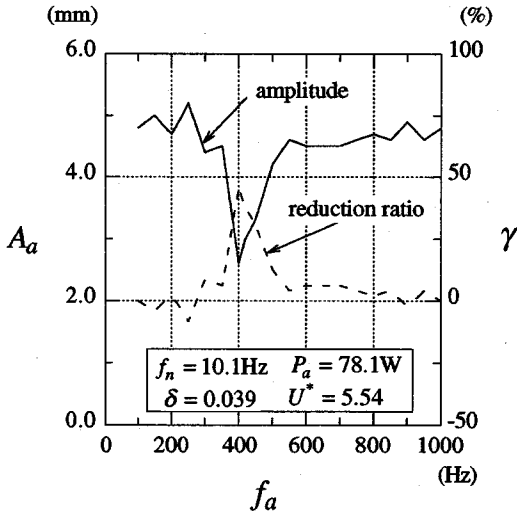


(b) 鉛直方向

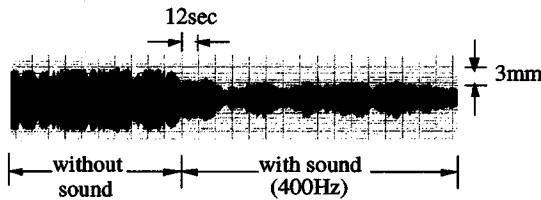
図-6 風洞内の音場（無風時）

とどめることにした。なお、スピーカの大きさの違いは、音響モード形成には影響を及ぼさない。

ところで音響を加える方向は、風洞内の仕切り壁に設置したスピーカから円柱軸方向に加える以外に、スピーカを風洞天井あるいは風洞床に設置して円柱軸直角方向から加えることも考えられる。しかしこの方法ではスピーカと円柱模型との距離がより遠くなってしまい模型付近で十分な音響パワーが得られないこと、また静止円柱に対する実験ではどちらの方向からの音響付加でも効果の特性に変化がないこ



(a) 音響周波数に対する振幅および低減率の変化



(b) 音響による振幅の低減の様子 ( $f_a=400\text{Hz}$ )

図-7 実験結果の一例

とが報告されていること<sup>18)</sup>などから、本実験では円柱軸方向から音響を加えることにした。また模型両側からスピーカで音響を加える方が大きな音響パワーを得ることができるが、静止円柱に対する実験<sup>18)</sup>では、片側および両側からの音響付加による効果の特性にそれほど大きな違いは認められなかったことから、本実験では片側からの音響付加とした。

## (2) 渦励振に効果のある音響周波数

スピーカへの入力パワー  $P_a$  を 78.1W で一定 (模型近傍での音圧レベルは音響周波数によって異なるが 105dB ~ 130dB 程度) とし、付加する音響の周波数  $f_a$  を 100Hz ~ 1kHz の範囲で変化させたときの渦励振振幅の変化の一例 (模型固有振動数  $f_n=10.1\text{Hz}$ , 対数構造減衰率  $\delta=0.039$ , 換算風速  $U^*=5.54$ ) を図-7(a) に示す。なお  $\gamma$  は渦励振振幅の低減率で以下のように定義する。

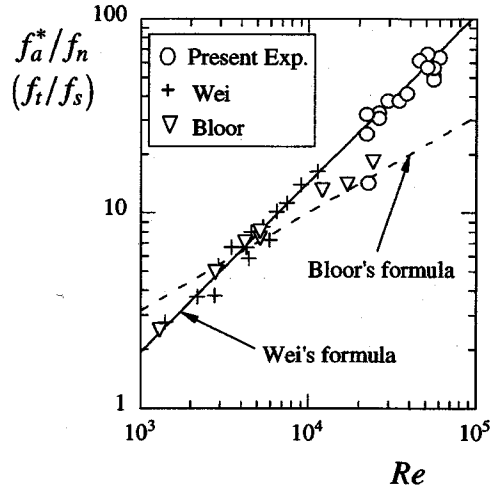


図-8 渦励振に効果のある音響周波数および遷移波周波数との比較

$$\gamma = \left(1 - \frac{A_a}{A_0}\right) \times 100 \quad (1)$$

ここで、 $A_a$  : 音響付加時の渦励振振幅、 $A_0$  : 音響を付加しないときの渦励振振幅である。付加する音響の周波数によって制振効果は異なり、図-7(a)のケースでは 400Hz 付近の音響を付加するとき最も制振効果が大きく、振幅にして 50% 程度の低減効果が得られているのが分かる。図-7(b) は 400Hz の音響を付加したとき渦励振振幅が低減される様子を示した時刻歴である。同様にして、模型の固有振動数あるいは風速域を変化させ、それぞれにおいて最も制振効果の高い音響周波数を調べた。結果を別途行った予備実験<sup>23)</sup> のデータとともに図-8 に示す。図の縦軸は最も効果の高かった音響周波数  $f_a^*$  をそれぞれの模型固有振動数  $f_n$  で無次元化してある。なお図中には Wei<sup>24)</sup> と Bloor<sup>25)</sup> が静止円柱まわりの剥離せん断層において測定した遷移波と呼ばれる微小変動の周波数  $f_i$  を渦放出周波数  $f_s$  で無次元化した値も示してあり、実線と破線はそれぞれ Wei および Bloor の遷移波周波数の測定結果から得られた回帰曲線である。なお、Bloor にならって遷移波周波数  $f_i$  を剥離点付近での境界層厚さ  $\delta_1$  を用いて、 $f_i \propto U/\delta_1$  ( $U$  は流速) となると仮定すると、境界層厚さは  $\delta_1 \propto (\nu D/U)^{1/2}$  ( $D$  は円柱直径) であるので、 $f_i \propto U^{3/2}/(\nu D)^{1/2}$  となる。これにカルマン渦放出周波数  $f_s \propto U/D$  であることを考慮すると、 $f_i/f_s \propto U^{3/2}/(\nu D)^{1/2} \times D/U = Re^{1/2}$  となるので図の横軸は  $Re$  数としている。Bloor はこのような理論的背景から、実験データに次のような回帰

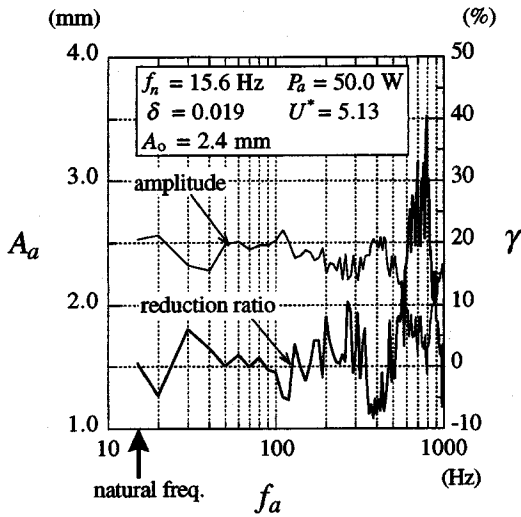


図-9 音響周波数が渦励振幅に及ぼす影響 (渦励振振動数に近い周波数を含む)

曲線をあてはめている。  
Bloorの式 (破線)

$$\frac{f_i}{f_s} = 0.1Re^{0.5} \quad (2)$$

一方, Weiは  $f_i/f_s$  の実験値はむしろ  $Re$  数の0.87乗に比例しているとして以下の回帰曲線を提案している。  
Weiの式 (実線)

$$\frac{f_i}{f_s} = \left(\frac{Re}{470}\right)^{0.87} \quad (3)$$

従来の静止円柱に対する音響付加実験<sup>(2)-19)</sup>によれば, 静止円柱まわりの流れにこれらの遷移波と呼ばれる微小攪乱の周波数付近の音響を付加することによって後流渦や円柱に作用する定常空気力特性が効果的に変化させられると報告されている。今回の渦励振制御の実験において最も効果の高かった音響周波数はほとんどがWeiの示した関係式(3)上に分布しており, 渦励振制御に対しても静止円柱の場合と同様, 剥離せん断層中の遷移波を音響により刺激することが効果的であると判断できる。

ここで遷移波とは円柱表面から剥離した剥離せん断層が層流から乱流へ移行する際, 乱れに先立って現れる微小変動のことである。この微小な変動は最初規則正しい正弦波状をしており振幅も小さいが, 下流に進むにつれて振幅が増大し, やがては正弦波形から乱流の不規則波形へと連続的に移行することが知られている<sup>(24)-29)</sup>。一般に剥離せん断層内の微小攪乱

$$\hat{v} = \phi(y) \exp[i(\alpha x - \sigma t)] \quad (4)$$

の挙動は以下の Orr-Sommerfeld 方程式によって記述される<sup>30)</sup>。

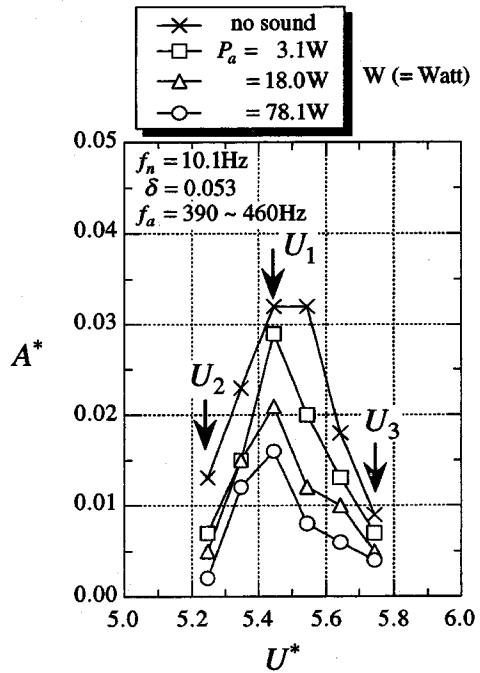


図-10 各風速域での音響の効果

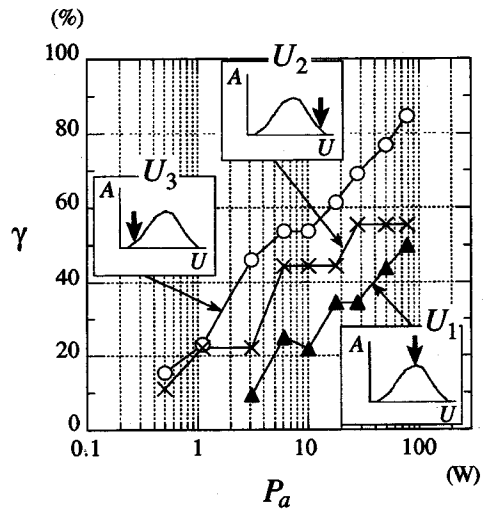


図-11 低減率から見た3風速域での音響の効果の比較

$$\begin{aligned} \left(U - \frac{\sigma}{\alpha}\right) \left(\frac{d^2}{dy^2} - \alpha^2\right) \phi - \frac{d^2 U}{dy^2} \phi \\ = \frac{1}{i\alpha Re} \left(\frac{d^2}{dy^2} - \alpha^2\right)^2 \phi \end{aligned} \quad (5)$$

ここには  $\alpha$  は実数で波数を表し,  $\sigma$  は複素数で実部

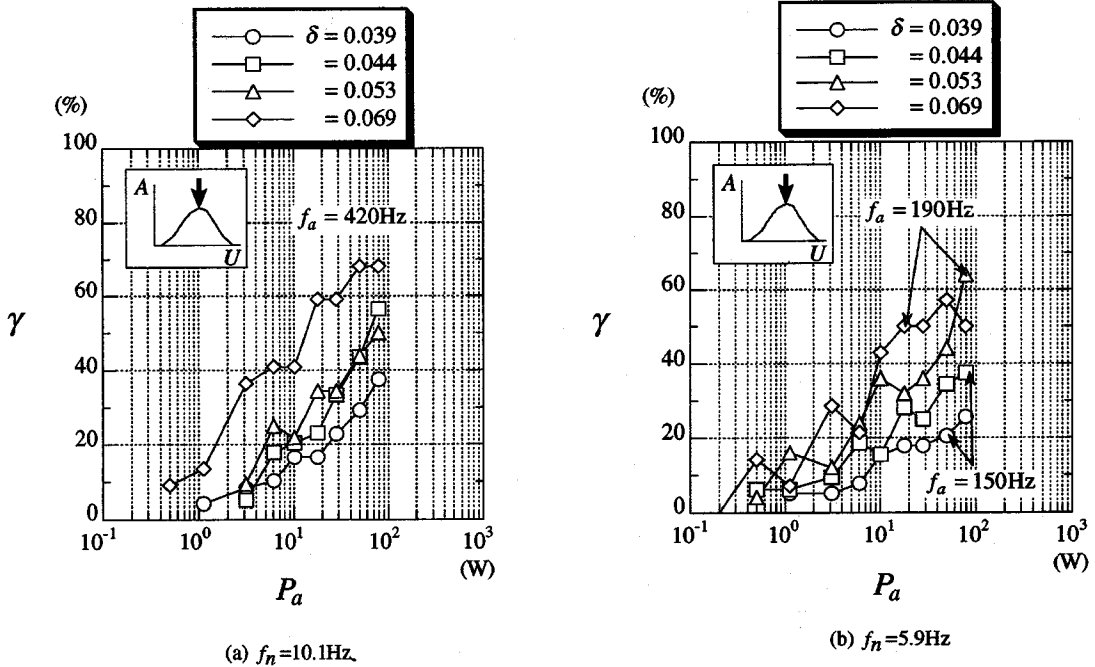


図-12 制振効果に与える無音響時の応答振幅の影響

$\sigma_r$ が周波数，虚部 $\sigma_i$ が時間的増幅率を表す。式(5)は固有値問題を構成し，与えられた $(\alpha, Re)$ および速度分布 $U(y)$ に対し固有値 $\sigma$ と固有関数 $\phi(y)$ を定める。攪乱は $\exp(\sigma_i t)$ で時間的に消長するので，流れは増幅率 $\sigma_i$ が正の攪乱に対し不安定となる。円柱まわりの剥離せん断層における遷移波も，音や気流中の乱れなどの外乱により生じた微小な変動が，剥離せん断層の速度分布により決定されるこのような固有の不安定性によって増幅され発生すると考えられる<sup>31)</sup>。なお静止円柱に対する可視化実験<sup>24), 26), 27)</sup>では，円柱表面から剥がれたせん断層内に遷移波が発生する様子がとらえられている。

また渦励振時の物体振動数と同じ周波数を有する音響の効果については，別途予備実験<sup>23)</sup>において固有振動数15.6Hzの円柱模型を用いて検討した。結果の一例を図-9に示す。遷移波周波数に近いと思われる800Hz付近の音響に比べ，物体振動数と同じ15.6Hz付近の音響では渦励振に対する効果はほとんど得られていない。なお山中ら<sup>19)</sup>も静止円柱における音響付加実験において，渦放出周波数付近の音響は遷移波周波数付近の音響ほどの効果はないという結果を示している。

### (3) 制振効果に与える無音響時の応答振幅の影響

図-5の $f_n=10.1\text{Hz}$ ， $\delta=0.053$ のケースの各風速域に対

して最も効果の高い390Hz～460Hzの音響を付加したときの応答振幅の変化を図-10に示す。いずれの風速域も音響付加により応答振幅が低減され，スピーカへの入力パワー $P_a$ を大きくするほど高い制振効果が得られている。このうち図中に矢印で示した無音響時の振幅が最大となる風速 $(U_1)$ ，振幅最大時風速より低い風速 $(U_2)$ ，振幅最大時風速より高い風速 $(U_3)$ の3風速域について縦軸を低減率にして音響の効果と比較してみると，3風速域のなかで無音響時の振幅が最大となる風速 $(U_1)$ の低減率が最も低いのが分かる(図-11)。無音響時の振幅が最大となる風速域では，物体振動がまわりの流れに及ぼす影響が強いため音響の効果が現れにくいのが原因と考えられる。

そこで対数構造減衰率 $\delta$ を変化させることによって無音響時の応答振幅(以下 $A_0$ と記述する)をさまざまに変化させ，音響による制振効果に与える $A_0$ の影響を検討したのが図-12である。なお図-12の各ケースの $A_0$ は図-5の黒マークに対応し，それぞれ $A_0$ が最大となる風速域である。また各ケースとも最も効果の高い音響周波数すなわち $f_n=10.1\text{Hz}$ の模型では420Hz， $f_n=5.9\text{Hz}$ の模型では150Hz( $\delta=0.039, 0.044$ のとき)および190Hz( $\delta=0.053, 0.069$ のとき)の音響を付加した。スピーカへの入力パワー $P_a$ が同じときと比べると，

やはり対数構造減衰率 $\delta$ が小さい(すなわち $A_0$ が大きい)ほど制振効果が低下する傾向が見られる。しかしいずれの場合も $P_a$ の増加とともに低減率も増加しており、このことは $A_0$ が大きい場合でも音響の強さを十分に大きくすれば制振効果を高められることを示唆する。

#### 4. まとめ

音響攪乱を用いた円柱の渦励振制御について、風洞実験によりその効果を確認するとともに以下の知見が得られた。

(1) 円柱の渦励振に対し制振効果の高い音響周波数は、Weiが静止円柱において求めた遷移波周波数の予測値とはほぼ一致した。すなわち剥離せん断層に存在する遷移波を音響により刺激することが渦励振制御に最も効果的であると考えられる。

(2) 音響による渦励振の制振効果は無音響時の応答振幅の大きさに依存し、無音響時の応答振幅が大きいほど制振効果は低下する。しかし無音響時の応答振幅が大きい場合でも、音響の強さを大きくすることで制振効果を高めることができた。

今回の実験では円柱模型の外側から円柱軸方向に単一周波数の音響を付加した。付加した音響の大きさは非常に大きなものであったが、模型の内側からの音響放出、2周波数音の付加等の工夫により小さな音響でもさらに効率良く渦励振を制振できる可能性がある。また音響によって渦励振が制御されるメカニズムは、剥離点の移動等によるものなのか、あるいは渦放出の2次元性が乱されることによるものかなどについても検討する必要がある。なお、剥離せん断層の不安定性を利用した今回の制振方法は、円形以外の断面の渦励振や流れの剥離をともなったその他の空力的不安定現象に対しても適用できると考えられ、これらについても検討を加えたい。

謝辞：本研究の遂行にあたって、平成6年度文部省科学研究費(特別研究員奨励費 No.06004120)を受けたことを付記し、謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 久保喜延他：境界層加速による正方形角柱の耐風制振法、構造工学論文集, Vol. 37A, pp.989-994, 1991.
- 2) 岡南博夫他：Jetによる空力安定化効果に関する基礎的研究、第11回風工学シンポジウム論文集, pp.79-84, 1990.

- 3) 日下部毅明他：アクティブコントロールによるフラッター制振に関する実験的研究、第13回風工学シンポジウム論文集, pp.431-436, 1994.
- 4) 浅井雅人、西岡通男：前縁剥離流の受容性、ながれ, 10, pp.35-46, 1991.
- 5) 浅井雅人他：翼面上剥離泡流れの音波に対する応答、日本航空宇宙学会誌, 第42巻第485号, pp.59-66, 1994.
- 6) 西岡通男他：渦の音響励起による翼の失速制御、日本航空宇宙学会誌, 第43巻第492号, pp.53-58, 1995.
- 7) Ahuja, K. K. et al. : Control of turbulent boundary layer flows by sound, *AIAA Paper No. 83-0726*, 1983.
- 8) Ahuja, K. K. and Burrin, R. H. : Control of flow by sound, *AIAA Paper No. 84-2298*, 1984.
- 9) Hsiao, F. B. : Control of wall-separated flow by internal acoustic excitation, *AIAA Journal*, Vol. 28, No. 8, pp.1440-1446, 1990.
- 10) Zaman, K. B. M. Q. et al. : Effect of acoustic excitation on the flow over a low-Re airfoil, *J. Fluid Mech.*, Vol. 182, pp.127-148, 1987.
- 11) Zaman, K. B. M. Q. and McKinzie, D. J. : Control of laminar separation over airfoils by acoustic excitation, *AIAA Journal*, Vol. 29, No. 7, pp.1075-1083, 1991.
- 12) 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), pp.537-546, New York: Hemisphere, 1989.
- 13) 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.
- 14) Peterka, J. A. and Richardson, P. D. : Effect of sound on separated flows, *J. Fluid Mech.*, Vol. 37, part 2, pp.265-287, 1969.
- 15) 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.), pp.115-118, Berlin: Springer-Verlag, 1992.
- 16) 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.
- 17) 岡本 覚他：円柱からの渦流出に及ぼす音波の影響(円柱軸方向に音響的かく乱を加えた場合)、日本機械学会論文集(B編), 46巻405号, pp.813-820, 1980.
- 18) 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, No. 44, pp.1-10, 1990.
- 19) 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巻5号, pp.246-256, 1971.
- 20) Matsumoto, M. et al. : Judgement of vortex-induced oscillation characteristics of bluff bodies by applied sound, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 52, pp.229-235, 1994.
- 21) Kubo, Y. et al. : The role of end plates in two dimensional wind tunnel tests, *Proc. of J.SCE, No. 368/T-5*, pp.179-186, 1986.



- 22) Parker, R. : Resonance effects in wake shedding from parallel plates: Calculations of resonant frequencies, *J. Sound Vib.*, 5(2), pp.330-343, 1967.
- 23) 松本孝矢 : 音響付加による渦励振制御, 東京大学卒業論文, 1994.
- 24) Wei, T and Smith, C. R. : Secondary vortices in the wake of circular cylinders, *J. Fluid Mech.*, Vol. 169, pp.513-533, 1986.
- 25) Bloor, M. S. : The transition to turbulence in the wake of a circular cylinder, *J. Fluid Mech.*, Vol. 19, pp.290-304, 1964.
- 26) Gerrard, J. H. : The wakes of cylindrical bluff bodies at low Reynolds number, *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A*, Vol. 288, pp.351-382, 1987.
- 27) Kourta, A. et al. : Nonlinear interaction and the transition to turbulence in the wake of a circular cylinder, *J. Fluid Mech.*, Vol. 181, pp.141-161, 1987.
- 28) Braza, M. et al. : Prediction of large-scale transition features in the wake of a circular cylinder, *J. Phys. Fluids. A.*, Vol. 2, No. 8, pp.1461-1471, 1990.
- 29) Braza, M. et al. : Prediction of certain transition characteristics in the wake of a circular cylinder in free and forced flow, *Proc. of IUTAM Symp. on Bluff-Body Wakes, Dynamics and Instabilities*(ed. H. Eckelmann et al.), pp.279-284, Berlin: Springer-Verlag, 1992.
- 30) 巽 友正, 後藤金英 : 流れの安定性理論, 産業図書, 1976.
- 31) 西岡通男他 : カルマン渦形成領域における攪乱増幅特性, *ながれ*, 10, pp.269-276, 1991.

(1994. 12. 6 受付)

## AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE CONTROL OF THE VORTEX-INDUCED VIBRATION OF A CIRCULAR CYLINDER BY ACOUSTIC EXCITATION

Shinji HIEJIMA, Kichiro KIMURA, Yozo FUJINO and Takashi NOMURA

A series of experiments over a Reynolds-number range of  $2.2 \times 10^4 \sim 6.3 \times 10^4$  was conducted to understand the effect of acoustic excitation on the vortex-induced vibration of a circular cylinder. The frequency and the intensity of the applied sound were varied. The following results are obtained: (1) The most effective frequency of acoustic excitation in suppressing the vortex-induced vibration approximately corresponds with the frequency of transition waves in shear layers separated from a cylinder surface. (2) Although applied sound is less effective in reducing larger vortex-induced vibration amplitude, it can be suppressed more effectively by applying sound with stronger intensity.