振動円柱の空力安定性に及ぼす周期的湧き出し・吸い込みの影響

Numerical Study of the Effect of Periodic Velocity Excitation on Aerodynamic Stability of an Oscillating Circular Cylinder

比江島慎二*・野村卓史**
Shinji HIEJIMA and Takashi NOMURA

*正会員 工博 岡山大学講師 環境理工学部環境デザイン工学科 (〒700-8530 岡山市津島中 2-1-1)

**正会員 工博 日本大学教授 理工学部土木工学科 (〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8)

A finite element method based on ALE formulation has been adopted to examine the aerodynamic characteristics of an oscillating circular cylinder when the separated shear layers around the cylinder is stimulated by periodic velocity excitation on the cylinder surface. As a result, the negative damping caused by the unsteady lift force is found to be reduced by some cases of the periodic excitation, thereby stabilizing the cylinder aerodynamically. Furthermore, it is shown that the change of the lift phase relative to the cylinder displacement by the periodic excitation seems to play an important role in stabilizing the cylinder.

Key Words : circular cylinder, finite element method, periodic excitation, separated shear layer, aerodynamic stability

1. はじめに

円柱などの空力的に鈍い物体の周辺流れでは、物体表面から流れが剥がれて剥離せん断層が形成される。剥離せん断層は物体周辺で巻き込みを生じ、周期的な渦を放出することによって物体に変動空気を作用させ、しばしば渦励振などの流体励起振動を引き起こす原因となる。また剥離せん断層は流体力学的に不安定な性質を有しており、主流中の乱れや音響などの微小な外乱に対して敏感に反応する。例えば、ある特定の周波数の音響攪乱を物体周辺の剥離せん断層内に送り込むと、音響により生じる微小な攪乱が剥離せん断層の移流不安定性によって流下とともに増幅され、やがて大きな変動へと成長し、物体周辺流れの特性を変化させる。西岡ら¹⁾は航空機の翼表面から剥離した流れに音響を付加することにより、剥離せん断層内に孤立渦を生じさせ、孤立渦による運動量輸送効果を利用して境界層の剥離を抑制できることを報告している。その他にも、翼まわりの剥離流れの制御^{2)~7)}や静止円柱周辺の剥離流れ特性を変化させる^{8)~13)}目的で音響が用いられている。また Matsumoto ら¹⁴⁾は、橋桁模型周辺流れへの音響付加により、橋桁の渦励振開始風速を予測する方法を示している。

著者らの風洞実験¹⁵⁾では、渦励振が発生している円柱周辺流れに対し、剥離せん断層の不安定性に関

する周波数の音響を付加することにより、渦励振をある程度低減できることが明らかとなった。また音響の代わりに、円柱表面上に設けた周期的湧き出し・吸い込み（周期的攪乱）により円柱周辺流れを刺激する数値流体解析¹⁶⁾の結果においても、風洞実験と同様に剥離せん断層の不安定性に関わる周波数の攪乱が、円柱周辺流れの特性や渦励振特性を変化させるのに効果が高いことが示された。付加した攪乱が剥離せん断層の不安定性により流下とともに増幅し円柱周辺流れの特性を変化させていると考えられるが、どのような流れ特性の変化あるいは空力特性の変化が渦励振低減の要因になっているかは明らかになっていない。本研究では振動円柱まわりの流れについて ALE 有限要素法にもとづく数値流体解析を行い、振動円柱周辺の流れや空力特性に及ぼす周期的攪乱の影響について検討する。

2. 解析方法

2.1 ALE 法に基づく流体の基礎方程式

振動円柱まわりの非圧縮・粘性流体の解析手段として、ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 法¹⁷⁾¹⁸⁾を適用した。ALE 法は、解析メッシュの節点が流体粒子とともに動くラグランジュ的立場と、空間に固定されているオイラー的立場の中間的な立場をとる方法で、節点が動く様式が、流体粒子の運動とは独立に

物体運動などに関連づけて任意に設定される。本解析で扱う非圧縮・粘性の2次元 Navier-Stokes 方程式および連続条件式は、ALE 法によると以下のように記述される。

$$\left. \begin{aligned} \rho \{u'_i + (u_j - \hat{u}_j)u_{i,j}\} &= \tau_{ij} + f_i \\ \tau_{ij} &= -p\delta_{ij} + \mu(u_{i,j} + u_{j,i}) \\ u_{i,i} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1 \sim 3)$$

ここで、 ρ は流体密度、 μ は粘性係数、 u_i は流速、 τ_{ij} は応力テンソル、 p は圧力、 f_i は物体力であり、 $\hat{u}_i$ はメッシュ速度（節点の移動速度）、 δ_{ij} はクロネッカのデルタである。 u'_i は流速成分 u_i の時間 t に関する微分を表し、 $u_{i,j}$ は流速成分 u_i の空間座標 x_j に関する微分である。式(1)が Euler 記述による通常の Navier-Stokes 方程式と異なる点は、移流速度が流体粒子の速度とメッシュ速度との相対速度になっている点である。

一般に、2次元解析の場合、軸方向の3次元的な流れが考慮されないため、剥離流れの特性や空力特性が3次元解析や風洞実験の場合とは定量的に異なる値を示す傾向がある。よって、音響などの微小攪乱が円柱周辺流れや円柱の空力特性に与える影響について検討する際にも、本来ならば3次元解析を行う必要があると思われる。しかしながら、微小攪乱による影響を定性的な範囲で検討する限りにおいては、2次元解析でもある程度の基本的な情報は得られると考えられる。したがって本解析では、計算負担を軽減してより多くの基礎的データをを得るためにも、2次元的な流れの挙動のみを対象として解析を行い、微小攪乱付加による渦励振の低減メカニズムについて検討する。

2.2 流体に関する有限要素方程式

ALE 記述した Navier-Stokes 方程式と連続条件式に、流速双線形、圧力一定の四辺形混合補間要素を用いて、SUPG (Streamline Upwind/Petrov-Galerkin) 法¹⁹⁾を適用すると、以下の有限要素方程式が得られる。

$$\mathbf{M}\mathbf{a} + \mathbf{N}(\mathbf{v} - \hat{\mathbf{v}})\mathbf{v} - \mathbf{G}\mathbf{p} = \mathbf{f} \quad (4)$$

$$\mathbf{G}'\mathbf{v} = 0 \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{v}$ は節点流速ベクトル、 $\hat{\mathbf{v}}$ はメッシュ速度のベクトル、 $\mathbf{a}$ は節点加速度ベクトル、 $\mathbf{p}$ は要素圧力のベクトル、 $\mathbf{f}$ は物体力および境界における流体力からなるベクトルである。また $\mathbf{M}$ は質量マトリクス、 $\mathbf{G}$ は勾配に関するマトリクスであり、 $\mathbf{N}(\mathbf{v} - \hat{\mathbf{v}})$ は対流項、粘性項および人工粘性に関するマトリクスを便宜的にまとめて表したもので移流速度 $\mathbf{v} - \hat{\mathbf{v}}$ の関数である。マトリクス $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{N}$ 、 $\mathbf{G}$ を作成するときに参照する節点座標は、物体の変位にしたがって変化する

図-1 周期的攪乱

る時間の関数である。なお有限要素方程式の時間積分法としては、予測子・修正子 (Predictor-Corrector) 法¹⁸⁾を適用した。本解析では、各時間ステップの無次元時間刻み $\Delta t^* = U\Delta t/D = 0.01$ として時間積分を行った。

2.3 周期的湧き出し・吸い込みについて

音響は円柱周辺の流体粒子を振動させ、剥離せん断層内に周期的な微小変動を生じさせる。この変動が剥離せん断層の不安定性により流下とともに増幅されて大きな渦となり、やがて円柱周辺の剥離流れの特性を変化させる働きをすると考えられる。風洞実験¹⁵⁾と同じ条件で解析するならば、音響による流体の圧縮性を考慮して解析すべきであるが、音響の圧縮性が関与するのは音源からの伝搬経路における挙動であり、いったん剥離せん断層中に音響による微小攪乱を生じれば、その攪乱の挙動は非圧縮性流れの現象として取り扱うことができると考えられる。そこで計算負担を軽減するためにも、音響による変動が剥離せん断層内で増幅されるのと同様な効果を再現する方法として、音響が剥離せん断層に与える周期的変動を図-1のような周期的湧き出し・吸い込み (周期的攪乱) で置き換えて解析している。

周期的攪乱は円柱表面上の2点に配置し、それらの変動流速 v_{ex} を以下のように与え境界条件として扱った。

$$v_{ex} = U_{ex} \sin(2\pi f_{ex}t + \theta_{ex}) \quad (6)$$

ただし U_{ex} 、 f_{ex} 、 θ_{ex} はそれぞれ攪乱による変動流速の振幅、周波数および位相である。なお円柱上2点における周期的攪乱の周波数および振幅は等しいとする。 θ_{ex} を円柱上2点の周期的攪乱源において等しくすれば対称攪乱となり、 180° 変化させたものとするれば逆対称攪乱となる。また上流側よどみ点と周期的攪乱付加点とのなす角度 ϕ_{ex} は、2次元数値解析によ

図-2 境界条件

図-3 解析メッシュ

り得られた円柱表面の平均圧力分布から判断して剥離点近傍と思われる $\phi_{ex} = 80^\circ$ とした。 f_{ex} については、以前行った解析¹⁰⁾において、剥離せん断層の不安定性に関する周波数付近に相当し、円柱周辺の流れ特性を最も顕著に変化させることができた $f_{ex} = 4.45f_s$ (f_s は $Re = 2000$ における静止円柱のカルマン渦放出周波数) に設定した。また、式(6)で表される変動流速により円柱表面から流入出する攪乱の変動流量の r.m.s 値を $q_{r.m.s} = U_{ex}\Delta x/\sqrt{2}$ (Δx は攪乱付加位置に対応する円柱表面上の解析メッシュ節点とそれに隣り合う節点との距離) とするとき、円柱投影面に流入する接近流の流量 $U \times D$ に対する比 $C_q = q_{r.m.s}/(UD) = U_{ex}\Delta x/(\sqrt{2}UD)$ として周期的攪乱の強さを表すこととし、本解析においては $C_q = 0.6(\%)$ に設定した。なお $C_q = 0.6(\%)$ は $U_{ex} = 0.5U$ に相当する。対称攪乱の場合について、 $C_q = 1.2(\%)$ ($U_{ex} = 1.0U$ に相当) などについても解析したが、円柱の空力特性に与える効果は、 $C_q = 0.6(\%)$ の場合と定性的にはあまり変化がないことを確認している。

2.4 円柱と流体との間の速度および力の関係

円柱表面上の節点流速ベクトルおよび節点加速度ベクトルをそれぞれ $\mathbf{v}^x$, $\mathbf{a}^x$, 円柱表面上の流体力 $\mathbf{f}^x$ とすると、円柱重心で定義された諸量との関係は以下ようになる。

適合条件：

$$\mathbf{v}^x = \mathbf{T}^t \dot{\boldsymbol{\delta}} + \mathbf{v}^{ex}, \quad \mathbf{a}^x = \mathbf{T}^t \ddot{\boldsymbol{\delta}} + \mathbf{a}^{ex} \quad (7)$$

つり合い条件：

$$\mathbf{X} + \mathbf{T} \mathbf{f}^x = \mathbf{0} \quad (8)$$

なお $\mathbf{v}^{ex}$, $\mathbf{a}^{ex}$ はそれぞれ円柱表面上に導入された周期的攪乱の変動流速および変動加速度を表すベクトル、 $\dot{\boldsymbol{\delta}}$, $\ddot{\boldsymbol{\delta}}$, $\mathbf{X}$ はそれぞれ円柱の速度、加速度および円柱重心に作用する集中力のベクトルである。 $\mathbf{T}$ は円柱の重心と円柱表面の各節点の間の幾何学的な関係を表すマトリクスである¹⁷⁾。また円柱がバネ支持される場合、円柱は流れ直角方向の 1 自由度系とし、 $\mathbf{X}$ を介して流体と連成する。

2.5 境界条件および解析メッシュ

図-2は境界条件、円柱および流体の各諸元を示す。流入流速 U は一様とし、円柱直径 D を代表長とするレイノルズ数 $Re = 2000$ である。側方境界はスリップ境界、下流境界はトラクション・フリー、円柱表面はすべりなし条件とした。また円柱がバネ支持されるとき、円柱の固有振動数が $Re = 2000$ におけるカルマン渦放出周波数 f_s に一致するように円柱諸元を決定した。

図-3は解析に使用したメッシュである。円柱周辺の放射状メッシュは ALE 法に基づく変形メッシュであり、円柱後流域は非変形メッシュである。変形メッシュの節点の移動速度は、円柱表面上で円柱重心速度と等しく、変形メッシュ領域の最外縁でゼロ、その中間領域では線形的に変化させた。なお本解析では、円柱の空力特性等に及ぼす周期的攪乱の効果を定性的に把握することを目的としているため、空力特性等への影響が比較的小さいと思われる円柱後流域については、比較粗いメッシュ分割を行っている。

3. 解析結果

3.1 加振円柱の非定常空力特性に及ぼす周期的攪乱の影響

(1) 非定常揚力の特性

片振幅 $z_0 = 0.2D$ で円柱を流れ直角方向に強制振動させ、攪乱を付加しない場合、対称攪乱および逆対称攪乱を付加する場合について円柱周辺流れを数値解析した。そのとき円柱に作用する非定常揚力について、円柱変位比例成分 C_{LR} および円柱速度比例成分 C_{LI} を次式により求めた。ただし、 $L(t)$ は時刻 t における非定常揚力、 f_c は円柱加振振動数、 $z_c(t)$, $\dot{z}_c(t)$ はそれぞれ時刻 t における円柱の流れ直角方向変位および速度である。なお本解析では、無次元時間にしておよそ 100 の非定常揚力 $L(t)$ の時刻歴により C_{LR} , C_{LI} を評価している。

図-4 非定常揚力の円柱速度比例成分 C_{LI}

$$C_{Lr} = \frac{2}{T} \int_0^T \frac{L(t)}{\frac{1}{2} \rho U^2 D} \frac{z_c(t)}{z_0} dt \quad (9)$$

$$C_{Li} = \frac{2}{T} \int_0^T \frac{L(t)}{\frac{1}{2} \rho U^2 D} \frac{\dot{z}_c(t)}{2\pi f_c z_0} dt \quad (10)$$

無次元加振振動数 $f_c D/U$ に対する C_{LI} の変化を図-4に示す。 C_{LI} は円柱振動時における非定常揚力の空力減衰の大きさを表し、 $C_{LI} > 0$ のとき負減衰、すなわち非定常揚力が円柱振動を自励的に増大させるように作用するため、円柱が空力的に不安定となる。逆に $C_{LI} < 0$ のときは正減衰となり、円柱は空力的に安定である。図によれば、攪乱なしおよび対称・逆対称攪乱付加のいずれの場合も、 $f_c D/U = 0.19 \sim 0.23$ 付近で $C_{LI} > 0$ となり、円柱は空力的に不安定となっているが、対称・逆対称攪乱を付加した場合は、攪乱なしの場合に比べてこの加振振動数域の C_{LI} が低下し、相対的に空力特性を安定化できているのが分かる。ただし、対称攪乱の場合は、 $f_c D/U = 0.23$ 付近で C_{LI} を低減できず、全体として C_{LI} が鋭いピークを持つ分布となっている。

静止円柱周辺流れに周期的攪乱を付加する以前の数値解析¹⁶⁾では、本解析と同じ周波数の対称攪乱付加により、カルマン渦放出周波数 f_s が $f_s D/U = 0.21$ から $f_s D/U = 0.23$ に変化することが分かっている。また静止円柱の後流域を線形安定性解析した結果²⁰⁾によれば、このような $f_s D/U = 0.23$ へのカルマン渦放出周波数の変化は、円柱後流の平均流速分布が対称攪乱付加により $f D/U = 0.23$ の変動に対して高い増幅率を有するようなものに変化するのが原因である

図-5 円柱変位に対する揚力の位相差 β

図-6 揚力の絶対値 $|C_L|$

ことが明らかになっている。本解析においても同様に、対称攪乱付加時には円柱後流域が $f D/U = 0.23$ の変動に対して高い増幅率を有していると考えられ、図-4の $f_c D/U = 0.23$ 付近において対称攪乱付加時に C_{LI} が低下しなかったのも、 $f_c D/U = 0.23$ の強制加振に対する後流の高い増幅特性により、後流振動が共振を起こしたのが原因と思われる。なお、逆対称攪乱の場合には、静止円柱後流の不安定性の変化は生じず、静止円柱のカルマン渦放出周波数は変化しないことを別途確認している。

攪乱付加により C_{LI} が変化する要因を探るため、円柱変位に対する揚力の位相差 β_L (=

図-7 強制振動時の等渦度線図および等圧力線図 ($f_c D/U = 0.21$)

$\tan^{-1}(C_{Li}/C_{LR})$) 及び揚力の絶対値 $|C_L|$ ($=\sqrt{C_{LR}^2 + C_{Li}^2}$) について調べた結果を図-5及び図-6に示す. $C_{Li} = |C_L| \sin \beta_L$ の関係があるので β_L が 90° から遠ざかるほどあるいは $|C_L|$ が小さくなるほど C_{Li} が減少し, β_L が 90° に近づくほどあるいは $|C_L|$ が大きくなるほど C_{Li} が増加することになる.

まず図-5の対称攪乱を付加した場合によれば, 図-4において C_{Li} を低減できた $f_c D/U = 0.19 \sim 0.23$ 付近の加振振動数域においては, β_L の値が攪乱なしの場合よりも増加し 90° から遠ざかるように作用してい

る. すなわち β_L の変化が C_{Li} を低減させるように作用しており, 対称攪乱付加による揚力の位相の変化が図-4の C_{Li} の低減の要因となっていることを示す. 逆対称攪乱の場合も, やはり β_L の攪乱なしの場合に対する変化は, $f_c D/U = 0.19 \sim 0.23$ 付近において C_{Li} を低減させるように作用しており, 揚力の位相の変化が図-4の C_{Li} の低減の要因となっている.

一方, 図-6の $|C_L|$ については, 対称・逆対称いずれの攪乱の場合も, $f_c D/U = 0.19 \sim 0.23$ 付近における攪乱なしの場合に対する $|C_L|$ の変化は, 必ずしも C_{Li} を低減させるようには作用していない. したがって

図-8 周期的攪乱の渦励振に対する効果 ($f_n D/U = 0.21$, $Sc = 5.0$)

以上の結果から、対称および逆対称攪乱の付加による C_L の特性変化には、揚力の絶対値 $|C_L|$ の変化よりも位相差 β_L の変化による寄与が大きいと言える。

(2) 円柱まわりの流れ

図-7は、 $f_n D/U = 0.21$ で強制加振したときの円柱変位最大時の等渦度線図および等圧力線図であり、それぞれ攪乱なしおよび対称・逆対称の周期的攪乱を付加した場合について比較したものである。等渦度線図によれば、攪乱なしの場合の円柱背後のせん断層はほぼ水平に伸びているのに対し、対称および逆対称攪乱を付加した場合は水平に対してやや下向きに傾いている。これは、攪乱付加により円柱後流渦放出の位相が早まっていることを示しており、図-5の攪乱付加により揚力の位相が早まる結果と一致する。なおこのような後流渦放出の位相の早まりは毎回の渦放出ごとに生じているのではなく、不定期に断続的に生じていることが一連の流れ図の観察から明らかになっている。また等圧力線図において対称・逆対称攪乱を付加した場合には、攪乱による渦と思われる小さな圧力領域が円柱両側の剥離せん断層付近に見られる。

3.2 渦励振に対する周期的攪乱の効果

バネ支持した円柱の渦励振について解析し、渦励

振に対する周期的攪乱の効果について検討した。円柱—バネ系の各諸元は図-2に示すとおりであり、円柱の無次元固有振動数 $f_n D/U = 0.21$ 、スクルートン数 $Sc = 5.0$ である。図-8は、円柱を強制加振後の無次元時刻 1100 付近からバネ支持に移行し、その後、応答振幅がほぼ安定した無次元時刻 1300 付近から周期的攪乱を付加したときの円柱変位および変動揚力係数の時刻歴である。

対称攪乱については、以前の解析¹⁶⁾においてすでに同じ風速域での渦励振に対する低減効果を確認しているが、渦励振時の円柱変位が前回の 4 倍程度大きい今回の解析においてもやはり渦励振を低減できた。また逆対称攪乱の場合、対称攪乱ほどの低減効果はないものの、渦励振を低減できることが明らかとなった。なお対称および逆対称攪乱における低減効果の違いは、図-4における C_L の低減効果の違いに起因していると考えられる。

図-9は図-8の渦励振時における円柱周辺流れの等渦度線図および円柱近傍の等圧力線図である。攪乱なしの場合は図-8の無次元時刻 1280 付近、対称・逆対称攪乱付加の場合は無次元時刻 1880 付近のフローパターンである。等渦度線図によれば、対称攪乱を付加した場合は、渦励振の抑制により、円柱周辺流れの特性が対称攪乱付加時の静止円柱まわり流れの

図-9 渦励振時の等渦度線図および等圧力線図 ($f_n D/U = 0.21$, $Sc = 5.0$)

特性¹⁶⁾に近いものになっている。すなわち、静止円柱への対称攪乱付加時に見られたカルマン渦放出周波数の増加¹⁶⁾と同様の効果により、円柱後流渦間の距離が、攪乱なしの場合や逆対称攪乱の場合に比べ多少小さくなっている。また等圧力線図によれば、図-7の強制振動時の等圧力線図と同様に、攪乱による渦と思われる小さな圧力領域が円柱両側の剥離せん断層付近に見られる。

4. まとめ

円柱表面上の2点から対称および逆対称の周期的攪乱を付加したときの振動円柱周辺流れをALE有限要素解析し、円柱に作用する非定常揚力特性や円柱周辺流れ特性の変化について検討した結果、以下の知見が得られた。

(1) 強制加振円柱周辺流れに対称および逆対称攪乱を付加した場合、負減衰を生じる加振振動数域において非定常揚力の負減衰成分を低減できた。ただ

し対称攪乱の場合、攪乱付加により励起される円柱後流の不安定周波数に対応する加振振動数近くでは負減衰成分を低減できなかった。

(2) 対称および逆対称攪乱のいずれの場合も、非定常揚力の負減衰成分の低減には、非定常揚力の絶対値の変化の寄与よりも円柱変位に対する非定常揚力の位相の変化の寄与が大きい。

(3) 円柱静止時のカルマン渦放出周波数と円柱固有振動数が一致するような風速域における渦励振の解析の結果、対称および逆対称いずれの攪乱も渦励振に対する低減効果が見られた。

以上の結果より、振動円柱周辺流れへの攪乱付加により生じる非定常揚力の位相の変化が、以前の風洞実験¹⁵⁾で見られたような音響付加による渦励振抑制の要因の1つとなっている可能性が示唆される。またカルマン渦放出周波数と円柱固有振動数が一致するような風速域においては渦励振に対する攪乱の低減効果が見られたが、その他の風速域においても同様に渦励振に対する低減効果が得られるか検討中である。

謝辞：本研究の一部は、平成9年度文部省科学研究費奨励研究(A) (課題番号09750557) およびウエスコ土木技術振興基金により行われたことを付記し、ここに謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 西岡他：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492号，pp.53-58，1995。
- 2) Ahuja, K. K., Whipkey, R. R. and Jones, G. S.: Control of turbulent boundary layer flows by Sound, *AIAA Paper* 83-0726, 1983.
- 3) Ahuja, K. K. and Burrin, R. H.: Control of flow by sound, *AIAA Paper* 84-2298, 1984.
- 4) Zaman, K. B. M. Q., Bar-Server, A. and Mangalam, S. M.: Effect of acoustic excitation on the flow over a low-Re airfoil, *J. of Fluid Mech.*, Vol.182, pp.127-148, 1987.
- 5) Hsiao, F. B., Liu, C. F. and Shyu, J. Y.: Control of wall-separated flow by internal acoustic excitation, *AIAA Journal*, Vol.28, pp.1440-1446, 1990.
- 6) Zaman, K. B. M. Q. and McKinzie, D. J.: Control of laminar separation over airfoils by acoustic excitation, *AIAA Journal*, Vol.29, pp.1075-1083, 1991.
- 7) Zaman, K. B. M. Q.: Effect of acoustic excitation on stalled flows over an airfoil, *AIAA Journal*, Vol.30, pp.1492-1499, 1992.
- 8) Peterka, J. A. and Richardson, P. D.: Effect of sound on separated flows, *J. Fluid Mech.*, Vol. 37 part 2, pp.265-287, 1969.
- 9) 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.*, Vol.35(1) Jan.-Feb., pp.37-39, 1989.
- 10) Hsiao, F. B., Shyu, J. Y., Liu, C. F. and Shyu, R. N.: 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.
- 11) Hsiao, F. B. and Shyu, J. Y.: Influence of internal acoustic excitation upon flow passing a circular cylinder, *J. Fluids and Struct.*, Vol.5, pp.427-442, 1991.
- 12) Sheridan, J., Soria, J., Jie, Wu and Welsh, M. C.: The Kelvin-Helmholtz instability of the separated shear layer from a circular cylinder, *Proc. IUTAM Symp. on Bluff-Body Wakes, Dynamics and Instabilities* (ed. H. Eckelmann et al.), Berlin: Springer-Verlag, pp.115-118, 1992.
- 13) Okamoto, S., Hirose, T. and Adachi, T.: The effect of sound on the vortex-shedding from a circular cylinder, *Bull. JSME*, Vol.24 No.187, pp.45-53, 1981.
- 14) Matsumoto, M. et al.: Judgement of vortex-induced oscillation characteristics of bluff bodies by applied sound, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol.52, pp.229-235, 1994.
- 15) 比江島他：土木学会論文集，音響攪乱による円柱の渦励振制御に関する実験的研究，No.525/I-33, pp.171-179, 1995.
- 16) 比江島他：第14回風工学シンポジウム論文集，周期的な湧き出し・吸い込みによる円柱渦励振抑制に関する数値流体解析，pp.187-192, 1996.
- 17) 野村，飯島：ALE法に基づく粘性流体と構造との関連問題の有限要素解析手法，土木学会論文集，No.416/I-13, pp.285-294, 1990.
- 18) 野村卓史：ALE有限要素法による流れ・構造連成解析への予測子・修正子法の適用と計算過程に関する技法，土木学会論文集，No.455/I-21, pp.55-63, 1992.
- 19) Brooks, A. N. and Hughes, T. J. R.: Streamline upwind/Petrov-Galerkin formulations for convection dominated flows with particular emphasis on the incompressible Navier-Stokes equations, *Comput. Meths. Appl. Mech. Engrg.*, Vol.32, pp.199-259, 1982.
- 20) 比江島他：円柱まわり流れの線形安定性解析，土木学会第51回年次学術講演会講演概要集，第1部(A)，pp.380-381, 1996.

(1998年4月24日受付)