

建材部品の流力振動・騒音に関する数値解析

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード: 作成者: 六郷, 彰 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/26773

氏名	六郷 彰
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第935号
学位授与の日付	平成19年3月22日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	建材部品の流力振動・騒音に関する数値解析
論文審査委員(主査)	木綿 隆弘(自然科学研究科・助教授)
論文審査委員(副主査)	岡島 厚(金沢学院短期大学・教授), 溝田 武人(福岡工業大学・教授), 上野 久儀(自然科学研究科・教授), 木村 繁男(自然計測応用研究センター・教授)

Numerical analysis of flow-induced vibration of circular cylinders with finite span-wise length and aerodynamic sound radiated from rectangular cylinders with various side ratios were carried out to solve various problems concerned with architectural structures. The calculation condition of flow-induced vibration of 3-dimensional circular cylinders is as follows; span-wise length of cylinder is $2.5D$, $5.0D$ and $8.0D$, where D is a diameter of cylinder. We inspected simulation results in detail and investigated the relation between the fluctuation of fluid forces and flow pattern. In the case of in-line oscillation, as larger span-wise length, the flow interference between tip and wake, so the flow pattern and fluid forces affected to cylinder is more complex. Moreover, in the case of cross-flow oscillation, as smaller span-wise length, the flow pattern near the base is affected by the down flow from tip. On the other hand, the computation condition of aerodynamic sound is as follows; the side ratio of rectangular cylinder is from 0.6 to 3.0. Fluid-dynamic characteristic, such as vortex shedding frequency and the base pressure, show good agreement with experiment results. The predicted aerodynamic sound also shows good agreement with experiments, and we shows that the change of flow pattern causes the drastic change of the sound pressure level.

1. 序論

近年、東京や大阪といった大都市においては、集合住宅や商業ビルディングの高層化が進み、高さ100mを越えるような物件も少なくない。そのため、高層階のベランダやバルコニーに設置される手摺格子、および屋上の機器を周りのビルから見えなくするように設置される目隠しルーバーといった建材部品は、常に風速が10m/s以上の高風速に晒されており、それらの構造物に発生する空力騒音や流力振動といった流体现象は、建材部品の商品性に大きな影響を及ぼすことになる。このような建材部品の多くは、その断面形状が円柱や角柱といったプラフボディそのものや、その組み合わせの形状をしたものが多く、このような基本断面形状から放射される空力騒音特性や、流力振動特性を調べることは、非常に重要な課題である。

一方、近年の計算機やCFD(計算流体力学)の発達により、上記のような流体に関連する諸現象の解明に数値解析を用いることが非常に有効な手段となっている。そのような現状を踏まえ、本論文では目隠しルーバーの先端部を模擬した有限スパン長さの3次元円柱の流力振動特性および、手摺格子を模擬した種々な断面比を持つ2次元角柱から放射される空力騒音特性について数値解析し、前者では円柱先端部から巻き込む流れと円柱背後に形成される後流渦との干渉が、流力振動特性にどのような影響を及ぼすかを明確にし、後者では断面比によって変化する流れパターンが、角柱から放射される空力騒音にどのように影響を及ぼし、さらにどのような流力特性が空力騒音に寄与するかについて明らかにする。

2. 数値計算手法

2. 1 有限スパン長さの3次元円柱の流力振動解析手法

非定常、非圧縮、粘性流れ場を対象にし、それを記述する3次元の連続の式およびNavier-Stokes方程式を基礎方程式として用いる。離散化手法は有限差分法を用い、対流項以外の空間差分には2次精度中心差分法を、対流項については3次精度の風上差分スキームを、時間積分にはCrank-Nicolsonスキームを用いる。各物理量の配置は、セル接点に速度を、セル中心に圧力を配置した変則的なスタガード格子を用いる。また速度と圧力のカップリングにはMAC法を用いる。流力振動の計算は流体と構造の連成解析になるために、その解析手法としてALE法を用いる。この手法は3次元円柱構造物を剛体と仮定し、図1に示すような2自由度の弾性支持モデルを考える。そして流れ方向および流れ直角方向それぞれの振動方程式を解いて振動速度を求め、得られた振動速度を対流項の対流速度に代入することで物体の振動の効果を考慮するものである。

2. 2 2次元角柱から放出される空力騒音の解析手法

空力騒音の予測手法としては、角柱から放出される空力音を二重極音と仮定し、物体に作用する非定常流体力を流れ場の解析から求め、それをCurleの式によって観測点での音の予測に用いる分離解法を用いた。流れ場の解析手法としては、非定常、非圧縮、粘性の乱流場を対象にし、乱流解析手法として、空力騒音のような非定常乱流場の解析に有効な手段であるLES(Large Eddy Simulation)を用いる。そのため、支配方程式は空間平均された連続の式および、Navier-Stokes方程式となる。離散化には有限体積法を用い、対流項以外の空間微分項には2次精度の中心差分法を、対流項にはQUICKスキームを用いる。また時間積分法は対流項以外をCrank-Nicolson法で、対流項については2次精度のAdams-Bashforth法を用いた。流れ場の解析結果から求められた非定常流体力をCurleの式に導入して図2に示す観測点での音圧を求める際に、スパン方向の空間相関を考慮するために、加藤らが提案した等価相関長モデルを用い、周波数ごとにスパン方向の相関を求めて音圧を計算した。

3. 有限スパン長さを持つ3次元円柱の流力振動の計算結果

3次元円柱の流力振動については、円柱直径とスパン方向長さの比であるアスペクト比が $AR=2, 5, 8.0$ の3種類について、比較的低い換算流速で生じる流れ方向振動と、高い換算流速で生じる流れ直角方向振動の両方についてそれぞれ解析した。計算条件を表1に示す。

3. 1 流れ方向振動の解析結果

図3に各アスペクト比における換算流速に対する振動振幅の応答特性を示す。アスペクト比が大きくなるにしたがって、高い換算流速域における振動振幅が大きくなっていることがわかる。次

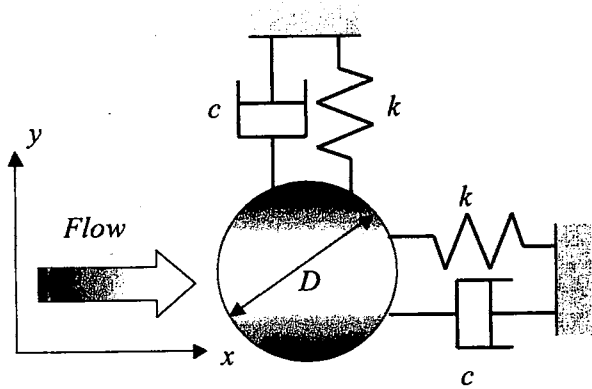


図1 円柱構造物の2自由度の弾性支持モデル

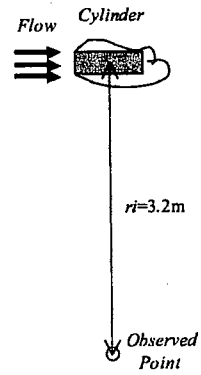


図2 角柱と観測点の位置関係

表1 流力振動の計算条件

(a) 流れ方向振動の計算条件

レイノルズ数(Re)	1000
アスペクト比(AR)	2.5, 5.0, 8.0
換算流速(Vr)	1.5~4.0

(b) 流れ直角方向振動の計算条件

レイノルズ数(Re)	1000
アスペクト比(AR)	2.5, 5.0, 8.0
換算流速(Vr)	4.5~9.5

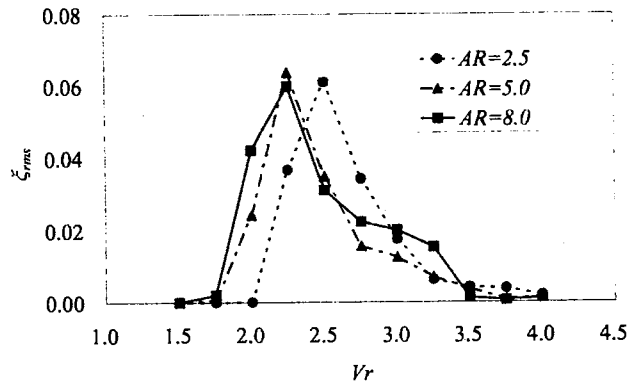
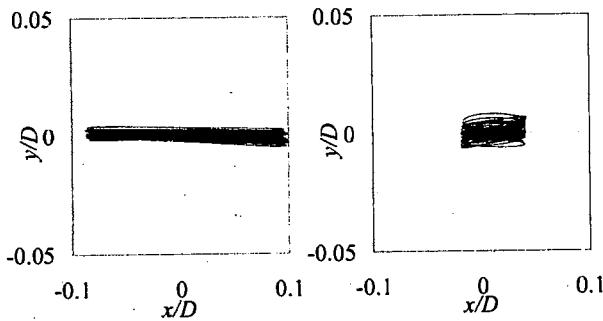


図3 各アスペクト比の円柱の換算流速に対する流力振動応答特性



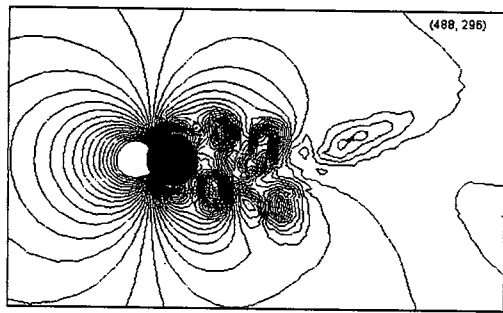
(a) $Vr=2.25$ (b) $Vr=3.0$
図4 $AR=8.0$ の応答振幅リサージュ

傍($z/D=5.0$)では形成された対称渦が後流中に放出され、物体から離れた位置で交互渦に再配列されている様子が示されている。一方、円柱根元に近い $z/D=2.0$ では物体背後には既に交互渦が形成され、後流中に放出されている。また図6に示す $Vr=3.0$ においては、物体中心近傍から既に交互渦が形成され、後流中に放出される様子が認められる。このように、流れパターンが対称渦が支配的な流れパターンから交互渦が支配的な流れパターンに変化することにより、応答振幅リサージュが変化することがわかる。

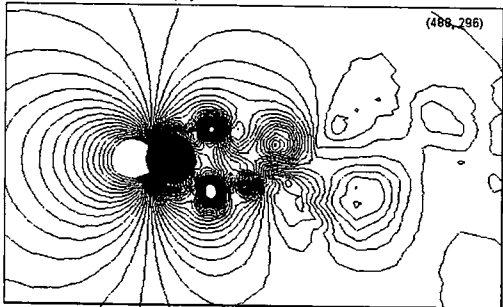
さらに、このような後流渦構造のspan方向変化を、物体背面近傍における速度変動の周波数および位相差によって図7~9に示す。図7の $AR=5.0$, $Vr=2.25$ の場合、いずれのspan位置においても同位相で周波数が高い成分の渦が卓越していることがわかる。次に同じ換算流速で $AR=8.0$ の場合は、流れパターンで示したように、先端からspan中央近傍までは $AR=5.0$ と同様に同位相で周波数が高い成分が卓越しているものの、そこから根元にかけては逆位相で低い周波数成分が卓越し、円柱span中央近傍を境に、対称渦が支配的な渦構造と交互渦が支配的な渦構造に明確に分かれる

に $AR=8.0$ における応答振幅リサージュを図4に示す。図(a)の $Vr=2.25$ (振動振幅最大時)のリサージュは流れ方向にほぼ一直線の軌跡を描いていることがわかる。一方、図(b)の $Vr=3.0$ (振動振幅減衰時)のリサージュは流れ直角方向にも振動し、つぶれた8の字の軌跡を描いている様子が認められる。

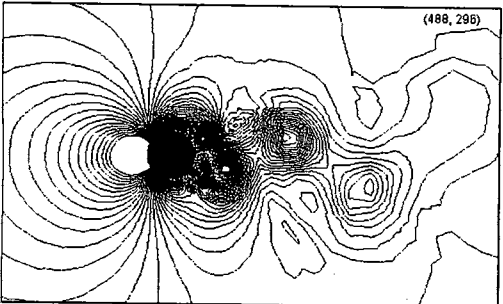
このときの各span断面における $AR=8.0$ 円柱周りの流れパターンを図5, 6にそれぞれ示す。まず振動振幅が最大となる $Vr=2.25$ (図5)においては、円柱先端から中心部にかけて円柱背後に対称渦が形成されているのがわかる。そして円柱中心近



(a) $z/D=7.0$

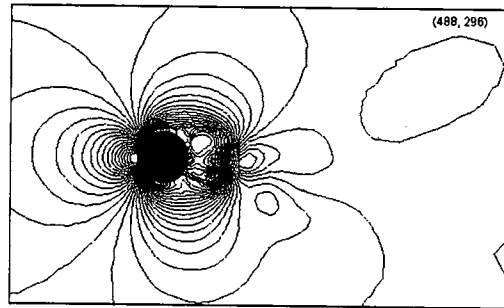


(b) $z/D=5.0$

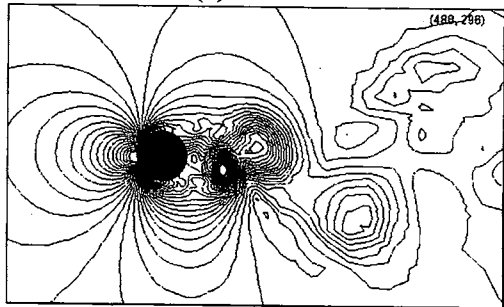


(c) $z/D=2.0$

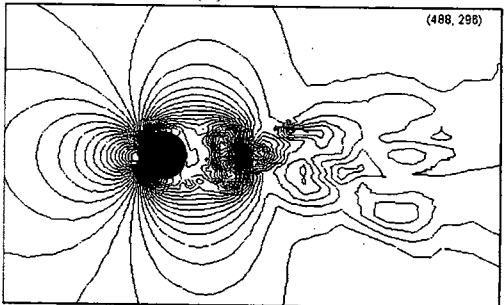
図 5 $AR=8.0, Vr=2.25$ の流れパターン



(a) $z/D=7.0$



(b) $z/D=5.0$



(c) $z/D=2.0$

図 6 $AR=8.0, Vr=3.0$ の流れパターン

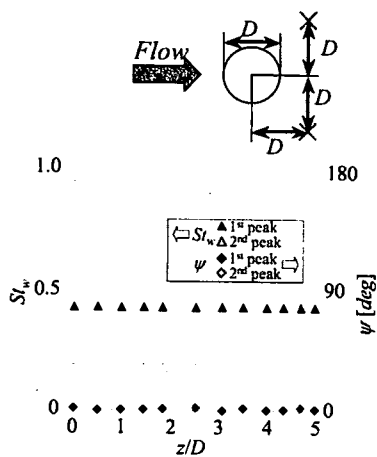


図 7 $AR=5.0$ 円柱の後流渦放出のスパン方向変化($Vr=2.25$)

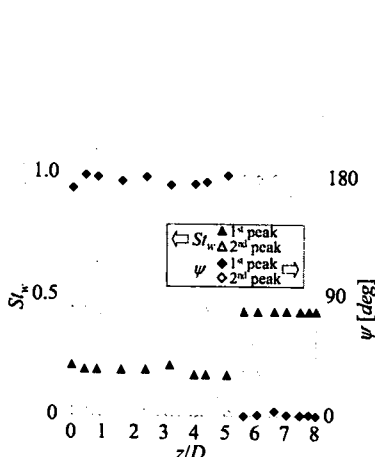


図 8 $AR=8.0$ 円柱の後流渦放出のスパン方向変化($Vr=2.25$)

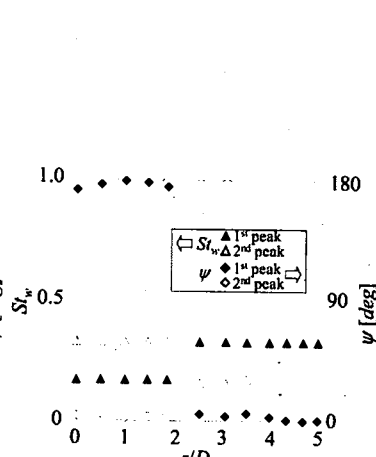


図 9 $AR=5.0$ 円柱の後流渦放出のスパン方向変化($Vr=3.0$)

ことが図 8 からわかる。一方、換算流速を $Vr=3.0$ に高くした場合、図 9 に示す $AR=5.0$ の場合は円柱先端から中心近傍までは同位相で高い周波数成分が卓越するが、根元にかけては逆位相で低い周波数成分が卓越しており、また $AR=8.0$ の場合も図 6 に示すようにその流れパターンで示すように同様の傾向にあることがわかる。このことより、図 3 において高い換算流速域においてアスペクト

比が大きいほど振動振幅が大きくなるのは、交互渦による流れパターンが流れ場を強く支配するためであり、これは2次元円柱における流れ方向振動の第二励振域に対応するものと考えられる。

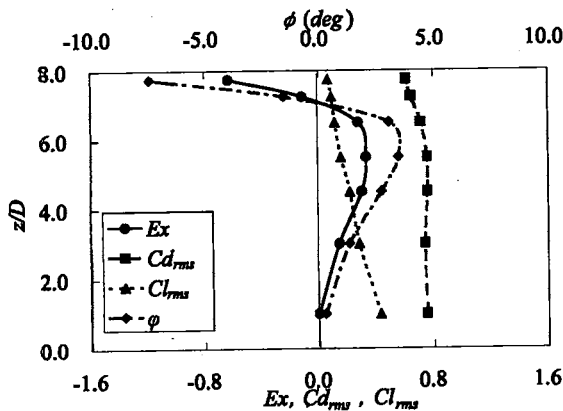


図10 AR=8.0円柱の励振エネルギー、抗力揚力変動および振動変位と抗力変動の位相差のスパン方向分布($V_r=2.25$)

次に流力振動を引き起こす励振エネルギーについて図10に $AR=8.0$, $V_r=2.25$ の場合を例に示す。図より、円柱先端においては揚力変動が振動変位に対して位相遅れを生じることにより位相差が負になり、それに対応して励振エネルギーも負の値を示し、振動振幅を減衰させる作用があることがわかる。これは先端からの巻き込みの流れが影響しているものと考えられる。一方、円柱スパン中央部においては位相差が正になることで励振エネルギーも正の大きな値を示す。さらに根元にかけては、上述のように交互渦が支配的になることにより位相差が小さくなり、励振エネルギーも減少していく。

以上のことより、流れ方向振動においては、対称渦の流れパターンが支配的な換算流速では、流れ方向振動振幅は大きくなる。一方、交互渦の流れパターンが支配的な換算流速では、振動振幅は減衰し、これは2次元円柱の第二励振域に対応するものと考えられる。交互渦が卓越する領域では先端からの巻き込みの影響が弱い領域であり、励振エネルギーは小さくなる。

3.2 流れ直角方向振動の解析結果

各アスペクト比に対する振動振幅の応答特性を図11に示す。図より、励振域はいずれのアスペクト比の円柱も一つであること、またアスペクト比が小さいほどその振動振幅が大きくなる。最大振幅時の応答振幅リサージュを $AR=8.0$, $V_r=7.0$ を例に図12に示す。この場合、流れ直角方向振動が卓越し、縦に一直線の軌跡を描くことがわかる。次に後流の渦構造のスパン方向変化について、円柱近傍の速度変動の周波数と位相差およびスペクトル密度分布を図13に示す。図よりいずれの

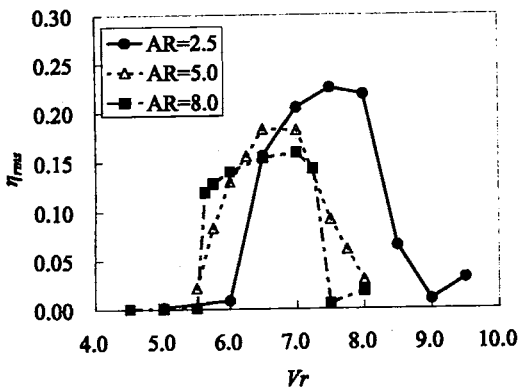


図11 各アスペクト比の円柱の換算流速に対する流力振動応答特性

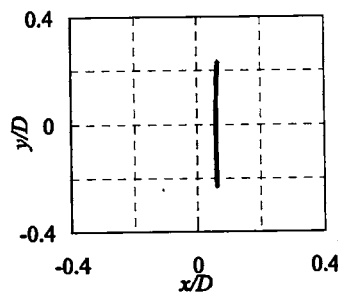
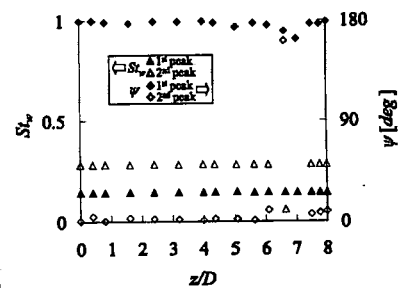
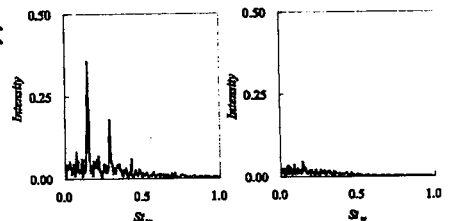


図12 AR=8.0円柱の応答振幅リサージュ ($V_r=7.0$)



(a)速度変動の周波数と位相差



(b)スペクトル密度 (c)スペクトル密度 ($z/D=6.1$) ($z/D=7.0$)

図13 AR=8.0円柱の後流渦構造 ($V_r=7.0$)

スパン位置においても逆位相の低い周波数の成分が卓越し、交互渦が支配的な流れである。またこの周波数は円柱構造物の固有振動数にロックインしている。しかしながらそのスペクトル強度はスパン方向によって著しく異なり、図(b)に示す円柱のスパン中央よりやや上部($z/D=6.1$)では卓越が強いものの、先端部($z/D=7.0$)ではその卓越はごく弱いことがわかる。

次に $AR=8.0$, $V_r=7.0$ (最大振幅時)を例として図14に流れ

パターンのスパン方向変化を渦度分布で示す。図(a)の先端部($z/D=7.0$)では円柱背後に対称渦が形成されるものの、物体後流には放出されない。スパン中央上部の $z/D=6.1$ では交互渦が円柱背後に形成、放出される様子がわかる。特徴的なのは、渦が放出される際、同じ回転方向の渦が2つ連続に放出されるということである。さらに円柱の根元に近い $z/D=1.6$ では後流渦形成領域は円柱背面から離れた領域になることが図(c)からわかる。 $Re=10^3$ で解析した2次元円柱では同様に渦形成領域が円柱から離れて存在し、そのため揚力の変動が小さくなるという現象が生じるが、本解析でも円柱根元近傍では同様の現象が生じていると考えられる。

最後に励振エネルギーのスパン方向変化について流れ方向振動と同様に調べたものを $AR=8.0$, $Vr=7.0$ を例に図15に示す。円柱根元から励振エネルギーがピーク値を取るまでは揚力の変動に対応した変化を示すものの、そこから先端にかけては揚力変動と振動振幅の位相差に対応して変化し、流れ方向振動の場合と同様に、円柱先端で負の値を示す。

以上、流れ直角方向振動について解析した結果、励振域はいずれのアスペクト比においても一つであること、流れパターンは交互渦が支配的であり円柱の固有振動数にロックインしていること、さらにアスペクト比の大きな円柱ほど円柱根元付近は先端からの巻き込み流れの影響を受けず、2次元円柱の流れパターンに類似することがわかった。

4. 種々な断面比の角柱から放出される空力騒音特性の数値解析結果

4.1 流力特性の変化

観測点における音圧を正確に予測するためには流れ場を正しく解析する必要がある。そこでLESで解かれた流れ場が実際の現象を正しくシミュレートしているか過去の実験結果と比較した。図16に断面比に対する後流渦放出ストローハル数および背圧係数の変化を示す。ストローハル数が断面比 $D/H=2.5\sim 3.0$ 付近で不連続に変化する現象や、背圧係数が $D/H=0.6$ で最小となる現象が、定量的にシミュレートされている。また流れパターンの図を図17, 18に示す。図17の $D/H=2.5$ の場合は完全剥離流れのパターンであるのに対し、図18の $D/H=3.0$ では周期的再付着流れの様相を呈し、これまでの報告と同様の結果を示している。以上より、流れ場の計算結果は妥当であると考えられる。

4.2 放出される空力音の変化

断面比に対する音圧レベルSPLおよび等価相関長さ L_c の変化を、中藤らの実験結果と比較して図19に示す。音圧レベルおよび等価相関長さともに実験結果と定量的にもよい一致を示している。

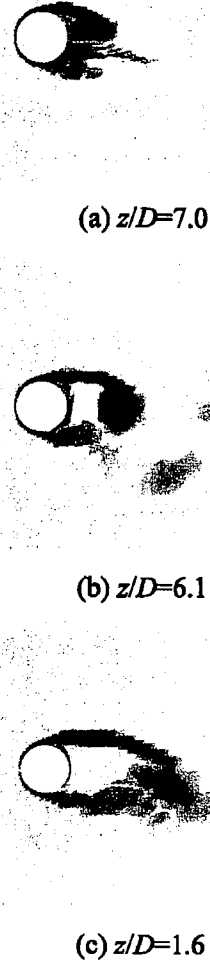


図14 $AR=8.0, Vr=7.0$ の渦度分布

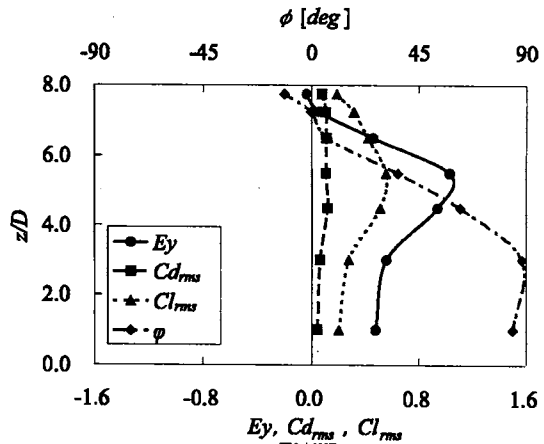
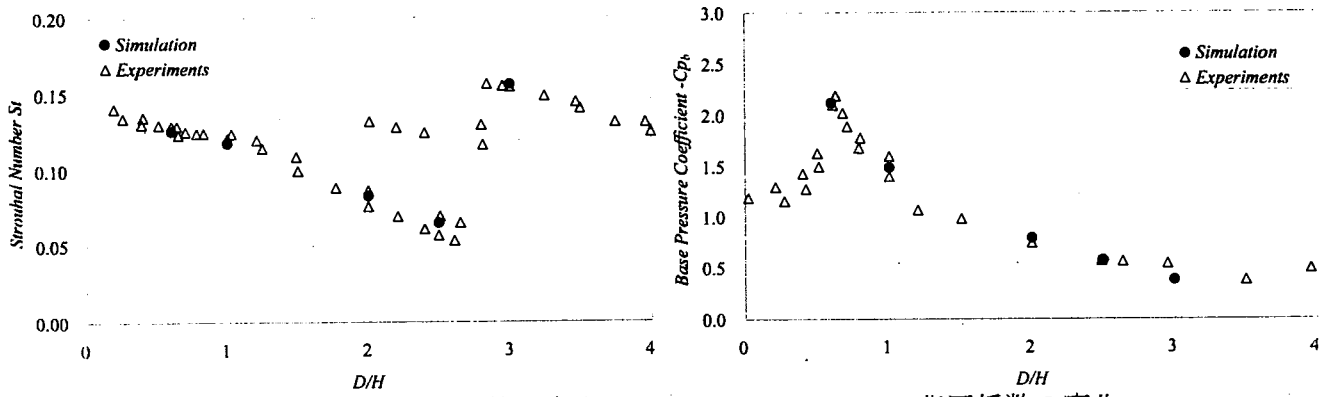


図15 $AR=8.0$ 円柱の励振エネルギー、抗力揚力変動および振動変位と揚力変動の位相差のスパン方向分布($Vr=7.0$)



(a) 後流渦放出ストローハル数の変化

(b) 背圧係数の変化

図 16 流力特性の断面比に対する変化

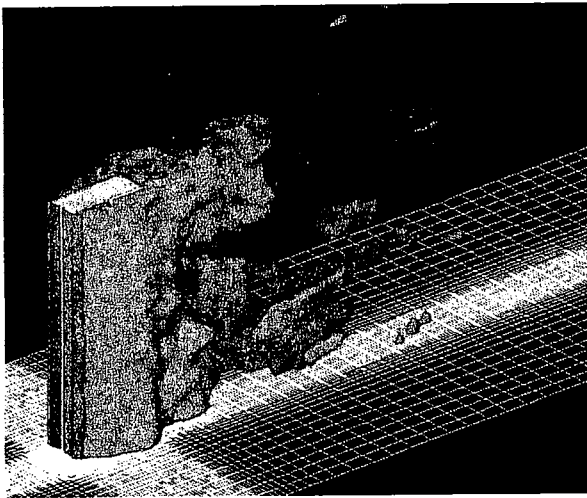


図 17 $D/H=2.5$ 断面柱周りの流れパターン

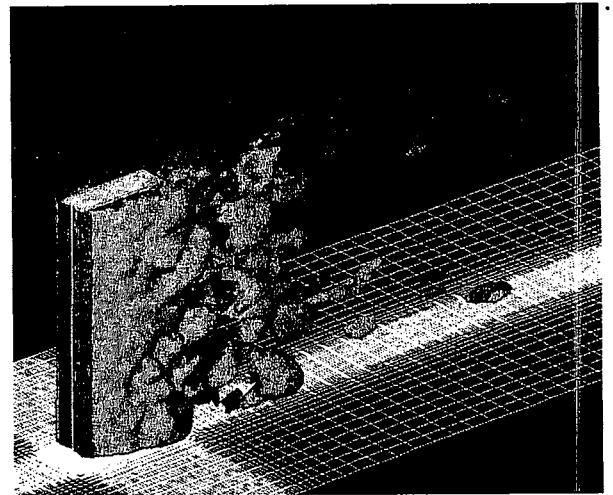
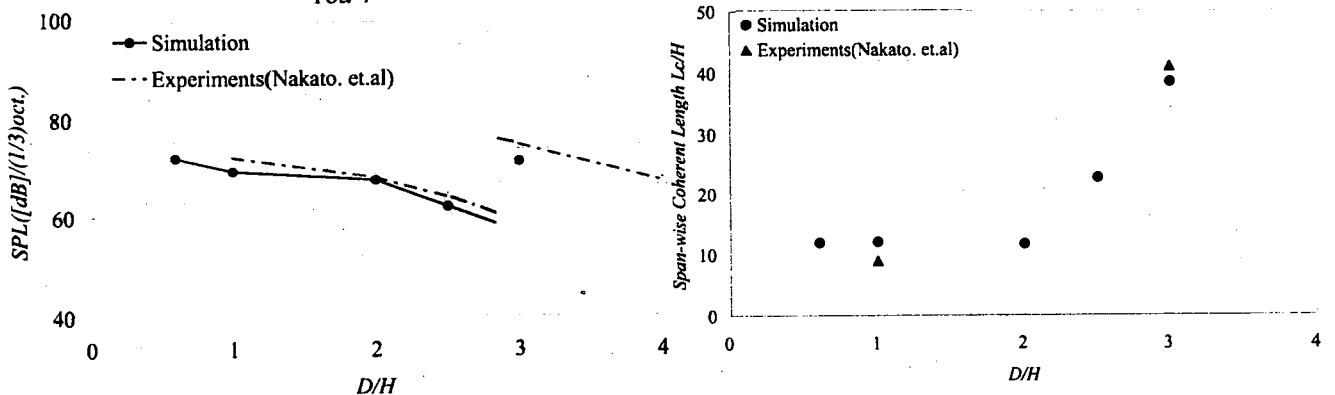


図 18 $D/H=3.0$ 断面柱周りの流れパターン

中藤らの実験では $D/H=2.5\sim 3.0$ にかけて音圧レベルが不連続に変化するが、本計算結果でも同様の現象を捉えることができた。このときの音圧スペクトルを図 20, 21 に示す。図 20 の $D/H=2.5$ の場合は、周波数 $f=97.3[\text{Hz}]$ と $240[\text{Hz}]$ の 2 つのピークが存在するものの、低周波数成分の卓越が大きく SPL のピーク値は $63.3[\text{dB}]$ となる。一方、図 21 の $D/H=3.0$ の場合は $f=235[\text{Hz}]$ の高周波数成分が大きく卓越し、 SPL のピーク値は $69.6[\text{dB}]$ となる。

次に流力特性が空力騒音特性に及ぼす影響因子を検証する。Curle の式のモデル式は次式で定義される。

$$\overline{p^2(r)} = \frac{Cl_{rms}^2 \rho^2 L L_c St^2 U^6}{16a^2 r^2}$$



(a) 1/3 オクターブバンド音圧レベルの変化

(b) 等価相関長さの変化

図 19 空力騒音特性の断面比に対する変化

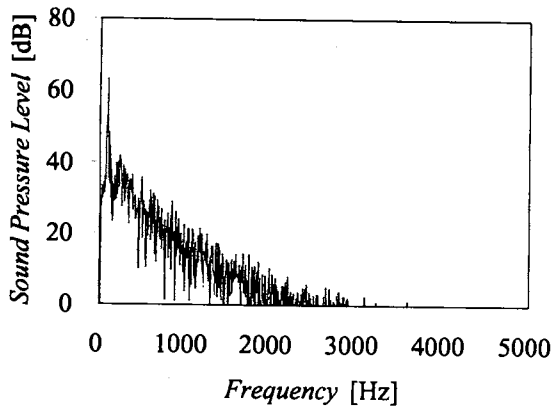


図 20 $D/H=2.5$ 断面柱の音圧スペクトル

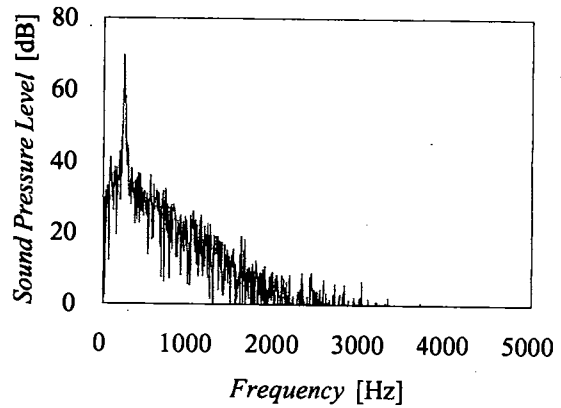


図 21 $D/H=3.0$ 断面柱の音圧スペクトル

一様流流速や空気の密度、音速などの定数成分を除くと、音圧の大きさは上式から揚力の変動量、等価相関長さおよび後流渦放出ストローハル数に依存する。それぞれのパラメータの効果を $D/H=2.5\sim 3.0$ の不連続変化に適用した結果を表 2 に示す。最も寄与度が大きいのはストローハル数の増加分にあることがわかる。つまり、流れパターンが完全剥離流れから周期的再付着流れへと変化したために、ストローハル数が増加し、音圧レベルが急増したものと考えられる。

以上より、本解析結果から、LES と Curle の式の組み合わせにより角柱から放出される空力騒音が正確に予測できること、また流れパターンの変化が音圧レベルの変化に大きく影響を及ぼすことを明らかにした。

5. 結論

建材部品の基本的形状として有限スパン長さを持つ 3 次元円柱の流力振動特性、および 2 次元角柱から放出される空力騒音特性を数値解析によって検証した。その結果、前者においては円柱先端からの巻き込み流れが流力振動特性に及ぼす影響を明らかにし、後者では流れパターンの変化が音圧レベルの変化の原因であることを示した。

表 2 流れパターンの変化にともなう物理量の変化と音圧レベルの変化量 [dB]

D/H	Cl_{rms}	Lc	St
2.5	0.73	22.7	0.065
3	0.55	38.5	0.157
音圧変化量	-2.46	2.29	7.66

学位論文審査結果の要旨

当該学位論文に関し、平成19年2月9日に第1回学位論文審査委員会を開催し、提出された学位論文及び関係資料に基づき内容を検討した。さらに、平成19年2月9日午後には口頭発表を行い、口頭発表後に第2回学位論文審査委員会を開催し、協議の結果、以下の通り判定した。

申請者は、平成元年3月に本学大学院工学研究科機械工学専攻を修了し、平成12年4月より自然科学研究科地球環境科学専攻に社会人入学した。申請論文は、「建材部品の流力振動・騒音に関する数値解析」と題し、目隠し用ルーバや手摺格子などの建材部品の基本断面形状である円柱や角柱について、発生する流力振動と空力騒音の基礎的な現象を数値シミュレーションで明らかにした。その結果、「スパン方向に有限な長さを持つ円柱構造物の流力振動特性」では、流れ方向および流れ直角方向振動について流力振動特性に及ぼす励振エネルギーと渦構造パターンのスパン方向変化の対応を明らかにした。さらに、「角柱構造物から放出する空力騒音特性」では、種々な断面比の角柱について算出した流体力と等価相関長さを Curle の式に代入して空力騒音を算出・予測した。そして流れパターンが「完全剥離流れ」から「周期的再付着流れ」へと変化する際の空力騒音が急増する現象が、主に後流渦放出ストローハル数の急変に起因することを明らかにした。本論文は、建材部品の基本断面形状の流力振動と空力騒音特性を把握する数値解析コードを開発し、それを用いて流れと騒音の詳細を流体力学的見地から考察したものであり、関連する工学分野に寄与するところが大きいと判定し、博士(工学)に値するものと認定した。