

矩形断面まわりの流れにおける空力音の発生源の特性に関する数値流体解析

Numerical Simulation of Aeroacoustic Sources in the Flow around Rectangular Cross-Sections

比江島慎二*, 近藤敏治**, 谷口健男***

Shinji HIEJIMA, Toshiharu KONDO and Takeo TANIGUCHI

*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)

**非会員 日本技術開発(株) (〒164-0012 東京都中野区本町 5-33-11)

***正会員 工博 岡山大学教授 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)

Numerical simulations of the flow around rectangular cross-sections are carried out to examine characteristics of aeroacoustic sources caused by the unsteady separated shear flows around the cross-sections. The aeroacoustic sources are identified by second derivative of pressure fluctuation in the incompressible flow around the cross-sections. It is shown that the locations of the aeroacoustic sources are not necessarily corresponding to those of high pressure fluctuation. Furthermore, it is found that reattachment of the separated shear flows to the solid surface near the trailing edges has significant effects on the intensity of the aeroacoustic sources.

Key Words : aerodynamic sound, aeroacoustic source, rectangular cross-section

1. はじめに

風の強い日の電線、鉄塔、住宅のベランダの手すり、橋梁高欄の平板列、あるいは高速走行する鉄道車両のパンタグラフなどから、騒音が発生することが知られている^{1)~8)}。これらは空力騒音と呼ばれ、その発生に部材振動などの固体振動は関与せず、物体周辺の剥離流れの非定常性やそこから放出される周期渦の流下などによる圧力変動に起因して発生する。すなわち空力騒音の発生は、物体周辺の非定常な剥離流れ挙動による純粋に流体力学的な作用が原因である。発生した空力騒音は多くの場合、帰還擾乱となって剥離直後のせん断層を刺激し、剥離流れから放出される周期渦の発達を促進する。そのため、周期渦により発生する空力騒音はますます強められ、それがさらに帰還擾乱となって周期渦の発達を促進することになる。このような自己励起的な増幅機構を有する空力騒音の場合、騒音レベルが 100dB を越えるような大きな音響を発生することもあり、しばしば周辺環境に騒音問題を引き起こす。さらに、近年の構造物の高層化や長大化により空力騒音の発生源となるような構造部材が強風下にさらされる機会が増えるとともに、交通機関の高速化などにより、空力騒音はますます頻繁に発生し、我々の身近な生活環境の中で多くの悪影響を及ぼしつつある。

空力騒音の予測や効率的な低減のためには、その発生源である物体周辺の非定常な流れの特性を十分に把握しておく必要がある。物体周辺流れの特性は風洞実験により検討されることが多いが、空力騒音の音源領域となる物体近傍の複雑な流れ場の詳細なデータを精度良く測定することは非常に困難である。

しかしながら、近年発達のめざましい数値流体解析によれば、このような空力騒音の発生に関わる非定常で複雑な物体周辺の流れに対し高精度で詳細なデータを得ることができ、空力騒音の発生源の特性を把握する上で極めて有効である。また、音波は圧縮性の流体の中を伝播するが、波長に比べて十分小さい音源領域を対象とする場合、音源領域における流体の運動は非圧縮性として扱ってよいことが知られている^{9)~17)}。そのような空力音の音源特性について、物体表面上や物体周辺流れ中の空力音の発生源と遠方場の空力音との相関を解析することにより、空力音の強さに実質的に寄与する音源の分布特性などを求める方法が報告されている^{11), 14), 18)}。また Tsujimoto¹⁷⁾らは、非圧縮性の流れ場における圧力変動の時間による 2 階微分が空力音の概略的な音源の指標となり得ることを数値解析により示している。本研究では、基本的な構造断面の 1 つである矩形断面まわりの流れを対象として、Tsujimoto らの示した簡便な音源指標についての数値流体解析を行い、矩形断面周辺の非定常流れに起因して発生する空力騒音の発生源の分布特性や周波数特性について検討する。

2. 解析方法

2.1 音源の指標

Tsujimoto¹⁷⁾らは、空力音の基礎式である Lighthill 方程式において非圧縮近似と高レイノルズ数を考慮し、流れ場の物理変数を非圧縮成分と音響成分に分離するなどして以下の方程式を導いた。ただし、 p'' は音響による密度変動、 c_0 は音速、 P は非圧縮性の流れ場における圧力変動、 $\bar{P}$ は P の時間平均である。

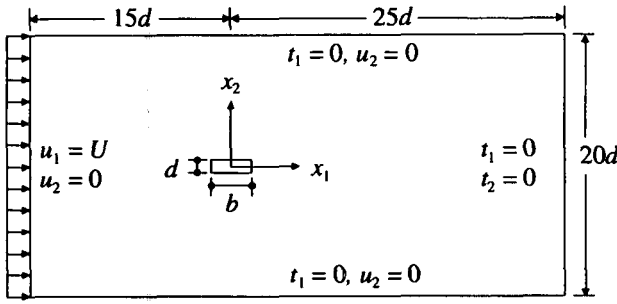


図-1 境界条件および解析領域の各諸元

$$\frac{\partial^2 \rho''}{\partial t^2} - c_0^2 \nabla^2 \rho'' = -\frac{\partial^2 \rho_1}{\partial t^2} \equiv \gamma \quad (1)$$

$$\rho_1 = \frac{P - \bar{P}}{c_0^2} \quad (2)$$

この式は、右辺の非圧縮性流れ場における圧力変動の時間による2階微分を音源 γ として、空力音の伝播式と考えられる。Tsujiimotoらはキャビティ流れにおいて、 γ 変動の空間分布特性などを解析することにより、 γ が空力音の音源の指標となることを示している¹⁷⁾。本研究では、矩形断面周辺流れを対象として γ の解析を行い、圧力変動との比較などを行うとともに、 γ を空力音の音源の指標とすることにより、非圧縮性流れ解析のもとで矩形断面周辺の空力音発生源の基本特性について検討する。

2.2 有限要素解析

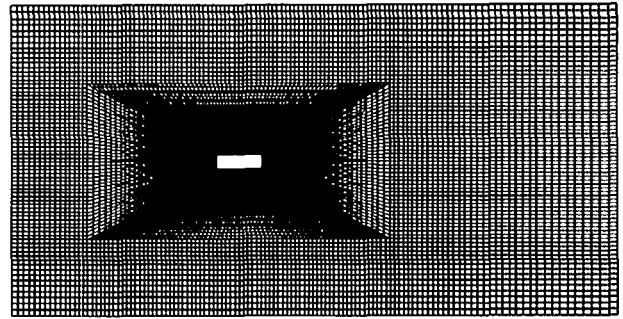
矩形断面まわりの非定常流れについて、2次元非圧縮粘性のNavier-Stokes方程式および連続条件式を基礎式として有限要素法による数値シミュレーションを行う。Navier-Stokes方程式と連続条件式は、流速双線形、圧力一定の四辺形混合補間要素を用いてSUPG (Streamline Upwind/Petrov-Galerkin) 法¹⁹⁾により離散化する。得られた有限要素方程式は予測子・修正子 (Predictor-Corrector) 法²⁰⁾により時間積分を行った。

図-1には境界条件および解析領域の各諸元を示す。流入流速 U は一様とし、 d を代表長とするレイノルズ数 $Re = 400$ 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、物体表面はすべりなし条件とした。本研究では矩形断面の辺長比 $b/d = 3 \sim 9$ について解析を行うが、図-2には例として $b/d = 3$ の場合の解析メッシュを示している。物体表面上のメッシュ厚さは $0.03d$ とし、全要素数はいずれの辺長比の場合も20,000程度である。

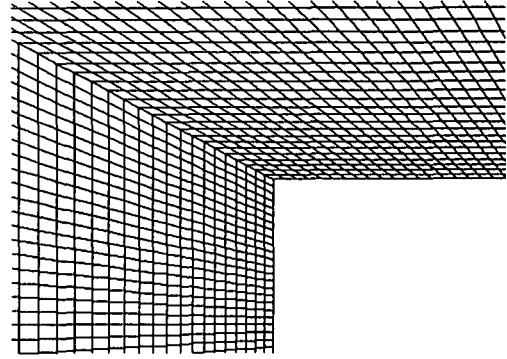
3. 解析結果および考察

3.1 圧力変動および γ 変動の分布特性の比較

各辺長比 b/d の矩形断面周辺の圧力および γ について、ある時刻における瞬間の分布を比較して図-3に示す。圧力分布図に見られるように、前縁エッジの剥離流れから周期的に放出された渦によって生じ



(a) 全体図



(b) 前縁付近のメッシュ分割

図-2 有限要素メッシュ ($b/d = 3$)

る圧力の低い領域が矩形側面部や後流部に存在している。 $b/d = 3 \sim 6$ の場合は1つ、 $b/d = 7 \sim 9$ の場合は2つの渦が矩形側面上に存在するような流れのパターンとなっている。また周期渦の周波数については、 $b/d = 3 \sim 6$ では b を代表長とするストローハル数 $St_b = 0.6$ 程度、 $b/d = 7 \sim 9$ ではそのほぼ2倍の $St_b = 1.1$ 程度となっており、 $b/d = 3 \sim 6$ から $b/d = 7 \sim 9$ にかけて階段状に変化する²¹⁾ことを確認している。

一方、 γ の分布は周期渦近くに絶対値の大きい領域が存在するとともに、渦と渦の中間部にも絶対値の大きい領域が存在する。これらの図からは判断できないが、周期渦近くでは γ は負の値、渦と渦の中間部では正の値をとり、正負が交互に配置されるパターンとなっている。これらの γ の分布特性は、周期渦の流下などに伴い時々刻々と変化しており、時間的に γ 変動の強い部分が空力音の音源となる可能性があると考えられる。

図-4には、各辺長比における圧力変動の標準偏差値および γ 変動のrms値の分布を比較して示している。圧力変動はいずれの辺長比の場合も、後縁に近い矩形側面部および後縁エッジ後方付近に強い変動を示す領域が存在する。 $b/d = 7 \sim 9$ の場合はさらに側面中央付近にも圧力変動の強い領域が存在するとともに、後縁エッジ後方の変動の強い領域が $b/d = 3 \sim 6$ の場合よりも後縁エッジ部に近付いている。矩形側面部の強い圧力変動の領域は、前縁から剥離した流れの再付着点付近に相当すると考えられる。

一方、 γ 変動の強い領域は、 $b/d = 3, 4$ では圧力変

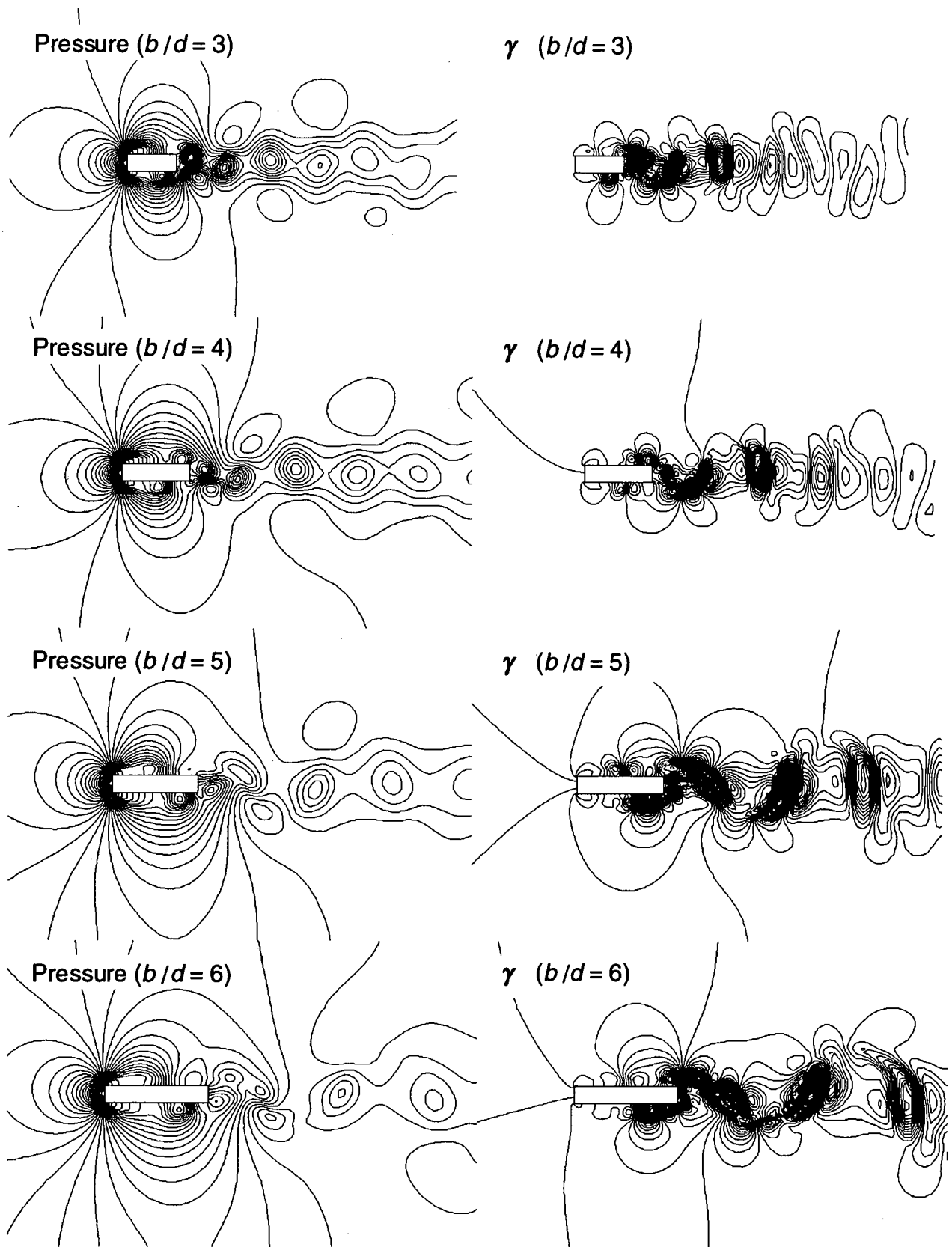


図-3 瞬間の圧力および γ の分布

動の場合と同じく後縁に近い矩形側面部および後縁エッジ後方付近, $b/d = 5, 6$ では後縁に近い側面部から後縁エッジ部にかけての領域および後縁エッジ後方付近, $b/d = 7 \sim 9$ ではやはり圧力変動と同じく側

面の中央部と後縁に近い部分および後縁エッジ直後付近となっており, これらが空力音の音源になる可能性のある領域と考えられる. それらの領域は, いずれの辺長比の場合も圧力変動が強い領域に近いが, それらは必ずしも一致していない. また $b/d = 3$ 以

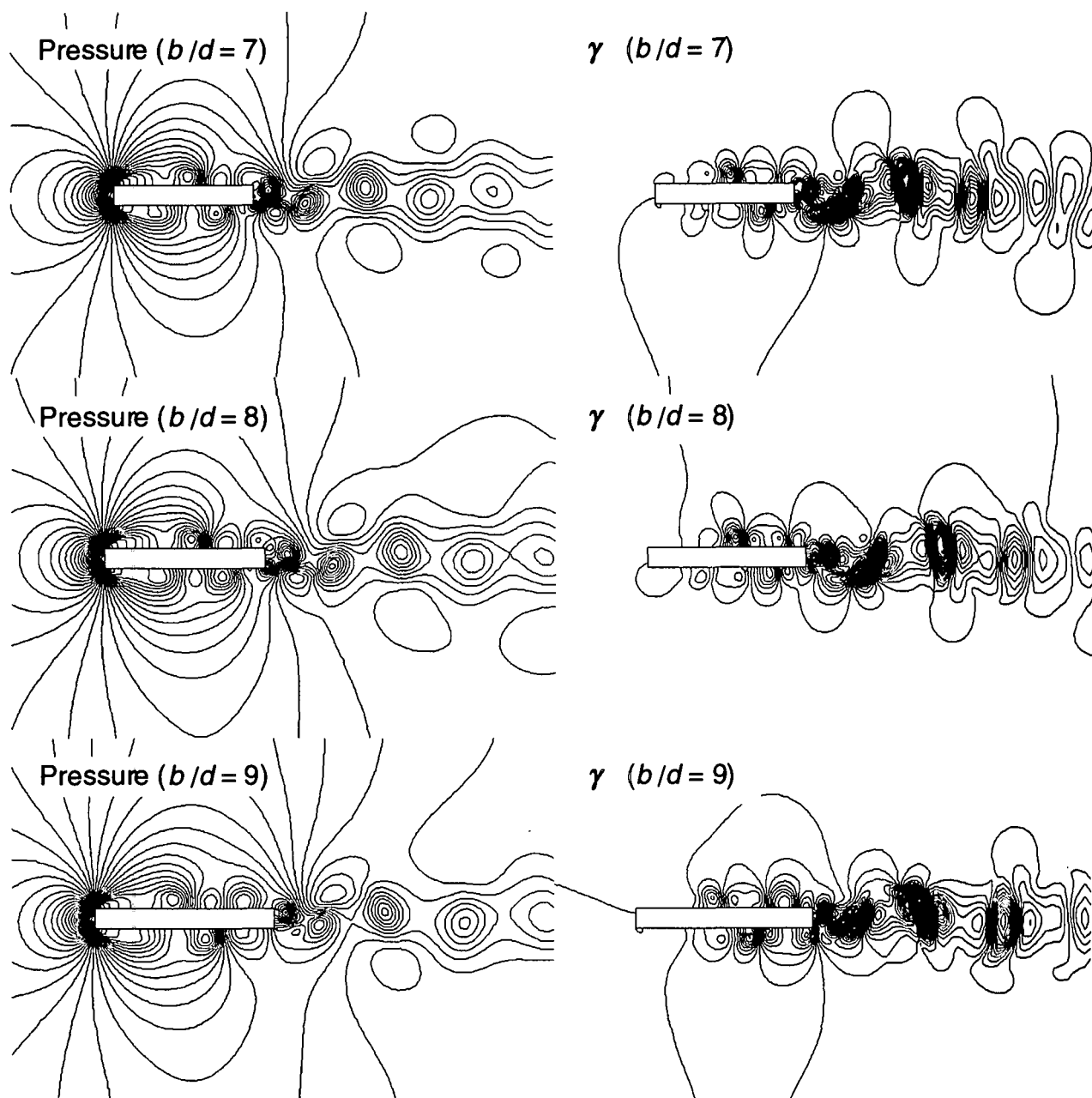


図-3 瞬間の圧力および γ の分布 (続き)

外のすべての辺長比において、矩形後流部に圧力変動の場合には見られないような γ 変動の強い領域が存在するといった違いも見られる。 γ 変動の場合、前縁エッジから放出される周期渦の周波数成分の他にその高調波成分が、圧力変動の場合に比較して強く現れることを確認していることから、高調波成分と基本周波数成分の分布特性の違いが γ 変動と圧力変動の分布特性の違いの要因になっていると考えられる。したがって、高調波成分も含めた音源について検討する場合、圧力変動の分布特性からだけではそれらの音源特性を十分には把握できない可能性がある。

3.2 γ 変動の周波数特性

図-4において γ 変動の強い場所 (図-4中の矢印)

について、 γ の時系列データからパワースペクトルを求めた結果が図-5である。なお $St_{b\gamma}$ は b と U で無次元化した γ の周波数である。 $b/d = 3, 4$ の場合、側面部の3-a, 4-a点では渦放出周波数に相当する $St_{b\gamma} = 0.6$ 付近の成分とその高調波成分が卓越する。後縁エッジ後方の3-b, 3-c, 4-b点も同様な傾向を示すが、渦放出周波数成分よりもその2倍の高調波成分の方が強く現れる。また後流部の4-c点では、渦放出周波数成分はほとんど現れず、渦放出周波数の2倍の成分とさらにその高調波成分が卓越している。これは側面部の点では片側の剥離せん断層から周期的に放出される渦の影響しか受けないのに対し、後流部では両側の剥離せん断層から交互に放出される渦の影響を受けることに起因する。 $b/d = 5, 6$ は $b/d = 3, 4$

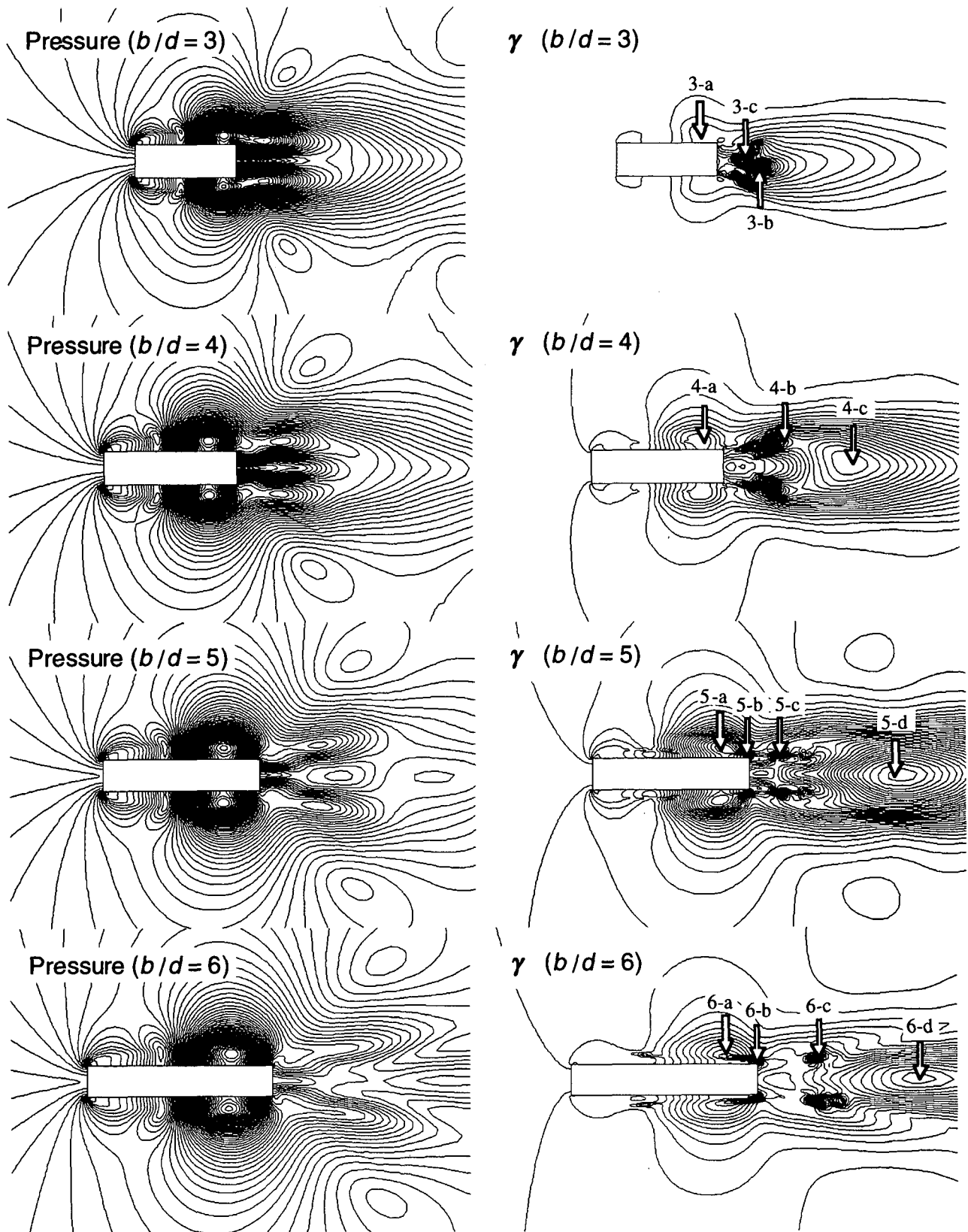


図-4 圧力の標準偏差値および γ のrms値の分布

に比べて全体的に γ 変動の強さが弱くなる傾向を示すが、やはり側面部の5-a, 6-a点、後縁エッジ部5-b, 6-b点および後縁エッジ後方5-c, 6-c点では渦放出周波数成分とその高調波成分が卓越し、後流部の5-d, 6-d点では渦放出周波数の2倍の成分とその高調波

成分が卓越する。 $b/d = 7 \sim 9$ の場合は渦放出周波数成分が $St_{b\gamma} = 1.1$ 程度に上昇するが、周波数特性の傾向は $b/d = 3 \sim 6$ の場合と類似しており、側面部の7-a, 7-b, 8-a, 8-b, 9-a, 9-b点および後縁エッジ直後の7-c, 8-c, 9-c点では渦放出周波数成分とその高調波成

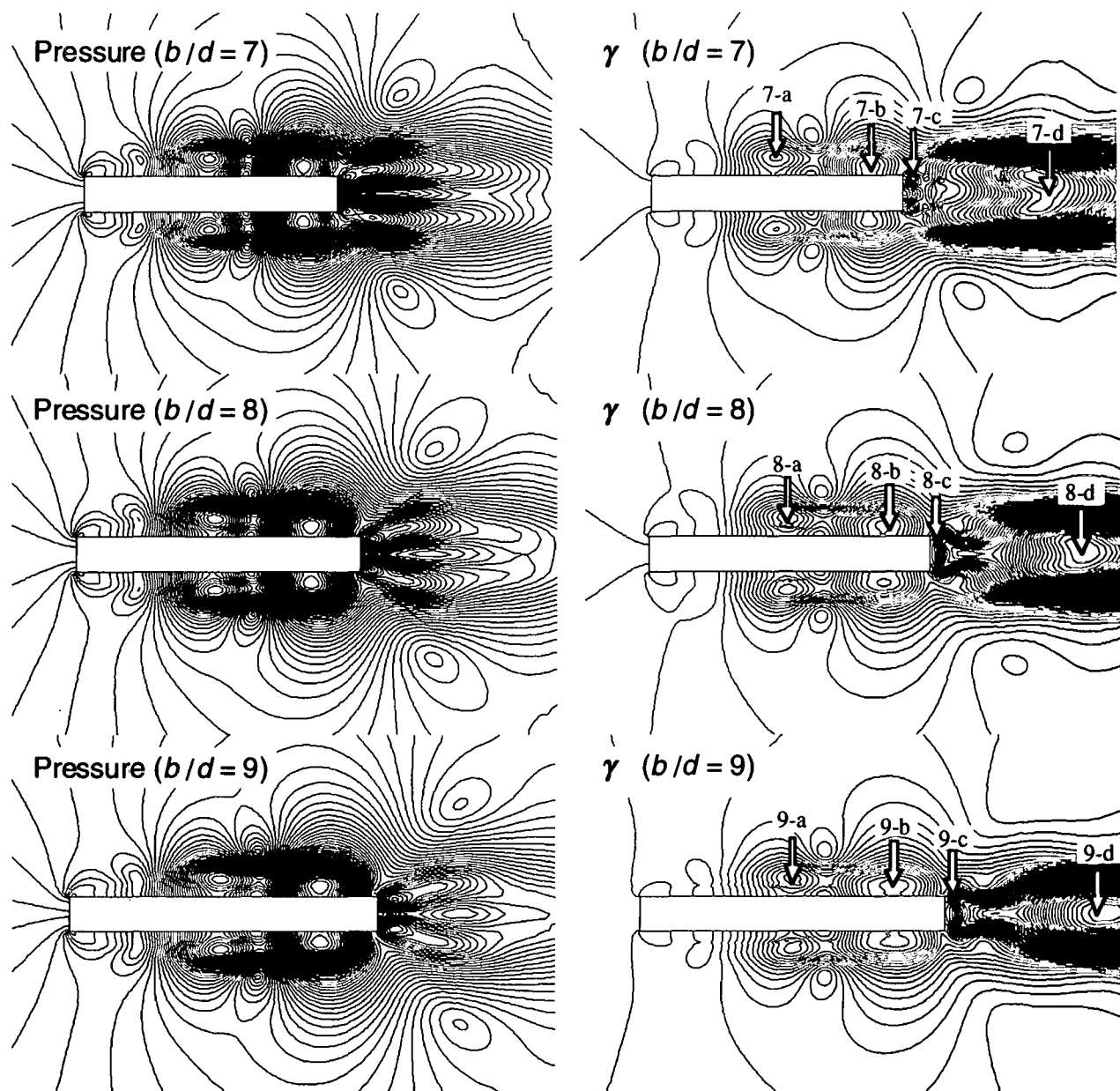


図-4 圧力の標準偏差値および γ のrms値の分布（続き）

分、後流部の 7-d, 8-d, 9-d 点では渦放出周波数の 2 倍の成分とその高調波成分がやはり卓越している。ただし、8-d 点では渦放出周波数成分とその高調波成分も強く現れている。

γ 変動において渦放出周波数の高調波成分の影響が強く現れるのは、 γ が圧力変動の時間による 2 階微分であることに起因すると考えられる。これらの高調波成分も遠方場に伝播する空力音の特性に少なからず影響を与えることが予想されるが、最も影響の強いのはやはり渦放出周波数成分と考えられる。ここでは渦放出周波数成分のみに着目し、図-5において γ の渦放出周波数成分のパワースペクトル値が最大となるものを辺長比ごとに調べた結果を図-6に示す。図中にはそれぞれパワースペクトルの最大値に対応する点の番号を記してあるが、 $b/d = 7$ 以外はいずれも後縁に近い側面部の点で渦放出周波数成分

のパワースペクトル値が最大となっている。また図中には前縁から放出される渦の St_b の値も示してあるが、前述のように $b/d = 3 \sim 6$ では $St_b = 0.6$ 程度、 $b/d = 7 \sim 9$ では $St_b = 1.1$ 程度となっており、同程度の St_b 数の辺長比どうしでは辺長比が大きいほど、 γ のパワースペクトルの最大値が減少することが分かる。また図-4の圧力変動の標準偏差値の分布によれば、同程度の St_b 数の辺長比どうしでは辺長比が大きいほど、後縁付近の矩形側面上の再付着位置が後縁エッジから上流側へ離れる傾向が見られる。これらの結果から、より後縁エッジに近い部分への剥離流れの再付着が、後縁付近における γ 変動の渦放出周波数成分の強さに大きな影響を与えていると考えられる。

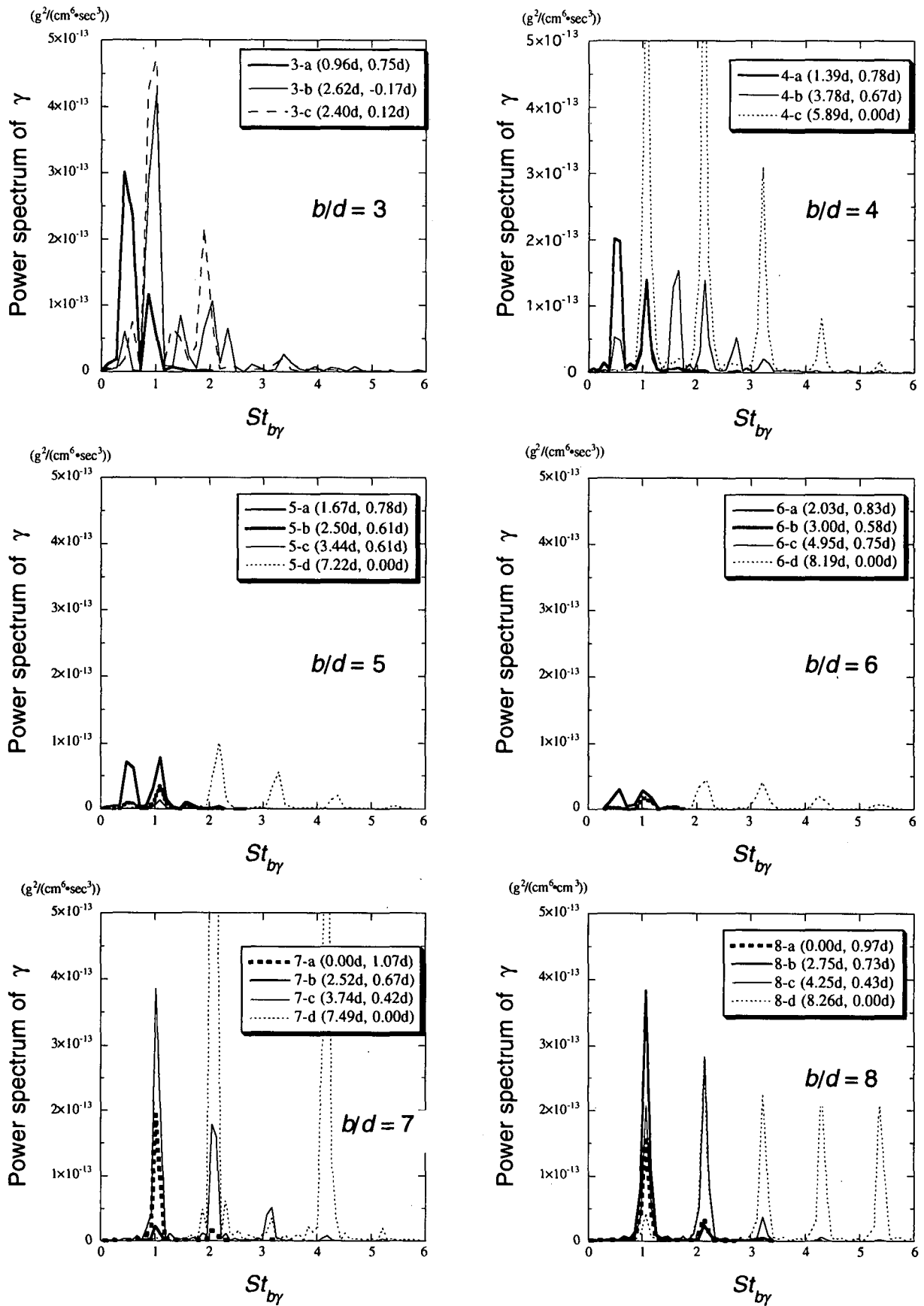


図-5 γ 変動の強い領域における γ のパワースペクトル

4. まとめ

矩形断面周辺の剥離流れから発生する空力音の発

生源の特性を検討するため、さまざまな辺長比の矩形断面まわりの流れについて数値シミュレーションを行い、圧力変動の時間による2階微分 γ を音源の

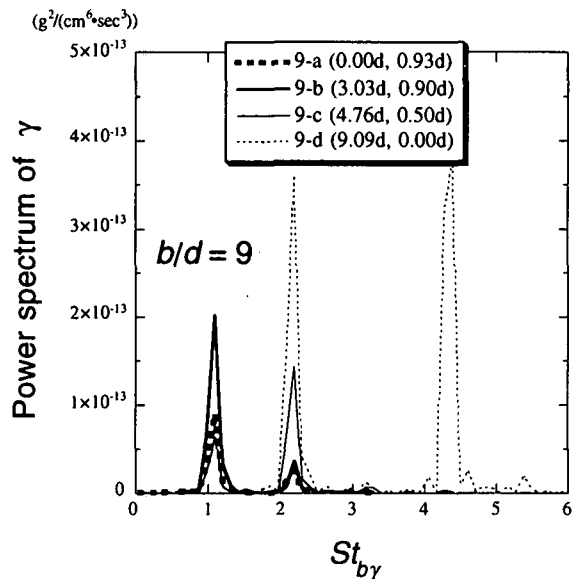


図-5 γ 変動の強い領域における γ のパワースペクトル (続き)

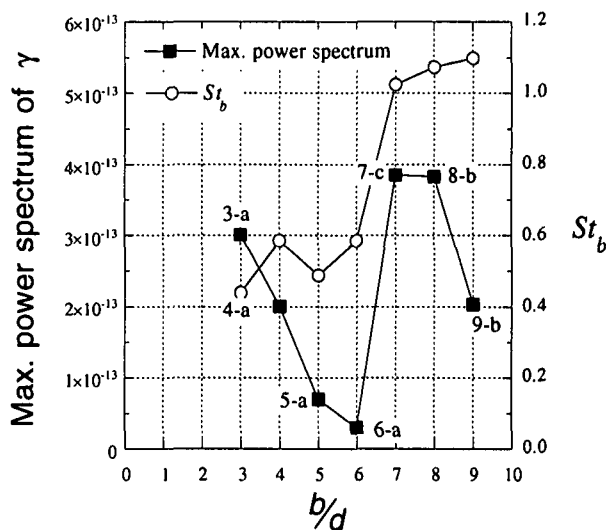


図-6 γ のパワースペクトルの渦放出周波数成分の最大値

指標としてその分布特性や周波数特性などを調べた。その結果、以下の知見が得られた。

(1) 矩形断面の前縁エッジから剥離した流れの非定常性やそこから周期的に放出される渦の作用により、矩形断面の側面部、後縁エッジ付近、後流部などに空力音の音源となる可能性のある、 γ 変動の強い領域が複数存在する。

(2) 矩形側面部や後縁エッジ付近の γ 変動の強い領域では、 γ 変動は渦放出周波数成分とその高調波成分が卓越し、後流部付近では渦放出周波数の2倍の成分とその高調波成分が卓越する。圧力変動と比較すると、いずれも高調波成分の影響が強く現れる。

(3) γ 変動の分布特性は圧力変動の分布特性に類似しているが、両者は必ずしも一致していない。このような違いは γ 変動に強く見られる渦放出周波数の高調波成分に起因すると考えられ、高調波成分も含めた音源について検討する場合、圧力変動の分布特性からだけではそれらの音源特性を正確には把握できない可能性を示唆する。

(4) 矩形幅を代表長とするストローハル数 St_b が同じ辺長比どうしでは辺長比が大きいほど、 γ 変動の渦放出周波数成分の強さが弱まることが明らかとなった。同時に、 St_b が同じ辺長比では辺長比が大きいほど、矩形側面上の再付着位置が後縁エッジから上流側に離れる傾向が見られることから、より後縁エッジに近い部分への剥離流れの再付着が空力音の渦放出周波数成分の発生に重要な役割をしていると考えられる。

本研究では、空力音の発生源の基本特性を検討するため、圧力変動の時間による2回微分 γ を音源の指標として用いているが、物体周辺の γ 変動が遠方

場の空力音の特性にどの程度寄与するかは不明である。遠方場の空力音の強さに実質的に寄与する音源の特性は、物体周辺流れの発生源と遠方場の空力音との相関により得られるため、 γ の特性とは多少異なる可能性がある。遠方場の空力音に実質的に寄与する音源の特性と γ の特性との違いについては今後さらに検討する必要がある。

謝辞：本研究の数値解析法に関して、日本大学の野村卓史教授には貴重なご助言を頂きました。深く謝意を表します。また、本研究の一部は、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) 加来治郎，山下充康：アルミ高欄からの騒音発生，日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集，pp.129-132, 1982.
- 2) 柴田久，森日吉：橋梁高欄からの発生騒音に関する実験的考察，第17回日本道路会議論文集，pp.736-737, 1987.
- 3) 嶋田隆一，比江島慎二，木村吉郎，藤野陽三，野村卓史：風による平板列からの騒音発生に関する実験的研究，土木学会第48回年次学術講演会概要集，第1部，pp.796-797, 1993.
- 4) 比江島慎二，嶋田隆一，木村吉郎，藤野陽三，野村卓史：平板列で構成される高欄に生じる空力音に関する実験的研究，日本風工学会誌，第55号，pp.111-112, 1993.
- 5) 藤野陽三，木村吉郎，比江島慎二：平板列で構成される高欄に生じる空力音に関する実験的研究，日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集，平成8年度，pp.173-176, 1993.
- 6) 須田健一，吉岡清：超高層集合住宅における風

- 騒音の特性, 日本風工学会誌, No.63, pp.59-60, 1995.
- 7) 森藤良夫: 鉄道車両の空力騒音とその制御, 日本航空宇宙学会誌, Vol.43, No.493, pp.108-113, 1995.
 - 8) 望月修, 丸田芳幸: 流体音工学入門 — ゆたかな音環境を求めて —, 朝倉書店, 1996.
 - 9) 小林敏雄, 佐竹正人: LES による空力音の予測, 第 5 回数値流体力学シンポジウム講演論文集, pp.191-194, 1991.
 - 10) 加藤千幸, 高野靖, 飯田明由, 池川昌弘: Large Eddy Simulation による流体騒音解析, 第 5 回数値流体力学シンポジウム講演論文集, pp.195-198, 1991.
 - 11) 三宅裕, 板東潔, 堀順士: Large Eddy Simulation による音源分布の解析, 日本機械学会論文集 (B 編), 59 巻 567 号, pp.173-179, 1993.
 - 12) 加藤千幸, 高野靖, 飯田明由, 藤田肇, 池川昌弘: LES による流体音の予測 (第 1 報, 二次元円柱からの放射音), 日本機械学会論文集 (B 編), 60 巻 569 号, pp.126-132, 1994.
 - 13) Hardin, J. C. and Pope, D. S. : Sound generation by flow over a two-dimensional cavity, AIAA Journal, Vol.33, No.3, pp.407-412, 1995.
 - 14) 古池治孝, 石原国彦, 後藤知伸, 高野泰齊: 数値解析による流体音の音源分布の解析, 日本機械学会論文集 (B 編), 62 巻 595 号, pp.160-166, 1996.
 - 15) 林篤史, 三宅裕, 辻本公一: 低マッハ数流れにおける空力音の数値シミュレーション, 第 29 回乱流シンポジウム講演論文集, pp.273-274, 1997.
 - 16) 林篤史, 三宅裕, 辻本公一: 低マッハ流れにおける空力音の音源解析, 第 11 回数値流体力学シンポジウム講演論文集, pp.117-118, 1997.
 - 17) Tsujimoto, K., Hayashi, A. and Miyake, Y. : Identification of noise source in low mach number flow by DNS, Proc. 4th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Part2, pp.923-931, 1998.
 - 18) 丸田芳幸, 小竹進: 平板の剥離流れに伴う騒音, 日本機械学会論文集 (B 編), 46 巻 406 号, pp.1055-1064, 1980.
 - 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) 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.
 - 21) Nakayama, R., Nakamura, Y., Ohya, Y. and Ozono, S. : A numerical study on the flow around flat plates at low Reynolds numbers, J. of Wind Engineering, No.52, pp.356-361, 1992.

(1999 年 4 月 23 日受付)