

論文内容の要旨

論文題目 流れ中の柱状物体列から発生する空力音の数値予測に関する研究

氏名 大嶋 拓也

第1章 序論

研究の背景 近年の急速な建築物の高層化，または住民・建物利用者の生活意識向上に伴い，バルコニー手摺子やルーバのような外気流に晒される建築付帯物から発生する「ヒュー」「ゴー」という空力騒音（風切り音）が問題となっている．風が吹き続ける限り空力騒音は持続的に発生するため，建物利用者のみならず近隣住民にとっても負担が大きく，まさにクオリティ・オブ・ライフにかかわる問題となる．そのため設計段階での確実な空力騒音の発生機構の把握，低減手法の開発が不可欠である．そのような研究は主に風洞実験による多数の研究が存在するものの，いずれも個別事例的な対処にとどまっており，一般的に適用できる成果を得るには至っていないのが現状である．

一方で近年進展の著しい計算空力音響学（CAA）手法によれば，実験条件の任意な設定および詳細な音源性状の取得が原理的に容易であるから，実験的手法の限界を克服可能と期待される．しかしながらCAAのための数値流体解析（CFD）は現在の計算機をもってしても過大な解析負荷を要求する．

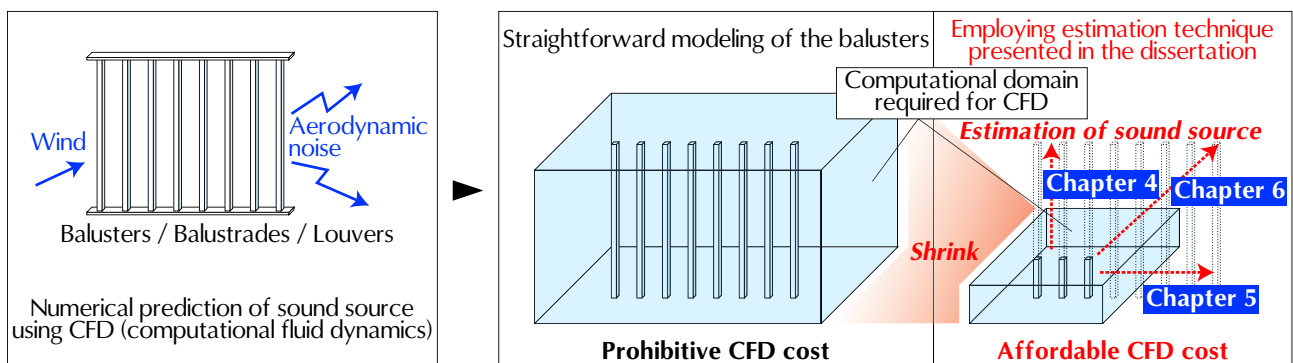


Fig. 1: Schematic description of the aim of the dissertation.

研究の目的　そこでベランダ手摺子，ルーバフィンなど，空力騒音が問題となる屋外建築付帯物の形状にあらためて目を向けると，典型的には断面寸法に比してスパンの大きな柱状物体，または柱状物体が等間隔に並んだ形状の柱状物体列である．本研究ではこの点に着目し，解析対象の物体形状が柱状物体ないし柱状物体列であることを前提とした空力音数値予測における数値流体解析負荷低減手法を提案し，実証を図る (Fig. 1) ．

第 2 章　空力音数値解析の基礎理論

本研究では空力音数値解析手法として Lighthill-Curle の空力音理論に基づく非圧縮性流体解析および Curle の式を組み合わせた手法を使用する．流体解析手法は RANS 系手法と比較して非定常解析に適した LES とし，LES における SGS モデルは工学的な問題への適用実績豊富な標準 Smagorinsky モデルとする．本研究の LES 解析では，LES における空間フィルタリングによる音源周波数特性への影響は軽微であり，人間の可聴域を概ねカバーするフィルタ特性が確保される．

物体表面変動圧は表面近傍 1 または 2 格子点の圧力から補外によって求める．境界条件は流入側を一様流，流出側を対流境界条件，側方は周期境界条件または滑り壁，スパン方向は滑り壁とした．第 4 章以降で使用する最小二乗推定法は Levenberg-Marquardt 法とする．

第 3 章　Curle の式の簡略化および実スケール解析に関する検討

負荷低減法提案の前段階として，以下 3 点の検討を行った．ただし以下の項目 1. , 2. のみ，乱流モデルを導入しない一般座標系数値流体解析手法によった．

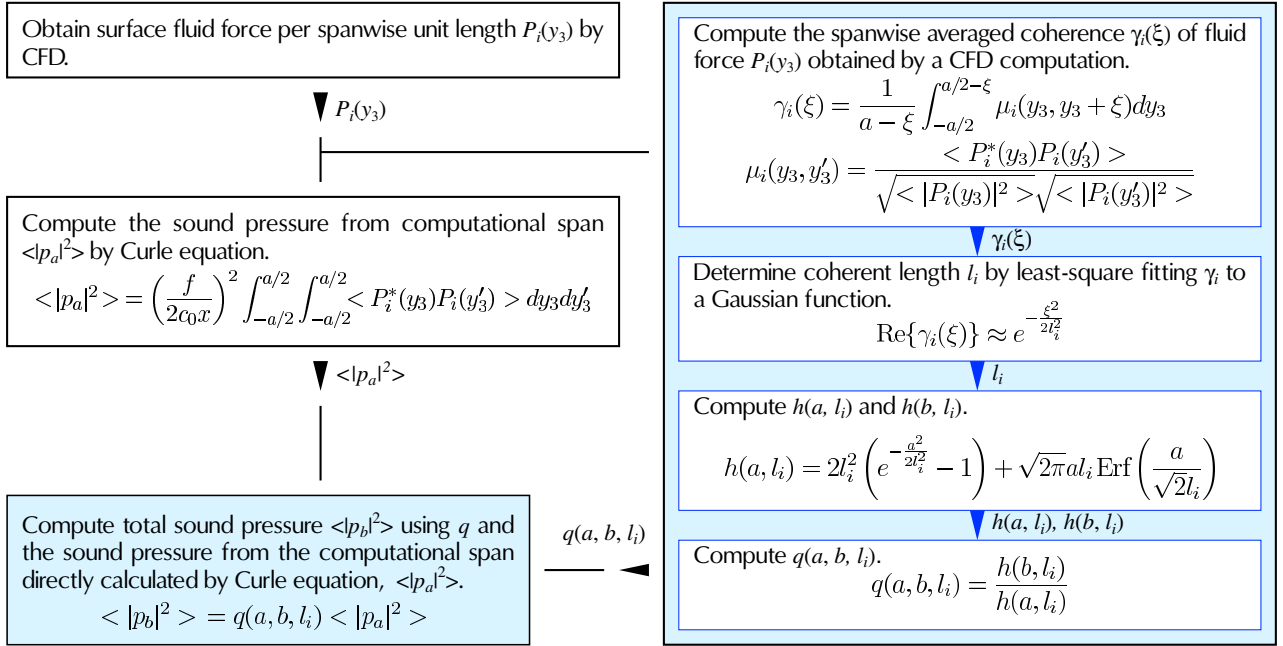
1. 実スケールの約 $1/10$ であるレイノルズ数 500 および 10^3 における円柱周り流れの二次元解析により，Curle の式において音源として扱われる物体表面圧力および物体表面摩擦応力それぞれの寄与を調べた．結果として，物体表面摩擦応力は実用上無視して差支えないことが明らかとなった．
2. レイノルズ数 10^3 における円柱周り流れについて，同一解析手法および解析条件での二次元および三次元流体解析を行った．両者の結果の比較から，正確な音源周波数特性の把握には三次元流体解析が不可欠であることが明らかとなった．
3. 標準 Smagorinsky モデル LES による実スケール (レイノルズ数 1.6×10^4) の正方形断面角柱型ベランダ手摺子周り流体解析を行い，既往の実験結果と比較して概ね妥当な放射音のピーク周波数が得られた．ただし本解析において全物体で同相の変動圧力を仮定した点には疑問が残り，第 5 章における検討課題となる．

第 4 章　部分スパン解析結果からの全体放射音圧推定法

推定手法構築　第 3 章で三次元解析の必要性を示したものの，柱状物体全スパンの直接的な数値流体解析は非効率である．ゆえに，物体表面変動流体力のスパン方向コヒーレンスを利用して，部分スパンの数値流体解析結果から全スパンからの放射音を推定する手法を定式化した．本推定手法に必要なスパン方向 2 点間のコヒーレンス実部のモデル関数は，既往文献で提案されていた (ただし未実証) Gauss 分布型の関数 $\exp\left(-\frac{\xi^2}{2l_i^2}\right)$ とした．ここで ξ は 2 点間距離， l_i はモデル係数で相関長さと呼ぶ．このときスパン a からの放射音強度 I_s は

$$I_s \propto 2l_i^2 \left(e^{-\frac{a^2}{2l_i^2}} - 1 \right) + \sqrt{2\pi} a l_i \operatorname{Erf} \left(\frac{a}{\sqrt{2}l_i} \right)$$

となる．上式を用いて，具体的な推定手順を Fig. 2 のように構築した．



□: Usual 2-step technique based on Lighthill-Curle equation, □: Additional procedure of the estimation technique.

Symbols a : computational span, b : actual span, y_3 : spanwise position on the body, ξ : spanwise distance of two points on the body, l_i : coherent length, f : frequency, c_0 : speed of sound, x : distance between sound source and receiving point

Fig. 2: Procedure of sound pressure estimation.

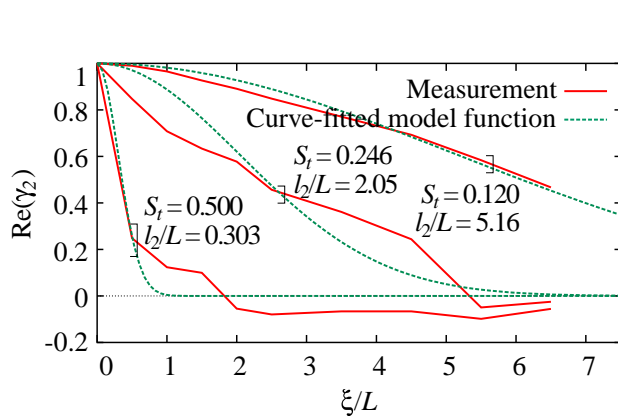


Fig. 3: Comparison of measured coherences and their curve-fitted model functions.

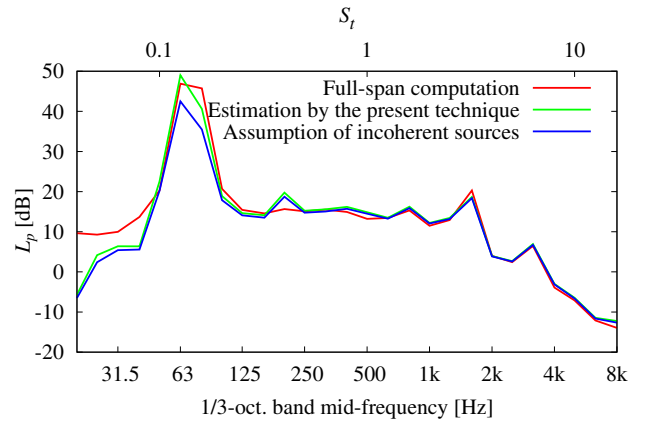


Fig. 4: Comparison of 1/3-octave band averaged sound pressure.

実証 風洞実験を通じた実験解析により，モデル関数および本推定手法の実証を試みた．その結果，Gauss分布型のモデル関数の妥当性が示され (Fig. 3)，本推定手法による推定結果は全スパンからの放射音実測値とよく合致した．さらに既往の類似手法との比較では，特に解析スパンに対して実スパンの大きな状況において，本推定手法の推定精度の優位性が示された．

一方，数値解析においても同様に，短スパン解析結果を利用した受信点音圧推定結果および全スパン解析による音圧算出結果の比較による実証を試みた．その結果，両者が良く合致した (Fig. 4)．さらに両解析における負荷の比較から，本解析例では解析負荷が約 1/5 に低減されることが示された．

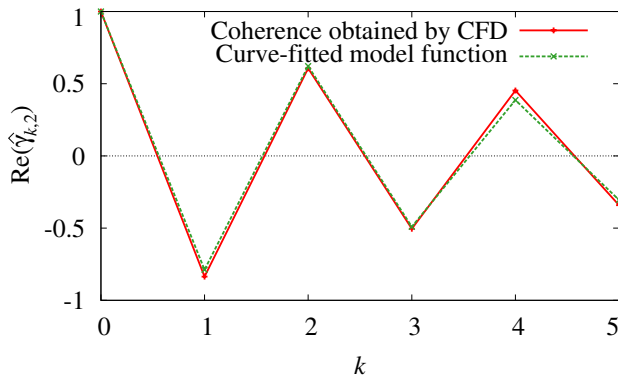


Fig. 5: Comparison of computed coherence and its curve-fitted model function.

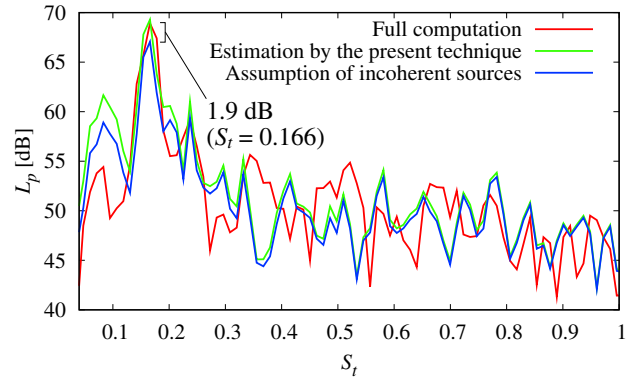


Fig. 6: Comparison of sound pressure by full computation, estimation by the technique and by incoherent assumption.

第5章 音源物体間相関を利用した柱列からの全体放射音圧推定法

推定手法定式化 第3章での柱状物体列解析において全物体同相の圧力変動の仮定に疑問が残ったものの、全物体同時の数値流体解析によって物体間位相差を考慮するには非現実的な計算機負荷が要求される。そこで第4章で提案した手法と同様に、各物体にかかる変動流体力の物体間コヒーレンスを利用して、柱状物体列の一部の解析結果を使用して全物体列からの放射音を推定する手法を構築した。

モデル関数の検討および推定手法構築 本手法において必要となる物体間コヒーレンスのモデル関数の妥当な関数形が未知であることから、数値流体解析によって検討した。その結果、正負交互のコヒーレンスが指数関数的に減衰する形の関数 $(-1)^k \exp\left(-\frac{k}{\hat{l}_i}\right)$ が適当との結論を得た (Fig. 5)。ここで k は物体間隔、 \hat{l}_i はモデル係数で相関距離と呼ぶ。さらに、本モデル式による具体的な推定手順の構築を行った。**実証** 本手法による推定結果と、全物体の数値流体解析を行い Curle の式から直接算出した受音点音圧、および物体数を超える部分について無相関を仮定した簡易推定式の三者を比較し、本手法の妥当性および簡易式に対する推定精度の優位性を示した。

第6章 スパン方向および柱列方向音圧推定法の同時適用

第4章および第5章で提案した両推定手法の同時適用に関する検討を行った。推定結果における位相情報の欠落の問題から前2章で提案した手法の順次適用が不可能であるため、新たな定式化を行い、推定手順を構築した。スパン方向および物体間コヒーレンスのモデル関数は前2章と共通の関数が使用可能であることを示し、また本定式化において仮定した他物体との音源コヒーレンスに対する性質について、その妥当性を示した。さらに全物体の数値解析を行った場合、本手法による推定結果、および簡易推定式の比較により、本推定手法の妥当性および簡易式に対する推定手法の優位性を示した (Fig. 6)。

第7章 総括

第1章から第6章の検討によって、柱状物体ないし柱状物体列周り流れによって発生する空力音の数値予測における、数値流体解析負荷低減手法を構築および実証した。従来の空力音数値解析はベクトル型計算機のような大規模な計算機資源が事実上不可欠であり、またそのような資源が確実に措置可能な状況で行われていた。今後は空力音数値解析の裾野が広がることで、比較的小規模な計算機資源においても柱状物体列のような複雑形状物体の解析に対するニーズが高まると予想され、そのような解析対象に対して本手法は有効である。