



平成27年度研究助成 【サウンド技術振興部門】より

複雑形状物体および運動変形する物体 を含む流れから発生する空力騒音の 直接数値シミュレーション法の確立

東北大学 流体科学研究所
教授

服部 裕司

1. 空力騒音との出会い

騒音は物体の振動によって発生する振動騒音と空力学的に発生する空力騒音に分けることができる。高速で運動する物体の場合、振動騒音のパワーが流れの速度の2乗に比例して増大するのに対し、空力騒音のパワーは速度の5～8乗に比例して増大する。速度が小さいときには重なり合いによって隠れている音が、速度が大きくなると重なり合いが不完全となり強く現れるのである。

筆者が空力騒音の研究に取り組み始めたのは助手として東北大学流体科学研究所に赴任した1994年のことである。当時は空力音の直接数値シミュレーションが世界で初めて行われたばかりであった。われわれはいち早くその手法を取り入れ、渦輪の衝突により発生する音波の直接数値シミュレーションに成功した。

空力音の世界は奥が深い。学問的にはライトヒルの空力音響学 (acoustic analogy) がその世界を切り拓いた。筆者が大学院生時代を過ごした研究室では、ライトヒルと親交があった神部勉先生が空力音の研究をされていた。研究は、衝撃波管から放出される渦輪を用いて、渦輪どうしの衝突や渦輪と物体の干渉により発生する空力音 (渦音とも呼ばれる) を無響室で観測する実験を行い、その結果を空

力音響学の理論と比較するものであった。上述の渦輪の衝突により発生する音波の直接数値シミュレーションも神部先生の実験を数値シミュレーションで確かめようとして行ったものである。しかしながら、私自身の大学院時代の研究テーマは空力音とは無関係で、その後空力音に20年以上 (休み休みではあるが) にわたって関わることになるとはその当時は思いもよらなかった。

2. 空力騒音の数値シミュレーション

現在空力騒音の数値シミュレーションの主流は、流れのみを何らかの方法で解いた結果から空力音響学理論の音源項を求めて音波を間接的に得るハイブリッド法である。これに対し、音波を物理法則に基づいて直接的に得るものを直接数値シミュレーションという。この場合には空気の圧縮性を考慮する必要があり、また音圧は大気圧に比べて微小であるため、圧縮性流れの方程式を高精度数値解法で解くことになる。ハイブリッド法が成功を収めている問題も少なくないが、平均流れが強く一様でない場合には空力音響学の理論の精度が悪くなることや、音波の流れへの影響を考慮できないことがハイブリッド法の欠点として挙げられる。これに対し、直接数値シミュレーションでは数値計算のコストは高いが、原理的にはすべての現象を正しく

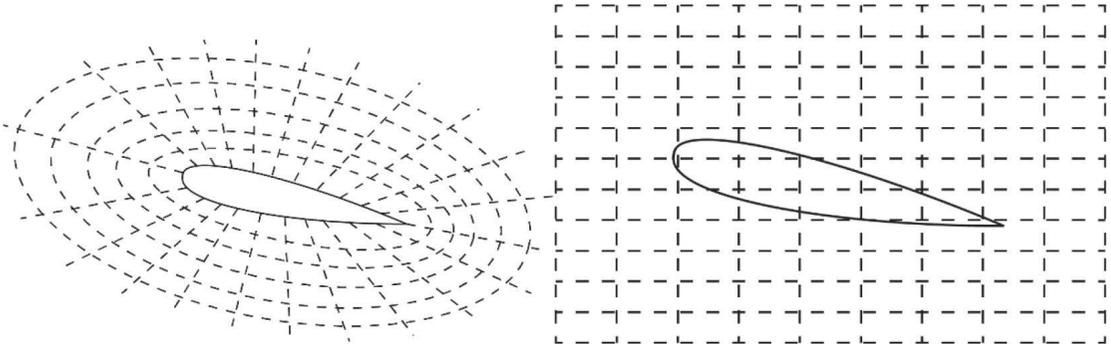


図1 境界適合格子（左）と埋め込み境界法（右）

捉えることができる。

われわれが最初に取り組んだ空力音の問題は基礎的なものであり、人間の耳に聴こえるものではない。計算機の発展とともに直接数値シミュレーションの適用範囲は拡大し、今や一部の实用機器の騒音を一定の精度で捉えられるようになりつつある。しかしながら、風車やヘリコプタなどの回転機械のように固定部と運動部をもつ機器の空力騒音を捉えることは困難である。

われわれは埋め込み境界法を用いることで回転機械からの空力騒音の直接数値シミュレーションが可能となると考えた。埋め込み境界法は流れの数値シミュレーションにおいて利用が拡大しつつある計算法である。従来方法では流れの中の物体にあわせて計算用の格子点を配置する（境界適合格子、図1左）。この方法は、物体表面で境界条件を課すのが容易である一方、物体の形状が複雑になると質のよい格子を生成するのが困難になるという欠点がある。これに対し、埋め込み境界法では直交格子などの単純な格子を用い（図1右）、この格子上で何らかの方法で境界条件を表現する。非圧縮性流れに関しては数学的な根拠も含めて数多くの研究成果があるが、空力音が直接的に含まれる圧縮性流れに関しては最近になって研究が始まっ

たところである。

埋め込み境界法により空力騒音を支配方程式の解として直接得ることができれば、複雑形状物体を含む流れや、風車やヘリコプタなどの時間的に変化する幾何をもつ流れにおいて発生する空力騒音を捉えることができる。これに取り組むのが本研究である。

3. 埋め込み境界法による空力騒音の直接数値シミュレーション法

埋め込み境界法は境界条件の表現方法によって大きく連続型と離散型に分けることができる。ここではわれわれが最近に開発した連続型の方法と、現在開発中の離散型の方法のそれぞれについて紹介する。

3.1 Volume Penalization 法による空力騒音の直接数値シミュレーション法

連続型の埋め込み境界法では、流れの運動方程式に体積力の項を付加することで物体表面上での境界条件が満たされるようにする。Volume Penalization 法では体積力を物体内部でのみはたらく強い摩擦力とする。その結果、物体内部の流れはあらかじめ与えられた物体の速度に近似的に一致し、粘性流れのすべりなし境界条件が満足されるようになる。

Volume Penalization 法は、非圧縮性流れの場合にはその数学的な正しさ（収束性）が保証されている。しかし、圧縮性流れの場合への単純な拡張では音波の反射が正しく扱えないことが課題であった。LiuとVasilyev¹⁾は連続の式に新しい penalization 項を付加することにより音波の反射を正しく捉えることに成功した。この研究は線形音波の範囲内であり、空力音は扱われていない。

われわれはまず LiuとVasilyevの方法を空力音の直接数値シミュレーションに適用し、その精度評価を行なった。その結果、物体が静止し

ている場合は正しい結果が得られるが、物体が運動する場合は結果が正しくないことがわかった。そこで彼らの方法を検討したところ、彼らが導入した penalization 項が方程式の並進対称性を破っていることに気づいた。並進対称性を保つように penalization 項の入れ方を修正した方法を提案し、これによる直接数値シミュレーションを行うと正しい結果を得ることができた²⁾。

図2は流れの中に振動する円柱と固定された円柱がある場合の空力音の計算例である。振動する円柱を回転翼に、固定された円柱を支柱に

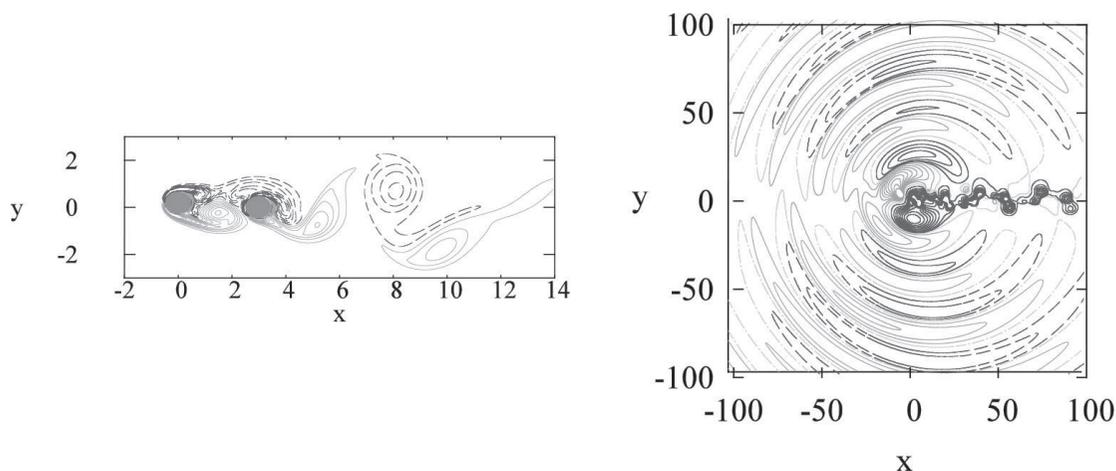


図2 改良されたVolume Penalization 法による空力騒音の直接数値シミュレーションの例。
 (左) 渦放出の様子、(右) 音波伝播の様子

対応させると風車の2次元モデルと見ることができる。もちろんこの対応はあくまでアナロジーであり、流れのレイノルズ数も小さいので、実際の風車とは開きがあるが、運動部と固定部を併せ持つ系において空力音を直接捉えることができることを示したことに意義がある。この方法の課題としては、適用が現時点では粘性流れに限られていること、計算資源の制約から高いレイノルズ数の計算が困難であることが挙げられる。

3.2 離散型埋め込み境界法による空力騒音の直接数値シミュレーション法

離散型の埋め込み境界法では、表面近傍の物体内部の格子点 (ghost point) 上の物理量を、境界条件を満たすように外挿する。このとき、境界上の点をはさんで一般に格子点とは一致しない流体領域の点 (image point) の物理量が必要となるが、これは周囲の点の物理量を用いて内挿により与える。

この方法は粘性流れだけでなく非粘性流れにも適用することができる。したがって、衝撃波を含む流れや、物体どうしの干渉が音波の発生の主要因である場合には計算効率の面で適している。われわれは現在この手法による直接数値シミュレーション法を開発中である。線形音波の伝播、円柱を過ぎる流れから発生する空力音、物体と渦対の干渉により発生する空力音につい

て、それぞれ音波が正しく捉えられることを確認した。今後はその応用として、トンネル微気圧波や回転翼と固定部 (支柱) の干渉により発生する空力騒音の研究に取り組む予定である。特に前者に関してはこれまで正確に取り扱うのが困難であった列車すれ違い時の微気圧波の解析を行うことを目指している。

4. 今後の展望

計算機の進化は今後も続くであろう。それとともに空力騒音の直接数値シミュレーションの応用範囲は拡大すると期待される。騒音発生メカニズムの解明や騒音源の特定にとどまらず、騒音低減のための機器形状最適化も直接数値シミュレーションにより行うことができる日もそう遠くないかもしれない。低騒音社会の実現に向けて、研究を続けていく所存である。

参考文献

- 1) Q. Liu and O. V. Vasilyev : A Brinkman penalization method for compressible flows in complex geometries, *J. Comput. Phys.* **227** (2007) 946 – 966
- 2) R. Komatsu, W. Iwakami and Y. Hattori : Direct Numerical Simulation of Aeroacoustic Sound by Volume Penalization Method, submitted to *Comput. Fluids*