

流体騒音の数値解析の現状と課題

加藤千幸（東大）

Computational Aeroacoustics: Present Status and Problems to be Solved

C. KATO*

*Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

ABSTRACT

Computational Aeroacoustics, which is defined as a method that numerically predicts sound due to fluid motion, is expected to become a powerful engineering tool for identifying primary mechanism of noise generation from the flow of interest and investigating means to achieve noise reduction. Unlike in the United States and some European countries, where noise generated from high-speed flow such as jet engine noise (fan noise) is of the central interest in this field, noise generated from relatively low-speed flow is the major interest in Japan and some Asian countries. This includes noise from low-pressure fans, automobiles and high-speed trains. Prediction of noise due to low-speed flows is, in general (or practically), achieved by a decoupling method where source fluctuations are first computed and fed to the following acoustic computation as the input data with an assumption that the generated sound does not alter the source flow field. It is crucially important to apply a decoupling method that is appropriate and most feasible to the flow and sound field of interest. Then, the accuracy of the source computations generally determines the overall performance of the sound prediction. This paper focuses on the noise generated from low-speed flows and overviews the present status of the noise prediction. Issues to be solved will also be addressed.

Key Words: Computational Aeroacoustics, Large Eddy Simulation, Bluff Body, Turbomachinery, Boundary Layer

1. はじめに

流体騒音¹⁾は流れの非定常変動に起因して発生するため、非定常流れ解析により流体騒音を予測することが（原理的に）可能であり、このような手法による流体騒音の予測と低減に大きな期待が集まっている。

欧米ではジェットエンジンから発生する騒音¹⁾など、比較的高速の流れから発生する流体騒音に対する関心が高いが²⁾、日本やアジア諸国では、プロペラファンやシロッコファンなどの低圧ファン、自動車、および高速車両から発生する流体騒音の予測や低減が問題となることが多い。このような比較的低速（低マッハ数）の流れから発生する流体騒音を予測するためには、音源となる流れの非定常変動と音の伝播とを別々に計算する分離解法を用いることが現実的である。分離解法では発生した音が音源に与える影響を考慮することはできないが、低速の流れから発生する音の変動は流れの変動に比べて桁違いに小さいため、音から流れへのフィードバック効果は特殊な場合を除いて無視することができる。流れ場と音場とを分離して計算することにより、渦と音（波長）の空間スケールの違いに起因する困難を排除することができる。分離解法を用いて流体騒音を予測する場合、音が発生する原理的なメカニズム、および音源・音場の性質を良く理解し、それに最も適した方法を用いることが重要である。一般に、低速の流れ場から発生する流体騒音の予測精度は音源の

非定常変動の予測精度に支配されることが多い。本稿では、低速の流れから発生する流体騒音の数値解析に関して、その現状を概観すると共に、将来的に解決すべき課題に関して概説する。

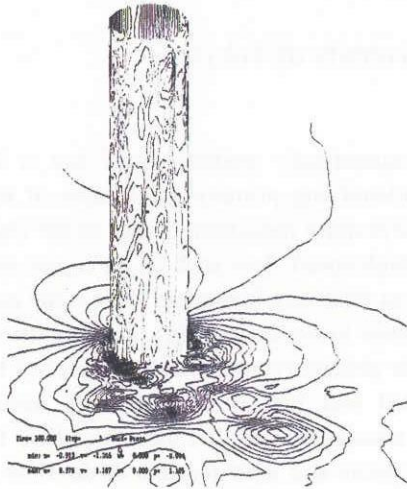
2. 低速の流れから発生する騒音の予測

2.1 ブラフボディ騒音

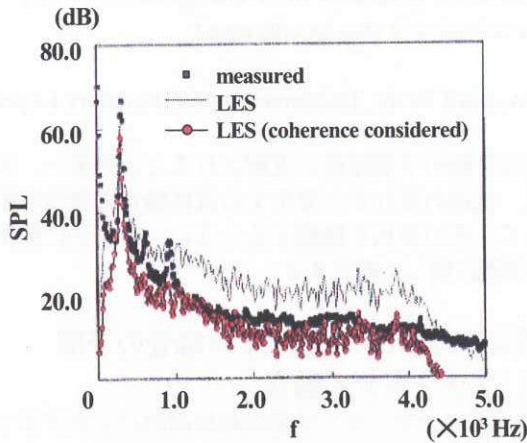
自動車のドアミラーや新幹線車両のパンタグラフなどから発生する騒音はいわゆるブラフボディ騒音である。一般に物体の寸法に比較して波長（正確には波長 2π ）が長い、つまり、比較的低周波数の騒音の場合、音源は点音源とみなすことができ、解析的な取り扱いが可能である。無限流体中（自由音場）に置かれた物体から発生する低周波数のブラフボディ騒音であれば、物体表面の圧力変動からCurl³⁾の式を用いて解析的に求めることができる。ブラフボディの表面圧力変動は物体から剥離した後流の渦の変動で決まるため、渦の変動を精度良く解析することが重要であるが、このためにはLES (Large Eddy Simulation) を用いることが必須であり、RANS (Reynolds Average Navier Stokes Simulation) では、原理的に乱流の非定常変動スペクトルを予測することはできない⁴⁾。

ブラフボディ騒音の予測例を図1および図2に示す。それぞれ、円柱⁵⁾およびパンタグラフの碍子⁶⁾から発生する騒音の周波数スペクトルを風洞実験値と比較した

ものである。このように、層流剥離する後流、あるいは、乱流剥離であっても、乱流境界層が剥離に大きな影響を及ぼさない場合は、上記の方法により騒音スペクトルの予測が可能であることが確認されている。音源計算の格子解像度が騒音予測精度に与える影響の検討、乱流剥離する場合の騒音予測、および、高周波数騒音（非コンパクトボディ騒音）の予測などは今後の課題である。



(1) 瞬時の表面圧力の分布

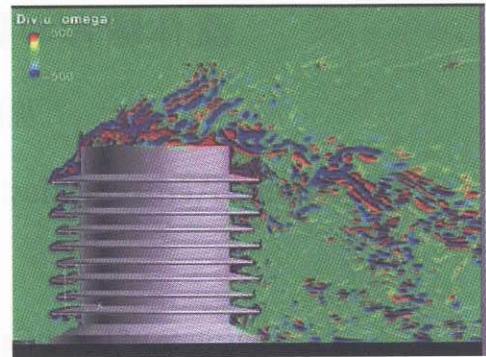


(2) 騒音スペクトルの実験値との比較

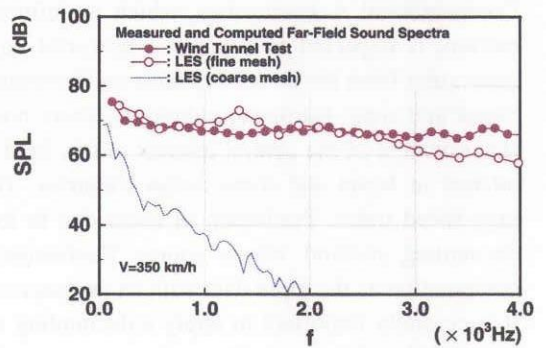
図1 円柱から発生する流体騒音の予測⁵⁾

2. 2ターボ機械から発生する騒音

ターボファンや軸流ファンなどから空力的に発生する騒音は、動翼と静翼との干渉により発生する干渉騒音と動翼や静翼自体から発生する騒音（セルフノイズ）に大別される。これ以外に、有限の厚みのある翼が回転していること自体により発生する騒音（翼厚み騒音）や負荷が掛かっている翼が回転することによる騒音（翼荷重騒音）などもあるが、低速のターボ機械の場合、翼厚み騒音や翼荷重騒音は余り大きくはなく、また、これらに関しては、翼形状や定常的な翼負荷分布から幾何学的に計算することができる⁷⁾。



(1) 瞬時のパワエル音源の分布



(2) 騒音スペクトルの実験値との比較

図2 碍子から発生する流体騒音の予測⁶⁾

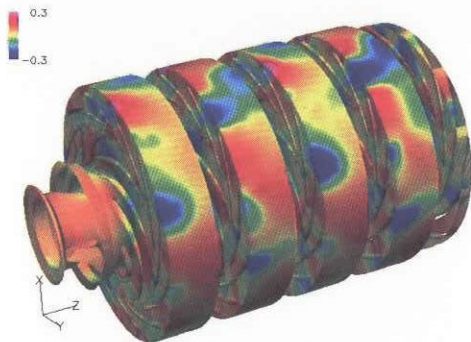
干渉騒音の音源はポテンシャル干渉や後流干渉に起因する圧力変動であり、現状でも音源となる圧力変動の周波数スペクトルは予測可能である。図3⁸⁾は遠心ポンプのディフューザ内の圧力変動をLESにより予測し、実測値と比較したものである。設計点運転では動翼通過周波数（NZ成分）およびその高調波成分が全体の騒音のオーバーオール値を支配するが、非設計点運転では乱流の変動に起因する広帯域成分の寄与が大きくなる。このような傾向も含めてLES解析により、音源となる表面圧力変動の周波数スペクトルを定量的に予測できていることが分かる（図3(3)）。このケースの場合は物体表面の圧力変動により発生した音は主としてケーシング内を弾性波として伝播し、機器外に放射される。そこで本解析では図3の(2)に示すような瞬時の表面圧力分布を衝撃解析の入力データとして与えることにより、固体内を伝播する音の解析を進めているが、これについては別途報告する。

動翼などの回転する音源から自由音場に放射される音はFfowcs Williams & Hawkins 方程式（FW-Hの式）⁷⁾から解析的に求めることができるが、プロペラファンなどの一部のターボ機械を除いて一般にターボ機械から発生する流体騒音を予測するためには、音源の変動だけでなく静翼やケーシングによる反射や回折などの音響効果を考慮する必要がある。音響計算には境界要素法（BEM）や線形化オイラー方程式などが用いられる。境界

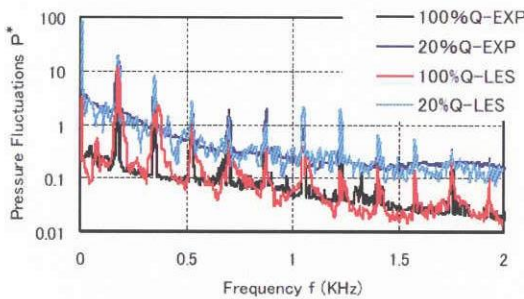
要素法は周波数領域で音場を解析する方法であり、一方、線形化オイラー方程式は時間領域で音の伝播を解析するものであり、それぞれ、長所・短所を有するが本稿ではその説明は割愛する。



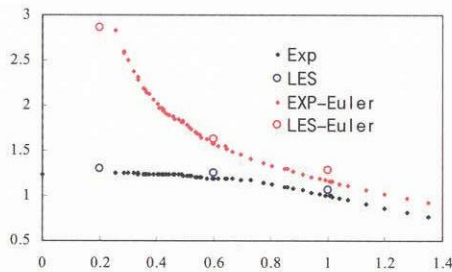
(1) ディフューザ入口近傍の瞬時の静圧分布



(2) ケーシング表面の瞬時の静圧分布



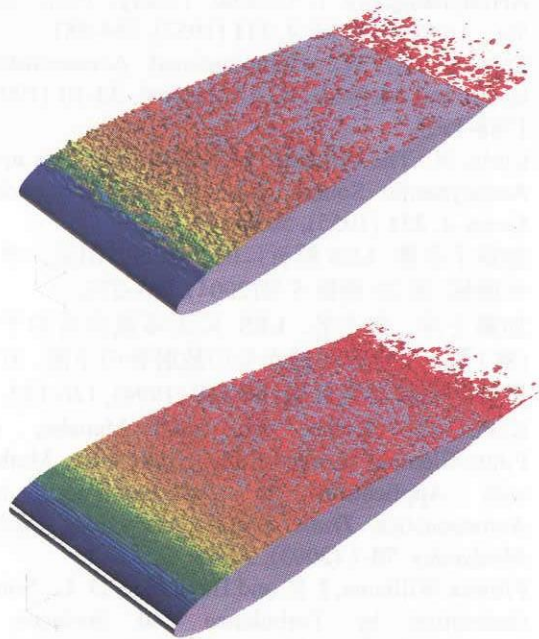
(3) 圧力変動スペクトルの実測値との比較



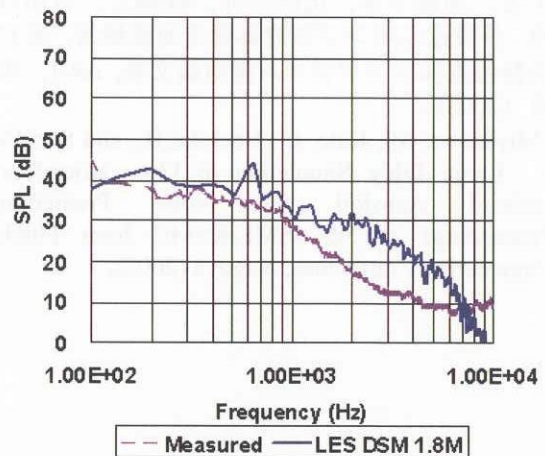
(4) 全揚程，羽根車仕事の実測値との比較

図3 遠心ポンプから発生する流体騒音の予測⁸⁾

最後に、翼自体から発生する騒音に関しては未だに予測の目処が立っていないのが現状である。例えば、プロペラファンから発生する流体騒音を予測するためには、動翼翼端から剥離する翼端渦の変動に起因する圧力変動や翼後縁近傍から剥離する境界層の変動に起因する圧力変動を予測する必要があるが、単独翼から発生する流体騒音の予測精度も現状では十分でなく、現在、盛んに研究が行われている。一例として、二次元翼から発生する騒音をLES解析により予測した結果を図4に示す⁹⁾。LES解析により境界層の遷移やそのレイノルズ数による差異などは定性的には捕らえられているが、騒音スペクトルの定量的予測にはまだ課題を残しているのが現状である。



(1) 翼負圧面の瞬時の渦構造
(上：Re 数 3×10^5 ，下：Re 数 2×10^6)



(2) 騒音スペクトルの実測値との比較
(Re 数 3×10^5 ，迎角 9度)

図4 二次元翼から発生する流体騒音の予測⁹⁾

謝辞

本研究のうち、遠心ポンプから発生する流体騒音の解析は、文部科学省 IT プログラム「戦略的基盤ソフトウェアの開発」プロジェクトの実証解析の一環として進められているものであり、遠心ポンプ内圧力脈動データは、本実証解析に参加している (株) 日立インダストリイズで計測されたものである。また、二次元翼から発生する騒音予測に関しては、21 世紀 COE プログラム「機械システムイノベーション」から援助を受けた。それぞれここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Lighthill, M. J.: On Sound Generated Aerodynamically I. General Theory, *Proc. Roy. Soc., London, Series A*, **211** (1952), 564-581.
- 2) Tam, C. K. W.: Computational Aeroacoustics: Issues and Methods, *AIAA Journal*, **33-10** (1995), 1788-1796.
- 3) Curle, N.: The Influence of Solid Boundaries upon Aerodynamic Sound, *Proc. Roy. Soc., London, Series A*, **231** (1955), 505-514.
- 4) 加藤千幸著: LES 解析に関する四方山話, ターボ機械 第 32 巻第 5 号(2004), 267-273.
- 5) 加藤千幸, 他 4 名: LES による流体音の予測 (第 1 報, 二次元円柱からの放射音の予測, 日本機械学会論文集 B 編, **60**-569 (1994), 126-132.
- 6) Kato, C., Kaiho, M., and Manabe, A.: Finite-Element Large Eddy Simulation Method with Applications to Turbomachinery and Aeroacoustics, *Trans. ASME, Journal of Applied Mechanics*, **70**-1 (2003), 32-43.
- 7) Ffowcs Williams, J. E. and Hawkings, D. L.: Sound Generation by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion, *Philosophical Transactions of the Royal Society, Series A*, 264-1151 (1969), 321-342.
- 8) 王宏, 加藤千幸, 山出吉伸, 桂裕之, 吉田哲也: 多段遠心ポンプの流体構造連成解析, 第 17 回数値流体シンポジウム講演論文集, A9-1, 東京 (2003).
- 9) Miyazawa, M., Kato, C., Yoshiki, H., and Suzuki, Y.: Large Eddy Simulation of Flow around an Isolated Aerofoil and Noise Prediction, *Proceedings of 5th JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference, Nagoya* (2002).