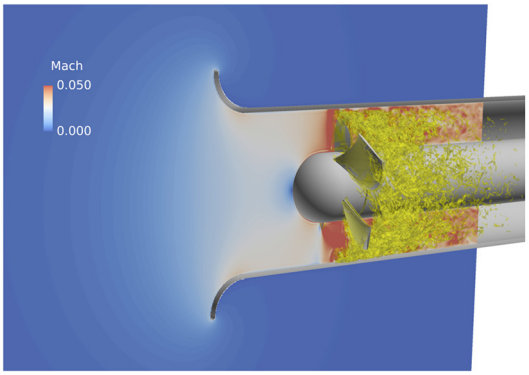
高精度空力騒音解析ツールの開発と製品静粛設計への適用

Development of High-fidelity CFD Tool for Aeroacoustics



西村 信祐[*1] Shinsuke Nishimura
林 健太郎[*2] Kentaro Hayashi
中江 修二[*3] Shoeji Nakaye
吉本 稔[*4] Minoru Yoshimoto

当社では，製品の環境性向上のため，各種機器の静粛化に取り組んでおり，その一環として流体機器の静粛化設計を実現する大規模空力騒音解析の技術開発を実施している。空力騒音解析には精密な流動解析と音波の伝搬解析が必要であるため，この観点から有望で近年急速に発展している大規模流体解析技術として格子ボルツマン法（Lattice Boltzmann Method：LBM）を適用した。本報では本解析技術の概要及び航空機離着陸翼型や軸流ファンの騒音を対象とした検証解析について紹介する。

1. はじめに

当社は，流体に関連する製品を数多く取り扱っている。それらの製品と流体が干渉することにより生じた圧力変動は遠方に伝播することで空力騒音となることがある。製品設計においては環境性向上の観点で，製品から発生するこのような空力騒音を最小化することが求められる。この設計プロセスの中でとりわけ重要な技術は，空力騒音を高精度に予測する技術である。一般に，空力騒音を予測するためには，風洞試験とCFD解析の2通りの方法があるが，前者は精緻に形状を模擬した供試体製作から風洞試験でのデータ計測までのリードタイムが長く，設計プロセスの中で日常的に利用することは難しい。また，後者についても，非定常的な流体の乱れが空力騒音源になる場合が多いことから，高精度かつ大規模な CFD 解析が必要となる。

当社では，高精度かつ大規模な CFD 解析に対応するために，格子ボルツマン法（LBM）を適用した CFD 解析ツールを開発している[(1)]。LBM は，気体分子運動論をアナロジーとする解析手法であり，従来型のNavier-Stokes方程式をベースとするCFD解析ツールに比べて，高速かつ高精度であるとの報告がある[(2)(3)]。本報では開発した LBM に基づく CFD 解析コードの概要や特徴と，その適用例について述べる。

2. 格子ボルツマン法に基づく CFD 解析ツールの開発

LBM は，速度を持つ多数の仮想粒子の集合体で流体を近似し，粒子の速度分布関数を用いて各粒子の衝突と並進を計算し，その速度分布関数から巨視的流れ場（流速，圧力など）を求める数値計算法である。以下に開発した CFD 解析ツールの特徴を示す。

*1 総合研究所流体研究部
*2 総合研究所振動研究部 主席研究員 博士
*3 総合研究所振動研究部 博士
*4 総合研究所流体研究部 主席研究員 技術士（機械部門）

(1) Cumulant 衝突モデル

前述の通り，LBM は従来型 CFD ツールに比べて，高速かつ高精度に流体解析が実行できるとの報告があるが，高 Reynolds 数流れにおいては，解析が発散しやすいというデメリットを有する。当社製品の流れ場は，高 Reynolds 数流れである場合が多く，実用的な CFD 解析ツールを開発するためには，高 Reynolds 数における数値的な不安定現象を抑制する必要がある。

そこで，本 CFD 解析ツールでは，不安定現象の抑制のために，Cumulant 衝突モデル[4]を用いた。Cumulant 衝突モデルは，流体の支配方程式である Navier-Stokes 方程式に直接的に影響を与えないレベルで数値的な粘性をコントロールする手法であり，安定に高 Reynolds 数流れを解析することができる。

(2) 壁モデル

一般に，壁面近傍に発達する境界層は非常に薄いため，それ自身を CFD 解析で解像するためには，壁面近傍に非常に細かな解析格子を配置する必要がある。しかし，LBM は立方体格子を用いるため，任意形状の壁面近傍で局所的に格子サイズを変更することが困難で壁面近傍の格子が不足する。

そこで，本 CFD 解析ツールでは，壁面近傍に発達する境界層を捉えるために，壁面近傍に密な格子が不要な平衡壁モデル[5]を用いた。

(3) 移動境界条件

本解析ツールは，ファンなどの回転機械への適用を想定し，Multi Direct Forcing 法[6]を用いた移動境界用の境界条件を実装した。Multi Direct Forcing 法は，移動する物体壁面を薄い膜であると考え，その膜上で所望の移動速度を達成するように，LBM の方程式の中の外力項をコントロールする手法である。

3. 検証及び製品静粛設計への適用

CFD 解析ツールの検証及び製品静粛設計への適用として，2つの事例について述べる。

(1) 航空機離着陸翼型の解析によるツールの検証

3翼素翼型 30P30N を対象とし，空力騒音解析を実施した内容について示す。30P30N は CFD 解析のベンチマーク問題としてオープンになっている翼型であり，機体空力騒音の予測技術向上を目指した国際ワークショップ Workshop on Benchmark problems for Airframe Noise Computations[7]の課題の一つに指定されている。

図1に解析で得られた非定常な流れ場の例（流速の指標であるマッハ数分布）を示す。また，図2及び図3に翼型周りの圧力係数と非定常圧力変動スペクトルの風洞試験結果との比較を示す。これらより，解析が大きな渦を伴う複雑な流れ場を捉えているとともに，定量的にも高い精度で空力騒音源となる圧力変動を評価できることを確認した。

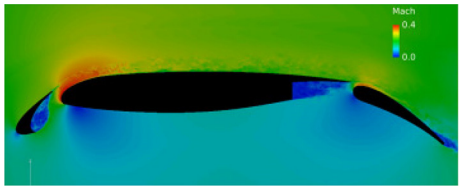


図1 航空機離着陸形態翼型の流れ場解析例
非定常流れ場の可視化

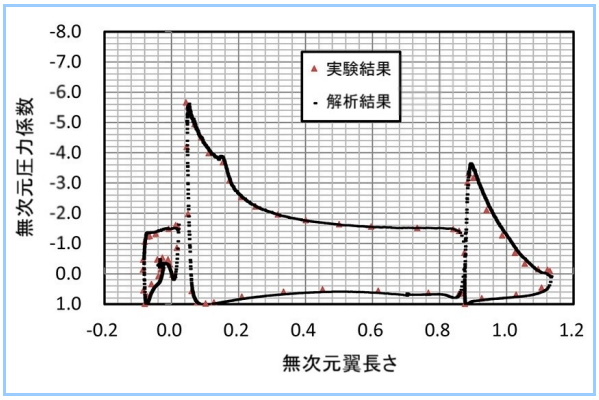


図2 航空機離着陸形態翼型の流れ場解析例
翼型周り圧力係数グラフ

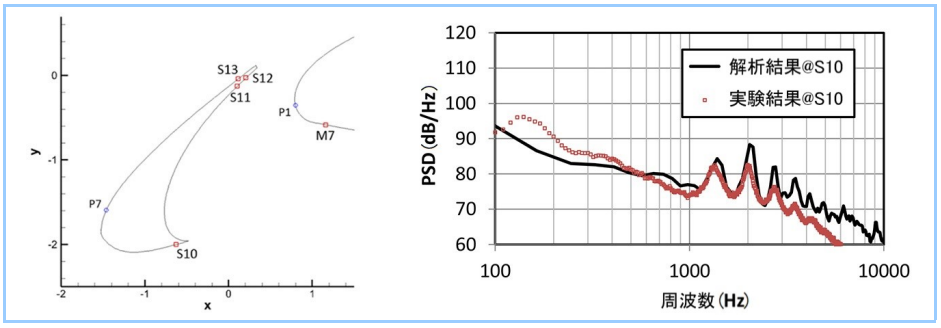


図3 航空機離着陸形態翼型の流れ場解析例 非定常圧力変動スペクトルグラフ

(2) 軸流ファンへの適用

USI7[8]を対象とした空力騒音解析を実施した内容について示す。USI7 は，The University of Siegen により設計された公知な軸流ファン形状である。

図4に解析で得られた非定常な流れ場の例（音波の密度擾乱と相関の強い速度場の発散分布）を示す。また，図5に遠方場における Overall Sound Pressure Level（OASPL）を示す。ファンが回転するような問題に対しても，高精度に空力騒音が予測できることを確認した。

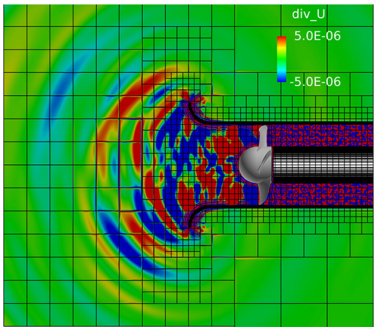


図4 軸流ファンの流れ場解析例
空力騒音伝播の可視化

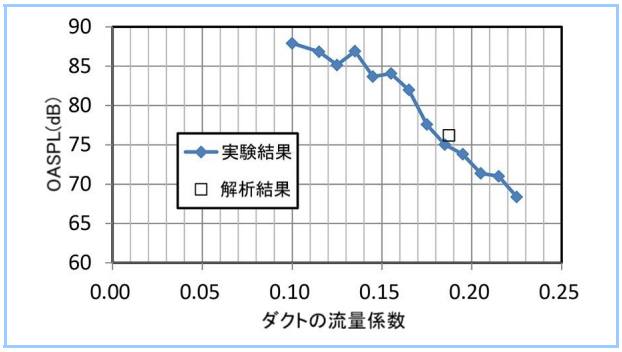


図5 軸流ファンの流れ場解析例 OASPL グラフ

4. まとめ

当社では，製品の環境性向上のため，各種機器の静粛化に取り組んでいる。本報では，流体機器の静粛化設計を実現する大規模空力騒音解析技術の概要及び航空機離着陸翼型や軸流ファンの騒音を対象とした検証解析について紹介した。本解析技術は空力騒音を精度よく予測することが可能であり，低騒音対策の検討に有用である。今後，本技術を当社製品へ広く展開し，各機器に適切な対策を施すことで，各製品の低騒音化へ貢献していく。

参考文献

(1) Nishimura, S., et al. Implicit Large-Eddy Simulation of rotating and non-rotating machinery with Cumulant Lattice Boltzmann method aiming for industrial applications, AIAA Aviation 2019 Forum. 2019.
(2) Geller, Sebastian, et al., Benchmark computations based on lattice-Boltzmann, finite element and finite volume methods for laminar flows, Computers & fluids 35.8-9 (2006): 888-897.
(3) Marié, Simon, et al., Comparison between lattice Boltzmann method and Navier-Stokes high order schemes for computational aeroacoustics, Journal of Computational Physics 228.4 (2009): 1056-1070.
(4) Geier, M. et al., The cumulant lattice Boltzmann equation in three dimensions: Theory and validation, Computers & Mathematics with Applications, vol. 70, 2015, pp. 507-547.
(5) Malaspinas, O. et al., Wall model for large-eddy simulation based on the lattice Boltzmann method, Journal of Computational Physics, vol. 275, 2014, pp. 25-40.
(6) Suzuki, K. et al., Effect of internal mass in the simulation of a moving body by the immersed boundary method, Computers & Fluids, vol. 49, 2011, pp. 173-187.
(7) https://info.aiaa.org/tac/ASG/FDTC/DG/BECAN_files_/BANCIV.htm
(8) Carolus, T. et al., A low pressure axial fan for benchmarking prediction methods for aerodynamic performance and sound, Noise Control Engineering Journal, vol. 63, 2015, pp. 537-545.