

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：33302

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760128

研究課題名(和文)流体・固体領域を伝播する空力音の統一的解析技術の確立

研究課題名(英文)Computation of Aerodynamic Sound through Fluid and Solid Boundaries

研究代表者

佐々木 大輔(SASAKI, Daisuke)

金沢工業大学・工学部・講師

研究者番号：60507903

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円、(間接経費) 690,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、航空機や高速車両を初めとする移動物体から生じる空力音が流体・固体領域を伝播する際の音響解析手法の構築である。複雑な物体から生じる空力音の解析手法として、境界埋め込み法に基づく直交格子法を構築し、空力音響解析手法の精度向上を行った。その結果、ジェットエンジンから発生するファンノイズを模擬した空力・音響連成解析を実施し、本手法の有効性を示した。その一方、流体・固体を伝播する空力音響解析手法の統一的解法を確立するには至っておらず、更なる手法の研究が必要である。

研究成果の概要(英文)：The objective of the study was to develop the computational approach to solve the aerodynamic sound through fluid and solid boundaries. The target was the aerodynamic sound from aircrafts and automobiles, thus the Cartesian-based approach was used to treat the complicated geometries as well as the sound propagation precisely. The Cartesian-based approach coupled with Immersed Boundary Method proved its usefulness through the CFD-CAA coupled simulation of fan noise from a jet engine. The further study is required to establish the new unified method to compute aerodynamic sound through fluid and solid boundaries effectively.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：流体工学 空力騒音 数値流体力学

1. 研究開始当初の背景

近年、世界各国の空港で航空機の離発着時の騒音規制が強化される方向にあり、今後騒音の大きい機体の運航は制約が増えていくことが予想される。日本においても、騒音による空港運用時間の制限や機体の騒音レベルに応じた離発着料が徴収されている。そのため、航空機メーカーは離発着時に生じる騒音の低減を目指して様々な開発を進めてきた。その結果、主要な騒音源であったエンジン騒音（ファン騒音・ジェット騒音）の低減が可能となってきた。エンジン騒音の低下に伴い、従来あまり検討されてこなかった機体から生じる空気力学的な騒音（風切り音）も無視できなくなりつつある。そのため、代表的な機体騒音源である高揚力装置や降着装置の騒音削減を目的とした研究が盛んに行われている。また、自動車を例に考えると、サイドミラー等から発する風切り音は車外だけではなく車内にも伝播し、乗客の快適性の観点から問題となる。これらの問題に対し、従来は実験による騒音の解析と低減が図られてきたが、近年では数値流体力学（CFD）による信頼度の高い解析が期待されている。

近年の急速な数値流体解析技術の進歩及びコンピュータの性能改善に伴い、CFDが自動車、鉄道そして航空機の分野において大いに活用されている。CFDは空力設計において大きな役割を果たし、旅客機の低燃費化に大きく貢献している。近年では、非定常性流れの解析や前述の空力騒音等の解析にもCFDが活用されてきている。物体周りから生じる空力音を数値解析により推算する手法として、物体近傍の非定常流れを解析し、その非定常変動を元にCurleの式を用いた分離解法がよく使用されている。分離解法では、一樣流の仮定が導入されている、物体近傍における回折や反射といった音響伝播を直接推算することはできないなど、適用可能条件に対する制約があることから、空力音を直接解析可能な高精度の手法が必要とされている。

航空機や自動車等の移動物体から生じる空力音を高精度にかつ効率よく解析するためには、複雑形状であっても効率よく解析を行える直交格子法、流体・固体領域を伝播する音響解析手法、流体と音響の連成解析手法が必要であり、本研究ではその実用化を目指した基礎研究を行う。

2. 研究の目的

本研究では、航空機や自動車を初めとする移動物体から生じる空力騒音を推算する手法の解析精度を高めると共に、空力音が物体壁面を透過して伝播するような、車内内の乗客に対しての空力音響解析を行う手法の研究を行う。

流体中の音響伝播解析手法と同様に、固体内（物体壁面）を通過する音響伝播解析法に境界埋め込み法を適用し、その手法の有効性の検証を行う。次いで、流体と固体の境界面

を通過する音響伝播解析手法へと拡張を図り、透過を含む音響伝播手法を確立する。

移動する物体から生じる空力騒音の物体内部への伝播を解析するため、流体解析手法と上記音響解析手法を組み合わせる。本手法の構築により、移動する物体から外部へ伝播する騒音と物体内部へ伝播する騒音を統一して解析することが可能であることを示す。

最後に、本研究において構築する空力音響伝播手法の有効性を検証するためには、実問題における妥当性の検証が必要不可欠である。そこで、三次元でのテスト問題での検証後、実問題を利用してその有効性の検証を行う。

3. 研究の方法

流体中の音響場を効率的に解析する手法として線形オイラー方程式に境界埋め込み法を適用し、直交格子であっても物体曲面を表現できる手法の開発をしてきた。そこで、本手法と同様に境界埋め込み法を適用して直交格子上で固体領域での音響伝播を解析することができると、複雑形状内部における音響伝播を効率的に推算可能となる。そこで、反射等を含む固体内部の音響伝播解析手法を直交格子上に展開し、境界埋め込み法を組み込んだ物体境界条件の検討を行う。構築した手法の有効性は、固体内部の音響伝播を用いた検証計算により実施する。さらに、流体・固体を伝播する音響解析手法の構築を目指すために、構築した固体内音響伝播解析手法と流体中の音響伝播を解析する線形オイラー方程式を組み合わせた手法の構築を行う。境界埋め込み法を適用した物体壁面において流体側から固体側への圧力波を滑らかに伝播させる手法の構築が本研究では不可欠である。

次いで、空力音響解析手法の構築を行う。そのために、移動物体から生じる空力騒音を正しく見積もるために流体解析と音響解析を組み合わせ検証解析を行う。空力音の伝播が空間全域に広がること、また実問題を取り扱うことから三次元化が欠かせないが、三次元化により計算規模の拡大に伴う計算時間の増大という問題の解決が必要となる。そこで、マルチブロック型直交格子法であるBuilding-Cube法の利点を活かして格子点数の削減を図ると共に、並列化効率の向上を図る。実際に並列化解析法を構築し三次元問題における空力音響の伝播解析を行い、実問題を利用した検証を行う。最終的に、本手法の実用性及び有用性についてまとめる。

4. 研究成果

本手法では、移動物体から生じる空力音の高精度化を図るために、直交格子法に基づく解析手法の構築を行った。

- (1) 流体と固体を通過する音響解析手法
流体と固体を通過する音響解析手法とし

て、直交格子を用いて FDTD 法（時間領域差分法）の構築を行った。その際、流体中の音響伝播解析と同様に境界埋め込み法を導入して解析を行った。しかし、FDTD 法ではスキームの解析精度が低いために高周波音源からの音波を解析するためには格子サイズが必要以上に小さくなってしまふこと、また固体領域の解析においても同様の問題が生じることから、実用的な三次元計算が難しいことが明らかとなった。そのため、固体領域と流体領域を精度良くかつ効率的に同時に解析する手法の構築には更なる検討が必要である。

(2) 音響解析手法の構築と検証

空力音響解析手法を構築するためには、空力場（流体場）の解析手法と線形オイラー方程式に基づく音響伝播解析手法を効率的に融合させる必要がある。そのために、ブロック型直交格子法の一つである Building-Cube 法を採用し、物体形状を正確に表すために境界埋め込み法を導入する。本研究で用いる境界埋め込み法は、Ghost Cell (GC) と Image Point (IP) を用いたものである。

図 1 に三次元軸対称ナセル形状である Generic Inlet からのファン騒音（音響）伝播を解析した結果を示す。ファン面で発生した騒音がナセル内壁を伝わり、最終的に出口で回折して、半径方向に伝播している様子が確認できる。発生する騒音の周波数は 1,578Hz であり、遠方場 SPL が他の音響解析手法とよく一致していることが示せたことより、本音響解析手法が有効であることを示した。

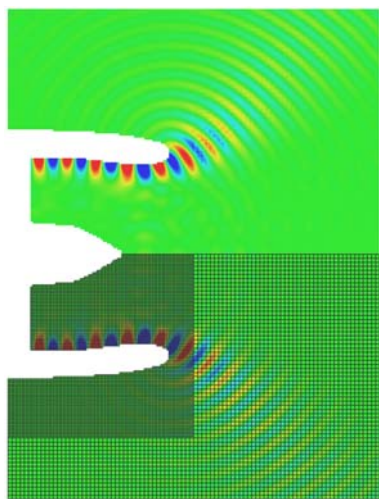


図 1 z=0 断面での圧力変動分布

(3) 空力音響解析手法の構築と検証

前述の音響伝播解析手法を用いて流体との連成解析手法を構築した。流体解析には圧縮性流体解析手法を用い、効率的な連成解析を行うために同一のブロック型直交格子法を使用した。また、並列解析手法を導入し、大規模な並列解析を行うことで計算時間の

短縮を図った。

三次元軸対称ナセル形状である JT15D からの空力騒音伝播を解析した。ファン面におけるマッハ数 0.175、ファンの回転周波数を 3150Hz の場合の遠方場における騒音指向性を実験値と比較した結果が図 2 である。図 2 より、実験値とよく一致している一方、若干のずれは改善の必要がある。

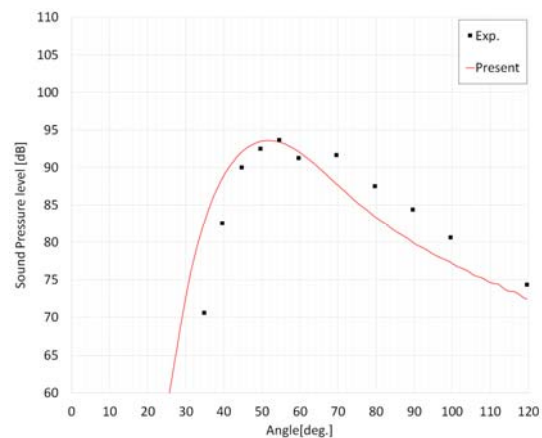


図 2 圧力変動値

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

1. 福島裕馬, 大林茂, 佐々木大輔, 中橋和博, 「Building-Cube Method を用いたエンジンナセルインレットからの騒音伝播解析」, 東北大学サイバーサイエンスセンター広報誌 SENAC, 査読無, 47 巻, 2014 年, pp. 35-45.
2. Yuma Fukushima, Takashi Misaka, Shigeru Obayashi, Daisuke Sasaki, Kazuhiro Nakahashi, “The Numerical Analysis of Forward Fan Noise Shielding Effect on the Over-the-Wing Nacelle Configuration,” AIAA Paper, 査読無, 2014-0720, 2014.

[学会発表] (計 9 件)

1. Yuma Fukushima, Takashi Misaka, Shigeru Obayashi, Daisuke Sasaki, Kazuhiro Nakahashi, “The Numerical Analysis of Forward Fan Noise Shielding Effect on the Over-the-Wing Nacelle Configuration,” 52nd AIAA Aerospace Science Meeting, January 13-17, 2014, National Harbor, USA.
2. Daisuke Sasaki, Yuya Kojima, Tatsuya Kuroda, Takeshi Akasaka, Masato Okamoto Koji Shimoyama, Shigeru Obayashi, “Cartesian-based CFD Solver for Low-Reynolds Number Airfoils,” Tenth International Conference on Flow Dynamics, November 25-27, 2013, Sendai, Japan.

3. Yuma Fukushima, Shigeru Obayashi, Daisuke Sasaki, Kazuhiro Nakahashi, "Computation of the Forward Fan Noise Shielding by the Building-Cube Method," Tenth International Conference on Flow Dynamics, November 25-27, 2013, Sendai, Japan.
4. 佐々木大輔, 中橋和博, 大林茂, 小林広明, 江川隆輔, 小松一彦, 高橋俊, 新井紀夫, 東田学, 石井克哉, 「次世代ペタスケールCFDのアルゴリズム研究」, 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点第5回シンポジウム, 2013年7月11日~12日, 品川, 東京.
5. Yuma Fukushima, Takashi Misaka, Shigeru Obayashi, Shinkyu Jeong, Daisuke Sasaki, Kazuhiro Nakahashi, "CFD-CAA Coupled Computation of Fan Noise Propagation from Engine Nacelle Based on Cartesian Mesh Method," 19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, May 27-29, 2013, Berlin, Germany.
6. 佐々木大輔, 「流体解析による最適設計の現状と展望」(招待講演), 日本機械学会北陸信越支部第50期総会・講演会, 2013年3月9日, 福井.
7. Daisuke Sasaki, Misaka Takeshi, Shigeru Obayashi, "Toward Large-Scale Design Optimization Based on Building-Cube Method," International Workshop on Uncertainty Quantification and Design Optimization, February 25, 2013, Trieste, Italy.
8. Shun Takahashi, Daisuke Sasaki, Yuma Fukushima, "Large-Scale Flow Simulation for Development of Engineering Product" (招待講演), December 7, 2013, Kyoto, Japan.
9. 福島裕馬, 佐々木大輔, 中橋和博, 「ブロック構造型直交格子を用いたエンジンナセルからの騒音伝播解析」, 第44回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム2012, 2012年7月6日, 富山.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年月日：
 国内外の別：

○取得状況 (計 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 取得年月日：
 国内外の別：

[その他]
 ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐々木大輔 (SASAKI, Daisuke)
 金沢工業大学・工学部・講師
 研究者番号：60507903