

論文審査の結果の要旨

氏名 山下 礼

本論文は、「Full-Field Simulation for Sonic Boom Propagation through Real Atmosphere (実在大気中のソニックブーム伝播に関する全空間解析)」と題し、7章から成っている。

第1章は序論であり、研究の背景と目的を述べている。ソニックブームは、超音速で飛行する物体から発生した衝撃波が地上に到達して爆発音を発生させる現象であり、超音速旅客機運用の妨げとなっているだけでなく、隕石落下時に甚大な地上被害をもたらす自然現象としても、重要な研究課題である。従来解析法は、衝撃波を音波として扱う幾何音響学をベースに、簡易物理モデルを組み合わせたものであり、遷音速領域や極超音速領域で無視できない流れ場の非線形効果や、ブーム立ち上がり時間形成の主要因と言われている大気分子の振動緩和効果の考慮に問題があった。ここでは、近年のコンピュータや数値流体力学(CFD)の発達を背景とし、上記問題を解決するものとして、飛行体まわりから地上までの広大な空間をひとつの計算領域として扱う全空間解析(Full-Field Simulation)と呼ばれる新しい手法が提案されている。このフレームワークを構築し、ソニックブームで特徴的な1)ブーム立ち上がり時間の形成、2)低超音速飛行時特有のカットオフ、3)極超音速飛行時特有の波形の遷移、の現象を解明してその有用性を示すこと、が研究目的である。

解析法は第2章で詳しく説明されている。大気条件の高度による変化(層状性)を考慮するための重力項、および並進・振動エネルギー緩和項を含む酸素と窒素の振動エネルギー保存式を加えた圧縮性ナビエ・ストークス方程式が支配方程式である。予備計算結果を用いて特定した衝撃波面に格子を沿わせることで、衝撃波の数値的鈍りを防ぐ手法や、層状性による非一様大気中でも安定して計算を進めるための補正法、計算負荷軽減のための計算領域分割法など、新たに開発された数値計算法が説明されている。

第3章ではJAXAが実施したD-SEND#1飛行試験を模擬するための全空間解析を実施し、結果が飛行データとよい一致を示したことで、本法の妥当性を検証している。

第4章では、分子振動緩和による波形の遷移過程と立ち上がり時間の形成メカニズムが詳しく調べられている。高高度の低密度大気では緩和時間が長くなり、衝撃波後方の広い範囲で並進・振動エネルギー交換項による全体的な圧力低下が起こる反面、立ち上がり形状そのものへの影響は少ないこと、緩和時間が適度に短いと、衝撃波直後の限られた範囲で圧力上昇が緩やかなものとなり、立ち上がり時間が形成されること、などの重要な知見を得ている。実際の立ち上がり時間は、分子振動緩和による波形の鈍化効果と、非線形性による急峻化効果の複合により形成されるものであり、それらを同時に考慮できる全空間解析の有効性が強調されている。

層状大気では地上に向けて大気温度と音速が上昇し、局所マッハ数が低下する。第5章では、超音速飛行体のマッハ数が低い場合、上空で局所マッハ数が1となり、波が回折して地上までブームが到達しなくなるカットオフと呼ばれる現象を対象としている。全空間解析により、飛行体からの衝撃波が、上方に伝播する **outgoing wave** と、下方に伝播する **evanescent wave** に分裂する現象が再現されており、3次元空間構造が明らかにされている。

第6章では、極超音速飛行体から発生したソニックブームの伝播特性を解析している。飛行体形状として球を仮定し、飛行マッハ数が高くなると地上に伝播するブーム波形はN型からピークが1個のみのカレット型に遷移するという極超音速特有の現象を見出した。さらに、N型からカレット型への遷移が起こる条件を、飛行体からの距離と飛行マッハ数によって明らかにしている。この波形遷移は、2013年のチェリャビンスク隕石落下に際し、1個の隕石破片から発生した爆発音の回数が1回であったという事実を説明するものとなっている。

第7章は結論であり、本研究で得られた成果をまとめている。

以上要するに、本論文は、全空間解析という新しいフレームワークを構築して、実在大気中を伝播するソニックブームの直接シミュレーションに成功し、ブーム立ち上がり時間の形成メカニズムなどを明らかにし、さらに、将来の数値飛行実験の実現性を示した点で、先端エネルギー工学、特に高速空気力学に貢献するところが大きい。

なお、本論文の第2章から第6章は鈴木宏二郎氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となって解析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（科学）の学位を授与できると認める。

以上1972字