

## 論文の内容の要旨

論文題目     **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)

氏 名     山下 礼

ソニックブームは、超音速飛行時に発生した衝撃波が地上に爆発音を発生させる現象であり、高速輸送を妨げる大きな障壁となっている。現在、ICAO（国際民間航空機関）ではソニックブームの国際基準制定に向けた議論を進めているが、あらゆる条件下でのブーム強度を評価するためには多くの詳細なデータが必要である。そのため、NASAやJAXAではソニックブームの詳細なデータを取得するため飛行試験を実施し、同時にソニックブームの予測手法の開発も促進している。一方、ソニックブームは機体の超音速飛行時だけではなく、隕石落下時にも発生する。2013年にロシアのチェリャビンスクで観測された隕石の場合、ブーム強度がコンコルドの数10倍であったと推算されており、建物の損壊や多くの人的被害をもたらす結果となった。そのため、隕石落下時のブーム強度を事前に予測することは危機管理を行う上で重要である。しかし、隕石のブーム強度は主に自己相似解により簡易的に評価されており、大気の層状性など実在大気中の効果を考慮に入れた詳細な解析は実施できていない。

ソニックブームの予測手法は、主に超音速機のブーム強度を予測するために開発されてきた。その予測手法は衝撃波を音波として扱う幾何音響学をベースとしており、複雑な物理現象も簡易モデル化して扱っている。そのため、適用範囲に限界があり、以下のような問題がある。

- ・ 分子振動緩和、粘性、大気乱流など実在大気中の効果を正確に考慮できないため、予測結果が飛行試験の結果と必ずしもよく一致しない。
- ・ 機体の加速、旋回、低超音速飛行時に波線が集積して形成されるフォーカスブームの予測において、大気層状性など幾つかの重要な効果を考慮できない。
- ・ 極超音速流において表れる強い非線形性、熱化学非平衡性を考慮できないため、極超音速機や隕石のブーム強度を正確に予測できない。
- ・ 衝撃波の3次元性や地面の影響などを正確に扱うことができない。

以上から、あらゆる条件下でのブーム強度を評価するためには予測手法のさらなる改善が必要で

ある。そこで本研究では、飛行体から発生した衝撃波を地上まで直接CFD解析（全空間解析）するという新しい手法を提案した。全空間解析では、物理現象に基づいた厳密なモデルを支配方程式に組み込むことで、分子振動緩和など複雑な実在大気中の効果を正確に扱うことができる。また、低超音速から極超音速までの全速度域に適用可能で、衝撃波の3次元構造や地形の影響なども考慮できる。以上から、全空間解析は上述した問題点を全て改善できるポテンシャルを備えており、実際の飛行試験を正確に模擬するための数値飛行実験も実施できると考えられる。さらに、流れ場全体の詳細なデータを取得できるため、立ち上がり時間の形成メカニズムなど未解明のソニックブーム現象を調査する上でも有望なアプローチになると期待される。

全空間解析を実施するための条件は、実在大気中の効果を考慮に入れること、全計算領域で衝撃波を正確に捕獲すること、膨大となる計算負荷を現実的な計算時間に抑えることである。しかし、上記の点を全て満足するのは難しく、過去に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例はなかった。そこで本研究の目的は、上記の点を全て満足した全空間解析という新しいフレームワークを構築し、以下の現象を解明することである。

- ・ 分子振動緩和による立ち上がり時間の形成メカニズム
- ・ 低超音速飛行時特有のカットオフ現象
- ・ 極超音速飛行時特有の波形の遷移現象

そして、全空間解析手法があらゆる条件下での数値飛行実験を行う上で有望なアプローチであることを明らかにする。以上の内容を、第1章に記述した。

第2章では、全空間解析手法を構築した。本手法のベースとなる支配方程式は、3次元Navier-Stokes方程式に大気の層状性を考慮に入れるための重力項、及び熱的非平衡モデルを加えた式である。熱的非平衡モデルでは、並進-振動エネルギー交換反応をLandau-Tellerの緩和式で評価し、 $O_2$ と $N_2$ の分子振動緩和効果を考慮した。支配方程式の解法はリーマンソルバーに基づいており、圧縮性流体のCFD解析でよく用いられる解法を適用した。しかし、層状大気を考慮に入れた場合、リーマンソルバーでは高度に応じた大気物性の変化を不連続面として捕えてしまい、非物理的な波動が誘起されてしまう。この影響を最小限に抑えるため、初期値からの変動成分を計算する数値的補正法を構築した。また、予備計算結果を基に衝撃波の位置を特定し、全計算領域で適合格子を形成する手法、及び計算領域を分割することで計算負荷を軽減する手法を構築した。その結果、全計算領域で衝撃波を高精度で捉えることに成功し、現実的な計算時間で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を可能にした。

第3章では、全空間解析の精度を検証するため、JAXAが実施したD-SEND#1の飛行試験を模擬した。その結果、熱的平衡を仮定した全空間解析の精度は、ソニックブームの代表的な予測手法の一つである波形パラメータ法と同等であった。また、熱的非平衡流解析で得られた圧力波形は、ソニックブームの立ち上がり時間も含めて飛行試験結果と良く一致した。以上より、本研究で構築した大気の層状性を考慮に入れるための数値的補正法、及び適合格子形成手法の有効性が確認された。そして、全空間解析は、実在大気中のソニックブーム伝播を評価する上で十分有効な解析精度に達していることを明らかにした。この結果を踏まえ、第4章から第6章では構築し

た全空間解析手法を適用し、未解明のソニックブーム現象、及び全空間解析手法の全速度場への適用性を調査した。なお、第4章から第6章では適用する問題に応じて支配方程式を簡略化することで、効率的に解析を実施した。

第4章では、分子振動緩和による波形の遷移過程、及び立ち上がり時間の形成メカニズムを解明するため、第3章で実施した解析に加え、3つの異なる一様大気条件で $O_2$ のみ、 $N_2$ のみ、及び $O_2$ と $N_2$ の緩和効果をそれぞれ考慮した解析を実施した。そして、圧力波形と並進-振動エネルギー緩和項の大きさを比較することで、分子振動緩和の影響を調査した。その結果、緩和時間が長い場合、並進-振動エネルギー交換反応がゆっくり励起されるため、衝撃波後方の広い範囲で圧力上昇値は低下したが、立ち上がり時間は形成されなかった。一方、緩和時間が短い場合、並進-振動エネルギー交換反応が速く励起されるため、衝撃波直後の狭い範囲で圧力上昇値が大きく低下し、立ち上がり時間が形成された。上記の結果は、分子振動緩和の強さが並進-振動エネルギー交換量の大きさ、及びエネルギー交換に要する時間によって評価できることを示している。また、波形の遷移過程は振動緩和時間によって分類できることを明らかにし、分子振動緩和が波形に及ぼす効果を明確化した。さらに、一様大気の場合、立ち上がり時間は遠方にかけて単調増加するが、層状大気の場合、地上にかけて緩和時間が短くなるため、立ち上がり時間が増減することを明らかにした。

第5章では、全空間解析により、低超音速飛行時に発生したソニックブームの伝播特性を調査した。層状大気中では、地上にかけて大気温度が上昇し、局所マッハ数が低下する。そのため、低超音速飛行時に発生した衝撃波は局所マッハ数が音速に達すると回折し、地上まで到達しなくなる。この現象はカットオフと呼ばれ、カットオフが起きる場合、現在制限されている陸上での超音速飛行が緩和される可能性が高い。その点を踏まえ、NASAはソニックブームのカットオフを調査するために飛行試験を実施したが、カットオフの詳細なシミュレーションは実施できていない。そこで本章では、低超音速飛行する回転放物面体まわりの流れ場を対象に、カットオフの全空間解析を実施した。その結果、回転放物面体から発生したincoming waveは、カットオフ領域での回折効果により、上方に伝播するoutgoing waveと下方に伝播するevanescent waveに分裂することを確認した。また、カットオフ領域で発生するフォーカスブームの強度や、evanescent waveの伝播特性、カットオフ面の3次元構造を明らかにした。以上より、全空間解析がカットオフの解析に適用できることを実証した。

第6章では、全空間解析により、極超音速飛行時に発生したソニックブームの伝播特性を調査した。通常、超音速機から発生するソニックブームの圧力波形は遠方場でN波になり、爆発音が2回観測されるが、チェリャビンスク隕石では一つの隕石の破片から発生した爆発音の回数が1回であったと推測される。そこで、超音速から極超音速の複数の飛行マッハ数で全空間解析を実施し、球体から発生した圧力波形のマッハ数依存性を調査した。その結果、飛行マッハ数が高くなると、爆発音の回数が2回のN波から一回のcaret波に遷移するという極超音速特有の現象を明らかにした。また、衝撃波の軌跡を追跡することにより、N波からcaret波への遷移曲線を取得し、実際の衝撃波角とマッハ角の変化を比較することで、波形の遷移メカニズムを解明した。以上よ

り，全空間解析が極超音速飛行時のソニックブーム伝播解析に適用できることを実証した．

最後に第7章では，結論を記述した．本研究では全空間解析という新しいフレームワークを構築し，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世界で初めて成功した．そして，構築したフレームワークを適用することで，立ち上がり時間の形成メカニズム，低超音速飛行時のカットオフ現象，極超音速飛行時特有の波形の遷移現象を解明した．上記の結果は，全空間解析手法があらゆる条件下での数値飛行実験を行う上で有望なアプローチであることを示唆している．