

令和 2 年 4 月 1 日

海外特別研究員最終報告書

独立行政法人日本学術振興会 理事長 殿

採用年度 平成 30 年度

受付番号 201860071

氏 名 山下 礼

(氏名は必ず自署すること)

海外特別研究員としての派遣期間を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。

なお、下記及び別紙記載の内容については相違ありません。

記

1. 用務地（派遣先国名）用務地： ケンブリッジ （国名： 英国 ）

2. 研究課題名（和文）※研究課題名は申請時のものと変わらないように記載すること。

解適合格子を用いた全空間解析によるソニックブームの消失メカニズム解明3. 派遣期間： 平成 30 年 4 月 1 日 ~ 令和 2 年 3 月 31 日

4. 受入機関名及び部局名

Department of Physics, The University of Cambridge5. 所期の目的の遂行状況及び成果…書式任意 書式任意 (A4 判相当 3 ページ以上、英語で記入も可)

(研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等)

(注)「6. 研究発表」以降については様式 10-別紙 1~4 に記入の上、併せて提出すること。

研究目的

ソニックブームは、超音速機から発生する衝撃波が地上に到達し、爆発音をもたらす現象であり、陸地上空を超音速飛行するために解決しなければならない課題の一つである。ソニックブームの予測手法は幾つか考案されてきたが、飛行試験以外では評価できない未解明の現象がある。斜め下方に伝播する衝撃波が大気温度の変化により回折し、上空に戻っていく現象（横方向カットオフ）はその一つである。回折領域では衝撃波が集積し、通常の数倍程度のソニックブーム強度になる場合があり、回折せずに透過した波はシャドーズーン（衝撃波が伝播しない領域）を伝播して消失する。そのため、ソニックブームの影響範囲を特定する上で、横方向カットオフ現象、及び透過波の伝播特性（衝撃波の消失メカニズム）の解明は不可欠である。以上を踏まえ、本研究の目的は解適合格子（Adaptive Mesh Refinement: AMR）を用いた全空間解析手法（高高空で発生した衝撃波を地上まで数値流体力学（CFD）解析する手法）を構築し、実在大気中を伝播するソニックブームの消失メカニズムを解明することである。具体的な内容は、以下の 3 点である。

(1) 解適合格子を用いた全空間解析手法の構築

(2) 解析精度の検証、及び 3 次元機体形状に対する適用性の実証

(3) 横方向カットオフ現象、及び透過波の伝播特性を解明し、次世代超音速機の開発に貢献

研究成果

(1) 解適合格子を用いた全空間解析手法の構築

解適合格子を用いた全空間解析手法を構築した。本手法は、衝撃波を高精度で捕えることができる航空宇宙工学の解析手法と、広い計算空間で実際の大気環境を再現できる気象解析手法を融合したものであり、以下に示す4つの手法が組み込まれている。

- (i) 衝撃波や圧縮波、膨張波などの波動が伝播する領域で、直交格子を局所的に細分化する patch-based AMR (Adaptive Mesh Refinement) 法
- (ii) 直交格子で複雑形状を再現するためのカットセル法、及び Ghost-fluid 法
- (iii) 数 10 km 以上に亘る計算領域を分割することにより、計算負荷を軽減するための計算領域分割法
- (iv) 高度に応じて大気圧、大気温度、大気密度が変化する層状大気を考慮する上で必要となる well-balanced 法 (離散化された格子点上で局所的に静水圧平衡を満たすための手法)

ここで、(i)から(iii)は航空宇宙工学、(iv)は気象学の解析でそれぞれ用いられてきた手法がベースとなっている。本研究では、層状大気中を伝播する衝撃波を高精度で捕えるために、各手法に修正を施している。層状大気の場合各セルの大気条件が高度に応じて変化するため、解適合格子法やカットセル法、Ghost-fluid 法を適用する際、非物理的な波動の発生を防ぐ必要がある。そこで、解適合格子法に関しては、細分化した細かい格子とベースとなる荒い格子の間でデータを内挿あるいは外挿する際、一様流条件からの変動成分のみを扱うことで上記の問題を回避した。カットセル法及び Ghost-fluid 法による物体まわりの計算では、飛行体近傍の流れ場は大気の層状性による影響をほとんど受けないことを考慮し、重力項を無視することで、一様大気の場合と同様の手法を適用した。また、well-balanced 法に関しては、空間精度を高次精度化する際、各セルで局所的に静水圧平衡を満たすための hydrostatic reconstruction と高次精度化のための piecewise reconstruction を同時に満足しなければならないが、高次精度 well-balanced スキームは十分に確立されていない。本研究では、通常の物理量の代わりに、一様流条件からの変動成分を用いて piecewise reconstruction を行うことで、空間2次精度、時間2次精度の well-balanced MUSCL-Hancock スキームを構築して適用した。

(2) 解析精度の検証、及び3次元機体形状に対する適用性の実証

構築した全空間解析手法の解析精度を検証するために、テスト計算を実施した。テスト計算では、一様大気と層状大気を想定した計算をそれぞれ実施し、解析結果を比較検討することにより、層状大気中を伝播する衝撃波の解析精度を詳しく検証した。

・ 2次元解析

くさびから発生する斜め衝撃波を解析対象とし、2次元オイラー解析を実施した。その結果、解析結果が斜め衝撃波の厳密解と良く一致することを確認し、一様大気中だけでなく、層状大気中においても高精度で衝撃波を捕えることに成功した。層状大気中を伝播する斜め衝撃波に対して、解析結果と厳密解の比較を行った例はこれまでになく、解析精度を検証する上で有用な新しい検証問題を提案できたと考えている。

- ・ 2次元軸対称解析

2次元解析では、波の幾何的な拡散効果を考慮に入れることができなかったため、2次元軸対称解析を実施した。ただし、2次元軸対称解析では、層状大気を考慮に入れることができないため、一様大気を想定し、物体近傍のみ解析を実施した。解析対象は Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) が実施した Drop test for Simplified Evaluation of Non-symmetrically Distributed sonic boom (D-SEND) #1 の飛行試験モデルである N-Wave Model (NWM)まわりの流れ場とし、2次元軸対称オイラー解析を実施した。その結果、過去の構造格子を用いた解析結果とよい一致を示したことで、波の幾何的な拡散効果を正確に考慮できていることを確認した。本解析では、リーマン解法（厳密リーマン解法、HLLC 法）、計算スキーム（2次精度 MUSCL-Hancock 法、3次及び5次精度 MPWENO 法）、制限関数（minmod, superbee）の比較もそれぞれ実施した。リーマン解法に関しては、HLLC 法の場合厳密リーマン解法に比べて計算速度は速くなるが、解析精度の低下が大きく、厳密リーマン解法の方がソニックブームの解析に適していることを確認した。計算スキームと制限関数に関しては、格子数が同じ場合、5次精度 MPWENO 法が最も解析精度は高いが、格子数に対する計算時間と解析精度の関係から、MUSCL-Hancock 法と superbee limiter を組み合わせて用いるのが最も適していることが分かった。また、解適合格子の階層（細分化のレベル）と解析時間の関係を明らかにするため、最小格子幅を一定とし、階層を変化させた場合の解析精度と解析時間を調査した。解析精度に関しては、階層によらず同一の結果を得ることができた。解析時間に関しては、階層を上げるほど総格子数は少なくなるが、階層を上げすぎると計算時間が逆に長くなったことから、解適合格子を用いた計算では適切な階層を選定する必要があることを確認した。

- ・ 3次元解析

2次元軸対称解析の結果を踏まえ、NWM まわりの流れ場に対する全空間解析（飛行高度から地上までの直接シミュレーション）を実施した。飛行試験の条件を基に飛行条件及び大気条件を設定し、一様大気及び層状大気を想定したオイラー解析を行った。衝撃波の総伝播距離は約 10 km であり、総格子数は約 5 億点となったが、計算領域分割法を適用することで、現実的な時間での計算が可能となった。解析結果は、波形パラメータ法による結果及び飛行試験結果とよく一致しており、一様大気中だけでなく層状大気中を長距離伝播する衝撃波も高精度で捕えることに成功した。このことから、解適合格子を用いた全空間解析手法を確立できたと考えている。また、本研究の目的である横方向カットオフ現象を調査するためには、横方向に湾曲する衝撃波を捕える必要があるが、構築した全空間解析手法により波動が伝播する全ての領域に適合した格子形成が可能であることを確認した。上記の成果を纏めた論文は、Journal of Computational Physics (Vol. 408, Article 109271, 2020)に掲載された。

3次元機体形状まわりの解析への適用性を確認するため、JAXA が実施した Gripen による Airborne Blimp Boom Acquisition (ABBA)飛行試験を再現するための計算を実施した。機体の形状は、stl (Stereolithography) 形式の機体形状ファイルを計算コードに読み込み、解析条件は ABBA の飛行試験条件に設定している。解析結果は波形パラメータ法による結果とよく一致したため、複雑形状まわりの流れ場に対する適用性は確認できた。しかし、全空間解析では考慮できていないエンジン排気の影響などが原因で飛行試験結果との一致は得られなかった（エンジン排気の影響の考慮については、今後の課題である）。そこで、解析精度をより正確に検証するため、First AIAA Sonic Boom Prediction Workshop (SBPW1) で解析対象となった Delta Wing Body (DWB)についての解析を追加で実施した。その結果、物体近傍の圧

力波形は風洞試験の結果とよく一致し、地上での遠方場圧力波形は波形パラメータ法の結果、及び SBPW1 で報告された結果ともよく一致した。そのため、本研究で想定していた複雑形状まわりの流れ場に対する適用性は十分に確認できたと考えている。

（３）横方向カットオフ現象、及び透過波の伝播特性の調査

回転放物面体まわりの流れ場を対象に、横方向カットオフ現象、及び透過波の伝播特性を調査した。まず、全空間解析により、斜め下方に伝播する衝撃波が大気温度の変化により回折し、上空に戻っていく現象（横方向カットオフ）が捕らえられることを確認した。横方向カットオフ現象は、従来の１次元、及び２次元のソニックブーム予測手法では解析困難であり、本研究で用いた全空間解析は次世代超音速機の開発において重要な新しい解析ツールになると考えられる。ただし、AMR を用いた直交格子による解析では計算コストが膨大となり、現実的な計算時間で十分な解析精度を維持するのが難しかった。そのため、階層を持たない衝撃波適合格子（衝撃波に厳密に沿った格子）による全空間解析も併せて実施し、カットオフ現象の詳しい調査を行った。その結果得られた知見を以下に示す。

- ・ 超音速飛行体から発生した **Incoming wave** は、カットオフにより、上空に戻っていく **Outgoing wave** と **Shadow zone** を伝播する **evanescent wave** に分裂する。
- ・ **Evanescent wave** の形状は、不連続な変化を伴う尖った波形から連続的に変化する丸まった波形へと変化する。このような波形の変化は、飛行試験でも度々確認されており、カットオフ現象を忠実に再現できていることを示唆している。**Evanescent wave** は指数関数的に減衰するため、カットオフ後の波はすぐに消失する。
- ・ ３次元空間内で横方向カットオフが起きる位置を抽出した結果、下に凸型の３次元曲線が得られた。この曲線は波線解析で得られる **Caustic** と一致しており、波線解析が横方向カットオフ現象の簡易評価に役立つことを明らかにした。
- ・ 機体直下で起きるマッハカットオフでは、回折領域で衝撃波が集積するため、通常の数倍程度のソニックブーム強度になる。一方、飛行経路から離れた横方向カットオフでは、地上で回折した **Outgoing wave** が上空でのみ **Incoming wave** と干渉する。そのため、横方向カットオフ時には、地上では衝撃波の集積が見られず、上空のみでソニックブーム強度が増幅する。横方向カットオフ時に波の集積が起こるか否かという議論は度々行われてきたが、本研究結果はこの議論を収束させるのに大いに役立つと考えられる。

以上から、当初予定していた項目に加え、必要に応じて追加計算や別の手法も駆使することで、所期の目的は十分に達成できたと考えている。また、本研究で構築した全空間解析手法を適用し、建物まわりを伝播するソニックブームを解析するなど、さらなる応用研究にも着手した。こうした応用研究に関しては、受け入れ先の研究者とのディスカッションで新たに生まれたものであり、海外特別研究員の任期終了後も共同研究として続けていく予定である。

学会誌への発表

渡英前に実施した研究を纏めた論文が 2 本、日本航空宇宙学会(JSASS)の国際論文である Transactions of JSASS と Elsevier の Aerospace Science and Technology に掲載された。前者は、本研究で扱っているソニックブームの全空間解析手法を隕石落下時の爆風に適用して得られた数値解析結果であり、2013 年にロシアのチェリャビンスクで観測された隕石落下時の爆風を再現している。後者は、本研究の事前検討として実施した、衝撃波適合格子による横方向カットオフの解析結果である。

渡英後の成果を纏めた論文が 1 本、Journal of Computational Physics に掲載された。本論文では、AMR を用いた全空間解析手法について記載している。また、残りの成果を纏めた論文を執筆中であり、国際誌に投稿予定である。

ICAS-IFAR award の受賞

本研究の内容は、渡英前に構築してきた全空間解析手法をさらに発展させるものであるが、その元となった博士論文 (Full-field simulation for sonic boom propagation through real atmosphere) の内容が評価され、ICAS-IFAR award を受賞した。ICAS-IFAR Award は、2 年に一度、International Forum for Aviation Research (IFAR) に所属する 26 ヶ国の加盟機関が、博士論文を通して航空科学の発展に大きく寄与した 40 歳未満の若手研究者を各 1 名選定し、International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS) がその中から 1 名を受賞者として表彰する賞である。受賞式は 2018 年 9 月 9 日から 14 日までの 6 日間にわたりブラジルのベロオリゾンテで開催された第 31 回国際航空科学会議ベロオリゾンテ大会 (ICAS 2018) で行われ、受賞記念講演として博士論文の内容も発表した。受賞記念講演は好評であり、本講演を拝聴された研究者の方から後日依頼され、2018 年 10 月 18 日には IFAR が主催している IFAR Virtual conference において、再度博士論文の内容を発表する機会が得られた。

Lindau Nobel Laureate Meeting への参加

39 人のノーベル賞受賞者と世界 89 か国から 580 人の若手研究者が集まった Lindau Nobel Laureate Meeting に参加した。ノーベル賞受賞者の講義、ディスカッション、science walk、boat tour など盛り沢山の内容で非常に多くの刺激を受けた。この会議では、30 人しかできないポスター発表者の一人に選ばれ、ノーベル賞受賞者及び若手研究者の前で発表する機会を得た。物理学を専門とする会議であったため、私の専門である航空工学とはかけ離れていたが、異分野の方々との交流は新鮮であった。詳細は Lindau Nobel Laureate Meeting の参加報告書に掲載されている。