

令和 6 年 6 月 28 日現在

機関番号：33924

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18777

研究課題名（和文）極超音速流中での水の相変化と着氷現象解明に向けた先端的研究

研究課題名（英文）Surface icing and phase change of water in hypersonic flow

研究代表者

渡邊 保真（Watanabe, Yasumasa）

豊田工業大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：60736461

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：音速の数倍で航行する、将来型極超音速輸送機で着氷が発生した場合、空力特性や運行の安全性へと影響を与えるため、高速気流中での水・氷の挙動を解明する必要がある。風洞実験では、極超音速機形状を単純化した模型表面と周囲での水及び氷の挙動を観測した。実験の結果、翼前縁で着氷を生成しやすい亜音速旅客機とは異なり、極超音速流れでは膨張波とその下流での温度の急速低下により、下流側機壁で着氷を生成しやすい事が判明した。水の挙動を予測する為、水滴の移流及び極超音速流れに着目し現象の数値シミュレーションモデルを提案した。解析結果は実験結果と良い一致を示し、将来の極超音速機の着氷防止基礎技術としての応用が期待できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

基礎化学的な水の非平衡相変化、物理学的な高速流体現象、そして壁面上の着氷現象という応用理工学が密接に関連した複合分野である極超音速機着氷現象に於いて、現象を定量的に観測しその特徴を解明し、着氷の形成しやすい条件の特定、簡易解析モデル構築により、水の高速気流との干渉現象を明らかにした事が学術的意義である。

水の相変化と高速気流干渉現象に対する解析手法により、水を素材・溶媒として用いる創薬・新材料開発分野に対しても、高速かつ柔軟な溶媒状態変化を利用した新たな材料合成手段への可能性を示す点で産業波及効果が期待でき、更に将来型航空機での着氷予測の基礎技術として安全安心な航行に資する点が社会的意義である。

研究成果の概要（英文）：Phase change of water and icing in hypersonic flow can affect aviation safety and aerodynamic characteristics of supersonic/hypersonic transport. Behavior of gas/liquid/solid water was measured in hypersonic wind tunnel tests and was characterized by experimental data. Unlike in subsonic aircrafts where icing tends to take place around leading edge of wings, ice layers were formed mostly near the trailing edge in hypersonic flow due to rapid change in flow temperature past expansion waves. Numerical simulation model for water droplet and air/vapor flow was proposed and its result showed a good agreement with findings in wind tunnel tests.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：極超音速 相変化 水 着氷

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

水は身近な物質であるものの、その航空分野への影響調査と研究は未だに黎明期に当たる。昨今は特に航空機への着氷現象が問題視されているが、その現象予測は実験的にケースバイケースで進められており理論的着氷モデルは未だに確立されていなかった。航空宇宙分野の事故としては例えば航空機 ATR72 型機において着氷による揚力喪失で墜落事故が 4 件発生するなど、航空輸送の安全安心を担保する上で着氷現象の解明と着氷回避のための条件特定は喫緊の課題であった。特に研究代表者が専門とする高速空気力学分野では、昨今日米欧各国で盛んに音速の数倍(超音速・極超音速)で航行する高速輸送機が設計されている。炭化水素燃料の燃焼で水蒸気を多く含む超音速エンジン排気に晒される機体表面では着氷リスクがあるにも拘わらず、このような高速気流条件下での着氷現象とそのリスク予測は、研究提案当初は手付かずの状態であった。

超音速・極超音速環境での着氷現象においては、その着氷メカニズムと着氷条件だけではなく、高速気流に特有の極限環境に留意する必要がある。特に航空機周りを高速で流れる水蒸気がよどみ点での高温高圧(十数気圧・約千°C)から後流近くでの低温低圧(0.1 気圧以下・-50°C)までの状態変化に要する時間は数十マイクロ秒から数十ミリ秒と極めて短時間であるため、水の状態図に表されるような平衡変化ではなく非平衡変化を引き起こしつつ、さらに衝撃波などの状態量の不連続変化を伴う複雑な高速流れと強く干渉する。そのため、本現象の解明には高速流体力学、応用熱力学、相変化の基礎化学等に多分野に渡る学際的な新しいアプローチによる取り組みが必要であった。

2. 研究の目的

以上のような背景のもと、本研究の目的は、高速気流中での水の相変化現象を明らかにする事である。それにより将来型高速・極超音速輸送機における着氷条件を特定し、着氷の影響を受けず安全に飛行可能な気流・湿度条件を解明することで、将来型航空機の安全性向上に資する。

具体的には、極超音速流れの圧力・温度・容積絶対湿度に対し、気流中に設置した模型に着氷が生成され、あるいは高速気流により着氷が融解・再凝固するときの気流・壁温条件の関係を実験により定量的に明らかにする。同時に、気流中の水の相変化と着氷生成に対する解析・予測モデルの提案と検証を行う。

3. 研究の方法

実験的なアプローチ:

水の極超音速気流中における挙動を解明するため、極超音速機形状を単純化したダイヤ型模型などを用い、表面に投入された液体及び気体の水がどのように移流し氷を生成し得るのかを実験により観測した。この時、気流条件(よどみ点温度・圧力、レイノルズ数、マッハ数)と水の温度、質量流量、空間分布、着氷位置の関係を明らかにする。実際には、実験実施設備である東京大学極超音速高エンタルピー風洞において、前縁及び後縁に 30 度の半頂角を有するダイヤ型模型等を投入し、模型前方にエンジン排気や一様流からの流入を模した水を投入し、そのときの水と空気の状態量や水の表面分布、着氷位置との関係を各種気流条件ごとに整理しその関係を求める。実験における気流条件は風洞が動作可能なマッハ数 7、よどみ点温度やく 600K とし、高輝度 LED による散乱光観測やシュリーレン法による流れ場可視化、水滴分布定量化を通して水の挙動を観測した。

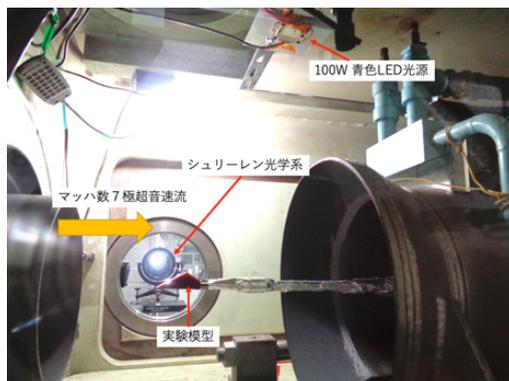


図1 実験の概要: (a) 実験模型と風洞装置の測定部

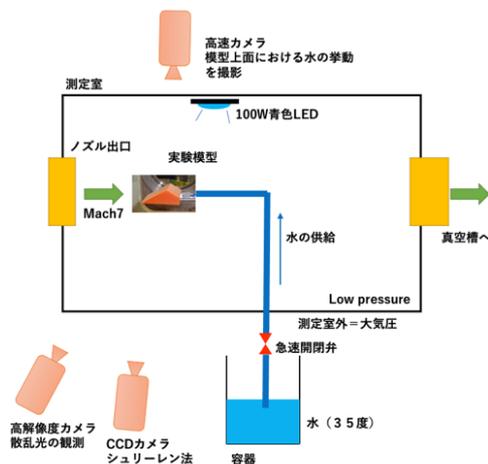


図1 実験の概要： (b)計測システムの概要

解析的なアプローチ：

基礎化学的な水の非平衡相変化、物理学的な高速流体现象、そして壁面上の着氷現象という複合的な現象を解析する必要がある。本研究では、流れ場については航空宇宙工学分野で使用される複数化学種に対する3次元非定常 Navier-Stokes 方程式を用いて解析を行った。また、水滴の挙動については、粒子法を応用した代表粒子の挙動を時々刻々解くことにより推算した。実験結果から、また、当初予想された通り、水はダイヤ型模型の頂点から発生する膨張波を通過した後、急速な温度低下を起こし、極めて着氷を生成しやすい状態となり、特に模型後縁で氷の生成が見られた。このことから、模型後縁に過冷却となった水滴が衝突した際に着氷が生成するとみなし簡易解析モデルを構築した。各種気流条件、水状態量ごとに、解析結果を実験と比較することで着氷生成の傾向を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 極超音速気流中での水の挙動の解明

極超音速気流における水の挙動をシュリーレン法による可視化、高輝度 LED による散乱光観測などにより計測した結果、通常気流温度が高温となる模型前方では、水は常に液体及び気体の状態を保ち、逆に、模型の頂点を越えて膨張波を通過すると水滴の増加が観測された。また、前方では極超音速流れと水の干渉による弓状の衝撃波が形成され、その背後で水滴は強い力を受けて下流側へと移流した。また、模型後縁では顕著な着氷の形成が見られ、時間と共に発達した。極超音速気流中での相変化も見られたが、機体表面を流れることで水が下流に移流し、着氷を形成するといったプロセスも同時に観測された。水の流れと極超音速流れとの干渉から、模型表面においては弓状の剥離領域も形成され、この剥離に沿って衝撃波も生成されていたと考えられる。衝撃波背後では温度が急速に上昇することから、この弓状衝撃波背後では水は液体及び気体の状態を保っていたと考えられる。

極超音速気流現象では、気流温度が衝撃波や膨張波といった波を介して不連続かつ急激に変化することから、通常の亜音速飛行を行う航空機の場合とは大きく異なり、極めて限定的な領域で着氷が急速に進行し得ることが判明した。

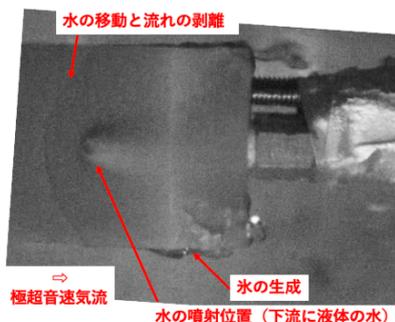


図2 模型表面での水の挙動

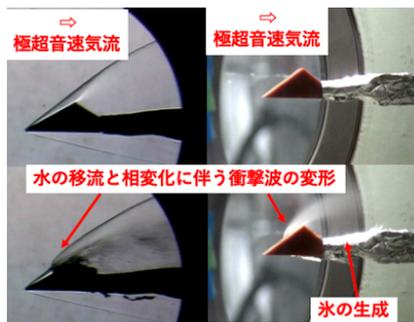


図3 着氷の生成と流れ場変化

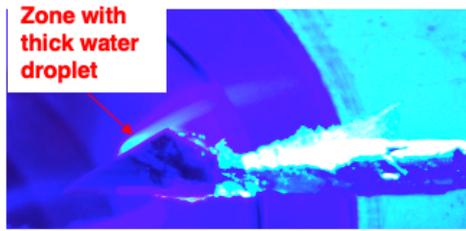


図4 水滴分布計測結果の一例

(2) 極超音速流れにおける水の挙動に関する数値解析

水の挙動を予測する為、水滴の移流及び極超音速流れに着目し現象の数値シミュレーションモデルを提案した。解析の結果、実験で観測された模型前方での水の移流、極超音速流れとの干渉による模型上方の弓状衝撃波の生成、模型表面における弓状剥離領域の生成について、実験結果と定性的に良い一致を示した。特に、水の分布については粒子法に基づく計算結果から分布を算出したところ、実験での分布計測結果とも良い一致を示した。ただし、模型表面の境界層内を移流する極めて薄い水の層については、着氷に伴う表面形状の変化を加味したより高度な解析モデルを使用することで精度良く推算できるものであると考えられる。下流側では流れの温度が急減少するため、着氷を生成しやすく、実験結果とも整合していると考えられる。今回提案した簡易解析モデルは、将来の極超音速機の着氷防止基礎技術としての応用が期待できる。

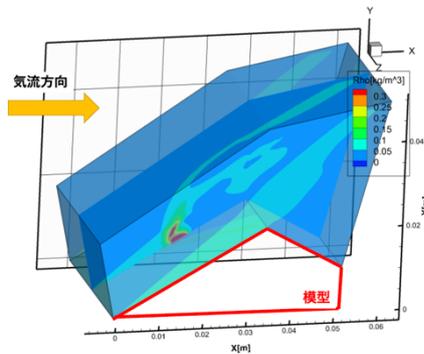


図5 流れと水の干渉計算の一例

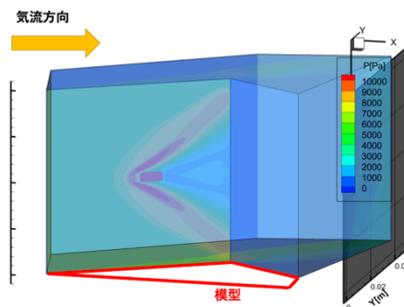


図6 圧力分布の一例

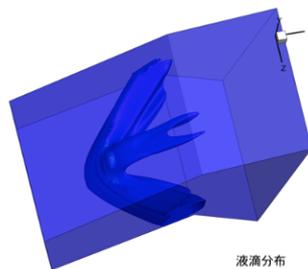


図7 模型表面での液滴分布の一例

得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

基礎化学的な水の非平衡相変化、物理学的な高速流体现象、そして壁面上の着氷現象という応用理工学が密接に関連した複合分野である極超音速機着氷現象に於いて、現象を定量的に観測しその特徴を解明し、着氷の形成しやすい条件の特定、簡易解析モデル構築により、水の高速気流との干渉現象を明らかにした事が学術的意義である。

水の相変化と高速気流干渉現象に対する解析手法により、水を素材・溶媒として用いる創薬・新材料開発分野に対しても、高速かつ柔軟な溶媒状態変化を利用した新たな材料合成手段への可能性を示す点で産業波及効果が期待でき、更に将来型航空機での着氷予測の基礎技術として安全安心な航行に資する点が社会的意義である。

以上が本研究成果の要点である。詳細については、本研究期間に発表した主な論文を参照していただきたい。また、成果全体については別紙の研究成果リストに記載の発表論文および講演会論文を参照していただきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 渡邊保真
2. 発表標題 極超音速気流中で膨張波を通過する水の挙動に関する数値解析
3. 学会等名 第66回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡邊保真
2. 発表標題 マッハ5 極超音速風洞の製作・放電気流制御と着氷研究
3. 学会等名 令和4年度極超音速統合制御実験研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasumasa Watanabe, Kojiro Suzuki
2. 発表標題 Fundamental study on icing and phase change of water along compression and expansion surfaces in Mach-7 hypersonic flow
3. 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Science, 10th Nano- Satellite Symposium & 14th IAA Low-Cost Planetary Missions Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasumasa Watanabe
2. 発表標題 Study on water-ice behavior and subsequent water-flow interaction in Mach-7 hypersonic flow
3. 学会等名 34th International Symposium on Space Technology and Science, 12th Nano- Satellite Symposium (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡邊保真
2. 発表標題 放電プラズマを利用した燃料点火とそれによる高速気流制御に関する基礎研究
3. 学会等名 第67回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>研究者プロフィール https://tiris.toyota-ti.ac.jp/html/100000074_ja.html その他、本研究に関する発表論文等 https://researchmap.jp/ywatana1</p>
--

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------