

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 12 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25286101

研究課題名(和文) マルチフィジックスCFDによる圧縮機におけるアイスクリスタル着氷現象の数値的解明

研究課題名(英文) Numerical Clarification of Ice Crystal Icing Phenomena in Compressor Using Multi-Physics CFD

研究代表者

山本 誠 (Yamamoto, Makoto)

東京理科大学・工学部・教授

研究者番号：20230584

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,400,000円

研究成果の概要(和文)：アイスクリスタル着氷は、ジェットエンジン圧縮機内部の主流静温が30 程度の領域で発生する。発生メカニズムが全く不明であり、これまでの着氷予測数値シミュレーションにおいては完全に予測対象外であった。したがって、アイスクリスタルを再現・予測できる新たな物理モデルおよび数値シミュレーション手法の開発が強く求められていた。

本研究では、まず、アイスクリスタル着氷に対してマルチフィジックスモデルを提案し、アイスクリスタル着氷現象の物理的特性を数値的に解明した。最終的に、開発したコードをジェットエンジンの圧縮機に適用し、アイスクリスタル着氷に関する流体力学的な知見と設計指針を提供した。

研究成果の概要(英文)：Ice crystal icing occurs in a multi-stage compressor of a jet engine, in which static temperature is about 30 degree C. The mechanism of ice crystal icing has not been well understood, and existing icing models cannot predict the icing. Therefore, a new physical model and numerical procedure for ice crystal icing have strongly been needed.

In the present study, first, I proposed a new multi-physics model for ice crystal icing, and using the model, I investigated the characteristics of ice crystal icing. Finally, applying the developed code to a multi-stage compressor of a jet engine, I obtained aerodynamic insights of ice crystal icing in the compressor, and provided some information on anti-ice crystal icing.

研究分野：計算力学

キーワード：計算力学 マルチフィジックス アイスクリスタル着氷 ジェットエンジン 圧縮機

1. 研究開始当初の背景

着氷は、空気中の過冷却水滴が壁面に衝突し、壁面上に氷層を形成する現象である。風力タービン、発電用ガスタービン、航空機、ジェットエンジン等における着氷の発生（氷層の形成）は、翼、機体、圧縮機動静翼等における空力性能の著しい低下、各種センサーの機能喪失を引き起こすほか、はく離した氷片による機械内部の物理的損傷等、きわめて深刻な影響をもたらす、しばしば大事故に至ることが知られている。設計・運転段階で着氷現象を考慮して対策を施すことは、発電用ガスタービンや風力タービンにおいては運転効率を高めてエネルギーの効率的生産に寄与する上で、また、航空機やジェットエンジンにおいては運航の安全性向上や燃費の向上に寄与する上で、きわめて重要な技術課題となっている。しかし、着氷現象は、流体挙動（圧縮性空気流）、水滴挙動、氷層成長による形状変化が相互に干渉して起こる典型的なマルチフィジックス現象であり、実験によって着氷現象を繰り返し再現することは容易ではない。また、地上での模擬実験や実機を用いた飛行実験では、多額な費用を要し、危険を伴うことになる。このため、さまざまな気象条件や水滴条件における着氷現象を正確に再現できる着氷モデルと着氷シミュレーション手法の構築が求められ、NASA（米）や ONERA（EU）を中心に世界中で精力的に研究開発が進められている。

着氷現象は、4形態（霧氷、雨水、スプラッシュ着氷、アイスクリスタル着氷）に分類できる。本研究の対象であるアイスクリスタル着氷は、ジェットエンジン多段圧縮機内部の主流静温が 30℃程度の領域で発生する。30℃という高温での氷層の形成はこれまで予想外の現象であり、最近、事故事例が報告されたことにより注目を集めている。発生メカニズムが全く不明であり、これまでの着氷予測数値シミュレーションにおいては完全に予測対象外であった。したがって、アイスクリスタルを再現・予測できる新たな物理モデルおよび数値シミュレーション手法の研究開発が強く求められていた。

2. 研究の目的

本研究では、アイスクリスタル着氷に対してマルチフィジックスモデルを構築し、これを申請者が開発してきたマルチフィジックス着氷コードへ実装することによりジェットエンジンの多段圧縮機において発生するアイスクリスタル着氷現象を数値的に解明し、最終的に、多段圧縮機におけるアイスクリスタル着氷対策に関する流体力学的な知見と設計指針を提供することを研究目的とした。

3. 研究の方法

(1) 平成 25 年度は、多段圧縮機における水滴の挙動およびアイスクリスタル着氷モ

デルの構築・検証を目標として研究を進めた。

研究代表者は、ジェットエンジン・ファン動静翼における着氷現象の数値シミュレーションを平成23年度に実施し、動翼ではハブ側に静翼ではチップ側に厚い着氷が発生することなどを数値的に実証した。この研究の発展およびアイスクリスタル着氷現象を解明する第一段階として、多段圧縮機における水滴挙動の数値的解明を実施した。多段圧縮機第1段上流から一様に分布させた水滴を流入させ、どのような飛行軌跡を描くのか、また、翼面のどこに水滴が付着するのかを調査した。多段圧縮機の形状および流れ条件は、NASAがデータベースとして公開しているものを採用した。

また、研究代表者がこれまでに開発した着氷コードでは、氷層以外の領域では壁面温度が流体温度と同じ、氷層領域では0℃と仮定する境界条件を用いていた。しかし、アイスクリスタル着氷現象は主流が30℃程度の高温領域において発生することが知られており、このような既存の境界条件設定では着氷を再現することが不可能であり、翼面での伝熱現象および翼壁面内部の熱伝導をも考慮して表面温度を正確に決定する必要がある。このため、既存の着氷コードにこれらの伝熱現象を評価する機能を追加し、壁面表面の温度を予測できるようにしたアイスクリスタル着氷モデルの構築を実施した。この着氷モデルの検証は、平板への氷塊の衝突と氷層の形成プロセスを数値計算することにより実施した。

(2) 平成 26 年度は、平成 25 年度に開発した多段圧縮機用コードにサブルーチンとしてアイスクリスタル着氷モデルを実装するとともに、壁面内部の熱伝導を計算するためのサブルーチンを追加して、高温条件においてアイスクリスタル着氷を再現可能なコードを開発した。多段圧縮機の計算は、最低でも 500 万点以上の格子点数が必要であるため、コードの並列化を実施し、現実的な計算時間で解が得られるようにした。次いで、このコードを多段圧縮機用の直線翼列に適用し、多段圧縮機におけるアイスクリスタル着氷の再現を行った。計算条件としては、大気温度 -30℃、大気中の水分含有量 (LWC) 1 g/m³、水滴直径 20 μm を仮定し、もっともアイスクリスタル着氷が発生する確率が高いと思われる大気条件を設定した。また、圧縮機の運転条件としては、設計点を仮定した。この数値計算結果を詳細に検討することにより、アイスクリスタル着氷の物理的特性や着氷による翼性能の変化などを調査した。

(3) 平成27年度は、パラメータ・スタディを実施することにより、アイスクリスタル着氷の特性を明らかにし、耐アイスクリスタル着氷性に優れた多段圧縮機に関する設計指針を提供することを目的として研究を実施した。アイスクリスタル着氷がどのような大気条件や圧縮機運転条件で発生しやすいの

かを明らかにするため、単一氷塊が多段圧縮機に吸い込まれた際、どのように融解して行くのか、大気条件や運転条件によってアイスクリスタル着氷がどのような影響を受けるのかなど、アイスクリスタル着氷の諸特性を解明した。このため、大気条件と圧縮機運転条件を種々変化させたパラメータ・スタディに取り組んだ。計算対象としては、JAXAが開発した圧縮機を選択した。

4. 研究成果

(1) 平成 25 年度は、多段圧縮機における水滴の挙動およびアイスクリスタル着氷モデルの構築・検証を目標として研究を進めた。まず、多段圧縮機上流から一様分布させた水滴を投入し、その飛行軌道を調査した。その結果、動翼ではハブ側のブロッキングが大きいためハブ側への水滴衝突が多く、静翼ではチップ側への水滴衝突が多くなることが確認された。また、この傾向は下流側の段においても同様であった。次いで、アイスクリスタル着氷モデルを構築した。このモデルには、氷塊の融解、融解により生じた水の熱輸送、壁面への熱輸送、壁面内部の熱伝導を考慮した。このモデルを既存の着氷コードに組み込み、初期温度 30℃の平板を対象として、アイスクリスタル着氷の再現を試みた。この結果、大気中に十分な氷塊が存在すれば、平板に衝突後に平板から熱を奪い、平板の温度が低下し、氷層が形成され得ることが示された。また、よどみ点の温度が高いため、氷層の形成がよどみ点ではなく、よどみ点から少し下流側に離れた領域から始まることが確認された。

(2) 平成 26 年度は、平成 25 年度に開発したアイスクリスタル着氷モデルを申請者が開発を続けている多段圧縮機コードに実装した。また、プログラムの並列化を行うことにより、計算時間の短縮化を図ることができた。次いで、新たに開発した着氷コードを多段圧縮機用の直線翼列に適用し、多段圧縮機翼におけるアイスクリスタル着氷現象を再現し、アイスクリスタル着氷が発生するプロセスを詳細に調査した。この結果、アイスクリスタル着氷が発生する物理的メカニズムとして、一部溶融した氷塊が翼前縁付近に衝突し、翼面から熱を奪うことによって翼の温度が低下し、翼表面の温度が氷点に達した領域から氷層の形成が始まるということが明らかとなった。また、翼前縁付近への氷塊の衝突が多いため、翼前縁から後縁に向かって翼内部の温度が上昇して行くことが示された。さらに、アイスクリスタル着氷による多段圧縮機翼の流体力学的性能変化を明らかにすることができた。計算結果の一例として、図 1 に使用した重合格子、図 2 に翼周りの静温分布、図 3 に翼内部の温度分布、図 4 に翼前縁のアイスクリスタル着氷の様子を示す。図 1 の格

子は、主流部の H 型格子 (黒色)、境界層計算用の O 型格子 (青色)、翼内部計算用の H 型格子 (赤色) から成っている。図 2、図 3 を比べると、流体と翼内部の温度が着氷の影響によって著しく異なることが明らかである。図 4 からは、アイスクリスタル着氷により形成される氷層が霧氷に類似であることが分かる。

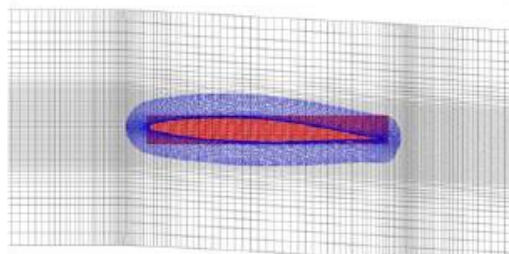


図 1 重合格子

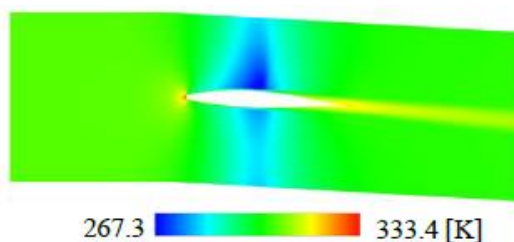


図 2 圧縮機翼列周りの静温分布

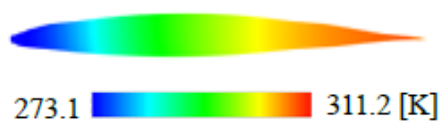


図 3 翼内部の温度分布

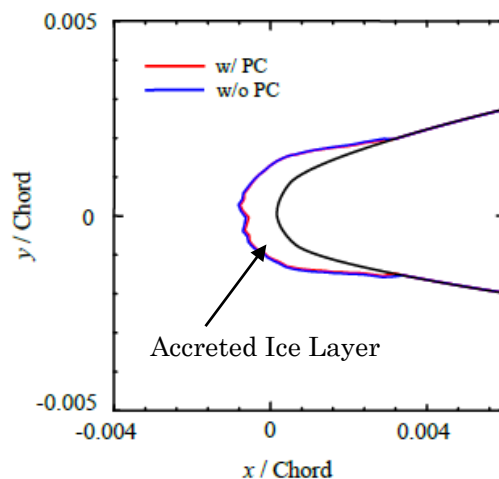


図 4 翼前縁のアイスクリスタル着氷

(3) 平成 27 年度は、パラメータ・スタディによりアイスクリスタル着氷の特性を明らかにし、耐アイスクリスタル着氷性に優れた多段圧縮機に関する設計指針を提供することを目的とした。まず、アイスクリスタル着氷の物理特性を解明しつつ圧縮機への流入条件を確定するために、単一氷塊がジェットエンジンに吸い込まれていく過程でどのように融解していくのかを数値計算した。こ

れにより、大気温度、氷の大気含有率、氷粒の直径等をパラメータとして、多段圧縮機の各段に流入する際の氷粒の融融状態が定量的に明らかになった。例えば、 $10\mu\text{m}$ 程度の氷塊では、着氷が想定されるような大気温度においても、多段圧縮機出口までに完全に融解してしまうことなどが示された。次いで、圧縮機的设计点状態を仮定して、着氷によって時間とともにどのように圧縮機性能が低下して行くのかを解析し、5秒間程度の着氷時間ですら数%の圧縮機の性能低下が生じることが明らかとなった。また、この性能低下が圧縮機通過流量の減少と断熱効率の減少としてほぼ線形に生じることが確かめられた。着氷状態によってどのように性能低下が引き起こされているのかを明らかにすることにより、多段圧縮機の耐着氷性に関

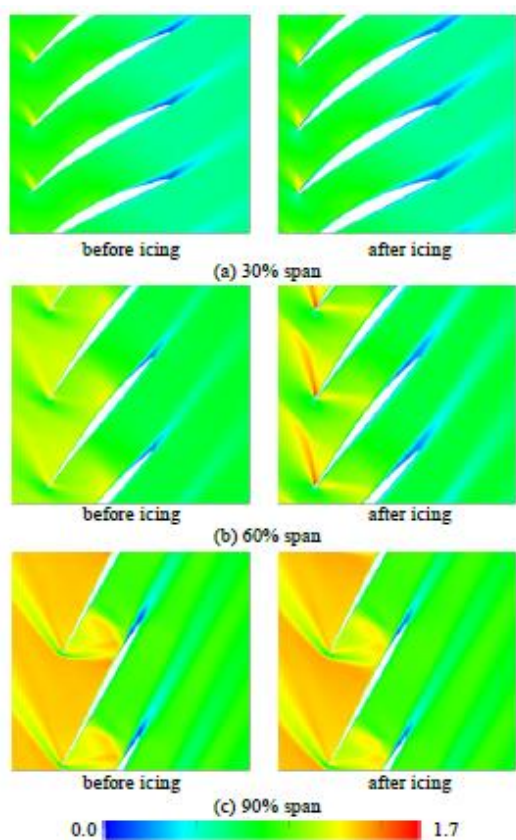


図5 着氷前後のマッハ数分布の変化

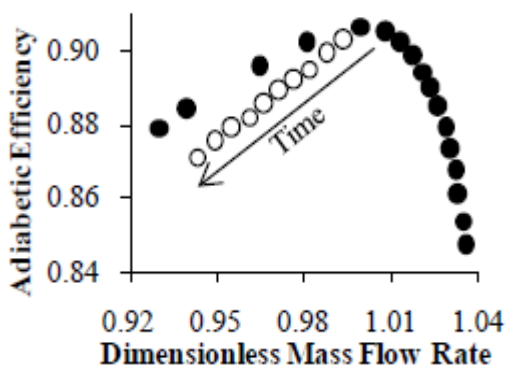


図6 着氷による断熱効率の時間変化

して新たな知見を提供することができたと言える。なお、当初目標としていた圧縮機の作動状態を変化させたパラメータ・スタディは、計算時間の関係で、予定したすべての状態に対しては実施できなかった。代表的な結果の例として、図5に着氷前後のマッハ数分布、図6に断熱効率の時間変化を示す。図5から、着氷によって、チップ側の衝撃波の形状が変化するとともに、後流が肥大化していることが確認できる。図6からは、着氷による効率低下が線形に生じることが分かる。

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 7件)

- ① R.Hayashi and M.Yamamoto, Numerical Investigation of Ice Shedding Associated with Engine Fan Icing, Proceedings of 2015 SAE Aerotech Congress and Exhibition, SAE2015-01-2091, (2015), pp.1-8, DOI: 10.4271/2015-01-2091
- ② R.Hayashi and M.Yamamoto, Numerical Simulation on Ice Shedding Phenomena in Turbomachinery, Journal of Energy and Power Engineering, Vol.9, (2015), pp.45-53
- ③ H.Miyake, M.Yamamoto, J.Hara, M.Iwasaki and N.Matsudaira, Fundamental Investigation on Nano-Particle Deposition Phenomenon, Proceedings of 12th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, ISAI12-057, (2015), pp.1-6
- ④ Y.Icikawa, M.Motosuke, Y.Kameya, M.Yamamoto and S.Honam, Three-Dimensional Flow Characterization of a Square Array of Multiple Circular Impinging Jets Using Stereoscopic PIV and Heat Transfer Relation, Journal of Visualization, Vol.18, (2015), pp.1-8, ISSN: 1343-8875 (Print) 1875-8975 (Online)
- ⑤ T.Nonomura, H.Honda, Y.Nagata, M.Yamamoto, S.Morizawa, S.Obayashi and K.Fujii, Plate-Angle Effects on Acoustic Waves from Supersonic Jets Impinging on Inclined Plates, AIAA Journal, Vol.53, (2015), pp.1-23, ISSN: 0001-1452
- ⑥ K.Isobe, M.Suzuki and M.Yamamoto, Numerical Investigation on Super-Cooled Large Droplet Icing of Fan Rotor Blade in Jet Engine, Journal of Thermal Science, Vol.23, (2014), pp.432-437, DOI: 10.1007/s11630-014-0726-2
- ⑦ 林,山本, エンジンファン着氷における氷の離脱現象のモデル化, 日本機械学会論文集, Vol.80, (2014), pp.1-12

[学会発表] (計 10件)

- ① M.Yamamoto, Hybrid Grid and

Particle-Based Method for Multi-Physics Engineering Problems, 13th U.S. National Congress on Computational Mechanics, 2015年07月28日, サンディエゴ (米国) (招待講演)

- ② 結城, MPS法を用いたNACA翼前縁における着氷シミュレーション, 日本機械学会第93期流体工学部門講演会, 2015年11月07日, 東京理科大学 (東京)
- ③ 山本, 水膜の移流を考慮した着氷モデルの検証, 日本機械学会第93期流体工学部門講演会, 2015年11月07日, 東京理科大学 (東京)
- ④ 志村, SLD着氷における液滴変形と液滴分裂の影響に関する数値的研究, 日本流体力学会第29回数値流体力学シンポジウム, 2015年12月16日, 九州大学 (福岡)
- ⑤ 山本, 粒子法を援用した着氷シミュレーション手法の開発, 第31回生研TSFDシンポジウム, 2016年03月09日, 東京大学生産技術研究所 (東京)
- ⑥ 古田, “アイスクリスタル着氷の成長に関する数値シミュレーション”, 第42回日本ガスタービン学会定期講演会, 2014年10月23日, 交通会館 (熊本)
- ⑦ 林, “ファン通過による液滴温度変化を考慮した着氷シミュレーション”, 第42回日本ガスタービン学会定期講演会, 2014年10月23日, 交通会館 (熊本)
- ⑧ M.Yamamoto, “Modelling of Super-Cooled Large Droplet Icing and its Application to Jet Engine Fan Rotor”, 10th International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements, 2014年9月18日, マルベラ (スペイン)
- ⑨ K.Yuki, “SLD Icing Simulation on NACA Airfoil Using MPS Method”, 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 2014年07月23日, バルセロナ (スペイン)
- ⑩ K.Furuta, “Numerical Investigation on Droplet Temperature of Ice Crystal Accretion”, 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), 2014年07月22日, バルセロナ (スペイン)

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0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 0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

<http://www.rs.kagu.tus.ac.jp/yamamoto/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 誠 (YAMAMOTO Makoto)

東京理科大学・工学部・教授

研究者番号: 20230584

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

以上