

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月17日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03918

研究課題名(和文) ジェットエンジンに適用可能な粒子・格子法ハイブリッド着氷予測コードの開発

研究課題名(英文) Development of Hybrid Particle/Grid-Based Icing Simulation Code Applicable to Jet Engine

研究代表者

山本 誠 (Yamamoto, Makoto)

東京理科大学・工学部機械工学科・教授

研究者番号：20230584

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,000,000円

研究成果の概要(和文)：着氷は過冷却水滴が壁面に衝突して氷層を形成する現象であり、航空機・ジェットエンジン等において空力性能の低下など悪影響を及ぼすことが知られており、普遍的な着氷モデル及びシミュレーション手法の開発が求められてきた。本研究では、あらゆる気象条件に適用可能な粒子・格子ハイブリッド着氷予測手法を新たに構築することを目的とした。まず、霧氷・雨水着氷の再現が可能な粒子法ベースの着氷モデルが開発された。次いで、本モデルを格子法の着氷コードに実装し、本手法が既存の予測法に比べて優れていることが示された。最後に、ジェットエンジン圧縮機翼の計算が行われ、本着氷予測コードが妥当な予測性能を有することが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

粒子/格子法ハイブリッド着氷予測手法を開発したことは、本研究が世界初である。本研究により着氷をより妥当に再現できるモデル及びシミュレーション手法が確立され、ジェットエンジンの着氷発生および着氷による空力性能低下のメカニズムが明らかとなった点は、高い工学的な価値を有する。また、本着氷予測コードを用いることにより、ジェットエンジンの信頼性向上・安全運転に多大な貢献が期待できる。さらに、風力タービン、自動車、鉄道、送電線などにおける着氷にも本研究結果を適用することが可能であり、各種機械の性能維持や事故防止に大いに貢献できるとともに、将来的には、エネルギー・環境問題に寄与するものと期待される。

研究成果の概要(英文)：Icing is a phenomenon that supercooled droplets in the air impact and accrete on a wall. It is observed on an aircraft and in a jet engine. When icing occurs in a jet engine, it leads to harmful affects like the critical degradation of aerodynamic performance. Although the researches have been conducted in the world, the universal icing model and simulation techniques have not been established. Therefore, they are strongly needed in the industries. In the present research, a particle/grid-based hybrid icing simulation code was newly developed. First, based on the MPS method, the universal icing model was developed and successfully verified for rime and glaze ice conditions. Second, this model was implemented in our grid-based icing simulation code, and the superiority of the code was confirmed through verifications. Finally, the developed code was applied to compressor blades in a jet engine, and it was confirmed that the code can reasonably reproduce the icing phenomenon.

研究分野：数値流体工学

キーワード：計算力学 マルチフィジックス 着氷シミュレーション ハイブリッド法 ジェットエンジン

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 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。航空機、ジェットエンジン、風力タービン、発電用ガスタービ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・外部の物理的損傷等、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。航空機における例として、最近でも 2009 年 2 月 12 日、ニューヨークにおいてコンチネンタル航空 3407 便 (DHC-8) が墜落し、乗員乗客合計 50 名の尊い命が失われている。設計・運転段階で着氷現象を考慮して対策を施すことは、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、また、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、きわめて重要な技術課題となっている。

ジェットエンジンでは、型式承認時に安全性を確認するための着氷試験が課されており、一定量の水滴を吸い込んで着氷が発生してもエンジンが健全に作動することを実証しなければならない。また、ジェットエンジンの設計・開発プロセスにおいて着氷に起因した不具合が発生した場合には、対応が非常に困難であり、開発の後戻りが大きい。このため、設計の初期段階で着氷現象を正確に予測することができれば、トータルの設計時間や開発コストの削減につなげることができ、より安全で安心なジェットエンジンを短期間で開発することが可能となり、国際競争力の獲得につながる。

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、多額の費用を要したり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・氷の共存条件における着氷現象を正確に再現できる普遍的着氷モデルと着氷シミュレーション手法の開発が強く求められ、世界中で精力的に研究開発が進められている。着氷現象に対する数値シミュレーションに関する研究は、1990 年代前半から NASA (Lewis 研究センター、米国) において始まった。NASA が開発した着氷予測プログラム「Lewis コード」が世界中に展開され、DRA (英国)、CIRA (イタリア)、ONERA (フランス)、Boeing (米国) などの機関が Lewis コードに準拠して独自の着氷予測コードを開発している。一方、残念ながら、日本での開発実績はこれまでになく、JAXA が最近研究に着手し始めた段階であり、航空機やジェットエンジンの開発で日本が世界的競争力を獲得する上で障害のひとつとなっている。

着氷現象は、次の 4 形態に分類できる。(1) 霧氷: 20  $\mu\text{m}$  程度の直径を有する水滴が壁面衝突点で瞬時に凍る形態であり、 $-15$  以下で発生する。(2) 雨氷: 20  $\mu\text{m}$  程度の水滴が壁面と衝突した後に壁面上を流れながら凍る形態で、 $0 \sim -15$  で発生する。(3) スプラッシュ着氷: 100  $\mu\text{m}$  以上の大きな水滴が壁面に衝突した際、数  $\mu\text{m}$  程度の複数の微小水滴に分裂し、跳ね返り (スプラッシュ) を起こし、跳ね返った微小水滴が壁面と再衝突することで氷層を形成する形態で、温度依存性は弱い。(4) アイスクリスタル着氷: 低圧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。NASA 等の既存の着氷モデルは (1) および (2) の形態を概ね予測できるようになっているが、(3)、(4) の形態を予測できるモデルは存在せず、着氷モデルの普遍性の欠如が大きな技術課題となっていた。

### 2. 研究の目的

本研究では、粒子法を用いて 4 種類の着氷形態を再現できる普遍的着氷モデルを新たに開発し、これを申請者が開発してきたジェットエンジンに対するマルチフィジックス着氷予測格子法コードへ実装することにより、あらゆる気象条件に適用可能な粒子・格子ハイブリッド着氷予測手法を新たに構築・検証することを研究の主目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究は、平成 28 年度から 3 年間にわたり実施した。具体的な研究内容は以下の順に実施することを予定した。

平成 28 年度は、霧氷用に開発済みである粒子法の既存コードを雨氷およびスプラッシュ着氷を再現できるように改造した。

平成 29 年度は、平成 28 年度に構築した粒子法による着氷モデルに、氷粒子の飛行・溶融・凍結挙動に関するモデルを導入し、アイスクリスタル着氷が再現可能なように改造した。また、開発した普遍的着氷モデルを申請者がこれまでに開発してきたジェットエンジン・シミュレーション用の格子法着氷予測コードに組み込み、粒子・格子ハイブリッド着氷予測コードを開発した。

平成 30 年度は、平成 29 年度に開発した着氷予測コードをさまざまな気象条件にさらされたジェットエンジンに適用し、パラメータ・スタディを実施することにより、耐着氷性に優れたジェットエンジン・ファン・圧縮機の設計指針を数値的に明らかにした。

#### 4. 研究成果

平成 28 年度は、研究代表者がこれまでに開発してきた粒子法による霧氷着氷モデルを拡張し、雨氷着氷モデルおよびスプラッシュ着氷モデルの構築・検証を目標として研究を実施した。まず最初に、過冷却水滴が衝突壁面上に形成する水膜およびその凍結挙動を妥当に再現できる雨氷着氷モデルの構築を実施した。粒子法の一つである MPS 法に基づいて過冷却水滴の凍結挙動を再現するため、水滴内および水滴と壁面との間の熱伝導現象を再現できるようにコードを改造した。次いで、平板および 2 次元 NACA 翼を対象として、凍結およびスプラッシュ現象の再現性について検証計算を実施した。水滴の衝突角度を変化させて各条件における凍結挙動を実験データと比較した結果、本研究で開発した着氷予測コードにより、過冷却水滴の凍結挙動およびスプラッシュ量が妥当に再現できることが確認された。図 1 に粒子法により予測された過冷却水滴の典型的な凍結およびスプラッシュ挙動を示す。この図より、着氷形状およびスプラッシュ量が明らかに衝突角度に依存して変化することが分かる。なお、開発した粒子法着氷モデルによって凍結する前の水膜がひも状の流動を形成する過程は再現できなかったが、このような挙動の再現には周囲の空気流の影響が顕著であり、これを考慮すべきであることが示唆された。

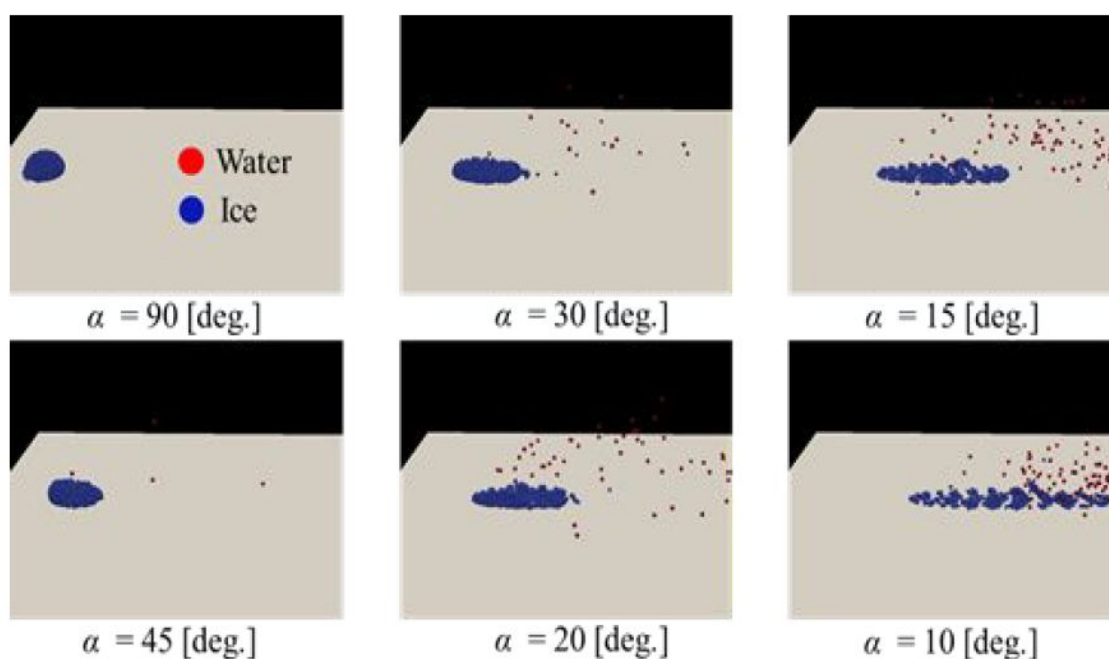


図 1 異なる衝突角度における着氷形状およびスプラッシュの状況

平成 29 年度は、開発した粒子法着氷モデルをアイスクリスタル着氷に対応できるように改造した。アイスクリスタル着氷に関する実験データは文献等に公開されていないため、現象を基本的な素過程に分解し、各素過程に対して検証を実施した。想定した素過程としては、氷の融解を伴わない低温気体中の氷粒子の飛行挙動、融解を伴う高温気体中の氷粒子の飛行挙動、氷粒子の壁面衝突挙動、融解により表面に液膜を有する氷粒子の壁面衝突挙動である。これらの素過程を再現できるモデル化を行うことにより、アイスクリスタル着氷現象を物理的に妥当に再現できる着氷モデルが構築された。次に、粒子・格子法ハイブリッド着氷予測コードにこのアイスクリスタル着氷モデルを実装した。また、ジェットエンジンの多段圧縮機におけるアイスクリスタル着氷の計算は、複雑な幾何形状および多数の氷粒子を取り扱うため、3 次元計算では最低でも 500 万点以上の格子点数が必要となるため、コードの並列化を実施し、可能な限り短時間で計算結果が得られるように配慮した。最後に、開発した着氷コードをジェットエンジンの多段圧縮機に適用し、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、GE90 エンジン想定し、飛行高度 6,000~10,000m、大気温度 249.2~223.3K、氷粒子直径 50~800  $\mu\text{m}$  においてファンから高圧圧縮機にかけて氷粒子の融解状態を再現し、圧縮機のどの部分でアイスクリスタル着氷が発生するのかを明らかにした。図 2 に氷粒子の融解率の分布を示す。アイスクリスタル着氷が発生するためには氷と水滴が共存していることが必要であると考えられている。この図から、氷粒子が部分的に融解してアイスクリスタル着氷が発生するのが極めて限定された条件であり、また発生個所も圧縮機内で限定されていることが分かる。最後に、もっともアイスクリスタル着氷が発生する可能性が高いと判断された高度 8,000m、氷粒子直径 100  $\mu\text{m}$ 、IWC7.0g/m<sup>3</sup> の条件において、低圧圧縮機第 3 段静翼におけるアイスクリスタル着氷の氷層形成プロセスが再現された。図 3 に、静翼前縁における氷層の成長の様子を示す。この計算結果により、アイスクリスタル着氷モデルが実機圧縮機内の着氷現象を物理的に妥当に再現できることが確認された。

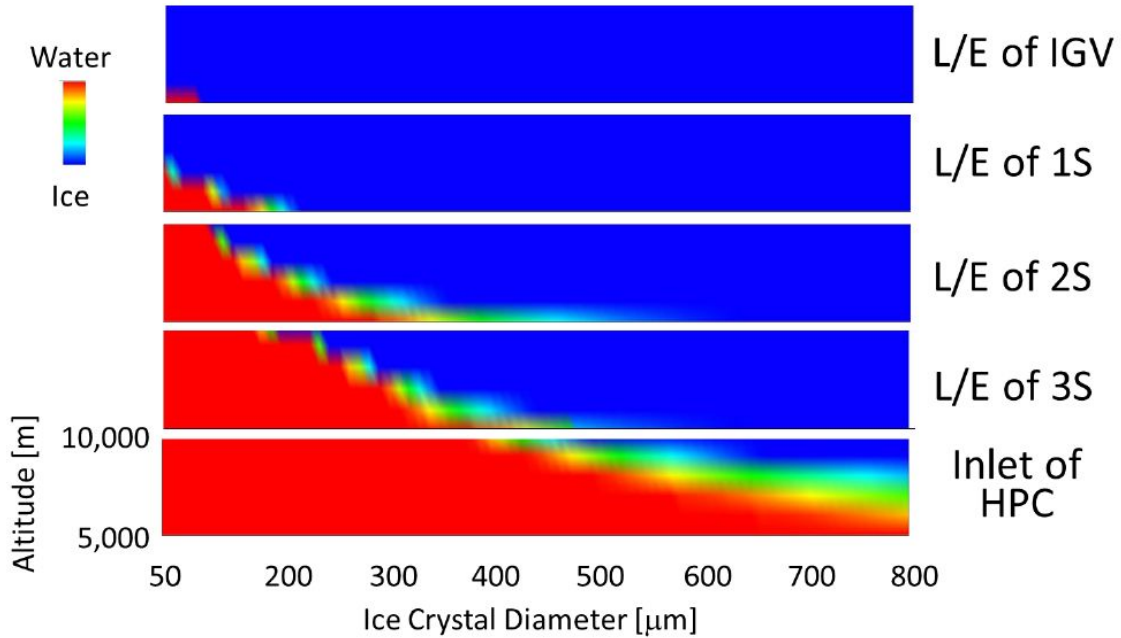


図 2 異なる飛行高度，氷粒子直径に対するアイスクリスタルの融解率

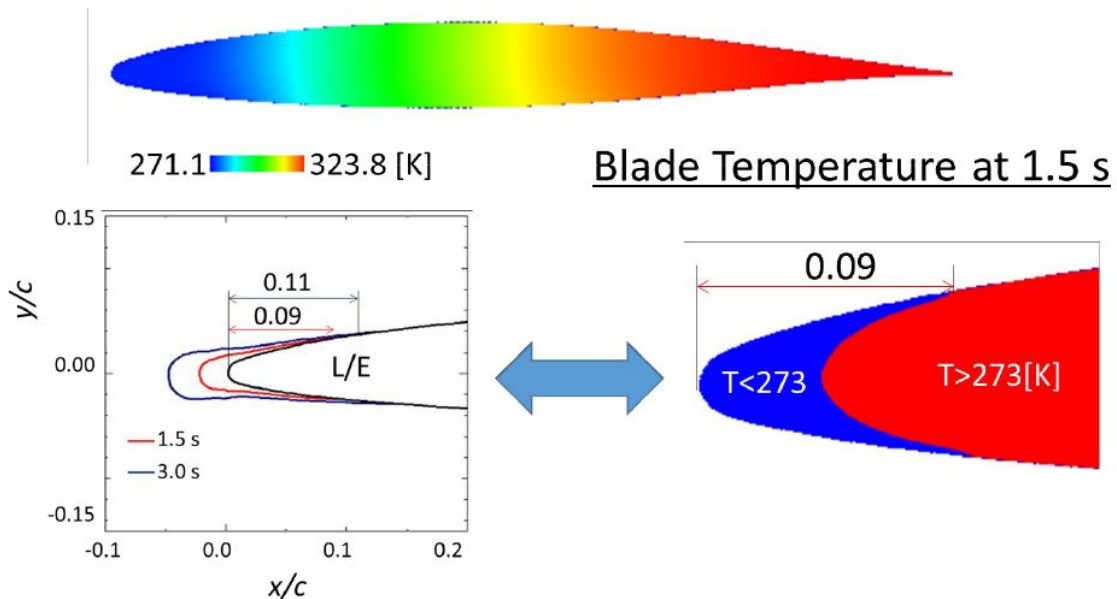


図 3 静翼内の温度分布および前縁における氷層の成長

最終年度である平成 30 年度は、平成 29 年度までに開発したアイスクリスタル着氷予測コードを用いてパラメータ・スタディを実施し、ジェットエンジンに発生する 4 種類の着氷現象の特性を明らかにすることにより、耐着氷性に優れたジェットエンジンに関する設計指針を提供することを目的として研究を進めた。ジェットエンジンにおける着氷現象の全体像を解明するためには、(1) 4 種類の着氷がどのような大気条件やエンジン運転条件で発生しやすいのか、(2) 大気条件や運転条件によって 4 種類の着氷現象がどのような影響を受けるのかなど、ジェットエンジンにおける着氷現象の諸特性を解明することが、ジェットエンジンの安全設計上必須であると考えられる。このため、本研究の最終段階として、大気条件とエンジン運転条件を飛行高度（したがって大気温度）、大気中の水分含有量（LWC）、大気中の氷含有率（IWC）を複数変化させたパラメータ・スタディを実施し、これらの各条件についてジェットエンジン・圧縮機コアにおけるアイスクリスタル着氷現象を数値的に明らかにすることを試みた。また、得られた知見を援用し、着氷を発生させにくい防氷／除氷デバイスの設置方法について設計指針を検討した。防氷／除氷デバイスとしては、近年実用化が進んでいる電熱ヒーターを採用し、ヒーターの設置範囲を系統的に変更した数値計算を実行した。本研究の結果、アイスクリスタル着氷が発生する圧縮機の部位は飛行高度によって大きく変化すること、飛行高度を固定すると極めて限定的な部位のみでアイスクリスタル着氷が発生することが再確認され、また、翼前縁に電熱ヒーターを設置して防氷／除氷を行う場合には、ヒーターの設置範囲を適切に設けないと意図に反して翼性能の大幅な低下を引き起こしてしまうことが明らかとなった。図 4 に、伝

熱ヒーターの設置範囲による着氷および流れの違いを示す。この条件では、ヒーター設置範囲を翼弦長の1%とした場合、ヒーターを設置しない場合よりも翼の空力性が悪化していた。

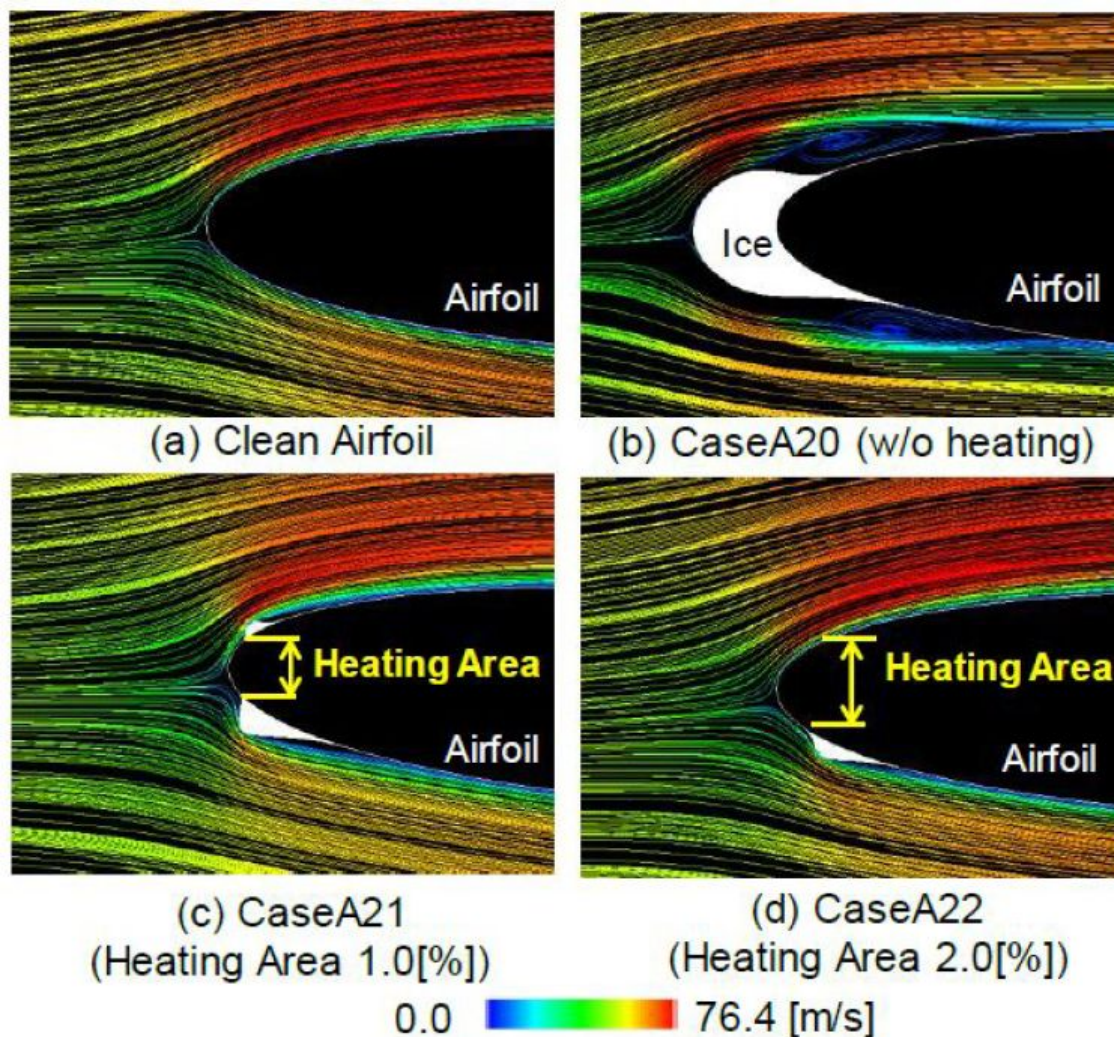


図4 伝熱ヒーターの設置範囲による氷層および流れの違い

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計9件)

"Numerical Simulation of Solidification Phenomena of Single Molten Droplet on Flat Plate Using E-MPS Method", S.Kondo, H.Mamori, N.Fukushima, K.Fukudome and M.Yamamoto, Journal of Fluid Science and Technology, Vol.13, No.3, (2018\_10), pp.1-8 DOI:10.1299/jfst.2018jfst000x (査読有)

"Euler-Lagrange Coupling 法による EGR クーラのすず堆積シミュレーションの開発", 原潤一郎, 岩崎充, 松平範光, 三宅啓史, 山本誠, 福島直哉, 守裕也, 自動車技術会論文集, 49 巻, 5 号, (2018\_9), pp.1032-1037 DOI:10.11351/jsaeronbun.49.1032 (査読有)

"Numerical Investigation on Sand Erosion Phenomenon of Coated and Uncoated Vanes in Low Pressure Gas Turbine", Y.Fuma, H.Mamori, N.Fukushima, M.Yamamoto and Y.Okita, International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements, Vol.6, Issue 2, (2017\_11), pp.282-290 DOI:10.2495/CMEM-V6-N2-282-290 (査読有)

"Temperature Measurement of Super-Cooled Droplet in Icing Phenomenon by Means of Dual-Luminescent Imaging", M.Tanaka, K.Morita, H.Mamori, N.Fukushima and M.Yamamoto, Journal of Thermal Science, Vol.26, No.4, (2017\_7), pp.316-320 DOI:10.1007/s11630-017-0944-5 (査読有)

[学会発表](計39件)

"Fundamental Investigation to Predict Ice Crystal Icing in Jet Engine", M.Iwago, K.Fukudome, H.Mamori, N.Fukushima and M.Yamamoto, Proceedings of 7th Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science (AJWTF7), (2018\_11), pp.1-7

"SLD Icing Simulation of Axial Fan on Droplet Temperature Dependency", T.Takahashi, H.Mamori, K.Fukudome and M.Yamamoto, Proceedings of 29th International Symposium on

Transport Phenomena (ISTP29), (2018\_11), pp.1-2  
" Icing Simulation of NACA0012 Airfoil with Hybrid Grid- and Particle-Based Method ",  
D.Toba, H.Mamori, K.Fukudome and M.Yamamoto, Proceedings of 12th Asian Computational  
Fluid Dynamics Conference (ACFD2018), (2018\_10), pp.1-7 (Invited Lecture)  
" Multi-Physics CFD Simulation with a Hybrid Grid- and Particle-Based Method ",  
M.Yamamoto, Advances in Computational Flow-Structure Interaction and Flow Simulation  
(AFSI2018), (2018\_5) (Invited Speech)  
" Effect of SLD Characteristics Phenomena on Icing on Axial Fan Blade ", M.Shimura,  
S.Uranai, H.Mamori, N.Fukushima and M.Yamamoto, Proceedings of International  
Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery (ISROMAC 2017),  
(2017\_12), pp.1-2  
" Effect of Evaporation on Melting Ratio of Ice Crystals Flowing in Jet Engine ",  
M.Iwago, H.Mamori, N.Fukushima and M.Yamamoto, Proceedings of 6th Asian Symposium  
on Computational Heat Transfer and Fluid Flow (ASCHT 2017), No.158, (2017\_12), pp.1-6

〔図書〕(計2件)

“ 流体機械 - 基礎理論から応用まで - ”, 山本誠, 太田有, 宮川和芳, 新関良樹共著, 共  
立出版, (2018\_9) (pp.1~8 及び pp.33~74, 総ページ数 308 頁) ISBN-10: 4320082206

〔産業財産権〕

出願状況 (計0件)

取得状況 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<https://www.rs.kagu.tus.ac.jp/yamamoto/indexj.html>

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名: 福島 直哉  
ローマ字氏名: Naoya Fukushima  
所属研究機関名: 東海大学  
部局名: 工学部  
職名: 特任講師  
研究者番号(8桁): 80585240

### (2)研究分担者

研究分担者氏名: 守 裕也  
ローマ字氏名: Hiroya Mamori  
所属研究機関名: 電気通信大学  
部局名: 大学院情報理工学研究科  
職名: 准教授  
研究者番号(8桁): 80706383

### (3)研究協力者

研究協力者氏名: なし  
ローマ字氏名:

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。