

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H04200

研究課題名（和文）ジェットエンジンにおける粒子付着のモデル化及びマルチフィジックス予測法の開発

研究課題名（英文）Development of Modeling and Multi-Physics Prediction Methods for Particulate Deposition in 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） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：ジェットエンジンに吸い込まれた微粒子は、2000[K]近い高温の燃焼器を通過する際に溶融し、タービンの翼やケーシング等の壁面に衝突すると壁面上で凝固し、付着層を形成する。この現象を粒子付着現象と呼び、タービン翼の空力性能の大幅な低下や冷却孔の閉塞による壁面の溶解など、ジェットエンジンに致命的な影響を及ぼす。本研究では、基礎実験および第一原理に基づいて高精度粒子付着モデルを新たに開発し、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予測コードへ実装することにより、ジェットエンジンのタービンに生じる粒子付着現象のメカニズムおよび付着特性を数値的に解明することに取り組んだ。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、ジェットエンジンにおける粒子付着現象を普遍的に再現できる粒子付着モデルおよびマルチフィジックスCFDシミュレーション手法が確立され、部分的ではあるが、ジェットエンジンの様々な運転条件下での粒子付着現象のメカニズムと特性が明らかになった。したがって、耐粒子付着性に優れたタービンを設計・開発することが可能となり、将来、より安全なジェットエンジンの開発に大きく寄与できるものと期待できる。さらに、この計算手法は、ジェットエンジンだけでなく、ボイラー等の熱交換器、溶射コーティング、スプレー塗装など、他の多数の工業プロセスに対しても発展的に適用可能であり、工業的に大きな貢献が期待できる。

研究成果の概要（英文）：Particles sucked into a jet engine melt when passing through a combustor with a temperature close to 2000[K], and when they collide with the walls of turbine blades and casings, they solidify on the walls and form an adhesion layer. This phenomenon is called deposition, and it has fatal effects on jet engines, such as a significant decrease in the aerodynamic performance of turbine blades and melting of wall surfaces due to clogging of cooling holes. In the present study, we developed a new high-accuracy particle deposition model based on basic experiments and first principles. The deposition model was implemented in the deposition code that we have developed for several years. We have attempted to numerically elucidate the mechanism of the deposition phenomenon and the deposition characteristics under extremely high temperature environment.

研究分野：数値流体工学

キーワード：計算力学 粒子付着現象 ジェットエンジン マルチフィジックス モデル化

1. 研究開始当初の背景

ジェットエンジンは砂や火山灰などの微小粒子を吸い込む可能性があり、これらの粒子はジェットエンジンに有害な現象を引き起こす可能性がある。粒子付着（deposition）はそのような現象の1例である。砂や火山灰の粒子は、エンジン内のファン、圧縮機、燃焼器を通過し、燃焼器で非常に高温に加熱される。粒子は主にSiO₂で構成されているため、軟化して溶融ガラス液滴のように振舞う。軟化・溶融した粒子は高速で高圧タービンの翼やケーシング壁に衝突し、表面に付着する可能性がある。これらの付着粒子は翼形状や表面粗さを変化させ、空力性能の低下やタービンの寿命を縮める可能性がある。さらに、タービン翼表面の付着物により、フィルム冷却用の冷却孔が閉塞する可能性がある。膜冷却は1800Kを超える高温の主流ガスからタービン翼を冷却して保護するために必要であり、冷却孔が粒子付着により塞がれると、表面温度の上昇によりタービン翼が損傷し破損する危険性がある。このように、高圧タービン翼への粒子付着現象は、飛行中に重大なトラブルや事故を引き起こす可能性がある危険な現象である。しかし、この現象の原因は十分に解明されておらず、現象の解明が強く望まれている。

粒子付着現象を理解するために、さまざまな粒子付着に関する実験が行われてきた（例えば、Aiら[1]、Webbら[2]、Bowenら[3]）。一方、これらの実験研究には大規模な実験設備と長い時間が必要なため、粒子付着現象をより簡単に調査するには数値的アプローチが有効と考えられている。最近、Bonsら[4]は、タービン静翼の冷却と粒子径分布を考慮して粒子付着現象を数値シミュレーションした。ただし、このシミュレーションは非常に基本的なものであり、理想的な状況に限定されており、使用した粒子付着モデルが妥当なものなのかも十分に明らかになっていない。したがって、ジェットエンジンにおける粒子付着現象を解明するためには、ジェットエンジンの実際の運転状況における最適な粒子付着モデルを明らかにする、あるいは新たに提案するためのさらなる研究が必要である。

2. 研究の目的

本研究では、基礎実験および第一原理（保存法則）に基づいて高精度粒子付着モデルを新たに開発し、これを申請者がこれまでに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予測コードへ実装することにより、ジェットエンジンのタービンに生じる粒子付着現象のメカニズムおよび微粒子付着特性を数値的に解明することを最終的な目的とする。この目的を達成するため、格子法に基づく従来型の粒子付着モデルの検証・改良、粒子法に基づく新たな粒子付着計算法の提案、基礎実験による高温条件における粒子付着に関するデータの取得・蓄積、ジェットエンジンにおける粒子付着現象の再現などを実施した。

3. 研究の方法

(1) シミュレーション戦略

本研究における格子法による粒子付着現象のシミュレーションは、弱連成を利用して行われた。この方法は、(a) タービン静翼周りにマルチブロックグリッドを生成、(b) タービン静翼周りの流れ場を計算、(c) 粒子軌道を計算して付着の有無を判定、(d) 翼表面での堆積層の厚さを計算、という順に計算を実施し、これらの一連の計算を反復することによって、粒子付着現象の時間・空間変化を再現する。それぞれの数値計算手順を以下に簡単に説明する。

(2) 流れ場の計算

流れ場はオイラー法によって計算した。流れ場は3次元、圧縮性、完全乱流であると仮定した。乱流モデルとしては、Spalart-Allmarasモデルが選択された。支配方程式はセル中心有限体積法により離散化した。非粘性項には2次精度MUSCLスキームを採用し、粘性項に2次精度中心差分スキームを使用した。時間進行は、MFGS法を使用した一次精度オイラー陰解法を用いた。なお、基本コードとして宇宙航空研究開発機構（JAXA）が独自に開発したCFDソルバー「UPACS」を利用した。

(3) 粒子軌道の計算

粒子の軌道はラグランジュ追跡法によって計算した。粒子は球形で回転せず、剛体であると仮定し

た。支配方程式として簡略化された Basset-Boussinesq-Oseen (BBO) 方程式を使用し、粒子の運動では抗力が支配的であるため、本研究では抗力のみを考慮することとした。したがって、本シミュレーション手法はオイラー・ラグランジュ法である。

(4) 粒子付着の計算

粒子が壁面に衝突すると判断された場合、粒子付着計算が実行される。格子法に基づく粒子付着シミュレーションでしばしば使用される 3 つの粒子付着モデルがある。臨界速度モデル (El-Batsh および Haselbacher [5])、臨界粘度モデル (Sreedharan and Tafti [6])、および OSU モデル (Bons et al. [4]) である。本研究では、これらのモデルの検証をBowenら[3]の実験データに対して検証した。図1は平板に衝突する粒子の軌跡、図2は3つのモデルによって予測された堆積層と実験データとの比較を示している。本研究により、OSUモデルが現時点では最適な粒子付着モデルであることが明らかとなり、後述するジェットエンジンでの格子法に基づく計算ではOSUモデルを採用することとした。なお、粒子法に基づく計算では、これらのモデルを使用せずに、ナビエ・ストークス方程式およびエネルギー式を直接解くことで熔融スズ液滴の凝固現象を再現した。

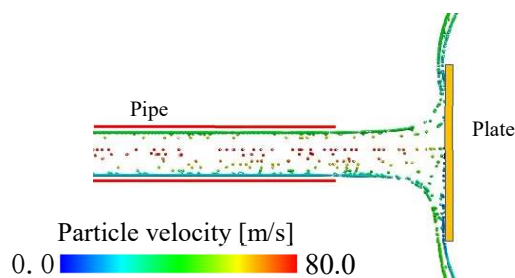


図1 平板に衝突する粒子の軌跡

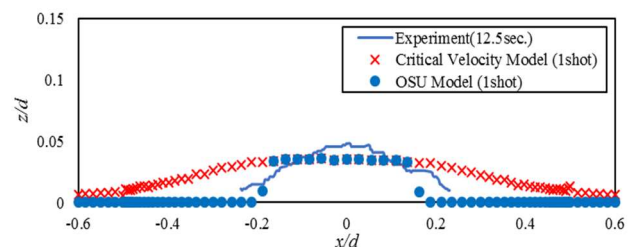
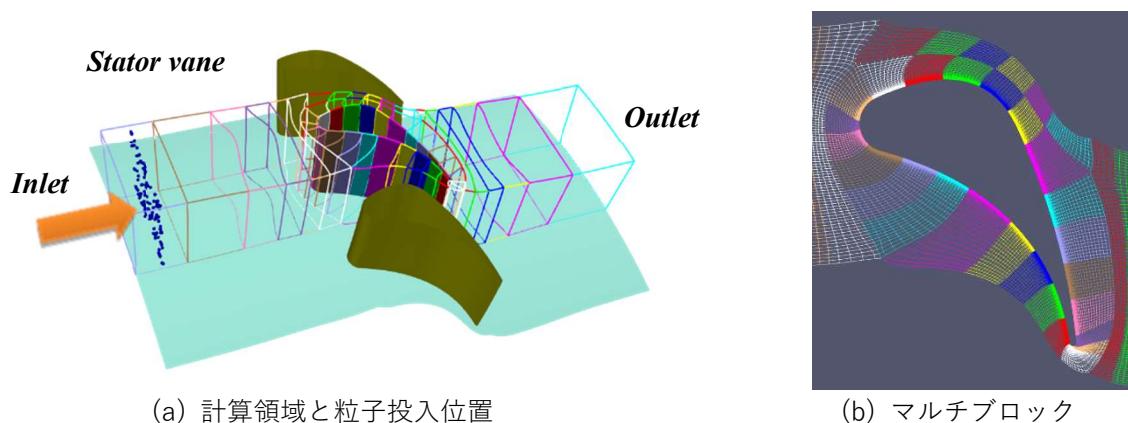


図2 モデル計算と実験データと比較

4. 研究成果

(1) ジェットエンジン運転条件における格子法に基づく粒子付着現象の数値シミュレーション

格子法に基づく計算例として、ジェットエンジンの計算結果を示す。計算対象は、JAXAの「グリーンエンジン技術」研究開発プロジェクトにおいて設計されたジェットエンジンの高圧タービン第1段静翼とした。流れ場の計算条件は離陸条件に基づいて設定された。図3(a)に示すように、周期性から単一の翼に対して計算を実行した。なお、本計算では、翼が均一に冷却されていると想定し、翼表面には等温壁境界条件を適用した。計算格子はマルチブロックグリッド法で作成し (図3(b)参照)、総格子点数は約280万であった。また、Bonsら[4]の研究などを参考にして、粒子は密度が 2300 kg/m^3 の垂瀝青灰と仮定し、エンジンに吸い込まれた粒子の総量を $14.4 \text{ g} \cdot \text{s/m}^3$ と設定した。粒子の投入位置は翼の十分上流側とし (図3(a))、1回の投入粒子数は100万個とした。



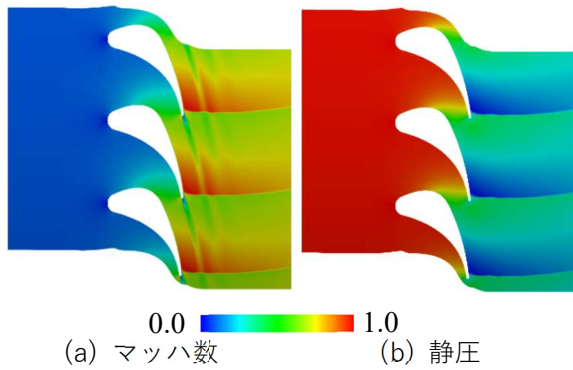
(a) 計算領域と粒子投入位置

(b) マルチブロック

図3 計算領域、粒子投入位置、マルチブロック格子

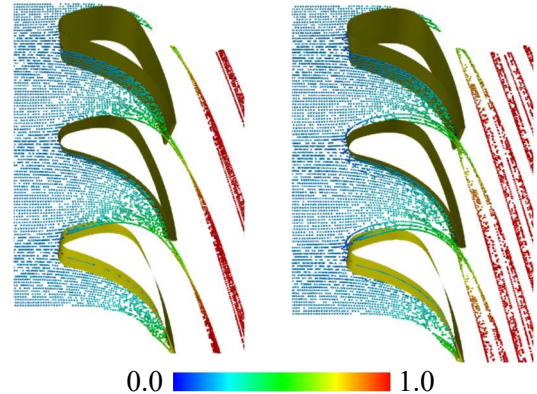
図4は、粒子付着前のミッドスパンにおける流れ場を示している。静圧と静温は、それぞれ入口の全圧力と全温度で正規化されている。これらの図は、タービン内の典型的な流れ構造を示している。

すなわち、流れは上流から下流に向かって加速拡大し、ノズルスロート付近のマッハ数は約1.0となっている。最大マッハ数が1.0を超えて翼後縁に衝撃波が認められるため、流れ場は遷音速になっていることが分かる。また、85%耐熱温度の等温条件における温度分布（図は省略）から、ベーン周囲に薄い温度境界層が観察され、断熱条件と等温条件とでは翼後流の静温度が異なることが明らかとなった。



(a) マッハ数 (b) 静圧

図4 粒子付着前の流れ場

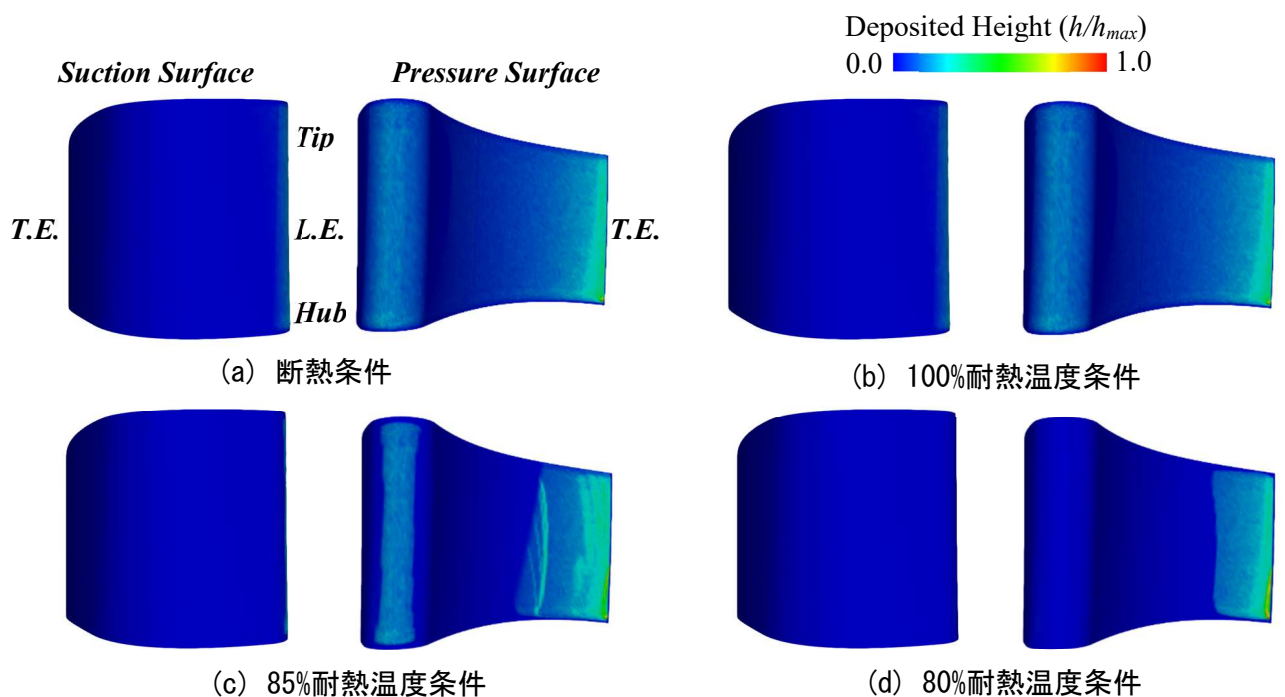


(a) 断熱条件 (b) 80%耐熱温度条件

図5 無次元粒子速度

図5に、翼の表面温度を変えた場合の粒子の軌跡を示す。色の等高線は粒子の速度を表し、すべての場合の最大速度で正規化されている。この図より、粒子が後縁付近で加速され、高い衝突速度で翼後縁付近に衝突することが確認でき、この高い衝突速度がすべての場合において後縁付近の粒子付着が顕著になる理由であることが明らかとなった。80%耐熱温度の場合（図5(b)）、翼表面の温度が低いため粒子が付着しにくくなり、すべての粒子が前縁から跳ね返ることが分かった。また、正圧面への二次衝突は衝突速度が小さいため、付着に至らないことなども確認された。

表面温度が異なる場合の粒子付着面の比較を図6に示す。付着高さは全ケースの最大高さで正規化してある。断熱温度と100%耐熱温度の場合の結果はほぼ同じとなった。また、翼の前縁と後縁での粒子付着が著しいことが明らかである。85%、80%耐熱温度の場合には、前縁付近の付着面積が減少し、後縁



(a) 断熱条件 (b) 100%耐熱温度条件
(c) 85%耐熱温度条件 (d) 80%耐熱温度条件

図6 異なる表面温度条件における粒子付着高さの比較

付近の正圧面に粒子付着が現れている。また、85%耐熱温度の場合、正圧面のミッドスパン付近に比較的激しい堆積が観察された。この領域の堆積高さは後縁の堆積高さと同様であった。80%耐熱温度の場合はさらに付着面積が減少し、表面温度が低いために翼先端付近に堆積が発生しないが、後縁での堆積高さは他の場合と同様であることが明らかとなった。

以上のように、格子法に基づく方法は、タービン翼上の粒子付着現象を概ね妥当に再現することができるが、実際のタービンの実験データがないため、数値結果を量的に検証することはできないが、数値結果はタービン静翼への堆積の傾向や特徴を理解するのに役立つことは明らかである。

(2) 粒子法に基づく粒子付着現象の数値シミュレーション

粒子法を粒子付着現象の再現に利用することにより、格子法では必須な経験的粒子付着モデルを排除することが可能であり、普遍性の大幅な向上が期待できる。

MPS法やSPH法などの粒子法が数多く開発されて工学問題で使用されているが、計算負荷が比較的小さいことを考慮して、本研究ではE-MPS法[7]を採用した。この方法では、流体の挙動が微小な計算粒子のクラスタによって表現され、連続の式とナビエ・ストークス方程式が支配方程式として使用される。さらに、粒子付着現象は液滴の凝固過程であるため、液滴内部および液滴と固体表面の界面での熱伝達を推定するためのエネルギー方程式も利用した。空間の離散化には勾配モデルとラプラスアンモデルが用いられた。液滴の凝固過程では潜熱が重要な役割を果たすため、計算粒子の状態変化を各粒子のエンタルピーを計算することで評価した。粒子の初期状態は液相とした。粒子温度 T が融解温度に達すると、液体計算粒子はその温度で一定の過渡状態になり、計算粒子が潜熱を失うと固相粒子として扱った。

本研究における計算条件は、Shakeri and Chandra [8] によって行われた実験と同様に設定した。液滴はスズ、基板はステンレス鋼、衝突角は90度、液滴の初期径は2.2[mm]、液滴の初期温度は519[K]、液滴の衝突速度 4.0 [m/s]、基板温度は298 [K] と仮定した。液滴は微小な計算粒子のクラスタによって表現し、総粒子数は約20万個とした。

図7に、スズ液滴の凝固の時間変化を示す。液滴は基板への衝突とともに広がり、基板との界面から凝固して行く。図から明らかのように、凝固後の堆積厚さは均一ではなく、周縁部にフィンガーと呼ばれる突起を形成するなど、格子法では捉えられない現象を再現できることが明らかである。また、ここでは示さないが、液滴の直径の時間変化は実験データと良好に一致することが確認できた。

粒子法をジェットエンジンに適用することには成功しなかったが、粒子付着のようなマルチフィジックス現象の良好な再現性という点で粒子法の高い可能性を実証することはできたと思われる。

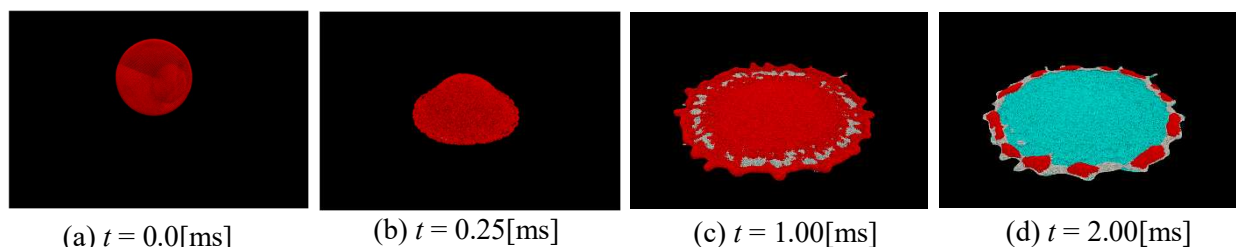


図7 スズ液滴の凝固プロセス

<参考文献>

- [1] Ai, W.G., et al., *ASME Turbo Expo 2008*, GT2008-50901, (2008), pp. 825-835
- [2] Webb, J., et al., *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 135, No. 2, (2011), 021033
- [3] Bowen, C.P., et al., *ASME Turbo Expo 2018*, GT2018-76251, (2018), V02DT47A009
- [4] Bons, J.P., Prenter, R. and Whitaker, S., *ASME J. of Turbomachinery*, Vol. 139, No. 8, (2017), 081009
- [5] El-Batsh, H. and Haselbacher, H., *ASME Turbo Expo 2002*, GT 2002-30600, (2002), pp.1035-1043
- [6] Sreedharan, S.S. and Tafti, D.K., *ASME Turbo Expo 2010*, GT2010-23655, (2010), pp. 615-626
- [7] Oochi, M. et al., *Tran. Japan Society of Comp. Engineering and Science*, 20100013, (2010), pp.1-8
- [8] Shakeri, S. and Chandra, S., *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.45, (2002), pp. 4561-4575.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計20件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 K.Fukudome, Y.Tomita, S.Uranai, H.Mamori and M.Yamamoto	4. 巻 8
2. 論文標題 Evaluation of Anti-icing Performance for NACA0012 Airfoil with Asymmetric Heating Surface	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Aerospace	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/aerospace8100294	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 K.Fukudome, Y.Muto, K.Yamamoto, H.Mamori and M.Yamamoto	4. 巻 180
2. 論文標題 Numerical Simulation of the Solidification Phenomena of Single Molten Droplets Impinging on Non-Isothermal Flat Plate Using Explicit Moving Particle Simulation Method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121810	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 荒井, 福留, 山本, 鈴木, 大北	4. 巻 49
2. 論文標題 タービンにおけるリーン翼のエロージョン特性と空力性能の数値シミュレーション	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本ガスタービン学会誌	6. 最初と最後の頁 179-187
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 佐藤, 志村, 福留, 江尻, 山本	4. 巻 2021
2. 論文標題 粒子法熱流体解析のための衝突噴流熱伝達率モデルの開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本計算工学会論文集	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11421/jsces.2021.20210012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Y.Gao, K.Fukudome, M.Yamamoto, T.Mizuno and M.Suzuki	4. 巻 ACGT2020-056
2. 論文標題 Numerical Investigation of Active Anti-Icing Technology Using Electro-Thermal Effect of CFRP	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of Asian Congress on Gas Turbines 2020 (ACGT2020)	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 M.Yamamoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Multi-physics CFD Simulation of Deposition Phenomenon in a Jet Engine	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of 8th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow (ASCHT2021)	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K.Fukudome, M.Narita, H.Mamori and M.Yamamoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Numerical Simulation of Deposition Phenomena of a Molten High-Viscosity Droplet using E-MPS Method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of 8th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow (ASCHT2021)	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 稲川, 福留, 山本	4. 巻 -
2. 論文標題 氷粒子付着判定とマルチショットを導入したアイスクリスタル着氷の数値的研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本ガスタービン学会定期講演会2021講演論文集	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 高,福留,山本,水野,鈴木	4. 巻 C04-3
2. 論文標題 CFRPの電熱効果を用いた能動的防氷技術に関する数値的研究	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本流体力学会第35回数値流体力学シンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S.Uranai, K.Fukudome, H.Mamori, N.Fukushima and M.Yamamoto	4. 巻 7
2. 論文標題 Numerical Simulation of the Anti-Icing Performance of Electric Heaters for Icing on the NACA 0012 Airfoil	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Aerospace	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/aerospace7090123	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 D.Toba, K.Fukudome, H.Mamori, N.Fukushima and M.Yamamoto	4. 巻 36
2. 論文標題 Proposal of Novel Icing Simulation Using a Hybrid Grid- and Particle-Based Method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Mechanics	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jmech.2020.35	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 T.Abe, K.Asada, S.Sekimoto, K.Fukudome, T.Tatsukawa, H.Mamori, K.Fujii and M.Yamamoto	4. 巻 59
2. 論文標題 Computational Study of Wing Tip Effect for the Flow Control Authority of DBD Plasma Actuator	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIAA Journal	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2514/1.J059706	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T.Wada, K.Fukudome, H.Mamori and M.Yamamoto	4. 巻 51
2. 論文標題 Evaluation of the Aerodynamic Performance after the Icing Using E-MPS Method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Heat Transfer Research	6. 最初と最後の頁 1135-1149
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1615/HeatTransRes.2020033124	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 H.Mamori, K.Fukudome, K.Ogino, N.Fukushima and M.Yamamoto	4. 巻 16
2. 論文標題 Heat Transfer Enhancement and Torque Reduction by Traveling Wave-Like Blowing and Suction in Turbulent Taylor-Couette Flow	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Thermal Science and Technology	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jtst.2021jtst0003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 林亮介, 山本誠	4. 巻 48
2. 論文標題 ジェットエンジンにおける着氷現象と試験技術	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本ガスタービン学会誌	6. 最初と最後の頁 143-148
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 K.Hirose, K.Fukudome and M.Yamamoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Three-Dimensional Simulation of Ice Crystal Trajectory with State Change around Rotor Blade of Axial Fan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 村田龍哉, 福留功二, 山本誠	4. 巻 -
2. 論文標題 粒子法を用いた平板に衝突する2金属液滴の凝固シミュレーション	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本機械学会第98期流体工学部門講演会講演論文集	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 稲向隆, 浅田健吾, 関本諭志, 福留功二, 山本誠, 藤井孝蔵	4. 巻 -
2. 論文標題 DBDプラズマアクチュエータによるガーニーフラップ付きNACA0015翼周り流れ制御のLES	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本流体力学会第34回数値流体力学シンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 小出悠龍, 福留功二, 山本誠, 平川香林, 大庭芳則	4. 巻 -
2. 論文標題 格子ボルツマン法を用いたジェットエンジン圧縮機における非定常流の数値的研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本流体力学会第34回数値流体力学シンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 福留功二, 塚原隆裕, 守裕也, 山本誠	4. 巻 -
2. 論文標題 平面クエット流における乱流スポットの成長と非相似性の発生	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第36回生研TSFDシンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計22件(うち招待講演 2件/うち国際学会 11件)

1. 発表者名 Y.Gao
2. 発表標題 Numerical Investigation of Active Anti-Icing Technology Using Electro-Thermal Effect of CFRP
3. 学会等名 Asian Congress on Gas Turbines 2020 (ACGT2020) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M.Yamamoto
2. 発表標題 Multi-physics CFD Simulation of Deposition Phenomenon in a Jet Engine
3. 学会等名 8th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow (ASCHT2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K.Fukudome
2. 発表標題 Numerical Simulation of Deposition Phenomena of a Molten High-Viscosity Droplet using E-MPS Method
3. 学会等名 8th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow (ASCHT2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K.Fukudome
2. 発表標題 Numerical Simulation of Deposition Phenomena of a Molten High-Viscosity Droplet Using E-MPS Method
3. 学会等名 8th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow (ASCHT2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K.Hirose
2. 発表標題 Prediction of Secondary Ice Particle Size for Ice Crystal Icing Using MPS Method
3. 学会等名 Particles 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 R.Murata
2. 発表標題 Numerical Simulation of Solidification of Two Metal Droplets Impinged on Flat Plate Using Particle-based Method
3. 学会等名 Particles 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤
2. 発表標題 コルバンのアナログを用いた平板流れの粒子法熱伝達率モデルの開発
3. 学会等名 日本計算工学会第26回計算工学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福留
2. 発表標題 非対称加熱したNACA0012翼における着氷シミュレーションおよび防水性能の評価
3. 学会等名 日本流体力学会年会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 稲川
2. 発表標題 氷粒子付着判定とマルチショットを導入したアイスクリスタル着氷の数値的研究
3. 学会等名 日本ガスタービン学会定期講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福留
2. 発表標題 E-MPS法を用いた高粘性単一液滴の堆積現象の数値的研究
3. 学会等名 日本機械学会第99期流体工学部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河野
2. 発表標題 E-MPS法を用いた過冷却液滴凝固の数値シミュレーション
3. 学会等名 日本流体力学会第35回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高
2. 発表標題 CFRPの電熱効果を用いた能動的防氷技術に関する数値的研究
3. 学会等名 日本流体力学会第35回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 廣瀬
2. 発表標題 2次粒径予測に向けた氷粒子崩壊モデルの開発
3. 学会等名 日本流体力学会第35回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤
2. 発表標題 解像度可変型 MPS 法を用いた液滴粒子のデポジションの数値シミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会関東学生会第61回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 兼次
2. 発表標題 E-MPS 法を用いた薄い水膜を有する壁面への液滴衝突の数値的研究
3. 学会等名 日本機械学会関東学生会第61回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 馬場
2. 発表標題 回転翼における氷離脱モデルに関する数値的研究
3. 学会等名 日本機械学会関東学生会第61回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 池田
2. 発表標題 粒子崩壊を考慮した圧縮機におけるサンドエロージョンの数値シミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会関東学生会第61回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M.Yamamoto
2. 発表標題 Multi-Physics CFD Simulations in a Jet Engine
3. 学会等名 International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K.Fukudome
2. 発表標題 Numerical Simulation of Glaze Ice Formation with Accompanied by Water Film Flow Using E-MPS Method
3. 学会等名 International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M.Suzuki
2. 発表標題 Numerical Simulation of Particulate Erosion in a Single-Stage Turbine for Jet Engines
3. 学会等名 International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K.Fukudome
2. 発表標題 Anti-Icing Simulation with Electric Heater for NACA0012 Airfoil
3. 学会等名 SAE AEROTEC Digital Summit (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H.Mamori
2. 発表標題 Numerical Simulation of Super-Cooled Large Droplet Icing on Commercial Axial Fan Blade
3. 学会等名 SAE AEROTEC Digital Summit (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 M.Yamamoto (分担執筆) Editor : W.G.Habashi	4. 発行年 2023年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 433
3. 書名 Handbook of Numerical Simulation of In-Flight Icing	

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究室のホームページ : Yamamoto C.F.D. Laboratory
<https://www.rs.kagu.tus.ac.jp/yamamoto/indexj.html>

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
研究分担者	鈴木 正也 (Suzuki Masaya) (40548161)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・主任研究開発員 (82645)	
研究分担者	福留 功二 (Fukudome Koji) (70710698)	東京理科大学・工学部機械工学科・助教 (32660)	
研究分担者	福島 直哉 (Fukushima Naoya) (80585240)	東海大学・工学部・講師 (32644)	
研究分担者	守 裕也 (Mamori Hiroya) (80706383)	電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授 (12612)	

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