

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H06067

研究課題名(和文) 微粒子吸込みによる高圧タービンへの粒子付着現象の実験的/数値的調査

研究課題名(英文) Experimental and numerical investigation on particulate deposition phenomena due to solid particle ingestion in high pressure turbine

研究代表者

鈴木 正也 (Suzuki, Masaya)

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

研究者番号：40548161

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,300,000円

研究成果の概要(和文)：高圧タービンで発生する高温高速条件における粒子付着を想定した実験的/数値的な評価手法を開発，物理現象の解明に取り組んだ。  
実験では，燃料として灯油，酸化剤として圧縮空気を用いたバーナーを用いて，高温高速の粒子を試験体に衝突させた。支配的なパラメータとなる速度，角度，温度の影響を確認し，粒子付着あるいは試験体の損傷が発生する条件を調査した。  
数値解析については，JAXAの流体解析コードUPACSに粒子付着モデルを組み込んだ。高圧タービン初段静翼のデポジション解析を行い，粒子付着のパターンを明らかにした。主に粒子直径と翼表面温度が粒子付着に及ぼす影響を調査することで，目指すべき表面温度分布を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでほとんど明らかにされてこなかった高温高速条件における粒子付着の物理現象の解明，それを再現する試験・解析手法の構築がなされた。これにより，高圧タービンの設計・開発・メンテナンスに多大な貢献ができると考える。

研究成果の概要(英文)：Experimental and numerical methods for particle deposition in high-pressure turbines were developed. Using these methods, the deposition phenomena due to high-temperature and high-speed impingements were clarified.  
In the experiments, a burner rig with kerosene as a fuel and compressed air as an oxidant was applied to make the particles collide with materials. The influences on the deposition and erosion phenomena of the velocity, angle, and temperature, which are dominant parameters, were investigated. The deposition models were implemented in a computational fluid dynamics solver, UPACS, developed by JAXA. The numerical simulations of deposition on the stator vane in the first stage of the high-pressure turbine were conducted. The deposition pattern on the turbine vane was revealed. The effects of the particle diameter and vane surface temperature on the deposition were focused, and the surface temperature distribution, which is adequate for anti-deposition, was investigated.

研究分野：流体工学

キーワード：デポジション エロージョン マルチフィジックス 固気二相流 ジェットエンジン タービン 実験  
流体力学 数値流体力学

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。

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 航空用ガスタービンの運用環境によっては、環境に含まれる固体粒子（砂や火山灰など）を吸込む場合があり、各エンジン要素で固体粒子衝突に起因する粒子付着やエロージョンが発生することがある。これらの現象はエンジンの性能や寿命を低下させ、時として事故に発展する可能性もあることから、メーカーやエアラインは発生抑制、洗浄・修理、部品交換などの対応を求められる。

(2) 2010年に発生したアイスランドの火山噴火では、航空機の運航に多大な混乱が生じ、火山灰に対する航空輸送の安全性向上への関心が高まっている。一方、日本は国土に多数の火山があり、黄砂が頻繁に飛来する環境である。さらに、日本だけでなくアジア地域全体としても広大な砂漠地帯を抱えており、固体粒子吸込みが発生しやすい過酷な環境である。

(3) 本研究では、固体粒子吸込みによる粒子付着、特に高圧タービンで発生する粒子付着に着目する。ファンや圧縮機などの低温部では、汚れとして翼などに付着することで、その表面粗さにより摩擦損失を増加させる。燃焼器下流の高圧タービンでは、燃焼ガスにより熔融した固体粒子が燃焼ガスよりも低温の翼表面で急冷され付着する。高圧タービンで生じる粒子付着は、摩擦損失の増加だけでなく、材料の劣化や冷却の著しい阻害につながる。近年の超高温での運転を想定して設計される高圧タービンにおいては、膜冷却が必須となっているが、付着物により膜冷却流が翼表面から離脱することにより、冷却効率の低下や空力損失の増加を引き起こす。

(4) 高圧タービンの粒子付着は高温燃焼ガス、冷却空気、固体粒子、構造材料が相互に干渉するマルチフィジックス現象であり、そのメカニズムは非常に複雑である。アイスランドの火山噴火以降、欧米を中心に研究が活発化した。付着物による影響の評価が主で、粒子付着の発生メカニズムの解明は十分に行われていない。特に高温高速条件に関する知見が不足している。

### 2. 研究の目的

(1) 実験と数値解析の両面からのアプローチにより、高温高速条件における粒子付着の物理的な過程の解明を行う。

(2) 高温高速条件における粒子付着を再現する計算手法を構築し、高圧タービンで発生する粒子付着を予測する。

(3) 本研究の達成により、高圧タービンの設計・開発・メンテナンスに貢献できる。

### 3. 研究の方法

(1) 高圧タービン環境を想定した高温高速条件で粒子付着を実験的に再現するため、研究代表者らのグループで開発した試験装置を使用する。この試験装置は、燃料として灯油、酸化剤として圧縮空気を用いたHVAF(High Velocity Air Fuel)方式のバーナーにより高温高速燃焼ガスを生成し、バーナー燃焼室の下流から固体粒子を投入、バレル内で加速させて試験体に衝突させることにより粒子付着やエロージョンを生じさせる。衝突速度、衝突角度、衝突温度等をパラメータとして、平板や円筒形の試験体に対する固体粒子暴露試験を行う。実験では実際の高圧タービンを模擬することは困難であり、平板等の基本的な対象への固体粒子暴露に限定する。

(2) 実機高圧タービンのような環状翼列内の粒子付着については、数値計算により評価を行う。研究代表者の所属する宇宙航空研究開発機構(JAXA)で開発された汎用流体ソルバー「UPACS」に対し、粒子付着を再現する計算手法を組み込み、数値計算に使用する。評価対象は次世代のジェットエンジンに搭載されるであろう高圧タービンのトレンドを想定し、同じくJAXAの「グリーンエンジン技術の研究開発」で設計された高圧タービン翼列とする。

### 4. 研究成果

(1) 図1は試験装置の外観写真、図2はこの試験装置を用いて平板試験体に粒子暴露試験を行った際の写真である。高圧タービンに使用される耐熱材料は表面温度1000°Cを超えるような高温に耐えるため、おおよそ800°Cから1200°Cまでの範囲で試験を行った。図3は平板の表面温度を1150°C、粒子の衝突速度800 m/s、衝突角度60°の条件で試験を行った結果である。左図は赤外線熱画像から得た表面温度コンター、右図は付着物の外観を示している。この条件では、粒子暴露直後から平板表面で粒子の付着が始まり、それとともに付着物は平板の表面温度よりも高温(図3では付着物の最高温度は1262°C)になり、その上に徐々に粒子が堆積して成長する過程が観察された。

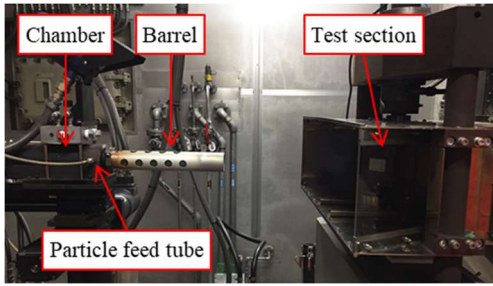


図 1 試験装置外観

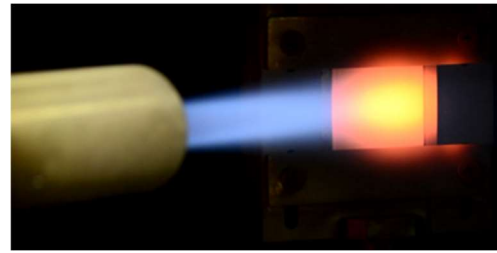


図 2 平板試験体の粒子暴露試験

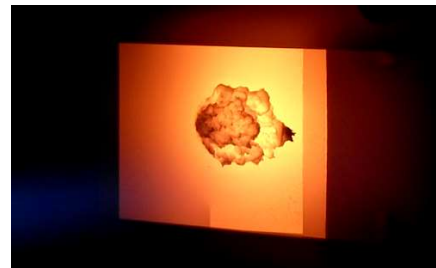
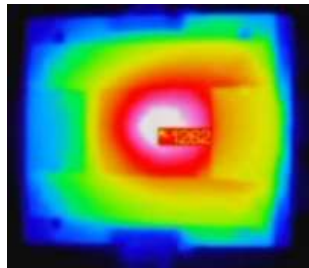


図 3 粒子暴露による平板の表面温度と付着物外観

(2) 一方、上記の試験条件よりも低温の状態として、表面温度  $1000^{\circ}\text{C}$  の条件で、衝突速度は  $800\text{ m/s}$ 、衝突角度を  $30, 60, 90^{\circ}$  とした場合の結果を図 4 に示す。この条件では粒子付着は発生せず、エロージョンによる損傷が確認された。さらに低温の  $800^{\circ}\text{C}$  においても同様にエロージョンが発生する結果が得られた。

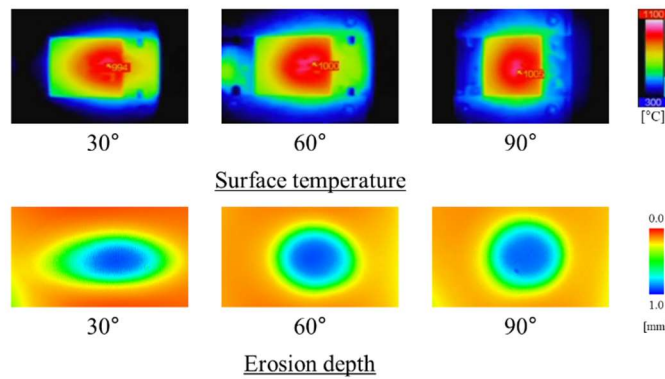


図 4 粒子暴露により損傷した平板の表面温度と表面形状

(3) 上記の粒子暴露試験で固気二相流の状態を仔細に計測することは難しいため、CFD も同時に行った。特に、装置の都合上、試験体を配置した場合の計測は難しく、試験体を配置しない状態で計測した結果から試験体を配置した場合の状態を予測する必要があるため、この観点で比較を行った。試験体の有無による渦構造の違いを図 5 に示す。図中の等値面は速度勾配テンソルの第二不変量であり、色は無次元ヘリシティを表している。背景のコンターは全圧分布である。バレル出口では規則的かつ二次元的な渦構造（不足膨張に起因するダイヤモンドショックによる）が確認できるが、試験体なしの条件ではポテンシャルコアの消失する近辺から三次元的な渦が形成され、試験体ありの条件では試験体からの反射波の干渉を受けてバレル出口に近い領域から三次元的な構造に遷移し、急速に混合が進むとともに試験体付近に複雑な渦が発生して下流へと流れている様子が確認できる。

(4) 図 6 は粒子の速度と温度を試験体のない場合と  $90^{\circ}$  に配置した場合について比較している。バレル内部で加熱・加速されるが、バレル出口付近のダイヤモンドショック構造には追従しておらず、粒子速度と粒子温度ともに気相に対する追従性には一定の時間遅れが存在することが分かる。特に粒子速度は追従性が低い。この結果として、ガス流が複雑な構造であるのに対し、

粒子の衝突速度や温度は比較的単純な分布となっている。試験体ありの条件では、跳ね返った粒子が低温低速の状態に滞留しているが、衝突前の状態は試験体の有無によらず、ほぼ一致していることから、試験体なしの計測結果から試験体ありの状態を比較的容易に推定できることが分かった。

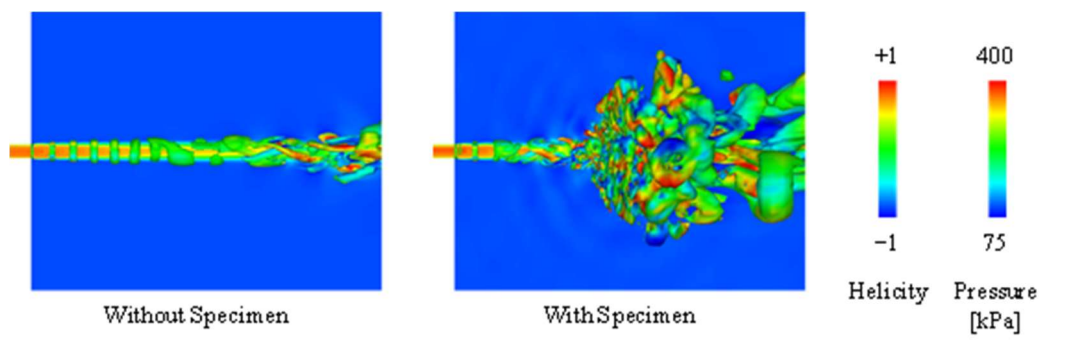


図5 粒子暴露試験を模擬した CFD 結果 (ガス流)

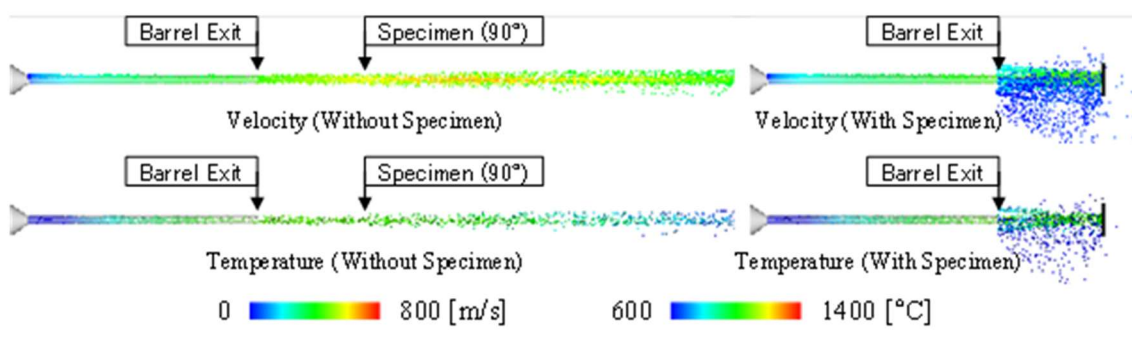


図6 粒子暴露試験を模擬した CFD 結果 (粒子)

(5) 粒子の付着モデルとして5通りのモデルを検討した。内訳は、衝突速度を閾値と比較して付着の判定を行う臨界速度モデルを2種、粒子の粘性を閾値と比較して付着の判定を行う臨界粘性モデルを2種、粒子衝突をバネ・マスに近似して付着判定を行うOSUモデルである。図7はこれらのモデルを用いて、実験データと比較した例を示している。この条件では臨界速度モデルは過剰に付着が発生し、臨界粘性モデルはほとんど付着しない結果となった。この結果からOSUモデルを今後の検討に使用することにした。

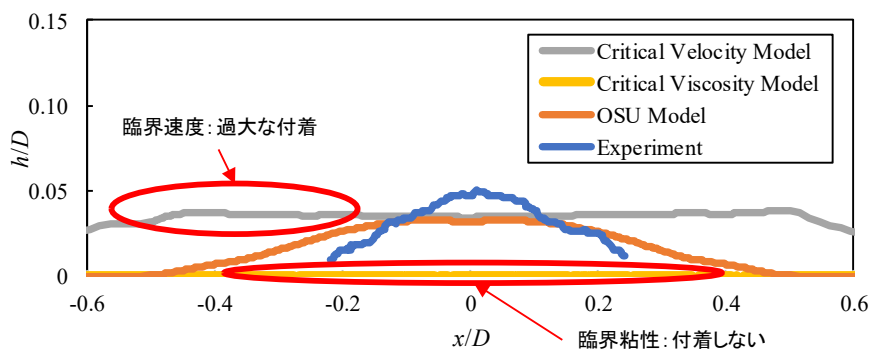


図7 粒子付着モデルの検証

(6) 構築された数値解析手法を用いて、高圧タービン初段静翼の粒子付着計算を行った。図8は粒子付着が発生する前の流れ場を示している。チョーク流量以下の条件であり、衝撃波や剥離は発生していない。図9は粒子直径を5, 10, 50  $\mu\text{m}$  としたときの粒子軌道を示している。粒子直径が5  $\mu\text{m}$  のケースでは粒子はガス流に追従しやすく、翼の負圧面、前縁から正圧面のミッドコード付近への粒子衝突が見られない。主に、前縁および正圧面の後縁付近に粒子が衝突している。粒子直径10  $\mu\text{m}$  では、粒子はガス流に追従しづらくなり、前縁から正圧面ミッドコードの

範囲についても衝突が発生している。粒子直径  $50 \mu\text{m}$  では、ほぼ流入時の慣性のままに翼に粒子が衝突している。

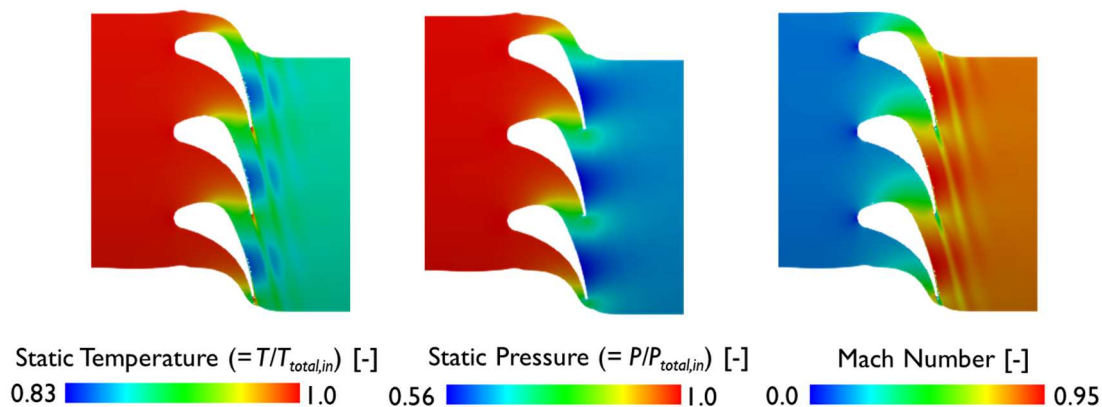


図 8 高圧タービン初段静翼周りの流れ場 (ミッドスパン)

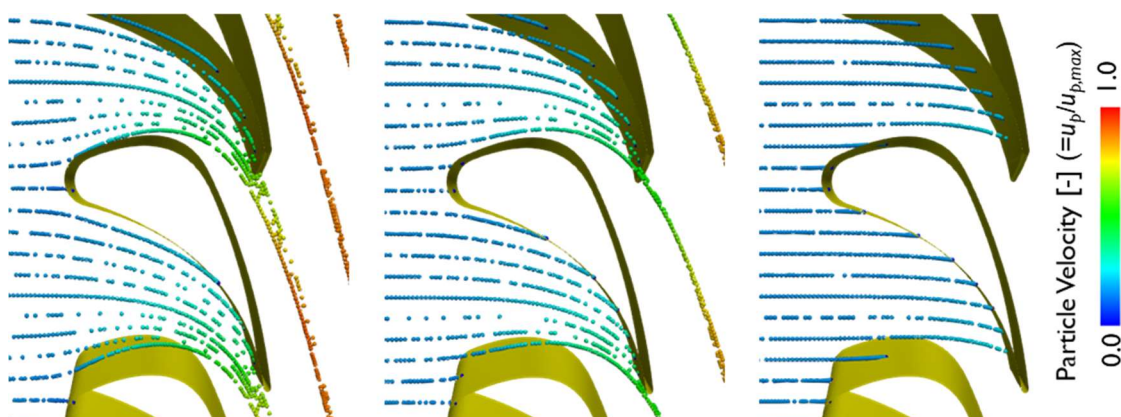


図 9 高圧タービン初段静翼周りの粒子軌道 (ミッドスパン)

左から粒子直径  $5, 10, 50 \mu\text{m}$

(7) 粒子直径の違いによる翼面への付着物の高さ分布の比較を図 10 に示す。翼負圧面については、粒子直径が大きくなるにつれて、粒子の衝突範囲が広がるため、粒子付着の発生範囲も広がっている。翼正圧面については、粒子直径が  $5 \mu\text{m}$  では前縁からミッドコード付近に粒子が衝突しないことから、粒子の付着しない領域が観察される。粒子直径  $10, 50 \mu\text{m}$  では、この領域が消失している。粒子直径  $10 \mu\text{m}$  のケースでは翼後縁が最も付着が発生している。粒子直径  $50 \mu\text{m}$  では、後縁部が隣接する翼の影になるため、粒子が衝突せず、前縁部の粒子付着が卓越する結果となった。

(8) 上記の実験および数値計算の結果の通り、本研究では、粒子付着の評価を可能とする実験/数値計算手法を獲得することができた。今後は得られた手法を活用し、粒子付着を抑制する技術の研究開発に着手する。

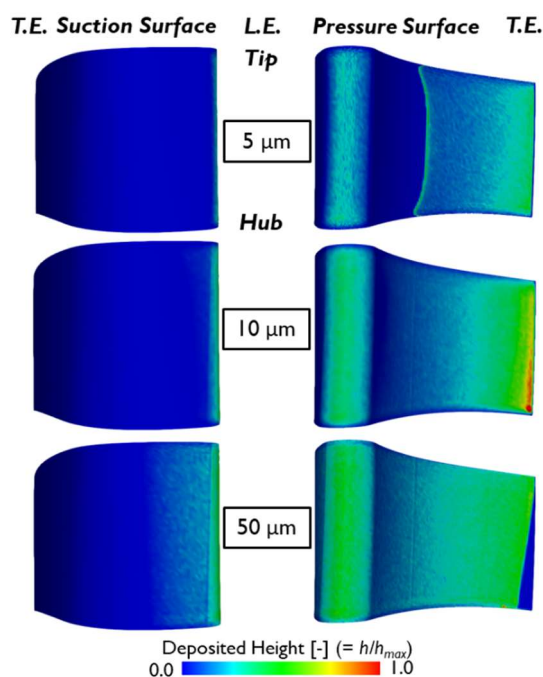


図 10 高圧タービン初段静翼の付着物高さ分布

上から粒子直径  $5, 10, 50 \mu\text{m}$

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 鈴木正也, 山本誠	4. 巻 47
2. 論文標題 ジェットエンジンにおけるマルチフィジックスCFDシミュレーション	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本ガスタービン学会誌	6. 最初と最後の頁 382 ~ 388
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27件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 10件）

1. 発表者名 河野結香, 福留功二, 山本誠, 鈴木正也, 大北洋治
2. 発表標題 UPACSを用いた高温環境における粒子付着モデルの検証
3. 学会等名 日本機械学会関東学生会第59回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Mizutori, K., Fukudome, K., Yamamoto, M., Suzuki, M. and Okita, Y.
2. 発表標題 Numerical Investigation of Deposition Phenomena on High-pressure Turbine Vane
3. 学会等名 The 7th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics, APCOM 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Arai, N., Fukudome, K., Yamamoto, M., Suzuki, M. and Okita, Y.
2. 発表標題 Numerical Simulation of Aerodynamic Performance Deterioration by Erosion for Leaned Turbine Vane
3. 学会等名 The 7th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics, APCOM 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上野学, 守裕也, 福留功二, 山本誠, 鈴木正也, 大北洋治
2. 発表標題 UPACSを用いたタービン静動翼におけるサンドエロージョン現象の数値予測
3. 学会等名 第33回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河野結香, 水取賢太, 福留功二, 山本誠, 鈴木正也, 大北洋治
2. 発表標題 高温環境における粒子付着モデルの検証
3. 学会等名 第33回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yagi, T., Fukudome, K., Yamamoto, M., Mizuno, T., Kazawa, J. and Suzuki, M.
2. 発表標題 Numerical Investigation of Passive Anti-Icing Technology using Sweep for Fan Rotor Blade
3. 学会等名 International Gas Turbine Congress 2019 Tokyo (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Arai, N., Fukudome, K., Yamamoto, M. and Suzuki, M.
2. 発表標題 Influence of Vane Lean on Erosion and Aerodynamic Performance in High-Pressure Turbine
3. 学会等名 International Gas Turbine Congress 2019 Tokyo (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mizutori, K., Fukudome, K., Yamamoto, M. and Suzuki, M.
2. 発表標題 Computational Study of Deposition Phenomena on High-pressure Turbine Vane using UPACS
3. 学会等名 International Gas Turbine Congress 2019 Tokyo (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荒井直己, 福留功二, 山本誠, 鈴木正也, 大北洋治
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第47回日本ガスタービン学会定期講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 有賀寛純, 和田展忠, 水野拓哉, 鈴木正也, 賀澤順一, 野崎理
2. 発表標題 防除氷のためのCFRP電流印加による発熱効果に関する実験的研究
3. 学会等名 第47回日本ガスタービン学会定期講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 八木智哉, 福留功二, 山本誠, 水野拓哉, 賀澤順一, 鈴木正也
2. 発表標題 スweepファン動翼における防氷と空力性能に関する数値的調査
3. 学会等名 日本流体力学会年会2019
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 Mizutori, K., Fukudome, K., Yamamoto, M. and Suzuki, M.
2. 発表標題 Numerical Simulation of Deposition Phenomena on High-Pressure Turbine Vane Using UPACS
3. 学会等名 ASME-JSME-KSME 2019 Joint Fluids Engineering Conference AJKFLUIDS2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ueno, M., Mamori, H., Fukudome, K., Yamamoto, M., and Suzuki, M.
2. 発表標題 Numerical Simulation of Sand erosion on CMC and Ni-based Superalloy Vanes and End Walls in High Pressure Turbine
3. 学会等名 The 14th International Symposium on Experimental Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, ISAI14 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荒井直己, 福留功二, 山本誠, 鈴木正也
2. 発表標題 UPACSを用いた高圧タービン初段静翼のリーク形状と壊食量の相関調査
3. 学会等名 日本機械学会関東学生会第58回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水取賢太, 福留功二, 山本誠, 鈴木正也
2. 発表標題 UPACSを用いた高圧タービン初段静翼におけるデポジション現象の数値解析
3. 学会等名 日本機械学会関東学生会第58回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木正也, 山根敬
2. 発表標題 耐熱材料のエロージョン試験法に関する研究
3. 学会等名 第46回日本ガスタービン学会定期講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上野学, 守裕也, 福留功二, 山本誠, 鈴木正也
2. 発表標題 UPACSを用いたタービン静翼における延性・脆性材料のサンドエロージョン挙動の数値解析
3. 学会等名 日本流体力学会年会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ueno, M., Mamori, H., Fukudome, K., Yamamoto, M., and Suzuki, M.
2. 発表標題 Sand Erosion Behavior of CMC and Ni-based Superalloy in Turbine Stator
3. 学会等名 Asian Congress on Gas Turbines 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Suzuki, M. and Yamane, T.
2. 発表標題 Development of High-Temperature High-Velocity Sand Erosion Apparatus
3. 学会等名 ASME Turbo Expo 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木正也, 賀澤順一, 水野拓哉
2. 発表標題 耐特殊気象エンジン技術の研究開発状況
3. 学会等名 日本航空宇宙学会第49期年会講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Suzuki, M., Hataya, H., Mamori, H., Fukushima, N. and Yamamoto, M.
2. 発表標題 Multi-Physics Simulation of Particulate Erosion Phenomena Using One-Way and Two-Way Couplings
3. 学会等名 13th International Symposium on Experimental Computational Aerothermodynamics of Internal Flows (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鈴木正也, 浮川直章, 藤沢良昭, 山根敬
2. 発表標題 高温高速エロージョンの光学計測
3. 学会等名 第45回可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鈴木正也, 畠谷尊明, 守裕也, 福島直哉, 山本誠
2. 発表標題 サンドエロージョン予測に対する境界適合格子に適した損傷形状表現と混相流の取り扱いに関する検討
3. 学会等名 日本流体力学会年会2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鈴木正也, 浮川直章, 藤沢良昭, 山根敬
2. 発表標題 高温高速エロージョン試験リグの開発
3. 学会等名 日本機械学会2017年度年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鈴木正也, 山根敬
2. 発表標題 高温高速固気二相流の数値シミュレーション
3. 学会等名 第45回日本ガスタービン学会定期講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鈴木正也
2. 発表標題 航空エンジンにおけるマルチフィジックス・シミュレーションの展開
3. 学会等名 第7回計算力学シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 上野学, 守裕也, 山本誠, 鈴木正也
2. 発表標題 UPACSを用いた高圧タービン初段静翼におけるサンドエロージョン現象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57回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
--	---------------------------	-----------------------	----