

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：11301
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2021～2023
課題番号：21H01241
研究課題名（和文）ガスタービンコンプレッサー流動・エアロゾル・凝縮・付着マルチフィジックスの探求

研究課題名（英文）Multiphysics of aerosol, condensation, and detachment in flows of gas turbine compressor

研究代表者
山本 悟（Yamamoto, Satoru）

東北大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：90192799
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 8,400,000円

研究成果の概要（和文）：大気中のエアロゾルを含む湿り空気の蒸発・凝縮・付着現象を伴うマルチフィジックス熱流動を支配する数値モデルを開発した。それを発電用ガスタービン圧縮機（GTC）内の高湿り空気流れを数値解析に応用して、これら現象を伴うGTC熱流動がその性能に与える影響を明らかにした。さらに、部分負荷運転するGTC、境界層流入する航空用GTCの湿り空気流れにも応用した。これら研究成果は、International Journal of Heat and Mass Transferに発表するとともに、2022年、2023年のASME Turbo Expo国際会議でも発表した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

再生可能エネルギーの導入に伴い、天候の変化による電力負荷変動が問題になっている。現在、この負荷変動を火力発電所のガスタービンが部分負荷運転により、平滑化している。ところが、本来設計条件で運用すべきガスタービンの出力を落として非設計状態である低流量状態で運転しているため、ガスタービン圧縮機の翼に想定外の負荷がかかり、翼が欠損することが報告されている。さらには大気中の湿度や入口噴霧が予想以上に影響を与えていることが示唆されている。本研究で開発した数値モデルにより、その蒸発・凝縮・付着現象を伴うマルチフィジックス熱流動を解明することが期待される。

研究成果の概要（英文）：A mathematical model governing multiphysics flows associated with evaporation, condensation, and adhesion phenomena of moist air containing aerosols in the atmosphere was developed. This model was applied to a moist-air flow in an industrial gas turbine compressor (GTC), and the influence of the GTC flow accompanied by the phenomenon on the performance was clarified. Furthermore, the model was applied to the moist-air flow of GTC operating under partial-load condition and an aircraft GTC with boundary layer ingestion. These research works were published in the International Journal of Heat and Mass Transfer, as well as at the ASME Turbo Expo international conference in 2022 and 2023.

研究分野：計算数理学

キーワード：数値流体力学 数値モデル 凝縮 付着 ガスタービン

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

性能向上を目的に産業用ガスタービンコンプレッサー (GTC) で GTC 入口に液滴を噴霧 (吸気冷却) することが知られているが、それに相反して大気中のエアロゾルが GTC 翼に付着することで性能が低下する問題が指摘されている。これまでも GTC 翼表面の微小粒子付着と湿りとの間に強い相関があることが研究により報告されていたが、逆圧力勾配の強い GTC 内部では高温になって湿りが蒸発すると思われる経緯があり、湿りの起源について明確な分析はなされてこなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的はまず、大気中のエアロゾルを含む湿り空気の蒸発・凝縮・付着現象を伴うマルチフィジクス熱流動を支配する数値モデルを構築して、これまで開発してきた GTC の熱流動大規模シミュレーション技術に融合することである。次に、産業用 GTC ならびに航空用 GTC の高湿り空気熱流動をスーパーコンピュータにより大規模数値解析して、液滴噴霧を伴う産業用 GTC 内部熱流動や大気中液滴が流入する航空用 GTC 内部熱流動が、それぞれの GTC 性能に与える影響を明らかにすることである。

3. 研究の方法

まず始めに、非平衡凝縮 (nonequilibrium condensation) をモデリングした。特に、非平衡凝縮を伴う湿り蒸気や湿り空気の熱流動がターボ機械の性能にどのような影響を与えているかを正確に把握するためには、非平衡凝縮モデルが必須である。凝縮・凝集を支配する一般力学方程式 (General Dynamic Equation, 略して GDE) は、微小液滴の核生成と成長を考慮して次式で定義される。

$$\frac{Df}{Dt} = I\delta(v - v^*) + f_{coag} \quad (1)$$

ここで、 f は 時間 t 、空間座標 $x_j (j=1,2,3)$ ならびに半径 r の球形液滴の体積 v の関数、 $f = f(v, x_j, t)$ として定義される。いま、同じ大きさの液滴が局所的に様に分布している単一分散系(monodisperse)を仮定すれば、式(1)から次の二つの式が導出される。

$$\frac{\partial \rho n}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho n u_j) = I \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho \beta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \beta u_j) = \frac{4}{3} \pi \rho_p \left(I r^{*3} + 3 \rho n \bar{r}^2 \frac{d\bar{r}}{dt} \right) \quad (3)$$

ここで、 ρ は混合流体の全密度、 $u_j (j=1,2,3)$ は流速、 n は単位質量当たりの液滴の数密度、 β は液滴の質量分率、 I は液滴の核生成率、 ρ_p は液滴の密度、 \bar{r} は液滴の平均半径である。 \bar{r} は次式により代数的に求めることができる。

$$\bar{r} = \left(\frac{3\beta}{4\pi\rho_p n} \right)^{1/3} \quad (4)$$

最終的に、式(2), (3)が圧縮性ナビエ・ストークス方程式と連立して解かれる。

湿り蒸気を支配している非平衡凝縮では、図 1 に示すように水蒸気の温度と圧力が降下して、本来は液体になる飽和蒸気圧曲線の値を超えてさらに降下した過冷却な状態になり、その後急激な凝縮が開始する。同時に潜熱も放出される。この温度と圧力のターニングポイントは Wilson point と呼ばれる。非平衡凝縮は、無核状態から液滴が生成される均一核生成

(homogeneous nucleation) に支配されている。

液滴の核生成率 I は、古典凝縮論 (classical condensation theory) に基づく次式により算出する。

$$I = \frac{\alpha_c}{1+\theta} \sqrt{\frac{2\sigma}{\pi m^3}} \frac{\rho_v^2}{\rho_p} \exp\left(-\frac{\Delta G^*}{k_B T}\right) \quad (5)$$

α_c , θ , m , σ , ρ_v , k_B , T は、それぞれ凝縮係数 (Condensation coefficient)、Kantrowitz 補正項、液滴を構成する分子 1 個の質量、液滴の表面張力、水蒸気の密度、Boltzmann 定数、場の静温である。式(5)は、水蒸気が液滴に相変化するのに必要な自由エネルギー (free energy) の最大値 ΔG^* に支配されている。 ΔG^* は次式のように導出される。

$$\Delta G^* = \frac{4}{3} \pi r_p^{*2} \sigma \quad (6)$$

r_p^* は臨界核半径。 ΔG^* は r_p^* の関数であると同時に液滴の表面張力 σ の関数であることがわかる。図 2 に液滴半径と自由エネルギーの関係を示す。過飽和度を S とすれば、この値が大きくなれば、 ΔG^* は小さくなり、飽和状態で ΔG^* は無限大になる。これは無核状態からの凝縮が飽和状態では起こり得ないこと、過冷却度が高いほど凝縮が起こり易いことを意味している。また、液滴半径が臨界核半径のとき、液滴は準安定な状態にあり、それより大きくなると液滴は成長し、小さくなると蒸発することを示している。液滴の成長は、Hertz-Knudsen 則に基づいた成長モデルにより計算される。

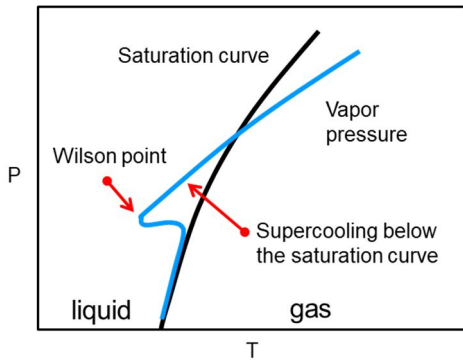


Fig. 1 Supercooled condition

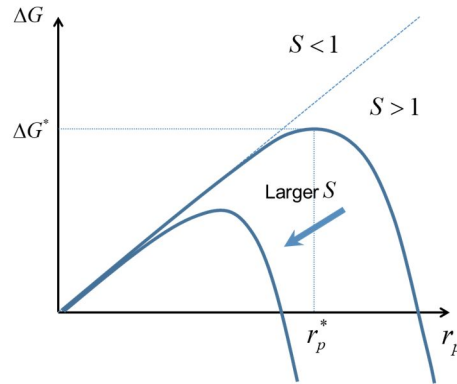


Fig. 2 Free energy curves

次に、液滴粒子の付着モデルはエアロゾル粒子の沈着現象に基づいてモデリングした。質量 m 、半径 r の球形粒子の運動方程式は

$$m \frac{dv}{dt} = -\frac{v-u}{B} + F_{external} \quad (7)$$

と定義した。ここで v , u はそれぞれ粒子と気体の速度である。 B は粒子の移動度で、 μ m 程度より小さい粒子では $B = C_c / 6\pi\mu r$ で与えられる。 C_c はカニンガムの補正係数 (Cunningham correction)、 μ は気体の分子粘性である。また、 $F_{external}$ は粒子に働く外力の総和である。気体の速度は圧縮性ナビエ・ストークス方程式により求める。粒子濃度の流束ベクトル F は次式で定義される。

$$F = vn - D_p \nabla n + BF_{external} \quad (8)$$

n は粒子の数密度、 D_p は粒子の拡散係数である。したがって、粒子数密度の保存式は、

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot F = 0 \quad (9)$$

ここで、対流項は粒子の速度で定義される。粒子の拡散係数 D_p はブラウン運動に伴う拡散と乱流に伴う拡散の和、 $D_p = D_B + D_i$ として定義される。このうち、 D_i は粒子が十分小さい場合に

は渦粘性と等価であると仮定して与えられる。一方、 D_B は次式で定義される。

$$D_B = \left(\frac{k_B T}{6\pi\mu r} \right) C_c \quad (10)$$

k_B は Boltzmann 定数。カニンガム補正係数 C_c は Knudsen Kn 数が十分大きい (粒子濃度が希薄) 場合には、 $C_c = 1 + 2.7Kn$ で与えられる。外力 $F_{external}$ に該当するものは重力や静電力などである。垂直方向から壁面に衝突する粒子のすべて、もしくはその一部が壁に付着するという仮定に基づき、粒子の付着速度 V_{dep+} は、粒子の平均数密度 n_{mean} ならびに摩擦速度 u_* により次式で定義される。

$$V_{dep+} = \frac{(f_2)_{wall}}{n_{mean} u_*} \quad (11)$$

$(f_2)_{wall}$ は壁面に付着する粒子の流束。 $u_* = \sqrt{\tau_{wall} / \rho}$ 。 τ_{wall} は気体の壁面せん断応力。気体と粒子間のすべり速度が平衡状態になるまでの粒子緩和時間 (Particle relaxation time) τ は次式で定義される。

$$\tau = \frac{2\rho_p r^2}{9\mu} C_c \quad (12)$$

さらに無次元化された粒子緩和時間 τ_+ は

$$\tau_+ = \frac{\rho\tau u_*}{\mu} \quad (13)$$

と定義される。

円管内発達乱流中における付着の実験的研究により、粒子の付着速度 V_{dep+} と粒子緩和時間 τ_+ との関係調べた結果、粒子の付着は異なる 3 つの付着現象に支配されていることが明らかにされている。まず τ_+ が十分小さい (約 1 以下) の場合には、粒子の付着は乱流渦の運動が支配的であり、次に τ_+ が約 1 から 10 の領域は壁面近傍で粒子の慣性運動により気体流動から逸脱し始めるため、 τ_+ が 10 倍増大するに間に V_{dep+} は 4 ケタ以上増大する。 τ_+ が 10 以上になる領域は粒子の慣性力が乱流拡散を卓越している領域である。本研究では、特に τ_+ が約 1 から 10 の領域に着目して、数理モデルを構築した。なお、付着モデルはすべて単一分散系の仮定に基づいている。

4 . 研究成果

今回の研究では、GTC 入口から流入した直径 $1\mu\text{m}$ 以下の微小粒子が、GTC 初段動翼の遷音速域で加速されることで非平衡凝縮が発生して粒子周りに液滴が形成され、それが翼に付着する可能性が示された。特に、湿度がゼロの場合と湿度が 90% の場合について粒子の付着率を比較したところ、湿度 90% の方が、5.7 倍付着率が高いことが示された。この結果は大気中の湿度が予想以上に GTC 翼へのエアロゾル付着を助長している可能性を示唆している。さらに液滴噴霧の際の GTC 入口からの液滴が、微小粒子の翼への付着を促進することも示された。本研究の成果は、Int. J. Heat and Mass Transfer (IF=5.6) に発表した。また、発電用 GTC 遷音速圧縮機の 1.5 段の多段静動翼列の湿り空気流れの数値解析に応用して、湿りが性能に与える影響について検証した。

Fig. 3 に、ガスタービン圧縮機 1.5 段を全周計算して得られた 50% スパンにおける瞬間温度分布を示す。微小液滴噴霧の有無を想定した場合の計算結果である。左図の入口微小液滴無しの結果と比べて、入口液滴噴霧を仮定した湿り度 0.5% の右図では、1 段目動翼前縁に発生した離脱衝撃

波後方で温度が低下している結果が示されている。これは、入口から流入する湿り空気が衝撃波により蒸発して、潜熱を吸収したことによる温度低下である。実際の作動環境において、大気中の水蒸気やその凝縮・蒸発を考慮した性能の見積もりが必要であることを示唆している。

Fig. 4には、Fig.3と同条件における瞬間湿度分布を示す。入口微小液滴無しの場合には、わずかな凝縮が発生しているものの、無視できる程度のものであるのに対して、入口湿度0.5%の場合には、液滴が初段動翼の中まで入りこんでいる。その後、衝撃波により大部分が蒸発してしまうが、一部の液滴は十分蒸発しきれず、衝撃波後方にまで達している。すなわち、これが翼表面に液滴が付着する原因の一つであることを、世界で初めて見出した。本研究成果については、ガスタービン圧縮機への液滴付着を精力的に研究しているイタリアの研究グループが本研究をすでにInt. J. Heat and Mass Transferで引用している[1]。

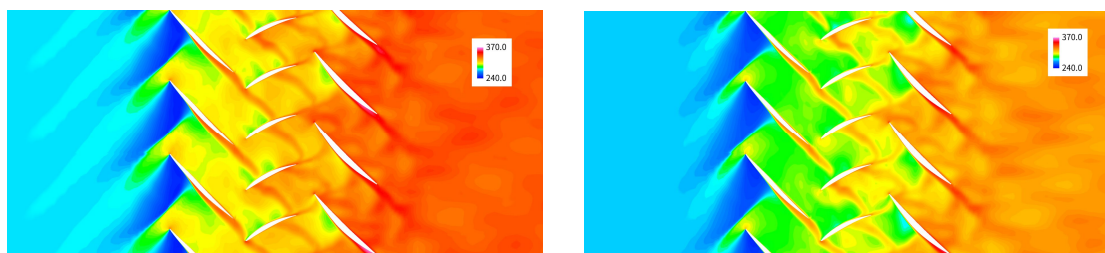


Fig. 3 Instantaneous temperature distributions at 50% span with and without inlet wetness (left: without inlet wetness, right: 0.5% inlet wetness)

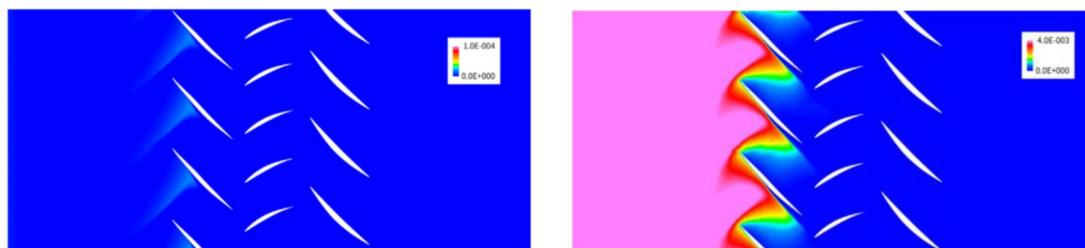


Fig. 4 Instantaneous wetness distributions at 50% span with and without inlet wetness (left: without inlet wetness, right: 0.5% inlet wetness)

電力負荷変動に対応するため実施されている部分負荷条件を想定した、発電用 GTC 遷音速圧縮機の入口案内翼(IGV)+1.5 段の多段静動翼列の湿り空気流れについても数値解析した。この研究成果は、2022 年 6 月にロッテルダムならびに 2023 年 6 月にボストンでそれぞれ開催された ASME Turbo Expo で発表した。一方、航空用 G T C の遷音速圧縮機を模擬した NASA Stage 37 を対象にして、最近注目されている境界層流入型(BLI)エンジンにおける非一様流入条件を仮定した湿り空気流れを数値解析して、非一様流入が湿り空気流れに与える影響を検証した。その結果、湿度が増加するにつれて、翼列周方向に局所的な剥離渦が形成されることが明らかになった。これは、BLI エンジンにおいて、湿り空気はその不安定性を助長する恐れを示していることを示唆している。本研究の成果は、2023 年 11 月に、Int. Gas Turbine Congress 2023 Kyoto で発表した。

さらに、粗大液滴を含む湿り空気流れの数値モデルを新たに構築して、粗大液滴がタービン翼への付着に深く関わっていることを明らかにした。本研究の成果は、2023 年 12 月に日本流体力学会数値流体力学シンポジウムで発表した。あいにく、この研究に付着モデルを組み込みまでは、本研究期間では実現しなかったが、現在、タービン翼ならびに遷音速圧縮機翼周りの湿り空気流れにおける粗大液滴の翼への付着現象を数値解析中である。

被引用文献

[1] R. Friso et al., Towards an Innovative Mechanistic Model to Predict the Detachment Process of a Deposited Layer, Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 200, (2023), 123525.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Hagita Yasuharu, Miyazawa Hironori, Furusawa Takashi, Yamamoto Satoru, Yonezawa Koichi, Umezawa Shuichi, Ohmori Shuichi, Suzuki Takeshi	4. 巻 GT2022-80251
2. 論文標題 The Effect of Partial-Load Operation on a Gas Turbine Compressor of an Advanced Combined Cycle Power Plant	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of ASME 2022 Turbo Expo	6. 最初と最後の頁 12 page
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/GT2022-80251	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 Yamamoto Satoru, Araki Koki, Moriguchi Shota, Miyazawa Hironori, Furusawa Takashi, Yonezawa Koichi, Umezawa Shuichi, Ohmori Shuichi, Suzuki Takeshi	4. 巻 178
2. 論文標題 Effects of wetness and humidity on transonic compressor of gas turbine	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 121649(1-13)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121649	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 MIYAZAWA Hironori, ARAKI Koki, FURUSAWA Takashi, YAMAMOTO Satoru, UMEZAWA Shuichi, YONEZAWA Koichi, OHMORI Shuichi, SUZUKI Takeshi	4. 巻 2021.15
2. 論文標題 Unsteady flow simulation of industrial gas turbine compressor under start-up operation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the International Conference on Power Engineering (ICOPE)	6. 最初と最後の頁 2021-0209(1-4)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jsmeicope.2021.15.2021-0209	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 Hagita Yasuharu, Hayakawa Riku, Miyazawa Hironori, Furusawa Takashi, Yamamoto Satoru	4. 巻 1
2. 論文標題 Self-Organization of Unsteady Full-Annulus Flows in a Gas Turbine Compressor Under Operating Conditions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of ASME 2023 Turbo Expo	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） 10.1115/GT2023-101937	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 Winiewski Piotr, Dykas Sawomir, Miyazawa Hironori, Furusawa Takashi, Yamamoto Satoru	4. 巻 201
2. 論文標題 Modified heat transfer correction function for modeling multiphase condensing flows in transonic regime	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 123597 ~ 123597
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123597	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 山本悟, 宮澤弘法, 古澤卓	4. 巻 51
2. 論文標題 デジタルツイン数値タービンの研究開発	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ターボ機械	6. 最初と最後の頁 19-25
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 -

[学会発表] 計9件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 萩田泰晴, 宮澤弘法, 古澤卓, 山本悟
2. 発表標題 全周流動計算に基づく発電用ガスタービン圧縮機部分負荷運転時の安定性向上の検討
3. 学会等名 第50回日本ガスタービン学会定期講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 徳山好紀, 萩田泰晴, 宮澤弘法, 古澤卓, 山本悟
2. 発表標題 部分負荷運転時の発電用ガスタービン圧縮機を通る湿り空気流れの全周解析
3. 学会等名 第50回日本ガスタービン学会定期講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 JUNG SEUNGYEON, 高島大夢, 宮澤弘法, 古澤卓, 山本悟
2. 発表標題 非一様流入条件下で作動する軸流圧縮機静動翼列全周の非定常流動シミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会第100期流体工学部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宮澤弘法, 萩田泰晴, 古澤卓, 山本悟
2. 発表標題 産業用ガスタービン圧縮機静動翼列における不安定流動の非定常全周シミュレーション
3. 学会等名 第36回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 萩田 泰晴, 徳山好紀, 宮澤弘法, 古澤卓, 山本悟, 梅沢修一, 米澤宏一, 鈴木武志, 大森修一
2. 発表標題 電力負荷変動対応時の実機ガスタービンコンプレッサー内部非定常流動解析
3. 学会等名 第49回日本ガスタービン学会定期講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Riku Hayakawa, Yasuharu, Hagita, Hironori Miyazawa, Takashi Furusawa, Satoru Yamamoto
2. 発表標題 Simulation Data Classification for Full-Annulus Flows of Gas Turbine Compressor
3. 学会等名 International Gas Turbine Congress 2023 Kyoto (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Jung Seungyeon, Hironori Miyazawa, Takashi Furusawa, Satoru Yamamoto
2. 発表標題 Unsteady Moist-Air Flow Simulation of Full-Annulus Axial Compressor with Boundary Layer Ingestion
3. 学会等名 International Gas Turbine Congress 2023 Kyoto (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 宮澤弘法, 萩田泰晴, 早川陸駆, 古澤卓, 山本悟
2. 発表標題 産業用ガスタービン圧縮機翼列流動の全周計算に基づく不安定稼働条件の分類
3. 学会等名 第51回日本ガスタービン学会定期講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 富田 謙衛, 古澤 卓, 宮澤 弘法, 笹尾 泰洋, 山本 悟
2. 発表標題 液滴速度非平衡を考慮した湿り空気のタービン翼列流動シミュレーション
3. 学会等名 第37回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2023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
研究 分担 者	宮澤 弘法 (Miyazawa Hironori) (20844335)	東北大学・情報科学研究科・助教 (11301)	

6. 研究組織（つづき）

	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	古澤 卓 (Furusawa Takashi) (80637710)	東北大学・情報科学研究科・准教授 (11301)	

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