

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04487

研究課題名（和文）極超音速希薄風洞を用いた希薄空力計測とMD解析による表面粗さ依存性の解明

研究課題名（英文）Investigation of Surface Roughness Dependence on Rarefied Aerodynamics based on Hypersonic Rarefied Wind Tunnel Measurement and Molecular Dynamics Simulations

研究代表者

小澤 宇志（Ozawa, Takashi）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・主任研究開発員

研究者番号：70567544

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、極超音速希薄風洞実験と数値解析を行うことにより、極超音速希薄気体空力現象の計測手法を確立し、物質表面係数及び表面粗さ依存性を評価することによる希薄空力予測精度の向上を目的とする。本研究では、数値解析による形状検討の結果、透過型チューブ模型を用いることで、表面係数物質依存性・表面粗さ依存性の影響評価が可能であることがわかった。希薄風洞実験との比較検証の結果、拡散反射比が高い解析結果と一致が見られた。また、MD表面反射解析コードを開発し、表面を模擬した粒子表面衝突システムを構築した。表面微細加工を用いることによって、依存性を制御できる可能性を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

希薄気体領域の空力特性予測は、これまで粒子数値解析に依存してきており、表面モデル依存性が重要な課題である。本研究は数値解析と実験の双方のアプローチを用いることにより、表面係数依存性・表面微細形状依存性の解明を目指すものであり、世界的に見ても例がなく、重要なデータと知見を得ている。超低軌道衛星や大気吸込型イオンエンジンの開発等の希薄流領域を利用するミッションの実現に向けて、希薄空力特性評価技術の向上は必要不可欠であり、本研究結果はこれらのミッションの実現に寄与すると考えられる。

研究成果の概要（英文）：This research aims to develop a measurement system for hypersonic rarefied aerodynamics and study rarefied aerodynamic dependence on surface conditions by carrying out both measurements in the hypersonic rarefied wind tunnel (HRWT) and numerical simulations. We first carried out numerical analyses for model configuration dependence in HRWT, and we found that the effect of surface accommodation and roughness conditions can be seen by using the flowing (not stagnant) model inside a tube. The measured pressure data were consistent with the numerical results with diffuse surface accommodation conditions. Although it is difficult to demonstrate the effect of actual surface roughness, we are able to estimate the influence of surface conditions by applying micro-structured treatment on surfaces.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：航空宇宙工学 希薄気体力学 希薄風洞 DSMC MD

1. 研究開始当初の背景

- (1) 近年、超低高度衛星、惑星探査機大気突入、大気吸入型イオンエンジン(Air Breathing Ion Engine; ABIE)等において、高速希薄気体における空力特性解明の需要が増加している。JAXA では、超低高度衛星や大気吸入型イオンエンジン実証試験等を計画しており、宇宙利用の拡大を目指している。希薄空力の決定精度を向上させるためには、物質表面熱適応係数の評価精度が重要であり、その手段として機体形状に依存する不確実性除去のため「模型を使った直接計測」が必要不可欠である。
- (2) JAXA においてマッハ数(M)10 以上、クヌーゼン数(Kn)0.1 以上の流れを作り出す 100mm 極超音速希薄風洞(HRWT)が構築されており、表面係数の気流組成依存性・物質依存性の解明手法は確立されつつあるが、表面粗さ等の表面状態依存性については、評価手法が確立されていない。
- (3) 世界的に見ても表面係数の表面粗さ等の表面状態依存性現象を解明するシステムが存在しないため、実験と数値計算の双方のアプローチによる希薄空力特性表面状態依存性評価システムの構築が必要不可欠である。

2. 研究の目的

本研究は、世界に先駆けて極超音速希薄気体の計測システムを構築する。極超音速希薄気体の空力特性の計測及び数値計算の融合は世界的に見ても例がなく、非常に独創的である。連続流領域と自由分子流領域の狭間である希薄気体領域の計測は最も困難であるため、この領域の計測システムの確立は重要であり、両領域のモデルを結合する上でも必要不可欠である。希薄気体領域の空力特性予測は粒子数値解析に依存してきたが、表面モデルの不確定なパラメータが多く、これらのパラメータの計測が熱望されてきた。近年、表面モデルの物質依存性や気流組成依存性は評価されつつあるが、表面状態依存性に関しては計測データが乏しく、多数の表面状態における計測データが必要である。本研究は、信頼性のある計測モデルを構築し、計測データの精度を向上させることにより、既存の数値計算モデルの検証と計測データを用いた新モデル、工学的に有用なツールの開発を目指し、希薄気体解析の信頼性の向上を狙うことが目的である。また、ミクロな現象を MD 解析で評価し、マクロな現象を計測された表面係数として比較検証を行うことにより、数値解析の信頼性向上と信頼性のある表面モデル・ツールの構築を目指すことに創造性がある。

3. 研究の方法

本研究では、固定型の圧力計測プローブによる表面係数評価システムを設計・構築し、圧力と表面係数・表面状態との相関性を評価する計測手法の確立を目指す。手法としては、まず計測気流と(Direct Simulation Monte Carlo)数値解析を融合することにより、圧力の表面係数依存性を検証する。次に、分子動力学(Molecular Dynamics; MD)解析により、表面係数評価手法を確立する。複数の表面状態(表面粗さ・表面微細加工)・表面材質の模型を製作し、圧力計測結果とこれらのパラメータの相関性を分析することにより、表面係数の物質依存性・表面状態依存性の検証を行う。

4. 研究成果

4.1 表面粗さ影響評価用模型形状検討

極超音速希薄風洞(HRWT)で使用する固定型の圧力計測模型のイメージを図 1 に示す。表面状態における影響が高くなる模型を設計するため、図 2 のような透過型の形状において、入口内径  $D_i$ 、長さ  $L$ 、出口直径  $D_e$  をパラメータとして、形状最適化の検討を DSMC 解析により行った。結果として、模型内の出口近傍圧力が表面熱適応係数依存性が高くなるのは、 $D_e/D_i$  の比が 4 程度が良いことがわかった。長さに関しては、図 3 の通り、 $L=48$  mm 程度が表面係数による圧力差が高く、最大で 5 Pa 程度差が生じることがわかった。従って、入口内径  $D_i=4$  mm、長さ  $L=48$  mm、出口直径  $D_e=1$  mm の形状を選定し、表面係数依存性を評価した。各表面係数を用いた場合の模型内部の圧力分布を図 4 に示す。鏡面反射( $\epsilon=0$ )から拡散反射( $\epsilon=1$ )に変化するにつれて出口近傍の管内圧力は低下していく。また、入口から 25、35、45 mm 位置の圧力比の表面係数依存性の比較を図 5 に示す。出口近傍の 45 mm 位置では圧力比が表面係数にほぼ線形に依存し、鏡面反射の場合( $\epsilon=0$ )と拡散反射の場合( $\epsilon=1$ )で圧力比が 35 程度変化するため、圧力比から表面係数を決定しやすいことがわかった。

4.2 表面粗さ影響評価計測結果

DSMC 数値解析結果をもとに、入口内径  $D_i=4$  mm、長さ  $L=48$  mm、出口直径  $D_e=1$  mm の形状

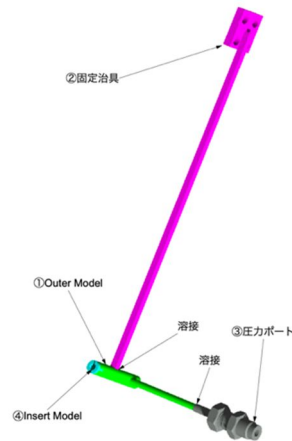


図 1:HRWT 表面粗さ影響評価用・表面微細加工影響評価用模型

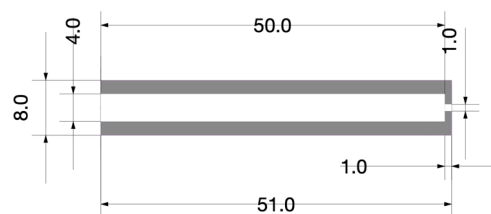


図 2: HRWT 透過型模型の寸法

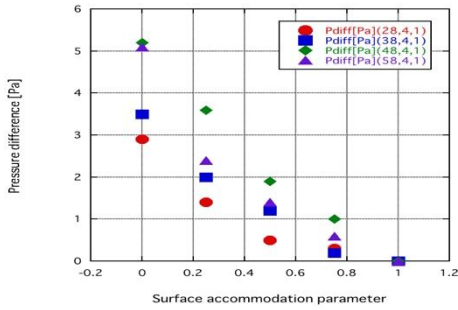


図 3: 透過型模型内出口近傍圧力の表面係数依存性

にて風洞模型を製作した。内部側の表面状態の影響を評価するため、表 1 のような材質・表面粗さにて 6 種類の模型を製作し、圧力計測にて比較検証を行った。

図 6 に表面粗さ模型を用いた希薄風洞計測写真を示す。計測は試験気流条件が事前にわかっているノズル出口から 17 mm、37 mm、50 mm の中心軸上の位置にて行った。図 7 にノズル出口から 17 mm 位置における表面物質影響評価用模型圧力の DSMC 数値解析と HRWT 計測結果の比較を示す。アルミニウム材質に金メッキを用いた模型では表面係数が 0.6 を推定していたが結果としてすべて拡散反射に近い計測結果と一致した。材質が金の場合、表面係数が 0.6 前後と考えているが、金メッキでは鏡面反射比が高くなる効果は得られなかった。

次に Model 1~4 を比較することによって、表面粗さによる影響を評価した。図 8 にノズル出口から 17 mm 位置におけるアルミニウム模型圧力の DSMC 数値解析と HRWT 計測結果の比較を示す。結果として表面係数 =0.8~1.0 の計測結果と近い結果が得られ、表面が粗い場合はすべて拡散反射に近い傾向が得られた。

#### 4.3 MD 解析による表面係数評価

衝突分子と表面状態を模擬した MD コード(LAMMPS)と NanoLabo(材料解析統合 GUI ソフト)を組合せた解析コードを開発した。図 9 のような分子の衝突を繰り返し実施し、表面反射の統計的なデータを主とすることにより、エネルギー熱適応係数(EAC,  $\epsilon$ )および接線方向運動量適応係数(TMAC,  $\tau$ )を下記式から評価した。

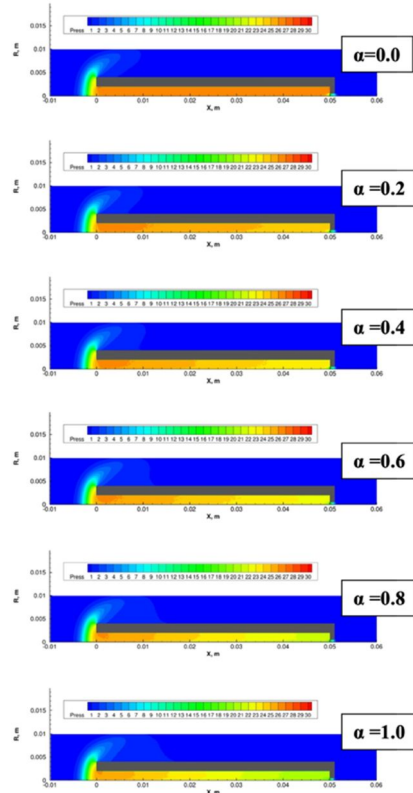


図 4: ピトー管型の圧力分布の比較

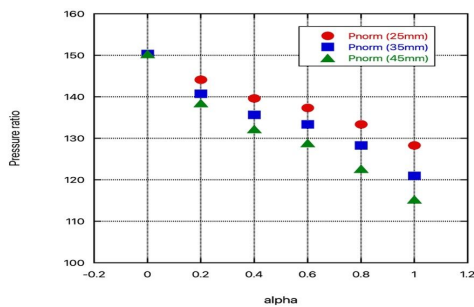


図 5: 入口から 25、35、45 mm 位置の圧力比の表面係数依存性の比較



図 6: 表面粗さ模型を用いた希薄風洞計測写真

表 1: 表面粗さ影響評価用模型リスト

No.	Name	Material	Surface Roughness	表面係数 (estimated)
1	Model 1A	SUS	Ra0.2	0.9
2	Model 1B	AL	Ra0.2	0.8
3	Model 1C	AL (金メッキ)	Ra0.2	0.6
4	Model 2	AL	Ra1.6	1.0
5	Model 3	AL	Ra6.3	1.0
6	Model 4	AL	Ra25	1.0

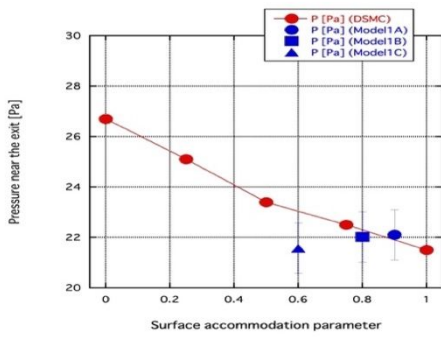


図 7: 表面物質影響評価用模型圧力の DSMC 数値解析と HRWT 計測結果の比較.

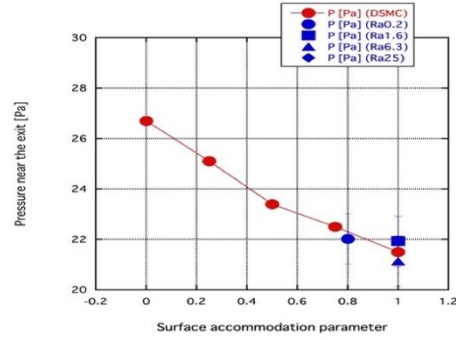


図 8: 表面粗さ影響評価用模型圧力の DSMC 数値解析と HRWT 計測結果の比較.

$$\alpha_E = \frac{E_{i,av} - E_{r,av}}{E_{i,av} - E_{s,av}}, \quad \alpha_T = \frac{p_{ti,av} - p_{tr,av}}{p_{ti,av}} \quad (1)$$

衝突分子は単原子酸素(AO)、窒素分子(N<sub>2</sub>)、または二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)を使用し、固体表面はアルミニウム結晶格子を使用した。図 10 では希薄風洞環境を模擬し、AO 分子が壁面法線方向から 600 m/s で入射し、アルミニウム表面で衝突した場合の反射角度分布を Maxwell モデルと MD 解析結果で比較している。MD 解析の反射分布はわずかな鏡面反射を含んでいるが拡散反射の方が割合が高い結果となっている。衝突を 10000 回程度繰り返し実施し、エネルギー熱適応係数を評価した結果を表 2 に示す。以前の希薄風洞球模型変位計測から得られた表面係数との比較結果は良い一致を示しており、気流組成の依存性はあまり高くない結果であった。ただし、MD 解析結果はポテンシャルに強く依存性するため、評価精度を高めるためにはポテンシャルの信頼性の向上が必要である。

#### 4.4 表面微細加工解析手法開発

希薄空力現象の表面粗さ影響評価に関して 4.2 項で議論したが、より定量的な評価に向けて、表面微細加工を施すことによって表面状態が判明している条件にて、表面状態が希薄空力に与える影響について検証した。希薄風洞模型は 4.1 項で設計した入口内径  $D=4$  mm、長さ  $L=48$  mm、出口直径  $D_e=1$  mm の形状を使用する。図 11 に表面微細加工のイメージ図を示す。20 度・74 度の平面が連続し、-20 度(A)と+20 度(B) の 2 種類で、加工ピッチを 1000~1 μm に変化させて比較検証した。希薄風洞模型加工は内壁側にレーザー加工処理を行う想定であり、試作では 50 μm ピッチ程度まで製作可能な目処がたっている。DSMC 解析では、模型形状に物理形状を使用した手法(I)と解析的に表面加工を模擬した手法(II)で比較した。手法(I)は物理形状を使用するため、より正確な解析手法といえるが、ピッチが小さくなり形状面要素数が増えると計算コストが高くなる欠点がある。手法(II)では各角度の面に入射する流束比を入射角・流束比のデータベースとして構築し、低コストで表面微細加工を模擬できる手法の開発を行った。

#### 4.5 表面微細加工影響評価

図 12 に希薄風洞環境( $Kn \sim 0.08$ ,  $V \sim 750$  m/s)における DSMC 手法 I と手法 II における圧力分布の比較を示す。表面微細加工(TypeA)のピッチは 1000 と 100 μm で比較しており、表面係数は完全拡散反射(  $\alpha=1.0$ )を仮定している。図にみられるように入射角による反射比の分布を考慮した手法 II の結果は手法 I の結果と大きな差がなく、簡易解析手法として採用可能と判断した。手法 II ではさらに

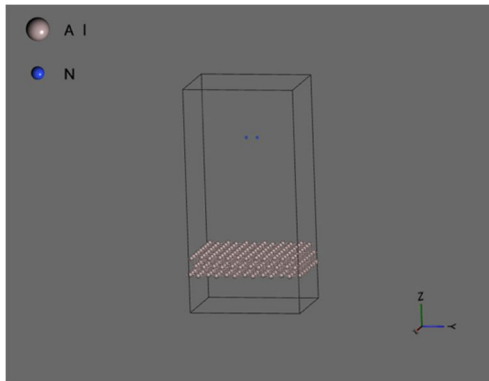


図 9: N<sub>2</sub>-AL 系表面係数評価用の MD 解析ツール

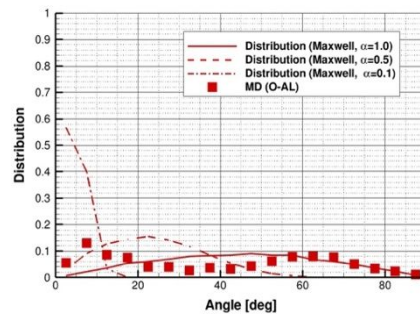


図 10: AO-AL 系反射分布の比較 (衝突速度 600 m/s の場合): Maxwell モデルと MD 解析

表 2: 熱適応係数の計測結果と MD 解析結果の比較

Material	(N <sub>2</sub> , HRWT)	(CO <sub>2</sub> , HRWT)	E (AO,MD)	E (N <sub>2</sub> ,MD)	E (CO <sub>2</sub> ,MD)	(Refs)
Aluminum	0.80 ± 0.06	0.86 ± 0.07	0.67 ± 0.2	0.71 ± 0.2	0.74 ± 0.2	0.77(N <sub>2</sub> , Acharya) 0.76(N <sub>2</sub> , Ho) 0.42(CO <sub>2</sub> , Acharya)

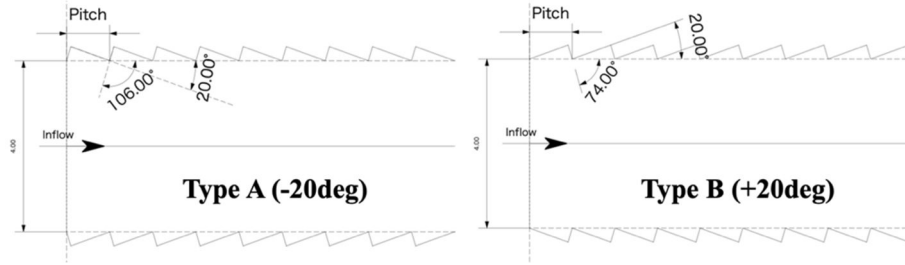


図 11: 表面微細加工有無の圧力比の比較  
( $Kn \sim 0.8$ ,  $\alpha = 0.6$  or  $1.0$ )

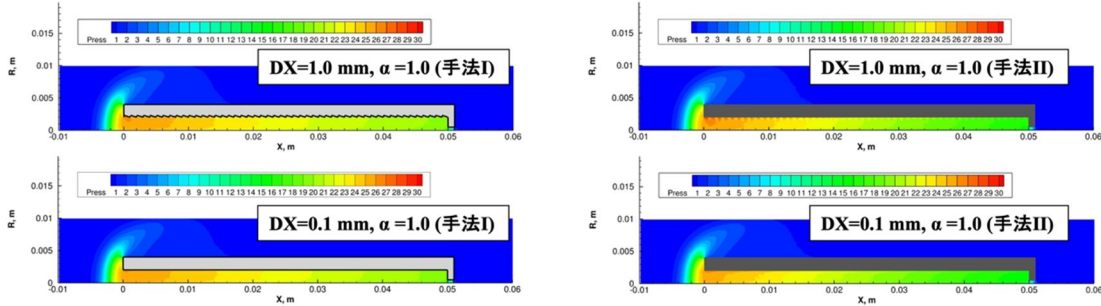


図 12: DSMC 手法 I と手法 II における圧力分布の比較: ピッチ 1.0, 0.1 mm

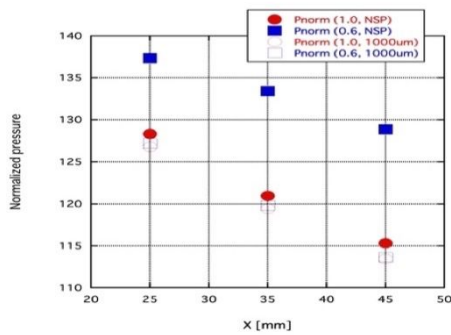


図 13: 表面微細加工有無の圧力比の比較  
( $Kn \sim 0.08$ ,  $\alpha = 0.6$  or  $1.0$ )

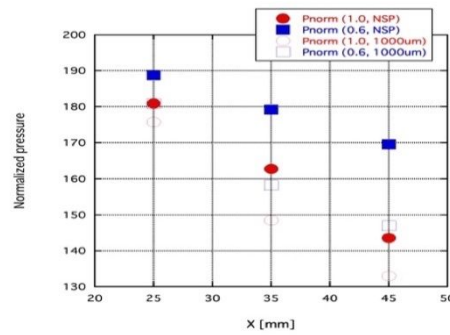


図 14: 表面微細加工有無の圧力比の比較  
( $Kn \sim 0.8$ ,  $\alpha = 0.6$  or  $1.0$ )

1  $\mu\text{m}$  ピッチまでピッチ依存性を評価したが、HRWT 環境の連続流近傍ではピッチ依存性はほとんどみられなかった。

次に、手法 I にてクヌーセン数依存性を評価した。連続流近傍から自由分子流近傍まで流入する数密度を変化させて DSMC 数値解析を実施した。まず、希薄風洞環境( $Kn \sim 0.08$ )の表面微細加工なし(NSP)と表面微細加工(TypeA, 1 mm ピッチ)有りと比較した結果を図 13 に示す。表面微細加工なしの場合、表面係数が 0.6 の場合は、1.0 の場合よりも高い圧力比を出口近傍で予測した。図 4 の通り鏡面反射比が高くなるほど、入口から出口に向かって粒子が送り込まれるため、出口近傍の圧力が高くなると考えられる。一方、表面微細加工(ピッチ 1mm)の場合は、 $\alpha$  が 0.6 と 1.0 で大きな差が見られず、双方とも表面微細加工なし拡散反射( $\alpha = 1.0$ )のケースと一致する結果が得られた。数密度を変化させた希薄流領域の  $Kn \sim 0.8$  の結果を図 14 に示す。本流れ場においても、基本的には同様の結果が得られた。表面微細加工(TypeA, 1 mm ピッチ)有りの結果は、表面微細加工なし(NSP)の拡散反射( $\alpha = 1.0$ )のケースに近い結果が得られた。ただし、 $\alpha = 0.6$  の方が、1.0 の場合よりも高い圧力比を予測し、表面係数依存性が連続流近傍よりも高い可能性が示唆された。

#### 4.5 今後の発展

今後の発展として、鏡面反射比が高い表面係数が 0.5 に近い材料を選定し、表面係数依存性を検証するとともに、4.4 項で得られた表面微細加工の影響を希薄風洞実験にて検証する。また、表面微細加工の影響を模擬した表面反射解析手法の信頼性向上に向けて、連続流近傍の拡散反射のケースのみでなく、表面係数依存性・クヌーセン数依存性も評価できるようなモデルを開発することによって、理論モデルを工学応用レベルにまで引き上げることを目指す。クヌーセン数依存性評価に向けては、希薄風洞環境のクヌーセン数向上を目指した風洞改良案を検討し、その実証を行う。MD 解析手法はポテンシャル依存性をさらに検証することによって、解析結果の信頼性を高め、地上実験できないようなフライト環境における表面係数等のデータベース構築を目指す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1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 Ozawa T., Suzuki T., Fujita K.	4. 巻 2996
2. 論文標題 Effect of speed ratio increase on pressure measurement for hypersonic rarefied gas flows	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 170001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0187371	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 小澤宇志	4. 巻 JAXA-SP-22-007
2. 論文標題 希薄流におけるロール減衰係数の数値解析	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 宇宙航空研究開発機構特別資料	6. 最初と最後の頁 175-182
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7件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 遠藤龍之介, 田川雅人, 横田久美子, 小澤宇志
2. 発表標題 希薄流圧力計測における表面加工の影響評価
3. 学会等名 第67回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 Ozawa, T., Shinkai, M., Kurita, N., and Hashimoto, S.
2. 発表標題 Analyses of Roll Damping Coefficients in Hypersonic Rarefied Flows
3. 学会等名 34th International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 OZAWA Takashi, SUZUKI Toshiyuki, and FUJITA Kazuhisa
2. 発表標題 Effect of Speed Ratio Increase on Pressure Measurement for Hypersonic Rarefied Gas Flows
3. 学会等名 32nd International Symposium on Rarefied Gas Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小澤宇志, 松山新吾, 山田和彦, 鈴木俊之, 藤田和央
2. 発表標題 はやぶさ型カプセルの姿勢安定性に関するサイズ・重心依存性評価
3. 学会等名 第66回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小澤宇志, 鈴木俊之, 藤田和央
2. 発表標題 希薄流におけるロール減衰係数の数値解析
3. 学会等名 第54回流体力学講演会/第40回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小澤宇志
2. 発表標題 航空宇宙研究開発と海外留学経験
3. 学会等名 第58回炭素材料夏季セミナー 炭素材料学会 次世代の会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小澤宇志
2. 発表標題 はやぶさ型カプセルの希薄空力特性および表面係数影響評価
3. 学会等名 第65回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2021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

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