

高温プラズマ流中のケイ素系耐熱材料周りの放射計測

山部 友紀翔（群馬大院理工・院），塚田 健人（群馬大院理工・院），

船津 賢人（群馬大院理工）

Radiation Measurements around Silicon-based Heat-resistant Materials in High-temperature Plasmajets

YAMABE Yukito, TSUKADA Kento and FUNATSU Masato
(Graduate School of Science and Technology, Gunma University)

ABSTRACT

When a space vehicle re-enters the Earth's atmosphere, a strong shock wave is generated in front of the vehicle and it undergoes severe aerodynamic heating. In order to protect the capsule from the heating, the ablation method is known as a thermal protection system. In our laboratory, we focus on silicon carbides as silicon-based heat-resistant materials which have high density and wear resistance. The heating experiments using air plasma freejets are performed systematically. In this study, we measured the strong radiation on the test-piece surface, the weak radiation around the test piece temporally and spatially with Wide Dynamic Range (WDR) camera. Then, we focused on the weak radiation around the test piece and analyzed its spatial-temporal distributions and mechanisms.

1. はじめに

地球大気圏に再突入する宇宙往還機前方には衝撃波が発生する。機体は衝撃波背後の高温・高圧気体から著しい空力加熱を受ける。この高温環境から機体を守る熱防御法の一つにアブレーション法がある⁽¹⁾。アブレーション法とは、熱防御材料の相変化を利用し、機体に流入する熱量を低減する方法である。現在、熱防御材料にはCFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) やPICA (Phenolic Impregnated Carbon Ablator) など、主に炭素系材料が利用されている⁽²⁾。近年では、ケイ素系材料が高密度、高耐熱性、高耐摩耗性をもつことから、次世代の革新的な熱防御材料として注目されている⁽³⁾。

本研究室ではケイ素系材料のうち、耐熱性に優れる炭化ケイ素 (SiC) に着目し、高温プラズマ流を用いた加熱試験を系統的に行っている^{(4)~(7)}。

以前の研究⁽⁵⁾において、SiCの定常加熱試験時には、試料表面にリング状物質が形成されることがわかっている。このリング状物質より前方の試料まわりは強く発光 (放射) し、リング状物

質より後方の試料まわりでは生成された気体による発光 (放射) を観測した。また、定常加熱試験中の試料表面の著しく強い放射と試料まわりに生成された気体の微弱な青白い放射を空間的に (面的に) 同時計測した。

本研究では、高温プラズマ流中のSiCの非定常加熱挙動に着目し、広いダイナミックレンジをもつWDR (Wide Dynamic Range) カメラにより、

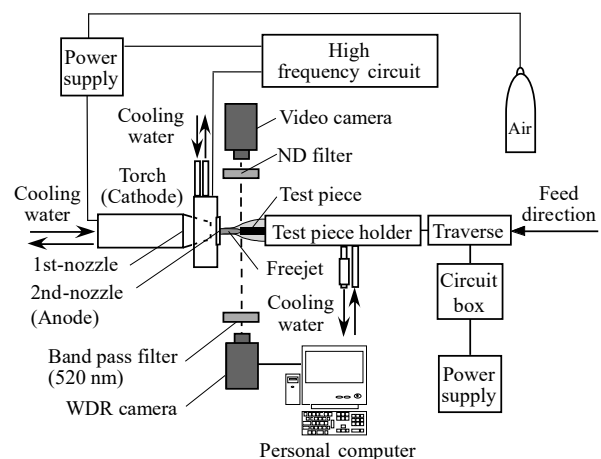


Fig. 1 Schematic view of experimental setup

その挙動を時間的空間的（時空間的）に計測した。特に、試料まわりの微弱な青白い放射に注目し、その時空間的な放射分布とその放射にいたるメカニズムを検討した。

2. 実験装置および実験方法

図1に実験装置概略を示す。実験装置は大別して空気プラズマフリージェット発生装置部と観察部からなる。空気プラズマフリージェット発生装置部は空気プラズマフリージェット発生装置、試料ホルダー、自動試料送り装置で構成される。一方、観察部では、2台のカメラをジェットの流れに対して垂直方向に設置し、計測を行った。図の下側には、計測可能な放射強度差が大きい (2^{16} : 65,536階調) WDR (Wide Dynamic Range) カメラで計測を行った。また、試料表面から生成された気体の微弱な放射は青白く、波長520 nm付近の放射が支配的であることが分光計測によりわかっている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。この波長に対応する520 nmの狭帯域フィルターを介したWDRカメラで、試料表面から生成される気体の微弱な放射を計測した。比較のため、図の上側には汎用ビデオカメラ (2^8 : 256階調) を設置した。汎用ビデオカメラにはO.D. = 3.0 (透過率が $1/10^{3.0}$) の減光フィルター (NDフィルター) を介して減光し、計測を行った。

空気プラズマフリージェット発生装置のノズル配置概略を図2に示す。一次ノズル部分は、陰極を有したトーチと出口直径0.7 mmの一次ノズルが一体となっている。また、外部には陽極を兼ねた二次ノズルが設置されている。作動気体には空気 (体積比率 $N_2 : O_2 = 79 : 21$) を使用した。一次、二次ノズル間の距離は2.5 mmとし、ノズル間に極小空気プラズマジェットを発生させた。そして、二次ノズル出口から噴出させることにより、空気プラズマフリージェットを得た。二次ノズルホルダーは内部に水を流し、冷却した。空気プラズマフリージェットのビデオカメラ画像を図3の上段に示す。ビデオカメラ画像より、二次ノズル出口から約20 mmまでは白色、20 mm以降では淡緑色の発光領域をもつ⁽⁷⁾。空気プラズマフリージェットの発生条件は、放電電流15 A、放電電圧 180 ± 2 V、貯気室圧力0.6 MPa (絶対圧力)、雰囲気圧力は大気圧 (0.1 MPa) である。試料ホルダーは三重円管構造であり、内部を流れる水で冷却している。次に、本研究で用いたジェットの特性について述べる。二次ノズル出口からの距離と熱流束の関係を図3の下段に示す。空気プラズマフリージェットの流

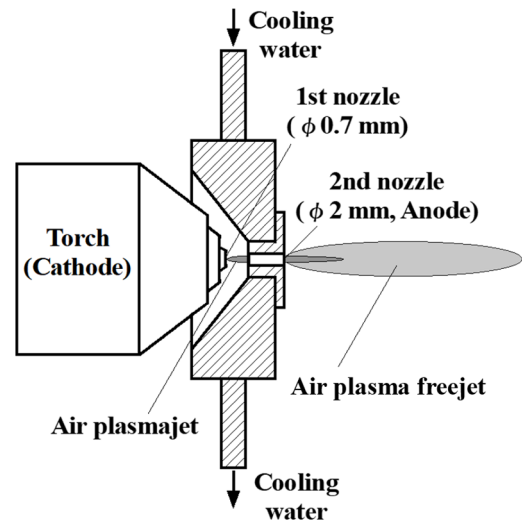


Fig. 2 Schematic view of nozzle layout of plasma freejets generator

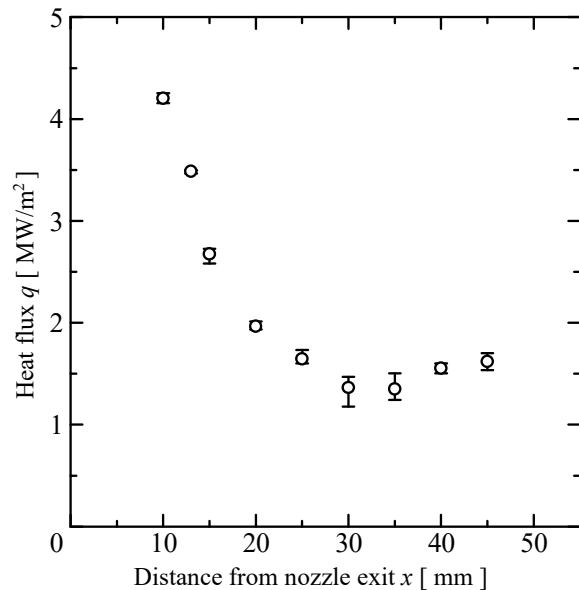
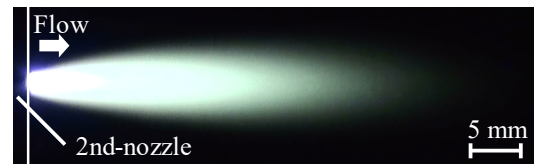


Fig. 3 Photo and heat flux distribution on flow axis of air plasma freejets



Fig. 4 Silicon carbide (SiC, diameter 2.0 mm)

れ方向に対して熱流束計を挿入し、熱流束を計測した。横軸は二次ノズル出口からの距離、縦軸は熱流束値である。図3下段より、二次ノズ

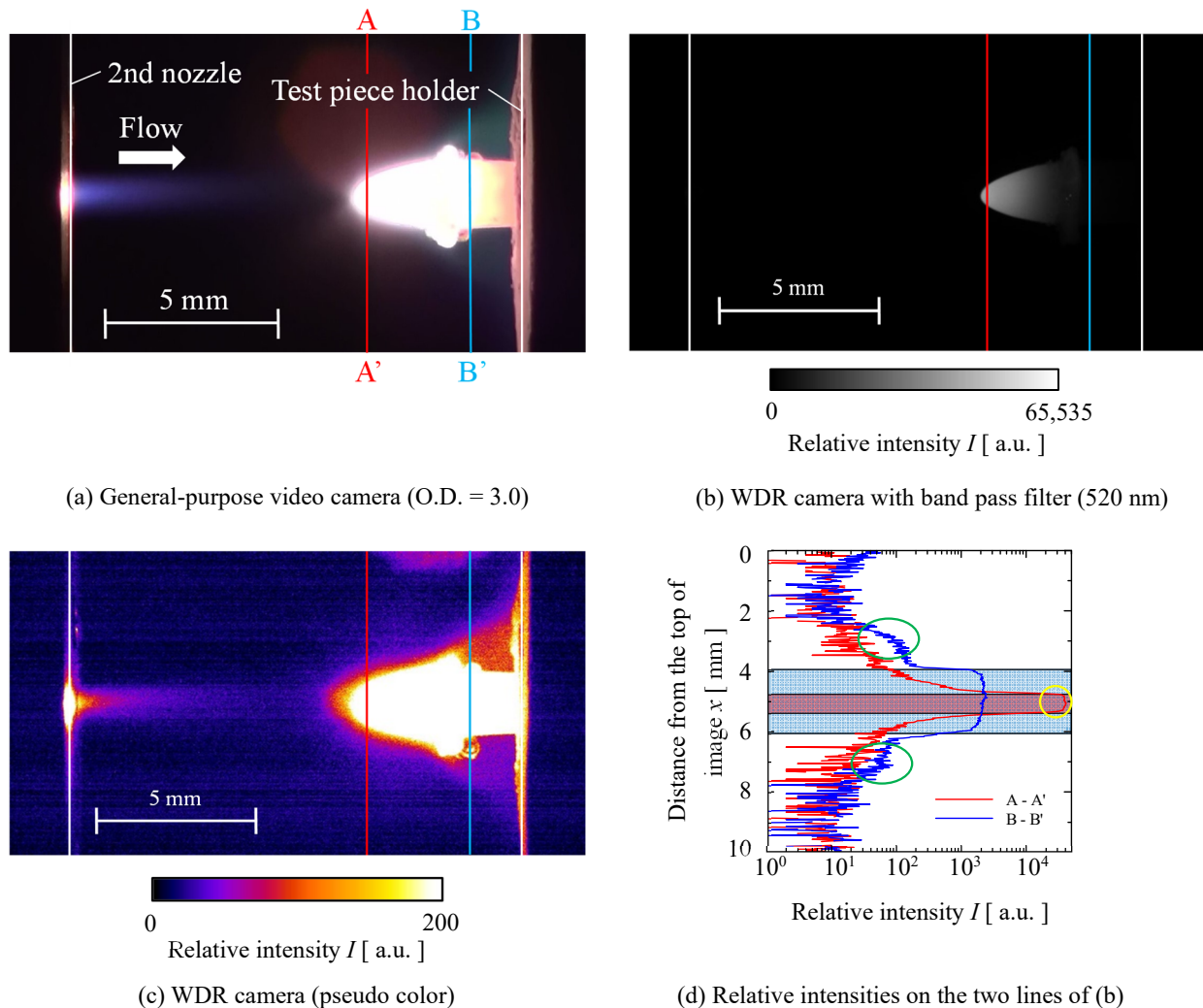


Fig. 5 Images of general-purpose video camera and WDR camera of SiC ablations, and its relative intensities (10.0 s)

ル出口からの距離の増加に伴い、熱流束値が減少していることがわかる。二次ノズル出口からの距離約20 mmまでは熱流束値が急激に減少し、20 mm以降ではほぼ一定となる。これより、アブレーション試験は、本実験装置において高い加熱率が得られる二次ノズル出口からの距離10 mmの位置で行った。この位置での熱流束は4.2 MW/m²である⁽⁸⁾。また、アブレーションの進行に伴い、試料先端位置は後退するため、自動試料送り装置を用いて試料を一定速度(0.61 mm/s)で送った。図4は試験に用いた試料画像である。試料は直径2 mmの断面形状を持つ丸棒のSiCである。

3. 実験結果および考察

3.1. 加熱時間 10.0 秒以降の試料まわりの微弱な放射分布

図5に加熱時間10.0秒のSiCの定常加熱試験時の画像を示す。ここで10.0秒以降はほぼ定常状態として仮定できるため、代表的な10.0秒の

画像を示している。図は動画から切り出した静止画像である。(a)は汎用ビデオカメラ、(b)はWDRカメラ、(c)は試料まわりの微弱な放射に注目し(b)のWDRカメラ画像の相対強度値200未満を疑似カラー表示した。そのため200以上の強度値は飽和している。(d)は(b)のA-A' (赤の実線)、B-B' (青の実線)に対応した放射強度分布を示す。(a)~(c)のA-A'は(b)の試料表面の放射強度値が最も高い点を通る径方向位置であり、B-B'は(a)の試料中央の突起状物質(実際は試料を覆うようにリング状に生成された物質)から軸方向後方0.5 mmの径方向位置を示す。これは微弱な青白い放射領域の一部に対応する。(d)の縦軸はWDRカメラの画像上端部からの距離、横軸は放射強度値を対数表示した。赤と青の領域はそれぞれA-A'、B-B'上の試料が存在する領域に対応する。まず(a)と(b)を比較すると、(a)は試料表面の著しく強い発光によって飽和しているが、試料後方の微弱な青白い発光がフレア状に広がっている様子がみてとれる。一方、(b)では試料

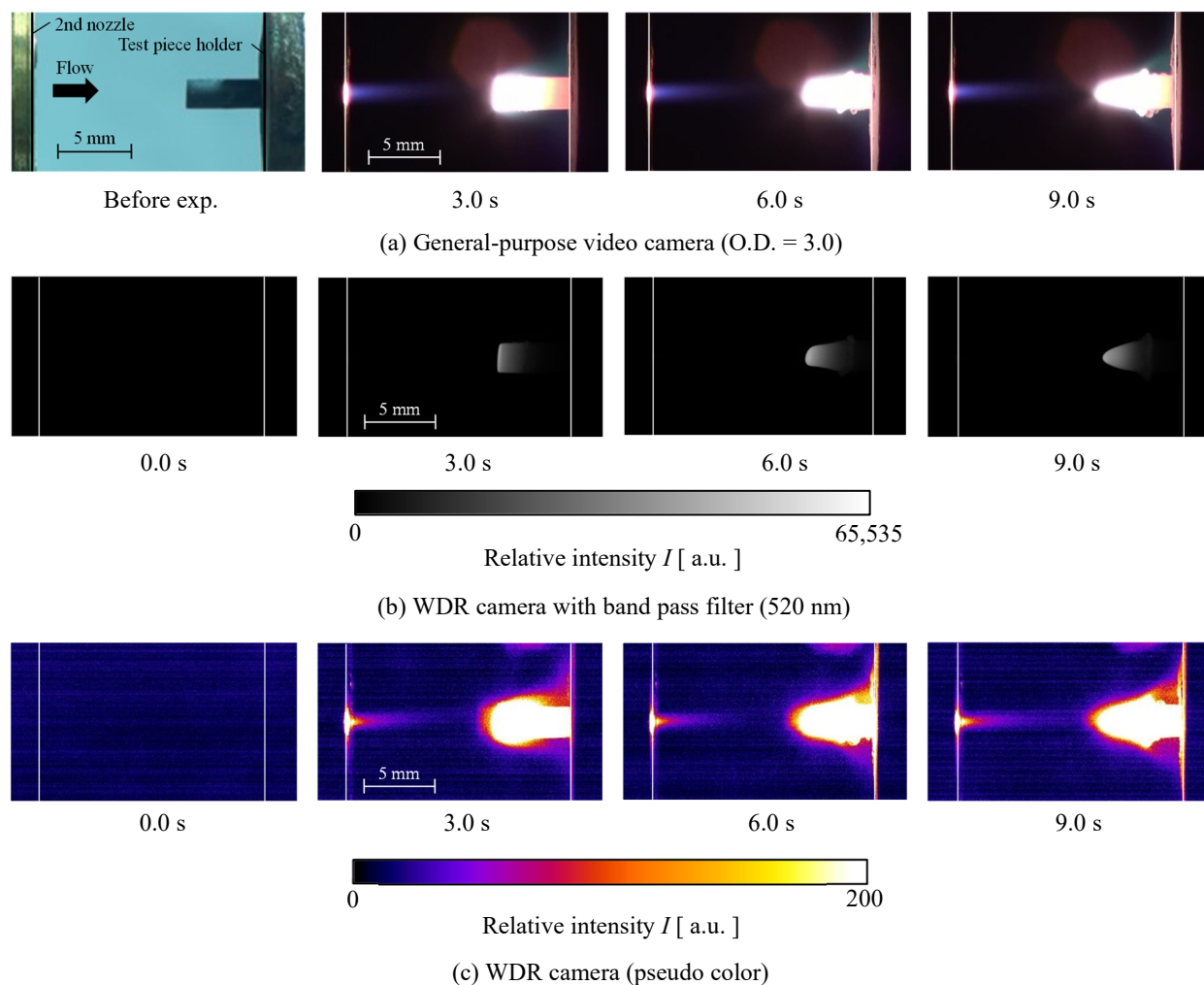


Fig. 6 Images of general-purpose video camera and WDR camera of SiC ablations before about 10.0 s

表面は飽和しておらず、(a)で確認された微弱な発光は確認できない。次に(b)と(c)を比較すると、(b)は試料後方の微弱な放射は確認できないが、(c)は(a)の微弱な青白い放射が確認できる。(d)のA-A'をみると、相対強度値は飽和せず、試料表面の強い放射をとらえている(黄色の実線で囲まれた丸い領域)。 (d)のB-B'をみると微弱ではあるが放射をとらえていることがわかる(緑の実線で囲まれた丸い領域内)。したがって、WDRカメラにより試料表面の著しく強い放射と微弱な青白い放射を以前の研究⁽⁵⁾と同様に同時計測することができた。

以前の研究⁽⁴⁾で、加熱時に生じる微弱な青白い放射は、局所的な分光計測から C_2 Swanバンドが支配的であることがわかっている。 C_2 分子の生成メカニズムは高温加熱によりSiCが熱分解し、その際に生じたC原子が再結合することで C_2 分子が生じている可能性がある。また、 C_2 Swanバンドの生成領域は、突起状物質(リング状物質)後方付近で生じていることから、この突起

状物質の形成と C_2 Swanバンドの発生には因果関係があると考えられる。すなわち、突起状物質をまわり込んだ流れは、急速に温度が低下し、 C_2 分子の再結合が促進される可能性がある。そこで、定常状態以前(10.0秒以前)のSiCの非定常加熱挙動を時空間的に計測し、考察する。

3.2. 加熱時間 10.0 秒以前の試料まわりの微弱な放射分布

図6に加熱時間10.0秒以前の試験時の画像を示す。図6は図5の(a)、(b)、(c)と同様の処理を行っている。また、右側の実線は試料ホルダー側面位置であり、ジェットは矢印の方向に流れている。3.0秒以降では、(a)の汎用ビデオカメラの青白い放射と(c)の擬似カラー表示した微弱な放射領域がほぼ一致する。また、(b)のWDRカメラ画像から試料表面が飽和せずを取得できていることがわかる。これらのことから、WDRカメラにより、試料表面の著しく強い放射と微弱な青白い放射を同時に時間的・空間的に計測できていることがわかる。

加熱時間3.0秒では(a)の汎用ビデオカメラ画像と(c)の擬似カラー表示したWDRカメラ画像から、微弱な放射が生成されていることがわかる。加熱時間6.0秒の(a)と(c)では、微弱な放射領域が3.0秒より広がっており、試料中央部に6.0秒の(a)から突起状物質（リング状物質）が形成されていることがみてとれる。さらに、時間経過とともに突起状物質（リング状物質）が径方向に広がり、その後方に微弱な放射領域が存在している。加熱時間9.0秒では軸方向に一定位置で突起状物質（リング状物質）がさらに径方向に成長し、その後方の微弱な放射領域も広がっている。これより、ジェットが、成長する突起状物質（リング状物質）の後方にまわり込むことで、ジェットの温度が低下しC₂分子が生成され、C₂ Swanバンドの放射が生じていると考えられる。

4. まとめ

本研究では、高温プラズマ流中のSiCの非定常加熱挙動に着目し、広いダイナミックレンジをもつWide Dynamic Rangeカメラにより、その挙動を時間的空間的（時空間的）に計測した。特に、試料まわりの微弱な青白い放射に注目し、その時空間的な放射分布とその放射にいたるメカニズムを検討した。

- (1) 炭化ケイ素の非定常加熱試験において、試料表面の著しく強い放射と試料まわりの微弱な放射を同時に時空間的に計測することができた。
- (2) 青白い微弱な放射領域は、突起状物質（リング状物質）の成長により、その後方に広がることがわかった。

5. 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費JP17K06941, 20K04915の助成を受けた。

6. 参考文献

- (1) Park, C., “Review of Chemical-Kinetic Problems of Future NASA Missions, I: Earth Entries,” *J. Thermophysics Heat Transfer*, Vol. 7, No. 3, pp. 385-398, 1993.
- (2) For example, Willcockson, W. H., “Stardust Sample Return Capsule Design Experience,” *J. Spacecraft Rockets*, Vol. 36, No. 3, pp. 470-474, 1999.
- (3) Tran, H. K. and Sawko, P. M., “Thermal

Degradation Study of Silicon Carbide Threads Developed for Advanced Flexible Thermal Protection Systems,” *NASA-TM-103952*, pp. 1-11, 1992.

- (4) 斧澤良太, 小澤正裕, 船津賢人, 白井紘行, 高草 木文雄, 「空気プラズマフリージェット中の炭化ケイ素アブレーションの放射測定」, 平成23年度衝撃波シンポジウム講演論文集, pp. 373-376, 2012.
- (5) 船津賢人, 菅原大聖, 半田圭佑, 橋本真, 「高温プラズマジェット中のケイ素系耐熱材料周りの放射計測に関する一考察」, 2019年度衝撃波シンポジウム講演論文集, 2C2-1, 4pages, 2020.
- (6) Funatsu, M., Konishi, K., Kawada, M., Ozawa, M., and Takakusagi, F., “Visualizations of SiC Ablations in Air Plasma Freejets,” *Trans. JSASS Aerospace Technology Japan*, Vol. 12, No. ists29, pp. Po_2_45-Po_2_50, 2014.
- (7) Hashimoto, M., Funatsu, M., Malisa, N., Morioka, G., and Ozawa, M., “Temperature Estimations of SiC Ablations with Several Kinds of Narrow Band-pass Filters,” *Trans. JSASS Aerospace Technology Japan*, Vol. 17, No. ists31, pp. 561-567, 2014.
- (8) Matsuoka, Y., Oya, Y., and Funatsu, M., “Ablation Experiments of Porous Carbonbased Heat-resistant Materials in Highenthalpy Air Plasma Freejets,” *Trans. JSASS Aerospace Technology Japan*, No. ists33, 2022-e-03.pdf, 6pages, 2022.