

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04567

研究課題名(和文) 傾斜機能型アブレーション熱防御システムの研究

研究課題名(英文) Study of Ablative Thermal Protection System with Functionally Graded Materials

研究代表者

鈴木 俊之 (Suzuki, Toshiyuki)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・主任研究開発員

研究者番号：20392839

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究で提案している密度分布を有する傾斜機能型アブレータについて、ホットプレスやオートクレーブを用いた製作工程を確立するとともに、試作したアブレータについて加熱試験を行うことによって耐熱基礎特性を取得した。試作後のアブレータについて、密度分布を評価した。これによると表面近傍の比重は約1.2であり、その後次第に比重が0.7まで低減され、バルクの比重としては0.8程度であることがわかった。想定通りの密度分布を有するアブレータが試作できた。次に試作した傾斜機能型アブレータの耐熱性能を評価するため、加熱試験を行った。目立った層間剥離は見られず、想定した耐熱性能を有していることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

有効密度 0.8 の傾斜機能型アブレータについて、広い加熱環境において、同クラスの従来アブレータよりも摩耗率を30～50%低減できるポテンシャルが示されたことは非常に意義深い。また見方を変えると、はやぶさアブレータと同等の損耗性能でありながら、はやぶさアブレータに比べて重量を40%以上低減できるポテンシャルが示されたことも重要である。

研究成果の概要(英文)：Functionally graded ablative materials with density gradient were newly developed for the thermal protection system of future space exploration missions. The ablating surface was densified to reduce the amount of surface recession, while the density inside the ablator was reduced with expectation of weight reduction and high heat insulation. Typical Bulk specific gravity was found to be about 0.8. Basic thermal characteristics of the developed ablative material were obtained by conducting heating tests. The manufacturability of the ablator was also confirmed by using not only the hot press but also an autoclave. The kinds of resin used for the prepreg were polyimide and phenol.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：アブレータ 傾斜機能材料

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

大気圏突入飛行に用いられる飛翔体は 10km/s 以上の超軌道速度で大気圏を飛行するために、機体前方には強い離脱衝撃波が生じ機体は過酷な空力加熱にさらされる。このような空力加熱から機体内部を保護するため、熱防御システム(以下、TPS)を構成する材料としては炭素繊維強化プラスチック(CFRP)等のアブレータが用いられる。過去日本においては、小惑星探査機はやぶさにおいて地球大気圏突入飛行を実施するに当たり、比重約 1.3 のアブレータを用いた TPS の開発が行われた。また近年では、JAXA が開発を進めている「こうのとりのり」搭載型小型回収カプセルの TPS として、比重約 0.3 の軽量アブレータの開発が行われた。比重 1.3 のアブレータは高密度であるが故に表面損耗量は小さいが、重く、断熱性が低いことが知られている。一方比重 0.3 のアブレータは断熱性に優れているものの、軽量であるが故に表面損耗量は非常に大きくなるといった技術的課題がある。

一方、近年では 3D 造形技術の適用により、複数の材料を締結部無く接合して軽量化することや、複数種材料の組成比を連続的に変えて耐熱性と強度を併せ持つ傾斜機能型材料を実現することが可能になると期待されている。特に炭素繊維成形体へ適用する場合、炭素繊維や樹脂含浸量を連続的あるいは断続的に変えることにより耐熱性を要する箇所を高耐熱化し、強度を要する箇所を高強度化し、軽量化を要する箇所を軽量化した傾斜機能型アブレータの実現が期待されている。

2. 研究の目的

- (1) 高い耐熱性能が必要なアブレータ表面近傍を高密度化する一方で、軽量化に資するためにアブレータ内部を低密度化した一体型の傾斜機能型アブレータを開発する。
- (2) メーカーにおける製造性を高めるため、オートクレーブを用いた製作方法を検討する。
- (3) プリプレグ製作にあたっては、研究開始当初は扱い易いポリイミド樹脂を用いるが、入手性の高いフェノール樹脂を用いた製造性についても検討する。

3. 研究の方法

- (1) 積層型アブレータは、炭素繊維クロスに樹脂を含浸させたプリプレグを積層させ、これを圧縮・加熱硬化することで作成される。一般的に圧縮・加熱硬化中に樹脂の熔融流動性が低い(粘度が高い)場合は、気孔が多く残存し、硬化後のアブレータが低密度になり、逆に熔融流動性が十分に高い(粘度が低い)場合は、アブレータ内部の気孔が少なくなり、アブレータは高密度状態で硬化する。従って積層させたプリプレグの厚み方向に温度勾配を設けると、TriA-X の粘度の温度依存性により、硬化後のアブレータの厚み方向に密度勾配が生じると期待できる。またアブレータ表面には樹脂体積含有率(V_M)の高いプリプレグを使うことで、相対的にアブレータ表面付近だけ樹脂含有率が高い高密度部になることが期待できる。本研究ではこれら 2 つのアイデアを用いて傾斜機能型アブレータの試作を行った。製作したアブレータについては、耐熱性能評価に向けて加熱試験を行い、想定通りの耐熱性を取得していることを確認した。
- (2) ホットプレスを用いた傾斜機能型アブレータの製造にあたっては、圧縮・加熱成形時にホットプレスの上側熱板と下側熱板に規定の温度差を設けることにより、積層したプリプレグ積層方向に沿って樹脂の熔融粘度を変化させて、圧縮時のアブレータ積層方向に密度勾配を生じさせる。オートクレーブを用いて傾斜機能型アブレータを製造するにあたっては、プリプレグ積層方向に沿って樹脂の熔融粘度を変化させるために、雰囲気温度一定に制御されたオートクレーブ内に温度の異なる領域を作成する必要がある。本研究ではオートクレーブ内の雰囲気温度はホットプレスにおける上側熱板温度と同一と考え、下側熱板に相当する温度領域をオートクレーブ内に作り出すべく、空冷装置をオートクレーブ内に設置したところ、ホットプレスで製作したアブレータと同程度の性能を持つ傾斜機能型アブレータが製作できることが判明した。
- (3) プリプレグ製作に用いる樹脂をポリイミドからフェノールに変更して試作を行った。プリプレグに含まれるフェノール樹脂の含浸割合を厚さ方向に連続的に変更することにより、フェノール樹脂を用いた場合でも傾斜機能型アブレータの製作は可能であることがわかった。

4. 研究成果

- (1) 上記アイデアを実証するために傾斜機能型アブレータの試作を行った。本研究で用いた成形手法の概要を図 1 に示す。まずはプリプレグの製作に向けて、所定の繊維体積含有率 (V_F) と樹脂体積含有率 (V_M) を設定しワニス重量を決定した後に、カイノール炭素繊維クロスに TriA-X ワニスを手塗りで含浸させる。その後真空デシケータを用いて 10 分間真空含浸させた後に真空乾燥を行う。更にその後はホットプレスを用いてプリプレグのシワを伸ばしてプリプレグの完成となる。

今回はアブレータ表層には $V_F: V_M=1:1.7\sim 2.0$ で製作したプリプレグ 10 枚を重ね、その下に $V_F: V_M=1:1$ で製作したプリプレグを 45 枚重ねて、合計 55 枚のプリプレグを用いてホットプレスによる圧縮・加熱硬化を行った。圧縮・加熱硬化時はアブレータ内部の温度をモニタするため、アブレータ表面とプリプレグ 10 枚間隔毎に K 種熱電対を設置した。積層させたプリプレグの厚み方向に温度勾配を設けるにあたり、以下に述べる方法で圧縮・加熱硬化を行った。まずホットプレスの上側熱板と下側熱板の設定温度をそれぞれ 250 と 150 に設定し、重ねたプリプレグを下側熱板上に設置する。その後プリプレグ上に上側熱板を接触させ、アブレータ内部の各温度が平衡になるのを待つ。各所の温度が平衡に達した後は、上側熱板のみ 4 /min で 380 まで昇温し、上側熱板が 340 に到達した際、アブレータ厚さが 40mm になるように 2.6MPa で加圧開始した。その後上側熱板温度が 380 に到達した時、下側熱板を 4 /min で昇温した。上下熱板が 380 に到達した後は 1 時間保持し、その後自然放熱を行った。

加圧加熱成形後のアブレータ母板とその断面図を図 2 に示す。図の母板サイズは 120mm x 120mm x 40mm であるが、成形時の圧力値及び樹脂含有率を見直すことで現時点では 150mm 角程度の母板まで製作することが可能になっている。断面図を見ると表面から約 5mm 程度までは緻密な層になっており、それより深い部分は目の粗い層になっていることがわかる。これは圧縮・加熱硬化時にアブレータ上下面において温度差を設けたことにより、アブレータの上下面においてポリイミド樹脂の溶融粘度が異なる状況が生じたためであると考えられる。

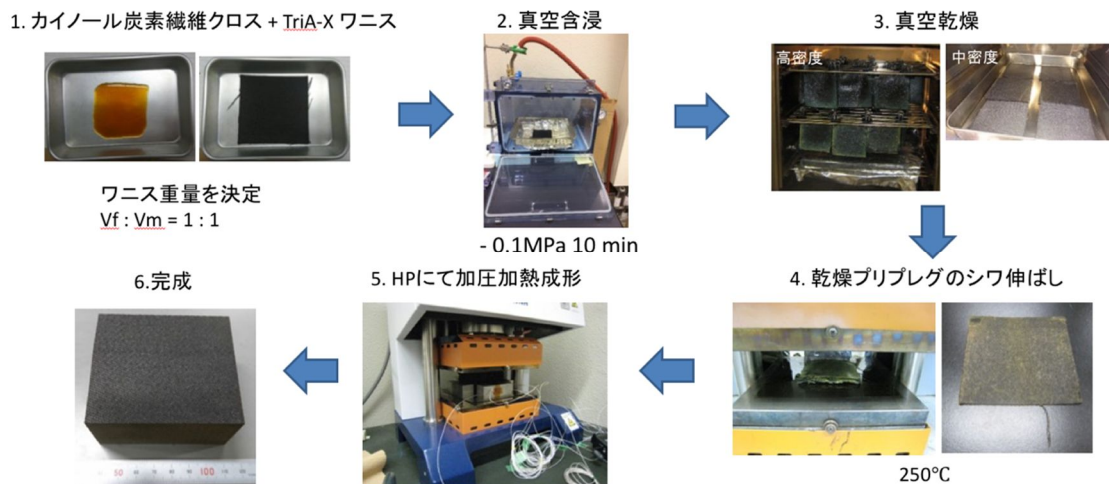
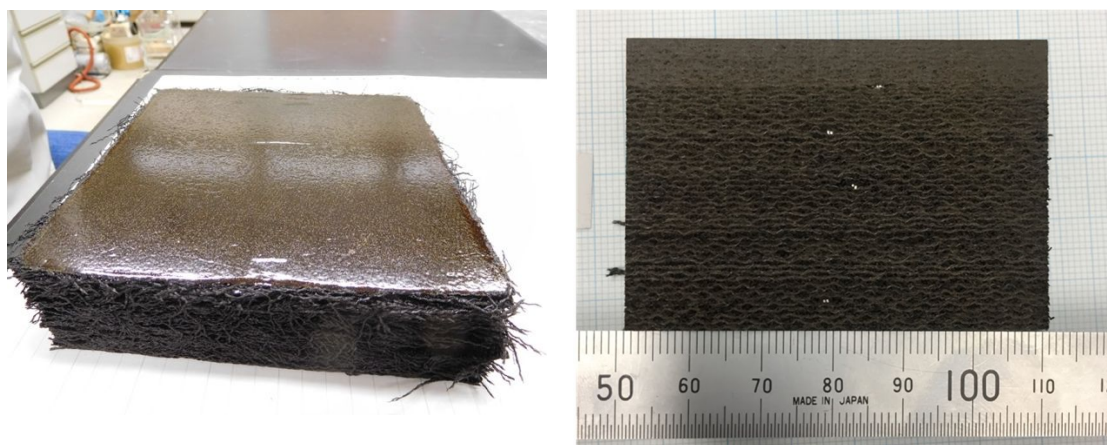


図 1 傾斜機能型アブレータの成形手法



(a) 加圧加熱成形後のアブレータ母板

(b) 母板の断面図

図 2 本研究で試作した傾斜機能型アブレータ

試作した傾斜機能型アブレータの耐熱基礎特性を取得するため、JAXA 調布航空宇宙センター 750kW アーク加熱風洞と JAXA 宇宙科学研究所 1MW アーク加熱風洞において加熱試験を

実施した。本加熱試験で得られた損耗量を加熱時間で除して得られる損耗速度を図 3 に示す。同図には宇宙科学研究所アーク加熱風洞において得られた比重約 0.8 の中密度アブレータ、比重約 1.3 のはやぶさアブレータの結果も示している。宇宙科学研究所アーク風洞の気流動圧は調布航空宇宙センターの動圧と異なるため、同じ加熱率における比較であっても注意が必要であるが、参考までに示している。

平均密度が同程度である比重 0.8 の中密度アブレータとの比較では、 $4\text{MW}/\text{m}^2$ 以上の加熱率条件では傾斜機能型アブレータの損耗速度の傾きが中密度アブレータに比べて若干緩やかであることがわかる。これは表面付近を高密度化したことが原因であると考えられる。

また傾斜機能型アブレータの損耗速度は $13\text{MW}/\text{m}^2$ 以上の高加熱率条件においてははやぶさアブレータの損耗速度に近くなっている。これは傾斜機能型アブレータの表面近傍密度がはやぶさアブレータの密度に近くなっていることが理由である。傾斜機能型アブレータの表面近傍密度がはやぶさアブレータの密度に更に近づけば、損耗速度の差異は更に小さくなると思われる。この場合、傾斜機能型アブレータははやぶさアブレータに比べて TPS 重量を $33.3\% (=1-0.9/1.35)$ 低減することができるポテンシャルを持っていると言える。

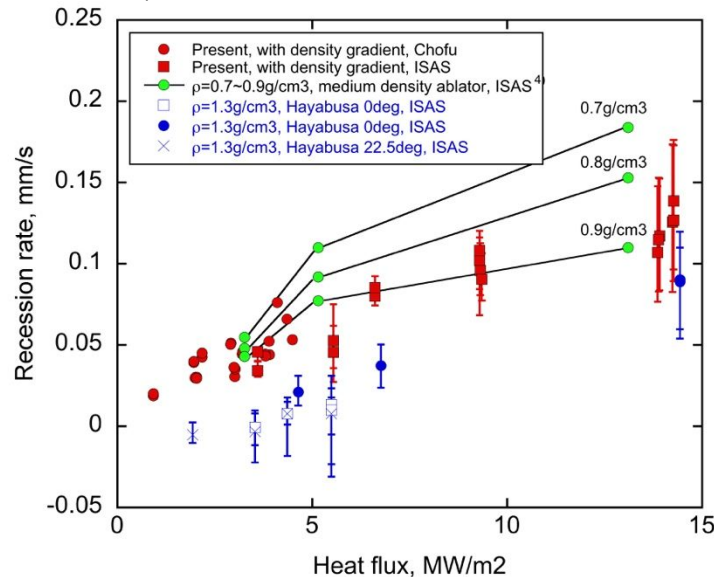


図 3 表面損耗速度の比較

- (2) 本研究ではオートクレーブ内の雰囲気温度はホットプレスにおける上側熱板温度と同一と考え、下側熱板に相当する温度領域をオートクレーブ内に作り出すべく、図 4 に示すような空冷装置をオートクレーブ内に設置した。オートクレーブを用いた試作に先立ち、本冷却システムの機能検証を次の手法によって行った。まずオートクレーブ内の雰囲気温度を 250 まで昇温し、冷却装置の物温度が 246 に到達した後、空冷装置に元圧 0.5MPa で常温空気を流入させた。その後雰囲気温度を保ったまま冷却装置の温度が落ち着くまで空気流入を継続することによって冷却装置の降温効果を確認した。試験開始から約 40 分後の冷却装置各所の温度を表 1 に示す。表より、雰囲気温度を 250 に保ったままでも冷却装置上は約 150 まで低減できることがわかる。これはホットプレスを用いた場合の下側熱板温度にちょうど一致するため、本冷却装置を使用してプリプレグ積層方向に温度勾配を設けることは可能であると考えられる。

表 1 冷却装置の検証結果

温度計測場所 (図 4c)	温度
導入配管 (IN 側)	153.0
冷却装置中央部	153.8
導入配管 (OUT 側)	188.1

オートクレーブ成形後に取り出された傾斜機能型アブレータとその切断面をそれぞれ図 5 と図 6 に示す。図 6 に示す通り冷却装置に近い側 (写真下側) に比べて、冷却装置から遠い側 (写真上側) は密になっている様子が見られる。

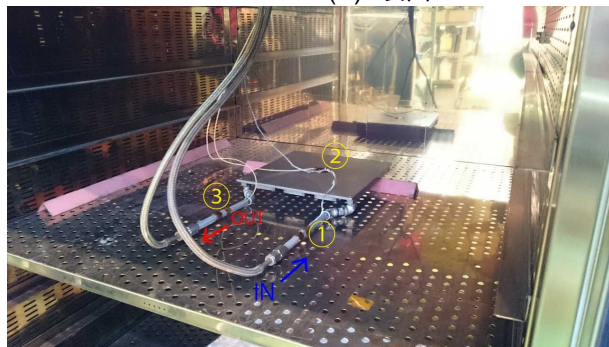
- (3) フェノール樹脂を用いて同様の手法により傾斜機能型アブレータを試作した。試作したアブレータ板について X 線 CT 撮影像を図 7 に示す。表面近傍の高密度化には成功したものの、低密度層内部には樹脂の含浸が一様ではない部分が残っていることがわかる。これはプリプレグの樹脂含浸が一様ではないことが考えられるため、今後はプリプレグの乾燥工程を見直すなど対処したい。



(a)裏面



(b)表面



(c)オートクレープ内の設置状況

図4 傾斜機能型アプレータ試作に向けたオートクレープ内空冷冷却装置

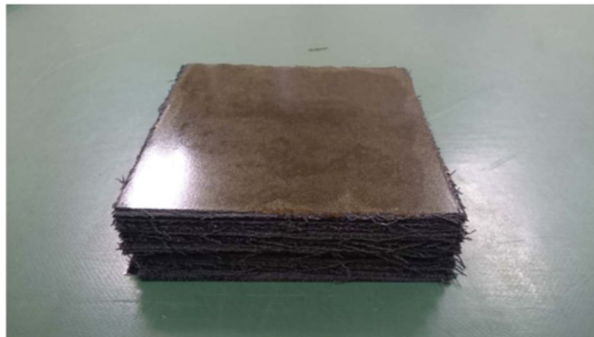


図5 オートクレープで試作した傾斜機能型アプレータ



図6 オートクレープで試作した傾斜機能型アプレータの切断面

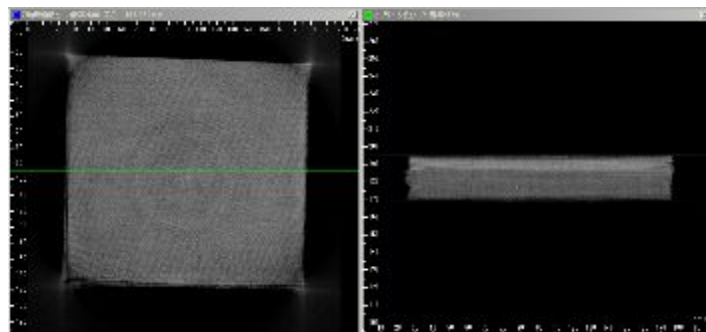


図7 フェノール樹脂含浸プリプレグを用いて試作した傾斜機能型アプレータのX線CT画像

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1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 Toshiyuki SUZUKI, Yuki KUBOTA, Yuichi ISHIDA, Takuya AOKI, Kazuhisa FUJITA, Kazuhiko YAMADA, Kenichi HIRAI	4. 巻 19
2. 論文標題 Study of Ablative Thermal Protection System with Density Gradient	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan	6. 最初と最後の頁 116-122
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2322/tastj.19.116	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8件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Suzuki, T., Kubota, Y., Ishida, Y., Aoki, T., Fujita, K., Yamada, K., and Hirai, K.
2. 発表標題 Study of Ablative Thermal Protection System with Density Gradient
3. 学会等名 32nd International Symposium on Space Technology and Science（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Suzuki, T., Kubota, Y., Ishida, Y., Aoki, T., Fujita, K., Yamada, K., and Hirai, K.
2. 発表標題 Study of Functionally Graded Ablative Material with Density Gradient
3. 学会等名 The International Conference on Flight vehicles, Aerothermodynamics and Re-entry Missions and Engineering (FAR2019)（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Suzuki, T.
2. 発表標題 Recent Development of Thermal Protection System Materials in JAXA
3. 学会等名 High Temperature Material Workshop（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木俊之, 久保田勇希, 石田雄一, 青木卓哉, 藤田和央, 山田和彦, 平井研一
2. 発表標題 オートクレーブを使用した傾斜機能型アブレータ製造性の初期検討
3. 学会等名 第51回流体力学講演会/第37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 2019年

1. 発表者名 鈴木俊之, 石田雄一, 青木卓哉, 藤田和央, 山田和彦, 久保田勇希, 平井研一
2. 発表標題 密度傾斜を有するアブレーション熱防御システムの研究
3. 学会等名 第50回流体力学講演会 / 第36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 2018年

1. 発表者名 鈴木俊之, 石田雄一, 青木卓哉, 藤田和央, 山田和彦, 久保田勇希, 平井研一
2. 発表標題 傾斜機能型アブレータの高加熱率環境における耐熱特性評価
3. 学会等名 第62回宇宙科学技術連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木俊之, 石田雄一, 青木卓哉, 藤田和央, 山田和彦, 久保田勇希, 平井研一
2. 発表標題 傾斜機能型アブレーション熱防御システムの研究
3. 学会等名 平成30年度 宇宙航行の力学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小河広明, 梅津信二郎, 鈴木俊之, 久保田勇希
2. 発表標題 傾斜機能型アプレータの熱物性評価
3. 学会等名 日本機械学会 関東支部 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

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 密度傾斜を有するポリイミドアプレータの発明	発明者 久保田勇希等	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2018-39284	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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