

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 27 日現在

機関番号：13901  
研究種目：基盤研究(B)  
研究期間：2012～2014  
課題番号：24360349  
研究課題名(和文)ハイブリッドアブレーションセンサーの開発  
  
研究課題名(英文)Development of a hybrid ablation sensor  
  
研究代表者  
酒井 武治 (Sakai, Takeharu)  
  
名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授  
  
研究者番号：90323047  
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：可変抵抗回路と光ファイバー計測を組み込み、実フライト計測へ適用可能な超小型アブレーションセンサーを開発した。アブレーションセンサーの作動特性を調べるため、低密度アブレータに搭載してアーク加熱風洞気流で加熱試験した。加熱試験での表面損耗量および炭化層深さはセンサー出力と概ね一致した。本開発により、アブレータの炭化層進展および表面損耗を一つのセンサーで同時計測可能であることが示された。

研究成果の概要(英文)：An ablation sensor is developed, in which a variable resistive circuit and an optical fiber measurement technique are implemented into a single unit. The developed ablation sensor is miniaturized to be applicable to a flight measurement. In order to examine the operational characteristics of the ablation sensor, the ablation sensor is tested with an arcjet wind tunnel by being embedded into a low density ablative test specimen. The results show that fair agreement is obtained between the sensor output and the measured data for the recession and char depth of the tested specimen, demonstrating that the developed sensor can simultaneously measure the receded and charred fronts of the ablative heat shield during heating.

研究分野：航空宇宙流体

キーワード：アブレーション 空力加熱 熱防御 フライト計測 光ファイバー計測 抵抗回路

1. 研究開始当初の背景

宇宙機が高速で大気突入する際に受ける空力加熱を防御するため、アブレーション法はコスト・実績の観点から最も有効な手法である。しかしながら、熱防御材料の厚みを設計する手法が確立されたとは言い難い。これは、大気突入時のあらゆる加熱環境が地上試験のみで再現できないことに起因している。アブレーション熱防御システムの設計には、風洞試験・数値解析技術に加え、フライト計測技術による相補的なアプローチが最も有効であると考えられる。風洞・数値解析予測技術は、はやぶさ開発を経て環境整備が進んでいるものの、フライト計測手法開発は着手されていない。

フライト計測には、埋め込み型アブレーションセンサーが最も有用であると考えられる。これまで欧米を中心に開発されたアブレーションセンサーでは、アブレーション現象の特徴である、表面損耗と樹脂の熱分解のいずれかが計測可能である。ただし、表面損耗と樹脂熱分解は本質的には異なる速度で起こるため、2つの現象を同時に計測することで、現象の理解が深まると考えられる。近年でも従来のセンサー原理を改良した開発が進んでいる。ただし、2つの現象を同時に計測するセンサーの開発は代表者の知る限りほとんどない。

2. 研究の目的

本研究では、飛行計測へ最終的には適用することが可能であり、アブレーション過程の表面損耗と樹脂熱分解を同時に計測できる埋め込み型アブレーションセンサーの開発を目的とする。実飛行計測にカギとなる小型化を達成するため、これまで開発されたアブレーションセンサー技術の組み合わせた複合型センサー構築を試みる。過去に開発されたセンサーのうち、樹脂の相変化を利用した可変抵抗回路計測と、高温炭化層内の材料放射光検知を利用した光ファイバー計測法を選定した。さらに、将来の宇宙ミッションで適用が見込まれる軽量なアブレータに艦装した場合に作動するよう各計測法にそれぞれ改良を加えて、同時計測できるような複合化方法を提案する。

3. 研究の方法

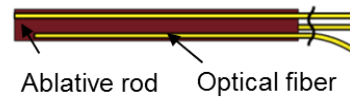
3-1 本アブレーションセンサーの概要

開発したセンサーは、表面損耗検知部と炭化検知部からなる。中空の炭化検知部に表面損耗検知部を挿入して本アブレーションセンサーが構成される。その模式図を図1に示す。

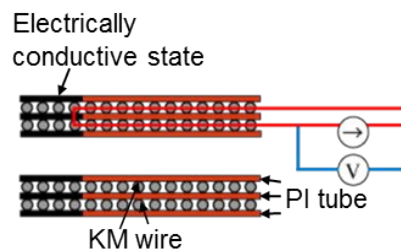
損耗検知部は、円筒アブレータロッドとその側面に溝を加工して埋め込まれた光ファイバー(石英, Edmund Optics Co., Ltd)からなる。アブレータロッドは、市販されているフェノール樹脂微粒子と短炭素繊維とを混練して焼結した代表者らによる内製品である。ロッド側面には、レーザー加工により溝を設け、光ファイバーを溝に接着剤固定した。本研究で

は、2mmあるいは5mm光ファイバー端面を離し、3,4本の光ファイバーを配置する技術までを確立した。それぞれの光ファイバーで検知・伝送される光は、Siフォトダイオードへ導光し、増幅回路を介して電圧あるいは電流値の時間履歴として出力する。

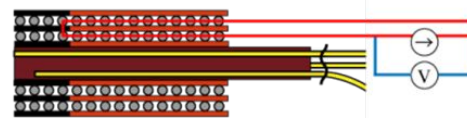
炭化検知部は、ポリイミド(以下PIと略す)管とカーマロイ(Tokyo Wire Co. Ltd, 以下KM)線からなる中空状可変抵抗回路である。接着剤を使わずに、かつ切断することなくKM線をPI管に螺旋状に巻く。最終的には同軸上にPI管は配置される。ピッチ間隔は約80 $\mu$ mで約 $\pm 10\%$ の標準偏差に収めた。回路には約1mAの定電流を流す。センサー深さを導出する式は、初期の回路抵抗値、計測される抵抗値、炭化検知部の単位長さあたりの抵抗値からなるパラメータで記述できる。本研究で用いたカーマロイ線の1次温度係数は、 $10^{-5} \sim 10^{-4} [1/K]$ 程度であるため、本センサーが作動する範囲内での温度( $\sim 1100K$ 程度まで)では、温度上昇による抵抗増加は小さく、センサー深さの導出に温度の影響は小さいとしている。



(a) 損耗検知部



(b) 炭化検知部



(c) ハイブリッドセンサー

図1 本センサー構成要素部および統合したハイブリッドアブレーションセンサー

3-2 作動特性試験

アブレーションセンサーおよび各検知部を独立してアブレータ供試体内部に艦装し作動特性を調べた。供試体は、宇宙航空研究開発機構の750kWアーク加熱風洞で生成される大気突入加熱環境を模擬した試験気流で加熱した。アーク風洞作動条件等は表1のとおりである。供試体は、図2のような円柱形状のものを使用した。アブレータ供試体の場合、炭素成形断熱材にポリイミド樹脂あるいはフェノール樹脂を含浸させて成形した内製品であり、比重は約0.3である。また、炭化検知部作動特

性試験では、黒鉛供試体も使って試験した。ここで、アーク加熱器部のアーク柱からの輻射を避けるため、中心軸上から離れた位置に醸装している。

表1 加熱試験条件

気流	空気
電流	300A
質量流量, g/sec	16
ピトー圧, kPa	13.5
冷温壁加熱率, MW/m <sup>2</sup>	1.7
供試体加熱時間, sec	30 ~ 80

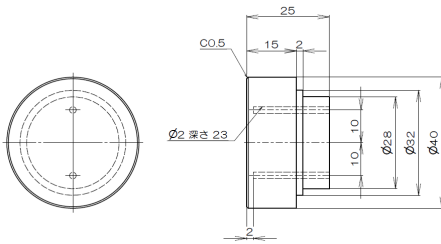


図2 アブレーションセンサー作動特性試験用供試体

#### 4. 研究成果

##### 4-1 炭化検知部の開発

炭化検知部を黒鉛供試体に挿入してアーク加熱試験した。その際の作動特性を図3に示す。本検知部では、外層から内層のKM線へ電流が流れて可変抵抗回路が形成されるが、PI管の炭化により、外層から内層へと電流が移行する位置が変わることで抵抗値が低下する。図3(a)はその傾向を示している。黒鉛供試体は炭化はしないものの、熱拡散率がアブレータに比べて高く、炭化検知部が作動する温度にまで比較的短時間で供試体全体が加熱される材料である。図3(b)より、約12sで18mm程度深さが進展する加熱環境に、本検知部が適用できることがわかった。

同加熱条件で黒鉛供試体を加熱試験し、中心軸上の内部温度を熱電対で計測した。熱電対計測位置に、本検知部により導出した深さが、熱電対計測位置に達した時刻を図3(b)より読み取り、その時の温度を表2にまとめた。本検知部は、1120K±10Kの等温度面に沿って移動する位置計測センサーとして作動することがわかる。図には示していないが、ポリイミド管の炭化による重量減少は、約1100Kで約40%となり、炭化がほぼ収束する。各位置での熱電対計測温度は、誤差範囲内でその温度に達している。本実験での黒鉛供試体内の等温度面の進展速度はアブレータの炭化面進展速度よりも高く、本検知部が、アブレータの炭化層進展を検知できる性能を十分に有していることがわかった。

##### 4-2 表面損耗検知部の開発

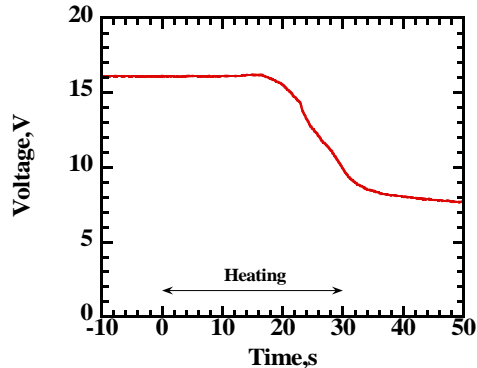
ポリイミド含浸アブレータ供試体に損耗検

知部を醸装して加熱試験した。その際の作動特性データを図4に示す。図の実験では、光ファイバーを3本使用し、ファイバー端面を供試体の初期表面から2,7,12mm位置にそれぞれ配置した。

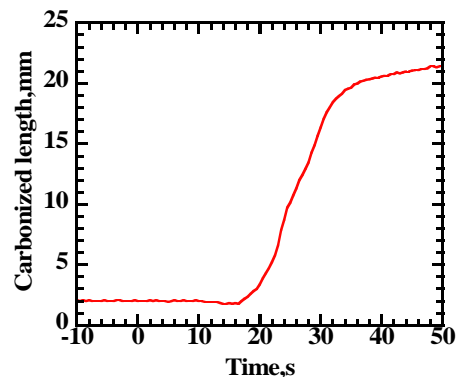
図4で得られた損耗検知部出力の傾向は、本検知部が表面損耗を計測したことを示唆している。熱防御材の表面が光ファイバー端面より前方にある場合、材料放射光が光ファイバーへ入光し、表面が近づくにつれてその熱放射光は強くなる。アブレータ表面が光ファイバー端面まで到達すると、衝撃層からの輻射が入光する。アブレータ材が損耗する典型的な温度環境では、材料熱放射光よりも衝撃層輻射が弱く、光強度出力は減少する。2,7mm位置では最初検知部出力が増大し、ある時刻で下がる傾向を示していることがわかる。一方、12mm位置では増大して加熱試験終了と同時に下がることから、表面位置が12mmまで達していないことを示唆する。本試験での表面損耗量は約11mmであった。これら検知部出力の傾向は、加熱試験時の供試体の表面損耗過程と首尾一貫する。

表2 センサー深さ到達時の黒鉛供試体内部温度

熱電対位置, mm	7.7	12.7	17.7
温度, K	1130	1125	1109



(a) 電圧降下



(b) センサー深さ時間履歴

図3 炭化検知部作動特性

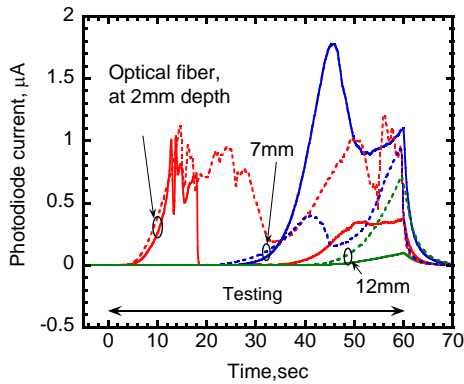
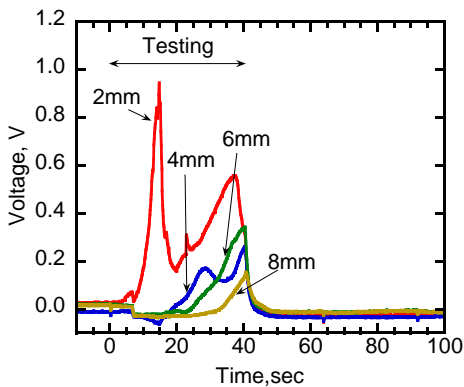
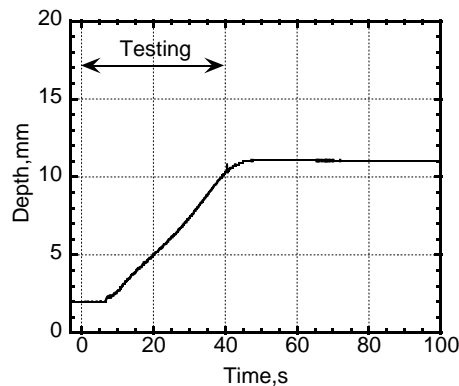


図4 表面損耗検知部作動特性(2 ランのデータを含む)



(a) 表面損耗検知部出力



(b) 炭化検知部出力

図5 ハイブリッドアブレーションセンサーの作動特性

#### 4 - 3 ハイブリッドアブレーションセンサーの開発

損耗検知部のアブレータロッドに4本の光ファイバーを装着し、炭化検知部の中空部分に挿入して、本アブレーションセンサーを構築した。ポリイミド含浸アブレータに本センサーを装着して加熱試験した場合の結果を図5に示す。アブレータロッドの径は約1mm、センサー全体の径は約1.9mmにまで小型化した。本試験での加熱時間は40sである。

損耗検知部および炭化検知部の各データ傾向から、本ハイブリッドアブレーションセンサーの構成で、アブレータ供試体の表面損耗

および炭化進展の同時測定が可能であることを示せたと考えている。図5(a)のデータから、2,4mmでは、それぞれ約14s、28sに光強度が減少している。他方、6,8mmデータからは、光強度の増大のみ観測される。従って、表面損耗量は4~6mmであることが予想される。2,4mm位置データから評価した平均損耗速度約0.14mm/sで、この速度をもとに評価した損耗距離は、 $0.14\text{mm/s} \times 40\text{s} = 5.6\text{mm}$ である。本試験での供試体損耗量は、約4.9mmであり、程よく予測できることがわかった。図5(b)の炭化検知部データから、最終的な炭化検知部深さは、約11.0mmであった。試験後供試体の変色部から評価した炭化深さは約12.0mmであり、こちらもおおむね一致していることがわかる。炭化検知部出力は、ほぼ線形に増加していることから、ほぼ一定に炭化面が進展してものと考えられる。平均進展速度を評価すると約0.31mm/sである。ここで、センサー深さ進展速度をアブレータの炭化層進展速度と考えると、表面損耗速度の約2倍である。このことは、本ハイブリッドセンサーが、アブレータの炭化表面の損耗とアブレータ内の樹脂の熱分解という2つのアブレーション現象を切り分けて計測できる能力を有していることをしめしている。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

Watanabe K., 他6名, and Sakai T., "Operational Characteristics of a Resistance Circuit Ablation Sensor for Ablative Heatshield Systems," Transactions of JSASS, Aerospace Technology Japan 12(ists29), Po\_2\_7-Po\_2\_12, 2014.

〔学会発表〕(計24件)

(1) 酒井武治, "ハイブリッドアブレーションセンサー開発の総括," 平成26年度航空宇宙空力シンポジウム, 平成26年1月, 鳥取県米子市

(2) Sakai T., Nakazawa H., Dantsuka Y., Watanabe K., Kitagawa K., Hirai K., Ishida Y., "In-Situ Measurement of Ablation Fronts of A Low Density Ablator With An Ablation Sensor," 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, January 2015, アメリカフロリダ州

(3) 福井大輝, 酒井武治, 藤田和央, "空力加熱環境下における炭素繊維断熱材の輻射輸送効果," 平成26年度宇宙航行の力学シンポジウム, 2014年12月, 神奈川県相模原市

(4) 中澤寛典, 段塚裕貴, 北川一敬, 平井研一, 石田雄一, 酒井武治, "ハイブリッドアブレーションセンサーによる低密度熱防御材料の炭化・表面損耗同時計測," 平成26年度宇宙航行の力学シンポジウム, 2014年12月, 神奈川県相模原市

(5) 段塚裕貴, 中澤寛典, 北川一敬, 平井研一, 石田雄一, 酒井武治, "低密度アブレータ熱防御材料のアブレーション計測法の開発,"

第 51 回日本航空宇宙学会中部・関西支部合同秋期大会, 2014 年 11 月, 愛知県名古屋  
(6) 福井大輝, 酒井武治, ”X 線 CT デジタルモデルを用いた成形断熱材の輻射熱伝導解析,” 第 51 回日本航空宇宙学会中部・関西支部合同秋期大会, 2014 年 11 月, 愛知県名古屋市  
(7) 福井大輝, 酒井武治, ”X 線 CT デジタルモデルを用いた炭素不織布断熱材の輻射熱伝導解析,” 第 58 回宇宙科学技術連合講演会, 2014 年 11 月, 長崎県長崎市  
(8) 中澤寛典, 段塚裕貴, 北川一敬, 平井研一, 石田雄一, 酒井武治, ”埋め込み型光ファイバセンサーによる低密度熱防御材料の表面損耗計測,” 第 58 回宇宙科学技術連合講演会, 2014 年 11 月, 長崎県長崎市  
(9) 福井大輝, ”炭素多孔質断熱材のレーザー加熱解析,” 2014 年航空宇宙流体科学サマースクール, 福岡県福岡市  
(10) 中澤寛典, ”アブレーションセンサーのレーザー加熱応答,” 2014 年航空宇宙流体科学サマースクール, 福岡県福岡市  
(11) 中澤寛典, 渡邊一也, 北川一敬, 平井研一, 石田雄一, 酒井武治, ”埋め込み型アブレーションセンサーによる炭化・リセッション同時計測,” 日本航空宇宙学会 第 45 期年会講演会, 2014 年 4 月, 東京  
(12) 酒井武治, 渡邊一也, 中澤寛典, 福井大輝, 北川一敬, 平井研一, 石田雄一, ”複合アブレーションセンサーの作動特性,” 平成 25 年度航空宇宙空力シンポジウム, 平成 25 年 1 月, 北海道登別市  
(13) Sakai T., Watanabe K., Nakazawa H., Kuribayashi M., Fukui H., Kitagawa K., Hirai K., Ishida Y., ”Development of A Simultaneous Measurement Sensor for Ablative Thermal Protection Systems,” 52nd Aerospace Sciences Meeting, January, 2014, 米国フロリダ州  
(14) 酒井武治, 他 3 名, ”アーク加熱風洞内の鈍頭物体への輻射加熱推算,” 第 45 回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2013, 2013 年 7 月, 東京  
(15) Sakai T., Fujita K., Fujii K., Suzuki T., Takayanagi H., ”CFD Study For Obtaining Arcjet Freestream With Higher Dynamic Pressures Using An Arcjet,” 44th AIAA Thermophysics Conference, June 2014, 米国カリフォルニア州  
(16) 中澤寛典, 渡邊一也, 福井大輝, 北川一敬, 平井研一, 石田雄一, 酒井武治, ”炭化・リセッションセンサーによるアブレーション計測,” 平成 25 年度宇宙航行の力学シンポジウム, 2013 年 12 月, 神奈川県相模原市  
(17) 福井大輝, 酒井武治, 鈴木俊之, 藤田和央, ”炭素発泡体内の輻射輸送係数評価法の開発,” 平成 25 年度宇宙航行の力学シンポジウム, 2013 年 12 月, 神奈川県相模原市  
(18) 中澤寛典, 渡邊一也, 福井大輝, 北川一敬, 平井研一, 石田雄一, 酒井武治, ”飛行計測を目指した埋め込み型アブレーションセンサーによる熱防御材料放射光計測,” 日本機

械学会 2013 年度年次大会, 2013 年 9 月, 岡山県岡山市  
(19) 福井大輝, 酒井武治, ”エックス線 CT による炭素発泡体の画像ベース解析法の開発,” 2013 年度年次大会, 2013 年 9 月, 岡山県岡山市  
(20) Watanabe K., Nakazawa H., Fukui H., Kitagawa K., Hirai K., Ishida Y., Sakai T., ”Operational characteristics of a resistive circuit ablation sensor for ablative heatshield systems,” 29th International Symposium on Space Technology and Science, June 2013, 愛知県名古屋市  
(21) 酒井武治, 渡邊一也, 中澤寛典, 福井大輝, 北川一敬, 平井研一, 石田雄一, ”アブレータの炭化・表面損耗同時計測のための小型複合センサーの開発,” 日本航空宇宙学会 第 44 期年会講演会, 2013 年 4 月東京  
(22) 酒井武治, ”アブレーションセンサーの作動特性,” 平成 24 年度航空宇宙空力シンポジウム, 2013 年 1 月, 京都府亀岡市  
(23) 渡邊一也, 中澤寛典, 福井大輝, 北川一敬, 平井研一, 石田雄一, 酒井武治, ”アーク風洞によるアブレーションセンサーの特性評価,” 平成 24 年度宇宙航行の力学シンポジウム, 2012 年 12 月, 神奈川県相模原市  
(24) 渡邊一也, 栗林充伸, 中澤寛典, 福井大輝, 北川一敬, 平井研一, 酒井武治, ”アブレーションセンサーによるアブレータの炭化過程計測,” 第 56 回宇宙科学技術連合講演会, 2012 年 11 月, 大分県別府市

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況 (計 0 件)  
取得状況 (計 0 件)

〔その他〕  
特になし

## 6. 研究組織

- (1) 研究代表者  
酒井 武治 ( SAKAI TAKEHARU )  
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：90323047
- (2) 研究分担者  
北川 一敬 ( KITAGAWA KAZUTAKA )  
愛知工業大学・工学部・教授  
研究者番号：50278230
- (3) 連携研究者  
鈴木 俊之 ( SUZUKI TOSHIYUKI )  
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・研究開発本部・上席研究員  
研究者番号：20392839