

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04478

研究課題名（和文）飛行アブレーションセンサーの検知性能検証法の開発

研究課題名（英文）Development of a Verification Method of Ablation Detection for a Flight Sensor

研究代表者

酒井 武治（Sakai, Takeharu）

鳥取大学・工学研究科・教授

研究者番号：90323047

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、これまでに我々が開発した超小型トーチ加熱試験法を用いて、埋込型センサーとは独立した、熱防御材のアブレーション現象を観測できる遠隔アブレーション計測法を開発した。計測には、熱カメラを適用し、時間解像度でアブレーション現象を観測することに成功した。最終的には、埋込型センサーによる直接計測と、開発した遠隔計測を並行してアブレーション実験を実施し、埋込型センサー（=飛行アブレーションセンサー）の非定常アブレーションの検知精度の検証を行うことができるようになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の大型地上加熱試験風洞では、調査することができなかった非定常空力加熱環境で、飛行環境で使えるアブレーションセンサーの検知精度が調査できるようになったことは、宇宙機カプセルが実飛行する際のアブレーション現象解明につながるとともに、将来の宇宙機カプセルの熱防御材設計にも役立てることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：In our research, we created a method for remotely measuring ablation that can observe the erosion of thermal protection materials without relying on an embedded sensor. We used a micro-torch heating test method that we had previously developed and added a thermal camera to the setup to capture time-resolved images of the ablation process. We then conducted ablation experiments while measuring using the embedded sensor and our new remote method. This research allowed us to verify the accuracy of detecting ablation using the embedded flight ablation sensor.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：アブレーション 空力加熱 センサー計測 非定常 アブレータ

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

宇宙機が空中を再突入飛行している際に起こるアブレーション現象が、機体の熱防御にどう寄与しているか、そのメカニズムが未解明である。熱防御材のアブレーションでは、内層にある樹脂が熱分解ガスとなって材料外へ噴出するものと、材料表面が酸化等によって消失するものの2つの主な質量減少過程が起こる。ただし、飛行軌道に沿った総アブレーション量は、従来の大型地上風洞試験では再現できない。そのため、飛行環境下でアブレーション量をその場計測できるセンサがメカニズム解明のために必要であった。

このような背景のもと、可変抵抗回路と光ファイバを一つのユニットにまとめ、表面と内層アブレーションである表面損耗や炭化を、同時計測可能な超小型埋込型アブレーションセンサ(図1、以降の図でも、当該センサをASU(Ablation Sensor Unit)と略して図示する)を新たに考案した。さらに、国際宇宙ステーションから地球へ物資を回収する2018年度の再突入ミッションで、開発した埋込型センサによる飛行計測を行い、知りうる限り世界で初めて、表面内層のアブレーション、内部温度および表面温度の同時検知に成功した。

開発したセンサでは、総アブレーション量だけでなく、飛行軌道に沿った炭化進展や軌道上の数点での表面温度など非定常データが取得できる。ただし特に、後者の非定常データの精度について検討するためには非定常加熱環境を構築する必要があった。このような状況に対して、我々は、火炎トーチを用いた超小型空力加熱試験装置の開発を行い、従来大型風洞試験設備では難しかった、飛行環境のような非定常加熱環境を部分的に再現することに成功した。このトーチ加熱環境での埋込型センサ計測を、センサとは独立してアブレーション観測することができれば、これまで不可能であった実飛行環境での非定常アブレーション計測技術の検証が行える可能性がある。

2. 研究の目的

上述した課題を背景として、本研究ではまず、我々が開発した超小型トーチ加熱試験法を用いて、埋込型センサとは独立した、熱防御材のアブレーション現象を観測できる遠隔アブレーション計測法を開発することとした。そのうえで、埋込型センサによる直接計測と、開発した遠隔計測を並行して実施し、埋込型センサ(=飛行アブレーションセンサ)の非定常アブレーションの検知精度の検証までを行うことを最終目的とした。

3. 研究の方法

(1) アブレーションセンサ

本研究で使用した埋込型センサ(図1)は、温度・表面損耗検知部と炭化検知部からなる径2mm程度の光学デバイス付可変抵抗回路である。温度・表面損耗検知部は、アブレータと同程度に表面損耗する細径材料に溝加工して光ファイバを埋め込んで部材である。光ファイバから入光する光を波長感度が異なる2つの素子で受光し、固体材料から気体への熱輻射の遷移を表面損耗検知時刻として評価する。同時に、放射温度計原理を使って、光ファイバ端面位置での温度が評価できる。炭化検知部は、ポリイミド管に抵抗線をらせん巻きした抵抗回路であり、アブレータの炭化に伴って変化する抵抗を計測して長さに変換することで、時々刻々と変化する炭化長さを評価できる。

(2) 実験系

図2に、本研究で構築した実験系の概要を示す。径12.7mmのアブレータ供試体にアブレーションセンサASUを埋込み、酸水素トーチあるいは酸素アセチレントーチでアブレーション実験する。トーチ先端と供試体表面の距離を自動ステージ(図にはなし)で変えて、熱流束を時間的に変えられる。本研究では、後述するように、供試体表面温度の変化を対象として実験した。トーチとアブレータ供試体の中心軸合わせは、本実験系構築に大変重要であった。本研究では、レーザー墨出し器を用いたが、特に、供試体表面を一様に表面損耗させるには、墨だし器による軸合わせが必須であった。また、埋込センサ計測では、アブレータ供試体の中心にセンサを構築し、炭化、表面損耗、温度を直接計測する。一方、遠隔計測では、後述するように熱カメラを用い、側面の温度場情報からアブレーション計測する。最後に、放射温度計計測では、供試体中心の表面温度の時間履歴を遠隔に計測している。

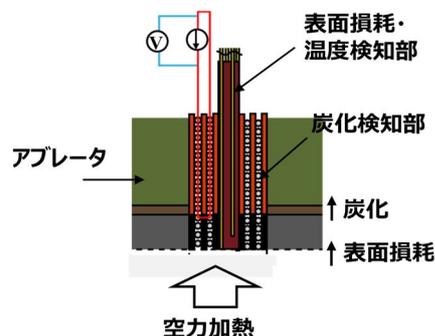


図1 埋込型アブレーションセンサ ASU(Ablation Sensor Unit)



(3)遠隔炭化検知

本研究では、熱防御材に使用したポリイミド樹脂の熱分解反応が、約 1150K で終了することがこれまでの研究で分かっており、この温度を熱カメラで観測し、供試体側面の炭化進展を評価した。ここで、観測面は、黒体塗料を塗布して実験を行った。なお、埋込センサに使われているポリイミド樹脂管の通電開始温度も、約 1150K であることから、直接計測法と同等な炭化検知結果が期待できる。

1150K の等温面捕獲のデモンストレーションを行った。熱源を半導体レーザー、供試体を黒鉛とした場合(図 2 の実験系とは異なる)の供試体側面熱画像を図 3 に示す。図から、700~1000 までを 50 ずつ分割した等温線の進展はほぼ一次元的であることがわかる。火炎タッチでアブレータ熱防御材を加熱した場合、ここまで鮮明な等温線間隔は見込めないが、定性的には同様であった。

(4)遠隔損耗計測

表面損耗の遠隔評価には最終的には、熱カメラを採用した。当初、アブレータ供試体をタッチ火炎で加熱しても様に損耗せず、側面から埋込センサ付近の損耗を観測することが難しかった。そのため、図 2 にあるように、レーザーと分光器を用いたシステムをバックアップとして準備した。この方法では、埋込センサの表面損耗・温度検知部に臙装した、遠隔計測用の光ファイバにレーザー光を導光し、表面損耗によって光ファイバ端面が暴露されたときに射出するレーザー光を、分光器で計測する原理で表面損耗を評価する。予備実験では、比較的うまく行ったが、炭化検知部と組み合わせるセンサ全体を制作する場合に、光ファイバを多数臙装することが難しかった。また、光ファイバの熱劣化が原因と考えられるが、レーザー光強度が、供試体表面からの放射強度にしばしば埋もれてしまう場合もあり、再現性のあるデータを確保することが難しかった。そこで、加熱試験系を見直し、タッチと供試体の芯だし方法を改善することで、熱カメラ単体での検知法に集約できた。

熱カメラによる観測では、気体と固体の赤外線放射輝度が異なることを利用して、気固界面位置の移動を捕獲し、表面損耗を評価した。後述するが、本研究で使用した熱カメラ(A655SC, FLIR)では、空間解像が不足し、検知精度評価に若干の課題が残った。ただし、本研究で開発した手法を、スペックの高い熱カメラで行えば、原理的には解消されるものと思われる。

4. 研究成果

(1)遠隔炭化検知性能

遠隔炭化検知法の性能を評価するため、アブレータ供試体に埋込センサの炭化検知部を臙装して実験した。一例として、ある再突入カプセルの飛行軌道上の表面温度時間履歴を再現して行った実験結果を図 5(a) に示す。この時の炭化進展履歴を、遠隔法と直接法と比較した結果を図 5(b) に示す。遠隔法に着目すると、40 秒付近のピーク温度を境にして、温度上昇時、下降時で炭化進展速度が異なることが予想され、その違いを程よく捉えていることがわかる。直接法でも同様な傾向を示しており、開発した遠隔法は、直接法と同等な非常炭化検知性能を有しているものと判断した。アブレータの総炭化量も同図に示したが、その予測精度も両手法で概ね良好であることがわかった。これらの結果より、直接法の最終的な検証に堪える遠隔炭化検知法の性能を確認できた。

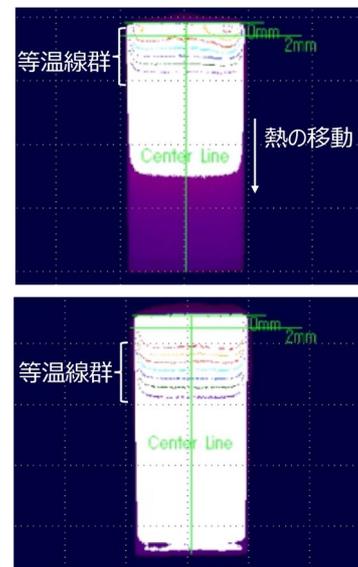


図 3 熱源を半導体レーザー、黒鉛供試体の場合の熱拡散(上から下へ時間経過)

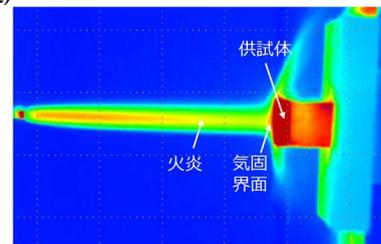
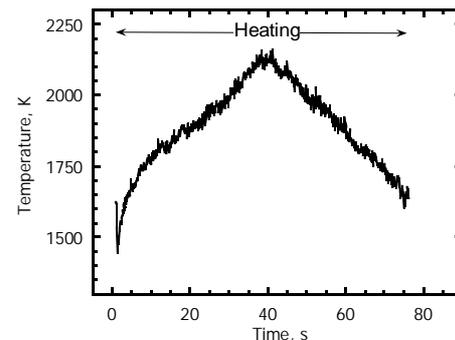
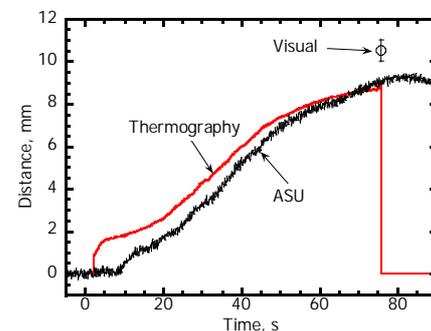


図 4 トーチ火炎で炭素多孔質体を加熱する様子



(a) 供試体中心軸での表面温度履歴



(b) 炭化進展履歴

図 5 遠隔・直接炭化検知法の比較

(2)遠隔表面損耗検知性能

炭素基材供試体(本研究を通して使ったアブレータの、樹脂含侵をしていない成形断熱材)に、埋込センサの温度・表面損耗検知部を構築して、アブレーション実験した。ここでは、一例として、表面温度が約 1850 K となる定常加熱条件での結果で議論する。ここで、供試体初期表面から約 2 mm の位置で、1本の光ファイバの端面を固定して実験した。

直接計測での光検知器出力電流時間履歴と、遠隔計測での気固界面位置時間履歴を比較した結果を図6に示す。直接計測では、材料から火炎への熱放射強度の変化を計測しており、光検知器出力電流の下がったところが表面損耗時刻である。遠隔計測データに着目すると、表面温度が一定であることから、ほぼ線形な表面損耗が期待され、その傾向を概ね捉えていることがわかる。ここで、本実験での表面損耗平均速度は約 0.1 mm/s であり、熱力メラの空間解像度が 0.27 mm/pixel だったことから、時間解像度が十分とは言えない表面進展となっている。しかし、直接計測と遠隔計測の 2 mm 表面損耗検知時刻の差は、約 6 秒であり、これは長さにして約 0.6 mm である。光ファイバ構築は手動のため、この程度の誤差は不可避である。従って本結果より、熱力メラによる遠隔表面損耗検知法が、直接法の最終的な検証を行える性能を有しているものと判断した。

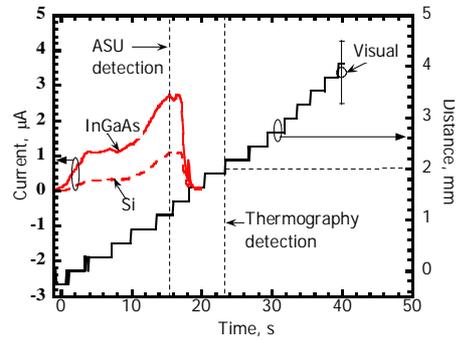
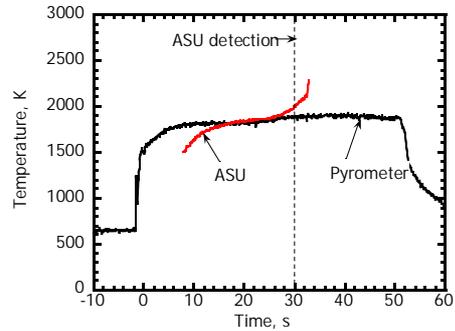


図6 熱源を半導体レーザー、黒鉛供試体の場合の熱拡散

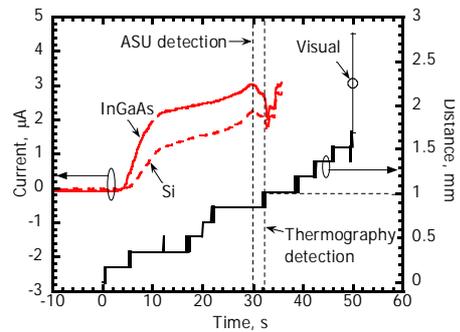


(a) 遠隔表面温度とセンサー温度

(3)直接法検証の一例

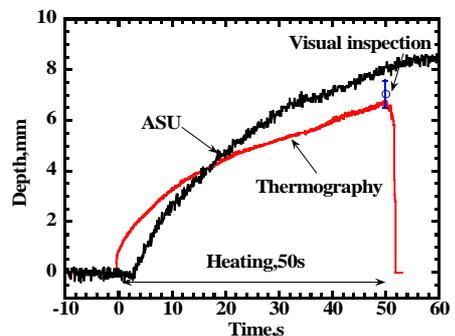
酸素アセチレントーチでアブレーション実験を行ない、直接アブレーション検知、遠隔アブレーション検知の同時計測に成功した。供試体表面温度時間履歴と直接法による温度の時間履歴を図7(a)に、直接・遠隔表面損耗検知データを図7(b)に、直接・遠隔炭化検知データを図7(c)に示す。

図7(a)に示すように、ほぼ定常な熱入力で実験しており、図7(b)の直接法の結果より、約 30 秒で 1 mm 損耗を検知したことがわかる。遠隔法での 1 mm 損耗検知は約 32 秒であり、概ね一致していることがわかる。この結果は、これまでできなかった、直接計測法の表面損耗検知精度が確認できるようになったことを意味している。ここで、平均損耗速度は約 0.04 mm/s と遅く、2 秒間の差は約 0.3 mm であり、十分な精度を有しているものと考えられる。



(b) 表面損耗

この検知時刻でのセンサ温度は、表面温度と考えることができる。図7(a)より、センサ温度と表面温度の差は約 7% であり、表面温度の精度評価も、並行してできるようになった。ただし、光ファイバの本数が本実験では 1 本に限られるため、本数を増やした多点計測での精度を今後確かめて、埋込センサ検知精度検証を行ってきたい。



(c) 炭化進展

図7 直接・遠隔計測結果の比較

図7(c)から、1 mm 損耗検知時刻において、直接法で 6 mm 程度、遠隔法では約 5mm と同等であり、これまでわからなかった非定常炭化進展データの精度の検討もできるようになった。ただし、直接法と遠隔法の炭化進展速度の違いは無視できるレベルとは言い難かった。これは今後の課題となったが、直接・遠隔アブレーション計測を並行して行えるようになったことは、最低限当初の目的を達成できたと考えている。

本研究により、さらに詳細に検討すべき事項はあるものの、非定常アブレーション検知特性を検証できる遠隔検知法の開発に成功し、埋込型飛行アブレーションセンサの検知の精度を調査できる環境を構築することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Sakamoto K., Takagi Y., Katsurayama H., Suzuki T., Sakai T.	4. 巻 22
2. 論文標題 Assessment of a Centerline Enthalpy Determination Method of Arcjet Wind Tunnel Flow	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Transactions of the JSASS, Aerospace Technology Japan	6. 最初と最後の頁 p.41-47
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/tastj.22.41	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 Sakai, T., Iwamoto K., Nakamura T., Ishida Y.	4. 巻 Vol.19, No.4
2. 論文標題 Unsteady Testing of an Ablation Sensor in Torch Flame	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The 32nd ISTS Special Issue of Transactions of JSASS, Aerospace Technology Japan	6. 最初と最後の頁 p. 591-597
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/tastj.19.591	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 2件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 酒井武治, 石本颯太, 富樫拓馬, 坂本憲一, 石田雄一
2. 発表標題 フライトアブレーションセンサーの非正常加熱プロファイルにおける検知精度
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

1. 発表者名 富樫拓馬, 石本颯太, 石田雄一, 酒井武治
2. 発表標題 酸水素トーチを使ったアブレータの直接・遠隔アブレーション計測法の開発
3. 学会等名 第60回日本航空宇宙学会 関西・中部支部合同秋期大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 酒井武治, 富樫拓馬, 石本颯太, 坂本憲一
2. 発表標題 飛行環境アブレーションのセンサー検知精度の検証
3. 学会等名 令和5年度 航空宇宙空力シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takeharu Sakai
2. 発表標題 University-initiated hypersonic flight measurement technique development :A case in the field of aerothermodynamics
3. 学会等名 2022 Sustainable Research and Innovation(SRI) Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 酒井武治、富樫拓馬、平野虎太郎、坂本憲一、石田雄一
2. 発表標題 アブレーション現象の遠隔検知法の開発
3. 学会等名 第65回宇宙科学連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kenichi Sakamoto, Yoichi Takagi, Kota Moriyama, Kaho Hayashi, Hiroshi Katsurayama, Toshiyuki Suzuki, Takeharu Sakai
2. 発表標題 Assessment of a Centerline Enthalpy Determination Method of Arcjet Wind Tunnel Flow
3. 学会等名 The 33rd International Symposium on Space Technology and Science (ISTS) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Sakai, T
2. 発表標題 Development and flight demonstration of an ablation sensor for reentry vehicle heat shield ablation measurement
3. 学会等名 The 8th Joint Symposium on Mechanical and Materials Engineering between Northeastern University and Tottori University(JSMME 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平野虎太郎, 富樫拓馬, 石田雄一, 酒井武治
2. 発表標題 表面損耗センサーの検知性能高度化
3. 学会等名 令和3年度宇宙航行の力学シンポジウムプログラム
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
研究 分担者	石田 雄一 (Ishida Yuichi)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・主任研究開発員	
	(20371114)	(82645)	

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
---------	---------