

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：15101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14251

研究課題名(和文)空力加熱される炭化層内の輻射輸送現象の解明

研究課題名(英文) Radiative Transfer in Low Density Carbon-based and Charred Materials Under Aerodynamic Heating Conditions

研究代表者

酒井 武治 (SAKAI, TAKEHARU)

鳥取大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90323047

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、大気突入宇宙機の熱防御材として有用な低密度炭素基材および基材から製造したアブレータ炭化材の空力加熱環境での熱応答を実験的・数値的に調査した。特に、高温環境に曝された際の材料内輻射熱輸送が材料の断熱性に及ぼす影響を調べるため、当該材料の内部構造をX線CTで構築した3次元モデルを使い光線追跡シミュレーションで計算した輻射熱伝導率を導入した。この実効熱伝導率を組み入れた数値解析法を、高温プラズマ風洞で加熱試験した各炭素系材料供試体の熱応答シミュレーションに適用し、輻射による熱輸送効果を定性的・定量的に明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Thermal response of carbon-based and char materials in an aerodynamic heating environment was studied experimentally and numerically. Radiative transfer in the materials was modeled using an effective radiative conductivity, which was evaluated through a radiative extinction coefficient deduced from a ray-tracing calculation using the X-ray CT models of the materials. Aerodynamic heating experiments were made using JAXA arcjet wind tunnel facilities, and the thermal response of the material's test specimen was numerically simulated using the radiative conductivity model. Comparison of in-depth temperature between calculation and measurement showed that overall trends in the measured time history of the temperatures was reproduced for all the materials examined in this study when the radiative conductivity was included in the calculation, suggesting that the radiative transfer within the low density carbon material can be modeled by the proposed method in this study.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：アブレーション 輻射加熱 低密度炭素材 空力加熱 アーク加熱風洞 数値シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

近年利用可能な炭素成形断熱基材(例えばドナカーボ、大阪ガスケミカル)は、巨視的には均質でありながら異方断熱性を発現する複雑な形態を持つ。空隙率は約 90%で、バルクの炭素材料に比べ熱伝導率が 1/10 以下である。このような軽量性・断熱性を、大気突入カプセル機の熱防御材料に適用する研究が近年積極的に行われている(Willcockson, W., Journal of Spacecraft and Rocket, 1999, Suzuki et al., AIAA Paper2012-3009 など)。大気突入時には、機体表面温度が数千 K にまで達し、材料内の温度勾配が高くなる。高温環境では、多孔質体内の輻射熱輸送が増大することは一般的に知られているが、宇宙機の大気突入時のような極限的な環境において、多孔体内の輻射輸送が増大し、熱防御材料の断熱性能がどの程度低下するかはあまりよくわかっていない。

X 線 Computed Tomography(以下 CT)により材料内部構造を 3 次元デジタルモデル化し、光線追跡シミュレーションすることで輻射減衰係数などの輻射特性量を評価する手法が提案されている(Petrasch J. et al., JQSRT, 2007)。本研究で対象とする炭素系多孔質材料では、エックス線の吸収が弱いため、モデル構築が難しく申請者の知りうる限り研究例がない。しかし申請者らの予備研究により、近年市販されている専用のエックス線 CT 装置を利用すれば、炭素のような軽元素材料でも、詳細なモデルが構築可能であることがわかってきた。しかしながら、微視的な X 線 CT モデルによって得られる熱的な物性値がどの程度巨視的な材料での熱伝導解析に使えるかは未だ未解明である。

2. 研究の目的

炭素成形基材あるいはアブレータ(炭素成形基材にポリイミドなどの耐熱樹脂を含浸させたもの)から樹脂成分を揮発させて製造した炭化材が空力加熱されている際の輻射熱輸送促進現象のモデル手法を構築し、それらを使って、高温プラズマ風洞試験で得られた炭素材の熱応答過程を明らかにする。

3. 研究の方法



図 1 アーク加熱試験用供試体(左から炭素基材, ポリイミド含浸アブレータ, 炭化材)

(1) 供試体

本研究では、炭素基材として大阪ガスケミカルのドナカーボを用いた。2 種類の密度の基材を使用し、それぞれ 0.13g/cc と 0.16g/cc

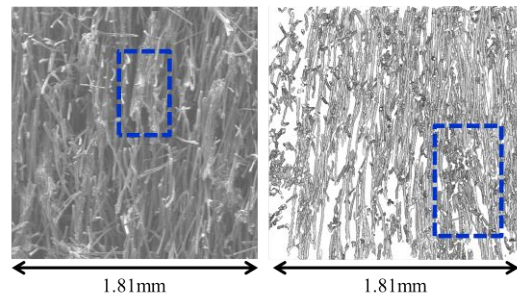
である。0.16g/cc の基材を使い、連携研究者の石田雄一博士協力のもと、ポリイミド樹脂を含浸させてアブレーション熱防御材料を製造した。さらに、熱処理して含浸した樹脂を炭化させた炭化材も後述するアーク加熱風洞での供試体として使用した。

(2) X 線 CT モデルによる実効輻射熱伝導率決定法の開発

X 線撮影条件

産業技術総合研究所所有の X 線 CT 装置 (FLEX-M345、Beamsense) を用いて材料を X 線撮影した。本研究で使用した材料の内部構造を鮮明に捉えられる条件を試行錯誤的に探索した。その結果、管電圧は 60kV、管電流は 100 μ A、ビュー数を 720 とした。撮影した試料は、各辺が 3mm \times 3mm \times 10mm 程度の直方体であり、バルク材料から手動で切断し採取した。

X 線 CT モデル



(a) SEM 画像 (b) CT モデル(炭素基材)

図 2 炭素基材内の断面の比較:青枠点線は炭素繊維の密着部分を表す

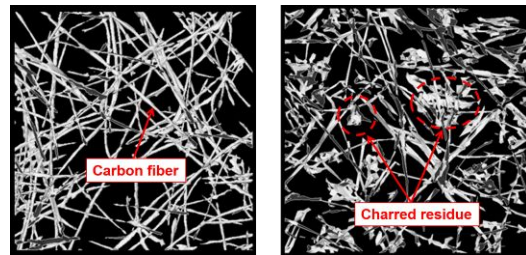


図 3 炭素基材と炭化材の断面比較:右図では炭素繊維以外のかたまりが見られ樹脂が炭化した成分であると考えられる

CT 画像群を積層して 3 次元ボクセルモデルを構築した。2 値化の閾値は、3 次元ボクセルモデルの空隙率が 93%となるよう輝度値を探索して決めた。本稿では、すべての画像に対して同じ閾値で 2 値化することで図 2 のように炭素繊維を鮮明に捉えることができた。

構築した 3 次元ボクセルモデルには、非物理的な固体ボクセルが存在する領域があることがわかった。これは、比較的大きな空隙ボクセル群中に、固体ボクセルが孤立している状態に相当する。本研究では、この固体ボクセルを構成するデータを CT 画像群から選別し、空隙として変換した。このノイズ除去

操作による空隙率変化は0.1%程度である。

熱処理して得られた炭化材と炭素基材の Standard Triangulated Language(STL) モデルを図3で比較した。図から、本研究で試行錯誤的に決定した条件によって、炭化した樹脂はモデル化可能であることがわかった。ただし、STL モデルでの光線追跡計算は膨大な時間がかかることが判明したため、のちで示す結果では、ボクセルモデルを用いて減衰係数を計算した。

(3) アーク加熱試験

表1 風洞作動条件

試験気体	窒素
アーク電流, A	450
質量流量, g/sec	18
ピトー圧, kPa	12.6
冷温壁加熱率, MW/m ²	3.0

表2 各材料での試験条件

	炭素基材		炭化材
	密度, g/cc	0.12	0.15
熱電対艱装深さ, mm	18, 23		18, 23, 25
X _{thick} , mm	40		25
加熱時間, sec	10	15	25
表面損耗, mm	0.5	0.4	0.1

各供試体の加熱試験には宇宙航空研究開発機構の宇宙科学研究所 1MW アーク加熱風洞および研究開発本部の 750kW アーク加熱風洞をそれぞれ使用した。1MW アーク加熱風洞作動条件を典型的な例として表1に示す。本実験では特に、窒素を試験気体を選び、表面損耗による材料内部温度上昇への影響を極力抑えることができた。

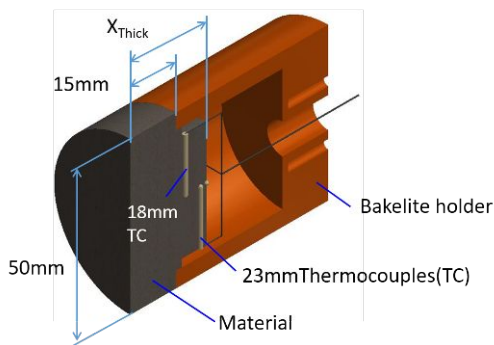


図4 熱電対艱装アーク加熱試験用供試体概略図

本研究では、概ね図4のような供試体を用いた。いずれの供試体でもK型熱電対を使って内部温度を計測し、供試体厚み等の詳細は表2に示した。先に述べたように、本試験での表面損耗は1mm以下であり、のちに示す解析結果では、表面損耗を無視している。

(4) 供試体実効熱伝導解析コード

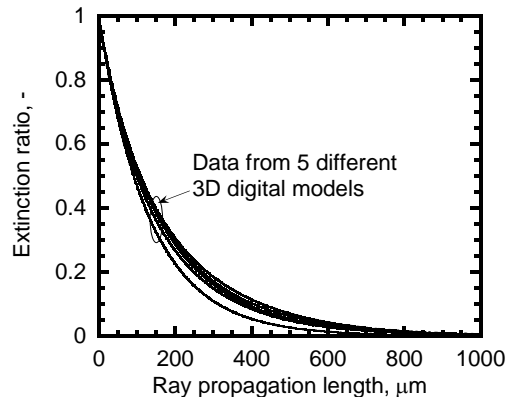
アーク加熱供試体の熱応答を一次元あるいは二次元軸対称として仮定し、エネルギー方程式を定式化した。特に、実効熱伝導率は固体熱伝導率 k_{sol} と輻射熱伝導率(第2項目)からなり、以下で与えた：

$$k_{eff} = k_{sol}(T) + \frac{16\sigma T^3}{3\beta}$$

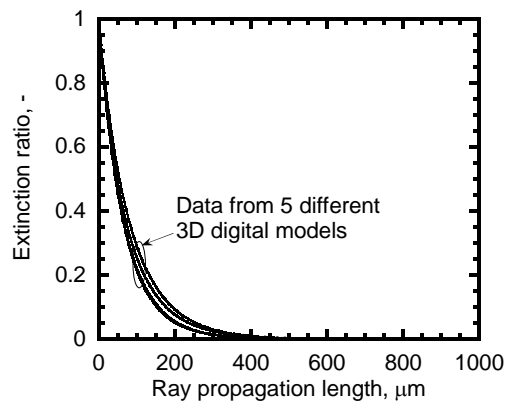
ここで、右辺第2項が輻射熱伝導率で、は次に説明する減衰係数である。比熱は Pottsらが提唱した温度依存性を加味したカーブフィットで与えている。

固体熱伝導率は、1000K 以下では利用可能な実験値データをもとにカーブフィットし、1000K 以上では、1000K で一定として近似した。カタログ値と本件で得られた輻射熱伝導率から、この近似の妥当性について議論し、本研究で行った実験データを解析する限りにおいては、概ね許容できるものと判断した。ただし、高温環境(約3000K以上)での実験は、あまり行わなかつておらずさらなる検証が必要であると考えられる。

4. 研究成果



(a) 炭素基材(0.15g/cc)



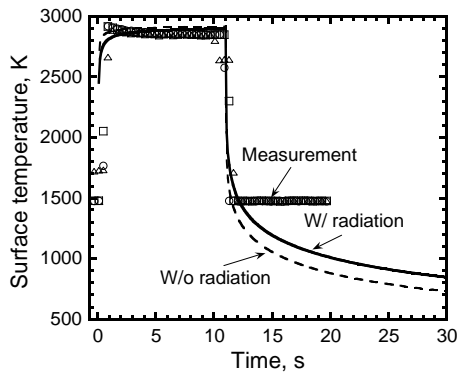
(b) 炭化材

図5 光線追跡解析結果

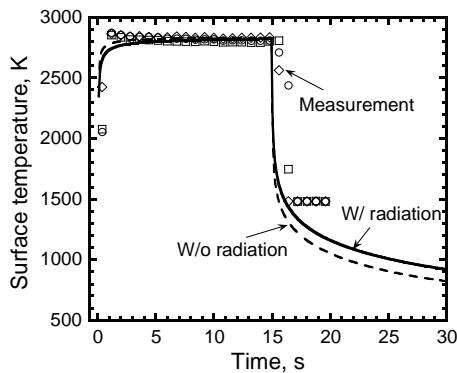
(1) 光線追跡法による輻射減衰係数の導出

X線CTモデルを使って光線追跡解析をした結果を図5に示す。炭素基材(0.15g/cc)と炭化材の結果について示す。方法論は Petrasch

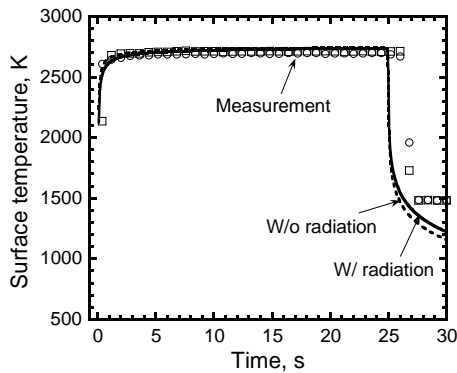
J.ら(JQSRT, 2007)に基づくが、解析コードを内製で開発した。図では、異なる5サンプルについて光線の初期位置から長さに対してどの程度光線数が減少していくかについて、光線追跡計算結果をもとに整理したものである。本手法では、それぞれの材料を半透明な性質をもつものと仮定し、その材料に初期に入射した光が、指数関数的に減少するベールランベール則に基づくものとして、得られたデータをカーブフィットして、ある一つの材料を代表する減衰係数を求めている。結果、炭素基材(0.15g/cc)、炭化材それぞれに対して、 $6656 \pm 666 \text{ m}^{-1}$ 、 $13610 \pm 1182 \text{ m}^{-1}$ となった。減衰係数の逆数は光が吸収されるまでの平均距離に相当し、炭化材のほうが、光が伝播しにくいという結果である。図3に示したように炭化材のほうが炭化した樹脂により光が吸収されやすいと考えられ、この傾向を捉えることができたと考えている。



(a) 炭素基材 0.12 g/cc



(b) 炭素基材 0.15 g/cc



(c) 0.28 g/cc

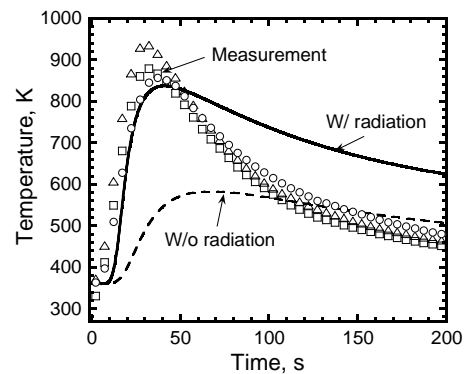
図6 アーク加熱試験時の供試体中心表面温度の実験と計算の比較

(2)アーク加熱試験データと1次元解析結果の比較

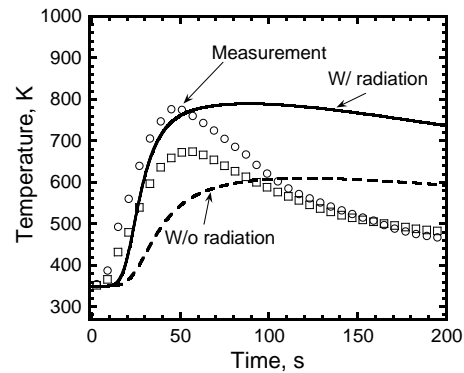
供試体中心表面温度時間履歴

炭素基材(0.12, 0.15g/cc)および炭化材のアーク加熱試験中の供試体中心の表面温度時間履歴の測定結果を図6(a),(b),(c)にそれぞれ示す。表面温度は密度に応じて低くなる(0.12と0.15g/ccとの違いはかなり小さい)傾向を示しており、2500~2900Kで準定常状態となっていることがわかる。ここで計算結果は実験結果を程よく再現している。これは実験における、供試体への入熱特性を正確に捉えてシミュレーションできていることを示唆する。

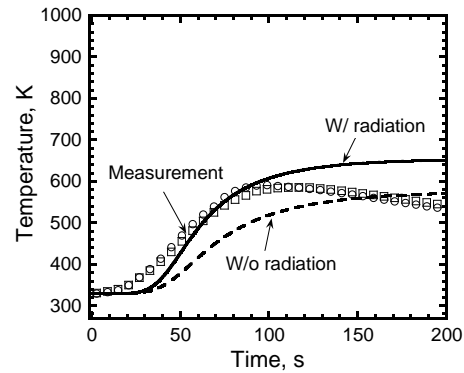
内部温度時間履歴



(a) 炭素基材 0.12 g/cc



(b) 炭素基材 0.15 g/cc



(c) 炭化材 0.28 g/cc

図7 内部温度(18mm)時間履歴の実験と計算の比較

図7に、内部温度履歴の実験と計算の比較

結果を示す。式(2)の輻射熱伝導項がある場合のほうが、測定した内部温度の昇温過程および最高温度との一致がよいことがわかる。この結果は、本研究でX線CTモデルを使って開発した微視的スケールの材料内部形態から得られる輻射熱伝導に関する情報が、材料を空力加熱した際の巨視的な熱伝導過程を捉えられることを示唆するものであると考えている。

一方で、最大温度を達成した後の特に冷却過程が本質的となる時刻では、本1次元計算では実験結果を再現できず、実験値を過大評価している。これらは図4に示した供試体とフォルダのはめあいにあたる隙間の冷却条件課した2次元軸対称解析を実施することで程よく実験値を再現できることが本研究を通してわかっている。

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)

(1) Sakai T., Nakazawa H., Dantsuka Y., Ishida Y., Kitagawa K., and Hirai K, "Dual-Component Sensor Design for In Situ Ablation Measurement", *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 31, No. 2 (2017), pp. 307-317

〔学会発表〕(計13件)

(1) 今村謙一, 酒井武治, 荒谷貴洋, 山田和彦, 鈴木俊之, 藤田和央, "コンストリクタ型アーク加熱風洞高エンタルピー気流のCFD予測精度の現状," 2016年衝撃波シンポジウム, 2017年3月, ヴェルク横須賀, 神奈川県横須賀市

(2) 酒井武治, 堀内拓未, 石田雄一, "空力加熱されるアブレータ内の輻射伝熱の影響," 平成28年度航空宇宙空力シンポジウム, 2017年1月, 鳥羽シーサイドホテル, 三重県鳥羽市

(3) Horiuchi T., Sakai T., Suzuki T., and Yuichi Ishida, "Radiative Transfer in a Low Density Ablative Material Under Arcjet Flow Conditions," 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2017年1月, Gaylord Texan, アメリカテキサス州

(4) 段塚裕貴, 岩本健太, 酒井武治, 石田雄二, 他2名, "搭載型アブレーションセンサーユニットによる低密度熱防御材料の炭化・表面損耗・温度同時計測," 平成28年度宇宙航行の力学シンポジウム, 2016年12月, 宇宙科学研究所, 神奈川県相模原市

(5) 堀内拓未, 他2名, 石田雄一, 酒井武治, アーク加熱される炭素多孔質材料の熱応答解析, 平成28年度宇宙航行の力学シンポジウム, 2016年12月, 宇宙科学研究所, 神奈川県相模原市

(6) 段塚裕貴, 桑村航矢, 酒井武治, 石田雄二, 他2名, "搭載型アブレーションセンサ

ーの計測精度," 2016年度日本機械学会年次大会, 平成27年9月, 九州大学伊都キャンパス, 福岡県福岡市

(7) 堀内拓未, 酒井武治, 他3名, "アーク加熱気流下の低密度炭素系熱防御材の熱応答," 第48回流体力学講演会/第34回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 2016年7月, 金沢歌劇座, 石川県金沢市

(8) 今村謙一, 他4名, 酒井武治, "アーク加熱風洞の高エンタルピー気流の圧力特性," 第48回流体力学講演会/第34回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 2016年7月, 金沢歌劇座, 石川県金沢市

(9) 酒井武治, 他2名, 石田雄一, "空力加熱される炭素多孔質材内の輻射輸送," 平成27年度航空宇宙空力シンポジウム, 2016年1月, 指宿いわさきホテル, 鹿児島県指宿市

(10) Sakai T., 他2名, Ishida Y., "Radiative Transfer In A Rigid Carbon Material Under Arcjet Flow Condition," 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2016年1月, Manchester Grand Hyatt San Diego, アメリカカリフォルニア州

(11) 段塚裕貴, 他4名, 石田雄一, 酒井武治, "アブレーションセンサーユニットによる低密度熱防御材用の炭化・表面損耗・温度同時計測," 平成27年度宇宙航行の力学シンポジウム, 2015年12月, 宇宙科学研究所, 神奈川県相模原市

(12) 堀内拓未, 他3名, 石田雄一, 酒井武治, "アーク加熱気流下での炭素成形断熱材内部の輻射輸送効果," 平成27年度宇宙航行の力学シンポジウム, 2015年12月, 宇宙科学研究所, 神奈川県相模原市

(13) Dantsuka Y. 他3名, Ishida Y., Sakai T., "In-Situ Ablation Measurement of a Low Density Ablator Using an Embedded Sensor," The 30th International Symposium on Space Technology and Science, 2015年7月, Kobe Convention Center, 兵庫県神戸市

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:

発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

酒井 武治 (SAKAI, Takeharu)
鳥取大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：90323047

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

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
研究者番号：20371145

(4) 研究協力者

()