

平成 31 年 4 月 16 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06891

研究課題名(和文)急速加熱時における耐熱CFRPの局所面外変形を伴う内部損傷の発生機構解明

研究課題名(英文) Numerical simulation for delamination involved with internal damage of CFRP ablator under rapid heating

研究代表者

小柳 潤 (Koyanagi, Jun)

東京理科大学・基礎工学部材料工学科・准教授

研究者番号：60386604

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：CFRPアブレータの急速加熱時に発生する層間はく離の発生メカニズムを同定し、数値シミュレーションを実施することで、定量的に層間はく離の発生予測が可能となる手法を確立した。数値解析は、熱伝導、炭化等の化学反応、発生したガスの流動、内部圧力によるはく離発生マルチフィジクス連成解析を実施した。JAXA所有のアーカ風洞を使用して、数値シミュレーション結果の妥当性を検討した結果、実験と解析では良い一致を示した。未知の環境における層間はく離の発生を予測できる技術を習得した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

将来人類が地球外で生活するようになったときに、地球への帰還技術は極めて重要となる。本研究は、大気圏再突入時の熱防御材料の信頼性に関わる重要な研究である。本研究により最も汎用的に熱防御材料として使用されるであろうCFRPアブレータの損傷発生メカニズムを明らかにした。これを踏まえて熱防御システムを設計することで地球帰還への高信頼化に繋がる。人類の宇宙開発に重要な意味を持つ研究成果となる。

研究成果の概要(英文)：By identifying the generation mechanism of delamination during rapid heating of CFRP ablator and carrying out numerical simulation, we have established a method that enables quantitative prediction of delamination generation. In the numerical analysis, multiphysics coupled analysis of heat conduction, chemical reaction such as carbonization, flow of generated gas, and separation generation by internal pressure was performed. As a result of examining the validity of the numerical simulation results using the arc wind tunnel owned by JAXA, good agreement was obtained between experiment and analysis. We learned the technology that can predict the occurrence of delamination in an unknown environment.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：CFRPアブレータ 大気圏再突入 熱防御システム 数値シミュレーション 層間はく離 マルチフィジクス連成解析

1. 研究開始当初の背景

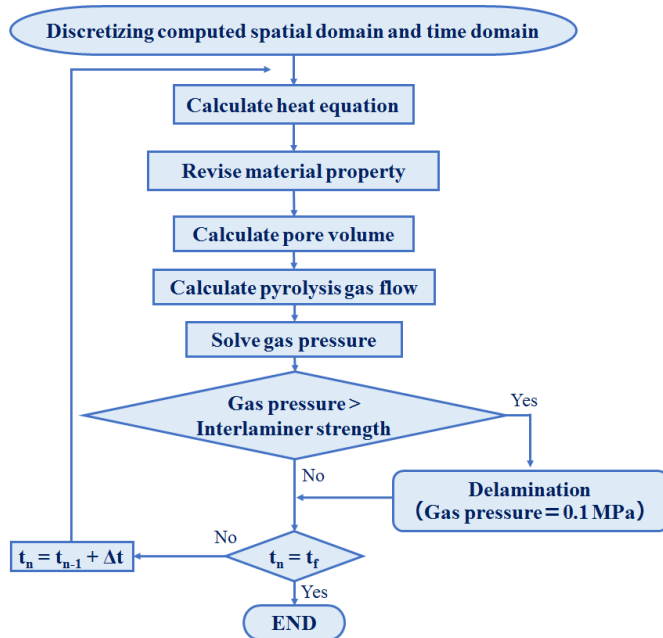
宇宙輸送機のエンジンノズルや、大気圏再突入時の耐熱材料としてカーボン繊維強化フェノール複合材料が用いられている。以下この材料をアプレータと呼ぶ。アプレータはフェノール樹脂の熱分解に熱エネルギーを消費させ、内側への熱の流入を小さくする働きを有する。アプレータは状況によって 1000°C ~ 3000°C、ときにはそれ以上の温度でかつ、活性雰囲気さらされる。このためアプレータのような耐熱材料に対しては、基本的には酸化に関する研究がこれまでに多くなされている。

実は他にも未解明の事象が存在する。これはアプレータ特有の事象であるが、急速加熱にさらされるため、その熱変形挙動が実は正確に追従できていない。ここで言う熱変形挙動とは線形な熱膨張等を示すのではなく、熱分解に伴うアプレータの収縮や、温度差が生む熱応力にもなうアプレータの損傷等の不可逆な変形である。すなわち、フェノール樹脂は熱分解時に気体を放出し、自身は収縮するという複雑な挙動をとり、これに起因するアプレータの損傷を含む変形は正確にシミュレートされていない。挙動を複雑にするもっとも大きな要因は、熱分解ガスによる内部圧力の増加に伴う面外変形を伴う層間はく離の発生である。準静的な加熱環境では熱分解ガスはアプレータ内部を浸透して外に出ることができるため内部圧力は無視できるが、急速加熱時には、そのガスが供試体外部へ出る速さよりもさらなる熱分解によって新たにガスが発生する速度が勝り、供試体の内部圧力の増加が起きる。この挙動を正確に予測できるようになれば、現在使われているアプレータの設計がさらに効率化されると期待できる。将来的には熱分解等を考慮した熱伝導—化学反応—変形の連成解析をおこなうことが望ましい。

2. 研究の目的

本研究では、CFRP アプレータの層間はく離の発生の信頼性の高い数値シミュレーションを実施することを目的とする。一方で、様々な加熱率での急速加熱試験を実際に行い、層間はく離の発生の有無を調査し、数値シミュレーションの妥当性を検証する。実験には JAXA 宇宙研所有のアーケ風洞試験を利用する。数値解析では、熱伝導、化学反応、発生ガスの流動、内部ガス圧による層間はく離発生を一色単に扱うマルチフィジクス連成解析を実施する。自作のコードを用い、パラメトリックスタディーを行う。

3. 研究の方法

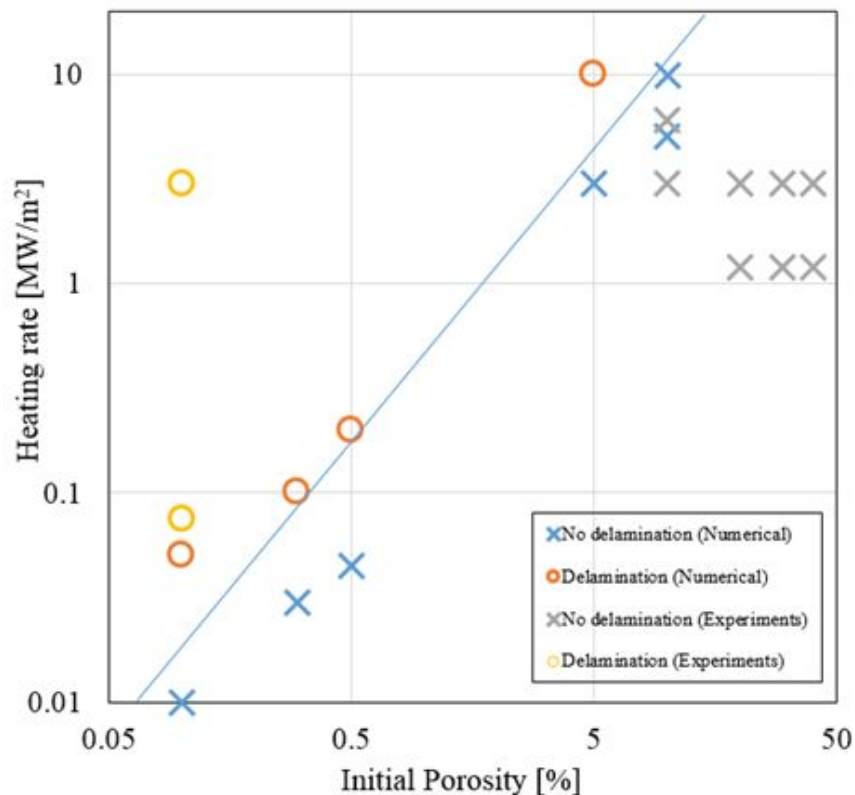


解析方法について述べる。左のフローチャートに従って、アプレータのマルチフィジクス挙動をモデル化した。用いた支配方程式は、熱伝導方程式、質量保存則、アレニウス型の化学反応式、ガス流動のダルシー則、気体の状態方程式である。これらの支配方程式に現れる各変数をすべて他の実験より決定した。すなわち、ガス透過試験、TGA 試験、フラットワイズ引張試験、熱伝導試験、DMA を実施した。得られた定数を用いて差分法によりアプレータ内部に層間はく離が発生するかどうかを予測した。

実験方法について述べる。試験機は JAXA 宇宙研所在のアーケ風洞試験を用いてモデル供試体を急速に加熱した。加熱率は 1MW/m²-6MW/m² で 30 秒間加熱し、層間はく離が発生するかどうかを調査した。なお、これらの実験と解析は供試体のかさ密度（気孔率）を変化させて実施した。

4. 研究成果

次頁に実験結果と数値シミュレーション結果の比較を図示する。図の縦軸は加熱率で、横軸は材料の気孔率を示す。加熱時間は 30 秒とする。図より、はく離するかしないかの境界ラインが描けることが明らかとなり、実験結果と解析結果で良い一致を示している。明らかとなった重要な点は、加熱率が 10MW クラスの場合でも、熱防御材料のかさ密度を 10% 程度低くする、すなわち気孔率を高くすることで、層間はく離を回避できることがわかったことである。得られた見解は極めて重要で、層間はく離の発生しない熱防御システムの設計が可能となることを意味し、有人宇宙開発の発展を後押し可能な重要な成果であると考えられる。



5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

1. Jun Koyanagi, Kenta Shinba, Yasuhiro Fukuda, Kenichi Hirai, Akiko Nakazato, Akinori Yoshimura, Takuya Aoki and Yasuo Kogo, Numerical Simulation of Delamination caused by Internal Gas Pressure for Mid-Density CFRP, Composite Part A, Vol. 115 (2018), pp. 255-263.
2. Jun Koyanagi, Fukuda Y, Yoneyama S, Hirai K, Yoshimura A, Aoki T, Ogasawara T, Local out-of-plane deformation of CFRP ablator under rapid heating, Advanced Composite Materials, Vol. 26 (2017), pp. 23-34.
3. 小柳 潤, 福田泰大, 米山聡, 平井研一, 吉村彰記, 青木卓哉, 小笠原俊夫, CFRP アブレータの急速加熱時に生じる局所面外変形, 日本複合材料学会誌, Vol. 42 (2016), pp. 146-152.

〔学会発表〕(計4件)

Delamination Caused by Internal Gas Pressure for Heat-Resistant CFRP Subjected to Rapid Heating

[共同発表者名] Kenta SHINBA, Jun KOYANAGI, Yasuo KOGO

[学会・会議名] 13th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics

[発表日付] 2018年10月30日 ~ 11月2日

Thermal response analysis of heat resistant CFRP and occurrence prediction of delamination

[共同発表者名] Kenta Shinba, Jun Koyanagi, Kenichi Hirai, Yasuo Kogo

[学会・会議名] The 11th Japan-Korea Joint Symposium on Composite Materials

[発表日付] 2017年9月13日 ~ 9月14日

Delamination of CFRP Ablator under Rapid Heating

[共同発表者名] Jun Koyanagi, Yasuhiro Fukuda, Takuya Aoki, Akinori Yoshimura, Saori Nagi, Ken-Ichi Hirai

[学会・会議名] 31ST INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SPACE TECHNOLOGY AND SCIENCE

[発表日付] 2017年6月3日 ~ 6月9日

アブレータの一次元の熱応答解析

[共同発表者名] 榛葉 謙太(東理大[学]), 福田 泰大(東理大[院]), 小柳 潤(東理大), 青木 卓哉

(JAXA), 吉村 彰記, 平井 研一(IHI エアロ), 中里 亜紀子, 奈木沙織
[学会・会議名] 日本複合材料学会 第8回日本複合材料会議 (JCCM-8)
[発表日付] 2017年3月16日 ~ 3月16日

〔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：
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：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等：該当なし

6. 研究組織

(1)研究分担者 該当無し

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：福田泰大, 榛葉謙太

ローマ字氏名：Yasuhiro Fukuda, Kenta Shimba

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。