

B5 超軽量 CFRP アブレータの創製とその熱的および機械的特性の評価

○戸島英貴 (青山学院大[院]), 後藤健 (JAXA・宇宙科学研究所)
大谷章夫 (岐阜大学), 米山聡, 有川秀一 (青山学院大)

Hidetaka Toshima (Aoyama Gakuin University), Ken Goto (JAXA), Akio Otani (Gifu University)
Satoru Yoneyama and Syuichi Arikawa (Aoyama Gakuin University)

In this study, a lightweight CFRP ablator was developed for a rocket nozzle of solid propellant rockets to realize weight reduction. To realize lightweight CFRP, this CFRP has many vacancies made by infiltrating phenol resin and solvent (ethylene glycol and carbon black). Various densities of CFRPs from 0.88 to 1.3 g/cm³ were realized by changing the composition ratio of resin and ethylene glycol. Thermal and mechanical properties were evaluated by measuring thermal conductivity and compression tests. The effect of bulk density, tow size and stitch density of 3-D fabric on thermal and mechanical properties were revealed. As a result, lower density sample possessed lower mechanical properties, however, its heat insulation property became superior. The mechanical and thermal properties of the light weight CFRP with carbon black were almost same as the sample without carbon black with some composition ratio.

1 目的

固体燃料式ロケットのノズルは無冷却で使用されるため、3000℃を超える燃焼ガスに耐える耐熱性が要求される。また、ノズル側面には推力偏向装置やバッテリーなどを取り付けるため高い断熱性能も必要である。そこで、固体燃料式ロケットのノズルには冷却が必要なく、システムが簡単な炭化型アブレータが使用されている。固体ロケットの炭化型アブレータには、ノズル上流側の環境が厳しいところには炭素繊維強化型フェノール樹脂 (CFRP) を使用し、下流側にはガラス繊維強化型フェノール樹脂 (GFRP) を使用している。この炭化型アブレータはノズルの重量にとって大きなウェイトを占めており、この部位を軽量化すると特に上段のモータの性能を大きく向上することができる。

そこで本研究では、ノズルの軽量化を実現するために超軽量 CFRP アブレータの創製を行う。現在使用している積層型 CFRP では、軽量化のためにフェノール樹脂を減らすと層間剥離が発生して燃焼ガスによる大きな減肉が発生する。この層間剥離をなくすために、本研究では層間方向に炭素繊維でステッチした織物を用いた。ノズルには燃焼中の推進力を支えるための圧縮強度、剛性と板厚方向の断熱性能が求められる。そこで、ステッチの間隔、織物の厚さ、嵩密度を変化させた軽量 CFRP を作製し、圧縮機械特性、熱伝導率を取得する。これにより、固体ロケットノズルに使用可能な超軽量アブレータの実現に向けた熱的・機械的特性に与える各材料パラメータの影響を明らかにすることを目的とした。

2 実験方法

2.1 供試材料

2.1.1 三次元炭素繊維織物 本研究では、燃焼中の層間剥離による後退量の増加を防ぐために三次元炭素繊維織物を用いている。これは平織りの炭素繊維織物 (東レ T-300-1K 平織り) を炭素繊維のステッチ (東レ T-300-3K) でつなぎ合わせたものである。従来のプリプレグを積層したものに比べ、厚さ方向の繊維によって層間の剥離を抑制する効果がある。本研究では Fig.1 に示すような 3 種類の織物を使用した。①～③のステッチ密度はそれぞれ 4 stitch/cm², 4 stitch/cm², 1 stitch/cm² である。

2.1.2 マトリックス成形 樹脂は加熱によって硬化するレゾール型フェノール樹脂 (Ph) (住友ベークライト, スミライトレジン PR-9480) を用いた。また、硬化後のマトリックスを軽量なものにするため、沸点が 197℃ であるエチレングリコール (EG) と混合し、フェノール樹脂の硬化の後に EG を揮発させる手法を用いた。また、エロージョン量が減る効果が得られるため、充填材としてカーボンブラック (CB) (エムコマース株式会社, 三菱カーボンブラック #85) を混入した。これら, Ph, EG, CB の混合率を変えることで密度を変化させた。マトリックスの成形は Fig.2 に示すように 3 段階に分かれており、110℃ で Ph をゲル化し、後の 160℃, 210℃ で EG を揮発させることで内部をポーラスにした CFRP を作製した。

2.2 圧縮特性取得試験 試験片は厚さ方向の繊維が2~8本上下左右等間隔になるように、10 mm×20 mmで厚さが8.5 mmとした。試験片を挟み込むように2つのひずみゲージを取り付け、得られた値の平均値を使用し、応力-ひずみ線図を取得した。圧縮試験は万能試験機（島津製作所、AG-5000A）を用いて、クロスヘッド速度0.5 mm/minで実施した。

2.3 熱伝導率測定 定常法を用いた試験機を使用した。試験片の上部と下部を、熱流束センサーと温度差センサーで挟み込んだ。上部からヒーターを用いて一定の熱を与え、下部はヒートシンクによって冷却を行った。この時の上部と下部それぞれの熱流束値、上部と下部の温度差を測定し、熱伝導率を算出した。試験片寸法はすべて、50 mm×50 mmで厚さは8.2 mmである。

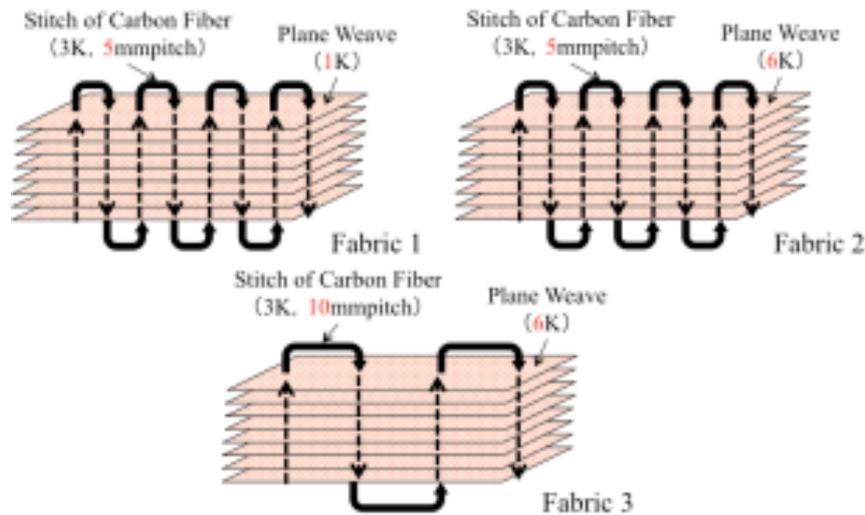


Fig.1 Shape and dimensions of 3-dimensional carbon fiber textile

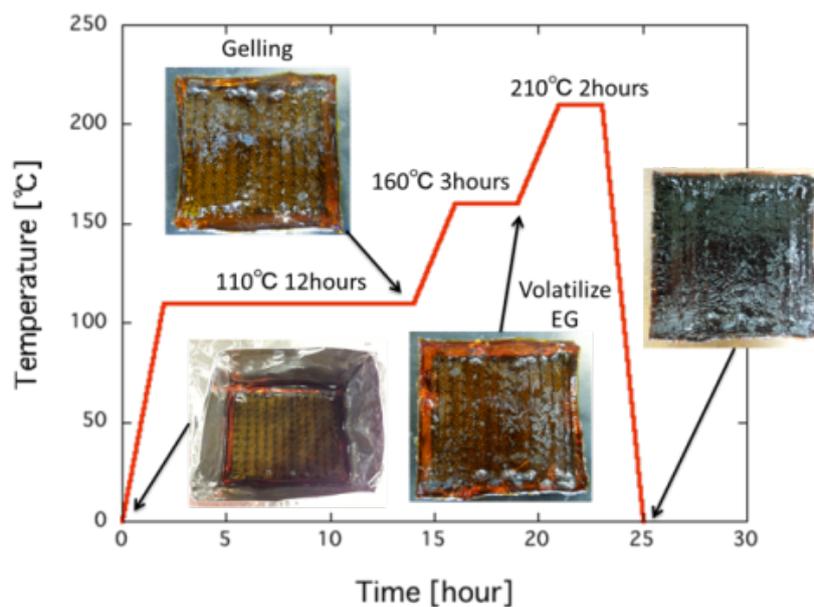


Fig.2 Heat treatment conditions of lightweight CFRPs

3 実験結果及び考察

3.1 マトリックスの混合比率の影響

3.1.1 Ph:EG と密度変化の関係 Fabric1 での Ph と EG の比率と密度の関係を Fig.3 に示す. EG を多く混入しているものほど密度が小さくなり, 密度は最小で約 0.88 g/cm^3 となった. また, CB を混入することによって密度は大きくなった.

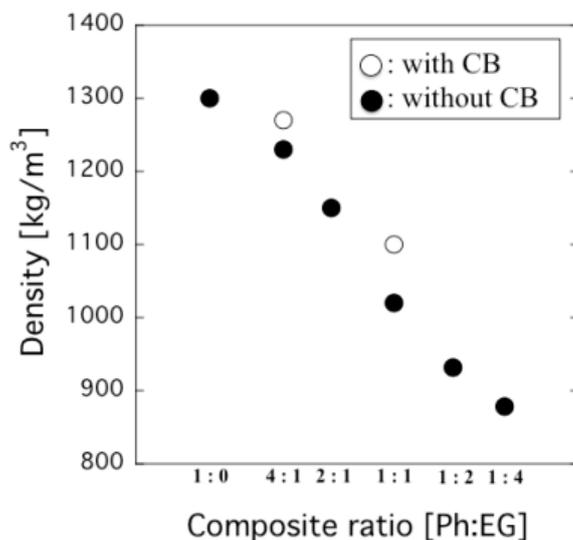


Fig.3 The relation of density and composition ratio (Fabric1)

3.1.2 圧縮試験 密度と強度, 弾性率の関係を Fig.4 に示す. この結果から, 内部をポーラスにして軽量化することで, 面内方向の圧縮強度は大きく低下したが, 弾性率は比率を変えても圧縮強度のように大きくは変化しなかった. 密度の小さいものは密度の大きいものに比べてポイドが大きく多いため, それらが連結し進展することで破壊するためであると考えられる. 一方, 弾性率については, 極端に密度が低下すると繊維の局所座屈が発生したり, 界面での応力伝達が十分に行えなくなるために圧縮弾性率が大きく低下すると考えられる.

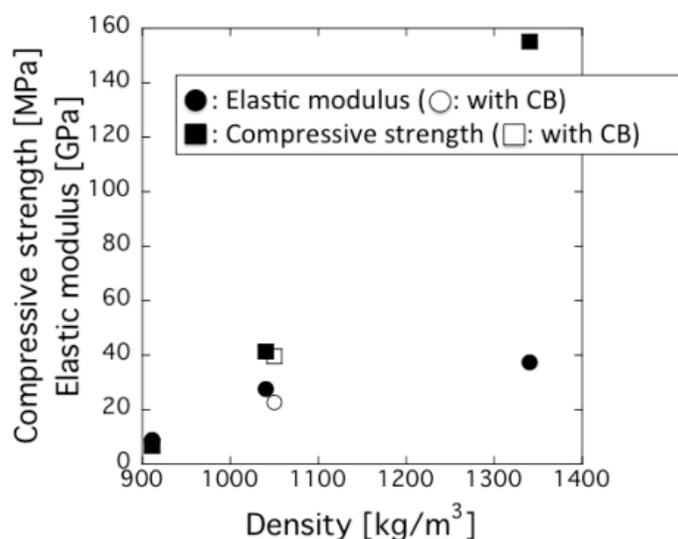


Fig.4 The relation of density, elastic modulus and compressive strength (Fabric1)

3.1.3 熱伝導率 測定した熱伝導率と密度の関係を Fig.5 に示す. 熱伝導率は密度が小さくなると小さくなった. これは, 断面観察で確認されたように密度が小さいほど熱伝導パスが少なくなるためである. また, CB を混合すると熱伝導率が向上するという報告がある⁽²⁾が, 本研究では CB の有無による熱伝導率の違いは見られなかった. この原因として, CB の混入量が全体比 20%で少量であったために, 影響が小さくなった可能性も考えられる.

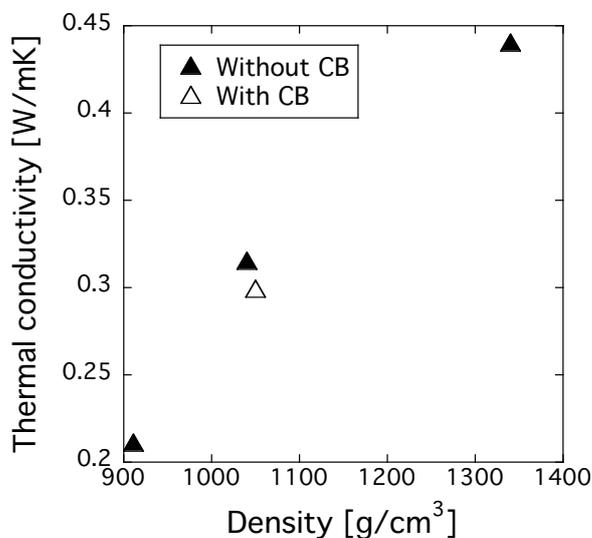


Fig.5 The relation of thermal conductivity and density(Fabric1)

3.2 三次元炭素繊維織物による影響

3.2.1 ステッチ密度と密度の関係 炭素繊維織物のステッチ密度と嵩密度の関係を Fig.6 に示す. Fabric2 と Fabric3 を比較すると, ステッチ密度の小さい Fabric3 の方が小さい密度となった. ステッチが少なくなった分密度が小さくなったと考えられる. しかし, Fabric2,3 と Fabric1 では, Fabric1 が特に小さくなることがわかった. これは, 繊維束の太さが違うことで, EG の揮発状況が変化し, その結果内部構造に違いが出たためと推測される.

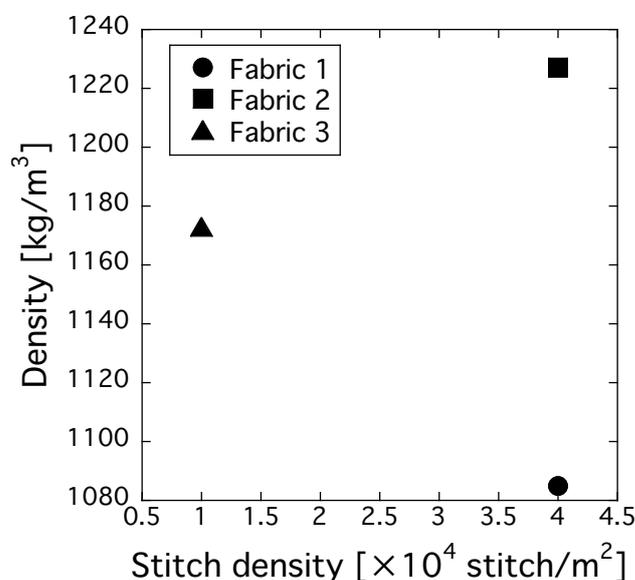


Fig.6 The relation of density of CFRP and stitch density

3.2.2 圧縮機械特性 ステッチ密度と圧縮強度の関係を Fig.7 に示す. Fabric2 と Fabric3 よりステッチ密度を小さくすると強度は向上する傾向となった. また Fabric1 と Fabric2 の比較から, 繊維織物の太さはそれほど大きい影響は無いと考えられる.

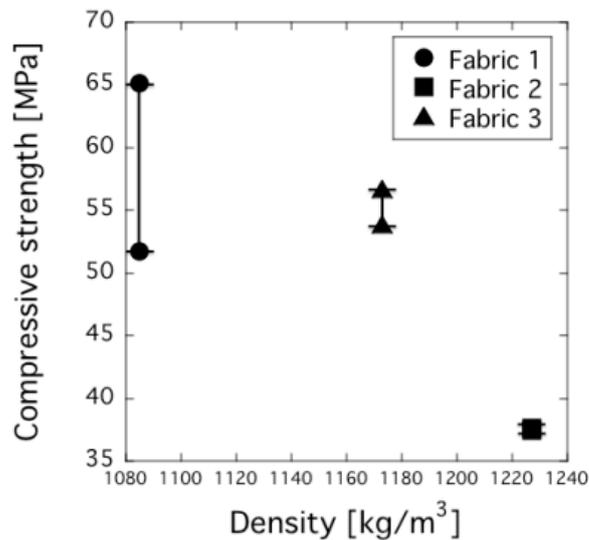


Fig.7 The relation of compressive strength and density

3.3 熱伝導率 嵩密度と熱伝導率の関係を Fig.8 に示す. Fabric2 と Fabric3 を比較すると, Fabric3 が小さい熱伝導率となっているため, ステッチ密度が小さいものほど熱伝導率は小さくなることがわかった. しかし, Fig.8 に示すように密度が最も小さい Fabric1 が最も小さい熱伝導率を示しており, 複合材の密度が大きくなればなるほど熱伝導率も大きくなることから, 熱伝導率は嵩密度に大きく依存すると考えられる. そのため, 織物の構造による違いを明確にするためには, 密度の小さなものを製作し比較することが必要である.

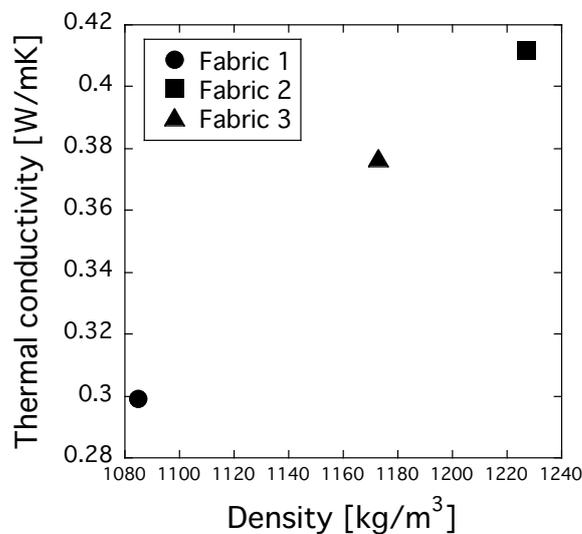


Fig.8 The relation of density of CFRP and thermal conductivity

4 結言

- (1) EG を混ぜて成形を行うことで密度を 0.88 g/cm^3 まで小さくできた。CB を混入することで密度は大きくなった。
- (2) 圧縮強度は、密度を小さくすることで 1/3 以下に低下した。弾性率、圧縮強度のどちらも、Ph:EG = 1:4 は非常に低い結果となった。
- (3) 圧縮強度はステッチ密度を小さくし繊維束を太くすると大きくなると考えられる。
- (4) 熱伝導率は、最小で約 0.211 W/mK まで低下させることが出来、密度に大きく依存すると考えられる。

参考文献

- 1) H. Kubota, Thermodynamics of the flying space object (2002), University of Tokyo Press, P.144-156
- 2) S. Han, D.D.L Chung, Increasing the through-thickness thermal conductivity of carbon fiber polymer-matrix composite by curing pressure increase and filler incorporation, Composites Science and Technology 71, (2011), 1944-1952