

機関番号：17104

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656541

研究課題名(和文) 低地球軌道インフレータブル構造用材料のための耐原子状酸素性付与技術に関する研究

研究課題名(英文) Functionalize of Atomic Oxygen Durability for the Inflatable Structure Materials on Low Earth Orbit

研究代表者

岩田 稔 (IWATA, MINORU)

九州工業大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：80396762

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円、(間接経費) 810,000円

研究成果の概要(和文)：超小型衛星の軌道離脱手段として用いられるインフレータブル構造用の膜には、高い耐原子状酸素性が求められる。膜材料には熱融着性、耐紫外線性、耐放射線性、および耐原子状酸素性が要求されるが、これらの要求性能を満たす材料は未だ開発されていない。

本研究では、宇宙分野で広く用いられるポリイミドに後処理によってフッ素F、ケイ素Si、およびリンPなどの耐原子状酸素性を付与する元素を分子構造中に導入することを試みた。その結果、耐原子状酸素性を付与する元素が検出され、高い耐原子状酸素性付与が期待できることが分かった。

研究成果の概要(英文)：The high atomic oxygen resistance is required on the inflatable structure materials used for the nano-satellite deorbit device. The heat seal property and the durability against ultraviolet ray and charged particle radiation are also required on the inflatable structure materials. However, there is no material having the required properties.

In this study, we tried to induce a F, Si, P, and etc. atom that gave the materials the atomic oxygen resistance to a chemical structure of polyimide widely used for space by using post process. As a result, the atom gave the atomic oxygen resistance was detected on the processed materials. Therefore, we could expect the high atomic oxygen resistance on the processed materials.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：構造・材料 耐原子状酸素性材料

1. 研究開始当初の背景

現在、世界中の大学・企業が地球観測および宇宙産業利用などに超小型衛星の使用を検討している。その一方で増加する超小型衛星群が運用終了後、宇宙ごみとして低地球軌道に留まることが問題視されている。このため H-IIA ロケットを用いた超小型衛星の相乗り打ち上げを実施している JAXA は、25 年以内にその軌道から離脱し、地球へ落下し燃え尽きるよう、超小型衛星を設計する事を要求している。このような超小型衛星のデブリ化を防ぐ手法が複数の機関から提案されており、運用終了後に、例えば図 1 に示すような巨大なインフレータブル構造体を展開させて大気抵抗を増加させる方法も提案されている。このようなバルーン状のインフレータブル構造体を展開させる為には、運用終了後にバルーンを膨らませる展開機構は勿論のこと、継ぎ目のない巨大な膜を製作するための熱融着性も必要とされる（接着剤は耐宇宙環境性に劣るため使用できない）。しかもこの巨大膜には低地球軌道における原子状酸素に対する非常に高い耐性が要求されているが、これらの要求性能を全て満たす材料は未だ開発されていないのが現状である。

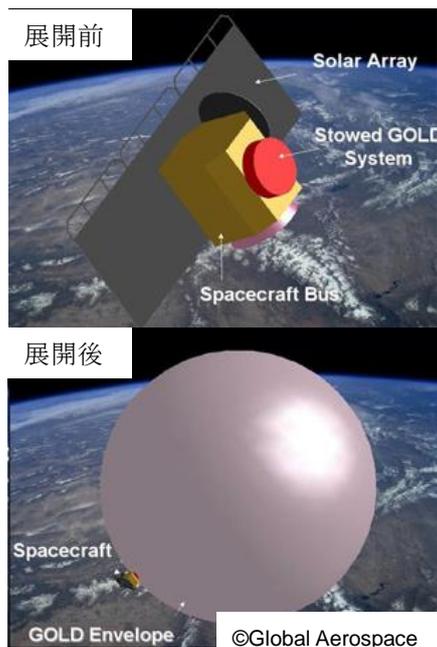


図 1 グローバルエアロスペース社による軌道離脱技術。展開前後の想像図

2. 研究の目的

宇宙開発において広く用いられているポリイミド材料は、耐熱性・耐放射線性に優れており、耐紫外線性が著しく劣る材料ではない。また近年、インフレータブル構造体で使用可能な熱融着性を有するポリイミドも開発されているため、非常に有望な材料である。しかしながら、上記特性に加えて耐原子状酸素性を併せ持つポリイミドがなく、低地球軌道のインフレータブル構造体には使えない。

本研究では、ポリイミド材料に着目し、例

えば熱可塑性を有するものの、耐原子状酸素性に劣るポリイミドに対して、耐原子状酸素性（以下、耐 AO 性）を付与する材料改質を後処理で施す手法を研究開発し、熱融着性、耐放射線性・耐紫外線性、耐原子状酸素性という 3 拍子揃った最強のインフレータブル構造用フィルムの創出に向けて一歩を踏み出すことを目的としている。

3. 研究の方法

高度 1,000 km 以下の低地球軌道において、原子状酸素は中性大気の主成分であり、宇宙機に使われている材料は秒速 8 km の原子状酸素に曝露され、侵食を受けることが知られている。特に高分子材料などの有機材料は顕著に原子状酸素の影響を受け、侵食により膜厚が減少する。このため低地球軌道におけるスペースシャトル、宇宙ステーション、および人工衛星などでの軌道上実証試験結果をもとに、耐原子状酸素性の高い材料の選別が行われ、分子構造内にフッ素 F、ケイ素 Si、およびリン P（以下、耐 AO 性付与元素と呼ぶ）などが含まれた材料の耐性が高いことが明らかとなり、世界各国で新規合成による材料開発や、コーティングの開発が進められてきた。

このため材料に耐原子状酸素性を付与するためには、これらの耐 AO 性付与元素を材料中に導入することが必要である。これを実現するために本研究ではプロセスガスを既存材料（例えば熱可塑性ポリイミド）と反応させ、耐 AO 性付与元素を分子構造中に導入する方法をとることとした。本研究では耐 AO 性付与元素として Si を選択し、材料改質装置の構築を進めた。しかしながら使用を予定していたプロセスガスの安全性および材料改質装置の附帯設備において、当初の計画では想定外の問題が発生し、材料改質装置の構築が難航し、長期間に亘り研究を中断せざるを得なくなった。最終的に当初の計画で使用予定であったプロセスガスが使用不可能となった。

本研究では異なるプロセスガスを用い、安全性および材料改質装置の附帯設備に関する問題を解決して、ポリイミドフィルムに材料改質を施す体制を整えることができた。

4. 研究成果

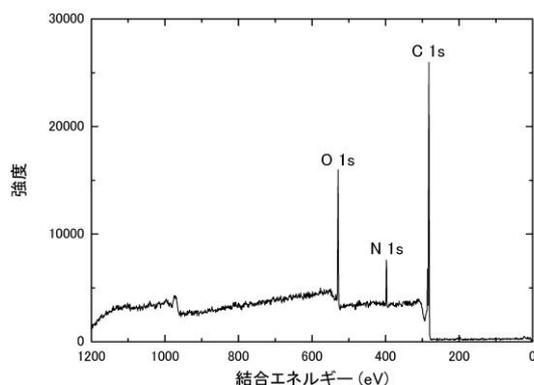
本研究で構築した材料改質手法を用いて、耐 AO 性付与元素を導入するポリイミド材料として、下記の 3 種類の材料を候補として選定した。

- ポリイミド A (非熱可塑性・高耐熱)
- ポリイミド B (非熱可塑性)
- ポリイミド C (熱可塑性)

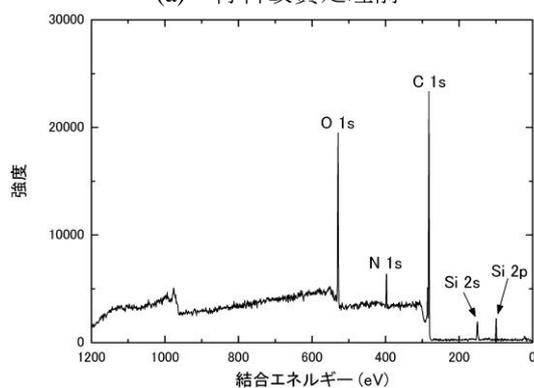
ポリイミド A および B は広く宇宙機で使用されている既存のポリイミドフィルムである。ポリイミド C は申請者らがこれまでに

開発したインフレータブル構造用ポリイミド材料である。いずれのポリイミドも耐熱性・耐放射線性・耐紫外線性に優れているが、唯一、ポリイミドCのみ熱可塑性を有しており、接着剤を用いずに熱融着によってポリイミド同士の接着が可能な材料である。

これらの3種類のポリイミド材料に対して同一条件下で材料改質処理を施し、耐AO性付与元素の導入を試みた。本研究ではX線光電子分光分析装置（以下、XPS。島津KRATOS AXIS-Nova型）による表面分析により、耐AO性付与元素の導入の有無を定性分析し、材料改質手法の有用性を検証した。図2にポリイミドAに対するXPS表面分析結果を示す。材料改質処理前は図2(a)に示すように、ポリイミド材料に含まれる元素であるC、N、Oのピークが認められ、耐AO性付与元素であるSiのピークは認められない。これに対して材料改質処理後は、図2(b)に示すようにポリイミド本来の元素ピークに加えて、耐AO性付与元素Siのピークが新たに出現している。



(a) 材料改質処理前



(b) 材料改質処理後

図2 XPS表面分析結果

ポリイミドBおよびCに対しても図2に示した結果と同様に、材料改質処理後にはポリイミド本来の分子構造を構成する元素とは異なる、耐AO性付与元素Siのピークが新たに出現した。これは材料改質処理により耐AO性付与元素が導入されたことを示唆するものと考えられる。

次に本研究の材料改質手法による耐AO性付与技術で達成すべき重要な点は、耐AO

性付与元素をポリイミド材料の奥深くまで導入する、という点である。仮にポリイミド材料の最表面のみにしか耐AO性付与元素を導入できなかった場合、微細な宇宙ゴミの衝突により最表面が削られるようなアクシデントが起きると、これによって耐AO性を失い、インフレータブル構造の機能性に支障をきたすことになる。したがって本研究では材料改質処理により、ポリイミド材料の奥深くまで耐AO性付与元素が導入されたかどうかを確認する必要がある。本研究ではXPS装置に付属するアルゴンイオン銃によりポリイミド材料表面をイオンエッチングして削り取り、再度表面組成を定性分析することにより、耐AO性付与元素の深さ方向分布を評価した。イオンエッチングは加速電圧4kVで1回当たり30秒間実施した。図3にイオンエッチング回数に対する耐AO性付与元素の相対ピーク強度を示す。ピーク強度はイオンエッチング実施前のピーク強度で規格化してある。

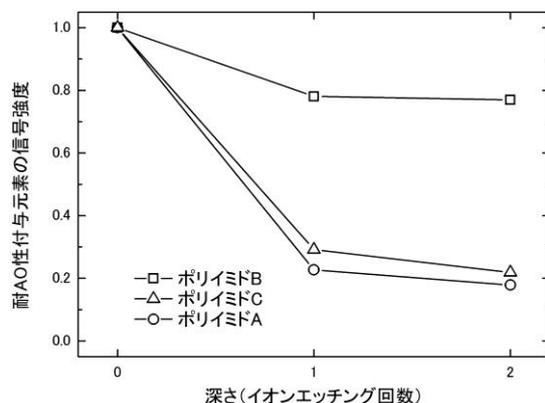


図3 耐AO性付与元素の深さ分布

ポリイミドAおよびCは耐AO性付与元素の信号強度が最表面に比べて著しく低下している。これはポリイミドAおよびCは耐AO性付与元素が材料の奥深くまで導入されにくい材料であることを示している。一方でポリイミドBはポリイミドAおよびCと比べて信号強度がそれほど低下していない。したがってポリイミドBは耐AO性付与元素が材料の奥深くまで導入されやすい材料である。上記の耐AO性付与元素の深さ方向の導入のしやすさは、プロセスガスのポリイミド材料中におけるガス透過性の違いによって生じているものと考えられる。ポリイミドCはガス透過性が高いと予想していたため、ここで得られた結果は意外なものであった。深さ方向の耐AO性付与元素の導入量を改善するため、材料改質処理条件を見直す必要があり、工業的に現実的な範囲で材料改質が可能かどうかを見極める必要がある。

材料改質処理によりポリイミド材料に耐AO性付与元素を導入することに成功したが、この耐AO性付与元素が有効に機能するかどうかを実験により明らかにする必要がある。

この検証実験も含め、今後は下記の事項について研究を進めていく必要がある。

(1) 耐原子状酸素性の実証

耐 AO 性付与元素が有効に機能することを検証するため、図 4 に示す九州工業大学現有の原子状酸素照射装置を用いて照射試験を行い、材料の重量減少量を評価することによって材料改質後のポリイミド材料の耐 AO 性を評価する。現在、照射試験に向けて、装置の稼働準備中である。



図 4 原子状酸素照射装置

(2) より詳細な分析による本手法の有用性の検討

耐 AO 性付与元素がポリイミド材料内でどのような結合状態で導入され、導入密度がどのくらいかを XPS による状態分析および定量分析により明らかにする。また深さ方向の耐 AO 性付与元素の分布を知ることによって本手法の適用限界を明らかにすることができると考えられる。

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 0 件)

〔学会発表〕 (計 0 件)

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1)研究代表者

岩田 稔 (IWATA, Minoru)

九州工業大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：80396762

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

田川 雅人 (TAGAWA, Masahito)

神戸大学・准教授

研究者番号：10216806

横田 久美子 (YOKOTA, Kumiko)

神戸大学・助手

研究者番号：20252794