

宇宙プラズマ環境下における宇宙飛翔体用 絶縁材料の耐久性評価

Durability Estimation of Insulating Materials in Space Plasma Environment

大阪大学 基礎工学部 機械工学科 助教授 田原 弘一
Associate Professor, Department of Mechanical Engineering,
Faculty of Engineering Science, Osaka University
Hirokazu TAHARA

The influence of high-energy ion bombardment, electron beam exposure and UV irradiation on chemical structures of non-metallic materials was studied to clarify the mechanism of material degradation and to estimate durability in space. Polymers of polyimide (UPILEX-S), Polytetra-fluoroethylene-ethylene (ETFE) and glasses coated with MgF_2 were exposed to ion beams of oxygen and nitrogen with energy levels of 600 eV - 5 keV, to electron beams with 20-30 keV and to UV light of 250-600 nm. For the polymers, X-ray photoelectron spectroscopic analysis showed that both addition reactions of oxygen or nitrogen atoms and separations of various structural compounds occurred by the complex beam exposure. In the glass plate, the coating layer of MgF_2 was sputtered drastically.

研究目的

地球低高度軌道（高度 300～1000 km 程度）上の宇宙飛翔体は太陽紫外線によって生成された希薄大気プラズマ中を飛行している。正あるいは負に帯電した宇宙船表面の絶縁材料、高電圧太陽電池パネルに付随する金属部及びその周辺の絶縁部などへ高エネルギーの電子、イオンが衝突し、それらの材料を劣化させることが近年問題になっている。本研究では、宇宙用耐熱性高分子材料及び太陽電池カバーガラスへの高エネルギーイオンビーム・電子ビーム・紫外線照射試験を行い、XPSによってその化学構造の変化を調べ耐久性を評価すると共に劣化機構を推測した。

研究経過

イオン加速機には電子サイクロトロン共鳴放電型（ECR）イオン源を使

用し、その発生イオン種は酸素と窒素である。照射イオンエネルギーは数百～5 keV 程度である。また、電子ビームのエネルギーは 20～30 keV であり、紫外線源はキセノンランプである。

本実験では耐熱性高分子フィルムとして宇部興産製のポリイミド・UPILEX-S を使用した。ガラス転移温度は 500 °C 以上であり、耐熱性に優れている。また、フッ素樹脂の一種である ETFE (Polytetra-fluoroethylene-ethylene) は、実際に熱制御材料として実用化されているテフロンと同様に良い耐熱性と絶縁性を持っている。太陽電池カバーガラスとしては MgF_2 膜をコーティングしてある PPE 社製カバーガラスを用いた。

1 keV の酸素イオンを照射した UPILEX-S の C_{1s} スペクトルを図 1 に示す。未照射試料には存在しない O -

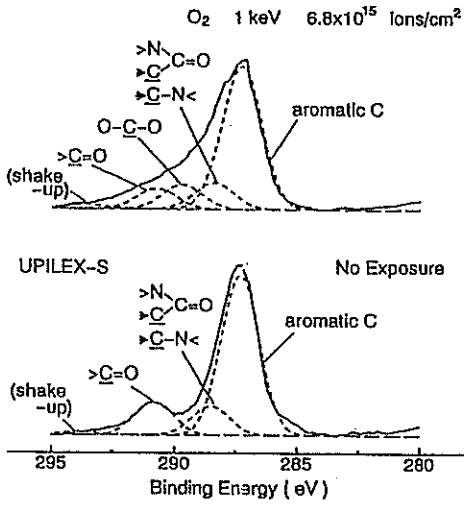


図1 イオンビーム照射後のUPILEX-SのXPSスペクトル

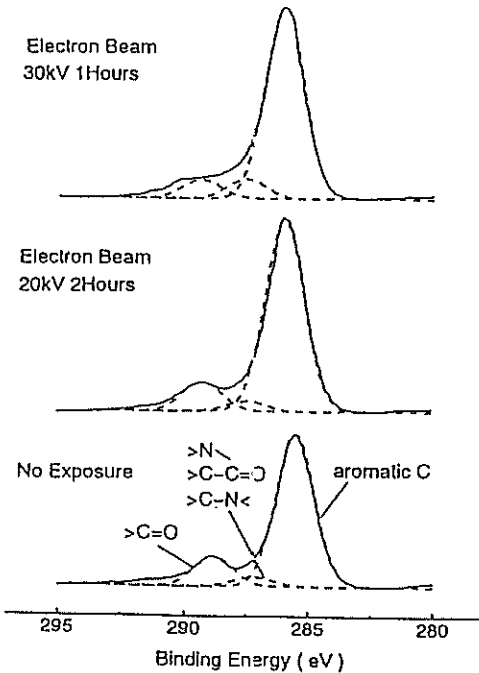


図2 電子ビーム照射後のUPILEX-SのXPSスペクトル

C-O構造が生成されていることがわかる。また=C=O構造の相対強度は未照射試料のそれに比べて減少している。これは酸素イオンの衝突によってこの構造がCO₂として脱離するためと推定される。照射後の試料の原子組成変化を表1、2にまとめる。

酸素イオンの衝突によってポリイミド試料表面では酸素原子の付加による官能基の生成とCO₂の脱離など結合の切断による官能基の減少という2つの反応が同時に起こっていると推測される。照射イオンエネルギーが低い場合は化学的な反応による効果が大きく、酸素原子の付加による官能基の生成が支配的であり(表1でOの含有量が多くなる)、イオンエネルギーが高くなると結合の切断による官能基の減少(表1でOの含有量が小さくなる)が激しく起こると考えられる。さらに、この官能基の増減は表1よりドーズ量にも大きく依存していることも推測される。窒素イオンを照射した場合は表2よりC-O-N構造が生成されていることがわかった。窒素イオンは酸素イオンに比べて化学的な反応性に劣るため、酸素イオンの照射に比べてN原子が付加する反応よりも衝突によって=C=O構造や生成されたC-O-N構造が脱離する反応がより支配的になると考えられる。

酸素イオン照射によるETFE表面の原子組成変化を表3に示す。イオン照射によってフッ素の含有量が著しく減少することがわかった。ETFE表面では酸素原子を含む官能基の生成とフッ素原子の脱離が同時に起こっていると推測されたが、ポリイミドと比較して酸素原子を含む官能基の生成は少なく、フッ素原子の脱離がより支配的であると推定される。また太陽電池カバーガラスではドーズ量の増加によってMgF₂膜が著しくスパッタされた。

電子ビーム照射後のUPILEX-SのXPSスペクトルを図2に示す。電子ビ

表 1 UPILEX-S の原子組成変化（酸素イオン照射）

| Dose | No Exposure | | 6.8x10 ¹⁸ ions/cm ² | | 8.2x10 ¹⁸ ions/cm ² | |
|--------|-------------|------|---|------|---|------|
| | O(%) | N(%) | O(%) | N(%) | O(%) | N(%) |
| 1 keV | 13.9 | 9.0 | 15.0 | 6.2 | 14.9 | 6.2 |
| 2.5keV | | | 13.5 | 4.8 | 13.6 | 4.4 |
| 5 keV | | | 13.5 | 3.7 | 10.1 | 3.6 |

表 2 UPILEX-S 原子組成変化（窒素イオン照射）

| Dose | No Exposure | | 2.0x10 ¹⁸ ions/cm ² | |
|--------|-------------|------|---|------|
| | O(%) | N(%) | O(%) | N(%) |
| 1keV | 13.9 | 9.0 | 13.7 | 9.6 |
| 2.5keV | | | 13.3 | 8.4 |
| 5keV | | | 12.7 | 6.9 |

表 3 ETFE の原子組成変化（酸素イオン照射）

| Dose | No Exposure | | 6.8x10 ¹⁸ ions/cm ² | | 8.2x10 ¹⁸ ions/cm ² | |
|--------|-------------|------|---|------|---|------|
| | F(%) | O(%) | F(%) | O(%) | F(%) | O(%) |
| 1keV | 52.6 | 0 | 9.6 | 19.8 | 10.3 | 25.6 |
| 2.5keV | | | 11.2 | 32.7 | 6.9 | 11.5 |
| 5keV | | | 6.8 | 11.3 | 6.0 | 11.2 |

ームの照射によって = C = O 構造が破壊されていくことが推定される。また、紫外線照射では紫外線エネルギーの共鳴吸収により - C - N - 結合が切断されていくことがわかった。

研究成果

宇宙用絶縁材料・高分子フィルムに

高エネルギーイオンビーム・電子ビーム・紫外線照射を行い、XPS 分析により、それら材料表面の化学構造の変化が調べられた。その結果、イオンビーム照射により試料表面では官能基の生成と脱離が共に起こることが推測された。照射イオンのエネルギーとドーズ量によってそれぞれどちらかの効果

が支配的になり、官能基の増減が起これると考えられた。また電子ビーム照射及び紫外線照射により結合の切断が激しく起こることが推定された。さらにイオン・電子・紫外線の複合照射によりそれぞれの単独照射効果の重ね合わせではない複合劣化現象が観察された。以上の絶縁材料の化学構造変化により耐熱性の低下が予想された。太陽電池カバーガラスの場合はコーティング膜が激しくスパッタされていくこともわかった。

今後の課題と発展

本研究ではイオンビーム、電子ビーム、紫外線による宇宙材料の劣化現象が調べられたが、今後はさらに原子状酸素とスラスタ排出流の影響を考慮した実験研究を行っていく予定である。さらに、材料の光学物性の変化も測定していかなければならない。

発表論文リスト

- 1) 田原弘一 他：空洞共振器を用いたマイクロ波放電加熱による宇宙環境試験用原子状酸素流の生成，応用物理，第58巻，第10号，1989，pp.1501-1505.
- 2) 田原弘一 他：高エネルギーイオン照射による宇宙用高分子及びガラス材料の化学構造変化，日本航空宇宙学会誌，第43巻，第494号，1995，pp.170-177.
- 3) 田原弘一 他：高エネルギーイオン照射による耐熱性高分子材料の化学構造変化，真空，第38巻，第3号，1995，pp.275-277.
- 4) H. Tahara et al., "Exposure of Space Material Insulators to Energetic Ions," J. Appl. Phys., Vol.78, No.6, 1995, pp.3719-3723.
- 5) L. Zhang, T. Kawabata and H. Tahara et al., "Chemical Structural Changes and Optical Properties of Ion, Electron and Ultraviolet Light Irradiated Polyimide Films,"

20th Int. Symp. Space Technology and Science, Gifu, Paper No.96-b-08, 1996.

6) H. Tahara et al., "Development of a Space Plasma Simulator Using an Electron Cyclotron Resonance Plasma Source and Its Applications to Material and Plasma Interaction Research," 20th Int. Symp. Space Technology and Science, Gifu, Paper No.96-b-38p, 1996.

7) H. Tahara et al., "Exposure of Polymer Films to Energetic Ions, Electrons and Ultraviolet Light," Methodologies for Ground Simulation of the Space Environment, Southampton, 1996.

8) H. Tahara et al., "Development of a Space Plasma Simulator Using an Electron Cyclotron Resonance Plasma Source," Methodologies for Ground Simulation of the Space Environment, Southampton, 1996.