学位論文題名

宇宙環境曝露によるポリイミドフィルムの
機械特性劣化とその予測法

学位論文内容の要旨

宇宙機(人工衛星、宇宙ステーション等)のサイズや形状は、宇宙輸送機(ロケット、スペースシャトル等)の搭載容積に拘束される。そのため、地上で小さく収納して輸送機に搭載し、打上げ後、宇宙空間で伸展・展開する宇宙膜構造物(フレキシブル太陽電池パドル、ソーラーセイル等)は、宇宙開発において欠かすことのできない技術である。宇宙膜構造物の構造材には、耐熱性に優れ、比強度及び寸法安定性が高いポリイミド(PI: Polyimide)フィルムが一般的に使用される。宇宙膜構造物において、構造材の機械特性劣化は構造物全体の変形または破壊を引起し、宇宙機のミッション失敗に繋がる可能性が高い。そのため、宇宙膜構造物の材料設計において適切なマージンを見込んだ強度を設定できるよう、宇宙環境曝露によるPIフィルムの機械特性劣化について事前に評価及び予測することは極めて重要である。これまでの研究により、宇宙環境に曝されたPIフィルムの引張強さ・伸びは、大きく低下することが明らかとなっている。しかし、宇宙環境曝露によるPIフィルムの機械特性劣化に関する研究実績は非常に少なく、その劣化メカニズムは不明である。そのため、PIフィルムの機械特性劣化を予測することは困難である。また、宇宙機にはITO(Indium Tin Oxide)、 SiO_2 、Al等を表面にコーティングしたPIフィルムが頻繁に使用される。コーティング付PIフィルムが宇宙環境に曝されると、コーティングの欠陥部で原子状酸素(AO: Atomic Oxygen)による浸食が生じ、フィルム表面に微小な穴(Undercut cavity)が形成される。このUndercut cavityによりPIフィルムの機械特性は大きく劣化することが懸念される。以上より、本研究では、SM/SEED(Service Module/Space Environment Exposure Device)実験により実宇宙環境に曝したPIフィルム、及び、各種照射設備を用いた宇宙環境模擬試験(地上模擬試験)に供したPIフィルムの機械特性劣化挙動を評価し、それら評価結果を比較することにより宇宙環境曝露によるPIフィルムの機械特性劣化メカニズムの解明を試みた。また、ITOコーティング付PIフィルム(ITO/PIフィルム)に対しても同様に評価・検討を行った。そして、PIフィルム及びITO/PIフィルムの機械特性劣化を破壊力学的立場から検討することにより強度劣化予測法の開発を目指した。

本論文は全7章から成る。各章の内容は以下の通り要約される。

第1章では、PIフィルムを宇宙膜構造物の構造材へ適用する上での課題を指摘し、本研究の目的を示した。

第2章では、SM/SEED実験により実宇宙環境に曝露したPIフィルム(Flight-PI)の引張試験、曝露面観察、破面観察の結果を示した。SM/SEED実験では、同一のサンプルを搭載したユニット3式を同時に打上げ、国際宇宙ステーション(ISS: International Space Station)の外壁に設置し、曝露期間を変えて1式ずつ回収した。Flight-PIの引張強さ・伸びは、曝露期間の増加に伴い徐々に低

下した。曝露面は AO の浸食により粗い面を呈しており、その粗さは曝露期間の増加に伴い増加した。破面には、曝露面、つまり AO の浸食を受けた面を起点とした放射状模様が確認され、その起点周辺には平坦部 (ミラー部) が見られた。この起点周辺の様相は、セラミックス等の脆性材料の破面と類似していた。

第 3 章では、地上模擬試験として AO、紫外線 (UV: Ultraviolet)、電子線 (EB: Electron Beam) の照射試験に供した PI フィルムに対し、Flight-PI と同様の評価を実施した結果を示した。地上模擬試験に供した PI フィルムのうち、AO 照射した PI フィルム (AO-PI) においてのみ引張強さ・伸びの低下が確認され、その低下は AO フルエンス (F_{AO}) の増加に伴い大きくなった。照射面には、コーン状の微小突起が無数に形成されており、コーンの高さ及び直径は F_{AO} の増加に伴い大きくなった。破面には、照射面を起点とした放射状模様が見られ、Flight-PI 破面と同様、その起点周辺にはミラー部が確認された。

第 4 章では、破面様相より引張試験中におけるき裂伸展挙動について考察し、各 PI フィルムのき裂伸展挙動を比較することにより、宇宙環境曝露による PI フィルムの機械特性劣化メカニズムを検討した。Flight-PI、AO-PI において、引張強さ・伸びの劣化挙動、表面様相、破面様相は類似しており、AO が PI フィルムの機械特性劣化を引起す主要因であることが明らかとなった。また、これら PI フィルムの破面様相より、宇宙環境に曝された PI フィルムは、AO の浸食を受けた面からき裂が伸展し、き裂の安定成長を経て破壊に至ると推測された。そして、曝露期間の増加に伴う引張強さ・伸びの低下は、 F_{AO} の増加に伴い AO の浸食により形成される曝露面の凹凸が大きくなるためだと考察した。

第 5 章では、AO 照射した ITO/PI フィルムの引張試験、表面観察、破面観察の結果を示し、Undercut cavity が PI フィルムの機械特性に与える影響について考察した。AO-ITO/PI の引張強さ・伸びは F_{AO} の増加に伴い低下し、その低下の程度は AO-PI と比較して大きかった。照射面には Undercut cavity が随所に形成されており、破面には Undercut cavity を起点とした放射状模様が見られた。以上より、Undercut cavity は破壊起点として作用し、PI フィルムの引張強さ・伸びを大きく劣化させることが明らかとなった。

第 6 章では、各 PI フィルムにおける F_{AO} と引張強さの関係を破壊力学に基づき予測することを試みた。強度予測に先立ち、PI フィルムの破壊靱性 (K_c) 評価試験を実施し、 K_c と欠陥面積 (A_d) の関係式を得た。また、Flight-PI、AO-PI ではミラー部寸法を、AO-ITO/PI では Undercut cavity 寸法を破壊起点となる欠陥寸法と見なし、それぞれについて F_{AO} との関係式を定式化した。Flight-PI、AO-PI の強度予測では、以上で求めた K_c と A_d の関係式及びミラー部寸法と F_{AO} の関係式を、「表面に半楕円クラックのある有限帯板の一様引張り」における K_c の近似式に代入することにより強度を計算した。一方、AO-ITO/PI の強度予測では、 K_c と A_d の関係式及び Undercut cavity 寸法と F_{AO} の関係式を、「表面に任意形状クラックのある半無限体の一様引張り」における K_c の近似式に代入した。破壊力学に基づいて計算した Flight-PI、AO-PI、AO-ITO/PI の引張強さは、いずれも実験値とほぼ一致した。すなわち、宇宙環境曝露による PI フィルム及びコーティング付 PI フィルムの強度劣化評価に対する破壊力学的手法の有効性が示された。

第 7 章では、本研究で得られた成果及び知見をまとめた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 中 村 孝
副 査 教 授 佐々木 一 彰
副 査 教 授 藤 田 修
副 査 教 授 佐々木 克 彦
副 査 教 授 覺 知 豊 次

学 位 論 文 題 名

宇宙環境曝露によるポリイミドフィルムの 機械特性劣化とその予測法

宇宙輸送機内に小さく収納して打上げた後、宇宙空間で展開する宇宙膜構造物は、宇宙開発における重要な先端技術である。宇宙膜構造物の構造材には、耐熱性、比強度、寸法安定性が高いポリイミド (PI) フィルムが一般に使用される。宇宙環境が PI フィルムの物理的あるいは化学的特性に及ぼす影響については、これまで数多くの検討がなされてきた。しかし、機械特性に着目した研究は非常に少なく、PI フィルムの機械特性が宇宙曝露によってどのような影響を受けるかはほとんど明らかにされていない。本論文はこの問題に着目し、国際宇宙ステーションを用いて実宇宙環境に PI フィルムを曝露する実験、および原子状酸素 (AO: Atomic oxygen)、紫外線 (UV: Ultraviolet)、電子線 (EB: Electron Beam) などの宇宙環境因子を PI フィルムに照射する地上実験を行うことで機械特性の劣化挙動を明らかにするとともに、破壊力学の援用によって宇宙環境における強度劣化を定量的に予測する手法の開発を試みたものである。

第 1 章では、本研究の背景と目的、および本論文の構成を述べている。

第 2 章では、実宇宙環境に曝露した PI フィルム (Flight-PI) の引張試験、曝露面観察、破面観察を行っている。その結果、曝露期間の増加に伴い、引張強さ・伸びが低下すること、曝露面は AO の浸食により深さ数 μm の微小な円錐状の様相を示し、その粗さは曝露期間の増加に伴い増加すること、などを定量的に明らかにした。

第 3 章では、地上実験として AO、UV、EB の照射試験に供した PI フィルムに対し、Flight-PI と同様の評価を行っている。地上実験に供した PI フィルムのうち、AO 照射した PI フィルム (AO-PI) においてのみ引張強さ・伸びが低下し、その低下量は AO フルエンス (F_{AO}) の増加に伴い大きくなること、および照射面には、円錐状の微小突起が無数に形成され、この円錐の高さ及び直径は F_{AO} の増加に伴い大きくなることなどを明らかにした。

第 4 章では、破面解析により引張試験中におけるき裂進展挙動を調べ、宇宙環境曝露による機械特性劣化の機構を検討している。Flight-PI、AO-PI において、引張強さ・伸びの劣化挙動、表面様相、破面様相は類似しており、AO が PI フィルムの機械特性劣化の主因であることを明らかにし

た。また、宇宙環境に曝されたPIフィルムは、AOの浸食を受けた面からき裂が進展し、き裂の安定成長を経て破壊に至ることを示した。さらに、曝露期間の増加に伴う引張強さ・伸びの低下は、 F_{AO} の増加に伴いAOの浸食により形成される曝露面の凹凸が大きくなるためであることを明らかにした。

第5章では、耐AO性を向上させるためにITO(Indium Tin Oxide)をコーティングしたPIフィルム(ITO/PI)にAO照射試験を行い、その機械特性を測定している。その結果、AOを照射したITO/PI(AO-ITO/PI)の引張強さ・伸びは F_{AO} の増加に伴い低下し、その低下の割合はAO-PIと比較して逆に大きくなることを明らかにした。その理由として、ITOコーティングに潜在的に存在する数 μ mの微小な欠陥を起点としてAOによる激しい侵食が生じること、この損傷度合いはITOコーティングの無い通常のPIフィルムに比べて大きくなることなどを、破面解析により示した。

第6章では、宇宙環境曝露によるPIフィルムの強度劣化を破壊力学に基づき予測する手法の構築を試みている。これまで厚さ数十から数百 μ mのPIフィルムの破壊靱性(K_c)を測定する方法が確立されていなかったことから、これを求める新たな手法を提案し K_c 値を測定した。さらにFlight-PI、AO-PI、AO-ITO/PIにおける曝露面の凹凸寸法や不安定破壊を生じるまでのき裂寸法と F_{AO} との関係を定式化した。これらの値をもとに破壊力学を用いて宇宙環境曝露後の引張強度を予測した。その結果、解析によって求めたFlight-PI、AO-PI、AO-ITO/PIの引張強さは、いずれも実験値とほぼ一致し、宇宙環境曝露によるPIフィルム及びコーティング付PIフィルムの強度劣化を予測する本手法の有効性が示された。

第7章は、総括であり、本研究で得られた主な結果をまとめている。

以上のように本論文は、宇宙環境におけるポリイミドフィルムの機械特性の劣化挙動を明らかにするとともに、その予測法を開発したものであって、宇宙工学ならびに材料強度学の分野に貢献するところ大である。よって著者は北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。