

小型ソーラー電力セール打ち上げ計画における新規薄膜ポリイミド材料の開発

(日大院理工) ○鈴木 基妥、(九工大) 岩田 稔、

(宇宙航空研究開発機構 総合技術研究本部) 石田 雄一

(宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部) 宮内 雅彦・横田 力男

[要旨]

耐宇宙環境性に優れた高分子薄膜を用いて超軽量の巨大セールを製造し、太陽光を推進力にして宇宙を航行する太陽光帆船（ソーラーセール探査機）が提案されてから数十年が経過したが、いまだに宇宙実証には至っていない。この要因のひとつに、巨大なセール製造が容易で、かつ厳しい宇宙環境に長期間耐える高分子薄膜の開発が難しいことにある。本報告は、一連の実験に基づき 2010 年 5 月に H-IIA による打ち上げが予定されている 20 m クラスのソーラー電力セール実証機打ち上げ計画の概要と新規開発の非対称熱可塑性ポリイミド薄膜について紹介する。

1. 緒言

粒子性を有する太陽光は微小な圧力（地球近傍で 0.46mg/m^2 ）を光の当たる面に加える。太陽光帆走（ソーラーセール）は、この微小ではあるが限りなく供給される圧力をセールに受けて推進力とする。この原理は 1920 年代に提案され、1970 年代に具体的な設計・評価が行われた。しかし、宇宙で長期使用可能な高分子フィルムの開発と、それらの接着・融着による大型セール製造技術の検討が不十分で、現在まで実現に至っていない。最近、我々はこの問題の解決を目指した新規熱可塑性ポリイミドの開発を開始した。それと並行して、世界初のソーラーセール探査機・太陽光帆走の宇宙実証に向けたワーキンググループを平成 14 年度に立ち上げ、安定した薄膜供給が可能で宇宙環境耐久性に優れた PMDA/ODA からなる APICAL® AH 7.5 μm フィルムによるさまざまな展開実験を重ね、直径約 10 m のセールの遠心力による宇宙展開実験を世界で初めて成功させた。ここでは、ソーラーセールド材に求められる性能と、それを解決すべく進められてきた研究結果についてまとめる。

2. 膜材の要求特性

宇宙環境には電子線や陽子線、あるいは原子状酸素など、さまざまな放射線類が存在する。これらの存在分布は地球からの高度によって異なり、低軌道では原子状酸素が多いが、ソーラーセールが航行する惑星間では陽子線、電子線が主となり、長期間航行するためにはこれらに対する耐久性が求められる。これまでの知見では、PMDA/ODA や BPDA/PDA といった全芳香族ポリイミドは、耐宇宙環境性において高分子材料の中では最も優れたもののひとつである。一方、直鎖に脂肪族鎖を含む高分子、例えばイソプロピリデン基を有するポリエーテルイミド Ultem®などは、耐宇宙環境性は極端に低下する。すなわち、ソーラーセールド材としての高分子材料は、製膜可能な全芳香族系高分子に限定される。

また、太陽光を受ける面は 120~150℃まで温度が上がることを予想され、150℃以上の

使用上限温度を有する材料であることも求められる。

3. 膜材候補1 -市販の非熱可塑性ポリイミド-

前項で述べたように、膜材候補としては全芳香族ポリイミドが挙げられる。できるだけ軽量化するために、いくつかの市販ポリイミドのうち入手できる中でもっとも薄い、厚さ $7.5\ \mu\text{m}$ のカネカ社 APICAL® AH を選択した。

太陽光を反射させて推力を得るため、ポリイミドの片面に厚さ $800\ \text{\AA}$ 程度のアルミを蒸着させる。20 m 程度の大きさの帆にするためには、幅 1 m 前後のポリイミドフィルムを接着させる必要がある。接着剤としては、耐宇宙環境性に優れたシリコン系接着剤を用いる。この接着剤は、半年程度の被爆量では接着強度に大きな劣化はみられていない。幅 1 m のポリイミドフィルムを貼り合わせ、裁断することにより、下底が 20 m の台形とする。この台形フィルムを4つ作成した後、これらを幅約 30 cm で蛇腹折りにたたみ、さらに衛星本体に巻きつけることにより収納する。惑星間に打ち上げ後、遠心力により収納していたフィルムを展開し、大きな帆に広げる仕組みである。

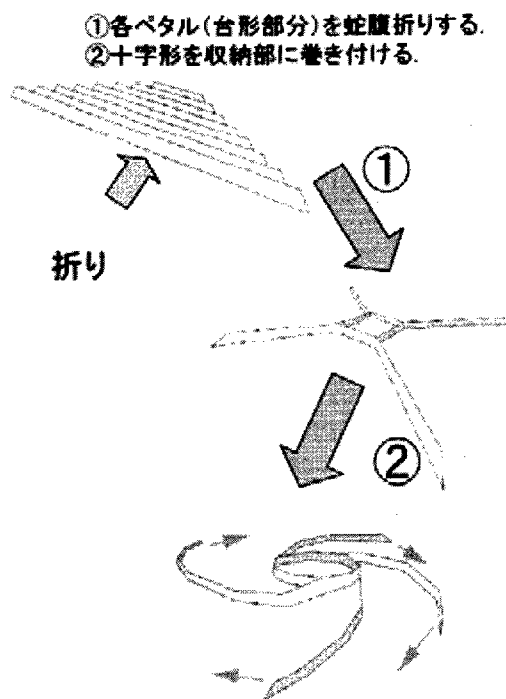


図1 膜の収納機構

4. 膜材候補2 -JAXA 開発熱可塑性ポリイミド-

全芳香族ポリイミドは耐熱性、耐宇宙環境性に優れているものの、熱融着性がないために貼り合わせには接着剤を必要とする。10年といった長期のミッションでは接着剤の耐宇宙環境性に不安が残り、軽量化、および作業性の面からも、熱融着可能な可塑性ポリイミドが望ましい。しかし、全芳香族からなり、さらに熱融着性を有するポリイミドはこれまでほとんど知られていない。著者らは以前、非対称構造を導入することにより耐熱性を保ちつつガラス転移温度以上での高温流動性の優れたポリイミドを見出している。この考えを基に、酸二無水物として 3,4'-オキシジフタル酸 (a-ODPA) と 4,4'-ジアミノジフェニルエーテル (4,4'-ODA) からなるポリイミドが、 T_g が 270°C と高い耐熱性を有しながらも熱融着可能であることを見出した。その作製法や強度評価の詳細はこの前の論文「新規非対称熱可塑性ポリイミドの構造と性質(V)」に譲るが、ここでは融着強度評価と耐陽子線評価について述べる。

融着前後のポリイミドフィルムの強度を表1に示す。接着方法はヒートプレス、レール移動式の2種類で行った。いずれも 350°C で融着可能であり、融着強度は元の 85% 以上を

保つ結果が得られた。このように、このポリイミドは十分な熱融着性を有することが確認された。

表 1 熱可塑性ポリイミド (a-ODPA/4,4'-ODA) フィルムの融着強度

	素材強度 (N / cm ²)	融着強度 (N / cm ²)	融着強度比(%)
ヒートプレス a)	31.8	27.27	85.7
移動式 b)	31.8	28.08	88.3

融着条件：a) OKSUN 工業製ヒートプレス機(ヒータブロック温度 352/304℃、加圧 2.5kgf/ c m²、30sec) 気温 21℃ 湿度 49%、溶着幅 7mm、ラップシール b) 北都電機(有)製エンドレスシーラ改造機(上部ヒータブロック温度 354℃、下部ヒータブロック温度 132℃、加圧 1.1kgf/cm²、溶着速度：1.08cm/sec) 気温 19.5℃ 湿度 48%、溶着幅 7mm、ラップシール 溶着強度：引っ張り速度(50 mm/分)、試験品巾： \approx 5mm

表 2 に 2 種類の熱可塑性ポリイミドと KAPTON®の耐陽子線評価結果を示す。約 10 年の照射量である 45 MGy の陽子線照射後もいずれも大幅な劣化はみられず、新たに開発した非対称熱可塑性ポリイミドにおいても十分な耐宇宙環境性を有することが示された。

表 2 ポリイミドフィルムの耐陽子線評価

	Dose [MGy]	Thickness [mm]	Modulus [GPa]	Stress at break [MPa]	Elongation at break		
					ave.	min.	max.
PI(a-ODPA/ 1,3,4-APB)	0	32	3.2	114	71	7	132
	16.7	32	3.0	106	93	65	117
	48.3	32	3.4	94	28	7	66
PI(a-ODPA/ 4,4'-ODA)	0	7	3.2	113	46	10	95
	45	7	3.3	111	37	11	73
	100	8	2.9	99	19	8	39
KAPTON	0	25	3.4	271	65	59	70
	16.7	25	3.6	239	43	38	47

まとめ

ソーラーセル探査機の開発状況について、主に膜材開発を中心に述べてきた。海外でもソーラーセル開発が進められているものの、用いる膜材は現状では PET が中心で、長期間使用することはまだ想定できていない段階である。2010 年の小型ソーラー電力セル実証機、さらには木星探査を目的とした 50 m スケールの本格的ソーラーセル探査機に向け、材料開発で優位に立つ日本が世界に先駆けてミッションを成功させることを期待してやまない。