

非対称構造の拓くポリイミド新材料と世界初の宇宙ヨット

“IKAROS”の膜開発

宇宙機構 (JAXA) 宇宙科学研究所 (ISAS) 共同研究員 横田力男
〒252-5210 相模原市中央区由野台 3-1-1 yokota.rikio@jaxa.jp

「要旨」

2010年5月、宇宙研究開発機構 (JAXA) により種子島宇宙センターから打ち上げられた世界初の宇宙ヨット「IKAROS」は宇宙展開に成功し、金星を越えて1年後も順調に航行中である。大きく広げた「帆」に太陽光を反射させ、光子の圧力を推進力として宇宙を航行する「ソーラーセイル」がこれまで実現できなかった理由には、微弱な太陽光から受ける力を利用する軽くて宇宙環境に強い膜 (高分子フィルム) がなかったことも大きな要因である。本稿は宇宙航空分野の高性能材料であるが非可塑性で膜製造に接着剤を必要とするポリイミド (カネカ社の APICAL AH) と我々が分子設計した非対称構造芳香族ポリイミドにより実現した長期宇宙環境耐久性と熱融着性を備えた耐熱、熱可塑性ポリイミド材料開発の経緯、およびこれらポリイミド薄膜を用いた世界初のソーラーセイル “IKAROS” 膜への適応について紹介する。

1、緒言

大きく広げた「帆」(薄膜) に太陽の光を反射させ、光子の圧力を推進力として宇宙を航行する「ソーラーセイル」の構想は100年も前から提案されていたが、世界の誰も実現できませんでした。その理由の一つは、太陽光から受ける微弱な力を推進力とするための軽くて宇宙環境に強い膜 (高分子フィルム) がなかったことと推定される。ポリイミド研究会ではよく知られているポリイミドは、米国デュポン社が開発したポリピロメリットイミド (PMDA/4,4'-ODA):KAPTON-H として40年も前にアポロ月着陸船外部表面熱保護膜に用いられていました。そのため宇宙工学の分野ではこれをセイル膜材に使う計画が繰り返し提案されてきましたが、KAPTON-H は、高温でも軟化しないため (非可塑性) にポリエチレンのように熱融着によって簡単に貼り合わせすることは困難なので、大きな「帆」の製造が容易ではないことが実現を阻んできた要因の一つと思われる。このような中で一片が約13.6mのソーラーセイル “IKAROS” 膜の宇宙展開に際して搭載カメラにより送信されたトンボの羽のように光輝く “IKAROS” の映像は私たちポリイミド研究者に大きな感動を与えてくれました。そこで本稿は “IKAROS” の帆・新規ポリイミド膜開発と “IKAROS” ソーラーセイル膜への応用展開について紹介する¹⁻⁶⁾。

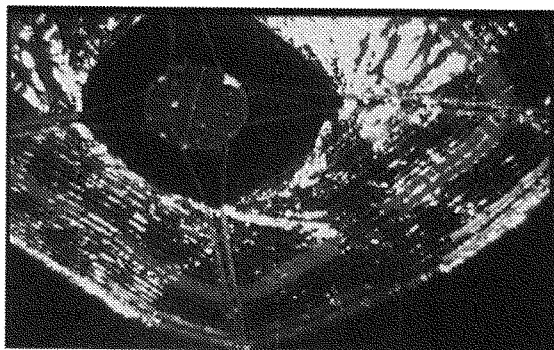
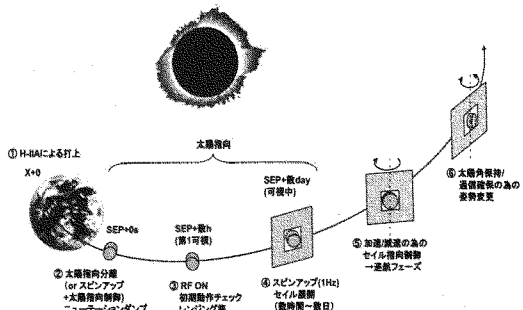


図1、“IKAROS”ソーラーセイル世界初の宇宙展開 (搭載分離カメラにより)

図2、小型ソーラー電力セイル実証機 “IKAROS” ミッションシーケンス



2、小型ソーラ電力ソーラーセイル “IKAROS”

微弱な太陽光を推進力とするソーラーセイルには少なくとも数十メートル角の大面积の超軽量膜が要求される。したがってセイル膜製造・折りたたみ・収納に加えて確実に宇宙展開できて、形状を安定的に保持することが求められる。展開方式には①小さく畳んだ膜をマストを伸ばしながら広げるポリイミド太陽電池パドルのような方法と②折りたたんだ膜を巻きつけた探査機を回転させ遠心力で伸展・展開する方法に大別される。“IKAROS”は②の方式をとる直径1.6mの展開システムとバス部、一片約13.6m、膜厚 $7.5\mu\text{m}$ のポリイミド薄膜から成る角型セイルである。“IKAROS”は2010年5月21日種子島宇宙センターからHIIAによる打ち上げられた後、図2のシークエンスで分離後、スピナップされ遠心力で2段階に伸長、展開された。下記に“IKAROS”のミッションデフィニッションを示す^{1,5)}。1) IKAROS セイルの完全宇宙展開、2) 薄膜太陽電池による発電と収電、3) 太陽光・光子による推進力の実証、4) 液晶デバイスによる姿勢制御の実証。当然のことながら、地上では実証が難しい太陽光による推進の確認が第一であって、それにはまずセイルの宇宙展開の成功が必須である。そのうえ次期大型ソーラーセイルに向けた技術の習得、即ち薄膜太陽発電による収電、および液晶デバイスによる操舵技術の実証が主目的とされたが幸運にもポリイミド膜の宇宙環境耐久性の実証を含めてすべてに成功し遙か宇宙を航行中である。

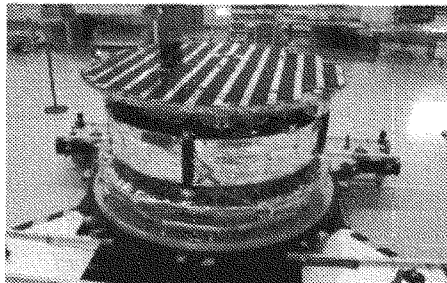


図3. “IKAROS”探査機の概要：探査機重量296kg、RCS推進剤20kg、セイル重量約16kg(含2kgチップマス) 直径160cm、高さ83cm、

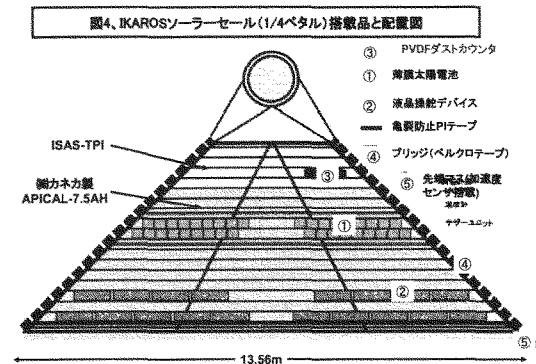


図3に探査機概要を示す。“IKAROS”は直径約160cm、全重量約307kgの探査機であるが図4のような膜面構成、即ち膜表面に48枚の薄膜太陽電池と外周域に72枚の薄膜液晶方向制御デバイスが接着取り付けられている。“IKAROS”は図のような台形状のペダル4つから成りベルクロを付けたブリッジで結ばれ、中央の展開システムへ各々4本の約 $1.5\text{mm}\phi$ のケブラーロープで結ばれている。各ペダルは後述のように探査機側面ドラムに幅約30cmの帯状に17折に畳まれて巻きつけ・収納される。セイル膜の伸展は図5の探査機を回転させ、先端チップマスの遠心力により先端部から繰り出される仕組みである。一方、カギとなる“IKAROS”セイル膜の中心部には新規に開発された宇宙環境性に優れ、熱融着が容易なポリイミド薄膜：ISAS-TPIが使用されている。また、周辺約89%にはKAPTON Hと同一化学構造のカネカ Apical AH $7.5\mu\text{m}$ が何れも表面アルミ蒸着して用いられている⁵⁾。

3、非対称構造による長期宇宙環境耐久性をもつ熱融着性耐熱ポリイミド

“IKAROS”セイル膜材の設計概念は、1章の次期大型セイルの設計・製造に応用展開することを目的とする。したがって使用する膜としては1) 人工衛星熱保護膜(MLI)として実績のあるポリピロメリットイミド(PMDA/4,4'-ODA)フィルムである。膜開発の状況によって2) 張り合わせに接着材を要せず長期宇宙環境耐久性と大規模膜製造が容易

な無接着・熱融着性をもつ新規熱可塑性ポリイミドフィルムの試行が並行検討された。その結果、実機膜には約 89%の膜面に PMDA/4,4'-ODA(カネカ(株) APICAL AH 7.5 μ m)を、中心部の約 11%には JAXA/ISAS 開発のビフェニルエーテル四酸二無水物(a-ODPA)とオキシジアニリン(4,4'-ODA)による新規熱融着性耐熱ポリイミド(a-ODPA/4,4'-ODA)の薄膜が、いずれも太陽面をアルミ蒸着して用いられた^{2,4)}。

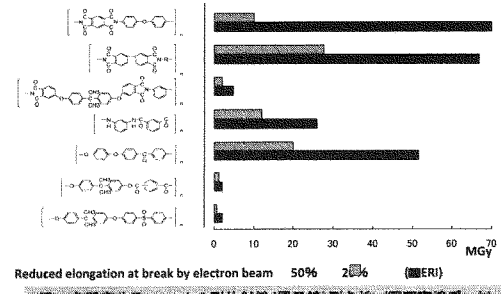
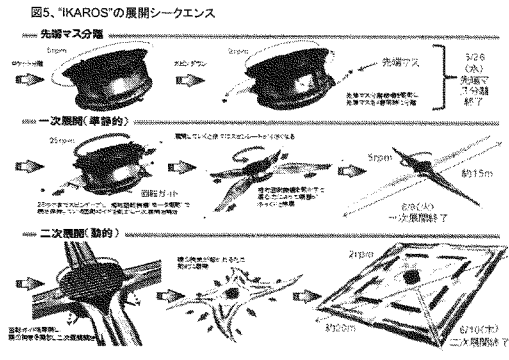


図6. 各種高分子フィルムの耐放射線(電子線)耐久性 (原研高崎データ)

3, 1 宇宙環境性をもつ高分子の化学構造とは

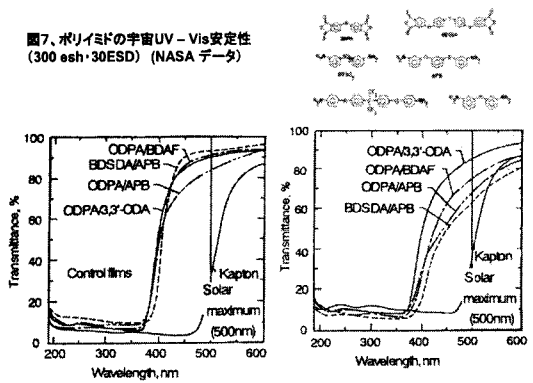
一般に炭素-炭素共有結合を基本とする有機系高分子フィルムの宇宙環境耐久性は十分ではなく、現在入手可能な宇宙環境耐久性薄膜は芳香族ポリイミド・APICAL AH、KAPTON H、UPIREX-S 等僅かである。唯一の熱融着ポリイミドとして知られるポリエーテルイミド (ULTEM) は屈曲な脂肪鎖を含むゆえ環境耐性は十分ではない。図 6 に高分子膜材の宇宙環境(地上電子線)特性を、図 7 はポリイミドの宇宙環境紫外線 30 日分(30ESD)の地上評価結果である。また図 8 は”IKAROS”セイル膜に求められる宇宙環境耐久性と膜特性である⁴⁾。

図8. 大規模宇宙膜構造物・ソーラーセイル膜材料の要求特性

技術課題

1. 宇宙環境耐久性 → 宇宙放射線 50MGy (Ikaros は 0.5年 < 2MGy)
2. 耐熱性 → 使用上限温度 120~150°C.
3. 機械特性 → 弾性率 3GPa, 破断強さ 100~200MPa, 破断伸び 50~100%
4. 膜厚 → 7.5 μ m, 幅 1000mm
5. 使用可能な膜材 → 芳香族ポリイミドが唯一 KAPTON, APICAL AH, UPILEX-R → 熱融着不可ゆえ接着による膜製造

図7. ポリイミドの宇宙UV-Vis安定性 (300 esh・30ESD) (NASA データ)



小型ソーラーソーラ電力セイル実証機” IKAROS” は名のごとく次期大型セイルへの技術的課題の抽出と技術の習得にあり、宇宙航行計画は半年と設定されている。そのため、予想される宇宙環境放射線は 10kGy 程度と見込まれ、汎用な PC や PES (図 6) もあるいは使用可能である。しかし、次期探査計画では 10 年を超える長期航行が予測され、膜の宇宙環境耐久性は電子線やプロトンでは 50MGy の耐性が求められる。また薄膜太陽電池や操舵デバイスを保持するセイル膜の機械的特性は弾性率 3GP、破断伸び 50%で十

分と見積もられが、耐熱性については膜の吸収率 α と放射率 ε から見積もられた表面温度は 150°C のために T_g は 200°C とされた。したがって耐熱性からは図 6 の PEEK やアラミドも使用可能なことを示すが、フィルムの膜厚や形状、接着性と紫外線耐久性から外れる。ここで地上の数百倍の宇宙紫外線には多くの高分子は劣化する。図 7 の UV 耐性を着色変化からみた結果も全芳香族ポリイミド KAPTON H が安定で π 共役に基づくハシゴ状化学構造によると推定されている。一方、フタルイミド間にエーテル結合を導入した s-ODPA/3,3'-ODA は -S-, -SO₂-, -C(CF₃)₂- に比べて安定なことが新規膜開発への注目点である⁷⁾。

3, 2 新規開発長期宇宙環境耐久性と耐熱熱融着性ポリイミド材料 ISAS-TPI “IKAROS” セイル膜中心部に約 11% 使用された ISAS-TPI は次期大型セイルに向けて接

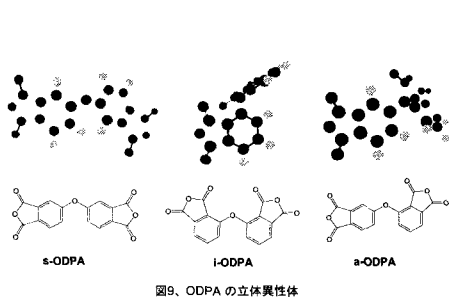


図9, ODPA の立体異性体

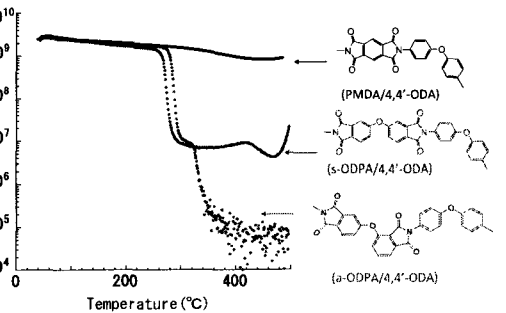
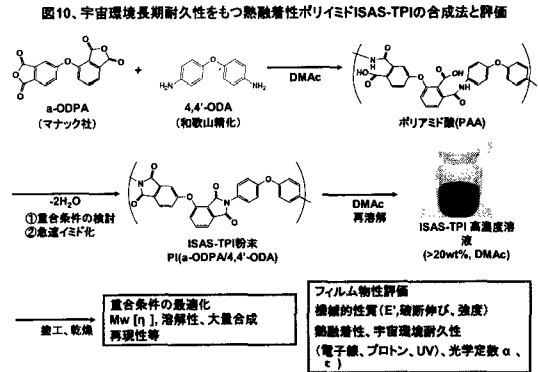


図11, セイル膜材 a-ODPA/4,4'-ODA (ISAS-TPI) と対称 PI の分子運動性 (DMA 曲線)

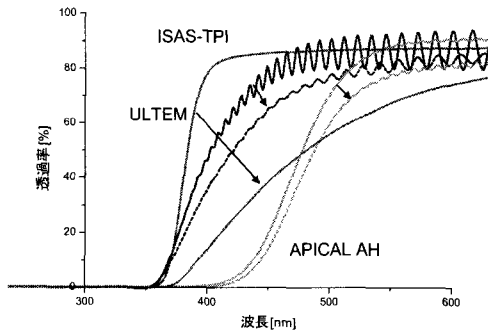


図12, Apical AH と ULTEM および ISAS-TPI の宇宙環境紫外線耐久性 (50ESD)

着剤を用いなくて膜製造ができる (熱融着) ように分子構造設計した非対称構造ポリイミドである。先に述べたように APICAL AH (PMDA/4,4'-ODA) は耐熱・耐宇宙環境性優れた高分子フィルムで、化学構造はエーテル酸素を除いて芳香複素環からなる (表 1)。一方、図 6 の PEI は熱融着できるポリイミドであるが脂肪鎖を含むゆえ汎用な PC や PES 同等に長期耐久性は期待できない。結果として UV 耐久性を考慮すると全芳香族ポリイミドのみが長期使用に耐える化学構造となる。しかし、これらはいずれも化学構造の対称性が高くガラス温度 T_g を超えても非可塑性で熱融着・貼り合わせは難しい。一方、図 7 はエーテル結合が UV に比較的安定なことを示し ODPA/ODA の化学構造の有効性が予

則される。しかし、従来の対称で直線性に優れた s-ODPA/4,4'-ODA では容易に秩序形成し、十分な熔融流動・熱融着性は期待できない。ここで非対称構造の特異性を基に a-ODPA を導入すれば耐宇宙環境性と熱融着性の両立という問題の解決に有効と予測できる。そこで我々は市販されていない a-ODPA モノマーを新たに依頼合成し、研究室でポリマー合成して基礎物性を評価した。即ち ISAS-TPI はわれわれ (ISAS) の 10 年を超える非対称構造ポリイミド研究の成果の一つで、化学組成は全芳香族に近いが原料酸二無水物は非対称構造ゆえ立体障害から非平面となり平面構造・分子間の重なりが阻害されると期待される³⁾。図 10 に合成ルートと実機膜開発への課題を示す。セイル膜にとってもっとも重要な熱可塑性についてみると図 11 の DMA 曲線から ISAS-TPI は対称構造 s-ODPA/4,4'-ODA に比べて Tg が高く (高耐熱) 無定形で、予想通り Tg の高温側では分子運動が活発に起こることが分かり、容易に熱融着可能なことが推測された。しかも化学的には PMDA/4,4'-ODA 同様に宇宙環境耐久性に優れた化学構造ゆえに長期間宇宙使用が期待される。図 12 は UV 照射 50ESD における光学特性 (吸収強度) の変化である。未蒸着フィルムの可視部スペクトル変化・被ばくによる濃色化は、いずれも ESD50 日相当の照射により吸収端が長波長にシフトし劣化がみられるが表 1 の FM 膜の強度特性は充分充たすことが明らかである。一方、宇宙環境放射線に関しては”IKAROS”の宇宙環境 (図 7) は飛翔期間 0.5 年として電子線と陽子線はそれぞれ 10kGy と見積もられているが放射線被ばく量は 100 倍の安全率をかけて 1MGy とし、同時に将来計画への使用も考慮して 20-100MGy までの耐久性が評価された。評価実験は高崎の原子力研究施設で行われた。また太陽光紫外線 180 日の評価試験は JAXA つくば電子部品・材料 G の照射装置を用い 10 倍加速で行われた。また熱融着機による ISAS-TPI FM 用フィルムの熱融着強度は融着条件 ; 340C、20sec、0.1MPa で未照射フィルムの膜強度 120MPa の 90%以上を有することが確認された。表 1 からいずれのポリイミドも宇宙環境 10 年以上に相当する耐久性を保持することが確認された。特に ISAS-TPI はポリイミドで NMP に 20%の高濃度の溶解性をもつゆえポリイミド溶液から薄膜が製造されていることが特徴である^{2,4)}。

表1、ソーラーセイルIKAROSポリイミド膜材の特性

4-1) ISAS-TPIフィルムの特徴
立宇宙環境性 (機械的、光学的性質)

Polyimide film	Tg (DMA) (°C)	Solubility (NMP) (%)	Heat sealing (340°C, 10sec)	Elongation (% retention)					
				Real elongation (%)					
				Proton (MGy)		Electron (MGy)		UV (ESD)	
				0	100	0	20	0	150
ISAS-TPI 8-9um ISAS Fujimori Co.	260	>20	>80%	100	26	100	93	100	87
Apical AH 7.5um KANEDA	>360	non	non	100	36	100	87	100	100
				81	22	82	64	82	82

表2 IKAROSセイル膜

セイル膜面には、下記の2種類の膜材を用いる

材料	膜材(1) PMDA/4,4'-ODA	膜材(2) a-ODPA/4,4'-ODA
	鍵カネカ製 APICAL-75AH ポリイミド薄膜	ISAS製膜 ISAS-TPI 熱可塑性 ポリイミド薄膜
化学構造式		
特性 (実測値)	弾性率: 3.0GPa, 伸度: 90% 軟化温度: 420°C, 熱融着性: X	弾性率: 2.8GPa, 伸度: 92% 軟化温度: 245°C, 熱融着性: O
セイル面積 (173.83 m ²)	154.28 (面積の88%)	19.36 (面積の11%)
膜厚 (μm)	7.5	7.5-9.0
セイル重量 (1.849 kg)	1.843	0.206
蒸着機	アルミニウム	アルミニウム
蒸着厚み (nm)	80	>80

4、“IKAROS”セイル膜の製造・開発

表 2 は IKAROS セイル膜に用いられたアルミ蒸着 APICAL-AH7.5 μm 薄膜と JAXA/ISAS 開発の非対称熱可塑性ポリイミド a-ODPA/4,4'-ODA (ISAS-TPI 7.5 μm) の化学構造と膜物性、セイル膜面使用面積等である。ISAS-TPI 膜開発は、あらかじめ実機膜作成のために研究室内で実機膜への使用に向けた大量合成法 (図 10) を確立した後に、信頼性の

高いセイル薄膜材料開発のために ISAS 内でポリイミド高濃度 DMA c 溶液を調整した後、藤森工業（株）研究所の協力の基に 7.5 μ m 厚さでロールフィルム上に塗工された。続いて東レ KP フィルム（株）により片面アルミ蒸着がなされた後、再び藤森工業（株）にてベースフィルムから剥離し、藤倉航装（株）によりセイル膜に製造された。APICAL AH 膜のガラス転移温度（T_g）は動的粘弾性（DMA）で約 360℃であるがガラス転移点に対応する弾性率の低下（図 11）は僅かではっきりとした軟化は示さないで非可塑性となる。先にも述べたように汎用高分子フィルムとはことなり PMDA/4,4'-ODA ポリイミドは卓越した高温・機械特性と環境安定性を有するゆえに特殊な宇宙材料の枠を超えて電子材料・情報機器に欠くことのできない高性能素材であるが、高温にして軟化させ熱的に融着させることはできない。そこで“IKAROS”セイル膜製造・APICAL AH の張り合わせには宇宙環境耐久性の比較的高いシリコン樹脂接着剤が検討された。ここで薄膜の接着ラインが長く大面積となるセイル膜では接着剤には被着膜材表面への塗布後、接着剤が流れ出さないような自己保持・高粘性の必要があり、その上、硬化条件すなわち温度・圧力・硬化時間が作業可能な条件に入る事が重要である。しかし宇宙用とされるシリコン樹脂は粘度、硬化条件の面から不向きで、一液系は長時間の硬化保持が要求されるため使用できない。そこで今回は東レ・ダウ社の協力の基に適度な粘度をもち 120℃、10 分で硬化する民生品シラスコン RTV4068 が 180℃で用いられた（この接着剤を含めてシリコン樹脂の宇宙環境耐久性は長期使用には十分ではない）。なおセイル膜 APICAL AH 7.5 μ m の反太陽面は未加工のポリイミド面であるが太陽面は金属アルミニウムが 80nm 蒸着されている¹⁾。

図13、IKAROSソーラーセイル膜の膜構成

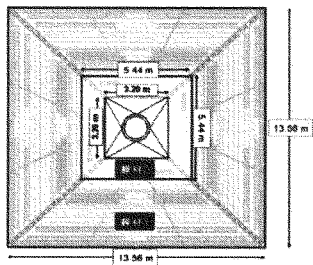
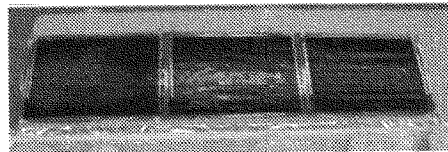


図13、IKAROSソーラーセイル膜の膜構成

図14、“IKAROS”搭載薄膜太陽電池



- 7.5(ISAS-TPI)
- 30-40 (RTV4068接着剤)
- 25(a-Si薄膜太陽電池)
- 30-40 (RTV4068)
- 25(a-Si)
- 30-40(RTV4068)
- 25(APICAL AH)
- 総厚 170~200 [μ m]

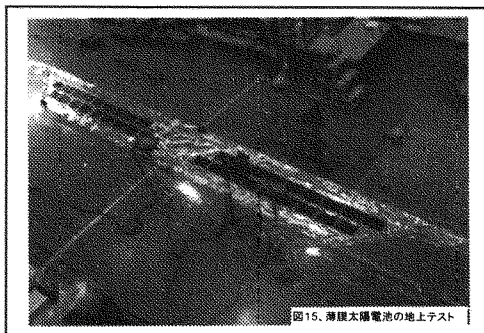


図15、薄膜太陽電池の地上テスト



図18、“IKAROS”ポリイミド薄膜セイル(1ペダルの地上点検写真)

5、“IKAROS”の搭載デバイス

2項のように“IKAROS”は次期大型セイル計画に必要な技術の習得・薄膜太陽電池に

よる発電と収電機能の確認、液晶デバイスによる姿勢制御の実証が主要な達成目標であり図4のようにセイル膜に接着・搭載されている。薄膜太陽電池を宇宙機に用いる計画は将来の大規模発電衛星には必須のものであるが、入手可能なものはアモルファスSi(a-Si)で通常は透明なプラスチックで覆われた軽量低コストのデバイスとして利用されており残念ながら国内には対応できるものは見当たらない。そこで“IKAROS”には米国 Power Film 社製の厚さ 25 μ m の a-Si 製ポリイミド薄膜太陽電池が搭載された。1 ユニットの220mmx320mmの薄膜太陽電池3枚(図14)から成り、1ペダルに12ユニット、全体で48ユニット(144枚)搭載され360Wの発電(未劣化時)能力をもつ。図15は1ペダル膜上への搭載薄膜太陽電池の機能試験の状況である^{1,2)}。

図16、光圧を利用した姿勢制御のイメージ

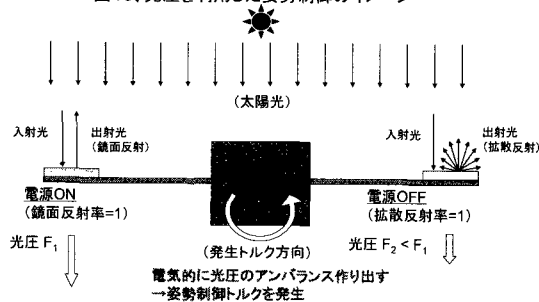
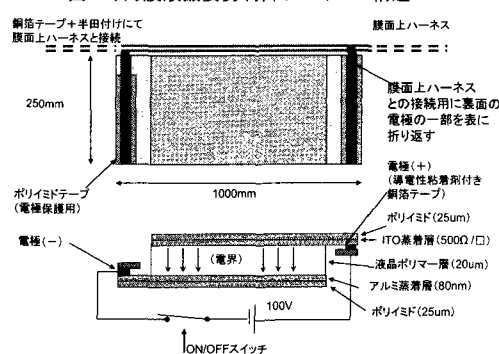


図17、薄膜液晶姿勢制御デバイスの構造



大面積の薄膜から成るセイルの方向制御・操舵技術は様々提案されている。一方、高分子液晶は電氣的に配向・膜の透過特性の制御が容易で地上では液晶ディスプレイとして盛んに用いられている。図16は薄膜液晶を用いた”IKAROS”の操舵デバイス(LCD)の概念図である。日本板硝子(社)製薄膜液晶を APICAL-AH 25 μ m で内側をITOコーティングしたものを上面に、アルミ80nm蒸着したものを下面にし同社でデバイス化された。1枚が1000mmx250mm、総厚約70 μ mのものを図4のように1ペダル18枚、搭載総数72枚、セイル膜面上にシリコン接着剤で接着されている。推定姿勢制御性能は1 deg/day(スピンドルト1 rpm時)である。このように高分子液晶の主たる使用分野とは全く異なった予想もつかない操舵デバイスへの応用展開は材料科学とシステム工学との発想の違いを際立たせるものである。搭載デバイスは”IKAROS”宇宙展開後、何れも十分な機能を持つことが確認されている。

6、まとめ

一辺が1 kmにも及ぶ大規模宇宙発電衛星に限らず本稿のソーラーセイルや宇宙パラボラアンテナ等の宇宙膜構造物には宇宙環境耐久性のある高分子材料が必須である。その候補材料としては、宇宙環境に比較的強い芳香環や芳香複素環をもつ『耐熱性高分子』、中でも KAPTON H に代表される芳香族ポリイミドが有力で、すでに多くの人工衛星や宇宙機あるいは国際宇宙ステーション (ISS) の大型太陽光発電パドル等に盛んに用いられている。しかしこのポリイミドを用いた大型膜製造には接着剤が必要であるが、頻繁に用いられているシリコン樹脂接着剤の宇宙環境耐久性は十分ではない。特に10 μ mより薄い薄膜により構成されるソーラーセイルでは接着剤を用いる方法は大型化にとって大きな障害となる。われわれの見出した非対称構造ポリイミドは主鎖の内部回転が立体障害のため抑制される結果、無定形で、対称構造に比べて高T_gをもち、宇宙環境

には KAPTON H 同様の高い耐久性をもつこれまでにないポリイミド素材である。ISAS-TPI を含めて有機材料の長期宇宙環境耐久性は万全とは言えないが設計と運用を一体化することにより積極的に応用展開するものと思われる。今回、幸運にも世界で初めてソーラーセイル“IKAROS”の宇宙展開を成功させた ISAS-TPI をはじめとした非対称ポリイミドは新たな宇宙材料として大型軟構造物・膜に新たな可能性を拓くと期待される。しかし薄膜太陽電池の高効率化や耐久性の向上、あるいは液晶の宇宙環境長期耐久性など宇宙材料ゆえに解決されなければならない課題は多く、英知の結集がこれまで以上に必要である。今回の開発に当たり高分子、中でもポリイミド研究会を中心とした多くの会社、研究所、大学の皆様の心からのご協力が世界で初めてポリイミド薄膜を主構成材料とした探査機を成功に導いたもので宇宙工学の研究技術者とともに進めた熱い日本の技術力の賜物と深く感謝する。

参考文献 ; 1) IKAROS 実験計画書、2010 年 5 月、JAXA、2) R. Yokota, et al, Proceedings of 9th China-Japan Seminar on Polyimides and Advanced Aromatic Polymers, p8-13 (2010) by China Aromatic Heterocyclic Resins Information Station and Japan Polyimide Conference、3) 横田力男、新訂「ポリイミド基礎と応用」2 編 1 部 2 章、NTS 出版、2010 年、4) 宮内 雅彦ら、第 52 回高分子討論会講演要旨集、2010 年 9 月、高分子学会、5) Y. Tsuda et. al、2010 IAC A3. 6. 8、6) Y. Funase et. al, 2010 IAC C1. 4. 3、7) 横田力男、ゴム協会誌、79 巻 1 号 p32(2006)、