

ソーラーセイル薄膜展開実験について

Solar Sail Deployment Experiment

システム開発部 実験用飛翔体システム開発グループ 下瀬滋

Shigeru Shimose

Experimental Space Vehicle System Development Group

Space System Development Department

Abstract

Solar Sail move by receiving momentum of photons in sunlight. This paper presents results of some Spin-Stabilized Solar Sail deployment experiment. ISAS has successfully deployed, for the first time in the world, the polyimide Solar Sail taking advantage of centrifugal force in space. Based on this result, the new deployment mechanism is being developed which retracts the 50m diameter sail.

1. はじめに

宇宙科学研究本部工学委員会の下に設置されたソーラーセイルワーキンググループは 2010 年代にソーラーセイルを利用した深宇宙探査機の実用化を目指して研究開発を進めている。その実現の為に必要な要素技術の一つとして薄膜面の展開技術がある。この技術実証の為に大気球及びロケット等を利用しての実験を実施してきた。以下に平成 17 年度までの実験概要について報告する。

2. 背景

ソーラーセイルは、風の力を受けて海の上を進む帆船のように、宇宙空間で太陽からの光の圧力すなわち光子と呼ばれる光の粒子がソーラーセイルの膜面に衝突することによって推進力を得る。

このソーラーセイルを探査機の推進力を得る方法に使うアイディアは、1919 年に F.A.ツェンダーと C.E.ツィオルコフスキーによって示されていたと言われている。しかし太陽からの光圧は地球上にいる我々が全く感じる事ができないほ

ど微小 ($4.57 \times 10^{-6} \text{N/m}^2$) なものである。従ってこの微小な光圧から推進力を得る為には巨大な膜面が必要であり、それは極軽量でかつ宇宙での過酷な環境に耐える素材である必要があった。当時はそれらの要求に応えられるものが無く実現できなかった。

ところが最近になって特に我が国において素材及び製造技術の向上により、有望な膜面素材が開発されてきた。ソーラーセイルは燃料を必要としない推進システムである為、惑星間探査機等への利用が期待され、現在諸外国でも研究・開発が進められている。

3. 遠心力安定型ソーラーセイル

太陽からの微小な光圧を推進力にするソーラーセイルはその光を受ける膜面を非常に大きくしなければならない。(現在計画中の探査機で直径 50m) しかしその大きさのままでは宇宙空間へ打上げることは不可能である。その為、打上時には膜面を折り畳んで収納する必要がある。

宇宙空間での膜面を展開する方式はノンスピン

型とスピン型に大別できる。ノンスピン型は膜面の展開及び展開後の圧縮力を受け持つ為のブーム等の構造支持部材が必要となる。この方式は姿勢制御及びシステム設計が単純化されるメリットがあるが、大型化に伴い重量が増加するデメリットがある。スピン型は回転の遠心力で膜面の展開を行う為、構造支持部材等が必要なく、重量増加を伴わずに大型化が出来る。そこで ISAS では特にスピン型（遠心力安定型）ソーラーセイルに着目して開発を進めている。

4. 膜面の展開形状

これまで『扇子型』と『クローバー型』の2種類の形状の遠心力安定型ソーラーセイルの実験を実施してきた。

『扇子型』は文字通り数枚（現状6枚）の扇形で構成され、収納状態では膜面を扇子のように周方向に折り畳み、それを中心円筒に巻き付ける。展開時は巻き付いた膜面を解きながら、扇子状に開いていく。扇型同士はブリッジと呼ばれる渡りで周方向につながれている。構造が簡単で展開も1動作で可能と、非常にシンプルな事が特徴である。(Fig 1)

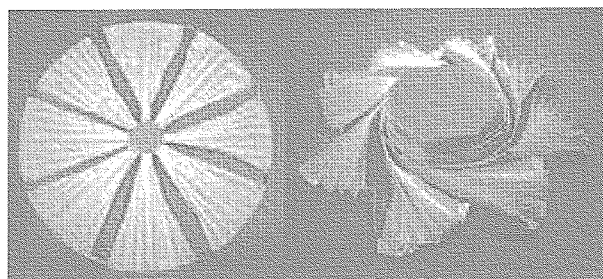


Fig 1 Fan Type Solar Sail

『クローバー型』は四角形と1/4円で構成され、展開を2段階で行う。最初に中心円筒に巻き付けられている膜面を十字形状に展開し、続いて蛇腹状に折り畳まれた十字形状の膜面を更に展開する。展開後の膜面は花びらを開いた様な形状になる。展開時に膜の折り目が遠心力による張力と角度を持っていることが特徴である。(Fig 2)

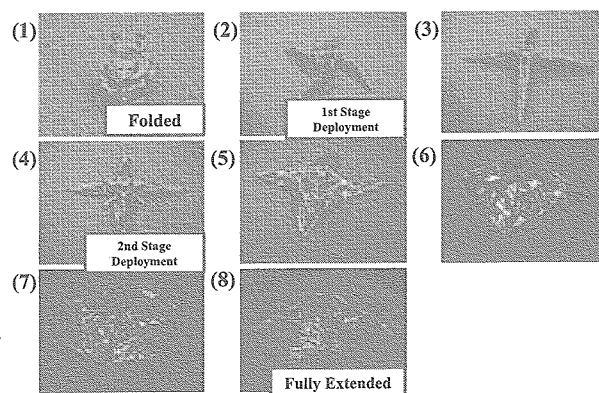


Fig 2 Clover Type Solar Sail

5. 膜面の素材

太陽の光を受けるソーラーセイルの膜面は100℃以上の高温になり、宇宙空間からの放射線を浴びる為、これらの環境に長期間耐える必要がある。現在この条件に最も適しているのが高分子フィルムの『ポリイミド』である。ポリイミドフィルムは短時間であれば400℃の高温でも使用可能で太陽光や放射線に対して十分に強く、宇宙空間においても約10年間使用することが出来る唯一の材料である。

この優れた性質の為、宇宙開発分野においては温度制御用（耐熱）として人工衛星の表面を被う材料(MLI)として利用されている。(Fig 3)

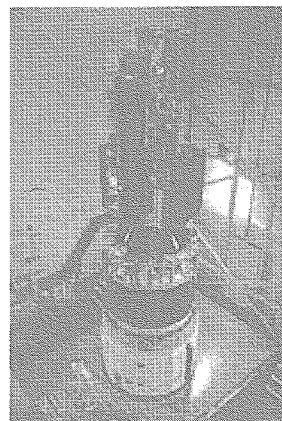


Fig 3 MLI attached to Satellite

現在計画中の探査機に使用する膜面の厚さは約7.5μm、それに静電防止の為にアルミニウムを50～100Å蒸着処理する。(Fig 4)

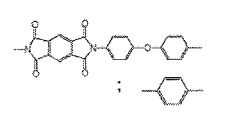
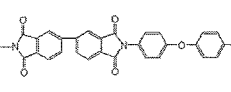
Polyimide APICAL NPI Thickness : 7.5µm Width : 109cm (commercially available) Deposited Al : 0.08µm Tensile modulus : 4.6GPa, Tensile elongation : 80% Tg : 420°C, Tensile strength : 88MPa Supplier : Kaneka Co., Ltd.	
Polyimide UPHLEX-R Thickness : 7.0µm Width : 109cm (not commercial) Deposited Al : 0.06~0.08µm Tensile modulus : 3.0GPa, Tensile elongation : 80% Tg : 300°C, Tensile strength : 268MPa Supplier : Ube Industries, Ltd.	

Fig 4 Chemical structure of Polyimide

6. 実験概要

遠心力安定型ソーラーセイルの最終的な目標である直径 50m 級の膜面展開を地上で実験する事は困難である。そこで巨大な膜の挙動を模擬できる信頼に足るシミュレーターの構築が必要となる。その技術開発ロードマップを Fig 5 に各実験の概要を以下に示す。

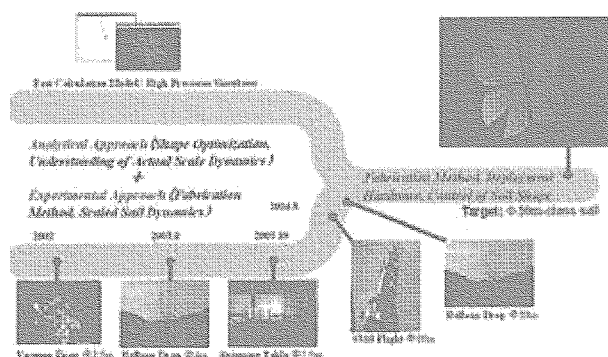


Fig 5 Roadmap of Solar Sail membrane deployment

6-1 地上実験

大気球及びロケットを用いた実験は一回限りの為、その予備実験としてスピントーブルを利用した事前検証を実施した。地上では重量と空気抵抗をなくす事は出来ないが、セイル周りに風除けを設け、相対的に空気が停止している状態での展開実験を実施することができた。この実験は無重量、高真空の模擬にはならないが何度でも繰り返し行えるメリットがある。その結果、直径 2m 級セイルの製作方法の確立、収納・展開方式の確認ができた。(Fig 6)

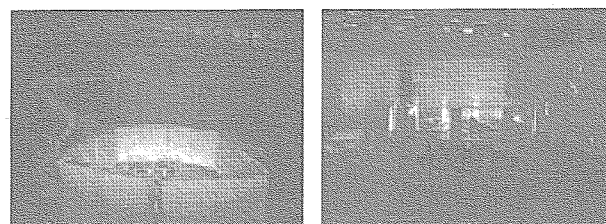


Fig 6 Spin table Experiment

6-2 大気球実験 (平成 15 年 8 月)

大気球を利用した無重量、高真空状況下での直径 4m 級セイルの動的展開実験は下記項目を目的に実施した。

- ・展開実現性の確認
 - ・観測された展開挙動の解析手法への反映
- 結果、画像を中心としたダイナミクス同定が出来た。(Fig 7)

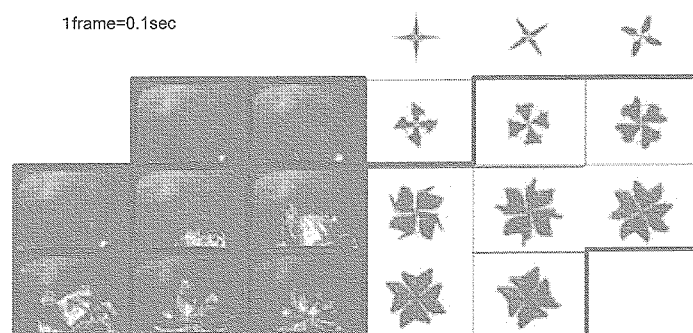


Fig 7 Result of Balloon experiment

6-3 観測ロケット実験 (平成 16 年 8 月)

観測ロケット S-310-34 号機を利用した無重量、高真空状況下での直径 10m 級セイルの動的展開実験は下記項目を目的に実施した。

- ・展開機構を含めた膜面構造物の設計方法及び加工・製作方法の取得
 - ・展開実現性の確認
 - ・観測された展開挙動の解析手法への反映
- 結果、ブーム等の構造支持部材を持たない薄膜構造物(ポリイミド)の遠心力による展開を宇宙空間において世界で初めて成功させる事ができた。ここまでの実験で一連の無重量、高真空状況下における薄膜の遠心力による展開のダイナミクス

ス解析に必要なデータを様々なスケールで収集する事が出来た。(Fig 8)

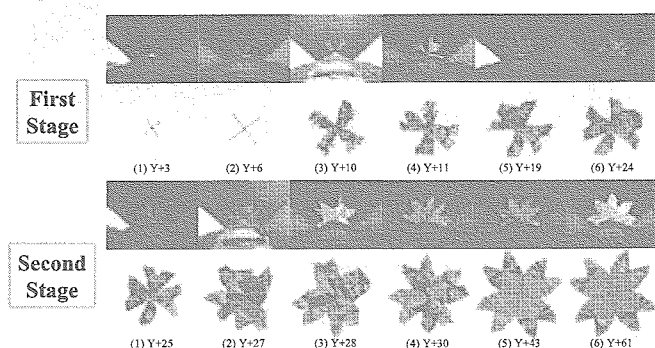


Fig 8 Result of Sounding rocket experiment

6-4 M-V ロケットサブペイロード実験

(平成 18 年 2 月)

これまでに膜面展開のダイナミクスに関しては検証ができたが、実際の探査機においては、できる限りダイナミクスの影響を受けない非常にゆっくりとした展開（準静的展開）を行うことを想定している。この準静的実験を行うには無重量、高真空の状態が長時間継続される必要がある。そこで M-V 型ロケットのサブペイロードとして直径 20m 級セイルを軌道上で展開実験を実施した。

結果は膜面の完全展開はなされなかったが、有用な知見を得る事が出来た。(Fig 9)



Fig 9 Result of M-V rocket experiment

7. まとめ

これまでの実験により、薄膜の展開に関する第一段階である遠心力による展開のダイナミクスの同定はほぼ完了した。現在は準静的展開におけるメカニズムの検証を進めているところである。

今後はこれらの結果をもとに直径 50m の薄膜を確実に展開するメカニズムの研究開発を進め、木星およびトロヤ群ヘソラー電力セイルとイオンエンジンを用いてのフライバイ探査の実現を目指す。(Fig 10)

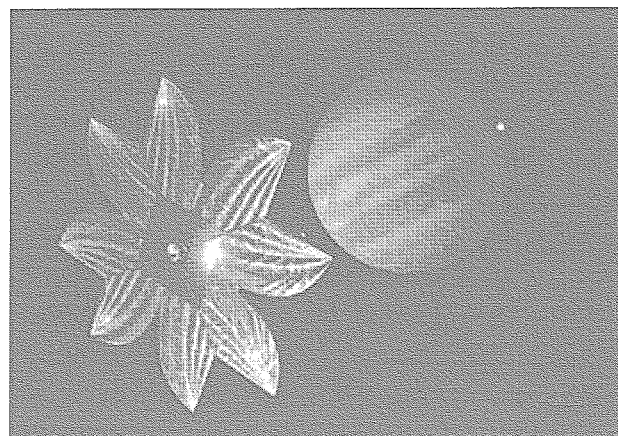


Fig 10 Jupiter and Powered-Solar Sail Spacecraft

[参考文献]

ソーラーセイルワーキンググループ作成資料