

P2-128 ソーラー電力セルの大型セイル膜面開発およびその収納・展開方法の検討

○白澤洋次, 森治, 奥泉信克, 澤田弘崇, 横田力男, 田中孝治, 豊田裕之 (JAXA), 船瀬龍 (東大), 古谷寛, 坂本啓 (東工大), 松本純, 大野剛, 大谷翔, 中条俊大, 濱崎拓, 林直宏 (東大・院), Marco Giancotti (サビエンツァ・ローマ大), 佐藤泰貴, 門西省吾 (東工大・院)

1. はじめに

ソーラーセイルWGでは、ソーラー電力セルによる木星圏探査計画 (次期計画) を2020年代初頭の打ち上げを目指して検討している。次期計画において想定されているセルは、小型ソーラー電力セル実証機IKAROSのセルに対し、**面積が約15倍の3000m²級**になるという点と、ベースフィルムより厚く剛性の高い**薄膜太陽電池**や**その他のデバイスがセルのほぼ全面を占める**という点において大きく異なる。ソーラーセイルWGでは、これらの違いにより発生するセルの製作・収納・展開における技術的課題について研究を進め、実際にセルおよびその展開機構の開発・試作を進めている。

2. 大型ソーラー電力セル膜面の設計

ソーラー電力セルにおけるセルの面積およびレイアウトは、要求される電力を獲得するために必要となる薄膜太陽電池の面積によって大きく影響される。一方、必要となる薄膜太陽電池の面積によってセルの面積および重量も大きく変動し、探査機バスシステムの設計に相互に影響する。ここでは、セルの**面積を3000m²以下**と現実的な制約を設け、さらに**折幅を0.45m**としてセルのレイアウト設計を行った (図1)。このレイアウトから薄膜太陽電池の供給可能電力を見積もった結果、135kW@1AU (5kW@5.2AU) 以上と算出された。また、セルの総重量 (先端マス40kg含む) は約214kgとなることがわかった。

検討に際して使用した主なパラメータは以下の通りである。

- ・ 薄膜太陽電池の単位面積あたりの重量: 0.0538kg/m²
- ・ 薄膜太陽電池の発電効率: 5%
- ・ 故障マージン: 50%

薄膜太陽電池を含め各種搭載デバイスのセル設計における検討状況について、IKAROSからの発展項目を中心に以下に列挙する。

ベースフィルム (ポリイミドフィルム)

- ・ IKAROSではシリコン系接着剤を用いてポリイミドフィルム同士を接続していたが、長期のミッションにおける接着剤の耐久性に懸念があり、**熱可塑性ポリイミド (ISAS-TPI)による熱融着方式**の研究を進めている。

薄膜太陽電池

- ・ 1ユニットのサイズを0.40m × 1.75mとし、これを全体で2704枚使用する。
- ・ 各ユニットを熱可塑性ポリイミドを用いて熱融着で接続し、**パッチワーク的に全体のセルを構成**していく。

可変反射率デバイス (Reflectivity Control Device, RCD)

- ・ IKAROSの実績を基に算出した姿勢制御に必要なトルクを獲得するために、セル面積の10%をRCDに割り当てる。場所はトルクアーム長を稼ぐためにセル外周部とする。
- ・ 光圧によるセル面内方向の力を獲得するため、RCDを搭載している蛇腹折りの段について**展開を拘束するブリッジ**を取り付け、**立体構造を実現**する (図2)。これにより**スピンレート制御が可能**になる。

PVDFダストカウンタ (ALADDIN)

- ・ 全体で0.25m² × 16chのセンサを搭載する (**過去最大の曝露面積を持つダスト検出器**)。
- ・ IKAROSではセンサの厚さが2種類あったものを20um厚の1種類に統一する。
- ・ ハーネスを短くノイズの発生を抑えられるよう、セル中心部近辺に配置する。

膜面ハーネス

- ・ IKAROSでは2層CCLに対しエポキシ系接着剤でポリイミドフィルムのカバーを貼り付ける層構成だったが、接着剤の耐久性が懸念されるため、接着剤を使用しない**熱可塑性ポリイミドによるCCLの開発**を進めている。
- ・ 各種デバイスとの接続には、耐宇宙環境性のある導電性接着剤の使用も検討している。

テザーユニット (セルとテザーを接続する)

- ・ IKAROSでは、セル展開時にテザーユニットが面外にねじれた状態に陥ってしまう問題があった。これを避けるように、ユニットのサイズおよびセルの角の部分におけるテザーが接続される位置と方向を調整する。

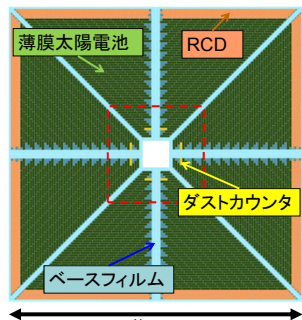


図1: 次期計画のセイルレイアウト

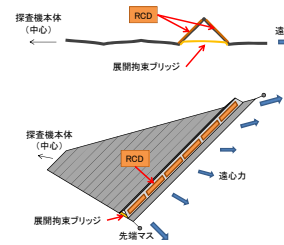


図2: RCDの立体構造模式図 (上: 断面拡大図, 下: 俯瞰図)

3. セイル膜面の試作

薄膜太陽電池、RCDなどのデバイスがセルのほぼ全面を占める次期セルにおいては、ベースフィルムが占める割合が小さく、ベースフィルムを基準としてデバイスの位置を管理する方法よりも、**各デバイスをユニット化しユニット同士をパッチワーク的に接続して相対位置を管理**するほうが作業ロスが少ない。特に大型のセルを製作する際には、この方式による簡素な製作手順が有効になると考えられる。このようなIKAROSとは異なるセル製作手順について検証するために、パッチワーク方式によるセルの試作を進めている。図3は、簡単に製作手順を確認するためにダミーの薄膜太陽電池ユニット、RCDユニットを用いて製作した模擬セルである。この作業の結果を反映し製作手順を見直した上で、今後、図1のセルの部分モデルである試作セル (図4) の製作を行い、製作精度の検証の他、巻きつけ実験などの各種試験を行う予定である。

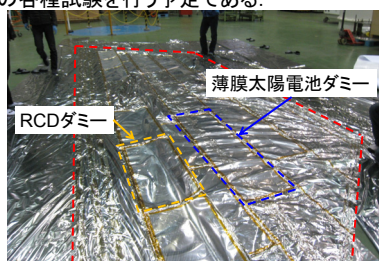


図3: 製作手順確認のため試作した模擬セル

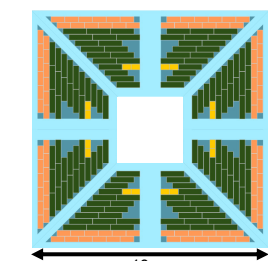


図4: 試作セルレイアウト (サイズは図1の赤破線内に相当する)

4. セイルの収納方法の検討

次期計画におけるセルの収納方法における重要な課題として、蛇腹状に折り畳んだセルを円筒形状の探査機本体周囲に巻きつける際に発生する内外周差の問題がある。IKAROSに比べ、**巻きつけ長さ・折数が増大し**、さらに**薄膜太陽電池の厚みの影響により大きな内外周差が発生**するため、そのまま巻きつけた状態と折線の位置がずれた状態で収納されてしまう。

これを解決するため、**外周側に対して内周側を少しずつ波型に弛ませて局部的に周差を解消する方法の検証**を進めている。これは、蛇腹状に折り畳んだセルの厚みから発生する内外周差を予測して周方向の巻きつけ位相を管理し、さらに内外周差により発生する波型を巻きつけ先端側に伝播させない機構により実現できる。

この巻きつけ方法の有効性を検証するため、薄膜太陽電池と同じ厚さのダミーセルを貼り付けた30折のセルを使用して巻きつけ実験を行った。この結果、膜の厚さを考慮した「巻きつけ位相管理」方法と、波形を伝播させないための「サンド」の使用により、**折線のずれを抑えた再現性のある巻きつけが可能であることを確認**した。



図5: 位相管理・サンド使用による巻きつけ実験

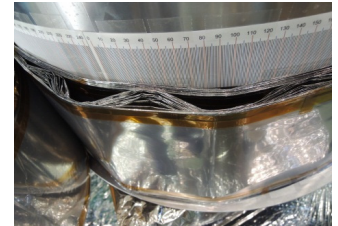


図6: 内外周差により発生した波型

これまでは矩形セルを使用した巻きつけ実験を行ってきたが、より実機に近い条件を検証するため、台形セルを使用した巻きつけ実験を計画している。また、「サンド」と「位相管理」による収納方法を実スケールで実現するための収納支援装置の設計・試作も進めている。今後は、この装置をセル展開機構と組み合わせた収納方法の検証を進める。

5. セイル展開機構の設計・試作

次期計画においては、探査機本体に搭載したイオンエンジンを使用して軌道制御を行う。この際、探査機本体がスピニングすると推力ベクトルに大きな制約が発生し獲得できる実効ΔV量が減少する。セルのスピニング展開方式との両立のため、主に以下の2つの方式について、セル展開機構の検討を進めている。

- ・ **シングルスピニング方式**
 - 探査機本体とセルが一体となってスピニングする。
- ・ **デュアルスピニング方式**
 - セイルのみをスピニングさせ、スリッピングを介して集電を行う。

両方式に対する、セル展開機構の観点での課題と検討概要を下表にまとめる。

検討課題	シングルスピニング方式	デュアルスピニング方式
セルからの集電方法 (スリッピングの開発)	IKAROSと同様 (スリッピングは不要)	大径、長寿命、大電流に適したスリッピングについて検討、試作を進めている。大型ベアリングの回転精度維持が難点。
打ち上げ振動環境に対する回転部分の保持機構	回転ガイドのみを固定するため、1箇所クラップ式のロンチロックを設ける。	回転部分 (セルも含む) の重量が大きいため、周方向8箇所クラップ式のロンチロックを設ける。
打ち上げ振動環境に対するセルのゆるみ・ごぼれ防止機構	周方向は根元をセルロンチロックで、先端部を先端マスにより拘束しゆるみ防止する。機軸方向のずれ・ごぼれは、セル収納部の上下フランジ幅を大きくすることにより抑える。	同左
展開途中のセルの周方向のずり防止方法の検討	蛇腹状に折り畳んだセルに穴をあけ、ピン止め式の セルロンチロック を追加する (図8)。	同左
ガイド棒 (セルを準静的に繰り出す支持棒) の構成	IKAROSと同様に相対回転させる。ただしベアリングは軽量化のため ローラー&レール式 の簡素な構造とする (展開時のみ使用する)。ガイド棒を解放するアクチュエータも相対回転するため、信号ラインは無線化が必要。	セル収納部を回転させるため、ガイド棒の相対回転は不要である。ただし小径スリッピングを使用する場合はハーネスを透過するためにガイド棒を片持ちにする必要がある。
全体総括	回転部分が軽量化できると、振動対策の構造も簡素であり全体的にも軽量化に製作可能である。基本的にIKAROS方式を踏襲するため技術的課題も少ない。	重量が大きい回転部を支持する構造を強化する必要がある。またロンチロックなどの機構も複雑になるため全体的に重量がかさむ。スリッピングの開発における技術的課題がある。

以上の検討結果から、デュアルスピニング方式においては回転部保持において複雑な機構を必要とし、簡易な見積もりにおいては展開機構全体の重量はシングルスピニング方式より200kg近く大きくなると思われている。軌道設計などの**システム設計の観点から実効ΔV量の損失を考慮しても、軽量化が可能なシングルスピニング方式の方が有利**であると見られ、現状ではこちらを第1案として設計を進めている (図7)。さらに検討課題に対する解決案の有効性を検証するため、セル展開機構の部分的な試作を進めており、今後、各種機能試験を行っていく予定である。

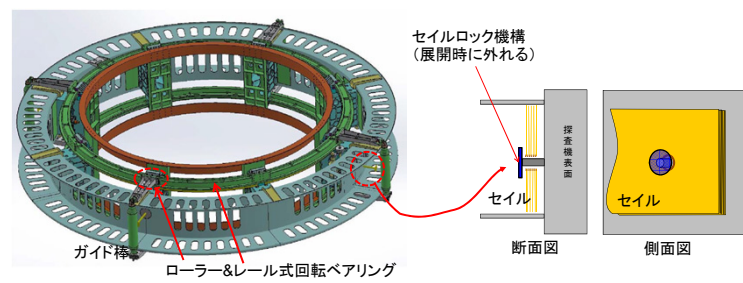


図7: シングルスピニング式セイル展開機構

図8: セイルロンチロック機構案