

宇宙大型アレイアンテナとその応用[†] Large Space Array Antenna and Its usage

黒瀬 豊敏・坂本文信^{*1‡}・上土井大助^{*2}
Toyotoshi KUROSE, Fuminobu SAKAMOTO and Daisuke JODOI

宇宙太陽光発電衛星に用いる大型構造物として、展開トラス構造物の研究開発を進めてきた。この構造方式は、シンプル/軽量で組立に高度な装置を必要とせず、数 km に及ぶ大型構造物を自動で軌道に構築できる。現在は地上実証をほぼ終えた段階であるが、この技術により、これまでにない宇宙機を実現できる可能性がある。本論文では、展開トラス構造物の技術を用いたレーダ衛星の可能性、及び現在検討を進めている次世代降水レーダ衛星について概要を報告する。

As a structure of solar power satellite, the deployable truss structure has been developed. It's almost at the stage when ground test is almost finished now. This technology has the potential to realize some kind of spacecraft which has never existed before. This paper reports that an outline of the next generation precipitation radar satellite which is using the technology of the deployable truss structure.

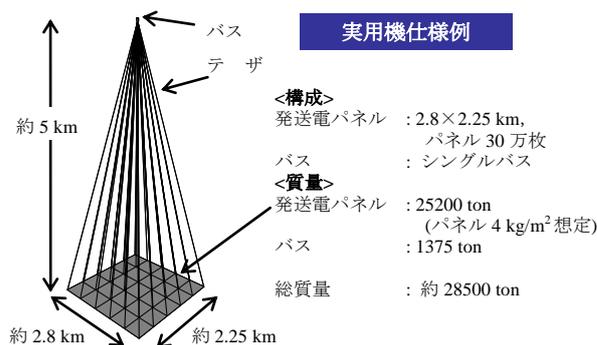
Keywords : SSPS, Space, Structure, Deployable, Radar, Precipitation, Surveillance

1. 目的および背景

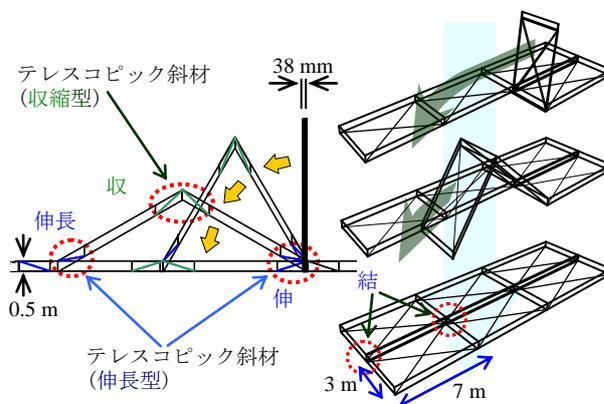
宇宙太陽光発電衛星の研究開発が進められている。これは、静止軌道に km 級の構造物を構築して太陽エネルギーを集め、マイクロ波あるいはレーザー光に変換して地上に伝送し、地上で再び電力に変換して利用する構想である。

マイクロ波によるエネルギー伝送方式の宇宙太陽光発電衛星の設計例として、発電を行う太陽電池と、地球に向かって送電を行うアレイアンテナを 1 枚のパネルにまとめ、そのパネルを数十万枚、約 2.5 km 四方の板状に並べたものがある(第 1 図)。

この送電パネルの構造方式と組立方法は、宇宙太陽光発電衛星の重要技術課題の一つであり、この対応として“展開トラス構造物”の研究開発を進めてきた(第 2 図)。その結果、現在は地上実証をほぼ終える段階となっているが、一方で宇宙太陽光発電衛星の課題としては低コストの打上、軌道間輸送に関する技術開発など、非常に大きな課題が残っており、その課題解決には数十年の研究開発期間を要すると考えられる。



第 1 図 宇宙太陽光発電衛星 設計例



第 2 図 展開トラス構造物

そこで、これまで宇宙太陽光発電衛星において研究開発を進めてきた大型構造物構造とその組立技術、マイクロ波/

[†] 第 2 回宇宙太陽発電シンポジウム, 2016 年 12 月 19-20 日, 東京にて発表

[‡] Corresponding author:

Toyotoshi Kurose. E-mail: kurose_toyotoshi@khi.co.jp

^{*1} 川崎重工業株式会社

〒504-8710 岐阜県各務原市川崎町 1 番地,
Kawasaki Heavy Industries, Ltd. 1, kawasakicho, kakamigahara city,
Gifu-Pref. 504-8710, Japan

^{*2} 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1,
Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1 Sengen, Tsukuba-shi.,
Ibaraki-ken, 305-8505, Japan
©SSPSS

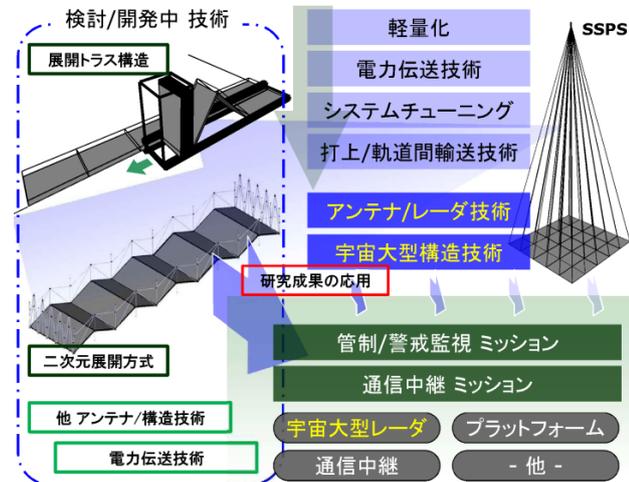
レーザによる無線電力伝送技術を他の用途に転用/活用するべく、現在その適用先の検討を進めている。それにより、宇宙太陽光発電衛星の技術を用いて様々な社会貢献ができるとともに、またその過程においては、さらなる関連技術開発の進捗が期待できる。

2. 研究開発成果のレーダ衛星への応用

宇宙太陽光発電衛星の主要技術としては、

- ・無線電力伝送技術
- ・大型構造物技術
- ・低コスト大量輸送技術

の3点が挙げられるが、これらのうち低コスト大量輸送技術については、再使用型輸送機や軌道間輸送機の研究開発が行われているが、大きな課題となっている。一方で、大型構造物技術はマイクロ波、レーザによる無線電力伝送技術と共に研究開発が進み、軌道上機の設計も可能になりつ



つある。

第3図には、大型構造物技術、及び無線電力伝送技術と、それを用いた応用サービスの例を示す。適用先としては、レーダ、通信中継、及び超大規模宇宙プラットフォームなどが考えられる。

第3図 大型構造/アンテナ技術の応用

もちろん無線電力伝送技術、及び大型構造物技術は、宇宙太陽光発電衛星に適用するためには、一層の軽量化、コストダウンなど研究開発を進める必要があるが、一方でこれらの研究開発は、ほぼそのまま、大型の宇宙レーダ衛星、通信衛星の研究開発と言い換えることができる。これまでにない規模の開口径を軌道上に設けることができ、高速大容量の通信中継や、広大な空海域をカバーして小さなターゲットを探知することができる画期的なレーダを実現できる可能性がある。

これらのうち、宇宙大型レーダ衛星の具体的な適用先として現在検討を進めている、降水レーダ衛星、航空機/船舶の管制用レーダ衛星について、以下に概要を示す。

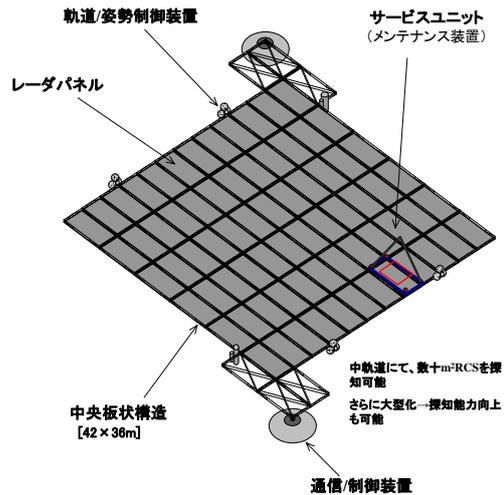
3. 宇宙大型レーダ衛星

前記の通り、これまで研究開発を進めてきた展開トラス構造物とその組立技術については、地上実証がほぼ終了し、

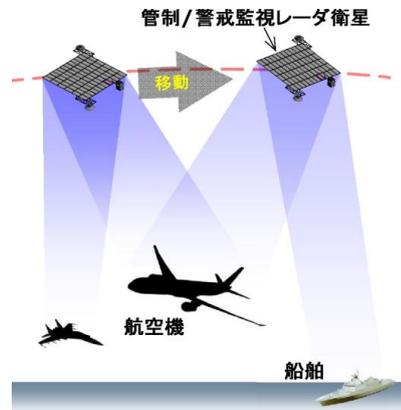
宇宙機への適用も検討できる段階である。展開トラス構造物の詳細は、参考文献1, 2に詳しい。この展開トラス構造を適用した場合、H-II B, H3 ロケットフェアリングに収納できる板状構造アンテナの大きさは最大 40 m 四方程度となるが、これを、例えば 2 GHz 帯のフェーズドアレイアンテナとすると 60 dBi 以上の開口利得が得られる。この性能は、静止軌道に配置したこの衛星が、携帯電話の中継基地として使用できる可能性を示し、地球規模の覆域を持つ通信、災害に無関係な非常通信など、様々な画期的通信ミッションが想定できる。

また、このアンテナをレーダとして利用すると、これまで実現が難しかった高性能宇宙レーダ衛星を実現し、宇宙からの航空機・船舶の管制や警戒監視を行うことも可能になると考えられる。現在は地上や航空機に搭載したレーダを必要な地域に配備して、航空機等の対象物の位置や動きを監視している。この機能を宇宙機に持たせることができれば、非常に広範囲をカバーできる画期的なセンサとなる。

例えば赤道上空高度 5,000 km の軌道に 4 機を均等に配置し、地球規模の管制/警戒監視を行うレーダを想定した場合、前記 40 m 級開口径 (第4図) であれば、数 m² RCS 以上のターゲットを探査でき、民間航空機からステルス機まで、すべての飛行物体を捕捉できる可能性がある (第5図)。



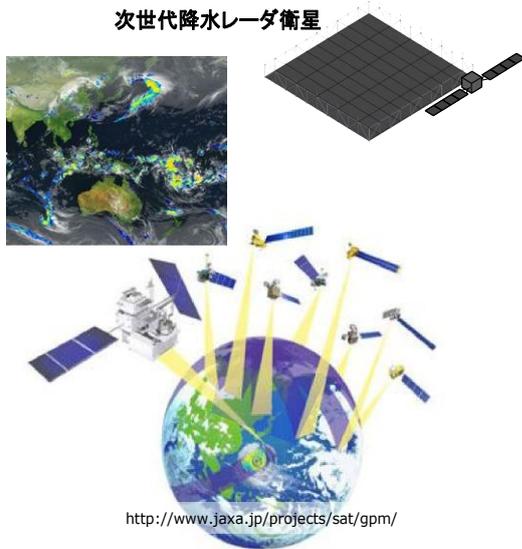
第4図 管制/警戒監視レーダ衛星 (40 m 級) 例



第5図 管制/警戒監視レーダ衛星 運用イメージ

さらに、この宇宙レーダ技術については、地球観測分野での利用として、次世代降水レーダへの適用が考えられる。現在地球全域の降水分布情報を取得するための GPM システムが稼働しているが、10機程度の低軌道衛星が3時間ごとの全地球の降水分布データを取得している。しかし地球温暖化、度重なる異常気象及びそれらの影響により災害が多発する状況を受け、常続的な降水データの取得が求められている。本目的のため、将来の降水レーダ衛星は静止衛星として、その高高度から降水分布に関するデータを取得することが検討されている。（第6図）

以下、現在検討を進めている、静止軌道から降水観測を行う宇宙大型レーダ（以下「静止降水レーダ」という）衛星について、その検討概要を示す。



第6図 次世代降水レーダ

4. 展開構造とパネル構造

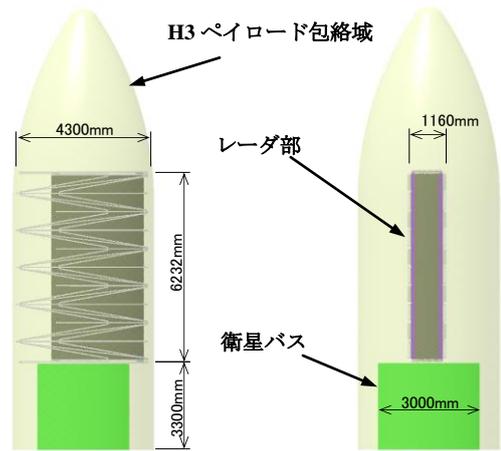
考案した展開構造及びパネル構造について概要を示す。静止降水レーダ衛星の検討条件は、以下を設定した。

- ・周波数：Ku 帯
- ・開口サイズ：30×30 m
- ・軌道：36000 km (静止軌道)
- ・打上ロケット：H3
- ・打上げ回数：1回
- ・バス：WINDS 衛星バス相当

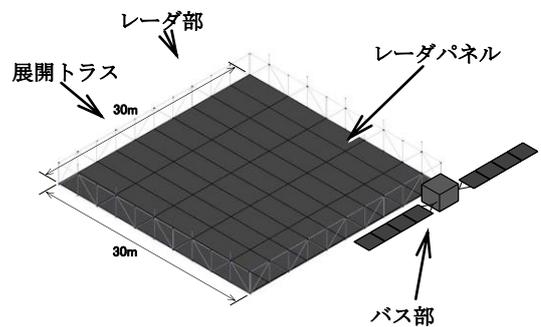
静止降水レーダ衛星は、レーダ部と衛星バス部で構成される。打上げ時のロケットフェアリング搭載状態を第7図に、軌道上での展開状態を第8図に示す。

レーダ部は、レーダパネル(6×3 m) 50枚を板状に展開した構造とし、その展開駆動及び剛性を確保するために、レーダパネル周囲に展開トラス構造を有する。

4.1 展開構造 展開トラス構造は前記のとおり、パネルを展開駆動するとともに、展開後は必要な剛性を発生する。また、ロケット一回の打上げを想定しており、そのため展開を支援する装置などを必要とせず、構造に搭載するアクチュエータにより自動展開する。



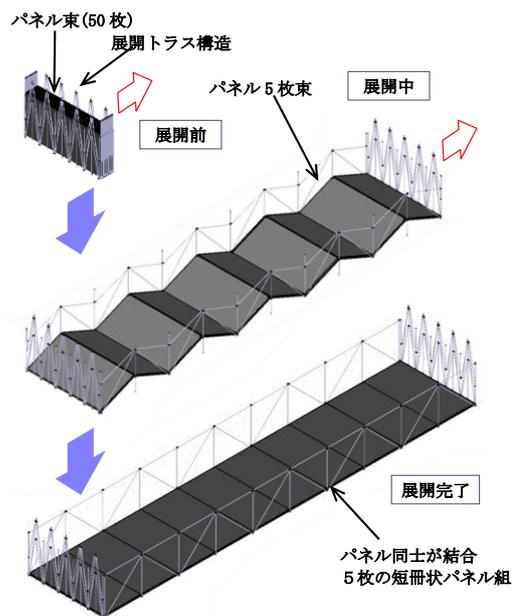
第7図 ロケットフェアリング搭載状態



第8図 軌道上展開状態

パネルの展開方法は、展開トラス構造をシンプルにすることができる、単純な二次元展開方式を採用する。ロケットフェアリングへの搭載状態は、蛇腹状に折り畳まれた展開トラス構造が50枚のレーダパネルの束を囲う形態となっており、バスの上部に設置される。

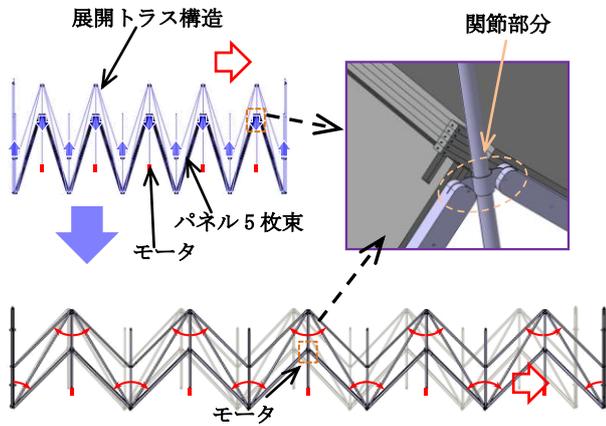
展開では、まずは5枚ずつ束となったレーダパネル10組が蛇腹状に一次展開する。



第9図 一次展開

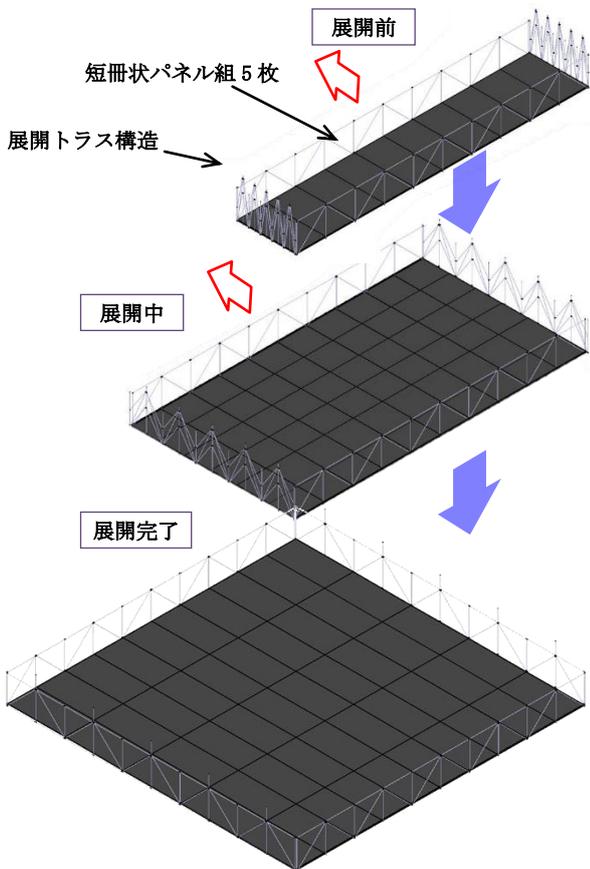
この際、その一次展開方向に折り畳まれた状態の展開トラス構造は、蛇腹が伸びるように展開駆動し、取り付けられた前記各パネル 5 枚の各束を板状に展開する。板状に展開されたパネルの組は、各層のパネル同士が結合し、5 枚の短冊状のパネル組が重なった状態となる。(第 9 図)

展開トラス構造の一次展開駆動は、モータが関節部分をスライドさせることで実現される。(第 10 図)



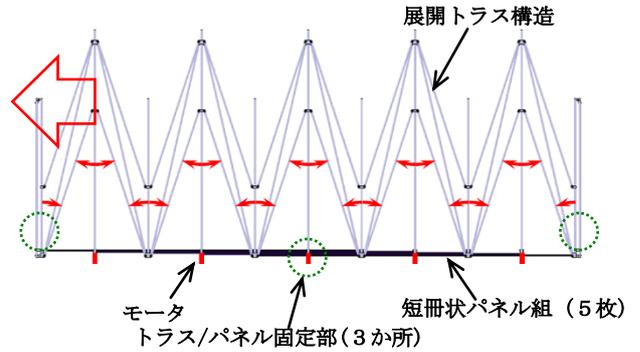
第 10 図 展開トラス一次展開駆動

引き続き二次展開を行う。展開方向に蛇腹状に折り畳まれた展開トラス構造をモータにより展開することで、重なっていた短冊状の 5 枚のパネル組を、一枚の板状に展開する。(第 11 図)



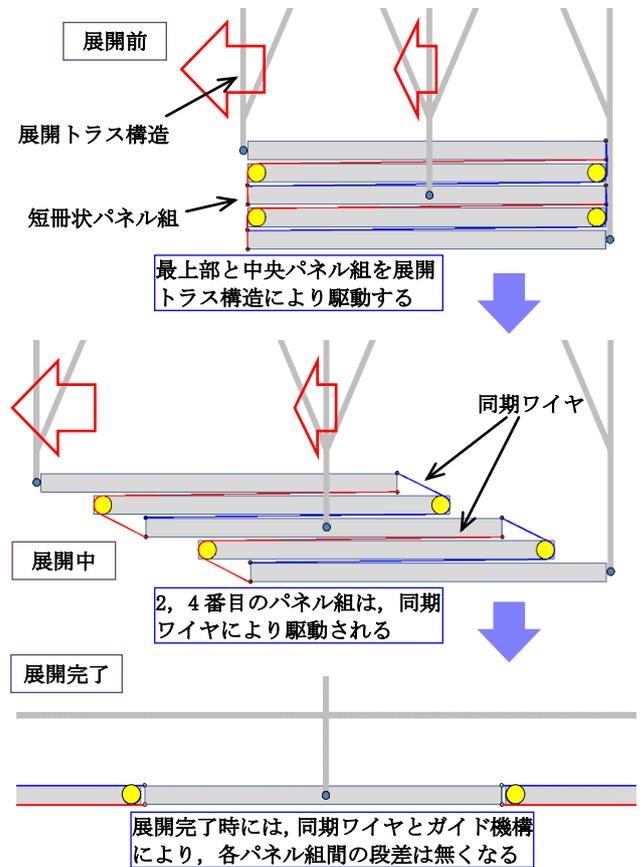
第 11 図 二次展開

第 12 図に展開トラス構造による 5 枚のパネル組の二次展開状況を示す。各短冊状パネル組は、展開トラス構造物の展開駆動に伴って、それぞれの必要量、スライド移動する。展開トラス構造は、パネル組とは端部で垂直の支柱部分が接触するが、二次展開方向に 11 本ある支柱とパネル組とは、展開中と同じ移動量(幾何学的に同じ位置関係)となるのは 3 か所のみであり、その部分(第 9 図中丸印)のみ、展開トラス構造とパネル組とは固定されている。それ以外の 8 か所は、カムフォロワとレール構造により、展開方向にスライドできるように拘束している。



第 12 図 展開トラス二次展開駆動

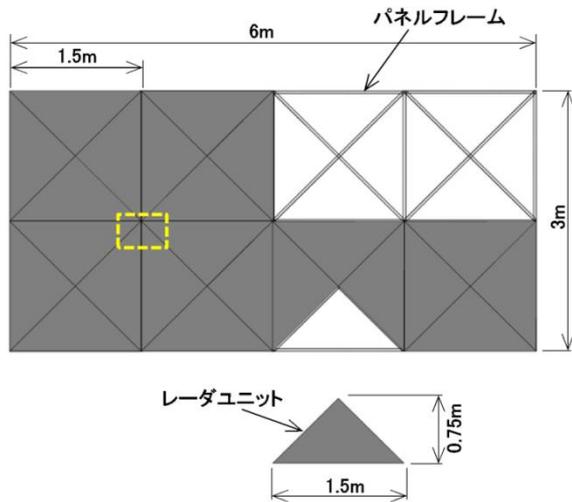
上記理由により、5 枚のパネル組のうち、2 枚(第 13 図の上から 2, 4 番目のパネル)は展開トラス構造からの駆動力は受けられない(スライドするように取り付けられている)ので、それぞれの上部及び下部パネルの半分の駆動量を幾何学的に作り出すための“同期ワイヤ構造”を有している。



第 13 図 パネル組の二次元駆動方法

同期ワイヤ構造は、2本のワイヤにより中央のパネル組（前記2, 4番目のパネル組）を、それぞれ上下パネルの中間に保つよう作用する機構で、位置はワイヤによりコントロールし、その動作のためのアクチュエータは有していない。展開完了段階では、同期ワイヤのテンションとガイド機構（第13図には図示されていない）により、隣のパネルとの段差を自動的に解消し、その状態がロックされる。この同期ワイヤ構造及び展開後の隣り合うパネル組間のロック機構は、30mに及ぶ短冊状のパネル組長手方向に数か所設け、展開完了後のパネル組の段差が発生することを防止するとともに、また固有振動数を向上させることにも役立つ。

3.2 パネル構造 前記のとおり、レーダパネルはロケットフェアリングの搭載条件から、3m×6mの大きさとしている。このレーダパネルは、レーダ機能を有する“レーダユニット”とその支持構造である“パネルフレーム”より構成する。（第14図）



第14図 レーダパネル構造

レーダユニットでは、それぞれのパッチアンテナ搭載部において高い平面度（例えば1mm rms以下）が要求されている。これを実現するため、各レーダユニットは三角形としてその隅3点をパネルフレームに固定するが、その際にレーダユニットを常に外側に引っ張る方向に力を作用させた状態となるようにすると、レーダユニットの構造が張り、必要な平面度を維持するようになる。またこのレーダユニットの3点取り付け方法では、パネルフレームの変形及び誤差がレーダユニットの面精度に影響しないこと、レーダユニット間の機械的影響がないことなど、優れた特長を有する。レーダパネルの構造材料はCFRPを想定し、パネルフレームは、斜材部分も含めて口型断面の柱状部材で、素材板厚は0.5mmとしている。

レーダユニットの大きさとしては、製造やハンドリングのしやすさを考慮して、底辺1.5m、高さ0.75mの直角二等辺三角形とし、6×3mのパネル1枚当たり、計32個のレーダユニットを搭載する。さらにレーダユニットを大型化すると取り付けポイント数が減り、ファスナやパネル構造の対応部材を削減することによる軽量化が期待できるが、一方で今後レーダ装置としての合理的なレーダユニット設計の状況を見て、その制約などを考慮し、適当なサイジングを行う必要があると考えている。

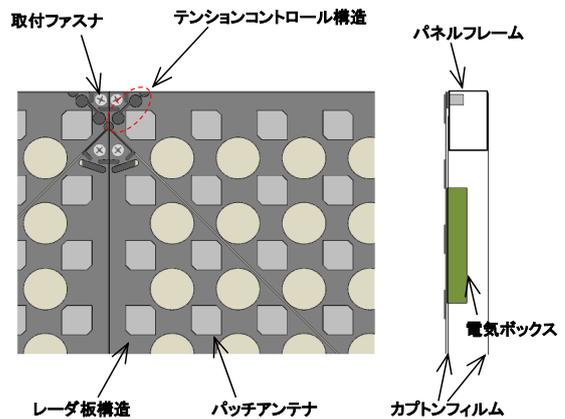
3.2.1 パネルフレーム 前記のとおり、パネルフレームには、各レーダユニットの3本の取り付けファスナに対応するナットを設ける（機械的IFはこれのみ）。

パネルフレームのレーダユニット取り付け面とその反対側の表面には、太陽光を遮る目的で熱制御構造を設ける必要があるが、この目的のために、カプトンフィルムを取り付けることとしている。詳細はシステム設計の段階で構造的な熱の影響やレーダ装置の温度条件などを考慮し、熱解析を行ったうえで決定する。

3.2.2 レーダユニット レーダユニットは、以下により構成される。

- ・ パッチアンテナ
- ・ 電気ボックス
- ・ レーダ板構造

レーダ板構造は、パッチアンテナ、レーダ電気ボックス及びそれらの配線を取り付けてレーダユニットを構成し、それをパネルフレームに取り付けるための基本的な機械的構造である。前記のとおり、パネルフレームへの3か所の取り付け点においてレーダ板構造に張力が作用するように取り付け、必要な平面度を確保する設計としている。材料は線膨張係数が小さくて軽量のCFRPを想定する。板厚は0.2~0.5mm程度を見込むが、機械的特性や製造方法などを考慮して設定する必要がある。一方の表面（地球を向いた面）にはパッチアンテナを、他面（パネル構造側面）に電気ボックスやワイヤハーネスなどを取り付ける。また、パッチアンテナ間のレーダ板構造部分には、軽量化のために軽減口を設けているが、太陽光のパネル内部（電気ボックス側）への侵入を防ぐため、パネルフレーム側同様カプトンフィルムを取り付けている。レーダユニットの三隅には、レーダ板構造にねじ止めするためのファスナ穴と、レーダ板構造に一定範囲の張力を作用させるための“テンションコントロール構造”を設けている。



第15図 レーダユニット取り付け例

テンションコントロール構造は、一定の力（例えば数十N）を常時レーダ板構造に作用させる必要がある。余分な部品を追加することなく、レーダ板構造を工夫することで対応し、工作上の精度や熱変形を考慮して、一定のばね要素を持たせるように設計する。第15図には、シンプルで軽量のテンションコントロール構造案として、レーダ板構造に適当な切れ込みを設けることにより、面内方向の引っ張り力が作用した際にはその部分が変形し、面内方向にばね要素として作用する構造を示す。作用する荷重はパネルフ

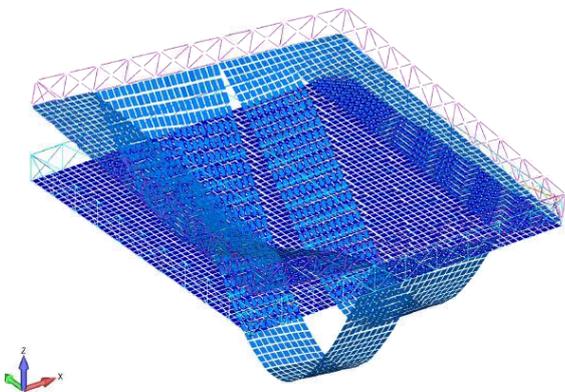
レームのナット位置とレーダ板構造のファスナ穴位置によってコントロールされる。従ってそれら位置決めには十分な精度を確保する必要があるが、加えて熱変形や誤差を許容するように設計する必要がある。また一定のばねストローク (0.5 .mm 程度を想定) も確保するように設計する。

5. 固有値, 剛性

今回検討した構造が、静止降水レーダ衛星として必要な特性を有していることを確認するため、固有振動数と剛性を解析により確認した。

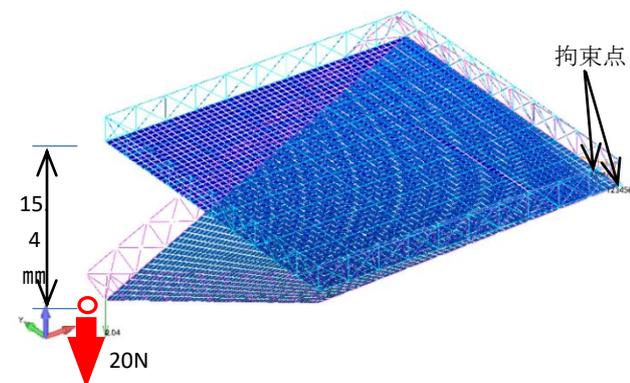
静止降水レーダ衛星には、24 時間周期で外力が作用し、したがって固有振動数は、その周期である 1.2×10^{-5} Hz よりも十分に高くする必要がある。

第 16 図は、一次の固有値解析結果例で、主に短冊状の各パネル組がそれぞれ単独で振動している状況が分かる。固有値は 3.4×10^{-3} Hz であり、前記外乱周期 (1.2×10^{-5} Hz) と比較して十分に高い値を示している。今後さらなる軽量化等の検討にも本結果を反映する。



第 16 図 固有値解析結果

また、軌道、姿勢制御時のスラスタ荷重を外力とする構造変形量についても解析を行っている。実際の衛星での状況とは異なるが最も変形量の大きくなる条件として、構造の隅を固定して、スラスタ発生荷重 20N (想定) を各方向に作用させ、その最大変形量を解析している。その結果、開口面外方向に制御力 (20N) が作用した場合の変形量が 15.4 mm で最大であり、十分に小さく、これにより制御荷重に対して十分な剛性を有することを確認した。



第 17 図 スラスタ荷重作用時解析結果例

6. 課題

これまで、構造を中心に静止降水レーダ衛星の成立性を検討し、レーダ構造の展開トラス構造による構成、展開方法については、一定の成立性を有する案が提示できたと考える。一方、レーダパネルについてはレーダの詳細設計を並行して進め、その構造に関する成立性を同時に確認する必要がある、その方向で今後検討を行っていく。

上記現状における静止降水レーダ衛星の構造設計における課題としては、以下が挙げられる。

＜軽量化＞：レーダパネルの質量検討、軽量化を進める必要がある。レーダの構成要素の中では、レーダユニットの占める割合が最も大きく、その質量低減が衛星全体の成立性に大きく影響する。

＜レーダパネル設計＞：レーダ電気設計とその結果を構造設計へ反映する必要がある。

＜システムチューニング＞：構造、電気系の設計を進めるが、バス、ロンチロック、制御等を含む、衛星全体のシステムチューニングを行う。

＜試験方法＞：展開構造の総合的な特性を確認するためには軌道上実験が必要である。また、それに向けた地上展開実験が必要である。

＜大型化対応＞：今回検討した展開構造やパネル構造について、宇宙太陽光発電衛星構造等に適用するための大型化検討が必要である。

7. おわりに

宇宙太陽光発電衛星の実現に向けて、アレイアンテナ方式の宇宙大型レーダ衛星を検討している。これは、通信中継、観測、警戒監視等のミッションにおいて、画期的なサービスを提供できる可能性がある。

その具体的な例として、静止降水レーダ衛星を検討している。ロケット一機で 30 m 級のレーダを静止軌道に構築することを目指す。このレーダは、展開構造とパネル構造により構成されるが、今回はその構造と展開方法について検討を行った。また、レーダパネルは特に軽量化が必要であるため、板状の構造にアンテナとレーダ電気装置を搭載する新たな構造を提案し、検討を行った。

今後は、まずは最も質量構成割合が大きいレーダパネルの設計を進め、レーダパネルとその構造を明確化するとともに、衛星としての成立性を確認する。また展開構造では、詳細設計を進めてその成立性を確認するとともに、地上での二次元展開実験方法や軌道上実証実験方法などについても検討を進める。

参考文献

- 1) 坂本文信, 小林由加子, 黒瀬豊敏, 上土井大助, 藤田辰人: SSPS 展開トラス構造物組立に関する実験装置の設計と軌道上での姿勢安定性の検討, 第 58 回宇宙科学技術連合講演会, 3H12 (2014).
- 2) 黒瀬豊敏, 上土井大助: 展開トラス構造を用いた宇宙プラットフォーム, 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, 1L16 (2015).
- 3) 坂本文信, 黒瀬豊敏, 上土井大助: 宇宙大型アレイアンテナの構造と展開方法, 第 60 回宇宙科学技術連合講演会, 4D03 (2016).

(2017. 2. 3 受付)