

Development of deployable truss structure and new structure concept for SSPS,

Yukako KOBAYASHI, Fuminobu SAKAMOTO, Toyotoshi KUROSE(KHI)
Daisuke JOUDOI, Tatsuhito FUJITA (JAXA)

Abstract

This paper presents about an experimental methods of deployable truss structure, which JAXA/KHI developed, in order to confirm it's assembly technology, the stability analysis of the technical demonstrator and a practical use SSPS and development project.

SSPS has a huge quadrangle panel structure which has each side lengths of about 2, 500 meters in the SSPS basic model. This panel has two functions which are power generation and energy transmission to the earth. This panel structure is a huge board-formed structure, and it was made from the deployable truss structure as structure/assembly methods of quadrangle panel structure. The deployable truss structure will be assembled automatically on orbit and after the assembling, this structure provide necessary and sufficient strength and stiffness condition. The most unique mechanical functions of this structure are “deployment” and “connection”. These functions have been tested and confirmed since 2010. Standing on these results, JAXA/KHI are considering each assembly methods and development scenarios about the configurations for the flight model and the technical demonstrator. Moreover, the deployable truss structure and some equipment for technical test on orbit are being developed. Further consideration will be needed to study the stability analysis and the methods of orbital control and attitude control.

展開トラス構造物の開発と太陽光発電衛星構造案^A

小林由加子、坂本文信、黒瀬豊敏（川崎重工）
上土井大助、藤田辰人（JAXA）

1. はじめに

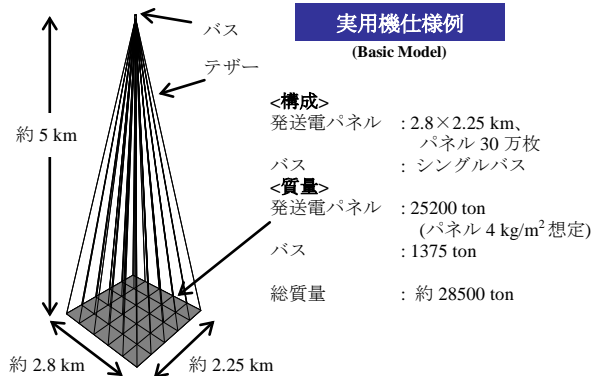


図1 実用機モデル (Basic Model)

SSPS 実用機の一案として、一辺が 2500m 程度の発送電パネルを有するモデルが想定されている(図1)。発送電パネル部は巨大な板状の構造であるが、この発送電パネル部分等の構造/組立方式として、“展開トラス構造物”の開発を進めている。この展開トラス構造物は、軌道上において自動で超大型の構造物を組み立てることができ、組立後はその構造に要求される強度剛性を持たせることができる。

この展開トラス構造物の基本的な技術である、“展開”と“結合”機能の確認を目的に、2010 年度から開発実験を実施、良好な結果を得た。その成果を踏まえ、実用機、および H-II B1～数機での打上げを想定

した技術実証機の具体的な仕様とその組立方法、および開発スケジュールを検討している。現在は、軌道上実証実験を考慮した展開トラス構造物と、組立に必要な各機器の開発を行っている。また、本構造を用いた技術実証機や実用機の、軌道上の組立後と組立中の軌道・姿勢・形状の安定性。制御方法の検討に着手している。

本論文では、一通りの組立要素技術を確認することを目的とした開発中の実験装置及びその実験方法と、想定する技術実証機/実用機の運用状態での安定性解析、および今後の開発計画について報告する。

2. 展開トラス構造

2.1. 概要

展開トラス構造物概要を図2に示す。

展開トラス構造物には、発送電パネルが取付られている。打上時には、長く連なった展開トラス構造物が蛇腹状に薄く折りたたまれており、その際の厚みは、発送電パネルの厚さ(38mm 想定)に収まる。軌道上でそのトラスが 2 枚 1 組ずつ直線状に展開されると、パネル周囲のトラス構造が立体的に立ち上がり、テレスコピック斜材の長さが固定されると形状が固定され、必要な剛性を有するようになる。またこの展開トラス構造物は、接合方向(図2参照)だけではなく、伸展方向(図2参照)にも、端部に新たな展開トラス構造物を結合して追加することができ、これを繰り返すことで、非常に大きな面積の板状構造物を構築できる。

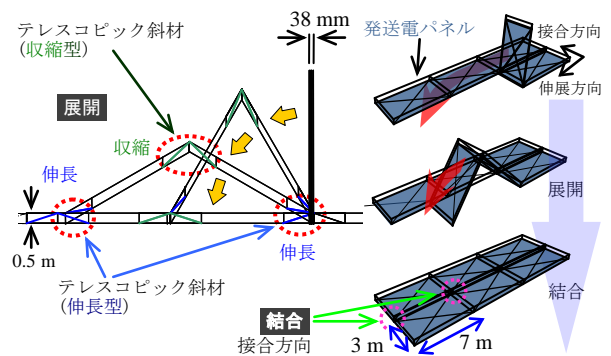


図2 展開トラス構造物

3. 展開トラス構造物組立シナリオ

実用機の軌道上での展開トラス構造物組立シナリオとして、以下の①～⑦を想定する(図3)。

- ①コンテナセット輸送：展開トラス構造物を、コンテナに収納し輸送する。コンテナは複数個連結した状態で静止軌道に輸送する。
- ②組立準備：静止軌道上に輸送後、展開装置とサービスユニットの配備を行う。
- ③1 列目組立：コンテナに収納された展開トラス構造物を展開装置とサービスユニットで展開する。
- ④コンテナ交換：RMS により展開装置から空になったコンテナを取外し 新たなコンテナと取替える。
- ⑤2 列目組立：展開装置を用い、展開トラス構造物の展開と既設トラスとの接合方向の結合を行う。

⑥ 伸展方向へのトラス結合：伸展方向に新たな展開トラス構造物を結合する。

⑦ コンテナセットの追加：コンテナセットを追加し、複数の展開装置を用いて、同時に展開トラス構造物の組立を進める。

⑦以降、複数の各展開装置が①～⑥のシーケンスを繰り返すことにより、実用機の発送電パネル(2.5 km四方)を、1年以内(目標)に組み立てることを想定する。

4. 2012年度までの地上実証実験成果

展開トラス構造物の基本機能である、組立シナリオ⑤の自動展開/接合方向結合機能を、2/7スケールの展開トラス構造物の供試体を製作し、先行して展開結合機能地上実証実験で確認した。実験装置は、展開トラス構造物、展開と結合を行う展開装置、実験装置を吊り下げて支持する重力補償装置により構成する。(図4)

実験は、展開トラス構造物1列6枚を展開完了状態(既設トラス)で設置し、その既設トラスに対して2列目の展開トラス構造物を展開装置により自動展開しながら、既設トラスに対して結合(接合方向の結合)を行った。その結果、以下を確認した。

- ・自動展開/結合(接合方向)
- ・展開後の展開トラス構造物の剛性
- ・重力補償装置を用いた地上実験方法

本成果をもとに設計を進め、実用機(図1)及び技術実証機の各仕様やそれらの組立方法、技術要素とその開発シナリオ等を検討している。

5. 全基本機能地上実証実験

5.1. 目的

2015年度に実施を予定している全基本機能地上実証実験では、残りの重要な組立に関する技術要素である組立シナリオ④、⑥のコンテナ交換(コンテナ/展開装置の分離/結合機能)や伸展方向結合(伸展方向結合装置機能)を含む組立シナリオ②～⑥を通して実施し、全ての基本組立要素についてその成立性を確認する。

5.2. 実験概要

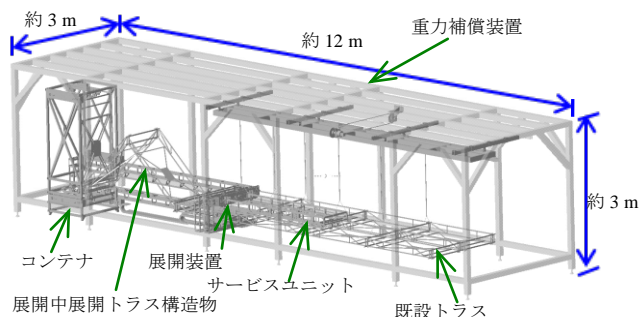


図5 全基本機能地上実証実験供試体概要

前項の組立シナリオ⑥の検証のため、展開結合機能地上実証実験で使用した展開トラス構造物に、伸展方向結合機構を追加する。伸展方向に追加する展開トラス構造物を、展開装置のトラス展開機構によりパネル法線方向に押込むような動作を行うことによって、ラッチ部分が啮合する。

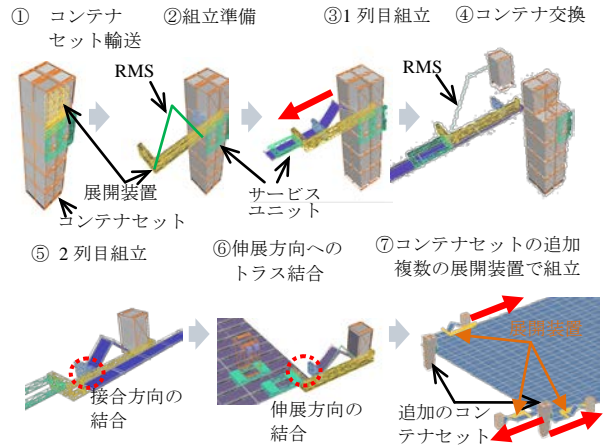


図3 展開トラス構造物組立シナリオ

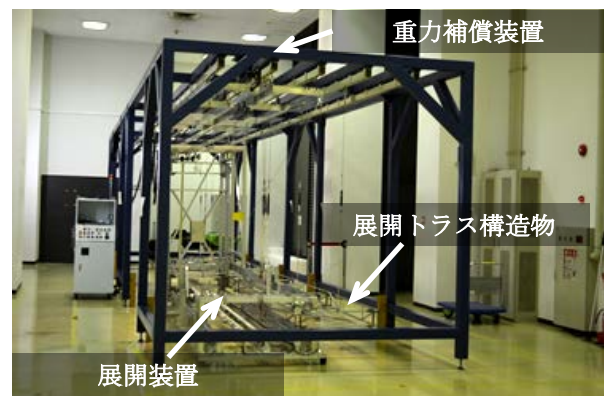


図4 展開結合機能地上実証実験

全基本機能地上実証実験の供試体概要を図5に示す。また、実験シーケンスを図6に示す。前項組み立てシナリオの②に相当するコンテナ/展開装置/サービスユニットの結合から、⑥に相当する伸展方向のトラス追加までのシーケンスを実施する。ただし、今回 RMS 関連部分は手動での対応とする。

5.3. 供試体各要素

<展開トラス構造物>

前項の組立シナリオ⑥の検証のため、展開結合機能地上実証実験で使用した展開トラス構造物に、伸展方向結合機構を追加する。伸展方向に追加する展開トラス構造物を、展開装置のトラス展開機構によりパネル法線方向に押込むような動作を行うことによって、ラッチ部分が啮合する。

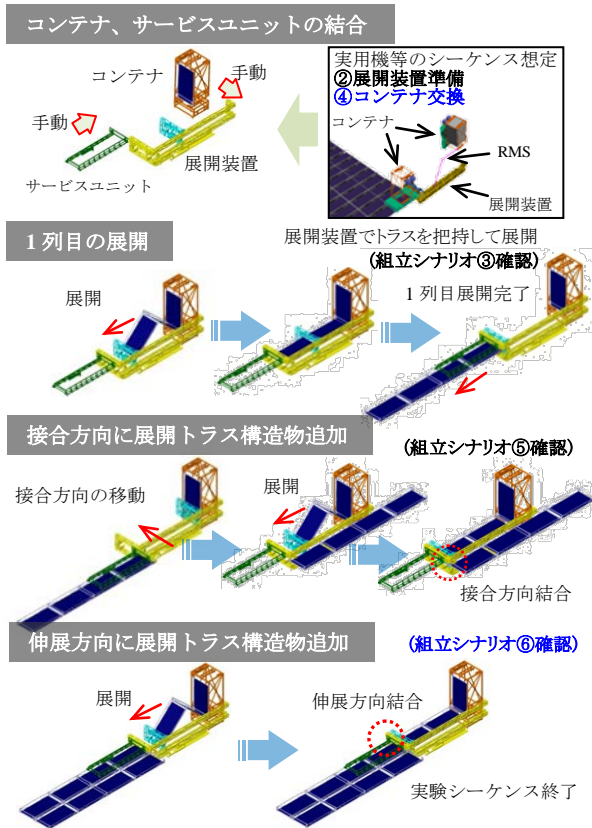


図6 全基本機能地上実証実験シーケンス

するための機構、及びサービスユニット移動機構により構成する。サービスユニット移動機構の爪が既設トラスを把持して送ることにより、トラス上を移動することができる。

＜重力補償装置＞

重力補償装置は、展開装置移動機構動作時に既設トラスを接合方向に移動させる必要があるため、展開結合機能地上実証実験において用いた同装置を改修して用いる。

5.4. 全基本機能地上実証実験のスケジュール

全基本機能地上実証実験のスケジュールを表1に示す。2013年度は基本設計と展開装置のフレームの製作を行った。2014年度は展開トラス構造物の改修、展開装置へのコンテナ結合機構の追加、コンテナのメインフレーム構造の製作を行い、2015年度には組立シーケンス確認実験を実施する予定である。

表1 全基本機能地上実証実験スケジュール

| 2013年度 展開装置フレームの製作 | 2014年度 展開装置/コンテナ製作 | 2015年度 全機能地上実証実験 |
|---|---|---|
| | | |
| <p>＜目的＞</p> <ul style="list-style-type: none"> 地上実証実験装置の設計 展開装置のフレーム構造の製作 | <p>＜目的＞</p> <ul style="list-style-type: none"> コンテナのフレームと展開装置結合機構の製作 展開装置のフレームにコンテナ結合機構を追加し、機能確認 展開トラス構造物の改修 | <p>＜目的＞</p> <ul style="list-style-type: none"> 一連の組立シーケンスの成立性を確認 |

6. 技術実証機および実用機の姿勢安定性

展開トラス構造方式により構築する、実用機、および技術実証機の、定量的な成立性の確認が必要である。運用状態での安定性のほか、環境条件、運用条件に即した、軌道制御、姿勢/制振制御についてもその方法と成立性を検討する必要がある。

一方、各機体の組立においては、その組立途中の機体が様々な規模/形態をとり、またそれぞれの状況でのユニー

＜展開装置＞

展開トラス構造物の自動展開及び既設トラスとの自動結合も、展開装置が行う。展開装置はフレーム、トラス展開機構、展開装置移動機構、トラス押込機構及びコンテナ結合機構で構成する。実機を想定し、軽量化を図るため、フレームにはトラス構造を採用している。トラス展開機構は、コンテナに蛇腹状に折りたたまれ収納されている展開トラス構造物の前端を把持し、コンテナから引っ張り出すことにより展開を行う。接合/伸展方向の結合のために、展開したトラス構造を所定の位置で押下げる機能を有している。展開装置移動機構は、所定のトラス展開完了後、次の列を展開するため展開装置を平行に移動する機能を有する。コンテナ結合機構はコンテナ交換の際に、コンテナ/展開装置の結合/分離を行う。

＜コンテナ＞

コンテナは、収納する展開トラス構造物を送り出す機構、展開装置との結合するための機構、およびフレーム構造により構成する。コンテナに収納された展開トラス構造物を上部/下部トラス送り機構によりコンテナから送出し、また展開中の展開トラス構造物の後端を把持する機能を有する。

＜サービスユニット＞

サービスユニットは、組立の際、必要に応じて展開装置を移動させ、また展開装置がパネルを展開する際には共調してそのパネルを適時支持する。サービスユニットは、フレーム構造、コンテナと同様の展開装置との結合

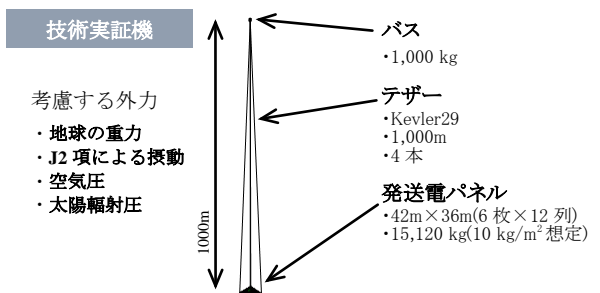


図7 技術実証機の解析モデルの形態

クな制御等要求が発生すること、また、組み立て作業などに伴う機体への加振力の付加などが予想され、組立状況に応じたシンプルで合理的な制御方法と、その成立性を確認する必要があることが予想される。

〈技術実証機の姿勢安定性〉

モデルとして設定する技術実証機の、発電電パネルの運用時のサイズは、H-II B による一回の打上で構築可能な 42m×36m と設定する。姿勢安定は実用機(BASIC MODEL)と同様にテザーとバスを用いた重力傾斜安定を用いる形態とした(図7)。パネル面密度は 10kg/m² とする。

座標系として、慣性座標系と軌道座標系の2つの座標系を設定する。慣性座標系は、地心を中心として春分点から日心の方向に X 軸、地球黄道面法線方向に Z 軸、右手系をなす方向に Y 軸をとる。軌道座標系は衛星の質量中心を中心とし、進行方向に x 軸、地心の方向に z 軸、右手系をなす方向に y 軸をとる。(図8)

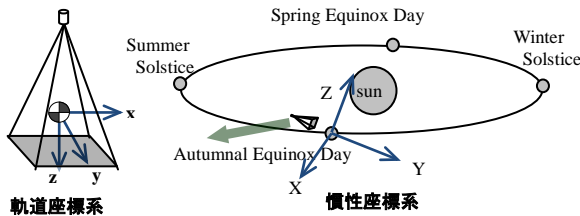


図8 解析に用いた座標系

技術実証機の重心周りの慣性モーメントは、 $I_x=9.396E+08 \text{ kg/m}^2$ 、 $I_y=9.402E+08 \text{ kg/m}^2$ 、 $I_z=3.813E+06 \text{ kg/m}^2$ となり、宇宙機の重力傾斜安定条件 $I_y > I_x > I_z$ を満たすことを確認した。各軸周りの固有角振動数は、軌道角速度を ω_0 とすると、 $\omega_x=2.00 \omega_0$ 、 $\omega_y=1.73 \omega_0$ 、 $\omega_z=0.39 \omega_0$ となる。

〈実用機の姿勢安定性〉

実用機のモデル仕様を、前述の図1とする。80枚x152枚(560m x 456m)のパネルを1ユニットとし、各ユニットの4隅をテザーで懸架する。

この実用機の重心周りの慣性モーメントは、 $I_x=3.512E+13 \text{ kg/m}^2$ 、 $I_y=4.074E+13 \text{ kg/m}^2$ 、 $I_z=2.775E+13 \text{ kg/m}^2$ と計算でき、 $I_y > I_x > I_z$ となって重力傾斜の安定条件を満たす。角軸周りの固有角振動数は軌道角速度を ω_0 とすると $\omega_x=1.22 \omega_0$ 、 $\omega_y=0.74 \omega_0$ 、 $\omega_z=0.45 \omega_0$ となる。

〈シミュレーション解析〉

前記技術実証機、実用機想定モデルの、太陽光輻射圧や J2 項等を考慮した実運用環境条件下における、シミュレーションによる定量的安定性解析を実施している。現状最終結論は得ていないが、各機体ともに運用状態における安定性/成立性は確認できる見込みであり、現在、解析結果の検証を進めている段階である。その後、前記3章において示した組立シナリオの各状況における軌道、姿勢、制振等制御方法とその成立性を確認するが、必要に応じて組立シナリオの見直しを含めて、調整を行ってゆくことになるものと考えている。

7. 今後の計画

〈課題/開発シナリオ〉

展開トラス構造物組立に関して、2015年度中を目途にその成立性確認を目指す予定であるが、具体的には以下につき、基本的な確認を行う必要がある。

- ・組立に関する技術要素成立性
- ・運用/組立時の軌道/姿勢/制振制御方法と成立性

現在、構造の組立において最重要な要素である展開装置の製作、また運用状態での安定性解析を進めているが、以下課題について今後検討を進める。

- ・サービスユニット/コンテナの設計具体化
- ・衛星組立方法及び各状態での制御方法との調整

上記課題を検討、地上実験を行うことにより、2015年度には展開トラス構造物組立に関する一通りの検討は一段落する予定である。その後、宇宙環境での成立性確認のための軌道上実験を経て、技術実証機、実用機を順次開発することを計画する。(表2)

表2 構造系開発シナリオ案

| 技術項目 | 地上実証実験 | 基礎技術実験 | | | | | 軌道上実証実験 | | | | | 実用機 | |
|--------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|-----|--|
| | | 2014年度 | 2020年度 | 2025年度 | 2030年度 | 2035年度 | 2014年度 | 2020年度 | 2025年度 | 2030年度 | 2035年度 | | |
| 開発/製造 | 地上実証実験方法 | ■ | | | | | | | | | | | |
| | 開発スケジュール/シナリオ | | | | | | | | | | | | |
| 打ち上げ | 高密度搭載方法 | ■ | | | | | | | | | | | |
| | 輸送機 I/F | | | | | | | | | | | | |
| 軌道投入 | 軌道制御 | | | | | | | | | | | | |
| | 姿勢制御 | | | | | | | | | | | | |
| | パージング | | | | | | | | | | | | |
| 構造組立 | 構造方式 | | | | | | | | | | | | |
| | 展開/結合方式 | | | | | | | | | | | | |
| | 軌道制御 | | | | | | | | | | | | |
| | 姿勢制御 | | | | | | | | | | | | |
| テザー組立 | スタック時のリカバリ方法 | | | | | | | | | | | | |
| | テザー組立方法 | | | | | | | | | | | | |
| 軌道修正 | 運用時の軌道制御 | | | | | | | | | | | | |
| | 運用時の姿勢制御方法 | | | | | | | | | | | | |
| 姿勢制御 | 制振制御 | | | | | | | | | | | | |
| | 制振制御 | | | | | | | | | | | | |
| メンテナンス | パネル交換方法 | | | | | | | | | | | | |
| | テザー交換方法 | | | | | | | | | | | | |
| | 構造メンテナンス方法 | | | | | | | | | | | | |
| | ストレージ補給方法 | | | | | | | | | | | | |

＜発展性検討＞

展開トラス構造とその組立技術を応用した、組立におけるより成立性の高い SSPS 構造方式についても検討を進めている。展開トラス構造方式では、物資輸送にコンテナを用いることを想定するが、輸送後の空きコンテナのうち、一部をバスとして利用、残ったコンテナを用いて 初送電パネル部とバス部とを繋ぐように支柱構造を設けると、テザーを用いない宇宙太陽光発電衛星(図9)が提案できる。図9は鏡ユニットを有するが、これは柱状の展開トラス構造物を用いた枠/骨組構造にフィルム状の鏡を張ったもので、発送電パネル部の輸送/組立技術にフィルム展開の技術を加えることで実現できると考えられる。この鏡ユニットを除いた構造の構築に必要な物資輸送量(コンテナ数)は、本論文で想定する図1の実用機と同じである。

展開構造は立体構造も容易に作るができるが、これらも考慮し、他衛星用の宇宙大型構造物への応用も検討が可能である。これまでにない大きな通信中継用の高利得アンテナ、観測監視用等のレーダ、電力/通信/排熱/軌道等制御を提供する大型の汎用無人プラットフォームや、次世代の宇宙ステーション/宇宙ホテル、軌道上ドック等の大型構造にも利用できると考えられる。構造方式の地上スピノフも含めて、今後応用展開を検討する。

8. まとめ

展開トラス構造を用いた SSPS の構造/組立に関する成立性の確認を進めている。現在は、発送電パネル部の組立技術の総合的な確認を目的とした実験を 2015 年度に行う計画で、主要組立関連装置である 展開装置、サービスユニット/コンテナ、試験治具類の開発を進めている。

実用機、技術実証機が重力傾斜の安定条件を満足することを確認した。また、運用状態での形態・姿勢・軌道に関する定量的な安定性を確認するため、シミュレーション解析を進めているが、実用機、技術実証機ともに安定であることを確認できる見込みである。

今後は、運用状態、および組立途中の各状態における、軌道/姿勢/制振制御方法とその効果を検討、またその成果を用いて、組立方法の見直し等調整を行ってゆく。そのほか、より確実な組立を目指した新たな構造の検討、また展開トラス構造を用いた他大型宇宙機/地上機器応用等についても可能性を検討してゆく。

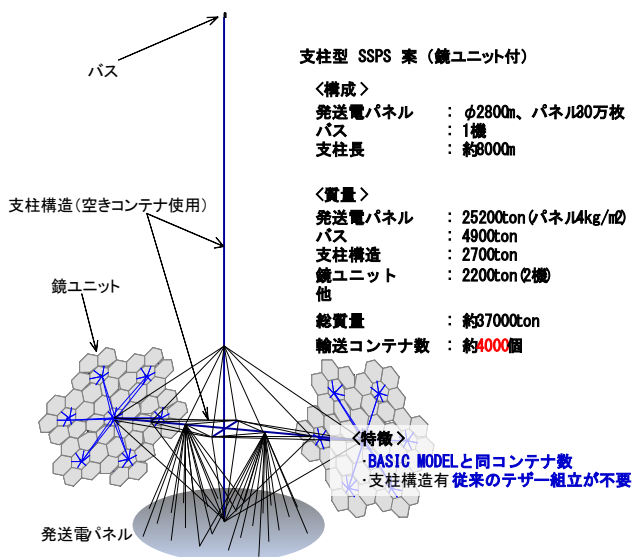


図9 支柱型 SSPS 案(鏡ユニット付)

参考文献

- 1) 小林、黒瀬、上土井、藤田：「宇宙太陽光利用展開トラス構造試作実験」，第 55 回宇宙科学技術連合講演会，JSASS-2011-4125，2011.
- 2) 小林、黒瀬、上土井、藤田：「SSPS 展開トラス構造用展開装置機能確認実験」，第 56 回宇宙科学技術連合講演会，JSASS-2012-4570，2012.
- 3) 小林、坂本、黒瀬、上土井、藤田：「SSPS 展開トラス構造物組立における展開・結合技術の地上実証実験」，第 57 回宇宙科学技術連合講演会，JSASS-2013-4480，2013