

3C18 SSPS 展開トラス構造用展開装置機能確認試験

○小林由加子、黒瀬豊敏（川崎重工業）、上土井大助、藤田辰人（宇宙航空研究開発機構）

Function Test of Developable Equipment for Deployable Truss Structure on SSPS

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

Key Words: SSPS, Deployable Truss Structure, Developable Equipment, Function Test

Abstract

SSPS is considered that spread out huge solar panels on geostationary orbit. As the satellite has a huge plate-like structure of 2500 square meters, the authors suggested building it up by Deployable Truss Structure. And to develop and join them automatically on the orbit, we also invented Developable Equipment and carried out function test for it. This paper reports results of the function test and shows the development scenario for technological demonstrator and practical model with the structure and the equipment.

1. はじめに

静止軌道に構築する巨大な宇宙太陽光発電システム(SSPS)が検討されている。この衛星は一辺が数 km に及ぶ巨大な板状構造を有するが、対応する構造方式として“展開トラス構造”の開発を進めている。この展開トラス構造を軌道上にて自動で板状に組み立てる“展開装置”を開発、機能確認試験を実施したので、その成果を報告する。また、本トラス構造/展開装置を用いた技術実証機、実用機、および今後の開発シナリオも併せて紹介する。

2. 展開トラス構造

2.1. 概要

SSPS の実用機としては、たとえば一辺が 2500 m 程度の発電パネルを有する図 1 に示すモデルが想定できる。20000 t を超える質量となることが予想され、その構造には必要な強度/剛性のほか、軽量化、

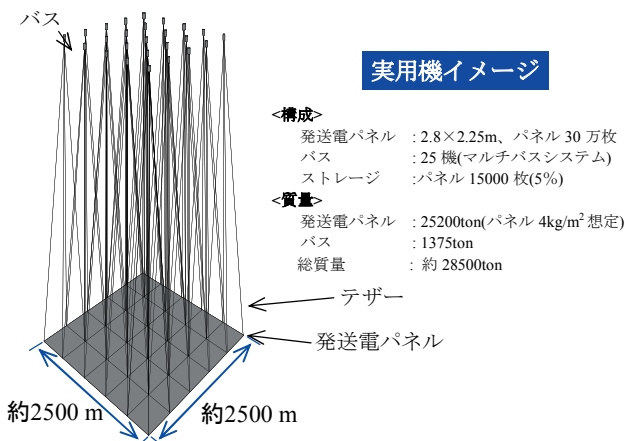


図 1 想定する実用機

打上時の小型化、また静止軌道における自動組み立てを考慮して、シンプルで簡易な組立方法であることが求められる。

この要求に対応する発電パネルの構造として、展開トラス構造を考案し開発を進めている（図 2）。この展開トラス構造は、打上収納時には長く連なった発電パネルが蛇腹状に薄く折りたたまれており、その際の厚みは構成部材の径(38 mm 想定)程度である。軌道上でそのパネルが 2 枚 1 組ずつ直線状に展開されると、パネル周囲に薄く折りたたまれている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安定、必要な剛性を有するようになる。展開済み(既設)のパネルには、この展開トラス構造の四隅に設けた結合機構により、順に固定してゆく。この展開トラス構造は、シンプルで軽量、打上時の収納効率が高い、特性調整が容易で組立時にロボットなど高度な装置が不要などの優れた特徴を有する。

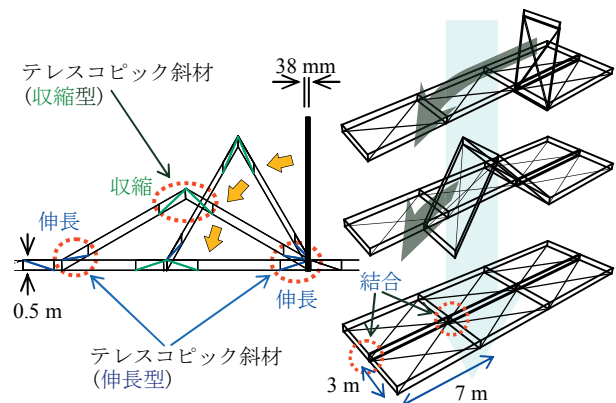
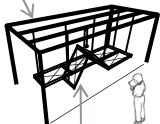

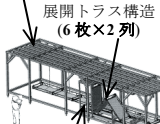


図 2 展開トラス構造

2.2 地上実証実験計画

この展開トラス構造の、自動展開方法を含む機能性能の確認を目的に、2010年度から3年間の予定で地上実証を進めている(表1)。

表1 地上実証(その1) 概要

2010年度 ＜試作試験＞	2011年度 ＜機能確認試験＞	2012年度 ＜地上実証実験＞
重力補償試験装置#1  展開トラス構造 (3枚×2列) 試験場所: KHI 岐阜工場	重力補償試験装置#2  展開トラス構造 (3枚×2列) 展開装置 試験場所: KHI 岐阜工場	重力補償試験装置#2  展開トラス構造 (6枚×2列) 展開装置 試験場所: TKSC
＜試験目的＞ ・展開トラス構造の基本機能確認 ・重力補償試験方法確認	＜試験目的＞ ・展開装置の機能性能確認 ・重力補償試験装置#2機能確認	＜試験目的＞ ・展開トラス構造の自動展開/結合機能確認 ・展開トラス構造の基本機能確認

2010年度は実用機/技術実証機の2/7程度の展開トラス構造供試体(約1.7×0.9m)をパネル6枚分製作し、展開/結合を手動で操作、機能を確認した。2011年度はこの展開/結合を自動で行うための“展開装置”を開発し、機能確認を行った(本報告)。2012年度は展開トラス構造をパネル12枚分に増やし、地上実証として展開/結合機能に関する最終確認を行うことを予定する。またこの地上実証実験においては、宇宙構造物の地上実証実験方法の確認も目的の1つとしている。重力補償試験装置を開発し、展開トラス構造および展開装置を吊り下げ支持している(図3)。

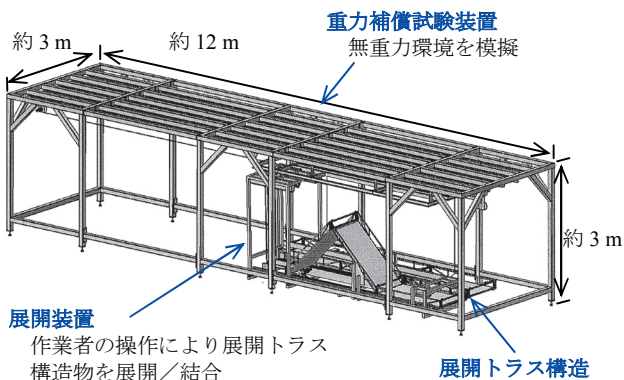


図3 機能確認試験供試体概要

3. 試験

3.1. 供試体

＜展開トラス構造＞

手動による展開/結合機能を確認するために2010年度製作した展開トラス構造供試体を、そのまま流用した(図4)。現実的な試験装置規模や部品/構造製作精度を考慮し、展開トラス構造供試体は実用/技術

実証機のおおよそ2/7の大きさ、パネル1枚分で1685×920×170mm、枚数は6枚(3枚×2列)としている。主要構造部分の材料はアルミ合金である。

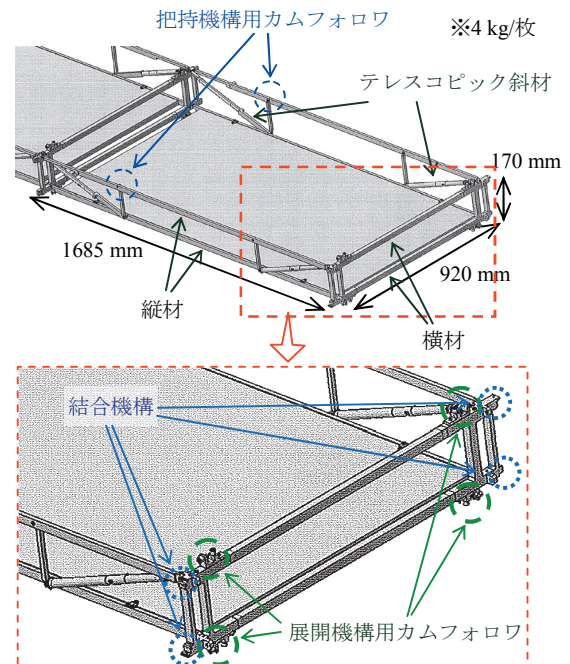


図4 供試体(展開トラス構造)

＜展開装置＞

前記2/7サイズの展開トラス構造に対応する展開装置を新規に設計製作した(図5)。

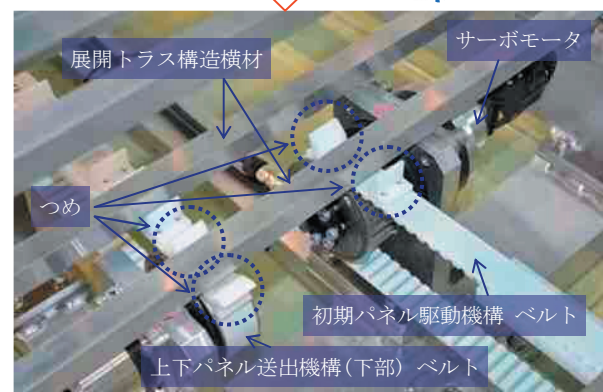
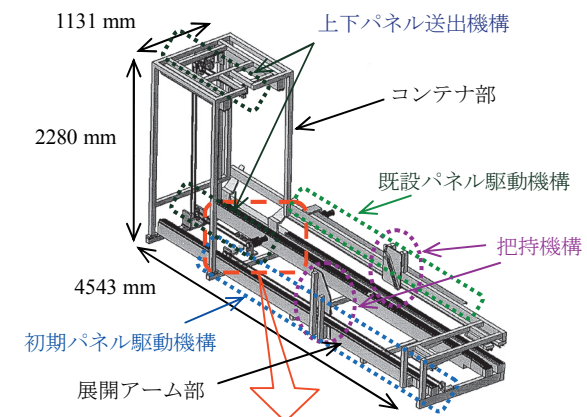


図5 供試体(展開装置)

主要な仕様は、以下の通り。

- ・寸法 4543×2280×1131 mm
- ・質量 93.5 kg
- ・材料 アルミ合金(主構成)
- ・サーボモータ 3個搭載

この展開装置は展開トラス構造の展開/結合を行うための機能を有し、各部を駆動するために以下機構を設けている。

- ・上下パネル送出機構
収納状態の展開トラス構造を展開可能位置に、順に送り出すための機構
- ・初期パネル駆動機構
各列最初の展開トラス構造1組を展開する機構
- ・既設パネル駆動機構
展開装置が既設の展開トラス構造端部を移動するための機構

各機構はサーボモータ1個を搭載する。展開装置制御装置は展開シーケンスに従って、各機構を単独で、あるいは同期して駆動制御する(図6)。

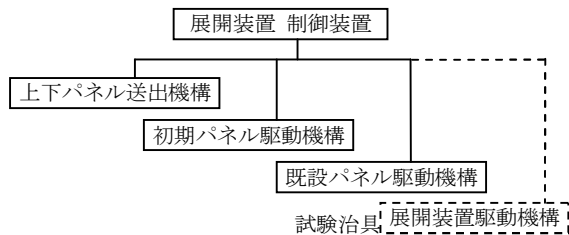


図6 展開装置 制御装置

重力補償試験装置は、展開装置が展開時に既設のパネルに対して移動する際、展開装置を吊り下げているワイヤ位置を、展開装置駆動機構(図7)により能動的に制御している。そのため、展開装置制御装置は展開装置の駆動状況に応じ、必要時同期して治具の展開装置駆動機構も駆動制御する。

展開装置は、展開トラス構造の各カムフォロワ(図4)に対応するレールを有し、展開するトラス構造の動き、および既設の展開トラス構造との相対的な運動をスムーズにガイドする。上下パネル駆動機構、初期パネル駆動機構は、展開中の展開トラス構造の横材(図4)を、図5に示すように駆動機構のつめ部分で把持し、ベルトを駆動して展開動作する展開トラス構造の各部の必要な駆動力を提供する。既設パネル駆動機構も同様の構造を有するが、同つめは既設の展開トラス構造を把持し、既設展開トラス構造と展開装置との相対的な運動を制御する。

本試験においては展開装置の各機構の機能を確認することのみを目的としており、展開シーケンスの

表2 展開シーケンス

<p>① 水平移動 No.1</p>	<p>上下パネル送出/初期パネル駆動機構が同期して駆動、展開可能位置に移動</p>
<p>② 展開後期 No.1</p>	<p>初期パネル駆動/既設パネル駆動機構が同期動作、展開トラス構造を展開する</p>
<p>③ 展開前期 No.2</p>	<p>上下パネル送出/既設パネル駆動機構が同期動作、展開トラス構造を把持機構へ到達するまで展開、展開済み展開トラス構造と先端部が結合</p>
<p>④ 水平移動 No.2</p>	<p>上下パネル送出/既設パネル駆動機構が同期動作、展開中の展開トラス構造位置を調整</p>
<p>⑤ 展開後期 No.2</p>	<p>既設パネル駆動機構が作動、展開完了/結合</p>

うちパネル2組目以降の展開シーケンスに相当する、表 2に示す5ステップにおいて駆動試験を実施した。2列目以降のパネルを展開する際の、先頭パネルを独自に展開し既設パネル前縁部に結合するシーケンスは、当該結合機構を持つ展開トラス構造を準備し2012年度に確認する。

＜重力補償試験装置＞

重力補償試験装置は、2010年度製作品に下記項目を改良して用いた（図 7）。

- ・ 架台延長 : パネル6→12枚対応
- ・ 展開装置駆動機構追加 :
展開装置の吊点位置を能動的に駆動制御

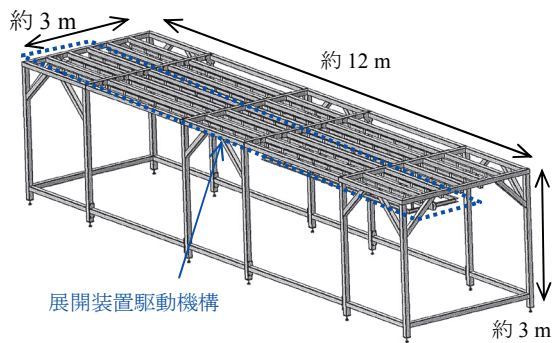


図 7 重力補償試験装置 概要図

3.2. 試験方法

本試験目的は、以下の通り。

- ・ 展開装置の展開/結合機能を確認
- ・ 地上実証実験方法の妥当性を確認

地上実証実験方法の妥当性については、展開/結合試験において併せて確認している。

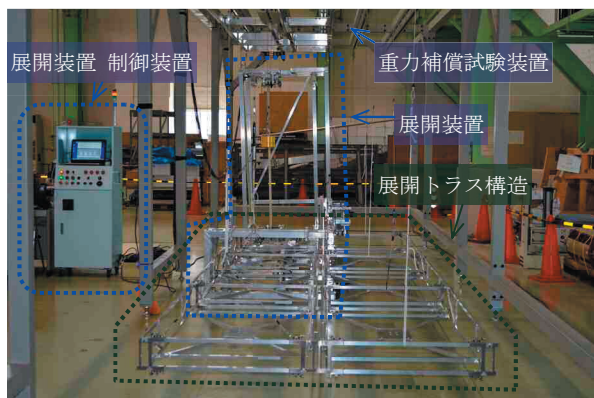


図 8 機能確認試験実施状況概要

図 8に試験実施状況概要を示す。以下、展開装置の展開/結合機能確認試験方法を示す。

展開/結合機能試験は、展開・結合の各シーケンスを連続作動させることで実施し、以下を確認する。

- ・ 各シーケンスが完了できること
- ・ 各機構の作動がスムーズで干渉等問題の無いこと
- ・ 各シーケンスの作動時間

各機構作動状況モニタ方法としては、ビデオ撮影を含む目視、および各機構サーボモータの駆動電流を監視/記録する方法で対応した。なお、展開/結合シーケンスの途中には、展開トラス構造の重量を支持するためのワイヤを取付/取外する作業が必要であり、作動時間にはその作業時間は含まないこととした。

3.3. 試験結果

以下試験は、2012年3月、川崎重工業株式会社 岐阜工場にて実施した。

＜自動展開/結合試験＞

前記自動による展開トラス構造の展開/結合試験を、計3回実施した（図 9）。

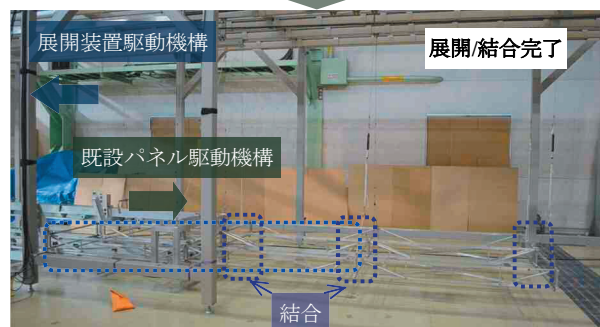
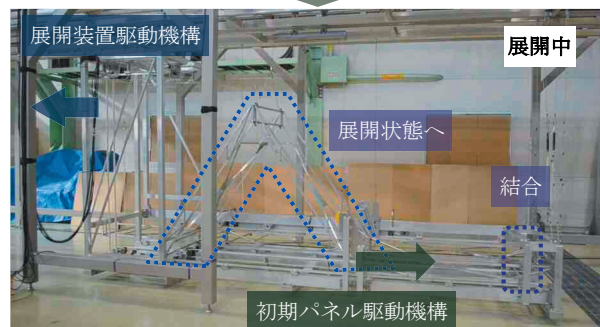


図 9 機能確認試験の実施状況

その結果、3回すべての試験において展開トラス構造が自動的に展開/結合できることを確認した。各モータの駆動電流モニタにおいても異常は見られなかった。一連のシーケンスの実施に必要な時間は、203秒であった。

〈地上実証実験方法の妥当性確認〉

展開トラス構造および展開装置を吊り下げる実験方法を採用したが、各部ともスムーズに駆動し、本試験方法の妥当性が確認できたと考える。

一方で、展開装置アーム下部の重力によるたわみが大きく、対策として車輪を追加して一部重量を支持するよう変更している。また、展開トラス構造/展開装置の懸下ワイヤロープ取回しが設計/試験実施上煩雑となった。本件対策を含め、今後より合理的な地上実証実験方法についても検討を行う。

3.4. 考察

展開装置の基本機能である展開トラス構造の展開/結合機能を実現するため、3つの駆動機構を有する展開装置を設計製作し、機能確認試験を実施した。試験は3回実施したが、各機構ともにスムーズで正常に作動することを確認し、また干渉等の問題も発生しなかった。この結果から展開方法、装置設計の妥当性が確認できたものと考えられる。

本試験は展開装置の基本機能確認を目的としており、試験で実施したシーケンスは、技術実証機、実用機における展開シーケンスそのものではない(1組目パネル結合、2列目以降展開位置への移動、コンテナ交換等のシーケンスを含まない)が、本試験における作動時間計測結果をもとに実用機、技術実証機の展開トラス構造の組立に必要な時間(パネル展開に必要な時間のみ)を推定すると、各機構を本地上実証と同速で駆動すると、40 m 級技術実証機では 8.5 時間、パネル 30 万枚展開することになると予想する 2500 m 級実用機では 1451 日間となる。技術実証機におけるパネル展開時間は、本結果から十分に短く、技術実証機組立作業と整合すると考えられる。一方、実用機では、たとえば 5 箇所同時にパネルの展開組立を行う場合、同パネル展開に必要な時間は 291 日となり、組立作業に適合するものと考えられる。この結果から、組立作業時間の観点からも本構造方式、展開装置の妥当性が示されたものと考えられる。

重力下での試験方法についても、展開/結合の機能試験が問題なく実施できたことを踏まえ、その妥当性が確認できたと考えるが、展開装置アーム部分の

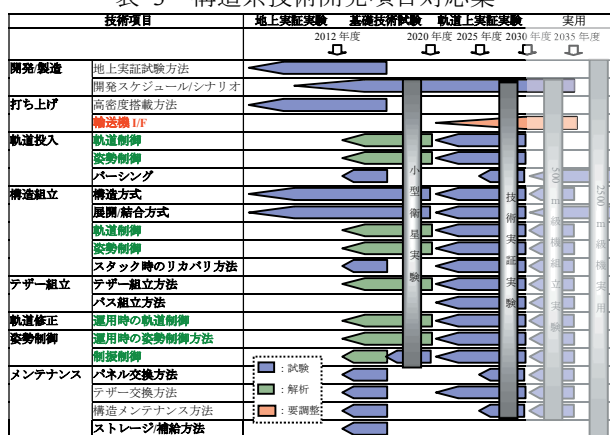
変形等、今後展開トラス構造および展開装置支持方法の更なる改善を検討する。

4. 開発計画

〈開発シナリオ〉

本展開トラス構造を用いた前記図 1 に示す、SSPS 実用機の開発を前提とする構造系部分(発送電パネル、RLV/OTV 等輸送系を除く)の開発シナリオを、軌道上組立から運用に至る、各フェーズにおいて必要となる技術要素とその開発/検証時期を切り口に整理した開発シナリオを表 3 に示す。

表 3 構造系技術開発項目対応案



構造系の開発は、技術実証機、実用機の 2 段階を想定する。実用機では大量の物資を静止軌道に輸送し、自動で巨大構造物を組み立てることとなるが、実用機移行の前に必要な各要素技術を確認するための、必要十分で合理的規模の技術実証試験が必要である。

現在進めている地上実証/基礎技術試験は、実用機のユニークな技術要素も含め、技術実証機の技術要素を検討確認することを目的とする。基本的な展開トラス構造の成立性を地上実証実験により確認した後、各部構造試作/シミュレーション試験などを実施、必要に応じて低軌道での小型衛星実験なども検討。その後、実用機における構造方式/組立/運用に関する基本的技術要素の最終確認として 技術実証実験を低軌道にて実施、実用機フェーズに移行する。

展開トラス構造を用いた SSPS の構造は、その構造自体が単純で、本試験の結果 展開/結合も目処が得られつつあることを踏まえ、開発シナリオにおいては構造開発に大きなブレイクスルーが必要な開発要素は無いものと考えられる。一方で、組立に必要な RLV/OTV については現状 未設計で、輸送系とのインターフェースによっては今後構造の再検討が必要

となる可能性が残る。また軌道上での組立方法、軌道/姿勢制御方法と本構造との整合性についても今後確認する必要がある。

〈技術実証域〉

図 10に 想定する技術実証機組立方法概要を示す。技術実証実験は、構造/組立/運用に関する技術要素の基本的な最終確認試験であるが、製作/試験実施可能な現実的試験機規模として、H-II/B ロケット一機による低軌道(500 km 等)での試験を想定する。

パネル 72 枚を収納したコンテナ、展開装置アーム、および簡易サービスユニットより構成、テザー/バス組立を含む 40 m 級機を実現する。

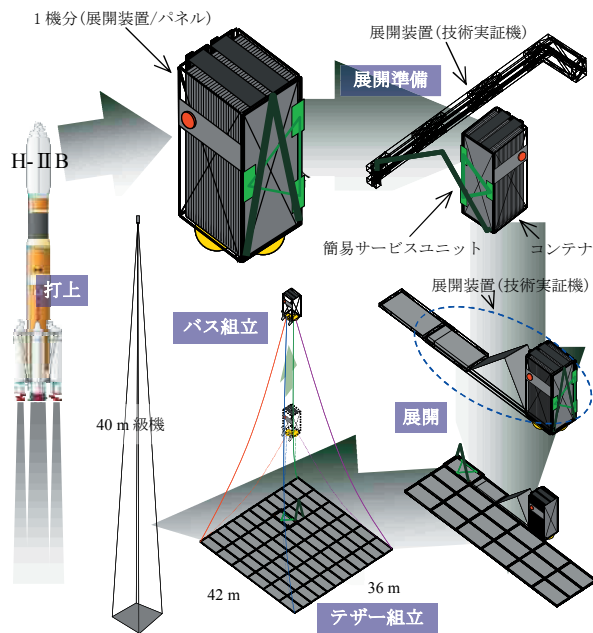


図 10 40 m 級技術実証機の組立想定

〈実用機〉

図 11に実用機組立方法概要を示す。実用機は前記のとおり RLV/OTV との調整によりチューニングが必要となる可能性もあるが、コンテナを用いた物資の輸送方法を採用することで、技術実証機において確認する構造/組立方法がそのまま実用機においても適用できると考えられる。

一方で 重力勾配が異なる静止軌道環境において 発信電パネルを極端に大型化させるため、制振制御方法を含む組立/運用時の軌道/姿勢制御方法について検討が必要となる。また後続 OTV のパーシングやバス組立等を行うサービスユニット等についても、実用機に対応してユニークな機能の検討が必要である。

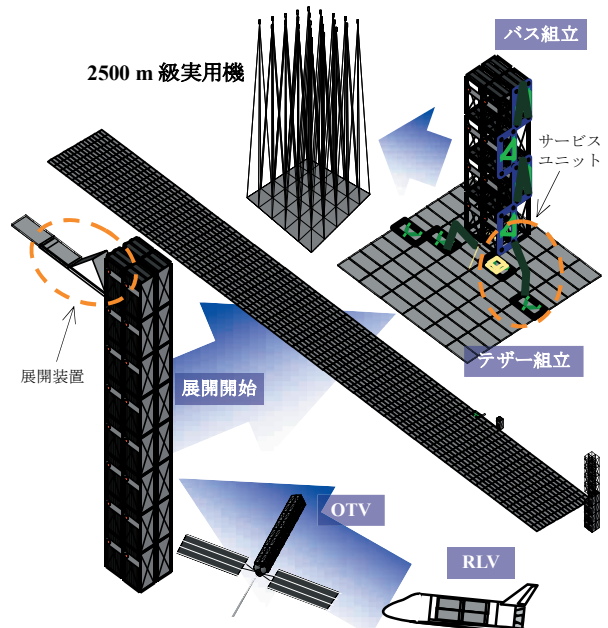


図 11 2500 m 級実用機の組立想定

5. おわりに

SSPS の大型構造物に適応する、展開トラス構造に関する地上実証実験を進めるが、2011 年度は展開トラス構造を自動展開/結合する展開装置の開発を行い、その基本機能を確認した。また展開トラス構造の地上実証実験方法についてもその妥当性を確認した。

2012 年度はこれら成果を踏まえ、展開トラス構造の機能性能を確認することを目的とした、最終的な地上実証実験を行う予定である。今後 本地上実証試験成果は技術実証機/実用機的设计に反映するが、技術実証機/実用機に適用する更に合理的で軽量化した展開トラス構造/展開装置を検討してゆく必要がある。

本展開トラス構造を用いた技術実証機/実用機の開発シナリオを検討した。本展開トラス構造は、その構造/組立方法がシンプルで、組立に高度な装置が不要であり、実用機に向けた開発シナリオ自体に大きな技術課題は無いものと考えられる。一方で RLV/OTV の開発はこれからであり、今後この観点から調整が必要となる可能性がある。また、今後 打上/運用方法や軌道上での軌道/姿勢制御、サービスシステム、バス/テザーの組立方法についての技術検討を含めた総合的なシステムチューニングを行い、SSPS の仕様を明確化してゆく必要がある。

参考文献

- 1) 小林、黒瀬、上土井、藤田：「宇宙太陽光利用システム 展開トラス構造試作試験」、第 55 回宇宙科学技術連合講演会、2011 年 11～12 月、JSASS-2011-4125