電磁石結合機構を用いた 30 m 級大型平面アンテナの構築方法

上土井 大助^{*1}, 倉富 剛^{*2}, 渡辺 和樹^{*3}Construction method of 30-m-class large planar antenna
using electromagnet connection mechanismDaisuke JODOI^{*1}, Takeshi KURATOMI^{*2} and Kazuki WATANABE^{*3}^{*1} Japan Aerospace Exploration Agency

2-1-1 Sengen, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8505, Japan

^{*2, *3} WEL Research Co., Ltd.

2-12-11 Aoyagi, Ichihara-shi, Chiba 299-0102, Japan

Received: 29 May 2018; Revised: 3 September 2018; Accepted: 12 November 2018

Abstract

In order to establish a construction method for a large space structure of several hundred meters or more required by the Space Solar Power Systems (SSPS), it is necessary to carry out a long series of experiments on orbit while gradually expanding the structure size because the current technology level to realize the large space structure is low. If we can carry out the experiments as space use missions like telecommunication, earth observation and so on, we can increase the possibility to carry out the experiments because the cost-effectiveness of the experiments is improved. Therefore, we aim to establish a construction method for a 30-m-class large planar antenna required by a radar to observe precipitation from a geostationary orbit as the immediate target. In order to establish the 30-m-class large planar antenna construction method with high feasibility and expandability for the SSPS, we proposed a method to deploy and connect antenna panel rows one after the other. And we verified feasibility for critical functions of large planar antenna deployment and connection mechanisms used in the proposed method by two step ground experiments. First, we carried out the experiment for the Electromagnet Connection Mechanism (ECM) which is the key device of the antenna deployment and connection mechanisms and confirmed that the basic function concept of the ECM can be realized. Next, we carried out the deployment experiment for panel rows equipped with the ECM and demonstrated the deployment and connection function concept of second and subsequent row panels because these functions are the critical functions.

Keywords : Construction, Large space structure, Space Solar Power Systems, Planar antenna, Precipitation radar, Deployment, Connection, Electromagnet

1. 緒 言

宇宙太陽光発電システム (Space Solar Power Systems: SSPS) は、クリーンなエネルギーを大規模に、安定的に、多地点に供給できるという特長を持っているため、エネルギー、気候変動、環境等の人類が直面する地球規模課題の解決の可能性を秘めている。

これまでに世界で様々な形状の SSPS が提案されているが、どれも数百 m～数 km の大型宇宙構造物を必要とする。SSPS 構想の一例 (Sasaki et al., 2007) を図 1 に示す。一方で、これまでに構築された最大の宇宙構造物は国際宇宙ステーション (International Space Station: ISS) であり、これは宇宙飛行士が船外活動やロボットアーム操作を行うことで組み立てられた。しかし、このような構築方法は、危険、高コスト、時間が掛かるという問題がある。これらの問題を解決するには、大型宇宙構造物を無人で自動的に構築できる方法が必要となる。

SSPS で必要とされる数百 m～数 km 級の大型宇宙構造物の構築方法を確立するためには、現状の技術レベルを考慮すると、段階的に構造物の規模を拡大しながら軌道上実験を積み重ねる必要がある。その際、軌道上実験を通信放送や地球観測のような宇宙利用ミッションとして実施することができれば、費用対効果が向上するため、軌道上実験を実施できる可能性が高まる。そのため、JAXA では、数百 m～数 km 級大型宇宙構造物の構築方法の確立に向けた当面の目標として、静止軌道から降水観測を行うためのレーダ (Geostationary Precipitation Radar: GPR) で必要とされる、30 m 級大型平面アンテナの構築方法の確立を目指している (上土井他, 2016) (Ozawa et al., 2016)。GPR 衛星のイメージを図 2 に示す。GPR は、静止軌道からの常時・機動的な降水観測により、台風の発生メカニズムの解明や気象予報・洪水予測の精度向上等が期待できる将来の降水レーダであり、マイクロ波方式 SSPS と同様に大型平面アンテナを必要とする。そのため、GPR で必要とされる 30 m 級大型平面アンテナの構築方法の確立を目指して研究を行うことで、SSPS で必要とされる数百 m～数 km 級大型宇宙構造物の構築方法の確立に貢献できると考えている。

数十 m 級の大型平面アンテナの構築方法としては、二次元展開により構築する方法が考えられるが、SSPS を見据えた場合、アンテナのサイズを更に拡大できる方法が必要になる。SSPS を含む大型宇宙構造物の構築方法としては、二次元展開構造物を展開した後結合する方法 (Sasaki et al., 2007) やロボットで構造部材を組み立てる方法 (Hoyt, 2013) (前野他, 2001) (Mankins, 2012) がこれまでに幾つか提案されているが、それらは大型柔軟構造物同士のランデブ・ドッキングや高機能ロボットによる組立作業などの高難度の技術を必要とする点で、実現性が高いとは言い難い。

そこで、本研究では、SSPS を見据えた拡張性があり、かつ、高難度の技術を必要とせず実現性の高い 30 m 級大型平面アンテナ構築方法の確立を目的とし、アンテナパネル列を順次展開・結合する方法を提案する。また、提案方法で用いる大型平面アンテナ展開・結合機構のクリティカル機能の実現性を 2 段階の地上実験で検証する。まず、当該機構においてキーデバイスとなる、電磁石を用いた結合機構 (Electromagnet Connection Mechanism: ECM) の単体実験を行い、ECM の基本機能の実現性を検証する。次に、ECM を搭載したパネルの地上展開実験を行い、大型平面アンテナ展開・結合機構のクリティカル機能である、2 列目以降のアンテナパネル展開・結合機能の実現性を検証する。

Fig. 1 Example of SSPS concept.

Fig. 2 Image of GPR satellite.

2. 構築方法の検討の前提と方針

30 m 級大型平面アンテナの構築方法を具体的に検討するためには、その前提や方針を設定する必要がある。本研究で設定した検討の前提と方針を以下に示す。

(1) 前提

- ・ 輸送機：GPR の打上げ目標時期は 15 年後以降を想定しているため、輸送機は H3 ロケットとする。
- ・ 打上げ回数：GPR は 1 回の打上げで構築することを想定しているため、打上げ回数は 1 回とする。
- ・ 衛星軌道：GPR は静止軌道を使用するため、衛星軌道は静止軌道とする。
- ・ 衛星バス：GPR では既存衛星バスの使用を想定しているため、衛星バスは既存静止衛星バスとする。
- ・ アンテナパネル：近未来の技術の適用を想定し、アンテナパネルの構造部分以外（アンテナ素子、誘電体、給電線、送受信モジュール等の部分）の面密度は 2 kg/m^2 、厚さは 10 mm とする。

(2) 方針

- ・アンテナパネル間隔：アンテナ素子配置への制約を緩和するため、アンテナパネルの間隔は可能な限り狭くする。
- ・アンテナ剛性：アンテナ面の変形補正機能への要求を緩和するため、アンテナの剛性は可能な限り高くする。
- ・構築コスト：低コストで構築できることが望ましいため、構築に掛かるコストは可能な限り抑える。
- ・構築速度：短期間で構築できることが望ましいため、構築速度は可能な限り速くする。
- ・構築信頼性：確実に構築できることが望ましいため、構築動作の信頼性は可能な限り高くする。
- ・拡張性：SSPS は数百 m～数 km の大型平面アンテナを必要とするため、アンテナサイズの拡大は可能な限り容易にする。

3. ECM を用いた 30 m 級大型平面アンテナの構築方法

3・1 主要構成要素

2 章の前提と方針に基づき考案した 30 m 級大型平面アンテナの構築方法について、主要構成要素を図 3 に示す。30 m×31.2 m の大型平面アンテナは、衛星バスとブームで繋がっており、ブームと平行なパネル列 10 列から構成される。パネル列は、パネル収納ボックス、プレッシャパネルおよび 12 枚のアンテナパネルから構成され、アンテナパネル 1 枚の大きさは、3 m×2.6 m である。

プレッシャパネルおよびアンテナパネルを収納した状態のパネル収納ボックスの概観を図 4 に示す。パネル収納ボックスは、プレッシャパネル（厚さ 70mm）を 1 枚、アンテナパネル（厚さ 26mm）を 12 枚収納でき、サイズは 3m×3m×0.45m で、プレッシャパネル 1 枚とアンテナパネル 12 枚を収納した状態の質量は約 250kg を想定している。

Fig. 3 Main components in construction method of 30-m-class large planar antenna.

Fig. 4 Overview of panel storage box.

3・2 構築シーケンス

提案する構築方法について、30m 級大型平面アンテナの構築シーケンスを以下に示す。

1. 収納状態のアンテナパネル（以下「パネル」という）を搭載した衛星が静止軌道に到達したら、太陽電池パドルを展開する。（図 5(a)）
2. ブームを伸展し、衛星バスから収納状態のパネルを離す。（図 5(b)）
3. 12 枚のパネルを収納したボックス（以下「パネル収納ボックス」という）の展開を行う。（図 5(c)(d)）
4. パネル収納ボックスの展開が完了したら、まず 1 列目のパネルだけを展開する。その際、1 列目のパネルの辺に沿って、2 列目のパネルの展開をガイドするワイヤ（以下「ガイドワイヤ」という）を伸展させる。（図 5(e)(f)）
5. 1 列目のパネルの展開が完了したら、2 列目先端のプレッシャパネル（緑色のパネル）に搭載されている、電磁石を用いた結合機構（ECM）でガイドワイヤを把持し、そのままガイドワイヤに沿って 2 列目のパネルを展開する。（図 5(g)）
6. 2 列目のプレッシャパネルが 1 列目のプレッシャパネルに接近したら、ECM によりプレッシャパネル間の自動結合を行う。（図 5(h)）
7. 以降、同様に 1 列ずつパネルを展開し、全てのパネルを展開する。（図 5(i)）

Fig. 5 Construction sequence.

3・3 大型平面アンテナの展開・結合機構

提案する構築方法で用いる大型平面アンテナの展開・結合機構は、パネル収納ボックスの展開機構、1 列目のパネル展開・結合機構および 2 列目以降のパネル展開・結合機構の主に 3 つから構成される。各機構の詳細を以下に示す。

(1) パネル収納ボックスの展開機構

パネル収納ボックスの展開（図 5(b)～(d)）では、パネル収納ボックス間のローラマイトヒンジの展開力をモーターで制御しながら、パネル収納ボックスを左右対称に同期して展開する。パネル収納ボックスの展開機構の詳細を示すため、パネル収納ボックスが 2 個の場合の展開動作を図 6 に示す。

パネル収納ボックスの展開において、展開ヒンジの基本的動作で重要な点は、収納時も展開時も隙間を生じないことである。これは ECM との適合においても重要であり、特に ECM によりガイドワイヤを吸引・把持する動作やパネル列間を結合する動作を確実にを行うために、パネル収納ボックスの間隔を可能な限り狭くする必要がある。この要件に適合できるヒンジとしてローラマイトヒンジが適切であると考えられる。ローラマイトヒンジの機構は互いの円周に接しそれに沿って回転しながら動作するのでヒンジの回転摩擦は極めて少ない。展開力は別途与える必要があり、パネル収納ボックスの展開は質量および慣性モーメントともに大きいため、モーターで展開力を制御しながら展開動作を行う。また、展開中の反力も大きいため、衛星全体の姿勢外乱を抑えるため、左右対称に同期して展開する。

Fig. 6 Deployment of panel storage boxes.

(2) 1 列目のパネル展開・結合機構

1 列目のパネルの展開（図 5(e)～(f)）では、パネル間のストリング（紐）に巻いたコイルばねの展開力によるパネルの展開およびガイドワイヤの伸展、テンショナ機構を用いたストリングの巻き取りによるパネル間の結合、倍力機構によるパネル間の強固な結合を順に実施する。1 列目のパネル展開・結合機構の詳細を示すため、1 列目のパネルが 4 枚の場合の展開動作を図 7 に示す。

1 列目のパネルの展開では、パネルそのものの質量は大型衛星の太陽電池パネルと同程度であるため、展開トルク等のヒンジ特性はそれと同程度の設計になると考えられる。しかし、パネルの枚数が多いためヒンジ数が多く、展開距離も長いため展開の信頼性確保と展開後の形状精度確保の設計はそれよりかなり厳しくなる。また、展開後のパネルの間隔を可能な限り狭くする必要性からも従来方式のヒンジでは要件を満たすことはできない。そのため、ストリングヒンジという、単純にストリングを各パネル間に通して連結したものをを用いる。図 7 に示すように、パネル間のストリングに巻いたコイルばねの展開力によりパネルの展開を行うとともにガイドワイヤの伸展も行う。また、全てのパネルが展開した後に、パネル収納ボックスに搭載されたテンショナ機構でストリングを巻き取ることでパネル間の結合を行う。なお、1 列目のパネル展開では、速度制御、振動制御、同期展開制御等は行わないことを想定している。この理由は、前述の制御を実現するには各ヒンジの状態を制御することになるが、30m のパネル列ではパネルの枚数が多くヒンジ数が多いため、展開の信頼性や安定性の観点でリスクが高くなると考えるためである。ストリングヒンジは、ヒンジ構造としては非常に単純で、回転摺動部を持

たず、テンションを与えた状態ではパネル間の隙間もできない。またパネル間の結合フィッティングの結合部精度を管理することで展開後の形状精度と再現性を確保し易いなど、本要件を満たす方式として適切であると考えられる。

一方、展開後の形状と剛性の安定性はストリングのテンションに依存するため、30 m の長さのストリングの熱歪の影響、疲労破壊に対する耐久性など、ストリングのみで展開後の形状を安定させることは困難と考える。したがって、展開後は別の機構でパネル間を強固に結合することで、大型平面アンテナの主構造としての強度と剛性を確保するのが望ましい。そのため、ストリングヒンジ方式と相性の良い機構として倍力（リンク）機構を用いる。ストリングヒンジによるパネル結合に適用可能な倍力機構の動作を図 8 に示す。ストリングヒンジは、ストリングにテンションを与えることにより、ストリングに巻いたコイルばねごとストリング実装用チューブに入り、所定の位置でパネル間を隙間無く結合できるため、倍力機構の動作に繋げることができる。倍力機構はモータ等で動作させることも考えられるが、パネルの枚数分部品も多くなるため、形状記憶合金等の材料変態を利用して機構を極力用いないアクチュエータを使用することを想定している。

Fig. 7 Deployment of 1st row panels.

Fig. 8 Motion of link mechanism.

(3) 2 列目以降のパネル展開・結合機構

2 列目以降のパネルの展開・結合 (図 5(g)~(i)) では, ECM によるガイドワイヤの吸引・把持, ケーブルドライブ機構を用いたガイドワイヤの巻き取りによるパネルの展開, 永久磁石によるパネル間の結合, ECM によるパネル列間の結合を順に実施する. 2 列目以降のパネル展開・結合機構の詳細を示すため, 2 列目のパネルが 4 枚の場合の展開動作を図 9 に示す.

2 列目以降のパネル展開・結合では, 30 m 展開した後で既展開パネル列先端での結合部の位置合わせを行う必要があり, また, 結合はシンプルな機構で行えることが望ましい. さらに, 将来的にアンテナサイズの更なる拡大を行う場合, パネル列数の増加により構築途中での不具合の発生確率が上がるため, リカバリのために結合部を容易に分離できることが望ましい. そのため, 新たに考案した ECM を用いる. ECM の概観を図 10 に, 図 10 の A-A 断面における自動結合・分離動作を図 11 に, 図 10 の B-B 断面におけるガイドワイヤ吸引・把持動作を図 12 に示す. 図 11 に示すように, 電磁石の磁力を利用し, オス側のラッチボルト (強磁性体のパーツ) およびメス側のラッチピン (永久磁石が埋め込まれたパーツ) を動作させることで, 結合・分離を行う. なお, 結合・分離動作の実施時のみ通電が必要で, 結合を維持するための通電は不要である. また, 図 12 に示すように, 電磁石の磁力を利用し, ガイドワイヤを ECM メス側で吸引・把持し, ECM メス側をガイドワイヤに沿って ECM オス側まで誘導することで, 確実な結合を行う. なお, ECM メス側でガイドワイヤの強磁性体部分を吸引した後, ケーブルドライブ機構でガイドワイヤを巻き取ると, ガイドワイヤに取り付けられたフックが ECM メス側に引っ掛かるが, このとき ECM メス側が把持しているのはガイドワイヤの非磁性体部分になる. そのため, ECM メス側の電磁石に通電した状態でガイドワイヤは吸引されなくなるため, その状態でロックピンを開放し, ケーブルドライブ機構でガイドワイヤを巻き取ることによりガイドワイヤの把持解除を行うこともできる.

ここで, ECM の設計に対する考え方を述べる. パネル列の展開完了後に, ケーブルドライブ機構を用いてガイドワイヤにテンションを与え, ガイドワイヤが弛まない状態にすれば, ECM メス側の結合面中心とガイドワイヤの距離が数十 mm 以下になると想定しており, その状態から, ガイドワイヤのテンションを緩めながら, ECM メス側でガイドワイヤの強磁性体部分を吸引することを想定している. よって, ECM メス側は, その結合面中心から数十 mm 以下の距離にあり, かつ, テンションの掛かっていないガイドワイヤの強磁性体部分を吸引できる必要がある. また, ECM は厚さ 70mm のプレッシャパネルに搭載することを想定しているため, それが可能なサイズにする必要がある. これらの要求を満たすには, ECM の製造容易性および後述する実測データ (表 1) を考慮すると, ガイドワイヤの強磁性体部分に用いる針金のサイズは $\phi 0.9\text{mm} \times 90\text{mm}$ 程度で, 電磁石のサイズは $\phi 40\text{mm} \times 40\text{mm}$ 程度となるため, ECM 結合状態のサイズは $45\text{mm} \times 45\text{mm} \times 74\text{mm}$ 程度, 質量は 500g 程度となる. ただし, これらの値は, 今後 ECM への性能要求を明確化し, 最適化する必要がある.

ガイドワイヤは展開する方向への拘束力はあるが, その直交方向の拘束力は無いに等しい. したがって, 2 列目以降のパネル間は, 展開中に自身で展開方向に対して直交する方向 (特に面内せん断方向) とねじれの剛性を有している必要がある. また, 2 列目以降のパネルも展開後のパネルの間隔は可能な限り狭くする必要がある.

これらの点からやはり使用するヒンジは通常の回転ヒンジでは適合しない。前述のストリングヒンジを使用してもテンションを与えるまではパネル列の長さが既展開パネル列より長くなり展開中の剛性がほとんどないため、既展開パネル列との衝突などが起こりやすく適切ではない。そのため、機構を伴わずパネル間の面内せん断剛性を維持し、展開後もパネルの間隔を可能な限り狭くする方法としては、テープヒンジの使用が適切と考える。テープヒンジの耐久性は材料自体に依存するので、その管理に課題はある。軌道上で展開時のみ使用し展開後は別の方法でパネル間を結合するのであれば実用的と考えるが、開発工程で最も負担がかかるのは地上試験であり、その開発工程も考慮して材料の強度と耐久性を検証する必要がある。30 m 級大型平面アンテナの90%は2列目以降のパネルであり、テープヒンジが機能性にも軽量性にも優れており、今後テープヒンジの使用材料もしくは同様の機能・性能を持つヒンジの研究開発が必要である。

パネルの展開力はSTEM 伸展材等与えることも可能であるが、長尺となるため伸展部材に加わる圧縮力に耐えるサイズとその設計と検証を行うより、ECM で把持しているガイドワイヤを曳航索としてECM にフックして曳航するケーブルドライブ機構による方式が効率的で確実と考える。

ケーブルドライブ機構によりパネルを展開すると、前述のテープヒンジの使用により、パネル間の結合部同士が近い位置に来るため、パネル間の結合は永久磁石を用いてシンプルに行う。

Fig. 9 Deployment of 2nd row panels.

Fig. 10 Overview of ECM.

Fig. 11 Motion to connect and separate automatically.

Fig. 12 Motion to attract and hold guide wire.

3・4 特長

2章(2)で設定した方針に対する対応結果を以下に示す。

- ・アンテナパネル間隔：アンテナパネルの間隔が0 mmになるようにした。
- ・アンテナ剛性：倍力機構や永久磁石を用いてパネル間結合部の剛性が向上するようにした。
- ・構築コスト：展開・結合機構をシンプルにして製造コストを抑えるようにした。
- ・構築速度：展開構造物を適用して構築速度が速くなるようにした。
- ・構築信頼性：多数パネルの同期展開を不要にして信頼性が向上するようにした。
- ・拡張性：既存技術であるロボットアームを用いたキャプチャ・バーシング等によりパネルを追加すれば、同様の構築シーケンスでアンテナサイズを拡大できるようにした。拡大方法の概念を図13に示す。

以上を踏まえ、提案する構築方法の主な特長を以下に示す。

- ・アンテナサイズを拡大するために、大型柔軟構造物同士のランデブ・ドッキングや高機能ロボットによる組立作業などの高難度の技術を必要としない。
- ・30 m級大型平面アンテナの90%を占める2列目以降のパネルは、パネル間ヒンジにテープヒンジ、パネル間結合に永久磁石を用いているため、シンプルかつ軽量である。
- ・任意のパネル列を展開トラスにすることが可能であるため、必要に応じて構造物の剛性を調整できる。

Fig. 13 Concept of antenna size expansion method.

4. 地上実験

4・1 ECMの単体実験

提案する構築方法で用いる大型平面アンテナ展開・結合機構において、ECMはキーデバイスとなる。そのため、ECMの単体実験を行い、ECMの基本機能である、ガイドワイヤ吸引・把持機能および自動結合・分離機能の実現性を検証した。また、今後ECMへの性能要求を明確化する際の参考として、ガタおよび剛性に関するデータも取得した。

本実験に用いたECM試作モデルの外観を図14に示す。同試作モデルの寸法は、オス側が45 mm×45 mm×22 mm、メス側が45 mm×45 mm×52 mmで、質量は、オス側が117 g、メス側が383 gである。電磁石には、FSGP-40（最大吸着力：400 N、電圧：DC24 V、電流：0.24 A、寸法：φ40 mm×40 mm、重量：300g）を使用した。

Fig. 14 Appearance of ECM prototype model.

まず、ガイドワイヤ吸引・把持機能の実現性を検証するための実験を行った。ECM メス側のガイドワイヤ引き込み孔の寸法を図 15 に、本実験の様子を図 16 に示す。非磁性体のワイヤの先端に強磁性体である針金（材質：鉄，寸法： $\phi 0.9\text{ mm} \times 90\text{ mm}$ ）を取り付けてガイドワイヤとし、それを鉛直に垂らして、ECM メス側で吸引・把持できるかを確認した。その際、ECM メス側の位置を ECM 結合面の面内・面外方向に動かして、ガイドワイヤを吸引できる範囲も測定した。本実験における吸引可能範囲の測定結果を表 1 に示す。本実験の結果として、ECM メス側がガイドワイヤを電磁石の磁力により吸引し、ロックピンにより把持できることを確認した。また、鉛直に垂らしたガイドワイヤの強磁性体部分の針金が ECM 結合面内で鉛直方向に対して 12.5 度程度まで傾いても吸引・把持できることも確認した。

Fig. 15 Size of slit to attract guide wire.

Fig. 16 Experiment to verify functions to attract and hold guide wire. The female ECM can attract the guide wire by magnetic force of the electromagnet and hold the guide wire by the lock pins.

Table 1 Measurements of range that female ECM can attract guide wire. Even if the distance between the connection surface center of the female ECM and the guide wire is at least about 60 mm, the female ECM can attract the guide wire.

		Distance in the in-plane direction [mm]							
		5	15	25	35	45	55	65	75
Distance in the out-of-plane direction [mm]	5	○	○	○	○	○	○	○	×
	15	○	○	○	○	○	○	○	×
	25	○	○	○	○	○	○	○	×
	35	○	○	○	○	○	○	×	×
	45	○	○	○	○	○	○	×	×
	55	○	○	○	○	○	×	×	×
	65	○	○	○	○	×	×	×	×
	75	×	×	×	×	×	×	×	×

次に、自動結合・分離機能の実現性を検証するための実験を行った。本実験の様子を図 17 に示す。ジルコニアボールの上に、ECM のオス側とメス側を配置し、自動で結合・分離できるかを確認した。その際、ECM オス側の位置を ECM 結合面の面内・面外方向に動かして、ECM メス側と結合できる範囲も測定した。本実験における結合可能範囲の測定結果を表 2 に示す。本実験の結果として、ECM メス側が ECM オス側を電磁石の磁力により吸引し、ラッチピンにより結合できることを確認した。また、電磁石の電流の方向を逆にすることで、ECM メス側のラッチピンが動作し、ECM のオス側とメス側を瞬時に分離できることを確認した。

Fig. 17 Experiment to verify connection and separation functions. The female ECM can attract the male ECM by magnetic force of the electromagnet and connect with the male ECM by the latch pins.

Table 2 Measurements of range that female ECM can connect with male ECM. In the case of the ECM alone, even if the distance between the connection surface center of the male ECM and it of the female ECM is at least about 11 mm, the female ECM can connect with the male ECM.

		Distance in the in-plane direction [mm]					
		5	10	15	20	25	30
Distance in the out-of-plane direction [mm]	5	○	○	○	○	○	×
	10	○	○	○	×	×	×
	15	○	×	×	×	×	×
	20	○	×	×	×	×	×
	25	○	×	×	×	×	×
	30	○	×	×	×	×	×
	35	×	×	×	×	×	×

今後 ECM への性能要求を明確化する際の参考として、ガタおよび剛性に関するデータも取得した。本データ取得の様子を図 18 に示す。この図に示すように、荷重計およびレーザー変位計を用いて測定を行った。また、ラッチ方向の定義を図 19 に示す。

ECM 結合面の面内方向の剛性に関する測定結果を図 20 に示す。この図のデータの線形近似により求めた剛性は、ラッチ方向縦で 9.8 N/mm 、ラッチ方向横で 4.8 N/mm であった。また、どちらの方向も図 20 の変位の最大値以上でラッチが外れた。ECM 結合面の面外方向については、ガタが 0.3 mm であったため、ECM オス側とメス側をそれ以上離そうとするとラッチボルトとラッチピンが接触し、荷重が 21.7 N (3 回平均) でラッチが外れることを確認した。

Fig. 18 Acquisition of backlash and stiffness data.

Fig. 19 Definition of latch direction.

Fig. 20 Measurements of stiffness in the in-plane direction. According to the linear approximation data, the stiffness in the vertical direction is 9.8 N/mm and it in the horizontal direction is 4.8 N/mm . When the displacement in each direction exceeds each maximum value of this figure, the latch in each direction is released.

4・2 パネルの地上展開実験

提案する構築方法で用いる大型平面アンテナ展開・結合機構において、2 列目以降のパネル展開・結合機能は当該機構のクリティカル機能である。そのため、2 列目のパネルの地上展開実験を行い、当該機能の実現性を検証した。

本実験に用いたパネル展開・結合機構試作モデルの外観を図 21 に示す。本モデルにおいて、パネル面は床に対して垂直になるようにして、展開した状態の 1 列目を治具の固定用フレームで支持した。また、2 列目のパネル先端をキャスタ付の板で支持して床との摩擦を低減させた。

Fig. 21 Appearance of deployment and connection mechanism prototype model.

本実験では、ガイドワイヤの吸引・把持、2列目のパネルの展開、1列目と2列目のパネル先端の結合・分離という一連の動作で機能の検証を行った。その際、ガイドワイヤは ECM で吸引できる範囲に入るように実装して実験を開始した。本実験の様子を図 22 に示す。

ガイドワイヤの吸引・把持機能については、ECM を ON にすることで、ガイドワイヤを ECM メス側で吸引し把持できることを確認した。ただし、ガイドワイヤを ECM で吸引できる範囲に入るように実装するため、その実現方法を今後具体化する必要がある。

2 列目のパネルの展開機能については、ケーブルドライブ機構でガイドワイヤを巻き取ることで、パネルを展開し、パネルフレームに実装された永久磁石によりパネル間を結合できることを確認した。ケーブルドライブ機構に巻き取られる側のガイドワイヤはテンションが発生するが、反対側はワイヤが弛まない程度のテンションしか与えていなかったため、パネルの面外方向の動きを拘束するには不十分であった。このような状況で、パネル間の結合に永久磁石を用いたため、展開途中でパネル間の結合が発生し、パネルの展開挙動が大きくなるがあった。そのため、展開挙動の安定化のために、展開中のパネル面外方向のふらつきを拘束する方策が必要になると考える。例えば、ケーブルドライブ機構をパネル列先端だけではなく根元にも搭載し、両方で必要なテンションを与えながら展開することが考えられる。

1 列目と 2 列目のパネル先端の結合・分離機能については、ECM のオス側とメス側を十分正確に接近させなければ結合に至らず、2 列目パネルの展開後の結合は困難であることを確認した。一方で、分離は常に ECM のオス側とメス側を近接状態にして実施するため確実に動作することを確認した。

そのため、2 列目パネルの展開後の結合を容易にするため、ECM にフィッティングパーツを追加する改良を行った。また、床との摩擦を更に低減させるため、2 列目のパネル先端を支持していたキャスタ付の板をエア浮上式ボールローラーユニットに変更した。改良後のパネル展開・結合機構試作モデルの外観を図 23 に、フィッティングパーツによる ECM の位置合わせ動作を図 24 に、改良後の実験の様子を図 25 に示す。フィッティングパーツの追加により ECM のオス側とメス側を十分正確に接近させることができ、2 列目のパネルの展開後に、1 列目と 2 列目のパネル先端を結合できることを確認した。

Fig. 22 Experiment to verify deployment and connection functions of second row panels. Regarding the connection function, it is difficult to connect after the deployment of the second row panels because the male and female ECMs have to approach each other with sufficient accuracy.

Fig. 23 Appearance of deployment and connection mechanism prototype model with fitting parts.

Fig. 24 Motion of alignment for male and female ECMs by fitting parts.

Fig. 25 Experiment to verify deployment and connection functions of second row panels (after improvement). Regarding the connection function, it is possible to connect after the deployment of the second row panels because the male and female ECMs can approach each other with sufficient accuracy by adding the fitting parts.

5. 結 言

SSPS を見据えた拡張性があり、かつ、高難度の技術を必要とせず実現性の高い 30 m 級大型平面アンテナ構築方法の確立を目的とし、アンテナパネル列を順次展開・結合する方法を提案して、その特長を示した。また、提案方法で用いる大型平面アンテナ展開・結合機構のクリティカル機能の実現性を 2 段階の地上実験で検証した。まず、当該機構においてキーデバイスとなる、ECM の単体実験を行い、ECM の基本機能である、ガイドワイヤ吸引・把持機能および自動結合・分離機能の概念が実現可能であることを確認した。次に、ECM を搭載したパネルの地上展開実験を行い、大型平面アンテナ展開・結合機構のクリティカル機能である、2 列目以降のアンテナパネル展開・結合機能の概念が実現可能であることを示した。

今回の地上展開実験で、2 列目パネルの展開挙動の安定化が課題として得られたため、今後対応策を検討し、その有効性を検証する必要がある。また、今回の地上展開実験は、ガイドワイヤが ECM で吸引できる範囲に入っている前提で実施したため、その前提が成立するように、1 列目のパネル展開・結合機構へのガイドワイヤの実装方法を具体化し、大型平面アンテナ展開・結合機構のクリティカル機能以外の機能についても地上実験により検証を行う必要がある。さらに、大型平面アンテナ展開・結合機構の性能について、構築後および構築中の形状・姿勢安定性の解析等により要求を明確化し、地上試験により検証を行うとともに、30 m 級大型平面アンテナ構築方法の確立を目的とした軌道上実験のリスク低減のために、小規模な軌道上展開実験を行う必要があると考えている。

文 献

- Hogstrom, K., Backes, P., Burdick, J., Kennedy, B., Kim, J., Lee, N., Malakhova, G., Mukherjee, R., Pellegrino, S. and Wu, Y., A robotically-assembled 100-meter space telescope, Proceedings of the 65th International Astronautical Congress (IAC-65) (2014), Paper No. IAC-14-C2.2.6.
- Hoyt, R. P., SpiderFab: An architecture for self-fabricating space systems, AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition (2013), AIAA 2013-5509.
- 上土井大助, 藤田辰人, 大橋一夫, 伊藤裕明, 渡邊秋人, 倉富剛, 渡辺和樹, 宇宙太陽光発電システム用大型構造物への STEM 構造の適用性検討, 第 57 回宇宙科学技術連合講演会講演集 (2013), 2M12.
- 上土井大助, 倉富剛, 渡辺和樹, 30m 級大型フェーズドアレイアンテナの展開・組立方法の検討, 第 60 回宇宙科学技術連合講演会講演集 (2016), 4D02.
- Jodoi, D. and Kurose, T., A 100-meter-class plate space structure construction method using a deployable truss, Mechanical Engineering Letters, Vol.3 (2017), DOI:10.1299/mel.17-00082.
- Joudoi, D., Fujita, T., Kobayashi, Y., Sakamoto, F. and Kurose, T., Studies on assembly technology of deployable truss structure for space solar power systems, Proceedings of the 65th International Astronautical Congress (IAC-65) (2014), Paper No. IAC-14-C3.1.3.
- 前野潤, 平山寛, 成尾芳博, SPS2000 構造, 組立と課題, 宇宙科学研究所報告特集, Vol.43 (2001), pp.63-74.
- Mankins, J. C., SPS-ALPHA: The first practical solar power satellite via arbitrarily large phased array, NIAC Phase 1 Final Report (2012).
- Natori, M. C., Nagasawa, M., Yamada, J., Okuno, A., Yamakawa, H., Higuchi, K. and Kishimoto, N., A basic construction concept for space structure systems using active connecting elements, Proceedings of the 2nd AIAA Spacecraft Structures Conference (2015), DOI:10.2514/6.2015-0683.
- Ozawa, S., Jodoi, D. and Uchida, H., Application of SSPS deployable phased array antenna to geostationary precipitation radar satellite, Proceedings of the 37th ESA Antenna Workshop (2016).
- Sasaki, S., How japan plans to build an orbital solar farm, IEEE SPECTRUM (2014).
- Sasaki, S., Tanaka, K., Higuchi, K., Okuizumi, N., Kawasaki, S., Shinohara, N., Senda, K. and Ishimura, K., A new concept of solar power satellite: Tethered-SPS, Acta Astronautica, Vol.60 (2007), pp.153-165.

References

- Hogstrom, K., Backes, P., Burdick, J., Kennedy, B., Kim, J., Lee, N., Malakhova, G., Mukherjee, R., Pellegrino, S. and Wu, Y., A robotically-assembled 100-meter space telescope, Proceedings of the 65th International Astronautical Congress

(IAC-65) (2014), Paper No. IAC-14-C2.2.6.

Hoyt, R. P., SpiderFab: An architecture for self-fabricating space systems, AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition (2013), AIAA 2013-5509.

Jodoi, D., Fujita, T., Ohashi, K., Ito, H., Watanabe, A., Kuratomi, T. and Watanabe, K., Study on applicability of STEM structures for large structures of Space Solar Power Systems, Proceedings of the 57th Conference on Space Science and Technology (2013), Paper No. 2M12 (in Japanese).

Jodoi, D., Kuratomi, T. and Watanabe, K., Study on deployment and assembly method for 30m class large phased array antenna, Proceedings of the 60th Conference on Space Science and Technology (2016), Paper No. 4D02 (in Japanese).

Jodoi, D. and Kurose, T., A 100-meter-class plate space structure construction method using a deployable truss, Mechanical Engineering Letters, Vol.3 (2017), DOI:10.1299/mel.17-00082.

Joudoi, D., Fujita, T., Kobayashi, Y., Sakamoto, F. and Kurose, T., Studies on assembly technology of deployable truss structure for space solar power systems, Proceedings of the 65th International Astronautical Congress (IAC-65) (2014), Paper No. IAC-14-C3.1.3.

Maeno, J., Hirayama, H. and Naruo, Y., Methods and subjects of construction of SPS2000, The Institute of Space and Astronautical Science Report SP, Vol.43 (2001), pp.63-74 (in Japanese).

Mankins, J. C., SPS-ALPHA: The first practical solar power satellite via arbitrarily large phased array, NIAC Phase 1 Final Report (2012).

Natori, M. C., Nagasawa, M., Yamada, J., Okuno, A., Yamakawa, H., Higuchi, K. and Kishimoto, N., A basic construction concept for space structure systems using active connecting elements, Proceedings of the 2nd AIAA Spacecraft Structures Conference (2015), DOI:10.2514/6.2015-0683.

Ozawa, S., Jodoi, D. and Uchida, H., Application of SSPS deployable phased array antenna to geostationary precipitation radar satellite, Proceedings of the 37th ESA Antenna Workshop (2016).

Sasaki, S., How japan plans to build an orbital solar farm, IEEE SPECTRUM (2014).

Sasaki, S., Tanaka, K., Higuchi, K., Okuizumi, N., Kawasaki, S., Shinohara, N., Senda, K. and Ishimura, K., A new concept of solar power satellite: Tethered-SPS, Acta Astronautica, Vol.60 (2007), pp.153-165.