

Panel Deployment Using Inflatable Extension¹

Ken Higuchi (ISAS/JAXA)

3-1-1 Yoshinodai, Sagamihara, Kanagawa 229-8510, Japan

Kazuki Watanabe (WEL Research, Co., Ltd.)

3-8-18-401 Motoyawata, Ichikawa, Chiba, 272-0021, Japan

Structure of a multi-tethered SSPS system is composed of all-in-one panels of power generation, transformation, and transmission. The minimum structural module of the all-in-one panels is a structural unit of 0.5m x 5m. 3800 panels of the structural unit are connected by deployable hinges. The doubly folded structural units are launched at one time, and build a unit of 100m x 95m.

The thickness of the all-in-one panel must be within 20mm including deployable hinges because of the constraint of launcher payload volume. All the power generation devices, transformation devices, battery, and transmission devices must be integrated in this thickness.

Proposed is an idea of structural concept other than honeycomb sandwich panel. Generally, a concept of inflatable structures imposes no restriction on volume after the inflatable deployment, and so it can make the thickness of the all-in-one panel larger during operation.

Here in this propose, the following design conditions are considered. (1) The folded thickness and so the deployed thickness 200mm is 10 times thicker than the original plan. The folded length 500mm is 1/10 of the original plan of 5000mm. Therefore, the folded volume of the 3800 panels at the launch remains unchanged. (2) The extension from 500mm to 5000mm is driven by an inflatable one-dimensional extension mechanism. After the extension, the extensible stem is used as a structural element. (3) Electrical devices can be located at the concentrated area and also can be distributed at the area between the two power generation and transmission surfaces. (4) Deployment hinges can be stored in the dedicated area and so the size and rigidity of hinges with reality can be designed.

Structural unit as a minimum structural module of all-in-one panel for a multi-tethered SPS system can be made thicker by using a concept of inflatable structures, with no change of volume at the launch. Instrumentation of electrical components on board is also improved. In order to investigate the reality of the proposal, a structural model was designed and manufactured by way of trial. The extension test of the module was successful. The perspective structural mass of an actual size is estimated to be light by the trial mode. Through the investigation here, a simple and lightweight deployable panel is considered to become realistic.

¹ Presented at the 11th SPS Symposium, 17-18 September 2008.

インフレーターブル伸展を併用したパネル展開方法^{注1}

樋口 健 (ひぐちけん)

ISAS/JAXA

〒229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1

渡辺和樹 (わたなべかずき)

(株)ウェルリサーチ

〒272-0021 千葉県市川市八幡 3-8-18-401

1. 序

マルチテザー型SSPSの提案[1][2]があるが、その特徴は、(1)発電・変電・送電一体型パネルであり、反射鏡、発電部、送電部などの大型構造物を別々に構築したり制御したりしなくて済む、(2)ユニット構成の繰り返しであるので拡張性と保守性に優れる、(3)受動安定で姿勢制御の信頼性が高い、(4)可動部が少なく不具合発生確率が低い、などである。そのマルチテザー型SSPSの構造は、0.5m×5mの発電一体型パネルの最小構造モジュールである“構造ユニット”パネル3800枚を展開ヒンジで結合し、これを折り畳んだ状態で1回の打ち上げで軌道に運び、軌道上でアクチュエータを用いて可動ヒンジ部を同期展開させて100m×95mの“ユニット”を構築するものである。この“ユニット”25枚を軌道上で結合して500m×475mの“ユニットアセンブリ”とし、さらにその“ユニットアセンブリ”25枚を軌道上で結合して2500m×2375mのSSPSの発電衛星とするものである。展開の過程は図1に示す2段階展開となる。パネル展開方式の0.5m×5mの構造モジュール3800枚を1回で打ち上げるためには、ロケットペイロード部の容積の制約により、収納状態のヒンジ厚さを含めて厚さ2cmとする必要がある。すなわち、発電一体型パネル厚さを、発電・変電・蓄電・送電装置等を全て含んで厚さ2cmに収めることが必要とされる。そのためには、電子機器の小型化が必須であるが、構造モジュールの構造様式とし

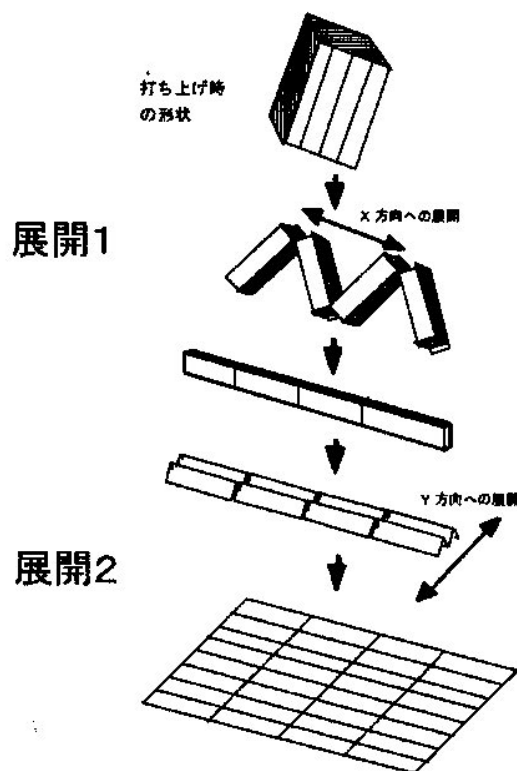


図1 発電電一体型パネルの2段階展開方式



図2 インフレーターブル方式一次元伸展構造

¹ 第11回宇宙太陽発電システム(SPS)シンポジウム、慶應義塾大学三田キャンパスにて2008年9月17, 18日開催

て厚さ2cmのハニカムサンドイッチパネルを想定した場合、両表面板に挟まれたハニカムコア部分に収められるべき電気電子機器（マイクロ波回路、制御装置、バイパスインターフェース、蓄電池、電力制御器など）の寸法から考察すると、両表面板間をつなぐハニカムコアが存在できる場所が極めて少なく、ハニカムサンドイッチパネルとすることが困難な状況になる。構造様式としてハニカムサンドイッチパネルを成立させるためには、機器の革新的な小型化・省スペース化が必須である。また、展開ヒンジや形状調整機構の必要容積を考えると、搭載状態でのヒンジ機構容積の省スペース化、すなわち収納時のヒンジの占める容積を極限的に減らす工夫が必要である。さらに、展開後のユニットパネル剛性はヒンジ部においてもパネル構造部と同等の曲げ剛性が維持されることが要求されるとすると、強固なヒンジ部を実現するために必要とされる容積と重量が想定外に大きくなる恐れがある。

そこで、ハニカムパネル展開構造以外を想定した場合の構造様式を検討した。打上げ時には容積を小さくしておき、軌道上で所望の容積あるいは面積に拡張できる展開構造様式の1つに宇宙インフレーター構造（宇宙膨張構造）があり、展開後の容積に制限がないことを利用して、展開後の板厚を大きく取ることが可能となる。この場合には、打上げ時の容積に由来する軌道上パネル厚さ2cmという制約を外すことができる。しかし、本SSPS検討に限って考えた場合、両面の発送電面の間に挟まれた電気電子機器自体は膨張・収縮はできないため、これら機器の容積や寸法が制約条件となる。ここでは、これらの困難点を克服する1案として、インフレーター伸展を利用した“構造ユニット”パネル構造を提案する。

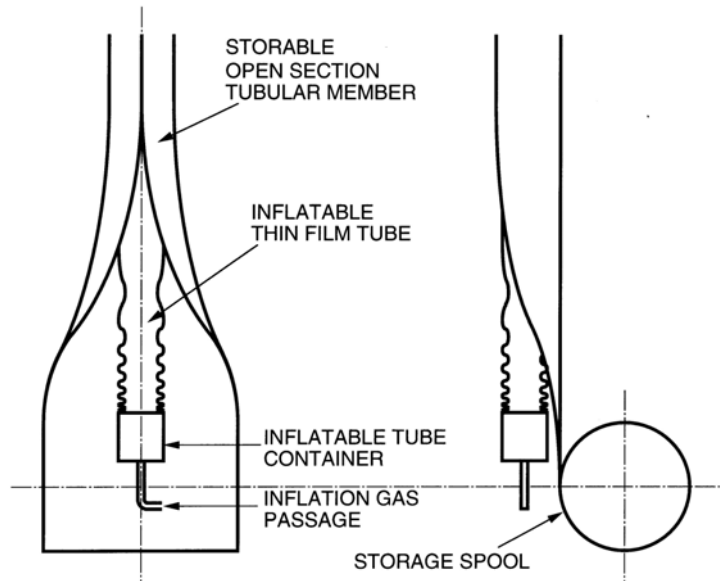


図3 インフレーター方式一次元伸展構造物の原理

2. インフレーター伸展によるパネル展開方式

インフレーター構造の一例として、図2のようなインフレーターSTEMを利用した伸展構造があり得る[3]。インフレーター伸展の基本構成は、図3に示すようにCFRP複合材料を用いた

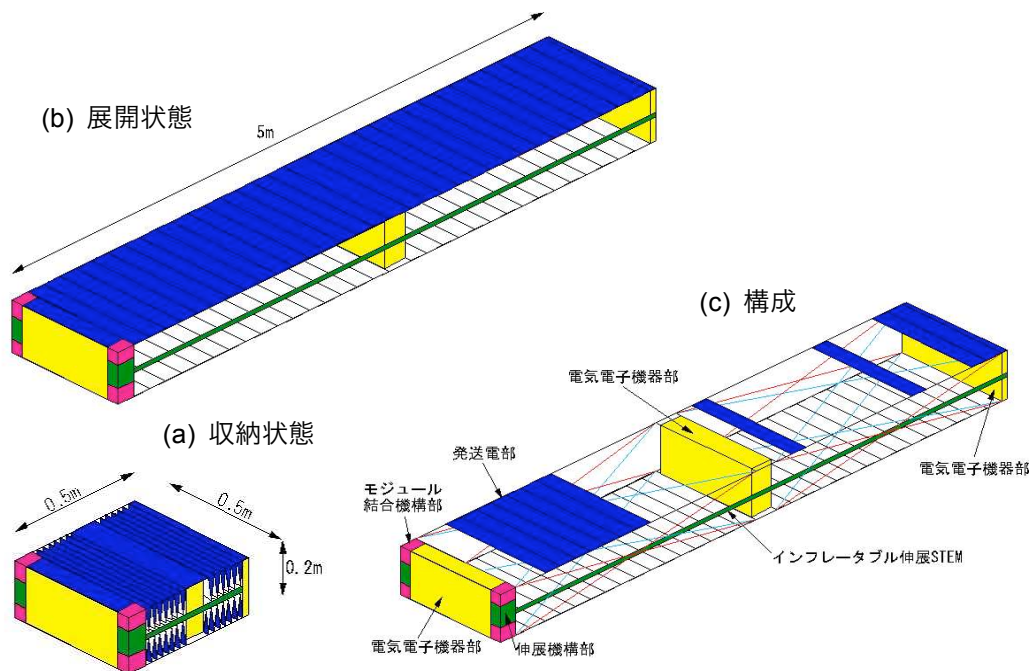


図4 構造ユニットの構成

開口断面チューブ部材(STEM)の内部に、インフレーターブルチューブを内蔵し、ガスで加圧することによって伸展動作を行うものである。すなわち、STEMを、リールに巻かれて収納された状態から、インフレーターブルチューブをアクチュエータとして一次元に伸展させ、自ら円筒形状になるSTEMの性質を利用して強度剛性部材とする。本方式は、これまで単体での試作と伸展試験を多数実施してきており[4][5]、その単純な構成と構造ゆえに軽量化と動作機能の信頼性を高めることが期待できる。また伸展アクチュエータとして使用されるインフレーターブルチューブは内圧を高めることで、伸展力を増大するだけでなく、チューブ自身の座屈強度を向上することも可能である。ただし、ここで提案している使い方では、長期運用を想定し、伸展後はインフレーターブルチューブ内圧を利用しないこととする。

発電電一体型パネルの最小構造モジュールである“構造ユニット”パネルのインフレーターブル方式の展開案を図4に示す。ここでは、これまでのマルチテザー型SSPSの検討に整合させるために、伸展後 0.5m×5m

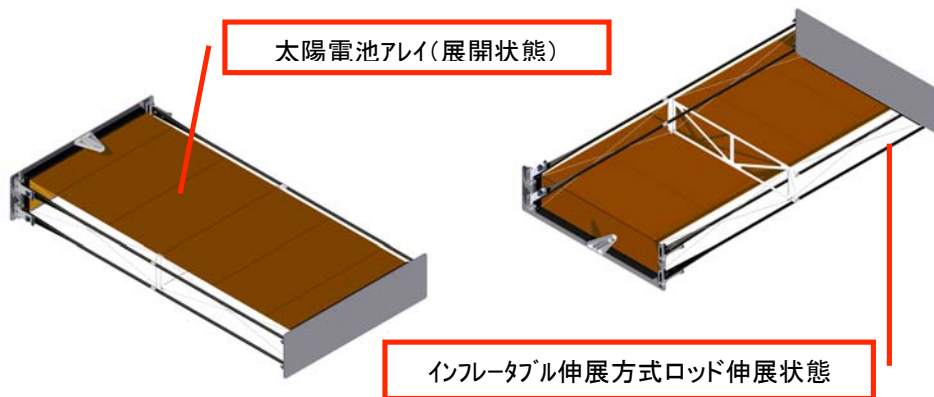


図5 試作品の構造

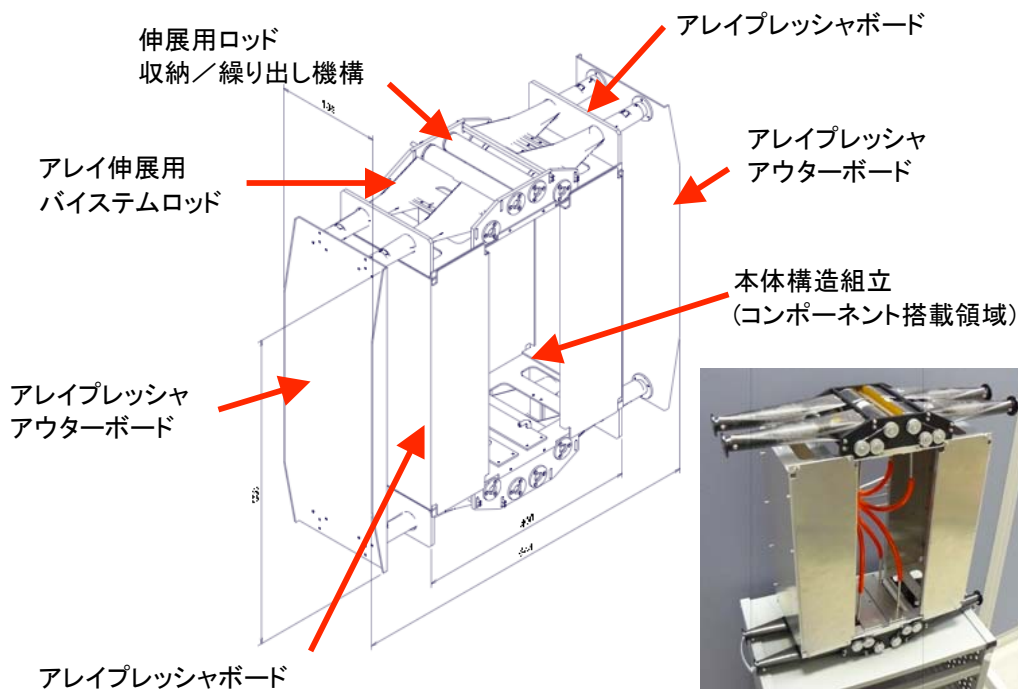


図6 伸展機構部の構造設計

となる構造モジュールとしたが、更に効果的な寸法があり得るとも考えられる。

設計条件は以下のように考えた。(1)収納厚さを展開パネル案の10倍(20cm)、収納長さを1/10倍(50cm)にして、打上げ時の収納容積を展開パネル案と同じになるようにした。(2)長さ50cmから5mへの伸展にはインフレーターブル伸展構造物(SPINAR)を用いる。このインフレーターブル伸展構造物を

リジッド太陽電池アレイまたはフレキシブル太陽電池アレイ展開の一次元伸展用アクチュエータとして機能させる。また、この伸展ブーム後は構造として機能する。(3)電気電子機器は必ずしも図4に示すような集中配置でなくても良く、蛇腹状に折り畳まれた発送電面間にも分散配置のための搭載空間をとることもできる。このように、電気電子機器を全て厚さ2cmに収めなければならない制約からも解放される。さらに、(4)構造モジュール間のヒンジ機構は、専用の大きな空間を確保できるようにもなり、より現実的なヒンジ機構を想定することができるようになる。

但し、ここに提案するインフレータブル伸展構造は、完全なハニカムサンドイッチパネルほどには大きな剛性は得られないことが想定されるので、軌道上の構造安定性確認などは新たな剛性値を用いた構造ダイナミクスシミュレーションで検証されなければならない。また、この試作は伸展構造様式の実現性の検証を目的としているので、発電・変電・送電機能は持たせず、また構造ユニット1モジュールのみの試作であるのでモジュール結合機構部の展開機能も持たせない。さらに、STEM 伸展後の長さを実際の1/2である2.5m程度に設定する。そして、試作モデルを供試体として構造モジュールの伸展機能を確認する。

3. 試作結果と展開試験

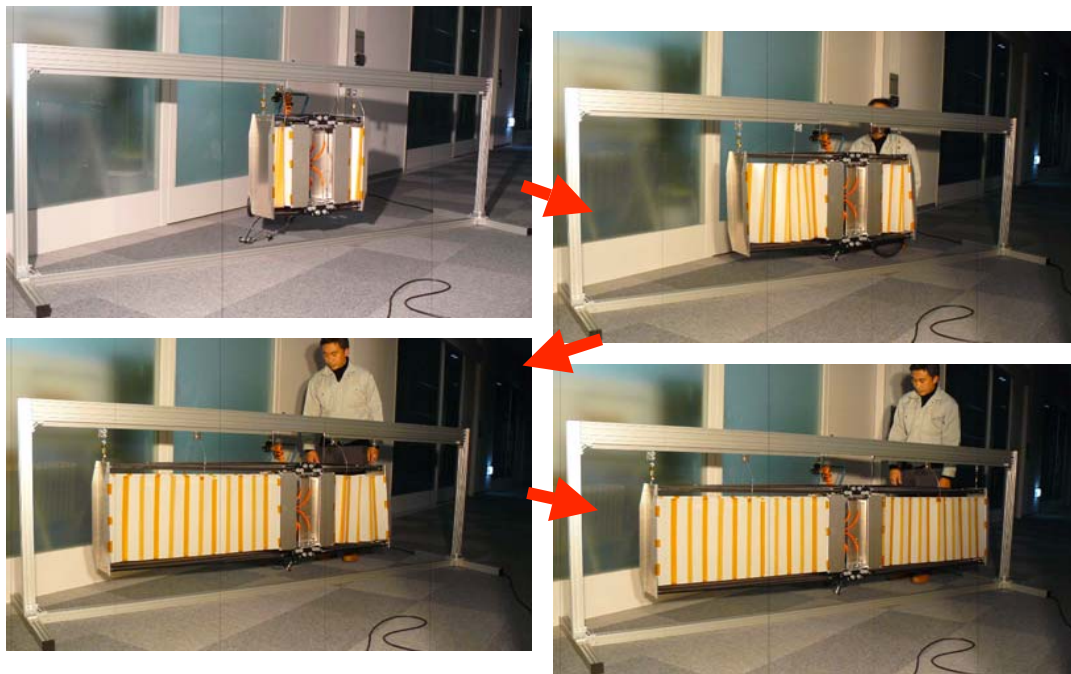


図7 伸展試験

表1 試作品の構造質量の見積り

部品	主要な材料	重量 [kg]	数量	総重量 [kg]
伸展ロッド／繰り出し機構	アルミ合金板金 CFRPステム材	1.8	2	3.6
本体構造組立	アルミ合金板金	1.8	1	1.8
アレイプレッシャボード	アルミ合金板金	0.5	2	1
アレイプレッシャアウターボード	アルミ合金板金	0.8	2	1.6
合計質量 但し、インフレーション装置は含まず。				8

表2 実機の構造質量の見積り

部品	主要な材料	重量 [kg]	数量	総重量 [kg]
伸展ロッド／繰り出し機構	CFRP製ブラケット CFRPステム材	0.6	2	1.2
本体構造組立	CFRPスキン/アルミハニカム/サンドイッチパネル	1.0	1	1.0
アレイプレッシャボード	CFRPスキン/アルミハニカム/サンドイッチパネル	0.3	2	0.6
アレイプレッシャアウターボード	CFRPスキン/アルミハニカム/サンドイッチパネル	0.4	2	0.8
インフレーション装置	ポンペ、バルブ	0.5	1	0.5
合計質量 但し、アレイダミーは含まず。				4.1

設計、試作、伸展試験をそれぞれ図 5, 6, 7 に示す。また、試作品の構造質量を表 1 に示す。

今回の試作をもとにした実機の構造質量の見積りが表 2 である。構造質量は 4 kg/m^2 程度にまで達成され得ると考えられる。

以上のように、本方式により、軽量で単純な伸展・展開アレイが実現可能であると考ええる。

しかし、本提案が必ずしも構造モジュールの最適な形態とは考えていない。それは、(1)同期伸展のリスクが依然あること、(2)本提案寸法のある搭載機器の搭載性を向上させようとするものであるが、発蓄変送電一体型パネルの曲げ剛性は必ずしも向上しない可能性があること、(3)熱設計上の成立性は別途検討しなければならないこと、(4)構造モジュールの大きさと縦横比およびユニット厚さの最適選択があり得ること、(5)結局は板をヒンジで開く方式であり、喫緊の設計には使用可能だが、20-30 年後の技術動向を反映していないこと、などの理由による。

4. 結論

マルチテザー方式で、発蓄変送電一体型パネルの構造モジュールの寸法と打上げ時容積を変えないで、インフレータブル伸展方式によって、板厚方向の寸法を拡大し、機器搭載性を改善する提案を行った。また、本方式の実現性を得るための試作を行い、試作品重量とともに実寸サイズの重量を見積もった。本方式により、軽量で単純な伸展・展開アレイが実現可能であると考ええる。

謝辞

本研究は、財団法人 無人宇宙実験システム研究開発機構 (USEF) の平成 19 年度支援による成果を含むものであり、著者らはここに深く謝意を表します。

参考文献

- [1] S. Sasaki, K. Tanaka, K. Higuchi, N. Okuizumi, S. Kawasaki, M. Shinohara, and K. Ishimura, "Engineering Research for New Tethered Solar Power Satellite," 25th International Symposium on Space Technology and Science, Kanazawa, Japan, 2006-f-11 (2006.6).
- [2] Susumu Sasaki, Yoshiyuki Fujino, Ken Higuchi, Kosei Ishimura, Shigeo Kawasaki, Hiroyuki Ogawa, N. Okuizumi, Kei Senda, Naoki Shinohara, and Koji Tanaka, "Feasibility Study of Multi-bus Tethered-SPS," 59th International Astronautical Congress, Glasgow, IAC-08. C3.1.3, (2008.9).
- [3] Ken Higuchi, Kazuki Watanabe, Akihito Watanabe, Hiroaki Tsunoda, and Hiroshi Yamakawa, "Engineering Design and Evaluation of an Ultra-light Extendible Mast as an Inflatable Structure," 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 7th AIAA Gossamer Spacecraft Forum, Newport, Rhode Island, USA. AIAA 2006-1809, (2006.5).
- [4] Ken Higuchi, Yoshiro Ogi, Kazuki Watanabe, and Akihito Watanabe, "Verification of Practical Use of an Inflatable Structure in Space," 26th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), Hamamatsu, 2008-c-08, (2008.6).
- [5] 樋口健, 渡辺和樹, 渡邊秋人, "宇宙インフレータブル伸展方式による月面発電タワー構造," 第 50 回構造強度に関する講演会, 3A09, 北九州, (2008.7).