

多重折り畳み型パネル展開構造物の構造特性評価

Evaluation of Structural Characteristics of Multiple Foldable Panel Structure

宮崎研究室

山田 諭

Abstract: In recent years, large space structure system such as SSPS (Space Solar Power System) is researched actively and multiple foldable panel structure is proposed to be applied such system. However, the larger its structure becomes or the higher the accuracy of the structure becomes. And its complexity affects deployment possibility, accuracy and structural property. In this paper, the structural property of the entire system affected the configuration conditions are evaluated by performing a structural analysis.

1. 緒言

1.1. 研究背景

近年、パネル展開を行う人工衛星の展開精度にも高精度さが要求されてきている。高精度展開構造物の代表的な例としては、宇宙太陽光発電システム(SSPS)が挙げられる。SSPSは、宇宙空間で太陽エネルギーを集め、そのエネルギーを地上へ伝送して利用するシステムである^[1]。

実現に向けての第一歩として、地上での電波ビームによるエネルギー輸送も研究されている。地熱発電や風力発電など、地上で発電する方法では送電設備などの設置コストの増加などの問題があるが、電波ビームによりワイヤレスでエネルギーを輸送することで、従来の送電線による方法と比較して、送電線とその下の土地が不要になり、鉄塔等も削減されるため大幅なコストと建設期間の削減につながる。

SSPSは、電波ビームによるエネルギー輸送を宇宙から行おうというものであり、宇宙政策全般に亘る計画として決定した国家戦略である「宇宙基本計画」の項目に採択されている。人工衛星を利用したSSPSの実現方法は様々なものが考えられているが、その一つが多重折り畳みパネル(Fig. 1)の展開によるものである。

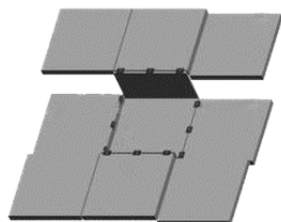


Fig. 1 多重折り畳みパネル^[2]

SSPSではパネルの表面にアレー放射素子が並べられ、アンテナとして機能する^[3]。大面積アンテナを建設する場合、従来の手段ではアンテナを小面積に分解し、建設現場まで輸送し、現場で組み立て設置していた。これでは多くの労力と時間が必要になってしまう。

しかし多重折り畳みパネルは、複数のパネルを重ねることによって小さく畳まれた状態から大きな面積を展開できるパネル構造であるため、展開時は大きく、収納時は小さいパネル構造を実現できる(Fig. 2)。

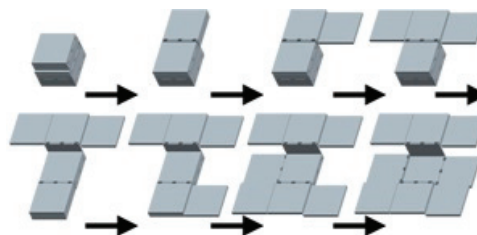


Fig. 2 パネル展開過程

パネル表面のアンテナは、同一平面上に小型のアンテナ素子が2次元方向に複数配列された構成になっており、各素子の位相を移相器により調整できる。こうすることにより、集中ビームや段差補正が可能となる。またアンテナ全体を傾けることなく、ビーム方向を調整することができる。受信部ではビームを受けて整流後、交流電気に再変換して出力する。これにより、送電線を張ることなく電気エネルギーを供給することができる(Fig. 3)。

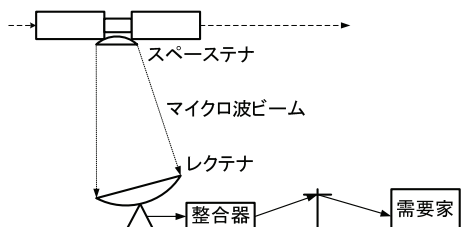


Fig. 3 SSPS と電力網のインターフェース^[4]

しかし、送信アンテナから出されたマイクロ波ビームを受信アンテナで全て受信できなければ、宇宙空間で得た太陽光エネルギーを効率的に利用することができない。多方向に拡散したマイクロ波ビームを効率よく受信しようとする、地上の受信アンテナが巨大化

してしまうことになるためこれは現実的とはいえない。したがって、送信アンテナを目的とした多重折り畳みパネルの展開にあたっては展開後の形状精度が高いことが求められる。

また、将来より大きな展開構造物を展開させる際、どの部分の展開ヒンジやパネルに剛性を持たせれば要求される形状精度を実現できるかがわかれば、構造物全体を精度よく作る必要がなくなる。これは構造全体の軽量化だけでなく、製作時間やコストの削減にもつながる。さらに、その影響をみたくて、構造全体に要求された剛性や形状精度になるためにはどのようなヒンジの諸元で設計すればいいのかわかるようになる。

1.2. 目的

1.1 節の研究背景を踏まえ、本研究ではヒンジの剛性、取り付け位置、個数、パネル間の傾きを変化させた場合に構造物全体の構造特性にどのような影響が出るかを明らかにすることを目的とする。

1.3. 影響評価のアプローチ方法

剛性評価を行うことで、要求された展開後の形状精度を実現するにはどのようなヒンジの諸元が必要となるのかを明らかにすることができるのではと考えた。

そこで、実際に考案されている多重折り畳みパネルの展開モデルを基に展開後の構造物全体の剛性評価を行った。

2. 解析結果

2.1. 解析方法

展開後の構造物の剛性を、固有振動数をみることでより行う。固有振動数が高いほど剛性も高いものとなる。特に、パネル間をつなぐジョイント部(=ヒンジ)の剛性や構造物展開後の形状が、全体の剛性に与える影響をみる。

解析手法としては汎用有限要素法ソフトウェアである「ANSYS®」を用い、モーダル解析を行った。

パネル枚数は、枚数によって固有振動数の変化に法則性があるかどうかをみるため 2,3 枚のパネル、および、多重折り畳みパネルでのアンテナの構成例として 9 枚のパネルについて、それぞれその枚数と同じ面積の 1 枚パネルとの剛性の比較や、平面に展開した場合での比較、パネル間で傾きや段差がある場合での比較、ヒンジのみ素材を変えた場合での比較を行った。こうして各場合の展開後の剛性評価をする。

2.2. 解析条件

今回解析したパネルとヒンジのモデルを以下の Fig. 4 に示す。

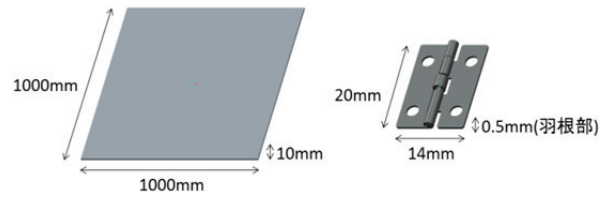


Fig. 4 パネル(左)とヒンジ(右)のモデル

また、パネルとヒンジの素材について、双方が同じ素材でできているとしたときの条件を Table 1、ヒンジのみ硬い素材でできているとしたときの条件を Table 2 に示す。ヒンジのみ硬い素材でできているときのヒンジの条件について、素材の硬さはヤング率によって変化するため、今回はヤング率をアルミの 10 倍の素材と仮定して解析した。

Table 1 パネルとヒンジが同じ素材のときの材料諸元

パネル, ヒンジ	
材料	アルミ
等方性弾性	
密度	2700kg/m ³
ヤング率	70.3GPa
ポアソン比	0.3

Table 2 パネルよりもヒンジが硬いときの材料諸元

	パネル	ヒンジ
材料	アルミ	アルミより硬い
等方性弾性		
密度	2700kg/m ³	2700kg/m ³
ヤング率	70.3GPa	703GPa
ポアソン比	0.3	0.3

ANSYS®でモーダル解析を行う際は CAD で作成したデータを取り込んで解析を行う。取り込んだモデルを微小要素に分割する「メッシュ」を切るときはメッシュの細かさを疎、中間、密から選択できるが、今回は密を選択した。メッシュが細かいほど解析時間は長くなるものの、一般的には精度のよい結果が得られる。

2.2.1. 2枚パネルの場合

パネル 2 枚の時の作成パターンは以下の 5 通りである。モデルの完全固定箇所は左方のパネルの端面を選択した。

- パネル 2 枚と同じ面積の 1 枚パネル
 - 平面に展開
 - 平面に展開で、ヒンジのみ硬い材料
 - パネル間で 10deg.の傾きあり
 - パネル間で 10deg.の傾きありで、ヒンジのみ硬い材料
- 完全固定箇所とヒンジの取り付け位置を以下の Fig.

5, 解析結果の一例を Fig. 6 に示す.

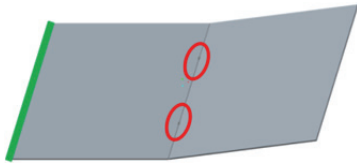


Fig. 5 パネル 2 枚の時の完全固定箇所(緑線部)とヒンジ取り付け位置(赤丸部)

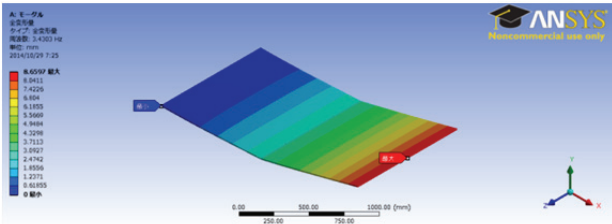


Fig. 6 解析例(2 枚:パネル間で 10deg.の傾きあり)

2.2.2. 3 枚パネルの場合

パネル 3 枚の時の作成パターンは以下の 5 通りである。モデルの完全固定箇所は左方のパネルの端面を選択した。

- パネル 3 枚と同じ面積の 1 枚パネル
- 平面に展開
- 平面に展開で、ヒンジのみ硬い材料
- パネル間で 10deg.の傾きあり
- パネル間で 10deg.の傾きありで、ヒンジのみ硬い材料

完全固定箇所とヒンジの取り付け位置を以下の Fig. 7, 解析結果の一例を Fig. 8 に示す。

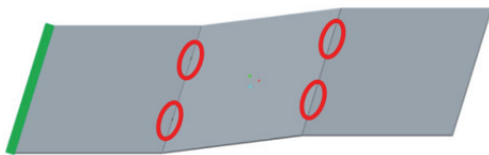


Fig. 7 パネル 3 枚の時の完全固定箇所(緑線部)とヒンジ取り付け位置(赤丸部)

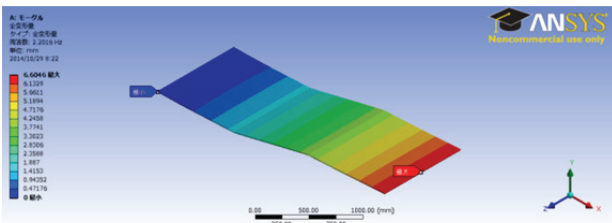


Fig. 8 解析例(3 枚:パネル間で 10deg.の傾きあり)

2.2.3. 9 枚パネルの場合

パネル 9 枚の時の作成パターンは以下の 7 通りであ

る。モデルの完全固定箇所は中央パネルの裏底面を選択した。

- パネル 9 枚と同じ面積の 1 枚パネル
- 平面に展開
- 平面に展開で、ヒンジのみ硬い材料
- パネル間で段差あり
- パネル間で段差ありで、ヒンジのみ硬い材料
- パネル間で段差ありで、10deg.の傾きあり
- パネル間で段差ありで、10deg.の傾きありで、ヒンジのみ硬い材料

完全固定箇所とヒンジの取り付け位置および段差の位置を以下の Fig. 9, 解析結果の一例を Fig. 10 に示す。

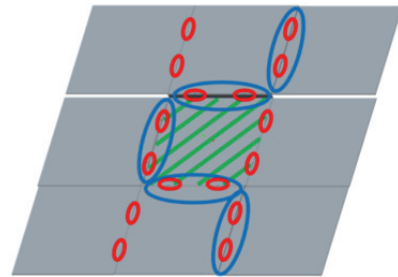


Fig. 9 パネル 9 枚の時の完全固定箇所(緑線部・裏底面)とヒンジ取り付け位置(赤丸部)と段差の位置(青丸部)

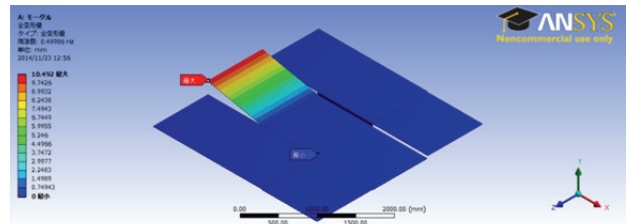


Fig. 10 解析例(9 枚:パネル間で段差あり)

2.3. 解析結果

パネル枚数が 2,3,9 枚の各場合で解析した固有振動数の結果を Fig. 11 にまとめる。

ヒンジが硬い>傾きがある>平面>それぞれの枚数と同じ面積の 1 枚パネル、の順に剛性は低くなっていく。段差を持ったパネルの場合は、段差と傾きを持っているの方が、段差のみよりも剛性が高い。

2 枚	傾きありでヒンジ硬い	傾きあり	平面でヒンジ硬い	平面	1枚パネルで同じ面積		
	3.4619Hz	3.4303Hz	2.2065Hz	2.1283Hz	2.1163Hz		
3 枚	傾きありでヒンジ硬い	傾きあり	平面でヒンジ硬い	平面	1枚パネルで同じ面積		
	2.227Hz	2.2016Hz	1.0339Hz	0.94844Hz	0.93502Hz		
9 枚	平面でヒンジ硬い	平面	1枚パネルで同じ面積	段差・傾きありでヒンジ硬い	段差・傾きあり	段差ありでヒンジ硬い	段差あり
	6.0402Hz	6.0038Hz	5.9972Hz	2.652Hz	1.993Hz	1.1413Hz	0.48986Hz

剛性:高

剛性:低

Fig. 11 枚数ごとの固有振動数の結果

2.4. 考察

「平面」と「それぞれの枚数と同じ面積の1枚パネル」の違いはヒンジが付いているかないかということと、パネル同士がヒンジで連結されているか直接連結されているかということである。

ここで、ヒンジの固有振動数が構造物全体の剛性にどのくらいの影響を与えているのかを知るため、ヒンジのみの固有振動数をみた。モデルの完全固定箇所は片方の羽根部の裏底面を選択した(Fig. 12)。



Fig. 12 ヒンジの完全固定箇所(緑線部・裏底面)

その結果、ヒンジのみの固有振動数は4789.6Hzであった。Fig. 11の解析結果では平面と1枚パネルの固有振動数の差は0.01Hz程度の差しかない。

今回使用したヒンジのモデルは、パネルの大きさに比べてとても小さいため、平面と1枚パネルを比較したときに、構造物全体の剛性にはヒンジの固有振動数はほとんど影響を及ぼさなかった。しかし、ヒンジが大きくなると構造物全体に対してのヒンジの面積の割合も大きくなるため、ヒンジの影響は顕著になってくるはずである。

したがって、ヒンジの剛性だけでなく大きさも構造物全体の剛性を評価するうえでの評価基準になる。

3. 結言

本研究では、展開後の多重折り畳みパネルの剛性評価をヒンジの条件やパネルの形状を変化させることにより行った。結果は、ヒンジが硬い>傾きがある>平面>それぞれの枚数と同じ面積の1枚パネル、の順に剛性は低くなっていった。また、段差を持ったパネルの場合は、段差と傾きを持っている方が、段差のみよりも剛性が高くなった。したがって、展開後の多重折り畳みパネルの形状精度を高くさせるためには、ヒンジの素材を硬いものにする必要がある。また、傾きや段差によって剛性が低くなることはなく、アクティブフェーズドアレイアンテナには集中ビームや段差補正が可能という特徴があるため傾きや段差があることは問題にならないといえる。

今後は展開後の挙動だけでなく、展開途中の挙動を解析し、どの部分のヒンジにどのくらいの力がかかるかを明らかにする。これがわかることで、取り付け位置ごとに必要なヒンジの強度が求められる。求めるにあたって、展開途中の挙動を解析するためにはヒンジにガタをもたせなければならない。しかしANSYS®の

固有値解析や周波数応答解析では非線形性を含ませることが出来ないため、接触部の変化(片浮き等)を含めた解析を行うのは難しい。時刻暦解析で荷重と接触面積の時間変動を時々刻々解析していく方法はあるが、過渡応答解析+接触解析(非線形解析の中でもっとも収束させるのが困難)と一緒に解く必要があるため、解析時間が長大になってしまうことが予想される^[5]。

したがって、複雑な展開構造になるほど、解析ができないことが考えられるため、ある程度低次元化したモデルと、実際の展開実験データの重ね合わせで、モデルの構造解析を行い、その上で展開までの解析を行いたい。

そのためにまずは、ヒンジの形状や大きさが及ぼす影響や、地上実験を模擬するための重力の影響を考慮した解析をすることで、実際にパネル展開を行う場合にどのパラメータが展開挙動に影響してくるのかを明らかにする。

参考文献

- [1] 宇宙開発戦略本部事務局, 宇宙基本計画～日本の英知が宇宙を動かす～.
<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/utyuu/keikaku/pamph_wa.pdf> (参照 2015-01)
- [2] 学校法人日本大学, 展開型フェーズドアレイアンテナ, 特開 2012-090253 号, 2012-05-10.
- [3] 電子情報通信学会編, 現代電子情報通信選書『知識の森』宇宙太陽発電, p.99, 株式会社オーム社, 2012.
- [4] 高野忠, エネルギーの未来 宇宙太陽光発電 宇宙の電気を家庭まで, p.137, 株式会社アスキー・メディアワークス, 2012.
- [5] CYBERNET, サイバネット メカニカル CAE サポートセンター FAQ.
<<https://ssl.okweb3.jp/ansys/EokpControl?&tid=208522&event=FE0006>> (参照 2015-01)