

B16 織物膜構造における薄型デバイス貼付および配線法の検討

仁尾航 (東工大・院), 坂本啓 (東工大), 大熊政明 (東工大),
渡邊秋人 (サカセ・アドテック)

1. 序論

人工衛星に搭載する展開型太陽電池アレイ構造を、薄膜太陽電池を薄膜でできた構造部材に貼付して構築することで、これまでになく軽量・高収納率に実現できることが期待される。しかし2010年にソーラー電力セイル IKAROS が、スピンによる遠心力によって 14m×14m サイズのセイルを展開することに成功したものの、3軸安定衛星に薄膜アレイを適用する方法を IKAROS の知見に基づき検討した例はいまだ希少である。IKAROS で顕在化した問題を解決しながら、新たな構造様式を提案することは意義深い。

構造規模によらず太陽電池アレイ構造を検討する時に、式(1)に示す発生電力質量比を向上させることが低コスト化につながると言える。

$$\text{発生電力質量比 [W/kg]} = \frac{\text{発生電力 [W]}}{\text{構造質量} + \text{太陽電池質量[kg]}} \quad (1)$$

すなわち、構造質量を低く抑えつつ、広い展開面積を持ち大きな発生電力を得ることで発生電力質量比を向上させることができる。

様々な展開式太陽電池アレイ構造の提案がこれまで行われてきている。種々の既存構造における発生電力質量比の概算値を著者がまとめたものを図1に示す。この概算においては、それぞれの構造に対して、今現在搭載可能な最高レベルの性能を持つ太陽電池を展開面積の80%を埋め尽くすように搭載することを想定した。

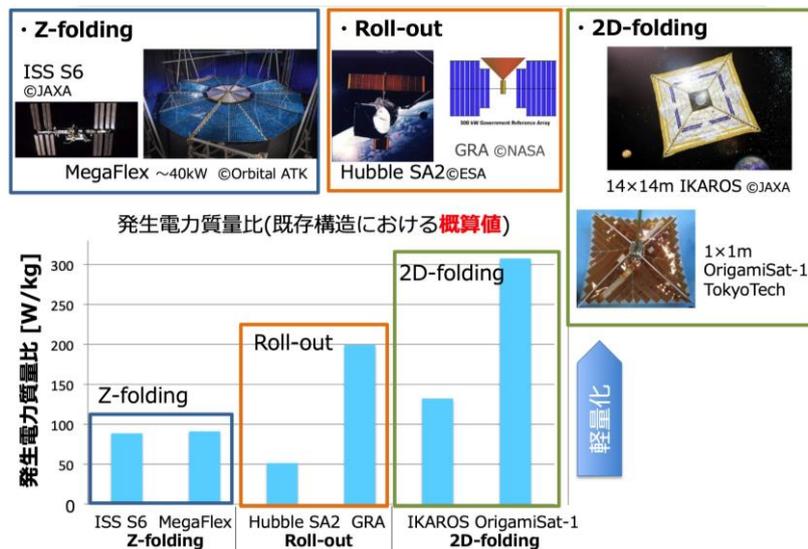


図1 既存構造における発生電力質量比の概算値

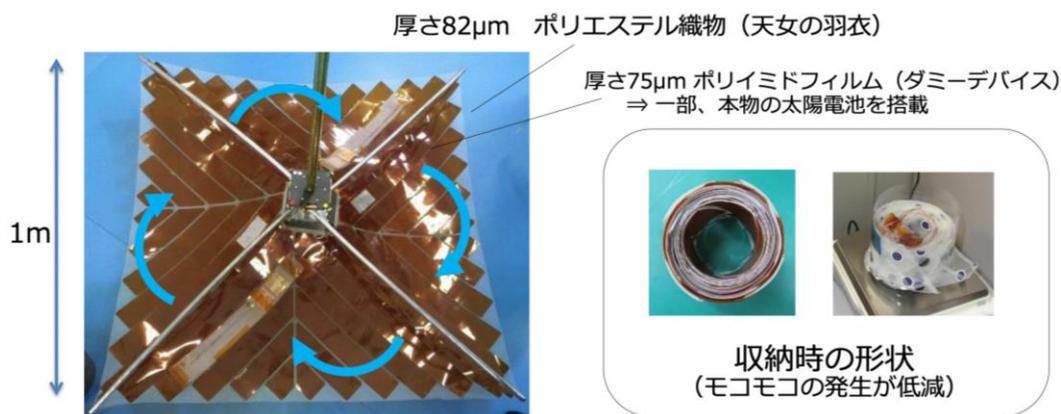


図2 織物膜による周長差の吸収

図1に示した概算における太陽電池の発生電力と質量、構造の質量と展開面積の情報に関しては以下を参考にした。すなわち、太陽電池セルについては、1) Z-Folding: Rigid Triple-Junction[1]、2) Roll-out, 2D-Folding: Flexible Dual-Junction[2]である。展開構造については、ISS-S6 モジュール[3]、ATK MegaFlex[4][5][6]、Hubble SA2[7][8]、GRA[9]、IKAROS[10]、OrigamiSat-1 (収納体積: 0.10 × 0.10 × 0.08 [m]、展開面積 1.0 × 1.0 [m]、質量 0.12 [kg])、である。

ここで、太陽電池アレイの展開構造を展開様式に応じ3つに分類して考える。Z-Foldingは蛇腹折りによって折りたたむ構造で、国際宇宙ステーション (ISS) など、多くの衛星で採用されている。Roll-outは巻物状に太陽電池と薄膜を巻きつけて展開する。実用例は少ないが、Hubble 宇宙望遠鏡などで採用された実績がある。2D-FoldingはIKAROSで採用された二次元的な展開方式である。実証例はIKAROSだけであるが、著者らが開発する3U CubeSat OrigamiSat-1は2019年打ち上げ予定である。これらの構造ごとに発生電力質量比を比較すると、図1より2D-Foldingが最も高い値を持つ傾向があるとわかる。

しかし、IKAROSでの実証にあたって課題も発見された。その一つが、薄膜を円筒状に巻きつける際に内外収差により生じる膜面外へのたわみ (以降、モコモコと呼称) の発生であり、搭載デバイスを損傷させてしまうことや収納効率が低下する恐れがあった。そこでOrigamiSat-1では、膜材料として伸縮性の高い織物を用いることで、モコモコの発生が低減することが確認された (図2)。ただし、(1) 織物の収納性を阻害しない配線方法は未だ確立されていないこと、が課題である。OrigamiSat-1ではIKAROSで使用された銅箔配線よりも剛性の低いフレキシブル導電糸を採用しており、そこで発見された課題は以下の2つである。すなわち、(2A) 抵抗値が比較的高いこと(1 Ω /m)、(2B) 配線が一定間隔で縫い付けられているのみであり固定が不安定であること、である。

本論文では上記(2B)を解決する一案として、「織物膜に導電糸を縫い付ける」という方法を提案する。そしてこの方法が課題(1)および(2A)に与える影響を評価することで、提案方式の有用性を示し、解決すべき課題を抽出することを本論文の目的とする。この目的を達成するため、本論文を以下のように構成する。2節にて電力的評価によって(2A)への対応を示し、3節にて提案する導電糸のミシンを使った縫い付け方法を示す。4節にて、課題(1)への対応として、収納性への影響評価を目指し、まずせん断剛性の評価を行う。

2. 導電系配線の電力的評価

2.1 評価方法

フレキシブル導電系を配線して用いた、太陽電池二次元展開構造の発生電力と質量について概算を行い、導電系配線の有効性を評価する。構造は 1m~100m の任意の幅を持つ四角形状の展開膜とし、OrigamiSat-1 の構造体積・質量から概算を行う。構造の模式図を図 3 に示す。展開面全体に太陽電池アレイを搭載する。一つの太陽電池アレイは複数の太陽電池セルから構成され、アレイの縦と横の長さから、太陽電池セルの数が決定し、発生電圧と発生電流が決定される。今回は、膜構造全体を 25 個(縦 5 個×横 5 個)のアレイに分割する場合と、100 個(縦 10 個×横 10 個)のアレイに分割する場合の 2 通りでアレイの大きさを計算する。太陽電池セルは OrigamiSat-1 に搭載予定の CIGS 太陽電池[11] (発生電力効率 7%) をアレイ面積の 80% に貼付することを仮定し、それぞれの太陽電池から衛星の中心まで、フレキシブル導電系のみを使って配線する。フレキシブル導電系は計測値から、一本あたり質量 1[g/m]、抵抗値 1[Ω/m]として概算する。ここで、発生電力質量比を α [W/kg]、衛星の配線を除いた質量を M [kg]、配線の質量を m [kg]、発生電力を P [W]、配線の消費電力を p [W]とすると、

$$\text{発生電力質量比 } \alpha \text{ [W/kg]} = \frac{P-p}{M+m} \quad (2)$$

$$= \frac{P}{M} \eta \quad (3)$$

ただし、 η は配線の質量と消費電力が衛星全体の発生電力質量比に与える損失を表す係数で、次式で定義する。

$$\eta = \frac{1 - \frac{p}{P}}{1 + \frac{m}{M}} \quad (3)$$

フレキシブル導電系は式(3)が最大となるように、複数本束ねて配置するものとする。

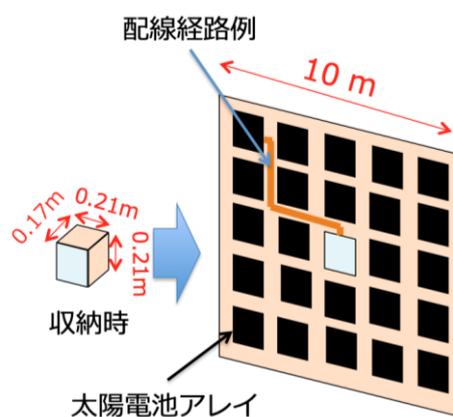


図 3 太陽電池アレイ展開構造の模式図 (一辺の幅 10m、太陽電池アレイ分割数 25 個の場合)

2.2 結果・考察

アレイ分割数が100個、展開膜の一边の長さが10mのときの計算結果を表1に示す。発生電力質量比は128 [W/kg]であった。これは概算であるが、従来の展開構造と比較して非常に高い値である。損失係数は1割程度であり、配線が発生電力質量比に与える影響は限定的であると言える。

表1 導電系配線の評価結果(アレイ分割数:100)

全体	展開膜の一边の長さ[m]	10.0
	衛星合計質量 $M + m$ [kg]	73.5
	発電電力 $P - p$ [kW]	9.37
	発生電力質量比 α [W/kg]	128
配線	配線質量 m [kg]	6.0
	消費電力 p [kW]	0.46
	損失係数 η [-]	0.87

また、図4は展開膜の一边の長さおよび、アレイ分割数を変更した際の計算結果である。一边の長さが変化しても損失係数には変化が少なく、構造が100mとかなり大きな規模になっても配線の影響は小さいままであることがわかる。一方で太陽電池アレイの分割数を変化させると損失係数に顕著な変化が見られた。アレイ分割数を100から25に減らすと損失係数は大幅に増大する、すなわち配線による損失を顕著に減少させることができる。

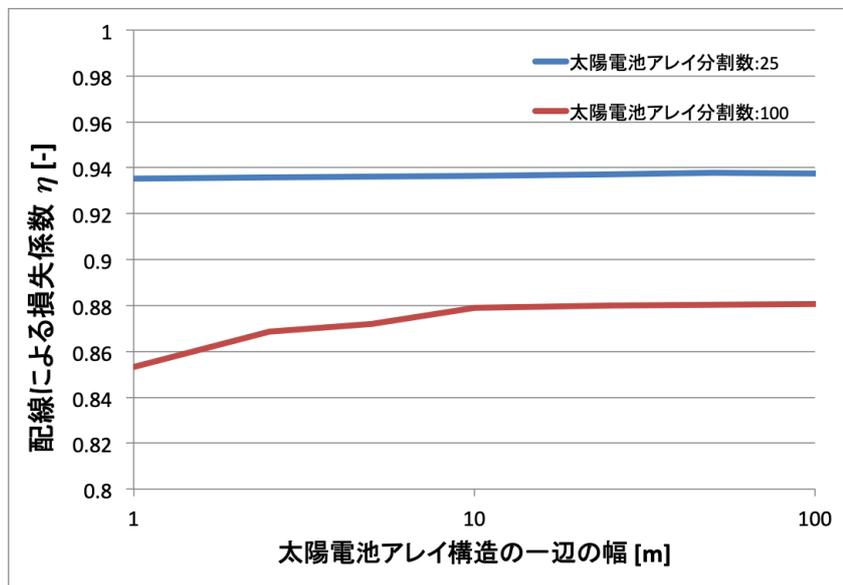


図4 配線による損失係数と膜構造一边の長さとの関係

この結果から、比較的抵抗値の高い導電系を配線として用いたとしても、衛星の発生電力質量比を高い水準に実現できることが電力的に説明できた。このことは、構造の規模によらず、また、太陽電池アレイの分割数を少なくすることで損失が小さくなる傾向があることがわかった。

3. 導電糸のミシン縫製

ここで、ミシンを使ってフレキシブル導電糸を縫い付ける方法を試みる。図3はフレキシブル導電糸を使って縫い付けたプロトタイプである。薄膜太陽電池を織物と固定する際には、導電糸をミシン糸として使用し太陽電池と織物を直接縫い付けて固定する。縫い付け後にはんだ付けすることで固定と導通を両方同時に達成することができる。また、フレキシブル導電糸を膜上に配置する際には導電糸とは別の固定用ミシン糸を用いる。ミシン糸でジグザグ縫いを行うことで導電糸を織物上に押さえつける。したがって、導電糸は摩擦によってのみ固定されており、織物の変形に対して柔軟に変形することができる。

次に、この導電糸の固定方式が織物の収縮性にどのような影響を与えるか評価を行うことを目指して、織物の特性としてのせん断変形をまず評価し、この固定方式の適用性を検討する。

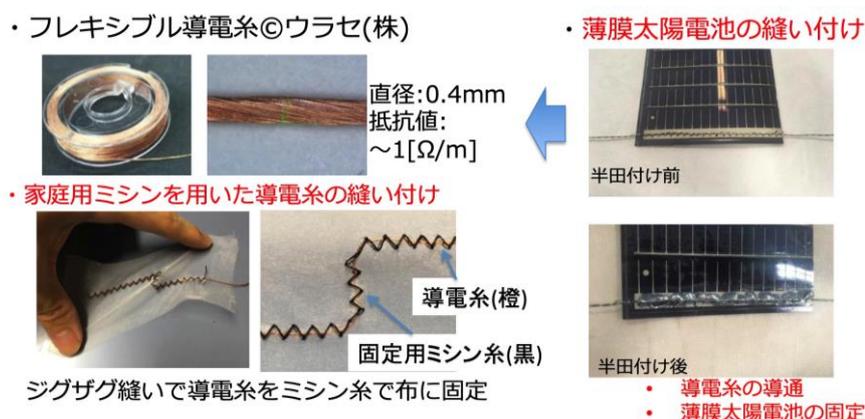


図3 フレキシブル導電糸のミシン縫製方法

4. 導電糸をミシン縫製した織物のせん断剛性の評価

4.1 評価方法

導電糸をミシン縫製する方法によって織物の収縮性にどのような影響を与えるためには、織物収縮時の現象について理解する必要があるが、その現象は未だ明らかになっていない。しかし、膜の巻きつけを蛇腹折りの複合系であると想定すると、収縮時の現象としては大きく二つの現象のどちらか、または両方が生じていると考えられる(図4)。ひとつは、周方向の膜の伸びであり、もう一方は蛇腹層間の周方向のずれである。どちらの場合においても、モコモコの発生を低減させるほどの現象に至らせる根本要因は織物が持つ Bias 方向(繊維に対して 45° 方向)に伸びる性質に他ならない。そこで、フレキシブル導電糸をミシン縫製する方法が織物のせん断剛性に与える影響についてまずは評価を行う。

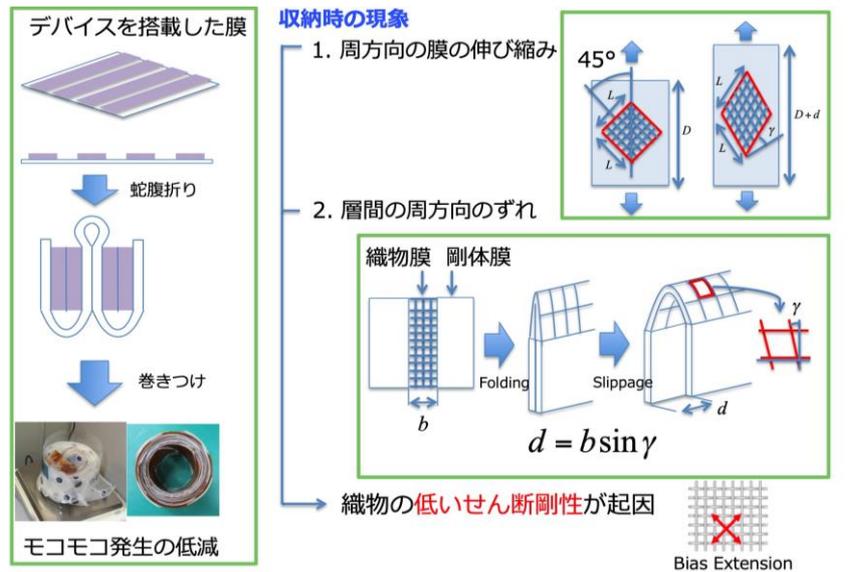


図 4 織物膜の収納性とせん断剛性

4.2 織物の Bias Extension Test

織物のせん断変形を試験する方法として一般的な Bias Extension Test [12]を実施し、織物のせん断変形と応力との関係を調べ、導電糸をミシン縫製した場合との比較を行う。試験の概要を図 5 に示す。一般的な引張試験機を用いて、繊維が引張軸と 45° になるように把持した試験片に引っ張り試験を行う。繊維方向に対して 45° の荷重方向であるため、純粋なせん断荷重を加えることができる。試験片の素材は、天女の羽衣 (AG00Z1N) を用いた。試験片のせん断角度は、試験片の初期長さを D [m]、伸びを d [m]とした時、式(2)で計算できる。初期値は試験片の拡大画像から推定する。

$$g = \frac{\rho}{2} - 2 \arccos \left(\frac{d}{2D} + \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \quad [\text{rad}] \quad (2)$$

また、試験片に加わるせん断応力は直接の計測が困難であり、今回は試験機のロードセル荷重を指標とした。

織物膜 Bias Extension Test

- ・試験機: 島津製作所製オートグラフAGS-20NT
- ・境界条件: ネジ式平面つかみ具で把持
- ・初期値: 拡大撮影画像から推定
- ・試験片: 天女の羽衣(AG00Z1N)

織物せん断試験で一般的な試験方法
(Williams, 2010)

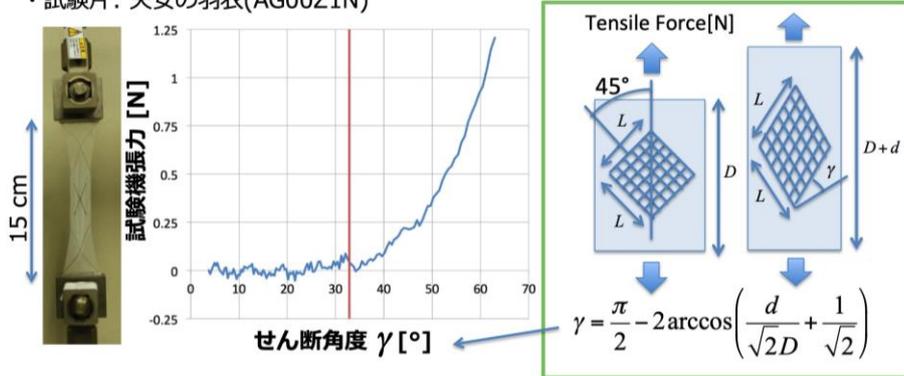


図 5 Bias Extension Test の概要と織物試験結果

図 5 中央のグラフは得られた織物単体の試験結果である。応力とひずみの関係が非線形となる、大変形を示す織物特有の結果を表している。また、せん断角度が 32° 程度までは試験片に加わる応力がほぼ 0 であった。

4.3 導電糸をミシン縫製した織物の Bias Extension Test

導電糸をミシン縫製した試験片は前節における試験片にフレキシブル導電糸をミシン縫製することによって付加したものであり、試験片の大きさ、織物の材料は全く同じである。導電糸の縫い付けに関しては 1) 導電糸を縫い付ける角度、2) 端部の処理方法という 2 つの設計パラメータを設定した。図 6 は試験片の概要を示す拡大図である。中央に四角で示したせん断観察範囲は、試験片の把持による境界条件の影響を受けない変形範囲である。導電糸はこの範囲で観察する。図 7 は導電糸の端部処理の位置と方法について示す。端部処理を行う試験片については、せん断観察範囲の枠上に端部処理を行う。処理の方法は、エポキシ接着剤による接着であり、導電糸が布に対して完全に固定される。一方で端部処理を行わない試験片では、導電糸は布に対して摩擦のみによって固定されているため、布に対して滑ることができる。

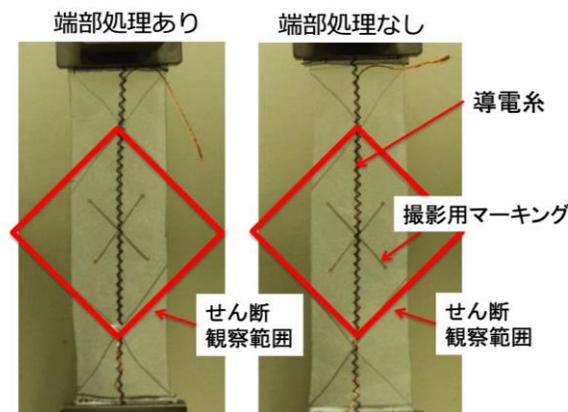


図 6 試験片の概要

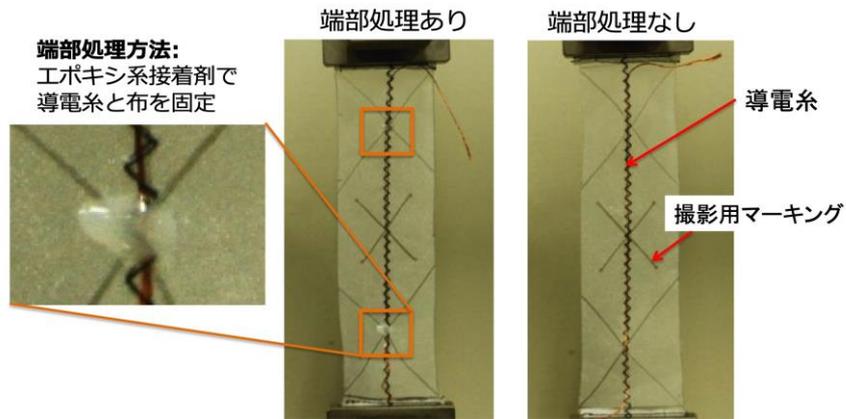


図7 試験片の端部処理方法

図8は今回用いる6種類の試験片である。導電糸のミシン縫製の角度を、引張軸方向の 0° 、引張軸に対して 45° 方向の 45° 、圧縮軸方向の 90° の3種類に変え、それぞれ端部処理の有無の2種類がある。

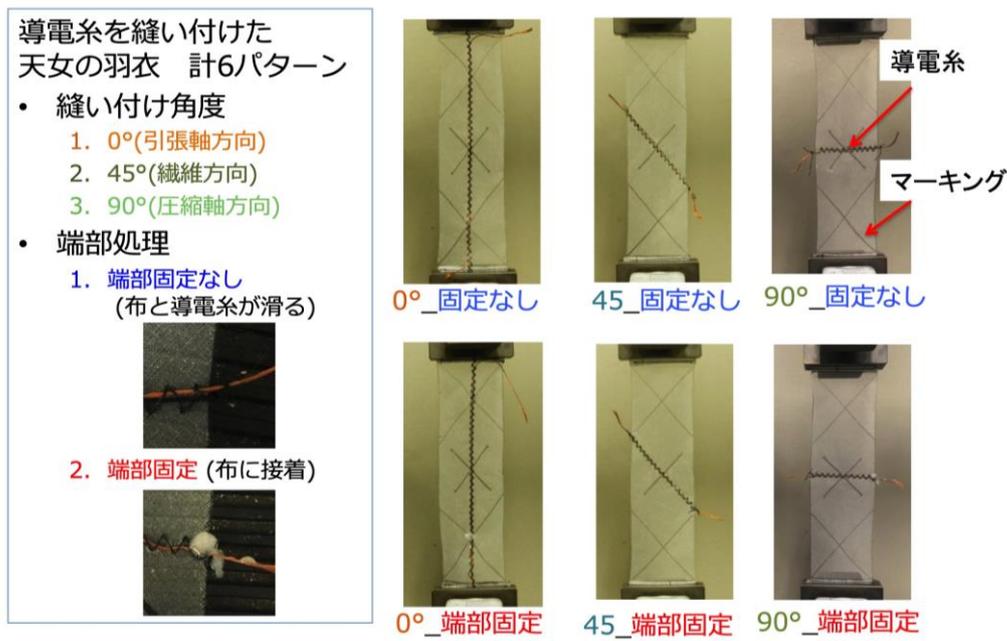


図8 導電糸をミシン縫製した試験片



0°_端部固定(14N)
導電糸がせん断変形を阻害

0°方向縫い付けと膜単体との比較

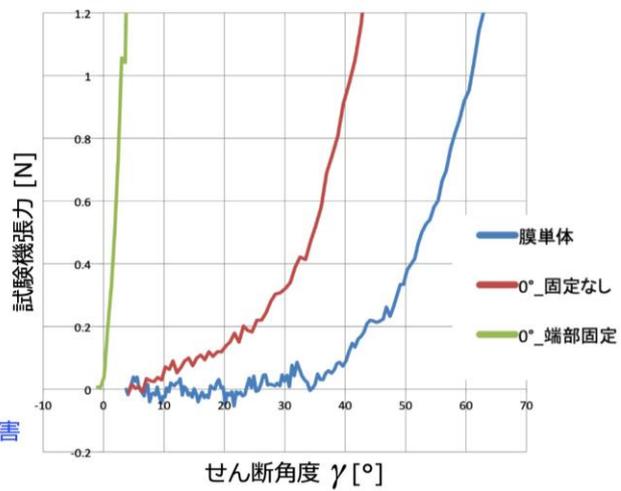


図9 0° 方向試験結果



45°_端部固定(0.4N)
せん断変形への影響は限定的

45°方向縫い付けと膜単体との比較

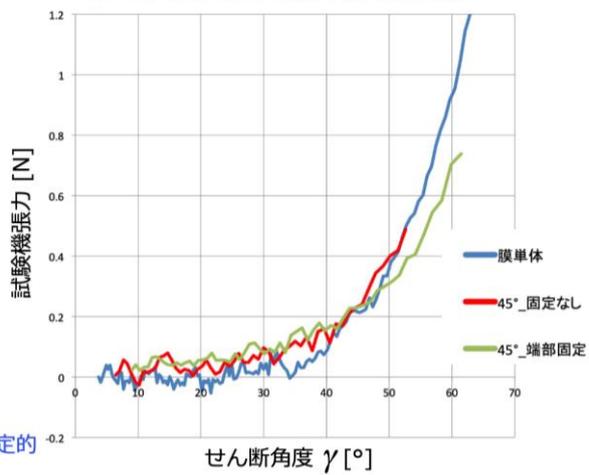


図10 45° 方向試験結果

90°方向縫い付けと膜単体との比較

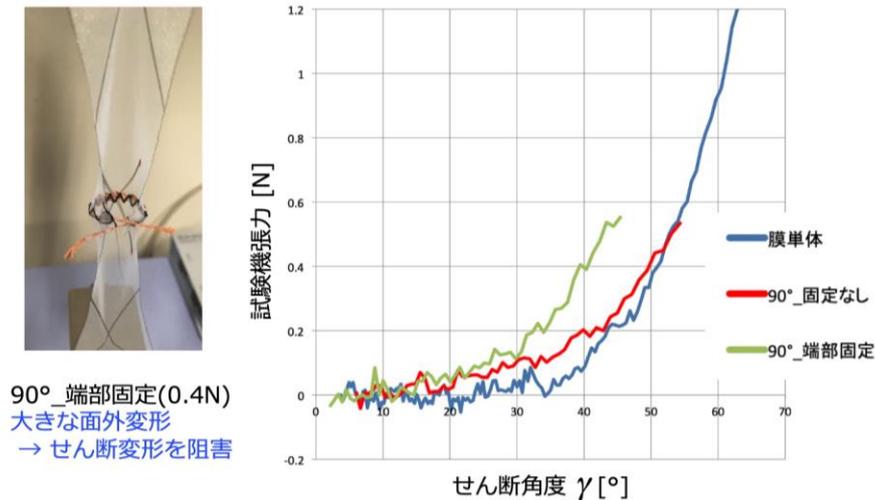


図 11 90° 方向試験結果

図 9、10、11 は試験の結果を示す。図 9 は 0° 方向の試験片と織物単体との試験結果の比較である。0° 方向の試験結果はどちらも織物単体に比べて高い応力を示している。とくに、端部処理を行った試験片については、せん断変形がほとんどないうちから、グラフの傾きが大きくなっている。これは端部処理された導電糸が織物の変形を阻害するように拘束を与えたためであると考えられ、端部処理が予想通り機能していることを確認できた。また、端部処理を行わなかった試験片についても大きな応力が得られている理由としては、織物の変形（引張軸方向の伸び）に対して導電糸が布の上を滑ったため、その摩擦力が応力として現れたと考えられる。

図 10 は 45° 方向の試験片と織物単体との結果の比較である。この結果に関しては膜単体と比較しても大きな差異は見られなかった。したがって、45° の導電糸が膜の変形に対して与える影響は小さいと言える。この理由としては、導電糸が織物の繊維と平行であったことが挙げられる。織物はせん断変形に対して、繊維方向の伸び縮みは非常に小さく、繊維方向に配置していた導電糸は端部処理を行っても変形に対して影響を与えなかったと推察できる。

図 11 は導電糸を 90° 方向に縫い付けたものと膜単体との比較である。端部処理を行った試験片については膜単体に比べて大きな応力が見られた。また、荷重を加えて行った際の試験片の様子が図 11 の左の写真であるが、平らであった膜が円筒状に丸まってしまっていることがわかる。これらの理由として考えられることは、導電糸に対して膜が縮んだ(膜の圧縮軸方向)結果、膜に曲率が発生したことである。変形に対して導電糸が反発したことで端部処理をしたときに応力が大きくなったと考えられる。

以上より、導電糸をミシン縫製した際に織物のせん断変形に与える影響を評価し、端部の状態と固定方向という二つの設計変数がせん断変形に与える影響を明らかにした。特に 45° 方向(導電糸と繊維が平行)では、端部を固定していても織物のせん断変形をほとんど阻害しない。

5. 結言

本論文では、衛星搭載を想定した織物膜太陽電池アレイの収納性向上を目指し、導電糸配線の電

力的評価と導電糸をミシン縫製する方法を適用したせん断試験を実施し、以下の2点を見出した。

- ✓ 太陽電池展開構造における、導電糸配線の質量と抵抗が発生電力質量比に与える影響は、構造規模によらず、1割程度であること。
- ✓ 構造の太陽電池アレイ分割数が小さいほど配線の影響を小さくすることができること。
- ✓ 導電糸を固定していても、繊維と平行であれば、織物膜の低いせん断変形は維持されること。つまり、織物の収納性を阻害しない可能性を示唆している。

今後の課題としては、導電糸のミシン縫製の収納性への影響を明確にするため、織物のせん断変形と薄膜太陽電池を貼付した織物構造の収納性との関係を明らかにすることが挙げられる。

【参考文献】

- [1] “XTJ Prime Space Qualified Triple Junction Solar Cell,” Spectrolab,
https://www.spectrolab.com/photovoltaics/XTJ-Prime_Data_Sheet.pdf (2019/01/16)
- [2] “Dual Junction Product,” Alta Devices, <https://www.altadevices.com/wp-content/uploads/2018/04/Dual-Junction-Tech-Brief.pdf> (2019/01/16)
- [3] “Press Kit/February 2009 STS-119 Full Power,” NASA,
https://www.nasa.gov/pdf/304681main_sts119_press_kit.pdf (2019/01/16)
- [4] “ATK Demonstrates Advanced MegaFlex Solar Array,” Parabolic Arc,
<http://www.parabolicarc.com/2014/01/21/atk-demonstrated-advanced-megaflex-solar-array/> (2019/01/16)
- [5] “Photos: ATK Validates New MegaFlex Solar Array Technology for NASA’s Future Solar Electric Propulsion Missions,” America Space, <http://www.americaspace.com/2014/05/04/photos-atk-validates-new-megaflex-solar-array-technology-for-nasas-future-solar-electric-propulsion-missions/> (2019/01/16)
- [6] “UltraFlex Solar Array Systems,” Northrop Grumman Corporation, UltraFlex Solar Array Systems – NASASpaceFlight.com Forum (2019/01/16)
- [7] “How Hubble Got Its Wings,” Space Engineering & Technology, http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering_Technology/How_Hubble_got_its_wings (2019/01/16)
- [8] “Press Kit December 1993, Space Shuttle Mission STS-61,” NASA, Washington, DC,
<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19940015719.pdf> (2019/01/16)
- [9] R.Pappa, G.Rose, T.Mann, J. Warren, M.Mikulak, T. Kerslake, T.Kraft, J.Banik, “Solar Array Structures for 300 kW-Class Spacecraft,” Space Power Workshop, April 24, 2013,
<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20140000360.pdf> (2019/01/16)
- [10] “小型ソーラー電力セイル実証機「IKAROS」,” JAXA,
http://www.jaxa.jp/projects/sat/ikaros/index_j.html
- [11] “Bare Modules,” Ascent Solar Technologies, USA, <http://www.ascentsolar.com/bare-modules.html> (2019/01/16)
- [12] P. Boisse, N. Hamila, E. Guzman-Maldonado, A. Madeo, G. Hivet, et al.. “The bias-extension test for the analysis of in-plane shear properties of textile composite reinforcements and prepreps: a review,” International Journal of Material Forming, Springer Verlag, 2017, 10 (4), pp.473-492.