自己展開膜面トラス構造の大型膜面アンテナへの適用

Application of Self-Deployable Membrane Truss Structure to Large Membrane Antenna

指導教授　宮崎　康行

M8020　山田　晃一郎
Koichiro Yamada

The demand for large, versatile and lightweight antenna systems is increasing due to the increase and diversification of communication information and the demonstration of SSPS technology. The Self-Deployable Membrane Truss structure (SDMT) has a high storage efficiency, and can construct a lightweight and large-area membrane truss structure. Also, the deployment method is very simple, so it can be applied to large membrane antennas. In this study, SDMT is applied to a large membrane antenna, and the antenna array layout and antenna performance is examined.

1. 序論

1.1. 大型膜面アンテナ

通信量の増大への対応やレーダーへの応用，宇宙太陽光発電[1](Space Solar Power Systems： SSPS)等，将来ミッションへの適用等の観点から，軌道上での大型膜面アンテナの需要が高まっている[2][3]．特に SSPS においては，数 km 級の発送電用アンテナは中核技術であり[4]，今後ますます大型で軽量な膜面アンテナへの需要が増大すると考えられる．

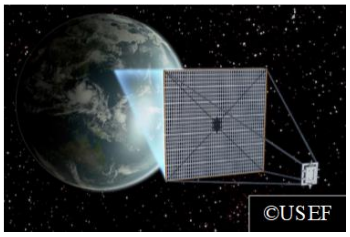
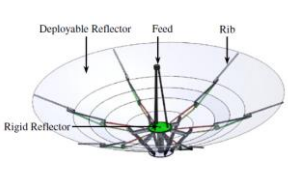


Fig. 1 SSPS[1]

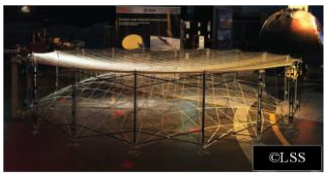
また，宇宙利用だけでなく，航空機やドローンを用いた測量，被災地での携帯電話通信システムなど，他分野への応用も期待できる．

1.2. 従来のアンテナシステム

しかし，今まで提案されているアンテナシステムは，Fig. 2 のように，展開にアクチュエータやモータ等の動力を用いるもの[5]や，複雑なヒンジ機構を有するもの[6]が多く，システム全体の重量や体積が大きいものがほとんどであった．今後，限られたリソース内で，益々高度なミッションを行う膜面アンテナを軌道上で構築する場合，展開方式の簡素化，システム全体の軽量化・大面積化が望まれる．



(a)Umbrella type antenna[5]

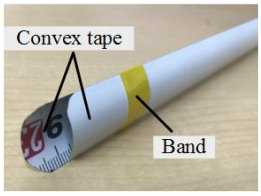


(b) Antenna with hinge mechanism[6]

Fig. 2 Conventional antenna system

1.3. 自己展開膜面トラス構造（SDMT）

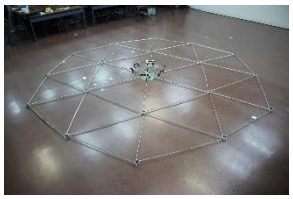
著者の研究室では，自己展開膜面トラス構造（Self-Deployable Membrane Truss structure：SDMT）に関する研究・開発を行っている．SDMT とは，Fig. 3 に示すような自己伸展部材を用いて構成したトラス構造に，膜面を搭載したものである．



(a)bi-convex boom

(b)CFRP boom

Fig. 3 Self-extensible boom



(a)24N42B model SDT(ϕ 4.4m)

(b)3N3B model SDMT (ϕ 5m)

Fig. 4 SDMT test model

SDMT の最大の特徴は，部材自体が，収納時に蓄えられる歪エネルギに起因する自己伸展力を持つため，アクチュエータ等の展開動力を必要としない点である．そのため，構造全体の軽量化が見込める．また，ブームを円筒状のハブに巻き付けて収納することができ，収納効率にも優れている．ハブの回転を抑制するラッチ機構を用いることにより，展開後の剛性を確保することも可能である．更に，1 つの SDMT を複数結合し，モジュール構造とすることで，より大型なトラス構造へ拡張することができる．

先行研究では，SDMT の力学的特性を表す式の導出[7]や，Fig. 4 のような概念モデルの試作及び展開試験を行い，設計の妥当性確認を行うとともに，展開性の向上を図ってきた[8][9]．また，SDMT を Starshade[10]やデブリキャプチャーデバイス[11]に適用することを提案している．

1.4. SDMT の大型膜面アンテナへの適用

前節までの背景を踏まえ，SDMT を大型膜面アンテナに適用することを考える．これにより，軽量性，展開の簡素さ，収納性，拡張性において，従来のアンテナシステムよりも優れたアンテナシステムを構築することができると考える．

SDMT を用いて大型膜面アンテナを構築する場合の流れは以下の通りである．まず，ミッション側の要求から，面精度，

剛性への要求が与えられる．従って，SDMT が展開後，適切な面精度，剛性を維持できるよう設計しなければならない．また，打ち上げ時の制約から，1 つのアンテナシステムに与えられるリソース（重量，体積）は限られており，アンテナアレイを搭載した膜面を最小限の体積に収納し，確実に展開を完了させなければならない．更に，アンテナアレイを膜面に配置する際，収納を考慮し，膜の折り目に干渉しないよう配置する必要があり，その上でアンテナとしての性能（指向性，サイドローブレベル等）を確保しなければならない．加えて，結合後の自己展開膜面トラスの 1 モジュールを，軌道上で複数結合するための，結合機構が必要となる．

1.5. 本研究の位置付けと目的

前節での考察を踏まえ，本研究の目的を「自己展開膜面トラス構造の大型膜面アンテナへの適用性を示すこと」とし，1.4 節に示した流れのうち，本研究では，収納可能なアレイ配置の検討及びアンテナとしての性能評価を行う．これにより，SDMT のアンテナへの適用性を明らかにする．

2. SDMTアンテナシステムとアレイ配置

2.1. SDMT アンテナシステム

SDMT アンテナシステムの 1 モジュールには，Fig. 5 に示す 7N12B モデル自己展開トラスを用いる．7N12B モデルはブーム収納部（Node）7 つと 12 本のブーム（Boom）からなる六角形のトラス構造であり，Fig. 6 のように平面充填が可能であるため，様々な形状にモジュール化することが可能である．また，膜を上下 2 枚搭載することで，片面は太陽電池アレイ，片面はアレイアンテナ，といったように，多用途のアンテナシステムに適用することができる．

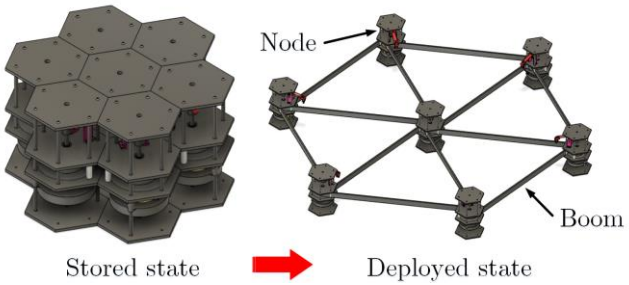


Fig. 5 7N12B model SDT

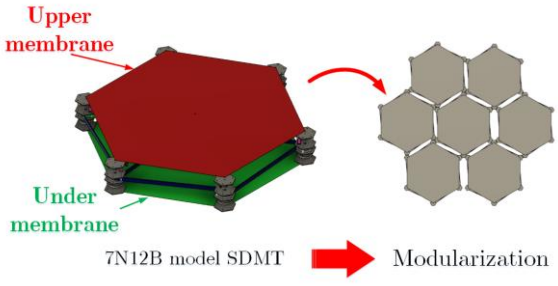


Fig. 6 Modular 7N12B

2.2. アンテナアレイの配置

本節では，7N12B モデル SDMT に搭載した膜面に対するアンテナアレイの配置を検討する．

まず，膜面の折り畳み方法には，Fig. 7 に示す回転二重折り[1]を採用する．回転二重折りは折り線パターンが直線であり，アンテナアレイ等の配置が容易であり，収納効率が高い．膜面の収納を考慮し，この回転二重折りの折り線パターンに干渉しないようにアンテナアレイを配置する．

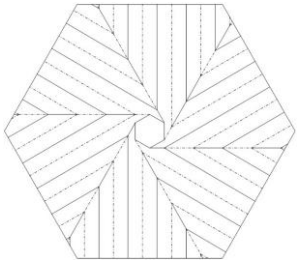


Fig. 7 Rotationally skew fold[1]

ここで，アンテナアレイの配置がアンテナの性能に与える影響について述べる．アンテナの放射パターンは，一般に以下の Fig. 8 のようになり，最も強い放射を行うローブをメインローブと呼び，それ以外のローブをサイドローブと呼ぶ．複数のアレイからの放射を合成し，より強い放射を得るアレイアンテナでは，アレイ間隔を広くすると，目的となる放射方向以外のビームが強め合う現象が発生する．この，メインローブ以外の強い放射をグレーティングローブと呼ぶ．グレーティングローブは不要な方向への放射であり，アレイアンテナ全体の性能低下を招く．

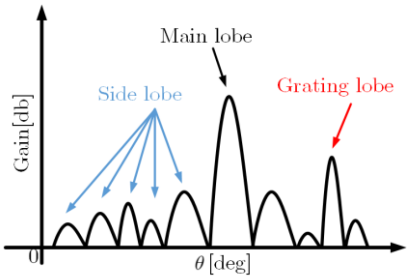


Fig. 8 Antenna radiation pattern

グレーティングローブが発生しない素子間隔 d は，波長 λ，最大走査角 θ_o から決定され，以下の(1)式で表せる[13]．

$$d < \frac{\lambda}{1+\sin\theta_o} \tag{1}$$

また，アレイの配列には，グレーティングローブの周期性から，素子間隔を大きくでき，素子数を削減することができる，三角配列[13]（Fig. 9）を採用する．

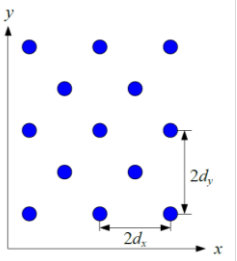


Fig. 9 Triangular arrangement [13]

今回は例として参考文献[4]及び[14]等にて提案されている 30m 級降水フェイズドアレイレーダと同等の性能を発揮できるか評価するため，以下の Table 1 の諸元を用い，(1)式からアレイ間隔を決定した．

Table 1 Specifications of 30m class precipitation radar

Frequency	13.6 GHz（Ku band）
Wavelength	0.0220 m
Scan angle	±6.0 deg
Horizontal resolution	20 km or less
Vertical resolution	500 m or less
Array size	8.9 ×8.9 mm

実際に，7N12B モデル SDMT にグレーティングローブを考慮した三角配列を満たし，かつ回転二重折りの折り線パターンに干渉しないようアンテナアレイを配置した図を Fig. 10 に示す．但し，Fig. 4 に示したモデルで，5m 級 SDMT の展開実績があるため，1 モジュールのサイズは直径 5m とした．図中青い線が折り線パターンであり，黒い正方形がアンテナアレイを表している．

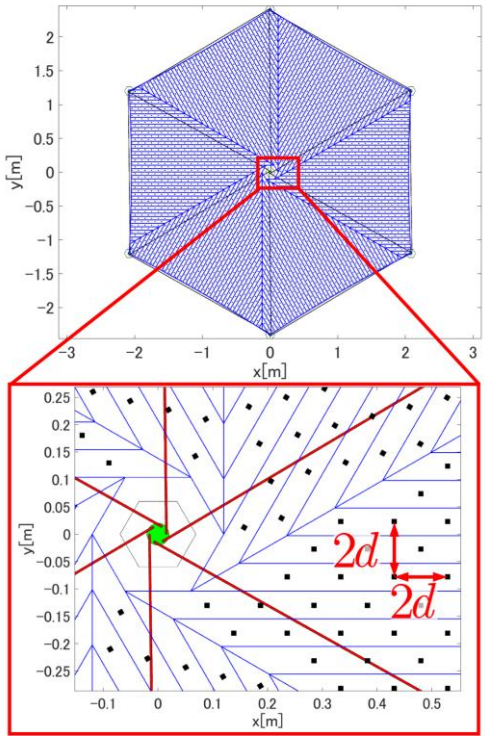


Fig. 10 Antenna array arrangement for 7N12B SDMT

3. アンテナ性能評価と考察

本章では，2 章で示した SDMT アンテナシステムがアンテナとしての性能を満たすかどうかを評価する．そこで，2.2 節で検討したアレイ配置をモデル化し，Matlab Phased Array System Toolbox©を用いてアンテナ放射パターンを算出する．

3.1. 1 モジュールの場合

Fig. 10 に示したアレイ配置から作成した解析モデルと，3 次元放射パターンを Fig. 11 に，仰角 0 deg における方位角に対する放射パターンを 2 次元化したものを Fig. 12 に示す．サイドローブレベル（メインローブと最も大きいサイドローブの利得差）は-11.09 dB であり，指向性を表す半値角は 0.23 deg であった．次に，素子間隔が放射パターンに与える影響を評価するため，素子間隔を 2 倍及び 5 倍にしたモデルで解析を行った．Fig. 13 より，素子間隔を広げることで，全体の利得は低下するが，サイドローブレベルを低減できることが分かる．しかし，素子間隔を 2 倍にした場合と 5 倍にした場合を比較すると，サイドローブレベルはほぼ同等である．これは，アレイ間隔を等倍，2 倍，5 倍と広げたことで，素子数が 2862 個，732 個，126 個と減少し，メインローブの出力も低下しているためであり，妥当な結果であると言える．1 モジュールでアンテナとして用いる場合は，ミッションから要求される利得と，サイドローブレベルを満たすことが出来るように適切な素子間隔を決定すればよいことが分かる．

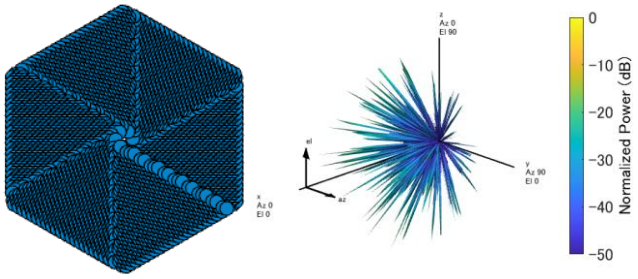


Fig. 11 Array arrangement and 3D radiation pattern

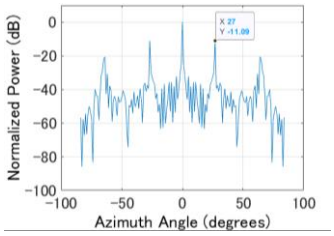


Fig. 12 2D radiation pattern

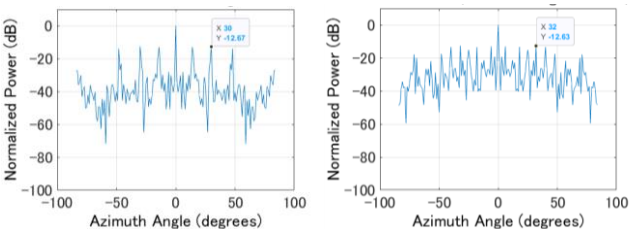


Fig. 13 2D radiation pattern when array spacing is increased (Left : 2 times, Right : 5 times)

また，素子間隔を広げることにより，グレーティングローブが発生する[13]はずであるが，今回の結果からは，メインローブに影響を与えるような，大きなグレーティングローブは発生していない．Fig. 10 のアレイ配置は，折り目を避けるため，素子同士が等間隔の三角配列になっていない部分が存在する．従って，全てのアレイを等間隔に敷き詰めておらず，不等間隔になっている部分が存在する．それゆえ，素子間隔を広げても，大きなグレーティングローブは発生せず，アンテナ性能に支障をきたさないと言える．

3.2. モジュール化した場合

Fig. 10 に示したモデルの SDMT を 1 モジュールとして，モジュールを複数結合し，大型化した場合のアンテナ性能を評価する．各モジュールの間隔は，ノードの体積や，モジュール結合機構を考慮し，Fig. 14 のように Δ=146mm とする．

今回は，Fig. 15 に示す円形パターン，長方形パターン，三角形パターンの 3 種類のモジュール配置方法をモデル化し，比較を行った．モジュール数は，代表長さが 30m となるように決定した．Table 2 に各パターンのサイドローブレベル，半値角を示す．

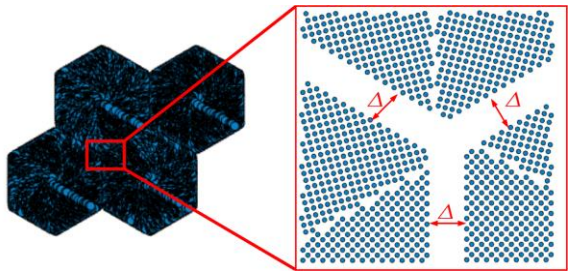


Fig. 14 Module spacing

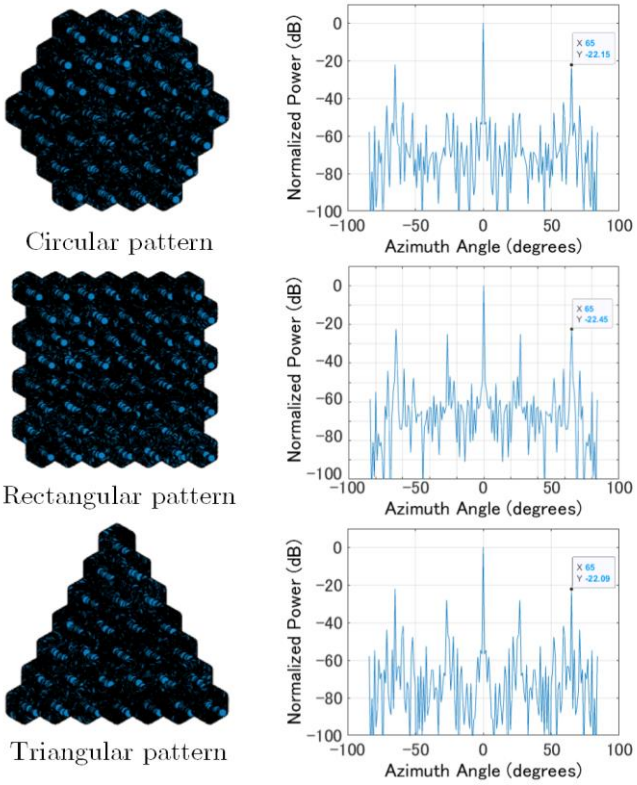


Fig. 15 Difference by module arrangement pattern

Table 2 Difference in antenna characteristics by module arrangement pattern

	Side lobe level	Half beam length
Circular pattern	-22.15 dB	0.111 deg
Rectangular pattern	-22.45 dB	0.121 deg
Triangular pattern	-22.09 dB	0.106 deg

Fig. 15 から，モジュール化することで，1 モジュールの場合よりもサイドローブレベルを抑えることができることが分かる. また, 大きなグレーティングローブも発生していない. これは，モジュール間の隙間がアンテナ性能に影響を与えないことを示している．また，Table 2 より，3 種類のモジュール配置方法で，サイドローブレベルに大きな違いはなく，三角形パターンが最も半値角 (指向性) に優れた結果になった．従って，高い指向性が要求されないアンテナシステムであれば，軌道上での組立の簡素さや，組立後の剛性を考慮してモジュール配列方法を決定すればよいことが分かる．

30m 級降水レーダーでは-13.26 dB のサイドローブレベル，0.032 deg の半値角が要求される[14]．今回の結果から，サイドローブレベルついては，問題なく要求値を満たしているが，半値角については，要求値未満であることが分かる．レーダー等の高い指向性が要求されるアンテナシステムへの適用については課題が残るが, SDMT を用いたアンテナシステムで，十分にサイドローブが低いアンテナを構築することが可能であることを示している．

4. 結論

本研究では，SDMT の大型膜面アンテナへの適用を提案した．また，アンテナ性能評価を行い，折り目に干渉しないようなアレイ配置や，モジュール間に隙間が空いている場合でも，アンテナとしての性能を発揮することが可能であることから，SDMT の大型膜面アンテナへの適用性を示した．

謝辞

本研究は,文科省・科研費 18H03817 の補助を受けました．

参考文献

[1] Glaser, P. E., : “Power from the Sun; It's Future”, Science, 162, 1968, pp.857-886.

[2] Zhi-Quan Liu, et.al., : “Review of Large Spacecraft Deployable Membrane Antenna Structures”, Chin. J. Mech. Eng. (2017) 30:1447–1459, 2017

[3] M. Leipold, et.al., : “Large SAR Membrane Antennas with Lightweight Deployable Booms”, 28th ESA Antenna Workshop on Space Antenna Systems and Technologies, ESA/ESTEC, May 2005

[4] 黒瀬豊敏，坂本文信，上土井大助：「宇宙大型アレイアンテナとその応用」，第2回宇宙太陽光発電シンポジウム，2017

[5] Vahid Hasanzade, et.al., “Compact Deployable Umbrella Antenna Design with Optimum Communication Properties”, JOURNAL OF SPACECRAFT AND ROCKETS Vol. 54, No. 3, May–June 2017

[6] Leri Datashvili, et.al., : “High TRL Achieved for European Large Deployable Reflector Antennas”, 12th European Conference on Antennas and Propagation, 2018

[7] Yasuyuki Miyazaki, et.al., : “Analytical solution of the bending of a bi-convex boom”, Mechanical Engineering Journal, Vol.2, No.6, December 15, 2015

[8] 福永桃子,宮崎康行：「自己展開トラスの展開性向上」, 第61回宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2017-4701, pp.1-6, 2017

[9] Momoko Fukunaga, et.al., : “Design Method of Self-deployable Truss to Prevent Jamming of Stored Booms”, AIAA Scitech 2019 Forum, AIAA 2019-1525, pp.1-13, 2019

[10] 設樂翔一，宮崎康行，中村壮児，高坂大樹，福永桃子：「自己展開膜面トラスを用いたスターシェードの形状」，第62回宇宙科学技術連合講演会,JSASS-2018-4962,pp.1-6,2018

[11] 河原林大思，松浦颯，宮崎康行：「自己伸展ブームを用いた立体トラスの構造特性」，第62回宇宙科学技術連合講演会,JSASS-2018-4280,pp.1-6,2018

[12] Hiroshi FURUYA, et.al., : “Boom/Membrane Integrated Deployable Space Structures for Small Satellites”, 4th International Symposium on Solar Sailing, 2017

[13] 電気情報通信学会：「知識の森，電気情報通信学会知識ベース」，4 群 2 編 7 章，pp.2-7, 2011

[14] Atsushi Okazaki, et.al., : “Simulating precipitation radar observations from a geostationary satellite” Atmos. Meas. Tech., 12, 3985–3996, 2019