

インフレータブル円環で張架した平面アンテナ構造の面精度評価^{*1}

Surface Accuracy Evaluation of Planar Antenna Structures Stretched by Inflatable Torus

角 田 博 明^{*2}・仙北谷 由美^{*2}

Hiroaki TSUNODA and Yumi SENBOKUYA

Key Words: Artificial Satellite, Large Satellite Antenna, Planar Antenna, Inflatable Structure, Membrane Structure, Surface Accuracy

Abstract: The next generation of geo-stationary mobile communication satellites will, most likely, use large flexible planar antennas. For this reason there is a strong interest in using very thin, membrane type planar surfaces together with inflatable support structures for such antennas. Unfortunately, existing membrane materials would yield excessively heavy antennas. This paper proposes the use of a mesh-type membrane based on a triaxial woven fabric using PBO (poly-p-phenylene benzobisoxazole) fibers to realize extremely lightweight antennas. A circular test membrane which diameter is 1.5 m is constructed and assessed to be mounted on an inflatable torus. Triaxial woven fabrics reinforced with plastic are used as the planar membrane structures. Two types of inflatable torus and the planar membrane structures are fabricated, and their surface accuracy is measured. The results of this study show that the surface accuracy of the membrane is clarified under the various pressure conditions of the inflatable torus and that the proposed membrane can be used for planar antenna structures.

1. は じ め に

人類による宇宙利用の活発化に伴い、宇宙で大形な構造物を作る要求が増えてきている。中でもこれまでとは異なるアプローチで大形な宇宙構造を実現するために膜面構造やインフレータブル構造に関する研究が注目されている。これらの構造は、1996年にIAE96 (Inflatable Antenna Experiment 1996)¹⁾と呼ばれる直径14 mのインフレータブル反射鏡の宇宙での展開実験が行われるなど、将来の大形宇宙構造の新しいコンセプトとして注目を集めつつある。膜で構成された構造物は、軽量・高収納効率・低コストといった宇宙構造に適した基本的特徴がある。しかし、以下に述べる原因により形状精度が向上しにくい短所がある。すなわち、a) 収納効率を高くする結果生じる折り畳み部分の塑性変形による形状不整（これが「折り皺」として残る）、b) 極端な薄肉化に伴う材料の不均一性に起因する形状不整、c) 内圧の変動や気体のリークによる形状不整、d) 膜面の貼り合わせ作業に伴う成形誤差、などである。このため、ソーラアレー・サンシールド・月火星居住モジュール・膜タンクなど精度要求が厳しくない構造を中心に研究開発が行われてきている²⁻⁵⁾。近年では、環状のインフレータブル構造で膜面を張架したり⁶⁻⁹⁾、ケーブルネットワークを併用して膜面を張架する¹⁰⁾などの方法で、膜面に均一に張力を作用させて所望の力学的平衡状態を作り、形状の不整を低減して精度要求の高いアンテナを作る試みもされ始めている。しかし、これらの膜構造に共通した課題とし

て、折り畳み部分の塑性変形による形状不整についてはほとんど解明されていない。特に膜面の材料や構成方法・収納方法の観点から研究されたものはない。筆者らはこれまで、アンテナの変形を電氣的に補償することを想定して、インフレータブル構造や平面アンテナ構造をフェーズドアレーアンテナに適用する方法について検討してきた^{11, 12)}。そこで、今回、平面形状のフェーズドアレーアンテナへの適用を目指し、折り畳み部分の塑性変形による形状不整（折り皺）を軽減することを目指した膜面の材料や収納方法について提案し、その有効性を明らかにした。

円環状または角環状のインフレータブル構造で張架した平面アンテナ用の膜構造としては、ポリイミドフィルムに接着した銅箔で放射素子や地導体を構成する方法が試みられている⁷⁾。平面アンテナの場合は、アンテナの給電方法によってはアンテナ膜面を2~3層にする必要がある。ここで使用する材料をできる限り薄く軽量化する必要がある。また折り畳まれる膜面に実装する放射素子や地導体には折り皺が生じにくい材料が望まれる。しかしながら、これらに銅箔を用いた場合は、折り畳んだ時に銅箔面に折り皺が生じ、膜面を張架することだけで取り去ることは難しい。また、全体を大きな曲率で丸めて長い筒状に収納することしかできず、大形化した際にも収納時の全長を短くすることはできなかった。

本論文では、軽量で折り皺が生じにくい膜面材料としてPBO（ポリパラフェニレンベンゾビスオキサゾール）繊維を用いたメッシュ状の三軸織物複合材料を平面アンテナ構造に適用し、それをインフレータブル円環で張架して、一方向への折り曲げと丸め込みを併用した収納方法で折り畳める平面アンテナ構造を提案する。これまでヒンジで結合されたCFRP製フレームで支持した軽量のアンテナ構造が研

^{*1}©2002 日本航空宇宙学会
平成12年10月15日、第44回宇宙科学技術連合講演会にて一部発表。
平成14年1月11日原稿受理

^{*2}日本電信電話（株）NTT未来ねっと研究所

究されている¹³⁾が、アンテナ膜面自体を折り畳むことができる大形アンテナや、ヒンジなどの機構を使わない展開構造物についての報告は見られない。ここで提案する平面アンテナ構造では、放射素子や地導体には導電性不織布を接着剤を使わずに複合材成形時のレジンを介してアンテナ膜面と一体で成形し、宇宙で使用した場合の経年劣化による剥離を生じにくくする。この平面アンテナ構造の膜面は、あらかじめ折り曲げる場所に規則的な折り目を設けておき、その折り目で折り曲げてから丸めることによりコンパクトに収納することができる。本論文ではこのように折り曲げと丸め込みを併用して折り畳める軽量な膜面について、その構成と面精度を明らかにする。なお、既報¹⁴⁾では金属製円環で膜面を張架して基礎的な面精度について明らかにしたので、本論文では膜材料が異なる二種類のインフレーション円環で張架した場合における直径1500 mmの平面アンテナ構造の面精度評価について述べ、インフレーション円環の内圧の変化によって面精度は変化するものの、0.1 mmRMS以下の面精度が達成できることを示す。

第2章では、平面アンテナを想定した二次元に折り畳めるフレキシブルな平面アンテナ構造のコンセプトを示す。第3章では、その妥当性を評価するために試作した平面アンテナ構造とインフレーション円環について述べる。第4章では面精度の測定実験の結果から平面アンテナ構造としての有効性を示す。

2. フレキシブルな平面アンテナ構造の提案

2.1 従来の平面アンテナ構造 平面アンテナは誘電体の基板の上に導電性の材料で放射素子・地導体・給電ライン(マイクロストリップライン)を構成する。放射素子を実装する膜面と地導体の膜面の間隔は周波数に応じて決められた距離を維持する必要がある。このため従来は、折り畳むことができない複数のユニットを多数のヒンジで連結して大形アンテナを構成し、このヒンジで折り曲げて収納していた¹⁵⁾。このため、大形化によるヒンジ数の増加に伴う展開信頼性の低下は避けがたく、また高コスト化や質量の増大も重要な課題である。

これに対して、フレキシブルプリント基板を応用したアンテナ膜面が研究されている。銅箔が接着されたポリイミドフィルムなどの膜材をエッチング処理で加工し、放射素子や給電ラインを構成し平面アンテナ構造とするものである。実際には放射素子への給電の方法に応じてこのような放射素子層・給電ライン層・地導体層を一定の間隔となるようにインフレーション構造などで張架してアンテナを構成する。この場合の各層間の誘電体は地上では空気であるが宇宙では真空となる。こうすることにより、八二カムパネルをヒンジで結合するよりも軽量で収納性に優れた平面アンテナを実現することができる。現在検討されているのは、10 m × 3.3 mの矩形の合成開口レーダ(Lバンド)や直径1 mと3 mの円形のリフレクター(それぞれXバンド及びKaバンド)である。これらは、放射素子や地導体に銅箔を用いているので、折り目をつける折り畳み方はできず、全

体を大きな曲率で丸めて収納している。したがって、収納時の形状は直径こそ小さくできるものの、細長い円筒形状になる。このためさらに大きなアンテナへの適用は難しく、より収納効率が高く柔軟に折り畳める平面アンテナ用の膜面が望まれていた。

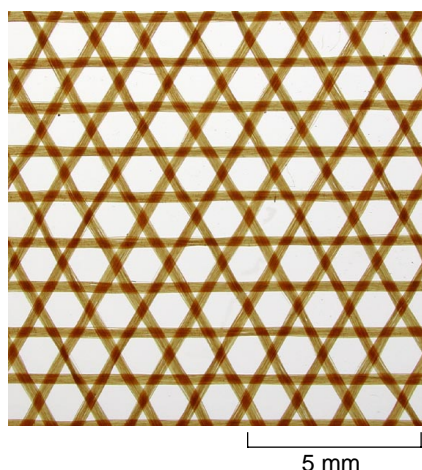
本論文ではSバンド(2.5 GHz)で使用する円形パッチアンテナを想定した。この場合、放射素子となる円形パッチの直径は60 mm、隣り合う円形パッチの中心間距離は120 mm、放射素子面と地導体面の距離(膜面間隔)は4.2 mmである¹⁶⁾。面精度を波長の1/20~1/40、膜面間隔の精度を間隔の1/20とした場合¹⁷⁾、面精度は3~6 mm、膜面間隔の精度は0.2 mm程度が必要となる。

2.2 メッシュ状の三軸織物を用いたアンテナ膜面 通信衛星用のアンテナを想定すると、地上の広い領域にビームを配置する必要があるため、合成開口レーダのように一方向に長い矩形のアンテナではなく二次元方向の広がりを持つアンテナが必要になる。このようなアンテナを対象として円環状のインフレーション構造で膜面を張架することを想定する。

平面アンテナの構造材料としては折り皺が生じにくいことや軽量化を考慮すると高分子フィルムよりも、繊維で構成したケーブル状またはメッシュ状のものが望ましい。これらの材料は張力を与えて形状を維持することができる。パラボラ反射鏡で使用している金属メッシュ(例えば金めっきモリブデン線の編み物)は曲面が要求されるパラボラ面を構成するには適しているが、伸縮性を有する編物なので直接放射素子を実装する平面アンテナには使いにくい。そこで、アラミド繊維束やPBO繊維束¹⁸⁾を使ってケーブルで平面アンテナの構造を構成することが考えられる。しかし繊維束のままケーブルとして使おうとすると放射素子等を実装するのが困難な上、繊維束の間隔が大きくなると後述する放射素子を装着した際に放射素子自体の面精度が維持できなくなる。

これらの問題を解決する方法として、繊維束を使った織物を使用することが考えられる。この場合、繊維を経糸と緯糸に配向した通常の二軸織物では、繊維方向と異なる方向に張力を付与すると膜面に歪が生じやすい。このため、工業化されていて一定の品質で製造することができる織物としてこれらの繊維束を60°方向で交差させて織った三軸織物を膜面に使用することとした。

三軸織物は1層で疑似等性を有するため、積層しないで複合材料として使うことができる。ここでも、この三軸織物を1層で使用することにした。この膜面は第1図に示すように繊維束の交差部に六角形の開口部を有している(メッシュ状)ため、軽量化にも貢献できる。また繊維織物のためレジンを含浸させて容易に複合材料にすることができる。こうすることにより折り畳みや展開の繰り返しに伴う繊維束のずれを防ぐことができる。メッシュ状の三軸織物は二軸織物に比べて単位面積あたりの繊維の量が少ないので、複合材化に必要なレジンの量を少なくすることができ、膜面の軽量化にも貢献できる。一方、平面アンテナと



第1図 三軸織物のメッシュ開口部の例（第1表記載のPF型の拡大図）

して使用する場合には、放射素子や地導体・給電ラインをこの膜面上に構成する必要がある。この材料には2.1節で述べたように、従来は銅箔が主に使われてきた。一部にめっきを施して導体にする方法も見られる¹⁹⁾が、大きな面積に対するめっき処理は難しく、アンテナの大形化に対しては適用が困難と思われる。これに対して、本提案の膜面のように複合材化するものでは、金属繊維不織布などを放射素子や地導体に使うことができる。金属繊維不織布は薄く形状が維持しにくい材料なので、レジンで膜面に固定することにより形状を安定させる。また銅箔で使用する接着剤とは異なり宇宙環境での耐久性が高く、長期間宇宙空間に暴露して使用する衛星搭載用のアンテナに適している。このようにメッシュ状の三軸織物を用いたアンテナ膜面は、軽量性・柔軟性・素子の実装性・耐久性などで優れた特徴が發揮できる。

第1表に平面アンテナ構造用の膜面で使用することを想定した三軸織物の諸元を示す。アラミド繊維は宇宙分野で広く使われている実績の多い材料であるが、紫外線による劣化が大きい。PBO繊維はアラミド繊維の約1.6倍の引張強度

第1表 平面アンテナ構造で使用する三軸織物の諸元

種類	AFA型	AFB型	PF型	
ゲージ ^{a)}	64	64	64	
面密度, [g/m ²]	58	27	26	
厚さ, [mm]	0.12	0.07	0.06	
密度, [g/cm ³]	0.48	0.39	0.43	
使用繊維	繊維材料	アラミド	アラミド	PBO ^{b)}
	繊維材料	アラミド	アラミド	PBO ^{b)}
	繊維 ^{c)} , [d]	195	100	100
	繊維本数	134	66	66
	密度, [g/cm ³]	1.44	1.44	1.56
	直径, [μm]	12	12	11.5
	引張強度, [MPa]	3630	3630	5800
引張弾性率, [GPa]	130	130	280	
伸び, [%]	2.4	2.4	2.5	

a) 10 cmあたりの目数

b) ポリパラフェニレンベンゾビスオキサゾール

c) 長さ9000 mの繊維の質量 [g], 単位: d

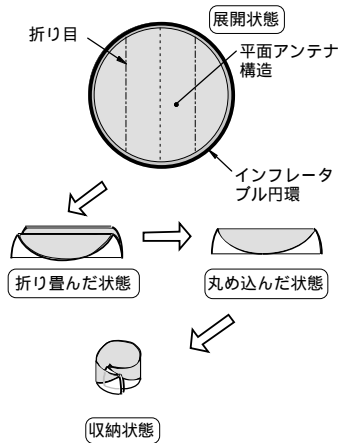
と約2.1倍の引張弾性率を有する新しい材料であるが現時点では宇宙での実績が乏しい。PBO繊維はアラミド繊維に比べて折り目部に使った場合の耐久性に優れると考えられる。一方PBO繊維は大気中や低軌道のように酸素分子や原子状酸素が存在する環境では紫外線劣化が大きいと言われているが、ここでは静止衛星での使用を想定したため、将来の平面アンテナ構造の材料としてはPBO繊維織物を想定し、初期検討としてはアラミド繊維も膜面の材料に取り上げた。単繊維（フィラメント）の本数は紡糸ノズルの数で決まる。ここでは直径12 μmの単繊維を使い、アラミド繊維の規格品で最も軽量の織度が195 d（繊維本数が134本）のものと、さらに軽量化を目指して製作した織度が100 d（繊維本数が66本）のものを使用した。これらの織物にエポキシレジンを含浸させて加圧加熱成型することにより複合材化し平面アンテナ構造用の膜面を作る。こうして、成形した三軸織物複合材料の諸元を第2表に示す。複合材化することにより面密度の増加はある（25～46%）ものの、材料の選択によって40 g/m²以下の膜面が得られることがわかる。厚さが0.5 mmのポリイミドフィルムの面密度が約710 g/m²であることを考慮すると、十分に軽量の膜面が得られることがわかる。

2.3 折り畳み方法と折り目の強度 平面アンテナ構造の膜面に放射素子や給電ラインを実装することを想定した場合、不規則な折り畳みを行うと素子などを損傷する恐れがある。このため、大形な膜面を折り畳むためには、折り目をつけて規則的に折り畳むのが望ましい。このような折り目は通常強度が低くなり、無理な力が加わると折り目で膜面が破損される恐れがある。これに対して丸め込みは曲率をもった収納方法なので放射素子などへの損傷が少ない。そこでアンテナ膜面ではあらかじめ決めた折り目で折り畳み、さらに全体を丸め込むことにより収納することとした。収納方法の例を第2図に示す。ここでは、全体を4つに折り畳み、それを丸め込むことにより円筒状に収納している。この際に周囲に配置したインフレータブル円環は、気体が導入されていないので、折り畳みの障害にはならない。

大形な膜面を一度に成形することはできないので、複数に分割して加工したものを結合する必要がある。ここでは、このような目的で成形時に結合する場所に折り畳みの際の折り目を重ねることとした。膜面の結合に際して重複幅を大きくすることにより、引張強度及び弾性率が大きく

第2表 平面アンテナ構造用の三軸織物複合材料の諸元

種類	AFA-N型	AFB-N型	PF-N型
三軸織物種類（第1表）	AFA型	AFB型	PF型
レジン含有率, [%]	29.1	27.8	28.6
成形温度, []	130	130	130
成形時間, [h]	2	2	2
成形圧力, [MPa]	50	0.1（大気圧）	0.1（大気圧）
面密度, [g/m ²]	71	39	38
厚さ, [mm]	0.10	0.08	0.08
密度, [g/cm ³]	0.72	0.48	0.51



第2図 平面アンテナの展開方法の例 (折り畳みと丸め込みを併用した場合)

できる。特に高強度・高弾性率繊維は重複部の長さが短いと接着性が悪くなる傾向にあり、剥離を起こす場合がある。このため重複部の長さは10 mmとし、膜面基材部を折り目部で挟み込んで接着した。隙間を大きくすると引張強度及び弾性率は低下する傾向にあるので、ここでは膜面の収納性も考慮して隙間は10 mmとした。

アンテナ膜面の折り目部には、a)折り曲げやすい、b)折り曲げ疲労に強い、c)膜面の凹凸を小さくできる、d)剥離しにくい、e)軽量である、ことが要求される。これらの要求条件を満たそうとするとAFA型は膜面基材部と同じ厚さなので、折り目部の表裏に取り付けると折り曲げ難く、膜面の凹凸も大きくなる。また、折り目部の片側のみに取り付けると温度変化により折り目部に反りが生じることが考えられる。そこで、両面に使用しても膜面基材部の厚さと大きな差が生じず、膜面の凹凸を小さくできるAFB型またはPF型を評価対象として選定し、第2表に示したAFB-N型とPF-N型の二種類の膜材を折り目部に使用した場合について強度を評価した。試験片は第3表に示す3種類の組み合わせで作製し、50回の折り曲げ試験後の諸特性を測定した。折り曲げ試験は、表に180°に折り曲げ、折り目を爪の甲で1回しごき、次いで180°裏に折り曲げ、折り目を同様にしごき動作を折り曲げ1回とした。試験片は幅25 mm・長さ150 mmで、折り目部の幅及び膜面基材部と折り目部のオーバーラップ長さはともに10 mmである。引張試験は万能引張試験機INSTRON 4482を用いて2 mm/min.の速度で行い、歪を非接触ビデオ伸び計で測定した。測定結果を第3図に示す。これより、強度保持率を比較すると折り目部にAFB-N型の材料を使用したものは45.7%であるのに対して、PF-N型を使用したものは93.8%または96.8%であった。また前者は容易に手で引き裂ける状態であり、膜面が受ける様々な負荷を想定すると、折り目に使う材料としてはPBO繊維を用いたものが適していると考えられる。

2.4 折り目が面精度に与える影響 本論文で取り上げる膜面については折り目部に放射素子や地導体などの導電性を有する材料を実装することを想定しているの、折り目部を含めた面精度の評価が重要である。そこで折り目

部を有する膜面について面精度を評価した。

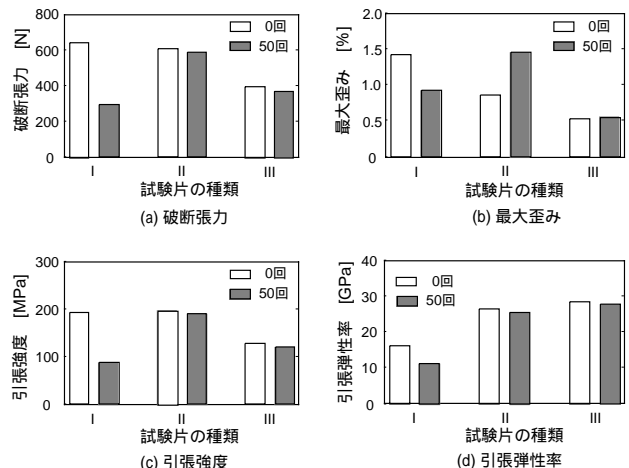
2.4.1 供試体 膜面基材部・折り目部ともにPF-N型の膜面 (第3表の試験片ではIIIに相当) を使用した直径300 mmの2枚の円形の供試体を製作した。供試体の寸法は後述するX-Yテーブルで測定できる寸法から選定し、第3章で述べる直径1500 mmの膜面の5分の1の縮尺とした。2枚の膜面は平面アンテナを想定し、周囲24点のケーブル接続点に膜面の間隔が一定に保たれるようにリング状のスペーサを取り付けている。ケーブル接続点に取り付けたケーブルは直径800 mmのアルミニウム合金製フラットリングに接続し、ケーブルに張力を与えることにより膜面を張架している。

折り方は折り目部の存在が膜面精度に顕著に現れるように、12本ずつの谷折りと山折りの折り目が放射状に入る方法²⁰⁾で行った。膜面には放射素子や地導体を想定したステンレス繊維焼結不織布を実装した。放射素子を想定した91個の円形パッチの直径は、第3章で述べている直径1500 mmの膜面に実装する円形パッチ (直径60 mm) の5分の1の縮尺である12 mmとした。この供試体の質量は放射素子層の膜面が3.8 g、地導体層の膜面が7.6 gである。面密度はそれぞれ53.8 g/m²及び107.6 g/m²である。ケーブルの張力は6.57 N、膜面張力は0.168 N/mmである。張力はハンディテンションメータで測定 (測定精度±0.5 N) した。

2.4.2 測定方法 膜面精度は膜面上の30 mm間隔の格子状の76点について、面外方向の変位量を第4図に示すX-Yテーブルに取り付けたCCDレーザ変位センサで測定した。76点の測定点のうち、放射素子の上にあるのは12点、折り目近傍にあるのは22点 (6点は素子上の折り目近傍) である。なお、地導体層には全面にステンレス繊維焼結不織布を実装しているの、全てこの上を測定している。X-Yテーブルの面外方向 (Z方向) の位置の精度は30 μm、変位センサの分解能は3 μmである。なお、測定は温度23 °C・湿

第3表 折り目部の強度試験用の試験片

試験片	膜面基材部	折り目部
I	AFA-N型	AFB-N型
II	AFA-N型	PF-N型
III	PF-N型	PF-N型



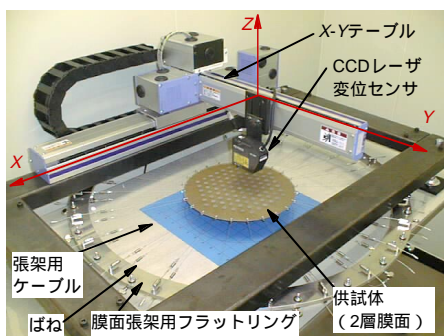
第3図 折り目部の材料の違いによる50回折り曲げによる特性劣化

度50%の環境で行った。

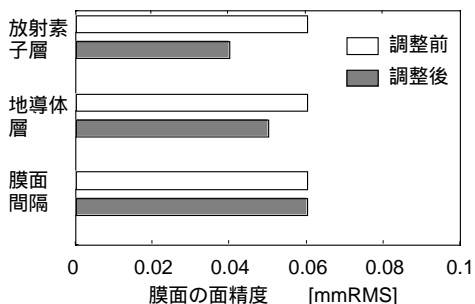
2.4.3 測定結果 測定は膜面のケーブル接続点に装着したリング状のスペーサの寸法を変更し、膜面間隔が4.9 mmの場合と6.54 mmの場合について実施した。この膜面間隔を選んだのは、入手が容易で品質が一定した規格品であるE形止め輪をスペーサに使用し、このスペーサの精度が膜面間隔に反映できることを確認するためである。測定の結果を第5図に示す。ここで、調整前とは24点の接続点のZ方向の位置を調整していない時のものである。このとき、僅かではあるが膜面に部分的な歪が観察されたので、歪が生じた場所とそれに向かい合う合計8点について地導体層の膜面の接続点位置を面外方向 (Z方向) に0.93 mm修正した。この修正を施した後の測定値が調整後と表示してあるものである。膜面には複雑な折り目があるにもかかわらず、膜面精度は0.1 mmRMS以下であり、また前述したような若干の調整を行うことにより0.05 mmRMS以下まで膜面精度を向上できることがわかった。

3. 試 作

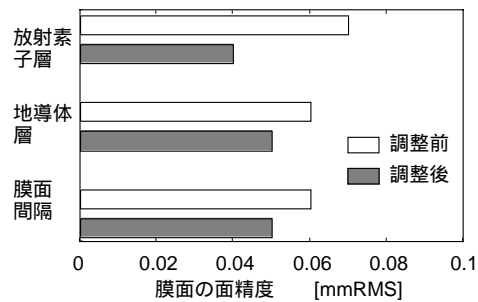
前章で提案した三軸繊維複合材料を使用した軽量の膜面



第4図 折り目部が面精度に与える影響の測定



(a) 膜面間隔4.9 mmの場合



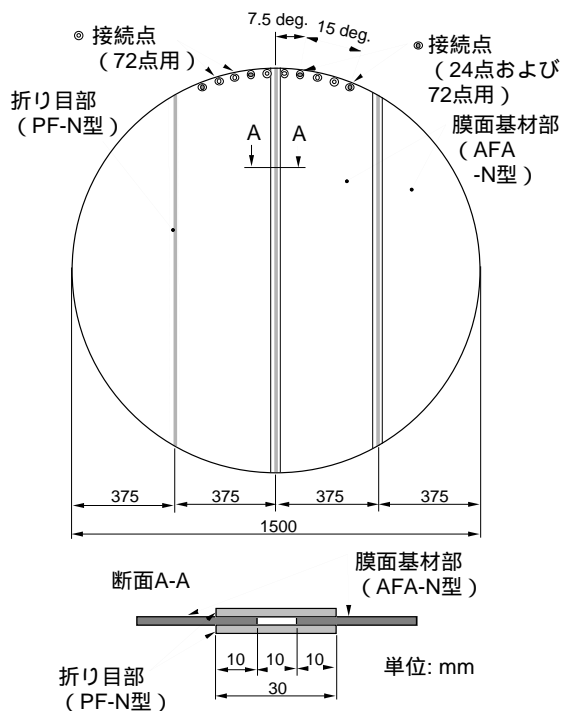
(b) 膜面間隔6.54 mmの場合

第5図 折り目部が面精度に与える影響の評価実験結果

構造が平面アンテナ構造として使えることを検証するために直径1500 mmの円形膜面の試作を行った。

3.1 膜面材料 膜面に構造上要求される強度は比較的小さいので、できる限り細い繊維を使い織物の厚さを薄くまた低繊維密度で織ることにより軽量化を図るのが望ましい。しかし、現有の織機で織れる仕様には限界があり、ここでは第1表に示した3種類の繊維織物から作ることができる第2表の3種類の複合材料から平面アンテナ構造を構成することとした。将来宇宙での利用を考えると紫外線による劣化が大きいアラミド繊維はそのままでは使えない (耐紫外線性を有する被覆またはコーティングが必要) が、本論文では膜面としての平面度を評価することを目的としたため、アラミド繊維織物を膜面基材部に使用したもので最初に試作を行った。ここでは、折り目部に2.3節の結果からPBO繊維織物を用いた膜面を使用した (第3表の試験片IIに相当)。また、さらに軽量化を目指して膜面基材部と折り目部ともにPBO繊維を用いた膜面 (第3表の試験片IIIに相当) を使用したものについても試作を行った。

3.2 膜面基材部にアラミド繊維織物を使用した平面アンテナ構造 試作した膜面の寸法を第6図に示す。膜面は直径1500 mmの円形で、4分割して製作し、2.3節で述べた折り目部により結合している。周囲には等間隔で72カ所の接続点を設けた。これらの接続点の破断力は取り付ける膜面の繊維の方向によって異なるが153~198 Nである。実験では第1章で触れた文献(14)によると、金属製円環で膜面を張架した基礎的な面精度の評価実験から1カ所あたりの最大張力は49 Nと想定されるので、安全率は3以上確保できている。膜面の厚さは本体の膜面基材部のAFA-N型膜面で0.115 ± 0.02 mm、折り目部のAFA-N型膜面にPF-N型膜面を2枚重

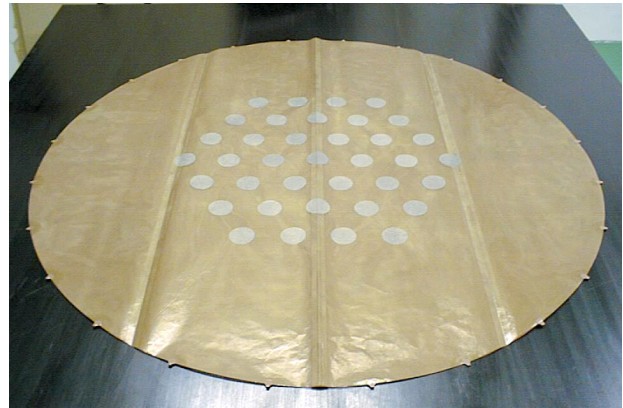


第6図 膜面基材部にアラミド繊維織物を使用した平面アンテナ構造の構成

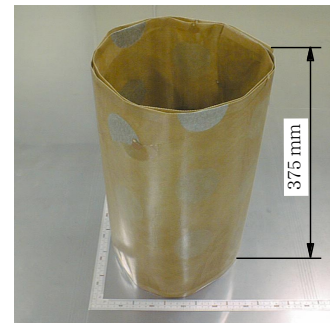
ねた場所で 0.198 ± 0.03 mm, 折り目部の隙間(PF-N型膜面2枚)で 0.117 ± 0.01 mmである. なお, 膜面の質量は126 g (面密度 71.3 g/m²)である.

3.3 膜面基材部にPBO繊維を使用したした平面アンテナ構造 前節で述べた膜面と同一の寸法及び折り方により全ての材料にPBO繊維織物複合材料を使用した場合について試作を行った. ここでは, 放射素子を想定して37個のステンレス繊維焼結不織布(面密度 50 g/m²)製の円形パッチ(直径60 mm)を, 地導体を想定して銅繊維焼結不織布(面密度 50 g/m²)を実装している¹⁶⁾. ステンレス繊維は細繊維化が可能なので, 隙間の割合が小さな(面積率が大きな)不織布を作るのに適しており, これは微細な加工が必要な円形パッチなどに適している. 一方, 銅繊維はステンレス繊維ほど細繊維化はできないものの, 製造コストが小さいため大きな面積に実装する必要がある地導体に適している. 試作した膜面を第7図に示す. 放射素子層の膜面の質量は85 g, 地導体層の膜面の質量は178 gであり, 面密度はそれぞれ 48.1 g/m²及び 100.8 g/m²である.

3.4 インフレーターブル円環 インフレーターブル円環は内圧により平面アンテナ構造に張力を与えて必要な面精度を維持する. 宇宙ではさらに膜面を硬化させて内部の気体を排出した状態で使用する. このため, 硬化型のインフレーターブル円環の寸法は平面アンテナ構造の張力とつり合う強度や構造物としての剛性から求める. しかし, ここでは平面アンテナ構造の面精度を測定するための支持構造として製作したため, 硬化型とはせず気密層のみで構成した. また, 膜面の貼り合わせによる製造が可能な寸法から管径を150 mmとし, 膜面精度測定装置を使った測定可能な寸法から外径を2100 mmとした. 硬化型インフレーターブル円環でも, 硬化後の形状は内圧で決定される硬化前の形状に依存する. インフレーターブル円環を試作するにあたり, 内圧が平面アンテナ構造の面精度へ与える影響を評価することを目標としたため, 内圧が10 kPa程度と35 kPa程度の二種類のインフレーターブル円環が得られるように膜材を選定した. また, 将来は硬化型インフレーターブル円環へ発展させることを考慮して, 気密膜単体ではなく第8図に示すような高強度繊維織物に気密加工を施した2種類の膜材をそれぞれ使用したインフレーターブル円環を試作した. AC型は, アラミド繊維織物にクロロスルホン化ポリエチレンを塗布したものであり, PE型はポリアリレート繊維織物にエチレンビニルアルコール共重合樹脂フィルムを接着したものである. 膜材の剛性により規定の寸法を実現する内圧(これを基準圧力と呼ぶ)が異なる. このため, インフレーターブル円環の膨張後の寸法を計測した時の内圧を基準圧力と呼んでいる. 基準圧力はAC型では35 kPa, PE型では9.8 kPaである. 試作にあたっては24個の直管を接続しているのほぼ24角形の形状である. 外径は約2100 mm, 内径は約1800 mm, 管径は約150 mm, 内容積は約 0.108 m³である. インフレーターブル円環に平面アンテナ構造を張架した例を第9図に示す. 膜面の折り畳みと丸め込みを併用することにより, 高さ約380 mm, 直径約300 mm程度に収納することができ

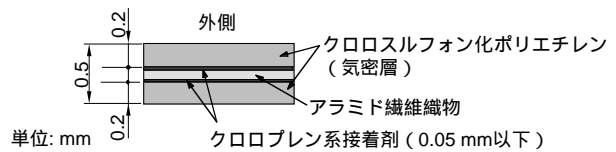


(a) 展開状態

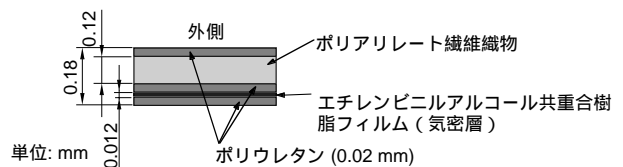


(b) 折り畳み・丸め込みを行った状態

第7図 PF-N型膜面を使用した直径1500 mmの平面アンテナ構造

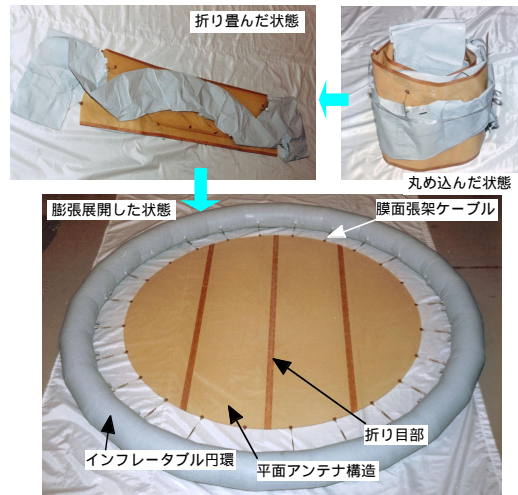


(a) AC型膜面



(b) PE型膜面

第8図 インフレーターブル円環の膜材の構成



第9図 インフレーターブル円環で張架した平面アンテナ構造の例

る．平面アンテナ構造を張架するためのタブはこのインフレーターブル構造の内周側の表面に取り付ける．しかし，インフレーターブル構造は薄い膜材料を貼り合わせて作るので，形状寸法を高精度で作るのは難しい．このため，タブはインフレーターブル円環を膨張展開させた際の基準圧力下で24カ所のフックの高さが同一になるように測定して取り付けた．

AC型の膜材を使用したインフレーターブル円環の質量は約3790 gである．PE型は膜材に強化繊維を使用しているものの，気密層に厚さ12 μm のフィルムを使っているためAC型に比べて膜材の全体の厚さが薄くなり，試作したインフレーターブル円環の質量は約850 gとAC型の約1/4以下である．

4. 面精度の評価

前章で述べた直径1500 mmの平面アンテナ構造を使用して，インフレーターブル円環で張架した場合の面精度を評価した．2.4節の膜面の面精度評価の結果から，適当なスペースを使うことで膜面間隔を一定に保つことができる見通しが得られている．したがって，張架方法は単純化してインフレーターブル円環の内圧が膜面精度に与える影響を明らかにするために，面精度の測定実験では3.2節で述べた平面アンテナ構造を使用して1層で行った．

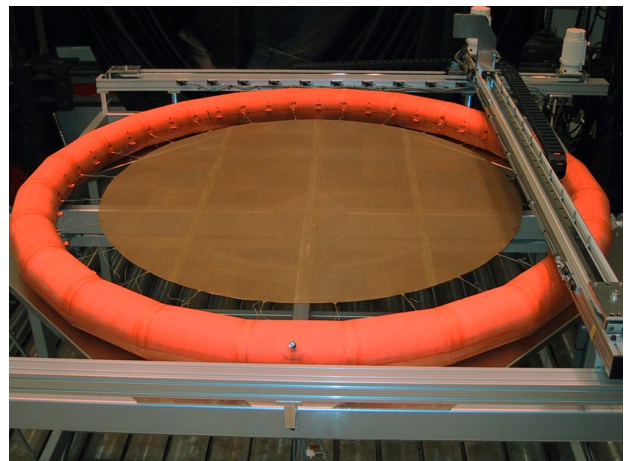
4.1 測定方法 面精度の測定実験では膜面上の24点の接続点とインフレーターブル円環に設けたフックをターンバックルを介して長さを自在に変えることができるPBO繊維の組紐で結合した．面精度はXYスキャニングテーブルに取り付けたCCDレーザ変位センサで膜面を非接触でスキャンすることにより測定した．変位センサはXYスキャニングテーブル上を80 mm/sの速度で動かして10行10列（合計100点）のうち膜面上にある有効なデータとして72点を取得した．変位センサの出力はアンプで電圧に変換した後にパーソナルコンピュータに取り込んだ．変位センサの分解能は10 μm である．AC型膜面を使ったインフレーターブル構造で張架して測定している様子を第10図に示す．

二種類のインフレーターブル構造は第8図に示したように膜材が異なるので，基準圧力は膜材の厚さが薄いPE型のほうがAC型より小さい．膜面精度の測定時の内圧は基準圧力の前後で測定するのが望ましいが，AC型の膜材を使用したインフレーターブル円環は基準圧力が35 kPaとかなり高いため，これ以上の内圧をかけることができず，内圧を下げた場合について面精度への影響を評価した．膜面精度の測定を行った内圧は，基準圧力を含めてAC型では4.9, 9.8, 14.7, 24.5, 35.0 kPa，PE型では4.9, 9.8, 14.7 kPaである．膜面を張架している24本のケーブルの長さはAC型のインフレーターブル円環で127 mm，PE型のインフレーターブル円環で126 mmで一定になるようにした．

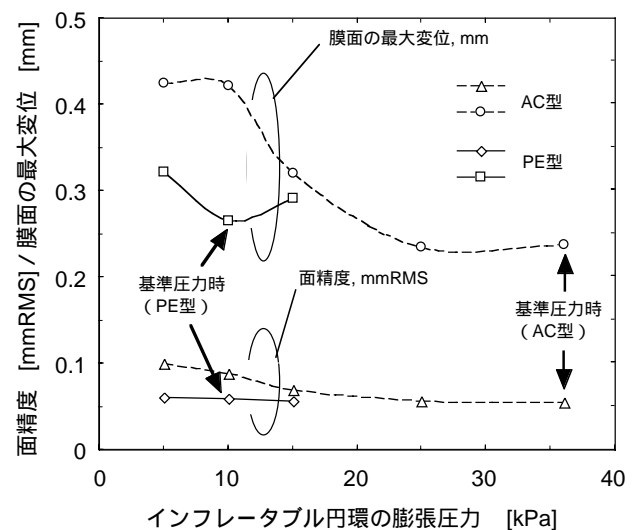
4.2 測定結果 膜面の面精度と最大変位（最大値と最小値の差）を第11図に示す．AC型は基準圧力の場合とそれ以下の場合で測定したが，圧力が下がるのに伴い面精度と最大変位ともに増加している．この原因はケーブル張力が

減少することにより膜面が撓んでくるためと思われる．したがって，最大変位は大幅に劣化するが面精度はあまり劣化せず，基準圧力の1/7の圧力の場合でも0.1 mmRMS以下を保っている．PE型は基準圧力の前後の圧力で測定した．この場合，最大変位の値が最も小さいのは基準圧力の時であり，それよりも圧力が高くて低くても最大変位は増加している．この場合も面精度の劣化はそれほど大きくなく，ほぼ0.06 mmRMS以下となっている．PE型で内圧を基準圧力より大きくした場合に最大変位が大きくなっているのは，インフレーターブル円環の形状に歪が生じているためと思われる．PE型は膜面の材料が薄いため内部の圧力によって形状の変化が大きく，これが膜面の変形に寄与していると思われる．

実験では平面アンテナ構造を張架するケーブルの張力を測ることはできなかった．しかし，鋼製の円環で同様な平面アンテナ構造を張架して行った面精度の測定実験¹⁴⁾における張力と面精度の関係から推定すると，1カ所あたり約30 Nの張力で張架されていると思われる．



第10図 AC型膜面を用いたインフレーターブル円環で張架したPF-N型膜面による平面アンテナ構造の面精度評価実験



第11図 インフレーターブル円環で張架した平面アンテナ構造の面精度と最大変位

面精度の測定値の再現性は、AC型膜面を使ったインフレーション円環の場合でもPE型膜面を使ったインフレーション円環の場合でも同条件における3回の測定で0.001 mmRMS以内と極めて良好であった。一方、膜面の最大変位では、AC型膜面を使ったインフレーション円環の場合で ± 0.01 mm、PE型膜面を使ったインフレーション円環の場合で ± 0.041 mmと測定値の約3%及び約15%である。1回の面精度の測定に要する時間は約10分間であり、面精度の測定ごとに内圧を調整した。AC型膜面を使ったインフレーション円環の圧力減少速度は、面精度測定中ほとんど無かったのに対して、PE型膜面を使ったインフレーション円環は0.02 kPa/minの圧力減少速度であり、1回の測定中での基準圧力に対する圧力減少の割合は2%程度である。この内圧の減少が最大変位の再現性に影響を与えらる。

PE型膜面の圧力減少速度が大きい原因は、膜材そのものではなく膜材の接着部にある。本インフレーション円環は、24角形(24角環)になっているため、接着部面積が全体の面積に占める割合が大きく、さらにPE型膜面は膜面の構成に起因する細部の接着部分の不整合が生じていると思われる。実際の宇宙インフレーション構造の場合でも、このような微小なリークは避けられない上、温度変化による膨張収縮で内圧が変化する。したがって、インフレーションシステムやインフレーション構造自体に内圧調整機構(調圧弁など)を装着する必要があると考えられる。

5. ま と め

大形な平面アンテナ構造への適用を想定して、二種類のインフレーション円環とそれで張架する軽量で皺になりにくい三軸織物複合材の平面アンテナ構造を試作した。インフレーション円環で張架した平面アンテナ構造の面精度を測定し、インフレーション構造の膨張圧力と面精度の関係を調べた。インフレーション構造の膜面の材料の違いにより、圧力の増減が膜面精度に与える影響は異なるが、インフレーション円環にタブを取り付ける際の位置を測定した時と同じ圧力で膜面精度を測定することにより0.1 mmRMS以下の面精度が達成できることがわかった。また、この基準圧力よりも圧力が増減すると面精度は劣化するが、その影響はあまり大きくないことがわかった。PBO繊維織物複合材を使用して試作した膜面は折り畳みと丸め込みを併用して収納できる上、折り皺が面精度の劣化に与える影響が小さく、酸素分子や原子状酸素が存在する環境では現時点において耐光性の課題があるものの静止軌道などにおいて使用する平面アンテナ構造として有望であると考えられる。

膜面精度の測定についてご協力を頂いた金沢工業大学の久保村健二教授、ならびに試作でご協力を頂いたサカセ・アドテック(株)の渡邊秋人氏及び関係者の方々に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Freeland, R. E. and Veal, G. R.: Significance of the Inflatable Antenna Experiment Technology, Proc. 39th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA Paper 98-2104, 1998, pp. 2789 - 2796.
- 2) Grahne, M. S., Cadogan, D. P. and Lin, J. K.: Inflatable Solar Arrays - Concept to Reality, 50th International Astronautical Congress, IAF-99-1.1.09, 1999.
- 3) Fang, H. and Lou, M. C.: Analytical Characterization of Space Inflatable Structures -An Overview, Proc. 40th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA Paper 99-1272, 1999, pp. 718 - 728.
- 4) Sadeh, W. Z. and Criswell, M. E.: Inflatable Structures for a Lunar Base, AIAA Space Programs and Technologies Conference and Exhibit, AIAA Paper 93-4177, 1993.
- 5) Komatsu, K., Sano, M., Kasai, T., Igawa, H., Kimura, J. and Ohyagi, T.: Concept Study of Membrane Tanks for Launch Vehicles, 41st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA Paper 2000-1572, 2000.
- 6) Fera, V. A., Lou, M. C., Huang, J. and Speer, S. E.: Lightweight Deployable Space Radar Arrays, Proc. 39th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA Paper 98-1933, 1998, pp. 1871 - 1875.
- 7) Cadogan, D. P., Lin, J. K. and Grahne, M. S.: The Development of Inflatable Space Radar Reflectarrays, Proceedings of 40th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA Paper 99-1517, 1999, pp. 2488 - 2494.
- 8) Bernasconi, M. C., Pagana, E. and Reibaldi, G. G.: Large Inflatable Space-Rigidized Antenna Reflectors: Land Mobile Services Development, XXXVIII Congress of the International Astronautical Federation, IAF-87-315, 1987.
- 9) Cadogan, D., Grahne, M. and Mikulas, M.: Inflatable Space Structures: A New Paradigm for Space Structure Design, 49th International Astronautical Congress, IAF-98-1.1.02, 1998.
- 10) Higuchi, K., Natori, M. C., Hatta, H. and Yokota, T.: Inflatable Space Rigidized Structure: Adaptivity and Fundamental Experiment, Proc. 20th Int. Symp. Space Technology and Science, ISTS-96-b-11v, 1998, pp. 396 - 401.
- 11) 角田博明, 石川博規, 仙北谷由美, 宮坂宏宏: 二次元展開構造物へのインフレーション構造の適用に関する検討, 第43回宇宙科学技術連合講演会講演集, 99-1C11, 1999, pp. 237 - 242.
- 12) 角田博明: 巨大なアンテナのための軽量構造 - インフレーション構造の適用 -, 電子情報通信学会, 技術研究報告 [アンテナ・伝搬/衛星通信], A-P2000-24, SAT2000-15, 2000, pp. 45 - 48.
- 13) 谷澤一雄, 赤石 明, 田畑真毅, 樺島重憲, 高橋 徹, 鈴木龍太郎, 安田靖彦: LEO衛星用2次元展開アレーアンテナの要素技術の開発, 電子情報通信学会, 技術研究報告 [アンテナ・伝搬/宇宙・航行エレクトロニクス], A-P2000-61, SANE2000-58, 2000, pp. 21 - 26.
- 14) Tsunoda, H. and Senbokuya, Y.: Shape Measurement of a Flat Stretched Lightweight Membrane for Planar Antenna Structure, Proc. 42nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, AIAA Paper 2001-1597, 2001.
- 15) 神野 誠, 鈴木龍太郎, 飯倉省一: アクティブフェーズドアレイアンテナ用2次元展開パネルの開発(展開シーケンスの提案とヒンジ機構・ラッチ機構の開発), 日本機械学会論文集中編, **67** (2001), pp. 196 - 202.
- 16) 仙北谷由美, 角田博明: 導電性不織布を用いた円形パッチアンテナの特性評価, 電子情報通信学会, 技術研究報告 [アンテナ・伝搬/宇宙・航行エレクトロニクス], A-P2001-140, SANE2001-86, 2001, pp. 81-85.
- 17) Jenkins, H. M.: Gossamer Spacecraft, Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 191, AIAA, Virginia, USA, 2001, pp. 460 - 462.
- 18) 矢吹和之: 高強度・高弾性率繊維ザイロン®について, 日本航空宇宙学会誌, **48** (2000), pp. 629 - 634.
- 19) Wu, M. S. and Ito, K.: Meshed Microstrip Antennas Constructed on a Transparent Substrate, IEICE Transactions, **E74** (1991), pp. 1277 - 1282.
- 20) <http://www2.eng.cam.ac.uk/~sdg/dstruct/wrapping.html>