

管理番号# 17-102

平成18年度
研究開発成果報告書

超軽量衛星搭載用展開アンテナ
設計技術の研究

委託先： 三菱電機(株)

平成19年4月

情報通信研究機構

平成18年度 研究開発成果報告書
(一般型)

「超軽量衛星搭載用展開アンテナ設計技術の研究」

目次

1	研究開発課題の背景	2
2	研究開発の全体計画	4
2-1	研究開発課題の概要	4
2-2	研究開発目標	6
2-2-1	最終目標(平成19年3月末)	6
2-2-2	中間目標(平成18年3月末)	7
2-3	研究開発の年度別計画	8
3	研究開発体制	9
3-1	研究開発実施体制	9
4	研究開発実施状況	10
4-1	超軽量展開支持構造構成法の研究開発	10
4-1-1	はじめに	10
4-1-2	支持構造基本構成検討	10
4-1-3	支持構造基本特性解析	13
4-1-4	支持構造特性評価モデル詳細設計	16
4-1-5	支持構造詳細解析評価	19
4-1-6	支持構造特性評価モデル製作	21
4-1-7	支持構造地上試験	23
4-1-8	支持構造重量	25
4-1-9	まとめ	27
4-2	高安定ケーブルネットワーク構造構成法の研究開発	28
4-2-1	はじめに	28
4-2-2	鏡面ケーブル構造構成検討	28
4-2-3	鏡面ケーブル構造製造設計	30
4-2-4	反射鏡面全体組立と構造特性評価	35
4-2-5	まとめ	39
4-3	総括	40
4-3-1	超軽量支持構造構成法の研究開発	40
4-3-2	高安定ケーブルネットワーク構造構成法の研究開発	41
5	参考資料・参考文献	43
5-1	研究発表・講演等一覧	43

1 研究開発課題の背景

(社会的・経済的背景)

開口直径の大きなアンテナの存在は、衛星通信や放送、惑星間通信さらには地球観測や情報収集などにおいて大きな意味を持つ。特に通信衛星にとっては、より巨大なアンテナを利用し限られた衛星電力でより高い送信性能を得、与えられた受信機性能でより高い受信性能を得ることでミッションの可能性をより大きく広げることができる。一方で、大形のアンテナは2トン級あるいは3トン級といった大型バスシステムへ搭載を前提としているため、現状の設計では小型の衛星に搭載できず、経済化の大きな障壁になっている。すなわち、現状の宇宙機システムの性能向上のためには搭載用アンテナを大形化すると同時に、質量を極限まで軽量化する必要がある。

(技術的背景)

通信衛星搭載アンテナ反射鏡面の研究はCSシリーズから始まり、以下のような構造設計技術の流れを踏んできた。

CSシリーズ搭載アンテナ：

- ・ 開口直径約1mの軽量アンテナ反射鏡面構造として、炭素繊維強化プラスチックを用いた複合材料による構成方法を開発した。
- ・ 同時に、線形構造解析プログラムを利用した「剛性設計」を基本にした最適設計を衛星搭載アンテナへ適用し軽量化に成功した。

技術試験衛星VI型搭載アンテナ：

- ・ 開口直径3.5mの軽量アンテナ反射鏡面構造として、展開形の反射鏡面を開発した。
- ・ 高信頼度の展開機構の開発、地上試験評価による軌道上性能の高精度保証方法の研究を行った。
- ・ 軽量設計としては、薄いハニカム・サンドイッチ殻をトラス構造で支持する構成とし、鏡面精度と剛性を異なる構造要素で分担することにより、高精度化と軽量化を同時に実現した。
- ・ 「強度設計」を基本とした構造最適化設計し、さらなる軽量化に成功した。
- ・ 1992年に打ち上げ。衛星は推進系の不具合で静止化できなかったが軌道上展開を成功させた。

以上の技術はN-S T A R - a, b機へ継承された。

高度移動代通信衛星搭載アンテナ（第一世代）：

- ・ 開口直径10m級の大型展開アンテナ反射鏡面構造として、反射鏡面をケーブルネットワーク構造と金属メッシュで構成し、それらを展開形の骨組み構造で支持する構成を考案した。
- ・ 張力が発生した時に初めて形状が決定し、展開型骨組み構造と連成して精度

が決定するケーブルネットワーク構造の形状および展開挙動を解析するため、非線形構造解析プログラムを開発した。

- ・ この解析プログラムにより構造軽量化の新たな評定として展開中の「遷移形状の強度設計」を基本とし、さらなる軽量化を可能とした。
- ・ 全体を一体の構造とせず、複数の基本モジュール構造の結合により構築することによって、展開信頼性、鏡面精度の地上試験評価を可能としていると同時に構造としての拡張性を与えた。

以上の構造概念および解析プログラムによる設計評価は宇宙航空研究開発機構が開発中の技術試験衛星Ⅷ型搭載アンテナへ適用されている。

高度移動体衛星通信アンテナ（第二世代）

- ・ 次世代通信衛星の要求仕様に応じて反射鏡面の要求仕様を決定。
- ・ 骨組み構造により構成する反射面支持構造の基本構成を考案し、解析モデルを作成して性能比較を実施した結果、現在のせん断方向に収納する展開型リブを放射状に配置する構成に決定した。
- ・ 幾何剛性行列の定式化と数値アルゴリズムの変更による解析ツールの高速化と非線形問題解析の高精度化を実現
- ・ 反射面支持構造の静荷重応答解析および展開解析により最適テンドン配置の検討を行い、軽量化の効果を確認。
- ・ 最適構成案に従った3m構造特性検証モデルを設計、製造し、特性試験を実施して基本概念の検証と解析の問題点を抽出

（全体の目的）

本共同研究内容は、以上の研究を背景に高度移動体衛星通信アンテナ（第二世代）の搭載寸法、搭載重量、展開特性、構造安定性の観点で、システムへの適合性と信頼性を詳細に研究し、搭載モデルの設計へ開発レベルを進めることを可能とする。これにより、比較的小型な通信衛星にて、10から100倍の通信容量の大容量化を実現するために必要な搭載機器コア技術である、超軽量大形アンテナ反射鏡の設計技術を確立することを目指し、安価で大容量な移動体衛星通信システムを実現させることを目指す。

本研究の成果を将来大容量移動体通信衛星研究開発のプロジェクトにつなぎ、2010年打ち上げ、2012年商用衛星導入を実現させることを目的とする。

2 研究開発の全体計画

2-1 研究開発課題の概要

本研究では、超軽量アンテナ反射鏡面構造を大きく分けて以下の役割分担を持つ3種類の構造要素で構成する。

- (1) 形を決める：ケーブルネットワーク構造
- (2) 圧縮力を受ける：展開型骨組み構造
- (3) モードを制御する：テンドン

これらのうち、(2)の展開型骨組み構造において、軽量化のために構造部材を細長くすると全体座屈が強度を支配するようになる。この全体座屈は、線形構造解析を基本としたこれまでの設計方法では定量的な把握と制御が困難である。よって、全体座屈をおこさせないように頑丈な骨組みにすると、構造重量が大きくなっていった。

本研究では、自社開発中の構造解析ソフトウェアを用い、従来設計上の考慮することができなかった全体構造の座屈モードを定量的に把握することより、重量軽減に効果のあるモードを(3)のテンドンを用いて制御する。重要な課題はこの非線形領域での座屈後モードを解析によって正確に把握し、最適なテンドン配置を行うことである。

解析と実際のハードウェア特性との違いに最も大きな影響を与えるのは、初期不整と言われる製造公差の積み上げであり、展開・駆動機構の局所的な剛性の影響およびガタである。これらの影響を定量化することによって、解析精度を明確にし、必要な重量マージンを把握しなければ信頼性のある構造を設計することはできない。

そこで、非線形領域における構造特性、機構特性の解析予測により限界まで軽量化したアンテナ反射鏡面構造を設計し、5m程度の直径のアンテナ反射鏡面構造をさらにハードウェア試作することによって、5kg程度で実現することによって単位面積当たりの重量を現時点の最軽量のアンテナの半分した世界最軽量のアンテナ反射鏡面構造が実現可能であることを証明する。

さらに解析精度を定量化すると同時に、実装設計や機構設計の限界を把握する。それにより、設計の方法論を検証し、20m級の大形反射鏡面も同様の設計で軽量化できることを検証する。

本共同研究では以下の2つの研究課題を定める。

- ア 超軽量展開支持構造構成法の研究開発
- イ 高安定ケーブルネットワーク構造構成法の研究開発

具体的には以下のような内容で検討を進める。

- ア 超軽量展開支持構造構成法の研究開発

超軽量・大形展開アンテナ反射鏡面構造を構成する構造要素のうち、以下のよりに展開支持構造の基本設計と解析による基本設計評価を行い、製造仕様を決

定して縮小試作モデルを製造し、設計の妥当性を検証する。さらに性能評価試験に必要な重力補償装置を含む地上試験装置の構成を検討し、その仕様を決定して製造を行う。

(1) 支持構造基本構成検討

支持構造試作モデルの基本構成案を検討し、アンテナ鏡面パラメータ、支持構造の形状設計（最適近似球面の決定）全体寸法、インタフェース点の最適化、さらに支持構造の折り畳み条件の設定とヒンジパラメータの設計、部材構成、機構設計を実施し、基本構成を決定する。

(2) 支持構造基本特性解析

支持構造基本構成案に従って、NTTが開発した構造解析プログラムにより解析モデルを作成し、展開の可否、展開力の余裕、荷重分布、部材強度、座屈強度、座屈後モード解析を実施し、部材基本諸元の決定とテンドンの配置を行う。この際、(イ)で検討するケーブルネットワーク構造による張力は簡易ケーブルモデルで模擬して主要寸法を決定する。詳細ケーブルネットワーク構造モデルが完成した時点で組み合わせた連成解析を実施し、設計パラメータの確認を行う。

(3) 支持構造特性評価モデル詳細設計

上記解析結果に基づいて、基本寸法、荷重条件などの要求仕様を決定し、試作縮小モデルの詳細設計を実施する。

(4) 支持構造詳細解析評価

支持構造詳細設計と平行して、解析評価モデルのパラメータを逐次変更し、設計変数を更新すると同時に、設計結果で予測される構造特性を解析し、設計にフィードバックする。さらにこの際、(イ)で検討するケーブルネットワーク構造の詳細モデルを用い、組み合わせた連成解析を実施して、設計パラメータの確認を行う。

(5) 支持構造特性評価モデル製作

支持構造特性評価モデルの製造を実施し、機構設計や実装形状も問題点を抽出して、軽量化の限界を明確にする。

(6) 支持構造地上試験特性評価

地上試験を実施するにあたり、支持構造地上試験解析モデルを作成し、部材荷重の解析と強度の評価を実施して吊り下げ条件や固定条件を決定する。

(7) 試験装置、治具設計製造、支持構造地上試験

上記評価結果に基づいて、試験装置、治具の仕様を決定し詳細設計および製造を実施する。試作ハードウェアを試験装置・治具へ設置し、負荷荷重の測定、部材歪の測定、展開力の測定等の構造・機構特性の評価を実施する。

イ 高安定ケーブルネットワーク構造構成法の研究開発

平行して反射鏡面ケーブルネットワーク構造の設計および基本仕様の検討を行い、反射鏡面を構成するケーブルネットワーク構造縮小モデルの製造を行う。上記、支持展開構造試作モデルと組み合わせることにより、超軽量・大形展開アンテナ反射鏡面構造を構成し、これより形状精度および展開性能の確認を行い実現性を検証する

(1) 鏡面ケーブル構造構成検討

反射面を構成するケーブルネットワーク構造の解析モデルを作成し、張力の均一化、取り付け点の変形に対する安定性、調整性等の観点から構成案のトレードオフを実施し、トポロジー、材料剛性、初期長さという製造のため設計仕様を決定する。

(2) 鏡面ケーブル構造製造設計、製造

上記設計仕様に基づき、ケーブルネットワーク構造縮小試作モデルの製造を実施する。

(3) 反射鏡面全体構成組立・調整

製造、試験評価した支持構造と反射面構造とを組み合わせ、形状調整、張力調整を実施する。

(4) 反射鏡面全体構造特性評価

形状精度、負荷荷重の測定、部材歪の測定、展開力の測定等の構造・機構特性の評価を実施する。反射鏡面構造として、総合的に性能を評価して、設計の妥当性を検証し、フルスケールモデル製造上の問題点を検討する。

2-2 研究開発目標

2-2-1 最終目標（平成19年3月末）

次世代移動体通信衛星へ適用可能な大形で高精度かつ超軽量の反射鏡面構造を以下の性能指標で実現する。

- ・反射鏡面開口直径は20m級、鏡面ランダム誤差は想定する使用周波数であるS帯(約2.5GHz)へ適用に対応。
- ・目標ミッション総質量400kgに対し、反射鏡の質量を配分。130kg程度(衛星バスへの固定構造を含む)が目標。

以上の目標のためにハードウェアを試作し、その性能を検証することにより設計法の妥当性を示す。さらに部材の加工性、機構などの部品設計、実装設計の問題点を抽出して実現性を検証する。

但し、重力補償装置などの地上性能評価のための装置・治具の規模により開発コストが著しく増加することを抑制し、また、十分な試験評価精度を得るためにスケールモデルとなる5m程度の開口直径のアンテナ反射鏡面構造を試作し、その性能を検証することにより設計法の妥当性を示す。

スケールモデルの性能目標を各サブテーマに対応させ、以下に示す。

ア 超軽量展開支持構造が、困難な機構部品、実装部品等のスケール化が困難な構造を除き、単位面積あたりの質量が 0.3 kg/m^2 以下になることの見通しを示す。

イ ケーブルネットワーク構造が軽量化した展開支持構造上で形状安定し、鏡面形状の理想パラボラに対するランダム誤差 2.4 mmRMS 以下となることの見通しを示す。

2-2-2 中間目標（平成 18 年 3 月末）

基本設計検討が完了した時点は中間目標点とし、各サブテーマ毎に以下の目標を設定する。

ア 超軽量展開支持構造の基本設計仕様の確定と性能予測を示す。

イ 高安定ケーブルネットワーク構造の基本設計仕様の確定と性能予測を示す。

2-3 研究開発の年度別計画

金額は非公表

研究開発項目	17年度	18年度	年度	年度	年度	計	備考
ア 超軽量展開支持構造構成法の研究開発							
(1) 支持構造基本構成検討	→						
(2) 支持構造基本特性解析		→					
(3) 縮小モデル詳細設計		→					
(4) 縮小モデル地上試験および特性評価		→					
イ 高安定ケーブルネットワーク構造構成法の研究開発							
(1) 鏡面ケーブル構造構成検討	→						
(2) 鏡面ケーブル構造製造設計	→	→					
(3) 鏡面ケーブル構造製造	→	→					
(4) ケーブルネットワーク特性評価		→					
(5) 反射鏡面全体構造特性評価		→					
間接経費							
合計							

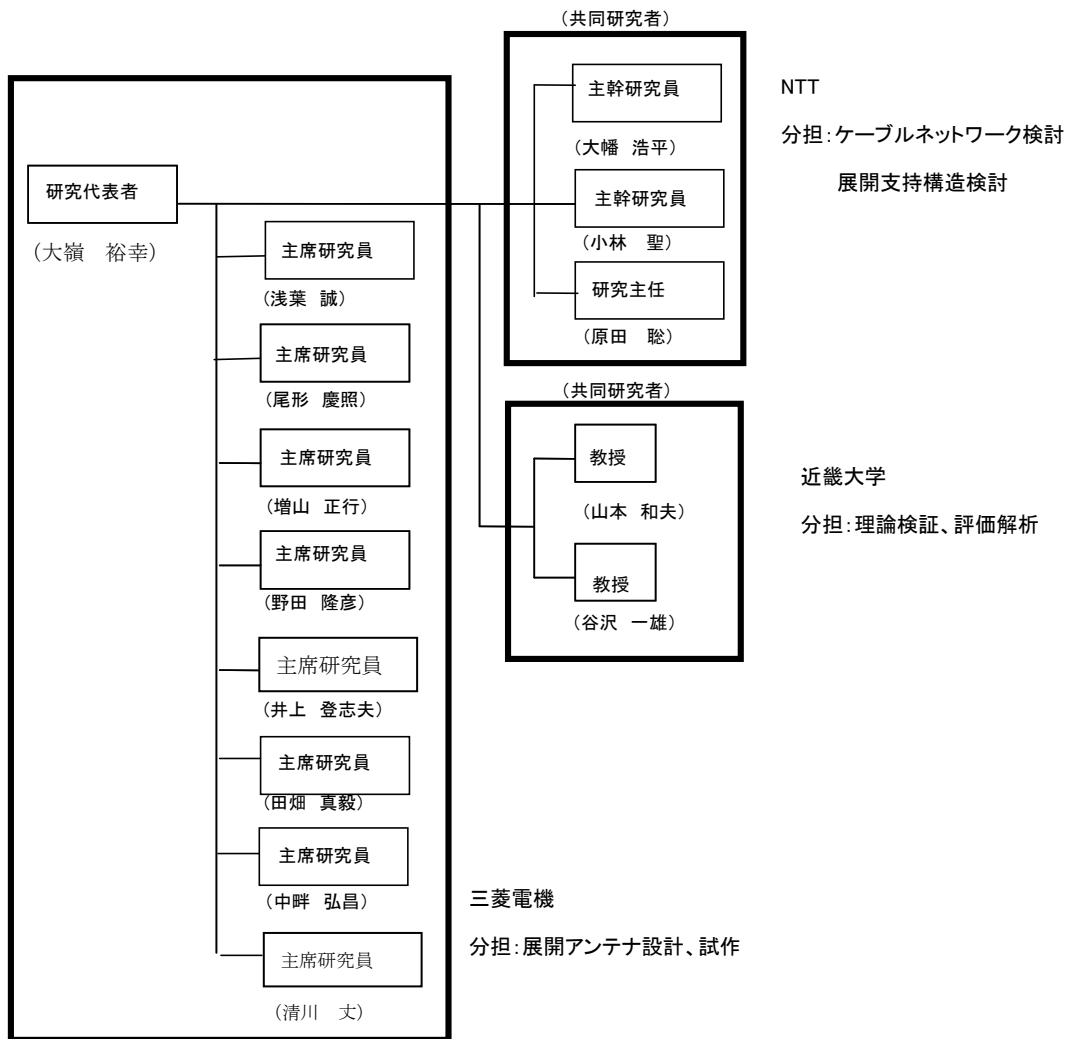
注) 1 経費は研究開発項目毎に消費税を含めた額で計上。また、間接経費は直接経費の30%を上限として計上(消費税を含む)。

2 備考欄に再委託先機関名を記載

3 年度の欄は研究開発期間の当初年度から記載。

3 研究開発体制

3-1 研究開発実施体制



4 研究開発実施状況

4-1 超軽量展開支持構造構成法の研究開発

4-1-1 はじめに

超軽量・大形展開アンテナ反射鏡面構造を構成する展開型支持構造について、以下(1)-(7)について検討した。

(1)支持構造基本構成検討，(2)支持構造基本特性解析，(3)支持構造特性評価モデル詳細設計，(4)支持構造詳細解析評価，(5)支持構造特性評価モデル製作，(6)支持構造地上試験特性評価，(7)試験装置，治具設計製造地上試験。

平成17年度は，試作スケールモデルの基本設計により，上記(1)，(2)を実施した。また，基本要素について試作し，試験により特性検証を行った。

平成18年度は，引き続き，試作モデルの詳細設計を行い，製造モデルに対応した解析モデルを作成して詳細な特性解析を実施した(上記(3)，(4))。また，試作モデルの製造を行い，試験方法の検討と試験治具の作成および特性試験を実施した。(上記(5)-(7))

4-1-2 支持構造基本構成検討

20m 規模の鏡面設計と同様の手順で試作スケールモデルを検討することで，軽量の支持構造を実現するための構成および設計技術の確立を目指した。

特性を検証する上で試験時のハンドリングを考慮し，スケールモデルの機械的な大きさが5m以下となるように，開口直径4mの反射鏡を想定して，スケールモデルの基本構成と要求条件を検討した。

(a) 支持構造の基本構成

メッシュとケーブルネットワーク構造からなる反射面を拡げる支持構造としては，周囲で支えるフープ型と中心から放射状にリブ構造を伸ばして支えるリブ型に大きく分けられる。

支持構造は反射面を拡げるための負荷に耐える必要があり，軽量化のため部材径や厚みを減らすと座屈するため，従来の構造設計では座屈強度以下までの軽量化を行えなかった。

しかし，細長いリブ構造の負荷による破壊モードを考えると，座屈後に変形が進行することで部材の曲げ歪が増大し破断にいたることから，座屈後の変形を抑制することで強度の向上が図れると考えられる。そこで，中心から放射状にリブ構造を伸ばして構成するリブ型展開構造に対し，座屈変形の進行を抑制するようにテンドン(ケーブル)を配置し，強度を補強した構成と検討した。

図1に今回検討した超軽量展開反射鏡の構成を示す。

ここでは，軽量化の観点から6本のリブからなる六角形状のアンテナを検討する。鏡面部分は所定のパラボラ曲面を形成する必要があることから，ケーブルネットワーク構造の鏡面部分は所定のパラボラ曲面を形成する必要がある。

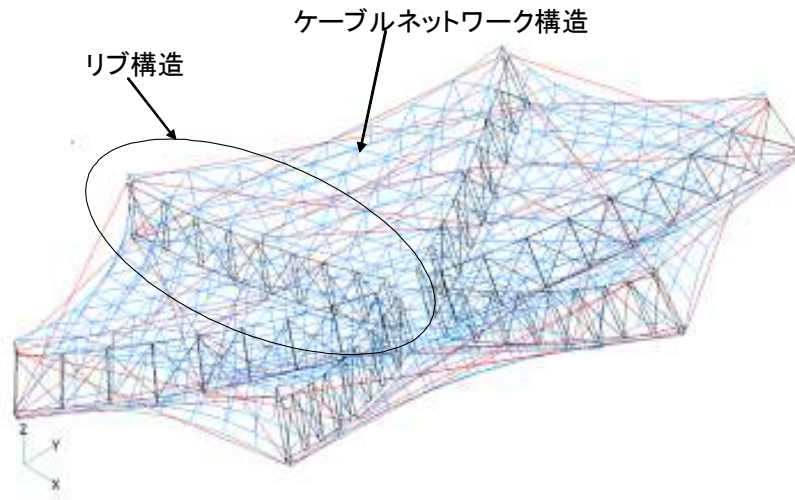


図 1 超軽量展開反射鏡構成

(b) 基本設計

縮小モデルとして、図 2 に示すように、開口面と垂直に z 軸（パラボラ頂点から焦点方向）を取り、開口面（ $x-y$ 面）に投影したときに 4m の円を内接し、中心がオフセットしたオフセットパラボラ反射鏡を想定した。ここでは、焦点距離 f と開口直径の比 (f/D) を 0.75 として、開口直径 4000mm に対し、焦点距離 3000mm とした。パラボラ軸上には衛星構体や給電部が置かれることから、ブロッキングを防ぐために、オフセット位置（中心位置の x 軸上の位置）を 2400mm として基本構成を検討した。また、部材長さの共通化により部品点数の削減する観点から、支持構造はパラボラ面を近似する球面を基準とする構造とした。

リブ型展開構造の中心から放射状に伸びるリブ構造は 1 次元的に伸びる伸展構造であり、実績や軽量化の観点から図 3 に示すような、薄いフレーム状の伸展トラス構造を用いることとした。これは、過去に 8m 規模の衛星搭載用反射鏡で使用された伸展マストの構造を参考に、一面を抜き出した構成となっている。図 3 に示すように、伸展トラス構造を鏡面に対しほぼ垂直な方向に配置し、鏡面の面外方向はフレーム状の伸展トラス構造で強度を確保し、鏡面の面内方向（伸展トラスが作る面に対しては垂直方向）の強度は伸展トラス構造間にテンドンを設置して強度を向上させる構成とした。

伸展トラス構造の低次の座屈モード（主として面内曲げ変形）に対応した座屈変形の進行を抑制することで破壊強度の向上を図るため、テンドンは、隣あう伸展トラス構造同士が変形を互いに拘束するように設置した。このとき、テンドンの取り付けインターフェースはリブ構造上に設置し、かつ、展開及び収

納を阻害しないように取り付ける必要があることから、取り付け可能位置は限られる。そこで、取り付け可能な位置で座屈変形が大きいモードの腹に近いところと、変形が小さいモードの節に近いところを選び、テンドンを設置した。伸展トラスはフレームの面外方向以外にねじり方向にも強度が低いことから、ねじれ方向の変形形状も考慮して配置している。

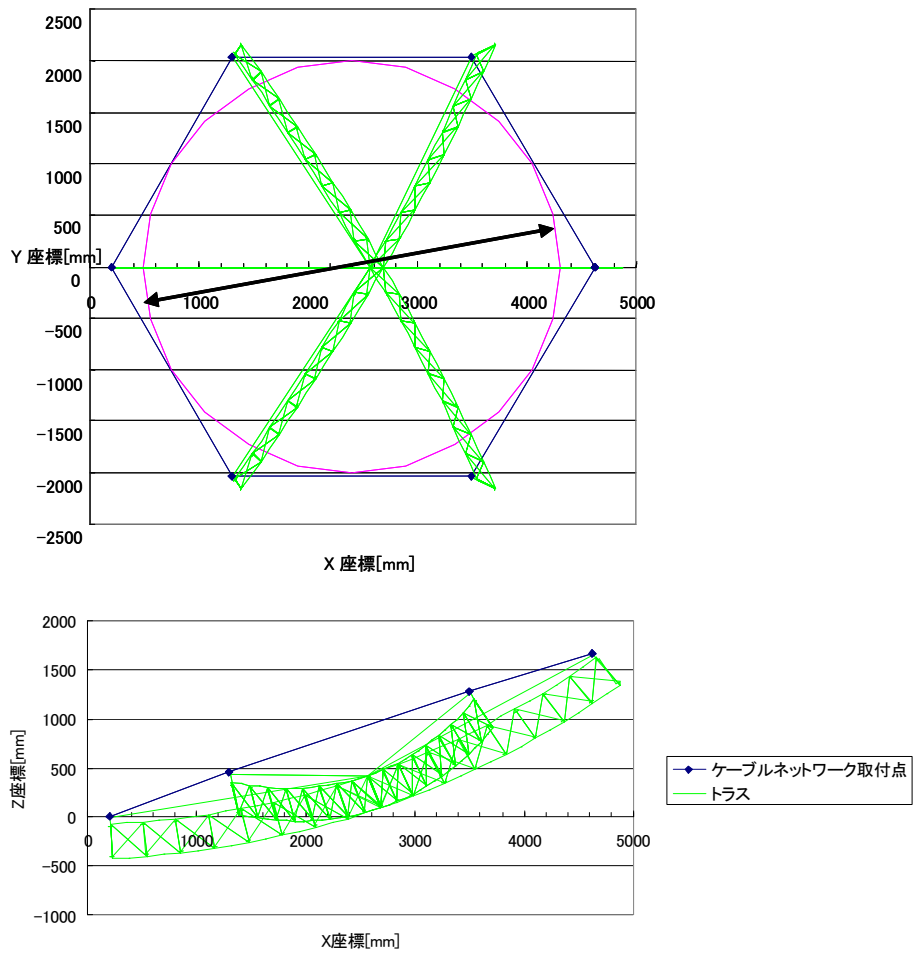


図 2 支持構造外形寸法

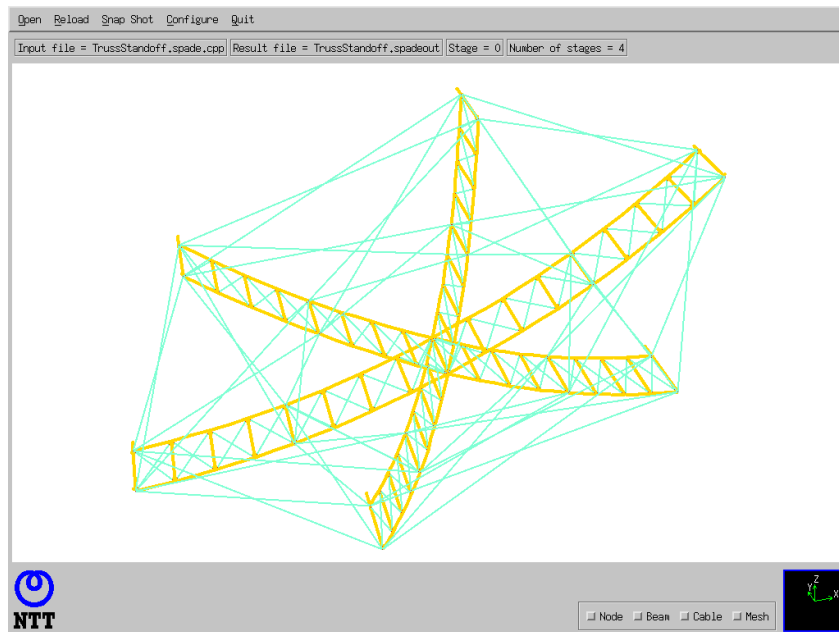


図 3 リブ型支持構造

4-1-3 支持構造基本特性解析

従来の構造と比較して、テンドンにより補強した提案構成の強度向上を解析的に検討した。

支持構造の基本特性を検証するため、リブを構成する伸展トラス単体及びテンドンで補強した支持構造全体に対して、伸展トラスの先端側から圧縮荷重を負荷したときの变形および部材に生じる曲げ歪を解析した。支持構造に加わる負荷は鏡面を形成するケーブルネットワーク構造を拡げるための反力として加わることから、先端から中心方向に負荷を与えて、そのときに生じる部材の歪レベルを解析した。

図 4 に支持構造の解析モデルを示す。展開支持フレーム構造の上部および下部に沿って設けた張力模擬ケーブル（ケーブルネットワークの取り付け位置を結んでいる）の長さを解析ステップの増加に応じて縮めていくことによって圧縮荷重を段階的に与えて解析した。ここでは、圧縮荷重として最大 150N を想定し、ケーブルの短縮により伸展トラスの先端に加わるケーブル張力が 150N を超えるところまで解析を実施した。このとき、前節の構成を元に解析モデルを作成し、従来のリブ型構造で 150N 以上の負荷に耐えられるように直径 12mm のチューブで構成されるものとして、解析モデルを作成した。テンドンの有無で結果を比較し、強度向上を検証した。

従来のリブ構造では個々のリブ（伸展トラス）は中心側を固定した場合、それぞれ独立しているため、解析の負荷を軽減するため、支持構造を構成する 6 本の伸展トラスのうち一つ（図 4 の負荷ケーブルを示した位置の構造）の解析結果で代表した。

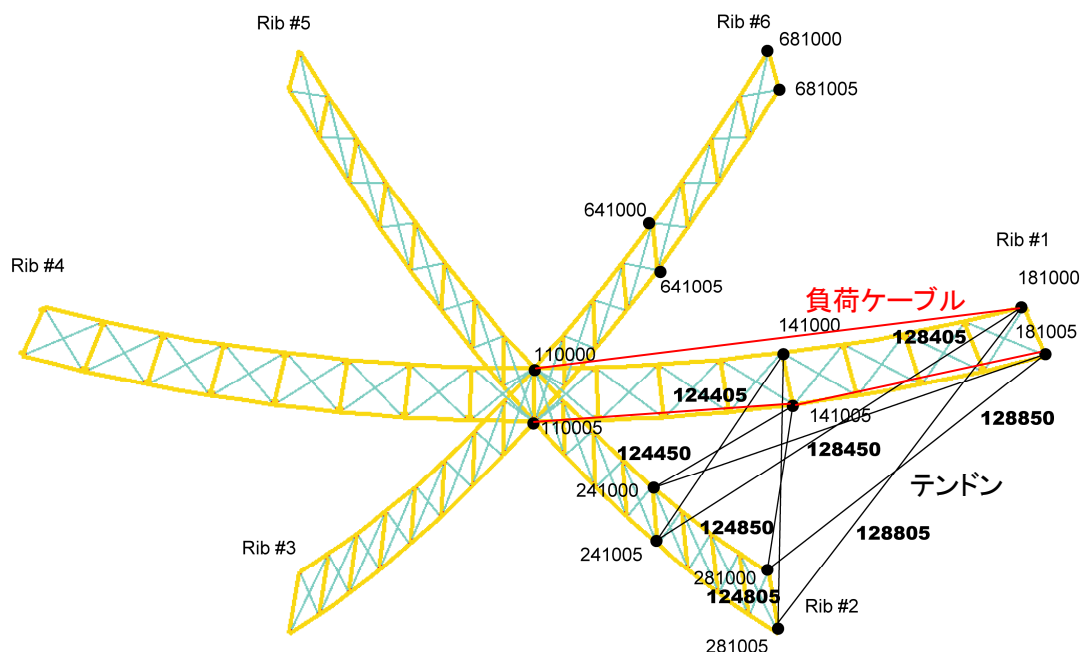


図 4 支持構造解析モデル（テンドン，負荷ケーブルは一部のみ表示）

結果の一例として、テンドンのない場合に相当する伸展トラス単体に前述の手順で負荷を加え、150N 以上の負荷が加わったときに部材に生じる曲げ歪の解析結果を図 5 に示す。また、テンドンで補強した支持構造について同様の解析を行った結果を図 6 に示す。

従来の構造ではリブ構造（ここでは伸展トラス）のみで荷重を受けるため曲げ変形が生じやすいが、テンドン補強した構造では、負荷レベルが同等（どちらも 150N 以上の先端負荷力）のときに曲げ応力が 1/3 程度に抑えられることが判った。

従来の構成においては、先端の負荷により変形が進行し、曲げ応力が増加し構造が破壊に至ることから、本構成では、部材径が等しい（構造重量がほぼ等しい）構成で、従来の構造と比較して、先端荷重に対し 3 倍の負荷レベルまで耐えられ、より軽量の構造が達成可能と考えられる。

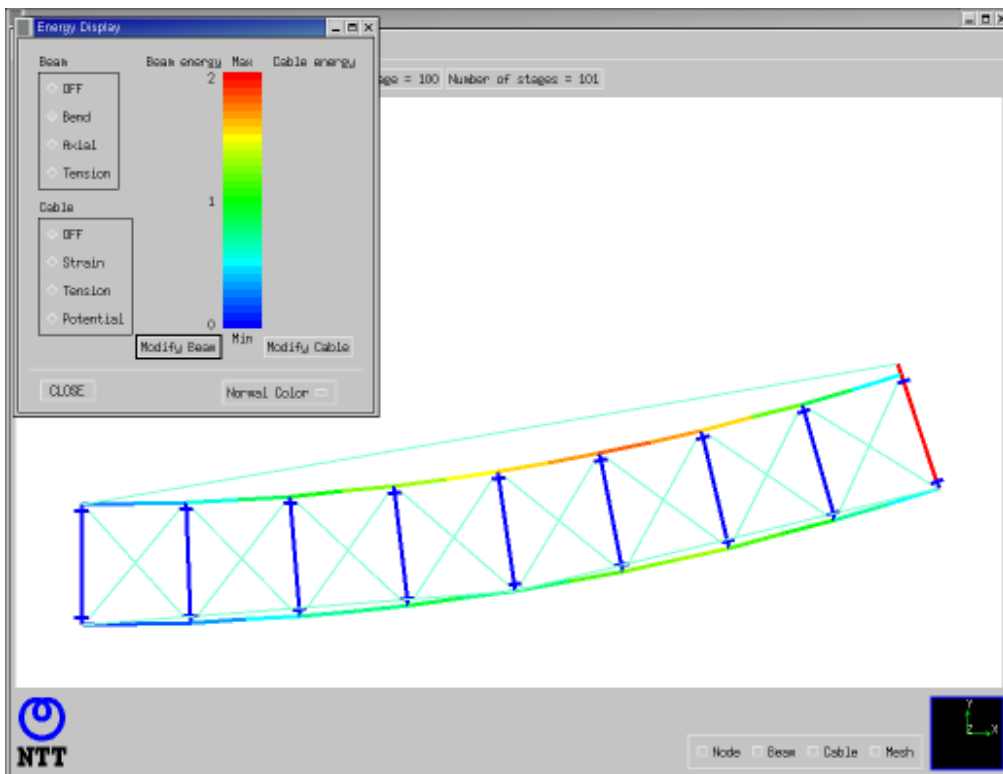


図 5 伸展トラスの曲げ歪

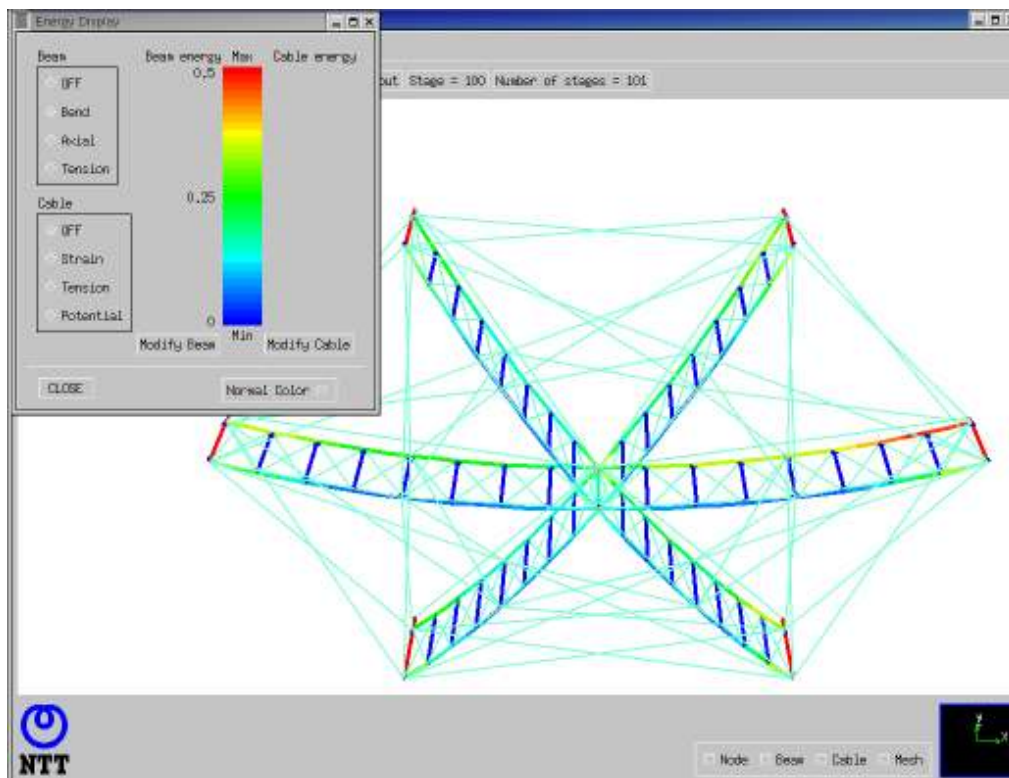


図 6 梁の曲げ歪

4-1-4 支持構造特性評価モデル詳細設計

実際に支持構造を製造するためには、伸展トラス構造を決め、展開方法、ケーブルネットワークとの接続位置などの詳細設計を行う必要がある。

(a) 支持構造要求条件と支持構造形状

鏡面寸法など支持構造設計における主要な要求条件を表 1 に示す。

今回設計する支持構造は従来とは異なる座屈変形後の形状を考慮した設計手法であり、負荷の大きさを想定し、所定の負荷をかけたときの特性（部材に生じる応力やひずみ）が設計時の解析結果予測値に一致することを確認するのが主目的となる。そこで、ケーブルネットワーク構造が支持構造に与える負荷は、主として先端から中心方向への負荷となる。そこで、先端から中心に向かう荷重に耐えられるように設計した。

このとき、負荷の大きさは伸展トラスのヒンジ設計が 20m 規模の場合でも同様に行えるように、スケールは 1/5 としたが、負荷レベルは 20m の鏡面で想定されるのと同等の負荷 (150N) に耐えられるように設計を行った。

表 1 支持構造主要要求条件

焦点距離	3600mm	
開口径	4500mm	
オフセット位置 (鏡面端部の(z 軸)からの距離)	500mm	
伸展トラス厚さ	350mm	
先端許容負荷	中心方向	150N
	周方向	10N
	面外方向	20N
	ねじり	0.88Nm

6本のリブを同じ構成として設計するため、支持構造は球面を近似する構成とした。鏡面はパラボラ形状をとるため、ケーブルネットワークの取り付け位置がパラボラ位置となるようにする必要がある。そこで、支持構造の上部が構成する球面はパラボラ面との差が小さくなるような球面となるように設計した。パラボラ面と伸展トラスが作る球面との関係を図7に示す。

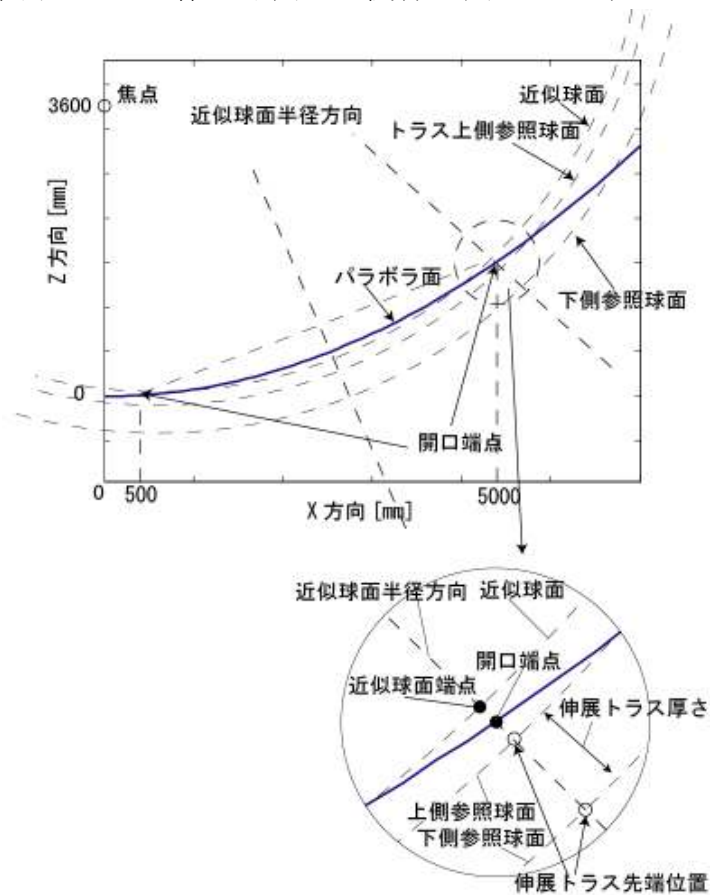


図 7 パラボラ面と伸展トラス構造の位置関係

(b) 伸展トラス構造

中心から放射状に展開し、鏡面を展開する伸展トラスの構造は実績、収納効率の観点から過去に衛星に使われて実績のある伸展マストの1面を参考にした構成とした。図8に伸展トラス構造の構成を示す。縦部材と折れ曲がり材、斜め材から構成された構造を単位として、複数結合した構成をとっている。このとき、鏡面側の折れ曲がり材の長さを反対側の折れ曲がり材の長さより短くすることで、展開状態で曲率を持つ構成とした。また、収納状態では縦部材の中に斜め材と折れ曲がり材が収納され、伸展トラス構造の収納容積は縦部材を並べた容積内に効率よく収納される構造となっている。

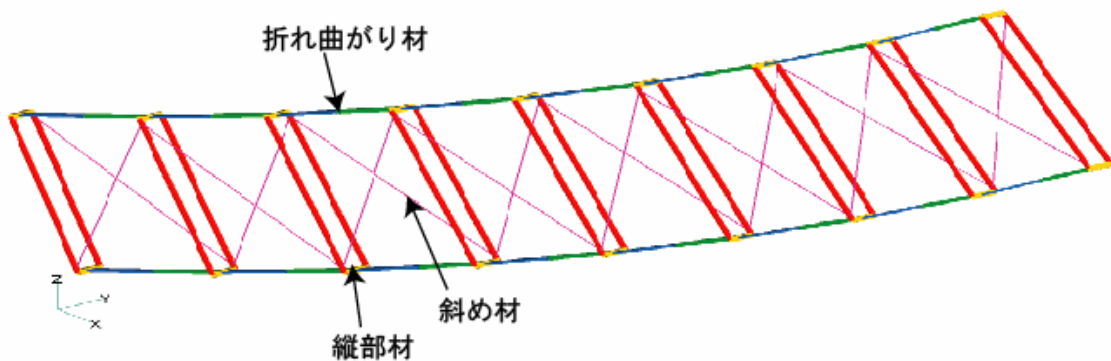


図8 伸展トラス構造

過去に使用されていた伸展マストは3面からなる3角形断面を取り、伸展方向に対して上下左右の両方向の剛性を確保していたが、今回の伸展トラス構造は1面を抜き出したフレーム状の構造となるため、前述のように、鏡面の面内方向（伸展トラスが作るフレームに対しては面外方向）は強度が弱く、テンドンにより拘束する必要がある。そこで、途中でテンドンの取り付けインターフェースを収納効率および展開の阻害にならないことを考慮して設置した。

(c) 支持構造の展開構成

実際に衛星に搭載する際には、鏡面は自動的に展開する必要がある。しかし、支持構造を完全に自動展開させるには、展開駆動機構を製造する必要がある。

展開機構は個々の支持構造や取り付けられる衛星とのインターフェースに合わせて個別に設計される。また、今回検討している超軽量支持構造を構成する伸展トラス自身は従来の構造を元にしており、実装上の問題はあるものの実現する上で不明な点は少ない。そこで、ここでは、支持構造の展開は手動で行う構成とした。

しかし、完全展開時に張力のバランスで形状が決まることから、完全展開にいたる前のケーブルネットワークが緩んだ状態から完全展開までは自動展開する構造とした。実際に反射鏡を製造する場合も、最後の完全展開部分のみ構造に負荷が大きくかかることから、伸展トラスは負荷の小さい状態で展開するこ

とで展開機構を小さくし、最後の完全展開部分は別に押し出す機構を用いることが予測される。そこで、中心部に押し出し機構を設け伸展トラスを手動展開後、伸展トラスを外側に押し出す機構を設けて、ケーブルネットワークに張力を付与し完全展開する部分は自動で行う構造とした。

(d) ケーブルネットワークとの接続点

従来のモジュラーメッシュアンテナでは中心と頂点部で鏡面はトラス構造に接続していた。しかし一体で形成すると、ケーブル本数が多くなり多数のケーブルに張力を与える必要があるため、周辺部のケーブル張力が増大する。一方、固定点を増やすと支持構造の変形が鏡面に直接伝わるようになることから、鏡面精度確保の観点からは、接続点は少ないほうが望ましい。

しかし、バックケーブルはタイケーブルを介してサーフェスケーブルに張力を付与すればよく形状の精度は要求されない。そこで、バックケーブルの固定点を増やし、張力の増加を防ぐと共に、バックケーブルがタイケーブルにより引っ張られることで生じる鏡面の厚さ方向のたわみ量を減らすことを検討した。鏡面の厚さ、張力の観点から検討した結果リブ構造の途中に 1 箇所固定点を増やすこととした。

4-1-5 支持構造詳細解析評価

(a) 試作モデル詳細解析

別途設計した鏡面（4-2 節以降に後述）を、支持構造と組み合わせて支持構造の変形も考慮し、部材に生じる変形や張力を解析した。解析結果の一例として、平衡状態の張力分布を解析した結果を図 9 に示す。また、支持構造部分の変形をわかりやすくするため、支持構造部分を抜き出し、変形を 10 倍に拡大して表示したものを図 10 に示す。図 10 より伸展トラスの変形は先端側と中心側で曲げ方向が異なり S 字状になっていることがわかる。テンドンがない場合低次の座屈変形は伸展トラスの面内方向に生じる曲げ変形であり、一様に曲がる変形となるが、この変形の進行がテンドンにより抑制され、より強度の高い変形形状に移行していることがわかる。

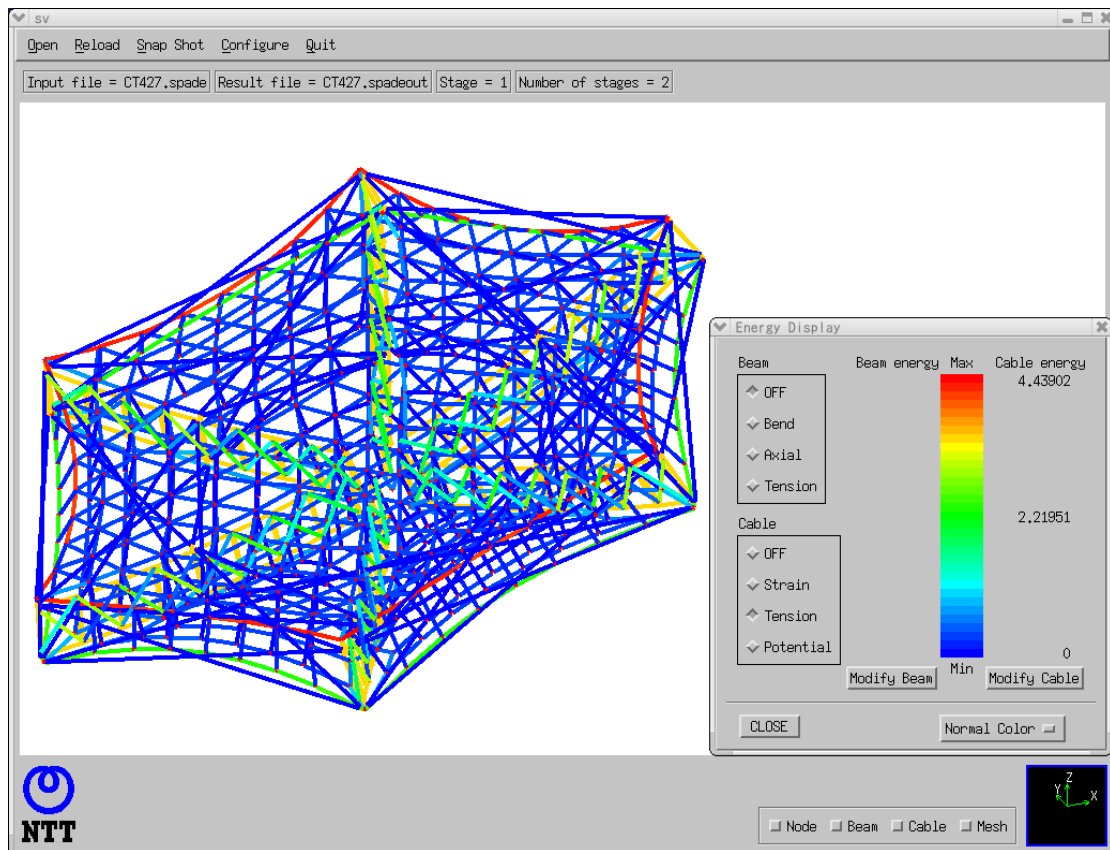


図 9 鏡面設計結果

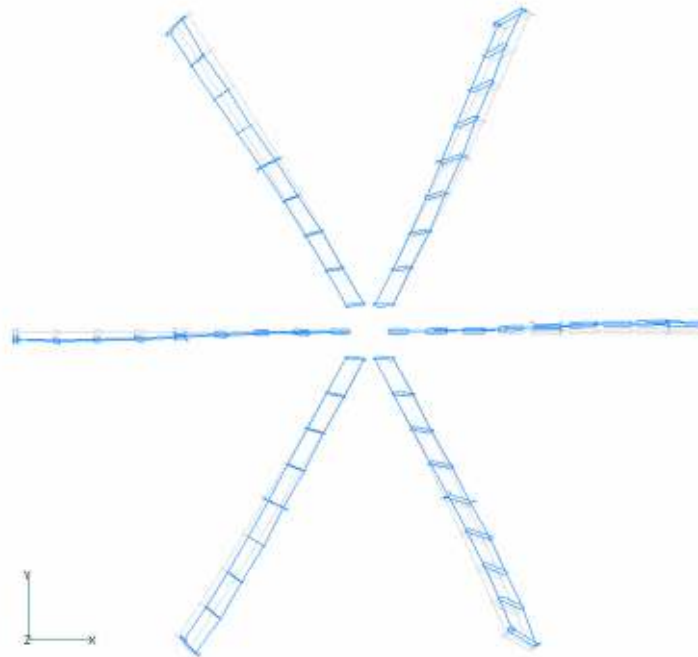


図 10 支持構造変形形状

4-1-6 支持構造特性評価モデル製作

図 11 に詳細設計に基づき試作した支持構造モデルを示す。収納状態はわかりやすいようにケーブルネットワークを外したものを拡大して表示している。中心のハブ部分に支持構造が集まる形で収納される。ハブ部分には、伸展トラス構造を展開した後、外側に押し出す機構を設けている。また、図 12 に伸展トラス構造の中心側 1 セルを展開した状態を示す。ハブ部分と駆動機構部分は今回、軽量化設計を行っていない。

伸展トラス構造は前述のように上下の折れ曲がり材により伸展方向に収納され、展開状態で形状を維持するように斜め部材が入った構成をとり、折れ曲がり材と斜め材は収納時に縦部材内に収納される構成となっている。これにより一つの伸展トラス構造の長さは展開時には 2.5m を超えるが、収納状態では伸展方向に 0.1m 以下の長さに収納される。

展開状態

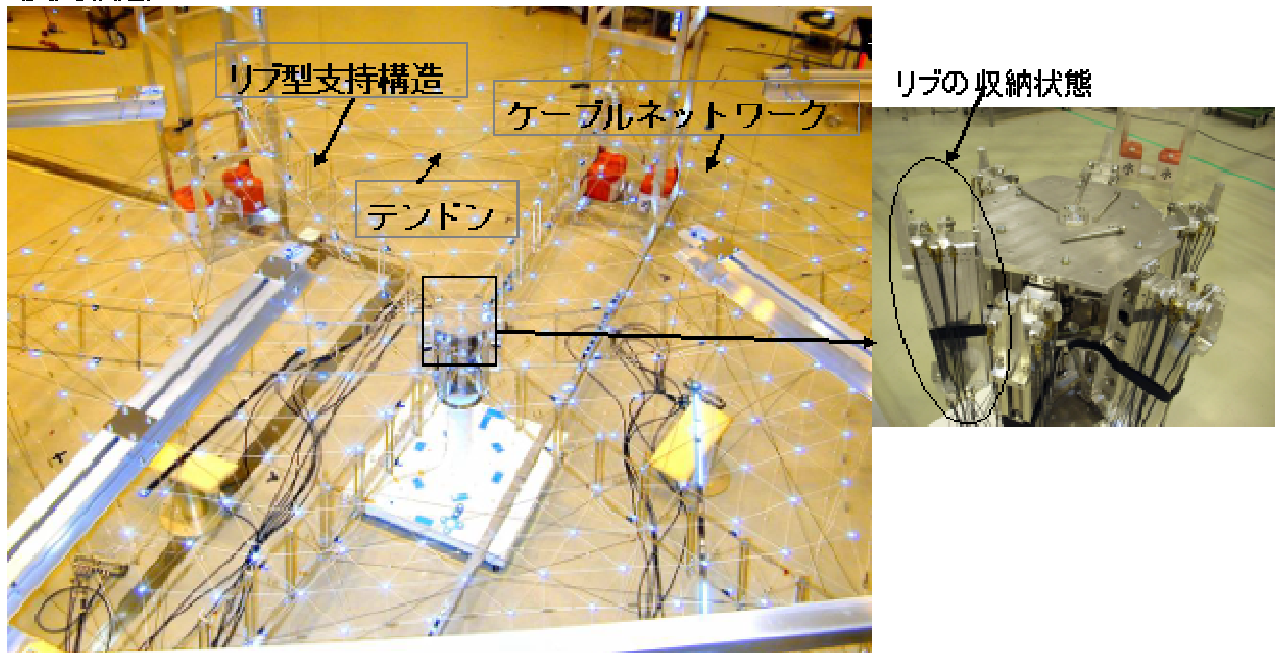


図 11 支持構造

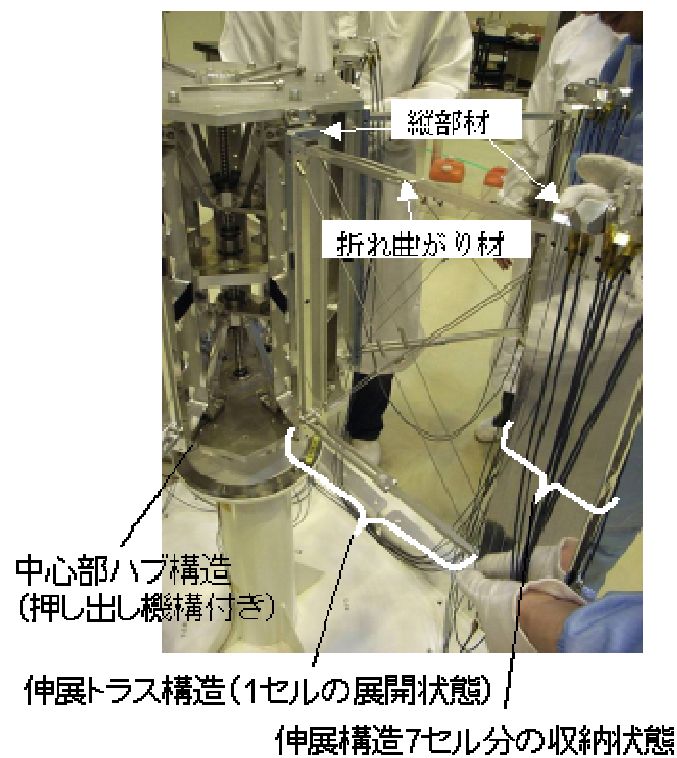


図 12 支持構造中心部 (伸展トラスの中心側 1セルのみ展開)

4-1-7 支持構造地上試験

テンドンにより補強することで曲げ変形の進行を抑制し、負荷に対するひずみレベルを抑制する効果を試作モデルの試験により検証した。先端から中心部に負荷用のケーブルを設置して、負荷用ケーブルを短縮した時の負荷用ケーブルに生じる張力および伸展トラス構造に生じるひずみレベルを測定することとした。このとき、試験装置や試験のための治具が伸展トラス構造の特性に与える影響が少ないように、伸展トラス構造の途中には歪ゲージ以外の設置をさけた構成とした。

図 13 に伸展トラスと負荷用ケーブルおよび試験治具を示す。伸展トラス構造の先端と中心側に負荷用ケーブルを固定するための負荷用治具を設置して、伸展トラス構造の上下に沿って負荷ケーブルを設置した。負荷用ケーブルの先端側は長さ調整用のターンバックルを介して、中心側はロードセルを介してそれぞれ治具に固定されている。

上下の負荷用ケーブルの長さを一定の割合 (0.5mm) ずつ同時に短縮し、そのときのひずみレベルを測定した結果を図 14 に示す。図 13 の歪ゲージ取り付け位置に示した、伸展トラスの中心側から 4 セル目 (図 14 の青線) と 7 セル目 (図 14 の緑線) の上側の折れ曲がり材の歪を測定した結果を示し、○はテンドンなしの従来のリブ構造に対応したもの、*はテンドンを設置した本構成に対応している。また、このときの、負荷用ケーブル短縮時に生じている負荷 (張力) を測定した結果を図 15 に示す。

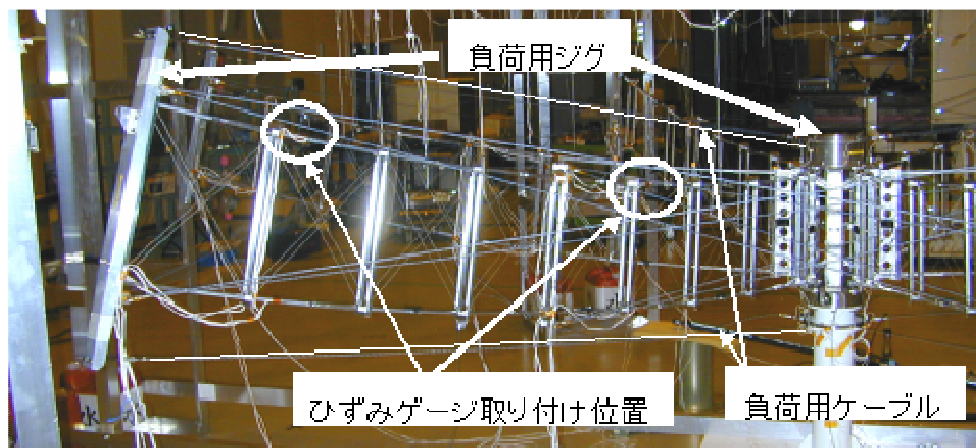


図 13 伸展トラス構造と試験治具

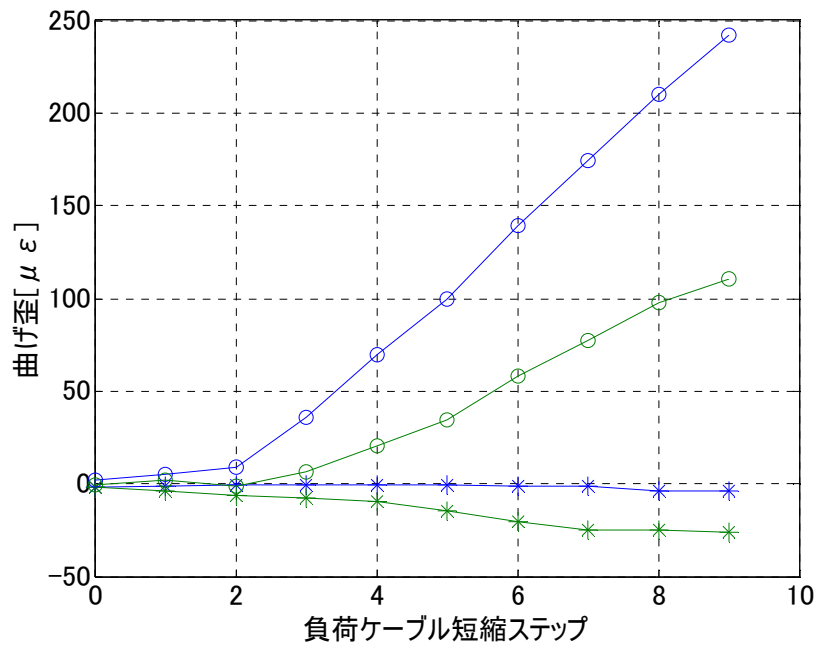


図 14 ひずみレベル測定結果

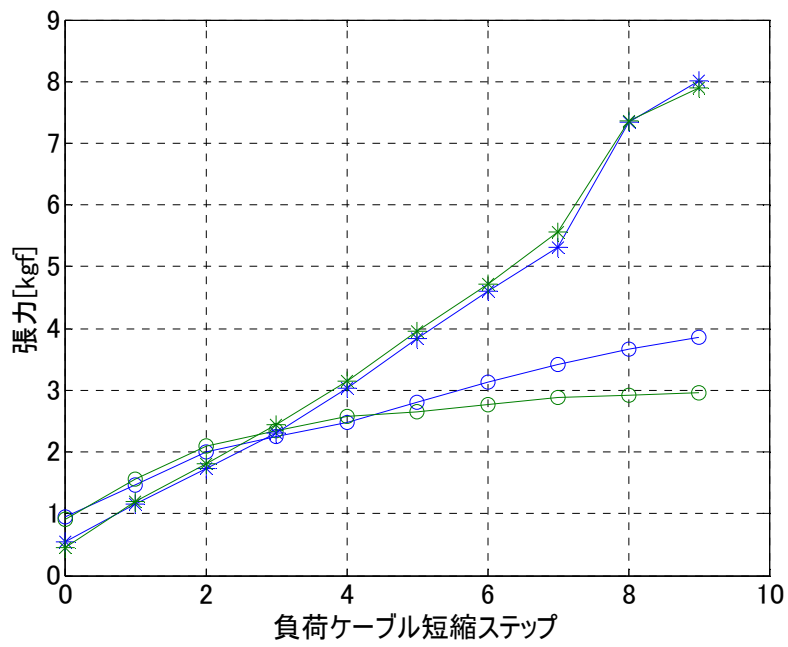


図 15 負荷ケーブルに生じた張力 (負荷)

図 14 よりテンドン無しの場合、ケーブルを短縮することによりひずみレベルが急速に増加していくが、テンドン補強型の超軽量支持構造の場合は、ケーブルを短縮したときの歪レベルの増加は小さいことがわかる。また、テンドンなしでは、中心側ほど曲げ歪が大きくなっていることから、中心側固定先端側自由な伸展トラス構造の全体的な曲げ変形が生じ、ケーブルの短縮により曲げ変形が増加していることがわかる。一方、提案構成では中心側よりもむしろ先端側の歪が大きく、一様な曲げ変形は抑制され、高次の変形が生じていることがわかる。

これらのことから、先端からの負荷により低次の座屈変形に対応した変形が最初に生じ、テンドンがない場合は伸展トラスの曲げ変形として表れ、ケーブルを短縮するほど曲げ変形が増加していくが、テンドンがある場合は変形が抑制されることが確認できたと考えられる。

また、図 15 より、テンドンなしの構成では、ケーブルの短縮につれて負荷ケーブル張力の増加量が減少していくことが判る。これは、1 次の座屈荷重は 5 kgf 以下であり、実際にはヒンジなどがたにより早い段階から座屈変形が生じ、曲げ変形の進行と共に座屈荷重に近づいているためと考えられる。一方、今回の構成では、初期段階ではヒンジなどがたなどの影響により、低次の座屈モードが早い段階で生じてテンドンなしと同様の挙動を示すが、負荷が増加するほど低次の座屈変形の進行が抑制され、変形のモードが高次のモードに対応した変形に移行し、低次の座屈荷重を超える負荷に耐えていることが判る。

以上より、従来の構成で本構成と同様の強度を得るには部材をさらに太くするなど重量の増加が避けられないが、本構成により従来と同程度の重量で倍以上の強度を得られることが確認できた。

4-1-8 支持構造重量

支持構造の重量を算出した。鏡面全体の重量としては、ケーブルネットワーク構造についても含む必要があるが、ケーブルネットワーク自体は、重量としてはほぼ無視できるため、支持構造部の重量を算出した結果を示す。

この今回の試作モデルでの支持構造部の単位面積あたりの重量を算出すると約 1.0kg/m^2 となり、目標とした 0.3kg/m^2 の約 3 倍となった。しかし、今回の試作モデルは地上試験用であり、衛星搭載用のフライト品とは異なるため、単位面積あたりの重量も異なってくる。そこで、単位面積あたりの重量が 0.3kg/m^2 以下になる見通しを示す。

衛星搭載用のフライト品と異なる点は以下の 2 点である。

- (1) CFRP の採用
- (2) 伸展マストの軽量化

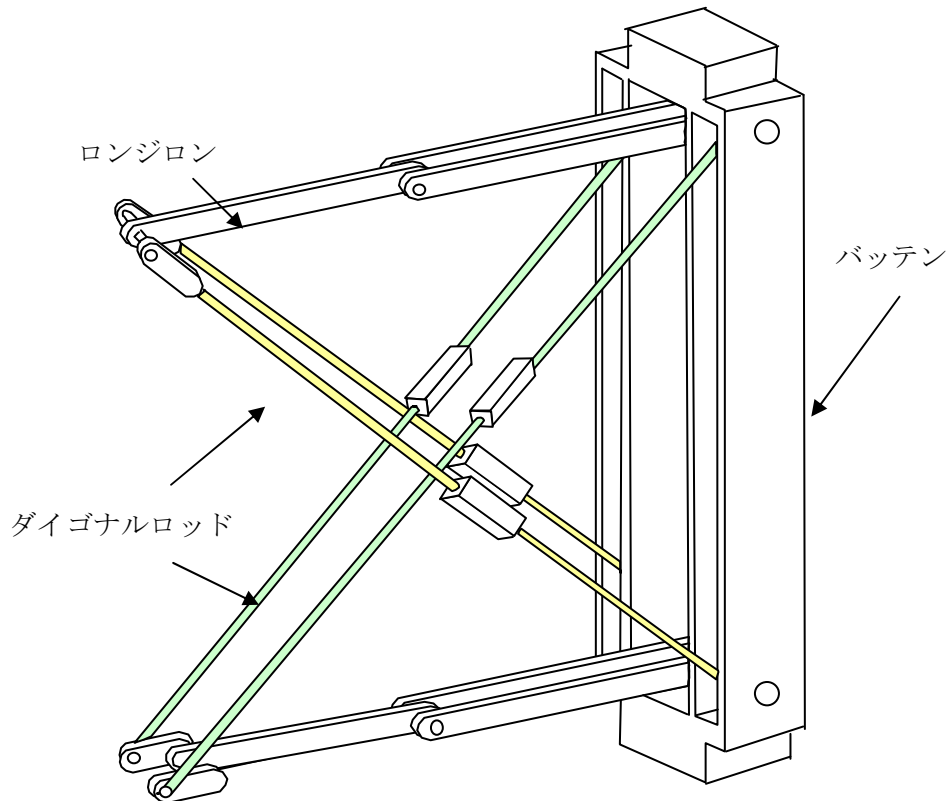
今回の伸展マストの試作はアルミで製作したが、衛星搭載用として実現するためには、CFRP を用いるのが軽量化のためには適当である。アルミの比重が 2.7 に対して、CFRP の比重は 1.6 のため、この比は約 60% となる。このため、CFRP を用いることでアルミの約 60% に軽量化することができる。但し、CFRP は高価であり、今回の試作はあくまでも地上試験における原理確認を主目的としているため、アルミを用いた。

次に、伸展マスト構造の具体的構造を図 16(a), (b) に示す。図 16(a) は今回の

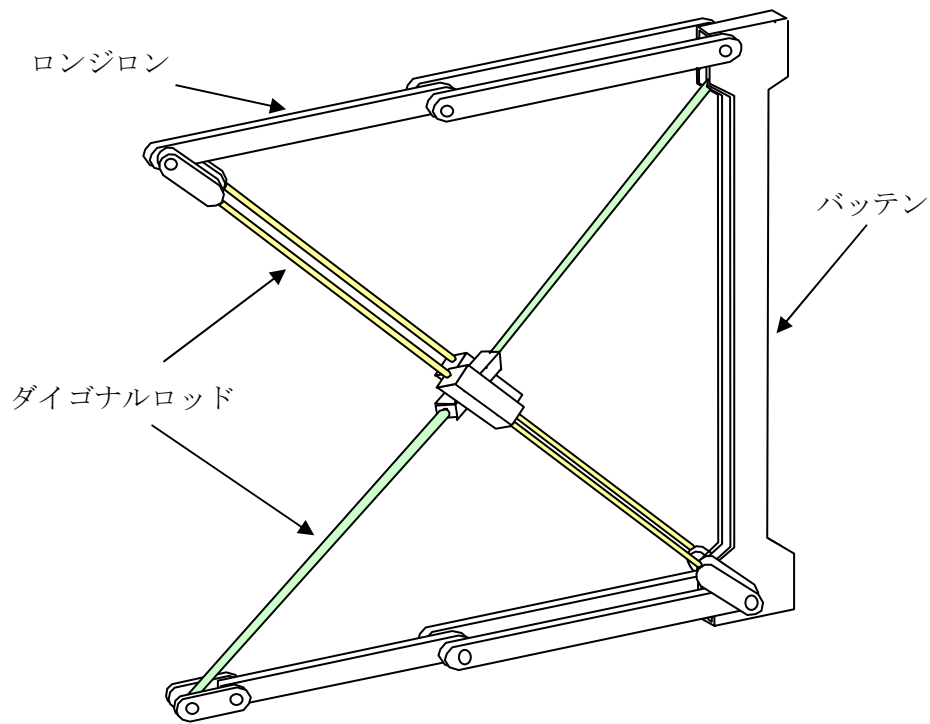
試作モデルであり、マスト幅を出来る限り狭くしてテンドン方式における座屈を実現させ、検証することを目的とした。すなわち図 16(a)に示すようにバッテンを2本の縦材を有する長方形枠とし、上下の2本の折りたたみ式ロンジロンおよび $\pm 45^\circ$ 方向の伸縮可能ダイアゴナルロッドとともに1個のボックスを構成した。2本の縦材の間隔を出来るだけ小さくし、伸展時には板状となって座屈しやすい形状としたものである。この試作試験の結果、テンドン方式の原理確認を実証することができた。

実際の 20mアンテナを想定した更なる伸展マストの軽量化案を図 16(b)に示す。すなわち縦材を2本から1本とし、ダイアゴナルロッドも現在は2本+2本の構成となっているものを2本+1本とするものである。現在のマスト重量の80%はバッテンの重量である。図 16(a)から図 16(b)に変更することによりバッテンの重量は約半分以下になり、またダイアゴナルロッドの重量も75%になる。両者を合計すると伸展マストの重量は現在の50%となる見込である。本軽量化案は、試作の初期段階において案としては検討されたが、テンドン方式の確認を第1目的としたため、伸展マストとして確実性のある図 16(a)を今回は採用したものである。

従って、(1)CFRPの採用による60%及び(2)伸展マストの軽量化による50%を組み合わせることで、鏡面重量としては約 0.3kg/m^2 が実現できる見込みである。



(a) 伸展マスト試作モデルの拡大図
図 16 伸展マストの構成



(b) 伸展マストの軽量化案
 図 16 伸展マストの構成

4-1-9 まとめ

超軽量展開支持構造を実現するため、従来の強度設計で問題となる低次の座屈強度を超えた強度を維持する支持構造を設計するために、非線形解析を用いて座屈変形を予測し、低次の座屈変形の進行を防ぐようにテンドンで補強した構成について検討した。5m規模の縮小モデルを設計ならびに製造し、特性試験を実施した。

その結果、低次の座屈荷重を越える強度の向上が確認でき、座屈変形を考慮した新たな設計手法の妥当性を確認した。

展開・収納のためのヒンジなど可動部分も 20m規模の鏡面を払げることを想定して、縮小モデルを設計した結果、可動のためのクリアランスを考慮しても、高次の座屈変形に移行することが明確になり、従来と同程度の重量で倍以上の強度を得られることが確認できた。

4-2 高安定ケーブルネットワーク構造構成法の研究開発

4-2-1 はじめに

超軽量・大形展開アンテナ反射鏡面構造を構成する鏡面ケーブル構造について、(1)鏡面ケーブル構造構成検討、(2)鏡面ケーブル構造製造設計、製造、(3)反射鏡面全体組立・調整、(4)反射鏡面全体構造特性評価を行った。

平成17年度は鏡面の形状を決定するケーブルネットワークの構成、設計手順を検討した(上記(1)、(2))。実現性を検証するために、5m規模試作モデルの基本設計を実施し、その基本特性について解析的に検討を行った。また、ケーブル製造方法を検討するために、簡易ケーブルネットワーク構造を試作し、特性を評価した。

平成18年度は引き続き、設計の妥当性を検証するための試作モデルの要求条件(鏡面精度)を明確化し、製造、組立てのための詳細設計を実施した。さらに支持構造と組み合わせた試作モデルの作成、及び反射鏡面の形状精度評価を実施した。(上記(2)-(4))

4-2-2 鏡面ケーブル構造構成検討

(a) 全体構成

パラボラ反射面をケーブルで区分けされたファセットにより多面体近似し、反射面部分に金属メッシュを張ることで、電波反射面を形成するメッシュアンテナを検討した。電波反射面は所定のパラボラ形状を形成する必要があるため、鏡面は図17に示すように、反射面を形成するサーフェスケーブルネットワークと、サーフェスケーブルネットワーク構造を面外方向に引っ張り凹面形状とするタイケーブル、タイケーブルを引っ張るためのバックケーブルネットワークから作られる構成とした。

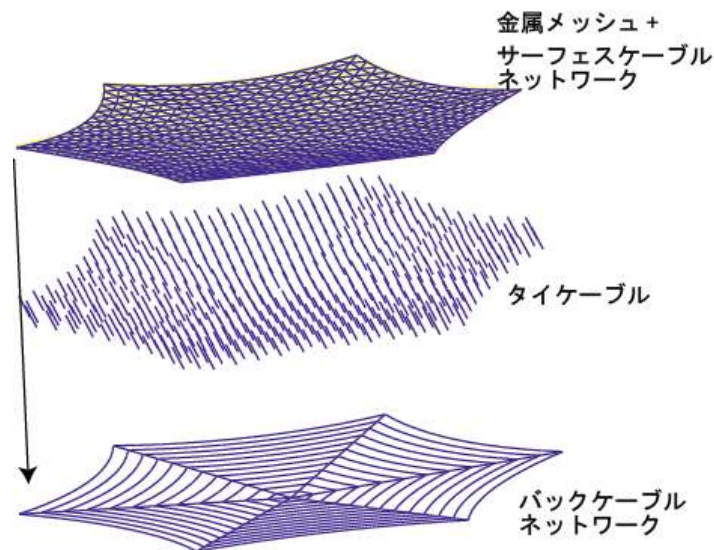


図 17 ケーブルネットワーク構造分解図

このとき、ファセットの形状を3角形とすれば、形状はケーブルの長さで一意に決まる。そこで、鏡面の電波反射面部分を構成するケーブルは張力の変化に対する長さ変化が無視できるような非常に剛性の高いケーブルを用いる構成とした。この構成により、ケーブルネットワークは張力のつりあった平衡状態で初めて形状が決まるものの、鏡面部分については、張力による長さ変化が小さく所定の形状を保つことができる。

一方、支持構造が軽量化により従来の構造より柔軟な構造となっていることから、展開時の形状精度が従来の構造より劣化することが予測される。そこで、支持構造に繋がる周辺部分のケーブルについては剛性の低いケーブルを用いて、鏡面部分とは逆に位置変位に対する張力変化を小さくすることで、支持構造が変形しても鏡面部分に所定の張力を与えることで鏡面の電波反射面部分の形状変形を抑える構成とした。

(b) 平衡解析とケーブルネットワーク構造の設計

展開状態での支持構造の変形を設計の段階で考慮してケーブルネットワーク構造の設計を行った。5 mスケールモデルについて基本設計を行い、支持構造を含めて平衡状態を解析したケーブルネットワークの解析結果の一例を図18に示す。

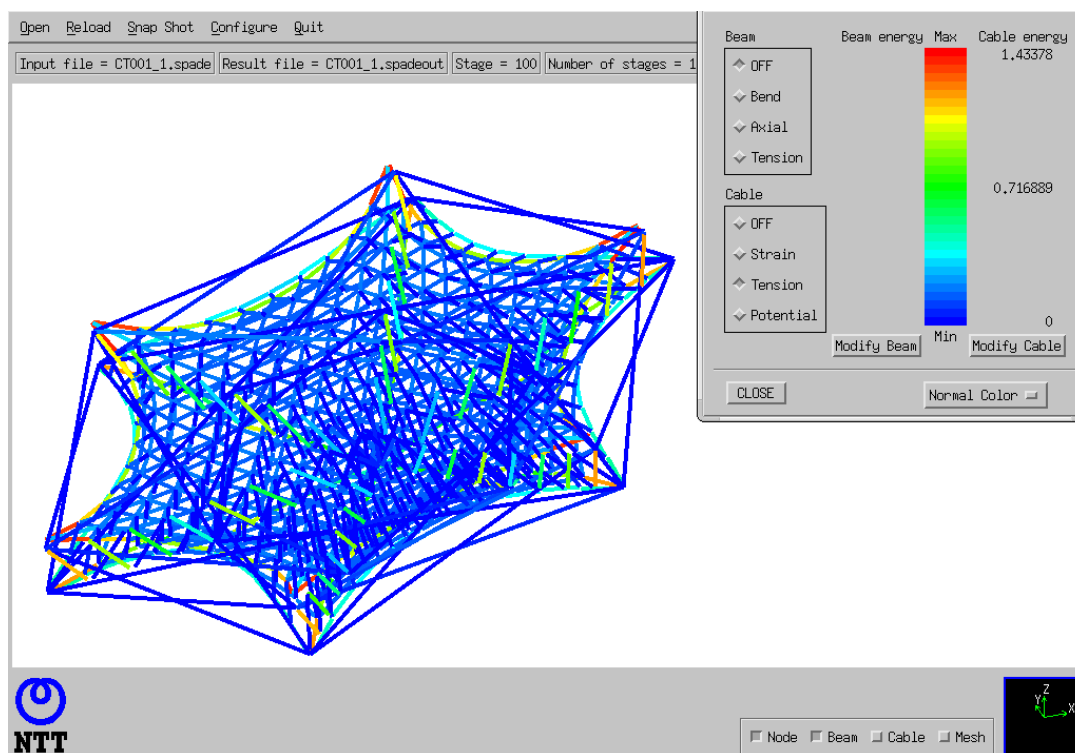


図 18 5 mスケールモデル基本設計結果

4-2-3 鏡面ケーブル構造製造設計

鏡面の形状を決定するケーブルネットワークの製造にあたり、必要とする要求条件を明確にし、要求条件を満たすケーブルネットワークの設計を行った。このとき、ケーブルを固定するノード及びケーブルの固定方法など、ケーブルネットワークの構成要素について設計する必要がある。また、支持構造に取り付けられるが、従来のリブ型支持構造で支えられた鏡面は、支持構造とケーブルネットワークは比較的独立していたが、今回検討している支持構造はテンドンがケーブルネットワークと干渉する恐れがある。また、支持構造の柔軟性が増加しているため、支持構造の変形を考慮して設計する必要がある。そこで、支持構造の設計にあわせ、ケーブルネットワーク構造の詳細設計を行った。

(a) 要求条件

鏡面精度の劣化要因としては、パラボラをファセットで近似する近似誤差、ケーブル製造誤差によるケーブルネットワーク構造の製造誤差、支持構造変形による形状誤差などが考えられる。

従来の開口径 13m のメッシュアンテナの場合、ケーブルネットワーク構造の製造誤差は組立時に調整により 0.1mmRMS 以下まで追い込む一方、モジュールの結合による誤差、地上で調整することによる重力の影響などの誤差を許容し、これらの許容精度は個別に RMS で与えたものを相関が無いものとして積み上げていた (Root Sum Square として)。今回想定している鏡面は、一体で形成されることと、全体的な調整や極端に異常があるような製造時のミスを除いては、ケーブルネットワーク構造を組立時に調整しないことを想定している。従って、製造後の鏡面精度として、上記のモジュール結合誤差、重力の影響による調整誤差は生じない。そこで、これらの許容誤差を製造組立後の許容鏡面誤差として割り振ることができる。

鏡面精度の要求条件は 2.4mmRMS であり、製造誤差に起因する誤差はそのほかの要因と相関がないものと考え、従来のメッシュアンテナにおいて、今回製造誤差に割り当て可能な許容誤差量は 1.35mmRMS 程度と考えられる。

他にも、軌道上での熱変形や振動による鏡面変形について従来は 0.45mmRMS 程度であったと想定すると、この影響は鏡面の大きさに比例することを考慮して、20m では 0.69mmRMS 程度と予測される。今回検討している構成では、支持構造の変形に対する感度を落とすように設計を行うため、これらの誤差要因の影響は 1/5 から 1/10 程度になると予測され、その場合、0.14mmRMS 以下となる。従って要求鏡面精度のうち製造精度として許容させる精度は 1.38mmRMS となる。

また、鏡面の形状誤差はその特徴から傾きや位置、曲率など、全体的に生じる形状誤差とノード位置がずれることにより生じる凹凸など局所的な変形に分けられる。全体的な変形はアンテナの給電部の向きや位置を調整することで、修整が可能と考えられる。そこで、局所的な凹凸が主要な問題として残る。

この様な局所的な凹凸は、平衡状態でのノード位置精度が原因となるため、ノードでのケーブル固定位置精度やケーブル自身の長さ精度。一方、ノード形状は鏡面の大きさではなく、ケーブルの太さや固定方向に依存する。またケーブルの長さ精度もケーブルの固定方法や端子の製造精度など、鏡面の大きさに

依存しないものが主要因となるため、試作スケールモデルでも製造精度はほとんど変わらない。従って、組立時に形状を調整しない場合、試作スケールモデルで得られる鏡面精度の凹凸成分は、曲率やファセットサイズが 20m のものと同様であれば、同程度となる。そこで、鏡面精度 2.4mmRMS を達成するためには、今回の試作モデルにおいて 1.38mmRMS 以下の精度でケーブルネットワーク構造（ケーブル接続点のノード位置）がパラボラ面上にある必要がある。

次に、サーフェスケーブルネットワークが構成するファセットのサイズが大きいくほど、パラボラ曲面の近似誤差が大きくなるため、要求される鏡面精度からファセットサイズが決まる。国内の移動体衛星通信用の周波数に要求される鏡面精度 2.4mmRMS から、近似誤差としてその半分以下の 0.9mmRMS を想定すると、ファセットサイズは 1 辺 90cm 程度となる。20m 規模の鏡面を考えると、開口面上で 1 辺 10 m の六角形を想定すると、中心から頂点までの区間を 10 分割程度で分割する必要がある。スケールモデルは 5m であるため、同様に考えると 1 辺を 3 分割すればよいが、開口径、焦点距離共に約 1/5 にスケールダウンしたスケールモデルの試作を想定し、ケーブル本数が増加することによる製造精度の影響を考慮するため、8 分割した試作モデルを製造することとした。

また、ケーブルネットワークは平衡状態でケーブル張力がつりあって形状を保つことから、個々のケーブルの張力の比が一定であれば、張力によらず安定形状を保つ。ケーブルの製造性を考慮するとケーブル張力が小さすぎると、材料の非線形性の影響が強くてでしまう。一方張力を大きくすると、周辺部分での張力が大きくなり、支持構造への負荷の増加に繋がる。基本設計を行った結果、最低張力と最大張力の比を 500 以下に抑えることが望ましく、また、支持構造への負荷を考慮すると、伸展トラス構造の最低次の座屈荷重の 1.5 倍程度の力が先端に加わるような張力となるケーブルネットを設計することとした。

(b) 要素の構成及び製造方法の検討

ケーブルネットワークは張力が釣り合った平衡状態で形状が決まることから、個々のケーブルはそれぞれ、所定の長さのときに所定の張力となる必要がある。鏡面形状を維持するには所定のノード位置で平衡状態を保つようにケーブルを製造する必要があり、あらかじめノード位置を所定の位置に設置して平衡状態を模擬してケーブルをノード上で固定するか、個々のケーブルが所定の長さとし張力を保つように製造し組み立てる方法が考えられる。

所定の位置にノードを設置してケーブルをノードに固定して製造するには、ケーブル張力のつりあった平衡状態を模擬するようにノードを所定の位置において製造する必要がある。従って、20m の鏡面を製造する場合は実際に 20m の大きさの場所を確保し、平衡状態を模擬するようにノードを設置する必要がある。作業場所の確保や作業性の上で問題がある。また、張力の釣り合いを含めて平衡状態をノードが模擬できるようにノード位置を固定するのも難しい。そこで、ノードを結ぶケーブルを個々に長さとし張力を管理して製造し組み立てる方法を検討した。

この場合、ケーブルのノード位置での固定方法を検討し、ケーブルのノード上の接続点間が所定の長さのときに、所定の張力となる必要がある。そこで、複数のケーブルを固定するためのノード形状、ケーブル取り付け方法や端子も

含めたケーブル構成について検討した。

いくつか試作をした結果、ケーブルが接続するノードについては図 19 に示す構造とした。鏡面側のノードは周囲 6 方向とタイケーブルの計 7 本のケーブルを固定する必要がある。ケーブルについても、実装を考慮すると宇宙線による劣化を防ぐことやケーブルのばらけ止めのために被覆を施したケーブルの使用が考えられる。そこで、ケーブルの太さとしては 1mm 程度のものを固定する必要がある。これらのことから、ケーブルに端子を取り付けノードに固定する構成とした。

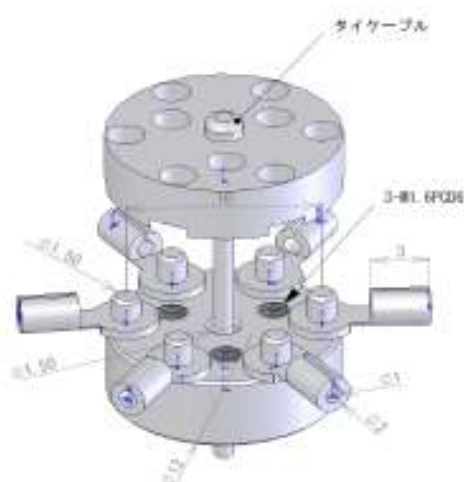


図 19 ノード構成

(c) 平衡状態の設計と支持構造との干渉の回避

製造精度を検証するために、簡易的なケーブルネットワークを設計し、端子を含めて所定の張力時に長さ誤差を 0.1mm 以下としてケーブルを製造したときのネットワーク形状精度を検証した。

(d) ケーブルネットワークと支持構造の干渉回避

支持構造は図 1 に示すようにケーブルネットワーク構造の中に設置されることから、ケーブルネットワーク構造を形成するケーブルとリブ構造やテンドンが干渉することが考えられる。特に中心から頂点方向に向かう対角方向にはリブ構造があるが、この上方向にも鏡面形状を形成するためにサーフェスケーブルネットワークノードが配置される。従って、これらのノードを引っ張るタイケーブルはリブ構造を避けて配置する必要がある。そこで、対角方向のバックケーブルはリブ構造を避けるように配置することとした。

干渉を避ける方法としてバックケーブルを図 20 のようにずらしてケーブルネットワーク構造の設計を実施したが、この場合、鏡面設計の中で平衡形状を算

出する過程で、対角方向に近づいてしまし、リブから所定の距離を保ち、かつ、鏡面精度を保つようなケーブルネットワーク構造の算出が困難なことが判明した。そこで、対角方向のバックケーブルを2つに分ける構成とした。このときタイケーブルも2つに分けると、張力が分散して小さくなりすぎるため、図21に示すようにタイケーブルは2本のバックケーブルのどちらかに割り振ることとして、ケーブルネットワーク構造の設計を試みた。その結果、図21に示す配置では設計のしやすさ、張力分布ともに、有意な差は見られなかった。タイケーブルの張力が小さいため、差が現れなかったと考えられるが、張力方向の対象性を考慮して、2Aの配置でケーブルネットワークを構成することを検討した。

(e) 支持構造とのインターフェース

支持構造の伸展トラスにケーブルネットワークは取り付けられる。伸展トラスは対称性を利用して球面を近似するように構成している。一方、鏡面はパラボラ面を近似する必要があることから、鏡面と支持構造の接続部は球面とパラボラ面との差だけオフセットさせる必要がある。このとき伸展トラスは収納率を高めるため、収納状態では縦方向の部材の中に、折れ曲がり材や対角部材が収納され収納時は立て部材が重なっただけの大きさとなる。そのため、ケーブル構造のインターフェース部材は縦部材上に隣あう縦部材と収納時にぶつからないように設置した。また、インターフェース部材上のケーブル固定点はケーブルが部材に干渉しない位置で固定した。

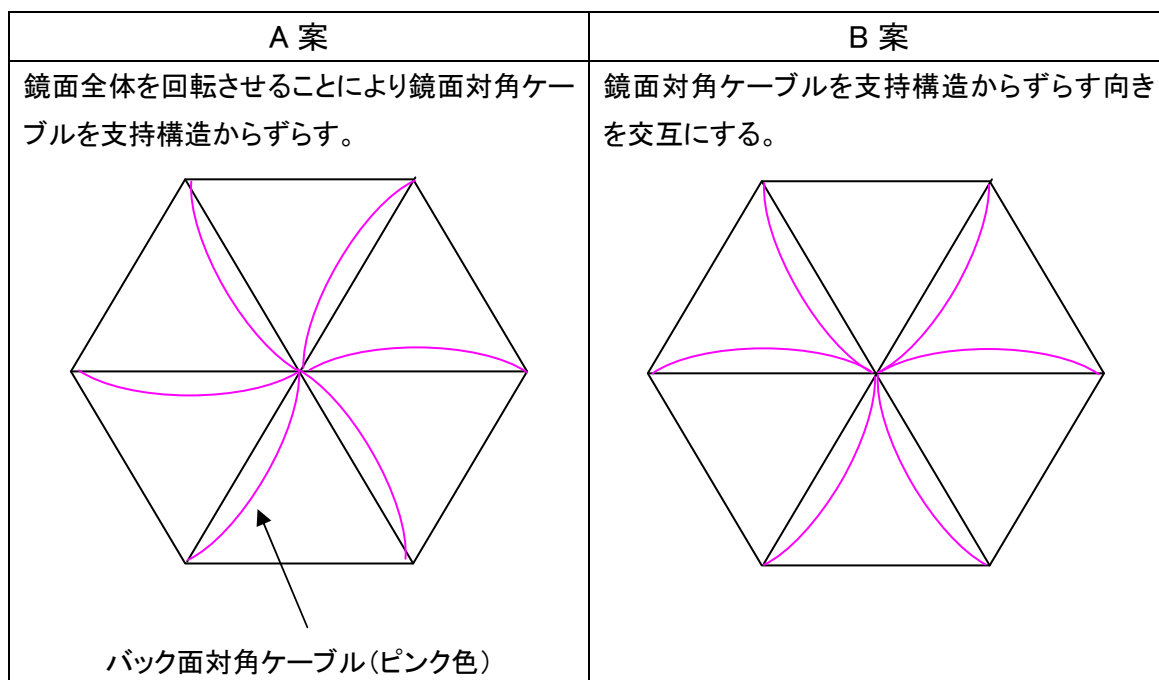


図 20 タイケーブルとリブの干渉を防ぐバックケーブル配置例

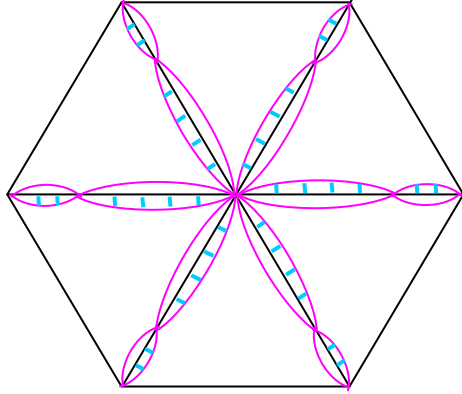
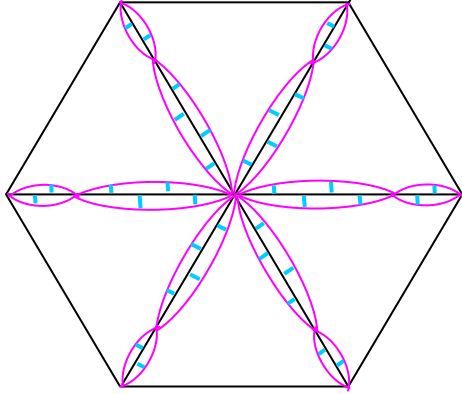
2A 案	2B 案
<p>バック面对角ケーブルを支持構造の両側(2本)に分ける。対角ラインのタイケーブルは片側のみとする。</p> 	<p>バック面对角ケーブルを支持構造の両側(2本)に分ける。対角ラインのタイケーブルは支持構造の両側に交互に配置する。</p> 

図 21 対角方向のバックケーブル配置例

支持構造も含めて設計を行い，平衡形状が所定の要求条件を満たすように，ケーブルネットワークを設計したときのケーブルの張力と長さを表 2 に示す。
(設計結果の平衡状態は 4-1-5 節図 9 を参照)

ケーブルネットワーク構造については周辺部で最大 4.4 k g となり，張力は全て 20gf 以上を確保できていることがわかる。

表 2 張力と長さ

ケーブル種別				ケーブル張力[gf]		ケーブル長 [mm]		EA [kgf]
				最大	最小	最大	最小	
高剛性 Cable	鏡面	6段までの全ケーブルと7段周方向	centsurf	589	204	400	226	4828
低剛性 cable	鏡面	8段周方向	edgesurf	4439	4275	351	264	226
	背面	8段周方向	edgeback	2520	2415	401	260	226
	鏡面	7段の周方向以外	rimsurf	700	282	358	212	56
	背面	7段の対角方向	rimback	977	960	377	291	226
	背面	6段までの対角方向	cent_radial_back	871	553	424	142	226
	背面	7段までの周方向	cent_inside_back	425	105	478	167	56
	タイ	タイケーブル	tie	229	27	457	27	56
全体				4439	27			

4-2-4 反射鏡面全体組立と構造特性評価

(a) 全体組立

ケーブルネットワーク構造を支持構造に取り付けた。実際には、組立時に展開形状を測定し、全体的な変位成分や支持構造とケーブルの取り付け部周辺に生じるひずみを取り除くことが可能だが、ここでは、設計との相違による影響を明確にするために、組立時の形状や張力の調整は実施しないこととした。

(b) 試験方法

ケーブルネットワーク構造が支持構造上で安定した状態で所定の精度を保つことを確認するために、ケーブルネットワークのノード位置の計測を実施した。ノードの上面に計測用のターゲットシールを貼り付け、3次元デジタルフォトグラメトリシステム(GSI社製V-STAR/S)を用いてノード位置を計測した。

次に、展開状態でケーブルネットワークを拡げるために支持構造に加わる負荷レベル及び、ケーブルネットワークに生じる張力を検証するため、周辺部分のケーブルにバネをいれ、バネの特性と伸び量からケーブルに加わる張力を計測した。

また、手動で収納と展開を実施し、収納から展開にいたる過程でケーブルネットワークがテンドンなどと干渉し展開を妨げることがないかを、確認した。

(b) 試験結果

ノード位置を計測し、パラボラ面に対する誤差を計測した結果を図22、図23に等高線表示したものを示す。図22において、○印が実際に計測した点を示し、

鏡面の変形が見やすいように補間して表示している。

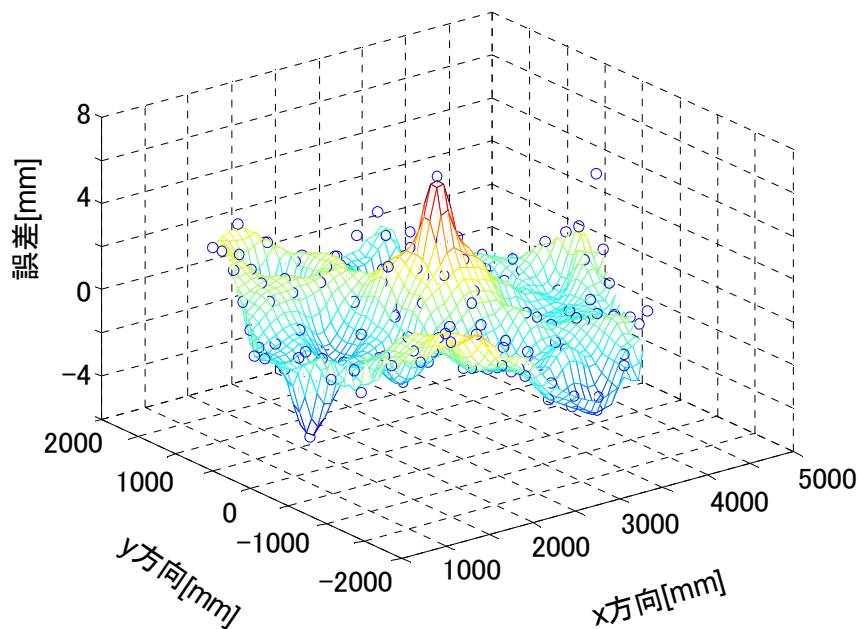


図 22 パラボラに対する誤差 (斜視図)

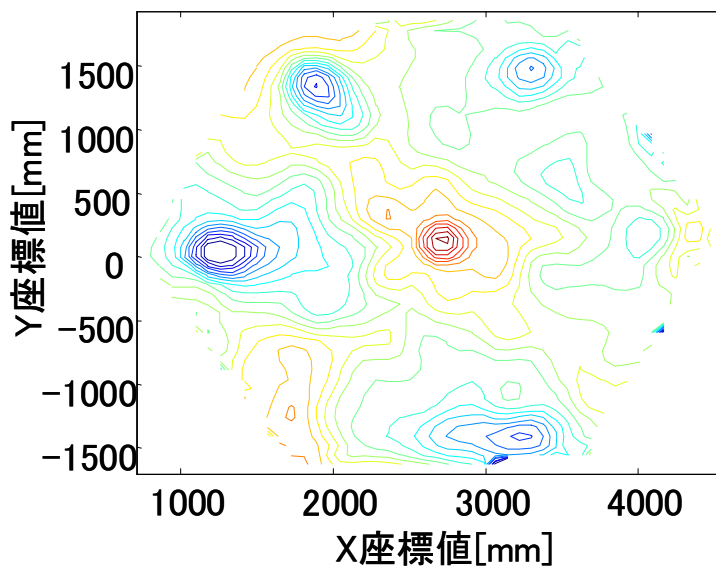


図 23 パラボラに対する誤差 (等高線図)

このとき、鏡面のランダム成分を明確にすることが目標であるため、剛体変位成分と焦点距離のずれを除いた、パラボラ面に対するランダム誤差成分を算出すると1.3mmRMS以下となり、目標とするランダム誤差成分1.38mmRMSを満たしており、ランダム誤差はノードに接続するケーブル誤差のローカルな影響と考ええると、前述のように鏡面の大きさが製造誤差に与える影響は小さいことから、鏡面形状誤差も大きさの影響は少ないと考えられる。そこで、他の要因は従来と同程度と考ええると、20mの反射鏡で2.4mmRMSの鏡面精度は達成可能と考えられる。

次に、頂点に繋がる周辺ケーブルに設置した96本のバネのうち48本について、バネの伸び張力を計測した結果を表3に、誤差量を1%刻みでとったヒストグラムを図24に占めす。

最大で15%程度誤差があるものの、ほとんどは5%以下に収まっており、展開状態ではほぼ設計通りの張力でケーブルネットワーク構造には張力が付与されていると予測できる。

表3 設計値に対する誤差の大きさ

設計値に対する誤差の大きさ[%]			
最大	最小	平均	標準偏差
15	-7.2	0.17	4.8

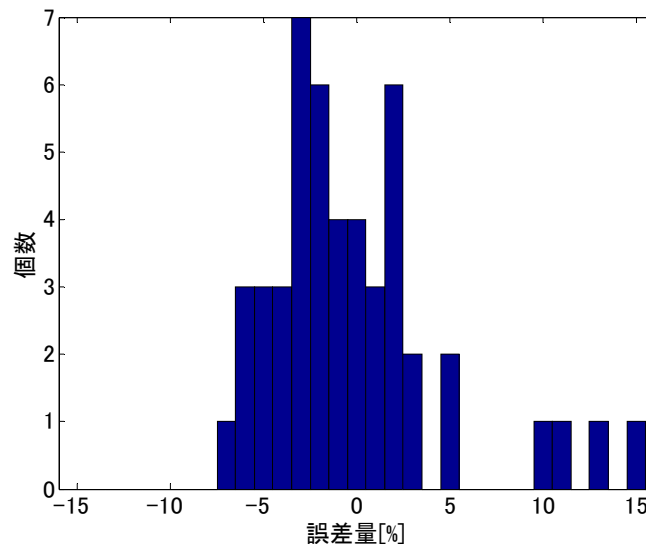


図24 張力誤差

次に、収納状態から展開までの間にケーブルが展開を阻害しないような展開方法が物理的に可能かどうかを検証した。

展開状態でケーブルネットワーク構造をとりつけた支持構造について、中心部分を収納し、順次手で展開しながら、伸展トラス構造とケーブルネットの干渉を防ぐような構成について検討した。図 25 に伸展トラスを収納状態から半分まで展開している様子を示す。ケーブルネットワーク構造は完全展開に近いところまでは、ほとんど張力が無く展開を阻害するような力を支持構造に付与することはない。また、リブ構造はケーブルネットワーク構造と接続しているものの、個々の伸展トラスについて、頂点側端部上下と中心のハブ部分、及び下側の途中 1 箇所のみであり、伸展トラスとケーブルは絡まないように分離可能と考えられる。また、テンドンとの干渉についても、順次繰り出して展開する場合は展開状態で干渉しないように配置しておけば展開可能なことを確認した。

上記展開試験により、これまでの MUSES-B などのメッシュアンテナと比較して、展開時にケーブルネットワーク構造と支持構造の干渉について、新たに大きな問題となるところは見当たらず、これまでの設計を踏まえることで、展開可能と考えられる。

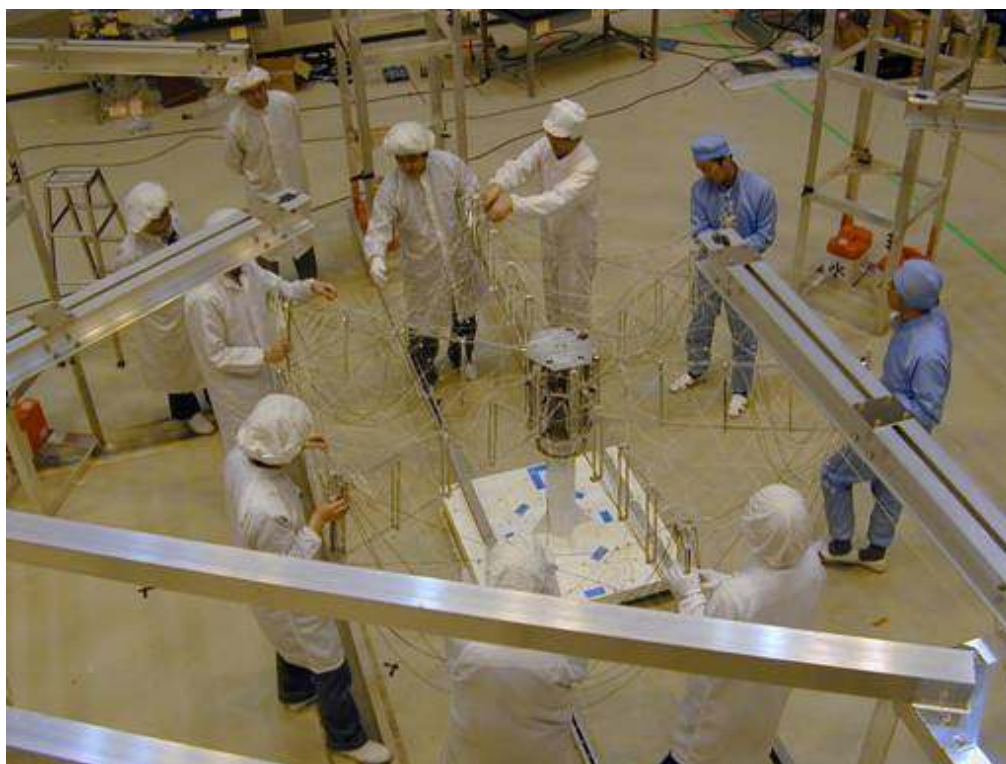


図 25 伸展トラス構造展開途中（4セル（半分）展開）

4-2-5 まとめ

ケーブルネットワーク構造を支持構造の変形も考慮して設計ならびに製造し、鏡面が設計どおり支持構造上に安定に形成されること、および、達成可能な鏡面精度、展開収納の可否を検証した。

その結果、目標とする展開支持構造上での形状安定については、ほぼ設計通りの張力でケーブルネットワーク構造が張られていたことから、本構成により支持構造の変形を許容しても、支持構造上に安定していることが確認できた。

次に、20mの鏡面で鏡面誤差2.4mmRMSの目標を実現するために、本試作で要求される鏡面精度を検討した結果1.38mmRMSとなった。試作モデルを計測した結果、支持構造の変形、および重力の影響を含めて1.3mmRMSの形状精度が得られた。これらのことから、今回検討した構成により20m級の反射鏡の鏡面ランダム誤差は想定する仕様周波数であるS帯（約2.5GHz）へ適用可能な鏡面を実現できる見通しを得た。

4-3 総括

「超軽量衛星搭載用展開アンテナ設計技術の研究」における、各課題の実施内容をまとめる。

4-3-1 超軽量支持構造構成法の研究開発

(1) 支持構造基本構成の検討

- ・ 特性を検証する上で試験時のハンドリングを考慮して、スケールモデルの機械的な大きさが5 m以下となるように、開口直径4 mの反射鏡を想定したスケールモデルの基本構成を決定した。
- ・ 収納状態と展開状態を満たす展開構造として、伸展トラス構造を放射状に配置したリブ型展開構造をテンドンにより補強した構成を採用した。

(2) 支持構造基本特性解析

- ・ 展開状態での部材歪を、伸展トラス構造単体および支持構造全体の両者について解析し先端負荷に対する歪レベルを明らかにした。
- ・ ケーブルネットワークの反力を模擬した力を付与して、部材に生じる応力を算出し、マージンを持って破壊しない部材径を決定した。

(3) 支持構造特性評価モデル詳細設計

- ・ 上記(1)、(2)ならびに鏡面ケーブル構造構成検討結果を元に、試作スケールモデルの要求条件および諸元を決定した。
- ・ 20m規模の支持構造を作成する場合に同様な構成で実現することを念頭におき、衛星搭載に実績のある伸展マスト構造を元にした軽量な伸展トラス構造とし、その詳細設計を実施した。

(4) 支持構造詳細解析評価

- ・ 鏡面形状を決定するケーブルネットワーク構造と支持構造を組み合わせ、支持構造の変形やケーブル張力などの特性を解析し、ケーブルネットワーク構造の張力が支持構造に低次の座屈荷重を超えた負荷を与えた状態で安定な平衡形状を持ち、且つパラボラ鏡面を所定の精度内で近似できていることを確認した。
- ・ 伸展トラス構造の変形形状が、中心固定、先端自由の低次の曲げ変形モード

ではなく高次の変形モードで安定することで強度が向上することを確認した。

(5) 支持構造特性評価モデル製作

- ・ 20m鏡面の設計を考慮して、展開・収納のためのヒンジを試作した。伸展トラス構造の収納効率を下げることなく、伸展トラスに接続するテンドンやケーブルネットワーク構造のインターフェース位置を配置する制限の元で、テンドンやケーブルネットワーク構造及び伸展トラス構造が収納から展開まで干渉することない設計が可能であることを確認した。

(6) 支持構造地上試験特性評価

- ・ ケーブルネットワークによる負荷が低次の座屈変形荷重を超えた状態で安定形状を保つことを確認した。
- ・ ヒンジなど可動部分のクリアランスがあっても、鏡面の負荷に対してテンドンにより低次の座屈変形を抑制し、高次の座屈変形に対応した形状変形に移行し、強度の向上が図れることを確認した。

(7) 試験装置， 治具設計製造， 支持構造地上試験

- ・ 支持構造の特性を検証するため、ケーブルネットワーク構造の負荷に対応させて、伸展トラス構造の先端から中心にむかって負荷を付与するように負荷用ケーブルを配置した試験装置を構成し、負荷用ケーブルを短縮させて、負荷用ケーブルの張力と伸展トラス構造の部材の歪を計測する試験系を構築した。

4-3-2 高安定ケーブルネットワーク構造構成法の研究開発

(1) 鏡面ケーブル構造構成検討

- ・ 鏡面部分は長さにより一意に形状が決まる構成とし、高剛性のケーブルを用いることで、張力を付与したときの長さ精度を確保して形状を維持する構成を採用した。
- ・ 支持構造の変形を含めて形状精度を維持するケーブルネットワーク構造を設計するための、支持構造の変形を考慮した設計手順を検討した。

(2) 鏡面ケーブル構造製造設計， 製造

- ・ 20m級鏡面の実現性を検証するため、縮小モデルに要求される鏡面精度や特性を明確にした。

- ケーブルの製造精度，および組立状態の精度を検証するために，高剛性のケーブルで作成した簡易ケーブルネットワーク構造の試作を行い，ケーブルを接続するノードの構成，ケーブル接続端子など必要となる要素について，製造方法を検討し，縮小モデルの製造方法を確認した．
- 5m の試作スケールモデルを製造するために，ケーブルネットワーク構造が支持構造の伸展トラス構造やテンドンなどと干渉しないようなケーブルネットワーク構成を考案し，ケーブルネットワーク構造と支持構造のインターフェース構造を明確化した．
- 20m規模の鏡面で2.4mmRMSの鏡面精度を得るために必要なケーブルネットワーク構造の製造精度を明確にし，所定の鏡面精度を実現するために，本試作スケールモデルにおいて必要となるケーブルネットワークのノード位置精度を明確にした．

(3) 反射鏡面全体構成組立・調整

- 支持構造の展開状態でケーブルネットワーク構造の組立取り付けを行った．
- ケーブルネットワーク構造が支持構造やテンドンに干渉せず，張力状態で支持構造上に安定していることを確認した．

(4) 反射鏡面全体構造特性評価

- 本試作スケールモデルに必要となるノード位置要求精度 1.38mmRMS に対して，1.3mmRMSの精度が得られていることを確認した．
- 支持構造への負荷となるケーブルネットワーク構造の周辺部のケーブル張力が設計どおり生じていることを確認し，支持構造が伸展トラス構造の最低次の座屈荷重を超えてケーブルネットワーク構造を押し広げていることが確認できた．
- ケーブルネットワーク構造を取り付けた状態で，手動による伸展トラス構造の収納・展開を行い，展開動作途中でケーブルやテンドンおよび構造部材間での干渉や，展開を物理的に阻害することがないことを確認した．

5 参考資料・参考文献

5-1 研究発表・講演等一覧

無し（H19年度発表予定2件）