

管理番号# 17-102

平成17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18年4月

情報通信研究機構

平成 17 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」

目次

1.	研究開発課題の背景	2
2.	研究開発の全体計画	5
2.1	研究開発課題の概要	5
2.2	研究開発目標	8
2.2.1	最終目標	8
2.2.2	中間目標	9
2.3	研究開発の年度別計画	10
3.	研究開発体制	11
3.1	研究開発管理体制	11
3.2	研究開発実施体制	11
4.	研究開発実施状況	12
4.1	超軽量展開支持構造構成法の研究開発	12
4.1.1	支持構造基本構成検討	12
4.1.2	支持構造基本特性解析	13
4.1.3	まとめ	22
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	22
4.2.1	鏡面ケーブル構造構成検討	22
4.2.2	鏡面ケーブル構造製造設計	23
4.2.3	まとめ	27
4.3	総括	28
4.3.1	超軽量展開支持構造構成法の研究開発	28
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	28

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C S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。

C S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、鏡面精度を剛性と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級の大形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、5 m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、5 kg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、以下のよう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

高度な構造解析技術をバックボーンに従来のアンテナ反射鏡面構造の構造設計の限界を超えた新しい設計領域を創出する。それにより、単位面積当たりの重量を現時点で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を実現し、宇宙機システムの性能を飛躍的に向上させることを目的とする。

(1) 実用化目標

第3世代から第4世代の携帯電話網を補完し、利用領域を拡大するための大容量移動体通信衛星を現行衛星コストの著しい増加なく、実現することを目標とする。N-STAR a, bおよびc号機の後継機となる次世代の移動体通信システムとして、2012年のドコモ商用衛星通信システムへの導入を目標とする。

さらに欧米がシステムメーカーとなる他の商用通信衛星への採用を期待すると同時に、通信衛星に限らず、宇宙ステーションや惑星間通信、深宇宙探査衛星、地球観測衛星等への適用へ拡大させていくことを目標とする。

(2) 技術目標

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。
- ・ 目標ミッション総重量400kgに対し、反射鏡の重量を配分。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、単位面積あたりの重量が 0.3 kg/m^2 以下になる見通しを示す。

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 mm RMS 以下となることを示す。

2.2.2 中間目標

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							

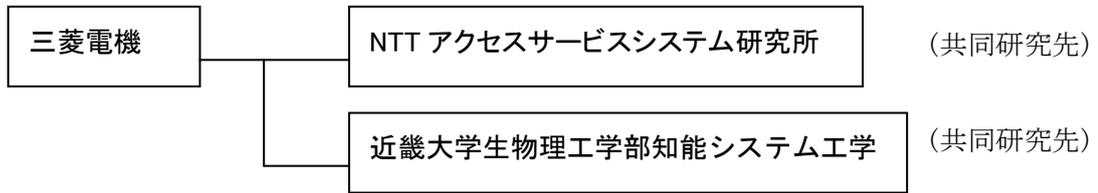
注) 1 経費は研究開発項目毎に消費税を含めた額で計上。また、間接経費は直接経費の30%を上限として計上(消費税を含む)。

2 備考欄に再委託先機関名を記載

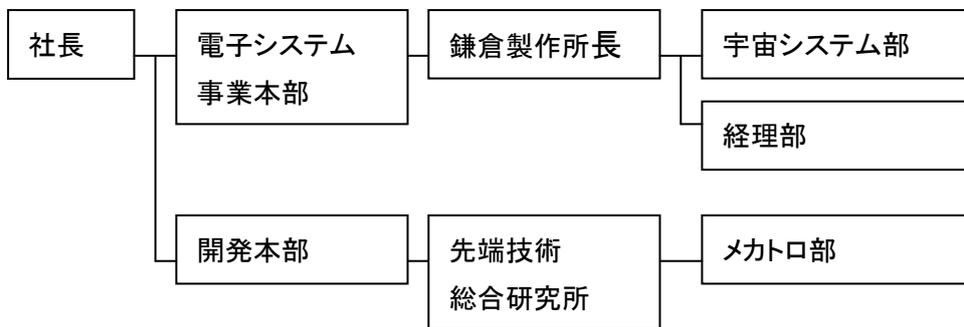
3 年度の欄は研究開発期間の当初年度から記載。

3. 研究開発体制

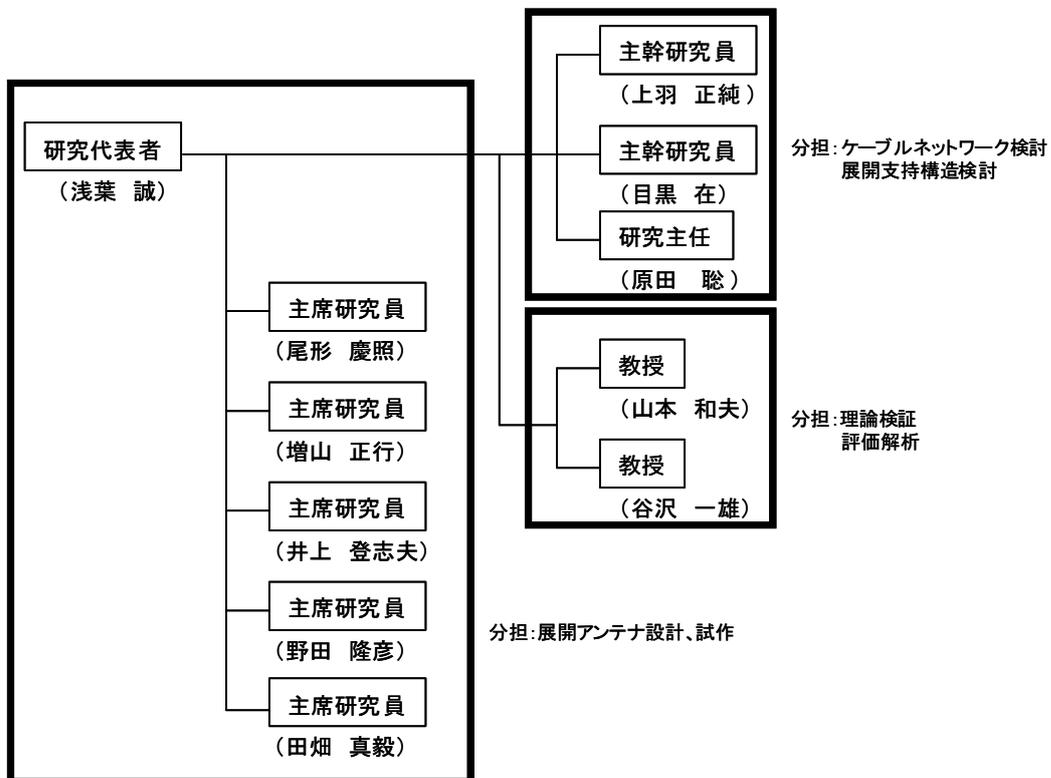
3.1 研究開発管理体制



【三菱電機】



3.2 研究開発実施体制



4. 研究開発実施状況

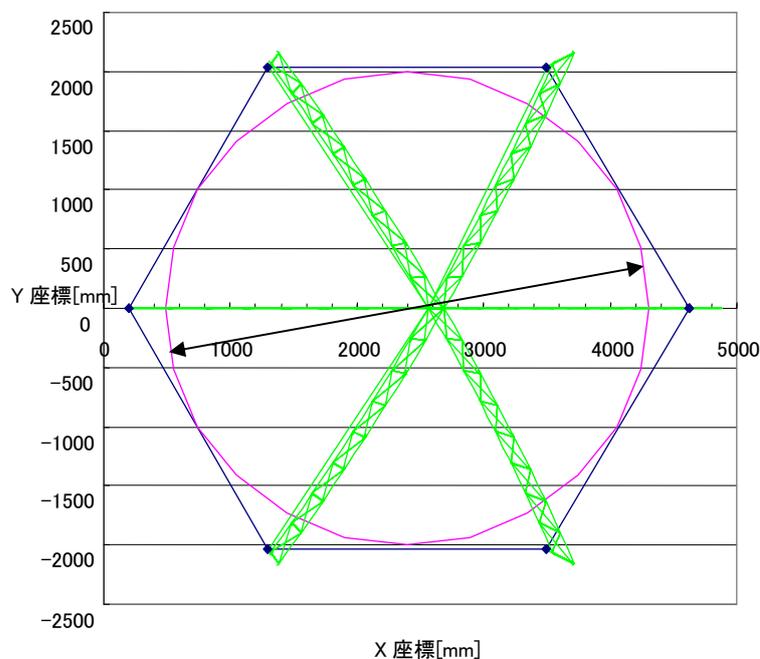
4.1 超軽量展開支持構造構成法の研究開発

平成 17 年度は，試作スケールモデルの基本構成を検討し，基本特性の解析を行った．また，支持構造を構成する基本要素について試作し，負荷試験を行い，ヒンジ部分を含む特性について検証した．

4.1.1 支持構造基本構成検討

20m規模の設計を前提に，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．

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 の円を内接するように，図 1 に示す寸法の支持構造を検討した．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，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．



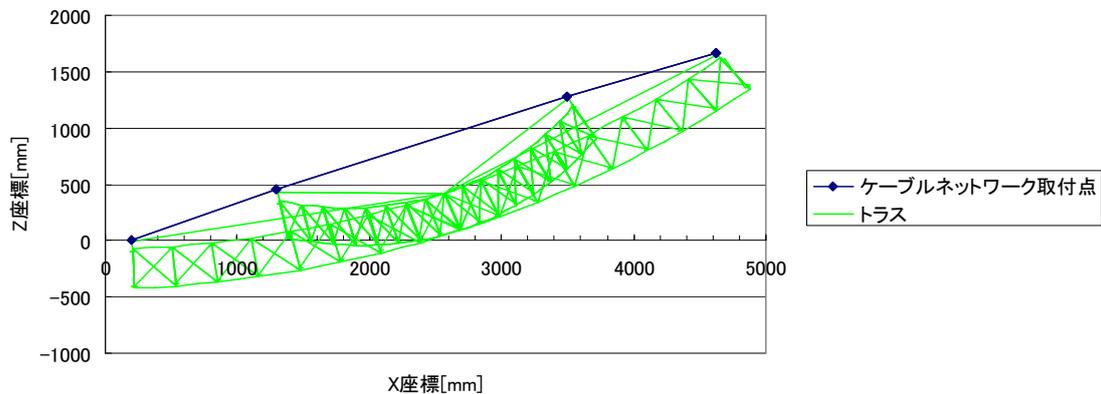


図1 支持構造外形寸法

展開フレームを構成する展開構造としては、実績や軽量化の観点から図2に示す構造とした。このとき、軽量化と強度の向上を両立させるためテンドン配置している。テンダンの配置は、低次の座屈モードにより生じる曲げ変形の進行を抑制し、破壊強度の向上を図るように、隣あうリブ同士が変形を互いに拘束するように決定した。

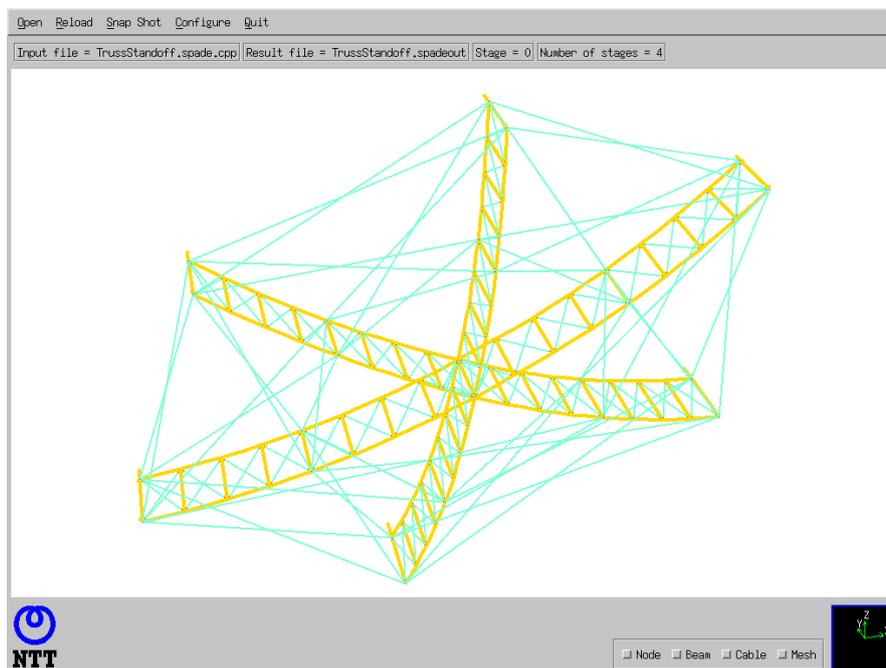


図2 支持構造

4.1.2 支持構造基本特性解析

支持構造の基本特性を検証するために、リブを構成する展開フレーム単体及びテンドンで補強した支持構造全体に圧縮荷重を負荷し、そのときの変形および曲げ歪を解析した。

次に、展開フレーム単体での座屈による変形の進行、並びに、テンドン補強による支持構造全体での強度向上を解析的に確認した。

a) 解析モデル

主要な構造パラメータを表1に、図3に解析モデルを示す。展開フレームは部品の共通化を図るために、図4に示す基本セル構造が結合した構成とした。図4において、実線部分は梁要素、点線部分はケーブル要素を示し、丸印はそれぞれの要素が結合する箇所を示している。ただし、図4は接続関係を示しており、実際の形状とは異なっている。

表1 主要構造パラメータ

Curvature radius of the approximated sphere	7.67854 m
Diameter of the supporting frame structure	4.76432 m
Height of the supporting frame structure	0.35 m
Aspect ratio of basic cells	about 0.8
Diameter (and thickness) of structural members	12 mm (1.0 mm)
Materials	Structural members : CFRP/Aluminum Hinge members : Aluminum
Applied compressive load	around 150 N

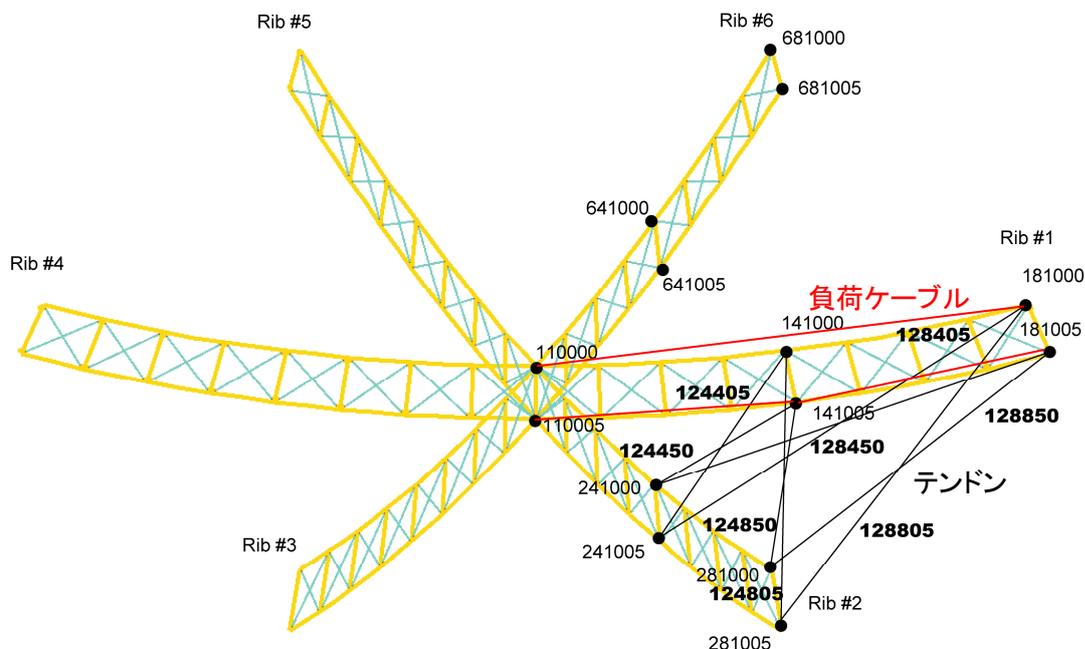


図3 支持構造解析モデル (テンドン、負荷ケーブルは一部のみ表示)

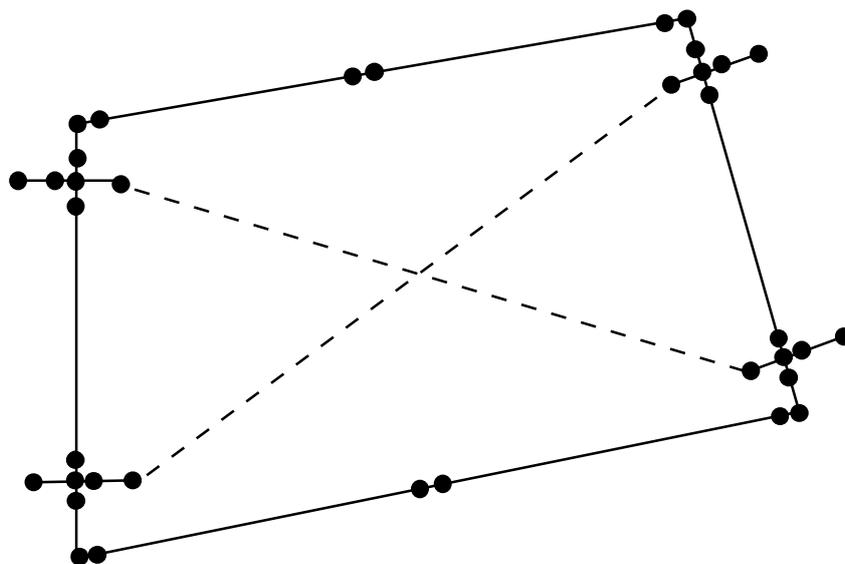


図4 基本セル構造

b) 展開フレーム負荷解析

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ケーブル張力が 150N を超えるところまで解析を実施した。

図5に 150N 以上の負荷となったときの曲げ変形を示し、図6に部材に生じる軸力を、図7に部材に生じる曲げひずみを解析した結果を示す。これらの結果より上面側の圧縮力が大きく、また、中心よりやや先端側で歪が最大となることがわかる。

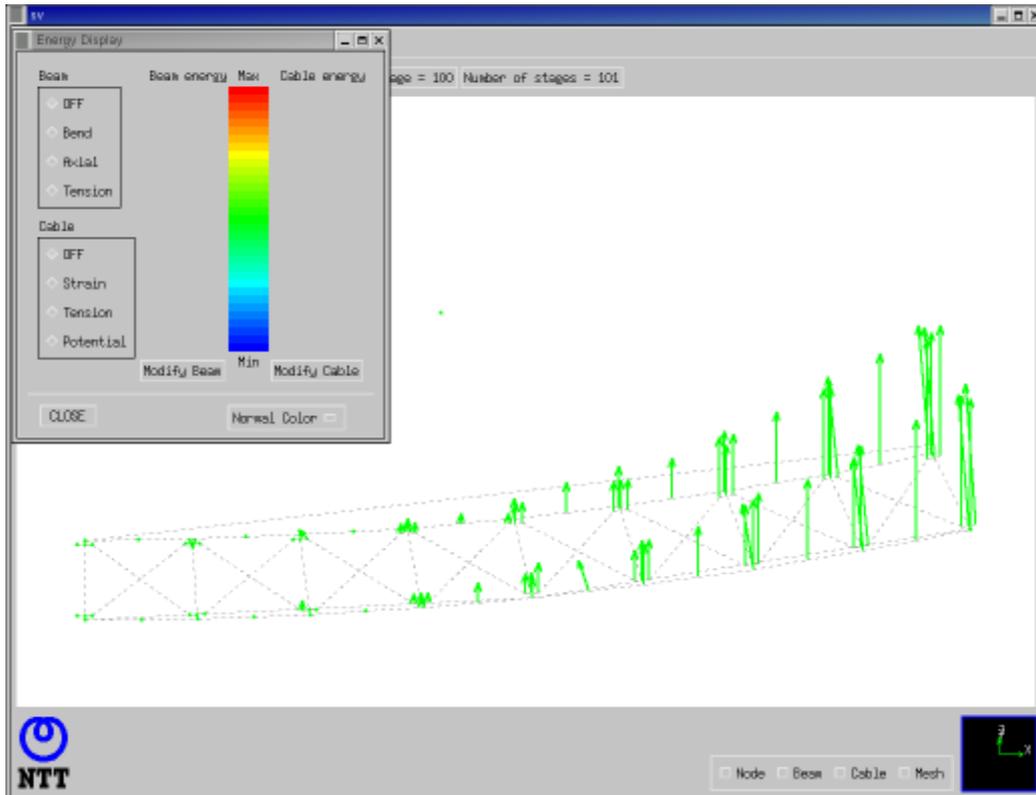


図5 変形モード

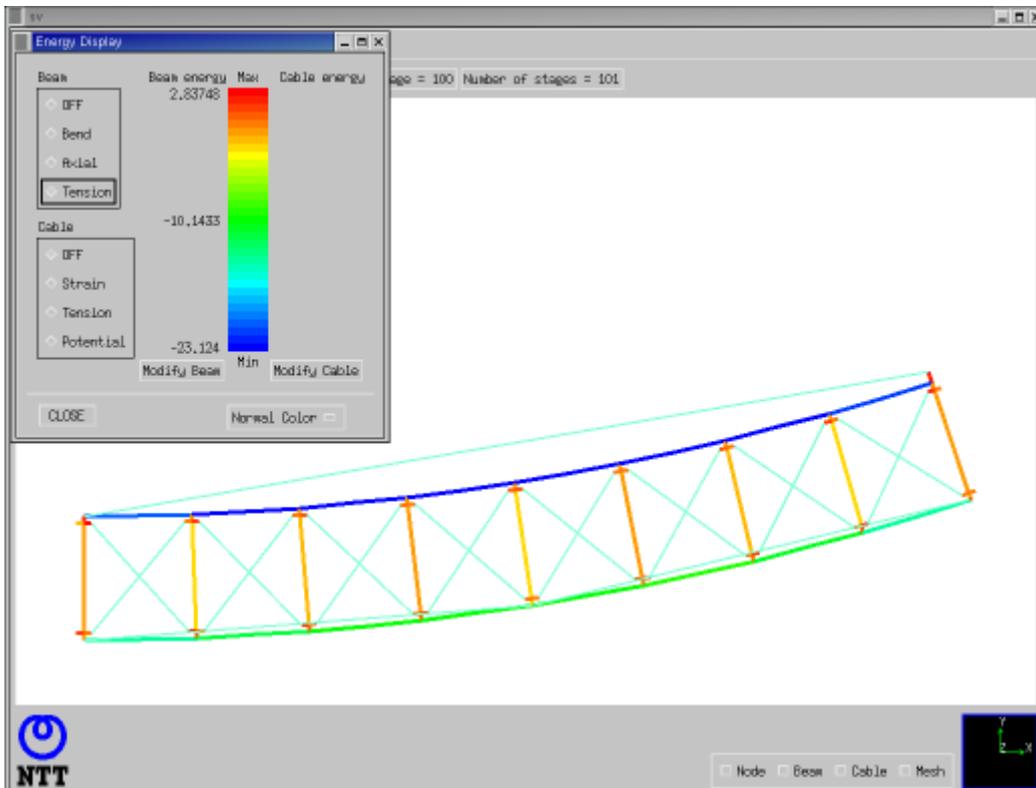


図6 梁の軸力

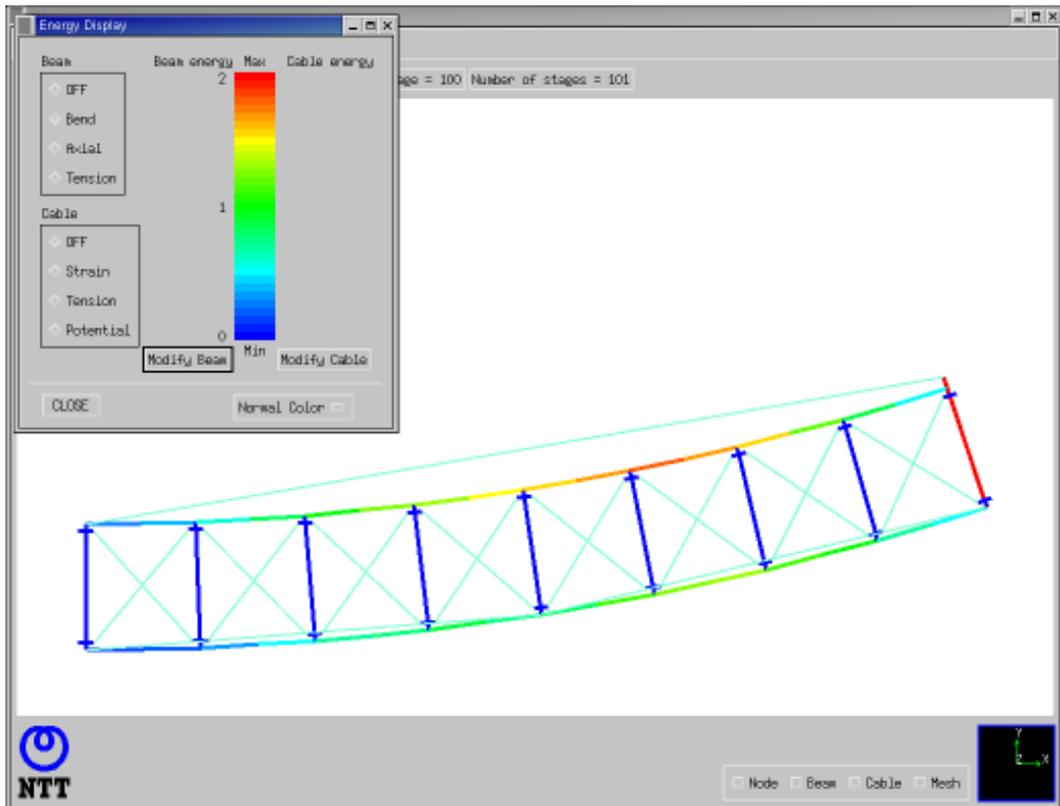


図7 梁の曲げ歪

c) 支持構造全体負荷解析

展開フレーム単体試験と同様に 6 本全ての展開フレームについて、上下に負荷用ケーブルを配置し、ケーブルを短縮して負荷を加えたときの部材歪および軸力を解析した。図 8 に梁に生じた歪エネルギーを図 9 に軸力を解析した結果を示す。

フレーム構造の単体の場合と比較して、テンドンにより変形が抑制されており、最大歪の位置が外周方向へ移動していることが分かる。これに伴い、曲げ歪が少なくなり、部材に生じる曲げ応力が 1/3 程度となる。一方、軸力については、部材に生じる圧縮荷重は展開フレーム単体と同程度であるが、引っ張り荷重が数倍になることが判明した。

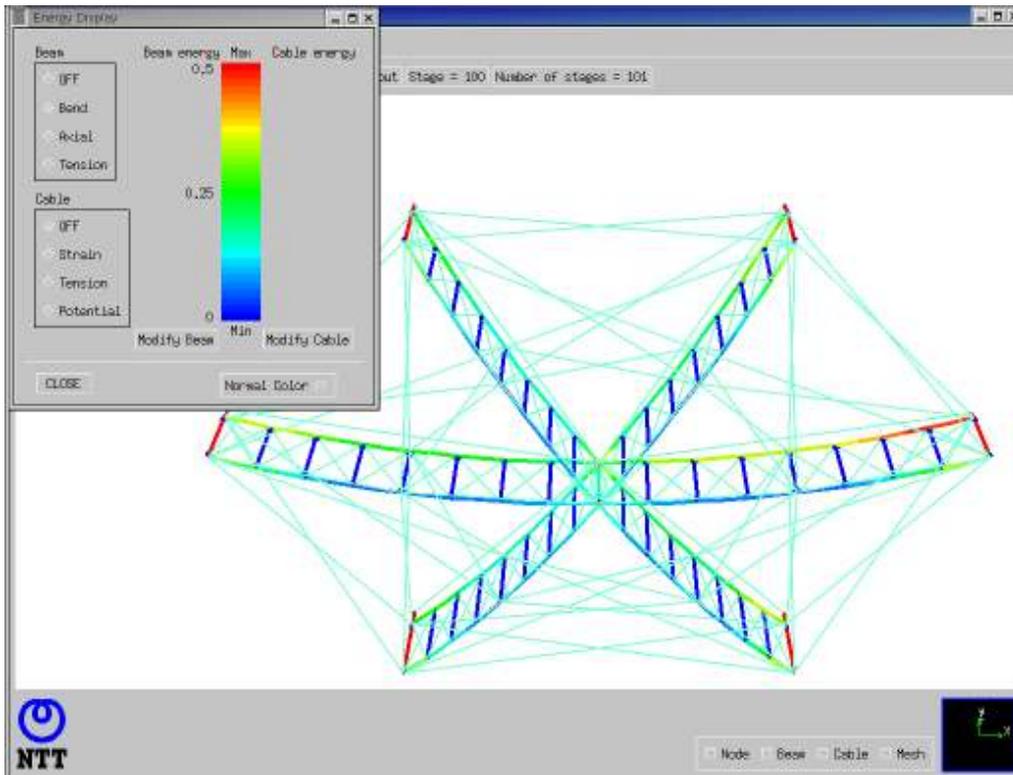


図8 梁の曲げ歪

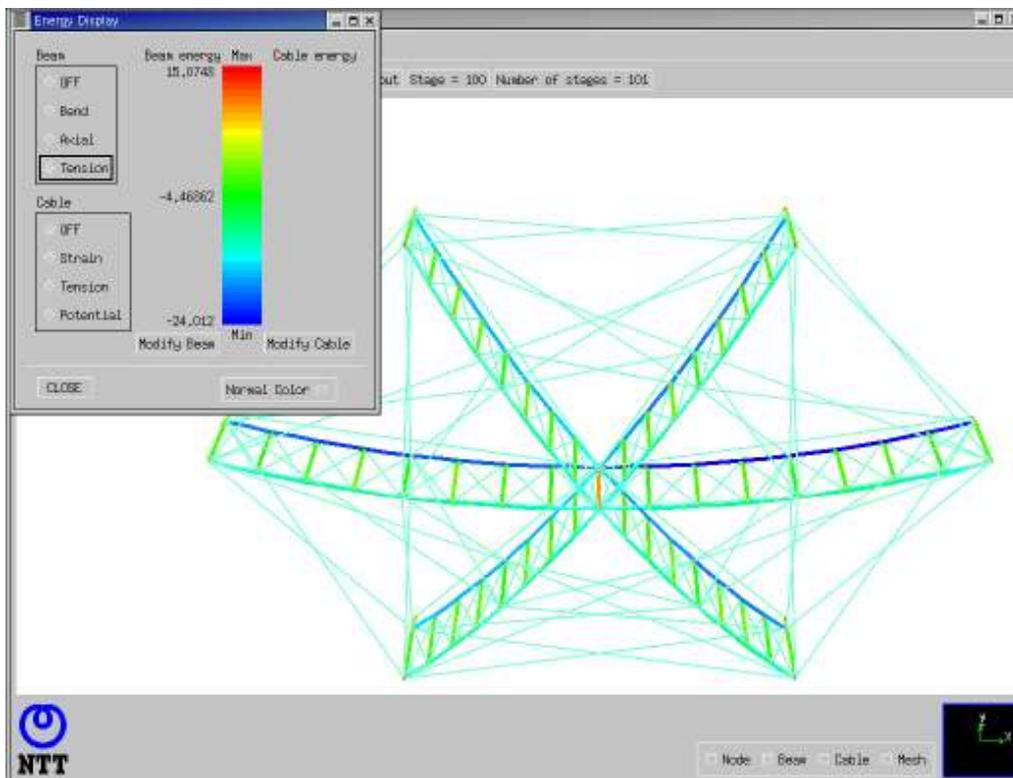


図9 梁の軸力

d) テンドン補強の効果

上記の解析においては、従来と同様に展開フレーム単体でも、座屈破壊せず十分な強度を有するように部材径を決定した。次に、材料剛性を下げ、材質を CFRP からアルミで構成した展開フレーム単体で座屈する構造の特性を検証した。図 10 に解析ステップごとに一定の割合で負荷ケーブルを短縮させたときの、負荷ケーブルに生じた張力の解析結果を示す。比較のために、材質が CFRP とアルミの両者の結果を示している。

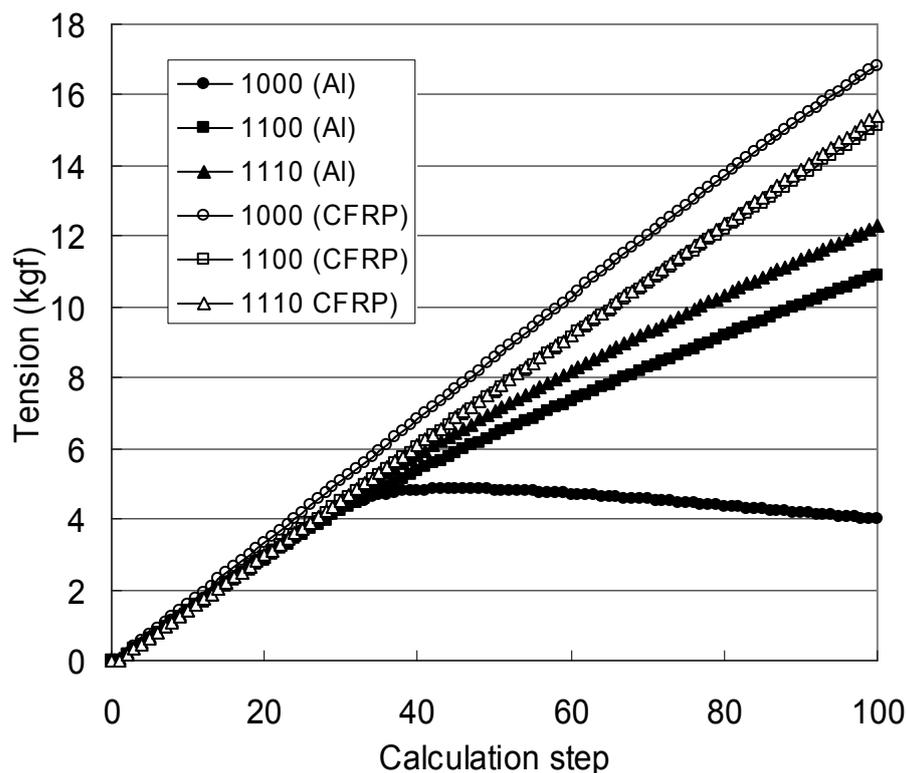


図 10 解析ステップ（ケーブル短縮量に相当）とケーブル張力；展開フレーム単体

図中、白抜きのプロットは CFRP 材料、黒く塗りつぶしたプロットはアルミ材料を示し、1000 は上部ケーブル、1100 および 1110 は下部ケーブルをそれぞれ示している。CFRP 材料の場合はほぼ線形に変化しているのに比較してアルミ材料の場合は上部のケーブルが座屈によって曲げ変形モードへ移行し、強度が確保できないことがわかる。

次に、テンドンで補強した支持構造全体について、同様に全ての展開フレームの上下にとりつけた負荷ケーブルを解析ステップごとに短縮したときの、ある展開フレームの負荷ケーブルの張力を解析した結果を示す。比較のために、展開フレーム単体の場合も表示している。

図 11 より、テンドン補強した支持構造全体では、展開フレーム単体より強度が向上することが確認できる。しかし、テンドン補強した状態でも 12kgf 手前で座屈が生じ、150N と

いった強度が得られないことがわかる。そこで、肉厚を 1.0mm から 1.5mm に増加させて解析したところ、150N を超える強度が得られることを別途確認した。

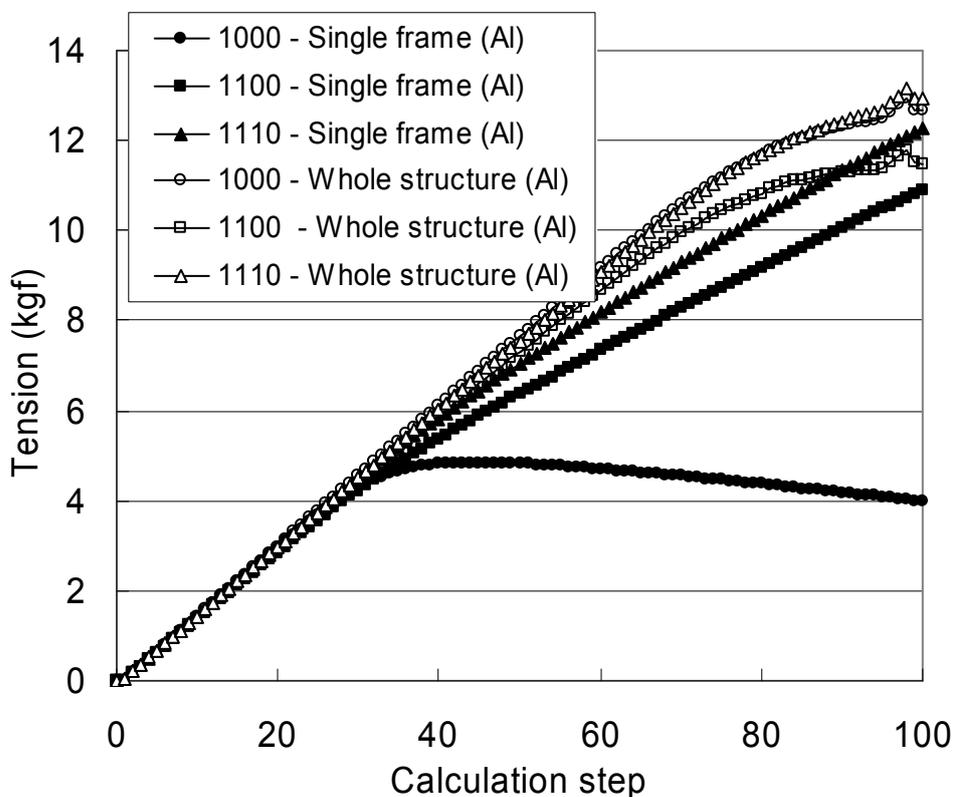


図 11 解析ステップ（ケーブル短縮量に相当）とケーブル張力

e) 基本構造特性試験

解析モデルと実際のハードウェアモデルとの相違の有無を検証するために、基本構造となる 1 セルについて特性試験を行った。試作した基本構造を図 12 に示す。

解析モデルと同様に、基本構造の上下に負荷用のケーブルを配置し、ケーブルの長さを少しずつ短縮させて、部材に生じる歪を測定した。測定したケーブル張力と軸歪の関係を図 13 に示す。図より、今回検討している構成では負荷に対する歪の非線形性は小さいことがわかった。

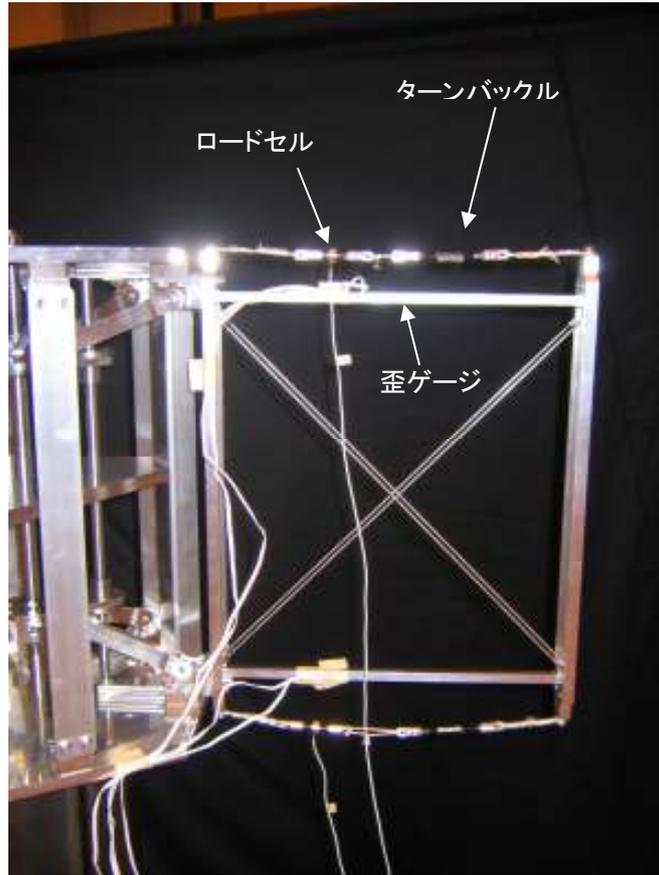


図 12 基本構造試作モデル

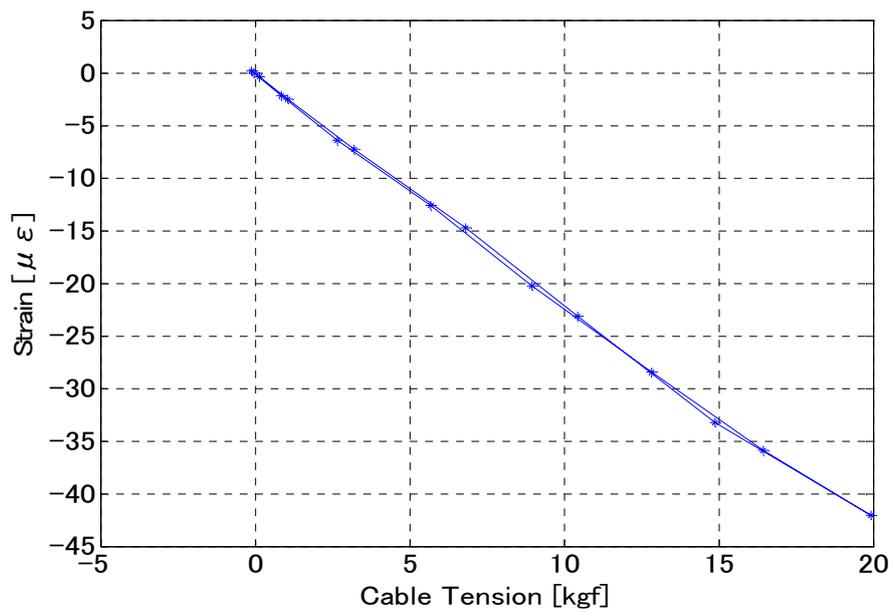


図 13 負荷試験結果

4.1.3 まとめ

支持構造の基本構成として、展開フレーム構造を放射状に配置した構造を検討した。また、基本特性を明確にするために展開フレーム構造に負荷をかけた場合の変形モードや歪レベルを解析し、支持構造全体ではテンドンにより補強することで強度の向上が図れることを確認した。

引き続き、スケールモデルの詳細設計を実施し、試作を通じて、大形構造物の試験方法も検討し、特性評価を行う。また、今回検討した構成により実際の 20m スケールで必要となる部材径を明確にし、質量や変形特性を明らかにする予定である。

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

平成 17 年度は支持構造の変形を考慮したケーブルネットワーク構造の設計手順を検討した。実現性を検証するために、5 m スケールの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。

4.2.1 鏡面ケーブル構造構成検討

20m 級のケーブルネットワーク構造の製造、解析上の問題は主としてケーブル本数の増大によることから、5 m スケールモデルについて、ケーブル本数は 20m 規模のものと同程度となるように 1 辺あたりの分割数を 10 段とした。

軽量化により柔軟な特性を持つ支持構造上で安定な形状を保つように、長さにより一意に形状が決まる構成とし、ケーブルに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、形状を維持する構成を検討した。

また、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。設計した 5 m スケールモデルについて、支持構造を含めたケーブルネットワーク平衡状態の解析結果を図 14 に示す。

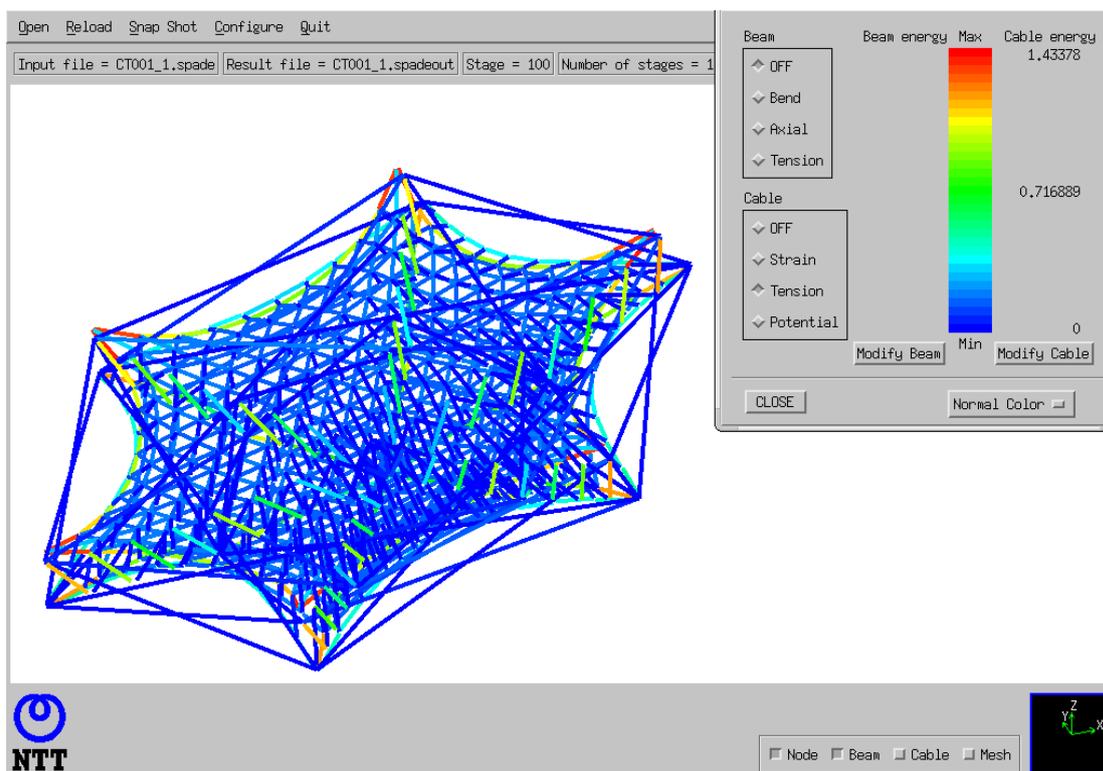


図 14 5 mスケールモデル設計結果

4.2.2 鏡面ケーブル構造製造設計

a) 製造方法の検討

ケーブルネットワーク構造の組立方法として、20m 規模の構造を製造することを考慮して、個々のケーブルが所定の長さや張力を持つように製造し、それらをノード点で結合して全体を構成する方法を採用した。この場合、個々のケーブルをノード点で接続する必要があるため、ケーブルの端部処理や製造方法、ノード形状を検討する必要がある。また、ノードでの固定部分も含めたケーブルの製造精度が要求される。ケーブルネットワーク構造の製造性を検証するために、簡易型のネットワークモデルを試作した。

b) 簡易ケーブルネットワークモデルの製造

・全体構成

図 15 に示すようなケーブルネットワークを試作した。1 辺が 80 cm の三角形の頂点部分を固定点として、鏡面部分に対応させた三角形ファセット 4 つを上下に持つネットワーク構成としており、ケーブルが接続するノード点は固定点 6 箇所を含めて 18 箇所、ケーブル本数 30 本からなるネットワーク構造である。

今年度の試作については、製造精度の影響を明確とするために、すべてのケーブルに剛性の高いケブラーを用いた構成を採用した。個々のケーブル長さや張力の算出は、従来と

同様にノードでのケーブルの固定方法を考慮して、解析モデルを作成し、平衡形状を解析して個々のケーブルの長さや平衡時張力を算出し製造をおこなった。

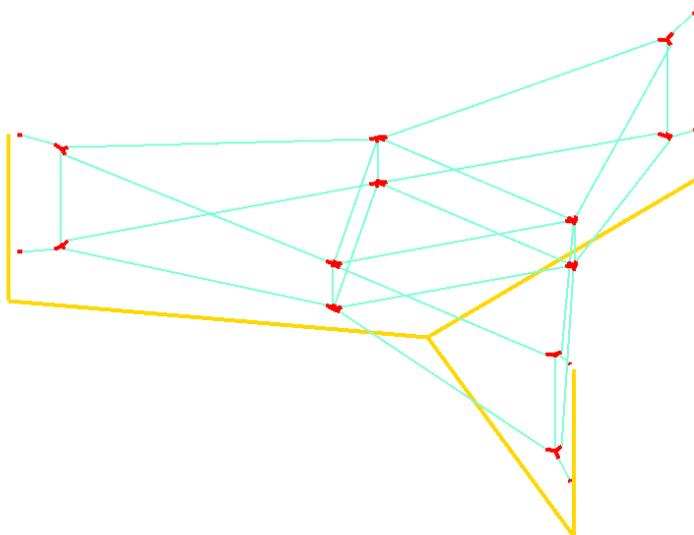


図 15 簡易ケーブルネットワーク

・ノード形状

ケーブルはノード位置で複数のケーブルを接続する必要があることから、ケーブルの端部に端子をとりつけ、端子をピンで留める構成とした。

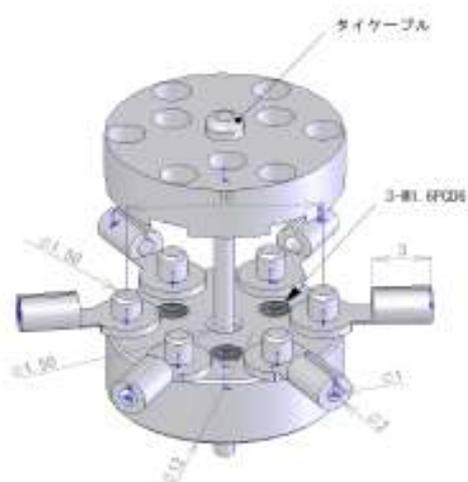


図 16 ノード構成

・ケーブル製造方法

ケーブルの製造にあたり、所定の張力で所定の長さのケーブルを製造するために、図 17 に示すケーブル製造装置を製作し、ケーブルを作成した。

ケーブル製造装置は、端子を取り付けたケーブルに所定の張力をかけた状態で反対側の端子の穴位置が所定の位置に来るようにケーブルに取り付ける構成となっている。端子間距離が所定の長さとなるようにケーブルに端子を取り付けて、個々のケーブルを製造した後、再度、端子間の距離を計測し製造精度を検証し、所定の張力でケーブル長さが 0.2m m以内となるように製造した。

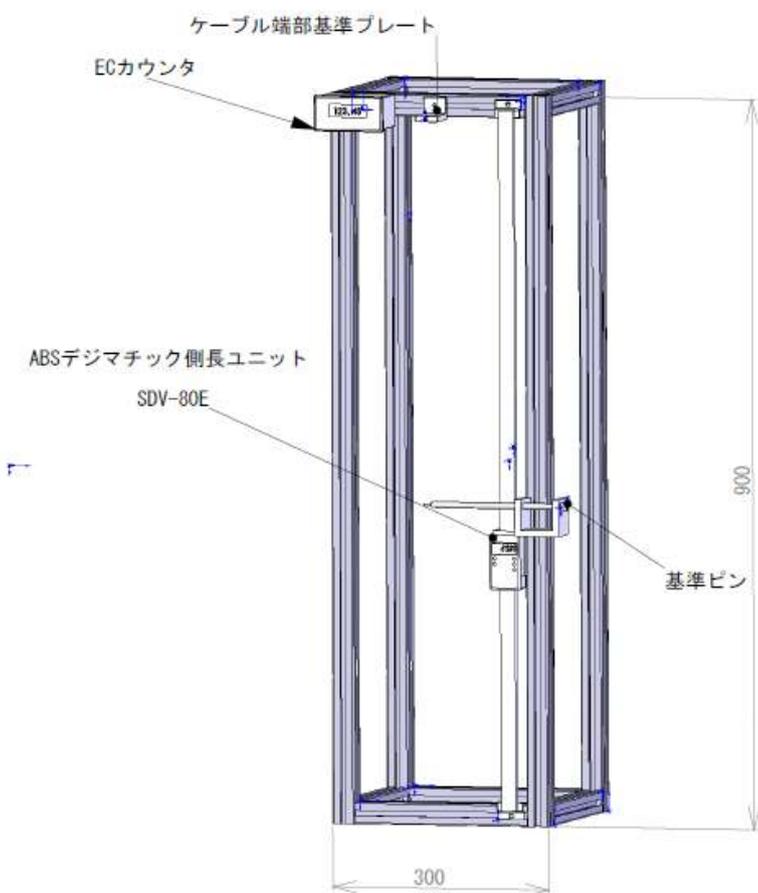


図 17 ケーブル製造治具

c) 形状測定試験結果

試作した簡易ケーブルネットワーク構造を図 18 に示す。ノード上には計測用のターゲットを設置している。ノードを含めて光っている点は計測用のターゲットで、ノード点以外のものは参照用に設置したものである。

写真測量の原理に基づき画像処理により三次元位置を計測する画像計測システムによりノード位置を計測した。

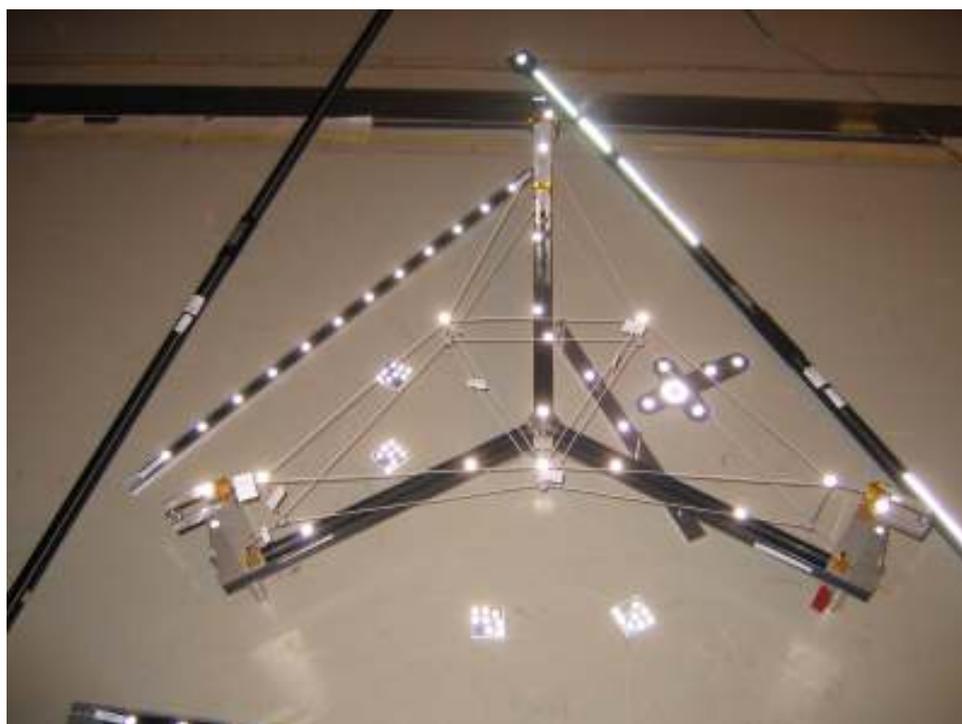


図 18 試作簡易ケーブルネットワークモデル

計測したノード位置と設計値の差を図 19 に示す。(見やすくするためにノードの変位量を 100 倍にして表示している。) また、図中上側のノード 6 点について、設計値を基準とした変位量を整理すると表 2 のようになる。今回ケーブルの製造精度は、0.2mm 程度であることを考慮すると、ケーブルの製造精度に対し 2 倍以内の精度で形状が確保されていることがわかる。

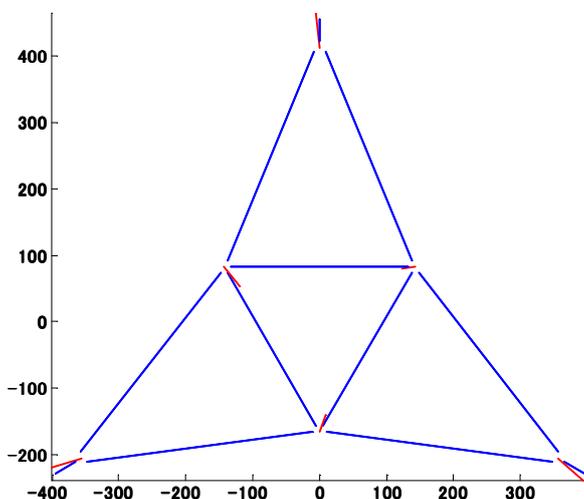
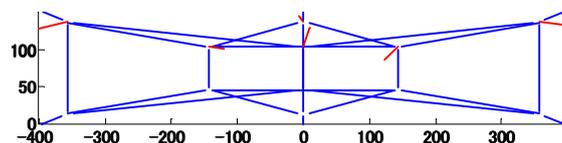


図 19 ノード位置変位

表 2 位置精度

最小値	0.27
最大値	0.55
R.M.S 値	0.43

4.2.3 まとめ

支持構造の変形を考慮した設計手法を検討し、5 mスケールモデルを想定してケーブルネットワーク構造の設計を行い、支持構造に設置した状態での平衡状態を解析した。また、ケーブルの製造方法、および、高剛性ケーブルによるネットワークの成立性を検証するために、高剛性ケーブル数十本程度から構成されるケーブルネットワーク構造を製造した。治具上に展開状態でケーブルネットワークを設置し、形状がケーブル製造精度の2倍程度の精度で維持されていることを確認した。

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、H17年度の各課題の実施内容をまとめる。

4.3.1 超軽量展開支持構造構成法の研究開発

リブ構造をテンドンで強化することで軽量化を目指した支持構造の基本構成及び特性解析を行った。

(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を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検討した。
- ・ 収納状態と展開状態を満たす展開構造として、展開フレーム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とした。

(2) 支持構造基本特性解析

- ・ 展開状態での剛性を、展開フレーム単体および支持構造全体の両者について、解析により検証した
- ・ 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、破壊しない部材径を決定した。

(3) H18年度の開発課題の整理

- ・ 本年度決定した基本構成に基づいて、超軽量大形支持構造の要求仕様、および諸元を決定する。
- ・ 展開特性解析を実施し、展開力、および展開の可否、条件の明確化を行う。
- ・ スケールモデル試作の詳細設計、および特性評価試験により、超軽量展開支持構造の設計技術、および、試験評価技術を確立し、超軽量大形支持構造の単位面積あたり質量が 0.3Kg/m^2 となる見通しを得る。

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

一つ一つのケーブルの長さを精度良く製造することにより、鏡面形状の精度を確保するケーブルネットワーク構造の構成について、支持構造の変形を考慮したケーブルネットワーク構造設計を行った。又、簡易モデルによるケーブル製造方法の検討を行い、基本設計仕様の確定と性能評価を行った。

(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。
- ・ 支持構造の変形を考慮した設計手順を検討し、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した。

(2) 鏡面ケーブル構造製造設計

- ・ 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った。
- ・ 試作モデルにより製造精度の数倍程度の範囲で形状精度が得られる見通しを得た。

(3) H18年度の開発課題の整理

- ・ 高精度なケーブルの製造技術の確立と、達成可能なケーブル製造精度の明確化を行う。
- ・ 支持構造が付与する必要がある張力の決定を行う。
- ・ 試作モデルによる大規模ケーブルネットワーク設計技術、および試験評価手法を確立する。