

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 15 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21360421

研究課題名（和文）超軽量衛星搭載用展開アンテナ反射鏡構造の研究

研究課題名（英文）A Study on Onboard Ultra-Light Weight Deployable Antenna Reflector Structures

研究代表者

目黒 在（MEGURO AKIRA）

東京都市大学・工学部・教授

研究者番号：70513539

研究成果の概要（和文）：超軽量・大型アンテナ反射鏡面構造の新たな設計方法を提案した。反射鏡面は金属メッシュとケーブル構造と支持展開構造で構成し、高い伸び剛性のケーブルでテンション・トラス構造を形成して精度の高い反射面を実現する。ケーブル伸び剛性の配置と反射面周辺の形状が鏡面精度、形状の安定性に与える影響を明らかにし、試作モデルでその特性を検証した。また、展開支持構造をホモロジ設計の概念で最適化することにより有効に質量を低減できることを示した。さらに、全体の構成を階層モジュラー構造とし、力学特性を継承させることで、大型構造の全体特性を試験することなく、部分構造でその特性を把握できる可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：A new design methodology for light-weight, huge-scale antenna reflector structures is investigated. The reflector structure consists of a metal mesh surface, a cable network structure (a system of cables) and a deployable frame structure. The cable rigidity and the surface edge shape, were considered in this design. A homologous design method was applied to design the supporting structure. As a result, the weight of the supporting structure can be effectively reduced. In addition, by constructing hierarchical module structures, the modular structures can show a self-similarity. We are expecting to obtain structural characteristics of a whole huge structure by testing a few basic modules.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010 年度	10,900,000	3,270,000	14,170,000
2011 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

研究分野：宇宙システム工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：宇宙構造，展開構造，軽量構造，大型構造，アンテナ，太陽電池パドル

## 1. 研究開始当初の背景

開口直径の大きなアンテナの実現により、衛星通信や放送、惑星間通信、さらには地球観測や広域情報収集などの分野において、新たな利用方法の開拓や市場の拡大が可能になる。現在のアンテナ開口直径は、10 m 規模

が商用レベル、20 m 規模が研究開発から商用レベルへ移行しつつあり、30 m 以上が研究開発の対象となっている。Fig. 1 に示すように、CS-3 へ搭載されたアンテナはハニカム・サンドイッチ板、ETS-VI は薄板と骨組みの組み合わせ、ETS-VIII はメッシュと骨組みの組み合わせ、とアンテナ反射鏡は構造のト

ポロジーを常に進化させ、直径の拡大とともに、単位面積当たりの質量を大きく低減させている。

国内外における 10 m 級以上の展開アンテナ反射鏡面の研究を以下に示す。(括弧内は単位面積当たりの質量。)

- (1) 宇宙航空研究開発機構 (以下 JAXA) による開口直径 13 m の移動体通信・放送用 2.5GHz 帯の展開形メッシュアンテナ。技術試験衛星 VIII 型 (きく 8 号) に搭載。2006 年 12 月に打ち上げ。(約 0.8 kg/m<sup>2</sup>)
- (2) JAXA による開口直径 10 m, 電波天文用 80 GHz アンテナ。MUSES-B の後継機へ搭載予定。(約 0.8 kg/m<sup>2</sup>)
- (3) ボーイング社の APMT, THURAYA 衛星では 12m の L 帯アンテナ反射鏡面を搭載。(約 0.5 kg/m<sup>2</sup>)
- (4) ロッキード社の ACeS 衛星ではハリス社の 12 m アンテナ反射鏡面を搭載。(約 0.5

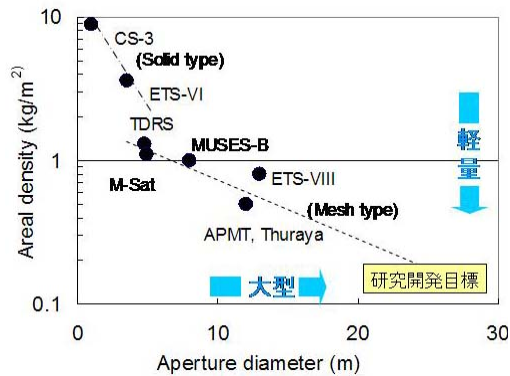


Fig.1 アンテナ反射鏡構造の技術動向  
kg/m<sup>2</sup>

## 2. 研究の目的

研究者は、これまで軽量テンドン構造による反射面支持構造の基本構成を考案し、幾何剛性行列の定式化により、座屈後の形状解析を可能として、構造特性の解析検証を行った。また、直径 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明らかにして 20 m アンテナをより軽量に実現できる見通しを得ている。本研究では、これらの成果を発展的に継承することによって、基本構造概念を拡張するため、反射鏡面を構成するケーブル構造と、ケーブル構造を支える支持構造とを、ケーブル構造の張力を維持するという制約条件下で最適化するホモロジ設計により、これまで以上のアンテナ反射鏡面構造の軽量化を行う。これらの方法の妥当性と、実用性を検証するため、有限要素解析プログラムと、汎用最適化プログラムを利用して解析を行う。また、階層性を持たせた基本モジュール構造を結合することにより、部分構造から構造物

全体の構造特性の把握を可能とし、構造物の運用信頼性を向上させる階層モジュール構造をアンテナ反射鏡面設計へ拡張することで、小型構造から大型構造までスケーラブルなアンテナ反射鏡面構造を実現する。

## 3. 研究の方法

### (1) えぐれ込み形状を与えたネットワーク構造の安定性

ケーブルネットワーク構造の形状安定性は、主に“ケーブル材料の伸び剛性”，“えぐれ込み率 (えぐれ込みの深さ/六角形の一辺の長さ)”，“タイ・ケーブルの張力”の 3 つの特性要因に支配される。特に、サーフェス・ケーブル全体に均一な張力を付与するためには、サーフェス・ケーブルで構成する反射鏡面の周辺にえぐれ込み形状 (カタナリ曲線) を与え、ケーブル張力を反射鏡面内に効率よく伝える必要がある。反射鏡面の周辺にえぐれ込み形状を与えることは、その方法論も含め、多くの検討課題がある。ここでは、えぐれ込み形状がケーブルネットワーク構造の形状安定性に与える影響について、Fig. 2 に示すケーブルネットワーク構造モデルを用いて解析し、検討した。アンテナ反射鏡面開口直径を 1500 [mm]、焦点距離 900 [mm]、焦点距離/開口直径比 0.6、オフセット角 0 [deg] とした。Table 1 に解析モデルのパラメータを、Fig. 2 にはケーブルネットワーク構造を固定する支持骨組み構造の構成を示す。骨組み構造と異なり、ケーブル構造の解析は初期形状を与えることができないため、各ケーブルの初期長さ (無ひずみ状態の長さ) を初期条件としてタイ・ケーブルに 0.1 [N] から 30 [N] の間の張力を持たせるために必要な初期長を与えた。解析には柔軟多体構造解析ソフト Origami/ETS (開発: 宇宙航空研究開発機構) を使用した。

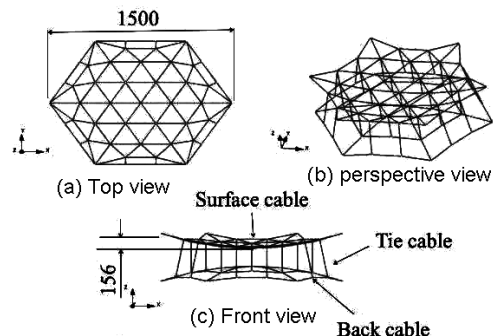


Fig. 2 Composition of the cable network

Table 1 Cable network model parameters

Cable rigidity [kN]	Surface cable	100	
	Back cable	100	
	Tie cable	0.01	
Edge curvature [%]	10	15	20
Tie cable initial tension [N]	0.1 - 30		

(2) 圧縮部材を用いたネットワーク構造の安定性

反射鏡面の周辺にえぐれ込み形状を与えず、一部のケーブル部材を圧縮部材（ロッド等）で構成する反射鏡面構成を新たに加えて検討した。

(3) 支持展開構造の軽量化設計法

Fig. 3 に示すフープ構造とリブ構造を組み合わせた静定トラス構造を支持構造とし、支持構造の最適設計（最小質量設計）を実施する。最適設計では、制約条件として、ケーブルネットワーク構造で構成する反射鏡面構造が鏡面として成立する条件（全てのケーブルに張力がある条件）を設定し、支持構造

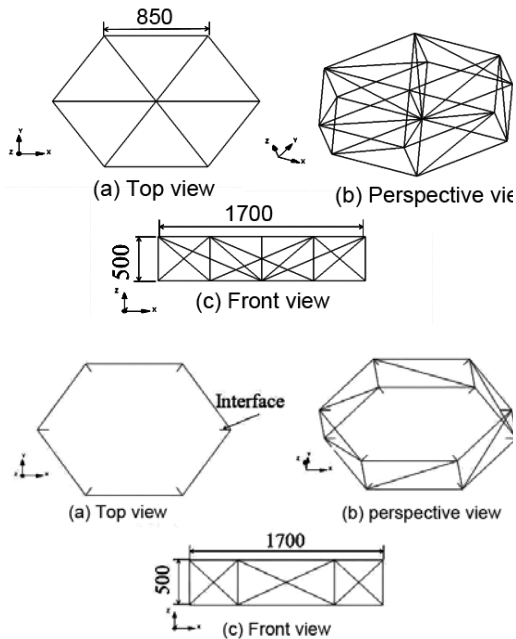


Fig. 3 Optimized supporting frame

物の変形をアンテナ反射鏡面（パラボラ面）に影響を与えない変形（ホモロガス変形）としたホモロジ設計に基づく軽量化を行なった。

支持構造物を構成する部材諸元を Table 3 にそれぞれ示す。ホモロジ設計により最適化された支持構造物に对称性が無いとケーブルネットワーク構造が平衡状態になりにくいいため、構成部材全体を Fig. 4 に示すように対称性を持たせた 8 つのグループに分けて最適化することで、対称性を維持した。

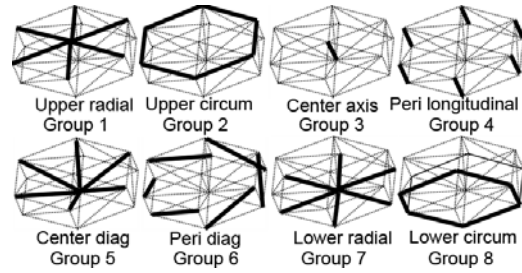


Fig. 4 Structural member groups

Table 3 Aerial, Material Properties

Diameter [mm]	12
Thickness [mm]	1
Material	CFRP
Young's modulus [GPa]	90
Transverse modulus[GPa]	33.1
Density[kg/m3]	$1.76 \times 10^3$

Table 4 に設計変数、制約条件及び目的関数をそれぞれ示す。タイ・ケーブルの初期条件として、すべてのタイ・ケーブルの張力が 3 [N] となるように各タイ・ケーブルの初期長を与えた。このときサーフェス・ケーブルとバック・ケーブルにそれぞれ生じる最低張力をサーフェス・ケーブルとバック・ケーブルの制約条件の下限値とした。最適化計算には汎用最適化支援ソフトウェア Visual DOC/DOT を用いた。

Table 4 Optimization condition

Design parameter	thickness	
Constraint condition	Surface error	< 2.0 [mmRMS]
	Surface cable tension	> 0.098 [N]
	Back cable tension	> 0.098 [N]
Performance index	mass	

(4) 階層モジュラー構造

超大型アンテナ反射鏡面構造の構築に階層モジュラー構造を拡張し、基本モジュール構造の結合により、部分構造から構造物全体の構造特性の把握を可能とし、構造物の運用信頼性を向上を図る。階層モジュラー構造は、基本構造を繰り返し使用するが、基本モジュール構造による反射鏡面の充填効率を向上させる必要がある。パラボラ面を充填できる多角形は、三角形、四角形、六角形等が考えられるが、本研究では、これまで提案されてきたもモジュール構造との違いを明確にするため、基本モジュールの形状を六角形とした階層性モジュラー構造を検討した。

#### 4. 研究成果

##### (1) えぐれ込み形状を与えたネットワーク構造の安定性

えぐれ込み率が大きくなると、サーフェス・ケーブルの張力のばらつきは小さくなるが、Table 5 に示すようにえぐれ込み率が小さい方が小さいタイ・ケーブル張力で安定することが分かる。また、Fig. 5に示すように、鏡面精度を最小にするタイ・ケーブル張力が存在し、えぐれ込み率を安易に設定するべきでないことが分かった。

Table 5 Analysis results

Tie cable initial tension	Edge curvature [%]		
	10	20	30
0.33	slack	slack	slack
0.35	0.26	slack	slack
0.40	0.30	slack	slack
0.50	0.40	slack	slack
0.60	0.49	0.48	slack
0.75	0.63	0.62	slack
1.0	0.87	0.86	0.85
1.5	1.35	1.34	1.33
2.0	1.83	1.82	1.81
3.0	2.79	2.78	2.77

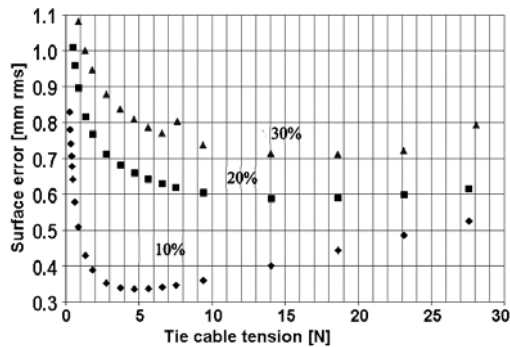


Fig. 5 Influence of the tie cable tension on the surface accuracy

##### (2) 圧縮部材を用いたネットワーク構造の安定性

Fig. 6 には、サーフェス・ケーブルの一部を圧縮部材（ロッド）に変更し、反射鏡面の周辺にはえぐれ込み形状（カテナリ曲線）を

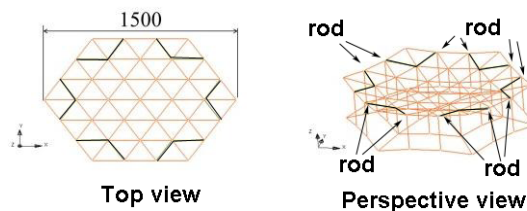


Fig. 6 Composition of the cable network structure with rod members

与えない解析モデルを示す。解析の結果、Table 5 で示した全ての条件において、安定して平衡形状を得られることが分かった。

##### (3) 支持展開構造の軽量化設計法

Table 6、Table 7に逐次2次計画法を用いた最適化前後の全質量、及び鏡面誤差（ベスト・フィット・パラボラからのランダム誤差）および、各設計変数グループの部材厚みを示す。鏡面精度を維持したまま支持構造を軽量化できていることが分かる。支持構造は静定トラス構造を構成しているため、部材には軸力のみが作用し、極めて薄い肉厚で形状が維持できている。今後、下記の点を考慮して検討を進めていく。特に、(2)の検討を行うことで、部材断面とトポロジーの同時最適化を目指す。

- ① 部材強度（材料強度、座屈強度）を考慮する。
- ② 部材本数を減らし、ラーメン構造とした場合、あるいはケーブル材を追加してテンドン構造とした場合を想定する。

Table 6 Results of optimization

Mass [kg]		Surface error [mmRMS]	
Initial	Optimized	Initial	Optimized
3.53	1.37	1.45	1.76

Table 7 Optimized design parameters

Structural member group	Thickness [mm]	
	Initial	Optimized
1	1.0	0.005
2		0.005
3		0.005
4		0.041
5		0.005
6		0.005
7		0.005
8		0.005

##### (4) 階層モジュラー構造

- ① ラジアルリブによる階層モジュラー構造

Fig. 7 に示すように、基本構造を六角形の放射リブ構造とし、自己相似性を保ったまま、世代を進めてスケールを拡大した構造モデルを作成した。構造モデルは平面モデルであり、部材諸元はTable 3と同様とした。また、Fig. 7の下に示すように、世代によらず全体形状に等価な荷重が作用するように、荷重点を部材の端部からオフセットさせた位置に設定している。解析の結果、“階層モジュラー構造物において、荷重条件が等しいと

き、基本モジュール内の軸力の分布は世代によらず一定である”，という岸本の示した結論と同等の結果を得ることができた。

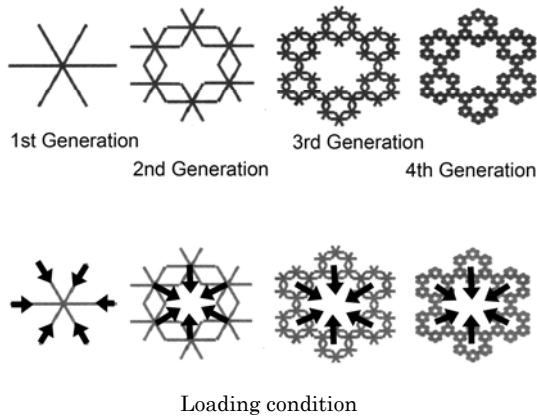


Fig. 7 Hierarchically combined radial rib modules

- ② フープ・リブによる階層モジュラー構造  
基本構造を六角形のフープ・リブ構造とし、自己相似性を保ったまま、世代を進めてスケールを拡大した構造モデルを Fig. 8 に示す。また、Fig. 7 と同様の条件で、世代によらず全体形状に等価な荷重が作用するように、荷重点を部材の端部からオフセットして設定している。また、フープ・リブ構造の場合、隣り合うモジュール間のフープの部材が重なり合う。そこで、Fig. 9 に示すように、これらの部材重複部分を重複したままのモデルと、共有化したモデルの2つのモデルを作成した。解析の結果、下記の結果を得た。
- 放射リブ構造と同様に、荷重条件が等しいとき、基本モジュール内の軸力の分布は世代によらず一定である。
  - 重複部材がある状態でスケールを拡大した構造モデルは、荷重条件が等しいとき、基本モジュール内の軸力の最大値は世代によらず一定である。
  - 重複部材を1本の部材で共有した場合、スケールを拡大した構造モデルは、荷重

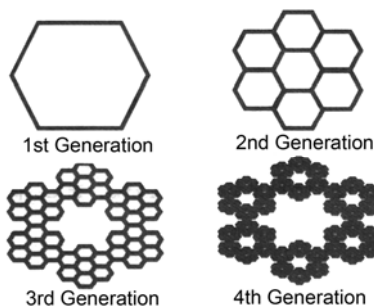


Fig. 8 Hierarchically combined hoop rib modules

条件が等しいとき、基本モジュール内の軸力の最大値は世代が進むごとに上昇する傾向を示す。

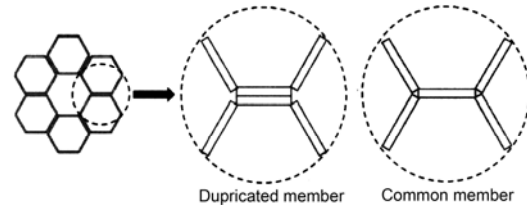


Fig. 9 Adjacent members in each basic module

### ③ 従来のモジュラー構造との比較

従来のモジュラー構造は、例えば、アンテナ反射鏡面を構成する場合に、開口面を最も効率良く充填し構成するため、Fig. 10 に示すように世代を構築している。また、Fig. 9 と同様の条件で、世代によらず全体形状に等価な荷重が作用するように、荷重点を部材の端部からオフセットして設定している。Fig. 10 に示すモデルを用いて解析した結果、下記の結果を得た。

- 自己相似性を持たないモジュール構造の軸力の最大値は世代が進むごとに上昇する。
- 自己相似性を持たないモジュール構造の基本モジュール構造内の軸力分布は自己相似性を持つモジュール構造の基本モジュール構造と比較して大きくなる。

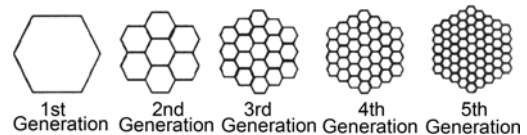


Fig. 10 Current module construction

### (5)まとめ

通信衛星のさらなる高機能化のため、巨大なアンテナ反射鏡面を軽量化、高精度に実現する新たな設計法を検討した結果、下記の結論を得た。

- “ケーブル材料の伸び剛性”，“えぐれ込み率”，“タイ・ケーブルの張力”の3つの特性要因のうち，“えぐれ込み率”と“タイ・ケーブルの張力”を中心にケーブルネットワーク構造の形状安定性への影響を検討した。えぐれ込み率の増加でサーフェス・ケーブルの張力のばらつきは小さくなる

- が、えぐれ込率が小さい方が小さいタイ・ケーブル張力で安定する
- ② 鏡面精度を最小にするタイ・ケーブル張力が存在し、えぐれ込率を安易に設定するべきでない。
  - ③ 反射鏡面の周辺にえぐれ込み形状を与えずに一部のケーブル部材を圧縮部材(ロード等)で構成した場合、安定した平衡形状を得られる。
  - ④ 反射鏡面を構成するケーブル構造を支える支持構造物を、ケーブル構造の張力を維持するという制約条件下で最適化するホモロジ設計を行なった結果、鏡面精度を維持したまま、さらなる軽量化が可能であることが分かった。

また、階層性を持たせた基本モジュール構造の結合により、部分構造から構造物全体の構造特性の把握することが可能か、検討した結果、

- ⑤ 階層モジュール構造の構造特性と自己相似性のないモジュール構造の構造特性を比較し、モジュール構造を階層モジュール構造とすることで、これまでのモジュール構造にない、力学的な相似性を得る可能性を示した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計5件)

- ① 目黒在, 黒川雄大, スケーラブルなアンテナ反射鏡面構造の構成法とその軽量化設計に関する研究, 日本機械学会第20回スペース・エンジニアリング・コンファレンス, 2012/1/21, 秋保リゾートホテルクレセント(宮城)。
- ② 黒川雄大, 目黒在, 階層性を持つ大型アンテナ反射鏡面構造の軽量化及び構造特性に関する研究, 第55回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2011/10/1, 愛媛県民文化会館(愛媛)。
- ③ Takayuki Kanonji, Akira Meguro, A New Design Methodology for Onboard Ultra Light-Weight Cable-Mesh Antenna Reflectors, International Astronautical Congress, 2010年9月28日, Prague, CZ.
- ④ 観音寺貴之, 目黒在, ケーブル構造で構成した衛星搭載用超軽量アンテナ反射鏡面構造の新設計法, 日本機械学会2010年度年次大会, 2010年9月6日, 名古屋工業大学(愛知)

- ⑤ 観音寺 貴之, 目黒 在, 渡邊力夫, ケーブル構造で構成した衛星搭載用アンテナの軽量化設計の検討, 第53回宇宙科学技術連合講演会, 2009年9月9日, 京都大学 吉田キャンパス (京都)

[その他]

ホームページ等

[H s t t p : // w w w . s s l . m s e . t c u . a c . j p /](http://www.ssl.mse.tcu.ac.jp/)

[h t t p : // w w w . e n v e n g . t i t e c h . a c . j p / f u r u /](http://www.enveng.titech.ac.jp/furu/)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

目黒 在 (MEGURO AKIRA)  
 東京都市大学・工学部・教授  
 研究者番号：70513539

##### (2) 研究分担者

古谷 寛 (FURUYA HIROSHI)  
 東京工業大学・総合理工学研究(研究院)・准教授  
 研究者番号：00190166

##### (3) 連携研究者

岸本 直子 (KISHIMOTO NAOKO)  
 独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・招聘開発員  
 研究者番号：60450714