

**Abstract**

本論では、ケーブルメッシュ構造アンテナにおいて求められている形状調整法について、新しい調整法を提案した。

ケーブルメッシュアンテナは、ケーブル剛性および長さが諸値からずれていると、所定の形状から誤差が生じてしまう。しかし、この方法は、従来では調整の難しかった剛性・長さのずれが多少ときにも対応可能である。さらに部材がケーブルだけでなくトラス構造の場合、ローカライズ部材でも対応可能である。この調整法は、従来の方法と比較してかなり良い誤差収束結果を得る事ができた。

**1. 諸言**

近年、宇宙用アンテナにおいて、アンテナの放射特性に対し、高ゲイン化・高周波数帯域化といった要求が高まっている。これらの放射特性への要求は、アンテナ鏡面の大型化・高精度化という形状の要求として現れてくる。例えば、1997年に打ち上げられた電波天文衛星「はるか」では、有効直径8mの開口鏡面を持ちながら、鏡面精度はわずか0.81mmRMSであった。[1]

その一方で、軌道上への運搬能力には制限があり、地上で見られるような剛構造の大型アンテナを軌道上に持ち込むことはできない。そのため、アンテナを展開構造・柔軟構造にする必要があり、メッシュ素材を展開する方式や剛性が高くなる鏡面を精度良く展開する方式のアンテナが開発されている。

これらの大型展開式アンテナは、剛性が低いため、地上重力下での展開実験が難しく、地上での実験的検証が十分には出来ない為に、軌道上では膜面の浮遊や調整ケーブルの絡みなど様々な不具合を起こしてきた。また、張力が作用していても、宇宙で使用する張力のレベルが小さい事により、形状制御が困難になることや、温度環境などの外界の影響を受けやすいなどの特徴があった。

これらの不具合を極力起こさないよう、重力補償装置や落下による微小重力実験が繰り返し行われてきたが、構造が大型・複雑な形状の構造物になると、形状調整が複雑化し、多くの調整時間とコストを生み出している。

一般に、トラス構造（ケーブルトラスを含む）によりアンテナ鏡面を構成する場合、部材の長さや剛性の製造誤差により、鏡面精度が低下する。そこで、ケーブル長さ調整機構を取り付けておき、製造後にケーブル長さを調整する事で鏡面形状を変化させ、必要な鏡面精度を実現する、という方法が考えられてきた。

例えば、Fig1のように、パラボラ鏡面を形成するサーフェスケーブルと、その表面に張られたメッシュ、サーフェスケーブルと対称なバックアップケーブル、

サーフェスケーブルとバックアップケーブルをつなぐタイケーブル、サーフェスケーブルやバックアップケーブル周囲に配置されたエッジケーブル、そして、このケーブルネットワーク装置の周囲に配置された剛な支持構造（サポートトラス）からなるケーブルメッシュアンテナにおいて、タイケーブルの長さを調節する事で鏡面形状を安定させる方法が提案されている。そこでは、タイケーブルの長さ調整の影響が、タイケーブル付近の鏡面節点にローカライズし、遠方の節点への影響が小さくなるよう、ケーブル張力や剛性の設計が成されている。これは、ローカライズできれば、1つ1つの鏡面調節点位置を互いに独立に調整する事が可能となり、形状調節が極めて容易になるからである。

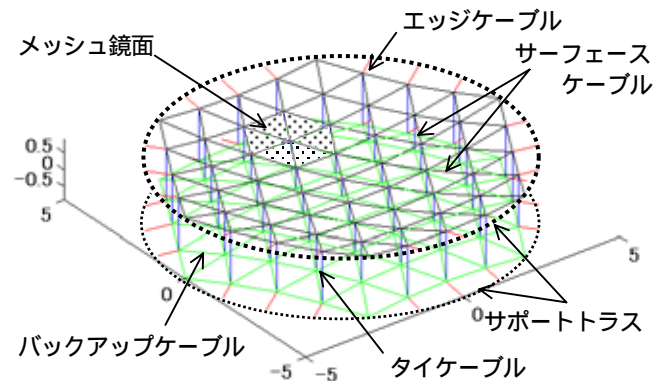
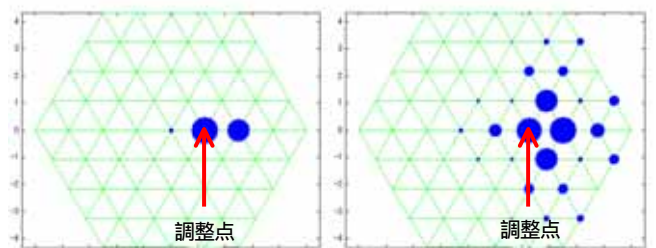


Fig1. アンテナ解析モデル例

ローカライズの影響を示すために Fig2 を示す。Fig2 は 1 つのタイケーブルの長さ変化に対する鏡面節点位置の移動量を表した例である。



(a) 部材張力が大きい場合 (b) 部材張力が小さい場合  
Fig2. タイケーブルの長さ変化による節点位置の移動

(a)は、鏡面ケーブルの張力が大きい場合(歪みが $10^{-1}$ オーダー)、(b)は、張力が小さい(歪みが $10^{-2}$ オーダー)の場合を表している。Fig2に見られるように、各部材張力が小さくなると、タイケーブルの長さ変化が広範囲に他点に影響している事がわかる。これは、部材張力が小さいことにより、各節点を支える面外張力が小さくなることによるものである。各ケーブル節点に働くの面外張力が小さくなると、1つのタイケーブル長さの調整の影

響がより広い範囲に及ぶようになる。したがって、変位がローカライズしなくなる。

つまり、従来の方は、部材張力を大きくし変位をローカライズさせることで、歪の幾何学的な非線形効果を大きくすることにより、ケーブル長さ調整を簡単に行おうというものであった。

しかし、近年要求されている大型アンテナでは、軽量化のため支持構造の剛性を低くせざるを得ず、一方で支持すべきケーブル本数が多くなる、という傾向にある。それゆえ、大型アンテナでは1つのケーブルに付加する張力をより小さくしなければならない。その結果、変位をローカライズさせることができず、従来の簡易な長さ調整法では十分な形状調整が困難となっている。その結果、必要な鏡面精度を得るための形状調整回数が多くなり、多大な労力を要するようになってしまっている。そのため、構造形状を調節するためのより合理的なツールが求められている。

## 2. 目的

ケーブルメッシュ構造では、ケーブル剛性および長さが設計値からずれていると、所定の形状から誤差が生じてしまう。そこで本研究では、ケーブルメッシュ構造のケーブル長さを調節する事で形状を調整する新しい方法を提案する。

この方法は、従来では調整の難しい剛性・長さのずれが多いときにも対応可能である。また、部材が圧縮剛性を持つトラス構造の場合にも対応可能で、従来の方よりも誤差収束が速くなる調整方法である。

## 3. 解析対象

本論文では、Muses-B(はるか)やETS- に見られるような、三角形要素の六角形モジュールから成るケーブルメッシュアンテナの例として、1節のFig1に示したケーブルネットワーク構造について形状調整法を提案し、数値実験の例により、その妥当性を示す。

### 3.1 問題設定

- 部材長誤差や剛性誤差については、設計値を基準に正規分布で与える事とする、また設計値からの最大許容誤差を与える。
- 各節点の3次元位置は、既知(測定可能)とする。
- 位置情報を用いて長さ誤差・剛性誤差を推定し、それに基づいて、目標とする鏡面形状を達成するような、タイケーブルの長さ調整量を決定する。そして、長さ調整を行う。(部材剛性は調節できないものとする。)

## 4. 形状調整手法

### 4.1 調整の流れ

まず、ケーブルの変形前の長さや剛性の設計値を、そ

れらの推定値として出発し、以下に示す調整を行う。

#### Step1 ノード位置の測定

地上試験を行う場合には、カメラ等で節点位置を測定する事になるが、ここでは数値実験として、非線形有限要素法により、節点位置を求める。

#### Step2 ケーブルの変形前の長さや剛性の推定値の更新

測定した観測点の位置をもとに平衡方程式を解き、ケーブル変形前の長さや剛性の推定値を更新する。

#### Step3 目標形状の決定

理想パラボラ面を目標形状として、鏡面節点の目標位置を決定する。

#### Step4 ケーブルの調整量の決定

タイケーブル調整量のみを調節できるものとして、鏡面節点を目標位置に移動させるため、調整量を算出する。

#### Step5 調整の実行

求めた調整量より、タイケーブル長さを変化させる。

Step1~Step5を繰り返すことで、ノード位置を目標位置に近づけていく。

## 4.2 部材の変形前の長さや剛性の推定

ケーブル剛性を  $EA_i$ 、ケーブル張力を  $T_i$ 、部材の変形前の長さを  $L_i$ 、部材の変形後の長さを  $\ell_i$  とすれば、部材の張力  $T_i$  は、

$$T_i = \frac{EA_i}{L_i} (\ell_i - L_i) \quad (1)$$

と書くことができる(ただし、 $i$  は部材番号)。ここで、

$$\mathbf{T} = [T_1 \quad T_2 \quad \dots \quad T_m]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{k} = [EA_1 \quad EA_2 \quad \dots \quad EA_m]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{L} = [L_1 \quad L_2 \quad \dots \quad L_m]^T \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\ell} = [\ell_1 \quad \ell_2 \quad \dots \quad \ell_m]^T \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} \frac{EA_1}{L_1} & \frac{EA_2}{L_2} & \dots & \frac{EA_m}{L_m} \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

(ただし  $m$  は部材数) とおくと、

$$\mathbf{T} = \text{diag}(\boldsymbol{\ell}) \boldsymbol{\eta} - \mathbf{k} \quad (7)$$

と書け、各ノードのアンテナ鏡面の平衡方程式は、次のように書くことができる

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\eta}, \mathbf{k}) \equiv \mathbf{B}\mathbf{T} = \mathbf{0} \quad (8)$$

ただし、 $\mathbf{B}$  はケーブルの連結パターンを表す行列である。

本研究では、 $\mathbf{L}$  と  $\mathbf{k}$  を直接推定するのではなく、 $\boldsymbol{\eta}$  と  $\mathbf{k}$  の推定を行い、そこから  $\mathbf{L}$  を算出している。以下、 $(\hat{\cdot})$ : 推定値、 $(\widehat{\cdot})$ : 実測値 とする。

$\boldsymbol{\eta}$  と  $\mathbf{k}$  の推定値の更新量をそれぞれ  $\Delta\boldsymbol{\eta}$ 、 $\Delta\mathbf{k}$  とおくと、これらは次式から求めることができる。

$$\mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}, \boldsymbol{\eta}^* + \Delta\boldsymbol{\eta}, \mathbf{k}^* + \Delta\mathbf{k}) = \mathbf{0} \quad (9)$$

ここで、

$$\Delta \boldsymbol{\eta} = \text{diag}(\boldsymbol{\eta}^*) \boldsymbol{\varepsilon}_\eta \quad (10)$$

$$\Delta \mathbf{k} = \text{diag}(\mathbf{k}^*) \boldsymbol{\varepsilon}_k$$

とにおいて、(9)式を整理すると  $\Delta \boldsymbol{\eta}$ 、 $\Delta \mathbf{k}$  に関する次のような線形方程式を得る。

$$\mathbf{W} \Delta \mathbf{Z} = -\mathbf{f} \quad (11)$$

$$\mathbf{W} = \left[ \hat{\mathbf{B}} \text{diag}(\hat{\boldsymbol{\ell}}) \text{diag}(\boldsymbol{\eta}^*) \quad \hat{\mathbf{B}} \text{diag}(\mathbf{k}^*) \right] \quad (12)$$

$$\Delta \mathbf{Z} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_\eta \\ \boldsymbol{\varepsilon}_k \end{pmatrix} \quad (13)$$

式(11)の解として

$$\Delta \mathbf{Z} = -\mathbf{W}^+ \mathbf{f} \quad (14)$$

を採用する。(  $\mathbf{W}^+$  は  $\mathbf{W}$  の Moore-Penrose 一般化逆行列である。) 次に、(14)式で得られた  $\boldsymbol{\varepsilon}_\eta$ 、 $\boldsymbol{\varepsilon}_k$  を用いて、 $\mathbf{k}$  の推定値を更新する

$$\boldsymbol{\eta}^* = \left[ \mathbf{I} + \text{diag}(\boldsymbol{\varepsilon}_\eta) \right] \boldsymbol{\eta}^* \quad (15)$$

$$\mathbf{k}^* = \left[ \mathbf{I} + \text{diag}(\boldsymbol{\varepsilon}_k) \right] \mathbf{k}^*$$

最後に、 $\boldsymbol{\eta}$  と  $\mathbf{k}$  を推定量としたのは以下の通りである。  
 ・  $\mathbf{k}$  を推定量とすることで、剛性の製造誤差を推定できるだけでなく、ケーブルのたわみも推定する事が可能となる。

・ 推定値を更新する方程式が、(11)式のように更新量に関して線形になる。

### 4.3 目標形状の決定

Fig3 のように、鏡面節点位置が理想鏡面からずれている場合、節点位置からパラボラ軸に平行に伸ばした直線とパラボラ面との交点を目標節点位置とする。

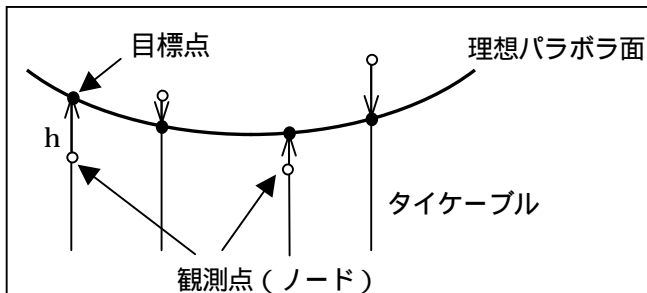


Fig3. 観測点と目標パラボラとの誤差

### 4.4 調整量の決定

従来は、タイケーブルの長さを変化させて鏡面節点を移動させるのに、タイケーブルの長さ調整量  $\Delta L$  を

$$\Delta L = \Delta h \times w \quad (16)$$

とする単純な方法であった ( $w$  は経験による)。これは、長さ調整は、遠方節点に影響を与えないと考えたからであった。

一方、本論では、以下のような調整法を提案する。

まず、(8)式における平衡方程式  $\mathbf{f}$  のうち、調整することのできる (タイケーブルの接続されている) 点に関する釣り合い方程式を抜き出したものを  $\mathbf{f}_{target}$  とする。

$$\mathbf{f}_{target} = \mathbf{f}_t(\mathbf{x}_t, \mathbf{x}_o, \boldsymbol{\eta}_a, \boldsymbol{\eta}_o, \mathbf{k}_o) \quad (17)$$

ここで、添字  $t$  は調節可能、 $o$  は調整する事のできない量、 $a$  は、実際に調整する量である。ここでは、ケーブル剛性は後から調節する事はできないので、調節できる要素としては考えない事にする。

前節で決定した目標節点の位置を  $\mathbf{x}_p$  とすれば、 $\boldsymbol{\eta}$  の調整量  $\Delta \boldsymbol{\eta}$  は、次式を解くことで求められることになる。

$$\mathbf{f}_{target} = \mathbf{f}_t(\mathbf{x}_p, \hat{\mathbf{x}}_o, \boldsymbol{\eta}_a^* + \Delta \boldsymbol{\eta}_a, \boldsymbol{\eta}_o^*, \mathbf{k}^*) = \mathbf{0} \quad (18)$$

ここで、調整量を

$$\Delta \boldsymbol{\eta}_a = \text{diag}(\boldsymbol{\eta}_a^*) \boldsymbol{\varepsilon}_a \quad (19)$$

とにおいて、(18)式を整理すると、 $\boldsymbol{\varepsilon}_a$  に関する次のような線形方程式を得る。

$$\mathbf{C} \boldsymbol{\varepsilon}_a = -\mathbf{f}_t(\mathbf{x}_p, \hat{\mathbf{x}}_o, \boldsymbol{\eta}_a^*, \boldsymbol{\eta}_o^*, \mathbf{k}^*) \quad (20)$$

$$\text{ただし、} \mathbf{C} = \left[ \mathbf{B}_t \text{diag}(\boldsymbol{\ell}) \quad \text{diag}(\boldsymbol{\eta}_a^*) \right] \quad (21)$$

これより、

$$\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_a = -\mathbf{C}^+ \mathbf{f}_{target} \quad (22)$$

(  $\mathbf{C}^+$  は  $\mathbf{C}$  の Moore-Penrose 一般逆行列.)

### 4.5 調整の実行

長さ調節により  $\boldsymbol{\eta}_a$  の推定値は次のように更新される。

$$\boldsymbol{\eta}_a = \boldsymbol{\eta}_a^* + \Delta \boldsymbol{\eta}_a = \left[ \mathbf{I} + \text{diag}(\boldsymbol{\varepsilon}_a) \right] \boldsymbol{\eta}_a^* \quad (23)$$

また、実際のケーブル長さは、次のように調整される。

$$\hat{\mathbf{L}}_a = \hat{\mathbf{L}}_a + \Delta \hat{\mathbf{L}}_a$$

$$\Delta \hat{\mathbf{L}}_{ai} = -\frac{\Delta \eta_{ai}}{\Delta \eta_{ai} + \frac{EA_i^*}{L_{ai}^*}} \hat{L}_{ai} \quad (24)$$

## 5. 計算例

### 5.1 アンテナモデル仕様

アンテナモデルの仕様は Table1 の通りである。

Table1. アンテナ仕様

最大アンテナ直径	10000mm
最大アンテナ口径	8600mm
サーフェスケープル数	156
エッジケーブル数	18
タイケーブル数	57
サーフェスケープル長	約1000mm
要素面形状	三角形
要素面数	96
誤差の標準偏差	0.01

### 5.2 結果および考察

以下に、部材張力が大きい場合と小さい場合、ケーブル長誤差の大きい場合と小さい場合、部材が圧縮剛性を

もつ場合について、それぞれ従来の方法と現在の方法とで調整を行い、比較する。

まず Fig4 は、従来の方法と提案する方法のそれぞれについて、形状誤差（鏡面節点位置の目標位置からのずれの最大値を無次元化したもの）と調整回数とを比較したものである。また、Fig5 は、Fig4 の場合に比べて張力を 1/10 にした場合の結果を表している。

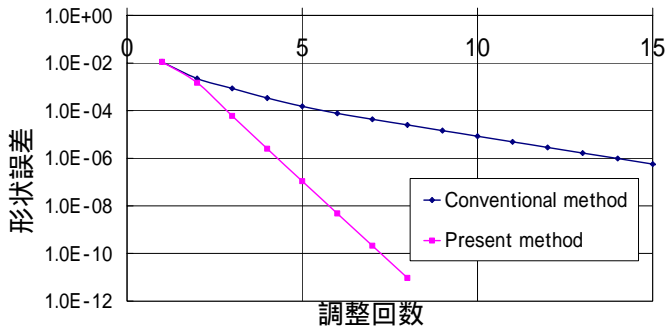


Fig4.部材張力が大きい場合の誤差収斂の推移

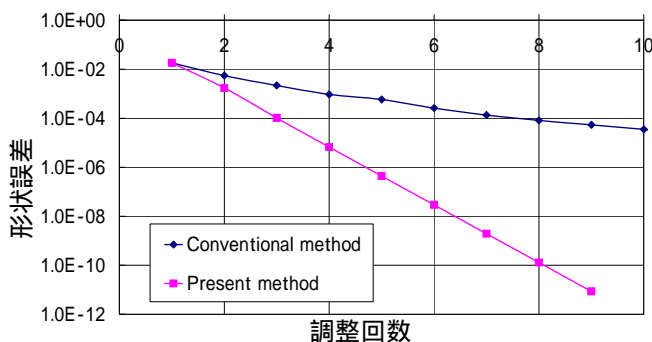


Fig5.部材張力が小さい場合の誤差収斂の推移

Fig4、Fig5 より、部材張力が大きい場合と小さい場合では、従来の方法と今回の方法共に、張力が大きい場合の方が誤差の収斂が早く、調整回数が少なくて済むことが解かる。

Fig6. は部材が、圧縮剛性を持つ場合の形状誤差の推移を示している。

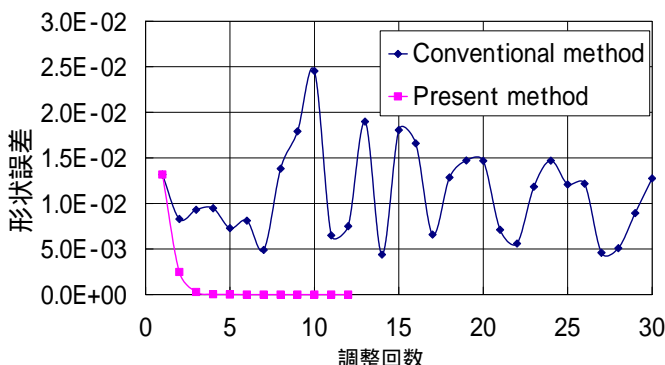


Fig6.部材が圧縮剛性を持つ場合の誤差収斂の推移

この図からわかる通り、部材が圧縮剛性を持つ場合には、従来の方法では誤差量が収束しない。

次に、Fig7 に部材長誤差が多分に含まれうる場合と、誤差を少なくした場合の誤差の収束を示す。

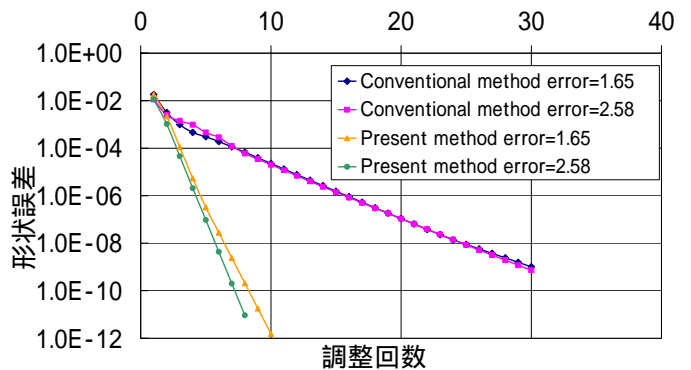


Fig7.部材誤差が大きい場合の誤差収斂の推移

この図からわかる通り、従来の方法では、部材長誤差の影響はほとんど考慮されないが、今回の方法では、部材長誤差が少ないほど形状誤差の収束は良いことがわかる。また、誤差収束も従来の方法よりも良い結果が得られた。

また Fig4 ~ 7 より、従来の方法よりも今回の方法のほうが調整回数が少なくて済み、ケーブルの調整回数は少なくて済むことがわかる。以上の結果より、次のことが言える。

#### 従来の方法

- ・部材張力が小さい場合、形状は目標形状に収斂するが、調整回数は多い。
- ・部材張力が大きい場合、部材張力が小さい場合よりも調整回数が少なくて済み、誤差収斂も部材張力が小さい場合と比べると速い。
- ・部材が圧縮剛性を持つ場合は誤差が収斂しない。

#### 今回の調整法

- ・部材張力が大きい場合であれば、従来の方法と同様に形状誤差を理想鏡面へ調節できる。従来の方法と比べると収斂は速く、調整回数は少なくて済み。誤差量は従来の調整法より減少している。
- ・部材張力が小さい場合でも、従来の方法よりも誤差を収斂はでき、調整回数は少なくて済み。
- ・部材長の誤差が多い場合であっても、収斂は早く調整回数も少なくて済み。また、誤差量も従来の方法より減少させることができる。

以上より、今回の調整法では、従来の方法よりも誤差を収斂させることができ、計算回数も少なくて済むことがわかる。

#### 6. 結言

今回提案した調整方法について、従来では調整の難しい部材長さの誤差が多いときや、部材が圧縮剛性を持つケーブル（トラス構造の場合）にも対応可能であることが解かった。また、この方法は従来の調整方法より誤差収斂が速く、部材の調整回数が少なくすることができる。

#### 7. 参考文献

- [1] 名取道弘、「宇宙用アンテナの放射特性に及ぼす機械的形状制御の影響」