E1 ケーブルメッシュアンテナの形状調整法に関する研究

Study on shape adjustment of cable-mesh antenna

平城 雅隆*1 (富士重工)

○正 宮崎 康行 (日大)

Masataka HIRAJI, Fuji Heavy Industry

Yasuyuki MIYAZAKI, Nihon University, 7-24-1 Narashinodai, Funabashi, Chiba

The present study addresses shape adjustment of cable-mesh parabolic antennas in which the boundaries are supported by rigid structures and the nodal points of the cable network are tied by support cable network. In the conventional design of the cable-mesh antenna, it has been adopted that the cable stiffness of the support cable network is rather high compared with that of the antenna surface. This design realizes the localization of effect of the change of the cable length on the deformation of the antenna surface. This feature enables us to adjust the nodal position of the surface only by changing the adjacent cables. The present study proposes a shape adjustment method that is available for the cable-mesh antennas where the deformation is not localized.

Key words: shape adjustment, cable network, parabolic antenna

1. はじめに

近年、衛星搭載アンテナには高ゲイン化・高周波数帯域化といった要求が課せられてきており、これらはアンテナ鏡面の大型化・高精度化という構造要求に反映されてきている。軌道上への運搬能力の制限の元でこれらの要求を満たす構造様式の1つとして、ケーブルネットワークと金属メッシュから成る展開型のパラボラアンテナが用いられている。このようなケーブル・メッシュアンテナの形状精度は部材の長さや剛性の製造誤差の影響を受け、最悪の場合、ケーブルのたるみを生じてしまうため、ケーブル長さの管理が重要となる。そこで、地上試験において、ケーブル長さを調整することでアンテナ鏡面を所定の形状にすることが行なわれてきた。例えば、Fig. 1のように①パラボラ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膜面、②サーフェスケーブルとほぼ対象なバックアップケーブル、③サーフェスケーブルとバックアップケーブルをつなぐ体ケーブル、④サーフェスケーブルやバックアップケーブルの周囲に配置されたエッジケーブル、⑤そして、これらケーブルメッシュを支持し、自己平衡張力を維持させるための剛なサポート構造から成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整することで鏡面形状の要求精度を達成する方式が提案されている。その際、サーフェスケーブルおよびタイケーブルの長さ変化の影響がそのケーブル

付近のノード(ケーブルネットワークの格子点)に局所化され、遠方のノードへの影響が小さくなるようにケーブル張力や剛性を設計することも提案されている。これは、形状変化を局所化できれば、サーフェスケーブルの製造誤差による鏡面精度低下をより小さくでき、かつ、タイケーブルの長さ調整によって個々のノード位置を互いにほぼ独立に制御することが可能となり、形状調整が極めて容易になるからである。そのような設計の最も簡単な方法の1つとして、タイケーブルに比べてサーフェスケーブルの歪をより大きくし、かつ、剛性をより低くするという方法がある。

Fig. 2 Effect of surface strain on sensitivity of surface cable length to nodal deviation

Fig. 2(a)は、Fig. 1のモデルについて、矢印で示したケーブルの長さ変化に対する鏡面ノードの変位の感度を黒い円の大きさで表したものである(円の半径が感度の対数値に対応し、半径は感度が最大となるノードの感度で正規化されている)。この例では、サーフェスケーブルの歪の水平成分(パラボラ軸に垂直な成分)を0.01としてある。図からわかる通り、サーフェスケーブルの長さ変化の影響はそのケーブルの両端のノードにほぼ局所化されている。これに対し、Fig. 2(b)はサーフェスケーブルの歪の水平成分を0.0001とした場合の感度を示している。この場合、感度はあまり局所化されておらず、ケーブルの長さ変化の影響がより遠方のノードにまで及んでしまっている。

Fig. 3(a)は、矢印で示したノードに取り付けられているタイケーブルの長さ変化に対する鏡面ノードの変位感度を表したものである。この例では、サーフェスケーブルの剛性をタイケーブルの1/100倍にしてある。図からわかる通り、タイケーブルの長さ変化の影響は局所化されている。これに対

Fig. 1 Antenna model

*1: 元・日大院

し、剛性をタイケーブルの 100 倍にした場合、Fig. 3(b)のように、影響が局所化されていない。

Fig. 3 Effect of surface cable stiffness on sensitivity of tie cable length to nodal deviation

この設計法では、サーフェスケーブルの歪を大きくし、かつ、剛性を低くすることで、ケーブルの長さ変化による鏡面の変位を局所化している。一般に、反射面としての鏡面精度を維持するには、鏡面ノードの位置をパラボラ軸方向、すなわち、タイケーブル方向にのみ調整すれば十分である。したがって、変位の局所化ができていれば、各々の鏡面ノード位置の移動は、そのノードにつながった 1 本のタイケーブルの長さを調整するだけで、他の鏡面ノード位置の変位を伴うことなく、独立に行なうことが可能となる。しかし、アンテナがより大型化すると、重量の制限からサポート構造部の剛性をより低くせざるを得なくなり、一方で、支持すべきケーブルの本数は多くなる。それゆえ、個々のケーブルの張力をより低くする必要があり、サーフェスケーブルの歪を大きくするためには、剛性をより低くする必要がある。しかし、ケーブルネットワーク部全体としても必要な剛性を持つ必要がある。サーフェスケーブルの剛性を低くすることには限界がある。それゆえ、鏡面の変形を局所化することがより難しくなり、1つのタイケーブルの長さ調整がより広範囲のノードの変位を引き起こすことになる。したがって、上記のようなタイケーブル長さを独立に調整する簡易的な方法では鏡面形状を思い通りに調整できず、その結果、必要な鏡面精度を得るための形状調整作業の増加を招くことになる。それゆえ、より少ない作業量で形状調整を完了できるよう、よりの確な長さ調整量を与える方法が望まれている。

そこで、本小論ではケーブル長さの変化に対してノードの変位が局所化されない場合や、剛性・ケーブル長さの製造誤差が大きい場合でも収斂性の高い形状調整法を提案する。

2. 問題設定

本小論では、Fig. 1 に示したケーブルメッシュアンテナモデルについて、タイケーブルの長さを変化させることによる鏡面形状調整法について考える。ただし、簡単のため、メッシュ膜面の影響は無視する。そこで、以下のように問題を設定する。

- (1) ケーブルの長さ誤差及び剛性誤差を、適当な許容最大誤差の元で、正規分布により与える。
- (2) ケーブルの長さおよび剛性の設計値を、それらの最初の推定値とする。
- (3) 以下の手順に従って形状調整を行なう。
 - 1) ノード位置の測定
地上試験の場合にはカメラ等で 3 次元位置を測定することになるが、ここでは数値実験として、非線形有限要素法によりノード位置を求める。
 - 2) ケーブルの変形前の長さおよび剛性の推定値の更新
測定したノード位置を元に平衡方程式を解き、ケー

ブルの変形前の長さおよび剛性の推定値を求める。

- 3) 目標形状の決定
測定した鏡面ノード位置を、理想パラボラ面のパラボラ軸方向に投影し、理想パラボラ面と交わった点を鏡面ノードの目標位置とする。
 - 4) ケーブル調整量の決定
タイケーブルのみ長さを調整できるものとして、鏡面ノードを目標位置まで移動させるためのケーブル調整量を算出する。
 - 5) 調整の実行
算出した調整量に従って、タイケーブルの変形前長さを変化させる。
- (3) 鏡面形状精度が所定のレベルに達するまで(2)の形状調整を繰り返す。

3. 形状調整方法

前節で示した形状調整手順について、以下に詳しく述べる。

3.1. ケーブルの変形前長さおよび剛性の推定

ケーブル番号 i のケーブルの剛性を EA_i 、変形前長さを L_i 、変形後の長さを ℓ_i とすれば、ケーブルの張力 T_i は次式で与えられる。

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

ここで、ケーブル数を m として、

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

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

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

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

$$\boldsymbol{\eta} = \left[\frac{EA_1}{L_1} \ \frac{EA_2}{L_2} \ \cdots \ \frac{EA_m}{L_m} \right]^T \quad (6)$$

と定義すると、

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

と書け (ただし、 $\text{diag}(\boldsymbol{\eta})$ はベクトル $\boldsymbol{\eta}$ の各成分を対角に並べた対角行列)、各ノードの平衡方程式は次式のように書ける。

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

ただし、 $\mathbf{x}$ はノードの変形後の位置を表す。また、 $\mathbf{B}$ はノードとそれに連結されたケーブルとの関係を表すブーリアン行列である。

本研究では、ケーブル長 $\mathbf{L}$ と剛性 $\mathbf{k}$ を直接推定するのではなく、 $\boldsymbol{\eta}$ と $\mathbf{k}$ の推定をまず行い、その結果から $\mathbf{L}$ を算出する。以下、推定量には右肩添え字 * を、観測量には上添え字 ^ を付けることにする。

$\boldsymbol{\eta}$ と $\mathbf{k}$ の推定量の更新量をそれぞれ $\Delta\boldsymbol{\eta}^*$ 、 $\Delta\mathbf{k}^*$ とすれば、これらは次式を解くことで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、

$$\Delta\boldsymbol{\eta}^* = \text{diag}(\boldsymbol{\eta}^*)\boldsymbol{\epsilon}_\eta, \quad \Delta\mathbf{k}^* = \text{diag}(\mathbf{k}^*)\boldsymbol{\epsilon}_k \quad (10)$$

とにおいて、式(9)を整理すると、 $\boldsymbol{\epsilon}_\eta$ と $\boldsymbol{\epsilon}_k$ に関する次のような線型方程式を得る。

$$\mathbf{W}\boldsymbol{\epsilon} = -\mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}, \boldsymbol{\eta}^*, \mathbf{k}^*) \quad (11)$$

ただし、

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

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_\eta \\ \varepsilon_k \end{bmatrix} \quad (13)$$

ここで、式(11)の解として、

$$\varepsilon = -W^{-1} f(\hat{x}, \hat{\eta}^*, \hat{k}^*) \quad (14)$$

を採用する。ただし、 W^{-1} はMoore-Penrose一般化逆行列である。そして、式(14)で得られた ε_η と ε_k を用いて、 η と k の推定量を更新する。

$$\eta^* \leftarrow [I + \text{diag}(\varepsilon_\eta)] \eta^*, \quad k^* \leftarrow [I + \text{diag}(\varepsilon_k)] k^* \quad (15)$$

(ただし、 I は単位行列)。

最後に、 L と k のペアではなく、 η と k のペアを推定量としたのは、これらを推定量とすることで、式(8)にある通り、平衡方程式がこれらの線形量となる。その結果、推定値を更新するための式は線形方程式となり、収束計算を必要としない。

3.2. 目標形状の決定

2節でも述べた通り、鏡面ノードの位置が理想パラボラ面からずれている場合、ノード位置からパラボラ軸に平行に延ばした直線と理想パラボラ面との交点を目標位置とする。したがって、Fig. 4の Δh が目標とする移動量となる(例えば地上試験を想定した形状調整の場合、理想パラボラ面ではなく、重力の影響を考慮した鏡面形状を目標鏡面とするべきであるが、ここでは形状調整法の評価を行なうことが目的であるので、簡単のため、目標形状を理想パラボラ面とする)。

Fig. 4 Position error from ideal parabolic surface

3.3. ケーブル調整量の決定

1節で述べた簡易調整法、すなわち、鏡面ノード位置を独立に調整する方法とは、タイケーブルの長さ調整量 ΔL を

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

とするものであった(w は調整者の経験に依存)。

一方、本小論では以下のような調整法を提案する。

まず、式(8)の平衡方程式のうち、位置を調整したいノード(今回の場合、鏡面ノード)に関する式を抜き出したものを f_{target} とする。

$$f_{target} = f_t(x_t, x_o, \eta_a, \eta_o, k_o) \quad (17)$$

ただし、添え字 t は位置を調整するノードに関する量、添え字 o は調整しない量、添え字 a は調整するケーブルに関する量を意味する。一般にケーブル剛性は調整不可能であるから、この式にある通り、調整しない量とする。

さて、前節で求めた鏡面ノードの目標位置を x_p とすれば、 η_a の調整量 $\Delta \eta_a$ は、次式を解くことで求められる。

$$f_{target} = f_t(x_p, \hat{x}_o, \hat{\eta}_a^* + \Delta \eta_a, \hat{\eta}_o^*, \hat{k}^*) = 0 \quad (18)$$

ここで、調整量を

$$\Delta \eta_a = \text{diag}(\eta_a^*) \varepsilon_a \quad (19)$$

とおいて、式(18)を整理すると、 ε_a に関する次のような線形方程式を得る。

$$C \varepsilon_a = -f_t(x_p, \hat{x}_o, \hat{\eta}_a^*, \hat{\eta}_o^*, \hat{k}^*) \quad (20)$$

ただし、

$$C = [B_t \text{diag}(\ell) \quad \text{diag}(\eta_a^*)] \quad (21)$$

これより、

$$\varepsilon_a = -C^{-1} f_t(x_p, \hat{x}_o, \hat{\eta}_a^*, \hat{\eta}_o^*, \hat{k}^*) \quad (22)$$

ただし、 C^{-1} は C のMoore-Penrose一般化逆行列である。

3.4. 調整の実行

長さ調節により、 η_a の推定値 η_a^* は次のように更新される。

$$\eta_a^* \leftarrow \eta_a^* + \Delta \eta_a = [I + \text{diag}(\varepsilon_a)] \eta_a^* \quad (23)$$

この更新は、ケーブルの変形前の長さを調整することにより実現する。したがって、ケーブル長さの調整量を ΔL と書くと、次式が成り立つ(ケーブル番号を表す添え字 i は省略)。

$$\frac{EA_a^*}{L_a^* + \Delta L_a} = \frac{EA_a^*}{L_a^*} (1 + \varepsilon_a) \quad (24)$$

また、ケーブル長さの推定量は

$$L_a^* = \frac{k_a^*}{\eta_a^*} \quad (25)$$

であるから、ケーブル調整量は次式で求められる。

$$\Delta L_a = -\frac{\varepsilon_a}{1 + \varepsilon_a} \cdot \frac{k_a^*}{\eta_a^*} \quad (26)$$

そして、この調整により、ケーブル長ベクトルの真値は次のように変化する。

$$L_a \leftarrow L_a + \Delta L_a \quad (27)$$

4. 計算例

前節で述べた形状調整法によって Fig. 1 のモデルの形状調整を行なった例を以下に示す。

4.1. モデルパラメータ

アンテナを形成する正六角形の一辺の長さを5、焦点距離を5、鏡面パラボラとバックアップパラボラとの距離を0.5、ケーブルネットによる正六角形の一辺の分割数を4とする(Fig. 1の通り)。また、サーフェスケーブルの歪の水平方向成分を ε_s 、タイケーブルとサーフェスケーブルその他のケーブルの剛性の比を γ 、ケーブル長さの誤差(設計値に対するずれの割合)の標準偏差を σ_L 、ケーブル剛性の標準偏差を σ_K とし、これらのパラメータが形状調整に与える影響について調べる。なお、誤差は正規分布で与え、許容値をそれぞれ $2\sigma_L$ および $2\sigma_K$ とした。また、結果を3.3節で述べた簡易調整法と比較する際、式(16)で $w=1.0$ とした。有限要素法により形状を算出する際、たるんでいるケーブルについては、本来なら圧縮剛性を0とすべきであるが、その場合、系が不安定構造になると解を得ることができないので、便宜上、圧縮剛性を引張剛性の 10^{-6} 倍とした。

4.2. サーフェスケーブルの歪の影響

まず、剛性比を $\gamma=0.01$ 、標準偏差を $\sigma_L=\sigma_K=0.01$ とした

場合について、鏡面誤差に対するサーフェスケープルの歪 ε_s の影響を調べた一例を Fig. 5 に示す。図において、“present”が前節で提案した手法を、“simple”は簡易調整法を意味する。鏡面誤差はケーブルネットワークの1セグメントの長さで無次元化してある。この図では $\varepsilon_s = 0.01$ と $\varepsilon_s = 0.0001$ の2つの場合について誤差をプロットしてある。どちらの場合も、 ε_s が小さい方が収斂性が悪くなっているが、これはケーブル長さ変化に対する変位が十分に局所化されていないためである。また、提案する方法の方が簡易調整法よりも非常に収斂性が高いことがわかる。なお、総ケーブル数403本のうち、ケーブルのたるみは、 $\varepsilon_s = 0.01$ の場合は6本、 $\varepsilon_s = 0.0001$ の場合には72本であった。

Fig. 5 Effect of surface strain

4.3. 製造誤差の影響

アンテナ鏡面の形状精度は、製造時のケーブル長さおよびケーブル剛性のばらつきの他、ノードで複数のケーブルを結合する際の偏心、鏡面の周辺のサポート構造物の寸法誤差・取り付け誤差による鏡面の支持位置のずれにより低下する。そこで、これらの影響を全てケーブル長さおよびケーブル剛性のばらつきで代用することにし、誤差の標準偏差が $\sigma_L = \sigma_K = 0.1$ と非常にばらつきが大きい場合について形状調整した結果を Fig. 6 に示す（図には $\sigma_L = \sigma_K = 0.01$ の場合の調整結果も比較のため示してある）。この例では、サーフェスケープルとタイケーブルとの歪の比を $\gamma = 0.01$ 、サーフェスケープルの歪の水平成分を $\varepsilon_s = 0.01$ としてある。

Fig. 6 Effect of deviation of length and stiffness

当然のことながら、ばらつきが大きいと、必要な形状精度を得るのに必要な形状調整回数は増加する。特に、初期の調整では精度はそれほど向上しない。しかし、提案する方法では調整回数が10回を過ぎてから精度の向上が明確に現れている。Fig. 7は $\sigma_L = \sigma_K = 0.1$ の場合の形状調整回数とたるんだケーブルの本数との関係を示している。調整前は総ケーブル数403本のうち98本がたるんだ状態にあったが、提案する方法では、形状調整の初期段階ではケーブル長さや剛性の推定が不十分であることによりケーブルのたるみが増加している。このため、Fig. 6のように誤差の収斂が遅いが、調整が10回を過ぎたところからたるんだケーブルの本数が一定となり、これにより調整がうまくいったものと考えられる。これに対し、簡易調整法の場合、Fig. 7に示す通り、たるんだケーブルの本数自体は単調に減少しており、Fig. 6に示す通り、誤差の収斂自体は遅いが形状精度は徐々に向上している。なお、 $\sigma_L = \sigma_K = 0.01$ の場合には、総ケーブル数403本のうち、たるんだケーブルの本数は8~9本であった。

Fig. 7 Number of slack cables

4.4. ケーブル長さおよび剛性の予測

提案する方法では形状調整の成否とは別に、ケーブル長さや剛性の推定の成否についても確認する必要がある。そこで、 $\gamma = 0.01$ 、 $\sigma_L = \sigma_K = 0.01$ の場合について、誤差（推定値と真値との差を真値で割ったもの。ただし、たるんだケーブルについては、引張剛性で割ったものとした）を Table 1 に示す。サーフェスケープルの歪成分 ε_s が小さいと、推定精度は悪化する。また、たるんだケーブルについては推定がうまくいっていない（値が1付近であるということは、たるんでいるはずのケーブルをたるんでいないと推定していることを意味する）。したがって、提案する方法では、ケーブルのたるみは推定できていない中で、強引に形状を調整していることがわかる。

Table 1 Estimation error

ε_s	length	stiffness	stiffness (slack cable)	Number of slack cables
0.01	0.0152	0.0269	1.01	9
0.001	0.0267	0.0264	1.02	95

4.5. 圧縮剛性の影響

これまででは、ケーブルネットワークの形状調整について考えたが、参考として、圧縮剛性を持ったトラスについて形状調整をした一例を Fig. 8 に示す。ただし、 $\gamma = 0.01$ 、 $\sigma_L = \sigma_K = 0.01$ とした。この例では、トラスの場合、簡易調整法では調整がうまくいっていないのに対し、提案する手法ではケーブルの場合と同様の収斂性が確認できる。

Fig. 8 Effect of compressive stiffness

4.6. ケーブルネットの分割数の影響

以上までの例では、正六角形の一边をケーブルネットワークで4分割した場合についてみてきたが、最後に、分割数を変えた場合についてみる。Fig. 9は、分割数 N によって形状調整による鏡面精度の変化の違いをプロットした例である。この例では $\gamma=0.01$ 、 $\varepsilon_s=0.0001$ としている。長さおよび剛性の誤差が小さい場合($\sigma_L=\sigma_K=0.01$)には、形状調整はうまくいっている。 $N=10$ の場合にははじめの2回は調整があまりうまくいっていないが、その後は他の場合と同様の収斂性を見せている。これに対し、誤差が大きい場合($\sigma_L=\sigma_K=0.1$)には、 N が大きくなると、鏡面精度は調整により向上するものの、収斂性は高くない。これは、分割数が多いと、ケーブルのたるみの本数がなかなか一定にならないためである。

(a) small deviation ($\sigma_L = \sigma_K = 0.01$)

(b) large deviation ($\sigma_L = \sigma_K = 0.1$)

Fig. 9 Effect of number of cable-net division

4.7. まとめ

以上をまとめると、次のようになる。

まず、簡易調整法は、対象が圧縮剛性を持たないケーブルで、かつ、サーフェスケーブルの歪を大きくとることができれば、非常にシンプルな方法で形状調整が可能である。ただし、調整による誤差の収斂性は、ケーブルの製造誤差に強く依存する。これに対し、提案する方法は、収斂性がより高い。ただし、製造誤差が大きいと、調整の初期段階では収斂性は遅い。これは、調整によりケーブルのたるみが増減するからである。調整が進んでたるみの増減がなくなると、収斂性が高くなる。

5. 最後に

本小論では、ケーブルの長さおよび剛性の両方を推定する方法について考えた。これに対し、張力を推定する方法もある。例えば、平衡方程式(8)より、

$$\hat{\mathbf{B}}(\mathbf{T}^* + \Delta \mathbf{T}) = \mathbf{0} \quad (28)$$

として、張力の推定値の修正項を

$$\Delta \mathbf{T} = \text{diag}(\mathbf{T}^*) \varepsilon_T \quad (29)$$

とすれば、 ε_T を以下の式から求めることができる。

$$\mathbf{V} \varepsilon_T = -\mathbf{v}, \quad \mathbf{V} = \hat{\mathbf{B}} \text{diag}(\mathbf{T}^*), \quad \mathbf{v} = \hat{\mathbf{B}} \mathbf{T}^* \quad (30)$$

すなわち、

$$\varepsilon_T = -\mathbf{V}^{-1} \mathbf{v} \quad (31)$$

ただし、この場合、張力の推定値から長さおよび剛性を同時に推定する適当な方法がないことや、式(28)の解として $\Delta \mathbf{T} = -\mathbf{T}^*$ が得られてしまったり張力が全て0と推定されてしまう可能性を避けるため、長さを剛性を同時に推定する方法について考えた。この方法を改良して、ケーブルのたるみもうまく推定できる方法(たるんだケーブルの剛性が0と推定されるような方法)にすることが今後の課題である。

参考文献

- [1] 佐藤, 三澤, 「衛星搭載用メッシュアンテナの鏡面精度」, 日本機械学会 2003 年度年次大会後援論文集, Vol. V, pp.375-376.
- [2] 田中, 名取, 樋口, 奥泉, 「宇宙用アンテナの放射特性に及ぼす機械的形狀制御の影響」, 第 17 回宇宙構造材料シンポジウム, 2001.
- [3] 目黒, 「宇宙用大型展開構造物と地上試験: 現状の課題と今後の動向 第 1 回 宇宙用展開構造物の大型化と地上試験評価の課題」, 日本航空宇宙学会誌, Vol.51, No. 593, pp.164-169.
- [4] 目黒, 「宇宙用大型展開構造物と地上試験: 現状の課題と今後の動向 第 2 回 宇宙用大型展開構造物のための地上試験評価技術と今後の動向」, 日本航空宇宙学会誌, Vol.51, No. 596, pp.233-238.