

3.3 34m アンテナの構造解析モデル

中島 潤一^{*1} 中村 俊夫^{*2} 済田 武志^{*2}
 堀口 淳司^{*2} 弓削 康平^{*2}

3.3 Structure Model Analysis of the Kashima 34m Telescope

By

Junichi NAKAJIMA, Toshio NAKAMURA, Takeshi SAITA,
 Junji HORIGUCHI, and Kouhei YUGE

Deformation analysis of the Kashima 34-m radio telescope is performed. Although the telescope has a large aperture and accurate reflector panels, the dish support structures determine the high-frequency performance. Especially in millimeter wavelength, deformations above 1-mm affect the telescope efficiency seriously. We have modeled 34-m telescopes into elements and used a finite element method FEM to simulate accurate telescope deformations. The first results we obtained agreed well with the realistic deformation. Future analysis and telescope evaluations based on computer simulations are possible with this FEM model.

[キーワード] 有限要素法, アンテナ構造解析

FEM (Finite Element Method), Antenna structural analysis

1. 概要

鹿島 34m電波望遠鏡は 1988 年に建設され 1990 年から本格運用が開始された我が国で 3 番目の大きさとなる電波望遠鏡である。本研究では 34mパラボラの有限要素モデル化を行いその解析の妥当性を確認した。各種仰角におけるパラボラ放物面の理想的状態からの変形は直接計測することは困難で、使用周波数がマイクロ波からミリ波となった場合効率低下がどの程度になるのか、あらかじめ機械的変形から予測することは受信機の搭載可否や受信性能を予測する為に重要な判断材料となる。また、現在のパラボラにおいて最も応力のかかる構造材を特定しメインテナンス上知ることや、次世代の大型パラボラを検討する場合にもモデルは大きく役に立つ。現在は衛星電波を用いたホログラフィー法などにより特定仰

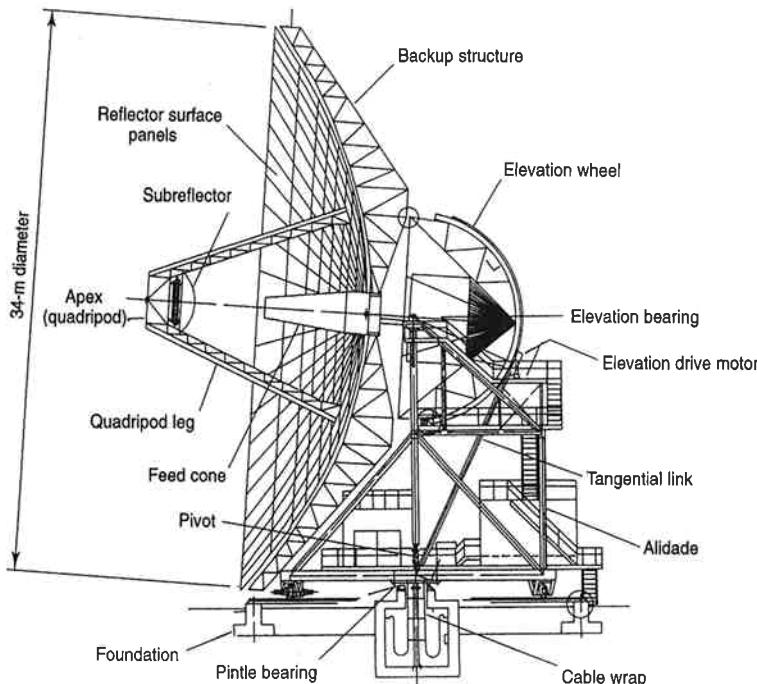
角の変形を実測しパネル内やパネル間の段差を知ることは可能であるが、そもそもアンテナの基本構造として大局的変形の程度を見積もることが第一段階としては必要である。今回鹿島 34m アンテナに対しては初めて本格的な有限要素法が適用された。

2. 鹿島 34m アンテナのバックグラウンドと 諸外国の状況

鹿島 34m アンテナの設計は 1980 年代にかけて一般的であった 32m インテルサット用通信パラボラからの拡張設計であり、基本的には NASA の DSN (Deep Space Network) 局に用いられているアンテナを多周波に改造した特殊仕様のアンテナとなっている。最も古い同タイプの 34m アンテナは NASA における DSS-15 (15 は NASA のアンテナ通し番号、第 2 図) であり 1984 年に TIW 社によって建設された。このアンテナがオーストラリア・キャンベラ、スペイン・マドリットにある同型アンテナと共に、ボイジャー深宇宙探査機から

*1 鹿島宇宙通信センター 宇宙電波応用研究室

*2 成蹊大学



第1図 鹿島 34m アンテナの基本構造。主鏡の反射パネルはバックアップストラクチャという骨組み構造で支えられている。この構造はエレベーション軸を中心に回転し反対側のカウンターウェイトとバランスする。(文献文献(1)より)

天王星通過時の画像を受信したことは歴史的である。但し、アンテナの設計が拡張による為、初期に建設された DSN のアンテナにおいては軽量化がはかられ、周辺パネルをメッシュパネルにするなどされている。製造メーカー TIW は NASA-DSN で深宇宙リンク時 8GHz の波長 37.5mm で効率が保たれ充分な性能を持っていることが確認されたため、CRL 鹿島 34m アンテナではこれをミリ波にまで対応可能な rms 0.17mm の高精度パネルとし、なおかつその軽量さから最高速駆動速度 $1^{\circ}/\text{秒}$ という測地 VLBI 観測に相応しい性能が大型アンテナから引き出された。しかし、構造に関しては外周で比較的薄肉の素材が用いられていることもあり、本来ミリ波をターゲットとして設計されていないパラボラで、重力変形や風荷重などによる変形がどの程度発生するのかは FEM (有限要素) モデルでの検証をまず行うべきである。これら情報が無い場合、観測受信能力の低下や変動を説明できないばかりでなく、受信天体などターゲットに対しても正しい評価をできない可能性がある。

諸外国ではすでに将来の大型望遠鏡プロジェクトが進行しつつあり、世界最大の可動電波望遠鏡として GBT (グリーンバンクテレスコープ) 建設が進み、ヨーロッパ (ポローニヤ大学)、オーストラリア (SKA) などで次世代大望遠鏡計画が進行している。これらプロジェクトでは、計算力学的に可能な大型望遠鏡モデルを追求する場合が多く、通信総合研究所も 34m アンテナの解析を通じて同様のプロセスを確立した。

3. 有限要素法

構造解析の有限要素法は対象を有限の要素に分割し、その中で弾性変形を近似的な連立一次方程式に置き換えて数学的に解く方法である。分割された要素の形状は要素をつなぐ節点で代表される。それぞの要素について節点と節点ひずみ関係を定義する要素合成マトリックスを求め対応する部分を組み合わせることにより、構造全体の合成マトリックスを作ることができる。これについて現実モデルに基づいた適当な拘束を与えて解けば、ある力が加わった時の構造物の変位を知ることができる。静的には、

$$K \cdot \delta = F \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\delta = K^{-1} \cdot F$$

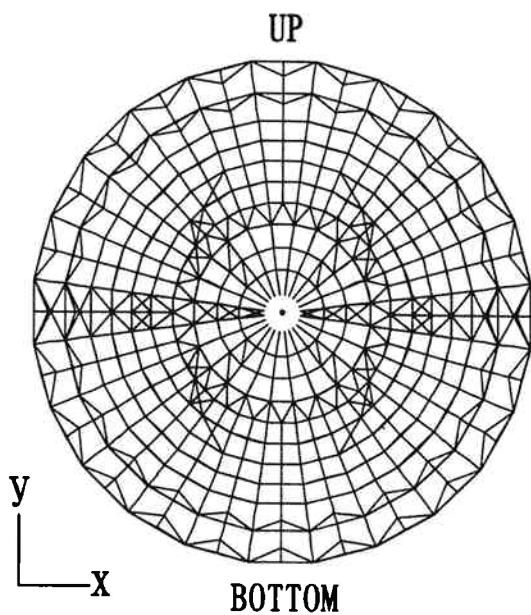
のように剛性マトリックス K 、外力 F から変位 δ を求めることができる。今回有限要素法解析は成蹊大学工学部機械工学科に於いて使用されている汎用有限要素モデリングソフト及び解析ソフト FEMAP/ANSYS を用いた(文献(2))。

4. 鹿島 34m アンテナのモデル化

第1図に示される鹿島 34m アンテナのモデル化にあたり、実際に主鏡支持部に使用されている全ての部材を計測し、これを用いて要素モデルとした。(第3, 4, 5 図) に計算機上に作成された 34m アンテナモデルを示



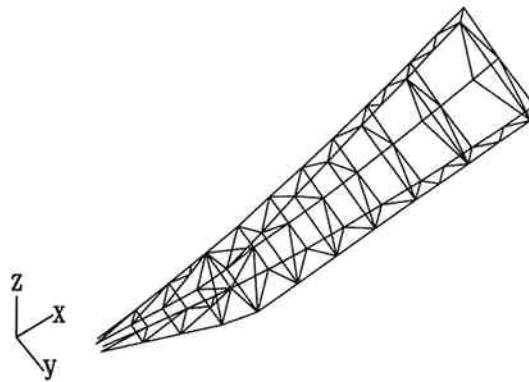
第2図 カリフォルニア州ゴールドストーンにおける NASA DSS-15 と呼ばれる同型アンテナ。周波数は 2.8GHz しかも搭載されず、周囲のパネルがメッシュ化されている。



第3図 34m アンテナの FEM モデル。ラジアル方向に走るトラスが直線となり、環状のフープ構造、応力緩和の為の追加構造が判る。



第4図 34m アンテナの FEM モデル。側面から見た場合、その外見が実際に見るアンテナと似る。

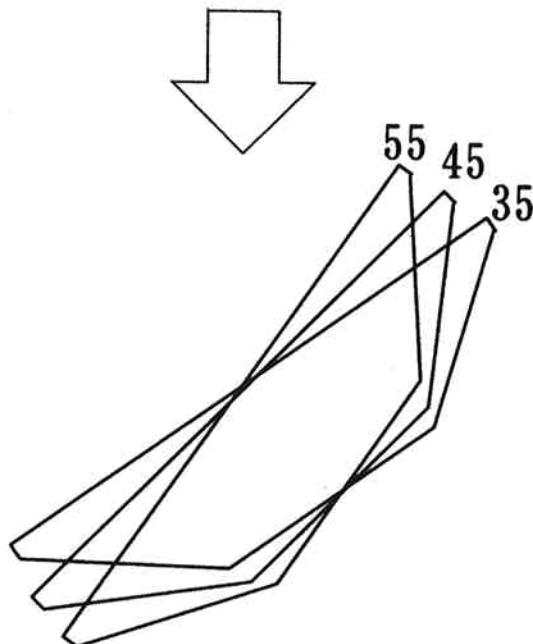


第5図 1/24 のモデル。軸対象な構造はこのモデルをもとに生成する。

す。これを実際のアンテナ構造と見比べながら節点を拘束し、第6図のように重力加速度をかけて変形を求めた。アンテナの構造材料は鉄としてヤング率 2.06×10^{11} 、ボアソン比 0.3、密度 7836.7kg/m^3 でこれら総重量がアンテナメーカーの示した設計重量に数%以内で一致することを確認した。断面形状は(第1表)に示したものとなり ROD 要素、TUBE 要素を組み合わせて 34m アンテナ構造をモデル化した。この構造を、センターハブの部分および EL 軸から延長一体化している剛性の高いオクタゴンとよばれる 8 角形の台座構造で基部節点を拘束した。またパネル質量を加えた変形解析も行っている。当初のモデルでは ROD 要素のみを用いて 34m アンテナを完全なトラス構造、ピン支持接合で解析した場合、フープ間にある構造材の接点に大きくくびれてしまうような大局的変形が出る現象が計算機上であったが、実際にはこのような物理現象は発生しない。従って検討の結果この部分のラジアル方向に走るトラスを全て剛接とする ROD 要素、TUBE 要素を用いてラーメン構造としてモデル解析を進めた。また最終的にはより正確な断面2次モーメントを与える BEAM 要素でモデル化を行い、双方のモデルでほぼ同等の変形結果を得た。34mを構成する BEAM 要素(鉄角パイプ)の断面形状及び断面2

第1表 34m 各部に用いられている角パイプの形状と断面2次モーメントの計算例。モデル内でねじりに対しての断面2次極モーメントも計算され、剛性マトリックスに反映される。

サイズ(縦×横×厚) [mm]	断面積 [mm ²]	断面2次モーメント [m ⁴]
38.1×38.1×3.175	484	5.1614E - 08
50.8×50.8×3.175	645	1.2627E - 07
50.8×50.8×4.7625	967	1.8064E - 07
76.2×76.2×6.35	1935	8.2582E - 07
101.6×101.6×9.525	3871	2.8902E - 06
101.6×101.6×12.7	5161	3.6745E - 06
101.6×101.6×6.35	2581	2.0203E - 06
101.6×101.6×4.7625	1934	1.5515E - 06
76.2×50.8×4.7625	1209	2.5159E - 07
101.6×101.6×7.9375	3222	2.4663E - 06
38.1×38.1×4.7625	725	7.2666E - 08



第6図 重力加速度に対するモデルの姿勢。実際には重力加速度のベクトルを変化させて解析する。

次モーメントは実測と計算により第1表のようになる。以下の部分では BEAM 要素を用いた FEM モデルでの計算結果を主にして今回のモデル解析結果を示す。

5. モデル解析と計算の妥当性評価

5.1 電波望遠鏡実機に即したモデルの評価方法

パネル荷重も加えた 34m 主鏡支持構造の変形は第7, 8 図のようなものになる。仰角が与えられることにより上端部、下端部が垂れ下がるという傾向が表れている。この変形で最大変位を示すのはパラボラ下端であり 5mm 程度の絶対変形量を示している。実機においてはパネル面がピン支持のボルトとナットで ±20mm 程度

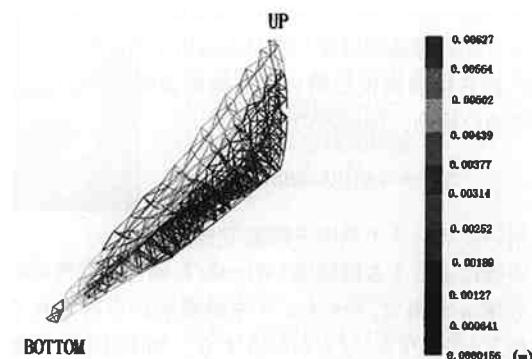
調整可能である。アンテナ建設時には、熱変形の無い夜間にセオドライトを用い、最も多く使用されるこの仰角 45°付近において変形した構造の上にパラボラまたは修正パラボラ形状を構成する。この点は最初から主鏡構造を剛体として天頂方向を向いた状態で理想鏡面を研磨する光学望遠鏡と電波望遠鏡が大きく異なる。よってモデルを用いた変形評価も実機と同じく EL 仰角 45° の変形を基準に差分を検討することにした。望遠鏡仰角 35°, 55° それぞれの変形結果は第9, 10 図に示すようなものとなった。焦点距離に最も影響する z 方向における変形を抽出したコントアでその最大変位は 0.8mm 程度であった。またパラボラ全体が下方向に移動する量は第11 図において 0.5mm 程度存在する。パラボラ面 rms は $\sigma = \lambda/4\pi$ で利得が 37% 低下する実用上の使用限界とされる。この式を適用する場合、まだ 22GHz (波長 27mm) では十分余裕があるが 43GHz (波長 7mm) では効率低下が大きく発生する領域である。但しこれら変形の発生する領域はアンテナ光学的には副鏡からの照射パターンにテーパーのかけられた部分であるため影響は致命的ではない。

5.2 内部応力のピーク

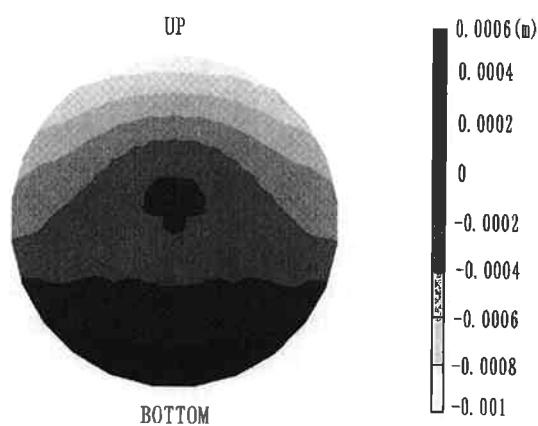
第12, 13 図に内部応力でピークを値を示した部材を示す、引張り圧縮とともに応力値は最大で約 16MPa 程度で 0.2% 弹性限 300MPa に対して充分に低いので変形は弾性的である。大きな引張り応力と圧縮応力はしばしばトラス構造の中で隣り合って存在する。軸対象構造に加えられている EL 軸近辺の補助材により EL に沿った部材では応力が広く分散されていることが判明した。

5.3 焦点距離の変動

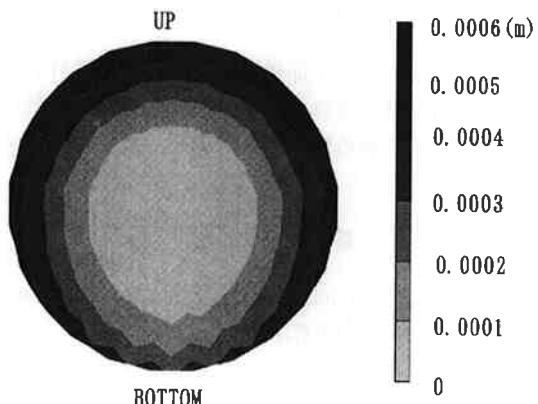
パラボラアンテナとしての性能は、ある周波数で運用した場合に、主鏡形状、副鏡形状、フィードシステムを含めたパラボラ光学系の総合性能であり開口効率 η (理想的には 1) で代表される。しかし、今回は主鏡のみの



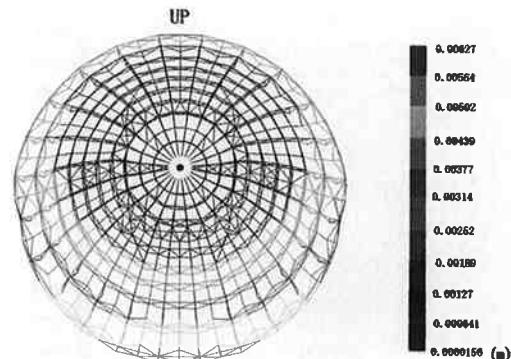
第7図 34m構造の45°における重力変形。変化量が強調されて表示されているが、34mの大きさに対して最大でも0.6mm程度の変形、この上に期待されるパラボラ形状を構築する。



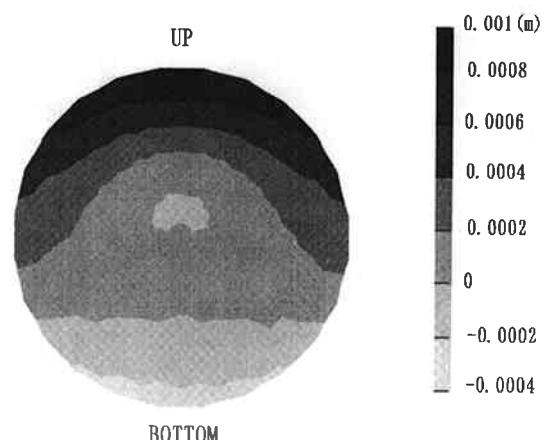
第9図 34m構造の55°におけるz軸方向の重力変形。45°に対する差分では、パラボラ上下端が理想状態から1mm程度変位を示す。



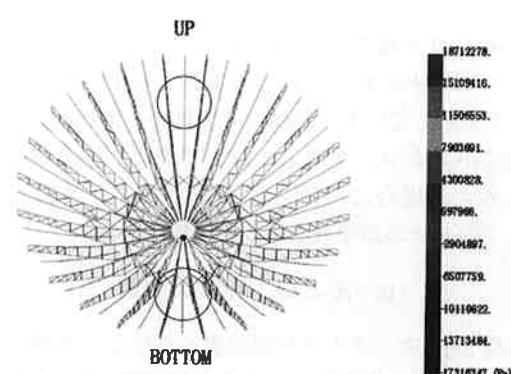
第11図 34m構造の35°におけるxy軸方向の重力変形。45°に対する差分では、外周が約0.5mmほど全体に下がることが判る。



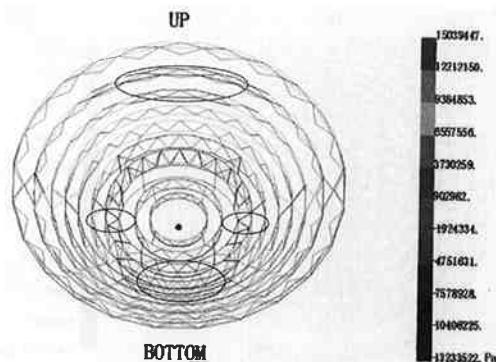
第8図 34m構造の45°における重力変形。パラボラ下側構造が引張りにより広がったような形状変化を示す。変化量が強調されて表示されているが、34mの大きさに対して最大でも0.6mm程度の変形である。



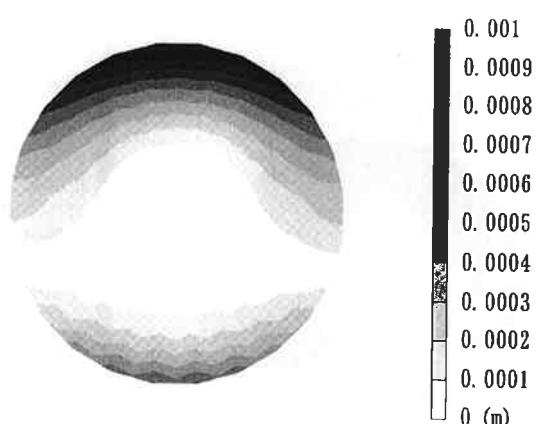
第10図 34m構造の35°におけるz軸方向の重力変形。45°に対する差分では、パラボラ上下端が理想状態から1mm程度変位を示し、55°の場合と対象になる。



第12図 仰角35°で最大応力の発生したトラス構造部位。引張り応力が○で示した領域で最も大きくなる。



第13図 仰角 35°で最大応力の発生したフープ構造部位。応力分布は○を付けた領域で最大となる。



第14図 焦点距離に変換した 35°における変位。45°に対し、外周が約 1mm ほどすでに変形していることが判る。

評価であり、理想焦点位置からの各接点の変位を計算する。この結果は第 14 図のようになり、仰角 35°ですでに最大で 1mm 程度の変形が見られる。ミリ波専用大型望遠鏡の場合は変形後の形状が再びパラボラ面を構成するホモロガス構造で設計されることがあるが、鹿島 34m アンテナにおいてはこのような効果が期待できないことを示している。副鏡位置の移動により低減される可能性があるが、波長 λ に対して焦点で波面が揃うことを考えた場合、今回の変形量からミリ波観測では 34m アンテナの効率低下開始が予想される。

6.まとめ、今後の課題

鹿島 34m アンテナの有限要素を作成し、実機に対して妥当な変形結果を与えるモデルが完成した。今後このモデルを用い以下のようなことを検討していく。

- (1) 今回は時間の関係で仰角 45°を中心にして 35°、55°でモ

デルの妥当性を調査したが、最も低仰角となる 10°までモデルの仰角を可変し変形を調査する。パネル rms とこれら接点変位を用いて主鏡の表面変形の rms 値を求めた場合、Ruze⁽³⁾の近似式

$$\eta = \exp[-4\pi\sigma/\lambda]^2 \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

を用いてアンテナ効率を推定できる。

- (2) 実機によるミリ波観測が行われた場合、仰角に対する効率 η を得て、パラボラ主鏡変形から得られる効率低下が支配的になるか調査する。効率低下には他の要因、例えば副鏡支持構造の重力変形などもありうるので必要があればこの部分もモデル化を行う。
 - (3) 2000 を越える主鏡支持の構造材を日常全てチェックすることは不可能だが、内部応力変化を個々の要素について詳細に追跡することにより、メインテナンス上より注目すべき個所を特定することができる。今回は最大応力の発生する要素のみを発見したが、繰り返しの仰角変化の中で、捻りを受ける要素、くりかえし応力の振幅が大きい要素などを抽出し溶接個所などをチェックすることが可能になる。
- また今回のモデル確立により通信総合研究所として必要とされる 34m 超の次世代大型パラボラアンテナを計算機シミュレーションにより検討することが可能となった。米国、ヨーロッパなどが 100m 級の電波望遠鏡を有する中で、我が国では未だ 64m を越える大型パラボラアンテナが無い。対深宇宙などに対してデータ伝送を行うために、今後ミリ波の広帯域な周波数資源が活用されるべきであり、これに適したアンテナを計算機上で検討することが可能となった。

謝 辞

本研究は成蹊大学工学部機械工学科、機械設計研究室との共同により進められた。ここで成蹊大学弓削教授はじめ、共同研究者の中村君、済田君、堀口助手に感謝する。

参 考 文 献

- (1) Levy., R., "Structural Analysis of Microwave Antenna", 1996, IEEE Press.
- (2) 中村俊夫卒業論文、"電波望遠鏡の自重による変形の解析"、成蹊大学、1998。
- (3) Ruze, J., "Antenna Tolerance Theory", Proc. IEEE, 54 April, 1966, pp.633-640.