

平成 21 年 4 月 17 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2006～2008

課題番号：18560761

研究課題名 (和文) 高精度宇宙用膨張膜鏡面の研究

研究課題名 (英文) Study on the high precision inflatable reflector for space use.

研究代表者

谷澤 一雄 (TANIZAWA KAZUO)

近畿大学・生物理工学部・教授

研究者番号：90114553

研究成果の概要：従来の宇宙用風船膜鏡面は内圧の変化、材料の非均一性、及び軌道上熱変化に対する形状変化が大きいため、高い鏡面精度の達成が困難であった。しかし、この風船膜の外側に寸法安定性が高く高精度なケーブルネットを取り付けることで、内圧の変化に対して形状変化の少ない鏡面が得られることを計算で示した。さらに、このケーブルネットによる形状変化の拘束効果を部分モデルの製作・試験により実証し、この効果をシミュレートできる有効な数学モデルを取得した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	500,000	0	500,000
2007年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2008年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	930,000	4,530,000

研究分野：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：①宇宙科学 ②人工衛星 ③シミュレーション工学 ④複合材料・物性

1. 研究開始当初の背景

宇宙通信分野での周波数の高度利用 (5GHz-30GHz 帯移動体通信)、宇宙科学での高周波域観測計画 (43GHz, 86GHz 電波観測/V SOP2, ARISE) に伴い、ミリ波域 (数十 GHz) で使用可能な宇宙用高精度アンテナ鏡面が必要とされている。これに適合する開口径 5-15m、周波数 10-80GHz の軽量な宇宙用高精度鏡面として、インフレーター (膨張膜) アンテナが各国で開発されてきたが、製造の

難しさや内圧や温度などの環境因子の変化に対する形状の不安定さなどから、実用にまで至っていない。

筆者¹⁾らは Fig. 1 に示すような膨張膜の外周を線膨張係数が小さく高剛性のケーブルネットで覆うことで、高精度な鏡面を得る方式 (以下、これをケーブルネット鏡面と呼ぶ) を提案し、物理パラメタの適切な選定で、実用的な面精度が得られることを示した。この鏡面では内圧荷重や熱荷重が膨張膜でなくケーブルネットで

受け持たれるので、圧力変形、熱変形、及び材料不整による形状劣化が網目という局所部分に押さえられる。このため、鏡面は大局的な変形は少なく、高い形状安定性が確保される。ただしこの解析では、ケーブル張力や膜張力は場所に寄らず一定で、初期の値から変化しないと仮定しているため、大変形下では成立しない可能性がある。

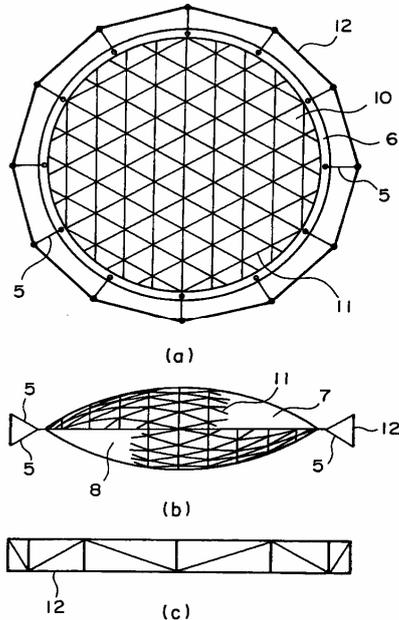


Fig.1 ケーブルネット付き風船膜鏡

なお、本提案の鏡面と類似の考えは矢島らにより開発されたスーパープレッシャー気球²⁾にも見られる。縦紐だけであるが、気球外周にこれを取り付けることで膜の膨張収縮が押さえられ、長寿命の気球の誕生となっている。

従来開発された宇宙用鏡面 (MUSES-B/8m、GARUDA/12m、THURAYA/12m、ETS-8/14m、及びNSTAR/6m 等) はすべてメッシュアンテナ方式 (メッシュ膜をケーブルのみで張架しパラボラ状に形成) であり、いずれも鏡面精度が 1mm 以上と悪い。将来の 0.2mm クラスの高周波数用の鏡面には対応できない。また、この鏡面は複雑な製造を必要とするため、極めて高価である。

本研究により実現される鏡面は、膨張膜鏡面のため製造も簡単で安価となる。さらに鏡面がケーブルネットで覆われているため、高精度な鏡面が実現できる。このため周波数の高度利用、或いは高周波域宇宙観測が容易に実現されるため、本研究の実用上の価値は高い。

2. 研究の目的

本研究の目的は、第一に環境因子の変化がケーブルネット鏡面の鏡面精度に及ぼす影響を正確に解析し、鏡面としての有効性や変形特性を明らかにすることである。第二にケーブルネットによる鏡面変形拘束効果を鏡面部分モデル

の製作及び試験により実証するとともに、上記解析法の結果と比較し、解析法の有効性を検証することである。

3. 研究の方法

(1) 特性評価

鏡面変形特性を求める第一の目的のために、内外の圧力差が零で半径 $R (=10\text{m})$ の球面形状となる膜と、膜の外側を三角格子のケーブルネットで覆った Fig.2a に示す球面アンテナを考える。ケーブルネット三角格子で囲われた部分はファセットと呼び、これを拡大したものを Fig.2b に示す。

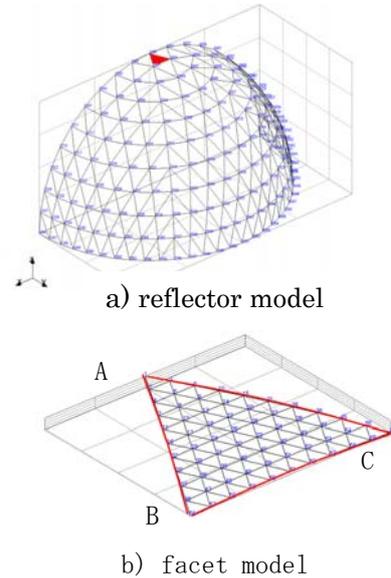


Fig.2 Mathematical model

ここで弧 AB、弧 BC、弧 CA は大円上に配置された一辺の長さ L のケーブル (以下境界ケーブルと呼ぶ) である。球面アンテナはこのファセットでほぼ均一に覆われていると仮定できるので、解析ではこの部分のみを考慮すればよい。弧 AB、弧 BC、弧 CA 上での変形は、この大円の弧を通る平面内でのみ可動となる条件 (対称条件) とした。

球面三角形 ABC の内部の膜は電波反射膜で、変形時の幾何学的非線形性を正確に考慮するため、剛性が等価となる三角格子のケーブルネットで近似した。以下このケーブルを膜ケーブルと呼ぶ。膜ケーブルは弧 AB、弧 AC をそれぞれ n 等分した点を通る大円上に配置し、この大円上で等分割した。膜ケーブルの軸剛性 EA_m は膜の面内剛性 E_t と膜ケーブルの一本の長さ (L/n) とから次式で求めた。

$$EA_m = (\sqrt{3}/2) E_t (L/n) \quad (1)$$

境界ケーブル及び膜ケーブルは、内圧零のときに初期張力が零で、ケーブル端点が半径 R の球面上となるように仮定した。独立変数はそれぞれのケーブル端点位置 (x,y,z) とした。内圧 p が変化したとき、これら端点位置がどのように移動するのかを求めるのが問題となる。釣り合い後の端点位置が分かれば、これから境界ケーブルや膜ケーブルに発生する張力やベストフィット鏡面精度が計算される。

(2) 実験による検証

本研究の第二の目的は、ケーブルネット鏡面モデルを実際に製作し、ケーブルネットによる膜面の変形拘束効果を測定し、合わせて解析の有効性を調べることである。

① ケーブルネット鏡面モデルと試験形状

製作した鏡面モデルを Fig.3a,b に、形状測定試験形状を Fig.4 a,b に示す。

鏡面モデルは図に示すように内径 480mm の圧力容器と、ケーブルネット鏡面からできている。ケーブルネット鏡面は Fig.3b に示すように、中央

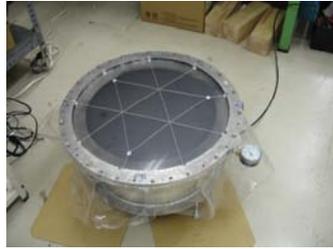


Fig. 3a ケーブルネット鏡面モデル

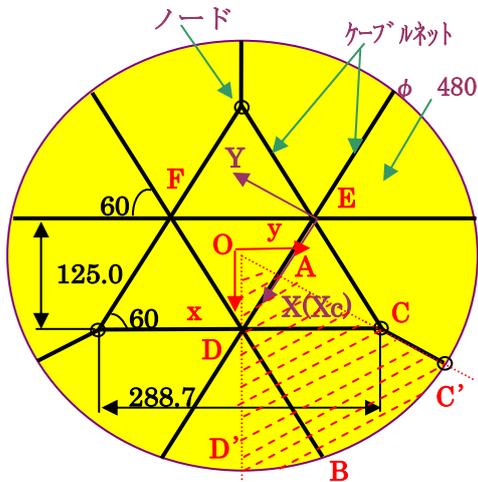


Fig.3b ケーブルネット鏡面詳細

144mm の正三角形ができるように平面状に張られたケーブルネットと、厚さ 40 ミクロンの平面ポリエチレン膜 (実験値 $E=152\text{MPa}$) からなっている。この鏡面は圧力容器上面に仕込まれた O リングと押さえ板で挟まれて圧力容器に取り付けられる。膜上面に取り付けられたケーブルネットは、その端部を押さえ板に取り付けられたブラケットに取り付けられている

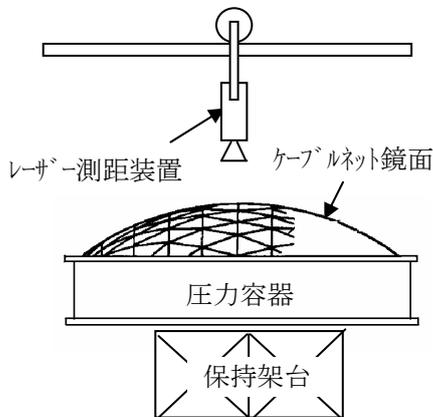


Fig.4a 鏡面モデル形状測定試験

る。ケーブルネットの材料は宇宙用アンテナでの使用実績があり、クリープ特性の良いノメックスコードで被覆したケブラー T29-400d とした (軸剛性 $EA=2530\text{ N}$ 、後述の膜剛性比で約 2 倍)。



Fig.4b 鏡面モデル測定試験

Fig.4a に示すように、鏡面モデルの形状測定は、圧力容器上に置かれた 2 軸方向に可動な固定台に取り付けられたレーザー測距装置 (キーエンス LK2100/NR2000) により行った。測定時の写真を Fig.4b に示す。

測定はケーブルネットを付けない膜面の場合と、ケーブルネットをつけた場合で行い、測定範囲は中央三角形 EFD を中心に行った。内部の外気に対する付加圧力は、約 100Pa、及び 200Pa で行った。

測定形状に対応する解析はモデルの対称性を考慮し Fig.3b におけるハッチング部分で行った。

4. 研究成果

(1) ケーブルネット鏡面の内圧変化下での面精度

本解析では $R=10\text{m}$ 、 $L=1\text{m}$ 及び 0.2m 、 $n=10$ とし、風船膜は $30\mu\text{m}$ 厚のポリエチレン製とした ($E=400\text{MPa}$)。この寸法では、各ファセットが平面で近似された場合の鏡面精度がそれぞれ 9.68mmRMS 、及び 0.387mmRMS となる。この値は将来の利用が期待される L 帯、及び Ka 帯に要求される鏡面精度に対応している。

この平面近似の鏡面精度は従来のメッシュ展開鏡面で得られる最良値で、この値以上の面精度が本鏡面で得られれば、ケーブルネット鏡面の実用の可能性が高いと判断できる。

① 境界ケーブルの剛性

解析に先立って境界ケーブルの軸剛性をどう選ぶかが問題となる。 $L=1\text{m}$ 及び 0.2m 、内圧 1Pa の下で、境界ケーブルの軸剛性を様々に変えて鏡面の面精度を計算した結果を Fig.5 に示す。図にて横軸は境界ケーブルと膜ケーブルの軸剛性比を、縦軸は鏡面精度を示す。図より風船膜の形状拘束という観点からは、 $L=1\text{m}$ 及び 0.2m のいずれの場合もケーブル軸剛性比で 100 倍程度あれば良い事が分かる。以下の計算では境界ケーブルの軸剛性はこの値を使った。なお、軸剛性比で 100

倍とは、ケーブルを等価な膜面と考えたときの膜剛性比が10倍となることを意味する。

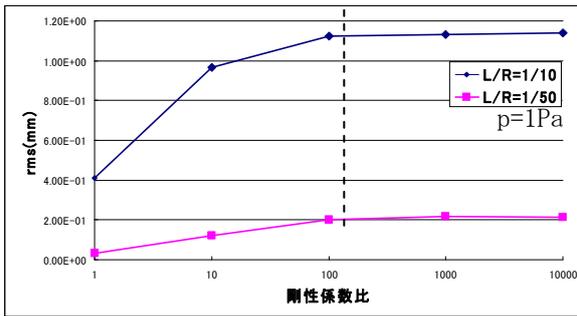


Fig. 5 境界ケーブルの剛性が鏡面変形に及ぼす影響

②内圧による鏡面変形

内圧の大きさに伴い、生じる変形を算出した結果を Fig.6 に示す。図において、横軸は内圧、縦軸は鏡面精度を示す。圧力変化量はポリエステル材（破壊応力 $=2.45 \times 10^7 \text{Pa}$ ）の破壊圧力 147Pa の二十分の一（7Pa）までとした。

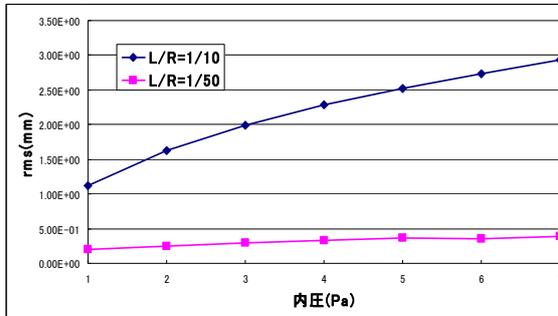


Fig.6 内圧の大きさが鏡面変形に及ぼす影響

この図から、1) 外側のケーブルネットの網目の長さ（ファセット長）が小さくなるほど鏡面精度の劣化は少なく、 $L=0.2\text{m}$ の場合は、内圧が 7Pa でも平面近似の面精度以下にならないこと、及び2) ケーブルネットの網目が大きくなると、圧力上昇に対する鏡面劣化は大きい、 $L=1\text{m}$ に見られるように、内圧が 7Pa になっても平面近似精度よりも良い値が得られることが分かる。

③膜面の張力分布

内圧変化に伴う、膜面の張力分布を算出した。図示はしないが、付加内圧の値が 2Pa 以下のうちは膜及びケーブルの張力分布はほぼ均一であるが、内圧値の増大につれて、膜張力が中央部で高くなることが分かった。

(2) 実験による検証

試験は、膜内部の付加圧力として約 100Pa、及び 200Pa で行った。100Pa の値は 1/1000 気圧に相当するもので一定に保つことが難しくデータの再現性が悪い。このため以下では 200Pa 相当の結果についてのみ述べる。

①鏡面の変形測定結果

230Pa の付加内圧下での膜鏡面の測定結

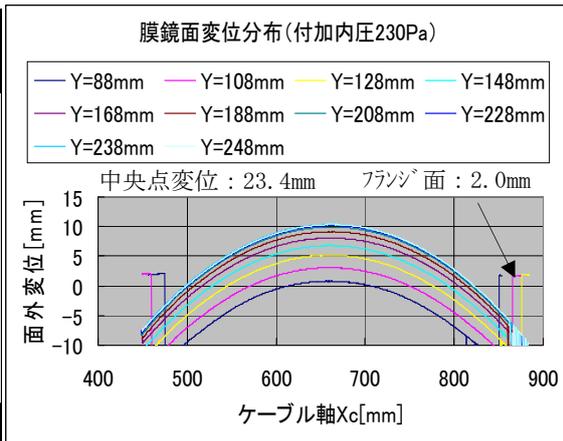


Fig.7 膜鏡面変形 (230Pa)

果を Fig.7 に示す。図にて、横軸の X_c 及び図中の Y 各軸は Fig.3b に示す方向で $X_c=662, Y=243$ が膜面の中心に当たる。また、図中のグラフの両端に見られるステップ状のピーク値は圧力容器上面の値を示している。膜鏡面の中央点変位は、押さえ板の厚さ 15 mm から計算され 23.4 mm であることが分かる。データのサンプリング周期は 0.1 秒で、各曲線は 400 近い測定点からなっている。

②ケーブルネット鏡面の变形測定結果

225Pa の付加内圧下でのケーブルネット鏡面の測定結果を Fig.8 に示す。図にて、横軸の X 及び図中の Y 軸は前述の測定座標軸と同じ方向である。ただし、 X 軸の原点は Fig.3b での E,D 点の midpoint としている。図中、高さ 0.4~0.5mm ほどの山形の波形は $\phi 0.45\text{mm}$ のケーブル上面を測ったことによる。ケーブルネット鏡

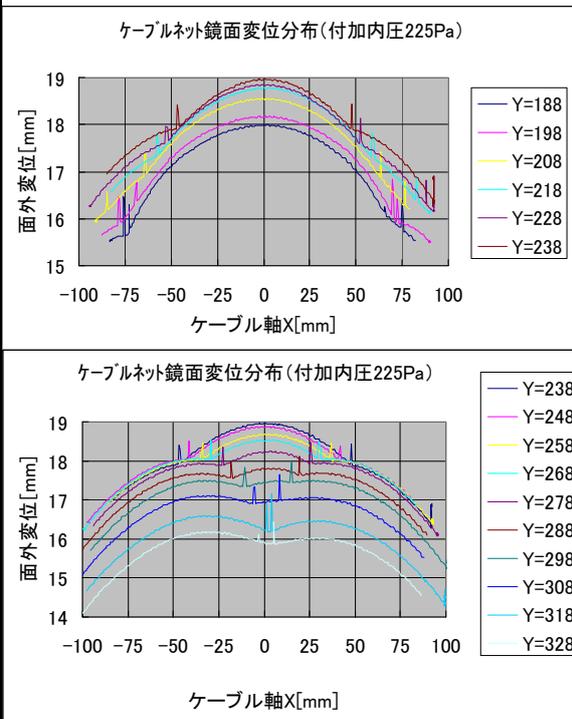


Fig.8 ケーブルネット鏡面変形 (225Pa)

面の中央点変位は本データ値に 13 mm 足して 19.0mm と得られる。付加圧力が 5Pa ほど異なるが、今回の試験ではこれを調整する装置がなかったことによる。図 8,9 の結果からケーブルネットによる膜鏡面の变形拘束効果が良く分かる。

③ 試験対応解析と実験曲線との比較

実験に対応する数学モデルは Fig.9 のように供試体の対称性を利用して 1/6 部分とした。

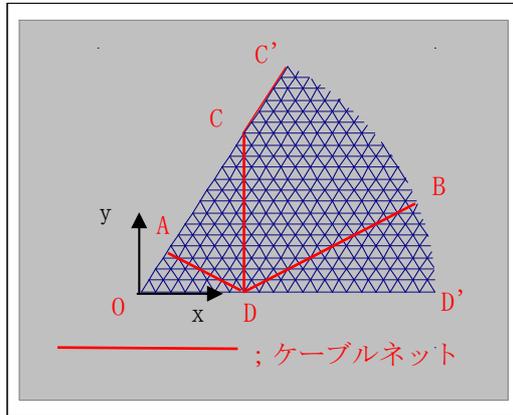


Fig.9 試験供試体の数学モデル

図において青いケーブルは膜ケーブルを、赤いケーブルはケーブルネットを示す。境界条件は弧 C'D' 上は固定、辺 OD', OC' 上は夫々 xz 面、yz 面でのみ変形が可能（対称条件）とした。

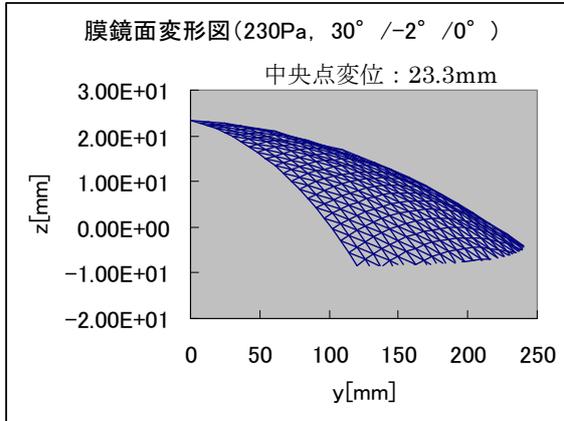


Fig.10 膜鏡面の变形 (付加内圧230Pa)

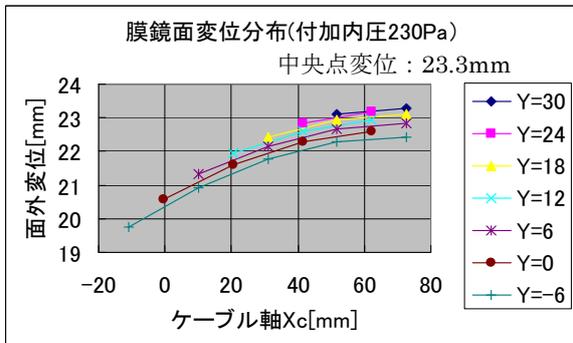


Fig.11 膜鏡面の断面図 (付加内圧230Pa)

先ず、付加内圧 230Pa での膜鏡面の变形解析結果を Fig.10,11 に示す。Fig.10 は变形の鳥瞰図を、Fig.11 は Fig.7 の実験に対応した各断面での变形を示す。Fig.11 より中心点を通る断面での膜鏡面の变形形状は Fig.7 にて Y=238 の曲線でほぼ代用できることが分かる。実験曲線と対応する計算曲線を比較したものを Fig.12 に示す。なお、ここでの解析では、膜鏡面の初期ひずみは実験でのピーク値と一致するように 0.01 とした。試験においても膜鏡面に皺が生じないように二方向に引張りフラジ`面に取り付けたことに対応する。

図にて、青い曲線は Y=238 で Xc 方向に測定した計測値、赤い曲線は Fig.8 のピーク値を Y 軸方向にプロットした曲線、黄色い曲線は解析値である。図より実験曲線は直交 2 方向に対称であること、及び計算曲線と実験曲線の対応は極めてよいことが分かる。

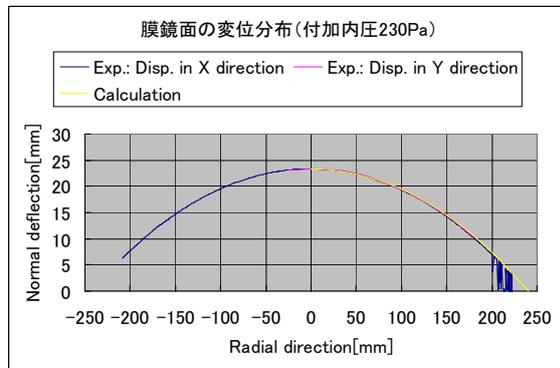


Fig.12 膜鏡面变形での試験と解析比較

次に、付加内圧 225Pa でのケーブルネット鏡面の变形解析結果を Fig.13,14 に示す。Fig.13 は变形の鳥瞰図を、Fig.14 は Fig.8 の実験に対応した各断面での变形を示す。中心点を通る断面での膜鏡面の变形形状は Fig.8 にて Y=238 の曲線でほぼ同様に代用できることが分かる。実験曲線と対応する計算曲線を比較したものを Fig.15 に示す。

この解析では、ケーブルネットのケーブルの初期ひずみはなしとした。ケーブルは数十 μ の精度で作られており、また初期状態で張架する

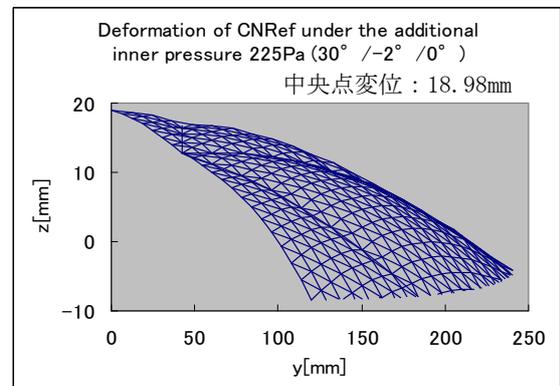


Fig.13 ケーブルネット鏡面の变形 (付加内圧225Pa)

様な機構がないことによる。

Fig.10 と Fig.13 及び Fig.11 と Fig.14 から

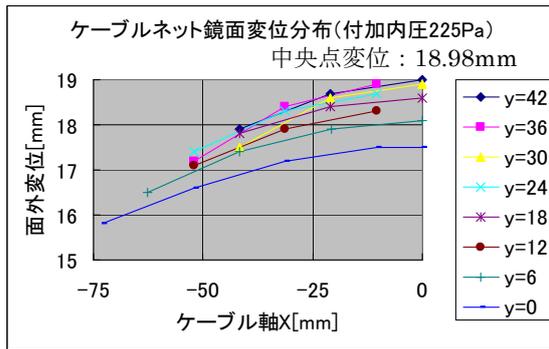


Fig. 14 ケーブルネット鏡面断面図 (225Pa)

ケーブルネットによる変形拘束効果が良く見て取れる。Fig.8 と Fig.14 の比較から計算と実験での変形形状が良く一致していることも分かる。Fig.15 は鏡面中心を通る断面内の変形曲線を比較したものであるが、青色で示す計

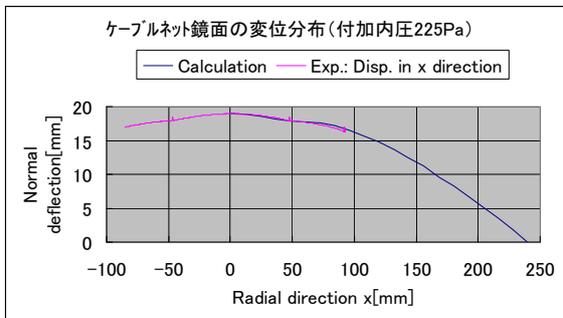


Fig. 15 ケーブルネット鏡面での試験値と解析値との比較 (付加内圧225Pa)

算値と赤色の試験値との対応は良い。

④まとめ

本研究の成果をまとめると以下のようになる。

- a. ケーブルネット付鏡面は、内圧変動に対し全体的な変形拘束する効果が大きく、使用周波数数十 GHz 帯の大口径の高精度宇宙用鏡面としての可能性が高い。
- b. ケーブルネットによる形状拘束効果を実験で実証することができた。また、この効果を定量的に評価できる数学モデルを作ることができた。

これらの成果はケーブルネット鏡面の将来性を示すものであり、現在検討が進められている VSOP2(43GHz15m φ/JAXA)や ARISE 計画(43GHz、86GHz25m φ/JPL)に適応できる可能性が高い。ただし、今回の実験結果は付加内圧 200Pa 前後、膜厚 40 μm、単純な三角形格子ケーブルネットなどに限られており数学モデルの信頼性がまだ低い。実際の設計に利用するためには、もう少し広範囲な圧力変動、物理パラメタの下でシミュレートできることを実証する必要がある。これが今後の課題

である。

(参考文献)

- 1) K. Tanizawa, J. Nishimura: Surface Accuracy of an Inflatable Reflector Covered with Uniformly Stretched Cable, Transactions of Theoretical and Applied Mechanics, Vol. 47, pp. 41-46 (1998)
- 2) 矢島信之ほか、新しい設計原理によるスーパーレシヤ-気球の実現、日本機械学会論文集 (2001)
- 3) K. Yamamoto, Shape Control of Cable Net Structures, Transactions of Theoretical and Applied Mechanics, Vol. 39, pp203-208 (1990)

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)

[学会発表] (計 3件)

- ① 谷澤一雄、宇宙用高精度風船膜鏡面、第 50 回構造強度に関する講演会、2008 年 8 月 1 日、北九州国際会議場
- ② 谷澤一雄、ケーブルネットで覆われた風船膜鏡面の力学特性、第 57 回理論応用力学講演会、2008 年 6 月 10 日、日本学術会議
- ③ 谷澤一雄、張力膜構造物の圧力変化による形状解析、第 51 回宇宙科学技術連合講演会、2007 年 10 月 31 日、札幌コンベンションセンター

6. 研究組織

(1) 研究代表者

谷澤 一雄 (TANIZAWA KAZUO)
近畿大学・生物理工学部・教授
研究者番号：90114553

(2) 研究分担者

なし。

(3) 連携研究者

なし。