

3 隅固定 1 隅引張荷重を受ける矩形膜の面外変位の確率分布モデルの検討

岩佐貴史^{*1}

梗 概

外力や境界条件等の不確定性を含む薄膜の変形挙動が経験的に従う確率分布を把握するため、皺の生じた矩形膜の形状計測を行った。対象とした薄膜は、3 隅固定 1 隅引張荷重を受けるポリイミドフィルムであり、寸法 0.2m x 0.2m、膜厚 12.5, 25, 50 μ m の矩形膜とした。検討結果より、各種不確定性を含む薄膜の変形挙動の空間分布は、正規分布や対数正規分布といった理論モデルには従わないが、空間分布の特性値である平均値・標準偏差・第三四分位点・中央値は、実験モデル間では正規分布等の理論モデルに従うと推定される結果を得た。

1. はじめに

ソーラー電力セイル (IKAROS) や大型展開アンテナ (ETS VIII) 等は、大きさが数十メートルにもなる膜面宇宙構造物の代表的な例である。このような膜面宇宙構造物は、その柔軟さゆえに重力のような微小荷重でも容易に変形が生じてしまい、その構造特性を地上で検証することが極めて困難な構造物となる⁽¹⁾。そのため、膜面宇宙構造物の開発では、地上試験の困難さを補うために、これまで以上にシミュレーション技術の果たす役割が大きくなると想定され、シミュレーション技術の信頼性を確保することが大きな課題となる。

シミュレーション技術の信頼性を確保するための方法論の一つとして、シミュレーション結果に対して信頼区間 (マージン値) を設け、「実際の応答をある一定の確率で包絡するような上限値」を設定するといった方法が考えられる。この方法論は、宇宙機の音響振動解析や衝撃応答解析等で既に適用され、その有効性が報告されている^(2,3)。この方法論では、1) 宇宙構造物の実際の応答が経験的に従う確率分布モデルを試験データから求め、2) その結果に基づいて解析結果と実際の応答との差が従う確率分布モデルを設定し、3) 設定した確率分布モデルから、シミュレーション結果に対して適切なマージン値を設定するといった手法がとられている。

したがって、同様の方法論を膜面宇宙構造物のシミュレーション技術に適用する場合、膜面宇宙構造物の実際の応答が経験的に従う確率分布モデルを試験データから求めることが必要となる。しかし、これまでのところ膜面宇宙構造物を構成する薄膜の形状計測に関する研究は数多く報告されているものの、膜面の応答が経験的に従う確率分布モデルに着目した研究は少

ない。

そこで、本研究では、膜面のシミュレーション結果に適切なマージン値を設定するための取りかかりとして、皺や弛みを含む膜面の変形挙動 (面外変位) が経験的に従う確率分布モデルについて検討した結果を報告する。

2. 薄膜の変形挙動の計測

2.1 実験装置

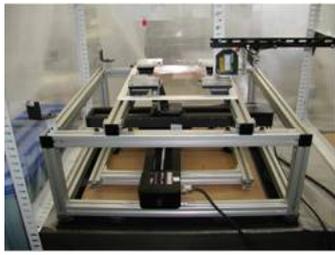
Fig. 1 に実験装置を示す。Fig. 1 (a) は実験装置の全体写真であり、同図 (b) は供試体である膜材の拡大写真である。実験で用いた膜材は、1 辺が 0.2m の矩形のポリイミドフィルムであり、その 4 隅はアクリル板で固定されている。ポリイミドフィルムの膜厚は、12.5, 25, 50 μ m の 3 通りを用いた。

矩形膜の変形形状は、矩形膜の下側に取り付けられたレーザー変位計で計測した。レーザー変位計は、自動 XY ステージに取り付けられており、自動 XY ステージを XY 方向 (水平面) にそれぞれ 2mm 間隔で移動させ計測を行なった。膜面上の計測点は 10201 (101 × 101) 点となる。計測の詳細は参考文献⁽⁴⁾に示す。

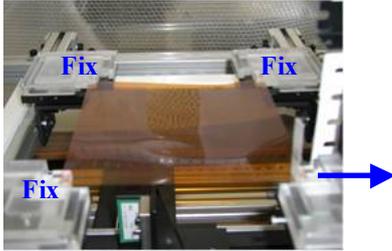
矩形膜へ負荷する荷重は、矩形膜の 1 隅に対して強制変位を導入することで与えた (Fig. 1 (b) 参照)。強制変位は、700 μ m をターゲットとし、別途設置したレーザー変位計で正確に計測した。強制変位は手動で導入したため、実験ケース毎に多少異なる結果となっている (Table 1 参照)。

実験ケースは、12.5 μ m の矩形膜に対して 3 ケース、25, 50 μ m の矩形膜に対してそれぞれ 1 ケースの計 5 ケースとした。Table 1 に実験ケースを示す。

*1 鳥取大学大学院 准教授



(a) Overall View



(b) Square Membrane

Fig.1 Outline of the Experiment Device

Tab.1 Experiment Cases

Cases	Thickness [μ m]	Enforced Displacement [μ m]
Case 1	12.5	672
Case 2	12.5	706
Case 3	12.5	719
Case 4	25	722
Case 5	50	705

2.2 計測結果

Fig.2~6に Case1~Case5の計測結果を示す. 同図は, それぞれ強制変位を導入する前後の膜面形状を示している. 図より, 矩形膜の端部ではレーザー変位計のスポットが膜面から外れるため正しく計測できていない点いくつか現れているが, それ以外の領域では膜面に生じた局所的な皺現象を良く計測できている.

膜面の面外変位は, これらの結果を基に強制変位導入前後の計測結果の差を計算することで求めた(式(1)参考).

$$w_{ij} = x_{ij}^a - x_{ij}^b \quad (1)$$

i : 計測点番号 ($i = 1 \dots N'$)

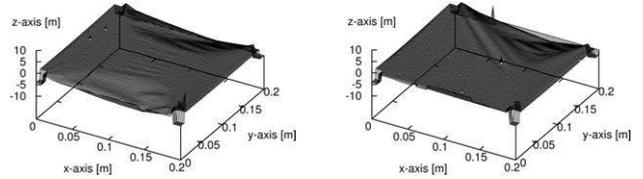
j : 実験ケース ($j = 1 \dots 5$)

$N' = 7921$: Fig. 7の破線領域内の計測点数

x_{ij}^a : 実験ケース j の計測点 i における変形後の計測値

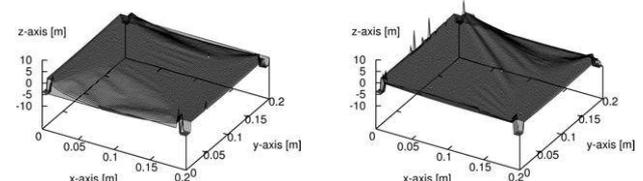
x_{ij}^b : 実験ケース j の計測点 i における変形前の計測値

なお, 膜面の面外変位の計算は, 矩形膜の4隅(アクリル板で固定される領域)と端部で膜面形状を正しく計測できていないため, Fig. 7に示す薄膜内部の矩形領域(図中の破線領域)に着目した.



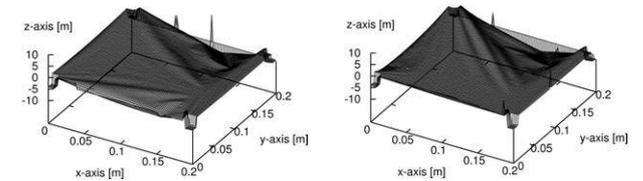
(a) Initial Surface Feature (b) Deformed Shape

Fig. 2 Measurement Result on Case1



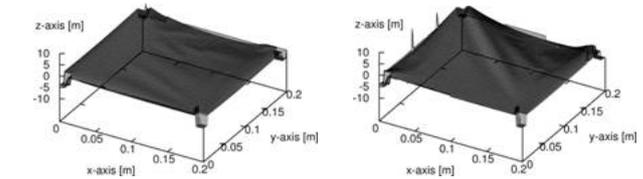
(a) Initial Surface Feature (b) Deformed Shape

Fig. 3 Measurement Result on Case2



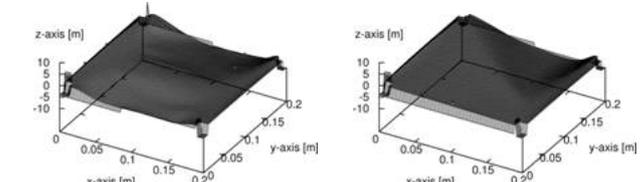
(a) Initial Surface Feature (b) Deformed Shape

Fig. 4 Measurement Result on Case3



(a) Initial Surface Feature (b) Deformed Shape

Fig. 5 Measurement Result on Case4



(a) Initial Surface Feature (b) Deformed Shape

Fig. 6 Measurement Result on Case5

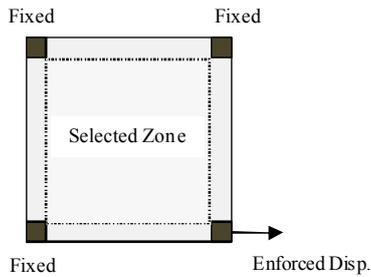


Fig. 7 Calculating Zones

3. 薄膜の面外変位の統計解析

3.1 面外変位の空間分布特性

式(1)を用いて計算した膜面の面外変位を統計解析し、その空間分布特性がどのような確率分布モデルに従うか検討した。検討にあたっては、面外変位が経験的に従うであろう確率分布モデルとして、正規分布と対数正規分布の2つのモデルを仮定した。正規分布と対数正規分布を予め仮定した理由は、宇宙機の音響振動や衝撃応答等は経験的に対数正規分布に従うことが報告されているためと^(5,6)、膜面の変位応答がこれらいずれかのモデルに従う場合、シミュレーション結果に加える信頼区間の計算等が容易になることを考慮したためである。

面外変位の空間分布特性は、正規確率プロット(QQプロット)を用いて検討した。正規確率プロット(QQプロット)では、対象とするデータが正規分布に従う場合、プロットされるデータが直線上に概ね分布する。

Fig.8~12 に実験データから求めた面外変位の正規確率プロットを示す。図中の対数スケールの結果は、面外変位を以下の式で対数スケールに変換した値をプロットしたものである。

$$\bar{w}_{ij} = \log\{abs(w_{ij})\} \quad (2)$$

図より、膜面の面外変位の正規確率プロットは、線形スケールでは局所的に大きな変化が見られ、対数スケールでは全体的に大きく曲がる結果となり、プロットされた点は直線近傍に分布していないことが分かる。参考までに、Fig. 13 に同じデータ数 ($N=7921$) の正規乱数を用いて正規確率プロットを描いた結果を示すが、この場合は綺麗な直線上に分布していることが分かる。

今回の実験で計測した膜面の変形形状は、局所的な座屈で生じた皺を含むため、座屈モードを含む特徴的な形状となっている。そのため、膜面の面外変位の空間分布特性は、このような特徴的な形状に含まれる規則性から、正規分布や対数正規分布には従わない結果になったと考えられる。

3.2 空間分布の特性値が従う確率分布

今回のモデルでは、膜面に生じる面外変位の空間分布特性は、正規分布や対数正規分布といった理論モデルには従わないと推定される結果となった。そこで、次に実験ケース毎に得られる空間分布が、実験間でどのような確率分布に属するのかを検討

するため、各実験ケースの面外変位に対して平均値・標準偏差・第三四分位点・中央値を計算し、これら4つのスカラー値が全実験ケースでどのような分布に従うかを検討した。平均値・標準偏差・第三四分位点・中央値は、面外変位の空間分布特性を表す特性値として利用する。表2に、各実験ケースに対し膜面の面外変位の平均値・標準偏差・第三四分位点・中央値を計算した結果を示す。

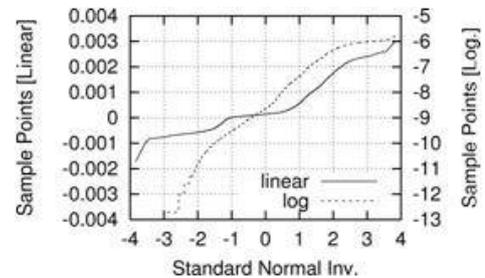


Fig. 8 Normal Probability Plot (QQ plot, CASE1)

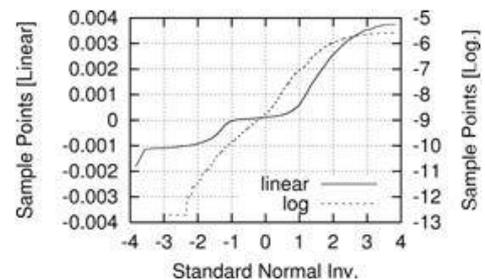


Fig. 9 Normal Probability Plot (QQ plot, CASE2)

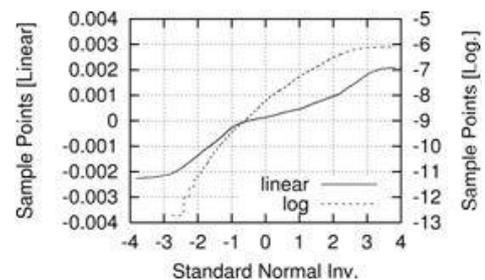


Fig. 10 Normal Probability Plot (QQ plot, CASE3)

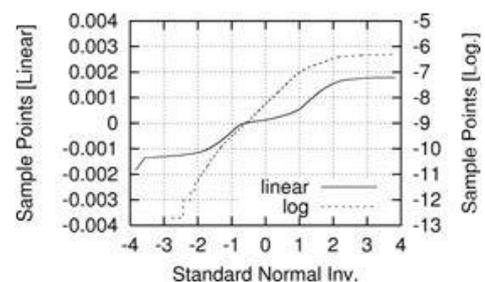


Fig. 11 Normal Probability Plot (QQ plot, CASE4)

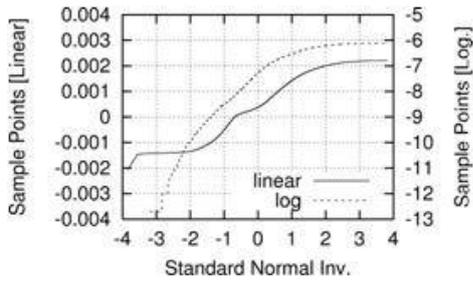


Fig. 12 Normal Probability Plot (QQ plot, CASE5)

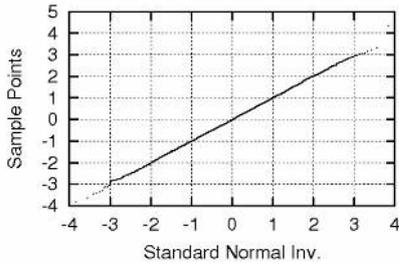


Fig. 13 Normal Probability Plot for Normal Random Number

Tab. 2 Amount of Statistics on Out of Plane Displacement

	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5
Spatial Average	249	275	74	139	434
Standard Deviation	492	723	524	576	877
75 Percentile	306	285	360	348	1077
Median	138	108	132	126	372

[μm]

次に、表 2 に示した平均値・標準偏差・第三四分位点・中央値に対し、正規確率プロット(QQプロット)を描かせた結果を Fig. 14 ~17 に示す。対数スケールは、膜面の面外変位の空間平均値・標準偏差・第三四分位点・中央値に対して式(2)と同様の処理を行って求めた結果である。

図より、膜面の面外変位の特性値は、完全には直線上に分布していないのが分かる。しかし、参考までに同じデータ数(実験ケース数)からなる正規乱数に対し、正規確率プロットを描かせた結果を Fig. 18 に示すが、Fig. 14, 15 に関しては同様のばらつき度合いとなっていることがわかる。したがって、データ数が少ないことから正規確率プロットのみでは理論モデルに従うか否かを判断することができない。そこで、膜面の面外変位の空間平均値・標準偏差・第三四分位点・中央値に対し、コルモゴロフ・スミルノフ検定(K-S 検定)を行い正規分布および対数正規分布への適合度について検討した。K-S 検定における帰無仮説は「膜面の面外変位の空間分布は、理論モデルに従う。」とし、統計解析ソフトウェア R を用いて実施した。

検定結果を Tab. 3 に示す。表中の値は p 値を表わしている。表より、平均値と標準偏差の p 値はいずれも 0.7 以上の値を示しており、適合度検定の帰無仮説を棄却できない結果となっている。また、第三四分位点や中央値についても、p 値が 0.2 以上であり有意水準を 5% としても適合度検定の帰無仮説を棄却できない。これより、今回の結果では、膜面の面外変位の空間分布は実験ケース間において正規分布にも対数正規分布にもいずれの分布にも従うといった仮説を棄却できない結果となり、特に平均値や標準偏差に関しては理論モデルへの適合度が高い結果となった。

今回の実験は、矩形膜の寸法、境界拘束の位置ならびに強制変位の導入方向を等しく設定するようにしているが、初期形状、境界拘束の完全性ならびに強制変位量等は必ずしも一致しているわけではなく、それらに間に規則性はないものと考えられ、このような結果になったものと考えられる。

以上より、各実験ケースにおける膜面の面外変位の空間分布は、正規分布や対数正規分布といった理論モデルに従わないと推定されるが、面外変位の空間分布の特性値(平均値・標準偏差・第三四分位点・中央値)は、実験ケース間では正規分布或いは対数正規分布等の理論モデルに従うと唆される結果を得た。今後は別の実験モデルや実験ケースを増やして検討していくとともに、今回の結果を基に解析結果に加えるマージン値を求める方法について検討していく予定である。

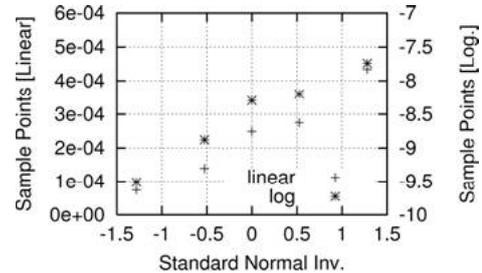


Fig. 14 Normal Probability Plot on Spatial Average

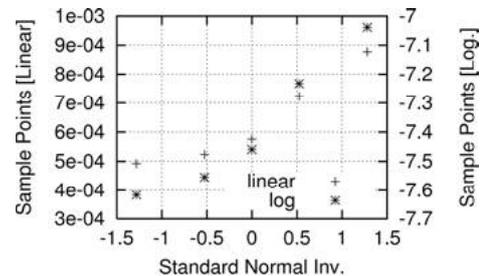


Fig. 15 Normal Probability Plot on Standard Deviation

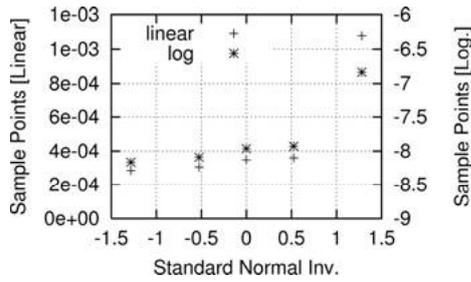


Fig. 16 Normal Probability Plot on 75 Percentile

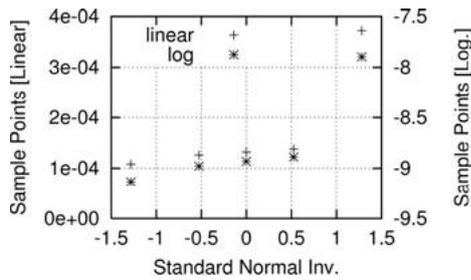


Fig. 17 Normal Probability Plot on Median

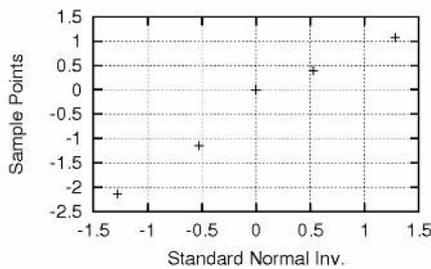


Fig. 18 Normal Probability Plot on Normal Random Number

Tab. 3 Results on Goodness of Fit Test (p-value, K-S Test)

	Normal Distribution	Log-Normal Distribution
Spatial Average	0.9839	0.8399
Standard deviation	0.7784	0.7799
75 Percentile	0.2283	0.3188
Median	0.2321	0.3153

4. まとめ

膜面のシミュレーション結果に適切なマージン値を設定するための取りかかりとして、皺の生じた膜面の形状計測を行い、実際の膜面の面外変位が経験的に従う確率分布モデルについて検討した。本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 3 隅固定 1 隅引張荷重を受ける正方形膜の面外変位の空間分布特性は、正規分布や対数正規分布といった理論モデルには従わないと推定される結果となった。
- (2) 膜面の面外変位の空間分布の特性値として、平均値・標準偏差・第三四分位点・中央値を考え、これらの値が実験ケース間でどのような確率分布に従うか検討した結果、面外変位の空間分布の特性値は正規分布等の理論モデルに従うと示唆される結果を得た。

これらの結果を踏まえ、今後は別モデルを用いて実験を行い、膜面の面外変位が従う確率分布について検証していく予定である。

謝辞

本研究は、ISAS/JAXA 戦略的開発研究費「先進軽量構造システムの研究」の活動の一環として実施されたものである。

参考文献

- (1) A. Meguro, K. Shintate, M. Usui and A. Tsujihara, "In-orbit deployment characteristics of large deployable antenna reflector onboard Engineering Test Satellite VIII," *Acta Astronautica* 65 (2009), pp1306-1316.
- (2) S. Ando and Q. Shi, "Prediction of Upper Tolerance Limit of Acceleration Power Spectrum Density of Satellite Panel under Diffused Acoustic Field Excitation," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, C* 72(722), 3348-3354, 2006-10-25.
- (3) T. Iwasa and Q. Shi, "Calculation Method for Flight Limit Load of V-band Clamp Separation Shock," *Journal of Space Engineering*, Vol. 3, No.1, 2010, pp. 15-23.
- (4) 岩佐貴史, 名取通弘, 樋口健, 古谷寛, "矩形膜のリンクリング現象に関する実験とその数値解析," 膜構造研究論文集, No.19, 2005.
- (5) "Dynamic Environmental Criteria," NASA HDBK-7005, March 13, 2001.
- (6) "Pyroshock Test Criteria," NASA-STD-7003, May 18, 1999.

Investigation on Empirical Probability Distribution Model of Out of Plane Displacement of Square Membranes held Fixed at Three Corners and subjected to Tensile Loading at Remaining One Corner

Takashi Iwasa ^{*1)}

SYNOPSIS

The shape measurement of the square wrinkled membranes was performed in order to clarify the empirical probability distribution model of the deformation behavior of the thin membranes, which include several uncertainties in the external forces and boundary constraints. The polyimide films whose size was 0.2m x 0.2m were treated. From the results, the spatial distribution of the out of plane displacement of the wrinkled membranes does not follow the normal distribution and log-normal distribution. However, it was shown that the statistics of the spatial distribution of the out of plane displacement such as average, standard deviation, 75 percentile and median follow theoretical models such as normal distribution and log-normal distribution.

*1) Tottori University, Associate Professor