

せん断負荷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}
杉田総平^{*2}

梗概

皺の形成過程ならびに消失過程における膜面の面外変位が経験的に従う確率分布モデルを検討するため、せん断負荷を受ける矩形膜を対象に DLT (Direct Linear Transformation) 法による形状計測実験を行った。対象とした薄膜はポリイミドフィルムとし、寸法 0.30m x 0.16m、膜厚 12.5×10^{-6} m の矩形膜とした。計測結果より、せん断負荷で生じる皺の形成過程ならびに引張負荷による皺の消失過程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は従わないものの、対数変換された膜面の面外変位の確率分布は膜面の変形過程や実験モデル間での変動が小さく類似性が高くなる結果を得た。

1. はじめに

ソーラー電力セイルやインフレータブルアンテナ等の大型宇宙構造物は、主要な構造要素が薄膜で構成される高度に軽量化された宇宙構造物である。このような超軽量大型宇宙構造物は、地上試験によって構造特性を検証することが難しく、数値シミュレーションを利用した「計算機実証」への期待が高まっている[1]。ところが、数値シミュレーションは数理モデルに含まれる仮定や解析モデルの不完全性(実モデルとの不一致性)等の影響で実現象との間には必ず差が生じてくる。この差は数値シミュレーション結果の信頼性に影響を与え、「計算機実証」を実現するうえで妨げとなる。

そこで、著者らは数値シミュレーションの信頼性を示す方法論の一つとして、数値シミュレーション結果に信頼区間を設定し、実際の応答を一定の確率で包絡するような上下限値を設ける方法を検討している[2,3]。この方法論は、数値シミュレーション結果と実際の挙動との差を決定論的に求めるのではなく、これらの差が従う確率分布を利用して信頼区間を設定し、信頼区間の大きさから数値シミュレーション結果の信頼性を評価しようとするものである。

その一環として、過去の研究では、3 隅固定 1 隅引張荷重を受ける矩形膜の面外変位を対象にその空間分布が従う確率モデルについて検討した[2]。本研究では、せん断負荷を受ける矩形膜モデルを対象に、皺の形成過程と消失過程の膜面の挙動を Direct Linear Transformation 法 (DLT 法) による画像計測法で測定し、膜面の面外変位の空間分布が従う確率モデルについて検討した結果を報告する。

2. 実験概要

2. 1 Direct Linear Transformation (DLT) 法

DLT 法は、複数台のデジタルカメラで撮影した画像から被計測物の 3 次元形状を復元する画像計測法の一つである。被計測物にはターゲット点が設置されており、このターゲット点の 3 次元位置座標を計算することで被計測物の 3 次元形状を求める。本研究では、画像計測ソフトウェア Move TR 3D ((株)ライブラリー)を用いて画像計測を行った。

2. 2 被計測物

Fig.1 に実験で用いた薄膜を示す。本研究では、寸法 0.30m x 0.16m、膜厚 12.5×10^{-6} m の矩形のポリイミドフィルムを計測した。図に示すように、薄膜の表面には画像計測用のターゲット点として直径 1.0×10^{-3} m の白丸を 6.0×10^{-3} m 間隔に設けている。ターゲット点の総数は 1323 点である。薄膜の上下端にはアクリル板が取り付けられており、アクリル板を介して薄膜をせん断負荷装置(次節で説明)に固定する。Tab. 1 にポリイミドフィルムの材料パラメータを示す。

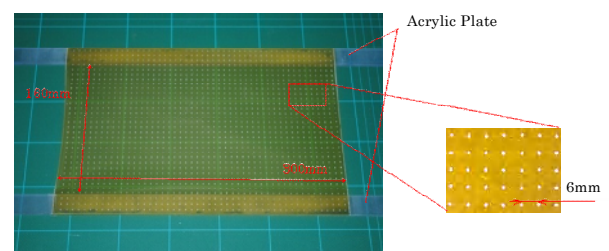


Fig.1 Membrane used in the experiment

*1 鳥取大学大学院 准教授

*2 第一精工株式会社

Tab. 1 Material parameters		
Property	Unit	Value
Tensile Strength	MPa	350
Tensile Elastic Modulus	MPa	3500
Thickness	$\times 10^{-6}\text{m}$	12.5

2. 3 セン断負荷装置

Fig.2 にせん断負荷装置を示す. 図に示すように, セン断負荷装置にはクランプバーが取り付けられており, このクランプバーにアクリル板(Fig.1)を挟むことで薄膜をせん断負荷装置に固定する. セン断負荷装置の上側クランプバーにはマイクロメータが 2 機設置されており, マイクロメータにより上側クランプバーは水平方向と鉛直方向に移動でき, 薄膜にせん断変位と引張変位を与えられる. セン断負荷装置の詳細は文献[4]に示す. 本研究では, セン断負荷を与えた際に生じる膜面の皺の形成過程と, その後引張負荷を与えた際の皺の消失過程を画像計測により測定した.

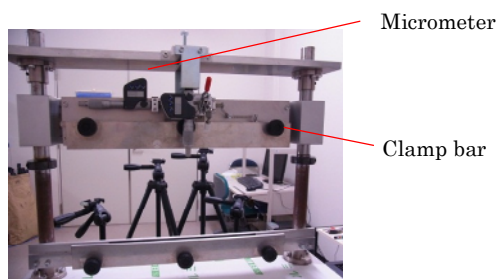


Fig. 2 Shear loading equipment

2. 4 計測コンフィグレーション

Fig.3 に計測状況写真を示す. 図に示すように, 薄膜を取り付けたせん断負荷装置を定盤の上に置き, 皺の形成過程と消失過程における膜面の変形形状を 4 台のデジタルカメラで撮影した. デジタルカメラは Nikon D3000 であり, 撮影時の各種パラメータは Tab.2 に示すとおりである. 焦点距離等のカメラパラメータは 4 台のカメラで同じ設定とした. Fig.4 にデジタルカメラとせん断負荷装置との相対的な位置関係を示す.

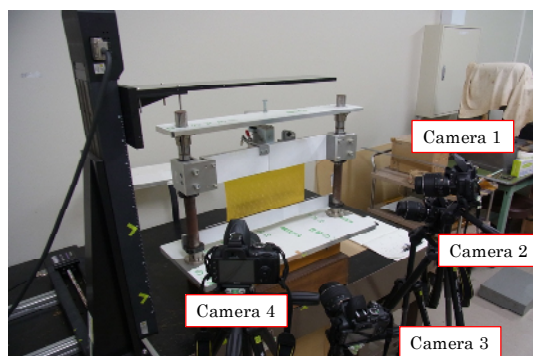


Fig.3 Picture of measurement situation

Tab.2 Parameters of digital cameras	
Model	Nikon D3000
Image Pickup Device	21.3x15.8 mm size CCD sensor
Number of Pixels	3872 x 2592
Exposure Time	1/6 sec

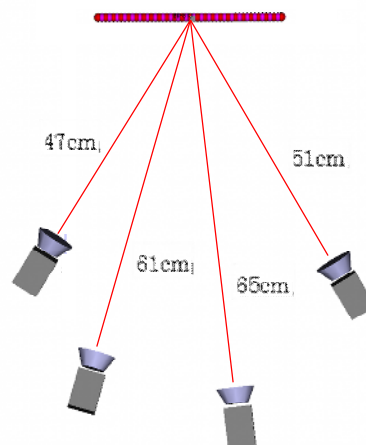


Fig. 4 Configuration of measurement equipment

2. 5 キャリブレーション

Fig.5 にキャリブレーション法を示す. 図に示すように, 本研究では 2 軸ステージ(シグマ光機:SGSP46-500, 位置決め精度 $25 \times 10^{-6}\text{m}$, 真直度 $20 \times 10^{-6}\text{m}$)に専用のキャリブレーションバーを取り付け, 2 軸方向に移動させることでキャリブレーションを行った. キャリブレーションバーには 0.05m 間隔で 9 個のコントロールポイントが設けてあり, その中の 3 点 (0.20m 間隔)を用いた.

Fig.6 に本研究におけるキャリブレーション点の配置図を示す. 図に示すように, 本研究では, 幅 0.40m , 高さ 0.19m , 奥行き 0.05m の計測空間内に 27 点のコントロールポイントを設定した. 実験では, キャリブレーションで設定した計測空間内にせん断負荷装置を設置し, 膜面の面外方向を z 軸方向とした.

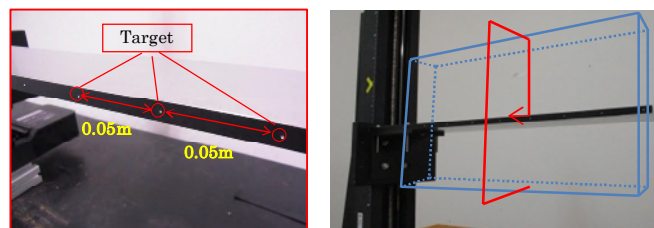
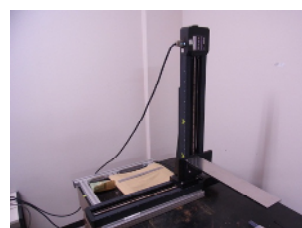


Fig.5 Calibration method

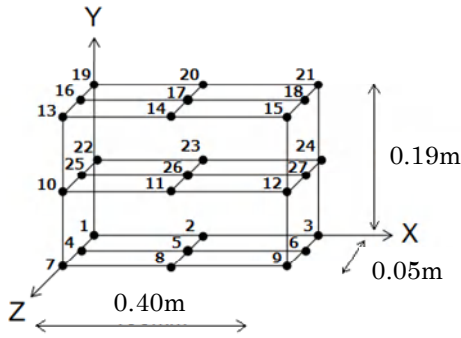


Fig.6 Configuration of calibration targets

2. 6 実験ケース

Tab.3に実験ケースを示す。本実験では6ケースの実験を行った。ケース1～3は初期張力を与えた薄膜にせん断変位を与えて皺を発生させるケース(皺の形成過程)であり、ケース4～6はせん断変位で発生した皺を引張変位によって消失させるケース(皺の消失過程)である。皺の形成過程と消失過程のいずれも実験の再現性を検証するために3回の実験を行った。各ケースで与えた強制変位量は同表に示すとおりであり、この値はマイクロメータで与えた数値を示している。

Tab.3 Experiment Cases

Cases	1	2	3	4	5	6
Behavior of Wrinkles	Formation Process			Dissipation Process		
Initial Enforced Disp.	Tensile : 0.5×10^{-3} m Shear : 0 m			Tensile : 0 m Shear : 1.0×10^{-3} m		
Final Enforced Disp.	Tensile : 0.5×10^{-3} m Shear : 1.0×10^{-3} m			Tensile : 1.0×10^{-3} m Shear : 1.0×10^{-3} m		

3. 計測精度の検証

3. 1 検証モデル

実験に先立ち本研究で用いた画像計測システムの計測精度について検証した。Fig. 7にx-y方向(面内方向)の計測精度の検証モデルを示す。図に示すように、面内方向の計測精度の検証モデルは、白色平板の表面に黒丸のターゲットを多数記したモデルである。この白色平板をせん断負荷装置の上側クランプバーに取り付け、x-y方向にマイクロメータで 0.1×10^{-3} mずつ10回移動させ(全移動量: 1.0×10^{-3} m)、その時の移動量と画像計測システムの計測結果とを比較した。この際、画像計測システムではFig.7に示した9個のターゲット点(図中の丸囲い)を計測した。

Fig.8にz軸方向の計測精度の検証モデルを示す。図に示すように、z軸方向の計測精度は2軸ステージに取り付けたキャリブレーションバーをz軸方向に 1.0×10^{-3} mずつ10回移動させ(全移動量は 10×10^{-3} m)、その時の移動量を画像計測システムで測定することで検証した。画像計測システムで測定したターゲット点はキャリブレーションバーに設置した7つのキャリブレーション点である(Fig.8参照)。

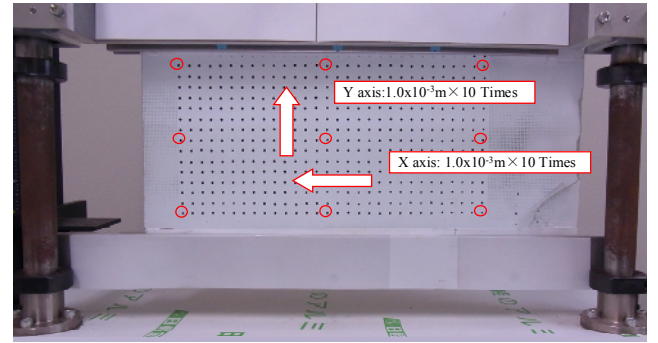


Fig. 7 White plate model

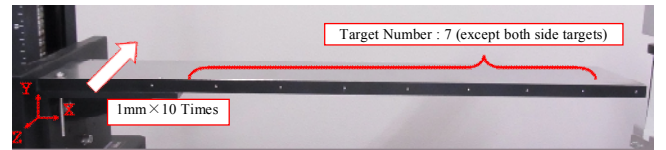


Fig. 8 Auto stage model

3. 2 検証結果

Tab. 4に検証結果を示す。表に示す値は、マイクロメータ或いは2軸ステージの移動量(各軸方向に対して10回の移動)を真値とし、それぞれ10回の移動量と画像計測システムで計測した各ターゲット点の移動量との差を求め、その差の標準偏差を計算した結果である。表に示すように今回の計測コンフィグレーションによる画像計測システムの計測精度は、x軸方向 17×10^{-6} m, y軸方向 14×10^{-6} m, z軸方向 33×10^{-6} mであった。

Tab. 4 Measurement accuracy

Directions	X axis	Y axis	Z axis
Measurement Accuracy	17×10^{-6} m	14×10^{-6} m	33×10^{-6} m

4. 膜面の面外変位が従う確率分布モデル

4. 1 矩形膜の変形挙動の計測結果

Figs. 9, 10にせん断負荷を与えて皺を発生させた際の膜面の変形挙動(初期形状からの相対変位)を示す。Fig.9は膜面の面外変位の空間分布を示しており、Fig.10はFig.9に示した結果の横方向中央断面図を示している。これらの図はCase1の結果に対応している。図より、せん断負荷を与えると薄膜の変形は矩形膜の中央部以外の領域から大きくなり、その後最終形状に至る。この傾向は他の実験ケースでも同様に見られた。皺の形成過程において矩形膜中央以外の領域から変形が大きくなるのは、過去の類似モデルを対象とした分岐解析による計算結果と傾向が同じである[5]。

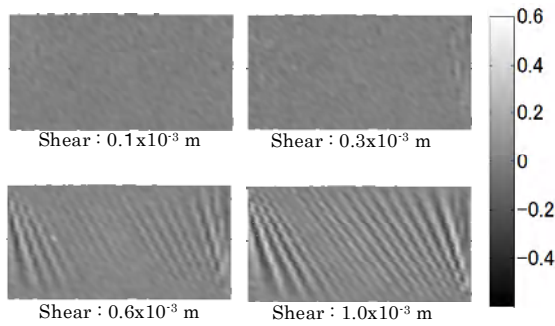


Fig.9 Deformation of membrane in Case 1

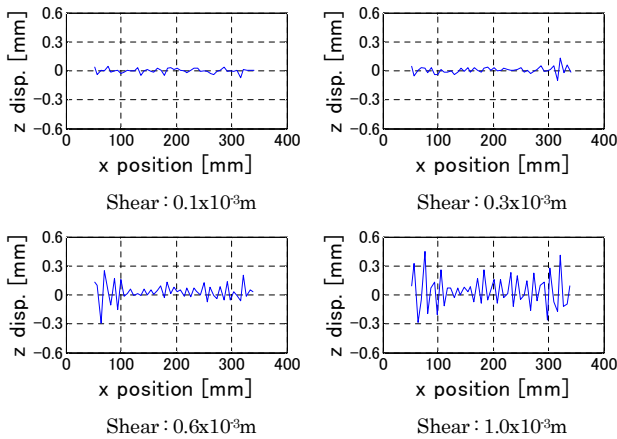


Fig.10 Cross-sectional deformation of membrane

Figs. 11, 12 には、引張変位を与えた際の皺の消失過程の膜面の変形挙動（皺の生じた膜面形状（初期形状）からの相対変位）を示す。Fig.11 は膜面の面外変位の空間分布を示しており、Fig.12 は Fig.11 に示した結果の横方向中央断面図を示している。これらの図は Case4 の結果に対応している。図より、皺が消失する際の変形挙動も皺の形成過程と同様に矩形膜の中央部以外の領域から大きくなり、引張負荷の増加とともに矩形膜全体に広がる傾向にある。この変形挙動の傾向は他の実験ケースでも同様に見られた。

皺の消失過程において、矩形膜中央部以外の領域から変形が大きく生じる原因としては、矩形膜端部が自由境界となっていることから皺を消失させる前の状態で応力状態の小さい弛み領域となっており、その結果引張変位を与えることにより変形が大きく生じたものと考えている。

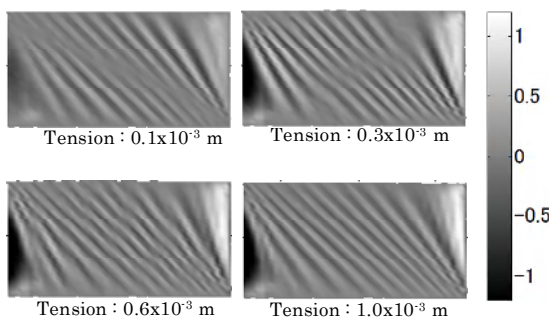


Fig.11 Deformation of membrane in Case 4

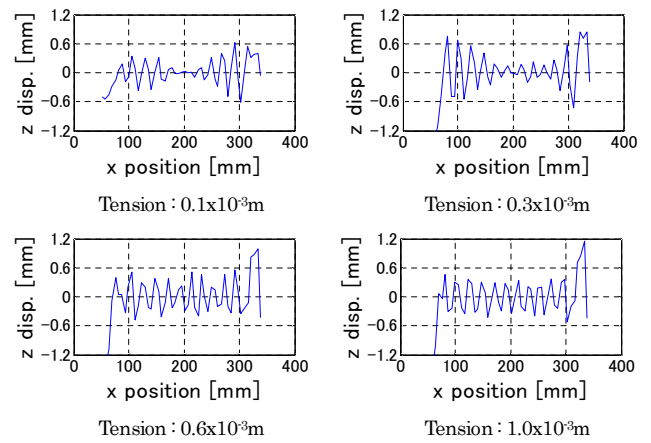


Fig.12 Cross-sectional deformation of membrane

4. 2 皺の形成過程における確率分布モデル

次に、皺が形成されていく過程の膜面の面外変位に対し、その空間分布が経験的に従う確率分布モデルを検討した。対象としたモデルは正規分布と対数正規分布である[6-9]。

Fig.13 に皺の形成過程における膜面の面外変位の正規確率プロット（線形スケール）を示し、Fig.14 に膜面の面外変位の絶対値を対数変換した値の正規確率プロット（対数スケール）を示す。Fig.14 において y 軸の数値が小さい領域で階段状の結果となっているが、これは有効数字に伴う影響である。図は、いずれも Case1 の結果を示している。Fig.13 より、皺の形成過程における膜面の面外変位の確率分布モデルは変形の進行とともに変動しているのがわかる。

一方、対数変換された膜面の面外変位の正規確率プロットは皺の形成過程においていずれも直線近傍に分布せず理論モデルには従わないものの、線形スケールの結果（Fig.13）と比較してみると正規確率プロットの形状がいずれも弓なり形状となっており皺の形成過程で類似性が見られる。同様の傾向は他のケース（Case2, 3）においても観測された。しかし、皺の形成過程における対数変換された膜面の面外変位の確率モデルが全て同一の母集団に属するか否かを KS 検定で確認したところ、形成過程における全ての確率分布モデルが属する同一の母集団は確認できなかった。

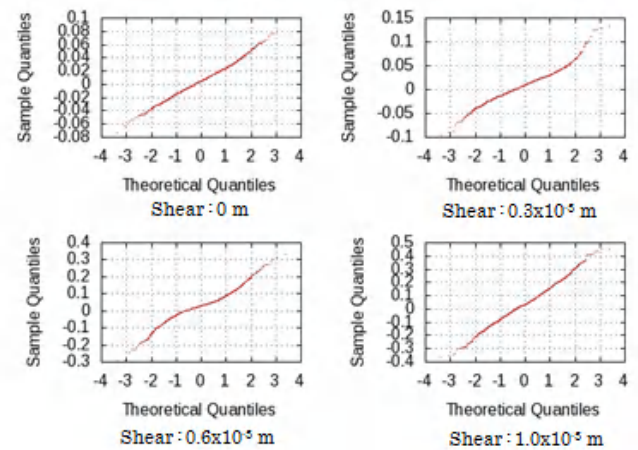


Fig.13 QQ-Plot of displacement with linear scale

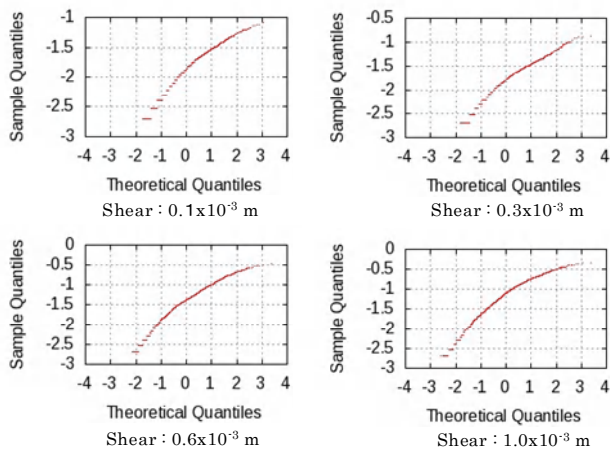


Fig.14 QQ-Plot of displacement with logarithmic scale

4. 3 皺の消失過程における確率分布モデル

Figs.15, 16に皺の消失過程における膜面の面外変位の正規確率プロットを示す。Fig. 15は膜面の面外変位の正規確率プロットであり、Fig. 16は面外変位の絶対値を対数変換した値の正規確率プロットである。図は、いずれも Case4の結果を示している。

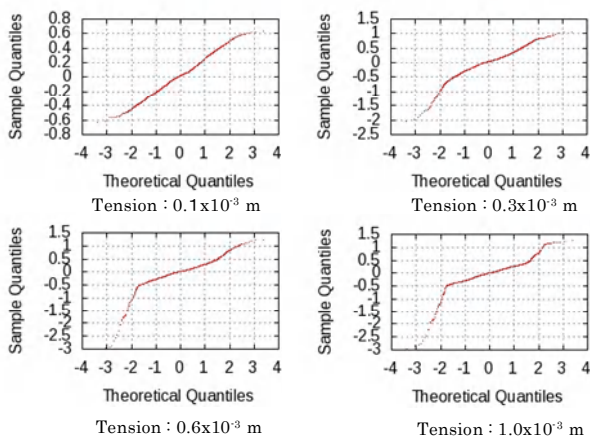


Fig.15 QQ-Plot of displacement with linear scale

Fig.15 より、皺の消失過程における膜面の面外変位は形成過程と同様に、多くの場合で直線近傍に分布しておらず理論モデルには従わないと推測される。また、皺の消失過程において正規確率プロットの形状の変動が大きい。一方、Fig.16 の結果より対数変換された膜面の面外変位は皺の形成過程と同様にいずれも直線近傍には分布しておらず理論モデルに従わないものの、正規確率プロットの形状はいずれも弓なり形状となっており線形スケールの結果のような極端な変動が見られない。しかし、膜面の対数変換された面外変位が全て同一の母集団から生じているか否かを KS 検定にて確認したところ、全ての結果が属する同一の母集団は確認できない結果となった。

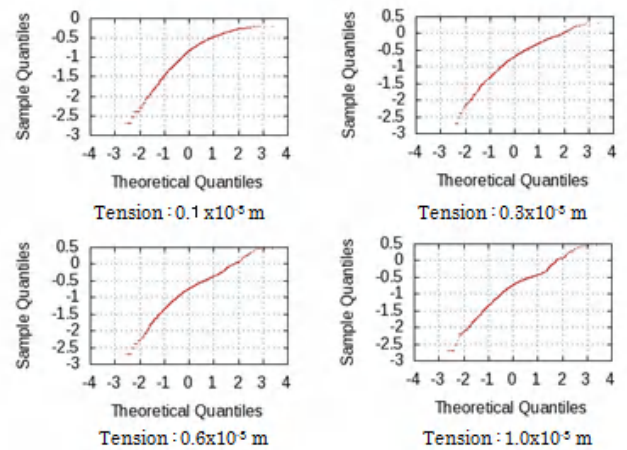


Fig.16 QQ-Plot of displacement with logarithmic scale

4. 4 膜面の面外変位が従う確率分布モデルについて

全節までの結果をみると、皺の形成過程ならびに消失過程における膜面の面外変位の確率分布モデルは、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ものの、対数変換された膜面の面外変位の正規確率プロットは変形過程においていずれも弓なり形状となり、線形スケールの結果ほど大きな変動が生じない結果となった。

そこで、過去の論文[2]で報告した1隅引張 3 隅固定の正方形膜モデルの結果と比較することで実験モデル間における確率分布モデルの類似性について検討した。Fig.17に1隅引張3隅固定の正方形膜モデルの正規確率プロットを示す。図は対数変換された膜面の面外変位の正規確率プロットであり、膜厚 12.5, 25, 50x10⁻⁶m の3とおりのモデルの結果である。

同図と今回の実験モデルとの結果(Figs.14, 16)を比較してみると、対数変換された膜面の面外変位の正規確率プロットの形状はいずれも弓なり形状となっており類似性がみられる。

したがって、これまでの実験モデルでは、膜面の面外変位を対数変換して得られる確率分布モデルは線形スケールの結果と比べて実験モデルや膜面の状態に影響を受けにくいモデルとなっている。今後は、皺の生じた膜面の面外変位を対数変換した際、その正規確率プロットの形状に類似性が生じる原因について実験と理論の両側面から検討していく予定である。

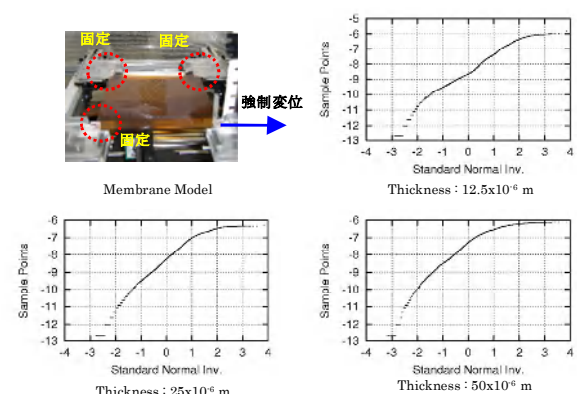


Fig.17 QQ-Plot for other membrane model

5. まとめ

皺の形成過程ならびに消失過程における膜面の面外変位が経験的に従う確率分布モデルを検討するため、せん断負荷を受ける矩形膜を対象に DLT (Direct Linear Transformation) 法による形状計測実験を行った。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 実験に先立ち本研究で用いた DLT 法に基づく画像計測システムの計測精度を検証した結果、面内方向(x-y 軸方向)の計測精度が $20 \times 10^{-6} \text{m}$ 以下、面外方向(z 軸方向)の計測精度が約 $30 \times 10^{-6} \text{m}$ であった。
- (2) せん断負荷を与えた際の皺の形成過程ならびに引張負荷を与えた際の皺の消失過程で生じる膜面の面外変位は、今回の実験では矩形膜中央部以外の領域から発生し、変形の進行に伴い全領域へと広がっていく傾向にあった。
- (3) 膜面の皺の形成過程ならびに消失過程における面外変位が経験的に従う確率分布モデルを検討した結果、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測される結果を得た。
- (4) 膜面の面外変位の確率分布は、皺の形成過程ならびに消失過程において変動するが、今回の実験ではその変動量は対数変換された面外変位の方が小さい結果となった。
- (5) 過去の実験を引用し実験モデル間での確率分布を比較した結果、対数変換された面外変位は正規確率プロットの形状に類似性がみられた。

謝辞

本研究は、公益財団法人マツダ財団(第 28 回マツダ研究助成)によりご支援を頂きました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- (1) N. Kogiso, H. Tanaka, T. Akita, K. Ishimura, H. Sakamoto, Y. Ogi, Y. Miyazaki, and T. Iwasa, "Structural Design Verification Using Simplified Model of Highly Precise Large-Scale Space Reflector", ASME Verification and Validation Symposium, 2012, V&V2012-6071,
- (2) 岩佐貴史, "皺の生じた正方形膜の面外変位の空間分布特性について," 日本機械学会宇宙工学部門, 第 19 回スペースエンジニアリングコンファレンス, 熊本, 2010.1.
- (3) T. Iwasa, "Calculation Method on Confident Interval for Wrinkling Analysis," Asian Pacific Conference on Shell and Spatial Structures, 2012, IASS-APCS-2012.
- (4) 岩佐貴史, 采光啓太, 杉山遼, 岸本直子, 樋口健, 藤垣元治, 塩川 貴之, "格子投影法によるポリイミドフィルムの表面形状計測", 航空宇宙技術, JSASS, Vol. 11, 2012, pp.69-78.
- (5) 泉田啓, "矩形せん断薄膜に分岐を伴わずに生じる皺の生成挙動," 第 28 回宇宙構造材料シンポジウム, JAXA, 相模原, 2012.
- (6) "Dynamic Environmental Criteria," NASA HDBK-7005, March 13, 2001.
- (7) "Pyroshock Test Criteria," NASA STD-7035, May 18, 1999.
- (8) 安藤成将, 施勤忠, "拡散音場で加振される人工衛星パネルの振動応答分散に関する検討," 日本機械学会論文集(C編), 72 巻, 720 号, 2006.8.
- (9) 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).

Investigation on Probability Distribution Model of Out of Plane Displacement of Rectangular Membranes Under Shear Loading

Takashi Iwasa ^{*1)}

Souhei Sugita ^{*2)}

SYNOPSIS

The surface configuration of the rectangular wrinkled membrane subjected to shear and tensile loadings was measured by the Direct Linear Transformation method, and a probability distribution model of the deformation behavior in the formation and dissipation processes of the wrinkles was investigated. The polyimide films whose size was 0.30m x 0.16m were treated. From the results, the probability distribution of the out of plane displacement of the membranes dose not follow the theoretical model such as normal and log normal distributions. However, the probability distribution shape of the logarithmic displacement shows little change during the deformation processes of the membranes and indicates an analogy between the experimental models treated in the work.

^{*1)} Tottori University, Associate Professor

^{*2)} Dai-ichi Seiko Co. Ltd..