

引張荷重を受ける正方形膜に生じるリンクルの計測と解析

小木曾 望^{*1}

伊藤 亜矢^{*2}

岩佐 貴史^{*3}

梗 概

本研究では、軽量宇宙構造としての利用が期待されている膜面構造に生じるリンクルを高精度に予測するために地上計測実験と非線形有限要素法による解析結果を比較する。地上計測実験としては、重力の影響を受けにくいように膜面を垂直に設置した実験装置を開発し、頂点に引張荷重を負荷した正方形膜面に生じるリンクルをレーザー変位計で計測する。その計測結果と MITC シェル要素を用いた擬似分岐座屈解析に基づく非線形有限要素法による解析結果とを比較し、解析精度を検証する。それらの比較に基づき、リンクル形状を高精度に推定するための解析モデルについて考察する。

1. 緒論

軽量で収納効率の高い膜材は、ソーラーセイルやインフレーターアンテナなどの大型軽量宇宙構造物の重要な構成要素と考えられている。しかし、膜材は曲げ剛性が非常に小さく、圧縮に対してほとんど抵抗することができないため、圧縮荷重のもとではリンクルが発生する。膜面に発生したリンクルは、膜構造物の力学特性だけでなく、その運用性能にも影響を与える可能性がある。したがって、膜面構造物の設計には、リンクルの生じる領域が極力少なくなるような設計を行うことが重要である。

膜面に生じるリンクル解析として、秋田らは張力場理論に基づいて定式化したリンクル量を提案¹⁾し、膜面に生じるリンクルを最小化する形状を求めてきた^{2,3)}。他方、この手法は、計算量は軽減されているが、張力場理論に基づいているため、膜面の面外変形を定量的に示すことができないという問題がある。面外変形を定量的に示すことができるシェル要素を用いたリンクル解析⁴⁾と比較することで、最適化によるリンクル低減の効果を示している⁵⁾が、十分とはいえない。

最適形状に対するリンクル低減の効果をより正確に示すためには、リンクル解析を計測実験により検証することが必要である。模型実験における膜面の面外形状の測定法には、CCD カメラを用いた写真測量法^{6,7,8)}や格子投影法⁹⁾、静電容量方式変位計¹⁰⁾やレーザー変位計^{4,11)}などの非接触式変位計が行われている。いずれの手法においても、地上計測においては、重力や空気の影響を考慮する必要がある。さ

らに、宇宙空間で利用する大型膜面構造に対しては、地上実験が困難なことが予測され、シミュレーションによる性能実証を中心として開発を進めていくことが不可欠となる。

そのため、大型宇宙膜面構造を実現するには、リンクル解析の高精度化が必要となる。そこで、本研究では、引張荷重を受ける正方形膜面構造に生じるリンクルに対して、実験によるリンクル計測結果と FEM によるリンクル解析とを比較し、その差異に対する誤差要因に対して考察する。

2. リンクル計測実験

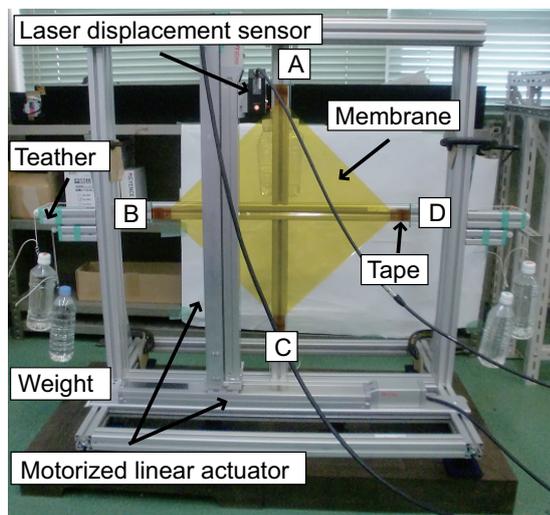
本研究では、膜面に生じるリンクル形状におよぼす重力の影響を小さくするために、膜面を地面に対して垂直に支持し、頂点に引張荷重を負荷して膜面に張力を与えてリンクルを計測する。そのために製作した装置を Fig. 1(a) に示す¹²⁾。この実験装置は、水平度 0.5mm/m、鉛直アクチュエータの鉛直度を 0.1mm/m の精度で調整している。

膜材は厚さ 12.5 μ m のカプトンフィルム (東レデュボン製, 50H) であり、一辺の長さ 400mm の正方形である。この膜材の物性値を Table 1 に示す。頂点 A, B, D は、Fig. 1(b) に示すように、厚さ 25 μ m、幅 30mm のカプトンテープで補強し、テザーとプーリーを介して引張荷重 (頂点 B, D に 9.8N、頂点 A に 1.96N) を負荷する。底部の頂点 C は、Fig. 1(c) に示すようにテザーを介して、フレームに固定する。なお、これらの頂点において、荷重の偏りやねじり変形を防ぐためにテザーは 2 本用い、テープに取り付けた金具を介して、2 本のテザーを平行に保っている。また、膜面に一様荷重

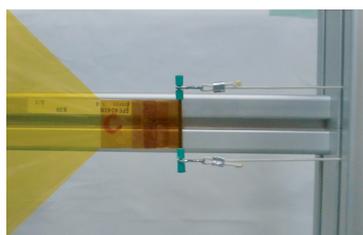
*1 大阪府立大学大学院 工学研究科 航空宇宙工学分野 准教授 博士 (工学)

*2 大阪府立大学大学院 工学研究科 航空宇宙工学分野

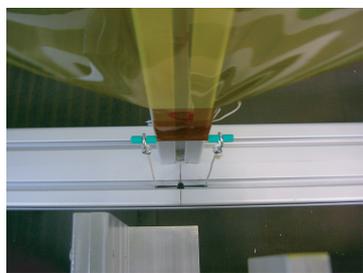
*3 鳥取大学大学院 工学研究科 宇宙機械工学専攻 准教授 博士 (工学)



(a) Experimental equipment



(b) Loaded corner stiffened by Kapton tape



(c) Fixed corner

Fig. 1: Experimental equipment and membrane setting

が負荷されるように、金具取付け位置を調整している。

このときに膜面に生じるリンクルの様子を Fig. 2 に示す。詳細は後述するが、水平方向に貫通する振幅の大きなリンクルが生じ、頂点付近には振幅の小さな短いリンクルが生じている。

リンクル計測には、レーザー変位計 (KEYENCE 社製, LK-G80, 分解能: $0.2\mu\text{m}$) を用いる。レーザー変位計を鉛直方向に移動させるために、一軸アクチュエータ (オリエンタルモーター社製, EZSM3E060MK) に取り付けている。その移動速度を調整することで、 0.2mm 間隔で変位を計測することが可能である。また、この鉛直方向一軸アクチュエータを水平方向一軸アクチュエータ (オリエンタルモーター社製, EZSM4E050MK) に搭載し、水平方向へも移動ができる。本研究では、Fig. 3 に示すように、鉛直方向にレーザー変位計を移動させながら面外変位を計測する。そのときの水平方向間隔は 16.6mm とする。また、上下の頂

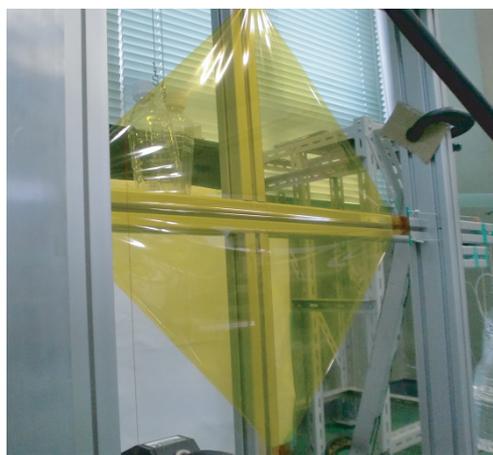


Fig. 2: Wrinkled membrane on experimental equipment

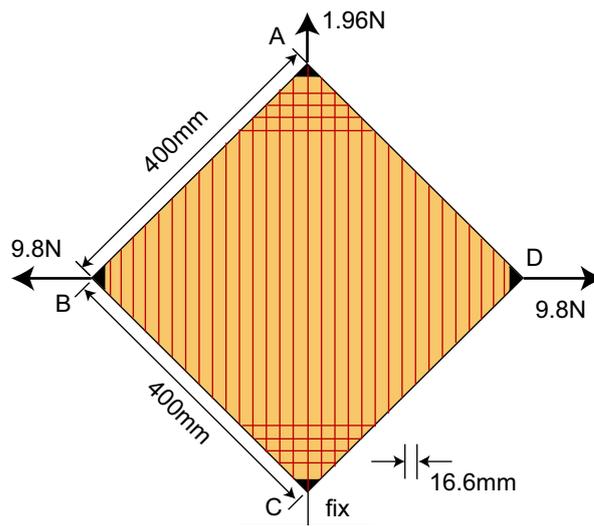


Fig. 3: Membrane model

Table 1: Membrane property

Young's modulus E	[MPa]	2959.6
Poisson's ratio ν		0.34
Dimension	[mm]	400×400
Thickness t	$[\mu\text{m}]$	12.5

点 A, C の近傍に生じるリンクルを計測するために、水平方向に移動させて面外変位を計測する。

3. 非線形有限要素法によるリンクル解析

3.1 幾何学的非線形有限要素解析

本研究では、リンクル解析のための非線形有限要素解析法として、FEAP(Finite Element Analysis Program)¹³⁾を用いる。シェル要素には、MITC (Mixed Interpolation of Tensorial Component) シェル要素¹⁴⁾を用いる。MITC 要素の特徴として、以下の4点があげられる。

1. 薄肉, 厚肉双方のシェルに適用でき, 薄肉シェル要素においても Locking 現象が生じない。
2. 剛体モード以外の虚偽のゼロ固有値を持たない。

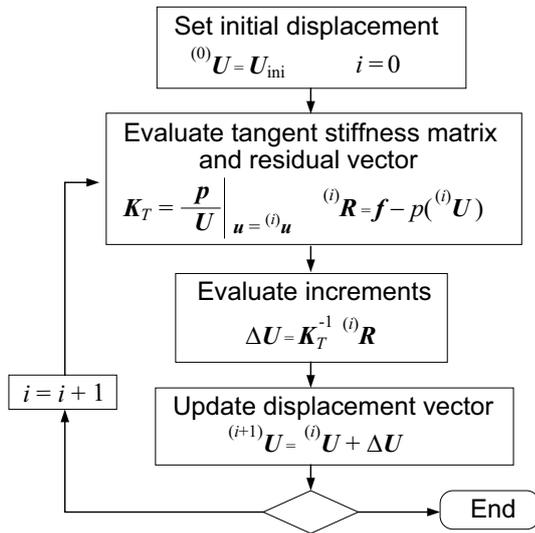


Fig. 4: Wrinkle analysis flow, $f = p(U)$

3. 要素のゆがみに対して、解の精度が損なわれない。
4. 要素内の任意の点に対して、ゼロを含む一定ひずみを表現できる。

これらの特徴は、リンクル現象のような極めて幾何学的非線形性の強い現象を解析するのに適している。

膜面に発生するリンクルは分岐座屈現象の一種であり、リンクル発生後に別の経路へ移行する不安定な現象である。しかし、今回の実験モデルでは、载荷によって生じたリンクルが、载荷とともに形状を大きく変化させるような飛び移り現象などの不安定な現象は生じないものと考え、解の経路を追跡するにあたっては、Newton-Raphson法を適用する。また、解析の収束性を向上させるためにLine-Search法を適用する。接線剛性マトリクスを計算する際に各節点で定義されるディレクターの回転項に有限回転項を考慮することで、解析ステップごとに完全な接線剛性マトリクスを計算し¹⁵⁾、解析の収束性と安定性を確保している。この解析のフローをFig. 4に示す。

3.2 解析モデル

1辺0.4m×0.4m、膜厚12.5μmの矩形膜の頂点部に現れるリンクル形状を求めるために、Fig. 5(a)に示すように、節点数8241、要素数8000で要素分割を行う。また、幅30mmのテープで補強した領域をモデル化するために、解析モデルでは、Fig. 5(b)に示すように、テープで補強した領域を削除した形状(厳密には八角形)とする。

要素分割において、中央の正方形部は40×40の均一な正方形要素とし、各頂点に向かう台形部は40×30の四辺形要素を用いる。また、頂点に向かっても、四辺形要素がつぶれないように分割幅を変えている。

境界条件は、計測実験条件に合わせて、矩形膜の下端Cを完全固定し、残りの水平頂点(B, D)に外力 T_1 を、最上

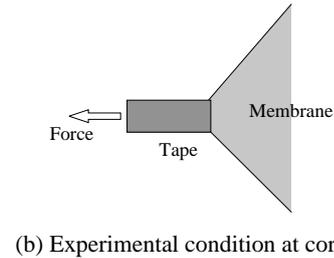
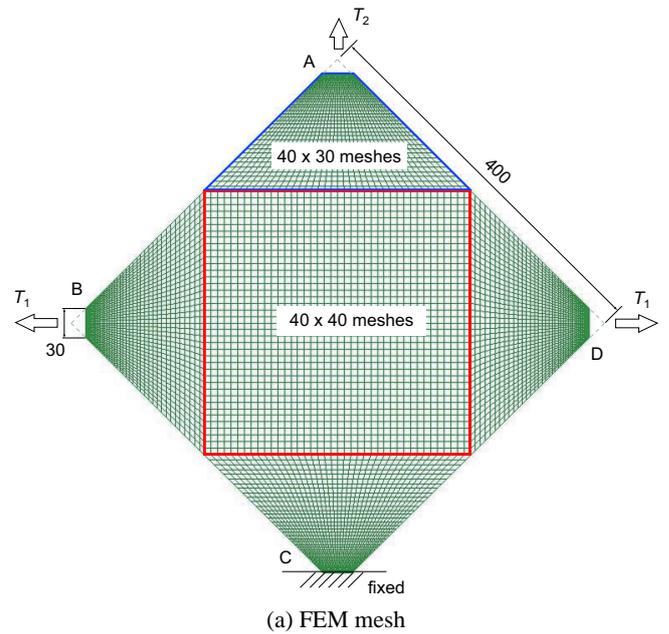


Fig. 5: FEM model

端Aに外力 T_2 を与える。このとき、頂点Cでは30mmの辺を固定し、その他の荷重負荷頂点には、30mmの辺に対する等価な分布荷重として引張荷重を負荷している。

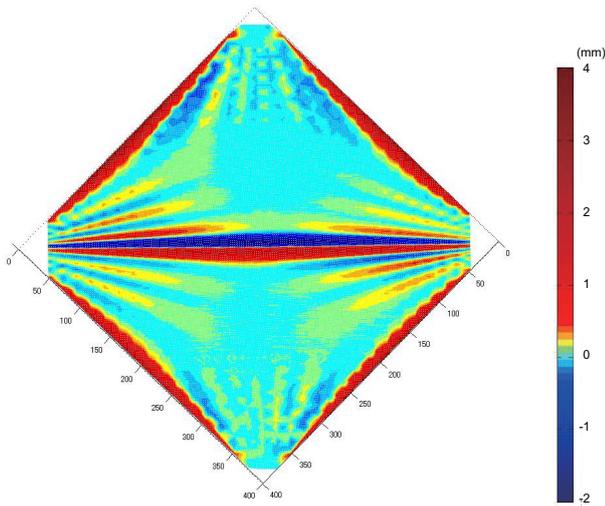
実験条件を厳密に再現するためには、矩形膜の初期形状を全視野で計測し、その結果を初期条件に用いて解析を行う必要がある¹⁶⁾。しかし、本研究の計測実験では矩形膜の初期形状を全視野で計測することが困難なため、初期不整を矩形膜の面外方向に正規乱数で与える疑似分岐座屈解析を採用する。そして、解析の収束性を考慮し、初期不整の大きさは膜厚に対して1/10程度となるように設定する¹⁷⁾。

4. 計測結果と解析結果の比較

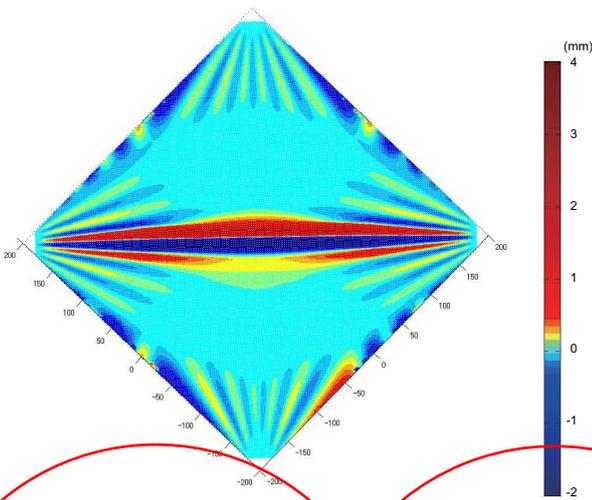
4.1 リンクル分布の比較

膜面全体の実験計測結果をFig. 6(a)に、解析結果をFig. 6(b)に示す。

実験においては、Fig. 3に示したように、レーザー変位計を鉛直方向に移動させながら計測した面外変位に、上下の頂点AおよびC付近だけを水平方向にレーザー変位計を移動させながら計測した結果を重ね合わせた面外変位を示している。計測結果は、上下の頂点AおよびC付近に凹凸があるように見えるが、これは、計測ラインが16.6mm間隔と広いために生じた作図上の補間による差異であり、実際にはこのような凹凸は存在しない(Fig. 2参照)。



(a) Experiment



(b) FEM analysis

Fig. 6: Comparison of wrinkle distributions

さて、実験と解析の両方において、引張荷重の大きな水平方向にはっきりとした面外変位がみてとれる。さらに、水平方向頂点だけでなく、上下の頂点にも近傍には複数本の細かいリンクルが表れている。FEM 解析で得られた最小主応力分布を Fig. 7 に示す。リンクルに沿って、最小主応力が負の値をとっており、解析で得られた面外変位はリンクルによるものと判断できる。

なお、実験結果に見られる周辺部の大きな面外変位については後述することとする。

次に、Fig. 8 に示す鉛直方向のライン上における面外変位の計測結果と解析結果を比較する。水平方向荷重点 B, D を結ぶ中央に生じる大きなリンクル形状は Fig. 9(a)~(d) のそれぞれの断面において、実験と解析でほぼ一致している。しかし、振幅、周期ともに解析の方が実験よりも大きな値となっている。Fig. 9(a) 中央部での変位は、Table 2 に示すように、プラス側では実験値と解析値は比較的近い値であるが、マイナス側ではその差が大きい。

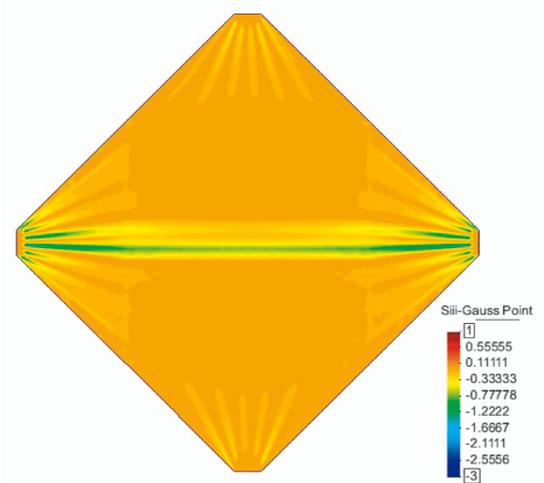


Fig. 7: Minor stress distribution by FEM analysis

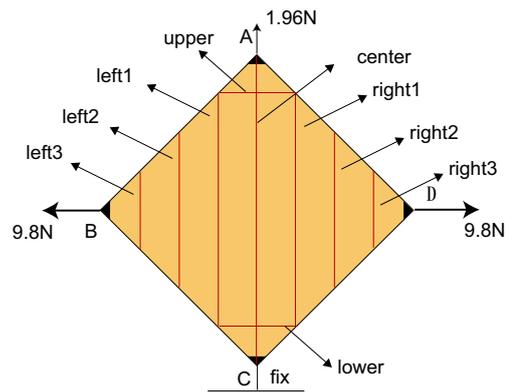


Fig. 8: Position of compared line segment

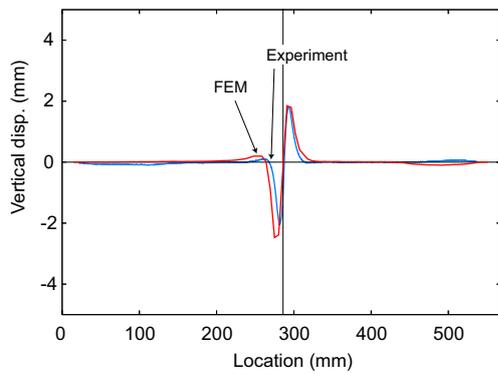
Table 2: Comparison of maximum displacement at center-line

	Experiment	FEM analysis
Positive side	1.853	1.706
Negative side	-2.019	-2.645

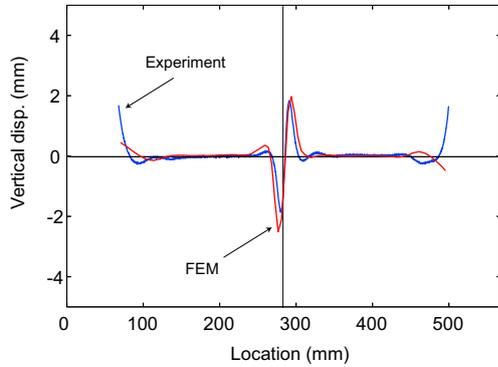
荷重点近傍に現れる小さなリンクルに対しては、Fig. 9(c), (d) に示すように、波数は一致しているようだが、リンクル形状が一致しているとは言いがたい。これは、周辺部のたるみ (slack) による変形が影響していると考えられる。

次に、Fig. 8 に示す上下の頂点に近い 2 つの水平線上の面外変位の計測結果と解析結果を Fig. 10 で比較する。鉛直方向の荷重自体が小さいために、上下頂点付近に生じているリンクルの振幅は、水平方向頂点 B, D 近傍のリンクル振幅よりも小さく、複数のリンクルに対してほぼ同じ振幅となっている。

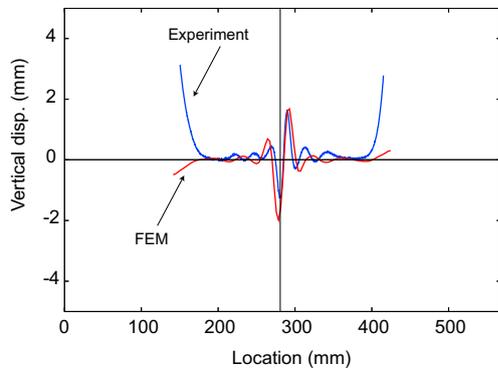
実験結果では、周辺部が slack の影響で大きな面外変形が生じているために、リンクル本数が左右で非対称となっている。そのために、解析結果とリンクル本数が異なっているが、リンクルの振幅、周期ともに、実験と解析でほぼ一致している。



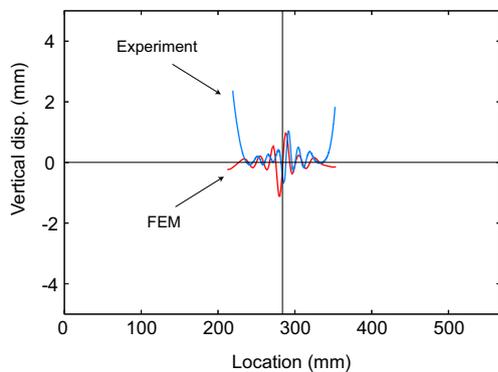
(a) Center



(b) Right 1



(c) Right 2

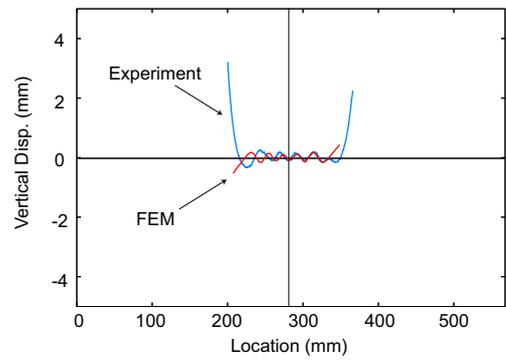


(d) Right 3

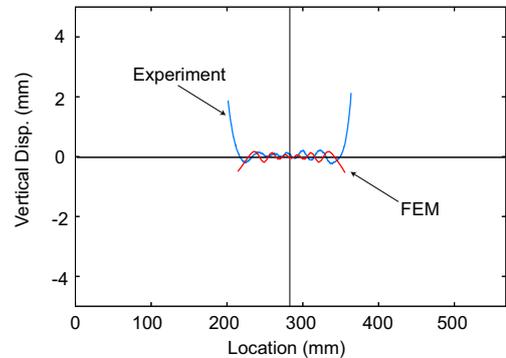
Fig. 9: Wrinkle distributions along vertical line segment

4.2 周辺部のたわみの比較

前節の Fig. 6 からわかるように、解析と実験においては周辺部のたわみの形状が大きく異なっている。実験における周辺部のたわみについて、これまでは (i) 巻きグセの影響



(a) Upper



(b) Lower

Fig. 10: Wrinkle distributions along horizontal line segment

響、(ii) 切断時の塑性変形の影響などを考えてきたが、今回、膜を詳細に観察したことにより、これらの影響は小さいと判断した。実験に使用した膜面は、幅 500mm のロール状から、幅方向に平行となるように一辺 400mm の正方形に切り出している。その巻きグセの影響が大きければ、対辺 AB, DC と対辺 AD, BC で異なった傾向が見られるはずであるが、Fig. 6(a) に示すように、周辺部のたわみはほぼ等しい。また、膜面の切り出しにおいては、膜面の下に薄い紙を敷き、その紙が切れないように膜を切り出しているため、切り出し時に切断面の塑性変形はほとんど生じていないと考えられる。

他方、Fig. 7 に示したように、周境界付近の応力はほぼゼロで slack 状態にある。このことから、周辺部の初期不整や重力の影響により、引張荷重を負荷した際にある種の安定状態として、このような形状になるものと考えられる。

周辺部のたわみは、中央部の大きなリンクルに対してはほとんど影響がないと考えられるが、荷重端近傍に生じるリンクルに対しては、Fig. 9(d) に示すように周辺部のたわみの影響を受ける。

解析結果においても、Fig. 6(b) に示すように、周辺部には slack 状態の影響と考えられる変形がみられ、その変形方向は一方向ではなく、不規則となっている。このような変形状態は、乱数で与えた小さな初期不整からの変形によって生じたものと考えられる。

今後は、解析においてはさらに細かい要素分割や高次要

素の使用, 初期不整の影響などのさらなる検討が必要である. また, 現在の計測方法では初期形状の影響をみることができないため, 周辺部の影響を詳細に観察できる計測方法を考案することが必要となる.

5. 結論

本研究では, 頂点に引張荷重を受ける正方形膜面に生じるリンクルに対して, 実験計測結果と FEM 解析によるリンクル分布との比較を行った. 実験においては, 膜面を鉛直に設置することで, 重力の影響を最小限に抑えた状態でのリンクル計測を実現している. 解析においては, MITC シェル要素を用いた疑似分岐座屈解析に基づく非線形有限要素解析を採用し, さらに, 頂点付近の要素分割を細かくすることで, 高精度化をめざした.

解析で得られたリンクル形状と計測実験で得られた面外変形形状に対して, 膜面全体の分布は, 広い範囲で一致していることを示した. さらに, いくつかの代表的な計測線上での比較を通して, 解析で得られたリンクル形状が高い精度で実験結果に一致していることを示した.

また, 実験で得られた膜境界部のたわみについて考察し, さらなる高精度化のための課題について述べた.

謝辞

本研究は, 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所の戦略的開発研究費「先進軽量構造システムの研究」からの支援をいただいた. ここに謝意を表する.

[参考文献]

- 1) Akita, T., Nakashino, K., Natori, M. C., and Park, K. C., A Simple Computer Implementation of Membrane Wrinkle Behavior via a Projection Technique, *International Journal of Numerical Methods for Engineering*, Vol. 71, No. 10, pp. 1231-1259, 2007.
- 2) 秋田剛, 名取通弘, 膜面のリンクルに関する感度解析, *宇宙技術*, Vol. 5, pp. 33-41, 2006.
- 3) 小木曾望, 平城大典, 秋田剛, 膜面のリンクル最小化のための NURBS 曲線を用いた形状最適設計, *日本航空宇宙学会論文集*, Vol. 56, No. 649, pp. 72-79, 2008.
- 4) Iwasa, T., Natori, M. C., and Higuchi, K., Evaluation of Tension Field Theory for Wrinkling Analysis with Respect to the Post-Buckling Study, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 71, No. 4, pp. 532-540, 2004.
- 5) 秋田剛, 小木曾望, リンクルの低減を目的とした矩形膜の周辺境界設計, *膜構造研究論文集*, No. 22, pp. 15-24, 2008.
- 6) Blandino, J. R., Johnston, J. D., Miles, J. J., and Soplop, J. S., Thin Film Membrane Wrinkling due to Mechanical and Thermal Loads, *AIAA Paper* 2001-1345, April 2001.
- 7) Blandino, J. R., Johnston, J. D., Miles, J. J., and Dharamasi, U. K., The Effect of Asymmetric Mechanical and Thermal Loading on Membrane Wrinkling, *AIAA Paper* 2002-1371, 2002.
- 8) Black, J. T., Leifer, J., DeMoss, J. A., Walker, E. N., and Belvin, W. K., Experimental and Numerical Correlation of Gravity Sag In Solar Sail Quality Membranes, *AIAA Paper* 2004-1579, April 2004.
- 9) 塩路義行, 樋口健, 岸本直子, 藤垣元治, 森本吉春, 格子投影法によるメッシュ膜面の面外形状の計測, 第 52 回構造強度に関する講演会, 1B06, pp. 61-63, 2010.
- 10) Jenkins, C. H., Haugen, F., and Spicher, W. H., Experimental Measurement of Wrinkling in Membranes Undergoing Planar Deformation, *Experimental Mechanics*, Vol. 38, No. 2, pp. 147-152, 1998.
- 11) Wong, Y.W., and Pellegrino, S., Wrinkled Membranes, Part I: experiments, *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-23, 2006.
- 12) 小木曾望, 伊藤亜矢, 岩佐貴史, 頂点に引張荷重を負荷した膜面のリンクル計測と解析との比較, 第 25 回宇宙構造・材料シンポジウム, pp. 80-83, 2009.
- 13) Taylor, R. L., A Finite Element Analysis Program User Manual, ver. 8.2, <http://www.ce.berkeley.edu/projects/feap/>
- 14) Bathe, K.-J. and Dvorkin, E. N., A Formation of General Shell Elements - The Use of Mixed Interpolation of Tensorial Components, *International Journal of Numerical Methods for Engineering*, Vol. 22, pp. 697-722, 1986.
- 15) 野口裕久, 久田俊明, 有限回転増分を考慮した効率的シェル要素の開発およびその評価, *日本機械学会論文集 (A 編)*, Vol. 58, No. 550, pp. 127-134, 1992.
- 16) Jacobson, M. B., Iwasa, T. and Natori, M. C., Quantifying Square Membrane Wrinkle Behavior Using MITC Shell Elements, *AIAA* 2004-1741, 2004.
- 17) 岩佐貴史, 名取通弘, 樋口健, 野口裕久, 円形張力膜のリンクル現象に関する幾何学的非線形解析, *膜構造研究論文集*, No.16, pp. 7-14, 2002.
- 18) Wong, Y. W. and Pellegrino, S., Wrinkled Membranes, Part 3: Numerical simulations, *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, Vol. 1, No. 1, pp. 63-95, 2006.

Comparison between Experiment and FEM Analysis of Square Membrane Wrinkling under Tension Load Applied at Corners

Nozomu KOGISO *1)

Aya ITO *2)

Takashi IWASA *3)

SYNOPSIS

This research addresses wrinkle distribution of the square membrane structure by tension loads applied at corners. The measurement system is built as the square membrane set in upright position and the wrinkle distribution is measured by using laser displacement sensor that is set at a horizontal-vertical stage composed of linear actuators. On the other hand, numerical solution is evaluated through geometrically nonlinear finite element analysis using MITC(Mixed Interpolation of Tensile Components) shell elements. In comparison of numerical results with wrinkle measurement results, the significant factors that give rise to difference between analysis and experiment is discussed to develop an accurate wrinkling analysis model.

*1) Dr.-Eng., Associate Professor, Osaka Prefecture University

*2) Graduate Student, Osaka Prefecture University

*3) Dr.-Eng., Associate Professor, Tottori University