

論文の内容の要旨

論文題目： リンクルを有する膜面の定量的評価に関する研究

氏名： 岩佐 貴史

本研究は、有限要素解析および模型実験により、リンクルおよびスラックを有する膜面の面外特性を定量的に検討したものである。本研究では代表的なリンクル現象として円形膜の中央に設置した回転軸を反時計周りに回転させた際に発生するリンクル現象 (図 1) と矩形膜の 3 隅を完全固定し残りの 1 隅に引張力を作用させた際に発生するリンクル現象 (図 2) を検討した。膜の微小な曲げ剛性を考慮した幾何学的非線形有限要素法として Locking Free 要素として代表的な MITC (Mixed Interpolation of Tensorial Components) シェル要素を用いた。本要素は、埋込座標系でのひずみ成分を用いることによって要素のひずみに対しても精度の高い解が得られるため、現在信頼性の高い要素の一つとして知られている。中央に回転軸を設置した円形膜の解析では、MITC シェル要素を用いた有限要素解析をリンクル解析に適用する際に必要となる解析条件を明らかにした。そして、構造スケール (円形膜半径と回転軸半径の差/膜厚)、初期張力、回転軸半径および載荷経路がリンクル特性に与える影響を定量的に示した。これらの結果は、膜厚が零に漸近する極限においても従来の張力場理論が示す解に漸近しない (図 3)。従来の張力場理論はリンクル領域内での圧縮応力の存在を考慮しておらず、境界拘束の影響を含めることができない。本研究では、従来の張力場理論がそのような理由で実際のリンクル現象を再現できないことを明らかにした。また、矩形膜を対象とした模型実験では、構造スケールおよび初期形状がリンクルおよびスラックに与える影響を定量的に検討した。そして、これらの結果と解析結果とを比較することにより (図 4)、幾何学的非線形有限要素解析の妥当性を示した。さらに、非線形性の強いリンクル現象特有の問題点として、解析結果は境界条件および重力の載荷順序に非常に敏感であることを指摘した。矩形膜を対象とした解析では、リンクルおよびスラックを有する複雑な膜面形状を包括的且つ定量的に検討するために 2 次元フーリエ変換を用いた膜面の形状解析法 (スペクトル解析法, 図 5) を提案し、その有効性を示した。このスペクトル解析法によれば、構造スケール (辺長/膜厚)、初期形状および重力の有無が載荷後の膜面形状に与える影響について検討でき、それらを簡明に示すことができる。

本研究における張力場理論の定量的な評価は、張力場理論を用いた膜構造物の設計に対する信頼性を確保するために必要不可欠である。また、リンクルおよびスラックを有する複雑な膜面形状を定量的にシミュレートする解析技術とその形状解析法の確立は、膜を積極的に利用する次世代大型宇宙構造物の設計の自由度を広げるとともに、リンクルを許容する膜構造物といった新しい構造概念を作り出すことを可能とする。本研究の意義はそのようにリンクルを有する膜面の定量的な解析が、今後直面するであろう膜構造物に関する工学的な諸問題に適切に対応し、そして従来の膜構造物の設計概念を越えた新しい構造概念を構築するための一手段を提供するところにある。

本研究で得られた具体的な知見を以下にまとめる．

1) リンクル解析に適する解析条件

シェル要素を用いてリンクル解析を行うと，得られる解は要素数，解析ステップ数およびシェル要素の形状関数に依存することが知られている．また，初期不整を考慮した幾何学的非線形解析の場合，得られる解は初期不整の形状およびその大きさにも依存する．そこで，MITC シェル要素による幾何学的非線形有限要素解析をリンクル解析に適用するにあたって必要となる解析条件を求めた．表 1 に解析条件を示す．尚，表 1 に示す解析条件はリンクル発生後の変形モードに着目した場合であり，変形モードが収束する条件を示している．ただし，初期不整には正規乱数（膜厚に対して 10% 以下の大きさ）を用い，形状関数に 4 節点 MITC シェル要素を用いる．

表 1 リンクル解析に適する解析条件

検討項目	解析条件	備考
要素アスペクト比	$h_r < 50, h_c < 20$	h_r ：半径方向要素幅/膜厚 h_c ：円周方向要素幅/膜厚 回転軸に隣接する要素を対象
解析ステップ比	$\delta_s < 10^{-3}$	δ_s ：載荷変位増分/円周方向要素幅 回転軸に隣接する要素を対象

2) リンクル特性の定量的検討

MITC シェル要素による幾何学的非線形有限要素解析により，構造スケール，初期張力，回転軸半径および載荷経路に依存するリンクルの面外特性について定量的に示した．リンクル発生本数は構造スケール，初期張力および回転軸半径が大きい程増大する．また，リンクル発生領域は構造スケールおよび初期張力が大きい程小さくなり，回転軸半径が大きいほど大きくなる．リンクル領域内に発生する圧縮応力は構造スケールが大きい程，また回転軸半径が小さい程解放される．載荷経路が膜面形状に与える影響は構造スケールが大きい程大きく，応力状態に与える影響は構造スケールが小さい程大きい．

3) 張力場理論の定量的評価

膜面の応力場により面外現象を推定する従来の張力場理論では解明できないリンクル波の存在を明らかにした．また，張力場理論をリンクル解析に用いる際の適用範囲を構造スケールを用いて検討した．そして，膜はリンクル領域内でリンクル波を拘束する境界条件を有する場合には座屈応力以上の圧縮応力を負担する構造材料であることを示した．この圧縮応力の存在により構造スケールが無敵大になる極限においても実際のリンクル現象は張力場理論解に漸近しないことを明らかにした．

4) 模型実験

矩形膜を対象とした模型実験を行い，構造スケールおよび初期形状に依存する膜面の実際の面外特性を定量的に明らかにした．また，実験結果と解析結果を比較することにより，リンクルを有する膜面の数値解析は他の構造材料を対象とした数値解析と比較して重力や境界条件の影響に極めて敏感であることを明らかにした．

5) 膜面の形状解析法 (スペクトル解析法) とその有効性

リンクルおよびスラックを有する膜面全体の挙動を包括的且つ定量的に検討するための方法として2次元フーリエ変換を用いたスペクトル解析法を提案し, その有効性を示した. 本解析法は, 複雑な膜面形状を振幅と波長成分および振幅と方向角成分に着目して検討することができ, 従来の断面形状による局所的な検討方法および変形図の目視による定性的な検討方法では解明できなかった膜面全体の定量的な挙動を簡明に示すことができる. このスペクトル解析法により, 構造スケール, 重力および初期形状が载荷後の膜面形状に与える影響を定量的に明らかにした.

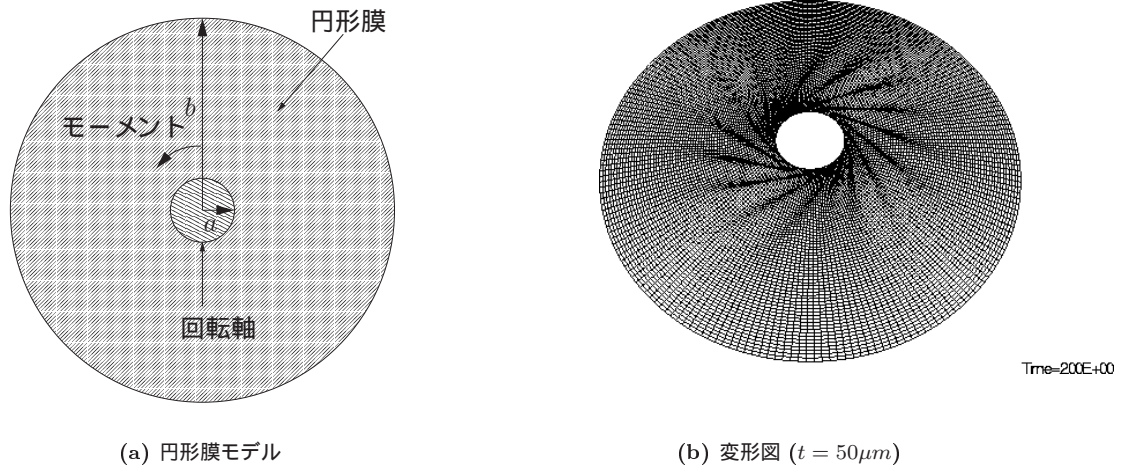


図1 円形膜モデル

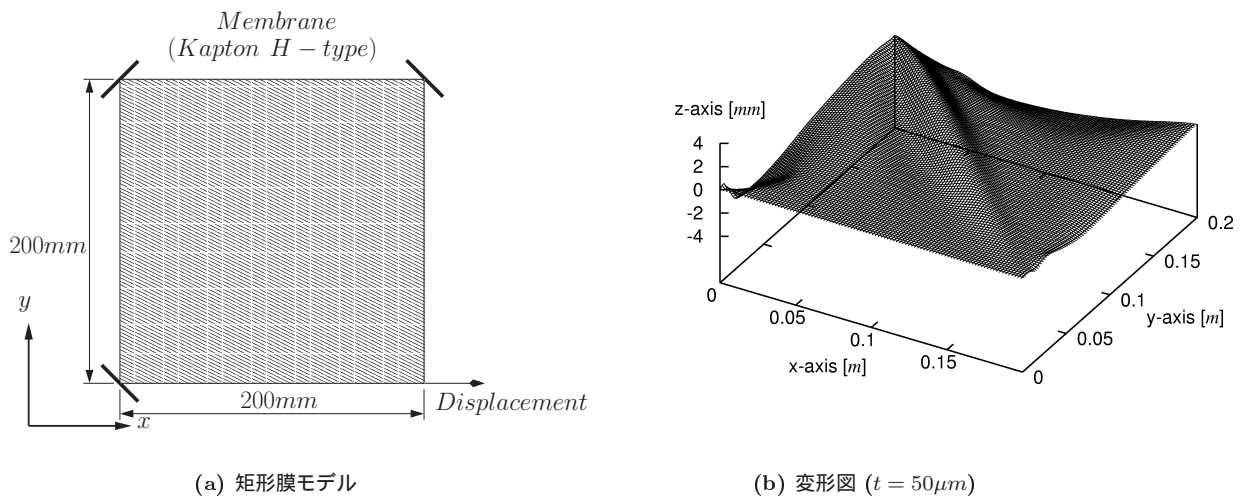


図2 矩形膜モデル

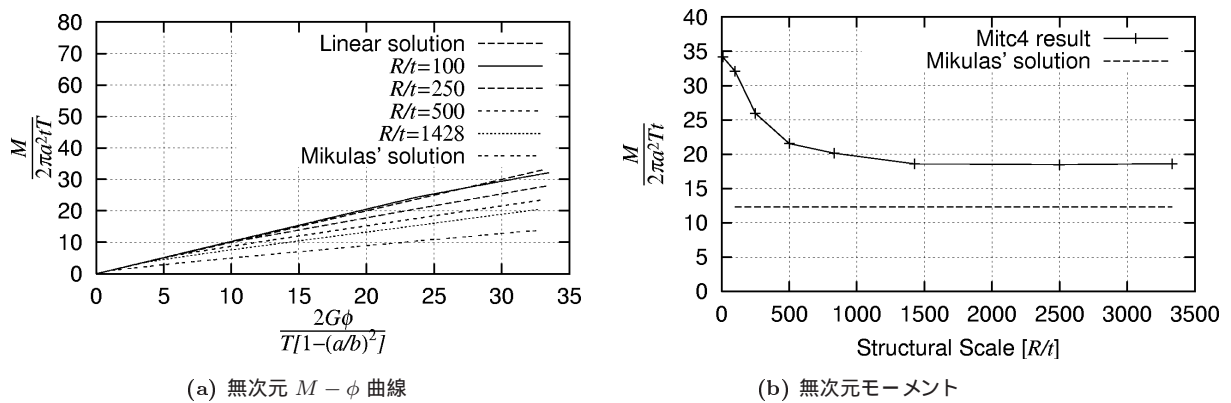
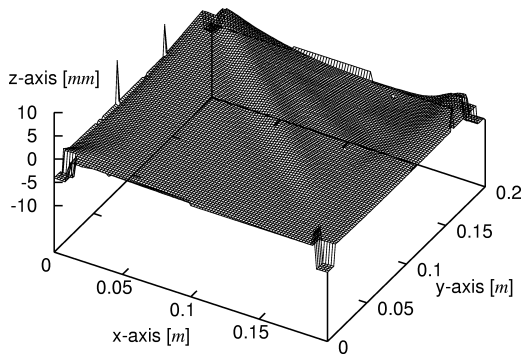
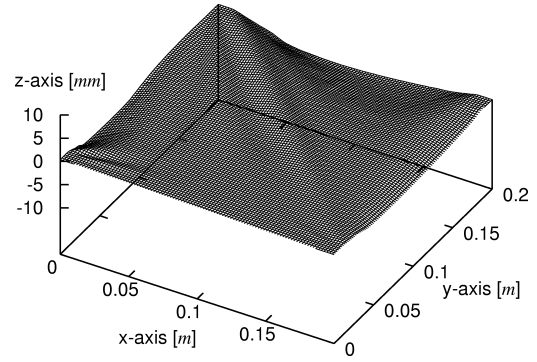


図3 張力場理論解との比較

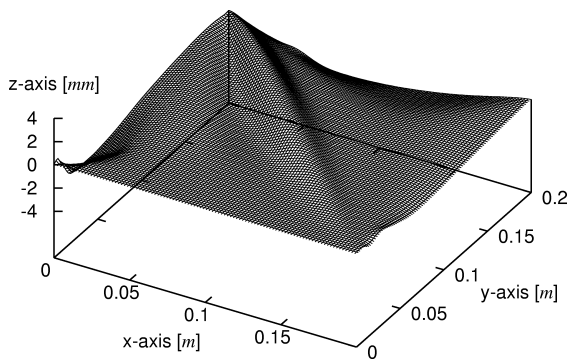


(a) 実験結果

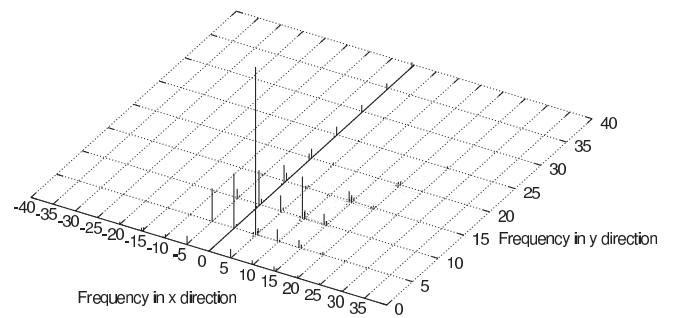


(b) 解析結果

図 4 実験結果と解析結果の比較 ($t = 25\mu m$)



(a) 変形図



(b) スペクトル解析結果

図 5 膜面のスペクトル解析 ($t = 50\mu m$)