

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 24 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420851

研究課題名(和文) 皺・弛み・折り目を含む薄膜の確率論的動力学モデルの探求

研究課題名(英文) Investigation on Stochastic Dynamic Model of Thin Membranes including Wrinkles, Slacks and Creases

研究代表者

岩佐 貴史 (IWASA, TAKASHI)

鳥取大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90450717

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：皺や折り目を含む薄膜の振動応答を画像計測法(格子投影法)で詳細に計測し、皺や折り目が薄膜の振動応答に与える影響を検討するとともに膜面の振動応答の空間分布が経験的に従う確率モデルを検討した。その結果、膜面の皺は曲げ波の伝搬過程に強く影響を及ぼすものの折り目は皺ほど顕著な影響を及ぼさないことがわかった。また、皺や折り目を含む薄膜の変位パワースペクトル振幅値の空間分布は対数正規分布のような理論モデルには従わない。

研究成果の概要(英文)：Vibration responses on thin membranes including wrinkles and creases are measured by photogrammetry using a grating projection method in order to clarify effects of the wrinkles and creases on the vibration responses of the thin membranes. And, a stochastic model of the spatial distribution of the power spectrum amplitude is also investigated. Results showed that the wrinkles appearing on thin membranes strongly affect the propagation phenomenon of bending waves on the thin membranes while the creases have an insignificant effect on the membrane vibration responses. In addition, the spatial distribution on the amplitude of the power spectrum density does not have an ideal model such as a traditional log normal distribution.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：ゴッサマー構造 振動応答 空間分布 確率過程 非接触全視野形状計測

1. 研究開始当初の背景

大型宇宙構造物はロケットによる輸送の制約から軽量性・収納性・展開性に優れた構造様式であることが要求され、このような要求を満たす構造物として薄膜やテザーを積極的に利用した膜面宇宙構造物が注目されている。しかし、膜面宇宙構造物はその柔軟さ故に重力のような微小荷重でも容易に変形してしまうため、その挙動を地上試験で検証することが極めて困難な構造物となる。したがって、膜面宇宙構造物の開発では従来以上に解析技術に依存せざるを得ない状況にあり、解析技術の信頼性を如何に確保するかが重要となっている。

解析技術の信頼性を示す一つの方法として、解析結果に信頼区間を設定し実際の振動応答が生じる範囲を一定の信頼度で予測する方法が従来の人工衛星の衝撃応答予測や音響振動予測に適用されている。この方法は、衝撃負荷や音響負荷を受ける人工衛星の振動応答（パワースペクトル振幅値の空間分布）が経験的に対数正規分布に従うことを利用したものであるが、薄膜のような幾何学的非線形の強い振動応答が従う確率分布に関しては未だ十分な検討がなされていない。そのため、同様の方法を膜面宇宙構造物に適用するためには、まずは幾何学的非線形性の強い薄膜の振動応答が従う確率分布モデルの特徴を明らかにする必要がある。

2. 研究の目的

本研究は、皺・弛み・折り目を含む薄膜の面外方向の振動応答を「外力作用点からの曲げ波の伝搬過程」、「伝搬過程から定常振動へ移る移行過程」、「移行後の定常振動過程」の全過程を光学的全視野形状計測法で測定し、1) 皺・弛み・折り目が薄膜の振動応答に与える影響を検証するとともに、2) 薄膜の面外方向の振動応答（パワースペクトル振幅値の空間分布）が経験的に従う確率分布モデルの特徴を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 実験モデル

本研究では1辺0.5m、厚さ $25\mu\text{m}$ の正方形のポリイミドフィルムを対象とした。実験モデルは皺や折り目の無いモデル (Flat)、対角線方向に皺を発生させたモデル (Wrinkle)、折り目を発生させたモデル (Crease)、0.10m 間隔に折り目を付けたミウラ折りモデル (Miura-ori) の4モデルである。図1に実験モデル (Wrinkle モデル) を示す。図に示すように実験モデルは四隅に取り付けたアクリル板 (1辺0.03m) をケブラーで引っ張ることにより固定している。Wrinkle モデル以外は四隅のケブラーに0.1kgの錘を吊るし、wrinkleモデルは対角方向に0.3kg~0.8kgの錘を吊るすことで皺を発生させた。入力荷重は衝撃力とし右上のアクリル板にインパクトハンマーで与えた。衝撃力は5N, 10N, 15N

の3パターンとした。そして、右上隅から左下隅に向かう曲げ波の伝搬過程とその後の定常振動過程を格子投影法による画像計測法で測定した。

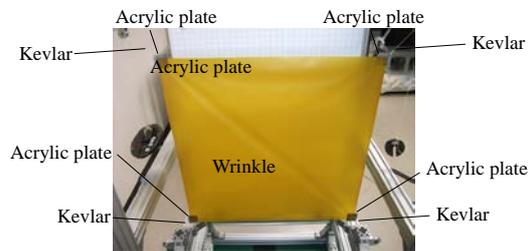


図1 実験モデル

(2) 格子投影法

格子投影法はプロジェクターから格子画像を被計測物に投影し、投影した格子の位相情報から被計測物の3次元位置座標を復元する能動的画像計測法の一つである。格子投影法は撮影した画像の画素毎に被計測物の3次元位置座標が得られるため計測結果の空間分解能が極めて優れているといった特徴がある。したがって、今回のように被計測物の振動応答の空間分布を検証するのに適した計測法である。本研究では、基準面を用いたキャリブレーションを適用することでカメラのレンズ収差の影響を受けずに被計測物の3次元位置座標を高精度に計測する方法を適用している。

図2に計測装置の写真を示す。カメラとプロジェクターは0.5mの間隔で設置しており、カメラと薄膜との距離は1.35mである。薄膜を取り付けた実験治具は除振台の上に置き、床からの振動が伝搬しないようにしている。

デジタルカメラの解像度は $640 \times 480 \text{pixel}^2$ 、フレームレートは200fpsであり、プロジェクターの解像度は $1280 \times 800 \text{pixel}^2$ である。計測時間は6秒とした。

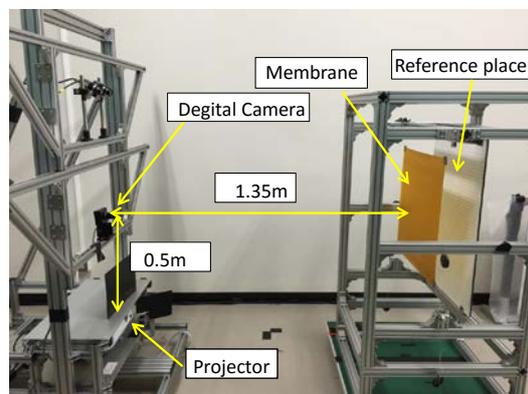


図2 計測装置

図3に計測範囲と解析範囲を示す。計測はデジタルカメラとレンズの制約から実験モデルの中央部分 ($0.45 \times 0.34 \text{m}^2$) となる。このうち計測データの解析範囲は $0.25 \times 0.25 \text{m}^2$

の正方形領域とし、データ点数は 122500 とした。

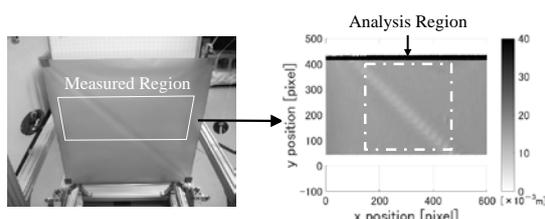


図3 計測範囲と解析範囲

4. 研究成果

(1) 皺・折り目が薄膜の振動応答に与える影響

図3～6に Flat, Wrinkle (対角線方向に 0.8kg の錘を設置した場合), Crease, Miura-ori モデルの計測結果を示す。図は、それぞれのモデルに約 15N の衝撃力を与えた際に生じる曲げ波第1波の伝搬過程を計測した結果である。各モデルで観測される曲げ波の大きさは衝撃力を手動で与えているため異なるものの、全てのモデルで曲げ波の第1波は波面を概ね直線に保ちつつ右上から左下に向かって伝搬していく様子が確認できる。しかし、Wrinkle モデルだけは曲げ波第1波が皺領域に到達すると皺領域から右上方向に位相が反転した反射波が生成されている(図5の 0.085sec~0.145sec)。これは、皺線に沿って形成される引張応力によって薄膜の面外方向の剛性が局所的に高くなったためであり、膜面の皺は曲げ波の伝搬過程に強く影響を及ぼすことがわかる。

一方、折り目を付けた2つのモデルは Wrinkle モデルのような反射波は確認されず、膜面の折り目が曲げ波の伝搬過程に与える影響は顕著にみられない。折り目を付けたモデルは薄膜を固定する際の張力が Flat モデルと同じ 0.1kg であり Flat モデルとの違いは折り目による膜面の局所的な変形のみであることを考えると、今回の結果からは折り目のような非常に局所的な変形は曲げ波の伝搬過程に強く影響を及ぼさず、不均一な応力状態の方が局所的な変形よりも薄膜の振動に影響を及ぼすものと考えられる。

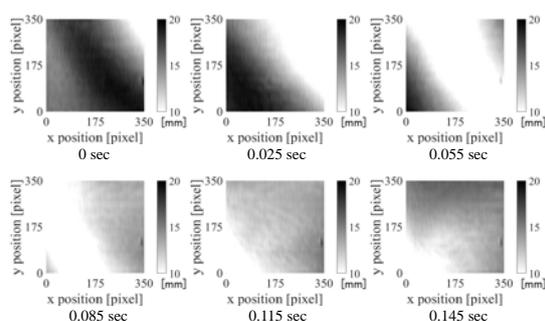


図4 Flat model

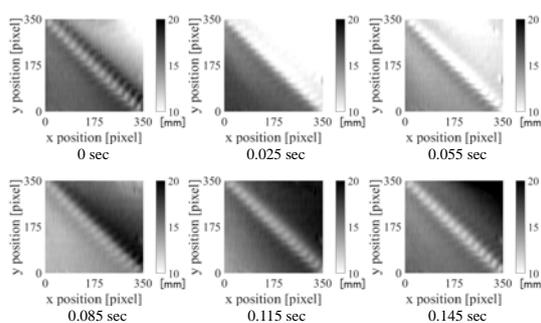


図5 Wrinkle model

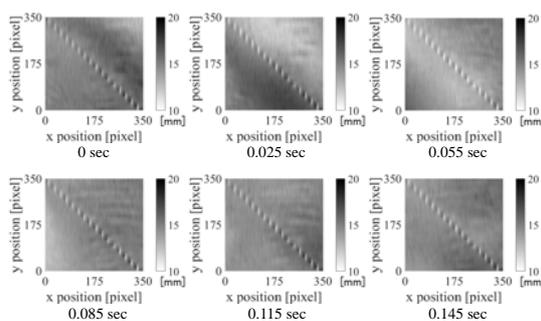


図6 Crease model

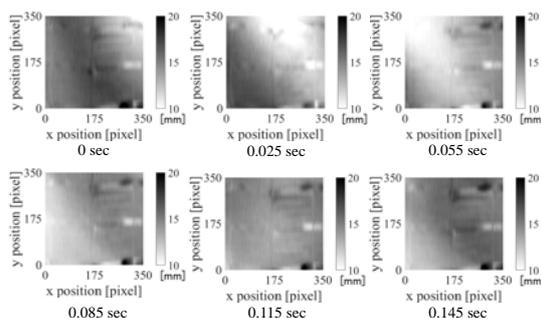


図7 Miura-ori model

図8～10には Flat モデルと他のモデルのパワースペクトル (PSD) を比較した結果を示す。図の結果はいずれも解析範囲の中央で計測された変位時刻歴データから求めた結果であり、図の縦軸は振幅の最大値で正規化している。図8より、Wrinkle モデルと Flat モデルを比較してみると Wrinkle モデルの方が一次の共振周波数が高くなっている。これは皺の形成に伴って生じる引張応力場の影響で膜面の剛性が高くなったためである。一方、図9, 10をみると、Creased モデルと Miura-ori モデルはいずれも Flat モデルと一次の共振周波数が概ね一致しており Wrinkle モデルのような違いはみられない。これは、Creased モデルと Miura-ori モデルの張力が Flat モデルと類似しているためであり、曲げ波の伝搬過程と同様に折り目のような局所的な変形は薄膜の定常振動応答に顕著な影響を及ぼさないことがわかる。

以上より、膜面に生じる皺は薄膜の振動応答に強く影響を及ぼすものの膜面の折り目は皺ほど顕著な影響を及ぼさない結果となった。

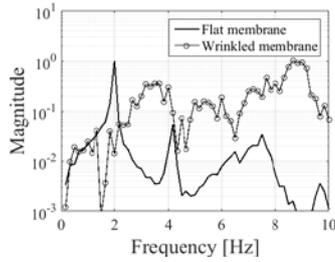


図8 変位 PSD の比較 (Flat & Wrinkle)

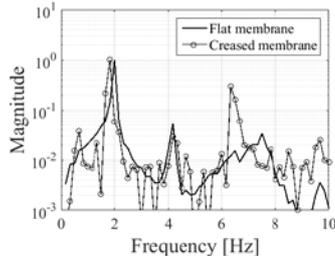


図9 変位 PSD の比較 (Flat & Crease)

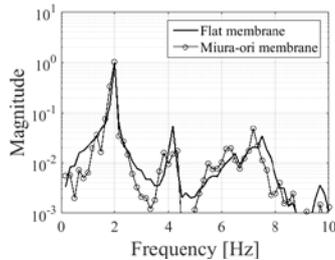


図10 変位 PSD の比較 (Flat & Miura-ori)

(2) 薄膜の振動応答が従う確率分布モデル
次に、皺や折り目を含む薄膜の振動応答として変位パワースペクトルに着目し、その空間分布が従う確率分布モデルについて検討する。図11に検討方法を示す。図に示すように薄膜の任意の点で計測されたパワースペクトルに対し、同一周波数上の振幅値を抽出する。そして、抽出した振幅値を正規確率プロットに表示することで、視覚的に変位パワースペクトル振幅値の空間分布が正規分布に従うか検討する。この時、従来の人工衛星の振動応答が経験的に対数正規分布に従うことが報告されていることを考慮し、今回の結果に対しても抽出した振幅値を対数変換し正規確率プロットに表示させ対数正規分布に従うか検討した。

図12に正規確率プロットの比較を示す。図はそれぞれのモデルに対して一次の共振周波数上の振幅値を抽出し、正規確率プロットに表示させた結果である。使用したデータは全ての計測点(122500点)のデータを用いている。なお、モデルによって振幅値に差があるため、以下の式を用いて振幅値を正規化し重ね書きさせている。

$$\bar{X}_f^i = \frac{X_f^i - \tilde{X}_f}{NIQR_f} \quad (1)$$

$$\tilde{X}_f = \text{mean}(X_f^i) \quad (2)$$

ここで、 X_f^i : 計測点 i で測定した周波数 f のパワースペクトル振幅値 (対数変換後), $NIQR_f$: X_f^i の正規四分位範囲である。図より、変位パワースペクトル振幅値は直線周りに分布せず対数正規分布のような理論モデルには従わないことがわかる。また、確率が 0.1 から下側と 0.90 より上側のデータはモデルによるバラツキが大きくなる傾向にあるが、上側のデータで矢印の箇所は計測エラーのデータであること、バラツキの見られるデータは全体の 2 割強程度であることを考慮すると多くのデータ (全体の 7~8 割のデータ) は概ね似たような分布となっていることがわかる。この傾向は皺の有無、折り目の有無に関係なく観測されることから、薄膜のような幾何学的非線形性の強い振動応答 (パワースペクトル振幅値) の空間分布は従来の対数正規分布のような理論モデルには従わないものの多くのデータ (全体の 7~8 割のデータ) で類似な分布特性にあることが示唆される。但し、今回の研究では十分な計測範囲を確保することができなかったことや正規確率プロットの性質上中心付近のデータのバラツキが小さく表示される傾向にあること等を踏まえ、今後は計測範囲を拡大してデータを取得し薄膜全体の振動モードを適切に捉えた上で、モード形状の視点から変位パワースペクトル振幅値の空間分布特性を詳細に検証していく必要がある。

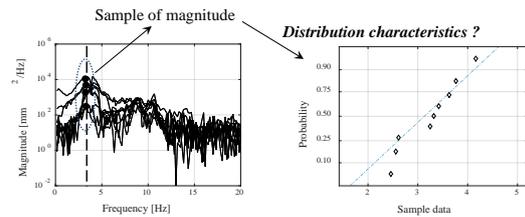


図11 変位 PSD の空間分布の検討方法

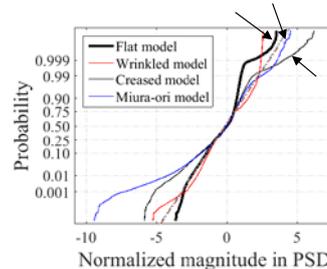


図12 正規確率プロットの比較

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① 岩佐貴史, 田中博之, “皺・折り目を含む薄膜の衝撃過渡振動応答の空間分布特性,” 実験力学, Vol.15, No.4, 2015, pp.270-276. (査読有)
- ② T. IWASA, H. TANAKA and M. FUJIGAKI, “Random Error Reduction Method for One-shot Shape Measurement using the Grating Projection Method,” Transaction of the JSASS, Vol.58, No.6, 2015, pp.337-334. (査読有)
- ③ T. HAYASHI, M. FUJIGAKI and Y. MURATA, “Projection Method of Small Pitch Fringe Pattern Using Talbot Effect with Super Luminescent Diode for 3D Shape Measurement,” Journal of JSEM, Vol.15, 2015, pp.81-86. (査読有)
- ④ T. IWASA and K. SUSAKI, “Development of Shape Measurement System for Vibrating Membranes,” Journal of Materials and Metallurgy, Vol.14, No.1, 2015, pp.72-75. (査読有)

[学会発表] (計11件)

- ① 田中博之, 岩佐貴史, “薄膜の振動モードが従う確率分布モデルを利用したパワースペクトル上限値の予測法,” ●日本機械学会中国四国支部, 第54期総会・講演会, 愛媛大学工学部 (愛媛), 2016.3.9.
- ② 岩佐貴史, 田中博之, “皺や折り目の生じた正方形膜の振動モードの変位分布特性について,” 日本機械学会宇宙工学部門, 第24回スペースエンジニアリングコンファレンス, 琴参閣 (香川), 2015.12.22.
- ③ 岩佐貴史, 青木友宏, 原田卓, 岸本直子, “サンプリングモアレ法を利用した大規模膜構造物の高解像度振動計測システムの開発に向けて,” 日本実験力学学会光学的手法分科会, 全空間画像計測コンソーシアム, 第3回サンプリングモアレ法による構造物の計測技術に関する研究会, 産総研臨海副都心センター (東京), 2015.8.10.
- ④ 青木友宏, 岩佐貴史, “皺の生じた膜面の振動応答特性に関する実験的検討,” 日本航空宇宙学会, 日本機械学会, 第57回構造強度に関する講演会, 岡山理科大学 (岡山), 2015.8.5.
- ⑤ Hayashi, T, Murata, T. and Fujigaki, M, “Small Pitch Phase-shifted Fringe Projection Method with Multi-core Fiber Using the Talbot Effect,” International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences, Circus

(Reno, USA), 2015.7.22.

- ⑥ 田中博之, 岩佐貴史, “皺を含む薄膜の振動応答が従う確率分布モデルについて,” 日本機械学会中国四国支部, 第53期総会・講演会, 近畿大学工学部 (広島), 2015.3.6.
- ⑦ 平松将紀, 岩佐貴史, “格子投影法による折り目を有する膜面の振動計測,” 日本非破壊検査協会 応力・ひずみ測定部門, 第46回 応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム, 日本非破壊検査協会 亀戸センター (東京), 2015.1.10.
- ⑧ 田中博之, 岩佐貴史, “格子投影法によるしわの生じた膜面の振動計測,” 日本機械学会宇宙工学部門, 第23回スペースエンジニアリングコンファレンス, 宇宙科学博物館 (石川), 2014.12.20.
- ⑨ 岩佐貴史, 田中博之, 須崎海里, “薄膜の振動計測時における偶然誤差の除去法,” 日本実験力学学会光学的手法分科会, 全空間画像計測コンソーシアム, 第2回サンプリングモアレ法による構造物の計測技術に関する研究会, ハービス OSAKA (大阪), 2014.3.24.
- ⑩ 須崎海里, 田中博之, 岩佐貴史, 藤垣元治, 吉川隆章, “格子投影法による膜面の波動伝播過程の全視野形状計測,” 日本非破壊検査協会 応力・ひずみ測定部門, 第45回 応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム, 大阪科学技術センター (大阪), 2014.1.24.
- ⑪ 岩佐貴史, 平松将紀, “格子投影法を用いた3次元形状計測時の計測ノイズ除去法について,” 日本航空宇宙学会, 第57回宇宙科学技術連合講演会, 米子コンベンションセンター (米子), 2013.10.9.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

http://www.mech.tottori-u.ac.jp/koriki/index.html/Kaken_iwasa_2013-2015.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩佐 貴史 (IWASA TAKASHI)

鳥取大学大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90450717

(2) 研究分担者

藤垣 元治 (FUJIGAKI MOTOHARU)

福井大学大学院工学研究科・教授

研究者番号：40273875

(3) 連携研究者 なし