

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 15 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21760654

研究課題名（和文） しわを含む膜面解析モデルの信頼性評価

研究課題名（英文） A study on reliability analysis for numerical mathematical models of wrinkled membranes

研究代表者

秋田 剛 (AKITA TAKESHI)

独立行政法人 宇宙航空研究開発機構・情報・計算工学センター・招聘職員（研究員）

研究者番号：20405343

研究成果の概要（和文）：本研究では、軽量膜面宇宙構造物設計の効率化と信頼性向上を目的として、しわを含む膜面解析モデルの信頼性を計測データから統計的に評価する方法を考察した。古典的な評価法であるモンテカルロ法と、近年研究が盛んなデータ同化法（数値シミュレーションと計測データを融合する技術）を、膜面ダイナミクスモデルに適用するための解析コードを開発した。開発したコードを用いて矩形膜の動的問題の感度評価やパラメータ推定を行い、有効性を検証した。

研究成果の概要（英文）：This study investigates a method for reliability analysis of numerical mathematical models of wrinkled membranes. A computer simulation code to analyze wrinkled membrane dynamics is developed. Both the Monte-Carlo method and the data assimilation method are implemented into this code for reliability analysis. A simple problem of square membrane dynamics is provided to verify the effectiveness of both methods. The Monte-Carlo method is applied for sensitivity analysis of model parameters, while the data assimilation method is used for model parameter estimations.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：膜面構造システム

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：膜のしわ・膜面構造・データ同化・パラメータ同定・宇宙機構造

1. 研究開始当初の背景

近年の宇宙開発の発展に伴い、ソーラーセイルを代表に軽量で収納効率の高い膜材を利用した軽量膜面宇宙構造物が数多く提案されている。膜面構造は、その柔軟性や構造サイズから地上実験が困難であることが多く、構造設計における解析モデルの重要性が高くなる。また膜面解析モデルは、膜に発生

するしわの影響で非線形性と不確実性が極めて強くなり、その高精度な信頼性評価方法の確立が望まれている。

これまでの研究で用いられている膜面解析モデルは決定論的に構築されており、その信頼性評価は実験データとの単純比較のみでしか行えなかった。しかし膜面構造の場合、実験条件や解析条件のわずかな違いで部分

的なしわの状況が異なるなど不確定性が強いので、単純比較のみによる信頼性評価では不十分である。また、実スケールの実験自体が困難で運用時の計測データのみで解析モデルの信頼性を評価する場合も考えられ、この場合は信頼性を高めるような計測システムを構築することが課題となっている。

2. 研究の目的

上記のような背景から、本研究では、軽量膜面宇宙構造物設計の効率化と信頼性向上を目的として、しわを含む膜面解析モデルの信頼性を計測データから統計的に評価する方法を構築する。

3. 研究の方法

本研究では、膜面解析モデルの統計的な信頼性評価に、古典的なモンテカルロ法と近年気象学や海洋学で盛んに研究が行われているデータ同化法を適用する。

(1) モンテカルロ法

モンテカルロ法は、膜の物性値、寸法、境界条件などにばらつきを与えた解析モデルを多数設定し、数値解析により解析モデルの統計的な性質を求める方法である。本研究では、過去に宇宙科学研究所において実施された膜のねじり振動実験の試験データを利用して、しわを考慮した膜面解析モデルの統計的評価を行う。

モンテカルロ法では、膨大な数の数値解析を行う必要がある。本研究では、膜面のしわモデルとして効率的な計算が行える張力場モデルを採用する。また膜面のダイナミクス計算には、非線形問題での安定性に優れた Generalized- α 法を適用して非線形有限要素解析コードを開発する。解析コードは、並列計算機上で効率的にモンテカルロ計算を実行できるように、並列計算ライブラリ MPI を利用してコーディングする。

(2) データ同化法

データ同化とは、数値シミュレーション結果と計測データを統計的に統合する方法の総称であり、気象学や海洋学の分野で盛んに研究が行われている。特に近年アンサンブルカルマンフィルタと呼ばれる効率的なデータ同化法が提案され、工学分野にも適用されつつある。本研究では、アンサンブルカルマンフィルタを膜面のダイナミクス計算に組み込むことで、解析モデルの評価を行う。

本研究では特に解析モデルのモデルパラメータの評価に注目する。非線形有限要素法の節点変位ベクトルとモデルパラメータからなるパラメータベクトルを組み合わせた拡大状態変数を定義して、アンサンブルカルマンフィルタの定式化を行う。本定式化により、モデルパラメータを計測データから逐次

推定することが可能となる。

データ同化用の解析コードは、(1)のコードに、共分散行列評価ルーチン、カルマンフィルタ処理ルーチンを追加して開発を行う。本コードも可能な部分には MPI により並列化実装し効率化を行う。

4. 研究成果

(1) モンテカルロ法によるモデル評価

過去に宇宙科学研究所において実施された膜のねじり振動実験の試験データを利用して、しわを考慮した膜面解析モデルの統計的評価を行った。図1に膜面モデルを示す。

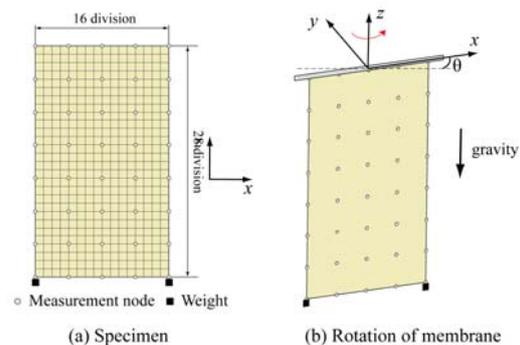


図1 膜のねじり振動モデル

ねじり振動実験では、矩形膜の底辺両端部におもりを取り付け、クランプされた上辺部を真空槽内で回転運動させた。膜面上の40点にターゲットマークが貼付され、画像計測により3次元位置座標が測定されている。解析モデルは、膜面を 16×28 の要素で分割したものを考えた。実験では0.6s間で膜の上端部を30度回転させ、その後自由振動させている。

① しわを考慮した膜面ダイナミクス解析コードの開発

Generalized- α 法を用いて張力場モデルによるしわを考慮した膜面ダイナミクス解析コードを開発した。開発は、Fortran90により行い、出力形式を汎用数値解析ソフトウェアである Matlab 形式で行えるようにした。また MPI を用いてモンテカルロ法の各サンプルをプロセスごとに処理する並列処理機能を実装した。開発コードは、膜要素以外にもはり要素やケーブル要素を含んでおり、膜面構造以外の宇宙機構造の解析にも適用可能である。本解析コードは、他機関の研究者が行っている膜面構造の動的設計問題 (Tamaru, H. et al, ICAST2011) や柔軟宇宙構造物の信頼性計算 (小木曾他, 構造強度に関する講演会, 2012) にも適用され、成果を収めるとともに、コードの信頼性を高めている。

② 事前解析

Generalized- α 法の時間積分スキームは、時刻 t の有限要素節点の変位、速度、加速度ベクトルをそれぞれ $\mathbf{u}_t, \dot{\mathbf{u}}_t, \ddot{\mathbf{u}}_t$ とおいたとき、次式で表される。

$$\ddot{\mathbf{u}}_{t+1-\alpha_m} = (1 - \alpha_m) \ddot{\mathbf{u}}_{t+1} + \alpha_m \ddot{\mathbf{u}}_t$$

$$\dot{\mathbf{u}}_{t+1-\alpha_f} = (1 - \alpha_f) \dot{\mathbf{u}}_{t+1} + \alpha_f \dot{\mathbf{u}}_t$$

$$\mathbf{u}_{t+1-\alpha_f} = (1 - \alpha_f) \mathbf{u}_{t+1} + \alpha_f \mathbf{u}_t$$

上式の α_f, α_m は数値減衰に関連するパラメータであり、線形問題ではスペクトル半径 ρ_∞ により次式で決定される。

$$\alpha_m = \frac{2\rho_\infty - 1}{\rho_\infty + 1}, \alpha_f = \frac{\rho_\infty}{\rho_\infty + 1}$$

非線形問題でも上式により決定されることが多いが、時間刻み幅の選定と合わせて、 ρ_∞ を適切に設定し、最適な計算精度・計算速度で解析を実行することが望ましい。図1のモデルに対して、適切な時間刻み幅と ρ_∞ を決定するための事前計算を行った。

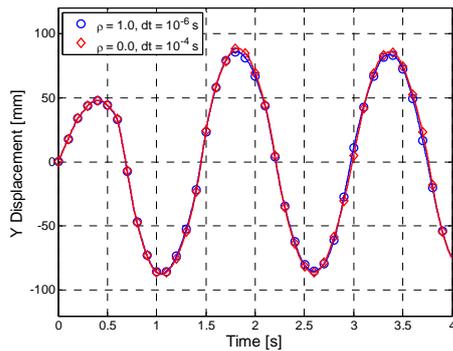


図2 膜左端 y 変位の比較

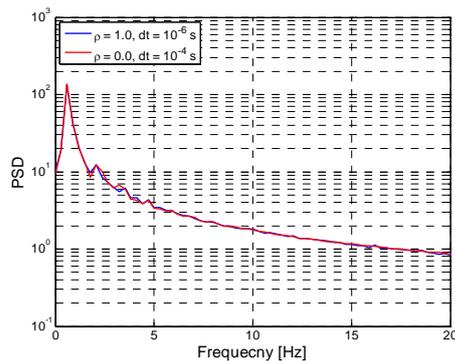


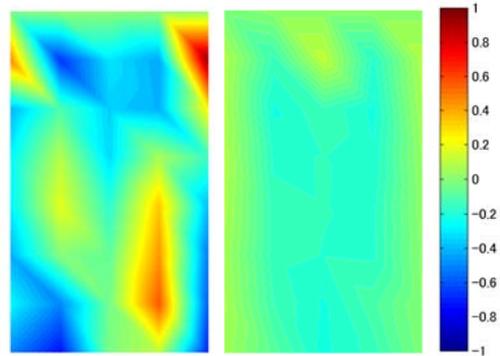
図3 膜左端 y 変位の周波数応答比較

例として時間刻み幅を $dt = 10^{-6}, 10^{-4}$ s, $\rho_\infty = 0, 1$ の2つのケースで解析した結果を示す。図3は膜左下端部の y 変位の比較であり、図4はその周波数解析の比較結果である。図より両ケースの差は十分少ないことがわかる。一方で、解析時間は本ケースでは50

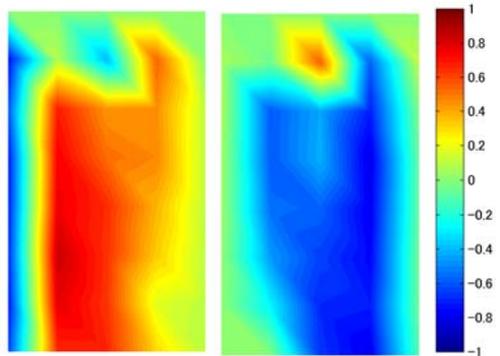
倍程度の差があった。モンテカルロ法では多数の計算を行うため、効率を考慮して $dt = 10^{-4}$ s, $\rho_\infty = 0$ を採用した。

③モンテカルロ法を用いたモデルパラメータの感度評価

モデルの不確定パラメータとして、減衰比、内圧、左端のおもり重量、右端のおもり重量を考え、モンテカルロ法により、計測値と解析値の残差のRMS値に対するパラメータ値の感度を評価した。サンプル値から共分散行列を作成し、RMS値とパラメータ値の相関係数値を感度値として評価した(図4)。



(A) 減衰比 (B) 内圧



(C) 左端おもり (D) 右端おもり

図4 感度評価結果

(計測点ごとにモンテカルロ法計算結果と計測値の残差を計算し、パラメータと残差間の相関係数を評価した)

図より、減衰比は膜に対して局所的に影響を与え、内圧パラメータに関しては、ほとんど感度がなく、計測値と解析値の残差に与える影響が小さいことがわかる。また、左右のおもり重量はそれぞれ感度の符号が反転しており、また与える影響も他のパラメータよりも大きいことがわかる。これらの感度値をもとに、解析結果と計測値の差が小さくなるような、パラメータ調整を行うことが可能となる。

(2) データ同化によるモデルパラメータの評価

① アンサンブルカルマンフィルタの実装

アンサンブルカルマンフィルタの基礎式となる状態空間モデルは、時刻 t の状態変数、システムノイズ、観測ベクトル、観測ノイズをそれぞれ $\mathbf{x}_t, \mathbf{w}_t, \mathbf{y}_t, \mathbf{v}_t$ として次式で与えられる。

$$\mathbf{x}_{t+1} = \mathbf{F}_t(\mathbf{x}_t, \mathbf{w}_t)$$

$$\mathbf{y}_{t+1} = \mathbf{H}_{t+1}\mathbf{x}_{t+1} + \mathbf{v}_{t+1}$$

上式の第1式が物理モデルを表す状態方程式であり、数値シミュレーションが担う部分である。第2式が計測値と状態変数を関連付ける観測方程式である。アンサンブルカルマンフィルタでは、第1式にモンテカルロ法を適用し、状態変数の予測値を統計的に求める。また予測値と第2式の計測値から、線形最小分散推定量を求め、計測値を考慮した数値シミュレーションの推定値を算出する。本方法は、古典的なカルマンフィルタに比べ、非線形問題との相性が良く、(計算負荷が大きいものの)実装が容易なことが知られている。

本研究では、アンサンブルカルマンフィルタを膜面解析モデルの評価に適用するために、以下の状態変数を定義した。

$$\mathbf{x}_t \square \begin{bmatrix} \mathbf{s}_t \\ \mathbf{u}_t \end{bmatrix}$$

ここに \mathbf{s}_t モデルパラメータからなるベクトルである。これより、モデルパラメータを、状態変数の推定値として計測値から逐次求めることができる。

アンサンブルカルマンフィルタによる推定を行うための解析コードを開発した。解析コードは、モンテカルロ法の解析コードにアンサンブルカルマンフィルタのモジュールを組み込む形で作成した。モジュールには、MPIによる並列化を適宜適用した。

本解析コードは、膜面解析モデルのデータ同化用に開発したものだが、ケーブル要素やはり要素等の基本的な有限要素を含んでおり、他の構造問題にも適用可能である。一例として、展開構造物のデータ同化に適用している(雑誌論文①)。今後は他の研究者と協力して種々の問題に本解析コードを適用していく予定である。

② 膜のねじり振動問題への適用

図1のモデルに対して、特にパラメータ同定を目的としたデータ同化実験を行った。ただし、有限要素の分割数を 4×7 に低減して実験を行っている。理由については後述する。

実験では、真のモデルパラメータを持つ解析結果にランダムノイズを加えて疑似計測データを作成した。疑似計測に対するデータ同化により、誤差を持つノミナルパラメータ

が真の値に収束するかどうかを検証した。実施した検証ケースは多岐にわたるが、ここでは左右のおもり重量を未知パラメータとしてデータ同化を行った結果を示す。

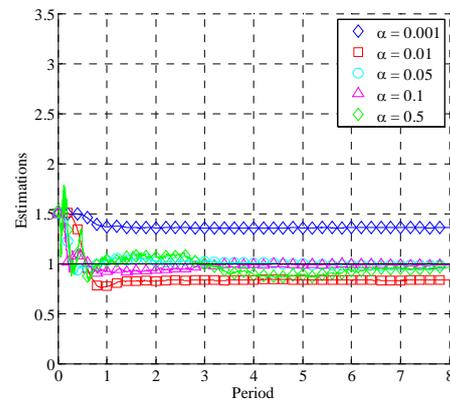


図5 ノミナル値を真値の1.5倍に設定したケース

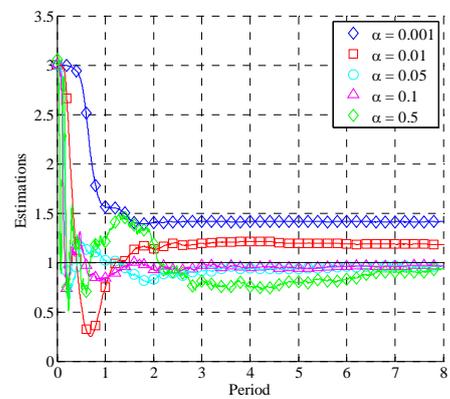


図6 ノミナル値を真値の3倍に設定したケース

図5, 6は、おもり重量のノミナル値を真値の1.5倍, 3倍に設定してデータ同化を行った結果である。縦軸が推定値、横軸が振動周期を表す。左右のおもりは、ほぼ同様の収束傾向だったので、左側のおもり重量の結果のみを示す。また図中の α の値は、データ同化を行う際の初期のサンプル値集合の分散に対応した値である。 α が大きいほど、モンテカルロ計算を行う初期サンプル値集合の分散が大きくなる。この解析ケースでは、システムノイズを0とした。両図より、 $\alpha = 0.001$ のときにパラメータが真値とオフセットをもった値に収束することがわかる。一方で、 $\alpha = 0.5$ とすると、真値に収束後もパラメータ変動が生じていることがわかる。これらのケースでは、 $\alpha = 0.05, 0.1$ のときに、適切な収束履歴を示していると考えられる。

システムノイズの分散値についても同様の傾向があることを他の数値実験で確認している。

実問題において、パラメータの真値は不明なので、データ同化で初期サンプルやシステムノイズの適切な分散値を設定することは非常に難しい。本研究では、次式で定義されるイノベーションの尤度に関連した評価関数を使った分散値の設定法を検討した。

$$\phi(\alpha) = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \mathbf{r}_{t+1}^{(m)T} \mathbf{r}_{t+1}^{(m)}$$

$$\mathbf{r}_{t+1}^{(m)} = \mathbf{y}_{t+1} - \mathbf{H}_{t+1} \mathbf{x}_{t+1}^{(m)}$$

ここに α は、各モデルパラメータの初期サンプル値集合の分散やシステムノイズ分散からなるベクトルであり、 T はタイムステップ総数、 M は総サンプル数、 (m) がサンプル番号を表す。図6の結果に対して上式の評価関数を計算すると以下ようになる。

表1 α と評価関数値の関係

α	0.001	0.01	0.05	0.1	0.5
	1.000	0.125	0.077	0.076	0.091

表より適切な分散値であると考えられる $\alpha = 0.05, 0.1$ のケースで、評価関数値が小さくなるのがわかる。本研究では、Matlab の最適化ツールボックスを利用して、この評価関数を最小化するシステムを構築した。今後は、実データを使ってデータ同化実験で有効性を実証していきたい。

③その他

高精度な 16×28 の要素で膜面を分割した解析モデルでのデータ同化実験を実施したが、サンプルによっては解析途中に膜の折り曲がりが発生するケースがあった。1つのサンプルに発生した折り曲がり、他のサンプルにも推定プロセスを通して影響を与え、推定が失敗するケースが見られた。今後は粒子フィルタなどのロバスト性の高いデータ同化法を適用して検証を進めていく予定である。

膜のねじり振動以外にも、公開論文に掲載されている膜の曲げ振動試験のモデルに対してもデータ同化実験を行い、有効性を確認している。

また図7のような、せん断変形による簡易的な膜のしわ発生装置を構築し、今後の実データによるデータ同化実験のための参考とした。

5. 主な発表論文等

(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1件)

- ① 秋田剛, 高木亮治, 嶋 英志, “アンサン

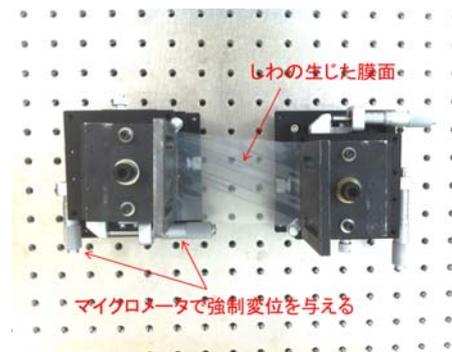


図7 膜のしわ発生装置

ブルカルマンフィルタによるモデルパラメータ推定—大変形を伴う非線形複合構造システムへの適用—, 日本計算工学会論文集, 20100021, 2010 (査読あり)。

[学会発表] (計4件)

- ① Takeshi Akita, Ryoji Takaki, Nobukatsu Okuizumi, M. C. Natori, and Eiji Shima, “An efficient estimation of membrane dynamics by using the Ensemble Kalman Filter (EnKF),” IASS-APCS 2012 Proceedings, From Spatial Structures to Space Structures CD-ROM (FF-502, 1-8), April 24th, 2012, Seoul, Korea.
- ② 秋田剛, 奥泉信克, 名取通弘, 高木亮治, 嶋 英志, “膜面ダイナミクスのデータ同化に関する一考察,” 第53回構造強度に関する講演会講演集, 2011年7月27日, pp. 16-18, 秋田.
- ③ 秋田剛, 奥泉信克, 名取通弘, 高木亮治, 嶋 英志, “アンサンブルカルマンフィルタによる膜面ダイナミクスのデータ同化,” 第43回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム2011講演集, 2011年7月8日, pp. 413-421, 東京.
- ④ 秋田剛, 奥泉信克, 名取通弘, 高木亮治, 嶋 英志, “不確定性を考慮した膜面ダイナミクス解析の一考察,” 第19回スペースエンジニアリング・コンファレンス, 2011年1月27日, pp. 413-421, 熊本.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

秋田 剛 (AKITA TAKESHI)

独立行政法人 宇宙航空研究開発機構・情報・計算工学センター・招聘職員(研究員)
研究者番号: 20405343

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし