論文題名：膜面宇宙構造物の非線形構造ダイナミクスの低次元化手法の研究

論　文　要　旨

平成 24 年 1 月

申請者　　日本大学大学院理工学研究科博士後期課程航空宇宙工学専攻　　　　山　崎　政　彦

1.　はじめに

膜面（数μ程度）やケーブルといった極めて柔軟な展開構造（ゴッサマー構造）と，人工衛星構体や展開支持構造のような剛性の高い構造とから成る膜面宇宙構造物は，重量・体積に比べて大面積を確保する事が可能なため，大型通信アンテナやサンシールド，ソーラーセイルなどの次世代の大型宇宙構造様式として期待されている．2010 年に打ち上げられた小型ソーラー電力セイル実証機 IKAROS は，膜面宇宙構造物の代表的な構造物であり，その設計・開発・運用の過程から膜面宇宙構造物の実用化に向けての課題が明確となった．

膜面宇宙構造物の実用化における大きな課題は地上実験が困難なことである．観測ロケット，気球，真空槽実験などが過去に行われてはいるが，これらの実験方法は，実験頻度が少なく，また，スケール誤差，環境誤差の影響から定量的なデータが得られず，未だ膜面宇宙構造物に関する地上実験法は確立されていない．そのため，地上実験により膜面宇宙構造物の運動を予測することは困難であり，設計・開発・運用の全てのフェイズで数値解析による挙動予測が必要不可欠な状況にある．

膜面宇宙構造物の数値解析は，膜面の挙動を数値的に安定に解くエネルギ・モーメンタム法に基づいた非線形有限要素法解析により行われ，IKAROS の軌道上のデータとの比較によりその妥当性が評価される段階には至った．しかし，軌道上実証された非線形有限要素法解析は，膜面宇宙構造物特有の非線形構造ダイナミクスが原因となり数値解析の計算コストが非常に高くなるという課題を抱えている．IKAROS では，領域分割型の並列コード化による計算の効率化も行われてきたが，今後のさらなる膜面宇宙構造物の大型化を考えると十分ではなく，計算コストの解決が望まれている．

以上より，今後の大型膜面構造物の実現には，軌道上実証により妥当性が確認された非線形有限要素モデルの低次元化手法を構築し，フルモデルとの数学的対応が付けやすく，かつ，計算効率の良い低次元モデルを用いた設計・開発が必要であると考えた．従来，宇宙構造物の数学モデルの低次元化には，振動の低次モードを保存する固有モード法が主流であった．但し，線形系を対象としているため，膜面のようにモードが時々刻々大きく変化する系への対応は困難であり，膜面宇宙構造物に適したモデル低

次元化手法が必要となる．

以上の背景を基に，本論文では，膜面宇宙構造物の非線形構造ダイナミクスに適したモデル低次元化手法を提案し，低次元化手法の有効性を実機に則した数値解析により示す．

本研究の成果により，IKAROS に続く次期ソーラーセイルの設計時に有益な選択肢を与えるだけでなく，大型の薄膜太陽電池を広げたり，大型アンテナ鏡面を形成したりする，新たな大型宇宙構造物の実現への可能性を広げることが可能となる．また，非線形性が強く，モードが時々刻々大きく変化するような系を効率よく解析することが可能となる．

2. 論文の構成

本論文は 6 個の章から成り立っており，第一章では本研究の背景を説明し，膜面宇宙構造物の現状・将来の開発，研究の動向，膜面宇宙構造物の課題と課題の原因となる非線形構造ダイナミクスについて示した．具体的には，膜面宇宙構造物は剛体運動や低周波の運動，高周波の運動が混在する Stiff な微分方程式になること，特に，宇宙空間では構造物の減衰が小さいため高周波の振動の減衰性が悪く，より Stiff な微分方程式となること．運動が大変位・大回転運動となるため，解析の精度保持のためには有限要素法のメッシュの分割数の増加が必要となり，時間ステップ幅をより小さくする必要性から計算時間が増大すること．剛体-ケーブルとのジョイント拘束など，微分方程式と代数方程式を同時に解く微分代数方程式となること．そして，もう一つの大きな特徴として歪の定式化に Green-Lagrange 歪を用いている事による変位の二次以上の項の影響による幾何学的非線形性と，膜面の座屈を微分不連続な応力-歪関係を持たせて表現した事による材料非線形性，これらの非線形特性に起因する運動中の時々刻々のモードの大きな変化があることが挙げられる．また，第一章では，低次元化手法構築の必要性と従来行われてきた研究について示した．

第二章では，膜面宇宙構造物の典型的な例である宇宙機 IKAROS を例に，膜面宇宙構造物の設計における考え方，膜面宇宙構造物の数学モデルと実際に膜面宇宙構造物の設計・開発・運用のフェイズに用いた際の課題を示した．特に，膜面宇宙構造物の設計・開発・運用では，数値解析によりパラメトリック・スタディを行い，膜面が衛星に巻きつく，膜面がひっくり返るなどの不安定な現象が起きないことを確認する必要がある．そのため，フルモデルと評価し十分であると設計者が判断した低次元モデルによりパラメトリック・スタディを行う事になるが，フルモデルの評価結果のない部分でもフルモデル解析値に対する低次元モデルの誤差を知れる事が望まれる．以上の非線形構造ダイナミクスの特徴，膜面

宇宙構造物の設計の課題より，本研究で解決すべき課題を以下のように整理した．

① 膜面宇宙構造物の数学モデルの幾何・材料非線形性に起因するモードの時々刻々の大きな変化に対応できること（幾何・材料非線形性への対応）

② 剛体運動や低周波の運動，高周波の運動が混在する Stiff な微分方程式に対応できること（数値安定性への対応）

③ 剛体-ケーブル等の幾何学的な拘束条件を有する系に対応できること（幾何学的拘束条件への対応）

④ 低次元モデルが有する誤差の推定ができること（実機設計・開発への対応）

また，第二章では IKAROS の軌道上実証データと本研究で用いる非線形有限要素法解析との比較により，現行の膜面宇宙構造物の数学モデルの妥当性について示した．

次に第三章では，軌道上実証された非線形有限要素法解析について示した．軌道上実証された非線形有限要素法解析では，エネルギ・運動量・角運動量を保存する保存型解法であるエネルギ・モーメンタム法に基づいた定式化を行っている．ここでは，非線形有限要素法解析の流れ，エネルギ・モーメンタム法，エネルギ・モーメンタム法で定式化された要素の等価節点力を示し，提案する低次元化手法との対応を取り易くした．

第四章では，膜面宇宙構造物の低次元モデル構築に必要な要求に対して，対応する以下の低次元化手法を提案した．

① 経験的固有直交分解法による運動中のモードの変化を考慮した低次元空間の選定（幾何・材料非線形性への対応）

経験的固有直交分解法により運動中のモードの変化を考慮した空間を取りだし，膜面宇宙構造物のように運動中のモードが時々刻々大きく変化するような系に対して有効な低次元空間の選定法を示した．

② 低次元空間でのラグランジュ方程式再構築によるエネルギ・モーメンタム法への対応（数値安定性への対応）

低次元空間でラグランジュ方程式を再構築する事で，自然な形でダイナミクスの低次元表現を導き，エネルギ・モーメンタム法を適用可能とし，剛体運動や低周波の運動，高周波の運動が混在する Stiff な微分方程式を安定に計算できる低次元化手法を示した．

③　ペナルティ法を用いた幾何学的な拘束条件を有する系への低次元モデル化手法の拡張（幾何学的拘束条件への対応）

ペナルティ法を用いた拘束条件の定式化を行い，幾何学的な拘束条件を有する様な系にも低次元化手法を拡張する方法を示した．

④　低次元誤差微分方程式による低次元モデルの誤差の推定（実機設計・開発への対応）

フルモデルで解くべき方程式の内，低次元化により切り落とした部分の時間発展を低次元空間内で計算することにより，フルモデルと低次元モデルの誤差の推定値を得ることが出来，低次元モデル単体で誤差の推定値を得る方法を示した．

また，提案する低次元化手法を簡易モデルに適用し，提案手法が膜面宇宙構造物に有効であることを数値計算により示した．

第五章では，提案した低次元化手法を実機に則したモデルに適用させ，提案手法が有効であることを数値計算により示した．特に，実際にIKAROSの設計・開発・運用でも行われたパラメータ・スタディを低次元モデルで行い，フルモデルの計算結果と比較することで，実機レベルの設計・開発・運用においても本手法が有効であることを数値計算により示した．また，提案手法はフルモデルの自由度が大きくなるほど計算効率が良くなる事を示した．

最後に第六章では，本研究で得られた結論を述べ，今後の課題について示した．

3.　おわりに

本研究では，膜面（数μ程度）やケーブルといった極めて柔軟な展開構造（ゴッサマー構造）と，人工衛星構体や展開支持構造のような剛性の高い構造とから成る膜面宇宙構造物の非線形構造ダイナミクスに適した低次元モデル化手法構築のために，経験的固有直交分解法に基づいた方法を，エネルギ・モーメンタム法，幾何拘束に対応可能なように拡張することにより，膜面宇宙構造物の非線形構造ダイナミクスに適した低次元モデル構築法を示した．また，実機の設計・開発の際に有用になる低次元モデルの誤差の推定方法について示し，実機に則した数値解析により提案した低次元化手法の有効性を示した．以上により，膜面宇宙構造物の非線形構造ダイナミクスのモデル低次元化手法の提案が行え，本研究の目的は達せられたと考える．今後は，実機の設計・開発への適用を通して実設計の問題・要求に対応可能なように低次元モデル化法を向上させていく事が重要である．