

論文の内容の要旨

氏名：有 田 祥 子

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：構造座屈と不安定性の動力的評価法

1. はじめに

宇宙機の設計・開発では、ミッションへの要求が高まるに従って、大型の構造物を宇宙で構築する技術の必要性が高まっている。宇宙で大型の構造物を構築する方法は組立型と展開型の2つに大別されるが、展開型の方がコストや構築期間の面で優れ、今後の宇宙機開発に向けて様々な展開宇宙構造物の研究・開発が行われている。また、パドルなど剛な部材の展開構造の他に、膜やケーブルなど部材の柔軟性を利用して収納・展開するゴッサマー展開構造が、より高効率な収納・展開を可能にする構造物として近年注目され、盛んに研究が行われている。

展開宇宙構造物を実現する上での重要な要求の一つに展開再現性が挙げられる。展開再現性とは何度展開しても同じ挙動で展開する性能であり、再現性が高いほど確実なミッション成功を保証することができる。2010年に打ち上げられた小型ソーラーセイル実証機 IKAROS では想定外の非対称展開が確認され、今後の展開宇宙構造物の開発に向けて再現性の評価法の確立および再現性の向上が課題として挙げられた。展開宇宙構造物の再現性に関する研究はこれまで、再現性を低下させる要因となる誤差や外乱を特定し、定量化し、モデル化して展開に与える影響を調べるという方法で行われてきた。しかしこの方法では実機設計の際、誤差や外乱のモデル化を誤ると結果が変わってしまうという問題がある。そこで本研究は、誤差をモデル化するのではなく、誤差や外乱に対するロバスト性の高い構造物を設計・選定するというアプローチで、展開再現性の高い構造物を設計する手法を提案することを目指す。

再現性を妨げる大きな原因の一つに、微小な誤差や外乱が大変位を生じさせる座屈現象が挙げられる。従って、誤差や外乱に対するロバスト性の高い構造物を設計・選定するには、座屈の起こらない構造を選定できればよいと考えられる。また、座屈の起こる構造しか選択肢がない場合、座屈による大変位の危険性、即ち不安定性を定量化し、その値を選定の判断基準とすれば設計に役立つと考えられる。更に、座屈を可視化して構造物のどの領域に大きな座屈変位が発生しうるかを視認できれば、対策を取るべき個所を知ることができ、設計に役立つと考えられる。

構造解析において、座屈は構造物の剛性マトリクスの固有値に0や負値が現れることで検出でき、静解析ではこれを用いて様々な研究が行われている。一方、動解析では、座屈の他に剛体運動でも固有値が0や負になることが知られており、座屈と剛体運動を区別できなければ座屈の検出が正しくできず、これを解決する方法は提案されていない。展開宇宙構造物は、大きく運動しながら展開する物も多く、動解析で応答を調べ、座屈を観測する技術が望まれる。動的座屈検出手法として、動的座屈を静的座屈モードの線形和として表し、その係数推移を調べる方法が提案されているが、この手法は初期形状から大きく変形していない場合においてのみ有効な手法であり、展開宇宙構造物のように時々刻々大きく変形する構造物には不向きである。また、動解析において座屈による不安定性を定量的に評価する研究はまだ行われていない。そこで本論文では、座屈と剛体運動を区別することで動解析中での座屈を検出し、定量化する手法を提案する。

また、大型構造物の動解析に多く用いられるトラス要素では、剛性マトリクスの固有値によって検出される座屈（構造座屈）の他に、1つの要素が座屈圧縮荷重を超える荷重を載荷されることによって起こる座屈（部材座屈）が存在し、部材座屈は構造座屈とは無関係に発生する。剛な部材に部材座屈が起こると塑性変形を起こし構造機能を失うが、ゴッサマー構造物はケーブルのたるみや膜のしわなどのように、圧縮によって部材座屈が起きても再度展張状態に戻れば構造機能が戻る性質を持っているため、展開の終始にわたって部材座屈を観察する必要がある。そこで本論文では、ゴッサマー構造物の性質をよく表現できる数学モデルを利用してゴッサマー構造物の座屈歪を求め、構造座屈と併せて可視化する手法を提案する。

2. 論文の構成

本論文は9個の章で構成される。第1章では本研究の背景、過去の研究、研究目的および方法を説明した。背景では、宇宙構造物の概念と展開宇宙構造物の有用性について述べ、過去の研究では展開宇宙構造物の展開方法に関する研究、再現性に関する研究、座屈に関する研究について述べた。そして、本研究で解決すべき課題を次のように整理した。

- ① 動解析中で剛体モードと座屈モードを区別して座屈を検出する手法の確立
- ② 座屈による不安定性の定量化手法の確立
- ③ 動解析における構造座屈と部材座屈を総合した座屈の可視化手法の確立

第2章では、構造動解析を行う上で基本となる柔軟構造力学、解析力学の理論を説明し、本論文の解析で用いる、二節点トラス要素・ケーブル要素、Newmark- β 法の有限要素法における等価節点力と剛性マトリクスの定式化について記した。これにより座屈の検出、定量化の理論構築において基本となる剛性マトリクスの数式表現を確認した。

第3章ではゴッサマーの部材座屈を可視化する手法を提案した。著者らは、圧縮によって簡単に座屈を起こすゴッサマーの特徴をよく表現できる数学モデルとして、過去に Modified Stiffness Reduction Model (Mod-SRM)を提案した。本章では Mod-SRM の数学モデルを説明し、Mod-SRM から部材の座屈歪の理論式を導出した。そして、動解析の中で、この座屈歪よりも大きな圧縮歪を示している部材をコンター表示することでゴッサマーの部材座屈を可視化する手法を示した。

第4章では構造座屈の基礎理論について説明した。本章では、剛性マトリクスの固有値が0以下となることが構造座屈であるということを分岐力学理論における物理学的な解釈とともに説明した。更に、分岐力学理論、構造動解析、構造静解析それぞれの方法でトラスアーチの座屈における固有値推移を求め、荷重制御静解析では負の固有値が得られないこと、動解析では解の一意性によって負の固有値が得られることを確認した。

第5章では、以下に示す方法で、動解析中で剛体モードと座屈モードを区別し、座屈を検出する手法を提案した。

- ① 運動中の構造物の剛体モードを見つける：
運動しながら変形している構造物に対し、歪が0の自由長状態を仮定する。このとき内力は0となるため、外力0で変形させることはできず、外力0で変位を生じさせられるのは剛体運動のみである。従って、この状態での剛性マトリクスの固有値が0となる固有ベクトルを取り出し、剛体モードと定義する。そして、全ての剛体モードから構成される剛体モード空間を定義する。
- ② 構造物の各固有モードが剛体モードであるか否かを調べる：
構造物の各固有モードに対し、剛体モード空間への直交成分を計算し、直交成分を持っていなければ剛体モード、持っていれば変形を含むモードと判別する。
- ③ 変形を含むモードの変形に要する仕事を計算し、座屈判定を行う：
変形を含むモードと判定された場合、剛性マトリクスと②で計算した剛体モード空間への直行成分を用いて、変形に要する仕事を計算する。その仕事は0以下であれば、座屈モードと判定する。

第6章では、座屈による不安定性の定量化手法を提案した。座屈が生じている時、外乱や誤差に対する構造物のロバスト性を知ることが望まれる。誤差や外乱による座屈変位量は構造物の運動の影響を受けると考えられるため、提案する理論では、外乱外力が加わって座屈変位を生じたと仮定して、この外力の大きさと座屈変位の大きさを運動方程式から計算し、次の2つの量を評価値として提案し、更にBD値を用いた構造座屈の可視化手法を提案した。

- ① DF値 (Disturbance Force Value) :
外乱外力のノルム。0以上の実数として得られ、DF値が小さければ、微小な外乱で座屈変位を生じてしまうためより不安定、DF値が大きければより安定に近いと評価する。
- ② BD値 (Buckling Displacement Value) :
座屈変位の節点ごとのノルムを並べたベクトル。成分は0以上の実数として得られ、その値が大きければ外乱によって大きく座屈変位してしまうためより不安定、小さければより安定に近いと評価する。また、成分値の大きさに応じて各節点をコンター表示する

ことによって、構造座屈の発生および外乱が生じた場合の座屈変位の程度を可視化する。

第7章では、提案した座屈検出手法、定量化手法、可視化手法が妥当なものであるかどうかを、トラスアーチモデルを用いて検証した。座屈検出手法の検証では、判定結果をモード形状と照らし合わせて確認し、正しく座屈検出が行われていることを確認した。定量化手法の検証では、運動状態が異なる2つのモデルに対して評価値を比較し、提案した評価値が妥当であることを確認した。また、ゴッサマー部材のモデルを用いて、部材座屈と構造座屈が可視化できていることを確認した。

第8章では、提案した手法を、実際の宇宙展開構造物を模したモデルに適用し、座屈特性を考察することで、実機設計に利用可能であることを確認した。具体的には、パドル展開、ブームによる膜面展開、膜面遠心展開の3つの構造モデルの計算を行い、出現した座屈モード個数、評価値、応答コンター図の比較から考察を行うことができた。

第9章では本研究で得られた結論を述べ、本研究の応用・展望について示した。

3. おわりに

本研究では、展開宇宙構造物の展開再現性を妨げる大きな原因の一つである座屈現象に注目し、座屈の起こらない構造物、座屈が起きたとしてもそれによる大変位の危険性が低い構造物を選定できるようにし、更に、座屈を可視化して大変位の危険性のある構造領域を視認できるようにする手法を構築した。これによって誤差や外乱に対するロバスト性の高い構造物を設計・選定することができるようになり、本研究の目的は達成された。