

論文審査の結果の要旨

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

審査委員：（主査） 教授 宮 崎 康 行

（副査） 教授 出 井 裕

教授 内 山 賢 治

千葉工業大学准教授 秋 田 剛

本論文は、ゴッサマー部材、すなわち、膜やケーブルネットワークといった、極めて柔軟でわずかな圧縮力により容易に弾性座屈を起こして大変位を呈する部材を用いた構造物を対象として、その非線形運動の安定性の評価理論の構築を試みたものである。近年、ゴッサマー構造は大型展開宇宙構造物の構造様式として注目され、その代表例であるソーラーセイルは日本が世界に先駆けて2010年に宇宙実証に成功し、現在、米国・欧州・中国等を含む世界各国でし烈な研究・開発競争が繰り広げられている。本研究は、ゴッサマー宇宙構造物の設計や挙動予測、実機運用の際に問題となる、展開再現性の評価に適用が可能であり、また、設計段階で複数の構造が提案された際にそれらを比較・評価することができる指標を示した、工学的有用性の高い、これまでにない独創的な研究であると判断する。論文内容の審査結果は以下の通りである。

まず、第1章では、本研究の背景、過去の研究、現状の問題点を適切に整理し、その問題点を解決する新たな方法を提案している。そして、本研究を、提案する方法の妥当性を示すための研究と位置づけ、研究目的および方法を示している。特に、従来の研究が、想定される外乱、すなわち、軌道上での摂動外力や、製造誤差等により生じる、設計パラメータのノミナル値からのずれといったものがゴッサマー構造物の運動にどのような影響を及ぼすのかを調べるため、外乱を一つ一つ具体的に与えて、それぞれの場合について運動を計算することにより、その外乱の影響を調べるという、コストの高い方法であったのに対し、本研究では、問題となる影響、すなわち、座屈を生じさせるために必要な外乱を求め、その大きさから構造物の評価を行うという、従来にないアプローチをとっている点に、本研究の特徴を見出すことができる。この方法を用いれば、未知外乱を設計者・運用者があえて想定するという手続きは不要となるばかりではなく、設計段階で複数の設計案があった場合に、その比較・評価ができる点で、工学的に有用性があると考えられ、本研究の着想は高く評価できる。

本章の内容は、本研究の意義・目的・独創性・位置づけを明瞭に示していると評価できる。

第2章では、第3章以降に示している数値解析結果の基礎となる柔軟構造力学、解析力学、数値解析の理論を示している。本章は、第3章以降の結果の理論的妥当性を示すために必要不可欠な内容であると判断する。

第3章では、わずかな圧縮力により容易に座屈を起こし得るという、ゴッサマー構造特有の特徴を表現する数学モデルとして本論文の提出者が既に論文発表済みのモデル（Modified Stiffness Reduction Model）について説明している。そして、この数学モデルを用いてゴッサマー構造の部材座屈を可視化する手法を提案している。部材座屈の可視化は、ゴッサマー構造物の比較・評価に極めて有効な手段であり、本章はその方法を適切に示していると判断する。

第4章では、従来の構造座屈の理論について解説し、座屈を検出する際の、座屈と剛性マトリクスの固有値の符号との関係について確認している。本研究は、この座屈理論を基礎に、この理論では評価できない、運動中の座屈を検出する方法を示したものであり、従来の理論と本研究で示す理論との違いを明確にする意味で、重要な章となっていると判断する。

第5章は第6章と並んで本論文の核となる章であり、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明快に示している。本章で示されている通り、従来の方法、すなわち、剛性マトリクスの固有値が負になった場合に座屈が生じていると判断する方法では、運動中は剛体モードを適切に抽出できない、すなわち、剛体変位が固有値負の固有ベクトルとなることから、固有値の正負をみているだけでは剛体モードを座屈モードとみなしてしまうことが問題であった。これに対して、本章では、時々刻々の運動状態において、幾何剛性を無視することで適切に剛体モード空間を求め、

変位増分空間を剛体モード空間と弾性モード空間の直和で表し、実際の変位増分の弾性モード空間への射影による仕事量の正負から座屈状態の有無を判断するという、従来にない、新たな方法を提案しており、従来の手法の問題点を解決している。その意味で、この章の内容は、本論文の独創性・重要性を示す根拠となっていると評価できる。

第6章では、座屈状態と判断された運動における不安定性の定量化手法を提案しており、これも本研究の核となる提案となっている。その中では、本論文の提出者がDF値 (Disturbance Force Value)、および、BD値 (Buckling Displacement Value) と呼んでいる、2つの評価指標を提案している。DF値は、ある運動状態において、座屈変位を生じさせる外乱のノルムの最小値を表しており、DF値が小さければ、微小な外乱で座屈変位を生じていることを意味していることから、運動の安定性の指標に用いることが可能であると考えられる。また、BD値は上述のノルム最小の外乱を実際に与えた際に生じる、物体内の各部の変位のノルムを並べたベクトルであり、このベクトルの各成分が大きければ外乱によって大きく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判断できる。また、このBD値のコンター図を物体内にプロットすれば、物体内のどの箇所がどの程度大きな変位を生じやすいかを可視化でき、設計のアップデートに利用できると考えられる。このような評価指標は従来から必要と認識はされつつも、提案はなされてきていない。しかし、本章では、これら2つの評価指標の厳密な導出手順を示すことで、その理論的意味および理論的妥当性を明らかにしていることから、本章の内容は他の研究者がこれらの評価指標を利用する判断基準にもなるもので、これらの評価指標は今後、工学的に有用な指標に成り得ると判断できる。

そして、第7章では、トラスアーチモデルを用いた数値計算例を通じて、第6章までに提案した計算手法や評価指標、可視化手法の妥当性を示している。具体的には、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ている。また、定量化手法の検証、すなわち、BD値とDF値の算出とその値の妥当性の検証については、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、理論的に予想される結果が得られていることを確認している。そして、一般的なトラス部材、すなわち、引張剛性と同等の圧縮剛性を有する部材と、ゴッサマー部材、すなわち、引張剛性に比べて圧縮剛性が極端に小さいモデルの2つを用いて、部材座屈と構造座屈が適切に可視化できていることを確認している。そこでは、得られた数値結果に対して論理的な考察・解釈を加えており、提案した計算手法・評価指標・可視化手法が妥当であることを納得するに十分な結果が示されていると判断する。

さらに、第8章では、本論文の提案内容の汎用性を示すこと、すなわち、より複雑な構造にも本論文の提案内容が適用できることを示すために、パドル展開、ブームによる膜面展開、膜面遠心展開という3つの構造モデルで第7章と同様の数値計算を行い、計算結果に対して適切な考察・解釈を与えている。この結果から、本論文の提案内容は、自由度の少ない小規模モデルだけでなく、自由度が多い実機レベルの宇宙構造物にも確かに適用可能であることが示されたと判断できる。このことは、本研究の工学的有用性をより高めることにつながると評価できる。

最後に、第9章では、本論文で得られた研究成果をまとめ、結論、すなわち、提案する計算手法・評価指標・可視化手法が妥当で有用であることを述べている。そして、本研究の今後の応用や展望を示している。第8章までの内容から、これらの自己評価は適切なものであり、その結論や今後の展望は十分に受け入れられるものであると判断する。

以上の通り、本研究は、展開運動など非線形運動中の構造物の座屈状態を調べる方法を示した、構造力学・解析力学の発展に寄与する研究であり、本論文はその詳細な理論や数値計算結果が示された、学術的価値の高い論文である。また、現在、研究が活発に行われているゴッサマー宇宙構造物に関し、その実機設計や運用の際に問題となる点を解決する手法を示した点で、工学的にも有用な研究である。

このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

平成28年2月18日