

氏 名 荻芳郎

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大甲第 1131 号

学位授与の日付 平成 20 年 3 月 19 日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 薄肉開断面梁のスピン軸方向伸展に関する研究

論文審査委員	主 査	准教授	峯杉 賢治
		教授	小松 敬治
		准教授	澤井 秀次郎
		准教授	坂井 真一郎
		教授	樋口 健

論文内容の要旨

薄肉構造は、軽量であるという利点から、航空機や宇宙機を含む工業機械に広く用いられている。ところが、回転機械の軸として用いられているのは、中実梁や薄肉閉断面梁がほとんどであり、薄肉開断面梁、特に非対称開断面を有する梁はほとんど用いられていない。これは、薄肉開断面梁が、中実梁や薄肉閉断面梁に比べて剛性・強度の点で不利であり、また、断面形状によっては重心とせん断中心が大きく離れ、曲げとねじりを連成させ、挙動をより複雑にするからであると考えられる。薄肉開断面梁の動的挙動に関するこれまでの研究は、非回転時及び非伸展時の振動問題に限られており、回転時、さらにはスピン軸方向伸展時についての研究はなされていない。しかし、宇宙機器の軽量化が今後も求められていくなかで、薄肉構造はさらに利用が拡大していくものと考えられる。

本論文の研究背景として、現在、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部にて次期磁気圏探査計画 SCOPE (cross-Scale COupling in Plasma universE)がミッション提案に向けて検討されている。SCOPE 計画では、衛星スピン軸方向に伸展式の電場アンテナが必要であり、スピン安定性などからくるアンテナ質量や剛性などの厳しい制約条件から、インフレータブル方式による薄肉開断面伸展梁 SPINAR (SPace INflatable Actuated Rod)を開発中である。この新規概念を SCOPE 衛星で実現するためには、薄肉開断面伸展梁の SCOPE 衛星搭載を想定した解析をしておく必要がある。

本研究の目的は、薄肉開断面梁のスピン軸方向伸展の動的挙動を明らかにすることである。本論文は、薄肉開断面梁の構造モデリング、一軸対称薄肉開断面を有する回転軸の安定解析、一軸対称薄肉開断面梁のスピン軸方向伸展解析、薄肉開断面伸展梁の開発における実証試験について述べている。

まず、薄肉開断面梁を連続体として扱い、回転軸の安定解析とスピン軸方向伸展解析に用いるための準備として、地上での振動試験結果から構造モデリングする方法について述べた。衛星スピン軸方向伸展構造物として有望な構造方式である薄肉開断面伸展梁の、SCOPE 衛星搭載を想定した解析を行うため、本論文では、薄肉開断面伸展梁を一般的な円形開断面を持つ一端弾性支持一端自由梁にモデル化した。円形開断面は一軸対称薄肉開断面の一種であり、一般的な一軸対称薄肉開断面梁について、自重圧縮か自重引張を受ける時の曲げとねじりの自由振動基礎式を、Vlasov による弾性理論と D'Alembert の原理より導いた。この基礎式を用いた一端固定一端自由梁の数値計算例より、一軸対称薄肉開断面梁では重心軸とせん断中心軸の不一致を考慮した振動解析が必要であること、及び重力加速度が固有振動数に与える影響を明らかにした。また、一端弾性支持一端自由梁の弾性支持パラメータを、地上で自重圧縮状態にあるときの固有振動数実験値を推定できるよう決定した。この一端弾性支持一端自由梁について振動解析を行い、SCOPE 衛星で必要とされる長さ 5 m では地上試験における重力の影響を無視できないことを示した。

次に、構造数学モデルを回転軸問題へ拡張するために、偏重心を持つ一軸対称薄肉開断面を有する回転軸について、Hamilton の原理により運動方程式を導出し、静的変形及び動的安定性を推定する手法を導いた。この手法を用いた一端固定一端自由軸の数値計算例より、角速度、危険速度、偏重心、及び静的変形の間関係を明らかにした。また、一軸対称薄肉開断面を有する回転軸では、重心とせん断中心の不一致に起因した不安定振動が、ある角速度領域で起こること、及び内部減衰が存在する場合には、1 次の危険速

度より大きい角速度では常に動的不安定になることを示した。薄肉開断面伸展梁のSCOPE衛星搭載を想定した一端弾性支持一端自由軸の数値計算例より、SCOPE衛星の運用スピンのレートでは、固有振動数が運用スピンのレートより低いものの動的安定であることを確認した。

さらに、一軸対称薄肉開断面を有する回転軸のモデルを発展させ、一軸対称薄肉開断面梁のスピンの軸方向伸展解析を行った。伸展加速度による軸方向力が梁の曲げとねじりに非保存力として影響を及ぼすものとし、一軸対称薄肉開断面梁のスピンの軸方向伸展時の曲げとねじりの運動方程式を、Hamiltonの原理により導出した。そして運動方程式をGalerkin法により離散化し、動的安定性を調べる方法を導いた。この手法を用いた一端固定一端自由梁の数値計算例より、内部減衰が存在しない場合は、定速度伸展時は重心-せん断中心距離やスピンのレートに関わらず常に動的不安定であるが、内部減衰が存在すれば動的安定領域が存在することを示した。伸展加速度の影響について考察し、正の伸展加速度によって動的不安定になる時は自重圧縮による座屈であることを数値計算結果により示した。また、伸展終了時の負の伸展加速度は動的安定性に悪影響を与えないことを示した。さらに、離散化した運動方程式を数値積分し、伸展が速いと伸展終了時の過渡応答振動が大きくなることを示した。薄肉開断面伸展梁のSCOPE衛星搭載を想定した一端弾性支持一端自由梁の数値計算例より、伸展中に動的不安定となる場合が見られたが、この場合には不安定の度合いが小さく有限時間で終わるため、伸展後の過渡応答振動に大きな影響は見られず、最大振れ回り量が有限であることが分かった。

最後に、開発中のSPINARについて、観測ロケットによる宇宙環境下でのスピンの面内伸展実験と航空機による微小重力環境下でのスピンの軸方向伸展実験を実施した。観測ロケット実験では、伸展方向がスピンの面内であり、SCOPE衛星で行うスピンの軸方向とは異なるが、宇宙環境下でのインフレータブル伸展を実証した。また、航空機実験では、微小重力環境下でのスピンの軸方向伸展を実証し、実構造物の動的挙動を把握した。航空機実験結果と一端弾性支持一端自由梁の数値計算結果とを比較することにより、伸展後スピンの時はあらゆる実験パラメータで動的安定であったことを確認し、スピンの軸方向伸展時の危険性を評価できることを示した。

以上のように、本研究では、一軸対称薄肉開断面を有する回転軸の解析手法を導出し、動的安定性を調べる方法を示すとともに、さらに回転軸が伸展する場合にまで適用できるよう拡張して、薄肉開断面梁のスピンの軸方向伸展の動的挙動を明らかにした。スピンの軸方向伸展の動的挙動に、薄肉開断面の構造モデルを用いることが伸展中及び伸展後の動的安定性を推定するために重要であり、伸展後の過渡応答振動を定量的に評価することが可能であることも示した。

論文の審査結果の要旨

薄肉構造は、軽量であるという利点から、航空機や宇宙機を含む工業機械に広く用いられている。ところが、回転機械の軸として用いられているのは、中実梁や薄肉閉断面梁がほとんどであり、薄肉開断面梁、特に非対称開断面を有する梁はほとんど用いられていない。これは、薄肉開断面梁が、中実梁や薄肉閉断面梁に比べて剛性・強度の点で不利であり、また、断面形状によっては重心とせん断中心が大きく離れ、曲げとねじりを連成させ、挙動をより複雑にするからである。薄肉開断面梁の動的挙動に関するこれまでの研究は、非回転時及び非伸展時の振動問題に限られており、回転時、さらにはスピン軸方向伸展時についての研究はなされていない。しかし、宇宙機器の軽量化が今後も求められていく中で、薄肉構造はさらに利用が拡大していくものと考えられる。

出願者の研究目的は、薄肉開断面梁のスピン軸方向伸展の動的挙動を明らかにすることである。出願者は本論文で、衛星スピン軸方向伸展構造物として有望な構造方式である薄肉開断面梁の構造モデリング、一軸対称薄肉開断面を有する回転軸の安定解析、一軸対称薄肉開断面梁のスピン軸方向伸展解析、薄肉開断面伸展梁の開発における実証試験について述べている。

まず、薄肉開断面梁を連続体として扱い、回転軸の安定解析とスピン軸方向伸展解析に用いるための準備として、地上での振動試験結果から構造モデリングする方法について述べた。薄肉開断面伸展梁を一様な円形開断面を持つ一端弾性支持一端自由梁にモデル化した。また、一般的な一軸対称薄肉開断面梁について、自重圧縮か自重引張を受ける時の曲げとねじりの自由振動基礎式を、Vlasov による弾性理論と D'Alembert の原理より導いた。この基礎式を用いた一端固定一端自由梁の数値計算例より、一軸対称薄肉開断面梁では重心軸とせん断中心軸の不一致を考慮した振動解析が必要であること、及び重力加速度が固有振動数に与える影響を明らかにした。また、一端弾性支持一端自由梁の弾性支持パラメータを、地上で自重圧縮状態にあるときの固有振動数実験値を推定できるように決定した。この一端弾性支持一端自由梁について振動解析を行い、搭載候補衛星で必要とされる長さでは地上試験における重力の影響を無視できないことを示した。

次に、構造数学モデルを回転軸問題へ拡張するために、偏重心を持つ一軸対称薄肉開断面を有する回転軸について、Hamilton の原理により運動方程式を導出し、静的変形及び動的安定性を推定する手法を導いた。一軸対称薄肉開断面を有する回転軸では、重心とせん断中心の不一致に起因した不安定振動が、ある角速度領域で起こること、及び内部減衰が存在する場合には、1 次の危険速度より大きい角速度では常に動的不安定になることを示した。

さらに、一軸対称薄肉開断面を有する回転軸のモデルを発展させ、一軸対称薄肉開断面梁のスピン軸方向伸展解析を行った。伸展加速度による軸方向力が梁の曲げとねじりに非保存力として影響を及ぼすものとし、一軸対称薄肉開断面梁のスピン軸方向伸展時の曲げとねじりの運動方程式を、Hamilton の原理により導出した。そして運動方程式を Galerkin 法により離散化し、動的安定性を調べる方法を導いた。そして、一端固定一端自由梁の数値計算例より、内部減衰が存在しない場合は、定速度伸展時は重心-せん断中

心距離やスピンレートに関わらず常に動的不安定であるが、内部減衰が存在すれば動的安定領域が存在することを示した。

最後に、開発中の薄肉開断面を有する回転軸について、観測ロケットによる宇宙環境下でのスピン面内伸展実験と航空機による微小重力環境下でのスピン軸方向伸展実験について述べた。観測ロケット実験では、伸展方向がスピン面内であり、スピン軸方向伸展とは異なるが、インフレーター伸展機構を宇宙実証した。また、航空機実験では、微小重力環境下でのスピン軸方向伸展を実証し、実構造物の動的挙動を把握した。航空機実験結果と数値計算結果とを比較して、伸展後スピン時はあらゆる実験パラメータで動的安定であったことを確認した。

以上のように、本研究では、一軸対称薄肉開断面を有する回転軸の解析手法を導出し、動的安定性を調べる方法を示すとともに、さらに回転軸が伸展する場合にまで適用できるよう拡張して、薄肉開断面梁のスピン軸方向伸展の動的挙動を明らかにした。スピン軸方向伸展の動的挙動に、薄肉開断面の構造モデルを用いることが伸展中及び伸展後の動的安定性を推定するために重要であり、伸展後の過渡応答振動を定量的に評価することが可能であることも示した。

以上から、本研究は軽量構造要素の動的挙動の解析・考察とその宇宙利用技術に重要な役割を担い、出願された論文は博士学位論文としてふさわしい水準にあると判定した。