

平成22年6月2日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）  
 研究期間： 2008 ～ 2009  
 課題番号： 20860037  
 研究課題名（和文） ゴサマー宇宙構造物の動特性同定法と振動制御法に関する研究  
 研究課題名（英文） Dynamical Property Identification and Vibration Control of Gossamer Space Structures  
 研究代表者  
 坂本 啓 （SAKAMOTO HIRAKU）  
 東京工業大学・大学院理工学研究科・助教  
 研究者番号： 40516001

## 研究成果の概要（和文）：

膜・ケーブルを主たる構造要素とする宇宙構造物（ゴサマー構造）において、軽量・高収納率という利点を保ちつつより高機能の構造を実現することを目指し、構造系と制御系の同時設計を行うための基盤技術を確立することを目指した。以下の3点において成果を上げた。第1に膜構造の周波数応答特性を減圧環境下で実験的に計測した。第2に、ゴサマー構造の曲げ剛性を考慮しながら展開解析を行う数値モデル化手法を開発した。第3に、膜面の動的展開を可能にする姿勢制御則と構造パラメータを、数値解析を用いて同時に設計する手法の一例を示した。

## 研究成果の概要（英文）：

The present study aimed at obtaining some fundamental technologies required for controller/structure-simultaneous design of gossamer spacecraft, which mainly consist of thin membranes and cables. Three achievements were made. (1) Vibrational characteristics of pretensioned membranes were identified through experiments in a vacuum condition. (2) New beam finite element was developed, which enabled transient deployment analyses of gossamer spacecraft. (3) Attitude control laws and structural designs for solar sail's 1-step deployment were found using a series of numerical analyses.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,330,000	399,000	1,729,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,530,000	759,000	3,289,000

## 研究分野： 工学

科研費の分科・細目： 総合工学 航空宇宙工学

キーワード： 構造・材料, 構造工学, 動力学, 機械力学・制御, 宇宙工学, 人工衛星

## 1. 研究開始当初の背景

人工衛星の構造設計において現在もっと

も注目を集めているものの一つが、膜やケーブルといった張力部材を用いた、超軽量・高収納率の新たな宇宙構造物である。ゴサマー

(Gossamer=蜘蛛の巣のように軽い) 構造と呼称されるこれら宇宙建造物の研究が、特に NASA を中心とする米国において活発に行われている。

ゴサマー構造が近年、特に注目を集めてきたのは次の背景による。ゴサマー構造の概念自体は古くから提唱されていたが、近年になって材料工学の発達により宇宙環境に耐える超薄型の膜材料や複合材料が開発され、ゴサマー構造の実現が現実味を帯びてきた。そしてゴサマー構造によって、これまでになかった宇宙ミッションが実現できるという大きな魅力がある。例えば 100m 級の膜を宇宙で展開することで太陽光の圧力を推進力とするソーラーセイルは、深宇宙探査のために理論上もっとも効率の良い推進方法の一つである。第二の例は、膜面を鏡面として用いる超大型アンテナがある。米国 NASA は 1996 年に地球周回軌道上で直径 14m の膜アンテナの展開実験を行った。別の例として、軌道上で発電を行い地球に送電する太陽発電衛星(SPS)がある。数 km 級の構造の建設が議論されている。このようにゴサマー構造は、宇宙環境利用の幅を大きく広げる基盤技術になりうる。

しかしゴサマー構造は一般に重力下では形状を維持できないほど柔軟であり、更にその動力学は重力と大気の影響を強く受けるため、軌道への打ち上げ前に、地上で構造の動特性を同定することは困難である。またゴサマー構造はしばしば著しく低い基底固有振動数を持つため、振動制御に能動的な方法が必要となってくると考えられるが、上に述べた理由で構造動特性モデルに不確定性が高く、いまだ構造・制御系の同時設計の適切な方法は確立されていない。結果、現状のゴサマー構造の設計は基底固有振動数をじゅうぶん高く設計する、という旧来の設計思想にとどまるものであり、ゴサマー構造の潜在能力を最大限に引き出すものとは言えない。すなわち構造・制御系の同時設計による「適応ゴサマー構造 (Adaptive Gossamer Structure)」とも呼べる新たな設計概念と、その設計手法の確立がいま、求められている。

## 2. 研究の目的

構造・制御系の同時設計法の確立のために軌道上実験を繰り返すことは、費用・時間的にたいへん負担が大きい。そこでまず、本研究代表者らが開発してきた数値解析法を用いて簡略な構造モデルの動解析を行い、次にその結果を実証する小規模な地上実験を行い、そして地上実験の結果を数値モデルに反映して少しずつモデル・構造を複雑化し、再

びその計算結果を実証する地上実験を行う、という反復を経ることが、「適応ゴサマー構造」の設計手法を築く最も妥当な道筋であると本研究代表者は考えている。

本研究では、(1) ゴサマー宇宙構造の動特性の地上実験による同定方法の開発、(2) 数値解析技術の向上、(3) 数値モデルを利用したゴサマー宇宙構造の設計法の開発、の3つを行うことで、「適応ゴサマー宇宙構造」の構造系/制御系の同時設計を行うための基盤技術を獲得することを目指す。

## 3. 研究の方法

上記の3つの目的(1)~(3)に対応して、以下のアプローチを取る。

### (1) ゴサマー構造の動力学に関する減圧環境中での実験手法の開発

張力によって剛性を持つ膜面の振動応答を、宇宙空間に近い減圧環境下で計測するための加振方法・計測方法を検討・開発する。より高精度な動特性の実験的同定が可能になれば、数値モデルの精度向上に貢献できる。

### (2) ゴサマー構造の数値解析技術の向上

宇宙空間での宇宙構造の動的挙動をできるだけ正確に予測するために、膜の曲げ剛性を考慮しつつ展開挙動が解析できる新たな構造要素を、幾何学的非線形有限要素法の枠組みの中で開発する。この要素を用いることで、例えばソーラーセイルのセイル展開時における姿勢制御系と構造系の連成を、より正確に解析することを可能にする。

### (3) ソーラーセイル膜展開時の姿勢制御系と構造系の連成解析と設計改善

ケーブル・集中質量からなる単純な解析モデルを用いて、宇宙機が大型膜を展開する時の姿勢制御則について検討を行う。2010年5月打ち上げのJAXAのソーラーセイルの設計を参考として用いて、数値解析を用いた宇宙機の構造・制御系同時設計の一例を示す。

## 4. 研究成果

前節で述べた3点それぞれについて、以下のような成果を得た。

### (1) ゴサマー構造の動力学に関する減圧環境中での実験手法の開発

膜面の減圧環境下での振動試験を容易に

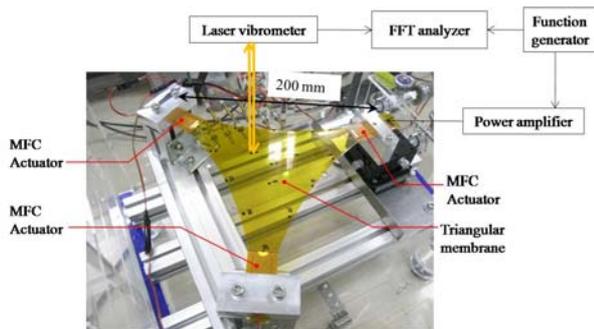


図1 ピエゾアクチュエータを用いた減圧環境での膜面の振動試験装置

行うことを目指し、ピエゾアクチュエータを用いた膜面の加振試験システムを開発した。振動の計測は、真空槽外からレーザー振動計を用いて実施した。

15cm 程度の小型膜を用いて約 1/100 気圧での膜面の周波数応答関数を計測した。この知見をもとに 2010 年度初頭には 40cm 正方膜を用いて 1/10000 気圧の高真空環境下で振動計測を実施する。

### (2) ゴサマー構造の数値解析技術の向上

通常、膜面構造に用いられる膜は、曲げ剛性は無視できるものとされ、面内方向の剛性のみを考慮してモデル化されてきた。しかし、JAXA のソーラーセイル IKAROS のセイル膜のように収納時に短冊状に折り畳んで膜複数枚が重なり合っていたり、太陽電池セルやハーネスが貼付されている場合、曲げ剛性の影響の評価が必要となる。

そこで本研究では、幾何学的非線形有限要素法の枠組みの中で曲げ剛性を考慮しつつ膜面の展開挙動が解析できる新たな構造要素として、長さを任意に変化させられることができる 3次元 Timoshenko 梁要素を開発した。この要素は、過渡応答解析においてエネルギーと運動量を保存する数値積分法を用いている点に特徴がある。

この要素をソーラーセイル展開挙動の解析に用いた。有限要素法による過渡応答解析を行い、ソーラーセイルの展開機構の性能評価を行い、衛星の実際の設計・運用に活かす成果を得た。

### (3) ソーラーセイル膜展開時の姿勢制御系と構造系の連成解析と設計改善

スピン安定型人工衛星において収納されていたゴサマー構造を一気に、動的に展開するための制御系と構造系の設計を、数値解析を用いて設計する方法論を構築した。

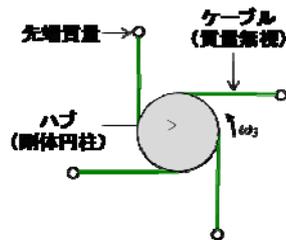


図2 ゴサマー構造の一気展開解析のための簡易理論モデル

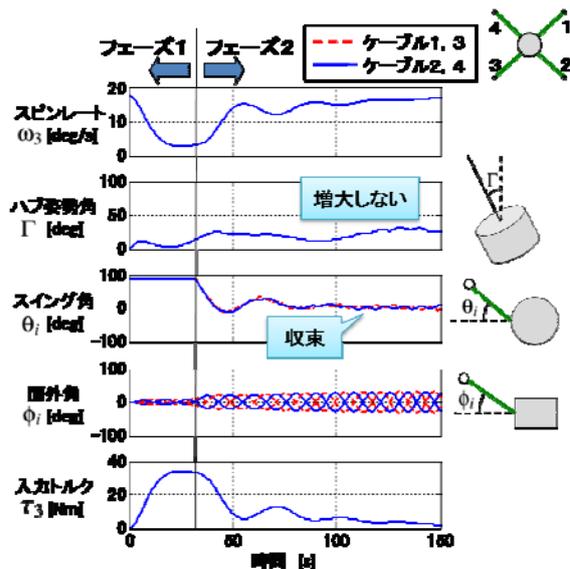


図3 スピンレート制御則と構造設計の改善によって一気展開が成功した例

解析にはまず、図 2 に示すような簡易的な理論モデルを用いた。円柱形の衛星バス部に 4 本のケーブルが巻きつけられており、それぞれの先端に集中質量が固定されている。スピン衛星において、先端質量がはじめは衛星バス部に固定されており、これらの固定が同時に解放されることで、巻きついていたケーブルが遠心力によって展開される。

このとき、スピンレートの制御と、構造設計（慣性モーメント比の設定）が適切でなければ、次のような展開失敗のモードに陥る。すなわち、

- スピンレートが低く、十分な展開力が得られない。
- 一度展開したケーブルが再びバス部に巻き戻ってしまう。
- スピン軸の首振り運動が増大し、バス部の姿勢が反転する。

以上の不具合モードを、できるだけ小さい姿勢制御アクチュエータによって回避する設計・制御則を見つけることが課題である。本研究では理論モデルを用いた過渡応答解析を実施することで、この課題の一つの解答を示した。図3に、提案する設計改善によって一気展開に成功した例を示す。

さらに提案した構造・制御の同時設計法を、JAXAのソーラーセイルIKAROSの開発のために作成された数値解析モデル(多粒子モデル)にも適用し、IKAROSの設計においても安定した一気展開が可能であることを示した。IKAROSはノミナルの運用では二段階展開と呼ばれる展開方法を用いるが、万が一、二段階展開機構に不具合が生じた場合には、本研究で開発した制御則が使用される予定である。

研究成果のまとめ：

- 研究代表者が赴任するまでは宇宙構造物研究の経験がなかった研究環境に、ゴッサマー宇宙構造物の振動実験の実施のためのシステムを構築した。(上記(1)の成果。)
- 数値解析を用いた研究(上記(2)および(3))においては、実際の宇宙ミッションに適用できる数値解析手法および構造・制御系の同時設計手法を開発した。

#### 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 O. Mori, H. Sawada, F. Hanaoka, J. Kawaguchi, Y. Shirasawa, M. Sugita, Y. Miyazaki, H. Sakamoto, and R. Funase, "Development of Deployment System for Small Size Solar Sail Mission," Transactions of Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Space Technology Japan, Vol. 7, 2009.

[学会発表] (計6件)

- ① H. Sakamoto, "Geometrically nonlinear analyses of wave propagation in non-uniformly pre-tensioned membranes," ISTS 2008-c-12, Proc. of the 26th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), Hamamatsu, Shizuoka, Japan, June 5-12, 2008.

- ② O. Mori, H. Sawada, F. Hanaoka, J. Kawaguchi, Y. Shirasawa, M. Sugita, Y. Miyazaki, and H. Sakamoto, "Development of deployment system for small size solar sail mission," ISTS 2008-d-57, Proc. of the 26th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), Hamamatsu, Shizuoka, Japan, June 2-8, 2008.

- ③ N. Okuizumi, H. Sakamoto, A. Kitajima, and M. Sugita, "Centrifugal deployment experiments of a square-shaped solar sail membrane," #A-5, Proc. of the 18th Workshop on JAXA Astrodynamics and Flight Mechanics, Sagami-hara, Kanagawa, Japan, July 28, 2008.

- ④ H. Sakamoto, Y. Miyazaki, and O. Mori, "Transient Dynamic Analysis of Gossamer Appendage Deployment Using Nonlinear Finite Element Method," AIAA 2009-2170, 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Material Conference, Palm Springs, CA, USA, 4-7 May 2009. (presentation canceled due to swine flu)

- ⑤ H. Sakamoto, Y. Miyazaki, and O. Mori, "Finite element dynamic analysis of solar sail deployment," ISTS 2009-c-32, Proc. of the 27th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), Tsukuba, Ibaraki, Japan, July 5-12 2009.

- ⑥ 坂本啓, 宮崎康行, 森治, 白澤洋次, 「有限要素法によるIKAROSセイル一次展開の動解析」, No. B1, 第25回宇宙構造・材料シンポジウム, 神奈川県相模原市, 2009年12月4日.

- ⑦ H. Sakamoto, Y. Miyazaki, and O. Mori, "Transient Dynamic Analysis of Solar Sail Deployment Using Nonlinear Finite Element Method," AIAA 2010-2587, 51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Material Conference, Orlando, FL, USA, 12-15 April 2010. (新型インフルエンザの為前年度発表できなかった④と同一の論文)

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂本 啓 (SAKAMOTO HIRAKU)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：40516001

(2) 研究代表者  
なし

(3) 連携研究者  
なし