

平成21年 5月21日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19360384

研究課題名（和文） ゴサマー・マルチボディ・ダイナミクスの保存型解法

研究課題名（英文） Structure Preserving method of Gossamer Multi-body Dynamics

研究代表者

宮崎 康行 (MIYAZAKI YASUYUKI)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：30256812

研究成果の概要（和文）：本研究では、膜面やケーブル、薄板、梁、インフレータブル構造といった極めて柔軟な展開構造（ゴサマー構造）と、人工衛星構体のような剛性の高い構造とから成る、ゴサマー・マルチボディ・システムのダイナミクスを、エネルギーや運動量・角運動量等を保存しつつ安定かつ高精度に模擬する構造保存型解法を構築した。そして、並列アルゴリズムを導入して計算を高速化した汎用非線形弾性動力学解析コード NEDA2.0 を開発した。

研究成果の概要（英文）：The target of this research was the gossamer multi-body system that consists of the gossamer structure such as membranes, cables, thin shells, beams, and inflatable structures, and the rigid structure such as spacecraft body. In this research, the structure preserving method of the gossamer multi-body dynamics is constructed, which preserves the structure of the system such as the energy, linear and angular momentums, and gives stable and highly accurate solution. The nonlinear elasto-dynamic analysis code NEDA2.0 was developed

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2008年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
総計	8,800,000	2,640,000	11,440,000

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：柔軟多体力学，構造保存解法，ゴサマー構造物，展開構造物，拘束系力学，モデル化，非線形有限要素法，並列計算

## 1. 研究開始当初の背景

研究代表者は、研究開始当初までに膜面の変形解析理論を提案し、ゴサマー構造物の展開ダイナミクスの保存型解法を構築し、解析コード NEDA (Nonlinear Elasto-Dynamic Analysis) を開発してきていた。そして、その利用結果をもとに数値解析理論を改良し

てきた。また、ソーラーセイルなどの展開シミュレーションを行い、これまで困難とされてきた実機サイズでゴサマー宇宙構造物の動解析ができるに至った。しかし、実機においては、ゴサマー構造だけでなく、衛星構体や、トラスなど他の構造との連成を考慮する必要があり、そのためにはジョイント等によ

る結合拘束条件を組み込む必要があった。

そこで、研究代表者は、保存型解法を任意の柔軟構造に適用できるように理論を一般化し、結合拘束条件の保存型解法を提案した。また、展開宇宙構造物によく用いられる折り畳み構造の場合、膜面など折り畳まれた部材同士の衝突を考慮する必要があるため、ペナルティ法と、局所ラグランジュ乗数法について、保存型解法を提案した。

さらに、これらの研究とは別に、軌道上で最新の研究成果を検証することを目標に、超小型人工衛星の開発を行い、その第1段階として、衛星バスの軌道上実証衛星SEEDSの打上げを実施するまでに至った(図1)。その中で、宇宙機システム全体を設計するために必要な考え方やノウハウを得るとともに、軌道上外乱を保存型解法に適用するための理論を定式化した。

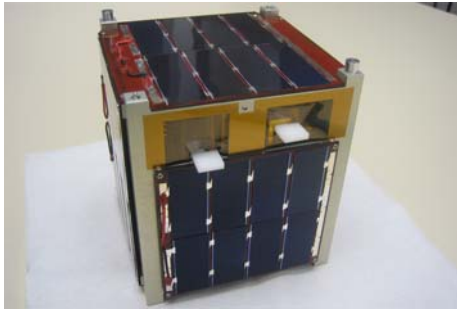


図1 開発した人工衛星 SEEDS

一方、ソーラーセイルなど、次世代の大型ゴサマー宇宙構造物の研究をみると、膜面のしわの解析や、姿勢制御方法、膜面材料の開発など、個々の研究は進んでいるが、宇宙機システム全体としての研究は未だ進んでいない。特に、膜面のダイナミクスについては、研究代表者以外に詳細な解析を行っているものではなく、バネ・マス系など、簡単なモデルで解析しているものが若干見受けられる程度であった。

また、海外においても、米国ではNASAを中心に、日本では(独)宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部を中心に、ゴサマー構造の実験的研究、および、主に静的な変形解析の研究が2000年前後以降、精力的に行われていたが、実機全体の挙動をシミュレーションできるまでには至っておらず、ゴサマー多体宇宙構造物の設計・開発手法自体が確立されていない状況にあった。

以上の状況の中、これまでの研究をまとめ、限定された状況における解析ではなく、ゴサマー多体宇宙構造物システム全体の運動を、近似を極力少なくし、高速で精度よく解析する手法を確立すれば、次世代の大型宇宙構造物の構造設計に極めて有効で、利用価値の高いものになる、というのが研究開発当初の状況であった。

## 2. 研究の目的

本研究は、3年間の研究期間の中で、次の5つの課題を実施することで、ゴサマー多体宇宙構造物のダイナミクスの保存型解法を構築することを具体的な目的とするものである。特に、課題(1)と(5)は本研究の根幹を成すものである。

- (1) 拘束を受ける柔軟多体宇宙構造物の運動の保存型解法の構築
- (2) インフレータブル構造におけるガス流入と膜との連成の保存型解法の確立
- (3) 微小重力下における柔軟多体構造物の運動実験の調査及び保存型解法の検証
- (4) 減圧下でのゴサマー多体構造物の展開運動の計測実験と数値計算との比較
- (5) ゴサマー多体宇宙構造物の運動解析

## 3. 研究の方法

「2. 研究目的」で述べた5つの課題について、以下の方法で研究を進めた。

- (1) 拘束を受ける柔軟多体宇宙構造物の運動の保存型解法の構築  
研究代表者が既に開発したゴサマー構造・柔軟構造の動解析コードNEDAに、次の3つの既存の研究成果を組み込む：①柔軟多体構造物における結合拘束の保存型解法、②弾性体の衝突問題の保存型解法、③軌道上の微小外乱の保存型解法。また、コードを並列化することにより、実機的设计・開発に耐え得る計算時間でゴサマー多体宇宙構造物の運動解析ができるようにする。
- (2) インフレータブル構造におけるガス流入と膜との連成の保存型解法の確立  
既に開発済みのガスと膜の変形とのNEDA用連成解析モジュールを修正し、熱力学的近似精度の高い保存型解法とする。
- (3) 微小重力下における柔軟多体構造物の運動実験の調査及び保存型解法の検証  
日本航空宇宙学会及びAIAAの文献調査により、過去の柔軟多体構造の微小重力実験結果をまとめ、それらの実験を数値計算で再現し、①で開発した解析コードの精度を評価する。これにより、本研究で提唱する保存型解法の有効性を検証する。
- (4) 減圧下でのゴサマー多体構造物の展開運動の計測実験と数値計算との比較  
ゴサマー多体構造モデル(具体的には、膜面の剛体から成る構造物のスピン展開モデルとインフレータブル構造物モデル)を製作し、高速度カメラ等を用いた展開運動計測システムを構築する。そして、計測実験を行ない、数値計算と比較する。
- (5) ゴサマー多体宇宙構造物の運動解析

既に提案されているソーラーセイルを例にとって、その展開運動および展開後の軌道上運動のシミュレーションを行い、その結果に基づいて本研究の保存型解法の有効性を検証する。

#### 4. 研究成果

以下の成果を得た。

##### (1) 拘束を受ける柔軟多体宇宙構造物の運動の保存型解法の構築

NEDA に柔軟多体構造物における結合拘束の保存型解法と衝突問題の保存型解法を組み込み、さらに、MPI を用いてコードを並列化し、NEDA2.0 をリリースした。並列化には、解析領域を複数のサブドメインに分割し、ラグランジュ定数を用いて相互作用を定式化する手法を用いた。その際、特に、全体構造（エネルギー・運動量・各運動量）を保存するよう、工夫した。以下にその要点を示す。

まず、構造物のある領域(m)と(n)との間の拘束条件を  $b_{mn}$  と書くと、力学的エネルギー  $P$  は、各領域のエネルギー  $P_{(m)}$  とラグランジュ定数  $I_{mn}$  を用いて

$$P = \sum_{m=1}^N P_{(m)} + \sum_{m>n=1}^N I_{mn} \bar{b}_{mn}$$

と書ける。領域(m)の配位変数を  $q_{(m)}$  と書けば、各領域における運動方程式は

$${}^m m, f_{(m)} = \frac{\partial P_{(m)}}{\partial q_{(m)}} + I_{mn} \frac{\partial b_{mn}}{\partial q_{(m)}}$$

と書ける（ただし、上付きのチルダは離散微分を意味する）。ここで、

$$b = \begin{bmatrix} b_{21} & b_{32} & b_{43} & b_{41} & b_{51} & b_{52} & b_{53} & b_{54} & b_{65} \end{bmatrix}^T$$

$$I = \begin{bmatrix} I_{21} & I_{32} & I_{43} & I_{41} & I_{51} & I_{52} & I_{53} & I_{54} & I_{65} \end{bmatrix}^T$$

とおけば、運動方程式のニュートン反復式は

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & B_{(1)} \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & K_{(N)} \\ C_{(1)} & \cdots & C_{(N)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dq_{(1)} \\ \vdots \\ dq_{(N)} \\ dl \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} f_{(1)} \\ \vdots \\ f_{(N)} \\ b \end{bmatrix}$$

と書ける。ただし、 $dq_{(m)}$  や  $dl$  はニュートン増分であり、

$$K_{(m)} = \frac{\partial^2 P_{(m)}}{\partial q_{(m)} \partial q_{(m)}}$$

である。上記のニュートン反復式より、

$$dq_{(m)} = K_{(m)}^{-1} \bar{f}_{(m)} - K_{(m)}^{-1} \bar{B}_{(m)} \bar{d}l$$

が得られ、これをニュートン反復式の最後の行の式に代入すると、

$$\begin{aligned} \bar{C}_{(m)} \bar{K}_{(m)}^{-1} \bar{B}_{(m)} \bar{d}l \\ = b + \sum_{m=1}^N \bar{C}_{(m)} \bar{K}_{(m)}^{-1} \bar{f}_{(m)} \end{aligned}$$

を得る。これを  $d$  について解いて、ニュートン反復式に代入することで  $dq_{(m)}$  を得ることができる。その際、 $K_{(m)}^{-1} \bar{f}_{(m)}$  や  $K_{(m)}^{-1} \bar{B}_{(m)}$  の計算は並列化できるので、計算時間の短縮が可能となる。以上が並列化の要点である。

そして、NEDA2.0 を(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)の小型ソーラー電力セイルIKAROSのセイル膜構造の設計に適用し、後の(5)で述べる通り、その結果、NEDA2.0 が実機開発に耐え得るものであることを確認した。図2にIKAROSの展開解析の例を示す。実機設計に利用できることは、ゴサマー宇宙機を用いた宇宙利用の実現・発展にとって画期的なことであり、本研究の最大の成果である。

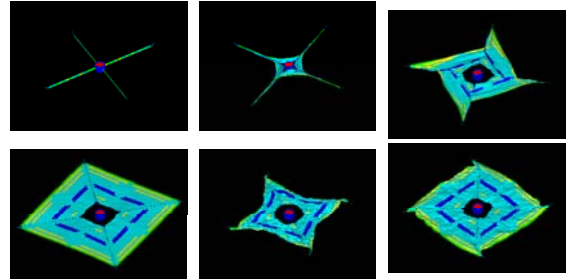


図2 IKAROSの展開解析例

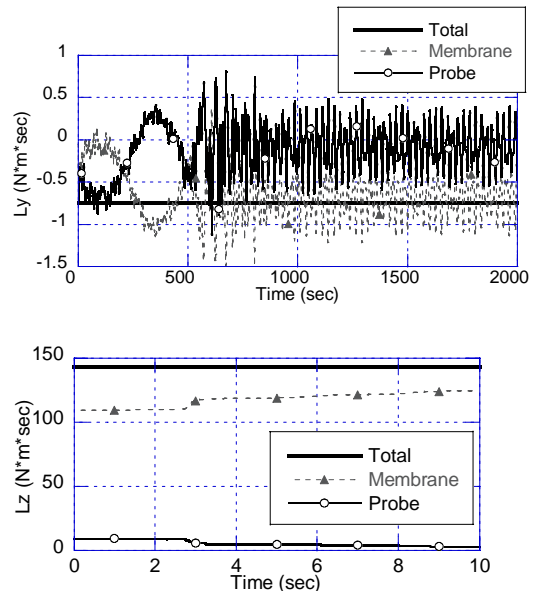


図3 IKAROS 展開時の角運動量の保存

IKAROSの運動予測において、最重要視されたのは、展開の安定性であり、これを評価するためには、減衰や外力が作用しない場合にはエネルギー・運動量・角運動量が厳密に保存される数値解析法を使用することが必須であ

った。これを実現し、かつ、実機レベルの解析が可能なコードはNEDA2.0しか存在しないことから、NEDA2.0はIKAROSの設計・開発ツールとして採用された。図3に、IKAROSのセイル膜面展開時の角運動量成分の保存例を示す。確かに保存則が成り立つことがわかる。

また、重力の高次摂動項や太陽復写圧、地球磁場による軌道上外乱を考慮した保存型解法を定式化し、宇宙機の軌道・姿勢解析コードOrbit2を開発した。

## (2) インフレータブル構造におけるガス流入と膜との連成の保存型解法の確立

折り畳まれた膜がガス注入により膨張してゆく際のチョーキングやガスによる仕事、および、エネルギーの移動を考慮した、保存型のインフレータブル構造のガス-膜連成解析モジュールを開発し、NEDA2.0に組み込んだ。

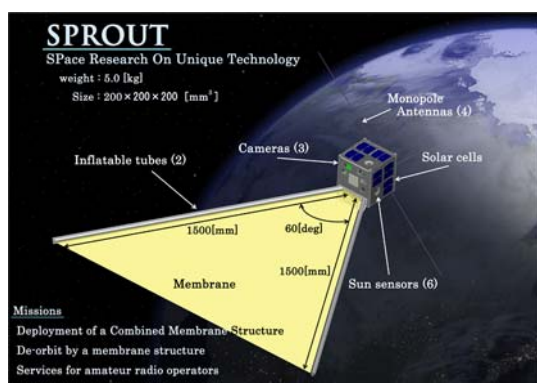


図4 SPROUTの概念図

また、この課題の宇宙実証をすべく、20cm立方で5kg級の超小型人工衛星SPROUTの概念設計を行い(図4)、実証のためのインフレータブル構造物(2本のインフレータブルチューブをV字に配置し、その間に三角形膜を配置したもの)や展開機構の地上試験モデルを開発した。

## (3) 微小重力下における柔軟多体構造物の運動実験の調査及び保存型解法の検証

これについては、航空機実験による展開実験事例がKentucky大学であった程度で、多くの研究は静的変形の数値解析および実験に留まっていることがわかった。特に米国においては、ゴサマー宇宙構造物に関する予算が縮減されたこともあり、一気に研究のアクティビティが下がったことは否めない。逆に言えば、ゴサマー構造については、現在、日本が海外を大きくリードしている状況が明確になった。

## (4) 減圧下でのゴサマー多体構造物の展開運動の計測実験と数値計算との比較

ゴサマー多体構造モデル(具体的には、膜面の剛体から成る構造物のスピン展開モデルについて、 $\phi 1000\text{mm}$ および $\phi 2000\text{mm}$ のもの計2つ、250mmと800mmの計2本のインフ

ータブルチューブモデルの合計4つ)を製作し、減圧下で展開実験を実施し、 $\phi 2000\text{mm}$ という比較的大きなゴサマー構造物モデルの地上実験が可能であることを示した。合わせて、高速度カメラを用いた展開運動計測システムを構築した。そして、真空での膜面の高速スピン展開挙動を撮影し、スピン展開における膜面の折癖の影響を詳細にデータ化することに成功した。特に、スピン展開開始時における膜同士の衝突の様子やトラベリングウェーブの発生など、数値計算により予想されていた現象で通常のビデオカメラでは計測が困難な挙動を確認することができた(図5)。

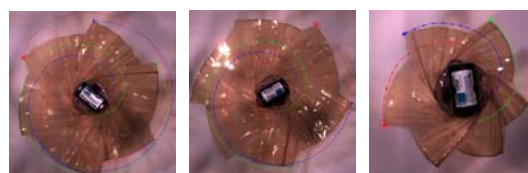
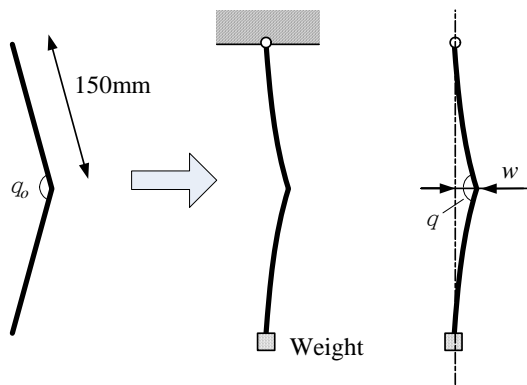


図5 真空下での膜の高速スピン展開

また、インフレータブル構造におけるチューブの折り畳みが展開運動に与える影響を実験的に評価し、品質工学の手法を用いて製造誤差にロバストで再現性の高いチューブの製作方法および展開方法の決定手法を示した。以上により、ゴサマー・マルチボディ・システムの地上実験法の向上の一方法を示すことができた。

## (5) ゴサマー多体宇宙構造物の運動解析

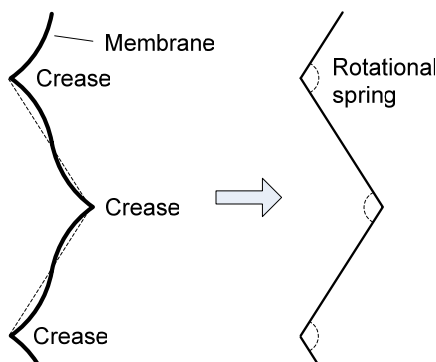
(1)でも述べた通り、JAXAの小型ソーラー電力セイル実証機IKAROSにおける膜面のスピン展開と実証機本体の運動の連成問題の開発評価を行った(IKAROSは平成22年5月21日に打ち上げられ、6月には軌道上でセイル膜面の展開ミッションを実施する予定である。その際に得られる軌道上データは本研究のNEDA2.0による解析結果と比較し、NEDA2.0の評価を行う予定である)。また、ゴサマー構造物の重要な課題の一つである、圧縮座屈後の構造特性の解析法として研究代表者が提案してきた圧縮剛性低減法を改良し、実験や他の高コストな解析手法と比較し、提案する手法による結果が低コスト(高速)で、かつ、実験や他の手法とよく合致することを示した(この成果は研究支援者である大学院生が国際学会の学生セッションで発表し、学生賞を受賞した)。具体的には、圧縮時の応力-歪関係を、伸張エラスティカ理論を用いて定式化し、圧縮剛性を歪の三次関数で近似するもので、それを膜構造の応力-歪関係に適用することで、膜のしわの分布を従来に比べて精度よく予測することを可能とした。



(a) 実験方法



(b) 実験写真



(c) 膜の変形 (d) 回転バネを有する膜要素

図6 膜面の折り目のモデル化

また、実験データに基づく、膜面の折り目の新しいモデルを提案した。具体的には、図6(a)のように折られた膜の短冊に重りを負荷して変形前後の折り目角度とたわみを計測することで、変形前の折り目角度  $q_0$  と折り目のバネ剛性を推定し、それを元に、(c)のような膜の変形を(d)のような回転バネで置き換える、というモデルである。

この他にも、IKAROSには膜面に補強用のテープを貼付してあることから、補強用線材を貼付した膜構造の計算手法として、膜要素とケーブル要素の重ね合わせ解析手法を提案した。具体的には、図7のように、膜要素の節点とケーブル要素の節点を配置し、ケーブル要素の節点変位を膜要素の節点変位で表す拘束を付加することで、補強テープの貼付を模擬する手法を提案した。この手法は、一

般には解が剛になるため推奨されないが、補強テープをケーブル要素で模擬しつつ、テープの剛性を考慮する方法として提案したものであり、IKAROSのように規模の大きい膜面構造物の展開挙動を解析する際の近似としては充分であるという判断から提案した。そして、剛性値をノミナル値から変えることで、剛性値の感度を調べ、この近似が数値解の振る舞いに問題を与えるものではないことを確認した。本研究では、小規模な地上実験や、数値計算結果を検討することで、設計対象に対してコストパフォーマンスのよい解析モデルを構築することに主眼をおいた。IKAROSのセイル膜構造の設計・開発にNEDA2.0を適用することで、そのノウハウを獲得できたことも、本研究の大きな成果である。

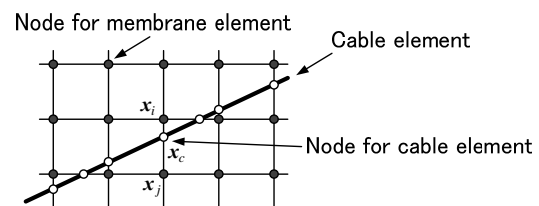


図7 膜面とケーブルの節点配置

これらの手法は、NEDA2.0に組み込まれており、IKAROSの開発評価に利用した。これにより、保存型解法の精度・適用範囲をさらに広げることができた。また、NEDA2.0を、JAXAをはじめ学外の研究者に配布し、実際に使用していただき、評価していただいた。特に、IKAROSの開発評価は十分に可能であるとの評価をいただき、NEDA2.0が汎用性のあるコードであることが示された。

以上により、本研究による保存型解法が、ゴッサマー宇宙構造物の解析・設計・開発・評価に有効であることが示された。現在、実験レベルでこのようなことができているのは研究代表者だけであり、これらの成果は平成22年度以降の次世代宇宙機の開発や、国内外のゴッサマー構造物研究の発展に適用可能となった。

以上の研究成果は、IKAROSのセイル膜展開の軌道上データとの比較と合わせて、今後、学術雑誌等で公開してゆく予定である。

## 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3件)

- ① Hiraku Sakamoto, Yasuyuki Miyazaki, and Osamu Mori, “Transient Dynamic Analysis of Gossamer Appendage Deployment Using Nonlinear Finite Element Method”, AIAA-2010-2587

(CD-ROM Proceeding of 51st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference), 査読有, pp.1-15, April 12, 2010, Orland, Florida.

- ② Osamu Mori, Hirotaka Sawada, Fuminori Hanamura, Junichiro Kawaguchi, Yoji Shirasawa, Masayuki Sugita, Yasuyuki Miyazaki, Hiraku Sakamoto, and Ryu Funase, “Development of Deployment System for Small Size Solar Sail Mission”, Transactions of Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Space Technology Japan, 査読有, Vol. 7, pp.Pd\_87-Pd\_94, November 28, 2009.
- ③ Yasuyuki Miyazaki, Kosuke Arita, “Simplified Model of Membrane for Wrinkle Analysis of Gossamer Structure”, AIAA Paper 2008-2134, (CD-ROM Proceeding of 49th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Schaumburg), 査読有, pp.1-10, IL, April 9, 2008.

[学会発表] (計 13 件)

- ① 宮崎康行, 「ゴッサマー宇宙構造物の経験的モデル低次元化」, 第 18 回スペース・エンジニアリング・コンファレンス, 2010 年 1 月 29 日, 東京工業大学(東京).
- ② 宮崎康行, 「小型ソーラー電力セイル実証機 IKAROS のセイル膜面の数学モデルについて」第 25 回宇宙構造・材料シンポジウム, 2009 年 12 月 4 日, (独) 宇宙航空研究開発機構(相模原).
- ③ 宮崎康行, 「有限要素法による IKAROS セイル一次展開の動解析」, 第 25 回宇宙構造・材料シンポジウム, 2009 年 12 月 4 日, (独) 宇宙航空研究開発機構(相模原).
- ④ 宮崎康行, 「品質工学を用いたインフレータービームの設計法」, 第 51 回構造強度に関する講演会, 2009 年 7 月 22 日-7 月 24 日, 和歌山県立情報交流センター(和歌山).
- ⑤ Yasuyuki Miyazaki, “Finite Element Dynamic Analysis of Solar Sail Deployment”, 27th International Symposium on Space Technology and Science, July 5-12, 2009, Tsukuba, Japan.
- ⑥ Yasuyuki Miyazaki, “Empirical Model Reduction of Spinning Solar Sail”, 27th International Symposium on Space Technology and Science, July 5-12, 2009, Tsukuba, Japan.
- ⑦ 宮崎康行, 「ゴッサマー宇宙構造物の展開

解析手法」, 第 58 回理論応用力学講演会, 2009 年 6 月 10 日, 日本学術会議(東京).

- ⑧ 宮崎康行, 「薄膜構造物におけるリンクル分布の予測手法について」第 24 回宇宙構造・材料シンポジウム, 2008 年 12 月 12 日, (独) 宇宙航空研究開発機構(相模原).
- ⑨ 宮崎康行, 「ソーラーセイルの膜面設計に関する一考察」, 第 50 回構造強度に関する講演会 2008 年 8 月 1 日, 北九州.
- ⑩ Yasuyuki Miyazaki, “Dynamic Behavior of Spinning Square Solar Sail”, 18th Workshop on JAXA Astrodynamics and Flight Mechanics, July 28, 2008, Sagami-hara, Japan.
- ⑪ Yasuyuki Miyazaki, “Evaluation of Numerical Analysis Model for Thin Membrane,” 26th International Symposium on Space Technology and Science, June 3, 2008, Hamamatsu, Japan.
- ⑫ 宮崎康行, 「超小型衛星のデオービットのためのインフレーター膜面構造の提案」, 第 51 回宇宙科学技術連合講演会, 2007 年 10 月 30 日, 札幌コンベンションセンター(札幌).
- ⑬ Yasuyuki Miyazaki, “A Deployable Membrane Structure for De-Orbiting a Nano Satellite”, 58th International Astronautical Congress, September 26, 2007, Hyderabad, India.

[その他]

ホームページ等

<http://forth.aero.cst.nihon-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

宮崎 康行 (MIYAZAKI YASUYUKI)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号: 30256812