

平成 22年 5月 26日現在

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2008～2009  
 課題番号：20760548  
 研究課題名 (和文) 非線形な大変形を伴う宇宙用柔軟展開構造の定式化と実験的検証  
 研究課題名 (英文) Formulation and experimental validation of flexible structure for space application which is subjected to large deformation.  
 研究代表者  
 菅原 佳城 (SUGAWARA YOSHIKI)  
 青山学院大学・理工学部・助教  
 研究者番号：10422320

研究成果の概要 (和文)：宇宙用柔軟展開構造物の基本的構成要素の一つとして柔軟 2 次元梁に着目して絶対節点座標法 (ANCF) に基づいて定式化を行った。定式化では内部粘性抵抗と柔軟展開構造物が地上で実験する際に受ける空気抵抗による摩擦についても考慮して、数学モデルを構築した。展開時に要求される大回転および大変形を受ける運動の一つである動的ステイフニングを ANCF によって表現できることを示し、既存の内部粘性抵抗モデルおよび提案する空気抵抗モデルについて実験との比較検証を行い、定性的かつ定量的に良い一致が得られた。

研究成果の概要 (英文)：Mathematical model is constructed for a 2-dimensional flexible beam as elemental factor of flexible deployment structure for space applications. The mathematical model is constructed based on Absolute Nodal Coordinate Formulation (ANCF) method and conventional internal viscosity model and proposed air drag force model are considered in the formulation. A dynamic stiffening effect which is a motion with large rotation and deformation is focused on because deployment structures often experience such an effect. Experimental validations about conventional internal viscosity model and air drag force model show good correspondences.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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

## 1. 研究開始当初の背景

近年の民生用電子部品などの小型化および高性能化により、小型人工衛星の能力が飛躍的に高まり、さらに大型衛星打上げの余剰

スペースを利用した相乗り方式による安価な打上げ機会の提供も増えつつあるため小型衛星への注目が増している。また、大型衛星に比べて開発費用および打上げ費用が大

幅に低く、開発期間も短いため最新の技術を搭載しやすく、費用的にも技術的にもより多くのミッションへの柔軟な対応が期待されるのも小型衛星が注目される理由である。多くのミッションでは衛星の構造そのものに「距離」および「広さ」が要求されることが多く、例えば、高い解像度を指す光学観測ミッションではレンズ撮像素子間の十分に長い焦点「距離」が必要となり、通信衛星では一般に十分な「広さ」を持ったアンテナほど利得は大きくなり、通信性能の向上が可能となる。「距離」および「広さ」の要求を満足するためには、大型衛星でも打上げ時の制限から展開構造を採ることが多いが、小型衛星においては強く要求される。

小型化に伴い展開機構への要求も高くなり、より柔軟な要素を用いて効率的に折り畳むことが要求される。最近では膜を展開して太陽光を受ける帆(ソーラーセイル)として使用したり、紐から構成された網を広げることでフェーズドアレイアンテナを構成するなどの試みも見られ、紐や膜などより柔軟な素材への注目が増加している。このような柔軟展開構造の挙動の把握不足は、希望形状への展開失敗を招いたり、姿勢制御力によって展開形状が崩れることで衛星自体の慣性特性が変わり姿勢制御性能へ予測不可能な悪影響を及ぼす。それゆえ、紐や膜などからなる非常に柔軟な要素を持つ展開機構の挙動の把握は非常に重要であるが、以下に示すような理由により、紐や膜のような柔軟要素を積極的に用いるには、まだ時期尚早であるとも言える。

- ・ 微小な変形を伴う柔軟機構に対しては有限要素法などの汎用的手法で解析可能であり、制御系構築にも十分であるが、大変形の表現能力がない
- ・ 大変形を伴う柔軟要素の定式化手法として Floating reference frame 法や Incremental finite element 法などがあるが、柔軟な挙動に伴う剛体挙動を正確に表現することができない
- ・ 航空機を使った微小重力実験等で事前の実証実験を行うこともできるが、コストは高く実験機会も少ないため、打上前の地上での検証等は容易ではないうえ、これまでの実績も少ない

近年、大変形を有する柔軟構造物の解析手法として、非線形有限要素法の研究がなされており、その一つである絶対節点座標法 (ANCF: Absolute Nodal Coordinate Formulation) という手法は、大変形を取り扱うことが可能であり剛体挙動の表現も正確である。ANCF では、せん断変形の導入、三角要素への適用による任意形状への対応、計算負荷の改善などの数々の技術的課題に

対する試みが行われ、その有効性が示されつつある。しかし、多くの研究では各技術的課題を単独に扱った議論が多く、さらに従来の定式化手法との比較については計算機上の議論が多いが、実際のシステムへの適用例や実験結果との比較による議論は申請者の知る限り非常に少ない。実験検証を行った興味深い研究もあるが、大変形を伴う弾性変形のみを評価したものや、減衰を含めた場合の定常応答などの一部の基本的表現に対する検証であり十分とは言えず、前述のような宇宙用の柔軟展開構造物の検証を行うために ANCF を採用するにはさらなる発展が必要である。

## 2. 研究の目的

宇宙空間において柔軟な展開構造を実現するための地上での検証方法として、ANCFを用いた数値解析を導入することを狙う。しかし、前述のように ANCF 自体はまだ発展段階であり、実際の宇宙用柔軟展開構造物の解析に導入するにはいくつかの問題点を解決しなければならない。

そこで、本研究ではまず宇宙用柔軟展開構造物の挙動の検証方法にどのように ANCF による数値解析を導入するかを検討する。宇宙用展開構造物とは言え、地上での実験的な検証も有益な情報であり、その実験的なデータと ANCF による数値解析を適切に融合することで、より確かな宇宙空間での検証を実現できる方法について基礎的な検討を行う。さらに ANCF を導入するにあたり、ANCF における不十分な点に着目してその改善を試みる。

## 3. 研究の方法

(1) 宇宙用柔軟展開構造物について地上での挙動検証実験を行うと宇宙空間での挙動を完全には実現できないものの、制限された検証実験が可能である。そこで地上での検証実験と同様の条件で数値解析を実現でき、さらにその数値解析結果が実験結果と定性的にも定量的にも非常に合致しているとするならば、数値解析モデルから地上において発生しうる効果を取り除いて数値解析を行うことで、宇宙空間での挙動を正確に表現し検証できるものと考えられる。そのため、宇宙用柔軟展開構造物を地上で検証した際に現れ得る挙動を ANCF によって表現できなければならない。以降に地上で考えられる影響を列挙する。

- ① 重力の表現と検証
- ② 動的スティフニング効果の表現
- ③ 大変形および大回転を発生する構造物の内部粘性摩擦モデルの実験的検証
- ④ 大変形および大回転を発生する構造物の空気抵抗の定式化と実験的検証

上記の①に関してはすでに研究例があり、本研究では②～④について研究を進める。

(2) 上述の(1)で述べたように ANCF における動的スチフニング効果の表現能力を確認する。汎用的な有限要素法では数値解析結果が発散することが報告されており、ANCF による表現能力を確認することは非常に重要である。また実験的検証が少ない ANCF において、動的スチフニング効果のような大回転および大変形を生じる挙動における実験的検証も非常に意義のあることである。

ANCF によって構築したモデルの動的スチフニング効果を実験的に検証するために、図 1 および 2 のような装置を構成する。

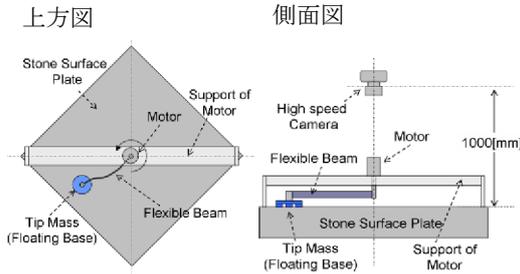


図 1 動的スチフニング効果検証用装置

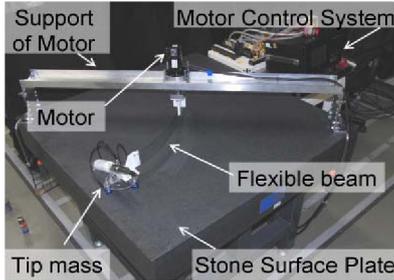


図 2 実験装置概要

図 1 および 2 の装置は先端に質量 (840g) がついた柔軟梁 (ポリ塩化ビニル, 50mm 340mm 1mm) の根本をモータで回転 (2 秒で定常角速度 8[rad/sec] を実現) させることで動的スチフニングを発生させるようになっており、装置上方に取り付けた高速度カメラにより挙動を解析する。また、先端質量は空気浮上ができるようになっており、重力の影響を除去できる。解析データから根本の回転挙動のデータを抽出し、図 1 および 2 の柔軟梁について構築した ANCF によるモデルに入力として与えて数値解析を実施し、実験結果と比較する。構築した ANCF によるモデルは以下のように表わされる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{\Phi}^T \\ \mathbf{\Phi} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{e}} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_s \\ \boldsymbol{\gamma} \end{bmatrix} \quad (1)$$

ただし  $\mathbf{M}$  は質量行列、 $\mathbf{Q}_s$  は剛性力、 $\mathbf{\Phi}$  は拘

束方程式から導出される行列、 $\boldsymbol{\lambda}$  はラグランジュ定数、 $\boldsymbol{\gamma}$  は加速度に関する変数である。また  $\mathbf{e}$  は

$$\mathbf{e} = [\mathbf{e}_1^T \mathbf{e}_2^T \dots \mathbf{e}_N^T]^T \quad (2)$$

で定義され、 $\mathbf{e}_i$  は第  $i$  要素の節点座標を並べたものであり、

$$\mathbf{e}_i = [e_{i1} \ e_{i2} \ e_{i3} \ e_{i4} \ e_{i5} \ e_{i6} \ e_{i7} \ e_{i8}]^T \quad (3)$$

と表現され、それぞれの要素は

$$\begin{aligned} e_{i1} &= r_{iX}|_{x=0}, e_{i2} = r_{iY}|_{x=0}, e_{i3} = \frac{\partial r_{iX}}{\partial x_i} \Big|_{x=0}, e_{i4} = \frac{\partial r_{iY}}{\partial x_i} \Big|_{x=0}, \\ e_{i5} &= r_{iX}|_{x=\ell_i}, e_{i6} = r_{iY}|_{x=\ell_i}, e_{i7} = \frac{\partial r_{iX}}{\partial x_i} \Big|_{x=\ell_i}, e_{i8} = \frac{\partial r_{iY}}{\partial x_i} \Big|_{x=\ell_i} \end{aligned} \quad (4)$$

である。このとき、式(4)の各座標は図 3 に示すように絶対座標で表現されており、ANCF の特徴のひとつである。

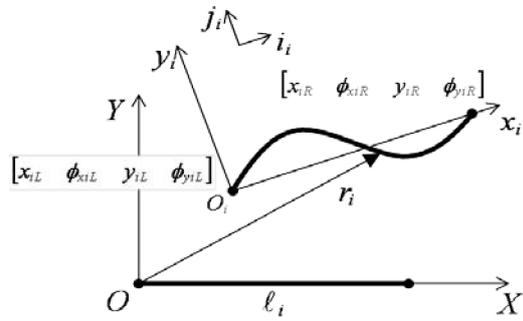


図 3 第  $i$  要素の節点座標

(3) 前述の(1)で述べたように内部粘性摩擦のモデルの実験的検証を行う。式(1)で導出したモデルに対してレーリー減衰を導入することで内部粘性摩擦の項を構築し、得られたモデルに対して数値解析結果と実験結果を比較することで、内部粘性抵抗のモデルの検証が可能となる。このとき構築したモデルは

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{\Phi}^T \\ \mathbf{\Phi} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{e}} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_s + \mathbf{Q}_v \\ \boldsymbol{\gamma} \end{bmatrix} \quad (5)$$

となり、 $\mathbf{Q}_v$  は得られた内部粘性摩擦に関する項である。(2)と同様に実験と比較するために、後述の実験での画像解析データから得られた回転のデータを式(5)の入力としている。

構築したモデルの実験的検証のために図 4 に示すような実験装置を構成する。図 4 のシステムは真空チャンバ (図 5)、モータ・ギアシステム、平衡用おもりから構成されており、真空チャンバの中には 2 次元梁 (ポリ塩化ビニル, 40mm 380mm 0.5mm) が固定されており、モータの回転によって真空チャンバを含めたシステムが回転 (1.5 秒で定常角速度 3[rad/sec] を実現) すると、チャンバ内の 2 次元梁が大回転と大変形を受ける。このとき、

チャンバ内は100分の1気圧に設定されており、変形の減衰の効果のうち空気抵抗の影響は非常に小さく、内部粘性摩擦が支配的であると考えられる。また、前述の動的スティフニングの実験と同様に装置上に設置した高速度カメラによって運動を解析する。実験の画像解析結果と構築した数値解析モデルの比較により定式化の実験的検証を行う。

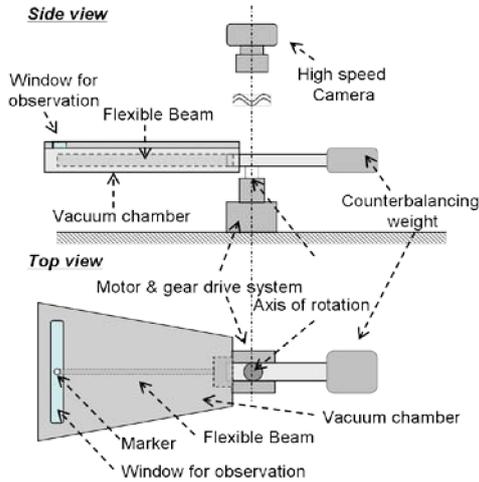


図4 内部粘性抵抗モデル検証用実験装置

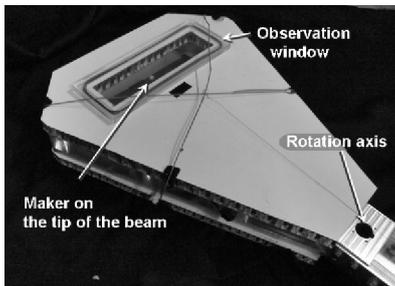


図5 真空チャンバ

(4) 前述の(1)で述べたように空気抵抗のモデルの実験的検証を行う。式(5)で構築したモデルにさらに空気抵抗の効果を含めたモデルを構築する。このとき、得られるモデルは

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \Phi^T \\ \Phi & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{e}} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_S + \mathbf{Q}_V + \mathbf{Q}_A \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (6)$$

と表現され、 $\mathbf{Q}_A$ は空気抵抗に関する項である。空気抵抗について定式化した結果得られる $\mathbf{Q}_A$ は本研究で新たに提案するものであり、後述の研究成果にて概要を述べる。前述の(2)および(3)と同様に実験と比較するために、後述の実験での画像解析データから得られた回転のデータを式(6)の入力としている。

構築したモデルの実験的検証のために図6および7に示すような実験装置を構成する。

図6および7のシステムは、モータ・ギアシステムのシャフト先端に2次元柔軟梁(ポリ塩化ビニル, 40mm 380mm 0.5mm)が接続されており、シャフトが回転(5秒で定常角速度5[rad/sec]を実現)すると、2次元柔軟梁が大回転と大変形を受ける。このとき、変形に対する減衰の効果は内部粘性抵抗と空気抵抗の両方から受ける。前述の(2)および(3)と同様に装置上に設置した高速度カメラによって運動を解析する。

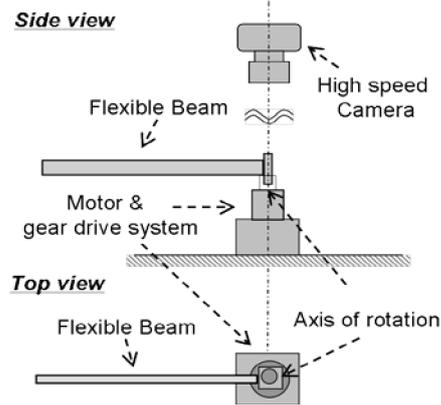


図6 空気抵抗モデル検証用実験装置

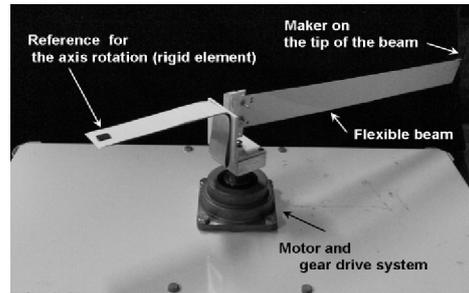


図7 空気抵抗モデル検証用実験装置概要

#### 4. 研究成果

(1) 本節ではANCFに基づいて得られる数学モデルで解析した結果と実験での動的スティフニング効果と比較する。図8に比較した結果を示す。

図8から明らかなように数値解析においても実験結果と同様に最初に大きな変形に達した後に変形が小さくなっており、動的スティフニング効果が表現されていることが分かる。それゆえ、実験と数値解析は定性的に一致していると言える。また、最大の変形量もおおよそ一致しており、動的スティフニングが顕著に表れている時(1.5秒以降)の固有振動数も比較的一致している。それゆえ、実験と数値解析結果の定量的な一致も得られていると考えられる。しかし少なからず定量的な誤差が発生しており、これらの誤差の

原因として考えられるのは内部粘性抵抗や空気抵抗であると考えられる。

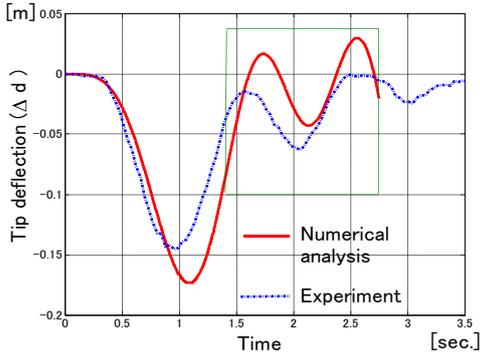


図8 動的スティフニングについての数値解析と実験の先端変形量の比較

(2)本節では ANCF によって得られるモデルに内部粘性抵抗を導入したモデルの実験的な検証を行った結果を示す。図9は検証するモデルによって梁の回転挙動について数値解析を行った結果と実験結果の比較を示す。

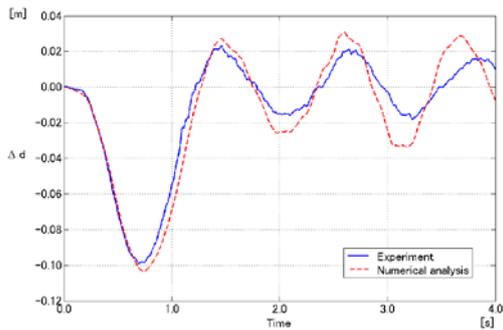


図9 内部粘性抵抗モデルを用いた梁の回転挙動の数値解析と実験の先端変形量の比較

図9が示すように、数値解析結果と実験結果はよく一致している。特に最大変形量に達したのち動的スティフニング効果が顕著になる0秒から2秒の付近までの結果は変形量および振動数ともに非常に良く一致していると言える。その後の2秒以降の定常的な過程では0秒から2秒までの一致の度合には劣るものの、変形および振動数ともに比較的良く一致している。このように、内部粘性抵抗モデルについて定性的かつ定量的な一致が得られた。このような大回転および大変形を有するような柔軟構造物に関して内部粘性摩擦を考慮した数値解析モデルの定量的かつ定性的な実験的検証の報告は数少なく、意義のある結果が得られたと言える。

(3) 本節ではまず ANCF によって得られるモ

デルに空気抵抗を導入したモデルの概要を示す。本研究では第  $i$  要素上の微小要素  $ds_i$  について図10に示すような空気抵抗による力を仮定した。ただし、 $\dot{r}_{iX}(x)$  および  $\dot{r}_{iY}(x)$  は微小要素の  $X$  および  $Y$  方向の速度であり、 $dF_{aiX}$  および  $dF_{aiY}$  は微小要素に対する  $X$  および  $Y$  方向の空気抵抗による力である。このとき、要素の全領域に渡って積分をすることで第  $i$  要素についての空気抵抗による力を導出することができるが、一般的に容易に積分を行うことはできず、解析的に空気抵抗による力を求めるのは困難である。そこで、次のような仮定を設ける。

[仮定1] 2次元柔軟梁の定式化において構成する要素の数は十分に多い。

[仮定2] 2次元柔軟梁の剛体運動によって発生する速度は梁の変形によって発生する速度よりも十分大きい。

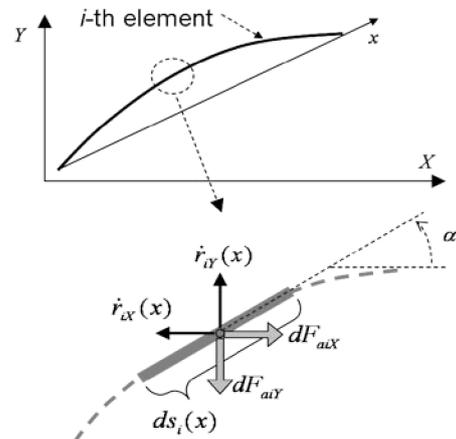


図10 第  $i$  要素上の点における空気抵抗による力

これらの仮定は、空気抵抗を受ける梁上のすべての点が絶対空間上で同じ速度方向を持つとみなすために導入している。その結果、前述のような積分の可能性に対する問題が緩和され、空気抵抗に関する項を解析的に表現することが可能となる。このとき第  $i$  要素に関する空気抵抗による力の  $X$  方向および  $Y$  方向成分に起因して発生する項  $Q_{AiX}$  および  $Q_{AiY}$  は次のように表わされる。

$$Q_{AiX} = -\frac{1}{2} C_D \rho_{air} h |e_{i4}| l_i \dot{e}_i^T P_X(\dot{e}_i) \quad (7)$$

$$Q_{AiY} = -\frac{1}{2} C_D \rho_{air} h |e_{i3}| l_i \dot{e}_i^T P_Y(\dot{e}_i) \quad (8)$$

ただし、 $C_D$  は抗力係数、 $h$  は2次元梁の高さ、 $l_i$  は要素あたりの長さ、 $\rho_{air}$  は周囲の空気の密度であり、 $P_X(\dot{e}_i)$  および  $P_Y(\dot{e}_i)$  は  $\dot{e}_i$  の多項式で解析的に表現される。ただし非常に長く複雑な項であるため、本紙では詳細は省

略する。このとき  $Q_{AiX}$  および  $Q_{AiY}$  から第  $i$  要素に関する空気抵抗による力の項  $Q_{Ai}$  が

$$Q_{Ai} = Q_{AiX} + Q_{AiY} \quad (9)$$

と表わされ、この  $Q_{Ai}$  を用いて式(6)で現れる  $Q_A$  は次のように定義される。

$$Q_A = [Q_{A1}^T \ Q_{A2}^T \ \cdots \ Q_{AN}^T]^T \quad (10)$$

上述のモデルに対して大回転および大変形を受ける場合の梁の挙動について数値解析を行った結果と実験結果を比較したものを図 11 に示す。また、いくつかの代表時刻における梁の形状について提案するモデルによる数値解析結果と実験結果を比較したものを図 12 に示す。

図 11 および図 12 から明らかなように、大局的な動きについては数値計算結果と実験結果で比較的一致していると言える。また、1.5 秒付近の変形の仕方が変化する様子も数値解析結果および実験結果の両者に表れており、提案手法は定性的にもその特徴をよく表現できていると言える。定常状態での振動数と変形の違いはあるものの、全体としては定性的かつ定量的に一致したモデルの構築が達成できたと言える。定常状態での差異の考えられる原因としては、実験において大変形によりねじりの変形も発生してしまい、それをモデルで考慮していないためであると考えられる。

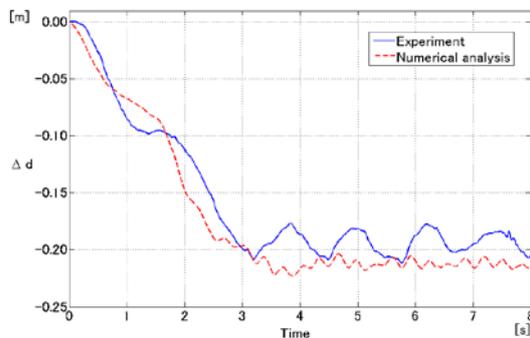


図 11 空気抵抗を考慮したモデルの数値解析結果と実験結果の先端変形量の比較

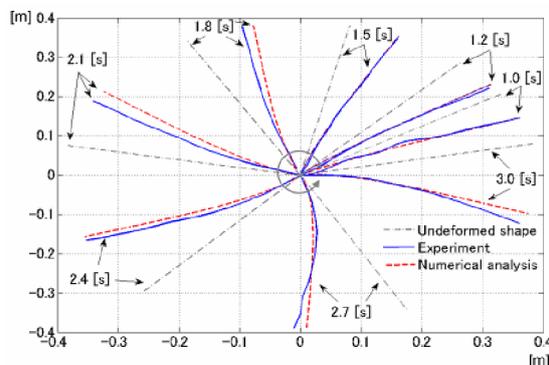


図 12 空気抵抗を考慮したモデルの数値解析結果と実験結果の形状に関する比較

以上のようにモデルに関する簡単な仮定や近似はあるものの、空気抵抗に関するモデルを解析的に導出できており、さらに定性的かつ定量的な一致が得られており、本研究では空気抵抗のモデルについて意義がある提案と有効な結果が得られたと言える。

## 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)

[学会発表] (計 3 件)

① Y. Sugawara, K. Shinohara, Y. Takagi, and N. Kobayashi, Experimental validation of numerical analysis on ANCF about dynamic stiffening effect of a two-dimensional beam, The 5th Asian Conference on Multibody Dynamics (ACMD), Kyoto, Aug. 2010, Kyoto, Japan

② Y. Sugawara, K. Shinohara and N. Kobayashi, Quantitative Validation of Dynamic Stiffening Represented by Absolute Nodal Coordinate Formulation, ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, 2nd Sept. 2009, San Diego, USA

③ 篠原健、菅原佳城、小林信之、柔軟要素を有する衛星の挙動解析についての実験的検証、19th アストロダイナミクスシンポジウム 2009 年 7 月 31 日、相模原市

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

菅原 佳城 (SUGAWARA YOSHIKI)

青山学院大学・理工学部・助教

研究者番号：10422320