

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：32601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560267

研究課題名(和文) 極柔軟マルチボディシステム制御のためのシステム自由度の低次元化に関する研究

研究課題名(英文) Reduction of degree of freedom in flexible multibody system

研究代表者

小林 信之 (KOBAYASHI, Nobuyuki)

青山学院大学・理工学部・教授

研究者番号：70276020

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、大変形と大回転を伴う極めて非線形性の強い極柔軟体の制御系設計のために、高精度かつ、低次元のモデル化手法を開発することを目的に、【1】曲げ捩りせん断および軸変形を考慮した非線形梁および非線形板へモード合成法を適用する自由度低減モデルの開発とその検証、【2】開発したモデルを用いた大変形と大回転を伴う極柔軟体の制御系の試設計を行った。その結果、【3】非線形性の強い極柔軟梁と板に対する低次元モデルが計算精度を保持しながら、システムの自由度を低減できること、【4】提案した自由度低減モデルが床体操のように大回転と大変形を伴いながら移動するロボットの制御に適用可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：This study was aimed at developing a high precision and reduced order model for the extremely flexible body undergoing large rotation and large deformation in order to design a controller for such a highly nonlinear system. As the result, the proposed reduced order model which uses a kind of component mode synthesis method enables to reduce the dimension size of the system matrix of flexible body and is verified to keep the numerical accuracy. Moreover it is also verified the present model can be applicable to design a controller of the mobile robot with extremely flexible link which is similar to floor gymnastics by numerical simulation.

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：機械力学・制御

キーワード：機械力学・制御 マルチボディダイナミクス 低次元化 極柔軟構造物 拘束系 モード合成法

1. 研究開始当初の背景

ソーラーセイルなどの極柔軟体はハンドリング時に大変形・大回転を伴うことが多く、その安定性確保のための制御が必要になるが、ダイナミクスの非線形性および複雑さ故に制御系設計のための低次元モデル化が困難であった。例えば、精度の高い極柔軟体挙動の解析法として Absolute Nodal Coordinate Formulation (以下、ANCF)と呼ばれるマルチボディダイナミクス分野における定式化が近年注目されているが、弾性力項が極めて複雑なため計算性が悪いことが知られている。また、拘束に関わる代数方程式を随伴するため状態方程式への変換が難しかった。

2. 研究の目的

本研究ではANCFにおけるシステム自由度の低次元化手法を開発し、これから得られる低次元化モデルに基づく極柔軟体の制御系を試設計する。さらに極柔軟体を用いた実験により低次元化手法の妥当性を検証すると共に、本低次元化手法に基づく制御系設計法について考察することを目的とする。

具体的には

- (1) 3次元梁または薄板で構成される極柔軟体のシステム自由度の低次元化手法の開発とその検証、
  - (2) 開発した低次元化手法を用いたモデルに基づく大変形・大回転を伴う極柔軟梁の制御系の試設計および実験による有効性の確認、
- が目的である。

3. 研究の方法

(1) 極柔軟体のシステム自由度の低次元化手法の開発

本研究では、曲げ振りせん断および軸変形を考慮した非線形梁および非線形板について低次元モデル化手法を開発したが、紙面の制約上、板について記述する。

図1に示すような絶対座標系{X, Y, Z}上にある柔軟板上の任意点Pの位置ベクトル $\mathbf{r}$ を式(1)で与える。

$$\mathbf{r} = \mathbf{S}\mathbf{q} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{q}$ は絶対座標系表示の節点の絶対変位と勾配からなる各節点12の自由度を持つ48x1の一般化座標ベクトルである。また、 $\mathbf{S}$ は絶対座標系で定義された3次の形状関数行列であり、式(2)に示すように各座標系に関する節点座標をそれぞれ独立に内挿するように定義する。

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_X & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{S}_Y & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{S}_Z \end{bmatrix} \quad (2)$$

$\rho, V, D, \varepsilon, \kappa$ を板の密度、体積、剛性、要素内の面内ひずみおよび曲率とすれば、板要素の運動エネルギー $T$ とKirchhoffの平板理論による歪エネルギー $U$ は式(3)および(4)で与えられる。

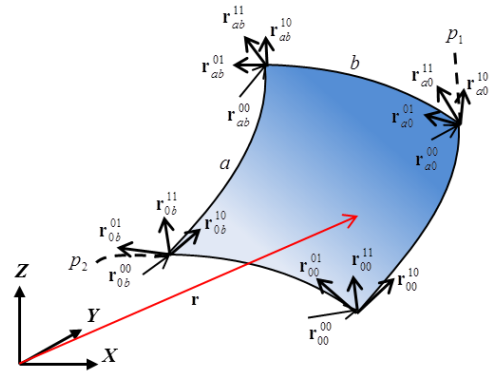


図1 柔軟板の変形

$$T = \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b \rho \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{S}^T \mathbf{S} \dot{\mathbf{q}} dp_1 dp_2 \equiv \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{q}} \quad (3)$$

$$U = U^\varepsilon + U^\kappa \quad (4)$$

式(3)から質量行列 $\mathbf{M}$ は一定値となり、Green-Lagrangeの歪理論を式(4)に適用すれば、弾性力 $\mathbf{Q}$ は式(5)のように導かれ、面内剛性行列 $\mathbf{K}^k$ は一定値となる。

$$\mathbf{Q}^k = \mathbf{Q}^\varepsilon + \mathbf{Q}^\kappa = \mathbf{K}^\varepsilon \mathbf{q} + \mathbf{K}^\kappa \mathbf{q} \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{Q}^\varepsilon$ と $\mathbf{Q}^\kappa$ は面内および面外弾性力である。外力 $\mathbf{Q}^\varepsilon$ を考えれば、板要素の非線形運動方程式は式(6)のように求まる。

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}^\varepsilon \mathbf{q} + \mathbf{K}^\kappa \mathbf{q} = \mathbf{Q}^\varepsilon \quad (6)$$

非線形である面内弾性力を外力と見なし、右辺に移項し、代数方程式で与えられる要素間の連結を速度変換行列により消去すれば、全系の運動方程式は、

$$\hat{\mathbf{M}} \hat{\mathbf{q}} + \hat{\mathbf{K}}^\kappa \hat{\mathbf{q}} = \hat{\mathbf{Q}}^\varepsilon - \hat{\mathbf{K}}^\varepsilon \hat{\mathbf{q}} := \hat{\mathbf{Q}} \quad (7)$$

と表される。面外剛性行列が一定であることを利用して、一般化座標を境界領域 $b$ と内部領域 $i$ に分けて $\hat{\mathbf{q}} = \{\hat{\mathbf{q}}_b^T, \hat{\mathbf{q}}_i^T\}^T$ とおき、Craig-Bampton法を適用すれば、大変形と大回転を考慮したモード合成法表記の運動方程式(8)を導出できる。

$$\overline{\mathbf{M}} \ddot{\mathbf{e}} + \overline{\mathbf{K}}^\kappa \mathbf{e} = \overline{\mathbf{Q}} \quad (8)$$

ここで、

$$\overline{\mathbf{M}} = \begin{bmatrix} \overline{\mathbf{M}}_{bb} & \overline{\mathbf{M}}_{b\xi} \\ \overline{\mathbf{M}}_{b\xi}^T & \mathbf{I} \end{bmatrix}, \overline{\mathbf{K}}^\kappa = \begin{bmatrix} \overline{\mathbf{K}}_{bb}^\kappa & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \boldsymbol{\Omega}_n^2 \end{bmatrix}, \mathbf{e} = \begin{Bmatrix} \hat{\mathbf{q}}_b \\ \boldsymbol{\xi} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

であり、考慮すべきノーマルモードの固有値 $\boldsymbol{\Omega}_n^2$ の数まで自由度を縮約できる。境界条件等の拘束条件を代数方程式 $\mathbf{C}$ として連立させた微分代数方程式(10)を時間積分することにより応答を求めることができる。

$$\begin{bmatrix} \overline{\mathbf{M}} & \mathbf{C}_e^T \\ \mathbf{C}_e & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{e}} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \overline{\mathbf{Q}} - \overline{\mathbf{K}}^\kappa \mathbf{e} \\ \mathbf{Q}_d \end{Bmatrix} \quad (10)$$

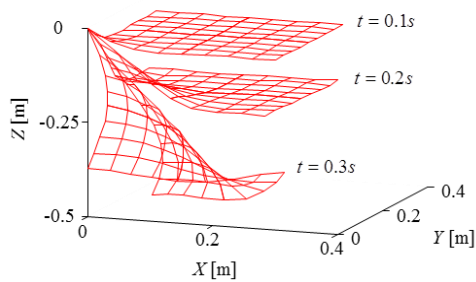
ここで、 $\boldsymbol{\lambda}$ は拘束力ベクトル、 $\mathbf{Q}_d$ は拘束に関する加速度方程式である。

本定式化の妥当性を検証するために実施した数値シミュレーションの内、2つの例を以下に示す。

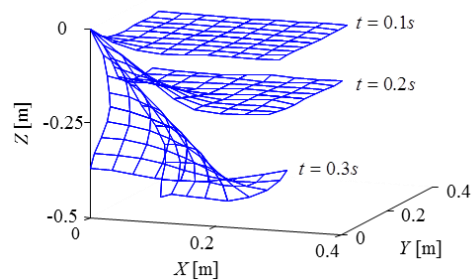
第一の例は、一端支持された極柔軟板が重

力加速度  $g=9.81 \text{ m/s}^2$  による重力を受けながら、自由落下する場合の数値シミュレーションである。解析対象の柔軟板は、大きさ  $0.3\text{m} \times 0.3\text{m}$ 、板厚  $0.01\text{m}$ 、密度  $7.81 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、ヤング率  $0.1\text{MPa}$  である。支持点とそれに対向する頂点を境界領域、その他を全て内部領域とし、ノーマルモードを3次まで縮小して（自由度 33）シミュレーションした結果を、縮小しない（自由度 108）結果と比較して図 2 に示す。

図 2 から、開発したシステム自由度の低次元化手法は実用レベルでの計算精度を保ちながら、低次元化できていること、柔軟板の大回転と大変形を伴う動的挙動が計算可能なことが分かる。



(a) 自由度縮小 (dof=33)



(b) 自由度縮小せず(dof=108)

図 2 柔軟板の自由落下

第二の例は、図 3 に示すような 4 頂点が単純支持された  $8\text{m} \times 8\text{m}$  の大きさで 16 メッシュの網の中央 (A 点) または辺の中央 (B 点) に物体が接触して柔軟な網が変形する場合の数値シミュレーションである。接触する物体は接触直前に  $1.6 \times 10^2 \text{ kgm/s}$  の運動量を持っていたと仮定した。網の断面積  $25\text{mm}^2$ 、密度  $7.81 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、ヤング率  $0.1\text{GPa}$  である。

図 4(a) に網の中央 (A 点) に物体が接触した場合、図 4(b) に網の辺の中央 (B 点) に物体が接触した場合、接触後  $t=0.2\text{sec}$  における網の変形を示す。図 4(a) から、中央に物体が接触した場合、網の中央が大きく変形し、網の 4 辺も大きく撓んでいる様子が分かる。また、図 4(b) から、網の辺の中央に物体が接触した場合、網の最大変位量は図 4(a) よりかなり小さく、網が褶曲していることが分かる。この結果から、本手法は、大回転と大変形を伴う網構造の動的挙動も計算可能であることが分かる。

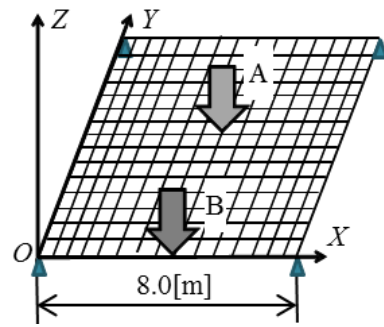
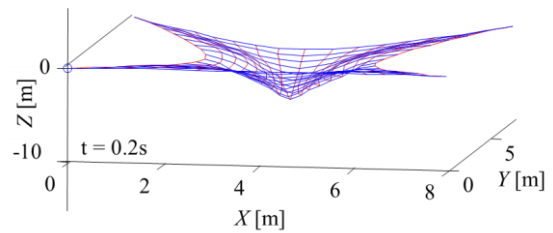
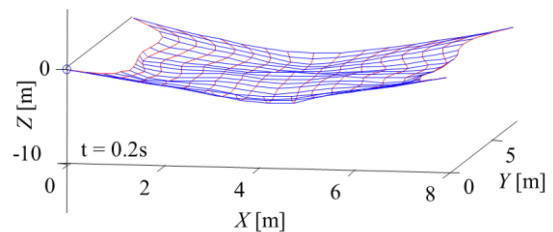


図 3 柔軟板の自由落下



(a) A 点に物体が接触した場合



(b) B 点に物体が接触した場合

図 4 接触後 0.2s における 4 点支持網の変形

(2) 低次元化モデルに基づく極柔軟梁の制御系の試設計および実験による確認

図 5 に示すように、柔軟梁の下端を自励的に並進駆動する (Phase 1 and 2) ことにより柔軟梁に変形を与え、先端部に取り付けられたピンをラッチ機構にロックし (Phase 3)、若干時間が経過したのち下端のラッチを解放する (Phase 4) ような制御を行い、下端と先端の拘束を切り替えることにより、あたかも床体操のように大回転しながら連続移動する機構を持った移動ロボットを制御対象とする。

この場合、微分代数方程式(10)は、このままの形では現代制御理論で用いられる状態方程式に変換できないので、拘束力を消去する必要がある。そこで、ラッチ部の拘束力を外力と見なすことにより代数方程式により表わされる拘束力を消去し、空気抵抗と梁の

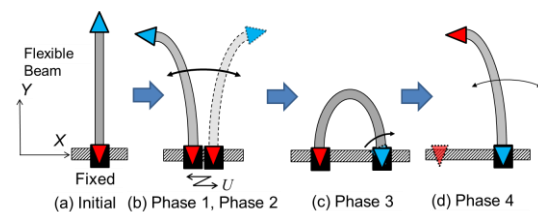


図 5 柔軟梁の自励駆動を利用した移動ロボット

構造減衰を考慮して、式(10)を常微分方程式に変換する定式化を導いた。

板厚 0.6mm, 高さ 0.35m のリン青銅製柔軟梁の下端を自励的に並進駆動した場合の数値シミュレーション結果を図6に示す。図(a)~(f)各図は 1sec.毎の柔軟梁の変形を 0.05sec.間隔で示している。図(a)~(c)から梁の振幅が増大し、図(d)では梁の変形がさらに大きくなり梁先端(青○)が着地する寸前まで振幅が増大している。図(e)では梁先端は着地し、梁先端がラッチされ、梁下端部(赤□)のラッチが解放され、図(f)では倒立した梁が再度励振されていることが分かる。すなわち、下端と先端の拘束を切り替えることにより回転しながら連続移動する機構を持った移動ロボットが、本研究の低次元モデル化手法による数値シミュレーションにおいて実現可能なことを示した。

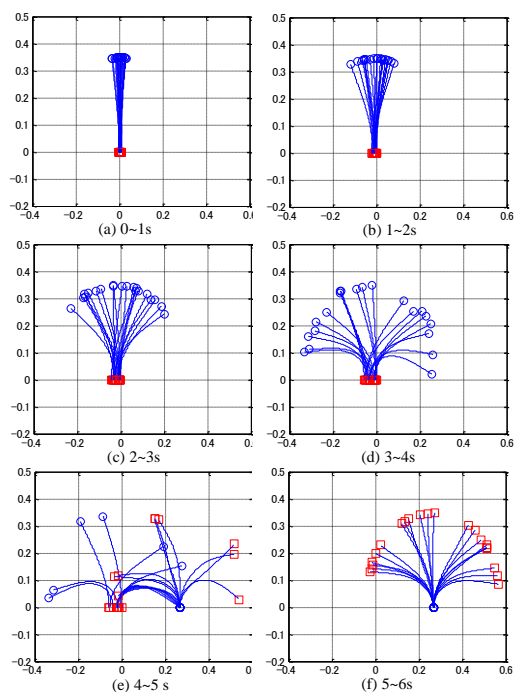


図6 柔軟梁の励振駆動シミュレーション

本研究の低次元モデル化手法の妥当性を調べるため、図7に示す柔軟な梁を用いた移動ロボット模型を作成してビジュアルフィードバックによる実験を行った。実験装置の構成を図7に、実験時の柔軟梁の変形を図8に示す。デジタルカメラでサンプリングした画像データから梁の変形を求め、梁を励振するように DSP を用いて直動ボールねじ機構を制御した。

図6に示した数値シミュレーションによる時間 3-5sec.における変形形状と図8に示した実験による変形形状が良く似ていることが分かる。しかしながら、自励的な励振により梁を大きく変形させることができたものの柔軟梁先端を着地するまでには至らなかった。柔軟梁の変形が大きくなるにつれて、

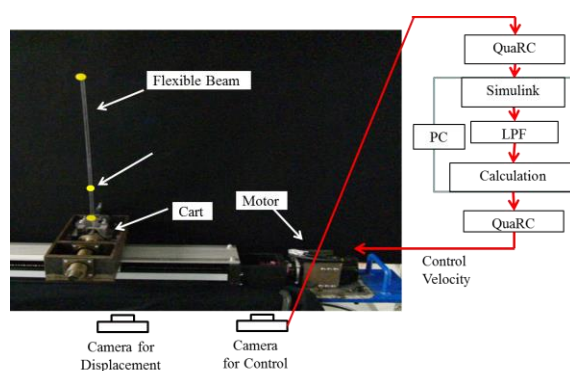


図7 柔軟梁の励振駆動実験装置

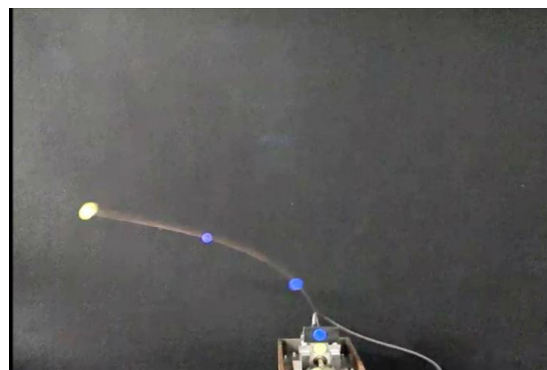


図8 柔軟梁の励振駆動実験

梁の構造減衰および空気抵抗が変化したことなどがその原因として考えられる。

しかしながら制御系を改良することにより、さらに大きく励振することは可能であると考えられ、また、実験により数値シミュレーションと近い柔軟梁の変形が得られたことから、低次元モデルを用いることによって、ほぼ柔軟なマルチボディ梁の大回転と大変形を伴う動的な応答を得られることが分かった。

#### 4. 研究成果

本研究により得られた主要な成果を以下に示す。

- (1) ANCF で表現される極柔軟梁および板で構成されるマルチボディシステムの面外変形に関わる剛性行列が一定値になることに着目してモード合成法を適用することにより自由度を縮小する手法を提案した。
- (2) 柔軟マルチボディシステムの動的挙動の数値シミュレーションにおいて、提案した手法により計算精度の低下を避けながら、計算性を向上することが可能なことをいくつかの数値シミュレーションにより示した。
- (3) 微分代数方程式で与えられるマルチボディシステムの運動方程式のうち、代数方程式で表される拘束を消去して状態方程式へ変換する手法を示した。
- (4) 梁の弾性変形を利用した移動ロボットのプロトタイプの模型を製作し、ビジュアルフィードバックによる励振実験により、提案するモデル化手法がほぼ妥当なこと、



梁の弾性変形を利用した移動機構に実現性があること、を示した。

## 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 4 件)

- ①門倉皓介, 小林信之, モード合成法による ANCF 3次元梁の自由度の低次元化 (24 自由度梁要素について), 日本機械学会論文集, 80-814, 2014, pp.1-12,印刷中.
- ②岡澤佑弥, 小林信之, 鳥阪綾子, モード合成法を用いた ANCF 板のシステム行列の自由度縮小, 日本機械学会論文集, 80-813, 2014, pp.1-12.
- ③和後翼, 小林信之, 菅原佳城, 中立軸に沿った平均軸ひずみ評価による ANCF 梁要素の軸弾性力の精度向上, 日本機械学会論文集 C 編, 79-804, 2013, pp.2704-2713.
- ④永井裕二, 村松幸治, 小林信之, 鳥阪綾子, 薄肉円筒液体容器の周方向波数が高さ方向に変化する振動モードに関する考察, 日本機械学会論文集, C 編, 79-776, 2013, pp.1321-1330.

[学会発表] (計 14 件)

- ①坂本渉, 小林信之, 鳥阪綾子, 極柔軟梁の大変形制御, 日本機械学会機械力学・計測制御部門講演論文アブストラクト集, No.13-18, 2013, 416.
- ②岡澤佑弥, 小林信之, 鳥阪綾子, モード合成法を用いた ANCF 板要素のシステム行列の自由度縮退, 日本機械学会機械力学・計測制御部門講演論文アブストラクト集, No.13-18, 2013, 415.
- ③永井裕二, 小林信之, 鳥阪綾子, 周方向波数が高さ方向に変化する振動モードが励起される薄肉円筒液体容器の地震応答, 日本機械学会機械力学・計測制御部門講演論文アブストラクト集, No.13-18, 2013, 209.
- ④寄木諄也, 小林信之, 鳥阪綾子, 渡邊昌宏, 配管に接続されたベローズ管に地震時に生じる係数励振振動, 日本機械学会機械力学・計測制御部門講演論文アブストラクト集, No.13-18, 2013, 212.
- ⑤滝沢翔, 小林信之, 鳥阪綾子, 円筒タンクのロッキング時底板浮上り特性に及ぼす円筒断面変形の影響, 日本機械学会機械力学・計測制御部門講演論文アブストラクト集, No.13-18, 2013, 210.
- ⑥ Kobayashi, N., Sato, T. and Torisaka, A., Passive Control of Liquid Sloshing on Floating Roof Tank with Multi Dynamic Absorber, ASME IPVP, PVP2013-97229, 2013, pp.1-8.
- ⑦田嶋大地, 菅原佳城, 鳥阪綾子, 小林信之, 圧電素子と NIC 回路による摺動部を持たない跳躍機構の開発, 日本機械学会年次大会, CD-ROM 講演論文集, J044091, 2012, pp1-5.

- ⑧永井裕二, 村松幸治, 小林信之, 鳥阪綾子, 薄肉円筒液体容器における周方向波数が液面近傍で変化する振動モードの計測, 日本機械学会年次大会, CD-ROM 講演論文集, S102014, 2012, pp1-5.
- ⑨小島玲央, 菅原佳城, 鳥阪綾子, 小林信之, 圧電素子を用いたフレキシブルリンクマニピュレータの受動制振制御, 22th Workshop on JAXA Astrodynamics and Flight Mechanics, JAXA, 2012, pp.383-388.
- ⑩Tajima, D., Sugawara, Y., Kobayashi N. and Torisaka, A., Development of hopping robot with negative stiffness switching circuit via piezo electric element, Proceedings of 6th Asian Conference on Multibody Dynamics, CD-Rom, 63732, 2012, pp.1-9.
- ⑪ Sugiura, T., Ichikawa, S., Kobayashi, N., Sugawara, Y. and Torisaka, A., Reduction of Degrees of Freedom in Three-dimensional ANCF Beam Element by Higher Order Shape Function, Proceedings of 6th Asian Conference on Multibody Dynamics, CD-Rom, 63732, 2012, pp.1-9.
- ⑫和後翼, 小林信之, 菅原佳城, 平均軸ひずみ測定の改良による ANCF 梁要素における軸弾性力計算精度向上, 日本機械学会年次大会, CD-ROM 講演論文集 G100073, 2011, pp1-5.
- ⑬小林信之, 市川章太, 杉浦拓夢, 菅原佳城, 拘束モードを用いた ANCF 梁要素, 21th Workshop on JAXA Astrodynamics and Flight Mechanics, 2011, JAXA, pp.383-388.
- ⑭Wago, T., Kobayashi, N., and Sugawara, Y., Improvement on Evaluating Axial Elastic Force in Bernoulli-Euler Beam Based on the Absolute Nodal Coordinate Formulation by Accurate Approximation of Mean Axial Strain, Proceedings of 8th International Conference on Multibody Systems, Nonlinear Dynamics, and Control, DETC2011-48021, ASME, 2011, pp1-8.

## 6. 研究組織

- (1)研究代表者  
小林 信之 (KOBAYASHI NOBUYUKI)  
青山学院大学・理工学部・教授  
研究者番号：70276020
- (2)研究分担者  
菅原 佳城 (SUGAWARA YOSHIKI)  
秋田大学・工学資源学研究科・准教授  
研究者番号：10422320
- (3)研究分担者  
鳥阪 綾子 (TORISAKA AYAKO)  
青山学院大学・理工学部・助教  
研究者番号：70449338