3版

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ３０ 年　 ９ 月 １２ 日現在

機関番号：３２６０１

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2014～2017

課題番号：２６４２０１６５

研究課題名（和文）大変形を伴う超柔軟構造を持つ動的システムの新しい解析手法の構築と実験的検証

研究課題名（英文）Proposition of an analytical method for system with extremely flexible structure which is subjected to large deformation and experimental verification of the proposed method

研究代表者

菅原　佳城（Sugawara, Yoshiki）

青山学院大学・理工学部・准教授

研究者番号：１０４２２３２０

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,600,000円

研究成果の概要（和文）：剛体の衝突現象の効率的な数値解析法を活用して，非常に柔軟な構造を持つシステムの解析手法を提案した．提案手法と従来法である非線形有限要素法による数値解析結果の比較により，計算性に優れる手法であることを示した．また実験装置を製作し，実験結果と提案手法による実験結果を比較することでよい一致を得ることができ，提案手法の有効性を実験的にも示した．さらに，提案手法の良い計算性を活用することで，柔軟な構造を有するシステムの数値最適化を容易に行うことができることから，テザーを有する宇宙機を対象とした効率的なテザー展開のための構造の最適化の一例を示した．

研究成果の概要（英文）：In this study, analysis method for a system with a very flexible structure is proposed and the method utilizes the analogy between the behavior of rigid body collision phenomena and system with very flexible structure. Comparison of numerical analyses by the proposed method and nonlinear finite element method as conventional method shows a good correspondence and the proposed method shows good computability compared to nonlinear FEM. Moreover, good correspondence between the experimental results and the numerical analysis results are obtained. Furthermore, by utilizing the good computability of the proposed method, numerical optimization of a system having a flexible structure can be easily performed and the proposed method is applied to the optimization problem of the structure of a spacecraft having a tether.

研究分野： Multibody dynamics

キーワード： flexible structure　multibody dynamics　complementarity　spacecraft　tethered system

１．研究開始当初の背景

人工衛星などの宇宙機を軌道上に打ち上げる際，それらをロケットフェアリングの内部に収納する必要があるため，軌道投入できる宇宙機の大きさには制限がある．そのような場合，宇宙機を非常に柔軟な構造で構成し，打ち上げ時には折り畳んでロケット内に収納し，軌道投入後に展開して大きな構造を宇宙空間で実現するという方法がとられる．

このような非常に柔軟な構造を持つシステム（以下,「超柔軟システム」）は，柔軟構造部と剛体構造部を有していることが一般的である．たとえば剛体構造部には様々な機器が搭載されており，目的に応じて剛体構造部が柔軟構造部によって様々な方法で接続されているというものである．柔軟な構造を実現するために，非常に軽い材料を採用されるため，柔軟構造部は剛体構造部に比べて質量が非常に軽いものが一般的である．このような超柔軟システムを軌道上に投入する場合，地球上では重力の影響が大きく，柔軟構造物の軌道上での挙動を打ち上げ前に実験的な方法で正確に把握することは極めて困難であり数値解析が選択されることが一般的である．しかしながら，非常に柔軟な構造と剛体と見なせるような剛性の高い構造が連成しているため，システムが有する固有振動数の範囲が広範囲にわたり，数値解析における計算性の悪化などを招くことがしばしばある．また超柔軟システムなどのようなシステムの柔軟構造部は大変形を受けるため，一般的な有限要素法などの解析方法を用いる場合は，モデルに対してより多くの要素数を採用する必要があり，その結果として計算時間の増大をもたらす．

２．研究の目的

超柔軟システムの特性に注目すると，柔軟構造部は非常に柔らかいため，その変形によって発生する剛性力がその柔軟構造部に接続さている剛体構造部の挙動に与える影響は非常に小さい．剛体構造部に比べ柔軟構造部の質量は一般的に非常に軽くなるため，柔軟構造部の運動に伴って発生する慣性力の剛体構造部への影響も非常に小さいと考えられる．しかしながら，柔軟構造部が張力を有するときは，剛体構造部の挙動へ大きな影響を与える．このような性質を考慮すると，柔軟構造部に張力がない場合はその系全体への影響を無視し，張力を有する場合にのみそれらの影響を考慮することで，長い計算時間を低減しつつ適度な精度を維持したまま解析ができると考えられる．しかしながら，張力が加わっている（以下,「張力状態」）場合と柔軟構造部が弛んでおり張力がかかっていない（以下,「弛み状態」）場合についての状態の遷移を考慮しつつ解析を行うと，接続される柔軟構造部の個数の増加によるシステムの複雑化につれて，可能性のある遷移の組み合わせを決定する処理に非常に長い時間を要する．ここで，超柔軟システムの例として，２つの剛体が紐のような非常に柔軟な構造で接続されている場合を考える．このとき，紐の弛み量を紐の自然長さから紐の両端の距離を引いた量として定義すると，弛み量が正の値を持つとき張力は０となり，弛み量が０のとき張力は正の値を持つという相補性の関係が成立し，このような性質を利用することで効率的な解析を行うことができると期待される．

前述のような柔軟構造物の相補性に基づいた解析方法のうち，衝撃的な力を扱った方法として Pfeiffer らによってユニラテラル・コンタクトの考え方が提案されている．Pfeiffer ら方法では，剛体の多点接触問題を対象として，接触・衝突における状態遷移を線形相補性問題に帰着させることで，正確かつ効率的な解析を可能としている． 本研究では Pfeiffer らの考え方と超柔軟システムの挙動についての相似性に着目して，多点接触問題に対するユニラテラル・コンタクトの考え方を基にして超柔軟システムの動的解析の方法を構築することを目的とする．また，提案解析手法の高速計算性を活用して，テザー衛星の最適化設計への応用を試みることも目的とする．

３．研究の方法

（１）提案手法の基本的な考え方

極めて柔軟な構造と剛体からなるシステムについて考慮するために，図１に示すような柔軟かつ軽量な紐の一端に剛体が接続されており，もう一端が固定されている対象を導入する．このとき，紐の質量は剛体の質量に比べて十分に小さく，また紐自体の曲げ剛性も剛体への運動が無視できるくらいに小さいものとする．また，このシステムにおける紐の弛みに関して，図１に示すように「紐の長さ」と「壁と剛体との距離」の差として相対弛み量 s を導入する．このようなシステムの運動を考慮する場合には，システムの状態遷移を十分に考慮する必要があり，図２に示すように２つの状態遷移が存在する．

図２上図（F1）は，張力状態からの弛み状態への遷移であり，このときの張力と相対弛み量の加速度について注目する．張力状態では紐に張力（正の値）が発生し相対弛み量の加速度は０となっているものの，紐の弛みが発生した時点で，張力が消え相対弛み量の加速度（正の値）が発生する．一方，図３の上図（C1）に接触問題における接触状態からの離脱を示す．接触状態では，抗力が存在する一方，相対距離の加速度は 0 のままである．接触状態から離脱に遷移するときに，抗力が 0 となり相対距離の加速度が正の値を持つ．明らかに図２における F1 と図３における C1 は対応関係があり，状態の遷移について同様の考え方ができる．

また，図２下図（F2）は最初にシステムは弛み状態にあり，その後に剛体の運動により

紐が伸びきった状態を経て，再び弛み状態になる遷移を表している．この際，張力状態になった際に無限小の時間で紐に衝撃的な張力が発生し，相対弛み量の速度について方向と量の変化が発生する．一方，このような状態の遷移は Pfeiffer らの文献でも報告されており，図 3 の下図（C2）は接触問題における衝突現象を表しており，相対距離を有する状態から始まり，剛体の運動によって衝突が起こり，衝突の前後において相対速度の方向と量において変化が起こることを示している．明らかに図 2 における F2 と図 3 における C2 においても対応関係があり，衝撃的な事象の前後における速度に関する遷移について同様の考え方ができると考えられる．

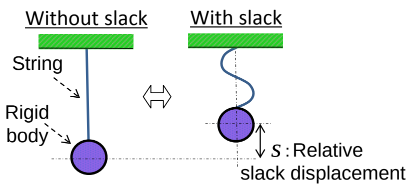

図 1　解析対象の基本構造

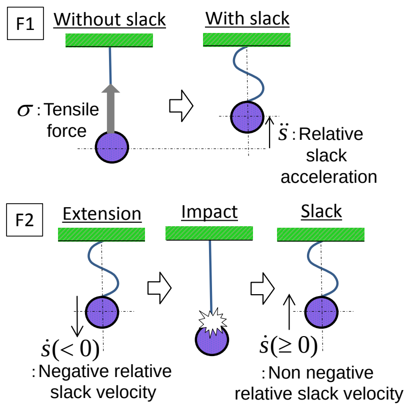

図 2　超柔軟システムにおける状態遷移

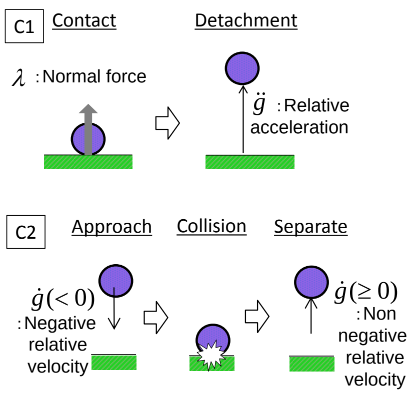

図 3　接触問題における状態遷移

（2）解析対象と定式化

前述で示した超柔軟システムと衝突問題における状態遷移の相似性を用いて，図 4 に示す対象の定式化を行う．基本的な方法は Pfeiffer らの衝突問題の取り扱い方を活用するため，図 4 の対象について適用することで超柔軟システムに対する定式化の提案手法の流れを示す．

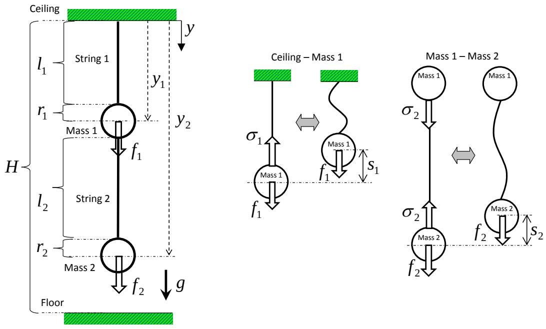

図 4　定式化の対象

図 4 のシステムの運動方程式は $y=[y_1 \ \ y_2]^T$ を一般化座標ベクトルとして以下のように表される．

$$M\ddot{y}-h-W\sigma=0 \tag{1}$$

ただし，

$$h=Mg+F \tag{2}$$

$$M=\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$F=\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$\sigma=\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{bmatrix} \tag{5}$$

であり，各記号は図 4 の通りである．また，一般化座標 y と相対座標ベクトル $s=[s_1 \ \ s_2]^T$ の間には以下の関係が成立する．

$$s=W^T y+c \tag{6}$$

ただし，

$$W=[w_1 \ \ w_2],\quad w_1=\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix},\quad w_2=\begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$c=\begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} r_1 \\ r_1+r_2 \end{bmatrix} \tag{8}$$

である．このとき，式(1)，(7)および(8)を用いると次式を得る．

$$\ddot{s}_i=\underbrace{w_i^T M^{-1} w_i}_{A_s}\sigma_i+\underbrace{w_i^T M^{-1} h}_{B_s} \tag{9}$$

このとき，$\ddot{s}_i$ および σ_i の間には相補性の関係が成立することから，次のような線形相補性問題を得ることができる．

$$\ddot{s}_i=A_s\sigma_i+B_s \tag{10}$$

$$\ddot{s}_i \geq 0,\ \sigma_i \geq 0,\ \ddot{s}_i \cdot \sigma_i \geq 0 \tag{11}$$

式(10)および(11)で表現される線形相補性問題によって前述の図 2 における状態遷移 F1 を検知することができる．また線形相補性問題については最適化手法等を用いて数値的に容易に解くことができる．

次に図 2 における状態遷移 F2 を考慮するために，図 5 のように伸張フェーズ（[B]→

[C]) と収縮フェーズ ([C]→[D]) を考慮する．

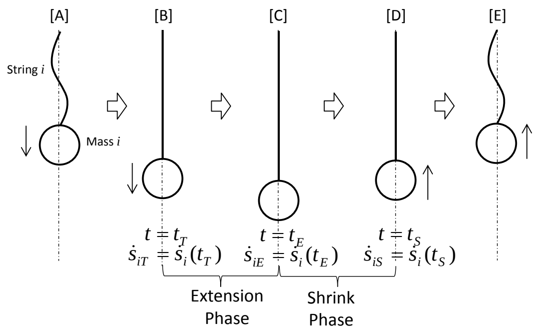

図 5　状態遷移 F2 における仮定

これは Pfeiffer らの衝突問題における圧縮フェーズと膨張フェーズに対応させることができ，系の力積を考慮することで以下のような線形相補性問題を求めることができる．

$$\dot{s}_{iE} = \underbrace{w_i^T M^{-1} w_i}_{A_E} \Sigma_{iE} + \underbrace{\dot{s}_{iT}}_{B_E} \tag{12}$$

$$\dot{s}_{iE} \ge 0,\ \Sigma_{iE} \ge 0,\ \dot{s}_{iE} \cdot \Sigma_{iE} \ge 0 \tag{13}$$

$$\dot{s}_{iS} = \underbrace{w_i^T M^{-1} w_i}_{A_S} \Sigma_{iP} + \underbrace{w_i^T M^{-1} w_i\, \varepsilon_{iN} \Sigma_{iE} + \dot{s}_{iE}}_{B_S} \tag{14}$$

$$\dot{s}_{iS} \ge 0,\ \Sigma_{iP} \ge 0,\ \dot{s}_{iS} \cdot \Sigma_{iP} \ge 0 \tag{15}$$

ただし，$\dot{s}_{iT}$，$\dot{s}_{iE}$，$\dot{s}_{iS}$ はそれぞれ時刻 $t = t_T, t_E, t_S$ における相対弛み量の速度であり，Σ_{iE}, Σ_{iS} は伸張フェーズと収縮フェーズでやりとりされる運動量であり，さらに $\Sigma_{iP} = \Sigma_{iS} - \varepsilon_i \Sigma_{iE}$ である．紙面の制限から，式(12)～(15)の導出については割愛する．式(12)および(13)で表される線形相補性問題から伸張フェーズ終了後の相対弛み量の速度とその際にやり取りされる力積が導出され，さらにそれらの値と式(14)および(15)で表される線形相補性問題を用いて収縮フェーズ終了後の相対弛み量の速度とその際にやりとりされる力積が導出される．つまり，衝撃的張力を経た後の挙動に関するパラメータを得ることができる．

以上より，図 2 における状態遷移 F1 および F2 の両方について線形相補性問題で解くことができ，その間のモデルの切り替えを行うことで，超柔軟システムの挙動に関する数値解析を高速で実施することが可能となる．

４．研究成果

（１）数値解析による提案手法の検証

提案手法の妥当性を検証するために表 1 に示すパラメータを用いて数値解析を行った．図 6 に解析結果を示す．数値解析における初期状態では床からの高さが $H_1 = 2$[m] および $H_2 = 1.3$[m] のところに静止した状態としており，紐 1 は張力状態であり，紐 2 は弛み状態となっているため，運動の開始とともに質量 2 が重力加速度によって下向きに動きだし，その後はパラメータに依存して各状態遷移が発生し，様々な運動が発生する．また提案手法では衝撃的張力が発生する際の前後の相対速度に関して物体の衝突現象で仮定されるような反発係数を設定することができ，図 6 は 2 つのパターンを示している．また各図における赤および青の軌跡はそれぞれ質量 1 および 2 の挙動を示している．

図 6 から明らかなように，柔軟構造部である紐の反発係数によってその挙動が大きく異なっており，図 6 上のように紐 2 の反発係数が小さいときは紐 2 が伸びきったまま，紐 1 が伸縮を繰り返すような挙動となっており，一方図 6 下のように紐 1 の反発係数が小さいときは紐 1 が伸びきったまま，下の紐が伸縮を繰り返すような形になっている．これは，紐が軸方向に変形を生じにくい場合は，それに連なり接続されている変形の生じやすい紐の方の変形が支配的になるという現象であり，物理的にも解釈できるものである．

表 1　数値解析のパラメータ

Parameter	Value	Parameter	Value
r_1	0 [m]	l_1	1 [m]
r_2	0 [m]	l_2	1 [m]
f_1	0 [N]	g	9.81 [m/s^2]
f_2	0 [N]	m_1	1 [kg]
l_1	1 [m]	m_2	1 [kg]

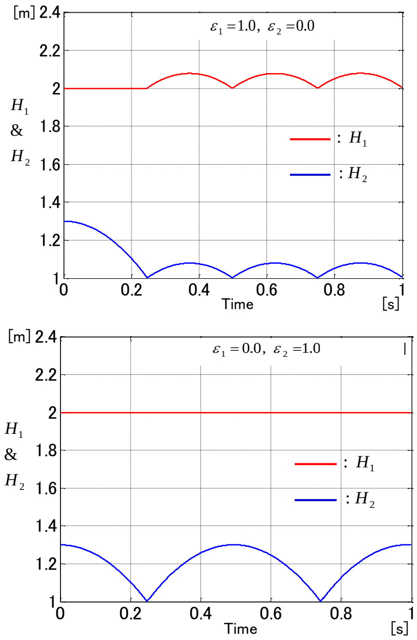

図 6　数値解析結果

（２）従来法（非線形有限要素法）との比較

ここでは，一般的な従来法である非線形有限要素法と提案手法との比較を示す．非線形有限要素法として，絶対節点座標法（ANCF）を採用する．また，解析対象として図 7 に示

すような天井から吊り下げられた紐と質量を採用する．また各パラメータを表 2 に示す．ANCF によって定式化する際には紐と質量を含めて 5 要素として定式化を行い，第 1 要素を天井にピン支持し，第 1 要素から第 4 要素を紐，第 5 要素を質量とみなし，対応するパラメータを割り当てている．さらに，本解析では対象の質量は質点と仮定しているが，ANCF においては長さ 1[cm]の梁要素としている．また，ANCF による定式化は本論文の本質的な部分ではなく紙面の制限もあることから，定式化の詳細については割愛する．初期状態では質量が床から 1.43[m]の位置に静止した状態であり，その状態からの鉛直方向の運動に着目して数値解析を行った．また，ANCF では質量の初期状態を与えることは容易であるが，それに対応した紐の部分に関する初期状態を決定するのは容易ではなく，適当な与え方を行うと不要な応力が発生してしまい，厳密な静止状態を実現できないことがある．そこで不要な応力を排除し理想的な初期状態を実現するために，準備的な数値解析を行う．この数値解析では，鉛直下向きに紐が伸びた状態に対して，質量部分に PD フィードバック制御則による力を加え，十分に長い時間の制御入力を与えることで，質量をある状態へと収束させつつ紐も静的な状態へ収束させる．その収束した状態を，比較対象のための数値解析の初期状態として使用する．

図 8 に提案手法および ANCF による数値解析結果の比較として，質量の床からの高さである H_1 の時刻歴応答を示す．図 8 より明らかなように 2 つの結果の間には大域的な挙動に関して良い一致が得られており，従来法を基準とした際の定性的および定量的な有効性を確認することができる．一方，衝撃的な張力の発生時にわずかな挙動の差が生じていることが分かる．これは，提案手法では紐に関しては弾性を考慮しておらず，相対弛み速度の変化が瞬時に発生している一方，ANCF では弾性的な挙動により紐が自然長になった直後に紐自体が衝撃的な張力を受けてわずかに伸長しており，質量の高さが 1[m]以下，つまり紐の長さが 1[m]以上になる瞬間が発生しており，このような挙動の差が二つの時刻歴応答の差につながっている．

提案手法では大変形をするような軽量な柔軟部分についての解析を大幅に省略することで，より効率的な計算を行うことができるという狙いがあるため，その効果を検証するためにも図 8 に示すそれぞれの数値解析に要する計算時間の比較を行った．ある初期状態から 1 秒の時刻歴応答を計算するのに対して，ANCF では 1276.5[s]の時間を要するのに対して，提案手法では 10.6[s]となっており，計算時間を 99.2%削減することができている．また，前述のように ANCF のような方法では初期状態決定のための予備的な解析も必要となり，それを含めると ANCF では 3209.2[s]の時間を要するが，提案手法ではそのような予備的な解析を必要としない．それゆえ，予備的な解析も含めた比較を行うと，提案手法では ANCF に比べ計算時間を 99.7%削減できていると言うことができる．

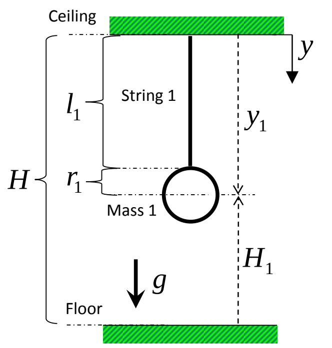

図 7 解析対象

表 2　数値解析時のパラメータ

Parameter	Value
r_1	0 [m]
l_1	1 [m]
m_1	0.5 [kg]
Cross-section shape of string	Square
Cross-section area of string	(0.5×10-3)^2 [m]
H	2 [m]

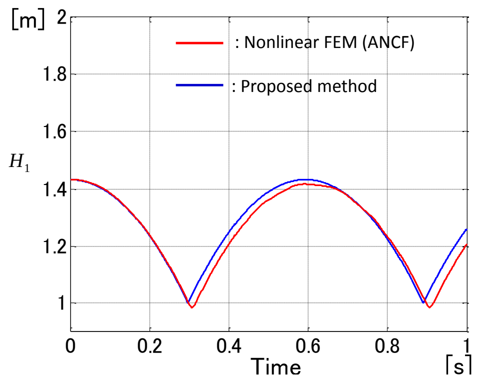

図 8　非線形有限要素法との比較

（３）実験検証

提案手法の有効性を示すために実験検証を行った．解析対象としては，図 4 と同様に 2 本の紐と 2 つの質量からなるシステムであり，それに対応する実験装置を図 9 のように構成し，各パラメータを表 3 に示す．また，実験結果を図 10 に示す．図 10 において A，B はそれぞれ質量 1 および 2 の時刻歴応答であり，実線が提案手法による解析結果，点線が実験結果である．結果より明らかなように定量的にわずかな差があるものの，その挙動は良く一致しており，提案手法の有効性が示された．特に赤い点線による枠に関しては質量 1 と 2 で特徴的な挙動が出ていることに注意されたい．

（４）テザーを有する宇宙機の設計最適化へ

の適用

本提案手法は数値解析の計算性に優れているため，高速で多くの計算を実施することができると言える．準備的な研究により，テザー衛星のテザーに小さな質量を配置することで，テザーの展開挙動が異なることが確認されており，その質量の配置個数や質量そのものの大きさによりテザーの展開挙動を最適にすることが考えられる．そこで，図 11 に示すようなテザー衛星を対象として，テザーの先端に取り付けた質量に力を加えることで展開を行う際に，テザー中間に配置した質量を変えることで展開挙動を効率的に行うように，提案手法による解析を活用した数値最適化を行う．

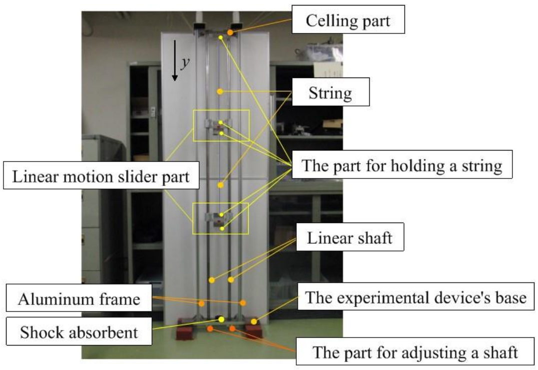

図 9　実験装置

表 3 実験装置のパラメータ

Mass1 and String1		Mass2 and String2	
Parameter	Value	Parameter	Value
r_1	0.0425[m]	r_2	0.0425[m]
l_1	0.33[m]	l_2	0.718[m]
m_1	1.05[kg]	m_2	1.05[kg]
H_1	1.114[m]	H_2	0.409[m]
ε_1	0.609	ε_2	0.726
Other parameters			
Step time	0.01[s]	Integral time	0.6[s]
H	1.4865[m]	g	9.81[m/s^2]
f_d	1.091[N]	D	1.05

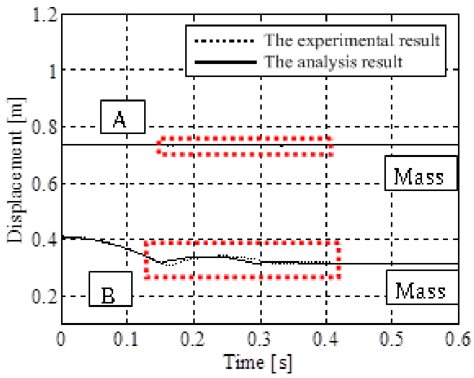

図 10　実験結果と数値解析結果の比較

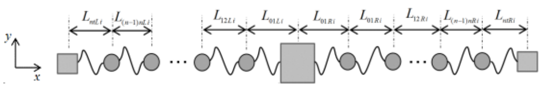

図 11　解析対象（テザー衛星）

紙面の制限から詳細は割愛するが，図 12 に解析の一例を示す．図 12 はテザー1 本あたりに中間質量（図 11 における丸形状の質量）を 3 つ設置し，その質量の大きさ(横軸)を変えたときに，テザーの展開の整定時間 (縦軸)を比較したものである．図より明らかなように中間質量が約 0.2kg のときに整定時間が最小値となっており，最適な質量が存在することが分かる．このような最適値を求めるには，繰り返し計算が必要があり，本手案手法の高速計算を活用すると容易に可能となる．

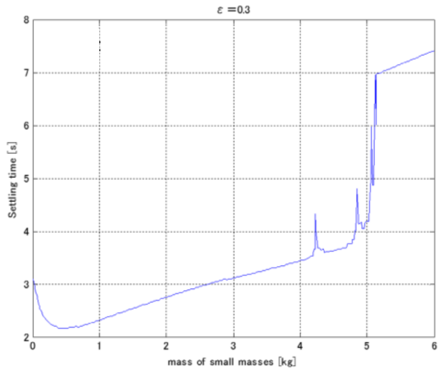

図 12 テザー衛星の中間質量に関する解析例

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　10　件）

①菅原 佳城、千田 拓、極めて柔軟な構造を持つシステムの相補性を考慮した運動解析について、日本機械学会機械力学・計測制御部門 Dynamics and Design Conference 2014、(2014)

②Yoshiki Sugawara、Syuntaro Oshima、Taku Chida、An analysis method for a system with mass and extremely flexible component and its application to analysis of deployable satellite、ECCOMAS Thematic Conference on Multibody Dynamics 2015、(2015)

③菅原 佳城、大島 俊汰郎、関 啓亮、テザーシステムの効率的展開についての一考察、日本機械学会機械力学・計測制御部門 Dynamics and Design Conference 2016 、(2016)

④Yoshiki Sugawara、Shuntarou Oshima、Yuri Toyama 、 Sayako Sakama 、 A study on the effective deployment of tethered system via fast analysis method and experimental validation、ECCOMAS Thematic Conference on Multibody Dynamics 2017、(2017)

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・准教授

研究者番号：10422320

(2)研究分担者

小林　信之（KOBAYASHI NOBUYUKI）

青山学院大学・理工学部・教授

研究者番号：70276020