

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月15日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560232

研究課題名（和文）生体深部病巣診断のための生体波動遠隔発生装置の開発

研究課題名（英文）Development of remote wave generator for inspection of a focus in a human body

研究代表者

永井 健一（NAGAI KENICHI）

群馬大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：00110403

研究成果の概要（和文）：MRE法による生体深部病巣診断における生体遠隔加振法の確立を目的として、装置の試作と計測実験を行った。電磁式加振機により励起した弦の横振動を、支点により弦の縦振動に変換し振動変位を伝達する。弦の他端は、生体加振部を模擬した薄肉弾性板で構成される箱形構造体に連結され、弾性板に曲げ変形を生じさせ生体を加振する構造とした。つづいて、箱形構造の曲げ変形の高精度解析法を確立するため、軸弾性拘束を受けるL字型はりの非線形振動解析を行った。これより、実験でも測定された不規則的な応答をもふくむ非線形振動挙動を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Aiming to establish a remote generation method of wave in a human body for an inspection of a focus, a remote-vibration exciter is proposed. The exciter consists of a long string and a frame made of thin plates which generates vibrations in a human body. The string transmits vibrations from an electromagnetic vibration exciter to the frame, then bending vibrations are generated in the frame. Furthermore, to establish an analytical procedure solving nonlinear vibrations generated in the frame structure, nonlinear vibrations of a L-shaped beam constrained by an axial spring are analyzed, including non-periodic responses also observed in the experiment.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：機械力学・計測制御

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：機械力学・制御，計測工学，生物・生体工学

1. 研究開始当初の背景

がんは日本人の死因の第一位であり、その早期診断技術の高度化は社会的に重要である。そのため、超音波診断法、X線CT法や、磁気共鳴画像（MRI, Magnetic resonance

imaging) 診断法など、人体を傷つけることなく病変部の可視化を行う非侵襲的な検査手法が発達してきている。近年では、生体深部の弾性係数分布を同定することにより、検査員の技量に依存せず、定量的かつ客観的な病

変部の診断を行う手法の開発が進められている。生体内の弾性係数を同定する検査手法の一つに、MRE (Magnetic resonance elastography) 法がある。MRE 法では、検査対象の生体深部に弾性波を伝播させるとともに、弾性波と同振動数の周期傾斜磁場を与える。その際の生体の MRI 画像の位相変化より弾性波の変位分布が得られ、適切な逆解析により生体内の弾性係数分布が求められる。MRE 法による検査を高精度化するための課題の一つに、生体内に波動を発生させる装置の開発がある。この波動発生装置は、MRI 装置近傍の強磁場 (3T 程度) 環境下で使用できるとともに、粘弾性を伴う生体に対して、振幅と位相が既知となる高精度の波動を生成する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、生体波動遠隔発生装置を、弦の振動や薄肉弾性体の曲げ変形により振動変位を伝達する構成により構築することを目的とする。まず、装置の試作と計測実験を行う。続いて、薄肉弾性体や支持部が有する非線形性の影響を考慮した理論解析を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 遠隔加振装置の試作と計測実験

試作した遠隔加振装置の概要を図 1 と図 2 に示す。生体を加振部に対応する部分は、3 枚の薄板をマッチ箱のように組み上げた構造となっている。天井の板サイズは 180mm×120mm、側面の板サイズは 120mm×90mm である。板厚はいずれも 0.2mm である。また天井の板と側面の板、および側面の板と土台との締結はそれぞれ 2 枚の L 字アングル材で挟み込み固定した。そして両側面の板を 3 本の弦により内側から引っ張り、側面を絞り込むことで天井の板を振動させた。この 3 本の弦は図のように 1 本の長い弦に接続されている。この長い弦を遠方で加振器により縦方向に振動させることで、生体加振部までの振動を伝達させた。加振機において、弦の端部に横振動を与え、その近傍の横振動をピンホールにより拘束することで、横振動を縦振動に変換した。なお弦の直径は 1mm である。燐青銅板のヤング率 E 、密度 ρ はそれぞれ、 $E=110\text{GPa}$ 、 $\rho=8.72 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ である。実験では、加振器による弦の加振点、天井板の中心のみを計測点とし、レーザー変位系による振動応答の計測の精度を向上させるため計測点には白色塗装を施した。

実験に用いた実験装置の概要を図 2 に示す。発振器 1 から正弦波の信号を電力増幅器 2 に加え、加振器 3 を駆動する。これにより、弦に周期的な加振を加えた。弦の加振部および薄肉弾性構造物の天井中心位置にレーザ

ー変位計 4 を設置し、加振部と天井板の動的応答を測定する。また、左端の加振器側のレーザー変位計で検出されたたわみの振動応答は電圧計 5 により振幅の実効値に変換され、応答振幅を得る。この数値をもとに、加振振幅を一定に保ち計測を行った。そして、薄肉弾性構造物の天井中心位置のレーザー変位計で検出されたたわみの振動応答は、電圧計 6 により振幅の実効値に変換され、応答振幅を得る。また、FFT アナライザ 7 により時系列波形の分析を行った。4 つのレーザー変位計の応答をもとに、各計測点のたわみの振幅をマルチチャンネルレコーダー 8 に記録した。それらのデータはパソコン 9 に記録した。

(2) フレーム構造に対応する L 字はりの理論解析

図 3 に示す連続はりを考える。連続はりは、水平はりと垂直はりの二本のはりから構成される。二本のはりは、互いの境界で直角に接合される。はりの接合部には、集中質量が付加される。さらに、二本のはりは、接合部で線形ばねによる弾性拘束を受ける。ばねの他端の初期軸変位 u_s により、水平はりは初期軸力を受ける。座標系は水平はりと垂直はりに対して、それぞれ θ_1 と θ_2 を定める。座標系 θ_1 の x_1 軸は、水平はりの軸方向に沿って定める。 z_1 軸は水平はりのたわみ方向に定める。同様に、座標系 θ_2 の x_2 軸は、垂直はりの軸方向に定める。接合部を弾性拘束された二本のはりは、重力加速度 g および周期加速度 $a_a \cos \Omega t$ が作用する。ここで、 a_a は加振加速度振幅、 Ω は加振角振動数、 t は時間である。

接合部を弾性拘束された連続はりの無次元基礎式は、つぎのようになる。

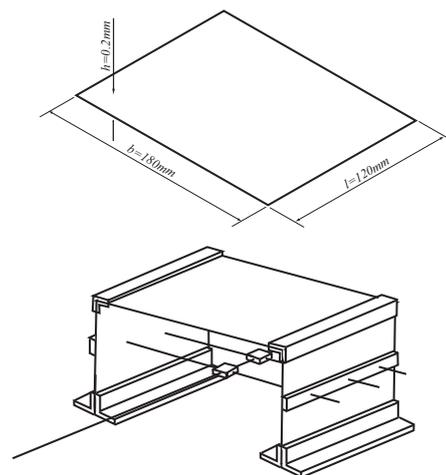


図 1 生体加振部

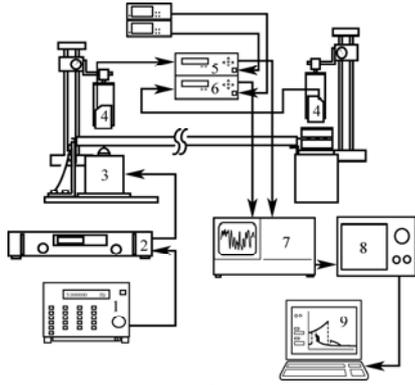


図2 実験装置

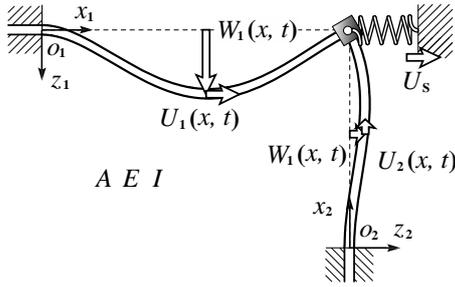


図3 L字型連続はり

$$L_1(w_1, w_2) \equiv w_{1,\tau\tau} - (n_{x1}w_{1,\xi_1})_{,\xi_1} + w_{1,\xi_1\xi_1\xi_1} - (p_s + p_d \cos \omega\tau) - \delta(\xi_1 - l_s)q_s = 0, \quad (1)$$

$$L_2(w_1, w_2) \equiv \rho\mu w_{2,\tau\tau} - \frac{\varepsilon\mu^2}{\alpha l^3} (n_{x2}w_{2,\xi_2})_{,\xi_2} + \frac{\varepsilon\mu^2}{\alpha l^3} w_{2,\xi_2\xi_2\xi_2} = 0, \quad (2)$$

$$n_{x1} = \frac{k}{1+k} \{u_s - u_0 + \int_0^1 \frac{1}{2} w_{1,\xi_1}^2 d\xi_1\} + \frac{1}{1+k} [\Gamma_1^2 \frac{\sqrt{\mu/\alpha}}{l} \{w_{1,\xi_1\xi_1} (1) + \beta_e p\} w_{2,\xi_2} (1)] + \frac{1}{1+k} [\Gamma_1 \frac{\varepsilon\mu\sqrt{\mu/\alpha}}{l^3} w_{2,\xi_2\xi_2} (1)], \quad (3)$$

$$n_{x2} = \frac{k}{1+k} \Gamma_1 \frac{l^2}{\varepsilon\mu} \{u_s - u_0 + \int_0^1 \frac{1}{2} w_{1,\xi_1}^2 d\xi_1\} w_{1,\xi_1} (1) - \Gamma_1 \frac{l^2}{\varepsilon\mu} \{w_{1,\xi_1\xi_1} (1) + \beta_e p\} + \frac{1}{1+k} [\Gamma_1^2 \frac{\sqrt{\mu/\alpha}}{l} w_{2,\xi_2\xi_2} (1) w_{1,\xi_1} (1)] + \Gamma_1 \frac{\sqrt{\mu/\alpha}}{l} p (\xi_2 - 1). \quad (4)$$

ここで、 w_1 と w_2 は、それぞれ水平はりと垂直はりの無次元たわみである。コンマの後の添え字は、それに関する偏微分を示す。 n_{x1} と n_{x2} はそれぞれ水平はりと垂直はりの軸力である。 q_s は無次元集中荷重である。

連続はりの幾何学的境界条件と力学的境界条件は、次式に示される。 $\delta(\xi - l_s)$ は、ディラックのデルタ関数である。 k は無次元のばね定数である。 u_s はばねの無次元初期軸変位である。 Γ_1 は、はりの細長比である。 l 、 α 、 ε 、 μ と ρ は、それぞれ、水平はりに対する垂直はりの長さの比、断面積比、ヤング率の比、断面二次モーメントの比および密度比である。 β_e は水平はりの質量に対する端部質量の比である。連続はりの幾何学的境界条件と力学的境界条件は以下のようなになる。

$$\xi_1 = 0; u_1 = 0, w_1 = 0, w_{1,\xi_1} = 0,$$

$$\xi_2 = 0; u_2 = 0, w_2 = 0, w_{2,\xi_2} = 0,$$

$$\xi_1 = \xi_2 = 1;$$

$$w_1 + \Gamma_1 \frac{\mu}{l\alpha} u_2 = 0, \quad \Gamma_1 u_1 - \sqrt{\frac{\mu}{\alpha}} w_2 = 0,$$

$$w_{1,\xi_1} - \frac{1}{l} \sqrt{\frac{\mu}{\alpha}} w_{2,\xi_2} = 0,$$

$$n_{x1} w_{1,\xi_1} - w_{1,\xi_1\xi_1\xi_1} - \beta_e p - \frac{1}{\Gamma_1} \frac{\varepsilon\mu}{l^2} n_{x2} = 0,$$

$$n_{x1} + \Gamma_1 \frac{\varepsilon\mu\sqrt{\mu/\alpha}}{l^3} (n_{x2} w_{2,\xi_2} - w_{2,\xi_2\xi_2\xi_2})$$

$$- k(u_s - u_1) = 0,$$

$$j_M w_{1,\xi_1\tau\tau} + w_{1,\xi_1\xi_1} + \frac{\varepsilon\mu\sqrt{\mu/\alpha}}{l^2} w_{2,\xi_2\xi_2} = 0. \quad (5)$$

基礎式のたわみをつぎのように仮定する。

$$w_i = \sum_j b_j(\tau) \zeta_{ij}(\xi_i), \quad (i=1,2, j=1,2,3,\dots) \quad (6)$$

$b_j(\tau)$ は未知時間関数である。 $\zeta_{ij}(\xi_i)$ ははりの形状関数である。関数 $\zeta_{ij}(\xi_i)$ は次式となる。

$$\zeta_{ij}(\xi_i) = e_{ij}(\xi_i) f_{ij}(\xi_i),$$

$$e_{ij}(\xi_i) = \cos p_{1ij} \pi \xi_i + q_{ij} \sin p_{2ij} \pi \xi_i,$$

$$f_{ij}(\xi_i) = \sum_{k=1}^5 c_{ijk} \xi_i^{k-1}. \quad (7)$$

上式の係数 c_{ijk} 、 p_{1ij} 、 p_{2ij} ならびに q_{ij} は、式(5)の境界条件を満たすように定められる。

$e_{ij}(\xi_i)$ は高次の振動モードを考慮するための関数である。基礎式(1)と(2)に式(6)を代入し、修正ガラーキン方を適用すると、つぎの非線形常微分方程式が得られる。

$$\begin{aligned}
& \sum_j \hat{B}_{ij} \hat{b}_{j,\tau\tau} + \sum_j (\hat{C}_{ij} + \hat{R}_{ij} p_s) \hat{b}_j \\
& + \sum_j \sum_k (\hat{D}_{ijk} + \hat{R}'_{ijk} p_s) \hat{b}_j \hat{b}_k \\
& + \sum_j \sum_k \sum_l \hat{E}_{ijkl} \hat{b}_j \hat{b}_k \hat{b}_l + \sum_j (\hat{R}_{ij} p_d \cos \omega \tau) \hat{b}_j \\
& + \sum_j \sum_k (\hat{R}'_{ijk} p_d \cos \omega \tau) \hat{b}_j \hat{b}_k - (p_s + p_d \cos \omega \tau) \hat{G}_i \\
& - q_s \hat{H}_i = 0 \tag{8}
\end{aligned}$$

式(8)の第一項は慣性力項である。第二、第三、第四項は、それぞれ線形復元力項、二次の非線形復元力項、三次の非線形復元力項である。第五項と第六項は係数励振項である。第七項と第八項は、静的・動的分布荷重と集中荷重に対応する。

ついで、時間変動項を省略し、未知時間関数 b_j を、静たわみを表す未知係数 \bar{b}_j に置換すると、係数 \bar{b}_j に関する連立三次方程式を得る。得られた方程式に対し、Newton-Raphson 法を適用し、静的復元力特性ならびに静的平衡位置を求める。つぎに、静的平衡位置を原点とするため、 $b_j(\tau) = \tilde{b}_j(\tau) + \bar{b}_j$ とし、式(8)に代入する、さらに非線形復元力項および周期外力項を省略すると、静的平衡位置における第 i 次の線形固有振動数 ω_i と固有ベクトルが求まる。これより、線形固有振動形 $\tilde{\xi}_{ij}$ が定まる。この線形固有振動形にもとづく規準座標 b_i を新たに導入すると、規準形連立方程式を得る。さらに、変位成分とその速度成分をそれぞれ $b_i^{(1)}$ と $b_i^{(2)}$ とし、連立方程式を変換すると、つぎの一階連立非線形常微分方程式を得る。

$$\begin{aligned}
& b_i^{(1),\tau} = b_i^{(2)} \\
& b_i^{(2),\tau} = -2\varepsilon_i \omega_i b_i^{(2)} - \omega_i^2 b_i^{(1)} - \sum_j R_{ij} p_d \cos \omega \tau b_j^{(1)} \\
& \quad - \sum_j \sum_k (D_{ijk} + R'_{ijk} p_d \cos \omega \tau) b_j^{(1)} b_k^{(1)} \\
& \quad - \sum_j \sum_k \sum_l E_{ijkl} b_j^{(1)} b_k^{(1)} b_l^{(1)} + G_i p_d \cos \omega \tau
\end{aligned} \tag{9}$$

4. 研究成果

(1) 実験結果

以下の要領で実験を行った。はじめに薄肉弾性構造物の固有振動数を調べた。次に加振実験を行い、周波数応答曲線を求め、それに基づき時系列波形、周波数分析を記録し、振動形態を分析した。結果整理のため、以下の諸量と無次元量を導入した。

$$\begin{aligned}
w &= W/h, \quad \Omega_0 = (1/b^2) \sqrt{D/\rho h}, \\
D &= Eh^3/12(1-\nu^2), \quad \omega = \Omega/\Omega_0, \quad \tau = \Omega_0 t
\end{aligned}$$

W はたわみ変位、その無次元量を w とする。また、 Ω_0 は振動数の代表量である。また Ω は

加振角振動数 ($\Omega = 2\pi f$, f : 加振振動数) であり、 ω は無次元加振振動数である。 τ は時間 t の無次元量である。

天井と側面をつなぐL字アンクル材の部分に衝撃加振し生体加振分の固有振動数を求めた。その結果、 $\omega = 10.8$ ($f = 11.5\text{Hz}$), $\omega = 25.8$ ($f = 27.6\text{Hz}$) に固有振動数を確認できた。1次と2次の振動モードを図4に示す。

続いて、生体加振部上に何も乗せずに実験を行った。このときの天井中心位置での周波数応答曲線を図5に示す。縦軸は振幅の実効値 w_{rms} 、横軸は加振振動数 ω である。

この結果より、加振振動数 $\omega = 131$ ($f = 140\text{Hz}$) にて、時系列波形についての周波数分析を行った。加振部での時系列波形と、周波数分析結果を図6に示す。また生体加振部の天井中心部での時系列波形と、周波数分析結果を図7に示す。図7には、2次と3次の高調波成分が見られる。また、1/2次の分数次調波、3/2次、7/2次の亜分数高調波成分が見られた。2次の高調波成分は基本調波成分に対して、1.1%程度であり、3次の高調波成分は0.1%程度であった。一方、天井板では、図7から、2次の高調波成分は1.7%程度、3次の高調波成分は0.3%に増加していた。しかし時系列波形では図6、図7の両方で高調波成分の影響が少ないことが確認できる。

一方、加振振動数 $\omega = 146$ ($f = 156\text{Hz}$) 付近では、生体加振部の時系列波形と周波数分析結果は図8となった。図8より天井中心部では非線形周期振動が発生していることがわかる。この非周期振動は遠隔振動伝達装置において、加振振動を正確に他端に伝播させる事を困難にするため、注意を要する。

次に、生体加振分の天井板に柔軟弾性体を搭載して加振実験を行った。この柔軟弾性体モデルのサイズは85mm×85mm、厚さ30mmである。このときの生体加振部の天井中心位置での周波数応答曲線を図9に示す。比較的広い周波数範囲において、振動が伝達されていることがわかる。

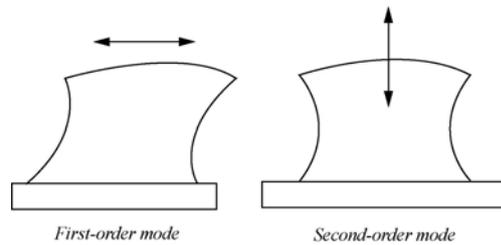


図4 生体加振部の固有振動モード

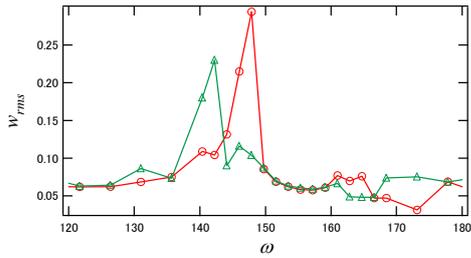


図5 生体加振部の周波数応答曲線

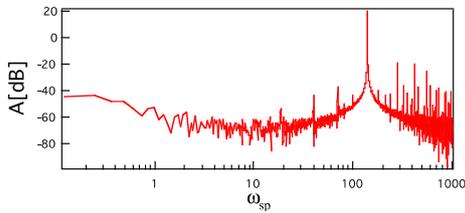
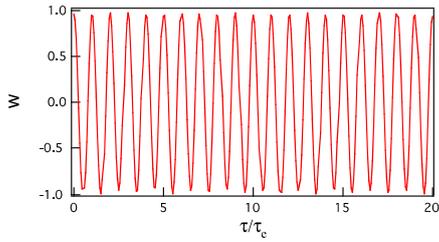


図6 加振部の時系列波形と周波数分析結果

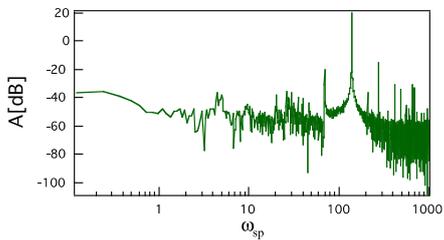
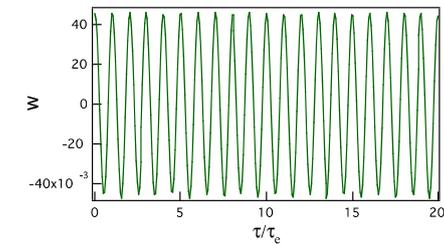


図7 生体加振部の時系列波形と周波数分析結果

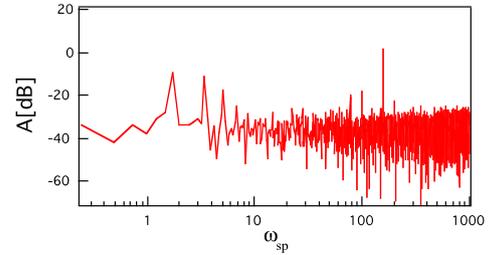
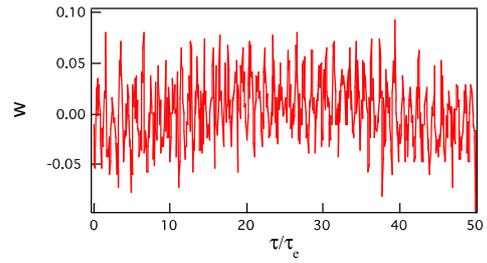


図8 生体加振部に生じる非周期応答

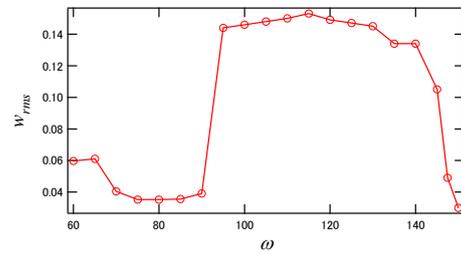


図9 柔軟弾性体搭載時の周波数応答曲線

(2) L字はりの解析結果

ばねの初期軸変位 u_s を逐次変化させた際の、はりの復元力特性を求めた。結果を図10に示す。図の縦軸は、水平はりの中央に作用する集中荷重 q_s である。横軸は、水平はり中央のたわみ w_1 である。図より、ばねの初期軸変位 u_s が $u_s = 0$ の場合、はりの復元力特性は、正負方向の荷重に対して、漸硬形の特徴を示す。ばねの初期軸変位 u_s が負に大きくなるに従い、はりの復元力特性は、負方向の荷重に対して、漸軟-漸硬形の特徴を示す。

座屈後のはりの非線形周波数応答曲線を直接数値積分により求めた。結果を図11に示す。図の縦軸は無次元たわみの実効値である。横軸は、無次元加振振動数である。なお、ばねの初期軸変位を $u_s = -1500$ とした。カオス振動応答は、最低次振動モードの主共振応答に伴い、振動数領域 $\omega = 15.4 \sim 15.8$ で生じる。加振振動数 $\omega = 15.6$ における時間波形、周波数分析結果および相図を図12に示す。時間波形は、二つの静的平衡点まわりを飛び移る非周期応答となる。

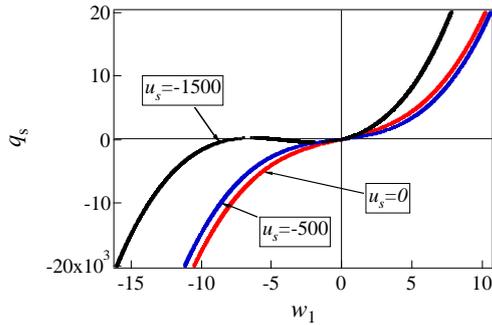


図10 中央に集中荷重を与えたL字はりの復元力特性

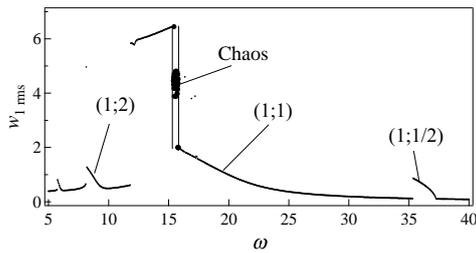


図11 L字はりの周波数応答曲線
 $\xi_1 = 0.5$, $p_d = 438$.

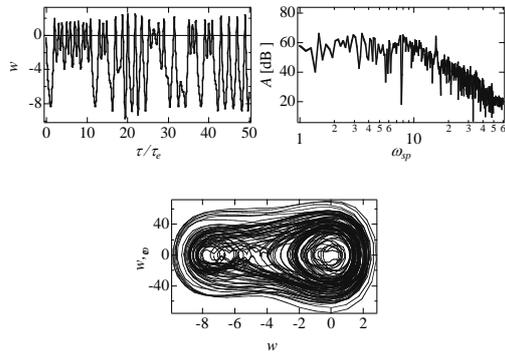


図12 L字はりの非周期的応答における時系列波形, 周波数分析結果および相平面
 $\omega = 15.6$

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2件)

- ① Onozato, N., Nagai, K., Maruyama, S. and Yamaguchi, T., Chaotic vibrations of a post-buckled L-shaped beam with an axial constraint, Nonlinear Dynamics, 査読有, Vol. 67, 2012, pp. 2263-2379.
- ② 山本隆夫, 一般化されたMREシステムの数

理模型, 第58回理論応用力学講演会講演予稿集, 査読無, 2009, pp. 349-350.

[学会発表] (計1件)

- ① 山本隆夫, 一般化されたMREシステムの数理模型, 第58回理論応用力学講演会, 2009. 6. 10, 日本学会会議 (東京都).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永井 健一 (NAGAI KENICHI)
群馬大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 00110403

(2) 研究分担者

山本 隆夫 (YAMAMOTO TAKAO)
群馬大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 80200814

山口 誉夫 (YAMAGUCHI TAKAO)
群馬大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 90323328

丸山 真一 (MARUYAMA SHINICHI)
群馬大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 60344295