

ピエゾインピーダンス法による梁の張力同定

宮下 剛¹・阿部雅人²・藤野陽三³

¹ 学生員 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

² 正会員 Ph.D. 東京大学助教授 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 (同上)

³ フェロー会員 Ph.D. 東京大学教授 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 (同上)

スマート構造によるヘルスマニタリング手法の一つとして、アクチュエータとセンサーの双方の機能を有する圧電素子を利用するピエゾインピーダンス法があるが、これまで定量的に構造物内部の状態を評価する手法は確立されていない。本研究では、ピエゾインピーダンス法により、構造物内部状態の変化を定量的かつ絶対的に評価する手法を提案する。具体的には、張力を受ける薄い梁を対象とし、圧電素子を含めた梁のモデル化を行い、梁に作用する張力を未知パラメータとして、計測されたインピーダンスから最適化手法により同定する方法を構築する。小型供試体を用いた室内実験を実施し、提案手法による張力の同定精度の高いことを示した。

Key Words: structural health monitoring, piezoelectric materials, impedance measurement, optimization technique, tensile force, beam

1. はじめに

社会基盤施設の経年劣化に伴う損傷・事故が近年多発しており、維持管理の重要性が認識されつつある。既往の維持管理手法として目視・打音検査などがあるが、経験を要する手法であり、客観的な手法とは言いがたい。そこで、構造物の健全性を客観的かつ合理的に把握する構造ヘルスマニタリング手法の確立が求められている¹⁾。

構造ヘルスマニタリング手法には、2つの流れがある。1つは、レーザードップラー速度計による非接触型の空間的な計測手法²⁾や超音波などを利用した非破壊評価手法である。これは、既往の定期検査を客観的かつ合理的に効率化を図ることを目的としている。もう1つは、生物が有する「自己診断」や「自己修復」の機能を構造物に持たせようとするこの方法はスマート構造コンセプトに基づいたものである。最終的には、構造物に生物が有するようなセンサ機能をもたせ、構造物自身に健全性を診断させるということを目指とする。

スマート構造によるヘルスマニタリング手法が確立すれば、構造物の供用状態・健全性を常時客観的に把握することが可能となる。すなわち、非常時・災害時は勿論のこと、通常供用時の損傷が検出でき、必要な対策を迅速にとることができる。そのため、構造物の状態を逐次把握することで不必要な補修や取り替えを避けられ、維持管理費を低減させることが可能となる。

圧電素子は、スマート構造に関する研究の中で積極的に用いられている材料の一つである。圧電素子とは、外部から力を加えると電流が発生する圧電効果と外部から電圧を印加すると力が発生する逆圧電効果の双方を有するセラミックスである。

圧電素子の逆圧電効果を利用して構造物を微小に加振することで、構造物内部に波動が伝播する。構造物内部に形成された波動は圧電効果により圧電素子内に電圧を発生する。圧電素子の入力電圧と出力電流の比、すなわち電気的インピーダンスは構造物内部全体の特性を反映したものであり、これから構造物内部の状態を逆解析により同定する手法がピエゾインピーダンス法と呼ばれる手法である³⁾。

既往の構造ヘルスマニタリング手法である打音検査やAE法と比較すると、圧電素子がセンサかつアクチュエータとして機能し、構造物を振動させるだけでなく、動的な応答をも直接測ることが可能となる。また、大型加振機を利用して構造物の大局的なモードを得る手法と比較すると、圧電素子は小型で設置が容易であることから、構造物の動的特性に与える影響は小さく、圧電素子が発生する高周波により、構造物に生じる損傷を局所的に検出することが供用期間中に可能となる。

ピエゾインピーダンス法に関する既往の研究^{3)~7)}では、鋼橋梁模型などに人為的に損傷を加えた前後での計測結果を比較し、損傷の有無を定性的に評価している。しかし、構造系のモデル化が十分に行われていないため、ピエゾインピーダンス法により得

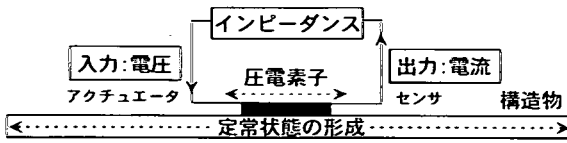


図-1 ピエゾインピーダンス法の概念図

られる電気的特性量と構造物内部状態の変化量を定量的に結びつける点では成功していない。また、計測結果の前後比較を必要とすることなく測定結果のみから構造物の内部状態を絶対的に評価する手法も確立していない。

そこで、本研究では、以下の事柄を目的とする。

- 1) 圧電素子を貼り付けた梁の構造モデルを構築し、 piezoelectric impedance method の計測結果として得られるインピーダンスの周波数応答関数を理論的に導出する。
- 2) 梁に作用する軸方向張力をインピーダンス計測結果のみから同定する最適化手法を示す。
- 3) 梁を用いた小型供試体による室内実験を行い、提案する同定手法の妥当性を検証する。

piezoelectric impedance method により、供用期間中に構造物の局所的な情報を得られることから、プレストレスや残留応力を計測することも可能となる。既存の応力測定手法としては、一般にひずみゲージを用いる方法がある。ひずみゲージは、ゲージ自体の伸びによる抵抗値の変化を測定するものである。そのため、変化が生じる前に測定を行っても、情報を得ることができない。それに対し、piezoelectric impedance method では、構造物を強制的に加振して応答を得ることが可能になるため、常に“絶対的な”情報が得られる。

本文で提案する手法を用いることにより、張力が変化する前後の過程で測定を行うことなく、一回の測定結果のみから梁に作用している張力値を絶対的に同定することが可能となる。

2. 圧電素子とpiezoelectric impedance method

ここでは、piezoelectric impedance method のモデルの構築に先立ち、圧電素子の基本的な性質について述べ、piezoelectric impedance method の概要および既往の研究についてまとめた上で問題点を抽出する。

(1) 圧電素子の性質

電気力学的特性を有する圧電素子は、逆圧電効果によりアクチュエータとして、また圧電効果によりセンサとして機能する。これらの機能は、単一の目的に用いることも可能であるが、両者の機能を同時

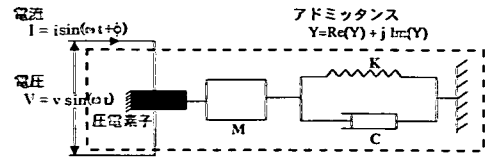


図-2 piezoelectric impedance method の既往のモデル¹⁾

に用いることも可能である。このとき圧電素子は、1つの材料で複数の機能を果たすことになるので、スマート構造を実現化する可能性をもつ材料として期待されている。

圧電素子の構成式には、力学的関係式および電気学的関係式があり、両者は連成している⁸⁾。

$$S_m = s_{mn}^E T_n + d_{mk} E_k \quad (1a)$$

$$D_i = d_{in} T_n + \epsilon_{ik}^T E_k \quad (1b)$$

$$(i, k, = 1, 2, 3; m, n = 1, 2, \dots, 6)$$

ここで、 S_m はひずみ、 T_n は応力 [N/m^2]、 E_k は電界 [V/m]、 D_i は電気変位(電束密度) [C/m^2]、 s_{mn}^E は弾性コンプライアンス [m^2/N]、 d_{mk} は圧電定数 [m/V]、 ϵ_{ik}^T は誘電率である。上付きの添字 T および E は、それぞれ応力が作用していない場合、電場が作用していない場合の値を表している。下付の添字 3 で表される方向は、圧電素子が分極している方向と平行であり、それと垂直な方向は下付の 1 および 2 により表現される。圧電素子に加える電場 E と発生するひずみ $\Lambda = \{\epsilon_{11}, \epsilon_{22}, \epsilon_{33}, \gamma_{23}, \gamma_{13}, \gamma_{12}\}^T$ の関係式は、次のように圧電定数を用いて表される⁹⁾。

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

(2) piezoelectric impedance method

a) piezoelectric impedance method の概要

piezoelectric impedance method では、まず図-1 のように構造物の表面に圧電素子を貼り付けたり埋め込んだりする。このとき、圧電素子は軽量であるため、構造物の動特性に与える影響は小さい。そして、外部から交流電圧を加えることで、逆圧電効果により圧電素子を振動させ、この圧電素子による振動を構造物に伝える。やがて定常状態が形成され、その定常状態を圧電素子は圧電効果により感知して電流を外部に出力することになる。最後に入力電圧と電気的な出力として得られる電流の比からインピーダンスを求め、このインピーダンスの変化から構造物の内

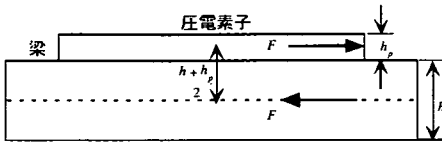


図-3 圧電素子が張りつけられている梁の力の釣り合い

部の状態を押し量る。測定結果として交流電圧の周波数を連続的に変化させたときのインピーダンスが得られる。

この手法を用いることにより、構造物に損傷が生じたり構造物の応力の状態が変化したりすることで生じる構造物の動的な応答の変化を圧電素子により電気的な応答として知ることが可能となる。

一般的に構造物の全体的なモードからは構造物の大局的な特性について知ることができないが、局所的な構造部材の状態について知ることができないとされている¹⁰⁾。 Piezoinpedance法では、外部から交流電圧を加えて構造物内部に高周波を発生させる。高周波数は、減衰しやすいため境界部分の影響は小さく、圧電素子の電気的な出力は、構造物の局所的な動的応答を反映しているといえる。また、圧電素子は小型で設置が容易であることから、通常は接近することが困難な場所のモニタリングをオンライン化する可能性を有している。

土木の分野で多用されているプレストレスが加えられた構造部材の応力や残留応力の状態などをモニターするためには局所的な情報が必要とされる。このような観点から Piezoinpedance法に基づくヘルスマニタリング手法は有効であるといえる。

b) 既往の研究および問題点の抽出

Piezoinpedance法の既往の研究では、実構造物を想定しており、1/4 鋼橋梁模型³⁾、合成コンクリート壁³⁾、重量のあるシリンダー構造の先端部⁴⁾、高精度のギア⁵⁾、宇宙構造物⁶⁾、航空機⁷⁾などを対象としている。

以上のような実構造物を想定する場合は、図-2に示されるバネ・マスモデルを用いて、構造物のインピーダンスと Piezoinpedance法により計測されるアドミッタンス(インピーダンスの逆数)を結びつける以下の式を採用している¹¹⁾。

$$Y(\omega) = i\omega a \left[\bar{\epsilon}_{33}^T (1 - i\delta) - \frac{Z_p(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_p(\omega)} d_{31}^2 E_{11}^E \right] \quad (3)$$

ここで、 ω は角周波数、 Y は電気的なアドミッタンス、 Z_p は圧電素子の力学的なインピーダンス、 Z_s は構造物の力学的なインピーダンス、 E_{11}^E は圧電素子のヤング係数、 d_{31} は圧電ひずみ定数、 $\bar{\epsilon}_{33}^T$ は誘電率、 δ は圧電素子の電気的損失係数、 a は圧電素子の形状に基づく定数である。

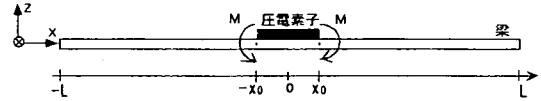


図-4 圧電素子が張りつけられた梁のモデル

既往の研究では、式(3)を用いて構造物内部の状態が変化すると計測されるインピーダンスに変化が生じるということを確認するのみで、定性的な段階に留まっている。また、構造系についてモデル化が十分に行われていないことから、構造物の内部状態に変化が生じる前後での計測が必要であり、計測される電気的特性量と構造物内部状態とを結びつける手法も確立していない。

本研究では圧電素子を用いて、構造物内部状態の変化を定量的かつ絶対的に評価することを目的とする。具体的には、構造物内部の応力状態を検出することを想定している。対象として、張力を受ける薄い梁を取り上げ、モデル化を行い、インピーダンスの周波数応答関数を理論的に導出する。これに、最適化手法を組み合わせることにより、測定結果のみから張力を同定する手法を提案する。

3. Piezoinpedance法のモデル化と梁の張力同定手法

プレストレスコンクリートや斜張橋のケーブルでは、構造物を維持するために張力の正確な計測が必要とされる。ここでは、これらの部材を梁部材と想定してモデル化を行い、さらに梁に加わる張力を Piezoinpedance法により同定する手法を示す。

(1) 圧電素子の力学的挙動のモデル化

圧電素子を図-3のように梁表面の片側に貼り付けられた場合を想定する。圧電素子が下層の梁に対して及ぼす力学的挙動は、圧電素子の端部において局所的なせん断力が存在するなど一般的に複雑なものと思われる。しかし、薄い梁や板に圧電素子を貼りつけて振動を発生させた場合、曲げによる変形が卓越すると考えてよく、曲げモーメントが圧電素子の端部で作用するものとして圧電素子の力学的挙動の単純化を行う¹²⁾。

ここで、圧電素子と梁は一体化しており、ひずみ分布は梁および圧電素子を含めて線形と仮定し、断面における力の釣り合いを考える。圧電素子が貼りつけられている部分のひずみ分布は、 ϵ, z, κ をそれぞれひずみ、中立断面からの距離、曲率とし、上付

きの添字 0 を中立断面における特性, 下付きの添字 p を圧電素子の特性とすると,

$$\varepsilon_p = \varepsilon_p^0 - z\kappa \quad (4a)$$

$$\varepsilon = \varepsilon^0 - z\kappa \quad (4b)$$

となる. 圧電素子の伸縮により発生する力を図-3 のように F と表したとき, 梁および圧電素子の中立断面に発生するひずみは, E, σ, Λ をそれぞれヤング率, 応力, 圧電素子により発生するひずみとすると,

$$\varepsilon^0 = -\frac{F}{EA} \quad (5a)$$

$$\varepsilon_p^0 = \frac{F}{E_p A_p} + \Lambda \quad (5b)$$

となる. Λ は式(2)より求める. 具体的には, 圧電素子の厚さ方向(3 方向)に電圧を加えて, 長さ方向(1 方向)にひずみを生ずることから $\Lambda = d_{31} E_3$ となる.

モーメントの釣り合いは h を厚さとする,

$$F \frac{h_p + h}{2} - [E_p I_p + EI] \kappa = 0 \quad (6)$$

となる. $E_p I_p$ は圧電素子の曲げ剛性を表す. 圧電素子と梁の境界部分においてひずみは連続しているとして,

$$\varepsilon_p^0 + \frac{h_p}{2} \kappa = \varepsilon^0 - \frac{h}{2} \kappa \quad (7)$$

という関係が成立する. 式(4)~(7)を用いて曲率 κ について解くと, 次のようになる.

$$\kappa = \frac{6}{h} \frac{T(1+T)}{6T + 4T^2 + 4 + \psi T^2 + \frac{1}{\psi}} \Lambda \quad (8)$$

ここで, $\psi = Eh/E_p h_p$ は梁と圧電素子の剛性の比を, $T = h/h_p$ は梁と圧電素子の厚さの比を表す.

以上により, 逆圧電効果に基づいた圧電素子が発生するモーメント M_0 は, 式(8)から

$$M_0 = -EI \left[\frac{6}{h} \frac{T(1+T)}{6T + 4T^2 + 4 + \psi T^2 + \frac{1}{\psi}} \right] \Lambda \quad (9)$$

となる. ここで, \bar{EI} は圧電素子が貼り付けられている部分の曲げ剛性を表す. 最終的には, 接着層の影響も反映したかたちで, 同定するパラメータの一つになる. また, 実験では圧電素子を梁へ直接接着するため接着が不十分な場合もあるため, 曲げモーメントの梁への伝達率 a を設定し, 以下のような曲げモーメントが梁に作用するものとする.

$$\bar{M}_0 = aM_0 \quad (10)$$

(2) 曲げ変形を受ける梁のモデル化

a) 曲げ変形の梁の支配方程式

本文3節(1)を受けて曲げモーメントが圧電素子の端部で作用するものとして圧電素子の力学的挙動の

単純化を行う. そこで, 薄い梁では変形が1次元的に生じると見なすことが可能であるため, 図-4 のような曲げモーメントが加えられたときに曲げ変形のみが発生するものとしてモデル化を行う.

圧電素子が $-x_0$ から x_0 の範囲に梁の片側に貼り付けられているとする. 梁の形状は, 幅, 厚さ, 長さがそれぞれ b, h, l とする. また, 梁は均質であり, ベルヌーイ・オイラー梁の仮定を満たすと仮定する. 圧電素子の形状は, 幅, 厚さおよび長さがそれぞれ b_p, h_p, l_p とする. また, 圧電素子と梁は一体に挙動すると単純化するので接着層の影響は無視し, 圧電素子が貼りつけられている部分では, ひずみ分布が断面を通して線形であると仮定する.

圧電素子が発生する集中モーメントの効果は, 圧電素子が貼り付けられている部分と貼り付けられていない部分とに梁を分けて, 切断部における連続性の条件として取り入れることにする. 以上の前提に基づき, 次のような自由振動の方程式を扱う.

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \eta A \frac{\partial w}{\partial t} = 0 \quad (11)$$

ここで, w, E, I, ρ, A, η はそれぞれ変位, ヤング率, 断面2次モーメント, 質量密度, 断面積, 減衰定数, である.

まず, 曲げモーメントが調和振動することを受け, 変位を次のように変数分離する.

$$w(x, t) = \hat{w}(x) e^{i\omega t} \quad (12)$$

式(12)を式(11)に代入すると,

$$EI \frac{d^4 \hat{w}}{dx^4} - (\rho A \omega^2 - i\eta A \omega) \hat{w} = 0 \quad (13)$$

となり, 式(13)の一般解は次のように表される.

$$\hat{w}(x) = \mathbf{A} e^{-ik_1 x} + \mathbf{B} e^{-ik_2 x} + \mathbf{C} e^{+ik_1 x} + \mathbf{D} e^{+ik_2 x} \quad (14)$$

ただし, k は波数であり, スペクトル関係として,

$$k_1 = \left[\frac{\rho A \omega^2 - i\eta A \omega}{EI} \right]^{1/4} \quad (15a)$$

$$k_2 = -i \left[\frac{\rho A \omega^2 - i\eta A \omega}{EI} \right]^{1/4} = -ik_1 \quad (15b)$$

と与えられる.

圧電素子が張りつけられている部分は圧電素子が貼り付けられていない部分と比較すると, 物性が変化するので式(14)よりこの部分の変位 $\hat{w}(x)$ を,

$$\hat{w}(x) = \mathbf{A} e^{-\bar{k}_1 x} + \mathbf{B} e^{-\bar{k}_2 x} + \mathbf{C} e^{+\bar{k}_1 x} + \mathbf{D} e^{+\bar{k}_2 x} \quad (16)$$

と表す. ここで,

$$\bar{k}_1 = \left[\frac{\rho A \omega^2 - i\eta A \omega}{EI} \right]^{1/4} \quad (17a)$$

$$\bar{k}_2 = -i \left[\frac{\rho A \omega^2 - i\eta A \omega}{EI} \right]^{1/4} = -i\bar{k}_1 \quad (17b)$$

であり, 断面の諸量を次のように表す.

$$\bar{A} = A + A_p, \quad \overline{\rho A} = A\rho + A_p\rho_p \quad (18)$$

以上より図-4のモデルにおける一般解は、変位 \hat{w} を用いて次のように表わされる。

$$(-L < x < -x_0) \quad (19a)$$

$$\hat{w}^-(x) = A^- e^{-ik_1 x} + B^- e^{-ik_2 x} + C^- e^{+ik_1 x} + D^- e^{+ik_2 x} \quad (19a)$$

$$(-x_0 < x < x_0) \quad (19b)$$

$$\hat{w}(x) = A e^{-ik_1 x} + B e^{-ik_2 x} + C e^{+ik_1 x} + D e^{+ik_2 x} \quad (19b)$$

$$(x_0 < x < L) \quad (19c)$$

$$\hat{w}^+(x) = A^+ e^{-ik_1 x} + B^+ e^{-ik_2 x} + C^+ e^{+ik_1 x} + D^+ e^{+ik_2 x} \quad (19c)$$

b) 連続性条件と境界条件

式(19)における係数を決定するために、圧電素子両端部における連続性の条件を次のように課す。

(変位)

$$\hat{w}^-(-x_0) = \hat{w}^-(x_0), \quad \hat{w}^+(x_0) = \hat{w}^+(x_0) \quad (20a)$$

(回転角)

$$\hat{w}'^-(-x_0) = \hat{w}'^-(x_0), \quad \hat{w}'^+(x_0) = \hat{w}'^+(x_0) \quad (20b)$$

(曲げモーメント)

$$EI\hat{w}''^-(-x_0) - \overline{EI}\hat{w}''^-(x_0) = \overline{M}_0 \quad (20c)$$

$$-EI\hat{w}''^-(x_0) + EI\hat{w}''^+(x_0) = \overline{M}_0$$

(せん断力)

$$EI\hat{w}'''^-(-x_0) = \overline{EI}\hat{w}'''^-(x_0) \quad (20d)$$

$$EI\hat{w}'''^-(x_0) = \overline{EI}\hat{w}'''^+(x_0)$$

ここで、 \overline{M}_0 は式(10)より求める。また、梁端部における境界条件は、弾性支持境界条件として、

$$-EI \frac{d^2 \hat{w}}{dx^2} + \alpha \frac{d\hat{w}}{dx} = 0 \quad (21a)$$

$$-EI \frac{d^3 \hat{w}}{dx^3} - K\hat{w} = 0 \quad (21b)$$

と与える。ただし、 α, K は回転バネ、鉛直バネの係数である。

以上により、式(19)の未知数である各波動成分の係数に関するマトリクス形式の方程式を得る。

$$[X]\{Y\} = \{Z\} \quad (22)$$

ここで、 $\{Y\}$ は未知数のベクトルであり、次のように表される。

$$\{Y\} = \{A^-, B^-, C^-, D^-, A, B, C, D, A^+, B^+, C^+, D^+\}^T \quad (23)$$

$[X]$ および $\{Z\}$ は、式(20)の連続性条件および式(21)の境界条件から決定されるマトリクスおよびベクトルである。未知数のベクトルである $\{Y\}$ は、

$$\{Y\} = [X]^{-1}\{Z\} \quad (24)$$

として求められる。

梁の中央部に圧電素子を接着するため、 $x=0$ に関する変位の対称性を仮定する。

$$\hat{w}(-x) = \hat{w}(x), \quad \hat{w}'(-x) = \hat{w}'(x) \quad (25)$$

このとき、式(19)の係数の間に次のような関係が成立するとして、計算の簡略化が可能になる。

$$\begin{aligned} A &= C, & B &= D \\ A^- &= C^+, & B^- &= D^+ \\ A^+ &= C^-, & B^+ &= D^- \end{aligned} \quad (26)$$

c) 張力を受ける梁の支配方程式

次に、薄い梁が張力 F_0 を受ける場合は、運動方程式として、次式を用いる

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \eta A \frac{\partial w}{\partial t} - F_0 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad (27)$$

また、スペクトル関係として、

$$k_1 = \left[\frac{-F_0 + \sqrt{F_0^2 + 4EI(\rho A \omega^2 - i\omega\eta A)}}{2EI} \right]^{1/2} \quad (28a)$$

$$k_2 = -i \left[\frac{F_0 + \sqrt{F_0^2 + 4EI(\rho A \omega^2 - i\omega\eta A)}}{2EI} \right]^{1/2} \quad (28b)$$

を用いる。このとき、変位の一般解が式(19)と同様の形式で与えられることになる。

(3) インピーダンスの周波数応答関数の導出

ここでは、ピエゾインピーダンス法により測定されるインピーダンスの周波数応答関数を、本文3節(2)のモデル化により求まる変位 \hat{w} を用いて表すことにする。

まず式(12)のように変数分離を行い、式(1)を次のように表す。

$$\hat{S}_1 = s_{11} \hat{T}_1 + d_{31} E_3 \quad (29a)$$

$$\hat{D}_3 = d_{31} \hat{T}_1 + \epsilon_{33} E_3 \quad (29b)$$

ここで、 $\hat{\quad}$ は変数分離した後の空間の関数を表すとし、電場 E_3 は空間には依存せず、 x 方向の一様な分布を仮定する。式(29a)より \hat{T}_1 について解いて、式(29b)に代入すると、

$$\hat{D}_3 = \frac{d_{31}}{s_{11}} \hat{S}_1 + \left(\epsilon_{33} - \frac{d_{31}^2}{s_{11}} \right) E_3 \quad (30)$$

となる。 \hat{S}_1 は圧電素子の表面に生じる軸方向のひずみであり、式(19b)の変位 $\hat{w}(x)$ を用いて、

$$\hat{S}_1 = -z \frac{d^2 \hat{w}}{dx^2} \quad (31)$$

と表される。ただし、 z は中立軸から圧電素子表面までの距離であり、 $z = h + h_p/2$ である。

調和振動をするときの電気変位と電流の関係は、次式で与えられる。

$$\hat{I} = i\omega \iint \hat{D} dA \quad (32)$$

表-1 供試体の幾何形状

| | 幅[mm] | 厚さ[mm] | 長さ[mm] |
|--------|-------|--------|--------|
| アルミニウム | 20.0 | 1.00 | 1000 |
| 圧電素子 | 約 22 | 0.267 | 20.0 |

表-2 アルミニウムの物性値

| | |
|--------------------------------|----------------------|
| ヤング率 E [N/m ²] | 6.9×10^{10} |
| 密度 ρ [kg/m ³] | 2700 |
| ポアソン比 ν | 0.345 |

表-3 圧電素子の物性値

| 物性 | チタンジルコン酸鉛 Pb(Zr,Ti)O ₃ |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| ヤング率 E_{11}^E [N/m ²] | 6.6×10^{10} |
| 密度 ρ [kg/m ³] | 7840 |
| ポアソン比 ν | 0.310 |
| 圧電ひずみ定数 d_{31} [m/V] | -1.90×10^{-10} |
| 誘電率 ϵ_{33}^T [F/m] | 1.60×10^{-8} |

表-4 測定ケース

| | ケース 1 | ケース 2 |
|----------|---------------|--------|
| 張力なし | 0 kgf | 0 kgf |
| 張力あり | 10 kgf | 8 kgf |
| | 98.0 N | 78.4 N |
| 周波数の変化範囲 | 1000~10000 Hz | |
| 周波数の変化幅 | 10 Hz | |

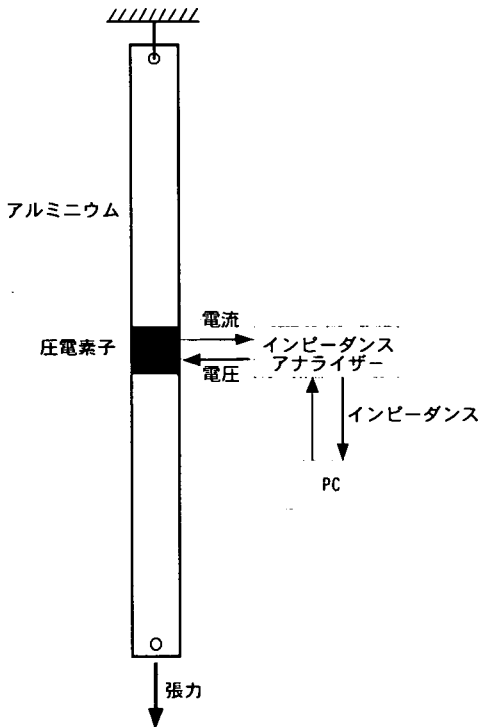


図-5 実験装置の概要

式(31)を式(30)に代入して、さらに式(32)により圧電素子表面について面積分を行い、電圧と電場の関係式である $V = E_3 h_p$ を用いると、

$$\hat{I} = i\omega \left\{ -\frac{d_{31}}{s_{11}^E} b_p z \hat{G} + b_p l_p \left(\epsilon_{33}^T - \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E} \right) \frac{V}{h_p} \right\} \quad (33)$$

となる。ここで、

$$\hat{G} = - \left(\frac{d\hat{w}(x_0)}{dx} - \frac{d\hat{w}(-x_0)}{dx} \right) \quad (34)$$

であり、圧電素子両端部における回転角の差を表し、係数が決定した式(19b)より求まる。

入力として一定電圧 $V = V_0$ を印加したとすると、ピエゾインピーダンス法により計測されるインピーダンス $\hat{Z} = \hat{V} / \hat{I}$ の周波数応答関数は式(34)より、

$$\hat{Z} = \frac{V_0}{i\omega \left\{ b_p l_p \epsilon_{33}^T \frac{V_0}{h_p} - \frac{d_{31}}{s_{11}^E} b_p \left(\hat{G} z + d_{31} l_p \frac{V_0}{h_p} \right) \right\}} \quad (35)$$

と表される。

この式における分母の第1項は、圧電素子のコンデンサとしての特性を表し、また分母の第2項は、圧電素子の電気力学的特性の連成効果を表している。

(4) 最適化手法による未知パラメータの同定

ここでは、構築したモデルに含まれる未知パラメータを同定する手法について述べる。本文3節(5)で述べる梁の張力同定手法も基本的にはこの同定手法を拡張したものである。

梁が張力を受けない場合は、スペクトル関係として式(15)を用いる。未知パラメータとして、式(21)での弾性バネ係数 K, α 、式(11)での梁の減衰 η 、式(18)での圧電素子が貼り付けられた合成部分の剛性 \overline{EI} 式(10)での曲げモーメントの梁への伝達率 a 、実

表-5 実験結果より同定したパラメータの値

| | ケース 1 (10kg) | | ケース 2 (8kg) | |
|---|--------------|----------|-------------|----------|
| | 張力 なし | 張力 あり | 張力 なし | 張力 あり |
| 鉛直バネ係数 K [N/m] | 241360 | 193230 | 192540 | 143320 |
| 回転バネ係数 α [N m] | 1152900 | 718450 | 334260 | 1043300 |
| 減衰定数 η [Ns/m ³] | 238150 | 94483 | 51240 | 101310 |
| 合成部の曲げ剛性 \overline{EI} [N m ²] | 0.37837 | 0.44082 | 0.60794 | 0.54844 |
| 曲げモーメントの 伝達率 a | 0.34073 | 0.21733 | 0.34856 | 0.1608 |
| 圧電素子の幅 b_p [m] | 0.024 | 0.025 | 0.020 | 0.021 |
| 張力 F_0 [N] | — | 99.86 | — | 78.232 |

験状況をふまえて圧電素子の幅 b_p を設定する。

未知パラメータの同定では、次式で定義される評価関数 J を最小化する。

初めに、GA(Genetic Algorithm)¹³⁾を用いて大域的な最小値を求める。次に GA による同定値を初期値として、シンプレックス法¹⁴⁾により収束性の確認を行った。

$$J = \sqrt{\sum_{n=1}^N \frac{(|Z_c| - |Z_a|)^2}{|Z_c|^2}} \quad (36)$$

ただし、 Z_c および Z_a はそれぞれ実験および提案したモデルから得られるインピーダンスであり、 N は離散化した測定周波数の個数である。

また、減衰定数 η の初期値としては、次のように与えた¹⁵⁾。

$$\eta = \omega_0 \times 10^{-3} \times \rho \quad (37)$$

ここで、 ω_0 は変化させる範囲での角周波数の平均値である。

梁が張力を受けない場合に計測されたインピーダンスとここで述べた手法により同定された未知パラメータを用いてモデルから求まるインピーダンスを比較することで、提案するモデルの妥当性を検証することが可能となる。

(5) 梁の張力同定手法

梁が張力を受ける場合は、スペクトル関係として式(28)を用いる。未知パラメータとして、 $K, \alpha, \eta, EI, a, b_p$ および張力 F_0 を設定し、張力を受けない場合と同様にして未知パラメータの同定を行う。これにより、梁に加わる張力を、計測結果の前後比較を必要とすることなく、同定することが可能になる。

4. ピエゾインピーダンス法のモデルと張力同定手法の検証

本文3節で提案した piezoelectric impedance method のモデルおよび梁の張力同定手法の妥当性を検証するために供試体に張力を加える前後でのインピーダンスの計測を行った。計測は、供試体を変更した2ケースについて行った。まず、張力を加える前の計測結果を利用してモデルの妥当性を検証する。次に、張力を加えた後の計測結果を利用して本文中で提案する張力同定手法の妥当性の検証を行う。

(1) 実験概要

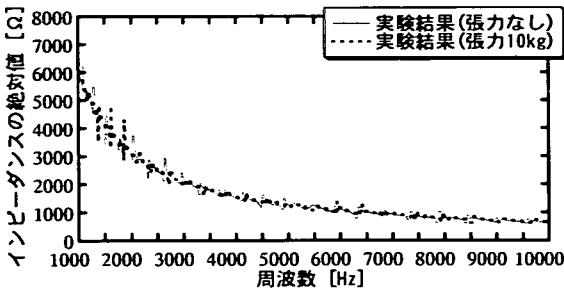
a) 実験方法

今回の実験に供試体として用いたアルミニウムと圧電素子の幾何形状および物性値をそれぞれ表-1、表-2、表-3 に示す。アルミニウムを用いた理由として、材料的に安定し、入手および加工が容易である点が挙げられる。

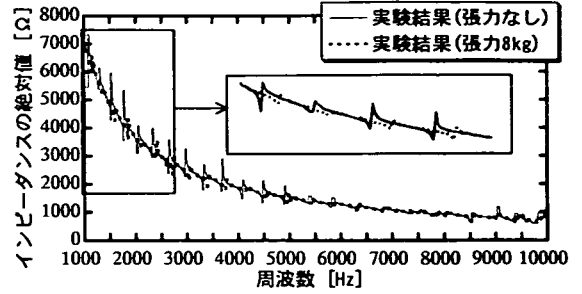
供試体の作成に当たっては、圧電素子をアルミニウムの梁の中央部にシアノアクリレート系の接着剤で接着した。圧電素子は、市販のもの表-1 に示す幾何形状に切り出した。その際、電圧を印加するときに接着層の影響を避けるために、圧電素子の幅を梁の幅よりも若干大きくし、圧電素子の両表面にリード線をはんだ付けした。そのため、インピーダンス同定手法では、式(35)の分母の各項に含まれる圧電素子の幅 b_p を同定するパラメータとして設定した。印加した交流電圧は 10[V] とし、インピーダンスアナライザーにより周波数を連続的に変化させた。作成した供試体は、図-5 のように天井から吊るし、下端部に重りを下げることで張力を加えることにした。

b) 張力を加える前後での計測結果の比較

今回の実験では、材料と張力を変更した2ケースについて計測を行った。表-4 に実験に用いた重りの質量と交流電圧の変化させた周波数範囲を示す。10kgf と 8kgf の重りの重量は、それぞれアルミニウムの降伏引張り強度の 4.4%、3.2% に相当している。重りを変更し、2ケースについて張力を同定するこ

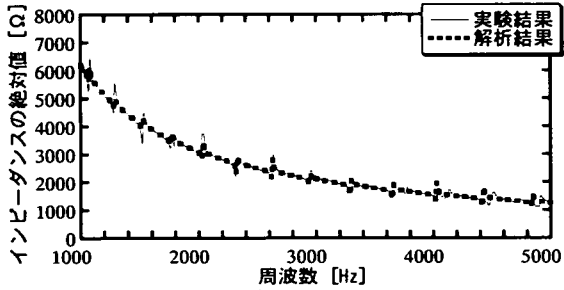


(a) ケース 1

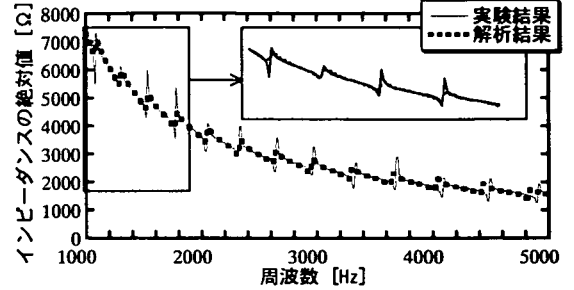


(b) ケース 2

図-6 梁に張力を加える前後での実験結果の比較

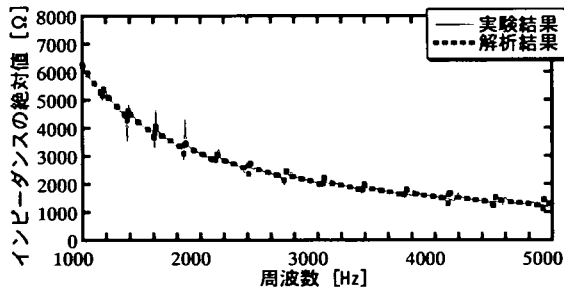


(a) ケース 1

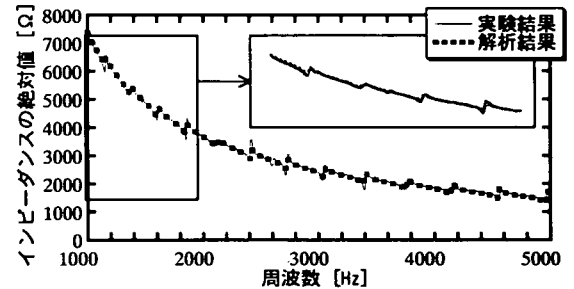


(b) ケース 2

図-7 張力を加えない場合の実験結果と解析結果の比較



(a) ケース 1



(b) ケース 2

図-8 張力を加える場合の実験結果と解析結果の比較

とで、張力の変化量を検出することが可能かどうか確認できる。周波数の変化幅は10Hzとした。

図-6に供試体を変更して、張力を加える前後でのインピーダンスの計測結果を示す。また、同図(b)に1000Hz~2000Hzの範囲を拡大したグラフを示す。張力を加える前後での計測結果を比較すると、ピークの形状に着目することで、グラフが全体的なかたちを保ったまま、周波数軸方向に平行移動していることがわかる。これは、薄い梁では、張力を加えることにより変形が全体に一樣に生じることによるためであると思われる。

(2) ピエゾインピーダンス法のモデルの検証

ここでは、本文3節で構築したモデルを張力同定手法に適用させるのに先立ち、張力を加える前の計

測結果と最適化手法により同定された未知パラメータを用いてモデルにより得られる解析結果を比較することで、モデルの妥当性の検証を行う。

実験では周波数を1000Hz~10000Hzの範囲で変化させて計測を行ったが、計測されたインピーダンスのピーク位置が明確となった1000Hz~5000Hzの範囲を採用した。また、10000Hz以上の周波数範囲でも実験を試みたが、計測結果に明確なピークが現れなかった。

a) 実験結果と解析結果の比較

張力を加える前の計測結果を用いて同定したケース1、ケース2のパラメータの値を表-5に示す。また、同定した未知パラメータを用いた解析結果と実験結果の比較を図-7に示す。解析における周波数の変化幅は、実験での変化幅に合わせて10Hzとした。

また、同図(b)に 1000Hz～2000Hz の範囲を拡大したグラフを示す。

ケース 1 とケース 2 の実験結果を比較すると、計測されたインピーダンスの絶対値は縦軸方向の移動が生じている。これは、それぞれのケースにおいて供試体が異なり、圧電素子の梁への接着や圧電素子の幅が異なることによるものと思われる。しかし、提案するモデルのように未知パラメータを設定し、最適化手法を利用することで、式(35)のみを用いて計測されるインピーダンスを再現することが可能となる。

図-7 から、提案したモデルにより、ケース 1、ケース 2 それぞれの実験結果が概ね再現されていることがわかる。ケース 1 とケース 2 を比較すると、ケース 2 の方が精度良く再現されていることから、提案する張力同定手法から求まる張力の値も精度良く同定されることが期待される。

b) 考察

図-7 において、実験結果と解析結果のグラフの全体的な傾向は概ね一致しており、低い周波数の範囲では、圧電素子の共振により発生するピーク位置も正確に再現されている。このことから本文で提案するモデルの妥当性が示されるものと思われる。しかし、図-7 に見られるように周波数が高くなるにつれてピーク位置にずれが生じている。この原因としては次のような理由が考えられる。

- 1) 実験では梁の上端部と下端部で境界条件が異なるが、モデル化では式(25)のように梁の中央部に関して変位が対称に発生すると仮定した。また、両端部の境界条件を同一に扱った。
- 2) 供試体上端を吊るすかたちにしたため圧電素子の振動により面外のねじれなどの曲げ以外の振動が発生している。
- 3) 供試体両端に開けた穴により波動が散乱を受けている。
- 4) 圧電素子の物性値の周波数依存性を考慮していない。
- 5) 高周波領域では、その影響が顕著となるせん断変形および回転慣性の影響をモデルの中で考慮していない。
- 6) 圧電素子と梁の間に存在する接着層の影響を考慮していない。また、はんだの存在による剛性の変化もある。

次に、同定されたパラメータについて考察を加える。

- 1) バネ係数および減衰定数には、ばらつきが生じている。これは、供試体の梁の両端部に穴を開け、一方を天井から吊るし、他方は張力を加える場合に重りを吊るしているため、境界条件は固定端と自由端の間にあり断定できない。また、ケース 1、ケース 2 では供試体を変更している。

これら実験状況の違いに基づきばらつきが生じているものと思われる。

- 2) 合成部の曲げ剛性を合成梁として評価すると、0.23 となる。供試体に用いた圧電素子の縦と横の長さがほぼ同じであり、リード線のはんだ付けの影響もあることから、合成部の曲げ剛性は大きめに評価されている。
- 3) 曲げモーメントの伝達率は、この値が 1.0 のときに、曲げモーメントが梁に完全に伝達することになる。同定結果では、合成部の曲げ剛性が大きく評価されていることに基づき、1.0 の値よりも小さくなっている。また、張力が加わる場合は、ケース 1 およびケース 2 ともに曲げモーメントの伝達率は張力を加えない場合と比較すると小さくなっている。
- 4) 圧電素子の幅は、2cm～2.5cm の間にあるのだが、ケース 1 およびケース 2 ともにこの範囲に含まれている値が同定されている。また、張力を加える前後で、それぞれのケースについてほぼ同じ値が同定されている。

以上より、本手法から同定された合成部の曲げ剛性、曲げモーメントの伝達率、圧電素子の幅の値は、実験状況と照らし合わせて見ると妥当であるといえる。また、各計測ケースでは実験状況が異なり、境界条件を断定できないことから、バネ係数および減衰にばらつきが生じている。しかし、モデルに含まれる未知の影響をパラメータとして計測結果から同定し、さらに同定したパラメータの値を用いることで、計測結果をほぼ正確に再現することが可能になる。張力の値も真値に近いものとして同定されたことから提案した張力同定手法は有効といえる。

また、式(21)で用いた弾性バネ係数 α, K の値が大きくなるのに伴い、解析結果によるグラフが高周波数側に移動していくことが確認された。これは、高周波になるにつれて、境界部分において波動が自由端としての影響よりも固定端としての影響を受けやすくなるのが原因と思われる。

(3) 張力同定手法の検証

本文 4 節(2)において計測結果を用いて未知パラメータを同定し、解析的に計測結果を再現することが可能となったことから、モデルの妥当性が確認された。ここでは、張力を加えた後の計測結果を利用して、本文 3 節で提案する張力同定手法の妥当性を検証する。

幾何形状を同一にして作成した 2 つの供試体それぞれに 10kgf と 8kgf の重りを吊り下げることで張力を与えた。張力を加えた後の計測結果を用いて同定したケース 1、ケース 2 のパラメータの値を張力の値を含めて表-5 に示す。また、これらのパラメータを用いた解析結果と実験結果の比較を図-8 に示す。

また、同図(b)に 1000Hz~2000Hz の範囲を拡大したグラフを示す。

張力を加える場合に同定されるインピーダンスは、張力が加わることで梁全体が均一の状態に近づくことから、図-8 に見られるように精度良く同定されている。

表-5 より同定された張力の値の誤差は、ケース 1 では 1.9%、ケース 2 では 0.2%であり、両ケースとも張力の値は精度良く同定されていることがわかる。また、張力を加えない場合のインピーダンスが精度良く同定されたケース 2 の方が、張力の値が精度良く同定されている。

5. まとめ

本研究では、 piezoelectric impedance method により梁に作用する軸方向張力を計測される電気的特性量から定量的かつ絶対的に評価する手法を構築し、小型供試体実験によりその適切性を確認した。よって、まとめると以下ようになる。

- 1) 圧電素子が片側に貼りつけられた薄い梁のモデルを構築し、電気的インピーダンスの周波数応答関数を理論的に導出した。その結果、未知パラメータを計測結果から最適化手法を用いて同定することにより、計測されるインピーダンスを再現することが可能となった。また、当初は減衰の効果により境界部分の影響は十分に小さいと想定されたが、パラメータとして境界部分の影響を含むことにより、長さが 1m のアルミニウムの供試体ではその効果が現れることが明らかになった。これは、piezoelectric impedance method における圧電素子のセンサとして機能する領域が金属の梁では約 2m とする既往の研究を確認した形となる¹⁶⁾。
- 2) piezoelectric impedance method により梁に加わる軸方向張力を前後比較を、必要とすることなく最適化手法を用いて絶対値を同定する手法を構築した。その結果、供試体の降伏引張り強度と比べると十分に小さい張力値を精度良く同定することが可能となった。

圧電素子に印加する電圧および圧電素子の幾何形状を変更することで、大きな振動を発生させることが可能になる。また、圧電素子を単一ではなく、複数用いることも考えられる。実験による検証では、薄い梁という単純な部材を用いたが、変形を一次元と見なせるプレストレスのケーブルや鉄道のレールなどに加わる張力のモニタリングに本手法を応用させることが可能であると思われる。

今後は、実構造物への適用を見据え、多様な応力

損傷状態を想定した実験により piezoelectric impedance method をさらに把握していくことが必要である。特に圧電素子の力学的挙動、圧電素子と構造物間の接着層の影響、構造物内部の波動伝播特性の把握、構造物の状態と圧電素子の応答の関係などについて研究を進めていくことで、圧電素子を損傷検出センサとして様々な用途に応用させていくことが可能になると思われる。

付録 piezoelectric impedance method による梁の簡易張力同定手法¹⁷⁾

本文では、最適化手法を用いることにより計測結果の前後比較を必要とすることなく、張力を同定する手法を示した。ここでは、張力を加える前後での piezoelectric impedance method による計測結果を既往の研究と同様に相対的に前後比較することで、梁に加わる張力を同定する手法を示す。この手法は、張力と周波数を簡単な式で表す。本文の手法と比較すると、パラメータを同定する必要はなく、計測結果のグラフを読み取るだけで良いことから適用が容易であるという利点を有している。

(1) 梁の簡易張力同定手法

本手法は、具体的には式(27)の張力を受ける梁の曲げ変形の方程式から周波数の変化量と張力の変化量を結びつける。張力を加える前後でのインピーダンスの計測結果から周波数の変化量を求め、そこから梁に加わる張力の変化量を求めるというものである。

式(28)のスペクトル関係より、張力や圧縮力が作用することで、同一波数の波動の周波数が変化することがわかる。ただし、以下では簡単のために式(28)に含まれる減衰は考慮しないことにする。

式(28a)において張力が作用していないときの角周波数を ω_0 として波数 k について解くと、

$$k^2 = \frac{\alpha\omega_0}{EI} \quad (38)$$

となる。ここで、 $\alpha = \sqrt{EI\rho A}$ とする。

次に、張力 F_0 が作用して角周波数が ω_0 から ω_1 に変化したとすると、式(28a)より波数は次のようになる。

$$k^2 = \frac{-F_0 + \sqrt{F_0^2 + 4\alpha^2\omega_1^2}}{2EI} \quad (39)$$

さらに、張力が $F_0 + \Delta F_0$ と変化して、角周波数が ω_2 に変化したとすると、式(39)より、

$$k^2 = \frac{-(F_0 + \Delta F_0) + \sqrt{(F_0 + \Delta F_0)^2 + 4\alpha^2\omega_2^2}}{2EI} \quad (40)$$

表-6 簡易張力同定手法による張力同定結果

| | ケース1 | | ケース2 | |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 厳密式 | 近似式 | 厳密式 | 近似式 |
| 重りの質量 | 10 kgf | | 8 kgf | |
| | 98.0 N | | 78.4 N | |
| 同定した張力 | 99.0 N | 94.1 N | 78.5 N | 75.5 N |
| 相対誤差 | 1.0 % | 3.9 % | 0.1 % | 3.7 % |

となる。式(38)と式(39)、式(39)と式(40)が等しいとしてそれぞれ $F_0, \Delta F_0$ について解くと、

$$F_0 = \frac{\alpha(\omega_1^2 - \omega_0^2)}{\omega_0} \quad (41a)$$

$$\Delta F_0 = \frac{2\alpha^2(\omega_2^2 - \omega_1^2)}{-F_0 + \sqrt{F_0^2 + 4\alpha^2\omega_1^2}} \quad (41b)$$

を得る。これらの式より張力の変化が波動の角周波数変化に直接関係していることがわかる。

ピエゾインピーダンス法では一般的に高周波の波動を扱い、部材に加えられる張力や圧縮力よりも梁の剛性が十分に大きいと考えられるので、

$$\left| \frac{F_0}{\alpha} \right| \ll O(\omega) \quad (42)$$

という近似が可能である。また、次式のように周波数の変化は測定を行う周波数の大きさよりも十分に小さいとすると、次のような近似が可能である。

$$|\omega_2 - \omega_1|, |\omega_1 - \omega_0| \ll O(\omega_0, \omega_1, \omega_2) \quad (43)$$

以上の近似により、厳密式である式(41)は次のような近似式となる。

$$F_0 \approx 2\alpha(\omega_1 - \omega_0) \quad (44a)$$

$$\Delta F_0 \approx 2\alpha(\omega_2 - \omega_1) \quad (44b)$$

式(44)は、張力と周波数変化の関係が線形関係で与えられるため適用が容易になる。

張力の同定を行うためには、式(44)の右辺に示されている周波数の変化量が必要となる。この周波数変化量をピエゾインピーダンス法により求める。具体的には、交流電圧の周波数を連続的に変化させることで作成した周波数-インピーダンスのグラフには、構造物の内部状態が変化すると、計測されたグラフに変化が生じる。変形を一次元と見なすことができる部材では、変形が一樣に起こるため、インピーダンスのグラフは全体的な形式を保った上で、平行移動が生じる。このグラフの平行移動量から、周波数の変化量 $\Delta\omega$ を読み取り、式(44)を用いて、左辺の張力の変化量 $F_0, \Delta F_0$ を算出することになる。

(2) 実験による妥当性の検証

梁に張力を加える前後での実験結果の比較である図-6を見ると、張力を加える前後のグラフには、全体的なかたちを保った上での平行移動が見られる。図-6のグラフより圧電素子の共振によるピークを手がかりとして、周波数の平均変化量を求め、厳密式(41a)および近似式(44a)により同定した張力の値を表-6に示す。

表-6の結果より計測結果の前後比較を行う本手法により張力の値が精度良く同定されていることがわかる。この手法では、式(44)のような簡単な式により、計測結果を比較することで張力を同定することが可能になる。しかし、共振位置の読み取りに任意性が含まれることや、現計測結果のみから張力を同定することができないなどの問題点がある。

参考文献

- 1) 山本鎮男：ヘルスマニタリング，共立出版，1999。
- 2) 貝戸清之，阿部雅人，藤野陽三：レーザー常時微動計測手法の構築と構造物の損傷検出へ，土木学会論文集，No. 689/I-57, pp. 183-199, 2001。
- 3) Park, G., Cudney, H. and Inman, D.J.: Impedance-based Health Monitoring for Civil Structures, *Proceedings, 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring*, Stanford, CA, pp.523-532, 1999。
- 4) Park, G., Harley, H.C. and Inman, D.J.: Impedance-based Health Monitoring Technique for Massive Structures and High-temperature, *Proceedings, 6th SPIE Conference on Smart Structures and Materials*, Newport Beach, CA, SPIE Publishing, pp.461-469, 1999。
- 5) Lalonde, F., Childs, B., Chaudhry, Z. and Rogers, C.A.: High-Frequency Impedance Analysis for NDE of Complex Precision Parts, *Proceedings, SPIE Conference on Smart Structures and Materials*, San Diego, CA, SPIE Publishing, Vol. 2717, pp.237-245, 1996。
- 6) Sun, F., Chaudhry, Z., Liang, C. and Rogers, C.A.: Truss Structure Integrity Identification Using PZT Sensor-Actuator, *Journal of Intelligent Material Systems and Structure*, Vol.6, pp.134-139, 1995。
- 7) Chaudhry, Z., Joseph, T., Sun F. and Rogers, C.A.: Local-Area Health Monitoring of Aircraft via Piezoelectric Actuator/Sensor Patches, *Proceedings, SPIE 1995 North American Conference on Smart Structures and Materials*, San Diego, CA, Vol. 2443, pp.266-276, 1995。
- 8) 上垣外修己，神谷信雄：セラミックスの物理，内田老鶴園，1998。
- 9) Crawley, E.F. and Anderson, E.H.: Detailed Models of Piezoceramic Actuation of Beams, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.1, pp.4-25, 1990。
- 10) Abé, M.: Structural monitoring using vibration measurement - current practice and future -, in *Artificial*

- Intelligence in Structural Engineering*, Ian Smith, ed, Lecture Notes in Artificial Intelligence 1454, Springer, pp.1-18,1998.
- 11) Liang, C., Sun, F. and Rogers, C.A. : Coupled Electromechanical Analysis of Adaptive Material System – Determination of Actuator Power Consumption and System Energy Transfer, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.5, pp.21-20, 1994.
- 12) Chaudhry, Z. and Rogers, C.A. : The Pin-Force Model Revisited, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.5, pp.347-354, 1994.
- 13) Jang, J. -S.R., Sun., C.-T. and Mizutani, E. : *Nuero-Fuzzy and Soft Computing*. Prentice-Hall, 1997.
- 14) Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsky, S.A. and Vetterling, W.T. (丹慶勝市, 奥村晴彦, 佐藤俊郎 訳) : *Numerical Recipes in C* [日本語版], 技術評論社, 1994.
- 15) Doyle, J. F. : *Wave Propagation in Structures*, 2nd ed., Springer, 1997.
- 16) Park, G., Cudney, H. and Inman, D.J. : Impedance-based Health Monitoring of Civil Structural Components, *Journal of Infrastructure Systems*, Vol.6, pp.153-160, 2000.
- 17) Abe, M., Park, G. and Inman, D.J. : Impedance-based Monitoring of Stress in Thin Structural Members, *11th International Conference on Adaptive Structures and Technologies*. Nagoya, pp.285-292, 2000.

(2001. 11. 18 受付)

TENSILE FORCE IDENTIFICATION IN BEAM BY PIEZO-IMPEDANCE METHOD

Takeshi MIYASHITA, Masato ABE and Yozo FUJINO

This paper presents a fundamental study of structural health monitoring technique called the piezo-impedance method, which utilize an electromechanical property of piezoceramics. For a thin beam with tensile force, an analytical model of the piezo-impedance method is developed on the basis of the wave propagation theory. Also, a tensile force identification method in a thin beam is proposed. An experiment is performed with small test pieces of beam to investigate a validity of the proposed method and it is found that analytical results are in good agreement with experimental measurement results and absolute value of the tensile force is identified with accuracy. By using the proposed method, it is possible to identify tensile force in a beam from only one measurement.