

圧電素子を用いた縦弾性波計測による構造物の損傷監視と位置同定*

江 鐘 偉^{*1}, 西村 浩一^{*2}, 長南 征二^{*3}

Structural Damage Monitoring and Localization with Longitudinal Wave Measuring Technique by PZT Patches

Zhongwei JIANG^{*4}, Koichi NISHIMURA and Seiji CHONAN

^{*4} Department of Mechanical Engineering, Yamaguchi Univ.,
2-16-1 Tokiwadai, Ube-shi, Yamaguchi, 755-8611 Japan

This paper presents a practical and quantitative technique for assessment and localization of infancy damages in a structure by measuring the impedance change of piezoelectric patches which were glued on the structure. The consideration of longitudinal wave propagation in structures is introduced for quantitative assessment of damage characteristics because the corresponding frequency regions are easily determined with longitudinal wave propagation analysis. It is shown that the damage location can be simply estimated by measuring the PZT's electric impedance and comparing with the longitudinal strain mode shape functions in the healthy structure.

Key Words: Structural Health Monitoring, Assessment of Damage Location, Impedance-Based Technique, Piezoelectric Sensor/Actuator, Longitudinal Wave Propagation

1. 結 論

最近, トンネルのコンクリートの落下事故や橋, 高速道路の破損事件がしばしば報道されている。このような大型構造物の急速な老朽化や機械システム・構造物のインテリジェント化に伴い, 米国を始め日本においても大型構造物の非破壊検査やヘルスマonitoringに関する研究がますます盛んになってきている。特に構造物やインフラストラクチャーでの初期損傷を早期的に発見することは大惨事を未然に防ぐことにつながるため, 構造物のヘルスマonitoring技術の開発が強く求められている。

このようなニーズに対応するため, 近年超音波プローブや光ファイバー, 渦電流, 磁場, 圧電素子などを用いた計測探傷法の研究が数多くなされている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。その中モード解析を利用した手法が最も多く, ここ数十年でたくさんの有効な手法が開発されている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。これらの手法では損傷の存在による構造物の共振周波数の変化を利用しており, 特に低周波数領域において共振周波数の変化が比較的に大きくなる大きな損傷に対して良い結果を得ている。しかしながら, モード解

析では高周波領域での誤差が大きくなるため, 微小な損傷の検出は困難である。一方, 初期損傷や微小損傷の発見に有効である高周波駆動技術による構造物ヘルスマonitoringの手法として, 圧電素子をセンサかつアクチュエータとして用いたインピーダンス計測法が注目されている⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。その基本原理は, 構造物の機械的インピーダンスと構造物に貼り付けた圧電素子の電氣的インピーダンスが持つ関係を利用して, 圧電素子の電氣的インピーダンスを記録することで構造物中の損傷による物理的変化(機械的インピーダンスの変化)を察知するものである。この手法では, 高周波数に適する圧電素子を用いるため, 一般に高精度に計測困難な構造物の機械的インピーダンスの変化を容易に計測でき, 小さな欠陥や初期的な損傷の発生を圧電素子の電氣的インピーダンスの変化により察知することが可能である。しかしながら, 現時点では損傷の状態の定性的評価にインピーダンス計測技術の導入についていくつかの研究報告が発表されているが, 定量的な計測評価法は未だに確立されていない。

以上の点に鑑み, 圧電素子を用いたインピーダンス計測による損傷状態の定量的な評価を行うには, 特徴的な現象を如何に抽出するかが肝要である。本研究では特徴的かつ評価に適するインピーダンス波形を容易に選出するため, 縦弾性波の伝播原理を導入し, また, 仮想的な損傷として構造物に微小応力を定量的に負荷できる小器具を用い, 仮想的な損傷とみなす応力

* 原稿受付 2000年9月7日。

^{*1} 正員, 山口大学工学部(〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)。

^{*2} JR 東海(元: 東北大学大学院)

^{*3} 正員, 東北大学大学院工学研究科。

E-mail: jiang@po.cc.yamaguchi-u.ac.jp

負荷状態変化と素子のインピーダンス応答の関係を詳細に調べ、さらに縦弾性波によるひずみ分布との関係から応力負荷位置の検出法を提案する。

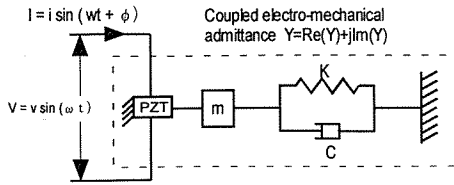


Fig.1. Concept of impedance measuring technique for a structure embedded with a PZT patch.

2. インピーダンス計測法と計測システム

構造物に損傷が存在すると、健康状態時に比べ構造物の機械的インピーダンスが変化する。本研究では、一般に計測困難とされる機械的インピーダンスの微小変化を、構造物に貼りつけてある圧電素子の電気的なインピーダンス変化を計測することにより構造物の機械インピーダンスを推測するインピーダンス技術を導入する。圧電素子を取りつけた構造物のモデルを図1のように考えると、圧電素子のアドミタンス Y (電気的インピーダンスの逆数) は構造物の機械的インピーダンス Z_s を用いて次式で表される。

$$Y = i\omega \frac{w_a l_a}{h_a} \left[\epsilon_{33}^T (1 - i\delta) - \frac{Z_s(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 Y_{xx}^E \right] \quad (1)$$

Z_a と Z_s はそれぞれ圧電素子と構造物の機械的インピーダンス、 Y_{xx}^E は圧電素子の電界が 0 (kV/m) の時のヤング率、 d_{3x} は任意の x 方向についての等価圧電定数、 ϵ_{33}^T は誘電定数、 δ は圧電素子の誘電損失率、 w_a 、 l_a 、 h_a はそれぞれ圧電素子の幅、長さ、厚さである。

式(1)において、圧電素子の機械的インピーダンスが一定と考えられると、構造物の機械的インピーダンスの変化は圧電素子の電気的インピーダンス ($1/Y$) の変化を支配していることがいえる。従って、構造物の機械的インピーダンスの値は、それに貼りつけた圧電素子の電気的インピーダンスの計測を通して得ることができる。本研究で行うインピーダンス計測法とは、この"損傷", "構造物の機械的インピーダンス", "圧電素子の電気的インピーダンス"の3者の関係を用いて、圧電素子の電気的インピーダンスの計測を行うことにより、構造物の損傷状態を評価しようというものである。

図2に示すように、基礎実験として構造物の基本要素である真鍮製はりを使用し、境界条件や外乱による

影響をできるだけ少なくするため、真鍮はりを発砲スチロールにより支持し、両端自由の境界条件として解析できる状態にした。また、はりに縦弾性波のみを発生するように、はりの裏表対称の位置に圧電素子 (25x25mm) が1枚ずつ貼り付けてあり、2枚の素子を同位相で駆動させる。計測システムの概略を図3に示す。圧電素子のインピーダンス計測は、インピーダンスアナライザー (HP 4194A) を用いて行った。また、定量評価法を確立するため、仮想損傷として U 字型の金具とボルトそしてナットから成る簡単な締め付け装置を作成し、構造物に負荷する応力は締め付けねじにトルクを定量的に与えることで調整できるようにしている。

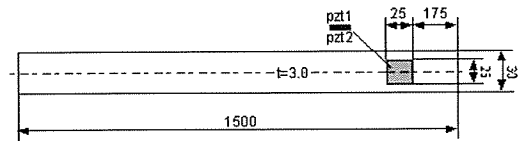


Fig.2. Test piece of a brass beam embedded with two piezoelectric patches.

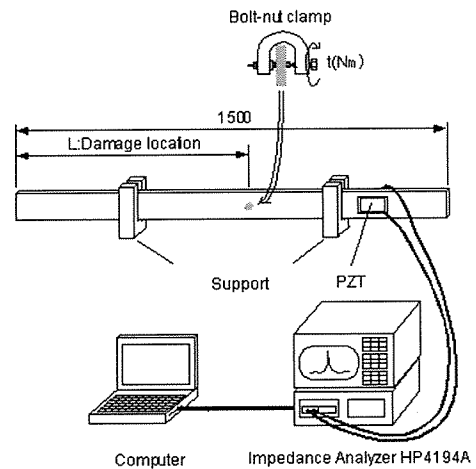


Fig.3. Experimental impedance measuring system.

図4は図2に示す真鍮はりに対して圧電素子に印加する電圧を 0~80 kHz まで掃引した場合のインピーダンス実部の応答である。さて、本真鍮はりを両端自由と考えた場合その縦振動の基本周波数は

$$f_0 = c / 2l = 1.206 \text{ kHz}$$

である。ここに、 c は縦弾性波の伝播速度、 l ははりの長さである。図4によると、約 50 kHz まではインピーダンスピークがちょうどこの基本周波数の整数倍に対応していることが分かる。ちなみに 50 kHz 以上

では真鍮製の幅による影響が現れてきて縦弾性波の基本周波数の整数倍とならなくなる。従って、両圧電素子をペアで駆動し、縦弾性波を発生させることは、比較的到高次縦振動モードまで容易に識別と抽出できることがいえる。また、インピーダンスアナライザにより測定されるインピーダンス信号には実部と虚部があるが、インピーダンス実部の信号が構造物の機械的インピーダンスの変化に対してより高感度であるため、本研究では以下インピーダンス実部の波形を使用して構造物の損傷状態との関係を調べ、損傷状態を定量的に評価する方法を探索する。

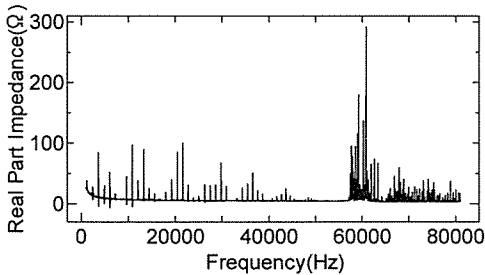


Fig.4. Frequency response to real part impedance of PZTs embedded on a healthy beam.

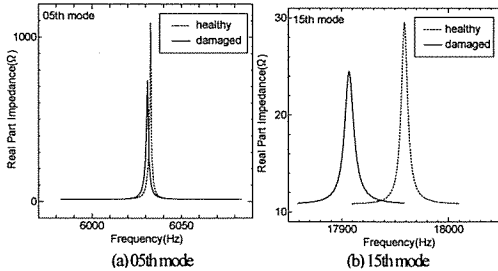


Fig.5. Impedance variations of the beam with a bolt-nut clamp at location $L = 700$ mm ($T = 1.0$ Nm).

3. 微小損傷位置の計測と同定法

図5は、仮想損傷としてある位置に締め付け装置を取り付け一定トルク ($T = 1.0$ Nm) を負荷した構造物に対して測定したインピーダンス結果の1例である。図5に示す5次縦振動モードと15次モードのインピーダンス変化の様子を見ると、5次モードよりも15次モードのピーク周波数が大きくシフトしていることが分かる。このことから、インピーダンスの変化を計測することで、応力変化という微小損傷の存在を適切な波動モードで察知することが可能であるといえる。以下ではインピーダンスの変化を数値的に表すため、図6に示すようにインピーダンスピーク周波数シフト量を

ΔF (健康時に比べ小さくなるものをマイナス、大きくなるものをプラス)、インピーダンスピーク値の大きさの変化量を A/A_0 と定義する。

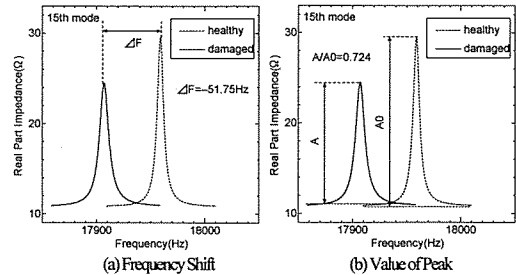


Fig.6. Definition of Frequency Shift and Value of Peak.

さて、圧電素子のインピーダンス測定値から損傷位置を計測同定する手法を確立するため、負荷応力の大きさを一定 ($T = 1.0$ Nm) とし、応力の負荷位置を変化させながら、素子のインピーダンスの変化を測定した。

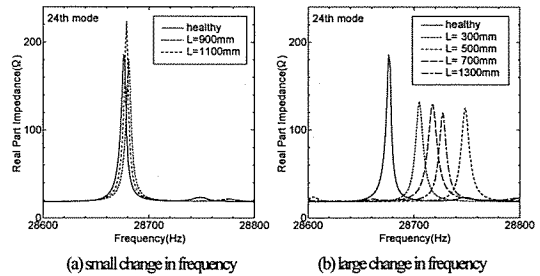


Fig.7. Frequency shift of impedances at the 24th mode as loading a clamp at several locations on the beam.

応力負荷位置をそれぞれ $L = 300, 500, 700, 900, 1100, 1300$ mm とした場合の24次縦振動モードの測定結果を1例として図7に示す。図7を見ると、応力の負荷位置によってピーク周波数がシフトする位置としない位置があることが分かる。比較するため、正常時はりの24次モードに対して正規化したひずみの変化(最大値を1とした場合)を図8に示す。図中の○印は $L = 300, 500, 700, 900, 1100, 1300$ mm の位置情報に対応している。図7と図8を比較すると、応力を負荷してもインピーダンスピーク周波数がほとんどシフトしない位置 $L = 900, 1100$ mm は、正常時はりのひずみが最大となる位置付近にあり、それに対し、インピーダンスピーク周波数が大きくシフトしている負荷位置 $L = 500$ mm は、正常時のひずみが最も小さい位置であることが分かる。これより、応力負荷時のインピーダンス波形変化は応力負荷位置でのひずみの大きさに依存することが考えられる。この現象については次のように説

明される。ひずみが大きい位置では、振動による大きな内部応力が働いている。そこに外部から微小な応力が負荷された場合、内部応力が大きいため、その影響はインピーダンスの変化に現れにくく、逆に内部応力が小さい位置、すなわちひずみの小さい位置に外部から微小な応力が負荷されると、その影響がインピーダンスの変化に敏感に現れてくることと考えられる。

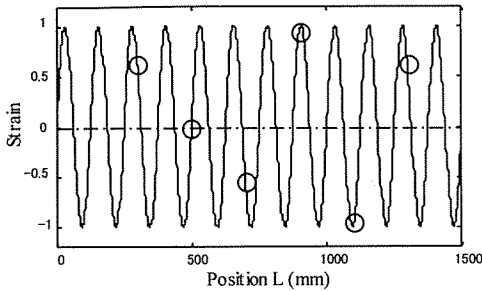


Fig.8. Strain mode shape of the 24th longitudinal wave.

次にこの現象を利用して応力の負荷位置の同定方法を考える。応力の負荷位置同定には、応力がひずみの大きい位置に負荷される時のインピーダンス変化は小さいことを考慮すれば、インピーダンス波形変化が小さいモードの情報を用いることが有効である。従って、損傷位置の同定について次の手順を提案する。

- (a) 各縦弾性波モードにおける圧電素子のインピーダンスを測定し、その変化の有無を確認する。
- (b) インピーダンス波形変化の小さいモードを選択する。
- (c) 選ばれたモードのひずみモード関数を重ねて描き、ひずみの最大部分が重なっている位置を探す。

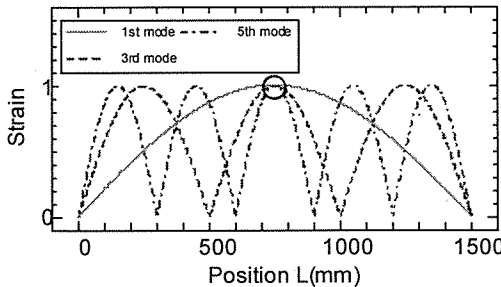


Fig.9. Concept of damage localization using strain mode shapes.

図9は応力負荷位置の同定概念を示したものである。例えば、計測結果から波形変化の小さいモードとして、1, 3, 5次モードが選ばれたとすると、それぞれのひずみモードを重ねて描き、ひずみの最大値付近で重なる位置(○印)は応力の負荷位置となる。

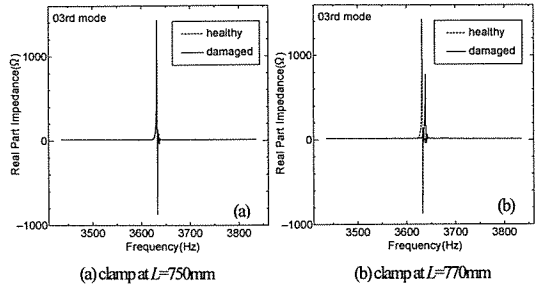


Fig.10. Impedance variations due to clamp locations.

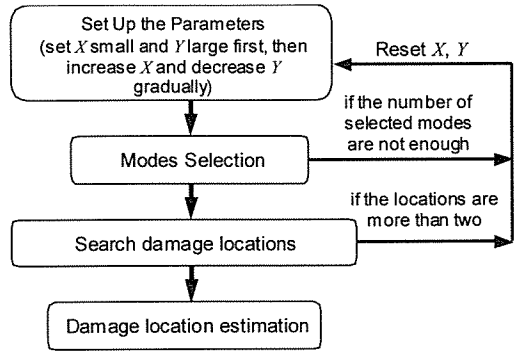


Fig.11. Procedure for damage localization by impedance measurement and strain mode shapes.

上述した波形変化の小さいモードを応力の負荷位置同定に利用する方法を提案したが、インピーダンス波形変化の大小を決めるには定式化が必要がある。ここで、波形変化が小である条件として、 $\Delta F, A/A_0$ を用いて以下のように定義する。

$$|\Delta F| \leq X, A/A_0 \geq Y \quad (0 \leq Y \leq 1) \quad (2)$$

上式のパラメータ値 X, Y の設定によっては、選ばれたモードが持つ位置情報の質、選ばれるモード数はかなり変化する。図10には、ある位置に応力を負荷した時の3次モードインピーダンス波形を示している。図10(a)は3次モードでひずみが最大となる位置 $L=750\text{mm}$ に応力を負荷した時の波形、(b)はひずみが最大となる位置から 20mm 離れた位置 $L=770\text{mm}$ に応力を負荷した時の波形である。 X を小さく ($X \rightarrow 0$)、 Y を大きく ($Y \rightarrow 1$) 設定すると、図10(a)のようなほとんど変化していない波形のみを選び出すこととなり選ばれたモードが持つ位置情報の精度は高いものになる一方、選ばれるモード数が少なくなる。一方では、 X を大きく、 Y を小さく設定すると、図10(b)のような少し変化している波形をも選び出すこととなり選ばれたモードが持つ位置情報の精度は低いものとなるが、選ばれる

モード数は多い。応力の負荷位置を同定するには、パラメータ値 X , Y の設定を十分考慮しながらモードの選定を行わなければならない。以上より、パラメータ値 X , Y の設定方法については次のことを提案する。最初は位置情報の精度が高いモードを選び X : 小, Y : 大とし、選ばれるモードの数が少ない場合は X をやや大きく, Y をやや小さくしていく。図 11 にはパラメータの設定ならびに損傷位置検出ためのフローチャートを示す。

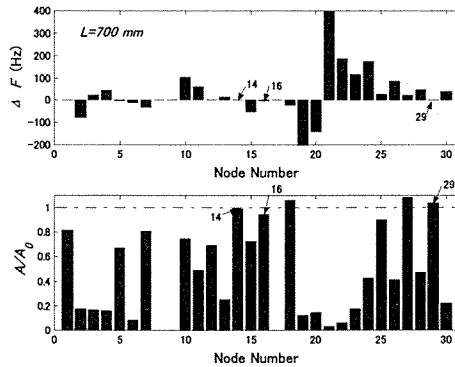


Fig.12. Frequency Shifts (upper) and Peak Values (lower) to the longitudinal wave modes from 1st to 30th.

さて、本研究で提案した損傷位置の同定法の有効性を確認するため、試験片の任意の位置に一定応力を負荷し、構造物のインピーダンス変化を計測、上記の損傷位置同定手順に従って応力の負荷位置を推定することを試みる。

まず、締め付け装置が $L=700$ mm に取りつけられた場合に測定したデータから 1~30 次モードについて算出した ΔF , A/A_0 を図 12 にプロットした。図 12 より、各モードにおいて微小損傷の影響がインピーダンス波形に現れていること、そして波形変化の大きさはモードによって異なることが確認できる。また、高次モードほど周波数のシフト量が大きくなる傾向にあり、高周波数ほど測定感度が高いことがいえる。

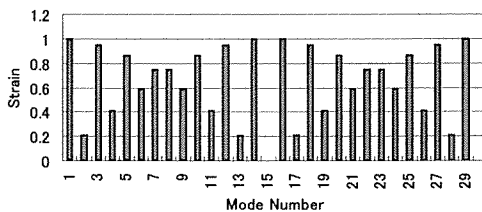


Fig.13. Strain distributions at each mode when the clamp is located at $L=700$ mm.

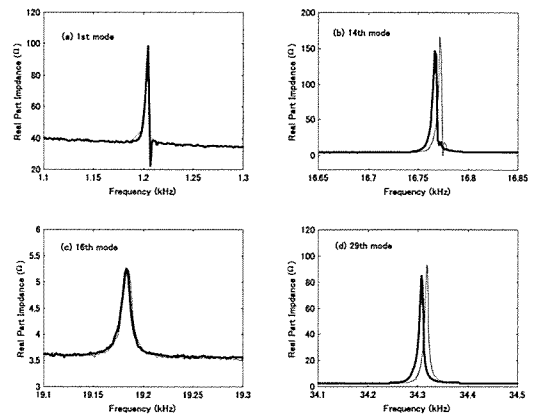


Fig.14. Impedance variations of healthy and damaged beams at (a)1st, (b) 14th, (c) 16th and (d) 29th modes.

Table 1. Parameters selection

X, Y	Mode number
5, 0.9	14, 16, 29

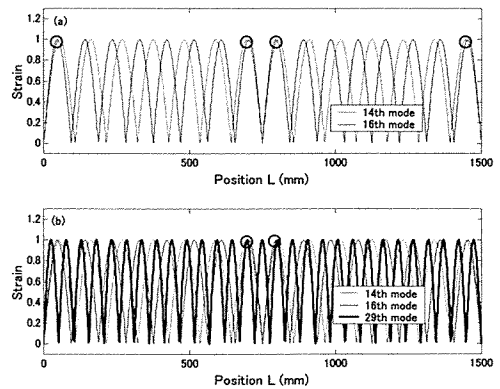


Fig.15. Estimation of damage location by plotting (a) two and (b) three strain mode shapes ($L=700$ mm).

次に図 12 に示した $L=700$ mm 位置に応力が負荷された時のインピーダンスピーク周波数のシフト量を、応力の負荷位置におけるひずみの大きさと比較してみる。 $L=700$ mm 位置における各モードのひずみの大きさを図 13 に示す。図 13 に示すひずみの大きいモードに対して、図 12 に対応するインピーダンスの変化が非常に小さいこと、それ以外のモードにおいてはインピーダンスの変化が比較的に大きいことが確認できる。特に正規化されたひずみが最大値 1 となるモード、1, 14, 16, 29 次モードに対してはその波形変化(図 14)が最も小さい。

さて、図 12 の測定結果からパラメータ X, Y の値を $X=5, Y=0.9$ とした場合に選定されたモード番号を表 1 に示す。そして、低次モードの順からまず 14 次および 16 次モードのひずみモード関数をプロットすると、図 15 に示すようにひずみ最大値付近に重ねた箇所が 4 箇所であった。それに 29 次モードひずみ関数を追加プロットすると最終的に 2 箇所まで絞り込むことができ、損傷位置は、 $L=700\text{ mm}$ と 800 mm のどちらかと推定される。

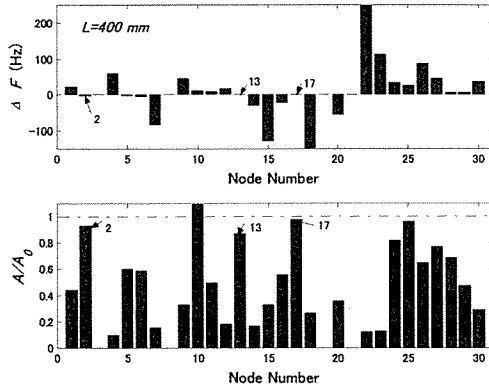


Fig.16. Frequency Shifts (upper) and Peak Values (lower) to the longitudinal wave modes from 1st to 30th.

もう 1 例として、 $L=400\text{ mm}$ に応力を負荷した時の負荷位置の同定に本法の有効性を示す。同様に 1~30 次モードのインピーダンス変化を計測しそして算出した $\Delta F, A/A_0$ を図 16 に示す。また、パラメータ X, Y の設定値と選定されるモード番号を表 2 に示す。パラメータの設定値は始めに $X=5, Y=0.9$ とすると 2 次と 17 次モードが選定された。この 2 つのモードにおけるひずみモード関数を図 17(a) に示す。図 17(a) をみると、2 次と 17 次ひずみモード関数がひずみの最大値付近に 4 点で交差していることが分かる。これは、この 2 つのモードの情報のみでは応力の負荷位置を絞り込むことは不十分といえる。そこで、パラメータの値を $X=8, Y=0.8$ に変更しモードの再選定を行った結果、13 次モードが選定された。13 次モードのひずみ曲線を重ねて図 17(b) に描くと、応力の負荷位置を 4 点から 2 点に絞り込むことができた。

Table 2. Parameters selection

X, Y	Mode number
5, 0.9	2, 17
8, 0.8	2, 17, 13

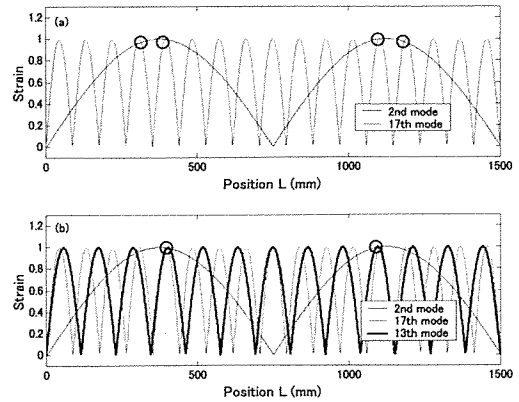


Fig.17. Estimation of damage location by plotting (a) two and (b) three strain mode shapes ($L=400\text{ mm}$).

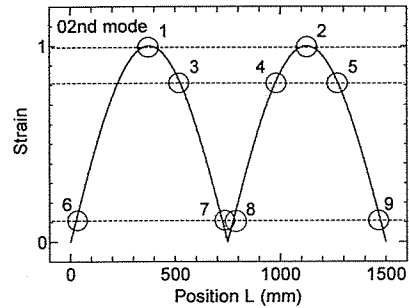


Fig.18. The 2nd strain mode shape on the beam and the map of loading positions of a clamp.

本実験で示した構造物が両端自由のはりで、対称構造となっているため応力の負荷位置をどうしても 2 点までにしか絞り込めない。さらに 1 点まで絞り込む解決法の 1 つとしては 2 段階検査の実施が考えられる。すなわち、まず本方法を用いて 1 回目の検査で損傷の位置を 2 ヶ所に特定し、その位置に対してさらに細別の検査を行うというものである。この場合、細別検査を行う際にどのような情報を利用できるかについて以下検討する。

図 18 に示す 2 次ひずみモード関数に○印と番号をつけてある位置にそれぞれ応力を負荷した場合の素子のインピーダンスを測定しその変化を調べた。番号 1, 2 に対応する位置ではひずみが最大の 1 であり、番号 3, 4, 5 に対応する位置ではひずみが 0.8、番号 6, 7, 8, 9 に対応する位置はひずみが 0.1 である。これらの位置に応力を負荷した場合に測定したインピーダンスの応答(図 19)から算出した 2 次モードにおける周波数シフト量ならびにピーク値の大きさを図 20 に示す。図より、ひずみの値が同じである位置に応力を負荷した場

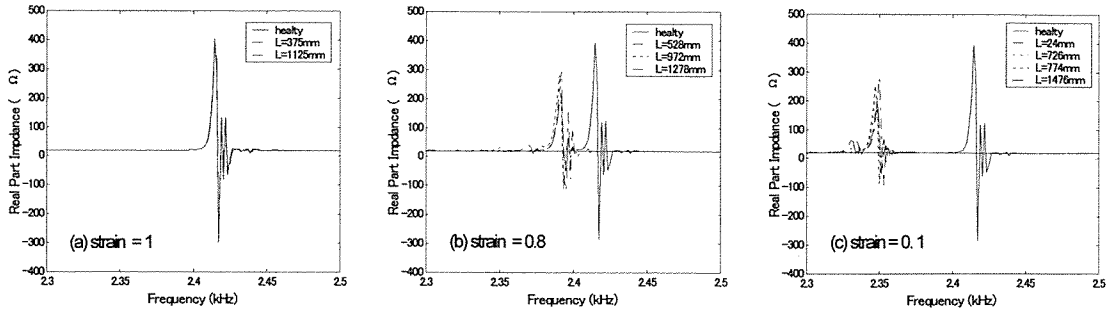


Fig.19. Impedance variations at the 2nd mode when the clamp is fixed on the position where (a) strain=1, (b) strain=0.8 and (c) strain=0.1.

合はピーク周波数シフト量 ΔF がおおよそ同じであるが、ピーク値変化量 $\Delta A/A_0$ に関してはかなりのばらつきが見られる。具体的には圧電素子が貼り付けてある位置(1300mm)の付近に応力を加えるとインピーダンスピーク値の変化量が大きくなる傾向にある。従って、圧電素子を対称にはりの両端に貼り付けておけば、各々ペアの圧電素子についてそのインピーダンス変化を計測・比較することで、損傷位置をさらに1点まで絞り込むことが十分可能と思われる。

1. 縦弾性波伝播原理を利用したインピーダンス計測法は、広範囲の周波数領域にわたりインピーダンスの変化を容易かつ高感度に計測でき、さらにそれに基づき損傷に関わる特徴パラメータを定義した。
2. 圧電素子のインピーダンス応答変化とひずみモードの情報を利用した、微小な損傷の発生位置の推定方法を提案した。

なお、本研究は文部省科学研究費補助金基盤研究(B)(2) (課題番号 11450092) の補助を受けた。

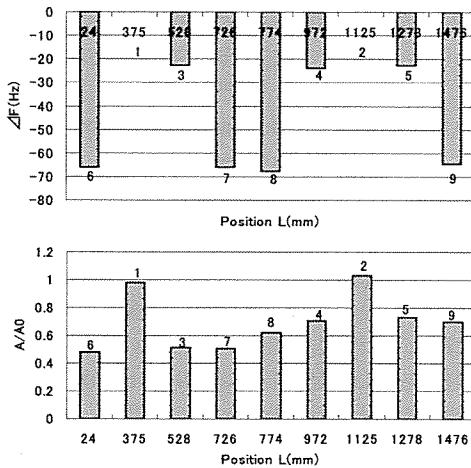


Fig.20. Variations of Frequency Shift (upper) and Peak Value (lower) of the impedance at the 2nd strain mode corresponding to the location number in Fig.18.

4. 結言

本研究では、インピーダンス計測技術と縦弾性波伝播原理を用いた構造物の損傷位置の検出方法について実験より検討を行った。得られた結果をまとめると以下のようなになる。

参考文献

- (1) B. P. Nandwana and S. K.MAITI, "Modeling of Vibration of Beam in Presence of Inclined Edge or Internal Crack for Its Possible Detection Based on Frequency Measurements", *Engineering Fracture Mechanics* 58(3), pp.193-205, 1997.
- (2) M. Boltezar, B. Strancar and A. Kuhelj, "Identification of Transverse Crack Location in Flexural Vibrations of Free-Free Beams", *Journal of Sound and Vibration*, 211 (5), pp.729-734, 1998.
- (3) W. M. Ostachowicz and M. Krawczuk, "Analysis of the Effect of Cracks on the Natural Frequencies of a Cantilever Beam", *Journal of Sound and Vibration*, 150(2), pp.191-201, 1991.
- (4) C. Liang, F. P. Sun and C. A. Rogers, "Coupled Electro-Mechanical Analysis of Adaptive Material Systems Determination of the Actuator Power Consumption and System Energy Transfer", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 5, 1994.
- (5) Z. W. Jiang, "Structure Health Monitoring with Piezoelectric Sensor and Actuators (Introduction of research at CIMSS and IWP measurement)", *Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 5 (4), pp.18-28, 1997.