

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20560218

研究課題名(和文) 非線形電気機械インピーダンス変調による構造物の初期損傷検出とモニタリング

研究課題名(英文) Detection and monitoring of incipient structural damages based on nonlinear electromechanical impedance modulation

研究代表者

曾根 彰 (SONE AKIRA)

京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・教授

研究者番号：20197015

研究成果の概要(和文)：構造物に貼付または埋め込まれた圧電材料の電気インピーダンスが、構造物に内包された損傷部の接触音響非線形性に起因して構造物振動に同期した変調を示すことを利用した、高感度の損傷モニタリング手法を開発した。この「非線形圧電インピーダンス変調法」は、従来から提案されている圧電インピーダンス法と非線形波動変調法とを融合し発展させたものであり、疲労き裂やボルト緩みなど接触型の初期損傷を感度よく検出可能である。

研究成果の概要(英文)：In this study, a damage detection and monitoring methodology, referred to as "nonlinear piezoelectric impedance modulation method", has been proposed by utilizing the modulation in the electric impedance of a piezoelectric material attached or embedded in a structure due to the contact acoustic nonlinearity at the damaged part. It has been shown that this methodology, developed by combining and advancing two existing approaches, i.e., the piezoelectric impedance method and the nonlinear wave modulation spectroscopy, has a potential to detect incipient contact-type damages such as fatigue cracks and loose bolts sensitively.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：機械力学・耐震工学

科研費の分科・細目：機械工学 ・ 機械力学・制御

キーワード：モニタリング、損傷検知、スマート構造

1. 研究開始当初の背景

ボルト緩みやクラックなどの局所的な損傷を高感度に検出可能な構造ヘルスマニタリング手法として、構造物表面に貼付した圧電素子の数十kHzから数百kHzの高周波域での電気インピーダンスの変化を利用する「圧電インピーダンス法」が提案され、航空、土木など様々な分野での応用が研究されて

いる。損傷によって高周波域における構造物の機械インピーダンスは大きく変化し、また圧電素子の電気インピーダンスは構造物の機械インピーダンスに依存するため、圧電素子の電気インピーダンスの測定により圧電素子の貼付位置近傍の微小な損傷を感度よく検出できるとされている。

このように圧電インピーダンス法は微小

損傷のモニタリング手法として有望ではあるものの、現実問題への適用を考えた際に次のような問題がある。

- (1) インピーダンスの変化を利用する方法であるため、健全時のインピーダンスをベースラインデータとして取得しておく必要がある。
- (2) 初期段階の損傷はしばしば、閉じたき裂、kissing bond などの「隠れた損傷」の形態をとっており、これらを見逃すことは安全管理上極めて重大な脅威となりうるが、圧電インピーダンス法ではこれらの損傷の検出は困難である。
- (3) 温度変化など損傷以外の変動要因の影響を受けることがあり、これらを取り除く必要がある。

いっぽう、申請者らはこれまでに、面と面の接触を伴う接触型の損傷部位における高周波波動と低周波構造振動の非線形相互作用（接触音響非線形性）を利用する「非線形波動変調法」に注目し、ボルト緩みの検知や疲労き裂の進展監視への応用可能性を示してきた。この手法は、損傷部位に作用する動的負荷変動による界面の接触状態の変化を、圧電素子から入力した高周波波動の振幅変調および位相変調として取り出すものであり、ベースラインデータを必要としないほか、「隠れた損傷」の検出が可能であるという著しい特長を持つ。ただし、高周波波動の送信と受信に最低限 2 枚の圧電素子が必要であり、圧電素子貼付のためのスペース制約が厳しい状況での適用可能性に問題があったため、これらを 1 枚にまとめたセルフセンシング手法の開発が課題となっていた。

2. 研究の目的

本研究では、これら二つの微小損傷検出手法を相補的に融合・発展させた「非線形圧電インピーダンス変調法」を開発することを目的とする。すなわち、構造物の高周波領域における機械インピーダンス特性が、負荷による損傷部位の界面状態の変化に同期して変動することを利用し、定電圧振幅で高周波駆動される圧電素子に流れる電流波形の変調として損傷を定量化することを試みる。次のことを主たる達成目標とする。

- (1) 真直はりの低サイクル疲労実験における疲労き裂の進展監視、およびボルト締結体におけるボルト緩みの早期検出を目的とした非線形圧電インピーダンス変調法の基礎実験を行い、従来法との比較対照によってその得失を明らかにする。
- (2) 圧電素子以外の電気機械トランスデュー

サの利用も視野に入れた上で、非線形圧電インピーダンス変調現象の一般的な物理モデルを構築し、理論面の整備を行う。

- (3) 理論モデルに基づいて、観測された変調情報を損傷の severity に関連づける「損傷指標」を導出し、その有効性を実験的に検証する。

3. 研究の方法

(1) 図 1 に示す実験装置を使用して、曲げ疲労き裂を有するはり状の試験片を作成し、非線形圧電インピーダンス変調法の基礎実験を行う。試験片に貼付した圧電素子に数十 kHz～数百 kHz までの高周波交流電圧を印加し、同時にき裂を開閉させるための低周波振動外力を与える。このとき圧電素子に流れる電流波形に生じる低周波振動応答に同期した振幅変調および位相変調を抽出し、き裂進展との関連、高周波電圧振幅および低周波振動振幅への依存性を網羅的に調査する。

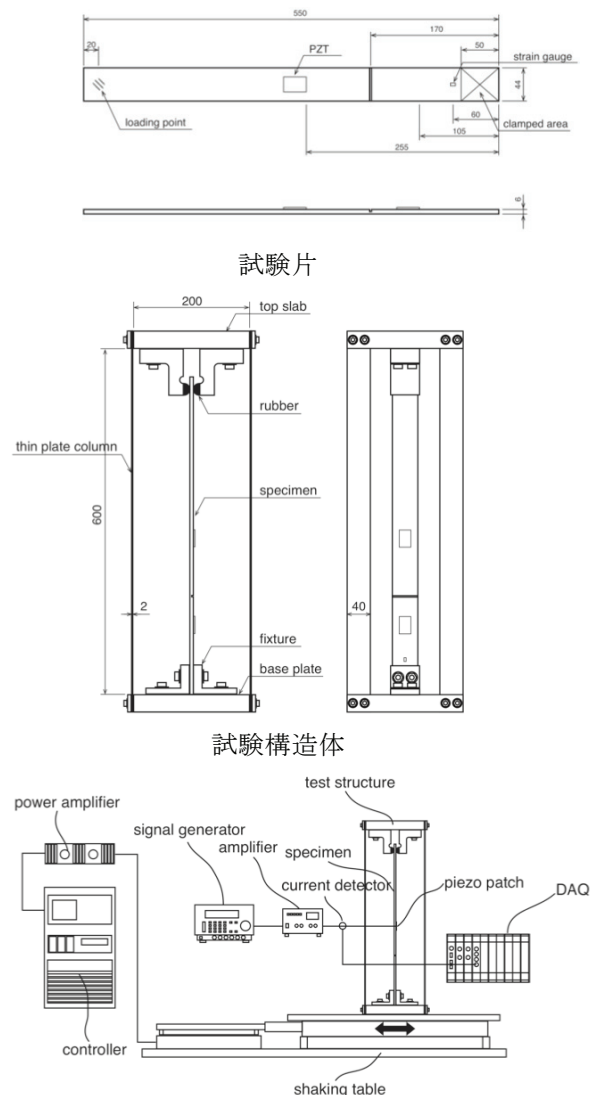


図 1 疲労き裂実験の試験片と実験装置

(2) 実験から観察される変調現象を説明するモデルを構築し、理論面の整備を行う。実験結果と対照しながら、モード展開モデルおよび波動伝播モデルの両面からアプローチする。まず構造物を1自由度系で表現した単一モードモデルにおいて、接触音響非線形性によってモード剛性が周期的に時間変化すると考えた時変係数モデルを構築し、摂動法や時変伝達関数の考え方などを導入してこれを解析する。次に、圧電素子を貼付したはりのモデルから波動方程式に基づくモデル化を行い、単一モードモデルとの関連づけを行うとともに、非線形圧電インピーダンス変調の波動場の解釈を試みる。

(3) 上述のモデルに基づき、瞬時インピーダンスの実測値から、ターゲットモードの複素モード剛性の変調特性を導出する。複数のモードについて複素モード剛性の変化と損傷部応力との関係を求めることにより、損傷部における局所的な複素剛性変化の様相を明らかにする。さらにこの知見に基づいて、損傷の severity 評価のための計量を導出し、有効性を検討する。

(4) 環境温度の変化に対するロバスト性、力学的外部要因の変化に対するロバスト性を検討し、従来手法、特に圧電インピーダンス法に対する優位性を調査する。

(5) はり試験片の平面曲げ疲労試験を実施し、き裂パラメータと損傷指標の相関性を検証する。圧電素子とき裂の位置関係、ターゲットモードの選択との関係などを検討し、疲労き裂進展監視への応用技術を開発する。

(6) ボルト締結部の健全性評価への適用可能性を調査する。

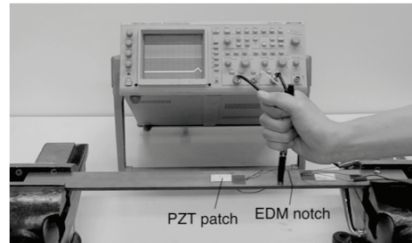
4. 研究成果

(1) 研究の主な成果

① 図1の実験装置を使用して、非線形圧電インピーダンス変調法の基礎実験を行った。疲労き裂が存在するとき、高周波電圧で駆動される圧電素子に流れる電流波形には図2のような変調が現れることを示した(ただし図2は非線形圧電インピーダンス変調現象のデモンストレーションのための簡易実験の結果である)。図2から明らかに読み取れる振幅変調のほか、電圧波形との位相差にも変調が現れており、これらをそれぞれ復調すると瞬時振幅と瞬時位相差の時間変動の波形が得られ、これらは低周波振動(ポンプ波)と同期したものになることを確認した。

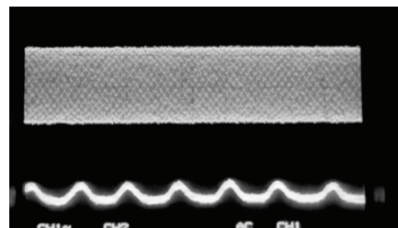
これらを用いて圧電素子の瞬時アドミタンスの軌跡を再構成すると図3のようになり、その形状は疲労き裂進展と共に大きく変

化することがわかった。高周波波動(プローブ波)として20kHz~100kHzの帯域を検討した結果、この帯域におけるアドミタンス実部のピーク周波数を採用することが妥当であるとの結論を得た。アドミタンス実部のピーク周波数は構造物の駆動点モビリティのピーク周波数に等しいため、この周波数を採用することにより、後述する単一モード近似によるモデル化が可能になった。



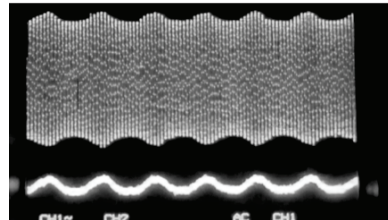
簡易実験装置

(ここではポンプ波を手動で与えている)



健全な試験片

(上段：電流波形，下段：試験片のひずみ)



疲労き裂を有する試験片

(上段：電流波形，下段：試験片のひずみ)

図2 非線形圧電インピーダンス変調現象

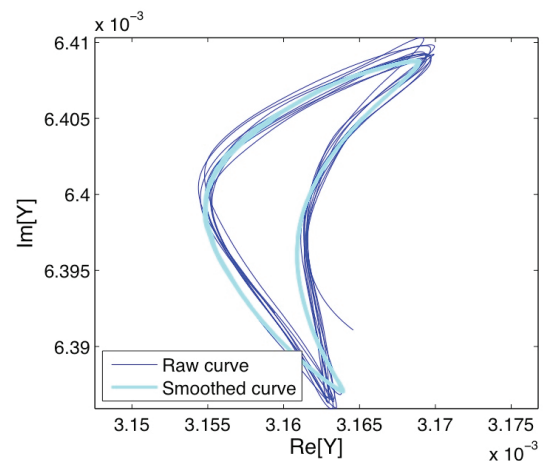


図3 瞬時アドミタンスの例

② 接触型損傷のポンプ加振による接触剛性変動効果を取り入れた単一モード近似に基づく1自由度線形時変システムモデル(図4)において、時変アドミタンスがこの線形時変システムにおけるZadehの時変伝達関数に相当することに留意して、slowly-varyingな系における摂動解法を経て時変アドミタンスの凍結近似解を求めた。凍結近似の妥当性を検討するために近似解を数値計算による瞬時アドミタンスと比較検討したところ、実用の範囲においてその差異は軽微であると結論づけられた。(図5)

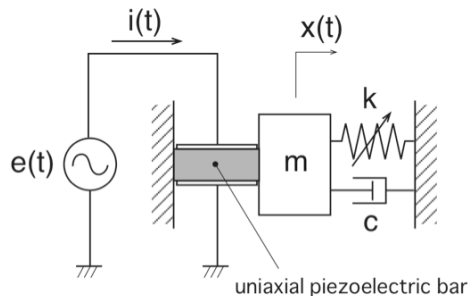


図4 1自由度線形時変システムモデル

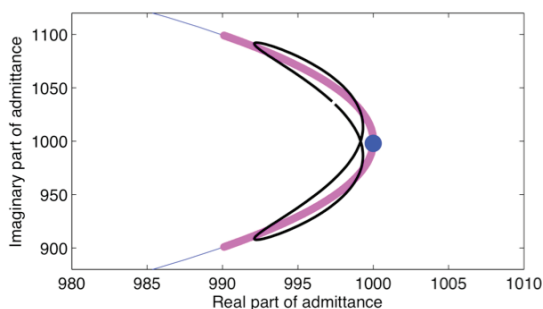


図5 瞬時アドミタンスの数値計算解(黒の実線)と凍結近似解(赤の実線)の比較

次に、圧電素子を貼付したはりのモデルから波動方程式に基づくモデル化を行い、モード展開法によって単一モードモデルとの関連づけを行った。さらに、時変アドミタンスを時間と位置に依存する場の関数と捉え直し、これが従う波動方程式を導出した。これにより将来的には損傷の位置検出が可能になると期待される。

③ 上述のモデルに基づいて、計測した瞬時アドミタンス値および注目する共振モードのQ値より、接触音響非線形性による無次元化モード複素剛性変動の大きさを評価する手法およびその計算法を提案し、さらにこれに基づく損傷評価指標KMIを定義した。提案した損傷指標は、複数の試験片における疲労き裂の進行に伴う剛性低下率と良好な相関を示した。(図6)

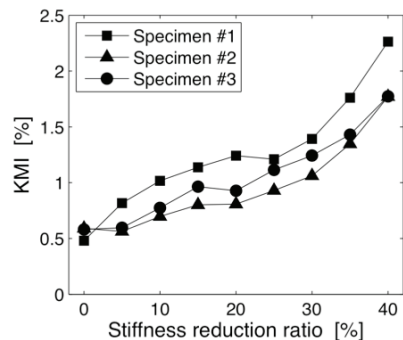


図6 き裂進展に伴う損傷評価指標KMIの変化(横軸は試験片の等価剛性低下率)

④ 環境温度および力学的外部要因の変化に対するロバスト性を検討し、実用可能性および従来手法に対する優位性の観点から、以下の知見を得た。

環境温度の変化に対して圧電素子の諸定数は変動するが、無次元化された損傷指標への感度は従来法である圧電インピーダンス法における損傷指標への感度に比較して小さいことを示した。

長時間の連続プローブ駆動による圧電素子および接着層の温度上昇、試験片の負荷状態の変化によるアドミタンスのドリフトの影響を調査し、無次元化された損傷指標に対する影響が僅少であることを示した。

以上の知見より、本手法が従来手法に比較して環境温度および力学的外部要因の変化に対してロバストであることが示された。

⑤ 平面曲げ疲労試験において試験片表面に小穴を加工し、これを基点として試験片幅方向および厚さ方向に表面き裂を進行させることにより、き裂サイズの推移と提案した損傷指標の関連づけを行った。提案した損傷指標KMIは疲労き裂長さに対して正の相関を示した。(図7)

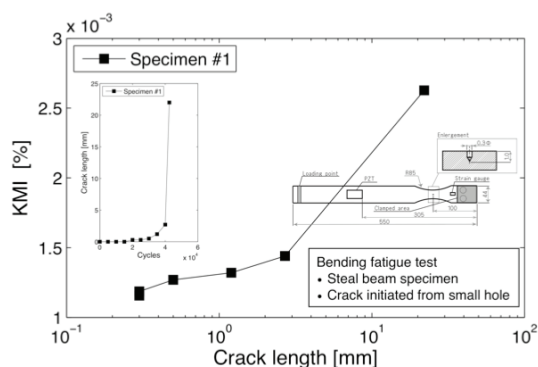


図7 き裂長さと損傷評価指標KMI

⑥ アルミニウムの直方体ブロックに圧電素子を貼付したアルミニウム平板を5本のボル

トで締結した試験体を用いて、これを垂直加振器に積載してポンプ加振を与えた際の圧電素子に流れる電流波形から導出される損傷評価指標値と締結状態の変化との関係を調べた。締結ボルト本数と損傷評価指標値との関係は図8のようになり、本手法がボルト締結体の健全性評価にも適用可能であることが示唆された。

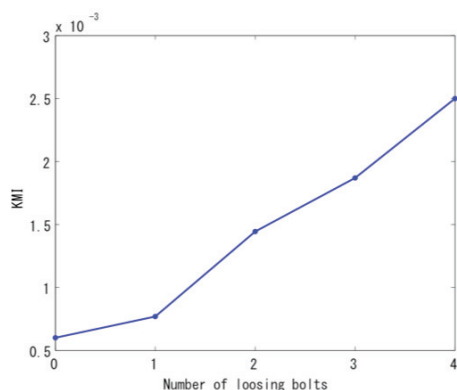


図8 緩みボルト本数と損傷評価指標

(2) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

本研究の成果は、稼働中の構造物に対する埋め込み型センサを用いたベースラインフリーな初期損傷診断の実用に繋がるものであり、機械や構造物のライフサイクルコスト低減のための健全性評価および余寿命評価の高精度化に貢献できると期待される。

(3) 今後の展望

より現実的な状況への発展・展開を図るとともに、本手法の実構造物への適用、複合材料の健全性診断への応用を推進する。また、本手法に基づく損傷位置推定技術を確立する。

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1件)

① A. Masuda, J. Aoki, T. Shinagawa, D. Iba and A. Sone, Nonlinear piezoelectric impedance modulation induced by a contact-type failure and its application in crack monitoring, Smart Materials and Structures, Vol. 20, No. 2, 025021, 2011. (査読あり)

[学会発表] (計8件)

① A. Masuda, Nonlinear piezoelectric impedance modulation method for detection of contact-type damages, 5th World

Conference on Structural Control and Monitoring, 2010/7/13, 東京都.

② A. Masuda, Detection and localization of contact-type damages via nonlinear impedance modulation of piezoelectric materials bonded on a beam structure, Proceedings of SPIE, Vol. 7650, 765034, 2010/3/11, San Diego.

③ 増田 新, 非線形圧電インピーダンス変調法によるき裂検出, 第2回検査・評価・保全に関する連携講演会, 2010/1/19, 東京都.

④ 増田 新 (代表), き裂による非線形圧電インピーダンス変調現象の解析, 日本機械学会 第8回評価・診断に関するシンポジウム, 2009/12/10, 金沢市.

⑤ 増田 新 (代表), 非線形圧電インピーダンス変調とき裂モニタリングへの応用, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2009, 2009/8/7, 札幌市.

⑥ A. Masuda, Nonlinear piezoelectric impedance modulation and its application to crack detection, Proc. of SPIE, Vol. 7295, 72951X, pp. 1-11, 2009/3/11, San Diego.

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: 構造物の損傷の診断方法および装置

発明者: 増田 新

権利者: 京都工芸繊維大学

種類: 特許

番号: PCT/JP2009/052311

出願年月日: 2009/2/12

国内外の別: 外国

6. 研究組織

(1) 研究代表者

曾根 彰 (SONE AKIRA)

京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・教授
研究者番号: 20197015

(2) 研究分担者

増田 新 (MASUDA ARATA)

京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・
准教授
研究者番号: 90252543

(3) 連携研究者

射場 大輔 (IBA DAISUKE)

京都工芸繊維大学・工芸科学研究科・
准教授
研究者番号: 10402984