

平成 21 年 6 月 26 日現在

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18560091  
 研究課題名（和文） 感度安定型 PZT 素子を用いた自己補償型 SHM システムの開発と応用  
 研究課題名（英文） Development and Application of Self-Compensated SHM System Using Mechanically Stabilized PZT Transducers  
 研究代表者  
 日下 貴之（KUSAKA TAKAYUKI）  
 立命館大学・理工学部・教授  
 研究者番号：10309099

研究成果の概要： 近年，高速輸送機関や土木建築構造物の損傷や劣化の状態をリアルタイムに検出するシステム（SHM システム）の開発が求められている．本研究では，耐久性に優れた PZT 素子を開発し，それを SHM システムに組み込むことによって，長期安定的に構造物の健全性を監視できるシステムを開発することを試みた．その結果，従来の PZT 素子に比べて 2 倍以上もの耐久性を有する素子と SHM システムの開発に成功した．

## 交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,900,000	0	1,900,000
2007年度	700,000	210,000	910,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,400,000	450,000	3,850,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：構造ヘルスマニタリング，損傷検出，圧電素子，ラム波

## 1. 研究開始当初の背景

特に，高速輸送機関や土木建築分野では，従来の定期検査ベースの非破壊検査に加えて，定期検査のインターバルを埋めることを目的としたリアルタイム構造健全性評価システム（SHM システム）への期待が高まっていた．中でも，PZT 素子を用いた SHM システムは能動的で高度な健全性評価が可能であることから，多様な対象物への展開が期待されていた．しかし，PZT 素子は圧電特性に優れる反面，非常に脆性であるなど，

光ファイバーなど素子に比べて，機械的特性に劣ることが問題視されていた．

## 2. 研究の目的

上記のような状況を勘案して，本研究では，長期にわたって安定した圧電特性を維持できる耐久性に優れた PZT 素子を開発し，その素子を用いることによって，長期安定的に構造物の健全性を監視できるシステムを開発することを目的とした．具体的な研究目的は下記のとおりであり，次節以降では，下記

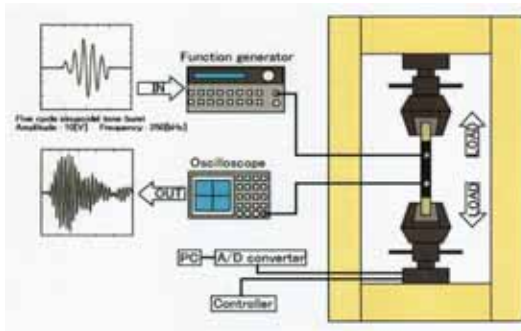


図 1 : P Z T 素子の圧電特性評価試験方法

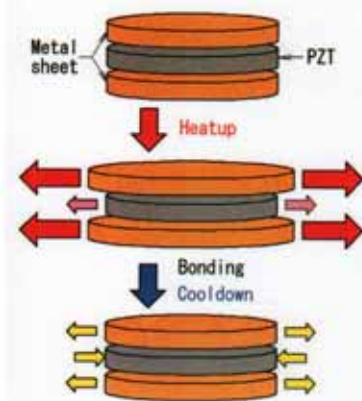


図 2 : 開発する P Z T 素子の基本構成

項目ごとに研究成果をまとめる。

(1) P Z T 素子の劣化挙動の解明

P Z T 素子の圧電特性劣化の本質的な要因を解明するとともに、圧電特性のひずみ依存性と圧電特性劣化の臨界点を定量的に明らかにする。

(2) 感度安定型 P Z T 素子の開発

従来の P Z T 素子（圧電特性劣化の臨界ひずみが約 0.5%）の 2 倍以上の臨界ひずみを有する P Z T 素子構造を提案するとともに試作する。

(3) 高信頼性 S H M システムの開発

開発した感度安定型 P Z T 素子を用いて、構造物中に発生した損傷や劣化を、長期安定的にリアルタイム監視できる S H M システムを開発する。

(4) 開発した S H M システムの実証試験

開発した感度安定型 P Z T 素子と高信頼性 S H M システムを用いて、C F R P 接着接合部材の剥離損傷をリアルタイムに検出することを試みる

3. 研究の方法

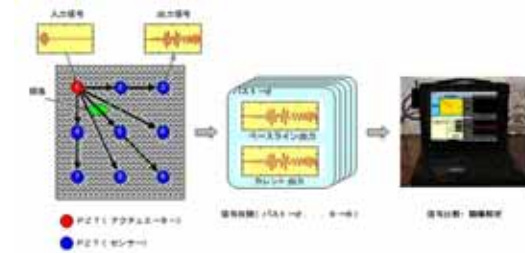


図 3 : 開発する S H M システムの基本構成

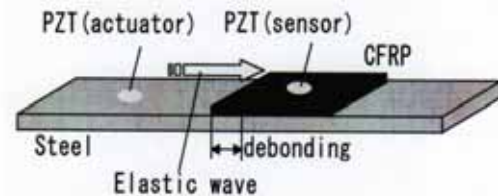


図 4 : S H M システムの実証試験方法

(1) P Z T 素子の劣化挙動の解明

図 1 に示すように、2 枚の P Z T 素子を C F R P 板に貼付し、万能材料試験機を用いて外力を負荷した。この際、一方の P Z T 素子から送信した波動を他方の P Z T 素子で受信し、外力の増加に伴う送受信効率の変化から P Z T 素子の感度変化を同定した。

(2) 感度安定型 P Z T 素子の開発

図 2 に示すように、本研究では、高温環境下で、円盤状に加工した P Z T 素子の両面に銅板を貼付することによって、P Z T 素子に圧縮の熱残留応力を発生させ、引張荷重に対する臨界点を向上させることを試みた（P Z T は引張強度に比べて圧縮強度が高い）。

(3) 高信頼性 S H M システムの開発

図 3 に示すように、本研究では、開発した感度安定型 P Z T 素子を監視対象物に格子状に貼付し、それぞれの P Z T 素子から波動を送信し、他の P Z T 素子で受信することによって、波動の変化から損傷の有無を定量的に評価することを試みた。

(4) 開発した S H M システムの実証試験

図 4 に示すように、本研究では、開発した感度安定型 P Z T 素子と高信頼性 S H M システムの有用性を検証するために、2 枚の P Z T 素子を用いて、C F R P 板を接着した鋼板の剥離損傷を定量的に評価することを試みた。

4. 研究成果

(1) P Z T 素子の劣化挙動の解明

図 1 に示した試験装置を使用して P Z T

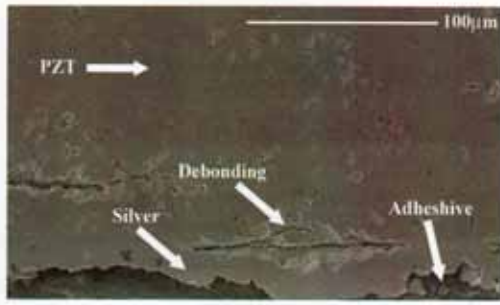


図5：PZT素子の損傷形態

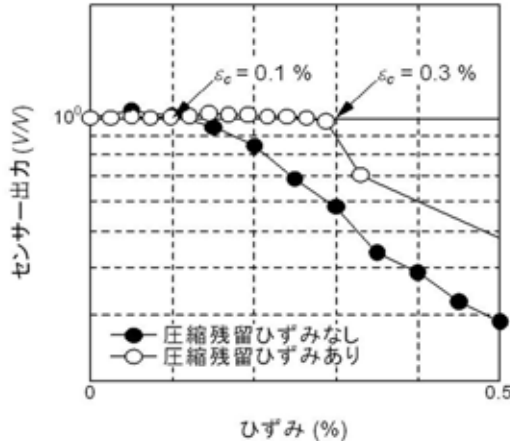


図6：PZT素子の感度劣化挙動

素子の感度低下挙動に及ぼす外力の影響を検討した。その結果、通常の圧電素子では、平均ひずみが約0.1%に達したところで圧電特性の低下が発生し、平均ひずみが約0.3%に達したところで、圧電感度は初期の50%以下に低下することが明らかになった。また、図5は、感度低下が発生したPZT素子の断面をSEMによって観察した結果であるが、PZT素子と電極との接合界面近傍にき裂が発生していることが確認された。すなわち、PZT素子の感度低下の主因は、PZT素子と電極との接合界面の剥離が原因であることが明らかになった。また、別途実施した数値解析の結果からも、接合界面付近に高応力が発生することが確認された。

#### (2) 感度安定型PZT素子の開発

図2に示した構造のPZT素子を試作し、圧電特性および強度特性について、図1に示した試験装置を使用して検討を行った。その結果、図6に示すように、従来のPZT素子（熱残留応力なし）では、平均ひずみが約0.1に達したところで圧電感度の低下が発生するのに対し、試作したPZT素子（熱残留応力あり）では、平均ひずみが0.3%に達するまで圧電感度の変化が見られなかった。すなわち、図2に示した構造を採用することによって、高ひずみの領域まで安定的に動作する

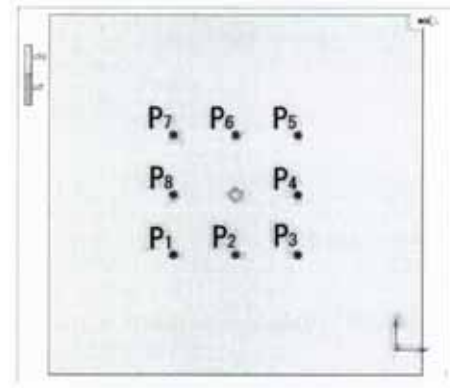


図7：SHMシステムの数値解析モデル

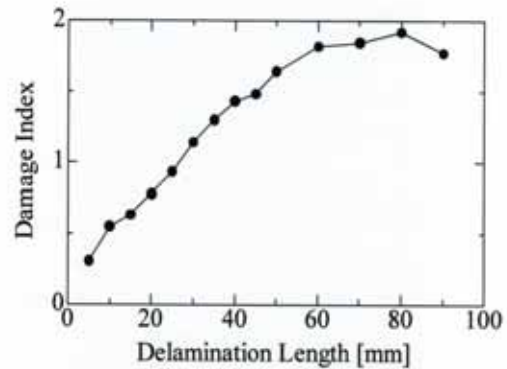


図8：DI係数を用いた損傷評価

PZT素子を作成することが可能であることが確認された。また、別途実施した疲労試験の結果から、このような圧電特性の低下挙動は荷重の繰返数にあまり依存しないことが明らかになった。

#### (3) 高信頼性SHMシステムの開発

図3に示した構成のSHMシステムを試作し、図7に示すような数値解析モデルを用いて、CFRP接着接合界面の剥離損傷を定量的に同定できるか否かについて検討を行った。検討には、市販の動的陽解法解析コードを使用し、弾性波の送信位置と受信位置を順次変化させ、得られる信号の変化から損傷の位置と寸法を同定することを試みた。その結果、損傷の有無に関しては十分な精度で同定できるものの、損傷の寸法や形状に関しては、誤検出のリスクを完全に回避することはできなかった。その要因としては、解析モデルの周辺境界で起こる多重反射の影響が予想以上に大きかったことがあげられ、今後、このような外乱を効率よく除去する必要があることが示唆された。

#### (4) 開発したSHMシステムの実証試験

図4に示した試験体を用いて、開発したPZT素子とSHMシステムの性能を評価することを試みた。この試験体は、CFRPと

鋼材の接合体であり、CFRP製の高压ガス容器やCFRPで補強された鋼橋などを想定したものである。図8に試験結果を示す。図中で、横軸は人工的に導入した剥離損傷の寸法、縦軸は本研究で提案したSHMシステムのために定義したDIというスカラー量である。図から、DIは剥離面積の増大とともに、ほぼ単調に増加することが分かる。すなわち、DIを評価することによって、剥離損傷を定量的に同定可能であることが分かる。このような評価が可能となる本質的な要因は、損傷の有無がCFRP板を伝播する弾性波の伝播速度に大きな影響を及ぼすことにあり、ラム波と呼ばれる板波の伝播(中でもA0モードと呼ばれる非対称モード)に着目することによって、定量的な損傷同定が可能となることが明らかになった。

#### 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)

浅井光輝、高野直樹、滝邦彦、足森崇志、日下貴之、上辻靖智，“均質化法による多孔質圧電材料のイメージベース・マルチスケール解析”，材料，査読あり，55巻，12号，2006年，1111-1116.

[学会発表](計6件)

浅井光輝、高野直樹、滝邦彦、足森崇志、日下貴之、上辻靖智，“均質化法によるイメージベース圧電解析手法の開発”，第11回日本計算工学会講演会，2006年6月12-13日，吹田市.

浅井光輝、高野直樹、滝邦彦、足森崇志、日下貴之、上辻靖智，“均質化法による多孔質圧電材料のイメージベース・マルチスケール解析”，M&M 2006 材料力学カンファレンス，2006年8月4-6日，浜松市.

足森崇志、日下貴之，“SHMのためのPZT素子の損傷特性評価と構造設計”，JCOM-36 シンポジウム，2007年3月8-9日，京都市.

大窪健資、日下貴之、三輪田学、船原昇，“Damage Index をもとにしたCFRP積層板の層間剥離損傷検出”，JCOM-36 シンポジウム，2007年3月8-9日，京都市.

大窪健資、日下貴之、秋元隆志，“PZT素子を使用したCFRP補強鋼材の損傷モニタリング”，JCOM-37 シンポジウム，2008年3月18-19日，京都市.

秋元隆志、日下貴之、大窪健資、阪口航，“Damage Index を用いたCFRP接着界面の損傷モニタリング”，M&M 2007 材料力学カンファレンス，2008年9月16-18日，草津市.

[産業財産権]

出願状況(計1件)

名称：圧電素子構造，モニタリング装置，及び，圧電素子構造の製造方法

発明者：日下貴之

権利者：立命館大学

種類：特許出願

番号：2007-055345

出願年月日：2007年3月6日

国内外の別：国内

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

日下 貴之 (KUSAKA TAKAYUKI)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：10309099

(2)研究分担者

高野 直樹 (TAKANO NAOKI)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：10206782

浅井 光輝 (ASAI MITSUTERU)

立命館大学・理工学部・助手

研究者番号：90411230