

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：53101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820004

研究課題名(和文) ピエゾ特性を利用した異材接合体の応力特異性評価

研究課題名(英文) Stress singularity evaluation of dissimilar joints using piezoelectric property

研究代表者

佐々木 徹 (Sasaki, Toru)

長岡工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号：60435419

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ピエゾ特性を利用した異材接合体の応力特異性評価手法の検討を行った。圧電材料と異方性弾性材料に対する特異応力場・応力集中場の式は、き裂、介在物および異材接合問題において、類似した形式で導出できることが分かった。圧電材料の強度評価手法は、解析理論の類似性を用いて、弾性材料の実験にて代替的に評価できる可能性が明らかになった。

研究成果の概要(英文)：In this research, stress singularity evaluation methods of dissimilar joints were considered. It was shown that the formulations of stress singularity/concentration fields for piezoelectric materials and anisotropic materials were derived by similar form in the case of crack, cavity, inclusion and dissimilar joints problems. This study indicated that strength evaluation methods for piezoelectric materials can be performed based on similarities of analysis theory by experiments of elastic materials.

研究分野：弾性力学

キーワード：応力特異性 圧電材料 異方性材料 異材接合体 特異応力場

1. 研究開始当初の背景

近年、機械や構造物の使用環境はますます厳しくなり、強度だけでなく、耐食性、耐熱性、耐摩耗性および軽量化・高機能化などが同時に要求されることが多くなってきている。このような様々な過酷な環境下における種々の要求は、単一の材料では満足させられない場合が多く、高付加価値製品を創出する‘異材接合体’が各種産業分野に利用される。ここで、異材接合体における接合界面および界面端近傍では、理論上、応力は無限大になる‘応力特異性’と呼ばれる現象が生じ、これが各種機械・構造物の思わぬ破壊や強度低下を導くことがある。

しかしながら、異材接合体の応力特異性評価については、現在までに広い範囲において適用可能な評価法は確立されたとは言えない。さらに、圧電材料にて構成される異材接合体についても、その重要性から関連の解析的研究は多く行われているが、解析結果の実験的検証は十分とは言えず、破壊力学パラメータの決定に関する強度実験手法も確立されたとは言えない。

2. 研究の目的

本研究では、圧電材料の強度評価に関するこれまでの研究成果を進展させ、圧電材料特有の特性を利用し、解析および実験の両面からのアプローチにより、異材接合体の応力特異性評価手法の検討を行った。また、圧電材料の強度評価手法について、解析理論の類似性を用いて、弾性材料の実験にて代替的に評価する手法の検討を行った。

3. 研究の方法

下記(1)～(4)の流れで研究を行った。

(1) 弾性数理解析に基づく、圧電材料・異方性弾性材料の特異応力解析

まず、図1に示すような、き裂を含む圧電材料または異方性弾性材料に対して、特異応力解析手法の検討を行った。

次に、図2および図3に示すような、圧電材料と異方性弾性材料で構成される、2次元および3次元異材接合体の特異応力解析手法の検討を行った。

また、図4に示すような、楕円孔または楕円形介在物を有する、圧電材料または異方性弾性材料に対して応力解析手法の検討を行った。

(2) 特異応力解析における解析理論の類似性の検討

(1)の特異応力解析において、解析理論の類似性の検討を行った。

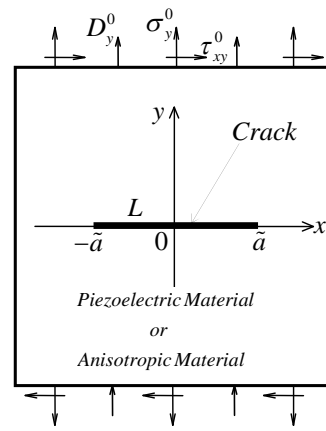


図 1

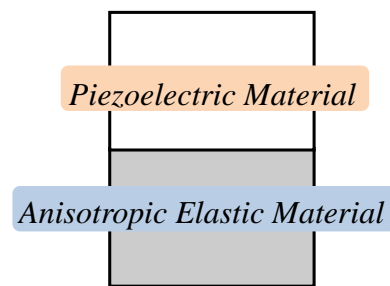


図 2

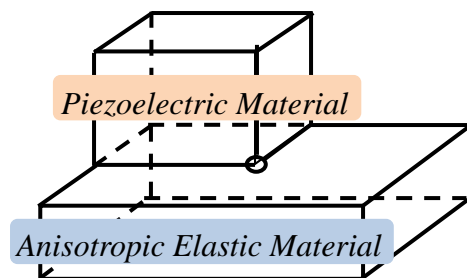


図 3

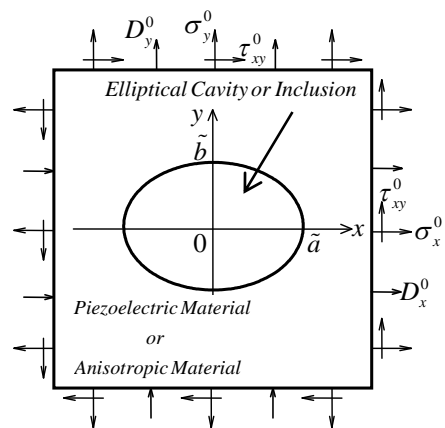


図 4

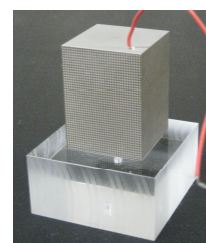


図 5

(3) 特異性挙動の実験測定

まず、予備実験として、実験で使用する圧電材料の基本特性を把握するために、()電圧 - 変位特性、()変位の経時特性、()変位の応答性を求める実験を行った。

次に、圧電材料とアクリルで構成される、異材接合体を作成した。試験片のサンプルを図5に示す。ここで、微小な領域で発生する特異性挙動を効率よく計測するために、これまでのノウハウを生かし、スクリーンマスクを用いて圧電材料に微小で多数の電極ペーストを塗布し測定する手法を用いた。デジタル油圧サーボ材料試験機を用いて、いくつかの条件下において、繰り返し荷重を負荷し、接合界面近傍に生じる電圧場の特異性挙動を計測した。

(4) 応力特異性評価手法の検討

(1) ~ (3)で得られた、知見・結果をもとに、応力特異性評価手法の検討を行った。

4. 研究成果

(1)き裂、楕円孔および楕円形介在物問題における応力解析と解析理論の類似性について

弾性数理解析に基づき、き裂、楕円孔および楕円形介在物を含む圧電材料または異方性弾性材料に対して、応力解析手法の検討を行った。

圧電材料の平面問題における基礎関係式と異方性弾性材料の基礎関係式より、圧電材料と異方性弾性材料の応力、電気変位、ひずみおよび電場などの各物理量の式が同一または類似の形式で導出できることが分かった。主に、下記の式のように、類似性を考慮し、圧電材料の電気変位成分が、異方性弾性材料における面外せん断応力成分に対応することを確認した。

・圧電材料の応力/電気変位式 ・異方性弾性材料の応力式

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_x = 2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^3 \mu_k^2 \phi_k'(z_k), \\ \sigma_y = 2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^3 \phi_k'(z_k), \\ \tau_{xy} = -2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^3 \mu_k \phi_k'(z_k), \\ D_x = 2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^3 \lambda_k \mu_k \phi_k'(z_k), \\ D_y = -2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^3 \lambda_k \phi_k'(z_k). \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \hat{\sigma}_x = 2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^3 \hat{\mu}_k^2 \hat{\phi}_k'(\hat{z}_k), \\ \hat{\sigma}_y = 2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^3 \hat{\phi}_k'(\hat{z}_k), \\ \hat{\tau}_{xy} = -2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^3 \hat{\mu}_k \hat{\phi}_k'(\hat{z}_k), \\ \hat{\tau}_{xz} = 2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^3 \hat{\lambda}_k \hat{\mu}_k \hat{\phi}_k'(\hat{z}_k), \\ \hat{\tau}_{yz} = -2 \operatorname{Re} \sum_{k=1}^3 \hat{\lambda}_k \hat{\phi}_k'(\hat{z}_k). \end{array} \right.$$

また、き裂、楕円孔および楕円形介在物を有する圧電材料と異方性弾性材料の解析において、基礎関係式の類似性を考慮し、類似的に定式化ができることが分かった。解析結果の一例を図6~図7に示す。解析結果の分布においても、圧電材料の応力成分・電気変位成分と異方性弾性材料の面内応力成分・面

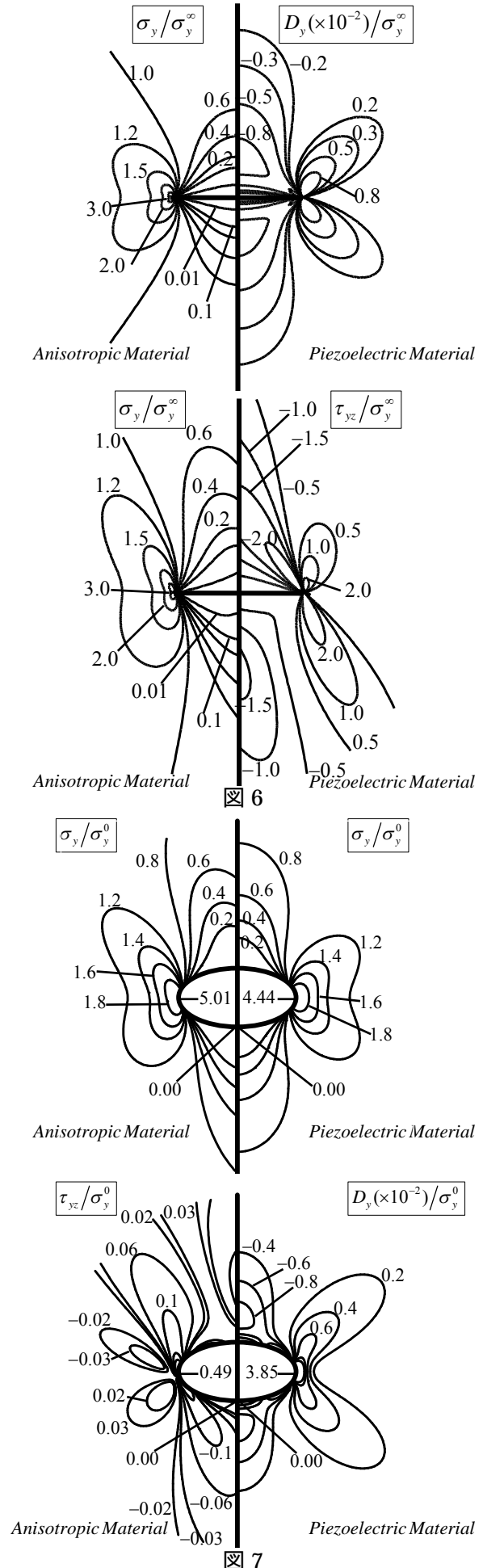


図 6

図 7

外応力成分の傾向の類似を確認した。

基礎関係式の類似性を考慮し、物性定数を適切に置き換え、同定することにより、異方性弾性材料の解析理論を、圧電材料へ適用可能であることが分かった。

弾性材料の応力特異場の測定手法は、ひずみゲージを用いた手法など簡便な手法も提案されていることを踏まえ、下記の変換により、弾性材料の実験にて代替的に、圧電材料のひずみ・電場などの物理量を推定できることが分かった。

$$\varepsilon_p = \Delta\varepsilon_i + \varepsilon_a$$

ε_p : 推定する圧電材料のひずみ・電場

ε_a : 弾性材料の強度実験により測定するひずみ

$\Delta\varepsilon_i$: 解析より同定し算出する圧電材料と異方性弾性材料のひずみ・電場の差異

(2)異材接合問題における、特異性挙動実験、特異応力解析および特異性評価手法について

予備実験にて、制御用パソコン、変位測定用のレーザ変位計、直流増幅器、圧電アクチュエータ駆動電源などを構成し、実験で使用する圧電材料の最大変位量、応答速度および発生力を測定した。

そして、予備実験の結果を基に、特異性挙動の実験測定を行い、いくつかの特異性挙動を示す結果を得ることができた。しかしながら、圧電材料を用いる実験は、実験環境の整備が難解であり、特に電気的な境界条件の管理において、外部からの擾乱に対して非常に敏感な実験になることが明らかになった。また、き裂、ノッチおよび一般化した異種境界を含む圧電材料の試験片作成時には、圧電特性の変化や分極反転について考慮しなければならないことが確認された。さらに、接合端部の特異応力場の測定についても、外部擾乱の影響を大きく受けやすいことが分かった。

一方、2次元および3次元異材接合体の特異応力解析において、き裂問題などと同様な解析理論の類似性が成立する場合があることが確認できた。また、接合端部周辺における特異応力場および特異電気変位場の式も類似した形式で導出できる場合があることが分かった。

そこで、計測手法・試験片作成時において取扱いが難解な圧電材料に対し、前節でまとめた、き裂、楕円孔および楕円形介在物問題において明らかになった解析理論の類似性を利用した、各物理量の推定手法を活用した評価手法が有効的であることが分かった。

以上より、解析理論の類似性を用い、弾性材料の実験にて、代替的に圧電材料で構成される異材接合体の応力特異性評価ができる可能性が明らかになった。今後、いくつかの検討を加え、成果を発表する予定である。

参考文献

古口日出男, Stroth 形式を用いた異方性圧電-等方性接合体のグリーン関数, 日本機械学会論文集 A 編, Vol. 79, No. 806 (2013), pp. 1444-1458.

Hiroshi Hirai, Masatsugu Chiba, Mitsutoshi Abe, Toru Ikeda, Noriyuki Miyazaki, "Stress intensity factor analysis of an interfacial corner between piezoelectric bimetals using the H-integral method", Engineering Fracture Mechanics, Volume 82, March 2012, Pages 60-72

Toshimi Kondo, Yohei Kurabe, Toru Sasaki, Takahiko Kurahashi, Yukio Miyashita, "Use of strain gages for determining generalized stress intensity factors of sharp V-notched plates under transverse bending", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 124-125, July 2014, Pages 248-261.

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3件)

佐々木徹, 種健, 近藤俊美, 遠方一様荷重下での楕円孔を有する圧電材料および異方性材料に対する類似的解析, 材料(日本材料学会誌), Vol. 64, No. 6, pp. 486-492 (2015), 査読有.

DOI:10.2472/jsms.64.486

佐々木徹, 種健, 近藤俊美, 境界に任意荷重が作用する圧電材料および異方性材料の解析(楕円板問題と楕円孔問題における類似的定式化), 日本機械学会論文集 Vol. 80 No. 815, pp. 1-16 (2014), 査読有.

DOI:10.1299/transjsme.2014smm0187

Toru SASAKI, Toshimi KONDO, Takeshi TANE, Analogy of stress singularities analysis between piezoelectric materials and anisotropic materials, Procedia Materials Science, Volume 3, 2014, Pages 1767-1772, 査読有.

[学会発表](計8件)

稲垣裕介, 佐々木徹, 種健, 宮川睦巳, 遠方一様荷重下でのき裂または楕円形介在物を有する圧電材料および異方性材料の類似的解析と応力拡大係数の算定, 日本機械学会 2016年度年次大会 2016年9月11日-14日, 九州大学(福岡県福岡市).

稲垣裕介, 佐々木徹, 種健, 宮川睦巳, 遠方一様荷重下でのき裂または楕円孔を有する圧電材料および異方性材料の類似的解析,

日本機械学会 北陸信越支部 第 45 回学生員
卒業研究発表講演会 ,0032 2016 年 3 月 4 日 ,
信州大学(長野県長野市) .

片山晃太郎, 佐々木徹, 宮川睦巳, 種健,
き裂境界または楕円境界に任意荷重が作用
する圧電材料および異方性材料の類似的解
析, 日本機械学会 2015 年度年次大会, 2015
年 9 月 13 日-16 日, 北海道大学(北海道札幌
市) .

Toru Sasaki, Takeshi Tane, Toshimi Kondo,
SIMILAR ANALYSIS FOR PIEZOELECTRIC
MATERIAL AND ANISOTROPIC MATERIAL WITH AN
ELLIPTICAL CAVITY AND ITS APPLICATION
~EVALUATION OF ELECTRICAL FIELDS BASED ON
SIMILARITY~, 6th International Conference
on MECHANICS AND MATERIALS IN DESIGN,
Ponta Delgada/Azores (Portugal), 26-30
July 2015.

佐々木徹, 近藤俊美, 種健, 楕円境界に任
意荷重が作用する圧電材料および異方性材
料の解析, 日本機械学会 2014 年度年次大会,
2014 年 9 月 7 日-10 日, 東京電機大学(東京
都足立区) .

Toru SASAKI , Toshimi KONDO, Takeshi
TANE, Analogy of stress singularities
analysis between piezoelectric materials
and anisotropic materials, The 20th
European Conference on Fracture, #618,
30th of June - 4th of July,
Trondheim(Norway) .

佐々木徹, 内部き裂を有する圧電材料およ
び異方性材料の類似的解析, 第 17 回応用力
学シンポジウム講演概要集, pp.245-246,
2014 年 5 月 10 日-11 日, 琉球大学(沖縄県中
頭郡西原町) .

湯川恵太, 佐々木徹, 古口日出男, 境界要
素法を用いたピエゾ接合体の特異応力に対
する検討, 日本機械学会 北陸信越支部 第 51
期総会・講演会, 806, 2014 年 3 月 8 日, 富山
県立大学(富山県射水市) .

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

出願年月日 :

国内外の別 :

取得状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類 :

番号 :

取得年月日 :

国内外の別 :

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

佐々木 徹 (SASAKI, TORU)

長岡工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号 : 60435419

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し