

令和 4 年 5 月 2 日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03855

研究課題名(和文) 圧電アクチュエータの界面剥離発生機構の解明

研究課題名(英文) The investigation on the detachment of the interface in an piezoelectric actuator.

研究代表者

上田 整 (Ueda, Sei)

大阪工業大学・工学部・教授

研究者番号：10176589

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円

研究成果の概要(和文)：界面に垂直なき裂を有する傾斜機能圧電積層厚板に熱衝撃負荷、静的電気負荷および機械的衝撃負荷が作用する場合を考え、き裂先端の特異電気弾性場を理論解析したものである。重ね合わせの原理および積分変換法を用い、特異電気弾性問題の解を特異積分方程式の解に帰着した。また、特異積分方程式の数値解析には、Gauss-Jacobi または Gauss-Chebyshev の数値積分公式を用い、応力拡大係数に及ぼす材料不均質性および幾何学的形状の影響を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

圧電アクチュエータをモデル化した複雑な組成・形状を有する傾斜機能圧電積層厚板に存在するき裂の熱衝撃応答、電気負荷応答および衝撃応答を厳密に理論解析し、応力拡大係数に及ぼす材料不均質性および幾何学的形状の影響を明らかにした。これらの研究成果は、圧電アクチュエータ中のき裂発生メカニズムを解明し、その強度評価ならびに機能評価の指針となる。すなわち、今後の発展が期待されている圧電アクチュエータの開発・設計上有益な知見を与えるものであるとともに、弾性数理解析の学問分野の確立に寄与するものである。

研究成果の概要(英文)：The fracture problems of a functionally graded piezoelectric material strip (FGPM strip) containing a crack perpendicular to the interface between the FGPM strip and a homogeneous layer under a thermal shock load, an electric load and a mechanical impact load are considered. By using the superposition technique and the Laplace-Fourier transforms techniques, the thermo-electro-mechanical fracture problem is reduced to a singular integral equation, which is solved numerically. The stress intensity factors are computed and presented for the various values of the nonhomogeneous and geometric parameters.

研究分野：破壊力学

キーワード：圧電材料 傾斜機能材料 破壊力学 弾性数理解析 電氣的負荷

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

傾斜機能材料は、スペースプレーンの外壁材として航空宇宙産業での実用化を目的に 1980 年代半ば頃から開発が始まっており、最近では、人口骨や熱電変換素子への適用が進められている。さらに、圧電アクチュエータの応力低減を目的として傾斜機能材料の概念を圧電材料に展開させた傾斜機能圧電材料の研究結果が報告されている。圧電アクチュエータは、微小変位制御における変位精度および応答速度に優位性を有しているが、変位レンジおよび発生力に関しては、十分と言えない。このため、屈曲型や積層型が開発されているが、変位レンジおよびコストの両面から屈曲型が比較的多く使用されている。屈曲型の場合、一枚の金属板に一枚の圧電材料を貼付けたユニモルフ型や二枚の圧電材料を用いて構成されるバイモルフ型が一般的であるが、金属板との接着層や金属電極層などの接合界面から剥離が発生することが知られている。このため、ユニモルフ型やバイモルフ型圧電アクチュエータの破壊挙動の解明が要望されるとともに、傾斜機能圧電材料の適用による圧電アクチュエータシステムの信頼性・健全性の確保が期待されている。

傾斜機能圧電材料単体の強度評価は、申請者以外にも国内外で精力的に行われているが、接合界面が存在する傾斜機能圧電アクチュエータシステムの電気熱弾性破壊力学的挙動を詳細に調査した研究は、界面の存在に起因する数学的困難さのためほとんど実施されていないのが現状である。しかしながら、ユニモルフ型やバイモルフ型の積層圧電アクチュエータシステムを対象とした場合、熱衝撃負荷によって発生する衝撃熱応力は、単層体の場合とは大きく異なることが予想され、傾斜機能圧電平板に存在するき裂の応力拡大係数に及ぼす金属層の材料特性などの影響を含めた検討が必要である。

### 2. 研究の目的

本研究では、金属平板に接合された傾斜機能圧電積層厚板中に存在するき裂を対象とした電気熱弾性破壊力学的検討を行う。破壊挙動と材料不均質性の関連を明らかにすることで、信頼性の高い圧電アクチュエータの設計が可能になることが期待される。

(1) 初期欠陥を模擬した微小内部き裂を有する積層厚板に機械的負荷が作用する場合を対象とした特異応力・電氣場に及ぼす不均質パラメータおよび幾何学的形状の影響を明らかにする。

(2) 同様の積層厚板の自由表面が急激に加熱・冷却される場合について、非定常応力・破壊力学的挙動に及ぼす不均質パラメータおよび幾何学的形状の影響を検討する。

(3) 積層厚板に電氣的負荷が作用する場合を対象に、材料内部に発生する応力を解明すると共に、き裂先端の特異応力を明らかにする。

(4) 積層厚板に機械的衝撃負荷が作用する場合を考え、動的応力拡大係数の時間的挙動を解明する。

(5) (1)～(4)の問題を積層厚板の自由表面に到達した縁き裂および界面に到達した破断層き裂の場合に拡張し、破壊力学パラメータを系統的に明らかにする。

(6) 熱衝撃負荷および電氣的負荷が作用する場合には、き裂面接触の発生が予想されるため、その発生メカニズムを解明する。

### 3. 研究の方法

図 1 に示す直角座標系  $(x, y, z)$  において、厚さ  $h_1$  の  $z$  軸方向に傾斜組成された傾斜機能圧電層および厚さ  $h_2$  の均質等方性弾性層から成る傾斜機能圧電積層厚板を考え、 $z$  軸上に長さ  $2c = b - a$  ( $0 \leq a < b \leq h_1$ ) の垂直き裂が存在するものとする。この積層厚板に以下の熱的・電氣的・機械的負荷が作用する問題を解析した。なお、傾斜機能圧電層および弾性体層の物性値はセレン化カドミウムおよびチタンとした。

(1)  $z = 0$  面の温度を固定した状態で、 $z = h_1$  面の温度が  $T_0 H(t)$  に変化する衝撃的熱負荷が作用する場合。ここに、 $T_0$  は任意温度、 $H(t)$  はヘビサイドの単位階段関数、 $t$  は時間を示す。

(2)  $z = 0$  面の電位を固定した状態で、 $z = h_1$  面に任意の電位  $\phi_0$  である電氣的負荷が作用する場合。

(3) 厚板に衝撃負荷が作用した第一近似として、き裂面に任意の衝撃応力  $-\sigma_0 H(t)$  が作用する場合。

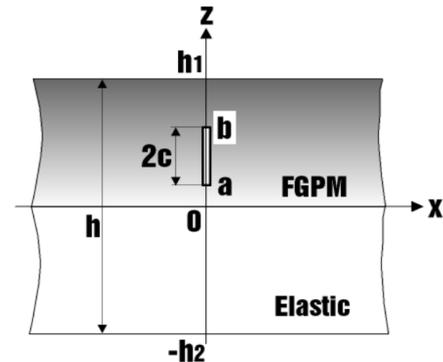


図 1 . 解析モデル

問題の解法には、弾性数理解析手法を用いた厳密な理論解析を用いた。具体的な解析手法としては、重ね合わせ法とフーリエ積分変換法を用い、問題の解を特異積分方程式の解に帰着する方法を採用した。得られた特異積分方程式をガウス - ヤコビの数値積分公式などを用いて数値解析し、応力拡大係数に注目した検討を加えた。熱衝撃負荷および機械的衝撃負荷による挙動は時間依存性を有するため、場の支配方程式をラプラス変換し、ラプラス像空間における解析を実施し、数値ラプラス逆変換法を適用して実空間における解を得た。また、熱衝撃負荷および電氣的負荷が作用する場合に発生する応力は、ひずみの適合条件式を用い、問題の性質を考慮することにより支配方程式の厳密解を得ることに成功した。

#### 4 . 研究成果

##### (1) 熱衝撃負荷が作用する場合

図 2 , 3 は、引用文献[1]で発表した計算結果の一部である。き裂先端  $z = a, b$  における標準化された応力拡大係数  $K_{IA}$  および  $K_{IB}$  の時間的挙動に及ぼす不均質パラメータ  $\beta h_1$  の影響を示したもので、 $F$  は無次元時間を表す。図 2 の実線および破線は、き裂面接触を考慮しない場合と考慮した場合である、き裂面接触を考慮により、 $K_{IA}$  が増大することが明らかになった。また、図 3 に示す  $K_{IB}$  は、き裂面接触によりゼロとなる時間範囲が存在する。破線は、き裂面接触によるき裂長さの変化を示したもので、き裂面接触によるき裂長さの減少を定量的に明らかにした。

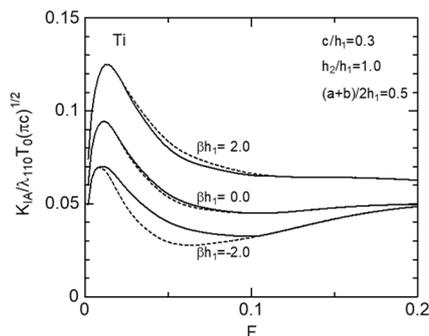


図 2 応力拡大係数  $K_{IA}$

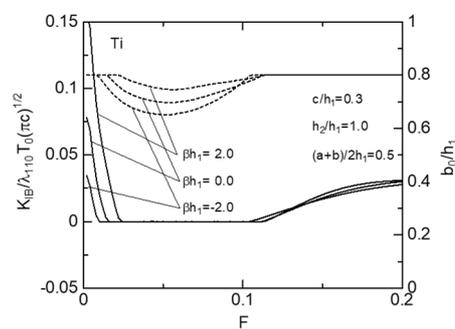


図 3 応力拡大係数  $K_{IB}$

(2) 電氣的負荷が作用する場合

図4は、引用文献[2]で発表した計算結果の一部である。き裂先端  $z = a, b$  における標準化された応力拡大係数  $K_{IA}$  および  $K_{IB}$  に及ぼす不均質パラメータ  $\beta h_1$  およびき裂位置  $(a+b)/2h_1$  の影響を示したもので、 $\sigma_0$  は電位に比例する基準応力である。応力拡大係数は、き裂位置により変動するが、その変動幅は不均質パラメータに大きく依存することを定量的に明らかにした。

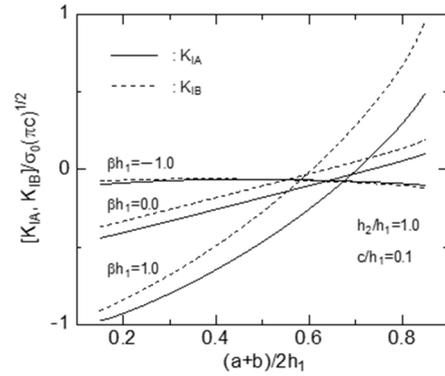


図4 応力拡大係数  $K_{IA}$  ,  $K_{IB}$

(3) 電氣的負荷が作用する場合

図5, 6は、引用文献[3]で発表した計算結果の一部である。き裂先端  $z = a, b$  における標準化された応力拡大係数  $K_{IA}$  および  $K_{IB}$  の時間的挙動に及ぼす不均質パラメータ  $\beta h_1$  および弾性体層の影響を示したもので、 $c_p$  はせん断波の伝播速度を表す。 $K_{IA}$  および  $K_{IB}$  は弾性体層の存在により、大きく低下することが明らかとなった。また、 $K_{IA}$  および  $K_{IB}$  に及ぼす不均質パラメータの影響は、 $K_{IA}$  および  $K_{IB}$  で逆の傾向を示すことを解明した。

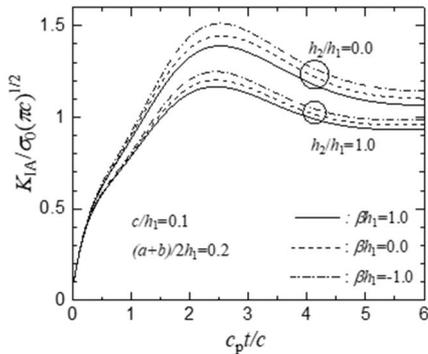


図5 応力拡大係数  $K_{IA}$

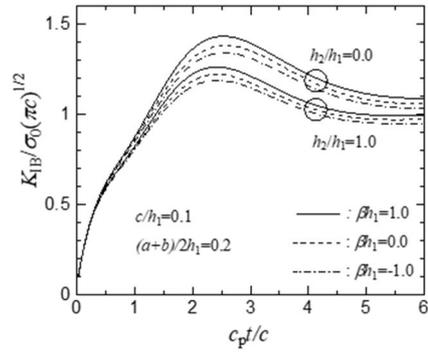


図6 応力拡大係数  $K_{IB}$

< 引用文献 >

- [1] Sei Ueda, Masayuki Okada and Yoshihisa Nakaue, Transient Thermal Response of a Functionally Graded Piezoelectric Laminate with a Crack Normal to the Bimaterial Interface, Journal of Thermal Stresses, 審査有, Vol.41, No.1, 2018, pp. 98 ~ 118.
- [2] Sei Ueda and Yuuta Yamabata, Stress intensity factor of a crack normal to the interface between a homogeneous and a functionally graded piezoelectric layers under an electric load, Bulletin of the JSME, Mechanical Engineering Journal, 審査有, Vol.7, Issue 5, 2021, pp.20-00325.
- [3] Sei Ueda and Ryosuke Naka, Dynamic response of a line crack perpendicular to the interface between a functionally graded piezoelectric strip and a homogeneous strip, Bulletin of the JSME, Mechanical Engineering Journal, 審査有, Vol.9, No.1, 2022, pp.21-00385.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sei Ueda and Ryousuke Naka	4. 巻 9
2. 論文標題 Dynamic response of a line crack perpendicular to the interface between a functionally graded piezoelectric strip and a homogeneous strip	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Bulletin of the JSME, Mechanical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 21-00386
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/mej.21-00385	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 上田 整, 山端優太	4. 巻 35
2. 論文標題 電氣的負荷が作用する傾斜機能圧電積層厚板の垂直き裂先端における特異電気弾性場	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Functionally Graded Materials	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sei Ueda and Yuuta Yamabata	4. 巻 7
2. 論文標題 Stress intensity factor of a crack normal to the interface between a homogeneous and a functionally graded piezoelectric layers under an electric load	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Bulletin of the JSME, Mechanical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 20-00325
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/mej.20-00325	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yoshiyuki Mabuchi and Sei Ueda	4. 巻 9
2. 論文標題 Transient Thermal Response of Functionally Graded Piezoelectric Laminates with an Infinite Row of Parallel Cracks Normal to the Bimaterial Interface	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Theoretical and Applied Mechanics Letters	6. 最初と最後の頁 289-292
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 上田 整, 馬淵由行	4. 巻 34
2. 論文標題 界面に垂直な平行き裂群を有する傾斜機能圧電積層厚板の非定常電気熱弾性応答	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Functionally Graded Materials	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sei Ueda, Masayuki Okada and Yoshihisa Nakaue	4. 巻 41
2. 論文標題 Transient Thermal Response of a Functionally Graded Piezoelectric Laminate with a Crack Normal to the Bimaterial Interface	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Thermal Stresses	6. 最初と最後の頁 98-118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 吉田優作, 山端 優太, 上田整
2. 発表標題 電氣的負荷が作用する傾斜機能圧電積層厚板の垂直き裂先端における特異電気弾性場
3. 学会等名 日本機械学会、M&M2021、材料力学カンファレンス
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y.Yamabata and S.Ueda
2. 発表標題 A crack normal to the interface between a functionally graded piezoelectric material strip and a homogeneous elastic layer under an electric load
3. 学会等名 The 8th Asian Conference on Mechanics of Functional Materials and Structures, ACMFMS2020+1 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Mabuchi, S.Ueda and Y. Nakaue
2. 発表標題 Transient Thermal Response of a Functionally Graded Piezoelectric Laminate with an Infinite Row of Parallel Cracks Normal to the Bimaterial Interface
3. 学会等名 The 12th International Congress on Thermal Stresses (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上田 整、馬淵由行、仲上佳寿
2. 発表標題 界面に垂直な平行き裂群を有する傾斜機能圧電積層厚板の非定常電気熱弾性応答
3. 学会等名 日本機械学会、2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上田 整、馬淵由行
2. 発表標題 界面に垂直なき裂を有する傾斜機能圧電積層厚板の非定常電気熱弾性応答
3. 学会等名 日本機械学会、M&M2018、材料力学カンファレンス
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------