

令和元年6月14日現在

機関番号：15201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26420015

研究課題名(和文)機能性不均質材料平板を伝播する応力振動の挙動解明と制御法開発

研究課題名(英文) Behavior and Control of Stress Oscillations Induced in Functional Inhomogeneous Plates

研究代表者

芦田 文博 (ASHIDA, FUMIHIRO)

島根大学・学術研究院理工学系・教授

研究者番号：60149961

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、衝撃圧力が作用した不均質圧電材料平板の動的弾性問題を解析し、弾性波の伝播によって誘起される応力振動の挙動を調査した。その結果より、圧縮性の定常応力振動が生じるか又は引張応力を伴った非定常応力振動が生じるかの支配因子は力学的インピーダンスであることが明らかになった。

次に、圧電材料や磁性材料で構成された不均質材料平板に衝撃圧力又は熱衝撃が作用した場合の動的弾性及び熱弾性問題を解析した。解析結果より、衝撃圧力が作用する場合は、適切な電位差又は磁位差の作用によって応力振動を抑制できることが示された。一方、熱衝撃が作用する場合は、磁界の作用によって熱応力振動を減衰できることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、不均質圧電材料平板に衝撃負荷が作用したとき、危険な引張応力を伴った非定常応力振動が生じること、力学的インピーダンスが定数になるように平板を設計すると、比較的安全な圧縮性の定常応力振動が生じることを示した。次に、圧電材料や磁性材料で構成された不均質材料平板において、不可避に力学的インピーダンスが変化する場合、電位差、磁位差または磁界の作用によって、危険な非定常応力振動を抑制できることを示した。

これらの研究成果は、独創的で学術的に意義があるとともに、薄膜層で構成されるナノ電子デバイス等では応力振動が破壊要因となるため、応力振動の抑制法の開発は社会的にも意義があると思われる。

研究成果の概要(英文)：In this study, an elasto-dynamic problem of an inhomogeneous piezoelectric thin plate subjected to impact pressure was analyzed first and behavior of the stress oscillation caused by the elastic wave propagation was investigated. Obtained results indicate that the mechanical impedance governs whether a compressive steady stress oscillation or an unsteady stress oscillation with tensile stress is induced.

Secondly, electro-elasto-dynamic and thermo-electro-elasto-dynamic problems of inhomogeneous thin plates composed of a piezoelectric material and/or a magnetic material were analyzed, when the plates were subjected to impact pressure or thermal shock. Obtained results illustrate that the stress oscillation induced by the impact pressure decreases when an appropriate electric or magnetic potential is applied to the plate. On the other hand, the thermal stress oscillation induced by the thermal shock attenuates as time advances when an appropriate magnetic field is applied to the plate.

研究分野：材料力学

キーワード：不均質材料平板 動的弾性問題 動的熱弾性問題 応力振動挙動 力学的インピーダンス 応力振動抑制法 圧電効果 磁性効果

1. 研究開始当初の背景

物性値が連続的に変化する不均質材料平板の動的弾性問題は、傾斜機能材料の登場によって注目され、1990年頃から盛んに研究されているが、多くは調和振動解析である。一方、衝撃負荷を受けて不均質材料平板内を弾性波動が伝播する場合の動的弾性問題に関する論文は少なく、そのほとんどはごく短時間内の近似解を導いた研究で、長時間までの解析は困難なために数値解析例が幾つか報告されているのみである。従って、応力振動の挙動を詳細に調査した研究は見当たらない。

申請者らは、2007年から、一方の表面が固定され、他方の表面に衝撃圧力が作用した不均質材料平板の動的弾性問題を、厚さ方向に物性値が指数関数状に変化する場合について理論解析する研究に取り組み、解析解を導くことに成功した。得られた解析解の数値計算を物性値の変化が異なる2つの不均質材料平板について行ったところ、

① 定常応力振動：応力振動が圧縮性で単調かつ周期的に変化する場合

② 非定常応力振動：応力振動が引張応力を伴って複雑かつ非周期的に変化する場合

と異なった挙動が現れた。①の場合の定常応力振動は均質材料平板に生じる応力振動と挙動が同じである。一方、②の場合の非定常応力振動では、最大振幅が①の場合に比べて約2倍となり、圧縮負荷が作用しているのにも拘わらず、作用した圧力の大きさにほぼ等しい引張応力が生じ、破壊の危険性が高まることが示された。従って、引張応力を伴う非定常応力振動が生じる要因や支配因子を明らかにすることは重要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、衝撃圧縮負荷や熱衝撃負荷が作用する不均質材料平板において

- ・弾性波動の伝播によって誘起される定常および非定常応力振動の挙動を明らかにすること
 - ・応力振動が定常か、それとも非定常か、その異なる挙動を支配する因子を特定すること
 - ・支配因子の物理的意味、つまり非定常応力振動を引き起す物理現象を明らかにすること
 - ・危険な非定常応力振動が生じないように、不均質材料平板を設計する手法を開発すること
- さらに、不均質圧電材料平板やマルチフェロイック不均質複合材料平板において
- ・圧電効果や磁歪効果などによって危険な非定常応力振動を制御する手法を開発すること
- である。もって、不均質材料平板を安全に使用するための技術資料を提供し、社会に貢献する。

3. 研究の方法

本研究計画・方法の概要は次の通りである。

- ・物性値が厚さ方向に指数関数状に変化する理想的な不均質材料平板の動的弾性および熱弾性問題の解析解を数学的に、数値結果を物理的に考察して応力振動の支配因子を特定し、危険な非定常応力振動が生じないように不均質材料平板を設計する手法を開発する。
- ・現実的な不均質材料平板の動的弾性および熱弾性問題を特性曲線法で数値解析し、理想的な不均質材料平板の解析解や数値結果から得られた支配因子や設計手法の妥当性を検証する。
- ・不均質圧電材料平板やマルチフェロイック不均質複合材料平板の動的弾性および熱弾性問題をそれぞれ解析し、圧電効果や磁歪効果を利用して、危険な非定常応力振動を効果的に制御する手法を開発する。

4. 研究成果

(1) 応力振動の挙動の解明

厚さ方向に物性値が指数関数状に変化する理想的な不均質圧電材料平板において、一方の表面が剛体平面に固定され、他方の表面に衝撃圧力が作用し、両表面に電束密度が作用しない場合の動的弾性問題を理論解析した結果、解析解を導くことに成功した。不均質材料平板の固定された表面の圧電材料にPZT-4を選んで、解析解に基づいて数値計算を行い、

① 定常応力振動：応力振動が圧縮性で単調かつ周期的になる場合

② 非定常応力振動：応力振動が危険な引張応力を伴って複雑かつ非周期的になる場合

と、2つの異なる挙動が生じる要因を調査した。数学的には、無限級数で表される応力の解析解の特性方程式形が異なり、特性方程式を満たす無限個の根が第1番目に対して、①の場合は整数倍に大きくなり、②の場合は非整数倍に大きくなった。その結果、応力の第1次成分の周期に対して高次成分の周期が、①の場合は整数倍となるために応力波形が重なって圧縮性で単調な矩形になるが、②の場合は非整数倍となるために応力波形がずれて引張応力が生じ複雑になることが明らかになった。次に、特性方程式の根を調査したところ、①の場合は力学的インピーダンスが一定になり、一方、②の場合は力学的インピーダンスが位置の関数になって変化することが分かった。つまり、応力振動の挙動を支配する物理的因子は力学的インピーダンス

であることが特定された。従って、危険な引張応力を伴った非定常応力振動が生じないように不均質材料平板を設計するためには、力学的インピーダンスが一定になるように物性値の変化を決定すればよいことが判明した。

力学的インピーダンスが一定な場合、不均質材料平板における運動方程式を空間変数について変数変換すると、均質材料平板における運動方程式と同形に帰着されることが分った。従って、両者における動的弾性場は物理的に同じ挙動を示すことが裏付けられた。

(2) 不均質圧電材料平板における非定常応力振動の抑制

厚さ方向に物性値が指数関数状に変化する理想的な不均質圧電材料平板において、一方の表面が剛体平面に固定され、他方の表面に衝撃圧力が作用し、両表面間に電位差が印加された場合の動的弾性問題の理論解析を行ったところ、解析解を導くことに成功した。不均質材料平板の固定された表面の圧電材料に PZT-4 を選んで、解析解に基づいて数値計算を行ったところ、力学的インピーダンスが定数の場合でも変化する場合でも、引張応力を伴って複雑な挙動を示す非定常応力振動が生じることが分かった。印加電位差をパラメータにとって非定常応力振動に及ぼす影響を調査したところ、印加電位差が大きくなるのにつれて、非定常応力振動の振幅が小さくなり、やがて非定常応力振動は完全に消滅して応力は作用した圧力に恒等的に等しくなった。さらに、印加電位差が大きくなると、非定常応力振動の位相が反転し、逆に振幅が大きくなった。解析解を精査したところ、非定常応力振動が完全に消去されるときの条件式が導かれ、印加電位差は作用した衝撃圧力及び圧電係数と誘電率から決定できることが分った。なお、この条件式を適用して求めた印加電位差は、印加電位差をパラメータにとって非定常応力振動が完全に消滅するように決定したときの印加電位差に一致した。

次に、絶縁材料のステアタイトと圧電材料の PZT-4 で構成され、厚さ方向に物性値が構成材料の体積分率に従って変化する現実的な不均質圧電材料平板について、前問と同じ境界条件の下に、つまり一方の表面が剛体平面に固定され、他方の表面に衝撃圧力が作用し、両表面間に電位差が印加されたときの境界条件の下に、動的弾性問題の数値解析を特性曲線法を適用して行った。その結果、前問の結果と同様に、非定常応力振動の挙動、つまり印加電位差が大きくなるのにつれて、非定常応力振動の振幅が小さくなって、やがて非定常応力振動は完全に消滅し、その後非定常応力振動の位相が反転して逆に振幅が大きくなった。非定常応力振動が完全に消滅するときの印加電位差は、前問の解析解より導かれた条件式から決定できることが判明した。さらに、電位差を印加する表面に関する圧電材料の体積の一次モーメントの逆数は非定常応力振動が完全に消滅するときの印加電位差とほぼ線形関係になることが示された。よって、非定常応力振動を完全に消滅させる印加電位差の支配因子は圧電材料の体積の一次モーメントであることが分かった。

(3) 不均質圧電材料平板における非定常熱応力振動の抑制

厚さ方向に物性値が指数関数状に変化する理想的な不均質圧電材料平板において、一方の表面が基準温度に保たれ、他方の表面に熱衝撃が作用し、両表面間に電位差が印加された場合の動的熱弾性問題の理論解析を行ったところ、解析解を導くことに成功した。不均質材料平板の固定された表面の圧電材料に PZT-4 を選んで、解析解に基づいて数値計算を行ったところ、非定常熱応力振動が生じた。この非定常熱応力振動は、印加電位差が大きくなるのにつれて、振幅が大きくなった。ただし、無次元印加電位差が 3 以内の場合、印加電位差が非定常熱応力振動に及ぼす影響は僅かで、最大引張応力と最大圧縮応力の増加は 10% 以内であった。無次元印加電位差が 3 を超えると、非定常熱応力振動が増幅される傾向は顕著になった。この結果は、機能性薄膜の積層構造であるナノサイズの電子デバイスでは低電圧で作動するため、許容電圧を決める際に重要となる。

次に、絶縁材料のステアタイトと圧電材料の PZT-4 で構成され、厚さ方向に物性値が構成材料の体積分率に従って変化する現実的な不均質圧電材料平板において、前問と同じ境界条件の下に、つまり一方の表面が基準温度に保たれ、他方の表面に熱衝撃が作用し、両表面間に電位差が印加されたときの境界条件の下に、動的熱弾性問題を特性曲線法を適用して数値解析を行った。その結果、前問の場合と同様の結果が得られた。

(4) マルチフェロイック不均質複合材料平板における非定常応力振動の抑制

圧電材料のチタン酸バリウムと磁歪材料のコバルト・フェライトで構成され、物性値が厚さ方向に構成材料の体積分率に従って変化する現実的なマルチフェロイック不均質複合材料平板において、一方の表面が剛体平面に固定され、他方の表面が衝撃圧力を受け、両表面間に電位差又は磁位差が作用した場合の動的弾性問題の数値解析を、特性曲線法を適用して行った。その結果、平板に非定常応力振動が生じることと、非定常応力振動は適切な電位差または磁位差を平板に作用させることによって効果的に抑制できることが示された。ただし、非定常応力振動を完全に消滅させることはできなかった。

(5) 不均質磁性材料平板における非定常熱応力振動の抑制

炭素鋼と酸化アルミニウムで構成され、物性値が厚さ方向に構成材料の体積分率に従って変化する現実的な不均質磁性材料平板において、一方の表面が基準温度に保たれ、他方の表面に熱衝

撃が作用し、さらに平板に磁界が作用した場合の動的熱弾性問題の数値解析を、特性曲線法を適用して行った。その結果、平板に非定常熱応力振動が生じることと、作用した磁界の影響によって非定常熱応力振動は時間経過につれて減衰することが分った。

なお、圧電材料のチタン酸バリウムと磁歪材料のコバルト・フェライトで構成され、物性値が厚さ方向に構成材料の体積分率に従って変化する現実的なマルチフェロイック不均質複合材料平板を対象に、一方の表面が基準温度に保たれ、他方の表面が熱衝撃を受け、両表面間に電位差又は磁位差が作用した場合の動的熱弾性問題についても特性曲線法を適用して数値解析を行った。しかし、電位差又は磁位差の作用によって非定常熱応力振動を殆ど抑制できないことが分った。

従って、非定常熱応力振動の抑制には磁界の作用が効果的であることが明らかになった。

なお、(3)～(5)の研究成果は未だ学術雑誌に投稿していないため、今後、研究成果を取りまとめて学術雑誌へ投稿する予定である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

- ① Mamoru Notsu, Fumihiko Ashida, Takuya Morimoto, Analysis of One-dimensional Generalized Magneto-thermoelastic Problems in Functionally Graded Material Thin Films, Proceedings of the 6th Asian Conference on Mechanics of Functional Materials and Structures, pp. 118-121, 2018 (4 (5) の研究成果の一部)
- ② Fumihiko Ashida, Takuya Morimoto, Hidenori Ozaki, Active Cancellation of Unsteady Stress Oscillation in a Functionally Graded Piezoelectric Thin Plate Subjected to Impact Loading, European Journal of Mechanics A/Solids, Vol. 67, pp. 84-91, 2018 (査読あり, 4 (2) の研究成果)
- ③ Fumihiko Ashida, Takuya Morimoto, Hidenori Ozaki, Control of Complicated Stress Oscillations in FGPM Thin Plates, Procedia IUTAM, Vol. 20, pp. 42-49, 2017 (査読あり, 4 (1) の研究成果)

[学会発表] (計17件)

- ① 桑原 涼, 芦田文博, 森本卓也, 圧電材料と磁歪材料とで構成された傾斜機能性平板の応力振動解析, 日本機械学会中国四支部第57期総会・講演会, 2019年3月7日, 山口大学工学部
- ② 極楽寺誠一, 芦田文博, 森本卓也, 傾斜機能性圧電薄膜における熱弾性挙動の特性曲線法による数値解析, 日本機械学会 M&M2018 材料力学カンファレンス, 2018年12月22～24日, 福井大学工学部
- ③ 勝部将治, 芦田文博, 森本卓也, 傾斜機能性圧電薄膜における熱弾性挙動の数理解析, 日本機械学会 M&M2018 材料力学カンファレンス, 2018年12月22～24日, 福井大学工学部
- ④ Mamoru Notsu, Fumihiko Ashida, Takuya Morimoto, Analysis of One-dimensional Generalized Magneto-thermoelastic Problems in Functionally Graded Material Thin Films, The 6th Asian Conference on Mechanics of Functional Materials and Structures, October 26-29, 2018, National Cheng Kung University, Tainan, Taiwan
- ⑤ Fumihiko Ashida, Takuya Morimoto, Hidenori Ozaki, Electro-elastodynamic Behavior of Functionally Graded Piezoelectric Thin Plates, The 15th International Symposium on Functionally Graded Materials, August 5-8, 2018, Kitakyushu International Conference Center, Kitakyushu, Japan (Keynote Lecture)
- ⑥ 野津 守, 芦田文博, 森本卓也, 傾斜機能磁性薄膜における一般化された一次元電磁熱弾性問題の解析, 日本機械学会中国四支部第56期総会・講演会, 2018年3月7日, 徳島大学理工学部
- ⑦ 芦田文博, 森本卓也, 三浦孝政, 傾斜機能性圧電平板における応力振動の抑制, 日本機械学会 M&M2017 材料力学カンファレンス, 2017年10月7日～9日, 北海道大学工学部
- ⑧ 篠岡雄輝, 芦田文博, 森本卓也, 傾斜機能性圧電平板における動的弾性問題の特性曲線解析, 日本機械学会第30回計算力学講演会, 2017年9月16～18日, 近畿大学東大阪キャンパス
- ⑨ Fumihiko Ashida, Takuya Morimoto, Hidenori Ozaki, Analysis of Dynamic Electro-elastic Problem in a Functionally Graded Piezoelectric Thin Plate, The 20th International Conference on Composite Structures, September 4-7, 2017, Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris, France
- ⑩ Fumihiko Ashida, Takuya Morimoto, Numerical Simulation of Stress Oscillation in a Functionally Graded Piezoelectric Thin Plate, The 8th International Conference on Computational Methods, July 25-29, 2017, Hotel Grand Bravo Guilin, Guilin, China

- ⑪ Takamasa Miura, Fumihiko Ashida, Takuya Morimoto, Analysis of a One-dimensional Dynamic Thermoelastic Problem in a Functionally Graded Piezoelectric Thin Film, The 5th Asian Conference on Mechanics of Functional Materials and Structures, October 14-17, 2016, Shanghai University, Shanghai, China
- ⑫ Fumihiko Ashida, Takuya Morimoto, Hidenori Ozaki, Control of Complicated Stress Oscillations in FGPM Thin Plates, The 24th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, August 21-26, 2016, Montréal Convention Center, Montréal, Canada (Invited Lecture)
- ⑬ 三浦孝政, 芦田文博, 森本卓也, 傾斜機能性圧電薄膜における一次元的熱弾性問題の解析, 日本機械学会中国四国支部第 54 期総会・講演会, 2016 年 3 月 8 日, 愛媛大学城北キャンパス
- ⑭ 芦田文博, 森本卓也, 傾斜機能性材料薄膜の熱応力振動解析, 第 26 回新構造・機能制御と傾斜機能材料シンポジウム, 2015 年 9 月 29 日～30 日, 九州大学西新プラザ
- ⑮ 芦田文博, 森本卓也, 尾崎秀典, 傾斜機能性圧電薄膜の応力振動解析, 2015 年度日本機械学会年次大会, 2015 年 9 月 13 日～16 日, 北海道大学工学部
- ⑯ Hidenori Ozaki, Fumihiko Ashida, Takuya Morimoto, Effect of Piezoelectric Actuation on Elastodynamic Behavior in a Functionally Graded Piezoelectric Thin Film, The 4th Asian Conference on Mechanics of Functional Materials and Structures, October 10-13, 2014, Nara Prefectural New Public Hall, Nara, Japan
- ⑰ Fumihiko Ashida, Takuya Morimoto, Thermal Stress Oscillation Behavior in a Functionally Graded Material Thin Film, The 11th World Congress on Computational Mechanics, July 20-25, 2014, Palace of Congresses of Catalonia, Barcelona, Spain

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

http://www.ecs.shimane-u.ac.jp/~em/index_jp.html

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

なし