

令和 4 年 5 月 13 日現在

機関番号：15201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04076

研究課題名(和文) 機能性材料で構成された不均質平板に生じる応力振動の適応的ロバスト制御

研究課題名(英文) Adaptive Robust Control of Stress Oscillations in Nonhomogeneous Plates Composed of Functional Materials

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) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、傾斜機能性マルチフェロイック複合材料平板に未知の衝撃圧力が作用して表面間の電位差振動が測定された場合を想定し、平板内に生じる危険な非定常応力振動を適応的に制御できる解析モデルを提案した。初めに、動的弾性逆問題を解析し、電位差から未知の衝撃圧力が推定できることを示した。次に、平板に適切な磁気的負荷が作用した場合について動的弾性順問題を解析し、非定常応力振動が効果的に抑制できることを示した。さらに、抑制後の電位差振動から非定常応力振動の抑制状態をモニタリングできることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

傾斜機能性平板に衝撃負荷が作用すると、平板内に引張応力を伴って振幅が大きく変動する非定常応力振動が生じる。そこで、損傷を防ぐために、衝撃負荷に適応して非定常応力振動を制御するモデルの提案が必要になっている。本研究の学術的価値は、未知の衝撃負荷が作用した場合の傾斜機能性マルチフェロイック複合材料平板を解析モデルに、圧電効果と磁歪効果を利用すると、非定常応力振動を適応的に制御でき、さらに制御後に非定常応力振動をモニタリングできることを示したことである。今後、波動伝播及び微小変位や振動などを適応的に制御する研究に発展することが期待される。

研究成果の概要(英文)：In this study, an analytical model is proposed, which can adaptively control an unsteady stress oscillation caused in a functionally graded multiferroic composite thin plate by the action of unknown impact loading. First, an inverse elastodynamic problem has been analyzed, when a piezoelectric voltage is assumed to be measured across the thin plate. Next, a direct elastodynamic problem has been analyzed, when appropriate magnetic loading is applied to the thin plate. It is seen from the obtained numerical results that the unknown impact loading can be inferred from the knowledge of the measured voltage and then the unsteady stress oscillation can be successfully controlled. Furthermore, the controlled unsteady stress oscillation is found to be monitored by measuring the voltage oscillation across the thin plate.

研究分野：材料力学

キーワード：傾斜機能性平板 マルチフェロイック材料 動的弾性問題 特性曲線法 非定常応力振動 適応的制御
圧電効果 磁歪効果

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

物性値が連続的に変化する傾斜機能材料など、不均質性を有する構造材料の力学的研究が1990年頃から注目され、今日まで多様な研究が数多く行われてきている。不均質材料は、構成材料が持つ力学的特性をそれぞれ発現して多機能化できるため、機械構造物に不均質はりや平板などが、MEMSなどの微小多機能デバイスに不均質薄膜層が利用されている。一般的に、平板などは薄くなるのにつれて、衝撃負荷を受けたときに動的挙動が顕著に現れ、弾性波が焦点化して応力が極大化又は極小化するために、構造物の健全性に悪影響を及ぼし、破壊に繋がる恐れがあることは広く知られている。このような観点から、不均質体の動的弾性問題は数多く報告されているが、その殆どは調和弾性波動の伝播挙動解析であり、傾斜機能性構造物に衝撃負荷が作用したときに生じる動的応力の挙動を長時間に亘って解析した研究は、最も現実的で実用上重要であるにも拘らず、非常に少ない。

以上のような研究動向を踏まえ、研究代表者は2010年頃より、衝撃圧縮負荷を受ける傾斜機能性平板の動的弾性問題を解析して動的応力の長時間挙動を調査した。その結果、均質平板に生じる圧縮性の定常応力振動とは異なり、傾斜機能性平板には引張応力を伴って振幅が大きく変動する非定常応力振動が生じることを明らかにした。さらに、圧電材料と構造材料で構成された傾斜機能性平板の動的弾性問題を解析し、圧電効果によって非定常応力振動を効果的に抑制できることを示した。しかし、この制御モデルは衝撃負荷が既知の場合にしか適用できない。

そこで、より現実的な適応的制御モデルとして、未知の衝撃負荷が傾斜機能性平板に作用して電位差が測定された場合を想定し、電位差から未知の衝撃負荷を推定した後に非定常応力振動を制御するモデルが必要となっている。ところで、2000年頃より、圧電材料と磁歪材料で構成されたマルチフェロイック複合材料が注目されている。この材料を利用すると、圧電効果によるセンシング機能と磁歪効果によるアクチュエータ機能が発現できるため、非定常応力振動の発生を検知して制御することが可能であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、圧電材料と磁歪材料で構成される傾斜機能性マルチフェロイック複合材料平板に未知の衝撃圧縮負荷が作用して、圧電効果によって平板の表面間に生じた電位差が測定された場合を想定し、非定常応力振動を適応的に制御できる現実的な解析モデルを構築するとともに、適応的制御機能つまりセンシング機能、アクチュエータ機能及びモニタリング機能の発現法を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

仮定した初期条件及び境界条件の下に、傾斜機能性マルチフェロイック複合材料平板の動的弾性問題を数値解析する。この解析には、精確な数値解が得られる特性曲線法を適用している。

・センシング機能

傾斜機能性平板に未知の衝撃圧縮負荷が作用し、圧電効果によって平板の表面間に生じた電位差の時間経過が測定された場合を想定して、動的弾性逆問題を解析する。これにより、測定された電位差から未知の衝撃圧縮負荷を決定するセンシング機能の発現法を確立する。

・アクチュエータ機能

傾斜機能性平板に既知の衝撃圧縮負荷と磁氣的負荷が作用した場合の動的弾性順問題を解析し、磁氣的負荷の大きさが非定常応力振動の減衰に及ぼす影響を調査する。これにより、非定常応力振動を制御するアクチュエータ機能の発現法を確立する。

・適応的制御機能

センシング機能とアクチュエータ機能を組み合わせて、測定された電位差から未知の衝撃圧縮負荷を推定し、次に磁氣的負荷を作用させることによって非定常応力振動を抑制し、さらに抑制後の電位差振動から非定常応力振動の抑制状態をモニタリングする適応的制御機能の発現法を確立する。

4. 研究成果

(1) 磁位差による非定常応力振動の適応的制御

主要な研究成果として、圧電材料と磁歪材料で構成される傾斜機能性マルチフェロイック複合材料平板の解析結果について述べる。

図1に示す解析モデルにおいて、平板の上表面は磁歪材料で、下表面は圧電材料とする。平板の物性値は磁歪材料と圧電材料の体積分率に従って変化するものと仮定する。このとき、圧電材料と磁歪材料の体積分率はそれぞれ $\hat{V}_p = (z/l)^n$ と $\hat{V}_m = 1 - \hat{V}_p$ で表され、 n は体積分率指数である。なお、磁氣的負荷によ

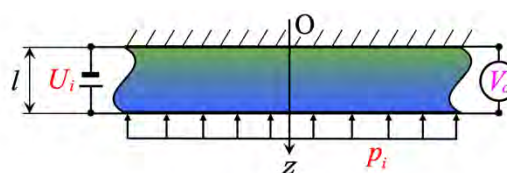


図1 磁位差が印加されたときの傾斜機能性マルチフェロイック複合材料平板

って非定常応力振動を抑制するときは磁歪材料の多い方が有利なため、体積分率指数が $n \leq 1$ の場合を考える。また、磁位差を印加する時間を \bar{t}_d 、応力振動と電位差振動の周期を $2\bar{t}_p$ で表す。

体積分率指数が $n=1$ の傾斜機能性平板に単位衝撃圧力が作用した場合の動的弾性順問題を、磁位差が印加されないときと初めから磁位差が印加されたときについてそれぞれ解析した。得られた数値結果より、平板の中央面における動的応力と表面間の電位差の時間的経過を図2と3に示す。図2より、磁位差が印加されていないときには平板に引張応力を伴った非定常応力振動が生じるが、適切な磁位差を印加することによって振幅の小さい圧縮性の非定常応力振動に抑制できることが分かる。また、印加磁位差が大きくなるにつれて、非定常応力振動の振幅は小さくなって、 $\bar{U}_i = -8714$ のときに最小となり、その後位相が反転して振幅が大きくなっている。従って、非定常応力振動を抑制する印加磁位差には最適値がある。図3より、応力振動の振幅に応じて電位差振動の振幅が変化していることから、電位差振動の抑制率から応力振動の抑制率が推定できることが分かる。なお、最大絶対電位差 $\bar{V}_{o\max}$ は第1周期において生じている。

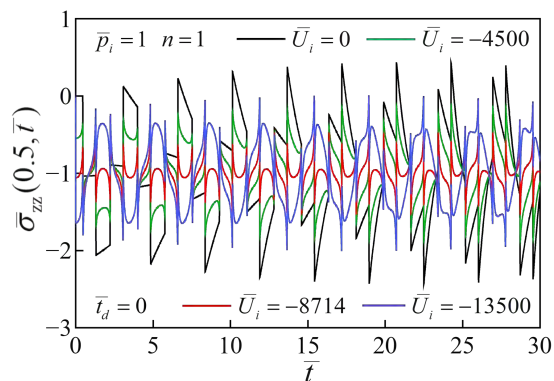


図2 平板の中央面における動的応力

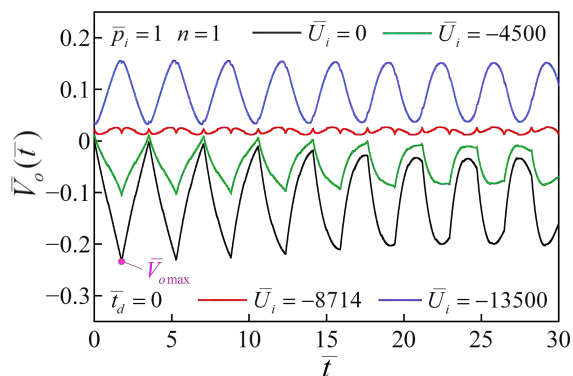


図3 平板の表面間における電位差

図4に体積分率指数と最適印加磁位差の関係を示す。この図より、両者はほぼ線形関係になっている。図5に示した体積分率指数と最大絶対電位差の関係より、両者は4次関数で近似できることが分る。体積分率指数が $n=0.1 \sim 1$ の場合に、最適磁位差を第1~5周期から平板に印加した場合の非定常電位差振動の抑制率を図6に示す。ある条件の下で非定常応力振動を抑制した場合、そのときの非定常電位差振動の抑制率が図6に示す抑制率に近いれば、非定常応力振動がほぼ最小に抑制されたものと推測できる。

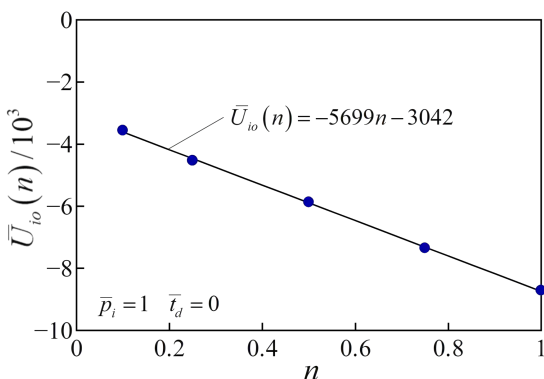


図4 体積分率指数と最適印加磁位差の関係

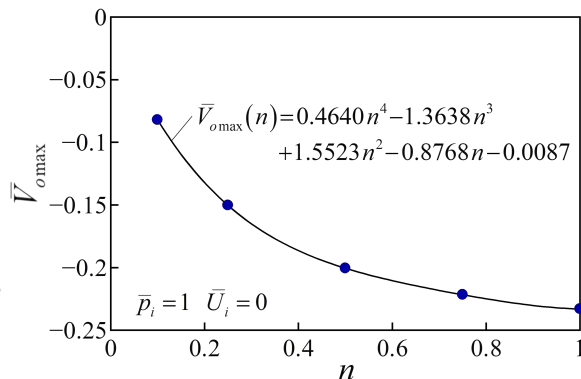


図5 体積分率指数と最大絶対電位差の関係

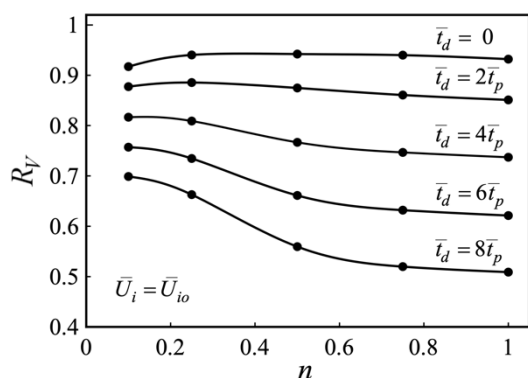


図6 非定常電位差振動の抑制率

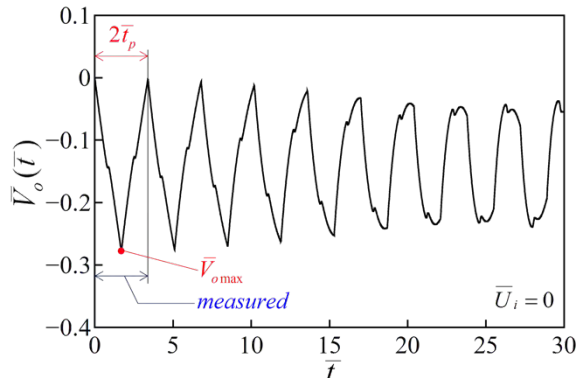


図7 測定されたものと仮定した電位差

体積分率指数が未知の傾斜機能性平板に未知の衝撃圧力が作用し、図 7 に示すように表面間の電位差が一周期分だけ測定されたものと仮定する。この図より、非正常電位差振動の周期と最大絶対電位差を読取ると、 $2\bar{t}_p = 3.3993$ と $\bar{V}_{o\max} = -0.27847$ になる。周期は弾性波の伝播速度の逆数を座標変数で積分すると求められるので、両者の関係を表す近似 2 次関数を導き、周期から体積分率指数を $n = 0.52277$ と推定した。単位衝撃圧力が作用したときの最大絶対電位差は、推定された体積分率指数を図 5 の関係式に代入すると、 $\bar{V}_{o\max} = -0.20304$ となった。この最大絶対電位差で図 7 から読み取った最大絶対電位差を除すと、作用した未知の衝撃圧力は $\bar{p}_i = 1.3715$ と推定できた。さらに、推定された体積分率指数を図 4 の関係式に代入すると、適切な印加磁位差は $\bar{U}_i = -8259.4$ となった。なお、これらの計算は第 2 周期中に終わることができると仮定した。

適切な磁位差を第 3 周期から平板に印加して制御したときの非正常応力振動と電位差振動を、制御しない場合と比較して図 8 と 9 に示す。図 8 より、応力振動は第 3 周期から効果的に抑制できており、最大振幅の抑制率は約 50% である。なお、図 9 から求めた制御後の電位差振動の抑制率は約 73% で、図 6 から読み取った電位差振動の抑制率の約 75% に近い値になった。従って、図 8 に示した非正常応力振動は第 3 周期からほぼ最小に抑制されたものと推測できる。

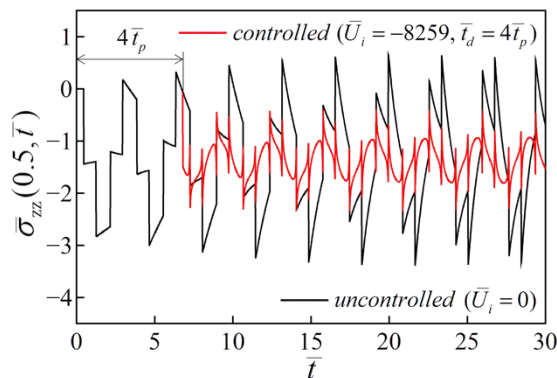


図 8 磁位差の印加による非正常応力振動の適応的制御

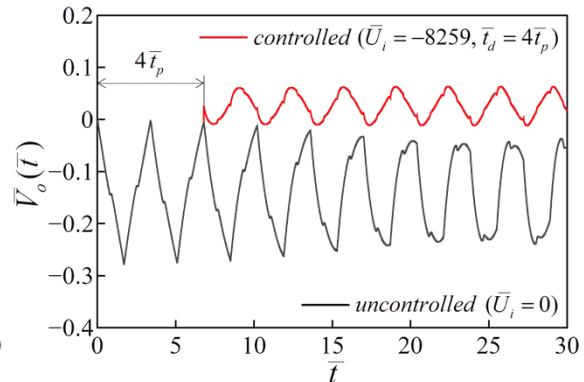


図 9 適応的に制御された場合の電位差

(2) 磁界の強さによる非正常応力振動の適応的制御

図 10 に示すように、体積分率指数が未知の傾斜機能性マルチフェロイック複合材料平板に未知の衝撃圧力が作用し、図 7 に示すような表面間の電位差が一周期分測定されたものと仮定した場合に、第 3 周期から適切な磁界の強さを印加することによって非正常応力振動を適応的に制御したときの結果について述べる。

磁界の強さが印加されたときの非正常応力振動を、磁界の強さが印加されない場合と比較して図 11 に示す。この図より、非正常応力振動は磁界の強さの作用によって徐々に減衰し、その減衰効果は磁界の強さの大きい方が顕著になっている。これは、磁界の強さによって発生するローレンツ力は運動方程式の減衰項に含まれるので、磁界の強さにつれて減衰項が大きくなるためである。従って、印加する磁界の強さは可能な限り大きい方が望ましい。また、磁界の強さの効果は減衰であるため、周期に関係なくいつ印加しても構わないので、ロバスト性に優れている。

図 8 と 11 を比較すると、非正常応力振動は磁位差を印加した場合には直ぐに抑制されているが、磁界の強さを印加した場合には減衰するまでにかかなり時間を要している。従って、応答性を優先する場合には磁位差による制御を、ロバスト性を優先する場合には磁界の強さによる制御を選択すべきである。

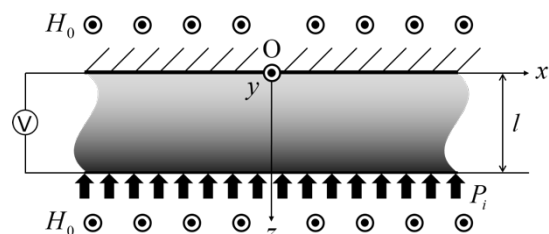


図 10 磁界の強さが印加されたときの傾斜機能性マルチフェロイック複合材料平板

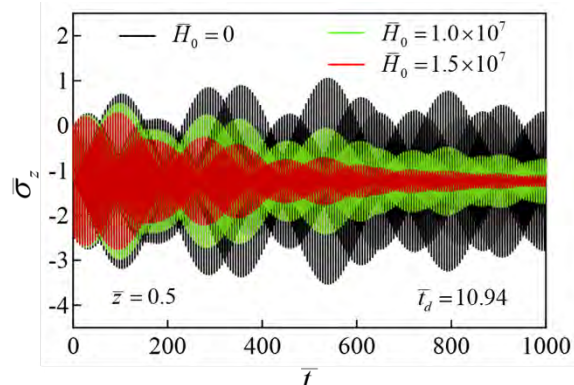


図 11 磁界の強さの印加による非正常応力振動の適応的制御

(3) 動的弾性逆問題の解析

上述した (1) と (2) の場合、動的弾性逆問題を直接解析しないで、順問題の解析結果を利用して逆問題の解を導いている。ここでは、動的弾性逆問題を直接解いて、測定されたものと仮

定した電位差振動から作用した衝撃圧力を決定したときの結果について概略を述べる。

図 7 に示すような電位差振動が長時間に亘って測定されたものと仮定した場合の動的弾性逆問題を、特性曲線法を適用して極く短い時間ステップごとに数値解析したところ、作用した衝撃圧力を精度良く求めることができた。しかし、解析に長時間を要するため、動的応力の時間的経過にとっても追従できない。つまり、第 1 周期で測定された電位差から衝撃圧力を第 2 周期中に求め、第 3 周期から適切な磁氣的負荷を作用させることは全く不可能であった。

しかし、測定不可能な平板内の非定常応力振動の挙動を測定可能な非定常電位差振動から知りたいときには、つまり動的現象に追従する必要がないときには、特性曲線法による動的弾性逆問題の解析は有用であると考えられる。

以上の結果より、研究目的は概ね達成できたものと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 F. Ashida, T. Morimoto, R. Kuwahara	4. 巻 未定
2. 論文標題 Adaptive control of an unsteady stress oscillation in a functionally graded multiferroic composite thin plate	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 European Journal of Mechanics - A/Solids	6. 最初と最後の頁 104643
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.euromechsol.2022.104643	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 F. Ashida, T. Morimoto, R. Kuwahara
2. 発表標題 Adaptive control of an unsteady stress oscillation in a functionally graded multiferroic composite thin plate
3. 学会等名 The 25th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 AO RIGELE, 桑原涼, 芦田文博, 森本卓也
2. 発表標題 傾斜機能性マルチフェロイック複合薄板における動的弾性逆問題の特性曲線解析
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 S. Taniguchi, F. Ashida, T. Morimoto
2. 発表標題 Control of Unsteady Stress Oscillation in a Functionally Graded Multiferroic Composite Thin Plate
3. 学会等名 The 7th Asian Conference on Mechanics of Functional Materials and Structures（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Nishi, F. Ashida, T. Morimoto
2. 発表標題 Mathematical Analysis of an Inverse Elastodynamic Problem in a Functionally Graded Piezoelectric Thin Plate
3. 学会等名 The 7th Asian Conference on Mechanics of Functional Materials and Structures (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 F. Ashida, T. Morimoto, S. Katsube
2. 発表標題 Behavior of Thermal Stress Oscillation in a Functionally Graded Piezoelectric Thin Film
3. 学会等名 12th International Congress on Thermal Stresses (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 桑原涼, 芦田文博, 森本卓也
2. 発表標題 傾斜機能性マルチフェロイック複合薄板の応力振動解析
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 西颯也, 芦田文博, 森本卓也
2. 発表標題 傾斜機能性圧電平板における動的弾性逆問題の数理解析
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2019材料力学カンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷口駿介, 芦田文博, 森本卓也
2. 発表標題 傾斜機能性圧電平板における動的弾性逆問題の特性曲線解析
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2019材料力学カンファレンス
4. 発表年 2019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
---------	---------