

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号： 11301
研究種目： 奨励研究
研究期間： 2023 ~ 2023
課題番号： 23H05183
研究課題名 機能性材料の位置依存性・結晶方位異方性を考慮したひずみ状態の数理的解析技術の開発

研究代表者

千葉 雅樹 (Masaki, CHIBA)

東北大学・多元物質科学研究所・技術職員

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 470,000 円

研究成果の概要：Fe-Ga合金単結晶はIoT機器の振動発電デバイスへの応用が期待される。本研究では、Fe-Ga合金単結晶試料の振動下でのひずみ測定と結晶方位・位置依存性の評価を行った。その結果、振動周波数とほぼ同じ周波数のひずみ波形が得られ、長手方向が[001]方位の試料がU字型デバイスの曲率が大きな位置にあるときにひずみが大きいことが示された。さらに引張変形したFe-Ga単結晶試料の応力解析を行った。その結果、試料表面への放電加工により困難であった単結晶試料の応力測定が可能となった。また応力印加方向に試料の主応力が増大・回転すること、すべり変形が起こったこと、すべり系と主応力が対応関係にあることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、Fe-Ga合金単結晶へ機械的振動場を印加したときに生じるひずみの波形における、結晶方位依存性や位置依存性を解析した。従来の研究では、位置依存性は数mmオーダーでのみ行われており、結晶方位依存性の解析は十分行われていなかった。本研究でのcmオーダーでの位置依存性の解析や、弾性率を考慮した結晶方位異方性の解析結果により、より高機能な振動発電デバイス設計への指針を与えられた。また従来は困難であった単結晶試料の応力測定手法や、応力値と結晶方位・すべり系の関係を示す解析手法を提示できた。これらの手法は、応力が印加された他の多結晶材料へ展開可能であり、社会的意義を有すると考えている。

研究分野： 金属材料学

キーワード： 鉄ガリウム単結晶合金 振動発電 結晶方位異方性 応力測定 すべり系

1. 研究の目的

Fe-Ga 単結晶合金は IoT 機器の振動発電デバイスとして期待され、発電量は外部振動場によって生じるひずみの大きさに依存する。ひずみの大きさは結晶方位異方性（弾性定数など）や位置に影響されるが、それらの観点からひずみ場の変化を解析した研究は少ない。また外部応力が印加された状態、または破壊された単結晶材料の応力状態を詳細に解析している研究は少ない。

本研究グループは、機械的振動場を印加した Fe-Ga 試料の複数地点のひずみ測定により、結晶方位と位置によって位相が異なることを明らかにしてきた。しかし数 mm オーダーの範囲でのみしか位置依存性の評価が行われておらず、より広い範囲での評価が求められていた。またこの試料は単結晶であるため、X 線応力測定が困難であった。本研究では、機械的振動場印加時の金属材料のひずみの結晶方位異方性と位置依存性を数理的に解析すること、および外部応力が作用している状態、または破断した Fe-Ga 単結晶試料の応力状態を解析することを目的とした。

2. 研究成果

(1) 機械的振動下における Fe-Ga 合金のひずみ測定、および結晶方位・位置依存性の評価

試料長手方向が [001], [011], [012]となるように、8×4×1 のサイズで Fe-Ga 合金単結晶を切り出した。図 1 のように 3 つの試料にひずみゲージを長手方向に 2 つ貼り付け(左から Gauge1, 2)、3 つ試料を U 字型デバイスの底部(A 点)から 7cm、5cm、3cm の点に並べて接着した。

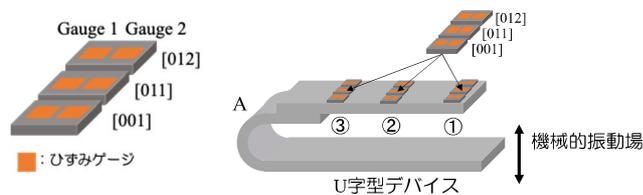


図 1. U 字型デバイスに装着された試料の模式図

51Hz、91Hz(デバイスの共鳴周波数付近)、151Hz の機械的振動場を印加(加振機を使用)し、振動中の試料のひずみゲージ測定を行った。強制振動すると仮定して次の運動方程式を仮定した。

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = F_0 \sin(\omega t) \quad \dots(*)$$

$x(t)$ は変位、 t は時間、 c は粘性項、 k はばね定数、 F_0 は外力の振幅、 ω は角周波数を表している。
(*)の解(三角関数)を MATLAB (数値解析ソフトウェア)でひずみ測定の結果にフィッティングし、振幅と角周波数を算出した。

ひずみ測定の結果、全ての測定でひずみの波形が観察され、フィッティングできた。得られた周波数は外部振動場の周波数とほぼ等しく、外部振動場に応答したひずみが生じていた。

図 2 に、長手方向が[001]の試料の 3cm, 5cm, 7cm の位置におけるひずみの経時変化を示した。機械的振動場の周波数は、91Hz である。A 点から遠い位置(曲率大)にあるほど、大きなひずみを得られた。ひずみの振幅は F_0 に比例し、曲率が大きいほど F_0 が大きいことに起因していると考えられる。Gauge 1, 2 で振幅の差が見られたが、位相差は小さいという結果が得られた。

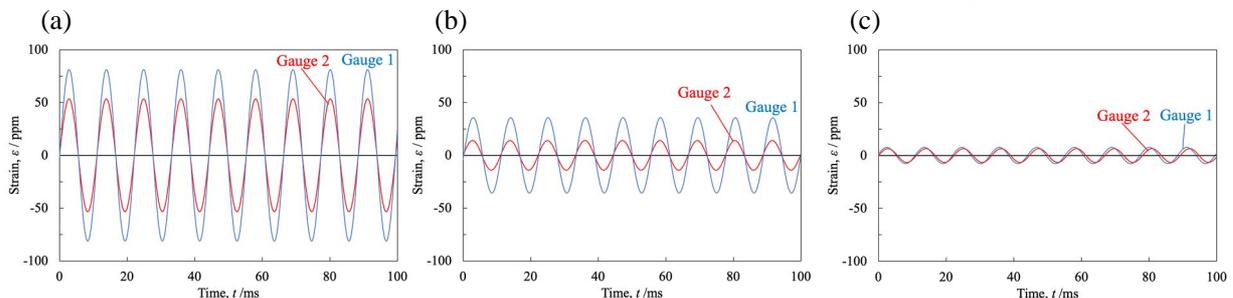


図 2. 長手方向が[100]の試料の(a)3cm, (b)5cm, (c)7cm の位置におけるひずみの経時変化

それに対し、[011], [012]の試料では、[001]の試料と比較してひずみが小さかった。また、曲率が大きな位置にあるほど大きなひずみである傾向があり、位相差が大きい傾向にあった。これらは、内部摩擦やヤング率の異方性がひずみの振幅に影響を及ぼされていると考えられる。特に [001]方向のヤング率は [011], [012]と比べて小さいので、[011]の試料でひずみが大きくなったものと考えられる。また試料内での位相ずれが大きい試料は、位置によって π 位相がずれている過程が見られていたので、その過程に対応していると考えられる。

次に、[001]の試料を A 点から 3cm の位置に貼り付け 51Hz, 91Hz, 151Hz の振動場を印加して

ひずみ測定を行った。その結果 91Hz では振幅が 81.1ppm の波形が得られたが、51Hz では 8.5ppm、151Hz では 3.6ppm と小さな値しか得られず、他の試料でも同様の結果であった。

以上の結果より、本デバイスで振動発電を行う際には弾性率の結晶方位依存性・位置依存性を考慮し、[001]方向の試料に共鳴周波数付近の振動を印加するのが望ましいことがわかった。大きな Fe-Ga 単結晶試料に多数のひずみゲージを貼り付け、位置依存性や曲率の影響を解析し、外部磁場や内部摩擦の影響を調べるため、微分方程式に磁場の項を加えた場合や、内部摩擦を変化させた場合の変化を考察する必要がある。

(2) 引張変形した Fe-Ga 合金単結晶の応力・ひずみ解析

試料長手方向が [001]、ゲージサイズが 10×4 となるように Fe-Ga 合金単結晶を切り出した。さらにゲージ部の厚さが $t = 0.5$ となるように型彫放電加工で加工し、試料表面を多結晶化した。試料のひずみが $\varepsilon = 0 - 6.7\%$ となるように、応力印加器具で破断するまで引張試験を行った。応力測定は 3次元方向の応力テンソルが測定可能な 2D 法で行った。試料のゲージ中心部の応力を、各ひずみにおいて逐次的に測定した。得られた応力テンソルに MATLAB で行列演算を施すことにより、応力楕円体を得た。応力楕円体の軸長は 3つの主応力の大きさ、矢印の向きは主応力の方向、内向き矢印は圧縮応力、外向き矢印は引張方向を示している。試料破断面の電子線後方散乱回折(EBSD)測定を行い、結晶方位・すべり系の解析を行い、応力状態との関係性を調べた。

試料表面の X 線回折測定の結果、回折環(デバイリング)が連続的であり、放電加工により試料表面が多結晶化していることがわかった。さらに、デバイリング上に明るいスポット状の点が観察された。解析が難しい単結晶 XRD からの情報を、解析が容易な多結晶の XRD から解析することができ、試料内部の単結晶の情報を含めて応力解析を行うことができた。

図 3 に $\varepsilon = 0\%, 0.8\%, 5.8\%$ (破断直前), 6.7% (破断)のひずみを与えたときの応力楕円体を示す。応力楕円体が応力印加方向に伸び、引張の主応力の方向が引張応力の方向に回転することがわかった。また試料破断後は、試料の引張応力が圧縮応力に転じることがわかった。

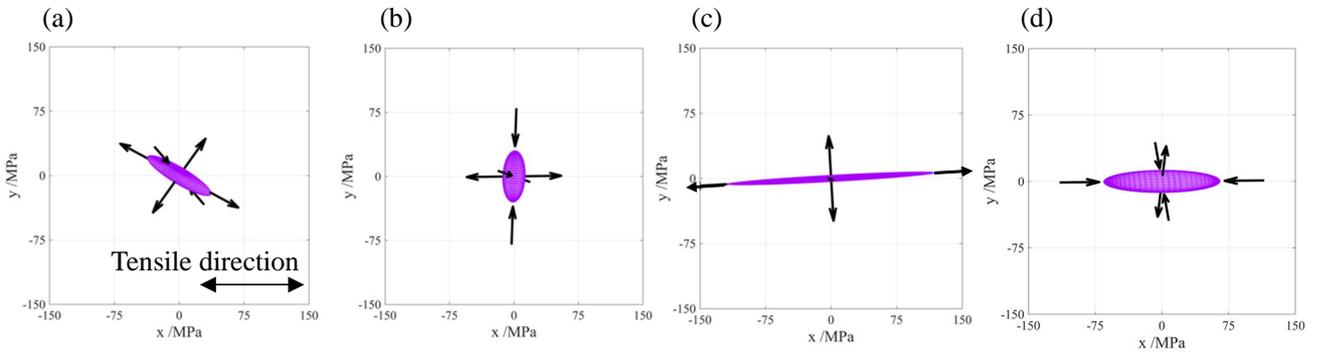


図 3. (a)0%, (b)0.8%, (c)5.8%, (d)6.7% のひずみを与えたときの応力楕円体

試料破断面の EBSD 測定エリアの平均方位から、代表的なすべり系を抽出・回転させることにより、見かけのすべり系を算出したところ、 $(-1 -1 2) [1 1 1]$ であることがわかった。SEM 観察によって試料破断面には界面が存在することがわかった。この界面とすべり面のトレースと比較したところほぼ一致していたので、試料内部ですべり変形していることが示唆された。

破断後の試料の応力楕円体と破断面のすべり系を可視化した結果を図 4 に示す。破断面のみかけのすべり面と 2つの主応力ベクトルで張られる平面が交わる直線方向と、主応力ベクトル σ_1 のなす角が 2.2deg であり、ほぼ同じ方向であった。これより、主応力の方向とすべり系は相互に対応していると考えられる。試料の方位が、すべり系に影響を与えていること、多結晶の測定結果(XRD)と単結晶の結果(EBSD)が対応関係にあることが示された。

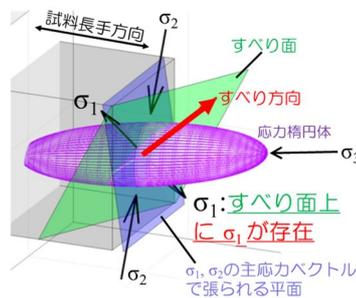


図 4. 破断後の試料の応力楕円体と破断面の EBSD 観察から得られたすべり系の関係

本解析手法は配向性が強い材料でも適応可能であると考えられるので、様々な材料で本手法の妥当性を確認する必要がある。

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 1件）

1. 著者名 Chiba Masaki, Misawa Kensuke, Tanimoto Hisanori, Kumagai Masayoshi, Sato Shigeo, Kawamata Toru, Suzuki Shigeru	4. 巻 110
2. 論文標題 大きな磁歪を示す鉄合金を搭載したデバイスの振動におけるひずみや磁界の変化	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Tetsu-to-Hagane	6. 最初と最後の頁 404 ~ 413
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2355/tetsutohagane.TETSU-2023-112	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 千葉 雅樹、丹野 健徳、阿部 真帆、石山 和志、田中 俊一郎、鈴木 茂
2. 発表標題 引張変形した鉄ガリウム合金単結晶の応力・ひずみ解析
3. 学会等名 日本金属学会2023年秋季講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 千葉 雅樹、丹野 健徳、阿部 真帆、石山 和志、田中 俊一郎、鈴木 茂
2. 発表標題 XRD・EBSDを利用した応力・ひずみ・すべり系の解析
3. 学会等名 日本鉄鋼協会ミニシンポジウム「鉄鋼業に貢献する先端的な分析関連技術」
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 千葉 雅樹、丹野 健徳、阿部 真帆、石山 和志、田中 俊一郎、鈴木 茂
2. 発表標題 Characterization of mechanical properties and microstructure of magnetostrictive iron-gallium alloys
3. 学会等名 令和5年度 電気通信研究所 共同プロジェクト 研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 千葉 雅樹、鈴木 茂
2. 発表標題 機械的振動下における鉄ガリウム合金のひずみ測定および結晶方位・位置依存性の評価
3. 学会等名 日本金属学会2024年春季講演大会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

研究組織（研究協力者）

氏名	ローマ字氏名
鈴木 茂	(SUZUKI Shigeru)
田中 俊一郎	(TANAKA Shun-Ichiro)
石山 和志	(ISHIYAMA Kazushi)
丹野 健徳	(TANNO Takenori)
阿部 真帆	(ABE Maho)