

## 加工に伴う電磁鋼板の歪み分布測定 Residual Stress Measurements of Electrical Steel with Cutting Processing

土井 智史<sup>a</sup>, 伊藤 登史政<sup>a</sup>, 青木 哲也<sup>a</sup>, 妹尾 剛士<sup>a</sup>,  
岡崎 恵一<sup>a</sup>, 小澤 正恒<sup>a</sup>, 菖蒲 敬久<sup>b</sup>  
Satoshi Doi<sup>a</sup>, Toshimasa Ito<sup>a</sup>, Tetsuya Aoki<sup>a</sup>, Takeshi Senoo<sup>a</sup>,  
Keiichi Okazaki<sup>a</sup>, Masatsune Ozawa<sup>a</sup>, Takahisa Shobu<sup>b</sup>

<sup>a</sup>(株)デンソー, <sup>b</sup>(国)日本原子力研究開発機構  
<sup>a</sup>DENSO CORPORATION, <sup>b</sup>Japan Atomic Energy Agency

モータの製造工程における打抜き等の量産性を重視した加工法は、材料中に磁壁移動を妨げる原因となる残留歪を伴う為、損失増大の要因となる。特に小型高効率モータは加工歪による損失増大が顕著な為、その影響を十分に検証する必要がある。しかし従来は試作機による評価/確認を行っていたため、工数増大および最適化困難という問題が有った。そこで我々は、加工歪の影響を高精度に予測する磁場シミュレーション手法の開発を検討中である。予測手法開発には無方向性電磁鋼板の加工歪分布を把握することが重要となるが、粗大粒且つ局所的な歪分布の為、従来のラボ X 線では十分な回折強度を得ることが出来ない。そこで今回、高エネルギー放射光測定にエネルギー分散法を適用した打抜き歪分布の測定を実施、その内部分布詳細に明らかにした。

**キーワード：** モータ、電磁鋼板、加工歪、エネルギー分散法

### 背景と研究目的

ハイブリッド自動車(HV)や電気自動車(EV)の普及に伴い、駆動用モータの更なる小型高効率化が強く求められている。モータの小型化においては、出力低下を補うために高速回転化が必須となるため、損失増加が懸念されるっており、その低減が強く求められている。そして、このような要求は近年ますます厳しくなっており、対応するためにはモータの最適化設計が必要不可欠となっている。

一方で、モータ損失の約半分を占めると一般的に言われている磁氣的損失は、実測出来ないことに加えて、シミュレーションによる誤差が±30%程度と大きく、最適化設計は非常に困難な状況にある。

先行研究においては、モータ製造時にモータコア材料である無方向性電磁鋼板が受ける加工歪の影響を考慮することによって、シミュレーション精度向上に効果があることが示唆されている[1]。また無方向性電磁鋼板は打抜き歪によって磁気損失が 1.5 倍程度に増加する例も報告されている[2][3]。以上から、モータ製造時の加工歪をシミュレーションにおいて厳密にモデル化することができれば、精度を著しく向上できると期待できる。但し、そのためには材料中の加工歪を精度良く把握することが重要である。しかし、材料が受ける加工歪は、ミリメートルオーダー以下の範囲で複雑な分布になっていると推測される。加えて、無方向性電磁鋼板の結晶粒径は 50~200 μm のため、通常の X 線測定器では歪み分布を調べるための十分な分解能を得ることができない。このため従来、無方向性電磁鋼板の加工歪分布を評価することは困難であった。一方、既に方向性電磁鋼板においては、高エネルギー放射光を利用することで、0.1 mm 程度の空間分解能で 3 次元応力分布評価の実施例が報告がされている。そこで、打抜き加工を施した無方向性電磁鋼板の内部歪分布を高エネルギー放射光にて計測することを考えた。

### 実験方法：

予めシャーにてカットした無方向性電磁鋼板のサンプルを準備し、高エネルギー放射光白色 X 線を利用したエネルギー分散法によってカット端面からの応力歪の分布を評価する。

【測定方法】：試験片を回折計に垂直に立て、Ge 半導体検出器が搭載された 2θ アームを天地、水平方向に移動させて、試験片の長手、および板厚方向の歪分布を計測する。今回実験では信頼性の高いデータを得ることを目的に、試料幅方向の歪は均一とし幅方向に揺動させ平均化を行う(図 1)。

【装置】 BL28B2

【材料】 無方向性電磁鋼板(結晶粒径：50 μm)

【サンプル形状】：短冊(板厚  $t$ 0.5 mm×全長 90 mm×幅 20 mm)

【測定位置】切断端面から 3 mm(0-1 mm を 0.1 mm 間隔, 1-2 mm を 0.2 mm 間隔, 2-3 mm を 0.5 mm 間隔)。また深さ方向は 0.1 mm 間隔とした。

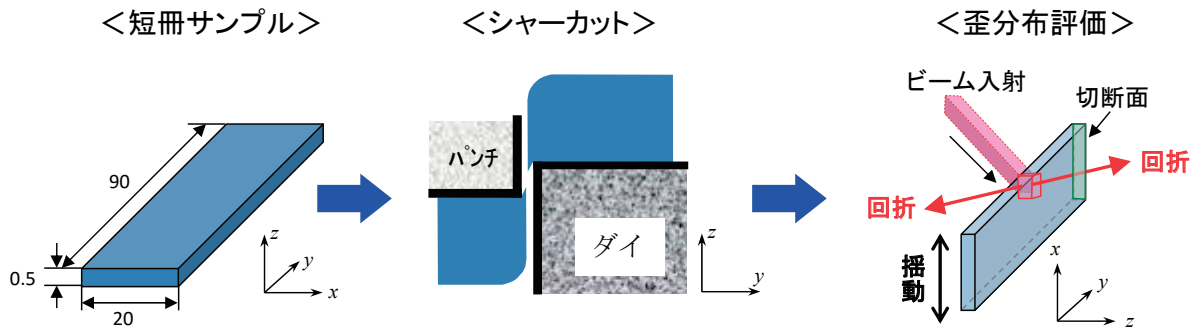


図 1. 測定概要

### 結果および考察：

各測定点で十分な回折ピークを得られた(3,2,1)回折面を使用し、ガウス関数フィッティングによる歪解析をした結果を図 2 に示す。シャー切断部のダレ面にて引張応力が出ており、切断部~0.3 mm 程度の範囲では歪を検出できていると推察される。

一方、試料内部では全くランダムな分布となっている。これは過去の研究事例から回折強度および各回折面からの情報が確保できる最適な Bragg 角が  $5^\circ$  付近にあるとの知見から今回  $5^\circ$  と設定したが、ビーム照射範囲が扁平な四辺形となり誤差を拾いやすい状況となったため、小さな歪が誤差に埋もれてしまったと考えられる。

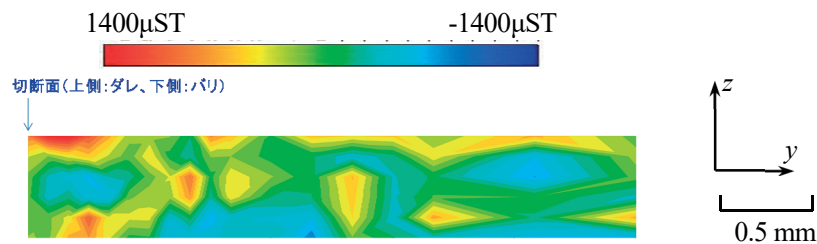


図 2. 残留歪分布

### 今後の課題：

今回、結晶粒径  $150 \mu\text{m}$  の材料をシャーカットしたサンプルを用い、歪評価を実施したが、回折強度が弱く解析不可能であったことから、今後、より大結晶粒の材料での評価方法を検討し、結晶粒径と加工による歪の関係について明確にし、加工シミュレーションによる高精度な打抜き歪の計算手法を確立していきたいと考える。

### 参考文献：

- [1] 青木哲也、大西宏充、デンソーテクニカルレビュー、**12** (2), 129-135, 2007-12.
- [2] 土居光代、屋敷裕義、岡田康孝、電学論 A、119 巻 6 号, 802-807, 平成 11 年.
- [3] 脇坂岳頭、新井聡、黒崎洋介、新日鐵技報第 393 号、116-120, 2012.