

電磁鋼板の残留応力測定に関する研究

池田 哲*・沓掛 暁史*・下地 広泰*

*電磁力担当

Residual Stress Measurement of Electromagnetic steel

Tetsu IKEDA*・Akifumi KUTSUKAKE*・Hiroyasu SHIMOJI*

*Electromagnetic Section

要 旨

モータの基幹材料である電磁鋼板に対する高精度残留応力測定への産業界のニーズに対応するため、X線残留応力測定装置での測定条件因子の測定結果への影響因子を明らかにし、高グレード材の測定は、コリメータ径、揺動角度、測定点数、X線電圧電流、測定時間の順で測定条件出しを行うことで、信頼限界値を±10MPa以下程度まで最小化することができた。今後は、この研究結果をEVモータやドローンモータの残留応力測定に適用していく。

1. はじめに

当センターでは、電磁鋼板の磁気特性測定を主とした電気機器の開発支援をおこなうなかで、電磁鋼板の残留応力とその磁気特性を劣化させることから、電磁鋼板やモータコアの残留応力測定の依頼試験を受託している。

近年、モータの効率規制や自動車のEV化の進展により、高グレード材の測定依頼が増えてきた。電磁鋼板を高グレード化するにあたり、鉄鋼メーカーは電磁鋼板の粒径を肥大化させており、X線を照射した際に多結晶のうち一部が回折する原理を利用するX線回折では、結晶サイズが大きくなると、照射領域での結晶数が少なくなり、残留応力測定精度が落ちる問題がある。

そこで本研究では、結晶粒が肥大化した高グレード電磁鋼板を対象とした測定条件の確立を目標とし、測定条件因子の測定結果への影響を明らかにする。

2. 測定条件

2.1. X線残留応力測定装置

本研究で使用した(株)リガク製 AutoMATE の外観を Fig.1 に、仕様を Table 1 に示す。本装置は、オプションとして回転機構を有しており、モータコアの周方向と径方向の測定に対応している。また電磁鋼板の肥大化した結晶粒の測定に対応できるようにコリメータはφ4mm 径まで各種揃えてある。

X線回折を利用して測定するため、試料表面から約10μm までの残留応力測定となる。そして、残留応力はX線回折から求められる格子面間隔と $\sin^2\phi$ 法から求められる結晶粒の向きの関係から算出される。

2.2. 測定試料

本研究で使用した電磁鋼板はEVモータコア3種であるが、鋼種などの材料データは開示せずに、本報では材料A、B、Cとする。



Fig. 1 装置外観

Table 1 装置仕様

型式	リガク製 AutoMATE
X線管球	Cr
最大出力	2kW
測定方法	並傾法, 側傾法
2θ 設定範囲	98~168°
試料サイズ	φ320mm×120mm
試料重量	20kg まで
コリメータ径	φ0.1,0.5,1,2,4mm
残留応力計測	$\sin^2\phi$ 法

2.3. 測定条件

これまでの測定経験から、電磁鋼板の残留応力測定では、できるだけ大きなコリメータを用い、揺動しながらX線を照射することが基本となる。本研究では、この経験則を確認することも含めて、結晶粒が肥大化した高グレード電磁鋼板を対象とした測定条件の確立を目標とし、測定条件因子の測定結果への影響を明らかにする。

測定条件の可変因子はコリメータ径、揺動角度、 $\sin 2\phi$ 数、X線電圧電流、測定時間とし、測定結果への影響度合いは、1標準偏差である信頼限界で判断した。

3. 測定結果と考察

3.1. 測定結果

測定条件因子を変化させた時の測定結果は、Fig.2に示す。(a) コリメータ径を1, 2, 4mmと大きくすると、信頼限界は54.37MPaから9.77MPaと測定精度は大きく向上した。これは、コリメータ径の中に含まれる粒子数が増えることで、信頼性が増すことによる。(b) 揺動角度を5, 10°と大きくすると、信頼限界は26.3MPaから14.16MPaと測定精度は向上した。揺動すると、その分測定範囲内の粒子数が増えるからである。(c) X線電圧電流を30kV30mAから20kV20mAに小さくすると、信頼限界は13.75MPaから4.89MPaと測定精度は大きく向上した。X線電圧電流が大きすぎると、X線検出器の $K_{\alpha 1}$ データがオーバーフローして、測定精度が低下することによる。(d) $\sin 2\phi$ 数を10, 15, 20, 40と大きくすると、信頼限界は26.3MPaから6.52MPaと測定精度は大きく向上した。これは、最小二乗法でのプロット数が多いほど正確になることによる。(e) 計測時間を30, 50秒と大きくすると、信頼限界は13.28MPaから10.93MPaと測定精度は少し向上した。計測時間は長ければ長いほど測定精度は向上するが、ある程度の測定強度があれば、計測時間の影響は小さい。

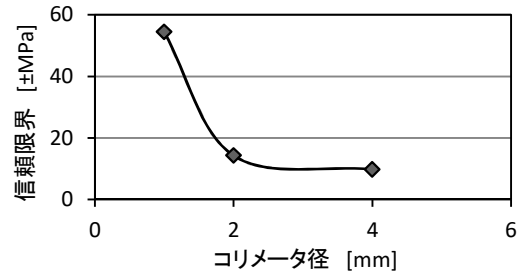
3.2. 考察

前項の測定結果から、測定条件因子の測定結果への影響の大きさは、コリメータ径、揺動角度、測定点数、X線電圧電流、測定時間の順となることが明らかになった。

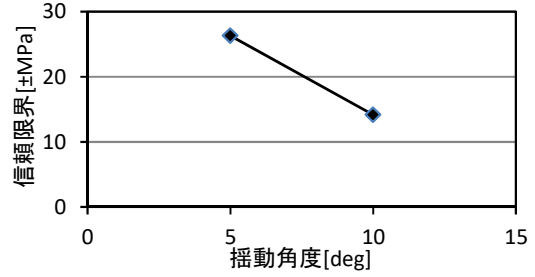
従って、結晶粒が肥大化した高グレード電磁鋼板を対象とした測定条件は、揺動角度 10°、X線電圧電流 20kV20mA を固定として、コリメータ径、測定点数で信頼限界を確認する手順となる。

4. まとめ

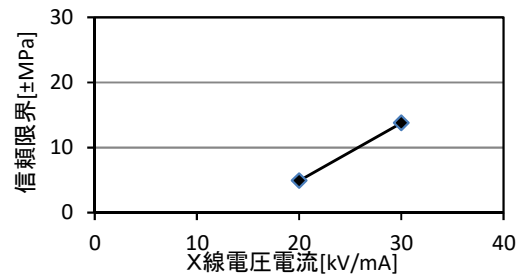
本報では電磁鋼板の残留応力測定について、その測定条件設定について報告した。今後はこの研究結果を、EVモータやドローンモータの残留応力測定に適用する。



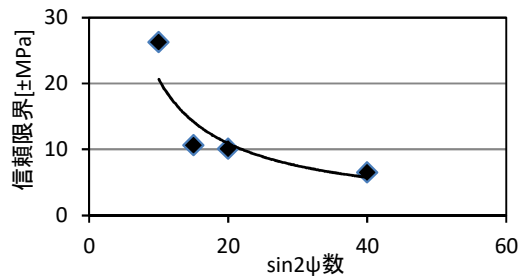
(a) コリメータ径 (材料A)



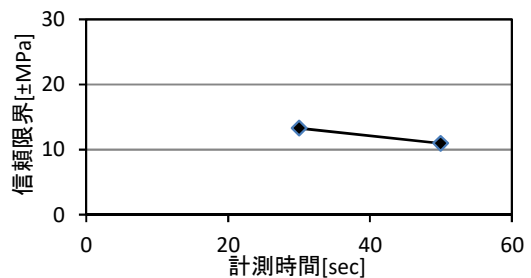
(b) 揺動角度 (材料B)



(c) X線電圧電流 (材料B)



(d) $\sin^2 \phi$ 数 (材料B)



(e) 計測時間 (材料C)

Fig. 2 測定結果