

## 電磁鋼板の残留応力測定に関する研究（第2報）

池田哲\*・沓掛暁史\*・下地広泰\*

\*電磁力担当

Residual Stress Measurement of Electromagnetic steel (2<sup>nd</sup> Report)

Tetsu IKEDA\*・Akifumi KITSUKAKE\*・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、各種測定影響因子を最適化することで、X線残留応力測定装置での測定信頼限界値を±10MPa以下程度までに抑えた電磁鋼板の各グレード別測定条件を明らかにできた。また測定時の移動誤差、回転誤差は0.02mmであることを確認するとともに、残留応力分布表示プログラムを開発した。

## 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8鋼種であるが、鋼種などの材料データは開示せずに、本報では材料をアルファベット表記とする。

## 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



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

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、低グレード材から結晶粒が肥大化した高グレード電磁鋼板までの測定条件の確立を目標とし、コリメータ径、揺動角度、X線電圧電流、測定時間、 $\sin 2\phi$  数を影響因子として、1標準偏差である信頼限界値が $\pm 10\text{MPa}$ となる測定条件に最適化した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 グレード別測定条件

信頼限界値を $\pm 10\text{MPa}$ 以下にするには、コリメータ径内に粒子を100個近く取り込み平均化する必要があるので、代表粒径が $0.01\text{mm}$ の低グレードAの場合、コリメータ径を小さくし、X線電圧電流を大きくして、計測時間を短くすることができる。

しかしながら代表粒径が大きくなると、コリメータ径を大きくするとともに、揺動角度を大きくする必要がある。一方でX線電圧電流が大きいと、 $K\alpha 1$  データがX線計測器からオーバーフローし、 $K\alpha 1: K\alpha 2=2:1$ が維持できなくなることから、X線電圧電流を小さくする必要がある。従って、代表粒径 $0.1\text{mm}$ 以上の高グレード材の場合、コリメータ径、揺動角度を大きくし、X線電圧電流を下げることになるので、測定強度を確保するために計測時間を長くすることになる。

こうして最適化した電磁鋼板のグレード別測定条件をTable 2に示す。この結果、誘導機からEVモータなどの高グレード材まで残留応力の測定条件を確立できた。

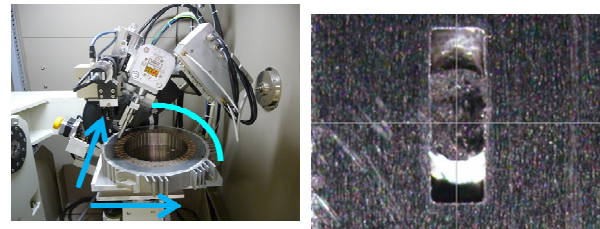
Table 2 電磁鋼板グレード別測定条件

グレード	代表粒径 [mm]	コリメータ径 [mm]	揺動角度 [°]	X線電圧 [V]	X線電流 [A]	計測時間 [秒]	$\sin 2\phi$ 数
A	0.01	1	5	30	20	20	5
B	0.02	1	5	30	20	20	5
C	0.03	2	10	20	10	50	10
D	0.05	2	10	20	10	50	10
E	0.1	4	10	20	10	50	10
F	0.2	4	10	20	10	50	10
G	0.2	4	10	20	10	50	10
H	0.2	4	10	20	10	50	10

#### 3.2 移動誤差

$300\text{mm}\phi$ 、 $10\text{kg}$ の大型モータコアの径方向、周方向の残留応力を測定するにあたり、その移動誤差、回転誤差を確認するための実験をおこなった。

Fig. 2(a)に示すように、モータコア内436点のXY方向の2方向からの測定で、計872点の移動となる。その測定前と全測定後の測定位置情報をFig. 2(b)のように装置搭載の位置合わせ用CCDカメラ画像で測定した。その結果、移動誤差X方向 $0.01\text{mm}$ 、Y方向 $0.01\text{mm}$ 、回転誤差 $0.02\text{mm}$ であり、コリメータ径 $2\text{mm}$ に対して $1/100$ 程度であり、測定結果には影響しないことを確認できた。



(a) 実験

(b) 誤差測定

Fig. 2 移動誤差実験

#### 3.3 残留応力分布表示

モータコアの残留応力結果を視覚的に表現するために、JMAG、MATLABなどのプログラムを利用し、Fig. 3のようなわかりやすい残留応力表示プログラムを開発した。

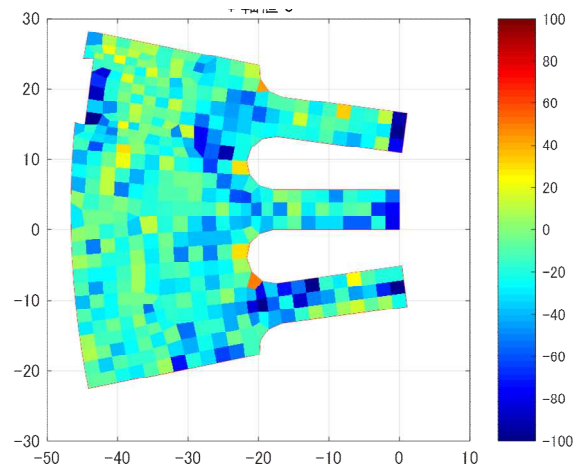


Fig. 3 残留応力分布表示

### 4. まとめ

本報では電磁鋼板の残留応力測定について、そのグレード別測定条件を明らかにするとともに、独自の表示プログラムを開発した。今後はこの研究結果を、大型モータ、EVモータやドローンモータの残留応力測定に適用する。