

**放射光 X 線を含む 3 放射線を用いた
浸炭鋼のハイブリッド残留応力測定法の開発**
**Development of Hybrid Residual Stress Measurement
of Carburized Steel Using Three Ionizing Radiation beams
Including Synchrotron X-rays**

坂井田 喜久^a, 川内 基範^a, 芹澤 崇宣^a, 水上 祐^a, 菖蒲 敬久^b, 卍山下 道哉^c
Yoshihisa Sakaida^a, Motonori Kawauchi^a, Takanori Serizawa^a,
Yu Mizukami^a, Takahisa Shobu^b and Michiya Manzanka^c

^a静岡大学, ^b(独)日本原子力研究開発機構, ^b(株)ヤマハ発動機
^aSHIZUOKA UNIVERSITY, ^bJAEA, ^cYAMAHA MOTOR CO., LTD.

クロムモリブデン鋼 SCM420 の浸炭層の回折面間隔から残留ひずみ成分を分離する実験手法の開発の基礎として BL46XU にて高エネルギー X 線による実験条件の検討を行った。実験は、BL46XU のエネルギー範囲 6~35keV に対し、入射側の Mo 箔フィルタを用いて、24keV の 3 倍波である 72keV を取出す方法を検討した結果、Pb 遮蔽板と CdTe 検出器を組込むことにより、 n 倍波による回折線の計数を極力抑えた実験条件を見出すことができた。

キーワード： 浸炭，クロムモリブデン鋼，高エネルギー X 線，残留応力，ひずみスキャンニング

背景と研究目的：

歯車やシャフト等の炭素鋼部品は、表面硬度と疲労強度を向上させる目的で、表層の Fe 結晶に炭素を強制固溶させ、マルテンサイト変態させる熱処理を行う。この熱処理を浸炭焼入というが、浸炭焼入処理を行うと部品に『ゆがみ』が生じ、『ゆがみ』修正のための後加工が必要となる。浸炭焼入処理は材料変化としては非常に複雑で、『ゆがみ』を制御するためには、『ゆがみ』と密接な関係にある残留応力の全貌把握が切望されている。

本研究では、極表面の残留応力測定に適したホームラボ X 線と、内部の測定に適した中性子線、さらに、その間を補間する放射光の高エネルギー X 線に注目し、3 つの放射線を相補利用することにより、浸炭部品の表面から内部にわたる残留応力の全貌を非破壊測定する技術の開発を目指す。浸炭鋼の放射光の高エネルギー X 線を用いた実験例は未だない。本実験では、放射光の高エネルギー X 線を用いて浸炭層内の回折面間隔変化を実測する手法を開発するために、70keV 程度の高エネルギー X 線によるひずみスキャンニングを行うための光学系と実験条件を見出すことを目的した。

実験：

供試材は、クロムモリブデン鋼 (SCM420) である。実験には、クロムモリブデン鋼のブロック材を浸炭焼入、焼戻処理した後、表面の浸炭層から深さ方向に、 $2 \times 2 \times 10 \text{mm}^3$ の寸法で切出した短冊試験片を用いた。放射光実験の前に、浸炭表面から深さ方向の組織変化と硬度を測定し、有効および全硬化層深さを求めた。一方、放射光実験は、BL46XU で行った。図 1 は、実験に用いた光学系を示す。BL46XU の利用可能な X 線のエネルギー範囲は、6~35keV である。一般的な全

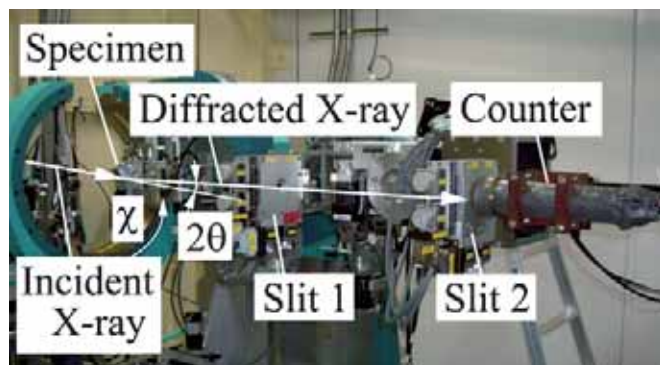


図 1. 実験に用いた光学系(BL46XU)

硬化層深さは、2mm 以下であり、表面から 2mm までの範囲の炭素濃度の変化に対応した回折面間隔変化を放射光 X 線により捉えられることが重要であり、本研究では Mo 箔フィルタを用いて放射光 X 線の波長の n 倍波から 70keV 程度の高エネルギー X 線を利用する方法を検討した。入射 X 線は、入射スリットで長方形断面に整形して試験片に照射し、回折 X 線を Slit 1 と Slit 2 を通して計数した。実験は、短冊試験片中央に放射光 X 線を照射し、ホームラボの Cr-K α 線で計数される範囲の α -Fe の X 線回折パターンが測定できるか検討した。また、 α -Fe の 110 および 211 回折に注目し、浸炭表面から材料内部の深さ方向にわたってひずみスキanningするための回折条件を検討した。

結果および考察：

図 2 は、浸炭表面から深さ方向の硬度分布を示す。図より、短冊試験片の有効および全硬化層深さは、それぞれ 1.3 と 1.9mm であることがわかった。そこで、本実験では、入射 X 線の波長を 24keV とし、Mo 箔フィルタによる 3 倍波の 72keV による回折線を用いることとした。

まず、検出器にシンチレーションカウンタを取付け、 $3 \leq 2\theta \leq 25^\circ$ の範囲を走査した。図 3 は、実験により得られた回折パターン(黒実線)を示す。実験の結果、10deg 付近に回折強度の高いピークが認められるものの、特に高角側でバックグラウンドが高く、かつ、予想される α -Fe の回折線を得ることはできなかった。そこで次に、受光側 Slit 1 のダイレクトビーム延長線上に Pb 板を巻き、上記の問題が改善されないか検討した結果(赤実線)、最強線の強度と高角側のバックグラウンドを低下させることができたが、 α -Fe の回折線を得るには不十分であった。この原因を検討した結果、Mo 箔フィルタによる 3 倍波以外の n 倍波も回折線として重畳され、シンチレーションカウンタでは 3 倍波の回折線のみを計測することができないことがわかった。そこで、検出器を CdTe に取り換えて回折パターンを測定した結果(青実線)、3 倍波以外の高次線による回折線を抑えることができ、 α -Fe の回折線パターンを得ることができた。

24keV の 3 倍波による回折線を得ることができたので、次に、浸炭層内のひずみスキanningを行うための予備測定を行った。実験は、浸炭表面に対して回折面法線が垂直な場合(図 4 と図 5 には x として表示)は、ビームサイズを幅 0.15×高さ 1.8mm とし、浸炭表面近傍の深さ 0.1mm と、表面からの深さ 3.1mm をゲージボリューム中心とするときの Fe-220 および 211 面の回折線を測定した。なお、Fe-110 は、 $2\theta=5^\circ$ 程度の非常に低角側に位置するため 220 回折を測定することとした。一方、浸炭表面に対して回折面法線が平行な場合(図 4 と図 5 には z として表示)は、ビームサイズを幅 0.15×高さ 0.2mm とし、浸炭表面近傍の深さ 0.1mm と、表面からの深さ 3.1mm をゲージボリューム中心とするときの Fe-220 および 211 面の回折線を測定した。

図 4 は、Fe-220 回折の $z=100\mu\text{m}$ と $z=3100\mu\text{m}$ における回折線強度分布を比較した結果を示す。浸炭表面近傍の 220 回折では、回折線幅が大きく広がるために、低角度側のすそ野で高次線によ

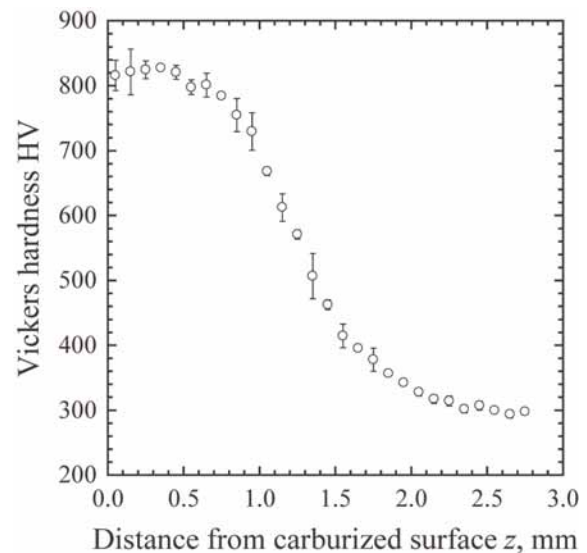


図 2. 浸炭材の硬度分布

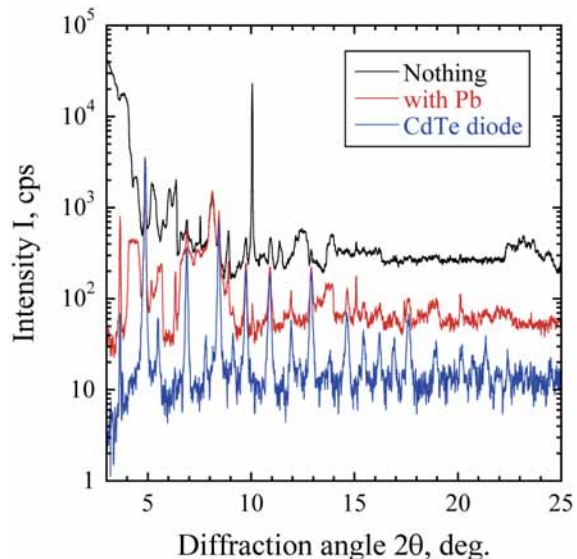


図 3. 浸炭材の回折パターン

る回折線が重なり、測定条件をさらに最適化する必要があることがわかった。一方、浸炭層よりさらに深い内部の回折線では、回折線幅がシャープなため、十分な精度で回折線強度分布を測定できることがわかった。

一方、図5は、Fe-211回折の $z=100\mu\text{m}$ と $z=3100\mu\text{m}$ における回折線強度分布を比較した結果を示す。200回折に比べると、浸炭表面近傍では、回折線幅が大きく広がる傾向は同じであるが、回折線強度分布のすそ野には他の回折線や高次線による回折線の重なりはない。また、浸炭層よりさらに深い内部の回折線も、回折線幅がシャープで十分な精度で回折線強度分布を測定できることがわかった。

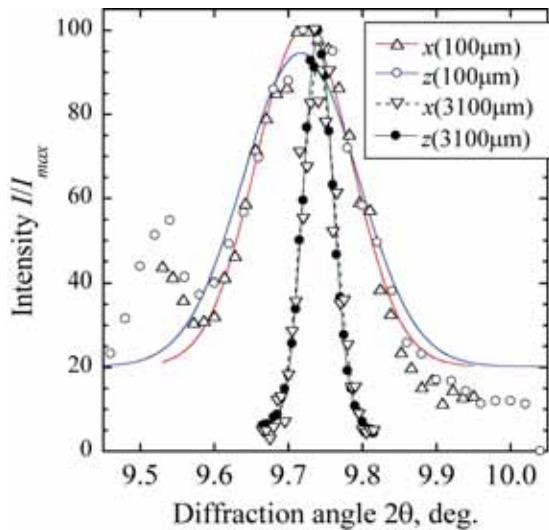


図4. 浸炭材の220回折

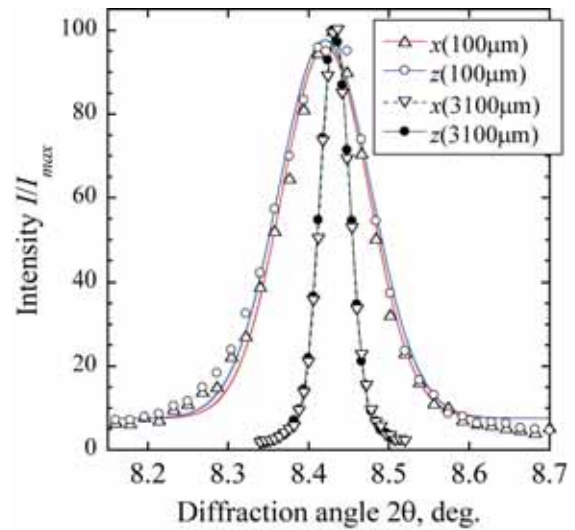


図5. 浸炭材の211回折

今後の課題：

Mo箔フィルタによる3倍波として高エネルギーX線による浸炭材のひずみスキャンニングを検討したが、浸炭表面近傍の220回折線では、光学系のさらなる調整や検出器の最適化により高次線による回折線が重ならないような測定条件を見出す必要があり、今後十分に検討したい。