

ラインプロファイル解析を用いたマルテンサイト鋼の焼き戻し温度による微視組織評価

THK 株式会社 水野 湧太

1. 緒言

マルテンサイト鋼は主要な機械構造材料であることからその強化機構は産業界にとっても重要な知見である。学術的および産業的な意義からマルテンサイトの強化機構についての多くの研究がなされてきたが、いまだ不明な点も少なくない。強化機構の主因子である転位は素材の製造工程のみならずその後の加工・熱処理などによってもその状態が大きく変化することから、素材を加工して使用する機械要素メーカーやアッセンブリメーカーにおいても強い関心もたれている。近年では X 線や中性子の回折法を用いた転位の評価方法などの手法も取り入れた研究アプローチも取り入れられ、焼入れまま材中には可動転位が多くその後の変形過程において大きな加工硬化が生じることなどが明らかとなっている (Akama 2016)。申請者らはこれまでの研究 (課題 2019AM0026) において中炭素鋼においても中性子線を用いた回折法がマルテンサイトの微視組織評価に有効であり、焼き入れによって高密度転位が導入され、焼き戻しによって導入された転位が減少する現象を定量的に確認することに成功した (2020 年 11 月トライボロジー会議秋にて発表済み、論文投稿を予定)。しかし、焼き戻し温度などの試験条件が粗く、詳細な微視組織変化現象の解明には至っていない。特に転位キャラクター (刃状転位とらせん転位の構成) や配置状態 (転位ダイポールの発達具合など)、プロファイル形状に敏感な因子については統計的に有意な水準での現象の把握に至っておらず、さらに研究を進めることが必要である。

2. 実験方法

本課題では種々の条件で焼入れ・焼もどし処理を施した S55C 相当の鋼を用いた。また、これらの熱処理材に対して降伏応力に応じた任意の量のひずみを一定時間付与し、応力緩和および可動転位の固着を生じさせた試料を用意し、予負荷前後での微視組織の変化を調査した。試験片形状は直径 5.5 mm で予負荷時に均一なひずみが導入されていると想定される 10 mm を切り出し棒状とし、内径 5.8 mm のバナジウムキャピラリーに装填し、測定ハッチ内に設置することで順次測定を実施した。試料は円筒状であり、軸対象の組織と考えられることから、試験片半径方向の散乱ベクトルを測定し、TOF 範囲および分解能の仕様から背面バンクのデータのみをタイムフォーカシングして解析に利用した。

解析は CMWP (Convolutional Multiple Whole Profile fitting) と呼ばれる解析方法 (Ribárik 2004) を用いた。同法はリートベルト解析法をベースに開発されたアルゴリズムであり複数の回折プロファイルと同時に最適化 (精密化) することで種々の材料組織の物理量を得ることができる。具体的に得られる物理量は転位密度、結晶サイズとその分散、転位キャラクター、転位配置パラメータなどであり、修正法と同様に本研究で重要となる転位の絡み具合を評価するための転位配置パラメータを得られる解析方法である。なお、前回課題 (2019AM0026) では当該解析方法から良好な各種パラメータが得られており、本課題においても当方法を用いて解析を進める。

3. 実験結果

3.1. 焼もどし温度とラインプロファイルの関係

焼もどし温度とプロファイル形状の関係について前回の研究 (課題 2019AM0026) を補完する結果が得られた。さらに前回の研究と同じ条件でも実施しており、前回得られた結果の信頼性を向上できると期待される。図 1 に焼もどし温度毎のラインプロファイルを示す。前回の結果と同様に焼入れままではブロードなピーク形状であったが、焼もどし温度の上昇に伴いシャープな形状となった。また今回新たに追加した条件である 160 °C、190 °C のデータを加えることで、ピーク形状の変化が 220 °C 以下の低

温側の焼もどし条件では大きく変化しておらず、220 °C より高温で急激に変化していることがわかった。前回の結果から焼もどし温度の上昇に伴う転位密度の減少を確認しており、ピーク形状の変化は転位密度の変化によると考えられる。したがって、今回の結果から低温側の焼もどし条件における転位密度の変化が緩やかであることが予想される。この転位密度の緩やかな変化は、前回の結果から得られる予想とは異なっており、CMWP による解析値を用いた詳細な検討が必要である。

さらに、前回の研究では焼もどし温度の上昇に伴い、加熱による残留応力の開放を示すピークトップの移動が見られたが、今回所得したデータが加わったことで、低温側の焼もどし条件ではピークトップの移動が興味深い挙動を取ることがわかった。

3. 2. ひずみ量とラインプロファイルの関係

図 2 にひずみ量毎のラインプロファイルを示す。降伏応力以上のひずみを与えた試料では残留オーステナイトのピークがわずかに減少しており、応力誘起変態によるオーステナイトの消失によると考えている。一方で、マルテンサイトのピークは裾野の形状に若干の差が見られており、転位密度もしくは転位の配置状態が異なっていることが考えられる。

4. 結論

今回の実験により、前回の研究（課題 2019AM0026）では詳細が得られていなかった低温側の焼もどし条件についてデータを得ることができた。低温側の焼もどし条件の試料は、焼もどし温度に対して機械的特性が大きく変動することを確認しており、今回得られたデータはこの変動と可動転位との関係を明らかにするうえで重要なものとなる。またひずみを与えることで、焼入れにより導入された可動転位が不動化および消滅することが予想される。前回はひずみを与えた試料の条件数が少なく有意といえる水準の結果を得ることができていなかったが、今回の実験により結果の信頼性を向上できると考えられる。さらに今回新たに降伏応力に応じて任意のひずみ量を与えた試料のデータも取得し、ひずみ量と可動転位の関係を明らかにできると期待される。

現状ではピーク形状に着目した考察に留まっているが、今後の CMWP による解析により転位密度や転位の配置状態を明らかにし、前回までに得られている結果と合わせて考察することで高強度鋼の機械的な振る舞いに及ぼす転位組織の影響の一端を解明できると期待される。

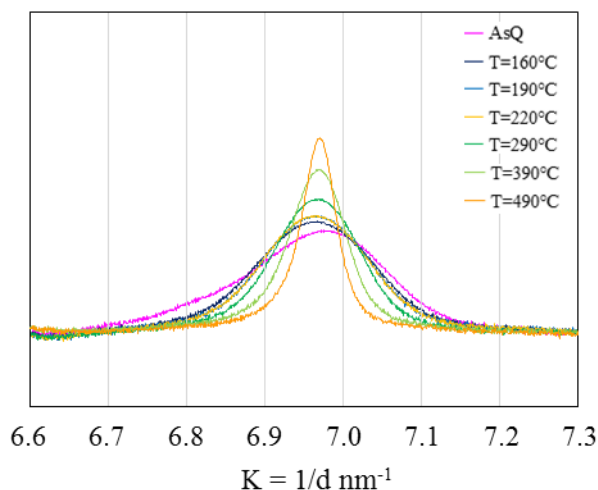


図 1 焼もどし温度毎のラインプロファイル

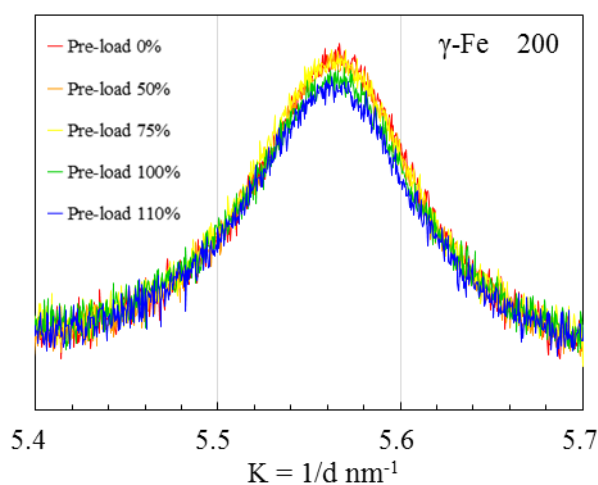


図 2 ひずみ量毎のラインプロファイル