

討15 鉄鋼の組織と破壊の様式

八幡製鉄 東京研究所○松田昭一

I 緒言：オーステナイト変態生成物の切欠靱性を支配する要因を微視組織の観点から明らかにすることを目的とする。すなわち低炭素焼もどしマルテンサイトに仮想的なフェライト粒に対応するマルテンサイト粒（有効結晶粒）とはいかなるものかを定義し、切欠靱性の判定規準として有効結晶粒という概念が物理的に意味があることを示す。また、ベイナイトに有効結晶粒という概念が成り立つかどうかについて検討する。

II 実験方法：光学顕微鏡、電子顕微鏡による衝撃破面の観察、電子顕微鏡による薄膜観察、制限視野回折等を行なった。

III 結果および考察

(1) 低炭素焼もどしマルテンサイト

劈開破壊は破面がある特定の結晶面に沿って割れる性質があり、フェライト鋼では $\{001\}_\alpha$ で劈開することがすでに明らかにされている。ところで低炭素焼もどしマルテンサイトの脆性破面はフェライトの劈開割れに類似した性質をもつが劈開面が何であるかということが直接証明されていないので quasi-cleavageと呼ばれている。最近、当研究室で脆性破面の結晶方位を etch pit で判定しすべて $\{001\}_\alpha$ であることを明らかにした。

劈開割れに伴って生ずる破面の微視的特徴は破面が平らであること、river pattern、tongue が観察されること等で代表される。低炭素焼もどしマルテンサイトの脆性破面にはこれ等の特徴がすべてみられる。このことは低炭素焼もどしマルテンサイトの破壊をフェライト鋼の破壊との対応ということを指導原理として進めることができるということの意味している。

フェライト鋼では、脆性クラックはフェライト粒界で止まるかまたは割れの方向を変える。その結果、劈開破面にはフェライト粒界に沿って heavy tear line が観察される。そこで本質的に割れの伝播に対する抵抗として働いている粒界の間隔を有効結晶粒径と呼ぶことにする。そうするとフェライト鋼ではフェライト粒径が有効結晶径に対応することになる。

低炭素焼もどしマルテンサイトに観察される heavy tear line の位置を微視組織のどこかに存在する大傾角粒界に対応すると仮定してみよう。そうすると再結晶が進まない限り、焼もどしによる sub-boundary の形成等による小さな変化によっては heavy tear line の分布は変わらないことが考えられる。実際に同じオーステナイト粒径をもった焼入れマルテンサイトと焼もどしマルテンサイトについて heavy tear line の分布を測定してみるとほとんど差が認められない。このことは先に提起した仮定の正しいこと、いいかえれば低炭素マルテンサイトが本来持っている結晶学的特徴が有効結晶粒を支配する要因になっていることを意味する。

つぎに大傾角粒界とは微視組織のいかなるところに対応するか考えてみる。特殊腐食液による光学顕微鏡観察、電子顕微鏡による薄膜観察および制限視野回折等の結果を総合解析すると、低炭素マルテンサイトはつぎのような結晶学的特徴を持っていることが明らかになった。1つのオーステナイト粒内のマルテンサイトは数個の bundle（2組の Kurdjumov-Sachs の variant で変態したマルテンサイト葉の束。形態上の特徴としてほぼ平行に並んだマルテンサイト葉から構成されている。）によって分割されている。1つの bundle はさらに co-variant packet（唯一の K-S variant で変態したマルテンサイト葉の束）で分割されている。そして bundle の境界、co-variant packet の境界は大傾

角粒界になっている。

低炭素焼もどしマルテンサイトの劈開破面を微視組織と対応させてみると、heavy tear line は概ね低炭素マルテンサイトの結晶学的特徴と対応することが明らかになった。すなわち低炭素マルテンサイトはオーステナイト粒界以外に1つのオーステナイト粒内に存在する bundle の境界、co-variant packet の境界で結晶方位が大きく変る性質があり、heavy tear line はかならずそれら等の境界で生ずる。したがってフェライト鋼のフェライト粒径に対応するマルテンサイトの有効結晶粒径は大傾角粒界の間隔の最小単位すなわちco-variant packet の大きさであると定義できそうである。

有効結晶粒に対する定義の妥当性を評価する1つの方法として延性領域での停留亀裂の大きさを測定することが考えられる。停留亀裂の大きさは有効結晶粒径に対応しなければならないからそのような観察からheavy tear line の間隔が有効結晶粒径として妥当な大きさであるか、どのようなheavy tear line が脆性破壊に対して有効であるか、という判断の根拠が得られる。実際に停留亀裂を観察しその微視的特徴を分類解析した結果、つぎのようなheavy tear line は破壊の伝播に対して有効に働いていないという結論に達した。

I) 1つの bundle がほぼ1つのco-variant packet からなるとき、その間にはさまれた細かいco-variant packet によるheavy teavy line。

II) 1つのco-variant packet 内で割れが2ヶ所以上から発生しそれ等が繋がってできたheavy tear line。

III) 割れが隣接する結晶粒に伝播するとき、その結晶面が階段状に割れそれ等が最終的に繋がってできたheavy tear line。

したがって低炭素マルテンサイトの有効結晶粒径を正確に表わすと、「co-variant packet の両端が bundle の両端に繋がらないというco-variant packet の大きさである」と定義できる。

オーステナイト粒度の異なった低炭素焼もどしマルテンサイトの劈開破面から有効なheavy tear line 間の分布をとり、その平均間隔を \bar{a} として Tr_s を $\bar{a}^{-\frac{1}{2}}$ に対してプロットするとよい相関がみられる。このことはフェライトに類似した有効結晶粒という概念が低炭素焼もどしマルテンサイトの脆性破壊に対して有効であることを表わしている。

(2) 低炭素焼もどし下部ベイナイト

フェライト鋼に類似した有効結晶粒の概念が低炭素焼もどし下部ベイナイトの脆性破壊に対する指導原理として採用できるかどうかを探索する基本的な問題点として、破面の微視的特徴を明らかにすることが考えられる。

当研究室では脆性破面の結晶方位をetch pitで判定し、破面の結晶面は $\{001\}_\alpha$ 、 $\{111\}_\alpha$ 、 $\{011\}_\alpha$ と $\{111\}_\alpha$ の中間の方位の面等で構成されていることを明らかにした。さらに破面の微視的特徴を注意深く観察し

I) 劈開割れの1つの特徴であるriver patternが観察されない、

II) 破面のほぼ全面にかなり規則的な配列をした小さなtear lineがあり、それ等の間隔はベイナイト葉の巾に対応している、

III) 小さなtear line で囲まれた1つ1つの破面にcarbideの痕跡がみられる、

ことを明らかにした。上記のいくつかの特徴より低炭素焼もどし下部ベイナイトの脆性破壊はベイナイト葉の粒界に沿ったintercrystalline fracture であることがほぼ正しいと考えられる。

低炭素焼もどし下部ベイナイトの破壊の様式がマルテンサイトと根本的に異なることは新しい事実であると同時に、破壊に対して有効結晶粒という概念の導入が有効であるかどうかという疑問を投げかけ

る。ところで脆性クラックの伝播経路を追ってみると大ざっぱにみてベイナイトの co-variant packet の境界で割れ方向が変っている。したがって低炭素マルテンサイトの破壊との対応は無理があるとしても、素朴に考えて下部ベイナイトの微視組織の中に存在する大傾角粒界 (co-variant packet, bundle, オーステナイト等の粒界) が割れの伝播に対して支配的な役割をしていることはほぼまちがいないと考えられる。

IV 結 言

- i) フェライトに類似した有効結晶粒という概念が低炭素焼もどしマルテンサイトの破壊に対して有効である。
- ii) 低炭素焼もどし下部ベイナイトの破壊の様式は低炭素焼もどしマルテンサイトと根本的に異なる。しかし有効結晶粒界に対応する大傾角粒界が割れの伝播に対して重要な役割をしていることはほぼ確かである。