

BCC 鋼における水素脆性破壊機構の本質的解明および 金属組織学に基づいた水素脆性破壊抑制の検討

京都大学大学院工学研究科・材料工学専攻 構造物性学研究室
博士後期課程 3 年 岡田 和歩

1. 鉄鋼材料の高強度化と水素脆性

構造用金属材料は、交通・輸送車両や建築部材を始めとする様々な用途に使用されており、現代社会の基盤を支える存在です。特に鉄鋼材料は、構造用金属材料の約 90% を占めており、輸送機器の燃費や衝突安全性の向上が求められている昨今では、高強度化へのニーズが高まっています。しかし、高強度鋼は「水素脆性」という現象を起こしやすく、大きな問題になっています。水素脆性とは、材料中に侵入した水素によって材料が脆くなる現象であり、予期せぬ破壊事故の原因となる危険性があります。したがって、高強度鋼の実用化に際しては水素脆性破壊の抑制が重要であり、そのためには水素脆性における破壊機構を把握することが必要です。今まで様々な水素脆性機構が提案されてきましたが、水素による破壊の本質は未だ明らかになっていないのが現状です。

2. マルテンサイト鋼の水素脆性破壊

鉄鋼材料のマルテンサイトは非常に硬く、高強度材料の基地組織として重要です。特に図 1 に示すようなラスマルテンサイト組織は、低・中炭素高強度鋼として用いられる代用的な組織であり、ラス、ブロック、パケット、旧オーステナイト粒 (以後旧 γ 粒) といった複雑な階層組織で構成されています。マルテンサイト鋼の水素脆性破壊は、2 種類の特徴的な破壊を伴います。1 つは、

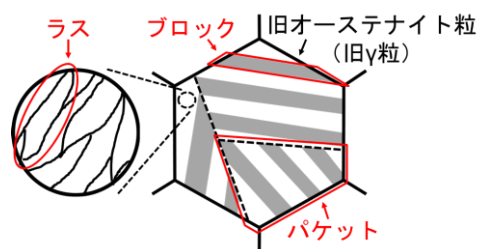


図 1: ラスマルテンサイト組織の模式図

旧 γ 粒界における粒界破壊であり、破壊は旧 γ 粒界を起点として発生します。もう 1 つの特徴的破壊様式である擬へき開破壊は、旧 γ 粒内で生じる破壊であり、へき開破壊 (低温脆性破壊などで生じる) によく似ていますが、通常のへき開破面に特徴的な river pattern には見られない筋状模様 (serrated markings) を伴う場合が多いです。また、BCC 金属 (体心立方格子構造をもった金属) で一般に見られる $\{001\}$ へき開破面とは異なり、水素脆性における擬へき開破面は BCC 構造結晶のすべり面である $\{011\}$ 面と平行であることを我々のグループは明らかにしています [1]。一般に、金属の塑性変形は、原子のずれ (転位) が結晶中の特定の原子面 (BCC 結晶では主に $\{011\}$ すべり面) を移動することによって生じます。したがって、水素脆性擬へき開破壊が BCC 結晶の塑性変形に起因した破壊である可能性が考えられます。一方で、ラスマルテンサイト組織におけるラス境界とブロック境界も $\{011\}$ 面と平行なため、水素脆性擬へき開破壊がマルテンサイト組織に起因したものなのか、あるいは BCC 鋼の水素脆性破壊の本質的特徴なのかは明らかになっていませんでした。そこで私の博士論文の研究では、ラスマルテンサイト組織と同じ BCC 構造の単純組織を有するフェライト組織の水素脆性破壊に着目し、マルテンサイト組織の水素脆性破壊と比較することで、微視組織の観点から水素脆性破壊の本質的特徴を明らかにしました。

3. フェライト鋼の水素脆性破壊

私たちは、高強度鋼ではないフェライト鋼においても大きな塑性変形を加えることで水素脆性破壊が生じることを発見しました。また、水素脆性破壊した試験片の破面の 90% 以

上が serrated markings を伴った擬へき開破面 (図 2) で覆われており, serrated markings を伴う擬へき開破面が BCC 鋼における水素脆性破壊の本質的な特徴であることがわかりました. さらに, フェライト鋼の擬へき開破面の面方位を正確に測定したところ, ほとんどが $\{011\}$ 面と平行に近いことがわかりました (図 3). これが, マルテンサイト鋼の擬へき開破壊の特徴と一致することから, BCC 鋼の水素脆性擬へき開破壊は本質的に $\{011\}$ すべり面と平行であり, ラスマルテンサイト組織に起因した破壊ではないことが明らかになりました [2].

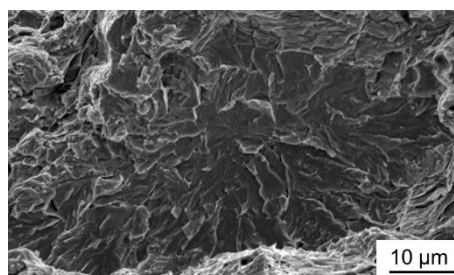


図 2: フェライト鋼の擬へき開破面

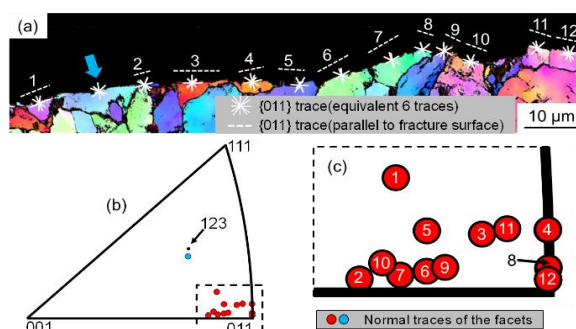


図 3: フェライト鋼の擬へき開破面の方位マップ

4. 水素が塑性変形挙動におよぼす影響と水素脆性擬へき開破壊機構

BCC 鋼の水素脆性擬へき開破面が本質的にすべり面である $\{011\}$ 面と平行であることから, 破壊機構を解明するためには, 水素が塑性変形挙動に

およぼす影響を明らかにする必要があります. しかしながら, ラスマルテンサイト組織のような複雑な組織は塑性変形に伴う微視組織の変化を観察することが困難です. そこで, 私たちは, 水素が導入されたフェライト鋼の変形微視組織を解析することで, BCC 鋼の水素脆性擬へき開破壊機構を考察しました. 金属の塑性変形を担う転位には, 大別すると, らせん転位と刃状転位という 2 種類があります. 私たちは, 水素の存在によって特にならせん転位の運動が活発になり, 転位がより絡まり合った形態に発達することを明らかにしました. このような結果から, 私たちは, らせん転位の切り合いによって生成される多量の空孔 (結晶格子の上にあるべき原子が欠けている状態) によって水素脆性擬へき開破壊が引き起こされるというモデルを考案しました. 現在は, 破壊の進展方向と平行である serrated markings と関連付けることで, 破壊モデルのさらなる検証を行っています.

5. 旧オーステナイト粒界への炭素偏析によるマルテンサイト鋼の水素脆化特性向上

上記のように, 水素脆性擬へき開破壊の機構は未だ完全には明らかになっていません. 一方で, マルテンサイト鋼のもう一つの典型的な水素脆性破壊様式である粒界破壊は, 水素によって旧 γ 粒界の凝集エネルギー (原子の結合を切り離して無限遠まで離すために必要なエネルギー) が低下することで旧 γ 粒界に沿って発生することが報告されています. したがって, 組織制御によって旧 γ 粒界の凝集エネルギーを向上させることができれば, 水素脆性に対する耐性が向上することが期待されます. そこで私たちは, 熱処理によって組織制御を行い旧 γ 粒界に炭素原子を偏析させる (濃化させる) ことで, 水素の存在下での旧 γ 粒界の凝集エネルギーを向上させ, マルテンサイト鋼の水素脆性を抑制することに成功しました.

参考文献

- [1] A. Shibata et al., Mater. Sci. Technol., 33 (2017), pp.1524-1532.
- [2] K. Okada et al., Int. J Hydrogen Energy, 43 (2018) pp.11298-11306.