

京都大学	博士（工学）	氏名	岡田 和歩
論文題目	フェライト鋼およびマルテンサイト鋼における水素脆性破壊機構の変形微視組織に基づく検討		

（論文内容の要旨）

本論文は、体心立方（Body Centered Cubic: BCC）結晶構造を有するフェライト鋼とマルテンサイト鋼の水素脆性破壊挙動と水素脆性に伴い形成される変形微視組織を比較・検討することで、水素存在下の塑性変形により形成される変形微視組織に基づいて BCC 鋼の水素脆性破壊の機構を議論した研究成果を取りまとめたものであり、全6章から成っている。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的を示している。現在の社会で強く要望されている鉄鋼材料の更なる高強度化を実現するためには、鋼で最も高い強度を示すマルテンサイト組織を活用する必要がある。しかしながらマルテンサイト鋼は、水素が侵入することで材料が脆くなる水素脆化現象を示し、これが超高強度化の大きな障害となっている。水素脆化の抑制のためには、その破壊機構の解明が必要である。これまでに様々な水素脆化破壊機構が提案されてきたが、水素に誘起される破壊の本質は未だ明らかになっていない。実用的に重要な低・中炭素鋼に現れるラスマルテンサイト組織は、ラス、ブロック、パケット、旧オーステナイト粒といった種々の寸法スケールの組織単位により構成されており、その水素脆性破壊においては粒界破壊と擬へき開破壊という2種類の破壊様式が主に確認されている。しかし、従来のマルテンサイト鋼の水素脆性機構に関する研究では、上述の破壊の起源がマルテンサイト鋼が示す複雑なラスマルテンサイト微視組織に由来するものなのか、あるいは BCC 結晶構造を有する鋼の本質なのかは明らかになっていなかった。そこで本研究では、マルテンサイト組織と同じ BCC 構造であり単純な組織を有するフェライト単相組織の水素脆性破壊挙動や水素脆性に伴い形成される変形微視組織を調べ、マルテンサイト鋼の水素脆性の場合と比較・検討することで、より一般的に BCC 鋼の水素脆性破壊の起源を明らかにすることを目的としている。

第2章では、フェライト単相組織の水素脆性破壊挙動や破面の結晶学的特徴を詳細に調べ、フェライト鋼の水素脆性擬へき開破面が、BCC 結晶の主たるすべり面である  $\{011\}$  結晶面と平行であることを示している。この特徴がマルテンサイト鋼の場合と一致することから、BCC 鋼の水素脆性に伴い現れる擬へき開破壊は、ラスマルテンサイト微視組織に起因したものではなく、 $\{011\}$  すべり面が本質的に重要な役割を果たすことを明らかにしている。さらに、水素がフェライト鋼の変形微視組織に及ぼす影響を詳細に調べ、水素存在下では (i) らせん転位の刃状転位に対する相対的な易動度が上昇すること、(ii) 転位組織が絡まり合った転位形態に発達すること、(iii) 変形後期（破壊が生じる直前のひずみ量）においてらせん転位密度が上昇することを明らかにした。これら変形微視組織観察結果に基づいて、らせん転位のジョグ引きずり運動によって導入された空孔・ナノボイドが  $\{011\}$  すべり面近傍で連結・成長することによる水素脆性擬へき開破壊機構を提案している。

第3章では、フェライト鋼とマルテンサイト鋼の水素脆性擬へき開破面の微視的な3次元構造や結晶学的特徴を透過電子顕微鏡（Transmission Electron Microscope: TEM）観察などを駆使して詳細に調べ、水素脆性擬へき開破壊においては  $\{011\}$  すべり面（すなわち微視的な破面）に働く分解垂直

京都大学	博士（工学）	氏名	岡田 和歩
<p>応力が重要な役割を果たすことを見出している。これは、水素脆性擬へき開破壊が単純に水素によってすべり変形が助長されることで生じるすべり面分離のような現象ではなく、塑性変形によって導入された空孔の連結による破壊機構などを考える必要性を示唆しており、第2章で提案した機構を支持する結果であると結論している。</p> <p>第4章では、マルテンサイト鋼の水素脆性を抑制する手法として、マルテンサイト変態の母相であるオーステナイト粒界における炭素の偏析を利用する手法を考案し検証している。旧オーステナイト粒界における偏析炭素濃度を増加させることで水素脆性粒界破壊を抑制し、マルテンサイト鋼の水素脆性特性を向上させることに成功した。さらに、クラック進展抵抗曲線を用いて破壊挙動の解析を行うことで、クラックの進展開始と進展のそれぞれの素過程における水素脆性特性の定量評価手法を確立している。水素の存在によってクラック進展開始抵抗とクラック進展抵抗の両方が著しく低下することや、水素脆性粒界破壊が完全な脆性破壊ではなくクラックの安定成長段階を含むことを見出している。また、旧オーステナイト粒界における偏析炭素濃度の増加によって、低水素量ではクラック進展開始抵抗とクラック進展抵抗の両方の低下が抑制されたが、高水素量では抑制されないという事実も見出している。</p> <p>第5章では、引張試験中その場観察とデジタル画像相関法を組み合わせることで、ラスマルテンサイト微視組織に対応した局所応力・ひずみ分布の測定に成功し、変形中に旧オーステナイト粒界へ塑性ひずみと応力（特に引張応力）の両方が集中した結果、旧オーステナイト粒界へ水素が集積することを明らかにしている。この結果により、マルテンサイト鋼が種々の寸法スケールの微視組織単位（様々な境界を内包するラスマルテンサイト組織）によって構成されるにもかかわらず、水素脆性粒界破壊が主に旧オーステナイト粒界に沿って生じる原因の一つが解き明かされた。</p> <p>第6章は総括であり、本研究で得られた結果を要約しまとめている。</p>			

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、高強度を示すマルテンサイト鋼を構造部材として実用化する上で大きな障害となっている水素脆性の本質を解明するため、体心立方 (Body Centered Cubic: BCC) 結晶構造を有するフェライト鋼とマルテンサイト鋼の水素脆性破壊挙動や水素脆性に伴い生じる変形微視組織を比較・検討することで、水素存在下の塑性変形により形成される変形微視組織に基づいて BCC 鋼の水素脆性破壊機構を議論した研究の結果を取りまとめたものである。得られた主な成果は次の通りである。

1. マルテンサイト鋼を含む BCC 鋼の水素脆性に伴い現れる擬へき開破壊は、ラスマルテンサイト微視組織に起因したものではなく、 $\{011\}$  すべり面が本質的に重要な役割を果たすことを明らかにした。さらに、水素がフェライト鋼の変形微視組織におよぼす影響を詳細に調べ、らせん転位のジョグ引きずり運動によって導入された空孔・ナノボイドが  $\{011\}$  すべり面近傍で連結・成長することによる擬へき開破壊機構を提案している。
2. フェライト鋼とマルテンサイト鋼の水素脆性擬へき開破面の微視的な 3 次元構造や結晶学的特徴を詳細に調べ、水素脆性擬へき開破壊においては  $\{011\}$  すべり面に働く分解垂直応力が重要な役割を果たすことを見出した。これは、本研究で提案した上述の擬へき開破壊機構を支持する結果である。
3. 旧オーステナイト粒界における偏析炭素濃度を増加させることで水素脆性粒界破壊を抑制し、マルテンサイト鋼の耐水素脆性特性を向上させることに成功した。さらに、クラック進展抵抗曲線を用いた解析を行い、クラックの進展開始と進展それぞれの破壊素過程における水素脆性特性の定量評価手法を確立した。水素によってクラック進展開始抵抗とクラック進展抵抗の両方が著しく低下することや、水素脆性粒界クラックの進展に安定成長段階が存在することを明らかにした。また、旧オーステナイト粒界における偏析炭素濃度の増加によって、水素によるクラック進展開始抵抗とクラック進展抵抗の両方の低下が抑制された。
4. 引張試験中その場観察とデジタル画像関連法を組み合わせることで、ラスマルテンサイト微視組織に対応した応力・ひずみ分布の測定に成功し、変形中に旧  $\gamma$  粒界へ塑性ひずみと応力の両方が集中した結果、旧  $\gamma$  粒界へ水素が集積することを明らかにしている。

以上の成果をまとめた本論文は、水素存在下の塑性変形により形成される微視組織に基づき BCC 鋼の水素脆性擬へき開破壊機構を統一的に明らかにしている。さらに、旧オーステナイト粒界における炭素偏析を利用してマルテンサイト鋼の水素脆性特性を向上させることに成功するとともに、マルテンサイト鋼の変形挙動に関する理解を深めている。本研究で得られた知見は水素脆性の本質を明らかにする上で学術的に重要であり、水素脆性を抑制した超高強度鋼の実用化にも大きく寄与するものである。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 4 年 2 月 17 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。