

京都大学	博士 (工学)	氏名	松宮 久
論文題目	低炭素マルテンサイト鋼の水素誘起疲労破壊におよぼす微視組織の影響		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、低炭素マルテンサイト鋼の水素誘起疲労破壊における破壊挙動と微視組織の関係、および変形条件 (試験周波数, 応力比) の影響を実験により系統的に調査し、低炭素マルテンサイト鋼の水素誘起疲労破壊メカニズムを議論した研究成果をとりまとめたものであり、全5章から成っている。</p> <p>第1章は序論であり、本研究の背景と目的を示している。近年、省資源・環境負荷低減の観点から、構造用金属材料には従来のはるかに超える超高強度が要求されるようになっており、構造用金属材料として最も多量に用いられる鉄鋼材料に関しては高強度鋼の需要が増大している。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、使用中に予期しない破壊事故が生じる危険性を孕むことから、水素脆性が超高強度化の大きな障害となっている。特に社会実装時に避けて通れない疲労破壊におけ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階層的組織単位により構成されている。低炭素マルテンサイト鋼においては、複雑な内部微視組織 (ラスマルテンサイト組織) が変形挙動に大きく影響をおよぼすことが報告されており、水素誘起疲労破壊挙動とラスマルテンサイト組織にも何らかの関係が存在する可能性が高い。しかし、低炭素マルテンサイト鋼の水素誘起疲労破壊に関する従来の研究はマクロな破壊特性におよぼす水素の影響のみに着目しており、破壊挙動と微視組織の関係は明らかにされていない。そこで本研究では、低炭素マルテンサイト鋼の水素誘起疲労破壊における破壊挙動と微視組織の関係、および変形条件 (試験周波数, 応力比) の影響を系統的に調査し、低炭素マルテンサイト鋼の水素誘起疲労破壊メカニズムを明らかにすることを研究目的としている。</p> <p>第2章では、低炭素マルテンサイト鋼の疲労破壊におよぼす水素の影響を、ラスマルテンサイト組織と関連付けて検討している。水素の有無によらず、疲労破面は大部分が粒内破壊を呈していたが、水素チャージ材には粒界破面が比較的多く観察された。また、FRASTA (<u>Fracture Surface Topography Analysis</u>) 法による破壊プロセス解析を行なった結果、未チャージ材では試料表面で発生したクラックが粒内を進展するのに対し、水素チャージ材では旧オーステナイト粒界で発生したクラックが粒内を進展することを明らかにしている。さらに、水素の有無によらず、クラックの大部分はラスマルテンサイト組織の特定の境界に沿って進展するのではなく、ラスを横断して進展することを明確に示している。これらの結果は、ラスマルテンサイト組織を有する低炭素鋼の疲労破壊において、破面形態の割合とマイクロ組織中のクラック進展経路が水素の存在により明確に変化することを示したものである。</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	松宮 久
<p>第3章では、低炭素マルテンサイト鋼の水素誘起疲労破壊におよぼす疲労試験周波数と応力比（疲労試験時に付加した最小応力／最大応力）の影響を調べている。本研究では引張-引張による疲労試験を実施しているため、定荷重試験（応力比0）が応力比最大の条件であり、応力比1.0となる引張-引張疲労が応力比最小の条件であった。水素チャージ材では試験周波数の低下に従って破断までのサイクル数が減少し、粒界破壊がより多く発現していた。また、応力比の増加に従って破断までの時間は増加したが、粒界破壊はより頻繁に観察された。FRASTA 法による破壊プロセス解析と X 線 CT（<u>Computed Tomography</u>）測定によるクラックの3次元観察の結果、高周波数・低応力比での疲労試験においては、メインクラックが粒内を連続的に進展していくことで破壊が進行するのに対し、低周波数・高応力比での試験においては、メインクラック先端近傍の旧オーステナイト粒界で独立した二次クラックが発生し、それらがメインクラックと連結することで破壊が進行することを明らかにしている。疲労変形時の連続的なクラック進展においては、メインクラック先端近傍の旧オーステナイト粒界に水素が集積するための時間が十分に存在するかどうかによって、このようなクラック進展挙動の違いが生じると考察している。一方クラック発生までの時間は、試験周波数には依存しないが応力比の増加に従って長くなることが確認され、試料中に蓄積される塑性ひずみも応力比の増加に従って小さくなることが示唆された。こうした結果から、繰り返し応力負荷時の転位運動に伴う旧オーステナイト粒界への水素輸送が、水素誘起疲労破壊において重要な役割を果たすと考察している。</p> <p>第4章では、マルテンサイト組織あるいはフェライト・パーライト組織を有する低炭素鋼の水素誘起疲労破壊に伴う変形組織の発達を調べている。フェライト・パーライト鋼では、隣接セル間の方位差が1°未満の転位セル組織が水素の有無によらず破面直下で発達していたが、水素チャージ材においては転位セル組織が微細化し、より大きな方位差を有していた。一方、マルテンサイト鋼ではラスを横断するクラック近傍には水素の有無によらず変形組織の発達が認められなかったのに対し、ラスと平行に進展していたクラック近傍には水素の有無によらずサブグレインが形成され、さらに水素の存在により塑性変形が局所化することを見出している。これは同じ体心立方（<b>Body Centered Cubic: BCC</b>）結晶構造を有する相を基地組織とする低炭素鋼であっても、マルテンサイト組織とフェライト・パーライト組織の間に疲労破壊挙動の違いが認められること、一方どちらの場合も水素存在下の疲労変形・破壊においては、クラック先端の塑性変形がより局在化することを示したものである。</p> <p>第5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>			

氏名

松宮 久

本論文は、高強度マルテンサイト鋼の構造部材としての社会実装に対して大きな障害となっている水素誘起疲労破壊の本質を解明するため、種々の変形条件下における低炭素マルテンサイト鋼の水素誘起疲労破壊挙動とラスマルテンサイト微視組織の関係を調査した研究の結果を取りまとめたものである。本研究により得られた主な成果は次の通りである。

1. 低炭素マルテンサイト鋼における水素誘起疲労破壊の破壊プロセスと結晶学的特徴を詳細に調べ、旧オーステナイト粒界で発生したクラックがマルテンサイトラスを横断して進展することで破壊が進行することを明らかにしている。これはマルテンサイト鋼の水素誘起疲労破壊機構を微視組織と関連づけて理解する上で重要な新知見である。
2. 低炭素マルテンサイト鋼の水素誘起疲労破壊におよぼす試験周波数と応力比の影響を系統的に調べ、試験周波数の低下および応力比の増加に従って粒界破壊がより多く発現することを明らかにした。さらに、破壊プロセス解析と X 線 CT 測定を組み合わせることで、低試験周波数および高応力比下での水素誘起疲労破壊では、メインクラック先端近傍の旧オーステナイト粒界で独立した二次クラックが発生し、それらが連結することで破壊が進行することを実験的に示している。これは、メインクラック先端近傍の旧オーステナイト粒界における水素集積が破壊に対して重要な役割を果たしていることを示唆するものである。
3. 低炭素マルテンサイト鋼の水素誘起疲労破壊において、クラックがラスを横断して進展する場合には水素の有無によらず変形組織の発達がほとんど生じないのに対し、クラックがラスと平行に進展する場合には、サブグレインが発達するとともに水素の存在により塑性変形が局所化することを明らかにしている。これは、繰返し応力負荷時の転位運動に伴う旧オーステナイト粒界への水素輸送が、水素誘起疲労破壊において重要な役割を果たすことを示すものである。

以上の成果をまとめた本論文は、低炭素マルテンサイト鋼の種々の変形条件下における水素誘起疲労破壊機構を精緻な実験により明らかにしている。本研究で得られた知見は、鉄鋼材料の水素誘起疲労破壊の本質を明らかにする上で学術的に重要であり、水素誘起疲労破壊を抑制した高強度鋼の実用化にも大きく寄与するものであって、学術上および実際上寄与するところが少なくない。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6年2月22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。