

京都大学	博士 (工学)	氏名	朴 魯謹
論文題目	Dynamic Ferrite Transformation in Fe-6Ni-0.1C Alloy (Fe-6Ni-0.1C 合金における動的フェライト変態)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、低炭素鋼に対して種々の温度・ひずみ速度での熱間圧延・急冷試験を系統的に行い、変形時の応力ひずみ応答を詳細に調べるとともに、得られるフェライト組織を解析する事によって、動的フェライト変態の発現を証明し、その特徴を調査した実験研究の成果をとりまとめたものであり、5章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、本研究の背景・目的を示した上で、過去に行われた動的相変態に関する研究を総括して問題点を抽出し、本研究の焦点を明確にしている。また、研究の目的を達成するための試料合金の設計と、加工と熱処理を精密に制御した物理シミュレーション試験の概念と詳細についても述べている。近年、鉄鋼材料の加工熱処理による組織制御においては、オーステナイト熱間圧延の最終仕上げ温度を低下させようとする試みが多く行われており、その過程で、<math>A_3</math> 変態点以下での低温オーステナイト圧延・フェライト変態によって粒径 <math>1\ \mu\text{m}</math> 以下の超微細フェライト粒組織が得られることが報告されている。そしてしばしば、その場合のフェライト変態は、オーステナイトの変形中に生じる動的相変態 (Dynamic Transformation) であるとの主張がなされている。しかし、高温現象である動的変態の発現を直接証明することは容易ではなく、動的相変態が真に生じているのかどうかは、未だ不明確である。また、仮に動的変態が生じていたとしても、変形条件と動的変態の兼ね合いやその kinetics、生じるフェライト組織の特徴、そしてその力学特性などを系統的に調べた研究例はほとんどない。本研究は、相変態域を拡大するために成分調整された Fe-6wt%Ni-0.1wt%C 合金を用いて系統的な高温圧縮試験を行ない、動的フェライト変態の発現を証明するとともに、その特徴を明らかにしようとするものである。第1章では、本研究の目的に沿って合金設計された試験材料 (Fe-6Ni-0.1C 合金) の詳細と、本研究で用いられた、冷却速度を含む加工熱処理条件を精密に制御できる加工熱処理シミュレーターによる実験の詳細についても記述している。</p> <p>第2章では、種々の温度・ひずみ速度で系統的に圧縮された Fe-6Ni-0.1C 合金の応力-ひずみ曲線を詳細に解析し、動的フェライト変態の発現を議論している。動的変態に由来した最大応力の低下 (軟化) が、ある範囲の変形条件下で生じ、Zener-Hollomon 因子 (Z 値) を用いてその臨界値を示すことができることを見いだしている。すなわち本研究の結果は、高温変形中の応力ひずみ応答を解析する事によって、動的フェライト変態の発現を定量的に議論することが可能であることを示すものである。そして臨界 Z 値以上であれば、平衡変態温度 (<math>A_{e3}</math> 点) 以上であってもフェライトへの相変態が生じることを示し、巧妙な加工熱処理実験によって、<math>A_{e3}</math> 点以上の温度における動的フェライト変態の発現を明確に証明している。そしてその理由を熱力学的に考察し、平衡変態点以上の温度での相変態の発現は、変形により導入される転位その他の格子欠陥の平均値からは理解することができず、その局所的な分布に注目することが必要である旨を提案している。また、得られたフェライト組織を組織・結晶学的に詳細に観察・解析する事により、種々の条件下における動的相変態の発現を明確に証明している。</p> <p>第3章では、やはり高温変形中の応力-ひずみ曲線を解析する事により、動的相変態の kinetics を議論することを試みている。その過程で、オーステナイト組織の結晶粒微細化が、動的相変態を大</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	朴 魯謹
<p>           きく促進することを見いだした。そして、変形応力の低下（軟化）量が、フェライトの体積率と強い相関関係を有することを、組織観察により証明している。このことにより、応力-ひずみ曲線の解析によって、動的フェライト変態時の kinetics を定量的に取り扱うことが可能であることを明らかにしている。そして、動的フェライト変態の速度論が、Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov の式により記述できることを示している。この結果は、高温変形時の応力ひずみ解析のみにより、動的相変態における速度論 (kinetics) を定量的に評価することが可能であることを示した初めての研究成果である。         </p> <p>           第 4 章では、動的変態により得られたフェライト組織の特徴を、幅広く解析・定量化している。動的変態を生じた低炭素鋼試料は、室温で残留オーステナイトを有することを示している。これは、オーステナイト中の C の濃化によるものであり、動的相変態が拡散型相変態であることを示唆するものである。オーステナイト粒径が粗大な場合、Widmannstätten 型フェライトと微細等軸フェライト粒の両方が生じることを見いだしている。母相オーステナイトと動的に生じたフェライトの間には、Kurdjumov-Sachs の方位関係とともに、部分的に Nishiyama-Wassermann の方位関係を確認した。動的フェライト変態の過程は、変形時のひずみ速度により異なることを示している。高ひずみ速度では、オーステナイト粒内から多数のフェライトが核生成するが、低ひずみ速度の場合、少数のフェライトがオーステナイト粒界で核生成し、その成長が律速する過程を取った。フェライト組織は、変形条件の影響を大きく受けた。変形温度の低下とともに得られるフェライト粒径は減少し、フェライト粒径は Z 因子により整理できることを示している。条件によっては、粒径 1 μm 以下の超微細粒フェライト組織が動的変態により得られることを示している。さらに、動的変態により得られたフェライト組織の機械的性質を、引張試験により明らかにし、同じ材料の静的フェライトの機械的性質と比較している。動的フェライト組織は静的フェライト組織よりも高い降伏強度を示し、これは主に動的フェライト粒内の加工硬化（転位組織の存在）によるものであることを示している。また、動的フェライト材では、Lüders 伸びが減少するという興味深い結果も見出している。これらの動的変態により得られたフェライト組織の組織・結晶学的特徴と機械的性質は、すべて静的変態により得られたフェライト組織と比較することにより示されており、動的変態により得られるフェライト組織の特徴を明確にしている。         </p> <p>           第 6 章は結論であり、本論文で得られた成果を総括するとともに、動的再結晶研究の今後の展望に言及している。         </p>			

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、低炭素鋼 (Fe-6Ni-0.1C 合金) に対して種々の温度・ひずみ速度での熱間圧延・急冷試験を系統的に行い、変形時の応力ひずみ応答を詳細に調べるとともに、得られるフェライト組織を解析する事によって、オーステナイト相の高温変形中に生じる相変態である動的フェライト変態の発現を証明し、その特徴を調査した実験研究の成果をとりまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. Fe-6Ni-0.1C 合金における動的フェライト変態の発現を確認し、高温変形時の応力ひずみ曲線の解析によって動的相変態の発現を検知できることを示した。すなわち、動的変態に由来した応力の低下 (軟化) が、ある範囲の変形条件下で生じることを見出し、その変形条件が、Zener-Hollomon 因子 (Z 値) を用いて、ある臨界の Z 値以上で動的相変態が発現することを示した。このように、変形中の応力ひずみ応答を元に動的相変態の発現を議論することができることは、本研究により初めて見いだされた重要な事実であり、フェライト組織の微細化手法として注目されている動的フェライト変態に関する基礎的理解を大きく進展させ、また、今後の動的変態に関する研究にも大いに資するものである。

2. 動的フェライト変態が、平衡変態温度 ( $A_{c3}$  点) 以上の温度でもで生じることを、巧妙な高熱処理実験により明確に証明した。また、平衡変態点以上の温度での相変態の発現理由を議論し、変形の不均一さ (局所ひずみ) に基づく仮説を提案している。平衡変態点以上の温度における動的相変態の発現は、従来もいくつか報告されていたが、その真偽はやや不明確であった。それに対し本研究では、平衡変態点よりも数十度上の温度で動的フェライト変態が発現することを、実験的に明確に証明した。これは、金属材料の相変態における常識に一石を投じるものとしても、重要な研究成果である。

3. 変形時の応力ひずみ曲線を解析する事により、動的相変態の進行の速度論 (kinetics) を定量的に導くことができることを見だし、本実験における動的フェライト変態の kinetics の特徴を明らかにした。これも、上記 1 と同様に、動的相変態の解析を応力ひずみ応答を元に詳細に解析できることを示した初めての成果であり、今後の動的相変態研究に大きく寄与することのできる研究成果である。

4. 動的相変態により生じたフェライトの組織学的特徴、集合組織、および機械的性質を、静的変態により得られたフェライト組織との比較のもと、明確にした。この過程で、従来報告されていない動的変態により得られたフェライトの興味深い組織学的特徴と機械的性質が明らかになっており、今後の本分野における興味深い研究課題を提示するものとして高く評価できる。

これらの成果は、依然として不明な点が多く、しかし微細粒フェライト組織を得るための手段として実用上も注目を受けている鋼の動的フェライト変態に関する基礎的知見を示し、その本質を明らかにする上で学術上寄与するところが大きい。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、平成 25 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。