

京都大学	博士 (工学)	氏名	毛 文奇
論文題目	Deformation mechanism of metastable austenitic steel with TRIP effect and associated kinetics of deformation induced martensitic transformation (TRIP 効果を示す準安定オーステナイト鋼の変形機構と変形誘起マルテンサイト変態の速度論)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、Fe-24Ni-0.3C (mass%) 準安定オーステナイト合金の変形挙動とその粒径依存性をオーステナイト相とマルテンサイト相間の応力・ひずみ分配に着目して解析し、さらに等温マルテンサイト変態を示す Fe-23Ni-33Mn 合金を用いて変形誘起マルテンサイト変態に及ぼす負荷応力、塑性ひずみおよび結晶粒径の影響を調査してマルテンサイト核生成の熱活性化過程を明らかにした実験的研究成果を取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。準安定オーステナイト合金においては、マルテンサイト変態開始温度 (M_s) 以上の温度であっても、応力や塑性ひずみを与えることで変形誘起マルテンサイト変態が生じる。変形誘起マルテンサイト変態は合金の加工硬化率を高め、高い強度と大きな引張延性をもたらす。こうした現象は TRIP (transformation induced plasticity) 効果として知られており、高い強度と大きな延性を両立した構造材料の開発において重要である。一方、平均粒径 $1 \mu\text{m}$ 以下の超微細粒材料 (バルクナノメタル) 研究において、準安定オーステナイトの結晶粒超微細化はオーステナイトを安定化して M_s 点を下げる一方、変形時には粒界からマルテンサイトが発生し優れた機械的性質をもたらすことが明らかとなった。こうした超微細粒準安定オーステナイトにおける TRIP 効果の発現原理を明らかにし、合金の力学特性に及ぼす影響を最適化するために、本研究では変形誘起マルテンサイト変態に及ぼすオーステナイト結晶粒径と変形条件の影響を調査し、また変形誘起マルテンサイトの核生成の活性化過程の定量化を目的として実験的研究を行なっている。</p> <p>第2章では、粗大粒径を有する Fe-24Ni-0.3C 合金の引張変形中その場中性子回折実験を行い、マルテンサイト相とオーステナイト相の間の応力・ひずみ分配を解析することによって、加工硬化挙動に及ぼす変形誘起マルテンサイト変態の影響を定量的に明らかにしている。引張変形中に形成される変形誘起マルテンサイトの体積率を走査電子顕微鏡 (SEM) 内における Electron Back-Scattering Diffraction (EBSD) 解析と引張変形中のその場中性子回折により明らかにし、引張変形時の加工硬化率の再増大とマルテンサイト体積率の増加がよく一致していることを見出した。ナノ硬さ試験により引張変形材中のオーステナイト相とマルテンサイト相の硬さを測定し、オーステナイト相は加工とともに硬さ (強度) が増大するが、マルテンサイトの硬さはほぼ一定であること、また硬さをもとに混合則を用いて推定した変形応力は、実験により得られた実際の変形応力とは一致しないことを明らかにした。後者は、材料全体の強度に二相間の力学的相互作用が大きな影響を与えていることを示唆している。そこでその場中性子回折のピークシフトから各相の格子ひずみを測定して両相の相応力を評価し、体積率を考慮した混合則を適用したところ、実験により得られた応力-ひずみ関係とよく一致することが明らかとなった。DIC 法により各相の平均塑性ひずみを測定し、各相の平均応力 (相応力) とともに考慮することによって、材料中の各相の応力-ひずみ曲線を分離・推定</p>			

することに成功し、各相の変形状況によって引張変形が3つの段階に分類できることを明らかにした。

第3章では、Fe-24Ni-0.3C 合金の変形挙動に及ぼす結晶粒径の影響を調査している。冷間強圧延と適切な条件での焼鈍によって、超微細粒径を含む種々の結晶粒径の試験片を作製することに成功している。得られた試料の引張変形挙動をその場中性子回折実験により解析し、結晶粒微細化の影響を明らかにしている。結晶粒微細化によって変形誘起マルテンサイト変態速度は抑制されるが、超微細粒材の加工硬化率はむしろ向上することが明らかとなった。第2章で用いた手法を適用して、オーステナイト粒径の異なる三種の試料におけるオーステナイト相およびマルテンサイト相の応力-ひずみ曲線を分離して描くことに成功し、結晶粒微細化とともに特徴的な3つの段階の発現時期が変化し、超微細粒材ではオーステナイトとともにマルテンサイトも大きく塑性変形する第三段階が拡張することが明らかとなった。こうした結果は、母相の結晶粒微細化に伴いオーステナイト/マルテンサイト界面の割合が増大し、その変形拘束効果によってマルテンサイトがより大きく変形し、材料全体として大きな加工硬化が実現されることを示している。

第4章では、前章までの結果によって引張変形中の変形誘起マルテンサイト変態の速度 (kinetics) が材料全体の強度と延性に大きな影響を与えることが明らかとなったことを受け、等温マルテンサイト変態を示す Fe-23Ni-33Mn 合金を用いて、応力付加およびオーステナイトの結晶粒径が変形誘起マルテンサイト変態の kinetics に及ぼす影響を調査した。得られた結果により変形誘起マルテンサイト変態の核生成の活性化エネルギーが初めて定量化され、活性化エネルギーは付加応力によって減少することを見出した。得られた結果は、変形モードの核生成を考えるために提案された **plaston** という概念をより詳細に明らかにしていく上で重要な実験データとなる。

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。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、Fe-24Ni-0.3C (mass%)準安定オーステナイト合金の変形挙動とその粒径依存性をオーステナイト相とマルテンサイト相間の応力・ひずみ分配に着目して解析し、さらに等温マルテンサイト変態を示す Fe-23Ni-33Mn 合金を用いて変形誘起マルテンサイト変態に及ぼす負荷応力、塑性ひずみおよび結晶粒径の影響を調査して、マルテンサイト核生成の熱活性化過程を明らかにしたものであり、得られた主な成果は次の通りである。

1. Fe-24Ni-0.3C 合金の引張変形時の加工硬化率の再増大と変形誘起マルテンサイトの体積率の増加がよく一致していることを見出した。引張変形中その場中性子回折実験と DIC 解析により、材料中の各相の応力ひずみ曲線を推定することに初めて成功し、各相の変形状況によって全体の引張変形が3つの段階に分類できることを明らかにした。得られた結果より、材料全体の強度に二相間の力学的相互作用が大きな影響を与えていることが明らかとなった。
2. Fe-24Ni-0.3C 合金の変形挙動に及ぼす結晶粒径の影響を系統的に調査した。結晶粒微細化によって変形誘起マルテンサイト変態速度は抑制されるが、微細粒材の加工硬化率はむしろ向上することを明らかにした。引張変形中その場中性子回折実験と DIC 解析を適用してオーステナイト粒径の異なる三種の試料におけるオーステナイト相およびマルテンサイト相の応力-ひずみ曲線を分離して描くことに成功し、母相の結晶粒微細化に伴いオーステナイト/マルテンサイト界面の割合が増大し、その拘束効果によってマルテンサイトがより大きく変形することによって、材料全体として大きな加工硬化が実現されることを見出した。
3. 等温マルテンサイト変態を示す Fe-23Ni-33Mn 合金を用いて、応力付加およびオーステナイトの結晶粒径が変形誘起マルテンサイト変態の kinetics に及ぼす影響を調査した。変形誘起マルテンサイト変態の核生成の活性化エネルギーが初めて定量化され、活性化エネルギーは付加応力によって減少することなどを見出した。

以上の成果をまとめた本論文は、準安定オーステナイト鉄合金における変形誘起マルテンサイト変態とその結果得られる機械的性質に及ぼす変形条件および結晶粒微細化の影響を系統的かつ定量的に明らかにし、等温マルテンサイト変態を用いて変形誘起マルテンサイト変態の核生成の活性化エネルギーを初めて定量化した。得られた知見は変形誘起マルテンサイト変態に関する基礎的理解を進展させ、また TRIP 効果の制御を通じて高強度と高延性を両立した先進構造材料の実現可能性を拓くものであり、学術上および実用上も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3年2月19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、(令和6年3月22日までの間)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。