

京都大学	博士（工学）	氏名	Avala Lavakumar
論文題目	Microstructural and mechanical nature of low alloy multiphase steel composed of ferrite, martensite, and austenite（フェライト、マルテンサイト、オーステナイトから成る低合金複相鋼の組織と力学特性）		
（論文内容の要旨）			
<p>本論文は、フェライト相、マルテンサイト相および残留オーステナイト相から成る低合金複相鋼（Fe-0.2C-1.6Mn-1.4Si-1.0Ni-0.5Al: mass%）における熱処理中のマイクロ組織形成過程と、得られた試料の力学特性とマイクロ組織の相関を系統的に調査し議論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。自動車などの輸送機器の軽量化による燃費向上と温暖化ガス排出量の削減や、事故・災害時の構造物の安全性の向上を目的として、鉄鋼をはじめとする構造用金属材料には従来の基準をはるかに上回る高強度が要求されるようになってきている。一方、高強度材も部材への加工・成形が必要であり、また衝突や事故時の安全性を確保するためにも、強度とともに高い延性および靱性を兼ね備えることが必要である。こうした要求のもと、近年の自動車用鋼板は、鋼の硬質相であるマルテンサイトやベイナイトを積極的に組織中に含むようになってきている。盛んに研究・開発が進む先進高強度鋼の中でも、軟質なフェライト相と硬質なマルテンサイト／ベイナイト相の他に残留オーステナイト相を含む複相鋼は、成型加工中あるいは衝突時などの変形中に残留オーステナイトが硬質なマルテンサイトに相変態し、それによって高い強度とともに高延性・高靱性を示すことが知られている。準安定オーステナイトの変形誘起マルテンサイト変態により優れた力学特性が得られる現象は、TRIP（Transformation Induced Plasticity）効果としてよく知られている。しかし、複雑なマイクロ組織を示し様々な組織のバリエーションがあり得る複相鋼におけるマイクロ組織の形成機構や、組織と力学特性の相関は十分には明らかになっていない。そこで本研究では、著者の所属グループが開発し超微細粒フェライト+オーステナイト組織の作製に成功した合金の化学組成を調整した Fe-0.2C-1.6Mn-1.0Ni-1.4Si-0.5Al (mass%) 合金を用い、加工熱処理中の組織形成過程を明らかにするとともに、得られた試料の引張変形中その場放射光高強度 X 線回折やデジタル画像相関（Digital Image Correlation: DIC）法によるマクロおよびマイクロ組織スケールでの局所変形挙動解析といった先端の実験手法を駆使して、複相鋼の力学特性をマイクロ組織と相関させて明らかにすることを目的とした。</p> <p>第2章では、0.2C-1.6Mn-1.4Si-1.0Ni-0.5Al 鋼に、全面マルテンサイト組織材を出発材として二相域焼鈍・急冷と比較的低温（400℃）での時効から成る二段階熱処理を施した場合のマイクロ組織形成過程を、SEM-EBSD や TEM などの手法を用いて観察・解析している。その結果、二相域焼鈍終了時点で超微細粒フェライト+オーステナイト二相組織を有する本鋼は、400℃低温時効時にオーステナイトからフェライトへの相変態が進行すること、そして最終的に得られるフェライトはその形態的特徴から4種類（Type I～IV）に分類できることを見出した。4種類の形態を有するフェライト中の局所方位分布や化学組成、転位密度などを測定した結果、Type I フェライトは二相域焼鈍時に初期マルテンサイトが高温焼き戻しされて形成したものであり、Type II～IV フェライトは</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	Avala Lavakumar
<p>400°C時効中にオーステナイトが相変態して新たに形成されたものであることを明らかにした。そして Type II～IVフェライトは、いずれもその相変態が、鉄および置換型溶質元素の短範囲拡散による構造変化が炭素の拡散によりコントロールされて生じるマッシュ変態によるものであり、形態は異なるが本質的には同一のものであることを解明した。さらに、マッシュ変態の結果として炭素が未変態オーステナイトに濃化し、大きな体積率のオーステナイトが室温冷却後も残留することが明らかとなった。最も優れた力学特性を有する試料は、引張強さ 1045 MPa、全伸び 29.5%を示し、その試料はフェライト相、マルテンサイト相、残留オーステナイト相の体積率がそれぞれ 74.8%、13.8%、11.4%であるなど、各試料のマイクロ組織が定量的に解析された。</p> <p>第3章では、第2章で得られた複相鋼が優れた強度-延性バランスを示す理由を、最も優れた力学特性（引張強さ 1045 MPa、全伸び 29.5%）が得られた試料を対象に、引張試験中のその場放射光 X 線回折やマイクロ DIC 解析による局所ひずみ分布測定によって調査している。その結果、引張変形の進行とともにオーステナイトが徐々に変形誘起マルテンサイト変態を起こすこと、引張変形とともに応力およびひずみがフェライト、オーステナイト、マルテンサイト各相間に分配され、材料中の応力・ひずみ分布の不均一性が增大することが明らかとなった。特に引張変形の進行とともにマルテンサイトが担う相応力の顕著な増大が確認された。またマイクロ DIC 解析によれば、変形中に形成されたマルテンサイトは大きな局所ひずみを示したが、生じたマルテンサイトバリエーションの同定とマルテンサイト変態の現象論に基づく解析により、変形誘起マルテンサイト中の大きな局所ひずみに及ぼす変態ひずみの影響は軽微であることが明らかとなった。これらの結果から、異相間の力学的相互作用、特に変形誘起マルテンサイト相と他の相との相互作用が本複相鋼の加工硬化の増大をもたらす、塑性不安定を抑制して大きな引張ひずみを得られることが明らかとなった。</p> <p>第4章では、TRIP 現象において、異相間の力学的相互作用が変形誘起マルテンサイト変態に与える影響を定量的に解析するために、フェライト+オーステナイト、およびフェライト+オーステナイト+マルテンサイトから成る二種類のマイクロ組織を有する試料を作製し、その変形挙動を詳細に調査している。得られた実験結果から、マルテンサイト相が存在する場合に隣接するオーステナイト相への応力分配が低減され、変形誘起マルテンサイト変態の進行が適度に抑制されること、その結果として強度・延性の両立に望ましい加工硬化率の変化が実現されることを明らかにした。この結果は、複雑なマイクロ組織を有する複相鋼において、異相の配置が変形誘起マルテンサイト変態の進行に強い影響を及ぼし、結果としてマルテンサイト変態の kinetics を制御して、全体として優れた力学特性をもたらすことを初めて見出した研究成果である。</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>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、自動車に代表される輸送機器の軽量化や事故時の安全性をもたらすための先進高強度鉄鋼材料として期待されているフェライト+マルテンサイト+残留オーステナイトから成る複相鋼を対象とし、その熱処理中の組織形成過程と引張変形中の力学特性を、先端的手法を用いて系統的に調査・議論した実験的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. 二相域焼鈍により得られるフェライト+オーステナイト組織を引き続き低温時効した場合に重要なマイクロ組織変化が生じることを明らかにした。本研究で用いた鋼の場合、低温時効中にオーステナイト相はフェライト相に相変態し、得られた新フェライトは3種類の異なる組織形態を示す。しかし異なる形態を示す新フェライトはいずれも本質的には同一のものであり、鉄および置換型溶質元素の短範囲拡散による構造変化が炭素の拡散によりコントロールされて生じるマッシュ変態により得られることを解明した。
2. 得られたフェライト+マルテンサイト+残留オーステナイト複相組織鋼は、高い強度と大きな延性を併せ持つ優れた力学特性を示した。最も優れた力学特性を有する試料は、引張強さ 1045 MPa、全伸び 29.5%を示した。引張試験中のその場放射光 X 線回折やマイクロ DIC 解析による局所ひずみ分布測定により、引張変形中の変形誘起マルテンサイト変態の進行や、異なる相間の応力・ひずみの分配挙動を定量的に解析した。その結果、異相間の力学的相互作用、特に変形誘起マルテンサイト相と他の相との相互作用が本複相鋼の加工硬化の増大をもたらし、塑性不安定を抑制して大きな引張ひずみが得られることを解明した。
3. TRIP 現象において異相間の力学的相互作用が変形誘起マルテンサイト変態に与える影響を、異なる組織構成を有する試料を準備してそれらの変形挙動を定量的に解析し、比較した。マルテンサイト相が存在する場合に隣接するオーステナイト相への応力分配が低減され、その結果変形誘起マルテンサイト変態の進行が適度に抑制されること、そしてその結果として強度・延性の両立に望ましい加工硬化率の変化が実現されることを明らかにした。

以上の成果をまとめた本論文は、フェライト、マルテンサイト、残留オーステナイトから成る複相鋼における変形時の異相間の局所的力学的相互作用を定量的に解析し、試料全体の優れた力学特性の原因を解明している。得られた成果は、高強度と高延性を両立した先進高強度鋼の材料設計に重要な知見を与えるものであり、学術上および将来の実用上もその進展に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8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7年9月30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。

要旨公開可能日：令和3年12月23日以降

