



Title	特殊鋼の機械特性と析出物制御に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	寺本, 真也
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第13996号
Issue Date	2020-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/78341
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Shinya_Teramoto_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 寺本 真也

学 位 論 文 題 名

特殊鋼の機械特性と析出物制御に関する研究

(Study on Mechanical Properties and Precipitation Control of Special Steels)

特殊鋼棒鋼および線材は主に JIS 規格鋼の機械構造用鋼, ばね鋼, 軸受鋼, 快削鋼等があり, 自動車の基本性能を担うエンジン部品, 動力伝達部品, 足回り部品といった重要保安部品に使用される。自動車業界では, 地球環境の保全のため自動車の燃費向上と二酸化炭素の排出量低減への対応が強く求められており, パワートレインの電動化や電動車 (HV(Hybrid Vehicle), EV(Electric Vehicle) 等) へのシフトが強まっている。一方で, パワートレインの電動化はモーターやバッテリー等の重量物が増加し燃費向上の足かせとなっており, 自動車機械部品の小型/軽量化による材料の高強度化ニーズがより一層高まっている。

特殊鋼棒線および線材から造られる自動車機械部品の高強度化は, 降伏強度または疲労強度の向上である。降伏とは多量の転位が運動し巨視的に塑性変形が生じることである。一方, 疲労とは繰返し変形による転位の運動の蓄積で微視き裂が発生し, き裂先端での局所的な塑性変形の繰返しによりき裂が伝播し破断する現象である。降伏強度も疲労強度も, その強度を上げるためには転位の運動を阻止して動きにくくすればよく, 強化の素機構には, 固溶強化, 転位強化, 析出強化, 結晶粒微細化強化の 4 つがある。4 つの強化機構の中で, 固溶強化は合金元素の固溶量に制限があり, 大きな強化は得られない。一方, 転位強化と結晶粒微細化強化は大きな強化が得られるが, 超高密度転位組織 (転位密度 $5 \times 10^{11}/\text{cm}^2$ 以上) や超微細粒 (結晶粒径 1 マイクロメートル以下) を造り込む必要があり, 通常の組織制御手段では困難である。したがって, 容易に大きな強化を得る手段は析出強化である。

析出強化による機械特性の変化を理解するためには, 析出物の直径, 平均粒子間距離, 数密度等のパラメータを定量的に評価する必要がある。析出物の解析技術として最も広く使われている手法は電子顕微鏡法である。電子顕微鏡法は, 一般的に透過型電子顕微鏡を用いて nm サイズの微細析出物の形態や分散状態を直接観察できるとともに, 電子線回折により微細析出物の結晶構造を特定できる。電子顕微鏡法で観察した像から微細析出物の定量評価することも可能であるが, その結果は局所的な情報から得たものであり, 例えば, 析出物の数密度を過大または過小評価することが考えられる。微細析出物の分散状態を広範囲な領域でかつ平均的な情報を定量評価する手法として, X 線小角散乱法が有効である。小角散乱法は X 線を試料に照射し, 透過した X 線の周辺, つまり散乱角 2θ が 3 から 5 度以下の領域を測定し, その情報から微細析出物の直径や数密度を定量評価できる。測定領域は X 線が透過した領域 (ビーム径 1mmx 試料厚さ 50 マイクロメートル程度) であり, 電子顕微鏡法と比べて広域である。

本研究では, X 線小角散乱法や電子顕微鏡法等の解析技術の長所を併用し, 鋼中に析出した鉄および合金炭化物の形態変化が機械特性に及ぼす影響について明らかにすることで, 機械構造用鋼をはじめとする特殊鋼における析出物制御に関する知見を得ることを目指したものである。

以下、本研究論文における各章の概要を簡潔に述べる。

第 1 章では、まず特殊鋼棒線および線材から造られる自動車機械部品の現況と鋼材に求められる特性について述べた。次に析出強化による降伏強度と疲労強度の向上、析出物の解析技術に関するこれまでの知見と課題について整理し、最後に本研究の目的と本論文の構成について述べた。

第 2 章では、小角散乱法を用いて鋼中の析出物を定量化するため、小角散乱法による各種鉄炭化物 (ϵ -Fe₃C, θ -Fe₃C 等) の検出可否を母相と炭化物の散乱長密度の差から検討した。また焼入れ焼戻しにより種々の鉄炭化物を分散させた焼戻しマルテンサイト組織を準備し、X 線または中性子小角散乱法による各種鉄炭化物の検出可否を明らかにした。

第 3 章では、多量の Si を含有した中炭素鋼を用いて、鉄炭化物の遷移過程 (焼戻しの第 3 段階) における降伏強度に及ぼす鉄炭化物の影響について系統的に検討した。この検討によって、鉄炭化物の遷移過程で降伏強度が顕著に低下することを明らかにした。また X 線小角散乱法、透過型電子顕微鏡、X 線回折を併用し、鉄炭化物の遷移過程での炭化物の形態や量の変化を詳細に把握することによって、遷移過程で降伏強度が顕著に低下する原因を考察した。

第 4 章では、焼戻し温度で V 炭化物の分散状態を変化させた試料を作製し、疲労強度、降伏強度に及ぼす V 炭化物の影響について系統的に検討した。この検討によって、V 炭化物の過時効において降伏強度が顕著に低下するのに対して、疲労強度はほとんど低下することなく維持されることを明らかにした。また X 線小角散乱法、透過型電子顕微鏡を用いて V 炭化物の大きさや量の変化を詳細に把握することによって、過時効で疲労強度が維持される原因を考察した。

第 5 章では、フェライト/パーライト組織中に V 炭化物を析出し、第 4 章に引き続いて疲労強度、降伏強度に及ぼす V 炭化物の影響について検討した。この検討によって、V 炭化物の過時効で疲労強度が維持される現象は組織に依存しないことを明らかにした。

第 6 章では、中炭素マルテンサイト鋼の焼戻し硬さに及ぼす Mo 炭化物の影響について検討した。この検討によって、Si, Cr, Mo を複合添加すると 400 から 500 度 C 焼戻しで大きな焼戻し軟化抵抗を示すことを明らかにした。また透過型電子顕微鏡、3 次元アトムプローブを併用し、 θ 炭化物の大きさや分散状態と Mo 炭化物の析出有無を確認することによって、複合添加による大きな焼戻し軟化抵抗を示す原因を考察した。

第 7 章では、結言として本研究で得られた知見を総括し、今後の工業的応用、機械特性と析出物制御に関する研究課題について述べた。