

鉄鋼材料におけるクラスターと転位の相互作用

河原, 康仁

<https://hdl.handle.net/2324/7157324>

出版情報 : Kyushu University, 2023, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 河原康仁

論 文 名 : 鉄鋼材料におけるクラスターと転位の相互作用

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

鉄鋼材料の機械的特性は、固溶原子や析出物、クラスターなどをはじめとする、合金元素の存在状態に依存する。中でもクラスターは、固溶原子や析出物に比べ、特に優れた強化能を有することが知られ、その起源の解明が古くから望まれている。クラスターの強化機構は主に、クラスターが転位をピン止めすることで強度が上昇する「転位ピン止め強化」と、特定のすべり面での転位運動を促進することで加工硬化率が上昇する「転位のプラナー化」、の二つに分けることができる。これらの強化機構は、クラスターと転位の相互作用機構に依存することから、本質的な理解のためには、クラスターの組成や結晶構造と、転位の性質やひずみ場との相関を原子スケールで解明することが必要不可欠である。

本論文では、低炭素フェライト鋼と窒素添加オーステナイト系ステンレス鋼におけるクラスターと転位の相互作用に着目し、透過型電子顕微鏡法 (TEM) 及び三次元アトムプローブ法 (3DAP) を用いた解析を行った。低炭素フェライト鋼では C クラスターが、窒素添加オーステナイト系ステンレス鋼では N-Cr クラスターが、高強度化に寄与している。しかし、クラスターの微細構造と転位コア構造を、高強度化の起源である各クラスターと転位の相互作用と相関付けて解析し、考察を行った例はない。なお、本論文は全 6 章で構成され、それぞれの概要は以下のとおりである。

第 1 章では、鉄鋼材料における合金元素の存在状態、合金元素の存在状態と材料強度の相関、並びにクラスターを活用した鉄鋼材料の強化原理について概説し、本論文の目的を示した。

第 2 章では、本論文で用いた透過型電子顕微鏡法と三次元アトムプローブ法についての概要を記述した。

第 3 章では、低炭素フェライト鋼を 323 K で時効した際に発現する C クラスターと強度変化の相関に関して、明視野 TEM 観察、原子分解能 TEM 観察、及びその場引張 TEM 観察を行い、C クラスターの形態及び構造、並びに転位との相互作用の解析を行った。明視野 TEM 観察結果から、323 K 時効材では、母相の {001} 上に板状の C クラスターが発現することが判明した。また、原子分解能 TEM 観察結果から、ピーク時効以降、部分的に ϵ 炭化物が C クラスター中に析出する傾向が見出された。そして、その場引張 TEM 観察結果から、C クラスターに対して、らせん転位が大きく張り出しながら相互作用する様子が観察され、C クラスターが転位ピン止め機構を介して強度に大きく寄与することが明らかとなった。

第 4 章では、473 K で時効処理した低炭素フェライト鋼において、TEM を用いた微細構造解析を行った。473 K 時効材においても、母相の {001} 上に C クラスターが板状で発現しており、C クラスターは ϵ 炭化物の前駆体として寄与していることが判明した。原子分解能 TEM 観察結果、C クラスターは体心正方晶構造を有しており、Zener-ordering を介して、C クラスターが発現していた。更に、その場加熱 TEM 観察結果から、C クラスターを介して析出した ϵ 炭化物が、溶解・残存を伴って、

θ 炭化物へと遷移することを明らかにした。以上の TEM 観察結果から、C クラスターと母相間に発現するひずみが転位ピン止め強化に寄与することを明らかにし、更には C クラスターを有効活用した炭化物の分散状態を制御することが可能であることを提示した。

第 5 章では、窒素添加オーステナイト系ステンレス鋼において、TEM 及び 3DAP を用いることで、973 K での変形時に発現するプラナー転位列の形成機構の解析を行った。明視野 TEM 観察結果から、N を添加することで、プラナー転位列が発現し、それが N 添加由来の著しい加工硬化の起源として寄与したことが示唆された。原子分解能 TEM 観察結果から、N 添加材では、刃状転位と積層欠陥、ローマー・コットレルの不動転位が高温変形を律速する様子が確認された。更に、幾何位相解析及びエネルギー分散型 X 線解析を適用することで、転位コア周辺に形成された引張ひずみ場に、Cr が偏析することを明らかにした。また、明視野 TEM と 3DAP を併用し、同一視野における転位の直接観察と溶質元素の分散挙動の解析を行い、転位に N と Cr が偏析する傾向を明らかにした。以上の微細構造解析の結果から、初めに N が転位と弾性的相互作用を起こし、その後 N-Cr クラスターを形成し、それらが転位の運動抵抗として寄与することが判明した。本結果は、数十年未解明なままであった窒素添加オーステナイト系ステンレス鋼におけるプラナー転位列の発現機構に、重要な知見を与えるものである。

第 6 章では、本論文を総括し、主たる結論を述べた。

以上のように、鉄鋼材料において発現するクラスターに TEM や 3DAP を適用することで、クラスター由来の強化機構の起源を明らかにした。C クラスターや N-Cr クラスターは、母相との間に生じるひずみや、合金元素間の化学的相互作用を介して転位運動に影響を及ぼす傾向が明らかとなった。