

京都大学	博士 (工学)	氏名	Hamidreza Jafarian
論文題目	Martensitic Transformation from Ultrafine Grained Meta-stable Austenite in Fe-Ni-C Alloy (Fe-Ni-C 合金における超微細粒準安定オーステナイトからのマルテンサイト変態)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、巨大ひずみ加工プロセスによって作製された Fe-Ni-C 合金の超微細結晶粒オーステナイト母相からのマルテンサイト変態を実験的に調べた結果をまとめたものであり、6 章からなっている。</p> <p>第 1 章は序論であり、本研究の目的を示した上で、巨大ひずみ加工とそれによる結晶粒超微細化を論じ、また従来の粗大結晶粒オーステナイト (母相) からのマルテンサイト変態に関する知見を概説している。金属材料を構成する結晶粒を微細にすることによって、種々の力学特性が向上することが経験的に知られており、これまで結晶粒微細化は金属材料の組織制御において常に重要な研究課題であった。近年、バルク状材料に相当ひずみ 4-5 以上の極めて大きな塑性変形を施すことが可能な巨大ひずみ加工プロセスの発達により、平均結晶粒径が 1 <math>\mu\text{m}</math> 以下であるバルク形状の超微細粒材料の作製が可能になってきている。一方、従来の金属材料の力学特性の向上は、組織制御法の一つである相変態を利用することによっても成し遂げられてきた。特に鉄鋼材料におけるマルテンサイト変態は高強度鋼作製に必要な相変態であり、マルテンサイト変態によって得られる組織は非常に微細な組織でもある。そのため、巨大ひずみ加工プロセスによって得られる超微細粒組織とマルテンサイト変態を組み合わせることによって、力学特性が飛躍的に向上した新材料の開発が期待できる。しかし、超微細粒オーステナイトからのマルテンサイト変態を調べた研究はこれまでほとんどなく、その力学特性だけでなく変態挙動そのものが不明であった。本研究では、ARB (Accumulative Roll Bonding) 法という巨大ひずみ加工プロセスにより作製される超微細粒オーステナイト母相の特徴とそこから生じるマルテンサイト変態の特徴を、材料組織、結晶学的特徴、機械的性質の観点から調べ、系統的な知見を得ようとしている。</p> <p>第 2 章では、ARB および ARB 後の焼鈍処理に伴うオーステナイトの組織と集合組織の発達過程を調べている。ARB に伴って大角粒界の間隔 (粒径) が減少していき、ARB を 6 サイクル施すことによって平均大角粒界間隔が 750 nm の圧延方向に伸長した超微細粒オーステナイト組織が形成されることを見出している。超微細粒オーステナイト組織は粒内部に高密度の小角粒界や転位が存在する加工組織の特徴をも有していることを明らかにしている。ARB に伴う超微細粒組織の形成は、grain subdivision 機構により理解できることを指摘している。また 6 サイクル ARB 後に 873K の焼鈍処理を施すことによって平均結晶粒径 2.5 <math>\mu\text{m}</math> の等軸粒で構成された微細粒オーステナイト組織が形成することを示している。ARB に伴ってオーステナイトの集合組織は Copper 方位から Brass 方位に変化していき、ARB 後の焼鈍処理によって再結晶が生じると集合組織は Cube 方位に変化することを見出している。また ARB を施したオーステナイトの引張試験を行ったところ、リュウダース変形を伴う降伏点現象が発現すること、引張変形時のリュウダース帯形成は、変形誘起マルテンサイト変態に起因していることを明らかにしている。</p> <p>第 3 章では、第 2 章で得られた種々の結晶粒径 (35 <math>\mu\text{m}</math>-750 nm) を有するオーステナイト組織から生成したマルテンサイトの組織とマルテンサイト開始温度 (<math>M_s</math> 点) を調べている。生成したマルテンサイトの形態はオーステナイト結晶粒径によらずレンズマルテンサイトであることを明らかにしている。超微細粒オーステナイト組織から生成したレンズマルテンサイトは形態が不規則になり、内部に小角粒界を含んでいること、オーステナイト結晶粒径の減少に伴って、生成するマルテンサイトプレートのサイズも減少することを見出している。オーステナイト結晶粒径が 2-3 <math>\mu\text{m}</math> 以下になると生成するマルテンサイトプレートのサイズはオーステナイト結晶粒径とほぼ同じになり、オ</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	Hamidreza Jafarian
<p>           ーステナイト結晶粒が微細になるとマルテンサイト変態による結晶粒微細化効果は小さくなることを明らかにしている。いずれにせよこれらの結果は、母相の結晶粒微細化とマルテンサイト変態を組み合わせることにより、より効果的に組織微細化をはかることが可能であることを示す結果である。また、ARBによってオーステナイト結晶粒径が 35 <math>\mu\text{m}</math> から 750 nm に減少しても <math>M_s</math> 点はほとんど変化しないが、ARB 後の焼鈍処理によって、オーステナイト結晶粒径が増加しているにもかかわらず、<math>M_s</math> 点は大きく低下することを見出した。この焼鈍による <math>M_s</math> 点低下は、オーステナイト中の転位密度や小角粒界密度の減少によるものと考察している。         </p> <p>           第 4 章では、種々の結晶粒径（35 <math>\mu\text{m}</math>～750 nm）を有するオーステナイト組織から生成したマルテンサイトのオーステナイトとの結晶方位関係を調べている。粗大な等軸粒で構成されたオーステナイト組織（結晶粒径：35 <math>\mu\text{m}</math>）から生成したマルテンサイトは、成長に伴って母相オーステナイトとの結晶方位関係が Greninger - Troiano 関係から Kurdjumov - Sachs 関係に変化していることを見出している。しかし ARB と焼鈍処理によって作製した微細な等軸粒で構成されたオーステナイト組織（結晶粒径：2.5 <math>\mu\text{m}</math>）から生成したマルテンサイトは、マルテンサイトプレート全体で母相オーステナイトと Greninger - Troiano 関係を満たしていることを証明した。これは生成したマルテンサイトプレートサイズが微細であることに起因していると考察している。また ARB によって作製した超微細粒オーステナイト組織（結晶粒径：750 nm）も同様に母相オーステナイトと Greninger - Troiano 関係を満たしているが、観察される結晶方位関係がマルテンサイトプレートごとに大きくばらついていることを見出した。これはオーステナイト結晶粒内に存在している高密度の転位や小角粒界によるものであると考察している。         </p> <p>           第 5 章では種々の結晶粒径（35 <math>\mu\text{m}</math>～750 nm）を有するオーステナイト組織からのマルテンサイト変態におけるバリエーション選択則を調べている。再結晶が完了した等軸粒オーステナイト組織からのマルテンサイト変態では、オーステナイト結晶粒径によらずバリエーション選択は生じていないことを示している。一方、1 サイクル ARB によって作製した粗大粒で構成された加工オーステナイト組織（結晶粒径：18 <math>\mu\text{m}</math>）からのマルテンサイト変態では、強いバリエーション選択を観察している。このバリエーション選択は ARB によって導入されたオーステナイト中の残留応力とマルテンサイト変態に伴う形状ひずみとの相互作用エネルギーの観点から説明できることを明らかにしている。6 サイクル ARB によって作製した超微細粒オーステナイト組織（結晶粒径：750 nm）からのマルテンサイト変態においても強いバリエーション選択が観察されるが、このバリエーション選択は上記の相互作用エネルギーではなく、圧延方向に伸長した超微細粒オーステナイト組織の結晶粒形状に起因していることを論じている。         </p> <p>           第 6 章は結論であり、本論文で得られた成果を要約している。         </p>			

氏名	Hamidreza Jafarian
----	--------------------

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、Fe-24wt%Ni-0.3wt%C 準安定オーステナイト合金を題材に、巨大ひずみ加工プロセスによって作製した超微細粒オーステナイトの特徴と、そこから生成したマルテンサイトの組織的特徴および結晶学的特徴を系統的に調べた研究結果を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-Ni-C 合金に対し、その  $A_f$  点以上で ARB (Accumulative Roll Bonding) 法による巨大ひずみ加工を施すと、grain subdivision 機構によって平均粒厚さ 750 nm の圧延方向に伸長した超微細粒組織が形成されることを、ARB に伴う材料中の転位密度の変化とともに定量的に明らかにした。さらに、ARB 材に対して引張試験を施したところ、通常の単相金属・合金とは異なり、変形初期にリュウダース変形が生じること、変形中に加工誘起マルテンサイト変態が生じ、20%程度の大きな引張延性が維持されることを見出した。これらの成果は、準安定オーステナイト鋼の巨大ひずみ加工に伴う組織と機械的性質の変化を初めて系統的に明らかにしたものとして高く評価できる。

2. ARB およびその後の焼鈍により作製された種々の結晶粒径のオーステナイトから熱的に生じるマルテンサイトの特徴を調べ、マルテンサイトの形態はオーステナイト結晶粒径によらずレンズマルテンサイトであることを見出した。母相オーステナイトとマルテンサイトの間の結晶方位関係に関しては、粗大な等軸粒で構成されたオーステナイト組織から生成したマルテンサイトは、成長に伴って母相オーステナイトとの結晶方位関係が Greninger-Troiano 関係から Kurdjumov-Sachs 関係に変化していく一方、超微細粒オーステナイト組織から生成したマルテンサイトは、マルテンサイトプレート全体で母相オーステナイトと Greninger - Troiano 関係を満たすことを明らかにした。さらに、超微細粒オーステナイト組織からのマルテンサイト変態においては強いバリエーション選択が観察され、このバリエーション選択は母相とマルテンサイト相の間の相互作用エネルギーではなく、圧延方向に伸長した超微細粒オーステナイト組織の結晶粒形状に起因していることを証明した。これらの実験結果は、超微細粒オーステナイトからのマルテンサイト変態の組織・結晶学的詳細を初めて明らかにしたものとして重要な成果である。

3. 巨大ひずみ加工と焼鈍により作製した種々の結晶粒径のオーステナイトのマルテンサイト開始温度 ( $M_s$  点) を調べ、 $M_s$  点の複雑な変化を見出した。ARB によってオーステナイト結晶粒径が 35  $\mu\text{m}$  から 750 nm に減少しても  $M_s$  点はほとんど変化しないが、ARB 後の焼鈍処理によって、オーステナイト結晶粒径が増加しているにもかかわらず、 $M_s$  点は大きく低下する。この焼鈍による  $M_s$  点低下は、オーステナイト中の転位密度や小角粒界密度の減少と対応していることを明らかにした。この成果は、転位や結晶粒界、そして母相の強度がマルテンサイト変態に対して及ぼす影響に関する統一的な知見をもたらすものとして高く評価できる。

これらの成果は、超微細粒オーステナイトからのマルテンサイト変態挙動を初めて系統的に明らかにしたものであり、本論文は、バルクナノメタルの相変態挙動に関して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23年11月21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。