

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 10 日現在

機関番号：16201

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760700

研究課題名（和文）格子欠陥導入による高Si電磁鋼板の高靱化機構の解明

研究課題名（英文）Toughening mechanism of defect-induced high Si magnetic steel

研究代表者

水口 隆 (MIZUGUCHI TAKASHI)

香川大学・工学部・助教

研究者番号：00462515

研究成果の概要（和文）：本研究では、温間圧延により格子欠陥を導入した電磁鋼板用 Fe-5%Si 合金を対象に、ひずみ速度を変化させた引張試験を実施した。その結果、圧延により格子欠陥の一種である転位が導入され、その密度は圧下率の増加に従って多くなったこと、また、転位密度が多くなるほど高靱化されることが明らかとなり、転位組織の導入が高靱化に有効であることを見出した。

研究成果の概要（英文）：The fracture behavior transition due to the change of strain rate in 5%Si magnetic steel with dislocation microstructures was studied. The Si steel was multi-passed rolled at 1073K to a various reduction up to 50%. The every rolled steels were fractured in ductile manners with necking at slower strain rate. When strain rate was faster, the local elongation (necking) disappeared and the fracture manner was changed to brittle. The strain rate at which fracture mechanism changed from ductile to brittle increased with the increasing of the reduction. This result indicates that dislocation structure is effective for the enhancement of toughness in Si steel.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,100,000	630,000	2,730,000

研究分野：金属材料学

科研費の分科・細目：材料工学・材料加工・処理

キーワード：延性－脆性遷移、ひずみ速度、電磁鋼板、Fe-Si、変形双晶、靱性、破壊、転位

## 1. 研究開始当初の背景

モータの鉄心材料として実用化されている電磁鋼板は、3%程度 Si を添加した Si 鋼である。電磁鋼板の省エネルギー化のためには、さらなる Si 添加による低鉄損化と高透磁率化が必要である。しかしながら、3.5%以上 Si を添加した高 Si 鋼では脆化により圧延による製造が困難となっており、まずは高 Si 鋼の破壊挙動に関する知見が必要とされている。そのため、現在でも電磁鋼板の高靱化に関する研究が活発に行われている。これまでの研究から、Fe-Si 合金では、延性破壊から脆性破壊に破壊形態が遷移する延性－脆性

遷移温度の存在が明らかにされている。この温度は、靱性の指標として一般的に用いられている。もし破壊や変形が熱活性化過程に律則するのであれば、温度変化とひずみ速度変化は等価であると考えられており、それならばひずみ速度変化による破壊形態の遷移が存在するはずであるが、詳細は明らかにされていなかった。これを明らかにするために、申請者は、完全再結晶組織を有する Fe-高 Si 合金を対象に、各種ひずみ速度における引張試験を行い、ひずみ速度変化による破壊形態の遷移を見出し、室温で靱性を簡便に評価できる手法を確立した。

一方、Fe-高Si合金の脆化改善への取り組みも報告されており、脆性破壊の抑制には引張試験を塑性ひずみ量数%で中断させる予ひずみ導入法による転位組織化が有効であるとされている。予ひずみ量が増加すると、転位密度も増加し、さらなる脆性の改善につながると予想されるが、これに関する系統的な報告はこの研究が実施された1980年代後半以降進展しないまま手つかずとなっており、高靱化に及ぼす予ひずみ量の影響を解明することの意義は大きい。

## 2. 研究の目的

本提案では、予ひずみ導入法として、従来報告されている引張試験ではなく、温間圧延を用いることとし、圧下率の制御により予ひずみ量の制御を行うこととした。電磁鋼板は圧延で製造されていることから、本研究成果の実製品への適用が可能となる。これまでに申請者により確立した靱性を簡便に評価できる手法であるひずみ速度変化引張試験を利用し、破壊形態が遷移するひずみ速度の予ひずみ量の影響(圧下率の影響)を調査することを目的とした。

## 3. 研究の方法

本提案では、真空溶解によって溶製したFe-5mass%Si合金を使用する。圧延時の脆性破壊を抑制するため、圧下率を0~50%の範囲内で変化させた1073Kでの温間圧延を行うことで、圧延材中に転位組織を導入した。その後、材料試験機を用いて室温で $10^{-5}/s$ から $10^0/s$ までのひずみ速度で室温引張試験を行い、応力-ひずみ曲線を採取し、破壊形態が遷移するひずみ速度を調査した。また、引張試験破断後の試験片の破断部近傍について走査電子顕微鏡による組織観察を行い、変形双晶の発生状況を観察し、破壊形態の遷移と変形双晶の発生状況との関連について考察した。

## 4. 研究成果

図1は圧下率の異なるFe-5%Si合金の各種ひずみ速度による引張試験により得られた公称応力-公称塑性ひずみ曲線である。0%圧延材では、実施したすべてのひずみ速度において加工硬化途中で破断した。20%圧延材では、ひずみ速度 $10^{-3}/s$ 以上では加工硬化途中で破断したのに対し、ひずみ速度 $10^{-4}/s$ では、加工硬化をして最大応力に到達したのち応力が低下する応力-ひずみ曲線が得られ、均一伸びと局部伸びの両方が観察された。同様の傾向が50%圧延材でも観察されたが、局部伸びの有無が分かれるひずみ速度は、20%圧延材と比べて上昇した。

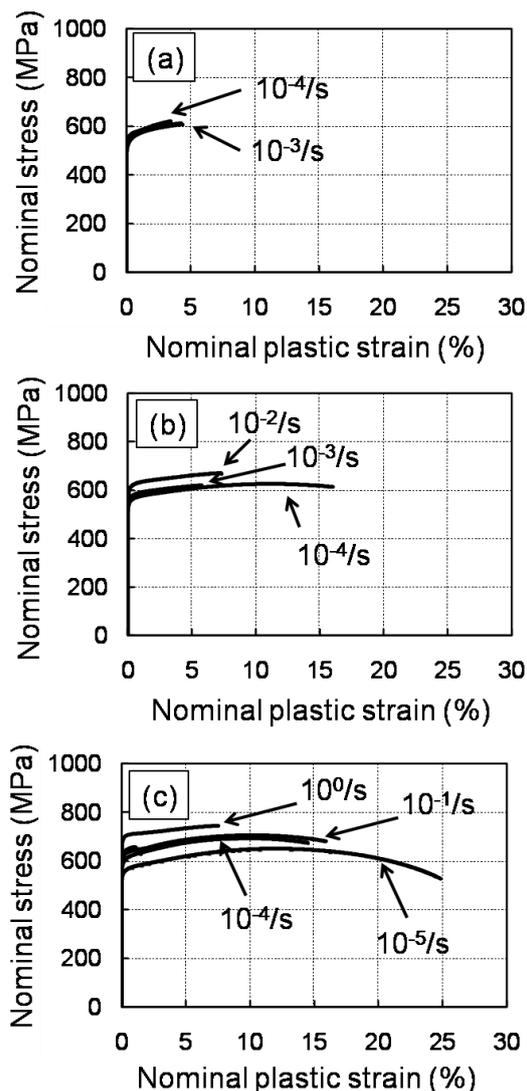


図1 圧下率の異なるFe-5%Si合金の各種ひずみ速度による引張試験により得られた公称応力-公称塑性ひずみ曲線

図2は、図1の応力-ひずみ曲線より得られた引張強さと破断伸びのひずみ速度依存性を示した図である。引張強度は、ひずみ速度と圧下率の上昇に従って増加した。これは圧延により内部に転位組織が導入されたことを示している。一方、破断伸びは、ひずみ速度の増加に従って低下し、また、圧下率の上昇に従って増加する傾向を示す。圧延材の場合には、図中に矢印で示す急激に破断伸びが低下するひずみ速度が確認できるが、これは図1の応力-ひずみ曲線での局部伸びの有無を反映したもので、ひずみ速度変化による破壊形態の変化を示す。このひずみ速度は、圧下率の上昇に従って高ひずみ速度側に移行した。変形や破壊が温度に依存する現象であるならば、破壊形態遷移温度の低下は、遷移ひずみ速度の上昇と等価である。つまり、

破壊形態が高ひずみ速度側に移行したことは、遷移温度が低下したことに等価である。このことから、圧延による Fe-5%Si 合金の脆化改善が達成された。また本研究で実施した範囲内では転位密度を上昇させるほどを高靱化する事が明らかとなった。

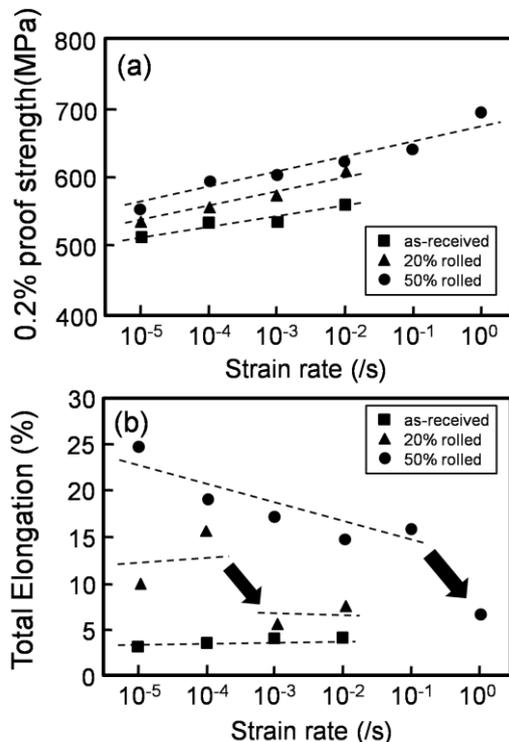


図2 図1に示した公称応力-公称塑性ひずみ曲線より得られた引張強さ(a)と破断伸び(b)のひずみ速度依存性

図3は、引張試験後の破断部近傍の走査電子顕微鏡による反射電子像で、局部伸びが観察されなかった条件(a)と局部伸びが観察された条件(b)での比較を示している。いずれの条件においても、図中の矢印に示すように結晶粒内に幅約 $1\mu\text{m}$ 程度のコントラストが観察された。電子線後方散乱回折法による結晶方位解析の結果、このコントラスト部分は周囲の結晶粒内と明確に結晶方位が異なることが判明し、このコントラストは変形双晶であると考えられた。局部伸びが得られた場合に比べて、局部伸びが得られなかった条件では変形双晶の発生量が多い。このことから、変形双晶が脆性破壊に大きく関与しており、変形双晶の発生量が多いほど延性が低下し脆性破壊を起こしやすくなると考えられる。

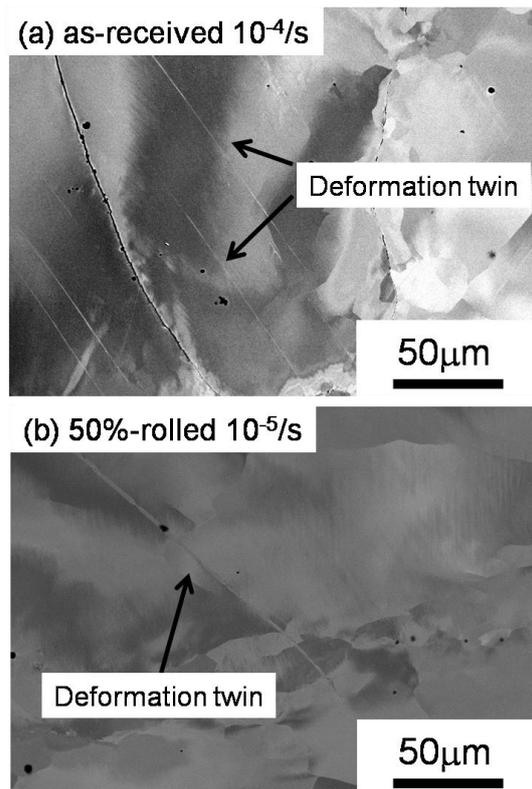


図3 局部のびの有無による破断部近傍の走査電子顕微鏡像の比較

これまでに得られた結果から、変形双晶の発生が応力-ひずみ曲線に大きな影響を及ぼし、その発生量が破断伸びに大きく影響していることが示唆された。この破断伸びと変形双晶発生量との関係を明らかにするため、Fe-5%Si合金における各種温度における引張試験を実施して組織観察を行うことで両者の関連性を検討した。

図4は、各種温度における引張試験から得られた公称応力-公称塑性ひずみ曲線である。この図から、温度低下に伴い破断伸びは低下し、同じひずみ量で比較すれば応力は上昇する傾向が見られた。また、塑性変形域での傾きで表される加工硬化率は温度低下に伴い上昇した。なお、曲線上の急激な応力低下は変形双晶の発生に起因すると考えられる。このように温度を変化させることで破断伸びを変化させた試験片の作製に成功した。この破断後の試験片の組織観察を行い、変形双晶の導入されている結晶粒の割合を調査することで、破断伸びと変形双晶発生量との関連を調査した。

図5(a)は、各試験温度での変形双晶の導入されている結晶粒の割合を破断伸びに対してプロットしたものである。この図から試験温度が低下して破断伸びが減少するほど、変

形双晶の導入された結晶粒の割合が大きくなることが分かった。また図 5(b)は変形双晶の交差が導入されている結晶粒の割合について同様にプロットしたものである。変形双晶の交差についても試験温度が低下して破断伸びが減少するほど、変形双晶の交差が導入された結晶粒の割合が大きくなっている。これらの結果から、変形双晶の発生および交差が多いほど破断伸びが低下することが明らかとなった。この結果は、変形双晶同士の交差が脆性破壊の原因となっていることを示唆するもので、変形双晶の発生を抑制することが高延性と高靱化につながる可能性があることが示唆された。

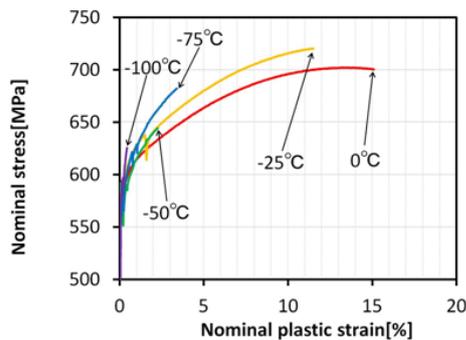


図 4 各種温度における引張試験から得られた公称応力-公称塑性ひずみ曲線

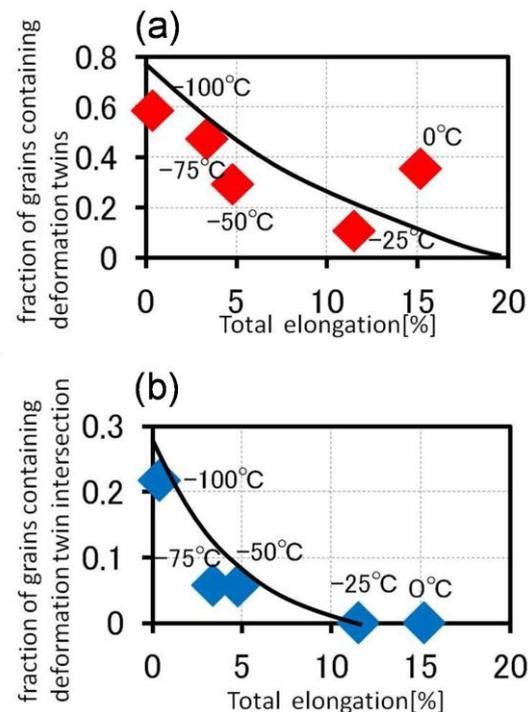


図 5 変形双晶の導入されている結晶粒の割合(a)と変形双晶の交差が導入されている結

晶粒の割合(b)と破断伸びとの関係

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

(1) Rintaro Ueji, Yoshinori Takagi; Noriyuki Tsuchida, Kazunari Shinagawa, Yasuhiro Tanaka, Takashi Mizuguchi, "Crystallographic features of epsilon martensite transformation during tensile deformation of polycrystalline 30%Mn austenitic steel", Mater. Sci. Eng. A, vol.576 (2013) 14-20.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2013.03.071>

(2) Takashi Mizuguchi, Rintaro Ueji, Hayato Miyagawa, Yasuhiro Tanaka and Kazunari Shinagawa, "Fracture Behavior Transition by change of Strain Rate in Dislocation-induced Si Steels", Mater. Sci. Forum, vol.706-709 (2012) 2187-2192. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.706-709.2187>

[学会発表] (計 10 件)

① 水口 隆、山本 龍太郎、樋口 智章、宮川 勇人、田中 康弘、「Fe-Si 合金のひずみ速度変化による破壊形態変化におよぼす Al の影響」日本金属学会 2013 年春期講演大会、2013 年 3 月 27 日、東京理科大学

② Kento IKEDA、Influence of crystal orientation on the deformation twin during tensile test in Fe-high-Si alloy, The 2nd Joint Workshop of Advanced Materials Science and Engineering between Kagawa University and Hanbat National University, 2013 年 1 月 7 日、Kagawa University

③池田 健人、Fe-高 Si 合金の引張試験における破断伸びと変形双晶発生量との関係、日本鉄鋼協会・日本金属学会中国四国支部講演大会、2012 年 8 月 9 日、鳥取大学

④池田 健人、Fe-5%Si 合金の低温引張試験における破断伸びと変形双晶発生量との関係、日本材料学会四国支部第 10 回学術講演会 2012 年 6 月 24 日、香川大学

⑤樋口 智章、Fe-高 Si 合金のひずみ速度変化による 破壊形態遷移におよぼす Al 添加の

影響、日本材料学会四国支部第 10 回学術講演会、2012 年 6 月 24 日、香川大学

⑥水口 隆、「Si 鋼のひずみ速度変化による破壊形態変化におよぼす Al 添加の影響」日本鉄鋼協会第 162 回秋季講演大会、2011 年 9 月 21 日、大阪大学

⑦【Invited】 水口 隆、「電磁鋼板用高 Si 鋼のひずみ速度変化による破壊形態変化」日本材料学会四国支部第 8 回夏季材料セミナー2011、2011 年 8 月 23 日、休暇村讃岐五色台

⑧藤岡 豪、「Fe-4%Si 合金の破壊形態に及ぼす温間圧延の影響」日本材料学会四国支部第 8 回夏季材料セミナー2011、2011 年 8 月 23 日、休暇村讃岐五色台

⑨藤岡 豪、「Fe-高 Si 合金の破壊形態に及ぼす転位組織の影響」、日本鉄鋼協会・日本金属学会中国四国支部講演大会、2011 年 8 月 8 日、岡山理科大学

⑩ T. Mizuguchi, " Fracture Behavior Transition by Change of Strain Rate in Dislocation-induced Si Steels, The 7th Int. Conf. on Processing and Manufacturing of Advanced Materials (Thermec 2011), 2011 年 8 月 3 日, Centre des Congres de Quebec (Canada)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

水口 隆 (MIZUGUCHI TAKASHI)

香川大学・工学部・助教

研究者番号：00462515