

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560839

研究課題名(和文) FCC + BCC 複相鋼における異相界面を利用した高速変形特性の制御

研究課題名(英文) Control of the high speed plastic properties by the phase boundaries in FCC+BCC multi phased steels

研究代表者

上路 林太郎 (Ueki, Rintaro)

大阪大学・接合科学研究所・准教授

研究者番号：80380145

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円、(間接経費) 1,290,000円

研究成果の概要(和文)：フェライト+オーステナイト二相鋼の高速変形挙動の調査を目的とした。検力ブロック式材料試験機を用い、0.001/sから1000/sまでの各種ひずみ速度での応力ひずみ曲線を測定した。二相鋼は大きな静動作を有することが明らかとなった各種条件で変形させた試料に対してEBSDを用い多結晶体の個々の結晶粒の方位を測定した。異相境界から1 μ m以内にある領域の測定データを抽出して行った局所結晶方位差を評価結果より、異相界面近傍では長距離応力場の増大に資する転位組織の優先的な発達があるを明らかにした。また、準安定オーステナイトにおける動的変態と前駆過程により生じる転位組織の関係も明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This study is aimed to clarify the plastic properties of the ferrite and austenite duplex phase steels at high speed deformation. The stress - strain curves were measured with the sensing block type testing machine at various strain rate ranging from 0.001/s to 1000/s. It was clarified that the duplex phase steel has a significant increase of 0.2% offset stress with the strain rate increasing. The EBSD (Electron back scattering diffraction) measurement was conducted on the samples deformed up to various strain at various strain rate. The misorientation measurement at the vicinity of the phase boundaries were examined and the preferential development of the local misorientation was clarified. This means that the dislocation structure which provides the long range stress field can be easily evolved near the phase boundaries. In addition, the relationship between the dynamic phase transformation and the dislocation structure was also found.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学 構造・機能材料

キーワード：材料強度 高速変形 異相境界 結晶塑性 オーステナイト 鉄鋼材料 フェライト 加工熱処理

1. 研究開始当初の背景

環境問題・資源問題に対応するため、自動車等輸送機械の軽量化が期待されている。同時に、自動車等では事故等衝撃に対する安全性も要求される。そのため、高強度材料の適用により構造体の堅剛性を保ちつつ使用材料量を削減することが必要である。こうした要求に対する材料の性能評価の際に「静動差」が用いられる。静動差とは、ひずみ速度が低速時(たとえば $10^{-3}/\text{sec}$) と高速時(たとえば $10^3/\text{sec}$)での強度差である。静動差が大きければ、良好な成形性(低速変形)と耐衝撃性(高速変形)を確保し易くすることができる。一方で、単相合金の場合、結晶粒超微細化等の一部の例を除くと、低速変形時の強度と静動差の間にはトレードオフの関係があることが知られている。

一方で、自動車車体の主要材料である鋼板では、近年、これまで利用されることが少なかったオーステナイト(FCC)相を積極的に活用し、高延性を確保しようとする試みが盛んに行われている。その中で代表的なものとして、高マンガンオーステナイト鋼の一種であるTWIP(Twinning Induced Plasticity)鋼などがある。一方で、オーステナイトは低い静動差を有する、という問題点がある。

こうした状況の下で、申請者らはオーステナイトとフェライトの混合率が、体積率でほぼ1対1である二相ステンレス鋼の高速変形挙動を調査した。図1は各種鉄鋼材料の低速変形時の降伏強度と静動差の関係を示したグラフである。低炭素鋼、フェライト系ステンレス鋼等を含む各種フェライト系鉄鋼材料(BCC)とSUS304等を含む各種オーステナイト系鉄鋼材料(FCC)のデータと比較する、フェライト相とオーステナイト相をほぼ1対1の体積割合で含有する二相ステンレス鋼(JIS-SUS329J4L)のデータを示している。BCC系やFCC系と

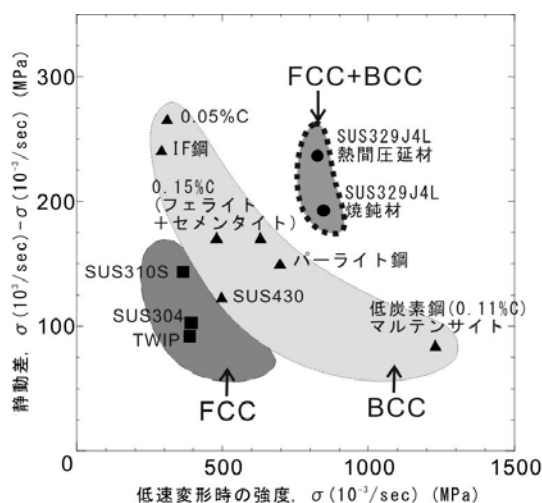


図1 各種鉄鋼材料の低速変形時の強度と静動差の関係。強度と静動差はトレードオフの関係にあるが、二相ステンレス鋼(SUS329J4L)は両者を共に良好な値に保ちやすい。

いった同種の材料では、それぞれ低速変形強度と静動差の間に反比例の関係が認められる。また、同じ低速変形強度で比べた場合、FCC系よりもBCC系の方が大きな静動差を有し易い。これはパイエルスポテンシャルの差異によるものと考えられる。

一方で、これらの材料の比較して、二相ステンレス鋼は高い低速変形強度と大きな静動差の両立が飛躍的に容易に達成できていることを我々は明らかにした。二相ステンレス鋼と同様の構成元素(Ni,Cr)からなる高合金鋼であるSUS304、SUS310S、SUS430では良好な静動差は達成されていないことより、二相ステンレス鋼の大きな静動差は合金成分の特殊性によるものではなく、組織によるものと考えられる。また、同様の結果は、Fe-Mn-Al-Si系FCC+BCC複合組織合金においても確認されている。こうした結果は、互いに塑性変形するFCC相とBCC相の混在により、静動差という変形強度のひずみ速度依存性を大きく変化させることの可能性を強く示唆している。しかし「FCC+BCC二相合金が大きな静動差を有する」という特異な挙動を示す理由は明らかとはなっていない。

2. 研究の目的

本研究では、FCC/BCC異相境界を含む金属材料の大きな静動差の発現メカニズムを明らかにすることを目的とする。特に、EBSD(Electron Back Scattered Diffraction)を用いて、ひずみ分配の変形速度依存性と異相境界近傍の特にFCC相の活動すべり系を検証により、より大きな静動差を得るための組織設計指針を得ることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では主に、二相ステンレス鋼JIS-SUS329J4L(0.02mass% C-0.4% Si-0.8% Mn-6.7% Ni-24.5% Cr-3.2% Mo-0.16% N)の変形挙動を調査した。また比較材として、準安定 γ 系ステンレス鋼SUS304L、安定 γ 系ステンレス鋼SUS310S、安定 γ 系TWIP鋼、極低炭素鋼を用いた。いずれも完全再結晶組織を有していた。各試料から標点間距離6mm、平行部幅2mm、板厚が1.2mmの小型試験片を引張軸が圧延方向と平行になるように採取し、検力ブロック式材料試験機を用いて、初期歪み速度0.001/sから1000/sの各種条件で引張試験を行った。各供試材の引張前後の微視組織をSEM/EBSD、TEM等で観察した。

4. 研究成果

図2はSUS329J4L熱延まま材(a,b)と再加熱材(c,d)に対して、EBSD測定により得られた結晶方位マッピング結果である。図では、 α 相(a,c)及び γ 相(b,d)のRD結晶方位を、図の右上にあるステレオ三角形中の配色を用いて示している。また、図中の水平方向とそれに垂直な方向は、RD及び板厚方向(ND)

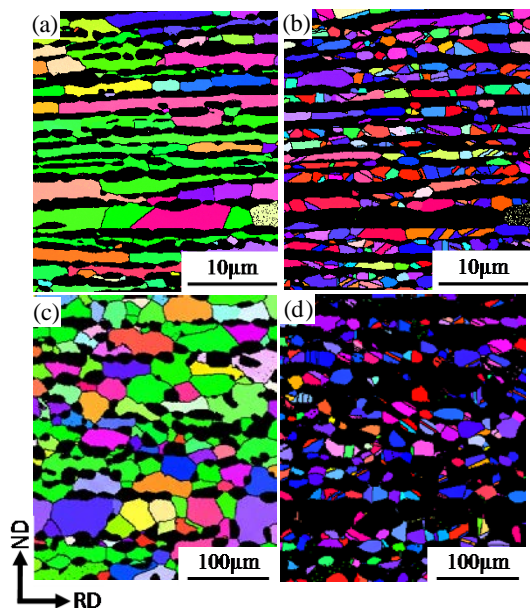


図 2 SUS329J4L 熱延まま材 (a, b) と再加熱材 (c, d) に対して、EBSD 測定により得られた結晶方位カラーマップ

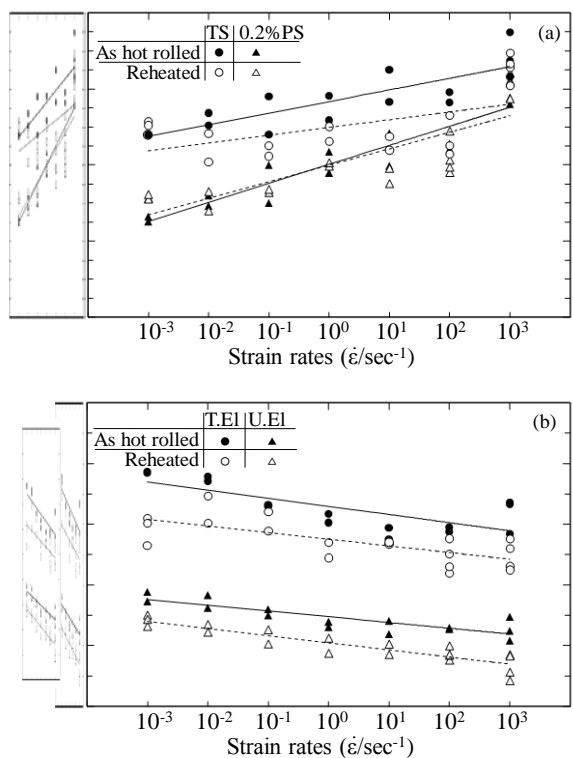


図 3 熱延まま材と再加熱材の 0.2%耐力 (0.2%PS)、引張強さ (TS) (a) および全伸びのひずみ速度依存性

に平行である。α相及びγ相における大きな変化は見られない。1200℃再加熱することにより、α結晶粒及びγ結晶粒は粗大化する。熱延まま材の平均α結晶粒径及び平均γ結晶粒径はそれぞれ2.1μmでγが1.5μmであり、再加熱材は、21.5μm (α) 及び9.3μm (γ) であった。また、熱延まま材のα相の占める面積率は53.0%であったのに対して、再加熱により、68.2%まで増大した。一方で、TEM観察により、再加熱材には、熱延まま材

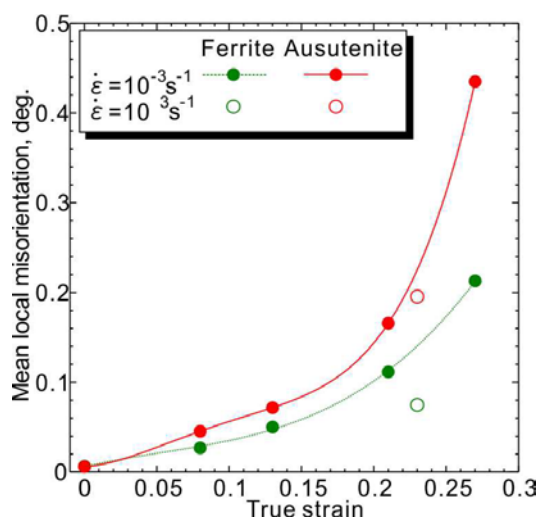


図 4 SUS329J4L 再加熱材 (c, d) に対して、各種引張ひずみを与えた後、EBSD 測定により得られた小角粒界の平均結晶方位差

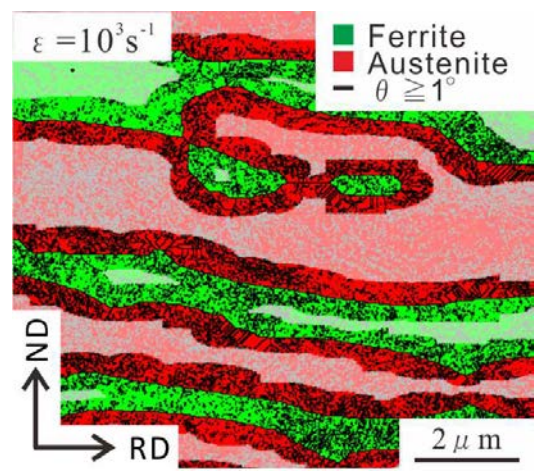


図 5 SUS329J4L 再加熱材に対して、引張ひずみを与えた後、EBSD 測定により得られた小角粒界マップ。

では見られなかった炭化物もしくは窒化物と思われる直径 20nm 程度の微細な析出物がα粒内部に存在することが確認された。

図 2 で示した組織を有する試料の応力ひずみ曲線を各種ひずみ速度で採取した結果、熱延まま材と再加熱材の 0.2%耐力 (0.2%PS) と引張強さ (TS) のひずみ速度依存性を図 3 (a) に示すような形で得ることができた。また、各ひずみ速度と全伸び (T.E1) 及び一様伸び (U.E1) の関係を図 3 (b) に示す。ひずみ速度の増加に伴い、引張強さと 0.2%耐力 (a) が増加し、全伸びと一様伸び (b) が低下する傾向は、両試料において認められた。特に、今回調べた速度範囲内におけるひずみ速度の増加に伴う強度の上昇は 200 から 300MPa と非常に大きな値を示したことは注目し値する。ひずみ速度の増加に伴う強度の上昇量は、0.2%耐力など比較的小さなひずみで比較した場合よりも、引張強さなど大きなひずみで比較した方が小さくなっていった。

塑性ひずみによって導入される方位差を EBSD 測定によって解析可能か検討する。

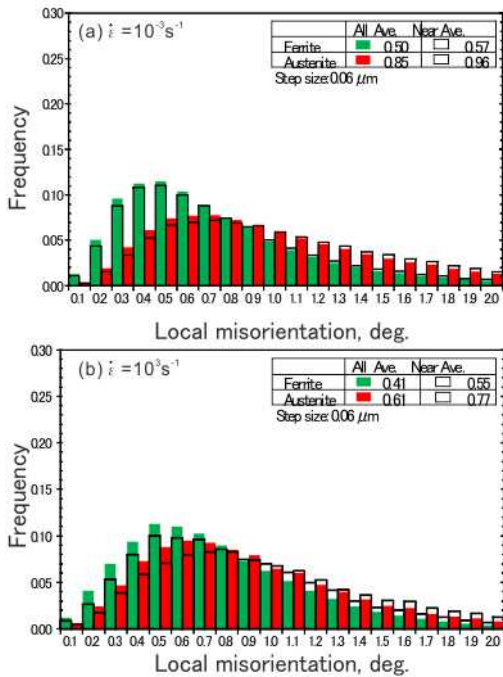


図 5 329J4L 熱延まま材をひずみ速度 0.001/s (a) およびひずみ速度 1000/s (b) で破断した試料の EBSD 測定によって得られた全領域および異相境界近傍におけるヒストグラムと平均結晶方位差

329J4L 再加熱材に異なる量のひずみを与えた試料から算出した平均結晶方位差を図 4 に示す。算出には、引張変形の影響を抽出するために結晶粒界と解析精度の低い 1° 未満の方位差を除外して、 $1 \leq \theta < 15^\circ$ を用いた。その結果、真ひずみの増加に伴って、平均結晶方位差が増加する傾向を確認した。そのため、EBSD 測定でひずみの定量化が可能と判断した。ひずみ速度およびひずみ量に関わらず、 α 相より γ 相の方が大きな平均結晶方位差を示した。同じひずみ量で比較すると、低速変形より高速変形の方が平均結晶方位差は小さい。これは、断熱変形の加工発熱による転位密度の低下が原因と考えられる。

結晶粒微細化強化された単相鋼では、大きな静動差を維持した高強度化が可能であると報告されている。それは、粒界によって長距離応力成分を高めたことに起因する。そこで、 $\alpha + \gamma$ 複合組織鋼の α / γ 異相境界の解析によって、大きな静動差の発現条件を検討する。図 5 は、 α 相を緑、 γ 相を赤で示した相分布カラーマップの測定例である。この図では、全領域の平均結晶方位差は点線、異相境界近傍は実線で塗り潰して示している。異相境界近傍として測定した領域は、異相境界から $0.5 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 以内である。全測定領域と粒界近傍における各種局所結晶方位差の存在確率を示したヒストグラムを図 6 に示す。信頼性のある測定結果が得られしていると考えられる 1 度以上の存在確率に着目すると、フェライト、オーステナイトに関わらず、また、変形速度に関わらず、粒界近傍で多くの小角粒界が存在していることが分かる。つま

り、329J4L 熱延まま材の異相境界は、変形に対して強い障害となることが考えられる。329J4L 熱延まま材が高強度に加え、高い静動差を有した理由として、 α / γ 間の異相境界が強い長距離障害物として働いたことで、一種の結晶粒微細化強化と同様の強化につながったと考えられる。

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 4 件)

① Gasem Dini, Rintaro Ueji, Effect of grain size and grain orientation on dislocation structure in tensile strained TWIP steel during initial stage of deformation, Steel Research International, 査読有, 83(2012), pp. 374-378.

② 高木勝規, 上路林太郎, 水口隆, 土田紀之, 準安定オーステナイト系ステンレス鋼 SUS301L の TRIP 効果におよぼすひずみ速度の影響, 鉄と鋼, 査読有, 97(2012), pp. 450-456

③ R. Ueji, D. Kondo, Y. Takagi, T. Mizuguchi, Y. Tanaka, K. Shinagawa, Grain size effect on high-speed deformation of Hadfield steel, Journal of Materials Science, 査読有, 47(2012), pp. 7946-7953.

④ R. Ueji, Y. Takagi, N. Tsuchida, K. Shinagawa, Y. Tanaka, T. Mizuguchi, Crystallographic orientation dependence of ϵ martensite transformation during tensile deformation of polycrystalline 30%Mn austenitic steel, Materials Science and Engineering: A, 査読有, 576(013), pp. 14-20

[学会発表] (計 5 件)

① R. Ueji, Y. Takagi, Y. Todaka, T. Mizuguchi, K. Shinagawa, Similarity in the crystallographic aspects of the grain size effects on deformation twin and deformation induced ϵ -martensite, 1st International Conference on High Manganese Steel (HMnS) (2011)

② 上路林太郎, 水口隆, 田中康弘, 品川一成, ハッドフィールド鋼の高速変形、日本金属学会高温強度の組織形成と材料科学研究会、(2011)

③ R. Ueji, D. Kondo, Y. Takagi, T. Mizuguchi, Y. Tanaka, K. Shinagawa, Grain size effect on the high speed deformation on Hadfield steel, TMS2012, 141st annual meeting, US (2012)

④ 上路林太郎, $\alpha + \gamma$ 二相マンガン鋼の組織と引張特性 (招待講演)、日本鉄鋼協会フォーラム第 5 回「高炭素・窒素オーステナイトの物性評価と力学特性制御」(2012)

⑤ 吉迫竜也, 李大潤, 上路林太郎, 品川一成、

水口隆、戸高義一、ハッドフィールド鋼における引張変形のひずみ速度依存性に及ぼす粒界炭化物の影響、日本鉄鋼協会・日本金属学会中四国支部鉄鋼第55回・金属第52回合同講演大会(2012)

〔その他〕 無

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上路林太郎 (UEJI, Rintaro)

大阪大学・接合科学研究所・准教授

研究者番号：80380145

(2) 研究分担者

水口 隆 (MIZUGUCHI Takashi)

香川大学・工学部・助教

研究者番号：00462515