

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20360318

研究課題名(和文) Fe-Mn 基合金における塑性変形初期過程の複合変形組織観察

研究課題名(英文) Observations on multiple deformation microstructures at the very early plastic deformation stages of Fe-Mn based alloys

研究代表者

澤口 孝宏 (SAWAGUCHI TAKAHIRO)

独立行政法人物質・材料研究機構・材料信頼性萌芽ラボ・主幹研究員

研究者番号：30354161

研究成果の概要(和文)：高 Mn 鋼の耐力に及ぼす変形様式の影響を調査した。三種類のプレート状塑性変形メカニズム(変形誘起 $\gamma \rightarrow \epsilon$ マルテンサイト変態、 γ 双晶変形、すべり変形)の共通性と相違性に着目して、その発生・発達過程と力学特性への影響が整理できる。いずれの変形様式も $\{111\}$ 最密面上のシア変位によって形成されるプレート状組織であり、積層欠陥の規則的な積み重なりによって記述される。一方、プレートの発生・発達過程と力学特性には、相変態による格子型・格子定数の変化の有無と、積層欠陥エネルギーやプレート核生成サイトの分布形態によって決まる積層欠陥の拡張幅が、塑性変形開始応力やプレートと他の組織との相互作用に多様な影響を及ぼして、多結晶合金のマクロ特性としての耐力が決定される。

研究成果の概要(英文)：We investigated the effect of deformation modes on the proof stress of high-Mn austenitic steels. Commonalities and differences among three plastic deformation mechanisms, i.e., deformation-induced $\gamma \rightarrow \epsilon$ martensitic transformation, γ deformation twinning and slip deformation, are discussed in their nucleation, development and the effect on mechanical properties. They are commonly formed on the closely-packed $\{111\}$ planes by the shear-type displacement and thus exhibit plate-like morphologies. They are described by regularly overlapping stacking faults. On the other hand, macroscopic properties such as the proof stress of polycrystal alloys are determined by the onset stress and a variety of microstructural interactions of the plates, which are differently affected by the existence/absence of the phase transformation, the stacking fault energy and the distribution of the plate nucleation sites.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
2009年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2010年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
年度			
年度			
総計	14,700,000	4,410,000	19,110,000

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：耐震・耐環境材料、マルテンサイト変態、双晶変形、原子間力顕微鏡、透過型電子顕微鏡、降伏応力

1. 研究開始当初の背景

耐摩耗鋼として有名な Hadfield 鋼の発明は 18 世紀にさかのぼる。以来、様々な基礎

研究や各種の工業利用が進められてきた。1980 年代頃からは、Ni フリー・ステンレス鋼、低温用鋼、非磁性鋼としての応用が注目

を集め、成分やプロセスの影響などが詳細に調べられている。1982年に発見されたFe-Mn-Si基形状記憶合金も、高Mn鋼と同類の相変態・変形挙動を示す。韓国のJeeらは、二元系Fe-Mn合金の優れた制振効果に着目して一連の研究を行っている。1990年代に入ると、いくつかのFe-Mn基合金に変形双晶が生じていることが判明した。最近、 ϵ マルテンサイトや変形双晶を利用して強度・延性バランスを改善させた新しい構造材料—TWIP (Twinning Induced Plasticity) 鋼も注目を集めている。このように高Mn鋼は長い研究の歴史を有する実用金属材料であるとともに、今もなお活発に研究が進められている材料である。

申請者らの研究グループでは、Fe-Mn-Si基形状記憶合金が対地震用制振合金として利用可能であることを見出し、新しい建築用制振ダンパー部材の開発に取り組んできた。また、その変形機構は、引張変形により応力誘起された板状 ϵ マルテンサイトが圧縮変形により γ オーステナイトに逆変態する現象に起因することを見出し、詳細なメカニズムの確立にも取り組んでいる。対地震用制振ダンパーの場合、柱や筋交いなどに設置したダンパー材を、建物本体よりも早期に塑性変形させて振動を吸収する履歴減衰型の制振メカニズムであるため、降伏点(耐力)は建物本体を構成する材料の降伏強度よりも低くなければならない。従って、Fe-Mn基制振合金の主たる開発目標の一つは、合金の耐力を低下させることである。

本研究課題では、低耐力化の手がかりとして、高Mn鋼のうち、Fe-Mn系制振合金(内部摩擦により音や微小振動を吸収する従来型制振合金)、Fe-Mn-Si系形状記憶合金、Fe-Mn-Si-Al系TRIP/TWIP鋼という三種類の合金における組成や組織の類似性と、変形挙動や特性の対照性に着目した。Fe-Mn制振合金にSiを添加するとFe-Mn-Si形状記憶合金となり、そのSiの一部をAlで置換していくと、Fe-Mn-Si-Al-TRIP/TWIP鋼になるが、その際、変形様式は(ϵ /転位混在型)→(ϵ 支配型)→(双晶支配型)と遷移する。これら対照的な三合金をモデル合金として各々の中間組成の合金を作製し、耐力を決定する支配因子を調査することは対地震用制振合金の開発指針を探る上で重要である。

2. 研究の目的

高Mn鋼中の応力誘起マルテンサイト変態や双晶変形については、種々の基礎研究がなされており、応力誘起 ϵ 変態や双晶変形の臨界応力を積層欠陥エネルギーによって予測する式なども提案されている。これらの実験結果や理論を組み合わせることで、各温度における耐力を予測できそうであるが、

各種高Mn鋼で報告されている各温度の変形挙動は、こうしたモデルでは単純に説明できないものが多い。予測を難しくしている理由として、すべり変形、応力誘起 ϵ 変態、双晶変形など複数の変形様式が混在していること、積層欠陥濃度を直接測定する方法が無いこと、および変形挙動にマルテンサイト変態や反強磁性変態が複雑に関与していることが挙げられる。本研究課題では、対地震用制振合金開発の調査対象としたFe-Mn系、Fe-Mn-Si系、Fe-Mn-Si-Al系の各種合金について、様々な温度での引張試験、マルチスケール変形組織観察(光学顕微鏡、原子間力顕微鏡、透過型電子顕微鏡、高分解能透過型電子顕微鏡使用)、内部摩擦・弾性定数測定による相変態挙動解析、および定量X線回折による積層欠陥濃度解析を行う。互いに類似した組成と対照的な性質を示す合金の変形挙動(特に耐力に着目)と相変態挙動を系統的に調査し、塑性変形初期過程に関する未解決課題に取り組む。

3. 研究の方法

各種Fe-Mn基合金について、様々な温度での引張試験を行い、耐力の温度依存性から、各組成、各温度における支配変形様式が、すべり変形であるか、応力誘起変態であるか、双晶変形であるかを推定する。また、光学顕微鏡、原子間力顕微鏡、透過型電子顕微鏡を用いたマルチスケール変形組織観察手法により、変形の各ステージにおける支配変形様式の直接観察を試みる。いくつかの試料については、塑性変形初期過程の高分解能透過型電子顕微鏡観察により、すべり変形、応力誘起変態、双晶変形の形成過程や、複数の変形様式が混在する状態の直接観察を試み、それらの相互作用について考察する。さらに、内部摩擦・弾性定数測定による相変態挙動解析、および定量X線回折による積層欠陥濃度測定を行って、変形挙動の温度変化に影響する支配因子について考察する。

4. 研究成果

(1) 各種変形様式の共通性と相違性

耐力を制御するためには、塑性変形開始を担う塑性変形様式とその開始応力の支配メカニズムを明らかにしなければならない。支配的な変形様式や2次変形様式とその寄与率は、合金組成、変形温度、結晶方位などの諸条件によって変化するが、組織・結晶・熱力学の諸因子が関連して力学特性に影響するこの複雑な関係を解き明かす重要な基礎として、高Mn鋼の主要な三変形様式の共通性と相違性を整理することから検討をスタートする。

高Mn鋼の主要な三変形様式、すなわち、変形誘起 ϵ マルテンサイト変態、 γ 双晶変形

およびすべり変形はいずれも FCC 格子の {111} 最密面上のシア変位であり、Shockley 半転位の運動による積層欠陥の形成が密接に関連している。積層欠陥が 1 層おきに形成すれば HCP 構造の ϵ マルテンサイト、積層欠陥が各層に形成されれば γ 双晶となる。また、すべり変形も、当該合金型では転位が半転位と積層欠陥に拡張して運動する。このように Shockley 半転位の運動によって変形が進行して高濃度の積層欠陥を生じることが三変形様式の共通点であるが、 ϵ と γ 双晶では、前者は相変態に伴う格子型と格子定数の変化があり、後者は相変態を伴わず結晶方位が変化するのみ、という重要な相違点があり、両者の様々な性質に違いを与えている。相変態を伴うか否かということは、変形様式の選択規則においても本質的に重要である。上記二つの変形様式に対して、すべり変形においては、原子レベルでの積層欠陥の規則配列はないと考えられる。もう一つの重要な相違点は、 ϵ や γ 双晶が成長するためには、何らかのメカニズムにより leading 半転位のみが運動して積層欠陥が結晶粒径に対して有意に伸展する必要があるのに対し、すべり変形の場合には、trailing 半転位も運動して、全体としては、元の結晶構造・方位を基本構造として維持しながら変形が進行することである。

以上の結晶学的あるいは原子メカニズム上の共通性と相違性は組織的特徴にも反映する。後述するように、三種類の変形様式はいずれも {111} 最密面上のシアであることを反映して、プレート状組織を呈する。プレートは十分進展して両端が結晶粒界に達しているものが多い。結晶方位によりプレートは平行に現れる場合と、平行なプレートの組が複数種発生して互いに交差する場合とがある。積層欠陥エネルギーが低いために焼鈍双晶界面の頻度が高いことも共通の特徴である。以上に整理した変形様式の共通性と相違性をベースに、次章以下、合金の耐力を制御する観点から、各種プレートの発生・発達過程とその力学特性への影響について論じる。

(2) プレート発生過程：支配変形様式の選択規則

耐力に影響する第一の因子は支配変形メカニズムの開始応力である。開始応力には、マルテンサイト変態・双晶変形・すべり変形の発生メカニズムが密接に関連し、マルテンサイト変態ではさらに相変態の熱力学的駆動力も重要である。変形様式により詳細の仕組みが異なることから、降伏現象を支配する変形様式の選択規則を明らかにすることが重要である。

変形様式の選択は、合金組成、変形温度、

結晶方位、および応力・ひずみレベルなどによって決まる。このうち、合金組成と変形温度は、積層欠陥エネルギー (SFE) の変化を通じて変形様式に影響するので、変形様式の選択規則を統一的に整理する尺度として SFE を用いた議論が近年活発に行われている。SFE の上昇に伴い、変形様式は ϵ マルテンサイト変態 \rightarrow γ 双晶変形 \rightarrow すべり変形の順に変化する。しかし、特定の SFE 値で配列規則が 1 層おきから各層に変化するのは何故であろうか。

この問いに答える鍵の一つが ϵ と γ 双晶の発生メカニズムである。共に積層欠陥を起源とする ϵ と γ 双晶には核生成機構も類似したモデルが提案されており、おもに三タイプ (支柱転位モデル、多重すべりモデル、交差すべりモデル) に分類することができる。各モデルについては、TEM などによる組織観察証拠も報告されており、これらはいずれかが正しいというのではなく、合金組成などの基本条件や核生成サイトを提供する局所条件などにより、異なるメカニズムが活動しうると考えるべきであろう。逆変態過程のその場 TEM 観察により、一方のマルテンサイト先端に存在する Shockley 半転位が、粒界や積層欠陥に固定された他端の半転位に向かって運動して、合体消滅することなども報告されている。このことは、 ϵ マルテンサイトの成長は trailing 半転位が何らかの理由によって固定されて、leading 半転位のみが運動することによって積層欠陥が伸展することが要素反応となっていることを示唆するものである。 γ 双晶についても同様であろう。

ここで注目すべき事は、各種核生成モデルにおいても、いくつかの例外を除いて、積層欠陥の配列規則を核生成モデルから予測することはできないということである。変形様式の選択規則については ϵ マルテンサイトの熱力学的安定性を考慮に入れねばならない。言い換えれば、 ϵ と γ 双晶は、変形により leading 半転位のみが運動して積層欠陥が粒内で十分に拡張する状況が隣接する原子層で連鎖的に生じること、すなわちそのためには、SFE が十分低く、かつ、leading 半転位を連鎖的に発生させる核生成サイトが存在することを共通の生成条件とするが、 ϵ マルテンサイトの熱力学的安定性の高低により、いずれの変形様式が現れるかが分かっていると整理することができる。

ϵ マルテンサイトの熱力学的安定性と SFE が関連していることは、積層欠陥を 2 原子層の ϵ 相とみなして、 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 変態の化学自由エネルギー変化と SFE 形成によって発生する弾性ひずみエネルギーおよび異相界面エネルギーの和によって SFE を熱力学的に計算する Olson-Cohen 仮定に象徴的に現れている。厚さの効果を一にすれば、 ϵ 発生上限の SFE

は ϵ 発生上限の変形温度 (すなわち M_d 点) における ϵ マルテンサイト形成の自由エネルギー変化に他ならないと近似的にはいえるであろう。 M_d 点の評価には Clausius-Clapeyron の法則に従う応力誘起マルテンサイト変態の上限温度と、さらに転位反応によって形成された新しい核生成サイトの効果により応力誘起変態の上限温度以上でもマルテンサイトが形成されるひずみ誘起マルテンサイト変態の上限温度との区別が、耐力の支配因子を探る上では重要である。同様に本合金系では、双晶変形もひずみ誘起タイプであり、塑性変形の開始はすべり変形による。

以上の検討の結果、SFE の上昇に伴い変形様式が $\epsilon \rightarrow \gamma$ 双晶 \rightarrow すべりと変化する理由とその臨界 SFE 値を理解する鍵は、変形誘起 ϵ マルテンサイトの熱安定性限界 ($\epsilon \rightarrow \gamma$ 双晶) と、trailing 半転位を補足して、積層欠陥を粒径レベルまで伸展させるメカニズムの活動限界 (γ 双晶 \rightarrow すべり) にあることが判明した。耐力は、応力誘起 ϵ 変態の上限までは ϵ 変態開始応力、ひずみ誘起 ϵ 変態、ひずみ誘起双晶変形、すべり変形についてはすべり臨界応力が決定因子と考えられる。

(3) プレート発達過程：組織要素の分類とプレート種の比較

三つの変形様式が共に {111} 面上にプレート状に形成されるために、前述のように、組織形態にも共通性が見られる。マクロ特性に影響を及ぼすであろう組織要素として、平行プレートによる結晶粒のラメラ化、異なる {111} 面上のプレート同士の交差、プレートと界面の交差などの特徴が見られる。実験的に得られる多結晶の耐力は、塑性変形の開始応力のみでなく、塑性変形初期の急速な硬化の影響も含まれるため、加工効果に影響するであろうこれらの内部組織要素も十分に理解する必要がある。

結晶粒のラメラ化は、新しい異相・双晶界面が転位運動の障壁となることにより加工効果を惹き起すと考えられている (動的 Hall-Petch 効果)。その度合いは、プレートの厚さやプレート同士の間隔が狭いほど高くなると考えられる。また、プレート内では転位の運動のしやすさもプレート種に特有の事情により母相とは異なっていると考えられる。 ϵ マルテンサイトの場合、プレート面が基底すべり面であるからプレートを横断する方向のひずみ伝達は非基底面すべりや双晶変形などによる。これらは基底面すべりに比べて活動応力レベルが高いと予想される。一方、 γ 双晶変形においては、双晶領域には非双晶領域よりも高濃度の転位が含まれることが確認された (格子不変変形などによると考えられる)。また、双晶内では、

Shockley 半転位の可動方向が母晶と反転しており、通常、母晶の主すべり面から侵入した半転位から、界面反応を経て形成される双晶内の半転位は、Schmid 因子が低いことが多い。以上から、総じてプレート内では転位運動 (または双晶変形等によるひずみ緩和) に対する障壁が母晶内よりも高いと予測される。さらに、異相・双晶界面では、結晶方位に応じた転位の分解反応が生じるが、幾何学的関係を満足する転位反応は系のエネルギー上昇を招く場合もあり、エネルギー損を補填するために必要な外力が上昇し、界面近傍には必要な応力レベルに達するまで転位が堆積して、Hall-Petch 効果を生じていると考えられる。

プレート自身が塑性変形の支配様式である場合には、プレート同士の交差もマクロ特性に中心的な影響を及ぼすと考えられる。たとえば Fe-Mn-Si 形状記憶合金では、数%までの引張変形が加熱によりほぼ完全に形状回復する。このことは、塑性変形がほぼ 100% ϵ マルテンサイト変態のみによって達成されていることを意味する。その場合、粒内では転位とプレートの反応よりもプレート同士の交差の方が頻繁に発生する。 ϵ マルテンサイトが支配変形因子である場合には極めて加工硬化率が高くなる傾向がみられるが、ここでは ϵ プレートの交差が中心的な役割を果たしていると考えられる。

プレート同士の反応は交差する二つのシア変形により特有の結晶方位を有する新しい相がマルテンサイト変態により形成される場合と、マルテンサイト変態を伴わずにすべりまたは双晶変形によって交差するシアの伝達がなされる場合とに別けることができる。 $\epsilon - \epsilon$ の交差では交差部に形成される相として、 ϵ 相、 α' 相、 γ 相などが観察された。 γ 相は本研究課題によって初めて観察に成功したものである。双晶-双晶の交差では α' 相と γ 相とが観察された。これらプレートの交差部生成物の格子型と結晶方位の様々なバリエーションは、競合する相 (γ 相、 ϵ 相、 α' 相) の相対的な熱力学的安定性、結晶方位、交差するシアのシア量で決まる。特に各相の安定性は不可欠な形成条件である。 $\epsilon - \epsilon$ 反応や双晶-双晶反応により α' 相が形成されるのは、それぞれ、 $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha'$ 二段変態および $\gamma \rightarrow \alpha'$ 変態が生じる合金組成範囲にあることが前提条件となる。交差生成物に及ぼす結晶方位の影響はバリエーション選択規則の方位依存性で整理できることも判明した。さらに、プレートが密な ϵ 板同士である場合と、衝突するプレートが微細な ϵ 相や積層欠陥と残留 γ 相とのラメラ構造になっている場合とでは、シア量の違いのために異なる交差メカニズムが働くことを見いだした。

プレート-界面反応についても、プレート-プレート反応と同様の分類が可能であるが、相安定性、結晶方位、シアール量という因子に加えて、プレート種 (ϵ 、 γ 双晶、すべり帯) と界面 (整合焼鈍双晶、不整合焼鈍双晶、 γ/ϵ 異相界面、結晶粒界) の組み合わせのバリエーションがさらに豊富になる。プレート-プレート反応の場合は変形条件によってプレート種が一種類にきまるので、反応は常に同種のプレート間で行われるが、プレート-界面反応では異種プレート反応も起こりうる。また、プレート-プレート反応の場合は、Schmid 因子によるバリエーション選択のために変形方位によって交差シアールの方位も決まるが、プレート-界面反応の場合、界面の方位の自由度があるために、交差シアールのバリエーションも増加する。さらに、不整合双晶界面や粒界などランダム性の高い交差方位関係もあり、より幅広い議論が必要である。

(4) 力学特性と組織・結晶・熱力学的諸性質の関係

変形様式による耐力の変化傾向は、これまでに述べてきた変形様式の見分け規則、変形様式の開始応力、初期の塑性変形組織発達による加工硬化によって説明できる。

M_s 点が室温付近にあり、 ϵ マルテンサイトが変形を支配する合金では、すでに化学自由エネルギーと非化学自由エネルギーがバランスしているため、変態の進行に必要な自由エネルギー変化はわずかでよく、変形誘起する場合の開始応力は低い。やや M_s 点が低くなると、応力誘起変態に必要な応力レベルが急上昇し、耐力は上昇する。反強磁性変態が M_s 点付近にある場合には、低温側の広い温度領域で化学自由エネルギーと駆動力が拮抗した状態が続き、冷却では十分なマルテンサイト変態が得られないが、変形すれば駆動力の不足分がすぐに補われる。さらに M_s 点が低下して (SFE の上昇に対応)、応力誘起変態が難しくなり、塑性変形はすべり変形によって開始する。ただし、このばあいにも転位反応で形成される核生成サイトの作用によりひずみ誘起マルテンサイト変態が生じる。さらに SFE が上昇すれば双晶変形の領域になるが、塑性変形の開始はすべり変形である。

マクロ特性としての耐力には、内部メカニズムから決まる塑性変形の開始応力だけでなく、多結晶としての性質も影響する。特に ϵ マルテンサイト変態では、塑性変形初期の急速な加工硬化の影響が顕著である。その応力-ひずみ曲線では弾性限が明瞭に現れず、弾性変形から塑性変形への変化が連続的である。この合金では、前述のように、優先方位に配向した粒内におけるミクロな塑性変

形はかなり低応力で開始していると考えられる。よく知られるように、FCC 金属単結晶の変形特性は、単一のすべり系が活動して低応力で変形が進行するステージ I、多重すべりにより直線的で高い加工硬化を示すステージ II、転移の再配列により軟化するステージ III に分けられるが、ステージ I のひずみ範囲は結晶方位依存性を示し、多重すべりが発生しやすい 001 方位などでは、ステージ I がほとんどなく、塑性変形開始直後から非常に高い加工硬化を示す。同様の加工硬化挙動とその方位依存性は、 ϵ マルテンサイトや双晶変形が支配変形様式の合金でも確認されている。多結晶の変形挙動はこれら各種方位の単結晶の特性の単純な平均ではなく、粒界や隣接粒との複雑な相互作用の総合結果であるが、比較的低応力で塑性変形が開始する粒や加工硬化率が高い粒などの影響が組み合わされた特性になっている。 ϵ マルテンサイトが支配的な合金の変形挙動は、非常に低い開始応力と高い加工硬化率に様々な方位の影響がマクロ特性となって現れたものであることが詳細な調査により判明した。 M_s 点が低下すると直線的な弾性変形領域が応力ひずみ曲線に現れ、加工硬化率が低下する。双晶支配の合金ではほとんどの粒がすべり変形によって塑性変形を開始し、降伏応力が低下する。加工硬化率も微減する。双晶変形が徐々に開始するが、その加工硬化率への寄与は ϵ より低いようである。

三種類の変形様式の共通性と相違性を比較しながら、耐力の値を左右する組織要素について整理して論じた。耐力には、合金組成によってきまる他の因子 (例えばパイエルズ応力)、結晶粒径、格子間原子、転位密度、集合組織など、様々な条件が影響する。しかし、本研究課題で、応用ターゲットに想定した高 Mn 鋼ベースの対地震用制振合金では、優れた疲労特性を得るために、 ϵ マルテンサイトや変形双晶を利用するが、その際に耐力を目標のレベルに設計する場合には、本研究課題で得られた知見が有効に活用できると期待される。

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 5 件)

- ① K. Ogawa et al., Atomic Arrangement of Interphase Boundary between Bainite and Austenite in Fe-Si-C Alloy, Materials Transactions, 査読有, 51, 2010, 455-462
- ② M. Koyama et al., Continuous Transition of Deformation Modes in Fe-30Mn-5Si-1Al Alloy, Materials

- Transactions, 査読有, 51, 2010, 1194-1199
- ③ K. Ogawa et al., Isothermal fcc/hcp Transformation in Fe-Si-C-Alloy Thermally Treated at Lower Bainitic Transformation Temperature, Materials Transactions, 査読有, 50, 2009, 2778-2784
- ④ 小山元道他, Fe-30Mn-5Si-1Al 合金における塑性変形様式の連続遷移, 日本金属学会誌, 査読有, 73, 2009, 174-179
- ⑤ Motomichi Koyama et al., The effects of thermomechanical treatment on the deformation characteristics of Fe-Mn-Si-Al alloys, Materials Science and Engineering A, 査読有, 497, 2008, 353-357

[学会発表] (計 12 件)

- ① 澤口孝宏, オーステナイト鋼における FCC/HCP マルテンサイト変態と FCC 変形双晶, 日本金属学会分科会マルテンサイト研究会, 2011年2月18日, 筑波大学東京キャンパス
- ② 小山元道 他, Work hardening behavior with twinning and dynamic strain aging in an Fe-17Mn-0.9C steel, 日本鉄鋼協会第 160, 2010年9月25日, 北海道大学, 札幌市
- ③ 澤口孝宏, 各種高 Mn 鋼における ϵ マルテンサイト交差部組織の比較研究, 日本金属学会 2010 年春期大会, 2010/03/28, 筑波大学 (つくば市)
- ④ ZHANG Xin et al., Microstructural factors describing the plastic deformation of TRIP/TWIP steels, 日本鉄鋼協会第 159 回春期講演大会, 2010/03/30, 筑波大学 (つくば市)
- ⑤ ZHANG Xin et al., A Comparative study between ϵ martensite and γ deformation twin in their effect on deformation behavior of TRIP/TWIP steels, 日本鉄鋼協会第 158 回秋期講演大会, 2009/09/16, 京都大学 (京都市)
- ⑥ 小川一行他, 引張変形した Fe-Mn-Si-Al 合金中に生成した板状 ϵ 相や変形双晶の交差部組織, 日本金属学会 2009 年秋期大会, 2009/09/15, 京都大学 (京都市)
- ⑦ 澤口孝宏他, マルテンサイト/変形双晶共存型高 Mn 鋼における変形機構と形状回復の特性の相関, 日本金属学会 2009 年春期大会, 2009 年 3 月 29 日, 東京工業大, 東京都目黒区
- ⑧ 澤口孝宏他, Fe-高 Mn 合金の制震効果に関するシミュレーション予測, 日本金属学会 2009 年春期大会, 2009 年 3 月 29 日, 東京工業大, 東京都目黒区
- ⑨ 澤口孝宏他, Fe-Mn-Si 基形状記憶合金の Al 添加による延性改善のメカニズム, 形状記憶合金協会, 2008 年 11 月 27 日, ユアーズホテル、福井市
- ⑩ 澤口孝宏他, 鉄系形状記憶合金の新用途-対地震用制振技術の開発と課題, 形状記憶合金協会, 2008 年 11 月 27 日, ユアーズホテル、福井市
- ⑪ 澤口孝宏他, Fe-Mn-Si 形状記憶合金の可逆的変態誘起塑性に関する段階的組織観察, 日本金属学会 2008 年秋期大会, 2008 年 9 月 23 日, 熊本市
- ⑫ 澤口孝宏他, Fe-30Mn-5Si-1Al 合金の変動挙動と支配組織因子, 日本金属学会 2008 年秋期大会, 2008 年 9 月 23 日, 熊本市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

澤口孝宏 (SAWAGUCHI TAKAHIRO)
 独立行政法人物質・材料研究機構・材料信頼性萌芽ラボ・主幹研究員
 研究者番号: 30354161

(2) 研究分担者

小川一行 (OGAWA KAZUYUKI)
 独立行政法人物質・材料研究機構・新構造材料センター・フレッシュキャリア
 研究者番号: 60370318

(3) 連携研究者

なし