

令和 2 年 7 月 6 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03433

研究課題名（和文）高強度と成形性の両立を実現する層界面組織制御を施した日本刀型鋼板の試作

研究課題名（英文）Prototype of Japanese sword-type steel sheet with control of interfacial microstructure in order to realizes both high strength and formability

研究代表者

上路 林太郎（UEJI, Rintaro）

国立研究開発法人物質・材料研究機構・構造材料研究拠点・主幹研究員

研究者番号：80380145

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：鋼板の強靱化を達成するために、日本刀の構造を模擬した鋼板を試作し、その構造と機械的性質の関係を明らかにした。日本刀の内部微細構造に強度の異なる炭素鋼の複合構造であることに着目し、低炭素鋼と高炭素鋼のサンドイッチ型複合鋼板（日本刀型鋼板）を、その構造を種々変化させて実際に作製した。構造と焼入れ性に相関があり、低炭素鋼層の体積率が大きい複合構造の場合は、応力等の発生により、熱処理により高強度を得にくい組織となってしまうことが分かった。さらに、異材界面形態に凹凸を人工的に付与した複合鋼板の試作評価と計算により、異材界面は局所的な応力集中が生じにくい平滑界面が望ましいことなども明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

構造用金属材料において成形性を有しつつ強靱化を図ることは、安全性向上や小型化を通じて、環境規制への対応や資源節約を実現する方策であり、工業分野の基本課題である。この課題に対する解決策として、高強度で成形性に優れた金属材料を得るための組織の革新的理想像として、日本刀の造り込みから着想した「日本刀型鋼板」を新たに提案する。ここでは日本刀型鋼板を、「サブミリメートルスケールの層厚さを有する軟質低炭素鋼層と硬質中（高）炭素鋼層からなるサンドイッチ型複合材料」と定義する。日本刀型鋼板を模擬した複合鋼板の試作などにより、優れた機械的性質を得るための指針を探索した。

研究成果の概要（英文）：In order to achieve the strengthening of steel, a steel plate simulating the structure of a Japanese sword was prototyped and the relationship between its microstructure and mechanical properties was clarified. Focusing on the fact that the internal structure of a Japanese sword has a kind of composite structure of carbon steels with different strengths, the sandwich-type composite steel sheets consisting of both low carbon and high carbon steels (Japanese sword type steel sheet) were prototyped. It was found that the hardenability in high carbon steel layer deteriorates when the volume fraction of the low carbon steel layers is large. In addition, through experiments and calculation of a composite steel sheet in which irregularities were artificially added to the dissimilar material interface morphology, it was clarified that a dissimilar material interface is preferably a smooth interface in which local stress concentration is less likely to occur.

研究分野：材料組織学

キーワード：鉄鋼材料 塑性加工 複合材料 金属組織 相変態 熱処理 強度 延性

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

構造用金属材料において素材としての成形性を有しつつ更なる強靱化を図ることは、安全性向上や小型化を通じて、ますます厳しくなる環境規制への対応や資源節約を実現する方策であり、工業分野の基本課題である。この課題に対する金属組織学的な解決策として、加工・熱処理による結晶粒微細化や組織複合化がある。近年では結晶粒微細化の極限ともいえるバルクナノメタルは、科研費新学術領域研究等で論議が展開された。また、自動車の高張力鋼板(ハイテン)の代表組織である軟質フェライトと硬質マルテンサイトの複合組織は、その塑性変形挙動が精力的に研究されている。

ところで、Dual Phase 鋼に見られる「組織の複合」という観点で考えると、日本独自手法の手がかりとして日本刀に思い当たる。古来の日本刀は鍛接により、硬い高炭素鋼をもってして軟質の低炭素鋼を挟み込み、Dual Phase 鋼よりも1~2桁大きなスケール(サブミリメートル)で複合化し、武器としての強靱性を備えている。もし、従来のマイクロメートルオーダーの組織制御に加えて、日本刀で見られるスケールの複合材料化を同時に施した「日本刀型鋼板」が出来れば、両特性を生かすことが期待できる。

申請者らは、低炭素(0.05%C)鋼と中炭素(0.44%C)鋼を、構成比率を種々変えて積層したものを高温圧縮・接合し、強制空冷により0.44%C鋼層のみマルテンサイトとしたサンドイッチ型積層構造を有する日本刀型鋼板(板厚1.2mm)の試作と評価を行った。積層は板厚中心に関して面对称構造とし、硬い中心層を有する硬芯材と軟質な軟芯材を作製した。室温準静的引張試験を行った結果、界面剥離が無いことが確認された他に、二つの結果が得られた。

- ・硬質層体積率が概ね4分の3以上になると、硬質層単層材より高強度を示す(図1左図)。

- ・成形性の指標である破断時減面率(右図)は、硬質層体積率に依らず硬芯材が良い。

すなわち、二次成形を必要とする鋼板の場合、一般的な日本刀とは逆の構造である硬芯材が好ましい。なおかつ、所謂、線形加算則の予測(左図点線)と反して、体積率10~25%程度の軟質層の日本刀の利用は強度を損なうことがないことが判った。この結果は線形加算則では考慮されない層間相互作用の存在を示しているが、発現メカニズムは明らかではない。

2. 研究の目的

日本刀型鋼板の室温引張変形特性における、硬質層体積率等構造の影響が生じるメカニズムを、層界面の塑性拘束効果に注目し実験と数値計算等による定量的評価により明らかにし、高強度や延性・成形性を最大化する積層設計指針を獲得することを目的とし、最終的には日本刀型鋼板を圧延等により試作する。

3. 研究の方法

硬質層体積率および硬芯材や軟芯材といった積層構造の影響を明確化するために、構成層の体積率の異なる小型板材を試作し評価を行った。顕微鏡等による組織観察と室温準静的試験による引張試験を行い、金属組織と機械的性質の相関を考察した。特に、界面における拘束効果を検討するために、人工的に凹凸を付けたサンプルの試作・評価を行った。また、大型材の製造方法の検証のため、鍛造と塑性加工を組み合わせたプロセスによる積層材の試作を試みた。

4. 研究成果

(1) 構成層体積率の影響

図2に各種硬質体積率を有する一体化材の横断面走査型電子顕微鏡(SEM)組織(反射電子像)を示す。図中に示すサンプルは、板幅25mm×長さ45mmであり各種板厚を有する0.05%C鋼(0.05mass%C-0.3%Si-1.5%Mn)および0.65%C鋼(0.65%C-0.3%Si-1.5%Mn)を用いて、板厚中心部に硬質の0.65%C鋼を配置し、表層部に軟質の0.05%C鋼を添えて三層合わせて板厚6mmとなるように、サンドイッチ型に積層したものを1000における平面ひずみ圧縮(圧縮率75%)により一体化して作製した。水平方向と垂直方向が板幅方向(TD)および板厚方向(ND)と平行である。いずれにおいても、板厚中心部を占める硬質層に白色の

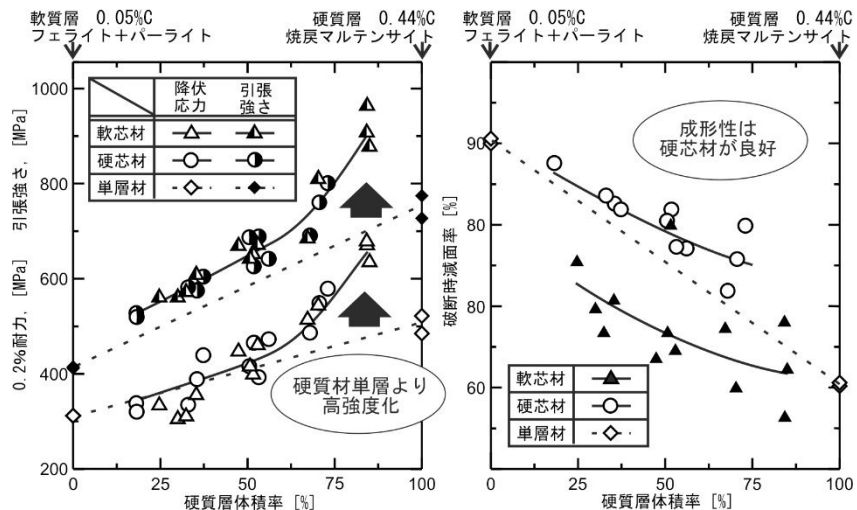


図1 低炭素鋼層と中炭素鋼層のサンドイッチ型構造を有する日本刀型鋼板の引張特性

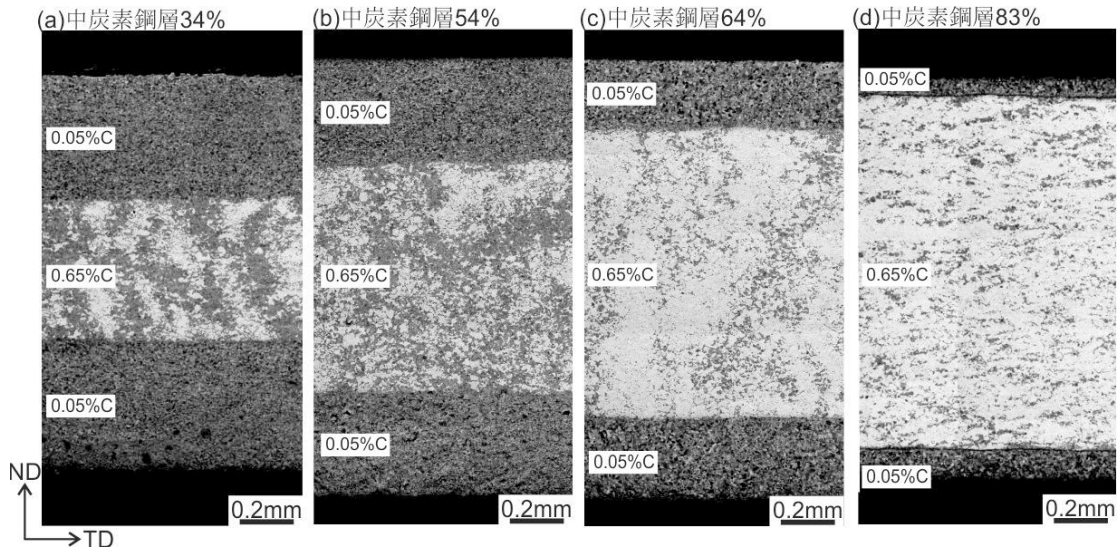


図 2 構成比率の違う低炭素鋼層(0.05% C)と中炭素鋼層(0.65% C)のサンドイッチ型積層材を急冷して得られたサンプルのSEM反射電子像。板厚中央に配置した中炭素鋼層の構成比率が大きいほど、白色で観察されるマルテンサイト面積率が增大する。

コントラストを有するマルテンサイト組織を示すサンドイッチ構造が観察された。硬質層中のマルテンサイト組織が占める割合は、硬質層体積率の増大に伴い増加していた。

図 3 は種硬質層体積率を有する積層一体化材の板厚方向の硬さ分布である。硬質層体積率が大きい場合は軟質層はフェライトの硬さを示し、硬質層は 0.65% C マルテンサイトの硬さを示す。一方で、硬質層体積率が減少すると、硬質層中の硬さの値が低硬さ側に大きくばらつき、軟質層の増大により、マルテンサイト生成が抑制されていることが確認された。すなわち、研究背景の節で述べた硬質層体積率と強度の関係において、硬質層(=高炭素鋼層)の体積率が概ね 4 分の 3 以上の大きい場合、高強度化が達成しやすい原因の一つに、硬質層-軟質層間の相互作用が弱くなることによる硬質層焼入れ性の向上があることが示唆された。

異材質層間の相互作用の詳細を検討した結果、層間の炭素濃度の違いがもたらす焼入れ時の変態が生じるタイミングの違いに起因する残留応力が、硬質層の拡散変態を促進し焼き入れ性を低下したことが明らかとなった。さらに、各層の降伏応力以下の応力であっても拡散変態が促進されることも明らかとなった。本研究の開始当初では、拡散変態-応力間の相互作用が顕在化するような状況は想定されておらず、日本刀のような不均質構造を有する素材における熱処理時の組織形成を支配している現象の明確化に加えて、鋼の熱処理制御における応力の重要性を明らかにすることが出来た。これらの結果は、米国で開催された国際会議(MS&T)で招待講演するなど、国際的にインパクトのある成果となった。

(2) 界面形態の影響

界面の影響を明らかにするために、人工的に界面形態を変化させた積層サンプルを作製、引張試験などの評価を行った。図 4 は平坦界面材(a)と凹凸界面材(b)の光顕組織である。凹凸界面は積層材の一体化の前に、あらかじめ切削加工により積層界面に凹凸をつけることにより実現した。いずれの場合も板厚中心軸に関して対称となる構成を有しており、0.05% C 鋼部と 0.45% C 鋼部はそれぞれ

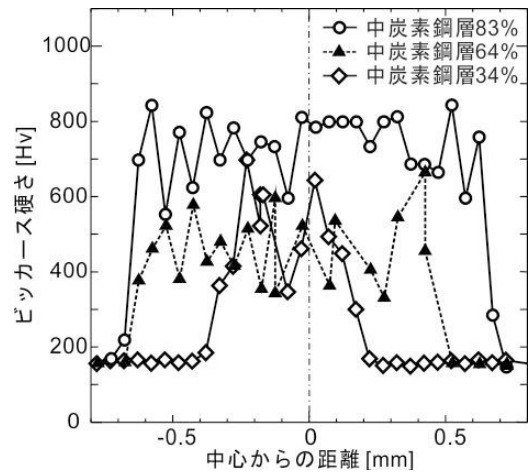


図 3 構成比率の違う低炭素鋼層(0.05% C)と中炭素鋼層(0.65% C)のサンドイッチ型積層材を急冷して得られたサンプルの板厚方向硬さ分布。

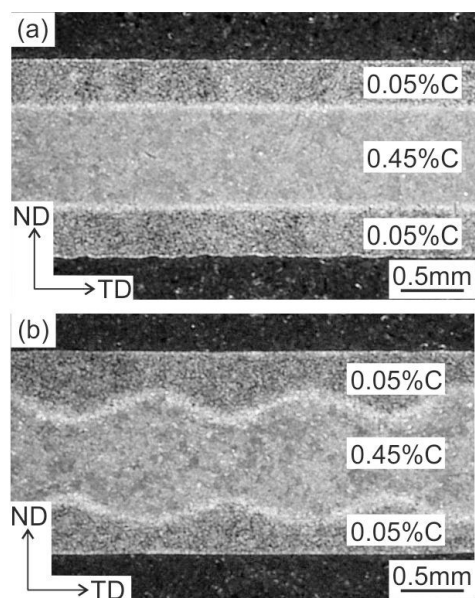


図 4 平滑界面積層材(a)と凹凸界面積層材(b)の断面光顕組織。凹凸界面は、積層前に界面に切削加工により凹凸をつけて一体化することにより作製した。

フェライト・パーライト組織とラスマルテンサイト組織を有していた。界面形態によらず、0.05% C鋼部と0.45% C鋼部の体積率は圧縮前と同じく、ほぼ1対1であった。

図5は平滑界面材と凹凸界面材の公称応力-公称ひずみ曲線である。比較のため積層材の各層を構成する0.05% C鋼単層材と0.45% C鋼単層材のデータも併せて示している。0.45% C鋼単層材は1900MPa以上の高強度を示すが、応力低下を伴う局部伸びを示すことなく破断した。その破面はリバーパターンを示していた。積層圧縮材の強度は界面形態に関わらず各構成層のデータの中間の値を示すが、0.45% C鋼単層材と同様に局部伸びを示さなかった。界面形態の違いにより生じた引張変形挙動の変化は、破断伸びに見ることができる。凹凸界面材の破断伸びは、平滑界面材よりも小さくなる。また凹凸界面材の破断位置は0.45% C鋼部の厚さが最も小さくなる部位であった。有限要素法(FEM)による数値解析の結果、平滑界面材の引張試験中では各層の板厚方向の応力分布はほとんど見られない一方、凹凸界面材では界面拘束の不均一により、同一構成層内部であっても、部位によって異なる応力分布を示す。特に、0.45% C鋼部厚さが最小となる部分で最も大きな引張応力が生じることが明らかとなった。すなわち、界面を凹凸化すると、界面拘束により、局所的には平滑界面材よりも大きな応力が生じてしまうため、破壊が促進されると考えられる。これらのことから、凹凸界面を導入することにより、不要な応力収支が材料内部で生じてしまい、平滑材よりも早期に破断してしまうことが明らかとなった。

人工的に凹凸をつけて界面の役割を実験により明らかにしようとする試みはこれまでになく、海外の学術雑誌の表紙絵(Steel Research International, 90-5(2019))に採用されるなどの国際的インパクトのある成果となった。

(3) 大型材の試作

上記の研究では、試作材サイズはおおよそ10mm×20mm×板厚約1mmの小型のものであった。これらは高温圧縮が可能な真空チャンパー内で作製されたものである。より大型のサンプルを得るための試みとして、高周波溶解鑄造用真空チャンパー内にて、鑄型の代わりに表面材を構成する低炭素鋼を設置し、内部に高炭素鋼を鑄造して、あえて溶着させることにより異材間を仮接合し、その後熱間鍛造と圧延により一体化された積層材を作製した。図6は得られた大型積層材の外観写真と断面光学顕微鏡組織である。鑄型材が箱型であるため板幅方向(外観写真の上下方向)の両端20mm程度は積層材となっていないが、中心部の幅約50mmの領域において、中心部が高炭素鋼であり、表層部が低炭素鋼の板材を試作できた。

(4) その他の成果とまとめ

日本刀と同様の構造、すなわち炭素量の異なる材質のサンドイッチ型積層鋼板において高強度が発現するためには、低炭素鋼層の体積率を抑え焼入れ熱処理時に高炭素鋼層の焼き入れ性を損なわないようにすることが必要であることが分かった。すなわち、人工的にサブミリスケールの不均質構造を作製する際には、熱履歴に応じて複合化に起因する熱応力が構成層の焼き入れ性の変化などもたらすため、構成材料単独の熱処理実験では検証できない相互作用、すなわち相変態の不均一に起因する残留応力の発生とその応力による拡散変態の促進を考慮する必要があることを明らかにした。

また、本研究を通じて、応力-拡散変態相互作用の実験手法や鑄造と塑性加工を組み合わせた大型材の試作方法を実証することができた。応力による拡散変態の促進にはミクロな塑性変形の関与が示唆されることも明らかになった。応力-拡散変態相互作用に関しては、本研究で示した積層材以外でも、鋼の熱処理工程など種々の場面で生じていることが指摘されているものの不明な点が多い課題である。日本刀型鋼板という積層材の研究を通して、より一般的な課題における研究手法と新知見を得たことも本研究の主な成果である。

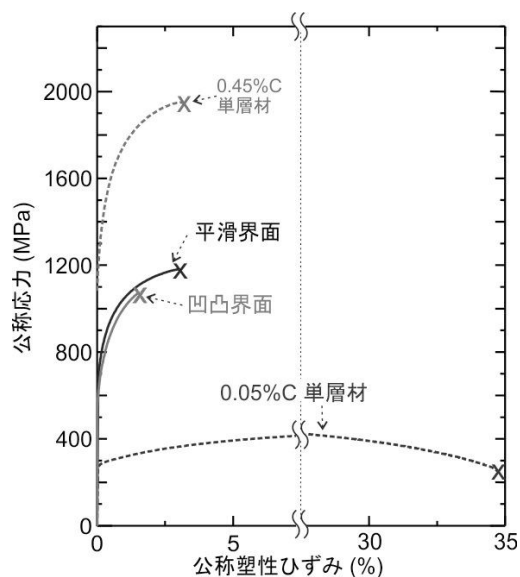


図5 0.05% C鋼および0.45% C鋼からなる積層材の公称応力-公称塑性ひずみ曲線。図4に示す平滑界面あるいは凹凸界面を有するサンプルの結果であり、凹凸界面が早期破断をもたらすことがわかる。



図6 低炭素鋼(JIS-SS400)と高炭素鋼(JIS-SK5)の大型積層材の外観写真(a)と横断面光学顕微鏡組織(b)。表層部に厚さ200μm程度の低炭素鋼層が存在する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Rintaro Ueji and Tadanobu Inoue	4. 巻 90
2. 論文標題 Effect of interface morphology on tensile properties of carbon steel sheet with sandwich structure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Steel Research International	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/srin.201900015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ueji Rintaro, Inoue Tadanobu	4. 巻 256
2. 論文標題 Acceleration of pearlite transformation in a high-carbon steel by uniaxial compressive stress confirmed by volume measurements	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Materials Letters	6. 最初と最後の頁 126637 ~ 126637
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.matlet.2019.126637	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ueji Rintaro, Inoue Tadanobu	4. 巻 764
2. 論文標題 Acceleration of diffusional transformation in a high-carbon steel layer composed of a sandwich-like clad steel sheet	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Materials Science and Engineering: A	6. 最初と最後の頁 138217 ~ 138217
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.msea.2019.138217	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 2件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 上路林太郎、井上忠信
2. 発表標題 低炭素鋼と中炭素鋼の積層構造における マルテンサイト組織形成の抑制
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第177回春季講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上路林太郎、井上忠信
2. 発表標題 低炭素鋼と中炭素鋼からなる日本刀型複層鋼板における メゾスケール積層界面形態と引張変形挙動
3. 学会等名 日本塑性加工学会 2019年度塑性加工春季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Rintaro Ueji and Tadanobu Inoue
2. 発表標題 Phase transformation behaviors in sandwich-like clad sheet composed of low and high carbon steels
3. 学会等名 MS&T2019, USA (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上路林太郎、井上忠信
2. 発表標題 日本刀型鋼板の組織と引張変形挙動
3. 学会等名 第55回材料研究会発表会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上路林太郎、井上忠信
2. 発表標題 高炭素鋼におけるパーライト変態に及ぼす圧縮応力の影響
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第178回秋季講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上路林太郎、井上忠信
2. 発表標題 日本刀型鋼板の組織と引張変形挙動
3. 学会等名 日本塑性加工学会 第68回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 高靱性を有する鋼材、及びその製造方法	発明者 上路林太郎、井上忠信	権利者 国立研究開発法人物質・材料研究機構
産業財産権の種類、番号 特許、特願2017-112147	出願年 2017年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	井上 忠信 (Inoue Tadanobu) (90354274)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・構造材料研究拠点・分野長 (82108)	