

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06488

研究課題名(和文)パーコレーション制御による複相鋼板の高機能化

研究課題名(英文)Development of Mechanical Properties in Dual Phase Steels by Percolation Control

研究代表者

中田 伸生 (Nakada, Nobuo)

東京工業大学・物質理工学院・准教授

研究者番号：50380580

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：複相鋼の力学特性を支配するメゾスケールな基本因子を明らかにすることを目的に、軟質+硬質オーステナイト複合組織を有するFe-Ni合金を用いて、その0.2%耐力に及ぼす硬質オーステナイト分率の影響を調査した。0.2%耐力は硬質オーステナイト分率の増加に従って連続的に上昇したが、その増加挙動はある分率を境に非線形的なものであった。この非線形的な強度の増加挙動は、硬質オーステナイトのパーコレーション挙動と一致した。これらの結果から、個々の硬質オーステナイト粒がしっかりと連結し、複合組織の母相となることで、塑性ひずみが軟質、硬質オーステナイトともに均一に分散し、顕著な強化をもたらすことが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：For an essential understanding the microstructural factors dominating mechanical properties of metals with duplex microstructure in a meso scale, a change in 0.2% proof stress depending upon hard austenite fraction was investigated in terms of a microstructural connectivity using Fe-Ni austenitic alloy having a duplex microstructure composed of soft and hard austenite. 0.2% proof stress is continuously increased with increasing the fraction of the hard austenite. Especially, it is efficiently increased according to iso-strain condition when the hard austenite fraction exceeds a critical value. The non-linear strengthening tends to have good correlation with a connectivity of the hard austenite, that is, percolation phenomenon. This suggests that when the hard austenite grains are firmly connected to each other, plastic strain is uniformly distributed between soft and hard austenite during deformation, which leads to a significant strengthening in metals with duplex microstructure.

研究分野：鉄鋼材料

キーワード：構造材料 組織連結性 パーコレーション マルテンサイト変態

### 1. 研究開始当初の背景

構造用金属材料は、低コストで優れた強度と延性を両立しなければならず、とくに自動車用鋼板には燃費向上による環境負荷低減を達成するため、延性(加工性)を保ちながら、更なる高強度化が要求されている。現在、自動車用鋼板として普及している Dual-Phase(DP)鋼は、フェライトとマルテンサイトの異なるふたつの組織から構成される複合組織を有しており、軟質なフェライトで加工性を保ちつつ、硬質なマルテンサイトで強度上昇を図ることをコンセプトとしたハイブリッドな高張力複相鋼板である。そのため、DP 鋼の強度はマルテンサイト体積率に強く依存しており、実製品においてもマルテンサイト体積率を増加させることで強度レベルの向上がなされているが、同時にフェライト体積率が減少するため、これによる延性劣化は避けられない。

一方で、近年、中性子線回折や画像解析を利用したひずみ測定によって、DP 鋼中のマルテンサイトは大して塑性変形しておらず、強化相としてほとんど寄与していないことが明らかとなってきた。さらに、マイクロメカニクスに基づいた Secant 法によって DP 鋼の応力-ひずみ曲線を再現した場合、第二相マルテンサイトに付与されるひずみ量が小さいことが同様に報告されている。この報告の中で、マルテンサイト体積率が 0.5 付近になった場合、フェライトとマルテンサイトのどちらを母相として選択するかによって、降伏ならびに加工硬化段階でのマルテンサイトに付与されるひずみ量が異なり、マルテンサイトが母相となった場合により大きなひずみが付与されることで、DP 鋼の降伏強度や加工硬化率が顕著に増加するという計算結果を併せて示している。これは、『母相/第二相間で、どのようにひずみを分配させるか』ということが複相鋼における重要な組織制御課題であり、マルテンサイト体積率が小さい場合であっても、そこに付与するひずみ量をより大きくすることが出来れば、DP 鋼の強度レベルを飛躍的に高めることが可能であることを明示している。

これは、直列型の Voigt (応力一定)モデル、並列型の Reuss(ひずみ一定)モデルが適用される複合材料のヤング率異方性と同様の議論であり、マルテンサイトが連結して分布し、母相として振る舞えば、DP 鋼における母相/第二相間のひずみ分配の様式が直列型から並列型へと変化することを連想させる。このような、ある系の中での要素のつながりは、統計学の分野などでパーコレーション(浸透)と呼ばれていることから、本研究では金属組織学にパーコレーションの概念を導入し、パーコレーション制御によって複相鋼板の高強度・高機能化を試みるものである。

### 2. 研究の目的

本研究では、まず、モデル合金を用いて硬

質な第二相の体積率のみを独立して変化させ、第二相がパーコレーションすることで降伏強度や母相/第二相間のひずみ分配挙動が不連続に変化することを確認し、複相鋼におけるパーコレーション効果を実証する。とくに、Secant 法を用いた理論解析を行うことで、軟質相と硬質相の母相遷移を明確にする。ついで、第二相の連結性を指標するパーコレーション指数を導入し、これによって降伏強度ならびにひずみ分配挙動の不連続変化を説明した後、独自の組織制御技術を活用したパーコレーション制御によって実用 DP 鋼の機械的特性改善を図る。

### 3. 研究の方法

Fe-28%Ni(mass%)オーステナイト合金に対して、図 1 に示すようにサブゼロ処理によって fcc-bcc マルテンサイト変態によって部分的にレンズマルテンサイトを生成させた。次いで、このレンズマルテンサイトを bcc-fcc マルテンサイト逆変態によって逆変態オーステナイトへ変態させるために、500°Cにて短時間焼鈍を行い、最終的に軟質なオーステナイトと硬質な逆変態オーステナイトの混合組織を得た。このとき、サブゼロ温度を種々変化させることでマルテンサイト変態の変態率を変化させることで、結果的に最終的な軟質+硬質オーステナイト混合組織における硬質な逆変態オーステナイトの分率を任意に制御した。このようにして作製した種々の逆変態オーステナイト分率を有する鋼に対して、室温引張試験を実施し、その引張特性に及ぼす逆変態オーステナイト分率の影響を調査した。

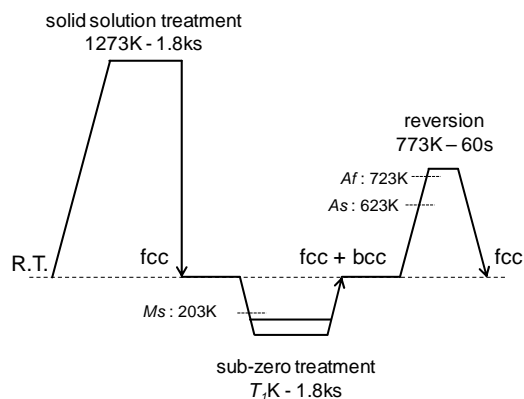


図 1. Fe-28%Ni 合金において軟質+硬質オーステナイト混合組織を得るための熱処理図

### 4. 研究成果

種々の逆変態オーステナイト分率を有する鋼の公称応力-ひずみ曲線の結果を図 2 にまとめる。逆変態オーステナイトの分率  $F_H$  が増加するほど、延性が低下する一方、強度が顕著に増加することがわかった。ここで、各試料の 0.2% 耐力を逆変態オーステナイト分率で整理したところ (図 3)、逆変態オーステナイト分率の増加に伴って 0.2% 耐力が連

続して増加するが、その増加挙動が単調でないことが明らかとなった。具体的には、逆変態オーステナイト分率が約 0.45 以上であれば、0.2%耐力が線形的に増加するのに対して、分率が 0.45 未満であると、この線形硬化則よりも低い強度となることがわかった。これは、マルテンサイト逆変態を用いてオーステナイト鋼の高強度化を図る場合、逆変態オーステナイトの分率を 0.45 以上にすることで、より効率よく強化が可能であることを物語っている。さらに、0.2%耐力と逆変態オーステナイト分率の非線形な関係について、マイクロメカニクスを用いた Secant 法による解析を実施したところ、逆変態オーステナイトの分率が低い時 (0.45 未満) は、未変態の軟質なオーステナイトが混合組織の母相となるのに対して、分率が高い時 (0.45 以上)、硬質な逆変態オーステナイトが混合組織の母相となることを明らかにし、混合組織における組織の連結性が、この種の鋼の力学特性を制御する重要な組織因子であることがわかった。

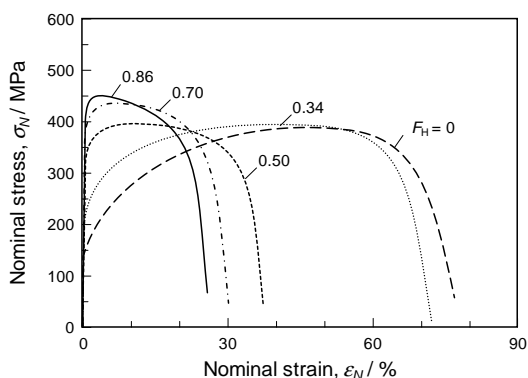


図 2. 逆変態オーステナイト分率  $F_H$  が異なる Fe-28%Ni オーステナイト合金の公称応力-ひずみ曲線。

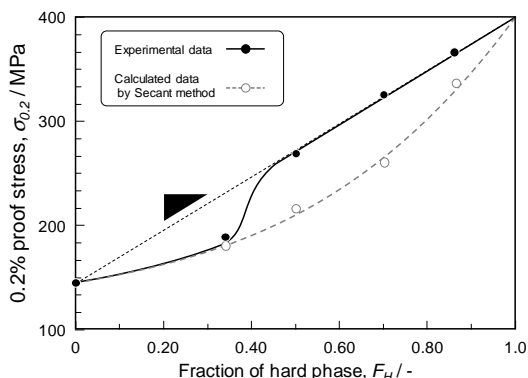


図 3. Fe-28%Ni オーステナイト合金の 0.2%耐力と逆変態オーステナイト分率  $F_H$  の関係

## 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 3 件)

① Nobuo Nakada, Yuji Ishibashi, Toshihiro Tsuchiyama, Setsuo Takaki: Self-Stabilization of untransformed austenite by hydrostatic pressure via martensitic transformation, 査読有, Acta Mater., 110(2016), 95-102.

② Nobuo Nakada: Direct observation of martensitic reversion from lenticular martensite to austenite in Fe-Ni alloy, 査読有, Mater. Let., 187(2017), 166-169.

③ Nobuo Nakada, Shouhei Kawasaki, Yuuki Kogakura, Toshihiro Tsuchiyama, Setsuo Takaki: Matrix switch related to microstructural connectivity and its effect on strength in metals with duplex microstructure, 査読有, Mater. Sci. Eng. A, 690(2017), 270-276.

[学会発表] (計 5 件)

① 中田伸生, 小ヶ倉勇樹, 尾中晋, 川崎翔平, 土山聡宏, 高木節雄: 複層組織合金の力学特性に及ぼす組織連結性の影響, 査読有, 鉄鋼インフォマティクス研究会第七回研究会 (招待講演), 平成 28 年 1 月, 東京キャンパスイノベーションセンター

② 中田伸生: Fe-Ni 合金におけるマルテンサイト逆変態の高温 EBSD 観察, 査読有, 日本鉄鋼協会第 172 回秋季講演大会, 平成 28 年 9 月, 大阪大学

③ 中田伸生, 川崎翔平, 小ヶ倉勇樹, 土山聡宏, 高木節雄: 複合組織合鋼の強度に及ぼす組織連結性の影響, 査読有, 日本鉄鋼協会第 173 回春季講演大会, 平成 29 年 3 月, 首都大学東京

④ 中田伸生: マルテンサイト変態に起因した静水圧応力による未変態オーステナイトの自己安定化, 査読有, 第 12 回 SPring-8 金属材料評価研究会 / 第 11 回 SPring-8 先端利用技術ワークショップ (招待講演), 平成 29 年 3 月

⑤ Nobuo Nakada, Yuji Ishibashi, Toshihiro Tsuchiyama, Setsuo Takaki: Self-stabilization of Untransformed Austenite by Hydrostatic Pressure via Martensitic Transformation, 査読有, International Conference on Martensitic Transformations 2017, 平成 29 年 7 月, シカゴ

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）  
なし

○取得状況（計 0 件）  
なし

〔その他〕

ホームページ等

[http://t2r2.star.titech.ac.jp/cgi-bin/researcherpublicationlist.cgi?q\\_researcher\\_content\\_number=CTT100685279](http://t2r2.star.titech.ac.jp/cgi-bin/researcherpublicationlist.cgi?q_researcher_content_number=CTT100685279)

<https://orcid.org/0000-0002-5473-3803>

<http://www.researcherid.com/ProfileView.action?returnCode=ROUTER.Success&Init=Yes&SrcApp=CR&queryString=KG0UuZjN5WkXE DFj2KSz11ce0vgE6aQ%252BPJf10WptpgY%253D&SID=D1JJ1rbYpvNR2jbMAXH>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中田 伸生 (NAKADA, Nobuo)  
東京工業大学・物質理工学院・准教授  
研究者番号：50380580

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

なし