

令和 6 年 4 月 16 日現在

機関番号：33903

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14423

研究課題名（和文）軟質フェライトを有効活用した高強度複相組織鋼のさらなる高強度・高延性化

研究課題名（英文）Increment of the strength and ductility of high-strength multi-phase steel by optimizing the characteristics of ferrite

研究代表者

小川 登志男 (Ogawa, Toshio)

愛知工業大学・工学部・准教授

研究者番号：10708910

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：高強度複相組織鋼において、主相であるフェライトの特徴を最適化することで、飛躍的な強度-延性バランスの向上を試みた。その結果、ミクロ組織がフェライトとマルテンサイトから構成されているDual Phase鋼板においてフェライトを等軸化・微細化・硬化させることで、強度-延性バランスが飛躍的に向上することを明らかにした。また、フェライトの三次元形態、さらには転位組織の定量情報とフェライト再結晶挙動の関係にも着目し、フェライトの特徴を決定づける支配因子についても明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で対象としている複相組織鋼は、自動車用鉄鋼材料として広く用いられている。年々自動車用鉄鋼材料に対する高強度化のニーズが高まる中で、本研究では複相組織鋼のフェライトの特徴を最適化することで、飛躍的な強度-延性バランスの向上に成功した。したがって、本研究で開発した複相組織鋼は、次世代の自動車用鉄鋼材料としての実用化が期待される。また、フェライトの三次元形態、さらには転位組織の定量情報とフェライト再結晶挙動の関係にも着目し、フェライトの特徴を決定づける支配因子についても明らかにした点は、学術的にも極めて重要な意義を持つ。

研究成果の概要（英文）：We attempted to dramatically improve the strength-ductility balance of high-strength multi-phase steel by optimizing the characteristics of ferrite. The obtained results revealed that the strength-ductility balance of dual phase steel with microstructure is composed of ferrite and martensite can be dramatically improved by making the ferrite equiaxed, refined, and hardened. We also focused on the three-dimensional morphology of ferrite, and the relationship between quantitative information on dislocation substructures and ferrite recrystallization behavior, and clarified the dominant factors that determine the characteristics of ferrite.

研究分野：構造用金属材料

キーワード：鉄鋼材料 複相組織 強度-延性バランス 再結晶 相変態 析出 フェライト

1. 研究開始当初の背景

年々高強度化が進む自動車用鋼板の代表例の一つとして、軟質なフェライトと硬質なマルテンサイトの二相からなる Dual Phase (DP) 鋼板が挙げられる。DP 鋼板は、フェライトが「延性」を担い、マルテンサイトが「強度」を担うことにより、優れた強度-延性バランスや成形性を達成している。DP 鋼板のミクロ組織制御に関する研究は 1970 年代から始まり、現在に至るまでさまざまな観点からミクロ組織解析が行われてきた。中でも、マルテンサイトの体積分率、サイズ、分布状態などに着目した解析事例が多く、DP 鋼板の特性はそれら因子によっておおよそ決定されるという見解が主流である。

一方、鋼の「基本組織」であるフェライトは、純鉄や軟鋼における材料設計のベースとなっており、その特徴については古くから多くの研究がなされている。そのため、近年はフェライトを対象としたミクロ組織の解析事例は少なく、DP 鋼板においてもフェライトに着目したミクロ組織解析事例は極めて少ない。しかしながら、DP 鋼板におけるフェライトの制御指針は必ずしも明確ではなく、フェライトの最適制御により DP 鋼板のさらなる高強度・高延性化が実現できる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究では、DP 鋼板をはじめとした複相組織鋼のさらなる高強度・高延性化を目的として、従来ほとんど着目されることのなかった「フェライト」の最適化を図ることが目標である。複相組織鋼の強度-延性バランスを向上させる手段の一つとして、ミクロ組織の均一化が有効であることが従来知られている。そこで本研究では、「フェライトの微細化・等軸化」と「フェライト-マルテンサイト間の硬度差低減」という観点から、複相組織鋼の高強度・高延性化を目指す。

3. 研究の方法

本研究では実験的アプローチを主軸として、複相組織鋼におけるフェライトの最適制御手法を確立すべく、主に以下の 4 点に取り組んだ。

(1) 転位組織の定量情報と再結晶挙動との関係

従来、転位密度の増加に伴い再結晶の進行が促進されることは広く知られているが、材料中の転位密度が変化すると転位配列や転位性格も同時に変化し得る。しかしながら、それら因子がフェライトの再結晶挙動におよぼす定量的な影響度は必ずしも明らかではない。そこで本研究では、転位組織の定量情報と再結晶挙動との関係について調査する。

(2) フェライトの三次元形態解析

ミクロ組織と強度-延性バランスとの関係を正しく理解するには、複相組織鋼においてもフェライトの三次元形態解析が必要不可欠である。そこで本研究では、フェライト粒の三次元形態解析を行う。

(3) フェライトの微細化・等軸化・硬化を同時に達成する製造プロセスの探索

上述したように、複相組織鋼の強度-延性バランスを向上させる手段の一つとして、ミクロ組織の均一化が有効であることが従来知られている。そこで本研究では、フェライトの微細化・等軸化・硬化を同時に達成する製造プロセスを探索する。

(4) 強度-延性バランスの調査

上記 (3) にて探索した最適製造プロセス条件で材料を作製し、その強度-延性バランスを調査する。

4. 研究成果

(1) 転位組織の定量情報と再結晶挙動との関係

転位性格の異なる試料の再結晶挙動を定量評価・比較することで、転位性格の差異が再結晶挙動におよぼす影響を調査した。具体的には、転位密度はほぼ同等でありながら、らせん転位と刃状転位の比率が異なる 2 つの試料を作製し、それらの再結晶挙動を比較した。その結果、刃状転位の比率が高い試料の方が再結晶の進行は速くなり、特に再結晶後期段階において両試料の再結晶率の差が顕著になった。また、セルラーオートマトン法を用いた再結晶シミュレーションを行った結果、転位性格による回復挙動の違いと再結晶の駆動力の差をシミュレーションに反映させることで、実験結果を精度よく再現できることが示された。これらの結果から、再結晶挙動を精密に制御するためには、転位性格は考慮すべき一つの因子であることを明らかにした。

(2) フェライトの三次元形態解析

低炭素鋼板の再結晶フェライト粒について、リアルセクションング法を用いて三次元再構築を行った結果、再結晶フェライト粒は概ね二次元的に成長していることを明らかにした。また、再結晶フェライト粒の多くは、特に圧延面法線方向への成長が抑制されていることを確認した。これは、再結晶フェライト粒の三次元形態が、圧延面法線方向における大角粒界間隔（未再結晶フェライト粒幅）に強く依存していることを示唆している。つまり、再結晶フェライト粒の三次元形態の制御には、再結晶開始前の初期組織の適切な選択が重要であることを見出した。

(3) フェライトの微細化・等軸化・硬化を同時に達成する製造プロセスの探索

DP 鋼板において、フェライトの微細化・等軸化・硬化を同時に達成する製造プロセスを探索した。供試材には、Nb 無添加および添加鋼の二種類の低炭素鋼を用いた。また、冷延-焼鈍前の初期組織をフェライト-パーライトおよびマルテンサイト単相とし、ミクロ組織形成挙動におよぼす初期組織の影響についても調査した。その結果、初期組織をマルテンサイトとした Nb 添加鋼において、フェライトが最も等軸化・微細化・硬化した。

(4) 強度-延性バランスの調査

上記 (3) の研究成果を踏まえ、初期組織をマルテンサイトとした Nb 添加型 DP 鋼板の引張特性を調査した結果、従来の DP 鋼板と比べて飛躍的に強度-延性バランスが向上した。以上のことから、DP 鋼板においてフェライトを等軸化・微細化・硬化させることで、強度-延性バランスが飛躍的に向上することを明らかにした。これは、複相組織鋼のミクロ組織を制御する上では考慮されていなかった因子であり、今後の複相組織鋼におけるミクロ組織制御指針の一つとなり得る重要な知見である。

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 2件）

1. 著者名 Kengo Horiuchi, Toshio Ogawa, Zhi-Lei Wang, Yoshitaka Adachi	4. 巻 14
2. 論文標題 Three-dimensional analysis of ferrite grains recrystallized in low-carbon steel during annealing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials	6. 最初と最後の頁 4154
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/ma14154154	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Minato Kawamura, Toshio Ogawa, Fei Sun, Yoshitaka Adachi	4. 巻 -
2. 論文標題 Evaluation of the tensile properties of vanadium-added steels with different ferrite and pearlite hardness ratios	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Materials Engineering and Performance	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11665-023-08436-w	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 Kotaro Iguchi, Toshio Ogawa, Fei Sun, Yoshitaka Adachi	4. 巻 24
2. 論文標題 Simulation-aided analysis of ferrite recrystallization behavior of pure iron with different dislocation characters	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Materials Research and Technology	6. 最初と最後の頁 6558-6566
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jmrt.2023.04.233	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Toshio Ogawa, Kengo Horiuchi, Zhilei Wang, Yoshitaka Adachi
2. 発表標題 Characterization of recrystallization behavior in pure iron and low-carbon steel by three-dimensional microstructural analysis
3. 学会等名 The 7th International Conference on Advanced Steels（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井口航太郎、孫飛、小川登志男、足立吉隆
2. 発表標題 転位性格を考慮した純鉄における再結晶挙動の定量解析
3. 学会等名 日本材料学会 第8回材料WEEK
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井口航太郎、孫飛、小川登志男、足立吉隆
2. 発表標題 組織形成シミュレーションの援用による純鉄の再結晶における転位性格の役割解明
3. 学会等名 日本金属学会・日本鉄鋼協会東海支部 第32回材料フォーラムTOKAI
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川村南斗、孫飛、小川登志男、足立吉隆
2. 発表標題 相間硬度比の異なるフェライト / パーライト鋼の引張特性評価
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第185回春季講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 井口航太郎、孫飛、小川登志男、足立吉隆
2. 発表標題 実験・シミュレーションの併用による純鉄の再結晶挙動における転位性格の役割解明
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第185回春季講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 堀内健吾, 王志磊, 小川登志男, 足立吉隆
2. 発表標題 鉄鋼材料における再結晶粒の三次元定量解析
3. 学会等名 第91回日本熱処理技術協会講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀内健吾, 王志磊, 小川登志男, 足立吉隆
2. 発表標題 低炭素鋼板における再結晶フェライト粒の三次元構造解析
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第182回秋季講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川村南斗, 王志磊, 小川登志男, 足立吉隆
2. 発表標題 析出強化フェライトを活用した複相組織鋼の相間硬度比および引張特性評価
3. 学会等名 日本金属学会・日本鉄鋼協会東海支部 第31回材料フォーラムTOKAI
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小川登志男, 小勝康平, 足立吉隆, 段野下宙志
2. 発表標題 初期組織の異なる低炭素鋼におけるフェライト再結晶挙動解析 (2): - 二相域焼鈍中の組織形成におけるフェライト再結晶の役割 -
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第187回春季講演大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 小勝康平, 陳達徳, 孫飛, 足立吉隆, 小川登志男
2. 発表標題 フェライト相制御によるDual Phase鋼の高強度・高延性化
3. 学会等名 日本金属学会・日本鉄鋼協会東海支部 第33回材料フォーラムTOKAI
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関