

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K15050

研究課題名(和文) 転位工学に基づいた加工誘起マルテンサイトの高強度発現機構の解明

研究課題名(英文) Clarification of high-strengthening mechanism of deformation-induced martensite based on dislocation engineering

研究代表者

増村 拓朗 (Masumura, Takuro)

九州大学・工学研究院・助教

研究者番号：40804688

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：準安定オーステナイト鋼であるFe-18Cr-8Ni合金(SUS304)の焼入れマルテンサイトおよび加工誘起マルテンサイトの組織、硬さ、転位密度を比較し、高密度の転位を有する加工オーステナイトから変態する加工誘起マルテンサイトのほうが、転位密度と硬さがともに高いことを明らかにした。一方で、転位の成分(刃状転位またはらせん転位)や分布状態は加工誘起マルテンサイトと焼入れマルテンサイトを圧延したものでほとんど変わらなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、高強度鋼として一般的に用いられる焼入れマルテンサイトと、TRIP鋼などで用いられる加工誘起マルテンサイトの強度と組織を比較したものである。従来、これら2つの組織の特性の違いが評価された例はなく、加工誘起マルテンサイトのほうが転位密度および硬さが高いという新たな知見が得られた。より高強度な鉄鋼材料を作製する上で、加工誘起マルテンサイトの利用価値が高いという結果は、工業的に大きな意義があると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In Fe-18Cr-8Ni alloy (SUS304), which is metastable austenitic stainless steel, the microstructure, hardness, and dislocation density of as-quenched and deformation-induced martensite were compared. The hardness and dislocation density of deformation-induced martensite are higher than those of as-quenched martensite, because the deformation-induced martensite is formed from work-hardened austenite with high dislocation density. On the other hand, the dislocation components (edge dislocations or screw dislocations) and the dislocation distribution were almost same between the deformation-induced and the as-quenched martensite.

研究分野：鉄鋼材料の組織制御

キーワード：加工誘起マルテンサイト マルテンサイト 転位密度 準安定オーステナイト ステンレス

## 1. 研究開始当初の背景

SUS304 (Fe-18%Cr-8%Ni 合金) に代表される準安定オーステナイト鋼は、加工に伴い硬質な加工誘起マルテンサイトが生成することで高い加工硬化能を有する。準安定オーステナイト鋼の加工硬化挙動は加工誘起マルテンサイトの体積率のみならず、強度に強く依存するため<sup>1)</sup>、その強化因子を正確に把握しておくことが重要である。一般に、マルテンサイトには  $10^{15} / \text{m}^2$  を超える高密度の転位が導入されており、転位密度はマルテンサイトの主たる強化因子の一つとして知られている<sup>2)</sup>。一方で、焼入れ処理で形成されたマルテンサイト(焼入れマルテンサイト)と加工誘起マルテンサイトの性質の違いはあまり議論されていない。加工誘起マルテンサイトは焼入れマルテンサイトと異なり、加工によって転位が導入されたオーステナイトからマルテンサイト変態したものであるため、オーステナイト中の転位密度を受け継ぐことでより高い転位密度を持ち、それに伴い高い強度を示す可能性がある<sup>3)</sup>。

近年では、D&P(Deformation & Partitioning) 鋼<sup>4)</sup>や R&P(Rolling & Partitioning) 鋼<sup>5)</sup>など、加工誘起マルテンサイトを母相とした高強度・高延性の材料が開発されており、さらなる高強度化を目指すには、加工誘起マルテンサイトそのものの性質を理解しておく必要がある。

## 2. 研究の目的

準安定オーステナイト系ステンレス鋼である SUS304 で得られる加工誘起マルテンサイトと焼入れマルテンサイトに対して、X 線ラインプロファイル法により転位密度や転位の状態を解析することで両者の組織的および機械的特徴の差異を調査した。

## 3. 研究の方法

### (1) 供試材

本研究では、同組成での焼入れマルテンサイトと加工誘起マルテンサイトの性質を調査するため、室温でオーステナイト単相であり、サブゼロ処理および冷間加工によりマルテンサイトが生成する Fe-18%Cr-8%Ni 合金 (SUS304) を用いた。なお、機械的性質に及ぼす転位の影響を明瞭に評価するために、炭素および窒素をほとんど含まない鋼種を選択した。

### (2) 熱処理方法

供試材に対し、Fig.1 に示す熱処理を行った。オーステナイト単相域である 1273 K で 1.8ks の溶体化処理後、直ちに水冷し、等軸な単相組織を得た。この試料に対し、5~80%の冷間圧延を施した試料 (加工誘起マルテンサイト) と、液体窒素(77 K) でサブゼロ処理を行った試料 (焼入れマルテンサイト) を実験に用いた。

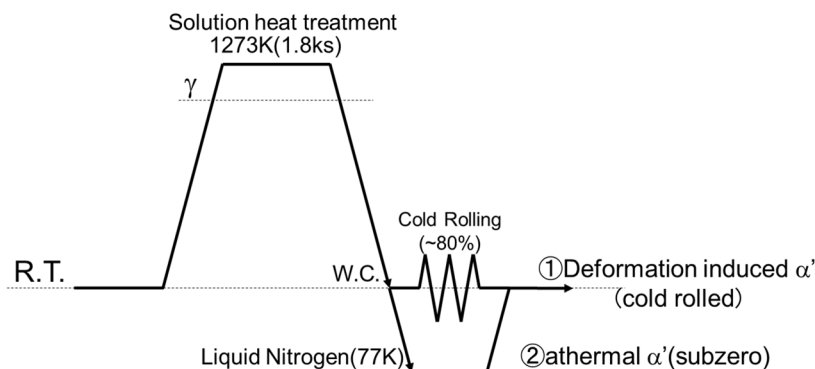


Fig.1 Schematic diagram of heat treatment.

### (3) 各種測定

得られた各試料に対し、ナノインデンテーション試験によるオーステナイトとマルテンサイトにおける各相の硬さ測定、光学顕微鏡、透過型電子顕微鏡を用いた組織観察、電子線後方散乱回折 (EBSD) 法を用いた結晶方位測定、X 線ラインプロファイル解析 (modified Williamson-Hall/Warren-Averbach 法) を用いた転位密度測定を行った。

#### 4. 研究成果

Fig.2 にサブゼロ材および 10%、30%、50% 圧延材におけるオーステナイトとマルテンサイトのナノ硬さを示す。サブゼロ材と比較し、10% 圧延材のオーステナイトのナノ硬さが上昇している。同様に圧延材の加工誘起マルテンサイトは、サブゼロ材の焼入れマルテンサイトと比較しナノ硬さが高くなっており、圧下率の増加とともに加工誘起マルテンサイトのナノ硬さ上昇が確認される。

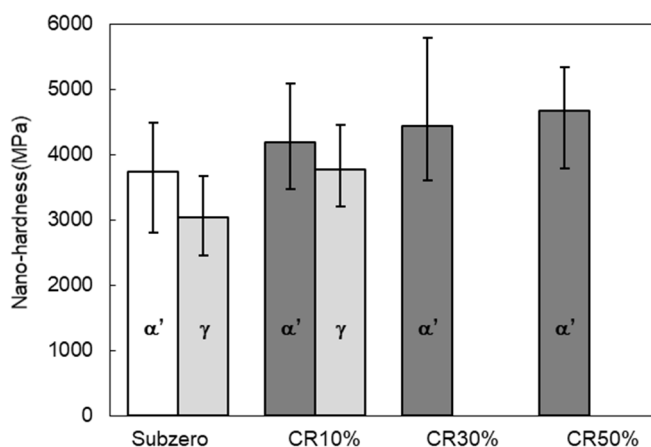


Fig.2 Nano-hardness of  $\gamma$  and  $\alpha'$  phases in subzero-treated and cold-rolled SUS304 steel.

Fig.3 に SUS304 のオーステナイトおよびマルテンサイト、ならびに全面焼入れマルテンサイトとなる 12%Cr-4%Ni 鋼に冷間圧延を施した試料の転位密度を圧下率で整理した結果を示す。オーステナイトの転位密度(●)は圧下率の増加とともに大きく上昇しており、圧延により転位が導入されていることがわかる。また、加工誘起マルテンサイトにおける転位密度(■)は焼入れマルテンサイト(▲)より大きい値を示しており、オーステナイトと同様に圧下率の増加とともにさらに上昇していくことがわかる。これは Fig. 1 の硬さの変化とよく一致している。一方、初めから焼入れマルテンサイトの状態で加工された 12%Cr-4%Ni 鋼(▲)の場合、圧延しても転位密度の上昇は小さい。したがって、加工誘起マルテンサイトにおける転位密度の大きな上昇は、変態前の加工オーステナイトに導入された転位密度に影響されると考えられる。つまり、高転位密度を有する高強度マルテンサイトを得るには、より大きな前加工によって多くの転位を蓄積した  $\gamma$  から変態させることが重要であると結論される。

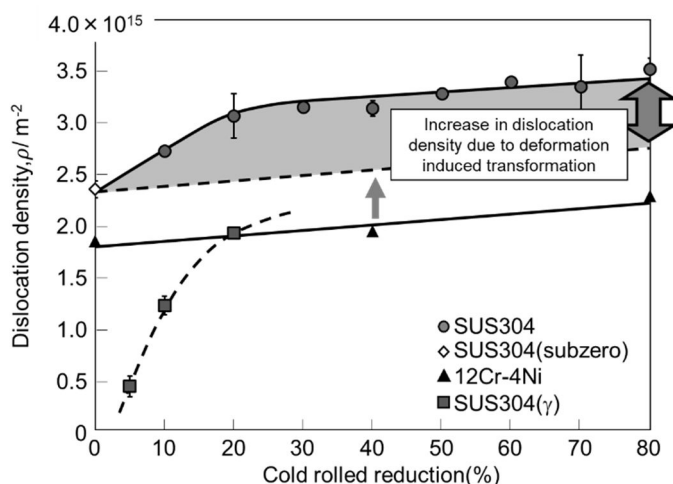


Fig.3 Variation of dislocation density with cold rolling reduction of SUS304 and 12Cr-4Ni steels.

#### 参考文献

- (1) T.Masumura and T.Tsuchiyama: ISIJ International, Vol.61 (2021), pp.617-624.
- (2) 中島孝一, 藤村佳幸, 松林弘泰, 土山聡宏, 高木節雄: 鉄と鋼, Vol.93 (2007), pp.459-465.
- (3) J.Lie, C.Chen, Q.Feng, X.Fang, H.Wang, F.Liu, J.Lu, and D.Raabe: Mater. Sci. Eng. A, Vol.703 (2017), pp.236-243.
- (4) B.B.He, B.Hu, H.W.Yen, G.J.Cheng, Z.K.Wang, H.W.Luo and M.X.Huang: Science, Vol.357 (2017), pp.1029-1032.
- (5) 松村雄太, 小川恭平, 細谷佳弘, 田中慎一, 嶋崎真人, 平田辰美: まてりあ, Vol.57 (2018), pp.20-22.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 高木節雄, 増村拓朗, 土山聡宏	4. 巻 106
2. 論文標題 フェライト鋼におけるヤング率と弾性スティフネスの関係	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 鉄と鋼	6. 最初と最後の頁 867-870
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/tetsutohagane.TETSU-2020-011	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 増村拓朗, 谷口大河, 浦中祥平, 平嶋一誠, 土山聡宏, 丸山直紀, 白幡浩幸, 植森龍治	4. 巻 106
2. 論文標題 電気抵抗測定法によるマルテンサイト中の固溶炭素量の評価	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 鉄と鋼	6. 最初と最後の頁 835-843
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/tetsutohagane.TETSU-2020-050	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 増村拓朗, 浦中祥平, 松田恭輔, 高木節雄, 土山聡宏	4. 巻 106
2. 論文標題 Direct-fitting/modified Williamson-Hall (DF/mWH)法を用いた低炭素焼戻しマルテンサイト鋼の転位密度解析	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 鉄と鋼	6. 最初と最後の頁 826-834
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/tetsutohagane.TETSU-2020-049	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 T.Tsuchiyama, T.Sakamoto, S.Tanaka and T.Masumura	4. 巻 60
2. 論文標題 Control of core-shell type second phase formed via interrupted quenching and intercritical annealing in a medium manganese steel	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 2954-2962
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-164	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 T.Masumura and T.Tsuchiyama	4. 巻 61
2. 論文標題 Effect of carbon and nitrogen on work hardening behavior in metastable austenitic stainless steel	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 617-624
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-535	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 T.Tsuchiyama, Y.Amano, S.Uranaka and T.Masumura	4. 巻 61
2. 論文標題 Effect of initial austenite grain size on microstructure development and mechanical properties in a medium-carbon steel treated with one-step quenching and partitioning	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 537-545
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-543	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 K.Kaneko, T.Maeda, K.Ichino, Y.Kawahara, T.Masumura, T.Tsuchiyama, H.Shirahata and R.Uemori	4. 巻 193
2. 論文標題 Formation of core-shell type structure in duplex martensitic steel	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scripta Materialia	6. 最初と最後の頁 112-116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scriptamat.2020.10.044	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 T.Maeda, S.Okuhata, K.Matsuda, T.Masumura, T.Tsuchiyama, H.Shirahata, Y.Kawamoto, M.Fujioka and R.Uemori	4. 巻 812
2. 論文標題 Toughening mechanism in 5%Mn and 10%Mn martensitic steels treated by thermo-mechanical control process	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Science & Engineering A	6. 最初と最後の頁 141058
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.msea.2021.141058	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 T.Masumura, T.Taniguchi, S.Uranaka, I.Hirashima, T.Tsuchiya, N.Maruyama, H.Shirahata and R.Uemori	4. 巻 61
2. 論文標題 Estimation of solute carbon concentration by electrical resistivity measurement in martensitic steel	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 in press
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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1件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 増村拓朗, 福田孝典, 土山聡宏, 山先祥太, 小貫祐介, 佐藤成男
2. 発表標題 加工誘起マルテンサイトと焼入れマルテンサイトの強度特性および転位組織の比較
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第180回秋季講演大会
4. 発表年 2020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
---------	---------