

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01652

研究課題名（和文）2500MPa超級超高機能過共析鋼の開発：強度・延性発現メカニズム解明

研究課題名（英文）Development of 2500MPa-class ultra-high-performance hypereutectoid steel: elucidation of the origins for strength and ductility

研究代表者

萩原 幸司 (Hagihara, Koji)

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：10346182

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では従来ほとんど注目されていなかった過共析鋼（高炭素鋼）に対し、組織制御により延性を具備させる方策を検討した。さらに開発鋼の特性向上、社会普及に向け必要不可欠な、高強度化・延性発現機構の裏付け、機能発現メカニズムの解明を目指し検討を行った。この研究成果として、2500MPaを超える最大強度と5%以上の塑性伸びを兼ね備える新鉄鋼材料の開発が実現されるとともに、強化を支配する組織学的因子が明らかとなった。これら成果の貢献を含めた形で、2023年春には株式会社コマツ、山陽特殊製鋼との共同開発により、商品名「タフフィット」として、延性を備えた超高強度炭素鋼の実用化にまでつなげることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究にて実験、解析の両観点から、引張、シャルピー衝撃値といった各種力学特性に対し各制御パラメータが及ぼす影響度を明らかにした。具体的に、炭化物の粒径、分布が非常に強い影響を及ぼすとともに、これに加えさらに焼き入れ前の旧オーステナイト粒径が力学特性に強い影響を及ぼすことが示された。実際の組織観察結果と突き合わせることで、この解析結果の妥当性についても確認された。このように本研究の遂行により学問的、実用的両観点から非常に大きな進展を得ることができ、実用化にまでつなげることができた。本鋼材のさらに広範な普及に向け求められるのは使用時の「長期信頼性」であり、引き続きこの点について検討を進める。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a strategy to improve ductility of hypereutectoid steel (high carbon steel) via microstructural control, which has received little attention in the past. Furthermore, we conducted studies aimed at elucidating the mechanisms by which high strength and high ductility are simultaneously achieved, which is essential for disseminating the use of developed new steel to society, and further improving its properties. As a result of this study, we have achieved the development of a new high-carbon steel that has a maximum strength of over 2500 MPa with having a plastic elongation of over 5%. The microstructural factors that control the strength of the developed steel were also revealed. Including the contribution of these results, in the spring of 2023, through the joint development with Komatsu Corporation and Sanyo Special Steel, we could commercialize the ultra-high strength carbon steel with maintaining ductility, named "TOUGHFIT".

研究分野：材料強度学

キーワード：鉄鋼材料 高強度 高延性 高炭素鋼 マルテンサイト

## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、多くの工業製品にて新材料開発や他材料への代替により軽薄短小化が進んでいるものの、旧態依然とした重厚長大のまま利用せざるを得ない部品も多い。例えば輸送機器であれば、大きな負荷や高摩耗の過酷な条件で使用されるパワートレイン部品（ベアリング、バネ、歯車、車軸）等がこれにあたる。この理由は、それらが炭素を多量に含む過共析鋼の製品であることによる。過共析鋼は高硬度、高耐摩耗性という優れた特性を有するが、その一方で“極めて脆い”。このため部品は大きな安全係数をかけて重厚長大に設計・製造せざるを得ない。現在問題となっている地球温暖化の抑制、カーボンニュートラル社会を実現すべく現状の排出CO<sub>2</sub>量をdrasticに削減すべく、構造部材の飛躍的な軽量化を過共析鋼の使用により実現するには、この過共析鋼最大の欠点である“脆さ”を完全克服することが必須である。これには、鉄鋼の常識・宿命的で避けることはできないとされている二律相反則「軟らかい材料は粘く、硬い材料は脆い」を覆す技術とサイエンスが必要である。我々はこのような新材料開発を、大規模な加工を施すことなく、熱処理のみにより達成できる可能性を見出した。すなわち、この技術を用いれば、鋼材原価の大幅なコストアップがなく、かつその特性制御のための熱処理は現状にて多くの会社が保有する製造設備をそのまま利用することが可能であるので、ユーザーは既存製品への適用や新製品の開発に利用することが早急に可能になり、幅広い社会普及が実現できる高い期待がある。

### 2. 研究の目的

上述のように、優れた力学特性を発現する新しい過共析鋼材の開発可能性を見出した現状において、この新鋼材の社会普及、更なる特性改善に向け必要不可欠なのは、ひとつには各種特性の更なる向上であり、もう一つさらに重要なのは、飛躍的な力学特性発現機構についての学術的解明である。新鋼材のさらなる特性向上のため、そして我々の生活に直結する基盤構造材料として新鋼材が社会に広く安心して受け入れられるようにするためには、高強度・高延性の発現機構の裏付け、すなわちメカニズムの理論的解明が必要不可欠である。すなわち、「なぜ強くなるのかよくわからないが、良い特性が出るので使用してください。」では、一般ユーザに開発鋼材を安心して使用、購入してもらうことは期待できない。

さらに、本鋼材の力学特性評価過程において、高強度鋼にて避けることのできない水素脆化に対する評価の重要性も浮かび上がってきた。具体的に、我々が見出した熱処理による、Cr元素の粒界富化を伴う結晶粒微細化組織制御が「水素脆化に対し何か影響を及ぼすのか、耐性を与え得るのか」という点は、大変興味を持たれる。本研究ではこれらの点を明らかにすることを目的に、実験・計算の両観点から検討を行った。

### 3. 研究の方法

本研究では、我々が独自開発したFe-0.7C-2.0Cr-0.25V(mass%)基本合金系をベースとし、主構成元素であるC, Cr, V量を変化させた鋼材、また新たにさらに新たにNb, TiB, Al, Siなどを微量添加した鋼材に着目した。これら鋼材の作製の多くは山陽特殊製鋼の協力のもと実施した。その後、作製した鋼材の熱処理条件(GBA, FM処理温度)を種々に変化させることによる組織変化を調査した。検討はSEM-EBSDによる結晶粒サイズ評価、集合組織評価、マルテンサイト形態評価、TEMによる炭化物評価、ならびにXRDによる転位密度評価などに着目し行った。作製した各鋼材の力学特性評価を、強度、延性については引張試験、破壊靱性については計装化シャルピー試験により行った。またこの試料作製は水中での放電加工により主に行ったが、実験の過程にてこの行程中での水素混入が示唆されたため、一部鋼材に対し、オイル中での放電加工による試料作製も行うことで、水素脆化の影響評価を行った。また調整した鋼材の一部に対し、160～600℃の種々の温度にて焼戻し処理を行い、微細組織変化、その熱的安定性、力学特性に与える影響について評価した。

さらに、このような実験解析により得られた組織学的パラメータ、さらにThermo-Calcにより導出される計算状態図情報と、力学特性(引張強度、延性、破壊靱性等)の相関について、ニューラルネットワーク法に基づく機械学習による検討を行うことで、力学特性を支配する因子の「影響度」の評価を行い、優れた力学特性発現メカニズムに関する考察を行った。

### 4. 研究成果

図1に本研究により組織を最適化したFe-0.7C-2.0Cr-0.25V(mass%)基本合金系が示す典型的な組織を示す。粒径数ミクロンの微細なマルテンサイト母相中に、球状化した微細炭化物が均一に分散されていることが見て取れる。また本鋼材における「典型的な」機能付与熱処理条件を図2に示す。検討により本研究では図2(a)に示す粒界炭化物のみの優先的溶解、粒内炭化物の球状化などを行う「前処理」の後、Crの粒界富化を狙った「粒界改質処理(Grain Boundary

Amelioration: GBA 処理) (図 2(b))」と、高温 (900~950°C) からの焼入れによる Full Martensite (FM) 処理 (図 2(c)) が、優れた力学特性を発現させるための熱処理として有効であり、後述するように鋼材に応じて、各保持温度、時間を調整することが重要であることを明らかにした。

前述のような様々な元素を微量添加、組成制御した計 4-50 種類程度の鋼材に関し、力学特性を室温引張試験、シャルピー試験により評価した結果、各鋼材は上述の GBA, FM といった最終熱処理条件に依存してそれぞれ異なる特性を示すことが見出され、各鋼材に対し最適な熱処理条件がそれぞれ存在することが見出された。最適な条件を選択することで、多くの鋼材で 100 J/cm<sup>2</sup> 以上のシャルピー衝撃値、2000 MPa 以上の最大強度を引き出せることが明らかとなった。ただし、適切な熱処理を選択しないと特性が出ない鋼材種が存在することも同時に見出され、Nb, Ti といった元素添加により新たに形成される炭化物の形態、さらには母相のマルテンサイト組織形態制御が極めて重要である可能性が示唆された。この点についてより詳細、定量的に考察する必要があるが、図 1 に示すように開発鋼材の組織は極めて複雑で、単純な解析で力学特性の支配因子を同定することは困難に思われた。そこで、上述の 4-50 種の鋼材より得られた実験データを機械学習により統合的に解析し、引張、シャルピー衝撃値といった各種力学特性に対し各制御パラメータが及ぼす「影響度」を明らかにした。この結果、母相中の炭素濃度といった従来より知られる因子以外に、炭化物の粒径、分布が非常に強い影響を及ぼしていることが見出された。特に炭化物においては、その粒径によって、個数の増加が力学特性に与える寄与が異なるなどの興味深い示唆が得られた。

しかし一方で、機械学習による解析だけでは不十分な事例も見られた。その一例として、図 3 に、各鋼材におけるシャルピー衝撃値と旧オーステナイト粒径、マルテンサイト粒径との関係を示す。図 3(a) の衝撃値と旧  $\gamma$  粒径の関係に着目すると、 $\gamma$  粒径が比較的大きい約 6  $\mu\text{m}$  以上の場合、結晶粒の微細化に伴い衝撃値は上昇しており、結晶粒微細化による靱性改善効果がみられる。一方、粒径が約 6  $\mu\text{m}$  以下と微細な場合は、それ以上の微細化では衝撃値は変化せず、200 J/cm<sup>2</sup> 前後の高い値で安定している。つまり、高靱性を得るためには最低 6  $\mu\text{m}$  以下の微細な旧  $\gamma$  粒が必要であることが見て取れる。一方、図 3(b) に示す衝撃値と焼き戻しマルテンサイト粒径の関係には相関がみられず、約 200 J/cm<sup>2</sup> の高衝撃値グループと約 20 J/cm<sup>2</sup> の低衝撃値グループに大きく分けられることが示唆された。このような旧オーステナイト粒径の重要性は機械学習解析結果からは明瞭に得ることができなかった。これは開発鋼材の高度な複雑さに加え、互いの因子間でも相互作用があるため、今回の 4-50 種という実験点数ですら、正確な解析結果を得るには十分でなかった可能性がある。今後も本研究のように実験と解析・観察を常に並行して実施することが重要であると改めて感じられた。

また Fe-0.7C-2.0Cr-0.25V (mass%) 基本合金について、引張変形挙動のひずみ速度依存性について詳細な評価を行った。この結果、ひずみ速度を増加させるにつれ破断伸びが増加する傾向が見出された。この要因として、引張試験中における水素の拡散が伸びに影響を及ぼしている可能性が示唆され、本合金の伸びが水素脆化挙動の影響を受けていることが示唆された。ただしここで注目すべきことに、この水素脆化挙動は熱処理条件、合金組成 (C, V, Cr) により極めて幅広い変化を示すことが見出された。すなわち、適切な組成、組織制御により、水素脆化挙動を高いレベルで制御できる可能性があることが初めて明らかとなった。

以上の内容を含めた本プロジェクト三年間の研究成果として、実際に 2500MPa を超える最大強度と 5%以上の塑性伸びを兼ね備える新鉄鋼材料の開発が実現された。このような実験結果が一部反映された形で、実際に 2023 年春には、株式会社小松製作所、山陽特殊製鋼との共同開発により、商品名「タフィット」として、延性を備えた超高強度炭素鋼の実用化 (@山陽特殊製鋼) にまでつなげることができた。以上のように、本研究の遂行により学問的、実用的両観点から非常に大きな進展を得ることができた。

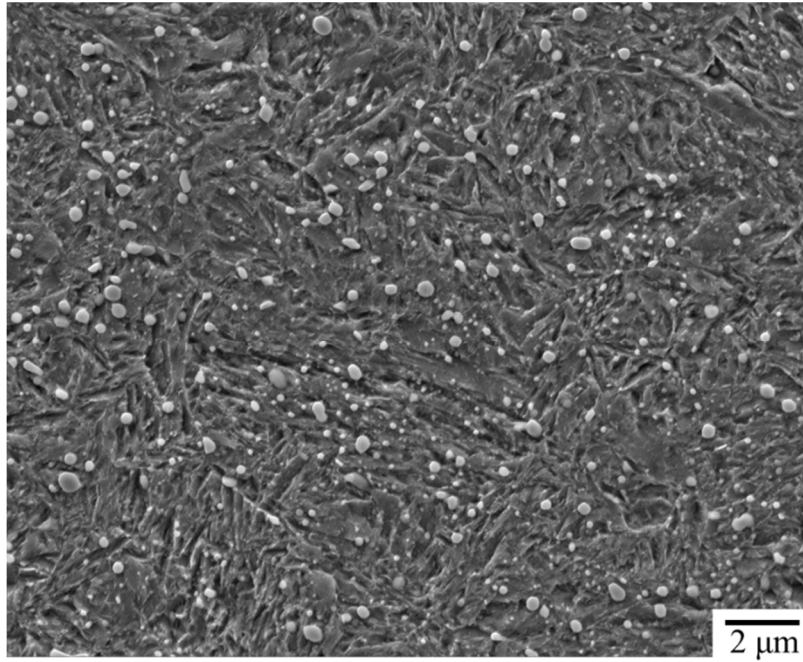


图 1 Typical microstructure evolved in the developed high-carbon steel after GBA treatment.

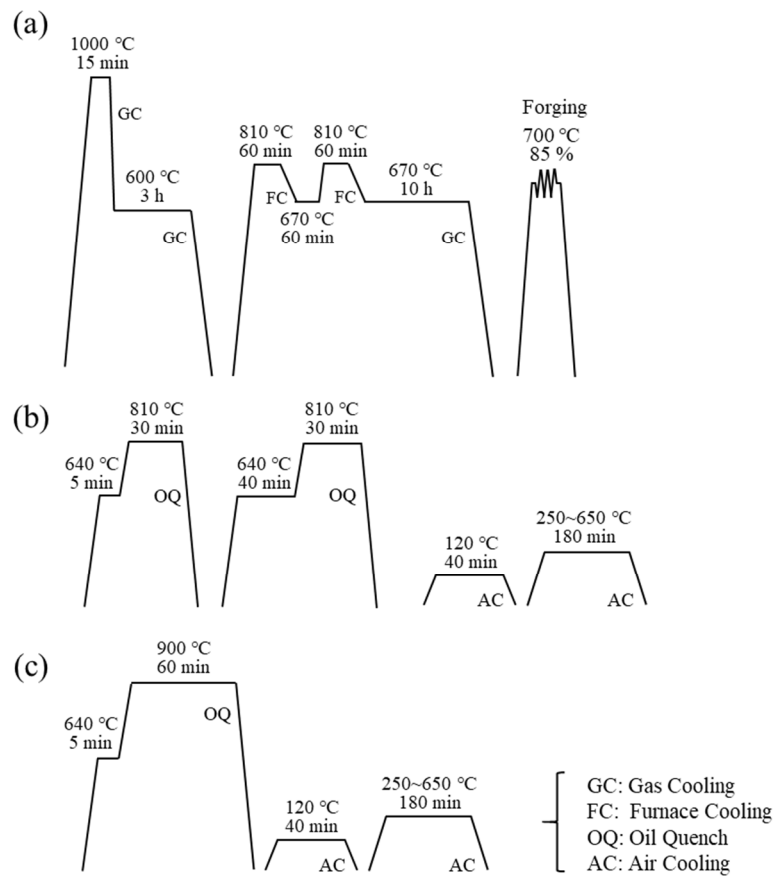


图 2 Typical developed heat-treatment processes for novel high-carbon steels. (a) Pre-heat treatment, (b) GBA treatment, and (c) FM treatment.

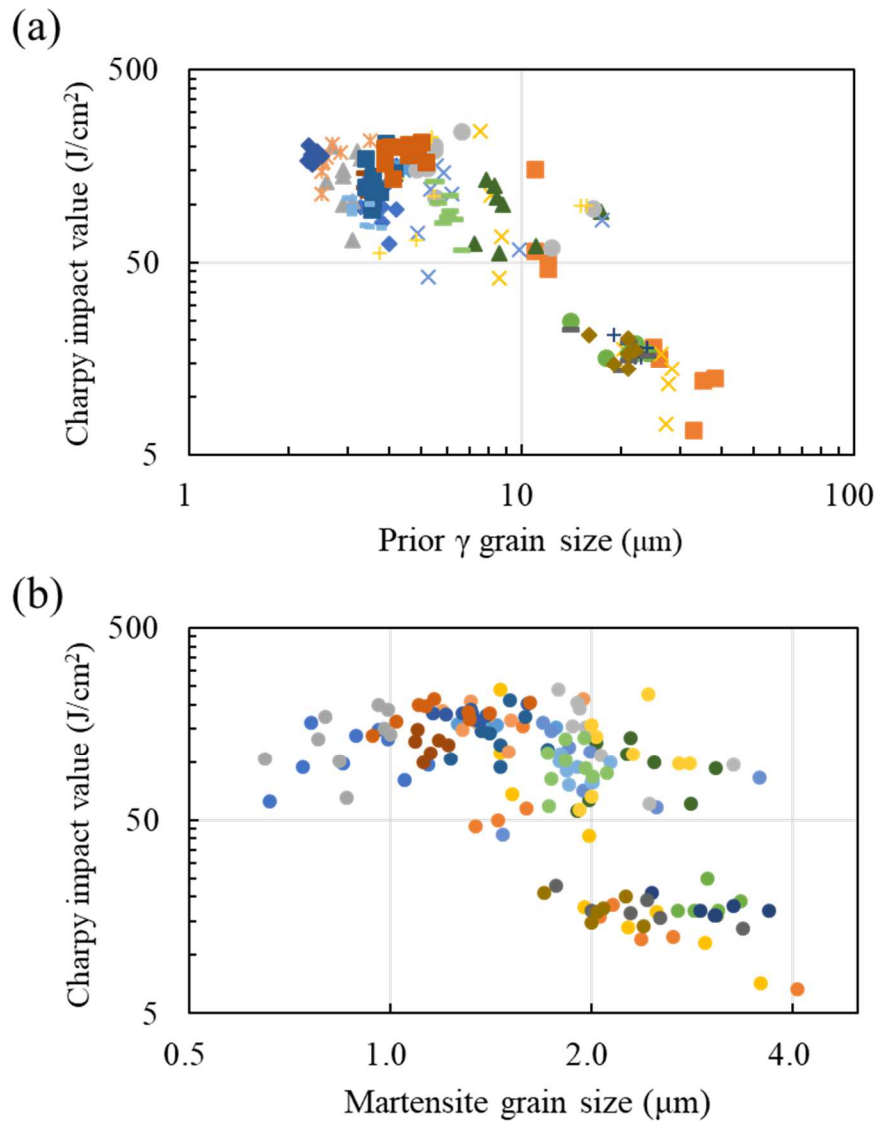


图 3 Relationships between Charpy impact values and (a) prior  $\gamma$  grain size, and (b) martensite grain size in various high-carbon steels.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 Tokunaga Toko, Yamamoto Koji, Minamino Yoritoshi, Takayama Takemori, Sugimoto Toshiyuki, Hagihara Koji	4. 巻 64
2. 論文標題 Effects of Cementite Particles on Impact Properties in High-hardness Hypereutectoid Steels	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 389-400
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2023-164	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 Tokunaga Toko, Minamino Yoritoshi, Yamamoto Koji, Sugimoto Toshiyuki, Hagihara Koji	4. 巻 64
2. 論文標題 Effect of rolling and alloying elements on the impact properties of hypereutectoid steels	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 1078-1088
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2023-453	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 Yamamoto Koji, Takayama Takemori, Minamino Yoritoshi, Koizumi Yuichiro, Tokunaga Toko, Hagihara Koji	4. 巻 205
2. 論文標題 Modification of grain boundary microstructure by controlling dissolution behavior of particles in Cr-containing hypereutectoid steel	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Materials Characterization	6. 最初と最後の頁 113241
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.matchar.2023.113241	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 南埜宜俊, 萩原幸司, 杉本隼之, 山本幸治	4. 巻 62
2. 論文標題 鉄鋼部品の設計・製造・利用を革新する高硬度高強度高靱性過共析鋼の開発と製品化への展開	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 熱処理	6. 最初と最後の頁 1-9
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10件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 原田 直哉, 徳永 透子, 萩原 幸司, 山本 幸治, 杉本 隼之, 南埜 宜俊
2. 発表標題 超高強度鉄鋼材料の炭化物溶解挙動に対するCr濃度の影響
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 2024年春季（第187回）講演大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 原田 直哉, 徳永 透子, 萩原 幸司, 山本 幸治, 杉本 隼之, 南埜 宜俊
2. 発表標題 超高強度鉄鋼材料の熱処理に伴う組織形成過程の解明
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 2023年第186回秋季講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中北 颯, 徳永透子, 萩原幸司, 山本 幸治, 杉本 隼之, 南埜 宜俊
2. 発表標題 高硬度高靱性過共析鋼の熱処理条件と力学特性の相関
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 2023年第186回秋季講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中北 颯, 徳永 透子, 萩原 幸司, 山本 幸治, 杉本 隼之, 南埜 宜俊
2. 発表標題 超高硬度過共析鋼の衝撃特性に及ぼす熱処理の影響
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

1. 発表者名 原田 直哉, 徳永 透子, 萩原 幸司, 山本 幸治, 杉本 隼之, 南埜 宜俊
2. 発表標題 超高強度過共析鋼の熱処理における組織形成過程の検討
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

1. 発表者名 徳永透子, 萩原幸司, 山本幸治, 杉本隼之, 南埜宜俊
2. 発表標題 高強度過共析鋼の微細組織と機械的性質との相関
3. 学会等名 2022年日本鉄鋼協会 秋季(第184回)講演大会 (@福岡工業大学)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中北 颯, 徳永 透子, 山本 幸治, 杉本 隼之, 南埜 宜俊, 萩原 幸司
2. 発表標題 高硬度マルテンサイト鋼の微細組織と力学特性
3. 学会等名 日本金属学会・日本鉄鋼協会東海支部 学生研究発表会 (材料フォーラムTOKAI @Web online)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中北 颯, 萩原幸司, 徳永透子, 山本幸治, 杉本隼之, 南埜宜俊
2. 発表標題 高硬度高靱性過共析鋼の焼戻し温度と衝撃特性の関係
3. 学会等名 日本鉄鋼協会2023年度春季講演大会 (@東京大学 駒場キャンパス)
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 秋原幸司, 中野貴由
2. 発表標題 応力誘起マルテンサイト変態を含む変形モード変化が Ti合金の力学特性に及ぼす影響
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 秋季講演大会併催シンポジウム 「チタン合金の相変態に関する研究動向」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 秋原幸司
2. 発表標題 材料強靱化原理の新展開 - 新規高機能性構造材料開発への挑戦 -
3. 学会等名 2021年度 本多光太郎・湯川記念合同講演会 [日本金属学会・日本鉄鋼協会東海支部 主催] (招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>名古屋工業大学 材料組織・塑性制御工学研究室 (秋原研究室) HP 共同研究開発された新鋼材の実用化(プレスリリース) <a href="https://www.sanyo-steel.co.jp/system/upload/news/20230330_news.pdf">https://www.sanyo-steel.co.jp/system/upload/news/20230330_news.pdf</a> 山陽特殊製鋼が新素材開発 高炭素鋼 硬度と靱性両立 <a href="https://news.yahoo.co.jp/articles/5beb5f91553ca51804e027fc37dd583d957eb288">https://news.yahoo.co.jp/articles/5beb5f91553ca51804e027fc37dd583d957eb288</a></p> <p>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 での発表において、優秀ポスター賞受賞を受賞 原田 直哉, 徳永 透子, 秋原 幸司, 山本 幸治, 杉本 隼之, 南埜 宜俊 超高強度過共析鋼の熱処理における組織形成過程の検討</p> <p>名古屋工業大学 材料組織・塑性制御工学研究室 (秋原研究室) HP <a href="http://hagihara.web.nitech.ac.jp/">http://hagihara.web.nitech.ac.jp/</a></p>
--

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
研究協力者	山本 幸治  (Yamakoto Koji)	コマツ	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	杉本 隼之  (Sugimoto Toshiyuki)	山陽特殊製鋼	
研究協力者	徳永 透子  (Tokunaga Toko)	名古屋工業大学・助教	

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