

油焼入れによる変態塑性係数の同定と 熱処理変形の予測精度向上

Determination of Transformation Plasticity Coefficient by Oil Quenching and Improvement of Prediction Accuracy in Heat Treatment Distortion

渡邊 啓介*

WATANABE Keisuke

Synopsis: The dimensional accuracy of power train parts depends on the distortion caused by oil quenching. The parts are manufactured from steel for machine structural use, and the steel generally transforms from austenite to bainite and martensite during the quenching. For accurately predicting the distortion, it is important to know the accurate transformation plasticity coefficients of both bainite and martensite transformations. Transformation plasticity is a phenomenon caused by stress due to transformation expansion, resulting in large plastic deformation of the steel. In this paper, a method was proposed to determine both the coefficients by fitting the distortions in numerical analyses of the quenching process to oil quenching experiments. In this method, two steel sheets with different thicknesses were used. By using this method for a thin sheet of Cr-Mo steel (consisting of martensite), the coefficient of martensite was determined as 21x10⁻⁵ MPa⁻¹. Thereafter, the coefficient of bainite was determined as 11x10⁻⁵ MPa⁻¹ by using a thick sheet (consisting of bainite and martensite). An experiment using a heat treatment oil with different cooling capacity was conducted to check the accuracy of the obtained coefficients. The predicted deflection using the obtained coefficients was in good agreement with the experimental result. Thus, it was demonstrated that the proposed method improves the prediction accuracy of the distortion caused by quenching.

Keywords: heat treatment; quenching; transformation plasticity coefficient; heat treatment analysis; heat treatment distortion.

1. はじめに

近年、地球温暖化を背景として、脱炭素に向けた動きが 世界的に加速している¹⁾。国内においては、2050年まで のカーボンニュートラル実現が社会的な課題²⁻⁴⁾であり、 製造業においても脱炭素社会の達成に向けて、エコプロセ ス、エコプロダクトへのニーズは益々高まっている⁵⁻⁷⁾。

その中で自動車においては、運転時の CO₂ 排出量が少な い BEV (Battery Electric Vehicle) や HEV (Hybrid Electric Vehicle) 等の次世代自動車が増加しており⁸⁻¹⁰⁾、原動 機の電動化が進んでいる¹¹⁻¹³⁾。電動化によりモーター走行 となることで車内の静粛性が向上する一方で、パワートレ インから発生するノイズが相対的に目立つようになってい る¹⁴⁾。このノイズの主な原因として、パワートレインを構 成するシャフトやギヤのかみ合い伝達誤差があり¹⁵⁻¹⁷⁾、こ の誤差を低減するために、それらの部品には高い寸法精度 が求められている¹⁸⁻²⁰⁾。それらの部品の多くは、機械構 造用合金鋼が素材として用いられており、塑性加工や機械 加工の後に熱処理を経て製造される^{21,22)}。熱処理におい ては、表層の硬化と疲労強度向上を目的として、浸炭後に 油焼入れが実施される^{23,24)}とともに、靭性向上を目的と して焼入れ後に焼もどしが実施される^{25,26)}。これらの熱 処理時に生じる変形が寸法精度の低下を招く²⁷⁾ことから、 厳格な寸法精度が必要な場合には、熱処理後に仕上げ加工 が実施されることもある²⁸⁾。しかしながら、仕上げ加工 は生産リードタイムの長期化や製造コスト増大の原因とな るため、その省略が望まれている。そのための方策として、 熱処理変形を見込んで熱処理前形状を決定することが考え られるが、その実現のためには熱処理変形を正確に予測す る必要がある。

^{*} 技術企画管理部 軸受・構造用鋼グループ 博士(工学)

熱処理変形の予測技術の一つとして、有限要素法(Finite Element Method: FEM) に基づく数値解析を用いた熱 処理シミュレーションがある。熱処理シミュレーション は1970年代から試みられており29,30)、1980年代には Inoue ら³¹⁾により温度、組織、応力の連成関係を考慮し た解析手法が提案された。この手法においては、鋼材内の 温度勾配で生じる熱応力・熱ひずみや、変態の温度依存性、 変態で生じる潜熱および変態応力・変態ひずみが考慮され る。さらに、変態中に応力が作用することで生じる変態塑 性ひずみについても考慮することができる。変態塑性とは、 作用する応力が温度と金属組織に応じて定まる降伏応力未 満であっても、相変態の進行中においては新相の変態膨張 で生じる応力がその周囲の未変態の母相に加わるために、 母相の変形抵抗が見かけ上低下して、塑性変形が生じやす くなる現象である。変態塑性は、熱処理後の鋼材の形状に 大きな影響を与えることが知られており³²⁾、熱処理シミュ レーションにより焼入れ変形を精度よく予測するために は、対象とする鋼材の変態塑性挙動を正しく知る必要があ る。

2. 変態塑性に関する従来の研究

変態塑性は、Sauveur³³⁾によって温度分布のある角棒 にねじり変形を与えた際に、変態点付近の部位で大きく塑 性を示す現象として発見された。Greenwood-Johnson³⁴⁾ は、ウラニウムにおける単軸応力下での変態中のひずみの 測定結果から、相変態開始から終了までに生じる変態塑性 ひずみ量として次式を提案した。

$$\varepsilon^{\rm tp} = \frac{5}{6Y} \frac{\Delta V}{V} \sigma \tag{1.1}$$

ここで、Yは母相か新相の降伏応力の小さい方の値、 $\Delta V/V$ は母相から新相への変態による体積ひずみ、 σ は負荷応力である。さらに、母相から新相への変態率を $\xi (0 \leq \xi \leq 1)$ とすると、関数 $\varphi(\xi)$ を導入し ξ に至るまで の変態塑性ひずみとして次式を仮定する。

$$\varepsilon^{\rm tp}(\xi) = K\varphi(\xi)\sigma \tag{1.2}$$

ここで、Kは変態塑性係数である。変態塑性は塑性変形で あるため静水圧は影響しないものと仮定すると、式(1.2) は偏差応力を用いて次式のように表すことができる。

$$\varepsilon^{\rm tp} = \frac{3}{2} K \varphi(\xi) S \tag{1.3}$$

また、式(1.3)を速度系で表すと次式のように表される。

$$\dot{\varepsilon}^{\rm tp} = \frac{3}{2} K \varphi'(\xi) \dot{\xi} S \tag{1.4}$$

さらに、式(1.4)に Desalosの提案式³⁵⁾ $\varphi(\xi) = \xi(2 - \xi)$ を用いることにより、次式が得られる。

$$\dot{\varepsilon}^{\text{tp}} = 3K(1-\xi)\dot{\xi}S$$
 (1.5)

式(1.5)と同様に、Leblondのモデルも広く用いられている。Leblondら³⁶⁾は、母相から球状の新相が変態 ひずみを伴って生成した際の、母相における弾塑性変形について理論的に式を導出し、有限要素解析結果と比較して 妥当性を確認した結果、次式を提案した。

$$\dot{\varepsilon}^{\text{tp}} = \begin{cases} 0 & \text{if } \xi \le 0.03 \\ \left(-\frac{\Delta V/V}{Y} \right) i \left(\frac{\sigma_{\text{eq}}}{\sigma_{\text{u}}} \right) (\ln \xi) \dot{\xi} S & \text{if } \xi > 0.03 \end{cases}$$
(1.6)

 σ_{eq} は相当応力、 σ_{u} は母相と新相の混合体の降伏応力を示している。また、式(1.6)中の関数iは、変態ひずみ速度の負荷応力に対する非線形性を表すものであり、有限要素法の数値解析結果から次式のように与えられる。

$$i\left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_{u}}\right) = \begin{cases} 1 & \text{if } \frac{\sigma_{eq}}{\sigma_{u}} \le \frac{1}{2} \\ 1 + 3.5\left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_{u}} - \frac{1}{2}\right) & \text{if } \frac{\sigma_{eq}}{\sigma_{u}} > \frac{1}{2} \end{cases}$$
(1.7)

Denis³⁷⁾ や Miyao ら³⁸⁾ により、式(1.5)を用いて熱処 理シミュレーションに変態塑性ひずみ速度が導入されたこ とにより、変態塑性の影響を考慮することが可能となった。 式(1.5)における変態塑性係数は、オーステナイト 化した試験片に応力を負荷しつつ相変態させる実験を行 い、試験片の伸びから測定された変態塑性ひずみと負荷応 力の線形回帰式の傾きから同定される。この方法を用いて、 Okamura ら³⁹⁾ は炭素量を変化させた Cr 鋼と Cr-Mo 鋼の

引張試験により、パーライト変態およびベイナイト変態の 変態塑性係数は変態による体積ひずみに依存することを報 告している。Hikidaら⁴⁰⁾は、炭素鋼の引張試験、圧縮試験、 ねじり試験を行った結果、変態塑性係数が応力の負荷方向 に依存することを報告している。また、Nagakiら⁴¹⁾によ り上述の方法よりも変態塑性係数を簡便に同定することを 目的として、平板の3点曲げ試験による方法が提案され ている。一方、機械構造用合金鋼のような低炭素低合金鋼 においては、空気放冷やガス冷却程度の冷却速度では拡散 変態が生じてしまうため、マルテンサイト変態の変態塑性 係数を同定することは困難であった。そこで、Otsukaら ⁴²⁾により中空材の4点曲げ試験を用いた方法が提案され ている。この方法では、試験片内部に水を流すことにより 高い冷却速度を得ることができる。

3. 本研究の目的

前述のように、これまで様々な方法により変態塑性係数 の同定が行われてきたが、いずれの方法においても、変態 塑性ひずみを正確に測定するために、塑性ひずみが生じな いオーステナイト降伏応力未満の低い負荷応力にて試験を 行う必要がある。その一方で、塑性変形を伴う機械構造用 部品の実際の焼入れにおいては、これらの方法の測定範 囲よりも高い応力が鋼材に作用すると考えられる。また、 Nakajima ら⁴³⁾は、Mn-Cr-Mo 鋼のベイナイト変態の変 態塑性ひずみを測定し、引張試験の負荷応力が 50MPa 超 えると線形関係から逸脱して変態塑性ひずみが増加するこ とを報告している。このことから、従来法で同定した変態 塑性係数を熱処理シミュレーションに用いた場合、変態塑 性の影響が過小評価される可能性がある。また、機械構造 用合金鋼の油焼入れ後の金属組織は、マルテンサイトとベ イナイトであることから、焼入れ変形を精度よく予測する ためには、両変態の変態塑性係数を正しく知る必要がある。 そこで、機械構造用部品の熱処理変形の予測精度向上を目 的として、マルテンサイト変態とベイナイト変態の変態塑 性係数の同定方法を検討した。なお、本研究で扱うベイナ イトは連続冷却による不完全焼入れ組織である上部ベイナ イトであり、フェライト、セメンタイト、マルテンサイト、 残留オーステナイトの複合組織⁴⁴⁾であるが、ここでは便 宜上、ベイナイト相として取り扱うこととする。

4. 変態塑性係数の同定方法

本方法においては、油焼入れ実験と数値解析により、マ ルテンサイト変態とベイナイト変態の変態塑性係数を同定 する。試験片には、同じ断面積の丸棒などに比べて曲げ剛 性が小さく、焼入れによる変形量が大きい形状として、平 板を採用する。また、2種類の板厚の試験片を用いること により、焼入れにより薄い板にはマルテンサイト変態、厚 い板にはベイナイト変態とマルテンサイト変態を生じさせ る。

まず、平板の焼入れを行い、その際の冷却曲線を熱電対 により測定する。ここで、平板を水平に固定することにより、 蒸気泡の滞留により下面が緩冷却となり上下方向に温度勾 配が生じる。次に、測定された冷却曲線から逆解析法⁴⁵⁾ により、熱伝達係数を同定する。そして、この熱伝達係数 を境界条件に用いて、薄い板の反りの予測値が実測値に合 致するマルテンサイト変態の変態塑性係数(K_M)を同定 する。さらに、このK_Mを用いて、厚い板の反りの予測値 が実測値に合致するベイナイト変態の変態塑性係数(K_B) を同定する。以上が同定方法の概要であり、実施した実験 および解析方法の詳細は以降に述べる。

4.1 実験方法

供試材には、Table 1 に示す化学組成の Cr-Mo 鋼(JIS SCM420 相当)を用いた。試験片は板厚 5mm と 10mm の平板(幅と長さはそれぞれ、20mm、100mm)とし、 試験片には K 型熱電対(直径 1.0mm)を挿入するために、 直径 1.1mm のドリル穴加工を行った。

Tabla 1	Chomical	compositions	of	cnocimon	$(macc_0/)$
Table I	Chemical	compositions	UI	specimen.	(111/2020)

С	Si	Mn	Р	S	Ni	Cr	Мо
0.23	0.29	0.81	0.01	0.01	0.07	1.08	0.15

実験には Fig. 1 に示す装置⁴⁶⁾ を用いた。この装置は制 御盤、加熱炉、油槽からなり、測定対象となる部品を支持 棒先端に取付け、加熱炉にて所定の温度に昇温後、支持棒 を下降させ加熱炉下部の油槽内で油焼入れを行うことがで きる。また、部品に熱電対を取付けることにより、焼入れ 中の冷却曲線を測定することもできる。



Fig. 1 (a) Overview and (b) schematic diagram of test equipment.

支持棒先端に取り付けた金網状の治具に試験片を水平 に固定し、不活性ガスのアルゴンと水素の混合ガスで満 たした加熱炉内で1123Kまで加熱し30min保持した後、 鉛直方向下向きに熱処理油中に浸漬した。熱処理油には、 コールドクエンチオイル(ハイスピードクエンチオイル C-2000Y、日本グリース(株))とセミホットクエンチオ イル(ホットクエンチオイルNo.300、日本グリース(株)) を用い、油温はそれぞれ353K、383Kとした。なお、次 章で述べる通り、前者は本方法によって変態塑性係数を同 定するため、後者は本方法の有効性を検証するために使用 した。試験片の冷却が完了した後に、非接触式三次元形状 測定機⁴⁷⁾を用いて、板幅中央断面の形状を測定した。そ の測定値から、上面の中央部と端部の鉛直方向座標の差を 反り量として求めた。

4.2 数值解析方法

本研究では、市販の数値解析ソフトウェア DE-FORM[™]-HTを用いて焼入れ変形を予測した。平板の幅中 央断面および長手中央断面を対称として 1/4 部分をモデ ル化し、平板中心に相当する位置の節点について板厚方向 変位を拘束した。メッシュ分割は、表面から 1.00mm 深 さまで幅 1.00mm、長さ 1.00mm、厚さ 0.25mm、それ 以外は幅 1.00mm、長さ 1.00mm、厚さ 0.50mm の六 面体とした。解析に用いた材料特性は、推定式⁴⁸⁻⁵⁰⁾や実 測値⁵¹⁾、市販の材料物性値計算ソフトウェア JMatPro の 計算値を用いた。本報において詳細は割愛するが、熱伝達 係数は、モデル表面を複数の領域に分割し、それぞれの領 域について逆解析法により同定した。なお、相変態を伴わ ないオーステナイト系ステンレス鋼の平板の焼入れ実験も 行い、この平板の熱応力で生じた変形の予測精度を検証す ることにより、同係数の与え方が妥当であることを確認し た。

5. 結果および考察

5.1 マルテンサイト変態の変態塑性係数の同定と検証

板厚 5mm の試験片を用いた実験結果から、K_Mの同定 と検証を行った。また、焼入れ後の試験片の組織観察と硬 さ測定を行った結果、実験にコールドクエンチオイルとセ ミホットクエンチオイルを用いた何れの場合においても、 ほぼマルテンサイト単相であった。

5.1.1 マルテンサイト変態の変態塑性係数の同定

コールドクエンチオイルを用いた実験において、種々の K_{M} を数値解析に与えて焼入れ後の反りを予測した結果を Fig. 2 に示す。Fig. 2 から予測値と実測値の誤差を求め、 この誤差と K_{M} について Fig. 3の関係を得た。Fig. 3より、 最小二乗法を用いて予測値が実測値と合致する K_{M} は 21 × 10⁻⁵ MPa⁻¹ と同定された。

ー方、式(1.6)の相当応力と変態塑性ひずみが線形 となる領域において、マルテンサイト変態開始温度付近 (673K)における各種材料特性から、従来法で同定した $K_{\rm M}$ に相当する係数は5×10⁻⁵MPa⁻¹と見積もられた。こ の係数に比べて本方法で同定した $K_{\rm M}$ (21×10⁻⁵MPa⁻¹)



Fig. 2 Experimental and FEM results of deflection of the thin sheet after quenching in cold quenching oil. (*K*: transformation plasticity coefficient (MPa⁻¹))



Fig. 3 Effect of transformation plasticity coefficient of martensite transformation on the difference between experimental and FEM results of deflection of the thin sheet after quenching in cold quenching oil.

は高く、この理由として、本方法の K_M は、変態塑性ひず みが応力との線形関係から逸脱して大きくなる応力の範囲 における平均的な傾きに相当することが考えられる。

5.1.2 同定したマルテンサイト変態の変態塑性係数の 検証

前項の実験に対して、熱処理油をセミホットクエンチオ イルに変更した実験を行い、試験片の反りを予測した結果 を Fig. 4 に示す。従来法で同定した $K_{\rm M}$ に相当する5× 10^{-5} MPa⁻¹を用いた場合、予測値は下向きの 7µm の反り であり実測値(下向きの 66µm の反り)に対し小さかった。 一方、本方法の $K_{\rm M}$ (21 × 10^{-5} MPa⁻¹)を用いた場合、 予測値は下向きの 62µm の反りであり実測値とよく一致 した。このことより、マルテンサイト変態を伴う焼入れ変 形を精度よく予測できたことから、本方法で同定した $K_{\rm M}$ は妥当であると考えられる。



Fig. 4 Experimental and FEM results of deflection of the thin sheet after quenching in semi-hot quenching oil. (*K*: transformation plasticity coefficient (MPa⁻¹))

5.2 ベイナイト変態の変態塑性係数の同定と検証

板厚 10mm の試験片を用いた実験結果から、K_Bの同定 と検証を行った。また、焼入れ後の試験片の組織観察と硬 さ測定を行った結果、実験にコールドクエンチオイルとセ ミホットクエンチオイルを用いた何れの場合においても、 ベイナイトとマルテンサイトの複相組織であり、ベイナイ ト分率はそれぞれ、前者は 20% 程度、後者は 40% 程度 であった。

5.2.1 ベイナイト変態の変態塑性係数の同定

コールドクエンチオイルを用いた実験において、種々の $K_{\rm B}$ を数値解析に与えて焼入れ後の反りを予測した結果を Fig. 5に示す。ここで、 $K_{\rm M}$ は5.1.1項で同定した係数(21 × 10⁻⁵MPa⁻¹)を用いた。Fig. 5から予測値と実測値の 誤差を求め、この誤差と $K_{\rm B}$ について Fig. 6の関係を得た。 Fig. 6より、最小二乗法を用いて予測値が実測値と合致 する $K_{\rm B}$ は11×10⁻⁵MPa⁻¹と同定された。



Fig. 5 Experimental and FEM results of deflection of the thick sheet after quenching in cold quenching oil. (*K*: transformation plasticity coefficient (MPa⁻¹))



Fig. 6 Effect of transformation plasticity coefficient of bainite transformation on the difference between experimental and FEM results of deflection of the thick sheet after quenching in cold quenching oil.

式(1.6)の相当応力と変態塑性ひずみが線形となる 領域において、ベイナイト変態のノーズ付近(773K)に おける各種材料特性から、従来法で同定した K_B に相当す る係数は3×10⁻⁵MPa⁻¹と見積もられた。この係数に比 べて本方法で同定した K_B (11×10⁻⁵MPa⁻¹)は高く、こ の理由として、本方法の K_B は、変態塑性ひずみが応力と の線形関係から逸脱して大きくなる応力の範囲における平 均的な傾きに相当することが考えられる。

5.2.2 同定したベイナイト変態の変態塑性係数の検証

前項の実験に対して、熱処理油をセミホットクエンチオ イルに変更した実験を行い、試験片の反りを予測した結 果を Fig. 7 に示す。ここで、 $K_{\rm M}$ は前項と同様に 5. 1. 1 項で同定した係数(21 × 10⁻⁵MPa⁻¹)を用いた。従来法 で同定した $K_{\rm B}$ に相当する 3 × 10⁻⁵MPa⁻¹ を用いた場合、 予測値は下向きの 16µm の反りであり、実測値(上向き の 22µm の反り)と反りの向きが異なった。一方、本方 法の $K_{\rm B}$ (11 × 10⁻⁵MPa⁻¹)を用いた場合、予測値は上向 きの 24µm の反りであり、実測値とよく一致した。

以上のことより、本方法で同定した K_B および K_M を用 いることにより、両変態を伴う焼入れ変形を高精度に予測 することが可能となった。



Fig. 7 Experimental and FEM results of deflection of the thick sheet after quenching in semi-hot quenching oil. (*K*: transformation plasticity coefficient (MPa⁻¹))

6. まとめ

本報では、機械構造用部品の焼入れ変形の予測精度向上 を目的として、2種類の板厚の平板を用いた油焼入れ実験 と熱処理シミュレーションを併用することにより、ベイナ イト変態とマルテンサイト変態の変態塑性係数を同定する 新たな方法を提案した。その有効性も検証した結果、以下 の知見を得た。

- (1)提案した方法をCr-Mo鋼(JIS SCM420 相当)に 適用した結果、マルテンサイト変態の変態塑性係数は 21 × 10⁻⁵MPa⁻¹、ベイナイト変態の変態塑性係数は 11 × 10⁻⁵MPa⁻¹と同定された。何れも、従来法で同 定される値よりも高いが、これは、本方法で同定した 係数が、変態塑性ひずみが応力との線形関係から逸脱 して大きくなる応力の範囲での平均的な傾きに相当す ることに起因すると考えられる。
- (2)(1)の変態塑性係数を用いて、焼入れによりベイナ イト変態とマルテンサイト変態を伴う平板の反りを予 測した結果、反り量の実測値が22µmに対して、予 測値は24µmとよく一致した。

以上の通り、提案した方法で同定した変態塑性係数を用 いることで、平板の焼入れ変形を高精度に予測できること が示されたことから、本研究は機械構造用部品の焼入れ変 形予測精度向上に寄与できるものと考えられる。

謝辞

本論文は、筆者が大阪大学大学院工学研究科に社会人ド クターとして在籍中に、宇都宮裕教授、岡村一男特任教授、 松本良准教授のご指導のもとで作成した学位論文とその他 論文^{52,53)}から抜粋し、若干の手を加えてまとめ直したも のです。改めまして、同教授のご指導に対し深く感謝いた します。

参考文献

- METI Agency for Natural Resources and energy, https://www.enecho.meti.go.jp/about/ whitepaper/2022/html/1-2-1.html
- M. Toyoda: J. Atom. Ener. Soc. Jpn., 62 (2020), 689 (in Japanese).
- Y. Sato, T. Ikeda, H. Ueda, R. Kawanishi and K. Oyama: *J. Jpn. Soc. Mater. Cycles Waste Manag.*, 33 (2022), 62 (in Japanese).
- 4) K. Yamada: J. Mater. Cycles and Waste Management, 33 (2022), 7 (in Japanese).
- 5) K. Hagiwara, T. Tokunaga, K. Yamamoto, T. Sugimoto and Y. Minamino: *Sanyo Tech. Rev.*, 31 (2024), 3 (in Japanese).
- R. Nagoshi, K. Watanabe and M. Nakasaki: Sanyo Tech. Rev., 31 (2024), 48 (in Japanese).
- 7) T. Fukushima and T. Hamano: *Sanyo Tech. Rev.*, 31 (2024), 75 (in Japanese).

- Y. Daisho: J. JFS, 82 (2010), 402 (in Japanese).
- 9) H. Kako: *Mitsubishi Denki Giho*, 88 (2014), 90 (in Japanese).
- 10) K. Takeuchi: *J. IEIE Jpn*, 41 (2021), 271 (in Japanese).
- K. Fujimura, R. Hirayama, K. Wajima and S. Yamazaki: *Nippon Seitetsu Giho*, 421 (2019), 167 (in Japanese).
- 12) S. Yamamoto: *SEI Tech. Rev.*, 194 (2019), 29 (in Japanese).
- S. Ota, M. Yamauchi, A. Mizoguchi, K. Yoshida and Y. Tamura: *SEI Tech. Rev.*, 194 (2019), 41 (in Japanese).
- K. Shibahashi, T. Kanazawa, S. Tanabe and T. Toi: *Trans. Soc. Automot. Eng. Jpn.*, 54 (2023), 278 (in Japanese).
- K. Yoshikawa, H. Tani, I. Tarutani, A. Suzuki, H. Maki and Y. Ueda: *Proc. JSME (C)*, 63 (1997), 369 (in Japanese).
- K. Morikawa, N. Maruyama, N. Hitomi and T. Enomoto: *Proc. JSME (C)*, 64 (1998), 253 (in Japanese).
- K. Morikawa, M. Komori, M. Nagata, I. Ueda and Z. Wang: *Proc. JSME (C)*, 78 (2012), 270 (in Japanese).
- T. Nonaka, A. Kubo, S. Kato and T. Omori: *Proc. JSME (C)*, 57 (1991), 229 (in Japanese).
- H. Ishiyama and H. Tateyama: *Seikei-Kakou*, 12 (2000), 155 (in Japanese).
- T. Sugimoto, K. Taniguchi, K. Ichitani, Y. Shimozato, M. Narazaki, T. Machi, M. Sonobe, Y. Sugiura and S. Kijima: *J. Jpn. Soc. Heat Treat.*, 55 (2015), 30 (in Japanese).
- N. Uehara, K. Isokawa, R. Tanaka and T. Yanagiya: *Denki-Seikou*, 53 (1982), 19 (in Japanese).
- Y. Kurebayashi, Y. Kasai, T. likubo, M. Saito, H. Ota and K. Arakawa: *Denki-Seikou*, 58 (1987), 176 (in Japanese).
- 23) S. Funatani and F. Noda: *J. Soc. Mater. Sci. Jpn.*, 17 (1968), 1124 (in Japanese).
- S. Oda, K. Miyachika, M. Misao and H. Fujio: *Proc. JSME (C)*, 53 (1987), 1965 (in Japanese).
- T. Kobayashi, H. Tachibana, W. Yagi and Y. Ueda: *J. Jpn. Inst. Metals*, 46 (1982), 433 (in Japanese).

- 26) T. Shiraga, S. Suzuki, S. Ishizaki, T. Abe and
 T. Sampei: *Bull. Jpn. Inst. Metals*, 28 (1989),
 316 (in Japanese).
- 27) K. Okamura: J. Soc. Mater. Sci. Jpn., 55 (2006), 529 (in Japanese).
- Y. Yanase, K. Ishizu, M. Ochi, J. Usude and T. Kikuchi: *Mitsubishi Heavy Industries Tech. Rev.*, 55 (2018), 1 (in Japanese).
- 29) Y. Ueda and T. Yamakawa: J. Jpn. Weld. Soc., 42 (1973), 567 (in Japanese).
- Y. Toshioka: *Tetsu-to-Hagané*, 62 (1976), 154 (in Japanese).
- T. Inoue and K. Arimoto: J. Soc. Mater. Sci. Jpn., 44 (1995), 103 (in Japanese).
- 32) T. Uehara: Comput. *Mech. Conf.*, 23 (2010) (in Japanese).
- A. Sauveur: McGraw-Hill, New York, 2nd (1926).
- 34) G.W. Greenwood and R.H. Johnson: *Proc. R. Soc. Lond. A*, 283 (1965), 403.
- 35) Y. Desalos, J. Giusti and F. Gunsberg: *IRSID*, Report No.902 (1982).
- 36) J. B. Leblond, J. Devaux and J. C. Devaux: *Int. J. Plast.*, 5 (1989), 551.
- S. Denis, E. Gautier, A. Simon and G. Beck: Mat. Sci. Tech., 1 (1985), 805.
- 38) K. Miyao, Z.-G. Wang and T. Inoue: J. Soc. Mater. Sci. Jpn., 35 (1986), 1352 (in Japanese).
- K. Okamura, K. Yamamoto, T. Saitoh and M. Fukumoto: *J. Jpn. Soc. Heat Treat.*, 49-Special Issue (2009), 701.
- N. Hikida, S. Sagae, H. Komuro, S. Nagaki and K. Oshita: M&M 2013 Mech. Mater. Conf. Collection of CD-ROM Papers.
- 41) S. Nagaki, S. Asaoka, K. Morozumi and K. Ohshita: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. A*, 69(2003), 1230 (in Japanese).
- 42) T. Otsuka, Y. Wakasu and T. Inoue: *Proc. Soc. Mater. Sci. Jpn.*, 52 (2003), 111 (in Japanese).
- 43) H. Nakajima, S. Yamamoto, H. Miyaji and E. Furubayashi: *Tetsu-to-Hagané*, 79 (1993), 1345 (in Japanese).
- 44) M. Maki: *Materia Jpn.*, 46 (2007), 321 (in Japanese).
- 45) M. Narazaki: *Nachi Tech. Rev.*, 15 (2008), A1 (in Japanese).

- 46) K. Watanabe and M. Yamada: Sanyo Tech. Rev., 26 (2019), 51 (in Japanese).
- 47) R. Nagoshi: *Sanyo Tech. Rev.*, 28 (2021), 74 (in Japanese).
- 48) J. Miettinen: *Metall. Mater. Trans. B*, 28 (1997), 281.
- 49) K. Okamura: J. Soc. Mater. Sci. Jpn., 55 (2006), 529 (in Japanese).
- 50) C.Y. Kung and J. J. Rayment: *Metall. Trans. A*, 13 (1982), 328.
- 51) M. Tajima: *Tetsu-to-Hagané*, 84 (1998), 547 (in Japanese).
- K. Watanabe, M. Nishikawa, M. Nakasaki, R. Matsumoto and H. Utsunomiya: *Tetsu-to-Ha-gané*, 110 (2024), 668 (in Japanese).
- K. Watanabe, M. Nishikawa, M. Nakasaki, R. Matsumoto and H. Utsunomiya: *Tetsu-to-Ha-gané*, 110 (2024), 1111 (in Japanese).

■著者



渡邊 啓介