

特別講演

□第185回春季講演大会生産技術賞(渡辺義介賞)受賞記念
特別講演(2023年3月8日)

圧延の過去、現在、未来

Past, Present and Future of Rolling

曾谷保博

Yasuhiro Sodani

JFE スチール(株)
監査役



*脚注に略歴

1 はじめに

この度は栄誉ある渡辺義介賞を頂きまして、誠に光栄に存じます。私は、1982年に日本鋼管(当時)に入社して以来、主に研究所で圧延技術の開発に携わってきました。

圧延は回転するロールの間で材料を伸ばす塑性加工法のひとつです。英語ではRollingと言います。押出しや引抜きでは工具が固定され、鍛造では工具である金型は材料を圧縮する方向に直線的に動きます。これらに対し、圧延は工具であるロールが回転するユニークな加工方法です。

本稿では圧延の生い立ちから、最近の技術の進展を紹介し、最後に未来について論じてみたいと思います。

2 圧延の過去

人類で最初の圧延機のスケッチを残したのは、15世紀末の天才画家レオナルド・ダ・ヴィンチです。この時代の資料を見ると、手回し圧延機で教会のステンドグラスを縁取る鉛や錫の板を伸ばす様子が描かれています。また圧延は銀貨や銅貨などの加工にも使われていました。さらにネックレスやティアラなどの金銀の装飾品の加工にも使われていました。一般市民に近いところでは、鉛を薄く板状に圧延し、円管やコの字に曲げて水道管や樋に使っていました。動力は手回しだったので、圧延できる金属は軟らかい材料に限られ、生産量にも限りがありました。17世紀に入ると、人力に代わり水車が動力として活用されるようになりました。現在、圧延機を“ミル”と呼ぶのはその名残です。

18世紀後半に欧州で起きた産業革命は、圧延へも大きな変革をもたらしました。ワットの蒸気機関を動力にして、巨大

な馬力での圧延が可能になりました。この時期に同時に進歩した鉄鋼精錬技術と相まって、鉄鋼圧延製品が大量に生産されるようになりました。

レールの敷設により、国境を越えて人や物資の大量輸送が可能になりました。また兵士の食糧として缶詰が発明され、19世紀には缶用材料であるブリキ板の生産が爆発的に増えました。このように圧延技術の進歩は、欧州列強にとって富国強兵の原動力となりました。その後、19世紀後半になって動力として電気が使われるようになり、ロールを電気モーターで回す現在の圧延技術の原型ができて上がりました。

圧延に関するエピソードや歴史に興味のある読者は、文献¹⁾をご一読いただければと思います。

3 圧延の現在

製鉄所の熱間圧延では厚み200~300mm、質量20t以上のスラブが連続圧延機により一気に数mmまで薄くなります。冷間圧延では厚み0.2mm以下、幅2mの薄板が170km/hで圧延されながらコイル状に巻き取られます。生産技術としての圧延の特徴はその連続性にあり、ロールの回転数を上げることによって生産能率が上がることから大量生産に適しています。

薄板をはじめ厚板、形鋼、棒線、鋼管などさまざまな形状の製品が圧延で作分けられます。圧延製品は自動車、船舶、橋梁、ビル、鉄道レール、配管など社会を支える様々な用途に使われます。家電製品、流し台、屋根や壁、飲料缶や食缶など日常生活においても圧延製品はあふれています。

製品の多様化とともに圧延機の形式も多様に変化してきました。ワークロールの変形を抑えるバックアップロールを備えた4重圧延機に始まり、中間ロールを挿入した6重圧延

* 1982年東京工業大学大学院理工学研究科機械物理工学専攻修士課程を修了後、日本鋼管(株)に入社。技術研究所、ペンシルバニア大学留学、スチール研究所長、副社長、を経て、2020年4月現職に就任。1996年2月東京工業大学より工学博士を授与。

機も広く用いられます。また板厚プロフィール制御を目的として、ロールベンダー、シフト、クロス機構を兼ね備えた圧延機が使われます。圧延荷重100MNに耐える厚板圧延機は、ワークロール直径1m、バックアップロール直径2mで、圧延機ハウジングは幅8m、高さ15mにもなります。箔用圧延機では、小径ワークロールの変形を抑制するための支持ロール形式も多様化し、20本ものロールクラスターを備えるものもあります。複雑な断面形状を有する形鋼は、幅と厚みを同時に圧延するユニバーサル圧延機で製造されます。継目無鋼管も圧延によって製造されます。中実素材に穴をあける穿孔工程は、傾斜圧延という独特の加工法をとります。その後はマンドレルミルやレデュサなどの孔型圧延機で外径と肉厚を減じます。

筆者が入社した頃は、石油ショックの影響で継目無鋼管ミルの建設ラッシュでした。最大の課題は寸法精度の向上であり、各圧延工程での肉厚変動発生機構の解明と抑止技術の開発に取り組みました²⁾。

圧延理論を勉強すれば、回転するロールを用いる圧延がいかにかに効率的な加工原理を持っているかを理解できます。最初に圧延理論を提唱したのは、航空工学の父と呼ばれる von Karman です。1925年に圧延中に材料にかかる力の関係を微分方程式で表現し、圧延反力を導く理論を発表しました。その後、転位論の創始者としても知られる Orowan が圧延理論を発展させ、変形の不均一性を考慮した理論を提案しました。現在では有限要素法などにより、材料の三次元変形や応力状態を詳細に解析することが可能になっています。

高精度で高能率な生産を実現する今日の圧延技術は、計算機制御により支えられています。制御ロジックは圧延理論に基づいています。圧延制御には計測技術も不可欠で、種々のセンサーが開発され高度な圧延制御を可能にしています。

形状に加えて材質を圧延プロセスの中で作りこむことも盛んに行われています。特に鉄鋼材料に対しては、加熱—圧延—冷却工程で、変態、析出、結晶粒微細化といった冶金原理を活用したTMCP技術が駆使されます。高価な合金元素を使わずに、所望の強度、延性をもった製品を作り分けます。現在、引張強さ1GPaを超える高張力鋼板（ハイテン）が量産されています。

以下には生産性向上を目的に行った「ハイブリッド潤滑による冷間タンデムミルの高速圧延技術の開発」と、材質創製を目的に行った「超微細粒鋼の創製基盤技術の確立」について紹介します。

3.1 ハイブリッド潤滑による冷間タンデムミルの高速圧延技術の開発

1990年代の開発当初、薄鋼板の薄ゲージ、高強度化のニーズが高まるとともに、冷間圧延に対する高速化への要請が強

くなっていました。缶用材料などの薄物硬質材を高圧下、高速で圧延するには、6スタンド圧延機かつ直接給油方式の潤滑システムが広く採用されていました。高濃度のパーム油を水と混ぜて直接給油する掛捨て方式です。優れた潤滑性を担保できるが、潤滑油の使用量が多く、廃液処理など環境負荷の面で問題を抱えていました。

筆者らは、5スタンド圧延機かつ循環給油（リサーキュレーション）方式での技術開発に着手しました³⁾。低濃度の潤滑油を水中に乳化させたエマルジョンを循環使用します。しかし薄物硬質材を高速で圧延しようとする、チャタリングという圧延機の異常振動が発生するため、低速での操業を強いられていました。

エマルジョンの潤滑機構としては動的濃化によるトラップモデルが提唱されていました（Fig.1）。まず、実機でロールバイト入側の潤滑供給量を増減させてみました。しかし高速圧延域での潤滑状態（圧延荷重や先進率）は全く変わらないのです。そこでラボで独自の実験装置を製作し、高速域での油膜形成挙動の解明に取り組みました。2000m/minを超える高速圧延では、エマルジョンがスプレーされてからロールバイトに到達するまでの時間は0.01～0.1秒程度です。このような極短時間においても、エマルジョンが鋼板表面に衝突して油膜を形成する（プレートアウト）挙動が、時間依存の現象であることを明らかにしました（Fig.2）。また、エマルジョンの粒径と濃度を制御することで、直接給油方式に匹敵する油膜形成能力が得られることも明らかにできました（Fig.3）⁴⁾。

同時にチャタリング発生機構に関する理論解析に取り組みました⁵⁾。Fig.4に示す連続圧延モデルを構築し、自励振動モデルを用いた考察によって、隣り合うスタンドの摩擦係数のアンバランスが連続圧延機の振動不安定を引起すことを明らかにしました。隣接するスタンドの摩擦係数を適切な範囲に制御することにより、チャタリング発生なしで高速圧延が実現できるという確信を持つに至りました。

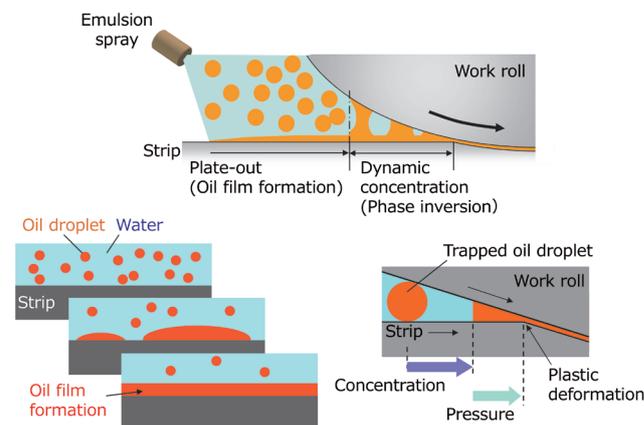


Fig.1 Oil film formation in O/W emulsion. (Online version in color.)

Fig.5に新たに開発したハイブリッド潤滑システムの基本構成を示します。循環給油方式をベースとしてハイブリッド潤滑システムを構成します。ハイブリッド潤滑システムはロールバイトから離して配置します。循環給油系等と同一の基油、界面活性剤を使用するので、循環システムの安定性に悪影響を与えません。付着効率の高い大粒径エマルジョンとスプレー供給技術の開発により、循環システムの油分ロスの範囲内でハイブリッド潤滑供給を行うことが可能になりました。

Fig.6に示すように、ハイブリッド潤滑をアクチュエータとして、摩擦係数をフィードバック制御するシステムを構築しました⁶⁾。プロダクトミックスや圧延条件に応じて、ハイブリッド潤滑からの供給量をプリセット制御します。またFig.7に示すように、高速域において、目標とする摩擦係数の範囲に入るように、潤滑供給量をダイナミックに自動調整します。このような冷間タンデムミルにおける摩擦係数のフィード

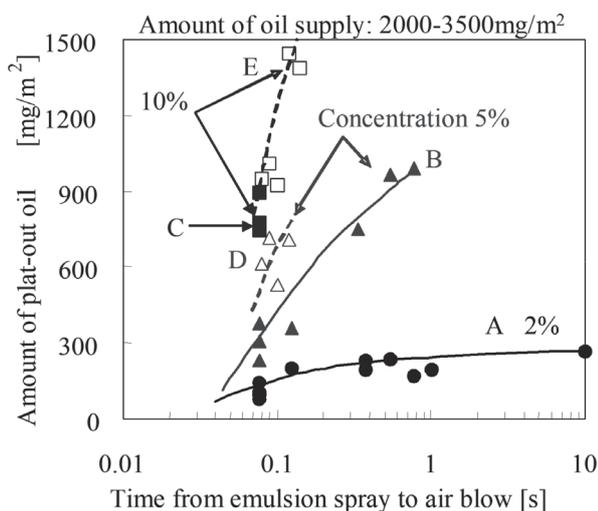


Fig.2 Influence of oil film formation time on plate-out characteristics.

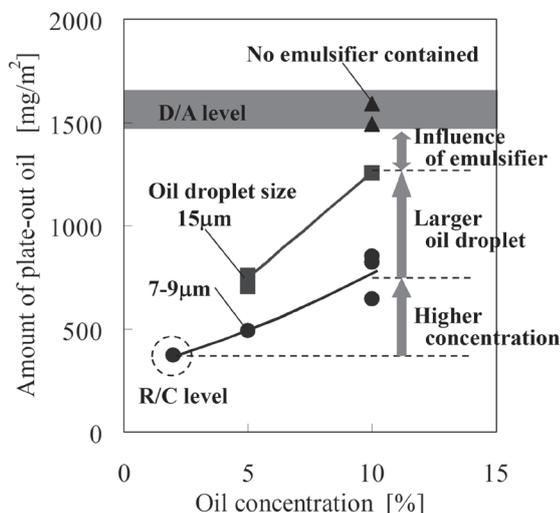


Fig.3 Influence of emulsion concentration and oil droplet size on plate-out characteristics.

バック制御の実用化は、世界で過去に例を見ません。

ハイブリッド潤滑システムは実用化され、2000m/minを超える高速圧延を安定的に実現しています。低濃度の合成エステルを循環使用しているため、圧延油消費量は少なく、ミル周りの作業環境も良好です。廃液処理がないため地球環境にもやさしい、EconomicalでEcologicalな潤滑システムを構築できました。

3.2 超微細粒鋼の創製基盤技術の確立

2000年前後、鋼の高強度化の手段として、希少金属の添加を抑え結晶粒微細化に関する研究が精力的に行われました¹⁻⁴⁾。ただし通常の熱延工程で超微細粒鋼を得ようとすると、板厚が薄く低温になる仕上圧延工程で圧延反力が大きくなること

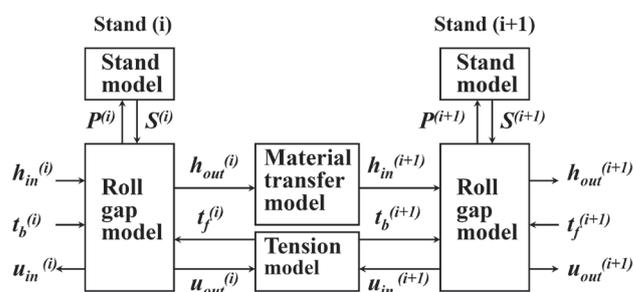


Fig.4 Schematic of continuous rolling model.

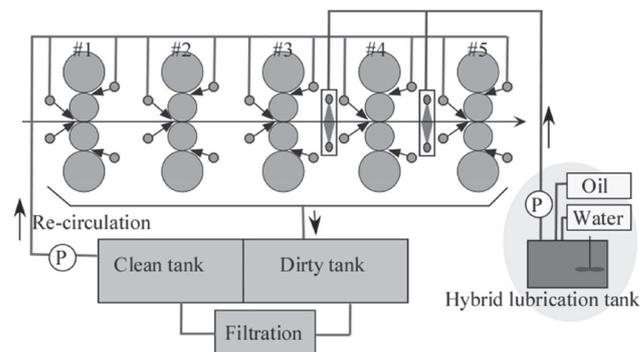


Fig.5 Schematic diagram of developed hybrid lubrication system.

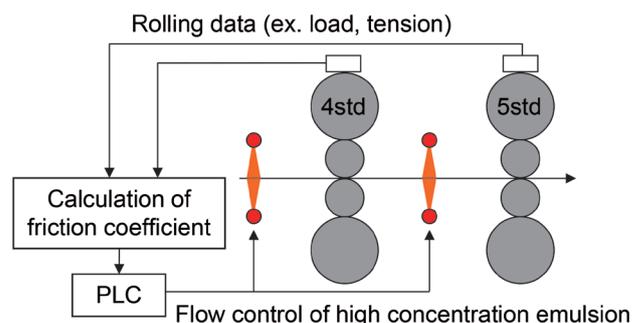


Fig.6 Schematic illustration of lubrication control actuator. (Online version in color.)

が不可避です。

筆者らは発想を変え、熱間圧延工程の粗加工に、圧下量制約のない1パス大圧下を可能とする鍛造型板厚大圧下加工を提案しました (Fig.8)^{7,8)}。粗加工の高温域で大ひずみ加工を加えることにより、オーステナイト組織を微細化する。仕上加工での圧延反力を低減して、効率的に結晶粒を微細化しようとするものです。また、オーステナイト組織の微細化挙動を定量的に解析するため、Fig.9に示すマイクロ組織解析システムを構築しました⁹⁾。3次元有限要素法により温度/変形解析するマクロスケールモデルと、再結晶と粒成長挙動を計算するミクロスケールモデルからなります。

単純組成のSi-Mn鋼 (0.14% C-0.64% Mn-0.01% Si) を使用してラボ実験を行いました。Fig.10に示すように、鍛造型板厚大圧下の加工温度1273K、1パス圧下率60%程度以上の条件で、20~30 μmの均一微細なオーステナイト組織が得られることが分かりました。また鍛造型板厚大圧下加工の後、パーヒータによる逆変態でオーステナイト組織が10 μmまで微細化し、その後圧下率50%の仕上圧延を施すことで、1.0 μmの超微細フェライト組織が得られました。

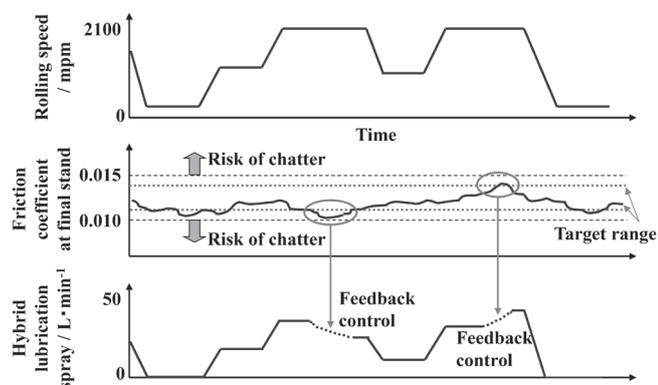


Fig.7 Example of dynamic lubrication control in actual production mill.

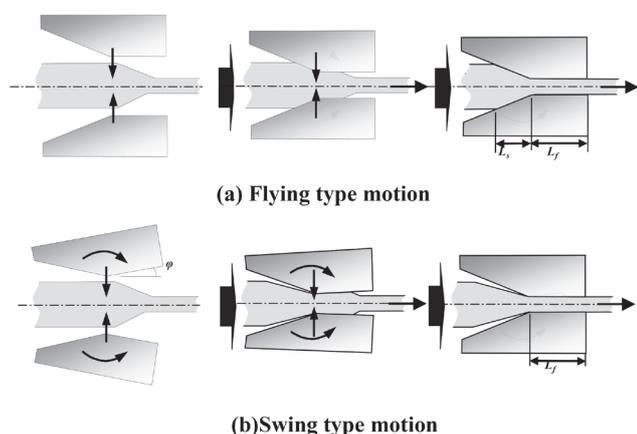


Fig.8 Basic concept of swing type forging.

4 圧延の未来

新興国は日本や欧州で完成された技術を導入し、爆発的に鉄鋼生産を伸ばしています。日本がかつてそうであったように、新興国でも導入技術と新鋭設備に改良を重ねて、品質、生産性の両面で世界トップ水準に追随して行くことは疑う余地がありません。し烈な国際競争の中で、日本は次の数十年をにらんだ長期的な視野に立ち、独創的な技術開発を持続し、製造プロセス革新への挑戦を続けることしか生き残る道はありません。

日本の鉄鋼会社は低価格の汎用品から、自動車用鋼板、電磁鋼板、ステンレス鋼板など的高级鋼の製造に軸足を移しています。自動車は自動運転技術に注目が集まっていますが、地球温暖化防止の観点から燃費向上が持続的な課題です。車体の軽量化と衝突安全性の両立を実現するための、高張力鋼板の使用比率の増大は目覚しく、引張強さ2GPaかつ成形しやすいハイテンの実用化が待たされています。今後とも地球資源の保全、リサイクルといった観点から、希少合金元素を用いなくて、種々の強度、延性を有する超ハイテンを作り分けるTMCP技術の重要性はさらに増すと思われます。

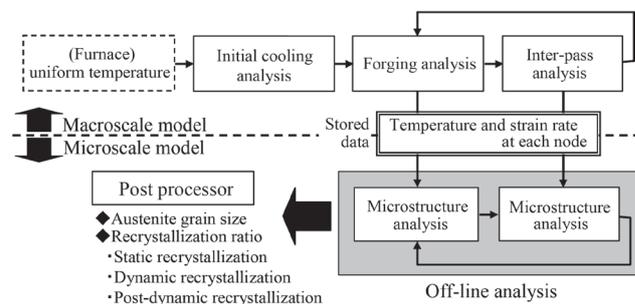


Fig.9 Analytical flow for the coupling of macro-scale model and micro-scale model.

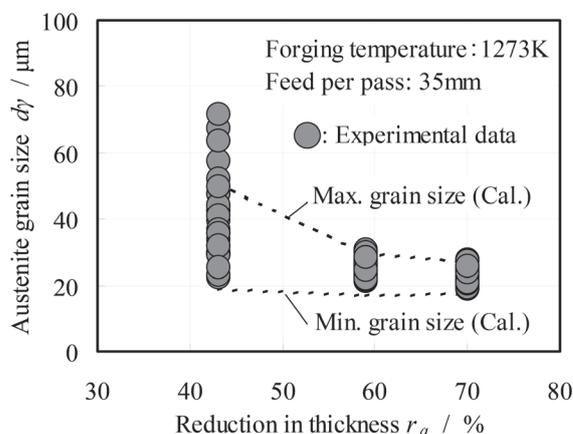


Fig.10 Austenite grain size after high-speed large-reduction forging.

変圧器やモータの鉄心などに使われる電磁鋼板は、鉄損などの特性を向上することで、莫大な省エネ効果が期待できます。電磁鋼板の製造プロセスは、圧延と熱処理を高度に組み合わせることで所定の特性を得る点で、広い意味でのTMCPと言えます。付加的な熱処理工程などを省略して、高能率に高品質な電磁鋼板を製造するプロセス開発への期待が高まっています。

耐食性が求められる用途にはステンレス鋼が使われます。自動車の排ガス浄化用の部材や、水素エネルギー用材料としてもステンレス鋼の用途は拡大します。またコスト削減や資源保全の要求から、厚板や鋼管では炭素鋼の表面に必要な厚みだけステンレス鋼を合わせる圧延クラッド鋼が適用されています。さらに最近では、自動車の軽量化を目的に、鉄鋼材料、非鉄材料および樹脂材料などのマルチマテリアル化が進んでいます。マルチマテリアルのクラッドに圧延が活躍する日が来るかもしれません。

軽量化に対するニーズから、薄鋼板のゲージダウンの進展は著しく、例えば3ピース缶用鋼板の板厚は0.1mm代に突入しています。最高速3000m/minを超える冷間圧延の実現が期待されます。加工発熱によりロールや材料の温度は100℃を超えます。超高速圧延を実現するためには、軸受けなどの圧延機の開発だけでなく、冷却や潤滑、ロールなどのトライボ技術の革新が必須です。

生産工程における省エネに対する取り組みは永遠の課題です。圧延で最もエネルギーを消費しているのは加熱炉であり、ガス炊きの加熱炉には蓄熱バーナなどの技術が投入されています。今後は、必要な時だけに加熱を瞬時に行えるIHなどの電気式加熱が、TMCPの手段としても活用されると思われます。

加熱工程の省略を可能にする、鋳造と圧延の直結は省エネの手段として最も効果的です。薄スラブ連続鋳造と熱延を直結したミニミルが実用化されています。また双ロールの間に溶鋼を流し込んで、一気に薄鋼板を鋳造するストリップキャスターの稼働も始まっています。これらのプロセスで、品質や生産性を改善するブレークスルーがあれば、従来の高炉メーカーが構築してきた厚スラブ鋳造-ホットストリップミルでの高級鋼製造プロセスを代替する可能性もあります。

現在の圧延操業は高度なコンピュータ制御に支えられています。例えば製鉄所の熱延ラインではコントローラの数50以上、センサーは2万個を超えます。コンピュータ容量の増加にともない、過去の大量の操業データを参照しビッグデータを活用する試みがすでに始まっています。データサイエンスを活用し、製品の品質予測が可能になり、バラツキ低減や生産性向上が図られます。また圧延機の経年劣化や設備異常を予知して、トラブルを未然に防止し早期の保全へつなげる

ことも可能になります。最近のAIやロボティックスの発達を見ますと、熟練オペレータが行っていた微妙なハンドル操作をAIが代替し、機械の点検や部品の交換もロボットが行う日が来るかもしれません。ITとの融合は圧延操業を大きく変容する可能性を秘めています。

5 おわりに

いい研究テーマを発掘するには現場をよく見ることです。五感を働かせて現象を観察すれば、技術開発のネタは山ほど転がっています。世界初のアイデアを絞り出すことが重要で、それをものにするのは原理・原則の追求です。プロセス開発は、地球環境に優しく、作業環境にも配慮した技術でありたいものです。そうすれば広く社会に受け入れられ、世の中に普及します。

圧延の歴史を振り返ると、圧延は古くから人間の生活に密接に寄り添い、社会の発展とともに進化してきました。日本鉄鋼協会の活動を通じて、圧延技術が現状に立ち止まることなく、未来に向けて人間社会の発展とともに、つねに進化し続けてほしいと思います。

参考文献

- 1) JFE スチール圧延技術研究会著、曾谷保博監修：トコトンやさしい圧延の本、日刊工業新聞社、(2015)、1.
- 2) 曾谷保博、平川智之、生井賢治、畑中政之、森謙一郎：鉄と鋼、79 (1993) 3、424.
- 3) Y.Kimura, N.Fujita, Y.Matsubara, K.Kobayashi, Y.Amanuma, O.Yoshioka and Y.Sodani : J. Mater. Process. Technol., 216 (2015), 357.
- 4) N.Fujita, Y.Kimura, K.Kobayashi, Y.Amanuma and Y.Sodani : J. Mater. Process. Technol., 219 (2015), 295.
- 5) Y.Kimura, Y.Sodani, N.Nishiura, N.Ikeuchi and Y.Mihara : ISIJ Int., 43 (2003) 1, 77.
- 6) N.Fujita, Y.Kimura, K.Kobayashi, K.Itoh, Y.Amanuma and Y.Sodani : J. Mater. Process. Technol., 229 (2016), 407.
- 7) M.Miyake, T.Yazaki and Y.Sodani : Mater. Trans., 54 (2013) 7, 1126.
- 8) M.Miyake, T.Yazaki and Y.Sodani : Mater. Trans., 54 (2013) 10, 1951.
- 9) M.Miyake and Y.Sodani : Mater. Trans., 55 (2014) 6, 911.

(2023年3月16日受付)