



## 躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

# 圧延転写技術を活用した新商品開発を通じて

Development of New Product by Using Transfer Rolling Technology

藤井康之  
Yasuyuki Fujii

(株) 神戸製鋼所  
技術開発本部 開発企画部  
企画担当課長

## 1 はじめに

筆者は、株式会社神戸製鋼所の技術開発本部材料研究所に勤務し、主に鉄鋼、チタン材を対象とした冷間圧延技術の研究開発に従事してきた。2004年の入社以来、冷間圧延に関する技術開発と平行して行ってきたのが、圧延転写技術の研究、および板表面への微細凹凸付与による高機能材料の新商品開発である。本稿では、筆者が近年注力してきた微細凹凸圧延転写技術に関する研究内容、および本技術を活用して製品化した「高伝熱チタン板HEET™」と製品開発を通じた経験を紹介する。

## 2 表面創製技術との出会い

入社2年目の期初に上司から任された仕事は「薄板に生物の持つ特徴を付与する」と言うものだった。

いわゆるバイオミメティクスである。この時の衝撃は入社13年目を迎える現在でも鮮明に覚えている。バイオミメティクスとは、生体のもつ優れた機能や形状を模倣し、工学・医療分野に応用することである。これら生物の持つ優れた表面機能は表面の微細な周期構造によって発現されており、例えばハスの葉は表面の微細凹凸(図1)により、表面積拡大効果(Wenzel理論)および空気をトラップする空隙の面積割合拡大効果(Cassieの理論)により撥水性が発現されることが知られている。ハスの葉の表面を参考した製品としては、汚れの付きにくい外壁材やヨーグルトの内蓋などが開発されている。バイオミメティクスは金属板においても適用可能であり、板表面に微細な凹凸を付与することで表面特性を向上できる可能性がある。

筆者がはじめに行ったのは、生物表面の微細周期構造と表面機能の関係を調査することであった。具体的には、まず、鳥

の羽、ハスの葉、アワビの貝殻などを採取、顕微鏡を用いてその表面構造を観察した。次に、蝶や鳥の羽に見られる構造色、ハスの葉の撥水効果、サメ肌の流体抵抗の低減効果などを発現させている表面構造(数百nm~数十μmオーダーの表面凹凸の形状や寸法)を調査行っただ。これら観察、調査に基づき、微細凹凸圧延転写を用いて生物の持つ表面構造を模倣した試作板を作り、特性の評価を行っていた(図2)。当時筆者の机の上や引き出しには、一見圧延技術者として似つかわしくないもの(植物、貝殻、鳥の羽など)が陳列されており、他の研究員からは奇異に思われていたかもしれないが、当時は生物の持つ表面構造に魅せられており、夢中で調査を行っていたことが思い出される。今思うと非常に幸せな時間であった。

## 3 微細凹凸圧延転写技術の開発

筆者が次に取り組んだのは、これら生物の持つ表面構造を金属板表面に転写する技術を構築することだった。金属板へ

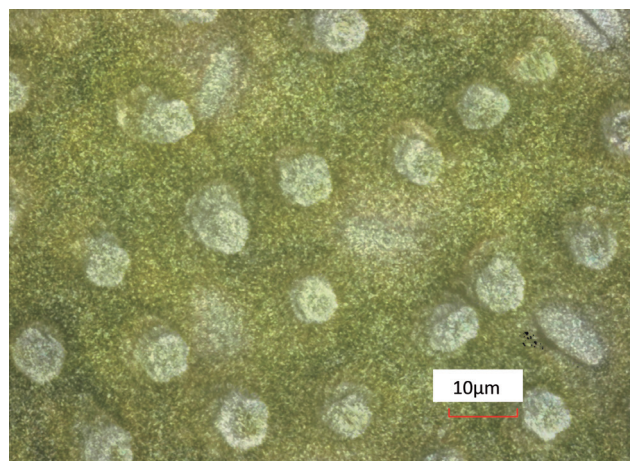


図1 ハスの葉表面の微細構造

の表面凹凸の加工方法としては圧延転写を選定した。表面への微細加工技術としては既にエッチングやナノインプリントなどの技術が世の中に存在していた。それら技術との生産性、コストの差別化を図る意図はあったが、新興国の技術の台頭によりコモディティー化が進んでいる金属板製品に関して、その特性を画期的に変える新技術、新製品を創出したいというのが一番の目的であった。金属表面の高機能化のためには、前述の生物表面の調査から凹凸の高さ、個々の凹凸形状が重要なファクターであることを掴んでおり、その実現には高圧下率かつ凹凸形状を正確に板表面に転写する圧延技術の開発が必要であった。圧延転写技術に関しては、従来から調質圧延の研究が多く報告されており、表面粗さRaなどの平均的な粗さを用いた巨視的な実験、解析が中心に議論されていた<sup>1-4)</sup>。近年では有限要素法を用いた微視的解析的な検討がなされているが<sup>5-14)</sup>、これら検討は調質圧延領域（圧下率5%以下）のダルロール転写（凹凸はランダム、凹凸ピッチは数百 $\mu\text{m}$ 、高さが数 $\mu\text{m}$ ）を対象としており、筆者らが対象としていた圧延転写とは本質的に異なるものであった。そこで高圧下率領域での転写挙動やロールの個々の凹凸面がどのように転写されるかといった“ミクロ”な観点での圧延転写現象の解明に取り組んだ。まずロールの軸方向に溝を付与した

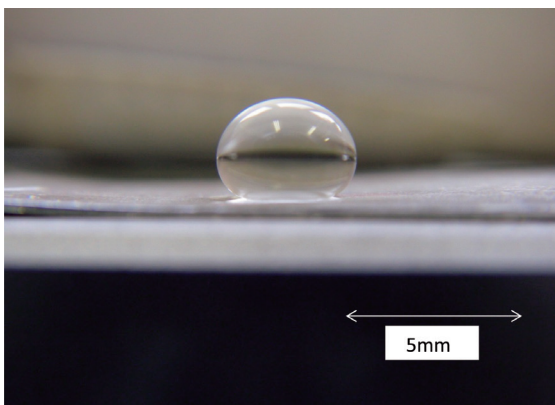


図2 表面微細加工板の撥水効果

2次元テクスチャロール（図3）を用いた転写実験、数値解析を行うことで転写性、転写形状の評価を行った。圧延転写では、ロールと材料の滑り状態を表す先進率が存在し転写性に影響を与えることが想定されたため、ロールによる押し込み転写と圧延転写の2つの検討を行い転写現象における相対すべり影響についても調査した。本検討の結果、圧延転写、ロール押し込み転写では形成される突起高さは圧下率に強く依存しており転写方法による差異は見られなかった。他方、転写形状は、ロール押し込み転写が圧延方向に对称形状であるのに対し、圧延転写では非対称形状であるといった違いがあることが分かった。また、形成された突起高さや形状は実験とFEM解析で一致しており、単純な2次元凹凸形状の転写に関してはFEM解析で十分予測できることが明らかとなった（図4、5）。これまで圧延転写における突起の形成はロール凹部への材料流動が主要因と考えられていた。しかし、FEM解析による調査の結果、突起頂部には歪がほとんど入っておらず、ロール凸部と接触した材料の板厚減少により見かけ上突起が形成されていることが分かった。また圧延転写で確認された非対称形状の突起形成はロールと材料の相対速度により出側への材料の延伸が阻害されることで発生している等、圧延転写における新たな知見を得ることが出来た<sup>15-16)</sup>。

次に筆者らは、格子状に凹凸を有する3次元テクスチャロール（図6）を用い同様の検討を行った。しかしながら、3次元テクスチャロールでは、2次元テクスチャとは異なる転写現象が発生していることが確認された。図7に圧下率と転写形状の関係を示す。2次元テクスチャでは圧下率の増加に伴い突起高さが増加するのに対し、3次元テクスチャでは圧下率10%以上の領域で突起高さが減少していた。この突起高さ減少は転写形状と関連しており、高圧下率領域では、転写される突起形状が圧延入側に傾いた直角三角形の形状となり、圧下率の増大に伴い突起高さが減少していることが分かった<sup>17)</sup>。この現象を解明するため、2次元FEMと3次元FEM解析を組み合わせた解析手法により転写過程を検証した。その結果、ロールと材料の接触域であるロールバイト内

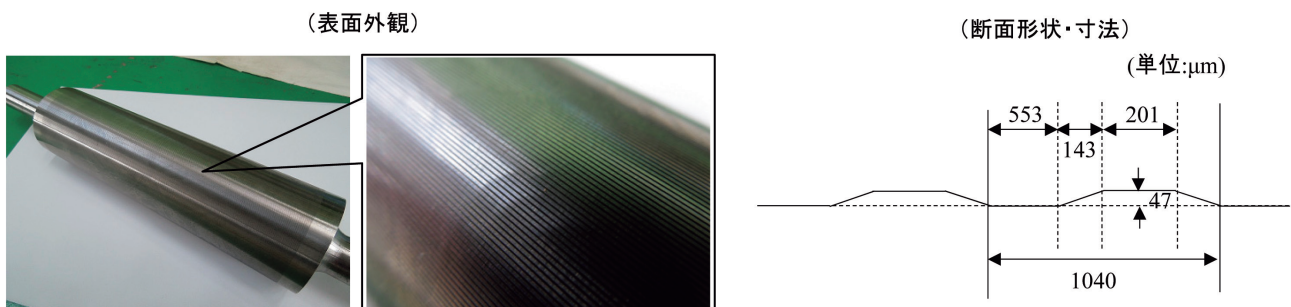


図3 2次元テクスチャロール

で形成された突起が、ロールバイト出側においてロールと接触変形していることが判明した。また、先進率を変化させることにより高圧下率領域における突起高さの減少やロールと材料の相対すべり量に伴った突起形状変化が再現可能であることを確認した。これら現象をFEM解析で再現するには摩擦係数の予測が重要となるが、圧延転写時の摩擦係数は凹凸形状、突起の高さ、潤滑油のトラップ影響などの複合因子に依存していると考えられ非常に複雑である。圧延転写における摩擦係数の予測には未だ課題を残しているが、検討の結果、先進率が測定できれば高圧下率領域においても突起形状を予測することができることがわかった。また先進率をパラメータとした転写形状予測式を確立することで、ロールバイト出側におけるロールとの接触変形を回避可能な圧延条件の設定手法を見出し、ロール凹凸形状の正確な転写を実現することが可能となった<sup>18)</sup>。

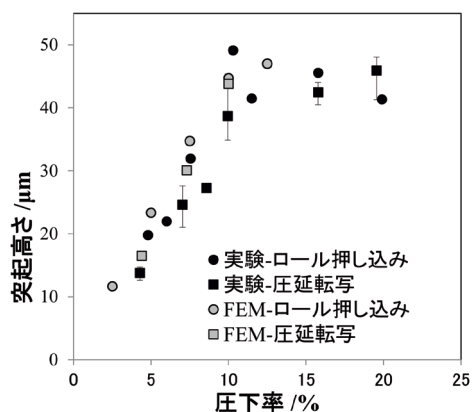


図4 圧下率と突起高さの関係

## 4 高伝熱チタン板の開発

圧延転写技術開発により高圧下率領域においても正確にロールの凹凸面を転写できる技術を獲得したが、すぐに製品開発には直結しなかった。本技術は従来の圧延技術とは全く異なるものであり、その実現性が不安視されたのがその理由である。唯一の解決策は実ラインでの製造実績を作ることであり、そのために地道な社内PR活動を続けた結果、一つの適用用途に出会った。それが熱交換器用のチタン薄板材である。熱交換器用のチタン薄板材に求められる特性は伝熱性効

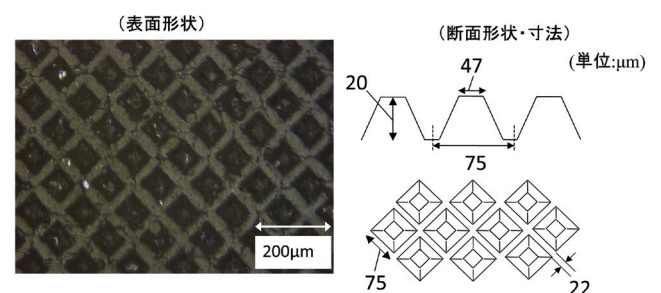


図6 3次元テクスチャロール

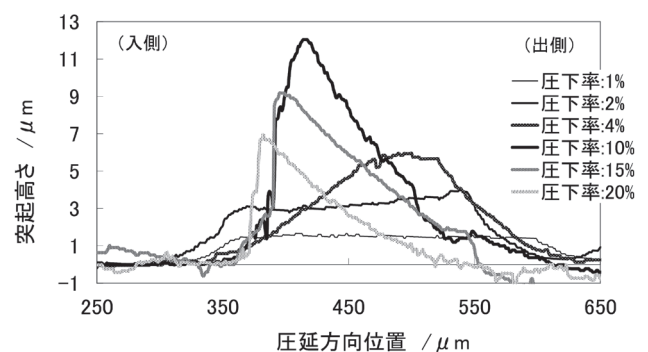


図7 3次元テクスチャロールでの転写形状

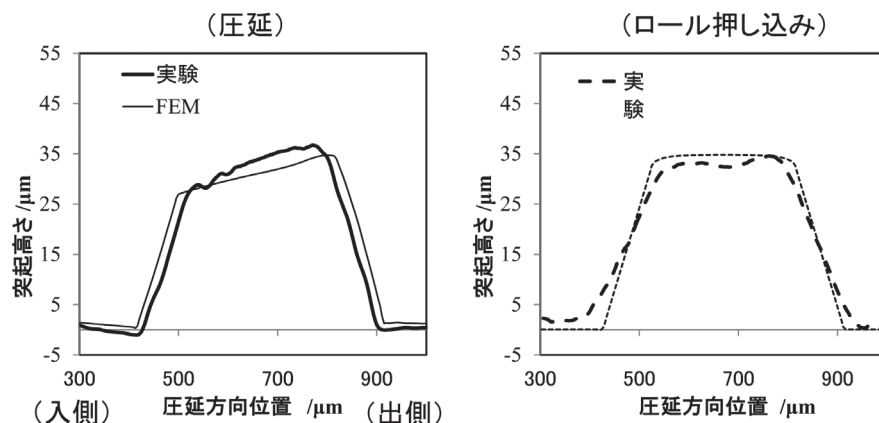


図5 実験とFEM解析の転写形状比較



率の向上であり、従来から表面積拡大による伝熱促進効果を目的に微細な金属粒子を溶射する方法などが提案されていた<sup>19)</sup>。しかしながら、コスト面、熱交換器の稼働の安定性（表面から脱落した溶射粉がタービンなどに流入することにより機器を損傷する恐れがあった）に課題があり実用化はされていなかった。その解決策として着目されたのが圧延転写技術であった。

開発にあたっては多くの苦労、時間を有した。筆者の技術の未熟さも有り、想定外のトラブル、多くの失敗も経験した。しかしながら本製品開発を続けてこられたのは、筆者をはじめ、開発メンバーが本製品開発を諦めなかったこと、また多くの関係者の協力があったからこそであると考えている。

基礎検討から7年経過した2013年に高伝熱チタン板の製品化にたどり着いた。高伝熱チタン板は、板の表面に微細な水玉柄の凹凸形状を付与することで表面積拡大効果、乱流促進効果、核沸騰促進効果により熱伝達効率を向上させたチタン薄板材である。チタンは他の実用金属材料と比べ海水に対し圧倒的に高い耐食性を示すため、主に海水を常時使用するプレート式熱交換器（PHE：Plate Heat Exchanger）のプレートとして使用される。図8に転写圧延で実機製造したコイルの外観、および従来材と転写圧延材の板表面の比較を示す。コイル全面に渡り均一な凹凸が形成されておりPHEに求められる機械的特性やプレス成形性に関しても従来材同等の特性が確認されている。現在、本製品は沖縄県久米島で連続運転を続けている海洋温度差発電の実証プラントに採用され、従来材比で20%の伝熱促進効果が実証されている<sup>20)</sup>。今後は海洋温度差発電プラント以外にも、エネルギープラントや造船向けなど広範囲な用途で利用されることが期待されている。

## 5 おわりに

本稿では、微細凹凸圧延転写技術に関する研究内容、および本技術を活用して製品化した高伝熱チタン板に関して紹介した。本研究開発を通じて、凹凸圧延転写の転写メカニズムや伝熱性に与える凹凸形状の設計などの基礎研究から、実機でのコイルの製造、PHEへの組み込み評価などの実用化検討までの一連の製品開発を経験することができた。この経験により薄板製造工程の周辺技術を学ぶことが出来たこと、多くの学会発表や特許出願が出来たことは非常に貴重な経験であり、圧延技術研究者として大きく成長させてくれたものと考えている。基礎検討から実用化まで約7年の期間を有したが、この間、大阪大学の宇都宮教授、東北大学の藤田名誉教授、JFEスチールの木島氏、新日鐵住金の明石氏には、学会、研究会で圧延転写技術のみならず、圧延技術に関する多くのご意見、アドバイスを頂いた。技術の深耕もさることながら、圧延の研究開発に関する多くの刺激を頂き、その都度研究に対するモチベーションが高まったことが思い出される。近年は若い技術者の学会への参加が少ないように感じる。圧延技術は成熟された技術と言われているが、本研究の課題である摩擦や潤滑理論に代表されるようにまだ実用技術として未解決の領域が多く残されていると思う。是非、若い技術者の方々には国内外の学会に参加し、自身の研究発表を通じて多くの意見を聞きながら、広い視野で研究開発を行うことをお勧めしたい。また、困難な課題にぶつかっても決して諦めず、周りの協力を得ながら多くの成功体験を積んで頂きたいと思う。

最後になりましたが、これまで取り組んできた様々な研究開発でお世話になりました方々にこの場をお借りして御礼を申し上げますとともに、このような発信の機会を頂きましたことに感謝申し上げます。

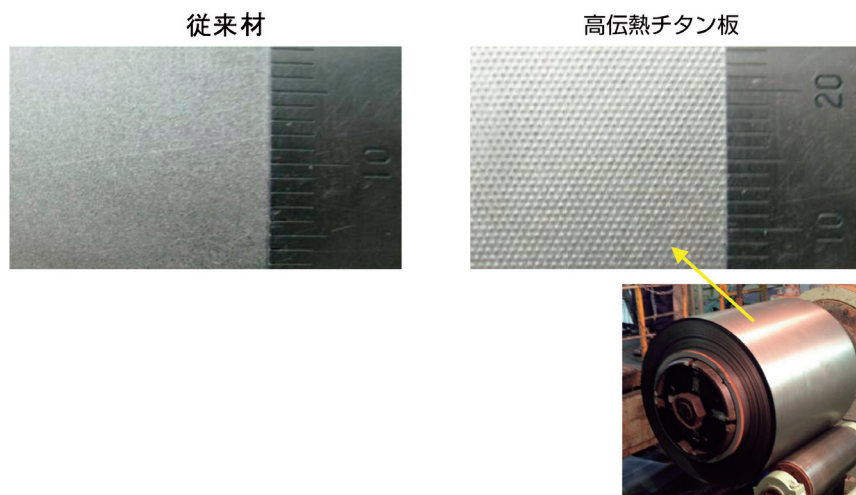


図8 高伝熱チタン板転写圧延後のコイル概観と板面拡大写真

## 参考文献

- 1) 大矢根守哉：塑性と加工, 18 (1977), 144.
- 2) 青木至：塑性と加工, 20 (1979), 1121.
- 3) 鍵田征雄：123回塑加シンポテクスト, (1989), 793.
- 4) 阿高松男, 上野泰司, 綿貫孝介：ふえらむ, 13 (2008), 445.
- 5) 池浩：調質圧延のミクロ変形解析研究会最終報告, (2007), 99.
- 6) 湯川伸樹, 秋山友彦, 吉田佳典, 石川孝司：鉄と鋼, 94 (2008), 399.
- 7) H.Kijima and N.Bay : J.Mat.Proc.Technol., 209 (2009), 4835.
- 8) 木島秀夫：63回塑加連講論, (2012), 443.
- 9) 木島秀夫：平成24年度塑性加工春季講演会, (2012), 149.
- 10) 明石透, 白石利幸, 小川茂, 松瀬善信：塑性と加工, 54 (2013), 606.
- 11) H.Kijima : J.Mat.Proc.Technol., 213 (2013), 1764.
- 12) 木島秀夫：平成25年度塑性加工春季講演会, (2013), 215.
- 13) 明石透, 白石利幸, 小川茂, 松瀬善信：塑性と加工, 55 (2014), 324.
- 14) H.Kijima : J.Mat.Proc.Technol., 214 (2014), 1111.
- 15) 藤井康之, 前田恭志, 伊福遼太：第141回圧延理論部会資料, (2014)
- 16) Y.Fujii, Y.Maeda and R.Ifuku : Proc.11th ICTP, (2014), 492.
- 17) Y.Fujii and Y.Maeda : IX International Conference Computational Plasticity COMPLASIX, (2007) 787.
- 18) 藤井康之, 前田恭志：60回塑加連講論, (2009), 401.
- 19) 池上康之, 新郷正志, 坂口俊之, 江頭正和, 平尾泰博：日本伝熱シンポジウム講演論文集, (2000), 825.
- 20) A.Okamoto : Titanium 2013, ITA 29th Annual Conference, (2013)

(2016年4月18日受付)

## 先輩研究者・技術者からのエール

大阪大学 大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻 教授

宇都宮 裕

藤井康之様は、(株)神戸製鋼所で圧延技術の研究開発に従事するかたわら、大阪大学の大学院博士課程にも籍を置いて研究をなさっていますので、コメントさせていただきます。

圧延は古典的なプロセスで、すでに成熟し、ある意味で確立された技術と一般には思われがちです。しかし、鋼板から形鋼、鋼管、棒線に至るまで鉄鋼材料のほとんどが圧延によって製造されている事実は何ら変わりはありません。現在では高度に制御された機械を用いてこれらの製造がなされていますが、操業上の課題や、学術的に未解明な現象が多く残されており、研究対象には事欠きません。圧延を対象とする大学の研究室は、現在では数えるほどしかありませんので、多くの技術者や研究者は、就職後に初めて圧延に携わることになります。しかし、膨大な量の優れた研究が過去になされていますので、忙しい業務の中で、それらをフォローして技術開発に応用していかなければなりません。工業的あるいは学術的に新規性のあるテーマを見出すことは、初学者にはかなりの困難を伴います。

この「躍動」から、藤井様がこうした背景の下で圧延技術の開発に果敢に挑み、苦労して新製品の開発にこぎつけたことがよく理解されます。藤井様の場合も、学生時代は大洋でのスルメイカの移動について研究され、就職後に圧延の研究を開始されたとうかがっております。こ

こでは触れられていませんが、古典圧延理論を改良して、実機でも使用される予測式を作成されるようなお仕事もされています。今回、ご自身のバックグラウンドが、生体模倣(バイオミメティクス)というキーワードで繋がっていて、圧延に表面テクスチャーの概念を新風として吹き込み、新たな製品の開発に繋がったことがよく理解されました。

同時に、社内外の技術者・研究者との議論によって成長されたことも窺い知ることができます。転写は、幸い学会発表が比較的積極的なトピックで、しかもJFEスチールの木島様や、新日鐵住金の明石様など優れた研究者がいっぱいいます。しかし、残念ながらこうした分野は、残念ながら例外的と言わざるを得ません。下工程では製品の品質や特性に直結することもあり、各社の研究発表は絞られております。ぜひ各社には、若手技術者・研究者が成長できる研究発表や議論の場の提供をお願いしたいと存じます。

藤井様は、現在は研究所の開発企画を担当されておられると聞いております。この機会に圧延や加工技術の現状を分析していただき、今後のブレークスルーとなる研究テーマのご提案を、特に若手技術者研究者に向けてお願いできればと存じます。

以上

JFEスチール(株) スチール研究所 圧延・加工プロセス研究部 主任研究員

木島 秀夫

学 会場でよく議論させて頂いている藤井さんが「躍動」に登場されると伺い、力不足に不安を覚えながらも、有益な情報を頂いている謝礼の意味も込めてエールの執筆をお受けいたしました。

塑性加工、特に圧延による材料表面粗さプロフィールの造り込みと機能の創製は、古くて新しい研究テーマであると言えます。従来から実験的・経験的に、所望の表面プロフィールを薄鋼板製造プロセスの最終工程である調質圧延において付与する技術が確立されてきました。さらに近年、市販の有限要素法コードの解析能力や安定性が高まり材料表面の変形を詳細に解析することが可能になって、変形メカニズムの解明は飛躍的に進歩しています。藤井さんの開発でも有限要素法を有効に活用されており、そのような時代の流れを上手く捉えて成功に結びつけた好例と言えるでしょう。ただその陰で、筆舌に尽くしがたい苦労を重ねられたであろうことは想像に難くありません。実際、学会の場で議論させて頂いているときも、言葉の端々からいろいろ悩まれ、考え抜かれている様子を感じ取ることが出来ました。材料や圧延条件の違いはあっても、バイオミメティクスのように直接的な微細加工による造り

込みが主流の分野において、塑性加工の圧倒的な効率性とコスト優位性を遺憾なく発揮されたことは、塑性加工技術者として大変痛快に感じるとともに、不屈の精神で開発を成功させたことに敬意を表します。

最近、鉄鋼協会や塑性加工学会での圧延セッションの発表件数が減少しており、長年この分野に携わって来た者として危機感を抱かざるを得ません。しかし、上記の有限要素法だけでなく、微細加工技術の進歩による理想的実験条件の実現や、計測技術の進歩による新データの測定、さらにデータサイエンスの活用など、研究開発環境は大きく変わっています。従来は定性論に過ぎなかった知見の定量化や、従来の常識を覆すようなメカニズムや新データの発見が期待されます。鋼板の調質圧延ひとつとっても対象材料個々に条件が異なり、まだまだ未知の現象や検討すべき技術項目はたくさん残っています。各社から藤井さんのように独創性と積極性に溢れた若手研究者が多数出てこられて、積極的に技術開発に挑戦し活発に議論がなされるよう願って止みません。その中心で議論をリードされている藤井さんの姿を思い描きつつ、以上をもってエールとさせていただきます。