



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

熱間圧延における酸化皮膜の研究を通じて

Research and Development on Oxide Scale Behaviour and Hot Rolling Characteristics

原 健一郎 (株)神戸製鋼所 技術開発本部
材料研究所 加工技術研究室
主任研究員

Kenichiro Hara

1 はじめに

私は現在、株式会社神戸製鋼所の技術開発本部 材料研究所 加工技術研究室に勤務しております。この部署では神戸製鋼所が扱う鉄鋼・金属材料を対象とした下工程の製造技術の開発を行っており、担当する金属やプロセスが多岐にわたるため1人の研究員が技術分野の壁を越えた開発に取り組むことができます。私もこれまでに鉄鋼・チタン・アルミニウム材を対象に、圧延・冷却・矯正など複数の技術分野について、分野横断的な視点を持ちながらの開発を担当してきました。担当する技術分野が広くなれば1つの技術分野の開発にかかる時間は短くなりますが、特に基礎研究に関して重要と思うテーマについては継続的な取り組みを行っています。

以下では、わたしが学生時代より継続して取り組んでいる熱間圧延の酸化皮膜の変形と圧延特性に与える影響に関する研究の概要を、企業研究者となった現在の視点をふまえながら紹介いたします。

2 鉄鋼材料の熱間圧延と酸化皮膜

厚板・薄板・棒鋼・線材・型鋼・管材など、鉄鋼材料の多くは熱間圧延を経て製造されています。熱間圧延では鋼材が加熱炉雰囲気や大気にさらされることで鋼材表面に酸化皮膜が形成します。形成した酸化皮膜の表面写真の例を図1に示します。魚の鱗状の特徴的な模様が形成することから、高温酸化で形成する酸化皮膜を“スケール”と呼称します。スケールはそのままでは圧延により鋼材に押し込まれ表面欠陥の原因となるため、圧延前にデスケラーで除去されます。しかしながらただちに新しいスケールが形成するため、熱間圧延工程ではロールと鋼材との間に薄いスケールが介在した状態で圧延を行っていることとなります。スケールは鋼材製

品の表面欠陥の原因となるだけでなく、摩擦や熱移動を介して圧延荷重や先進などの圧延特性にも影響を与えることが知られています。生成するスケールの相および組成や機械的性質については高温酸化の分野において精力的な取り組みがある一方、圧延におけるスケールの変形や分断・剥離等の発生挙動は必ずしも明らかでなく、圧延特性に及ぼす影響も適当な摩擦係数や熱伝達率を仮定することで考慮されるに留まっています。そこで、今後の熱間圧延材のさらなる表面品質の追求および寸法精度の高精度化に向け、スケールの分断の発生や圧延特性への影響を、圧延におけるスケールの形態を観察することで明らかにすることにしました。

3 酸化物ガラス粉末を用いた酸化皮膜の観察方法の開発

まずは、熱間圧延におけるスケールの観察手法から検討をはじめました。熱間圧延は高温高速で行われるため熱間圧延

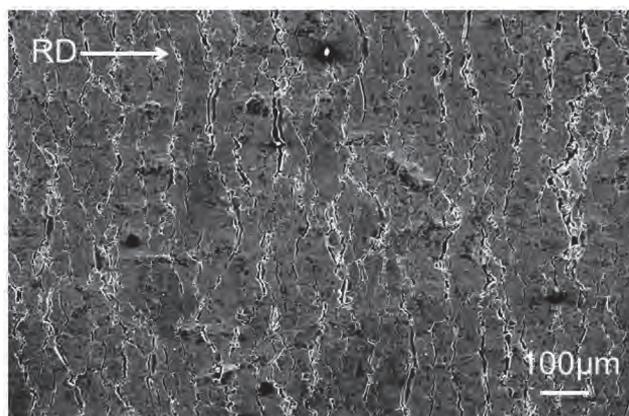


図1 鋼板表面に形成した高温酸化皮膜(鱗状の特徴的な模様が形成することからスケールと呼ばれる)

中のスケールのその場観察は現実的ではなく、これまでは真空圧延機¹⁾や圧延材を不活性ガスで満たされた容器に投入して冷却した後に観察する²⁾等の方法により、熱間圧延のスケールの変形に関する先駆的な研究が行われてきました。しかしながらこれらの手法には特殊な装置を必要とするほか、観察のための切断や研磨時に脆性なスケールが下地金属から剥離する場合もある等、困難な点もありました。そこで著者らは熱間圧延直後のスケールを簡便に保存する方法として、熱間圧延直後の鋼板に酸化ガラス粉末を振りかけて鋼板からの入熱によりガラス粉末を軟化させ濡れ広げることで表面を被覆する方法³⁾を開発しました。図2に本手法による断面の観察例を示します。ガラスの選定に際しては賀屋らの研究⁴⁾を参考に、熱間圧延直後の鋼板に素早く濡れ広がるために軟化温度が十分に低く、冷却中のスケールおよび下地金属からの剥離を防ぐために線膨張係数が鉄鋼材料に近く、スケールおよび下地金属との濡れ性が良いものを選択しました⁵⁾。ガラスによるコーティングは鋼板表面と大気との接触を遮断することでスケールの成長を防止するだけでなく、組織観察のための切断や機械研磨の際には端面のダレや脱落を防止する補強材としての役割を果たすため、走査電子顕微鏡 (SEM) による観察⁵⁾や電子後方散乱回折法 (EBSD) 等の各種分析⁶⁾にも好適であることを確認しています。加えて本実験手法は熱間鍛造等、他の熱間加工プロセスにも転用可能⁷⁾であるほか、観察対象の鋼板のサイズ等も問わないため、ラボ・実機を問わず熱間加工におけるスケールを観察するこ

とが可能となりました。

4 熱間圧延における酸化皮膜の変形

前章の観察手法を用いて、熱間圧延直後の鋼板の表面を被覆し断面を観察した例を図3⁸⁾に示します。実験は圧延温度 T に設定したアルゴン雰囲気の中で鋼板を加熱した後、炉内を大気に置換し酸化時間 t を設けてスケールを成長させたうえで圧延したもので、スケールの変形は、スケール厚さ・圧延温度・圧下率の影響を受け、薄いスケールは均一変形する一方、厚いスケールは表面から分断され不均一に変形することが確認できます。EBSDを用いた圧延前後でのスケールの結晶粒の平均的なアスペクト比の評価⁶⁾から薄いスケールは下地金属の変形に追従し長手方向に延伸している一方、厚いスケールは分断を生じ、長手方向への延伸が少ないことが明らかとなり、この塑性変形量のスケール厚さ依存性に着目し圧延におけるスケールの分断発生について考察しました。

スケールの主成分であるFeOは高温では塑性変形能を持つこと、その塑性変形能は強い温度依存性を持つことが熱間の引張試験⁹⁾により実証されています。そこでスケールの変形形態の圧延温度およびスケール厚さに対する依存性をスケールの厚さ方向の温度分布に着目して整理し、圧延におけるスケールの形態の予測に活用することにしました。高温の下地金属と低温の圧延ロールがスケールを介して接触する場合、スケールの厚さ方向には極短時間でスケールの熱伝導率

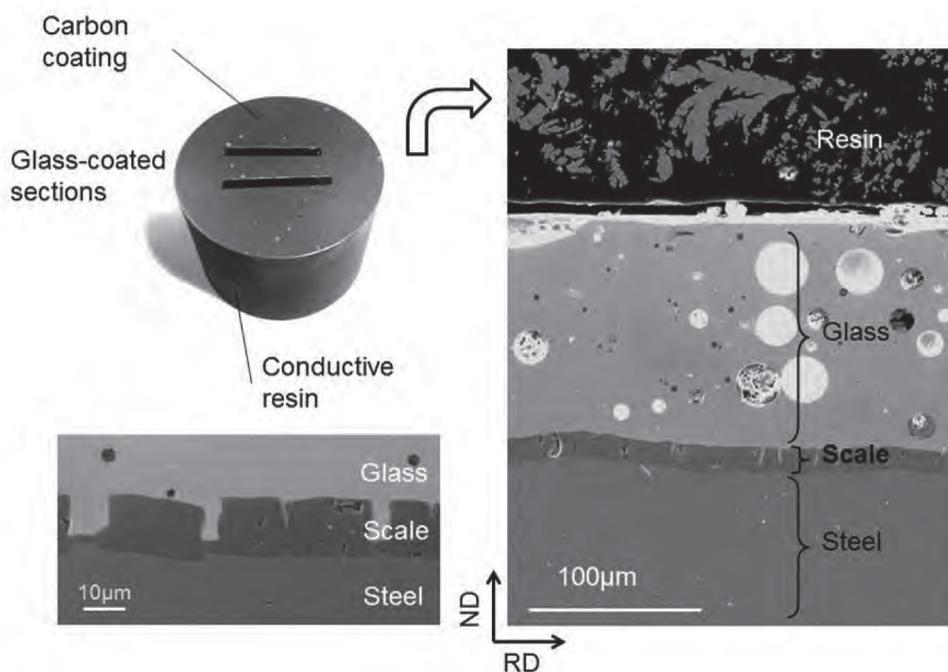


図2 圧延直後にガラスで表面を被覆後した上で導電性の樹脂に埋め切断および研磨してSEMで観察する観察手法³⁾

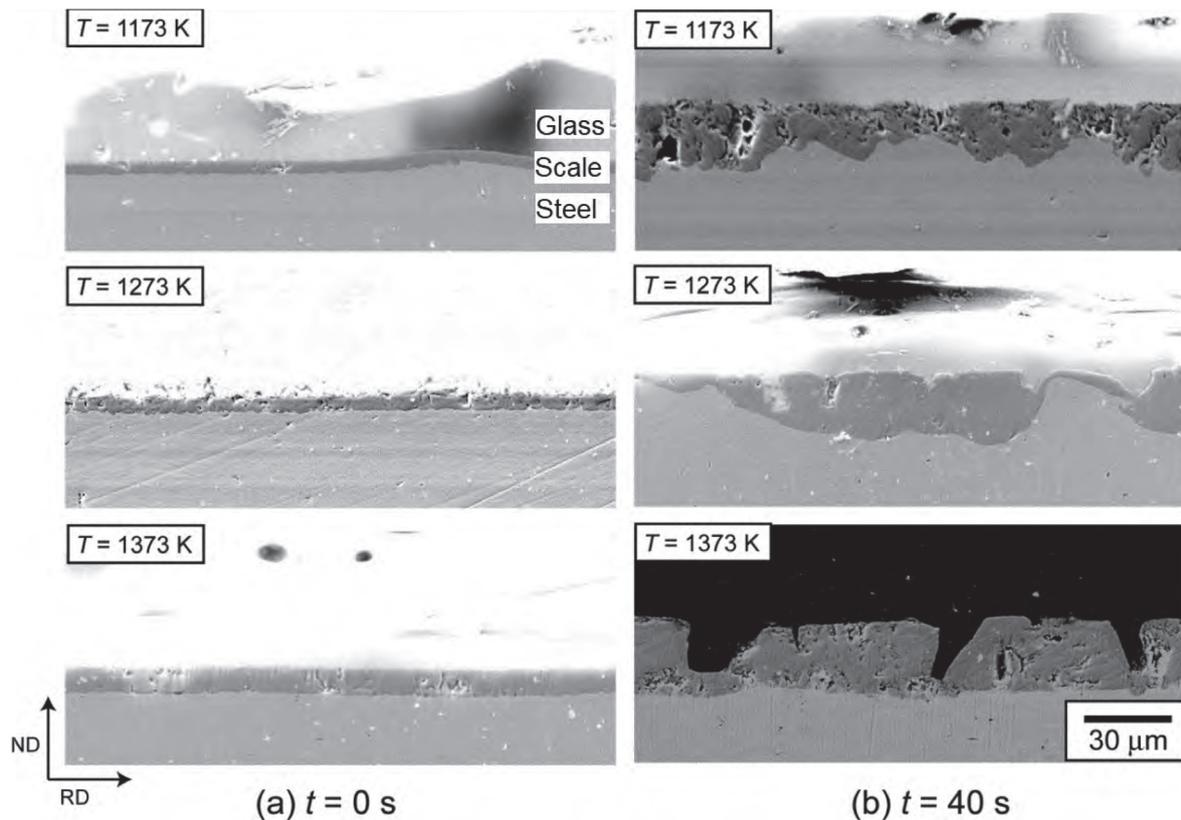


図3 圧下率30%における圧延後スケールの形態(圧延温度 T でアルゴン雰囲気中で加熱後に炉内を大気に置換し酸化時間 t だけスケールを成長させたうえで圧延したもの)⁸⁾

に律速された温度分布が形成されます。この時スケールが薄い場合は下地金属からの熱流で最表面温度が延性域に保たれるのに対して、スケールが厚い場合には、スケール自身の低い熱伝導率のために最表面の温度低下が大きく、脆性域となり分断を生じると想定しました。

以上の仮説に基づき、板厚方向の1次元熱伝導方程式を立てスケール表面の温度を計算することで、スケールの分断の発生を予測しました。Hidakaら⁹⁾の高温引張試験結果よりスケールの延性が下地金属の圧延によるひずみを下回る温度をスケールの延性脆性遷移温度と仮定することでスケールに分断が発生する限界厚さを求め、その温度依存性を明らかにしました(図4¹⁰⁾)。本予測手法をスケールの成長曲線(酸化曲線)と組み合わせることで、スケールに分断を生じない限界酸化時間を推算した結果を図5¹¹⁾に示します。圧延温度が低ければスケールが脆性的であるためスケールが薄くとも分断が発生し、圧延温度が高ければスケールは延性的である一方スケールが短時間で厚く成長するため分断が発生するという二律背反によって限界酸化時間が決定されることが読み取れます。本手法に基づき、表面欠陥の原因となるスケールの分断の発生を抑制する目的でのデスクレーリングの最適タイミングの推定が可能となりました。

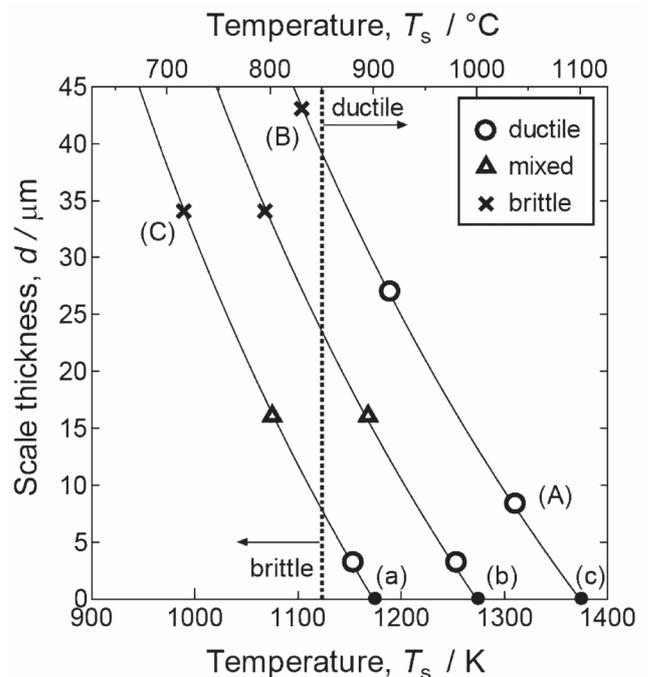


図4 ロール接触直後におけるスケールの最表面温度(計算値)のスケール厚さおよび圧延温度 T_i に対する依存性(T_i = (a) 1173 K, (b) 1273 K, (c) 1373 K)¹⁰⁾

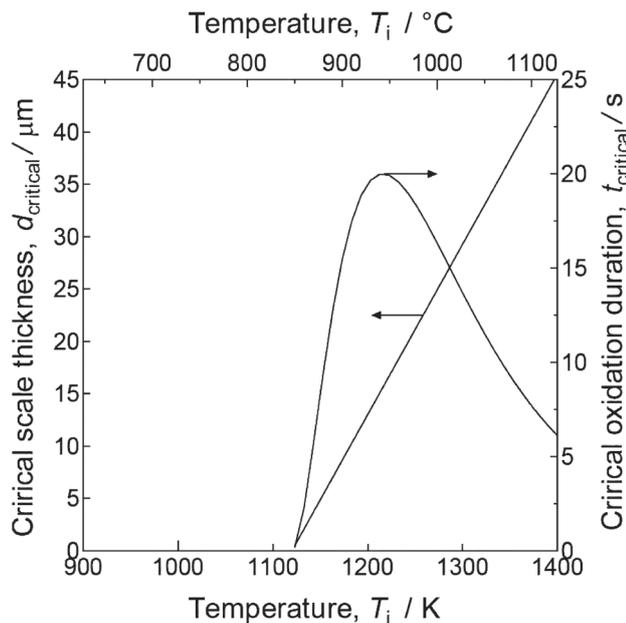


図5 スケールに分断が発生する限界スケール厚さおよび限界酸化時間¹¹⁾

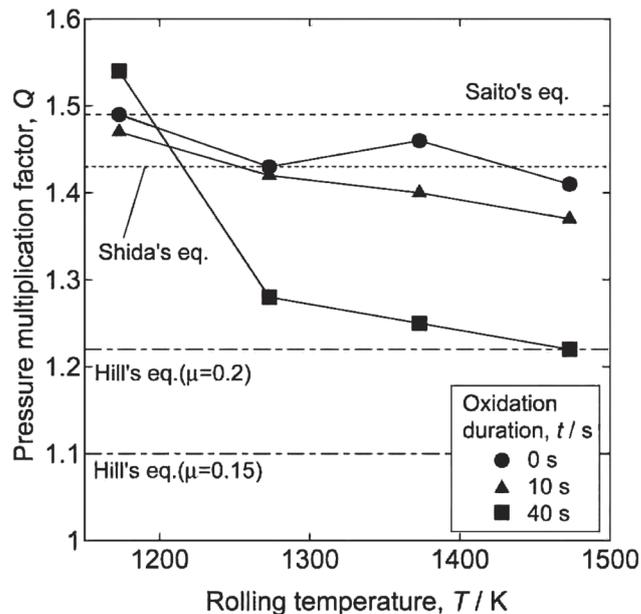


図6 圧下力関数の圧延温度およびスケール厚さ依存性 (圧下率 30%)⁹⁾

5 酸化皮膜が圧延特性に及ぼす影響の評価

今後熱間圧延板の寸法精度および平坦度のさらなる高精度化を実現する上では、圧延荷重の予測精度のさらなる向上が必要となります。予測精度向上に向けた取り組みとしてスケールの摩擦への影響を評価しました。実験で測定した圧延荷重を変形抵抗や投影接触長さで規格化することで摩擦への影響を圧下力関数として評価した結果を図6に示します。圧下力関数の大小をスケールの変形と対応させて確認すると、スケールが均一に変形する場合圧下力関数はスケールの厚さには依存せず一定であり圧延荷重の予測精度はスケールの影響を受けない一方で、スケールに分断が発生する場合には圧下力関数が低減している⁹⁾ことが確認できます。この際、被圧延材のメタルフローとして内部に導入される付加的せん断変形が減少していることも明らかとなりました。この現象は、スケールが摩擦低減効果を示すことを意味しており、スケールが均一変形する場合と区別せず取り扱っていると圧延荷重の予測が過大となることを示しています。スケールの摩擦低減効果は複数パスの圧延¹²⁾においてもスケールに分断が発生するタイミングで発現すること、Siなどの添加元素により変化するスケールの相や組成の影響を受ける¹³⁾こと、摩擦低減とは逆に摩擦が増える場合もある^{14,15)}ことを確認しております。本知見はまだ実機に生かすことはできていませんが、今後の熱間圧延荷重予測のさらなる高精度化の方向性として、スケールの相や変形の違いに着目した摩擦の変化を考慮に入

れる必要性を明らかにできたものと考えております。

6 おわりに

本研究は、宇都宮裕先生(現大阪大学教授)のご指導のもと神戸製鋼所との共同研究として開始したもので、私は当初学生として研究を担当しておりました。大学在学時には早い時期から鉄鋼協会の学会・各種討論会・研究会に数多く参加させていただきました。鉄鋼業界の企業研究者の方々には皆、なぜそうなるか、というメカニズムを非常に大切にしており、製造現場を知る方々の疑問に答えたい、という思いで実験を繰り返し、また学会で意見を伺うという充実した生活を送ることができました。本研究は、数多くの先輩方とのディスカッションを経て進展したものと考えております。特に、2012~2013年までに参画させていただいた鉄鋼協会の「加工プロセスにおける酸化被膜の影響研究会」では、大学・企業双方の第一線の研究者の方々から鉄鋼プロセスの研究開発に関する様々な着想や視点を頂き、日本の鉄鋼分野の優れた基礎研究の数々と応用研究の取り組みの深さに多くの刺激をいただきました。

企業研究者となった現在では、これまでラボの小さな圧延機で自ら手を動かしながら実験・観察してきた現象を実機にあてはめて実証・改善する立場となりました。実機から得られる情報は時に外乱や計測ノイズも多く、起きている現象を把握し難いことを痛感しましたが、原理原則を心の灯明のように掲げながら物事を順序立てて整理し考察することで、

データから現象をすくい上げたり改善につながるヒントを得たりという経験を積むことができました。失敗も数多くありますが、企業研究者の先輩方に教えていただいた、なぜそうなるのか、という視点を常に大切にしながら日々の職務に邁進しております。

私も中堅の研究者となり、社内では徐々に担当分野を先導していく立場となりました。入社より現在を振り返ると、自らの取り組みを社外に発信し知見を社会に還元する機会が少なかったことを今更ながら心苦しく感じております。今後は、生産現場での課題を知り学会と産業界の橋渡しをすることで学術の発展にも寄与できる研究者として成長していく所存であり、引き続き皆さまのご指導、ご支援をいただければ幸いです。

参考文献

- 1) 瀬川明夫, 鈴木健寛 : 材料とプロセス, 22 (2009), 1069.
- 2) 岡田光 : 塑性と加工, 44 (2003), 94.
- 3) H. Utsunomiya, S. Doi, K. Hara, T. Sakai and S. Yanagi : CIRP Ann. Manuf. Technol., 58 (2009), 271.
- 4) 賀屋章, 水田桂司, 福森淳三, 川水努, 関庚俊 : 三菱重工技報, 36 (1999), 300.
- 5) 原健一郎, 土井彰一, 宇都宮裕, 左海哲夫, 柳修介 : 鉄と鋼, 96 (2010), 492.
- 6) K. Hara, H. Utsunomiya and R. Matsumoto : Adv. Mater Res., 922 (2014), 242.
- 7) R. Matsumoto, Y. Osumi and H. Utsunomiya : J. Mater. Process. Technol., 214 (2014), 651.
- 8) 原健一郎, 宇都宮裕, 左海哲夫, 柳修介 : 鉄と鋼, 97 (2011), 393.
- 9) Y. Hidaka, T. Anraku and N. Otsuka : Oxid. Met., 59 (2003), 97.
- 10) 原健一郎, 松本良, 宇都宮裕 : 材料とプロセス, 26 (2013), 878.
- 11) H. Utsunomiya, K. Hara, R. Matsumoto and A. Azushima : CIRP Ann. Manuf. Technol., 63 (2014), 261.
- 12) 原健一郎, 柳修介, 宇都宮裕 : 第63回塑性加工連合講演会講演論文集, (2012), 459.
- 13) K. Hara, H. Utsunomiya, R. Matsumoto and T. Sakai : J. Phys. Conf. Ser., 379 (2012), 012043.
- 14) 原健一郎, 仲村宗起, 宇都宮裕, 左海哲夫, 松本良 : 銅と銅合金, 51 (2012), 290.
- 15) K. Hara, S. Doi, H. Utsunomiya and R. Matsumoto : Steel Res. Int., Special Edition, (2012), 1011.

(2022年4月18日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

金沢工業大学 工学部機械工学科 教授

近藤 泰光

原さんとは鉄鋼協会の「加工プロセスにおける酸化皮膜の影響」研究会で一緒になりました。原さんは大阪大学の宇都宮先生のところの博士過程の学生で、私は企業研究者という立場でした。いつも笑顔で親しみやすい印象でした。研究発表ではテーマの背景等の周辺の知識もしっかり理解されており、下記のように新しい知見を次々と発表されており、その研究実力に驚いたことを記憶しています。

この分野の長年の課題として、鋼材表面にスケール起因の疵がどのように発現するかという問題がありました。この問題は、スケールの特性に関する高温酸化の分野と塑性加工分野との境界領域の問題であることや、実験での実態を保存することが難しいことから、長年の課題でした。この問題に新たな考えを持ち込んだのが原さんと宇都宮先生のグループでした。原さんが示した図4は明快にその機構を説明しています。スケールの主組成

であるウスタイト (FeO) は酸化物でありながら、高温域では塑性変形できる性質があり、温度とスケール厚みとの関係で、ウスタイトが塑性変形できない場合にスケールが分断して表面疵につながるというものでした。領域塑性加工を専門とする研究者が、スケールの特性を考慮してすることで得られた成果で、その研究会を代表する知見でした。また、図2に示されているように、ガラス粉末を用いることで実験後の状態を凍結されているのも見事でした。

原さんは圧延分野の企業研究者として活躍されており、今後さらなるご活躍を期待しています。さらに、若手研究者の育成も期待しています。最近、鉄鋼協会の講演大会での発表件数も、コロナ禍のせいもあるのか少なく感じています。原さんには若手研究者を引き連れて学会に来られることも期待しています。

日鉄テクノロジー(株) 東日本事業所 環境省エネ技術部 部長

岡田 光

鉄鋼協会の研究会を通して知り合ったのは、原さんが学生の頃でした。当時、私は熱間圧延におけるスケール疵改善に取り組んでおり、今回、本文で紹介されたスケール観察方法やスケール変形挙動調査を大変参考にさせて頂きました。特にスケール対し熱伝導に基づいた解析方法や考え方は、当時、私が取り組んでいた課題のヒントになりましたし、その重要性から鉄鋼協会において「スケールの伝熱特性支配因子調査」研究会を設立するきっかけになりました。

神戸製鋼に就職されてからは、スケールだけでなく、圧延・冷却・矯正など製造プロセスに係る幅広い分野について担当されていると聞いています。本文の「終わりに」を読ませて頂くと、製造現場における課題に対し奮闘されている様子が伝わってきました。

私も長い間、製鉄所内に駐在し、鋼板表面、特にスケールに係る課題に取り組ませていただきました。その中で、様々な失敗もありましたが、大きな成果につながり、周囲の人と一緒に喜び、充実した時間を過ごすことができました。私の製造現場を対象とした研究者としての経験を紹介し、原さんへのエールとさせて頂きたいと思います。

研究は、物事の真理を探究するという性質から一つのテーマを長い時間かけて深く掘り下げるのが良いと思います。しかし、製造現場を対象とした研究、特に私の携わった疵対策のような課題は、緊急性を要する 경우가多く、じっくり考えている余裕はありません。良かれと思われる対策を繰り返している中、最善策が見つかり解決するものです。その時に、「なぜそうなるか」という理屈付けを行い、再発防止を図りました。でも、この理屈を考える中で、腑に落ちないことが発生するのです。私は、これを忘れないことが大事だと思います。

製造現場では、解決したと思うと次の課題が発生し、いつまでも解決済みの課題に取り組む訳にはいきません。でも、腑に落ちないことを覚えていっていると、それが数年、あるいは数十年後、ふとしたきっかけで理解できるようになります。そうすると視界が開け、様々な理解できなかった現象が、連鎖反動的に見えてきます。

原さんも中堅研究者となり、より広い分野の課題に対応されることでしょう。「なぜそうなるか」ということを大事にし、より深く製造プロセス課題の本質を見極めて下さい。そして、その取り組みを発信することにより産業界から学会を牽引されることを期待します。