



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

多様性と深まりの両立： 研究トレードオフ関係への挑戦

Consistency between Diversity and Deepening :
Challenge to Trade-off Relationship in Research

田路勇樹
Yuki Toji

JFE スチール (株)
スチール研究所 鋼材研究部
主任研究員

1 はじめに

2002年に川崎製鉄(株)に入社し技術研究所薄板研究部門(現JFEスチール(株)スチール研究所薄板研究部)に配属になり、10年余りになります。現在は、約2年間の海外留学を経て、所属が鋼材研究部に変わり、研究開発の対象が自動車用薄鋼板から厚鋼板に変わったところです。今回、「躍動」への寄稿の機会を頂きましたので、この機会にこれまでに携わった自動車用薄鋼板の研究開発を振り返り、企業研究者の研究生活の一端をご紹介します。

2 JFEスチールでの研究内容

当社には研究のみを行う製鉄所から独立した中央研究所なる組織がないため、材料開発研究部門の各研究員は、研究開発のシーズ発掘や現象解明のための基礎研究、新商品開発において最適な特性を得るためのラボ開発、生産ラインでの実機製造実験に加えて、量産品不具合への対応や、お客様への技術説明など、多様な業務を受け持ちます。一度に全ての業務に携わることはあまりありませんが、自分が担当する商品の開発フェーズに応じて上記の業務を順々に担当し、10年経つとおおよそ全てを経験します。振り返ると、基礎的な研究よりも、商品実用化のための研究開発が多かったように思います。以下では、筆者が携わった高加工性1180MPa級超高強度鋼板の開発についてご紹介します。

近年、自動車車体用鋼板は、地球環境保全を目的としたCO₂排出量低減のための薄肉軽量化と、車両の衝突安全性向上のための高強度化が進められています。特に、衝突時に乗員を守るキャビン周りには引張強さ(TS) 980 MPa級以上の鋼板が多く適用されるようになってきています。一方、鋼板

を高強度化すると成形性が低下し、TS1180MPa以上の超高強度部品の製造には、高コストな熱間プレス成形が適用されることが多くなっています。そこで筆者らは、低コストな冷間プレス成形の適用可能な、成形性に優れた1180MPa級冷延鋼板を開発、実用化しました^{1,2)}。従来1180MPa級鋼は、低炭素量で高強度が得られるマルテンサイト単相組織が主流であったのに対し、開発鋼は加工性を向上させるため軟質なフェライトを体積率で約40%含有させ、硬質なマルテンサイトとの複合組織としました。これにより、加工硬化特性(n値)を向上させることができ、従来比2倍の高い伸び値を達成しました。また、複合組織化により低下した引張強度を補償するため、Siによる固溶強化を活用しました。さらに、複合組織鋼は各組織の分率に依存して機械的特性が大きく変化するため、材質の安定化には熱処理工程において精密な組織制御が必要となりますが、当社独自の水焼入れ型連続焼鈍設備を活用して、材質を量産レベルで安定化させることができました。

また、TSが1180 MPa以上の鋼では使用中の遅れ破壊が懸念されます。遅れ破壊は、鋼に侵入した水素に起因した鋼の脆化・破壊現象であり、1960～1970年代に橋梁用高力ボルトで破壊した事例があります。現在のところ自動車用鋼板において使用中の遅れ破壊は報告されていませんが、近年の材料超高強度化を受けて、遅れ破壊抑制への配慮が必要でした。一般的に遅れ破壊の支配因子は、強度や組織などの材料因子、負荷応力、侵入水素量と報告されています。しかし、筆者らは薄鋼板の場合は成形加工でのダメージを考慮する必要があることを指摘し、負荷応力、塑性ひずみ、侵入水素量の3軸で破壊領域を定量評価する、3次元マップを用いた材料評価法を提案しました³⁾。図1は開発鋼の遅れ破壊発生条件マップを示したものです。材料を使用する条件を図中に当

てはめることで、使用条件での遅れ破壊発生の危険性を定量的に評価でき、遅れ破壊を回避するための部品設計の指針が得られると考えています。上記のような検討の結果、開発鋼は図1の冷間プレスダイレクトビームに初めて適用いただくことができました。また、本開発に関連して、遅れ破壊および鋼板への水素侵入挙動に及ぼす塑性加工の影響を基礎的に調査した結果の論文投稿^{3,4)}、国際学会での発表⁵⁾や、当社が自動車用鋼板分野で提携しているThyssenKrupp Steel Europe AGとの共同研究⁶⁾など、様々な経験を行うことができました。

3 MPIEでの研究内容

基礎研究から上述したように材料が実際に使用されるまで、多様なフェーズで材料開発に携わることができるのが企業での材料研究開発の面白さかと思えます。しかし一方で、様々な業務を同時に担当するため、一つ一つの研究を深めにくい点にもどかしさを感じていました。そんな中、社内の海外留学制度により、約2年間ドイツのMax-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH (MPIE) で研究する機会を得ました。そこでの研究内容の一部を紹介させていただきます。

近年、Quenching & Partitioning (Q&P) 熱処理⁷⁾を用いた材料開発が、特に海外で盛んに行われています。Q&P熱処理は、オーステナイト単相またはフェライト-オーステナイト二相域からマルテンサイト変態開始点以下まで冷却し、オーステナイトの一部をマルテンサイト変態させた後に、200～500℃程度の温度域で保持することで、マルテンサイト中の過飽和な炭素原子が周囲のオーステナイト中に分配するという現象を用いてオーステナイトを安定化させるものです。し

かし実際には、ほとんどの場合、マルテンサイト変態させた後の保持の過程で、未変態オーステナイトがベイナイト変態してしまいます⁸⁾。そのため、炭素原子のオーステナイトへの濃化が、マルテンサイトからの分配で生じたものなのか、ベイナイト変態に伴うものなのかを、明確に、定量的に示した報告はこれまで見られませんでした。Q&P熱処理後の組織と機械的特性およびその関係を理解・制御して、優れた商品開発につなげるためには、これらの競合する現象を正確に把握することが不可欠です。そこで筆者らは、マルテンサイト変態後、保持中にベイナイト変態が起こらない化学成分、熱処理条件を見出し、ベイナイト変態が生じていないことをX線回折および膨張率測定で明確に示した上で、炭素原子のマルテンサイトからオーステナイトへの分配を、3次元アトムプローブ (3DAP) を用いて示しました (図2、3)⁹⁾。この結果より、炭素原子がベイナイト変態を伴わずマルテンサイトからの分配によってオーステナイトに濃化したこと、(ベイナイトをせん断型変態と考えた場合はベイナイト変態では起こりえない) To成分を超えて炭素がオーステナイト中に濃化しうること、多くの場合マルテンサイトへの炭化物生成を伴うため、CCE (Constrained Carbon Equilibrium) モデル⁷⁾で予測されるオーステナイト中炭素濃度までは濃化せず、マルテンサイトへの炭化物析出を考慮したモデルが必要であること、等が明らかになりました。

その他の研究テーマを含め、興味の赴くままに研究を進めた結果、当初考えていたほど十分に深い研究ができたかといえそうでもないかもしれません。しかし、実用化をあまり意識せずに研究に没頭でき、企業の研究員としては貴重な時間を過ごすことができました。また、MPIEの同僚や、留学中にMPIEを訪問された多くの大学、企業の研究者の方々と

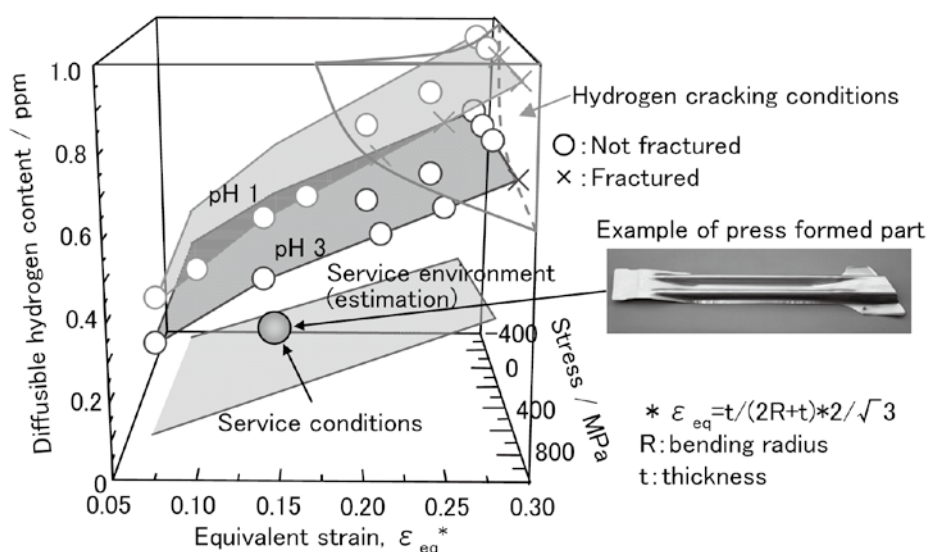


図1 高加工性1180MPa級超高強度冷延鋼板の遅れ破壊危険領域マップ

出会い、議論できたことは大きな刺激となりました。そこで得た繋がりは筆者にとって何よりの財産です。

4 おわりに

今回紹介した以外にも、自動車用高強度薄鋼板の開発に関連して、冷延鋼板の表面性状改善や工場での生産性向上、材

質ばらつき低減等、これまで多様な業務を担当してきました。そしてこの度、新たに厚鋼板を担当することになりました。同じ金属組織制御を基軸にした部署であるにもかかわらず、用途、鋼板の板厚、製造工程が変わると、要求される特性、鋼板造り込みのポイント等が、自動車用薄鋼板とは大きく異なり、日々、「へえ～」と驚きながら研究開発を進めています。先に述べたように、研究テーマ、業務が多様であるため、一つのことを深く考えるのが難しい環境ではありますが、様々な課題を担当できる分、抽斗が増えるとも言えます。変化を楽しみ、より幅広い課題に対応できる研究者になるとともに、一方で、大学の先生やMPIEの同僚と学術的な議論を多少なりとも楽しめるように、また、より高いレベルでコラボレーションできるように、時間を見つけて勉強していこうと思います。今後ともご指導ご支援のほど、よろしくお願い致します。なお、本稿で紹介した研究結果、開発成果は、多くの関係者の方々の様々な形でのご尽力、ご助力、ご助言により得られたものであることを付記し、この場をお借りして御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Y.Toji, K.Hasegawa, K.Kawamura, H.Kawabe and H.Shigemoto : *Materia Jpn*, 48 (2009) , 129.
- 2) Y.Toji, K.Hasegawa, H.Shigemoto, H.Kawabe, T.Fujita, Y.Tanaka, H.Nakamura, H.Ishida and H.Sakamoto : *Rev. Automotive Eng.*, 30 (2009) , 159.
- 3) Y.Toji, S.Takagi, M.Yoshino, K.Hasegawa and Y.Tanaka : *Tetsu-to-Hagané*, 95 (2009) , 887.
- 4) Y.Toji, S.Takagi, K.Hasegawa and K.Seto : *ISIJ Int.*, 52 (2012) , 274.
- 5) Y.Toji, S.Takagi, M.Yoshino, K.Hasegawa and Y.Tanaka : *Mater.Sci.Forum*, 638–642 (2010) , 3537.
- 6) S.Takagi, Y.Toji, K.Hasegawa, Y.Tanaka, N.Rössler, B.Hammer and T.Heller : *Inter.J.Automotive Eng.*, 2 (2010) , 7.
- 7) J.G.Speer, D.K.Matlock, B.C.De Cooman and J.G.Schroth : *Acta Mater.*, 51 (2003) , 2611.
- 8) M.J.Santofimia, T.Nguyen-Minh, L.Zhao, R.Petrov, I.Sabirov and J.Sietsma : *Mater.Sci.Eng.A*, 527 (2010) , 6429.
- 9) Y.Toji, H.Matsuda, M.Herbig, P-P.Choi and D.Raabe : *Acta Mater.*, 65 (2014) , 215.

(2014年1月27日受付)

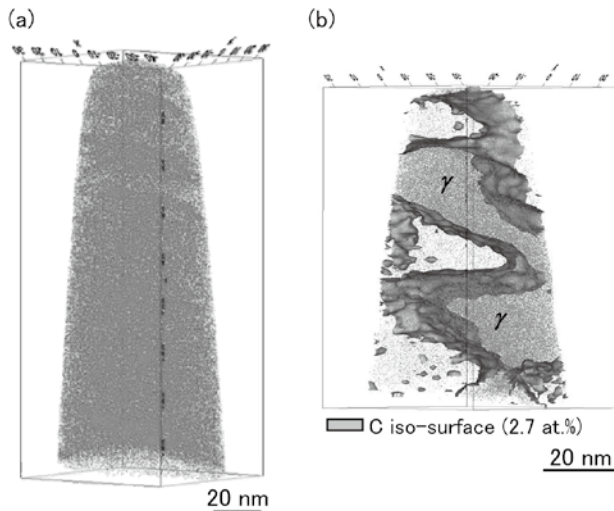


図2 3次元アトムプローブによって得られたパーティショニング処理前後の炭素原子分布 (Fe-2.7at.% C-Si-Mn) (a) 900°C → WQ、(b) 900°C → WQ → 400°C × 300s

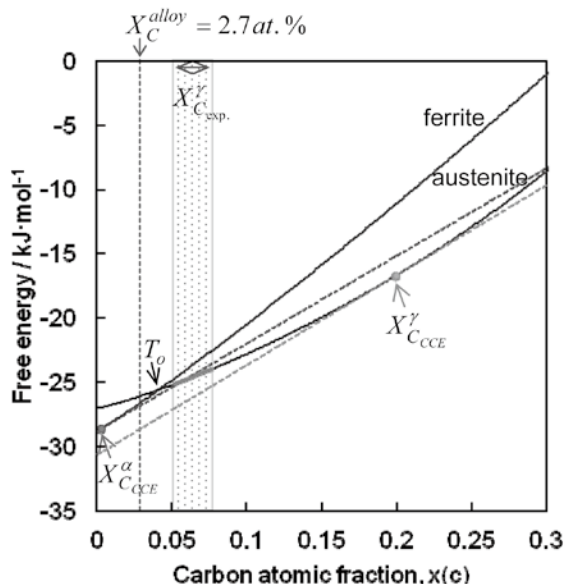


図3 3次元アトムプローブによって得られたオーステナイト中炭素濃度 ($X_{C_{\alpha\beta}}^{\gamma}$) とCCEモデルで予測される値 ($X_{C_{CCE}}^{\gamma}$) との比較 (化学成分: Fe-2.7at.% C-Si-Mn、熱処理条件: 900°C → WQ → 400°C × 300s)

先輩研究者・技術者からのエール

九州大学 機械工学部門 材料力学講座 教授
(独) 物質・材料研究機構 元素戦略材料センター 特命研究員

津崎 兼彰

深化と多様性の両立。田路勇樹さんはそれを実践されている。素晴らしいことです。その田路さんへのエールとして、3つの小話を届けます。

最初は「深化」に関する話。物事を深めようと研究を続けていると誰でも、「これで良いのだろうか？自分のやっていることに間違いはないか？」と不安になります。間違えることが怖いのです。以前に先輩から、「間違いを恐れていて成功はない」と論されましたが、最近よい表現に出会いました。同僚に勧められて読んだ沖方丁の「天地明察」の中の文章です。角川文庫版(上) 58頁より引用します。『だからこそ面白い。未知こそ自由だった。誤りすら可能性を作り出し、同じ誤りの中で堂々巡りをせぬ限り、一つの思考が、必ず、次の道しるべとなる。』頑張る力が湧いてくる表現です。

二つ目は「多様性」に関連して。米国在住歴の長い先輩研究者との会話の中で思ったこと。先輩曰く、「駐日大使になったケネディさんに多くの日本人が好意を抱いている。でも、ケネディ家は真のリベラルであり、彼女は今の日本を好感しているとは思えない。」なるほど、そこで思いました。日本人の多くは自分が好意を持っている相手は、当然、自分にも好感を抱いていると思込んでいる、と。相手に好意を抱くのは良いのですが、勘違いは大きな失敗を引き起こします。

多様な仕事の中で、私達は、異国の研究者、異分野の研究者と交わることが多くあります。思い込みと勘違いは禁物です。

三つ目は「支える力」について。2014年2月10日早朝の成田空港での話。大雪のために空港ラウンジで長い時間飛行機待ちをしていた時に、研修生のウエイターさんから聞いた話です。「昨日9日の日曜日は雪で午前中一便しか飛びませんでした。飛行機はあり、空港の除雪も出来ていたのですが、地上交通機関の乱れで機材整備員が空港に来られなかったのです。」なるほど、スタープレーヤーだけでは野球も芝居もできないのと一緒にです。田路さんは、将来必ずリーダーになれます。支える力への感謝を、共に肝に銘じましょう。

田路さんとは、小生がNIMS時代に何度か研究討論の機会がありました。また昨夏にMPIEを訪れた際にも討論しました。討論は真摯で楽しかった。田路さんは、薄板から厚板へと担当を変われました。しかし、鉄鋼研究を続けられる限り、今後も楽しい討論の機会があるはずで。小生はいつでもオープンです。田路さんは今回、鉄と鋼100巻の年に、気概あふれる記事を書かれました。小生も新たな職場で「機械工学と材料工学が融合した新しい材料力学の構築」に挑戦します。好奇心を大切に、心を拓いて、共に歩みましょう。

新日鐵住金(株) 技術開発本部 先端技術研究所 上席主幹研究員

高橋 淳

田路さんに最初にお会いしたのは、2011年にドイツのマックスプランク鉄鋼研究所(MPIE)にて派遣研究を進めていた時です。その時期、研究所に日本人はほとんどいませんでしたので嬉しい反面、同業他社ということで研究も含め今後どのように接すればよいか少し困惑した思いを持ったことを覚えています。その時点の田路さんの研究テーマは私自身の研究とそれほど接点はないと記憶していますが、私が帰国後、躍動の記事「多様性と深まりの両立」の中で述べられているように、アトムプローブを用いた鉄鋼基礎メタラジの研究に取り組まれたと知りました。

昨年のEUROMAT(セビア)で1年振りにお会いし、Quenching & Partitioning 熱処理による炭素分配挙動に関する興味ある研究成果を聴講させていただき、新しい技術に自らチャレンジする姿勢を感じました。MPIEにおいても、広く他の研究者の研究にも興味を持ち、セミナーやRoundtable discussion等の場に積極的に参加するなど、自分の研究分野に壁を作らないバランスの良い企業研究者という印象を持っていました。この10年間、シーズ発掘の基礎研究から量産製造まで多様なフェーズの業務を担当されてきたことを本

稿で知り、それが頷けました。企業においては、不明な冶金現象を解き明かすだけでなく、そこからシーズを見出しさらに材料開発に繋げていくことが求められ、同時にこの経験が研究者を育てると考えるからです。

本稿にもあるアトムプローブ法は、原子を1個ずつ測定できることから何でも判ると思われがちですが、不均一な組織を有する鉄鋼材料においては全くの誤りで、目的を持った的を射た実験を行わなければ有益な情報は得られません。鉄鋼材料研究は長い歴史があり、原子レベル解析を用いても、先人たちが作り上げた通説を確認したに過ぎないことがほとんどです。しかし、極まれに、予想外の結果が得られ新たな展開に繋がることがあります。これを成し遂げるためには、何よりメタラジの基礎学をしっかり理解し、このような解析技術を活用する必要があります。企業研究者であっても真理の追究において壁はありませんので、今後も大いに議論させていただきたいと思います。同じ鉄鋼材料分野で切磋琢磨できる研究仲間が増えることは自身の力を向上させるためにも有難いことであり、この気持ちを田路さんへのエールとさせていただきます。