



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

鉄鋼冶金研究における私の守破離

My "Shu-Ha-Ri" in Research on Steel Metallurgy

中田伸生

Nobuo Nakada

東京工業大学
物質理工学院 材料系
准教授

1 はじめに

本稿の執筆依頼を受けたものの、なかなか筆が進まない。2012年から始まった「躍動」は、すでに80名以上の方が執筆されており、そのいずれも素晴らしい研究成果や体験を収録された貴著ばかりである。このような評判の企画を私が担当できるのか、という不安を感じたのが第一の理由である。加えて、「躍動」では、先輩研究者・技術者からのエールとして、関連分野における著名な先生のコメントが同時に掲載されることを特徴としている。自分の研究を第三者に評価されることはもとより、通信簿の公開とも言うべき、このようなシステムを恥ずかしく思ったのが第二の理由である。しかしながら、執筆の機会をいただいた以上、私なりに自身の研究生生活を振り返るとともに、今後の意気込みを記そうと思い、筆を進めることにした。

これまでの研究生生活を振り返るとき、多くの先生、先輩からたくさんのご指導をいただいたことに改めて気付く。茶道、武道などの世界には「守破離(しゅ・は・り)」と呼ばれる修行の段階を示した言葉が存在する。すなわち、

守：師や流派の教え、型、技を忠実に守り、確実に身につける段階

破：他の師や流派の教えについても考え、良いものを取り入れ、心技を発展させる段階

離：一つの流派から離れ、独自の新しいものを生み出し確立させる段階

である。本稿では、とくに研究者として守破離の転換点を与えて下さった師と仰ぐ先生方との出会い、そして、これによる研究の発展を中心に紹介してみたいと思う。

2 私の守破離

守：鉄鋼の組織制御の妙技に魅せられて～九大での14年間～
私が本格的に鉄鋼研究を始めたのは新世紀が幕開けした

2001年、21歳のときである。九州大学工学部 物質科学工学科に在籍していた私は、4年生の研究室配属の際、材料加工工学講座の教授 高木節雄先生(現九州大学名誉教授)の研究室の門を叩いた。当時、熱力学、結晶学、速度論などの要点をまとめながら金属の相変態を広範に取り扱う高木先生の「固相変態論」は学科の名物講義のひとつであり、私もこの講義を通して「鉄鋼材料の組織制御の面白さ」の一端に触れた一人である。言うまでもなく、高木先生は組織制御の達人であり、オーステナイト鋼では加工誘起変態とその後の逆変態¹⁾、フェライト鋼においては粉末プロセスを利用した超強加工技術²⁾という独創的な手法によって、超微細粒鋼の創製を先駆けたことは有名である。このような研究例が物語るように、高木研では鋼の合金設計と加工熱処理によるユニークな組織制御を専売特許としており、そこで習得した知識と技術こそが私の研究者としてのDNAであることは間違いない。とくに、マルエージング鋼やステンレス鋼などの高合金鋼における幅広い合金設計は、炭素鋼では実現することのできない組織制御の可能性を感じさせてくれる。幸運にも修士課程修了後そのまま高木研の助教(当時は助手)に採用いただいた私は、それまでに学んだ知識を活かし、ラスマルテンサイトからオーステナイトへの逆変態の際に発現するオーステナイトメモリーと呼ばれる現象について、高合金鋼を用いた研究³⁾を進めることで学位論文をまとめることができた。

さて、高木研では、「熱処理が終わったら、速やかに光学顕微鏡観察と硬度試験を行うこと」という教訓が長く伝わっている。とくに、金属の組織観察に対しては、私は、なかなか思うような組織写真が撮影できず苦しんだことを思い出す。実は、この機械的とも言える反復作業の中こそ金属組織と向き合う時間があり、「この組織は、どういった熱・加工履歴を経て形成されたのか?」、「力学特性を向上させるための理想的な組織とは?」ということ想像する力を養ってくれたように思う。その具体的な一例がパーライト組織である。図1は

共析鋼を恒温保持することで生成したパーライトの (a) SEM 組織写真ならびに EBSD 法で取得した (b) フェライト相に関する結晶方位マップである。パーライトは鋼のラメラ共析組織であり、金属の初学者でも必ず習う基本の変態組織である。当時、EBSD 法が普及し始めており、学生と何気なく取得したパーライト中のフェライト結晶方位が目まぐるしく変化することにとっても驚いた。共析変態とはいえ、パーライト中のフェライトも所詮は過冷オーステナイトから析出した相である。「なぜ、拡散律速によって析出したフェライトの結晶方位がこんなにも変化するのか？」高木研で受けた薫陶がなかったら、このような素朴な疑問を見落としていたかもしれない。その後、更に研究を進めるうちに、このパーライト中の結晶回転はフェライト/セメンタイト間のミスフィットによって生じる弾性ひずみに起因し、さらに、これによって生み出された内部応力がパーライトの強度因子のひとつになっているという新たな発見を見出すことができた (図2)⁴⁶⁾。

破：理論と計算が実験を活かす ～東工大での出発～

2015年春、東京工業大学 大学院総合理工学研究科 材料物理科学専攻 (現 物質理工学院材料系) に現職として異動した。鉄鋼研究を続けることは決めていたが、研究室の立ち上げと同時に今後の研究の方向性を模索していた。そんなとき、暖かく声を掛けていただいたのが同じ講座に所属されていた教授 加藤雅治先生 (現 東京工業大学 名誉教授、日本製鉄株式会社 顧問) と尾中晋先生である。とくに加藤先生は、私に「固体の変形と力学」という大学院講義の聴講を特別に許可し、大学院生に交じって聴講する私に冶金学の観点から見た固体力学について丁寧にご教示下さった。加藤先生の講義の中にはマイクロメカニクスの基礎も含まれていた。マイクロメカニクスは、東工大の学生から「毎苦勞迷渦荷苦痛」と当字されるほど全容の理解は難しく、もし仮に私が学生のとときに同じ講義を受講していても全く理解できなかつたらう。しかしながら、九大時代の経験を通し、自分なりに研究に対する問題意識を持って受講すると、毎回の講義が楽しくて仕方なく、自分のために講義を行っていただいているという錯覚に陥るほどだった。ちなみに、このとき加藤先生はご退職の前年であり、本講義を受講できたのはまさに幸運であった。受講した講義の回数はわずか7回であったが、この講義を通して学んだことを利用し、上述したパーライトの内部応力に関する新しい論文⁷⁾を加藤先生と共著で書き上げることができた。内容は、マイクロメカニクスの初等問題に過ぎないが、私にとっては忘れることのできない論文のひとつである。なぜなら、東工大に赴任して初めて取り組んだ研究であると同時に、これまでに投稿してきた論文とは異なり、組織写真や力学試験などの実験データが一切含まれていない論文だからである。

私は実験屋である。そんな私が、加藤先生の多大なるご尽力があったとはいえ、理論的な解析だけで論文を書き上げた経験は、新たな角度で研究に取り組むことで研究分野が大きく拓けることを私に教えてくれた。理論は素晴らしい。問題の単純化などいくつかの制約はあるものの、現象に対して明確な道標を与えてくれる。加藤先生流に言えば「見通しの良い結果」を与えてくれる。その後、実際にEBSD法を用いてパーライト中のセメンタイトの内部応力を測定したところ、マイクロメカニクスによって導き出せる理論解が実験結果とよく一致することが明らかとなった (図3)⁸⁾。本当の意味で理論と実験が融合するとき、実験結果により深い意味が与えられることを学んだ。最近では、ここに計算も取り入れようと、澁田靖先生 (東京大学) ならびに下川智嗣先生 (金沢大学) のご指導の下、分子動力学シミュレーションを用いた異相界面構造のモデリングに挑戦し、連続体力学とのマルチアプローチを目指している (図4)。ちなみに、パーライトの内部応力問題については、産学競創基礎基盤研究プログラム「革新的構造用金属材料創製を目指したヘテロ構造制御に基づく新指導原理の構築⁹⁾」におけるテーマのひとつとして、塚田祐貴先生 (名古屋大学)、諸岡聡博士 (日本原子力研究開発機構)、小島真由美博士 (現 JFE スチール株式会社) と名実ともに若手チームを結成し、フェーズフィールドシミュレーションや中性子・放射光技術を活用した多角的な理論・実験・計算の融合による共同研究も遂行している¹⁰⁾。

離：今後の展望

気が付けば、私も40歳を迎え、鉄鋼研究も20年という中堅の域に入った。我が国における定年制を考慮し、守破離のそれぞれの期間が同程度であるとするならば、未だ私は「破」の途中であり、様々な学問、研究に挑戦する時期だと感じる。現在、尾中先生ならびに昨年4月に着任された宮澤直己先生とご一緒させていただき、多くの学生たちに囲まれながら充実した教育・研究生生活を過ごしている (図5)。他の材料に比べて成熟した鉄鋼研究において、新たな研究分野を開拓し、「離」に至ることはとても難しい。それでも、私にしかできない研究があると確信して、ひたぶるに歩を進めるのみである。

3 おわりに

守破離は千利休の教えであり、その心は「規矩作法守り尽くして破るとも離るとも本を忘るな (利休道歌)」という和歌にある。大切なのは、守破離によって道を極めるときに「根本を忘れない」ことである。教育者として、研究者としての根本とはなんだろうか。それは、好奇心を忘れず、研究に取り組み、その姿を持って学生達を導くことではないだろう。

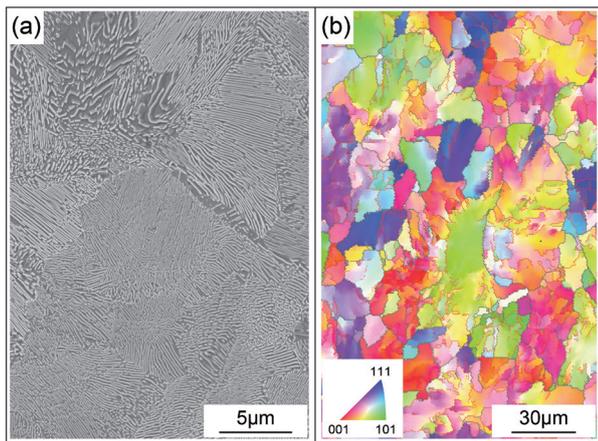


図1 0.8%C共析鋼を恒温保持することで形成したパーライトの(a)走査型電子顕微鏡写真と電子線後方散乱法によって取得した(b)フェライト相に関する結晶方位マップ

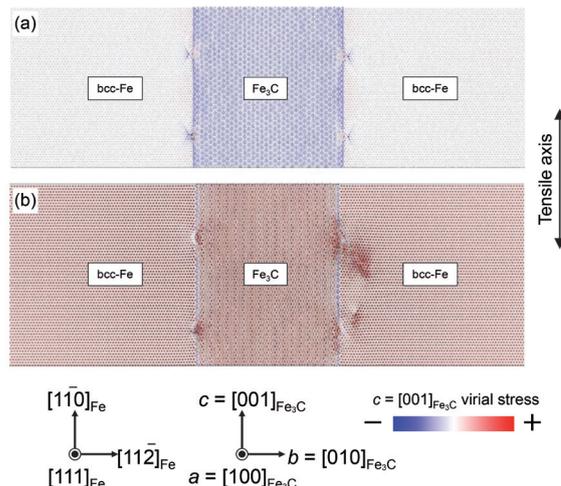


図4 分子動力学シミュレーションによるラメラパーライトの弾塑性変形挙動のモデリング。引張方向へのビリアル応力を表示。(a) 変形前に存在したミスフィット転位を起点として、(b) 変形中にフェライト母相へ転位が放出される様子を示す

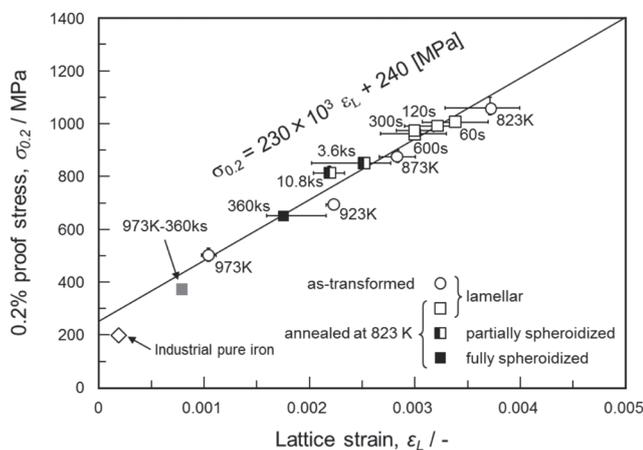


図2 種々の温度・時間の恒温保持によって形成したパーライトにおける0.2%耐力とフェライトの格子ひずみの関係⁵⁾



図5 研究室メンバーとの集合写真。尾中晋先生(三列目左から四人目)、宮澤直己先生(三列目左から六人目)と著者(二列目一番左)

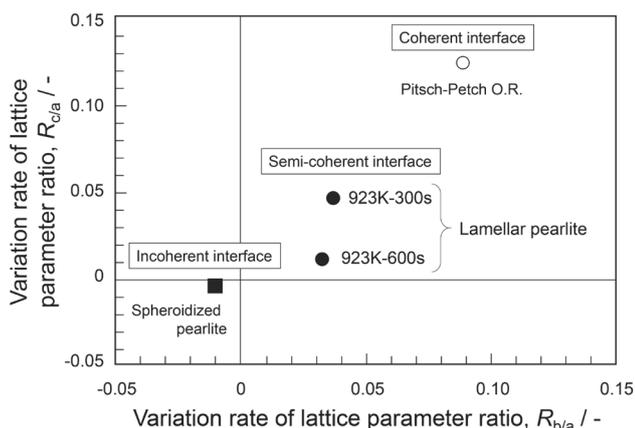


図3 電子線後方散乱法によって測定したパーライト中のセメンタイトの局所的な格子定数比 b/a と c/a の変化⁷⁾。整合界面を持つラメラセメンタイト(白丸)の理論値とラメラセメンタイト(黒丸)ならびに球状化セメンタイト(黒四角)の実験値。フェライト/セメンタイト界面の整合/半整合/非整合に伴い内部応力が緩和される様子を示す

うか。高木先生、加藤先生がそうであったように、今後、私も研究室にいる学生達にとって「守」となり得る存在に成長できれば、大学教員冥利に尽きる。

参考文献

- 1) 高木節雄：鉄と鋼, 80 (1994), N529.
- 2) 高木節雄：鉄と鋼, 105 (2019), 941.
- 3) 中田伸生：日本金属学会誌, 83 (2019), 449.
- 4) N.Nakada, N.Koga, T.Tsuchiyama and S.Takaki : Scr. Mater., 61 (2009), 133.
- 5) N.Koga, N.Nakada, T.Tsuchiyama, S.Takaki, M.Ojima and Y.Adachi : Scr. Mater., 67 (2012), 400.
- 6) N.Nakada, N.Koga, Y.Tanaka, T.Tsuchiyama, S.Takaki and M.Ueda : ISIJ Int., 55 (2015), 2036.
- 7) N.Nakada and M.Kato : ISIJ Int., 56 (2016), 1866.
- 8) 雨宮雄太郎, 中田伸生, 諸岡聡, 小坂誠, 加藤雅治：鉄と鋼, 105 (2019), 314.
- 9) 加藤雅治：鉄と鋼, 105 (2019), 123.
- 10) 毛利優斗, 塚田祐貴, 小山敏幸：鉄と鋼, 105 (2019), 305.

(2019年10月15日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

九州大学 総合理工学研究院 研究院長、教授

中島 英治

ふえらむ「躍動」は非常に面白く、いつも楽しみにしている記事であった。特に著者へのエールを読むのが好きであったが、今回、中田伸生先生に頼まれ、ノーとは言えず、忙しい中、こうやって記事を書いている。

中田君が学位論文を書く前だったと思うが、九州大学の名誉教授 高木先生が鉄鋼協会の研究会を立ち上げられた。この研究会のテーマは降伏現象で、組織と特性部会のロードマップのど真ん中のテーマであった。この研究会で中田君は九大高木研究室の中心メンバーとして表に裏に活躍されていたが、この研究会は非常に印象深かった。鉄鋼材料の降伏現象をミクロな立場とマクロな立場から議論されたが、降伏応力の物理的な意味は何か？ミクロ降伏とマクロ降伏の関連は？などなど、いろいろ議論した記憶がある。この中でパーコレーションという現象が材料の降伏現象を理解する一つの手助けにならないかと、中田君に紹介した。中田君はいつもの輝く目で私の話を聞いてくれ、理解し、次の研究会で会った時にはパーコレーションの物理をすでに理解していた。なんとという吸収の速さであろう、と当時感心したが、今思えば、中田君は常に何かを謙虚に学び、吸収しようとしており、高木研究室、加藤・尾中研究室でも多くのことを学んできたようである。このような中田君が非常に

印象に残ることを言ってくれた。「マルテンサイトの降伏応力は低く、加工硬化が大きい」ですと。普通硬くて強度の高いマルテンサイトは降伏応力が高く、最大引張強度も高いと思っていたら、見せてくれた応力-ひずみ曲線では確かに降伏応力が低い。何だ、こんなものかと思っただけだが、実はマルテンサイト系の耐熱鋼のクリープ変形における遷移段階は非常に特異でフェライト系耐熱鋼と大きく異なる。マルテンサイト鋼のクリープ変形の遷移域でのひずみ速度の低下は異常に急激である。これは応力-ひずみ曲線の大きな加工硬化に対応する現象である。フェライトとマルテンサイトのこの本質的な差は変態のひずみを緩和するために導入された転位に起因するものであると思われるが、その詳細は定量的には理解されていない。ただ、マルテンサイト系の材料の重要な本質的な現象をきちんと頭を整理して主張する中田君はさすがである。この域に達すると中田先生とお呼びするのがふさわしい。

取り留めのないことを書いたが、中田先生は将来有望な金属材料の研究者である。今後も大きく夢を膨らませ、日本の鉄鋼研究、材料研究を牽引していただきたいと心から思っている次第である。

(一社) 軽金属溶接協会 専務理事

相浦 直

鉄鋼冶金という少し懐かしい響きに、冒頭から反応してしまいました。私は、これまで、鉄系とは違う金属に関係してきましたが、外から見る「日本の鉄」の存在にはある安心感を覚えます。その最先端の研究者として「躍動」の執筆者に選ばれる中田先生は、まさに、鉄をはじめとする金属材料の謎を解き明かす勇士の一人なんだとあらためて納得します。

「守破離」、ほほう、こう来たか。と、中田先生への興味も沸き、読み進めました。九大、東工大、と素晴らしい師にも恵まれ、そこで、満足することなく、次々と自然界の謎へ挑戦していく。まさに勇士です。その背景には、そもそも中田先生にある、素直にありのままを受け入れる姿勢に加え、あふれるほどの疑問を持つ好奇心、未知なことに怯まない強さがあるのだと思います。その強さは、とかく行き過ぎると自分を孤立させてしまうところですが、先生もちまへの優しさと、周りの人を尊ぶ姿勢に支えられているのだと思います。私とは年も離れた後輩ですが、いつも先生との話に引き込まれるのは人としての魅力があるからだと感じています。

近年、パーライトの内部応力のご研究を興味深く拝見させていただいています。内部応力の可視化という手法

で、理論解明に挑まれています。研究の成果はもとより、変化に強い方だとの印象が強いです。逆境になればなるほどアドレナリンを人一倍出せる方ではないでしょうか。事実、研究グループの主力メンバーの突然の交替にも、研究リーダーとして、前向きに見事に対処されたのを記憶しております。まさに攻める勇士です。

私の大切にしている言葉に、「不易流行」という芭蕉の言葉があります。私は、何事も、基盤となる事とその時に大事な事、その両面を常にバランスをとって進めることが大事だ、というように解釈しています。中田先生は、これまでも、常に学びを進め基礎を築き、その上で、数々の自然現象の解明に挑戦されてきました。今後も、ご自分の基礎をなす学理を追求し、かつ時流にあった未知への挑戦を怯むことなく続けていただきたいと思います。

最後に、集合写真でも周りのみなさんのはつらつとした姿を頼もしく拝見しました。今や、中田先生も自分が師となって若手の研究者を育成する役目を担われています。まさに、若手研究者のリーダーとして活躍いただくことは、産業界が期待するところです。中田先生の益々のご発展を祈念しております。