



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

日々是匍匐前進

村上俊夫

(株) 神戸製鋼所 材料研究所
主任研究員

Toshio Murakami

1 はじめに

2001年に神戸製鋼所に入社してから、(株) 神戸製鋼所の技術開発本部 材料研究所 材質制御研究室という部署で鉄鋼材料の研究開発に取り組んできております。この部署では神戸製鋼所が扱う金属材料の大半の組織制御技術について研究開発しており、条鋼、厚鋼板、薄鋼板、鋳鍛鋼、溶接材料、鉄粉、アルミ、銅、チタン、時には生体材料まで取り扱っています。そのため、一人の研究員が分野の壁を超えて研究に取り組むことができ、筆者も上記のうち半分程度の分野に関わったことがあります。

本稿では、そのような環境で取り組んできた研究開発事例を、学会・論文発表に加え、特許で公開した知見も交えながら紹介させていただきます。ただ、11年間研究開発に取り組んできましたが、少しでも前に進むために必死に匍匐前進しているというのが現状です。そのため、『躍動』という題目にふさわしい内容になるかわかりませんが、神戸製鋼所という企業の研究員が何を考えながらどんなことに取り組んでいるかお伝えしたいと思います。

2 想定外の知見は分野を超えて

実際のモノ作りでは、成分・プロセスのいくつもの要素が同時に変化し、組織や特性に影響を及ぼします。そのため、成分ひとつ変えるとしても、組織や特性の変化が予想を裏切ることは珍しくありません。例えば、ある成分を増やすと、ある条件では特性が正の相関を示していたのが、他の条件が変わると負の相関を示すようになったりします。それが想定外の現象であれば、新しい材料の制御指針につながるため、実験をする際はある程度結果を想定して実験を仕込みますが、狙い通りの結果が得られるより、狙いが外れた方が楽しいことがよくあります。

一つの事例として鋳鋼の強度－靱性バランス改善の取り組

みを例示します。対象としている製品は船のエンジンのクランク軸に用いる材料で、疲労特性が要求されるため、フェライト－パーライト組織にVを添加して、VCの析出強化を活用して降伏強度を確保するように材料設計されていました。この材料は焼入れ焼戻し（といいつつ、巨大な鋳塊のため焼入れの冷却速度は5～20℃/min）で材質を作り込むのですが、部位ごとに冷却速度が異なるので幅広い冷却条件で強度と衝撃特性を満たすことが必要で、特に冷却速度が高くなった時に強度が高くなり靱性が劣化するため、靱性を確保するかが重要な課題でした。

その対策として、析出強化量の制御や変態制御（ベイナイト化）などを検討しましたが、なかなか強度・靱性バランスを改善できませんでした。あるとき、Nによるひずみ時効の効果の見るためにNの添加量を増加させたところ、予想に反して強度が若干低下、そのかわり幅広い冷却速度範囲で強度が安定化、靱性が大幅に改善されるという結果がでました。

今振り返ると理由は単純で、添加していたVがNの増量によりVCNとして安定化し、焼入れの加熱時にピン止め粒子として働くようになったため γ 粒径が微細化され、対象とする冷却速度範囲内では安定して微細なフェライト－パーライト組織を示すようになったために、強度が安定化、靱性が改善されたというものでした¹⁾。

ちょっとした工夫でVを析出強化に使うか、組織微細化に使うか制御できるという知見は、条鋼分野の圧延型非調質鋼に展開できました²⁾。通常、非調質鋼ではVを0.1～0.2%添加してVCで析出強化させています。これに対し、非調質で焼入れ焼戻し（QT）材同等以上の強度－靱性バランスを実現させることを狙い、N、V量の増加による棒鋼圧延時の加熱、圧延中にVCを多量に分散させることで組織微細化を図りました。

その結果、Fig.1に示すように0.2%V鋼では20 μ m程度だった旧 γ 粒径が、0.5V鋼では不均一な組織ながら、粗くて10 μ m、微細な部位では2～4 μ mまで微細化することができ、引張強度（TS）がほぼ同等でFig.2（a）に示すように室

温での u ノッチのシャルピー吸収エネルギー(uE_{RT})でQT材のおよそ倍の218Jまで靱性が改善できました。また、特筆すべきはその延性・脆性遷移温度($vTrs$)で、Fig.2 (b)に示すように0.2V鋼では室温付近であるのに対し、0.5V鋼では -40°C 以下まで低温化しています。非調質鋼でここまで高靱化できたのは画期的でしたが、開発目標に対し過剰な特性で、かつ、V添加コストをQT処理のコストと比較するとメリットが小さいことから研究は止まってしまいました。ただ、低温靱性に対するニーズが出てくれば適用できるのではないかと考えています。

また、一定量以上のV添加は、むしろ強度が低下しており、この知見は'07～'11年に実施された鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発プロジェクトの制御鍛造分科会の中で取り組んだ鍛造部品の傾斜機能化に活用しました。V添加材を用いて熱間鍛造の加熱時にVの固溶量制御をしたのですが、それによりFig.3に示すような傾斜機能化プロトタイプ部品の実現することができました^{3,4)}。さらに、自動車用超ハイテンの微細化による成形性改善などにも有効なことも見出しています⁵⁾。このように得られた知見を各分野の課題に

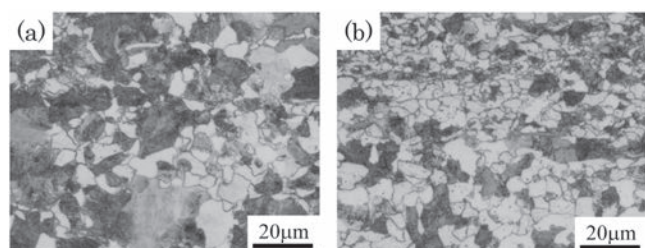


Fig.1 Microstructure of microalloyed medium carbon steel with (a) 0.2%V and (b) 0.5%V after 950°C heating and 850°C hot rolling

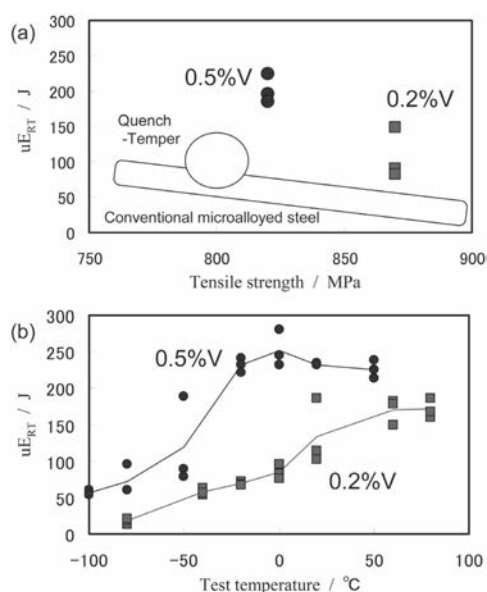


Fig.2 (a) TS- uE_{RT} balance and (b) Charpy transition curve of microalloyed steels with 0.2%V and 0.5%V

あわせて展開できることは、筆者の所属する部署の良いところと思います。

3 材質予測技術に対する思い

材質予測、特に組織予測に関しても取り組んできています。きっかけは'00年～'04年の「溶接技術の高度化による高効率・高信頼性溶接技術の開発」というプロジェクトで溶接部の材質予測技術に関わったことです。ここでは豊橋科技大の梅本先生が中心になって取りまとめた内容⁶⁾をベースに、溶接金属特有のアシキュラーフェライトの予測モデル⁷⁾を加えたことと溶接部のプロセス予測⁸⁾と組み合わせることで多パス溶接の溶接金属の不均一組織を予測できることが特徴になります。この取り組みを通して古典的な組織予測の基礎を身につけることができました。

またこの中で、フェライトの予測についてもまだまだ課題が山積していることがわかりました。特に変態初期と変態中後期を同時に精度よく予測することは難しく、なんらかの工夫が必要になります。この原因は大きく分けて2つあると考えています。一つは変態初期が核生成・成長モードに対し、変態中後期は核生成がおこらず成長のみで変態が進行するように変化すること、もう一つは成長をZenerのモデルで決まるC拡散律速の成長モードからソフトインピンジモードに変化した、成長速度の低下に従い合金元素の分配も成長に影響することがあると考えています。また、 γ 粒界に沿った成

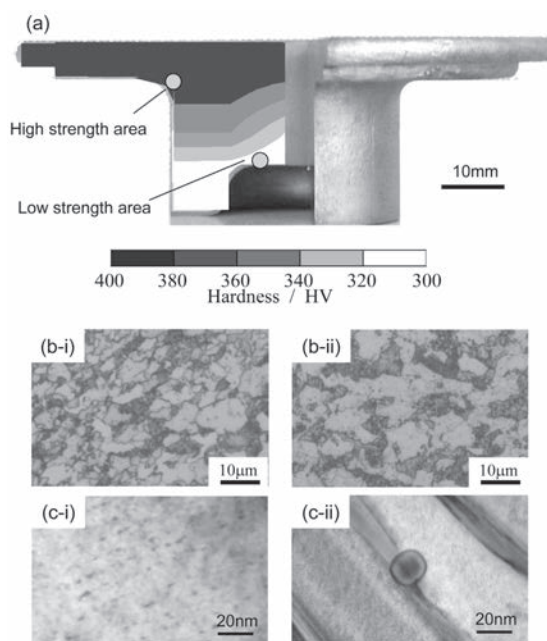


Fig.3 (a) Hardness distribution and (b) optical and (c) TEM micrographs at (i) high strength area and (ii) low strength area of functionally graded hot forged steel parts achieved by the solute vanadium control in 0.5%V added medium carbon steel

長速度と粒内に向かう成長速度も分けて扱わないと、粒径が微細なオーステナイトから形成されるフェライト変態と、溶接金属中のような粗大なオーステナイト粒からの粒界フェライトの形成を妥当に予測することはできません。上記の項目の中で筆者が既に検討できているのは限られた範囲ですが、その中でもソフトインピンジメントは重要な項目と考えて独自に取り組んだのでその内容を紹介します。

ソフトインピンジメントについては組織予測に組み込むことのできる基本式は既に提示されています⁹⁾。しかし、このモデルは離れた2点から同時にフェライトが形成される場合にしか適用できません。実際にはフェライトが全て同時に形成されるわけではなく、形成されるタイミングの異なるフェライト同士の間成長速度を考慮する必要があります。そこで初期フェライト粒径に差があった場合の、ソフトインピンジメントが起こった状況での成長挙動を検討し、その予測方法を導出しました¹⁰⁾。

このソフトインピンジメントモデルを用いれば、元々の狙いである変態中後期の変態速度の遅れを考慮できます。また、古典的な変態予測に組み込むことで、梅本先生の文献でも用いられている『変態率』という概念を用いずにKJMA型の予測モデルをつくることができ、その結果として『変態率』を用いることで失われていた粒子数、粒子サイズの情報を考慮できるようになります¹¹⁾。詳細は割愛しますが、このような取り扱いをすれば、2相域加熱時に残存するフェライトの粒径分布を考慮しながら連続冷却中の変態挙動を計算することが可能になり、薄板分野で活用されているようなDP鋼やTRIP鋼の組織形成挙動を粒径分布も含めて妥当に計算できます。

このような工夫は金属材料の変態挙動・析出挙動に汎用的に適用でき、先輩研究員の勧めで銅合金中の析出、溶解挙動の予測をしてみました¹²⁾。銅合金での析出挙動の実験データをモデルでどこまで予測できるか検討してみたのですが、この時に驚いたのは、銅中にNi₃Pが形成される現象では、鉄鋼で一般的に用いられている核生成-成長モデルではその挙動を予測することができず、ほぼ核生成のみで析出現象が進むと考えるのが妥当だという結論が得られました。非常に面白い発見だと思って喜んでいたのですが、そのような挙動はとっくの昔に実験的に検証されていた¹³⁾というのがオチでした…。

銅合金での件は勉強不足だったということを除けば、組織予測を通して実際におこっている現象を理解できることを示唆しています。それができれば、その現象を前提にして次の組織制御指針を検討することができるようでしょう。そこが、組織予測技術の価値のひとつかと考えています。最近ではPhase Field法のように形態までビジュアル的に予測可能な技術が汎用化しており、上記のような現象は簡単に考慮できるのかもしれませんが、計算が早く（上記の内容ならPCを使っても長くても数分）、ケーススタディが簡易にできたり、数式に基

づいて現象を理解することができたりする古典的な予測技術は、まだまだ活用できるのではないかと考えています。また、このような組織予測技術の高度化を通して、材質予測の元々の狙いである鋼材の製造技術への適用し、究極の姿と思っている鋼材製造工場の完全自動制御化、バラつきゼロのモノ作りに一歩でも近づくことができないかと夢見ております。

4 最後に

この11年間に取り組んできたことを振り返ってみると、自分なりに新しいことを見出して来たつもりでいたのですが、結局、従来知見のマイナーチェンジの域を出ず、先人たちが積み上げた山の上に小石をひとつ積み上げるのが精一杯という印象を拭えません。積み上げは当然重要なのですが、ブレークスルーするためには従来の知見・常識を覆し、新しい概念を生み出す必要があるかと思っています。その実現に少しでも近づくために引き続き『匍匐前進』していくつもりですが、企業の一研究員の力では絶対的に不足しているので、各方面の方々にお力添えをいただければと考えています。

参考文献

- 1) 村上俊夫, 難波茂信, 香川恭徳, 藤綱宣之: 特許3820720号。
- 2) 村上俊夫, 難波茂信, 下津佐正貴, 外山正雄, 小泉富士雄: 特許3950682号。
- 3) 村上俊夫, 畑野等, 有川剛史, 柿本英樹: 鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発プロジェクト第1回シンポジウム講演予稿集, (2009), 127。
- 4) 村上俊夫, 柿内エライジャ, 長田卓, 畑野等: 鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発プロジェクト第2回シンポジウム講演予稿集, (2012), 107。
- 5) 柿内エライジャ, 村上俊夫, 畠英雄: 特開2011-179050。
- 6) M.Umemoto, A.Hiramatsu, A.Moriya, T.Watanabe, S.Nanba, N.Nakajima, G.Anan and Y.Higo: ISIJ Int., 32 (1992), 306。
- 7) 関勇一, 村上俊夫, 難波茂信: ふえらむ, 10 (2005), 168。
- 8) 山本剛史, 山崎洋輔, 辻陽子, 宮坂史和, 黄地尚義: 溶接学会論文集, 23-1 (2005), 71。
- 9) C.Capdevila, F.G.Caballero and C.García de Andrés: Met. Mater. Trans. A, 32 (2001), 661。
- 10) 村上俊夫, 野村正裕, 二村裕一, 三浦正明: CAMP-ISIJ, 24 (2011), 401。
- 11) 村上俊夫: 特開2010-271084。
- 12) 村上俊夫, 有賀康博: 銅と銅合金, 49 (2010), 35。
- 13) T.Miyazaki, S.Kobayashi and T.Koyama: Metallur. Mater. Trans. A, 30A (1999), 2783。

(2012年3月27日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

(公社)自動車技術会 フェロー

武智 弘

➤ の原稿を拝見し「日々是匍匐前進」という旗印を高く掲げ多くの分野の材料開発に日夜邁進しておられる村上さんの現状がよく分り深い感銘を受けました。ここに書かれている事例は大変興味ある事ばかりですが字数の制約があるので全体的な事の一つだけ書かせて頂きます。お許し下さい。

近年鉄鋼材料の高機能化が強く要求されるようになり、鉄鋼材料の性質のバランス、という事が益々重要になってきました。ここで言うバランスとはある製造条件を変化させた場合、Aという必要特性は向上するが他の必要特性のBは逆に劣化する事が多いので、その得失を比較する意味でこの言葉が使われています。ただここで大切な事は「バランスとはAとBの妥協ではない」という事です。AとBを考慮しその両方を少しでも良くする条件は何か、を探索する事だと思います。

その場合その分野で従来から常識とされてきた知識の味付けを少し変えてみる、という程度では駄目です。その分野で非常識とされた知見、全然関係ないと思われていた知見をブレークスルーとして持ち込まねばならないでしょう。しかしその分野の専門家は普通そんな事はしません。私の知っている一つの例をご紹介します。

昭和30年代の後半、八幡製鉄所では画期的な超深絞り用鋼

板として今で言うIF鋼が開発されました。その動機は自動車会社から成型時のスプリングバックを低減するため降伏強度を下げて欲しい、という事でした。

当時八幡技研の鋼板研究室は厚板グループと薄板グループが机を並べており厚板グループは造船用鋼板の降伏強度を上げようと努力していました。ある日厚板グループが「降伏強度を上げようと思ってTiを入れたら逆に下がってしまった」と騒いでいたそうです。横で聞いていた薄板グループは「理由をよく分らんがそれならむしろ追試してみよう」と言っている研究しTiとC/Nの量・比を制御すれば降伏強度は劇的に下がる、という事を発見しました。これがIF鋼誕生の引き金だったという事です。後になって私が当時の鋼板研究掛長から直接聞いた話です。

つまり従来の通念に反する事をやるには他の分野とよく情報交換する事が非常に効果的だという事です。日本鉄鋼業には膨大な知見、技術が各鋼種ごとに蓄積されており、また現在でも分野横断的に情報交換する点では世界で一番恵まれていると思います。村上さんは神戸製鋼所で多種類の材料の研究をやっていらっしゃるとか、これは素晴らしい利点です。是非その恵まれた長所を大いに活用されて神戸製鋼所のため、日本のために更なる活躍をされる事を祈って止みません。

JFE スチール(株) スチール研究所 部長

三田尾 眞司

「匍匐前進」を前向きに捉えている様子が伺われ、頼もしく感じた。材料科学の先人たちが積み上げてきた知の山の大きさに圧倒され、前進を実感できないこともある中、重要なのは、着実に匍匐前進できる底力であると思う。

発展・成熟過程は、KJMA曲線で記述できる。個人の発展について、例えば、テニスでもゴルフでも、初心者頃は、種々、工夫するもののうまくいかず、悶々とした日々が続く。その後、努力を継続した結果として、比較的急速に上達するステージを迎える。なかなか実践できなかった理論が、上達して実践できから、初めて理解できたりする。上級者になっても悩みは尽きないが、初心者の悶々とした状態と、上級者の悩みとは、上達の速度は同じとしても、ステージが違うため、その内容は全く異なる。

一方、技術分野そのものも、KJMA曲線に沿って発展する。研究者個人のKJMA曲線の終点レベルは、分野の発展レベルにも依存する。分野の発展の例として、航空機の歴史を見てみると、空を飛ぶという人類の夢に向けたチャレンジは、紀元前から続けられてきたが、ライト兄弟による初の動力飛行成功は、20世紀に入ってから1903年、その高々24年後の1927年には、リンドバーグによる単独・無着陸での大西洋横断飛行成功

に至っている。KJMA曲線で例えれば、ライト兄弟の成功までが長い潜伏期で、その後、一気に核生成・成長した。最近の新型航空機は、空を飛ぶ技術そのものというよりは、先進の制御技術、安全技術、快適性、そして、エンジンの進歩や軽量化による燃費向上など、時代に合致する新しい価値を提案した、総合技術の結晶と言えるだろう。

翻って、構造材料の材質制御・商品開発技術は、現在、KJMA曲線のどの段階なのだろうか。各論で違いがあり、また、色々なご意見があると思うが、総じて、初心者の悶々とした状態というよりは、上級者の悩みの領域に入っているのではないかと思う。先人たちが積み上げた知の山、ベースとなる理論・技術を踏まえたうえで、更なる高性能化を目指しつつ、広範な周辺技術と組み合わせ、総合技術の結晶として新たな価値を提案するステージに差ししかかっており、材料研究者に求められるKJMA曲線の終点レベルは非常に高い。この高度なタスクを遂行できる本物の材料研究者こそが、匍匐だとしても前進できる底力の源である。匍匐前進する喜びを、中堅そして若手の多くの材料研究者が、継続的に持ち続けることができるような環境づくり、人材育成、そして、技術伝承のあり方が問われている。