



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

鉄鋼上工程に広がるデータの海

The Data Sea Spreading across the Upstream Process of Steel Manufacturing

足立毅郎
Takero Adachi

(株)神戸製鋼所 技術開発本部
材料研究所 精錬凝固研究室
主任研究員

1 はじめに

私は2011年に株式会社神戸製鋼所に入社後、技術開発本部の材料研究所 精錬凝固研究室に配属され、これまで約12年間に亘り一貫して鉄鋼上工程の研究に携わってきた。対象プロセスは、焼結・直接還元・溶銑予備処理・铸鍛鋼など、浅く広くという形で様々な経験をさせていただいたが、一貫して技術の柱としてきたのは「評価解析」であったと認識している。

昨今の製造業DX化において、鉄鋼上工程プロセスでもビッグデータ解析による操業改善指針の抽出^{1,3)}や故障の早期検知といった技術が適用されている。研究開発においても、データ活用の観点から画像特徴量、元素、結晶構造といった情報を統計的に耐えうるレベルで取得して数値化し、評価するための技術が重要性を増している⁴⁾。

私が焼結プロセスの研究を始めたとき、鉄鉱石という自然のばらつきを受け止めるプロセスの難しさに途方に暮れる思いであった。立てた仮説が一部分で当てはまっても、全体としてその仮説が妥当であることを主張し難いことが大き

な壁であった。そこで研究生活の中では、可能な限り全体を見て、表現する評価技術を構築することを心がけてきた。本記事では、それら技術の一部を紹介させていただく。

2 焼結プロセス① - 擬似粒子構造の画像解析

私が評価解析を身に付けるきっかけとなったのは、焼結プロセスにおける造粒工程の研究であった。神戸製鋼所加古川製鉄所において、マグネタイトペレットフィード（以下マグPF）の多量使用のため図1に示す2系統並列造粒設備の片方を用い、焼結返鉱を核とした2層構造マグネタイトミニペレットを製造する技術を検討した⁵⁾。返鉱核を配置する目的は、骨材効果による強度向上、マグPF薄層化による酸化促進の2点であるが、これら効果を最大限取り込むために、造粒後に狙い通り返鉱が核に配置されたミニペレットが製造できているかを評価する必要があった。そこで、図2に示す通り、アクリル製の孔開き容器にミニペレットを1つずつ配置し撮像したのち、網を被せて核の流出を防ぎながら被覆層を洗

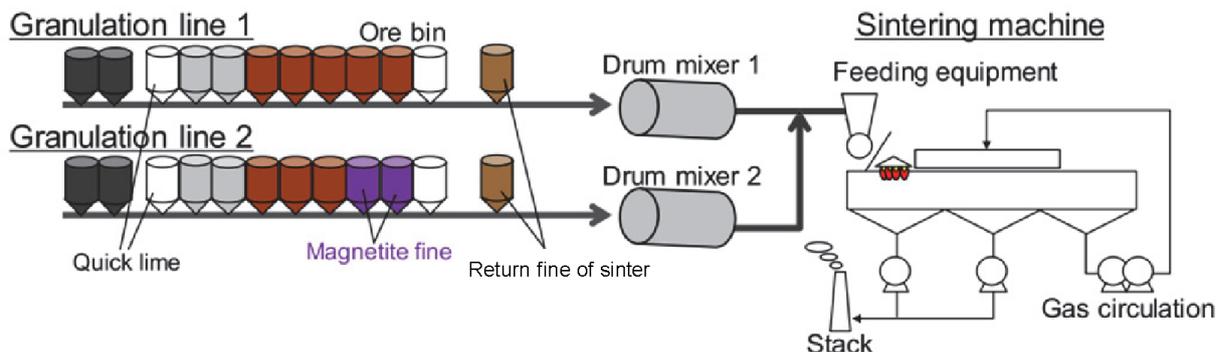


図1 神戸製鋼所加古川製鉄所における2系統並列造粒を用いたマグネタイトミニペレット製造模式図 (Online version in color.)

い流し、再度撮像して前後の画像を解析することで、核保有率ならびに被覆層厚みを算出する技術を構築した。本技術を用いることで、返鉱配合率に対する核保有率、被覆層厚みの推移が図3に示す通り解析可能となり、造粒条件の改善に繋がった。

本手法の代替手段としては、ミニペレットを人力で潰して前後の寸法を計測する、樹脂埋めして断面を観察する、X線CTを用いて核の有無と被覆層の厚みを解析する、といった方法が考えられるが、今振り返ってみても、本方法は作業コスト、迅速性、被検量といった面で上記方法よりも優れていると考えており、若手の頃に創意工夫して造粒改善に資する評価技術を構築した例として紹介させていただいた。また自ら画像処理プログラムを構築するなかで、画像処理ではx、y座標で指定される箱（ピクセル）に8bitグレー画像ならば0-256、RGBカラー画像ならば0-256×3種類の値が放り込まれた行列を独自の方法で処理することにより、多種多様な特徴量を正確かつ高速に抽出可能であることを学んだ。この取り組みを通じて、物事をデジタルに捉えることでかなり多くの課題は解決できるという気付きが得られた。

3 焼結プロセス② - 鉱物相解析 (MLA) による融液浸潤の可視化

鉱物相解析 (Mineral Liberation Analysis, MLA[®]) との出会いは、当時の上司から「こんな面白い装置があるよ」という紹介がきっかけだったが、デモ画像を見て、「この装置があれば評価解析の世界が広がる」と直感した。画像解析では人の目に見える情報は引き出せるが、元素の情報までは引き出せない。MLAによる鉱物相解析では、画像情報を基に電子ビームを当てる場所を特定のアルゴリズムで選定し、数10msというごく短い時間で特性X線を取得していく。次いで、予め登録した鉱物相の特性X線データベースと照合し、最も合致度の高い鉱物相判定するという装置である。従来、研究者が特性X線を見て行っていた鉱物相判定を自動化/高速化することで、mmオーダーの広範囲について鉱物相マップを得ることができ、統計的なアプローチも可能となる。

研究事例として、焼結鉱の融液浸潤解析の事例を図4に示す。石灰傾斜配合造粒⁷⁾における石灰の適正分配条件を検討するため、石灰濃度の異なる2層のタブレットを上下に配置し、加熱して融液浸潤実験を行った。加熱後のタブレット界面について、先述したMLAを用いて融液浸潤挙動を解析し

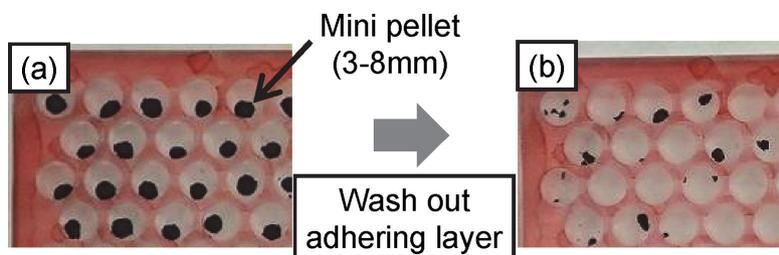


図2 ミニペレット水洗法による核保有率、被覆層厚みの算出
(a) 水洗前 (b) 水洗後 (Online version in color.)

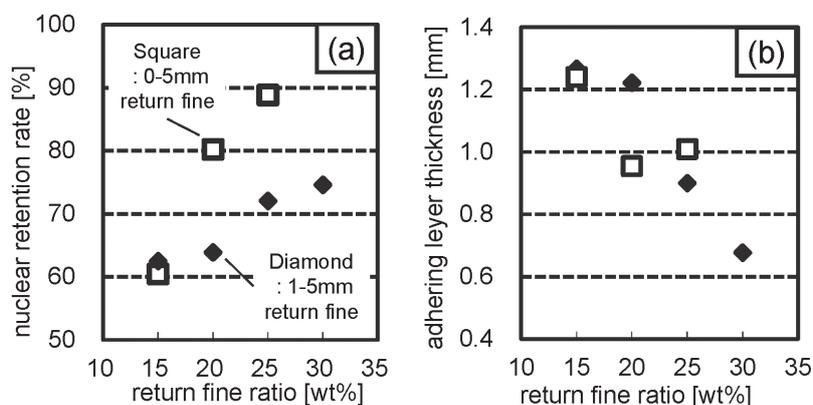


図3 返鉱配合率とミニペレットの核保有率、被覆層厚みの関係
(a) 核保有率 (b) 被覆層厚み

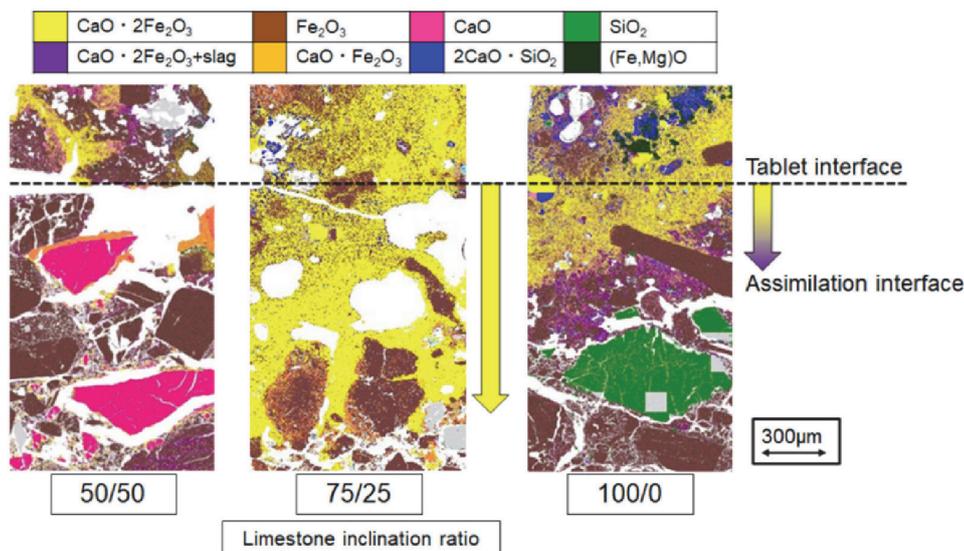


図4 MLAによる焼結融液浸潤試験後の鉱物相マップ (Online version in color.)

た。焼結の融液は Fe_2O_3 と CaO が反応してできたカルシウムフェライト系融液であるが、 SiO_2 、 Al_2O_3 の固溶も考えるとその組成は広範囲にわたる。MLAはこれら融液を精緻に分類することには適していないが、ここでは融液浸潤性という観点に着目し、浸潤性の高い $CaO \cdot 2Fe_2O_3$ と、これに SiO_2 、 Al_2O_3 が固溶することで浸潤性が低下した2種類の融液に分類されるよう鉱物相データベースを調整することで、広範囲における融液浸潤の様子を組成情報に基づいて視覚的に表現することに成功した。

4 流動層還元解析

最後に、評価解析という趣旨からは一見逸れる内容ではあるが、筆者の取り組んだ流動層還元解析を紹介したい。本研究は2018-19年にオーストリアのMontanuniversitaet Leobenに留学する機会をいただいた際に実施したものである。流動層は鉄鉱石の事前処理なしで還元処理することができる反応容器であるが、ガス原単位が大きいことがデメリットである。これを克服するため、FINMET, FINEXといったプロセス⁸⁾では多段化が志向されており、そのプロセス設計に関する研究に取り組んだ。

まずマス/エネバランス計算により求めた各流動層の還元ガス入り/出口温度およびガス酸化度を図5のようなFe-O相安定図上にプロットすることで多段流動床の還元進行を検討し⁹⁾、ガス原単位を最小化するプロセス条件を決定した。次に、決定したプロセス条件を実験条件に落とし込み、160mm Φ流動層炉¹⁰⁾を用いて還元実験を行った。重量変化により還元率推移を取得するとともに、還元後の鉄鉱石は断面SEM-EDX分析に供した。

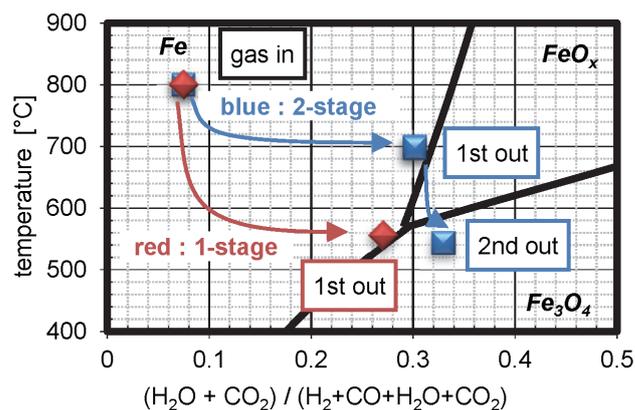


図5 多段流動層還元におけるFe-O相安定図 (Online version in color.)

面SEM-EDX分析に供した。

この研究から、ガス原単位を最小にする条件では還元率が70%程度で停滞することが分かり、その原因は鉄鉱石組織の緻密化や、還元進行に伴う脈石成分の濃化⇒複合酸化物の形成によるものであることを突き止めた。本現象を考慮して多段流動層の再設計を行い、還元温度上昇による還元組織構造の制御ならびに複合酸化物還元促進のためのガス酸化度低減を取り入れることで、ガス原単位を抑えながら還元率を90%程度まで改善できる条件を見出した¹¹⁾。

この研究からは、プロセス設計⇒実験⇒評価解析⇒改善プロセスの再設計・評価という一連のプロセスを学んだが、なぜそのプロセス条件ではうまくいかなかったのかを突き止め、対策を抽出する評価解析の重要性がシンプルながら良く分かる例と思う。この基礎検証の重要性に立ち返り、自分はプロセス改善のために何を見るべきなのか、見るためには何

が必要なのか、を考えることを大事にしたいと改めて感じた。

5 終わりに

これまで述べたように、私は鉄鋼上工程の研究を進めるにあたり、都度必要な評価技術を構築し、プロセス改善に役立ててきた。これには上司から常々、「自分だけの軸を持つ」と言われてきた事が大きく関係している。ここで言う軸とは、とりもなおさずグラフの軸にできる評価指標のことである。私の仕事はあくまでプロセス改善であるが、改善のためには何を見る必要があるのかを考え、それを実現する研究開発を積み重ねてきたことにより、結果的に評価解析の技術が高まってきたのだと認識している。

表題に掲げた通り、鉄鋼上工程の研究はさながら広大なデータの海を眺め、全体を表現する方法を検討し、独自の評価指標をコンパスとして進むべき道を決定するのと似ていると感じる。産業全体の責務であるカーボンニュートラル化においては、プロセス前提が変わることにより取得すべきデータの種類、着眼点も大きく変わる。このような時代においては、評価分析・データ解析はプロセス改善の方向を示す共通基盤として益々重要性が高まっていくと考えているため、今後も先端技術に対する視野を広く保つと同時に、柔軟な思考を心がけることで「自分だけの軸」を生み出していきたい。

最後に、これまでプロセス改善・評価解析についての数多くの議論を通じて、成長させていただいた社内外の関係者様に深く御礼申し上げます。これからも、自分ならではの評価解析技術の創出を通じて、鉄鋼プロセスの改善・脱炭素に貢献していく所存です。

参考文献

- 1) S.Liu, Q.Lyu, X.Liu, Y.Sun and X.Zhang : ISIJ Int., 59 (2019), 2156.
- 2) Y.Li, Q.Zhang, Y.Zhu, A.Yang, W. Liu, X.Zhao, X.Ren, S.Feng and Z.Li : Computational Intelligence and Neuroscience, Vol.2022, Article ID 3343427.
- 3) 森純一, 小原丈司 : 材料とプロセス, 33 (2020), 534, CD-ROM.
- 4) E.Donskoi, A.Poliakov, R.Holmes, S.Suthers, N.Ware, J.Manuel and J.Clout : Minerals Engineering, 86 (2016), 10.
- 5) 大菅宏児, 足立毅郎, 山崎慎太郎, 宮川一也 : 鉄と鋼, 109 (2023), 355.
- 6) P.Sylvester : Use of the Mineral Liberation Analyzer (MLA) for Mineralogical Studies of Sediments and Sedimentary Rocks, Mineralogical Association of Canada Short Course, 42 (2012), 1.
- 7) K.Osuga, T.Adachi, K.Miyagawa, T.Matsumura and K.Nozawa : ISIJ Int., 59 (2019), 1756.
- 8) S.Johannes : Particuology, 9 (2011), 14.
- 9) T.Adachi, D.Spreitzer and J.Schenk : The 1st International Symposium on Iron Ore Agglomerates (SynOre2022), 1 (2022), 104.
- 10) M.Skorianz, H.Mali, A.Pichler, F.Plaul, J.Schenk and B.Weiss : Steel Research Int., 87 (2016), 633.
- 11) T.Adachi, D.Spreitzer and J.Schenk : 6th European Steel Technology and Application Days (ESTAD), (2023), I29-1.

(2023年8月3日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

東北大学 大学院環境科学研究科 教授

村上 太一

昨年のいつだったか、足立さんに躍動コメントの執筆依頼を受けた。ありがたいことに、すでに3人の方について執筆させていただいておりネタの枯渇の心配はありましたが、日ごろお世話になっている方だったので快諾させていただきました。私は、足立さんのメインフィールドである鉄鋼上工程のなかでも製鉄分野を専門としております。彼とは、2016年ころからナショプロや鉄鋼協会の研究会やフォーラム活動などで、一緒に仕事をさせていただいております。そのあたりから紐解いて、僭越ではありますがコメントさせていただきます。

足立さんと初めてお会いしたときのことはもう覚えていませんが、印象的だったのは彼がLeoben留学中に同大学で開催された2国間シンポジウムに参加したときでした。Leobenは山奥の町であり、私は帰国するために会議後にグラーツまで陸路で移動の予定でした。彼は当時グラーツに居住していたため一緒に移動し、グラーツを案内いただき、その後ランチをしました。その際、留学中の目標をお聞きしたことを覚えています。そのとき受けた彼の印象は、「真面目」で「律儀」でした。あれから5年たちますが今もその印象は変わりません。

本稿を読まれている方はすでに足立さんの原稿も目を通されているものと思います。ここでも彼の律義さが表れている一文があります。「ここで言う軸とは、とりもなおさずグラフの軸にできる評価指標」というくだりです。そこで、私から軸の追加を提案したいと思います。「自分だけの軸」ということはオンリーワンである独創的なものを持つということだと思います。その軸は何でもよく、数値化できない自分のポリシーでもいのように思います。これからのカーボンニュートラルに向けた仕事は、そのような独創性と柔軟性から達成できる種が見つかるかもしれません。

カーボンニュートラルといえば、最近、他大学の学生から鉄鋼業のカーボンニュートラルに関する状況を教えてほしいとのメールが来ることがあります。また、高校に訪問すると、本当にCO₂の排出増が地球温暖化につながっているのかという質問を受けたりします。一般の特に若年層への鉄鋼業の重要性とカーボンニュートラルに向けた取り組みについて、もっとアピールをしていく必要を感じています。これは足立さんだけではなく、私自身も含めた皆さんへということになりますが、世の中へのアピールをもっとやっていきましょう。

JFEスチール(株) スチール研究所 研究企画部 主任部員

樋口 隆英

まずは足立さんとの出会いについてご紹介します。彼のお名前を初めて知ったのは、2017年の春季講演大会でした。製鉄分野の原料・焼結セッションにおいて、神鋼さんの発表抄録に見慣れない研究者を発見し、当日会場でお会いできるかと期待しましたが結局会えず、後日改めてプログラムを確認したところ、KR脱硫に関するご発表をされておりました。なぜ製鋼の研究者が焼結研究に？とっておりました所、同年8月、的場記念川渡セミナーでお会いする機会を得ました。当時、私は2年間のオーストラリア留学から帰国して間もなく、丁度、海外留学先を検討されている足立さんと同部屋というご縁もあり、あれこれと留学おまけ話をさせていただきました。その1か月後の秋季講演大会では2層構造マグネタイトミニペレットに関する、資源対応力強化の観点で重要かつ興味深い研究成果をご発表され、これは優秀な研究者が出てきたなと思いました。

その後、足立さんは一旦留学に旅立たれるのですが、数年経過した2020年頃、帰国後の足立さんを焼結のディープな世界にいざなうチャンスが到来しました。当時、焼結鉱の鉱物組織評価に関する研究会の設立準備に携わらせて頂いており、各社から気鋭の研究者を出して

いただく必要がありました。そこで足立さんに白羽の矢が立ち、私が説得の役目を仰せつかりました。精練・凝固のバックグラウンドをお持ちで、研究会およびご本人のキャリアにとってもプラスになるはずと思い、学会発表以上に強い意気込みで面談させていただきました。結果、無事ご快諾の返事を頂き、研究会メンバーに参画頂くのですが、それ以降、高リン鉱石の活用検討や流動層還元プロセスなど、原料研究から新製鉄プロセスにわたる広い分野のご研究に従事され、タイムリーに学会報告されるなど、製鉄分野の重要なキーマンとして目覚ましい活躍をされております。

今後ますますのご活躍を期待し、エールを送らせて頂きます。足立さんの発表には必ず良い仕込みがあり、確固たる考察に裏打ちされています。これは、ご本人が意識されております「評価解析」の軸の賜物と思います。これは今後も是非高めて頂きたいと思います。また、昨今のカーボンニュートラル研究においては、製鉄プロセスを俯瞰して研究開発する必要があります。足立さんの製鉄・製鋼・境界領域を語るの能力もまた大事な軸の一つだと思います。ご自身の強みを生かし、鉄鋼業をリードする活躍をされる事を願っております。