



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

焼結層内のその場観察手法の開発

In-situ Temperature Measurement and Gas Analysis in Sinter Beds

平 健治

Kenji Taira

日本製鉄(株) 技術開発本部
先端技術研究所 環境基盤研究部
主任研究員



諸言：製鉄プロセスの技術蓄積と他分野の技術導入

製鉄プロセスの開発の歴史は他の技術分野と比較しても長く、それに伴う技術蓄積の大きさも、他に類を見ない規模である。私に取り組む焼結プロセスも、その研究の歴史は長い。世界で主として利用されているドワイト・ロイド型焼結機が製鉄プロセスに利用されたのは1910年であり、その時点でプロセスの基本構成は確立していた^{1,2)}。また、そのプロセス内部で進行する化学反応についても、古くから詳細に調べられている。1970年代には、加熱条件によって生成するカルシウムフェライトが針状や柱状に変化することが確かめられており³⁾、私の生まれた1980年代半ばにはX線CTによって気孔構造までも調べられている^{4,5)}。現在、実機適用が進められている技術も、そのアイディアの原型は前世紀の論文に既に書かれている場合が多くあり、先人達が焼結プロセスに注いだ熱意には驚異的なものを感じる。

過去に積み上げられた知識と伝統によって、現在に生きる人々の行動が律される様子を、オルテガは死者の眼差しと表現している⁶⁾。先人の著した研究論文に垣間見える研究に対する熱量は、雑な実験と研究を行ってはならない、と我々に語りかけ、訴えかけてくる。一方で、過去に蓄積された技術の重みと深さによって、製鉄の特に上工程は、新参者が手を出しにくい技術分野になってしまっているように感じる部分がある。製鉄以外の分野で研究を行う者から見ると、製鉄プロセスという技術分野は、他者を寄せ付けない排他的な雰囲気を感じている。サルトルは、個人の自由を縛る主観としての他者の存在を、他者の眼差しと表現しているが⁷⁾、先ほどの死者の眼差しが、技術分野の総体としての他者の眼差しとなり、異分野からの研究者の参加を妨げているように感じる。

そうした心理的な参入障壁を感じながらも、いい意味で空

気を読まずに、他部署の焼結試験装置を借りて図々しく実験を始めたのが3年前である。それまで業務で取り組んできた触媒分野では、充填式の反応装置内部の温度やガスを詳細に分析するような取り組みが多数行われているが、同様のアプローチは焼結分野では試みられていないようであった。ちょうど、それまでやっていた触媒の研究に飽きてきたところだったので、勤め先のメイン事業に近い研究開発もしてみたいという思いも相まって、焼結層内のその場観察に関する研究を始めた。それによって得られた研究成果のうち、論文発表済みの2つの内容について以下で紹介を行う。



焼結層内の高空間分解での温度測定⁸⁾

研究レベルで焼結反応を試験する際には、円筒形の鍋と呼ばれる反応装置が用いられている。焼結層内部の温度変化が焼結鉄の還元しやすさ、強度に大きな影響を与えることは古くから知られているので、鍋試験の際には10 cm程度の間隔で数点程度の温度測定を行うことが通例である。一方、タバコの燃焼を解析した研究では、mm以下のオーダーの空間分解能、1 s以下の時間分解能で燃焼場の時間変化を詳細に解析した報告があり⁹⁾、触媒反応の分野でも、mm以下の空間分解能で温度・ガス分析が達成され、反応機構が議論されている¹⁰⁾。そうした報告も鑑みながら、焼結層内の詳細な分析のために提案した温度測定法を図1に示す。焼結層の中心にアルミナ管を差し込み、その内部で熱電対を上下に走査することで温度測定を行った。この測定で肝要なのは、アルミナ管の選定である。アルミナ管と熱電対の隙間が大きすぎると熱伝達速度が下がり、正確な温度が測れなくなる。また、アルミナ管の肉厚が厚すぎると、熱電対自身の熱伝導によって上下方向の分解能が低下してしまう。最終的に内径1.2 mm、外径1.8 mmのアルミナ管を用いることになったが、それと

同程度の寸法のアリミナ管をある国内大手のセラミックスメーカーに見積り依頼した際には、法外な値段を提示されて途方にくれたのを覚えている。結果的にはそうした細いアリミナ管をカタログ品として扱う企業を見つけることができ、実験を実施することができた。日本の素材メーカーの層の厚みに助けられたといえる。

詳細な解析方法は論文を読んで頂くとして、温度測定結果のみを図2に示す⁸⁾。解析の結果、時間分解能10秒、空間分解能2 mmで、焼結層中心部の層厚方向の温度分布を調べことに成功した。反応時間が経過するにつれて、燃焼部が下層方向へ移動していく様子が明瞭に確認された。現在、本手法

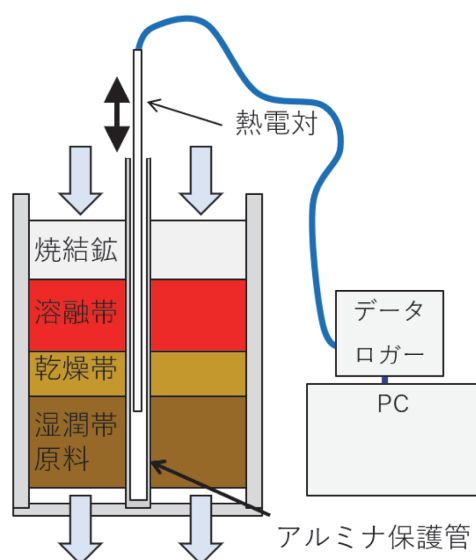


図1 焼結層内温度分布測定装置の概略図

をさらに発展させて、バーナー着火最中の温度変化を詳細に調べることや、焼結層の面内方向の温度分布測定を行うことに取り組んでいる。近日中に学会発表と論文投稿を行う予定である。

3 焼結層内における燃焼時のNOx発生挙動の分析¹¹⁾

排ガスに含まれるNOxの抑制は、焼結プロセスにとって古くから重要な課題である。流動床で燃焼反応が進行する発電ボイラーなどと比較して、火格子燃焼が進行する焼結プロセスでは燃焼場を自在に制御することが難しい。したがって、窒素含有量が少ない炭材を利用することでNOx発生を抑制することや、脱硝設備による排ガス処理によってNOxを除去することで、NOx排出量の削減が進められてきた。一方で、弊社の大分製鉄所では、コークス表面にCaOを付着させることで燃焼時のNOx発生量を抑制する手法 (LCC : Lime Coating Cokes) が実用化されている。この成果は、造粒方法の変更により燃焼場を制御することでNOx発生量を抑制できることを示すものである。充填層内部での燃焼をその場観察し、NOxの発生の仕方を詳細に調べることができれば、造粒方法の見直しによる燃焼場の制御によって、より一層のNOx発生量削減を進めることができると考えられる。

そこで、図3に示すような装置構成で、焼結最中の焼結層内のガス分析を行った。反応が進行し、燃焼部が下層へと移動する過程ではサンプリングされるガスの組成が経時的に変化する。このガス組成の経時変化を解析することによって、燃焼部のどこで、どれくらいのCO₂、NOが発生しているかを調べ、各位置でのNOx転換率 (炭材中のNがNOxになる

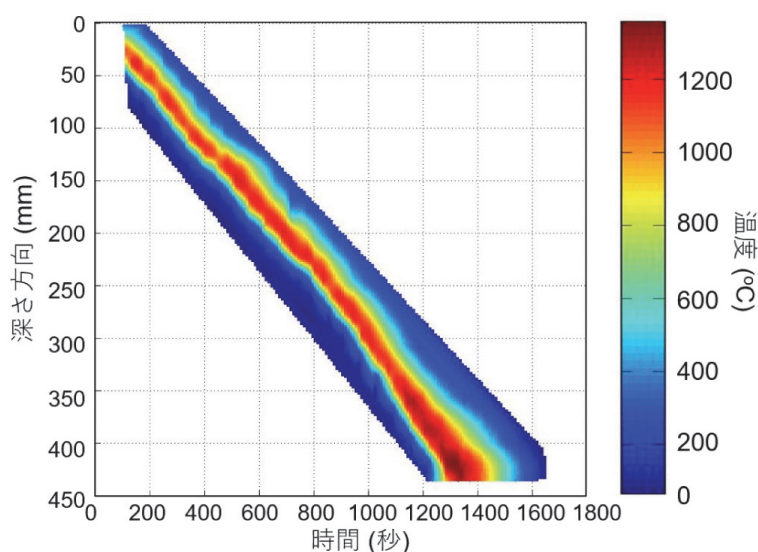


図2 鍋試験中の焼結層内の温度分布測定結果⁸⁾

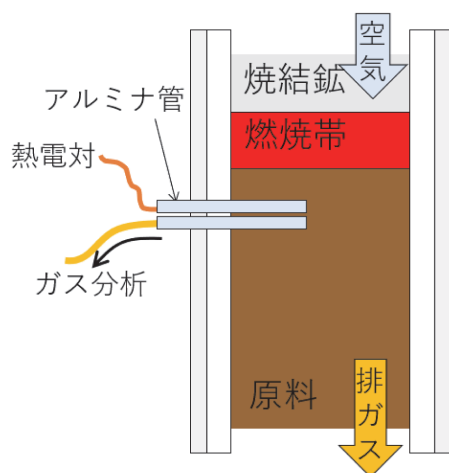


図3 焼結層内のガス分析方法の概略図

割合)も計算した。解析方法詳細は論文を読んで頂くとして、ここでは結果のみを図4に示す¹¹⁾。コークスを炭材として用いた場合には、燃焼部の下流側(図4の左側、燃焼初期に対応)においてCO₂とNOの発生量が多く、NOの転化率も同様の傾向がみられることが確認された。これまで、本手法を用いて、造粒方法や炭材の種類がNO_x発生挙動に与える影響などを調べている。機会があれば、学会などで紹介したい。

4 今後の予定

焼結層内部の温度、ガスの測定については、今回紹介したもの以外についても既に研究成果が得られている。それらを学会発表、論文投稿する過程で議論を深め、さらに踏み込んだ考察につなげていきたい。また、製造現場に本研究の測定手法を適用することで、製造プロセスの改善に役立てていきたい。

今回は温度とガスのその場観察について紹介したが、それら以外にも、触媒分野で利用されている反応解析手法の中には、焼結プロセスに適用可能なものが多数あると考えている。そうした技術の適用を進める他、他のプロセスへの展開も行い、製鉄プロセス全体の技術レベル向上を図っていきたい。

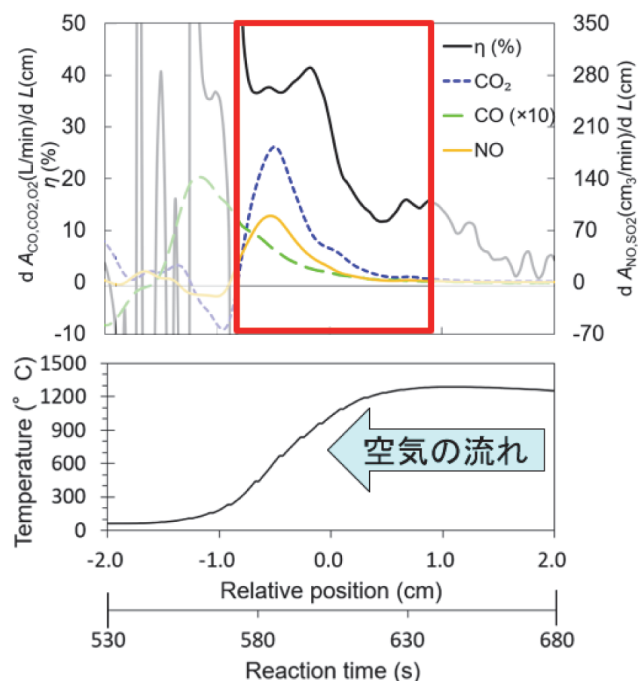


図4 燃焼部の各位置におけるガス発生量とNO_x転化率(η)の計算結果、太線で囲まれた部分は燃焼部を示す。図横軸は、焼結開始からの時刻と、データ解析により得られた燃焼部中央からの相対な距離(負が下層方向)である¹¹⁾

参考文献

- 1) 稲角忠弘：叢書 鉄鋼技術の流れ 第2シリーズ 第1巻 焼結鉄—資源少国日本の挑戦記録—, 日本鉄鋼協会, 東京, (2000)
- 2) 岡田陽一：鉄と鋼, 2 (1916) 6, 585.
- 3) 稲角忠弘：鉱物工学, 丸善, (1975)
- 4) 稲角忠弘, 笠間俊次：鉄と鋼, 78 (1992) 7, 1061.
- 5) 笠間俊次, 稲角忠弘, 中安勤：鉄と鋼, 78 (1992) 7, 1069.
- 6) オルテガ (著), 寺田和夫 (翻訳)：大衆の反逆, 初版, 中央公論新社, (2002)
- 7) JP・サルトル (著), 伊吹武彦 (翻訳)：実存主義とは何か, 増補改訂版, 人文書院, 東京, (1996)
- 8) K. Taira and M. Matsumura : ISIJ Int., 58 (2018) 5, 808.
- 9) R. Zimmermann, S. Ehlert, C. Liu, K. McAdam, R. Baker and T. Streibel : Anal. Chem., 87 (2015) 3, 1711.
- 10) R. Horn, N.J. Degenstein, K.A. Williams and L.D. Schmidt : Catal. Letters 110 (2006) 3-4, 169.
- 11) K. Taira : Fuel, 236 (2019) 15, 244.

(2019年2月15日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

九州大学 大学院工学研究院 材料工学部門 教授

国友 和也

突然、平君からメールが舞い込んできた。この執筆依頼である。意外だった。彼との共通点はあるものの、接点があまりにも少なかったからである。でも、彼の「躍動」の原稿を見て、少しエールを送りたくなった。そんな魅力のある若手研究者である。

私が大学に来る前に彼とは同じ会社に勤めていたが、ラップしていたのは9か月で部署も違うため記憶なし。そんな彼と直接話したのが、私が講師をしていた5年前の蔵王の鉄鋼工学セミナーでのこと。入社後の実務経験年数も浅く、理学部出身で、環境関係の部署で排ガスの研究と、製鉄コースの受講生としてはかなり風変わりな受講生ではあった…というような感想を持つこと自体が、まさに彼の言う製鉄の「排他的雰囲気」そのものかもしれないが。ただ、このセミナーに出てくるからには、上司の育成戦略に沿ったものなのだろうと思っていたら、その後、学会の焼結のセッションで見かけようになり、論文誌への掲載と、しっかりと「心理的な参入障壁」を乗り越えて、製鉄分野で確実に活躍の基盤を築きつつある。

実は、私自身も鉄を全く知らずに、鉄鋼会社に入社した一人であった。聞いたことのない単語にとまどいながら、選択を間違ったかなとも思ったりもしたものだ。で

も、狭いながらも自分の切り口で話ができる技術分野ができてくると、周りの景色が変わって見えはじめた。スタートは小さな専門店でも、そのうち大きな百貨店にするぞと思った。今の彼なら、百貨店なんて時代遅れなものなど目指さずに、もっと新しい形態のビジネスへの展開を夢見るはずだ。

そんな君にとって、過去に積み上げられた知識と伝統に基づく「他者の眼差し」は、「参入障壁」であり、まちがった常識と固定観念を押し付ける困った存在だったかもしれない。しかし、今は気にする必要は全くない。なぜなら、君自身が既にその中に参入して、店を開くことができたのだから。これからは、過去の知識も伝統も「前世紀の論文」も、活用する価値があると思えば、大いに活用すればよい。

平君、どんどん進め、前だけを見て。私たち過去の間人は、口出しはしない。でも、君が苦しくなって、進めなくなると、ふと後ろを振り返った時に、心配そうに君を見つめエールを送り続けている私たちの視線に気づくだろう。そんな「他者の眼差し」もあるのではと、私は思う。

「振り向かぬ子を見送れり 振り向いた時に振る手を用意しながら (俵万智)」

JFEスチール(株)スチール研究所 製鉄研究部 主任研究員

樋口 隆英

まずは平さんとの出会いとその時の印象について書かせて頂きます。初めてお会いしたのは2017年の鉄鋼協会春季講演大会です。標題のin-situ測定に関して2連報で発表されましたが、焼結プロセスを正確に語り、堂々と発表されている姿に感銘を受けました。質疑では会場からの手強い質問にも臆する事なく的確に受け答えをされており、これは頼もしい若手が焼結研究に現れたなと感じました。その後、同年の秋季講演大会で、再び平さんにお会いする事になり、彼に対する私の印象が確固たるものになります。その年の焼結セッションでは海外からの講演が4件続き、あたかも国際セッションのような状況に少々不安な気持ちで座長を務めさせていただきました。しかし、講演終了後、会場からの質疑に移りますと、間髪を入れずに平さんの手がずっと伸び、良い意味で“空気を読まない”鋭い英語の質問が始まりました。静まった会場の“眼差し”に冷や汗をかきましたが、参加した同僚の若手研究員も印象的だったらしく、語り草になっています。その後のセッションでは、層内温度プロフィール測定の続報を持って平さんが登壇されましたが、質疑含めて素晴らしい発表だった事は言うまでもありません。

多少長く焼結分野に携わっている者としてエールを書かせて頂きます。第一に、焼結機は高炉に比べて時定

数が小さいため、原料や操業の変動に対して短時間でその成否が現れます。近年、鉄鉱石の品質も徐々に変化しており、焼結層内の化学反応も変化すると予想されます。平さんの研究者としてのバックグラウンドは化学、特に不均一系の表面化学とお聞きしております。短時間で非平衡かつ不均一に進行する焼結反応は、様々な化学反応の上に成り立っており、化学屋にはうってつけの研究フィールドと思います。色々な化学現象を空間的に解析できるようになれば、プロセスを制御するための新しいアイデアも生まれてきます。ぜひ新しい反応解析手法を製鉄研究に持ちこみ、プロセス解析技術をレベルアップさせて頂きたいと思います。第二に、ご本人も書かれていますが、製鉄分野にはある種の閉鎖的な雰囲気があるかもしれません。しかし、組織の垣根を越えて産学官で連携し、深くプロセスの議論ができるのは製鉄分野の大きな強みでもあります。平さんは、焼結に関する学会発表、論文投稿も何本もされておりますので、既に製鉄研究者の一員と私は思っております。しかし、古い眼差しに縛られること無く、忌憚のない平節にて、国内外問わず、大いに製鉄を盛り上げて頂きたいと思います。最後に、既に幅広い分野で数々のご研究をされておりますが、今後も益々ご活躍をされる事を願っております。