



私の論文

／ 今振り返ってみて、行間にこめた思い、エピソード

これまで見えなかった高炉内軟化融着現象を見るために*

Challenges to Visualize for the Softening and Melting Phenomenon in the Blast Furnace

大野光一郎

Ko-ichiro Ohno

九州大学大学院 工学研究院
材料工学部門 冶金物理化学講座
反応制御学研究室 教授

1 はじめに

今回、2020年掲載論文対象の澤村論文賞に選出いただいた拙著「Gas Permeability Evaluation of Granulated Slag Particles Packed Bed during Softening and Melting Stage with Fanning's Equation¹⁾」につきまして、本誌にてご紹介をさせていただく機会を頂きました。本研究は、多くの先人によって洗練された実験技術である荷重条件下還元試験法^{2,4)}に、独自のアレンジを加えて開発した「急速昇温・急速冷却が可能な荷重軟化試験装置」を用いて、軟化融着を伴う充填層試料内部のガス圧力損失挙動をErgun式に依らずに推算する挑戦を行なった内容となっております。僭越ながら共著者を代表いたしまして、本試験装置開発のモチベーションと、その準備状況、それに加えて本研究技術の将来的発展要素についての解説をさせていただきたいと思います。

2 新型荷重軟化試験装置の開発

著者はかねてより製鉄プロセスの中における軟化溶融挙動について大きな興味を持っておりまして、本装置開発以前にも高炉内融着帯近傍における銑滓分離挙動についての高温その場観察法による取り組み⁵⁾を行って参りました。この手法では顕微観察を主としたため、高炉融着帯近傍において生じる現象に比してスケールの小さい微視的組織の傾向を示すにとどまり、プロセス操業そのものの指針を指摘するためには

ワンクッションある歯痒さをかねてより感じておりました。こうした折、ご縁がございまして2010年から一年間のドイツ留学をさせて頂く機会を頂き、アーヘン工科大学においてHeinrich Wilhelm Gudenau先生（2019年8月ご逝去）に師事する貴重な経験に恵まれました。

滞在中には常々、仕事よりもこちらの人間とのコネクション作りに力点を置くべきであるとのご指導をいただき、愚直に実行した結果、帰国後10年を経過する今でも欧州の製鉄研究者とのアクティブな交流は、かけがえの無い財産となっております。また先生は、如何にして自分の研究を魅力的に魅



Fig.1 Portrait with Prof. Gudenau in Osaka in 2010.
(Online version in color.)

* [今回の対象論文]

大野光一郎, 喜多村佳輝, 助永壮平, 夏井俊悟, 前田敬之, 国友和也: 「Gas Permeability Evaluation of Granulated Slag Particles Packed Bed during Softening and Melting Stage with Fanning's Equation」, ISIJ International, Vol.60 (2020), No.7, pp. 1512-1519, (第32回澤村論文賞受賞)

せるのかという点を特に重要視されており「帰国後にまず誰にも真似のできない独自の実験手法を開発しなさい」というご助言をいただいております。これが今回開発した装置につながるわけですが、その理由が「独自の手法に勝るセールスポイントは無い」という利点にあり、後ほど紹介させて頂く各種コラボレーションに発展的につながっていくことまで見越した、素晴らしいアドバイスであったと日々感謝しております。2011年に帰国後、Gudenau 先生のアドバイスを実践すべく開発を開始したのが「急速昇温・急速冷却が可能な荷重軟化試験装置」となります。

皆様をご承知のように一般的な荷重軟化試験においては、原料の還元軟化収縮に伴う充填層内のガス圧力損失推移を追跡することは可能ですが、軟化・融着のその場で何が生じているのかを解析することは困難でした。本装置では融着帯近

傍における軟化・融着現象のみを抽出することを目的として、充填層試料を融着帯温度まで急速昇温し、特徴的な現象（例えば圧力損失最大値を示すなど）が生じた任意の温度で急冷試料が作製可能な装置の開発を行いました。まず初めに、そもそも現存する荷重軟化試験装置がどのような工夫を施して作製されているのかを学ばせて頂くことを目的として、全国の荷重軟化試験装置を見学させていただきました。日本国内の学側研究者で唯一荷重軟化試験装置をお持ちであった名古屋工業大学の林昭二先生の研究室を皮切りに、日新製鋼・呉、JFE スチール・福山、神戸製鋼所・加古川、新日本製鐵・富津、住友金属工業・鹿島（2011年当時）で所有し実働していた荷重軟化試験装置群を行脚させていただいた経験は今でも大変貴重なものとなっております。

3 脱エルガン式に向けた挑戦

一般的には固体粒子充填層内部をガスが流通する際に生じる圧力損失は式 (1) に示すタイプの Ergun 式を用いて推算がなされてきております。

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu u}{(\phi D_p)^2} + 1.75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho u^2}{\phi D_p} \quad \dots\dots\dots (1)$$

本式で重要な因子としては、空隙率や、粒子の代表粒子径、充填粒子の形状因子などが挙げられますが、充填された固体粒子の軟化変形や融着による合一などが発生する、軟化融着帯においてその推定に不確かさが残ります。例えば、スラグ粒子による充填層の圧力損失挙動を急冷試料と共に評価した事例¹⁾を Fig.3 に示しますが、圧力損失の上昇開始時点で



Fig.2 Experimental scenery with softening and melting test of iron ore under high temperature conditions. (Online version in color.)

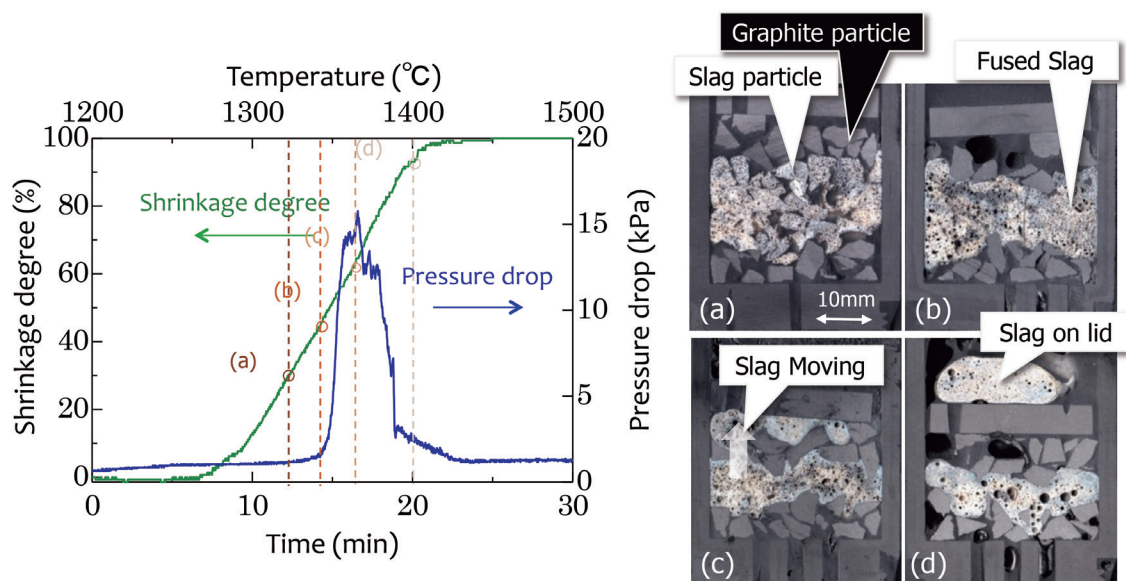


Fig.3 Relationship between maximum pressure drop and fusing slag layer formation behavior. (Online version in color.)

はかろうじて粒子としての形態を保っているものの、圧力損失が最大値を示す領域に差し掛かると、粒子同士が大きな一つの溶融物として振る舞い、ガスの通気を阻害している様子が伺えます。このような状況においては、既に粒子としての体裁が保たれておらず、粒子径の平均化や、形状因子の付与に物理的な根拠を与えるのは困難な状況であると考えられます。

こうした中、小塊コークスを鉍石中に混合装入することで融着帯近傍の通気改善がなされるメカニズムを対象とした研究⁶⁾を遂行する中で、固体充填物が軟化融着する過程で、装入した炭材は軟化した固体粒子の合一化による集合を妨げることによって、その間隙に通気経路を形成していることを見出しました。これを契機に、軟化熔融を伴う固体充填層の圧力損失を、融着した粒子間に形成される通気経路の形状を計測することによって直接的に見積もる手法に着想し研究⁷⁾を進めて参りました。基本的な思想としては、通気経路を細管に近似し細管内を通気する際生じる圧力を、基本的なFanning式で算出を行うという非常に単純なものとなります。

$$\Delta P = \left(\frac{2L_p}{D} \right) (\rho_f \bar{u}^2) f \quad (2)$$

ΔP は圧力損失、 L_p はパイプの長さ、 D はパイプの直径、 $\bar{u}$ はパイプ内の流速、 ρ_f はガスの密度、 f は円管のファニング摩擦係数となります。ここでポイントとなる、通気経路形状の見積もりには、急冷試料の作製技術と、micro CT撮影による三次元情報の取得技術が大いに役立ちました。

4 発展的応用とコラボレーション

以上のように、本実験手法は軟化熔融を伴う固体粒子充填層の圧力損失の測定と、そのメカニズムの考察に有用である

ことをお示ししてまいりましたが、本手法は「試料の急速昇温・急速冷却が可能」な環境下で「荷重を負荷するためのマニピュレーター」を操作可能な実験条件を提供できるとも言え換えることができます。

本環境を活かして、粒子の集合体である充填層を対象とせず、単一粒子の高温荷重条件下における変形や反応を解析した事例も、これまでに報告をさせて頂いております。例えば、昨今の水素製鉄HYBRIDなどで気を吐くSSABなどとの共同研究⁸⁾では、オリビンペレットの軟化変形挙動についての報告をさせて頂いておりますし、先に山岡賞を受賞いたしました埜上先生の「高炉内融着現象の制御研究会」ではFig.4 (a)に示すような試料配置にて模擬焼結鉍の高温変形挙動についての共同研究⁹⁾を発表させて頂いております。また、金属鉄と炭材間の浸炭熔融反応¹⁰⁾や、鉍石と石灰間の滓化反応¹¹⁾など、拡散対タイプの実験への活用も可能です。さらに、工夫を凝らした事例としては、Fig.4 (b)に示すよう固体粒子を充填するスペースに、滴下型静滴法の実験設備を作り込むことで、反応を伴う（ここでは溶鉄への炭素溶解）動的接触角変化の反応進行度解析¹²⁾への活用も可能な技術となっております。

以上のように、工夫次第で様々な応用を可能とする実験技術であると自負しており様々な分野とのコラボレーションをお待ちしております。現在も齊藤先生が主査を勤める「多相融体の流動理解のためのスラグみえる化研究会」に本技術を応用したフォーミングスラグの気泡分布などで力不足ながら参画させて頂いております。ご興味をお持ちいただけました折には、是非ともご相談御用命いただければ幸いです。

5 おわりに

本論文で構築したのは、反応を伴わずに固体粒子充填層が軟化熔融する挙動を解析するための技術でしたが、本実験技

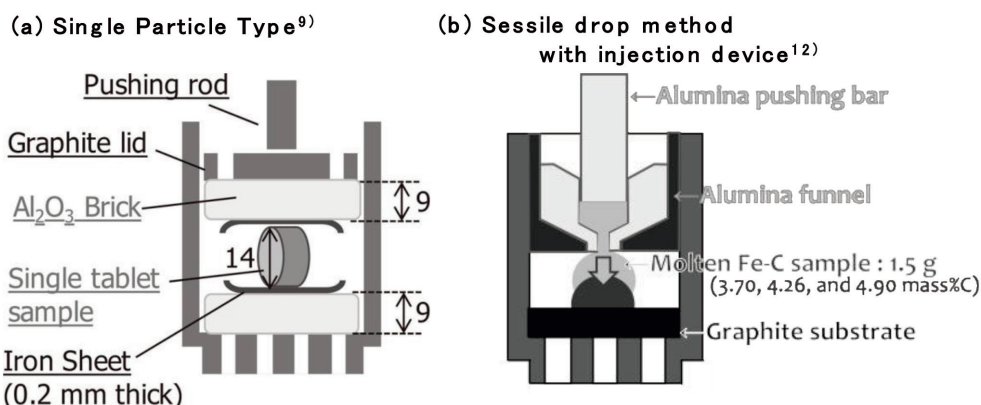


Fig.4 Examples of evolutionary applications with softening and melting test apparatus.^{9,12)} (Online version in color.)

術開発時のコンセプトとしては、時事刻々と反応による変化を伴う系においても、急速昇温・急速冷却条件を活用して、反応途中の状態を急冷保存して解析を行うというものですので、今後は反応を伴う系における現象の解明、特に炭材と鉬石など異相同士が接する界面で生じる反応が、充填層軟化と圧力損失挙動に与える影響について追及を進める所存であります。

6 謝辞

最後になりましたが、科研費 若手研究 (A) (課題番号：24686084) による新型荷重軟化試験装置の開発に先立って2011年に各所の荷重軟化試験装置を見学させていただいた当時にご丁寧にご対応いただきました皆様、論文執筆及び科研費 基盤研究 (B) (課題番号：15H04168) にご参画いただきました助永先生、夏井先生、本実験手法の確立に向けてご尽力いただきました学生の皆様、また研究室における本装置開発を快諾していただきました、清水正賢先生 (2022年5月ご逝去)、国友和也先生、本実験手法の利活用について熱心にご議論いただきました埜上研究会の委員の皆様にご礼を申し上げて、本論文紹介の結びとさせていただきます。

参考文献

1) K. Ohno, Y. Kitamura, S. Sukenaga, S. Natsui, T. Maeda and K. Kunitomo : ISIJ Int., 60 (2020), 1512.

- 2) 斧勝也, 山口一良, 重見彰利, 西田信直, 神原健二郎 : 鉄と鋼, 65 (1979), 505.
- 3) 森克巳, 日高良一, 川合保治 : 鉄と鋼, 66 (1980), 1287.
- 4) 堀田裕久, 山岡洋次郎 : 鉄と鋼, 71 (1985), 807.
- 5) K. Ohno, M. Kaimoto, T. Maeda, K. Nishioka and M. Shimizu : ISIJ Int., 51 (2011), 1279.
- 6) 堀俊介, 大野光一郎, 前田敬之, 国友和也, 市川和平 : 材料とプロセス, 28 (2015), 608, CD-ROM.
- 7) 大野光一郎, 前田敬之, 国友和也, 森田雄介, 西村恒久, 砂原公平 : 材料とプロセス, 28 (2015), 417, CD-ROM.
- 8) A. Kemppainen, K. Ohno, M. Iljana, O. Mattila, T. Paananen, E. Heikkinen, T. Maeda, K. Kunitomo and T. Fabritius : ISIJ Int., 55 (2015), 2039.
- 9) K. Ohno, H. Konishi, T. Watanabe, S. Ishihara, S. Natsui, T. Maeda and K. Kunitomo : ISIJ Int., 60 (2020), 1520.
- 10) K. Ohno, S. Miura, T. Maeda and K. Kunitomo : ISIJ Int., 59 (2019), 655.
- 11) K. Ohno, T. Handa, Y. Kawashiri, T. Maeda and K. Kunitomo : ISIJ Int., 61 (2021), 2953.
- 12) C. S. Nguyen, K. Ohno, T. Maeda and K. Kunitomo : ISIJ Int., 57 (2017), 1491.

(2022年5月31日受付)