



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

変形を伴うコークス層と分散相による閉塞

Clogging of Coke Bed due to Its Deforming and Dispersed Phase

夏井俊悟
Shungo Natsui

東北大学
多元物質科学研究所
助教

1 はじめに

2017年に刊行されたふえらむ Vol.22, No. 4「私の論文」に続いて、この度再び本企画に寄稿させていただく機会を頂戴した。本誌面を多分に拝借し、再び著者個人の視点から研究紹介する貴重な機会であり、まずは関係各位に深く御礼申し上げます。本稿は、令和元年度俵論文賞受賞論文「回転強度試験における時系列3D scanningと固気液三相の移動解析によるコークス変形が及ぼす充填層内流れ特性評価」について紹介する。高炉下部の特有の現象、特に「種々の変形していくコークス群と充填構造の変化」「融体のホールドアップと気相閉塞」といった大変複雑な問題を定量的かつ動学的に記述したい、との思いから本論文を執筆するに至っている。特に、実験データを動力学モデルに反映していく一連の方法について解説する。まず、この研究に取り組む背景、続いて、論文の概要を説明した後、今後の発展性について述べさせていただきます。

2 研究に至るまで

本研究は、2015～2018年に実施されたJFEスチール(株)北海道大学包括連携プログラム内にて実施された。当時、北大鈴木亮輔教授が主体となって行ってきた共同研究がちょうど区切りとなり、バトンを渡していただいた形で本共同研究が始められた。包括連携においては、経験の多い先生方が研究代表者となることが多く、当時教員歴3年の若手にこのような大きなチャンスを与えて下さった鈴木先生の懐の深さには感謝の念に堪えない。しかも製鉄部門研究のため、本論文

の共著者である照井光輝氏、柏原佑介氏、最近では村尾明紀氏にもご協力頂く機会にも恵まれ、共研テーマすら当初完全な手探り状態であった当方との打ち合わせのため札幌まで足を運んで頂いたり、実験の知見収集のための福山地区訪問にご対応いただくなど多々ご配慮いただいた。研究方針を入念に議論して、本研究の目的を、「高炉下部の通気・通液特性を計算可能な数値モデルを開発し、その挙動解析を行うこと」、「モデルによる結果から通気・通液性の新評価指標を提案し、安定操業技術の向上を図ること」に定め、研究を実行できる状態にはなったが、中々壮大な目的であり、正直なところ現在も道半ばどころか手探り状態にある。本論文では、様々な思案の結果、北大で行っていた数値解析とJFE社で実施されている実験技術とを結ぶアイディアに至り、共著者各位には快くご賛同いただき、以降示すような新たな取り組みを実行するに至った。

3 本研究の背景

高炉におけるコークスの役割は、酸化鉄の還元、炉内の熱発生源、そして充填構造の通気・通液性を確保するための構造体とされている。近年では、低コークス比操業によってコークスへの負荷が増大して、劣化・摩耗による炉全体の通気抵抗増加が懸念されている。さらに、鉄やスラグなど溶融体が生成する融着帯以下の領域で、小粒径コークス充填層の自由空間を溶融体が占有することにより、通気性が著しく低下することが知られる¹⁾。最近では、コークス・鉱石混合層形成による融着帯での通気性確保などの方策が検討されている^{2,3)}。ただし、今後の不透明な原料事情も相俟って、鉱石の

* [今回の対象論文]

夏井俊悟, 澤田旺成, 照井光輝, 柏原佑介, 菊地竜也, 鈴木亮輔: 「回転強度試験における時系列3D scanningと固気液三相の移動解析によるコークス変形が及ぼす充填層内流れ特性評価」, 鉄と鋼, Vol.104 (2018), No.7, pp.347-357 (第82回俵論文賞受賞)

軟化溶融現象は複雑化し、その適用範囲については未だ議論の余地が残っている。通気性の動力的理解に基づくプロセス設計を実行するには、原料粒子スケール以下の移動現象を直接評価する方法が求められる。

高炉用コークスの品質評価として、タンブラーなどを用いた回転強度試験がある。回転強度試験では、規定の容器内にコークス試料を装入し、規定の速度・回転数で回転した後、所定の篩い分けを行い、一定径以上の歩留を強度指数 (DI, TI, CSR) として評価している。本研究は、回転強度試験におけるコークス形状の非定常な変化を追跡し、それらで形成される高炉内での充填層構造と周囲流れ場を直接解析してはどうか、との発想に基づいている。近年では、ラボレベルで購入可能な3Dスキャナでも、サブミリオーダーの解像度で物理形状データを出力することができる。これを用いて詳細なコークス表面情報を数値力学モデル解析に反映できれば、将来的に各強度指数のコークス群が形成する充填構造、局所空隙形状および融液・気相流れの関係について検討し、充填層構造内の流れを直接評価可能ではないかと考えた。

4 本論文の概説

回転強度試験法においては、落下衝撃が比較的低いタンブラー試験機を採用して、回転数毎のコークスの微妙な形状変化を追跡することとした⁴⁾。一定強度のコークスを38~50 mmで篩分けを行い、代表的なコークスに ϕ 1 mmの貫通孔を開け、そこに糸を通して結びつけたものをマーカーとして、所定の回転数 (100, 200, 300, ..., 1000 rev) まで回転させた。各回転数で静止後、代表コークスの3次元表面形状を評価したところ、突起状部位の破壊が優先的に進行、一方で進展した内部亀裂が破断の起点となって体積破壊による変形も生じており、複雑な形状変化の情報を次のように数値シミュレーションに取り入れたことが本手法の特徴と言える。その概略図をFig.1に示す⁵⁾。まず、得られた3D表面形状データにLevel set関数と呼ばれる物体内部では正、外部では負となる関数を適用して、正の粒子のみ配置することでFig.1bのように固体形状を正方格子の上に数値化できる⁶⁾。次に、multi-sphere (MS) -DEMによって形状の情報を有するコークス群の運動を解析して充填層構造を得る⁷⁾。MS-DEMは、その名の通り固体形状に合致するように複数の粒子を配置し、重心からの距離を保持することで複雑形状固体の運動を解析する方法である。これを各コークス形状に適用して充填過程を計算すればFig.1cに示すような結果が得られる。この充填層構造は高炉下部レースウェイ直上付近を模擬した粒径分布であり、本論文では、重力方向に滴下する溶融体と気相のカウンターフローを評価した。溶融体は一般に連続流体と

して運動を記述されてきた⁸⁾が、充填層構造内を通過するときには自由表面形状が大きく変化して、分散相を多く形成するため、Fig.1aに示すように流動を有限個の粒子運動で近似するSPH法⁹⁾を適用して、分散流体と連続流体を明示的に区別することなく解析を行った (DEMやSPHはいわゆるfully-Lagrange型の解法である。一方で、気相はコークスと溶融体の間を満たしているため、空間を正方格子で離散化して運動を解いたほうが都合がよく、Euler型の解法のSMAC法を採用した)。一連の解析は、例えばFig.1d, eに示すような結果を与える。このように一部を切り出して可視化してみると、溶融体が滴下することにより空隙が専有され、気相の流れが制限されることが明確に理解できる。

定常状態にある十分に大きい流量の液相の供給を止め、静的になったときの液相体積分率を静的ホールドアップ、 hs という。 hs は、充填層構造内の通液性および通気性における重要な指標である。本計算では非濡れのコークス表面を仮定して解いたところ、コークスの変形が進行するとともに hs はわずかな減少傾向を示した。粒子径が小さくなると毛管長以下のスケールの空隙 (ポトルネック) が多くなり、 hs が増加すると考えられたが、その逆の傾向を示す結果であった。そこで得られた滞留液滴について、個別の体積および接触するコークスを追跡したところ、各コークス粒子径・形状に応じた hs サイトを形成することがわかった。初期コークス層では、液滴はコークス平面上に扁平になって存在しており、一方で、変形後コークス層中において、液滴は主に空隙のポトルネック中に補足されるようにシフトした。平均液滴体積は hs との相関が見られ、滞留する個々の液滴体積が hs を決定する主要な因子と考えられる。一方で、コークス変形の進行とともに単位体積当たりの液滴数は増加した。粒子径および球形度の変化により液滴の滞留形態が変化し、その違いが気相流れに及ぼす影響は無視できないものと推察された。

Fig.2に液相の有無による流れ場の変化を示す。Fig.2a, bには、一例として、タンブラー回転数 $N=1000\text{rev}$ で存在する空隙に補足された静的 hs サイト周りを拡大表示した。空隙を液滴が占有することによって、流れていた気相のパスが限定されることがわかる。この液滴による閉塞効果は、充填物のサイズや形状に依存する。本論文では、コークスの変形の違いが流速の変化に大きく影響することを言及した。すなわち、変形前の大粒径コークスは、空隙を液が占有するが主流に顕著な影響を与えないが、変形後のコークスは、粒径と球形度が低下して、粒子間隙が狭く、この領域を液滴が占有することによって同じ hs でも流れを大きく変化させる。このような流速分布の変化は圧力勾配を増大させる方向に働き、すなわちFig.2cに示すように、Ergunの式¹⁰⁾で理論的に予測された充填層の圧損量に液 hs の影響を考慮しても、計算で得

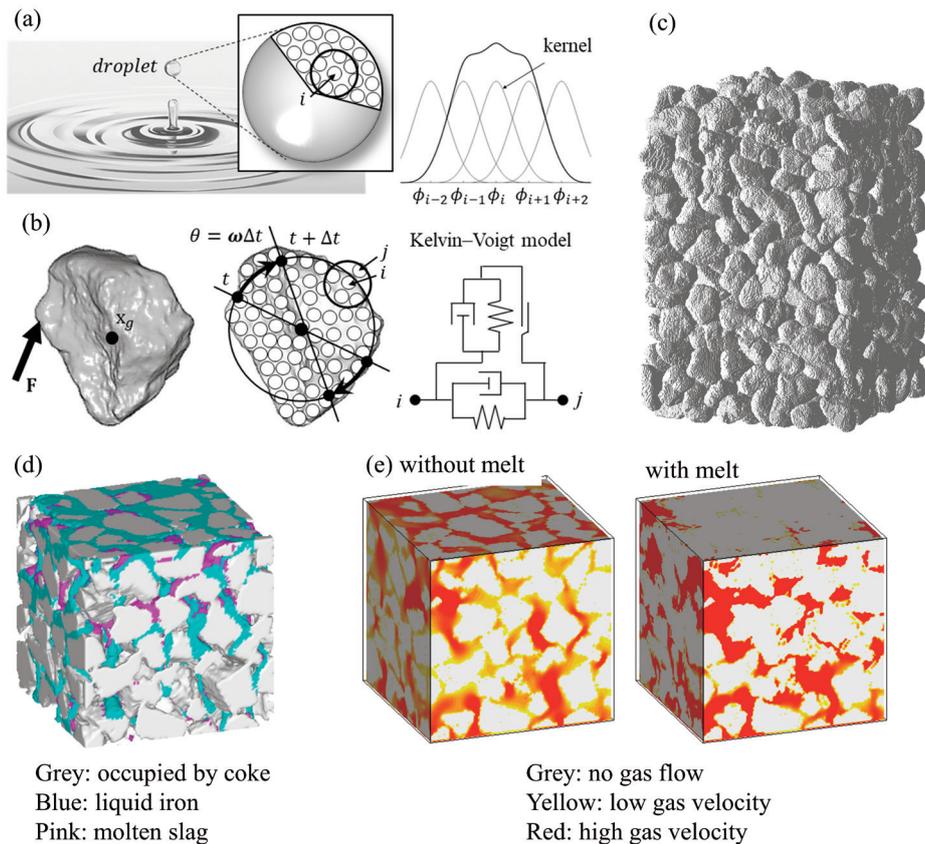


Fig.1 Euler-Lagrange coupling dynamics model for multiphase flow in coke bed. a) Description of the distribution of a physical quantity using the SPH kernel function, b) Assembly configuration for packing simulation of non-spherical solids, c) Calculated cokes packed bed structure, d) Molten iron and slag distributions, e) Gas velocity distributions with or without melts.

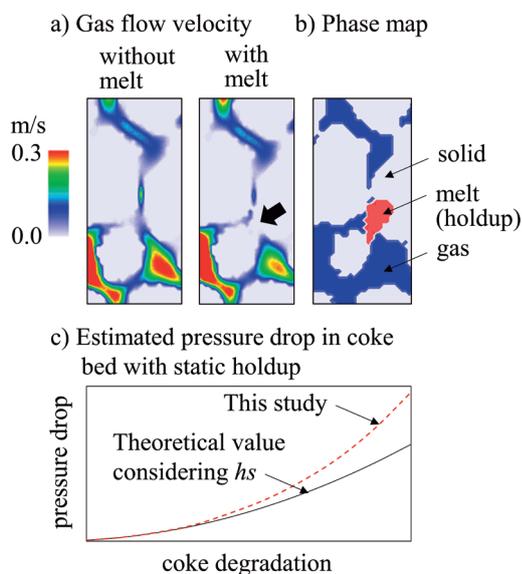


Fig.2 Gas distributions with or without holdup melts in coke bed.

られた圧損量の方が大きくなる傾向が得られる。同じ h_s サイトにおいても空隙および滞留液滴の形状によって充填層内圧力損失に与える影響が異なることが示唆された。

5 今後の展望

充填層内気流パスの流れは等価ではなく必ず偏流するので、空隙を形成する立体構造の幾何学的特徴をすべて考慮した数値解析を実行すれば、局所閉塞やフラッディングを予測することができるはずである。一方で、高炉内充填物はコークスや鉱石など化学反応を伴うため、突発的に生じる条件を定量的に考慮することは未だに困難である。そこで我々は、反応後強度毎のコークスの変形データを取得し、これに対応する閉塞解析手法の確立を目指している^{11,12)}。この研究では、発生した粉の重力落下、コークス間のブリッジングとすべり、これらによる空隙の狭隘化の進行、そして圧力損失が増大していく過程を可視化して理解を深めていくことが期待できる。最近では、齋藤泰洋先生に情報の提供を頂き、充填層構造の通気性定量化に取り組み、コークス内部の空間評価に用いられている解析手法の“burn アルゴリズム”¹³⁾を用いて、空隙の幾何的データに基づく通気性評価を行った。このような幾何データ解析を用いると、固気界面に作用するせん断応力によるエネルギー損失過程を積算して圧損を評価でき、また空隙の詳細な形状変化から、単純な粉化量のみではなく個々の

コースの配置・変形・移動の過程を合わせて考えなければ圧損が決まらないことを再認識することができる¹⁴⁾。さらに、充填層構造安定性の定量化には、粒子間の交差点(インターセクション)の応用数学的取り扱いにより、中長期的な空隙の不均一性を多角的に評価することで、閉塞条件を見出していくことも間違いなく有用と考えている^{15,16)}。一方で、機械学習の代表的な手法であるDeep Learningによって、人間が認識するのが難しいコースの破壊のような3次元の非線形現象においても、強度と変形パターンを結びつけられることが確認できた¹⁷⁾。適切な問題設定と対象範囲を与えたAIは極めて有用で、力学的な原理として解釈できなくとも、未知のコース層閉塞を予測できるかもしれないと個人的には思っている。

プロセス解析においても、コンピューティングパワーの増大とともに実験や動力学シミュレーションから得られたデータの分析の重要性が高まってきた。Fig.3に近年よく描かれているサイバーフィジカルループ¹⁸⁾をコース層の閉塞問題に当てはめて示した。理論に基づくモデリング、実験・観察、シミュレーション、データ解析のループを形成することで、複合的な現象に対する知識の統合が実感として得られると思われる。すなわち、固体力学に基づいた(理論)コースの熱間強度(実験値)を得て、コース群の3D充填構造と動的挙動(計算)を求めた後、閉塞や破壊パターンなどの予測を行う(データ解析)など、一連の解析ループが高度に機能すれば、プロセス工学において極めて強力な手法と言える。本論文では、実験結果とデータ処理、数値解析という方法を採用したが、将来、それぞれの垣根が薄れ、あるいは有機的な結びつきが強まったアプローチや概念が生み出されていくと予想される。最後に、伊藤公久先生がご執筆された解説記事¹⁹⁾を引用すれば、「金属精錬に携わる技術者・研究者は、あらゆる手法を駆使して、(原材料の多様化やCO₂排出量削減など困難な問題に)立ち向かわなくてはならない」一方で、「我々金属精錬の研究者は、対象となる現象についての正しい物理的・化学的理解を怠らず、慎重に(新たな手法の)適

用を進めることが肝要」である。これを戒めとして各位のお叱りを賜って、今後も新たな技術に心を躍らせ現象理解を少しでも深化できたら望外の幸である。そして、目標のひとつである「モデルによる結果から通気・通液性の新評価指標を提案し、安定操業技術の向上を図ること」の達成は、残念ながらまだまだこれからである。より速い、より機能的な、より低コストで、より柔軟なプロセス解析を目標に研究を継続したい。

参考文献

- 1) N.Standish : Nature, 202 (1964), 587.
- 2) K.Terui, K.Ichikawa and Y.Kashihara : ISIJ Int., 60 (2020), 463.
- 3) 柏原佑介, 岩井祐樹, 佐藤健, 石渡夏生, 佐藤道貴:鉄と鋼, 102 (2016), 661.
- 4) A.R.Powell and D.W.Gould : Ind. Eng. Chem., 20 (1928), 725.
- 5) S.Natsui, K.I.Ohno, S.Sukenaga, T.Kikuchi and R.O.Suzuki : ISIJ Int., 58 (2018), 282.
- 6) M.Sussman, P.Smereka and S.Osher : J. Comput. Phys., 114 (1994), 146.
- 7) J.F.Favier, M.H.Abbaspour-Fard and M.Kremmer : J. Eng. Mech., 127 (2001), 971.
- 8) P.R.Austin, H.Nogami and J.I.Yagi : ISIJ Int., 38 (1998), 246.
- 9) J.J.Monaghan : J. Comput. Phys., 110 (1994), 399.
- 10) S.Ergun : Chem. Eng. Prog., 48 (1952), 89.
- 11) 平井東, 夏井俊悟, 埜上洋 : 材料とプロセス, 32 (2019), PS-15, CD-ROM.
- 12) 平井東, 夏井俊悟, 埜上洋 : 材料とプロセス, 33 (2020), PS-4, CD-ROM.
- 13) 内田中, 山崎義昭, 松尾翔平, 齋藤泰洋, 松下洋介, 青木秀之, 濱口眞基 : 鉄と鋼, 105 (2019), 957.
- 14) 平井東, 夏井俊悟, 埜上洋 : 材料とプロセス, 34 (2020), 494, CD-ROM.
- 15) S.Natsui, A.Sawada, H.Nogami, T.Kikuchi and R.O.Suzuki : ISIJ Int., 60 (2020), 1453.
- 16) H.Nogami and T.Yamawaki : ISIJ Int., 60 (2020), 1560.
- 17) 夏井俊悟, 平井東, 埜上洋 : 材料とプロセス, 34 (2020), 492, CD-ROM.
- 18) G.Schirner, D.Erdogmus, K.Chowdhury and T.Padir : Computer, 46 (2013), 36.
- 19) 伊藤公久 : まてりあ, 54 (2015), 436.

(2020年12月1日受付)

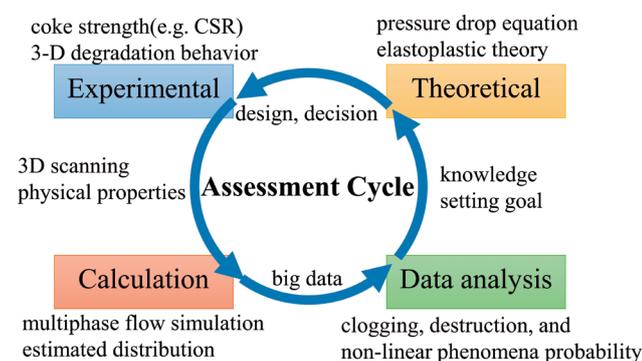


Fig.3 Concept of loop analysis for complex clogging in coke bed structure.