



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

フェロコークスの構造と強度

Ferro-coke Structure and Strength

松下洋介

Yohsuke Matsushita

東北大学大学院
工学研究科化学工学専攻
准教授

1 はじめに

本論文「Effect of Iron Ore Reduction on Ferro-coke Strength with Hyper-coal Addition」¹⁾は平成21～24年度、NEDO委託事業「資源対応力強化のための革新的製鉄プロセス技術開発」において実施した神戸製鋼所(株)と東北大学の共同研究の成果¹⁻⁴⁾のうちの一報であり、関係者各位に謝意を示すとともに日本鉄鋼協会の澤村論文賞という名誉ある賞をいただいたことに共著者一同深く感謝し、今後も日本鉄鋼協会ひいては鉄鋼産業に貢献する研究を進めていかなければならないと身の引き締まる思いでおります。また、ふえらむの「私の論文」の記事を執筆させていただく機会をいただいたことに感謝するとともに、我々の研究について紹介させていただき、論文では書ききれなかった内容について述べさせていただきます。

2 コークスの構造と強度の評価

我々の研究グループでは、コークスは気孔を含む多孔質体と捉え、その強度はコークスの基質自体の強度ではなく、気孔を含むコークスの構造が粘結炭由来のコークスの強度を決定することを示してきた⁵⁾。そのため、マイクロX線CT(Computer Tomography)を用いてコークス撮像し、コークスの構造を評価する技術を確立してきた⁶⁾。具体的には、撮像したコークスの断面像に二値化処理を施すことで基質と気孔に分類し、これを積み重ねることで実際のコークスの構造を再現し、コークスモデルを構築する。なお、現在のマイクロX線CTの解像度は数百nmからμm程度であるため、この

大きさが再現する構造の最小単位となる。

再現したコークスを対象にBurn法⁷⁾を適用し、気孔壁厚さを数値化することでコークスの構造を定量的に評価する。また、円形度が低い気孔が存在する場合にコークスの強度が低下することが報告されているため、気孔の円形度を求めることでコークスの強度を類推する。さらに、ボクセル有限要素法(voxel-based finite element method)による応力解析を実施し、応力集中部位やその大きさを定量的に評価することで、コークスの強度を検討する⁸⁾。その際、METIS⁹⁾を用いて解析領域を分割し、MPI(Message Passing Interface)⁹⁾を用いて並列計算を実施するいわゆる領域分割に基づく並列化を実施している。この手法では、分割した各領域を各プロセッサが担当するため、理論的にはN個のプロセッサを用いることで計算時間が1/Nとなることが期待できる。

さらに、実際に作製したフェロコークスを対象に割裂引張試験を実施し、強度を統計的に検討可能なワイブルプロットを用いてデータを整理することでフェロコークスの破壊応力を定量的に評価している。なお、落下衝撃により発生する粉を対象とするドラム指数が主に表面破壊を評価する手法であるのに対し、割裂引張試験は体積破壊を評価する手法であると認識している。

3 フェロコークスの構造と強度の評価

本論文では石炭に鉄鉱石(本論文では鉄鉱石のモデル物質としてヘマタイトを用いている)を混ぜ、乾留することで得

* [今回の対象論文]

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: 「Effect of Iron Ore Reduction on Ferro-coke Strength with Hypercoal Addition」, ISIJ International, Vol.56 (2016), No.12, pp.2132-2139 (第28回澤村論文賞受賞)

られるフェロコークスを対象としているため、これまで述べた手法の一部に改良を加える必要があった。具体的には、石炭とヘマタイトを混ぜ、乾留する際にヘマタイトがマグネタイト、ウスタイト、鉄と還元されるため、フェロコークスの構造を再現する際、基質と気孔に加えて鉄粒子に分類する必要があった。幸い、鉄粒子は基質と気孔の輝度値が大きく異なることから、二値化処理を二回繰り返す三値化処理を施すことで、図1に示すとおり、基質、気孔と鉄粒子を分類することができた。上述のBurn法を用いることで、図2に示すとおり、鉄粒子周りに気孔が生成していることからヘマタイト、マグネタイトあるいはウスタイト周囲の基質が酸化されるこ

とで消失することを示した。また、この酸化により石炭の溶融性が低下することでフェロコークスの強度が低下することが懸念されるため、この溶融性の低下を緩和することを目的に石炭にバインダーとしてHyper-coalを添加したフェロコークスを作製した。割裂引張試験の結果、Hyper-coalを適量添加することでこの溶融性の低下を緩和し、コークスの強度を向上することができた。実際、ボクセル有限要素法による応力解析によりHyper-coalの添加により応力が緩和することを示した。また、Hyper-coalを適量添加することで、円形度の低い気孔の割合が小さくなることを確認した。

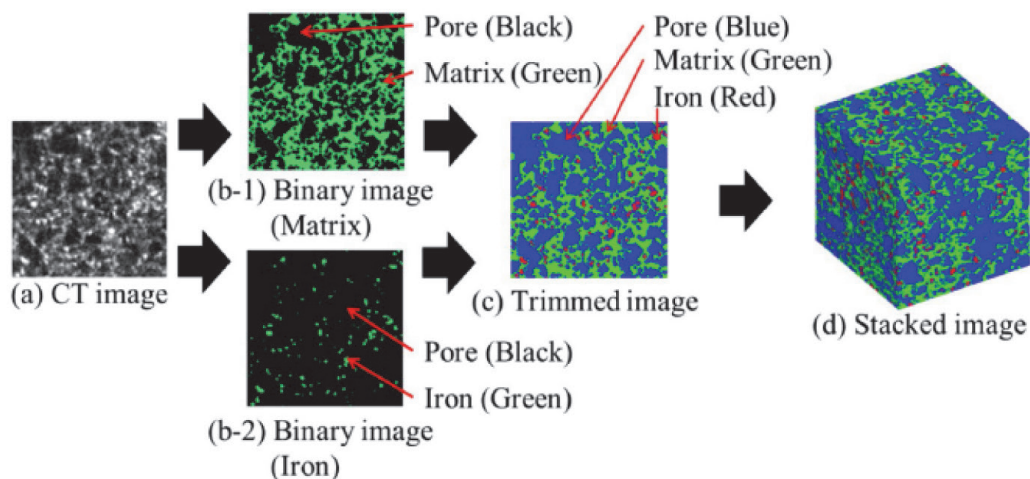


図1 フェロコークスを再現するモデル

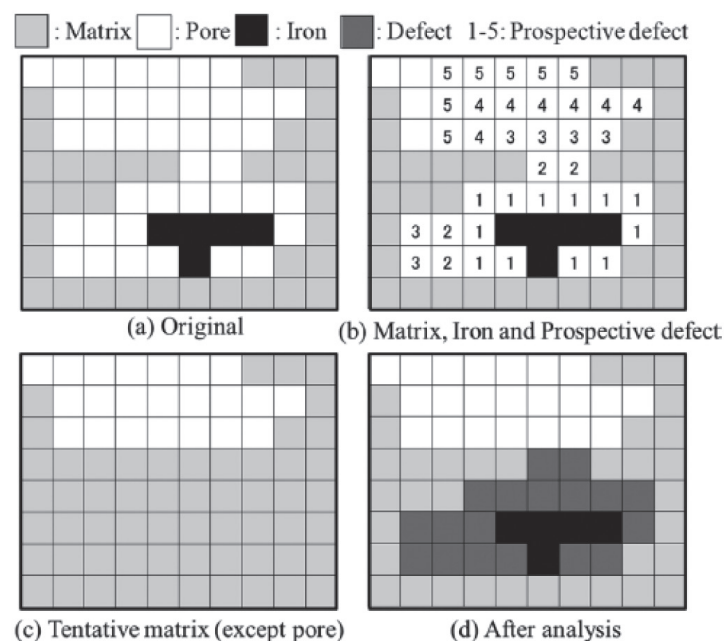


図2 Burn法による気孔壁厚さの評価

4 まとめと今後の展望

本論文「Effect of Iron Ore Reduction on Ferro-coke Strength with Hyper-coal Addition」¹⁾について概説した。具体的には、これまでのコークスの構造と強度の評価方法をフェロコークスにも用いることができるように改良し、適用することで、フェロコークスの構造と強度を定量的に評価し、フェロコークスの強度を向上することができた。

近年、Maximal Ball法¹⁰⁾を用いて気孔のつながりを数値化することでコークスの構造を定量化しようと試みている。さらに、ボクセル有限要素法により定式化した連立方程式の解法に代数マルチグリッドである代数的マルチグリッド法 (AMG法)¹¹⁾やAGgregation-based algebraic MultiGrid (AGMG)¹²⁻¹⁴⁾を用いることでロバストかつ速やかに数値解を求める。著者らの知る限り、スカラー演算機を用いる場合、この手法が最も確実かつ短時間に応力解析を実施することができる。現在、不均一反応C-CO₂で示されるいわゆるソリューションロス反応によりコークスの基質の一部が消失した際のコークスの構造を評価するため、マイクロX線CT像から構築した1億超のボクセルからなるコークスモデルを対象にソリューションロス反応を伴う物質移動解析¹⁵⁾を実施している。これにより、種々の温度やガス化剤濃度の条件においてソリューションロス反応に伴い変化するコークスの構造を定量的に評価することが可能となる。

また、粘結炭に劣質炭を配合したコークスでは、溶融した粘結炭由来の基質と溶融が不十分な劣質炭の界面が配合炭由来のコークスの強度を決定することを示唆している。この接着不良となり得る界面を考慮し、破壊挙動を検討するため、剛体-バネモデル (rigid-body spring model, RBSM)¹⁶⁾を用いた破壊解析を実施することで、破壊挙動はもちろん破壊に至るまでのコークス内に発現する応力分布の変化について調査することができる。このように、我々の研究グループでは一見、極めて複雑な構造を有するコークスの構造を再現するとともにコークスの強度を定量的に評価するべく研究を進めている。また、多様化するコークスの原料や製造方法に適した評価方法を開発しており、これらが求められるコークスの強度を担保するコークス製造の技術開発の一助となれば望外の喜びである。

参考文献

- 1) A. Uchida, Y. Yamazaki, S. Matsuo, Y. Saito, Y. Matsushita, H. Aoki and M. Hamaguchi : ISIJ Int., 56 (2016), 2132.
- 2) A. Uchida, T. Kanai, Y. Yamazaki, K. Hiraki, Y. Saito, H. Aoki, N. Komatsu, N. Okuyama and M. Hamaguchi : ISIJ Int., 53 (2013), 403.
- 3) A. Uchida, Y. Yamazaki, K. Hiraki, T. Kanai, Y. Saito, H. Aoki, T. Inoue, N. Kikuchi, N. Okuyama and M. Hamaguchi : ISIJ Int., 53 (2013), 1165.
- 4) A. Uchida, Y. Yamazaki, S. Matsuo, Y. Saito, Y. Matsushita, H. Aoki and M. Hamaguchi : ISIJ Int., 57 (2017), 1524.
- 5) 三橋雅彦, 副島宗高, 朝熊裕介, 山本剛, 青木秀之, 三浦隆利, 加藤健次, 板垣省三: 鉄と鋼, 88 (2002), 188.
- 6) K. Hiraki, Y. Yamazaki, T. Kanai, A. Uchida, Y. Saito, Y. Matsushita, H. Aoki, T. Miura, S. Nomura and H. Hayashizaki : ISIJ Int., 52 (2012), 1966.
- 7) W.B. Lindquist, S.-M. Lee, D.A. Coker, K.W. Jones and P. Spanne : J. Geophys. Res. Solid Earth., 101 (1996), 8297.
- 8) G. Karypis and V. Kumar : SIAM J. Sci. Comput., 20 (1999), 359.
- 9) D. Silin and T. Patzek : Phys. A Stat. Mech. Its Appl., 371 (2006), 336.
- 10) MPI Forum : MPI Forum, <https://www.mpi-forum.org/>, (accessed 2018-08-3)
- 11) H. P. C. Laboratory : AMGS, <http://hpcl.info.kogakuin.ac.jp/lab/software/amgs>, (accessed 2018-08-3)
- 12) Y. Notay : SIAM J. Sci. Comput., 34 (2012), A2288.
- 13) Y. Notay and A. Napov : SIAM J. Sci. Comput., 34 (2012), A1079.
- 14) Y. Notay : Electron. Trans. Numer. Anal., 37 (2010), 123.
- 15) Y. Numazawa, Y. Saito, Y. Matsushita and H. Aoki : ICFD2018 (2019), OS18-14.
- 16) T. Kawai : J. Soc. Naval Arch. Japan, 141 (1977), 187.

(2018年8月8日受付)