

東北大学 多元物質科学研究所 教授 Hiroshi Nogami

# し はじめに

近年、鉄鋼業を取り巻く社会的・経済的状況は大きく変化 している。気候変動問題に関する国際的な枠組みであるパリ 協定は、世界の平均気温の上昇を産業革命以前のレベルを基 準として2℃以下に抑え、1.5℃に抑制する努力を追求するこ とを目的としている。この目標を実現するために、すべての 先進国は、2030年までに温室効果ガス排出量を数十パーセン ト削減するという国毎の貢献を設定している。一方、経済界 では、化石燃料からのダイベストメントの傾向が拡大してい る。このため、大量のCO₂を排出する鉄鋼業は、還元材の転 換や炭素のリサイクルなど、抜本的な技術変革が求められて おり、世界中でさまざまな技術開発が進められているが、こ れと同時に、現行の製鉄プロセスの究極的な効率改善も進め る必要がある。

このような背景の下、一貫製鉄所の使用エネルギーの約7 割が投入される製銑工程の基幹プロセスである高炉では、低 炭素操業を目指した取り組みが進められてきた。高炉の低炭 素操業下では、プロセスの重要な推進力である熱エネルギー と還元ガスの供給量が減少するとともに、炉内通気性担保の 役割を担うコークス層の炉内体積割合が減少するなど、操業 の不安定化要因が顕著となる。これに加えて、結晶水や脈石 成分の増加や粒度の低下といった製鉄原料の劣質化が進行し ている。このような状況下でさらなる低炭素条件での高炉操 業を実現するには、高炉の効率を維持しつつ操業の不安定さ を回避する操業制御技術の開発が必要となる。

東北大学 大学院工学研究科 准教授	三木貴博 Takahiro Miki
九州大学 大学院工学研究院 准教授	大野光一郎 Koichiro Ohno

# 2,研究会活動概要

高炉内部は、炉頂から装入された焼結鉱やペレットなどの 塊状製鉄原料の昇温・還元が進行する塊状帯,還元が進行し 高温に達した鉱石類の軟化・変形・融着・溶融が進行する 融着帯,融着帯で発生した溶銑滓がコークス充填層中を滴下 する滴下帯,羽口から供給された高温空気とコークスが燃 焼し、高温の還元ガスが生成するレースウェイ,炉底中央で コークス粒子が停滞する炉芯および滴下した溶銑滓が比重分 離して蓄積する湯溜まりなどの領域に区分される。本研究会 は、これらのうち融着帯に着目した。

Fig.1に高炉融着帯近傍の炉内充填構造の模式図を示す。 高炉内では、コークスと鉱石類が交互に装入され、層状充填



Fig.1 Schematic diagram of packed bed structure in blast furnace around cohesive zone, and research topics in research group.

層を形成している。酸化鉄の還元が進行し、装入物の昇温が 進行すると、鉱石粒子が軟化変形して互いに融着するが、こ の融着領域は均一な高さで形成されるわけではなく、炉内半 径方向の鉱石/コークス比および装入物粒径の分布によっ て、半径方向に形成位置が異なる。上述のように、コークス と鉱石は交互に層状に装入されるため、高炉の縦断面内で は、融着鉱石層は飛び石状に分布することになり、これらの 間に挟まれたコークス層はコークススリットと呼ばれる。融 着鉱石層では粒子同士の融着により粒子間の空隙が閉塞し て、鉱石層の通気性が低下するため、炉下部から供給された 高温の還元ガスは、主にコークススリットを通過して炉上部 へと流通する。コークススリットは流通断面積が限定的で通 過時の還元ガス速度が上昇するため、急激な圧力損失が融着 帯で発生する。低炭素操業では、コークス使用量の低下によ るコークススリットの薄層化に伴う還元ガスの流通流速増 大、および鉱石層厚増大に伴うコークススリット内のガス流 通距離の増大などにより融着帯の圧損が上昇することが予想 される。融着帯で過大な圧力損失が発生すると、装入物の荷 下がりと炉上部への適正なガス分配が阻害され、操業の不安 定性発現に繋がると考えられている。

一定のコークス層厚の下で融着帯の圧力損失を低減するた めには、流体力学的には、融着帯の厚さを減少させて融着帯 内のガス流路長を短縮するか、融着帯自体の通気性を向上さ せる必要がある。前者のためには、軟化・融着の開始の遅延 と溶融・溶け落ちの迅速化が必要であり、後者のためには、 融着鉱石層の構造制御および融着帯内で発生した融体の迅速 な排除が必要となる。そこで本研究会では、「融着層の形成開 始に対応する軟化制御」、「融着帯下端形成に対応する鉱石層 の高速溶解」、「生成融液の滴下迅速化」および「軟化・溶融 に伴う層構造変化」の四項目に着目し、各項目について諸現 象の支配因子抽出と定量表現の構築を目指し、熱力学・物性 工学・反応工学による基本的な現象解明を担当する委員と数 学的モデリングを担当する委員を配置して密接な連携の下に 研究会活動を実施した。融着帯の通気性確保という共通かつ 最終的な目標に向けて、個別の研究項目で得られた知見を統 合するため、共通試料を用いた特性評価および融着現象のモ デリングを実施した。研究会の実施体制をTable1に示す。

## 3 研究成果

## 3.1 融着層の軟化および溶融制御

高炉上部で還元・昇温が進行した鉱石粒子は、高温による 材料特性の変化および内部の融液生成により強度が低下し て、変形が生じる。その後の粒子内部の融液の生成挙動およ び賦存状態が融着層の変形および領域を決定する重要な因子 となる。そこで、本研究会では「軟化制御」および「高速溶融」 WGを中心に融着帯温度域における鉱石粒子の構造および反 応・融液生成挙動について検討を行った。

#### 軟化溶融温度における鉄鉱石の還元挙動

鉱石層の軟化溶融開始温度は鉱石の還元率とともに上昇 することが知られており、融着帯形成温度付近での還元促進 により融着層の肥大を抑制可能であることが示唆される。一 方、この温度域では鉱石内の気孔が生成した融液により閉塞 して、還元ガスの拡散が阻害され、還元速度は著しく低下す る<sup>14)</sup>と報告されている。即ち、融着帯近傍の還元促進には、 融液生成と気孔構造の関連に基づく制御が重要となる。そ こで融液生成時の鉱石還元挙動と微細構造の変化に及ぼす 組成および脈石成分の影響を調査した<sup>5)</sup>。試料としてSiO<sub>2</sub>に 対するCaOの組成の比 (C/S) を1.5, 2.0, 2.5としたFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>2</sub>焼成体を作製して、1000から1200℃にお いて還元実験を実施した。結果の一例として1200℃で還元 した試料の断面観察結果をFig.2に示す。還元後、C/S=1.5 では大きな酸化鉄の粒子間にスラグ融液が多量に存在して いるのに対して、C/S=2.0、2.5では微細な多孔質構造を有 し、上記酸化鉄の粒子間にはスラグ融液が存在しなかった。 またC/S=2.0, 2.5では1000~1200℃で温度とともに還元 速度が上昇したのに対して、C/S=1.5では1200℃の還元速 度が1000℃と同程度まで低下した。C/S=1.5ではFeO<sub>x</sub>ま

Table1	Organization structure of	of research group.

対象現象	基礎試験	モデル解析	企業幹事
軟化制御	林→渡邊 (東工大) 小西 (阪大)	加納 (東北大)	折本 (新日鐵住金)
高速溶融	三木 (東北大)	平田 (東北大)	野内→佐藤健 (JFE)
迅速滴下	植田 (東北大) 植木 (名大)	夏井 (北大)	松山→弘中 (日新)
層構造	大野 (九大)	埜上 (東北大)	笠井 (神鋼)

所属は研究会終了時

での還元後、FeO<sub>x</sub>粒子間にFeO<sub>x</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を含むカルシウムシ リケート系スラグが存在していたため、1200℃では上記ス ラグとFeO<sub>x</sub>粒子の反応によってオリビン系スラグ融液が生 成したことが示唆された。このスラグ融液によって開気孔 率が16%まで低下したため、1200℃の還元速度が低下した。 C/S=2.0, 2.5ではFeO<sub>x</sub>までの還元後もFeO<sub>x</sub>粒子間に SFCA由来の脈石成分を含むFeO<sub>x</sub>が存在し、1200℃で脈石成 分がFeO<sub>x</sub>からスラグとして分離しFeO<sub>x</sub>粒子内に分散したた め、粒子間の気孔が閉塞しなかったことが示唆された。

## 溶融酸化物の反応・溶解挙動

酸化物間の反応の進行は鉱石粒子内の融液の量および分散 状態を通じて粒子の軟化・溶融特性に影響を及ぼすことから、 融着層の変形制御のためには、異相酸化物間の反応性を理 解することが重要である。これまでに、酸化物試薬の混合物 を1373KのAr雰囲気下で加熱して酸化物間の反応性を調査 し<sup>6</sup>、CaOとFeOの反応性が高く、CaO-FeO液相の形成が速 く、その融液が他の酸化物と反応すること、また、CaO-FeO 液相とSiO<sub>2</sub>固相の界面に2CaO・SiO<sub>2</sub>が形成されていること を確認している。そこで、溶融CaO-FeO相へのSiO<sub>2</sub>の溶解 挙動ならびにAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>添加と温度の影響を調査した<sup>7)</sup>。

本研究ではFeO/CaO比を3とし、所定量のAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を添加した混合酸化物0.1gを直径5mmの円柱状タブレットとして、SiO<sub>2</sub>るつぼ内に設置して、1473KのAr雰囲気中に所定時間 設置した後、急冷して、試料をSEM-EDSにより分析した。結 果の一例として、Fig.3にCaO-FeO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>液相へのSiO<sub>2</sub>溶解 に対するAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含有量の影響を示す。CaO-FeO 試料をSiO<sub>2</sub>ル ツボ上で1423Kまで急速に加熱すると、SiO<sub>2</sub>とCaO-FeOの 界面に2CaO・SiO<sub>2</sub>相が生成する。CaO-FeO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>融液への SiO<sub>2</sub>の溶解は、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含有量の増加に伴って促進された。ま た、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>が7 mass%以上になると、界面での2CaO・SiO<sub>2</sub>の 生成が抑制され、SiO<sub>2</sub>の溶解がさらに促進される。加熱温度 を1473Kとした場合には、界面での2CaO・SiO<sub>2</sub>の生成は観 察されず、CaO-FeO 液相へのSiO<sub>2</sub>の溶解は迅速であり、SiO<sub>2</sub> 系脈石鉱物の溶融が促進され、液体スラグが生成する。



 $\label{eq:Fig.3} \begin{array}{ll} \mbox{Effect of } Al_2O_3 \mbox{ content on } SiO_2 \mbox{ dissolution into } \\ \mbox{ CaO-FeO}(-Al_2O_3) \mbox{ liquid } phase^7 \mbox{.} \end{array}$ 



Fig.2 Variations of microstructure of simulant sinter iron ores with reduction<sup>5)</sup>

#### 軟化融着帯域における初期融液形成挙動

焼結鉱は融着帯において、内部の半溶融のスラグを還元さ れた鉄の殻が覆う形態になっている<sup>810)</sup>。内部の液相率が高 ければ、荷重による変形量と融液の吐出量が大きくなって鉱 石層の通気性を悪化させ、一方、スラグ部の融液量が少なけ れば吐出量が少なく、通気性を改善できると考えられる。言 い換えれば、融着帯の通気性確保のためには、融着帯の温度 域における還元進行下での融液生成挙動の制御が必要とな る。そこで、本研究では試薬合成により得られる均質な焼結 組織を対象として、高炉模擬雰囲気での等温保持環境下での 還元時のスラグ形成と内部組織の変化の観察を行い、焼結鉱 塩基度 (CaO/SiO<sub>2</sub>), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>濃度および初期組織の影響につい て評価を行なった。Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, SiO<sub>2</sub>およびAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>またはカ オリナイト粉末を所定組成で混合し、大気中で1270℃、5分 間焼成した試料を用いた。組織観察を行った後、所定の雰囲 気の高温顕微鏡下で等温還元し、還元後の試料は切断・研磨 して電子線マイクロアナライザ (EPMA) により断面組織観 察を行なった。

結果の一例として、C/S=2.5の還元中断試料の断面観察 結果をFig.4に示す。図中、未反応のSiO<sub>2</sub>の周囲にFeOを固 溶したCaO·SiO<sub>2</sub>粒子と、その周辺にオリビン組成に近いス ラグが、またその外周にFeOが固溶した2CaO·SiO<sub>2</sub>が多く分 布していることが観察され、この組織は局所融解の結果生成 したものと考えられる。同様の観察を種々の組成および還元 条件下で行い、以下の知見を得た。2CaO·SiO<sub>2</sub>はカルシオウ スタイト(CW)が金属鉄に還元され、鉄以外の脈石成分が排 出される際に形成され、スラグの融液量を相対的に低く抑え る効果がある。またその効果が最も顕著なのはC/S=2.0の 時である。融液生成温度に関する塩基度依存性は、1.5<2.5 <2.0である。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>濃度の上昇により融液生成温度は上昇す る。微細なCFや柱状CFなどの組織の違いによる融液生成温 度の違いよりも、焼結鉱中の未反応SiO<sub>2</sub>が局所的な融解を引



Fig.4 Microstructure of residual SiO<sub>2</sub> and its surrounding structure caused local melting.

き起こし、融解の起点となるため、未反応SiO₂の存在が初期 融液の生成温度を引き下げる原因となりうる。

## 融着層の軟化粒子変形および熱流動モデル

鉱石粒子は、上述の鉱石の反応による組成や融液量の変化 に伴って機械的特性が変化し、充填層の荷重が作用すること で変形する。また、この変化は、個別の鉱石の温度履歴に強 く依存する。このため、軟化層の変形挙動を推定するために は、固体から固液共存状態を経て溶解に至る過程での鉱石粒 子の変形および相変化を、力学的・熱的に表現する手法が必 要となる。

融着帯では、鉱石粒子は堅固な固体状態から軟化・溶融を 経て融液へと変化する。この一連の挙動を統一的な表現で推 定するモデルを開発した<sup>11)</sup>。本モデルでは、連続する物質を 微小な粒子の集合体として表現する手法を用いており、固体 から軟化状態までの変形をこれら微小粒子間の衝突に加え て粒子間の連結バネによる拘束を考慮したAdvanced DEM (ADEM)<sup>12)</sup>により、また、溶融後の融体の流動をSmoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法<sup>13,14)</sup> により表現している。 粒子の軟化はADEMにおける連結バネのバネ定数の低下に より、また溶融は連結バネの切断と粒子追跡手法のSPHへの 切り替えにより表現し、両手法で物質を構成する微小粒子を 共通で使用することで、軟化から溶融に至る粒子挙動を統一 的に推定できる構成とした。構築したモデルの妥当性はいく つかの検証試験や数値実験を通して確認しており、円柱状の 予備還元焼結鉱の昇温下の軟化および相変化挙動の再現に成 功している。

高炉充填層内では、高温の還元ガスが充填された装入物粒 子間の空隙を流通し、装入物粒子に熱を供給する。融着帯で は、鉱石粒子は熱供給に伴う温度の上昇により軟化・溶融し て鉱石層の充填構造が変化すると層内のガス流動特性が変化 し、これに伴って伝熱挙動も変化する。そこで、融着帯の鉱 石粒子の温度履歴を定量的に把握するため、融着帯の変形に 伴う還元ガスの流動の変化と伝熱機構の変化を考慮した推定 法の開発を行った<sup>15)</sup>。開発モデルは、熱流体流動と粒子伝熱 のサブモデルで構成されており、前者は、充填層内の粒子間 の空隙内の熱流動を推定する。後者は、個別の粒子の伝熱を 追跡するもので、伝導と輻射による粒子間の熱交換を評価す る新たな手法を取り入れている。これらのサブモデルは、対 流熱交換速度および粒子配置によって連成されている。結果 の一例として、長方形充填層の中央部に軟化融着した変形層 を配置して、充填層下部から高温気流を導入した際の充填層 昇温過程を切り出してFig.5に示す。充填層は下部から昇温 され、高温領域が層底部から上部に向けて進展していくが、 中央部の変形層およびその下流 (上部) に大きな昇温遅れが 生じている。これは粒子変形により充填層中央の通気性が低



Fig.5 Snapshot of temperature distributions of gas and particles in packed bed with deformed layer<sup>15</sup>.

下して、高温ガスの流通が阻害されてガスから粒子への熱供 給が停滞するためであり、昇温に対する粒子間伝導の寄与が 大きくなっている。本モデルの妥当性は実験結果および理論 解との比較でも確認しており、融着帯近傍における伝熱過程 の定量評価の基礎を確立することが出来た。

#### 3.2 融液の迅速滴下

融着帯の底部から下部のコークス充填層では、鉱石の溶融 で発生した融液が滞留すると充填層中の空隙を埋めてガスの 流通を阻害するため、生成した融液をこの領域から迅速に滴 下させることが出来れば通気性の向上が期待できる。先行研 究会<sup>16</sup>では、融体と粒子のぬれ性が充填層中の融体の滴下に 大きな影響を及ぼすことが示されている。本研究会では生成 融液の「滴下迅速化」WGを中心に、コークス表面のぬれ性 に影響を及ぼすと考えられる灰分の反応に伴う挙動、非平滑 界面における液体の動的接触角およびコークス充填層内の液 体の滴下挙動について検討を行った。

## コークスの反応に伴う灰粒子特性変化

高炉内におけるコークスのソリューションロスや燃焼等の 反応は、コークス粒子表面から内部にかけて不均一に進行す るため、その形態によってコークス内部で灰粒子の分布が変 化する。コークス表面に灰分が濃化すると、コークス表面を 流通する融体のぬれ性が変化すると共に、融体との反応によ り融体の性状をも変化させ<sup>17-21)</sup>て、融体の流動特性に影響を 及ぼす。そこで、コークスの反応過程におけるコークス炭素 質構造の変化および灰粒子挙動の解明を目的とし、ガス化ま たは燃焼反応の中断試料の断面組織を観察および画像解析す ることで、反応過程におけるコークス粒内の灰粒子特性につ いて実験的に検討した<sup>220</sup>。結果の一例として、反応前および 1400℃で80%まで反応させた試料中の灰粒子の粒径別体積 割合をFig.6に示す。反応前と比較して、ガス化および燃焼後 にはいずれも粒径100µm以上の大きな灰粒子の割合が増加 しているが、燃焼反応ではその変化が大きく、灰粒子の溶融・



Fig.6 Variation of size distribution of ash particles in coke sample by gasification and combustion<sup>22)</sup>.

凝集の進行が顕著であった。ガス化でも一部灰粒子の溶融は 観察されたが、凝集は顕著ではなかった。種々の温度、雰囲 気および反応率の試料について、気孔率・収縮率の測定およ び顕微鏡観察を行い、反応の種類および反応形態が灰分挙動 に及ぼす影響を明らかにした。

#### コークス上の液滴の転落と動的ぬれ性

融着帯で生成した融液は、コークス充填層内を滴下する が、充填層中の滞留量は表面張力、粘性やぬれ性が影響を及 ぼす。このため、滞留量に及ぼす物性値や充填構造の関連に ついては数多くの研究が行われてきているが、それらの多く は平滑表面を対象としたものである。本研究会では、融着帯 底部で生成した融体の滴下の開始時に、不均一非平滑な表面 を有するコークス粒子間の空隙への融体の侵入が生じるこ とを念頭に、非平滑面上での液滴の転落角と動的接触角の関 係について検討した<sup>23)</sup>。直方体の板状に切り出し、所定の温 度およびCO/CO2濃度雰囲気下でガス化した高炉用コーク スを測定用の基板試料とした。表面の観察、分析および形状 測定を行った後、一部の基板には撥水処理を施した。回転ス テージに固定して水平に静置した基板上に蒸留水を滴下し、 ステージを傾斜させて液滴の形状および前進接触角、後退接 触角を測定した。一連の測定により以下の結果を得た。非平 滑面を有するコークス表面上における転落角と前進接触角と 後退接触角の差である接触角ヒステリシスの関係にも、平滑 面と同様の関係が成立する。ガス化反応処理前のコークスは 平滑面に比してヒステリシスが増大し、一時間以上のガス化 反応を行ったコークスではヒステリシスが減少した。ガス化 反応によりコークス表面に数um規模の凹凸が生成し、微小 な凹凸が生成した後にはガス化反応時間を増加するに従って ヒステリシスは減少したが、その変化は小さかった。

#### コークス層内固液共存スラグ流れ解析

近年、SPH法やMPS法といった粒子法を用いた流体解析 が、充填層内の空隙中を不飽和の状態で自由界面を伴って流

通する液体の運動の解析に応用され、一般的な常温液相よ りも密度、粘度、表面張力が高く、またコークスとのぬれ性 の悪い融体の、高炉内部を想定した条件での流動解析が可能 になってきている。スラグ内部に粉や固相成分が混在した場 合には、スラグの粘性は塑性流体的な挙動を示すと考えられ る<sup>24,25)</sup>。そこで、ぬれ性の悪いコークス充填層における固相 共存溶融スラグの滴下を念頭に、粘性モデルとして代表的な 塑性流体のBinghamモデルを採用してSPH法による流動解 析を実施した<sup>26)</sup>。結果の一例として、Fig.7に充填層内の静 的ホールドアップサイトに及ぼす Bingham 降伏応力の影響 を示す。スラグ中の固相率に相当する降伏応力の増加によっ て、滞留した個別の液滴の肥大化と分散の拡大が生じるが、 液滴の捕捉位置に対する降伏応力の影響はわずかであった。 液滴体積は一定の降伏応力を超えると増加傾向を示し、その 値は充填層の狭領域であるボトルネックでのせん断速度低下 と相関がみられた。また、降伏応力によらずコークスの投影 面積と液滴滞留量の間に相関が確認された。すなわち、溶融 スラグの固相比率の増加は、特定のホールドアップサイトで の滞留量の増加を引き起こすことが予想される。

## 3.3 軟化・溶融に伴う層構造変化

融着帯において鉱石の軟化変形が生じると、粒子間の空隙 の狭窄・閉塞が生じて通気性が低下する。充填層の圧力損失 はErgun式に代表される粒子径や空隙率などの充填特性と、 粘度、密度や空塔速度などの流動条件に基づく推算式により 評価されることが多いが、粒子変形を伴う鉱石層でこれらの 因子をいかに取り扱うべきか、また推定式の適用範囲につい ての知見は十分とは言えない。また、変形層内の空隙の特性 やその変化は、融着帯の圧損を評価・推定する上で基本的か つ根本的な現象であるにもかかわらず、定量的な推定および 評価は十分とは言えない状況にある。本研究会では「層構造 WG」を中心に軟化層の構造について検討を行った。

## 軟化過程における焼結鉱の収縮速度の定式化

融着帯の圧力損失推定に対しては、従来数多くの研究が行 われてきたが、提案された圧力損失の推定式の多くは、鉱石 層収縮率の関数として表現されており、鉱石種や還元条件に 依存する鉱石層の収縮挙動が既知である必要がある。そこで 軟化過程における焼結鉱層の収縮速度を定式化するため、荷 重および還元ガス条件が荷重軟化試験における層収縮速度に 及ぼす影響を評価した<sup>27)</sup>。その結果、焼結鉱の軟化過程を層 収縮速度の最大値を境界とした2つの温度領域に分割して定 式化し、諸因子の影響を明確化することに成功した。低温域 では見かけの軟化粘度の式<sup>28)</sup>を適用でき、層収縮速度は荷重 に比例し、見かけ軟化粘度に反比例する。一方、高温域では 層収縮速度は融液の生成速度に比例し、その比例係数は充填 層に占める金属鉄の体積割合の増加に伴って低下したことか ら、高温域では融液生成挙動および生成した金属鉄による耐 軟化性向上効果が層収縮速度を決める主な支配因子であると 考えられる。得られた収縮速度の推定式により、Fig.8に例示 したように、荷重および還元条件によらず昇温過程の焼結鉱 の収縮速度の変化を良好に推定可能となった。

## 軟化溶融充填層過程の通気抵抗評価

上述のように、軟化鉱石層の圧損は層の収縮率と関連付け て議論されているが、還元ガスは変形層中の空隙を流通して いることから、より詳細な通気性の検討のためには変形層中 の空隙の太さ、長さや屈曲度や連結といった空隙そのものの 特性を把握する必要がある。そこで、試料の急冷が可能な荷 重軟化試験装置による充填層の昇温中断試料から3次元CT スキャニングにより空隙形状を測定し検討した<sup>29)</sup>。測定結果 の一例として、Fig.9に圧力損失が最大となる条件で昇温を 中断したスラグ充填層の一定の高さ間隔における断層画像を 示す。 軟化・溶融過程にあるスラグ粒子充填層の圧力損失は、 ガスの流通する有効ガス経路の形状に適合させてFanningの 式を適用することで推定できることを示した。また、溶融ス ラグの分散状態およびスラグ試料層と層の上下に充填した炭 材との接触状況の観察から、溶融スラグと炭材間の毛管力の バランスが最大圧力損失値と強い相間を示すことが明らかに なった。

#### 変形充填層内の空隙構造解析

前項では荷重軟化試験の中断急冷試料から空隙形状を抽 出することに成功しているが、同一充填層の粒子軟化に伴う 空隙形状の経時的な変化を追跡することは困難である。そこ



Fig.7 Effect of yield stress on molten-slag holdup profile :(a)  $\tau_{B} = 0$ , (b)  $\tau_{B} = 0.2$ , (c)  $\tau_{B} = 2.0$ , and (d)  $\tau_{B} = 20.0 \text{ Pa}^{26}$ .

で、離散要素法を用いて単分散球充填層を構成し、粒子同士 の体積的な重なりを許容して粒子層変形を再現し、層変形に 伴う空隙率、比表面積、動水半径流路構造、流路の幅と長さ などの充填層の特性値を抽出して検討した<sup>300</sup>。その結果とし て、空隙率や比表面積を変形前の粒子の形状および層収縮率 に基づいて導出した圧力損失は、変形後の実際の比表面積や 空隙率に基づいて導出した場合と比較して過大に推定する傾 向があり、これが荷重軟化試験に見られる圧損の立ち上がり の層収縮に対する遅れの一因となることを示した。また、充 填層内で隣接する三粒子に囲まれた空間が主な気流の流路を 構成するものと仮定し、充填粒子の位置情報から幾何的に流 路ネットワーク構造を抽出することに成功した(Fig.10)。変 形充填層の通気性と密接に関連する因子である流路ネット ワークの流路幅は、充填層の収縮とともに縮小する傾向があ



Fig.8 Effects of load (a) and gas composition (b) on shrinkage rate during softening process27).



Fig.9 Sequential cross-sectional images every 0.5 mm of softening packed bed of slag particles<sup>29)</sup>.

るが、小塊コークスの混合装入のように、変形層中に堅固な 粒子を混合すると、堅固な粒子の周辺には変形粒子と比較し て大きな空間が形成され、流路狭窄の傾向が緩和されること を示した<sup>30,31)</sup>。

## 充填層内融液静的ホールドアップサイトのトポロジー的考察

上述の充填層内のスラグ流動解析において、融体の静的 ホールドアップの滞留位置は、物性の影響が小さく、充填層 内の空間構造の影響が顕著であることが示された。また前項 では、粒子配置から幾何的に流通経路構造の抽出が行われ た。ここでは、充填層内の空間構造について、融体のホール ドアップサイトの特性について、トポロジー解析の手法を適 用して検討を行った<sup>32)</sup>。充填粒子の中心座標を離散点群とし て、充填空間を四面体に分割して再構成し、それぞれの面の 特徴付けを行った。結果の一例としてFig.11に、トポロジー 解析で得られた空間分割と動力学解析で得られた溶融スラ グ静的ホールドアップ分布を重ねて示す。 分割空間の面情報 は充填層内のボトルネックと関連付けられ、ホールドアップ サイトとボトルネックの数密度が空間的相関を持つこと、ま た、スラグの表面張力に基づく毛管長スケールと最小空隙面 積相当径の比による液滴の滞留形態の幾何的な変化を定量化 できることを見出した。この知見は融液の迅速な滴下を促進 する充填構造設計を示唆するものである。



Fig.10 Flow path network in deformed packed bed with 30% of coke mixing<sup>30)</sup>.

#### 3.4 研究会共通試料による検討

ここまでに示したように、個別の研究テーマにおいて様々 な測定手法の確立および知見が得られた。しかし、研究者毎 に異なる組成や条件で調整された試料が使用されていたこと から、共通の模擬焼結鉱試料を用いた検討が計画された。研 究会における討論で決定した組成および焼成条件でFe2O3, CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>からなる円柱状タブレット試料を企業側 で作製し、組織観察、還元試験を行った後、単一タブレット 試料を毎分1000℃以上の急速加熱と急冷が可能な軟化溶融 シミュレータに供して、変形挙動を不活性雰囲気下において 評価した<sup>33)</sup>。結果の一例として、Fig.12に異なる軟化収縮段 階で急冷した予備還元率53.7%の塩基度2.0の試料の断面観 察結果を示す。試料の外周部と中心部では予備還元の進行度 合いに差異が生じており、金属鉄の生成形態が異なっている ことがわかる。前述の鉱石層の収縮速度の定式化では、収縮 速度を二つの温度領域に分割したモデル化を行ったが、ここ では収縮の挙動を現象面から三段階に分割して検討してい る。収縮の初期段階は収縮速度解析の低温領域に、第二段階 は高温領域の前半で収縮速度が高く維持される部分に、第三 段階は高温領域の後半で収縮速度が減衰する部分に相当して いる。各試料の収縮挙動の主な違いは第二段階に顕著に表れ た。予備還元率の低い試料では低塩基度な試料ほど第二段階 での収縮率が大きくなり、これは塩基度が低いほど変形初期 に溶融スラグの生成比率が高くなるためと考えられる。予備 還元率が高い試料では、金属Fe相が骨材として変形抵抗を 示し、収縮挙動に大きな役割を果たしていることが示唆され た。

単一の模擬焼結鉱タブレット試料の荷重軟化試験により得 られた収縮特性を、先に示した鉱石粒子の軟化溶融モデルで 使用される鉱石の強度物性パラメータに変換した。このパラ メータを利用して、タブレット試料を1/4に等分割した粒子 を用いて構成した充填層の軟化収縮挙動の推定を行った<sup>34)</sup>。 Fig.13に軟化溶融シミュレーションおよび荷重軟化試験によ り得られた収縮挙動の比較を示す。本研究会で開発された個 別粒子の軟化溶融モデルに単一タブレット試験で求めた強度



Fig.11 Distributions of slag droplet hold up (yellow dot) and bottleneck (blue triangle) under different surface tension. (a)  $\sigma = 0.50$ , (b)  $\sigma = 0.82$ , (c)  $\sigma = 1.00$ , (d)  $\sigma = 1.50$ , respectively<sup>32</sup>).



Fig.12 Quenched sample's cross-sectioning observations of high pre-reduction degree, Basicity  $= 2.0^{33}$ .

物性を適用することで、層状試料の収縮挙動を良好に再現す ることに成功した。

## **4** まとめ

本稿は、2016年から2019年にかけて活動を行った「通気 性確保を目指した高炉融着帯の制御」研究会の活動の状況お よび成果を概説したものである。本研究会では、参加した委 員と幹事並びにその共同研究者が多様な視点から高炉融着帯 の内部で生じる現象の解明および定式化に取り組み、数多く の成果が得られた。研究会名にある「融着帯の制御」の直接 的な手段の提案には到ってはいないが、それを考察する上で 必要となる知見を一部ではあるが提供できたものと考えてい る。得られた知見をより深化し、高炉操業における限られた 操作因子との関連を明確化することが、高炉の深部に(高炉 を直接操作可能な炉口および羽口から最も遠くに)位置する 高炉融着帯の制御技術を実現する道筋と考えられる。本研究 会の成果が製銑プロセス技術の一層の向上に繋がることを期 待したい。

文末ではあるが、本研究会活動の推進にあたっては、製銑 部会を始め内外の多くの技術者・研究者方から、また鉄鋼協 会の事務局の皆様から多大なご支援とご指導をいただいた。 記して謝意を表す。



Fig.13 Comparison of measured and simulated shrinkage behavior of simulant sinter bed<sup>34)</sup>.

#### 参考文献

- 中本将嗣,中里英樹,川端弘俊,碓井建夫:鉄と鋼,90 (2004)、1.
- M.Nakamoto, H.Ono-Nakazato, H.Kawabata T.Usui and T.Tanaka : ISIJ Int., 44 (2004), 2100.
- 3)川端弘俊,岩城陽三,小西宏和,小野英樹,碓井建夫,竹 内栄一,内藤誠章,西村恒久,樋口謙一:実験力学,16

(2016), 20.

- 4) H. Konishi, H. Kawabata H. Ono and E. Takeuchi : Adv. Exp. Mech., 1 (2016), 251.
- 5) K. Kato, H. Konishi, H. Ono, S. Fujimoto and Y. Koizumi : ISIJ Int., 60 (2020), 1479.
- 6) T. Miki and Y. Fujita: ISIJ Int., 55 (2015), 1206.
- 7) T. Miki and A. Kawakami : ISIJ Int., 60 (2020), 1434.
- 8) 森克巳, 日高良一, 川合保治: 鉄と鋼, 66 (1980), 1287.
- 9) 井上勝彦, 池田孜, 上仲俊行: 鉄と鋼, 68 (1982), 2431.
- 10) 堀田裕久, 山岡洋次郎:鉄と鋼, 71 (1985), 807.
- 11) S. Ishihara and J. Kano: ISIJ Int., 60 (2020), 1469.
- 12) S. Ishihara and J. Kano: ISIJ Int., 59 (2019), 820.
- 13) J.J.Monaghan : Computer Physics Communications, 48 (1988), 89.
- R.A. Gingold and J.J. Monaghan : Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 181 (1977), 375.
- 15) H. Nogami : ISIJ Int., 60 (2020), 1495.
- 16) 植田滋:ふぇらむ, 20 (2015), 491.
- 17) K.Ohno, S.Tsurumaru, A.Babich, T.Maeda, D.Senk, H.W.Gudenau and K.Kunitomo : ISIJ Int., 55 (2015), 1245.
- 18) T. Matsui, N. Ishiwata, Y. Hara and K. Takeda : ISIJ Int., 44 (2004), 2105.
- M.W.Chapman, B.J.Monaghan, S.A.Nightingale, J.G.Mathieson and R.J.Nightingale: ISIJ Int., 47 (2007), 973.
- 20) F.McCarthy, R.Khanna, V.Sahajwalla and N.Simento : ISIJ Int., 45 (2005), 1261.

- F.McCarthy, V.Sahajwalla, J. Hart and N.Saha-Chaudhury: Metall. Mater. Trans. B, 34 (2003), 573.
- 22) Y.Ueki, K.Teshima, R.Yoshiie and I.Naruse : ISIJ Int., 60 (2020), 1427.
- 23) S. Ogyu, L.Zheng, X.Gao, S.Ueda, S.Sukenaga and S.Kitamura : ISIJ Int., 60 (2020), 1401.
- 24) S.Kuang, Z.Li and A.Yu : Steel Res. Int., 89 (2018), 1700071.
- 25) 齊藤敬高, 吉村慎二, 春木慎一郎, 山岡由宗, 助永壮平, 中島邦彦: 鉄と鋼, 95 (2009), 282.
- 26) S.Natsui, A.Sawada, H.Nogami, T.Kikuchi and R.O.Suzuki : ISIJ Int., 60 (2020), 1445.
- 27) N. Yasuda, K. Nishioka and S. Nomura : ISIJ Int., 60 (2020), 1487.
- 28) 中村正和, 関義明, 近藤真一: 鉄と鋼, 56 (1970), 1456.
- 29) K. Ohno, Y. Kitamura, S. Sukenaga, S. Natsui, T. Maeda and K. Kunitomo : ISIJ Int., 60 (2020), 1512.
- 30) H. Nogami and T. Yamawaki : ISIJ Int., 60 (2020), 1560.
- 31) M. Yakeya, A. Kasai, R. Tadai and K. Nozawa : ISIJ Int., 60 (2020), 1438.
- 32) S.Natsui, A.Sawada, H.Nogami, T.Kikuchi and R.O.Suzuki : ISIJ Int., 60 (2020), 1453.
- 33) K. Ohno, H. Konishi, T. Watanabe, S. Ishihara, S. Natsui, T. Maeda and K. Kunitomo : ISIJ Int., 60 (2020), 1520.
- 34) S. Ishihara, K. Ohno, H. Konishi, T. Watanabe, S. Natsui, H. Nogami and J. Kano : ISIJ Int., 60 (2020), 1545.

(2020年10月28日受付)