

技術論文

RFIDを用いたベルレス高炉の装入原料トラッキング技術の開発

Tracking Technique of Burden Materials for Blast Furnace with Bell-less Top by Using RFID

中野 薫*	伊勢居 良仁	夏井 琢哉
Kaoru NAKANO	Yoshito ISEI	Takuya NATSUI
渡邊 健太	岸野 友泰	
Kenta WATANABE	Tomoyasu KISHINO	

抄 録

高炉の高出銑比，低還元材比操業において，炉内の通気性確保と反応効率向上が重要であり，装入物分布制御はそのための主要な制御手段である。ベルレス高炉の装入物分布は分配シュートの傾動角とバンカーから排出される原料の経時変化を調整することによって制御される。バンカーから排出される原料の経時変化の把握のため，これまで原料サンプリングがなされてきたが，休風時に実施する必要があるため様々な条件で多くのデータを得ることは容易ではなかった。そこで，非接触ID認証技術RFID(Radio Frequency IDentification)を用いた新しい高炉装入原料のトラッキング技術を開発した。本原料トラッキング技術は，ベルレス高炉における装入物分布制御を高精度化し，高炉操業を改善する上で有効な技術であることがわかった。

Abstract

In ironmaking process, improving permeability and reaction efficiency in blast furnaces is important issues in order to operate blast furnaces with high productivity and low reducing agent rate. And burden distribution is one of important control factors. The burden distribution of bell-less top blast furnace is controlled by adjusting the tilt angle of a rotating chute and charging sequence of each burden material discharged from top bunkers. In order to accurately grasp the transport process of raw materials from their bins to the stock level inside the blast furnace, raw materials sampling has been conducted during pause of the furnace. However, it is difficult to obtain so many data under various conditions because it is necessary to temporarily stop the blast furnace. Therefore, we developed a new tracking technique of burden materials in charging process by using RFID (Radio Frequency IDentification) tags. It has been found that the developed tracing technique of burden materials is effective for precisely controlling the burden material distribution and improving the blast furnace operation.

1. 緒 言

近年の高炉操業においては，原料価格の高騰と原料の劣質化への対応，さらには，CO₂排出抑制への対応と銑鉄生産コスト低減の観点から，高出銑比，低還元材比操業の中で高微粉炭比，低コークス比化が志向されている。このような状況の下，高炉内での通気性確保と反応効率向上の両立は重要な課題となっている。

これら課題への対応には，原料そのものの強度や反応性を適切に制御，管理することも手段の一つであるが，高炉半径方向の原料の堆積状態，すなわち，装入物分布を適切に制御することも有効かつ重要な手段である。装入物分布

制御では，高炉半径方向にコークス，銑石それぞれの層厚を制御することに加え，高炉半径方向の粒度分布制御や銑石層内での小塊コークスや特定原料を特定領域に配置させることを狙った分布制御が行われている。

高炉への原料装入には，従来のベル式装入装置に比べ自由度の高いベルレス式装入装置が近年の主流になっている。ベルレス式装入装置において装入物分布を制御する方法として，分配シュートの傾動角の変更に加え，高炉炉頂に原料を搬送する装入コンベア上への原料切り出し順序を変化させる方法がとられる。装入コンベア上に切り出された原料は炉頂バンカーに一旦蓄えられた後に，集合ホッパーを通して分配シュートから排出される。しかしながら，

* プロセス研究所 製銑研究部 上席主幹研究員 千葉県富津市新富 20-1 〒 293-8511

炉頂バンカーへの原料装入において原料が転がり、粒度偏析や密度偏析が生じることに加えて、原料をバンカーから排出する際には排出口直上部の流下速度が大きく、側壁部近辺では遅くなるファンネルフローと呼ばれる偏流が生じ、排出順序が大きく入れ替わる。このことは、原料を装入したい順序に装入コンベア上に切り出しただけでは、狙いどおりの装入物分布状態に制御ができないことを示している。

この問題を解決するために、オフラインでのミニチュアモデルによるバンカー排出特性調査¹⁻³⁾や、離散要素法 DEM (Discrete Element Method) による計算機シミュレーション⁴⁻⁵⁾を用いて、実機の排出特性を推定する方法が行われている。しかし、ミニチュアモデルや計算機シミュレーションでは定性的な傾向は把握できるが、実高炉での状況を定量的に把握できない。また、筆者らが開発した、実機における原料サンプリング調査結果に基づき、バンカー内への原料装入過程における原料堆積特性とバンカーからの原料排出過程におけるファンネルフロー排出特性を決定し、原料排出順序を推定可能な3次元バンカーモデル⁶⁾を用いれば、実機の排出特性を推定可能であるが、実機における原料サンプリング調査は、高炉稼働中の調査が困難であり、手間や時間を要する等によりデータ数を増加させて精度向上を図ることは容易ではなかった。

他方、高炉内にセンサーを挿入して炉内に落下した原料の粒度や、コークスと鉱石の混合度を測定する方法⁷⁻⁹⁾も提案されているが、炉内での原料状態計測では、コンベア上への原料切り出し順序との直接の対応関係を把握することができない。

そこで、装入コンベア上への原料切り出し順序と炉頂バンカーから排出される原料の粒度や原料混合度の時間変化との関係を把握する手法として、近年多くの分野で活用されている非接触で ID 認証が可能な RFID (Radio Frequency Identification) タグをトレーサーとして原料中に混入させて、高炉内までの搬送途中にて ID 検出をすることを考えた。

本報告では、主たる高炉原料であるコークスと鉱石をトラッキング対象として、RFID を用いた高炉原料トラッキングの原理と課題、原料を模擬した RFID タグの内容と、実高炉における性能評価結果と従来法による3次元バンカーモデルによる推定結果との比較について報告する。

2. RFIDを用いた原料トラッキング

2.1 測定原理

近年、RFID と呼ばれる電波による非接触通信と IC チップを利用した認証技術が普及してきている^{10,11)}。図1に RFID システムの構成を示す。RFID はタグやラベル状に加工された RFID タグと呼ばれるパターンアンテナ付の IC チップを人や物に付与し、そこに記憶された情報をタグリーダーと呼ばれる装置により非接触で読み取ることで、物体認識や個人認証などを行う。従来からあるバーコードによる ID 認識と比べると、汚れに強く、対象から離れて認識や認証を行うことができる点で優れている。RFID タグを内蔵した模擬原料を作成して、トラッキング対象とする原料が貯留槽からコンベア上に排出された直後に同位置に投入し、高炉炉頂に装入されるまでの原料の搬送経路の途中で検出することができれば、稼働中の高炉においても適用可能な原料トラッキング技術を実現できる。

本原料トラッキング技術の稼働高炉への適用イメージの例として、図2に直接装入方式を採用する高炉での RFID による原料トラッキング原理を示す。原料槽から直接、装

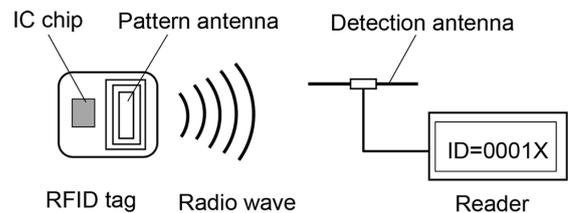


図1 RFID システムの構成
Configuration of RFID system

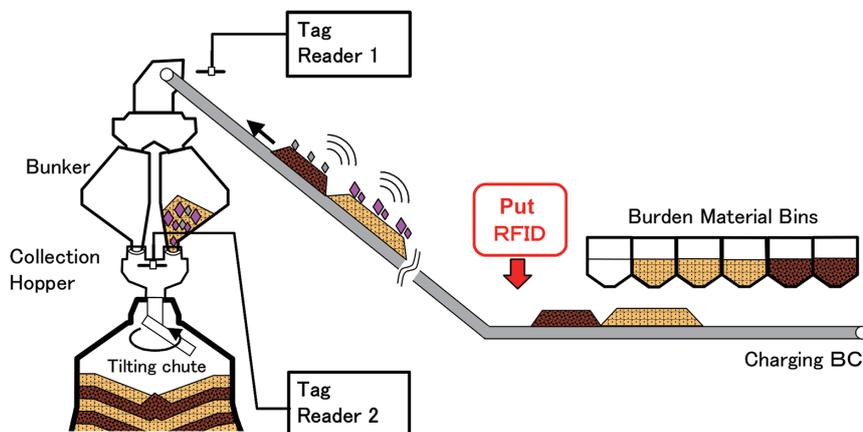


図2 RFID による原料トラッキング原理
Burden material tracking by using RFID for direct charge type

入ベルトコンベア(以下, 装入 BC)上へ切り出された原料は, 装入 BC により炉頂に運ばれ炉頂バンカーに一旦蓄えられた後に, 集合ホッパーを通して分配シュートから炉内へ排出される。ここで, 原料槽出側 BC 上を流れる原料中に一定間隔で RFID タグを投入することを考える。装入 BC 上と集合ホッパーにアンテナを設置して ID を検出することにより, 炉頂バンカーでの偏析, ファンネルフローの影響を把握した上で, 炉内への装入タイミングを的確に把握することができる。

2.2 RFID タグ基本特性

図 3 に現在実用化されている主な RFID システムのキャリア周波数と検出可能な距離の関係を示している。RFID には, パッシブ方式とアクティブ方式の 2 方式が存在する。パッシブ方式は, タグリーダーからの電波をエネルギー源として動作する RFID タグであり, 電池を内蔵する必要がなく, 保守なしにほぼ恒久的に動作するメリットがあるが, 検出距離を確保するためには強力な電波放出を必要とする。一方, アクティブ方式は, 電池を内蔵した RFID タグであり, 自ら電波を発して一定周期で ID を送信する。このため, 小さい電波出力でも通信距離が比較的長く取れるメリットがある。

本研究では, 電波出力が小さく周辺設備への影響が少ないこと, 数 m 以上の通信距離を取れることから, アクティブ方式の RFID システムを採用した。アクティブ方式のタグのサイズは, 電池の大きさ, 送信アンテナのサイズに依存しており, 市販のタグで 20 mm ~ 30 mm 程度であり, 模擬対象の原料の大きさにも近く, 原料の特性を模擬しやすいと考えた。また, アンテナ選択の自由度も高く鉄鋼現場への適用時にも障害が少ない。

使用したアクティブ RFID システムの仕様を表 1 に示す。日本国内の電波法上無免許で使用可能な微弱無線局である周波数 322 MHz 以下, 強度 $500 \mu\text{V}/\text{m}$ 以下に該当するものをシステムとして使用した。使用したタグは, 基板サイズ

は使用したボタン電池の大きさにより決まり, $24 \text{ mm} \times 34 \text{ mm}$ である。0.5 秒間隔で 16 進数 7 桁の ID を発信する。この ID 発信周期について, ホッパーから排出され落下する途中のわずかな時間でタグの ID を読み取れるように短くすべきであるが, 短くしすぎると電池寿命が短くなる。実際に試験を行う際の準備期間を考慮して, 電池寿命は約 1 か月を確保可能な発信周期 0.5 秒とした。使用最高温度 60°C は内蔵する IC チップの安定性により決まり, 高炉内に装入される直前までは検出可能と考えられる。検出アンテナとしては, 検出感度が高く, 指向性の低いダイポールアンテナを使用した。使用したリーダーは, 1 秒間あたり最大 40 ID を読み取ることができ, ID 検出と同時に受信信号強度 RSSI (Received Signal Strength Indicator) を検出できる。

次に, 高炉で使用される原料の電波の透過性を評価するため, 図 4 に示すように RFID タグを厚み 15 cm 原料に埋設して, 1.8 m 離れた外部からの検出可否を調査した。焼結鉱, 鉱石中では検知可能だったが, コークス中では ID を検知できなかった。これは, 鉄鉱石, 焼結鉱の主成分である Fe_2O_3 の導電率は $1.3 \times 10^{-3} \text{ S}/\text{m}$ と絶縁体であるのに対し, コークスの主成分であるカーボンの導電率は $3.0 \times 10^4 \text{ S}/\text{m}$ と導電体であることが原因と推定される。コークスに

表 1 使用したアクティブ RFID システムの仕様
Specification of evaluated RFID system

Item		Specification
System	Type	Active type (Battery operation)
	Carrier frequency	300 MHz band
	Output power	$< 500 \mu\text{V}/\text{m}$
Tag	Substrate size	$24 \text{ mm} \times 34 \text{ mm}$
	Operating temperature	0 to 60°C
	ID sending duration time	0.5 s
Reader	Antenna	Dipole type
	Modulation method	ASK (Amplitude Shift Keying)
	ID code	Hexadecimal, 7 digits
	Recognition ability	40 IDs/s

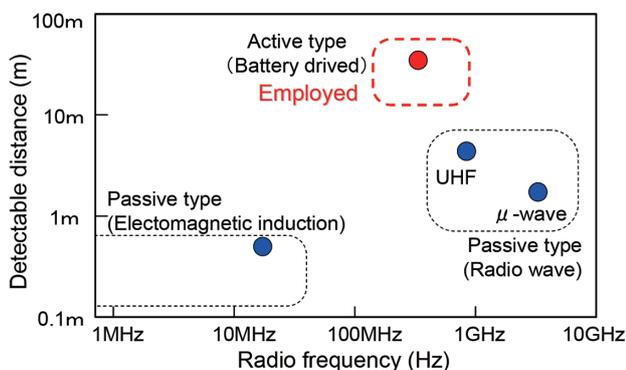


図 3 主な RFID システムのキャリア周波数と検出可能な距離の関係

Carrier frequency and identification distance of RFID systems

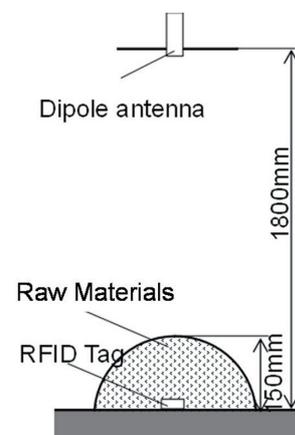


図 4 RFID タグの高炉原料による影響調査方法
Influence of material on ID detectability

埋没された RFID タグから放出された電波は、タグを囲っているコークスにより遮蔽されてしまう。コークスバッチにおいてトラッキング調査を行うときは、コークス表層に RFID タグを配置するか、原料間の空隙が大きくなるホッパーやバンカーからの原料排出部にアンテナを設置する方がよいと考えられる。

2.3 原料模擬 RFID タグ

RFID 基板単体では、実機の高炉においては原料が炉内に装入されるまでに加わる衝撃に対する耐久性を確保できず、また、形状や比重の差により原料と異なる偏析挙動となりトラッキング精度を確保できない。そこで、原料の挙動を模擬できる比重と粒径を備えて、かつ、耐久性に優れた原料模擬タグケースを製作することを考えた。

RFID 基板を保護するケースを複数の条件で試作して、コークスのドラム強度試験器¹⁴⁾により耐久性を評価し、500 回転以上の衝撃を加えても故障しない保護ケースの条件を探索した。最終的に採用した保護ケースの材質は電波の透過性を考慮してプラスチック製として、RFID 基板と電池はケース内部に固定し、保護ケース表面は傷つき抑制のため厚めのテープによりテーピングを施した。

高炉装入原料は、コークス、焼結鉱、塊鉱石、副原料で構成される多数の密度、粒径の異なった粒子の集合体と見ることができる。数多くの粒子内に存在する 1 粒子の偏析挙動に着目すると、周辺粒子に比べて密度が大きく、粒径が小さいほど、下に沈みやすく転がりにくい傾向にある。実原料と同様な偏析挙動を模擬するためには、RFID タグの粒径と密度が実原料に近い必要がある。コークス模擬タグには実際のコークスに近い比重のプラスチックを選定して保護ケースを作成し、鉱石類模擬タグではプラスチックで作成した保護ケースに鉄製のおもりをつけることで見かけの密度を実原料に近づけた。

一方、粒径については、RFID 基板サイズの制約により 20mm 以下は再現できないので、見かけ上の偏析挙動が同じになるように、おもりを付加して意図的に密度を大きくすることで対応した。図 5 に作成した 2 種類の RFID タグを内蔵した模擬粒子 (原料模擬タグ) を示す。コークス模



図 5 作成した RFID タグを内蔵した模擬粒子
RFID particles imitating burden materials

擬タグは、粒径 55mm のコークスを模擬しており、鉱石模擬タグは、粒径 10mm の鉱石を模擬している。

3. 稼働高炉における原料トラッキング性能の評価

3.1 検出特性の評価

稼働高炉の原料搬送過程において RFID タグを投入し、RFID タグの検出特性を調査した。調査は、図 2 に示す原料槽から装入 BC に直接原料を排出する直接装入方式を採用する鹿島第 1 高炉で実施した。装入 BC 最上部付近と集合ホッパー内にアンテナを設置し、それぞれに受信機を接続した。RFID タグは、装入 BC 上に切り出された焼結鉱上に等間隔になるように鉱石模擬タグを合計 20 個投入した。

装入 BC 最上部での RFID 検知結果を図 6、集合ホッパー内での検知結果を図 7 に示す。横軸は RFID タグの電波を最初に検知した時間を基準とした時間であり、縦軸は装入 BC への投入順に対応するように RFID タグの ID を簡易に

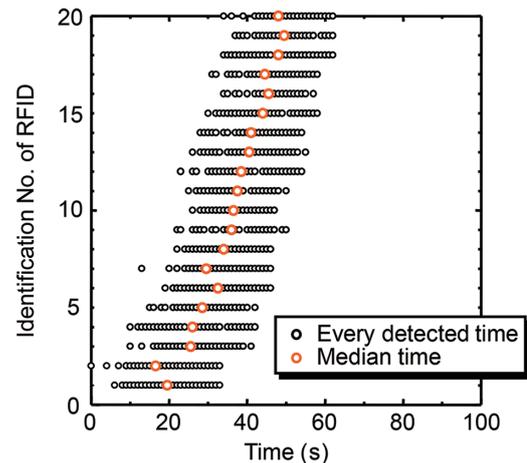


図 6 鹿島 1 号高炉装入 BC 最上部での RFID 検知結果
RFID detection time chart at charging BC top of Kashima No. 1 BF

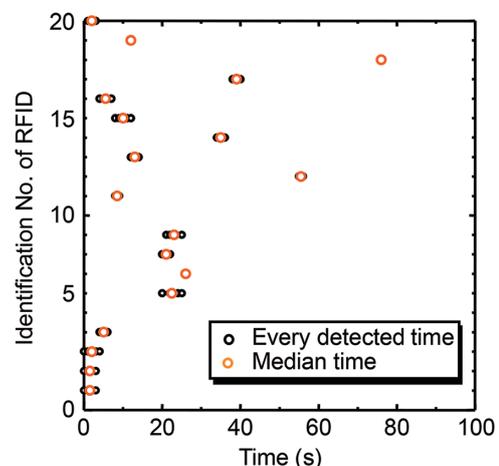


図 7 鹿島 1 号高炉集合ホッパー内での RFID 検知結果
RFID detection time chart at collection hopper of Kashima No. 1 BF

表 2 RFID タグ検出成功率
Detection success ratio of RFID

Target furnace (Charge type)	Batch	Charging BC top	Collection hopper
Kashima No.1 BF (Direct charge system)	Ore 1	100%	89%
	Coke	100%	96%
	Ore 2	99%	97%

表した番号である。投入した RFID タグ 20 個に対して、装入 BC 最上部、集合ホッパー内ともに 20 個全数検知した。装入 BC 最上部では、同一の RFID タグは約 30 秒程度継続して検知されるが、電波検知の最初と最後の時間の中間値をみると、ほぼ装入順に対応することがわかった。他方、集合ホッパー内での検知結果は、装入順に対して大きく入れ替わって炉内へ装入されていることが確認された。また、集合ホッパー内では、同一の RFID タグは約 3 秒程度継続して検知されることがわかった。集合ホッパー壁部は金属製で外部からの電波は遮蔽されることと測定時にコークスを装入しておらず原料による電波の遮蔽の影響はないことから、集合ホッパー内での検知継続時間は原料の集合ホッパー内の滞留時間を表すと考えられる。

3.2 検出成功率の評価

前節では、直接装入方式のベルレス高炉において、RFID タグ 20 個の投入に対して、全数を装入 BC 最上部と集合ホッパー内で検知することを確認したが、RFID タグを用いた原料トラッキングの精度評価のためには、RFID タグの投入数を増加し、原料を模擬した RFID タグが経験する搬送過程での衝撃等の条件を実原料に近づけることが必要である。

そこで、直接装入方式の鹿島第 1 高炉で、原料を模擬した RFID タグの投入数を 200 個に増加させて、RFID タグの検出成功率を評価した。ここで、投入する RFID タグ総数に対して、検出された RFID タグ総数の比を RFID タグの検出成功率と定義する。RFID タグの検出成功率の低下は、原料の搬送過程における RFID タグの機械的衝撃による破損と RFID タグ周辺におけるコークスによる電波遮蔽が原因と考えられる。

表 2 に稼働高炉にて実施された RFID を用いた原料トラッキング試験での各検出アンテナのタグ検出成功率を示す。鉬石装入バッチとコークス装入バッチに分けて、各アンテナ設置場所における投入タグ数に対する検出したタグ数の割合を示している。装入 BC 頂上、集合ホッパーのいずれも 89% 以上の検出成功率を確保できており、目標であった原料トラッキングに必要な検出成功率 80% 以上を達成していることを確認できた。

4. 稼働高炉における原料装入特性評価への適用

上述したように、RFID タグは稼働高炉での検出成功率

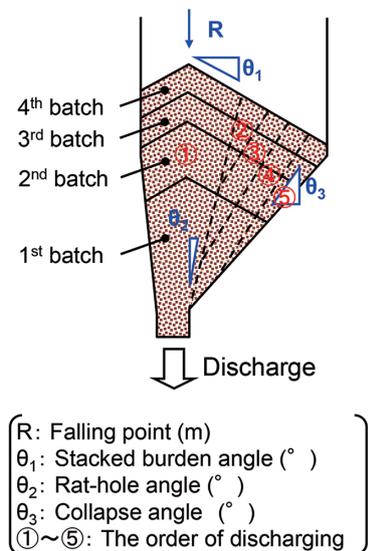


図 8 3次元バンカーモデルの原料装入過程と原料排出過程の特性パラメータ

Parameters in the 3-dimensional bunker model in the process of charging and discharging burdens

が高く、原料トラッキングの手段としての必要条件を備えていることが確認できた。次に、その測定精度について検証すべく、筆者らが開発した 3 次元バンカーモデル⁹⁾の計算結果との対応を評価した。

4.1 3次元バンカーモデルの概要

これまで筆者らは高炉層頂への原料ダンプ時の装入経時変化を推定するため、3次元バンカーモデルを用いてきた。3次元バンカーモデルでは、図 8 に示すようにバンカー内への原料装入過程において、バンカー内の原料堆積頂点位置と堆積角 θ_1 を与えてバンカー内の堆積状態を計算し、バンカーからの原料排出過程において、ラットホール角 θ_2 と崩壊角 θ_3 を与えてファンネルフローを表現し、原料排出順序を計算する。ここで、モデルに与えるバンカー内の原料堆積頂点位置と堆積角 θ_1 は休風時に実施した調査結果を反映し、ラットホール角 θ_2 と崩壊角 θ_3 については、予め実施した模型実験で一時的に決定しておき、休風時に実施した分配シュートからの排出原料のサンプリング結果に基づいて微調整して決定する。

4.2 原料装入条件と 3 次元バンカーモデル計算結果との比較

ここでは、鹿島第 1 高炉において、休風時に実施されたサンプリング結果に基づいて調整された 3 次元バンカーモデルの計算結果と RFID タグによる原料トラッキング計測試験結果との対応を評価した。

RFID タグによる原料トラッキング計測試験時のコークスダンプ、鉬石ダンプ、それぞれの原料切り出しバッチ毎の切り出し量の条件を図 9 に示す。それぞれの原料を模擬し

Coke dump	
Ore dump	

図9 原料切り出し量の条件
Conditions on discharging amount of burdens from burden material bins

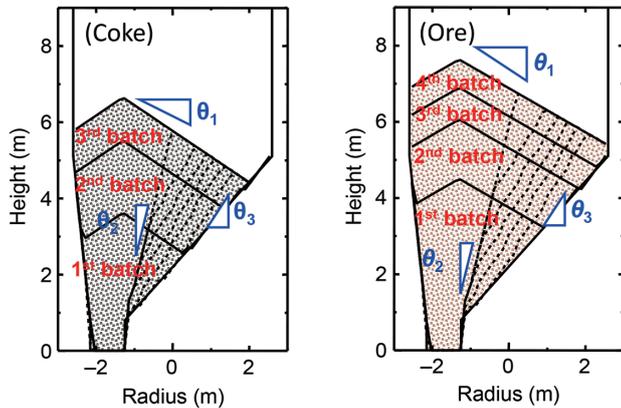


図10 3次元バンカーモデルで推定されたコークス、および、
鉬石の各ダンプ前のバンカー内の堆積状態と原料排
出時のラットホールと崩壊線

Stacked profile of each batch of burdens and lines of discharging behavior predicted by the 3-dimensional bunker model

た RFID タグは装入 BC 上に切り出された原料の上に、コークスで7～8個/トン、鉬石で2～3個/トンを等間隔になるようにそれぞれ投入した。

3次元バンカーモデルで推定されたコークス、および、鉬石の各ダンプ前のバンカー内の堆積状態と原料排出時のラットホールと崩壊線を図10に示す。

ここで、コークスは第1バッチから第3バッチ、鉬石は第1バッチから第4バッチがバンカー内で堆積している領域を区別して表示しており、排出時にはラットホールから周辺部壁方向に向かう順に排出される。バンカーから原料排出中に集合ホッパーでの RFID タグの検知頻度をバッチ毎に整理した結果と3次元バンカーモデルにより推定されたバッチ毎の排出経時変化との対応関係を図11に示す。バンカーからの原料排出順序は上述のように、排出口直上に形成されるラットホール内の原料が先に、壁側近傍の原料が遅れて排出されるが、RFID タグ検出結果は、コークス、鉬石ともに第1バッチ、第2バッチの排出初期と後期にそれぞれピークを持つパターンとなっていることから、上記の挙動を定性的に捉えることができています。RFID タグ検出結果は、その他のバッチの排出挙動も含めて3次元バンカーモデルにより推定した原料排出パターンと概ね一致した。

このように RFID タグによる原料トラッキング計測は高

炉稼働時に計測可能であることから、容易に測定頻度を増加することが可能であり、高炉における装入物分布制御を高精度化する上で有効な手段となり得る。また、これまで休風時の原料サンプリングによってのみしか、3次元バンカーモデルの推定精度向上を図れなかったが、本 RFID タグによる原料トラッキング計測により、その推定精度向上のための情報を多く得ることができる。RFID タグによる原料トラッキング計測による実態把握と3次元バンカーモデルによる未知の装入条件での推定結果を組み合わせることで、より高精度の装入物分布制御が期待できる。

5. 結 言

ベルレス高炉における装入物分布制御の高精度化を目的として、非接触 ID 認証技術 RFID を用いた新しい高炉装入原料のトラッキング技術を開発した。本技術は、アクティブ方式の RFID タグを内蔵したコークスまたは鉬石の模擬粒子を原料に投入して、高炉内層頂へ装入されるまでの搬送経路上で ID を検出することが特徴である。本報告では、実高炉における検出タイミング精度、検出成功率の評価を行った。その結果、高炉内へ装入される直前の集合ホッパーにおいてもホッパー内部の通過タイミングを正確に検出でき、全投入タグに対する検出成功率は83%以上であった。また、従来の推定手法である休風時のサンプリング結果に基づいて予め調整された3次元バンカーモデルによる推定結果との対応を評価し、原料排出パターンは概ね一致することを確認した。

これらの結果より、開発した高炉装入原料のトラッキング技術は、高炉における装入物分布制御を高精度化し、高炉操業を改善する上で有効な手段であることがわかった。

参考文献

- 1) 松崎眞六, 田口善弘: 鉄と鋼, 88 (12), 823-830 (2002)
- 2) 柏原佑介, 岩井祐樹, 石渡夏生, 大山伸幸, 松野英寿, 堀越裕之, 山本耕司, 桑原稔: 鉄と鋼, 102 (1), 9-16 (2016)
- 3) 村尾明紀, 柏原祐介, 大山伸幸, 佐藤道貴, 渡壁史朗, 山本耕司, 福本泰洋: 鉄と鋼, 102 (11), 614-622 (2016)
- 4) Mio, H., Kadowaki, M., Matsuzaki, S., Kunimoto, K.: Minerals Engineering, 33, 27 (2012)
- 5) Narita, Y., Mio, H., Orimoto, T., Nomura, S.: ISIJ International, 57,

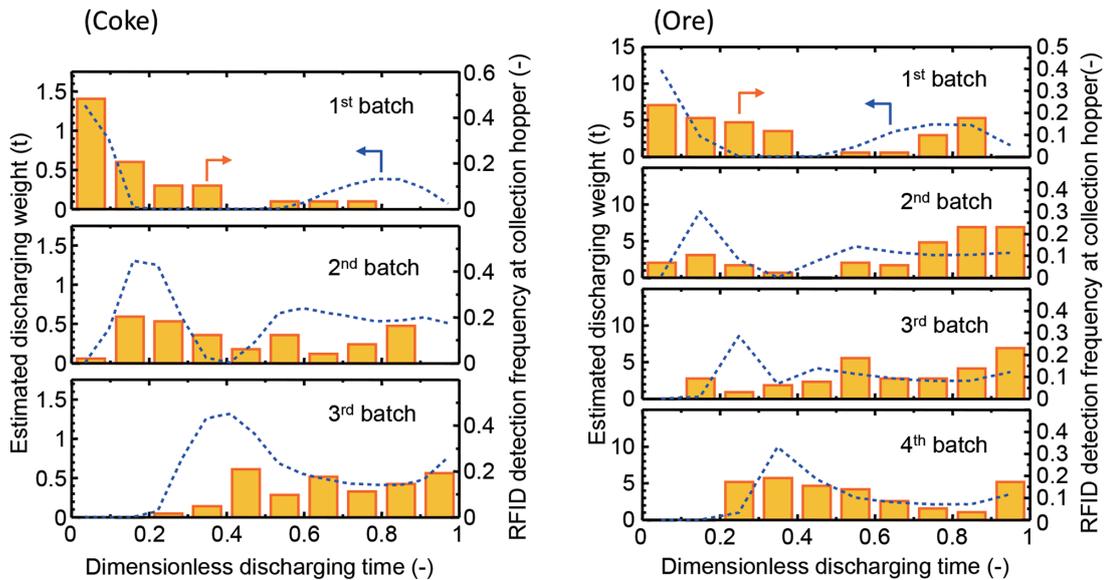


図 11 RFID タグの検知結果と 3 次元バンカーモデルにより推定されたバッチ毎の排出経時変化との対応関係
Discharging behavior of each burden measured with the RFID detection at the collection hopper and predicted by the 3-dimensional bunker model

429-434 (2017)

- 6) Nakano, K., Sunahara, K., Inada, T.: ISIJ Int. 50 (7), 994-999 (2010)
- 7) 芦村敏克, 森下紀夫, 井上義弘, 樋口宗之, 馬場昌喜, 金森健, 和栗眞次郎: 鉄と鋼. 80 (6), 457-462 (1994)
- 8) 大野二郎, 矢代弘克, 白川芳幸: 計測自動制御学会論文集. 24 (2), 112-118 (1988)

- 9) 村川恵美, 小西行雄, 田口整司, 浜田尚夫: 川崎製鉄技報. 20 (3), 228-229 (1988)
- 10) 三次仁: 電気学会誌. 126 (8), 521-524 (2006)
- 11) 清水雅史: 電気学会誌. 126 (8), 534-537 (2006)
- 12) JIS K 2151:1957, コークス類 - 試験方法



中野 薫 Kaoru NAKANO
プロセス研究所 製鉄研究部
上席主幹研究員
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



渡邊健太 Kenta WATANABE
鹿島製鉄所 製鉄部 製鉄技術室 主幹



伊勢居良仁 Yoshito ISEI
プロセス研究所 計測・制御研究部
主幹研究員



岸野友泰 Tomoyasu KISHINO
鹿島製鉄所 製鉄部 製鉄原料工場
燃焼課長



夏井琢哉 Takuya NATSUI
プロセス研究所 製鉄研究部 主幹研究員