

物流デジタルツイン活用による石炭配合槽建設時の物流検証

Simulation-Based Logistics Digital Twin for Coal Blending Silo

熊野 徹 KUMANO Akira JFE スチール DX 戦略本部 インテリジェント技術開発部 主任部員
迫田 卓 SAKODA Taku JFE スチール 西日本製鉄所（福山地区） コークス部 コークス炉建設班 主任部員
成合 孝一 NARIAI Koichi JFE スチール 西日本製鉄所 企画部 IE ソリューション室 主任部員

要旨

JFE スチールは、西日本製鉄所（倉敷地区）の原料炭配合槽新設に伴う搬送業務への影響を検証するため、離散イベントシミュレーションを活用した精緻な物流デジタルツインを開発した。

JFE スチールでは原料炭コストを削減するため、従来のベッド配合方式から配合槽方式への転換を検討していた。一方、配合槽方式はベッド配合方式に比べて物流効率が劣るため、搬送操業への悪影響が懸念されていた。そこで、ヤード、配合槽、搬送機の競合を統合制御するモジュールを備えた物流デジタルツインを用いて、設備停止トラブルをランダムに発生させるモンテカルロシミュレーションを行い、操業安定性を定量評価した。その結果、問題なく操業できることを設備投資前に確認した。

Abstract:

JFE Steel developed a sophisticated logistics digital twin based on discrete event simulation to assess the impact of introducing a new coal blending silo at West Japan Works (Kurashiki) on transportation operations. To reduce coal costs, JFE Steel had been considering a shift from the conventional bed blending method to the silo blending method. Since the silo method is less efficient logistically than the bed method, there were concerns about negative effects on transportation operations. To address this, a logistics digital twin equipped with integrated control modules for coordinating competition among the yard, silo, and transport equipment was utilized. By conducting Monte Carlo simulations that randomly generated equipment failure events, the operational stability was quantitatively evaluated. As a result, prior to capital investment, it was confirmed in advance that stable transport operation would be feasible without problems.

1. はじめに

鉄鋼業では、成分や品質が異なる鉄鉱石・原料炭を所望の成分になるように配合して使用している。配合方法は、屋外で地層状に積みつけて混ぜるベッド配合方式と、複数の筒状のサイロから連続的に抽出して混合する配合槽方式がある（図 1）。ベッド配合方式は野積みのため一度にまとまった搬送が可能ため物流効率がよいが、一方で目標成分から乖離しやすく、また長期間屋外に保存されて曝露されることによる品質の低下が懸念される。配合槽方式は、複数の銘柄を槽の下部から連続的に切り出して配合するため品質が安定するが、槽の容量が小さいためベッド方式より槽への搬送回数が多く、物流効率上不利である。従来、当社の西日本製鉄所（倉敷地区）（以下、倉敷地区）の原料炭操業ではベッド配合方式を採用しており、配合のばらつきと曝露期間中の品質悪化対策として、高品質で高価な原料炭を

多量に配合していた。そこで、品質安定と原料炭コストダウンを目的に配合槽方式への移行を検討した。ただし、前述のように配合槽方式はベッド配合方式に比べて一度の搬送

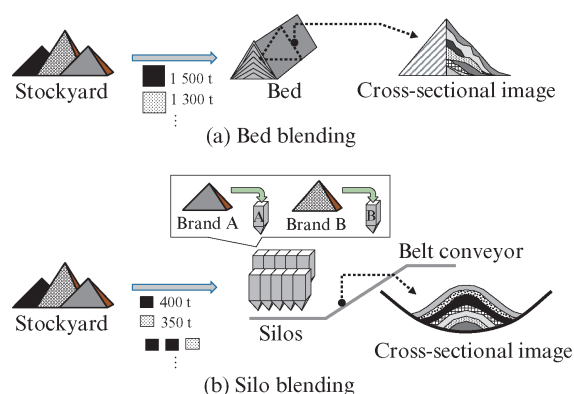


図 1 原料炭配合方式の比較（ベッド配合方式 vs 配合槽方式）³⁾

Fig. 1 Comparison of coal blending methods: Bed vs. Silo system³⁾

©2024 日本鉄鋼協会

2026 年 2 月 9 日受付

で運搬できる原料炭が少なくなるので、配合槽方式への転換後の生産量が同等であれば搬送回数が増えるため、原料ヤードから配合槽への搬送操作が物流のボトルネックとなることが懸念されていた。

本件のような未知の物流現象を検証する技術として離散イベントシミュレーション（Discrete Event Simulation: DES¹⁾）がある。DESは、システム内で発生する個々のイベント（搬送、加工、待機など）を時間軸に沿って順次処理することで、現実の運用プロセスを高精度に再現する手法である。特に製造や物流のような工程単位での制約が多い領域で、待ち時間やボトルネックの分析、運用ルールの変更による影響評価に有効である。その他の検証技術として、連続シミュレーションやシステムダイナミクスが挙げられる。連続シミュレーションは物理的な連続変化の解析に適しているが、イベント単位の処理には不向きであり、システムダイナミクスはマクロ的な流れの把握に優れる一方で個別挙動の追跡は困難である。これらと比較して、DESは工程単位の詳細な挙動分析、複数シナリオの比較検討、意思決定支援について高い実用性を持ち、鉄鋼業においても過去に適用されてきた^{2,3)}。そこで、本件についても、配合槽建設投資の前に物流コストの試算と運転法案の確認をDESにより実施することとした。

本稿では、その内容を報告する。

2. 原料物流シミュレータ

2.1 原料炭物流フロー

倉敷地区の原料炭のフローを図2に示す。原料炭を積んだ船がバースと呼ばれる港に入港すると、バースで原料炭を荷役後ベルトコンベアで貯炭ヤードへ搬送し、山状に積みつけて保管する。その後、前章で述べた配合ベッド、あるいは配合槽へ搬送して混合し、コークス炉へ搬送する。配合ベッドはかならず2対からなり、片方のベッドが積み付け中の間、他方のベッドは下工程のコークス炉へ配合炭を供給する。切り出し中のベッドが空になるまでに積み付け中の

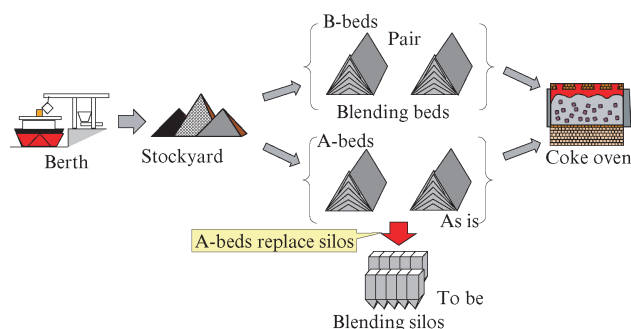


図2 西日本製鉄所（倉敷地区）における原料炭フロー

Fig. 2 Raw coal transportation flow at West Japan Works (Kurashiki)

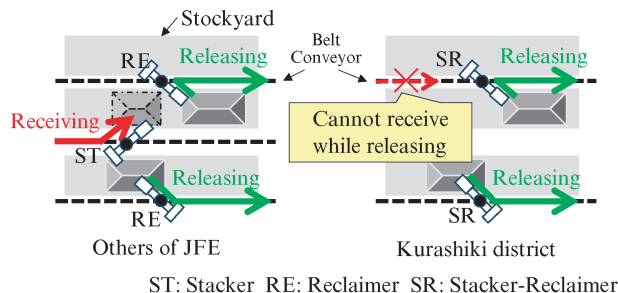


図3 西日本製鉄所（倉敷地区）の原料炭ヤード図

Fig. 3 Layout of raw coal yard at West Japan Works (Kurashiki)

ベッドを完成させ、切り出し中のベッドが空になると供給するベッドを切り替えることで、連続してコークス炉へ配合炭を供給する。倉敷地区には2対のベッドが2組存在していた。そのうちの1組を配合槽化した場合について検証した。なお、倉敷地区ではスタックリクレーマと呼ばれる移動機で貯炭ヤードへの受け入れと払い出しの双方を実施している。そのため、配合槽への払い出しの頻度が多くなると受け入れが遅れて物流費が悪化する恐れがあり、逆に受け入れを優先すると払い出しが遅れて生産影響が出るなど、配合槽化による物流ボトルネック化の影響が大きくなりやすいレイアウトとなっている（図3）。

2.2 シミュレータ概要

図4に今回開発した原料炭物流シミュレータの概要を示す。本シミュレータは、以下に示す入出力情報のもと、倉敷地区の1か月間の原料炭搬送操作を1分ごとの離散時間で実行するように開発した。

- ・入力情報：製鉄所レイアウト、貯炭ヤードの初期在庫、石炭船の入船実績、原料炭のヤード山配置実績、コークス炉生産実績、原料炭配合計画・実績、定修・トラブル実績、搬送機の能率・速度等のパラメータ
- ・出力情報：在庫トレンド（貯炭ヤード、配合槽、ベッド）、入出船履歴、搬送作業履歴

シミュレーションの成功条件は以下のように定義した。

- ・破綻条件：ベッド切り替え時間遅れ、原料船入港遅れ、配合槽在庫下限抵触、ヤード在庫枯渇
- ・成功条件：破綻条件に達することなく1か月のシミュレーション期間を完走

2.3 シミュレータ構造

図5に開発したシミュレータの構造と処理内容を示す。本シミュレータでは、1単位時間ごとにベッド、配合槽の在庫がコークス炉の生産計画に従って消費される。在庫状況や時刻に従って後述の受け入れロット、払い出しロットが順次生成されて実行待ちリストに追加され、搬送経路を確保し、競合しないように実行する仕組みとしている。

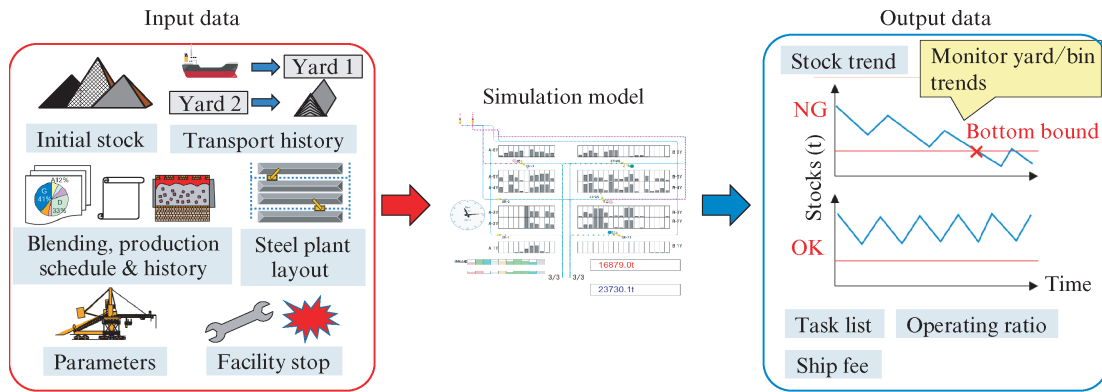


図4 原料炭物流シミュレータの概要³⁾

Fig. 4 Overview of the coal logistics simulator³⁾
©2024 日本鉄鋼協会

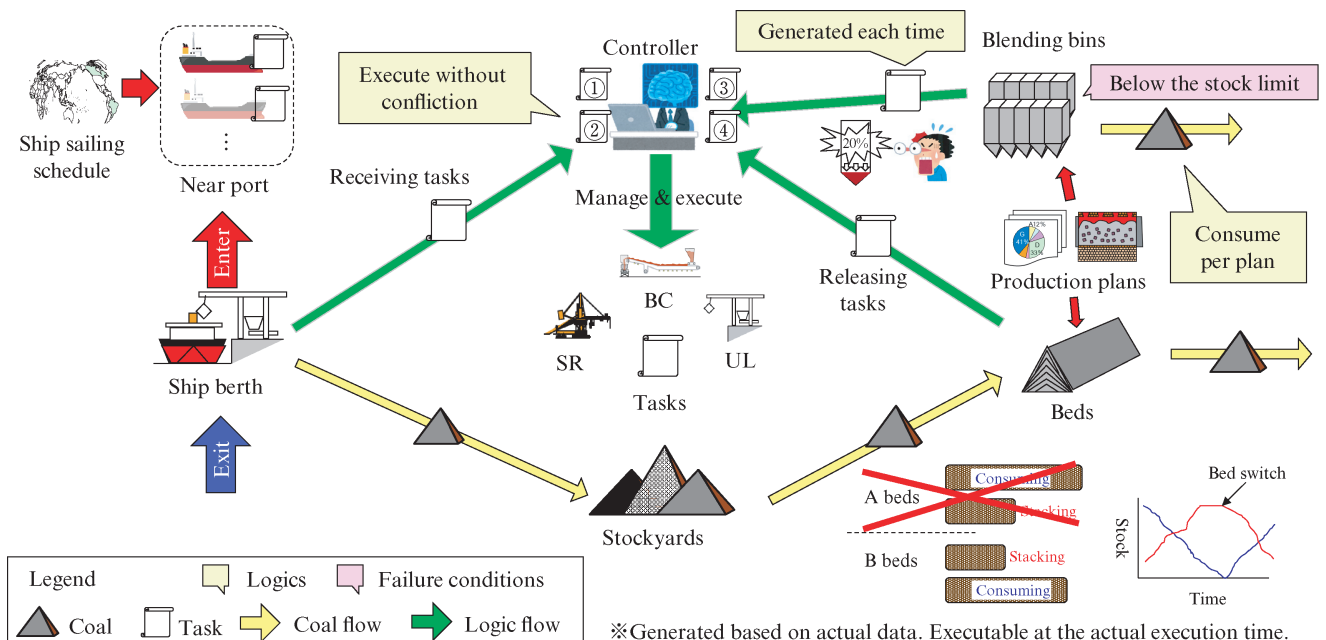


図5 原料炭物流シミュレータのロジックフロー

Fig. 5 Modular structure of the coal logistics simulator

2.3.1 バースモジュール

船の入出庫管理と、貯炭ヤードへの受け入れロットの生成を行う。入力データに従って船を生成し、入港時間になったらバースへ入港させる。入港時間にバースに空きがない場合は操業破綻として終了する。入港に伴い、実績データ (From-to, 銘柄, 数量) を保持した船からの受け入れロットを生成し、後述のコントローラモジュールへ送る。

2.3.2 ベッドモジュール

ベッドの在庫管理と払い出しロット生成を行う。積み付け中のベッドについて、実績データ (From-to, 銘柄, 数量) が与えられ、実績の開始時間になったら補充 job を生成してコントローラモジュールへ送る。切り出し中のベッドについては、下工程のコークス炉の生産量に従って在庫を消費する。切り出し中のベッドの在庫がなくなると積み付け中の

ベッドと切り替える。実績の切り替え時間までに積み付け中のベッドへの積み付けが完了していないと、破綻として終了する。

2.3.3 配合槽モジュール

配合槽の在庫管理と払い出しロット生成を行う。下工程のコークス炉の生産量に従って在庫を消費する。各槽の在庫量を監視し、閾値を下回ると貯炭ヤードから当該槽へ補充し、払い出しロットを作成してコントローラモジュールへ送る。在庫が補充される前に下限を下回ると破綻として終了する。

2.3.4 ヤードモジュール

貯炭ヤードへの受け入れと払い出しロットに従って在庫の管理を行う。受け入れ時は在庫上限を迎えると作業を停止し、払い出し時は在庫下限で作業を停止する。

2.3.5 コントローラモジュール

バースモジュール、ベッドモジュール、配合槽モジュールから送られてくる受け入れ・払い出しロットを優先順に並べてリスト管理し、ベルトコンベアやスタックリクレーマなどの移動機を割り当てて作業競合のないように実行する。本シミュレータは、生産影響を避けるために払い出しロットを優先する設計としており、また、操業破綻に至りやすい配合槽への払い出しロットを最優先としている。

これらのモジュールを備えることにより原料炭物流を模擬したシミュレーションが可能となる。本稿では、シミュレーションの妥当性を確認するため、まず現状操業を再現し、その後、配合槽稼働後の想定操業を開発した。

3. シミュレーション結果

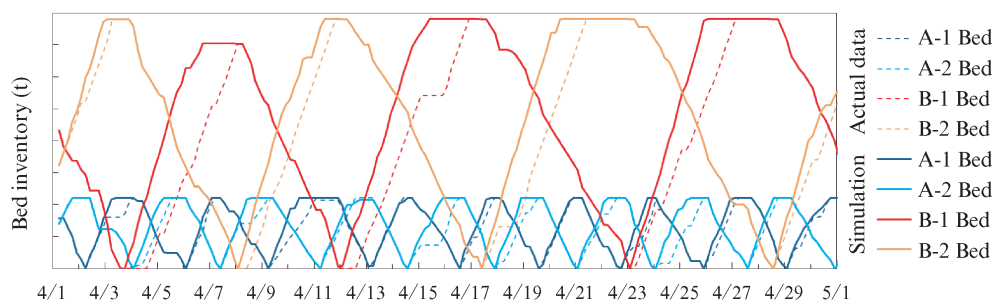
3.1 現状操業の再現

前章で述べたとおり、ベッドが2組存在するレイアウトでシミュレーションを行い、シミュレーションの妥当性を評価した。図6にその結果を示す。図中グラフ(a)はベッド在庫の履歴を示しており、破線は実績、実線がシミュレーション結果である。それぞれ4本ずつ線があり、A系統のベッドペア、B系統のベッドペアの在庫の履歴を示している。実績のシミュレーション結果の在庫推移について、切り出し中のベッド在庫がなくなるまでにペアとなる積み付け中のベッドが完成しており、下工程であるコークス炉へ連続的に配合

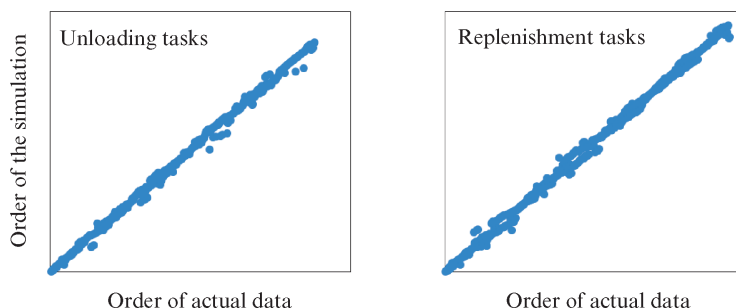
炭を供給できていることがわかる。ただし、実績に対してシミュレーションの方が早期にベッドが完成しているのは、トラブルを含む設備停止の機能が未実装であったためである。図中(b)のグラフは受け入れロットと払い出しロットの作業順を実績とシミュレーションで比較しており、実績と良好に一致していることが分かる。このように、ベッド在庫が枯渇することなく連続して切り替わっていること、実績の作業順からの乖離が大きくないことから、シミュレーションの結果が妥当であると判断した。

3.2 配合槽稼働後のシミュレーション

次に、開発したシミュレータを改造し、1組のベッド配合方式を配合槽方式へ置き換えた状態、つまり配合槽方式1機とベッド配合方式1組が存在するレイアウトについて検証した。ただし、検証時は配合槽の実機が存在せず、払い出しロットの実績データが準備できなかった。そこで、前章の配合槽モジュールで述べたとおり、配合槽への払い出しロットは槽の残量をトリガーとして補充するように実装した。本シミュレータを用いて、実績のトラブルデータを編集し、発生時刻をランダムに変更して発生させたモンテカルロ数値実験を10ケース実行した。そのうちのワーストケースの結果を図7に示す。図中(a)のグラフはベッド在庫の推移を示しており、現状操業の再現と同様にコークス炉への供給が途切れることなく、ベッド在庫が連続して推移していることが確認できた。グラフ(b)は配合槽が在庫欠損を起



(a) Bed inventory history



(b) Comparison of tasks order

図6 シミュレーション結果（現状操業）³⁾

Fig. 6 Simulation results of current operations³⁾

© 日本鉄鋼協会 2024

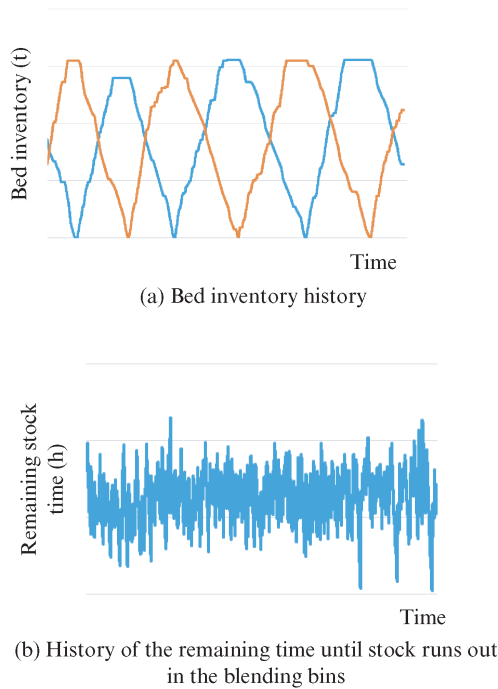


図7 ワーストケースのシミュレーション結果³⁾

Fig. 7 Worst-case simulation results for silo operation³⁾
©2024 日本鉄鋼協会

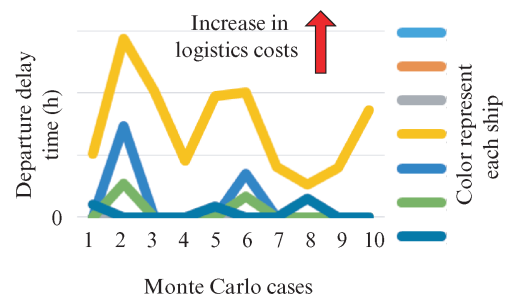
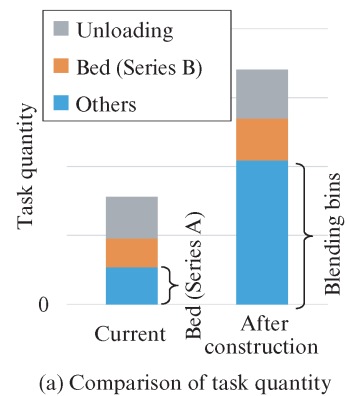
こすまでの最短時間をプロットしており、残り時間が0となることなく完走していることから、配合槽稼働後も操業破綻がおこらないことが確認できた。ただし、図8(a)に示すように、当初の懸念どおり、配合槽を建設した場合には槽への払い出しロット数(図中の青色)が従来に比べて大幅に増加していることが分かる。また、(b)のグラフは10ケースの数値実験結果における船の出航遅れ時間を示しており、払い出し操業がタイト化した結果、従来よりも原料炭の受け入れ操業が遅れ、物流費が上がるということが確認された。しかし、本物流費の増額分は、配合品質改善によるコスト削減効果よりも小さいことから、問題なく投資が成立することが確認できた。

4. おわりに

本稿では、倉敷地区における原料炭配合方式の見直しに伴う物流課題に対し、DESを用いて検証した結果を報告した。

配合槽方式への移行により、配合品質の安定化と原料炭コストの低減が期待される一方、搬送頻度の増加による物流ボトルネック化が懸念されていた。

開発したシミュレータにより、現状操業の再現性を確認し



(b) Departure delay time of each ship after the blending bins start operation

図8 配合槽建設による物流ボトルネックの影響

Fig. 8 Negative impact of silo implementation on logistics bottlenecks

た上で、配合槽稼働後の操業シナリオを複数ケースで検証した結果、操業破綻なく生産を継続できることを確認した。物流費の増加は見られたが、配合品質改善によるコスト削減効果がそれを上回り、投資の妥当性が示された。

なお、本稿では触れていないが、さらに本シミュレータを活用して、配合槽方式の最適な運転方を策定し、配合槽は現在安定稼働中である。今後は、他工程への応用やシミュレータの高度化を通じて、さらなる物流最適化をめざしていきたい。

参考文献

- 1) Fishman, G. S. Discrete-Event Simulation. Springer New York. 2001. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3552-9>
- 2) Yamamoto, S.; Kumano, A. An Integrated System of Scheduling and Digital Twin for Ore Transportation Action Inside-outside Steelworks. 2023, Proceedings of the 2023 Winter Simulation Conference, Inform, MD.
- 3) 熊野徹, 成合孝一, 迫田卓, 吉成有介. 原料炭配合槽の安定操業に向けた物流シミュレータの開発. 材料とプロセス. 2024, vol. 37, no. 1, p. 149.