

# 鉄鋼物流を対象としたデジタルツイン技術の開発

## Digital Twins for Logistics in Steel Making Process

高倉 優理子\*  
Yuriko TAKAKURA

森 純一  
Junichi MORI

小林 敬和  
Hirokazu KOBAYASHI

三淵 喬  
Takashi MITSUBUCHI

### 抄 録

鉄鋼生産プロセスは多段階の工程において数千～数万種類にわたる鉄鋼製品を造り分けている。各工程は製鉄所内に個別の工場として存在し、その間を搬送しながら製造を行うが、物流は非常に複雑であるため、物流整流化は生産の効率化を考える上で大きな課題である。そこで日本製鉄(株)と日鉄ソリューションズ(株)では、物流の可視化、解析、シミュレーションを行うことができるデジタルツイン技術を開発している。本稿ではデジタルツイン技術の構想及び実際の課題に適用した事例について紹介する。

### Abstract

Steel works produce hundreds and thousands of steel products in a multi-stage process. Products are transferred between factories which have different processing lines. Therefore, the logistics in steel making processes are usually complex and this causes problems such as shortage or oversupply of stocks. Nippon Steel Corporation and NS Solutions Corporation have developed digital twins for visualizing, analyzing and simulating logistics. In this article, we introduce the concept of the digital twins and their application examples.

## 1. 緒 言

鉄鋼生産プロセスは、高炉、転炉、連続鋳造、圧延、焼鈍、表面処理等の多工程にわたるブレイクダウン型の生産形態であり、工程毎に同一製造条件の製品を連続して製造するロット生産を行っている。このため、各工程で処理順序や製造ロットが異なり、これら製造条件の組み合わせは数千から数万種類にも及ぶ複雑な生産構造となっている。また、品質とコストの観点からは同一製造条件を連続して製造する大ロット生産が望ましいが、製品毎に製造条件や納期が異なるため、品質・コスト・納期バランスを考慮した生産計画、スケジューリングを立案することが難しい。そこで、日本製鉄(株)では、これまで各工程・工場単位に、品質とコストと納期のバランスをとった生産計画・スケジュール立案業務を支援するシステム技術の開発を行ってきた。

しかしながら、鉄鋼生産プロセスは、工程間をキャリアやAGV等の様々な搬送機器で搬送しながら製品を造り上げるプロセスであるため、各工程内における生産計画・スケジュールだけでなく、工程間でモノの滞留や材料

不足が発生しないようにスムーズに製品/半製品を下流工程に搬送すること、すなわち物流を整流化することが重要である。例えば、次の工程へ製品を搬送するキャリアの手配が遅れてしまい工場間にモノが滞留した場合、単に搬送工期が伸びるだけではなく、払出側の工場では製品が引取られないため在庫が積み上がり、受入側の工場では製品供給が遅れ材料不足が発生する。払出側の後面において在庫がひっ迫した場合、払い出し設備は処理した製品を払い出すことができず設備停止をせざるを得ない。また材料が不足した場合も設備を停止させることとなる。1つの設備が停止すると他の設備への製品/半製品の供給まで停止することになるため、製鉄所全体の減産に繋がってしまう。また、物流整流化を阻害する要因は搬送機器によるものだけではなく、製品の出来栄に応じた追加工程の発生、操業変動による処理時間の変動、天候悪化による海上輸送製品の引取量の低下、といった様々な内的・外的要因が複合的に影響し合った結果として発生する。

このため、物流を整流化するためには、特定工程のみを対象とするだけではなく、製鉄所全体、少なくとも前後工

\* プロセス研究所 インテリジェントアルゴリズム研究センター 生産マネジメント研究室 研究第一課 主任研究員 博士(工学)  
千葉県富津市新富 20-1 〒 293-8511

程の物流も考慮した上で、生産計画・スケジューリングや現場作業指示といった意思決定を行う必要がある。このような意思決定を適切に行うためには、現状の物流を正しく認識し、将来の物流をシミュレーションした上で、品質・コスト・納期の観点から最適となるアクションを検討する、といったプロセスを経ることが重要である。しかしながら、数万種類の製品を数十～数百にも及ぶ設備で造り分けを行っている鉄鋼生産プロセスにおいて、工程間の影響を把握した上で、上述の意思決定プロセスを行うことは容易ではない。さらに、鉄鋼生産プロセスは原料から最終製品までが長大な製造工程である。従って、ある工程の状態（設備稼働率や在庫数等）が数日経って別工程の状態へ影響を及ぼすことも多いため、過去に遡った時系列データ分析が必要であり、これが意思決定をさらに複雑化している。

そこで本研究では、製鉄所内で収集・蓄積した物流データをもとに、過去から現在までの物流を計算機上に再現し、将来の物流をシミュレーションできる物流デジタルツインプラットフォームを開発している。2章では、物流デジタルツインの構想と開発したプラットフォーム“Geminant”について紹介する。その後、Geminantの適用事例として、3章では、薄板精整工程の物流可視化とボトルネック要因解析への適用事例について、4章では、工程間のキャリア管制業務を支援することを狙いとした物流シミュレータの開発プロセスとその適用事例について紹介する。5章では、在庫管理業務支援を目的に開発した物流シミュレーションモデルとモデルを持続的に改善し効果を発揮し続ける仕組みについて述べる。最後に6章でまとめと今後の展望を述べる。

## 2. 物流デジタルツインの構想

物流デジタルツイン構想では、実績データをもとに過去から現在までの物流を計算機上に再現するとともに、未来の物流をシミュレーションできる基盤構築を目指している。図1に物流デジタルツインの全体構想を示す。

Layer-1では、実プロセスを過去から現在にわたって再現する。このとき、物流可視化の入力となる実績データは製品単位に物流をトラッキング可能なデータモデルとして蓄積しておくことで、要因調査時の遡及解析ができるようにする。また、データモデルを対象プロセスによらず共通化することで、設備・置場・搬送機器間の流量グラフや、在庫量や設備・搬送機器の稼働率の時系列推移、といった工程の特性に依存しない情報は、対象プロセス毎にシステムを造り込むことなく可視化・再現を行うことができる。鋼材単位の搬送経路や物理的干渉を加味した可視化が必要な場合は、3Dでの物流可視化が有効であり、ここは対象プロセス毎に造り込みが必要であるものの、デジタルツインプラットフォーム上で共通部品を用意することでシステム開発を効率化できる。

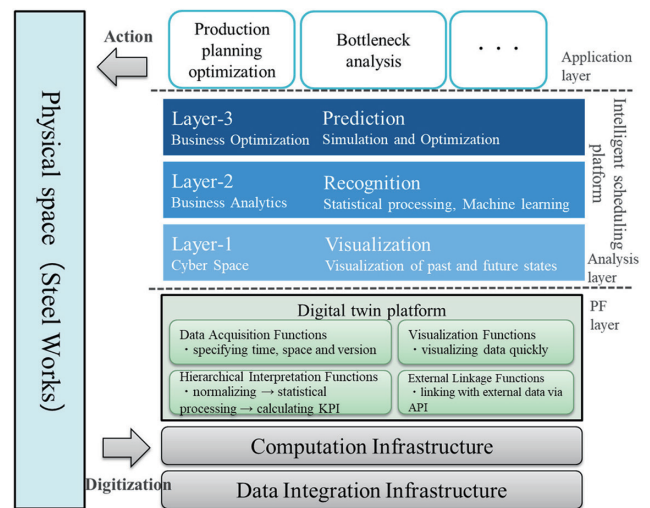


図1 物流デジタルツインの構想  
Logistics digital twin concept

Layer-2は、データモデルをもとに、在庫・工期・稼働率等の統計解析や時系列解析、ボトルネック工程やクリティカルパスの抽出、といった物流状態の認識を行うレイヤーである。物流トラブル発生時の要因解析の例として、品種毎の平均工期に有意差が無かったか、稼働率が通常より低くなっている搬送機器が無かったか、などを認識する。物流解析処理は部品化することによって、データさえ準備できれば対象工程に依存することなく素早く解析できる。

Layer-3は、シミュレータをもとにした将来の物流予測や、生産計画やスケジュールを立案するレイヤーである。例えばLayer-2の認識レイヤーをもとに決定した意思決定の有効性をシミュレーションで事前に確認したり、数理計画法のような最適化モデルによって数学的に最適な方策を自動的に決定したりする。シミュレータ・数理モデルで使用するデータモデルはLayer-1と共通化することで、可視化～物流解析～シミュレーション～最適化までの一貫性を担保することができる。

以上の各レイヤーを備えたインテリジェントスケジューリング基盤を活用することで、各製鉄所が抱える物流課題を解決することが可能なアプリケーションを素早く実装することができる。アプリ層で決定したアクションは実プロセスへ反映され、さらに実績データを収集することで、業務とシステム（データ・モデル）の改善PDCAを回すことが可能となる。

このような構想に基づき、アプリケーション層を日本製鉄、デジタルツインプラットフォームを日鉄ソリューションズ(株)システム研究開発センター、その間のインテリジェントスケジュール基盤を両社間の共同研究として技術開発を進めてきており、以降では、上記構想に基づき開発したデジタルツインプラットフォーム“Geminant”について紹介する。

日鉄ソリューションズシステム研究開発センターでは、

製造現場において、デジタルツイン技術を利用して関係者間での共通認識を醸成することを目指している。物理世界をデジタル世界上で可視化する“見えるツイン”に加えて、デジタル世界上で未来の試行ができる“さわれるツイン”もあわせて実現することが、より深い相互理解に繋がると考えている。

前述の通りデータに基づく改善業務の流れは、データを可視化し (Layer-1)、現状を認識し (Layer-2)、将来を予測して適切な意思決定 (Layer-3) を行い、現実世界にアクションを取るプロセスを経る。これらプロセスをデジタルで代替する範囲を徐々に拡大することで業務の客観性と迅速性を高めることができると考えている。デジタル化範囲を拡大するステップとして、観測、推定、融合、自動化の4つのステージを設定している (図2)。“観測”ステージではデータ可視化プロセス (Layer-1)、“推定”ステージでは認識と予測プロセス (Layer-2, 3) まだがデジタル化できている状態をいう。さらに、“融合”ステージではデジタル世界と物理世界をリアルタイムに同期しながら予測と実績をすり合わせていき、最後は人の判断が必要なくなった部分の“自動化”ステージである。最後のステージである“自動化”を達成するためには、特に融合のステージに入った

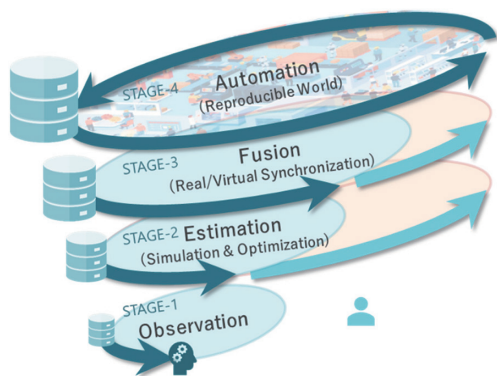


図2 デジタル化範囲を拡大する4つのステージ  
Four stages to expand the scope of digitization

あとでも改善のサイクルを回し続けることが大切であると考えており、そのためには、“見えるツイン”“さわれるツイン”を実現した上で、それらのツインに対しても改善のサイクルを回していくことが必要不可欠となる。システム研究開発センターでは、継続的なブラッシュアップが可能な“見えるツイン”“さわれるツイン”を構築するための基盤として、デジタルツインプラットフォーム Geminant の開発を行っている (図3)。

Geminant が提供する機能の1つとして、3D可視化機能が存在する。Geminant では共通の3D可視化用のデータモデルが事前に定義されており、現実の状態をその共通のデータモデル形式で格納することで、個別に画面を造り込むことなく3D可視化が可能となる。この機能は“見えるツイン”として現在や過去のデータを可視化するだけでなく、シミュレーションや最適化などによって未来の予測データを作成した際にも、同様のデータモデルとして結果を格納することで、“さわれるツイン”として未来の予測結果を観察することができるようになる。以降では、Geminant の適用事例について紹介する。

### 3. 適用事例1：物流状態の可視化とボトルネック要因解析

製鉄所内では物流が複雑であるために、置場のひっ迫や生産対象鋼材の不足 (材欠) により設備が停止するトラブルが発生したとしても、その要因がわからず解決に繋げることができないという事例が多く発生する。例えば日々の操業において置場のひっ迫が発生した場合、前工程からの鋼材の流入過多や、後工程への払い出しが減少したなど複数の要因が考えられるが、前工程や後工程はさらにその前の工程や後の工程から影響を受けているため、それらの工程に要因があることも想定され、要因の特定は容易ではない。また、これら複数の要因の候補の中からトラブルの要因を特定し、解決のためのアクションに繋げるためには、前述の通り、それぞれの設備や置場、搬送機器の状態が単

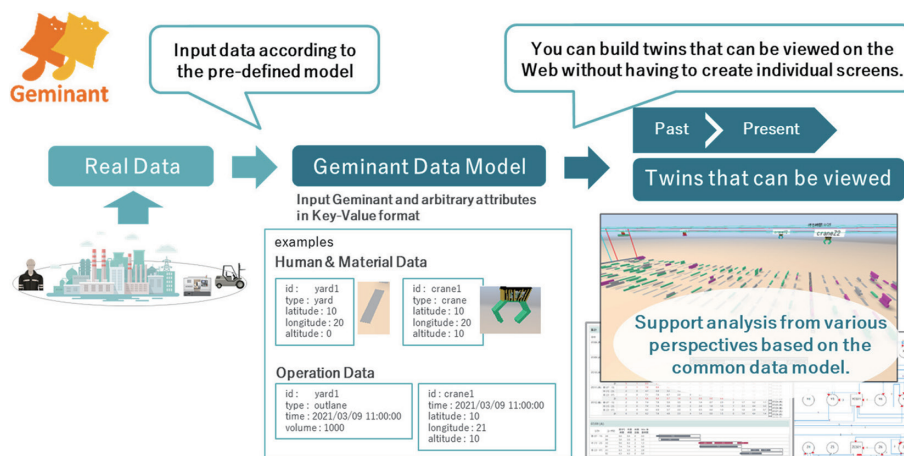


図3 Geminant における“見えるツイン”の高速化技術  
Geminant technology to accelerate building twins that can be viewed

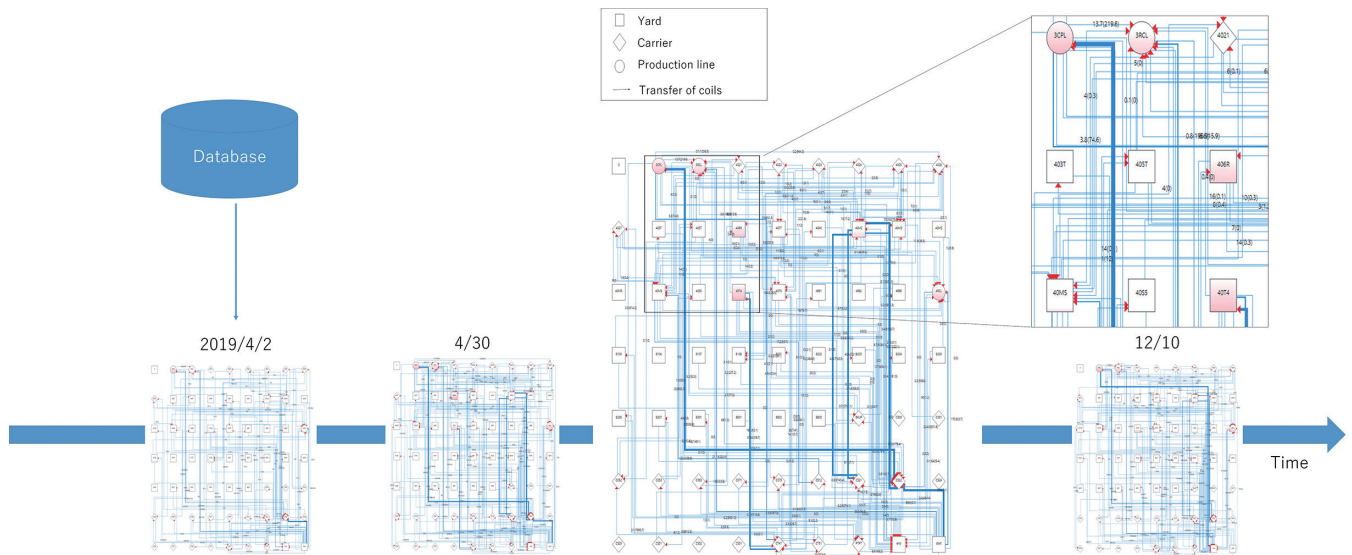


図4 物流ネットワーク可視化システム  
Logistics network visualization system

独で把握できるだけでなく、それらの空間的な繋がりを把握できることが重要である。その1つの方法として、物流の設備や置場、搬送機器間の繋がりをネットワークとして可視化するシステムを開発している。このシステムについて本稿では“物流ネットワーク可視化システム”とよぶ<sup>2)</sup>(図4)。

鉄鋼生産プロセスでは工場全体のマクロバランスを解析する、というマクロな視点や、工場内での輸送順を入れ替える、のようなミクロな視点まで様々な粒度での物流解析が必要であるが、分析対象毎に可視化システムを作成したのでは、可視化システムの実装に時間がかかってしまう。そのため、物流ネットワーク可視化システムでは、鋼材毎に定型で用意する通板履歴データを入力とし、そのデータフォーマットに則ってデータ整備をすれば物流が可視化、解析を可能としている。通板履歴データは、製品毎に振られているID、通過工程、工程の開始時間と終了時間を含んでいる。本システムでは、このように定型で整理された物流実績データを用いて物流可視化を行う。

物流ネットワーク可視化システムは、鋼材毎の工程通板データを入力することにより、設備、置場、搬送機器間の鋼材の流れを、それらをノードとした有向グラフとして可視化するものである。ノードは工程(置場、設備、搬送機器)を表しており、ノードの形状は工程の種別を示している(置場：四角、設備：丸、搬送機器：ひし形、等)。エッジは工程間の鋼材の流れを示しており、エッジの太さは期間毎の流量(鋼材数・重量)、移動時間、後工程の処理時間を含めた工期に対応している。また、各工程は、描画間隔に応じた時間間隔で集約した工程能力に対するひっ迫率に応じて赤くアラート表示され、ひっ迫率の高い工程を容易に抽出することができるようになっている。

前述の通り、鉄鋼生産プロセスにおける物流は、その注

文構成や天候、物流の状態によって刻一刻と変化する。本システムではその物流の変化を追うことができるようにするため、物流ネットワークを定期的な時間間隔で描写し、その物流の変化を追うことを可能としている。物流の時間経過は、任意の時間間隔(例：1時間、12時間、1日、1週間)毎のアニメーションとして可視化され、各物流の変化を認識することが可能である。

また、ノードやエッジの配置を工場内のレイアウトにあわせて変更するなど、ユーザの求めるレイアウトにあわせて自由にレイアウトを変更することで直感的な状況の把握が可能となる。

本システムで物流を解析する際には、すべての鋼材の工程通過パターンについて可視化を行い、その中からトラブル要因の特定を行うことが望ましい。しかし、すべての工程通過パターンをネットワークとして可視化すると物流が煩雑になるため、その中から人手で分析に必要な主要な物流を抽出することは困難である。そのため、本研究では物流の情報を保ちながらネットワークを単純化し、主要な物流情報を抽出しネットワークを可視化する技術を開発した<sup>3)</sup>。

さらに主要な物流ネットワークのグラフ構造を実績データから自動的に抽出することを目的として、本研究ではネットワークの単純さと工程通過パターンの再現性を同時に評価して適切なネットワーク構造を選び出すための評価指標を提案する。観測された $n$ 個の工程通過パターン(例：熱延→めっき→出荷、等)のデータを $x = \{x_1, \dots, x_n\}$ とし、確率モデル $f(x|\theta;G)$ に従って $x$ が発生すると仮定する。ここで、 $\theta = \{\theta_1, \dots, \theta_M\}$ は未知パラメータであり、候補のグラフ構造 $G$ から計算される各工程通過パターンの発生確率である。本評価指標では、確率モデルの優劣を判断する基準として、最大対数尤度とモデルの次元数 $M$ の組み合わせ

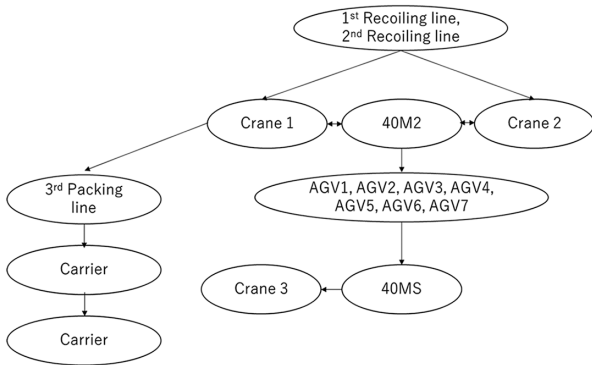


図5 評価指標が最良となるネットワークの例  
An example of graph with best evaluation value

によって計算される(式(1))。

$$\text{score} = -\sum_i^n \log f(x_i | \theta_{ML}; G) + w \cdot M \quad (1)$$

ここで  $\theta_{ML}$  は工程通過パターン発生率  $\theta$  の最尤推定値を表している。各候補グラフ構造  $G$  に対して本評価指標を計算し、その値が最小になるグラフ構造を最良のグラフ構造と考える。また、 $w$  は重み係数を表しており、この重み係数を変更することによってユーザの求める単純さでの物流ネットワークの抽出が可能となる。

このネットワーク評価指標を用いてネットワークの探索を行った結果について述べる。以下はある製鉄所のデータの1年分の物流をネットワークとして可視化した結果であるが、この結果からは類似の工程がまとまりかつ単純化されたネットワークが抽出できていることがわかる。例えば図5では1年分の製鉄所通過工程パターンについて工程集約パターンを変更して作成したネットワークのうち、評価値が最良となるネットワークの例であるが、1精整(1st Recoiling line)、2精整(2nd Recoiling line)及び7台のAGV(AGV1~7)が集約されている。これらは物流上の役割が類似していることから、集約した場合でも工程通過パターンの情報を失うことなく物流ネットワークとして可視化できているといえる。

本ネットワーク可視化ツールを用いて、1年分の物流データの可視化を行った。その結果、ある特定の日において置場の在庫ひっ迫率が98%となっており、高いひっ迫率となっていることが判明した。この置場ひっ迫の要因を調査するために物流ネットワークより主要な物流を抽出すると、当該置場にコイルを搬送する搬送機器が高負荷になっている(図6)。さらにその前工程を見ると、一時的にひっ迫した置場に対する払い出し量が増加していることが見て取れる。

以上のように、物流をネットワーク可視化し、かつその時系列変化を追うことにより、ひっ迫の要因を分析することができた。

#### 4. 適用事例2: 管制物流シミュレーション技術

製鉄所では溶融物や重量物の工程間の搬送が多く、これらは工場に備え付けられたAGV(無人搬送台車)、複数工

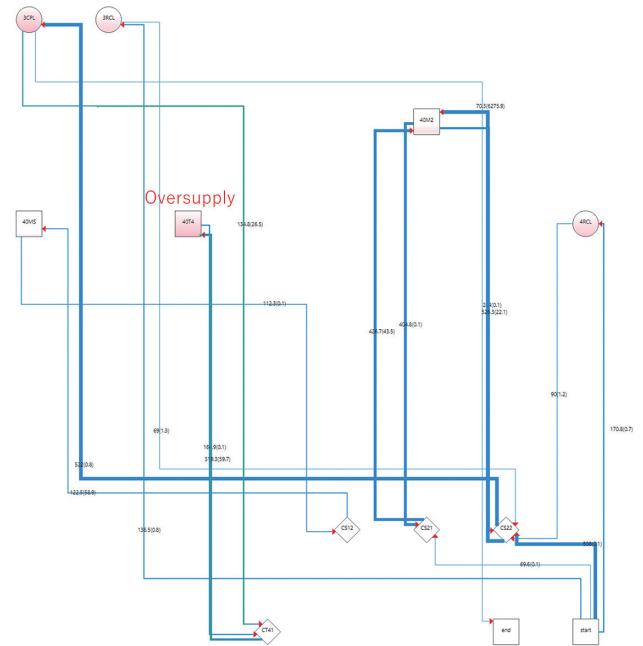


図6 抽出された物流トラブル  
Extracted logistics problems

場間を結ぶ貨車やキャリア(重量物搬送車両)等によって搬送される。このため、搬送機器に搬送物を適切に割り当て、少ない搬送機器でスケジュール通りに搬送先に届くように指示を出す物流管制業務が物流コストの低減には重要である。本章では、工場間のキャリア搬送業務の効率化を狙いとしたキャリア物流シミュレータを開発しており、シミュレータを用いた業務支援を行う仕組みに加えて、シミュレータの予測精度改善のサイクルを迅速に回すためにGeminantを活用した事例について述べる。

製鉄所内の工場間を繋ぐ物流では、各工場から搬出される鋼材は天井クレーン等によってパレットとよばれる台の上に置かれ、キャリアとよばれる搬送台車によってパレット毎に次の工場まで運ばれていく。

前述の通り、鉄鋼生産プロセスでは注文自体が数千から数万種類にも及び、各鋼材の製造条件は工程によって異なる。このため、同一製造条件をまとめて製造するロット生産を行っている鉄鋼生産プロセスにおいて、各鋼材を処理する順番は工程毎に異なるという特徴を持つ。すなわち、各種の鋼材を前工程の処理順に次工場に搬送してしまうと、次工場が必要なタイミングに必要な鋼材を届けることができない。そのため、工場間を繋ぐキャリアパレット搬送業務は、前後の工場での処理順の違いを物流の中で吸収していく役割も有している。

そのような役割の都合上、キャリアパレット搬送業務では前後工程での計画と実操業でのずれの影響を大きく受けることとなる。そのため、キャリアやパレットの現在地情報をリアルタイムに把握しながらキャリアの到着予想時刻や次のパレットの払出・受入要求時刻などの物流状態を予測することにより、適切な搬送指示を素早く出していく必

要がある。人手で実施しているこれらの搬送指示をシステムでより効率化するためには、物流状態を高精度に予測可能なシミュレータが必要となる。

しかしながら、キャリアパレット搬送業務においては、データ化されていない情報や制約が多い、担当者の暗黙知によって判断が行われている、などの理由から、少し先の将来を予測しようとした際にシミュレーションが十分な精度にならない場合がある。この問題を解決していくために、シミュレーション結果を随時可視化し、実際の操業と比較しつつ精度を高めるよう、シミュレーションモデルの更新を行っていく必要がある。

シミュレーションモデルの精度を向上するためには、

1. シミュレーションの実行
  2. シミュレーション結果と実際の操業の比較・分析
  3. シミュレーションの改修
- というサイクルを速いスピードで繰り返し回していくことが必要となる。

このサイクルを回す上で、シミュレーション結果と実際の操業との差を分析するための可視化技術は重要な要素となっている。この比較・分析のための可視化においては、シミュレーションした時間全体の中から注目したいポイントを絞りこみ、その詳細情報にすばやくドリルダウンしていくことが必要となる。ドリルダウンを行う際には、ある1つの視点で可視化するだけでなく、様々な粒度の異なる視点を、それぞれ連携させながら見ることが重要となる。

粒度の異なる視点を連携させることで改善に繋げる一例を紹介する(図7)。この例では、指標値の時間変化を可視化するグラフビュー、各キャリアの搬送時間を可視化するガントチャートビュー、地図上で詳細なキャリアの動きを可視化する3Dビュー、の3種類の可視化を連携して解析を行っている。これらのビューを組み合わせることで実績データとシミュレーションデータを並行して可視化した上で、結果に大きな差異がある部分を確認し、改善を行うことにより、計画外の操業変動が発生した場合でも素早くシミュ

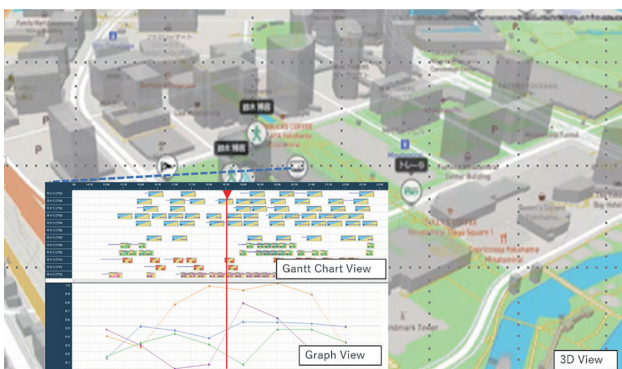


図7 3つのビュー間を時刻同期させることで連携させる画面の例

Example of a screen that is linked by synchronizing the time between the three views

レータを修正し、物流予測を行うことが可能となる。このことにより、工場内でのキャリア担当範囲の選択やキャリア台数の調整等を物流の将来予測に基づいて行うことができるようになるため、より精度の高いアクションを取ることができるようになると思われる。

## 5. 適用事例3: 在庫予測シミュレーションモデルと持続的改善の仕組み

製造コストの低減には、生産設備を機会損失無く活用することが重要であり、搬送機器の待ちや干渉、置場の材欠やひっ迫といった物流トラブルを限りなく小さくすることが望まれる。生産計画立案時に置場在庫や必要な搬送量を正確に予測することができれば、物流トラブルを予見し生産計画をリスケジュールすることが可能となる。本章では、薄板工程を対象として、生産計画から各置場の在庫量を予測する方法として、離散系シミュレータを用いた事例について述べる。

離散系シミュレータは、処理時間・処理工程、物流ルールが既知であり、その通りに製造・搬送が行われるような完全に自動化されたプロセスに対しては高精度に物流を予測することができる。ところが鉄鋼生産プロセスは、製品毎の処理時間の変動が大きく、また精整工程のように製造途中の品質によって通過有無が決まったり、品質に応じて工程内で分割し複数製品を産出したりする工程もあるため、物流を正確にシミュレーションするためには各設備の処理時間/処理有無/処理内容等を予測することが必要である。さらに、物流ルールの中には、工場作業員の判断のような曖昧なルールも多数存在するが、すべての物流ルールを調査し、正確にシミュレータに記述することは現実的ではなく、また物流ルールのメンテナンスにも多大なコストがかかる。本章では、これらの物流パラメータや物流ルールを実績データから自動学習することで、物流シミュレータの予測精度を持続的に改善する仕組みについて述べる(図8)。

ここでは、開発した薄板工程シミュレータの一部である冷延工程～連続焼鈍工程間のコイル物流に切り出して技術の詳細を述べる。冷延設備で処理されたコイルは天井ク

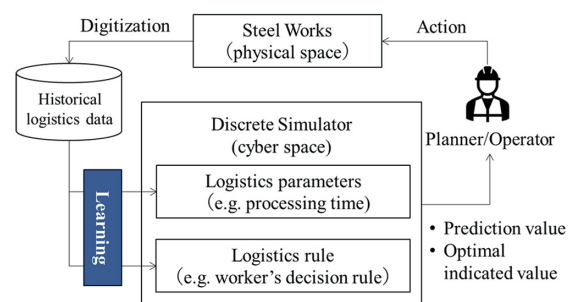


図8 物流シミュレータの予測精度を持続的に改善する仕組み Mechanisms to sustainably improve prediction accuracy of logistics simulator

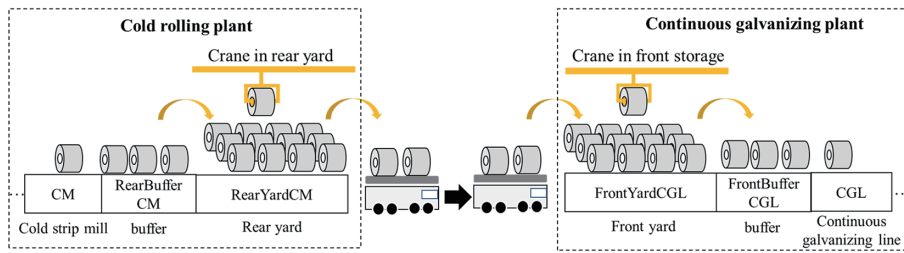


図9 冷延工場から連続焼鈍工場へのコイル搬送  
Coil transfer from cold rolling plant to continuous galvanizing plant

レーンで後面置場へ搬入され、その後パレットに積載されたのち、キャリアで次工場である連続焼鈍工場に搬送される。連続焼鈍工場では、天井クレーンにてパレットに積載されたコイルを前面置場に搬入した後、スケジュールに従って連続焼鈍設備にコイルを搬送する。生産設備をアイドル時間なく稼働させるためには、後面置場のひっ迫や前面置場の材欠を避けつつ、搬送機器を適切に搬送物に割り当てる必要があり、物流をシミュレーションすることで物流上の問題点を事前に把握し対策を取ることが望まれる。物流をシミュレーションするためには各設備の処理時間を製造着手前に計算する必要があるが、処理時間はコイルの規格やサイズによって異なる。そこで実績データをもとに、コイル属性から時間当たり処理重量を予測する統計モデルを構築し、統計モデルにより予測した時間当たり処理重量をもとに離散シミュレーションを行っている。注文構成や操業変化によって時間当たり処理重量も変動するが、実績データから統計モデルを自動学習する機能を備えることによって、シミュレータの予測精度を持続的に改善することが可能である。

また、各生産設備の前後面には設備と直結した置場 (Buffer) が存在し、例えば冷延後面置場クレーンには“冷延後面バッファ (RearBufferCM) から冷延後面置場 (RearYardCM) へのコイルの受入”と“冷延後面置場 (RearYardCM) からパレットへのコイルの払出”の2つの仕事が割り当てられており、どちらの仕事を優先すべきかのルールをシミュレータに記述する必要がある (図9)。Rear-BufferCM のひっ迫によって設備停止を避けるためには RearBufferCM から RearYardCM へのコイル払出を優先する必要がある。一方で次工程である連続焼鈍設備を稼働させるためには、RearYardCM からパレットへのコイル払出作業を実施すべきである。同様のルールは連続焼鈍前面置場クレーン、連続焼鈍前面置場 (FrontYardCGL)、連続焼鈍前面バッファ (FrontBufferCGL)、にも存在する。そこで、状況に応じてどちらのクレーンを優先すべきかといったオペレータ判断のルールをベイズ最適化により推定した。ベイズ最適化とは、形状がわからない関数に対して効率的に最適解を探索する手法であり、関数はガウス過程に従うと仮定することが多い。応用先として実験計画法における新

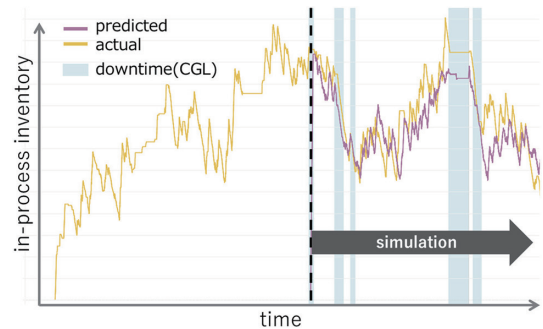


図10 在庫の予測値と実績値の比較  
Comparison of predicted and actual in-process inventory

しい実験候補の探索や、機械学習モデルのハイパーパラメータの決定などがあげられる。ここでは、ベイズ最適化によってシミュレーション結果の良し悪しを評価する尺度として在庫推移の予測値と実績値の差が最小となるオペレータ判断ルールを探索することを試みた。図10は、シミュレーションによる予測仕掛数と実績仕掛数の時系列推移を示しており高精度に仕掛数を予測できている。実績データを用いたベイズ最適化によってシミュレータの予測精度を高めることが可能であることがわかる。

本章では、実績データからシミュレータのパラメータやルールを学習する手法を紹介した。本手法は、シミュレータ構築時の予測精度を高めるだけでなく、注文構成や操業変化といった物流プロセスの経年変化に応じたシミュレータの精度改善を容易に行うことができる。

## 6. 総 括

本稿では、物流整流化に向けた物流デジタルツイン構想を実現するためのデジタルツインプラットフォーム“Geminant”と製鉄所での適用事例について述べた。Geminantには、現状の物流を正しく認識し、将来の物流をシミュレーションし、適切なアクションを取る、といった人の知的作業を支援するために必要な機能が備わっている。また、データモデルや解析モジュールを共通化することによって、開発工期の短縮も図っており、多くの物流関連の業務を対象に成果を発揮している。今後は、Geminant を実世界と同期させた“融合”ステージ、さらには人の介在を限りなく少なくした“自動化”ステージへとデジタル化範囲を拡大させ

ていくことによって、現実世界と完全に同期がとれたサイバー空間の構築を目指す。

### 参考文献

- 1) 伊藤, 黒川, 塩谷, 小林, 吾郷, 森: 鉄鋼生産プロセスにおける生産計画, スケジューリング技術. 新日鉄住金技報. (411), (2018)
- 2) 高倉, 森, 小林: 鉄鋼プロセスにおける物流視覚解析システムの開発. 材料とプロセス. 35 (2), (2022)
- 3) 高倉, 森, 小林: 再現性と単純さを考慮した物流グラフ抽出. 材料とプロセス. 36 (1), (2023)



高倉優理子 Yuriko TAKAKURA  
プロセス研究所  
インテリジェントアルゴリズム研究センター  
生産マネジメント研究室 研究第一課  
主任研究員 博士(工学)  
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



小林敬和 Hirokazu KOBAYASHI  
プロセス研究所  
インテリジェントアルゴリズム研究センター  
生産マネジメント研究室 研究第一課長  
博士(システム情報学)



森 純一 Junichi MORI  
プロセス研究所  
インテリジェントアルゴリズム研究センター  
生産マネジメント研究室 研究第一課  
上席主幹研究員 Ph.D.



三淵 喬 Takashi MITSUBUCHI  
日鉄ソリューションズ(株)  
システム研究開発センター  
デジタルツイン研究部  
ハイパーアーキテクチャグループ 主務研究員