

原料物流・ヤード操業と保全における DS-CPS 技術の活用

Utilization of DS - CPS Technology in Raw Material Logistics & Yard Operation and Maintenance

熊野 徹 KUMANO Akira JFE スチール スチール研究所 サイバーフィジカルシステム研究開発部 主任研究員 (副課長)
山元 隼 YAMAMOTO Shun JFE スチール スチール研究所 サイバーフィジカルシステム研究開発部
石垣 雄亮 ISHIGAKI Yusuke JFE スチール スチール研究所 サイバーフィジカルシステム研究開発部 主任研究員 (課長)

要旨

製鉄所の最上流工程である原料物流・ヤード操業を最適かつ安定的に行うため、Data Science (DS) および Cyber Physical System (CPS) を活用した鉱石配船・配合・山配置計画システムと搬送ベルトコンベア設備の異常を早期に発見しトラブルを未然防止する監視システムを開発した。

Abstract:

In order to optimally and stably carry out raw material distribution and stockyard operation, which are the most upstream process of steel works, an ore carrier scheduling, blending, and stockyard layout planning system and a monitoring system for the early detection and prevention of failures of conveyor belt facilities using Data Science (DS) and Cyber Physical System (CPS) have been developed.

1. はじめに

製鉄所の最上流工程である原料物流・ヤード操業は所全体の操業を安定させるうえで重要な役割を担っている。

近年、情報インフラの発展に伴うデータ量の指数関数的増大を背景として、高度なデータ分析による課題解決法としてのデータサイエンス (Data Science; 以降 DS)、およびフィジカル空間の莫大なセンサ情報 (ビッグデータ) をサイバー空間に集約し、これを各種手法で解析した結果をフィジカル空間にフィードバックすることで価値を創出するサイバーフィジカルシステム (Cyber Physical System; 以降 CPS) が脚光を浴びている。

JFE スチールにおいても、上記を活用した開発を推進するためデータインフラの整備を進めており、安定操業と操業最適化の両立を実現するために必要な各種データを収集できるようになっている。

本稿では、原料物流・ヤード操業へ DS-CPS を適用し操業の最適化と安定化を実現する鉱石配船・配合・山配置計画の最適化への取り組みおよびヤード操業の保全技術である搬送ベルトコンベア監視への取り組みについて述べる。

2. 原料物流・ヤード操業

2.1 原料操業概要

原料操業の計画業務には、配船計画、配合計画、ヤード

配置計画がある。原料操業の日々の業務は、これらの計画を元を実施されている。

原料山元から各製鉄所への配船物流は、各製鉄所が要求する原料銘柄を、在庫不足を発生させないように安定的に供給することが使命である。当社が提示した配船計画に沿って、海運会社が運行管理を行っている。

所内原料物流は、焼結炉、高炉および製鋼の使用原料を安定的に供給し、所定の品質を担保することが使命である。図 1 に製鉄所における鉱石原料の物流の概要を示す。原料船が製鉄所に到着し、バースに着岸した後、アンローダーが積載原料を荷揚げする。荷揚げされた原料は搬送ベルトコンベアを經由して「粗鉱ヤード」と呼ばれる仮置きヤード

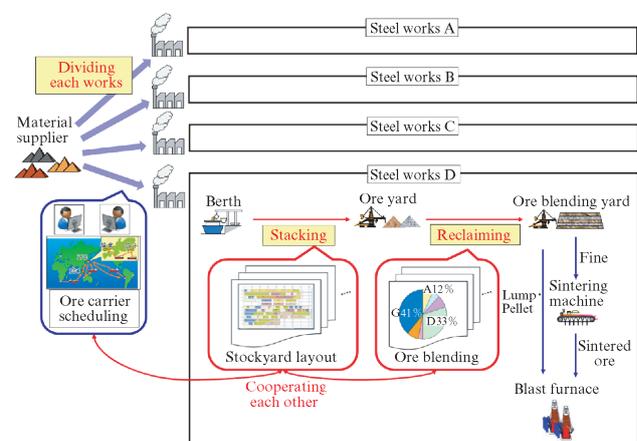


図 1 製鉄所における原料操業の概要

Fig. 1 Outline of raw material operation of iron & steel works

にヤード配置計画に基づいて受け入れられる。粗鉱ヤードには、石炭、鉱石、副原料等全ての原料が銘柄毎に在庫として石炭系と鉱石系に分かれて配置されている。鉱石は粗鉱ヤードから焼結用粉鉱処理プロセスと高炉用塊鉱処理プロセスへ運ばれ、所定の品質となるように配合計画に基づいて配合された後、ブレンディングヤードに積み付けられる。ブレンドされた粉鉱は焼結工場へ輸送され、塊鉱は高炉へ輸送される。ペレット、焼結鉱は処理鉱と呼ばれ、粗鉱ヤードから高炉へ輸送される。石炭は石炭処理プロセスへ運ばれ、配合槽でブレンディング後、コークス工場へ運ばれる。

2.2 原料操業の課題

配船計画を決めるうえで、計画担当者は、揚地側である各製鉄所の原料在庫を切らさないことを第一の目的とし、次いで船の備船コストや滞船料といった輸送コストの削減を考慮している。しかし、原料の安定供給と輸送コストの削減は相反する関係のため、両立した最適な計画を立案することは非常に困難である。

また、原料の受入場所によっては払出機の制約で計画どおり配合できない場合があるので、配合とヤード配置は連携した計画にする必要がある。しかし、原料操業に関連する情報が膨大で、かつ人手に頼った計画立案であるため、十分に連携した計画が立てられていなかった。その結果、当初の配合計画を変更することが多くなり、成分調整のための副原料装入量が増加していた。また、熟練者でもヤードの長期傾向の予測が難しく、長期的視点でヤード効率を最大化できていなかった。その結果、原料船の沖待ち時間が増加し、多額の滞船料が発生していた。

さらに、配船計画は天候等の影響を受けやすいため、頻繁に修正を余儀なくされる。所内物流計画は、到着予定の原料に基づいて計画を立てるため、配船計画が変更されるたびに修正する必要があり、各計画を修正するために時間を取られることも課題となっていた。

これらの課題を解決するためには、最終的に配船計画・配合計画・ヤード配置計画を同時に最適化することが求められる。しかし、実用上求められる計画単位で同時最適化することは、対処すべき問題が余りにも多く困難であった。一方、対処可能なレベルに精度を粗くした計画では、操業の都合を十分に反映できない恐れがある。そこで、3つの計画を個別に最適化するとともに、高速計算により計画作成時間を削減し必要に応じて各計画を修正できるようにすることで前述の課題の解決を図った。

一方、所内原料物流を支えるのは多数設置された搬送ベルトコンベアである。搬送ベルトコンベアは、一旦トラブルが発生すると、原料操業のみならず高炉操業へも影響が直結し損失が大きくなるため、その設備管理は非常に重要である。このことから、多種多様なセンサによる状態監視の

ニーズは高いものの、原料ヤードでは広い敷地に多数のベルトコンベアが設置され、総延長距離が数十 km から数百 km に達する場合もあるため、データを収集するための配線費用が高額になってしまう。そこで、有線ではなく、最新の情報通信技術 (Information and Communication Technology; 以降 ICT) を活用した無線モニタリングが求められていた。

上述の課題に対する取り組みの中で、本稿では、特に処理量が多い鉱石系を対象とした配船・配合・山配置計画の最適化への取り組みと搬送ベルトコンベアの状態監視による異常早期発見・トラブル未然防止の取り組みについて述べる。

3. 鉱石配船計画の最適化

3.1 鉱石配船計画

原料配船業務では、バース等の設備制約を考慮しつつ原料安定供給と輸送コスト最小化の両方を満たす最適な配船計画の作成が求められる。しかし、輸送に関わる制約は計画全体を俯瞰して判断する必要があるため立案が難しく、両立した最適な計画を手で作成することには限界がある。一方で、計算機による立案でも、しらみつぶしのような計算方法では、決定すべき変数の数に対し計画の候補の数が指数的に増加するため、スーパーコンピュータでも膨大な時間がかかる。本稿では、最適化技術を活用したスケジューラエンジンにより計画作成業務を効率的に支援するシステムの開発事例を報告する。

今回、対象にしたのは当社で作成している全地区への配船計画である。積地での荷積計画は入力として与えられており、積荷を運ぶ船と揚地での荷揚計画をスケジューラで作成する。荷揚計画の作成の際に考慮すべき事項は、バース設備制約、および在庫切れ、多港揚げ回数、滞船料の3項目の最小化である。なお、一般的な配送計画と異なり、在庫量の管理単位として銘柄を集約したグループの間に、非対称な補填関係 (例: グループ1はグループ2として使えるが、グループ2はグループ1として使えない) があることを考慮する必要がある。また、バースを占有する時間は荷揚能力 (t/hr) を基に計算するが、バース修理等に伴う荷役能率の低下を考慮する必要がある。

3.2 配船スケジューラ

前述した補填関係や荷役能率の変化などを織り込むため、船の動静を詳細にシミュレーションする機能を作成した。配船スケジューラエンジンはシミュレーションを繰り返し実行しながら、計画を改善する (図2)。繰り返し改善にはタブーサーチ¹⁾を活用し、局所解にとどまらないようにした。図3は局所解から逃れられている様子を示している。また、計算速度の高速化のために以下の処理を導入した。

・GRASP法¹⁾により初期計画を生成し、良い初期計画か

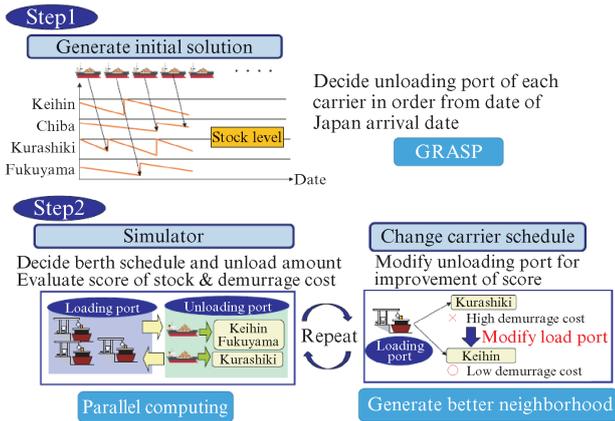


図2 配船スケジューラのアルゴリズム
Fig. 2 Algorithm of ore carrier scheduler

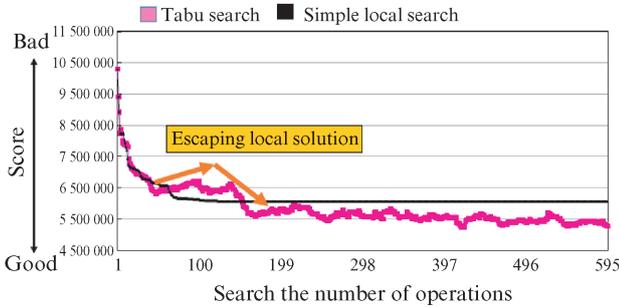


図3 タブーサーチによる近傍探索
Fig. 3 Performance of tabu search

ら探索する。

- ・タブーサーチでの近傍解生成では、近傍解をランダムに生成するのではなく、改善と思われる近傍解に絞って生成する。
- ・シミュレーションを並列処理化する。

これらにより6カ月の長期計画の計算時間を5分まで高速化できたことから、実用化可能と判断した。また、オフライン検証で多港揚げ回数6%削減の効果を確認した。

実システムへの導入に際し、エンジンでは定量的な扱いが困難な、天候等による変動要因を計画に反映させるため、対話式で計画を変更できる機能を実装した(図4)。例えば、荷役時間が伸びそうな航海がある場合、計画者が予測する荷役時間を入力し再度エンジンを実行することにより、現実 に即した計画を作成できる。現在、システムを実機化し、業務への導入を進めている。

4. 鉱石配合計画の最適化

4.1 鉱石配合計画

図5に、今回対象とした鉱石配合計画の概要を示す。鉱石配合計画は、鉱石の成分情報、鉱石船の入船予定、在庫

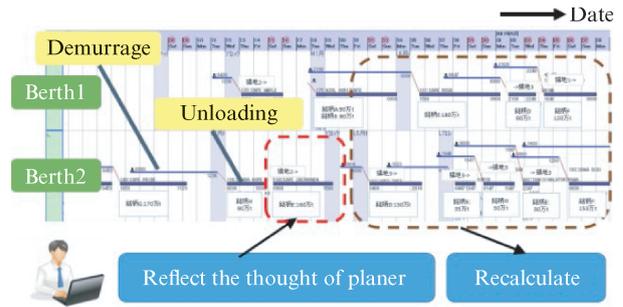


図4 対話式スケジューラ
Fig. 4 Interactive scheduling system

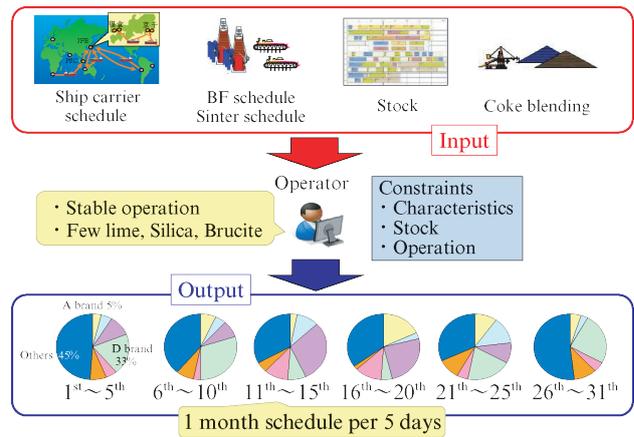


図5 鉱石配合計画の概要
Fig. 5 Outline of ore blending problem

情報、生産計画などが入力情報として与えられた状況で、在庫上下限、溶銑・焼結の性状制約の諸制約のもと、目的関数である鉱石コストが最小となる鉱石の使用計画を、数日単位・月単位で立案する計画である。

実操業で使用する鉱石の銘柄は20銘柄以上あり、在庫制約、焼結の強度制約、スラグの流動性制約などを満たしながら5日単位の計画を1か月分作成する大規模で複雑な計画となるため、人手による作成では精度が粗く改善の余地があった。しかし、鉱石配合計画を数理最適化問題¹⁾としてモデル化すると、溶銑スラグの塩基度計算などに非線形性があるため単純な線形計画問題¹⁾とならず、解法に工夫が必要になる。一方で、本問題は一部変数の定数化操作によって線形計画問題に定式化可能なため、定数化操作により高速で解けるが、出力解が定数化操作方法に大きく左右されていた。

そこで、非線形性をもつ変数を一旦定数化して線形計画問題として解き、得られた解の評価関数の改善のため定数化した変数をメタヒューリスティクス¹⁾を用いて探索する、独自の二段階のアプローチによるモデル²⁾(以降 Hybrid モデル)を開発した。メタヒューリスティクス手法としては、収束が早く、メンテナンス性、柔軟性に優れた粒子群

最適化法³⁾ (Particle Swarm Optimization; 以降 PSO) を適用した。PSO の基本概念は、群 (Swarm) となった粒子 (Particle) がお互いの情報を共有しながら解空間を探索していくもので、個々の粒子の持つ最良の情報と群で共有する最良の情報を利用して解を探索する方法である。

4.2 Hybrid モデルのアルゴリズム

Hybrid モデルのアルゴリズムイメージを図 6 に示す。定数化方法探索部分 (図中の PSO part) では、非線形変数を K 個の多次元ベクトルの粒子として表現し、PSO による最適な位置ベクトルを探索する。線形計画部分 (図中の LP part) では、線形化された K 個の粒子と同数の線形計画問題を解き、解として K 個の配合計画を得る。得られた解は粒子の比較指標となり、定数化方法探索部分の PSO アルゴリズムに用いられる。以上の操作を繰り返すことにより、非線形変数を含む鉄石配合計画問題を高速で解くことができる。

4.3 効果検証

貯鉄ヤード内のサイクルが入れ替わる連続 3 か月分のデータに基づき、担当者 3 名が作成したマニュアル計画の平均コストと、1 か月毎に 3 回 Hybrid モデルにより計算した計画のコストを比較し、効果を検証した。なお、主原料となる鉄鉱石は事前に長期の購入契約が結ばれており、計画の最適化によりただちに購入量を削減できるものではないので、購買に融通の利く副原料の配合量で比較した。

図 7 に結果を示す。グラフは、3 か月分の計画で使用する副原料の配合量を示している。担当者の作成したマニュアル計画の平均配合量を 100% とすると、Hybrid モデルによ

る配合計画は 98.7% と、副原料配合量を 1% 強削減できることを確認した。本手法を実装したシステムは西日本製鉄所福山地区で工程化され、効果をあげている。

5. ヤード山配置計画の最適化

5.1 ヤード山配置計画

図 8 にヤード山配置計画の概要を示す。ヤード山配置計画は、受入の配船計画と払出の配合計画、現在のヤード状況と在庫量が与えられた状況で、移動機の能力・稼働時間の制約のもと、ヤード効率が最大 (ヤード占有率 Min・ライン切替時間 Min) となるような受入場所、払出山を選択する計画である。ヤード山配置計画は、受入と払出を同時に考慮しなければならないうえに、どのスペースに受け入れるか (払い出すか)、複数の山に分割するか否か、を考えねばならず、非常に煩雑である。1 か月以上の長期計画となると山配置の組み合わせ数は爆発的に増加するため、最適な山配置計画を作成することは非常に困難であった。

そこで、高速計算が可能な Greedy 法¹⁾ に多点探索性を付加する独自の手法を備えた山配置計画最適化システムを開発した。

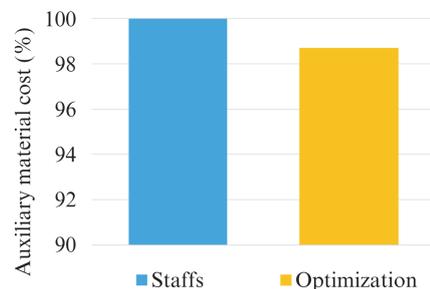


図 7 担当者と Hybrid モデルの計画結果比較
Fig. 7 Comparison of results by staffs and optimizations

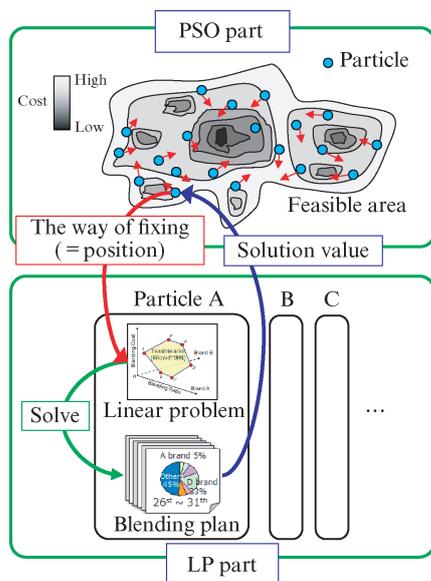


図 6 Hybrid モデルのアルゴリズム
Fig. 6 Algorithm of Hybrid model

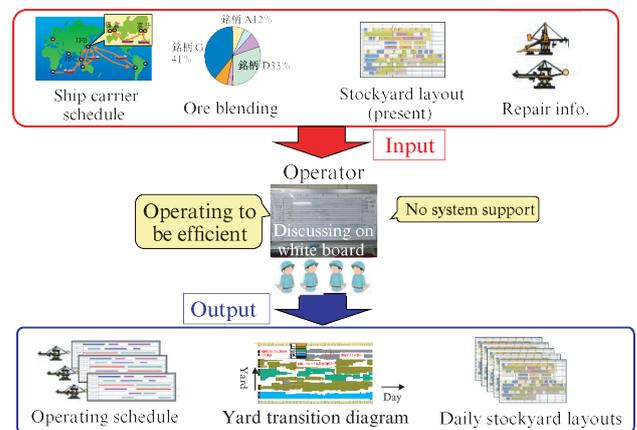


図 8 ヤード山配置計画の概要
Fig. 8 Outline of stockyard layout problem

5.2 山配置計画最適化アルゴリズム

山配置計画最適化システムの有するアルゴリズムは、前述の通り Greedy 法をベースとしたメタヒューリスティックスである。図 9 に Greedy 法の適用方法を示す。受入場所の選択、払出山の選択により、ヤードの山状況は複数のパターンに分かれる。一般にヤード効率は、ヤード内山数の削減により向上する。これは、山数が少ない方がデッドスペースが減ってヤード有効容量が広くなり、また受払時のライン切替の手間が減るためである。そこでヤード内山数の最小化を目的として Greedy 法を適用し、各日の山数が最小となるパターンを採用する。しかし、向こう数日単位の山数で評価すれば、更に山数を削減できるパターンが存在する可能性がある。本アルゴリズムでは、Greedy 法に多点探索性を付加した (図 10)。

具体的には、まず計画初日について山数最小群となる受入パターンを作成し、その山数最小群のパターンについて、それぞれ向こう数日間の計画を作成する。この際、2日目からの数日間の計画は Greedy 法に従い、山数が最小となるように受払いする。次に、向こう数日間の平均山数 (山/日) を計算し、数日単位で山数最小となった1日目の受入パターンを採用して翌日に進める。2日目からも同様の操作を繰り返すローリングスケジューリング⁴⁾を実施し、計画最終日に達すると終了する。以上の操作により非常に短い計算

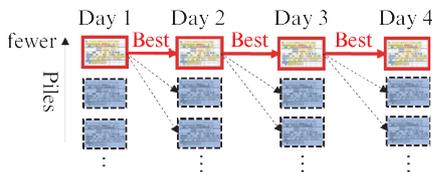


図 9 Greedy 法アルゴリズムの山配置計画問題への適用
Fig. 9 Greedy algorithm for stockyard layout problem

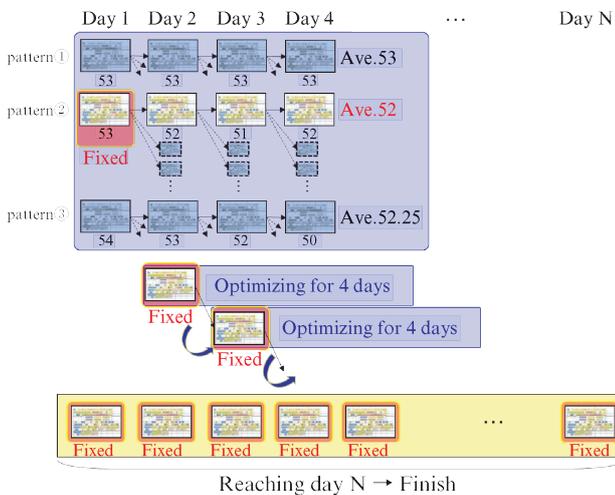


図 10 山配置計画最適化モデルのアルゴリズム
Fig. 10 Algorithm of stockyard layout problem

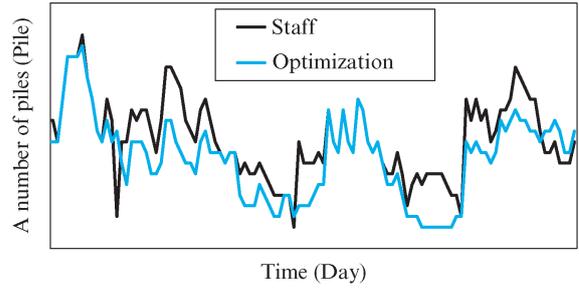


図 11 オペレータと山配置計画最適化システムの山数比較
Fig. 11 Comparison of results by a staff and the optimization

時間で山数の最小化を実現できる。

5.3 効果検証

連続する 2 週間のデータに基づき、従来のオペレータが手作業で作成した計画に従って操業した場合と、本システムに従って操業した場合との山数の推移を図 11 に示す。図中青線は最適化結果による山数の推移を示しており、従来の手作業の計画 (黒線) と比べ、月平均のヤード山数を 4% 削減できた。本システムも前章で述べた鉱石配合計画最適化システムと併せて西日本製鉄所福山地区で工程利用され、効果をあげている。

6. 原料ヤードでの設備管理

6.1 ベルトコンベア異常監視

原料ベルトコンベアは一旦トラブルが発生すると損失が大きく、その設備管理は非常に重要である。そのため、多種多様な多数のセンサで監視することが求められているが、原料ヤードは広い敷地に多数のベルトコンベアが設置されているため、有線でのデータ収集は建設、維持管理ともに膨大なコストがかかる。加えて、多様な対象を適切に監視するセンサの開発・配置が必要となる。そこで、ICT を活用して効率的に異常を検知できるベルトコンベアの監視システムを開発した。

設置するセンサとしては、コンベアベルトの耳切れや縦裂き、穴やキズ等の形状不良を検知するための可視カメラ、駆動部やプーリ軸受の異常を検知するための振動計、温度計、マイクロホン、また、投入シュート部には原料の詰まり状況を監視するための可視カメラ、マイクロホン、温湿度計、振動計等がある。

可視カメラによるコンベアベルトの監視例を図 12 に示す。コンベアベルトの表面をネットワークカメラで撮影し、ベルトの形状不良を画像処理で検知する。画像から形状不良を検出する手法としては、画像処理で特徴量を求めツリー判定する技術⁵⁾が一般的であるが、不良形状の多様性と屋外撮像での外乱を考慮し、大量の画像データを元に異常判定モデルを構築した。開発したモデルは、データを蓄

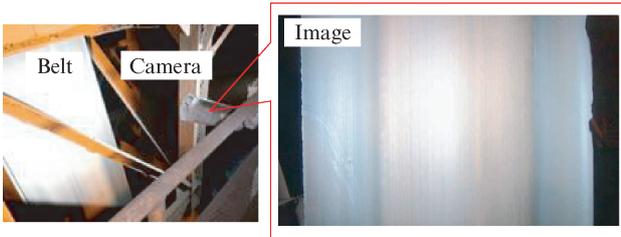


図 12 コンベアベルトの画像監視
Fig. 12 Image monitoring of conveyor belt

積することで、形状不良の有無や性状の判別精度を向上させることが可能である。

6.2 異種データの複合診断

ベルトコンベア設備で防止したい異常やトラブルは、火災をはじめ、ベルト破断、駆動系停止、シュート原料漏れ等多岐にわたるが、個別の異常現象が、複数のセンサ情報や操業情報に影響するのが一般的である。そこで、種類の異なる多数のセンサ情報を複合的に評価することで、異常を予兆段階で精度良く検知し、効率的な保全アクションに活用できる。

多数のセンサ情報を効率的に監視するため、監視対象物の異常度の経時変化を、異常度の大きさに応じてヒートマップ表示した。異常度のスコアは、センサごとに最大値や平均値などの統計量を計算するか、もしくは画像ごとに異常を検知した上で正常状態からの逸脱度合いとして演算する。そして、逸脱度合いに応じて色分けして示すことで、各センサ間の異常の相関を可視化できる。このヒートマップ表示は、ベルト形状不良、振動、音、温度等の多数の異なるデータを時系列に並べて一目で確認できることから、複数のセンサの相関評価に有効である。

ベルトコンベアを複合的に監視するためのシステム概要を図 13 に示す。ベルトコンベアに設置した各種センサの情報をエッジコンピュータで収集し、必要に応じて一定の時間範囲での統計量などを計算する。エッジコンピュータで計測データを事前処理してからデータを伝送することで、時間波形の生データをそのまま伝送するよりも大幅に容量を軽減できる。無線通信により集約されたデータベースサーバのデータから異常度のスコアを演算してヒートマップ表示する。

以上のとおり、種類の異なる多数のデータを一元的に監視することにより、異常を検知できるようになった。

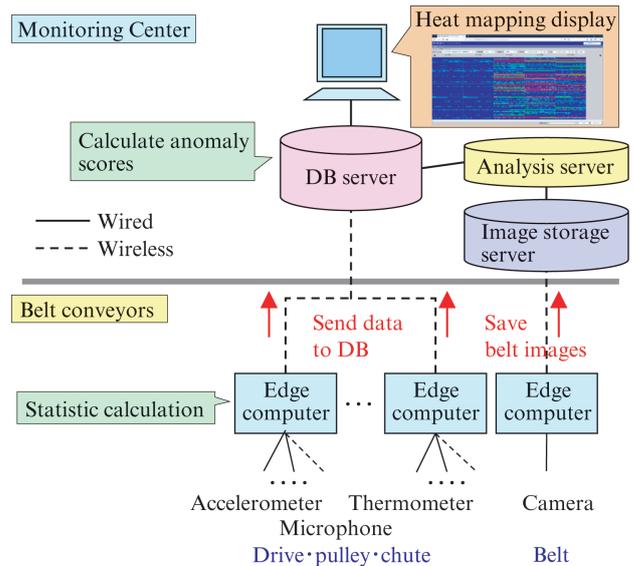


図 13 ベルトコンベア異常監視システム
Fig. 13 Belt conveyor monitoring system

7. おわりに

製鉄所の最上流工程である原料物流・ヤード操業を最適かつ安定的に行うため、DS-CPSを活用した鉱石配船・配合・山配置計画システム、搬送ベルトコンベア設備の異常を早期に発見し未然に故障を防止する監視システムを開発した。

これらのシステムは原料物流・ヤード操業の最適化と安定操業に寄与しており、今後これらの技術を各所に展開していく所存である。

参考文献

- 1) 久保幹夫, 田村明久, 松井知己. 応用数理計画ハンドブック (普及版). 朝倉書店, 2012, 1376 p.
- 2) 熊野徹, 吉成有介, 山口収, 宮沢徹. 数理最適化技術を用いた鉱石配合計画の最適化. 鉄と鋼. 2020, vol. 106, no. 9, p. 611-620.
- 3) Kennedy, J; Eberhart, R. Particle Swarm Optimization, Proc. Int. Cnof. On Neural Netw. 1995, p. 1942-1948.
- 4) Baker, K. R. An experimental study of the effectiveness of rolling schedules in production planning. Decision Science. 1977, vol. 8, p. 19-27.
- 5) 大重貴彦. 表面品質の計測技術. ふえらむ. 2018, vol. 23, p. 164-168.



熊野 徹



山元 隼



石垣 雄亮