

データサイエンスを活用した設備状態監視技術

Condition Monitoring Technology for Steel Making Facilities Utilizing Data Science

館野 純一 TATENO Junichi JFE スチール スチール研究所 副所長 (理事)・博士 (工学)

飯塚 幸理 IIZUKA Yukinori 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長 (理事)・博士 (工学)

要旨

一貫製鉄プロセスでは、設備などのトラブルが発生すると操業への影響が甚大であるため、設備異常を早期に見し未然に故障を防止することが強く求められている。これらの高度な監視、異常診断が求められる製鉄設備に対して、最新の ICT (Information and Communication Technology, 情報通信技術)、AI (Artificial Intelligence, 人工知能) などデータサイエンス技術を活用した設備状態監視の新たな取り組みについて紹介する。

Abstract:

In integrated steel making process, the influence of equipment troubles on production operation is significant. Therefore, it is strongly required to find out faults in the equipment at an early stage and to prevent the damages. New endeavors toward condition monitoring technology of the steel making facilities utilizing data science, such as ICT (Information and Communication Technology) and AI (Artificial Intelligence) are introduced.

1. はじめに

臨海型一貫製鉄所では、原料の荷揚げ・貯蔵から製銑、製鋼、圧延などの製鉄工程を経て、最終製品として出荷するまでの一連の設備が広大な工場敷地に配置されている。国内における製鉄所は、その多くが高度成長期に建設されており、これら鉄鋼生産設備においては、老朽化が進んだものから、新たに導入された最新設備までが存在し、設備メンテナンスへの要求レベルもさまざまである。

一貫製鉄プロセスでは、設備などのトラブルが発生すると操業への影響が甚大であるため、設備異常を早期に見し未然に故障を防止することが強く求められている。製鉄所は基本的に 24 時間操業体制であり、設備が稼働した状態で常時監視して、異常の予兆を検知・対処する必要がある。

鉄鉱石、石炭など製鉄原料の荷揚げ、貯蔵、搬送を行う原料ヤードは広大な敷地に、積み付け、払出しのためのハンドリング機械や多数のベルトコンベア設備が設置されている。また、屋外かつ粉塵などの悪環境下であるため、設備の監視、保守が困難とされてきた。

加熱されたスラブから薄板コイルを製造する熱間圧延設備では、精密な機械設備が直列に配置され、さまざまな製造仕様の製品が順次生産されている。そのため操業条件が変更されながらの設備センシングとなり、データが多様多様となる。それゆえ、異常の予兆を判断することが難しかった。

JFE スチールでは最新の ICT (Information and Communication Technology, 情報通信技術)、AI (Artificial Intelligence, 人工知能) などデータサイエンス技術適用のための基盤整備と技術開発を進めている^{1,2)}。本論文では、上述した高度な監視、異常診断が求められる製鉄設備に対してデータサイエンスを活用した、設備状態監視の新たな取り組みについて紹介する。

2. 原料ヤード設備状態監視

2.1 ベルトコンベア異常監視システム

原料ベルトコンベアはトラブルが一度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、各種センサを多数設置して監視するニーズは高いが、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、その総延長距離が数十 km から数百 km に達する場合もあり、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 ICT を活用した無線によるモニタリングが求められている。

JFE スチール千葉地区でベルトコンベア監視システムの実証試験を実施し、複数センサデータの一括監視および画像データ活用による異常診断について検証を行った。ベルトコンベア異常監視システムの概要を図 1 に示す。原料ヤードにおいて鉱石系および石炭系の複数のベルトコンベアを対象とし、各ベルトコンベアに設置したセンサ情報を無線通信で原料ヤードセンターに集約して異常診断を実施する

2019 年 2 月 15 日受付

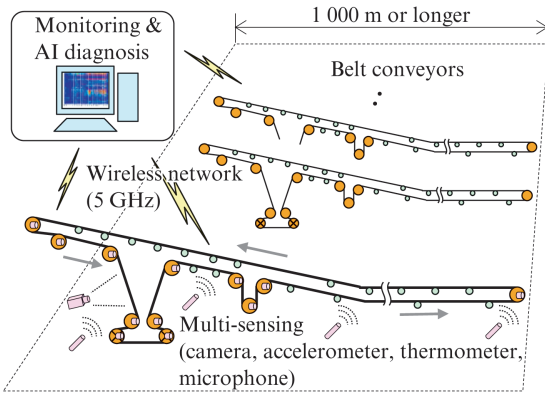


図1 ベルトコンベア異常監視システム

Fig. 1 Belt conveyor monitoring system

システムである。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、駆動部やプリー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。

2.2 無線ネットワークの構築

2.2.1 原料ヤード環境でのネットワーク設計

原料ヤード環境で無線ネットワークを構築するための無線通信方式^{3,4)}を検討した。無線通信における各周波数帯の特徴を表1に示す。一般的に、無線伝送の速度と距離はその周波数帯によって変化する。周波数が低い場合には通信速度は遅くなるが、障害物に強く、通信距離は長くなる。一方で、周波数が高い場合には通信速度は速くなるが、障害物に弱く、通信距離は短くなる。なお、通信速度と距離は無線規格の送信電力やアンテナの特性にも影響される。例えば、Wi-Fiによる無線通信において指向性の高いアンテナを用いた場合、通信する方向が限定される一方で1000m程度の長距離通信が可能となる。

ベルトコンベアの監視において、ベルト表面を可視カメラで撮影した動画データを伝送する必要があることから、大容量の伝送が可能で5 GHz帯の無線LANが有効であると考えられる。5 GHz帯の無線は直進性が高いため、設備が入り組んでいてアクセスポイントを複数設置する必要がある箇所については図2に示すようなマルチホップネットワークを構築するとさらに安定した伝送が可能となる。つまり、複数コンベアを監視する場合、原料山沿いの長距離は1対1のP2P (Peer-to-Peer) 接続で確実に伝送し、アクセスポイントが集中する場合にはマルチホップ接続で通信経路を最適化して伝送する構成が望ましい。

2.2.2 無線通信の基礎検証試験

原料ヤードでの無線通信環境を調査するため、基礎検証試験を実施した。試験条件を表2に示す。また、試験環境

表1 無線通信方式の特徴

Table 1 Wireless communication scheme

	ZigBee IP, Wi-SUN	ZigBee	Wireless LAN (Wi-Fi)	
Frequency band	900 MHz	2.4 GHz	2.4 GHz	5 GHz
International standard	IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.4	IEEE 802.11 b/g	IEEE 802.11 ac
Transmission speed (max)	100 kbps	250 kbps	54 Mbps	6.9 Gbps
Communication range	700 m	50 m	100 m*	100 m*

* Approx. 1 000 m with directional antenna

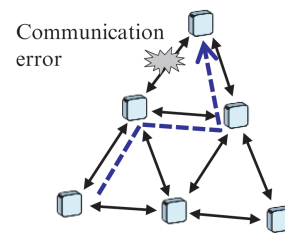


図2 マルチホップネットワーク

Fig. 2 Multi-hop networks

を図3に示す。原料山沿いの直線試験と、高さ11mの原料山を挟んでの山越え試験により5 GHz帯無線の通信速度をアンテナの条件を変えて測定した。

通信速度の測定結果を、通信距離を横軸として図4に示す。通信速度はアンテナの指向性によって顕著に変化し、高指向性アンテナを用いた場合には1000mの長距離であっても非常に速い通信速度を確保できた。一方、指向性の劣る中指向性アンテナあるいは無指向性アンテナの場合には、距離によって通信速度が遅くなる特徴が見られた。1対1のP2P接続と中継ポイントが1つあるホップ接続の場合の比較では、中継有りの場合に若干通信速度が低下することを確認できた。また、無線アクセスポイントの間に障害物がある山越えの場合には、通信距離が短くても通信速度が極端に低下することを確認した。

ベルトコンベアの監視において、コンベア1本当たりに必要な通信速度は20 Mbpsと試算しているが、高指向性アンテナを用いることで原料ヤードの広い範囲を要求速度の10倍以上の速度で余裕のある通信ネットワークを構築できることになる。また、山越え試験で確認したように5 GHz帯無線は障害物に弱い特徴があるため、アクセスポイントが200m以内に集中する場合には中継して通信し安定性を確保することが重要である。

2.3 画像によるベルト異常検知

可視カメラによりコンベアベルトの表面を撮影し、ベルトの形状不良を検知するモデルを作成して精度を検証した。

表 2 無線通信の検証試験条件

Table 2 Test conditions of wireless communication

Condition		Straight		Over pile
		P2P	1 hop	
A	High-directional antenna (3 dB beamwidth: 9°)	200-1 000 m	—	—
B	Medium-directional antenna (3 dB beamwidth: 30°)	200-1 000 m	—	57 m
C	Non-directional antenna	100-1 000 m	100 m+100 m 200 m+200 m 500 m+500 m	—

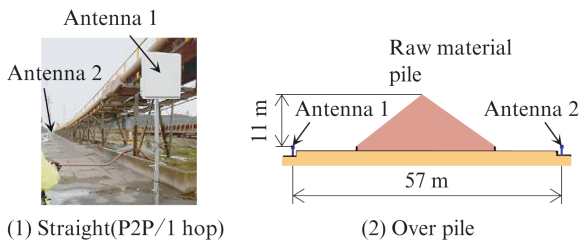


図 3 原料ヤードでの無線試験環境

Fig. 3 Wireless communication test in raw material yard

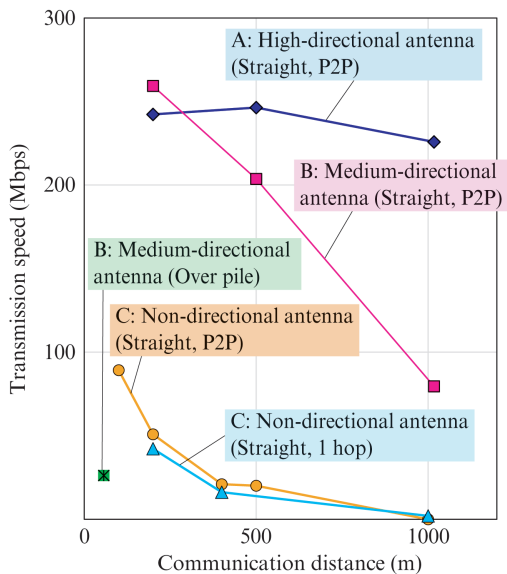


図 4 通信速度の測定結果

Fig. 4 Measurement results of transmission speed

ベルトの撮影状況を図 5 に示す。カメラには、防塵・防水性能を有するネットワークカメラを使用し、ベルトコンベアの速度を考慮してベルトをブレ無く撮影できるようにシャッタースピードを設定した。シャッタースピードが速い場合には明るさが不足するため、照明を複数台設置して必要な光量を確保し、ベルト表面が均一な明るさになるように調整した。

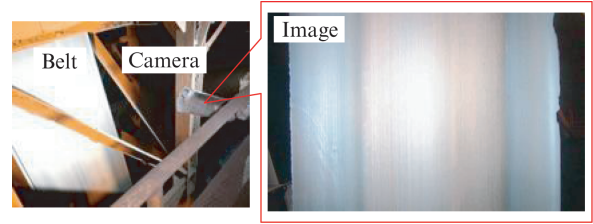


図 5 コンベアベルトの撮影状況

Fig. 5 Taking images of conveyor belt

撮影した画像データを元にして、不良形状の多様性を考慮に入れた異常判定モデルを構築した。異常判定モデルの検証は、事前に撮影した画像の 80% のデータを用いてモデルを構築し、モデルにとっては未知となる残りの 20% のデータを判別することで行った。判別精度は、各画像データについて、モデルによって判別した結果が実際の形状不良の有無や性状と一致するかどうかの正答率によって評価した。その結果、評価用データの全体で正答率は平均 87% であり、初期モデルとして十分な精度を確認できた。

3. 熱間圧延設備異常予知

3.1 データサイエンスによる異常予兆監視

コスト競争力で優位を維持するには設備の安定化が欠かせない。JFE スチールでは、これまで、トラブルの再発を防止するために、そのトラブルに特化した監視モデルを構築するというアプローチをとってきた。しかし、導入から数十年経過した設備の割合が増加したこともあり、想定外のトラブルが増えており、従来のアプローチでは対処できなくなりつつある。一方で、トラブル発生後の事後解析において操業データを確認すると予兆と思われる事例が多々ある。そこで、ビッグデータ解析技術を取入れ、膨大なデータを効率的かつ網羅的に解析することにより、想定外のトラブルに対しても予兆検知が可能な異常監視システムを、熱延プロセスを対象に開発した。

3.2 熱間圧延設備異常監視システムの概要

熱延プロセスの特徴は、多種多様な機器や設備から構成され、さらに階層的な構造を示す点にある。そこで、図 6 に示すように、計器レベル、機器レベル、全体レベルのレベル別監視を構成し、各レベルに適切な手法を適用した。

下位の計器レベルは従来の上下限チェックで対応できる監視である。中位の機器レベルは、主成分分析を用いた波形監視と、データ駆動型モデルを用いた変数間相関監視を主要な監視手法として導入した^{5,6)}。上位の全体レベルは、扱う変数項目が数百以上と膨大になるため、ビッグデータ解析に有利なスパースモデリングの一種である Lasso 回帰⁷⁾に基づく手法を導入した。いずれの場合も正常時の基準に

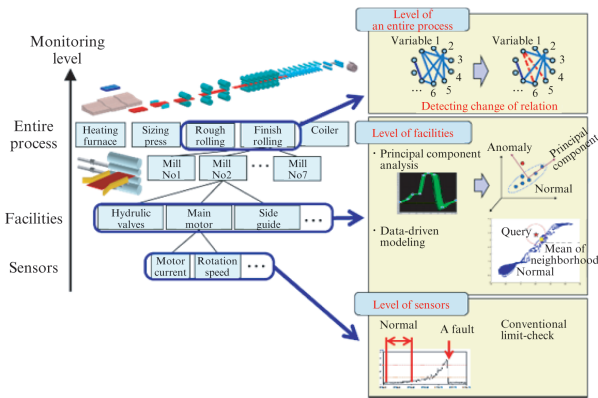


図6 レベル別異常予兆監視

Fig. 6 Concept of anomaly sign detection by hierarchy level of a manufacturing process

対するはずれ度合いを異常度として指標化した。

監視対象が膨大な量となることから、効率的に監視するために、監視対象別の異常度の経時変化を、その大きさに応じてヒートマップ表示した。表示例を図7に示す。縦軸は監視対象、横軸は圧延順であり、1つのセルは圧延材毎に演算した異常度のスコア（平均値などの統計量）を示す。

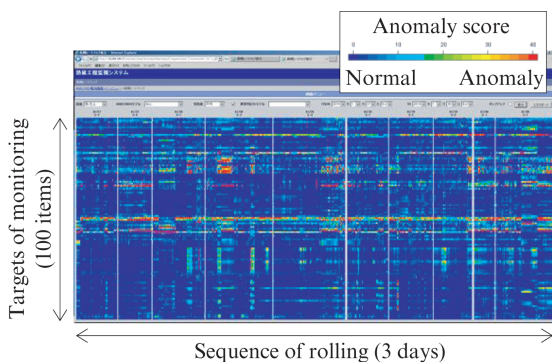


図7 ヒートマップ表示

Fig. 7 An example of heat mapping display

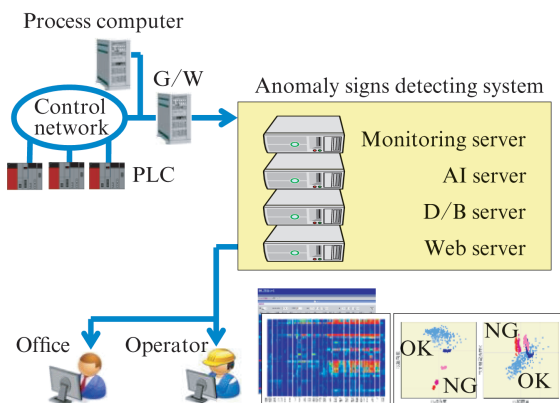


図8 システム構成

Fig. 8 System configuration of anomaly signs detection

本システムの概要を図8に示す。ヒートマップは操作室、事務所等でWeb閲覧可能である。また、着目すべき変数が特定されるので必要に応じて散布図などのグラフの自動作成も可能である。散布図では、正常材とトラブル材の比較を容易に行える。

3.3 全体レベルの監視

熱延全体レベルの監視として適用したLasso回帰によると、微小な影響係数がゼロとなるため不要な説明変数を大幅に削減することが可能となる。概要を図9に示す。あらかじめ準備した正常時のデータに対して変数別の予測モデルを構築し、監視判定時に新たに得られた実績値に対して予測誤差を演算する。判定対象のデータが正常であれば予測誤差は小さく、異常であれば大きくなるため、予測誤差に基づき変数別に異常度を演算できる。

仕上圧延プロセスを対象とした予兆検知例を図10に示す。図に示すのは監視対象の中で圧延機の機械精度状態を示す項目に対する異常度のチャートである。上昇傾向にあった異常度が補修後に低下していることが確認できる。

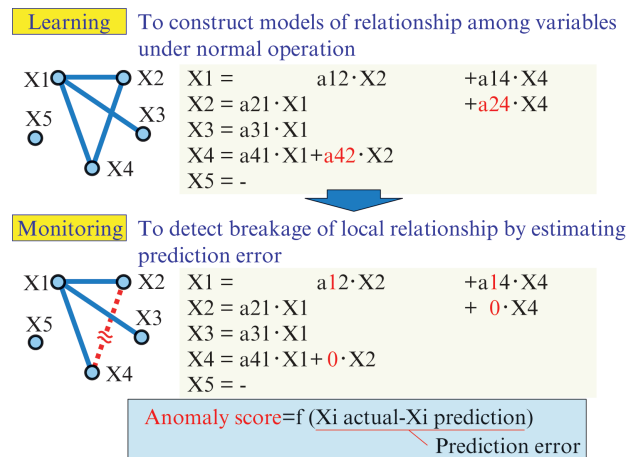


図9 全体レベルの監視

Fig. 9 Application of lasso regression method to detecting anomaly signs of the entire process

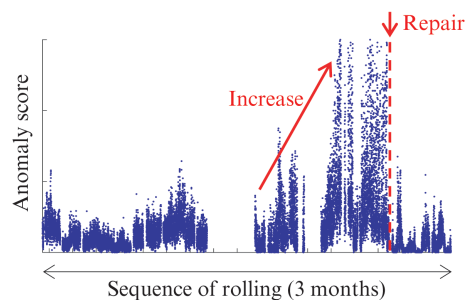


図10 全体監視の予兆検知例

Fig. 10 An example of detecting anomaly signs by the level of the entire process

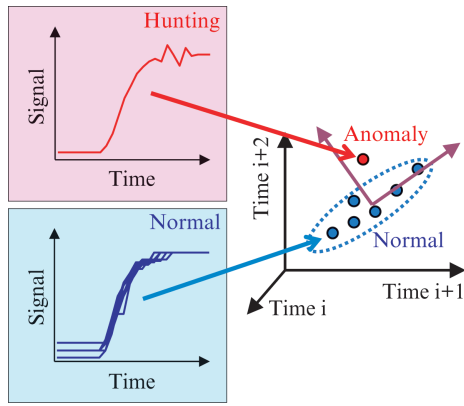


図 11 主成分分析による波形監視

Fig. 11 Application of PCA method to detecting anomaly signs in a facility

3.4 機器単体レベルの監視

ここでは、主成分分析による波形監視に限定して説明する。一定動作を示す設備は、その設備の状態を示す信号の波形が一定であり、異常時には波形が乱れることが多く、これを予兆ととらえる。そこで、主成分分析を用いて波形の乱れを検知し異常診断する方法を開発した⁶⁾。位置決めモータなどは一定動作を示す典型的な設備である。図 11 は位置決めモータで駆動される設備の移動量の波形を示した図である。波形を構成するサンプリング点が k 点あるとすると、1 つの波形は k 次元空間上では 1 点に対応する。隣り合うサンプリング点は相関があるため、正常時の波形は k 次元空間上で互いに相関を有する形で分布する。ここで主成分分析を適用することで、正常時の波形を主成分として抽出することが可能となる。図 11 に示すようにハンティングなどにより波形に乱れが生じるときは、主成分から外れるので主成分に垂直な成分から定義される逸脱度を算出し、監視することで異常予兆を検知できる。

仕上巻取機における予兆検知例として巻取開始直後の設備動作波形を監視した結果を図 12 に示す。ここで、上昇傾向にあった異常度が補修後に低下しているのを確認できる。

4. おわりに

データサイエンス技術を適用した設備状態監視の新たな取り組みについて紹介した。原料ヤード設備の監視ではベルトコンベアを対象に実証試験を行い、広域データ収集に不可欠な無線ネットワークに必要な仕様と、ベルト形状不

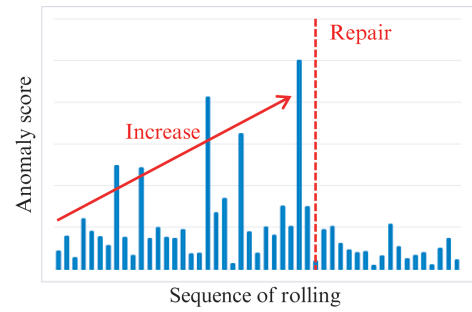


図 12 機器単体の予兆検知例

Fig. 12 An example of detecting anomaly signs by the level of facilities

良の画像判定の実用性を確認した。熱間圧延設備の監視では、階層構造を示す各機器・設備に対するレベル別監視システムを提案し、各レベルに応じて適切な異常度解析手法を適用することにより、網羅的な異常予兆監視ができるシステムを構築した。

今後、これらの技術を各種設備へ展開し、設備異常の未然防止による生産安定化を推進していく。

参考文献

- 1) 風間彰ほか. 鉄鋼プロセスにおけるデジタルデータ活用. ふえらむ. 2018, vol. 23, p. 696-699.
- 2) 飯塚幸理ほか. JFE スチールにおけるデータサイエンス活用技術の開発と展開. ふえらむ. 2018, vol. 23, p. 700-705.
- 3) 山田暁ほか. 無線 LAN 関連システムの国際標準化動向. 電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン. 2016, vol. 10, no. 2, p. 74-79.
- 4) 福井潔ほか. センサネットワーク向け 900 MHz 帯の標準化動向. OKI テクニカルレビュー. 2011, vol. 78, no. 1, p. 104-107.
- 5) Hirata, T. et al. A Fault Detection Technique for the Steel Manufacturing Process Based on a Normal Pattern Library. IFAC-PapersOnLine. Paris, 2015, vol. 48, issue 21, p. 871-876.
- 6) 鳴瀬卓也ほか. 鉄鋼設備のために開発・導入された状態監視技術. トライボロジスト. 2017, vol. 62, no. 11, p. 671-678.
- 7) Tibshirani, R. Regression Shrinkage and Selection via the Lasso. Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological). 1996, vol. 58, issue 1, p. 267-288.



館野 純一



飯塚 幸理