

# ICT を活用したベルトコンベア監視技術

## Belt Conveyor Monitoring System for Effective Maintenance Utilizing ICT

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)  
明智 吉弘 AKECHI Yoshihiro 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

製鉄原料を貯蔵、搬送する原料ヤードでは、多数のベルトコンベアが稼働している。ベルトコンベアにトラブルが発生すると損失が大きくなり、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ことが強く求められている。しかし、原料ヤードが広大なため、複数のベルトコンベアに多数のセンサを設置して監視することは難しかった。そこで、ICT (Information and Communication Technology, 情報通信技術) を活用したベルトコンベアの監視システムを開発した。JFE スチール千葉地区の原料ヤードで実証試験を行い、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、ベルト形状不良の画像判定の実用性を確認した。また、複数のセンサ情報の相関を評価できる、ヒートマップ表示を用いた一元的な監視システムを構築した。

### Abstract:

In the raw material yard of steel works where iron-making materials are stored and conveyed, a number of belt conveyors are in operation. It is strongly required to find out abnormalities in belt conveyor equipment at an early stage and to prevent breakdowns, as the loss to production is large. However, the raw material yard is so large that it is difficult to install many various sensors for monitoring. Therefore, JFE Steel developed a belt conveyor monitoring system utilizing ICT (Information and Communication Technology). Demonstration test was conducted at JFE Steel East Japan Works (Chiba), and specifications necessary for wireless networks, which are indispensable for wide-area data collection, and the usefulness of image judgment system of belt shape defects were confirmed. And, a centralized monitoring system using a heat mapping display to evaluate correlation of multiple types of data was built.

## 1. はじめに

臨海型一貫製鉄所では、原料の荷揚げ・貯蔵から製鉄、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。国内の製鉄所は、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するため、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、設備異常を早期に発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、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、屋外かつ粉塵などの悪環境下でもあるため、設備の監視、保守が困難とされてきた。

JFE スチールでは最新の ICT (Information and Communication Technology, 情報通信技術) や AI (Artificial Intelligence, 人工知能) などのデータサイエンス技術を広く適用するための基盤整備と技術開発を進めている<sup>1,2)</sup>。本論文では、原料ヤードに設置された多数のベルトコンベアを対象に ICT を活用して開発した設備状態監視システムについて紹介する。

## 2. ベルトコンベア異常監視システムの概要

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なり、その設備管理は非常に重要である。そのため、種類の異なる多数のセンサを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 に達する場合もあるため、データを収集する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 を活用した無線モニタリングが求められていた。

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、複数の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。原料ヤードの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システムである。設置するセンサは、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可視カメラ、駆動部やプリー軸受の異常を検知する振動計、温度計、マイクロホン、および投入シュート部の原料の詰まり状況を監視する可視カメラ、マイクロホン、温湿度計、振動計等である。

### 3. 無線ネットワークの構築

#### 3.1 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<sup>3,4)</sup>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。

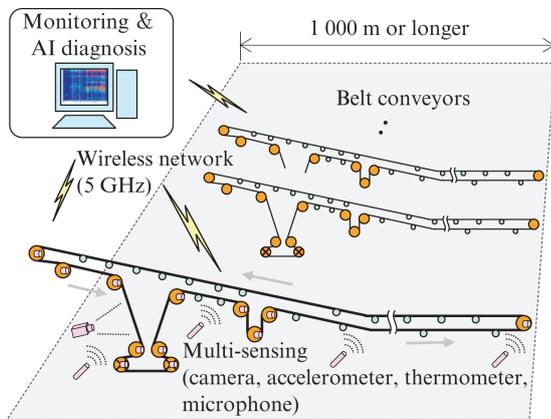


図1 ベルトコンベア異常監視システム

Fig. 1 Belt conveyor monitoring system

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 802.11b/g	IEEE 802.11ac
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

例えば、Wi-Fiによる無線通信で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1 000 m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は、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な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伝送が安定する。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。

#### 3.2 無線通信の基礎検証試験

原料ヤード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、試験環境を図3に示す。原料山沿いの直線試験と、高さ11 mの原料山を挟んでの山越え試験をアンテナの条件を変えて行い、5 GHz帯無線の通信速度を測定した。

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1 000 m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

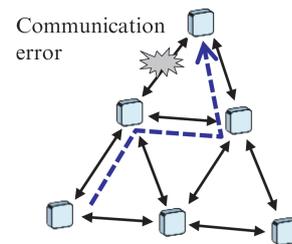


図2 マルチホップネットワーク

Fig. 2 Multi-hop networks

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 (3dB beamwidth: 9°)	200 – 1 000 m	—	—
B Midium-directional antenna (3dB 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	—

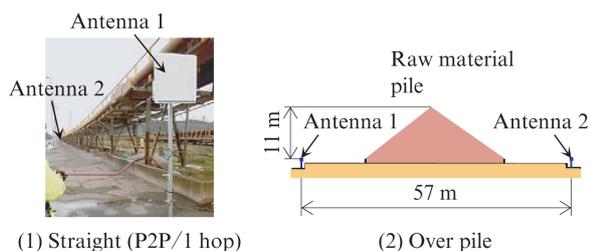


図3 原料ヤードでの無線試験環境

Fig. 3 Wireless communication test in raw material yard

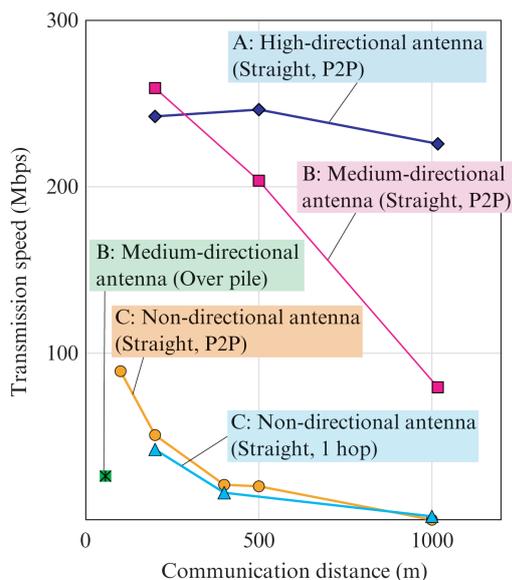


図4 通信速度の測定結果

Fig. 4 Measurement results of transmission speed

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つあるホップ接続との比較では、中継ポイントあ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必要な通信速度を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で要求速度の10倍以上の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、ベルトコンベア乗り継ぎ部のように設備が入り組む状況では、中継して通信し安定性を確保することが重要であり、アクセスポイントが200 m以内であれば、無指向性アンテナを適切に配置することで複数の通信経路を確保しながら、必要な通信速度を実現できる。

#### 4. 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てベルトの形状不良を検知するモデルを作成し、精度を検証した。

ベルトの撮影状況を図5に示す。カメラは、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、ベルトをブレ無く撮影できるシャッタースピードに設定した。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認し、ベルト表面が均一な明るさになるように調整した。

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<sup>5)</sup>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し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。

モデルを構築する際の画像データ量を変えて評価した判別精度を図6に示す。モデル構築に用いるデータ数が多いほど判別精度が高くなり、多様な不良形状に対してより正確に判別できていることが分かる。今回、初期モデルで正答率90%以上の十分な精度を確認でき、さらにデータを蓄積することでより実用的なモデルが構築可能と判断できた。

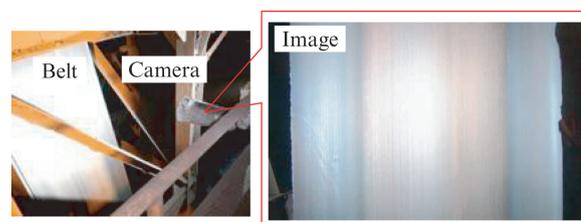


図5 コンベアベルトの撮影状況

Fig. 5 Taking images of conveyor belt

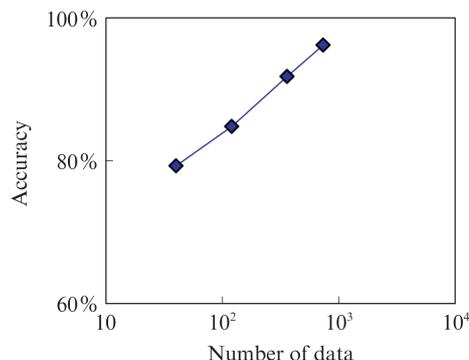


図6 判別精度に対するデータ数の影響

Fig. 6 Influence of number of data on judgment accuracy

## 5. 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、火災を始め、ベルト破断や、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。その相関関係の模式図を図7に示す。例えば、ベルトの破断を防止するためには、ベルトの片寄りや耳切れ、穴開きあるいはプリーとの接触による摩耗が知りたい状態であるが、ベルトの耳切れはベルトの画像データの他にプリーの振動や駆動部の振動や音と相関があると考えられる。従って、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。その表示例を図8に示す。ここで縦軸は監視対象、横軸は時間であり、1つのセルは一定の時間間隔ごとに演算した異常度のスコアを示す。

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し、あるいは画像ごとに異常を検知した上で、正常な状態からの逸脱度合いとして演算する。そして、正常値からの逸脱度合いに応じて、青色、水色、緑色、赤色

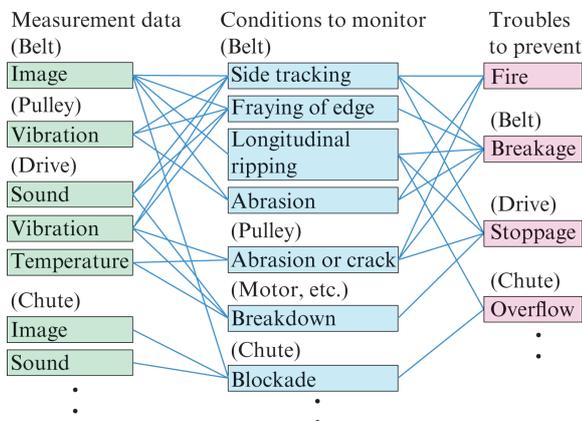


図7 データ相関の模式図

Fig. 7 Schematic diagram of data correlation

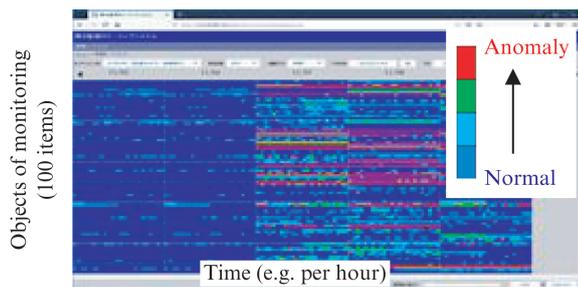


図8 ヒートマップ表示

Fig. 8 Example of heat mapping display

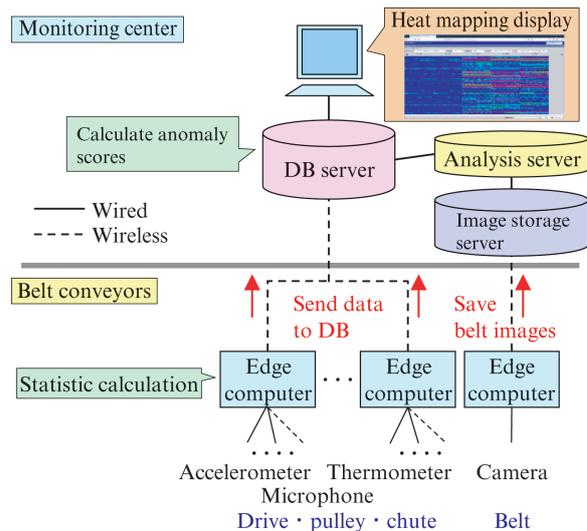


図9 システム構成

Fig. 9 System configuration of integrated monitoring

と順に色で示すことで、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、ベルト形状不良や振動、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。

複合監視システムの概要を図9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。以上のように、種類の異なる多数のデータを一元的に監視することで、異常を早期に検知できる。

## 6. おわりに

原料ヤードのベルトコンベアを対象に、ICTを活用した監視システムを開発した。得られた知見を以下に示す。

- (1) JFE スチール千葉地区の原料ヤードで実証試験を行い、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、ベルト形状不良の画像判定の実用性を確認した。
- (2) 種類の異なる多数のセンサ情報の相関を評価できる、ヒートマップ表示を用いた一元的な監視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) 大重貴彦. 表面品質の計測技術. ふえらむ. 2018, vol. 23, p. 164-168.



石垣 雄亮



明智 吉弘