

## 状態監視システム

## Condition Monitoring System

吉田尚弘・亀田幸則・原靖彦  
YOSHIDA Takahiro・KAMEDA Yukinori・HARA Yasuhiko

## 要 旨

近年、様々な業界で、設備や構造物のメンテナンスが重大な課題となっており、安全性を低下させることなく、膨大なメンテナンス経費の削減が必要となっている。一般的に定期点検で設備の不具合発生を未然に防ぐ予防保全と、不具合が発生した後に補修や修理をする事後保全の二通りのメンテナンスが実施されているが、IoT/ビッグデータの活用によるメンテナンスのスマート化が注目されている。スマートメンテナンスでは、センサネットワークで設備の状態を監視し、必要に応じてメンテナンスを実施する予知保全が導入されている。予知保全では、データを高頻度で取得可能であるため、設備の劣化傾向などを予防保全よりも早期に把握できる。

油圧機器に着目した場合、トラブルの約6割は作動油の酸化や汚損といった劣化が原因と言われており、油の状態変化をリアルタイムに検出することで、定期的な採油による性状分析を必要とせず、油圧機器の異常を事前に検知できる可能性がある。

機器の寿命や故障予測を行うためには、フィールドデータを継続的に収集、蓄積し、分析モデルを構築していく必要がある。生産設備の予知保全、寿命予測といった故障診断による新規ビジネス創出を目指し、開発したワイヤレス通信端末と油状態センサを適用してフィールドデータ収集が可能な状態監視システムを構築した。

## Abstract

In recent years, maintenance of equipment and structures has become a serious issue in various industries, and there is a need to reduce enormous maintenance costs without degrading safety. In general, two types of maintenance are performed: preventive maintenance to proactively prevent equipment failures through regular inspection, and post-maintenance to carry out repairs after a failure occurs. The approach of achieving smarter maintenance by using IoT and big data is currently garnering attention. Smart maintenance employs predictive maintenance in which the condition of equipment is monitored by a sensor network and maintenance is performed when necessary. In predictive maintenance, data can be acquired at high frequency, so the deterioration trends of equipment can be ascertained earlier than with preventive maintenance.

About 60% of troubles with hydraulic equipment are said to be caused by deterioration such as oxidation or fouling of hydraulic oil. By detecting changes in the condition of oil in real time, there is a possibility that abnormalities in hydraulic equipment can be detected in advance, without the need for periodic oil collection and property analysis.

In order to predict the service life and failure of equipment, it is necessary to continuously collect and accumulate field data, and build an analysis model. KYB has developed a condition monitoring system enabling collection of field data by using wireless communication terminals and oil condition sensors, which were developed with the aim of creating new businesses based on failure diagnosis, such as predictive maintenance and service life prediction of production equipment.

## 1 緒言

モノとインターネットの融合により新たな付加価値を創造するIoT（Internet of Things）への注目が高まり、製品の付加価値向上の動きが進んでいる。

特にデジタル時代は、つながることで業界の境目がなくなってくるため、その領域は他の業界から次々に参入してくる可能性があり、隣接市場や融合する業界・商材を意識した視点が重要と言われている。また近年、様々な業界で、設備や構造物のメンテナンスが重大な課題となっており、安全性を低下させることなく、膨大なメンテナンス経費の削減が必要となっている。

一般的に定期点検で設備の不具合発生を未然に防ぐ予防保全と、不具合が発生した後に補修や修理をする事後保全の二通りのメンテナンスが実施されているが、IoT/ビッグデータの活用によるメンテナンスのスマート化が注目されている。スマートメンテナンスでは、センサネットワークで設備の状態を監視し、必要に応じてメンテナンスを実施する予知保全が導入され、データを高頻度で取得するため、設備の劣化傾向などを予防保全よりも早期に把握できる。また、劣化が顕著な部分をいち早く交換したり、劣化や故障がみられない部分は交換周期を延伸することができるため、メンテナンスの質を下げずに負荷を減らせる可能性がある<sup>1)</sup>。

一般的な油圧機器のトラブル原因の約6割は作動油の劣化が原因であり、作動油の状態変化をオンラインで把握することで、故障の未然防止、ダウンタイム削減が期待できる<sup>2)</sup>。設備の経年劣化と障害の関係を表すP-Fカーブを図1に示す。曲線上のP点は、設備の劣化や変化を初めて検出できるポイントで、F点は設備やシステムの障害が発生するポイントである。P点とF点の間が予期せぬイベントを回避するチャンスであり、検出するタイミングが早いほど、障害を修正できる期間が長くなる。従来の巡回点検ではデータの品質及び継続性の問題により劣化予測モデル構築が困難であり、状態監視では劣化や変化を検出可能な適切なデータ収集頻度を考慮する必要がある。従来からの作業員による採油/油分析に対し、油状態センサを用いたリアルタイムの監視を行うことで、P点をより手前にするのが期待できる。また、振動センサなどとの組合せにより、機器の状態を内部から詳細に把握することが可能となる。

機器の寿命や故障予測を行うためには、フィールドデータを継続的に収集、蓄積し、分析モデルを構築していく必要があるが、将来、メンテナンスやサービス分野に展開していくためには、状態監視システムを対象設備に展開し、分析、予測のノウハウを蓄

積する必要がある。各種センサを適用した状態監視システムを社内へ広く展開するため、開発したワイヤレス通信端末と油状態センサを適用してフィールドデータ収集が可能な状態監視システムを構築した。

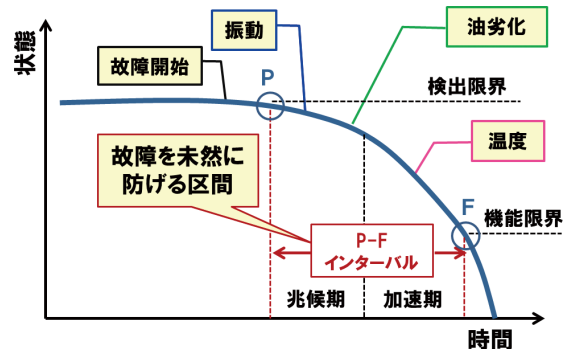


図1 P-Fカーブ

## 2 状態監視システム

### 2.1 状態監視システムの課題

寿命予測と故障診断による新規ビジネス創出が最終ゴールであるが、収集したデータから価値を生み出せるか、という命題に対し、実現方法とその効果が予測困難なため、データ収集・蓄積・活用における事前の要件定義が難しいという、IoTの活用における本質的な課題がある。機器のどんな種類の状態を分析すれば故障や余寿命予測につながるか、どんなデータ分析の手法が有効かは、事前に明確な仕様を決めることが難しいため、データ収集可能なプロトタイプを開発し、概念実証（PoC：Proof of Concept）のステップで、実現性と有効性の確認を行っていく必要がある。また、開発初期から大規模なシステムを構築しようとする、システム開発に多額の初期投資がかかるため、小規模なIoTシステム構築によるスモールスタートで、導入効果を確認しながら進める必要がある。

### 2.2 システム概要

本システムは、油圧機器や設備、試験機等に設置され、近距離ワイヤレス通信にて各種センサデータを収集する機能を有する。機器の寿命や故障を予測する分析モデルの構築につなげるため、フィールドデータを継続して収集、蓄積する必要がある。ワイヤレス通信のメリットである設置の柔軟性を活かし、実現性と有効性をスモールスタートで検証できるように、インターネットや3G回線などは使用しない、図2のような構成とした。ワイヤレス通信端末に接続された各種センサにて、対象機器の状態（振動、温度、油状態など）を検出する。検出した信号は、ワイヤレスセンサネットワークによりIoT-Gateway

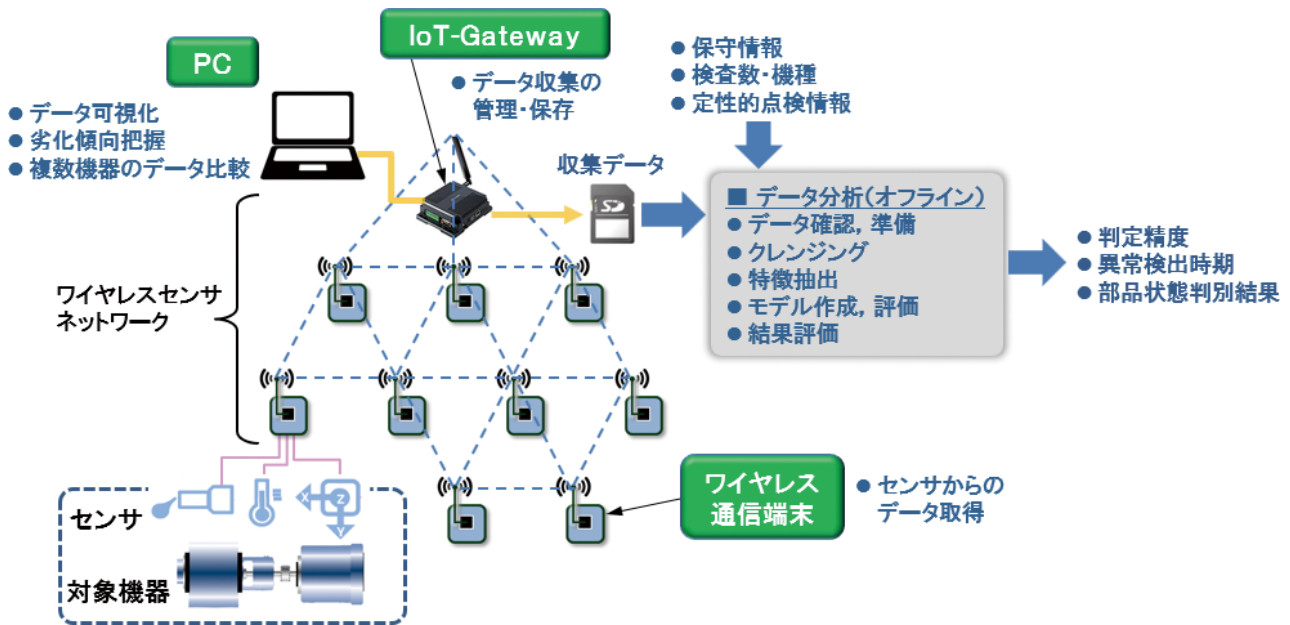


図2 状態監視システム構成

に集約される。有線LANで接続されたPCで収集したデータをグラフ等で見える化し、各データの経時変化、正常状態の把握、複数機器のデータ比較、劣化の傾向分析などが可能である。

## 2.3 ワイヤレス通信端末

### 2.3.1 無線モジュール

無線通信では空間に放射した電磁波を利用するため、有線通信にはない特別な課題を有する。特に通信の信頼性に直接関連する課題としては、次の3つが挙げられる。

- (1)距離の2乗に比例した信号強度の減衰
- (2)送信電磁波の反射による干渉
- (3)他の無線通信や電磁波ノイズによる妨害

また、実際の運用時の課題としては、長期通信安定性やセンサを含めた動作安定性、センサと通信の安定動作に関わる消費電力、セキュリティなどが挙げられる。工場などの金属配管や装置に囲まれた見通しが利かないエリアでは、無線通信経路上に障害物があるため通信品質の悪化が懸念され、マルチパスフェージング<sup>注1)</sup>は環境内の各物体の位置と性質に左右されるため、実際の環境では予測が不可能である。さらに、無線LANなどの別ネットワークとの干渉、ドア開閉やトラック、フォークリフト、作業員などの工場内移動体の影響も考えられる。システム運用開始時に通信できない等のトラブルを予防するためには、システムの設計・構築時に、実環境下での通信環境評価、確認を行うことが重要となる。

無線モジュールを選定するにあたり、周波数帯域の異なる複数のモジュールについて、実環境での各種性能比較評価を行い、産業用ワイヤレスセンサ

ネットワークに必要な接続信頼性、長期電池駆動、長期安定性、セキュリティ、設置の容易さの5つの特性を満足する方式であるIEEE 802.15.4e規格準拠のSmartMesh IP<sup>TM注2)</sup>(アナログ・デバイセズ社)を採用した。特長としては、99.999%以上の通信データ信頼性と、業界最高レベルの超低消費電力であり、これらを実現するため、TSCH(Time Slotted Channel Hopping)という時刻同期のメッシュ型ネットワーク技術を適用している点である。周波数(チャネル)、時間、空間(送信先)の3つの冗長性を利用することで、マルチパスフェージングの影響が懸念される環境でも通信の信頼性を高めることができる方式であり、産業用の状態監視においては、例えばEmerson社の無線フィールド機器では、35億デバイス時間以上の累計稼働実績がある通信方式である<sup>3),4)</sup>。

注1) 様々な経路で受信点に到達した電波が互いに干渉し、電波の受信レベルの強弱に影響を与える現象のこと。

注2) SmartMesh IPはアナログ・デバイセズ社の商標です。

### 2.3.2 ワイヤレス通信端末本体

ワイヤレス通信端末の外観を写真1に示す。屋外への設置、油飛散や粉塵等が懸念される環境での使用を想定し、保護等級IP66を満足する筐体構造とした。本体は設置、移設を容易にするため、背面のマグネットで固定できる方法をとっているが、ねじ又はベルトでの固定にも対応できる構造とした。主な仕様を表1に示す。

### 2.3.3 電池、電源回路

電源電圧は2.2~3.7Vで動作可能としているため、プラントの無線機器で実績のある塩化チオニルリチウム電池(公称電圧:3.6V)も使用可能であるが、



写真1 ワイヤレス通信端末

表1 ワイヤレス通信端末の主な仕様

項目	主な仕様
無線通信方式	SmartMesh IP™ (アナログ・デバイス) 通信周波数：2.4GHz、通信速度：250kbps 接続端末数：100台 (max)
センサ入力	アナログ：2ch、デジタル：2ch (SPI, I <sup>2</sup> C) 油状態センサ接続時はCAN→SPI変換
測定データ	加速度実効値、温度、油状態値 基板上加速度、基板上温度、電池電圧
データ送信間隔	15分 (1分～24時間で設定可能)
本体構造	保護等級IP66
電源電圧	DC3.0V (DC2.2～3.7V) 二酸化マンガリチウム電池
動作温度	-30～85℃
外形寸法、質量	W68×D92×H42mm、本体：約230g

原理試作時に評価した低温特性に優れる二酸化マンガリチウム電池 (公称電圧：3.0V) を標準搭載とした。電池容量は7,500mAh (2,500mAh×3cell) で、データ送信間隔15分のとき、電池寿命は5年以上を目標とした。

低温時の電池電圧低下やセンサ供給電源電圧の確保のため、電池からの電圧を昇降圧DC/DCコンバータで昇圧し、3.3Vを生成して後段の回路に供給している。センサへの供給電源やインタフェース部は必要な時だけ電源供給できるように、負荷スイッチにてオン、オフ制御する。また、電池電圧を抵抗分圧して電圧監視する部分にも負荷スイッチを用いて、必要な時だけ電圧をモニタするようにし、低消費電流化を図った。消費電流が小さい振動センサや温度センサを接続する場合は電池駆動とし、油状態センサなどの消費電流が大きいセンサの信号を入力する場合は、外部電源よりセンサ及び通信端末に電源を供給する。

## 2.4 油状態センサ

油圧機器などで使われる作動油は、時間基準や性

状分析での劣化管理を行っており、定期的な作動油の交換や採油が必要となっている。また、油圧機器のトラブルの約6割は作動油の酸化や汚損といった劣化が原因と言われている。このようなことから、油の状態変化をリアルタイムに検出することで、定期的な採油による性状分析が不要となり、更に作動油の交換サイクルの最適化が可能となると考えられる。また、油の劣化のみならず油圧機器の異常を検知できると考え、油状態センサの開発に着手した。

### 2.4.1 検出パラメータ

一般的に作動油の性状分析は、専門の分析機関にて行われており、ユーザーは油圧機器より採油し性状分析を依頼する。分析機関では作動油の性状分析項目として、酸化劣化の指標である全酸価や、汚損に関連する汚染度、金属元素、水分といった項目の分析を行う。これら項目と油状態センサで検出する電気的パラメータとの関係性を調査すると、図3のようになり、各分析項目と比誘電率及び導電率との間に関係性があることが分かっている。このことから、比誘電率と導電率を検出することで油の状態変化を推定できると考え、油状態センサの検出パラメータとして比誘電率と導電率を採用している。

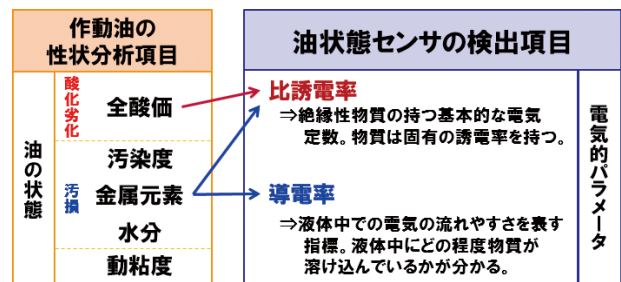


図3 作動油分析項目とセンサ検出項目との関係

### 2.4.2 検出原理

油状態センサの比誘電率と導電率の検出原理を図4に示す。油に浸漬した電極に電圧を印加して、この応答から測定対象である作動油の静電容量と抵抗値を検出する。検出された静電容量と抵抗値から、測定対象である作動油の比誘電率と導電率を算出する。また、比誘電率と導電率は温度依存性があるため、油温と事前に作動油の温度特性を測定して作成した補正マップを用いて温度補正を行い、40℃相当の値に補正した比誘電率と導電率を出力する。

### 2.4.3 電極構造、検出回路構成

油状態センサの検出値である比誘電率と導電率を検出する電極形状は小型かつ高感度を実現するため、内側電極と外側電極の2つの円筒電極を同軸上に配置する同軸円筒電極形状を採用した。電極形状の検

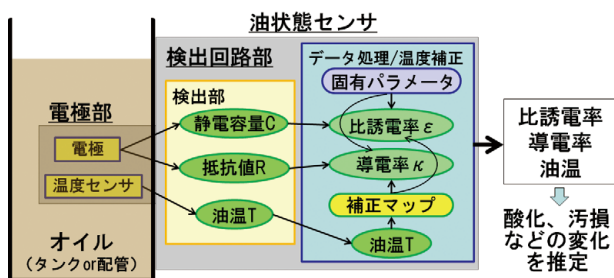


図4 原理試作センサの検出原理 模式図



写真2 油状態センサ

討においては、電界解析を活用して電極のサイズ、形状の最適化を図った（図5）。内側電極と外側電極の間に油を導くことで、油の静電容量と抵抗値の測定を実現する構造となっている。また、内側電極と外側電極は樹脂製の電極ガイド部品で固定されており、内側電極と外側電極の位置固定及び絶縁性の確保を行っている。微弱な電気信号を扱うため、電極の外側に電極カバーを設け、外来ノイズなどへの対策を行っている。検出回路部に関しては、静電容量の検出に汎用の静電容量検出ICを用いて、回路の簡略化及び低コスト化を図った。抵抗値の検出はオペアンプ等を組合せ電極部に流れる微小電流を検出することにより実現した。静電容量と抵抗値の検出結果をマイコンで演算処理し、比誘電率、導電率、油温を出力する回路構成とした。

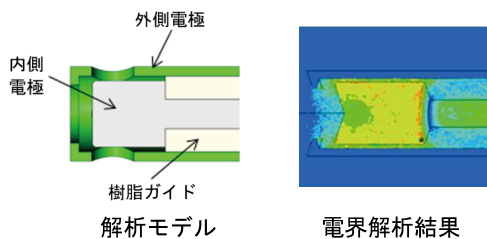


図5 解析例

### 2.4.4 仕様

油状態センサの主な仕様を表2、外観を写真2に示す。サイズは検出部を含みφ42×87mmであり、油圧機器への取り付けを考慮して小型化を図っている。また、電源電圧はDC9～32V、センサ出力としてCANを採用し、建設機械などへの搭載も考慮した仕様となっている。

表2 油状態センサの主な仕様

項目	開発センサ仕様
検出項目	比誘電率, 導電率, 油温
サイズ	φ42×87mm (コネクタ部除く)
電源電圧	DC9～32V
センサ出力	CAN
動作温度範囲	-20～100℃
耐圧性	1.0MPa以下

### 2.4.5 検出例

開発した油状態センサで実際の作動油を測定した結果として、検出値である比誘電率と分析機関での性状分析結果である全酸価との関係を図6に示す。また、検出値である導電率と分析機関での性状分析結果である水分量との関係を図7に示す。センサ検出値である比誘電率と導電率にて、油の酸化劣化や水分量の傾向を推定できると考えられる。

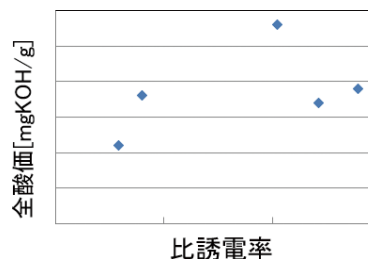


図6 比誘電率と全酸価の関係

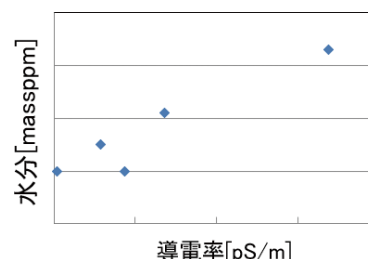


図7 導電率と水分量の関係

## 3 データ収集・分析

### 3.1 フィールドデータ収集

対象機器の状態量の変化を定量的に把握することから始める必要があるため、開発したセンサやワイヤレス通信端末を工場内の生産設備や実験部門の耐久試験機等に設置し、データの収集と可視化を行っている。異常を見つけるための測定に多大な労力をかけているのは定着化が進まないため、まずベストコンディションで運転されていない機器を早く見つけて着手する必要がある。対象機器の選定については設備管理部門にヒアリングを行い、比較的故障の発生頻度が高い設備を対象とした。収集したデータの

例を図8, 図9に示す。

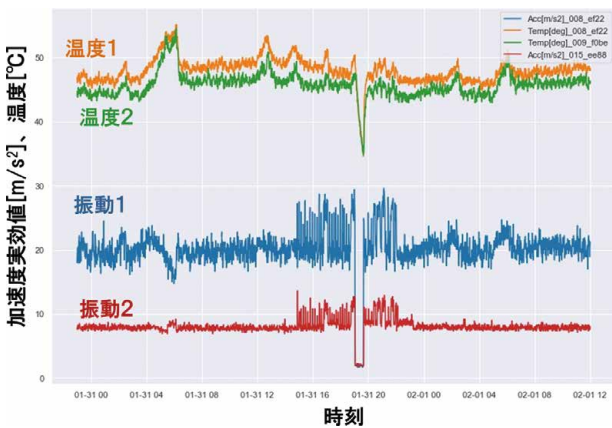


図8 収集データの例 (振動, 温度)

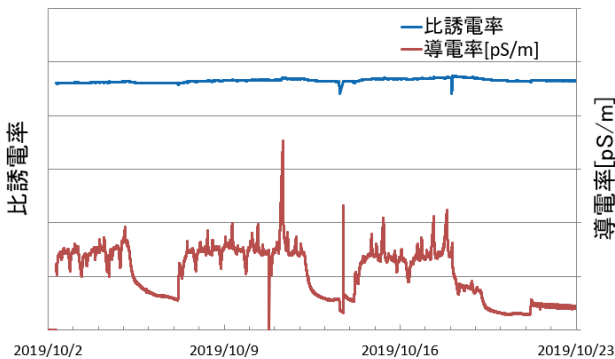


図9 収集データの例 (油状態)

IoT-Gatewayに有線LANで接続されたPCで, 収集データの可視化や端末の状態管理などを行うことができるPCソフトを作成した。データ収集と並行して, 各データの経時変化, 劣化の傾向分析などを行うことが可能である。表示例を図10に示す。

データの収集と可視化を行うことで, これまで製造部門や設備管理部門も気付かなかったような様々な気付きがあり, 設備の改善や安全性向上など, 製造現場にフィードバックできるものもある。油状態センサの検出値を用いて, オイルフィルタ交換や更油時期など, 適切なタイミングで保守を促すことも可能である。

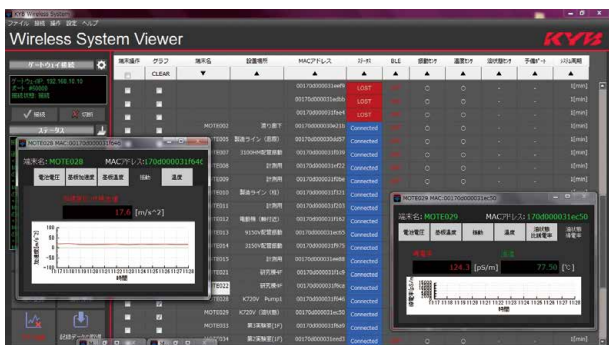


図10 PCソフト表示例

### 3.2 通信品質

ワイヤレス通信端末の設置箇所と伝送経路の例を図11に示す。センサを接続しない中継端末も合わせて合計27台の端末でメッシュネットワークを構成した。各端末からのデータはマルチホップ<sup>注3)</sup>でIoT-Gatewayに集約するようにし, データ送信間隔1分で継続してデータ収集を行っている。

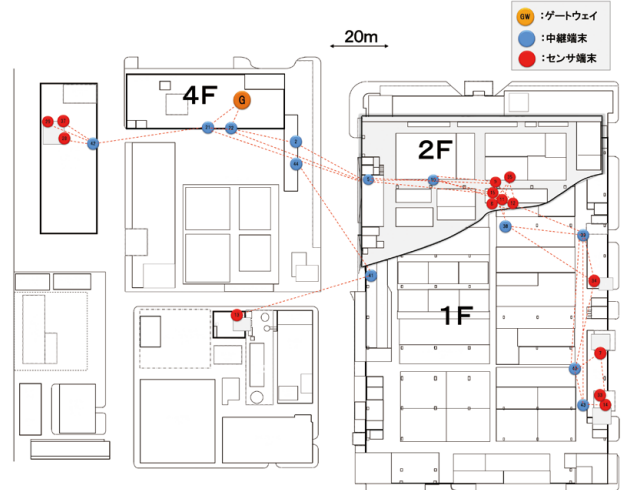


図11 通信端末の設置箇所と伝送経路の例

ネットワークを構築してから約20日後の各端末間の受信電力 (電波強度) と経路安定性の関係を求めた結果を図12に示す。設定したデータ送信間隔で各端末間が通信したときの平均受信電力と経路安定性の値を全てプロットしたものである。赤点はIoT-Gatewayと端末間の経路 (1ホップ目) のデータで, IoT-Gatewayにはハードウェアまたは電波の干渉に関して, 他の端末とは異なる点があるため, 分けて表示した。経路安定性  $S$  [%] は, 送信パケット数  $numTxPk$  と送信失敗回数  $numTxFail$  を用いて, 式(1)より求めたもので, リトライなしで全て1回で送信できれば  $S$  は100%, 2回に1回リトライが入る状態では50%である<sup>5)</sup>。図12の右側のヒストグラムより, 経路の大部分が経路安定性80%以上である。また, 受信電力が  $-70\text{dBm}$  より低くても経路安定性が高い経路が確保できているため, 微弱信号の受信に苦勞している端末はなく, 配置した端末間の通信状態は良好であることを確認した。

$$S = 100 \times \left( 1 - \frac{numTxFail}{numTxPk} \right) \quad (1)$$

注3) 複数の無線端末がそれぞれの隣接する無線端末を経由してデータを伝送していく通信技術。

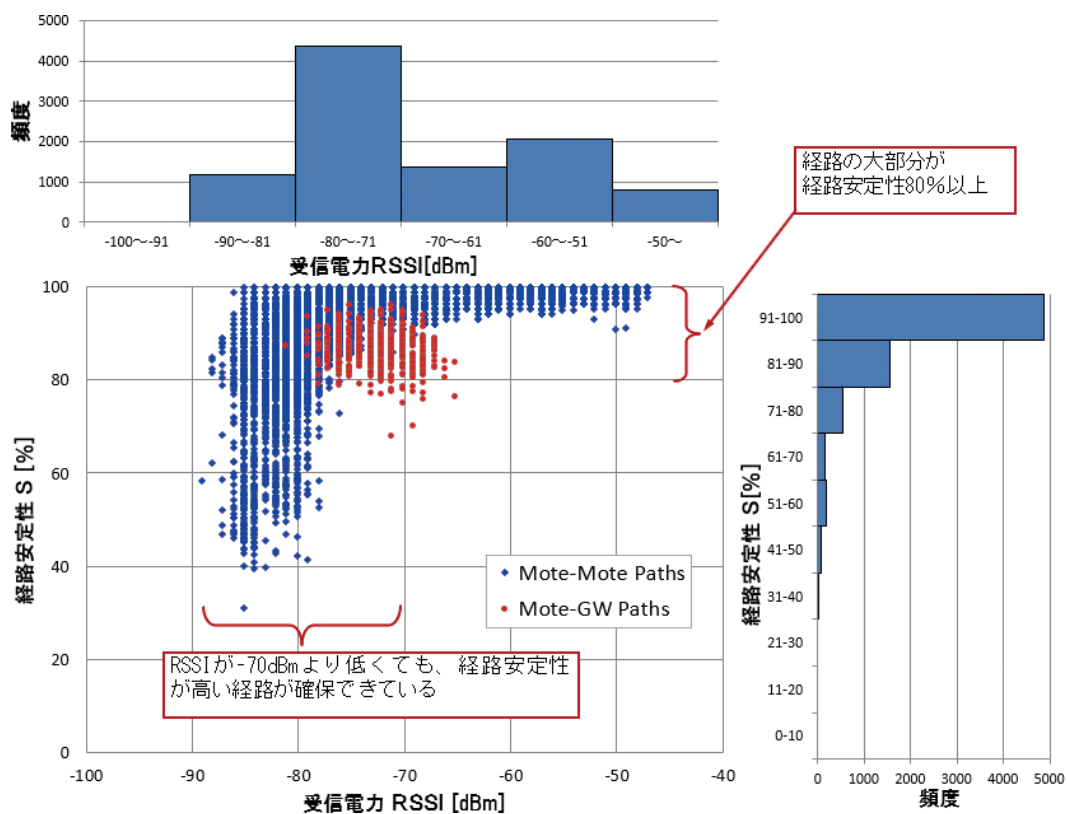


図12 ワイヤレス通信端末の受信電力と経路安定性（ネットワーク構築から20日後）

### 3.3 データ分析

生産設備の構成機器の一つである油圧ポンプについて、故障発生前後の収集データを用いてデータ分析を実施した。収集した各センサデータから特徴量の抽出と選定を行い、対象機器が正常か否かを判定するために機械学習を活用した。作成した機械学習モデルのイメージを図13に示す。油圧ポンプの特定の故障モードについて、限定された条件下ではあるが、高い検出精度で正常と異常の判別ができることを確認した。故障や異常のデータが少ないため、現状では故障の予兆検出には至っていないが、機械学習の直接的な教師データが得られるように、現在は状態監視の対象機器を増やし、フィールドデータ収集を継続中である。

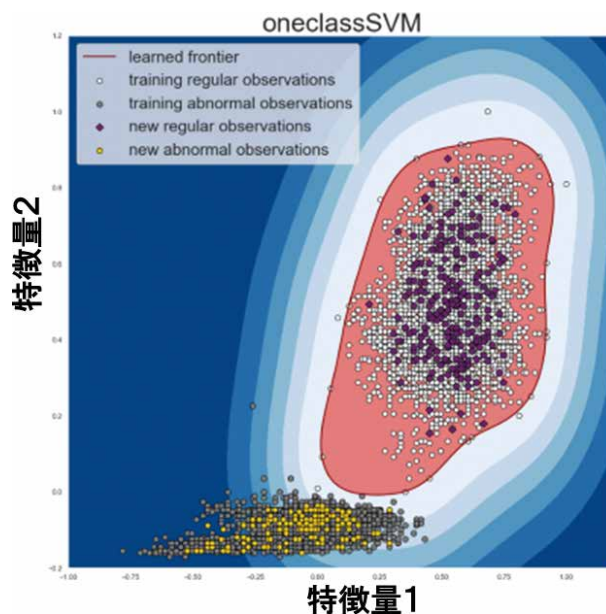


図13 機械学習モデルのイメージ

## 4 将来展望

現在は2.2で示した構成でフィールドデータ収集とデータ分析を個別に対応しているが、将来はクラウド化し、設計、検査、保守、運用、過去不具合等の複数データとの組み合わせやデータ分析の効率化、AIを活用した対象機器の故障予測や寿命予測モデルの最適化が行えるような状態監視システム構築を目指す。

油状態センサの他に、各種状態監視用センサの開

発を並行して進めているが、捉えたい現象の把握と特徴抽出のため、事象の因果関係把握、センサの取り付け位置や対象機器内部機構/外部環境要因見極め等のノウハウを蓄積する必要がある。

生産設備の予知保全が必要という認識はあるものの、導入及び運用時には様々な課題があり、予知保全の仕組みを本格的に運用している例はまだ少ない

のが実情である。下記①～③を目指す姿とし、装置の稼働率向上、設備の生産性向上を実現したいと考える。

- ①安価で稼働に影響しないセンシング手段確立
- ②収集したデータを分析して故障予兆を検出
- ③工場全体にわたり多くの設備を監視するため安価なシステムで実現できている

状態監視システムを社内に広く展開し、収集データから分析、判断のノウハウを蓄積することで、将来は油圧機器製品の故障予知や寿命予測による新規ビジネス創出につなげたい。機器（製品）の状態監視を行うことで、販売後も連続的、継続的に顧客を把握し、関係を維持することができる。使用状況の把握や収集データ解析による洞察や発見は、機器単位の故障診断や、より確実なフェイルセーフ機能の実現、機器の適切な運用提案（高効率、安全、延命等）、新製品、代替製品の提案、保守部品市場の開拓など、コンサルティングや新たなビジネス価値の創出・提供につながる可能性がある。また、実使用環境から得られた情報や知見は、現行機種改良や新規開発にもフィードバックすることができる。

状態監視用に開発した各種センサや、故障予兆検出のノウハウを油圧機器に組み込むことができれば、機器の状態監視だけでなく、母機の稼働状態や周囲環境などを把握するプローブデバイスとして機能し、システム全体、あるいは母機のヘルスマonitoringへの活用も期待できる。

## 5 結言

生産設備の予知保全、寿命予測と故障診断による

新規ビジネス創出を目指し、開発したワイヤレス通信端末と油状態センサを適用してフィールドデータ収集が可能な状態監視システムを構築した。データを「見る」ことは、多くの知見や考察を生み出してくれるため、状態監視の適用対象を増やし、フィールドデータ収集を継続して実施し、収集データから分析、判断のノウハウを蓄積していく。

IoTで価値の本質をサービスへとシフトし、モノは購入した後も継続的に価値を向上し続けることができるようになる。あらゆるモノとモノがつながるようになり、ますます便利な世の中に発展していくが、売上と収益を上げられるビジネスモデル構築を実現するには、まず人と人がつながることが重要であると感じる。可視化する情報、解決すべき課題、得られる価値を明確にして、社内関連部門と連携した活動を進めていく。

## 参考文献

- 1) 日経BP社：「感じる鉄道第1部 スマート化する鉄道、IoT活用でより安全・便利に」日経エレクトロニクス、(2016年3月号)。
- 2) 風間俊治：作動油の劣化とその対策について、フルードパワーシステム学会誌、Vol. 47, No4, p 7-11 (2016)。
- 3) 日経BP社：NE Academy「信頼性の高い無線センサーネットワーク構築の勘所」
- 4) 小林純一：勝者のIoT戦略、日経BP社、(2016年)。
- 5) Dust Networks: SmartMesh IP Application Notes, Revision 15, Analog Devices, Inc.

## 著者



吉田 尚弘

2011年入社。技術本部基盤技術研究所情報技術研究室。主に状態監視用センサの開発に従事。



亀田 幸則

2005年入社。技術本部基盤技術研究所情報技術研究室主幹研究員。主に状態監視用センサの開発に従事。



原 靖彦

1989年入社。技術本部基盤技術研究所情報技術研究室長兼DX推進部専任課長。主に電子機器の開発に従事。