

技術論文

製鉄設備における診断技術の現状と今後

Present Status and Future of Equipment Diagnosis Technologies for Steel-making Plants

山 本 豊 樹*
Toyoki YAMAMOTO和 田 和 実
Kazumichi WADA鹿 子 慎太郎
Shintaro KANOKO樋 口 暁
Akira HIGUCHI

抄 録

新日鐵住金(株)の設備診断技術は、40 数年前に国内製造業でいち早く基礎・応用研究を開始し、オン・オフラインの当該機器の開発から実用化まで新日鐵住金グループ全体で進めてきた。また、それらの技術や装置を現場に導入活用し、予知保全が整備現場で定着している。一方、稼働年数の長い設備を安定且つ高生産維持すべく保全活動として、近年設備診断技術の有用性、重要性がますます高くなっている。直近の開発概要と今後の方向性について述べた。

Abstract

Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation (NSSMC) has started to research equipment diagnostic technologies, and has been a leader in developing and applying fundamental manufacturing technologies for about forty years. On-line/off-line diagnostic systems, which have been developed by whole consolidated NSSMC, have been put to use in the field. So far, the technologies and system have been promoted for introduction to a variety of fields and put to practical use in predictive maintenance activities. Meanwhile, they have been increasingly necessary and important to maintain equipment operating under long-term stress and to maintain to high production through maintenance activities. In this paper, we outline our recent development results and future direction.

1. 緒 言

鉄鋼業は、原料荷揚げから製鉄、製鋼、圧延の各製造工程を経て、製品出荷に至るまで、極めて多岐にわたる設備で構成され、下記のような環境に縛られる特徴がある。

- ① 高温、重荷重、腐食、摩耗等の高ストレス
- ② 24 時間連続操業
- ③ 多品種混成と高精度・高品質生産との両立
- ④ 寄り付き困難、大規模で複雑な構造

これらの環境における設備の安定稼働と整備コスト低減のため、設備の劣化を把握しつつ整備時期を計画する予知保全〔状態基準保全 (CBM) : Condition Based Maintenance〕(図 1 参照) が不可欠である。新日鐵住金(株)では、早期且つ定量的に劣化兆候を把握する手段として、設備診断技術を開発し、診断装置の実用化並びに現場定着を推進してきた。

設備診断技術は、機械部品の劣化と、検出される信号の因果関係を検証し、診断ロジックを構築することを柱とする。当該技術は機械劣化メカニズムを故障物理に基づき解明し、劣化の兆候となる信号の計測技術と、診断指標に数

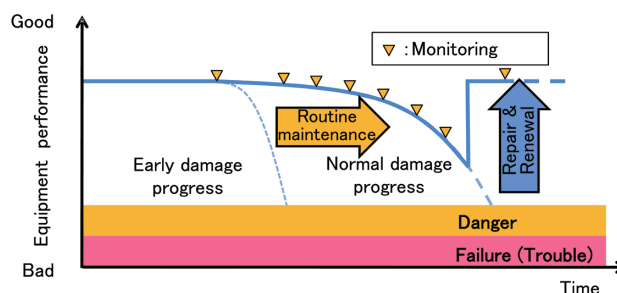


図 1 状態保全の概要
Outline of condition based maintenance

値化するための信号処理技術とを組み合わせる総合的な機械要素技術であり、新日鐵住金では機械技術全社共通部門が主体的に開発並びに技術を蓄積してきた。

2. 製鉄設備における診断技術

製鉄設備の保全は、保全工事を基軸に計画され、その内容および周期は管理基準で定められている。さらに的確な工事を実施するために、その設備毎に定めた周期にて点検、診断が実施される。日々の点検は保全員が計画的に点

* 設備・保全技術センター 機械技術部 機械保全技術室 主幹 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

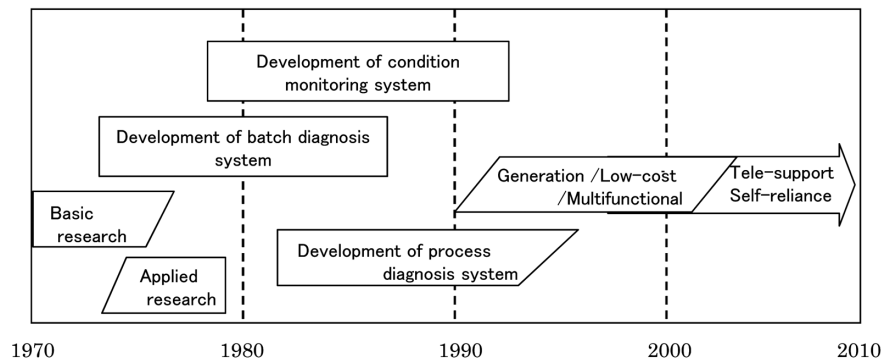


図2 設備診断技術の変遷
History of diagnostic technologies

検、診断し、その点検項目は、外観目視点検、触診、聴音等の日常保全としての五感点検とは別に、多機能携帯型診断器（エレスマート®）等の設備診断機器による定量状態監視が行われている。また、油圧作動油や潤滑油脂の定期的なサンプリングによるコンタミネント分析等の潤滑診断も併用する等各診断法の特徴を活かし、設備の状態を把握している。さらに、重要設備や回転数が変化する設備には、振動診断を主体とするオンラインシステムを導入している。これらの装置導入により、早期の劣化検出が可能となり、劣化部品の取替を定修工事に計画的に反映する等、確実なる予防保全を促進してきた。

3. 設備診断技術開発の進展

新日鐵住金は、これらの設備診断技術の適用開発を‘70年代から取り組み、多機能携帯型診断器（エレスマート®）をはじめとする携帯型診断器を製鉄所の各ライン（工場）に累計2000台以上導入し、現場保全に欠かせないツールとして活用・定着化している。また、‘80年代は携帯型診断器で培った診断技術をベースに精緻かつ24時間連続診断ができるオンラインシステムを開発し、‘90年代はさらに汎用化、ローコスト化、高機能化を進め現場に導入展開してきた。現在、全社で新旧併せ100ライン（工場）以上に導入し、現場保全業務の一翼を担っている^{3,4)}(図2)。

4. 設備診断システムの活用事例

前述の設備診断システム、特にオンラインシステムで設備劣化検出した事例を紹介する。

4.1 熱間圧延工場仕上圧延機駆動設備

日本の高炉一貫製鉄所において熱間圧延（熱延）工場は唯一の単一ラインの工程であるため、熱延工場での設備トラブルは、製鉄所全体の生産影響に波及する。特に圧延機のトラブルは、長時間の工場休止に直結または著しい生産能力の低下をもたらす恐れがある。そこで、全熱延工場の圧延機、特に駆動系設備に振動センサを常設し、オンラインシステムで連続監視している。図3は仕上圧延機主減速

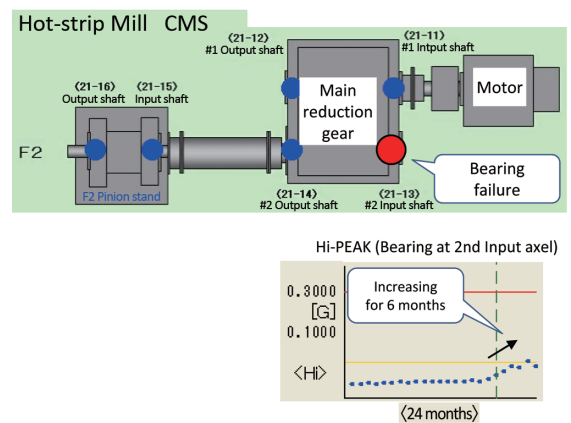


図3 仕上圧延機主減速機軸受劣化の検出
Detecting abnormal bearing in main reduction gear box of finishing mill

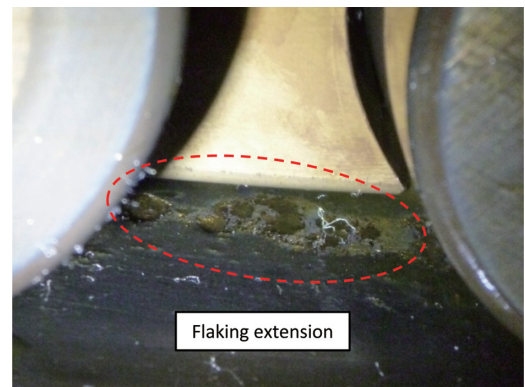


図4 軸受外輪転動面の剥離
Flaking on outer ring race

機の予知保全事例である。軸受取替の6か月前から、軸受の診断パラメータであるHi値が徐々に上昇したため、保全員が当該軸受のエンドカバーを外し、軸受内部をファイバースコープにて観察したところ、外輪軌道面に剥離を確認した（図4）。潤滑給油量を増加する等、潤滑監視を強化しながら次回の定修まで延命することにより軸受の本来寿命を全うすると共に、減産等の生産影響を与えることなく計画生産している。

図5は熱延工場の粗圧延機主減速機の診断事例である。

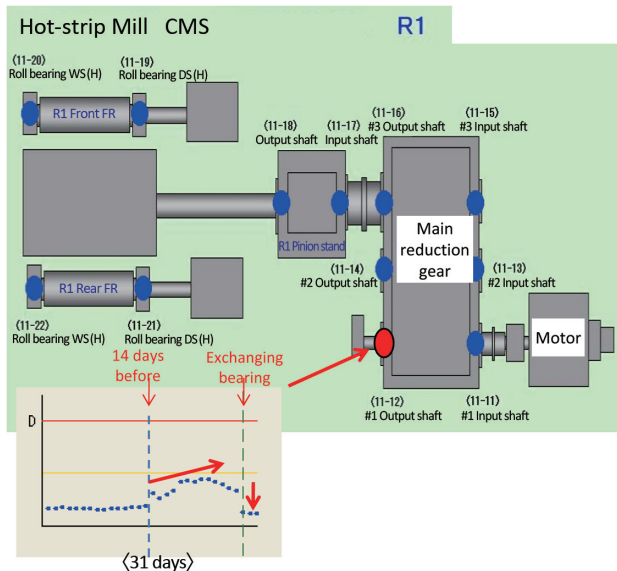


図5 粗圧延機主減速機軸受劣化の検出

Detecting abnormal bearing in main reduction gears box of roughing mill

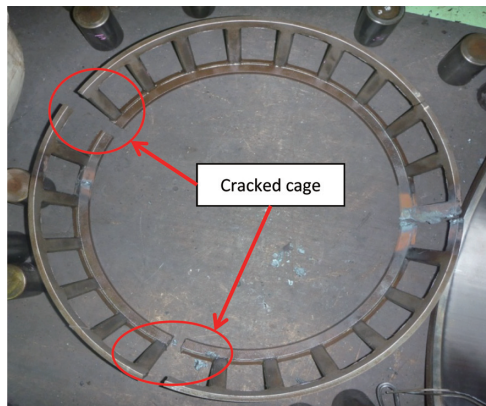


図6 軸受保持器割損状況

Cracking cage in bearing of primary reduction gear box of roughing mill

本事例も軸受劣化を検出する Hi 値が軸受取替の約2週間前より増加したため、精密診断を実施した。その結果、保持器の劣化を示す周波数が確認されたので、数日後に控えた定修で当該軸受の取替を計画した。定修にて確認したところ、事前に予知していた通り保持器の一部が破断していた（図6参照）。この診断事例でも、予備軸受の準備並びに工事要員の事前確保ができ、当該設備内の歯車や軸破損等の2次被害を防止している。これらの診断事例のように全社熱延工場にて、年間20数件の劣化兆候を検知し、年間約120時間のライン休止回避に貢献している。

4.2 線材工場圧延設備

線材工場で製造される鉄鋼製品は、直径数ミリのサイズまで圧延されるため仕上圧延機の圧延速度は極めて高く、駆動系には 10000min^{-1} 前後で運転される高速回転体が多い。そのため、駆動系ケーシング内の歯車や軸受に微細な

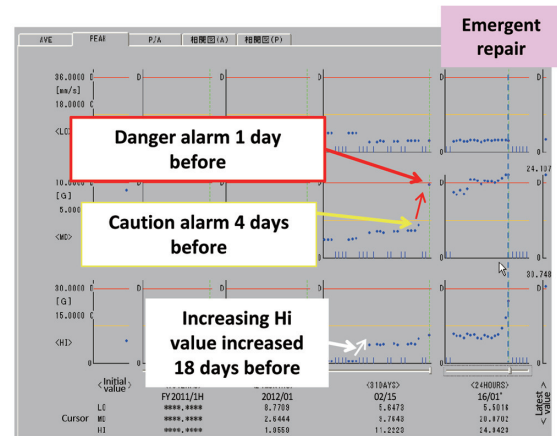


図7 増速機軸受傾向管理グラフ
Trend graph of speed increasing gear box

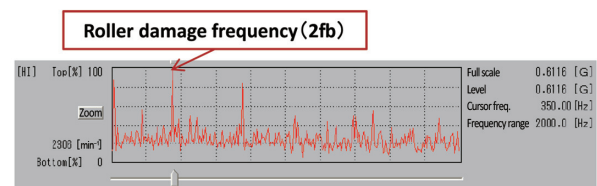


図8 精密診断結果
Result of precise diagnosis

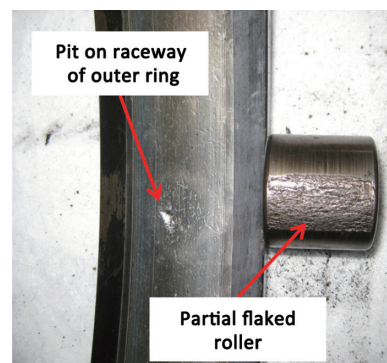


図9 取り外した軸受の破損状況
Flaking of roller bearing

傷等が生じた場合急速に劣化が進展し、設備全体の休止を招くことがある。新日鐵住金では当該設備の微細な初期劣化の徴候を検出べくオンラインシステムを設置している。

図7は振動診断の傾向管理グラフを示す。軸受の劣化を示す Hi 値がベースラインから上昇し、その14日後に全周波数の加速度値を表す Md 値が注意レベル、さらに1日後には危険レベルまで急増したため、給油強化と共にオンライン自動精密診断機能を用い原因解析を行った。その結果、図8に示すように転動体の劣化を示していたので、軸受予備手配等の取替準備を進めていたが、Hi 値が急激に上昇したためラインを休止し軸受取替を速やかに実施した。取り外した軸受は精密診断結果の通り転動体にフレーキングが発生していた（図9）。当該診断事例では、突発休止や設備2次被害を防止し、生産影響並びに修繕費増加を最低限に抑制した。

5. 新たな設備診断技術開発の取組み

5.1 現場適用展開中の設備診断技術

5.1.1 パラボラ型マイクロホンを用いた音響診断

回転機器の軸受等の診断において、劣化検出感度が他診断手法に比べ概して高い振動診断を用いることが多いが、1設備当り複数点の接触計測が必要なため作業性が悪く安全上の問題から設備自体に寄り付き困難な状況も散見される。そこでこれらの課題を解決すべく、パラボラ型マイクロホンを用いた音響診断技術を開発し実用化している。

(1) マイクロホンの指向性

当該技術で使用するマイクロホンはパラボラ形状であるため指向性が高く、製鉄現場における他の装置や周辺のエア、冷却水等の雑音（バックグラウンドノイズ）を低減でき、検出能力を高めることが可能である。図10にパラボラマイクロホンの指向特性、図11に各周波数における正対方向からの音圧減衰を示す。一般的なマイクロホンは無指向性のため入射角による音圧減衰は殆ど発生せず、特性パターンはどの周波数帯においてもほぼ真円状となるがパラボラマイクロホンは高周波になるほど指向性が高くなる。対象物から1m離れた位置からの測定の場合、周波数10kHzでは正対方向から10°ずれると3dB、20°ずれると10dB程度音圧が低減し、さらに後方音については20dB以上低減する設計とした。

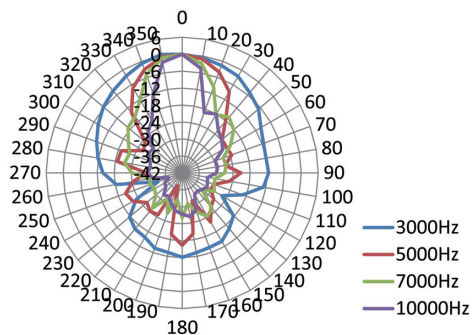


図10 マイクロホン指向特性
Polar pattern of microphone

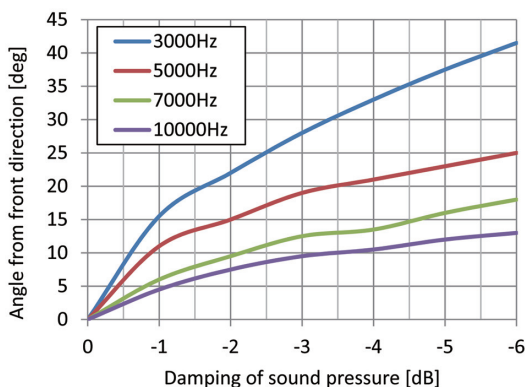


図11 正対方向からのずれ角と音圧減衰
Relation of angle value and acoustic damping

(2) 音響による軸受診断

このパラボラマイクロホンによるオンラインでの劣化軸受検知事例を示す。図12は検知した劣化軸受の音響測定結果、写真1は当該軸受の開放点検写真である。屋外雑音環境下において、ハウジングから数十cm～数m離れた位置より測定した音に軸受劣化の特徴波形をとらえることができ、軌道面等に生じた疵を検知できた。

これらの検証と製鉄現場の実フィールド試験を繰り返して当該技術を実用化し、多機能携帯型診断器（エレスマート®X、日鉄住金テックスエンジニアリング(株)製のオプション機能として市販化している（写真2）。

5.1.2 クレーンワイヤロープの残寿命予測

クレーンのワイヤ関連の点検、検査は、安全衛生法クレーン等安全規則により、月例点検時に“吊り回数”，年次点検時等にて1回／2年の“ケーブル点検”が定められているが、ワイヤロープの交換基準は、その使用期間と概算吊回数並びに素線劣化確認の実績より（時間）周期で定めていた。しかしながら、操業変動等の稼働率増加（吊回数超

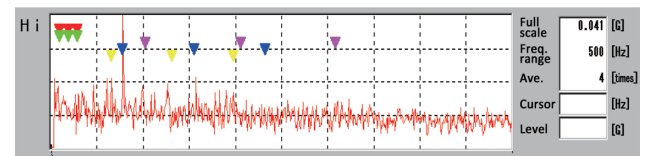


図12 軸受劣化測定結果
Frequency dependence of defective bearing



写真1 開放点検軸受
Overhaul inspection of defective bearing



写真2 パラボラ型マイクロホンと携帯端末
(日鉄住金テックスエンジニアリング(株)提供)
Parabolic microphone and compact data analyzer

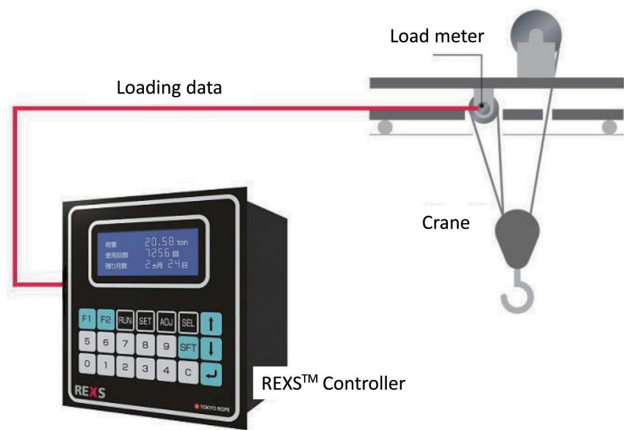


図13 ワイヤロープ寿命予測監視装置 (REXS®)
Wire rope residual life monitoring system (REXS™)

過)による負荷分布の増加, または安全側での周期設定によるオーバーメンテナン스의解消等が課題となり, その管理適正化が求められていた。そこで, これらを解決すべくロードセルで負荷情報を採取して累積疲労を評価するワイヤロープ寿命管理システム“REXS” (東京製綱(株)と共同開発, 図13参照)を実用化し⁵⁾, 重要クレーンの一部に導入している。ロープやシーブの諸元等, クレーン仕様を入力し, 荷重計の信号を接続するだけでロープの残寿命(回数)をリアルタイムで自動算出できる。

5.1.3 レーザー変位計を利用した実稼働設備の構造解析

日本の製鉄設備, 特に屋外鋼構造体は, 一貫製鉄所の建設から40~50年が経過し, 腐食等の長周期劣化が顕在化している。そこで, 最新の測量技術や非破壊検査技術を応用した効率的な老朽診断手法を導入してきた。たとえば, 劣化したベルトコンベヤ架構のたわみやコークス軌条の歪を三次元レーザースキャン技術で計測し, コンベヤベルトの蛇行防止やコークス移動機の動作精度確保に利用している。またヤード移動機の劣化診断においては, 三次元レーザースキャン技術と数値解析技術を組合せて, 腐食減肉した構造部材の耐力を迅速に診断し, 補修部位や老朽更新の優先順位を決定する等の技術を実用化している(図14参照)。

5.1.4 自律型設備診断技術の開発

(1) 太陽エネルギーを利用した屋外自律診断装置

原料エリア等の広域に散在する製鉄設備は, 設備診断装置の給電配線や有線LANの敷設等の工事費用が高額となるため, オンラインシステムの普及が遅れていた。そこで設置工事費の削減を目指し, 太陽電池パネルと無線LAN装置を付与した自律型屋外設備診断システムの実用化に取り組んでいる(写真3参照)。現在, 製鉄現場での発電, 消費電力の仕様適正化や無線通信の安定性等のフィールド評価を行っている。

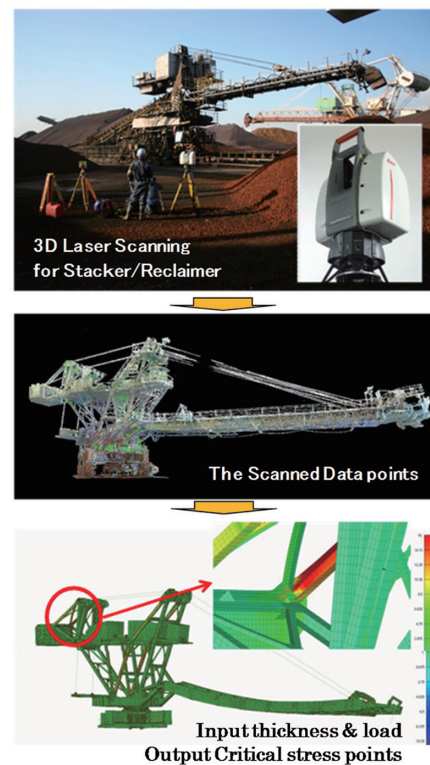


図14 レーザー変位計を利用した設備劣化評価診断
Structure diagnosis by 3D laser scanning and FEM technologies



写真3 屋外自律型診断装置の概要
Solar-powered wireless CDT system

(2) 自己発電無線式振動センサの開発

設備自体が移動する設備の診断において, 給電配線や通信線の養生並びにケーブルの耐久性の確実なる確保は困難を極める。特に数kHz以上の高周波信号を採取, (一時)保存・解析する振動診断では, センサを含む診断装置自体の消費電力が高く1次電池単体による経年連続診断は極めて困難である。そこで, 自己発電と無線機能を付与した振動センサの実用化を目指している。図15に焼結鋸の揺動スクリーン軸受を対象に自己発電と無線機能を有した振動診断装置を設置した例を示す。当該ユニットは数kHzの振動生波の無線伝送も可能であるため, 傾向管理の簡易診

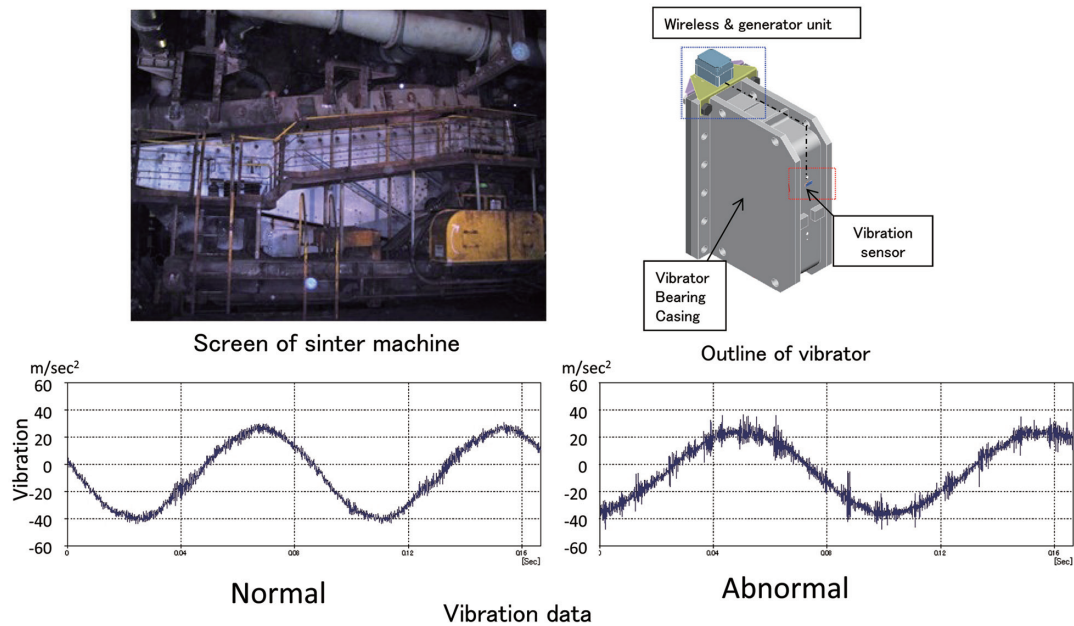


図 15 自己発電無線式振動センサ
Energy harvest wireless vibration sensor

断における警報後に、地上（固定）システムにて精密診断（周波数分析）も実施できる。今後は、センサとユニットの一体化、並びにさらなるコンパクト化も目指していく。

5.2 最新の設備診断技術の開発

5.2.1 電流兆候解析（MCSA）の適用開発

オンライン振動診断はセンサ常設のため、導入時の計装工事費が増大する。また、運用時においても、ケーブルを含む振動センサの信頼性維持管理が必須である。これらの課題を解決すべくセンサーレス診断技術として、駆動モータの既電流信号を用いた診断技術を模索している。そのひとつとして現在、単に電流の絶対値を管理するだけでなく周波数分析することにより設備劣化の検出能力が向上するといわれている電流兆候解析（Motor Current Signature Analysis : MCSA）に注目している⁹⁾。

(1) MCSA による検出原理

MCSA では軸受劣化やアンバランスを検出できる可能性があるとされているが、有効なのは後者である。軸心まわりの質量分布に不平衡（アンバランス）が生じた場合、軸は振れ回る挙動を示し、トルクが変動する。それにより電流値が変化するため、低周波数帯域（～100Hz 付近）に着目することで劣化検出できる可能性がある。図 16 に示すように、一般的な誘導電動機はトルク変動に伴いすべりが変化し、電流値が変化する¹⁰⁾。これにより図 17 に示すように運転周波数を中心としたサイドバンドが発生する。モータに供給する電圧の周波数（運転周波数）に着目する利点は、高周波数帯域に比べノイズピークが少なく、よりサイドバンドを抽出し易いところにある。

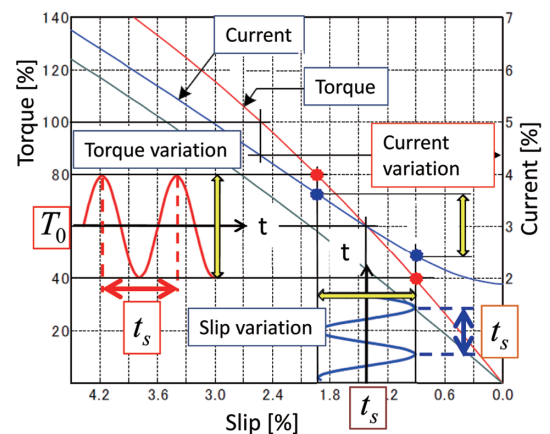


図 16 誘導電動機の特特性曲線
Characteristic curves of induction motor

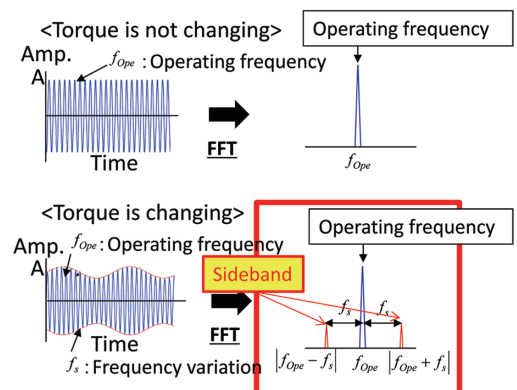


図 17 トルク変動時に生じる波形
Waveforms generated from torque variation

(2) MCSA によるアンバランス検知試験

図 18 に示すモータ駆動回転試験機を用いてアンバランスの検出能力について検証した。図 19 はモータ回転数

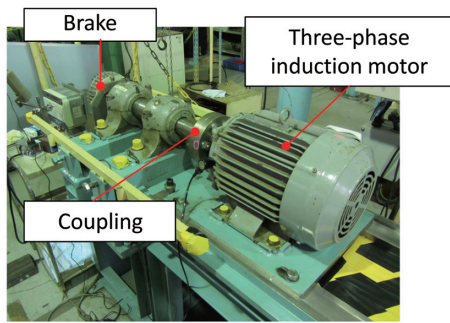


図 18 モータ駆動回転試験機
Motor driven rotating simulator

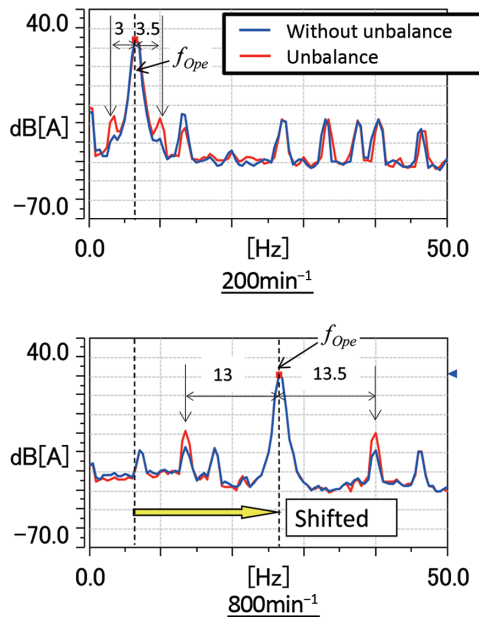


図 19 アンバランスの有無による信号変化
Signal variations caused from unbalance

200 min⁻¹, 800 min⁻¹における電流のFFT波形である。いずれの回転数においても運転周波数を中心としたサイドバンドにおいて明らかなピーク差が発生していることからアンバランスを十分検知可能である。

5.2.2 レーザードップラー振動計による振動診断

非接触診断の例として紹介した音響診断は、指向性が高い高周波数を用い、主に軸受の劣化検知を得意とするが、指向性が低く回折（回り込み）しやすい低周波数によるアンバランスやミスアライメント等の軸や歯車の劣化診断では、劣化設備の特定が困難な場合もある。そこで、レーザ振動検出技術を適用した非接触低周波振動診断を探索している。

レーザードップラー振動計は測定対象物にレーザー光を照射した際、反射光の周波数がドップラー効果により変化することを利用して振動計測をする装置である。まずその振動検出性能を評価するため、加速度センサとの比較試験を実施した。写真4に計測機器、図20に測定対象（軸受

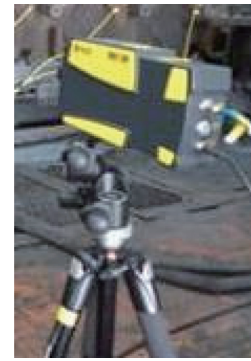


写真4 携帯型レーザードップラー振動計
Portable laser Doppler vibrometer

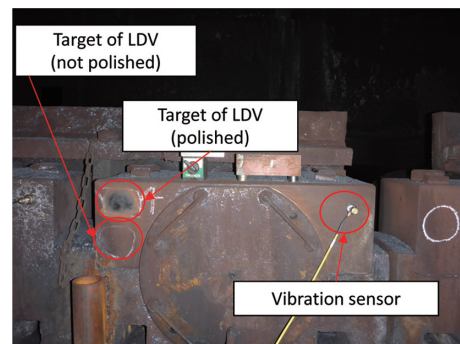


図 20 測定対象（ハウジング）
Measuring target (Housing of bearing)

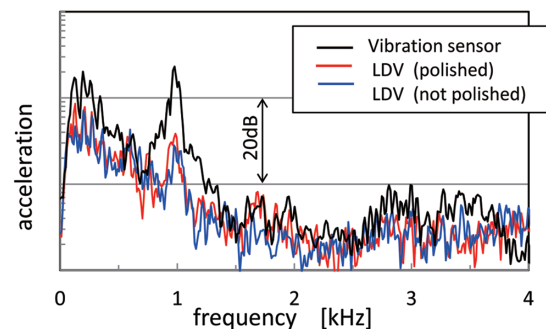


図 21 振動加速度の周波数スペクトル比較
Comparison of spectrum frequencies

ハウジング)を示す。まずレーザー光の反射影響について評価するため、測定対象は表面を手入れしたものと手入れしていないものの2条件で行っている。図21は約5m離れた位置からの振動加速度の測定結果である。4kHz以下特に1.5kHz以下において、レーザードップラー振動計のSN比は、通常の加速度ピックアップとほぼ同等であるため、アンバランスやミスアライメント等の軸起因や一部の歯車の劣化傾向管理に絞れば適用可能であることを確認できた。

5.2.3 構造物の診断技術の開発

(1) 構造物の非破壊検査技術

鋼構造物の非破壊検査に直流電位差法を用いる試みも



写真5 被検査体および直流電位差法による計測状況
Inspected object and outline of inspection by direct current potential different method

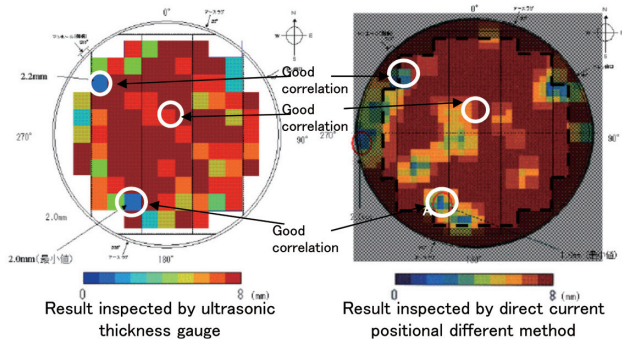


図22 電位差法による厚み測定結果例
Example of thickness inspection of basal plate by direct current potential different method

進めている。測定面積が広く保温材で覆われている鋼構造物やタンク底板の減肉部位をスクリーニングする技術として期待される。写真5に示すように、稼働中に底板の外周から計測するため開放検査を省略できる。図22から分かるように超音波厚み計と当該手法による検査結果は類似した厚み分布であることが確認できた。今後も当該検査技術の高分解能を含む高精度化、並びに信頼性向上を推進していく。

(2) 音源可視化装置による騒音探査技術

複数マイクロホンとカメラを有する音源探査装置を用い、製鉄現場の騒音源を可視化し、その騒音源の効率的な解明も進めている。図23は、製鋼工程の集塵装置周辺の配管を含むエリアでの騒音源調査結果の一部を示す。当該音源探査手法にはビームフォーミング法を用いた。ビームフォーミング法は、音源から発した音波が当該装置に配置した複数のマイクロホンに到達する際の時間差を利用し、装置基準の騒音源到来角度を同定することが可能である。特に波長が短い高い周波数においてはその指向性が高まり、卓越した到来主音波（メインローブ）を算定し、高精度の音源探査が可能となる。

この図内のコンタで表現されるように、もっとも耳障りな周波数に絞り込んだ音響を可視化することにより、その騒音源の位置（場所）を明確化でき、その後の具体的な騒音低減対策方案策定を支援することができた。

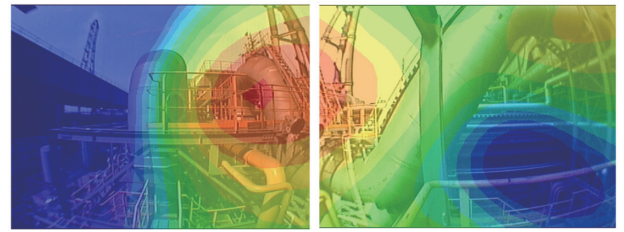


図23 音響可視化装置による騒音源探査
Sound source investigation by sound visualizing system

6. 結 言

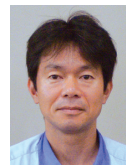
新日鐵住金における設備診断技術の適用事例、研究開発の概要を紹介した。設備の安定稼働等にとって設備診断技術は有効な手段であり、今後は自社による革新的な研究開発の推進、並びにグループ企業をパートナーとした早期の現場実用化を目指していく所存である。

参考文献

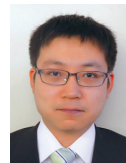
- 1) 藤井彰：潤滑経済. 534 (02), 6 (2010)
- 2) 村山恒実：潤滑経済. 504 (11), 18 (2007)
- 3) 村山恒実, 中嶋智, 永井裕和, 山本豊樹：新日鉄技報. (362), 71 (1997)
- 4) 大石直樹, 四阿佳昭, 栗栖泰, 和田和実, 石森裕一：新日鉄技報. (391), 113 (2011)
- 5) 石井弘之：クレーン. 564 (03), 25 (2011)
- 6) 豊田利夫：電流微候解析 MCSA による回転機械の診断技術の紹介. PE 最新保全技術調査研究会第2回発表会, 東京, 2009-11
- 7) 瀬戸天次：プラントエンジニア. 505 (03), 33 (2011)



山本豊樹 Toyoki YAMAMOTO
設備・保全技術センター 機械技術部
機械保全技術室 主幹
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



和田和実 Kazumichi WADA
大分製鉄所 設備部 中央整備室長



鹿子慎太郎 Shintaro KANOKO
設備・保全技術センター 機械技術部
主任研究員



樋口 暁 Akira HIGUCHI
設備・保全技術センター 機械技術部