

モニタリングシステムによる予防保全技術の構築

Study of Condition-based Maintenance Technologies Using a Monitoring System

河田直樹 Naoki KAWADA

製造現場における設備の突発的な故障は、生産効率の低下だけでなく、製造品質にも影響する可能性がある。このため、製造現場では予防保全を行ない、できるだけ製造中の故障の発生を防ぐ努力をしている。従来の予防保全は、一定周期で行なう時間基準保全が主流であったが、近年、情報処理技術の発展とともにさまざまな設備の監視技術が開発され、保全周期の延伸、保全費用の低減、稼働率の向上などを目的としたモニタリングシステムを構築し、設備の常時監視に基づいて保全を行なう状態基準保全に移行する例が見られるようになった。

本稿では、モニタリングシステムと状態基準保全の関係に注目し、周辺技術の構築とその効果について述べる。

1 はじめに

製造現場における生産設備は、情報処理技術の発展によって年々高度化、複雑化している。

このような状況での生産設備の突発的な故障は、生産効率や製品品質の低下に影響するので早期の対応が必要であるが、高度化、複雑化したシステムに対する製造現場の対応が難しくなっている。

これに対応するためには、あらかじめ生産設備の故障発生を想定し、その発生を防ぐ対策として予防保全技術がある。予防保全には2つの方式があり、一定周期で予防的に保全を行なう時間基準保全（Time Based Maintenance）と、設備を常時監視し、その状況の変化に応じて予防的に保全を行なう状態基準保全（Condition Based Maintenance）に大別される^①。

近年では、保全周期の延伸や保全費用の低減、稼働率の向上を目的として、時間基準保全から状態基準保全に移行する事例が多く見られる。これらのほとんどは設備の主要部位または部品の常時監視によって、保全周期の適正化ができることが前提条件となっている。

また、状態基準保全は機械設備の常時監視によって、不具合の発生をいち早く察知または予測し、被害を最小限に留める役割があり、予防保全とは区別した予知保全^②という呼び方をする場合もある。

状態基準保全を実現するためのツールとしてモニタリングシステムは不可欠であると考え、センシング技術を含んだ情報処理技術の近年の急速な発展によって、比較的容易に導入することが可能となった。

本稿では、このような状況における当社での抵抗スポット溶接やレーザー溶接の自動機械設備の状態基準保全の検討や鉄道車両の台車部品の状態基準保全の検討を例にし

て、モニタリングシステムによる予防保全技術の構築のポイントと効果を述べる。

2 状態基準保全とモニタリングシステム

状態基準保全の実現には、設備の状態を正確かつ定量的に観測し、将来を予測する技術が必要である。その技術体系の全体または一部がモニタリングシステムである。主なモニタリングシステムの役割や機能を以下に示す。

- ・ 設備が劣化または故障に至る原因を知る
- ・ 設備の劣化や故障の部位、程度を知る
- ・ 設備の性能、効率を知る
- ・ 設備の信頼度や寿命を推定する

これらすべての機能を持ち合わせたモニタリングシステムの開発は難易度が高いが、目的に合わせて機能を限定することでモニタリングシステムの開発と導入が容易となる。

次に、保全コストの面からモニタリングシステム導入の利点を考えてみる。設備の保全過程で関わる発生コストは以下の3種類に大別される。

(1) 補修コスト

劣化部品を補修、交換するためのコスト。部品費と交換作業費からなる。

(2) 点検コスト

設備の状態を点検するためのコスト。点検のための機器の費用と人件費からなる。モニタリングシステムに関わる費用はこれに含まれる。

(3) 機会損失

主に設備が故障し、休止することによる生産減、燃料等の生産損失を指す。

これらのコストを総合的な保全コストとして考慮すれば、保全レベルを上げることによって、点検コストが上がるが、補修コスト、機会損失が下がり、反対に保全レベル

を下げることによって、点検コストは下がるが、機会損失や補修コストは高くなる。

このことから、保全レベルと保全コストはトレードオフの関係にあることがわかり、保全コストを考慮したモニタリングシステムを選択する必要がある。

3 モニタリングシステムを支える技術

機械設備などの状態基準保全を実現する場合、設備の常時監視を行なう必要があり、このための測定が不可欠である。これに設備診断機能を付加したモニタリングシステムでは、測定に加えて信号処理、特徴抽出、正常・異常の判定、異常発生・寿命の予測といった機能が関わってくる²⁾。

これらに関わる技術の概要と特徴を述べる。

3.1 計測技術

設備の状態を測定する手段であり、測定すべき物理量と場所の選定が重要となる。

一般に機械設備の状態を監視するための計測では「振動」、「音」、「温度」が用いられることが多い。これは、機械設備が自ら能動的に動作を行なう性質を持ち、動作中に振動または音を発生することに起因している。

これらの量の実際の計測手段の代表例を表1に示す。目的、要求精度、環境に応じて多数の手段がある。

また、これらの計測手段は、その精度を一定に維持するために、定期的な校正が必要となる。点検コストに、校正費用が含まれるので、計測手段の選定の際には十分な配慮が必要である。

表1 代表的な状態監視のための物理量と計測手段

物理量	代表的な計測手段
振動	加速度センサ 変位センサ
音	AEセンサ 超音波センサ マイクロホン
温度	熱電対 放射温度計 赤外線サーモグラフィ

3.2 信号処理技術

一般的な計測手段から得られる信号は電気信号であり、さまざまな手段で時間領域、周波数領域、空間領域の信号として変換される。変換手段の多くは信号（有益な情報）の増幅やノイズ（有害な情報）の除去といった処理をとらない、主にアンプやフィルタが用いられる。

また、周波数領域の信号への変換にはFFT（高速フーリエ変換）が用いられる。

これらの処理は、モニタリングシステムの構造と処理の流れの中で前段に位置するため、前処理と呼ぶ場合もある。

3.3 特徴抽出技術

機械設備の状態の変化を捉えるための技術でモニタリングシステムの中核をなす。

時間領域、空間領域の信号は、それぞれの履歴に対する波形として示されるため、波形の特徴化を行なうに等しい。

波形特徴化で得られる特徴量には、波形率（=実効値/平均値）、波高率（=最大値/実効値）、尖度、歪度、変化量（微分特性）、存在量（積分特性）などがある。

また、周波数領域の信号は、周波数スペクトルとして扱われ、その特徴量には、平均周波数、等価帯域、極値頻度などがある。

このうち、当社で適用頻度の高い特徴量である変化量（微分特性）、存在量（積分特性）³⁾を説明する。

図1は、機械振動の波形を時刻暦で示した時間領域の信号である。信号は加速度センサからアンプとローパスフィルタを介して得られた電圧で示されている。この波形の特徴化を行なうために、変化量と存在量を抽出する。

まず、時刻暦波形に一定間隔で時間軸に平行線（標本線と定義）を引き、特徴量を算出するための時間軸上の区間（抽出幅と定義）を設定する。

次に、抽出幅の区間内で標本線と交差する回数を変化量（微分特性）とし、標本線の上の範囲にある値の合計を存在量（積分特性）としてもとめる。抽出幅の区間内で変化量と存在量が1データずつもとまることになる。変化量と存在量の算出を波形データの全区間で実施することで、波形全体の特徴化を行なうことができる。これを波形解析と呼ぶ。

図1では、標本線を波形全体の平均値と標準偏差に基づいて設定しているが、直値（例えば0.5V）から間隔

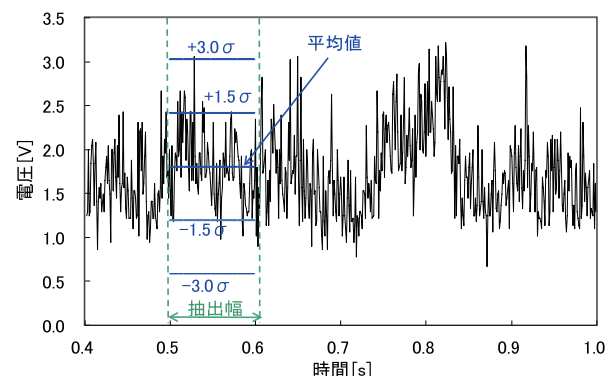


図1 波形の特徴化（波形解析手法）

を設定して、標本線を引いても良い。

3. 4 判定技術

モニタリングシステムの多くは、しきい値を設定し、その値との比較によって、データ間に差異があるか否かを判定する手法が一般的である。

しかし、実用上はノイズや正常状態におけるばらつきの影響を受けて、しきい値を一意に決定することは非常に難しい。このため、グレーゾーンを設けて、最終的な判断を現場作業員や技術者に委ねている場合が多い(図2)。

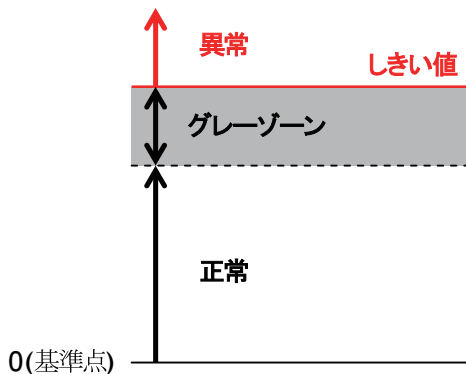


図2 しきい値による判定

このような課題解決のため、波形に対してしきい値を設定するのではなく、波形全体をパターンとして捉え、パターンの相違を判定する方法(パターン認識技術)を導入した。

パターン認識技術には、主に多変量解析、ニューラルネットワーク、ベイズ理論による統計的推定などがある。当社では、パターン認識技術として品質工学からMTシステムを採用した。

MTシステムの概要を図3に示す。まず、パターン認識の基本となる比較の基準となるパターンのデータ群を単位空間と呼ばれる行列とする。行は時刻暦波形の場合、測定時刻とし、列は波形の特徴量として、行列を生成する。この際、データは均質性が問われるので、ノイズ除去などの前処理やデータの特徴化のための波形解析などを行なうことが前提となる。

次に、基準とした単位空間とのパターンの相違を比較するため、被判定データ群を単位空間と同様の処理を行ない、これを信号空間と呼ばれる行列とする。

単位空間と信号空間の比較によって、相違を判定するために有効な特徴量と有害な特徴量を見極めるため、2水準系の直交表を用いる(図3-②)。

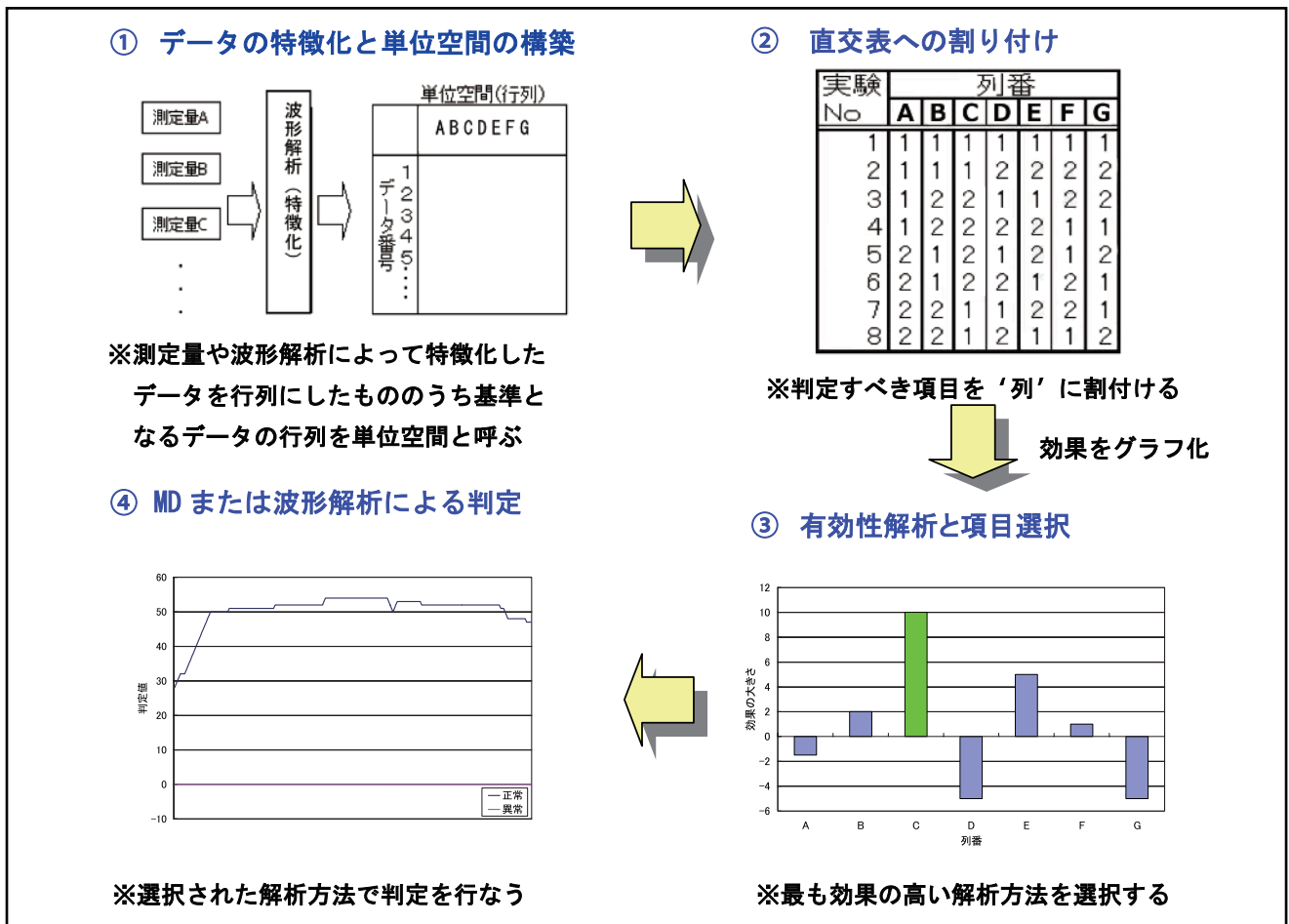


図3 MTシステム概要

図3-②は、L_s直交表で、実験計画法や品質工学で用いられている表である。図3-②の列番A～Gは特徴量を示し、その下に記された1と2で構成される行列によって、それぞれの特徴量を判定に用いるか否かを選択する。実験No.1～8はそれぞれの特徴量を取捨選択したデータの組み合わせパターンで、L_s直交表の場合、8通りの組み合わせとなる。MTシステムでは2水準系直交表が用いられるため、他にL₁₆、L₃₂、L₆₄、L₁₂₈、L₂₅₆、などがあり、より多数の特徴量の組み合わせを調べることができる。

直交表で行なう作業は、図3-③に示す有効性解析によって判定に有効な特徴量の選別につながり、モニタリングシステムの構築時、または生産ラインの立ち上げ時や変更時に行なう作業となる。

そして、選別を行なった特徴量を用いてMTシステムのマハラノビスの距離（以下、MD）をもとめ、その値の大小で単位空間とした波形パターンと比較対象の波形パターンの比較をすることができる（図3-④、図4 (a)）。MDが1に近ければ、似たパターンの波形であることを示し、MDが大きくなれば、違うパターンの波形であることを示す。単位空間に正常状態の波形を選べば、MDが1に近いとき正常であることを示し、MDが大きな値を示せば、何らかの異常があることを示す。そのしきい値D₀の決め方は(1)式で示される。(1)式のAは「検査コストと検査に伴い設備が停まることによって生ずる損失」を示し、A₀は「検査での不具合の見逃しや劣化による故障によって生ずる損失」を示す。そして、D_iは代表的な故障時のMDの中央値である。

$$D_0^2 = A/A_0 \times D_i^2 \dots\dots\dots (1)$$

3. 5 予測技術

正常と異常の判定は、単位空間に対するさまざまな事象の信号空間の相違を見つけることである。この場合、図4 (a) で示すように信号空間は一つであり、単位空間と1対1で比較することに等しい。

ここで、設備の状態をランク分けして、それぞれを複数の信号空間とした場合、その状態の変化をMDで表現することができる（図4 (b)）。

図4 (b)の単位空間を設備導入時の初期状態のデータ群とし、経年劣化の把握と異常（故障）を検出させるため、正常に機能する範囲での劣化状態のデータ群と、劣化が進行し、異常となる状態のデータ群を信号空間とした場合、MDは設備の導入時から故障発生までの状態変化を示すこととなる。この性質を利用し、MDのしきい値を定めることによって、設備の劣化または故障の予測

が期待できる。ただ、予測精度の向上のためには、多くの事象のデータが必要となる。

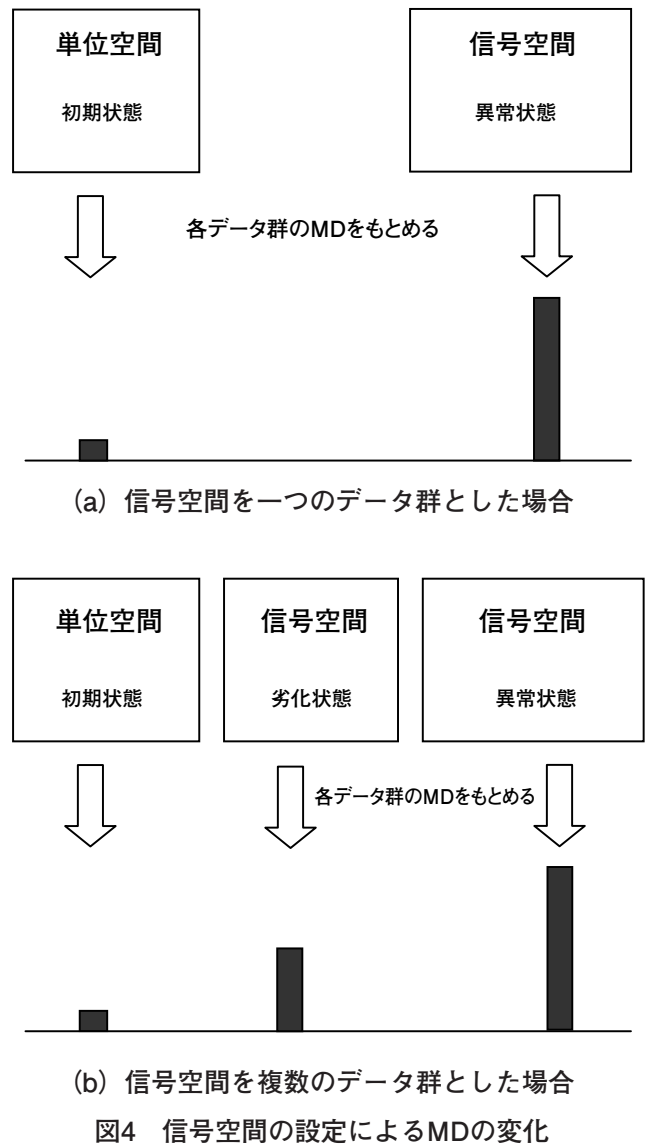


図4 信号空間の設定によるMDの変化

4 モニタリングシステムの開発状況

予防保全（状態基準保全）を実現するために、モニタリングシステムの導入を検討し、開発した2つの事例を以下に示す。一つは生産設備（レーザ溶接システム）、もう一つは製品（鉄道車両の台車部品）の予防保全のためのモニタリングシステムの開発である。

4. 1 レーザ溶接モニタリングシステムの開発

レーザ溶接は、材料への入熱量が少ないことを特徴とし、このレーザを断続的に照射すれば、抵抗スポット溶接よりもはるかに小さな溶接部（以下、ナゲット）を形成する。このナゲット一点あたりの面積とナゲット点数による継手強度の管理で、抵抗スポット溶接を適用した従来設計の構造体への適用が比較的容易な手段である。

レーザスポット溶接システムのモニタリングシステムは、図5に示すように、溶接に関わる全プロセスを溶接前、溶接中、溶接後の3つのフェーズに分けて、それぞれ状態監視を行なうシステムとしている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。それぞれのフェーズで異常と判定された場合、ただちに停止して対策をとることを促す。

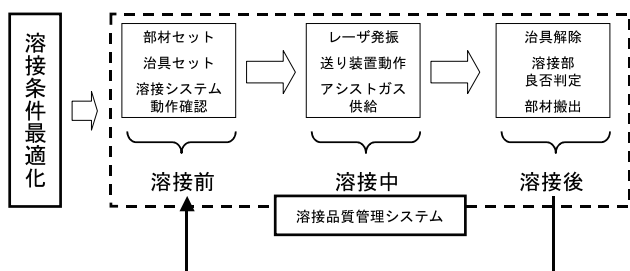


図5 レーザスポット溶接システムのモニタリングシステム

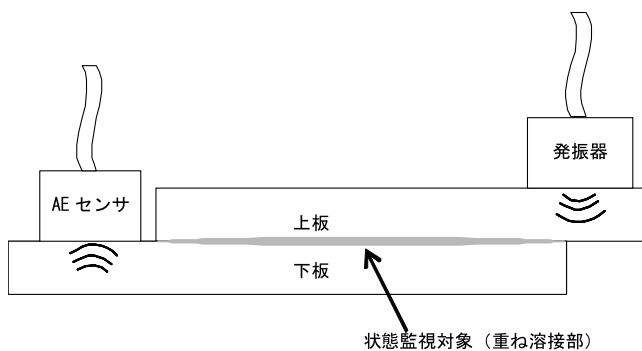


図6 溶接前プロセスに関する状態監視例

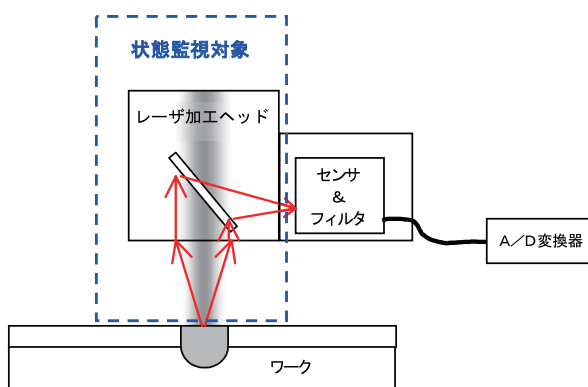


図7 溶接中プロセスに関する状態監視例

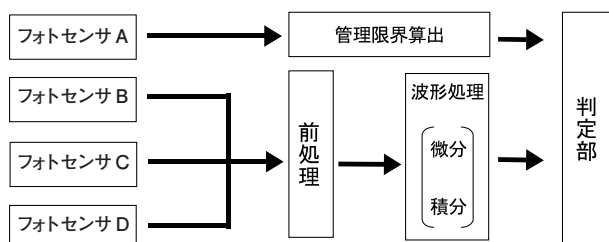


図8 溶接中プロセスに関する状態監視の処理方法

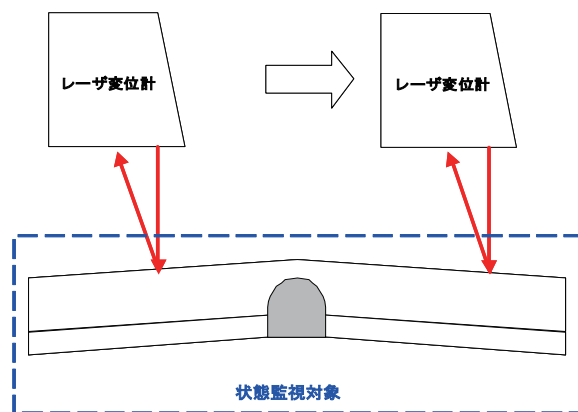


図9 溶接後プロセスに関する状態監視例

図6は溶接前プロセス、図7、8は溶接中プロセス、図9は溶接後プロセスの状態監視方法の一例である。溶接前は発振器（パルス発生器）とAEセンサの組み合わせによる重ね溶接時の被溶接物間のギャップの状態監視を行ない、溶接後はレーザ変位計による被溶接物のひずみの状態監視を行なう。溶接前後は主に被溶接物に関わる状態監視を行なっている。溶接中は被溶接物がレーザ照射によって発光するため、その状態によってレーザ発振器や周辺機器の状態を推定することができる。この特徴を利用し、図7に示す破線部を対象として、光強度を測定するフォトセンサで状態監視を行なう。これは、機械設備を監視するモニタリングシステムでは、検出手段も含めて特殊な例である。

各プロセスの状態監視の実施例を図10～14に示す。接合前の状態監視結果では、AEセンサからの信号を電圧で取得し（図10）、波形解析を経てMDをもとめると、被溶接物のギャップをMDの増大によって確認できる（図11）。図10に対する図11の時間軸上での差異は計算時間によるものであるが、0.1s以下であるので実用上での問題は無い。

接合中の状態監視は、各センサからの電圧信号に変換し、波形解析によって判別する。この手法によって、機器の不具合によるレーザ出力異常、溶接速度異常、加工ガス供給異常を検出することができた。その中から、加工ガス供給異常時のフォトセンサからの出力波形の変化を図12に、波形解析結果を図13に示す。また、その際の溶接部への影響を図14に示す。機器の異常が品質低下につながるため、間接的な品質管理の面でも状態監視は必要と考える。

さらに接合後には、図9に示す溶接部周辺の変形をレーザ変位計で測定し、その波形データを移動平均処理（またはフィルタ処理）して、被溶接物表面の状態を確認することができる（図15）。良品の表面状態を正常の

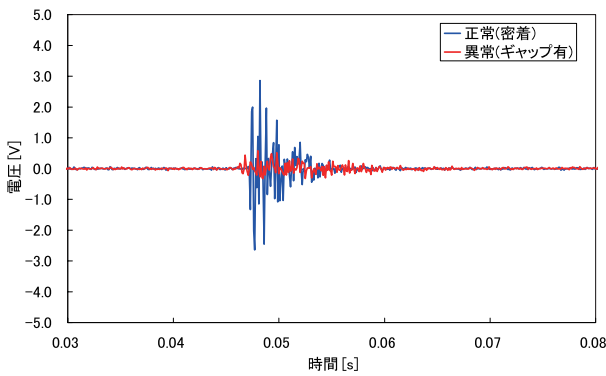


図10 接合前の波形比較

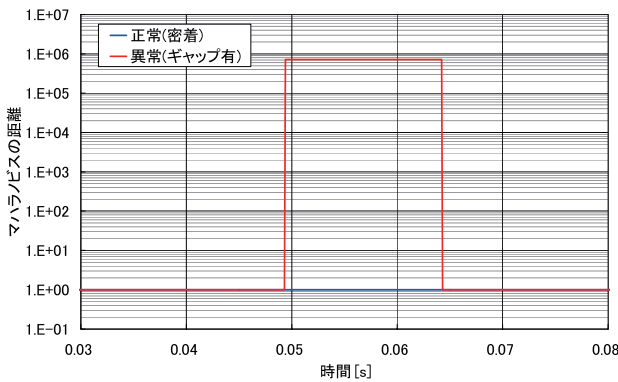


図11 接合前の判定結果

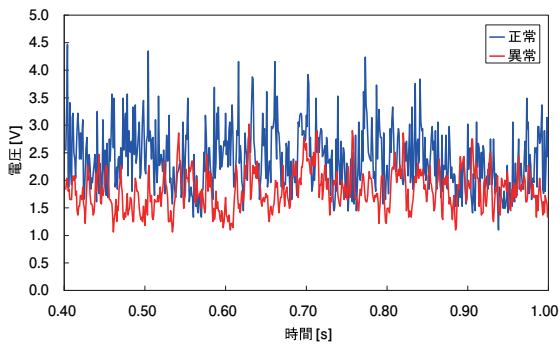


図12 接合中の波形比較

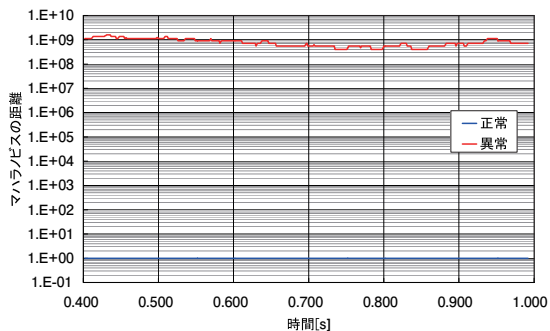
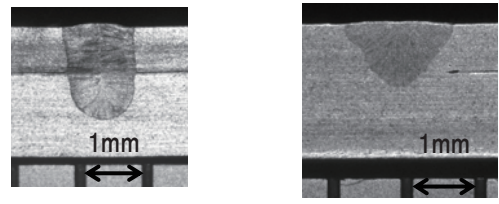


図13 接合中の状態監視結果



(a) 正常 (b) 異常

図14 加工ガス供給の状態変化による溶接部の変化

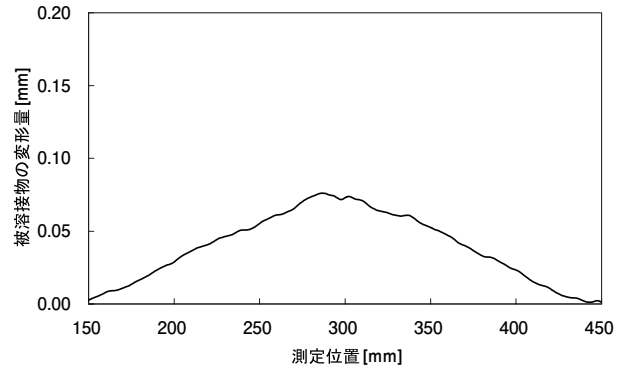


図15 被溶接物の表面形状測定結果

波形パターンとして判定に用いることで、品質を監視するための指標の一つとできると考える。

4. 2 台車モニタリングシステムの開発

主に台車の振動などを抑制するためのばね、ダンパといった台車部品の検査周期の延伸を目的に開発したシステムである。図16にその構想図を示す。台車の主要部品の状態監視と突発的な異常を監視し、安全性とメンテナンス性を向上させるシステムである⁶⁾。

本稿では、波形パターンで状態変化を監視する技術として、左右動ダンパの状態監視（具体的には、ダンパの不具合による減衰係数の変化の監視）を例として述べる。

システムの基本構造は、検出手段としてメンテナンスの都合から車体（客室内を想定）の振動加速度を選択し、前処理としてフィルタ処理と図1に示す波形解析による特徴化を行ない、最後にMDにて状態変化を検出することとした。

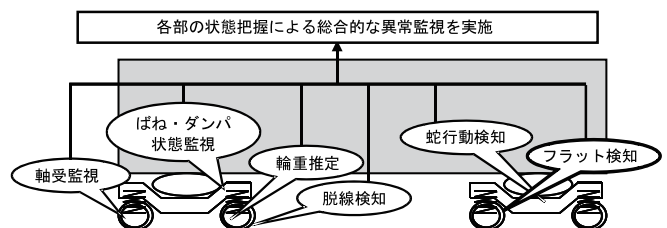


図16 鉄道車両の台車モニタリングシステム構想図



～試験内容～
 空気ばねのパンク、フェールダンパへの交換により異常を模擬、正弦波加振による試験を実施した。

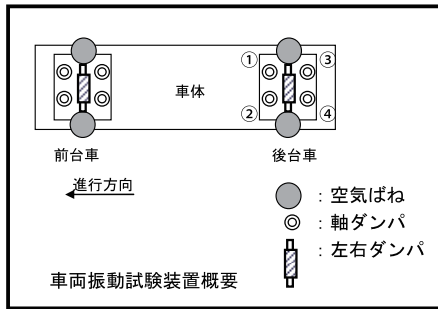
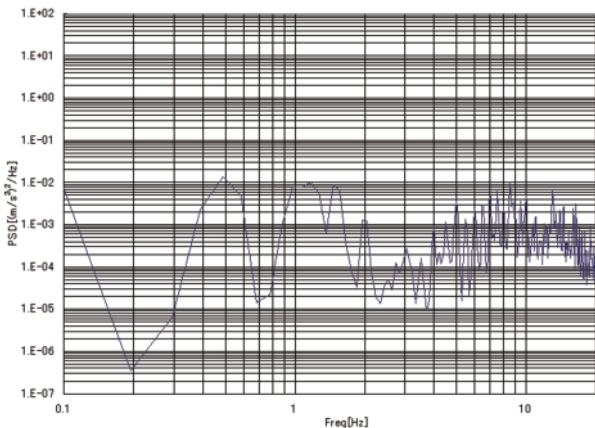
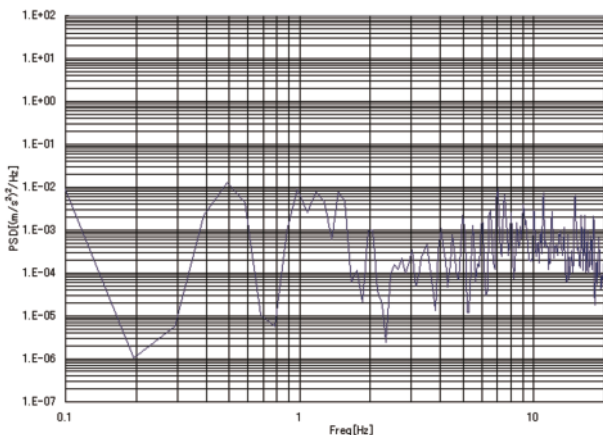


図17 試験概要



(a) 左右動ダンパ正常状態



(b) 左右動ダンパ異常（減衰力75%低下）状態

図18 車体の左右振動に関する周波数解析結果

実験検証は車両振動試験装置を用いて行なった。走行条件として速度域を2つに分け、それぞれに相当する振動を車体相当部位に油圧シリンダの加振によって与え、車体の上下、左右、前後振動加速度を測定して、システム検証の基礎データとした。

この実験では、ダンパの異常状態を減衰力が低下した状態をダンパの改造によって模擬し、2つの速度域を想

定し、加振レベルを大きく変えてそれぞれ車体の振動測定を行なっている。

まず、従来から行なわれている周波数解析による波形比較を行なった。その結果を図18に示す。1～4Hz付近で差異が見られるが、この波形に対して、しきい値を一意に決めて異常を判別することは困難であることがわかる。

次に、図3に示す流れでMDの算出を行なった。なお、前処理としてローパスフィルタと波形解析を行なっている。

2つの速度域での正常状態と異常状態（減衰力75%低下）をそれぞれ複数回の実験によって取得し、実験走行時間内のMDの変動の最小値、中央値、最大値を図19、図20に示す。この結果から、低速度での振動レベルの変化はMDで20程度を境にして区分できることがわかり、高速度ではMDで40程度を境にして区分できることがわかる。これは速度の増加とともに、振動加速度が増加することに起因していると考えられる。

ところで、レーザ溶接の状態監視の場合は、図11や図13に示すような大きな差異が見られたが、それに比べるとダンパの異常に対するMDの変化が小さい。これは、レーザ溶接装置が定置式であり、また同一の溶接条件での状態監視のため、正常状態の波形のばらつきが小さいことに起因していると考えられる。

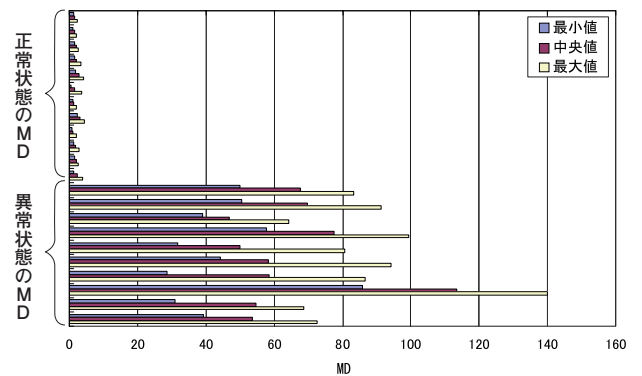


図19 低速度でのMDによる判定

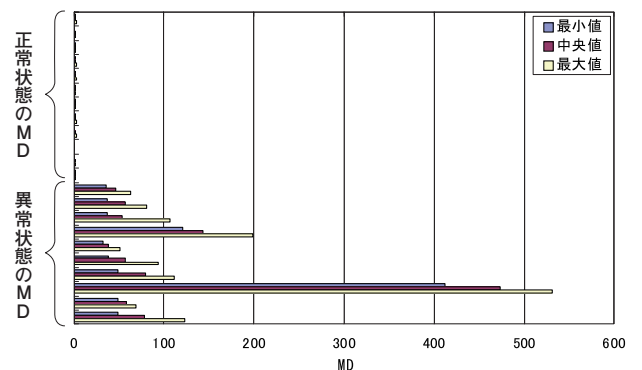


図20 高速度でのMDによる判定

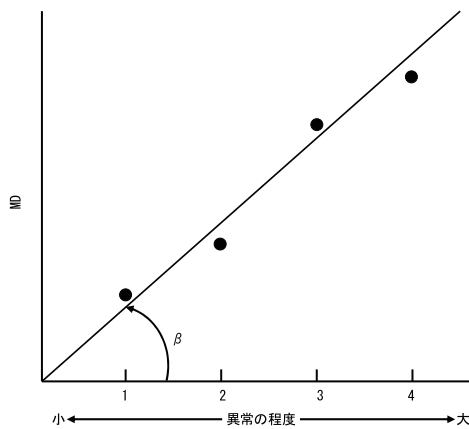


図21 異常レベルとMDの関係

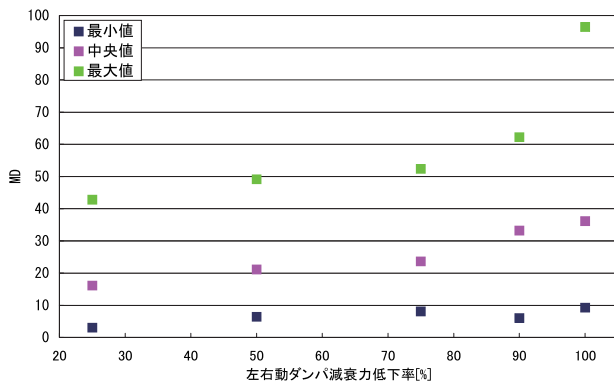


図22 左右動ダンパの異常レベルとMDの変化

車体の振動から左右動ダンパの異常判定の可能性を得たが、予防保全の観点からできるだけ早い時期に劣化を検出することがもとめられる。このため、図4の正常と劣化状態から異常に至るまでをMDで推定する方法を検討した。

具体的には、図21のように異常（劣化）のレベルを複数段階設定し、それぞれのMDと相関が得られることを確認した。単位空間には正常状態、すなわちダンパの初期状態を用い、減衰力の低下レベル25%～100%の間の5段階のデータをそれぞれ信号空間としてMDをもとめている。

その結果を図22に示す。25%から100%低下に向けてMDの増大は確認できるが、各劣化レベルでのMDのばらつきが大きく、少なくとも隣り合う劣化レベルの区分が困難である。これは、振動波形の特徴化が十分ではなく、ここで採用したローパスフィルタと波形解析の前処理方法に課題があると考えられる。

5 まとめ

レーザー溶接システム、鉄道車両台車部品のモニタリングシステムの開発事例から、次のことが明らかとなった。

- ・ 定置型の設備は、定常的な動作が多いため、正常状態からの変化をMDでよく捉えられる。
- ・ 移動型の設備（輸送機器）は、移動条件などの外乱が多数あるため、前処理の技術開発が重要となる。
- ・ 保全時期の推定のため、劣化予測技術がもとめられるが、劣化レベルの区分、波形特徴化技術の開発などの課題がある。

現在、さまざまな分野で劣化予測技術の課題解決に向けて、波形特徴化やMTシステムのような解析技術の改良がなされている。これらの技術を予防保全技術に組み込むことで、現在よりもさらにきめ細かい状態監視ができ、メンテナンス性が向上すると考える。

参考文献

- (1) 日本プラントメンテナンス協会：「設備診断技術」, 12, (1990), 日本プラントメンテナンス協会
- (2) 豊田利夫：「最近の設備診断技術（CDT）と予知保全（CBM）」, 鉄鋼業における信頼性と設備診断技術：計測・制御システム工学会シンポジウム, 17-21, (1998), 日本鉄鋼協会
- (3) 田口, 兼高編：「品質工学応用講座 MTシステムにおける技術開発」, 85-86, (2002), 日本規格協会
- (4) 河田直樹, 他：ステンレス鋼板のレーザー溶接システムに関する状態監視システムの開発, 精密工学会誌 Vol.75 No.5, 629-633, (2009), 精密工学会
- (5) 河田直樹, 他：「ステンレス鋼板のレーザー溶接品質管理手法の開発」, 東急車輛技報 第59号, 20-25, (2009), 東急車輛製造(株)
- (6) 河田直樹, 他：「MT法を用いた異常診断システムの開発」, 東急車輛技報 第54号, 10-19, (2004), 東急車輛製造(株)

著者紹介



河田直樹
博士（工学）
生産本部
技術部（基礎開発）主査