

パターン認識技術を用いた設備保全診断システムの開発

神生 直敏, 飯田 憲一, 畑沢 賢一, 鶴谷 知洋

Development of Machine Condition Diagnosis System Using Pattern Recognition

Naotoshi KAMIO, Kenichi IIDA, Kenichi HATAZAWA, Tomohiro TSURUYA

抄 録

工場のプラントや生産ラインで高稼働率かつ安定的な生産を維持するためには、設備機器の故障兆候を早期に発見して、保全（メンテナンス）を行う「設備診断技術」を導入することが効果的である。

生産設備で検出可能な機械振動、温度など多種類の波形データから、パターン認識技術を用いて、非熟練者でも精度良く総合的な診断が可能となる、中小企業向けの設備保全診断システムの開発を行った。具体的には、パターン認識技術や特徴抽出手法の比較実験を実施し、パターン認識技術として品質工学におけるMT法・RT法を用いたシステムを開発し、2つの事例により開発したシステムの有効性を確認した。

キーワード：保全，設備診断技術，パターン認識，品質工学，MT法，RT法

Abstract

It is effective to discover the trouble sign of the equipment and to use “Machine CDT (Condition Diagnostic Technology)” for maintaining high working rate and stable production in the manufacturing plant and assembly line.

From various kinds of wave pattern data such as detectable machine vibration, temperature in the manufacturing plant, we developed the machine condition diagnosis system in high accuracy even as for non-expert and for small and medium enterprises using pattern recognition technology. Concretely, the comparison experiment of the pattern recognition technology and the feature extraction technique was conducted, and we developed the diagnostic system by the MT method and the RT method of the quality engineering as a pattern recognition technology. We confirmed the effectiveness of the system that developed by two cases.

KEY-WORDS : maintenance, CDT, pattern recognition, quality engineering, MT (Mahalanobis-Taguchi) method, RT (Recognition -Taguchi) method

1. はじめに

工場プラントや生産ラインで高稼働率かつ安定的な生産を維持するためには、保全作業（メンテナンス）が重要である。生産設備の保全方法は、壊れてから直す「事後保全（BM; Breakdown Maintenance）」と、壊れる前に直す「予防保全（PM; Preventive Maintenance）」の2つに大きく分かれるが、重要かつ修理に長時間必要な設備は、設備機器の故

障兆候を早期に発見して、予防保全を行うために「設備診断技術（CDT; Condition Diagnostic Technology）」を導入することが効果的である。

本研究では、生産現場における設備の稼働状態を表す多種類の波形を、パターン認識技術を用いることで総合的に評価し、非熟練者でも判定が容易であり、安価かつ高精度な診断が可能となる中小企業向けの設備診断システムについて、開発を行った。

事業名：一般試験研究

課題名：パターン認識技術を用いた設備保全診断システムの開発

2. 設備診断技術と研究目的

故障兆候を定期的に観測し、その結果に基づいて設備保全を行う状態監視保全の中心技術が「設備診断技術」である。

設備診断技術で最も多く使われる手法が、設備の機械振動を測定する「振動法」である。振動法には、簡易診断と精密診断があり、簡易診断では設備の状態を簡易的に診断するために、測定された振動速度の絶対値で判断する方法や基準値の数倍とする相対値で判断する方法などがあるが、実際には機械毎にデータを蓄積し自社基準を作ることが必要となる。また、図1のような異常の原因を調べることを目的とする精密診断では、図2のような振動波形をFFT（高速フーリエ変換）処理してピーク周波数と機械諸元から計算される推定周波数を比較し、表1の様に異常原因を判定する。



図1 設備の異常例
(軸受の外輪傷)

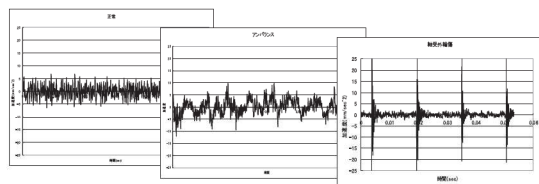


図2 設備の正常・異常状態を示す振動波形の例
(左から、正常・アンバランス・軸受損傷)

表1 精密診断における主な原因別の判定方法

主要な異常現象	FFT解析結果の特徴
アンバランス	回転周波数値にピークが発生
軸受異常	計算式で別に求められる推定周波数値と生波形を「包絡線処理」したFFT解析し、発生したピーク値と比較し判断(単なるFFT解析だけでは判断しにくい)
歯車異常	噛み合い周波数付近の±側両サイドに、変調成分のピークが発生。摩擦程度で変調成分も変化する

ただし実際の現場では、機械装置の構造、稼働環境により、ノイズ成分が混入することが多く、診断の判定精度を高めるには、測定感度・部位選定、波形処理方法などのノウハウが必要であり、熟練者の技術伝承も課題となっている。更に根本的な問題として、振動法では当然ながら振動以外の情報は考慮しない。また、異常原因を表す「特徴」が未知である場合は、原因を特定できないことが多い。

本研究では、生産設備で検出可能な機械振動、温度など稼働状態を表す多種類のデータについて、パターン認識技術を用いて、非熟練者でも精度良く総合的な診断が可能となる中小企業向けの設備診断システム(図3)について研究を行った。

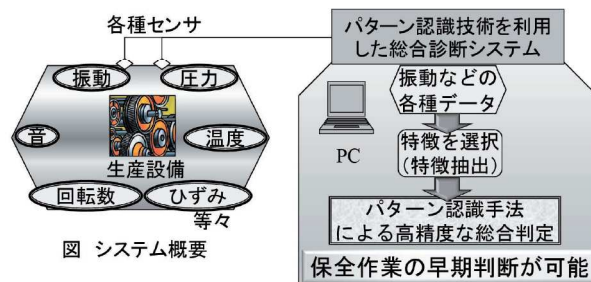


図3 システム概要

図3 設備診断システムのイメージ

研究を進めるに当たり、現場作業者に行ったヒアリング結果から、設備診断システムに求められる機能として、「現状設備における異常の程度(異常度)を正確に知ることが可能」、「判定の仕組みが理解しやすい」、「安価に導入可能」、「新たな異常にも対応可能」などが挙げられた。

3. パターン認識手法・特徴抽出方法の比較検討

システム製作を始める前に、パターン認識手法における判定性能を調査するため、軸受異常などを再現できる振動発生装置(図4)を利用して、設備の正常状態を基準データとして、別途測定したサンプルデータの正常・異常の判別を行う比較実験を行った。

実験では、従来の振動法と同様に、振動波形における正常状態のデータおよび異常状態のデータを、設備性能測定システム(助JKA補助事業設備)により収集し、サンプルとした。なお、比較実験用データの測定条件を表2に示す。



図4 振動発生装置





表2 比較実験用データ

測定項目	振動加速度(垂直方向)
測定条件	回転数 995rpm (16.6Hz) サンプリングHz 76.8kHz
測定数	合計120サンプル (内訳) 正常60サンプル 基準学習用55、判別用5 異常60サンプル アンバランス20 歯車摩擦 20 軸受損傷 外輪10内輪10

検討するパターン認識手法としては、ヒアリンク結果などを考慮し、一般的なパターン認識手法の他に、実験計画法の研究で著名な田口玄一博士が考案したMTシステムの中のMT法（マハラノビス・タグチ法）とRT法（認識タグチ法）を検討対象とした（表3）。

一方、パターン認識手法を用いる場合、測定されたデータから判別に有効な情報を取り出す「特徴抽出方法」が重要な問題となる。本研究で検討する特徴抽出手法としては、波形の平均値やピーク値など設備診断で利用される統計値を特徴とする「波形統計量」と、MTシステムで主に用いられる「波形微積分特性（変化量・存在量）」を検討した。波形微積分特性は、波形を何本かの線分で横分割し、その分割線毎に波形の「交点数」と、波形と分割線が重複した「線分長」という2つの数値を特徴とする方法である（ただし、振幅レベルの大小に起因する影響を減らすために、前処理としての正規化処理は必要）。

表3 検討したパターン認識手法

名称	特徴
最近傍決定法 (k- Nearest Neighbor rule) 	あるデータxが2つのグループの内のどちらに属するかを判断するのに、xに近いデータをk個を抽出し、k個のデータの中で、数の多い方のグループの方にxが属すると判断する(多数決)。精度良く判定するには、多くのデータ数が必要。k-3が用いられる事が多い。
サポートベクターマシン (Support Vector Machine) 	多種類のデータ(色つき丸印)をグループに分ける「境界線(実線)」について、両側のゆとり(マージン)幅が最も広く取れるような境界線を探索する手法。境界線を表す関数が判定式となるが、項目が多くなると、学習データによっては、必ずしも全てを満足する境界線が見つかるとは限らない。
決定木 (Decision Tree) 	決定木とは、問題解決に使う図解の一つで、すべての状況を樹状に図で表現したもので、結果を系統的に示すことができ、人間にも理解しやすい利点がある。条件が少なければ、Excelだけでも判別可能。
多層パーセプトロン (Multi-classifier Perceptron) 	視覚と脳の機能をモデル化したパターン認識手法である。ニューラルネットワークの一種。誤差を少なくするようにモデル化するが、求められた判別式は人間が見ても分かりにくい。
単純ベイズ分類器 (Naive Bayes classifier) 	単純な独立性仮定と共にベイズの定理を適用することに基づいた単純な確率的分類方法。パラメータ数は少ないので、比較的少数の訓練事例で学習が可能だが、特徴量間の依存性を全く考慮できない。迷惑メール対策等々有名。
MT法 (Mahalanobis-Taguchi method) 	判定対象データと基準とするデータ群との差異を1つの正の数値(MD値)で表現し、事前に決めた閾値(一般的には3~5)で判定する手法。逆行列が生成できないと解析不能になるケースがある。
RT法 (Recognition-Taguchi method) 	MT法の発展手法で、基準データ群との差異を2つ(Y1,Y2)あるいは1つ(D値)の数値で表現する手法である。MT法に比べて処理方法が平易である。

比較実験で使用したソフトウェアは、MT法、RT法にはマイクロソフト社のExcel2000およびアングルトライ社のMT-AddInsを、それ以外のパターン認識手法にはWaikato大学(NZ)が開発したWeka3.5.8を使用した。また、波形微積分特性の特徴抽出にはアングルトライ社のWavetool(分割数を20にした場合、1波形につき40個の特徴データを)、波形統計量の特徴抽出には、エクストラネット・システムズ社のWave Comparator(同38個の特徴データ)を利用した。

実験では、少ない学習データから有効性を検証する方法と

して、学習データと判別データを規則的に入れ替えて検証する交差検定法(cross-validation)を用いた。

表4に2種類の特徴抽出手法における各パターン認識手法の判別成績を示す(上段は波形微積分特性、下段は波形統計量)。なおMT法のしきい値については、マハラノビス距離(以下、MD値)で3.0と、RT法の閾値は単位空間データの距離(以下、D値)平均値の2倍とした。その結果、特徴抽出手法に波形微積分特性を用いた場合は、MT法、RT法および一般的なパターン認識手法でも良好な判別結果が得られたが、波形統計量を用いた場合、RT法と単純ベイズ分類器は判別率が他に比べ低いことがわかった。また、見方を変えると、MT法は特徴抽出手法に影響されにくい安定した判別手法とも言える。

表4 正常・異常判別成績の比較

特微量:波形微積分特性

正規化波形
N=120(学習データ55,正常5,異常60の判定) 特徴数40

	決定木	最近傍	パーセブ	サポート	ベイズ	MT法	RT法
判別率(%)	98.462	100	100	100	98.462	100	98.462
誤判別件数	1	0	0	0	1	0	1
(内訳)異常を正常と判定	1	0	0	0	1	0	0
(内訳)正常を異常と判定	0	0	0	0	0	0	1

特微量:波形統計量

正規化波形
N=120(学習データ55,正常5,異常60の判定) 特徴数38

	決定木	最近傍	パーセブ	サポート	ベイズ	MT法	RT法
判別率(%)	98.462	98.462	98.462	98.462	90.77	100	63.078
誤判別件数	1	1	1	1	6	0	24
(内訳)異常を正常と判定	1	1	1	1	6	0	18
(内訳)正常を異常と判定	0	0	0	0	0	0	6

MT法は、基準とする学習データ群に対し、新たな判別データと基準データ群(単位空間)との差異を1つのマハラノビス距離(MD値)と呼ばれる正の数値で表現し、事前に決めたしきい値(一般的には3~5)で判別する手法である。また、RT法はMT法の発展手法で、MT法に比べると処理方法が平易で、基準データ群との差異を2つの数値(Y1, Y2)または1つの数値(D値)で表現する手法である。MT法およびRT法による解析手順を図5、図6に示す。

MT法やRT法は、従来のパターン認識手法と異なり、①基準データ群(単位空間)との差異を具体的な数値で表現できる、②単位空間の作成時に熟練者のノウハウを反映させることが可能、③未知のパターンにも対応可能と言う特徴がある。これらは、現場作業者の要望をほぼ満足するものである。

図7にMT法を使用した場合の判別データのMD値のグラフを示す。左から5つのデータが正常データで、それ以外は異常データである。異常の種類によっては、数値のばらつきが見られるものの、明らかに正常と異常の数値に大きな違いがあることがわかった。なお、RT法でのD値についても、ほぼ同様の結果になった。

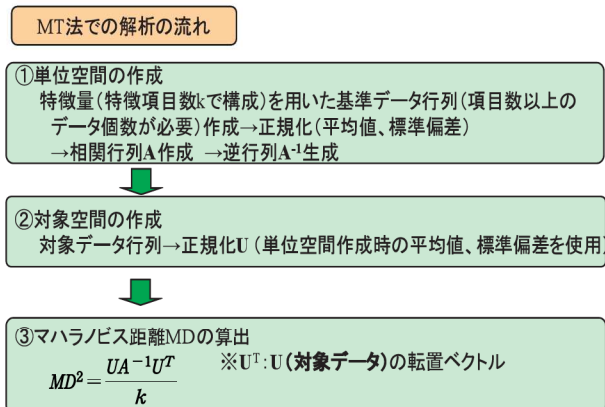


図5 MT法での解析手順

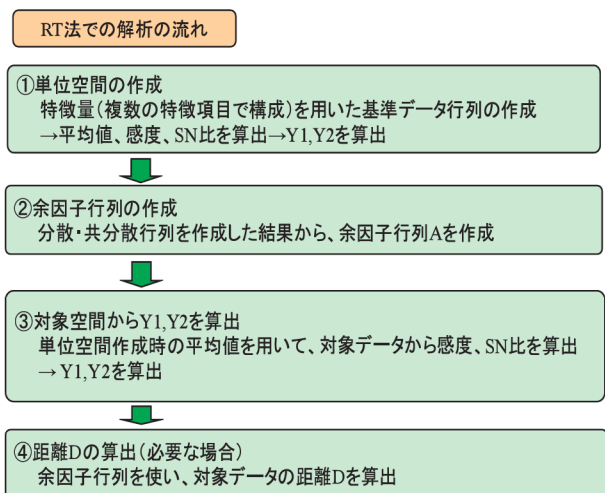


図6 RT法での解析手順

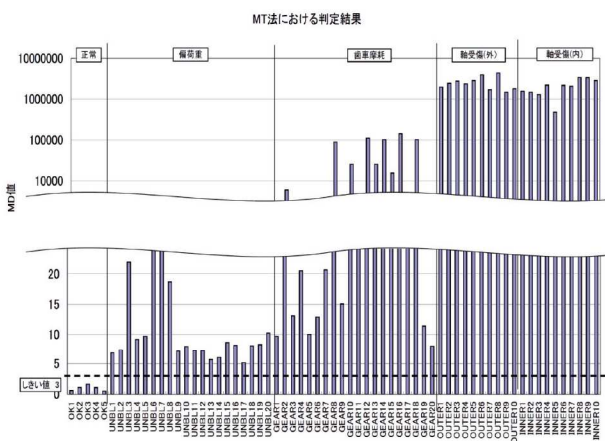


図7 MT法による判定結果 (MD値)

次に、RT法でのY1, Y2を用いて、散布図化したものを図8に示す。MT法は、判定結果を1つの数値(MD値)でしか表現できないが、RT法は判定結果をD値にする前に、2つの数値Y1, Y2で表現できることから、単位空間データも含め、全てのデータを容易に2次元図(散布図)化が可能である。軸受傷について、内輪傷と外輪傷で分布が重なって

いるものの、それ以外のデータは、状態毎にほぼグループ化できていることがわかる。このような2次元図自体は、厳密な原因判別手法ではないが、測定データの可視化ができることで、現場での傾向判断が容易となる。

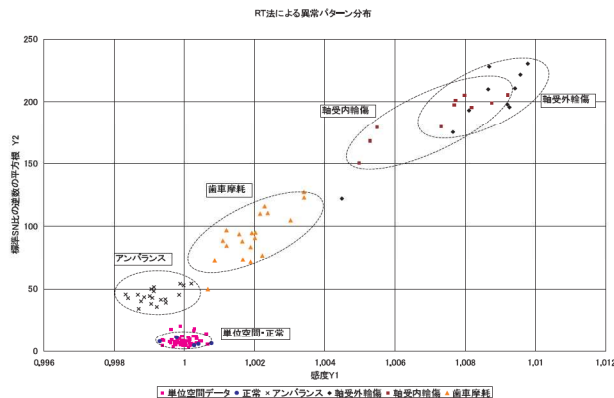


図8 RT法による種別毎のデータ分布(波形微積分特性)

一般的なパターン認識手法は、想定されている異常パターンのデータが数多く収集できれば、異常パターンの分類も精度良くできると言われている。しかしながら、現実には正常データは収集できるものの、異常データ収集は設備の規模が複雑かつ大きくなるほど困難となる。MT法、RT法は基準とする正常データ群との差異で測定データを評価するため、学習用のデータ収集は正常データのみで良く、この方式は未知なる異常パターンにも対応可能である。

これらの結果から、パターン認識手法を設備診断システム開発においては、MT法やRT法を使用することが有効であると考えられる。

4. 総合診断システムの製作

前項までの結果を踏まえ、機械設備の多種類(多次元)のデータによる総合診断手法について検討を行った。必要となる機能としては、異常の判別だけでなく、異常がどの種類のデータに起因しているかを知ること重要である。

そこで、今回、特徴抽出手法の影響を受けにくく良好な判別ができるMT法と、MT法のような解析時に数理的な制約が少なくデータの2次元図化が可能なRT法の、それぞれの特長を生かすために、2段階にMT法およびRT法を適用する「マルチ法」の利用を検討した。具体的には、1段目にRT法を用い、2段目にMT法またはRT法を用いることとした。1段目を2変数のRT法とすることで、MT法のように一気に1変数にデータを圧縮することによる情報消失の程度を少しでも抑え、種類毎の波形データの傾向分布を分かりやすい形(散布図)にできる。

総合診断システムの製作は、Excel2000-VBA(マクロ)

を基本に開発し、システム製作にかかるコストを抑えている。なお、今回の診断システムでは、測定可能な種類数として、最大4種類（チャンネル）とした。診断システムでの診断の流れを図9に示す。

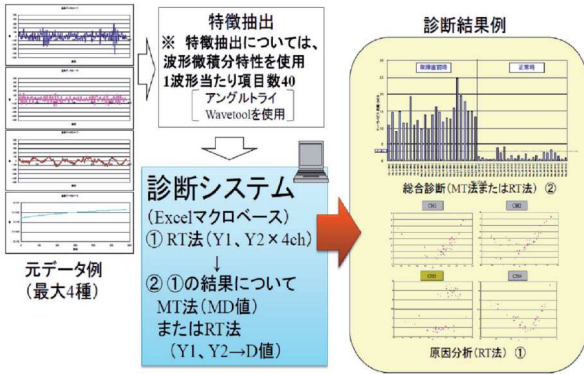


図9 製作したシステムでの診断の流れ

5. 実証実験結果

試作したシステムを使って、道内企業2社の生産設備の異常診断を行った。基準データ群として、正常状態100データを用意し、判別データには、基準データとは別に測定した正常状態と異常状態のサンプルを各50データ用意した。

5.1 事例①：モータ軸受の診断

電機部品製造設備に用いられている電機モータ（図10）用軸受異常の診断を実施した。測定データの内訳は、振動3チャンネル、回転変動1チャンネルである。

本診断システムにおいて、1段目にRT法、2段目にMT法（MD値で判別）を使用した診断結果を図11に、同様に1段目および2段目ともRT法（D値で判別）を使用した結果を図12に示す。さらに、診断結果について判別率（正しく判定されている割合）と内訳をまとめたものを表5に示す。



図10 モータ軸受測定

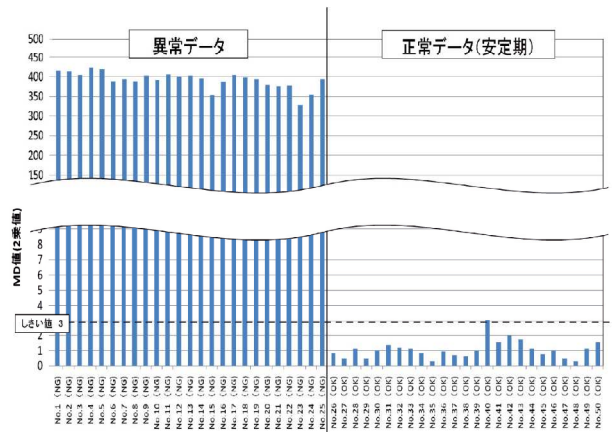


図11 多種類データによる異常診断結果例 (事例①, 1段目RT法, 2段目MT法)

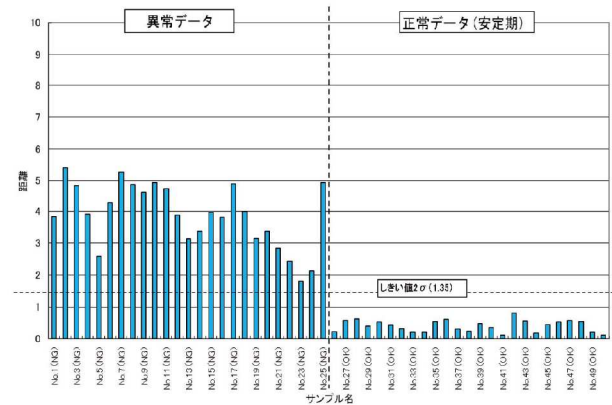


図12 多種類データによる異常診断結果例 (事例①, 1段目RT法, 2段目RT法)

表5 事例①（モータ軸受診断）の判別率

1段目	2段目	判別率	内訳
RT	MT	0.98 (49/50)	しきい値はMD値3.0 正常データを正常と判断 24/25 正常データを異常と判断 1/25 異常データを異常と判断 25/25 異常データを正常と判断 0/25
RT	RT	1.00 (50/50)	しきい値は2σ 正常データを正常と判断 25/25 正常データを異常と判断 0/25 異常データを異常と判断 25/25 異常データを正常と判断 0/25

5.2 事例②：形状加工装置の総合診断

自動車部品製造設備に用いられている形状加工装置（図13）を対象とする総合診断を実施した。測定データの内訳は振動3チャンネル，温度1チャンネルである。

本診断システムにおいて，1段目にRT法，2段目にMT法（MD値で判別）を使用した総合診断結果を図14に，同様に1段目および2段目ともRT法（D値で判別）を使用した結果を図15に示す。さらに，診断結果について判別率と内訳をまとめたものを表6に示す。



図13 形状加工装置測定

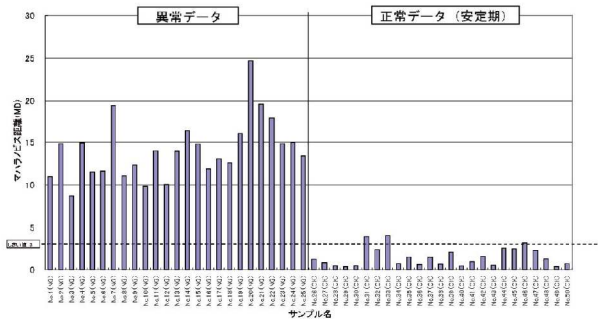


図14 多種類データによる異常診断結果例
（事例②，1段目RT法，2段目MT法）

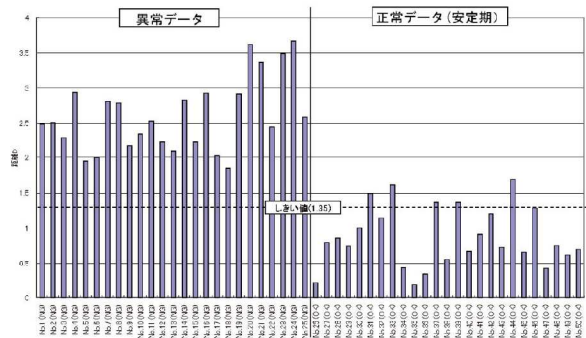


図15 多種類データによる異常診断結果例
（事例②，1段目RT法，2段目RT法）

表6 事例②（形状加工装置診断）の判別率

1段目	2段目	判別率	内訳
RT	MT	0.94 (47/50)	しきい値はMD値3.0 正常データを正常と判断 22/25 正常データを異常と判断 3/25 異常データを異常と判断 25/25 異常データを正常と判断 0/25
RT	RT	0.90 (45/50)	しきい値は2σ 正常データを正常と判断 20/25 正常データを異常と判断 5/25 異常データを異常と判断 25/25 異常データを正常と判断 0/25

6. 考察

本診断システムでの診断結果は，事例①，②とも2段目にMT法，RT法のどちらを選んでも，概ね9割以上正しく判定できていることがわかる。安全サイドの見地から，少なくとも異常データを正常と判別しないことがシステムとして重要である。事例①，②とも今回はこのようなケースは発生しなかったが，閾値の決め方によっては，判別精度自体にも影響を及ぼすことから，今後それらも考慮した閾値の決定方法が必要になる。

また，2段目にRT法とMT法を用いた診断結果に差が生じたことは，2段目の手法により判別結果が分かれたサンプルが存在することを意味し，2段目に用いる手法の選択方法も含め，今後詳細に分析することで判別精度向上に結びつくと思われる。

一方で，基準データ群（単位空間）の選定も精度に影響することが知られており，熟練技術者のノウハウを反映した合理的な選定方法も検討することで，更なる判別精度向上につながると思われる。

また，今回の測定データのうち，1段目に用いたRT法での分布例を図16に示す。本診断システムではチャンネル毎にRT法による測定データの2次元図が自動的に作成されるが，チャンネルによっては，正常データと異常データでは明らかに分布が異なることが一目で分かる。実際，作業者からの故障箇所の情報と診断結果が一致しており，判別結果の妥当性を確認した。

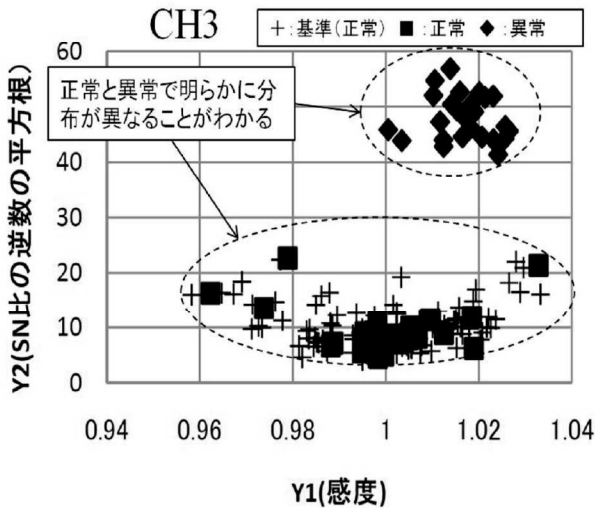


図16 RT法での異常診断結果例
(事例②, CH3)

7. まとめ

本研究により、設備の稼働状態を表す複数の波形について、MTシステム（MT法、RT法）を複合的に用いることで、生産設備の高精度な総合診断が可能となる、中小企業向けの設備診断システムを製作することができた。

今後の検討課題としては、考察に挙げた事項の他、

- ・波形の前処理方法（例えば独立成分分析等によるノイズ成分の効果的分離）
- ・波形微積分特性での、分割数の妥当な決定方法

などが挙げられ、今後、事例を積み重ねながら、北海道内の中小企業に役立つシステムとしての完成度を高めていく予定である。

謝辞

研究を進めるに当たり、データ収集に協力して頂いた北海道内の企業2社および実験装置を貸与頂いた(株)雇用・能力開発機構 北海道センターの方々に、ここに記して感謝の意を表す。

引用文献

- 1) 田口玄一：音声のためのパターン認識，品質 工学，Vol.3，No.4，pp.385-399，(1995)
- 2) 井上紀明：振動法による設備診断，pp.34-39，日本プラントメンテナンス協会，(1998)
- 3) 立林和夫，手島昌一，長谷川良子：入門MT システム，pp.153-173，日科技連，(2008)
- 4) 田村希志臣：よくわかるMTシステム，pp.121-141，日本規格協会，(2009)