

称号及び氏名 博士（経済学）石 井 康 夫

学位授与の日付 平成 19 年 3 月 31 日

論 文 名 「TIME SERIES ANALYSIS AND ITS APPLICATION TO MAINTENANCE
(時系列解析と設備保全分野への応用)」

論文審査委員 主査 竹安 数博

副査 石垣 智徳

副査 村澤 康友

論文要旨

我が国における製造業は、近年中国や東南アジア諸国の経済発展と工業技術の進展により大きな変革を迫られている。

これらの国々は、低賃金労働者を活用して大量生産による低コスト製品の生産を拡大し、欧米や日本等世界各国へ輸出し、市場シェアを高めている。

一方我が国企業は、製品やサービスの差別化のため専門的、高付加価値製品の製造や開発に特化すると共に、在来品のコスト削減が緊急課題となっている。なかでも、加工費の工数削減と設備稼働率向上が重要課題となる。

工場や保有施設における設備稼働率に関しては、特に大型設備を有する鉄鋼業界等では、突発的に発生する設備故障でラインが停止すると、後続プロセスの遅れを招き、納期の大幅遅延を招くなど、大幅なコストアップ要因に繋がる可能性がある。そこで、これらの事態を防止するための設備異常検知は、重要な役割を果たす。

近年、サプライチェーンの効率化に伴い、生産ラインの停止事故等は、取引先全体に対し非常に広範囲な影響を及ぼすため、現場での取り扱いが容易で、細かい対応が可能な設備異常検知手法がますます求められている。

企業にとってステークホルダー満足のため、企業価値を向上させていくには、継続的に利益を出しながら国際市場の中で勝ち残る必要がある。付加価値の高い商品開発、コストパフォーマンスの高い価格設定が必須となる。その意味からも、工場や保有施設の稼働率向上のための設備保全は極めて重要な経営課題となる。

設備保全分野では、従来定期的に保全する方法「時間基準保全」(Time Based Maintenance : TBM) が主流であったが、近年は設備監視のハードウェア・ソフトウェア

の性能アップも相まって、設備の状況を判断してタイムリーな保全を行なう「状態基準保全」(Condition Based Maintenance: CBM) にシフトしつつある。こちらの方が、部品コストや保全コストの低減、故障率の低減に繋がるからである。保全を行なうと、保全後の初期故障を生じる確率が高くなるため、保全しなくてもよいものも定期保全で保全したために初期故障を生じたりすることがある。部品の状態がよければできるだけ保全しないほうがよいといえる。

CBM に移行すると、異常の兆候をできるだけ速やかに捉えることが求められる。そのため的手法として、現在様々なものが検討されているが、業態や分野によってその指標も異なってくる。

CBM においては常に設備を監視し、センサ類で収集したデータ群を処理することになる。そこではオンラインか擬似オンラインでの処理が必要である。

これらの分析には一般的に時系列解析手法が用いられる。時系列データを解析してシステム同定を行う方法である。システム同定の目的は「制御系設計」、「異常診断」や「故障検出」、「モデルに基づいた計測」、「適応信号処理」、「画像解析」等であり、設備の劣化予測や制御に活用されることが多い。

本論文では、このような時系列解析とその設備保全分野への適用に関して研究を行った。

設備の異常検知手法としては従来感度の良い指標としてデータの RMS 値、Kurtosis 値、Bicoherence 値などを計算する方法や、時系列を AR (Auto Regressive ; 自己回帰) モデルや ARMA (Autoregressive Moving Average ; 自己回帰移動平均) モデルに当てはめ、システムパラメータを推定し、そのシステムパラメータの正常値からの乖離度等を計算する方法が用いられてきた。

また、カルマンフィルタの残差系列の白色性検定を行うことによって異常検知する Residual-Based Approach 法などがある。

一方周期運動体の劣化を評価する際には、複数の劣化指標を算出し、その劣化確率を重み付けして加算したものを算出し、異常確率とするフォールト・マトリックス手法が提案され用いられてきた。

これらの各種異常検知手法に関しては、計算の煩雑さ、逐次計算における収束計算の複雑さ等の課題があり、これらを克服するために過去から様々な研究が行われてきたが、克服すべき課題も存在する。

例えば、データ発生スピードがデータ処理能力を上回るような場合、オンラインでのシステム同定が難しい。

さらに、従来感度のよい設備異常検知手法とされた Kurtosis については、現場での取り扱いが複雑である。また、簡便で感度のよい異常検知手法は常にその開発が求められている。

本論文では、これらとは異なるアプローチにより、従来から提案されている各種の手法の改善を試みると同時に、現場で容易に取り扱うことのできる設備異常検知の仕組みを提

案した。即ち、現場では緻密な設備診断のニーズはあるものの、設備面やコスト面さらには人的な技術レベル等の運用面から、必ずしも精密な設備異常検知技術の導入ができない場合がある。そこで、現場でもスピーディでかつ簡便に用いることのできる設備異常検知の簡易計算手法を提案した。本論文における改善の視点は以下の通りである。

- (1) 繰り返し計算等複雑な計算アルゴリズムの簡素化モデルによる計算時間の短縮
- (2) 計算時間の短縮による早期の設備異常検知の仕組みの構築
- (3) 現場でも簡易に設備の異常検知できる簡易計算手法の導入
- (4) 異常検知の精度向上

以上の視点に基づき、簡易設備診断手法の開発や、手法自体の改善を提案し、数値計算によってその有効性を検証した。

本論文の構成は、以下の通りである。

第2章では、(1)(2)の目的のため、オンラインパラメータ推定時における時系列の複数データ処理に関して、データの発生が速く、処理装置を超えるような場合の、まとまったデータ処理方法に関して①自己相関関数を用いる場合、②逐次計算を繰り返す場合の二種類の方法を提案し、数値計算により実証的にそれらの比較検討を行った。

第3章では、(1)(2)の目的のため、カルマンフィルタを用いた異常検知手法において簡易計算手法を提案し、短時間の計算で有効な異常検知を行う手法を提案した。回転体等の振動信号等は、短時間で大量に出力され振動信号等の発生に対し、計算処理が追いつかない場合がある。また、カルマンフィルタを用いた場合計算が複雑で、推定したパラメータの変化が少なく異常検知しにくいという課題に対し、系が正常時の N 個のデータに対し新たに l 個のデータが加わった場合の近似解を導出し、これらの課題を解決するための簡易計算手法を導出した。

第4章では、(3)の目的のため、時系列解析において取り扱いの簡単なARモデルを用いて正常値からの乖離度を定義し、システムパラメータ推定時に簡易計算手法を導入・提示した。

また、時系列の予測誤差分散は、重みつきシステムパラメータ間距離となっており、「マハラノビスの汎距離」に一定値を掛けたものであることを示した。

特に予測誤差分散は、数式モデルのシステムパラメータの変化を正常値からの乖離度として示すことができ、設備の劣化状況を有効に評価できる指標となり、重みつきのない場合と比較して感度が良いことを数値計算により実証的に示した。

第5章では、(3)の目的のため、時系列解析において普遍的とも言えるARMAモデルを用いて、正常値からの乖離度を定義し、システムパラメータ推定時に簡易計算手法を導入・提示した。

ここでは、キュムラントが4次白色であることに着目し、4変数の関係を用いれば、キュムラントも自己相関関数の組合せで解析的に計算できることを示した。また数値計算で用いた2次のモデルでは、MA部分も解析的に導出できることを示した。

第 6 章では、(3) の目的のため、第 5 章で取り扱った 2 次元の ARMA モデルを 3 次元に拡張し、同じく簡易計算手法を導入・提示した。

第 7 章では、(4) の目的のため、複数の劣化指標を抽出し、あらかじめ定めたモデルに当てはめ劣化確率を算出し、複数の劣化確率の線形結合で異常検知するフォールト・マトリックス手法に改善を加えた。すなわち、劣化確率算出時に上下限の制約条件を導入し、さらに曲率を可変数としたモデルを開発して、現場の実態に近づけると共に精度の向上を図った。

第 8 章では、以上述べてきた各種の異常検知手法に関して、総合的に評価を行ない、今後の課題とまとめを行った。

以上述べたように、提案した手法は、数値計算によって有効性を実証的に確認した。

今後の課題としては、より汎用性の高い高次モデルへの拡張や厳密解との比較等さらに事例を増やし、現場での実測データを用いた、詳細な有効性評価のシミュレーションを行うなど、更なるモデルのブラッシュアップを図って行きたい。

審査結果の要旨

本論文では、時系列解析とその設備保全分野への適用に関して研究を行っている。

本論文では、従来手法とは異なるアプローチにより、従来から提案されている各種の手法の改善を試みると同時に、現場で容易に取り扱うことのできる設備異常検知の仕組みを提案している。本論文における改善の視点は以下の通りである。

- (1) 繰り返し計算等複雑な計算アルゴリズムの簡素化モデルによる計算時間の短縮
- (2) 計算時間の短縮による早期の設備異常検知の仕組みの構築
- (3) 現場でも簡易に設備の異常検知できる簡易計算手法の導入
- (4) 異常検知の精度向上

以上の視点に基づき、簡易設備診断手法の開発や、手法自体の改善を提案し、数値計算によってその有効性を検証している。

第 2 章では、(1)(2)の目的のため、オンラインパラメータ推定時における時系列の複数データ処理に関して、データの発生が速く、処理装置を超えるような場合の、まとまったデータ処理方法に関して①自己相関関数を用いる場合、②逐次計算を繰り返す場合の二種類の方法を提案し、数値計算により実証的にそれらの比較検討を行っている。

第 3 章では、(1)(2)の目的のため、カルマンフィルタを用いた異常検知手法において簡易計算手法を提案し、短時間の計算で有効な異常検知を行う手法を提案している。第 4 章では、(3) の目的のため、時系列解析において取り扱いの簡単な AR モデルを用いて正常値からの乖離度を定義し、システムパラメータ推定時に簡易計算手法を導入・提示している。

第 5 章では、(3) の目的のため、時系列解析において普遍的とも言える ARMA モデルを用いて、正常値からの乖離度を定義し、システムパラメータ推定時に簡易計算手法を導入・提示している。第 7 章では、(4) の目的のため、複数の劣化指標を抽出し、あらかじめ定

めたモデルに当てはめ劣化確率を算出し、複数個の劣化確率の線形結合で異常検知するフォールト・マトリックス手法に改善を加えている。

本研究に関して、国際学術論文誌（レフェリド・ジャーナル）に1件、国内学術論文誌（レフェリド・ジャーナル）に3件論文が掲載されたほか、紀要 11件、特許 4件、国際学会発表 9件、国内学会発表 4件、英文学術専門書（共著）1点と十分な業績を積んでいる。

以上のとおり、本論文は、本論文提出者が自立した研究者として十分な能力と学識を備えていることを示している。本審査委員会は、本論文の審査ならびに最終試験の結果に基づき、本論文提出者に対して博士（経済学）の学位を授与することを適当と認める。