

(技術資料)

機械稼働データを活用した予知保全の仕組の実現

Realization of Predictive Maintenance System Utilizing Machine Operation Data



中川智廣*1
Tomohiro NAKAGAWA



小熊尚太*1
Shota OGUMA



亀山浩行*1
Hiroyuki KAMEYAMA



中島 一*1
Hajime NAKASHIMA



友近信行*2 (博士(情報学))
Dr. Nobuyuki TOMOCHIKA

KOBELCO CONSTRUCTION MACHINERY CO., LTD. has developed a predictive maintenance system (KSCAN) to realize stable operation of hydraulic excavators and to improve customer satisfaction and service efficiency. The KSCAN system comprises a daily condition monitoring function and a periodic condition diagnostic function that are installed in a hydraulic excavator and a server for analyzing and diagnosing various sensor information sent from the excavator. The results are provided to service mechanics, enabling them to take preliminary measures on the operating machines that may experience serious failures and, thus, prevent them from failing. This paper explains the systems and functions achieving the above.

まえがき = 近年、油圧ショベルに求められる排出ガス規制や燃費といった環境性能に対する要求レベルは高まってきた。それを実現するために機械の仕組みが複雑化したり、様々な機能が組み合わさったりしてきたことで、装置の不調を捉えることが困難になってきている。

いっぽう、サービスマンの高齢化と引退により、若手の早期戦力化を図らなければならないが、技術習得を短期間で行うことは難しく、その効率化が必須課題となっている。さらには、お客様の施工管理において計画とおりに工事を完了させることが必須であり、そのため油圧ショベルの故障による長期間のマシンドアウンなどは未然に回避しなければならない。

こうした背景から、コベルコ建機(株) (以下、当社という) は、油圧ショベルのマシンドアウンを未然に防止するための予知保全の仕組み「Kスキャン」を開発し、安定稼働の実現をサポートした。また、未習熟なサービスマンでも高品質なサービスを提供できるよう、「Kスキャン」の中に油圧ショベルの診断を支援する機能を構築し、サービス業務の効率化にも寄与した。これらの仕組みや機能について紹介する。

なお、当社のサービス現場では、本仕組みを従来浸透してきた予防保全活動の中で扱うため、「予知保全」も含めて「予防保全」と呼んでいる。

1. 予知保全の仕組の狙い

これまで、当社はサービス活動として、油圧ショベルの稼働時間ごとに点検および部品の交換を行う「時間基準型の予防保全活動 (Time Based Maintenance)」を行ってきた。油圧ショベルの稼働をサポートする稼働機管

理システム「MERiT」には、フィルター類の交換時間および油圧ショベルの警報をお客様やサービスマンに知らせる機能を搭載している。しかし、油圧ショベルの使用環境によっては、想定外の劣化により故障に至る場合や、警報が発報されてからサービスマンが駆けつけた時には故障が重篤化してしまっている場合もある。これらを未然に防止するうえで、一定間隔でのメンテナンスのみでは限りがあると考えられる。

そこで、従来の時間基準型の予防保全に加えて、装置の状態を常に把握し、その状態に応じて必要な処置を取る「状態基準型の予知保全活動 (Condition Based Maintenance)」を導入することとした。

まずは油圧ショベルにおいて最重要部位である動力装置 (エンジン、油圧ポンプ) について予知保全の仕組みを開発し、段階的に対象装置の拡大を図ることとした。

重篤な故障に至る前にその状態を察知し、サービスマンに点検を促すことで、全世界のお客様に使用いただいている油圧ショベルが安定して、24時間・365日稼働できることが本仕組みの狙いである。

2. 実現の手段

2.1 仕組の概要

油圧ショベルにはエンジンおよび油圧アクチュエータを制御するための様々なセンサが搭載されている。また、稼働機を管理するために、位置情報や警報情報を送信する通信装置を搭載している。これらの情報を蓄積する仕組みはすでに構築し、運用を行ってきた。これらの既存のセンサと仕組みとを活用して予知保全の仕組み (図1) を構築した。

*1 コベルコ建機(株) ICT推進部 *2 (株)神戸製鋼所 技術開発本部 生産システム研究所

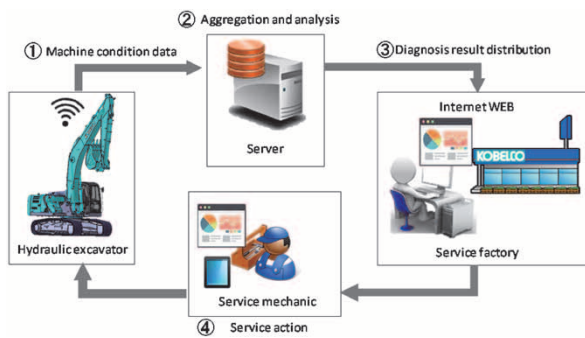


図1 予知保全の仕組み
Fig. 1 Outline of predictive maintenance system

- ①各種センサ情報をサーバへ自動的に送信
- ②サーバに蓄積されたデータを自動的に分析，診断
- ③診断結果をサービスマンへ提供
- ④提供された情報に基づき，サービスマンが必要な処置を実施

動力装置の状態をタイムリーかつ精度よく把握するため、「状態観察機能」と「健康診断機能」の二つの診断機能を組み合わせることにより，これらを実現した。

2.1.1 状態観察機能

動力装置の日々の稼働状況を観察（測定）し，その変化傾向から動力装置の状態を診断する。（図2（a））

- ①一日の稼働時における各センサ情報を蓄積
- ②必要に応じてデータを圧縮し，夜間に送信
- ③一日ごとの変化の傾向を分析し，診断
- ④翌朝，診断結果を提供

診断のために機械を止めることなく，お客様では気づきにくい日々の微妙な変化を新車時の傾向と比較することでの確に捉えることを狙った。

2.1.2 健康診断機能

サービスマンが動力装置に対し行う点検用の操作を自動化して，常に同じ条件にて装置の状態を診断する。（図2. b）

- ①各種点検パターンを一つの運転モードに集約
- ②水温，油温を一定条件に自動的に調整
- ③測定後には即座にデータを送信し，分析，診断
- ④診断結果をその場で確認

サービスマンごとにある，技量の違いによって生じる測定結果のばらつきの影響を排除することにより，診断精度の向上を図る。また，点検時間を短縮でき，お客様

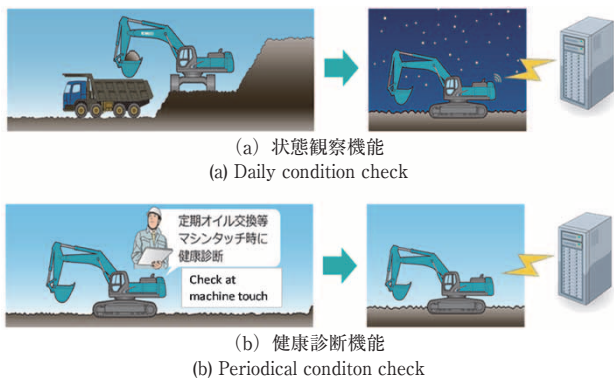


図2 予知保全機能
Fig. 2 Function of predictive maintenance

の待ち時間を最小限にすることができた。

2.2 具現化

2.2.1 診断の対象とする動力装置の症状

動力装置の状態を診断するにあたり，捉えるべき症状を定義しておく必要がある。これまで蓄積してきた故障データベースから，動力装置の系統ごとに故障事例を抽出し，発生頻度と稼働への影響度との両方の観点で整理を行い，捉えるべき症状を決定した（図3）。

2.2.2 診断内容

1) 評価指標の設定¹⁾

評価指標の設定手順は①事象の因果関係の把握，②データの前処理，③モデルの作成／評価，④実機搭載のステップに分けて実施した（図4）。

一例として，PM（Particulate Matter）排出低減装置として搭載しているDPF（Diesel Particulate Filter）のすす詰まりを診断するために設定した評価指標『すす堆積増加量』の設定手順について紹介する。

①事象の因果関係の把握

捉えるべき症状に関して，関連する事象とその周辺事象を抜けなく，かつ重複なく抽出する。つぎに，各事象を「原因」・「結果」・「共変関係」・「外乱」の4グループに分類して各事象同士のつながりを線で結び，作用する順に並び替える。最後に，捉えるべき症状を捕捉する上で最も効果的な事象を，着目すべき事象（評価指標の基礎）として選択する。本指標の場合はDPF差圧の増加量（Increasing differential pressure）を着目すべき事象とした。すす堆積量の増加に関する因果を表した関係図を例として図5に示す^{3), 4)}。

②データの前処理

評価指標に必要なモデルの精度を確保するためには，データの前処理作業が重要である。外れ値や異常値を除去し，データ分布の形状などを確認する。油圧ショベルの稼働においては，稼働時間が短いデータやDPF再生中のデータなど，誤差の影響を受けやすい部分についてはあらかじめ除く必要がある。

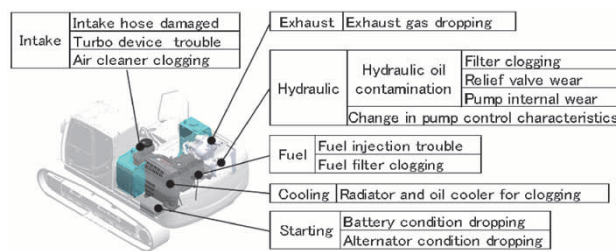


図3 診断の対象とする系統と症状
Fig. 3 Symptoms to diagnose

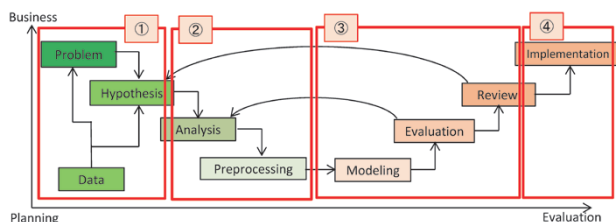


図4 評価指標の設定手順
Fig. 4 Procedures of making evaluation index

③モデル作成・評価²⁾

作成した因果関係図に基づき、着目すべき事象を表すモデルの作成を行う。作成したモデルの精度は、相関係数や予測値と実測値の残差などにより評価する。図6に示すように、本事例ではモデル予測値と実測値の差が小さく、良好な精度であると判断した。

また、評価指標と実測データを時系列で比較し、実際のすす堆積により発生・増加する状況（例、すす再生不良や手動再生など）やDPF交換の状態に追従しており、評価可能であると判断した（図7）。

④実機搭載

まず、データロガーなどの時系列データを用いて、基本ロジックの有効性を確認する。つぎに、1日単位のデータで診断できるよう、膨大な稼働データの中から診断

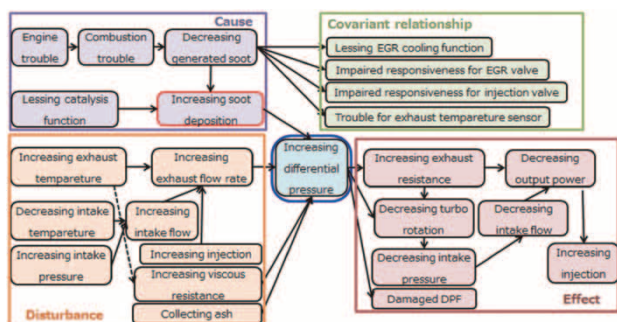


図5 DPFすす堆積量の増加に関する因果関係図

Fig. 5 Causal relationship diagram of increasing soot deposition on DPF

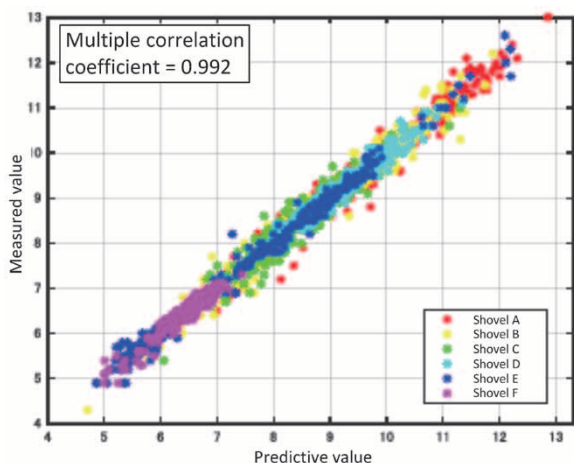


図6 予測値と実測値の比較（すす堆積量指標）

Fig. 6 Comparison of predicted and measured values (Evaluation index increasing soot deposition)

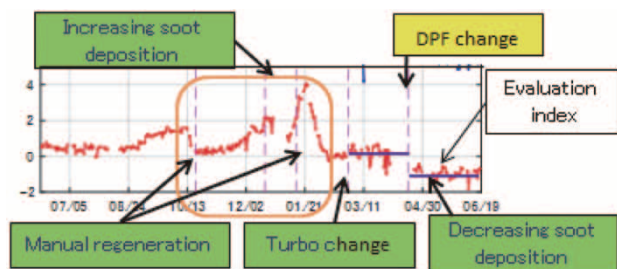


図7 すす堆積量の評価指標（1日毎の評価）

Fig. 7 Evaluation index increasing soot deposition (Daily)

に有効なデータのみを抽出して蓄積する機能を油圧ショベル側へ織り込む。システム構築の際の基本的な考え方としては、油圧ショベル側でのデータの加工や演算処理は必要最低限にとどめ、サーバ側で高度かつ複雑な演算処理を行うことで多種多様な機械仕様や地域特性などにも柔軟に対応できるようにした。

また、機体ごとに個体差があり、評価に影響する可能性がある。このため、個体差を考慮して評価できるよう、機差学習の機能をサーバ側の演算機能に持たせた。この結果、誤判定が減り評価の精度向上が実現できた。

2) 状態判定方法

これまで、正常と故障の二つの判定基準であった。今回、予知保全の仕組みを構築するにあたり、正常ではない状態を捉えるために、正常の領域内に新たに二つの判定基準（経過観察、要点検）を設けた（図8）。

3) 判定閾（しきい）値の設定

指標の特性から、以下の二つの方法で判定閾値の設定を行った。

- ①機械設計上、故障の判定基準が明確になっている指標は、その基準の手前に判定閾値を設定した。
- ②今回独自に考案した評価指標については、故障の判定基準がない。このため、稼働に影響を及ぼす症状を実際に再現して運転手の感性への影響を調査し、判定閾値を設定した。

なお、感性への影響調査にあたっては、長年油圧ショベルの開発に従事してきたテストオペレータにより操作性の評価を実施した。この結果、掘削力や作業装置のスピードの変化が±20%程度に達すると、運転手が操作感覚に違和感を覚え、作業能率低下による不満を認識し始めることがわかった。そこで、この手前に閾値を設定することとした。

4) 設定した評価指標の一覧

以上の工程を経て系統ごとに評価指標を設定した（表1）。

2.2.3 診断情報の提供方法

「Kスキャン」の情報をサービスマンに提供するにあたり、入手しやすさと現場での取り扱いを考慮して、タブレット端末やスマートフォン用のアプリを開発した。また、内容を理解しやすいよう、診断結果は数字と時系列のグラフで表示し、結果に応じて提案すべき点検内容も表示した。さらに、お客様にも保有機の診断状況が把握いただけるよう、既存の稼働機管理システム「MERiT」内にレポートを表示する機能を追加した。（図9）

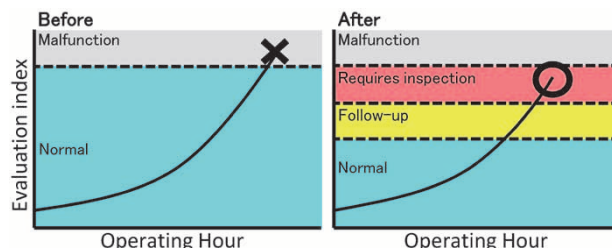


図8 判定基準の設定

Fig. 8 Setting of criteria

表 1 評価指標の一覧
Table 1 List of evaluation index

	Daily condition check	Periodical condition check
Output system	Efficiency	Fuel consumption rate
	Rotation down rate	Rotation down
Cooling system	Efficiency(Cooling)	-
	Efficiency(Hyd)	
	Max water temp	
	Max hyd oil temp	
Fuel system	Injector leakage characteristics	Common rail pressure
	Common rail pressure	Injection adjustment value
Intake system	Boost Efficiency	Boost pressure
	Air cleaner clogging	
Exhaust system	Soot deposition amount	DPF pressure differential
Starter system	Start time	Battery voltage
	Battery voltage	
Hydraulic system	Hyd oil filter clogged	Relief pressure
		Pressure decrease rate
		Pump volumetric efficiency
		Pump flow characteristic

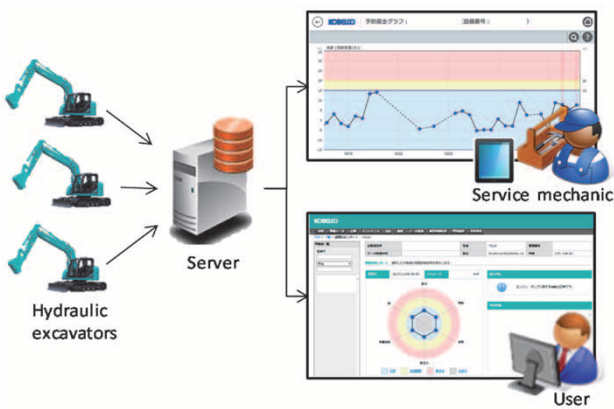


図 9 Kスキャンによる情報提供の仕組み
Fig. 9 Image of information service provided by KSCAN

3. 予知保全の仕組みの検証

予知保全の仕組みにおける検証の進め方としては、仕組みの早期実現のため、診断機能の基本的な確認を行った。その上で、精度のチューニングとフィールドでのN増し検証を並行して進めるアジャイル型の方法を取り入れた。以下の手順により、従来チューニングに必要とされていた期間を大幅に短縮することが可能となった。

3.1 診断機能確認

実際に軽微な故障状態を再現した試験機を診断し、設定した評価指標で判定できることを確認し、モニタ評価に進めた。

3.2 フィールドテスト

N増し検証を進めながら完成度を段階的に上げるために複数のステップを設けた。ステップごとに、モニタ台数と地域を追加しながら目標とする精度に向かって、評価指標の改善と調整を行った。

STEP1：日本国内の既出荷機に対して予知保全機能を搭載し、開発試験機で作り上げた精度の見極めを行った。

STEP2：台数を大幅に追加してSTEP1の改善を反映した機械側ソフトの測定ロジック、サーバ側の評価式にて検証を継続した。

STEP3：使用環境や機械仕様などの条件を追加するために、海外向けに生産された主要モデル全てにSTEP2の改善を反映した状態観察機能を搭載してグローバルにデータ収集を行い、検証した。

4. 成果 (モニタ期間中)

本機能の運用により、実際に故障の兆候を捉えた事例について紹介する。

4.1 作動油汚染の事例 (健康診断機能)

- ・機械用途：産業廃棄物の分別と積込
- ・診断結果：油圧機器の性能劣化兆候有り (図10)
- ・点検結果：作動油の汚染, 圧力制御弁の摩耗 (図11)
- ・お客様からのご指摘：なし

健康診断機能により、図10の診断結果1を得た。正常な状態であれば、32~34 MPa程度のリリーフ圧力であるが、当該機 (A号機) は31.7 MPa付近まで低下していたため、機械の点検を行った。図11に示す写真のように、作動油は汚染しており、リリーフ弁のポペットシート部が異常摩耗していることが確認できた。当該機 (A号機) はリリーフ弁および作動油を交換することで正常状態に復帰できた。診断機能にて油圧ショベルの不調を実際に捉え、それをお客様が気付く前に発見することができ、当初の目的を達成できた。

以前、当該機 (A号機) は先端アタッチメントの取り付け、取り外しが行われており、その際に取付けられたブレーカ装置内に残留していた異物により、作動油が早期に汚染されたものと推測される。この件を機に、サービス工場では同じお客様に対して先端アタッチメントの取り付けに関する注意事項を浸透させることが可能になった。当該機 (A号機) のマシンドアを防止するだけでなく、お客様が保有されている他の油圧ショベルにお

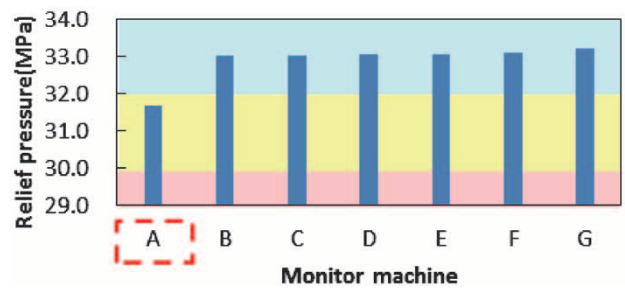


図10 事例1における診断結果
Fig.10 Diagnostic data in case 1

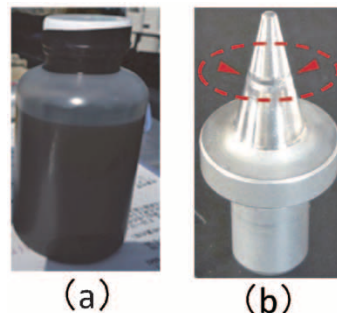


図11 事例1における点検部品 (a) 作動油, (b) リリーフ弁
Fig.11 Inspection parts in case 1 (a) Hydraulic oil, (b) Relief valve

いても、類似問題の発生を未然に防ぐことにも貢献できると考えられる。

4.2 エンジン オーバーロードの事例 (状態観察機能)

- ・ 機械用途：碎石積込
- ・ 診断結果：エンジンとポンプ出力のアンマッチ (図12)
- ・ 点検結果：油圧ポンプ制御部品の摩耗 (図13)
- ・ お客様からのご指摘：なし

状態観察機能により、図12の診断結果2を得た。正常な状態であれば、0.25~0.29程度の評価指標値になるが、当該機 (H号機) は0.33付近まで上昇していたため、点検を行った。図13の写真に示すように、ポンプ吐出流量を制御する部品が摩耗していることが確認できた。当該機 (H号機) は、摩耗した部品を交換することで正常な

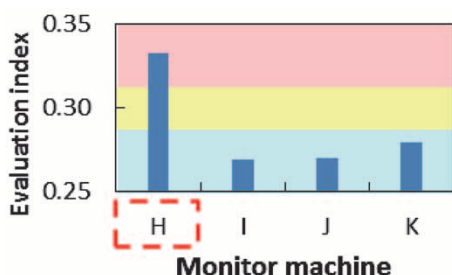


図12 事例2における診断結果
Fig.12 Diagnostic data in case 2

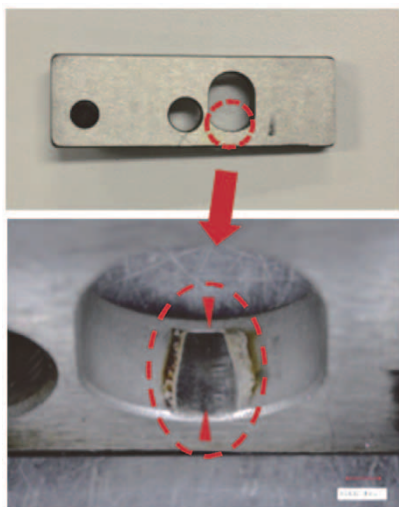


図13 事例2における点検部品 (ポンプ制御部品)
Fig.13 Inspection parts in case 2 (Pump control parts)

状態に復帰できた。お客様の運転方法は該当部位の作動頻度が高い運転方法だったため、想定よりも早く摩耗したと考えられる。

この状態を放置し続けた場合、エンジンへの長期的な過負荷により、オーバーホール時期に部品交換レベルでは回復できない可能性があり、お客様にライフサイクルコストの予期せぬ負担を強いる恐れがある。当該機を保有されているお客様に対して状況を説明し、他の保有機に対して、同内容の点検と類似箇所の交換工事とを実施した。こうした成功事例によりお客様の保全意識を高めることにも貢献できた。

5. 展開スケジュール

日本国内においては、2016年9月に上市した「SK250-10」より本機能を使った予知保全活動を開始し、2017年下期から海外にも活動を展開した。

むすび = 世界中のお客様が保有されている全ての油圧シヨベルが24時間、365日安定に稼働することを目指し、動力装置が重篤な故障に至る前に、その状態を察知してサービスマンに点検を促す「状態基準型の予知保全」の仕組みを構築することができた。

実際に「状態基準型の予知保全」を運用した結果、データに裏付けされた情報をもとに診断を行うことで、サービスマン個人の力量に左右されない高品質なサービスを提供することが可能になった。これにより、お客様の保全に対する意識を高めることにも貢献できると考えている。

今後もサービス現場における活用実績を重ね、継続的な診断精度の向上と対象装置の拡大を図る。また、そこから得られるビッグデータをさらに活用して、より良い商品開発とサービスの実現を追求する。

こうした活動を通してお客様満足度の向上に努め、油圧シヨベルの信頼性向上にて社会発展に寄与していく。

参考文献

- 1) 井手剛. 入門 機械学習による異常検知—Rによる実践ガイド. コロナ社, 2015
- 2) 加納学. システム制御情報学会誌. 2004, Vol.48, No.5, p.165-170.
- 3) 鈴木孝幸. 自動車用ディーゼルエンジンの理論と実際. 山海堂, 2007
- 4) 豊田利夫. ターボ機械. 2004, Vol.32, No.3, p.129-137.