

株式会社 NTTデータ数理システム
2022年度 学生研究奨励賞

スマート設備状態監視・診断システムに関する研究 ー ベイジアンネットワークと電流信号による回転機械異常検出と感度評価 ー

三重大学 生産環境システム学研究室
谷本 樹音
宇陀二千佳 山岡桃子



目次

■ 研究背景

- ・ 診断の老朽化、設備診断技術者の不足、設置困難な場所への対応

■ 研究課題・目的

■ 研究方法

- ・ 本研究で扱うデータ、異常種類について、実験の流れ

■ 研究概要

- ・ 特徴パラメータ、ノイズ除去

■ 簡易診断

- ・ モデル構築詳細、モデル構築結果

■ 精密診断

- ・ 感度分析、モデル構築詳細、モデル構築結果、検証結果

■ 結果のまとめ・考察

■ 今後の課題

研究背景 —設備の老朽化—

長年使用している老朽化の設備の増加

設置してから数十年間適切な診断・保全を受けていない老年期に入っているインフラ施設や工場設備がたくさん存在する。

また、日本では高度成長期(1960～1970年)に建てられたインフラ施設・工場設備が現在も数多く使用されている。

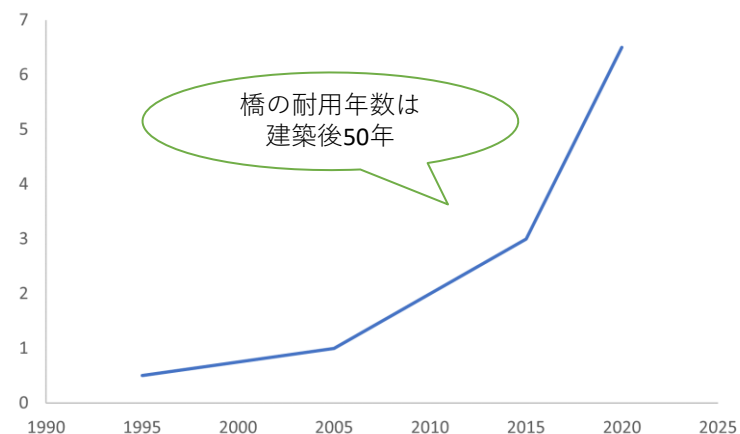
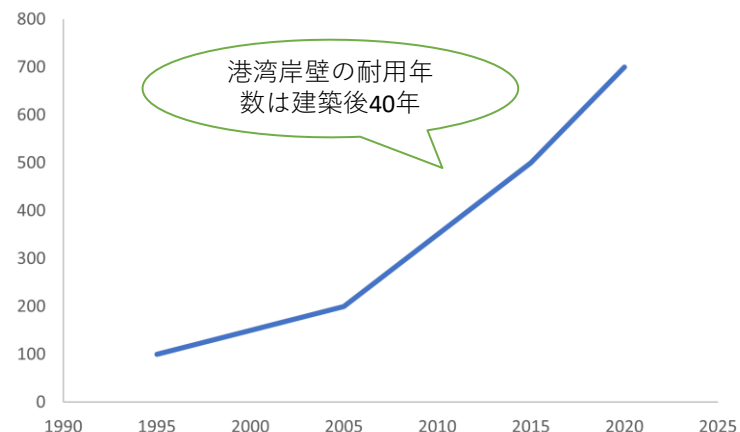


図1 耐用年数を迎える橋梁を港湾岸壁の推移^[1]

研究背景 — 設備診断技術者の不足 —

理想と現実の差が大きくなる現場

- ◆ 設備の高度化(知能化・自動化・省力化)による現場の設備操作人員が減らされた時

理想：設備の面倒を見る診断・保全技術者は相対的に**増員される**

現実：設備・保全技術者は設備操作人員とともに**減らされる**

- ◆ 設備の高度化による設備操作の簡易化の進行により、

理想：設備操作に対する技術・技能の要求が下がるので、代わりに技術者の**設備診断・保全技術・技能を向上させる**

現実：科学的な手法でなく勘・コツ・度胸を頼りに設備管理を行っていることが多く、**設備診断・保全技術・技能が継承されていない**

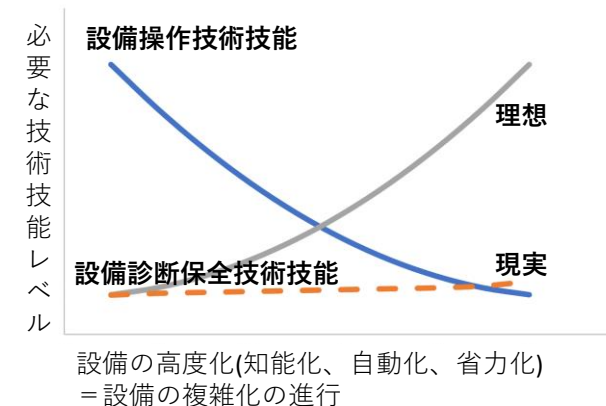
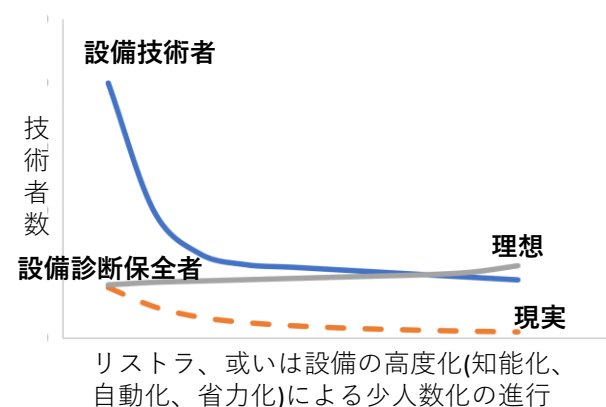


図2 生産現場の理想と現実^[2]

研究背景 —設置困難な場所への対応—

電流信号により人が出入りしにくい場所にも設置が可能に

◆ 主流である**振動信号**による回転機械の設備診断

収集が簡便で回転機械の様々な異常信号がキャッチできる。

ただし、高温・高湿エリアや放射線エリアなどの場所は振動信号の計測作業が困難であり、そのような環境に設置される回転機械の有効な診断方法がない。

◆ **電流信号**による回転機械の設備診断

電流信号は取得が容易で診断対象から離れた場所で測定できる。

ただし、異常種類によって電流信号から状態特徴を抽出することが難しい場合もある。



研究課題・目的

◆ 本研究の課題

- ・ モータトルクに大きく影響する異常状態(ミスアライメントや接触異常など)は検出しやすいが、軸受傷の早期異常は比較的検出しにくい
- ・ これまでに電流を利用した設備診断の研究が少ないため、事例がない

◆ 本研究の目的

ベイジアンネットワークを用いて、モータにより駆動される回転機の異常状態を検討対象とし、電流信号による回転機械異常検出と感度評価を行う

◆ 活用方法

電流を利用した異常検出するシステムの開発

→人が立ち入るのが困難な場所に設置された機械でも設備診断が可能となる

研究方法 一本研究で扱うデータ

◆ 実験内容について

実験設備：中速回転機械シミュレータ

回転速度：1200rpm

サンプリング周波数：100kHz

時間：1min、動負荷：200kg

◆ 異常種類

- ・ 正常
- ・ 複数傷外輪、内輪
- ・ 点フレーキング外輪、内輪（120度、180度、360度）
- ・ ワイセ傷外輪、内輪（120度、180度、360度）

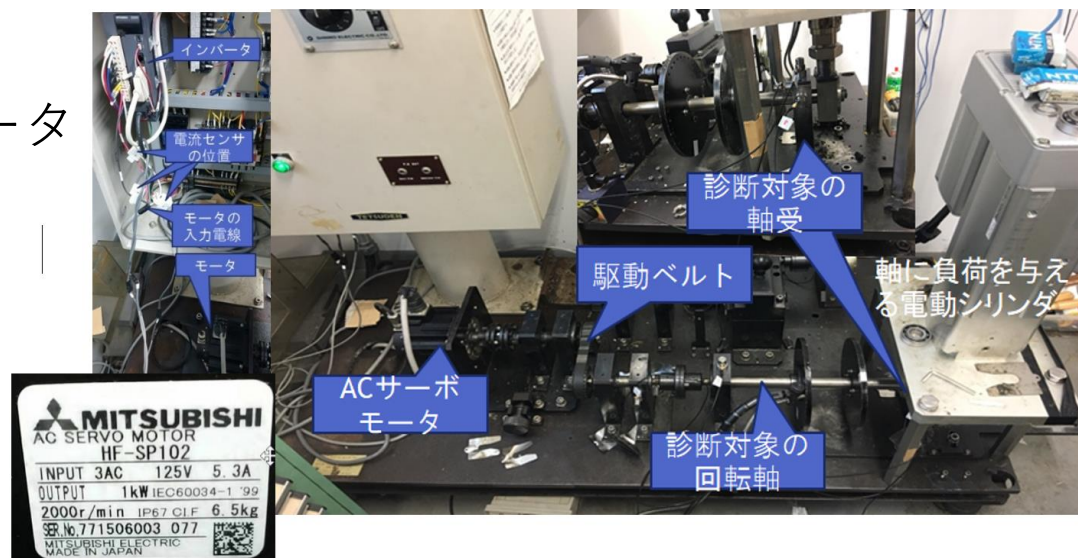


図4 中速回転機械シミュレータ

研究方法 —異常種類について—

回転機械の異常

構造系異常



ミスアライメント・アンバランスなど
低周波数帯域に特徴信号が現れる

自励系異常



歯車摩耗・共振など
中周波数帯域に特徴信号が現れる

衝撃系異常



軸受異常・歯車局所異常など
高周波数帯域に特徴信号が現れる

今回は早期の異常検出が比較的しにくい、**衝撃系異常**を診断対象とする。

研究方法 —異常種類について—



軸受複数傷(外輪)



軸受複数傷(内輪)



点フレーキング(外輪,120度)



点フレーキング(内輪,120度)



外輪点フレーキング(180度)



内輪点フレーキング(180度)



ワイセ傷(外輪,120度)



ワイセ傷(内輪,120度)

※異常種類の各点フレーキング、ワイセ傷の180度と360度は省略

研究方法 —実験の流れ—

電流信号の測定

有次元特徴パラメータの算出

有次元特徴パラメータとベイジアンネットワーク
による簡易診断

正常？
異常？

正常

終了

異常

各スペクトル成分の平均値と標準偏差を計算

SDIとDIの比較を行い、ノイズのスペクトル成分を削除

無次元特徴パラメータの算出

無次元特徴パラメータとベイジアンネットワーク
による精密診断

異常種類の特定

研究概要 —特徴パラメータ—

特徴パラメータとは

時系列信号から求めた時間領域の特徴パラメータ、およびスペクトルから求めた周波数領域の特徴パラメータなどがある。また、設備診断用の特徴パラメータは「有次元特徴パラメータ」と「無次元特徴パラメータ」に分けることができる。

◆ 有次元特徴パラメータ

有次元特徴パラメータは、信号の平均値・実効値・ピーク値などのように単位(速度、加速度など)を持ち、信号の振幅の大きさを表すものである。

◆ 無次元特徴パラメータ

従来の統計学で使用されている歪度、尖度などのような特徴パラメータであり、単位を持たず、信号の大きさに関係ない、信号の形状を反映するものである。

研究概要 —ノイズ除去—

SDIとDIの比較について

複数個のスペクトル成分を1セットとして、
診断信号と基準信号（正常信号）のDI値を計算する

$$DI = \frac{|\mu_1 - \mu_2|}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}}$$

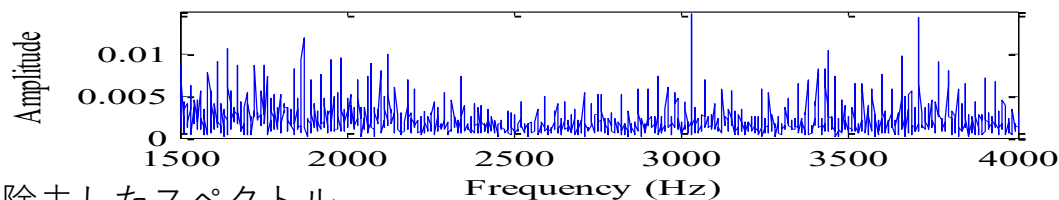
平均値： μ_1, μ_2

標準偏差： σ_1, σ_2

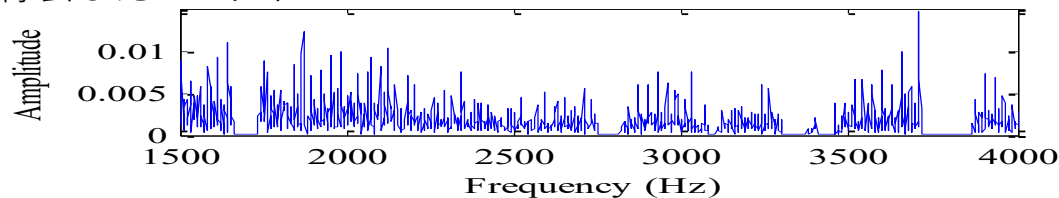
DI>SDIの場合：スペクトル成分は残る

DI<SDIの場合：スペクトル成分を除去する

生信号のスペクトル



ノイズ成分除去したスペクトル



簡易診断 —モデル構築詳細—

ベイジアンネットワークによるモデル構築

◆ 使用したソフトウェア

BayolinkS (NTTデータ数理システム社製)

◆ グラフ構造の探索

構造学習アルゴリズム : Greedy Search

評価基準 : AIC

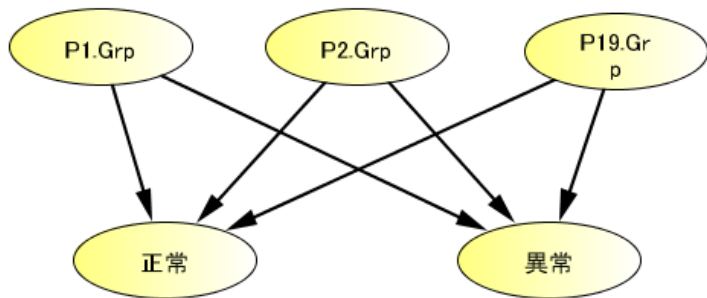
◆ 使用したパラメータ

P1, P2, P19

◆ 使用したDI値

DI値=1.3

簡易診断 —モデル構築結果—



検証結果

	正常	異常
件数	108	108
正解件数	102	102
正解率	0.944444	0.944444
平均対数尤度	0.465926	0.465926

感度分析結果

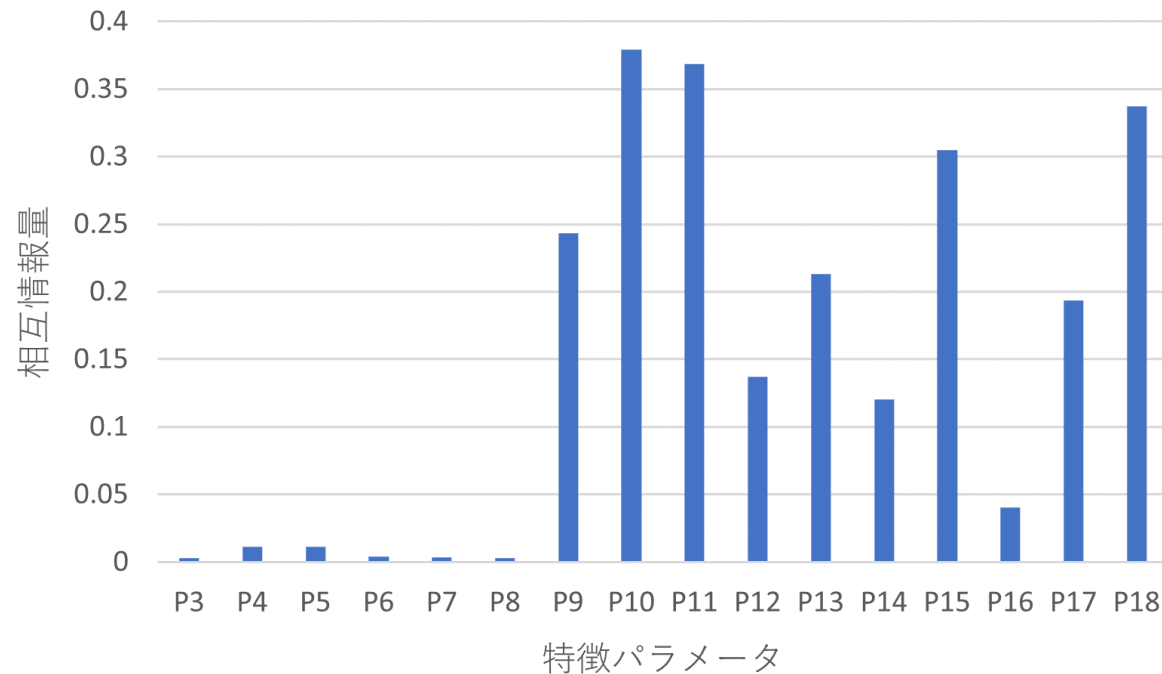
P1 : 0.021470
P2 : 0.014466
P19 : 0.006593

有次元特徴パラメータであるP1,P2,P19を用いて簡易診断をおこなった結果、正解率が約94%であることから、診断を正しくおこなうモデルを構築することができた。

また、感度分析の結果から、主にP1とP2が簡易診断を行う上で重要なパラメータであることがわかった。

精密診断 — 感度分析 —

感度分析の結果、パラメータ9,10,11,15,18の5つが精密診断をおこなう上で大きく影響していることがわかる。
よって、上位5つを用いて精密診断をおこなうこととする。



精密診断 —モデル構築詳細—

ベイジアンネットワークによるモデル構築

◆ 使用したソフトウェア

BayolinkS (NTTデータ数理システム社製)

◆ グラフ構造の探索

構造学習アルゴリズム : Greedy Search

評価基準 : AIC

◆ 使用したパラメータ

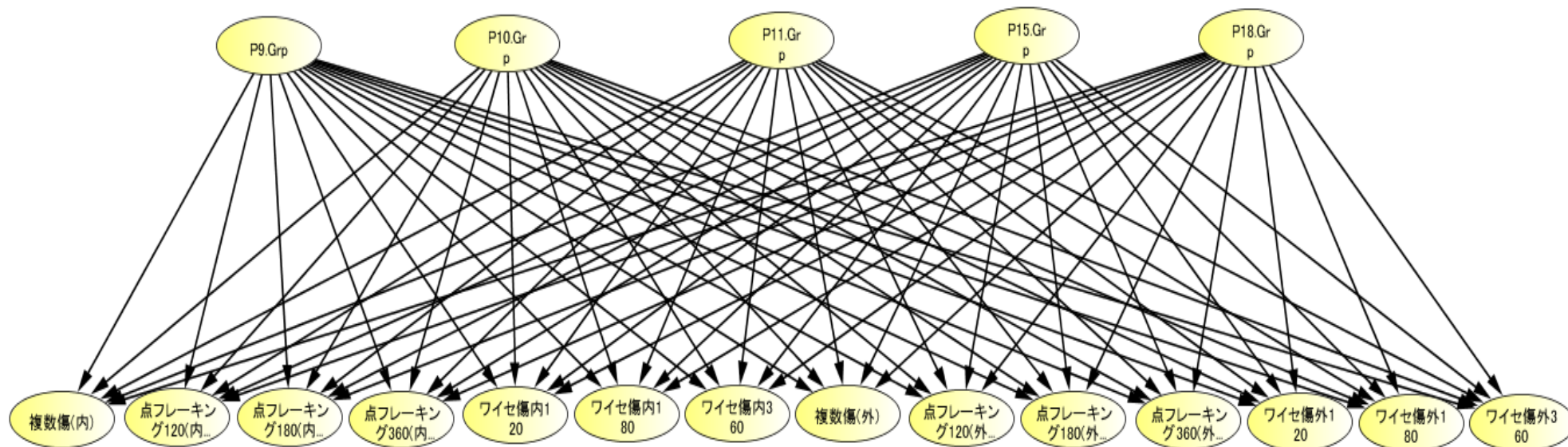
P9, P10, P11, P15, P18

◆ 使用したDI値

DI値=1.3

精密診断 —モデル構築結果—

構造学習の結果



精密診断 — 検証結果 —

軸受内輪の検証結果

	複数傷	点フレー キング120	点フレー キング180	点フレー キング360	ワイセ傷 120	ワイセ傷 180	ワイセ傷 360
正解率	0.925558	0.933002	0.931762	0.925558	0.925558	0.928040	0.929280
平均対数 尤度	0.486525	0.506299	0.499735	0.555083	0.510479	0.509795	0.482439

軸受外輪の検証結果

	複数傷	点フレー キング120	点フレー キング180	点フレー キング360	ワイセ傷 120	ワイセ傷 180	ワイセ傷 360
正解率	0.928040	0.934243	0.930521	0.928040	0.926799	0.926799	0.926799
平均対数 尤度	0.528742	0.502456	0.502003	0.512275	0.508084	0.527742	0.496374

結果のまとめ・考察

◆ 電流信号による回転機械異常検出と感度評価

簡易診断・精密診断どちらも診断精度が9割を超え、異常種類をきちんと検出していることから、電流信号を利用した回転機械の異常検出は可能であることがわかった。

しかし、使用するDI値を変えても診断率は変わらなかったため、検証方法を再度検討する必要がある。

◆ 考察

軸受傷の早期異常は比較的検出しにくいと言われているが、検証結果では9割以上の正解率であったため、ノイズ除去や感度分析をおこなったことで、精度が上がったことがわかる。

■ 今度の課題

- ◆ データ処理・検証方法を再度見直し、DI値を変えたデータを比較し最適なDI値を検出する
- ◆ 電流信号で異常種類を検出しやすい構造系異常であるアンバランスやミスアライメントなどと比較し、構造系異常と摩耗系異常(軸受異常)での違いを検証する

参考文献

1. 陳山 鵬, “社会・生産プラントの安全・安心のための回転機械設備診断の基礎と応用”, (P5)
2. 陳山 鵬, “社会・生産プラントの安全・安心のための回転機械設備診断の基礎と応用”, (P6)
3. 正 劉 信芳・馮 芳・中村孝博, 誘導電動機の電流信号による回転機械系の監視診断,
日本機械学会[No.16-58]