

**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振動信号による回転機械異常検出と感度評価ー**

NTTデータ数理システム 学生研究奨励賞2022

**2022年12月2日
三重大学/生物資源学部/共生環境学科
宇陀二千佳
谷本樹音 山岡桃子**

1. 研究背景
2. 課題
3. 目的
4. 研究方法
5. 研究結果
6. まとめ
7. 付録

1. 研究背景：設備の老朽化について

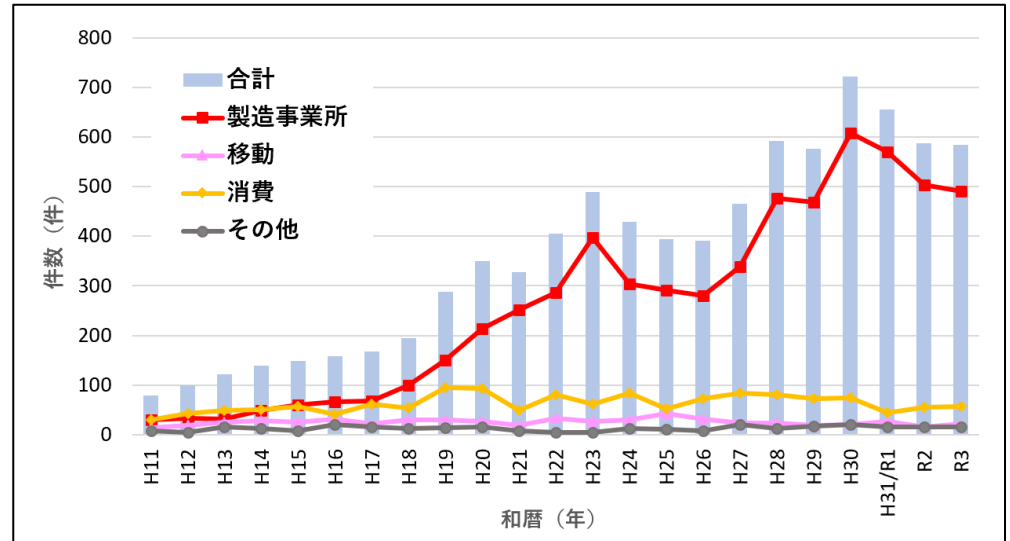
■ 老朽化設備の増加

設備は普段から診断や保全をしっかりと行えば、異常が発生しても原因を早期に突き止め、正常に修復することで事故を未然に防止することができる。

しかし世の中には設置してから数十年間適切な診断、保全を受けずに老朽化した工場設備が無数に存在している。また1960～70年代の高度成長期に作られた、これから老朽化していく設備は現在でも数多く使用されている。

■ 設備の老朽化に伴う事故の増加

右図は高圧ガス事故全体の件数推移であり、事故は年々増加傾向にあることがわかる。また事故の多くは製造事業所で発生している。設備事故の頻発は多大な人的、経済的な損失に加え、地球環境に悪影響を及ぼすこともある。



出所：経済産業省「高圧ガス事故の状況について」のデータより作成

1. 研究背景：設備の診断技術の重要性

■ 診断技術の向上がもたらすもの

重大事故の防止

重要な設備のトラブルや事故を未然に防ぎ、人々の豊かな生活を守る

生産効率向上

突発的な故障による生産停止を防ぎ、修復にかかる費用・時間や生産損失を削減する

より良い地球環境

設備を最適な状態に保つことで省エネルギー、低生産コスト、高効率化を実現する

1. 研究背景：現場の設備について

装置型産業における設備は回転機械、配管、制御機械、運搬機械などがある。その中で回転機械は最も多く使用されており、劣化発生頻度も全体の約4割を占めている。**装置型産業において回転機械は最も劣化しやすい設備である。**

回転機械設備の診断対象箇所は軸受の部品が多く、これらは常に回転しているため摩耗や破壊しやすいものである。

回転機械設備を診断する技術の中で、**振動法による診断は約7割近くを占めており最も多く使用されている診断方法である。**

軸受の診断技術を高めることは、設備で発生する多くの故障を防ぐことに繋がる。
知的手法(AI, ベイジアンネットワークなど)を使うことで振動法の精度を高め、スマート設備診断システムを構築することができれば、多くの設備事故を防止することができる。

本研究では診断対象を軸受とし、振動法を採用する

1. 研究背景：回転機械の異常について

■ 回転機械の異常種類は大きく分けて3種類ある

構造系異常

Ex: ミスアライメント, アンバランス
etc...

自励系異常

Ex: 歯車摩耗、共振 etc...

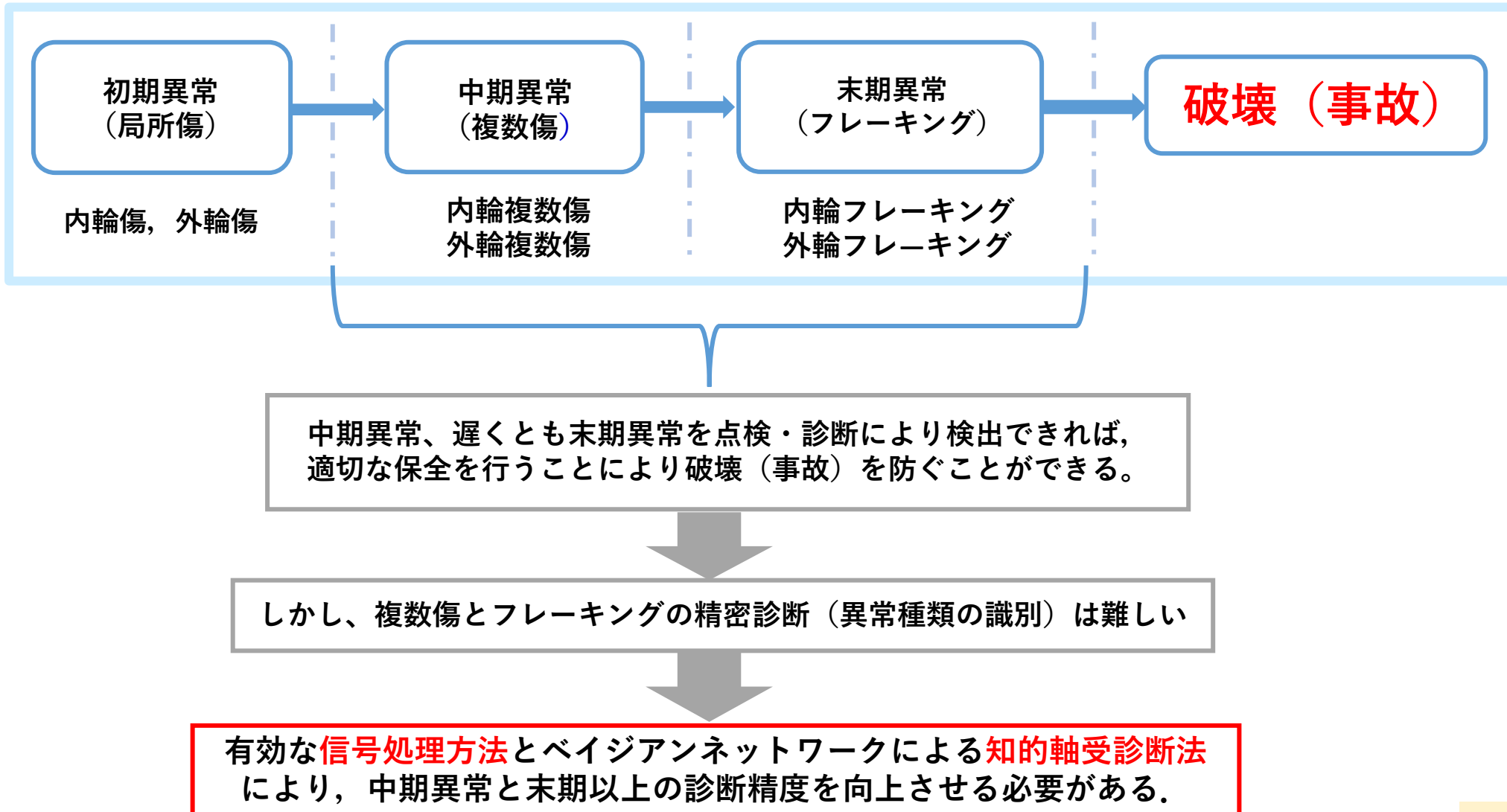
衝撃系異常

Ex: 軸受異常、歯車局所異常 etc...

本研究では、軸受複数傷やフレーキングによって発生する
衝撃系異常が診断対象である

2. 課題：中期異常（複数傷）・末期異常（フレーキング）の診断精度向上

■軸受が破壊に至るまで



3. 目的：特徴パラメータの選定により中期・末期異常の診断精度を高める

振動法では振動を計測し、振動信号の特徴から設備の状態を推定している。振動信号を用いて算出され、信号の特徴を表すパラメータを特徴パラメータといい、有次元と無次元の2種類がある。

■ 有次元特徴パラメータ

- ・ 信号の平均値，実効値，ピーク値など
- ・ 信号の振幅の大きさを表すもの
- ・ 異常か正常かの判断（簡易診断）に有効
- ・ 異常種類の識別（精密診断）には基本使わない

■ 無次元特徴パラメータ

- ・ 信号の歪度，尖度など
- ・ 信号の形状を表すもの
- ・ 異常種類の識別に有効である
- ・ 異常種類によって感度の高さが変わる

異常種類の診断精度を高めるためには異常種類の識別に有効なパラメータを使用することが重要である。数ある無次元特徴パラメータの中から最適なものを見つけ、統計フィルタとベイジアンネットワークによりスマート軸受診断システムの構築法を確立することを目的とする。

4. 研究方法：統計フィルタの利用について

■本研究では、有効な信号処理方法として統計フィルタを使用する。

複数個のスペクトル成分を1セットとして、基準(正常)信号と診断(異常)信号のDI値を計算する。

$$DI = \frac{|\mu_1 - \mu_2|}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} \quad \begin{array}{l} \mu : 2つの信号の平均値 \\ \sigma : 2つの信号の標準偏差 \end{array}$$

右図のように

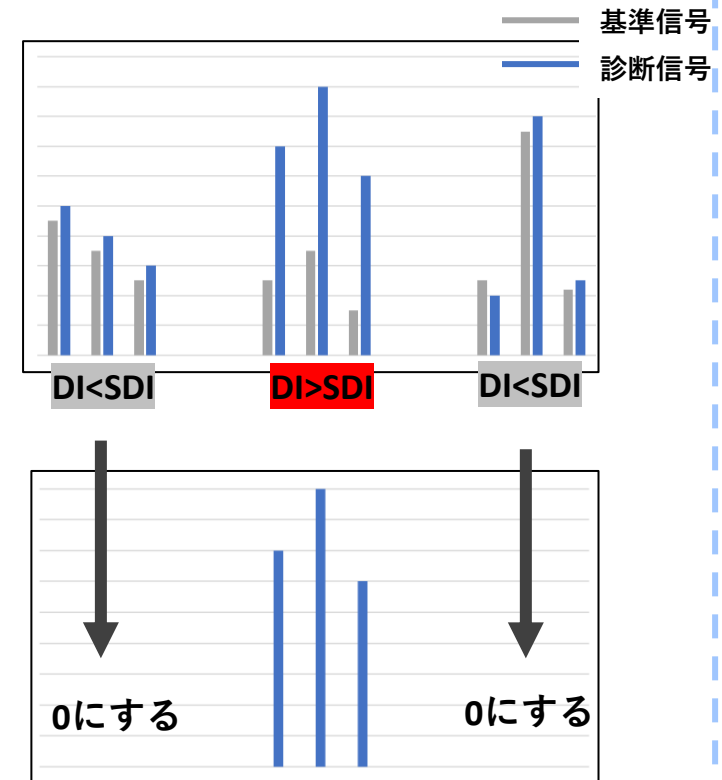
DI < SDI*1で、基準信号と診断信号の間に統計的な有意差がない場合

→診断信号のスペクトル成分はノイズとみなし0にする

DI > SDIで、基準信号と診断信号の間に統計的な有意差がある場合

→診断信号のスペクトル成分は残す

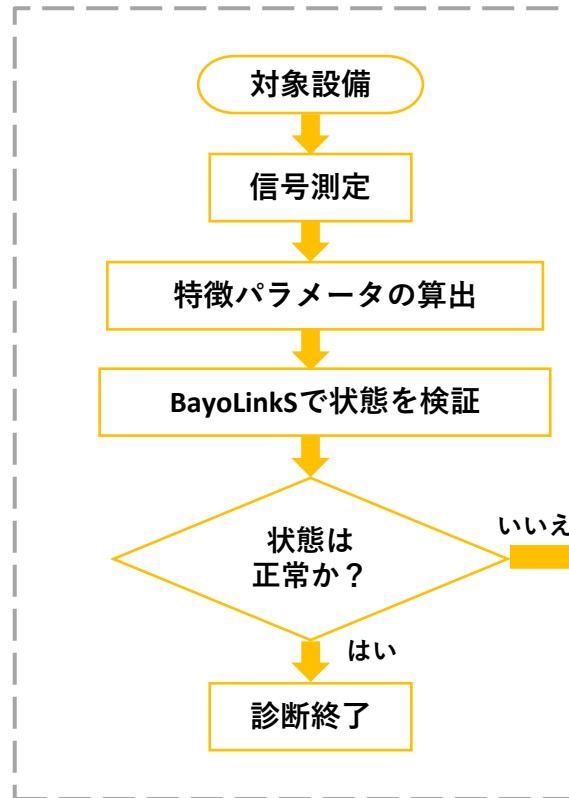
統計フィルタの使用により診断に有効なデータのみを残すことができるため、診断精度を高めることができる。



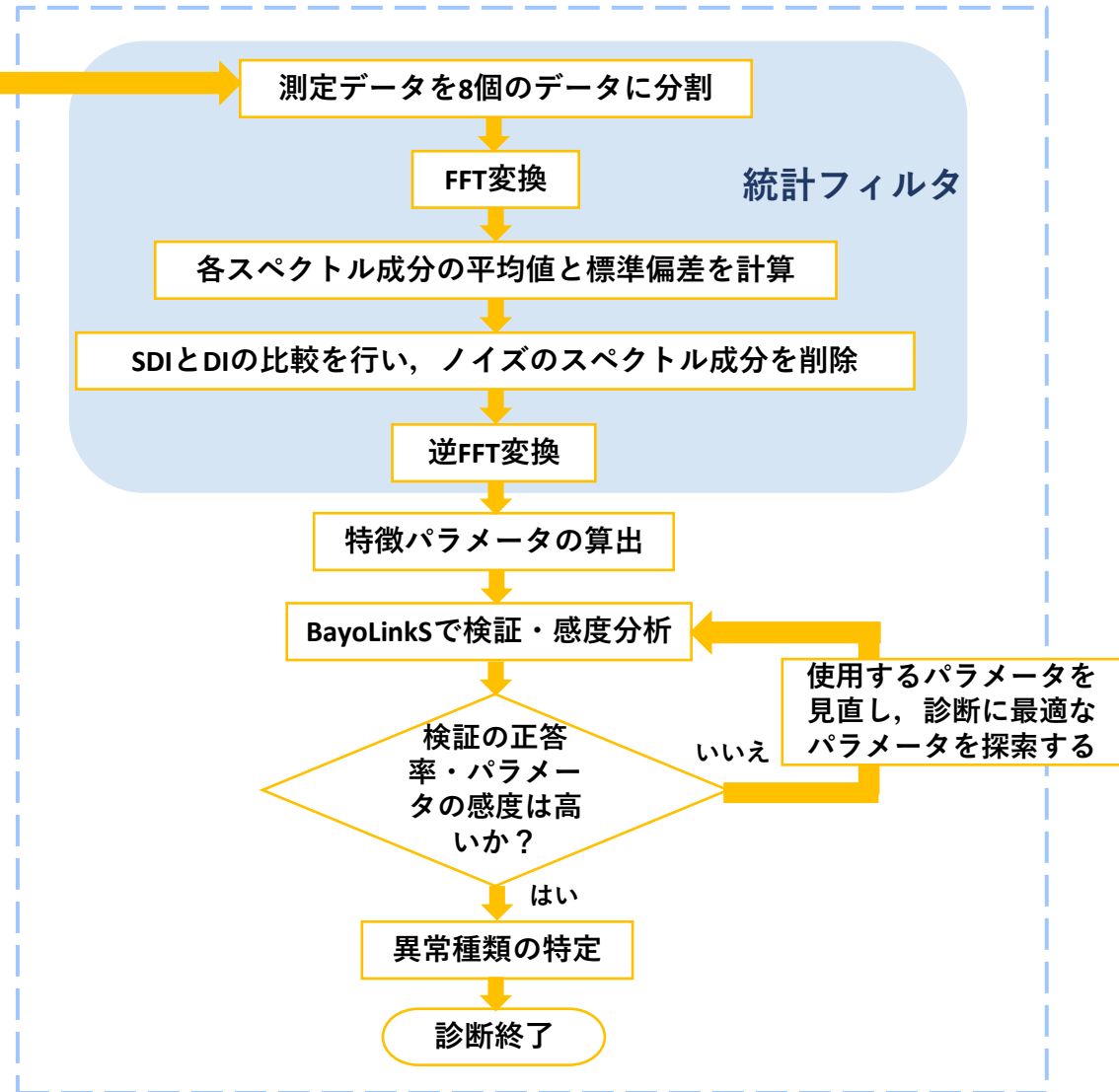
*1：統計フィルタに用いられる識別指標の閾値であり、基本は1.0に設定する。

4. 研究方法：簡易診断と精密診断の流れ

簡易診断

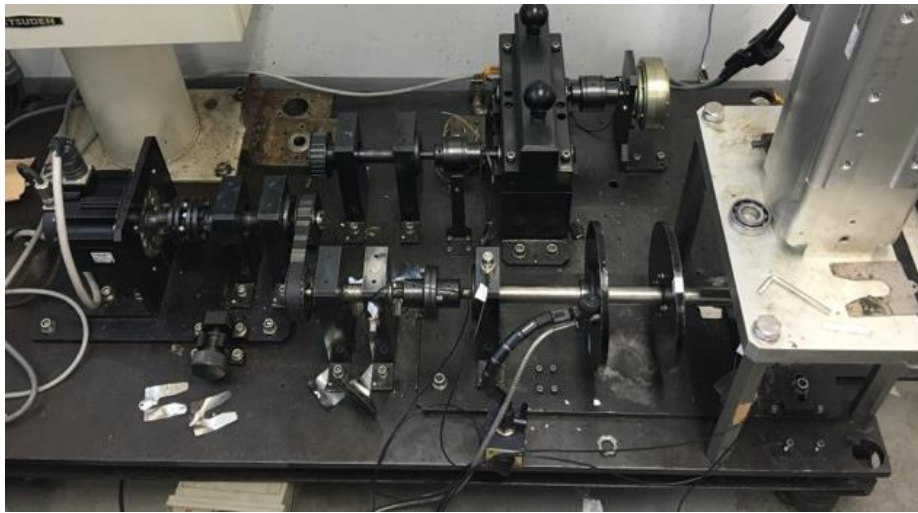


精密診断

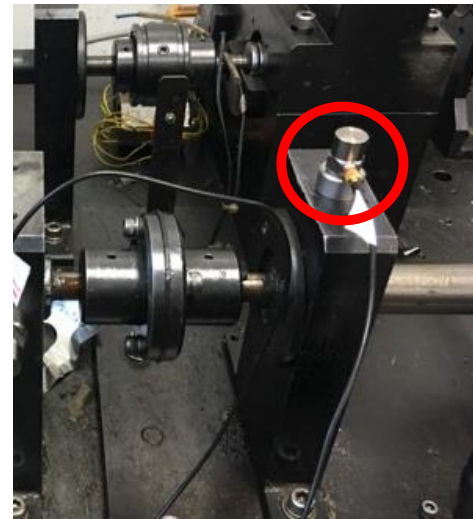


4. 研究方法：データ概要

- ・ 実験設備：中速回転機械シミュレーター
- ・ 回転速度：1200rpm
- ・ サンプルング周波数：100kHz
- ・ サンプルング時間：60s
- ・ 加速度センサ：鉛直向き
- ・ 使用軸受：NTN NU204E



中速回転機械シミュレーター



加速度センサ

4. 研究方法：データ概要

■ 実験に使用する軸受の傷の種類を以下に示す

本研究で使用する軸受の傷は全て人工的につけたものである。

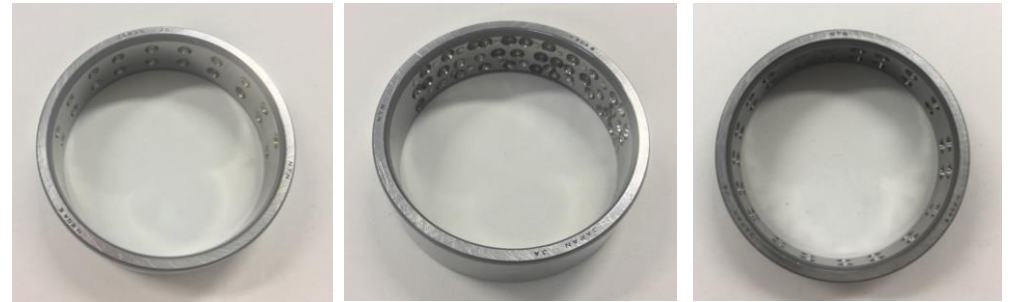
複数傷



外輪傷

内輪傷

点フレーキング



傷範囲120度

傷範囲180度

傷範囲360度

線フレーキング(ワイセ傷)



傷範囲120度

傷範囲180度

傷範囲360度

4. 研究方法：製品の使用アイコン・設定について

■使用製品：BayoLinkS

■MSIPでの主な使用アイコンと設定

離散化

分割数：8

手法：等間隔

構造学習

アルゴリズム：Greedy Search

情報量基準：AIC

欠損値除去方法：ペアワイズ除去

制約条件，感度分析，検証など

4. 研究方法：感度分析について

■ 目的変数

複数傷外輪，内輪

点ブレーキング内輪・外輪（傷範囲120度，180度，360度）

ワイセ傷内輪・外輪（傷範囲120度，180度，360度）

■ 説明変数

簡易診断...p1,p2,p19（有次元特徴パラメータ）

精密診断...p3,p4,p5,p6,p7,p8,p9,p10,p11,p12,p13,p14,p15,p16,p17,p18（無次元特徴パラメータ）

* 19種類のパラメータの詳細は付録に記載

精密診断はパラメータ数が多いため，複数のパラメータの組み合わせで分析しようとする処理時間が膨大になる．よってパラメータの感度分析は1種類ずつ行う．

パラメータの感度の高さは異常の種類によって変化する．
異常種類それぞれに適したパラメータを選定する．

後に行う検証で，使用する説明変数の数が6個以上になると処理時間が膨大になる．よって感度分析によるパラメータの選定では，パラメータ数を5個に絞ることにする．

5. 研究結果：簡易診断

感度分析結果

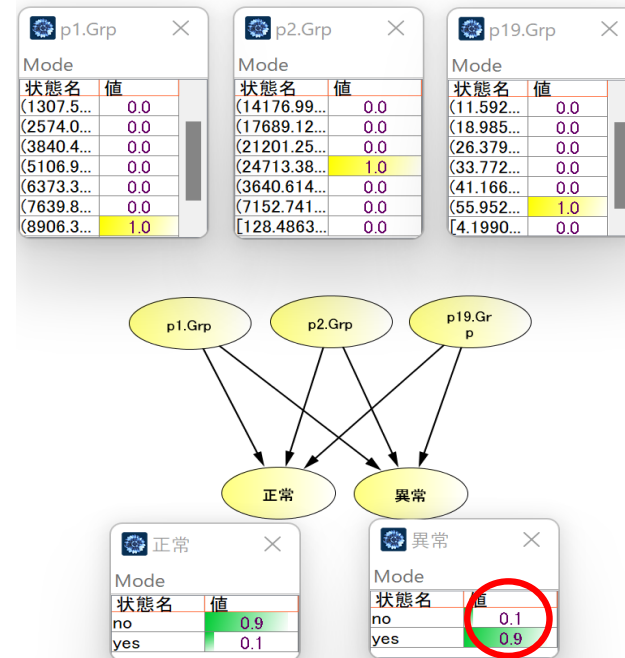
目的変数	説明変数	相互情報量
正常	p2	0.008898
	p1	0.008566
	p19	0.005065
異常	p2	0.008898
	p1	0.008566
	p19	0.005065

検証結果

目的変数	件数	正解件数	正解率	平均対数尤度
正常	108	100	0.926	0.578
異常	108	100	0.926	0.578

モデルのシミュレーション

実際の異常データを入れたとき、90%の確率で異常と判断することができる。

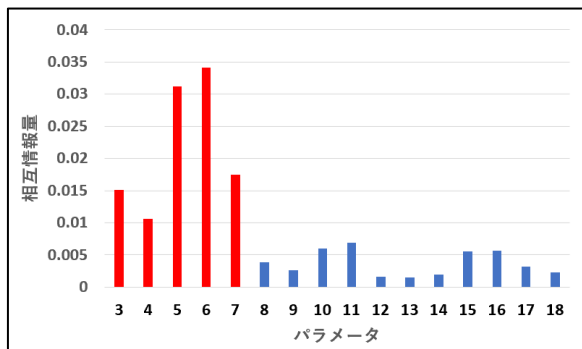


感度分析結果より、簡易診断の場合p2, p1, p19の順に感度が高い。
検証結果より、正常・異常どちらも正解率が9割を超えており診断精度が高いといえる。

5. 研究結果：精密診断の感度分析

棒グラフはパラメータの相互情報量を比較した結果である。相互情報量大きいパラメータ上位5個を赤色で示している。表は選定したパラメータの相互情報量の値を示している。

■複数傷外輪

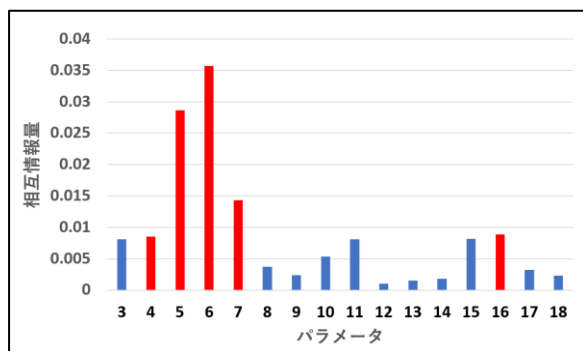


説明変数	相互情報量
p6	0.034132
p5	0.031249
p7	0.017507
p3	0.01507
p4	0.010675



複数傷外輪の診断に有効なパラメータは、感度が高い順にp6,5,7,3,4である。

■複数傷内輪



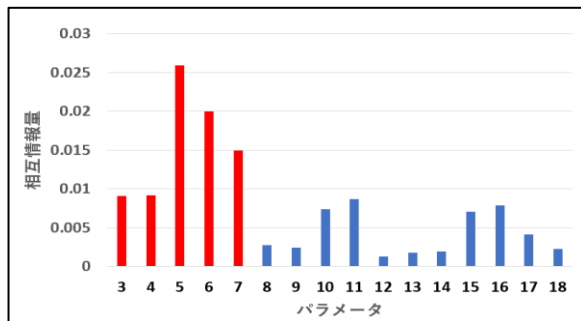
説明変数	相互情報量
p6	0.035702
p5	0.028619
p7	0.014338
p16	0.008889
p4	0.008493



複数傷内輪の診断に有効なパラメータは、感度が高い順にp6,5,7,16,4である。

5. 研究結果：精密診断の感度分析

■点フレーキング外輪120度

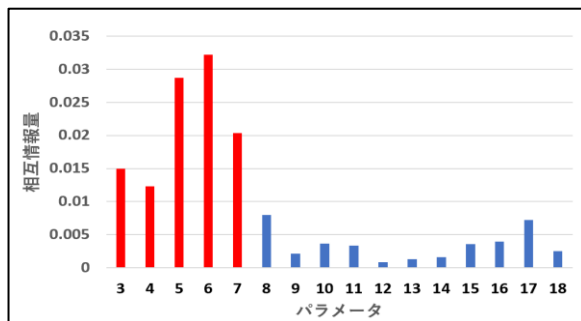


説明変数	相互情報量
p5	0.025947
p6	0.019973
p7	0.014961
p4	0.009158
p3	0.009086



点フレーキング外輪120度の診断に有効なパラメータは、感度が高い順にp5,6,7,4,3である。

■点フレーキング外輪180度

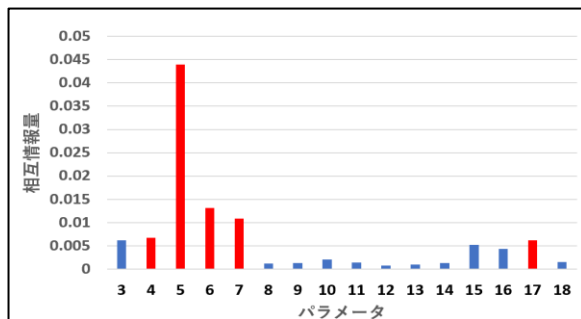


説明変数	相互情報量
p6	0.032235
p5	0.028725
p7	0.020393
p3	0.015006
p4	0.012341



点フレーキング外輪180度の診断に有効なパラメータは、感度が高い順にp6,5,7,3,4である。

■点フレーキング外輪360度



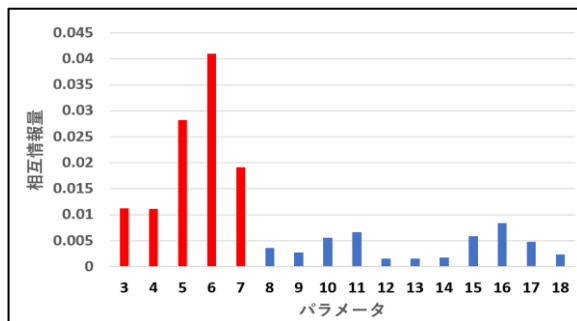
説明変数	相互情報量
p5	0.04389
p6	0.013095
p7	0.010858
p4	0.006701
p17	0.0062



点フレーキング外輪360度の診断に有効なパラメータは、感度が高い順にp5,6,7,4,17である。

5. 研究結果：精密診断の感度分析

■点フレーキング内輪120度

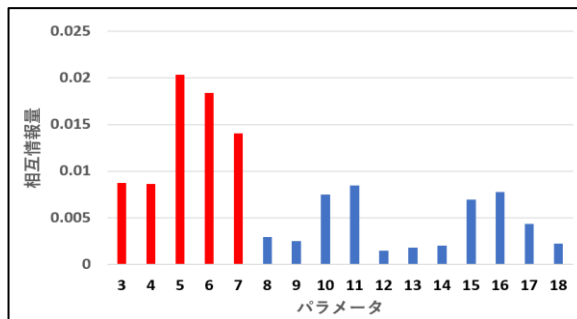


説明変数	相互情報量
p6	0.041022
p5	0.028182
p7	0.019117
p3	0.011232
p4	0.011168



点フレーキング内輪120度の診断に有効なパラメータは、感度が高い順にp6,5,7,3,4である。

■点フレーキング内輪180度

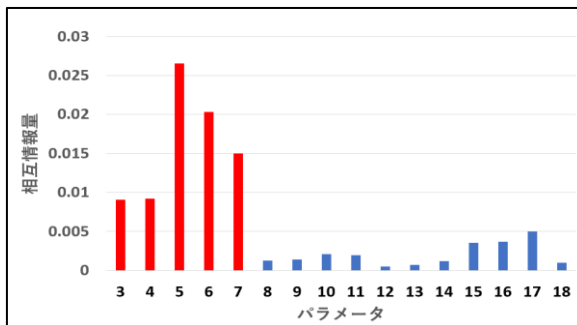


説明変数	相互情報量
p5	0.020358
p6	0.018383
p7	0.014079
p3	0.008739
p4	0.008631



点フレーキング内輪180度の診断に有効なパラメータは、感度が高い順にp5,6,7,3,4である。

■点フレーキング内輪360度



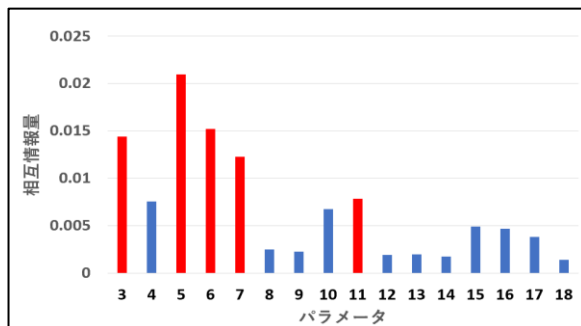
説明変数	相互情報量
p5	0.026502
p6	0.02031
p7	0.014995
p4	0.009178
p3	0.009101



点フレーキング内輪360度の診断に有効なパラメータは、感度が高い順にp5,6,7,4,3である。

5. 研究結果：精密診断の感度分析

■ワイセ傷外輪120度

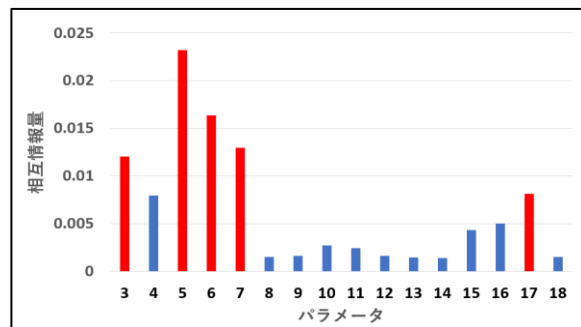


説明変数	相互情報量
p5	0.020959
p6	0.015219
p3	0.014417
p7	0.012271
p11	0.00787



ワイセ傷外輪120度の診断に有効なパラメータは、感度が高い順にp5,6,3,7,11である。

■ワイセ傷外輪180度

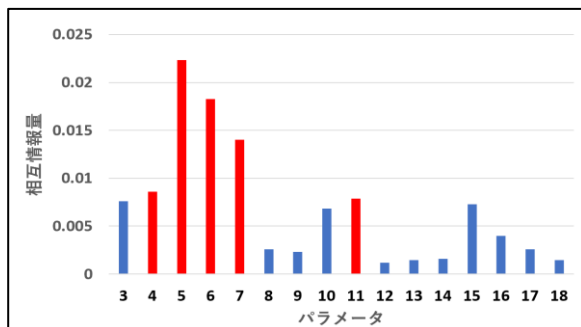


説明変数	相互情報量
p5	0.02317
p6	0.016371
p7	0.012938
p3	0.012027
p17	0.008121



ワイセ傷外輪180度の診断に有効なパラメータは、感度が高い順にp5,6,7,3,17である。

■ワイセ傷外輪360度



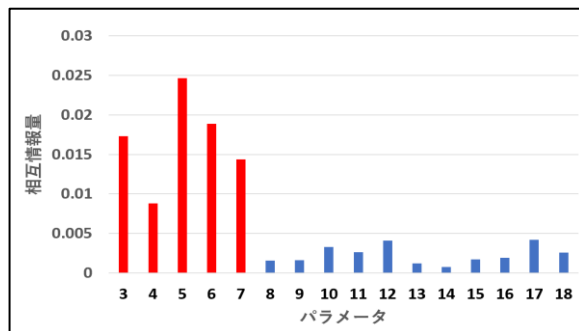
説明変数	相互情報量
p5	0.022322
p6	0.018267
p7	0.014014
p4	0.008592
p11	0.007859



ワイセ傷外輪360度の診断に有効なパラメータは、感度が高い順にp5,6,7,4,11である。

5. 研究結果：精密診断の感度分析

■ワイセ傷内輪120度

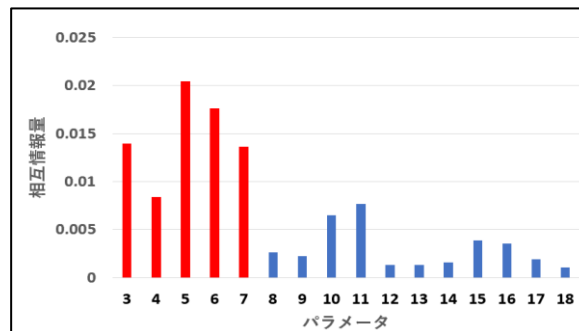


説明変数	相互情報量
p5	0.02463
p6	0.018895
p3	0.017328
p7	0.014364
p4	0.008801



ワイセ傷内輪120度の診断に有効なパラメータは、感度が高い順にp5,6,3,7,4である。

■ワイセ傷内輪180度

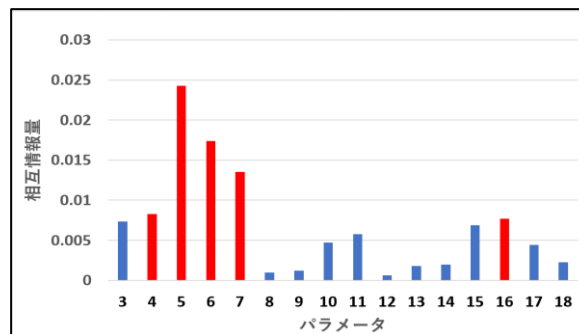


説明変数	相互情報量
p5	0.020448
p6	0.017597
p3	0.013981
p7	0.013637
p4	0.008366



ワイセ傷内輪180度の診断に有効なパラメータは、感度が高い順にp5,6,3,7,4である。

■ワイセ傷内輪360度



説明変数	相互情報量
p5	0.024282
p6	0.017404
p7	0.013527
p4	0.008301
p16	0.007693



ワイセ傷内輪360度の診断に有効なパラメータは、感度が高い順にp5,6,7,4,16である。

5. 研究結果：精密診断の検証

表は異常種類ごとに感度の高いパラメータを選定し、それぞれ検証を行った結果をまとめている。

目的変数	件数	正解件数	正解率	平均対数尤度
複数傷外輪	807	746	0.924411	0.415655
複数傷内輪	807	750	0.929368	0.408501
点フレーキング外輪120度	807	748	0.92689	0.428473
点フレーキング外輪180度	807	749	0.928129	0.397974
点フレーキング外輪360度	807	753	0.933086	0.438619
点フレーキング内輪120度	807	748	0.92689	0.409157
点フレーキング内輪180度	807	748	0.92689	0.434173
点フレーキング内輪360度	807	747	0.925651	0.429257
ワイセ傷外輪120度	807	748	0.92689	0.49279
ワイセ傷外輪180度	807	750	0.929368	0.489563
ワイセ傷外輪360度	807	752	0.931846	0.429817
ワイセ傷内輪120度	807	754	0.934325	0.426433
ワイセ傷内輪180度	807	749	0.928129	0.43619
ワイセ傷内輪360度	807	749	0.928129	0.432334

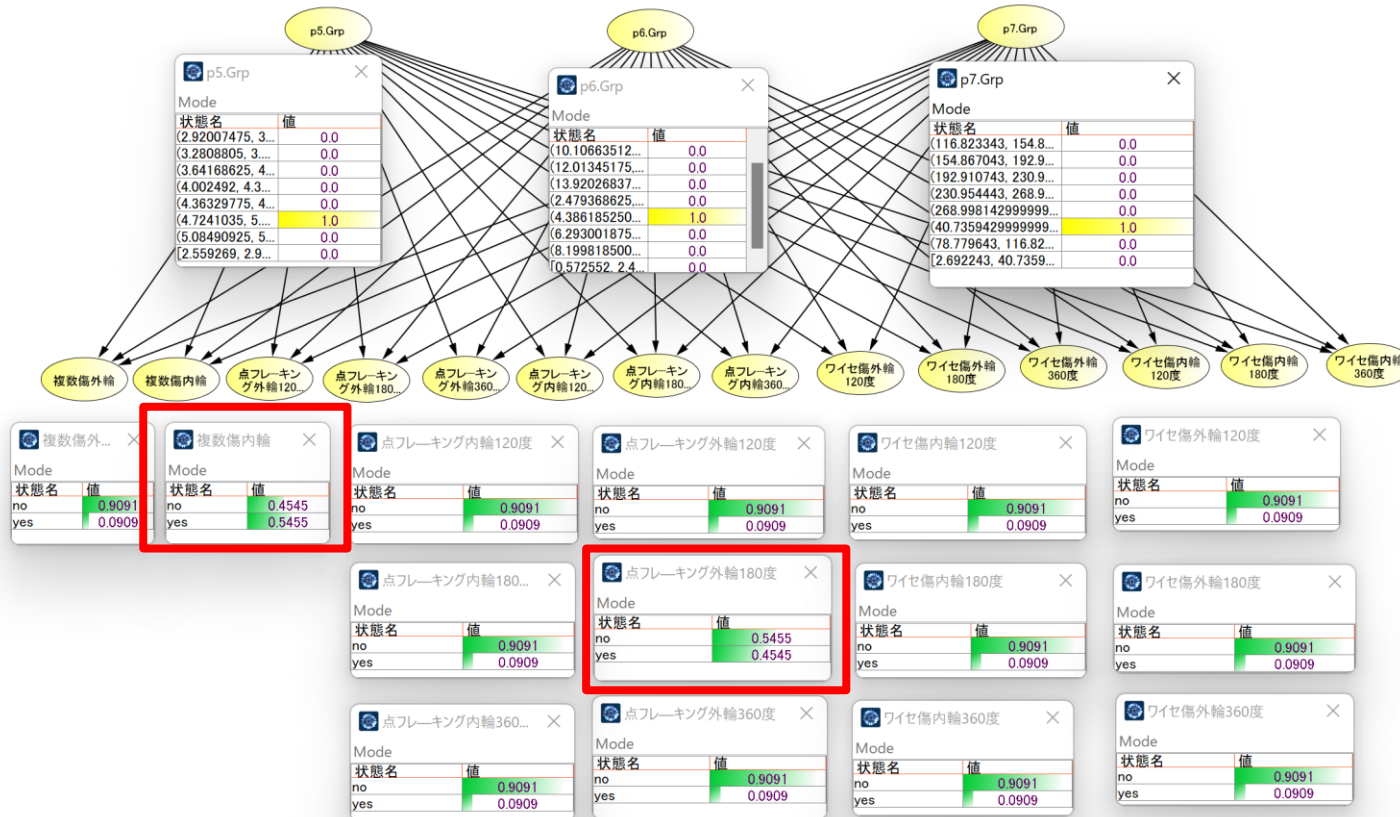
全ての異常種類の正解率が9割を超えており診断精度が高いという結果が得られた

5. 研究結果：モデルのシミュレーション例

■感度分析の結果p5,6,7は比較的どの異常種類でも感度が高かった

→同じモデルで全ての異常を判断できるように、p5,6,7のみを使ってモデルを作成し、シミュレーションをする

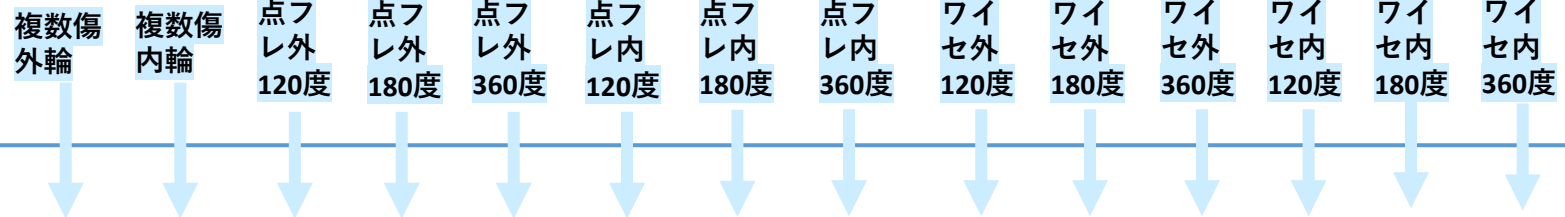
実際の複数傷内輪のデータでシミュレーションした結果



異常種類が複数傷内輪である確率が約55%，点フレーキング外輪180度である確率が約45%，それ以外の異常種類である確率が約9%

5. 研究結果：モデルのシミュレーションまとめ

■入力データ（それぞれの異常種類のデータ）



■結果

異常種類	確率													
複数傷外輪	58%	9%	0%	4%	13%	20%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	1%	53%
複数傷内輪	28%	55%	0%	21%	7%	20%	0%	0%	0%	0%	0%	6%	6%	25%
点フレ外輪120度	2%	9%	21%	4%	0%	20%	20%	20%	2%	20%	20%	1%	1%	3%
点フレ外輪180度	2%	45%	0%	61%	0%	20%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	1%	21%
点フレ外輪360度	1%	9%	0%	4%	60%	20%	0%	0%	0%	0%	0%	3%	3%	4%
点フレ内輪120度	8%	9%	0%	21%	0%	80%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	1%	4%
点フレ内輪180度	2%	9%	13%	4%	0%	20%	13%	13%	12%	13%	13%	6%	6%	4%
点フレ内輪360度	2%	9%	21%	4%	0%	20%	20%	20%	1%	21%	21%	1%	1%	7%
ワイセ傷外輪120度	2%	9%	9%	4%	0%	20%	9%	9%	19%	9%	9%	3%	3%	4%
ワイセ傷外輪180度	2%	9%	14%	4%	0%	20%	14%	14%	12%	14%	14%	1%	1%	4%
ワイセ傷外輪360度	2%	9%	16%	4%	0%	20%	16%	16%	9%	16%	16%	2%	2%	4%
ワイセ傷内輪120度	2%	9%	0%	4%	12%	20%	0%	0%	8%	0%	0%	48%	48%	4%
ワイセ傷内輪180度	2%	9%	0%	4%	10%	20%	0%	0%	14%	0%	0%	37%	37%	4%
ワイセ傷内輪360度	2%	9%	7%	4%	0%	20%	7%	7%	24%	6%	6%	1%	1%	4%

結果の表の青い箇所の確率が高ければ、異常が検出できているといえる。

複数傷外輪・内輪，点フレキング外輪180度・外輪360度・内輪120度，ワイセ傷内輪120度は確率が低いものもあるが，異常の検出ができています。

6. まとめ

■ 成果

- ・ 感度分析の結果より
無次元特徴パラメータは精密診断に有効であるが、中には異常種類によって感度が低くなり診断に適さないパラメータも多くあるということがわかった。
- ・ 検証結果より
パラメータの選定により高い診断精度を得ることができた。
- ・ モデルのシミュレーション結果より
複数傷外輪・内輪，点フレーキング外輪180度・外輪360度・内輪120度，ワイセ傷内輪120度は確率が低いものもあるが，異常の検出ができた。

■ 考察：モデルの診断精度が悪かった理由について

- ①使用するパラメータの数を絞り過ぎたことが考えられる
どの異常種類においてもp5p6p7の感度が高かったため3種類でモデルの構築を行ったが，14個の異常種類を同じモデルで判別するにはパラメータを増やす必要があると考えられる。
- ②離散化の分割数が少ない可能性がある。
分割数を増やすことで入力データを細かく設定できるようになり，診断精度が高くなると考えられる。

6. まとめ

■ 今後の展望

- ・使用するパラメータ数・離散化の分割数を増やして再度構造学習を行い、診断精度の高いモデル構築を目指す。
- ・パラメータの選定以外の方法で診断精度を高める
今回使用した統計フィルタではSDIの値を1.0に設定している。SDIの値を変えると診断精度が変わる可能性があるため、精度が最も高くなる最適なSDIの値を探索する方法を考え実行したい。

7. 付録：パラメータの詳細

- p1：実効値
- p2：ピーク値
- p3：歪度
- p4：尖度
- p5：波形率
- p6：極大値の歪度
- p7：極大値の尖度
- p8：極小値の歪度
- p9：極小値の尖度
- p10：極大値の数/ゼロ・クロース数
- p11：極小値の数/平均値クロース数
- p12：極大値の数/極小値の数
- p13： $+0.5\sigma$ クロース数/ -0.5σ クロース数
- p14： $+1.0\sigma$ クロース数/ -1.0σ クロース数
- p15：スペクトルの歪度
- p16：スペクトルの尖度
- p17：単位時間当たり時間平均をクロースする頻度
- p18：波形の安定指数
- p19：スペクトル幾何平均

参考文献

1. 陣山鵬. 「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」,DET LLP出版(2015).
2. 江海洋, 薛紅涛, 神豊 and 陣山鵬. "逐次型ベイジアンネットワークと信号融合による設備診断法—回転機械構造異常診断への応用—". 日本設備管理学会誌 vol25,No4,pp167-170,(2014).
3. 経済産業省. 高圧ガス事故の状況について. 2021.