

運転履歴を活用した設備の点検優先度決定手法

Priority Decision Method of Maintenance Inspection based on Operation History

島田 淳哉†
Junya Shimada

坂上 聡子†
Satoko Sakajo

1. はじめに

高い稼働率維持が求められるビルや工場設備など（以下、設備）は、故障発生時の迅速な復旧が要求される。そのため、設備の定期点検や修理を実施するメンテナンス会社は、早期対応によるサービス向上のため、設備の運転状態を常時、遠隔監視していることが多い。本稿で監視対象とする設備は、自身の運転状態を常にモニタし、そのモニタ情報を監視センターに逐一発報する。発報された情報は、運転履歴として監視センターに収集され、故障信号と予兆信号を含む故障履歴と、運転時間などを含む運転データから構成される。ここで故障信号とは、運転状態が正常状態を逸脱した場合に発報され、設備は停止される（以下、故障）。また、予兆信号とは、運転状態が正常範囲内であっても、計測値がある閾値を超えた場合に発報され、設備は一度再起動するが継続して運転される（以下、予兆）。このとき、監視センターでは、故障に対しては、作業員に設備点検の確実な実施を促し、予兆に対しては、設備点検の準備を促す。故障を防ぐためには、予兆発生に応じて作業員が出動し、早期対応することが望まれる。しかし、全ての予兆が故障に至るわけではなく、また、作業員数にも限りがあるため、全体の故障設備数の抑制を図りつつ、効率的な設備点検を実施する必要がある。そこで、本研究グループでは、早い時期に高い確率で故障する設備を優先的に点検するため、故障履歴を活用し、予兆から故障に至るまでの時間間隔から設備点検の優先度を決定するシステムを開発した[1]。しかし、予兆から故障に至るまでの時間間隔における特性は、現場状況によっても変化する。そこで本稿では、更なるサービス向上及び保守効率化のために、現場状況を考慮したシステムの拡張を行ったので報告する。

2. システム概要

予兆から故障に至るまでの時間間隔は、予兆の発生部位または検知項目などを表す予兆内容と関係することが考えられる。そこで、予兆内容ごとに設備点検の緊急度を判定し、緊急度に基づき設備が故障するまでの時間を作業員に提示するシステムを考える。時間の提示により、通常業務を行っている作業員は、作業を中断して、設備点検のために出動する必要があるか判断することができる。本システムは、予兆内容ごとに予兆から故障までの経過時間に対する累積故障確率分布から、故障の起こりやすさを表す指標（以下、リスク特性）を定義し、以下の手順に従い、設備点検の優先度を決定する。

- 1) リスク特性値抽出部：予兆内容ごとにリスク特性の値を抽出する。
- 2) 緊急度判定部：各リスク特性値を緊急度という一つの評価指標に統一し、設備点検の緊急度を判定する。
- 3) 出動限界時間算出部：設備が故障するまでの作業員の猶予時間を算出する。
- 4) 重み係数算出部：現場状況を表す運転データの中から、予兆から故障に至るまでの時間間隔と関係する特性（以下、現場特性）を抽出し、リスク特性値に現場状況を反映させるための重み係数を算出する。

なお、システムの概要図を図 1 に示す。故障履歴には、「発生日時」「予兆・故障」「設備 ID」「予兆・故障内容」が蓄積されている。

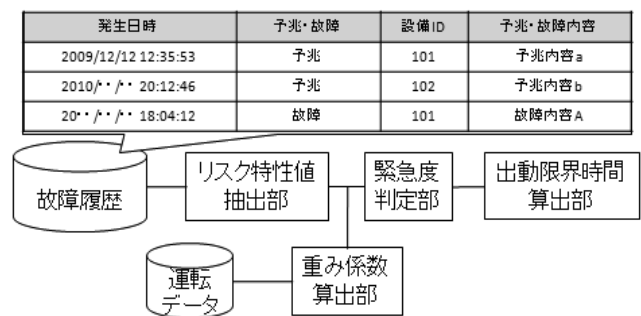


図 1: システムの概要図

3. 点検優先度決定手法

3.1. リスク特性値抽出部

(ア) 予兆-故障対応付け

予兆から故障に至るまでの時間間隔を求めるため、設備 ID ごとに予兆から一定期間以内に、最初に発生した故障に対して予兆-故障対応付けを行う（図 2）。

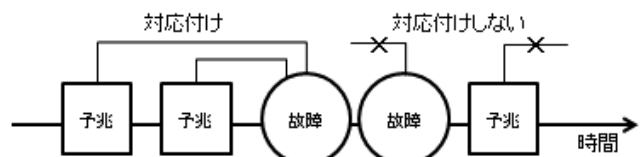


図 2: 予兆-故障対応付けの例

(イ) 累積故障確率の生成

予兆-故障対応付けを行った予兆及び故障に対して、予兆から故障に至るまでの時間間隔を基に、予兆内容ごとに累積故障確率を算出する。累積故障確率は予兆が発生してから時間 t 以内に故障する確率 $P(t)$ を示しており、時間 t で故障する確率を $p(t)$ とすると、 $p(t)$ 及び $P(t)$ は以下の式で表される。

† 三菱電機株式会社, Mitsubishi Electric Corp.

$$p(t) = \frac{\text{時間}t\text{における故障設備数}}{\text{予兆-故障対応付け件数}}$$

$$P(t) = \int_0^t p(t)dt$$

(ウ) リスク特性値の抽出

図 3 より、累積故障確率分布を作成した結果、大きく 4 つの特徴に分類できることが分かった。そこで、累積故障確率分布の特徴及び予兆-故障対応付け件数から、以下のようにリスク特性を定義した。

リスク特性

- *slope* : 予兆発生直後の累積故障確率の立ち上がり (短時間の累積故障確率)
- *prob* : 一定時間経過した時点の累積故障確率 (長時間の累積故障確率)
- *rank* : 予兆-故障対応付け件数の順位

- *slope* : 小, *prob* : 大 (予兆内容 a)
- *slope* : 大, *prob* : 大 (予兆内容 b)
- *slope* : 小, *prob* : 小 (予兆内容 c)
- *slope* : 大, *prob* : 小 (予兆内容 d)

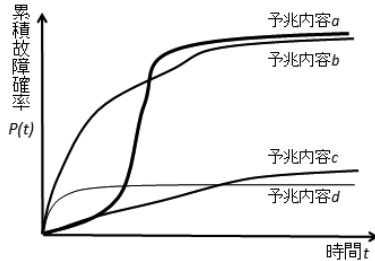


図 3: 代表的な累積故障確率分布

3.2. 緊急度判定部

(ア) リスク特性値の正規化

各リスク特性に対する重みを統一するため正規化を行う。各リスク特性値を *slope*, *prob*, *rank* としたとき、それらの最大値をそれぞれ *Ms*, *Mp*, *Mr*, 最小値をそれぞれ *ms*, *mp*, *mr* とすると、正規化された各リスク特性値 *slope'*, *prob'*, *rank'* は以下の式で表される。

$$slope' = \frac{(slope - ms)}{(Ms - ms)}$$

$$prob' = \frac{(prob - mp)}{(Mp - mp)}$$

$$rank' = \frac{(rank - mr)}{(Mr - mr)}$$

(イ) 緊急度の判定

正規化された各リスク特性を基に 3 次元空間分布を作成し、全リスク特性に対して最も高い値を基準点として、基準点から予兆内容ごとにプロットされた点までの距離を算出することにより緊急度を判定する。基準点からの距離が短いほど、故障する可能性が高いことを示してお

り、緊急度が高く設定される。図 4 は、4 つの予兆内容に対して作成した 3 次元空間分布を示しており、正規化された各リスク特性値を *slope'*, *prob'*, *rank'* とすると、基準点からの距離 *D* は以下の式で表される。

$$\text{基準点からの距離 } D = \sqrt{(1 - slope')^2 + (1 - prob')^2 + (1 - rank')^2}$$

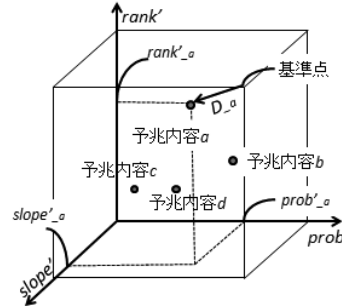


図 4: リスク特性から成る 3 次元空間分布

3.3. 出動限界時間算出部

出動限界時間とは、予兆が発生した設備に対して、故障を未然に防ぐことが可能な、作業員が待機できる最大の時間を表す。緊急度が高い設備ほど、出動限界時間が短くなるように設定される。本稿では、緊急度が最も高い場合 ($D = 0$) の出動限界時間を t_1 , 最も低い場合 ($D = \sqrt{3}$) の出動限界時間を t_2 ($t_2 > t_1$) とそれぞれ対応付け、出動限界時間を基準点からの距離 D の指数関数 (図 5) でモデル化した。図 5 から以下のように出動限界時間が算出される。

$$\text{出動限界時間} = \exp \left\{ \frac{D}{\sqrt{3}} (\log t_2 - \log t_1) + \log t_1 \right\}$$

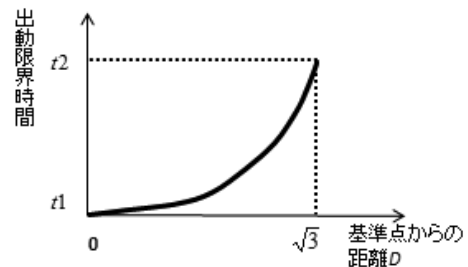


図 5: 出動限界時間と D との対応関係

3.4. 重み係数算出部

(ア) 稼動状態を表す指標の定義

運転データには、設備の運転時間、測定温度、目標温度、設備のサーモスタットが ON / OFF された切替回数を表すサーモ回数、及び設備のサーモスタットが ON の時の累積時間を表すサーモ ON 時間など複数存在する。そこで、予想される故障発生要因から以下に示す仮説を立て、運転データから稼動状態を表す指標を定義することにより、予兆から故障に至るまでの時間間隔に影響を与える可能性のある運転データを選出した。

[仮説] 常時フル稼働している設備ほど早く故障する

[稼働状態を表す指標の定義]

- ・サーモ ON 時間割合：サーモ ON 時間/運転時間
- ・サーモ回数割合：サーモ回数/運転時間

常時稼働を表す指標

- ・温度差：|測定温度-目標温度|

フル稼働を表す指標

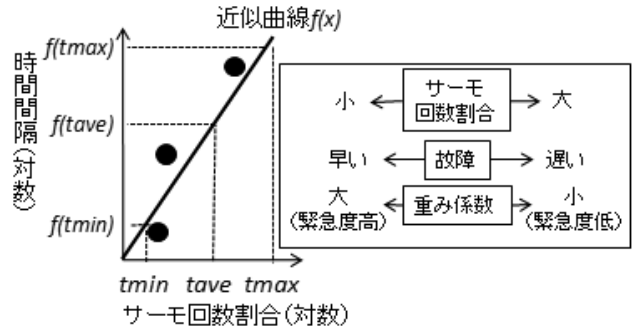


図7:サーモ回数割合の関係グラフと重み係数との対応関係

(イ) 現場特性の抽出

定義した各指標と、予兆から故障に至るまでの時間間隔との相関係数を算出し、強い相関を示す指標を現場特性として抽出した。本稿では、算出した結果(表1)から、相関係数の絶対値が0.7より大きい場合を強い相関であると判断し、現場特性としてサーモ回数割合と温度差を抽出した。現場特性と時間間隔との関係グラフを図6に示す。

表1:相関係数算出結果

稼働状態を表す指標	相関係数 R
サーモ ON 時間割合	-0.56
サーモ回数割合	0.98
温度差	-0.75

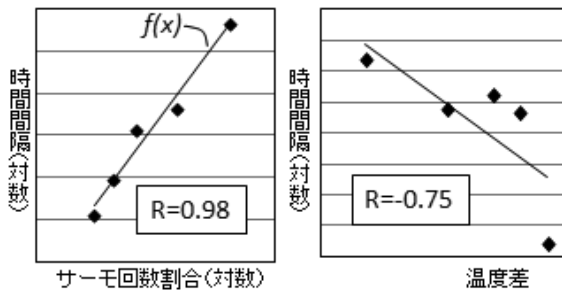


図6:現場特性と時間間隔との関係グラフ
(左:サーモ回数割合, 右:温度差)

(ウ) 重み係数の算出

図6の故障発生傾向に基づいてリスク特性値に重み付けを行うことにより、リスク特性値に現場状況を反映する。

以下、サーモ回数割合を例にして説明する。図7は、サーモ回数割合の関係グラフと重み係数との対応関係を示した図である。サーモ回数割合が小さいほど、予兆から故障に至るまでの時間間隔が短くなるため、設備点検の緊急度を高くするために、重み係数が大きく設定される。

図7の関係グラフから求められる近似曲線 $f(x)$ とサーモ回数割合を基に、重み係数を算出する。サーモ回数割合の最小値を $tmin$ 、最大値を $tmax$ 、平均値を $tave$ 、そのときの時間間隔を $f(tmin)$ 、 $f(tmax)$ 、 $f(tave)$ とする。また重み係数を、サーモ回数割合の平均値を1とした、最小値 $Wmin=tmin/tave$ 、最大値 $Wmax=tmax/tave$ 、平均値 $Wave=1$ と定義すると、サーモ回数割合(対数) x のときの重み係数 $W(e^{f(x)})$ は、図8の関係グラフを用いて算出される。なお、重み係数の最小値、最大値はそれぞれ、 $Wmin=W(e^{f(tmin)})$ 、 $Wmax=W(e^{f(tmax)})$ となる。

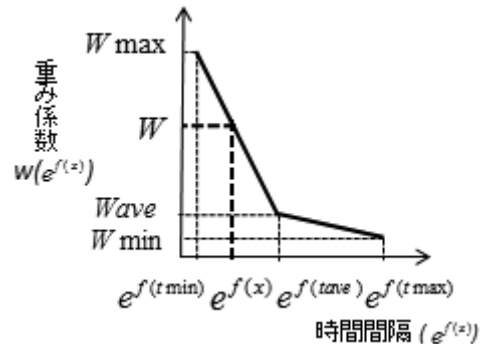


図8:サーモ回数割合を用いた場合の時間間隔と重み係数との関係グラフ

最後に、算出された重み係数 W をリスク特性値にかけることにより、現場状況の故障発生傾向がリスク特性に反映される(図9)。

リスク特性値			
	slope'	prob'	rank'
予兆内容a	slope_a'	prob_a'	rank_a'

↓

リスク特性値への反映			
	slope'	prob'	rank'
予兆内容a	slope_a' × W	prob_a' × W	rank_a'

図9:リスク特性値への反映

4. 評価実験

4.1. 実験概要

現場状況を考慮し、緊急度の高い設備に対して優先的に点検する効果を検証するため、評価実験を行った。3つの評価指標を以下に示す。

評価指標
・故障数
⇒少ないほどサービス向上につながる
・故障停止時間 (1件当たりの平均)
⇒短いほどサービス向上につながる
・出動限界時間 (1件当たりの平均)
⇒長いほど作業負荷が軽減され保守効率化につながる

なお、予兆が発生してから保守が完了するまでに必要な時間を対応所要時間として以下の式で定義した。

$$\cdot \text{対応所要時間} = \text{出動限界時間} + \text{移動時間} + \text{作業時間}$$

そのとき、故障停止時間は、予兆及び故障の発生日時及び対応所要時間を用いて以下の式で表される。

$$\cdot \text{故障停止時間} = (\text{予兆の発生日時} + \text{対応所要時間}) - \text{故障の発生日時}$$

4.2. 比較手法

本実験では、提案手法の他に出動タイミングの異なる2つの手法を比較手法とした。それぞれの手法について以下に示す。

[比較手法]

- ・故障発生直後：故障発生すると作業員が出動
- ・基本手法：予兆内容ごとの緊急度から算出された出動限界時間に基づき、予兆から出動限界時間が経過すると作業員が出動

[提案手法]

- ・基本手法に加えて、現場状況ごとの緊急度から算出された出動限界時間に基づき、予兆から出動限界時間が経過すると作業員が出動

4.3. 実験結果

本実験において、移動時間や作業時間については設備が設置される現場に関係なく固定値に設定した。実験結果を表2に示す。なお、故障数及び故障停止時間については故障発生直後を、出動限界時間については基本手法を、それぞれ基準値として各手法の結果を比率で比較している。結果として、サーモ回数割合を用いた提案手法により、故障数を33%低減、故障停止時間を2%低減、出動限界時間を26%延長させることができることが分かった。

以上のことから、提案手法を用いることにより、サービス向上及び保守効率化に貢献できることが分かった。

表2:評価結果

手法	現場状況	故障数	故障停止時間	出動限界時間
故障発生直後		100%	100%	—
基本手法		67%	98%	100%
提案手法	サーモ回数割合	67%	98%	126%
	温度差	67%	98%	101%

5. まとめ

本稿では、作業員の早期対応によるサービス向上、及び効率的な設備点検を実施するために、現場状況を考慮した設備の点検優先度を決定するシステムを開発した。本システムは、予兆内容ごとに予兆から故障に至るまでの時間に対する累積故障確率分布を特徴づける立ち上りにおける累積故障確率、一定時間経過した時点における累積故障確率、及び予兆-故障対応付け件数の順位をリスク特性として定義した。このリスク特性から作成される3次元空間分布から緊急度を決定し、緊急度に応じて設備が故障するまでの作業員の猶予時間として出動限界時間を算出した。さらに、現場状況を考慮するため、現場状況を表す運転データの中から故障発生と関係する現場特性を抽出し、故障発生傾向に基づいてリスク特性値に重み付けを行った。評価実験を行った結果、故障数を33%低減、故障停止時間を2%低減でき、サービス向上に貢献できることが分かった。さらに、出動限界時間を26%延長でき、保守効率化を図ることができる見込みがあることが分かった。

参考文献

[1]島田, 坂上: 設備保守効率化のための故障履歴活用技術に関する研究, 情報処理学会 第75回全国大会