

# カルマンフィルタを用いた流れ加速型腐食による減肉進展予測モデルの構築

## Prediction of Wall Thinning by Flow Accelerated Corrosion using Kalman Filtering

神戸大学大学院	小島 史男	Fumio KOJIMA	Member
神戸大学大学院	坪田 淳一	Junichi TSUBOTA	Student Member
神戸大学大学院	植田 正裕	Masahiro UEDA	Student Member

The purpose of this report is to establish a predictive methodology for estimating rate of wall thinning in a piping system used in ageing nuclear power plants. First, mechanism of flow accelerated corrosion caused by steam of flowing water is given by KWU-KR model. Secondly, a method for setting geometrical parameter based on pipe wall thickness measurements is considered. Thirdly, estimation methodology for wall thinning rate is formulated within the framework of Kalman filtering. Finally, some simulation results are demonstrated.

Keywords: Preventive maintenance, condition monitoring, simulation, estimation

### 1. 緒言

原子力プラントの高経年化に伴い、配管減肉管理の高度化が求められている。平成21年から施行されている新検査制度においては定期検査間隔が最大24カ月ごとまで延長されたため、プラント運転中における状態監視、傾向管理技術に対する要求がより高まっている。そのため、配管減肉進展を高精度に予測し、危険個所を早期に発見する技術の開発が望まれている。電磁超音波探触子(Electromagnetic Acoustic Transducer:EMAT)を用いた運転中モニタリング技術に関する研究が現在進行中であり、EMAT から逐次得られる測定データを用いることで予測精度の向上を図る。本研究では、流れ加速型腐食の減肉進展予測モデルの一つであるKWU-KR法にカルマンフィルタを適用したモデルの構築を行い、予測精度の向上を目指す。

### 2. FAC 減肉進展予測モデル

#### 2.1 KWU-KR モデル

配管減肉として流れ加速型腐食(Flow Accelerated Corrosion:FAC)を考える。FACは化学的な腐食反応と物理的な流れの力の重ね合わせにより発生すると考えられており、発生に寄与するパラメータとして溶存酸素濃度、母材のCr,Moの含有量、平均流速、温度、pH、配管形状などが挙げられる[1]。これらのパラメータを入力として使用するFAC減肉進展予測モデル

として、ドイツのシーメンス社が開発したKWU-KRモデル[2]を本研究では使用した。このモデルではFACによって減肉が進行する配管の肉厚 $W_c(t)$ を次のように表している。

$$W_c(t) = \frac{\Delta\phi_R(t)}{\rho_{st}} \quad (1)$$

ここで、

$\Delta\phi_R$  : 減肉率 ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2\text{hr}$ )

$t$  : 露出時間 ( $\text{hr}$ )

$\rho_{st}$  : 鉄の密度 ( $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ )

である。上記式を用いれば、減肉を考慮した配管の肉厚は時間の関数となり、次のように計算される。

$$W_{\text{pipe}}(t) = W_{\text{original}} - W_{c,\text{calculated}}(t) \quad (2)$$

ただし、

$W_{\text{pipe}}(t)$  : 時刻(t)における配管肉厚 (cm)

$W_{\text{original}}$  : 初期の肉厚

$W_{c,\text{calculated}}(t)$  : 時刻 t における減肉量計算値 (cm)

である。減肉率は次のように計算される。

$$\Delta\phi_R = 6.25k_c (Be^{Nw} [1 - 0.175(pH - 7)^2] 1.8e^{-0.118g} + 1) f(t) \quad (3)$$

ここで、

$$B = -10.5\sqrt{h} - (9.375 \times 10^{-4} T^2) + (0.79T) - 132.5 \quad (4)$$

$$N = -0.0875h - (1.275 \times 10^{-5} T^2) + (1.078 \times 10^{-2} T) - 2.15 \quad (0\% \leq h \leq 0.5\%) \quad (5)$$

$$N = (1.29 \times 10^{-4} T^2 + 0.109T - 22.07) 0.154e^{-1.2h} \quad (0.5\% \leq h \leq 5\%) \quad (6)$$

である。また、

連絡先:小島 史男、〒651-1301 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1、神戸大学大学院システム情報学研究科システム科学専攻、電話:078-803-6493、E-mail:kojima@koala.kobe-u.ac.jp

$k_c$  : 幾何学形状ファクター

$w$  : 流速 (m/s)

pH : pH 値

$g$  : 溶存酸素濃度 ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )

$h$  : クロムとモリブデンの含有量 (%)

$T$  : 温度 (K)

$f(t)$  : 時間に対する修正ファクター

である。このうち、時間に対する修正ファクター  $f(t)$  は次のように与えられている。

$$f(t) = C_1 + C_2 t + C_3 t^2 + C_4 t^3 \quad (7)$$

ここで、

$t$  : 露出時間 (hr)

$$C_1 : 9.999934 \times 10^{-1}$$

$$C_2 : -3.356901 \times 10^{-7}$$

$$C_3 : -5.624812 \times 10^{-11}$$

$$C_4 : 3.849972 \times 10^{-16}$$

である。ただし、 $f(t)$  は十分時間がたつと非常に大きな値となるため、 $t > 9.6 \times 10^4$  時間 (約 11 年) の範囲では、 $f(t) = 0.79$  で一定とする。幾何学形状ファクター  $k_c$  は管の形状に応じて一定値が与えられる。

## 2.2 幾何学形状ファクターのモデリング

本研究では、同じ管中でも幾何学形状ファクター  $k_c$  の値は位置により変化するものと捉え、測定データを下に  $k_c$  をオリフィスからの軸方向距離に関する関数としてモデリングを行った。今回は測定データとして関西電力(株)火力センターのオリフィス直下部位の測定データ (軸方向 7 点、周方向 8 点、合計 56 点) を用いた (Fig.1)。軸方向の測定点間隔  $d = 16.52(\text{cm})$  である。ABCDEFGF それぞれについて周方向 8 点の平均をとり、その値を KWU-KR モデルの肉厚  $W_c(t)$  とすることでその地点における  $k_c$  を求める。それぞれの軸方向距離において、求めた  $k_c$  の値に近くなるような関数をモデリングし、幾何学形状ファクター関数  $k_c(x)$  とした (Fig.2)。

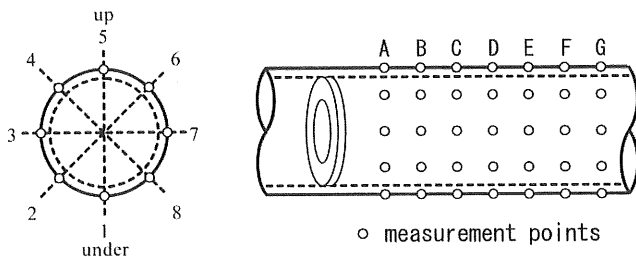


Fig. 1 Measurement points.

$$k_c(x) = \left( 1 - \frac{1}{1 + \text{EXP}\left(-0.3 \times \left(-30 + \frac{x}{d} \times 10\right)\right)} \right) \quad (8)$$

求めた  $k_c(x)$  を用い、KWU-KR モデルから軸方向距離が ABCDEFG におけるそれぞれの減肉進展予測を行ったグラフを Fig.3 に示す。KWU-KR モデルのパラメータ入力を実際の原子力発電所内のデータに基づき以下のように設定した。

$$h = 0.08(\%)$$

$$T = 463(\text{K})$$

$$\text{pH} = 6.5$$

$$w = 5.186(\text{m}/\text{sec})$$

$$g = 1.2(\text{ppb})$$

$$\rho_{st} = 7.86 \times 10^6 (\mu\text{g}/\text{cm}^3)$$

## 3. カルマンフィルタによる減肉率推定問題

KWU-KR モデルにカルマンフィルタを適用することで EMAT から逐次的に取得されるデータを用いてモデルを順次更新し、予測精度の向上を図る。減肉進展をトレンドとして考え、KWU-KR モデルを状態空間表現すると次のようになる。

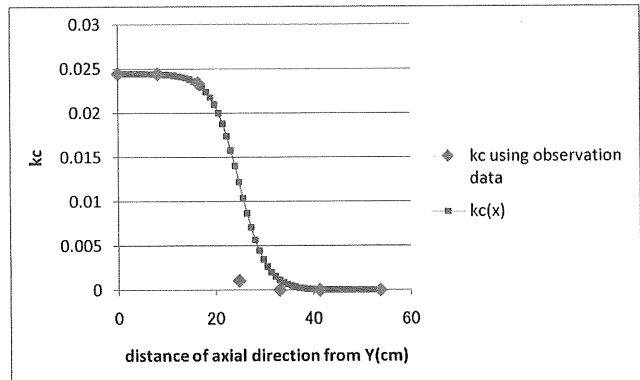


Fig. 2 approximate function of  $k_c$ .

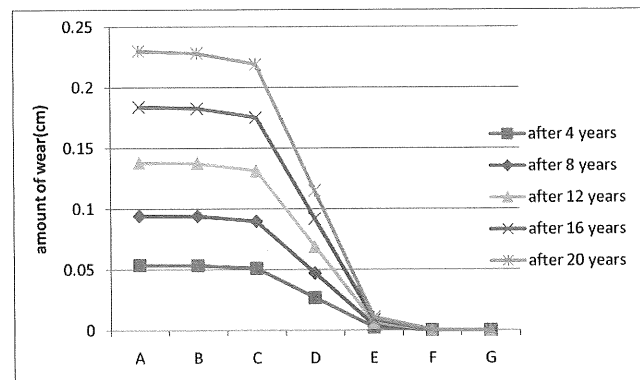


Fig. 3 prediction of wear at axial direction point.

$$x_n = Fx_{n-1} + Gv_n \quad (9)$$

$$y_n = H_n x_n + w_n \quad (10)$$

ここで、 $v_n$  はシステムノイズ、 $w_n$  は観測ノイズである。ただし、

$$x_n = \begin{bmatrix} T_n \\ T_{n-1} \\ T_{n-2} \\ T_{n-3} \end{bmatrix}$$

$$F = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & C_3 & C_4 \\ 1 & & & \\ & \ddots & & \\ & & & 1 \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$H_n = [rate \ 0 \ 0 \ 0]$$

である。ここで

$$rate = \frac{\Delta\varphi_R t}{\rho_{st}}$$

$$\Delta\varphi_R = 6.25k_c(x)(Be^{Nw}$$

$$[1 - 0.175(pH - 7)^2]1.8e^{-0.118g} + 1)$$

$$C_1 : 9.999934 \times 10^{-1}$$

$$C_2 : -3.356901 \times 10^{-7}$$

$$C_3 : -5.624812 \times 10^{-11}$$

$$C_4 : 3.849972 \times 10^{-16}$$

各種パラメータは KWU-KR モデルのものを用いる。トレンドの次数  $k=4$  は KWU-KR モデルにより決定した。このモデルは状態ベクトル  $x_n$  により KWU-KR モデルにおける修正ファクター  $f(t)$  を更新していくことを示している。減肉量の観測データ  $Y_j = \{y_1, y_2, \dots, y_j\}$  を入力し、一期先予測とフィルタリングを繰り返すことで時刻  $n$  ( $n \leq j$ ) における状態  $x_n$  の推定を行う [3]。

一期先予測

$$x_{n|n-1} = Fx_{n-1|n-1} \quad (11)$$

$$V_{n|n-1} = FV_{n-1|n-1}F^T + GQG^T \quad (12)$$

フィルタリング

$$K_n = V_{n|n-1}H^T(HV_{n|n-1}H^T + R)^{-1} \quad (13)$$

$$x_{n|n} = x_{n|n-1} + K_n(y_n - Hx_{n|n-1}) \quad (14)$$

$$V_{n|n} = (1 - K_nH)V_{n|n-1}$$

ただし、

$$x_{n|n-1} \equiv E(x_n | Y_j) : \text{状態 } x_n \text{ の条件付き平均}$$

$$V_{n|j} \equiv E[(x_n - x_{n|j})(x_n - x_{n|j})^T] : \text{分散共分散行列}$$

$Q$  : システムノイズの分散

$R$  : 観測ノイズの分散

$x_{n|n}$  : システムの状態の推定値

$V_{n|n}$  : 誤差共分散行列

$x_n$  ( $n > j$ ) については観測データが存在しないので、形式的に  $Y_j = Y_{j+1}$  が成り立つとみなして一期先予測アルゴリズムを繰り返し行うことにより、 $n > j$  での状態  $x_n$  の予測を行う。

$$x_{n+i|n} = Fx_{n+i-1|n} \quad (15)$$

$$V_{n+i|n} = FV_{n+i-1|n}F^T + GQG^T \quad (16)$$

以上により求めた状態  $x_n$  の推定値を用いて、時系列データの予測を行う。 $Y_j$  が与えられたときの  $y_{j+n}$  の平均と分散共分散行列を  $y_{j+n|j} \equiv E(y_{j+n} | Y_j)$ 、

$d_{j+n|j} \equiv \text{Cov}(y_{j+n} | Y_j)$  と表すことにすると(10)より

$$y_{j+n|j} = E(H_{j+n}x_{j+n} + w_{j+n} | Y_j) \\ = H_{j+n}x_{j+n|j} \quad (17)$$

$$d_{j+n|j} = \text{Cov}(H_{j+n}x_{j+n} + w_{j+n} | Y_j) \\ = H_{j+n}V_{j+n|j}H^T + R_{j+n} \quad (18)$$

が得られる。減肉量の予測値  $y_{j+n}$  は  $y_{j+n|j}$ 、またその標準誤差は  $(d_{j+n|j})^{1/2}$  で与えられる。

## 4. シミュレーション実験

### 4.1 実験条件

入力する観測データとして、KWU-KR モデルにより発生させた減肉量に平均 0、分散 0.0001 の正規白色雑音を加えたものを配管上のある 1 点における疑似観測データとして用いる。モデルのパラメータ入力は以下のように設定した。

$$k_c = 0.04$$

$$w = 5.1816(m/s)$$

$$pH = 9.128$$

$$g = 1.2(\mu g/kg)$$

$$h = 0.08(\%)$$

$$T = 49(K)$$

また、

$$Q = 1.0 \times 10^{-20}$$

$$R = 1.0 \times 10^{-20}$$

とする。プラント運転開始から 2 年間 (24 カ月) の疑似観測値を入力として用い、その後 2 年間 (運転開始から 4 年間) までの減肉量予測を行う。なお観測デ

ータ取得、予測の1ステップを1週間=168時間としている。

## 4.2 実験結果

Fig.4 に疑似観測データと予測値の比較を示す。予測値は疑似観測データの傾向を捉え、時間に対してほぼ線形な関数となっている。また、疑似観測データと予測値の誤差共分散を Fig.5 に示す。約5週目あたりから誤差共分散の値は急激に減少しており、その後非常に小さい値を維持している。このことから、予測は精度よく行われていることが確認できる。

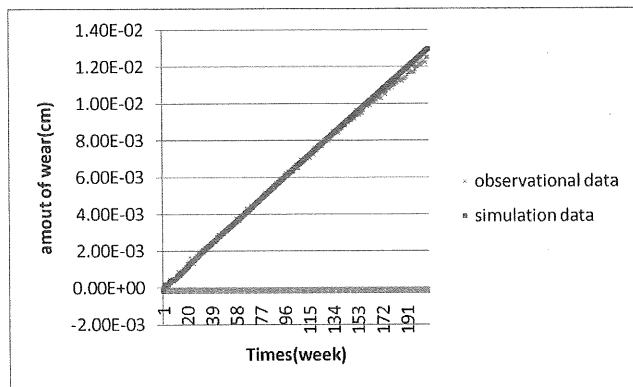


Fig. 4 amount of wear (observation data vs simulation data).

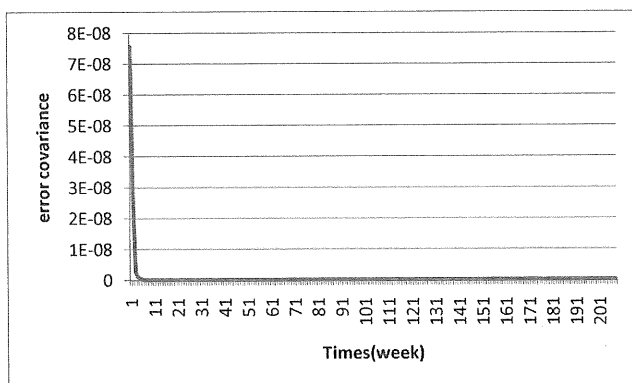


Fig. 5 time series variation in amount of error covariance.

## 5. 結言

本研究では、流れ加速型腐食の減肉進展予測モデルの一つである KWU-KR 法にカルマンフィルタを適用したモデルの構築を行い、予測精度の検証を行った。カルマンフィルタをモデルに組み込んだことにより、EMAT から逐次得られる測定データを予測に反映させ、常時監視中の予測精度を向上させることを可能にした。今後の課題は任意の位置における減肉を予測し、危険箇所を選定することで EMAT の適切な配置を行うことである。そのために流れが減肉に作用する影響を解析し、解析に基づき減肉進展予測モデルを改良することについて現在検討中である。

## 謝辞

本研究は経済産業省原子力安全・保安院の「平成21年度高経年化対策強化基盤整備事業」において実施した研究であることを記し、関係各位に深甚の謝意を表す。

## 参考文献

- [1] S. Uchida, M. Naitoh, Y. Uehara, H. Okada, N. Hiranuma, W. Sugino, and S. Koshizuka, "Evaluation Methods for Corrosion Damage of Components in Cooling System of Nuclear Power Plants by Coupling Analysis of Corrosion and Flow Dynamics(II): Evaluation of Corrosive Conditions in PWR Secondary Cooling System", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.45, No.12, 2008, pp.1275-1286
- [2] C.L. Smith, et al., "Incorporating Aging Effects into Probabilistic Risk Assessment-A Feasibility Study Utilization Reliability Physics Model," NUREG/CR-5632, 2001, pp.44-48
- [3] 北川源四朗, "時系列解析入門", 岩波書店, 2005, pp.125-141.