



日本原子力研究開発機構機関リポジトリ
Japan Atomic Energy Agency Institutional Repository

Title	環境因子を考慮した炭素鋼の大気腐食モデリングとシミュレーション
Author(s)	五十嵐 誉廣, 小松 篤史, 加藤 千明, 坂入 正敏
Citation	鉄と鋼, 107(12), p.998-1003
Text Version	出版社版
URL	https://jopss.jaea.go.jp/search/servlet/search?5070044
DOI	https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2020-110
Right	© 2021 The Iron and Steel Institute of Japan. This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).



Modeling and Simulation of Atmospheric Corrosion of Carbon Steel Considering Environmental Factor

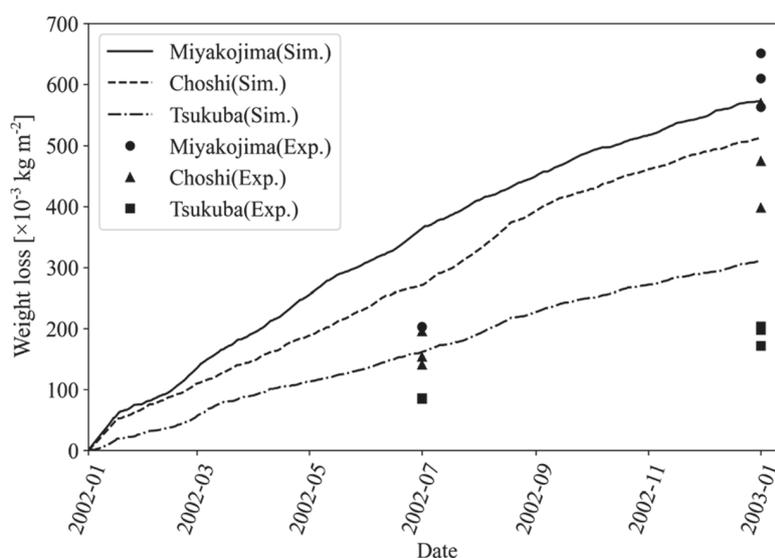
Takahiro IGARASHI^{1)*}, Atsushi KOMATSU¹⁾, Chiaki KATO¹⁾ and Masatoshi SAKAIRI²⁾

1) Nuclear Science and Engineering Center, Japan Atomic Energy Agency

2) Faculty of Engineering, Hokkaido University

Abstract: In order to clarify the effect of environmental factors on the atmospheric corrosion of steel, novel model for predicting the reduction of atmospheric corrosion considering relative humidity and rain falls was developed. We conducted a one-year calculation simulation of atmospheric corrosion in Miyakojima City, Choshi City, and Tsukuba City using the developed model. Corrosion weight loss by the simulation could reproduce the measured value well. Corrosion weight loss was greatly affected by the amount of airborne sea salt, relative humidity, and rain falls.

Keywords: atmospheric corrosion; carbon Steel; computer simulation; airborne sea salt; relative humidity; rain falls.



Received on Oct. 14, 2020; Accepted on Nov. 18, 2020

* Corresponding author. E-mail: igarashi.takahiro@jaea.go.jp, Address: Japan Atomic Energy Agency, 2-4 Oaza-Shirakata Tokai-mura Naka-gun Ibaraki 319-1195



© 2021 The Iron and Steel Institute of Japan. This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



インフラ構造物の経年劣化に対する維持管理の最適化に向けて

環境因子を考慮した炭素鋼の大気腐食モデリングとシミュレーション

五十嵐 誉廣¹⁾*・小松 篤史¹⁾・加藤 千明¹⁾・坂入 正敏²⁾

Modeling and Simulation of Atmospheric Corrosion of Carbon Steel Considering Environmental Factor

Takahiro IGARASHI, Atsushi KOMATSU, Chiaki KATO and Masatoshi SAKAIRI

1. 緒言

橋梁等の大型構造物において、大気腐食現象は重大な劣化事象の一つである。構造材の安全性や部材交換時期の把握の視点から、部材の腐食減耗量予測の社会的要求がある。この要求に応えるためには、大気腐食メカニズムの理解および部位ごとの腐食減量の正確な推定が必要であり、これまでに多くの研究がなされている。例えば Oshikawa and Nakano は沖縄における鋼材の大気腐食減耗量を決定する因子を把握するため実地測定および実験室における模擬試験を行い、大気腐食の原因となる水膜形成に及ぼす気温、相対湿度および海塩量の重要性を示した¹⁾。Katayama は電気化学インピーダンス法を利用して鋼製の構造物模擬試験体での大気腐食モニタリングを行い、部位ごとに腐食量が異なりその原因は環境条件に起因する表面濡れ時間の違いであることを示した²⁾。Hirohata らは主要海塩の一つである $MgCl_2$ に着目し、水膜の $MgCl_2$ 濃度が飽和濃度に達し且つ水膜厚さが 2×10^{-4} m 以下になったときにステンレス鋼表面に孔食が発生することを示した³⁾。このように過去の研究から、大気腐食の腐食速度は鋼表面の水膜厚さに大きく依存すること、そして水膜厚さは気温、相対湿度、海塩量等の環境因子に依存することが明らかにされている。

一方で腐食減量を推定するための手法の提案もされている。例えば、Kihira らは大気腐食減耗量の長期予測を目的とし、初年1年間の腐食量と酸化皮膜の保護性を表すパラメータからなる腐食減耗予測モデルの構築を行った⁴⁾。Kihira らのモデルは初年1年間の腐食量のみで長期予測が可能であることが非常に利便性の高い手法である。一方で予測腐食量は初年1年間の腐食量を基準としているため、将来の環境因子の変化を考慮した予測をすることは難し

い。年間降雨量等のさまざまな気象条件を想定可能な腐食量予測法が望まれている。

本研究では、環境因子が大気腐食減量に及ぼす影響について明らかにすることを目的として、新たな大気腐食減量予測モデルの構築を行った。考慮する環境因子として、重要なパラメータの一つである相対湿度と降雨を考慮した。開発したモデルを用いた大気腐食シミュレーションと実際の曝露試験の結果と比較し、開発モデルの妥当性を検証した。

2. 相対湿度と降雨を考慮した大気腐食減量予測モデル

本研究で開発した新たな大気腐食減量予測モデルは、時刻 t における飛来海塩量 $m_i(t)$ (i : 海塩の種類)、相対湿度 $\phi(t)$ 、天気 $w(t)$ 、酸化皮膜による腐食抑制係数 B を入力パラメータとしている。開発モデルでは以下の手順を繰り返すことで腐食減量計算を行う。i) 付着海塩の総量の導出、ii) 水膜厚さの導出、iii) 付着海塩量の更新、iv) 腐食速度の導出、v) 腐食減量の導出。Fig.1 に腐食減量計算のフローチャートを示す。

2.1 付着海塩の総量の導出

時刻 t における付着海塩 i の総量 $M_i(t)$ は、以下の式に従い $m_i(t)$ を時間積分することで導出した。

$$M_i(t) = \int m_i(t) dt \dots \dots \dots (1)$$

2.2 水膜厚さの導出

時刻 t における水膜厚さ $\delta(t)$ は各種海塩 i を要因とする水膜厚さ $\delta_i(t)$ の総和とした。開発モデルでは、 $\delta_i(t)$ は潮解湿度 d_i 、溶解度 s_i および $\phi(t)$ から導出した。Oshikawa らの研究により、飛来海塩の主成分である $NaCl$ と $MgCl_2$ のモ

2020年10月14日受付 2020年11月18日受理 (Received on Oct. 14, 2020; Accepted on Nov. 18, 2020)

1) 日本原子力研究開発機構原子力基礎工学研究センター (Nuclear Science and Engineering Center, Japan Atomic Energy Agency)

2) 北海道大学大学院工学研究院 (Faculty of Engineering, Hokkaido University)

* Corresponding author. E-mail: igarashi.takahiro@jaea.go.jp, Address: Japan Atomic Energy Agency, 2-4 Oaza-Shirakata Tokai-mura Naka-gun Ibaraki 319-1195



© 2021 The Iron and Steel Institute of Japan. This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.ja).

ル濃度と相対湿度の関係は直線に近く、湿度100%ではモル濃度がほぼゼロになることが示されている⁵⁾。そこで開発モデルでは、Fig.2に示すように湿度100%における水膜中の塩量はゼロであり、潮解湿度における単位体積当たりの塩量から湿度100%に向けて直線で近似されると仮定した。得られた直線の式の逆数から単位質量あたりの溶媒体積が導出されるので、 $M_i(t)$ との積をとって単位面積あたりに換算し、以下の式から $\delta(t)$ を導出した。

$$\delta(t) = \sum_i \delta_i(t)$$

$$\delta_i(t) = \begin{cases} M_i(t) \left[\frac{s_i}{d_i - 100} (\phi(t) - 100) \right]^{-1} & \phi(t) \geq d_i \dots\dots\dots(2) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

2・3 付着海塩量の更新

開発モデルでは、環境条件により付着海塩量に変化するとし、「降雨による洗浄効果」と「水膜の流出」の2つの仮定をおいた。

Oshikawaらによる構造用材料の大気曝露試験により、降雨影響のない部位に比べて降雨影響のある部位では腐食速度が抑制される傾向があり、その要因は降雨による洗浄効果であることが示されている。開発モデルでは、計算ステップごとに降雨の有無を設定し、降雨の場合は付着海塩の総量 $M_i(t)$ をゼロとした。Fig.3(a)に降雨による洗浄効

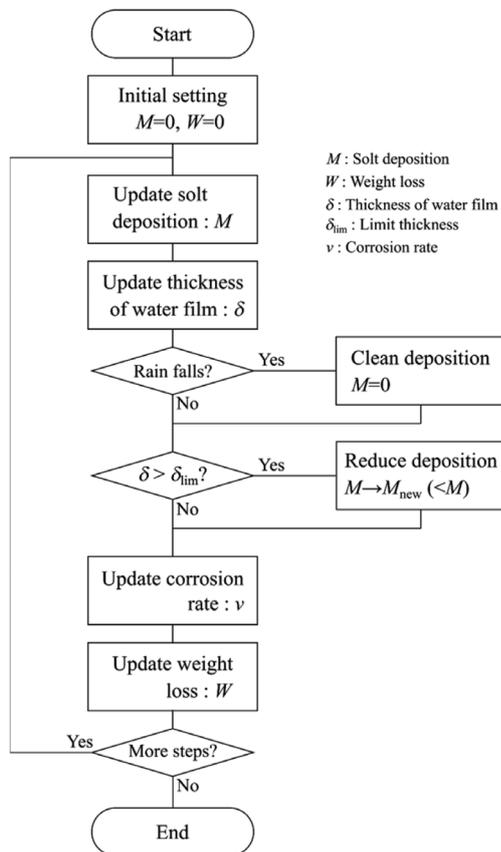


Fig. 1. Flowchart of atmospheric corrosion simulation model.

果の模式図を示す。

開発モデルにおいては、水膜厚さは式(2)に示すように付着海塩量に比例して厚くなる。そのため、飛来海塩が定期的に付着する条件においては水膜が際限なく厚くなることになる。しかし、現実においては設置場所、表面の角度、振動等の影響により水膜厚さは抑制されると考えられる。このような効果を導入するため、開発モデルでは限界水膜厚さ δ_{lim} を導入した。水膜厚さが δ_{lim} を超えた場合、 δ_{lim} 以上の水膜部分が、その水膜に含まれる付着海塩とともに流れ落ち、 δ_{lim} 以下の水膜に含まれる付着海塩のみが残ると仮定し、以下の式に従い水膜厚さおよび付着海塩の総量を更新した。

$$\delta(t) = \delta_{lim}$$

$$M_i(t) = M_{i,0}(t) \times \frac{\delta_{lim}}{\delta_0(t)} \dots\dots\dots(3)$$

ここで $\delta_0(t), M_{i,0}(t)$ はそれぞれ、更新前の水膜厚さと付着海塩の総量を表す。Fig.3(b)に限界水膜厚さ導入による付着海塩総量の更新の模式図を示す。

2・4 腐食速度の導出

時刻 t における腐食速度 $v(t)$ は、酸化皮膜が一定速度で成長すると仮定し、水膜厚さ $\delta(t)$ と腐食抑制係数 B を変数とする以下の式から導出した。

$$v(t) = v_0(\delta(t)) \cdot B \cdot t^{B-1} \dots\dots\dots(4)$$

ここで $v_0(\delta(t))$ は、大気曝露による酸化皮膜のない状態における腐食速度であり、Fig.4に示すように水膜厚さと腐食速度を表すTomashov型モデルを3点の変曲点を用いた4本の直線で関数化し下記の式で定義した。

$$v_0(\delta(t)) = \begin{cases} \frac{v_1}{\log \delta_1 + 3} (\log \delta(t) + 3) & \delta(t) < \delta_1 \\ \frac{1}{\log \delta_2 - \log \delta_1} \{ (v_2 - v_1) \log \delta(t) + v_1 \log \delta_2 - v_2 \log \delta_1 \} & \delta_1 \leq \delta(t) < \delta_2 \dots\dots(5) \\ \frac{1}{\log \delta_3 - \log \delta_2} \{ (v_3 - v_2) \log \delta(t) + v_2 \log \delta_3 - v_3 \log \delta_2 \} & \delta_2 \leq \delta(t) < \delta_3 \\ \delta_3 & \delta(t) \geq \delta_3 \end{cases}$$

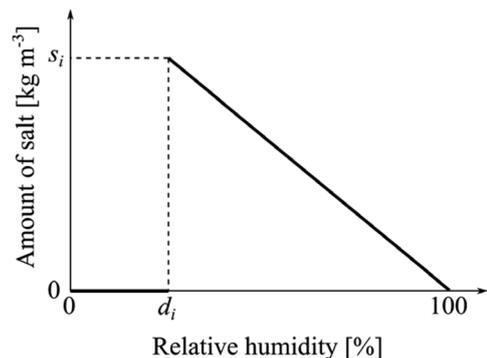


Fig. 2. Linear approximation of amount of salt per unit volume as a function of relative humidity in developed model.

ここで δ_i, v_i はそれぞれ, Fig.4中に示す変曲点 r_i ($i=1,2,3$)における水膜厚さと腐食速度を表す。

2・5 腐食減量の導出

時刻 t における総腐食減量 $W(t)$ は, 以下の式に従い $v(\delta(t))$ を時間積分することで導出した。

$$W(t) = \int v(\delta(t)) dt \dots\dots\dots (6)$$

3. 計算解析方法

本研究では, 宮古島市, 銚子市, つくば市における炭素鋼板の大気腐食を想定し計算シミュレーションをおこなった。シミュレーションによって得られた腐食減量と2002年に実施された実地曝露試験の腐食減量データ⁶⁾を比較し, モデルの妥当性の検証を行った。

腐食速度 $v(\delta(t))$ は以下のように設定した。大気曝露による酸化皮膜のない状態における腐食速度 $v_0(\delta(t))$ のモデル化には, Hosoyaらによって得られた恒温槽中の炭素鋼板

の腐食速度と水膜厚さの関係を表したデータを参照し, 前節に示した4本の直線による関数化を行った⁷⁾。Table 1に関数化に用いた変曲点座標を示す。腐食抑制係数 B は, 前例に基づき全国41橋曝露データの平均値である0.73を用いた⁸⁾。本研究では飛来海塩の種類をNaClとMgCl₂の2種類とした。各地点における単位時間単位面積あたりの飛来海塩量は, 各曝露試験地点における単位時間単位面積あたりのNaCl付着量の2002~2012年平均値と, 付着海塩中のイオン存在比 $Mg^{2+}/Na^+ = 0.11$ から導出した^{6,9)}。Table 2に一覧を示す。NaClとMgCl₂の潮解湿度はそれぞれ75%と33%とし, 溶解度はそれぞれ358.9と546.0 kg m⁻³とし

Table 1. Inflection points of corrosion rate curve⁷⁾.

Inflection points	Thickness of water film: δ [$\times 10^{-6}$ m]	Corrosion rate: v [$\times 10^{-6}$ kg m ⁻² s ⁻¹]
r_1	10.0	0.04
r_2	60.0	0.07
r_3	300.0	0.04

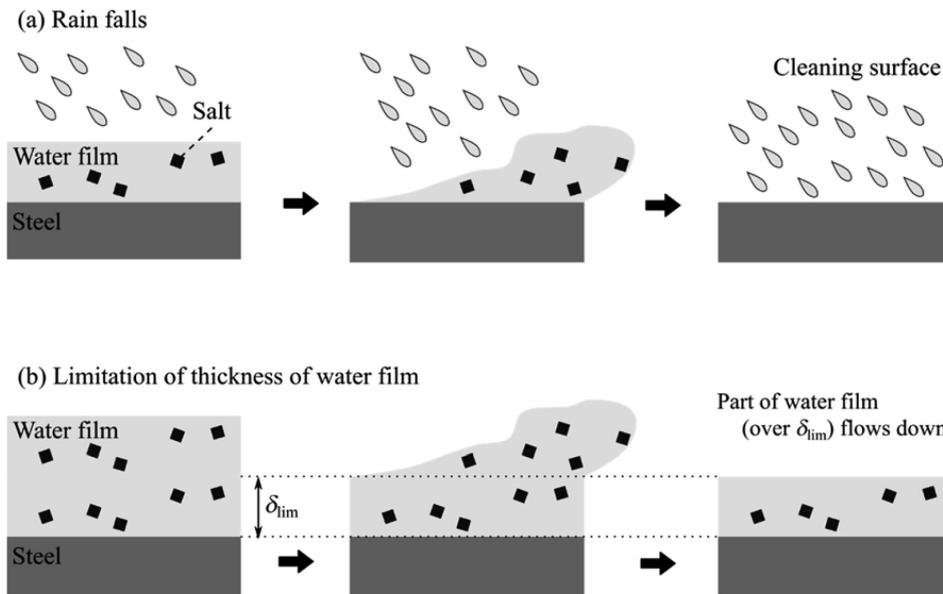


Fig. 3. Model for updating total amount of salt on surface of steel. (a) Effect of rain falls, (b) Effect of limitation of thickness of water film. δ_{lim} in the figure represents limit thickness of water film.

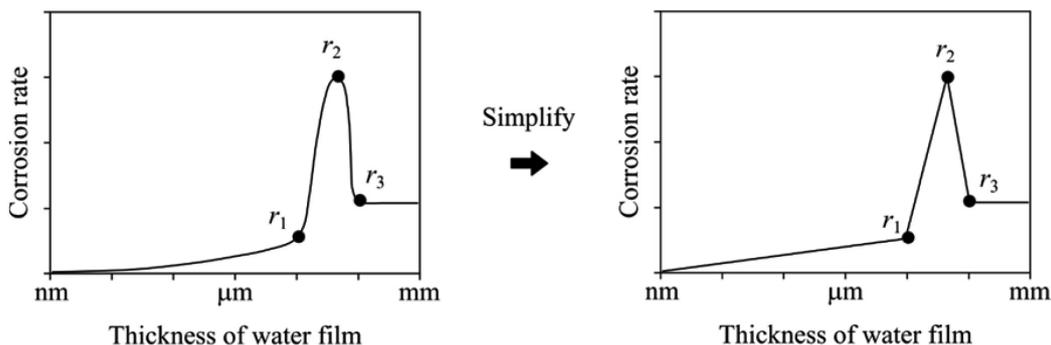


Fig. 4. Linear approximation model of corrosion rate as a function of thickness of water film. r_i represents inflection point of the curve of Tomashov model.

た^{1,10)}。各地点における相対湿度と降雨のデータは気象庁ウェブサイトで公開されている気象データを用いた¹¹⁾。限界水膜厚さは 5×10^{-4} mとした。シミュレーション期間は2002年1月1日から2002年12月31日の1年とした。計算シミュレーションの時間刻み幅は1時間とした。

4. 結果と考察

Fig.5に開発モデルを用いた大気腐食減量シミュレーションの結果を示す。銚子市と宮古島市における曝露1年

Table 2. Amount of salt deposition per unit surface area per time^{6,9)}.

Exposure point	NaCl [$\times 10^{-3}$ kg m ⁻² d ⁻¹]	MgCl ₂ [$\times 10^{-3}$ kg m ⁻² d ⁻¹]
Miyakojima	0.0487	0.00548
Choshi	0.0263	0.00296
Tsukuba	0.0024	0.00027

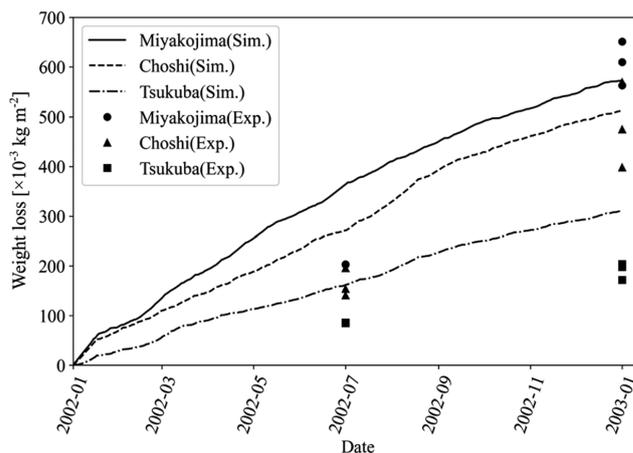


Fig. 5. Weight loss of carbon steel under open test condition. Solid line, dash line and dash-dot line represent simulation data at Miyakojima, Choshi and Tsukuba, respectively. Closed circle, closed triangle and closed square represent experimental data at Miyakojima, Choshi and Tsukuba, respectively⁶⁾.

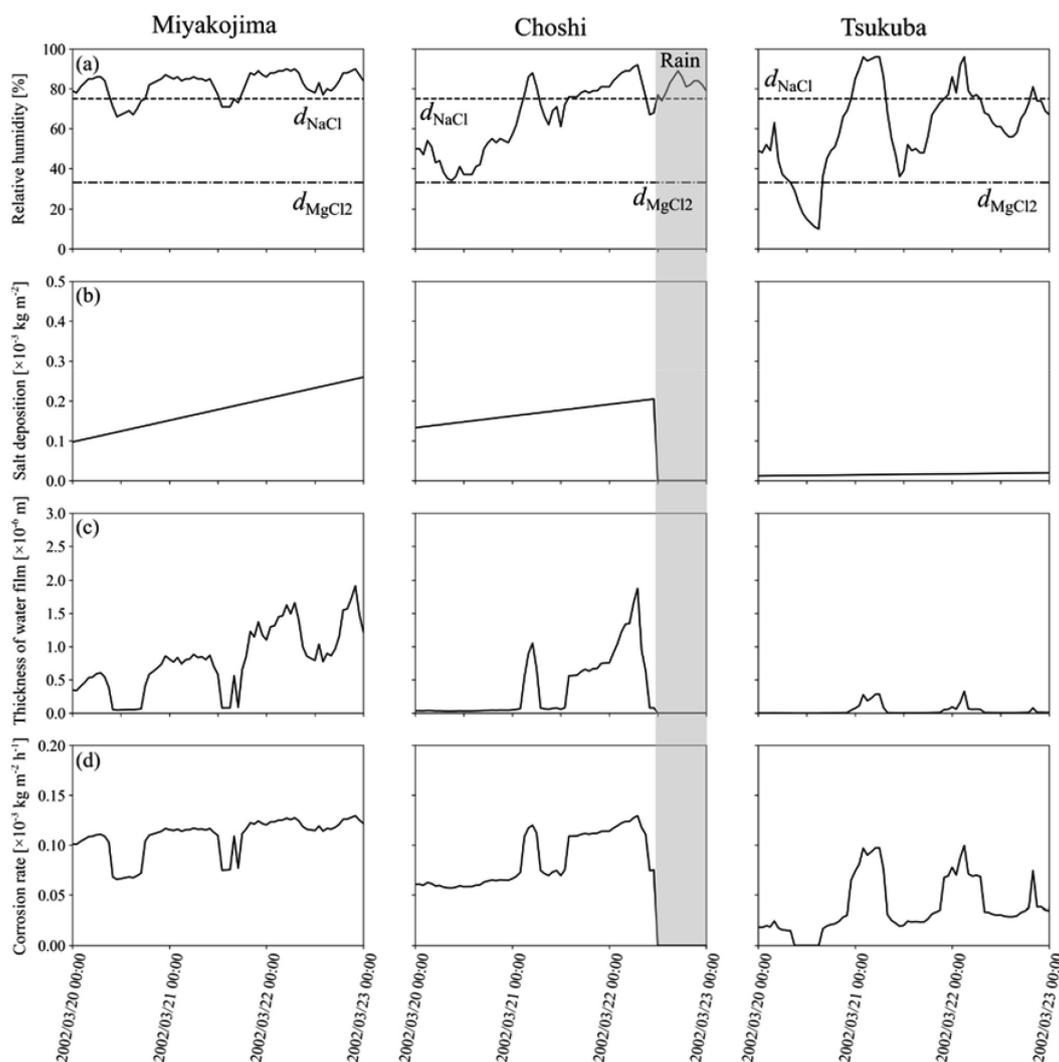


Fig. 6. Several physical values at each site in terms from 2002/3/20 to 2002/3/23 calculated by developed model. (a)Relative humidity, (b)Salt deposition, (c)Thickness of water film, (d)Corrosion rate. d_i represents deliquescence relative humidity of salt i . Gray-colored region represents the term of rain falls.

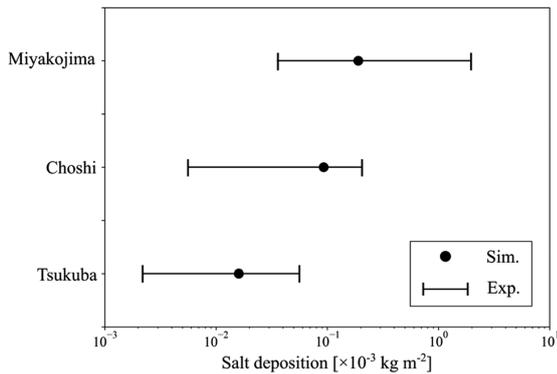


Fig. 7. Annual averages of salt deposition at each site. Closed circles and bars represent simulation results and range of experimental data, respectively¹²⁾.

後のシミュレーション結果は、実測データを良く再現できていた。一方、曝露1年後のつくば市および曝露半年後のすべての地点におけるシミュレーション結果は、実測データと比べて大きかった。このシミュレーションと実測データとのずれは、二つの原因が考えられる。一つは、腐食抑制係数 B について、各曝露地点における設置条件に応じた値ではなくすべての地点の実測値の平均⁸⁾を用いたため、つくば市のように他地点よりも腐食環境が厳しくない地点では腐食減量が大きくなった可能性がある。もう一つは、開発モデルでは温度影響を考慮していないため、シミュレーション開始時期から数か月間の冬期間における腐食速度低下が考慮されず、すべての地点において曝露半年後の腐食減量が多くなった可能性がある。腐食速度に対する温度影響および、曝露地点ごとに適切な B を設定することで、予測精度は向上すると考えられる⁴⁾。

計算モデルの妥当性を確認するため、計算シミュレーションによって得られた各種物理量を調査した。Fig.6に2002年3月20日から2002年3月23日までの各地点における相対湿度、付着海塩量、水膜厚さ、腐食速度のグラフを示す。水膜厚さは、すべての地点においてNaClの潮解湿度である相対湿度75%を超えたときに急激に厚くなった。これは水晶微小天秤を用いた実測データ⁷⁾によって得られた傾向と一致していることから、シミュレーションによって相対湿度と水膜厚さの関係を正確に再現できたと考えられる。Fig.7に各地点におけるシミュレーションによる付着海塩量の年平均値と実測データのグラフを示す。すべての地点において、シミュレーション結果は実測データをよく再現できていた。Fig.6の銚子市3月22日午後に見られるように、開発モデルでは降雨による定期的な鋼表面洗浄効果が導入されていることから、吸着海塩量の再現には、降雨の考慮が重要であることが示唆される。

5. 結言

本研究では、環境因子が大気腐食減量に及ぼす影響について明らかにすることを目的として、相対湿度と降雨を考慮した、新たな大気腐食減量予測モデルの構築を行った。開発モデルを用いて、宮古島市、銚子市、つくば市の3地点における2002年1月1日から1年間の大気腐食シミュレーションを行った。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 銚子市と宮古島市における曝露1年後の腐食減量のシミュレーション結果は、実測データを良く再現できていた。
- (2) つくば市における曝露1年後、およびすべての地点における曝露半年後の腐食減量のシミュレーション結果は、実測データと比べて大きい値となった。シミュレーション精度を向上するためには、各地点ごとに適切な腐食抑制係数を設定すること、および温度効果の導入が必要である。
- (3) すべての地点において、NaClの潮解湿度である相対湿度75%を超えたときに水膜厚さが急激に厚くなった。シミュレーションによって、実験測定で確認されている相対湿度と水膜厚さの関係を正確に再現できた。
- (4) すべての地点における付着海塩量のシミュレーション結果は、実測データをよく再現できていた。吸着海塩量の再現には、降雨の考慮が重要であることが示唆された。

文 献

- 1) W.Oshikawa and A.Nakano: *J. Surf. Sci. Soc. Jpn.*, **36**(2015), 35 (in Japanese).
- 2) H.Katayama: *J. Surf. Sci. Soc. Jpn.*, **36**(2015), 24 (in Japanese).
- 3) Y.Hirohata, H.Ota, T.Haruna and K.Noda: *J. Jpn. Inst. Met. Mater.*, **81**(2017), 115 (in Japanese).
- 4) H.Kihira, K.Tanabe, T.Kusunoki, H.Takezawa, H.Yasunami, M.Tanaka, K.Matsuoka and Y.Harada: *Doboku Gakkai Ronbunshu*, **2005**(2005), No.781, 71 (in Japanese).
- 5) W.Oshikawa, T.Shinohara and S.Motoda: *Zairyo-to-Kankyo*, **52**(2003), 293 (in Japanese).
- 6) Data Sheet on Atmospheric Corrosion Properties of Carbon Steel and Weathering Steels, National Institute for Materials Science, Tsukuba, (2014), 13 (in Japanese).
- 7) Y.Hosoya, T.Shinohara, W.Oshikawa and S.Motoda: *Zairyo-to-Kankyo*, **54**(2005), 391 (in Japanese).
- 8) Report on Application of Weathering Steel to Highway Btldges (XX) — Proposed Manual for Design and Construction of Unpainted Weathering Steel Bridges, Public Works Research Institute, Tsukuba, (1993),4 (in Japanese).
- 9) I.Muto and K.Sugimoto: *Zairyo-to-Kankyo*, **47**(1998), 519 (in Japanese).
- 10) CRC Handbook of Chemistry and Physics, 92nd ed., CRC Press, Boca Raton, FL. (2011), 4.
- 11) Search for past weather data, Japan Meteorological Agency, <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>, (accessed 2020-10-07), (in Japanese).
- 12) T.Shinohara: *Zairyo-to-Kankyo*, **64**(2015), 26 (in Japanese).