

1. 目的

沖縄県は高温多湿で、周辺が海に囲まれている。そのため海岸線からの距離が短く、海から飛来する塩分の影響を受ける。よって、沖縄県は他県に比べ鋼材が腐食しやすい厳しい環境下におかれている。

本研究では、沖縄県の屋外における鋼材の腐食環境評価手法の提言を目的に、実橋の腐食環境を考慮して雨がかりのある環境下における、鋼材の暴露試験及び飛来塩分量調査を行い、腐食環境の評価手法の提案を行う。また、自己腐食型センサである ACM センサーシステムで得られたデータをもとに暴露地における腐食環境の評価についても行う。

2. 試験方法

2.1 試験場所

試験は海岸線から 0.0 km (海岸部①), 0.7 km (海岸部②), 1.8 km (内陸部①), 2.4 km (内陸部②) 離れた 4 つの場所で行った。

2.2 試験期間

試験期間は約 1 ヶ月を 1 期間として、内陸部②, 海岸部①, 及び海岸部②は 13 期間, 内陸部①は 11 期間行った。

2.3 試験方法

(1) 暴露試験

試験鋼材には、幅 50 mm, 長さ 130 mm, 厚さ 3.2 mm の普通鋼板 (SS400, または SM400) を用いた。試験では先ず、暴露前の初期重量を計量し、暴露面積 (40 mm×100 mm) 以外をリビクテープで被覆する。被覆した試験鋼材はそれぞれ内陸部①, ②は南北 2 方向に各 8 枚ずつ設置した。海岸部①は東西南北 4 方向に各 6 枚, 海岸部②は南北 2 方向に各 6 枚ずつ設置した (図 1)。

暴露後の試験鋼材の除錆は「腐食減耗評価方法の高精度化 (錆付き鋼材の除錆方法)」(社会法人 腐食防食協会)¹⁾ に準じて行った。

腐食度及び腐食速度の算出法を以下に示す。

$$C = \frac{W_0 - W_1}{A \times D} \quad (1)$$

$$R = \frac{W_0 - W_1}{A} \quad (2)$$

$$CR = \frac{C \times 365 \times 10^{-4}}{\rho} \quad (3)$$

ここで C は腐食度 (mdd), R は発錆量 (mg/cm^2), CR は侵食速度 (mdd/year), W_0 は暴露前質量 (mg),

W_1 は除錆後質量 (mg), A は暴露面積 (dm^2), D は暴露日数 (day), ρ は鋼材の密度 (g/cm^3) である。

(2) 飛来塩分捕集

捕集方法には、土研式タンク法²⁾を用いた。その仕組みは、飛来塩分を捕集する 10 cm×10 cm (=1 dm^2) のステンレス製の雨水捕集器, シリコンホース, ポリタンク, およびそれらを格納する格納箱から構成されており, ステンレス捕集器とポリタンクはシリコンホースで結ばれている。

各試験場に捕集口を東西南北に向けて 4 方向に設置した (図 1)。

飛来塩分量の算出法を以下に示す。

$$A = \frac{1}{200} \times 10^{-3} \times (\text{NaCl の原子量: } 58.5) \times \frac{X}{W} \quad (4)$$

$$B = A \times \frac{(\text{Cl}^- \text{ の原子量: } 35.5)}{(\text{NaCl の原子量: } 58.5)} \quad (5)$$

$$C = B \times Y \times 1000 \quad (6)$$

$$D = A \times Y \times 1000 \quad (7)$$

$$P = \frac{D}{d \times S} \quad (8)$$

ここで A は試料中に含まれる NaCl 量 (g), B は試料中に含まれる Cl^- 量 (g), C は試料中に含まれる Cl^- 量 (mg), D は試料中に含まれる NaCl 量 (mg), P は日平均飛来塩分量 (mdd), X は試料について行った 1/200AgNO₃ 滴定量 (ml), W は (試料からの) 分取量 (ml), Y は試料量 (ml), d は暴露日数 (day), S は捕集口面積 (=1 dm^2) である。



図 1 設置状況

(3) ACM 型腐食センサー

ACM (Atmospheric Corrosion Monitor) 型腐食セン

サー（以下、ACM センサー）は二つの異種金属から構成されており、ACM センサー表面に薄い水膜ができると、両金属間が連結し、腐食電流が流れる。これを測定し解析することにより、結露・降雨時間 (h) も求めることができる。

ACM センサーをそれぞれ内陸部①と②、海岸部②は南北2方向、海岸部①は東西南北4方向に設置した (図1)。

ACM 腐食センサーの解析式を以下に示す。

$$Q = I \times T \quad (9)$$

$$Q_{day} = \frac{Q}{d} \quad (10)$$

$$D = \frac{T}{24 \times 60 \times 60} \quad (11)$$

ここで Q は積算電気量 (C), Q_{day} は日平均電気量 (C/day), D は結露日数 (day), I は結露時の ACM センサー出力 (A), T は結露時間 (sec), d は暴露日数 (day) である。

(4) 気象調査

気温、湿度は試験現場で計測したデータから、降雨量、日照時間、全天日射量、風向・風速は気象庁のデータ (那覇) を用いた。

濡れ時間は、ISO の基準に基づき、湿度 80%以上、かつ気温 0°C以上の時間を積算し経過日数で割った値を濡れ時間と定義する。

3. 試験結果

3.1 海岸線からの距離と腐食度

各測点での月別の腐食度と、海岸線からの最短距離を図2に示す。

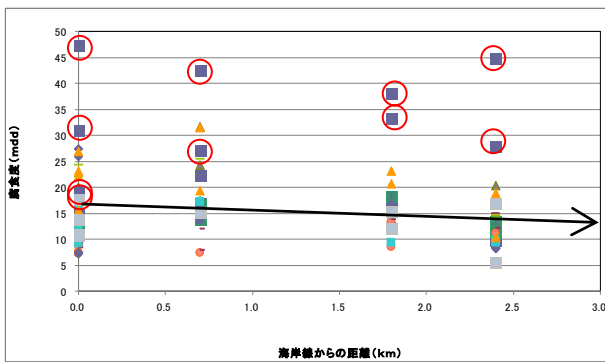


図2 海岸線からの距離と腐食度

丸でかこんでいるのは台風が沖縄県本島付近を通過した月である。

図より、台風月は海岸線からの距離にかかわらず著しく腐食度が高いことがわかる。したがって、鋼材の腐食に対して台風の影響は大きいといえる。台風が上陸した月を除いた回帰曲線を同図に示す。図より海岸線からの距離が長くなるに従い、腐食度も減少傾向にある。これより、海岸線からの距離が大きい程、腐食環境は緩和されることがわかる。

3.2 気象要因

(1) 濡れ時間と腐食度の関係

濡れ時間と腐食度との関係を図3に示す。

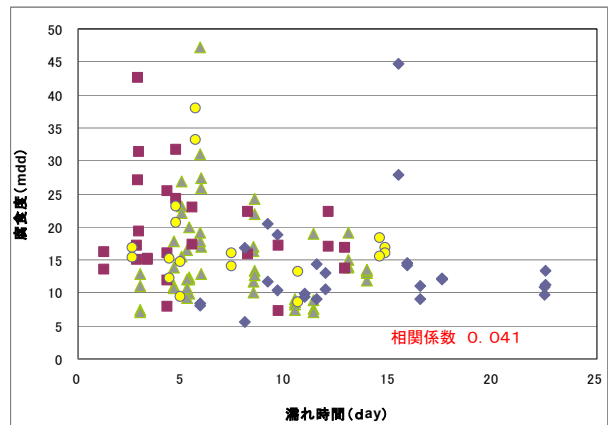


図3 濡れ時間と腐食度

図より、濡れ時間が長くなるに従って腐食度は減少している傾向にある。しかしながら、相関係数は0.041と低く、屋外においては腐食との関係があるとはいえない。

(2) 日照時間と腐食度との関係

日照時間と腐食度との関係を図4に示す。

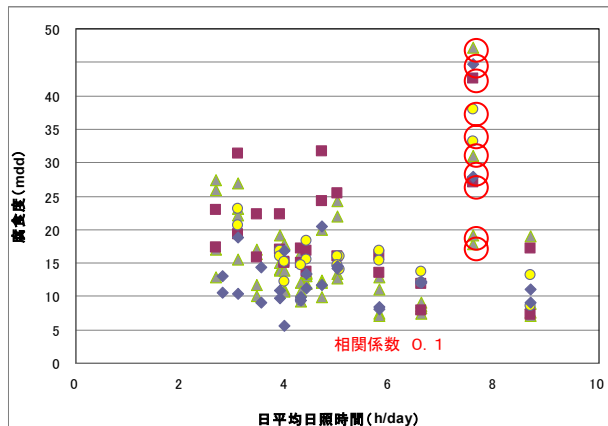


図4 日照時間と腐食度

台風が接近した月 (丸) を除くと、日照時間が長くなるにつれ腐食度は減少している傾向にある。相関係数も0.177と、若干の相関がみられる。

(3) 降雨と腐食度の関係

降水量・降雨時間と腐食度との関係 (海岸部①北) を図5に示す。

日平均降水量と腐食度との関係を見ると、日平均降水量が多い月でも、少ない月でも腐食度は同程度となっているのがわかる。一方、日平均降雨時間と腐食度との関係を見ると、日平均降雨時間が長い月では腐食度も高く、短い月では腐食度も低くなっているのがわかる。また相関係数も降水量と腐食度では0.050、降雨時間と腐食度とは0.334となった。

このことから、腐食の進行には降雨量よりも、降雨時間が関係する。

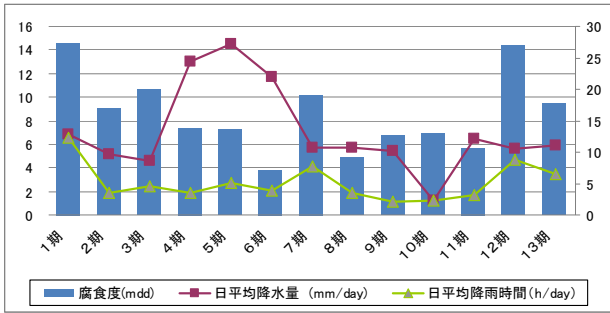


図5 降水量・降雨時間と腐食度

3.3 腐食度と飛来塩分量

(1) 海岸からの距離と飛来塩分量

飛来塩分量と海岸からの最短距離の関係を図6に示す。

回帰曲線の結果(直線)を同図に示したところ、海岸からの距離が長くなるにつれて減少傾向にある。

しかし、本土²⁾(点線)と比べると、飛来塩分量の減少傾向が小さい。これは、沖縄県の周りを海が囲んでおり、さらに高い山など飛来塩分を遮るものもないため、内陸部へ飛んでくる塩分が多くなるからだと考えられる。

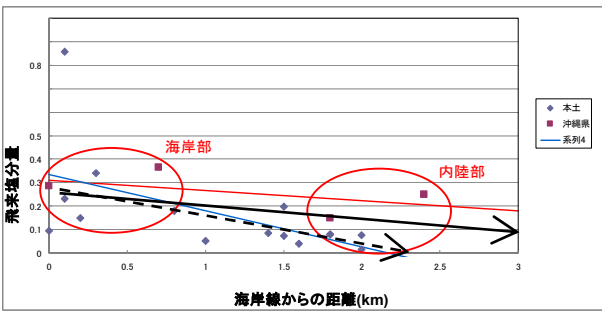


図6 海岸からの距離と飛来塩分量

(2) 腐食度との関係

飛来塩分量と腐食度との関係を図7に示す。

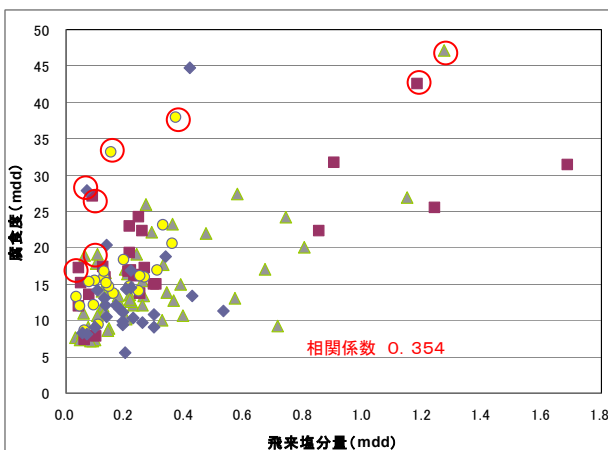


図7 飛来塩分量と腐食度

図をより、台風が接近した月を除いて、飛来塩分量が増加するに従って腐食度も増加している傾向にある。これは塩分が鋼板表面に水を吸着させること

によることと、水の電気伝導度を大きくして腐食を促進させることによるものと考えられる。また、相関係数0.354で、飛来塩分量と腐食度には関係性がみられる。これより、雨がかりのある環境下における鋼材の腐食環境に対して、飛来塩分量を適用すれば、一定の評価は可能であると考えられる。

3.4 ACMセンサーの適用性

(1) 腐食電流のしきい値について

雨がかりのない屋内では、腐食電流のしきい値を $1\mu\text{A}$ としている³⁾。しかし本研究では雨がかりのある屋外で行っているため、このしきい値の適用性を明らかにする必要がある。そこで、雨がかりのある屋外でのACMセンサーしきい値を検証した。

水中、人工雨、屋内、自然雨(小雨)でのACMセンサーの出力実験を行った。実験結果を図8に示す。

図8からもわかるとおり、雨がかかるとACMセンサーは非常に大きな値を示し、小雨でもセンサー出力は $100\mu\text{A}$ 以上に及ぶ。水中下では常時 $100\mu\text{A}$ 以上となった。このことから、雨がかりのある環境下でのACMセンサー異常値を $100\mu\text{A}$ 以上とし、 $100\mu\text{A}$ をしきい値(I_H)とすることを提案する。

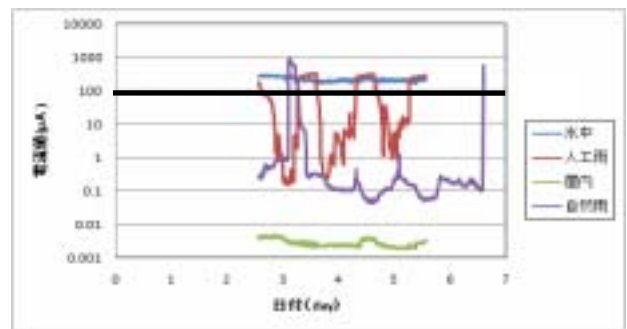


図8 人工降雨によるACMセンサー出力

(2) 日平均電気量と腐食度

前節での提案をもとに、電流値のしきい値を $100\mu\text{A}$ として日平均電気量を算出した。

日平均電気量と腐食速度の関係を図9に示す。軸は対数で表示している。

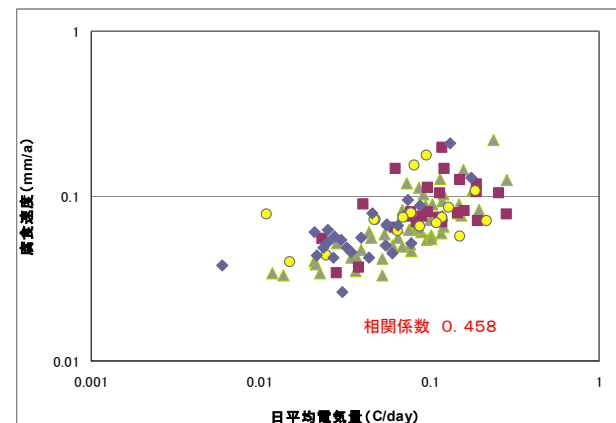


図9 日平均電気量と腐食速度

図より、日平均電氣量が増加すると腐食速度も速くなる。また、相関係数は0.458であり、日平均電氣量と腐食速度には関係性はあるといえる。

4. 考察

4.1 環境評価式

前章で説明した図9を用いて、雨がかりのある環境下における評価式を求めた。傾きは、鋼材の腐食特性を示すと考え、雨がかりのない環境下での評価式(式(12))の傾きを採用して求めた。式(12)の切片を変化させ、図9の回帰曲線に最も近い直線式(式(13))を求めた。

$$\log CR = 0.378 \log Q - 0.636 \quad (12)$$

$$\log CR = 0.378 \log Q - 0.719 \quad (13)$$

式(12)と(13)より、雨がかりのある環境下では雨がかりのない環境下と比べ、腐食速度が0.081(mdd/year)遅くなるという結果となった。

これは雨がかりのない環境下では、鋼板に付着した飛来塩分が蓄積され、腐食が促進される。一方、雨がかりのある環境下では、雨により飛来塩分が洗浄され、鋼板への影響は少なくなる。よって、雨がかりのない環境下と比べ、雨がかりのある環境下では腐食速度が遅くなると考えられる。

4.2 環境評価レベル

屋外における環境評価式より、腐食レベルを3段階にランク付けした。

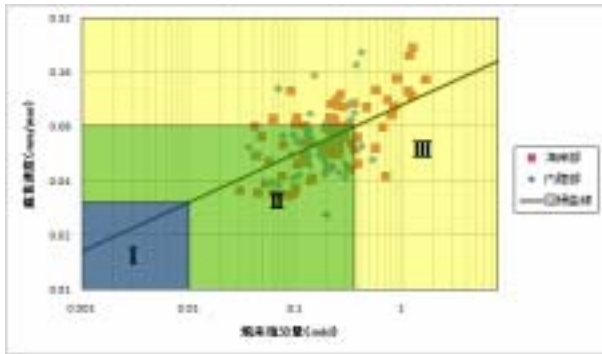


図10 飛来塩分量による環境評価

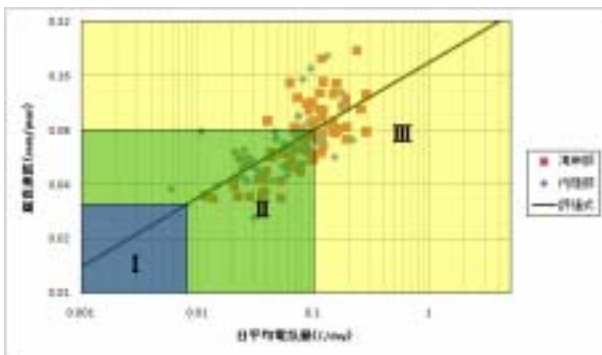


図11 日平均電氣量による環境評価

レベルIは飛来塩分の影響をほとんど受けない本

土の内陸部での、腐食しにくい環境である。レベルIIIは沖縄県の海岸部(海岸線から近い場所)で、飛来塩分の影響を受ける、非常に腐食しやすい環境である。レベルIIは沖縄県の内陸部(海岸線からある程度離れた場所)で、レベルIより腐食しやすく、レベルIIIより腐食しにくい環境である。

図10、及び図11をもとにそれぞれの腐食レベルを15~20年目安での防食法について提言する。

本土の内陸部では、一般塗装系を。沖縄県内の内陸部では、重塗装系を。沖縄県内外の海岸部では、重塗装系と水洗いを行う。

表1 腐食レベルによる防食表

腐食レベル	腐食速度 (mm/year)	日平均電氣量 (C/day)	飛来塩分量 (mdd)	維持管理
I	0~0.033	0~0.008	0~0.01	一般塗装系
II	0.033~0.080	0.008~0.1	0.01~0.353	重塗装系
III	0.080~	0.1~	0.353~	重塗装+水洗い

5. 結論

本研究では、雨がかりのある環境下での鋼材の腐食環境評価手法の提言を目的に、鋼板の暴露試験及び飛来塩分調査により腐食環境の評価を行った。

本研究の結論及び今後の課題を以下に示す。

1. 海岸から距離が長くなるに従い、腐食度は減少する傾向にある。
2. 台風の影響が著しい。
3. 腐食の進行には降雨量よりも、降雨時間が関係する。
4. 飛来塩分は、海岸からの距離が長くなるに従い減少傾向にあるものの、本土と比べるとその減少程度は小さい。

また、飛来塩分量と腐食度には関係性がみられ、雨がかりのある環境下における鋼材の腐食環境に対して、飛来塩分量を適用すれば、一定の評価は可能である。

5. 雨がかりのある環境下でのACM腐食センサーのしきい値を100μAにすることを提案した。
6. 雨がかりのある環境下での日平均電氣量と腐食速度との評価式を提言した。
7. 腐食環境を3つに区分し、15~20年を目安とした防食法を提案した。

6. 参考文献

- 1) (社)腐食防食協会:第145回腐食防食シンポジウム資料,腐食減耗評価方法の高精度化—鍍付き鋼材の除錆方法(2004.6.18)
- 2) 建設省土木研究所,(社)鋼材倶楽部,(社)日本道路協会:耐鋼性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書(VII)
- 3) 押川渡,他:雨がかりのない条件下に暴露された炭素鋼の腐食速度とACMセンサー出力との関係,材料と関係