

# 亜熱帯島嶼地域における鋼材腐食特性と腐食促進試験法の検証

設計工学講座 所 宏祐

## 1. 序論

沖縄は日本で唯一の亜熱帯環境地域に属し、高温・多湿で且つ周辺が海に囲まれた島嶼性・海洋性の特徴を有している。図1に気象庁公開データ<sup>1)</sup>における約30年のデータを示す。図には沖縄と日本の代表地点（東京・銚子、名古屋、大阪、松江、新潟）および東南アジア（台北、マニラ、バンコク）の平均気温、平均湿度、平均風速を示す。図より沖縄の気温は冬季でも15℃程度以下にならず、常に材料の化学反応が起こる高温を保持している。なお、当然ながら赤道に近い東南アジアよりは低い。次に、金属の腐食に必要な水分供給環境に影響を与える相対湿度は、年間を通して70～80%と濡れ環境になっている。また、風速はほぼ1年中平均5m/sと強い環境となっており、島嶼海洋性の特徴がみられる。この強い風速環境は、膨大な飛来塩分の輸送環境に影響を与える。以上のマクロ的環境より沖縄は過酷な腐食環境であることがわかる。

したがって、亜熱帯島嶼地域に位置し過酷な腐食環境である沖縄において、鋼材の腐食特性を把握し評価することは、インフラ構造物を構築する材料や防食技術の開発にとって、非常に価値が高いことである。

そこで、本研究では、亜熱帯島嶼地域の沖縄における鋼材の腐食特性を明らかにすることを目的に、沖縄県内の橋梁および暴露試験場において、飛来塩分捕集および鋼材の腐食速度調査を実施した。また、既往研究の全国41橋暴露試験<sup>2)</sup>との比較検証を行った。さらに、沖縄の鋼材腐食特性を活用した既存の腐食促進試験と自然環境との比較検証を行った。

## 2. 亜熱帯島嶼地域の鋼材腐食特性

### 2.1 試験方法

#### (1) 調査地点

図2に本研究の調査地点を示す。対象は沖縄県内に架かる橋梁13橋と、暴露場4か所の計17地点である。各調査地点において、鋼板暴露試験、飛来塩分捕集試験および温湿度計測等を実施した。

#### (2) 飛来塩分捕集試験

飛来塩分捕集試験は、JIS Z 2382 のドライガーゼ法に準じて実施した。本試験方法は蒸留水で煮沸乾燥させた約150×300mmのガーゼを二つ折りにして写真1に示す木枠にはめ込み、雨がかりの無い橋梁桁下フランジなどに設置して捕集を行った。塩分を捕集する面は100×100mmである。塩分捕集期間は約1ヶ月とし、1ヶ月毎にガーゼの交換・回収を行った。

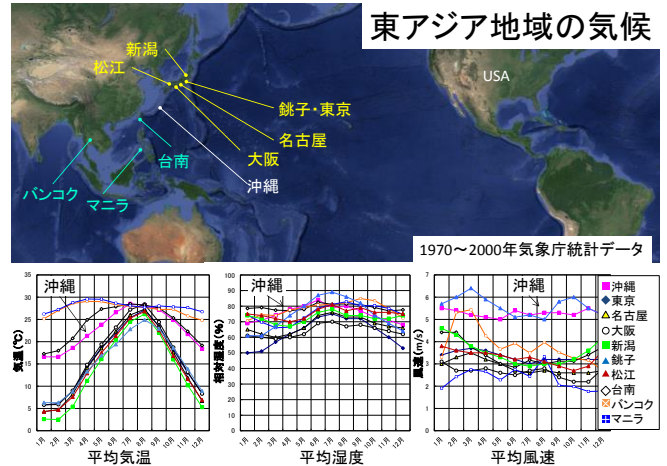


図1 沖縄の気温・湿度・風速<sup>1)</sup>

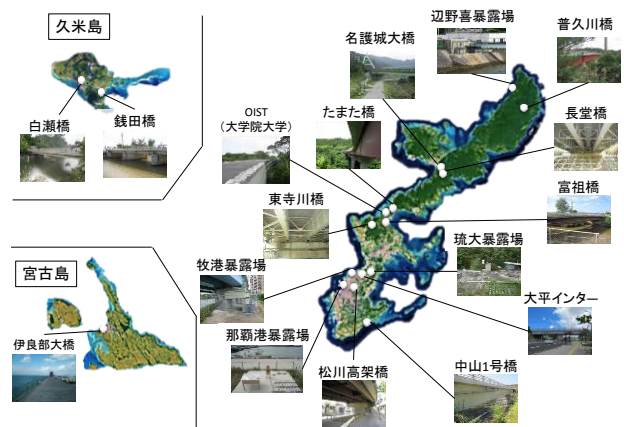


図2 沖縄での調査地点

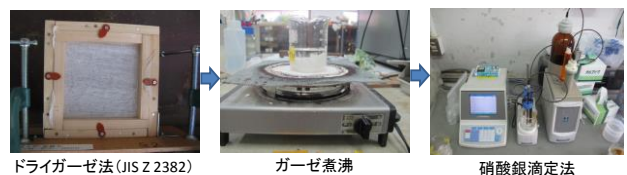


写真1 飛来塩分捕集試験手順

表1 ワッペン試験片化学成分

化学成分CHEMICAL COMPOSITION %							
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
12	26	107	11	3	31	7	45

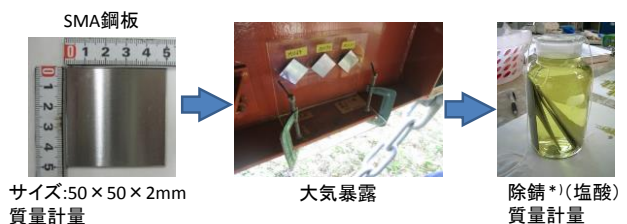


写真2 鋼板暴露試験手順

飛来塩分量は、硝酸銀による中和滴定分析（硝酸銀滴定法）にて算出計量した。

### (3) 鋼板暴露試験

鋼板暴露試験には、SMA 鋼材（50×50×2mm、鏡面仕上げ、以下、ワッペン試験片という）を用いた。表 1 にワッペン試験片の化学成分を示す。ワッペン試験片の設置は、写真 2 に示すように飛来塩分捕集器と同位置で、実橋では桁内の下フランジ上面に垂直設置し、4 か所の暴露場では暴露架台内の雨がかりのない箇所に垂直設置した。暴露期間は 1～3 年である。暴露期間中は、電磁式膜厚計によりさび厚の計測を行った。さび厚計測は 10 回計測の平均値をさび厚とした。ワッペン試験片は回収後、鑄成分の定量分析、腐食減耗量の算出<sup>3)</sup>、腐食減耗曲線の算出を行った。

### (4) さび成分分析

大気環境下で生じた錆の成分を分析するため、粉末 X 線回折装置により定量分析を行った。X 線回折装置で分析可能な錆成分は、 $\alpha$ -FeOOH、 $\beta$ -FeOOH、 $\gamma$ -FeOOH、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> の 4 種類である。定量分析に必要な標準物質について、 $\beta$ -FeOOH は不安定で入手困難なため、 $\alpha$ -FeOOH、 $\gamma$ -FeOOH、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> の 3 種類の定量化を行った。

## 2.2 鋼材腐食特性

図 3 に腐食減耗量と飛来塩分量の関係を示す。図より沖縄における飛来塩分量と腐食速度は幅広く分布しており、その中で、沖縄の特徴として飛来塩分量 0.1～1mdd に多く分布していることがわかる。

また、飛来塩分量が 0.5mdd 以上のデータを用いて算出した回帰曲線より、腐食速度が非常に大きくなる傾向を示した。このことが、日本本土より腐食環境が厳しくなる要因の一つと考えられる。

図 4 に既往研究式<sup>4)</sup>から求めた腐食減耗予測曲線（既往研究式<sup>4)</sup>）を示す。100 年後の腐食減耗量において本土海岸部と沖縄の両方とも 5mm を越える腐食特性を示すが、前述した飛来塩分が 0.5mdd 以上となる辺野喜橋、塩屋大橋などの沖縄西海岸においては腐食減耗量が極めて大きくなる傾向がみられる。

暴露期間 1 年と 1 年以上の腐食減耗量から直接最小二乗法により求めた腐食減耗予測曲線（直接近似式<sup>2)</sup>）を図 5 に示す。図より既往研究式の腐食減耗予測曲線と同様に、沖縄は本土海岸部と同程度の腐食減耗量の傾向を示しつつ、本土海岸部より極めて大きい腐食減耗量がみられる地点が存在することがわかる。

図 6 に 50 年後の腐食減耗量と年平均飛来塩分量の関係を示す。なお、同図には図 3 の実測値も示した。50 年後の飛来塩分量と腐食減耗量の関係においても回帰曲線は 0.5mdd 未満の範囲では腐食減耗

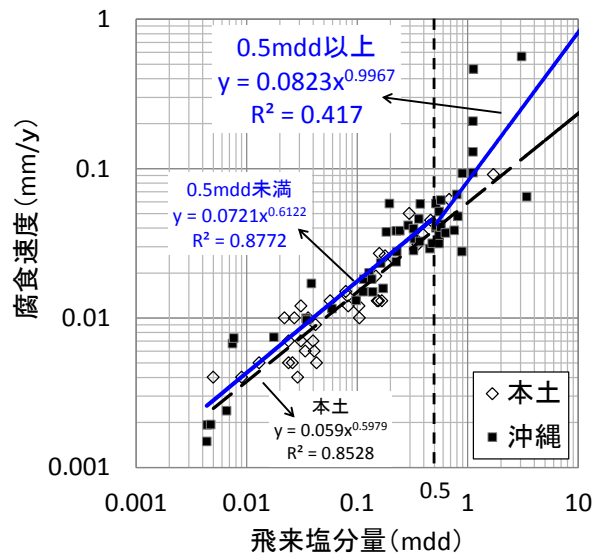
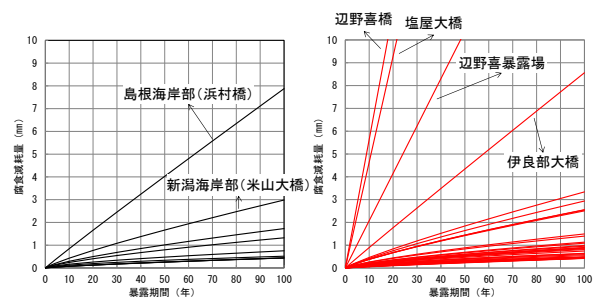
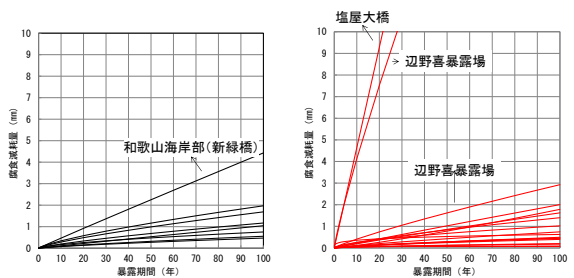


図3 飛来塩分量と腐食速度の関係



(1) 本土海岸部 (2) 沖縄  
図4 腐食減耗予測曲線（既往研究式<sup>4)</sup>）



(1) 本土海岸部 (2) 沖縄  
図5 腐食減耗予測曲線（直接近似式<sup>2)</sup>）

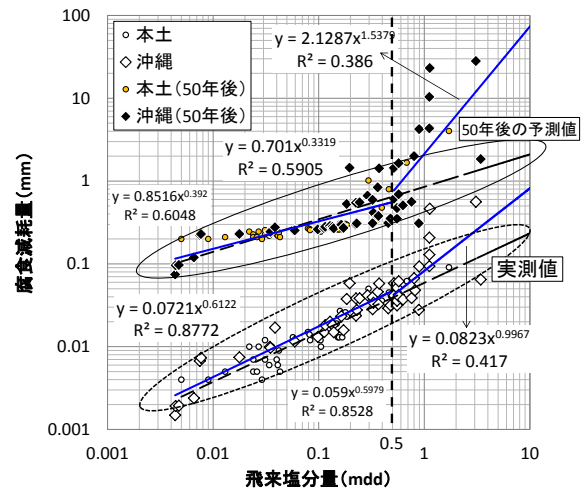


図6 50年後の腐食減耗量

量は同程度の傾向がみられる。一方、沖縄の飛来塩分量が 0.5mdd 以上の地点では腐食減耗量が大きくなる傾向がみられる。

### 2.3 さび成分特性

図 8 に辺野喜暴露場、牧港暴露場、琉球大学暴露場に 3 か月と 6 か月間暴露したワッペン試験片から採取したさびの X 線回折による定量成分分析結果を示す。図より辺野喜暴露場、琉大暴露場の自然環境下のさび成分は活性さびである  $\gamma$ -FeOOH の割合が増加している。牧港暴露場では変化がみられなかった。

## 3. 腐食促進試験法の検証

### 3.1 腐食促進試験方法

#### (1) 塩水噴霧試験

塩水噴霧試験による腐食促進試験は JIS Z 2371 に準じた塩水噴霧試験機を用いて実施した。使用する鋼板は、大気暴露試験結果との比較のため、同様のワッペン試験片を用いた。ワッペン試験片は試験槽内に 15°傾斜させて設置し、試験槽内温度 35°C とし、5%濃度食塩水を噴霧した。

#### (2) 複合サイクル試験

複合サイクル試験で使用した試験鋼板は、大気暴露試験と同様のワッペン試験片である。5%濃度食塩水を塗布後、恒温恒湿機により、気温 35°C・湿度 90%の湿潤条件で 2h、気温 40°C・湿度 50%の乾燥条件で 6h を 1 サイクルとして、3 サイクルごとに 5%濃度食塩水を鋼板にスプレー塗布して腐食促進を行った。

#### (3) 潮風腐食促進試験

潮風促進試験では、写真 5 に示すようにアクリル板で作成した試験槽に、エアプロセッサにより温度と湿度を調整した空気と、超音波加湿器による塩ミストを合流させ、試験槽内に設置した鋼板を温湿度を制御した潮風により腐食させる装置を作成し、鋼板の腐食促進を実施した。使用した鋼板は、大気暴露試験と同様のワッペン試験片である。また、ワッペン試験片は潮風を面で受ける様に自然環境下と同様に垂直に設置している。促進試験条件は 2つの条件で行った。以下に試験条件を示す。

##### ① S6 サイクルモデル

試験槽内の促進試験条件は気温 35°C・湿度 90%・塩ミスト噴霧の湿潤条件で 2h、気温 40°C・湿度 50%・塩ミスト噴霧なしの乾燥条件で 6h を 1 サイクルとして腐食促進を行った。

##### ② 辺野喜冬モデル

実環境下での鋼材腐食の検証として、辺野喜暴露場での腐食環境を元に試験槽内の腐食促進条件を設定して試験を実施した。辺野喜暴露場のデータより気温 15°C・湿度 90%・塩ミスト噴霧の湿潤条件で 15h、気温 25 度・湿度 50%・塩ミスト噴霧の乾燥

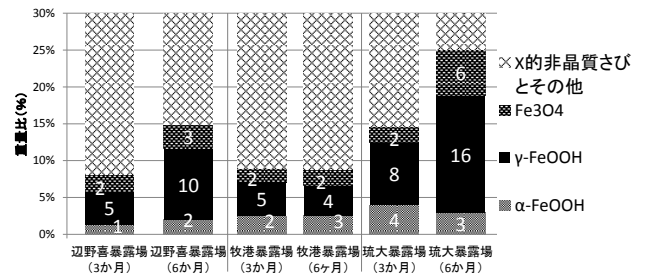


図7 さび成分割合



写真5 潮風腐食促進試験装置

	塩水噴霧	複合サイクル	潮風(S6)	潮風(辺野喜冬モデル)	辺野喜暴露場
さび厚 100μm					
さび厚 200μm				↓	
さび厚 300μm					
さび厚 400μm				継続中	

写真6 ワッペン試験片のさび外観状態

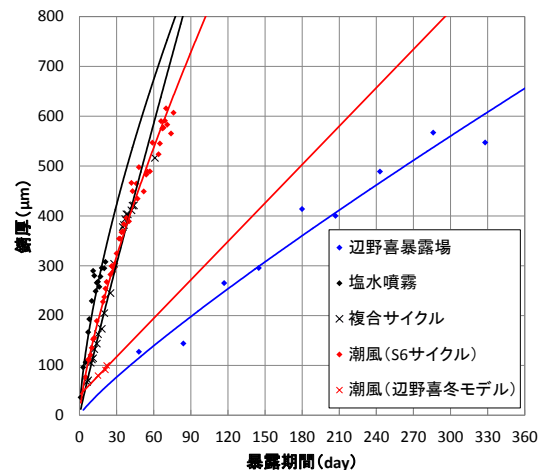


図8 ワッペン試験片の錆厚変化

条件で 9h を 1 サイクルとして腐食促進を実施した。

### 3.2 鋼材腐食特性

写真 6 に塩水噴霧、複合サイクル、潮風促進試験、辺野喜暴露場のワッペン試験片のさび外観を示す。自然環境である辺野喜暴露場のさび色は褐色から暗褐色に変化がみられる。複合サイクル、潮風促進試験のさび色は褐色から暗褐色の変化がみられるが、塩水噴霧試験のさび色は褐色と暗褐色がまだらにでており、さび質がどろどろで表面は凸凹が激しい。

図 8 に錆厚変化を示す。各さび厚値に対して  $Y=AX^B$  の近似曲線を示している。自然環境である辺野喜暴露場に対して塩水噴霧と複合サイクルと潮風 (S6モデル) が約 5~6 倍、潮風 (辺野喜冬モデル) が約 2 倍の速さで促進していることが確認できる。

図 9 に腐食減耗量から直接近似式による腐食減耗予測曲線を示す。図 8 と同様な傾向がみられ、潮風 (辺野喜冬モデル) はある程度、自然環境下を再現している。

図 10 に錆厚と腐食減耗量の関係を示す。塩水噴霧試験、複合サイクル試験、潮風促進試験 (S6、辺野喜冬モデル) において自然環境下のさび厚と腐食減耗量の関係に概ね当てはまる。

### 3.3 さび成分特性

図 11 に塩水噴霧試験、複合サイクル試験、潮風腐食促進試験 (S6 モデル) のさび成分分析の結果を示す。複合サイクル試験、潮風腐食促進試験 (S6 モデル) は  $\alpha$ -FeOOH、 $\gamma$ -FeOOH、 $Fe_3O_4$  の割合はほぼ辺野喜暴露場と同程度となり大気環境下腐食に近い傾向を示した。一方、塩水噴霧試験では  $\alpha$ -FeOOH、 $\gamma$ -FeOOH、 $Fe_3O_4$  の 3 成分の割合が 50% 以上と高く、他試験との違いが得られた。

## 4. 結論

- (1) 飛来塩分量と腐食速度において飛来塩分が 0.5mdd 以上となる回帰曲線は腐食速度が非常に大きくなる傾向を示した。
- (2) 腐食減耗予測において本土海岸部より極めて大きな腐食減耗量を示し、50 年後の予測値において飛来塩分量 0.5mdd 以上の地域が存在する沖縄の腐食速度は極端に大きくなることを確認した。
- (3) 既存の腐食促進試験と大気環境下腐食 (辺野喜暴露場) のさび外観状態の比較により、塩水噴霧試験は褐色と暗褐色がまだらにでており、さび成分割合においても大気環境下腐食 (辺野喜暴露場) とは相関性がないことを確認した。
- (4) 複合サイクル試験と潮風腐食促進試験では大気環境下腐食 (辺野喜暴露場) とさび外観とさび成分割合においてほぼ同程度の腐食傾向が得られた。

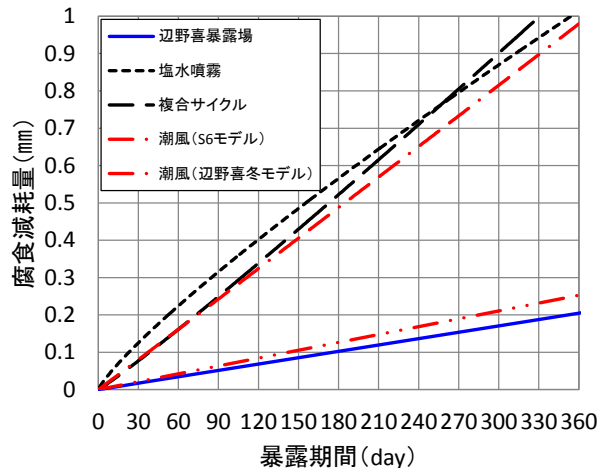


図9 ワッペン試験片の腐食減耗予測曲線

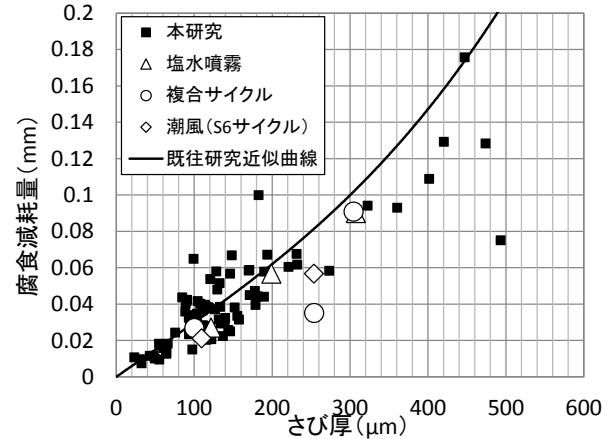


図10 さび厚と腐食減耗量の関係

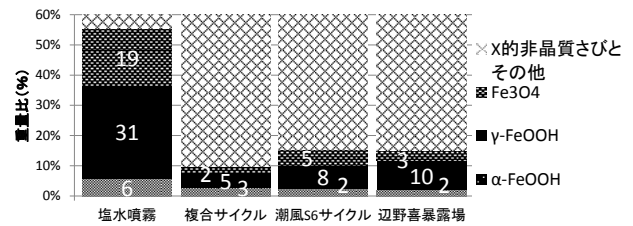


図11 腐食促進試験のさび成分割合

### 【参考文献】

- 1) 気象庁、<http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>、NCDC : National Climatic Data Center HP : <http://www.ncdc.noaa.gov/>
- 2) 建設省土木研究所ら：耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書 (XVIII) -全国暴露試験のまとめ (概要編) -、1993.3.
- 3) (社) 腐食防食協会：第 145 回腐食防食シンポジウム資料 [主題] 鋼橋防食技術・新パラダイム具現化へのさびサイエンス、2004.6.
- 4) 紀平ら：耐候性鋼の腐食減耗予測モデルに関する研究、土木学会論文集、No.738/I-64、271-281、2003.7.