

原子力リスク低減研究—海塩粒子による構造物腐食（4）

福永 忠* 中安 文男*

Nuclear Risk Reduction Study The Structure Corrosion by the Sea Salt Aerosols (4)

Tadashi Fukunaga, Fumio Nakayasu

Corrosion due to sea salt aerosols is one of the major factors causing ageing degradation. In this respect, we performed various types of exposure tests; placing standard test pieces in the open air environment and placing the test pieces in the shielded environment with and without a filter at the air intake. We measure the weather factor, the environment pollution factor and corrosion of samples (carbon steel etc.) We calculated the relation of those factors and we found that calculated (multivariate analysis) value has good agreement with measured value.

1、緒言

日本では、海岸沿いに多くの構造物があり、その中には、冷却水を必要とする原子力発電所も含まれている。それに加えて、原子力発電によって発生する使用済燃料の中間貯蔵施設も沿岸に立地する可能性が強いので、環境因子（環境汚染因子と気象因子）による構造物腐食は、原子力関連施設の健全性を検討する上で、重要な因子の一つである。

環境汚染因子による腐食には、様々な要因があるが、図1に示すように、その主要なものは、環境因子、構成材料及びその表面状態である。

本研究は開放暴露試験（環境因子からの影響を直接的に受ける試験）装置と遮へい暴露試験（環境因子からの影響を直接受けない試験）装置を、海浜地区（あわら海岸）及び準沿岸地区に設置し、腐食と環境因子及び材料との関係を解明するために行っている。

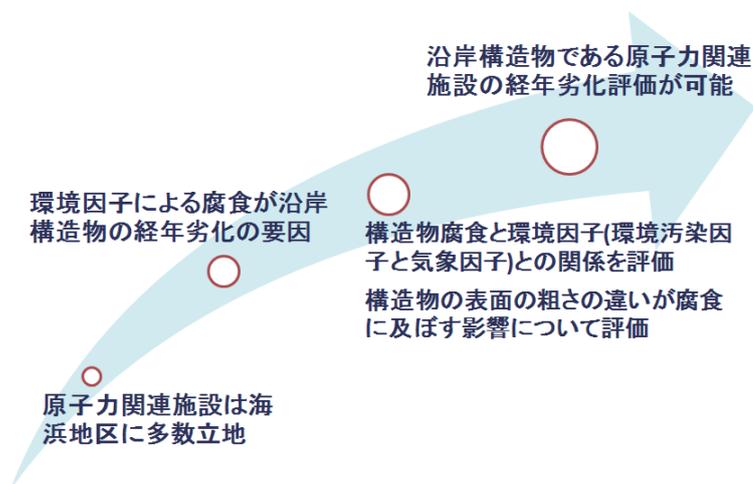


図1 環境汚染因子による腐食研究の目的

* 原子力技術応用工学科

本報告は第4報であり、第3報までの主要な報告事項は次の通りである。

- ① 海塩粒子による炭素鋼の腐食は、暴露時間の増加とともに、単調に増加し、飽和する傾向はなく、むしろ加速傾向にある。これは、開放暴露試験及び遮へい暴露試験に共通してみられる。腐食の単調増加もしくは加速傾向にある理由は、生成した腐食生成物が脱離していくためであると考えている。
- ② SUS316 及び SUS304 の応力腐食割れ (SCC) は、現在のところ観察されていない。使用した試験片は、JIS に規定する U-バンド試験片である。文献調査結果などによると、ウェット&ドライ条件を実機とはほど遠い実験室条件 (海水噴霧など) で実施した場合には、容易に SCC が観察されるとのことである。実機条件で SCC を観察するのは困難である。
- ③ 防食処理を施した試験片には腐食は観察されていない。これは、選択した防食処理 (塗装、メッキなど) は、その効果を長時間持続することを示している。
- ④ フィルターを用いた遮へい暴露試験でフィルター効果の確認を行ったところ、フィルターの使用により、海浜地区 (海岸線から 300m 以内) の海塩粒子飛来量及び腐食減量を準沿岸地区 (福井市街地) と同程度に抑えられることが判明している。
- ⑤ フィルター寿命の予備的試験を実施したところ、フィルター寿命は 4 カ月程度または、捕集海塩粒子 $500\text{mg}/\text{m}^2$ 程度であると推定している。フィルター寿命とは、フィルターが海塩粒子を除去できなくなる状態 (ハエ取り紙全面にハエがくっつくというイメージ) 及び/又はフィルターの目詰まり (海塩粒子などによる目詰まり) による通過風量の減少 (当初通過風量の 10 分の 1 程度) と考えている。
- ⑥ フィルターの代わりに「ガラリ」を用いる予備試験を実施した。ガラリは、海塩粒子除去と腐食減量の低下に寄与すると推定している。
- ⑦ 環境汚染因子 (海塩粒子) と気象因子との相関評価を重回帰分析により実施したところ、平成 20 年度のデータ間では、強い相関がみられた。
- ⑧ 同様に、腐食減量と環境因子 (環境汚染因子+気象因子) との相関評価を重解析により実施したところ、平成 20 年度のデータ間では、強い相関が見られた。
- ⑨ 冬季には、中国大陸から SO_x が飛来していると推定している。

2、試験方法

環境因子と構造物腐食との関係を解明することを目的として大気暴露試験を実施した。本報告では、暴露条件を変え、海塩粒子の飛来量を比較し、得られたデータを用いて、回帰分析による評価を行った。また、構造物腐食を気象因子及び環境汚染因子により推定することも試みた。

2-1 大気暴露試験

大気暴露試験は JIS Z 2381「大気暴露試験方法通則」に準じ、以下の通り行った。

a 暴露試験場

JIS Z 2381 付属書 1 (暴露環境の区分) の日本海・南区域に属する福井県の海浜に、設置した暴露試験場は、当該地域の気候を全面的に受ける場所であり、図 2 に示すあわら海岸にある。また、海岸と内陸を比較するために福井工業大学 3 号館屋上にも設置した。



図 2 あわら試験地

b 海塩区分

あわらの海塩区分は JIS Z 2381 付属書 1 (暴露環境の区分) の海浜 (海岸線から 300m 以内) であり、福井工業大学屋上は、準沿岸 (海岸線から 2km~20km) である。

c 暴露試験装置

暴露試験装置は、図 3-1、3-2 に示すように暴露架台、試験箱、試料保持枠などで構成され、堅牢な構造とした。構造材料は、試料の化学的性質、物理的性質および、性能の経時変化に影響を与えない耐食性のステンレス鋼に塗覆装を施した型材とした。暴露試験装置の設置面から暴露試験を行う試料の最下端までの距離は 500mm 以上とした。暴露試験面の方位は海岸線と直角とし、角度は水平面から 45 度とした。あわら海岸には、4 台の大気暴露試験装置の暴露面を海岸線と平行設置し、福井工業大学 3 号館屋上に 1 基の開放暴露試験を設置した。

あわら海岸に設置した遮へい暴露試験装置 4 台の内訳は、フィルター無、フィルター有(取替えなし)、フィルター有(定期取替え)、ガラリ(ブラインド状の羽根を十数枚取り付けたもの)である。福井工業大学三号館屋上にも開放暴露試験装置を設置した。

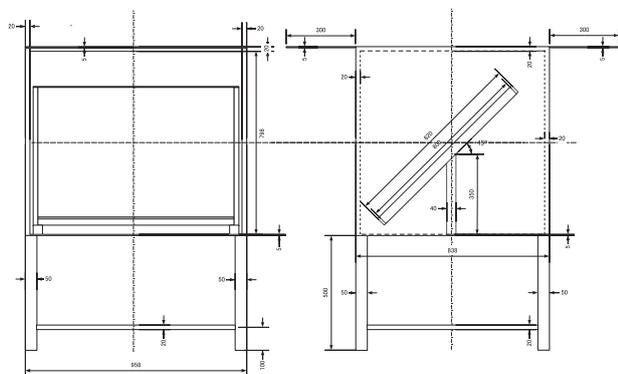


図 3-1 暴露装置 (概略図)



図 3-2 暴露試験装置写真)

d 暴露試験方法

開放暴露試験と遮へい暴露試験の2種類を実施した。開放暴露試験は日照、雨、雪、風などの大気環境下で試料を直接暴露する試験法で、試料相互間の接触による影響が生じないように、適当な間隔をおいて試料を取り付けた。遮へい暴露試験は遮へい構造物の中に試料を設置して、日照、雨、雪、などの影響を直接受けない状態で暴露する試験方法で、海岸からの外気の流通以外を遮断できる構造とし、試料相互間の接触による影響が生じないように、適当な間隔を開けて試料を取り付けた。

e 試験片

暴露試験の目的である腐食特性を評価するため、平板形状の試験片を用いた。試料の形状及び寸法は JIS-Z-2381 付属書 2 に準じ、寸法は 100mm×100mm とした。

2-2 環境汚染因子の測定

環境汚染因子の測定は、JIS に準じたドライガーゼ法を用いた。図 4 に示すように、外寸法 150mm×150mm、内寸法 100mm×100mm のポリエチレンの枠組みを 2 枚用意し、ガーゼ 120mm×120mm を 2 枚重ねにし、1 枚の枠組みにしわが生じないように固定し、もう 1 枚の枠組みで、ガーゼを挟むようにして固定した。このドライガーゼプレートは遮へい暴露試験装置内に、図 5 に示す様に設置した。

一定期間暴露したドライガーゼプレートを回収、処理し、イオンクロマトグラフを用いて環境汚染因子を測定した。

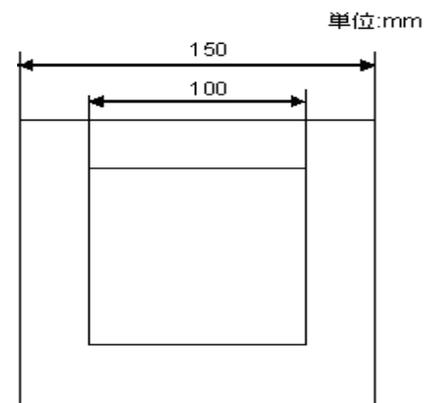


図 4 ガーゼプレートの寸法

2-3 腐食減量

暴露試験を行う前に試験片の質量 (W_1) を 0.01g 単位で測定し、暴露試験終了後、試験片に生成した腐食生成物を JIS-Z-2382 付属書 A に示す溶液を液温 20-25 度にて 10 分間浸漬して除去した。腐食生成物を除去した試験片を 0.01g の単位で質量 (W_2) を測定し、質量減少 ($\Delta W = W_1 - W_2$) を求めた。

2-4 腐食度

腐食度の測定は JIS-Z-2383 「大気環境の腐食性を評価するための標準金属試験片及びその腐食度の測定方法」に準じ、腐食減量を 1 年あたりに規格化し、腐食度 $\gamma_{\text{corr}}/(\text{m}^2 \cdot \text{y})$ で表した。

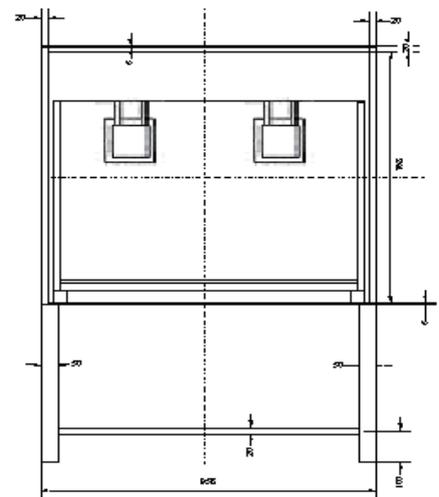


図 5 ガーゼプレート設置法

2-5 フィルター寿命評価

あわら海岸に設置した暴露試験装置の内、2基にフィルターを設置し、片方を一ヶ月毎に取替え、(フィルター有り、定期取替え) 他方を1年間取替えなし(フィルター有り、取替え無し)とし、海塩粒子飛来量と腐食減量(腐食度)の比較を行うことにより、フィルターの寿命評価を行った。評価したフィルターを図6に示す。

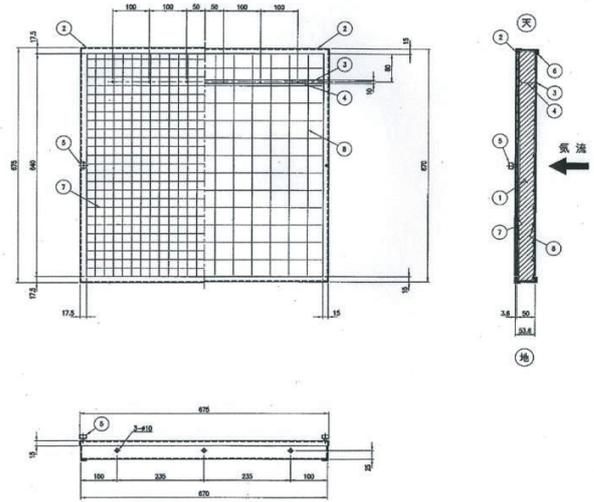


図6 フィルター

3 海塩粒子飛来に関する試験結果

3-1 暴露条件別での海塩粒子飛来量の比較

図7に示す様に海塩粒子飛来量は冬季に多く、夏季に少ない。この理由は、冬の日本海は夏に比べ風速は大きく、風によって運ばれる海塩粒子飛来量が増加するものと考えられる。

あわら海岸(海浜地区)の暴露試験装置にフィルターを取り付けると準沿岸地域の工大屋上に設置したものと同程度の海塩粒子飛来量となる。

フィルター交換ありと交換なしの比較では、設置当初は、同程度の海塩粒子飛来量(透過量)となるが、4ヶ月程度経過すると、フィルター交換無の方が交換有より海塩粒子飛来量が少なくなる。その理由は、交換無の場合は飛来海塩粒子によって、フィルターが目詰まりし、風が透過し難くなったと考えられる。

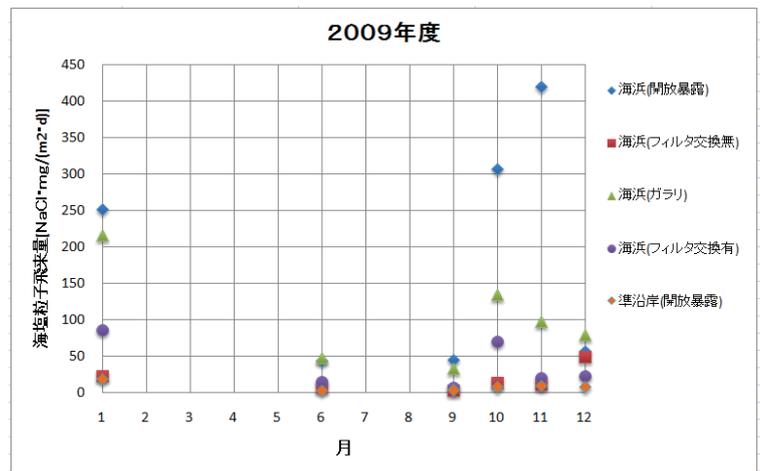


図7 季節による海塩粒子飛来量の変動

3-2 気象因子の相関及び海塩粒子との相関

各気象因子間の関係性を評価した結果を表-1に示す。同表に示すように、あわら海岸では、風速と気温が高い相関を示している。

表-1 気象因子相互間の関係

気象因子と海塩粒子飛来量との関係を表-2に示す。同表から分かるように、風速と海塩粒子飛来量に強い相関がある。

	気温	風速	日照時間
降水量	0.07	0.08	0.57
気温	—	0.71	0.64
風速	—	—	0.46

表-2 からは、気温と海塩粒子飛来量間、降水量と海塩粒子飛来量間には相関が無いようにみられるが、図-8 に示すように、海塩粒子飛来量と降水量との間には、ある種の相関があると考えている。風速 5m のところに海塩粒子飛来量の極大値が存在する。降雨量が小さい時は、雨が海面を叩くことで、海の水が跳ね上がって、小さい粒になり、風によって運ばれるので、風速の増加に従って海塩粒子飛来量が増加し、その後、ある程度降水量が大きくなると降水量の増加により、海水が海に戻されるため、海塩粒子飛来量が減少すると考えられる。最後に、降水量の増加と共に海塩粒子飛来量が再び増加するが、これは雨により海に戻される海水の粒子より、雨によって飛散する海水の粒子の量が多くなるためと考えている。

表-2 に示すように、平均日照時間と海塩粒子飛来量の間には、相関があるが、これは日照時間が短い冬に、風が強くなるという福井（日本海沿岸）の特性によるものと考えている。

3-3 重回帰分析による海塩粒子飛来量と気象因子の関係

フィルター無しの遮へい暴露における気象因子と海塩粒子飛来量の関係を重回帰分析により評価した結果を図 9,10 及び 11 に示す。

図 9 に示す 2008 年単年の相関係数は 0.96 であり、図 10 に示す 2009 年単年の相関は 0.99 と非常に高い値を示したが、2008 年及び 2009 年の 2 年間に渡る相関をとると、0.85 となったが、高い

表-2 海塩粒子飛来量と気象因子の相関

	海塩粒子飛来量
平均気温	0.33
平均風速	0.71
平均降水量	0.30
平均日照時間	0.48

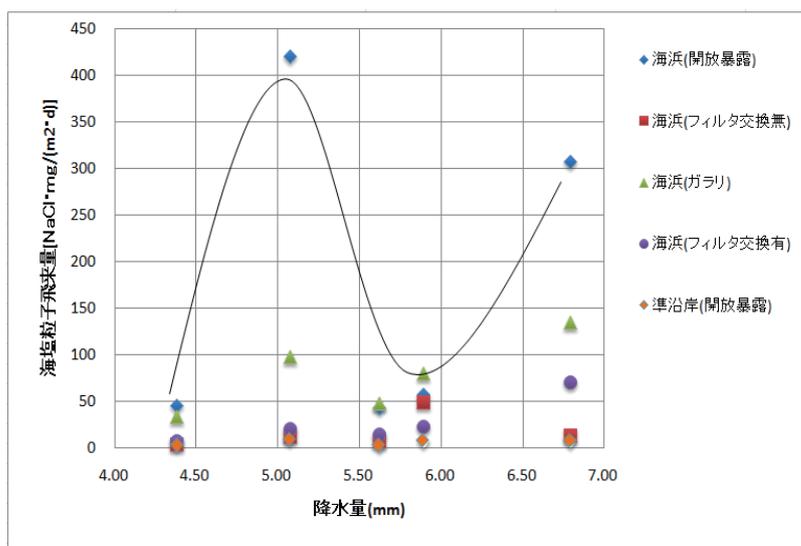


図 8 海塩粒子飛来量と降水量の関係

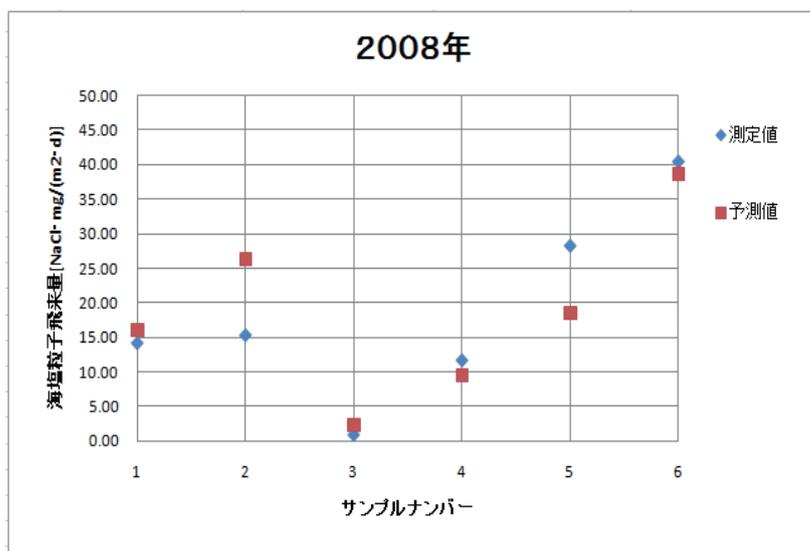


図 9 海塩粒子飛来量と気象因子（2008 年）

相関を示している。

これは、海塩粒子飛来量に影響を及ぼす気象因子の内。回帰分析に使用した因子が海塩粒子飛来量を大きく左右していることが推定できる。

図 12 にフィルター有りでフィルターの交換をしなかった場合の気象因子と海塩粒子飛来量との関係の重回帰分析で評価した結果を示す。この時の相関係数は、0.89 であり強い相関を示している。このことは、暴露条件が変わっても、単年では、海塩粒子飛来量と気象因子の間に強い相関があるということを示している。

3-4 結果の評価

海塩粒子の飛来量は気象条件によって大きく変化するが、一つの因子だけで海塩粒子の飛来量を推定することは困難である。複数の気象因子によって、海塩粒子の飛来量を推定することを目的として、多変量解析で海塩粒子飛来量と気象因子の関係を求めた。この結果、2008 年及び 2009 年単年では、よい相関が得られ、また、暴露条件が変わっても良い相関が得られているが、複数年に渡って多変量解析を行うと、単年度に比べると低下している、しかし、複数年でも強い相関を示している。これにより海塩粒子飛来量を支配しているのは気象因子であることが明らか

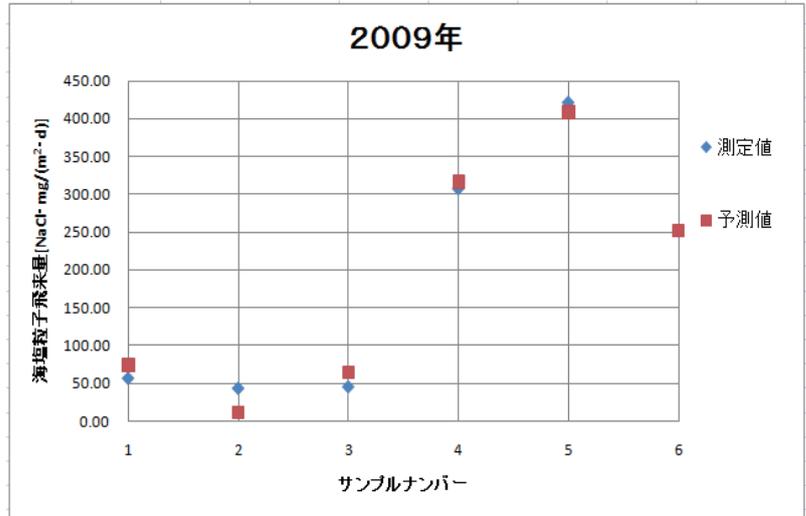


図 10 海塩粒子飛来量と気象因子 (2009 年)

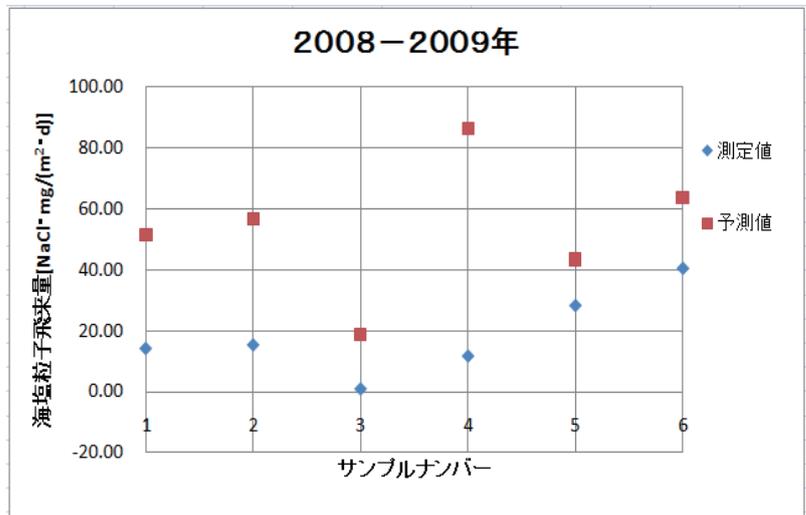


図 11 海塩粒子飛来量と気象因子 (2008 及び 2009 年)

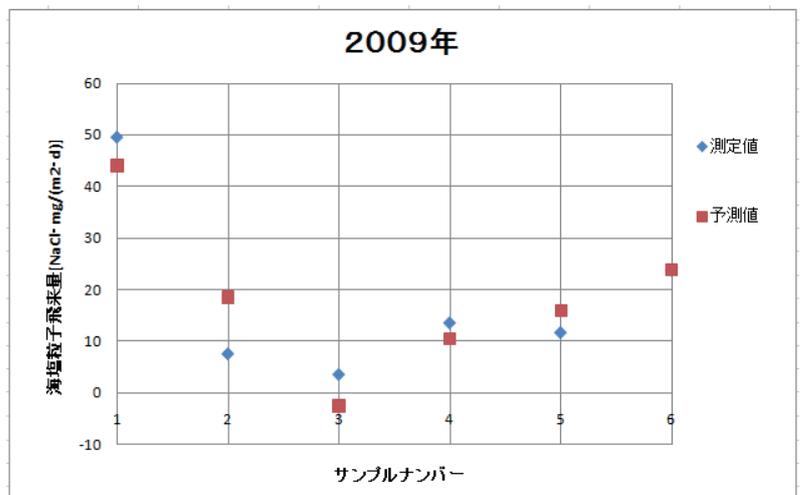


図 12 海塩粒子飛来量と気象因子 (フィルター有、交換無)

になった、よって海塩粒子飛来量は気象因子に依存していると考えられる。

4、構造物腐食試験結果

4-1 腐食と気象因子

あわら海岸に装置A(開口部にフィルターなし)、装置B(開口部にフィルターあり・交換なし)、装置C(開口部にブラインド状の羽根を十数枚取り付けたもの)、装置D(開口部にフィルターあり・交換あり)の計4台の遮へい暴露試験装置を設置し、また、遮へい暴露試験装置上部に開放暴露試験装置Rを設置した。また、福井工業大学3号館屋上に開放暴露試験装置Kを設置した。いずれの暴露試験装置にも試験片を設置し、暴露試験を行った。

気象因子と暴露条件別の腐食度の相互関係を評価した、それでも高い相関であることが判明した、暴露条件を変えても気象因子は海塩粒子飛来量に影響を与えている。

4-2 宮古島とあわら海岸の比較

開放暴露の装置R(あわら)と宮古島の腐食度の比較を図13に示す。同図から分かるように、宮古島の腐食度に比べ、あわら海岸の腐食度の方が数倍大きい。この理由は、JISに規定する試験方法、一番影響の受けやすい方向に向けて試験片を設置、

によるものと推定している。

JISに規定する方法は試験片が一番影響を受けやすい方向に向けて設置することになっている。しかし、あわら海岸の腐食は、主として日本海からの風によって運ばれる海塩粒子によるものであり、言い換えると一方向の風の影響を強く受けるのに対し、海に囲

まれた宮古島では、風の方向が様でないが、一方向の風の影響しか受けないように試験片を設置しているためだと推定している。

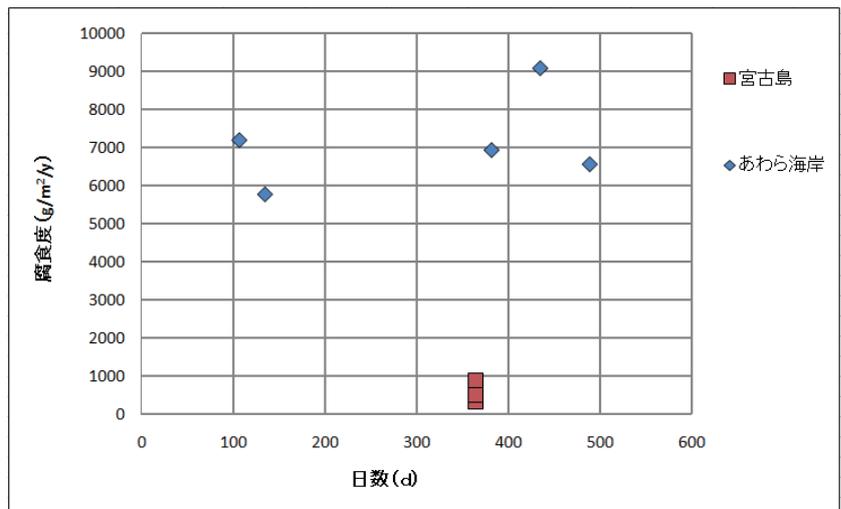


図13 あわら海岸と宮古島の腐食度の比較

4-3 重回帰分析による測定データの評価

目的変数(Y)を腐食度、説明変数(X)を降水量、気温、日照時間、風速、海塩粒子飛来量とした重回帰分析を行った結果を、図14に示す。使用した重回帰式は、一次式であり、相関係数は0.95と強い相関を示した。

第3節で述べたように、海塩粒子の飛来量と気象因子の関係では、単年及び複数年の重回帰分析では、強い相関を示した。腐食と環境因子についても、複数年で強い相関を示している。これらにより、腐食を支配する主な因子は海塩粒子飛来量であり、海塩粒子飛来量を支配するのは気象因子であることが確認できた、各気象因子がどのくらい海塩粒子飛来量に影響を与えているのかをこれから明らかにしなければならないと考えている。

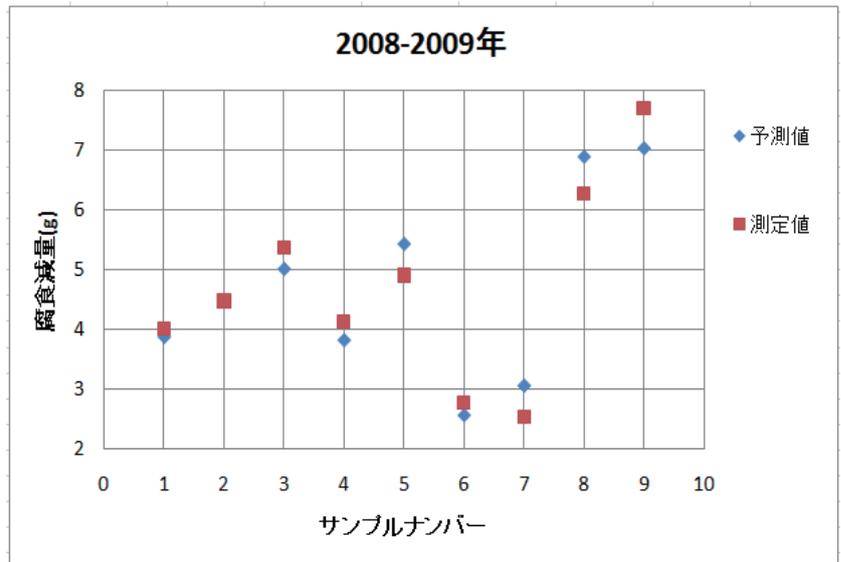


図14 複数年度（2008年及び2009年）回帰分析結果

4-4 表面粗さの相違による腐食減量の変化

供試体である炭素鋼の表面を100、320、500、800、1000で研磨し、開放暴露試験装置に設置し、1日、1週間、2週間、3週間、1カ月後の腐食減量の比較を行った。1カ月間の試験結果は、データのばらつきが大きかったが、図15示すように1週間から3週間の試験結果では、表面粗さが小さい程、腐食も小さくなることが判明した。

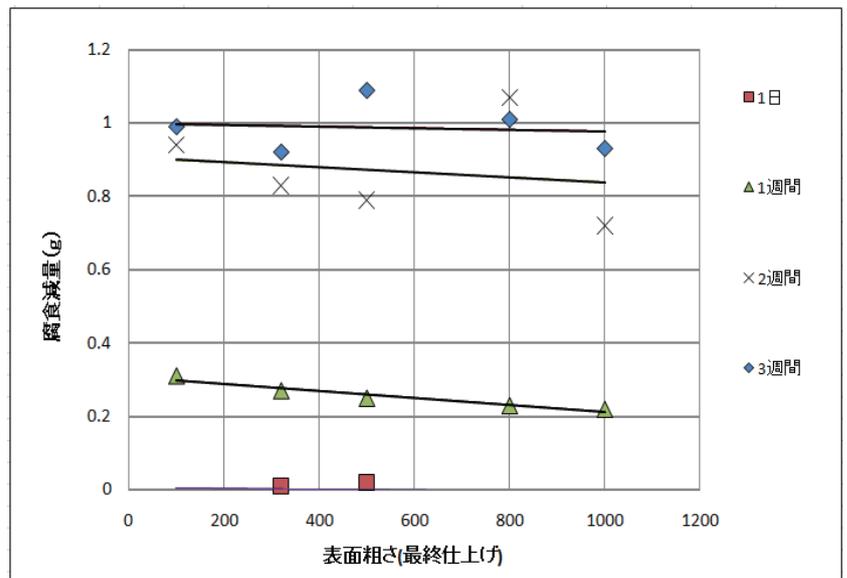


図15 表面粗さと腐食減量

1か月の試験結果のばらつき大きかった原因は、腐食が長期

(この場合1か月)に及ぶと、初期状態(表面)の影響が無くなる。また、1日間の腐食では、測定誤差の範囲に腐食が収まってしまうため、表面粗さの相違が観察されなかったと考えている。

4-5 結果の評価

腐食には気象因子、海塩粒子飛来量及び表面状態が強く影響する。

気象因子の中で腐食に影響を及ぼすのは、風速と降雨量である。風は空気中に含まれている海塩粒子運ぶ、雨は海面に衝突することにより海水を巻上げ、海塩粒子を中空へ散布し、風によって腐食試験装置に運ばれる。また、雨が降り、それが乾くことによって、腐食の条件である WET & DRY が形成されることになる。これらの理由により腐食に影響を与える気象因子として、風と雨が大きな影響を持つと考えられる。

5 結語

本研究によって得られた成果は次のとおりである。

- ① 炭素鋼表面粗さの相違による腐食感受性評価をフィールド試験において確認し、表面粗さが粗い程、腐食の進行が早いことが判明した。しかし、4 週間以上の腐食では、当初の表面状態の影響がなくなることが確認された。
- ② ガラリ性能評価試験（海塩粒子飛来量、腐食減量）では、ガラリは、海塩粒子飛来量、腐食減量の低下に効果があることが判明した。
- ③ 環境汚染因子と気象因子の相関評価の結果、単年でも複数年でも高い相関を得られました。海塩粒子飛来に対する支配因子が気象因子であり、気象因子だけを測定することによって、海塩粒子飛来量の推定が可能になった、また、各気象因子が海塩粒子飛来量に対する影響の程度を解析する必要がある。
- ④ 腐食減量と環境因子の相関では、複数年に亘り強い相関があることが判明した。これは、環境因子の測定により、腐食量の推定が可能であることを示している。

参考文献

- 1) 石原 只雄：最新・腐食事例解析と侵食診断法、株式会社テクノシステム、2008
- 2) 中安 文男：海塩粒子腐食に及ぼす環境因子の影響、検査技術、2008
- 3) 気象庁；<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- 4) 谷、竹田他：使用済燃料コンクリート貯蔵用キャニスタ-候補材の塩化物応力腐食割れの特性（その7）－SCC 評価および塩分流入低減技術の考案－、電力中央研究所報告、Q06014、2007 年 6 月
- 5) 竹田、谷他：キャニスタ系使用済燃料貯蔵施設における SCC 対策に関する研究（その1）、-塩分流入対策技術および SCC 評価-電力中央研究所報告、Q07030、2008 年 5 月
- 6) 中安文男他：The Effect of Sea Aerosols in the Japan Sea Coast Facilities, ENC 2007, Transactions pp188-191, 2007 年 9 月
- 7) 中安文男他：The Sea Salt Corrosion Study at Japan Sea Coast, EUROCORR 2008, paper 1169, 20

(平成 22 年 3 月 31 日受理)