

原子力リスク低減研究 —海塩粒子による日本海沿岸地域構造物の腐食—

中 安 文 男*

Nuclear Risk Reduction Study The Effect of Sea Salt Aerosols in the Japan Sea Coast Facilities

Fumio Nakayasu*

All of 15 nuclear power plants in Fukui Prefecture are located in the Japan Sea Coast. Corrosion is strongly influenced by material and environmental factors. We installed the salt damage experimental yard at Awara sea coast in March, 2006. We are doing the open air test, sheltered test without filter and with filter.

The carbon steel standard specimen were exposed under three kinds of test conditions mentioned above. The corrosivity of the open air test specimens was higher than it of Miyako Island, Okinawa. The corrosivity of carbon steel of winter was higher than it of summer.

The measurement of chloride deposition rate was done by the dry gauze method. The correlation between chloride deposition rate and the average velocity of the wind was found. The correlation between chloride deposition rate and the average rainfall was a little complicate. It means the chloride deposition rate has maximum value at a certain rainfall amount. No other clear relation was found.

1、緒言

福井県には、現在 15 基の原子力発電所が立地され、そのすべてが日本海に面している。原子力発電所構造物の経年劣化を考える場合、海塩粒子による腐食が重大な因子の一つである。多くの研究者により海塩粒子による構造物腐食が研究¹⁻⁸⁾されているが、構造物腐食は環境因子に強く影響を受けるため、ある特定の環境下での腐食試験が必要となる。この観点から、日本海南区分、海浜地区（海岸線から 300m 以内）に属する福井県あわら市海岸に大気暴露試験装置（以下暴露装置という）を設置し、開放及び遮へい大気環境下での暴露試験を実施している。

金属構造物の腐食は、その金属が環境因子と反応し、金属以外のものに変化することをいうが、通常、腐食に関与する基本物質は水と溶存酸素である。臨海大気中での腐食は、腐食反応自体に直接関与する水と酸素のほかに、腐食を促進する因子が存在する。例えば海塩粒子（塩化物イオン）は、作用機構は必ずしも同一ではないが多くの構造物の腐食を促進する。

本研究では、他の研究者との研究結果比較のため、開放大気環境下に標準試験片（炭素鋼）を設置し、同一の試験片を、空気取り入れ口にフィルターを有する場合と、フィルターを有しない場合の 2 種類の遮へい環境下に設置し、計 3 種類の暴露試験を実現している。

* 原子力技術応用工学科

2、試験方法

図-1 に示す大気暴露試験装置（暴露装置）をあわら市波松区の海岸に設置した。本試験装置は、JIS Z 2381 (2001)に準じて製作・設置されたものであり、図-1 左側は、開口部にフィルターを有しない暴露装置であり、右側は、フィルターを有する暴露装置である。開口部は海岸線と平行に2箇所（前面と後面）に設けている。フィルターは、新菱冷熱製「平型フィルター」を用いたが、その主要諸元を表-1に示す。

図-2 の左側に開放大気暴露試験に使用する、暴露装置天井に取り付けた標準試験片の設置状況を、右側に遮へい大気暴露試験に使用する、暴露装置内部に取り付けた試験片の設置状況を示す。標準試験片はJIS Z 2383 (1998)に準じて製作し、遮へい暴露試験装置内の炭素鋼試験片も標準試験片と同様にJIS Z 2383 (1998)に準じて製作した。これらの試験片は、すべて、10cm×10cmの大きさとした。当初試験では、炭素鋼は、内陸部で常温で酸化皮膜を形成させたものを使用した。環境因子の腐食度への影響を見るための短期試験では、酸化皮膜を除去した試験片を用いた。原則1月に1回、試験片の状況を確認し、写真撮影および重量測定を行なった。また、規定の暴露期間を経過した試験片については、腐食性生物を除去後の重量減少を測定し、腐食度とした。短期試験では、1日毎に試験片を取替え、同様の方法で腐食度を算出した。

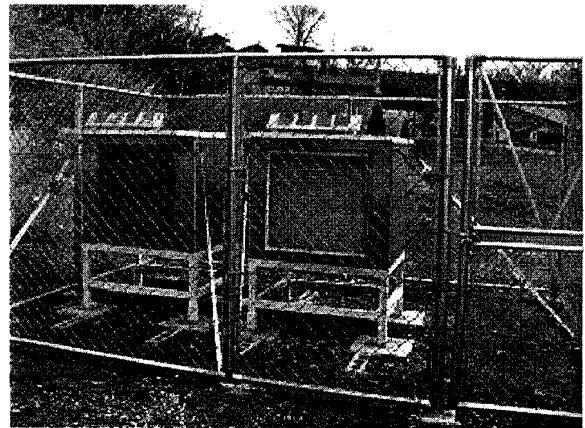


図-1 大気暴露試験装置

表-1 フィルター諸元

寸法(ケーシング込み)	670×670×54 ¹
処理風量	56.6m ³ /min(2.3m/s 相当)
初期圧力損失	6mmAq
交換圧力損失	12mmAq
除塵効率	85%重量法(JIS8 種)
ろ材材質	ガラス繊維
フィルター重量	5kg

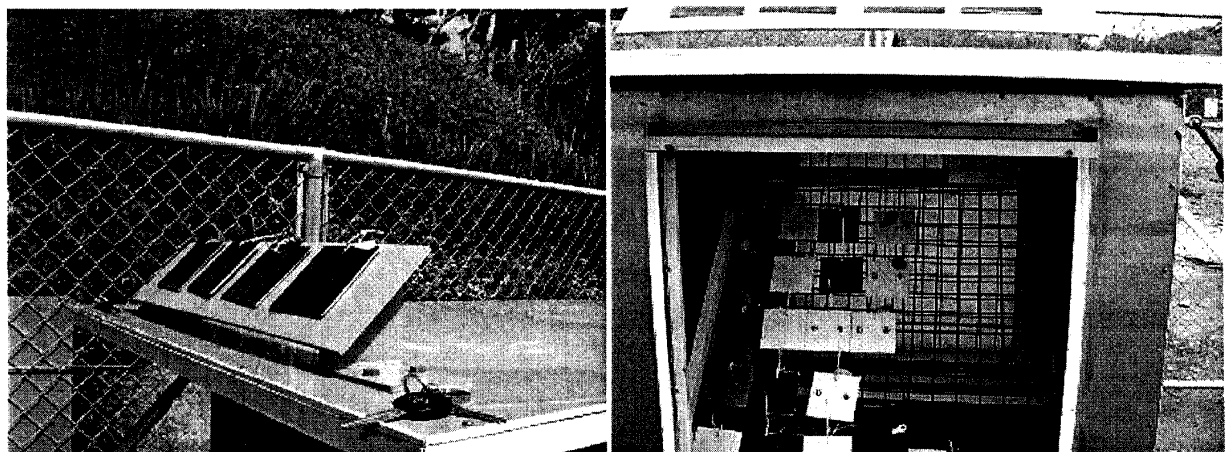


図-2 試験片設置状況（左：開放暴露試験片、右：遮へい暴露試験片）

飛来塩化物量は、JIS Z 2382 (1998)に規定する「ドライガーゼ法で行った。図-1に示す暴露装置内に、図-3に示すドライガーゼプレートを設置し、原則1月に1回取替えを行ない、飛来海塩粒子量をイオンクロマトで測定した。飛来海塩粒子の捕集面積もJIS Z 2382に準じて100cm²とした。短期試験では、フィルターの影響をなくすために、ドライガーゼプレートを暴露試験装置外（フィルター前面）に取り付け、取替えは1日毎に行い、同様にイオンクロマトで海塩粒子飛来量の測定を行なった。



図-3 ドライガーゼプレート

3、試験結果および結果の評価

3-1、海塩粒子飛来量

図-4に、2006年3月31日から2007年1月10日までの海塩粒子飛来量の一月毎の変動とフィルター捕集率 R の変動を示す。なお、フィルター捕集率 R の定義は、以下のとおりである。

$$R = \frac{A-B}{A} \times 100$$

ここで R : フィルター捕集率

A : フィルター無し暴露試験装置内の海塩粒子飛来量

B : フィルター有り暴露試験装置内の海塩粒子飛来量

図-4の実線データは「フィルター無し暴露試験装置内の海塩粒子飛来量」を示しているが、この飛来量は、夏季に少なく、冬季に多いという傾向を示し、その差は30倍を越えている。これは後述するように風速との関連が推定され、風速が大きい冬季ほど、飛来量も多くなっている。同図中の破線は、フィルター捕集率を示している。フィルターの捕集率を海塩粒子の飛来量に対してプロットした結果を図-5に示す。

図-4,5から明らかなように、海塩粒子

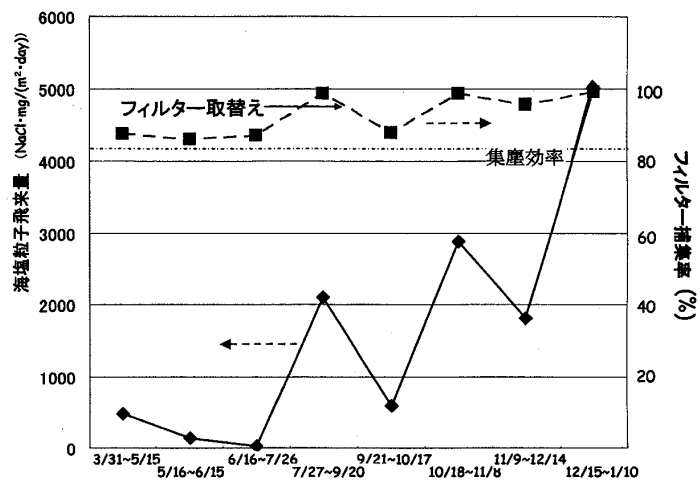
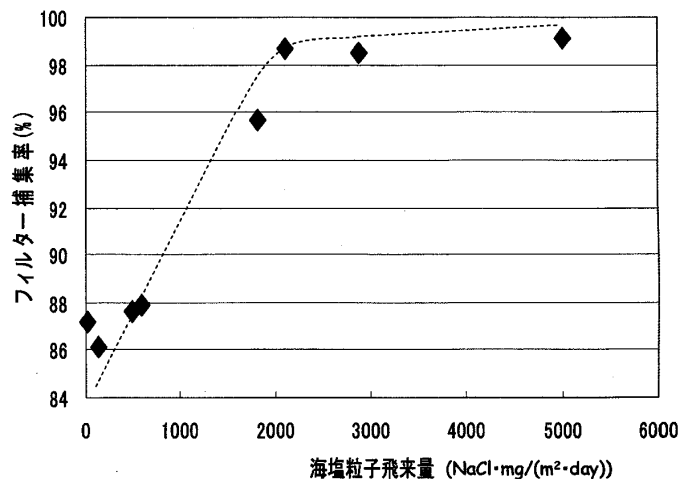


図-4 海塩粒子飛来量の時期的変動



の飛来量が少ない、即ち、風速が小さい時、捕集率はほぼ一定値（86%~88%）であるが、風速が大きくなる、即ち海塩粒子の飛来量が多くなると、捕集率は上昇し、100%に近づいてくる。この原因としては、フィルターが目詰まりし、交換圧力損失（表 - 1 参照）に達したためなのか、処理風量（表 - 1 参照）を超えたためなのかは不明である。

海塩粒子飛来量と環境因子の関連を正確に評価するため、日々の飛来量の測定を行なった。この測定にも「ドライガーゼ法」を採用したが、ドライガーゼプレートは、暴露装置外の開口部前面とした。ドライガーゼプレートを暴露装置内に設置しなかったのは、海風と陸風の影響を明確にするためである。この短期試験では、海側に設置したプレートを前面ガーゼプレート、山側に設置したプレートを後面ガーゼプレートと呼ぶことにした。図 - 6 に短期変動

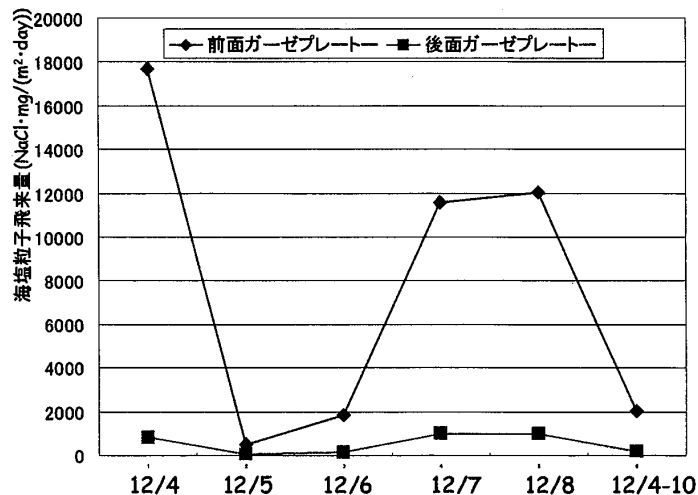


図 - 6 海塩粒子飛来量の短期変動

の測定結果を示す。同図に見られるように、海塩粒子飛来の日々の変動も大きく、その差は約 40 倍に達する。また、海側の前面フィルターで測定した飛来量は、山側の後面フィルターで測定した飛来量より大きく、その差は 20 倍程度に達するが、その比率は必ずしも一定ではない。日中、海面と陸面が太陽からの熱を同じだけ受けたとき、海面は液体なので表面と深部の水が混り、温度が上がりにくい。これにより、海上よりも陸上の大気の気温が高くなる。すると、陸上では海上よりも気圧が低くなる。この海陸の気温差が原動力となって海風（海から吹く風）が吹く。陸風（陸から吹く風）については逆のメカニズムである。海風が吹くと海塩粒子飛来量が増加し、陸風が吹くと減少するが、前面ガーゼプレートは海風の影響を、後面ガーゼプレートは陸風の影響を受けていると考えられる。

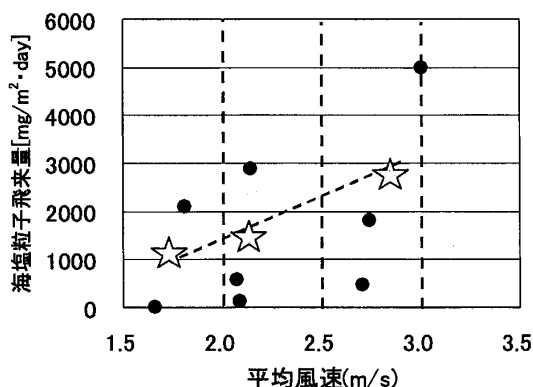


図 7-1 風速との関係：長期試験

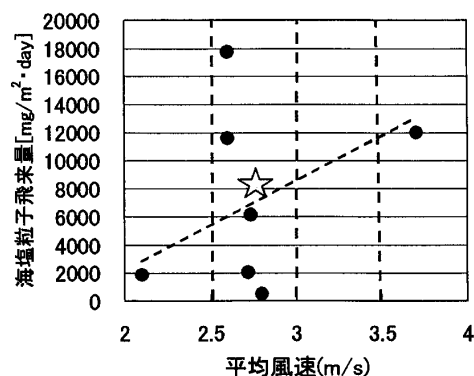


図 7-2 風速との関係：短期試験

海塩粒子飛来量と環境因子との関連性を評価した。図 7-1 に 1 ヶ月の平均風速と平均海塩粒子飛来量の関係を示し、図 7-2 に日々の変動を示している。両図とも、平均風速の 0.5m 毎にグループ化し、飛来海塩粒子の平均値を星型で示した。両図から明らかなように、平均風速と海塩粒子飛来量には相関があると推定される。前述したように、長期試験の海塩粒子飛来量はフィルターを有しない暴露装置内での測定値を、短期試験のそれは、暴露装置外（前面ガーゼプレート）での測定値を示しているの、両者の海塩粒子飛来量の絶対値比較は意味を持たない。

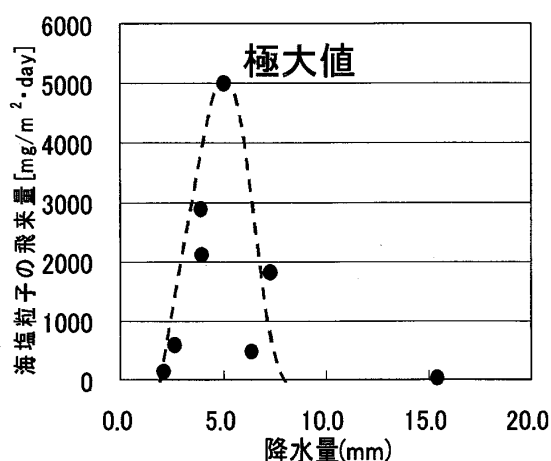


図 8-1 降水量との関係：長期試験

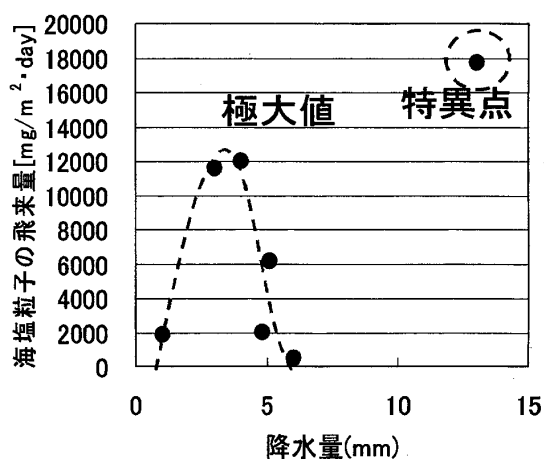


図 8-2 降水量との関係：短期試験

図 8-1 および図 8-2 に降水量と海塩粒子飛来量の関係を示している。長期試験及び短期試験とも、降水量約 5mm で飛来海塩粒子量が極大値を示している。これは、次のような仮説が成立する可能性を示している。即ち、雨滴が海面に衝突すると、海水（海塩粒子）が空気中に放出される。降雨量の増加に伴い、空気中に放出される海塩粒子量も増加する。最初は、発生した海塩粒子のうち、雨滴に付随し海面に戻る海塩粒子量が少ないため、飛来量が多くなる。降雨量がある値を超えると、発生した海塩粒子の多くが雨滴に付随し海面に戻

表-2 短期試験中の環境因子

12 月	海塩粒子 飛来量	降水量	最大 1 時間	平均気温	最高気温	最低気温	平均風速	最大風速	日照時間
			降水量						
		mm	mm	℃	℃	℃	m/s	m/s	時間
4 日	17719	13	4	4.7	8.2	2.4	2.6	7	1.7
5 日	488	6	3	5.6	9.4	3.2	2.8	4	1.6
6 日	1849	1	1	6.7	10.7	3.6	2.1	5	7.2
7 日	11589	3	1	9	11.6	5.7	2.6	4	0
8 日	12008	4	3	8.4	9.4	5	3.7	6	0
9～14 日	12249	5	2	7.1	9.6	4.9	2.7	5	1.3

るため、飛来量が少なくなる。図 8-2 に見られる特異点は、表-2 の 12 月 4 日の海塩粒子飛来量である。平均風速が 2.6m/s 程度であり、その影響を強く受けているとは考えられないが、最大風速が 7m/s と測定期間中最大であることが着目される。また、平均気温、最高気温および最低気温とも測定期間中最低である。いずれにしても、平均風速および降水量以外の環境因子の影響を受けていると推定されるが、その環境因子は何であるかは、特定できていない。

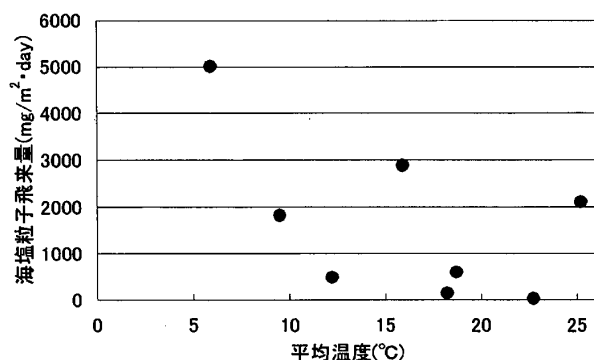


図 9-1 平均温度との関係；長期試験

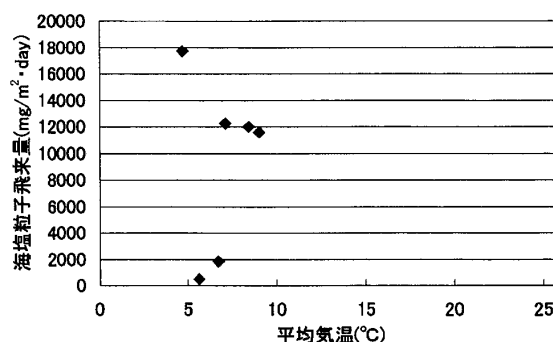


図 9-2 平均温度との関係；短期試験

図 9-1 および 9-2 に平均気温と海塩粒子飛来量との関係を示す。図 9-1 に示す長期試験では、平均気温が高くなると、海塩粒子飛来量が少なくなるという相関がありそうであるが、図 9-2 の短期試験では、必ずしもこの関係が明確でない。なお、最高気温および最低気温についても同種の傾向があり、温度との関係は確定できない。

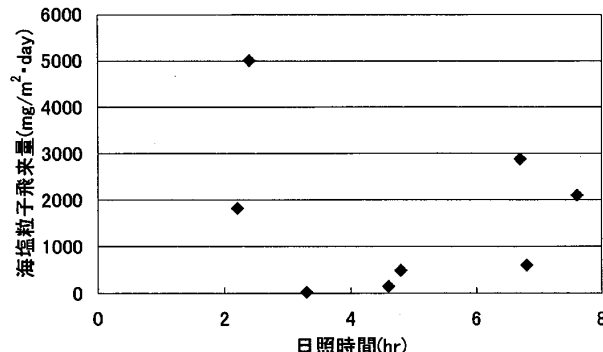


図 10-1 日照時間との関係；長期試験

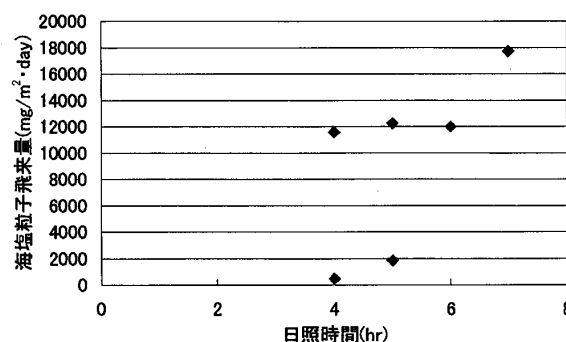


図 10-2 日照時間との関係；短期試験

図 10-1 及び 10-2 に日照時間と海塩粒子飛来量との関係を示す。平均温度と同じように、長期試験では何らかの相関、即ち、日照時間が長くなるほど、海塩粒子飛来量が減少するといえそうであるが、短期試験では、逆の傾向を示しているとも考えられるので、相関は不明である。

3-2、標準試験片の腐食度

暴露装置外に、図-2 に示す方法で設置した標準試験片の腐食度を JIS-Z 2383 に準じた方法で測定した。この結果を図-11 に示すが、同図には、JIS Z 2383 記載の他の試験結果である宮古島、銚子及び西原の結果も示している。本試験の腐食度は、時期により異なり、冬期間を含む 06.3.31~06.12.15 期間の腐食度は、冬期間を含

まない06.3.31~06.9.21期間の腐食度より1.7倍大きい、これは、日本海南区域の海塩粒子飛来量が、冬期間に増大する(図-4) ことによると考えられる。

暴露装置を設置したあわら市波松区海岸の腐食度は、宮古島のそれと比較しても数倍大きいことが判明した。腐食度は、試料の前処理方法などにも強く依存するが、それらを考慮しても、暴露装置を設置した場所の腐食度は大きいと推定される。逆にいえば、本暴露装置を使用しての耐食試験は、十分意味のあるものと考えている。

図-12に標準試験片、フィルター有りの遮へい試験片およびフィルター無しの遮へい試験片の腐食度を示している。X軸は、2006年3月31日からの経過日数を示し、縦軸は年当りに規格化した腐食度を示している。同図から明らかなように、冬期間を含む259日暴露の年当りの腐食度は、174日暴露の年当りの腐食度より大きい。これは、海塩粒子の飛来量の多い環境下では、炭素鋼腐食の進行速度は、低下せず、むしろ増加することを示している。また、遮へい環境下では、腐食度は直接暴露より小さく、フィルターを付けた遮へい環境では、フィルター無しの場合よりも、より腐食度は減少する。しかし、フィルターにより海塩粒子飛来量は、12%程度以下に減少するが(図-4、図-5参照)、腐食度は約50%程度にしか減少しない。加えて、直接暴露試験では、259日暴露の腐食度は、174日暴露の腐食度は70%程度増加するが、遮へい暴露試験での腐食度の増加は、フィルター有りで17%程度、フィルター無しで15%程度である。

図-13に海塩粒子飛来量と腐食量の関係を示すが、海塩粒子飛来量も、腐食量も規格化していない累積量で示している。同図から明らかなように、フィルターの有りの場合の海塩粒子飛来量は2.1倍で、フィルター無しの場合は2.0倍となる。また、累積腐食量も、フィルター有りで1.7倍、フィルター無しで1.7倍となる。これは、環境条件により、当初の腐食量は異なるが、その後は、海塩粒子飛来量が、腐食量を律速しているこ

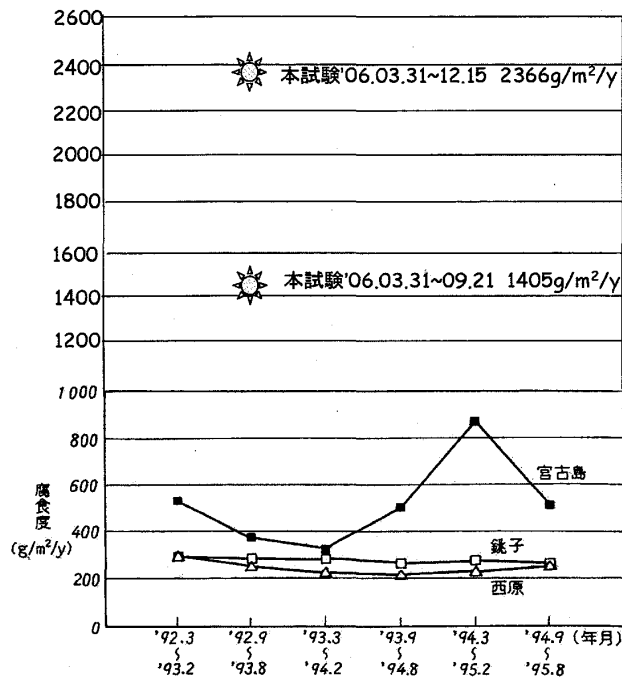


図-11 標準試験片の腐食度

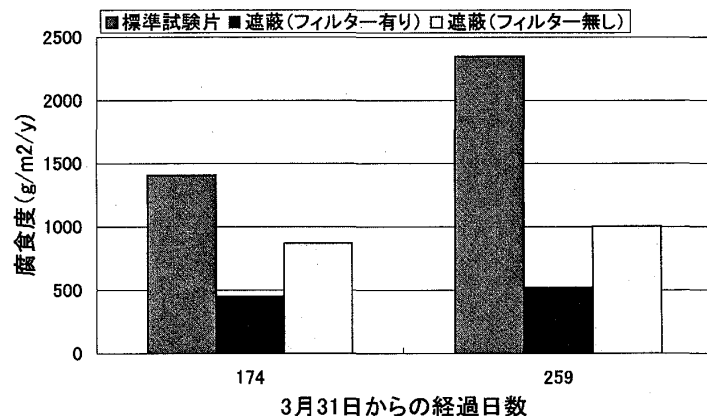


図-12 腐食度と暴露時期 (季節による影響)

とを示唆している。

4. 結言

日本海南区域、海浜地区に属する福井県あわら市波松区海岸に暴露試験装置を設置し、日本海特有の環境条件下で直接暴露試験および遮へい暴露試験を実施し、次のことが判明した。

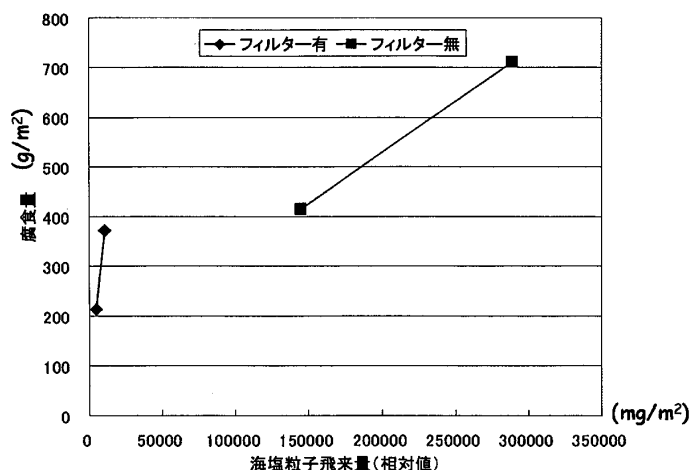
- ① 海塩粒子飛来量は、季節により変動する。
- ② 海塩粒子飛来量と平均風速は近似的に直線関係が成立する。
- ③ 海塩粒子飛来量と降雨量は、降雨量のある値に対し、海塩粒子の飛来量に極大値が存在する。
- ④ 海塩粒子飛来量と日照時間、気温など、その他の環境因子との関係は、明確でない。
- ⑤ 設置したフィルターの海塩粒子捕集率は、飛来海塩粒子量が少ないと約 88%程度であるが、多いと捕集率は 100%近くに上昇する。
- ⑥ 飛来海塩粒子累積量が2倍になると、フィルター透過海塩粒子量も2倍になるとの結果を得ているが、フィルター透過海塩粒子量と、飛来海塩粒子量との相関は確定できていない。
- ⑦ 暴露装置設置場所のあわら市海岸は、宮古島地区より、腐食度は大きい。
- ⑧ フィルターにより、飛来海塩粒子量は、12%以下程度に減少するが、腐食量は 50%程度にしか減少しない。
- ⑨ フィルター有りの場合、フィルター無しの場合、いずれの場合も飛来海塩粒子の累積量が2倍になると、累積腐食量も1.7倍となる。

本研究の実施には、福井工業大学の特別研究費の交付を受けています。

参考文献

- 1) 小野 晃：個々のエアロゾロ粒子の物質構成分析法とその応用例、気象研究所技術報告第1号、1978
- 2) 岸川結香、小島知子：大気エアロゾロ粒子のキャラクタライゼーション、九大H17-040、平成17年
- 3) 日本化学会編：大気の化学、学会出版センター、1990年9月
- 4) 三浦和彦：海洋起源エアロゾルの放出と変質、SOLAS WORKSHOP IN NAGOYA 2002.8
- 5) 森 芳徳他：飛来塩分量全国調査（1）、土木研究所資料、No.2203,1985
- 6) 山田文則、細山田得三：海面から発生する飛来塩分に関する実地観測とその飛来塩分発生・輸送数値モデルの開発、海岸工学論文集 Vol.50, pp1176-1180、2003
- 7) 堀田健治、平野正昭：沿岸域における海塩粒子の発生に関する研究（第2報）、日本建築学会構造系論文報告集、第455号、pp207-213、1994
- 8) 松永信博他：消波護岸によるしぶきの発生と護岸背後地への移送、海岸工学論文集、Vol41、pp1046-1050、1994

（平成19年4月2日受理）



図・13 海塩粒子飛来量と腐食度