

原子力リスク低減研究 - 海塩粒子飛来量と環境因子の関係 -

中安 文男*

Nuclear Risk Reduction Study The Relation between Sea Salt Amount and Environmental Factors

Fumio Nakayasu

Corrosion due to sea salt aerosols is one of the major factors causing ageing degradation. In pursuing sea salt aerosol-induced corrosion research, it is necessary to perform corrosion tests under a certain set of environmental conditions since corrosion of structures is highly sensitive to environmental factors. The amounts of sea salt aerosol tend to be lower in the summer season and higher in the winter season. The difference between seasons is expected to relate to the environmental factors.

The amounts of sea salts at the sea coast with filter are almost same as it of inland. This means our filter has good enough capability to prevent aerosol penetration.

1. 緒言

海塩粒子などの環境汚染因子による構造物腐食は、図-1に示すように供試体の性状、環境汚染因子、気象因子、暴露時間および暴露環境などによって大きく異なり、この事象の解明のため多数の暴露試験が実施さ

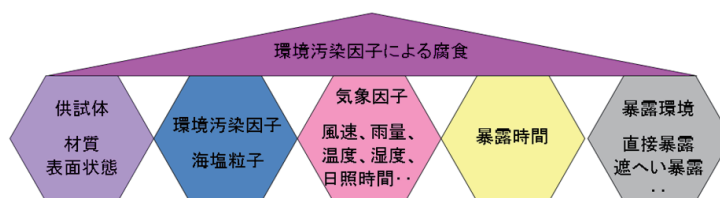


図 - 1 環境汚染因子による腐食

れ、局地的な腐食状況の把握に努めている¹⁻⁷⁾。言い換えると海塩粒子などの環境汚染因子による腐食は、特定の地域、特定の時期・期間に限定されたものであり、普遍化が困難であると考えられている。このことが、腐食関係式から時間因子を排除（加速試験）することを困難にしている。本研究の当面の目的の一つは、特定地域（日本海南区分）における腐食関係式から、時間的因子を排除し、加速試験法を確立することにある。

我が国の原子力施設を含む多くの施設は、沿岸に立地し、経年劣化の観点からは、海塩粒子腐食が課題の一つである。最近、福井県の原子力施設で起こった、安全上重要な機器の腐食は、海塩粒子によるものであり、この種の腐食の予測の困難さを示している。

福井県には、現在 15 基の原子力発電所が立地され、そのすべてが湾岸に面しているが、新たな

* 原子力技術応用工学科

原子力の施設は、湾岸ではなく、日本海沿岸に立地される可能性が強い。本研究は、日本海南区分、海浜地区に属する福井県あわら海岸（海岸線から 200m 程度）と準沿岸地区（海岸線から 15Km 程度）に属する福井市街（福井工業大学屋上）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た。あわら海岸（海浜地区）では、開放暴露試験及び 4 種の遮へい暴露試験を、福井市街（準沿岸地域）では、開放暴露試験を実施し、海浜地区と準沿岸地区との比較および海浜地区でのフィルター効果の確認を行った。

2. 研究目的

本研究の目的は以下のとおりである。

- A) 主要構造部材の海塩粒子による劣化の影響を大気暴露試験により検証する。
- B) 代表的な海塩粒子除去フィルターを用いてフィルターを使用した場合とフィルターを使用しない場合の海塩粒子飛来量を比較し、フィルター性能を検証する。
- C) 代表的な海塩粒子除去フィルターの寿命を検証する。

3. 試験方法

海浜地区の試験は、以下のとおり、JIS Z 2381 (2001)「大気暴露試験通則」の内、自然通風型、遮へい暴露試験に準じて実施した。

- 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
- B) 海塩区分：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）
- C) 暴露試験装置：暴露試験装置は、
図-2 に示す。
- D) フィルター：試験箱の前面および後面には、取り外し可能なフィルターを設置する。
- E) 暴露試験面の方位および角度：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 度とする。
- F) 海塩粒子付着量：JIS Z 2382(1998)「大気環境の腐食性を評価するための環境汚染因子の測定」に規定するドライガーゼ法とし、暴露架台と同一の試験箱内に設置する。
- G) 設置方法：暴露架台および試験箱は、風雨を避ける方法（屋根など）を講じた上、接地面に強固に固定する。



図-2 大気暴露試験装置（海浜地区）

H) 暴露期間：JIS Z 2383(1998)「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」に規定する期間に準じる。

図-2に示す暴露試験装置は、あわら市海岸(海岸線より約200m、海浜地区)に、JIS Z 2381 (2001)に準じて製作・設置したものである。図-2左側の2基は2006年に設置したものであり、右側2基は、昨年(2008年)に設置したものである。遮へい暴露装置には、フィルターを有しないもの1基、フィルターを有するもの2基、ガラリを有するもの1基の計4基である。フィルターを有する遮へい暴露装置の片方は1か月毎にフィルターを取替、他方は1年間フィルターを取替ないものとしている。4つの遮へい暴露試験装置の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。遮へい暴露試験装置に使用した平型フィルターの諸元を表-1に示す。図-2の四つの遮へい暴露装置の間には、データロガー付きの気象観測装置を設置し、風向、風速、気温、雨量などの気象因子を10分毎に測定記録している。図示していないが、福井市内の福井工業大学3号館屋上(海岸線より約15km、準沿岸地区)に、開放大気暴露試験装置を設置している。なお、海浜地区とは海岸線より300m以内を、準沿岸地区とは海岸線より2km超20km以内を指す。また、300m超2km以内は沿岸と、20km超は内陸と称する。

表-1 フィルター諸元

寸法(ケーシング込み)	670×670×54 ^t
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

飛来海塩粒子量測定の例を図-3に示す。同図はJIS Z 2382 (1998)に準ずる「ドライガーゼ法」での測定例である。海浜地区(図-2)及び準沿岸地区に設置した暴露試験装置内に、ドライガーゼプレート(図-3)を設置し、原則1月に1回取替を行ない、飛来海塩粒子量をイオンクロマトグラフで測定している。飛来海塩粒子の捕集面積はJIS Z 2382に準じ100cm²である。

図-4の左側に開放大気暴露試験片の設置状況を、右側に遮へい大気暴露試験片の設置状況を示す。試験片はJIS Z 2383 (1998)に準じ、10cm×10cmの大きさである。規定の暴露期間を経過した試験片については、JIS-Z2383に準じて腐食性生物を除去し、その後の重量を測定し、試験開始前との差を腐食減量とし、単位面積、年当たり(g/m²/y)に規格化したものを腐食度とした。



図-3 ドライガーゼ法



図 - 4 試験片設置状況（左：開放暴露試験片、右：遮へい暴露試験片）

4. 試験結果および結果の評価

4. 1 海塩粒子飛来量と気象因子

4. 1. 1 海塩粒子飛来量の暴露試験条件別での比較

図-5に海塩粒子飛来量の比較を示す。遮へい暴露フィルター無（F無）に一番多く海塩粒子が飛来し、次にガラリ、フィルター定期取替、フィルター定期取替無、準沿岸の順となっている。すべての暴露条件で、冬季になるにつれ海塩粒子量飛来量が増えている。フィルターを取り付けることで海浜地区の海塩粒子飛来量を準沿岸のそれと同程度まで減らすことが可能である。また、ガラリは、フィルターと同等の効果とまではいかないが、海塩粒子飛来量を抑えることが可能である。

図-6にフィルターを定期取替え（1 か月毎取替）しているものと定期取替無（1 年毎取替）の比較を示す。2008 年 6 月に、両暴露装置のフィルターを取替えて実験を開始した。

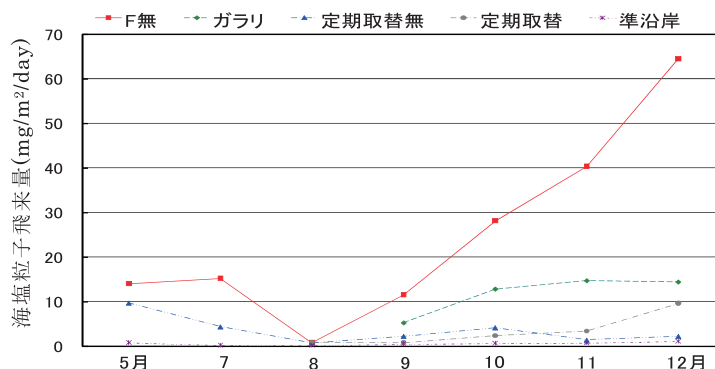


図 5 2008 年度海塩粒子飛来量比較

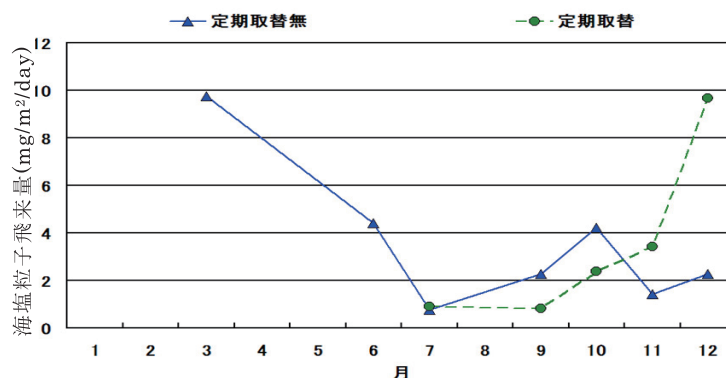


図 - 6 フィルター定期取替有、無の海塩粒子飛来量比較

7月の海塩粒子飛来量はほぼ同じ値を示していた。7月の時点から10月頃まではフィルターを定期取替えている方が低い値を示していた。これは、フィルターの海塩粒子捕集効果がと働いているからである。しかし、10月以降この関係が逆転している。この理由はフィルターが目詰まりして風を通さなくなり、結果的に海塩粒子飛来量が減少したと考えられる。フィルターは約4ヶ月(総海塩粒子 520 (mg/m²))で目詰まりを起こしていると推測した。

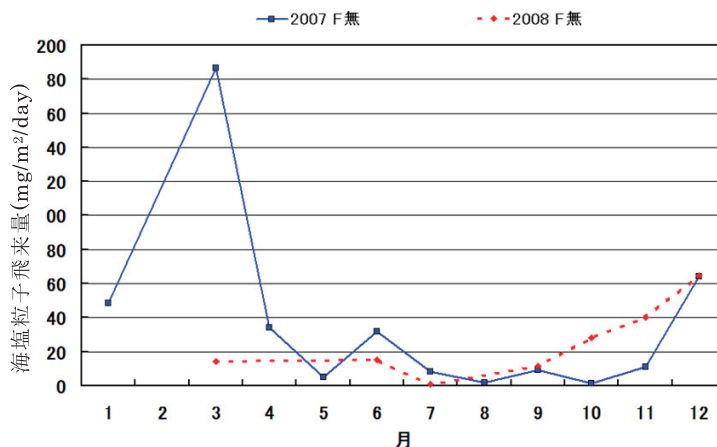


図-7 2007年度、2008年度フィルター無の比較

2007年度と2008年度のフィルター無の比較を図-7に示す。両年の比較を行うと、海塩粒子飛来量は、冬季に多く、夏季に少ないという共通の傾向があるが、その絶対量には相違がある。

4. 1. 2 海塩粒子飛来量と気象因子（風速、気温、降雨量、日照時間）の関係

平均風速と海塩粒子飛来量との関係を図-8に示す。同図にみられるように、平均風速が大きいほど、海塩粒子飛来量が多い。図示していないが、最大風速と海塩粒子との関係も、図-8と同様の関係を示す。これは風が強いときには、粒径の大きな海塩粒子が運ばれるからであると考えている。

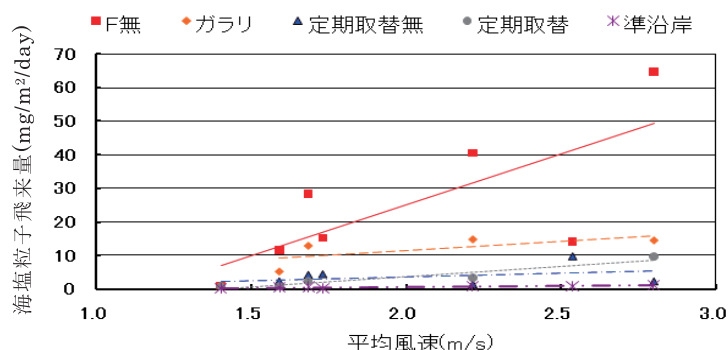


図-8 海塩粒子飛来量と平均風速の関係

図-9に平均最高気温と海塩粒子飛来量との関係を示す。同図に見られるように、平均最高気温が上昇すると飛来する海塩粒子量が減少する。同様の関係は、平均気温、平均最低気温との関係にも見られ、気温が上昇すると、海塩粒子飛来量が減少することが分かる。これは、冬季は気温が低く、風が強く、海塩粒子飛来量が多いことと関連している。

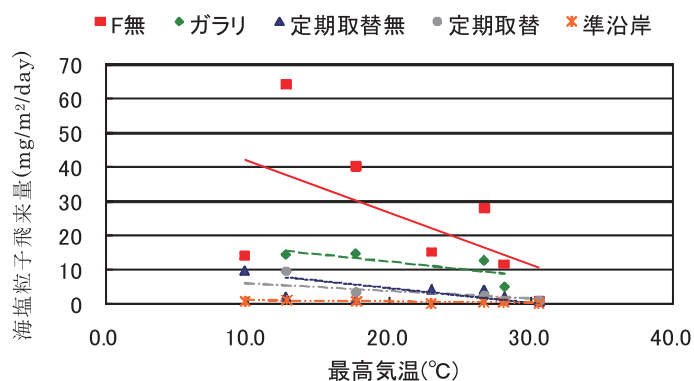


図-9 海塩粒子飛来量と平均最高気温の関係

平均降雨量と海塩粒子飛来量との関係を図-10に示す。同図に見られるように、降雨量が増加すると、飛来する海塩粒子量が増加する。これは、雨が海面に衝突することで多くの泡が発生し、その泡が海塩粒子発生の元になってくるので、降水量が多いほどより多くの海塩粒子が生成されることになる。

平均日照時間と海塩粒子飛来量との関係を図-11に示す。日照時間が長いほど、海面の温度を上昇させ、海水の蒸発が起こり、海塩粒子の量が多くなるとも考えられる。しかし、測定結果によると、それとは逆に、日照時間が短いほど海塩粒子量飛来量が多い。これは日照時間が短いのは冬であり、この時、風が強く、海塩粒子飛来量は増加する。従って、日照時間だけでは海塩粒子飛来量の決定はできない。

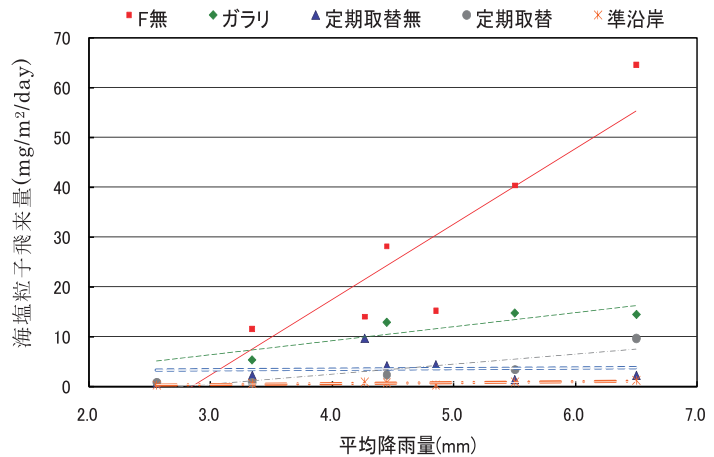


図-10 海塩粒子飛来量と平均降雨量の関係

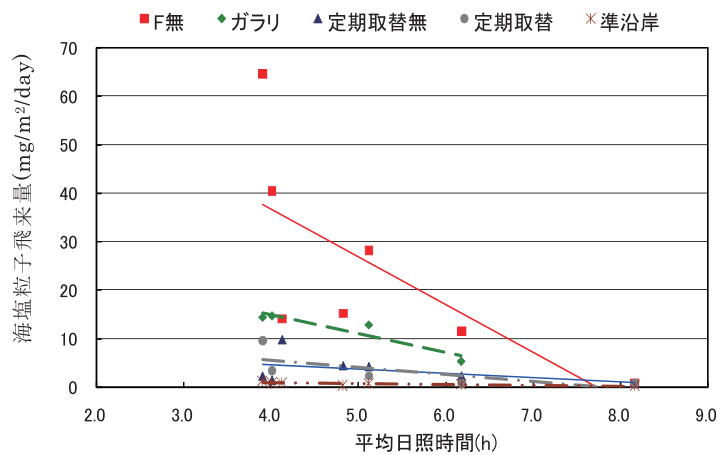


図-11 海塩粒子飛来量と平均日照時間の関係

4. 2. 気象因子の相互関係

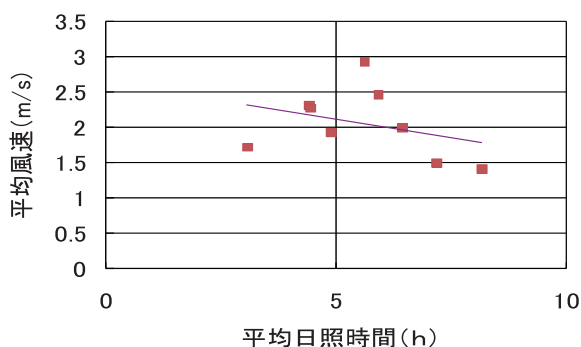


図-12 平均雨量と平均日照時間の関係

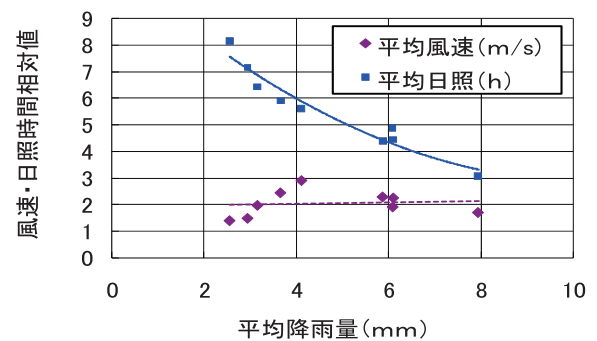


図-13 平均降雨量と風速・日照時間の関係

降水量、気温、風速、日照時間の気象因子間の相互関係を確認した結果を図-12、13に示す。両図に見られるように、平均降雨量と平均日照時間、平均風速と平均日照時間には相関があるが、平均降雨量と風速の間に相関があるかどうかは、不明である。

4. 3. 重回帰分析

説明変数(X)を風速、降雨量、気温、日照時間とし、目的変数(Y)を海塩粒子量として次の1次方程式で重回帰分析を行った。

$$Y=aX_1+bX_2+cX_3+dX_4$$

それらの内、フィルター無遮へい暴露とフィルター有遮へい暴露の結果を図-14、15に示す。フィルター無遮へい暴露の重相関Rは96%、フィルター定期取替無遮へい暴露の重相関は93%だった。完全一致とまではいいがたいが、計算値と測定値に大きな差は見られずよい結果となった。

4. 4. 他の環境汚染因子

海浜と準沿岸の NO_3^- 飛来量及び SO_4^{2-} 飛来量の比較を図-16、17に示す。図-16に示すように、イオウ酸化物飛来量は、海浜の方が高い値を示していた。これは海水中に含まれる SO_4^{2-} が飛来したのと考えている。しかし、12月には海浜の SO_4^{2-} が大きな値を示している。海水中に含まれる Cl^- 量と SO_4^{2-} 量の比は0.14である。10月、11月、12月の Cl^- 量と SO_4^{2-} 量の比はそれぞれ0.12、0.11、0.29となり、12月には、海水由来の SO_4^{2-} 以外の SO_4^{2-} 飛来があったものと推定され、中国大陸からの飛来があったと考えるのが妥当である。

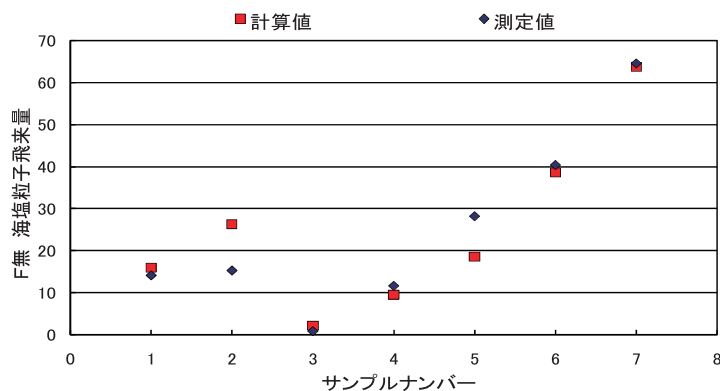


図-14 重回帰分析 (遮へい暴露フィルター無)

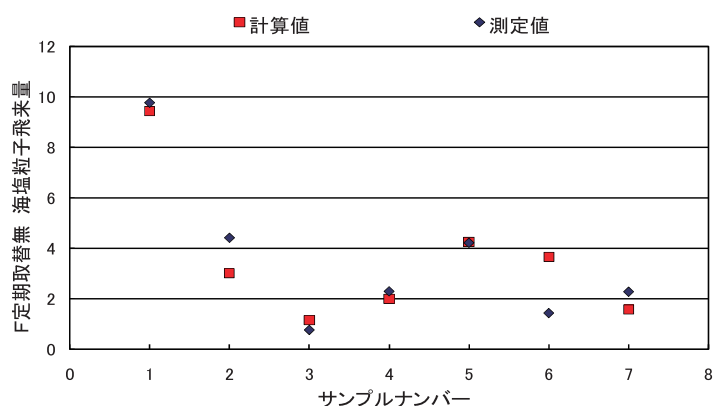


図-15 重回帰分析 (遮へい暴露フィルター定期取替無)

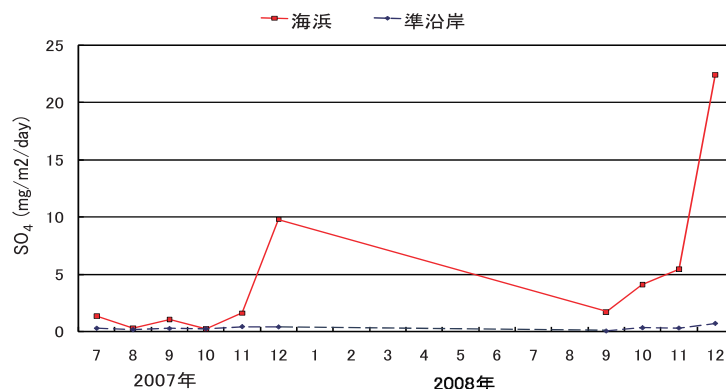


図-16 イオウ酸化物飛来量比較 (海浜と準沿岸)

表-2 海水の主要成分

イオン	Na^+	Mg^{2-}	Ca^{2+}	K^+	Br^+	CO_3^{2-}	SO_4^{2-}	Cl^-
(g/kg)	10.766	1.293	0.413	0.403	0.0674	0.142	2.708	19.353

図-17 に NO_3^- 飛来量の海浜と準沿岸の比較を示す。同図から分かるように冬季を除き、準沿岸の NO_3^- 飛来量は、海浜地区のそれより大きい。冬季には、この関係が逆転する。表-2 に見られるように、海水中に、 NO_3^- はほとんど存在しない。準沿岸（市街地区） NO_3^- は、自動車排ガス等に由来し、海浜地区の NO_3^- は、特に冬季に、中国大陸などからの飛来が推定される。

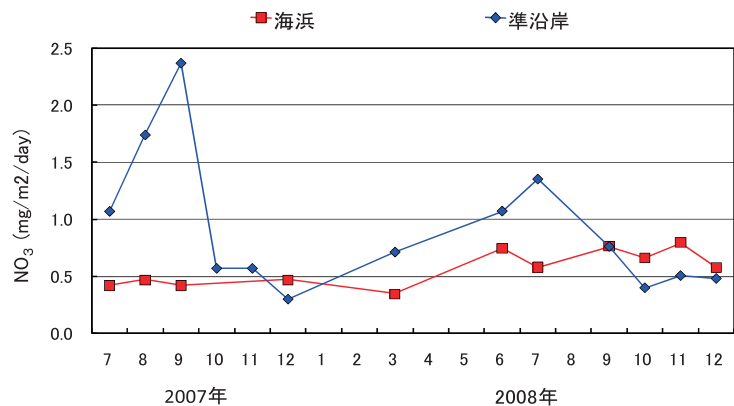


図-17 窒素酸化物飛来量比較（海浜と準沿岸）

5. 結言

試験結果から、次のことが判明した。

- ① 海塩粒子は冬になるにつれ増加する傾向が見られた。
- ② 海塩粒子飛来にもっとも関係する気象因子は風速である。
- ③ 海塩粒子飛来量は、海浜のフィルター有と準沿岸はほぼ同一の値になっており、使用したフィルターは十分な性能を有している。
- ④ フィルターは4、5ヶ月で目詰まりし、目詰まりすると風が通過し難くなり海塩粒子の量が減る。
- ⑤ 海浜地区では、12月には SO_4 が多く中国大陸からの飛来と考えられる。
- ⑥ それぞれの気象因子には相互関係があり、試験を実施した季節、環境等によってさまざまな相関が現れることが判明した。
- ⑦ 海塩粒子飛来量と気象因子の相関確認のため、多変量解析を実施し、良い結果を得た。

参考文献

- 1) 中安文男：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－、福井工業大学研究紀要 第37号（第一部） pp379-386、2007年5月
- 2) 中安文男他：The Effect of Sea Salt Aerosols in the Japan Sea Coast Facilities, ENC 2007, Transactions pp188-191, 2007年9月
- 3) 中安文男他：The Sea Salt Corrosion Study at Japan Sea Coast, EUROCORR 2008, paper 1169, 2008年9月
- 4) 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
- 5) 日本化学会編：大気の化学、学会出版センター、1990年9月
- 6) 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
- 7) 森 芳徳他：飛来塩分量全国調査（1）、土木研究所資料、No.2203,1985

（平成21年3月31日受理）