

論文 塩害環境下における飛来塩分量特性に関する一考察

真喜志 和広^{*1}・山田 義智^{*2}・富山 潤^{*3}

要旨：本研究は、沖縄本島の 5 地点で飛来塩分を測定してその特性を考察した。その結果、飛来塩分の季節による変動があることや、海岸近くにおいては積算風量と飛来塩分に直線関係が認められることが分かった。積算風量と飛来塩分量の相関を高めるためには、海風の対象方向を限定した方が良いことが分かった。海岸から離れた地点では積算風量と飛来塩分量の相関が悪く、土研式塩分捕集器の特性が原因である可能性がある。提案する解析手法による飛来塩分量を実測値と比較したところ、積算風量と飛来塩分量の関係と同じように海風の対象方向を限定した方が良いことが分かった。

キーワード：飛来塩分量、台風、海風、移流拡散方程式、有限要素法

1. はじめに

コンクリート中への塩化物イオンの供給経路としては、当初からコンクリートの使用材料中に混在している内在型と、外部環境から供給されコンクリート表面を介して浸透する外来型の 2 つのパターンが存在する。

外来型塩化物イオンの供給源の一つとして、海から風により陸地に運ばれてくる飛来塩分があり、コンクリート構造物に塩害を引き起こす原因の一つとなっている。

海岸での飛来塩分の発生と内陸部でのその分布状況に関しては、多くの実験的研究¹⁾および解析的研究²⁾が行われ、筆者らも海岸地形、風速、海岸からの距離、地上からの高さ、地表粗度、遮蔽物を考慮可能な有限要素法による解析手法を提案している³⁾。しかし、その解析手法においては、海岸での風による飛来塩分量の発生や、海塩粒子の沈降速度などは限られた地域（東シナ海に面した地域）の測定値から同定しており、多くの地域を対象に解析してその精度を確認するには至っておらず、特に 1km 以上の内陸部や 50m を超える高さ地点での検討はまだなされていない。また、台風は多くの飛来塩分をもたら

すと考えられるが、その供給特性について長期間観察した研究は筆者の知る限りない。

本研究では沖縄本島の異なる 5 地点において飛来塩分量を測定し、台風時の特性および風の影響について実測結果を基に考察し、さらに、太平洋側地域（海岸より 1km 以上の内陸や高さ 50m 以上の地点を含む）の飛来塩分量について解析結果と実測結果の比較検討を行った。

2. 飛来塩分量の測定概要

2.1 観測地点について

飛来塩分の測定位置は、沖縄本島の東シナ海に面した国頭村字辺野喜の海岸近くで 1 ヶ所、太平洋に面したうるま市具志川に 3 ヶ所、さらに、東シナ海と太平洋のほぼ中間地点にある西原町の琉球大学構内に 1 ヶ所の計 5 地点である。図-1 にはそれらの地点を示す。

飛来塩分に最も影響する風速・風向データは、図-1 中に示す気象観測所で測定された毎時間観測値を用いた。ここで、地理的条件より、伊是名の観測値は辺野喜の海岸近くの風状態を表し、金武の観測値はうるま市の 3 地点、那覇の観測値は、琉球大学の風状態を表すものとして

*1 琉球大学 理工学研究科環境建設工学専攻 (正会員)

*2 琉球大学 工学部環境建設工学科 助教授 博士 (工学) (正会員)

*3 琉球大学 工学部環境建設工学科 助手 博士 (工学) (正会員)

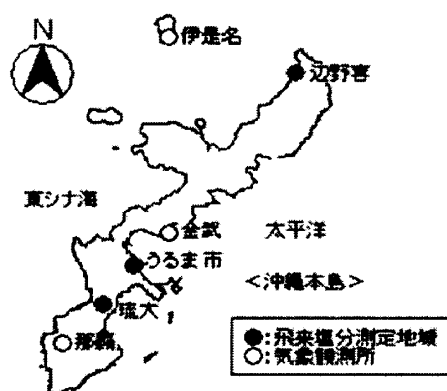


図-1 飛来塩分および風向・風速の観測所

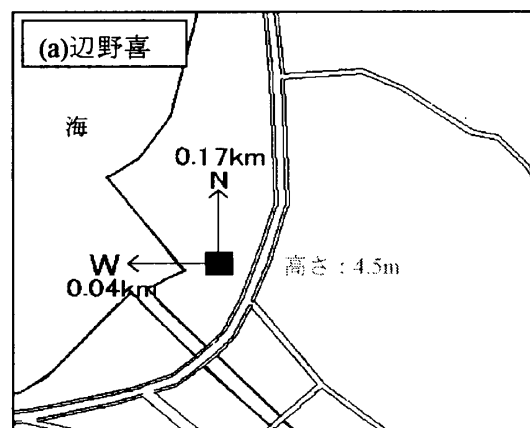
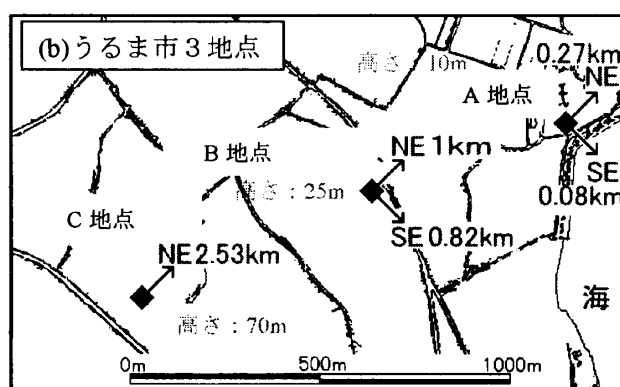


図-2 飛来塩分観測地の詳細と海までの距離

採用した。図-2 は各地点の飛来塩分捕集器の捕集面法線方向の海岸までの距離と高さ(標高+捕集器の高さ)を示す。なお、本研究では飛来塩分捕集器の捕集面法線方向海岸までの距離が10km 未満の方向の飛来塩分量を対象とした。その理由は、台風の常襲地で塩害環境の厳しい沖縄県においても10km 以上海岸から離れた場合は、コンクリートの塩害が問題になることは少ないと判断したためである。従って、図-2 中には、飛来塩分捕集器の捕集面法線方向の距離が海岸まで10km 未満の距離しか記入していない。

2.2 飛来塩分の捕集・分析方法と風向の定義

飛来塩分の捕集には、いわゆる土研式塩分捕集器を用いた。捕集面は4面であるが上述の理由により、捕集面法線方向の海までの直線距離が10km 未満の方位の飛来塩分量を本研究では検討対象とする。

塩化物イオン量の分析には、塩化物イオン選択性電極による電位差滴定法を用いた。なお、

電位差滴定法では妨害イオンによる精度の問題が懸念されたので、数点の飛来塩分量について妨害イオンの影響がないイオンクロマトグラフィーにより塩化物イオン量の分析を行い、電位差滴定法による結果と比較した。その結果、図-3 に示すように両者ほぼ同じであったため、電位差滴定法による測定結果でも問題ないものと判断した。

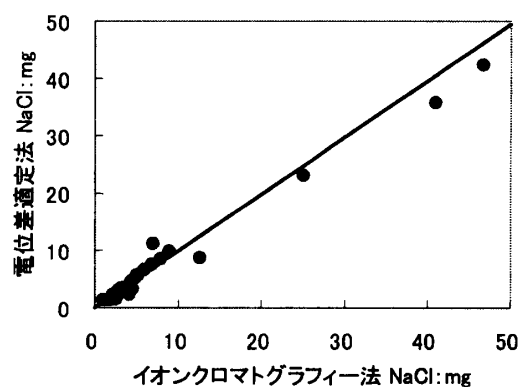


図-3 電位差滴定法とイオンクロマトグラフィー法の比較

飛来塩分を観測した期間は、辺野喜地点が2002年3月～2005年10月までの約4年間、うるま市3地点、琉球大学構内は2004年11月～2005年10月までの1年間である。

2.3 海風の風向・風速の定義

飛来塩分を海から飛来塩分捕集器まで運ぶ風を本研究では海風とし、その風速は、捕集面の法線方向の風速に換算した。また、海風の対象方位は次の2種類で検討した（図-4参照）。

- (1) 捕集器面の海側法線を基準に $\pm 67.5^\circ$ （ $\pm 22.5^\circ$ 刻み）以内の範囲。なお、 $\pm 67.5^\circ$ （ $\pm 22.5^\circ$ 刻み）とした理由は、気象観測で得られる16方位の風向と対応させるためである。以降この場合をケース1と称する。
- (2) 基本的に上記(1)と同じ範囲とするが、捕集器面の海側法線を基準に $\pm 45^\circ$ を超える場合については、その方向の海岸までの距離が捕集面法線方向の海岸までの距離よりも長い場合にはその方位を海風の方位に入れない。以降この場合をケース2と称する。

3. 実測結果およびその考察

ここでは、海岸に最も近く、かつ、標高の低

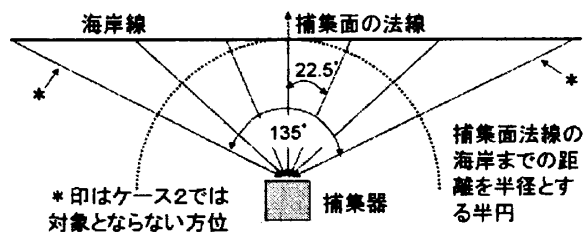


図-4 海風の対象方位

い辺野喜の測定結果と海岸から最も遠く観測高さの最も高い琉球大学構内の測定結果について検討する。なお、うるま市3地点については、4章において解析結果と比較検討する。

3.1 飛来塩分量の周期性と台風による影響

図-5には、辺野喜地点の海に近い西側の捕集面における毎月の飛来塩分量($\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day}$)と積算風量(m)の関係を示す。ここで積算風量は捕集面の法線方向に変換した海風の1時間毎の平均風速(m/s)にその風が吹いた時間(s)を乗じたものと定義した。ここで、単に平均風速で整理せず積算風量で整理した理由は、飛来塩分量には風速のみならず、その風が何時間吹いて塩分を供給し続けたかが重要であるためである。

図-5中の数字は各年の台風番号を表し、括弧付は沖縄本島の太平洋側を通過した台風で、付

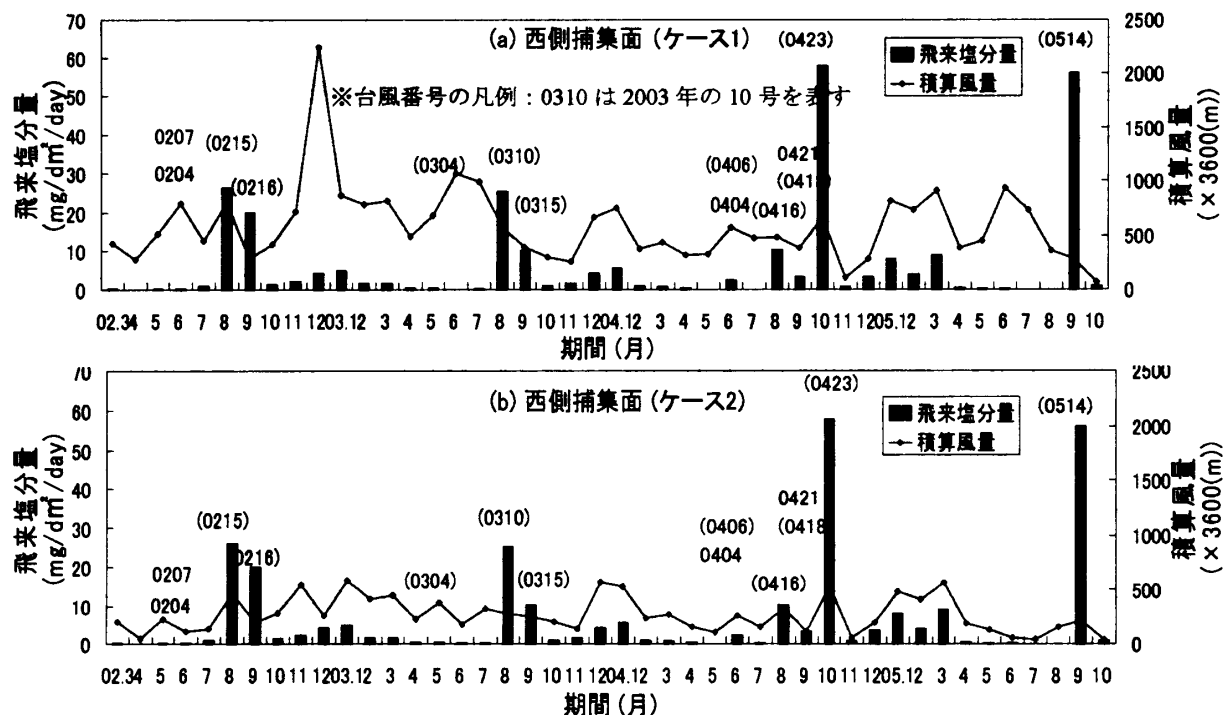


図-5 2002.3～2005.10における辺野喜地点の飛来塩分量と積算風量の関係

いてないのは東シナ海側を通過したものである。

図-5(a)は海風の対象方位を上述のケース 1 とした場合、図-5(b)はケース 2 とした場合である。両図より、台風の影響がある期間(主に 7 月～10 月)を除き、毎年 11 月～3 月の冬期に比較的飛来塩分量が多く、4 月～6 月の飛来塩分が少なくなる周期を示している。

海風の対象範囲の検討としては、海風の対象範囲を狭めたケース 2 の方が対象範囲を狭めないケース 1 に比べて飛来塩分量と積算風量との相関性が良くなることが、図よりわかる。

台風の飛来塩分に与える影響については、台風のコースに影響がある。これを表-1 と図-5 を用いて示す。東シナ海に面した辺野喜地点において、飛来塩分量を多くもたらす台風は表-1 と図-5 に示すように、台風の中心の進路が沖縄本島の太平洋側を通過する場合に多く、東シナ海側を通過する台風の影響は小さい。これは、台風の風向きが北半球では反時計回りに台風中心に向かって吹き込むため、台風中心が太平洋側を通過する場合、東シナ海に面した海岸では風は海から陸地に吹き込む方向になるためと考えられる。

3.2 積算風量と飛来塩分量の関係

前節の辺野喜地点の観測結果より、海風の対象範囲をケース 2 のルールで決めた方が、積算風量と飛来塩分量の相関性がよいことが示された。そこで、この節においては、ケース 2 のルールで海風の対象範囲を定めて積算風量を算出した結果について考察する。

図-6 に辺野喜地点における積算風量と飛来塩分量の関係を示す。図中(a)が西側捕集面、(b)が北側捕集面である。積算風量と飛来塩分量には線形関係が認められ、台風期間はそれ以外の期間と同じ積算風量であっても 2 倍以上の飛来塩分量となることが図よりわかる。また、台風期間の飛来塩分量は、それ以外の期間に比べると積算風量との相関がないことが、図中の近似直線およびその決定係数より理解される。

図-7 は今回の測定で海岸までの最短距離が

表-1 台風の勢力と中心の進路

年	番号	中心気圧 (hPa)	最大風速 (m/s)	通過の位置 (太平洋側)	通過の位置 (東シナ側)
2002	台風4号	925	30		○
2002	台風7号	945	45		○
2002	台風15号	950	40	○	
2002	台風16号	950	40	○	
2003	台風4号	985	23	○	
2003	台風10号	960	40	○	
2003	台風15号	980	30	○	
2004	台風4号	960	35		○
2004	台風6号	925	50	○	
2004	台風16号	940	45	○	
2004	台風18号	940	40	○	
2004	台風21号	990	25		○
2004	台風23号	940	45	○	
2005	台風14号	925	50	○	

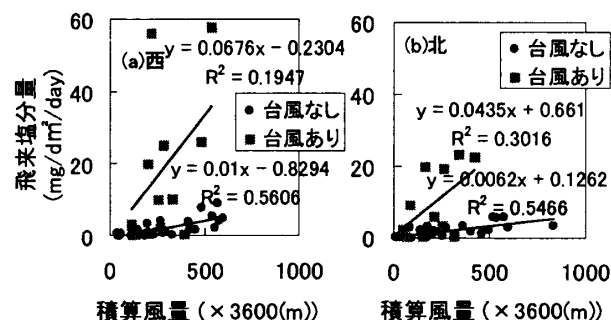


図-6 積算風量と飛来塩分量(辺野喜 西・北)

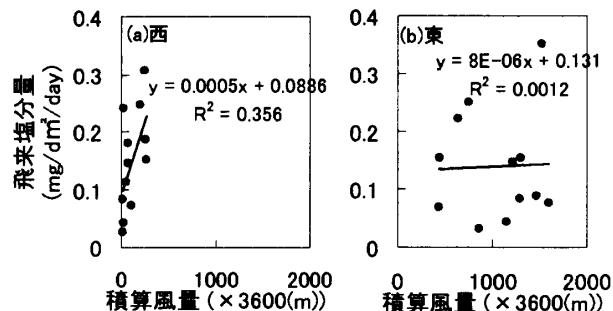


図-7 積算風量と飛来塩分量(琉大 西・東)

最も遠い琉球大学構内での飛来塩分測定結果である。ここで、(a)は捕集面が西側を向いており、(b)は東を向いている。図-6 の辺野喜に比べると、同じ積算風量であっても飛来塩分量が少ないことがわかる。これは、海岸からの距離、標高などが関係していると考えられる。また、積算風量が増えると飛来塩分量も増える傾向は西側においては認められるものの、東側ではほとんどない。また、その相関は辺野喜の結果に比べ低いものとなっている。この原因として、土研式塩分捕集器の特性が考えられる。土研式塩分捕集器においては、海岸付近で水分を含む海塩粒子は捕集面に付着しやすいが、海岸から離

れた距離まで到達する軽くて比較的乾いた海塩粒子は捕集面に達しても付着性が悪く、風により捕集面から剥がされる可能性がある。従って、土研式塩分捕集器の測定精度を上げるためには、湿度や捕集面の濡れ時間等も考慮したデータ整理が必要であると考えられ、今後の課題である。

4. 飛来塩分量の解析値と実測値の比較検討

4.1 移流拡散解析の概要³⁾

飛来塩分量の移流拡散方程式を式(1)に示す。

$$-\bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} = w \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) - Q \quad (1)$$

ここで、 x は海岸からの距離、 y は地上高さ、 $\bar{u}$ は高さ y の水平方向平均風速で、式(2)で表される。 $\bar{c}$ は海塩粒子濃度の各位置における平均値である。また、 k_y は垂直方向の乱流拡散係数で式(3)にて仮定した。式(2)、(3)の u^* は摩擦速度を表し、式(4)で表せる。式(4)中の U は地上 50m の風速で、観測風速より求めた。遮蔽量 Q は式(5)で表される。沈降速度 w は次節で示す。

$$\bar{u} = \frac{u^*}{\kappa} \ln \frac{y}{z_0} \quad (2)$$

$$k_y = \kappa u^* y \quad (3)$$

$$u^* = \frac{\kappa U}{\ln(50/z_0)} \quad (4)$$

$$Q = \gamma \bar{c} u \quad (5)$$

ここで、 κ はカルマン定数(=0.40)、式(5)の γ は遮蔽係数であり、空間中に占める障害物の密度等で決まる。また、 z_0 は地表粗度である。

4.2 数値解析法と境界条件・初期条件の概要³⁾

式(1)の移流拡散方程式を有限要素法により離散化し、式(6)に示す。ここで、鉛直方向については、上流型有限要素法を用い離散化し、水平方向については、 θ 法(差分法)にて離散化した。

$$\begin{aligned} & \left(\theta [K] + \frac{1}{\Delta x} [C] \right) \{ \Phi(x + \Delta x) \} \\ & = \left(- (1 - \theta) [K] + \frac{1}{\Delta x} [C] \right) \{ \Phi(x) \} + \{ F \} \quad (6) \end{aligned}$$

ここで、 $[K]$ は海塩粒子の沈降項、乱流拡散項および障害物による塩分遮蔽項を加え合わせた行列、 $[C]$ は風速を考慮し、水平方向への海塩粒子濃度の変化を表す行列である。また、 $\{ \Phi \}$ は節点の海塩粒子濃度行列で、 $\{ F \}$ は既知のフラックス項である。

数値解析の際の境界条件は、地上 100m 位置でフラックスを 0 とし、地表面位置で海塩粒子濃度に沈降速度を乗じて得られるフラックスを与えた。また、海岸において海塩粒子濃度 c の鉛直分布も条件として与えている。海岸での海塩粒子濃度 c の鉛直分布は海岸の状況と風速を考慮して式(7)で求められる。式(7)中の q_0 は海岸の海上 4.5m 位置で発生する飛来塩分量であり、式(8)で与えられる。式(8)中の α は海岸係数と称し、リーフ海岸で $\alpha=0.196$ 、消波ブロック海岸で $\alpha=0.795$ 、入り江砂浜海岸で $\alpha=0.454$ の値であり、海岸における実測結果を基に決定した。また、沈降速度 w は式(9)で与え、 β は式(10)、初期沈降速度 w_0 は式(11)で与えた。

$$c = \frac{q_0}{\frac{u}{\kappa} \ln(4.5/z_0)} \exp \left(- \frac{w_0}{4.5 \kappa u} \ln \left(\frac{y+4.5}{4.5} \right) \right) \quad (7)$$

$$q_0 = \alpha U^2 \quad (8)$$

$$w = w_0 e^{-\beta x} \quad (9)$$

$$\beta = 0.0069 (\alpha U^2)^{0.868} \quad (10)$$

$$w_0 = 0.0642 q_0 \quad (11)$$

4.3 飛来塩分量解析結果と実測値の比較検討

前節の解析手法を用いてうるま市 3 地点の飛来塩分量を数値解析で求め、実測結果と比較した。C 地点は北東方向のみで、他は北東方向と南東方向の飛来塩分量を対象とした。解析に用いた各地点の海岸からの距離（飛来塩分捕集器の捕集面法線方向）及び観測高さは図-2(b)を参照されたい。建物などの状況より地表粗度 z_0 は海岸近くの A 地点で 0.01m、その他は 0.03m とした。海岸係数 α は全地点 0.454 とした。遮蔽係数 γ は A 地点の北東のみ飛来塩分捕集器の前方に密集した樹木が生い茂っているため 0.03 とし、他は捕集器前方に障害物がほとんどないことか

ら考慮しなかった。また、解析に用いた風速は金武気象観測所のデータを用いており、対象風向はケース 1 とケース 2 の 2 パターンで行った。

うるま市 3 地点各方位の飛来塩分量に関する解析結果と実測値の比較を図-8 に示す。図より前章の積算風量と飛来塩分量との関係でも見られたように、ケース 2 のルールで海風の方位を限定したほうが、限定しないケース 1 よりも解析結果と実測結果が一致する傾向にある。このことは、海岸からの距離がある程度離れた場合、飛来塩分量の測定対象となる捕集面の法線方向より $\pm 45^\circ$ を超えた斜め方向からの風がその捕集面の飛来塩分量に与える影響は小さいことを示唆していると考えられる。

なお、ケース 1 の海風を採用した場合、本解析手法で得られた飛来塩分量は多くの事例で実測値より高めの値を示し、飛来塩分量を考慮する際には安全側となる。

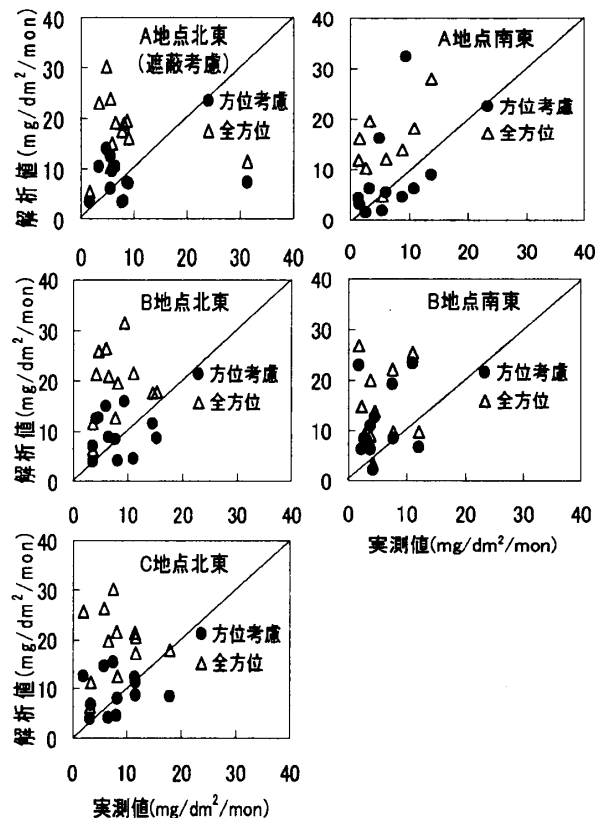


図-8 解析値と実測値の比較

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に纏める。

- 1) 東シナ海に面した辺野喜地点の測定によると、毎年 11 月～3 月までの冬期に比較的飛来塩分量が多く、4 月～6 月では少なくなる周期を示した。また、7 月～10 月は台風による飛来塩分量が非常に多い。
- 2) 沖縄本島において、台風の中心が太平洋側を通過した場合に、東シナ海側で台風による飛来塩分量が多くなる傾向がある。
- 3) 海岸に近い地点においては積算風量と飛来塩分量には線形関係が認められた。なお、ケース 2 のルールで海風の方位を限定したほうが、限定しないケース 1 よりその相関は高い。
- 4) 台風期間はそれ以外の期間と同じ積算風量であっても 2 倍以上の飛来塩分量となり、積算風量と飛来塩分量の相関は良くない。
- 5) 今回の測定で海岸までの最短距離が最も遠い琉球大学構内での飛来塩分量は少なく、かつ、積算風量との相関も良くない。この

理由として土研式塩分捕集器の特性が考えられる。

- 6) 飛来塩分解析結果において、ケース 2 のルールで海風の方位を限定したほうが、限定しないケース 1 よりも解析結果と実測結果が一致する傾向にある。

謝辞：飛来塩分捕集器設置にご協力頂いた各施設関係者、数値解析を実施した元琉球大学学生 宜志元氏に記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 例えば 浜田純夫ほか：海岸付近の飛塩調査とコンクリートに浸透する塩分，第 8 回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.85-88，1986.
- 2) 例えば 山田文則ほか：飛来塩分の発生・輸送シミュレータの開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.27, No.1, PP.865-870, 2005
- 3) 山田義智ほか：海岸付近における飛来塩分量に関する解析的研究，日本建築学会構造系論文集，No.514, pp.21-26, 1998.12