

## 論文 移流沈降領域における飛来塩分量と風速の関係

佐藤 國雄\*<sup>1</sup>・笠原 隆祐\*<sup>2</sup>・塩野 計司\*<sup>3</sup>

**要旨**：新潟県の海岸付近において、2年半にわたって飛来塩分と風の比較観測をおこなひ、捕集塩分量と風速の関係を調査した。観測は、汀線から内陸に900 mの距離にある移流沈降領域内と考えられる地点でおこなった。捕集塩分の大部分は風速が4 m/s以上の風によってもたらされ、風速が4～20 m/sの範囲にある風が1回発生することによって捕集される塩分量は風速に比例することが明らかになった。

**キーワード**：飛来塩分，風速，移流沈降領域，塩害，鉄筋コンクリート

## 1. はじめに

鉄筋コンクリートの塩害は沿岸地域に建設された施設の維持管理にかかわる重要な問題であり、その発生状況に関する実態調査<sup>1)</sup>は広くおこなわれてきた。塩害に対する防止対策も、塗装技術や電気防食技術の応用によって、さまざまな展開をみせている。

塩害の原因になる飛来塩分の発生状況についても1980年代に全国的な調査<sup>2)</sup>がおこなわれ、その後の調査研究の成果も加わって、巨視的なレベルでは一定の理解<sup>3)</sup>が得られるまでになっている。この間の研究によって、飛来塩分量の地域性や、塩分量と海岸からの距離や標高との概略的な関係が明らかにされてきた。

しかし、塩分量とのより直接的な関係が期待される風や波との関係を詳しく調査した研究は限られており、風速や波高と飛来塩分量を関係づける系統的な知見が示されるまでには至っていない。とりわけ、飛来塩分の発生領域（供給領域）よりも内陸側に位置する移流沈降領域での状況に関しては、環境条件の多様性という困難もあり、定量的な知識の蓄積は十分には進んでいない。

このような状況は、気象観測や海象観測の記録を構造物の設計に利用するための途を閉ざし、

構造物が建設される地点の自然条件を考慮した設計法の実現をはばんでいる。

この研究では、飛来塩分の発生や移流に強く影響すると考えられる要因のなかから風速を選んで着目し、特定の観測点において長期にわたる飛来塩分と風の観察をおこなって、飛来塩分量に与える風速の影響について考察することを目的とした。観測点は汀線から900 mほど離れた場所に設け、移流沈降領域において観測をおこなったものと考えた。

## 2. 資料

## 2.1 観測点

新潟県西蒲原郡寺泊町の北部に位置する野積橋を観測点とした（図-1）。野積橋は大河津分水路の河口近くに設置され、汀線からは約900 mの位置にある。橋軸は海岸にほぼ平行で、北北東と南南西を結ぶ方向を向いている。橋の道路面は直下の水面から約25 mの高さにある。

## 2.2 飛来塩分

海側の高欄に土研式塩分捕集器<sup>2)</sup>を設置した。この装置の塩分捕集面には一辺が10 cmの正方形をしたステンレス板が使われている。捕集器は鋼製の箱で保護されており、その前面に開けられた通風口で外気に接している。捕集装置の

\*1 長岡工業高等専門学校助教授 環境都市工学科（正会員）

\*2 長岡工業高等専門学校専攻科生 環境都市工学専攻

\*3 長岡工業高等専門学校教授 環境都市工学科 工博

前面を海側に向け、観測方向を西北西とした。

観測装置が固定され、観測窓が装置の前面だけにあるため、捕集される塩分の到来方向は一定の範囲に限られる。

この観測では、捕集面の法線が西北西を向いているために、おもに西北西（若干の幅をみれば、北西～西の範囲）から飛来する塩分量を調査したことになる。

観測は1992年8月25日から1995年2月13日までの約2年半にわたっておこなった。

観測資料の回収は月に1回を目処におこない、観測期間を通じて30件の資料を収集した。資料の収集間隔は21～44日の範囲にあり、平均は30日だった。

捕集器の塩分をイオン交換水で洗い流して採取し、実験室に持ち帰って塩分量（塩化ナトリウム換算質量）を測定した。測定は塩化物イオン選択電極法によっておこない、測定装置にはソルテスター（（株）堀場製作所製）を用いた。

測定値は「 $\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day}$ 」を単位として整理した。単位のなかに含まれる  $\text{dm}$  は  $\text{deci-meter}$ （10 cm）を意味する。塩分量の単位は、通例にしたがって  $\text{mdd}$  と略記する。

### 2.3 風

国土交通省北陸地方整備局信濃川工事事務所は野積橋の直下（下流側の右岸）に観測点（野積観測所）を設け、風の観測をおこなっている。この研究では風に関する独自の観測はおこなわず、野積観測所で得られた資料の提供を受けた。

風の観測は、飛来塩分の観測よりも7mほど低い位置でおこなわれていた。この標高差によ

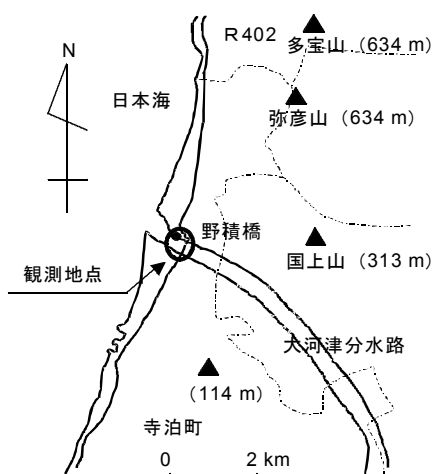


図-1 観測地点の概略図

る風速の違いを試算したところ3～5%の違いに過ぎないことが明らかになったため、標高差による風速の補正はおこなわないことにした。風速の試算には、接地境界層内（地表から数十メートルの範囲）での風速分布を算定するための実用式<sup>4)</sup>（指数則、対数則）を用いた。

飛来塩分を観測した期間（1992年8月～1995年2月）の「風測月表」を印刷資料で入手し、風速と風向のデータを電子化した。データの記載方法は標準的なものであり、風向は16方位の分類で示され、風速は  $\text{m}/\text{sec}$  を単位とし、1桁の小数部を持つ数値で示されていた。風向と風速は10分間の平均値として整理され、1時間に6つの観測値が示されていた。この論文では、10分間を代表する風向や風速が1回記録されたことによって、そのような風が「1回発生した」と考えた。

## 3. 分析

### 3.1 風の特徴

#### (1) 風向

飛来塩分の発生や移流には、海側から吹く風の影響が支配的であると考え、風向が南南西から北北東の範囲にある風に注目して分析した。観測地点での風に関する全般的な特徴は文献<sup>5)</sup>で紹介してあるので、ここでは省略した。

以後の記述を簡潔にするために、南南西～北北西（海側）から吹く風を海風と呼ぶことにする。

海風の風向は北西と西北西が多く、この2方向を合わせたときの観測回数は、風速の条件を設けないときにも海風の69.5%を占め、風速の範囲を5  $\text{m}/\text{s}$  以上に限ったときには海風の79.6%に達した。

このことによって、海風の卓越方向と飛来塩分の観測方向が一致していたことが確認できた。この観測で得られたデータは、風の発生回数と飛来塩分量の関係を、風と塩分の到来方向を北西から西北西の範囲に限定して捉えたものになっていた。

## (2) 海風の風速別発生回数と季節変動

海風の観測回数を風速別に分け、それぞれの変動傾向を調べた。風速の区切りは「2 m/s 未満」「2 m/s 以上、4 m/s 未満」などのように 2 m/s 刻みとし、風速の範囲ごとに月別の観測回数を求めた。風速が「2 m/s 以上、4 m/s 未満」と「4 m/s 以上、6 m/s 未満」の場合を例として、月別の観測回数の例を示した (図-2)。

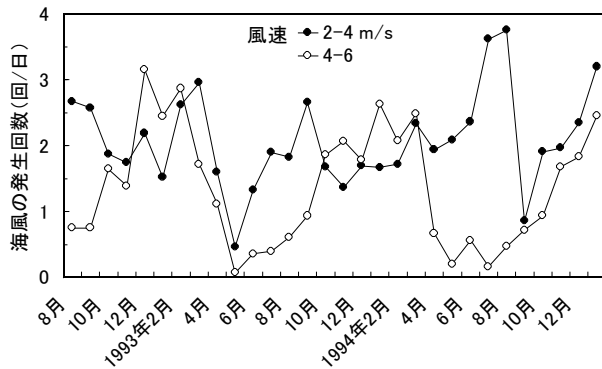


図-2 風速別に求めた月別観測回数の例

次に、月別の観測回数の組 (2 つの時系列；図-2では『2 m/s 以上、4 m/s 未満』と『4 m/s 以上、6 m/s 未満』の場合を例示した) ごとに、相関係数を算出した。相関係数の計算は、風速の範囲がとなりあう組み合わせの全てについておこない、結果を図-3に示した。

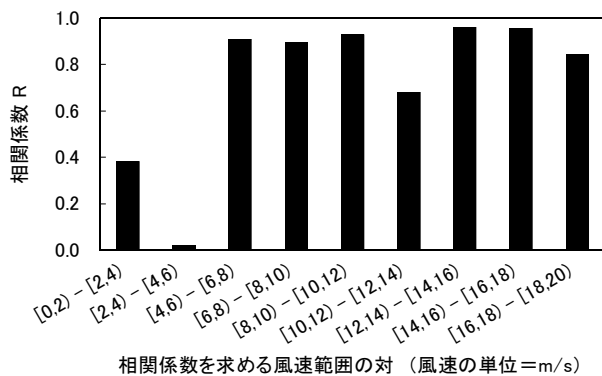


図-3 風速別観測回数 (月別変動) の相関性

図-3には、風速が 2 m/s, 4 m/s, 12 m/s で小さな相関係数 ( $R < 0.7$ ) が求められ、この風速の前後で風の消長傾向が異なっていたことが示されている。

このことを念頭におき、風速の範囲を「2 m/s 未満」「2 m/s 以上、4 m/s 未満」「4 m/s 以上、12 m/s 未満」「12 m/s 以上」の4つとして毎月の海風の観測回数を数えると、図-4のような結果になった。

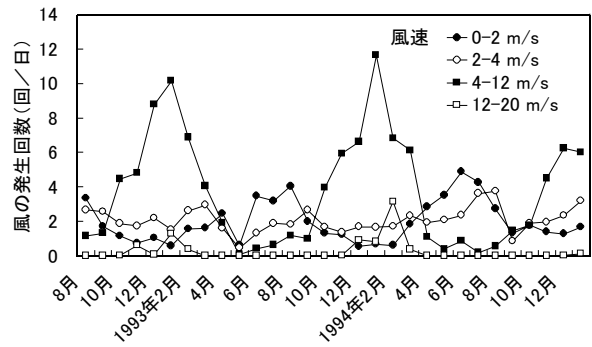


図-4 海風の風速別発生回数の変動

## 3.2 捕集塩分量

### (1) 季節変動

捕集塩分量が月ごとに变化する様子を図-5に示した。図-5のプロットの横方向の位置は、観測期間 (約 1 か月) ごとの中央の期日に合わせた。塩分量は mdd を単位とし、月ごとの平均値で示している。

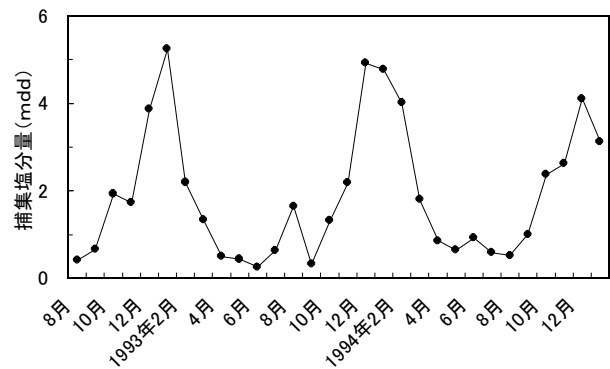


図-5 捕集塩分量の変動

捕集塩分量には、季節風の影響によると思われる冬季の増加が見られた。2年半にわたる全観測期間についての平均値が 1.9 mdd であるのに対し、その 2 倍 (3.8 mdd) を上回る値が 1993 年 1, 2 月; 1994 年 1, 2, 3 月; 1995 年 1 月に記録されていた。観測された捕集塩分量 (月ごとの平均値) の最大値は 5.2 mdd, 最小値は 0.26 mdd だった。

## (2) 風との関係

図-4（海風の観測回数）と図-5（捕集塩分量）を比較すると、捕集塩分量が多い月には風速が「4 m/s 以上、12 m/s 未満」の観測回数が多くなっていた。また、風速が「12 m/s 以上」の観測回数も、その絶対値は小さいものの、捕集塩分量の消長関係と似た傾向を示していた。これに対し、風速が「2 m/s 未満」と「2 m/s 以上、4 m/s 未満」の範囲にある弱い風の観測回数の変動は捕集塩分量の変動とは似ていなかった。このような傾向から、風速が4 m/s よりも強い風の発生回数が飛来塩分量に強い影響を与えていることが推測された。

図-6では、海風の観測回数と捕集塩分量の相関関係を調べた。図-6の2つのグラフはそれぞれ、風速の範囲が「4 m/s 未満」と「4 m/s 以上」の場合を示している。相関係数は、それぞれに-0.52, 0.90と求められた。

風速が「4 m/s 未満」の弱い風では小さな値だった相関係数が、「4 m/s 以上」の風では格段に大きな値を示した。このような整理によっても、風速が4 m/s 以上の海風が飛来塩分の発生に強く影響していることが推測できた。

捕集塩分量の記録は、さまざまな強さの風の影響によって発生・移流した塩分の総和と考えることができる。したがって、図-4と図-5の比較や図-6のような整理（限られた風速の

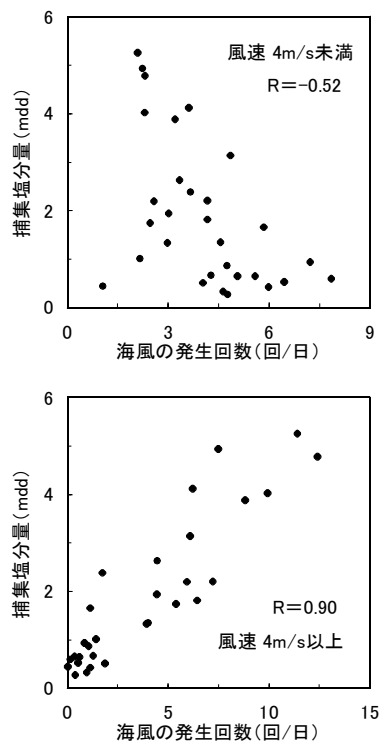


図-6 海風の発生回数と捕集塩分量の関係

範囲における観測回数と塩分量の関係を調べる方法)には、予備的な分析には適するものの、より踏み込んだ考察をするための手がかりにはなりにくいという欠点がある。この点を改善するために、以下のような方法を取り入れてみた。

### 3.3 風の観測回数から捕集塩分量への変換

海風の風速別観測回数と捕集塩分量が、式(1)のように関係づけられると考えた：

$$S = \sum s_i = \sum (c_i \times n_i) \quad (1)$$

ここに、S：捕集塩分量 (mdd)，s：ある風速の範囲にある海風の発生に起因する捕集塩分量 (mdd)，n：ある風速の範囲にある海風の日平均観測回数，c：海風の観測回数を捕集塩分量に変換する係数で、その値は風速の範囲によって変化する ( $\text{mg}/\text{dm}^2$ )，i：風速の範囲を示す添え字。

式(1)に含まれる2つの観測値(sとc)はいずれも1日あたりに基準化された量であり、任意の期間内の平均値(1日あたり)として取り扱うことができる。この研究では、飛来塩分の観測間隔(前述)に合わせ、ほぼ1か月の期間を使った。

なお、風速が大きな風ほど飛来塩分の発生や遠方までの移流に寄与する程度が強いと思われるので、上の式に含まれる係数 $c_i$ には：

$$c_i < c_{i+1} \quad (2)$$

のような関係が期待できる。

捕集塩分量(図-5)を目的変数とし、風速別に整理した海風の観測回数(図-4)を説明変数として、式(1)に含まれる係数 $c_i$ ( $i = 1, 2, 3, 4$ )を最適化した。最適化の条件は、式(3)に示した残差平方和を最小にすることとした。

$$\text{Res} = \sum \sum \{(c_i \times n_{ij} - s_{ij})/s_{ij}\}^2 \quad (3)$$

ここに、Res：残差平方和，c：海風の発生回数を捕集塩分量に変換する係数 ( $\text{mg}/\text{dm}^2$ ) [最適化の対象]，n：海風の日平均発生回数 [観測値]，s：日平均捕集塩分量 (mdd) [観測値]，i：風速の範囲を示す添え字(風速の範囲に対応

して、 $i = 1, 2, 3, 4$ ),  $j$ : 捕集塩分量と海風の発生回数が観測された時期(月)を示す添え字(観測回数に対応して、 $j = 1 \sim 30$ )。

シンプレックス法を使って最適化すると、風速  $v$  (m/s) の範囲ごとの係数  $c$  (mg/dm<sup>2</sup>) は次のように求まった:

$$c = \begin{cases} 0.055 \pm 0.001 & (0 \leq v < 2 \text{ m/s}) \\ 0.023 \pm 0.001 & (2 \leq v < 4 \text{ m/s}) \\ 0.319 \pm 0.001 & (4 \leq v < 12 \text{ m/s}) \\ 0.617 \pm 0.001 & (v \geq 12 \text{ m/s}) \end{cases}$$

風速が「2 m/s 未満」と「2 m/s 以上、4 m/s 未満」の範囲に対する係数の値には、式(2)のように期待される大小関係に逆転が起こっている。しかし、小さな値の範囲で問題であることを考慮すれば、「ともに小さな値として求まった」と理解することができる。

変換係数の最適値を図-7に示した。横座標は、風速の範囲ごとに求めた平均値で与えた。

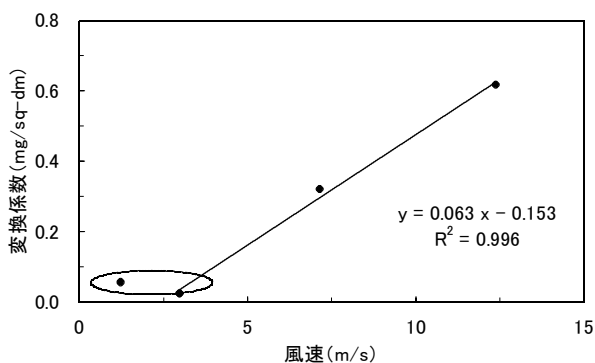


図-7 海風の発生回数を捕集塩分量に変換する係数の風速依存性

図-7からは、まず、風速が3~4 m/s 未満

の弱い風が1回発生することによる捕集塩分量への影響は、風速が10 m/s以上の強い風が1回発生することによる影響に比べてきわめて小さく、前者は後者に対して1オーダー低い水準にとどまっていることが分かる。

このことは、飛来塩分の発生や移流に強く関与する風の風速が3~4 m/s以上のものであることを示しており、表-1に示した「風速と海面の状況」の関係<sup>6)</sup>と符合するものと見ることができる。表-1はビューフォト風力階級表の一部であり、これによれば、飛来塩分の発生に強く影響すると思われる波の砕けは、風速が「3.4 m/s以上、5.5 m/s未満」とそれよりも強い風の範囲で発生することが分かる。

図-7からは、また、風速が3~4 m/s以上の風が1回発生することによる捕集塩分量への影響は、風速に比例した関係になっていることが読みとれる。風速と飛来塩分量の関係には、飛来塩分の発生量と風速の2乗が比例することを示したウェーバー則が知られており、この研究での分析結果はこれとは異なった傾向になっていた。しかし、この研究での観測が移流沈降領域でおこなわれたものであるのに対し、ウェーバー則が発生領域での現象を対象にしたものであることに注意する必要がある。両者の違いは考察の対象とする領域の違いによって説明できる可能性があり、今後の検討を期したい。

変換係数の最適値(図-7)と海風の観測回数(図-4)を使って再現した捕集塩分量を図-8に示した。捕集塩分量が変動する様子を観

表-1 海面の状況と風速の関係<sup>6)</sup>

風速(m/s)	海の様子
0.3未満	鏡のような海面。
0.3以上 1.6未満	うろこのような小波ができるが、波頭に泡はない。
1.6以上 3.4未満	小波の小さいもので、波はまだ短いがはっきりしている。波頭はなめらかに見え、砕けていない。
3.4以上 5.5未満	小波の大きいもので、波頭は砕け始める。泡はガラスのように見える。ところどころ白い波が現れることがある。
5.5以上 8.0未満	波の小さいもので、波は長くなる。白波がかなり多くなる。
8.0以上 10.8未満	波の中ぐらいのもので、波はいっそうはっきりして長くなる。白波がたくさん現れる(しぶきを生ずることもある)。
10.8以上 13.9未満	波の大きいものができ始める。至るところで白く泡だった波頭の範囲がいっそう広くなる(しぶきを生じることが多い)。
13.9以上は省略	

測値と再現値で比較すると相関係数は 0.90 だった。また、捕集塩分量の全観測期間についての平均は 1.5 mdd と再現された。観測値 (1.9 mdd) に対する再現値の差は 0.4 mdd であり、観測値に対する差の割合は 20 % だった。

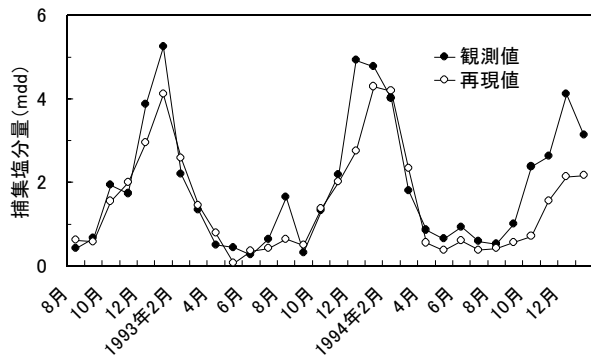


図-8 捕集塩分量の観測値と再現値

#### 4. おわりに

新潟県西蒲原郡寺泊町の北部(野積)において飛来塩分量の観測をおこない、捕集塩分量と観測地点の風向・風速の関係を分析した。飛来塩分の観測は、汀線から内陸に 900 m の地点にある、直下の水面からの高さが 25 m の橋梁上でおこない、この観測を移流沈降領域での事例調査として位置づけた。観測は 1992 年 8 月から 1995 年 1 月までの 2 年半をかけておこなった。

この研究の結果は次のようにまとめられる：

- 1) 海側から吹く風の卓越方向と飛来塩分の観測方向が一致していたことが確認され、捕集塩分量と風速の関係を分析する目的に適った資料が収集できた。
- 2) 風速が 4 m/s 以上の海風の観測回数と捕集塩分量には高い相関性があり、風速が 4 m/s 以上の海風が移流沈降領域における捕集塩分量に強く影響することが明らかになった。
- 3) 風速が 3 ~ 4 m/s 未満の風が 1 回発生することによって捕集される塩分量は、風速が 10 m/s 以上の風が 1 回発生することによって捕集される塩分量よりもはるかに少なく、1 オーダー以上も低い水準にあることが明らかになった。
- 4) 風速が 3 ~ 4 m/s 以上の風が 1 回発生するこ

とによって捕集される塩分量は、風速に比例して多くなることが明らかになった。この関係が移流沈降領域での塩分量を示すものであるのに対し、発生領域での塩分量については、塩分量が風速の 2 乗に比例することを示したウェーバー則が知られている。両者の関係については、今後の検討を期したい。

この研究での取り組みは、特定の地域(新潟県)における特定の観測条件(汀線からの距離が約 1 km, 標高が 25 m)のもとでの一つの事例調査に過ぎない。この研究の延長線上に、移流沈降領域での飛来塩分量に関するより一般的な知見を求めようとするれば、異なる観測条件での事例調査の積み重ねが必要になる。当面は、この方向で研究の拡大を図りたいと考えている。

この研究で使った風のデータは、国土交通省北陸地方整備局信濃川工事事務所から提供していただき、データの受けわたしにさいしては調査第二課の方々に大変にお世話になった。関係の機関と担当者にふかく感謝する。

#### 参考文献

- 1) たとえば、森 芳徳, 片山 清, 守屋 進, 佐伯彰一, 宮田年耕, 中野正則, 佐藤和徳, 田中良樹, 飛来塩分量全国調査 (I), 土木研究所資料, No. 2203, pp. 1-86, 1985
- 2) 藤原 稔, 箕作光一, 田中良樹, 飛来塩分量全国調査 (III) — 調査結果およびデータ集, 土木研究所資料, No. 2687, pp. 1-266, 1988
- 3) たとえば、宇多高明, 小俣 篤, 小西正純: 海岸からの飛来塩分の計算モデル, 海岸工学論文集, Vol. 39, pp. 1051-1055, 1992
- 4) 有田正光 (編著): 大気圏の環境, 東京電機大学出版局, pp. 37-43, 2000
- 5) 笠原隆祐, 佐藤國雄, 塩野計司: 海岸付近の飛来塩分量と風の関係, 第 20 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会, pp. 197-200, 2002
- 6) 日本放送協会 (編): NHK 最新気象用語ハンドブック, 日本放送出版協会, p. 181, 1986