

# 台風時における大気中の海塩濃度分布に関する研究

仲 座 栄 三\* ・ 津 嘉 山 正 光\*\* ・ 北 村 康 司\*\*\*  
牧 野 敏 明\*\*\* ・ 出 口 智 則\*\*\* ・ 比 嘉 強\*\*\*\*

## 1. はじめに

塩害の主要因となっている海塩粒子について, その発生や輸送に関する研究は数多く行われている。特に, 鳥羽・田中 (1967) らの研究は, メソスケール (海岸からの距離が数百メートル内) での海塩粒子の拡散現象を取り扱ったものであり, 国内における先駆的な研究として挙げられよう。また, 幸喜 (1978) による農学的な見地からの研究は, 海塩粒子の空間分布特性のみでなく, 植生や暴風ネットの効果, 塩害, 降雨中塩分量などの解明にも及び多岐にわたる。浜田ら (1986) は, コンクリート構造物への塩分浸透問題解明研究に関連し, 沿岸部付近の塩分量特性を詳しく検討している。

鉄骨や鉄筋コンクリート構造物など人工構造物の深刻な塩害 (腐食劣化や表面塗装劣化など) の殆どは, 海岸部で生じている。そのため, 土木工学や建築工学的な見地からは, 特に海岸部における局地的な海塩濃度分布の解明とそれに対する予測と対策法の確立が必要とされる。

海岸部を対象とした局地的な (海岸からの距離が数キロメートル内) 大気中海塩量分布に関する研究は, 前述の研究例を始めとして数多く存在する (例えば, 仲座ら, 1990; 宇多ら, 1992, 村上ら, 1992)。しかしながら, 最盛期の台風時における系統だった観測例は少なく, また地表上 10 m を越える位置での観測は殆ど行われていない。さらに, 先駆的な研究である鳥羽・田中らのメソスケールでの研究との結び付けが見られない。

本研究は, 仲座ら (1998) の研究をさらに進め, 台風時における大気中海塩量分布特性 (鉛直及び平面分布) の解明を行う。特に, 大気の流れとそれが輸送する海塩量の鉛直分布特性や, 塩分量と裏表の関係にある海岸からの水蒸気供給量の解明に焦点が絞られており, 鳥羽・田中らのメソスケールの研究と沿岸部の局地的な研究との結び付きが示される。

## 2. 理論的考察

Tanaka (1966), 鳥羽・田中 (1967) は, 接地境界層内の大気の流れを定常かつ一様とし, 海から内陸への海塩粒子の輸送量に対する解析解を与えている。それによると, 無次元海塩粒子濃度を  $\theta$ , 風速を  $u$  とするとき, 海岸からの距離が  $x$ , 鉛直高さが  $z$  の位置における無次元海塩粒子濃度分布は次式で与えられる。

$$\theta = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\xi} - \frac{\zeta}{2\sqrt{\xi}} \right) \exp(-2\zeta) - \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right) \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\xi} + \frac{\zeta}{2\sqrt{\xi}} \right) + \left( 1 + \frac{1}{2\gamma} \right) \exp[2\gamma\{\zeta + 2(1+\gamma)\xi\}] \operatorname{erfc} \left\{ (1+2\gamma)\sqrt{\xi} + \frac{\zeta}{2\sqrt{\xi}} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで,  $\xi = w^2 x / 4Du$ ,  $\zeta = wz / 2D$  であり,  $D$  及び  $w$  は大気の平均的な物質拡散係数及び海塩粒子の沈降速度である。また,  $\gamma = \lambda u / w$  で与えられ, 地表面近傍の海塩除去量に対する係数である。

式 (1) から, ある  $z$  における海塩量の最大値の発生する鉛直位置 ( $z_p$ ) の近似値と無次元濃度の極大値 ( $\theta_p$ ) が次のように与えられる (鳥羽, 1966)。

$$\left. \begin{aligned} \theta_p &= \frac{\lambda u}{4w} + \frac{3}{4} + \frac{w}{4}(\lambda u + w), \\ z_p &= -\frac{D}{w} \ln \left\{ \frac{1}{2} + \frac{w}{2(\lambda u + w)} \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

Tanaka の解析解は, 海塩粒子濃度が沿岸部では高度と共に指数曲線的に減衰する分布形となる。また, 内陸部では地表面の除去効果により, 海岸からの距離に伴い地表面付近の濃度とその上部より減少する。そのため, 地表面からいくらか上で極大値をとり, さらにその上層部では再び指数曲線的な分布となる。

仲座ら (1990) は, 現地観測結果から, 高度 2 m 程度の大気中海塩粒子濃度分布の算定式として, 式 (3) で示される経験式を提案している。

$$q_x = q_0 \exp(-D \ln s) + q \dots\dots\dots (3)$$

ここで,  $S = \ln[\sqrt{(gx)}/u]$  である。また,  $q_x$  及び  $q_0$  は, そ

\* 正 会 員 工 博 琉球大学助教授 工学部環境建設工学部  
\*\* 正 会 員 工 博 琉球大学教授 工学部環境建設工学部  
\*\*\* 学生会員 工 修 琉球大学大学院 理工学研究科  
\*\*\*\*

れぞれ海岸からの距離が  $x$  及び 0 (ln 関数にゼロは与えられないため、通常 10 m 程度を与えている) となる位置での海塩濃度である。  $q_{\infty}$  は、海岸から相当離れたところでの海塩量で、変化量が海岸部の変化量に対し無視し得る程度となる位置での値である。  $D$  は距離による海塩量の減衰の大きさを与える係数で、冬期季節風の観測結果から、  $D=2.0$  程度であることが知られている。ここで、式 (3) を少し変形すると次式を得る。

$$q_x = (q_0/g)(u^2/x) + q_{\infty} \dots\dots\dots (4)$$

すなわち、飛来塩分量は風速の 2 乗に比例し、海岸からの距離に反比例することを示している。

さらに、仲座ら (1993, 1996) は、植生や局所的な地形の効果をも考慮できる計算手法を示している。その中で、最も特徴とするところは、海岸からの距離による沈降速度の違い及び植生によるフィルター効果のモデル化にある。仲座らの計算モデルの妥当性は、灘岡ら (1996)、山田ら (1998) によっても示されている。

3. 現地観測位置及び方法

観測は沖縄本島南部米須海岸にて台風 9810 号の接近時に行った。現地観測位置を写真-1 に示す。観測時、台風 10 号は中心気圧が 900 hpa にも達し、観測史に残る台風に発達した。写真-1 に示す観測位置は、図示のように海岸から内陸方向に平坦に広がる地形上にある。海岸は約 200 m のリーフ、約 10 m 幅の砂浜、高さ 10 m 幅 30 m 程度の植生帯(防風林)、さらにその背後は平均背丈が 1.5 m 程度のサトウキビ畑、住宅地(米須集落：殆どが 2 階建ての建物と 5 m 程度の背丈の植生からなる)と続く。鉛直方向の観測点は、写真に示す St. 1 と St. 2 である。

写真-2 に観測風景を示す。写真に示すように、鉛直方向の風向・風速、温度・湿度などの測定にはクレーンをを用いた。地表面から高度 30 m までに 10 個所の測定点を設け、各観測点で 3 分間の測定を地表面から上方向に順に行い、さらに逆方向に 3 分間の測定を行った。往復の計測で各高度における観測時間は計 6 分となる。また、

風向・風速、温度・湿度に関しては、観測中の時間変動を検討するため、高度 5 m の位置で定点連続観測を行った。用いた風速計は三杯式風速計である。大気中の海塩輸送量の測定にはガーゼ法 (仲座ら, 1990) を用いた。

4. 観測結果及び考察

図-1 に、定点観測で得られた観測時間中の風向・風速、温度、湿度の経時変化を示す。図示のとおり、海岸部における風向・風速は安定し、海から陸方向に吹き込む南東の風であった。観測期間中、温度及び湿度が大きく変動しているのは、降雨による影響である。図-2 に、台風 9810 号来襲時の水位及び有義波高の経時変化を示す。台風に伴う波浪の波高は、観測期間中 (10 月 14~15 日) ほぼ一定で、2.5~3.0 m であった。

図-3 に、風速の鉛直分布を示す。図中の●印が観測値

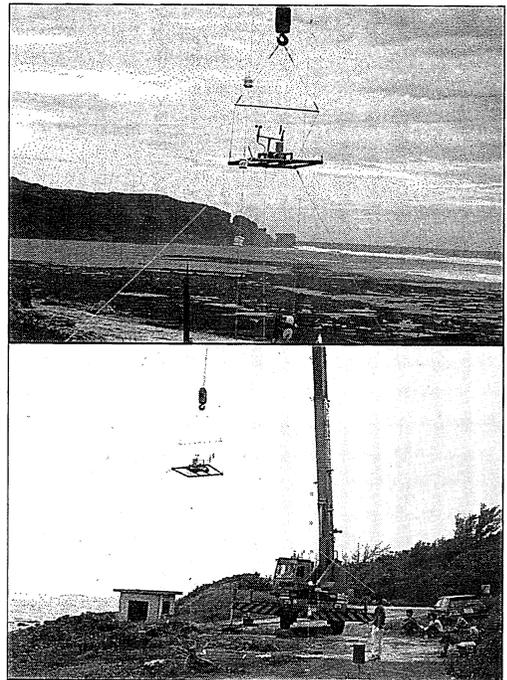


写真-2 観測風景

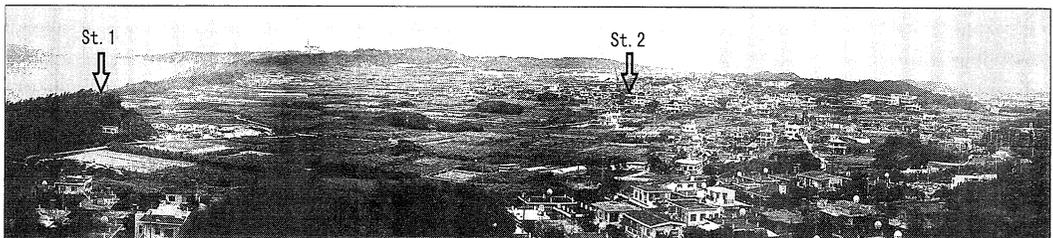


写真-1 観測位置

であり、実線はべき乗則による計算値を示す。風速分布の観測値から、接地境界層の厚さは、海岸部 (St. 1) 及び米須地区 (St. 2) でそれぞれ、10 m 及び 25 m 程度と判断される。また、St. 2 において、高度 7 m 以下では、植生・家屋キャノピー層の影響と思われる風速の変化が見られる。

図-4 に、風による海塩の輸送量の鉛直分布を示す。海塩輸送量分布のピーク値は、接地境界層の上縁から幾分下方にあり、大局的には Tanaka の算定式で予測される分布形となっている。図-5 は、干潮時の St. 1 における海塩輸送量の分布である。この時、汀線は St. 1 の位置から 200 m 程度後退している。換言すると、汀線がそのまま、観測点が内陸に入った状態となる。図示のとおり、海塩輸送量の分布は偏平化しており、図-4(a) に示す状態よりかなり拡散が進んだ状態となっている。

上述の海塩輸送量分布を、ピーク値 ( $\theta_p$ ) とその高度 ( $z_p$ ) を用いて無次元化し、表示したのが図-6 である。図-7 には、St. 1 と St. 2 とにおける観測値を同時に比較するため、 $z_p$  より低い位置での分布を示してある。地表面やキャノピー層の存在の影響で詳細部までは一致しないものの、大局的にはいずれの観測点でも相似形を保っていることが示される。

ここで、観測値及び Tanaka の理論解である式 (1)

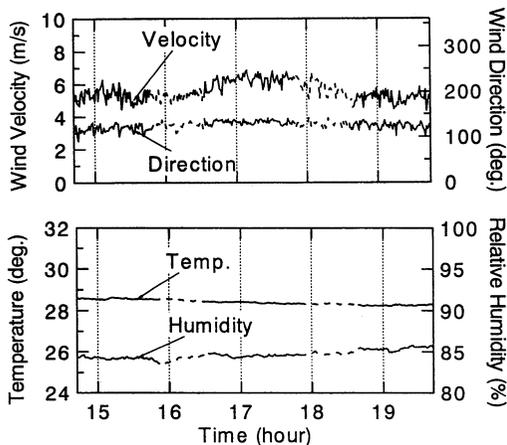


図-1 風向・風速・温度・湿度の経時変化 (98 10/14)

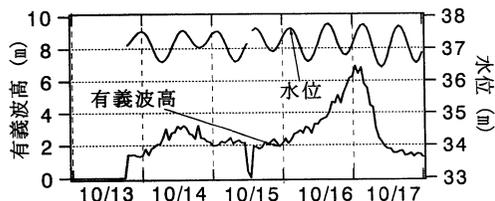


図-2 水位及び波浪の経時変化

を基に、海塩粒子の沈降速度及び地表面における除去量を求めてみる。接地境界層上縁における海塩輸送量の鉛直分布から、 $w/D=0.035$  と求まる。大気の運動量拡散係数  $K$  を  $K=ku_*z$  ( $k$ :カルマン定数,  $u_*$ :摩擦速度) と

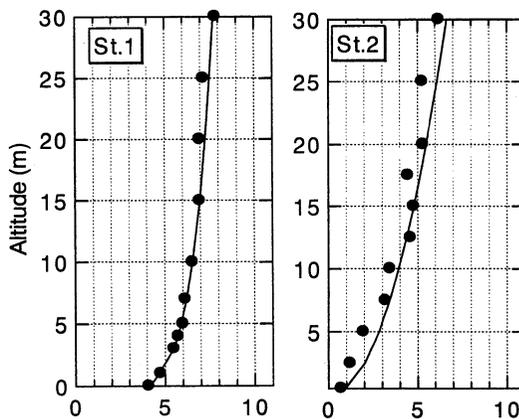
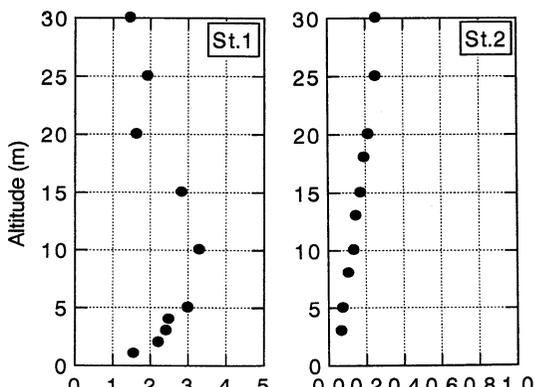
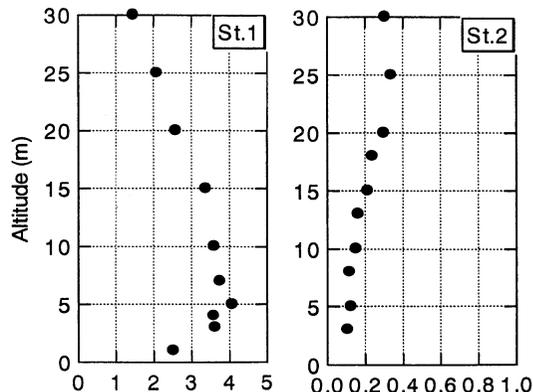


図-3 風速分布 (10/14 14:42)



(a) 10/14 14:42~15:47



(b) 10/15 15:38~16:43

図-4 海塩輸送量の鉛直分布

し、接地境界層内の平均を取ると、 $K=1.42 \text{ m}^2/\text{s}$ となる。ここで  $D=K$  とすると、沈降速度が  $w=0.05 \text{ m/s}$  と求まる。この値は、仲座ら (1993) が与えた沈降速度とほぼ一致する。

さらに、地表面付近の海塩輸送量分布の観測値に対し、ベストフィットする  $\gamma$  の値を求めると  $\gamma=20$  となり、つづいて  $\lambda=0.14$  が求まる。一方、仲座ら (1996) は植生によるフィルター効果を、 $\lambda s \theta u$  ( $s$  は葉面積密度) と表しており、植生の葉面積密度が  $0.4 \text{ m}^2/\text{m}^2$  の時、 $\lambda=0.35$  と

なることを示している。物理的には、 $\lambda=s\lambda'$  である。これらの値はこの関係式を満たしている。図-8 に、St.1 における観測値と式 (1) による計算値との比較を示す。観測値と計算値との対応は良い。

これまで、海岸部の海塩量に関する研究の殆どが高度 10 m 以下を対象としたものであり、その結果を鳥羽・田中らが与えた海塩粒子輸送量の高度分布式と関連させて議論することが困難であった。以上のように本研究成果によりそれが可能となった。

海から何らかの形で飛沫となり拡散する海水滴は内陸へ輸送されるに従い蒸発し、大気へ水蒸気を供給する。沿岸域におけるこうした水蒸気供給は、言わば大気に対して逆降雨現象として作用する。海水の 3% が塩であることを考えると、内陸へ輸送される海塩量の約 100 倍にも達する量の水蒸気が大気へ供給されていることになる。この現象は、水収支の面からは非常に重要な問題であるものの、その説明は遅れている。

図-9 に、絶対湿度の鉛直分布を示す。海塩輸送量分布で見られたと同様に、海から供給された水蒸気は、接地

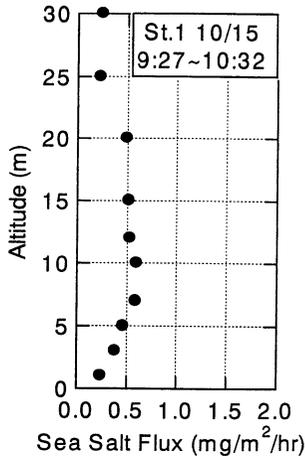


図-5 海塩輸送量分布

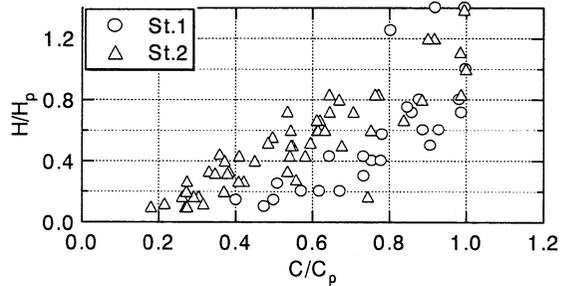
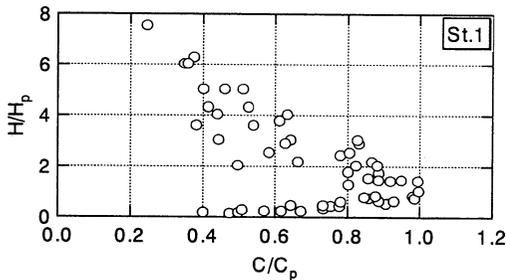
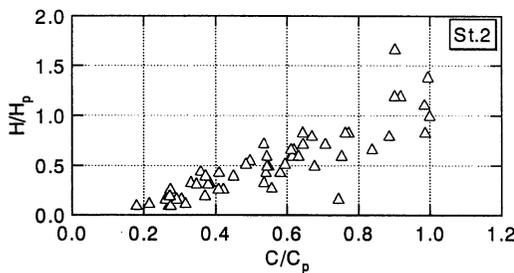


図-7 無次元高度と無次元濃度との関係



(a) St.1



(b) St.2

図-6 無次元高度と無次元濃度との関係

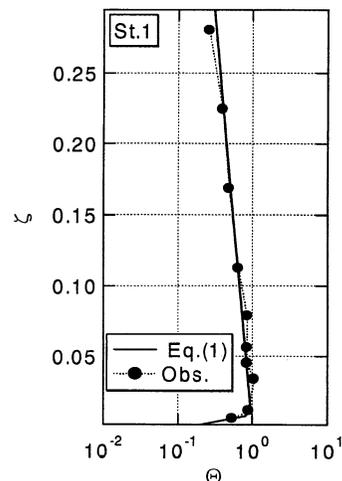


図-8 観測値と Tanaka の理論解との比較

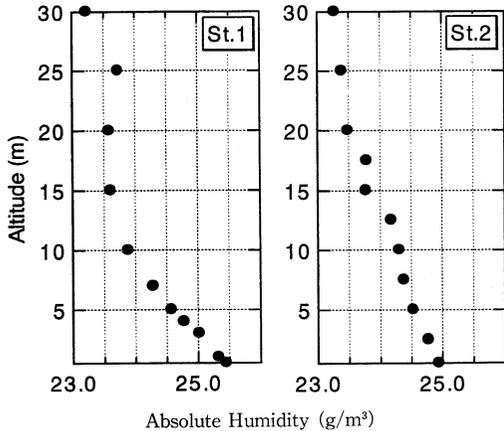


図-9 絶対湿度の鉛直分布

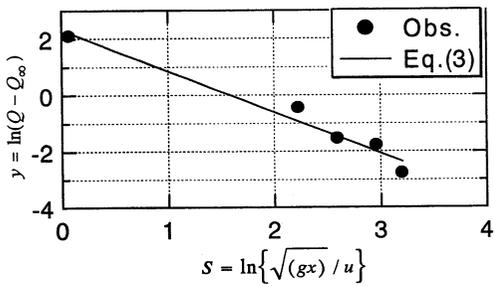


図-10 海塩輸送量の空間分布

境界層内で拡散しているのが分かる。しかしながら、両者には決定的な違いがあり、海塩輸送量分布が地表面付近やキャノピー層内で海塩粒子の沈降や植生等のフィルター効果により減衰しているのに対し、絶対湿度の分布にはその傾向が見られない。例えば、ある粒子径の海水滴が飛来することを想定し、それが地表面や植生に付着した場合を考える。この時、水分は直ぐに蒸発し大気へ供給される。一方、海塩はそのまま地表面や植生に付着したままで、実質的に除去される。このメカニズムにより、水蒸気量と海塩量との分布に対称的な違いが生じることになる。

この事に関しては、仲座ら(1996)が解析的な検討を行っている。さらに詳細な水蒸気量や海塩量の分布予測に關する数値計算手法は現在開発中である。

図-10に、地表面高さ2mにおける内陸方向3.5kmまでの海塩輸送量分布を示す。図示の実線は、式(3)による計算値を示す。観測結果は、計算値と良く一致している。

### 5. おわりに

本研究では、接地境界層の外縁まで観測高度を伸ばすことにより、これまで解明の遅れていた台風時かつ高度10mを越える海塩輸送量の実態を明らかにした。この観測結果により、鳥羽・田中らが進めたメソスケールの海塩分布に対する研究と、海岸付近を詳細に調らべるといふ局所的な研究との結びつきが可能となった。また、水文学における水収支問題で重要といわれる高波浪時に海岸から供給される水蒸気の拡散に関する検討を行った。今後は、大気と海塩及び水蒸気の拡散とをリンクさせた計算手法を用い、より詳細な議論を行う予定である。

本研究を進めるに当たり、郵政省沖縄電波観測所長増田悦久氏に多大なご協力を頂いた。また、本研究の一部には、科学研究費(基盤研究(B)、研究代表者：仲座栄三、課題番号：09450189)の援助を受けた。ここに記し、感謝の意を表します。

### 参考文献

宇多高明・小俣 篤, 小西正純 (1992): 海岸からの飛来塩分量の計算モデル, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 1051-1055.  
 幸喜善福 (1978): 海岸保全的見地からの沖縄の飛塩に関する研究, 琉球大学農学部学術報告, 第25号, pp. 430-554.  
 鳥羽良朗 (1966): 海塩粒子, 海と空, 第41巻, 第3・4号合併号, pp. 1-48.  
 鳥羽良朗・田中正昭 (1967): 塩害に関する基礎的研究(第一報) 海塩粒子の生成と陸上への輸送モデル, 京都大学防災研究所年報第10号B, pp. 331-342.  
 仲座栄三・津嘉山正光・照屋雅彦 (1990): 沿岸微気象の一要素としての飛塩量特性, 環境システム研究, Vol. 18, pp. 88-93.  
 仲座栄三・津嘉山正光・山路功祐・日野幹雄 (1993): 飛塩(海塩粒子)拡散の数値流体力学的解析, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 1036-1040.  
 仲座栄三・津嘉山正光・北村康司・日野幹雄 (1996): 植生を有する海岸における飛来塩分量に関する研究, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 1181-1185.  
 仲座栄三・津嘉山正光・北村康司・増田悦久・和田 誠・糸数義直 (1998): 強風時の飛来塩分量と降雨中塩分濃度に関する研究, 海岸工学論文集, 第45巻土木学会, pp. 1176-1180.  
 灘岡和夫・内山雄介・東川孝治 (1996): 大気及び土壌中の塩分かみ砂浜海岸植生環境について, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 1171-1175.  
 浜田純夫・日野伸一・兼行啓示・長谷川博 (1986): 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.  
 村上和男・加藤一正・清水勝義・福田真人・宮崎啓示 (1992): 砕波帯内における海塩粒子の発生に関する現地調査, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 1046-1050.  
 山田義智・大城 武・栢田佳寛 (1998): 海岸付近における飛来塩分に関する解析的研究, 建築学会論文集, 第514号, pp. 21-26.  
 Tanaka, M. (1966): On the transport and distribution of giant sea-salt particles over land (I). Theoretical model, Special Contr. Geoph. Inst. Kyoto Univ., 6, pp. 47-57.