

飛塩（海塩粒子）拡散の数値流体力学的解析

仲 座 栄 三*・津嘉山正光**・山路 功 祐***日 野 幹 雄****

1. はじめに

強風などによって海から飛来する海塩粒子（飛塩）による塩害は、金属製品の普及とともに深刻となってきた。最近では、電柱の碍子への付着に伴う漏電やハイテク製品への不純物混入の原因として問題視されている。さらに、最近の大規模な埋立などによる住宅地域の海側への進出につれて、塩害もより深刻な問題となっている。これは、自然海岸で植生が飛塩に対して一種のフィルター作用を有しているのに対し、上述の海岸では十分な植生帯を伴わないことによるものと説明される。

台風 T 9119 は、日本列島をほぼ縦断するコースをとり、各地で甚大な強風災害や塩害をもたらした。特に塩害は思わぬ方面へも及び、大都市は未曾有の停電災害（新しい災害形態）に見舞われた。

台風銀座の異名を持つ沖縄地方では、塩害問題は古くから深刻な問題であった。海塩粒子の一年間にわたる全降下量は、他県のそれと比較にならない程度と言われ、まさしく島そのものが“塩づけ”の状態といわれる。そのため、家電製品などは特殊な塗装を施した沖縄向けの仕様となっている。

飛塩に関する研究は、古くから多くなされている。実務レベルの、しかもローカルな調査結果は、参考文献として挙げるに尽くせない程の量があるものと推察される。日本における科学的な研究としては、鳥羽・田中ら（1966, 1967）の先駆的な一連の研究がある。また、農学面では幸喜（1970）の研究があり、土木構造物（鉄筋コンクリート）を対象とした飛塩の問題については浜田ら（1986）の研究が先駆的研究として挙げられよう。

海岸工学の分野において、塩害問題と飛塩量とが具体的に述べられたのは、仲座ら（1990, 1991）に始まる。しかし、その翌年には、村田ら（1992）、村上ら（1992）や宇多ら（1992）などによって、詳細な現地観測データが提示されている。特に、村上らの現地観測データは砂波帯内を横断する方向で観測がなされており、今後飛塩

の発生源における飛塩量が明らかにされるものと期待される。飛塩量の予測式として、鳥羽・田中らは一連の研究の中で、風速及び海塩粒子の降下速度を内陸方向に一定として理論式と算定図表を提示している。かれらは、飛行機などを利用した現地観測データと理論値とを比較し、理論値の妥当性を示している。しかし、彼らの現地観測データは、かなり上空のものを対象としたものであり、我々が日常的に体験している暴露状況を反映していない。一方、幸喜や浜田らは、現地観測値を基に簡易的な経験式を与えている。その後、仲座らや宇多らも独自の経験式を提示している。

これまで提案されている従来の飛塩量算定式は、実務レベルで非常に簡略的であり、利用し易いという利点を有するものの、それらのいずれもが内陸方向に風速や粒子降下速度を一定としていること、及び地形条件や植生の影響を考慮し難いというところに難点を有する。

飛塩の拡散現象は風速場の影響を非常に大きく受けるため、極めてローカルな問題を含んでいる。多分に、確定量として与え得る主な物理量は、海側での風速、沖波波高や気温分布などと考えられ、他の条件は境界条件として与えられるべき物理量であろう。

本研究は、飛塩の拡散現象を数値流体力学的に解析し、従来の飛塩算定式が抱えている問題を解決すると共に、海岸林（防風林）の飛塩除去効果などを考慮した計算手法を提示することを主たる目的としている。

2. 理論及び計算手法

2.1 風 速 場

以下の議論で現象は二次元的とみなす。風速場を規定する基礎式は、以下の Navier-Stokes の運動方程式と連続の式である。

$$U_t + U \cdot \nabla U = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 U + F_D \quad \cdots (1)$$

$$\nabla \cdot U = 0 \quad \cdots (2)$$

ここで、 $U=(u, v)$ とする。

F_D の項は植生が流体に及ぼす抵抗を意味し、神田（1992）にならって次式で与えた。

* 正 会 員 工 博 琉球大学助手 工学部土木工学科
 ** 正 会 員 工 博 琉球大学教授 工学部土木工学科
 *** 学生会員 琉球大学大学院生 工学部土木工学科
 **** 正 会 員 工 博 中央大学教授 総合政策

$$F_D = -C_D S U^2 \frac{u_i}{|U|} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 C_D は抵抗係数であり($C_D=0.5$)、 $S(\text{m}^2/\text{m}^3)$ は植生の葉面積密度である。

風速場は、二次元乱流とし、数値計算の簡略化の為に、拡散係数には prandtl の混合距離理論を用いて、ブシネスク型の渦動粘性係数を用いた(ゼロ方程式モデル)。また、実際の数値計算では、直接連続の式を用いているのではなく、運動方程式と連続の方程式を連立して得られる Poisson 方程式(4)式を用いている。

$$\nabla^2 P = -\frac{\partial D}{\partial t} + \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right) \\ \left[\therefore D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right] \dots\dots\dots (4)$$

基礎式の差分化は、空間微分項に関しては基本的に中央差分とし、時間微分項には前進差分を適用した。特に、非線形慣性項については、計算の安定化を図る目的から、河村・桑原らの高精度風上差分を適用した。その差分法は、例えば物理量 Φ に対して次式で示される。

$$U^* \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_i \approx U \frac{(\Phi_{i+2} + 8\Phi_{i+1} - 8\Phi_{i-1} + \Phi_{i-2})}{12\Delta x} \\ + |U| \frac{(\Phi_{i+2} - 4\Phi_{i+1} + 6\Phi_i - 4\Phi_{i-1} + \Phi_{i-2})}{4\Delta x} \\ \dots\dots\dots (5)$$

本研究における風速場のシミュレーションに用いた計算コードは、1987年当時、東京工業大学日野研究室で日野・神田・岸(1987)が開発したものがベースとなっている。そのため、実際には上記の NS 方程式を直接数値計算しているのではなく、一般座標系に書き換えたものを用いている。

2.2 海塩粒子の拡散

海塩粒子の拡散現象に対する基礎式としては、下に示す Fick の拡散方程式を用いた。

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} = W_0 \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (D_m + K_x) \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \right\} \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ (D_m + K_y) \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} \right\} - C_{\text{cut}} \\ \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $\bar{C}$ は濃度、 K_x 、 K_y はそれぞれ乱流拡散係数、 D_m は分子拡散、 W_0 は海塩粒子の降下速度、 C_{cut} は植生の塩分除去効果を考慮した項である(このことについては後で述べることとする。)

上式の差分化に際しても、風速場と同様な考え方に基づいた。また、物質拡散係数は厳密には運動量拡散係数とは異なるものと考えられるが、ここでは簡略化の為に、同一のものとして与えた。実際の数値計算ではこの拡散方程式も一般座標系を用いて変形し、上述の NS 方程式

計算コードに組み込んだ。すなわち、流れの計算と拡散の計算とが同時進行するようにした。

2.3 境界条件及び計算条件

計算では、図-1に示すような海岸モデルを用いた。すなわち、計算領域は海岸から内陸方向に300.0 mとし、鉛直上方に40.0 mとした。計算に用いたメッシュは不等間隔メッシュであり、底面から上方に徐々に変化させた。領域の海側境界が碎波点であり、そこでは風速を鉛直方向に一定として与えた。底面境界条件は non-slip 条件とし、陸側及び上端の境界には透過境界条件を適用した。風速は、上流側境界で鉛直方向に一樣分布として $U=5.0 \text{ m/s}$ を与えた。そのため、領域内には上流側を始点とする乱流境界層が下流方向に発達することとなる。この境界層は、現地においては内部境界層に対応する。

植生を考慮した計算の場合には、図-1に示すとおり、植生高さを10.7 m、植生帯幅を48.0 m、植生の幹部分を地上高4.7 mとして、それより上部の葉の部分で葉面積密度を $2.5 (\text{m}^2/\text{m}^3)$ とし、幹の部分ではゼロとした。

飛塩濃度に関しては、飛塩の発生源を碎波帯内に局所化し、上流側境界を碎波点として、そこで鉛直方向に指数関数的に分布させた。鳥羽・田中ら(1967)によると、飛塩の発生は海表面の気泡がはじけると、エアロゾル的な海塩粒子が大気中に放出されることによるとしている。また、波の碎波などによって放出された大粒径の海塩粒子はその大半が海岸付近で降下し、内陸まで及ばないことを指摘している。しかし、筆者らが行った現地観測(1991)では、海岸線から2 km以内の地域であれば、比較的风速が小さい場合でも、明らかに碎波帯からの飛塩が主要なものとなっていることが分かった。碎波帯内における飛塩濃度の鉛直分布に関しては、村上ら(1992)の現地観測値を参考に、海表面で最大値を有する指数曲線(7)式で与えた。

$$C_0(y) = \exp(Ay) \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 $C_0(y)$ は碎波帯内における鉛直(y軸)方向の無次元飛塩濃度、 A は飛塩量の鉛直方向の減少率を与える係数である(ここでは、 $A=-0.293$ として与えた)。

3. 計算結果及び考察

図-2に植生がない場合の風速の計算結果を示す。図示のとおり、風速場は海岸線から内陸方向に境界層の発

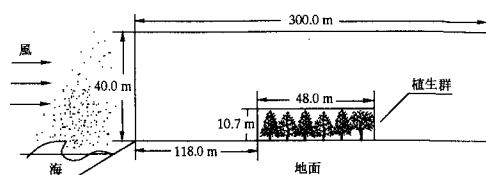


図-1 計算領域の概念図

達を伴いながらほぼ一方向流となっている。この風速場に対する飛塩濃度の数値計算結果を図-3に示す(粒子降下速度をゼロとしている)。計算は飛塩濃度が時間的にほぼ一定となることを確認して終了しているため、当然ながら濃度分布は上流側境界で定常的に与えた分布形をほぼ保ちつつ、下流方向に移流された形をとることになる。これでは、海岸線から内陸方向に飛塩濃度が減少することを表し得ないので、以下の計算では粒子の降下速度を考慮することとする。しかしながら、粒子の降下速度は飛塩濃度と密接な関係にあることが想定できるので、あらかじめ陽的にその正確な値を与えることは困難である。そこで、本研究では以下のようにして与えることとした。

海塩粒子の粒径(重量)が降下速度を左右すると考えられ、それは自らの“ふるい分け作用”によって海岸線から内陸方向に減少すると考える。また、その変化は指数関数的であるとし、その変化を次式で与える。

$$W(x) = W_0 \exp(-Bx) \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 W_0 は砕波点位置での粒子の降下速度、 $W(x)$ は内陸の任意点($x=x$)における粒子の降下速度、 B は定数である。ここでは、粒子の降下速度を鉛直方向に一定として与えているが、これは計算の簡略化と鉛直方向の変化を予測するだけの現地データを有していないという理由による。ここで、 W_0 及び係数 B の同定 (identification)を行う必要があるが、これは計算値と現地観測デー

タ(仲座ら, 1990)との比較で行った。具体的には、先ず計算値と観測値とが海岸線から50 m以内で一致するように、 W_0 を決定し、次に鉛直方向に平均した飛塩濃度が内陸方向に一致するように係数 B を決定した。

図-4に、 W_0 の値を0.06に固定し、 B の値を変えて行った飛塩濃度の計算値を示す。図中、●印は仲座ら(1991)が平坦地で行った現地観測値である。図示のとおり、粒子の降下速度が飛塩濃度の内陸方向分布形を大きく変化させることがわかる。また、係数 B の値を0.012とした計算結果は、現地観測値と良く一致している。この図より、(8)式中の係数 B は、以下0.012を用いることとした。

図-5にこの場合の飛塩濃度の分布を示す。

はじめに述べたとおり、本解析手法は最終的には三次元地形条件や植生の効果、あるいは構造物周りの局所的現象をも考慮し得る計算モデルの確立を目標としている。以下では、飛塩に対する植生のフィルター効果を考慮した計算手法について説明する。また以下の議論では図-3、4に示す計算結果が比較の為の基本場となる。

図-6は、植生帯を海岸線から118.0 m離れた位置に設置した場合の風速分布である。図示のとおり、風速は植生の前面で上昇流となり、植生背後の後流域では風速が非常にやせた形となっている。植生の存在は、大気の流れに対して流体抵抗となる上に、飛塩に対しては一種のフィルターとして作用する。ここで問題となるのが植生によるフィルター効果をどうモデル化するかである。

以下では植生によるフィルター特性を次式のようにモデル化した。

$$C_{cut} = \Gamma_c \cdot S \cdot C(c) \cdot U(u) \dots\dots\dots (9)$$

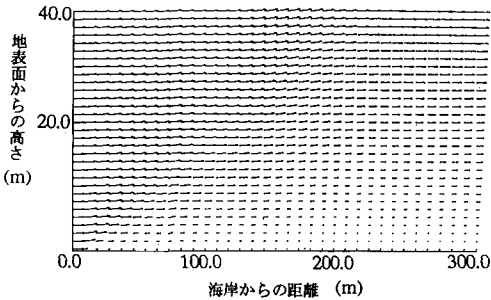


図-2 風速ベクトル

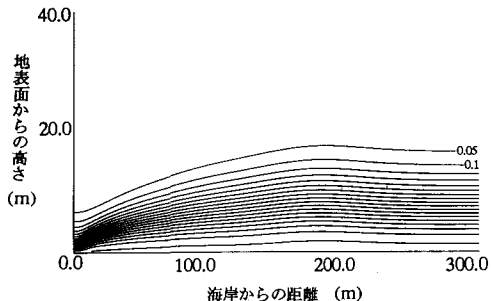


図-3 飛塩濃度分布 ($W_0=0.0$)

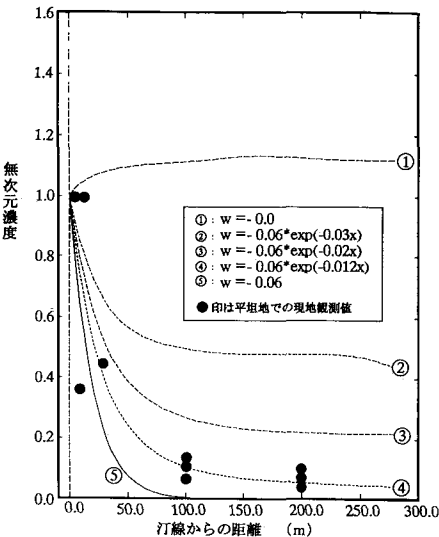


図-4 飛塩粒子の降下速度の違いによる飛塩濃度分布の変化

ここで、 C_{cut} は植生による単位時間単位体積当たりの飛塩除去量、 γ_c は定数、 C 及び U はそれぞれ濃度及び風速の関数である。ここで先ず、 C 及び U の関数形を決定しなければならないが、これらの関数形を決定し得る程の詳細な現地観測データはこれまで得られていない。そこで、本研究では、最も簡単な関数形を用いることとし、一次の関数形とした。

図-7 に、植生があり、海塩粒子の降下速度を考慮しない場合の飛塩の濃度分布を示す。図-3 の計算結果と比較すると植生前面の上昇流によって、海塩粒子がかなりの高さまで巻き上げられている。また、地表面付近の高濃度の飛塩が植生の後方で、植生の幹部帯より吹き上げられて、植生の後流域は全般的に高濃度帯となっている。一方、図-8 は、粒子の降下速度を考慮した場合であり、植生の後方では、図-5 と比較して上方まで拡散しているものの、図-7 の計算結果とは大きく異なる。しかし、この場合も、植生によってその背後が極端に濃度が低下させられるとする仲座らの現地観測値と一致しない。

図-9 は、植生に (9) 式で示すフィルター効果を持たせた場合の計算結果である ($\gamma_c=1.0$)。この場合、植生背後では、殆ど飛塩濃度がゼロとなっており、植生の効果を一応反映した結果となっている。図-10 は、 $\gamma_c=0.5$ とした場合の計算結果である。図示のとおり、飛塩濃度は植生の背後まで入り込み、植生背後も濃度が増加している。この濃度分布の全体的な傾向は、筆者らの現地観測

値と定性的に一致している。

図-11 は、より大きな飛塩除去効果を期待して植生を海側に接近させた場合の計算結果である ($\gamma_c=1.0$)。計算結果は、むしろ植生背後で大きくなっている。これは、植生前面の上昇流が海岸付近の高濃度の飛塩を巻き上げ内陸部に移流することによるものと説明される。

自然の海岸では、海と植生帯とは砂浜によって分けられている。すなわち、砂浜が大粒径の海塩粒子を受けとめる一種のバッファゾーンであり、植生は決して必要以上にその砂浜を覆い、海側に前進することはない。この自然の仕組みは我々も見習わなければならない。なぜならば、最近の埋立では海と陸との極めて狭い水際に植

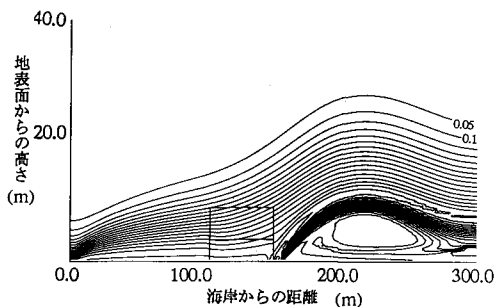


図-7 飛塩濃度分布 ($W_0=0.0$, 植生のフィルター効果なし)

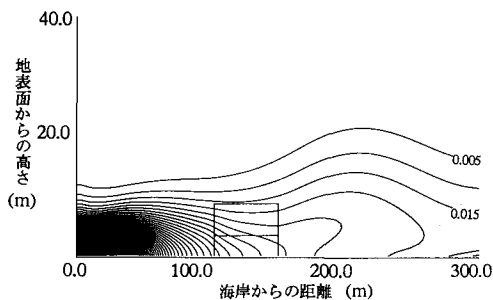


図-8 飛塩濃度分布 ($W(x)=0.06 \cdot e^{-0.0012x}$, 植生のフィルター効果なし)

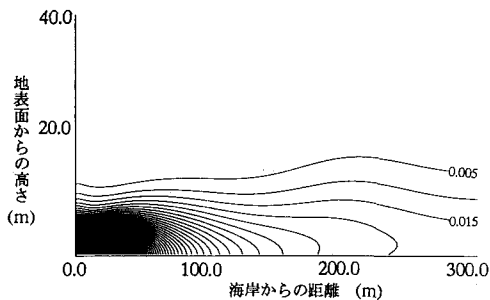


図-5 飛塩濃度分布 ($W(x)=0.06 \cdot e^{-0.0012x}$)

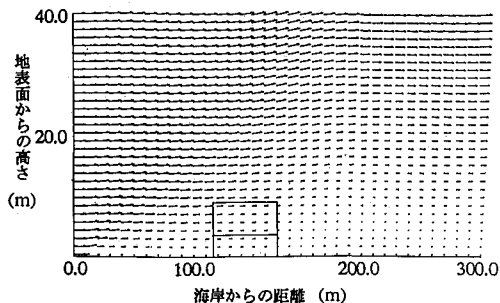


図-6 風速ベクトル (植生帯を有する場合)

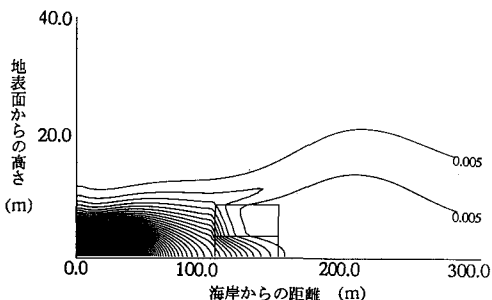


図-9 飛塩濃度分布 ($W(x)=0.06 \cdot e^{-0.012x}$, 植生のフィルター効果あり, $\gamma_c=1.0$)

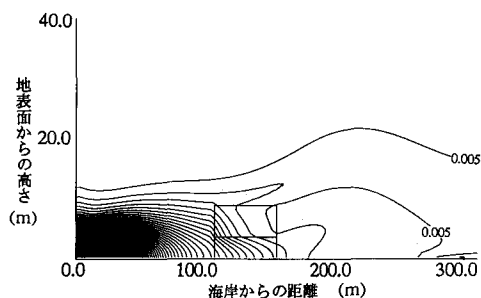


図-10 飛塩濃度分布 ($W(x)=0.06 \cdot e^{-0.012x}$, 植生のフィルター効果あり, $\gamma_c=0.5$)

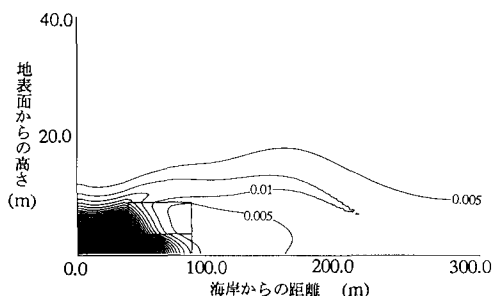


図-11 飛塩濃度分布 (植生を海岸から 59.0 m の位置に移動した場合, 計算条件は図-9 と同じ)

生帯を設けており, 自然の猛威に負けて枯れていく植生の保全に悩まされている例が多いからである。

最後に, 東京など大都市における臨海地域の塩害問題がなぜ地方の塩害と比較してさほど問題とならないのか? この問に対して多少荒っぽく, しかも仮説的な答を述べる。東京など大都市では, 光化学スモックなど大気中に様々な油性分を含む物質が混入しており, これが金属類に付着し, 一種のコーティング剤となって表面を覆っている効果によるものと考えられる。もちろん, 都市部の大規模港湾は, 波の碎波帯を海岸から遠ざけている(あるいは, なくしている)ことも一因として考えられる。

4. おわりに

本研究では, 最近その進歩が目ざましい数値流体シミュレーション手法を用いて, 海岸から飛来する飛塩粒子(飛塩)の解析を行った。大気の流れは Prandtl の混合距離理論を導入した N-S 方程式の差分陰解法により求め

た。また, 飛塩濃度の拡散については, Fick の拡散方程式に飛塩粒子の降下速度を考慮した基礎式を用い, N-S 方程式と連立して数値解析した。粒子降下速度を海岸からの距離により指数関数的に変化させた計算結果は, 現地観測データを良く説明するものであった。さらに, この手法を植生がある場合に適用し, 植生背後の飛塩拡散の予測を行った。本研究では, 現象を二次元として取り扱っており, 三次元場への拡張とより現実的な乱流モデルの取り込みなどが今後の課題である。また, 本数値解析手法には, 基本的に一般座標系が用いられており, 山岳地形や構造物の影響を考慮した解析も可能である。地形が飛塩濃度分布に与える影響に関しては, 紙面の都合上割愛した。別の機会に報告する予定である。

謝辞: 本研究で用いた N-S 方程式の数値解析コードの一部は, 1987 年当時, 東京工業大学工学部日野研究室で日野・神田・岸が開発したものを利用した。ここに記して深甚なる感謝の意を表したい。

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, 第 39 回海岸工学講演会論文集, pp. 1051-1055.
- 鳥羽良明 (1966): 海塩粒子—大気と海洋との相互作用の一要素として—, 海と空, 41, 3.4 併合, pp. 71-118.
- 鳥羽良明・田中正昭 (1967): 塩害に関する基礎研究 (第 1 報) 海塩粒子の生成と陸上への輸送モデル, 京大防災研究所年報 第 10 号 B.
- 幸喜善福 (1970): 海岸付近の空中塩素量に関する研究, 琉球大学農学部学術報告第 17 号.
- 仲座栄三・津嘉山正光・照屋雅彦 (1990): 沿岸微気候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・照屋雅彦 (1991): 大気環境アメニティーの一要素としての飛塩量特性, 第 38 回海岸工学講演会論文集, pp. 896-900.
- 浜田純夫・日野伸一・兼行啓治・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.
- 村上和男・加藤一正・清水勝義・福田真人・宮崎啓示 (1992): 碎波帯内における飛塩粒子の発生に関する現地調査, 第 39 回海岸工学講演会論文集, pp. 1046-1050.
- 村田拓也・山田 功・石田浩人・堀田新太郎 (1992): 海浜上における飛塩の鉛直分布, 第 47 回年次学術講演会, pp. 1226-1227.