

植生帯を有する海岸における飛来塩分量に関する研究

仲 座 栄 三*・津嘉山正光**・北 村 康 司***・日 野 幹 雄****

1. はじめに

海から飛来する海塩粒子は、金属類や鉄筋コンクリートなどの腐食劣化や農作物などへ塩害をもたらす。海水飛沫は主として水滴とそれに溶解する NaCl とからなっており、内陸に飛来するにつれて水蒸気の蒸発あるいは凝結を伴いながら輸送される。そのため、海岸近傍の気温分布や湿度分布など、微気象にも影響を及ぼす。

海水飛沫などに対する対策としては、古くから防風林や防風ネット等を用いた対策がなされている。こうした対策を効率良く行うには、海岸近傍の飛来塩分量の空間分布特性や防風林及び防風ネットなどの防風効果及び飛塩除去効果などを十分把握しておく必要がある。また、水文気象学的には、海水飛沫からの水蒸気拡散の解明が急がれる（例えば、巻田ら、1994）。

本研究では、防風林を有する海岸において、気象や飛来塩分量の現地観測を行い、植生による飛来塩分量の除去効果や海塩粒子の沈降速度などを明らかにする。さらに、雲や大気中の水蒸気に関する既往の理論を飛沫の問題に応用し、飛沫の粒径分布や沈降速度の時間変化、あるいは飛来塩分量と気温・湿度との関連を解析する。

2. 植生帯を有する海岸における気象及び飛来塩分量の現地観測

2.1 観測場所及び方法

現地観測を行った海岸の概要を図-1に示す。観測対

象とした海岸は、沖縄本島恩納村屋嘉田海岸である。図示のとおり、この海岸には、高さが人間の背丈程度の植生帯（モクマオ林）と、高さが約7mの植生帯とが比較的明瞭に分かれて存在している。植生帯の直前は砂浜であり、満潮時にはその浜の前面が汀線位置となる。しかしながら、この海岸は干潟海岸であり、干潮時にはこの位置から約1km離れた沖側のリーフ先端付近が波の碎波点となる。

図-1に St.1～6 の印で示す箇所が観測位置である。それぞれの観測位置で鉛直方向に7点の観測点を設けた（1m間隔）。植生帯内における風速や気温などは、場所的な変化が大きいのので、沿岸方向に3測線、鉛直方向に0.5m間隔の補助測定点を設けた。

測定項目は、風向・風速、気温、湿度、飛来塩分量である。観測は、風速が5～12 m/sの範囲となる日を選び3回行った。塩分採取には、ガーゼ法を用い、採取器としては仲座ら（1990）が考案したものを用いている。鉛直方向の気象の観測は、8mのポールに測定架台を取り付け、それを上昇及び下降させることで行った。観測時間は、各測定点で上昇中に1分間ずつ行い、さらに下降時に1分間として、各観測点で合計2分間のデータを得た。ただし、気象は短時間に変化することも想定されたため、St.1の高さ1mの位置で、連続測定を行い、気象の時間的な変動を捉えた。

観測は、1996年1月～2月に行われたが、この期間は沖縄地方の真冬である。以下の結果の説明では、混乱を

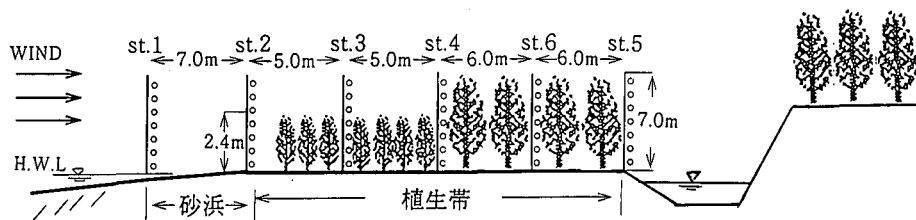


図-1 海岸の断面図

* 正 会 員 工 博 琉球大学助教授 工学部環境建設工学科
 ** 正 会 員 工 博 琉球大学教授 工学部環境建設工学科
 *** 学生会員 琉球大学大学院 工学研究科建設工学専攻
 **** 正 会 員 工 博 中央大学教授 総合政策学部

さけるため、主に1月26に行われた観測結果について述べる。

2.2 観測結果

図-2に、観測点 St.1-5 までの風速分布を示す。図中の破線は、対数則に基づく計算値を示す（実線については後で説明する）。植生帯外の領域における風速分布は、対数分布と良く一致している。植生が風速場に及ぼす影響は非線形的な作用を行うため、植生帯内の風速分布を得るには単純な場合でも数値計算が必要となる（例えば、仲座ら、1993）。

風速場の数値計算に対する植生の効果は、一般に抗力抵抗として組み込まれる。すなわち、次式の形を取る。

$$F_D = -C_D S(z) U^2(z) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 U は風速、 C_D は抵抗係数、 $S(z)$ は植生密度である。

植生密度は、樹木の種類や間隔によっても異なり、海岸固有の値であり、何らかの形で同定する必要がある。樹木の種類が同一の植生帯内の植生密度は類似した海岸であれば、ほぼ同じ値の植生密度を有するものと考えられ、海岸によってさほど大きく異ならないことが期待さ

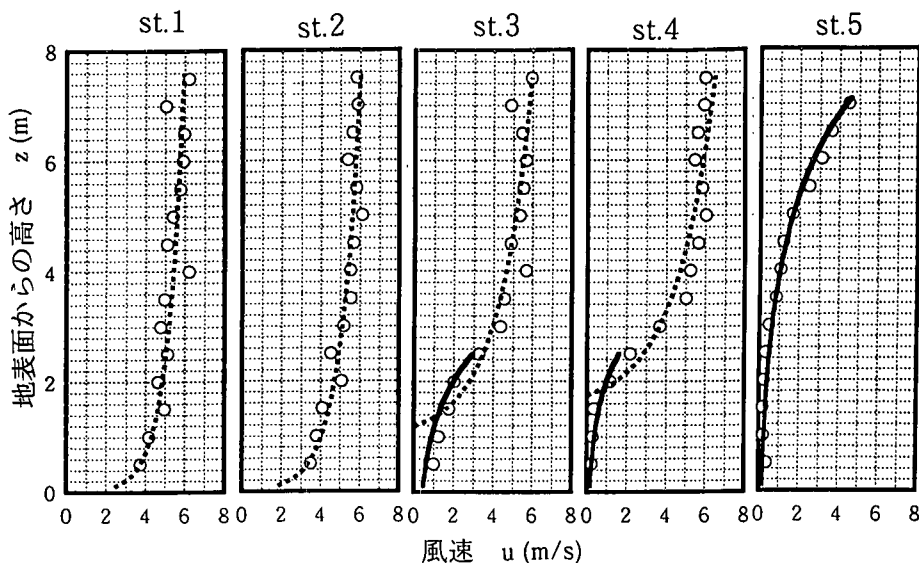


図-2 風速の分布

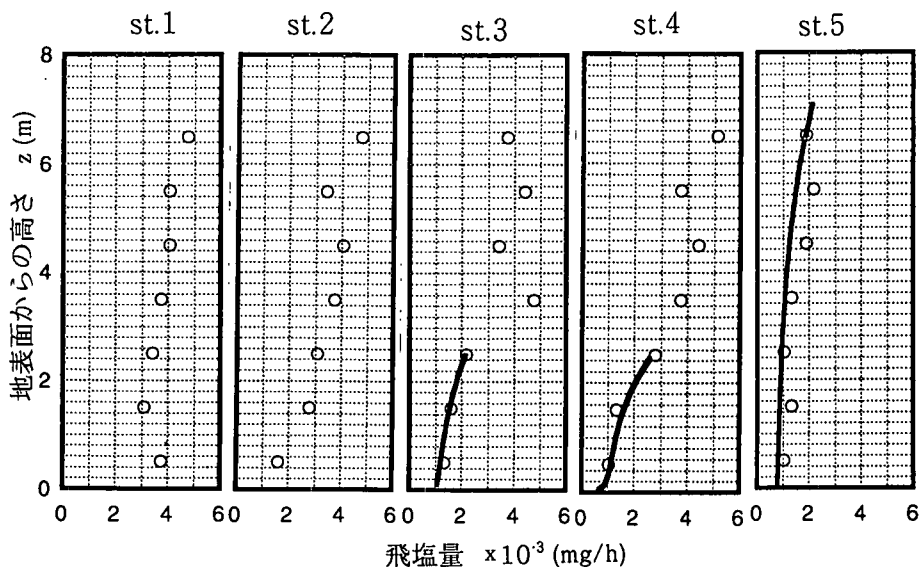


図-3 飛塩量の分布

れる。

本研究では、Navier-Stokes の方程式に植生の流体抵抗を考慮した後、各観測点で局所的に水平方向変化を無視し、Marquett 法を適用して植生密度を求めた(日野ら, 1986; 神田, 1992)。3 回の観測データから得られた各観測点における植生密度の平均値を用いて、植生内の風速分布を計算したのが、図-3 中の実線である。図示のとおり、観測地と計算値とは良く一致している。ここで用いた植生密度の平均値は、 $0.4 \text{ m}^2/\text{m}^3$ で、高さ方向に一様分布とした。

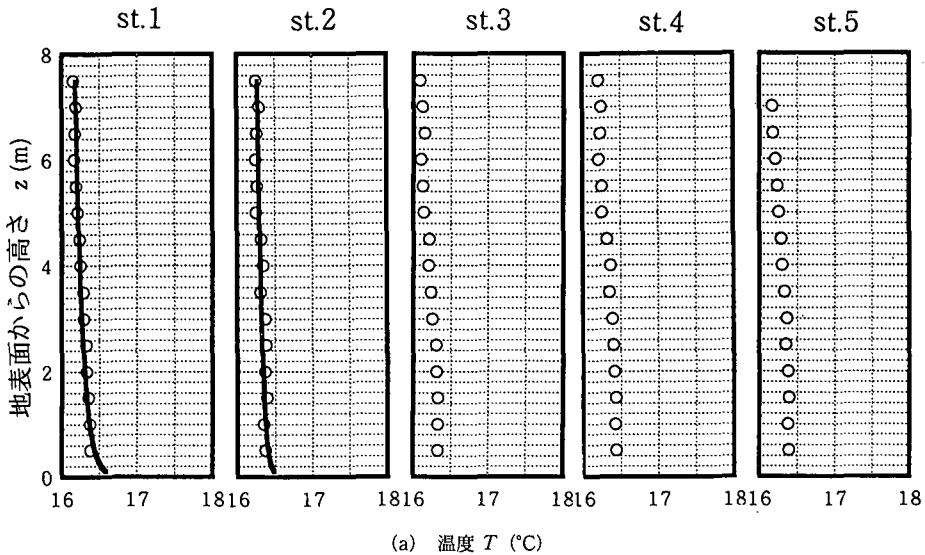
図-3 に、飛来塩分量の分布を示す。汀線近傍で鉛直方向にほぼ一定であった塩分量分布は、沈降速度を伴うた

め、汀線から内陸に行くにつれて地表面付近の塩分量がやせて行く傾向を示す(仲座ら, 1991 参照)。さらに、植生内では、植生によってかなり飛来塩分がカットされている(フィルター効果と呼ぶことにする)。植生のフィルター効果に関する物理モデルは未だ確立されていない。ここでは、仲座ら (1993) によって次元解析的に提案されたフィルター効果モデルを観測データから検証する。

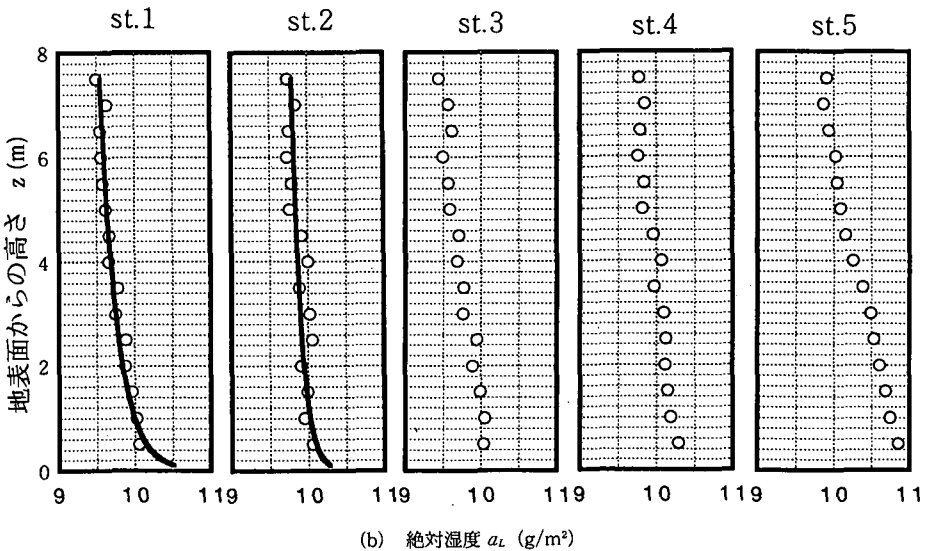
仲座らは、飛来塩分量の分布が Fick の拡散方程式で取り扱えるものとして、植生のフィルター効果を次式のようにモデル化している。

$$C(z)_{\text{out}} = \lambda S(z) C(z) U(z) \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $C(z)$ は塩分量であり、 λ は定数であるが、物



(a) 温度 T ($^{\circ}\text{C}$)



(b) 絶対湿度 a_L (g/m^3)

図-4 温度及び湿度分布

理的に考えて1.0以下の値をとるものと考えられる。このモデルに対し、上述の植生密度分布を用いて Marquitt 法により、 λ が0.3~0.4と求められた。平均的な値として、 $\lambda=0.35$ を用い、植生帯内の飛来塩分量の分布を計算したのが図中の実線である。植生キャノピー層内で、計算値は観測値と良好な一致を示しており、植生によるフィルター効果のモデルの妥当性が検証された。

図-4に、気温および絶対湿度(g/cm^3)の分布を示す。海から吹き込む風の気温は約16.2°Cであり、湿度は70.0%であった。図中の実線は対数分布を仮定した場合の計算値である。植生前面の気温や湿度の高さ方向の変化は、ほぼ対数分布で説明される。植生キャノピー層内の温度や湿度は、海岸線から内陸に行くにつれて僅かに上昇している。これは、植生からの蒸発散やそれによる潜熱の変化として捉えられる。

3. 飛沫の蒸発と沈降速度に関する理論的検討

以下では、高橋(1987)の雲の物理に関する理論展開を参考に、飛沫の蒸発と沈降速度などに関する基礎的な検討を行う。

例えば、台風時の波の砕波は高さ50mを越えて大量の飛沫を巻き上げる。この飛沫は、移流や拡散あるいは蒸発・凝集・衝突・分裂などの作用によって、発生時の粒径分布を変化させながら内陸方向に輸送されと考えられる。ここでは、海岸の気温や湿度などに大きく影響を与え、水文気象学的にも重要となる蒸発の効果に関して検討を加える。

高橋によれば、半径 r の粒径を有する水滴の蒸発速度は次式で与えられる。

$$r \frac{dr}{dt} = \frac{(S-A)}{L^2 M \rho_L A / K R T_\infty^2 f_a + \rho_L R T / e_s(T_\infty) D M f_\beta} \quad \left. \begin{array}{l} A=1+B/r-C/r^3 \\ \dots\dots\dots (3) \end{array} \right\}$$

ここで、 S は大気湿度、 T_∞ は気温、 L は潜熱、 K は空気熱伝導度、 ρ_L は水の密度、 R は水蒸気の気体定数、 $e_s(T_\infty)$ は飽和水蒸気圧、 D は水蒸気拡散係数、 f_a, f_β は水分子および空気分子の水滴への付着係数 α, β で決められる変数、 B および C は、水滴に含まれる溶質の効果を示すものである。以下の議論では、問題を簡単にするために、溶質の効果を入れないことにする。

ここで、気温10°C程度を想定すると、蒸発による粒径の時間変化は次式で与えられる(r_0 は初期粒径、湿度70.0%)。

$$r^2(t) - r_0^2 = -5.0 \times 10^{-7} \cdot t \quad \dots\dots\dots (4)$$

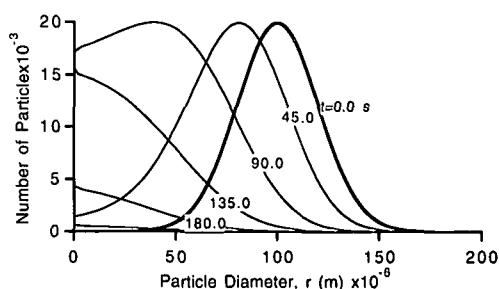
また、微細飛沫に関する沈降速度は、一般に次式の形となる。

$$V \propto (\rho_s - \rho_a) / \rho_a g r^2 / \nu \quad \dots\dots\dots (5)$$

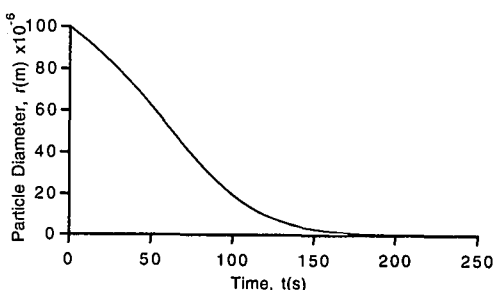
ここで、 ρ_s は粒子の比重、 ρ_a は大気の比重、 ν は大気の動粘性係数である。上式から、飛沫の沈降速度は、蒸発によって時間と共に直線的に減衰することが分かる。

次に、粒径分布を仮定した場合の検討を行う。砕波等でのような粒径分布の飛沫が巻き上げられるかについては、これまで十分な研究が見あたらない。ここでは、中心粒径を100 μm とするガウス分布で与えることとする。

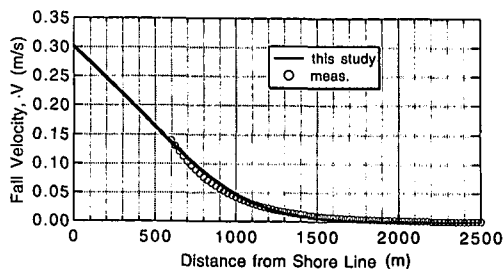
図-5に、粒径分布の時間変化、平均粒径の時間変化、沈降速度の時間変化を示す。水滴の蒸発速度は、半径に反比例するため、粒径の小さい所の分布の時間変化が激しく、分布形は時間と共に大きく変化する。その結果、平均粒径も単一粒径を仮定した式(4)の場合と異なる時間変化を示す。同図(c)は、風速を5.0m/sとして、時間を距離に変換した場合の飛沫の沈降速度の変化である。図中の○印は仲座ら(1993)が現地観測データを整



(a) 粒径の変化



(b) 平均粒径の時間変化



(c) 平均沈降速度の飛沫発生源からの距離による変化

図-5 粒径分布を考慮した水滴の蒸発に関する計算例

理して得た経験式(式(6))を基にプロットしたものである。

$$V(x)=0.14 \cdot \exp\{0.003 \cdot (x-600)\} \cdots \cdots (6)$$

観測値が砕波点から500-600 m程度離れた箇所でのものであることを考えて(結果的であるけれども)、観測値の初期値は600 mの位置で与えている。仲座らは現地観測データを基に、沈降速度が海岸からの距離によって指数曲線的に減衰するとする式の提案を行っているが、その特性は、ここで議論した海水飛沫の蒸発などによる沈降速度の変化と傾向の軌を一にする。

4. おわりに

植生帯を有する海岸において、気象及び海水飛沫の輸送量の観測を行い、植生が風速及び飛来塩分量の分布に及ぼす影響の検討を行った。また現地データを用いて、これまで提案されている数値モデルの検証を行った。さらに、海岸近傍の大粒径飛沫の内陸輸送と飛沫の水蒸気蒸発などに関する理論的考察を行った。

ここでの理論的な議論は、水滴の移流や拡散及び溶質濃度を考慮せず、また粒径分布に関する大胆な仮定を設けてのものである。そのため、ここでの議論は現象理解

の一助となっても、そのまま現地データを説明することには用い得ないものである。今後は、大気の湿度や気温変化とリンクさせた、より完全な数値モデルの開発と解析を行う予定である。

参 考 文 献

- 神田 学 (1992): 大気-植生-土壌および水面の相互作用を考慮した水文気象に関する研究, 東京工業大学博士論文, p. 196.
- 高橋 劭 (1987): 雲の物理, 東京堂出版, p. 172.
- 仲座米三・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.
- 仲座米三・津嘉山正光・照屋雅彦 (1991): 大気環境アメニティの一要素としての飛塩量特性, 土木学会, 海岸工学論文集, pp. 896-900.
- 仲座米三・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 pp. 1036-1040.
- 日野幹雄・灘岡和夫・佐藤昭人 (1986): Marqurt 法による不飽和土壌パラメーターの同定, 第30回水理講演会論文集, pp. 379-384.
- 巻田将聡・神田 学・竹内邦良 (1994): 飛沫水粒子の蒸発メカニズムに関する基礎的研究, 土木学会第49回年次講演会, pp. 36-37.