

有明海沿岸域における飛来塩分の拡散機構と その数値モデルに関する研究

山田文彦*・滝川 清**・外村隆臣***

1. はじめに

飛来塩分とは、主として沿岸域で風と波の作用によって生成された飛沫や海塩粒子が、移流と乱流拡散によって陸上へ輸送される現象である。この飛来塩分は塩害の直接的な要因であり、有明海沿岸域においても、1991年9月、相次いで上陸した台風17号・19号により、広域的に塩害が発生し、多数の送電線事故や水稻の収穫量が著しく減少するなどの被害を被っている。このため、飛来塩分の発生・拡散機構を十分に解明し、塩害の防止と軽減を行うことは、高質な海岸空間の創造に必要な不可欠な研究課題となっている。

さらに近年、熊本新港建設に代表されるような人為的インパクトが増加し、将来的な有明海域の環境悪化も懸念されていることから、飛来塩分のメカニズムを解明することは、有明海域における環境変化を予測するための重要な基礎資料のひとつとなるものと考えられる。

飛来塩分の拡散機構について、宇多ら(1992)、仲座ら(1993)は数値解析により陸域における海塩粒子の輸送プロセスを調べている。村上ら(1995)は現地観測により、植栽による飛来塩分量の低減効果を調べている。松永ら(1996)は風洞付造波水槽を用いて、海域から陸域にいたる飛沫濃度の定量的な評価方法について調べている。滝川ら(1996)も現地観測に基づき、飛来塩分が地形・波浪・気象などの影響を受ける地域性の強い現象であることを指摘している。しかしながら、今までのところ、有明海沿岸域を対象とした研究例は非常に少ない。

本研究では、有明海に面した熊本県沿岸部における飛来塩分の拡散機構の解明を目的として、現地観測と数値解析を行った。現地観測においては、飛来塩分の空間分布特性や風向・風速などの気象条件の影響を3次的に検討するとともに、高域での飛来塩分の分布状況についても調査を行った。また、数値解析においては、海塩粒子の沈降速度を考慮し、堤防背後での飛来塩分の沈降現象を再現するとともに、降雨時における海塩粒子と雨滴

との付着に伴う沈降および濃度減衰(希釈効果)のモデル化についても検討を行った。

2. 現地観測の概要

現地観測は、平成5年より10数回、飛来塩分量の観測を実施している熊本県玉名郡横島千拓地で行った(図-1)。ここは、平成3年の台風17・19号により、熊本県内で最も水稻の被害が大きかった場所である。今回は、飛来塩分の空間分布の3次元特性や降雨による希釈効果などを調べるために、観測線を2本設置した。観測線間の距離は420 mである。また、第2観測線では、堤防前面に消波ブロックがほぼ堤防の高さまで積まれている。

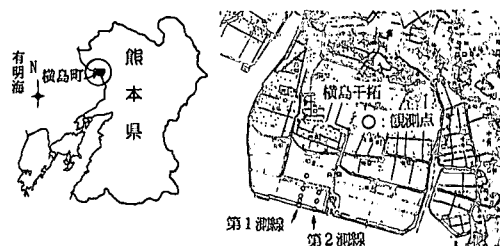


図-1 観測場所

(1) 観測方法

観測方法は、滝川ら(1996)と同様に、ガーゼ(10 cm×20 cm)を網籠に巻き付けた飛来塩分捕捉器(図-2(a))を、高さ6 mの鋼製ポールに1 m間隔で取り付け、このポールを、堤防から800 mの間に第1観測線に5箇所、第2観測線には3箇所設置した。また、各観測点には簡易雨量計(牛山・松山, 1994, 図-2(b))を設置し、風向・風速も現地において実測した(Davis社, ウェザーモニターII)。さらに、高域での飛来塩分量の分布状況を調べるために、観測用アドバルーン(直径2 m)を用いて上空50 mまでの観測も行った。アドバルーンは堤防から100 mの地点に設置し、飛来塩分捕捉器は2 m間隔で取り付けた(図-3)。分析方法は、観測後、ガーゼを蒸留水に浸し攪拌した後、この水溶液中のNa⁺濃度をコンパクトナトリウムイオンメーター(堀場, C-122)を用いて測定

* 正会員 工修 熊本大学助手 環境システム工学科
 ** 正会員 工博 熊本大学教授 環境システム工学科
 *** 正会員 熊本大学技官 環境システム工学科

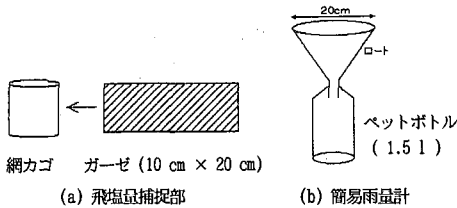


図-2 観測機器

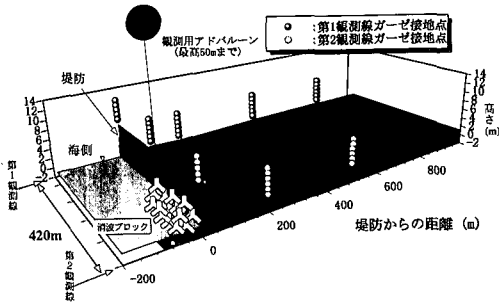


図-3 観測装置の設置状況

した。

(2) 観測日時および気象状況

観測時期は、水稻が稲穂をつけている時期で、強風下という条件を考慮して、8月中旬から10月上旬にかけての台風接近時を選んで現地観測を行い、比較のため晴天時や弱風時の観測も数回行う予定であった。しかし、今回は熊本県沿岸に接近した台風がほとんどなく、結果的には弱風時での観測のみとなった。観測日時および気象データを表-1に示す。

表-1 観測日時および気象データ

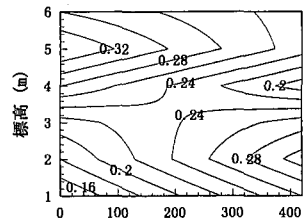
観測名	観測日時 (観測時間)	降雨量 (mm)	平均風速 (m/s)	最大風速・風向 (m/s)
第1回	H.8.8.13-14 (29 h)	80	3.65	9.0 ENE
第2回	H.8.8.15-22 (163 h)	3	1.0	4.0 NE
第3回	H.8.8.22 (6 h)	0	1.2	3.0 SSE
第4回	H.8.8.28 (8 h)	65	0.8	3.0 SSE
第5回	H.8.9.5 (8 h)	0	0.8	2.0 WNW
第6回	H.8.9.12 (6 h)	0	1.0	3.0 ENE
第7回	H.8.10.2 (6 h)	0	0.6	2.0 SW

(3) 観測結果

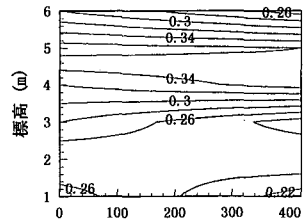
a) 飛来塩分の空間分布の3次元特性

ここでは、第5回と第7回観測について比較を行う。両観測においては、ともに降雨はなく、平均風速もほぼ等しいが、風向が異なる。

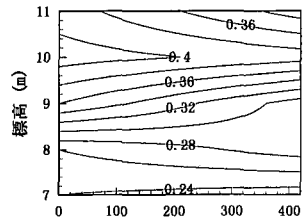
観測で得られたNa⁺濃度の空間分布を図-4 (第5回



c) 堤防より500m地点

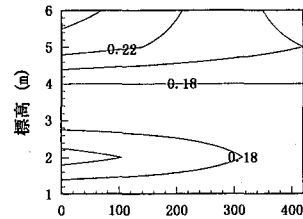


b) 堤防より200m地点

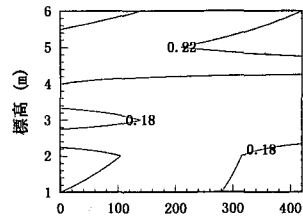


a) 堤防上

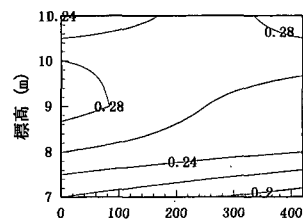
図-4 Na⁺濃度の観測結果 (第5回観測)



c) 堤防より500m地点



b) 堤防より200m地点



a) 堤防上

図-5 Na⁺濃度の観測結果 (第7回観測)

観測), 図-5 (第7回観測) に示す。各図は第1, 第2測線で観測した Na^+ 濃度の鉛直分布を, 堤防に平行な面で線形補間した結果であり, それぞれ, 堤防上, 堤防から 200 m 地点, 堤防から 500 m 地点での結果を示している。また, 図中の数値はガーゼ 200 cm^2 中に含まれる Na^+ 濃度 (ppm) を表す。

第5回観測では平均的に西側から風が吹いており, 第1測線が風上側である。堤防から離れても 200 m 地点までは著しい濃度減衰はあまり見られない。500 m 地点までくると減衰傾向が現れているが, この場合は, 風上側の第1測線の方が濃度の減衰は強いようである。

一方, 第7回観測では, 平均的に南より風が吹いており, 堤防から離れるに従って, 第5回観測よりも濃度の減衰が著しく, 200 m 地点と 500 m 地点の濃度分布は, ほぼ似たような傾向となっている。

これらの結果より, 弱風時の飛来塩分の空間分布は, 風向により 3 次元的に変化する事が明らかとなった。

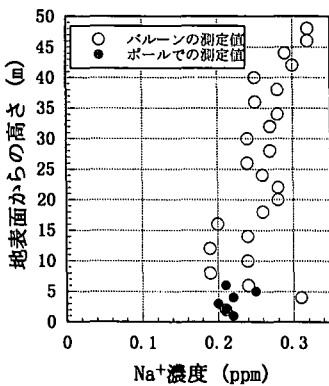
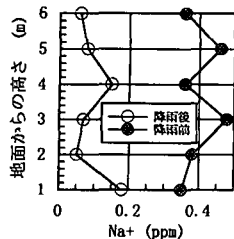
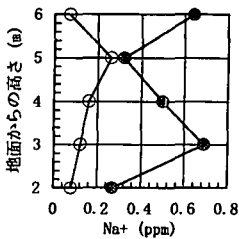


図-6 Na^+ 濃度の鉛直分布 (堤防より 100 m 地点)

表-2 簡易雨量計による降雨量 (第4回観測)

堤防からの 距離 (m)	降 雨 量 (ml)	
	第1測線	第2測線
200	6.9	219.0
500	196.0	10.2



a) 堤防より 200 m 地点 b) 堤防より 500 m 地点

図-7 降雨前後での Na^+ 濃度の鉛直分布の比較

b) 高域での飛来塩分の分布状況

今回は数回にわたり, 観測用アドバルーンを用いて高域における飛来塩分量を捕捉した。図-6 に第7回観測における Na^+ 濃度の鉛直分布を示す。図中, 黒丸は鋼製ポールによる観測結果を示し, 白丸がアドバルーンによる観測結果である。図より最大風速が 2 m/s 程度であればアドバルーンを用いても, 鋼製ポールとほぼ同様の結果を得られる事がわかった。また, Na^+ 濃度は地上から 50 m 上空までわずかながら増加する傾向にあり, この観測時においては, Na^+ 濃度のピーク値は 50 m よりもさらに上空に存在すると考えられる。さらに, このピーク値は前節までに述べた現地特有の 3 次元的要因により, 観測時の風向・風速等の影響でかなり変化することが推測される。高域での Na^+ 濃度の鉛直分布は, 次章で述べる数値シミュレーションにも今後取り込んで行く必要があるため, 継続して高域での観測を行う必要がある。

c) 降雨による飛来塩分の希釈効果

第4回観測では, 観測後のカーゼ回収中に激しいにもかかわらずに遭遇した (降雨時間, 約 20 分)。そのため, 降雨前後での飛来塩分の付着量の差を比較することができた。表-2 に各測点での簡易雨量計の降雨量を示す。図-7 は, 堤防から同一距離の測点での Na^+ の鉛直分布を示す。それぞれ黒丸が降雨前, 白丸が降雨後の実測値である。両図より, ガーゼに付着した飛来塩分量は降雨の後ではかなり減少していることがわかる。これは, 海塩粒子と雨滴との付着に伴う希釈効果を表しているものと考えられる。

3. 飛来塩分の数値シミュレーション

(1) 海塩粒子の沈降速度のモデル化

海塩粒子はその自重により, 堤防背後から徐々に沈降し, さらに, 海塩粒子中の水蒸気の蒸発・凝結をとまないうちながら内陸部へと輸送される。この一連の過程を, 海塩粒子の粒径が堤防から離れるに従って指数的に減少するものと考え, 粒径に応じた沈降速度を与える。

まず, 堤防上での海塩粒子の粒径を d_0 とすると, d_0 は風速 u の関数と考えられる。この粒径の距離減衰は, 仲座ら (1993) にならってモデル化した。さらに, 降雨が観測された場合, 海塩粒子が雨滴に付着し, 取り込まれる過程をその粒径 d が大きくなるものとして評価する (式 (1))。なお, 雨滴の粒径 d_{rain} は, 単位降雨強度における粒径 d_r が降雨強度に比例して指数的に大きくなり, 空間的には一様に分布するものと仮定した。 (式 (2))

$$d = d_0(u) \exp(-B \cdot x) + d_{\text{rain}} \quad \text{..... (1)}$$

$$d_{\text{rain}} = d_r \exp(C \cdot r) \quad \text{..... (2)}$$

ここで, x は堤防からの距離, r は降雨強度, B, C は定数であり, 今回は $-0.012, 0.020$ とした。

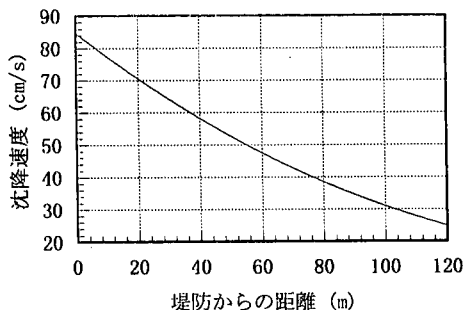


図-8 沈降速度の空間分布

このようにして求めた粒径 d から, Best の経験式 (3) (Best, 1950) により沈降速度を求める。

$$W_0 = A \exp bz \{1 - \exp[-(d/a)^n]\} \quad (3)$$

ここに,

$$0.3 \text{ mm} < d < 6.0 \text{ mm}$$

$$A = 958, b = 0.0354, a = 1.770, n = 1.147$$

$$0.05 \text{ mm} < d < 0.3 \text{ mm}$$

$$A = 188, b = 0.0256, a = 0.304, n = 1.819$$

図-8 に, 沈降速度の空間分布を示す。この図は, $d_0 = 0.1 \text{ mm}$, 降雨なしの場合の結果である。

(2) 降雨による飛来塩分の希釈効果のモデル化

降雨の前後での観測結果より明らかとなった, 飛来塩分に対する降雨の希釈効果を, 塩分濃度の逸散項 Q_r として取り扱い, 降雨強度 (雨滴の沈降速度) と関連付けて評価し, 拡散方程式中に組み込む (式 (4))。

$$Q_r = -\alpha \left(\frac{\partial W_r \cdot c}{\partial y} \right) \quad (4)$$

ここで, W_r は雨滴の沈降速度, c は塩分濃度であり, Best の式 (5) で評価した。また, α は定数であり, 今回は 0.005 としている。

$$W_r = A \exp bz \{1 - \exp[-(d_{\text{rain}}/a)^n]\} \quad (5)$$

(3) 基礎式

現象を 2 次元的に考え, 風速場の密度は一定であると仮定すると, 基礎式は非圧縮性流体を対象とした連続式 (6) と N-S 方程式 (7), (8) で表される。飛来塩分は, 海塩粒子の沈降速度が大きい堤防背後域以外ではミスト状であると考え, Fick の拡散方程式 (9) で表せるものと仮定した。また, 海塩粒子の沈降速度, 降雨による希釈効果については前述のモデルを用いる。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + F_x + F_{ix} \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + F_y + F_{iy} \quad (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial uc}{\partial x} + \frac{\partial vc}{\partial y} \\ = \frac{\partial W_0 \cdot c}{\partial y} + k \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) + Q_r + C_{\text{cut}} \quad (9) \end{aligned}$$

$$F_{ix} = C_D \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon} |u| u \quad (10)$$

$$F_{iy} = C_D \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon} |v| v \quad (11)$$

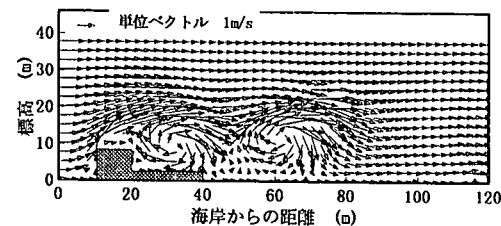
ここで, (v, u) は (x, y) 方向の速度成分, ρ は密度, p は圧力, ν は動粘性係数, (F_x, F_y) は (x, y) 方向の物体力成分, (F_{ix}, F_{iy}) は (x, y) 方向の透過層 (防風林などの透過性フィルター) 内での流体抵抗, W_0 は海塩粒子の沈降速度, Q_r は降雨による希釈効果, C_D は抵抗係数, ϵ は空隙率, c は塩分濃度, k は拡散係数, C_{cut} は透過層内での濃度の減衰項である。計算手法の詳細は滝川ら (1996) に詳しい。

(4) 計算結果

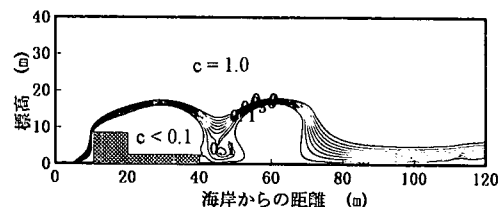
横島干拓地を対象とした計算結果を図-9 に示す。(a) は定常状態での風速分布を示す。(b)~(d) は飛来塩分の定常状態での濃度分布を等高線で示したものであり, 左側境界より単位濃度を流入させた結果である。また, これらの図はそれぞれ, 沈降速度を考慮しない場合 (b), 沈降速度のみを考慮した場合 (c), 沈降速度と降雨による希釈効果を考慮した場合 (d) について, その結果を示している。なお, 図-9 において, ハッチ部分は現地の堤防を表している。

解析領域は横 125 m, 縦 40 m, 計算格子幅はともに 50 cm であり, 計算時間間隔は 0.05 秒である。なお, 今回は透過層の有無については検討を行っていないので, $(F_{ix}, F_{iy}), C_D, C_{\text{cut}}$ は考慮していない。

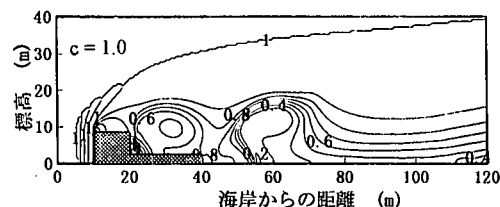
(a) 図より定常状態の風速分布においては, 堤防背後に 2 つの大きな渦が存在していることがわかる。(b) 図を見ると, 沈降速度 W_0 を考慮しない場合は, 塩分濃度は風速分布に従って移流拡散され, 堤防背後では塩分濃度が非常に低くなっており, 従来の観測結果とは異なっている。ところが, 沈降速度を考慮すると, (c) 図のように堤防背後域にも濃度の高い部分が現れ, 観測結果 (例えば滝川ら, 1996) と定性的に等しい傾向を再現できることがわかる。さらに, 塩分濃度の逸散項を考慮することで, 降雨による飛来塩分の希釈効果がある程度再現できることがわかった ((d) 図)。



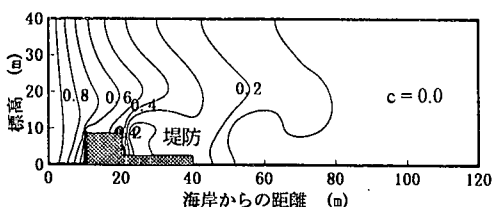
a) 風速分布



b) 海塩粒子の沈降速度を考慮しない場合 (濃度分布)



c) 海塩粒子の沈降速度のみを考慮した場合 (濃度分布)



d) 海塩粒子の沈降速度と降雨の希釈効果を考慮した場合 (濃度分布)

図-9 計算結果

明らかとなった。特に、弱風時の塩分濃度の距離減衰特性は、風向に強く依存している。

2) 鋼製ボールの観測結果と比較し、最大風速が 2.0 m/s 程度であればアドバルーンを用いても同様の観測精度を得られる事、さらに上空 50 m においても、飛来塩分の鉛直分布は上昇傾向にあることがわかった。

3) 数値解析においては、海塩粒子の沈降速度を考慮し、降雨による塩分濃度の希釈効果をモデル化することで、観測結果に近い計算結果を得ることができた。

今後は現地観測により、流入側での飛来塩分濃度の鉛直分布および流入速度を厳密に考慮するとともに、乱流モデルの組み込み・3次元解析を行い、より自然界に順応したモデル化などを検討していく予定である。

謝辞：現地観測にあたっては、農林省家畜改良センター熊本牧場、横島町役場の方々に多大なるご協力を頂いている。ここに、厚く謝意を表します。また、本研究は文部省科学研究費補助金基盤研究(B)(2)(代表者：滝川 清)の一部を使用した。併せて深大なる感謝の意を表します。

参考文献

- 牛山素行, 松山 洋 (1994): 簡易雨量計の観測精度について, 水文・水資源学会研究発表要旨集, pp. 46-47.
- 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, (2), pp. 1051-1055.
- 滝川 清, 山田文彦, 外村隆臣, 松本健作, 坂本鶴治 (1996): 内海沿岸域における飛来塩分特性とその対策について, 海岸工学論文集, 第 43 巻, (2), pp. 1176-1180.
- 仲座栄三, 津嘉山正光, 山路功祐, 日野幹雄 (1993): 飛塩 (海塩粒子) の数値流体力学的解析, 海岸工学論文集, 第 40 巻, (2), pp. 1036-1040.
- 松永信博, 植田 操, 鶴崎賢一, 岸岡賢祐 (1996): 強風によって沖合い海域から浅海域へ輸送されるしぶき量の低減率について, 海岸工学論文集, 第 43 巻, (2), pp. 1186-1190.
- 村上和男, 加藤一正, 清水勝義, 尾崎 靖, 西守男雄 (1995): 植栽による飛沫 (海塩粒子) の低減に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第 42 巻, (2), pp. 1036-1040.
- Best A. C. (1950): Empirical formula for the terminal velocity of water drops falling through the atmosphere, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., Vol. 76, pp. 302-311.

5. 主要な結論

本研究で得られた結論を以下に要約する。

- 1) 飛来塩分の現地観測より、弱風時における空間分布特性は、風速・風向により 3 次元的に変化することが