

飛来塩分特性の数値モデルと防風ネットを用いた その抑制効果に関する研究

滝川 清*・山田文彦**・外村隆臣***・荒木宣博****

1. はじめに

沿岸域における潮風害（塩害）の直接的な要因は海から輸送される飛来塩分である。この飛来塩分は大別すると、粒径が大きい海水滴（粒径 4 mm 以下）と粒径の小さな海塩粒子（粒径 3~18 μm 程度）により構成され、それぞれの発生・拡散機構は地形や気象などの影響を受けて複雑に変化する。このため、飛来塩分のメカニズムには依然として不明な点が多く残されている（例えば、宇多ら, 1992；村上ら, 1995；松永ら, 1996）。本研究では、飛来塩分特性と透過性構造物を用いたその抑制効果を解明するために現地観測と数値解析を行った。熊本県沿岸域で現地観測を実施し、飛来塩分の空間分布特性などを調べるとともに、沿岸部に防風ネットを設置し、その抑制効果を定量的に調査した。また、数値解析では海水滴の沈降速度などを考慮した数値モデルを作成し、観測結果との比較と、精度検証を行った。さらに、Mass-consistent モデル (Sharman, 1978) により熊本県沿岸域での 3 次元的な風速場の再現を試みた。

2. 現地観測の概要

現地観測は、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玉名郡横島干拓地（図-1）で実施した。同地区では平成 5 年から観測を行っているが、今回は地形的な要因に起因した飛来塩分特性を詳しく調べるために、堤防背後 100 m 以内の飛来塩分量の空間分布について測定した。さらに、防風ネットによる抑制効果についても実測した。

2.1 観測方法および分析方法

観測方法は、滝川ら（1996）と同様に、網竈にガーゼを巻き付けた飛来塩分捕捉器を、高さ 6 m の鋼製ポールに 1 m 間隔で取り付け、これを堤防から 100 m 内に 5 箇所設置した（図-2）。さらに、上空での飛来塩分の分布状況を調べるために、観測用アドバルーンを用いて、高さ 50 m までの観測も行った。アドバルーンは堤防から

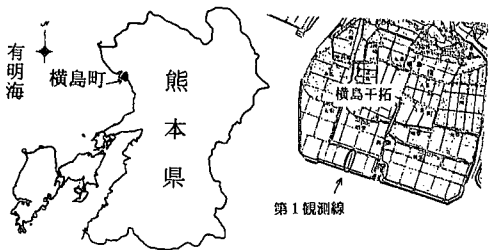


図-1 観測場所

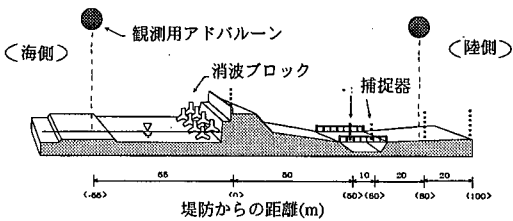


図-2 観測器設置状況

海側へ 55 m, 陸側へ 80 m 地点に設置した。また、風向風速計（牧野応用測器研究所, VR 036, AG 750）を堤防上に設置し、現地での風の状況も同時に計測している。分析方法は、観測後、ガーゼを蒸留水に浸し十分に攪拌した後、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）を用いて測定した。

2.2 観測時期および気象状況

観測時期は、台風接近時を考慮して、8 月~10 月にかけて 7 回の観測を行った。表-1 に観測日時および観測期間中の気象データの一部を示す。図-3 は、第 7 回観測時に堤防上で観測された風向風速の経時変化を示している。この観測時においては平均的な風向は西風であるが、時間的にかなり変動していることがわかる。

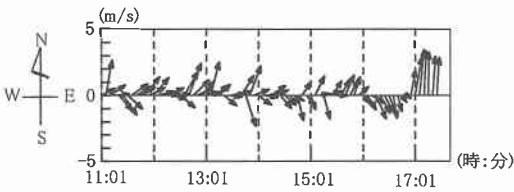
2.3 観測結果

今回の観測では、現地付近のみかん農園で実際に使用されている網目 6 mm の農作物用防風ネットを用いて、飛来塩分の抑制効果についての実測を行った。防風ネットは堤防から 80 m 付近に設置し、第 1 測線に隣接させた（図-4）。防風ネットの寸法は高さ 4 m, 横幅 6 m, 奥

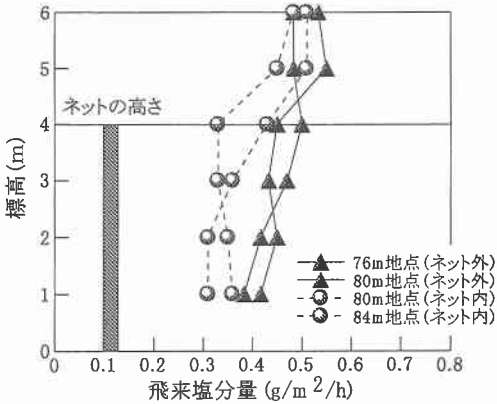
* 正 会 員 工 博 熊本大学教授 工学部環境システム工学科
** 正 会 員 工 修 熊本大学助手 工学部環境システム工学科
*** 正 会 員 熊本大学技官 工学部環境システム工学科
**** 学生会員 熊本大学大学院 自然科学研究科

表一 観測日時および気象データ

観測名	観測日時 (観測時間)	平均風速, 風向 (m/s)	最大風速 (m/s)
第5回	'97.9.22 (8h)	2.43, S	3.96
第7回	'97.10.17 (6h)	2.92, W	3.91



図一三 風向風速の経時変化 (第7回観測時)

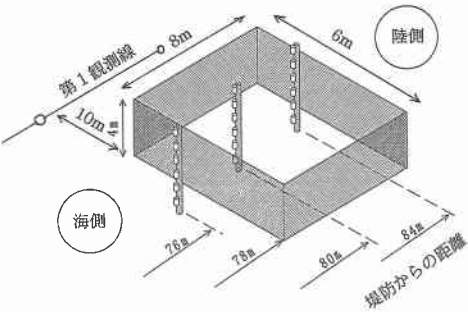


図一五 飛来塩分量の鉛直分布の比較
(防風ネット内外, 観測結果)

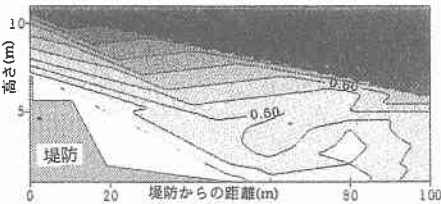
行き 8 m である。

図一五に防風ネット内外での飛来塩分量の鉛直分布を示す。防風ネットの外側と比べ、内側の飛来塩分量は減少している。そこで、防風ネット内外での飛来塩分量の断面平均値を計算し比較すると、このネットを用い、弱風時 (2~3 m/s 程度) において 20~25% 程度の飛来塩分量を抑制できることがわかった。

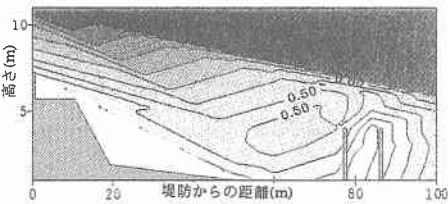
図一六に防風ネットを設置しない場合 ((a) 図) と設置した場合 ((b) 図) の飛来塩分量の空間分布図を示す。それぞれの図は、観測結果を線形補間して描いたものである。(a) 図より、飛来塩分は空間的に一様に分布していないことが判る。また、(b) 図より、防風ネットで囲まれた部分は飛来塩分量が少ないことが判る。



図一四 防風ネット設置状況



(a) 防風ネットを設置しない場合 (観測結果)



(b) 防風ネットを設置した場合 (観測結果)

図一六 飛来塩分量の空間分布

今回の観測では防風ネットによる抑制効果の検証を行ったが、防風林や防風垣などの植栽の場合は透過率が更に小さくなるため、今回の観測以上の飛来塩分抑制効果が得られるものと考えられる。

3. 数値解析

3.1 基礎式

現象を2次元的と考え、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 (1) と N-S 方程式 (2), (3) で表される。飛来塩分は、海水滴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 (4) で表されるものと仮定した。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + F_x \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + F_y \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial uc}{\partial x} + \frac{\partial vc}{\partial y} = \frac{\partial W_0 \cdot c}{\partial y} + k \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) + Q \quad \cdots \cdots (4)$$

ここで、 (u, v) 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、 c は塩分濃度、 k は拡散係数、 Q は降雨による塩分濃度の逸散項 (山田ら, 1997)、 W_0 は海塩粒子の沈降速度である。今回は ν, k をそれぞれ $0.145 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、 $0.5 \text{ m}^2/\text{s}$ と与えた。

海水滴はその自重により、堤防背後から徐々に沈降し、更に、海水滴中の水蒸気の蒸発・凝結を伴いながら内陸部へと輸送される。この一連の過程を、海水滴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 W_0 を Best (1950) の経験式により算定した。さらに、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、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。

$$W_0 = A \exp bz [1 - \exp\{- (d/a)^n\}] \quad \cdots \cdots (5)$$

$$d = d_0(u) \exp(-B \cdot x) \quad \cdots \cdots (6)$$

$$\begin{cases} 0.3 \text{ mm} < d < 6.0 \text{ mm} \\ A = 958, b = 0.0354, a = 1.770, n = 1.147 \\ 0.05 \text{ mm} < d < 0.3 \text{ mm} \\ A = 188, b = 0.256, a = 0.304, n = 1.819 \end{cases}$$

ここで、 x は堤防からの距離、 B は距離減衰を示す定数であり、今回は -0.012 とした。

離散化は SMAC 法を用い、N-S 方程式および拡散方程式中の移流項には 3 次精度の風上差分法を適用した。また今回は、乱流モデルは組み込まず、直接シミュレーションを行った。拡散項にはクランク・ニコルソン法を用い、圧力および濃度の計算には不完全コレスキー分解付共役勾配法を用いた。計算手順は流入流出速度を指数分布で与え、ほぼ定常状態になるまで風速場の計算を行い、その結果を用いて拡散場の計算を行った。

3.2 計算結果

横島干拓地を対象とした計算結果を図-7 に示す。解析領域は横 155 m、縦 50 m とし、計算格子は縦横共に 50 cm である。この図は定常状態での風速分布を示し、堤防

上での風速が第 5 回観測時の平均風速 2.42 m/s になるように流入風速を与えた結果である。

図-7 の風速場を用い、流入濃度および海水滴の沈降速度を変化させて、飛来塩分の濃度分布を拡散計算によって求めた。飛来塩分の流入濃度は、堤防から海側の 55 m 地点において鉛直方向に指数的に分布させた。この鉛直分布に関しては、村上ら (1995) の観測結果を参考にして、海表面で最大値を有するを指数曲線式、 $c(y) = \alpha \exp(\beta \cdot y)$ で与えた。 $c(y)$ は鉛直 (y 軸) 方向の飛塩濃度、 α は比例定数、 β は飛来塩分量の鉛直方向の減少率を与える係数である。まず、 β を 0 (流入境界での飛来塩分量分布が高さ方向に一樣) とし、飛来塩分濃度 c を流入させた。流入境界条件、海塩粒子の沈降速度条件を表-2 の通りにケース分けを行い、それぞれについて拡散計算を行った。図-8 に拡散場の計算結果を示す。図中の数値は飛来塩分量 ($\text{g/m}^2/\text{h}$) を表す。

図-8 の (a) ~ (d) の結果から分かるように、堤防の影響で発生した渦が存在する地点では、それぞれのケースについても飛来塩分量が少ないことが判る。また、(a) 図で堤防直前で飛来塩分量が少なくなっているのは、海塩粒子の沈降が堤防地点から始まるものとして計算したためであるが、実現象においてこのように減少することは有り得ないため、他のケースでは海塩粒子の沈降開始点を -55 m とし計算を行った。

図-9 に、堤防背後 0 m、50 m、60 m、80 m 地点で得られた現地観測値とケース 1~4 の計算値との比較を示す。

計算条件で若干の相違は見られるものの、風速場が乱れる堤防背後 50~60 m 地点付近では、特に観測値と計

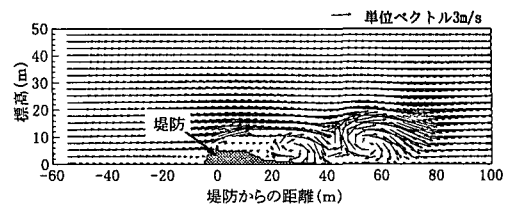


図-7 風速分布 (計算結果)

表-2 流入境界条件および沈降速度条件

	流入境界条件		海塩粒子の沈降速度条件		
	比例定数 α	減衰係数 β	発生時粒径 d_0	距離減衰係数 B	沈降開始点 x
ケース 1	3.61×10^7	0	0.06 mm	-0.01	0 m 地点
ケース 2	3.61×10^7	0	0.06 mm	-0.01	-55 m 地点
ケース 3	3.61×10^7	0	0.06 mm	-0.05	-55 m 地点
ケース 4	4.34×10^7	-0.01	0.06 mm	-0.05	-55 m 地点

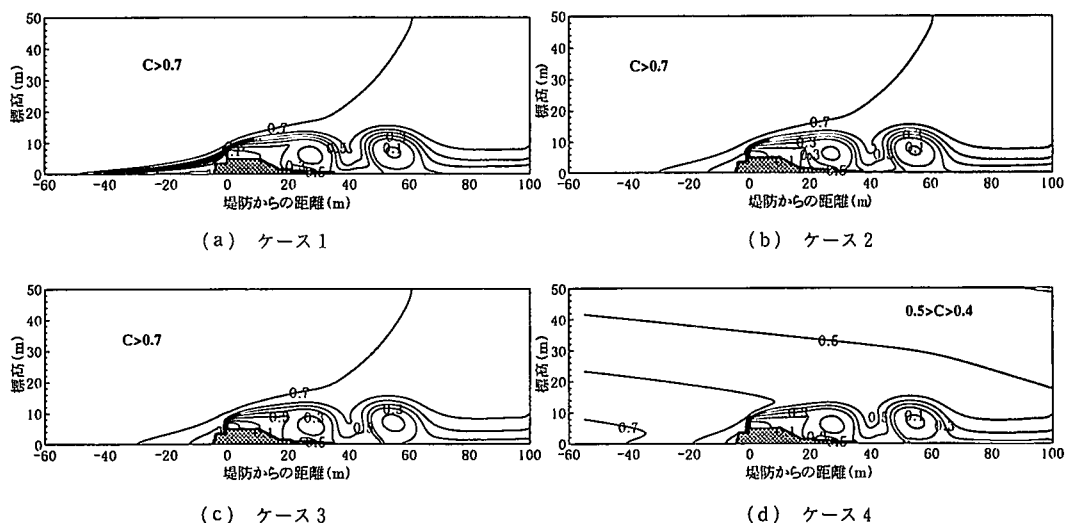
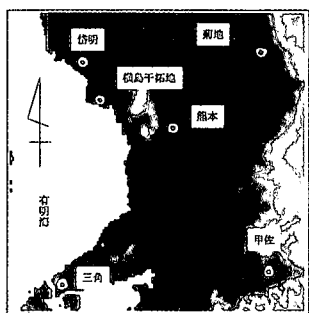
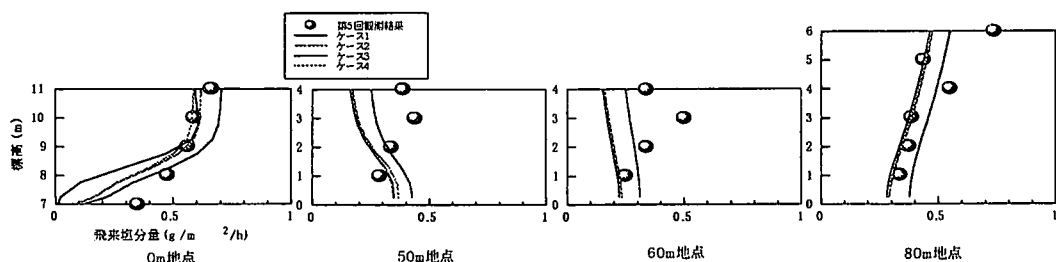


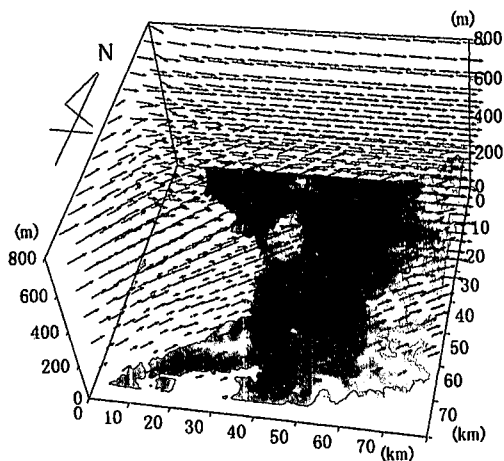
図-8 濃度分布



算値との差が大きい。これより堤防背後域では3次元的な流体運動の重要性が伺われる。

そこで、有明海沿岸域での3次元的な風速場を再現するために、Sharman (1978) が提案した Mass-consistent モデルによる解析を行った。

このモデルは、地上の気象観測所の風速データを用い、質量保存則を満足する3次元風速場を変分法により算定するものである。気象分野での適用例は多いが、海岸工



学分野でも後藤ら (1993) が海上風の推算に用いている。

今回は対象地である横島干拓地とともに、熊本、岱明、菊池、甲佐、三角の5箇所の気象観測所の風向風速デー

タも用いた(図-10)。なお、標高データは、国土地理院の数値地図を用いた。図-11はMass-consistentモデルを用いた有明海沿岸域での3次元風速場である。今後も現象をより詳細に解明するためには、3次元数値シミュレーションを行う必要がある。

4. おわりに

今回得られた結論を以下に要約する。

- 1) 弱風時における飛来塩分の空間分布は、地形的な影響を強く受けることが判った。
- 2) 防風ネットによる飛来塩分の抑制効果を検証した結果、20~25%程度の効果が得られた。
- 3) 計算結果と観測結果を比較し、飛来塩分が風速場の地形特性に強く依存していることが判った。

飛来塩分の支配要因には自然現象が複雑に絡み合っているため、今後も現地観測を継続し、データの蓄積を行うとともに、より自然界に適応した3次元的なシミュレーション手法開発・検討を行う必要がある。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究(B)(2)(滝川 清)および奨励研究(A)(山田文彦)より援助を受けた。また、海岸工学小委員会WG(代表：辻本剛三)においては、貴重な御助言を頂いた。ここに記して謝意を表す。さらに、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, (2), pp. 1051-1055.
- 後藤智明, 柴木秀之 (1993): 陸上地形の影響を考慮した海上風推算, 港研報告, 32巻, 3号, pp. 65-97.
- 滝川 清, 山田文彦, 外村隆臣, 松本健作, 坂本鋼治 (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, 日野幹男 (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, 樋田 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, 鶴崎賢一, 中村聡志, 尾崎 靖, 福田真人, 宮崎啓司, 山田邦明, 西守男雄 (1995): 飛沫の発生と疑似植栽による飛沫抑制効果に関する現地調査, 港湾技術研究所報告, 第34巻, 第4号, pp. 302-311.
- 山田文彦, 滝川 清, 外村隆臣 (1997): 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, 海岸工学論文集, 第44巻 (2), pp. 1216-1220.
- 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.
- Sharman C. A. (1978): A Mass-Consistent Model for Wind Fields over Complex Terrain, Journal of Applied Meteorology, Vol. 17, pp. 312-319.