

海からの飛来塩分シミュレーションに関する研究

琉球大学 学生会員 ○管 哲夢・琉球大学 正会員 富山 潤
 琉球大学 正会員 伊良波 繁雄・東京大学 吉村 忍
 東洋大学 中林 靖

1. はじめに

沖縄県のようなまわりを海に囲まれた小さな島々では、海から飛来する塩分による塩害が深刻な問題となっている¹⁾。

飛来塩分に関する従来の解析的研究は、移流拡散方程式や Fick の拡散方程式を用いたものが一般的である^{2), 3)}が、本研究では、モデル化が容易で、複雑な風速場における拡散現象の予測可能なランダムウォーク法⁴⁾を粒子拡散モデルとして採用し、その妥当性を検討した。

2. 風速場⁵⁾

(1) 基礎方程式

非圧縮粘性流体の運動は、以下の質量保存則から導かれる連続の式と、運動量保存則から導かれる Navier-Stokes 方程式によって支配されている。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2)$$

ここで、 p は圧力、 ν は動粘性、 $\mathbf{u}$ は速度である。境界条件としては、以下の速度境界条件と表面力境界条件を考える。

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_0 \quad \text{on } \Gamma_v \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_0 \quad \text{on } \Gamma_\tau \quad (4)$$

ここで、 Γ_v 、 Γ_τ はそれぞれ、速度境界条件、表面力境界条件の与えられる境界を表す。また、 $\boldsymbol{\tau}$ は応力成分を示す。

(2) 有限要素法による定式化

本研究では上述で示した支配方程式を、速度に関して 1 次、圧力に関して 0 次の補間関数をもつ六面体要素 (Q1-P0 要素) を用いた混合補間法により有限要素に近似し、未知変数の離散化を行うと次式を得る。

$$C_i^T \mathbf{u}_i = 0 \quad (5)$$

$$M \dot{\mathbf{u}}_i + B(\mathbf{u}) \mathbf{u}_i - C_i p + D \mathbf{u}_i = \mathbf{f}_i \quad (6)$$

ここで、 $\mathbf{u}_i$ は節点流速値をすべて含む全体列ベクトル、 p はすべての要素圧力値からなる列ベクトルであり、 $\mathbf{f}_i$ は外力ベクトルである。また、 M 、 C_i 、 C_i^T 、 $B(\mathbf{u})$ 、 D はそれぞれ、質量、勾配、発散、対流、拡散を表す全体行列である。また、時間積分は流速修正法を用いた。

3. 飛来塩分粒子の拡散

(1) 移流拡散モデル

本研究では飛来塩分の移流拡散モデルとして 3 次元ランダムウォーク法を用いた。

ここで、ランダムウォーク法について簡単に述べる。

3 次元乱流で、風方向 (x 軸)、風方向と鉛直で奥行き方向 (y 軸)、高さ (z 軸) とし、 i ステップ目の粒子の風下距離を $x_i(x, y, z)$ 、速度を $u_i(u, v, w)$ とする。すると $i+1$ ステップ目における放出後のそれぞれの粒子の位置 x_{i+1} と速度 u_{i+1} との関係は以下のように表せる。

$$x_{i+1} = x_i + u_{i+1} \Delta t \quad (7)$$

ここで、 $i+1$ ステップ時における粒子速度 u_{i+1} は次式で表される。

$$u_{i+1} = \alpha u_i + \lambda_{i+1} \quad (8)$$

ここで、 λ_{i+1} は乱流統計量、流れ場の特性により求まるランダムな変数である。また、 $\alpha = R(\Delta t)$ はラグランジュの相関関数であり、中立層内では普通、次式で表される。

$$R(t) = \exp(-\Delta t / \tau_L) \quad (9)$$

ここで、 τ_L はラグランジュの時間スケールである。式(8)は、前ステップの粒子の移動(移流速度)をひきずる部分(右辺の第 1 項目)とある標準偏差(値のばらつき)をもつて毎回乱数で大きさが任意に変わる部分(第 2 項目)とで表現される。 $\alpha = R(\Delta t)$ は総観規模場の現象で一般的な値となるようラグランジュの時間スケールを設定して求めた。

(2) 飛来塩分の濃度測定

初期条件として、飛来塩分粒子に次式で示す高さ方向 z に指数的に変化する塩分濃度 $C_0(z)$ を与えた³⁾。

$$C_0(z) = \exp(Az) \quad (10)$$

ここで、 A は飛塩量の鉛直方向の減少率を与える係数であり、仲座らと同様 $A = -0.293$ を与えた。

また、解析領域内の塩分濃度は、領域を格子状に分割し、その各格子内に存在する粒子数とその粒子が持っている初期塩分濃度を使って次式より求めた。

$$C_{gri} = \kappa \sum_{i=1}^N C_{oi}(z_0) / V \quad (11)$$

ここで、 $C_{oi}(z_0)$ は、粒子発生位置 z_0 で与えた初期無次元濃

キーワード 飛来塩分、塩害、ランダムウォーク法、有限要素法

連絡先 〒903-0129 沖縄県中頭郡西原町字千原 1 番地 琉球大学工学部環境建設工学科 TEL098-895-8649

度, V は格子の体積, N は格子内に現在存在する粒子数, κ は換算係数を示す.

また, 本解析では, 粒子の沈降速度も考慮し, この速度が高さ方向と風速方向に関係があるものとし, 次式を用いた.

$$W(x, z) = W_0 \exp(-B(x + z)) \quad (12)$$

ここで, $W(x, z)$ は, 内陸の任意位置における沈降速度である. W_0 は砕波点位置での粒子の降下速度である³⁾. W_0 , B の同定は, 仲座ら³⁾の観測値に一致するように決定した.

4. 数値解析例

本研究では, 図-1 に示す計算領域を仮定した. 風速は海岸線から内陸方向に風速 5m/s の一様な分布を与え, 反対方向の面は透過境界条件とした. また, 底面では no-slip 条件とし, それ以外の面は slip 条件とした.

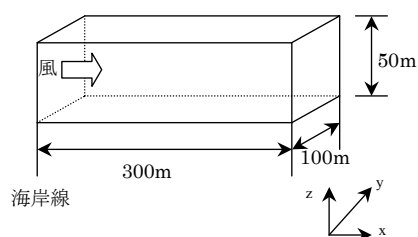


図-1 計算領域概略図

ここでは, 仲座ら³⁾の調査結果を対象にランダムウォーク法による飛来塩分の移流拡散シミュレーションの検証と沈降速度(式(12))の係数(B)の同定を行うために奥行き方向(y 方向)の移動を無視し, 2次元的な解析を行った. なお, 砕波点位置での粒子の降下速度 W_0 は仲座ら³⁾と同じ値(0.06m/s)を使用した. また, 塩分発生粒子は, $Y=50(\text{m})$ で高さ方向を10分割した位置から発生させた. 図-2 に塩分濃度分布(無次元濃度)を示す. なお, 解析では濃度測定格子 $10 \times 10 \times 10\text{m}$ を仮定した.

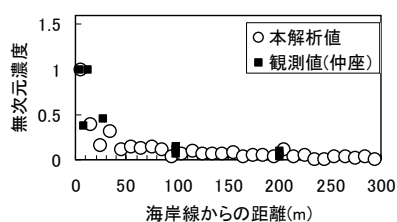


図-2 飛来塩分粒子の無次元濃度分布

図-2 に示す本解析結果は, 塩分粒子分布が, ほぼ定常状態になった時点のものを用いた. 本解析結果は, $B=0.05$ とした場合であり, 仲座ら³⁾の観測結果と良く一致していることがわかる. 今後の解析では $B=0.05$ を用いた.

次に, 図-3 に示す防風林(高さ10m)およびいくつかの建造物(高さ10m)のある場合の解析を示す. 解析領域, 風速および境界条件等は前解析と同じである. ただし, 飛来塩分粒子は海岸線位置の面からほぼ均一に発生させた.

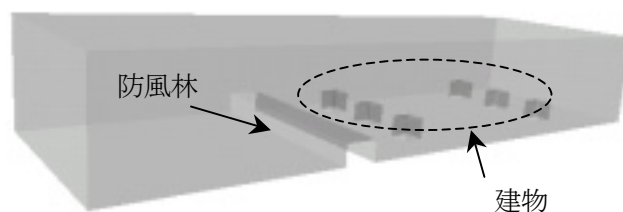


図-3 計算領域

図-4 に飛来塩分粒子の移流拡散状態を(a)粒子発生初期, (b)移流拡散途中, (c)定常状態の三つに分けて示す.

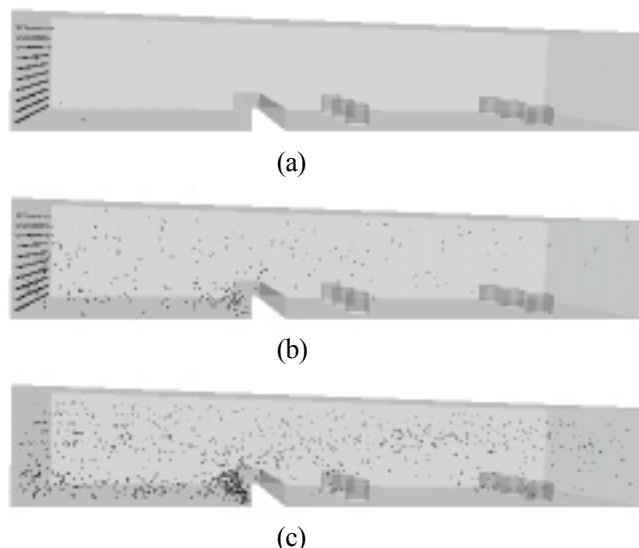


図-4 飛来塩分の移流拡散状況

図-4 からわかるように本解析結果は防風林の遮塩効果が有効であることを示しており, 飛来塩分粒子の移流拡散シミュレーションを比較的良好に再現していると考えられる. しかし, 観測結果がないため塩分濃度についての考察は省略する. 今後, 観測値との比較が必要である.

5. まとめ

本研究では, ランダムウォーク法による飛来塩分粒子の移流拡散現象のシミュレーションを示した. 今後, 実際の地形を考慮し, 観測値との比較検討を行う予定である.

参考文献:

- 1) 伊良波繁雄, 他: 沖縄県でのコンクリート橋の耐久性調査, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.191-196, 1998.6
- 2) 山田義智, 他: 海岸付近における飛来塩分量に関する解析的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第514号, pp.21-26, 1998.12
- 3) 仲座栄三, 他: 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, Vol.40, pp.1036-1040, 1993.8
- 4) LEY, A.J., A random walk model of two dimensional diffusion in the neutral surface layer, Atmospheric Environment, No.16, pp.2799-2808, 1982
- 5) 矢川元基, 奥田洋司, 中林靖: 有限要素法流れの解析, 計算科学シリーズ, 朝倉書店, 1998.5