論文 ランダムウォーク法による飛来塩分の拡散シミュレーションに関する基礎 的研究

大城 勝*1・富山 潤*2・伊良波 繁雄*3・吉村 忍*4

要旨:本研究は,海岸からの飛来塩分の拡散現象を解析的に求めることを目的とするもので ある。沿岸域におけるコンクリート構造物の塩害は極めて深刻な問題であるため,その要因 の一つである飛来塩分の拡散現象を数値的に求めることは重要な課題である。従来,飛来塩 分の拡散は移流拡散方程式を用いるのが一般的であるが,本手法は,新たに飛来粒子の拡散 の求解法としてランダムウォーク法を用いた解析法を示し,その妥当性を検討した。 キーワード:ランダムウォーク法,飛来塩分,塩害,数値解析

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,海から飛来する海塩粒子(飛来塩分) による塩害が深刻な問題となっている^{1),2)}。ま た,最近,大規模な海の埋立てなどによって, 海岸に隣接したコンクリート建造物が増加する 傾向にあり,沿岸域付近でのコンクリート構造 物に対した塩害もより深刻な問題となっている。 このため,海からの飛来塩分の拡散現象を解析 的にもとめることは重要な課題である。

飛来塩分に関する従来の解析的研究は,移流 拡散方程式³⁾や Fick の拡散方程式⁴⁾を用いた ものが一般的であるが,本研究では粒子拡散法 の一種である3次元ランダムウォーク法を採用 した。

粒子拡散モデルとしてランダムウォーク法⁵⁾ を採用した理由は、モデル化が容易で、複雑な 風速場における拡散現象が予測可能であること や各粒子の拡散を個別に扱え、また、濃度分布 を解明するために大気中の多数の粒子を数値的 に追跡できることである。

本手法の妥当性を検討するために、仲座ら⁴⁾ の行った調査結果との比較を行った。また、今 回行った風速場の計算は有限要素法を用いてい るため現実に近い複雑な地表面を考慮した解析 も可能であるが今回は簡単な空間形状を仮定し た。なお,今回の研究は基礎的検討であるため, 単純な風速場で解析を行った。

2. 理論及び計算手法

2.1 風速場⁶⁾

本研究では、風速場を3次元層流と仮定し、 以下に示す有限要素法により求めた。

(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。

$$\nabla \cdot u = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \left(u \cdot \nabla \right) = -\nabla p + v \nabla^2 u \tag{2}$$

ここで, pは圧力, vは動粘性, 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。

- $u = u_0 \qquad on \Gamma_v \tag{3}$
- $\tau = \tau_0 \qquad on \, \Gamma_\tau \tag{4}$

ここで、 Γ_{V} , Γ_{τ} , はそれぞれ, 速度境界条件,

*1	琉球大学大学院	理工学研究科	環境建調	设工学専攻	(正会員)
*2	琉球大学助手]	「学部環境建設」	_学科 (正会員)	
*3	琉球大学助教授	工学部環境建設	设工学科	(正会員)	
* 4	東京大学大学院教	牧授 新領域創成	 战科学研究	宅科	

表面力境界条件の与えられる境界を表す。また, τ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,混合 補間法を用いて有限要素に近似した。本研究で は,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。

次に未知変数の離散化を行い,さらに,行列 方程式の形に整理し直すと以下のように表され る。

$$C_i^T u_i = 0 \tag{5}$$

$$M\dot{u}_i + B(u)u_i - C_ip + Du_i = f_i \tag{6}$$

ここで、 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、 f_i は外力ベクトルである。また、 $M, C_i, C_i^T, B(u), D$ 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。

式 (5), (6) を流速修正法を用いて時間積分 を行うと次のように変形できる。

$$C^T u_{n+1} = 0 \tag{7}$$

$$u_{n+1} = u_n - \Delta t M^{-1} (-Cp_{n+1} + B(u)_n u_n + Du_n - f_n)$$
(8)

ここで、 Δt は時間きざみ幅で、 $t = n\Delta t$ である。 式(8)の圧力は陰に扱われなければならないこ とを表している。次に式(8)の両辺に C^T を掛 けて式(7)を用いると、以下のような圧力に関 するポアソン方程式が得られる。

$$C^{T}M^{-1}Cp_{n+1} = -\frac{1}{\Delta t}C^{T}u_{n} + C^{T}M^{-1}(B(u)_{n}u_{n} + Du_{n} - f_{n})$$
(9)

式(9)から圧力 *p*_{n+1}を求め,次に式(8)から流速 *u*_{n+1}を求めることで,時間が進められる。 なお,質量マトリックス *M* はあらかじめ対角集 中化してあるので,逆行列 *M*⁻¹の計算は不要で ある。

本研究における風速場の計算に用いた解析コ ードは、矢川ら⁶⁾が開発したものを用いた。

2.2 海塩粒子の拡散

(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。このモデ ルは,発生源から追跡粒子を放出し,個々の粒 子が平均流と乱流によって運ばれるとして,そ の後の粒子の分布を,3 次元空間で計算するも のである。

ランダムウォーク法につては文献(5)に詳し いのでここでは簡単に述べる。

 3 次元乱流で*i*ステップ目の粒子の風下距離 を*x_i*,鉛直(y 軸)方向の距離を*y_i*,鉛直(z 軸)方向の距離を*z_iとし、<i>u_i*,*v_i*,*w_i*をそれぞれ 粒子の水平方向,鉛直(y 軸)方向,鉛直(z 軸)方向の速度とする。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と速度 との関係は以下のように表せる。

$$x_{i+1} = x_i + u_{i+1}\Delta t \tag{10}$$

$$y_{i+1} = y_i + v_{i+1}\Delta t \tag{11}$$

$$z_{i+1} = z_i + w_{i+1} \Delta t$$
 (12)

ここで, *u_i*,*v_i*,*w_i*はそれぞれの*x,y,z*方向にお ける粒子の速度を示し次式で示される。

$$u_{i+1} = \alpha \, u_i + \lambda_{i+1} \tag{13}$$

$$v_{i+1} = \alpha \, v_i + \xi_{i+1} \tag{14}$$

$$w_{i+1} = \alpha w_i + \mu_{i+1}$$
(15)

ここで、 $\lambda_{i+1}, \xi_{i+1}, \mu_{i+1}$ 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、次のように表される。

 $R(t) = \exp(-\Delta t/\tau_L)$ (16) ここで, τ_L はラグランジェの時間スケールであ る。式(13)(14)(15)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)をもって毎回 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ェの時間ス ケールを設定して求めた。

(2) 飛来塩分の濃度測定

飛来塩分の濃度に関しては,図-1に示すよう な計算空間を格子状に分割し,ある時間のある 格子内の個々の粒子がもつ濃度情報より求める。

-666-

具体的には、高さ方向に層分割した各層から同 じ数の粒子を発生させる.しかし、各層の粒子 にはそれぞれ高さで異なる仲座らの提案した式 (17)で示す無次元濃度 $C_o(z)$ を初期値として与 える。つまり、塩分粒子は発生位置が高いほど 無次元塩分濃度が小さいことになる。式(17)も とに式(18)より各格子内の塩分濃度 C_{gri} を求め る。

$$C_{_0}(z) = \exp(Az) \tag{17}$$

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。

$$C_{gri} = \kappa \sum_{i=1}^{N} C_{oi}(z_0) / V$$
(18)

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。



図-1 濃度測定のための格子配置

また、本研究では、海岸線から内陸方向に飛 来する塩分濃度の減少を表現するために粒子の 沈降速度を考慮した。沈降速度は飛来塩分濃度 や粒子の自重、湿度などに大きく影響されると 考えられる。そこで本研究では、沈降速度は海 岸線から内陸方向に減少し、さらに高さ方向に も関係があるものと考え簡易的に次式を仮定し た。

$$W(x,z) = W_0 \exp(-B(x+z))$$
(19)

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⁴⁾。 W_0 , Bの同定は、仲座らの観測 値に一致するように決定した。 また,数値解析において飛来塩分粒子が地面 に接触した場合は,完全吸着と仮定して解析を 行った。

3. 数值解析例

3.1 風速場

本研究では、図-2 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 とした。また、底面では no-slip 条件とし、それ 以外の面は法線方向のみを風速ゼロとした。



図-3 に風速場を求めるための要素分割図を 示す(要素数1940,節点数2679)。

図-4 に風速ベクトル図を示す。また, **図-5** に,海岸から 0m, 60m, 180m, 240m 地点の風 速の鉛直分布を示す。





図-5 風速の鉛直分布

この図より,風速場は海岸線から内陸方向に 向かって速度境界層の移動が確認できるため, ランダムウォーク法による計算($\lambda_{i+1}, \xi_{i+1}, \mu_{i+1}$) で使用する境界層高さ h(m)は風速の境界層を もとに次式を仮定した(図-6参照)。





200m

図-6 境界層の概念図

0m

- 3.2 拡散シミュレーションの検証
- (1) 2次元問題による検証

ここでは、仲座ら⁴⁾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拡散シミュレ ーションの検証と沈降速度(式(19))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 は仲座らと同じ値(0.06)を使用した。

塩分発生の粒子は, *Y=50(m)*で高さ方向を 10 分割した位置から発生させた。

図-7 に飛来塩分濃度分布(無次元濃度)を示 す。本解析では濃度測定格子は 10×10×10m を 仮定した。



図-7 飛来塩分粒子の無次元濃度分布

図-7 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 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。

図-8 に塩分が飛来する様子を示す(海岸から 粒子を発生させてから 200 秒間の粒子分布)。

図-8より,発生位置の低い粒子は,発生する とすぐに地面に降下し,塩分粒子の発生位置が 高いほど,また,発生位置から内陸方向に向か うほど塩分が拡散していく様子が表現されてい ることが分かる。



(2) 障害物がある場合の拡散問題

飛来塩分による塩害を防ぐために,海岸林(防 風林)などが設けられる。そこで、本項では解 析空間に図-9 に示す不透過な障害物を仮定し、 飛来塩分がどのように拡散していくか検証した。



図-9 計算領域の概念図

図-10 に風速ベクトル図を示す。また,図-11 に,海岸から 0m,60m,180m,240m 地点の風速 の鉛直分布を示す (y=50m)。これらの図より, 障害物以降の風速は障害物の上付近で早くなっ ている。これは風速場が変動していることを示 すものであるが,風速場の計算は本来,乱流を 考慮した解析が必要であり,今後の課題である。



図-11 風速の鉛直分布

図-12 に無次元濃度分布図を示す。この図よ り、塩分濃度は障害物の影響を受け、障害物前 方(海岸線側)に蓄積され、障害物後方(内陸 側)にはほとんど飛来しないことを示している。 しかし、今回の風速場の解析に乱流を考慮して いないため、この結果が妥当なものか断定はで きないが、飛来塩分の内陸方向への進行状況の 傾向は現しているものと思われるが、今後、観 測値との比較し定量的な評価が必要である。



図-12 無次元濃度分布

図-13 に塩分粒子が飛来する様子を示す(海 岸から粒子を発生させてから200秒間の粒子分 布)。図-13より,塩分粒子は,発生直後は,障 害物がない場合とほとんど同じ拡散状態を示す が,障害物に達すると,障害物前方(海岸側) に蓄積されていく様子が確認できる。この結果 からも海岸線近くに防風林のような飛来塩分の 内陸への進行を妨げる障害物を設けるのは,有 効であることがわかる。



図-13 塩分粒子の拡散

4. まとめ

本研究では、ランダムウォーク法による飛来 塩分の拡散シミュレーションの基礎的検討を行 った。その結果、風速場に乱流を考慮していな いが、飛来塩分の内陸方向への進行状況の様子 は表現可能であることが分かった。

今後の課題として,風速場の計算では乱流を 考慮し,また,実際の地形データをもとにした 計算モデルを用いた解析を行い,実測値と比較 することが上げられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり,東洋大学講師の中 林靖先生に貴重なご意見,ご教授を賜りました。 ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 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,No1,pp.191-196,1998.6
- 2) 室賀啓希,他:沖縄県でのコンクリート構造物の耐久性調査と維持管理に関する研究, コンクリート工学年次論文報告 集,Vol.23,No.1,pp.1177-1182,2001
- 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
- 4) 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
- LEY,A.J.,:A random walk model of two dimensional diffusion in the neutral surface layer, Atmospheric Environment, No.16, pp.2799-2808, 1982
- 6) 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