レイノルズ平均乱流モデルに基づく風況・海塩粒子輸送解析 － 期間累積飛来塩分量の空間分布の推定 －

Numerical Simulation of Wind and Sea Salt Particle Transport using Reynolds-averaged Turbulence Model - Estimation of Spatial Distribution of Cumulative Airborne Sea Salt -

須藤 仁¹・服部康男¹・平口博丸²・木原直人³

Hitoshi SUTO, Yasuo HATTORI, Hiromaru HIRAKUCHI and Naoto KIHARA

Numerical simulation of wind and sea-salt particle transport was performed using a Reynolds-averaged turbulence model. Spatial distributions of time-averaged airborne sea salt locally varied under the influence of complex terrains and ground surface roughness with decaying tendency according to the distance from shoreline. In comparison between observational value of deposited sea-salt and numerical value of airborne sea-salt, they showed significant correlation with each other except for points very close to shoreline, suggesting that this simulation technique has a capability to appropriately estimate the spatial distribution of deposited sea-salt and airborne sea-salt, though there is still room for improvement in inlet boundary conditions on the sea for better estimation of sea salt near shoreline.

1. はじめに

海塩粒子は、電力設備や構造物等の主要な腐食・劣化要因の一つである。そのため、耐腐食設計の観点から、飛来塩分量の期間累積値の算定が必要となる。通常、その量は海岸からの距離に対して指数的に減衰すると考えられているが、地形の起伏や地表状態の影響により、実態は必ずしもそれと整合しない（例えば、仲座ら 1991, 村上ら 1995, 加藤・赤井 2001）。このような問題に対して、数値解析による飛来塩分量の推定は有力な手段の一つである。既往の数値解析事例では、海塩輸送に及ぼす海岸周辺の防風林や構造物の影響等が検討されている（例えば、仲座ら 1993, 野中・石本 1999, 山田ら 2007）。しかしながら、これらを電力設備に適用するには対象とする空間スケール（数百 m）が小さく、長期間累積値の評価を効率良く行うための手法に関する議論は十分でない。そこで、本研究では、地形起伏等、地表面条件の非一様性の再現性に優れたレイノルズ平均乱流モデルに基づき、数十 km 四方を対象とした風況と海塩粒子輸送の数値解析を行う。更に、長期間累積値の評価を効率良く行うための手法を新たに考案し、期間累積処理した飛来塩分量の解析値と屋外機器に付着した塩分量の観測値との対比から、その適用性を評価する。

2. 解析手法

(1) 基礎式・離散化法・境界条件

本解析では、風況や物質輸送の解析に対して検証実績のある数値流体解析コード NuWiCC（須藤ら 2004, Suto ら 2008, 服部ら 2009）を用いる。同解析コードにおいて、基礎方程式は、一般曲線座標系で表示した大気の流れ式、運動量保存式、および海塩粒子濃度の輸送方程式である。デカルト座標系では次のとおり表示される。

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial U_j}{\partial t} + U_i \frac{\partial U_j}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_j} + \nu_t \frac{\partial^2 U_j}{\partial x_i^2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U_i \frac{\partial C}{\partial x_i} = g_i \tau_p \frac{\partial C}{\partial x_i} + a_i \frac{\partial^2 C}{\partial x_i^2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 a_i ：海塩粒子濃度の渦拡散係数 [m^2/s]、 C ：海塩粒子濃度 [$1/\text{m}^3$]、 g_i ：重力加速度ベクトル $g_i = (0, 0, g)$ [m/s^2]、 P ：圧力 [Pa]、 U_i ：気流の速度 $U_i = (U, V, W)$ [m/s]、 x_i ：座標 $x_i = (x, y, z)$ [m]、 ν_t ：渦動粘性係数 [m^2/s]、 ρ ：空気の密度 [kg/m^3]、 τ_p ：速度の緩和時間 [s]である。乱流モデルには高 Re 数型 $k-\varepsilon$ モデルを用いる。上式は、(a) 大気は非圧縮性の中立大気と見なすこと、(b) 気流に及ぼす粒子の影響は小さいこと、(c) 速度の緩和時間 τ_p は気流の時間スケールに対して小さいこと、(d) 粒子の結合や分裂の頻度および粒径の変化は小さいこと（野中・石本 1999, 加藤・赤井 2001）、の条件を仮定したものである。

離散化法として、時間発展には克蘭クニコルソン法を用いる。空間離散化には、移流項に対して 3 次精度風

1	博(工)	(財)電力中央研究所	地球工学研究所
2	正会員	博(工)	(財)電力中央研究所
3	正会員	博(理)	(財)電力中央研究所

上差分法, その他の項に対して2次精度中心差分法を採用する。

流入側境界は海上に設定するものとし, 対数則に基づく風速分布と, 次式で表される個数濃度鉛直分布を与える (Toba 1965, 鳥羽・田中 1967)。

$$\log\left(\frac{C}{C_0}\right) = -m^{2/3} U_{10}^{-1} \chi(z) - \frac{W_2 z}{V_t}, z \leq 10[m] \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$C = C_{10} \exp\left(-\frac{g \tau_p + W_2}{V_t} z\right), 10[m] < z \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで, m : 粒子塩分質量 [kg], W_2 : 下降気流の代表速度 [m/s], 添字0: 海面直上, 添字10: 海拔10mでの値を表す。 χ は本来, 高さ, 相対湿度および海面摩擦係数の関数であるが, 高さ z [m] のみの関数に簡略化する (加藤・赤井 2001)。なお, 海岸の極近傍の飛来塩量には海岸地形等の条件が影響することが指摘されているが (宇多ら 1992), この指数関数型の濃度分布にはその影響が考慮されておらず, 留意が必要である。地表境界では, 地表面粗度を考慮した対数則から定まる風速と粒子の沈着モデル式 (Lewellen and Sheng 1980, 野中・石本 1999) を用いる。

(2) 累積的な飛来塩分量の推定手法

累積的な飛来塩分量を効率良く推定するため, 新たに考案した次の手続きを採用する。①複数の階級に分類した風向, 風速, 粒子径ごとに, 風と海塩粒子輸送の数値解析を実施する。②海上の複数地点の風データ (気象モデル解析データ等) から, 任意の地上位置の風向・風速の出現頻度を推定する。③風向, 風速, 粒子径別の解析結果に, 風向・風速の出現頻度の重み付けをし, これを

表-1 粒子・風速条件

粒子階級		風速階級 (風速 U_{10} [m/s])		
階級	$-\log m_0$ [kg]	UL (2~6m/s)	UM (6~10m/s)	UH (10~m/s)
P1	14.5~13.0	CaseP1U1	CaseP1U2	CaseP1U3
P2	13.0~12.0	CaseP2U1	CaseP2U2	CaseP2U3
P3	12.0~11.0	CaseP3U1	CaseP3U2	CaseP3U3

図-1 地上の風向・風速出現頻度推定のイメージ

足し合わせることによって, 飛来塩分量の累積値あるいは期間平均値を算出する。

上記②において, 任意の地上位置の風向出現頻度 R_{WD} , 風速階級出現頻度 R_{CV} は, 次式により算出する。

$$R_{WD}^{(WD,x,y)} = \frac{R_{WD}^{(WD,P_{WD})}}{\sum_{WD} (R_{WD}^{(WD,P_{WD})})} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$R_{CV}^{(CV,WD,x,y)} = \frac{R_{CV}^{(CV,WD,P_{WD})}}{\sum_{CV} (R_{CV}^{(CV,WD,P_{WD})})} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで, P_{WD} は, 地上評価地点 $P(x, y)$ の風向 WD における風上側の海上データ地点である。図-1に示す本手法のイメージのとおり, 任意の地上地点の R_{WD} , R_{CV} は, 風向に応じて, その風向の風上側の海上にあるデータを利用することとし, 異なる風向については異なる地点のデータを利用する。例えば, 風向1のときは, 海上地点P1における風向1の風向・風速の出現頻度を地上地点Pに適用するものとする。多くの場合, 海上での風観測は行われないため, ここでは気象モデル解析による統計データ (NEDO局所風況マップ) を R_{WD} , R_{CV} に用いることを想定する。なお, 上式のように, 海上の R_{WD} , R_{CV} から地上の R_{WD} , R_{CV} を推定するのではなく, 気象モデルによる地上地点の R_{WD} , R_{CV} をそのまま利用することも考えられる。しかし, 一般に, 気象モデルと本コードのような数

図-2 利用するNEDOデータの位置と解析領域 (NEDOデータ: ●印位置, 解析領域: 矩形枠)

値流体解析モデルでは地形影響の取り込み方が異なるため、推定地上風には乖離が生じる。その結果として、海塩粒子の起源（海岸位置）や海塩粒子の量を適切に評価できない可能性があるため、上式を用いることとしている。

(3) 利用データ・解析ケース

解析対象地は、観測データが取得された愛媛県新居浜市周辺（以下、新居浜）、愛媛県大洲市周辺（以下、大洲）とする。海上風データとしては、NEDO局所風況マップの高度30mデータ（以下、NEDOデータ）を用いる。図-2に利用するNEDOデータの位置と計算領域を表す矩形枠を示す。地形と粗度区分の設定にはそれぞれ、国土地理院が発行する数値地図50mメッシュ（標高）データと国土数値情報1/10細分区画土地利用データを利用する。土地利用-粗度区分-粗度長の関係は、日本建築学会建築物荷重指針・解説（1993）を基に定める。また、解析風向は、計算負荷を考慮して、累積飛来塩分量の評価領域（図-2の矩形枠が重複する領域）近傍の海上において、出現頻度・平均風速が共に高い主要な3～4風向（大洲ではNW, NNW, N, 新居浜ではNE, ENE, WSW, W）とする。風速・粒子径条件を表-1に示す。海塩粒子の輸送過程は粒子の質量と風速に依存するため、文献（鳥羽・田中 1967, 加藤・赤井 2001）を参考に、海塩粒子は海面直上の粒子の塩分質量 m_0 に応じて3階級に、風速も海拔10mの風速 U_{10} に応じて3階級に分類し、それぞれの階級に対して計算を行う（1風向あたり9ケース）。

なお、階級UHは、NEDOデータにおいて、風速12m/s以上が一つの風速階級として扱われていることを考慮したものである。また、各解析風向に対する解析領域において、水平方向の格子間隔は200m（等間隔）、鉛直方向の格子間隔は最小で20m（地表）、最大で1615m（地上高さ10km）と不等間隔に配する。

3. 観測データの概要

解析結果の精度評価のため、四国電力（株）によるパイロットがいしの塩分付着量データを用いる。本データは、1965年～1998年の内、5年程度の期間に取得されたものであり（地点によりデータ取得時期と期間は異なる）、地点ごとに1ヶ月の間隔で付着量を測定している。測定法として、汚損がいし表面を一定量の蒸留水で洗浄し、洗浄液の抵抗率から等価塩分付着量を求める筆洗い抵抗法を用いている。対比する値としては、得られた複数の観測データ（1ヶ月値）が対数正規確率分布に従うとして算出された累積確率50%値を対象とする。なお、本塩分付着量データの観測期間と解析の基となるNEDOデータの対象期間（2000年）は異なるが、前者は複数年にわたるデータを基にした確率値が対象であり、後者も風況が特異でなかったことが確認されている年を対象としたものであることから、年ごとの偏差は大きくないものとして比較する。

図-3 風速の年平均分布（地上高さ40m）

図-4 飛来海塩量の年平均分布（地上高さ40m）

4. 結果および考察

図-3, 図-4にそれぞれ, 本解析による飛来海塩量の年平均分布 (地上高さ40m) を示す. 新居浜と大洲のどちらの地域においても, 地上では地形の起伏等の影響を強く反映した局所的な変化の大きな分布となっており, これは精度検証がなされている他の地域での傾向 (須藤ら2004) と似たものである. また, 海上でも風速は非一様となっているが, これは, 複数の海上風データを利用していることと, 陸地の影響を一部受けていることによるものである. 一方, 飛来海塩量は, 海岸からの距離に応じて減衰する傾向が見られる. ただし, それは一様ではなく, 風速場と対応するように, 地形起伏等に応じて値が増減していることが分かる.

図-5に, 塩分付着量の観測地点と番号, 図-6に観測値と解析値との地点ごとの対比結果 (新居浜市周辺) を示す. ただし, 観測値はがいに付着した塩分量 (がいの単位表面積・単位時間あたりの塩分付着質量 [$\text{mg}/\text{cm}^2/\text{month}$]) であるのに対して, 解析値はその地点に飛来した海塩粒子中の塩分量 (風向直角断面の単位面積・単位時間あたりの飛来塩分量 [$\text{mg}/\text{cm}^2/\text{month}$]) であり, 相対的な比較である点について留意されたい. 解析結果は, 塩分付着量の地点ごとの増減傾向を概ね再現し

(a) 新居浜

(b) 大洲

図-5 塩分付着量の観測地点と番号 (コンター: 標高)

(a) 新居浜

(b) 大洲

図-6 地点ごとの観測値との対比

(a) 新居浜

(b) 大洲

図-7 観測値との相関関係
(△: $L \leq 100\text{m}$ の地点, ▲: $L > 100\text{m}$ の地点)

ており、地形等の影響を反映したものであることが示唆される。ただし、大洲では、海岸からの距離 L が100m以下の地点で、他の地点と比べた時の値のレベルが過小となる傾向が見られる。

図-7には、観測値と解析値との相関関係を示す。図中の直線は、 $L > 100\text{m}$ の地点を対象とした場合の原点を通る1次の回帰線である。新居浜において、両者は良い正の相関を示していることが確認できる（相関係数：0.82）。大洲においては、図-6と対応するように、観測による塩分付着量が多い $L \leq 100\text{m}$ の地点で、解析による飛来海塩量がある値以上に大きくならない傾向が見られる。これは、沿岸で消波ブロック等に波が打ち当たる際に局所的に発生する粒子の影響、海岸地形条件の影響（宇多ら1992）等を式（4）、式（5）では考慮しておらず、現地の海岸線での海塩分布を十分再現できていないためと考えられる。また、この乖離が生じる海岸からの最大距離は、風が強く塩分付着量が大きくなる地域ほど長くなるものと推察される。なお、大洲において、 $L > 100\text{m}$ の地点を対象とした場合の相関係数は、0.74であった。以上のことから、海岸に極めて近い位置での推定のためには、流入側境界条件の設定方法等に改善の余地があるものの、それ以外の位置では、本解析により、広域に分布する特定の機器等に対する塩分付着量を相対値として推定できると共に、その前提となる飛来塩分量の空間分布についても概ね再現できていることが示唆された。

5. まとめ

レイノルズ平均乱流モデルに基づく風況・海塩粒子輸送解析と、新たに考案した累積飛来塩分量の推定手法により、期間累積飛来海塩量の解析値を求め、これを海塩付着量の観測値とを対比した。主な結果は次のとおりである。

- ・解析による飛来海塩量分布には、離岸距離に応じた減衰傾向が現れると共に、風速場と対応して、地形起伏等に起因する値の増減が特徴的に見られた。
 - ・塩分付着量が相対的に小さい新居浜では、観測による海塩付着量と解析による飛来海塩量に良い相関が見られた。塩分付着量が相対的に大きい大洲では、離岸距離 $L \leq 100\text{m}$ の地点を除いた観測と解析との対比において、良い相関が見られた。
- 以上のことから、本解析の適用性について次のことが明らかとなった。
- ・本解析により海塩輸送における地形影響等が表現され、海岸の極近傍を除く位置では、海塩付着量および飛来海塩量の空間分布（地点間の大小関係）を推定できる。
 - ・海岸に極めて近い位置での推定のためには、流入側境

界条件の設定方法等に改善の余地がある。

なお、上記のとおり、本解析により飛来海塩量の空間分布を推定可能であることが示唆されたが、その絶対値が適切に評価されているかどうかは明らかでない。期中塩分量の観測データとの対比等を通じた更なる検証も、今後の課題である。

謝辞：本研究の実施にあたり、四国電力（株）電力輸送本部 送変電部 送電グループの宮崎浩一氏、高松支店 電力部 送電課の東野克俊氏には、塩分付着量の観測データ提供に関する協力を頂いた。また、電力計算センター（株）の神崎潔氏には、本解析の実施において協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

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，39，pp.1051-1055。
- 加藤史之・赤井幸夫（2001）：簡易型塩分飛散予測モデルの構築と評価，農業気象，57（2），pp.79-92。
- 須藤 仁・田中伸和・服部康男・大西浩史・神崎 潔（2004）：観測データを用いた三次元風況解析コード（NuWiCC）の適用性評価，第26回風力エネルギー利用シンポジウム，pp.267-270。
- （独法）新エネルギー・産業技術総合開発機構：局所風況マップ，<http://app2.infoc.nedo.go.jp/nedo/index.html>。
- 鳥羽良明，田中正昭（1967）：塩害に関する基礎的研究（第1報）．海塩粒子の生成と陸上への輸送モデル，京大防災研究所年報，10B，pp.331-342。
- 仲座栄三・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，海岸工学論文集，38，pp.896-900。
- 仲座栄三・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，40，pp.1036-1040。
- 野本善政・石本好孝（1999）：乱流モデルによる海岸林周辺の風速・塩分濃度の数値解析について，ながれ，18，pp.336-347。
- 服部康男・田中伸和・平口博丸・杉本聡一郎・橋本 篤・須藤 仁・和田浩治（2009）：電中研気流シミュレーションコードNuWiCCによるおろし風の強風再現，電力中央研究所報告，N08047，22 p。
- 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）の軽減に関する現地観測，海岸工学論文集，42，pp.1036-1040。
- 山田文則・細山田得三・下村 匠（2007）：海岸に隣接した構造物周辺の飛来塩分の発生・輸送過程とその長期的な予測計算，海岸工学論文集，54，pp.1216-1220。
- Lewellen, W. S. and Y. P. Sheng（1980）：Modeling of dry deposition of SO₂ and sulfate aerosols, EPRI EA-1452, project 1306-1, 68 p.
- Suto, H., Y. Hattori, N. Tanaka and Y. Kohno（2008）：Effects of Strong wind and ozone on localized tree decline in the Tanzawa mountains of Japan, Asian Journal of Atmospheric Environment, 2（2），pp.81-89。
- Toba, Y.（1965）：On the giant sea-salt particles in the atmosphere II. Theory of the vertical distribution in the 10m layer over the ocean, Tellus, 17, pp.365-382。