

## 暴風場における海からの飛沫生成・輸送過程の計算法の開発

北海道大学 学生会員 阿部 伸弘  
 北海道大学 正会員 猿渡亜由未

### 1. はじめに

台風来襲時等に海面から大量に発生する飛沫は海塩を含んでいる為、電線や海岸構造物に付着すると腐食等の塩害をもたらす原因となる。海面からの飛沫の生成機構はいくつか存在するが、風が要因となって発生するものとして、白波発生時に混入する気泡が水面に浮上する際に発生する film droplet や jet droplet, 波のクレストから発生する spume 等があり、波浪により発生するものとしては砕波飛沫や越波飛沫等が挙げられる。それぞれ生成機構に依存して生成量やサイズスペクトル等が異なる。Reid et al. (2001) や山田ら (2007) により飛沫濃度の現地観測がなされてきたが、局所飛沫濃度分布を予測する方法は確立されていない。本研究では局地気象モデルにより暴風時の気象場を追算し、暴風下の海面からの飛沫生成量を見積もと共に、飛散する飛沫の濃度分布を計算する事を目的とする。

### 2. 数値計算法

#### 2-1 Weather Research and Forecasting Model

本研究では米国立大気研究センター (National Center for Atmospheric Research) で開発された局地気象予測モデル WRF (Weather Research and Forecasting model) を用いて気象場の再現を行う。本モデルは圧縮性流体のオイラー方程式を  $\sigma$  座標系内で解くことにより風速、温度、空気密度、湿度等の分布を求めるものである。米国立環境予測センター (National Center for Environmental Prediction) が提供する FNL (Final analysis) 気象データを3時間毎に入力した。

本研究では2009年台風18号来襲時の2009年10月6日15時から2009年10月9日9時(JST)までの期間の気象場を追算した。最大計算領域は北緯15.81-50.13度、東経116.29-158.39度、この時のグリッド幅を約30km、時間刻みを60secとした。海岸に面した数地点において最小計算グリッド幅を約1.2kmでネスティング計算を行った。気象モデルにより得られた風速場に基づき、次節の方法により飛沫生成量の予測と移流拡散過程の計算を行った。

#### 2-2 飛沫の移流拡散

飛沫濃度の移流拡散方程式は次式で表わされる。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i c) = S, \quad (1)$$

ここで、 $c, u_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) はそれぞれ飛沫濃度と飛沫速度であり、 $S$  は飛沫濃度のソース項である。本研究では飛沫の濃度と速度をそれぞれ  $c = \bar{c} + c'$ ,  $u_i = \bar{u}_i + \widehat{u}_{ri} + u_i'$  と Reynolds 分解する。 $\bar{u}_i$  は2-1により求める飛沫位置における風速であり、 $\widehat{u}_{ri}(r, x_i, t)$  は飛沫の風速からの平均逸脱速度である。本研究では  $\widehat{u}_{ri} = (0, 0, w_t)$  ( $w_t$  は Stokes 則から求める飛沫の終端落下速度) とした。すると(1)式より、径  $r \sim r + \Delta r$  の飛沫の濃度の移流拡散方程式が得られる。

$$\frac{\partial \bar{c}_r}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{u}_i + \widehat{u}_{ri}) \bar{c}_r = -\frac{\partial}{\partial x_i} \overline{u_{ri}' c_r'} + \frac{dS}{dr} \quad (2)$$

$\bar{c}_r = \bar{c}_r(r, x_i, t)$  はそれぞれ半径  $r \sim r + \Delta r$  の飛沫の平均濃度である。飛沫濃度については  $\bar{c} = \int_0^\infty \bar{c}_r dr$  が成り立ち、飛沫フラックスについては  $\widehat{u}_{ri} \bar{c} = \int_0^\infty \widehat{u}_{ri} \bar{c}_r dr$  が成り立つとした。右辺第1項の乱流拡散項は  $\overline{u_{ri}' c_r'} = -D \partial \bar{c} / \partial x_i$  とモデル化した ( $D$  は拡散係数であり、風速場の渦粘性係数と等しいとする)。また、本来飛沫は飛散する過程で蒸発するため径が変化するが、本研究では生成時から径が変わらないと仮定した。

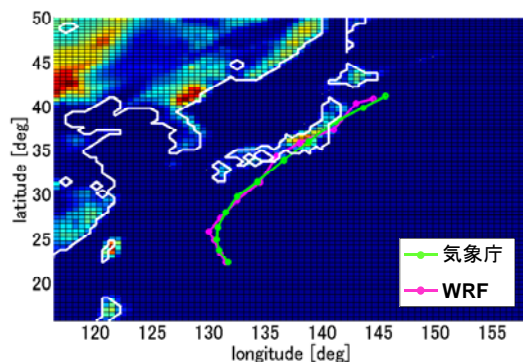


図1：計算領域と台風の中心軌道。

飛沫ソース項は気泡の再曝気後に発生する film droplet と jet droplet (サイズレンジ:1.0 - 150 μm) を考慮して提案された Gong (2003) のモデルを用いて決定した.

$$\frac{dF}{dr} = 1.373U_{10}^{3.41}r^{-A}(1 + 0.057r^{3.45}) \times 10^{1.607e^{-B^2}}, \quad (3)$$

$$A = 4.7(1 + \theta r)^{-0.017r^{-1.44}}, B = (0.433 - \log r)/0.433, \theta = 30,$$

ここで  $F$  は飛沫の個数フラックス,  $U_{10}$  は 2-1 の計算から求められる 10 m 上空風速である. これにより (2) 式のソース項を次式により与えた.

$$\frac{dS}{dr} = \frac{dF}{dr} \frac{4\pi r^3}{3} \Delta x \Delta y \quad (4)$$

3. 計算結果と考察

図 1 の実線で示すのは気象モデルにより追算された台風 0918 号の軌道を気象庁が発表した軌道と比較したものである. 本研究で台風の中心位置は, 気圧の最小位置と定義した. 台風の移動を良く再現している事を確認した. また海岸に面した数値点における台風通過中の気圧, 風速, 気温の変化について, 本研究の追算結果と気象庁公開データとを比較した(図 2 に一例). 気圧の時間変化はいずれの地点においても良好な一致を示した. 風速については最大となる時刻はよく一致し, 最大風速の差はいずれの地点も 5m/s 以下であった. 気温の時間変化についても概ね一致する事を確認しており, その差は大きい時でも 5°C 以内であった.

2-2 節の方法で飛沫濃度分布を再現できるか確認する為に, 検証計算を行った. Reid et al. (2001) は汀線から 0 - 50 km, 海面上 0 - 1000 m の領域において海塩濃度分布の現地観測を行い, 海塩濃度の空間分布を測定した. 本研究では 50km×500m×250m の計算領域内に対数則に従い一定の風を与えた時の飛沫の生成・移流・拡散過程を計算し, Reid et al. (2001) の観測結果と比較した(図 3). 観測では海塩濃度を測定している一方, 計算結果は単位体積当たりに含まれる飛沫の体積を表しており定量的に比較する事はできないが, 風下方向・鉛直下方向に向かう程, 飛沫濃度が増加する分布の特徴が再現された.

気象モデルの計算により得られた風速場を入力値として

2-2 の方法で飛沫濃度の移流拡散を計算すれば, 台風時の飛沫濃度分布を見積もる事ができる. ただし本研究では film droplet と jet droplet の生成を風のみをパラメータとして求めたが, 1. で述べたように特に砕波や越波が生じる沿岸域やその背後の陸域における飛沫濃度分布を予想する為には波浪条件を基に砕波・越波飛沫の生成を考慮すべきである. これらは今後の課題である.

参考文献

Reid et al. (2001) Evolution of the vertical profile and flux of large sea-salt particles in a coastal zone, *J. Geophys. Res.*, 106, D11, pp. 12039-12053.  
 山田ら (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想計算, *海岸工学論文集*, 54 巻, pp. 1216-1230.

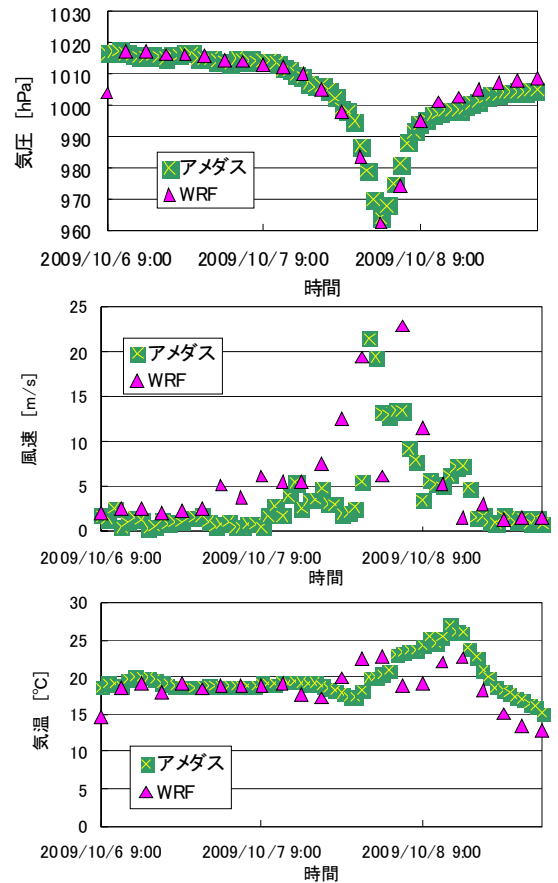


図 2 : 台風 0918 号通過時の 34.07°N, 136.19°E (愛知県尾鷲市) における気圧 (a), 風速 (b), 気温 (c) の時間変化

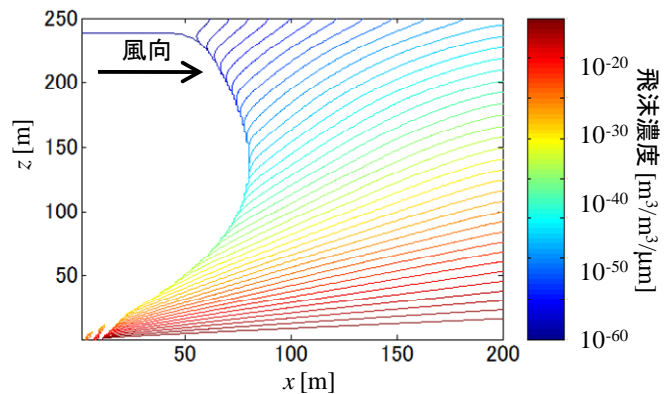


図 3 :  $U_{10}=4\text{m/s}$  のときの半径 1.0 - 3.2 μm の飛沫濃度の縦断面分布 . z = 0 が海水面 .