

風による海からの飛沫生成・輸送過程の特徴

The characteristic of generation and transportation of the fine sea sprays by the winds

北海道大学大学院工学院 ○学生会員 阿部 伸弘 (Nobuhiro Abe)
北海道大学大学院工学研究院 正員 猿渡 亜由未 (Ayumi Saruwatari)

1, はじめに

海岸域では空気中の海塩濃度が高い為塩害が発生する。海塩の影響は海岸線からの距離により見積もられているが、飛沫濃度の分布は地形による影響がある。そのため局所的な飛沫濃度分布は見積もることができない。

海から発生する飛沫には様々な種類があり、その発生メカニズムもそれぞれである。例えば、風が要因となって発生するものとして、(1)白波発生時に海中に混入した気泡が再度海面に浮上し、破裂するときに発生する径10μm以下の微細な飛沫 film droplet と jet droplet や、(2)波のクレストから強風により、海水が引きちぎられるようにして発生する spume などがある(Fairall et al, 2009)。また、波浪により発生するものとしては、(3)波のクレストが着水するときに発生する砕波飛沫や越波飛沫などがある。それぞれ生成機構に依存し、発生量、サイズスペ

表-1 風速と風向

	風速 [m/s]	風向
Case 1	4	陸から沖
Case 2	4	沖から陸
Case 3	6	陸から沖
Case 4	6	沖から陸

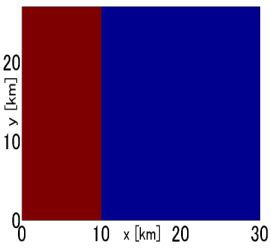


図-1 計算領域(Case 1~4)

クトル等が異なる。飛沫の蒸発や飛沫が海に着水し再度海中に戻るときに局所的な大気-海洋間の熱や湿度の交換が起こる。これまで Reid et al.(2001)や山田ら(2007)によって飛沫濃度の現地観測が為されてきたが、局所飛沫濃度分布を予測する方法はまだ確立されていない。

本研究では移流拡散方程式を用いて飛沫の生成・輸送過程を計算することを目的とすると共に、一定の風速下での飛沫濃度分布と、気象モデルにより計算された実際の風速場に近い条件での飛沫濃度分布を比較し、考察することを目的としている。本研究では、小径で最も飛散範囲が広いと予想される(1)気泡の再曝気に伴う飛沫を対象とする。

2, 計算方法

2-1, 飛沫の生成と移流拡散

飛沫濃度の移流拡散方程式は次式で表される。

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

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 $c = \bar{c} + c', u_i = \bar{u}_i + \hat{u}_{i1} + u'_{i1}$ と Reynolds 分解する。 $\bar{c}$ は平均粒子濃度、 c' は濃度変動、 $\bar{u}_i$ は粒子位置速度、 u'_{i1} は速度変動を表す。 $\hat{u}_{i1} = \hat{u}_{i1}(r, x_i, t)$ は飛沫の風速からの平均逸脱速度である。本研究では $\hat{u}_{i1} = (0, 0, w_t)$ (w_t は Stokes 則から求める飛沫の終端落下速度であり、飛沫

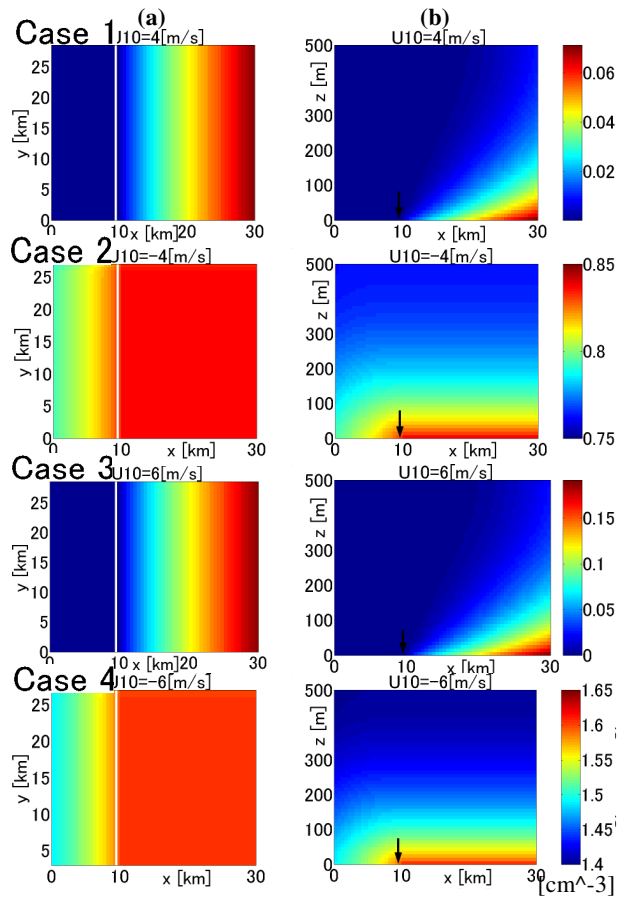


図-2 (a)水平断面、(b)y=15における鉛直断面上のr=1~3μmの飛沫濃度分布(白線、矢印は汀線位置)

径 r にのみ依存する)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.

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

$\bar{c}_r = \bar{c}_r(r, x_i, t)$ 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 $\hat{u}_{ri} \bar{c} = \int_0^\infty \hat{u}_{ri} \bar{c}_r dr$ が成り立つとした. 右辺第1項の乱流拡散項は

$$\overline{u'_{ri} c'_r} = -D \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_i} \quad (3)$$

$$D = \frac{\nu_T}{S_c} \quad (4)$$

D は拡散係数であり, ν_T は風速場の渦動粘性係数, S_c はシュミット数である. 本研究で対象とする飛沫は微細であり風速場に完全に追従するものとし, $S_c = 1$ とした. 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. 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

表-2 WRF 計算領域

	グリッド幅[km]	グリッド数
d1	30	80×80×34
d2	6.0	101×101×34
d3	2.0	181×181×34
d3'	2.0	21×21×31

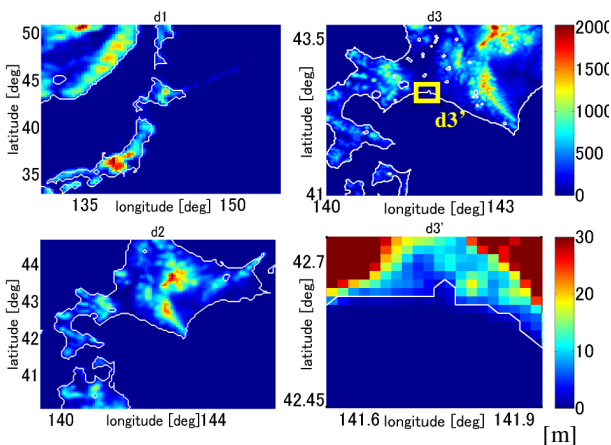


図-3 WRF 計算領域(d1~d3),と飛沫濃度分布計算領域(d3')

表-3 WRF 計算条件(鵜川町の観測データ(アメダス))

	日付	風向	平均風速
Case 5	1999/3/8	北(陸から沖)	8[m/s]
Case 6	1999/3/25	南(沖から陸)	4[m/s]

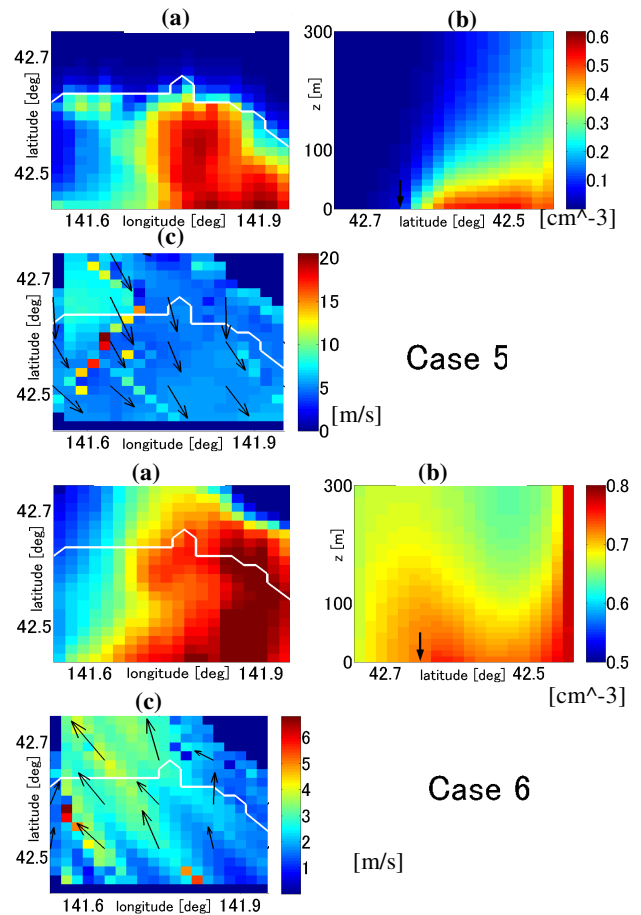


図-4 (a)水平断面, (b)longitude=141.745における鉛直断面上の $r=1\sim 3\mu\text{m}$ の飛沫濃度分布と(c)入力した風速風向

して提案された Gong(2003)のモデルを用いて計算した.

$$\frac{dF}{dr} = 1.373 U_{10}^{3.41} r^{-A} (1 + 0.057 r^{3.45}) \times 10^{1.607 e^{-B^2}} \quad (5)$$

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

ここで, $F[\text{cm}^{-3}]$ は飛沫の個数フラックス, $U_{10}[\text{m/s}]$

は 10m 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.

$$\frac{dS}{dr} = \frac{dF}{dr} \frac{4\pi r^3}{3} / \Delta z \quad (6)$$

2-2, Weather Research and Forecasting (WRF)

実沿岸域におけるメソスケール風速場を計算する為に, アメリカ大気研究局(National Center for Atmospheric Research)で開発された局地気象予測モデル WRF

(Weather Research Forecast) を使用する、本モデルは圧縮性流体の為のオイラー式を σ 座標系内で解くことにより風速、温度、空気密度、湿度の分布を求めるものである。初期・境界条件として過去の気象データと地形データを入力し風速、風向等の追算を行う。本研究では入力する気象データとして NCEP(National Center for Environmental Prediction)が公開する FNL(Final analysis)を用いる。FNL は空間解像度 1 度×1 度、鉛直方向 27 層で 6 時間毎に提供されている。本研究では WRF により得られた風速場に従い飛沫が生成・移流されるとき飛沫濃度分布も 2-1 の方法により計算した。

3. 飛沫濃度分布

3-1. 一様な風速

単純な陸地を考え、そこに一様な水平方向風速を与えて計算を行った。計算領域は陸から沖に向かって 30km(うち陸地が 10km)、幅 30km、鉛直高さ 500m とし、陸から沖に吹く風を正として 10m 上空風速 4m/s、-4m/s、6m/s、-6m/s をそれぞれ与えた(表-1)。風速は対数則に従うものとした。

図-2 から、海面から発生した飛沫が拡散しながら風に乗り移流している様子や、陸方向に風が吹く Case 2,4 では汀線から離れるに従い飛沫濃度が薄くなり、分布が拡散している様子が確認できる。

3-2. WRF による風速

3-2-1. 計算条件

実際の風速場に近い条件を与えて計算するために、気象モデル WRF によって計算した風速場を用いて飛沫濃度を計算した。

WRF の計算領域は日本を含む領域から 3 回の nesting 操作を行い、一番解像度が高い領域では北海道の鶴川町付近を表示した(図-3(d1~d3)、表-2)。飛沫濃度分布は海岸付近で標高が低く、海岸線が比較的単純な鶴川町を中心とした領域(図-3(d3'))において計算した。

比較的一様な風が陸から沖、沖から陸にそれぞれ長時間吹いていた 1999/3/8 と 1999/3/25 のそれぞれの 13:00 JST の風速場を初期条件として 2-1 の方法で飛沫濃度分布を計算した(表-3)。

図-4(Case 6)から、平地の領域に飛沫が集中していることが確認でき、飛沫濃度分布は地形に依存するということがいえる。

3-2-2. 飛沫濃度と海岸からの距離の関係

図-5(a)は陸から沖に向かって風が吹くときの海岸からの距離と海水面の飛沫濃度の関係を示している。図-5(b)は沖から陸に向かって風が吹くときの海岸からの距離と地表での飛沫濃度の関係を示している。どちらも風速に伴って飛沫濃度が大きくなっているのが確認できる。海上と

陸上とでは地(海)表面の粗度が大きく異なるので海岸付近では風速場の空間変化が大きくなる。風向、風速の変化が大きいことにより、飛沫濃度のばらつきが生じるものと考えられる。

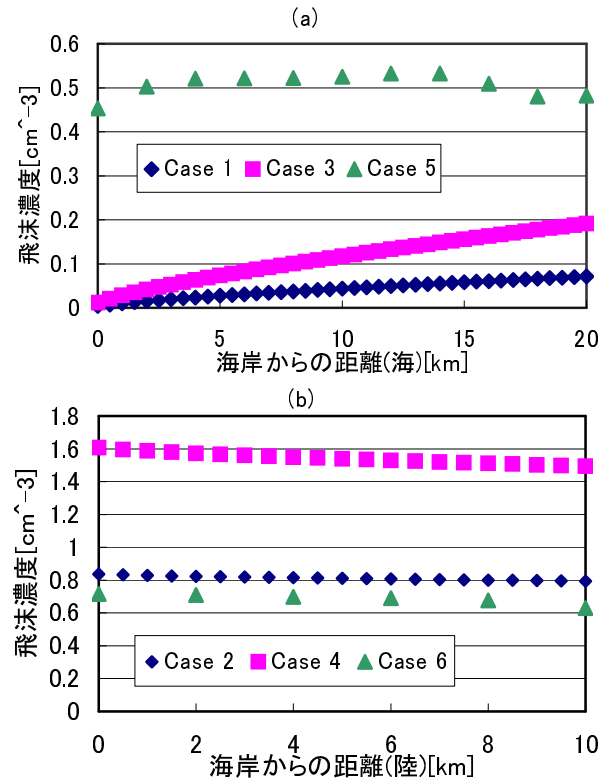


図-5 (a)地表における海岸からの距離と飛沫濃度
(b)海水面における海岸からの距離と飛沫濃度

4. 結論

- 乱れや空間的な風速風向分布のない単純一様な風のもとでの飛沫濃度分布と、気象モデルにより再現した実沿岸域における風速場に対する飛沫濃度分布を計算し比較した。
- 本研究では、風速にのみ依存した飛沫生成を対象としたが、実際には特に沿岸域では砕波や越波により発生する飛沫の影響も大きいと考えられる。今後沿岸域における飛沫濃度分布を定量化する為には波による飛沫生成を考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 山田・細山田・下村 (2007) : 海岸に隣接した構造物周辺の飛沫塩分の発生・輸送過程とその長期的な予想計算. 海岸工学論文集, 54, pp. 1216-1230
- 2) 仲座ら (1999) : 台風時における大気中の海塩濃度分布に関する研究. 海岸工学論文集, 46, pp. 1251-1255.
- 3) Fairall, C.W., M.L. Banner, W.L. Peirson, W. Asher, and R.P. Morison (2009) : Investigation of the physical scaling of sea spray spume droplet production, J. Geophys. Res., 114, C10001.
- 4) Edgar L. Andreas (2004): Spray Stress Revisited. Journal of physical oceanography, volume 34.
- 5) Gerrit de Leeuw (1999): Sea Spray Aerosol Production from Waves Breaking in the Surf Zone. J. Aerosol Sci. Vol 30, Suppl. 1, pp. S63-S64.