

気象モデルを用いた沿岸砕波による飛沫が与える局所気象変化 に関する数値計算

The Numerical Computation about Partial Weather Change Due to Sea Spray from Wave Breaking using a Meteorological Model

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 正会員 猿渡 亜由未(Ayumi Saruwatari)

1. まえがき

海上に存在する飛沫は蒸発過程を通して大気・海洋間の熱・湿度フラックス, 即ち海から大気へのエネルギー供給量に影響を与える為, 海上気象場の決定要因の一つとなっている。飛沫は外洋において主に波浪のクレスト水面が風により引きちぎられる('spume'), または混入気泡が水面で崩壊する('bubble bursting')事により発生するが, 沿岸域ではそれらに加え砕波や越波によっても飛沫が発生する。De Leeuw(1999)は沿岸域では $O(10\mu\text{m})$ 以上のサイズの飛沫数密度が外洋よりも1-2オーダー程大きくなる事を観測結果から明らかにしているが, これは飛沫の発生要因の違いによりサイズスペクトルが変化する為である。また, 外洋において飛沫サイズごとに飛沫の発生量を増加させ, 気象モデルを用いた数値実験を行うことにより, 飛沫径が $O(10\mu\text{m})$ 以上の飛沫が特に海上気象に影響を与えるということも確認している(猿渡・阿部, 2011)。しかし, 沿岸域で飛沫の発生量が増加することによる海上気象の変化についてはまだ観測結果も少なく, 定量化するまでに至っていない。

そこで本研究では飛沫発生量に応じた飛沫の気化潜熱フラックスの計算法を提案すると共にそれを気象モデルの中に組み込み, 種々の気象条件下, また飛沫発生量が沿岸域で増加することを想定し, 飛沫発生量を局所的に変化させた条件下における数値実験を行う事により, 海から発生する飛沫が海上気象に与える影響について調査する事を目的とする。

2. 計算方法

(1) メソスケール気象予測モデル

海上の風速, 温度等の気象場は, 米国大気研究センターにより開発され近年気象研究においてよく用いられるメソスケール気象予測モデル Weather Research and Forecasting model(WRF-ARW)を用いて計算する。本研究では飛沫による気化潜熱フラックスを次に示す方法で計算し, これを海面における熱フラックスの境界条件に加える事により, 飛沫による効果を評価した。

表-1 各計算領域における計算条件

領域	計算領域サイズ [km × km]	計算グリッド数	時間刻み [s]
1	606 × 606	101 × 101 × 34	12
2	362 × 362	181 × 181 × 34	4

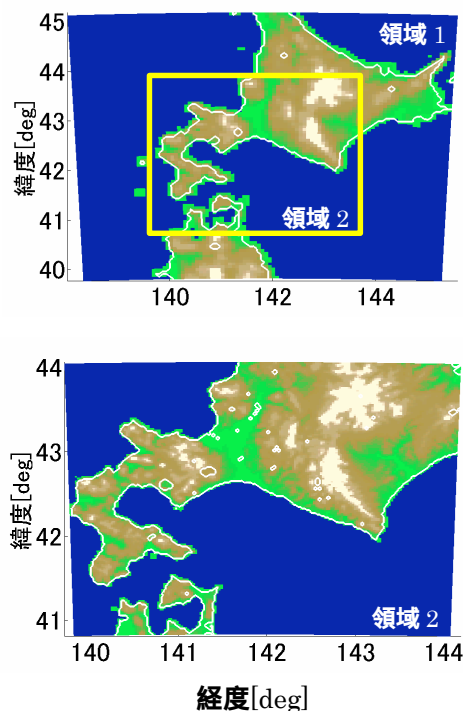


図-1 本研究で用いた計算領域 1(上)と 2(下)

(2) 飛沫の気化潜熱フラックスの計算法

飛沫の存在による気温変化に関する実験, 観測結果を基に飛沫の潜熱フラックスをモデル化する試みはなされているが(e.g. Andreas, 1992), 本研究ではできる限り一般的な関係を基に飛沫の気化潜熱フラックス q_{sp} は次式により表される。

$$q_{sp} = Lw \quad (1)$$

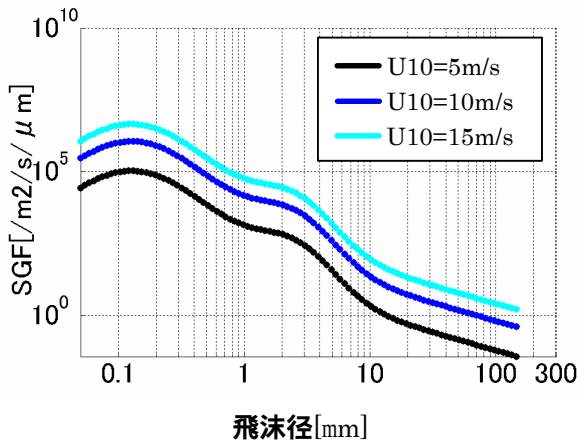


図-2 本研究で用いた Gong(2003)による SGF

ここで L は気化潜熱係数, w は蒸発速度である. 蒸発速度を求める為のモデルは数多く提案されているが本研究では乱流中の蒸発速度を表す次式により求める(上田, 2000).

$$w = 0.0018 \frac{K}{v} u (e_s - e) \times 10^{-2} \quad [\text{kg/m}^2/\text{s}] \quad (2)$$

$K[\text{m}^2/\text{s}]$ は水蒸気の拡散係数, $v[\text{m}^2/\text{s}]$ は動粘性係数, $u[\text{m/s}]$ は水面上での風速, $e_s[\text{Pa}]$ は水面における飽和水蒸気圧, $e[\text{Pa}]$ は周囲の蒸気圧である. 曲率を有する水面上での飽和蒸気圧は Kelvin の式より求める.

$$e_s = e_{s0} \exp\left(\frac{2s}{re_s}\right) \quad (3)$$

ここで σ は表面張力係数, r は水面の曲率半径であり本研究では飛沫半径を用いる. e_{s0} は静水面上の飽和蒸気圧であり Murray の近似式より求める.

$$e_{s0} = 610.8 \exp\left(\frac{aT}{T+b}\right) \quad (4)$$

$T[^\circ\text{C}]$ は気温, $a=17.27$, $b=237.3$ は定数である. また, 周囲の蒸気圧 e は比湿 S から次式のように求める.

$$e = \frac{M_{\text{air}}}{M_{\text{vapor}}} p S \quad (5)$$

ここで M_{air} , M_{vapor} はそれぞれ空気と水蒸気の分子量であり, p は気圧である.

式(1)により求めた飛沫水面からの潜熱フラックスに基づき, 海表面からの飛沫の蒸発による潜熱フラックス Q_{sp} を次式の様に求め, 気象モデルの海面における熱輸送フラックスの境界条件に加える事により飛沫による熱輸送の効果を評価する.

$$Q_{sp} = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} 4\pi r_0^2 q_{sp} t \frac{dF}{dr_0} dr_0 \quad (6)$$

$r_{\min}$, $r_{\max}$ は考慮する飛沫径の範囲を表し本研究ではそれぞれ $0.1\mu\text{m}$, $300\mu\text{m}$ とした. r_0 は発生時の飛沫径, t は飛沫による熱輸送の継続時間, $dF/dr_0 [1/\text{m}^2/\text{s}/\mu\text{m}]$ は単位時間中, 単位海表面積から発生する径 r の飛沫数を

表-2 本研究で行った数値実験ケース

Run	y/m/d	SGF
1	2009/10/6	飛沫なし
2	2009/10/6	式(10)により与える
3	2009/10/6	沿岸域のみ SGF を 100 倍

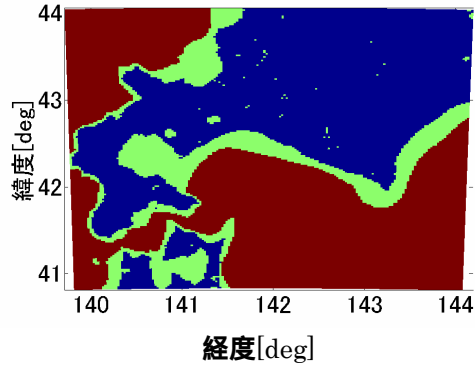


図-3 領域 2 (青が陸地, 緑が沿岸域, 赤が外洋)

表す Spray Generation Function(SGF)である. 熱輸送継続時間 t は飛沫の滞空時間 t_r または飛沫が完全に蒸発するのに要する時間 t_e のいずれか短い方を取るものとする. 即ち,

$$t = \min[t_r, t_e], \quad (7)$$

$$t_r = \frac{h_0}{w_t}, \quad (8)$$

$$t_e = \frac{rr}{3w}. \quad (9)$$

ここで w_t は飛沫径に依存して決定される終端落下速度である. また h_0 は飛沫発生時の水面からの初期高さであり, 本研究では Blanchard・Woodcock(1957)の実験結果に基づき $h_0=15\text{cm}$ とした.

(3) 計算条件

計算期間は 2009 年 10 月 6 日の日本時間 9 時から 21 時までの 12 時間を助走期間とし, その後 21 時から 7 日の 9 時までの 12 時間を対象期間とした. 6 日の 21 時から経過時間を t と表す. National Centers for Environmental Prediction(NCEP)から提供される空間解像度 1 度の再解析データ Final analysis(FNL)を 6 時間おきに入力した.

図-1 及び表-1 に計算領域と計算条件を示す. 本研究では図-1 に示すように 2 領域でのネスティングを行っており, 本論文では示す結果は全て水平方向グリッドサイズを 2km , 領域サイズを $362\text{km} \times 362\text{km}$ として計算した領域 2 で得られたものである.

前節の方法で飛沫による熱輸送量を計算する為には飛沫発生量を $SGF(dF/dr)$ により与える必要がある. SGF は外洋における観測結果に基づき数多くのモデルが提案

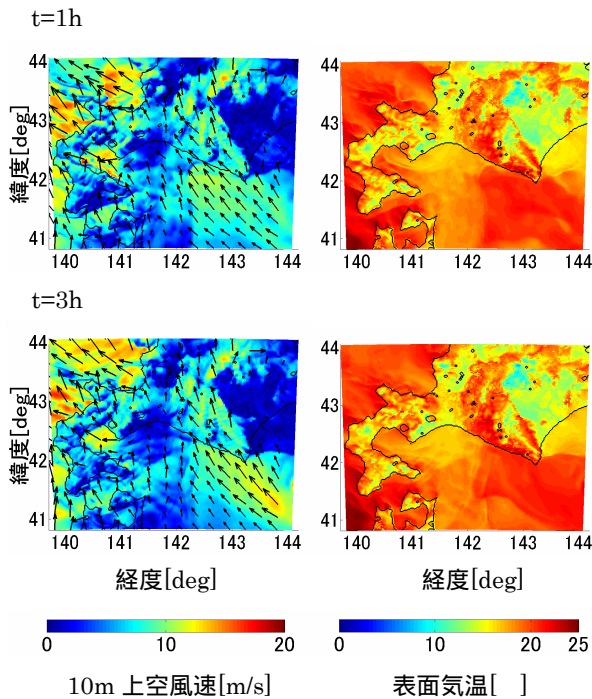


図-4 飛沫を考慮しないRun1の気象モデルによる10m上空風速(左)と表面気温(右)の計算結果

されている．本研究では低風速時から比較的高風速時までの外洋における観測データを元に，bubble burstingにより発生する飛沫数を10m上空風速 U_{10} から求める為のSGFモデルを提案したGong(2003)の式を用いた(図-2)．

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

$$A = 4.7(1 + qr)^{-0.017r^{-1.44}} \quad (11)$$

$$B = \frac{0.433 - \log r}{0.433} \quad (12)$$

ここで $q=30$ である．本研究では[1]飛沫の発生を考慮しない場合(Run1)，[2]Gong(2003)のSGFにより見積もられる飛沫発生量に応じた潜熱フラックスを考慮した場合(Run2)，[3][2]同様飛沫による効果を考慮し，かつ水深が100m以下である沿岸域(図-3参照)のみにおいてSGFを2オーダー増加させた場合(Run3)の気象変化を計算した．表-2に各数値実験ケースの一覧を示す．

3. 計算結果

(1) 飛沫による海上気象の変化

図-4は飛沫の効果を考慮しないRun1における10m上空風速，表面気温の気象モデルによる $t=1h$ ， $3h$ の計算結果である．ここに示す計算領域2の海上では計算期間に渡って5～15m/sの風が様に北西に向かって吹いており，風速に伴い表面気温も変化している事がわかる．

図-5は飛沫を考慮したRun2と飛沫を考慮していないRun1との10m上空風速と表面気温のそれぞれの差である．飛沫の発生に応じて10m上空風速は0.05m/s程の

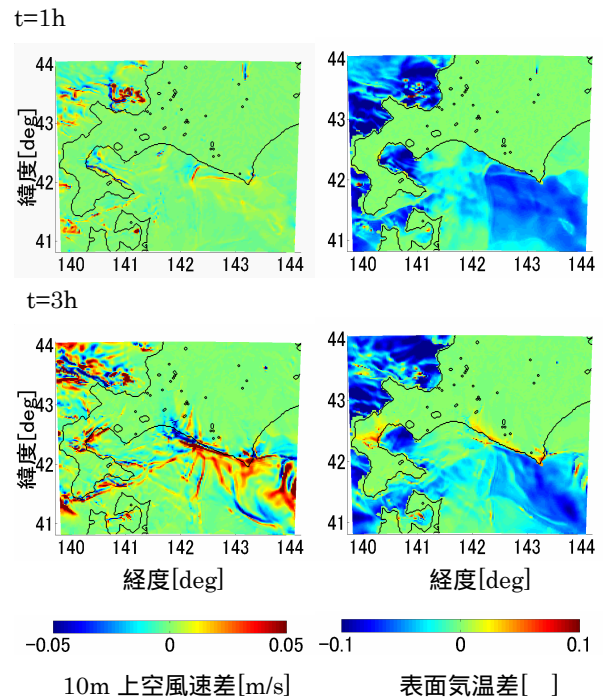


図-5 飛沫の効果による10m上空風速の変化(左)と，表面気温の変化(右)(Run2とRun1の差)

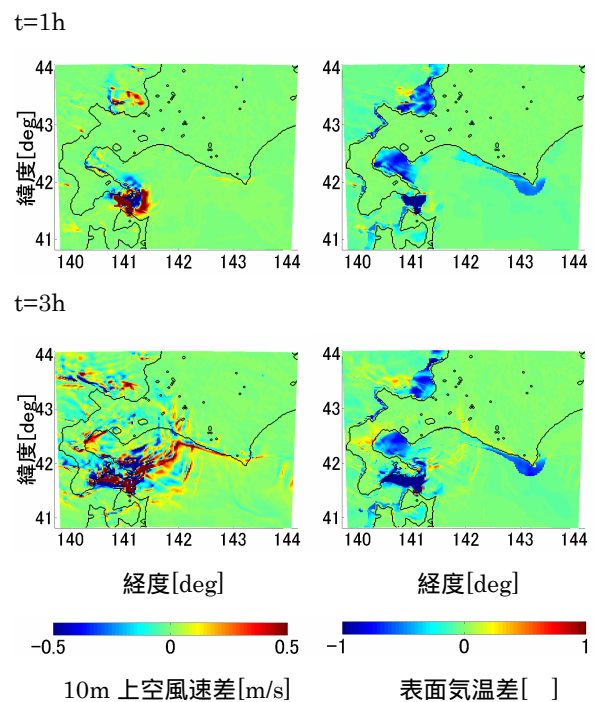


図-6 沿岸域のSGFを100倍して計算したRun3と飛沫を考慮しないRun1との10m上空風速(左)と表面気温(右)のそれぞれの差($t=1h$ ， $3h$)

増加を示し，気温は0.1程の低下を示した．また，風速が大きい領域でより飛沫による効果が現れている事が確認でき，これは風速がSGFに直接影響を与え飛沫の発生が増加している事も確認できたと言える．

(2) 沿岸域における飛沫発生増加による効果

図-6は飛沫を考慮し，沿岸域においてのみSGFを2

オーダー増加させた Run3 と飛沫を考慮しない Run1 との 10m 上空風速と表面気温のそれぞれの差を示している。沿岸域では風だけではなく、砕波や越波等によっても飛沫が発生するので外洋に比べて飛沫発生量が多くなることが知られているが、その詳細な予測法等はまだ多くの研究がなされていないので、本研究では水深が 100m 以下の沿岸域での SGF を Gong(2003)の式(10)を単純に 100 倍したものにして見積もっている。その結果沿岸域において 10m 上空風速は最高で 1 オーダー以上の増加、表面気温は最高で 1 オーダー以上の低下を示した。特に広く沿岸域になっている範囲でその変化が大きく現れていることも確認できた。本研究では、水深のみで沿岸域を定めており、沿岸域での波の発生を考慮していない。従って、波が強く発生する所ではこの結果は過小評価になっており、内湾等の波が穏やかな所では過大評価になっている可能性がある。

4. 結論

本研究で提案した飛沫による熱フラックス計算を気象モデルの中に組み込み、飛沫が海上気象場に与える影響について調べた。本研究の計算条件では風速に依存して 0.1 程度の気温低下が海面近傍で確認された。また、沿岸域にのみ 100 倍にした SGF を与えて計算し、

飛沫を考慮していない計算結果と比べた結果、外洋に比べ沿岸域では風速が 1 オーダーの増加、表面気温が 1 オーダーの低下を示しているのを確認した。特に沿岸域が広く広がっている範囲でその変化は大きい事を確認した。

参考文献

- 1) 猿渡亜由未・阿部伸弘(2011):海からの飛沫の発生に対する海面近傍の気温分布の応答, 海岸工学, Vol67, No2, 2011, I_371-I_375
- 2) 上田政文(2000):湿度と蒸発 - 基礎から計測技術まで -, コロナ社。
- 3) Andreas, E.L.(1992):Sea spray and the turbulent air-sea heat fluxes, J.Geophys, 97, C7, pp.11429-11441
- 4) Blanchard, D.C. and A.H.Woodcock(1957):Bubble formation and modification in the sea and its meteorological significance, Tellus, 9, pp.145-158.
- 5) De Leeuw, G.(1999):Sea spray aerosol production from waves breaking in the surf zone. J.Aerosol Sci., 30, Suppl.1, pp.S63-64.
- 6) Gong, S.L.(2003):A parameterization of sea-salt aerosol source function for sub- and super-micron particles, Global Biogeochemical Cycles, 17, 4,