大気エアロゾルの海上現地観測

猿渡亜由未¹・渡部靖憲²・山田朋人³・大塚淳一⁴・馬場康之⁵・
水谷英朗⁶・久保輝広⁷・内山雄介⁸・森信人⁹・二宮順一¹⁰

¹正会員 北海道大学 大学院工学研究院 (〒 060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

E-mail: saruwata@eng.hokudai.ac.jp

²正会員 北海道大学 大学院工学研究院 (〒 060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

E-mail: yasunori@eng.hokudai.ac.jp

³正会員 北海道大学 大学院工学研究院 (〒 060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

E-mail: tomohito@eng.hokudai.ac.jp

⁴正会員 寒地土木研究所 (〒 062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)

E-mail: 08900@ceri.go.jp

⁵正会員 京都大学 防災研究所 (〒 649-2201 和歌山県西牟婁郡白浜町堅田 2500-106)

E-mail: baba.yasuyuki.7z@kyoto-u.ac.jp

⁶正会員 京都大学 防災研究所 (〒 649-2201 和歌山県西牟婁郡白浜町堅田 2500-106)

E-mail: mizutani.hideaki.7e@kyoto-u.ac.jp

⁷京都大学 防災研究所 (〒 649-2201 和歌山県西牟婁郡白浜町堅田 2500-106)

E-mail: kubo.teruhiro.3s@kyoto-u.ac.jp

⁸正会員 神戸大学 大学院工学研究科 (〒 657-0013 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)

E-mail: uchiyama@harbor.kobe-u.ac.jp

⁹正会員 京都大学 防災研究所 (〒 612-8235 京都府京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

E-mail: mori.nobuhito.8a@kyoto-u.ac.jp

¹⁰正会員 金沢大学 理工学域 (〒 920-1192 金沢市角間町)

E-mail: jnino@se.kanazawa-u.ac.jp

海から発生する波飛沫は大気-海洋間の熱、湿度、運動量の輸送量を決定すると共に、海塩粒子となって大気エアロゾルを構成することから、海上気象場に影響を与える重要なファクターの一つとなっている一方、その発生量は様々な要因に影響を受けることから精度良い見積もりが困難である。本研究では波飛沫発生量と気象、海象条件との関係を明らかにすることを最終的な目的とし、和歌山県田辺湾上において大気エアロゾルの粒子数密度の海上現地観測を行った。測定対象の三粒径 ($0.3, 1.0, 5.0 \mu\text{m}$) のうち最も小さい粒子の数密度は観測期間を通して 100 km 以上のスケールの大気環境に支配され、平常時は波飛沫由来の海塩粒子の影響を多く含まないことが分かった。しかし太平洋側からの強風が卓越する気象イベント時には何れの粒径の観測結果でも風速に対する単調増加傾向を示すことが確認された。この傾向は白波砕波が発生し始めると言われる海上風速 6 ms^{-1} 以上の条件で表れ始めていることから、波飛沫由来の海洋性エアロゾル濃度の増加を観測した結果であると考えられる。

Key Words: Sea spray, atmospheric aerosols, in situ observation, particle counter

1. はじめに

様々な要因により海面から絶えず発生している波飛沫は、海上気象を決定する重要なファクターのひとつとなっている¹⁾。小径の飛沫は発生後即座に蒸発し周囲の大気と熱、湿度を交換すると共に、海塩粒子を形成して海洋性エアロゾルとして大気へと供給される。比較的大径のものは周囲の空気流により加速後、再着水することにより大気から海洋への運動量輸送に寄与している。

多くの海上飛沫は、白波砕波等により海中に混入した気泡が浮上した際に気泡と海表面との間に形成された水膜が弾けることにより形成され (film droplets)、この飛沫の径は $O(1 \mu\text{m})$ 以下と言われている。Film droplets

に続いて水膜が弾けた後に形成されたキャビティが跳ね上がることにより jet droplets と呼ばれる $O(10 \mu\text{m})$ 程度の飛沫も発生する。白波砕波率は海上風速 $4\text{--}6 \text{ ms}^{-1}$ 以上のとき風速に依存して急激に上昇すると言われており^{2),3)}、film/jet droplets の発生量も風速に対し同様の応答をすると考えられる。風速が $9\text{--}12 \text{ ms}^{-1}$ 以上となると波のクレストが風とのせん断により引きちぎられて spume と呼ばれる $O(10\text{--}100 \mu\text{m})$ の飛沫が発生し^{4),5)}、海上にエアロゾルが更に供給される。

これまで多くの研究により飛沫発生量とそのサイズスペクトルを予測する為のモデルが提案されてきたものの、それぞれのモデル間で飛沫量の予測値が数オーダー異なる場合もあり、その予測法はまだ確立されていない⁶⁾。その一因は海上データ取得の困難さから現

図-1 観測地点位置と、本研究で利用した和歌山県、兵庫県一般局による粒子状物質濃度測定地点、及び気象庁 AMeDAS 南紀白浜位置。

地データが不足していることが挙げられる。また波飛沫の発生量とサイズスペクトルは海上風速の他、白波被覆率や波高、水温、気温、湿度、海水の成分等により変化することが知られているものの、既往モデルでは主な支配要因である海上風速と白波被覆率以外の要因を殆ど考慮していないことも、予測の不確実性の一因となっている。

本研究の最終的なゴールは飛沫由来のエアロゾル数

図-2 観測塔と機器設置位置。

密度と気象、海象条件との関係を明らかにすることであり、そのために過去3年間に渡り海上現地観測を行ってきた。本論文では、海洋由来の粒子とそれ以外の粒子による影響が共に含まれる観測結果の内、現地以外の地域から移流されてきたエアロゾルの影響について検討し、観測結果の解析手法を確立する。また、本観測結果の中で海洋由来のエアロゾルの影響が卓越する条件について調査した。

2. 現地観測

現地観測は、京都大学防災研究所 白浜海象観測所の田辺中島高潮観測塔にて行った(図-1)。観測塔の座標は北緯 $33^{\circ}42'32''$ 、東経 $135^{\circ}19'58''$ であり、和歌山県南東部の西側に開けた田辺湾湾口(湾口幅約4km)の中ほどの、汀線から2km程離れた海上に位置している。観測塔付近の水深は30m程度であるが、海丘の頂上に位置する観測塔の直下の水深は約10mとなっている。

本観測塔の海面上10m地点の南向きテラス上にパーティクルカウンタ(APC ErgoTouch, Biotest社製)を設置して、海上エアロゾル濃度を測定した(図-2参照)。Film dropletsの発生高さは海面から15–20cm程度^{7),8)}、spumeは波高程度⁹⁾と言われており、本設置高度では海面から発生した水飛沫の直接観測ではなく、それに起因して空気中に供給された海塩粒子を測定していることになる。テラスから塔の半径方向に突き出して延ばされた長さ80cm、内径6mmのサンプリングチューブの先端のノズルから流量28.3L/minで吸引された空気はパーティクルカウンタ本体に取り込まれ、空気中含まれる0.3, 1.0, 5.0 μm 径の粒子の個数がカウントされ

図-3 2013 年 (a), 2014 年 (b), 2015 年 (c) 観測期間中における海上エアロゾル粒子数密度.

る（装置の計数損失は測定数密度 $7 \times 10^7 \text{ m}^{-3}$ で 5%）。これらの径は飛沫が蒸発することにより形成される海洋性エアロゾルのサイズレンジの内、ピーク付近のサイズに相当する。本装置でカウントしているのは空気中に含まれる微粒子の数であるため、観測結果には現地で発生する波飛沫に由来する海洋性エアロゾルと陸から移流してくる内陸性エアロゾルの両方の影響が含まれている。パーティクルカウンタの設置期間は 2013 年 8 月 27 日–11 月 27 日（92 日間）、2014 年 7 月 22 日–10 月 30 日（100 日間）、2015 年 7 月 29 日–11 月 5 日（99 日間）の毎年夏季の約 3 か月間であり、この間

1 時間毎に 1 分間ずつの吸気、測定を行った。現地で使用可能な電力、メモリの制限によりこれ以上細かい周波数でのサンプリングは行っていないが、本データを各時刻の代表値とし、強風イベント発生前後での粒子数のオーダーの変化に着目して解析を行った。

本観測塔では、風速、風向、日射、気温、湿度、気圧、海水面温度、水温、波高、波の周期など、種々の気象海象の常時観測が行われてきた^{10),11),12),13),14)}。本研究では大気エアロゾル粒子数密度と、観測塔の平均海面から 23 m 高さの地点に固定されている超音波風速計による風速風向測定結果との関係を調査する。

図-4 2013 年 (a), 2014 年 (b), 2015 年 (c) 観測期間中の観測塔 23 m 上空風速（青）と気象庁 AMeDAS 南紀白浜における風速（黒）. (b のみ縦軸のレンジが異なる.)

3. 観測データ

図-3 は 2013 年から 2015 年までの海上エアロゾル濃度の全観測結果の時間変化を表す. ここで, 全ての観測結果は単位体積当たりのエアロゾル粒子数に換算されており, 横軸は各年 8 月 1 日 00:00 (JST) からの経過日数としている. 本研究で測定した 3 粒径の粒子数密度はそれぞれ粒径が小さくなる程 1-2 オーダーずつ増加した. ここで全測定期間中のそれぞれの粒径の時系列間には殆ど相関が見られなかった (相関係数 $R < 0.17$). これは, 陸域に比較的近い本観測地点では特に平常時は陸起源のエアロゾルの影響を受けやすく, 粒径毎に主要な構成粒子の起源が異なっているためであると考えられる. ただし後述する様に強風時のみを抽出すると海起源の粒子の増加により 3 粒径間の相関が表れる.

図-4 は対応する期間における観測塔 23 m 高さ, 及び観測塔から最も近い気象庁の観測所である AMeDAS 南紀白浜 (図-1 参照) における観測風速の時間変化である. 単純に風速とエアロゾル濃度とを比較してみ

ても, いずれの粒径の測定結果にも明確な依存関係は見られないことが確認された.

4. 海塩粒子由来以外のエアロゾル

観測地点における粒子数密度に対する波飛沫以外に由来するエアロゾルによる影響を調べる為に, 兵庫県及び和歌山県の一般環境大気測定局 (網干, 王子, 浜甲子園, 洲本市役所, 会津公園, 位置は図-1 参照) において測定された空気中の微小粒子状物質 PM2.5, SPM の濃度と本研究の観測結果とを比較した. 本研究で利用した環境測定局の位置は観測塔から最大約 140 km 離れた地点に位置している (兵庫県, 網干). PM2.5 は粒径 $2.5 \mu\text{m}$ 以下 (組成に依るが, ピーク径は一般に $O(0.1 \mu\text{m})$), SPM は粒径 $10 \mu\text{m}$ 以下 (ピーク径は一般に $O(1 \mu\text{m})$) の大気中の微粒子と定義される. また微小粒子状物質は硫酸塩や硝酸塩, 炭素など多くの種類の物質により構成され, その 99% が海洋以外に由来していると言われている¹⁵⁾.

図-5 2013 年 (a), 2014 年 (b), 2015 年 (c) 観測期間中の、観測塔周辺の一般環境大気測定局における PM2.5 及び SPM の観測結果。観測データは兵庫県及び和歌山県よりご提供。

表-1 兵庫県及び和歌山県の一般環境大気測定局で測定された PM2.5, SPM 濃度と、エアロゾル濃度観測結果との対数変換相関係数 R . $R \geq 0.5$ を太字で記す. 括弧付きは期間中欠測を多く含むもの. (上) 2013 年, (中) 2014 年, (下) 2015 年.

2013	PM2.5			SPM		
	0.3 μm	1.0 μm	5.0 μm	0.3 μm	1.0 μm	5.0 μm
洲本市役所	(0.65)	(0.15)	(0.09)	(0.51)	(0.14)	(0.10)
王子	0.61	0.17	0.06	0.51	0.21	0.20
浜甲子園	—	—	—	0.56	0.25	0.17
網干	0.71	0.36	0.43	0.38	0.17	0.09
会津公園	0.46	0.17	0.08	0.60	0.41	0.25

2014	PM2.5			SPM		
	0.3 μm	1.0 μm	5.0 μm	0.3 μm	1.0 μm	5.0 μm
洲本市役所	0.46	-0.07	0.03	(0.13)	(0.02)	(0.02)
王子	0.46	-0.09	-0.02	0.26	0.13	0.07
浜甲子園	—	—	—	(0.34)	(0.14)	(0.08)
網干	0.32	-0.01	0.04	0.13	0.12	0.01
会津公園	0.60	0.08	0.07	0.49	0.32	0.14

2015	PM2.5			SPM		
	0.3 μm	1.0 μm	5.0 μm	0.3 μm	1.0 μm	5.0 μm
洲本市役所	0.53	0.07	0.07	(0.19)	(0.08)	(0.02)
王子	0.63	0.05	0.05	0.54	0.17	0.03
浜甲子園	0.64	0.04	0.08	0.45	0.14	0.06
網干	0.49	0.10	0.08	(0.28)	(0.09)	(-0.01)

図-5 は本研究の観測期間と同一期間における、一般環境大気測定局において測定された PM2.5 及び SPM 濃度の時間変化を表す. 全ての測定局における PM2.5 と SPM の濃度遷移と、本研究における 0.3 μm 粒径の粒子数密度の遷移との間には類似性が見られた (図-5 と 図-3 の 0.3 μm を比較). この類似性は風向に依存せず、全観測期間を通して確認された. 表-1 の様に本研究と一般局におけるエアロゾル測定結果の対数変換値に対する相関係数 R を求めると、PM2.5 濃度に対する 0.3 μm 粒子数密度の相関は $R = 0.32\text{--}0.71$ の範囲であり、多くの結果で $R \geq 0.5$ の比較的高い相関を示した. SPM についても最大で $R = 0.60$ と比較的高めの値を示したが、PM2.5 程の高い相関がなかったのは SPM と本研究の測定粒子の粒径差が大きいこと、大径粒子の方が雨等により除去されやすいことが要因として挙げられる. また、何れの粒子状物質についても 2014 年の相関係数が他の観測年に比べ小さめになっているのは、次章で述べる様に 2014 年は強風イベントが頻発し本海上観測において海塩粒子由来のエアロゾルが相対的に多く観測されたためと考える. 以上の結果より、海上観測塔における平常時の 0.3 μm 径の粒子濃度は、少なく

とも 100 km 以上のスケールの広範囲の微小粒子状物質の分布に支配されていることが明らかとなった. 一方 1.0 μm , 5.0 μm 粒径の粒子数密度と陸上で測定された粒子状物質濃度との相関は概ね 0.2 以下と、両者の関連性は見られなかった. つまりこの粒径の観測結果は、よりローカルな影響を相対的に大きく受けていると考えられる.

5. 観測データの抽出

(1) 風向の影響

本観測で得られた海上エアロゾル濃度の風向への依存性について検討する. 図-6 は、観測塔 23 m 高さにおいて測定された風速と観測微粒子数密度との関係をプロットしたものである. それぞれ風向が、東、西、南、北向き $\pm 45^\circ$ の条件で場合分けして、全観測データについて図示している. このうち南風条件の場合のみ、風速が $O(10 \text{ ms}^{-1})$ となる強風時において、粒子数密度の風速に対する単調増加傾向が表れている. パーティクルカウンタは観測塔の南側に設置されているため、南寄りの風が吹く際は観測結果に対する塔の後流による

図-6 (a) 北風, (b) 西風, (c) 南風, (d) 東風条件の時の 23 m 上空風速と粒子数密度との関係. (赤) $0.3\ \mu\text{m}$, (緑) $1.0\ \mu\text{m}$, (青) $5.0\ \mu\text{m}$ 粒径の測定結果.

表-2 本研究で抽出した強風イベント. 括弧書き付きは台風から変わった温帯低気圧.

#	期間	要因
1	2013.09.14–18	T201318
2	2014.08.09–11	T201411
3	2014.09.24–26	温低 (T201416)
4	2014.10.05–08	T201418
5	2014.10.13–15	T201419
6	2014.10.26–30	温低
7	2015.08.16–18	温低
8	2015.10.01–03	温低 (T201521)

影響が最も小さくなると考えられる. また多くの既往研究で飛沫ソース関数が風速をパラメータとして飛沫発生量を予測しているように, 海上の海塩粒子濃度は風速に依存した増加傾向を示すものと予想される. 即ち, 本観測条件では観測塔の後流の影響が小さく且つ外洋側から強風が卓越したときに, 波飛沫による海上エアロゾル濃度の変化が測定できていると考えられる.

(2) 強風イベント時の微粒子数密度

本観測で海塩粒子による影響が支配的となると考えられる南寄りの強風イベント時のデータのみを抽出した場合の観測エアロゾル粒子数の風速への依存性について調査する. 強風イベントは, 観測塔 23 m 上空において概ね $10\ \text{ms}^{-1}$ 以上のピーク風速が観測された時刻

を中心として, その前後 1–2 日間を 1 イベントとした. 各イベントの期間と発生要因は表-2 にまとめられる通りであり, 4 つの熱帯低気圧の通過と 4 つの強い温帯低気圧の発達に起因するものである. 図-7 はそれぞれのイベント中で南寄りの風が最も強化された時刻の風速と海面気圧の分布を表す (データは気象庁 MSM より). イベント 2, 3, 5, 8 は比較的安定して南寄りの強風が観測サイトに吹き続けていた一方, 1, 4, 6, 7 は台風の通過中, 若しくは温帯低気圧の発達過程で一時的に強い南風が形成されたイベントであった.

強風イベント期間中, 風向きが南寄り (南 $\pm 90^\circ$) の場合のデータのみを抽出し, 23 m 上空風速と観測エアロゾル粒子数との関係をプロットした (図-8). ここで抽出データのうち最大風速は $26.1\ \text{ms}^{-1}$ であった. 図-6 (c) でも確認されたように, いずれの粒径においても概ね $10\ \text{ms}^{-1}$ 程度を境に風速の変化に対する粒子数の応答の特徴が異なっている. 津守ら³⁾ は本研究と同一の観測塔に設置した固定デジタルビデオカメラにより取得した海面の連続画像から, 白波被覆率と風速との関係を調べている. それによると 10 m 上空風速が $6\ \text{ms}^{-1}$ 以上になると急激に白波被覆率が増大することを明らかにしている. この風速を 23 m 上空風速に換算したものを図-8 中にも示しているが, これは粒子数の風速への応答の違いを表す代表風速となっていそうである. つまり本風速以上の条件で観測されたエアロゾル粒子は, 白波砕波により発生量が増加した film/jet droplets に起因する海塩粒子の影響が反映されたものであると考える.

何れの粒径においても強風条件下における風速に対

図-7 強風イベント1から8の期間中、観測地点で最も南寄りの風が強化された時刻における10 m 上空風速（カラー、ベクトル）と海面気圧（等高線）。データは気象庁MSMより。

図-8 強風イベント期間中の23 m 上空風速と (a) $0.3 \mu m$, (b) $1.0 \mu m$, (c) $5.0 \mu m$ の観測粒子数密度との関係。黒点線は $U_{10} = 6 ms^{-1}$ に相当。

する粒子数の単調増加傾向が確認される。前章で平常時はより広域の大気エアロゾル濃度分布に支配されることが確認された $0.3 \mu m$ 粒子数についても同様の風速への依存性が表れており、飛沫の発生量が増加する強風時には本粒径のエアロゾル粒子でも海塩粒子による寄与が増大するものと考えられる。低風速条件下では

風速に対する粒子数のばらつきが大きく明確ではないものの、 $0.3 \mu m$, $1.0 \mu m$ の粒子数については風速の低下に伴う一定値への漸近傾向が見られる。 $5.0 \mu m$ 粒子では低風速時に風速の増加に伴う粒子数の減少傾向が認められるが、この理由については引き続き検討する必要がある。

図-9 強風イベント期間中の 23 m 上空風速と (a) 0.3 μm , (b) 1.0 μm , (c) 5.0 μm の S3F との関係.

6. 飛沫ソース関数との比較

既往研究で提案されてきた飛沫のソース関数 dF/dr (Sea-Spray Source Function, S3F)^{e.g.6)} と本研究の測定結果を比較するために、観測粒子数密度を飛沫の発生フラックスに換算する. S3F は飛沫の発生量の予測モデルであり、 r_0 から r_1 までの dF/dr の積分値は、単位時間に単位海表面積から発生する半径 r_0 から r_1 までの波飛沫の数を表す. 観測された粒子数密度からソース関数への換算は、既往研究で用いられてきた次の関係により行った.

$$\frac{dF}{dr} = V_{dep}(r) N(r) \quad (1)$$

ここで、 N は半径 r の飛沫の数密度、 V_{dep} は半径 r の飛沫の落下速度であるが、飛沫数密度が平衡状態にある場合これは飛沫発生時の上昇速度と等しいと仮定している. 本研究では V_{dep} は Andreas et al.¹⁶⁾ が提案する方法で見積もった. また、前述の様に本研究の観測結果には飛沫由来以外のエアロゾル粒子も同時にカウントしているが、荒天時の観測結果は飛沫による寄与が支配的であると仮定して、前章の方法で抽出した本研究の観測結果をそのまま飛沫数密度 N として用いた.

図-9 に本観測結果から求めた飛沫ソース関数と風速との関係を表す. また、Monahan et al.¹⁷⁾, Gong¹⁸⁾, Smith et al.¹⁹⁾, Lewis & Schwartz²⁰⁾, Andreas^{21),22)}, de Leeuw²³⁾, Petelski & Piskozub²⁴⁾ により提案された S3F モデルによる予測結果も併せてプロットしている. 各モデルで

想定している飛沫の種類や風速域が異なるため、予測結果に数オーダーの差異があり単純に比較はできないものの、本研究の観測結果は既往の予測モデルと必ずしも一致しないことが分かる. また、何れのモデルも海上風速のみをパラメータとしたものであるが、波浪条件、水温、湿度、気温、海水の成分などその他の条件によっても発生する海塩粒子の量は変わる筈であり、それら諸条件に対する大気エアロゾル濃度の応答などについても今後より詳細に調査する必要がある.

7. 結論

本研究では和歌山県白浜町田辺湾において海上エアロゾル粒子の現地観測を行った. 観測を行ったのは 0.3, 1.0, 5.0 μm の 3 粒径であるが、全観測期間中の各粒径の粒子数密度の間には殆ど相関が無く、平常時はそれぞれ起源の異なる粒子が数密度を支配しているものと考えられる. 0.3 μm 粒子数密度については観測サイトから最大 140 km 離れた兵庫県及び和歌山県の一般環境大気測定局において測定された PM2.5 及び SPM の濃度と比較的高い相関があることが確認され、本粒径の観測結果は 100 km 以上のスケールの広域の大気エアロゾルの分布に大きく影響を受けていることが明らかとなった. 一方 1.0, 5.0 μm 粒子の数密度は周辺の一般局における粒子状物質濃度との相関は全く見られず、これらの観測結果はよりローカルなエリアにおいて発生したエアロゾルの影響を受けているものと予想される.

平常時は種々の要因の影響を受ける海上エアロゾル粒子数であるが、風向と期間を限定することにより波飛沫由来と考えられるエアロゾル粒子数の変動を抽出することができた。南風条件の場合、観測サイト南側に広がる太平洋上で発生した海塩粒子が運ばれてくることにより観測結果に対する海洋性粒子の寄与が増し、また強風イベント中は大量に発生する波飛沫により観測結果に対する海塩粒子の影響が増大した。これらにより南風が卓越する強風イベントの際は、白波砕波が発生し始める 6 ms^{-1} 以上の風速に対してエアロゾル粒子数が単調増加する傾向が表れた。

今後は風速以外の条件に対する海上エアロゾル粒子数の応答について詳細に調査する必要がある。

謝辞: 本研究で使用した PM2.5 及び SPM の濃度観測データは、兵庫県環境影響評価室及び和歌山県環境管理課からご提供頂いた。また本研究は京都大学防災研究所一般共同研究費及び JSPS 科学研究費補助金から助成を受けた。ここに記し謝意を表する。

参考文献

- Veron, F.: Ocean spray, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol.47, No.1, pp.507–538, 2015.
- Monahan, E. C.: Oceanic whitecaps, *Journal of Physical Oceanography*, Vol.1, No.2, pp.139–144, 1971.
- 津守博通・杉原裕司・古寺大悟・吉岡洋・芹澤重厚: 気象・波浪条件が白波被覆率に及ぼす影響, 海岸工学論文集, Vol.51, pp.51–55, 2004.
- Koga, M.: Direct production of droplets from breaking wind-waves — its observation by a multi-colored overlapping exposure photographing technique, *Tellus*, Vol.33, pp.552–563, 1981.
- Andreas, E. L.: Sea spray and the turbulent air-sea heat fluxes, *J. Geophys. Res.*, Vol.97, No.C7, pp.11429–11441, 1992.
- Grythe, H., Ström, J., Krejci, R., Quinn, P., and Stohl, A.: A review of sea-spray aerosol source functions using a large global set of sea salt aerosol concentration measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, Vol.14, pp.1277–1297, 2014.
- Blanchard, D. C. and Woodcock, A. H.: Bubble formation and modification in the sea and its meteorological significance, *Tellus*, Vol.9, No.2, pp.145–158, 1957.
- Edson, J. B. and Fairall, C. W.: Spray droplet modeling: 1. lagrangian model simulation of the turbulent transport of evaporating droplets, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol.99, No.C12, pp.25295–25311, 1994.
- Edson, J. B., Anquetin, S., Mestayer, P. G., and Sini, J. F.: Spray droplet modeling: 2. an interactive eulerian-lagrangian model of evaporating spray droplets, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol.101, No.C1, pp.1279–1293, 1996.
- 馬場康之・水谷英朗・久保輝広・内山雄介・森信人・渡部靖憲・山田朋人・猿渡亜由未・大塚淳一: 田辺中島高潮観測塔における 2013 年夏季観測結果, 京都大学防災研究所年報, B, Vol.56, pp.455–461, 2014.
- 馬場康之・水谷英朗・久保輝広・内山雄介・森信人・渡部靖憲・山田朋人・猿渡亜由未・大塚淳一・二宮順一: 田辺中島高潮観測塔における 2014 年夏季観測結果, 京都大学防災研究所年報, B, Vol.57, pp.315–320, 2015.
- 馬場康之・水谷英朗・久保輝広・内山雄介・森信人・渡部靖憲・山田朋人・猿渡亜由未・大塚淳一・二宮順一: 田辺中島高潮観測塔における 2015 年夏季観測結果, 京都大学防災研究所年報, B, Vol.58, pp.315–320, 2016.
- 馬場康之・水谷英朗・久保輝広・内山雄介・森信人・渡部靖憲・大塚淳一・山田朋人・猿渡亜由未・二宮順一: 台風通過に伴う田辺湾湾口部における海水温変化について, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, pp.1476–1480, 2014.
- 内山雄介・松川大佑・神吉亮佑・馬場康之・森信人・水谷英朗・渡部靖憲・大塚淳一・山田朋人・猿渡亜由未・二宮順一: 紀伊半島田辺湾湾口部における海水交換特性に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, pp.1446–1450, 2014.
- 横田久司・秋山薫・三好猛雄・上野広行・石井康一郎・樋口幸弘・伊藤雄一: CMB 法による PM2.5 発生源寄与割合の試算について, 東京都環境科学研究所年報, pp. 148–149, 2010.
- Andreas, E. L., Jones, K. F., and Fairall, C. W.: Production velocity of sea spray droplets, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol.115, No.C12, 2010.
- Monahan, E. C., Spiel, D. E., and Davidson, K. L.: *A Model of Marine Aerosol Generation Via Whitecaps and Wave Disruption*, pp. 167–174, Springer Netherlands, Dordrecht, 1986.
- Gong, S. L.: A parameterization of sea-salt aerosol source function for sub- and super-micron particles, *Global Biogeochemical Cycles*, Vol.17, No.4, 1097, 2003.
- Smith, M. H., Park, P. M., and Consterdine, I. E.: Marine aerosol concentrations and estimated fluxes over the sea, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol.119, No.512, pp.809–824, 1993.
- Lewis, E. R. and Schwartz, S. E.: *Sea Salt Aerosol Production: Mechanisms, Methods, Measurements and Models — A Critical Review*, Vol. 152 of *Geophysical Monograph Series*, AGU, 2004.
- Andreas, E. L.: Time constants for the evolution of sea spray droplets, *Tellus B*, Vol.42, No.5, pp.481–497, 1990.
- Andreas, E. L.: A new sea spray generation function for wind speeds up to 32 ms^{-1} , *Journal of Physical Oceanography*, Vol.28, No.11, pp.2175–2184, 1998.
- de Leeuw, G., Neele, F. P., Hill, M., Smith, M. H., and Vignati, E.: Production of sea spray aerosol in the surf zone, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol.105, No.D24, pp.29397–29409, 2000.
- Petelski, T. and Piskozub, J.: Vertical coarse aerosol fluxes in the atmospheric surface layer over the north polar waters of the atlantic, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol.111, No.C6, 2006, C06039.

(2016. 6. 24 受付)

IN SITU MEASUREMENTS OF ATMOSPHERIC AEROSOL OVER THE OCEAN

Ayumi SARUWATARI, Yasunori WATANABE, Tomohito YAMADA,
Junichi OTSUKA, Yasuyuki BABA, Hideaki MIZUTANI, Teruhiro KUBO,
Yusuke UCHIYAMA, Nobuhito MORI and Junichi NINOMIYA

Sea spray is one of the important factors to affect weather conditions over the ocean in terms of constituting an aerosol as well as determining air-sea transport of heat, moisture and momentum. The final goal of this study is to explain the relationship between sea-spray generation and conditions of the atmosphere and ocean for a more accurate prediction of the amount of sea spray. This study conducted three-year field observations of atmospheric aerosol at an offshore observatory in Tanabe Bay, Wakayama. Large-scale (> 100 km) distribution of atmospheric aerosol was found to dominate the concentration of the observed aerosol less than $1\ \mu\text{m}$ in normal weather conditions. During storm events with strong winds from the Pacific Ocean, however, the observed concentration monotonically increased with the wind speed, which is considered to be a result of the increase in oceanic aerosol derived from sea spray.