

消波ブロックによる直立堤での飛来塩分発生量の 低減効果に関する現地観測

Effects of Dissipation Blocks on Reduction of Salt Water Spray Caused at a Vertical Breakwater

山城 賢¹・吉田明徳²・日高倫興³・見國洋平⁴・西井康浩⁵

Masaru YAMASHIRO, Akinori YOSHIDA, Tomooki HIDAKA, Yohei MIKUNI and Yasuhiro NISHII

At Waku fishing port in Yamaguchi pref., which has a vertical breakwater at the mouth of the port, dissipation blocks were installed in front of the breakwater to reduce the sea water spray caused at the breakwater. In this study, to clarify the effect of dissipation blocks on the reduction of the spray caused at the vertical breakwater, field observations were conducted at Waku fishing port in the winter seasons before and after the construction: the wave run-ups (heights and frequency), the wind (velocity and direction) and the salinity concentrations of the spray at 30 observation points were measured. The observed data showed that the dissipation blocks can effectively reduce the sea water spray caused at a vertical breakwater.

1. はじめに

防波堤や護岸は、高波から背後の施設や陸域を防護するという重大な役割を果たす反面、大量の飛来塩分の供給源となる場合がある。山口県下関市の和久地区では、漁港の静穏度を確保するため港口に直立防波堤が設置されたが、暴浪時にはこの防波堤で飛沫が大規模且つ頻繁に打ち上がり、地区の住民は飛来塩分による塩害に長く悩まされていた。この状況を改善するため、2007年から堤体前面を消波ブロックで被覆する工事が開始され、2009年に完了した。

飛来塩分の現地観測はこれまでも数多く行なわれており、防波堤や護岸等の海岸構造物で発生する飛来塩分について現地観測を実施した例としては、樋田ら（1999）による消波護岸で生じる飛沫の現地観測、山田ら（2004）の構造物で生じた飛沫による飛来塩分の輸送に関する現地観測などがある。また、飛来塩分の対策については、砂浜海岸を対象にした、村上ら（1995）の植栽による飛沫低減効果に関する研究などが挙げられる。しかし、直立堤で生じる飛来塩分に対して対策工を施し、その効果を具体的に観測した事例は見当たらない。

著者らは、同地区で2005年から冬季風浪時における飛沫の打上げや飛来塩分量の観測を行っており、これま

で、来襲波と飛沫の打上げ高の関係、防波堤背後に飛来する海水飛沫の粒径等について検討した（山城ら、2006a, 2007）。本論文では、消波ブロック設置前後の飛来塩分量の観測結果を比較し、直立堤で発生する飛来塩分量の消波ブロックによる低減効果について検討した。

2. 観測内容

(1) 対象地区の概略

対象地区である和久漁港地区は、山口県下関市にあり日本海に面している。図-1に当該地区の位置および概略を示す。和久漁港は北西方向に港口を有しており、特に冬季風浪時には暴風暴浪に晒される。そのため、港口から約70m沖に図-2上図に示す直立防波堤（天端高7.1m、堤体幅13.1m、延長140m）が設置され、これにより暴浪を防ぎ港内の静穏度が確保されている。しかしながら、暴浪時には直立堤で大規模な打上げが頻繁に生じ、発生した飛沫や海塩粒子が強風で陸域に運ばれ、地区全体で窓枠の錆などの家屋被害、植木の枯死、洗濯物が干せないなどの塩害が生じている。地域住民によれば、40m以上の打上げが生じ、地区の中央を通る国道付近まで飛沫が雨のように降ることもあるとのことであった。

当該地区では、塩害を被ってきた地域住民の要望により、2005年度冬季に下関市による飛来塩分の調査が行われ、著者らも観測に参加した。同時に、人工リーフ等の対策工が幾つか提案され、効果を比較するための水理模型実験を実施した（山城ら、2006b）。水理模型実験では飛来塩分量を直接評価できないため、越波流量により比較した。その結果、図-2下図に示すように、直立堤の前面を消波ブロックで完全に覆う対策案が最も効果的であったため、これが対策工として適用された。消波ブロッ

1 正会員	博(工)	九州大学助教	大学院工学研究院環境都市部門
2 正会員	工博	九州大学准教授	大学院工学研究院環境都市部門
3 学生会員		九州大学大学院工学府海洋システム工学専攻	
4	修(工)	西部ガス株式会社	
5 正会員	博(工)	(株)三洋コンサルタント調査部長	



図-1 和久漁港の概略と観測位置

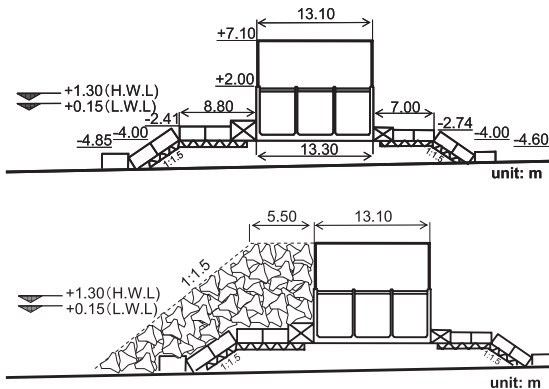


図-2 防波堤断面図（上：ブロック設置前，下：ブロック設置後）

表-1 観測内容

観測回	観測日	観測時間		観測項目			
		開始時刻	終了時刻	波浪	風向風速	飛来塩分	打上げ高
1	2005年12月13日	7:30	16:36	●	●	●	●
2	2005年12月22日	7:22	15:53	●	●	●	●
3	2006年2月8日	6:59	15:30	●	●	●	●
4	2006年12月17日	11:40	16:44		●		●
5	2006年12月28日	11:11	15:56		●		●
6	2007年2月14日	13:18	16:50		●		●
7	2007年2月15日	10:01	12:02		●		●
8	2008年2月9日	13:30	16:47		●		●
9	2008年12月22日	9:17	14:48		●	●	●
10	2008年12月23日	8:55	14:25		●	●	●
11	2009年1月10日	9:24	16:37		●	●	●
12	2009年1月11日	9:45	13:43		●	●	●
13	2009年12月18日	9:02	15:41		●	●	●
14	2009年12月19日	8:43	14:04		●	●	●

クは30t（一部40t）で、2007年の夏頃から設置され、同年には防波堤延長の半分、2008年には防波堤の前面全体、そして、2009年に防波堤の端部に設置されて完了した。

（2）観測項目

観測は2005年12月から2009年12月の冬季に合計14回実施した。観測内容を表-1に示す。最初の3回の観測は下関市と合同での調査で、この時は、2005年11月から2006年3月まで波浪観測を実施しており、直立堤による反射波ができるだけ影響しない位置（水深約13m）の海

底に設置した波高計（協和商工（株）製DL-3型）によりサンプリング間隔0.5秒で連続観測を行なった。風向風速は、プロベラ式風向風速計（コーナシステム株式会社製KADEC21-KAZE）を漁港にある岩の上に設置し、連続的にサンプリング間隔2秒で計測を行なった。設置高は地表面からおよそ5m（DL+11.3m）である。飛来塩分量は、全14回の観測のうち第4回から第8回までの5回を除く9回で観測した。なお、第7回までの観測は直立堤で、第8回は消波ブロックが防波堤前面の半分に設置された状態、第9回から12回までは防波堤前面の全体に消波ブロックが設置された状態、第13回と14回は防波堤の端部まで消波ブロックが設置され、施工が完了した後の状態である。観測日は雨や雪が降らない日を選んでおり、観測方法は、樋田ら（1999）を参考に写真-1に示す金網籠にガーゼを入れたものを地区全域に満遍なく30箇所程度設置し、これにより飛来塩分を捕捉した。設置位置は民家の間の細い路地などで、地上1mから4m程度の高さである。観測終了後に採取したガーゼは密閉容器に保管し、RO膜水50mlでガーゼを洗浄して、十分に塩分を溶出させ、電導度計（WTW社製Cond340i）によりNaCl換算で塩分濃度を測定した。飛沫の打上げ高については、直立堤をほぼ真横に望める約2km南の岬からデジタルビデオカメラを用いて連続撮影した。撮影した画像から一波毎に防波堤天端からの打上げ高をピクセル単位で計測し、防波堤上に設置されている灯標の高さを基準として実際の打上げ高さに換算した。ただし、打上げ高の計測結果は、特に小さい打上げについては計測者による個人差が大きく、平均値や発生頻度に影響するため、天端上5mを基準として、それ以上の打上げだけを対象とした。観測位置を図-1に示す。

また、一部の観測では、これらの項目以外に、転倒杵式雨量計による飛沫量の計測や、ビデオの撮影記録から目視で識別できる範囲での飛沫の最大飛距離の計測、および、感水紙を用いた飛沫粒径の計測等も実施した（山城ら、2006a、2007）。

3. 消波ブロックによる飛沫の打上げの抑制

（1）観測結果の概略

表-2に、波高、風向風速、飛沫の打上げ高等について



写真-1 飛来塩分捕捉器

表-2 観測結果

観測回	観測日	観測時間		和久				藍島		飛沫の打上げ高		
		開始時刻	終了時刻	風速 (m/s)	最多風向	有義波高(m)	有義周期(s)	有義波高(m)	有義周期(s)	平均値(m)	最大値(m)	頻度 (回/hr.)
1	2005年12月13日	7:30	16:36	8.97	NW	1.66	6.07	2.14	6.64	9.2	33.6	213.3
2	2005年12月22日	7:22	15:53	9.52	NNW	2.20	7.00	3.02	7.57	13.8	51.4	358.1
3	2006年2月8日	6:59	15:30	9.86	WNW	2.33	7.20	—	—	13.9	57.1	334.0
4	2006年12月17日	11:40	16:44	11.32	WNW	—	—	2.22	6.44	12.3	46.3	332.3
5	2006年12月28日	11:11	15:56	9.24	WNW	—	—	2.22	6.63	9.9	35.5	234.4
6	2007年2月14日	13:18	16:50	12.31	WSW	—	—	—	—	7.1	17.4	68.6
7	2007年2月15日	10:01	12:02	6.00	WNW	—	—	—	—	7.1	14.6	24.0
8	2008年2月9日	13:30	16:47	8.56	W	—	—	1.42	5.24	7.2	10.4	10.7
9	2008年12月22日	9:17	14:48	8.45	NW	—	—	2.01	7.03	6.1	8.7	4.3
10	2008年12月23日	8:55	14:25	4.77	NNW	—	—	1.10	5.44	0.0	0.0	0.0
11	2009年1月10日	9:24	16:37	7.34	NW	—	—	1.82	6.45	6.0	8.2	3.5
12	2009年1月11日	9:45	13:43	7.54	W	—	—	1.94	6.55	6.3	8.9	14.6
13	2009年12月18日	9:02	15:41	7.88	NW	—	—	—	—	6.3	8.4	2.7
14	2009年12月19日	8:43	14:04	7.22	NW	—	—	—	—	6.4	9.5	3.4



写真-2 飛沫の打上げの様子

観測結果の概略を示す。表には、最寄りのナウファス観測地点である藍島の観測結果を併せて示している。

風向風速をみると、冬季季節風によるWNWからNNWの風がほとんどであり、風が強い時の観測中の平均風速は10m/s程度であった。また、消波ブロック設置前における観測日の風速が全体的に大きい。飛沫の打上げ高は、直立堤の状態ですべて57mを観測したが、消波ブロックが設置された後は、そのような大きな打上げ高は観測されていない。

(2) 飛沫の打上げの低減効果

消波ブロックによる飛沫塩分対策は、飛沫塩分量を直接制御するのではなく、大量の飛沫塩分を発生する直立堤での大規模な飛沫の打上げを防ぎ、それに伴う飛沫塩分量の低減を狙ったものである。そこで、まず飛沫の打上げの低減効果について考察する。写真-2は飛沫の打上げの様子で、左は第1回観測時（直立堤）における典型的な大規模打上げの様子であり、右は第9回観測時（消波堤）における観測中最大の打上げである。厳密には、第9回から第12回の観測結果は、防波堤の端部にまだ消波ブロックが設置されていないが、端部の影響は小さいと思われるので、第9回以降の観測は消波堤についての観測結果として取り扱う。表-2より、第1回と第9回の観測時の気象海象を比較すると、和久地区での風速、藍島における波高ともに、第1回観測時の方が若干大きい、気象海象条件はほぼ同程度であったと思われる。

直立堤では、大規模な飛沫の打上げが頻繁に生じ、防波堤から200mほど離れた地点にいても、飛沫が小雨の

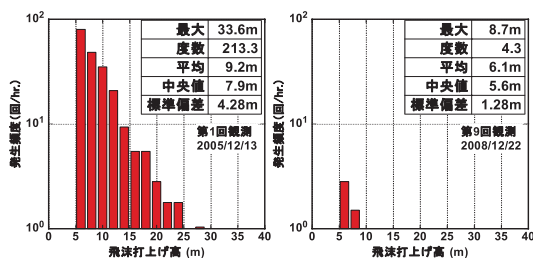


図-3 飛沫の打上げ高の頻度分布の比較

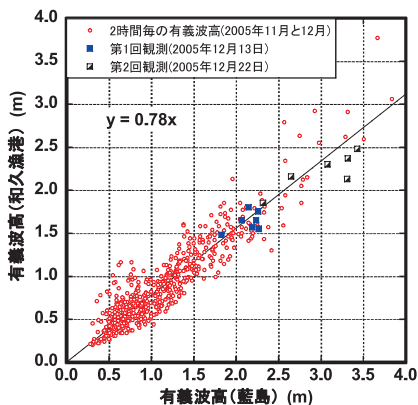


図-4 藍島と和久漁港の有義波高の関係

ように降り注ぐことがしばしばあった。一方、消波堤では、観測中に大きな打上げを見ることはほとんどなかった。図-3は第1回と第9回の観測における飛沫の打上げ高の頻度分布を比較したものである。ただし、観測した時間が異なるため、1時間当たりの発生頻度として示している。また、階級幅は2mである。第1回と第9回の観測結果の比較から、消波ブロックの設置によって、平均打上げ高と最大打上げ高がともに減少し、特に飛沫の打上げの頻度については、大幅に減少していることが分かる。また、消波ブロック設置後には、10mを超えるような打上げはまったく生じていない。

飛沫の打上げには来襲波の波高が大きく影響するので、波高と打上げとの関係を調べる必要があるが、防波

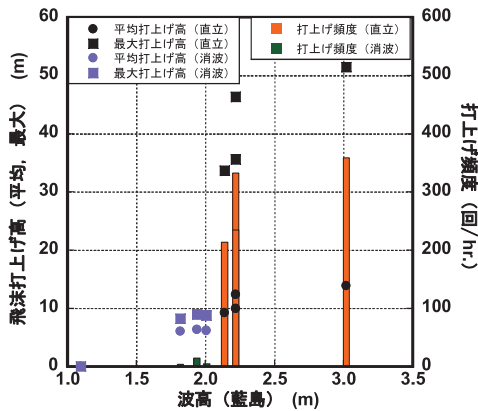


図-5 飛沫打上げ高の平均値および最大値と発生頻度

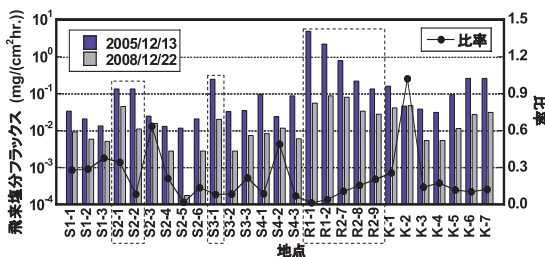


図-6 第1回観測 (2005/12/13: 直立堤) と第9回観測 (2008/12/22: 消波堤) との飛来塩分量の比較

堤の沖側で波浪観測を実施できたのは2005年11月から2006年3月までの期間のみである。この期間について、防波堤の沖側での波高と藍島の波高との関係を示すと図-4のようになる。ただし、藍島では2006年1月から8月まで欠測しており、比較できたのは2005年11月と12月のみである。図に示す○は2時間間隔で得られた有義波高であり、第1回と第2回の観測時については、マーカーを変えて示している。図より、両者は相関が高く、防波堤に來襲する波の波高は藍島の波高の約8割である。この結果を踏まえ、飛沫の打上げと藍島での波高との関係を調べた。図-5に藍島の波高と観測日毎の平均打上げ高と最大打上げ高、および打上げ頻度の関係を示す。ただし、ブロックが半分設置された状態の第8回観測結果は除いている。打上げ高の平均値は消波ブロックの設置に関係なく波高とほぼ一意的な関係を示しているようにも見えるが、最大打上げ高と打上げ頻度については、格段に減少していることが分かる。したがって、消波ブロックの設置により、頻発する大規模な飛沫の打上げが、相当に抑えられることが確認された。

4. 飛来塩分量の低減効果

(1) 消波ブロック設置前後での比較

図-6は第1回と第9回の観測における飛来塩分量を比較したものである。飛来塩分量は、単位面積単位時間当た

りのフラックスで表わしている。また、図には飛来塩分フラックスの比も併せて示している。なお、観測地点N1からN3は、消波ブロック設置後に新たに追加した地点であるため除いている。図中の破線で囲んだ地点は防波堤からの飛来塩分の影響が大きいと思われる地点であり、消波ブロック設置前の第1回観測では飛来塩分量が大きくなっている。一方、消波ブロック設置後の第9回観測では、全体的に飛来塩分量が小さい。特に、防波堤からの飛来塩分の影響が大きい地点では飛来塩分量の差が顕著であり、防波堤に最も近いR1-1地点では、飛来塩分量が1/100程度となっている。

(2) 飛来塩分量と風速の関係

消波ブロックによる飛来塩分の低減効果を、より定量的に評価するには、入射波や風と飛来塩分量との関係を把握する必要がある。ただし、入射波高については、消波ブロック設置後の観測データがないため、ここでは、全ての観測日において同位置で計測した風速と飛来塩分量との関係を調べた。図-7に、防波堤からの飛来塩分はほとんど影響しないと思われるK-1地点、および、防波堤からの飛来塩分の影響が大きいS3-1地点について風速と飛来塩分フラックスの関係を示す。図中には風速の累乗による回帰線を示している。なお、飛来塩分には風向も強く影響するが、飛来塩分の観測時はNW～NNWがほとんどであるので、ここでは風向の影響は考えない。

地区北側のK-1地点は、防波堤からの飛来塩分の影響をほとんど受けず、すぐ西側にある海岸で生じた飛来塩分が主であるため、飛来塩分量はブロックの設置に関係なく風速と一意的な関係にある。一方、防波堤の風下にあるS3-1地点は、防波堤からの飛来塩分が主であり、ブロック設置前後で風速に対する飛来塩分量の増加率が明らかに変化している。一般的に海面からの飛来塩分の発生量は風速の累乗に比例するとされており、村上ら(1992)は碎波帯における飛来塩分の発生量について、海塩粒子の発生量は波速に対する相対風速の2乗に比例すると報告している。図に示す回帰式によれば、K-1地点で概ね風速の6から7乗、S3-1地点では、消波ブロック設置後が風速の5乗であるのに対し、直立堤では、風速の20乗に比例することになっている。観測結果の数が少

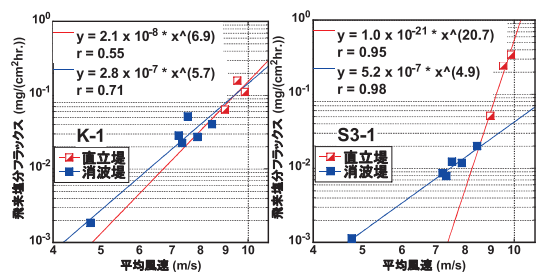


図-7 風速と飛来塩分量の関係

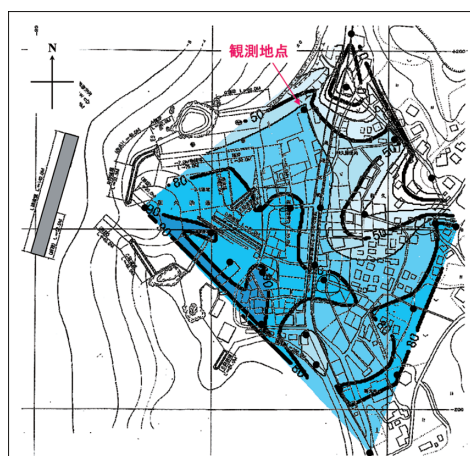


図-8 飛来塩分量の低減率 (風速10m/s)

ないこともあり、回帰式の妥当性については定かではないが、いずれにしても、防波堤の風下に位置する地点は、消波ブロック設置前後で風速に対する飛来塩分量の増加率が大きく変化したことは明らかである。

(3) 消波ブロックによる飛来塩分量の低減率

図-7に示した回帰式をもとに消波ブロックによる飛来塩分量の低減効果について考察する。なお、図-7の回帰式によれば、風速が小さい範囲では消波堤での飛来塩分量が直立堤に比べて多くなる。この理由としては、直立堤では反射する波であっても消波堤では波がブロックで碎けて飛来塩分が発生することが一因と考えられるが、前述のとおり、特に直立堤での観測結果が少ないため、直立堤における低風速時の飛来塩分量については定かではない。一方、消波堤についても9m/s以上の風速については観測値が得られていないが、10m/s程度までであれば、回帰式による推定値はそれほど大きく異なるものではないと思われる。そこで、当該地区における典型的な冬季風浪時の状況として風速10m/sを想定し、図に示す回帰式から、風速10m/sにおける消波ブロックの飛来塩分低減率を推定した。ただし、ここでの風速とは風向風速観測地点における平均風速のことである。図-8に低減率の分布を示す。なお、低減率は直立堤と消波堤の飛来塩分量の差を直立堤の飛来塩分量で除し百分率で表示している。全体的には、防波堤からの飛来塩分の影響が小さい地区北側を除いて50%以上の低減率であり、特に、冬季風浪時に防波堤の風下になる範囲では、80%以上の高い低減率が推定された。

5. おわりに

消波ブロックでの前面の被覆による飛来塩分対策が行なわれた現地の直立堤を対象に、対策の前後で飛来塩分

量を観測した。したがって、現地の同一の地点における、直立堤と消波堤での飛来塩分量の貴重な観測結果が得られたといえよう。この観測結果から、直立堤での大規模な飛沫の打上げに起因する飛来塩分を低減するには、堤体前面を消波ブロックで被覆し、飛沫の打上げを抑えることが極めて有効であり、それにより、防波堤の風下での飛来塩分量が格段に低減されること示した。ただし、現状では、地域住民の日常生活に対する飛来塩分量の許容値といった、明確な目標となるものは無い。したがって、アンケート調査等を通じて住民の実感としての満足度等を把握することが重要と思われる。しかしながら、消波ブロックにより大規模な打上げがほとんど生じなくなったという目に見える事実は、地域住民にとって大きな安心感を与えるものと思われる。

謝辞：本研究を実施するにあたり、和久漁港漁業共同組合、下関市豊北総合支所の水産振興課の方々には、現地観測に御理解と御協力を頂くとともに貴重な情報を頂きました。また、ビデオ撮影の際には、養護老人ホーム松涛園の敷地の一部をお借り致しました。さらに、現地観測の実施にあたっては(株)測研の古賀大補氏、古賀洋樹氏、兄玉充由九州大学技術職員、横田雅紀九州大学助教、および観測当時に研究室に在籍していた多くの学生諸君に協力頂きました。また、結果の整理においてナウファスの波浪観測データを利用させて頂きました。なお、本研究の一部は、財団法人防災研究協会による石原藤次郎研究奨学金の助成を頂き実施されたものです。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 櫛田 操・松永信博・香月 理 (1999)：冬季雪灘沿岸における飛沫塩分量の現地観測，海岸工学論文集，第46巻，pp. 1246-1250.
- 村上和男・加藤一正・清水勝義・尾崎 靖・西森男雄 (1992)：砕波帯内における海塩粒子の発生に関する現地調査，海岸工学論文集，第39巻，pp. 1046-1050.
- 村上和男・加藤一正・清水勝義・尾崎 靖・西森男雄 (1995)：植栽による飛沫（海塩粒子）の軽減に関する現地実験，海岸工学論文集，第42巻，pp. 1036-1040.
- 山田文則・細山田得三 (2004)：海岸構造物周辺のしぶきから発生する飛来塩分の輸送とその長期的観測，海岸工学論文集，第51巻，pp. 1121-1125.
- 山城 賢，吉田明德，西井康浩，橋本裕樹，石堂 濯，加嶋武志 (2006a)：現地観測による越波飛沫特性について，海岸工学論文集，第53巻，pp. 726-730.
- 山城 賢，吉田明德，西井康浩，橋本裕樹，加嶋武志，石堂濯 (2006b)：既存直立堤の飛沫低減法に関する実験的研究，海洋開発論文集，Vol.22，pp. 271-276.
- 山城 賢，吉田明德，村上和康，加嶋武志 (2007)：直立防波堤での打上げにより生じる飛沫の粒径分布について，海岸工学論文集，第54巻，pp. 761-765.