

直立防波堤で生じる飛沫の輸送に対する 風の影響

EFFECT OF WIND ON LANDWARD TRANSPORT OF SPLASH
GENERATED BY WAVE-OVERTOPPING AT VERTICAL BREAKWATER

山城 賢¹・吉田明徳²・村上和康³・加嶋武志³

Masaru YAMASHIRO, Akinori YOSHIDA, Kazuyasu MURAKAMI, Takeshi KASHIMA

¹正会員 博(工) 九州大学大学院助教 工学研究院環境都市部門
(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744番地)

²正会員 工博 九州大学大学院准教授 工学研究院環境都市部門
(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744番地)

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
(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744番地)

To clarify the effects of wind and wave run-up on the transportation of the splash caused by wave overtopping, field observations were conducted at Waku fishing port in Yamaguchi prefecture in the winter season over two years from December 2005 to February 2007. The violent wave run-up at a vertical breakwater and the transportation of splash by wind were recorded with 3 digital video cameras. Besides, incoming waves were measured with a wave gauge and wind was also measured with a wind anemometer. On the basis of observation data, several findings were obtained: 1) there are high correlations among the wave heights, wave run-up heights and the distance of splash transportation, 2) contrary to expectation, relatively low correlations are found between the distance of splash transportation and wind velocity, 3) the distance of splash transportation can be estimated from the wave run-up height and wind velocity with a simple expression obtained by multiple regression analysis.

Key Words : *water spray, wave run-up, transport of spray, wind velocity, vertical breakwater, field observation*

1. はじめに

暴浪時に防波堤や護岸に作用した波が水煙状に高く打上がり,それが強風によって背後地に飛散する越波飛沫について現地観測が行われた例は少なく未解明な部分が多い.そもそも,従来の防波堤等の設計においては,飛沫の発生や周辺地域への影響は考慮されていない.その理由としては,飛沫が構造物の破損等重大な損害を生じないことや飛沫の発生および輸送過程が複雑であることなどが挙げられる.しかし,実際には沿岸部で生じる飛沫により,海岸道路の交通障害や塩害等の被害が全国各地で生じていることが加藤ら¹⁾により報告されている.山口県下関市にある和久漁港地区も飛沫による塩害が生じている地域であり,そこでは漁港の沖に建設された直立防波堤により港内を静穏に保てるようになったものの,高波と同時に強風が作用する場合に大規模な越波飛沫が生じ,周辺地域の生活環境が悪化している.著者らは,和久漁港地域において来襲波浪の計測を含め越波飛沫の現地観測を行い,有義波高

と飛沫の打上げ高の関係などについて議論した²⁾.その結果,来襲波と飛沫の打上げ高の関係や,飛沫の打上げ高と飛沫輸送距離の関係について,幾つかの知見を得たが,飛沫輸送に対する風の影響を明確に示すことができていなかった.本研究では,さらに現地観測を行い蓄積したデータをもとに,波高,飛沫の打上げ高,飛沫輸送距離などの相互の関係を整理するとともに,飛沫輸送に対する風の影響について検討した.

2. 現地観測

(1) 和久漁港地区の概略

対象地域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に示す直立防波堤(天端高7.1m,堤体幅13.1m,延長140m)が

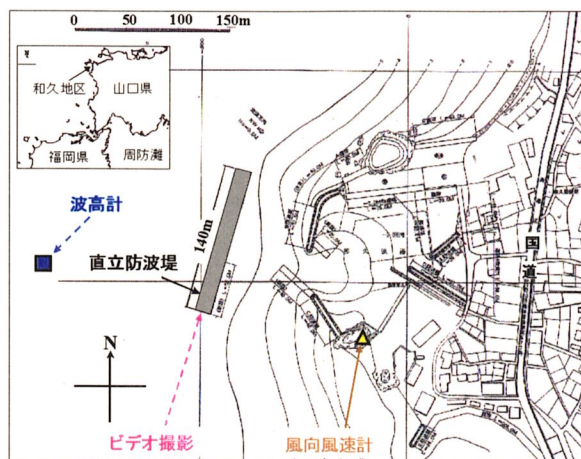


図-1 和久漁港地区の概略および観測位置

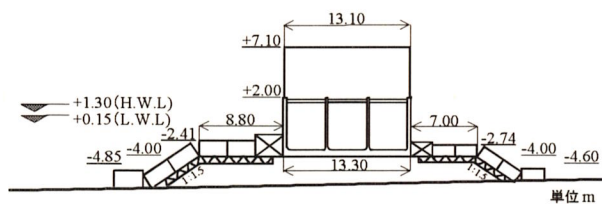


図-2 直立防波堤の断面図

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図-3 に示すような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、防波堤から約 300m 離れた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。

(2) 観測内容

観測は冬季の暴浪時を対象に、2005 年 12 月 13 日と 22 日、2006 年 2 月 8 日、12 月 17 日と 28 日、2007 年 2 月 14 日と 15 日の計 7 回実施した。観測項目を表-1 に示す。前半 3 回の観測については、波高計（協和商工㈱製 DL-3 型）を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）

表-1 観測項目

観測日	観測時刻	観測項目
2005年12月13日	8:52 ~ 15:38	波浪(波高,周期,波向き)
2005年12月22日	8:52 ~ 15:04	飛沫の打上げ高
2006年2月8日	8:37 ~ 14:19	飛沫輸送距離
2006年12月17日	12:37 ~ 16:38	風向風速
2006年12月28日	11:48 ~ 15:54	飛沫の打上げ高
2007年2月14日	13:34 ~ 17:02	飛沫輸送距離
2007年2月15日	10:27 ~ 12:03	風向風速



図-4 ビデオカメラ設置状況

の海底に設置し、2005 年 11 月から 2006 年 3 月まで連続的にサンプリング間隔 0.5 秒で来襲波浪を観測した。波浪以外の項目は全ての観測日で実施した。それぞれの観測位置を図-1 に示している。風向風速は、プロペラ式風向風速計（コーナシステム㈱製 KADEC21-KAZE）を漁港にある岩の頂上に設置し、連続的にサンプリング間隔 2 秒で計測を行った。なお、設置高は地表面からおよそ 5m で海面からは DL+11.3m である。飛沫の打上げ高(以後、飛沫高とする)と飛沫輸送距離の観測は直立堤をほぼ真横に望める約 2km 南の岬から図-4 に示すようにビデオカメラ 3 台を用いて、それぞれ防波堤近傍、漁港、全景（防波堤から漁港までを含む）を連続撮影した。飛沫高 (R) および飛沫輸送距離 (D) は、図-3 に示すように個々の打上げについて画像記録からピクセル単位で距離を計測し、打上げ高は防波堤上に設置されている赤灯台と白灯台の高さの平均を、また輸

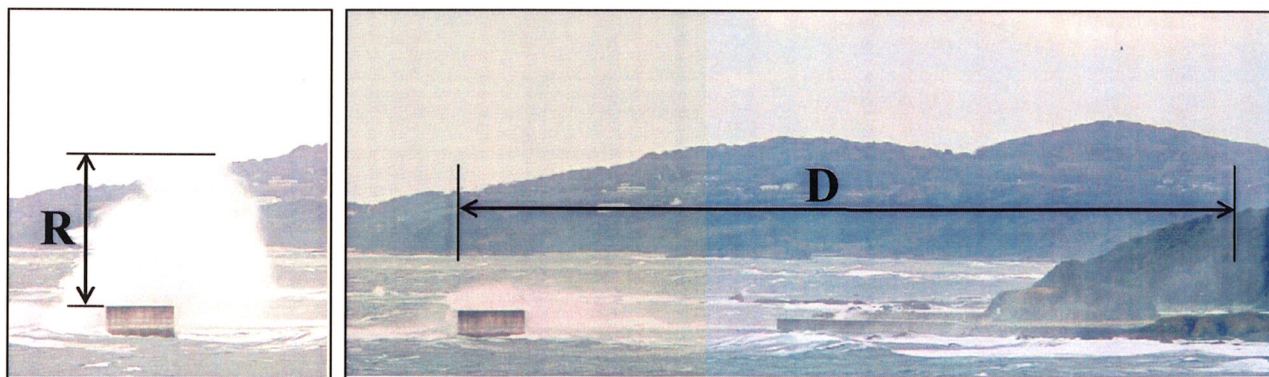


図-3 飛沫の打上げ高と飛沫輸送距離の計測

表-2 観測結果の概略

	観測時間 (h.m.s)	波浪			風向風速		風向補正風速 (m/s)	飛沫の打上げ高				飛沫輸送距離	
		有義波高 (m)	有義周期 (sec)	平均波向 (deg.)	平均風速 (m/s)	最多風向 (方位)		最大値 (m)	平均値 (m)	打上げ回数 (回)	1分当たりの発生回数 (回/min)	最大値 (m)	平均値 (m)
第1回観測(2005.12.13)	6:45:45	1.59	6.07	283.76	9.0	NW	7.5	33.6	7.2	2177	5.4	127.8	16.8
第2回観測(2005.12.22)	6:12:22	2.17	7.00	276.95	9.6	NNW	6.4	51.4	13.4	2330	6.3	159.8	41.3
第3回観測(2006.2.8)	5:42:29	2.33	7.20	276.88	9.8	NW	8.6	57.1	13.8	1911	5.6	157.2	35.7
第4回観測(2006.12.17)	4:01:11				11.3	WNW	10.4	46.3	11.8	1427	5.9	139.2	32.2
第5回観測(2006.12.28)	4:06:03				8.2	WNW	8.2	35.5	9.6	1013	4.1	246.6	31.4
第6回観測(2007.2.14)	3:28:09				12.3	WSW	9.3	17.4	5.5	401	1.9	38.3	13.5
第7回観測(2007.2.15)	1:35:47				6.0	WNW	5.5	14.6	5.1	81	0.8	27.7	8.9

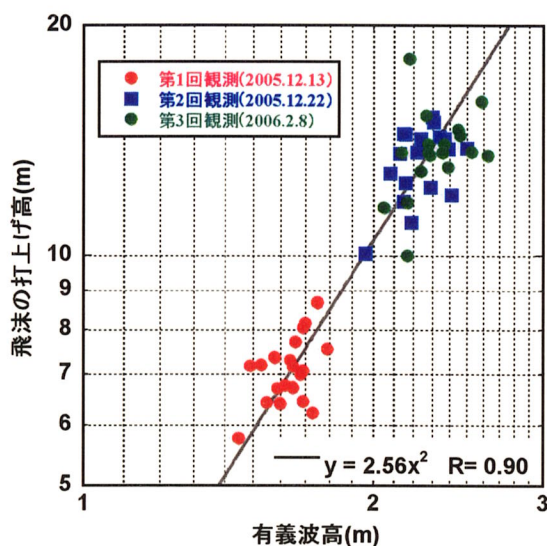


図-4 有義波高と飛沫の打上げ高の関係

送距離は直立堤の天端幅を、それぞれ基準として換算した。なお、飛沫の打上げ高は天端からの高さで、飛沫輸送距離は防波堤前面からの飛距離として整理している。また、ここでの飛沫輸送距離とは、画像記録から目視で判別できる飛沫の最大飛距離を意味しており、海塩粒子を含め目視で判別できないほど細かい飛沫は考慮していない。

3. 観測結果

(1) 観測結果の概略

表-2 に全 7 回の観測結果の概略を示す。第 2 回および第 3 回観測における最大の飛沫輸送距離は、設定したビデオカメラの撮影範囲を越えていたため、実際の飛距離は表中の値よりも大きい。なお、前述の通り、ここでの飛沫輸送距離とはビデオ映像から打上げ毎に目視で判断した飛沫の最大飛距離であり、実際にはビデオ映像で判断できない微細な飛沫がより遠くへ運ばれている。また、風向補正風速 (U) とは、防波堤に垂直な風速成分に修正したもので、第 3 回観測では風向の計測に手違いがあったため、周辺のアメダス観測資料を基に、風向を推定し、それにより風速を補正した。来襲波浪については、3

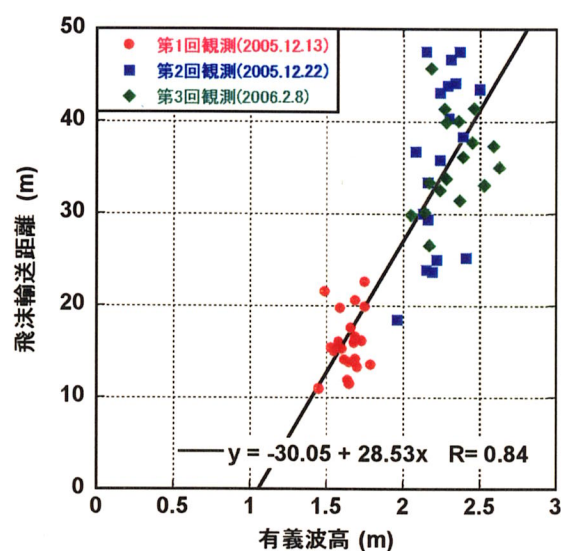


図-5 有義波高と飛沫輸送距離の関係

回の観測結果しかないが、いずれも防波堤にほぼ垂直に入射しており、波高は第 2 回観測と第 3 回観測でほぼ同程度で、第 1 回観測日より大きい。それに伴い、飛沫高と飛沫輸送距離も第 2 回および第 3 回観測の結果が第 1 回観測結果より大きくなっている。また、第 6 回および第 7 回観測では、飛沫高、飛沫輸送距離ともに小さかった。木村ら³⁾は有義波高と堤前水深から飛沫の打上げ高の 1/3 最大値を求める推定式を提案しており、それにより観測時における飛沫高を推定すると第 1 回観測時は 4.77m、第 2 回観測時は 11.2m となった。本観測値における飛沫高の 1/3 最大値は第 1 回が 12.1m、第 2 回が 22.4m であるため、木村ら³⁾の式による推定値は、本観測結果に比べて非常に小さい。これは、木村ら³⁾の式は本観測対象の防波堤の条件に比べ、堤前水深が非常に浅い場合の実験結果を基にしていることが影響していると思われる。

(2) 入射波と飛沫の打上げ高および飛沫輸送距離との関係

図-4に20分間毎に算定した有義波高と飛沫高の平均値との関係を示す。図の結果は、波浪の観測結果が少ないため、3回分の観測データである。また、図中には2次の回帰曲線を示している。多少のばらつ

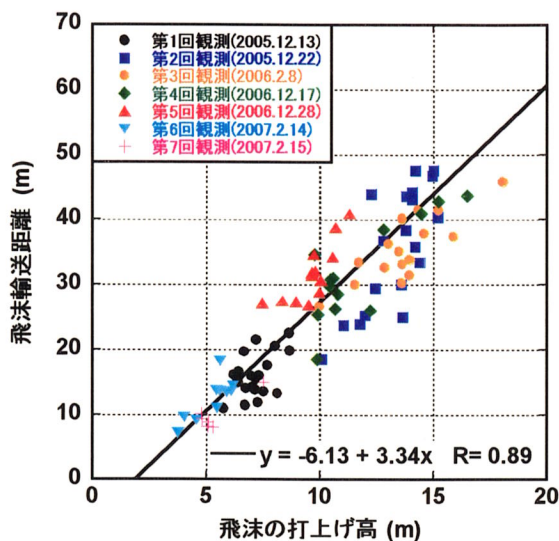


図-6 飛沫の打上げ高と飛沫輸送距離の関係

きがあるものの有義波高と飛沫高には高い相関関係が認められる。したがって、観測した範囲においては、平均的な飛沫高は波のエネルギーに比例するといえる。図-5は20分間毎の有義波高と飛沫輸送距離の平均値の関係を示している。有義波高と飛沫輸送距離は概ね比例関係があり、図に示す回帰直線によれば、対象の防波堤では、来襲波が1m以上になると飛沫が飛び始めることになる。なお、飛沫高に対する周期や潮位の影響については、本観測の範囲内では、来襲波の有義波高と有義波周期には高い相関 ($R=0.94$) があり、したがって、飛沫高と有義波周期の相関も高い ($R=0.88$)。ただし、潮位差は50cm程度しかなく、防波堤の堤前水深(約8.0m)に対して小さいため、対象の防波堤においては潮位の影響はほとんどないといえる。

(3) 飛沫の打上げ高および風速(風向補正風速)と飛沫輸送距離との関係

図-6は飛沫高と飛沫輸送距離、図-7は風速と飛沫輸送距離、図-8は風速と飛沫高の関係を示している。それぞれの図は全7回の観測結果であり、各プロットは20分間の平均値である。図より、飛沫高と飛沫輸送距離には高い相関が認められる。図-4および図-5の結果と併せて、有義波高、打上げ高および飛沫輸送距離の3者間には互いに強い相関があることが分かる。一方、風速と飛沫輸送距離との関係をみると、それぞれの観測日の結果には、ある程度の相関が認められるものの、全体的には相関が認められない。また、風速と飛沫高についても同様に全体的な相関関係はない。しかしながら、飛沫高と飛沫輸送距離の関係を示した図-6をみると、全体的には明確な相関関係が認められるが、同じ打上げ高であっても飛沫輸送距離はある幅を持って分布している。この飛沫輸送距離の分布の幅を風速の影響と考え、飛沫高を階級化し、各階級について風速と飛沫輸送距離の関係を調べたところ、図-9に示

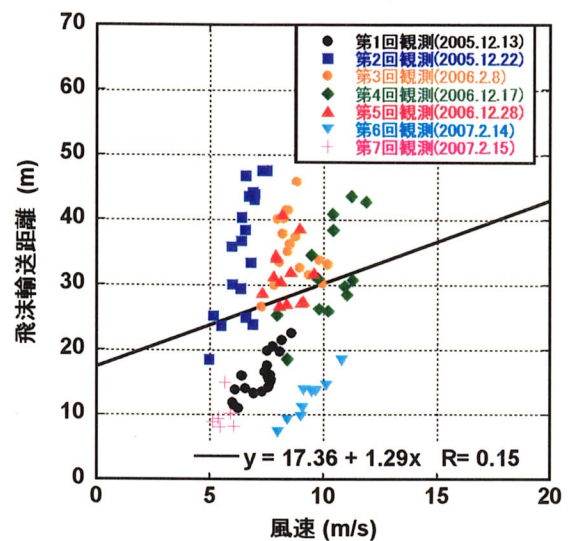


図-7 風速と飛沫輸送距離の関係

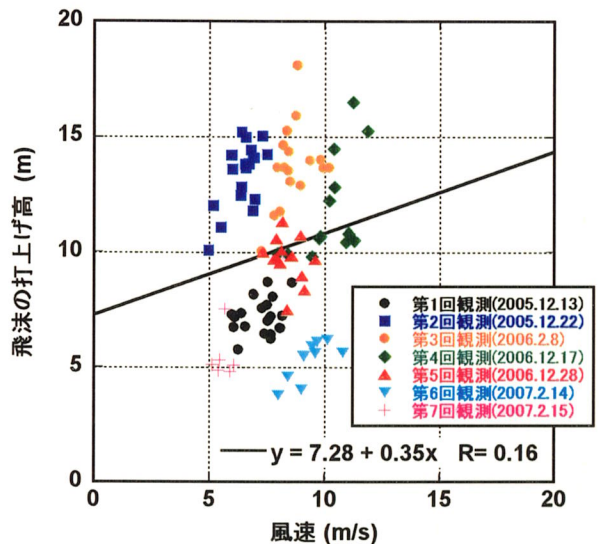


図-8 風速と飛沫の打上げ高の関係

す結果を得た。図より、全体的な傾向としては、打上げ高が低い場合には、風速の影響が比較的明確に現れているが、飛沫高が大きい場合には、無相関あるいは負の相関が現れている。単純に考えると、風が強い時ほど来襲波浪は大きく、それに伴って、打上げは激しく飛沫も大量に飛散する。また、飛沫が同じように打上がった場合には、当然ながら、風が強い程、輸送される距離は大きくなる。したがって、風速と飛沫輸送距離には高い相関があると考えられるが、図-9に示した結果では必ずしもそのようなはっていない。この理由を考えると、今回の観測は強風時にのみ実施しているため、得られた風速のデータは変動幅が限られている。もし、15m/s以上の強風時や、5m/s以下の弱風時のデータが多数得られたとすれば、風速と飛沫輸送距離との関係はより明確に現れる可能性がある。このことは風速と飛沫高の相関が低くなっていることの一つの理由でもある。ただし、風速と飛沫高の無相関については、風向と波向き関係も大きく影響していると思われる。

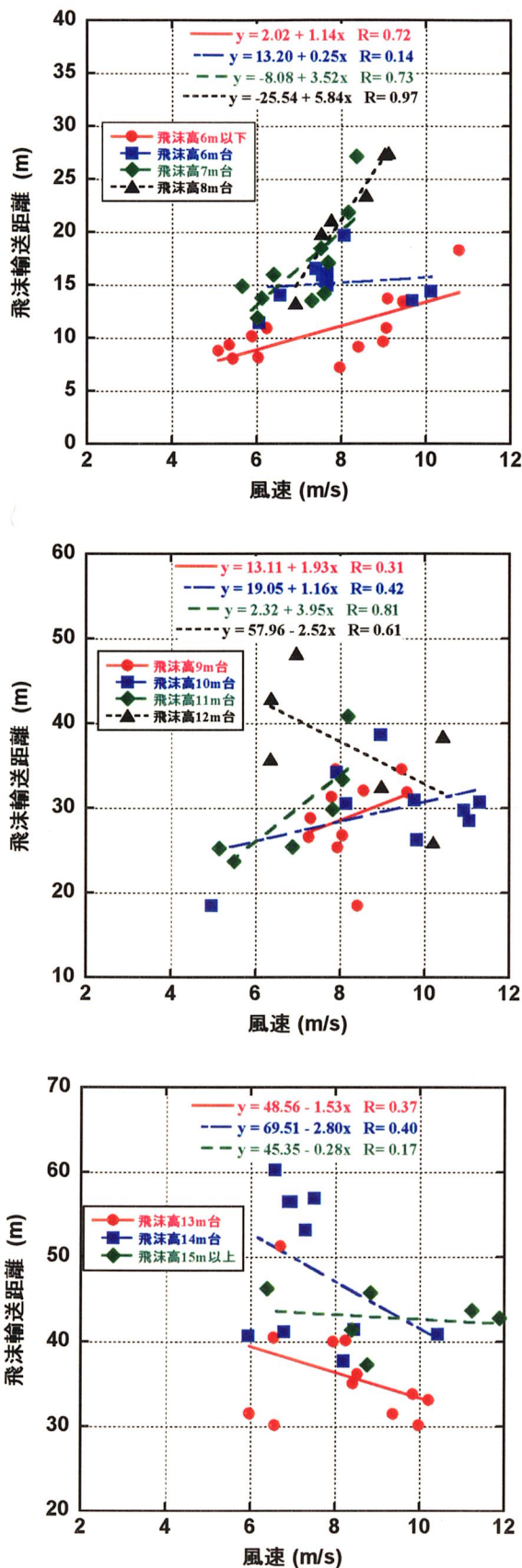


図-9 飛沫の打上げ高の階級による風速と飛沫輸送距離の関係

る。その他に、飛沫輸送距離の計測に関する問題もある。飛沫輸送距離はビデオカメラで撮影した映像から目視によりモニタ上で計測しているため、観測日の天候（明るさ）に影響される。このことが図-7において、観測日毎では風速と飛沫輸送距離に相関が認められる理由とも思われる。また、防波堤で発生した大量の飛沫は、落下あるいは拡散しながら輸送されており、図-3に示したように霧状になって風に流されていく。したがって、あまりに風が強い場合には、急速に拡散してしまいビデオ映像に映らず、結果的に、飛沫輸送距離を小さく見積もる可能性がある。図-9で飛沫高が大きい場合には、風速と飛沫輸送距離に無相関や負の相関が生じているが、このようなことが原因の一つになっていることも考えられる。加えて、飛沫輸送距離の計測には飛沫の量も影響しており、飛沫の発生量が多ければ、輸送される様子をより長い距離にわたって認識できることになる。これらのことから、飛沫の輸送に対する風の影響をより詳細に議論するためには、天候等に影響を受けにくい観測方法を考える必要がある。また、それと同時に映像記録からの目視による計測に加えて、実際に飛来している飛沫の量を計測することが重要といえ、これらは今後の課題である。

4. 飛沫の打上げ高と風速に基づく飛沫輸送距離の推定

前述のとおり、飛沫輸送距離の計測値には、様々な要因による変動が含まれている可能性があり、簡単に風速と飛沫輸送距離の関係を見出すことは出来ないが、飛沫高と風速の情報から飛沫輸送距離が推定できれば、当該地域の住民にとっては有益な情報となるであろう。そこで、次元解析と重回帰分析を行った。

(1) 次元解析

飛沫輸送距離(D)に強く影響する要素として、飛沫高(R)、補正風速(U)、重力加速度(g)を取り上げ、次元解析を行った結果を図-10に示す。縦軸は飛沫輸送距離と打上げ高の比(D/R)であり、横軸は次元解析で得られたパラメーター($g/(RU)$)である。図より、風速と飛沫高の積が小さくなるほど、飛沫輸送距離と飛沫高の比は一定値に漸近し、飛沫輸送距離は飛沫高の1.5~2.0倍程度になる。逆に、風速と飛沫高の積が大きくなれば、飛沫輸送距離は飛沫高の3倍、4倍と大きくなる傾向を示している。

(2) 重回帰分析

飛沫高と風速から当該地域における飛沫輸送距離の推定値を求めるため重回帰分析を行った。図-11は飛沫輸送距離の観測値と重回帰式による推定値を示しており、観測値、推定値ともに基準化して表示している。なお、事前に幾通りかの分析を行い、飛

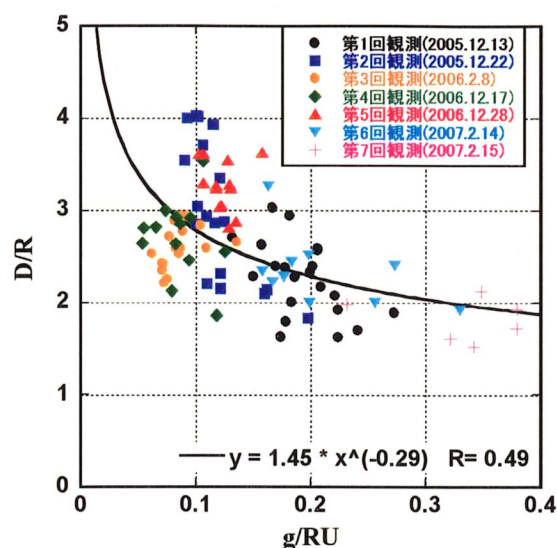


図-10 飛沫輸送距離と飛沫の打上げ高の比 (D/R) と次元解析により得られたパラメーター (g/RU) の関係

沫高と風速を線形で重ね合わせるよりも、図中に示す式の形で表した方が、推定精度が高いことを確認している。図中に示す重回帰式の各係数（式中の α, β ）からわかるように、風速の影響は飛沫高に比べ非常に小さく表れている。すなわち、得られた推定式において、風速は図-6 に示した飛沫高と飛沫輸送距離の重回帰式を調整し推定精度を高める役割を担っている。飛沫高に対して風速の影響が過小評価になっているようにも思えるが、各係数は有意であり決定係数も高いことから、当該地域における一般的な冬季風浪時の条件では、この重回帰式は高い推定精度があるといえる。

5. あとがき

本研究では、直立堤での打上げに伴って発生する飛沫の輸送特性を明らかにするため、山口県下関市和久漁港地区において7回の現地観測を行い、来襲波浪、風向風速、飛沫の打上げ高、飛沫輸送距離の計測を行った。得られたデータから、各項目間の関連性について整理した結果、直立堤で生じる飛沫の打上げ高は概ね来襲波浪の波高の2乗に比例して増大すること、飛沫輸送距離は飛沫高との相関が非常に高いことを示した。さらに、飛沫輸送距離に対する風速の影響について検討し、飛沫輸送距離を飛沫高と風速から精度良く推定する重回帰式を得た。

ただし、ビデオ撮影による飛沫輸送距離の計測については、幾つかの問題があり、今後の観測においては、より工夫が必要と考えられる。また、実質的に飛来してくる飛沫の量を計測することが重要と思われるため、ビデオ映像から求める飛沫輸送距離を補正する意味においても、今後は飛沫量の計測を実施したい。加えて、本研究における観測は特定の防

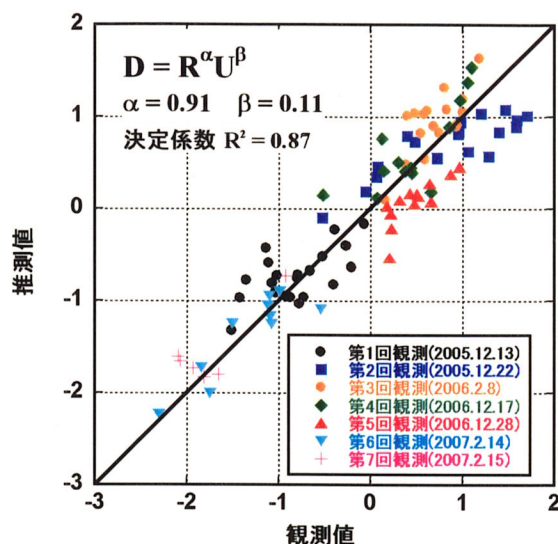


図-11 飛沫輸送距離についての重回帰分析による推定値と観測値の比較

波堤を対象としたものであるため、飛沫の打上げ高に対する堤前水深やマウンドなどの影響については、既往の研究成果との比較を行い把握する必要がある。将来的に、種々の地形や構造形式などの条件について、波浪および風向風速と飛沫の打上げ高や輸送距離の関係が明らかにされれば、暴風暴浪時の飛沫の予測や対策工法の選定の際に大いに役立つものと思われる。また、現地における観測結果が十分に蓄積されれば、実験や数値シミュレーションにおける検討の際に極めて有用な情報となる。

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西野政次氏を始め水産振興課の方々および㈱三洋コンサルタントの西井康浩氏には現地観測に御協力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、観測でのデータ収集においては㈱測研の古賀大補氏、古賀洋樹氏、児玉充由九州大学技術職員、横田雅紀九州大学助教、修士課程の小野貴也君（現㈱三洋コンサルタント）、古本裕一君（現九州大学博士後期課程）、白尾國貴君に協力頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 加藤史訓, 笠井雅広, 佐藤慎司, 今村能之: 越波被害の実態に関する全国調査, 海洋開発論文集, 第15巻, pp. 31-36, 1999.
- 2) 山城 賢, 吉田明德, 西井康浩, 橋本裕樹, 石堂 濯, 加嶋武志: 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, 2006.
- 3) 木村克俊, 浜口正志, 岡田真衣子, 清水敏晶: 消波護岸における越波飛沫の飛散特性と背後道路への影響, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 796-800, 2003.