

沖合人工島「長州出島」における 越波飛沫の現地観測

FIELD OBSERVATIONS ON WAVE-OVERTOPPING AND WATER SPLASH AT AN ARTIFICIAL ISLAND “CHOSHU-DEJIMA”

山城 賢¹・吉田明德²・村上和康³・見國洋平⁴・日高倫興⁴・西井康浩⁵
Masaru YAMASHIRO, Akinori YOSHIDA, Kazuyasu MURAKAMI,
Youhei MIKUNI, Tomooki HIDAKA and Yasuhiro NISHII

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 福岡市西区元岡744)

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 福岡市西区元岡744)

³修(工) 日本工営株式会社 空港・港湾部 (〒102-8539 東京都千代田区麴町5-4)

⁴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 福岡市西区元岡744)

⁵正会員 博(工) ㈱三洋コンサルタント 調査部 (〒802-8534 北九州市小倉北区京町3-14-17)

An artificial island “Choshu-Dejima”, which is located in the Sea of Japan in Yamaguchi prefecture, is being constructed in the open sea. Therefore, Choshu-Dejima is often struck by large waves directly, and wave overtoppings and violent wave run-ups are often caused at the seawalls. In this study, to clarify the characteristics of the wave overtoppings and violent wave run-ups caused at the seawalls, field observations were conducted three times in the winter season (from Dec. 2008 to Feb. 2009). The wind velocity and wind direction were measured by an anemometer. The heights and frequencies of the wave run-ups at the seawalls were recorded by using 9 digital video cameras. On the basis of the observation data, several findings were obtained: 1) it was understood where the wave run-up occurs frequently, 2) the run-up heights become larger as the frequency of the run-ups increases regardless of wave directions and locations of the seawall, 3) the conditions of the run-up height and the frequency for the occurrence of the wave overtopping at the seawall was found.

Key Words : wave run-up, wave overtopping, splash, field observations, artificial island

1. はじめに

下関港では、港湾貨物量の増大や船舶の大型化に対応するため、下関市の日本海側に、新たな物流拠点として沖合人工島「長州出島」が建設中である。この人工島の建設地については、下関港が前面の関門航路と背後の市街地に挟まれ、既存港湾施設の拡張が困難であることや、海上輸送の時間短縮および陸上交通とのアクセス等の利便性が考慮されている。また、建設にあたっては、周辺環境等に配慮し、外周護岸の一部を、捨石基礎マウンドの天端幅を 30m 程度確保した環境共生型護岸として、藻場造成が行われている^{1),2)}。

一方、人工島が建設されている海域は日本海に面しており、冬季には、冬型の気圧配置に伴う風浪が頻繁に発達する。したがって、冬季風浪による越波や海水飛沫の特性を把握することは、人工島の管理上極めて重要といえる。また、人工島は、将来的には植生等による越波飛沫対策が計画されているが、

現在建設中で建物等の遮蔽物がほとんど無い状況であるため、飛沫の輸送過程を把握するための非常に都合の良い観測フィールドであり、この人工島での観測結果は海岸工学の観点からも貴重なデータとなり得る。そこで、本研究では、当該人工島における越波および飛沫の発生状況を把握することを目的とし、冬季風浪時に現地観測を実施した。

2. 現地観測

(1) 人工島の概略と冬季の気象条件

図-1 に長州出島の位置を示す。長州出島は山口県下関市の日本海側に位置し、南西約 3km に六連島、西約 7km に藍島がある。図-2 に長州出島の概略を示す。図中の塗り潰している部分が 2009 年 2 月時点での埋立済みの範囲である。図-3 は同時点における護岸の暫定断面を示したもので、上は後述する領域③の位置での護岸断面であり、下は藻場造成の



図-1 長州出島の位置

ための環境共生型護岸（後述する領域⑧の位置）で、マウンドの天端幅が35mある。護岸は、反射波の低減を図るためスリット式の直立護岸が採用されており、観測を行った時点での天端高は、DL+約5.0m、天端幅は約10mである。ただし、完成後の天端高はさらに高くなる。

人工島周辺の水深は11mから17mであり、この海域では、冬季風浪時にNWからWの風と波が卓越する。人工島の設計波は波向がWNWで波高は4.6mである。また、潮位は南風泊（図-1参照）の平均潮差で約70cmである。

(2) 観測内容

観測は冬型の気圧配置が発達した2008年12月26日、2009年1月10日および31日の計3回実施した。観測項目は、飛沫の打上げ頻度と高さ、越波

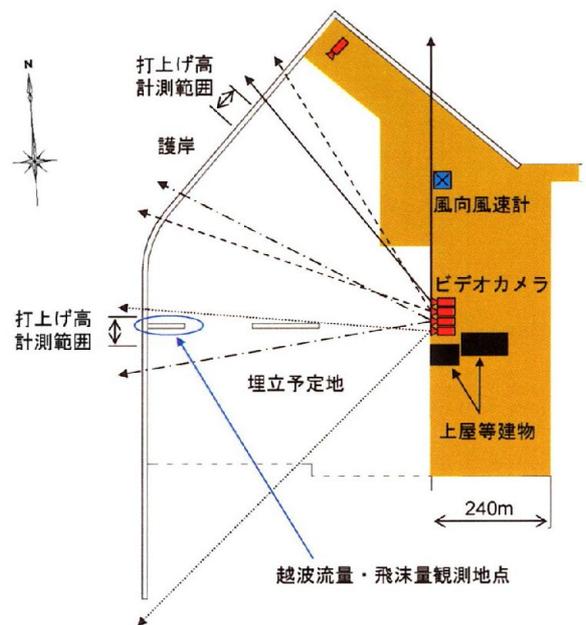


図-2 長州出島の概略と観測位置

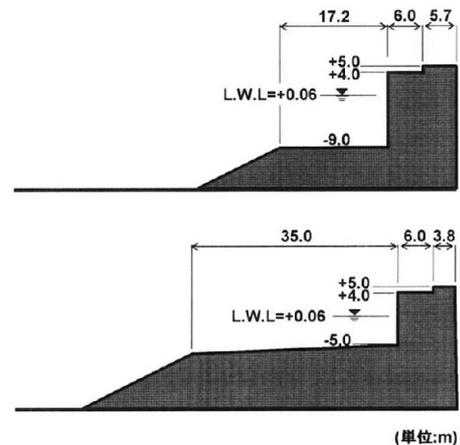


図-3 観測時の護岸の暫定断面

流量、飛沫量および風向風速である。

護岸で生じる飛沫の打上げはビデオカメラで撮影した。図-2に示すように、護岸の全景を4台のビデオカメラにより背後から撮影した。写真-1に4

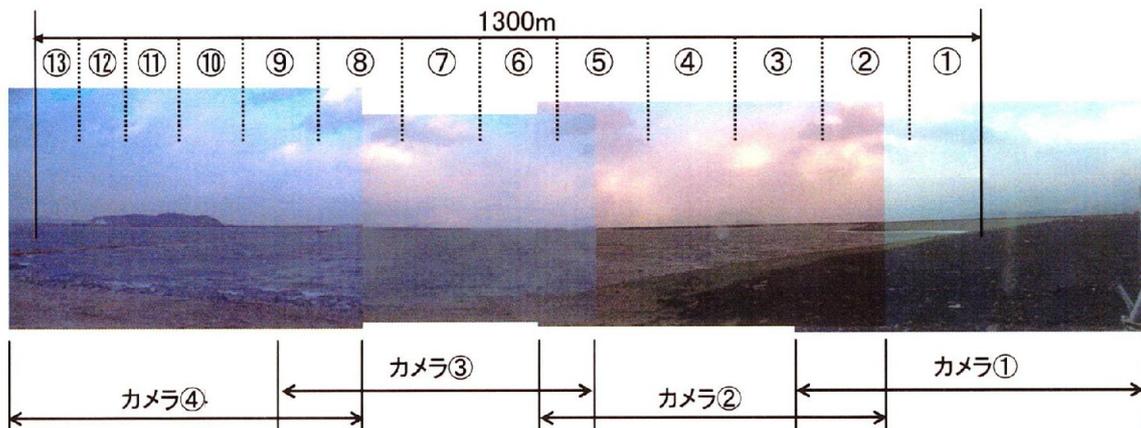


写真-1 打上げ頻度計測用ビデオカメラの撮影範囲（①から⑬は打上げ頻度を計測した小領域）

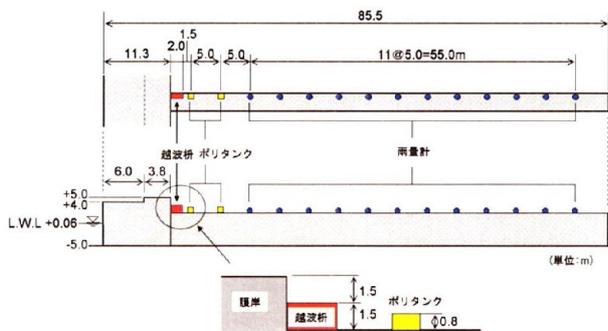


図-4 越波流量および飛沫量の観測位置

台のビデオカメラによる撮影画像を示す。写真の上側に①から⑬まで番号が付けてあるが、これは後述する打上げ頻度の計測の際に分割した小領域の番号である。これに加え、飛沫の打上げ高を計測するために、護岸の2箇所(図中の打上げ高計測範囲)についてズームアップして撮影した。また、護岸で発生した飛沫の飛散の様子を、側方から3台のビデオカメラで撮影した。したがって、合計9台のビデオカメラを使用した。

越波流量および飛沫量は、図-2中に示す越波流量・飛沫量観測位置において計測した。越波流量は越波水を貯留させる柵(高さ1.5m、長さ2.0m、幅0.7m)を作成し、これを護岸背後に設置して柵内の水位を水位計で計測し越波流量を求めた。飛沫量は、越波柵の背後にポリタンク(高さ0.7m、長さ1.0m、幅0.9m)2個と転倒柵式雨量計(Davis社製 Model7852)12台を設置して計測しており、ポリタンクについては越波柵と同様に、内部に設置した水位計によって得られた記録から飛沫量を算出した。転倒柵式雨量計は0.2mmの降水量(飛沫量)毎に計量柵が転倒し、その時刻が記録される。越波柵等の具体的な配置を図-4に示す。

風向風速は、図-2に示す位置にプロペラ式風向風速計を設置し、連続的にサンプリング間隔2秒で計測した。計測位置の高さは地上10mである。

なお、観測では、埋立地および橋梁部で飛来塩分量の観測も行ったが、本論文では、飛沫の打上げと越波流量および飛沫量の検討結果について述べる。

3. 飛沫の打上げ

(1) 観測時の気象海象

表-1に、観測時の風向風速、波浪および潮位の平均値等を示す。風向風速は島内での観測結果であるが、波浪は人工島から西に約7kmの位置にあるNOWPHASデータ観測地点(藍島)、潮位は南南東に約4kmの位置(南風泊)での観測データである。また、潮位はC.D.L.基準(C.D.L.=T.P.-0.67m)で示しており、南風泊のC.D.L.は人工島のD.L.に利用されている。なお、表中に示されている開始時刻および終了時刻は、全ての観測項目において計測が行

われている時間帯であり、観測項目によってはより長時間計測しているものもある。

第2回および第3回観測と比べ、第1回観測は風速や波高が小さく、全3回の観測中では最も穏やかであった。また、第2回と第3回観測では、風速、波高、潮位はほぼ同程度であるが、風向は大きく異なっており、第2回観測時は西風であった。

表-1 観測日の風況と海象

	時刻		風向風速		波浪			潮位
	開始(h.m)	終了(h.m)	風速(m/s)	主風向	有義波高(m)	有義周期(s)	主波向	平均値(cm)
第1回観測(08.12.26)	10:40	15:30	8.65	NW	1.40	6.37	NW	69.7
第2回観測(09.01.10)	8:30	15:00	11.51	W	1.81	6.41	NW	87.6
第3回観測(09.01.31)	8:30	15:00	10.58	NNW	2.14	6.73	NNW	82.1

(2) 打上げ頻度の観測結果

写真-2は護岸での打上げの様子を撮影したもので、冬季風浪によって、このような飛沫を伴う打上げが発生する。飛沫の打上げ頻度の観測結果の例を示す。図-5は、第2回観測時(2009年1月10日)における有義波高(藍島)と潮位(南風泊)の時系列で、図-6は同日の観測により得られた打上げの頻度分布である。打上げの頻度分布は、図中に示すように護岸を100m幅の13区間に分割し、ビデオ映像から各領域における1時間当たりの打上げの発生回数を調べたものである。この日の波は、観測中ほぼ一定してNW方向から来襲しており、風もWでほぼ一定であった。図-5と図-6を比較すると、午前から午後にかけて、波高と潮位の減少に対応して打上げの回数も減少していることがわかる。また、領域によって頻度が大きく異なることも認められる。この理由としては波向に加えて、マウンド形状の違いも影響しているようである。図-3の護岸断面をみると、環境共生型護岸の捨石マウンドは、幅が広いだけでなく、マウンド上水深が浅い。一般的に、マウンドが広く、マウンド上水深が浅ければ、来襲波はたとえ碎波しなくとも、浅水変形により切り立った状態で護岸に作用しやすいため、飛沫の打上げも生じやすくなると考えられる。したがって、他の部分に比べて、環境共生型護岸の部分で打上げ頻度が



写真-2 護岸での飛沫の打上げの様子(2009/1/10)

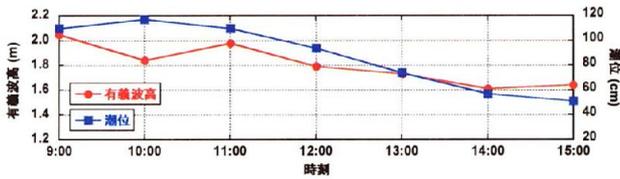


図-5 第2回観測時の有義波高（藍島）と潮位（南風泊）

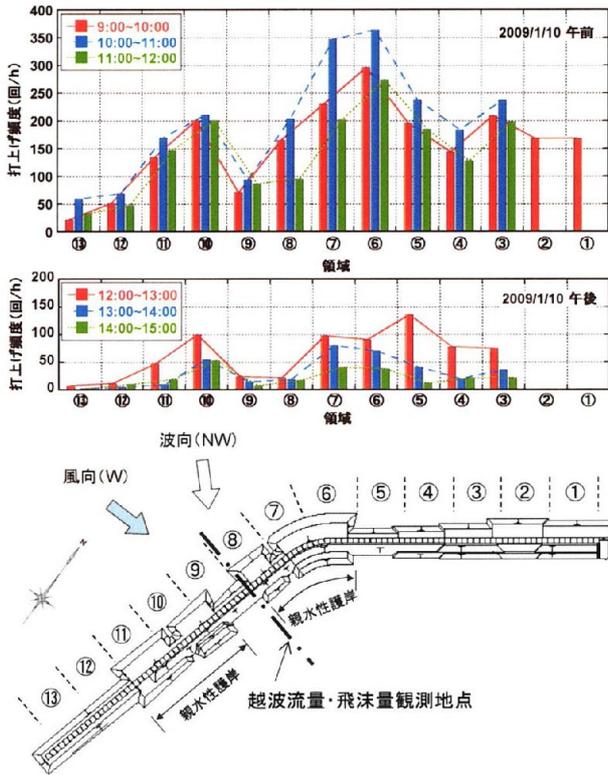


図-6 打上げ頻度の分布 (2009/1/10)

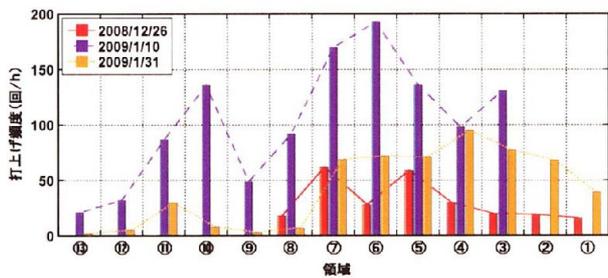


図-7 観測日による打上げ頻度の比較

大きくなっているものと推測される。

図-7 は各観測日における打上げ頻度の平均値を比較したものである。ただし、第1回観測（2008年12月26日）の領域⑨から⑬と第2回観測（2009年1月10日）の領域①、②については、ビデオ記録の不具合により欠測としている。第1回観測と第2回観測を比較すると、欠測の部分は不明だが、概ね相似形の分布になっているようである。表-1 に示す波浪の観測結果から、来襲波浪の波向はほぼ同じであり、波高の差が打上げ頻度の差に繋がっていると考えられる。第3回観測（2009年1月31日）は来襲波高が最も大きかったが、波向がNNWであっ

たため、ほぼ沿い波になる領域⑧から⑬ではほとんど打上げが生じておらず、領域①から⑦ではほぼ同程度の頻度で生じていた。しかし、波向がNWであった第2回観測時に比べると打上げ頻度は小さい。

(3) 打上げ頻度と来襲波浪の関係

図-7 の結果から、護岸の変曲点にあたり打上げ頻度が高い領域⑦について、打上げ頻度と来襲波浪との関係を調べた。図-8 に藍島における有義波高と領域⑦での打上げ頻度の関係を示す。前述のとおり、第1回および第2回観測時は波向がほぼ同じであるが、第3回観測時は波向が異なるため、第3回観測の結果は異なる傾向を示す。波向による傾向の違いを把握するためには、より多くの観測結果が必要であるが、NWからの波浪に対しては、図中に示すラインが、有義波高と打上げ頻度の関係を概ね表わしていると思われる。波高以外に、有義周期および潮位の影響についても検討したが、本観測の結果の範囲では、打上げ頻度との明確な関係は認められなかった。

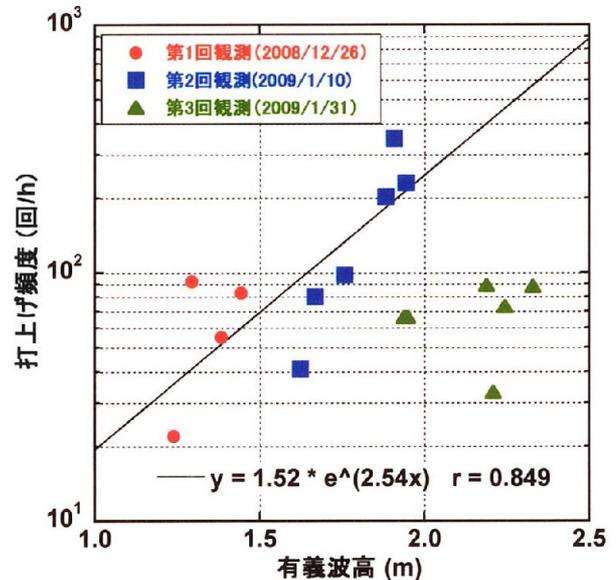


図-8 打上げ頻度（領域⑦）と有義波高（藍島）の関係

(4) 打上げ頻度と打上げ高の関係

図-2 に示す2箇所での打上げ高計測範囲について、ビデオ記録から飛沫の打上げ高を読み取り、打上げ頻度との関係を調べた。飛沫の打上げ高は、護岸の天端からの高さであり、モニタ上において目視でピクセル数を計り、ケーソン1函の長さを基準に実距離に換算した。したがって、ここでの飛沫の打上げ高はモニタ上において確認可能な範囲で計測したものである。また、一波毎の打上げ高を読み取ることが困難であったため、本検討においては、10分間での最大打上げ高のみを計測した。

図-9 に打上げ頻度と打上げ高の関係を示す。なお、打上げ頻度は打上げ高の計測範囲に対応する領

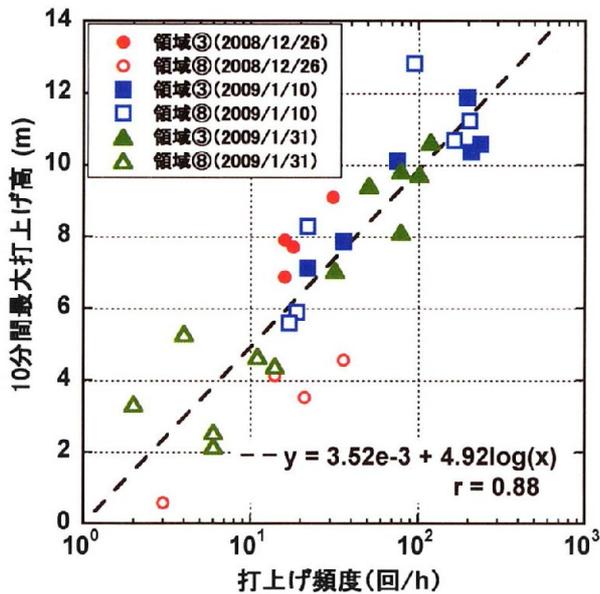


図-9 打上げ頻度と10分間最大打上げ高の関係

域③と⑧の結果である。また、打上げ頻度が1時間当たりの打上げ回数であるため、打上げ高は10分間最大打上げ高を同じ1時間で平均したもので整理している。打上げ頻度の増加に伴い、打上げ高も増加することは容易に推測できるが、図より、打上げ頻度と打上げ高には、波向や護岸の位置によらない一意的な関係が認められる。また、図に示す打上げ高は10分間での最大打上げ高であるため、多少のばらつきがあるものと思われ、打上げ高についても1時間当たりの平均値等で整理できれば、より明確な関係を得られることが期待される。なお、本観測の範囲内における最大打上げ高は15m程度であった。図-9に示す関係式から考えると、仮に打上げが1時間当たり1000回生じた場合、打上げ高は約15mであることから、多少のばらつきを考慮しても打上げ高は20m程度が最大限度ではないかと推測される。著者らは、人工島と同じく下関市の日本海側で、直立防波堤での打上げ高について同様の観測を行っており、そこでは打上げ高が60m程度に達することもあった³⁾。その経験からすれば、堤前水深等の条件が異なることを差し引いても、人工島護岸の打上げ高が最大で20m程度であれば、最大値としては小さく、スリット構造により打上げ高が低減されていることが考えられる。

4. 越波流量と飛沫量

(1) 越波流量および打上げ高・頻度の時系列

図-10に、越波流量、打上げ高、10分間最大打上げ高の時系列を示す。これらは第2回観測(2009年1月10日)における観測結果であり、越波流量は、図-4に示すように、護岸背後に設置した越波

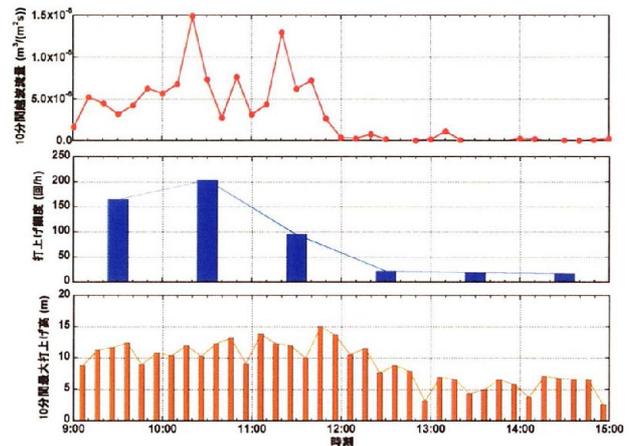


図-10 第2回観測時(2009/1/10)の10分間越波流量、打上げ頻度、10分間最大打上げ高の時系列

桁内の水位から求めた10分間毎の単位面積当たりの越波流量である。10分間最大打上げ高と打上げ頻度は、越波桁を設置した位置(図-6での領域⑧)におけるものである。なお、第1回および第3回観測では、桁に越波水が流入しておらず、越波桁を設置した位置では、第2回観測時にもみ越波が護岸背後に流入していた。

10分間毎に求めた越波流量は時間的に大きく変動しているが、越波は打上げの頻度と規模が大きい午前中に生じており、午後になると多少打上げが生じていても海水は護岸背後にほとんど流れ込んでいない。越波に関しては、一ヶ所での観測で越波が生じていたのが第2回観測のみとデータが少ないため、十分な検討はできていないが、おおよその目安としては、打上げ高が10m程度で打上げ頻度が1時間当たり50から60回程度以上になると護岸背後への越波水の流入が生じるものと思われる。

(2) 飛沫量の空間分布

図-11に、図-10で越波が生じていた9:00から12:00の3時間について、越波桁と雨量計の記録から算定した単位面積当たりの越波流量の空間分布を示す。なお、飛沫量も越波流量と同じく第2回観測

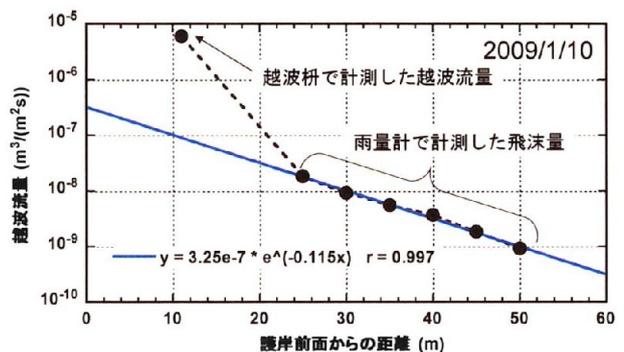


図-11 単位面積当たりの越波流量の空間分布

でのみ有意なデータが得られていた。越波流量は護岸の直背後が最も多く、離れるにつれ急激に減少することが分かる。雨量計の計測位置では、海水は全て飛沫として飛来しており、その量は護岸からの距離に対して指数関数で表わされる。このような越波流量の空間分布は、例えば、Fukuda らの観測例⁴⁾や著者らが行った実験結果⁵⁾など多くみられる。一方、越波柵（護岸の直背後）では飛沫として流入する海水に比べ、越流として流れ込む海水が主であると思われる。図に示す回帰式で越波柵の位置での飛沫による越波流量を推定すると $9.11 \times 10^{-8} \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ となり、それ以外が全て越流による越波流量とすれば、越流による越波流量は $5.95 \times 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ となって、護岸直背後における越波流量はほぼ越流によるものと推測される。また、護岸前面より 50m 以上離れた地点にも雨量計を設置していたが、飛沫量は記録されておらず、この観測日の条件では、水量として計測できるような飛沫は護岸から概ね 50~60m 程度の範囲に飛来していたといえる。

5. おわりに

本研究では、現在建設中の沖合人工島「長州出島」において、冬季風浪時の越波飛沫について現地観測を実施した。その結果、人工島の外周護岸で生じる飛沫の打上げについては、波向によって顕著な発生箇所が変化するものの、冬季風浪の卓越する波向が NW であることから、打上げ頻度が高い箇所を概ね特定することができた。そして、打上げ頻度と打上げ高には、波向や護岸の位置によらず高い相関があり、両者の関係は対数で表されることがわかった。また、これまでの観測結果では波向が NW に限定されるが、打上げ頻度は藍島における有義波高と比較的明瞭な関係を示していることから、今後、観測データを蓄積することができれば、近隣の既存観測地点で得られる波浪情報と人工島での打上げとの関連付け、さらには護岸で生じる打上げの予測に繋がることが期待される。

越波流量や飛沫量についても、幾つかの貴重な観測データを得ることができ、越波発生を目安などについて考察したが、詳細な検討のためにはより多くの観測結果が必要である。本現地観測では、当初、一波毎の越波量を求め、打上げ高と越波量の関係を詳細に調べる予定であったが、越波柵内の水位記録に含まれるノイズ等の理由により、一波毎の越波量の算定が困難であった。現地での一波毎の越波量あるいは数分程度の短時間での越波流量について観測でき、それらの変動特性を把握できれば、安全管理上非常に有用と思われる。なお、飛沫量や本論文で述べていない飛来塩分量については、打上げ（頻度、規模、発生箇所）や風向風速との関連など詳細な検討を進める予定である。

謝辞：本研究を実施するにあたり、現地観測の実施やデータの収集・整理について、九州大学の横田雅紀助教、児玉充由技術職員および多くの関係者の方々に御協力頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 江頭和彦, 諫山貞雄, 福田恭三, 山縣延文, 吉村文雄: 下関沖合人工島の建設 (ひびくくらんど), 海洋開発論文集, 第 18 巻, pp.113-117, 2002.
- 2) 山平辰巳, 末永正次, 中島悟朗, 山本秀一, 田村圭一: 下関沖合人工島における藻場造成の取り組み, 海洋開発論文集, 第 23 巻, pp.387-392, 2007.
- 3) 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.
- 4) Fukuda, N., Uno, T. and Irie, I.: Field Observations of Wave Overtopping of Wave Absorbing Revetment, *Coastal Engineering in Japan*, Vol.17, pp.117-128, 1974.
- 5) 山城 賢, 吉田明德, 橋本裕樹, 久留島暢之, 入江 功: 越波実験における風洞水槽内風速の現地風速への換算, 海洋開発論文集, 第20巻, pp.653-658, 2004.