

# 狭い砕波帯をもつ砂浜海岸を遡上する波浪の挙動

水工学研究室 小川 和真

指導教員 犬飼 直之 (細山田 得三)

## 1.はじめに

四方を海に囲まれた我が国は、海岸の勾配が急で狭い砕波帯を持つ海岸が多く存在し、そのような海岸で水難事故が発生している。新潟県内においても平成26年5月4日に、新潟県上越市柿崎区上下浜海岸において、突然高い波浪が襲来して海岸を遡上したことで子供3名が海へ流され、救助に向かった大人2名を含め5名が死亡する事故が発生した。

砕波帯が狭い海岸では汀線付近の海側で急勾配となる場合が多く、汀線付近で砕波するため波のエネルギーが減衰することなく陸地へ遡上し、海中だけでなく、砂浜上にいる人にも被害を及ぼす可能性がある。そのため、海浜での水難事故防止のためにも海中だけでなく陸上を遡上する波浪の挙動把握が必要不可欠である。

本研究では、砂浜前面の海底勾配が急で狭い砕波帯を持つ砂浜海岸を遡上する波浪の挙動の把握を目的として、上下浜を対象とし、現地調査や波浪解析、数値計算を実施した。

そのために、まず当時の波浪情報を得て波浪解析をおこなった。次に現地調査を実施し、数本の岸沖方向の測線に沿い砂浜上から汀線沖100m程度までの標高・水深データを取得した。またUAVを用いて事故発生時に近い天候・気象時に海岸を遡上する波浪の挙動を把握した。同時にUAVの取得画像に現地調査での海底地形情報を加えて海岸付近の地形データを作成した。その後、作成した地形データに事故当時の波浪を入力して波浪の挙動の数値計算を実施し、事故当時の波浪状況を水平2次元および鉛直2次元で再現し、海岸を遡上する波浪の挙動を把握した。

## 2.事故発生時の海象状況の把握

本研究では事故当時の現地波浪を把握するため、図-1に示すように、事故現場から西に8kmに位置する直江津波浪観測所<sup>1)</sup>のデータを用いた。これによると、事故当時の有義波高は1.2m、周期は7.9秒であり、波向はNWであった。波高、周期、波向ともに事故の前後で急激な変化は見受けられず、比較的安定した波浪状況だったと考えられる。

次に図-2に直江津における5年間の有義波高と周期の関係を示す。図-2より、海域全体で見た場合、事故時の波高1.2mはこの海域では高波浪で



図-1 上下浜海岸位置図

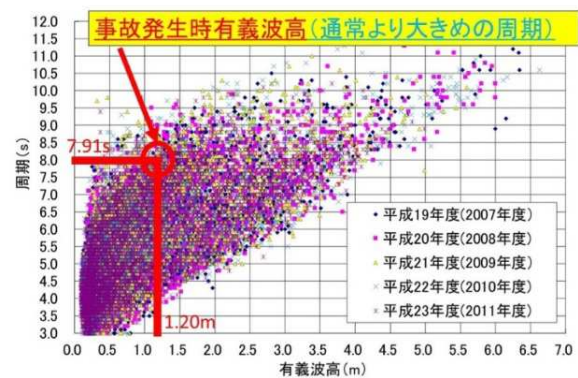


図-2 直江津における有義波高と周期の関係 (Nowphas 直江津港, 平成19年度～23年度)

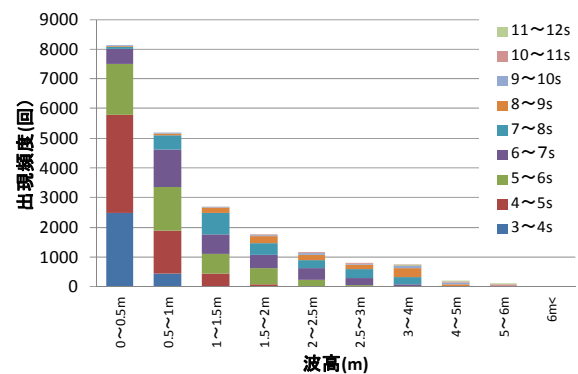


図-3 直江津における波高と周期の出現頻度分布

はないが、この波高に対して周期7.9秒程度というのは長めの周期であった。この原因として、事故当日は現場上空を高気圧が東進しており、これにより波高はあまり発達しなかったが、吹送距離が通常よりも長くなる気圧配置であったために周期が通常よりも大きくなったと考えられる。

図-3に有義波高と周期ごとの出現頻度分布を示す。図-3に示したように波高帯1～1.5mに対し

では周期 7~8 秒が最も出現頻度が高くなっているものの、全体の中では出現頻度は低く、全波浪の中でも 1/30 程度の出現頻度である。また、波高帯 1~1.5m の波浪は周期 7 秒以下の波浪が 70% を占めており、周期 7 秒以上の波浪が 30% 程度であった。

以上のことから、事故時の波高 1.2m に対して周期 7.9 秒は長めの周期であり、出現頻度も低く、事故当日は特別な波浪状況であったと考えられる。

また本研究では事故発生時の「突然高波浪が発生し、子供をさらった」という目撃証言から突然の高波浪の現象の有無を把握するため、直江津波浪観測所の周波数別解析データを使用し、事故発生時の波高頻度分布の作成および実現象に近い波浪の再現を行った。

事故当日の波高頻度分布の算出には、Longuet-Higgins<sup>2)</sup>の理論を用いた。以下に理論式を示す。

$$p(H)dH = \frac{\pi H}{2 \bar{H}^2} \exp \left[ -\frac{\pi}{4} \left( \frac{H}{\bar{H}} \right)^2 \right] dH \quad (1)$$

ここで、 $p(H)$ : 確率密度関数、 $H$ : 波高(m)、 $\bar{H}$ : 平均波高(m)である。

図-4 に作成した波高頻度分布図を示す。図から事故発生時には波高 0~2.1m 程度までの波浪が発生し、有義波高 1.2m であっても波高 2.1m 程度の波浪が発生し得ることがわかった。

続いて、より事故時に近い波浪を再現するために、解析された直江津の周波数別の波高の波形を合成し、実現象に近い不規則波の再現を行った。

図-5 に、作成した波形と有義波高の 1 分間の水位変動を示す。図より、有義波高の波形は 1 周期ごとに規則的な正弦波となるのに対し、複数の周波数帯から作成した波形は、最小波高 0.23m から最大波高 2.08m の範囲で不規則に挙動していることがわかる。

以上のことから、突然高波浪が襲来したという目撃証言とも合致する。よって、事故発生時の状況として、低波浪時に被災者が汀線付近へ近づいていた時に、最大波に近い波浪が襲来したために、転倒するなどして流されたのではないかと考えられる。

### 3. 現地調査による地形および波浪状況の把握

#### (1) 地形情報の把握

##### a) 地形データの作成

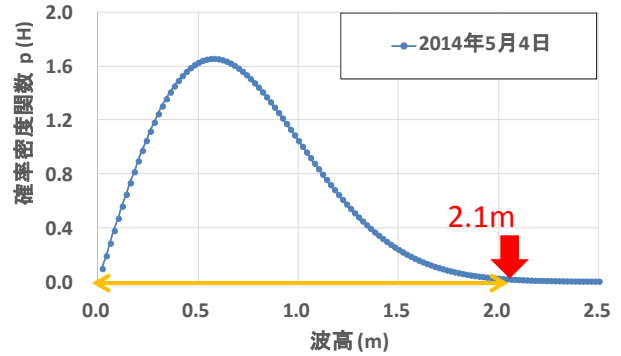


図-4 事故発生時(1時間)の波高頻度分布

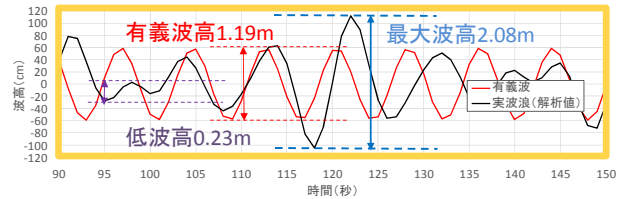


図-5 周波数別波高から作成した波形と有義波の比較

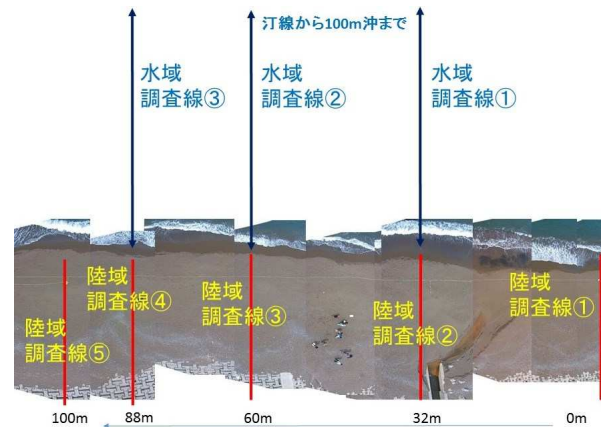


図-6 現地での側線位置および番号



図-7 使用した UAV(ドローン)

波浪状況把握と数値シミュレーションで使用する地形データは平成 26 年 7 月 4 日と 8 月 29 日、平成 27 年 1 月 14 日の計 3 回現地調査を実施し、作成された落合ら<sup>3)</sup>のものを使用した。図-6 に現地で実施した陸上での岸沖方向の 5 本の測量線、



図-7 に調査に使用した UAV を示す。

また、落合ら<sup>3)</sup>が作成した格子データは陸域情報だけであったため、8月29日に取得した水底の水深変化状況を使用して陸上から汀線沖100m付近までの格子地形データを作成した。図-8に、作成した陸上と海底を含めた地形格子情報を示す。

b) 現地海岸の地形的特徴の把握

図-8より、汀線から陸上付近では上下および水平方向に地形の褶曲（ビーチカスプ）があることがわかる。ここでは特に汀線から10m程度陸側および汀線から20m程度陸側の2箇所異なるカスプが発達している。

(2) 波浪状況の把握

a) 調査日と事故日の波浪状況の比較

事故時と同様に高気圧が現場上空を東進する気象状況時の平成27年1月14日にUAVを用いて上空から波浪状況を把握した。事故当時は有義波高1.2m、周期7.9秒、波向NWであったが、調査時は有義波高0.96m、周期7.3秒、波向WNWであった。

図-9に、調査時にUAVで撮影した波浪の遡上距離と事故時の波浪の遡上距離の比較を示す。調査日の遡上距離は、図中の場所では汀線から最大24m程度であった。事故時の遡上距離は報道の映像から確認すると28m程度であり、調査日の遡上距離は若干低めではあるが、海岸を遡上する波浪の挙動は定性的には事故時とほぼ同様の波浪状況ではないかと考えられる。

b) 波浪状況の把握

事故時の波浪状況と定性的に同様であることから、調査時の波浪状況を把握した。図-10および図-11に地上およびUAVから撮影した波浪の遡上状況を示す。両図より、波浪が水深の深いカスプ地形の窪地へ集中しており、その結果、カスプの窪地で楕状の流れの模様となることがわかる。

4. 数値計算による波浪状況の把握

本章では、現地の条件にあわせて数値実験を行い、砂浜を遡上する波浪の挙動を水平2次元および鉛直2次元で再現し、それぞれの波浪の挙動を把握した。

(1) 平面2次元数値モデルによる波浪挙動把握

a) 数値モデルの概要および計算条件

用いた数値モデルは、波浪の伝播状況および海浜流の状況を計算することができる修正ブシネスク方程式<sup>4)</sup>および連続式でそれを陽的に差分し

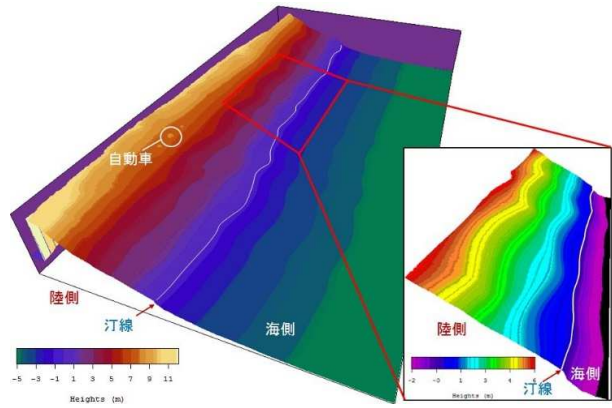


図-8 作成した地形格子情報

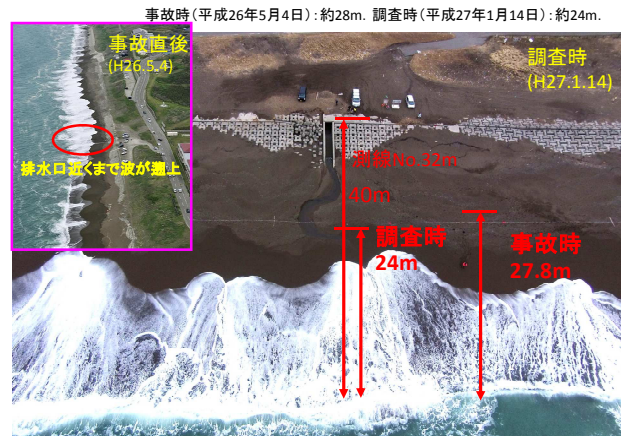


図-9 調査日と事故時の波浪の遡上距離の比較



図-10 波浪の遡上状況(地上)  
(引き波時. カスプ窪地へ流れが集中)

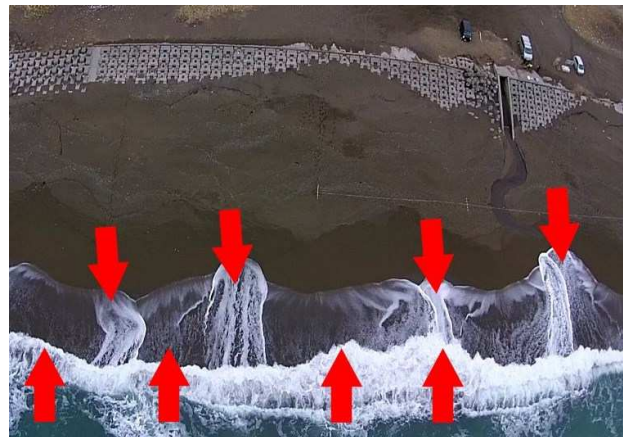


図-11 波浪の遡上状況(UAV)

た.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q_x^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Q_x Q_y}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - MD_x + \tau_x \\ &= \left( B + \frac{1}{3} \right) h^2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial^2 Q_x}{\partial t \partial x} + \frac{\partial^2 Q_y}{\partial t \partial y} \right) + \\ & \quad Bgh^3 \left( \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial x \partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q_x Q_y}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Q_y^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - MD_y + \tau_y \\ &= \left( B + \frac{1}{3} \right) h^2 \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial^2 Q_x}{\partial t \partial x} + \frac{\partial^2 Q_y}{\partial t \partial y} \right) + \\ & \quad Bgh^3 \left( \frac{\partial^3 \eta}{\partial y^3} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial y \partial x^2} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

ここで、 $MD_{xy}$ は碎波減衰項、 $D$ は全水深、 $Q_{xy}$ は流量、 $h$ は静水深、 $\eta$ は水面変動量、 $B$ は定数(1/21)、 $g$ は重力加速度、 $\tau_{xy}$ は Manning 公式を用いた海底摩擦項である。

地形情報は、UAV からの取得画像および現地調査で得た水底の地形情報から作成した地形格子情報を用いた。格子間隔は 0.2m とした。計算では事故時の波浪条件にあわせるために、波高 1.2 m、周期 7.9 秒の規則波を海岸と反対側の外境界で入力した。

## b) 計算結果

図-12に引き波時の水位分布図を示す。図より、波浪は汀線から 25m 程度陸上へ遡上している。事故時の波浪遡上距離は 28m 程度であり、計算は若干小さめの結果となったが定性的には現地の波浪の遡上の挙動を再現できているのではないかと考えられる。

また、図-12より、ビーチカスプが発達する地形ではカスプの褶曲の窪地付近へ流れが集中し楕状に流下する現象を確認できた。

### (2) 鉛直 2 次元数値モデルによる波浪挙動把握

#### a) 数値モデルの概要および計算条件

汀線付近から陸上へ遡上する波浪の鉛直方向の挙動を把握するために CADMAS-SURF 2D<sup>5)</sup>を用いて鉛直 2 次元の数値実験をおこなった。なお、CADMAS-SURF の再現性については造波実験との比較を行い確認済みである。

計算に用いた地形情報は、航空測量から得た地形情報のうち、事故発生現場と考えられる図-6における横軸 30m 付近の褶曲の窪地の岸沖方向の

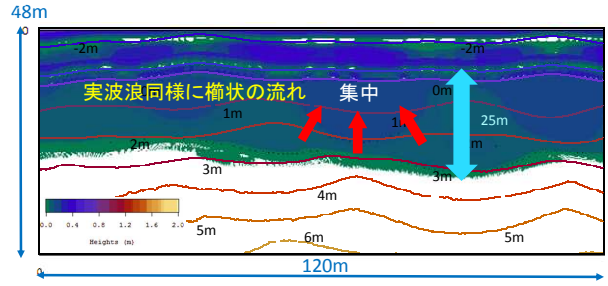


図-12 砂浜上の波浪の挙動  
(引き波時、カスプ窪地へ流れが集中)

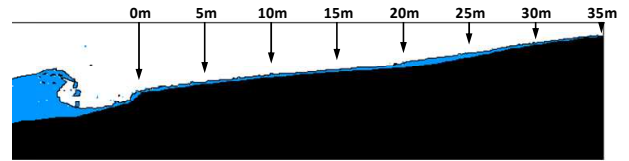


図-13 事故発生場所の岸沖水深変化および波浪到達・遡上状況



図-14 事故発生場所の汀線付近へ波浪が到達する状況および流速ベクトル

水深変化情報を用いた。地形の状況は図-13に示す。地形情報は水平 10cm、鉛直 5cm の精度であり、沖側で事故時の最大波高と考えられる波高 2.08m、周期 8.5 秒の規則波を入力した。また、汀線から陸上側への各地点における水位と流速の時間変動を明らかにするために汀線から 5m 間隔で計測ポイントを設定し、計算を行った。

## b) 計算結果

数値計算では事故の目撃証言から、低波高時に突然高波高の波浪が到達した状況を想定しているため、第 1 波からの波浪の遡上状況を把握した。図-13に計算開始から第 2 波が汀線に到達する時の水位変動状況を示す。遡上距離は実際の事故発生時に約 28m、計算結果で約 34m であった。実波浪の遡上距離と計算結果に 6m 程度の差異があるが、前述したように低波高時に高波高の波浪が襲来した状況を想定して数値計算を行っているものの現実的に高波浪到達時に陸上に水塊が存在



しない状況はあり得ず、低波浪時に存在していた水塊が影響を及ぼしているためと考えられる。よって、計算結果に多少の差異はあるものの、定性的には実波浪の再現ができていないと判断した。

図-14 に、汀線に計算開始後の第 3 波が汀線に到達する際の水位分布と流速ベクトルを示す。図より、汀線より陸上へ遡上した波浪が汀線方向へ流下しており、その上に被さる様に波浪が到達していることがわかる。

この計算結果を用いて、汀線から陸上側への各地点における水位と流速の時間変動を把握した。

図-15 に各点における水位の時間変化を示す。各点の位置は図-13 に示す通りである。横軸は計算開始後の経過時間（秒）を示しており、30 秒程度で波浪が汀線へ到達し水位の変動が始まっていることがわかる。また、第 1 波の最大水位は汀線から陸上側 5m 付近で最大 70cm 程度、第 2 波以降では汀線から 5m 地点で 1m 程度、汀線から 10m 地点で 1.3m 程度、それより陸上側で 40cm 程度の水位となる。また、計算開始後 41 秒時、汀線から 10m 地点で、第 1 波の引き波と第 2 波の遡上波の位相がこの地点で重なり、水位が著しく上昇する現象が確認できた。

以上のことから第 2 波目以降で水位が増大する理由として、波浪到達時に陸上を遡上・流下する水塊が存在し、流入する水塊の挙動に少なからず影響を及ぼしているためと考えられる。また、本研究では鉛直 2 次元解析のため海浜断面を一様として計算をおこなっているが、実際にはカस्प下端部である褶曲の窪地に周囲の海水が集中するため、水位は更に増大すると考えられる。

図-16 に、各点における水平方向流速の時間変化を示す。各点の位置は図-13 に示す通りである。図より、第 1 波の到達直後の流速が最大となり、毎秒 7m 程度となる。第 1 波の遡上速度が最大となる理由として、事前に陸上を遡上・流下する水塊が存在せず、陸上へ遡上する波浪の運動が低減されないことによると考えられる。また、遡上時には波浪の陸上への強い押し込み効果により汀線から陸上へ 20m 地点まで流速は秒速 7m 程（時速 25km 程度）となるが、流下時は秒速 3m 程度である。つまり、汀線上を通過して遡上する水塊の運動は波浪の周期と連動するが、流下する水塊の運動は周期とは連動していない。

また、最大流速が 10m/s 程度の流速は、例えば津波の場合、越村ら<sup>6)</sup>によると、鉄筋コンクリー

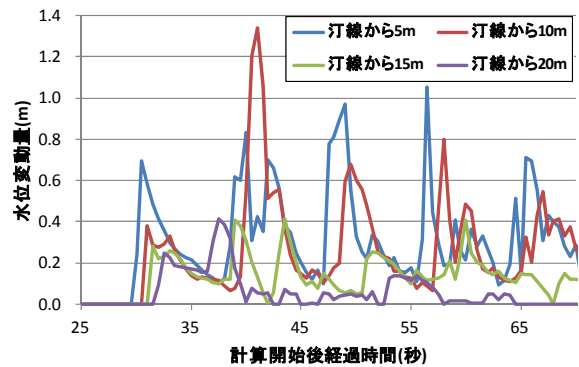


図-15 水位の時間変化

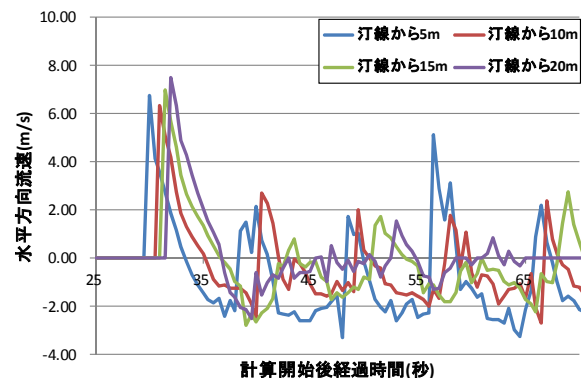


図-16 流速の時間変化

ト造りの家屋が破壊される流速となる。上下浜では第 1 波の最大水位は 70cm 程度であり、加えて、大きい流速および急勾配の砂浜などの要因より児童が直立し続けることは非常に困難であったと考えられる。

## 5.まとめ

事故時の海象の特徴として、波高 1.2m に対して周期 7.9 秒は比較的長めの周期であることがわかった。今回の事故発生原因としては、波高が一時的に低下した際に汀線付近で遊んでいる時に襲来した高波浪にさらわれた可能性が高いと考えられる。

UAV の航空写真および現地測量結果を用いて現地の地形データを作成した。また、UAV で撮影した映像からカस्प地形で遡上する現地の波浪の挙動を把握した。

数値シミュレーションでは、現地の最大波高時の波浪状況を再現し、カस्प地形で遡上する波浪がカस्पの窪地に集中した後に楕状に流下する状況を把握した。また、波高 2.08m の波浪が遡上する速度は最大で秒速 7m 程度であり、水位は汀線から陸側へ 10m の地点で最大 1.3m 程度となる。

以上のことから、今回の水難事故は海水浴場ではない砂浜海岸上で発生した事故であり、上下浜

のように狭い砕波帯をもつ海岸では、たとえ水中でない砂浜上であっても、波が急に砂浜を遡上し、水中へ流出する事もあるので注意が必要である。

#### 参考文献

- 1) (独法)港湾空港技術研究所：NOWPHAS（全国港湾海洋波浪情報網）(オンライン), 国土交通省, <http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>, 2011.
- 2) Longuet-Higgins, M.S. : On the statistical distributions of the heights of sea waves, Jour. Marin Res., Vol.9, No.3, pp.245-266, 1952
- 3) 犬飼直之, 江尻義史, 大竹剛史, 山本浩, "平成26年5月に新潟県上越市柿崎区上下浜で発生した水難事故時での砂浜を遡上する波浪の動態把握について", 日本船舶海洋工学会/日本海洋工学会, 海洋工学シンポジウム論文集, 第25巻, OES25-086, 2015.
- 4) 犬飼直之, 大竹剛史, 山本浩, 細山田得三: 突堤付近における砂浜海岸での離岸流の可視化および発生予測について, 土木学会, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 71, No.4, I\_715-I\_720, 2015.
- 5) (財) 沿岸開発技術センター: 「数値波動水路の研究・開発」(CADMAS-SURF), 大光社印刷株式会社, 2001.
- 6) 越村俊一・行谷佑一・柳沢英明: 津波被害関数の構築, 土木学会論文集 B Vol.65 No.4, pp.320-331, 2009.