

ビーチカスプにおける粒径分級の数値計算

Numerical Simulation of Grain Size Sorting at Beach Cusps

清水達也¹・小林昭男²・宇多高明³・熊田貴之⁴・野志保仁⁵・芹沢真澄⁶

Tatsuya SHIMIZU, Akio KOBAYASHI, Takaaki UDA, Takayuki KUMADA
Yasuhiro NOSHI and Masumi SERIZAWA

Topography of beach cusps and grain size sorting was observed at four coasts, as well as the observation of a backwash flow in a bay of a cusp. A movement of sea water flowing obliquely from the apex to the bay was observed, resulting in the generation of a backwash flow. On the basis of this observation, two pairs of sink and source were assumed and three-dimensional cusp topography was predicted, using the contour-line-change model considering the effect of grain size change by Kumada *et al.* (2005). The formation of a cusp and associated accumulation of coarse materials around the apex were well predicted.

1. はじめに

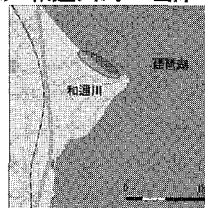
砂浜海岸では、沿岸方向に apex と bay が周期的に並ぶ cusp がしばしば観察される。それらは波長により giant cusp, large cusp, beach cusp に区別される (Komar, 1998)。ビーチカスプの成因には、嶋田ら (1995) が述べているように、エッジ波説と、遡上波と地形の相互干渉説がある。これらの説によると cusp は edge wave cusp と swash cusp とに分かれ、前者はエッジ波 (倍周期) を伴った遡上波がカスプ形成の主因となるものであり、後者は遡上波と地形の相互干渉によって生じる遡上波と地形の共鳴的現象であるとした。また嶋田ら (1995) は、実験的観察により、swash cusp が形成される場合 backwash がその湾入部 (bay) で交差して backwash flow となること、また backwash flow は噴流となって波の突っ込み点まで達し、湾入部での波の遡上を妨げることを見出した。edge wave cusp と swash cusp のモデル化としては、Komar (1998) によると、standing edge wave model (Guza and Inman, 1975) と self-organization model (Werner and Fink, 1993) が代表的である。一方、柴崎ら (2005) は、bay で発達する backwash flow の作用を等深線変化モデルにおける一対の吸い込み・湧き出しに置き換えることにより、動的平衡状態にある cusp の発達を説明できるとした。いま、ある cusp において cusp 周辺の流体運動を観察すると、bay での backwash flow による冲向き漂砂の仮

定は妥当と考えられるが、apex においては波の作用によって岸側に運ばれる海水は往復運動によってそのまま沖へ戻るのではなく、bay へと斜めに流れ落ち、backwash flow となる。このことを考慮すれば、apex においては bay とは逆に沖に吸い込みが、また岸側に湧き出しが存在することにより、岸向きの漂砂が起こると推定される。しかしこのような点は検討されていない。このことから本研究では、吸い込み・湧き出しを2組設定し、その効果を調べることにした。一方、実海岸では apex に粗粒の土砂が堆積し、逆に bay には細粒の土砂が堆積する現象も広く観察されるが、従来の研究では cusp 周辺での底質の分級機構についても検討されていない。そこで、熊田ら (2005) の粒径分級を考慮した等深線変化モデルを用いて cusp における粒径分級について検討する。

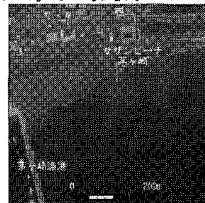
2. beach cusp の現地調査

様々なスケールを有する cusp の地形特性と粒径分級を明らかにするために、湖岸や湾内のように作用波浪のエネ

(1) 和邇川河口左岸 (2) お台場海浜公園



(3) 茅ヶ崎海岸



(4) 夷隅川河口左岸

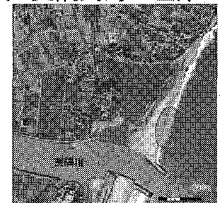


図-1 現場調査位置図

- | | |
|-------------|--|
| 1 学生会員 | 日本大学大学院理工学研究科海洋建築工学専攻 |
| 2 正会員 工博 | 日本大学教授理工学部海洋建築工学科 |
| 3 正会員 工博 | (財)土木研究センター理事なごさ総合研究室長兼日本大学客員教授理工学部海洋建築工学科 |
| 4 正会員 博(工) | (株)水圏科学コンサルタント |
| 5 学生会員 修(工) | 日本大学大学院理工学研究科海洋建築工学専攻 |
| 6 正会員 | 海岸研究室(有) |



図-2 波長数十 cm の cusp 地形 (和邇川河口左岸)

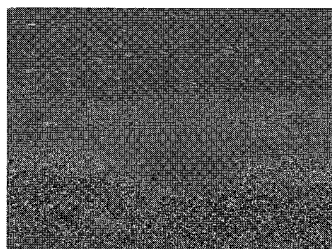


図-3 別の cusp の拡大図

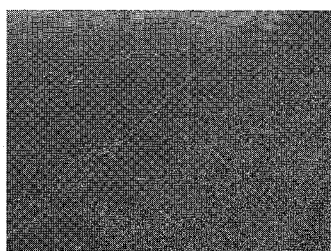
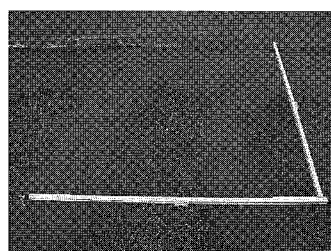
図-4 波遡上時の cusp 状況
(お台場海浜公園)図-5 波が遡上する直前の状態
(お台場海浜公園)

図-6 cusp 形状の測量状況

ルギーレベルが低い場所から、太平洋に直接面した海岸までいくつかの湖岸・海岸で現地調査を行った。調査対象は、図-1 に示すように(1)琵琶湖西岸の和邇川河口左岸の湖岸、(2)お台場海浜公園、(3)相模湾に面した茅ヶ崎海岸、および(4)太平洋に面した夷隅川河口左岸である。

(1) 和邇川河口左岸

2007年2月9日、琵琶湖西岸に流入する和邇川河口左岸において cusp の観察を行った。図-2 は湖浜に発達した波長が数十 cm の cusp である。規則正しい cusp が発達しているが、汀線より陸側には相対的に粒径の大きな礫が堆積している。cusp の apex 位置に点 A, A' を定め、その延長線上で沖合の礫床との交点を B, B' とすると、カスプの形成範囲は A と B の間であって主に細砂で覆われている。また、B, B' では細砂の堆積域がくびれ、それらの中央部では幅が広く、cusp の汀線と逆位相の地形が形成されている。また B, B' の沖合は粒径の大きな礫で湖底面が完全に覆われており、cusp はこの基盤上で形成されている。通常の波浪条件では、B, B' より沖合の湖底面は変化がなく、固定床と同様な意味を持つ。このことは、B, B' 点の水深はこの湖浜における波による地形変化の限界水深 h_c を与える。また cusp の bay では勾配が緩くなっており、apex より掘られている。ここには汀線を覆うような礫は存在せず、相対的に粒径の細かな砂が覆っている。図-3 は別の cusp の拡大図である。この cusp では bay は深く掘られ下層に堆積していた粒径の大きな礫が多数現れている。このような地形となるには細砂を沖方向へ運び去る強い海水流動の作用が必要である。

(2) お台場海浜公園

2007年4月7日、お台場海浜公園西部の、水上バス発

着場の桟橋近傍にある防砂突堤の東側隣接部において cusp の観測を行った。お台場海浜公園は閉鎖性海域にあるので、他の海岸と比較して風波の作用は弱い。近傍での水上バス発着時に航跡波が生じ、それによってかなり強い波が生じる。cusp は主にこの波によって発生している。また、お台場海浜公園は干満の潮位変動が著しく、短時間で cusp が形成される。図-4 は、波の遡上時における cusp の周辺状況を示したものであるが、図の破線位置で底質の粒径が大きく変化し、礫分はそれより岸側に分布している。図-5 は波が遡上する直前の状態で撮影したものであるが、規則正しく並んだ cusp の bay では波の遡上が遅れ、波峰線が凹状となっているのが見てとれる。

4月21日にはお台場海浜公園の cusp 諸元の定量化を行うために典型的な cusp を選び、図-6 のように水平・鉛直座標を容易に定めることのできる簡易測量手法を開発し、それを用いて地形測量を行った。また底質採取も行い、採取試料は乾燥後ふるい分け粒度分析を行った。結果を測線配置とともに図-7 に示す。cusp の波長は約 100 cm であり、apex では全体に粒径が粗く、bay では細かいことが分かる。また、 $X=0 \sim 50$ cm では apex が沖に突出し bay は岸側に凹んだ形状をしているのに対し、 $X=100 \sim 150$ cm では逆モードの形状となっている。この特徴は和邇川河口左岸での観察結果(図-3)と一致している。

(3) 茅ヶ崎海岸

2007年1月18日、茅ヶ崎漁港東側隣接部の海浜において cusp の形成状況を観察した。茅ヶ崎漁港の東側隣接部にある海水浴場(サザンビーチ)では海浜構成材料は細砂であるが、ここでも cusp の発達が見られ、遡上波が戻り流れとなる際の3次的流動が観察できた。図-8 は、遠方

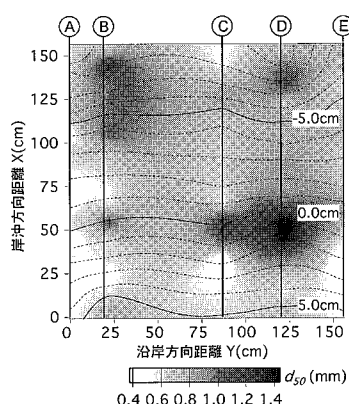


図-7 等深線と中央粒径分布（お台場海浜公園）

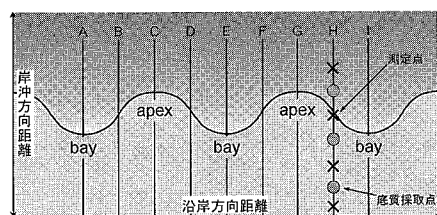


図-10 測量位置図

に茅ヶ崎漁港を望んで cusp を撮影したものであるが、cusp の bay では戻り流れが集中して流れている。cusp の apex に這い上がった海水はすぐに海に戻れるが、一部 apex から bay 方向へと流れた海水は長い距離移動するために遡上波と位相がずれ、これにより冲向き流れが発生するように観察された。bay の背面から撮影したのが図-9 である。両側から bay の底に流れてきた海水が集まって backwash flow となっていることがよく分かる。

(4) 夷隅川河口左岸

夷隅川河口左岸は太平洋に面し外洋の波浪エネルギーを直接受けるため季節によって海岸線の変動が激しい。そのため夷隅川河口左岸における cusp は年間を通じて定位置に形成されることはなく、cusp の波長や形状も季節によって変動する。そこで、2005 年 10 月 10 日、2006 年 3 月 6 日、5 月 1 日および 6 月 28 日と計 4 回の観察を行い、cusp の形状および粒径分級が顕著に表れていた 2006 年 6 月 28 日の観測において cusp の地形測量と底質採取を行った。測線は沿岸方向に等間隔で定めると apex および bay の各頂部を外す恐れがあるため、図-10 に示すように apex (C, G) と bay (A, E, I) の測線を定めた上で、apex と bay の中間に測線 B, D, F, H を定め、bay から 2 波長目の bay までを対象範囲とした 9 測線 (A ~ I) に沿って測量を行った。また、各測点間の中点 (図の○印) において底質採取を行った。採取試料は乾燥後ふるい分け分析を行った。

図-11 は観測された cusp 形状である。波長は約 30 m で

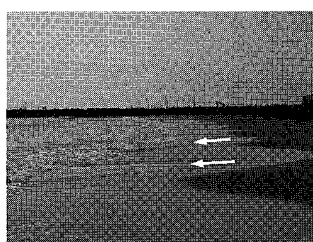


図-8 backwash flow の状況

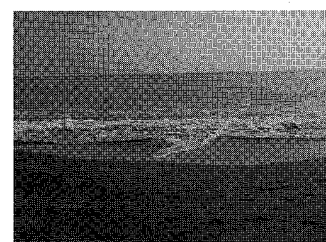


図-9 apex から集中した戻り流れを cusp 正面から望む

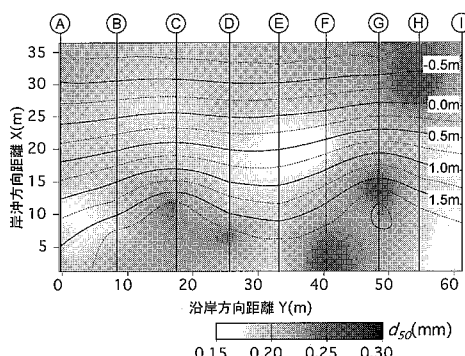


図-11 等深線と中央粒径分布（夷隅川河口左岸）

ある。図-11 には d_{50} の平面分布も示す。apex では粗粒の砂が堆積しているのに対し、bay では細粒となっているが、汀線に近づくにつれて粒径は一樣になっている。この傾向は、お台場海浜公園での調査結果と似た傾向である。

3. beach cusp の発達のモデル

4 海岸での観察・現地観測から cusp の発達状況を述べてきたが、cusp の流体運動に関しては、bay では茅ヶ崎海岸で観察されたように backwash flow が発生しているのでそれによる冲向き漂砂を仮定することが妥当と考えられる。一方、cusp の apex では波の作用によって岸側に運ばれる海水は往復運動によってそのまま沖へ戻るのではなく、bay へと斜めに流れて落ち、backwash flow となると考えられる (図-12 参照)。この場合、砂の吸い込み・湧き出しは、図-13 に示すように apex においては bay と逆に沖に吸い込み点、また岸側に湧き出し点が分布し、その結果岸向きの漂砂が起こると考えられる。この流体運動によって輸送される混合底質粒径は、apex では打ち上げと同時に減衰する遡上エネルギーにより粗粒砂が堆積し、減衰したエネルギーでも輸送される細粒砂は bay へと流れ落ちる。その繰り返しの結果 cusp の apex に粗粒の土砂が堆積するのに対し、bay には細粒土砂が堆積すると考えられる。

上記基本的考え方に基づいてモデル化を行った。本研究では粒径分級の機構も調べることを目的とするために、計算には熊田ら (2005) による粒径分級を考慮した等深

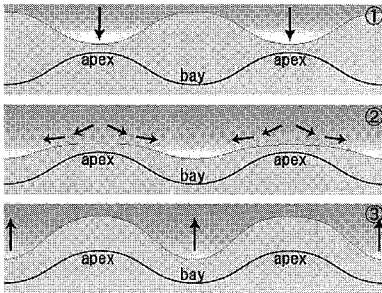


図-12 cusp 地形と海水流動概念図

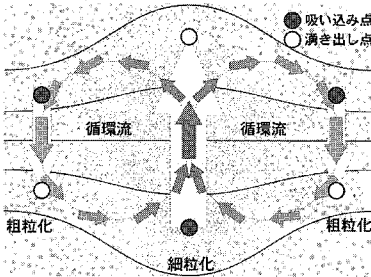


図-13 cusp 漂砂機構概念図

線変化モデルを用いた。熊田らのモデルの漂砂量式、粒径毎の含有率変化の計算式は原論文のとおりであるが、とくに粒径毎の土砂量保存則については、土砂の吸い込み・湧き出し項を付加した次の式を用いた。

$$\frac{\partial y^{(k)}}{\partial t} = -\frac{\partial q_x^{(k)}}{\partial x} - \frac{\partial q_z^{(k)}}{\partial z} + q_s^{(k)} \quad (1)$$

$$; k=1, 2, \dots, N$$

$$q_s^{(k)} = K_1^{(k)} \cdot \mu^{(k)} \cdot q_{all} \quad (2)$$

$$K_1^{(k)} = \frac{A}{\sqrt{d^{(k)}}} \quad (3)$$

ここに、 $y^{(k)}$ は粒径毎の等深線変化量、 x は沿岸方向座標、 z はある等深線の地盤高、 $q_x^{(k)}$ 、 $q_z^{(k)}$ は粒径毎 (k 番目の粒径) の沿岸・岸沖漂砂量、 $q_s^{(k)}$ は粒径毎の吸い込み・湧き出し項、 $\mu^{(k)}$ は交換層内の粒径毎 (k 番目の粒径) の含有率、 $d^{(k)}$ は底質粒径である。 A は未知数とし、対象海岸の変形過程に応じて設定できる。 q_{all} は単位幅・単位深さあたりの砂の吸い込み・湧き出し量である。混合粒径(全粒径)に応じた等深線変化量 ΔY は、等深線毎に粒径毎の等深線変化量 $\Delta y^{(k)}$ を合計して次式から求められる。

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = \sum_{k=1}^N \frac{\partial y^{(k)}}{\partial t} \quad (4)$$

4. 計算結果

(1) 仮想海岸への適用

cusp 形成の基本的現象を理解するために、まず仮想海岸での計算を行った。計算では2粒径の混合砂を考え、細粒土砂の粒径を0.5 mm、粗粒分の粒径を5 mm、そ

表-1 計算諸元

計算ケース	CASE1 (仮想計算)	CASE2 (再現計算)
初期地形	1/10	1/10
初期粒径	0.5 mm : 60 % 5.0 mm : 40 %	0.25 mm : 70 % 1.5 mm : 30 %
平衡勾配	0.5 mm : 1/10 5.0 mm : 1/10	0.25 mm : 1/10 1.5 mm : 1/10
交換層幅	B=0.27 m	
入射波条件	砕波波高 = 1.0 m 砕波波向 $\alpha=0^\circ$ 潮位条件 M.S.L=0.0 m	
地形変化の水深範囲	バーム高 $h_R=1.5$ m 地形変化の移動限界水深 $h_C=3.0$ m	バーム高 $h_R=2.0$ m 地形変化の移動限界水深 $h_C=4.0$ m
境界条件	左右境界の漂砂移動量なし	
漂砂量係数	漂砂量係数 $A=0.3$ 小笠ランプトンの係数 $\zeta=0$ 岸沖・沿岸漂砂量係数比 $\gamma=0.1$	
土砂落ち込みの限界勾配	陸域: 1/2, 海域: 1/3	
計算範囲	沿岸方向: 90 m 鉛直方向: $Z=5 \sim -10$ m	沿岸方向: 300 m 鉛直方向: $Z=5 \sim -10$ m
計算メッシュ	沿岸方向: $\Delta Y=2.5$ m, 鉛直方向 $\Delta Z=0.5$ m	沿岸方向: $\Delta Y=2.5$ m, 鉛直方向 $\Delta Z=0.5$ m
計算時間間隔 Δt	$\Delta t=0.001$ hr	
計算ステップ数	1.0×10^5 steps	
数値計算法	陽解法による差分式	
吸い込み位置 (Y(m), Z(m))	Y= 0 50 100 150 200 250 300 Z= -1.5 0.5 -1.5 0.5 -1.5 0.5 -1.5	Y= 0 15 30 45 60 75 90 Z= -1.0 1.0 -1.0 1.0 -1.0 1.0 -1.0
湧き出し位置 (Y(m), Z(m))	Y= 0 50 100 150 200 250 300 Z= 0.5 -1.5 0.5 -1.5 0.5 -1.5 0.5	Y= 0 15 30 45 60 75 90 Z= 1.0 -1.0 1.0 -1.0 1.0 -1.0 1.0

れぞれの含有率を60%、40%と仮定し、粒径集団の平衡勾配は同一の1/10とする。またバーム高 h_R は1.5 m、波による地形変化の限界水深は浅海域での現象であることから $h_C=-3.0$ mとした。その他吸い込み・湧き出し点の位置、吸い込み・湧き出し量などの条件は表-1のケース1の通りである。

図-14に仮想海岸での計算結果を示す。cuspのbayには細砂が集まり、apexでは粗粒分が集積する。また沖合には連続的に粗な粒径の土砂が集まっている。これらは琵琶湖西岸の和邇川河口左岸での観察結果をうまく説明している。陸上部では、粒径が実測と逆の傾向にあるが、現地では水位変動があり、汀線近傍のバーム頂部まで持ち上げられるために異なった結果になったと考えられる。図-15は、底質粒度組成の時間変化を示す。計算は 1×10^5 ステップまで行ったが、粒度組成は 5×10^4 ステップで平衡状態に達した。そこで代表的に0、 1×10^3 、 5×10^3 、 1×10^4 、 5×10^4 ステップの粒度組成を示す。初期には5 mmの粒径含有率が40%、0.5 mmの粒径含有率が60%であったが、 1×10^3 ステップではbayの中心において5 mmの粒径含有率が次第に増加する一方、apex近傍では減少するという変化が現れた。 5×10^3 ステップではbay中心の5 mmの粒径含有率が60%まで増大し、apex付近にあった0.5 mmの粒径含有率のピーク位置が海浜中央部へとずれた。 1×10^4 ステップでは、bay中心において5 mmの粒径含有率が50%と依然として初期ステップよりも大きい値を示すと同時に、0.5 mmの粒径含有率のピーク位置が 5×10^3 ステップと比較して一層bay中心へとずれた。最終的に

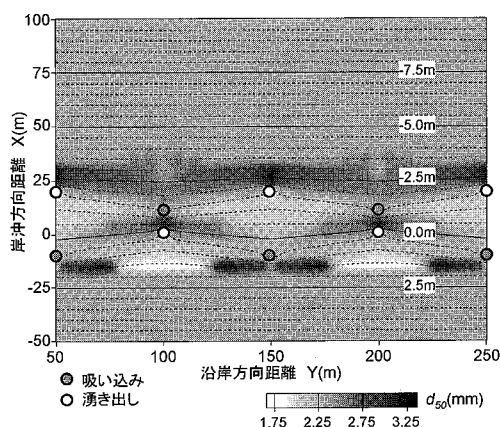


図-14 等深線と中央粒径分布の計算結果(仮想海岸)

5×10^4 ステップでは、bay と apex の中間にあった 0.5 mm の粒径含有率のピークが消え、bay 中心にピーク位置がずれた。両端の apex では 0.5 mm の粒径含有率が著しく小さく、全体として 0.5 mm の粒径含有率の分布が釣鐘状となった。これ以降波の作用があっても粒度組成には変化が見られず平衡状態に達した。以上より、時間経過とともに apex では粗粒砂が堆積し、bay では細粒砂が堆積している状況がよく予測できた。

(2) 夷隅川河口左岸の cusp への適用

実海岸への適用対象には夷隅川河口左岸の cusp を選んだ。計算条件として、粒径は現地調査で得られた解析結果を参考に 1.5 mm と 0.25 mm の 2 粒径を考え、含有率はそれぞれ 30 %、70 %、粒径集団の平衡勾配は同一の 1/10 とした。バーム高 h_R は 2.0 m とし、波による地形変化の限界水深は浅海域での現象であることから $h_c = -4.0$ m とした。吸い込み・湧き出し点の位置、吸い込み・湧き出し量などの条件は表-1 のケース 2 のとおりである。

図-16 に夷隅川河口左岸の cusp の再現結果を示す。夷隅川河口左岸の調査では -0.5 m までしか測量することができなかったため、検討範囲は -0.5 m までとなる。これを考慮して現地観測結果と比較すると、apex および bay の位置関係は現地と似た傾向を再現できている。また、粒径についても apex に粗粒砂が堆積するのに対し、bay では粗粒砂が堆積するという傾向を再現することができた。

5. ま と め

4 海岸において cusp の形状、底質粒径および海水流動について調べた。この結果、cusp 上での海水流動は、apex から bay へと斜めに流れて落ち、backwash flow となることから図-13 のような概念図として整理することができた。この考え方に基づいて、柴崎ら (2005) の吸い込み・湧き出し機構と、熊田ら (2005) の粒径分級を考慮した等深線変化モデルを用いて検討した結果、

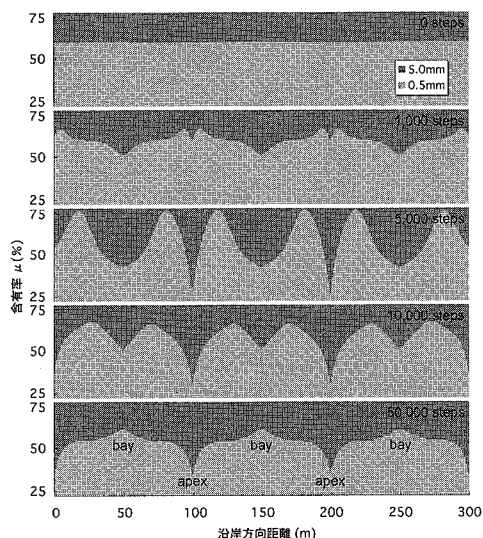


図-15 粒径別含有率の沿岸分布(仮想海岸)

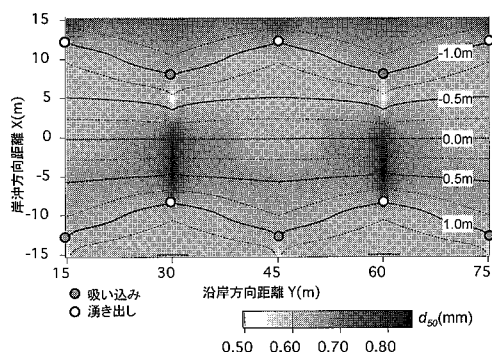


図-16 等深線と中央粒径分布の計算結果(夷隅川河口左岸)

cusp 形状だけでなく、apex に粗粒砂、bay に細粒砂が集まる現象も予測可能となった。

参 考 文 献

- 宇多高明・芹沢真澄・古池 鋼・三波俊郎(2004):2次元ポテンシャル流とのアナロジーに基づく動的安定海浜形状の予測法, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.491-495.
- 熊田貴之・宇多高明・芹沢真澄・三浦正寛(2005):波の遮蔽域形成に伴う3次元地形・粒径変化の予測法, 海洋開発論文集, 第21巻, pp.1029-1034.
- 柴崎 誠・宇多高明・芹沢真澄・小林昭男・前田友司(2005):ビーチカスプの形成・維持機構, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.416-420.
- 嶋田宏幸・高野弘毅・水口 優(1995):ビーチカスプの成因について, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.586-590.
- Guza, R. T. and D. L. Inman (1975): Edge Waves and Beach Cusps, Journal of Geophysical Research, Vol. 80 (21), pp. 2997-3012.
- Komar, P. D.: Beach Processes and Sedimentation, Second Edition, New Jersey, Prentice-Hall, pp. 544, 1998.
- Werner, B. T. and Fink, T. M. (1993): Beach Cusps as Self-organized Patterns, Science, Vol. 260, pp. 968-971.