

ビーチカスプの形成・維持機構

柴崎 誠* ・宇多高明** ・芹沢真澄**
小林昭男*** ・前田友司****

神奈川県秋谷海岸でビーチカスプの形状を観察し、これを基礎として砂の吸い込み・湧き出しを考慮した等深線変化モデルによりビーチカスプの動的平衡状態を再現した。モデルでは、沿岸漂砂量係数を一定(0.2)とした条件で、岸沖・沿岸漂砂量係数の比 K_s/K_r と、砂の吸い込み・湧き出し量を種々変化させた計算を行った。また、岸沖・沿岸漂砂量係数の比 K_s/K_r を一定(1.0)とし K_s , K_r を変化させた場合についても計算を行った。この結果相対的に岸沖漂砂の作用が沿岸漂砂と比較して小さい場合、カスプ間隔/碎波帯幅(Y/B)が急激に減少することが分かった。

1. はじめに

前浜勾配が急な海浜ではしばしばビーチカスプ(以下、カスプ)が観察されるが、その発達に関する最も有力な説は edge wave によるものである。一方、カスプと比較して沿岸方向の空間規模ははるかに大きい、類似な現象として離岸流起源のリップチャネルが沿岸方向に規則的に並ぶラージカスプもある。筆者ら(2004)は、後者について、砂の吸い込み・湧き出しを考慮した等深線変化モデルによりその動的平衡状態を再現した。両者ともリズムミッドな汀線が形成されるという形態的類似性を考慮すると、このモデルはカスプの発達機構の説明にも適用できる可能性がある。そこで、本研究では、まず現地海岸のカスプの形状を調べた後、このモデルによりカスプを再現し、その形成・維持機構について検討した。

2. 神奈川県秋谷海岸におけるカスプの観察

現地海岸において見られるカスプの形状を調べるために、2004年12月2日に図-1に示す神奈川県三浦半島西岸に位置する秋谷海岸で現地調査を行った。その際、関根川の河口左岸側に見事なカスプが観察されたことから、このカスプを対象として間隔や前浜勾配を測定した。

写真-1は海岸線に沿う県道の護岸上から海岸線を北向きに撮影したものである。海浜にはカスプがよく発達し、7個のapexと6個のbayが見られる。また砂層厚は薄く後浜には基盤岩が見えることから、これらのカスプは基盤岩上にある砂礫が沿岸方向に分布することによって形成されたものであることが分かる。写真-2は、写真-1において下から2番目のカスプの波長の測定状況であり、波長は約6.8mであった。また前浜勾配は、手前のポール位置で1/6、前方のポール位置で1/7であり、

また前浜構成材料は礫であった。なお写真-1によればカスプの波長を測定した2番カスプ位置での碎波帯幅は、カスプの波長とほぼ等しいことも見て取れる。

写真-3は、写真-1の7個のカスプのうち、下から3、4番目のカスプにおいて波が最も引いた瞬間の碎波状況である。4番目のカスプにおいて汀線が最も後退している部分では写真に矢印で示すように沖合からの入射波の碎波が遅れている。観察によれば、そこではカスプのapexからbayへと斜めに戻り流れが集中し、そのため逆流の作用を受けて波の進行が遅れることが見出された。

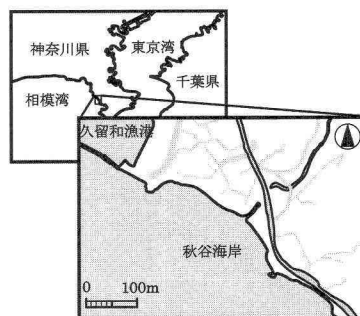


図-1 神奈川県秋谷海岸の位置

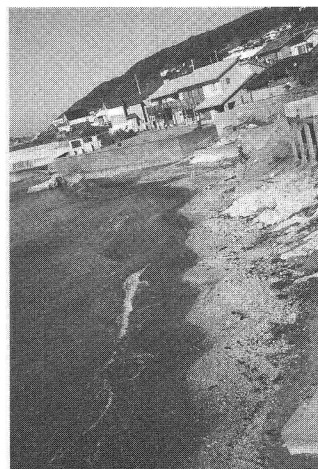


写真-1 秋谷海岸におけるビーチカスプの形成状況

* 正会員 (株)三洋コンサルタント
** 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
*** 正会員 海岸研究室(有)
**** 正会員 工博 日本大学助教授理工学部海洋建築工学科
***** (株)合人社計画研究所



写真-2 ビーチカスプの間隔

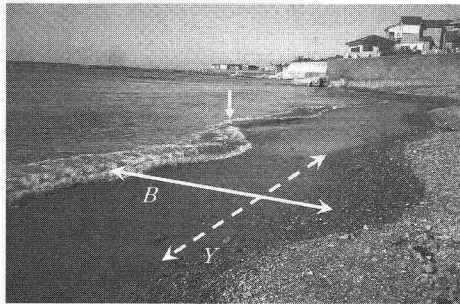


写真-3 ビーチカスプの碎波帯幅

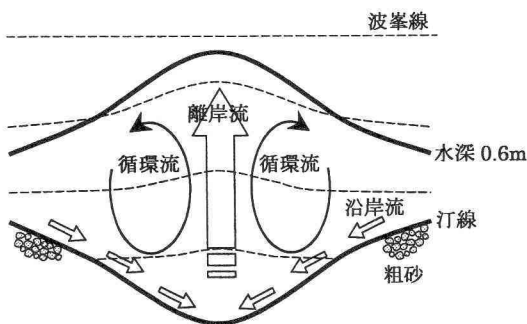


図-2 海浜流とカスプ地形の概念図

すなわち図-2に示すように、カスプの地形特性に応じ、引き波が一様とならずに、カスプ中央部を通じて海水が沖へと戻るといふ3次元構造の海水流動がこのような地形を安定的に存在させていると推定された。

3. 砂の吸い込み・湧き出しを考慮した等深線変化モデルによるカスプの形成・維持機構

(1) 計算の方法と条件

秋谷海岸における観察結果をもとに、沿岸漂砂による海浜安定化機構と、底質粒径に応じた平衡勾配と海浜縦断勾配とのバランスに起因する岸沖漂砂による縦断形の安定化機構を考慮した芹沢ら(2002)を基礎として、砂の吸い込み・湧き出しを与えることにより動的平衡状態にある海浜形状を表現できるモデル(宇多ら, 2004)を用い

てカスプの形成・維持機構の検討を行った。このモデルは、ある量の砂が離岸流などにより岸側から沖向きに運ばれるが、それと同量の砂が沿岸漂砂の作用を受けつつ岸向きに運ばれるため、砂移動があるまま海浜は動的安定状態を保つことができるという点に特徴がある。このような土砂移動は静的安定状態とは異なり、深浅図の比較のみでは把握が困難である。

モデルの基礎式は式(1)～(6)で与えられる(宇多ら, 2004)。

$$q_x = \varepsilon_z(z) \cdot K_x \cdot (EC_g)_b \cos \alpha_b \sin \alpha_b \cdots \cdots (1)$$

$$q_z = \varepsilon_z(z) \cdot K_z \cdot (EC_g)_b \cos \alpha_b \sin \beta_c \cdot \left(\frac{\cot \beta}{\cot \beta_c} - 1 \right) \cdots \cdots (2)$$

$$\cot \beta = -\frac{\partial Y'}{\partial z} \cdots \cdots (3)$$

$$\varepsilon_z(z) = \varepsilon_x(z) = \varepsilon(z) / \int_{-h_c}^{h_R} \varepsilon(z) dz \cdots \cdots (4)$$

$$\varepsilon(z) = \begin{cases} 1/(h_c + h_R) & (-h_c \leq z \leq h_R) \\ 0 & (z \leq -h_c, h_R \leq z) \end{cases} \cdots \cdots (5)$$

$$\frac{\partial Y'}{\partial t} = -\frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_z}{\partial z} + S \cdots \cdots (6)$$

ここに、式(1)は沿岸漂砂量式、式(2)は岸沖漂砂量式である。等深線上の各点での沿岸漂砂量 q_x 、岸沖漂砂量 q_z を式(1)、(2)で与え、これを用いて x - y 空間の2次元の連続式(6)を解くことで等深線変化量が計算される。ここに、 x は沿岸座標、 z は鉛直座標(地盤高)、 t は時間、 Y' は等深線位置、 S は単位深さ・沿岸方向単位幅当りの湧き出し量、 $(EC_g)_b$ は碎波点のエネルギーフラックス、 α_b は碎波波向と等深線のなす角、 $\cot \beta$ は等深線間隔、 $\varepsilon_x(z)$ および $\varepsilon_z(z)$ は沿岸および岸沖漂砂量の水深方向分布であり、式(5)のように一様で与える。さらに、 K_x は沿岸漂砂量係数、 K_z は岸沖漂砂量係数、 h_c は波による地形変化の限界水深、 h_R はバーム高である。平均勾配 $\tan \beta_c$ には初期地形勾配を与える。

計算では、観察結果に基づき、初期地形を海底勾配1/10、 $H_b=0.5$ m、碎波帯幅 $B=6.0$ mとし、実測のカスプ間隔6.0 mを参考として吸い込み・湧き出し間隔を6.0 mに固定し、水深0.0 mに砂の吸い込み、水深0.6 mに湧き出しを様々な強度で与えた。さらに、沿岸漂砂量係数 K_x は芹沢ら(2002)と同じ0.2とし、岸沖・沿岸漂砂量係数の比 K_z/K_x を種々変化させて岸沖漂砂量係数の変化がカスプの発達に及ぼす影響について検討した。また、 K_z/K_x を1.0と一定とし、沿岸漂砂量係数を種々変化させた場合のカスプの形成についても検討した。計算は全体で16ケース行った。表-1には16ケースの計算条件と諸定数をまとめて示す。

表-1 計算条件

ケース番号	$K_z/K_x, \pm S(m^3/m/m/yr)$
1	0.1, 7.0×10^4
2	0.2, 7.0×10^4
3	0.4, 7.0×10^4
4	0.8, 7.0×10^4
5	1.0, 7.0×10^4
6	1.2, 7.0×10^4
7	1.4, 7.0×10^4
8	1.6, 7.0×10^4
9	1.8, 7.0×10^4
10	2.0, 7.0×10^4
11	5.0, 7.0×10^4
12	8.0, 7.0×10^4
13	5.0, 1.4×10^5
14	0.1, 7.0×10^4
15	0.2, 7.0×10^4
16	0.4, 7.0×10^4
初期地形	直線平行等深線 (勾配1/10)
入射波条件	碎波波高 $H_s=0.5$ m, 入射波向 $\alpha_s=0$ deg
沿岸・岸沖漂砂の水深分布	地形変化: 限界水深 $h_c=1.0$ m, バーム高 $h_B=0.5$ m
平衡勾配	$\tan \beta_c=1/10$
土砂落ち込みの限界勾配	配陸上: 1/2, 水中: 1/3
計算メッシュ	沿岸方向 $\Delta_x=1$ m, 鉛直方向 $\Delta_z=0.2$ m
計算時間間隔 Δt , STEP 数	$\Delta t=0.05$ hr, 5000 STEP
境界条件	左右端: $q_x=0, q_z=0$
湧き出し・吸い込み点	全ケース水深0 mに吸い込み, 水深0.6 mに湧き出し

(2) 計算結果

a) 砂の吸い込み・湧き出し量 S および K_z を一定(0.2)に保って K_z/K_x を変化させた場合

図-3には計算結果の一例として、岸沖・沿岸漂砂量係数の比 K_z/K_x を0.2, 砂の吸い込み・湧き出し量を $S=\pm 7.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{m}/\text{m}/\text{yr}$ として求めたケース2の等深線形状を示す。砂の吸い込み・湧き出しを与えた測線上において汀線では bay が、沖合の等深線では apex が形成され、しかもそれらが動的平衡状態として安定的に存在している。しかしながらこのケースでは、汀線から水深0.6 mの間で等深線の間隔が大きく広がり、緩勾配

斜面が形成される一方、陸上部には急勾配の浜崖と水深0.8 m以深には海底勾配が1/3の急勾配斜面が形成された。すなわち、初期縦断形が沖向漂砂に起因して陸側で大きく削られ、その土砂が沖合の h_c 以深に多量に堆積するという結果となった。この計算結果は、秋谷海岸での観察結果と大きく異なる。この原因としては、計算で設定した $K_z/K_x=0.2$ という値では、岸沖漂砂の作用が小さ過ぎるために、吸い込み・湧き出しにより沖に運ばれた砂を汀線へと戻す作用が弱く、結果として次第に沖へと土砂が運ばれたことによると考えられる。

図-4は、図-3に示したケース2と他の条件を同じにしたまま、岸沖漂砂を強めるために K_z/K_x のみを0.2から5.0と大きくしたケース11の等深線形状である。この場合も砂の吸い込み・湧き出しを与えた測線上で汀線付近では bay が、沖合等深線では apex が形成された。しかし図-3の $K_z/K_x=0.2$ の場合と比較して等深線間隔は狭まり、陸側での浜崖の形成と沖合の h_c 以深での土砂の落ち込みはなくなり、かなり現地条件に近くなった。海底勾配は約1/10のままほとんど変化していないが、汀線付近でのカブの岸沖方向の長さが現地では約2.0 mであったのに対し、計算では約1.0 mと短いことが相違点である。

b) 現地海岸のカブ地形の再現

以上のことから、砂の吸い込み・湧き出しを与えた付近の海底勾配は沿岸漂砂量係数が0.2と一定の場合、岸沖漂砂量係数 K_z により強く支配され、 K_z/K_x が0.2と小さいと緩勾配となり、5.0と大きいと急勾配になることが明らかになったが、汀線付近でのカブの規模は砂の吸い込み・湧き出し量にも依存するはずである。そこで、岸沖・沿岸漂砂量係数の比を $K_z/K_x=5.0$ と一定に保ったまま、砂の吸い込み・湧き出し量をケース11の2倍、すなわち $S=\pm 1.4 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{m}/\text{m}/\text{yr}$ とした計算(ケー

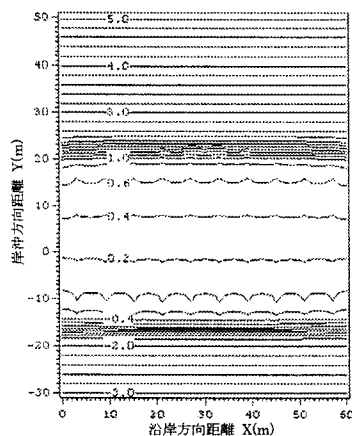


図-3 等深線(ケース2)

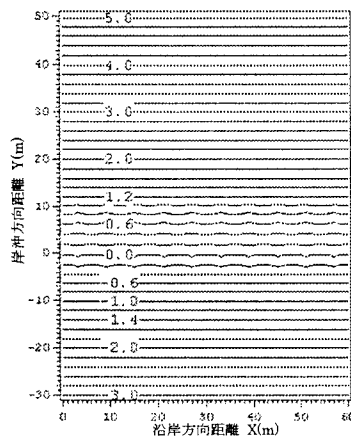


図-4 等深線(ケース11)

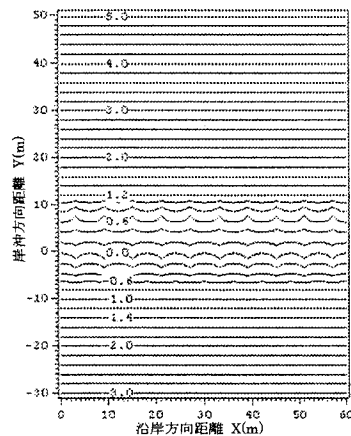


図-5 等深線(ケース13)

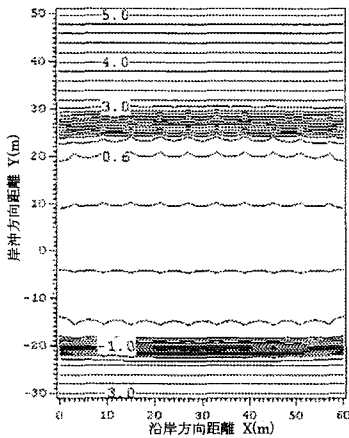


図-6 等深線(ケース1)

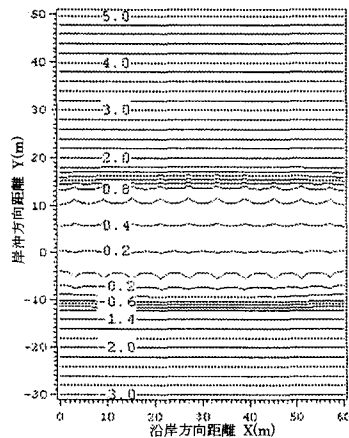


図-7 等深線(ケース3)

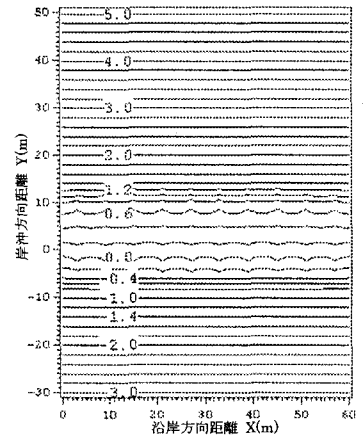


図-8 等深線(ケース5)

ス13)を行った。

図-5はケース13の計算結果である。このケースにおいても汀線付近のbayと沖合等深線でのapexが動的平衡状態として形成されたが、砂の吸い込み・湧き出し量が増えたため海底勾配はほぼ1/10と図-4とほぼ同様のまま、カスプの岸沖方向の長さが約2.0mとなり、秋谷海岸での観察結果とほぼ同様となった。砂の吸い込み・湧き出し量に比例してカスプの岸沖方向の長さが増大している点が注目される。

c) 岸沖・沿岸漂砂量係数の比とカスプの規模の関係
前節の検討により、カスプの形成は沿岸漂砂量係数が一定(0.2)の場合、岸沖漂砂量係数に大きく依存し、急勾配海岸でカスプが形成されるには相対的に岸沖漂砂の作用を強めることが必要ことが分かった。しかし、岸沖・沿岸漂砂量係数の比とカスプの規模については十分明らかではない。そこで、写真-3に示す秋谷海岸におけるカスプ間隔 Y が6.0m、碎波帯幅 B が6.0mであったことから、カスプ間隔を6.0mと固定し、水深0.0mに砂の吸い込み、水深0.6mに湧き出しを $S = \pm 7.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{m}/\text{yr}$ で与え、沿岸漂砂量係数を0.2と一定とし、岸沖・沿岸漂砂量係数の比 K_z/K_x を0.1~8.0の間で変化させた計算を行った。

図-6は $K_z/K_x = 0.1$ (ケース1)の計算結果である。他と類似したカスプ地形が計算されているが、等深線間隔が大きく広がり約1/60の緩勾配斜面が形成された。同様に、図-7は $K_z/K_x = 0.4$ (ケース3)の計算結果である。等深線間隔は $K_z/K_x = 0.1$ の場合よりも狭まって約1/30となった。岸沖・沿岸漂砂量係数の比を4倍増加させた結果、海底勾配は2倍となった。

$K_z/K_x = 1.0$ (ケース5)の場合は図-8のように砂の吸い込み・湧き出しを与えた測線における海底勾配は約1/20となった。 $K_z/K_x = 0.4$ の場合(ケース3)と比較すると、

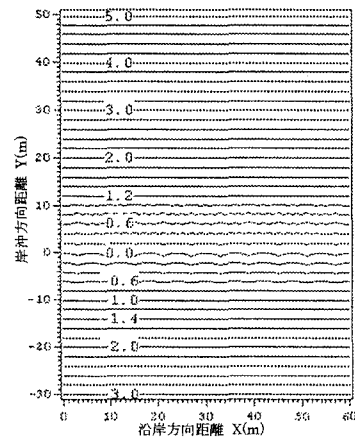
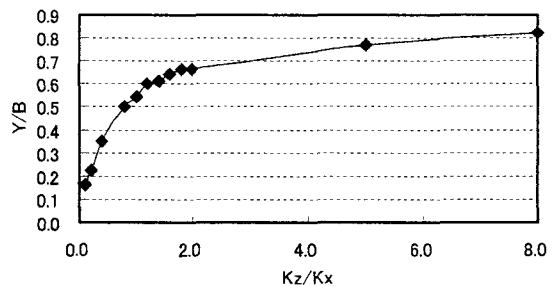


図-9 等深線(ケース12)

図-10 碎波帯幅およびカスプ間隔と K_z/K_x の関係

K_z/K_x を2.5倍にした結果、海底勾配は1.5倍となった。最後に $K_z/K_x = 8.0$ の場合(ケース7)が図-9であるが、砂の吸い込み・湧き出しを与えた測線における海底勾配は約1/10となり、最も急勾配となった。

d) カスプ間隔/碎波帯幅と K_z/K_x の関係

砂の吸い込み・湧き出しを与えた水深0.0mから0.6mの幅を碎波帯幅 B とし、これとカスプ間隔 Y の比が、沿岸漂砂量係数を一定(0.2)とした時、岸沖・沿岸漂砂量係

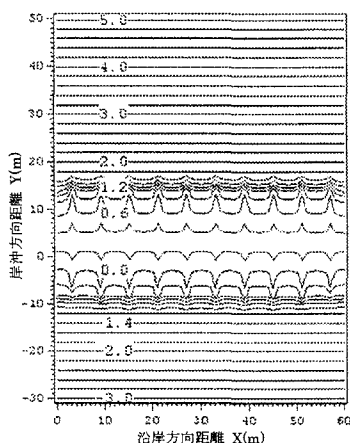


図-11 等深線(ケース14)

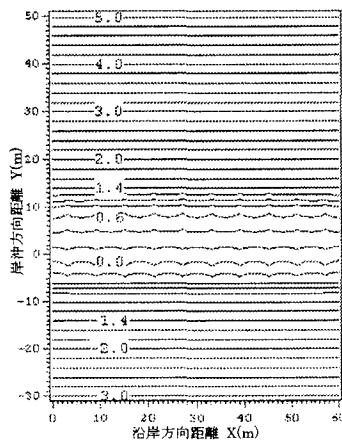


図-12 等深線(ケース15)

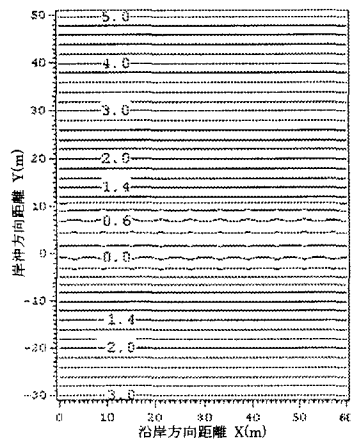


図-13 等深線(ケース16)

数の比 K_z/K_x に依る依存性を有するかを調べた。図-10は岸沖・沿岸漂砂量係数の比とカスプ間隔/碎波帯幅の関係を示す。岸沖漂砂の作用が弱い場合、すなわち K_z/K_x が小さい場合、 Y/B は小さな値を取る。しかし K_z/K_x が2.0以上では Y/B はほぼ0.82に漸近することが分かる。

以上のことから、カスプの形成に大きく影響を及ぼすのは、沿岸漂砂量係数が一定の場合岸沖漂砂量係数であり、またカスプの規模は砂の吸い込み・湧き出し量に大きく依存することが分かった。

e) 砂の吸い込み・湧き出し量 S および K_z/K_x を一定とし K_z , K_x を変化させた場合

図-11には $K_z/K_x=1.0$, $K_z=K_x=0.1$ の場合のケース14の計算結果を示す。砂の吸い込み・湧き出しを与えた測線において海底は緩勾配となり、図-10に示したカスプ間隔/碎波帯幅と K_z/K_x の関係では $Y/B=0.55$ であったが、このケースでは Y/B が0.29と小さくなった。これは岸沖漂砂量係数が小さいため、沖合へ運ばれた砂が汀線付近に戻りにくくなったためと考えられる。

図-12に $K_z/K_x=1.0$, $K_z=K_x=0.2$ の場合(ケース15)の計算結果を示す。ケース14と比較すると Y/B が0.5となり急勾配となったが、汀線のカスプの規模は縮小した。これは、 K_z/K_x は一定であるが、岸沖・沿岸漂砂量係数が共に2倍となり、全体の砂の循環が強まったためと考えられる。

図-13に $K_z/K_x=1.0$, $K_z=K_x=0.4$ の場合(ケース16)の計算結果を示す。 Y/B が0.75となり海底勾配は約1/13と最も急勾配であるが、汀線のカスプの規模は縮小した。

以上より、岸沖・沿岸漂砂量係数の比 K_z/K_x を1.0の同じ値に保ちつつ、 K_z , K_x の絶対値を大きくすると、初期の海

底勾配を維持しつつカスプが形成されるが、沖合へ運ばれた砂が循環流により岸へと戻されやすくなるため、カスプの規模は小さく目立たないものになることが分かる。

4. ま と め

本研究では、現地海岸でしばしば観察されるビーチカスプの形成・維持機構について神奈川県秋谷海岸で実測を行うとともに、吸い込み・湧き出しを考慮した等深線変化モデルを用いて検討した。観察の結果、ビーチカスプの地形特性に応じて引き波が一様とならずに、カスプ中央部を通じて海水が沖へと戻るという3次元構造の海水流動がこのような地形を安定的に存在させていると推定された。等深線変化モデルによる計算によれば、汀線付近においてはbayが形成され、沖合等深線ではapexが動的平行状態で形成された。その場合、岸沖・沿岸漂砂量係数の比が現象を強く支配し、相対的に沿岸漂砂の作用が強い場合は緩勾配が、岸沖漂砂の作用が強い場合は急勾配が形成されることが分かった。また汀線付近のカスプの規模については砂の吸い込み・湧き出し量に応じて大きくなることが分かった。

参 考 文 献

- 柴崎 誠・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・熊田貴之(2004): 離岸流の発生と窪みの形成・維持機構のモデル化, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 141-145.
- 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼・熊田貴之(2002): 海浜縦断形の安定化機構を組み込んだ等深線変化モデル, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 496-500.
- 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.