

Hsu モデルの三次元海浜変形予測モデルへの拡張

芹沢 真澄*・宇多 高明**・三波 俊郎***
古池 鋼***・神田 康嗣****

1. ま え が き

防波堤背後の湾入汀線の計算法として, Hsu・Evans (1989) は, 極座標表示の汀線形状に関して, 2 次のオーダーまでの回帰分析により直接的に汀線形状を求める手法を示した。この方式は, 繰り返し計算を必要とせず, 計算が非常に容易という利点を有するが, 一方で土砂収支が満足するような試みがなされていないために, 養浜時の汀線変化予測などにはそのまま使えず, また, この式は厳密な意味で境界条件を満足していないという問題点があった。そこで, 筆者らは, 両者を解決した新しい方式を提案した(芹沢ら, 1996)。しかし, これらの方式であっても, 依然として防波堤背後における 3 次元的海浜変形を予測しうるものではない。この種の問題について, 筆者らは, 波による地形変化を初期地形から出発して解く, 等深線変化モデルの開発を進めてきた(例えば, 宇多・河野, 1996)。これによれば, 防波堤背後の安定海浜形状についても計算が可能である。しかし, この手法では繰り返し計算が必要であって, Hsu のモデルのように簡単に解を得ることはできない。このことから, ここでは Hsu の方式と, 等深線変化モデルにおいて仮定されている沿岸漂砂量の水深方向分布を考慮することにより, 養浜後の 3 次元地形変化を直接的に計算する簡易手法を開発する。

2. 計算の基本式

2.1 汀線変化と等深線変化の関係式と漂砂の移動高

宇多・河野 (1996) は, 沿岸漂砂量の水深方向分布を与えることにより, 沿岸漂砂による 3 次元的海浜変形を予測可能な等深線変化モデルを開発した。ここでは, 宇多・河野と同じ沿岸漂砂量の水深方向分布 $\epsilon(z)$ を用いる。これは次式で与えられる。

$$\epsilon(z) = \frac{2}{h_c^3} \cdot (h_c/2 - z)(z + h_c)^2 : (-h_c \leq z \leq h_R) \\ = 0 : (z < -h_c, h_R < z) \dots\dots\dots (1)$$

ここに, z : 静水面を基準として鉛直上方に取った座標, h_c : 波による地形変化の限界水深, h_R : バーム高である。式 (1) において, 汀線上 ($z=0$) では,

$$\epsilon(0)=1 \dots\dots\dots (2)$$

が成立し, ここより陸側, 海側とも漂砂量は減少する。

式 (1) の沿岸漂砂量の水深方向分布は, ある微小時間における等深線の水平方向変位を算出し, 等深線の水平方向変位の最大値で各等深線の水平方向変位を割って規準化したとき, 規準化された沿岸漂砂量が汀線位置で最大となること, したがって等深線の水平方向の最大変位は汀線上で現れることを意味している。すなわち, 汀線変化量に対する各等深線の水平方向変位の比を求めたものとなっている。この場合, 波浪条件が一定であれば, 沿岸漂砂移動に伴い, 次々と等深線の水平方向変位が起こるとし, それらが重なった条件下での等深線の総水平変位と, 総汀線変化量の比も近似的に式 (1) で与えられる水深方向分布に等しいと考えられる。したがって, 汀線変化量 $\Delta Y(0)$ が与えられると, 水深 z_k における等深線変化量 $\Delta Y(z_k)$ は, 次式から計算できる。

$$\Delta Y(z_k) = \epsilon(z_k) \cdot \Delta Y(0) \dots\dots\dots (3)$$

一方, 式 (1) を $z = -h_c \sim h_R$ の範囲で積分した値は, 式 (2) を考慮すると, 海浜断面面積の変化量 ΔA の, 汀線変化量 $\Delta Y(0)$ に対する比, すなわち漂砂の移動高 D_s に等しい。したがって, 漂砂の移動高 D_s は次式となる。

$$D_s \equiv \Delta A / \Delta Y(0) = \int_{-h_c}^{h_R} \epsilon(z) dz \\ = \frac{h_c}{2} (1 - h_R/h_c)(1 + h_R/h_c)^3 \dots\dots\dots (4)$$

式 (4) によれば移動高 D_s は, h_c と h_R から計算される。この D_s は, 土砂収支を満足させつつ汀線変化の計算を行う際必要となる。一方 h_c と h_R は等深線変化モデルの場合と同様にして碎波波高 H_b から次式により求める。

$$h_c = 2.5 H_b, h_R = 0.8 H_b \dots\dots\dots (5)$$

2.2 安定汀線の計算

防波堤背後における安定汀線形状の計算は Hsu の方法によるが, Hsu 式の係数値は筆者らの修正式(芹沢ら, 1996)を用いる。汀線の計算値は内挿して直交座標系 (x, y) の値に変換する。この場合, 波が大きく斜め入射する

* 正会員 海岸研究室(有)
** 正会員 工博 建設省土木研究所河川部長
*** 正会員 海岸研究室(有)
**** 正会員 (有)水城ネットワーク

場所など、条件によっては防波堤背後での汀線形状が大きく湾曲してオーバーハング状態となり、同じ沿岸方向距離座標に対して汀線が2価となって等深線変化の計算ができなくなる。このような条件を除くために、便宜上、汀線の方角角の上限値を設定してオーバーハングのない汀線形状に修正することにした。ここでは沿岸方向距離座標軸から70°の方向を上限としてそこで汀線の計算範囲を打ち切り、その外側は直線で外挿した。

2.3 土砂収支の保存式

汀線変化の計算では、計算範囲全体の総土砂量が不変であるという条件を次のようにして満足させる。ある地点(i)の汀線変化量 $\Delta Y(0)^{(i)}$ に漂砂の移動高 $D_s^{(i)}$ を乗じたものは、その地点での海浜断面面積変化量 $\Delta A^{(i)}$ を与えるが、計算区域全体の総土砂変化量 ΔV は、この断面面積変化量に計算距離間隔 dx を乗じた値を沿岸方向に加算した値で与えられ、土砂収支が成立するためには $\Delta V=0$ でなければならない。つまり、

$$\Delta V = \sum_i \Delta A^{(i)} dx = \sum_i D_s^{(i)} \Delta Y(0)^{(i)} dx = 0 \quad \cdots (6)$$

ここに dx は海岸線の分割幅、とくに D_s が一定の場合、

$$\sum_i \Delta Y(0)^{(i)} dx = 0 \quad \cdots (7)$$

となり、これは砂浜の総面積変化量=0が成立することを表している。この場合、 D_s の値によらず砂浜の侵食面積=堆積面積を満足させればよい。以上より、Hsuの方法による汀線の計算の際には、防波堤から十分離れた下手側の点Qを岸沖方向に移動させ、汀線変化量が式(6)を満足するように汀線位置を決める。

2.4 海浜縦断勾配が安息勾配を越えた場合の補正法

海浜縦断勾配が限界勾配を越えた場合には、等深線変化モデルと同様な手法により、土砂収支を満足させながら水深の大きな領域へと土砂を移動させ、結果として土砂の落ち込みによる冲向き漂砂を考慮する(図-1参照)。 z_3 と z_4 の間で限界勾配を越えたとき、断面面積 S_1 、 S_2 の面積が等しく、かつ ab' が限界勾配となるように b' 、 c' 点を設定するのである。限界勾配は、陸上部と水中部をそれぞれ別々に与える。等深線変化モデルでは、この種の地形変化に関してオーバーハングの修正の機構としたが、オーバーハングの修正というよりも、限界勾配よりも勾配が大きくなったとき、冲向きの土砂移動が起きて勾配が緩くなる、と考えた方が物理的意味を理解し易い。

3. 計算の手順

図-2には計算のフローを示す。入力データは、初期地形、防波堤(ヘッドランド)の諸元、入射波向、碎波波高(分布)、陸域・海域の限界勾配 i_c 、 i_r である。最初に沿岸方向に適当な間隔で計算範囲を分割する。次に碎波

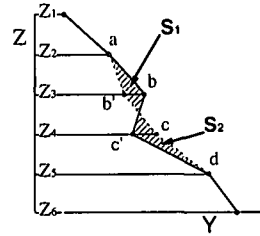


図-1 限界勾配を越えた場合における海浜縦断形の安定化機構

波高からそれぞれ式(5)、(4)、(1)より h_c 、 h_R 、 D_s 、 $e(z_k)$ を計算する。次にHsuの方法によって土砂収支を満足させつつ新しい汀線位置を計算し汀線変化量 $\Delta Y(0)$ を求める。 $\Delta Y(0)$ が求まると各水深ごとの等深線変化量 $\Delta y(z_k)$ が式(3)から求められるから、等深線の変化量を初期値に加えれば新たな等深線位置が定まる。ここまでの計算が終わると、土砂収支を満足したままで各等深線の位置が決まるが、この段階では計算された等深線の間隔、すなわち海底の局所的な海浜勾配が陸域または海中での砂の安息角から定まる限界勾配より急となることもあり得る。そこで、局所海底勾配が限界勾配よりも急な場合には、海浜縦断面内で土砂収支を保ったままで冲向きの土砂移動が生じるようにして各等深線の位置を計算し直す。等深線の新しい位置が決まったならば、等深線位置の変化からみた収束条件と比較し、収束条件を満足すれば計算を終了する。満足されなければ汀線の計算からやり直す。以上が計算の概要である。

計算は全体で6ケースからなる。表-1に条件を一括して示す。ケース①は、全てのケースの基本となるもの

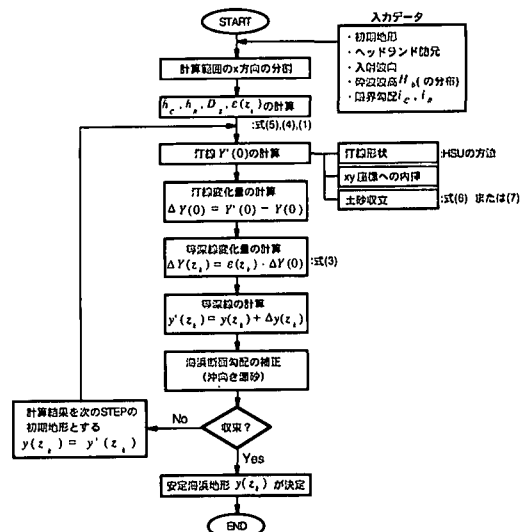


図-2 計算のフローチャート

表-1 計算ケースの一覧

ケース	特徴	初期地形	H_b (m)	h_c (m)	h_R (m)	i_c	i_R
1	基本	$i=1/10$	2.0	5.0	1.6	1/2	1/2
2	緩勾配	〃	〃	〃	〃	1/4	〃
3	低波高	〃	0.4	1.0	0.32	1/2	〃
4	波高分布考慮	〃	$K_d \times 2.0$	$2.5H_b$	$0.8C_b$	〃	〃
5	波深の影響	ケース1の安定海浜	2.0	5.0	1.6	〃	〃
6	ヘッドランド間の海浜	$i=1/10$	〃	5.0	1.6	〃	〃

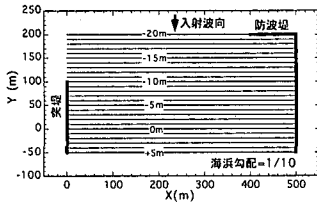


図-3 計算座標系と計算領域の設定

で、初期海底勾配を1/10の一定とし、図-3のように左端に突堤、右端に防波堤がある場合を対象とする。また碎波波高は2mで沿岸方向に一定とする。陸域、海域における限界勾配は1/2で両者が等しいとする。ケース②は、海中での限界勾配を1/4と緩くしたこと以外はケース①と同じ条件である。ケース③は、ケース①の碎波波高2mに対して、静穏な波浪条件下で海浜変形を予測するものであり碎波波高を0.4mとして他の条件はケース①と同一である。ケース④は沿岸方向に波高分布が存在する場合においても同様に計算が行えることを示すために防波堤背後域における波高分布を方向分散法により求め得られた K_d 値(回帰係数)をもとに $K_d \times 2.0$ mで碎波波高を与えた計算である。以上が基本的なケースであるが、ケース⑤、⑥では防波堤背後での浚渫が周辺海岸へ及ぼす影響と、ヘッドランド間での海浜変形について取り上げる。この場合、比較の基準としては常にケース①を念頭におく。

4. 計算結果

4.1 ケース①～④の計算結果

図-4、5には、ケース①～④の計算結果をまとめて示す。図-4は安定海浜の深浅図、図-5は各測線に沿う海浜縦断面形の重ね合わせ図である。ケース①から順に特徴を述べる。ケース①においては、防波堤による波の回折効果によって防波堤背後の汀線は大きく湾曲しつつ突出するが、それに合わせて等深線も前進している。このとき舌状砂州では、図-4(a)、図-5(a)に示すように、海中での安息勾配を保ちつつ土砂が深い場所まで落ち込んでいく。舌状砂州では汀線から海中では非常に急勾配となるが、陸上部には波のうちあがり高さに応じた平坦面

が形成される。一方、防波堤による波の遮蔽域外では、浅海部から陸上部で等深線または等高線が後退し、図-4(a)にあつては陸域での密集した等高線によって、図-5(a)にあつては急勾配の斜面の形成から明らかなように、浜崖の形成が進んでいる。結局、このケースでは、防波堤による波の遮蔽域の外側の区域で浜崖侵食が進み、そこからの生産土砂が防波堤背後に堆積して舌状砂州を形成したことがうまく計算されている。なお、図-5(a)によると、堆積域では海浜断面積が非常に大きいものに対して、侵食域では浜崖は形成されているものの、海浜断面積の変化量が小さいが、侵食域の断面数は非常に多いのに対し、堆積域で、しかも大きく堆積した断面の数はごくわずかであることにより、土砂収支が成立している。

図-4、5(b)には、舌状砂州の形成において、土砂が堆積する場合の限界勾配をケース①の1/2から1/4と緩くした場合(ケース②)の計算結果を示す。限界勾配が小さいことは、実際には養浜砂の粒径がより小さい場合に相当する。縦断形に明らかなように、限界勾配が小さくなると深い部分にまで土砂が落ち込む。しかしながら、侵食域での海浜地形には大きな違いは見られない。

図-4、5(c)には、入射碎波波高を2.0mから0.4mと極端に小さくした場合(ケース③)の計算結果を示す。堆積域では、海中での限界勾配によって定まる勾配になるので、波高条件には依存せず、ケース①とほぼ同様な結果が得られる。大きな違いが現れるのは侵食域である。波による地形変化の限界水深が小さくなるために、ごく浅い、汀線近傍から陸側の土砂が削り取られ、そこで生産された土砂が沿岸漂砂によって右向きに運ばれる。この場合も浜崖ができる点はケース①の場合と同様であるが、海面下で削り取られる土砂量が減少した分、陸域侵食(浜崖侵食)が進む。防波堤背後での堆積において、限界勾配が一定とすれば、舌状砂州の形成に必要な土砂量はほぼ一定であるから、波高が低い条件で長い時間かかって侵食が進んだ場合、高波浪で急速に侵食が進む場合よりも、浜崖侵食が著しい点は興味深い。

図-4、5(d)には、ケース④の計算結果を示す。他のケースとの決定的な相違は、碎波波高の沿岸方向変化を考慮したことである。図-6には、碎波波高の沿岸方向分布を示す。碎波波高の変化は、 h_c 、 h_R の変化をもたらし、波高の低下は地形変化の生じる範囲を水深方向に狭める。また、これとともに、漂砂の移動高の低下を招く。図-6によれば、波高低下が起こるのは $x > 300$ mであるから、 $x < 300$ mでの地形はケース①とほぼ同様である。しかし舌状砂州の部分では波高低下が著しいので、陸域での波のうちあがりに伴う土砂堆積が標高の低い範囲にとどまる。図-4(d)の平面図に示されるように、1mの

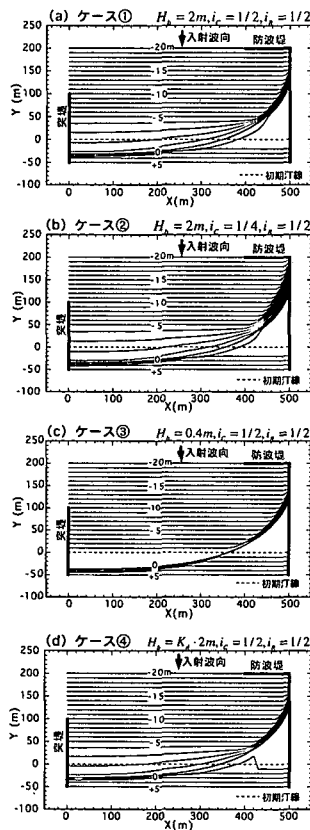


図-4 ケース①～④の安定
海浜形状の比較

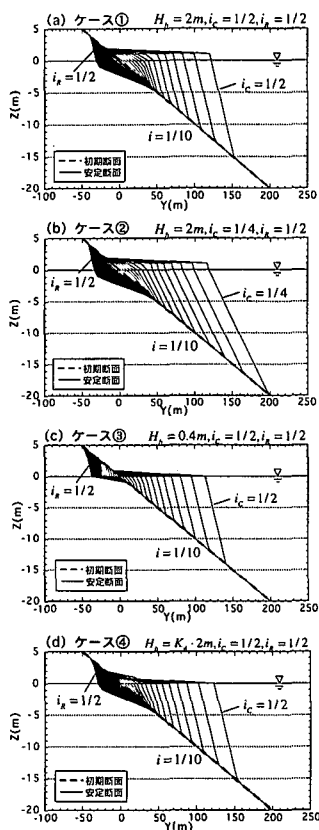


図-5 ケース①～④の海浜
縦断面形の比較

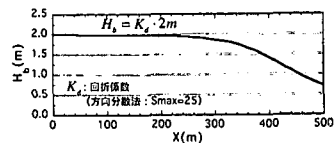


図-6 碎波波高の沿岸分布 (ケース④)

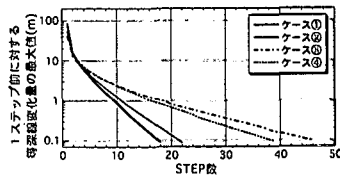


図-7 繰り返し計算の収束過程の比較
(ケース①～④)

図-8である。ここに冲向き漂砂は海浜全体を見たネットの意味での分布形である。両者を比較すると、限界勾配が1/4と緩いケース②では深い部分までの土砂の落ち込みが生じており、このため、最も大きい沿岸漂砂量が現れている。波高条件の異なるケース①、③の比較では、ケース③の冲向き漂砂は浅海域から陸域が集散的に侵食されたため汀線付近で冲向き漂砂のピークが現れているが沿岸漂砂量自体はケース①に比べて小さい。

等高線は波の到達がなくなるので途中までしか前進できない。この点を除けば、ケース①と④との相違は小さい。

4.2 繰り返し計算の収束性

本研究の方法は、例えば等深線変化モデルなどと異なり、初期条件から出発し、 Δt 時間ごとに計算を繰り返して最終的な安定海浜形状を定めるものではなく、最終的な安定汀線に近い汀線形を最初に設定し、それから誤差を最小にするよう繰り返し計算を行うことにより、少ない繰り返し計算で安定海浜形状の計算が可能である。一例として、図-7には、繰り返し計算における1ステップ前の等深線形状からの変化量の最大値と、ステップ数との関係を示す。これによれば、限界勾配を変化させたケース①、②ではほぼ似たような収束状況であるが、波高が低いケース③や、波高の沿岸方向変化があるケース④では、ケース①、②の2倍程度の繰り返し計算が必要になっている。しかし、いずれの場合も、高々50ステップと急速に安定海浜形状に到達することが分かる。

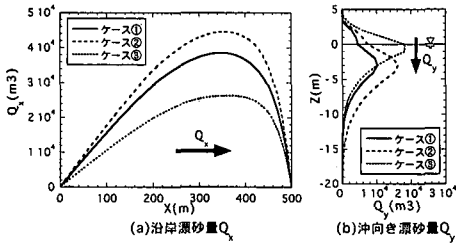
4.3 漂砂量の分布

ケース①～③について、海浜変形量から沿岸漂砂量の沿岸分布と、冲向き漂砂量の水深方向分布を求めたのが

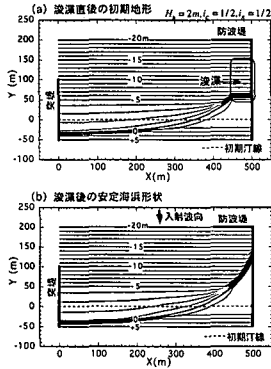
4.4 防波堤背後での浚渫が隣接海岸に及ぼす影響

海浜に防波堤のような波の遮蔽構造物が伸ばされれば、その背後で舌状砂州が伸びる。このような場合、最近では例は少なくなりつつあるものの、防波堤背後に形成された舌状砂州の先端部が、航路や泊地の障害となるために、新たな堆積防止を図る施設の建設が十分でないまま、浚渫により取り除かれることがあった。この場合、浚渫は防波堤による波の遮蔽域周辺での侵食にとどまらず、沿岸漂砂が移動している系全体に及ぼさずであるが、従来は侵食の影響が過小評価され、この結果、事後に浜崖侵食を含む侵食問題が起こることが多い。そこで、ケース①を対象として、防波堤背後での浚渫が周辺海岸へ及ぼす影響について検討する。

浚渫前の海底地形が図-4(a)で与えられるとする。この条件のもとで、図-9(a)に示すように、防波堤背後に形成された舌状砂州の頂部を三角形に削りとり、浚渫後の等深線が平行になるように浚渫を行ったとする。この条件で計算を行ったのが図-9(b)である。防波堤背後には、図-4(a)とほぼ同様な形状を有する舌状砂州が再び形成される。舌状砂州を再び形成させるに必要な土砂



図—8 海浜地形変化量から逆算した沿岸漂砂量と冲向き漂砂量の水深方向分布



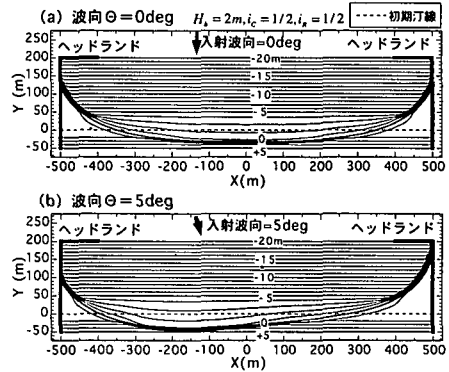
図—9 浚渫が周辺海浜地形に及ぼす影響の検討

は、 $x=0$ mにある突堤から右の区域から供給されるので、この範囲全域で侵食が進む。図—9(a), (b)を比較すれば、(b)において陸域の密な等高線で表される浜崖の形成範囲が陸側に移動するとともに、沿岸方向にも広がり示すことがよく分かる。また、舌状砂州の先端部の形状を詳細に比較すると、新たに形成された舌状砂州は全体に陸側へずれていることも分かる。

舌状砂州は静的安定な姿に至るまで変形を遂げるが、その頂部の一部を浚渫すると、先端部が安定形状からずれるために、その部分に再び舌状砂州を発達させる。その土砂は沿岸漂砂により砂が流れている全区域から供給されることになるので、沿岸漂砂の閉じた系全体へと海浜変形が及ぶことになる。したがって、再堆砂防止の方策が不十分なまま浚渫を行うことは、周辺域での浜崖侵食を含む侵食を助長することが結論される。

4.5 ヘッドランド間の安定海浜形状計算への応用

図—10には、両端をヘッドランドで囲まれたポケットビーチでの安定海浜の計算に本研究の方法を当てはめた結果を示す。(a)は直角入射条件、(b)は反時計回りの方向に 5° の入射角で波が入射する場合である。直角入射



図—10 ヘッドランド間の安定海浜の計算への応用

の場合には両側のヘッドランド背後での舌状砂州の形成に必要な土砂は主として海浜中央部から運び去られるために、中央部で浜崖侵食が進む。一方、斜め入射の条件では上手側に位置するヘッドランド背後の舌状砂州の規模が下手側のそれより規模が小さくなると同時に、浜崖侵食は上手側のヘッドランドの下手側で著しく進み、明らかに直角入射の場合よりも侵食量が多い。以上のように、この方式は、ヘッドランド間で養浜を行う場合の安定海浜の形状予測にも有効利用が可能である。

5. あとがき

初期状態から Δt 時間間隔で繰り返し計算を行うのではなく、Hsuが与えた安定汀線の計算式と沿岸漂砂量の水深方向分布を同時に考慮することにより、波の作用後に達する最終的安定海浜形状を3次元の意味で計算する方式を開発した。この方式は従来の方式と比較してはるかに容易に解を得ることができる。問題点として防波堤を設置する前の初期汀線が沿岸方向に不規則な形状を有する場合、これが最終結果に影響すると考えられる点があげられる。この場合には初期地形を直線平行等深線地形に置き換えてから計算を行えばよいと考えられる。

参考文献

- 宇多高明・河野茂樹 (1996): 海浜変形予測のための等深線変化モデルの開発, 土木学会論文集, No. 539/II-35, pp. 121-139.
- 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼・神田康嗣 (1996): 修正 Hsu モデルによるヘッドランド周辺の最適安定海浜形状の計算法, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 646-650.
- Hsu, J. R. C. and C. Evans (1989): Parabolic bay shapes and applications, Proc. Intern. Civ. Engrs, Part 2, 87, pp. 557-570.