

砂 嘴 の 伸 張 予 測 モ デ ル

渡 辺 宗 介*・宇 多 高 明**・芹 沢 真 澄***

1. ま え が き

細長い湾や湖において、波浪が大きく斜め入射する場合所には、しばしば砂嘴の発達を見る。わが国で規模の大きな砂嘴としては、三保松原や野付崎砂嘴などがあるが、これらの砂嘴はもともと十分な漂砂の供給を前提として形成されてきたものである。しかし、近年、種々の要因によって砂嘴上手側からの供給土砂量が減少し、これによって砂嘴を取り巻く海岸線の後退が目立ってきている。長い直線状の海岸線と異なり、砂嘴は海岸線の曲率が大きいことから、直線状海岸と比較してその形状変化の予測が難しく、そのことが侵食対策の立案を妨げる一因となっている。

このような砂嘴の平面形の予測手法として、King・McCullagh(1971)は、砂嘴が異なる方向からの波浪作用の繰り返しによって形成されるとして、モンテカルロ法を用いたシミュレーションモデルを構築し、Hurst Castle 砂嘴の変形過程を例としてモデルの妥当性を示した。しかしこのモデルは確率論的手法であって、砂嘴周辺での漂砂移動を物理的に説明するモデルではない。宇多ら(1998)は、潟沼の親沢島砂嘴の変形に関して、砂嘴の汀線に沿った展開座標を用い、この座標系のもとで汀線変化モデルを用いることによって砂嘴形状の変化を予測し、計算結果が実測値とよい対応を示すことを示した。このモデルは展開座標を用いる関係上、予測汀線は原形状に対する摂動解を得るものに等しく、大きな変位を伴う海岸線の変形予測には適さない。さらに、宇多ら(1993)は、静的安定状態にあるポケットビーチの海岸線形状を与える Hsu・Evans (1989) の式が、鉤状砂嘴の平面形状の計算に応用できることを霞ヶ浦内の和田岬砂嘴、徳島県の和田ノ鼻および野付崎を例として示した。また三保松原と米国東海岸の Sandy Hook において、砂嘴の経時的発達段階における平面形の形状計算にもこの方法が適用できることを示した。この方法は、砂嘴の平面形状が簡単な式で表せることを示してはいるものの、その力学

的裏付けは不明確である。

本研究では、砂嘴の伸張現象について、その原理に戻って考察し、砂嘴を有する海岸線が大きな変位を起こす場合のモデルを構築する。最初に、三保松原, Sandy Hook, 野付崎砂嘴について平面形状の変化を調べ、これらをもとに砂嘴伸張の予測モデルを構築する。

2. 砂嘴の平面形の変化

三保松原は、駿河湾西岸に形成された複合砂嘴である。図-1a は三保松原周辺の海底地形と海岸線形状である。No. 25～No. 15 の区間の海岸線はほぼ直線状で NE 方向に延びている。しかし海岸線は No. 15 付近より緩やかに NNE 方向に曲がったのち、先端部は鉤状に湾曲する。また、三保という地名は、砂嘴の先端が3つに分岐していることに由来するとされる(中山, 1983)。図-1b は、中山が示した三保松原の形成過程である。三保の海岸線は A → B → C と変化したと考えられ、C が現在の海岸線である。

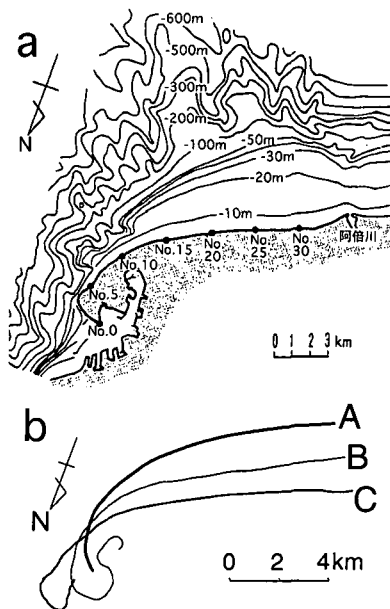


図-1 a : 三保松原周辺の海底地形,
b : 三保松原砂嘴の変形過程

* 学生会員 東京大学大学院総合文化研究科広域システム科学科
** 正 会 員 工 博 国土交通省国土技術政策総合研究所研究総務官
*** 正 会 員 海岸研究室(有)

ある。すなわち、砂嘴は現在の海岸線の方を保ちつつ単調に延びたのではなく、砂の供給側の海浜が侵食されると同時に、そこからの侵食土砂が砂嘴の先端部に堆積して分岐砂嘴として発達したとされている。

第2の例である米国ニュージャージー州の北東部にあるSandy Hookは、Ambrose海峡の南岸に位置し、図-2aに示すように Navesink 川の河口部に付け根を持つ複合砂嘴である。Ambrose 海峡はENE～S方向に開き、大西洋に直結する。吹送距離においてSE方向が無限大となっているため、この方向からの波浪が卓越すると考えられる。図-2bは、Johnson (1919) によって示されたSandy Hookの形成過程である。Sandy HookはA→B→C→Dと発達したと考えられ、Dは現在の海岸線を示す。

第3の例は、北海道東部、根室海峡に位置する複合砂嘴の野付崎である(図-3a)。宇多・山本(1992a)は、その形成過程を次のように推定した。まず、図-3bに示すように約6000年前の根室海峡の地形を(1)と推定した。知床半島と根室半島間の海岸線は、国後島西岸のそれとほぼ平行で、なだらかな海岸線であるのに対し、海底は知床半島と国後島の間は深く、根室半島と国後島の間は-20m以深であった。(1)の地形では、波向線を示した北東からの入射波(周期10sの深海波)によって崎無異川河口(P点)より南側が侵食され、侵食された土砂は沿岸漂砂により南へと運ばれる。入射波浪のエネルギーは、国後島の遮蔽効果によりその背後で大きく低下するから、波高が低下する位置には土砂が堆積し、砂嘴Iが形成される(2)。このとき、砂嘴先端は波の屈折作用により鉤状となる。次に、P点の南側の侵食がさらに進み、海岸線の後退区域は南側に広がる。侵食土砂は沿岸漂砂の下流端に堆積して砂嘴IIが形成され、2つの砂嘴先端I、IIが見られるようになる

(3)。砂嘴が分岐する原因としては先端部分の曲率が大きくなることによる沿岸流の離岸現象が挙げられる(宇多・山本, 1991)。P点付近の海岸線の後退が進むと、屈折効果により波は海岸線に対しほぼ直角に入射するようになるから、海岸は侵食されにくくなる。この結果、沿岸漂砂下手側への供給土砂量が減少し、侵食域はさらに南側へ広がる。沿岸漂砂の下流端に運ばれた土砂はそこで堆積し、分岐砂嘴の形成過程により砂嘴IIIが形成される(4)。同様な変化がさらに進み、(5)の地形となる。この段階では、漂砂上手側の海岸線

の後退が進んで安定形に近づくため、漂砂下手側への供給土砂量が減少する。そのため砂嘴の付け根部分が土砂供給源となって海岸線の後退が始まる。この間、沿岸漂砂の下流端には砂嘴IVが形成される。このような過程により現在の野付崎(6)が形成されたと推定した。

3. 砂嘴伸張の基本的考え方

三保松原(図-1b)、Sandy Hook(図-2b)、および野付崎(図-3b)の海岸線形状の変化は、高い類似性を有している。すなわち、沿岸漂砂の上手側の海浜が波の作用で削り取られて汀線が後退し、そこからの供給土砂が砂嘴の先端方向へと移動、堆積して砂嘴がさらに延びるというものである。この場合、砂嘴の発達段階に応じて、砂嘴先端部では一度堆積して前進した海岸線が再び後退

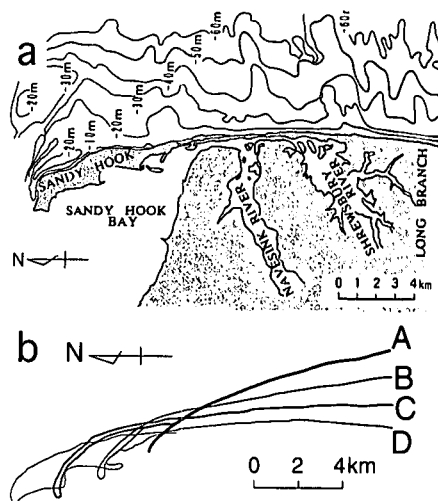


図-2 a : Sandy Hook 周辺の海底地形, b : Sandy Hook の変形過程

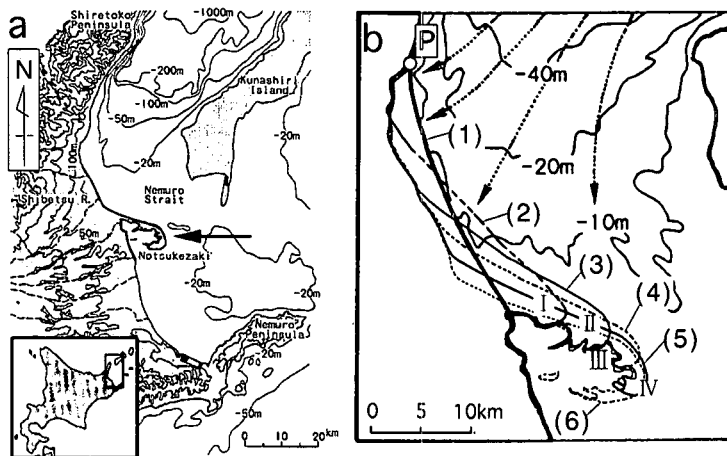


図-3a : 野付崎周辺の海底地形, b : 野付崎の変形過程

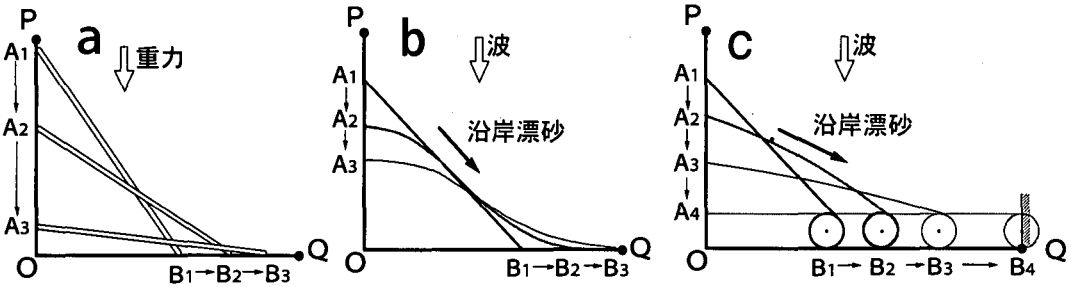


図-4 壁に立てかけた棒の転倒現象とのアナロジーに基づく砂嘴の変形モデル

し、そこから供給された土砂もまた砂嘴の先端へと運ばれるという特徴がある。

これらの海岸線の変化は、波の作用の下で水平面上において生じたものである。しかしこれと良く似た現象は、重力場において観察される。図-4aを参照し、摩擦のない水平面 OQ と壁面 OP があり、壁面に立て掛けられた棒 A_1B_1 が重力の作用で倒れる場合を考える。棒は、 OP 面では $A_1 \rightarrow A_2 \rightarrow A_3$ と移動し、同時に水平面上では先端位置が $B_1 \rightarrow B_2 \rightarrow B_3$ と移動する。この場合、 OP 面との接点は下方に移動するが、棒は剛体なので変形せず、 OQ 面上に横になれば静止する。

いま、図-4a とのアナロジーにより、三角形の海岸線を有する海浜の沿岸漂砂による変形について考える。図-4b は、波の入射方向に対して海岸線が傾いているために沿岸漂砂が生じる場の海浜変形の一般状況である。三角形の海浜 A_1OB_1 において、 OP は沿岸漂砂の出入りのない固定境界であるとする。また B_1Q 間には OP と直交する直線状海浜が続いている。この場合、沿岸漂砂により、 OP との境界線に沿って汀線が後退して、波の入射方向と海岸線とのなす角は次第に小さくなり、これによって境界近傍での沿岸漂砂量は 0 に漸近していく。剛体の棒が重力場で倒れる場合には、図-4a に示したように時間経過と無関係に棒は直線的であり続ける。このことが砂でできた海岸線の場合との現象的相違点である。さらに砂の堆積部では、 $B_1 \rightarrow B_2 \rightarrow B_3$ のように砂浜が広がるが、図-4b の場合には沿岸漂砂により、境界線 OQ 上に砂が堆積し、三角形の堆積区域の頂点が右向きに移動することになる。最終状態において B_3 は無限遠まで遠のく。このような海岸線の変形は護岸前面の汀線変化として汀線変化モデルにより計算が可能である。

砂嘴の変形では、図-1b, 2b, 3b に示したように、砂は海岸線に沿って連続的に流れるのではなく、砂嘴の先端は大きく湾曲して波の作用が弱いために、そこに土砂が堆積するが、砂嘴の先端部が到達する以前には、砂嘴先端を越えて下手側の区域へと土砂が移動することができない。このため図-4b の場合とは現象的に異なる。砂嘴の先端部は沿岸漂砂移動から見れば不連続点であり、

不連続点が沿岸方向に移動することから、図-4b のように沿岸方向に連続的に土砂が移動するという条件設定はできない。

砂嘴の先端部は図-1b, 2b によればほぼ円弧状である。これを考慮して砂嘴の変形をモデル化したのが図-4c である。砂嘴の先端部は右方向に移動可能な円弧で近似され、漂砂上手側での侵食土砂量に見合うように円弧が右方向に前進して新しい形状に到達する。円弧はあたかも車輪のように水平面上を移動する。円弧が到達する以前には、 B_3 より右側の区域に砂は存在しない。しかし、沿岸漂砂上手側の境界 OP に隣接する部分の海岸線の後退は図-4b の場合と全く同様であって、土砂収支を満足しつつ海岸線の後退とともに沿岸漂砂量の減少が起こる。図-4c では、漂砂の上手側海浜から運び去られた土砂が堆積した場合、土砂収支を満足する位置に砂嘴（円弧）が移動し、それより下手側には砂は移動できない。これが図-4b の場合に無限遠まで土砂が運ばれたのと大きな相違である。このような状況は、四国那賀川河口右岸側での、1953 年から 1961 年の間における砂嘴の発達状況からも見てとれる（宇多，1997）。

なお、図-4c において円弧が B_4 位置に到達し、そこで固定境界に接続したとすれば、海岸線は波の入射方向と直角になって終局の安定形状になる。この状態に対し、海岸線が波の入射方向と斜めに傾いている状態は侵食され易い状態にある。

4. 砂嘴伸張のモデル化

図-5a に示すように、海浜の右端に円弧で近似されるような砂嘴を考える。初期の海岸線は A_1C_1 と円弧 C_1B_1 で与えられ、 A_1C_1 は C_1 で円弧に接している。波が y 軸方向から入射するとすれば、 y 軸が固定境界の場合、 A_1 が後退して A_2 に移動する過程で、境界壁の隣りにはほぼ三角形の侵食域 A_1RA_2 が形成される。侵食土砂は沿岸漂砂により海岸線に沿って右向きに運ばれる。運ばれた土砂は砂嘴（円弧 C_1B_1 ）周辺に堆積するので、砂嘴自体が x 軸方向へと移動して RC_2 、円弧 C_2B_2 、 B_2B_1 および円弧 B_1C_1 、 C_1R で囲まれた堆積域が形成される。この場合、

堆積土砂量(=堆積面積×堆積域での移動高)と侵食土砂量(=侵食面積×侵食域での移動高)が等しくなるようにして B_2 が定まる。この場合、沿岸漂砂移動にともなう海浜縦断形は平行移動するものとする。

時間経過とともに侵食域は A_1RA_2 から $A_2R'A_2'$ へと広がるが、その場合 R' を R に置き換えて計算を進めればよい。また RC_1 が C_1 で円弧に接することは、直線海岸線 RC_1 に沿って運ばれてきた沿岸漂砂が円弧で近似した砂嘴の海岸線に沿って連続的に運ばれるための条件である。

以下では、図-5bに示す RC_1 、円弧 C_1B_1 および B_1O_1 、 O_1R で囲まれた部分の面積 S ($=S_1+S_2+S_3+S_4$)を求める式を誘導する。ここに S_1 、 S_2 は三角形の面積、 S_3 は扇状区域の面積とする。まず、幾何学的計算より、 $RC_1=\xi$ は、 x_1 、 y_1 および円弧の半径 a により式(2)で表される。

$$\xi = (x_1^2 + y_1^2 - 2 \cdot a \cdot y_1)^{1/2} \quad (2)$$

また RTO_1 が直角三角形であって、 $O_1T^2 + O_1R^2 = TR^2$ が成立するので、 $TB_1 = TC_1 = \zeta$ は次式で表される。

$$\zeta = a \cdot y_1 / (\xi - x_1) \quad (3)$$

さらに、 $\tan \theta = \zeta / a$ の関係を利用すると、 θ は次式で求められる。

$$\theta = \tan^{-1}(y_1 / (\xi - x_1)) \quad (4)$$

結局、面積 S は、

$$S = 1/2 \cdot a \cdot \xi + 1/2 \cdot x_1(a + y_1) + 2 \cdot a^2 \cdot \theta \quad (5)$$

となる。図-5aに示した B_1 が B_2 に移動した場合、 RC_2 、円弧 C_2B_2 および B_2O_1 、 O_1R で囲まれた部分の面積 S' も全く同様な手法によって計算できるから、それらより堆積面積($S'-S$)が計算される。実際に侵食面積を与えて砂嘴先端の前進距離を求めるには、 x_2 を与えた繰り返し計算を行う。

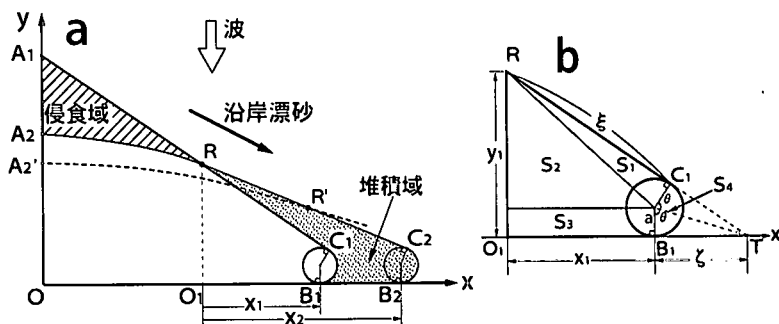


図-5 円弧で近似された砂嘴先端部の移動境界モデルの考え方

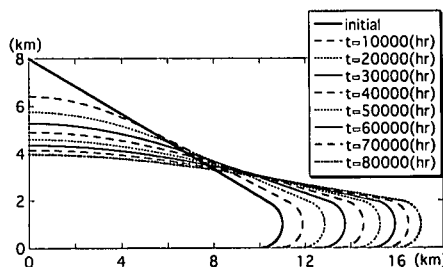


図-6 砂嘴伸張の計算結果 ($a=1$ km)

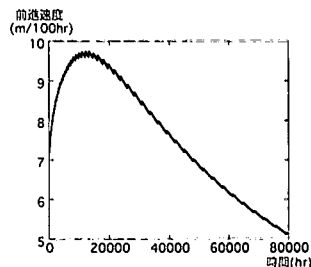


図-7 砂嘴の前進速度の経時変化

5. 数値計算例

図-5aに示したモデルの具体的計算を行った。図-5aにおいて A_1 の y 座標を8 km、 B_1 の x 座標を10 kmと固定し、砂嘴の半径 a を1 km、0.5 km、0.1 kmと変えてモデル計算を行った。波高2.0 mの波が y 軸方向から入射したとして、侵食域での汀線の後退は汀線変化モデルにより予測した。汀線変化計算では $\Delta x=200$ m、 $\Delta t=10$ hrとした。このケースでは侵食域と堆積域での漂砂の移動高は一定としたため、侵食面積と堆積面積が均衡すれば土砂収支が満足される。図-6は、 $a=1$ kmの場合の計算結果である。 y 軸に接した部分では汀線が後退し、海岸線が波の入射方向と直角方向に近づいていく。侵食土砂は x 方向へ運ばれ、侵食土砂量に見合った形で砂嘴が前進していく。 $x=8$ km付近では、一度海岸線が前進した後、再び後退している。図-7には、時間と砂嘴の前進速度の関係を示すが、砂嘴の前進速度は初期に極大値を持ち、時間経過とともに低下していく。

図-8, 9には砂嘴の半径を $a=0.5$ km、0.1 kmとした場合の計算結果も示す。砂嘴の半径が小さくなるほど同じ時間での砂嘴の前進量が増大し、これとともに海岸線全体の変形が著しく侵食量も増大していることが図-6, 8, 9の比較から分かる。砂嘴の半径が無限小であれば、図-4bに示した場合に近づいていく。一連の計算結果より、もともと砂浜が存在しない場所に砂嘴が発達してそれが伸張することは、侵食域からの土砂流出を抑制する

効果も発揮することも分かる。また、図-6 に示した結果を図-1b, 2b, 3b と比較すると、地形条件が異なるので定量的比較はできないが、現地海岸の現象への相似度が高く、少なくとも原理的には砂嘴の前進現象の説明が可能になったといえる。

宇多・山本 (1992b) は砂嘴形成海域の水深を変えた場合における砂嘴の伸張状況について移動床水理模型実験によって調べた。ここでは砂嘴形成海域の水深が小さい場合の結果を検証データとして用い再現計算を行った。図-10 に実験結果 (実線) と計算結果 (破線) を示す。実験は水深 5 cm の浅い海に換算沖波波高 4.6 cm, 周期 1.27 s の波を作用させて行われた。右側の砂の供給源側で汀線が後退すると同時に、砂が左側の浅い海へと運ばれ、単純砂嘴が形成されている。この状態に対し、砂嘴の伸張方向に x 軸、直角方向に y 軸を定めて砂嘴の半径を 0.35 m として計算を行った。実験値をもとに、砕波波高を 6 cm, 砕波波向を 9° とし、漂砂の移動高は侵食域では 0.16 m, 堆積域では 0.1 m とした。図-10 に示すように実験と比較すると侵食域での汀線後退と堆積域における砂嘴伸長とが非常によい対応を示すことが分かる。

6. ま と め

本研究では、沿岸漂砂によって運ばれた土砂が次々と堆積することで砂嘴が伸びて行く現象を予測できるモデルを開発した。このモデルでは、漂砂上手側で侵食により海岸線が後退する現象と砂嘴の伸張が決定論的に説明される。また、このモデルは、通常の汀線変化モデルなどと異なり、移動境界内で土砂収支を満足しつつ海岸線形状が決定されることに特徴を有している。また、このモデルによる計算結果は実験結果を定量的によく説明できた。

なお、砂嘴の進行方向や砂嘴先端の半径は周辺海底地形および、そこでの波の屈折・回折に関係すると考えられ、これらを明らかにすることは今後の問題である。

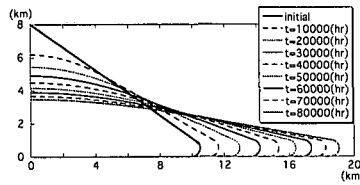


図-8 砂嘴伸張の計算結果 ($a=0.5$ km)

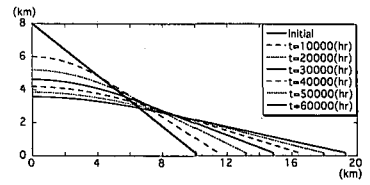


図-9 砂嘴伸張の計算結果 ($a=0.1$ km)

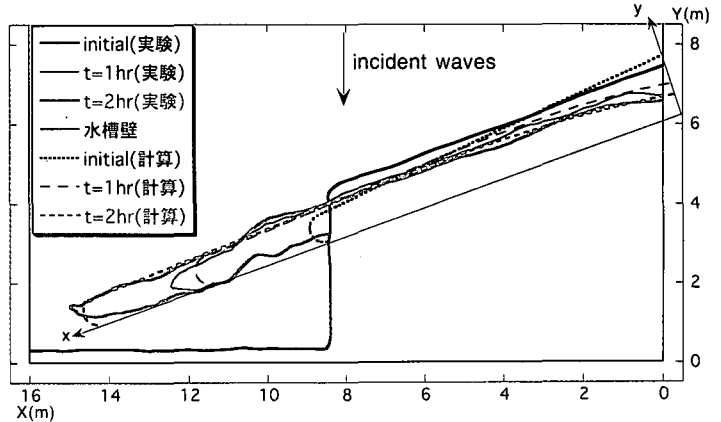


図-10 実験結果と再現計算結果の比較

参 考 文 献

- 宇多高明 (1997): 日本の海岸侵食, 山海堂, 442 p.
- 宇多高明・住谷勉夫・矢澤 隆・大谷靖郎・厚坂祐次 (1998): 展開座標を用いた汀線変化モデルによる親沢鼻砂嘴の地形変化予測, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 541-545.
- 宇多高明・山本幸次 (1991): 複合砂嘴の形成過程に関する実験的研究, 地形, 12, pp. 357-367.
- 宇多高明・山本幸次 (1992a): 北海道野付崎の形成過程, 地形, Vol. 13, pp. 141-157.
- 宇多高明・山本幸次 (1992b): 砂嘴形成海域の海底地形と砂嘴形態の関係について, 地形, Vol. 13, pp. 19-33.
- 宇多高明・山本幸次・小田切健史 (1995): 鈎状砂嘴の平面形の一般化表示, 海洋開発論文集, Vol. 11, pp. 67-72.
- 中山正民 (1983): 自然の造形美, 分岐砂嘴上のドラマ, 龍瀬良し明・山口恵一朗・堀 淳一「日本の海岸・島東日本編」, そして, 183 p.
- Johnson, D. W. (1919): Shore Processes and Shoreline Development, Wiley, New York, 584 p. [Facsimile edition: Hafner, New York (1965)]
- Hsu, J. R. C. and C. Evans (1989): Parabolic Bay Shapes and Applications, Proc. Instn. Engrs., Part 2, 87, pp. 557-570.
- King, C. A. M. and M. J. McCullagh (1971): A simulation model of a complex recurved spit, Jour. Geology, Vol. 79, pp. 22-37.
- Zenkovich, V. P. (1967): Processes of Coastal Development: Oliver & Boyd, Edinburgh, 738 p.