

鉤状砂嘴の平面形の一般化表示

General expression of plane shape of a recurved sand spit

宇多高明*・山本幸次**・小田切健吏***

Takaaki Uda, Koji Yamamoto and Kenji Odagiri

Geometrical similitude of the plane shape of a recurved sand spit of various scales found in lakeshores and on sandy beaches is investigated. It is found that the method originally proposed by Hsu·Evans as a predictive model of the plane shape of bay-shaped beaches is applicable to the general expression of the plane shape of a recurved sand spit. The method is applied to Wadabana spit in Lake Kasumigaura, Wadanohana spit in Tokushima Prefecture, Notsukezaki compound spit in Hokkaido, Mihono-matsubara compound spit in Shizuoka Prefecture and Sandy Hook on the U.S. east coast.

Keyword: Sand spit, Plane shape, General expression

1. まえがき

自然海岸で見られる堆積地形の一つである砂嘴は、その形態により単純、鉤状、複合砂嘴などに分類される(砂村, 1985)。これらの砂嘴は、1方向からの卓越沿岸漂砂により砂礫が運ばれ、その下流端に堆積して形成されるものであるが、その形態は砂礫が堆積する海域の海底形状に強く依存する(宇多・山本, 1992)。しかしながら、湾内および湖内で観察される砂嘴や、実験室で再現された砂嘴の平面形状を比較すると、それらの幾何学的スケールは大きく異なっているが、同一種の砂嘴の平面形状は互いによく似ていることに気付く。このようにその規模を問わず平面形状が非常に似ていることは、砂嘴の平面形状の一般化表示の可能性を示している。しかし、個々の砂嘴の平面形状についての記述は多くなされている(例えば、Johnson, 1919; Zenkovich, 1967)ものの、砂嘴の平面形状の一般化表示という観点からの研究はほとんどないのが現状である。

そこで、本研究では鉤状砂嘴を対象として、その平面形の一般化表示を試み、規模の異なる鉤状砂嘴の幾何学的相似性について検討する。また、複合砂嘴(鉤状砂嘴が沿岸方向に連なった砂嘴)の発達過程の説明に鉤状砂嘴の平面形の一般化表示を応用し、その変形予測の可能性に関し若干の考察を試みる。

2. 鉤状砂嘴の平面形の一般化表示

一般に、卓越波浪の入射方向に対し波の遮蔽域を造るような岬の背後では湾入した砂浜地形(以下、ポケットビーチ)が形成される。Hsu・Evans(1989)は、静的安定状態にあるポケットビーチの海岸線形が簡単な式で与えられることを示した。一方、ポケットビーチと鉤状砂嘴の海岸線形状を比較すると、海岸線の法線の向きが互いに逆方向であること以外、共になだらかな曲線で構成される点において共通点を有している。静的安定状態にあるポケットビーチ内では、海岸線上の任意地点において入射波は汀線に対しほぼ直角方向より入射するため、汀線は入射波の方向に対し安定形状を保つ。これとの類推により鉤状砂嘴について考えてみると、鉤状砂嘴の海岸線は、沿岸漂砂により緩やかに変形しつつも、砂嘴の初期の発達段階を除けばかなり安定な状態にあると考えられる。この場合、砂嘴の海岸線は準静的安定状態にあると見なすことができる。このことは、海岸線上の任意地点において海岸線に立てた法線に対して、極端に大きな角度で波が入射することはないこと、すなわち、波の作用による緩やかな海岸線変形は生じ得ても、砂嘴が急激に消失するような変形は起こり得ないことを意味している。このとき、砂嘴周りの海岸線の形状はHsu・Evans(1989)の方式により計算可能と考えられる。そこで、Hsu・Evansのポケットビーチの海岸線表示法を用いて、鉤状砂嘴の平面形の一般化表示について検討した。

図-1に示すポケットビーチを考え、防波堤先端に点P、入射波の波峰線方向にPR、波峰線と平行な安定汀線上に点Qを定めるとき、Hsu・Evans(1989)はポケットビーチ内の安定海岸線形状を式(1)で与えた。

$$r/r_0 = C_0 + C_1(\beta/\theta) + C_2(\beta/\theta)^2 \quad (1)$$

ここに、 $r_0 = PQ$ 、 $\beta = \angle RPQ$ であって、 C_0 、 C_1 、 C_2 は β に依存する係数である(表-1参照)。

本研究では、図-1(a)において陸域と海域を逆に考え、砂嘴の平面形状の一般化表示を試みる(図-1(b)参照)。

*正会員 工博 建設省土木研究所河川研究室長(〒305 茨城県つくば市大字旭1番地)

**正会員 建設省土木研究所海岸研究室研究員

***正会員 株式会社 ゼックス

なお、各係数は表-1の数値をそのまま使用する。

式(1)による鉤状砂嘴の平面形状の一般化表示の可能性は、図-1(a)における点P、Q、Rに相当する点を一義的に与えることができるか否かにかかる。ここではまずいくつかの鉤状砂嘴を対象として、試行錯誤により一般化表示の可能性について検討する。

3. 現地海岸の砂嘴の平面形の一般化表示

鉤状砂嘴として、茨城県の霞ヶ浦内にある和田岬、徳島県の和田ノ鼻、および北海道の野付崎を選び、各々のケースについて検討する。

(1) 霞ヶ浦和田岬

和田岬は霞ヶ浦の南東岸に位置する(図-2)。冬季のNW方向の季節風と最長のフェッチラインが一致することから、SE方向に砂嘴が発達している(宇多ほか, 1984)。和田岬の湖岸線形状に着目すると、No.22~No.19は東西方向へほぼ直線的に延びているが、No.18~No.6の区域で南側に回り込んで半径約150mの半円形状となる。その形は典型的な鉤状砂嘴である。

この和田岬の平面形状を式(1)によって表示する。図-3において汀線がほぼ直線状であるNo.22~No.19の湖岸線上に任意の接点Q'を取る。次に、No.22~No.19の範囲の湖岸線の延長方向において、最も突出した点S₁と最も離れた点S₂を設定する。S₁からNo.22~No.19と平行に線分を延ばし、接点Q'とS₂よりその法線方向に延ばした線分との交点をそれぞれ点R'、中心

点P'とおく。以上により、P'、Q'、R'が定まるが、これらをもとに式(1)により平面形状を計算すると、現地の湖岸線形状に対し、計算値は西側に歪んだ形となる(図-3、1点鎖線)。そこで、接点Q'の位置を変えずに、中心点P'をS₁に近づけつつ移動させ、試行錯誤により式(1)で与えられる平面形状と現地の湖岸線形状がほぼ一致するような中心点P''を求めた。図-3の破線は、実測の湖岸線と最も良い一致を示す計算値であって、そのときの中心点はP''で与えられる。

図-4は、図-3で得られた中心点P''の位置を変えずに、接点Q'をNo.22~No.19の間でほぼ等間隔に移動させ、これによる砂嘴の平面形状の変化を計算したものである。これによると、中心点P''が固定されていれば、湖岸線がほぼ直線の部分において接点Q'の位置を任意に移動させても式(1)で与えられる平面形状にはほとんど変化がないことが分かる。

(2) 徳島県の和田ノ鼻

第2の例は徳島県の東海岸に形成された和田ノ鼻の場合である。和田ノ鼻の位置する紀伊水道はSE方向に開いており(図-5)、この方向から入射する波浪が卓越する(宇多・山本, 1988)。和田ノ鼻の海岸線はNo.16、およびNo.5付近でその方向が大きく変わるが、ここでは、No.16~No.1の間の海岸線に着目する。この範囲のうち、No.16~No.5の

表-1 Hsu・Evans(1989)式の各係数

β°	C_1	C_2	C_3
10	0.036	1.011	-0.047
15	0.050	0.998	-0.049
20	0.055	1.029	-0.088
25	0.054	1.083	-0.142
30	0.045	1.146	-0.194
35	0.029	1.220	-0.253
40	0.000	1.326	-0.332
45	-0.039	1.446	-0.412
50	-0.088	1.588	-0.507
55	-0.151	1.756	-0.611
60	-0.227	1.930	-0.706
65	-0.315	2.113	-0.800
70	-0.409	2.284	-0.873
75	-0.505	2.422	-0.909
80	-0.600	2.520	-0.906

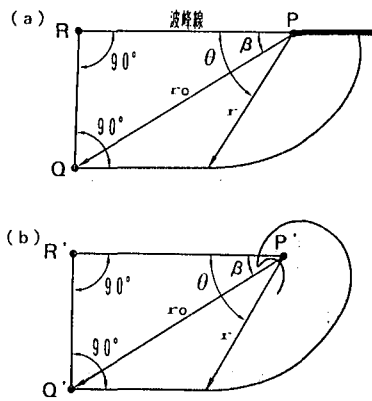


図-1 Hsu・Evans(1989)式のパラメータの定義図

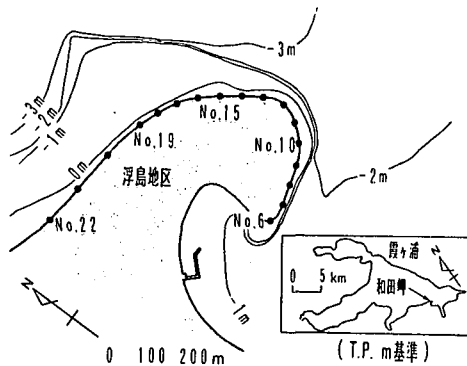


図-2 和田岬の地形特性

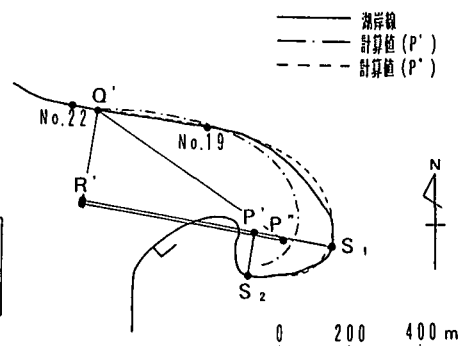


図-3 和田岬への適用
($\beta = 25.2^\circ$, $C_0 = 0.054$,
 $C_1 = 1.803$, $C_2 = -0.142$)

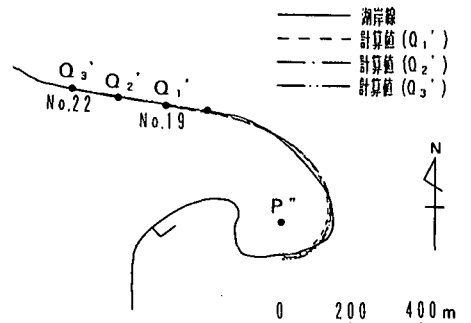


図-4 接点変化図(和田岬)
($\beta = 23.0^\circ \sim 35.5^\circ$)

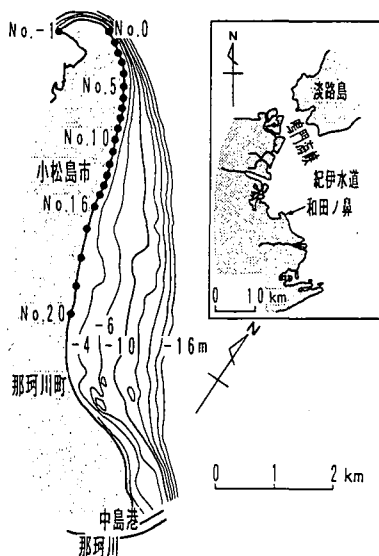


図-5 和田ノ鼻の地形特性

(3) 北海道の野付崎

北海道東部の知床、根室両半島の間に位置する野付崎は、延長20km、幅4kmの複合砂嘴である(図-8)。根室海峡は、北側を知床半島、南側を根室半島、東側を国後島に囲まれている。波の入射方向はNEとSE方向となるが、吹送距離においてNE方向が長く、水深も深い。よって、波浪エネルギーはNE方向が卓越し、これが野付崎形成の主な営力であるとされる(高野, 1978)。野付崎の海岸線は、No.1～No.5の区間ではほぼ直線的にESE方向へ延び、No.6付近よりSE方向へ鉤状に回り込み、No.10付近より野付崎の先端であるNo.12にかけて再び直線的に延びている。また、野付崎先端の円弧状の部分の半径は約2.5kmである。

図-9は、野付崎の海岸線形状の一般化表示を試みたものである。中心点を P' とした場合、計算値は現地に対し内側に大きくずれた(図-9, 1点鎖線)。よって、計算で与えられる形状がより大きな弧を描くように中心点 P' を湾曲部の終端寄りに移動させ、現地と計算値とがよく一致する中心点 P'' の位置を求めた(図-9参照)。試行錯誤的に定めたとはいえ、計算訂線と実測訂線とはこの場合もよい一致を示す。

図-10は、中心点 P'' を一定とし接点 Q' を変化させた場合の海岸線形状の変化である。野付崎においても先に検討した2つの砂嘴と同様の結果が得られた。

以上、3つの砂嘴へのHsu・Evans(1989)の式の適用によれば、この式はポケットビーチだけでなく、鉤状砂嘴についても適用が可能であることが明らかである。ここで、和田岬、和田ノ鼻、野付崎において円弧状部分の半径を比較

海岸線はほぼ直線的にNNW方向に延び、No.5～No.1はNW方向へ徐々に回り込む鉤状砂嘴の形状を示す。和田ノ鼻先端の円弧状の部分の半径は約600mである。

霞ヶ浦和田岬と同様の手法で和田ノ鼻の海岸線形状の一般化表示を試みる。まず、接点 Q' を海岸線が直線状であるNo.16～No.5の間のNo.12に設定し、前述の方法により中心点 P' を設定すると、計算値は現地に対し先端が内側に回り込み過ぎる結果となった(図-6, 1点鎖線)。そこで、中心点 P' を S_2 に近づけつつ、繰り返し計算より実測の海岸線と計算訂線とがよい一致を示すような中心点 P'' を求めた(図-6参照)。図中の破線が計算値、実線は実測値である。この場合も両者は非常によい一致を示す。同様にして中心点 P'' を固定して接点 Q' を変化させた場合の計算結果を図-7に示す。和田ノ鼻の場合も、海岸線が直線的に延びる部分より接点 Q' を選択すれば、式(1)により得られる平面形状はほぼ同一となることわかる。

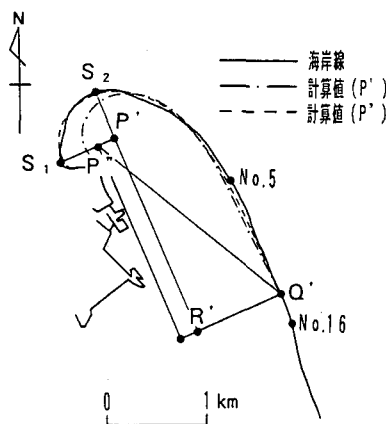


図-6 和田ノ鼻への適用
($\beta = 26.0^\circ$, $C_0 = 0.054$,
 $C_1 = 1.803$, $C_2 = -0.142$)

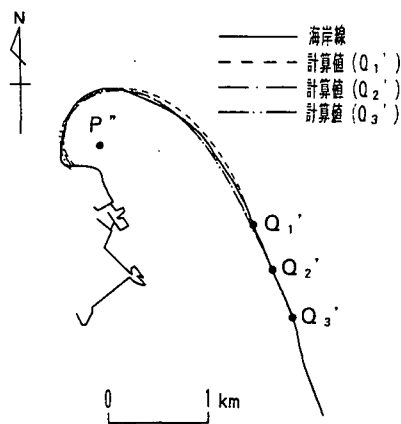


図-7 接点変化図(和田ノ鼻)
($\beta = 23.0^\circ \sim 36.0^\circ$)

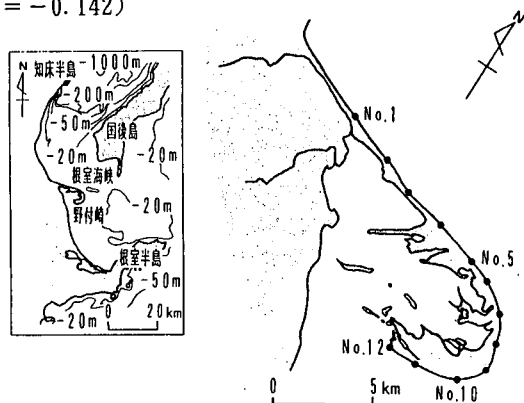


図-8 野付崎の地形特性

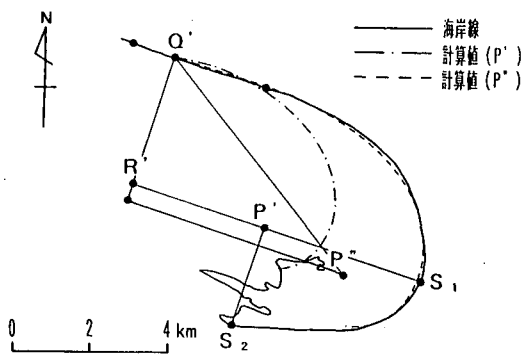


図-9 野付崎への適用
($\beta = 35.0^\circ$, $C_0 = 0.029$,
 $C_1 = 1.220$, $C_2 = -0.253$)

すると、和田岬を1とした場合、1:4:16.7となる。このように砂嘴のスケールにかなり大きな違いがあるにもかかわらず現地海岸の海岸線形状が式(1)により良好に表示でき、また、試行計算によれば中心点P"の選択の任意性は非常に低いことがわかった。さらに、中心点P"を固定すれば、接点Q'を海岸線が直線的に延びている部分で任意に設定しても、得られる平面形状はほぼ一定となることが示された。

4. 砂嘴の平面形状の変化

前節までの検討結果より、Hsu・Evans(1989)の式により砂嘴の平面形状の一般化表示が可能となった。そこで次に複合砂嘴である静岡県三保松原、および米国東海岸にあるSandy Hookの形成過程に同様な手法を適用して砂嘴の平面形状の変化予測の可能性について検討する。

(1) 静岡県の三保松原

三保松原は駿河湾に面する清水海岸の東端部に形成された複合砂嘴である(図-11)。駿河湾は、中央に駿河トラフを有し、S方向に開いている。清水海岸はSW~NW方向に走る海岸線を持つため、湾口からの入射波が斜め入射し、NW方向へ沿岸漂砂を発生させる(宇多ほか, 1991)。三保松原の海岸線形状は、No.25~No.15の区間ではほぼ直線状にNW方向へ延びる。No.15付近より緩やかにNNW方向への湾曲し、No.5へと続く。さらにNo.5で変曲点を持ちやや外側に膨らみ、No.3で再び内側へ鉤状に湾曲する(図-12)。また、三保という地名は砂嘴の先が3つに分岐していることに由来するとされる(中山, 1983)。

図-13は、中山が示した三保松原の形成過程である。三保松原の海岸線はA→B→Cと変化したと考えられ、海岸線Cは現在の地形を示す。接点Q'の位置の選択には前述の通りかなりの任意性があるため、便宜上接点Q_B'およびQ_C'は海岸線A上の接点Q_A'における汀線の法線方向でそれぞれの汀線と交わる点に設定した。これによると、現在の海岸線形状(海岸線C)における先端部でのわずかな膨らみを除けば、いずれの海岸線形状もHsu・Evansの式による計算値とよい一致を示している。図-12に示したように、砂嘴の先端部付近では、約1/50の勾配で-400mまで落ち込む非常に急な海底谷が汀線近傍まで迫っている。このため、この海底谷による波の局所的な屈折変形の影響を強く受けたことが上述の膨らみの原因と考えられる。式(1)では、海底勾配の影響などは考慮されておらず、この膨らみを除くと砂嘴先端まで現地と式(1)による計算値とは非常によい一致を示すことから、計算結果はほぼ妥当と考える。

次に、汀線の後退に伴う中心点の変化について着目すると、接点がQ_A'→Q_B'→Q_C'と変化するにつれ中心点はP_A"→P_B"→P_C"と砂嘴の発達方向へ直線的に変化することが特徴的である。

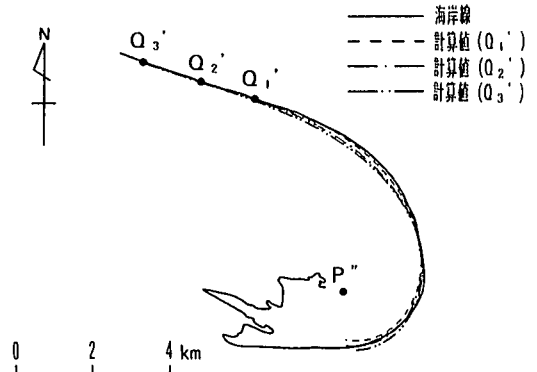


図-10 接点変化図(野付崎)
($\beta = 31.0^\circ \sim 47.5^\circ$)

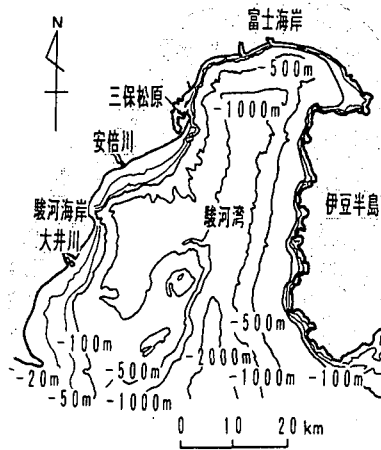


図-11 三保松原の地形特性

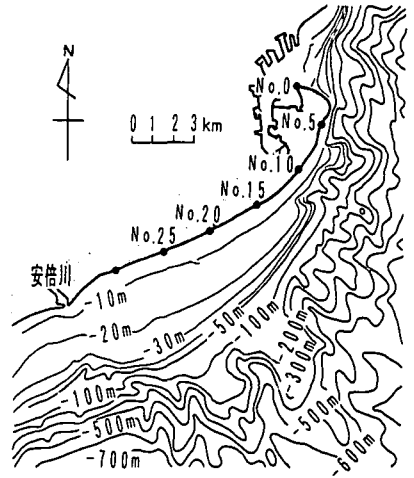


図-12 三保松原周辺の海底地形

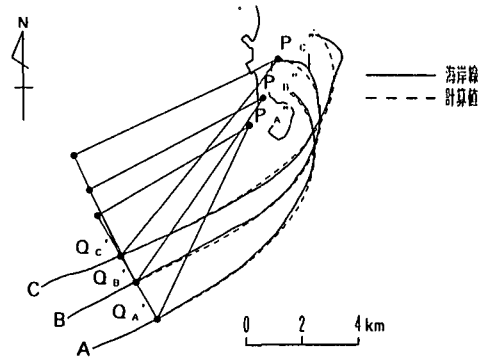


図-13 三保松原の変化過程への適用
($\beta = 32.5^\circ \sim 22.0^\circ$)

(2)米国のSandy Hook

Sandy Hookは、米国のニュージャージー州の北東部、Ambrose海峡の南岸に位置し、Navesink川の河口部につけ根を持つ複合砂嘴である(図-14)。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-15は、Johnson(1919)により示された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、海岸線Dは現在の地形を示す。接点の選定方法を三保松原と同様とすると、Sandy Hookにおいても三保松原と同様、中心点は砂嘴の発達方向へ直線的に変移する(図-15参照)。

図-16は三保松原とSandy Hookの砂嘴の形成過程における、汀線の後退量(ΔX)と中心点P"の移動量(ΔY)の関係を示したものである。 ΔX と ΔY の間には式(2)の関係が成立する。

$$\Delta Y = 3.75 - 1.73 \cdot \Delta X \quad (2)$$

これによれば、データ数は少ないものの、汀線の後退量と中心点P"の移動には逆相関が成立し、中心点P"の移動量が大きい場合には汀線の後退量が小さくなる関係が成立する。さらに、図-17には砂嘴の発達に伴う $\angle R'P''Q'$ の変化を、相対的汀線量との関係として整理した。ここに、相対的汀線後退量とは、各段階の汀線後退量を三保松原の場合(図-13)には $Q_A'Q_C'$ により、またSandy Hookの場合(図-15)には $Q_A''Q_D''$ により基準化したものである。図-17によると、漂砂の上手側区間の汀線の後退と同時に砂嘴の発達は続くが、このとき $\angle R'P''Q'$ は単調減少の傾向にある。Hsu・Evansの与えた静的安定状態にあるポケットビーチの海岸線形状における γ および β の定義図(図-1(a))によれば、 $\angle RPQ$ (角 β)は波峰線と直線状の海岸線とのなす角であった。これとの類推によれば、砂嘴の場合においても角 β は砂嘴の上手側の直線状の海岸線と入射波とのなす角と考えることができる。そして、砂嘴の発達とともに角 β が小さくなることは、波の作用により砂嘴が次第に扁平な形状へと変化することを示している。

三保松原とSandy Hookの各発達段階における砂嘴の平面形状がHsu・Evans(1989)の式により与えられることが明らかになったが、これらの分岐砂嘴の先端部は不連続に突出した形状を持つ。一方、本研究で示した方式により砂嘴の経時の変化が与えられるとすれば、砂嘴の先端は連続的なものとなって分岐することができない。この意味より、砂嘴の分岐現象についてはこの研究の範囲外にあることを付記しておく。

6. 結論

本研究の主要な成果は以下に要約される。

①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)の式が鉤状砂嘴の海岸線形状の計

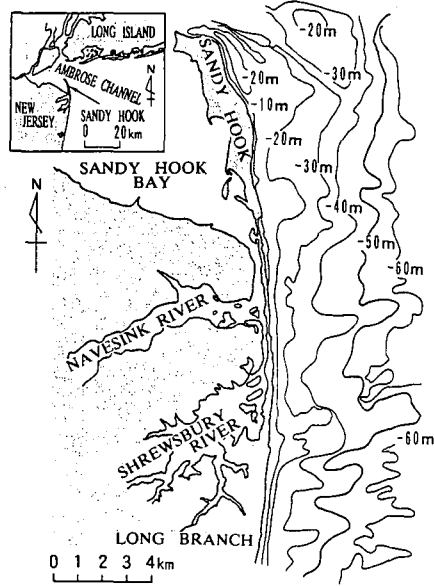


図-14 Sandy Hookの地形特性

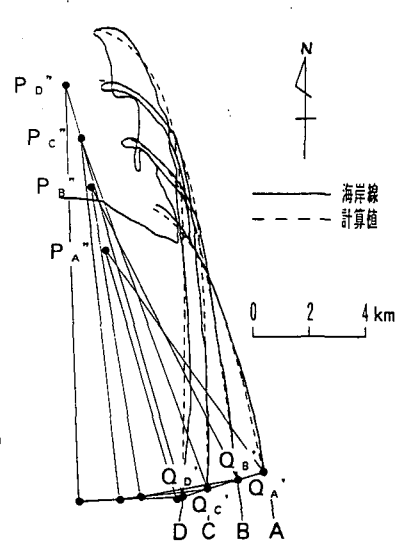


図-15 Sandy Hookの形成過程への適用 ($\beta = 19.5^\circ \sim 14.5^\circ$)

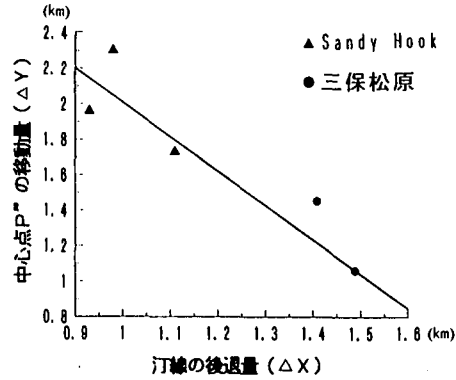


図-16 汀線後退量(ΔX)と中心点P"の移動量(ΔY)との関係

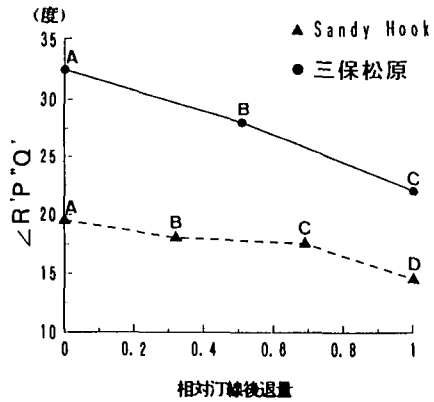


図-17 砂嘴の発達に伴う相対的汀線後退量 ΔX と $\angle R'P''Q'$ の関係

算にも使えることを初めて明らかにした。3つの鉤状砂嘴の海岸線形状はいずれも計算された海岸線とよい一致を示した。

②砂嘴の海岸線形状の計算においては、中心点 P'' 、接点 Q' および点 R' を定める必要があるが、接点 Q' の位置の選定が結果に及ぼす影響は小さい。また、 P'' は試行錯誤的方法で定めることになるが、その選択の幅は大きくない。

③分岐砂嘴の各発達段階の海岸線形状もHsu・Evansの式により良好に説明される。このとき、中心点 P'' は砂嘴の発達に伴いその発達方向へ直線的に移動し、 $\angle R'P''Q'$ は次第に小さくなって、砂嘴は次第に扁平な形状へと変化することが分かった。

参 考 文 献

- 宇多高明・古川博一・竹淵 勉(1984): 湖内にできた砂嘴の変形過程, 第39回年講演概要集(Ⅱ), pp. 187-188.
- 宇多高明・山本幸次(1988): 砂嘴地形の形成過程: 現地観測と模型実験, 地形, Vol. 9, No.4, pp. 295-307.
- 宇多高明・山本幸次・河野茂樹(1991): 砂嘴地形周りの海浜変形-三保松原を例として-, 地形, Vol. 12, No.2, pp. 117-134.
- 宇多高明・山本幸次(1992): 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, No.2, pp. 141-157.
- 砂村継夫(1985)海浜変形: 本間 仁監修, 堀川清司編, 「海岸環境工学」, 東京大学出版会, 582p.
- 高野昌二(1978): 野付崎における分岐砂嘴の発達, 東北地理, Vol. 30, No.2, pp. 82-90.
- 中山正民(1983)自然の造形美、分岐砂嘴上のドラマ: 籠瀬良明・山口恵一郎・堀 淳一編「日本の海岸・島東日本編」: そしえて, 183p.
- Hsu, J. R. C. and C. Evans(1989): Parabolic Bay Shapes and Applications, Proc. Instn. Civ. Engrs., Part2, 87, pp. 557-570.
- Johnson, D. W. (1919) Shore Processes and Shoreline Development: Wiley, New York, 584p. [Facsimile edition: Hafner, New York(1965)].
- Zenkovich, V. P. (1967) Processes of Coastal Development: Oliver & Boyd, Edinburgh, 738p.