

# アーマールコートによる安定海浜の形成

宇多高明\*・酒井佳治\*\*・竹 潤 勉\*\*

## 1. ま え が き

漂砂の移動限界水深は、波浪条件、底質粒径および比重によって定まるが、底質の比重はほぼ一定であると考えられるので、波浪条件が一定であっても底質粒径が変化すれば移動限界水深は変化する。したがって、底質粒径の変化が大きい場合には、粒径変化が漂砂について考える上で相当重要である。潟沼では湖に良くみられる砂嘴地形が随所に見られ、その中に底質粒径変化が大きい舌状砂州がある。本研究ではこの舌状砂州を取り上げ、地形、地質に関する現地調査を実施した。研究の対象とした舌状砂州は、前報<sup>1),2)</sup>で種々の検討を行った親沢鼻の東方約1 kmに位置している。調査の結果、この砂州周辺ではアーマールコートが形成され、湖面に突き出た湖岸がほぼ安定形状を保っていることが判明した。さらに、混合粒径が漂砂に及ぼす効果については研究例が少ないため、移動床模型実験を実施し、その機構を調べた。実験では波浪条件を一定に保ち、底質粒径のみを3種類(細粒、粗粒および両者を1対1の割合で混合したもの)に変化させた。実験の結果、潟沼内の砂嘴と同様にアーマールコートが形成されることが判明し、混合粒径比に応じて移動限界水深や漂砂量係数が定まることがわかった。結局、アーマールコートが形成されると、侵食領域での侵食速度は減少することから、アーマールコートを利用して安定海浜を形成する工法の可能性が立証された。

## 2. 潟沼内の舌状砂州周りでの現地調査

### 2.1 現地調査概要

現地調査は、潟沼内の親沢鼻東方約1 kmに位置する舌状砂州周辺(図-1 参照)で昭和60年5月30日から25日までに実施した。調査項目は、深浅測量および底質採取である。深浅測量は図-2に示す各測線上でT.P. -1.0 m付近からT.P. 0.6 m付近までを1 m間隔に行った。また底質採取は同一線上で各測線につき等間隔に5点(測線 No. 3, 8, 13は9点ずつ)を行った。

### 2.2 地形特性

図-2に示す等深線図によると、砂州の東側では沖合部が緩勾配であるのに対して、西側ではほぼ一様に急勾配で、特に測線 No. 6 付近で勾配が急である。これらの地形特性は、前報<sup>1),2)</sup>で述べた親沢鼻の特性によく似ており、当砂州は東側で侵食され、侵食された土砂は西側へ回り込み堆積することで形成された地形であると考えられる。また当砂州周辺の卓越波の入射方向は、親沢鼻と同様に東であることからこのことが理解できる。

図中の破線は、昭和46年2月測量の地形図より得られた汀線形状で、太い実線は今回測定された汀線形状である。両者を比較すると、測線 No. 7, 8 付近で汀線が前進しているが、その他の位置では大きな変化はみられない。一般に湖内に形成された砂州は、卓越波の入射方向側で侵食され、侵食された土砂は裏側へ回り込み堆積しながら変化し成長する。当砂州においては、14年前の汀線形状との比較により、ほぼ全域で大きな汀線変化がみ

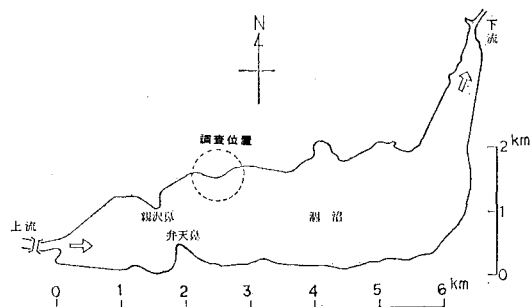


図-1 位置図

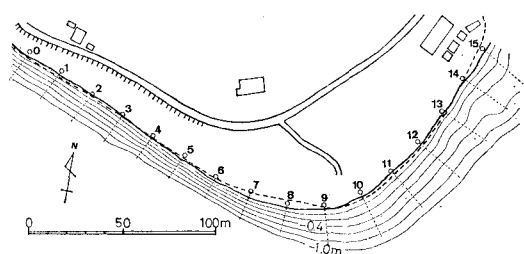


図-2 等深線図

\* 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室長

\*\* 正会員 建設省土木研究所海岸研究室

られないことから、14年前の地形が形成された段階で地形が既に安定形状に近いものになっており、その地形特性のもとで漂砂の平衡が保たれていたと考えられる。

### 2.3 海浜断面形状の重ね合わせと移動限界水深の推定

断面図の重ね合わせにより移動限界水深の推定を試みる<sup>2)</sup>。各測線の断面形を岸沖方向に移動させて沖合部がほぼ一致するように重ね合わせると(図-3)、2断面を除くどの断面形も T.P. -0.75 m 付近で一致する。また、侵食域の断面形(測線 No. 12, 13, 14, 15)のみに注目すると、T.P. -0.5 m 以深はほぼ同一断面形状であると見なすことができる。堆積域の断面では、底質が深みへ落ち込んでゆくためにかなり深い位置でのみ初期断面形が保存され得ることを考慮すれば、移動限界水深は侵食域の断面にのみ注目して得られた T.P. -0.5 m 付近と推定することができる。また、当砂州の卓越波の入射方向は東であることから、波高は砂州の東側で大きく西側でやや小さいと考えられ、移動限界水深も東側で大きく西側でやや小さい傾向にあると思われる。一方、この砂州では親沢鼻と異なり西側での堆積形状はあまり顕著でない。これは砂州の突出が小さいために運ばれた底質が砂州の西側に堆積せずさらに下手へと流出するためと考えられる。

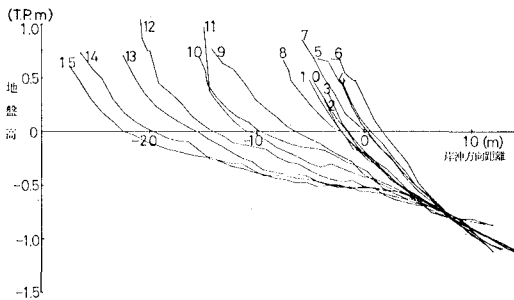


図-3 海浜断面の重ね合わせ

### 2.4 海浜形状と底質特性

図-4 は各測線を汀線に直角であると見なし、実際には湾曲している汀線を横軸方向に直線となるように考えて描いた等粒径線図である。図によれば砂州の東側で中央粒径が 20~50 mm 程度と粗粒であるのに対し、西側のそれは 1~10 mm 程度と細粒であることがわかる。このことから卓越波の入射方向側である東側で細粒が洗い流され、移動しにくい粗粒のみが残されたと考えられる。現在漂砂の平衡が保たれているとするならば、現在の波浪以上のものが作用しない限り東側の粗である底質は移動しないことになる。以上のことから、この砂州は湖面に突き出た形状でありながらアーモアコートによりほぼ安定形を保っていることがわかる。また、図からは

読み取ることはできないが、筆者らが海底面の状況を調査したところ中央粒径 0.2 mm 程度の粒径が現れる水深より深い場所では 0.2 mm 程度の粒径の底質が分布していることがわかった。これは波浪により底質が移動し得る限界の位置が中央粒径 0.2 mm 程度の等粒径線で示されることを示唆している。図-4 と同様にして描いた等深線図を図-5 に示す。先に、海浜断面形状の重ね合わせにより推定した移動限界水深は T.P. -0.5 m であるが、図-5 におけるその等深線と図-4 における中央粒径 0.2 mm の等粒径線を比較すると、西側では一致しないが中央および東側で良く対応していることがわかる。西側で一致していないのは、西側は堆積域であり、底質が深みへ落ち込んでゆくためと考えられる。

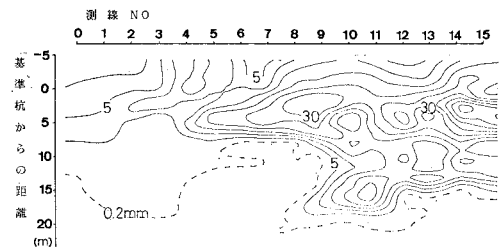


図-4 等粒径線図

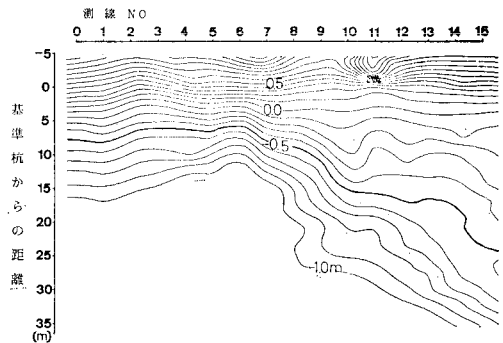


図-5 等深線図

## 3. 混合粒径水理模型実験

実験は幅 4 m の平面水槽を用いて行った。模型海浜は海浜勾配が約 1/5.8 の直線状海浜とし、沿岸漂砂を卓越させるために波の入射方向に対して海岸線を 30° 傾けて整形した。実験では海浜形状、波浪条件 ( $H_f = 3$  cm,  $T = 0.8$  sec) 等は全て一定とし、底質粒径のみを変化させた。実験は3ケースから成る。ケース1は中央粒径 0.32 mm の砂を用いた。ケース3は中央粒径 2.7 mm の砂を、ケース2はケース1、3の底質を1対1の割合で混合した砂を用いた。実験では海浜形状、碎波波高および碎波点における入射角の分布を測定した。混合粒径の実験では実験開始前と10時間後の2回底質採取を行

い粒度組成を調べた。採取は3測線において行い、表面砂を採取するとともに、堆積域の3地点において鉛直方向の採取も行った。海浜形状の測定は、沿岸方向に0.25 m、岸沖方向に0.1 m 間隔で、4および10時間後の2回行った。碎波波高は容量式波高計を用いて沿岸方向に0.25 m 間隔で測定し、碎波点における入射角は写真撮影によって定めた。

## 4. 実験結果

### 4.1 海浜地形変化の特性

図-6 は波の作用後10時間における等深線形状を示す。初期状態では等深線は互いに平行であったが、沿岸漂砂によって地形変化が生じている。以下、地形変化状況を詳しく調べる。まず侵食域 ( $X=2\sim4$  m) ではほぼ7.5 cm より深い領域の等深線には有意な変化が生じていないが、水深0~7.5 cm の間では等深線間隔が広がっている。これは移動限界水深がほぼ7.5 cm 付近にあって、それより深い部分では地形変化が生ぜず、それより浅い領域では侵食されて緩斜面ができたことを示している。これらの特性は現地調査で得られた図-5 と良く対応する。堆積位置 ( $X=0\sim2$  m) においては、陸上部で土砂が堆積し、平坦面が形成されるため等高線間隔が広がった。また、水深5 cm から17.5 cm までの範囲の等深線間隔は密になっており、親視鼻で得られた地形特性<sup>2)</sup> と良く対応する。

次に各ケース相互の比較を行うために、代表的に2断面を選び、断面形状の比較を行った。図-7 は侵食域の  $X=3.75$  m 断面の比較である。粗粒の底質が含まれると有意な地形変化の生ずる限界水深 ( $h_{c1}$ ) は小さくなる。各ケースについて測定すると、 $h_{c1}=6.8$  cm,  $h_{c2}=5.8$  cm,

$h_{c3}=3.5$  cm となる。またケース1, 2, 3の順に底質が移動しにくくなるために、陸上部の侵食範囲も次第に小さくなることもわかる。堆積域の  $X=0.25$  m 断面について同様な比較を行ったのが図-8 である。図-7 と同様に、地形変化量はケース1, 2, 3の順に小さくなっている。前浜勾配は粗粒の方が急である。また砂州高は粗粒, 細粒, 混合の順になっている。

### 4.2 移動限界水深

Hallermeier<sup>3)</sup> は沿岸漂砂が活発な範囲の沖側限界水深を推定する式として次式を提案した。

$$D=2.2H_s-68.5H_s^2/(gT_s^2) \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 $H_s$ : 沖波有義波高,  $T_s$ : 周期,  $g$ : 重力加速度。この式は比重が2.58の細砂に対して適用される。一方、最近汀線変化モデルの計算でこの  $D$  値を用いる例があるが、急勾配海浜では  $D$  値をそのまま予測に用いることは合理的でないことが次のようにして示される。ケース1の  $X=3.75$  m 断面と  $X=0.25$  m 断面のデータをもとに議論する。まず地形変化状況を明らかにする

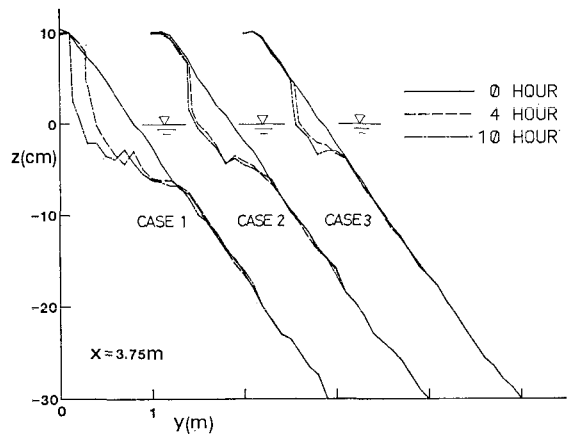


図-7 侵食域代表断面形状の比較 ( $X=3.75$  m 断面)

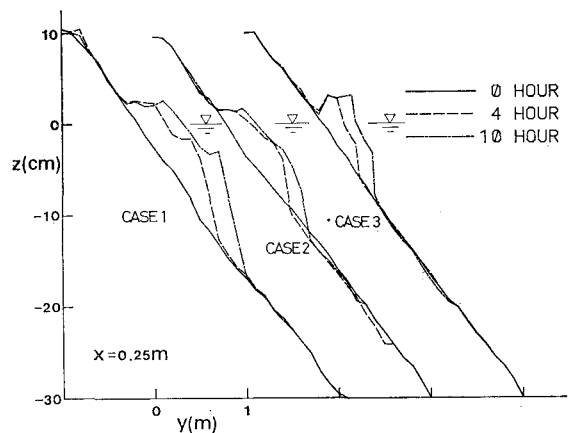


図-8 堆積域代表断面形状の比較 ( $X=0.25$  m 断面)

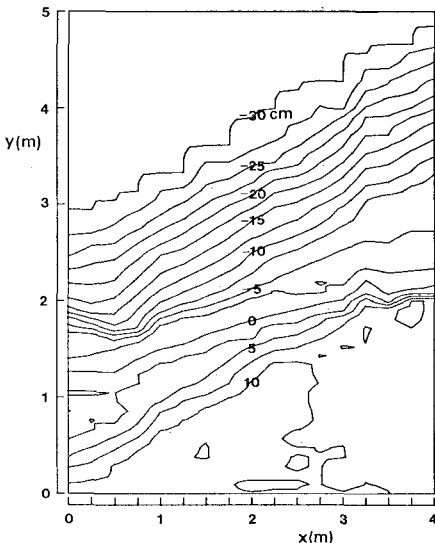


図-6 等深線図 (細粒, 10 時間後)

ため、図-7, 8で示される地形変化を鉛直軸に投影した水平変位図を作成した(図-9)。ただし、パー、トラフがあるときには断面面積が等価な平坦面に置き換えた。X=3.75 m 断面では浜崖侵食が進んだために陸上部の変化が大きい。浜崖が後退する場合、前浜勾配がほぼ一定値を保つため、地形変化の生ずる最高点の高さは初期形状に依存することになる。有意な地形変化の生じ始める移動限界水深は  $h_c=7$  cm と与えられるが、この値は式(1)による  $D=6.2$  cm とかなり良く一致する。一方、堆積域にある  $X=0.25$  m 断面では陸上部の地形変化の生ずる範囲は、海面下のそれに比較してずっと小さい。これは砂州高が波のうち上がり高さで規定されるためである。海面下では  $D$  値で与えられる水深よりもずっと深い所まで変形が生じ、しかも水深約 8 cm で深では4時間後と10時間後の形状がほぼ平行となっていることから判断すると、沖合では海底勾配が一定のまま堆積したことがわかる。このように急勾配海浜では沖合で地形変化が始まる水深は、限界水深  $D$  とは無関係であり、底質の海中での安息角と初期形状とによって定まることがわかる。図-9 には10時間後の形状より陸上部と海面下について断面面積の変化量を算出し、これを汀線変化量  $\Delta y$  で割ることによって得られた高さ  $h_e=14.5$  cm,  $h_a=15$  cm を示した。これらの値は、平均移動高  $h=12$  cm より大きい、その理由は後者が全断面のデータを平均して求めた関係であることによる。さらに、図-9によると、侵食堆積時ともに断面積変化量を  $D\Delta y$  とおくことは、地形変化量を過小評価してしまうことになることがわかる。

最後に侵食域の移動限界水深を詳しく調べる。移動限界水深は側壁より 1 m 以上離れた場所ではほぼ一定値を有していた。このため特に  $X=3.0, 2.75, 2.5$  m 断面を選び、これらの地点での平均値を求めるとともに、

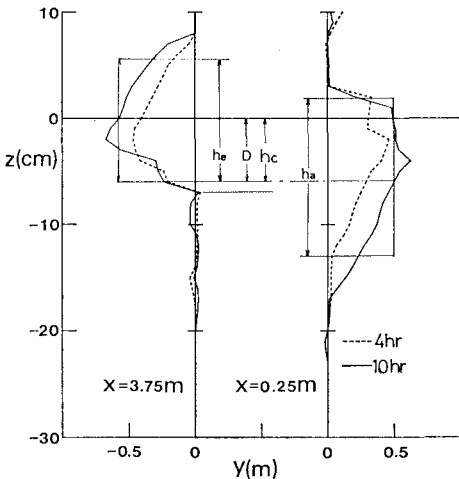


図-9 地形変化の水平変位(細粒)

表-1 移動限界水深と碎波波高

| ケース | 移動限界水深<br>$h_c$ (cm) | 碎波波高<br>$H_b$ (cm) | $h_c/H_b$ |
|-----|----------------------|--------------------|-----------|
| 1   | 5.6                  | 3.3                | 1.70      |
| 2   | 3.7                  | 3.1                | 1.19      |
| 3   | 1.8                  | 3.3                | 0.55      |

同じ区域の碎波波高の平均値との関係を調べた。この結果は表-1 に示される。表には移動限界水深の碎波波高に対する比も示されているが、細粒の場合にその比が最も大きく、粗粒の場合には0.55となった。混合粒径の移動限界水深は両者の平均値に等しい。細粒と粗粒の混合比が0.525対0.475であり、碎波波高がほぼ同じであったことを考慮すると、混合粒径の移動限界水深は粒径の配分比で各々の移動限界水深に重みを付けて平均した値となった。

#### 4.3 漂砂量係数と粒度分布特性

$X=2$  m の中央断面においては、初期地形が保たれていた(図-6 参照)。また碎波波高や入射角もほぼ一定であった。このためこの断面の沿岸漂砂量は時間的に一定値を有していたと考えられ、沿岸漂砂量はサベージ公式を用いると次のように表される。

$$q_0 = 1/8 w_0 f (H^2 C_g)_b \sin \alpha_b \cos \alpha_b \dots\dots\dots (2)$$

ここに  $w_0$ : 水の単位体積重量,  $f$ : サベージ係数,  
( $H^2 C_g$ )<sub>b</sub>: 碎波点における波のエネルギーフラックス,

$\alpha_b$ : 碎波点における入射角

この断面より上手側の土量の  $t_0$  時間内の変化量を  $V_0$  とすれば、 $q_0, V_0, t_0$  の間には

$$q_0 = V_0/t_0 \dots\dots\dots (3)$$

が成立する。 $t_0$  として4時間を選ぶと、 $V_0$  は4時間後の地形変化より計算できる。式(1), (2)の等値関係よりサベージ係数の逆算が可能なので、測定値を基に計算したところ、表-2の結果が得られた。なお、断面積変化の計算では精度を向上させるために沖合の積分範囲を移動限界水深までとした。細粒の  $f$  値は現地海岸で用いられている  $f=0.217$  に対して約1/2となった。混合粒径の  $f$  値は細粒と粗粒のほぼ中間値であって、細粒と粗粒の配合比で各々の係数値に重みを付けて平均した値となった。次に、侵食、堆積および中立断面における表面の粒度組成を図-10に示す。図には初期海浜形状と10時間後の形状も示した。縦軸の  $\gamma$  は底質全重量に対する2 mm のフルイ目を通して底質の重量比をパーセント

表-2 サベージ係数

| ケース | $V_0$ (m <sup>3</sup> ) | $\bar{H}_b$ (m) | $\alpha_b$ | $f$ (m <sup>3</sup> /t) |
|-----|-------------------------|-----------------|------------|-------------------------|
| 1   | $3.06 \times 10^{-2}$   | 0.034           | 10.4       | 0.119                   |
| 2   | $1.80 \times 10^{-2}$   | 0.028           | 13.0       | 0.092                   |
| 3   | $1.47 \times 10^{-2}$   | 0.032           | 13.7       | 0.052                   |

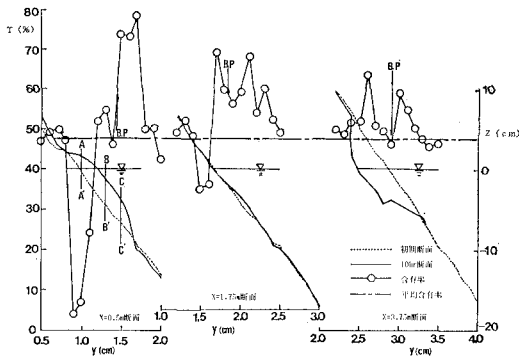


図-10 代表3地点における底質粒径の含有率鉛直分布

表示で示している。なお、細粒の砂は 2mm 以上の粒径を含まず、逆に粗粒は 2mm 以下の粒径を含まないことは実験前の粒度分析によって明らかとなっている。また鎖線で示す  $\gamma=47.5\%$  の線は混合砂の粒度組成である。まず侵食域の代表である  $X=3.75\text{m}$  断面について調べてみる。侵食域では粗い粒径のものが残されており、粗粒の組成比が高くなっている。図中 B.P. は碎波点位置を示すが、 $\gamma$  の極大値は碎波点の沖側と岸側の 2ヶ所で現れた。しかし侵食を受けていない沖合部での組成比は初期の混合割合を保っている。侵食域では細粒の底質が早く移動し、アーマリングが生じたことがわかる。これは図-4 に示す砂州の侵食域に位置する No. 13, 14 付近で得られる特徴と対応する。 $X=1.75\text{cm}$  断面は、ほぼ侵食も堆積も生じていない断面であるが、ここでは汀線より沖で粒径が粗くなっている。潟沼の砂州においてこれと対応する位置にあるのは、図-3 の断面形によれば、測線 No. 8 または No. 9 である。図-4 でこれらの測線の粒径分布を調べると、T.P. 0.2m より低い海浜においては確かに粗粒が分布していることがわかる。さらに  $X=0.5\text{m}$  断面では碎波点より沖で粗粒割合が高く、碎波点よりやや岸側では逆に粗粒の底質割合が著しく高くなる。この状況は再び潟沼の砂州周りで生じている。図-3 において断面形より判断すると、測線 No. 5 または No. 6 は堆積領域に位置するが、これらの

測線の粒径分布を図-4 で調べると、岸側には細粒が、またその沖には粗粒が分布していることは明かである。以上のように、移動床模型実験で得られた粒度分布特性は、潟沼内の舌状砂州地形周りで得られた分布特性と良く一致することがわかる。

## 5. 結 論

本研究では、潟沼において地形、底質に関する現地調査および混合粒径砂に関する移動床模型実験を実施し、混合粒径底質のアーマリング効果の解析を試みた。その結果、次の結論が得られた。

(1) 当砂州は、卓越波の入射方向および地形形状から、東側で侵食され、侵食された土砂が西側へ回り込み堆積することで形成された地形であると考えられる。(2) 昭和 46 年 2 月測定の地形図と今回の深淺測量から得られた汀線形状とを比較すると、ほぼ全域で大きな変化がないことから、現在この砂州周りでは漂砂の平衡が保たれていると考えられる。(3) 海浜断面形状の重ね合わせにより推定された移動限界水深はほぼ T.P. -0.5m である。(4) 砂州周りの底質粒径分布は、東側で粗粒、西側で細粒であった。これは卓越波の入射方向側である東側で細粒が洗い流されて移動しにくい粗粒のみが残され、アーマールコートが形成されたものである。また現在湖面に突き出た砂州形状であるにもかかわらず地形変化があまり生じていない理由は、アーマールコートが形成されているためと考えられる。(5) 混合粒径の移動床実験においても、潟沼の砂州と同様に侵食域においてアーマールコートが形成されていることが確認された。また、侵食域、堆積域における粒径の岸沖分布特性は、潟沼のデータとよい対応を示した。

## 参 考 文 献

- 1) 宇多高明・山本幸次: 潟沼親沢鼻の変形過程について, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 370~374, 1985.
- 2) 宇多高明・山本幸次: 湖および湾内に発達する砂嘴地形の変形特性, 地形, Vol. 7, No. 1, pp. 1~22, 1986.
- 3) Hallermeier, R. J.: Sand transport limits in coastal structure designs, Coastal Structures '83, ASCE, pp. 703~716, 1983.