

宍道湖の湖浜変形に関する一考察

A note on beach changes due to wind waves in Lake Shinji

宇多高明*・山本幸次**・戸川光司***

Uda, T., K. Yamamoto and K. Togawa

Beach changes of Torigasaki Area in Lake Shinji Located in Shimane Prefecture were investigated. On this beach a cusped foreland was formed behind an offshore breakwater built for protecting cultivation facilities of shells against wave action. Aerial photographs were compared to investigate long-term shoreline changes of this cusped foreland. Seasonal, cyclic beach changes due to the change in wave direction corresponding to the wind direction were found at the head of the foreland. Grain size distribution around the foreland was measured.

Key words: Beach changes, cusped foreland, offshore breakwater, lakeshore

1. まえがき

閉鎖域である湖沼においては、しばしば季節風などの作用で風波が発達し、これにより湖沼では特徴ある地形変化が生ずる。湖沼への来襲波は、外洋に面した海岸への入射波と比較すると波高が1オーダー低く、卓越周期も1/3程度と短い、これにより生起している地形変化は外洋に面した海岸の現象と非常によく似ている。したがって湖浜変形について考察することは、現地海岸でみられる現象の理解につながると考えられる。この観点より筆者らは霞ヶ浦（宇多ほか、1987）、瀬沼（宇多ほか、1992）、琵琶湖（安川ほか、1988）などにおいて湖浜変形についての研究を進めてきている。本研究では、その一環として新たに島根県北部に位置する宍道湖を選んで湖浜変形について考察を加えることとする。以下では、特に宍道湖の南岸に位置する鳥ヶ崎の西側に形成された砂州（鳥ヶ崎砂州）を対象として湖浜の変形特性を明らかにする。

2. 鳥ヶ崎砂州の地形特性

宍道湖は、島根県北部に位置し、面積80km²と我が国第6位の規模を持つ湖である（図-1）。この湖の南岸ほぼ中央部には鳥ヶ崎と呼ばれる岬状の地形がみられ、その西側には1962年5月当時、南北方向になだらかな直線状の汀線をもった湖浜が広がっていた（写真-1）。この地点への吹送距離はWNW, W, NWの順に長く（図-1）、また、松江气象台における1980年～1986年の気象観測によれば、宍道湖付近での風向は季節風であるW方向の出現率が高い（図-2）。

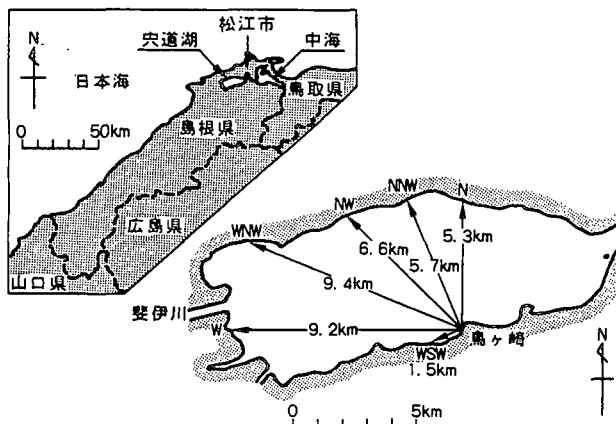


図-1 宍道湖の形状

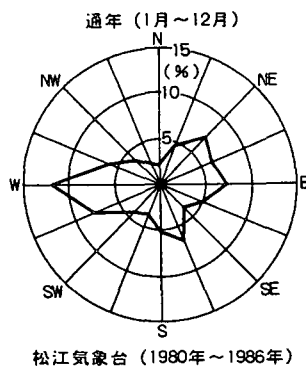


図-2 風向の出現率

* 正会員 工博 建設省土木研究所河川研究室長 (〒305 茨城県つくば市旭一)

** 正会員 建設省土木研究所海岸研究室研究員

*** (株)建設技術研究所大阪支社河川本部

したがって、鳥ヶ崎ではW～NWの方向からの入射波が卓越することになる。さらに、この湖浜は北端と南端が岬状に突出した地形によって挟まれたフック状であることから、ポケットビーチと同様にほぼ安定した湖浜であったと推定される。しかし、湖浜の中央部やや南側にシジミ養殖場の防波堤が1965年11月に建設されたため、この防波堤の影響により湖浜変形が進み、舌状砂州（鳥ヶ崎砂州）が形成された。24年後の1989年5月に撮影された空中写真（写真-2）によれば、波の回折・屈折状況を調べることができる。沖合の防波堤は不透過構造であるが、これと直交する突堤状の西側部分は透過性であり、波峰線は防波堤背後の水域にほぼ連続的に侵入している。したがって西側からの入射波は、舌状砂州の南側では湖浜へ直接到達し、北側では沖合の防波堤で回折した波が作用する。すなわち鳥ヶ崎砂州の形成要因は防波堤による波浪の回折作用によると言える。次に、鳥ヶ崎砂州の形成過程を、1962年より1989年までの間における4回の空中写真をもとに調べてみる（図-3参照）。防波堤建設以前の1962年5月では湖岸線はなだらかな直線状でほぼ安定した状態にあった。1965年11月に防波堤が建設され、その2年後の1967年5月には波浪の回折により北側の汀線が後退し始め、現在の砂州の位置よりやや北側で汀線が前進した。1976年9月になると砂州の北側では汀線が湖岸沿いの道路護岸まで達し、砂礫の供給がほぼなくなったため、砂州の両側の汀線が後退し、舌状砂州の発達が止まった（1989年5月）。このように防波堤建設後の24年間で、なだらかな直線状の湖浜から舌状砂州へと変化したことがわかる。



写真-1 鳥ヶ崎西岸の湖浜地形（1962年5月）

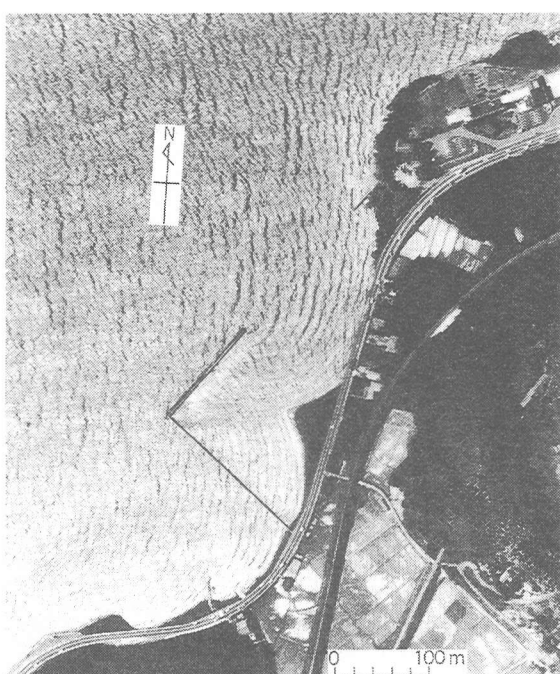


写真-2 鳥ヶ崎西岸の湖浜地形（1989年5月）

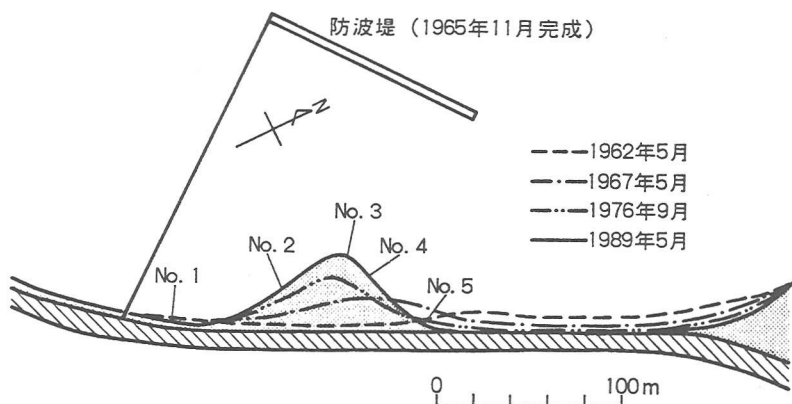


図-3 鳥ヶ崎西岸の湖岸地形の経年変化

舌状砂州の断面形（測線位置は図-3参照）を図-4に示す。西側の測点No.1においては $Z=0.6\sim-0.5\text{m}$ が急勾配斜面、それより沖は $Z=-0.5\text{m}$ の平坦面が広がり、全体として凹形の断面である。これは侵食域で見られる典型的な断面形特性（宇多・山本，1988）である。舌状砂州の先端の測線No.3では、沖合の $Z=-0.4\text{m}$ の平坦面に対し、汀線付近は鉛直上方に凸形の断面形となっており、ここが明らかに堆積域にあることを示している。砂嘴先端より東側の測線No.5は、測線No.1と同様に凹形であって侵食域の断面特性を示す。

以上に述べた砂州周辺における断面形の特徴は、測線No.1付近とNo.5付近が侵食され、その砂礫が沿岸漂砂によってNo.3付近に運ばれ堆積したことを示し、汀線変化（図-3）とよく対応する。また、侵食域の測線No.1, No.5において $Z=-0.5\text{m}$ 付近に緩勾配斜面が広がり、それ以浅は急勾配斜面であることから、侵食域で顕著な地形変化が収束する限界の水深（地形変化の限界水深）は $Z=-0.5\text{m}$ にあることがわかる。ところで他の湖沼における地形変化の限界水深としては、霞ヶ浦の浮島地区で約 0.5m （宇多ほか，1987）、酒沼の親沢鼻では約 0.6m であり（宇多ほか，1992）、これらの値は共によい一致を示している。

測線No.2, 3, 4に沿って砂礫を採取し、中央粒径の水深方向変化を調べた（図-5）。各地点ともに砂礫の中央粒径は $Z=0.4\sim 0.1\text{m}$ で $d_{50}=0.2\sim 1.0\text{mm}$ と徐々に大きくなり、 $Z=0.1\sim -0.4\text{m}$ では $d_{50}=1.0$ から 15mm の粗粒、 $Z=-0.4\text{m}$ 以深では再び $d_{50}=0.2\text{mm}$ の細粒となる。陸上部で標高が増すにしたがい d_{50} が小さくなるのは飛砂が堆積しているためである。No.2, 4において d_{50} が沖合で急激に小さくなる水深は $Z=-0.4\sim -0.5\text{m}$ であり、侵食域の地形変化の限界水深が $Z=-0.5\text{m}$ にあることを示す。砂礫の粒径が汀線付近で粗く、地形変化の限界水深で細くなる点は、現地海岸で見られる現象とよく一致する。

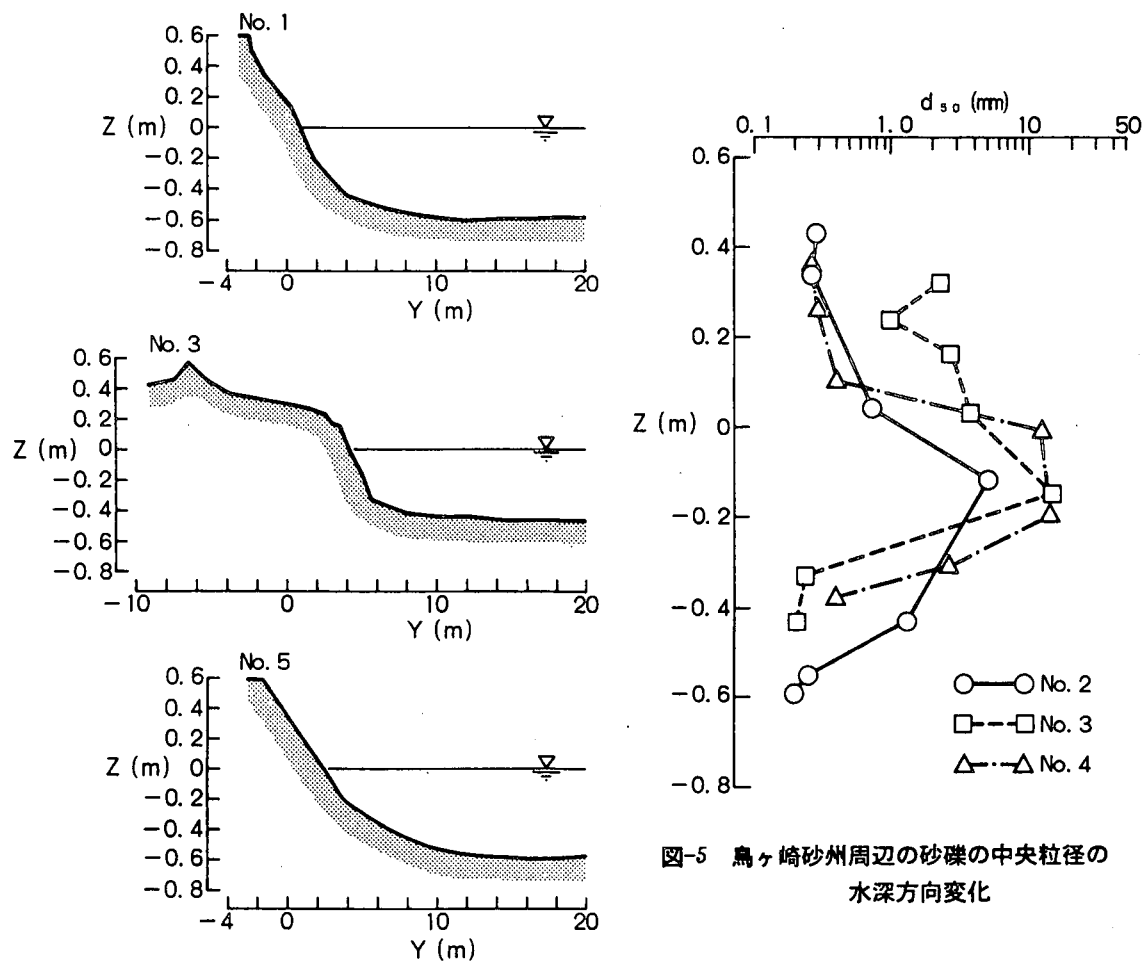


図-4 鳥ヶ崎砂州周辺の湖浜断面形

図-5 鳥ヶ崎砂州周辺の砂礫の中央粒径の水深方向変化

3. 鳥ヶ崎砂州の短時間での変形とその機構分析

鳥ヶ崎砂州の先端では波向変動に応じたサイクリックな汀線変動が見られる。例えば、1991年3月29日には鳥ヶ崎砂州の先端は西側に突出していた（写真-3）が、5月21日には西側の砂州先端の突出部は消失した（写真-4）。さらに2日後の5月23日には再び先端は西側へと発達し始めている（写真-5）。

1991年3月29日の汀線形状のデータはないが、5月21日、23日の汀線変化と、目視により測定した、水中部の堆積物の粒径が粗粒より細粒へ変化する限界線を図-6に示す。水中部の堆積物変化線の形状は写真-3の砂州先端部の形状とよく対応しており、3月2日の汀線形状はこの堆積物変化線とはほぼ平行であったと推定される。また、5月21日と23日の汀線形状を比較すると、砂州先端の東側で汀線が後退し、西側で前進しており、3月29日と5月21日の間とは逆の地形変化が生じたことがわかる。

次に、5月21日と23日の間に著しい汀線変化があった位置の断面形の変化を調べた（図-7）。汀線が最も前進したA-A'測線では $Z=-0.2m$ 付近の緩斜面上へ砂礫が堆積し、頂部の高さが $Z=0.1m$ のbermが形成された。一方、汀線が最も後退したB-B'測線では $Z=0.25\sim 0.4m$ が侵食され、この場合の地形変化の限界水深は $Z=-0.4m$ にあることがわかる。



写真-3 鳥ヶ崎砂州先端の状況
(1991年3月29日)

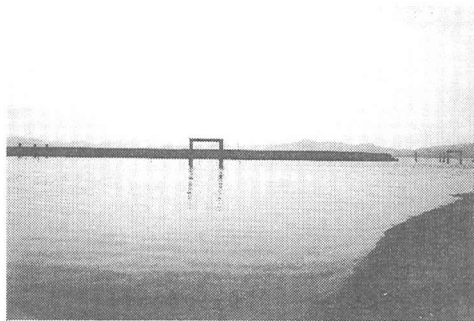


写真-4 鳥ヶ崎砂州先端の状況
(1991年5月21日)

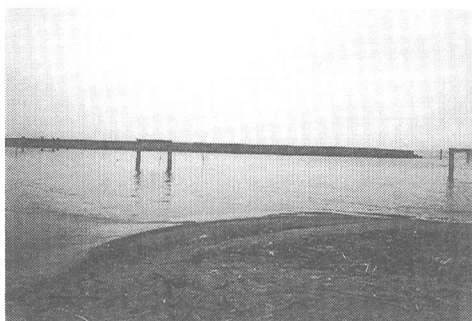


写真-5 鳥ヶ崎砂州先端の状況
(1991年5月23日)

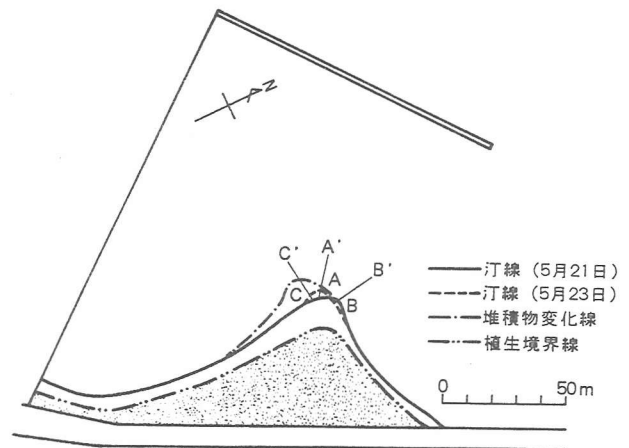


図-6 鳥ヶ崎砂州の汀線形状

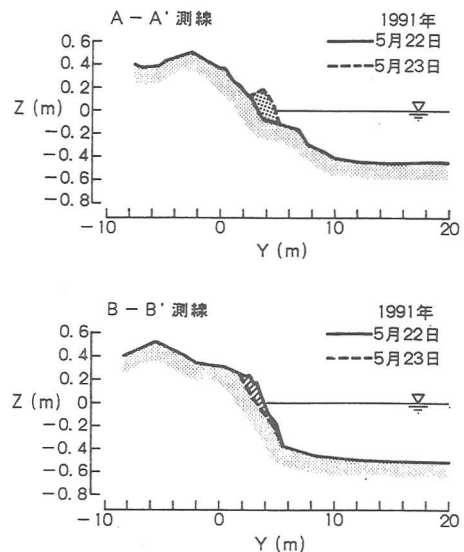


図-7 鳥ヶ崎砂州先端の断面形と変化

汀線の比較によれば、A-A' 測線でbermが形成された緩斜面は、一旦砂礫が堆積した後、再び西側からの入射波による侵食作用を受けて形成されたと考えられる。そこで、この近傍にあるC-C' 測線での砂礫の d_{50} の水深方向変化を調べた(図-8)。Z=0.4mの陸上部には $d_{50}=0.32\text{mm}$ 、均等係数 $U_c=1.94$ と均一な細粒が堆積している。これは飛砂により運ばれた細砂が堆積していることを示す。Z=0.3~0.1mの急斜面には $d_{50}=0.5\sim 2.0\text{mm}$ 、 $U_c=5\sim 11$ と不均一な粗砂が分布し、この範囲では波の作用による砂礫の移動が活発である。Z=-0.1~0.4mの緩斜面には $d_{50}=1.0\sim 3.0\text{mm}$ 、 $U_c=3\sim 13$ の不均一な粗砂が分布しており、この部分が侵食作用を受けていることから、アーミング現象が生じていると推定できる。砂嘴周辺では沿岸方向にアーマーコートが見られる(宇多・酒井、1986)が、侵食緩傾斜面上においてもアーマーコートが形成されることがわかる。Z=-0.5m付近の平坦面には、 $d_{50}=0.2\text{mm}$ 、 $U_c=2$ と再び均一な細砂が分布する。ここでは波の作用が弱く、砂礫の移動が生じていないことを示す。

以上の地形変化は波の入射方向の変動に伴う短期間の変動である。したがって、その機構を調べるには風波の時間的発生状況を検討することが必要とされる。出雲工事事務所では湖心観測所で1989年1月以降、気象・波浪観測を行っており、これらの観測結果をもとに波浪推算式が提案されている(出雲工事事務所、1992)。そこで、この波浪推算式をもとに、以下では1991年3月30日より5月20日までの波浪を推算するとともに、風波に対する地形応答について検討する。宍道湖内での風波の発達に関する波浪推算式は式(1)で与えられる。

$$\frac{gH_{1/3}}{U^3} = 0.3A \left\{ 1 - \frac{1}{[1 + 0.004(gF/U^3)^{1/2}/A]^2} \right\}, \quad A = \tanh \left[0.578 \left(\frac{gh^{3/4}}{U^2} \right) \right] \dots (1)$$

ここに、 g :重力加速度 (m/s^2)、 $H_{1/3}$:有義波高 (m)、 U :風速 (m/s)、 F :吹送距離 (m)、 h :平均水深 (m)である。また、有義波高との相関から有義波周期 $T_{1/3}$ (s) は式(2)で与えられる。

$$T_{1/3} = 2.31 \cdot H_{1/3}^{0.43} \dots (2)$$

ここで、島ヶ崎砂州に強く影響する風向はN~WSWであること(図-1参照)を考慮して、式(1)~(2)により湖心観測所において1991年3月30日より5月20日までに観測された風向、風速のデータを用いて、波浪推算を行った結果を表-1に示す。なお、平均水深は $h=5.0\text{m}$ とした。また、島ヶ崎砂州沖合の防波堤に対する法線方向が $N38^\circ W$ であることから、この法線方向に対し反時計回りから波が入射する場合を正、時計回りからを負として、風向別に波のエネルギーを式(3)で算出した結果を表-2に示す。

$$E = \frac{1}{8} \rho g H_0^3 C_g \dots (3)$$

表-1 湖心観測所における風向・風速と波浪推算結果

月	日	風 向	U (m/s)	F (km)	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)
3	30	W	1.7	9.2	0.058	0.68
	31	NNW	2.1	5.7	0.071	0.74
4	3	NNW	2.4	5.7	0.085	0.80
	4	WNW	2.7	9.4	0.116	0.91
	5	N	2.7	5.3	0.098	0.85
	8	NW	3.6	8.6	0.150	1.02
	13	WNW	2.3	9.4	0.092	0.83
	15	WSW	3.1	1.5	0.074	0.75
	18	N	3.2	5.3	0.122	0.93
	28	NNW	4.3	5.7	0.172	1.08
	29	N	4.9	5.3	0.190	1.13
5	2	W	8.4	9.2	0.329	1.43
	3	NNW	4.7	5.7	0.167	1.12
	4	NNW	3.1	5.7	0.120	0.93
	8	WSW	3.1	5.7	0.157	1.04
	13	N	3.0	5.3	0.112	0.90
	14	N	2.5	5.3	0.088	0.81
	16	WSW	10.1	1.5	0.213	1.19
	17	WSW	9.4	1.5	0.202	1.16
	18	WSW	8.7	1.5	0.191	1.13
	19	WSW	7.5	1.5	0.170	1.08

表-2 風向別の波のエネルギー

風 向	θ	$E \times 10^4$
N	-38.0°	156.7
NNW	-15.5°	182.1
NW	+7.0°	44.7
WNW	+29.5°	37.6
W	+52.0°	300.2
WSW	+74.5°	396.8

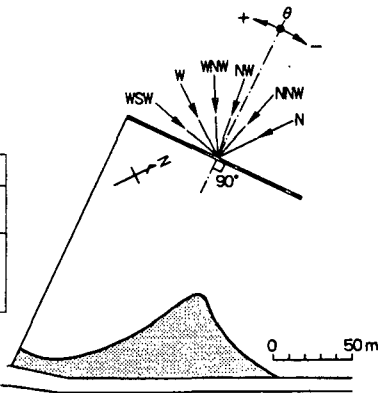


図-8 島ヶ崎砂州先端の断面形と砂礫の分布

3月30日より5月20日までのEの合計によると、西側からの波のエネルギーが明らかに卓越する。したがって、3月29日～5月21日における砂州先端の東側への移動は、西側からの波の作用によると言える。

一方、5月21日～23日の日平均風向はE方向であり、式

(1)～(2)による波浪推算はできないが、砂州先端では北側からの入射波が砕波する状況が観察された(写真-5参照)。すなわち、波高は低いものの、E方向の風によって発達した波も鳥ヶ崎先端を回り込んでこの砂州に作用し、それにより西側へ向いた漂砂による汀線変化(図-6)が生じたと言える。ここで、図-6において5月21日～23日の間に汀線が前進した範囲内での砂礫の堆積量は $V=2.2m^3$ となる。断面測量は5月22日、23日のほぼ同時刻に行っていることから、1日でこの砂礫の堆積が生じたことになり、漂砂量は $Q=2.2m^3/d$ と算定できる。砂州先端での砕波角を $\alpha=10^\circ$ と仮定して、サベージの漂砂量公式で $Q=2.2m^3/d$ を与える砕波波高を逆算すると $Hb=6.7cm$ となる。この値は表-1に示した推算波高に比べると1オーダー小さいが、このオーダーの波も見られることから、風向の変化に伴い短期間に、頻繁に砂州先端の地形変化が生じていると推定される。

これを模式的に示すと図-9となる。この場合、地形変化の陸側限界は、植生分布の境界によって与えられよう。

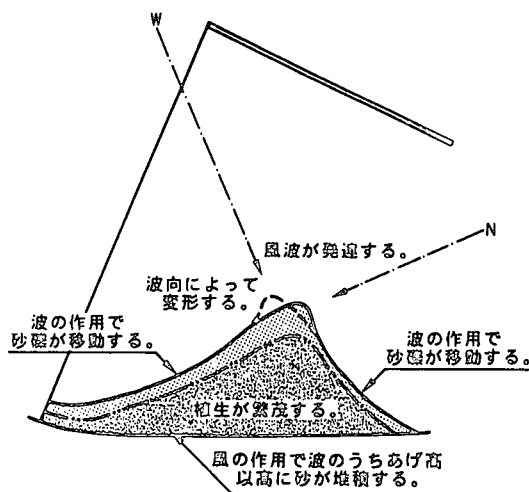


図-9 鳥ヶ崎砂州先端の短期間の地形変化

4. まとめ

六道湖内の鳥ヶ崎砂州周辺において、湖浜変形に関する現地実測を行った。観測結果の要点やその意味するところは次のようにまとめられる。

- ①鳥ヶ崎西側の湖岸は、1962年5月当時ならかな直線状の湖岸線を有し、西側から入射する波に対しポケットビーチのように安定した湖浜であったが、1965年11月にシジミ養殖場の防波堤が建設されると、西側からの入射波が防波堤により回折するようになり、舌状砂州が形成された。この舌状砂州の経時的発達状況が空中写真の比較から明らかになった。
- ②鳥ヶ崎砂州の断面形特性と、粒径の水深方向変化特性から、鳥ヶ崎砂州周辺での侵食域における地形変化の限界水深は約0.5mにあることが分かった。
- ③六道湖内のほぼ中央部に位置する鳥ヶ崎砂州の先端では、風向変動に応じた周期的な地形変化が生じていることが分かった。
- ④ここで得られた知見は、波による地形変化をある程度定量的に捉えたものであるために、今後、六道湖において環境に配慮した養浜などを進める上での設計資料として役立つと考えられる。

謝辞

本研究に際しては、建設省中国地方建設局出雲工事事務所の担当者には資料等について多くの援助を受けた。ここに記して、深甚な謝意を表します。

参 考 文 献

- 宇多高明・酒井佳治(1986): アーマコートによる侵食防止効果, 第41回年講演演概要集, pp.573-574.
- 宇多高明・赤穂俊作・今井武雄(1987): 霞ヶ浦における風波による湖浜変形の実態, 土木学会論文集, 第381号/II-7, pp.161-170.
- 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, 9, pp.295-307.
- 宇多高明・山本幸次・畑中達也(1992): 瀬沼北岸、親沢鼻砂嘴1983年～1990年における変形特性, 海岸工学論文集, 第39巻, pp.386-390.
- 建設省中国地方建設局出雲工事事務所(1992): 平成3年度六道湖湖岸堤構造検討業務報告書.
- 安川 歩・宇多高明・田村徳朗・加木 実・富士川洋一(1988) 琵琶湖における風波による湖浜変形の実態, 第35回海岸工学講演会論文集, pp.472-476.