

琵琶湖における風波による湖浜変形の実態

安川 歩*・宇多高明**・田村徳郎***
加本 実***・富士川洋一****

1. ま え が き

湖に関する問題は多岐にわたるが、水資源や水質の問題が近年の議論の中心となっている。しかし湖の規模がかなり大きいと、湖内で発達する風波によって湖浜変形の問題が生ずることがある。例えば、湖に造られた構造物の影響のために、湖浜が侵食される例は各地で見られる。したがって風浪による湖浜変形の問題についても十分な検討が行われるべきである。ところが湖浜変形を対象とした研究は数少ないのが現状である。筆者らの1人(宇多)は、茨城県の霞ヶ浦において湖浜変形の実態を調べた¹⁾。本論文では琵琶湖を対象に議論を進める。

琵琶湖の湖浜変形に関しては、金成ほか²⁾が南湖に流入する藤の木川の河口デルタの発達過程を調べた。この研究では繰り返し撮影された空中写真をもとに、河川流による河口デルタの発達過程を論じた。しかしデルタの変形に同じく大きく寄与する波浪による地形変化については十分な検討がなされていない。また、芝野³⁾は、同じく地形図をもとに流入河川の河口デルタ形状を調べるとともに、風資料をもとに波浪のエネルギーフラックスを計算し、それより沿岸漂砂特性について論じた。

本研究では、湖内より代表地点を選んで、まず深淺測量を実施し、それより漂砂特性の把握を行おうとするものである。さらに、芝野³⁾と同様に風資料をもとに波浪推算を行い、波浪特性と漂砂特性の関係について論ずる。

2. 調査方法

琵琶湖湖岸の代表箇所において深淺測量を実施し、得られた深淺図をもとに漂砂特性を把握する。深淺測量は17地点で実施した。これらのうち顕著な地形特性の見られる14地点を選び、考察を加えた。代表14地点は北湖より選定し、湖西側より7地点、湖東側より7地点を選んだ(図-1参照)。各地点の地形特性を以下に述べるが、

その記述の順序は和邇川左岸に位置する和邇舟溜より時計回りの方向とする。これらの地点では1回の深淺測量データがあるのみであり、地形の経時的变化を知ることにはできない。しかし海浜や湖浜の地形変化に関しエルゴード性の概念⁴⁾を導入すれば、地形の時間的变化過程は空間的变化過程に置換することが可能である。そのためただ1回の深淺データではあっても、沿岸方向地形変化より地形の時間的变化過程の推論を行うことができる。したがって、等深線の沿岸分布を利用すれば、著しい地形変化が生ずる限界を定める意味での、漂砂の移動限界水深の推定が可能となる。以下ではこの手法を用いて漂砂の移動限界水深を推定する。

3. 湖西地区の漂砂特性

湖西地区からは南より順に、和邇舟溜、近江舞子、大溝地区(萩の浜)、今在家地区、北舟木漁港、生水川樋門・舟溜、新川舟溜の7地点を選んで調査を行った。これらのうち、和邇舟溜～今在家地区は安曇川河口の南

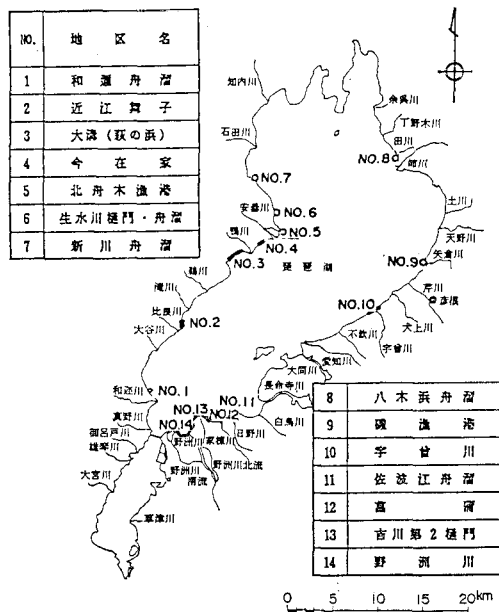


図-1 琵琶湖内の深淺測量の実施箇所

* 正会員 建設省近畿地方建設局琵琶湖工事事務所長
** 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室長
*** 正会員 建設省近畿地方建設局琵琶湖工事事務所
**** 正会員 (株)建設技術研究所

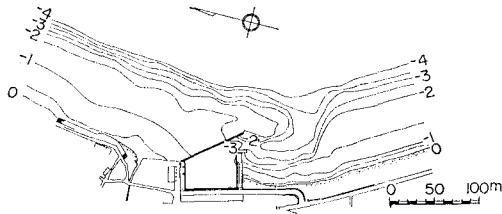


図-2 和邇舟溜周辺の深浅図 (1986年8月)

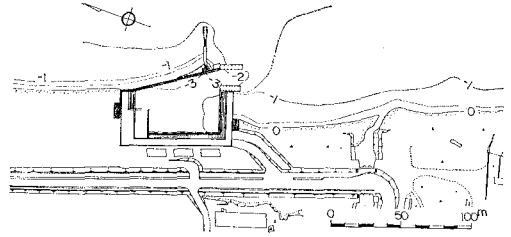


図-4 北舟木漁港周辺の深浅図 (1984年2月)

に、それ以外は北側に位置する(図-1 参照)。安曇川河口は大きく湖面に突き出ているために、湖岸線の方向がこの地点ではば SW~NE 方向より SE~NW 方向へと大きく変化する。以下、顕著な地形特性の見られる代表4地点を選んで漂砂特性を把握する。

(1) 和邇舟溜

和邇舟溜は湖西の和邇川左岸に位置する(図-1)。舟溜周辺の深浅図を図-2に示す。基準面は B.S.L. 0.0 m (T.P. 84.371 m) としている。舟溜は南に港口を有し、その沖には約 3m に至る航路が掘られている。舟溜の北側の湖浜は -1.5 m までは緩勾配であるが、それ以降は急勾配である。同様に南側の湖浜には -2.0 m おいて勾配急変点がある。0~-1.0 m の等深線は舟溜の北側ではやや沖に突き出ており、しかも不透過の防波堤とその方向が鋭角状に交差している。一方、南側の等深線は沖に向け凹状となっており、防波堤近傍では、汀線がやや前進し、それより離れた所で最も後退している箇所が見られる。以上に述べた湖浜地形特性より、この地点の沿岸漂砂の方向は南向きであることがわかる。また、南側の侵食域において、汀線と同様な沿岸方向変化の見られる等深線が -1.5 m であることから、この地点における漂砂の移動限界水深は約 -1.5 m と考えられる。ただし上述の議論が成立するためには、防波堤の長さ

が漂砂の活発な範囲より十分長くと仮定する必要がある。本報告でとくに断わりのない場合は、この条件がほぼ常時満足されていると仮定する。

(2) 今在家地区

今在家地区は大溝地区と鴨川河口を挟んで対照的な位置にあり、安曇川河口のすぐ南側に位置する(図-1)。深浅図を図-3に示す。この

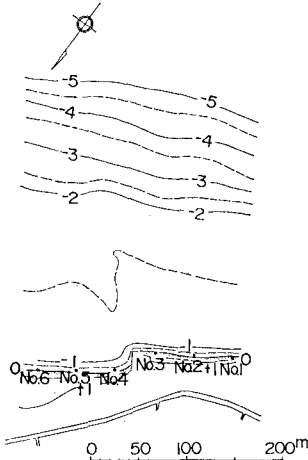


図-3 今在家地区の深浅図 (1986年10月31日)

地区では、-1.0~-2.0 m の間に緩い勾配の斜面があり、その沖は約 1/36 とほぼ一定勾配で深くなっている。また、-1.0 m 以浅では再び勾配が急になる。図の中央部において沖に突き出た建物は織物工場であって、その北東側では汀線が後退している。これは北東方向への沿岸漂砂の卓越する場に護岸が突き出ているため、これらが突堤の機能を有したためと考えられる。さらに、その場合汀線の沿岸方向変化と同様な変化が見られる等深線が約 -1.0 m であることから、漂砂の限界水深は約 -1.0 m であることもわかる。

(3) 北舟木漁港

北舟木漁港は安曇川北流河口の左岸に隣接している(図-1)。漁港周辺の深浅図を図-4に示す。この地区では沿岸漂砂による地形変化が顕著に表われている。すなわち、漁港の北側では汀線が斜め防波堤の取り付け部まで見られるのに対し、南側ではずっと内陸側に位置し、漁港位置で汀線が不連続になっている。この地形形状から当地点では南向きの沿岸漂砂が卓越していることがわかる。漁港の港口部では北側からの土砂の回り込み・堆積が生ずるために、種々の堆積防止策がとられている。防波堤の南側の汀線は沖向きに凹形状を呈している。このような地形形状は図-2に示した和邇舟溜周辺の形状と良く似ている。さらに、湖面下の等深線形状と汀線形とを比較すると、-1.0 m までの等深線の沿岸方向の形状は、汀線形とほぼ平行であり、-1.5 m のコンターとは明確な相違が見られる。このことから当地区における漂砂の移動限界水深は約 -1.0 m であると考えられる。

(4) 生水川樋門・舟溜

生水川樋門・舟溜は北舟木漁港の北約 2.0 km に位置する(図-1)。樋門および舟溜周辺の深浅図を図-5に

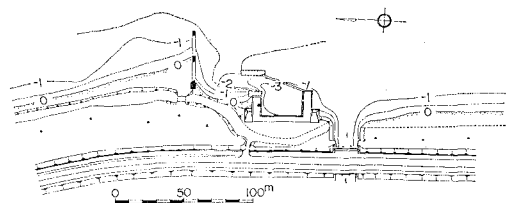


図-5 生水川樋門・舟溜の深浅図 (1984年11月)

示す。舟溜の北側には防砂突堤がある。漂砂がそれにより阻止されたため、防砂突堤の両側の汀線形を比較すると、北側の方が大きく前進している。舟溜・樋門の施設があるために、汀線はこれらの施設の位置で不連続形となっている。全体的な地形特性から判断すると、北舟木漁港と同様この地点においても沿岸漂砂の卓越方向は南向きであることがわかる。また、汀線と -0.5 、 -1.0 m の等深線はほぼ平行なこと、およびそれより沖側には広い平坦面が存在することから、この地点における漂砂の移動限界水深は約 -1.0 m であると言える。

新川舟溜より生水川舟溜・樋門を含んで北舟木漁港に至る区間の地形は、湖岸線がほぼ北西より南東方向に走っており、安曇川河口以南の湖岸線の方と大きく異なっている(図-1 参照)。新川舟溜、生水川舟溜・樋門、および北舟木漁港周辺の沿岸漂砂はいずれの地点においても南下する方向が卓越しており、安曇川河口左岸に関して見れば河口方向へと漂砂が移動していることを意味する。一方、安曇川右岸においても河口方向への漂砂移動が見られる。一般に、河口デルタが形成される場合、それが海または湖面へ突出すると、漂砂は河口より遠ざかる方向へと向く。しかし安曇川河口では湖岸線の方より、これと逆の結果となっている。結局、安曇川の河口デルタは、河川自体の流出土砂が堆積して発達するとともに、沿岸漂砂によっても成長してきたと考えられる。

4. 湖東地区の漂砂特性

湖東地区からは、北より順に八木浜舟溜、磯漁港、宇曾川地区、佐波江舟溜、あやめが浦、吉川第2樋門、野洲川河口の7地点を選んで調査した。湖の形状を調べると、姉川河口より南側は大きなフック形状形状となっており、また湖東地区の長浜～出在家の間に流入する河川の河口の大部分は西に偏寄っている。これは NE 方向を主とする季節風によって発生した風浪によって南西方向の沿岸漂砂が卓越したためと考えられる。以下では代表

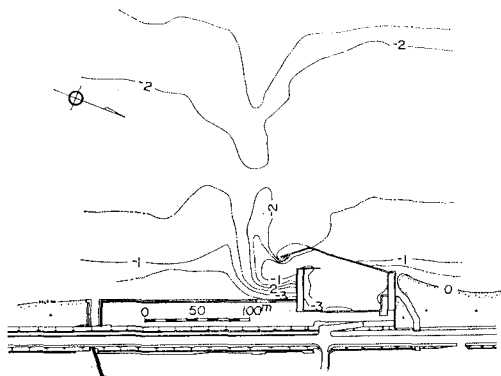


図-6 八木浜舟溜周辺の深浅図(1985年2月)

4地点の漂砂特性を把握する。

(1) 八木浜舟溜

八木浜舟溜は姉川河口の右岸、河口より 1.5 km 地点に位置する(図-1)。舟溜周辺の海底形状を図-6に示す。この地区においては、沖浜は緩い勾配の斜面となっている。舟溜の南側には航路浚渫により細長い溝が形成されている。舟溜の北側には広い前浜が存在する。しかも舟溜の斜め防波堤の付け根部分では -0.5 m と -1.0 m の等深線が鋭角状に防波堤法線と交差している。一方、舟溜の南側隣接部では前浜は存在せず、護岸で囲まれている。舟溜を挟んだ両側での等深線の形状の相違は、この地区での沿岸漂砂の卓越方向が南向きであることを示している。また、防波堤の北側での等深線形のうち、 $0 \sim -1.0$ m の等深線は互いにはほぼ平行であり、しかも防波堤法線とのなす角が鋭角状であること、さらには、 $-1.5 \sim -1.0$ m の間はほぼ平坦面となっていることなどから判断して、沿岸漂砂の移動限界水深は約 -1.0 m であると考えられる。

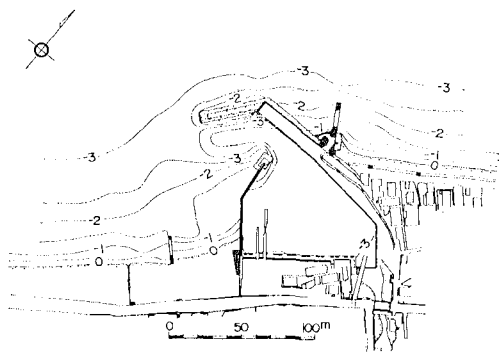
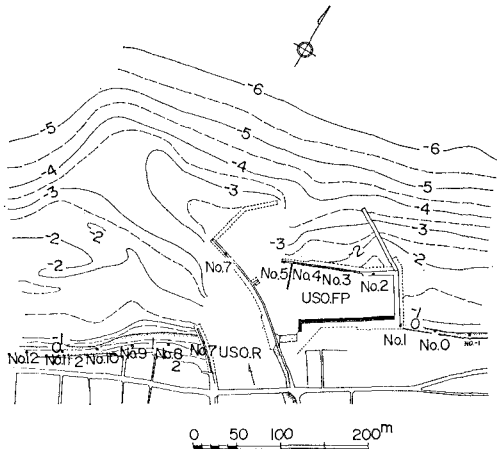


図-7 磯漁港周辺の深浅図(1984年2月)

(2) 磯漁港

磯漁港は彦根市の北約 5.0 km に位置する(図-1)。漁港周辺の海底形状を図-7に示す。漁港の南北の汀線は明らかに漁港位置を境にして不連続となっており、これより沿岸漂砂の卓越方向が南向きであることがわかる。南向き漂砂の港内への回り込みを防止するために、防波堤の付け根部分には防砂突堤が設置されている。漁港の南側では防波堤による波の遮蔽域があるために、汀線は漁港に近接するほど前進している。

次に、等深線の形状より漂砂の移動限界水深を推定する。まず漁港の北側では -3.0 m 以浅の等深線形は汀線とはほぼ平行であって、これらの形状のみから移動限界水深の推定を行うことは難しい。漁港の南側の等深線形に関しては、 -2.5 m 以浅の等深線形は変動は見られるものの、ほぼ汀線形と平行であるのに対し、 -3.0 m の等深線と汀線との関係は漁港に近接するほど間隔が広がっており、 $-3.0 \sim -2.5$ m の間の海底面の幅も広がって



図—8 宇曽川地区の深浅図 (1986 年 10 月 29 日)

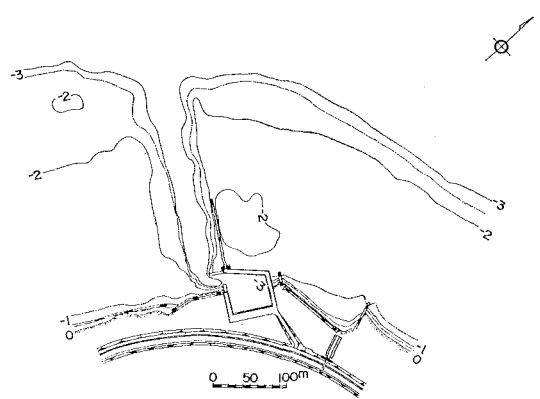
いる。このことから推定の精度は他の地区と比較して低いものの、約 -2.5m が移動限界水深に近いと推定される。推定の精度が低い理由は、 -3.0m と -2.0m の等深線の沿岸分布が良く似ていることから、 -3.0m 付近でも漂砂が生じている可能性が多少は残されているためである。

(3) 宇曽川地区

宇曽川地区は磯漁港の南西約 8.9km に位置する(図—1)。当地区の深浅図に図—8 に示す。この地区には宇曽川が流入している。その河口の等深線は左岸側に大きく偏寄しており、 -5.0m 以深でも等深線が沖方向に突き出ている。これは河川からの流出土砂が湖底に堆積して形成されたものである。また、河口の西側への偏寄は当地区での沿岸漂砂の卓越方向が西向きであることを表わしている。一方、この地区における漂砂の移動限界水深を等深線形状から推定することは特徴的な等深線形状が見られないためかなり難しい。宇曽川の左岸側においてあえて推定を試みる。河口部で、河口デルタ状に突き出た等深線は、 -2.5m 以深がほぼ平行であるのに対し、 $-2.5\sim-1.5\text{m}$ の間はそれらとはまったく異なった特徴を示し、この間に緩い勾配の斜面が形成されている。また、 -1.5m 以浅の等深線は互いにほぼ平行であるが、沖合の河口デルタの等深線形とは異なった形状となっている。 -2.5m の等深線形がそれ以深の等深線と平行である点は、この等深線は波の作用のもとでほとんど変化がないことを表わしていると考えられる。一方、 -1.5m の等深線は汀線と同じ沿岸方向変化が見られるから、この等深線は移動限界水深以浅にあると考えられる。結局、多少推定精度は低い、移動限界水深は両者の中間の -2.0m 付近にあると考えられる。

(4) 佐波江舟溜

佐波江舟溜は日野川河口左岸に隣接している(図—1)。舟溜周辺の湖浜地形を図—9 に示す。当地区では、 -1.5



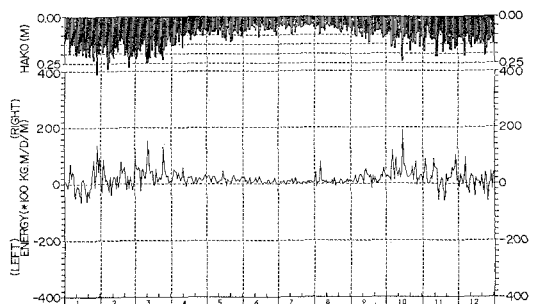
図—9 佐波江舟溜周辺の深浅図 (1986 年 8 月)

m と -2.0m の間に広い平坦面が存在する。 -1.5m 以浅の等深線は互いにほぼ平行である。舟溜の沖合が浅いために、 -3.0m に達する細長い航路が掘られている。当地区では湖岸線の方向が大きく変化しているが、漂砂特性は北側地区ほど明瞭に見られる。一番北側にある突堤周辺の地形形状に注目すると、北側では汀線が前進し、南側ではフック状に著しく汀線が後退している。これより当地区の沿岸漂砂の卓越方向は明らかに西向きであることがわかる。また、突堤上手での -1.5m 以浅の等深線形が互いに平行であり、かつその沖には広い平坦面が存在することより、漂砂の移動限界水深は約 -1.5m と考えられる。

5. 来襲波浪と漂砂の関係

本節では琵琶湖北湖の湖上風を代表すると考えられる気象庁彦根地方気象台の3時間ごとの風向風速資料をもとに波浪推算を行い、各地点の波のエネルギーフラックスを算出して漂砂との関係を調べた。データの収集期間は1973年1月から1985年12月に至る13年間の資料である。

最初に全データをもとに季別および全年の風配図、風力図を求めた。これによると琵琶湖では風向風力ともにNWとSSE方向が卓越する。NWの風は冬期の季節風が主である。またSSE方向は主として夏期の台風時



図—10 沿岸方向沖波エネルギーフラックスの経年変化

に生ずる。琵琶湖の地形特性を考慮すると、湖西側は NW からの風は陸風となるので漂砂に関しては重要でなく、SSE からの風が重要である。逆に湖東側は NE からの風が影響し、SSE からの風は重要ではない。

次に、地形特性を調べた 14 地点において波浪の推算を行った。まず 16 方位別に対岸までの直線距離を計測し、Saville の方法により有効吹送距離を求めた。さらにこの有効フェッチを用いて SMB 法によって沖波有義波高 ($H_{1/3}$) と周期 ($T_{1/3}$) を計算した。次に、これらの値より沖波のエネルギーフラックスを次式で求めた。

$$F = 1/16 \rho g H_{1/3}^2 L_0 / T_{1/3} \times 24 \times 60^2 \times \sin 2(\theta - \theta_0) \quad (1)$$

ここに、 $\rho g = 1$ とし、また F の単位は $\text{kg} \cdot \text{m}/\text{day}/\text{m}$ である。また、 θ は 16 方位別の入射角、 θ_0 は汀線に対する法線が N 軸となす角である。 θ, θ_0 ともに N 方向より時計回りを正とした角度である。データは 13 年間分あり、その測定間隔は 3 時間ごとなので、各日の観測値の平均を算出した。図-10 に宇曾川で得られた結果を一例として示す。湖東のほぼ中央部に位置する宇曾川地点は、 $N \sim NE$ 方向に長いフェッチを有する。このため冬期の季節風により湖岸に沿って左向き（西向き）のエネルギーフラックスが明らかに卓越している。また、図-10 の上段には平均波高（沖波）も示した。冬期には波が高く、そのオーダーは約 0.25 m である。

同様な計算は各地点で行うことができるので、14 地点全部で計算を行い、さらに各地区ごとに全期間の沿岸方向エネルギーフラックスの累積値を求め、結果を表-1 に示した。図-1 には累計値とフラックスの卓越方向を矢印で示した。矢印は湖岸の法線方向を基準として示した。さらに平均波高値も示した。

一般に、湖西地区は湖東地区に比べ静穏であり、4 月～9 月、10 月～3 月で卓越方向が異なる地区が多い。一方、湖東地区は 10 月～3 月にかけて NW を代表とする冬期の季節風により、波浪エネルギーは非常に大きくなる。この結果卓越方向はほぼ一方のみとなる。全体として右から左方向を向いたフラックスが圧倒的である。

表-1 には、深浅測量図より得られた漂砂の移動限界

表-1 波浪と漂砂の関係

No.	地 区 名	波 浪 特 性			漂 砂 特 性	
		16 方位別累計値 $\text{kg} \cdot \text{m}/\text{日}/\text{m}$	卓越方向	平均波高 (m)	移動限界水深 (m)	漂砂の方向
1	和 邇 舟 溜	-201	→	0.09	-1.5	→ 湖西
2	近 江 舞 子	76	←	0.07	-1.5	← //
3	太 湖 (秋の浜)	78	←	0.07	-1.0	← //
4	今 在 家	443	←	0.07	-1.0	← //
5	北 舟 大 漁 港	-322	→	0.10	-1.0	→ //
6	生 水 川 樋 門・舟 溜	-802	→	0.11	-1.0	→ //
7	新 川 舟 溜	-786	→	0.09	-0.5	→ //
8	八 木 浜 舟 溜	5085	←	0.14	-1.0	← 湖東
9	磯 漁 港	6716	←	0.22	-2.5	← //
10	宇 曾 川	3733	←	0.21	-2.0	← //
11	左 波 江 舟 溜	6839	←	0.18	-1.5	← //
12	葛 浦	-6070	→	0.16	-1.5	→ //
13	吉 川 第 2 樋 門	6159	←	0.17	-1.5	← //
14	野 洲 川	6102	←	0.16	-1.5	← //

水深や移動方向も示した。沖波波浪エネルギーフラックスの卓越方向と深浅測量を用いて得られた漂砂の移動方向は一致している。また、漂砂の移動限界水深と平均波高との間にもかなり良い対応が見られることがわかる。

6. 結 論

①琵琶湖の湖岸には舟溜等の多くの施設が造られた。これらの施設周りでは風浪に伴う沿岸漂砂による地形変化が見られる。この地形特性を調べると漂砂の卓越方向や移動限界水深の推定が可能である。

②種々の構造物周りの地形変化は、スケールは異なるものの、現地海岸において沿岸漂砂が阻止されたときに生ずる地形変化特性と良く似ている。

③代表 14 地点において彦根気象台における風資料をもとに沖波エネルギーの沿岸方向成分を算出した。エネルギーフラックスの卓越方向は、いずれの地点とも湖浜地形特性より推定される漂砂の方向と良く一致した。

④深浅図をもとに、顕著な地形変化が見られる限界の意味での漂砂の移動限界水深を求めた。湖西での移動限界水深は -1.0 ～ -1.5 m にあり、湖東では北部を除けば -1.5 ～ -2.5 m にある。

参 考 文 献

- 宇多高明・赤穂俊作・今井武雄：霞ヶ浦における風浪による湖浜変形の形態，土木学会論文集，第 381 号/II-7，pp. 161～170，1987。
- 金成誠一・中山 鮮・山本淳之：琵琶湖における河口 Delta の発達過程について（1），京大防災研究所年報，第 15 号 B，pp. 1～21，1971。
- 芝野照夫：漂砂の動態に基づく砂浜海岸の特性とその変遷に関する研究，京都大学学位論文，284 p.，1985。