

霞ヶ浦柏崎地区での養浜礫の挙動に関する現地観測

FIELD OBSERVATION OF MOVEMENT OF NOURISHED
GRAVELS AT KASHIWAZAKI AREA IN LAKE KASUMIGAURA小菅 晋¹・宇多高明²・斉藤 泉³・林 義之⁴・秋葉隆之⁵・大塚直哉⁵Susumu KOSUGE, Takaaki UDA, Izumi SAITO, Yoshiyuki HAYASHI,
Takayuki AKIBA and Naoya OHTSUKA¹正会員 工博 東海大学海洋学部教授(〒424-0902 清水市折戸3-20-1)²正会員 工博 建設省土木研究所河川部長(〒305-0804 茨城県つくば市旭1)³建設省関東地方建設局霞ヶ浦工事事務所調査課長(〒311-2424 茨城県行方郡潮来町潮来3510)⁴建設省関東地方建設局霞ヶ浦工事事務所調査係長(同上)⁵東海大学海洋学部海洋土木工学科(〒424-0902 清水市折戸3-20-1)

Field observation of movement of nourished gravels was carried out at Kashiwazaki area in Lake Kasumigaura. Beach changes after the nourishment using gravels of median diameter 5.3mm were measured by beach surveys. Aerial photographs were taken by using a model airplane, and shoreline changes were compared. Longshore sediment transport rate was estimated to be around $2.4\text{m}^3/\text{d}$ ($868\text{ m}^3/\text{yr}$) from July 25, 1997 to October 28 from the comparison of beach profiles. Nourished gravels mainly moved in the longshore direction while forming berms.

Key words: Beach nourishment, gravels, Lake Kasumigaura, longshore sediment transport, aerial photographs

1. まえがき

1997年12月, 新河川法が施行された。新河川法では, 従来のように治水・利水のみではなく, 河川の環境改善をも大きな目標の一つに掲げており, これにより河川事業は従来よりも新しい方向へと進むことになった。広大な風域を持つ霞ヶ浦でも, 従来は治水・利水目的を達成するために湖岸堤の建設が急速に進められたが, その結果水際線付近の良好な環境の喪失を招いたことは否めない。そこで, こうした状況を改善するために, 従来のコンクリート製の湖岸堤に覆土を行い, そこに植生の繁茂を許するとともに, 水際線付近に湖浜を創出するという新しい環境改善手法が積極的に導入され, 湖岸各地で試験施工が行われるようになった。その一つとして, 霞ヶ浦の土浦入りでは覆土を行うとともに, 風波に対する消波施設として, 離岸堤を設置して養浜土砂の流出防止を図る手法が用いられた¹⁾。これにより湖岸環境の改善がかなり進み, 波浪に対する消波効果も発揮されたが, 水中に捨石製の構造物が並ぶことによる景観の悪化や, 岸近くの水域の閉鎖性などが問題となった。そこで, 波浪に対する覆土の保護工として, のり先部を粒径の大きな礫により保護する手法についても検討が進められている。この場合, 礫は風波の作用によって移動する可能性があるから, その挙動について十分な理解が必要である。このこと

から, 霞ヶ浦の高浜入りにおいて礫養浜の現地実験を行い, 興味ある結果を得たのでここに報告する。

2. 霞ヶ浦高浜入りの柏崎地区の地形と波浪特性

霞ヶ浦(西浦)は, 面積 171km^2 , 最大水深 7m , 平均水深 4m の湖である。本研究の調査区域は, 図-1に示すように高浜入りに位置する柏崎地区である。この地区は, 高浜入りの南西岸に位置するために, 風波の発達から見れば北側からの波浪の作用を受け易いが, 湖のくび



図-1 霞ヶ浦の柏崎地区の位置

れた部分を通じてSE方向にも吹送距離が伸びている。NおよびSE方向の吹送距離はそれぞれ3.8kmである。湖岸線形状が複雑なため、これら以外の方向の吹送距離は短い。湖内波浪については、霞ヶ浦の湖心データをもとに推算式²⁾が提案されているが、それらの式により上述の吹送距離をもとに計算すると、風速5m/sでは有義波高が約0.38m(周期3.46s)、10m/sでは約0.84m(周期4.66s)となる。

図-2は、霞ヶ浦の湖心観測所において1982～1985年に測定された季節別の風配図である²⁾。図-1の位置図から吹送距離を考慮するとともに、明らかに陸風となる風向を除いた上で図-2を参照すれば、柏崎地区では秋季・冬季にはNまたはNE方向が、そして夏季にはSSE方向の頻度が高いことが分かる。これらの風向と先に述べた吹送距離から、柏崎地区ではN方向とほぼSE方向からの入射波が卓越すると推定される。

3. 柏崎地先における礫養浜

1996年、柏崎地区では湖岸堤防の環境改善と同時に、耐震補強の一環として、延長540mの区間において既設のコンクリート製の湖岸堤上に覆土が行われた。また、汀線近傍では波の作用から覆土を守るために、中央粒径5.3mmの礫を用いた養浜が行われた。養浜時の汀線は護岸線と平行に造られたが、その後主として北からの風波の作用により養浜礫が東方向に大きく移動した。図-3には養浜区間の平面図と測線配置を示す。

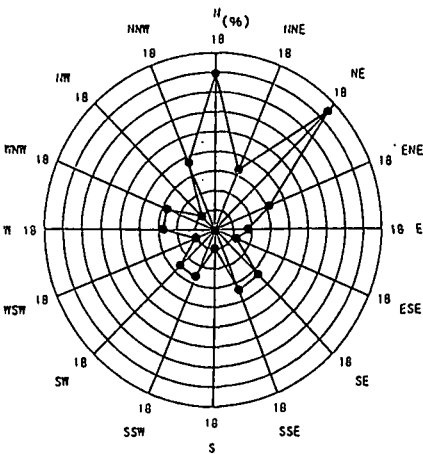


図-2 霞ヶ浦湖心観測所での風配図

養浜後、礫の移動状況を調べるために、図-3のように沿岸方向に20m間隔の測線を設けて湖浜縦断形の変化を調べた。養浜区間は延長540mであるが、そのうち図-3に示す延長400m区間で詳細地形変化調査を行った。したがって図-3の西端は沿岸漂砂が自由に出入り可能な条件にある。また、調査区間の西端近傍の測線No.6には船溜まりのための樋門がある。一方、測線No.19から南側では湖岸線が大きく南側へと屈曲している。

4. 写真による現地状況の把握

1997年9月11日、養浜区域の現地踏査を行った。詳細分析を行う前に、現地状況の理解を促進するために現地踏査結果について述べる。まず、写真-1には測線No.6付近に位置する樋門と、その前面に設置されている突堤周辺の状況を示す。写真中央より左側に長く伸びる植生帯は、堤防への覆土の上に生えた植生である。また、この植生の基部に沿って白いシートが見えるが、これはこの付近から湖側に高く盛ってあった養浜礫の下部に敷いた吸い出し防止用シートが現れたものである。また、汀線付近には粒径の著しく大きな礫が見えるが、これらは養浜礫の下層に設置した捨石層が上層部の侵食によって露出したものである。写真-1に示した突堤上からは興味深い写真が撮影できる。写真-2,3が撮影結果である。写真-2は、樋門出口にある突堤(写真-1参照)のうち、西側突堤上から西側を向き、焦点を水平線と汀線が重なる位置において撮影したものである。同様に、写真-3は、写真-1に見える突堤上で写真-2を撮影した地点と同じ離岸距離上に立って、写真-2と逆方向を望んで撮影したものである。これらは、写真の撮影方向と高さを同一にしているので、突堤を挟んだ両側の汀線形状の非対称性を明瞭に識別できる。西側を撮影した写真-2では礫浜が広がっており、しかも写真の手前ほど前浜が広いことから、写真撮影位置にある突堤が東向きに沿岸漂砂を阻止していることが分かる。一方、東側を望んだ写真-3では、汀線付近が削り取られ、礫の下部に投入されていた捨石層が露出するとともに、侵食域と考えられる区域では植生帯との境界にシートが現れている。写真-2では堆積、写真-3では侵食と、不透過性の突堤を挟んだ汀線形状の著しい非対称性は、この位置で東向きに沿岸漂

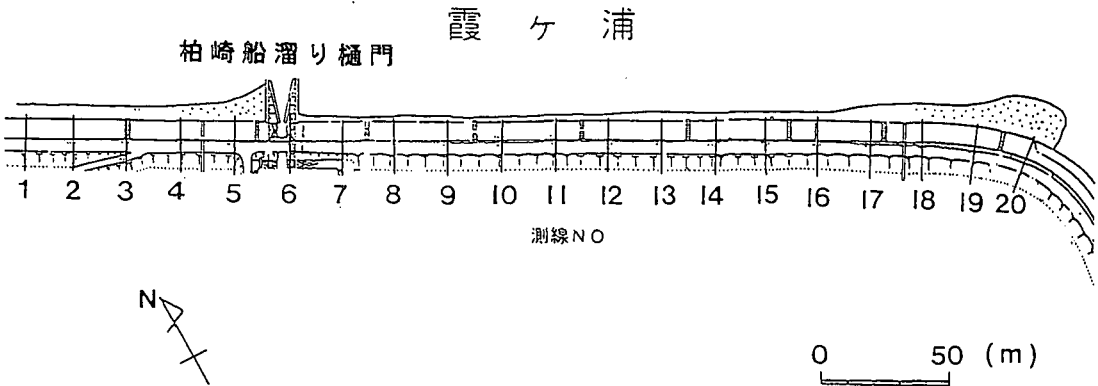


図-3 柏崎地区における測線配置

砂が卓越していることをよく表している。突堤から東側にさらに離れた場所では、写真-4に示すように汀線付近の縦断形がやや凹状となり、ここでも礫の下部に入れた碎石が汀線付近で露出している。このことは、この付近でも突堤による東向き沿岸漂砂の阻止の影響が及んでいることを表している。しかし、礫浜は背後の植生域を持つ覆土帯を守るのに効果を発揮している。

写真-5には測線No. 19付近の湖浜状況を示す。礫が堆積してきれいな砂浜が広がり、礫浜の一部には植生も侵入している。汀線は写真撮影位置へ近づくにしたがい前進しているが、これはこのすぐ東側に形成された砂嘴が突堤と同様、沿岸漂砂の阻止効果を有するためである。図-3に示したように、既設護岸の法線は南部で大きく湾曲していたが、この湾曲部では写真-6に示すように礫がコンクリート護岸の上まで堆積し、その先端部の汀線形状はほぼ半円形に近似される。以上の現地写真によれば、柏崎地区ではNo. 6にある突堤周辺と、調査区域東端のNo. 19付近で著しい地形変化が

見られる。

5. 空中写真による湖浜形状の変化

柏崎地区では、1996年10月から1997年8月までの間に、延べ5回自動操縦装置付きの模型飛行機によって空中写真撮影が行われた。以下では、これらの空中写真の比較を行う。写真-7は、樋門周辺の湖浜状況の変化を示す。1996年10月では、樋門出口には突堤は設置されておらず、湖岸線は直線的に伸びていた。その後、北風の作用で東向きの土砂移動が起こり、樋門出口を礫が塞いだために、1996年11月までに樋門出口に突堤が設置された。突堤の建設後、1996年12月、1997年2月、4月まで突堤の西側では三角形に汀線が前進し続け、汀線の前進区域が次第に西側へと広がりを示した。しかし、突堤の西側で大きく前進していた汀線も、1997年8月には全体に後退している。これらに対して、突堤の東側での汀線の後退はそれほど目立っていない。これは、礫層の下部に設置した捨石層を構成す



写真-1 樋門から東側端部の湖浜状況



写真-4 湖浜の中央部の礫浜



写真-2 樋門から西側を望んだ状況



写真-5 東側端部付近の湖浜状況



写真-3 樋門から東側を望んだ状況



写真-6 東側端部に形成された砂州

る、粒径の著しく大きな礫は波浪の作用で移動することがほとんどないために、汀線変化が小さく現れたことよる。調査区間の東端部の汀線変化を写真-8に示す。この付近では湖岸線の沿岸方向の曲率が大きく変化し、湖岸堤が南側に凹んでいる。このように曲がり込んだ湖岸線では、北側からの波浪が遮蔽されて波高が低下し、これにともなって沿岸漂砂量が場所的に急激に減少する。このため、そこに礫が堆積し砂嘴が形成された。この砂嘴は、1997年2月までに著しく発達し、その先端部の汀線はほぼ半円形で近似される。しかし半円形に大きく堆積して形成された砂嘴の土砂量も、1997年7月23日までには減少している。この時期は、写真-1において突堤の西側の汀線が後退した時期と一致している。両者を考え合わせれば、柏崎地区にお

いては全体としては東向きの沿岸漂砂が発達しているが、夏季には一時的に西方向の沿岸漂砂が発達し、東側に運ばれた砂礫が一部逆流することを意味している。柏崎地区は、図-1に示したように霞ヶ浦の高浜入りに位置するため、北側からの風波の作用が著しいが、南東からの風も作用することができるため、上述のようにサイクリックモードを有する湖浜地形変化が起きたと考えられる。これは、霞ヶ浦の浮島地区で観察された現象と全く同一である²⁾。

6. 汀線と湖浜縦断形の変化

図-4には、1996年7月の施工時の計画図を基準として、1997年5月までの汀線変化を示す。これによれば、

樋門の西側と東側の区域で非常によく似た汀線変化が生じている。すなわち、樋門の西側隣接部では汀線が前進し、そこから西側へ離れると後退傾向に変わる。

また、樋門の東側隣接部では汀線が後退し、No. 20付近では大きく汀線が前進している。これらは、この期間東向きの沿岸漂砂が卓越したことを意味している。次に、特徴的な汀線変化が見られる測線を選んで湖浜縦断形の変化を調べてみる。樋門の西側では、汀線の後退域から測線No. 2を、前進域からはNo. 5を選ぶことができる。No. 5は、樋門の出口にある突堤の脇を通る測線であるために、最も大きな汀線変化が現れている。汀線後退域のNo. 2の湖浜縦断形の変化を図-5に示す。

図中の破線は計画断面であり、実線が1997年5月の測定断面である。これは、0.2m以深で土砂が緩勾配で堆積しているように見えるが、実際はこの緩勾配部分は土砂を余盛したものである。したがって注目すべきは0.2m以浅での地形変化である。この測線では、Y.P. 0.2m～1.7mの範囲で侵食が起きている。平均汀線付近で最大の変位が生じており、そこより沖側・岸側に地形変化量は小さくなる。また、この測線での波による地形変化の限界水深はほぼ1mにある。

図-6には、測線No. 5の湖浜縦断形の変化を示す。図-5に示したNo. 2の変形が、一様勾配斜面が侵食されて凹状となったのに対して、No. 5では全く逆に鉛直上方

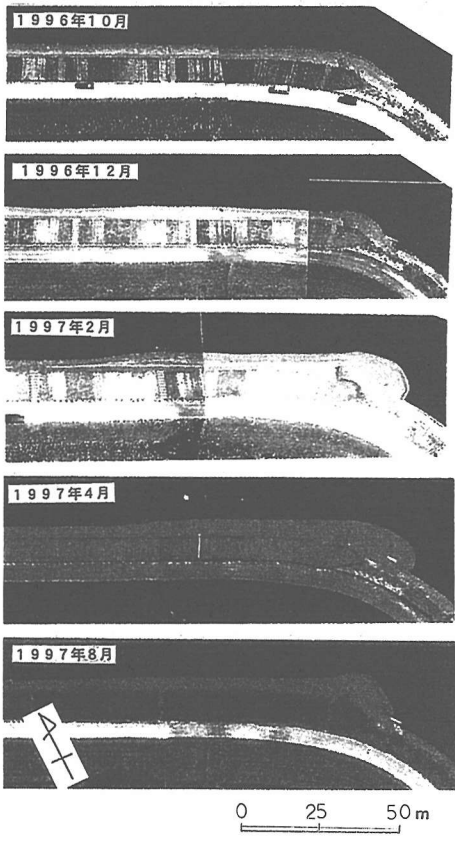
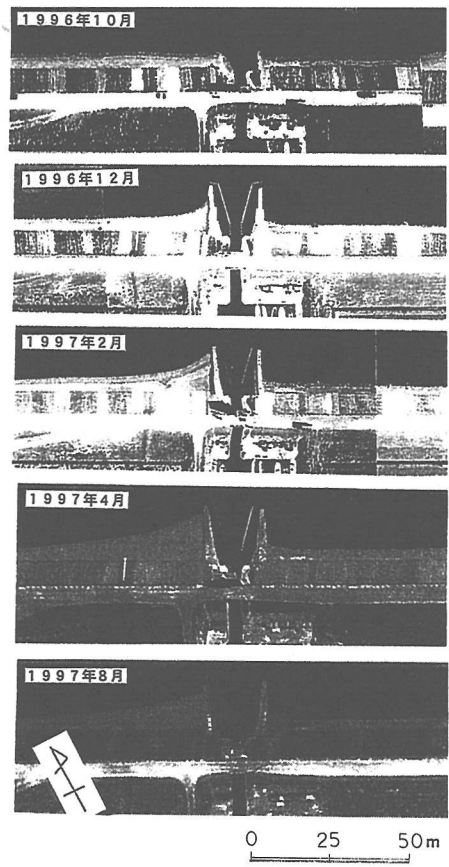


写真-7 柏崎地区の樋門周辺の空中写真比較

写真-8 柏崎の東部、砂州地形区域の空中写真の比較

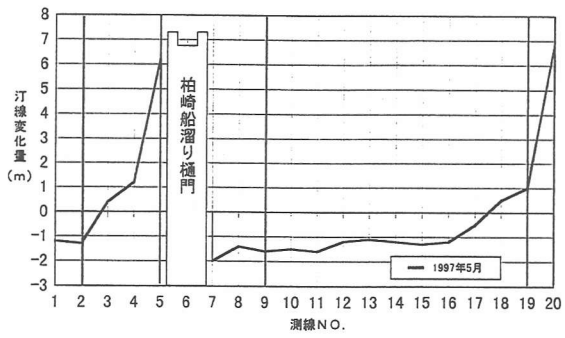


図-4 柏崎地区における養浜後の汀線変化

に凸な形状になりつつ大量の土砂が堆積している。湖浜勾配は先端部ほど急になり、先端部の最急勾配は約35°となる。また、前浜上での地形変化は、ほぼ1.9m付近まで生じており、標高1.7mと1.5mに2段のバームが形成されている。前浜上にバームが形成され、湖底に近づくにしたがい急勾配の斜面が形成される点は、樋門の突堤から十分離れた場所から樋門方向へと運ばれてきた礫が、樋門の出口に設置されている突堤によって阻止され、そのために突堤に沿って急勾配をなして砂が堆積したことを表していると考えられる。なお、この場合、礫の安息角に近い角度をなして土砂が深い部分へと落ち込むために、侵食域における波による地形変化の限界水深より深い部分まで著しい地形変化が生じている。

図-7には樋門の南60mに位置する測線No. 9の湖浜縦断面の変化を示す。この測線においても図-5の場合と同様、ほぼY.P. 0.3mより深い部分の縦断面の実測値と計画断面の間にはかなり大きな違いがある。これは施工時に土砂の余盛をしたことによるが、もしも冲向きに

砂移動が生じた影響も含まれていたとすれば、沿岸漂砂に関する土砂収支検討が困難になる。そこで底質調査によりこの点を確認めた。図-7に示すように点A、Bで底質採取を行い、粒度試験を行った結果を図-8に示す。これによれば、Aでは中央粒径が5.2mmであるのに対し、Bでは0.12mmと細粒の底質である。したがって、沖合での縦断面の不一致は余盛りによるものであり、砂礫は沿岸方向に移動したと言える。

この測線は、樋門出口にある突堤の東側に位置し、西側からの沿岸漂砂の供給が断たれている。このため東向きの沿岸漂砂の均衡が崩れて侵食が起きた。侵食は、0.5m～1.9m間で著しい。侵食によって断面が凹状となる状況は、樋門西側の測線No. 2の場合と非常に似ている。

図-9には測線No. 19における湖浜縦断面の変化を示す。この断面でも、ほぼ0.3m以深にある緩勾配の斜面は、養浜時に形成されたものと考えられる。ここで湖浜勾配が変化しているが、それより上方の1.9m付近までで顕著な地形変化が生じている。この間、1.9m付近

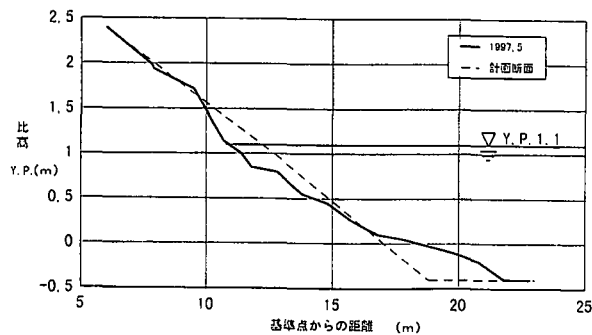


図-5 湖浜縦断面の変化（測線No. 2）

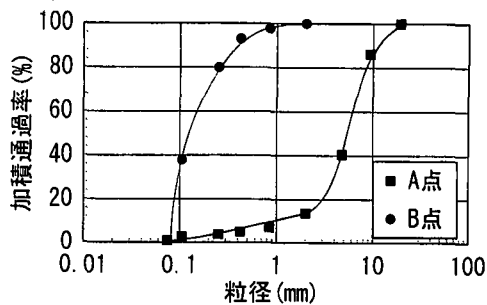


図-8 測点A、Bでの底質粒径加積曲線

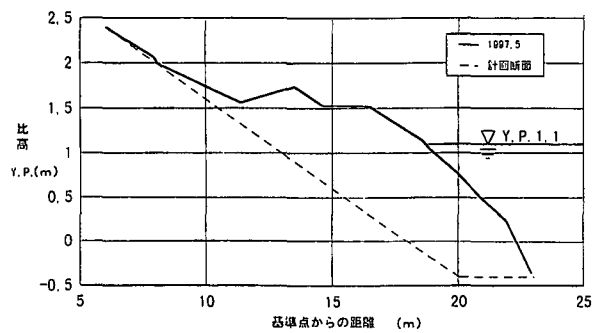


図-6 湖浜縦断面の変化（測線No. 5）

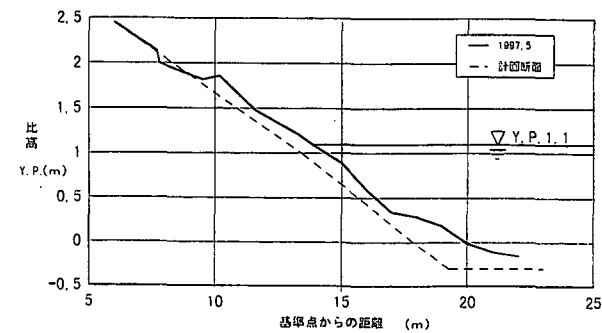


図-9 湖浜縦断面の変化（測線No. 19）

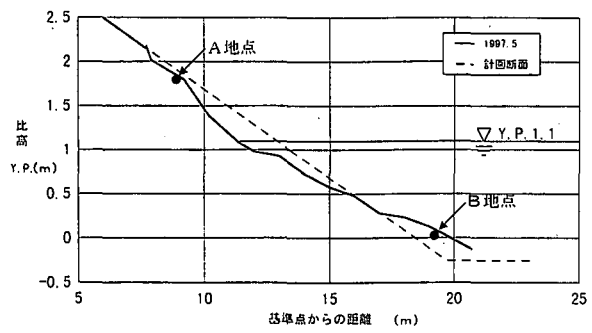


図-7 湖浜縦断面の変化と底質採取点（測線No. 9）

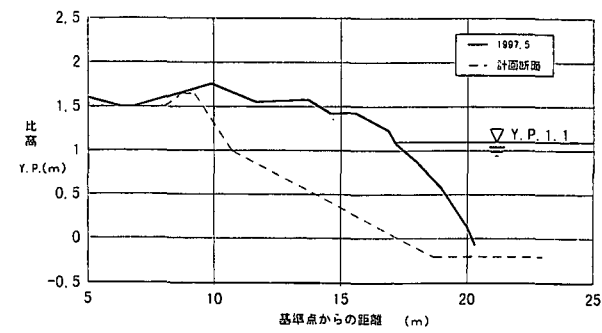


図-10 湖浜縦断面の変化（測線No. 20）

に小高いバームが形成され、それより沖側ではほぼ一定厚で土砂が堆積しているように見える。No. 19は、図-3に示した汀線変化図によれば、汀線がわずかに前進した場所であるが、平面図によれば湖岸線の沿岸方向の曲率がこの位置から大きくなる。したがって図-3の汀線変化図ではNo. 19からNo. 20へと汀線が急激に前進したように見えるが、実際には湖岸線自体が南側に後退している効果が現れている。

測線No. 20における湖浜縦断形の変化を図-10に示す。この断面ではY. P. 1. 7m, 1. 5m, 1. 4mにバームが形成されている。樋門の西側に接した測線No. 5と非常によく似た縦断形変化が現れている。いずれの断面でも鉛直上方に凸な変形が起き、縦断形は沖合では急勾配となり、その最急勾配は約 30° である。また上位2組のバームの高さもよい対応を示す。No. 5は、樋門の出口にある突堤の西側に接する測線であったから、南向きの沿岸漂砂が阻止された結果土砂が堆積して上に凸な縦断形が形成されたと考えられるのに対し、No. 20は、図-3によれば東側に沿岸漂砂を阻止するような施設はなにもない。それにもかかわらず、No. 5とNo. 20とが土砂の堆積において非常によく似た縦断形変化が起きた点は、No. 20のすぐ南側にあたかも沿岸漂砂を阻止する施設があるのと同様な条件下にあることを意味する。その原因としては、図-3に示したように、No. 20において湖岸線の方が大きく湾曲し、これによって湾曲部の裏側が北側からの風波に対して遮蔽されて沿岸漂砂量が激減し、そこに砂嘴が形成されたためと考えられる。

7. エネルギーフラックスと湖浜地形変化

Y. P. 2. 0mから0. 5mまでの範囲の断面変化から湖浜断面積変化量を求め、沿岸分布を算出したのが図-11である。閉じた漂砂系である樋門の東側区域で侵食・堆積土砂量を算出すると、侵食土砂量は約 209m^3 、堆積土砂量は約 244m^3 となる。観測期間中の平均漂砂量は、侵食・堆積量の平均値を経過日数で割れることにより約 $2. 4\text{m}^3/\text{d}$ となる。これは約 $868\text{m}^3/\text{yr}$ に相当する沿岸漂砂量である。

一方、この期間において、霞ヶ浦の湖心観測所の気象データをもとに霞ヶ浦の波浪推算式²⁾を用いて波浪を推算し、さらに湖岸線の方を考慮して沿岸方向のエネルギーフラックスを求めた。各月の波浪エネルギーフラックスの変化を図-12に示す。1997年7月25日から10月28日までの東向きのエネルギーフラックスの

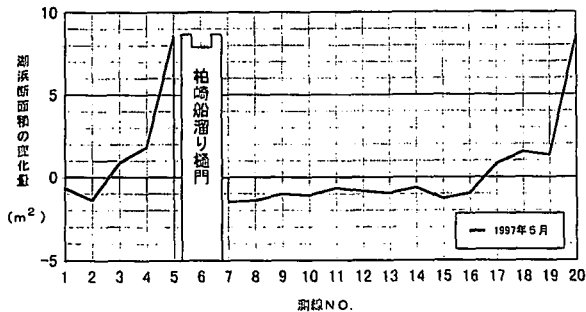


図-11 湖浜断面積変化量の沿岸方向変化

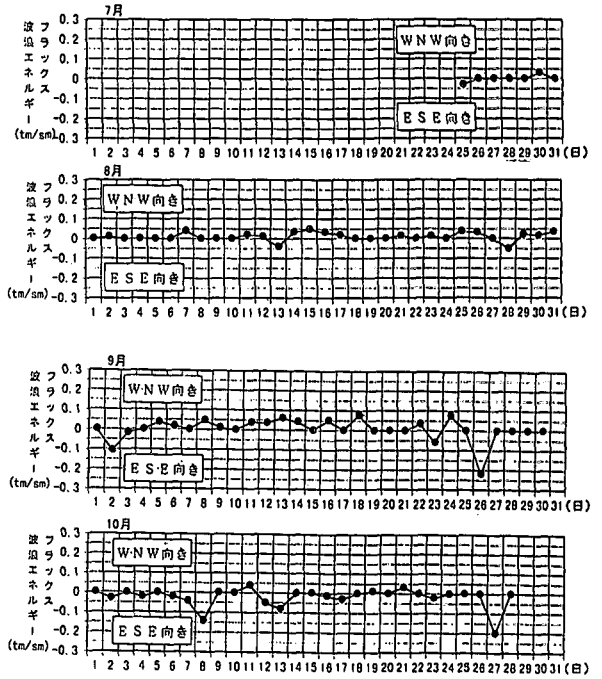


図-12 沖波のエネルギーフラックスの経時変化

総計は約 $1. 19\text{tm}/\text{s}$ ($11. 67\text{kW}/\text{m}$)、また西向きは約 $1. 01\text{tm}/\text{s}$ ($9. 90\text{kW}/\text{m}$)となった。すなわち東向き成分が卓越し、 $0. 18\text{tm}/\text{s}$ ($1. 77\text{kW}/\text{m}$)となる。これより全体としては東向きの成分が卓越しているが、夏季には一時的に西向き成分が卓越することが明らかである。

8. まとめ

(1) 霞ヶ浦の高浜入りに位置する柏崎地区では、養浜礫は主として北風による風波によって東向きに移動したが、夏季にはSE方向からの入射波によって一部西向きにも移動した。全体に、サイクリックモードの汀線変化が生じているが、平均的には東向きの沿岸漂砂が卓越することが明らかになった。このような観察結果は、同じ霞ヶ浦の浮島地区での観察結果と同一である。

(2) 中央粒径 $5. 3\text{mm}$ の礫を用いた養浜では、礫は波浪の作用で沿岸方向に運ばれた。そして湖岸線の曲率が大きく変化する場所では礫が堆積して砂嘴が形成された。この砂嘴は自ら突堤のような沿岸漂砂の阻止効果を有していることが分かった。

(3) 柏崎地区における1997年7月25日から10月28日までの観測によれば、この間の沿岸漂砂量は約 $868\text{m}^3/\text{yr}$ に相当することが分かった。

参考文献

- 1) 宇多高明・小菅 晋・岡村和男・本田哲也・木内秀規：湖岸堤への覆土による湖岸の環境改善と覆土の安定性，海岸工学論文集，第43巻，pp. 831-835，1996。
- 2) 宇多高明：「日本の海岸侵食」，山海堂，p. 442，1997。