

風浪の作用下での湖岸への植生の繁茂条件について

宇多高明*・小菅 晋**・岡本正一***・伊藤正光****

1. ま え が き

淡水湖では、湖岸付近に植生が繁茂することが可能である。そして植生の繁茂は、湖岸の環境・景観形成や、多様な生物種の生育に役立つと考えられる。近年、湖の環境保護の声がとみに高まっており、これらの植生を含む湖岸域の環境向上を図る試みが各地で行われている。このような植生の繁茂を考えたとき、広い水域を持つ湖では、湖内での風波が植生の繁茂と密接に関係すると考えられる。なぜなら、強い風波の作用は、植生の根が張るべき土壌の喪失を招くからである。このように、湖では、風波が植生の生育に対する一つの制約条件になると考えられる。一方、多くの湖では洪水防御のために湖岸付近の湿地より沖側に湖岸堤が造られたために、護岸前面が深すぎて植生の生育空間が存在しないという場合も多くある。このような場合には、護岸の前面で覆土を行えば、その内側に植生の繁茂を促すことができ、事実、宇多ら（1996）は、霞ヶ浦の土浦入りでのこのような試みについて報告した。その場合、波によって土砂が流出しないよう、適切な規模を有する流出防止施設が必要となる。しかしながら、植生の繁茂との関係において、これらの点について検討した例はない。そこで、ここでは霞ヶ浦を例として、湖岸への植生回復条件について現地観測によって調べるものである。

2. 霞ヶ浦（西浦）の地形と気象

霞ヶ浦（西浦）は、図-1 に示すように、面積 220 km²、平均水深 4 m、最大水深 7 m の、わが国第二の規模を持つ湖である。この湖の中央部に位置する湖心観測所では気象観測が行われてきている。一例として、図-2 には 1993 年の測定データをもとに描いた風配図を示す。年間を通じ NE 方向が卓越風向である。これら 2 方向と比較すると頻度は低いものの、SE～SSE、SSW～SW、さらには W～WNW 方向にも低いピークがある。霞ヶ浦は、図-1 に示したように、複雑な湖岸線形状を有するために、こ

れら各方向からの風によって湖岸各地には特徴ある風波が作用する。

3. 湖岸の各地点における波浪推算と植生帯幅の測定

湖岸植生の繁茂状況と、作用波浪の間には密接な関係が成立すると推定されるために、まず湖心観測所の気象観測データから湖岸に作用している平均的な波浪条件の推算を行った。この場合、平均的な気象条件を示した 1993 年 1 月～12 月のデータを利用し、ある観測日の代表風速として日最大風速を選び、湖岸の 73 地点において読みとった吹送距離より、波浪推算を行った。図-1 には、推算地点 73 点を示す。測点は、最下流の右岸側に No. 1 を設け、時計回りの方向に番号を付けている。土浦は No. 30 と No. 31 の間に位置し、出島地区は No. 31 から No.

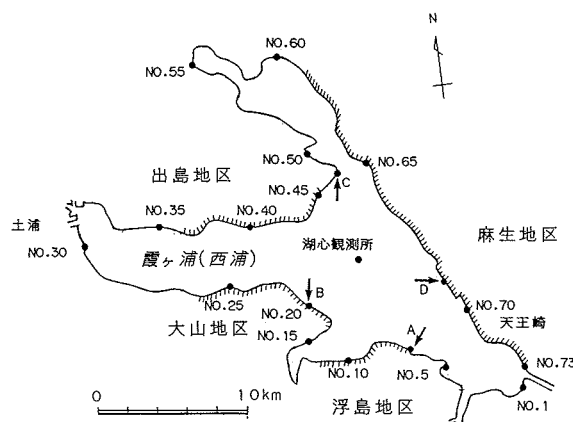


図-1 霞ヶ浦における波浪推算地点

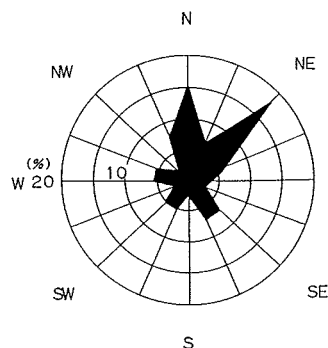


図-2 湖心観測所の風配図（1993）

* 正会員 工博 建設省土木研究所河川部長

** 正会員 工博 東海大学海洋学部教授

*** 大都工業(株)

**** (株)サンユテクノス

55 が、また霞ヶ浦東岸は No. 51～No. 73 が相当する。霞ヶ浦（西浦）の湖岸線延長は 122 km であるから、平均の観測地点間距離は、約 1.7 km である。

これら各地点ごとに、陸風となる場合を除いて、宇多ら（1987）の求めた式（1）、（2）から $H_{1/3}$ と $T_{1/3}$ を推算した。

$$gH_{1/3}U^2 = 2.47 \times 10^{-3} (gF_e/U^2)^{0.427} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$gT_{1/3}/2\pi U = 6.98 \times 10^{-2} (gF_e/U^2)^{0.285} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $H_{1/3}$ ：有義波高（m）、 $T_{1/3}$ ：有義波周期（s）、 F_e ：有効吹送距離（m）、 U ：風速（m/s）、 g ：重力加速度である。なお、ここでは計算を簡略化するために、 F_e については近似的に各方向別の吹送距離をそのまま用いた。式（1）により、波高が推算されるが、植生の繁茂に関係するのは、作用波浪のうちでもエネルギーレベルの高い波浪と考えられることから、有義波高と同様な意味において、平均化の工夫を行った。まず、方向別に $H_{1/3}$ の大きい順に並べ、上位 1/3 の平均値を求めた。 $T_{1/3}$ も同様な扱いとした。湖岸のある地点の波高は、方向別に変化することから、各地点各方向別に以上の計算を行ったのち、各方向別の出現回数を重みとして、日最大風速から平均有義波高・周期を計算した。

植生帯幅の読みとりは空中写真と現地踏査をもとに行った。この場合、湖岸の孤立した植生を除外するために、沿岸方向に 200 m 以上の長さを有する植生を植生帯と定義した。また、植生帯は岸沖方向の広がりを持つことから、その最大幅を合わせて読みとった。植生帯の判読においては、人工構造物により植生帯幅が広げられ

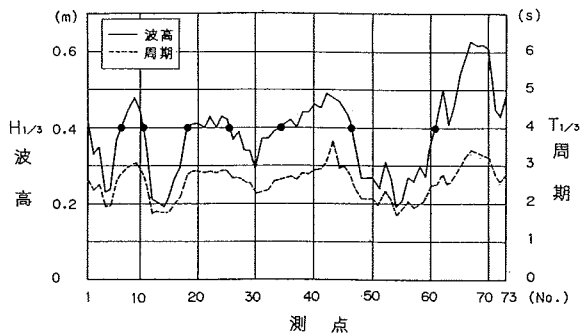
ている場合には、人為的影響があるため除外した。除外した場所は、清明川河口部（No. 26 付近）の植生浄化施設、水生植物園（霞ヶ浦総合公園、No. 28 付近）、浮島西の洲の砂利採取場（No. 9 付近）である。

図一3には推算波高の沿岸分布を示す。波高はほぼ 0.2～0.6 m の値を有している。また、周期はほぼ 2～3.5 s の間の値を持つ。波高は沿岸方向に大きく変動するが、仮に 0.4 m を境として、それより高い波高となる区域を示すと、図一1のハッチで示す通りであるが、入江状の区域では波高が低く、中央部では波高が高い。

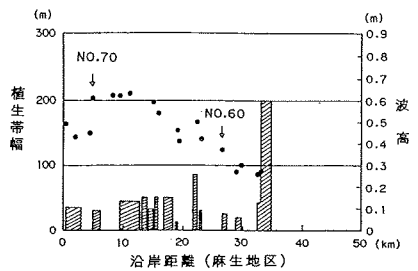
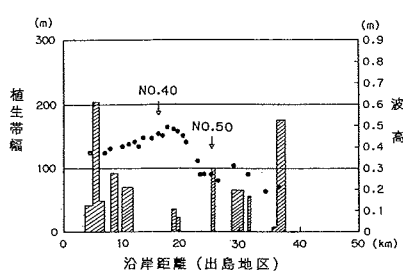
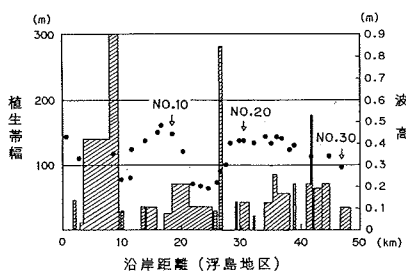
図一4～6には、No. 1～No. 30、No. 31～No. 55、No. 56～No. 73 の範囲に分けて、植生帯幅と推算波高の沿岸分布を示す。図一4では、波高が 35～40 cm を境として波高が高い場所では植生の繁茂が悪く、波高が低い場所では植生の繁茂が盛んな傾向が見られる。図一5に示す No. 31～No. 55 の範囲でも、ほぼ同様な傾向が見られる。図一6に示す No. 56～No. 73 では、図一4、5ほど相関は高くはないが、No. 57 付近のように植生帯の広い場所では明らかに波高が低い。

以上のように、波高と植生の発達の間には相関が認められ、湖岸線が湖に突き出ており、年間を通じて作用波高が高い所では植生が生育しておらず、波に対して遮蔽された、入江の奥では植生の繁茂が盛んである。また、それらの限界波高はほぼ 0.4 m にある。しかし、図一4～6では、平均的傾向から大きくはずれるデータもある。例えば図一6の No. 67 付近では波高が高いにもかかわらず、かなり広い植生帯がある。図一7はこの地区の平面図である。これによると湖岸には多くの船溜まりがあり、両端を防波堤で囲まれた区域で植生の発達が良好ことが分かる。このように、植生の繁茂条件には、作用波浪が関係しているに止まらず植生の繁茂空間が必要である。

一方、図一4～6は沖波データであるが、湖岸近傍では波浪の浅海変形が生じるので、植生の繁茂には湖岸近傍での海底形状にも依存するはずである。そこで、比較的良好な相関が見られた図一4、5に示す測点について、湖岸線から水深 1 m までの距離を読みとり、これより湖底勾配を算出した。これによると、湖底勾配は 1/12～1/



図一3 湖岸各地点における推算波高・周期



図一4 植生帯幅と推算波高 (No. 1～30)

図一5 植生帯幅と推算波高 (No. 31～56)

図一6 植生帯幅と推算波高 (No. 57～73)

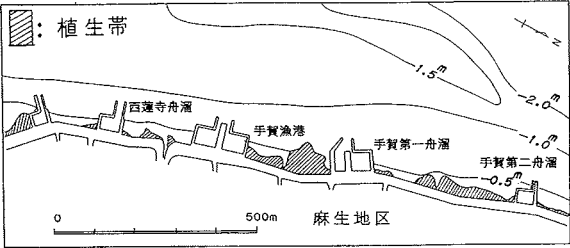
1265 の間に分布するので、勾配が 1/30 より急(勾配大)、1/30~1/100 (勾配中)、1/100 より緩やか(勾配小) の 3 グループの分け、植生の繁茂、波高および湖底勾配の関係を表一1のように整理した。これによれば、表中○印で示すように、植生ありは波高が 40 cm 以下でかつ勾配が小・中の場合であって、波高 40 cm 以下でも勾配が大であると植生が繁茂しないこと、また波高 40 cm 以上では湖底勾配によらず植生帯が存在しないことが分かる。なお、表中に示す●印は特異な例であって、波高が 40 cm 以下であっても護岸がむき出しとなっている (No. 30, 48, 49, 51) か、逆に No. 12 のように勾配大であるが、波高が特に低い場合である。

以上のように、植生の有無には波高とその付近の湖底勾配が関係していることが分かる。

次に、湖岸状況の現地踏査結果について述べる。現地踏査では、図一1に矢印で示すように、相対的に波高が高い区域から、A (浮島地区：No. 7)、B (大山地区：No. 20)、C (出島地区：No. 46)、D (麻生地区：No. 69) の 4 地点を選んだ。写真一1は、A 地点の湖岸状況である。湖岸堤の前面にはかなり広い前浜が広がり、一部には植生も見られる。浮島地区では、沿岸漂砂の移動を阻止する施設の周辺で写真一1と同様な状況がしばしば観察される。写真一2は、B 地点の状況である。ここでも前浜が存在し汀線近傍まで植生が繁茂している。これらに対して、写真一3に示す C 地点では、湖岸堤に沿って越波災害を防止するために、護岸線と平行に消波工が設置されており、しかも消波工の前面はかなり深く、かつ強い波浪の作用を受けるために、植生の繁茂は不可能である。また D の麻生地区の湖岸も C 地点と同様な状況であった。

以上より、波の作用が強い場所でも、湖岸堤防の前面に十分広い前浜が存在しておれば、植生の繁茂が見られる。このことは、緩勾配の湖浜が存在して、それによる消波効果が見込めれば、植生の繁茂が可能であることを示している。ただし、この場合汀線では波浪の作用が著しいから、粘性土は波の作用で流出し、したがって植生の繁茂は不可能である。すなわち、波の著しい作用を受ける範囲は、砂浜でなければならず、それより内陸側には植

生の繁茂が可能である。したがって、植生の繁茂を支配する要因は、植生が繁茂するに必要な土壌層を確保できるかどうかにかかっていると考えられる。波の作用を直接受ける場所では、粘性土を入れても波に洗い流され、土壌を形づくることはできない。一方、砂浜は波の作用で移動するから、波による地形変化の限界水深までの範



図一7 異常に幅広い植生帯がある特異な例

表一1 植生の有無と波高・湖底勾配の関係

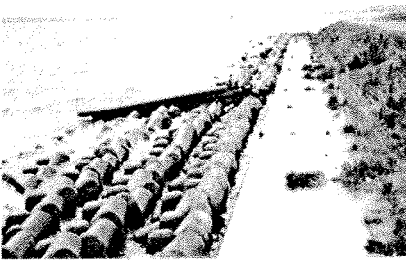
地点 番号 No.	波高40cm以下						波高40cm以上						備 考	
	植生帯有			植生帯無			植生帯有			植生帯無				
	小	中	大	小	中	大	小	中	大	小	中	大		
1											○			黒国工
2			○											
3	○													
4		○												
5														和田野
6						○								和田野
7	○					○								
8		○												
9												○		砂利採取場
10	○													
11		○												
12			●											波高が特に高い
13	○													
14	○													
15		○												
16	○													
17						○								
18													○	水上飛行場
19	○													
20	○													
21	○													
22	○													
23		○												
24	○													
25		○												
26	○													
27	○													
28	○													
29	○													
30				●										水生植物園
31		○												
32	○													
33		○												はず堀
34	○													
35														
36		○												
37													○	
38													○	
39											○			
40											○			
41											○			
42											○			
43											○			
44	○													
45		○												
46											○			
47											○			削波工
48						●								護岸剥き出し
49						●								護岸剥き出し
50	○													護岸剥き出し
51						●								護岸剥き出し
52		○												
53		○												
54														削波工
55	○					○								



写真一1 A 地点の湖岸状況 (1996. 12)



写真一2 B 地点の湖岸状況 (1996. 12)



写真一3 C 地点の湖岸状況 (1996. 12)

囲で土砂が流出しないような策が必要となる。これには風波による地形変化の限界水深を調べる必要がある。そこで、以下では、代表的に天王崎と浮島における湖浜地形変化について調べた。

4. 代表地点における風波に伴う地形変化

4.1 天王崎湖水浴場

霞ヶ浦東岸において、湖岸線が湖に大きく突出した場所は、天王崎と呼ばれており、古くから湖水浴場として有名であった。その後湖の水質の低下とともにこの湖水浴場は使われなくなったが、近年、この地先で人工的に湖水浴場を造ることが計画され、1985年以降計画は実施に移された。以下では写真によりその周辺の湖岸状況の変化について調べてみる。

写真-4は、1987年頃の天王崎の全景である。南側に伸びた不透透突堤と階段護岸の間に三角形の砂浜が伸びている。この湖浜はそこでの作用波に対してほぼ直角となって安定している。この湖浜汀線への法線は、ほぼNW方向を向いている。写真-4に見える三角形の前浜部分において、汀線に沿って木製の隔壁を造り、その内側の土砂を湖側に押し出すことにより、内側をくり抜くようにして池が造られた。写真-5は、1993年8月12日におけるこの池の状況である。その後、直線状であった砂浜の前面に、消波を目的とした離岸堤が2基造られた。離岸堤の建設直後の状況を写真-6に示す。離岸堤の消波効果により、離岸堤の背後には舌状砂州が形成されつつあることが見てとれる。

1996年7月30日、この離岸堤背後の砂浜において深淺測量を実施した。図-8には、深淺測量の結果を示す。

2基の離岸堤の背後にはいずれも舌状砂州が発達しているが、北側の離岸堤背後のほうが発達が良い。これは、南側の離岸堤と突堤の間の開口部からSSW方向から発達する風波が侵入し、NW方向からの主な波浪の作用にこの波による作用が加わったためである。

図-9～11には、図-8に示す測線No.1からNo.14までの湖浜縦断形を重ねて示す。深淺測量は沿岸方向にほぼ5m間隔で行った。図-9は1号離岸堤の中心から南側に位置する測線の縦断形である。ここに、図の記号◆で示す縦断形は、土砂投入を行う前におけるNo.1付近の縦断形である。図示するように、離岸堤背後に土砂が堆積しているが、No.3では-0.3m程度の平坦面が存在している。そして離岸堤に近づくにしたがい地盤高が上昇している。土砂投入前の縦断形と比較すると、離岸堤の付け根付近で約1m厚で土砂が堆積している。

1号離岸堤の北側半分周辺の縦断形を示す図-10では、No.4を除き、-1m以浅で土砂の堆積が生じている。

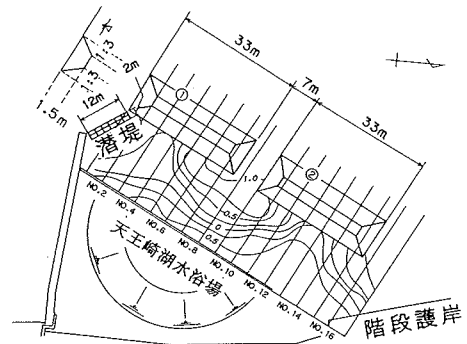


図-8 湖水浴場周辺の深淺図

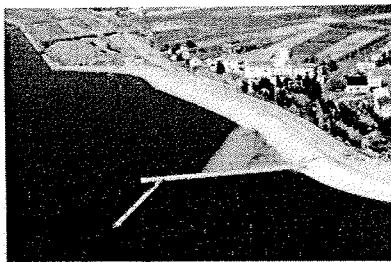


写真-4 天王崎の空中写真 (1987)

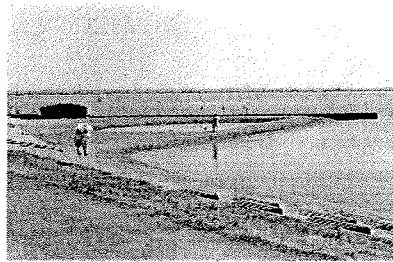


写真-5 湖水浴場前面の砂浜 (1993. 8)



写真-6 天王崎の空中写真 (1994. 8)

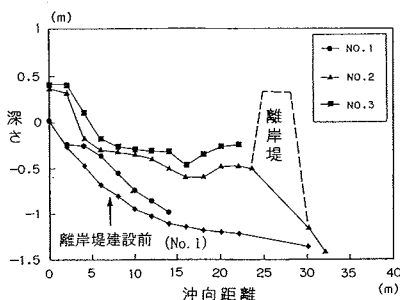


図-9 測線 No. 1～3 の縦断形

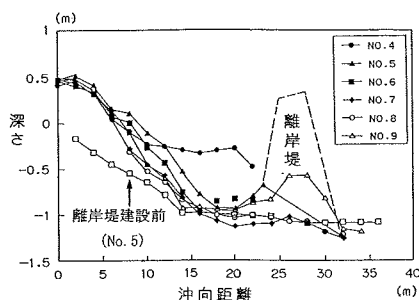


図-10 測線 No. 4～9 の縦断形

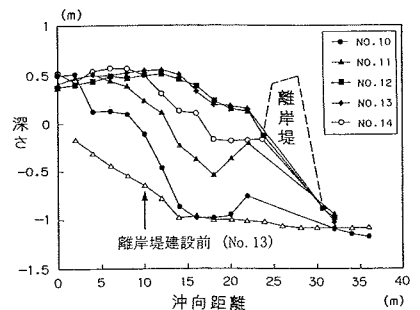


図-11 測線 No. 10～14 の縦断形

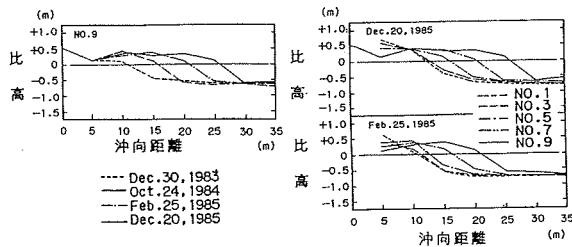


図-12 浮島1号樋管の湖浜縦断形の変化

2号離岸堤の南側半分の測線では、図-11に示すように、標高0.5mから-1mまでの間で大量の土砂が堆積しており、離岸堤の背後に近づくにしたがい堆積厚が厚くなる。離岸堤の中心線付近のNo.13, 14では、わずかな水面を残すのみで、離岸堤の背後部にトンボロが形成されている。土砂投入前の縦断形と比較して、離岸堤の背後ではほぼ-1mまでの範囲で土砂が堆積している。

図-9~11によれば、この地区での波による地形変化の限界水深は、ほぼ-1mにある。一方、図-3によると、No.70での推算波高は約0.6mである。よって波による地形変化の限界水深と推算波高の比は約1.7となる。

4.2 浮島1号樋管

浮島1号樋管周辺の湖浜地形変化については、宇多ら(1987)が調べている。図-12は、浮島1号樋管への漂砂流入阻止を目的として建設された矢板近傍の測線における湖浜縦断形の経時変化を示しているが、これによると、波による地形変化の限界水深はほぼ-0.6mにある。一方、図-3によれば、ここでの推算波高は約0.4mである。これらより、波による地形変化の限界水深と推算波高の比は、1.5となる。

5. 考 察

天王崎と浮島1号樋管位置での波による地形変化の限界水深と、推算波高の比はそれぞれ1.7と1.5であった。図-3によれば、天王崎は最も波高の高い区域を代表しているから、霞ヶ浦内での推算波高に対して、ほぼ1.7倍の深さを波による地形変化の限界水深とし、それ以浅の土砂が波によって移動しないように漂砂阻止施設を造れば、植生の繁茂する土壌を確保できることになる。すなわち、波のうちあげ範囲も含んで、波が直接作用する範囲には砂礫を投入し、その背後に植生のための土壌を形成すれば、植生の繁茂が可能になると考えられる。

表-1によれば、波高が0.4m以下と静穏で勾配が緩ければ植生の繁茂が可能のように見えるが、波高が低くても護岸が冲出しされて波の直接的な作用を受ける場所では植生がない所も多いことから、植生が生育するための土壌を含む緩勾配の湖岸域を形成させられるかどうか

支配要素であり、波高の高いところではそれらの規模が大きくなることを意味する。そして現況の霞ヶ浦の湖岸では、推算波高40cm以上の高波浪の作用する区域では、そのような工夫が取られてこなかったことが図-4~6のような結果として現れたと考えられる。以上の結果から、次の方策が考えられる。

① 入江の奥で作用波高が非常に低く、自然に土砂が堆積して土壌が形成される場合には、そのままでも植生が繁茂可能である。

② 波高は限界波高(約40cm)より低いが、土壌を形成させるための投入土砂が沿岸漂砂により失われる恐れがある場合には、その地点の推算波高の約1.7倍までの水深の土砂が沿岸方向に移動しうから、その範囲の土砂が移動しないような補助施設を造る必要がある。

③ 推算波高が限界波高より高い場合には、そのままでは植生の繁茂は難しい。大量の土砂を投入できれば②と同様な方法が考えられる。しかしこの場合は湖の水域面積の大きな減少につながるから、局地的には可能であっても全域的な展開は難しい。沖合も含めて大量の土砂を投入できない場合には、消波施設により波浪を減衰させ、①の状況を目指して作用波高の低減を図り、減衰した波高に対して②の方策をとるのが現実的である。

6. ま と め

本研究の成果は以下にまとめられる。

① 霞ヶ浦の湖岸に生育する植生帯の分布を空中写真により求めた。一方、湖の気象観測データに基づく波浪推算から求めた波高との関係を調べたところ、波高は約40cmを境に、それより波高が低い所で植生の繁茂が盛んなこと、しかし勾配が1/30以上と急勾配になると波高40cm以下でも植生は繁茂しないことが分かった。

② この原因として、波高が高い場所あるいは波高は低くても、植生の繁茂すべき土壌が波の作用で流出しやすいことが指摘された。そこで、波の作用下での波による地形変化の限界水深を天王崎と浮島で求めたところ、限界水深は推算波高の約1.7倍となることが分かった。

③ 波高が高い場所では、植生の繁茂する土壌の区域を守る施設の設計において、施設の先端水深を波高の約1.7倍までとしなければならないことを意味する。

参 考 文 献

- 宇多高明・小菅 晋・岡村和男・本田哲也・木内秀規 (1996): 湖岸堤への覆土工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.
- 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, No. 381/II7, pp. 161-170.