

湖岸植生帯の再生手法に関する検討

A NOTE ON LAKESHORE RESTORATION CREATING HABITAT OF PLANTS

宇多高明¹・見澤正勝²・古川秀一³・今村史子⁴・城野裕介⁵

Takaaki UDA, Masakatsu MISAWA, Shu-ichi FURUKAWA,
Fumiko IMAMURA and Yusuke SHIRONO

¹正会員 工博 (財)土木研究センター理事なぎさ総合研究室長(〒110-0016 台東区台東1-6-4)

²理修 茨城県土木部(〒310-8555 水戸市笠原町978-6)

³農修 茨城県土木部(〒310-8555 水戸市笠原町978-6)

⁴正会員 農修 日本工営(株) 環境部(〒102-8539 千代田区麹町5-4)

⁵正会員 工修 日本工営(株) 環境部(〒102-8539 千代田区麹町5-4)

A method for restoring the lakeshore using beach nourishment was studied, taking Lake Hinuma as an example. Field measurements on lakebed topography, grain sizes of bed materials, change in water level and salinity with time, and classification of lakeshore vegetations were carried out. Depth changes in median diameter of bed materials were measured. The content rate of fine sand had a peak approximately at the depth of closure due to waves, whereas the content rate of silt and clay and the salinity increased with the depth. The habitat of Brackish-water clam *Corbicula japonica* was located along the depth zone satisfying the condition that salinity is larger than 3 and bed materials are composed of fine sand. Using this information, the lakeshore restoration creating habitat of animals and plants could be done through the formation of a lakebed with a gentle slope using fine sand. A flat lakebed is formed first in the shallow water zone, and a barrier island is planned to be formed by wave action due to the shoreward sand movement. A wetland landward of this barrier is useful for the habitat of animals and plants.

Key Words : Lakeshore, restoration, vegetation, Lake Hinuma, salinity, depth of closure

1. はじめに

涸沼は、**図-1** に示すように茨城県東部に位置する面積 9.4 km²、平均水深 2.1 mの汽水湖であり、汽水性の貴重な生物相を有し、ヤマトシジミなどの漁業生産の場としても知られており、絶滅危惧種のヒヌマイトトンボの生息も認められている。かつて湖岸沿いには広大な浅場が存在し、水中には沈水植物、汀線付近にはヨシやマコモ等の抽水植物が繁茂する豊かな植生帯が形成されていた。しかし大規模干拓事業や農地整備のための堤防建設などに伴う浅場の減少や、汀線部の護岸化により、現在では沈水植物はほぼ消失し抽水植物も限られた場所で生育するのみである。こうした状況を受け、茨城県では涸沼の過去の良好な湖岸植生帯の再生を行うとともに、副次的に涸沼における代表的な生物の再生も考慮した計画を策定した¹⁾。涸沼での自然再生では、従来の湖岸植生の再生整備等で見られるような大規模な人工構造物を極力用いず、現地環境条件を手本として自然の再生力

を最大限利用する整備手法とした¹⁾。この考え方を具体化するために、本研究にあつては再生事業の対象とする宮前地区について湖浜地形、水位、底質、塩分、植生などに関する総合的な観測を行い、それをもとに具体的な湖岸整備法について検討した。

調査対象の宮前地区は、**図-1** のように涸沼北岸中央部に位置しており、本地区の堤内地には、ヒヌマイトトンボの重要な繁殖地であるヨシ原が広がっている。この地



図-1 調査地域位置図

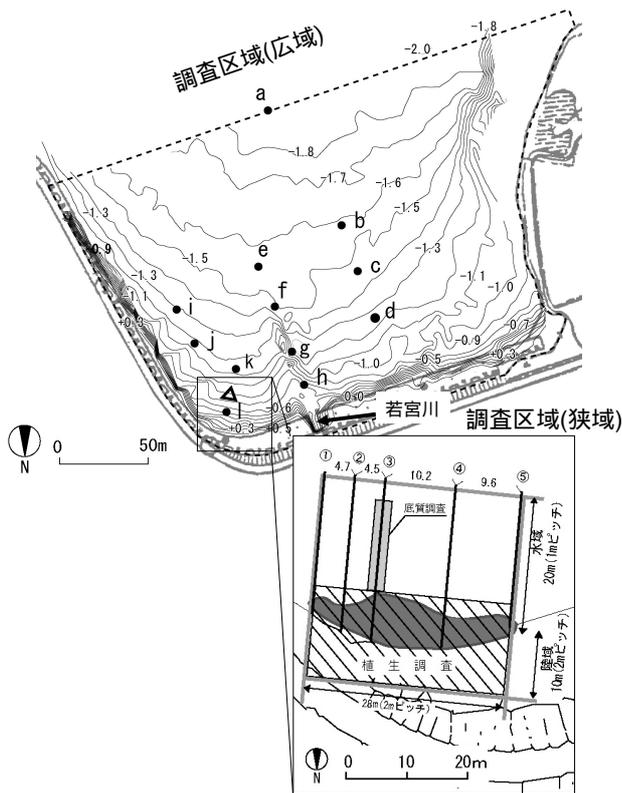


図-2 調査区域および測線配置

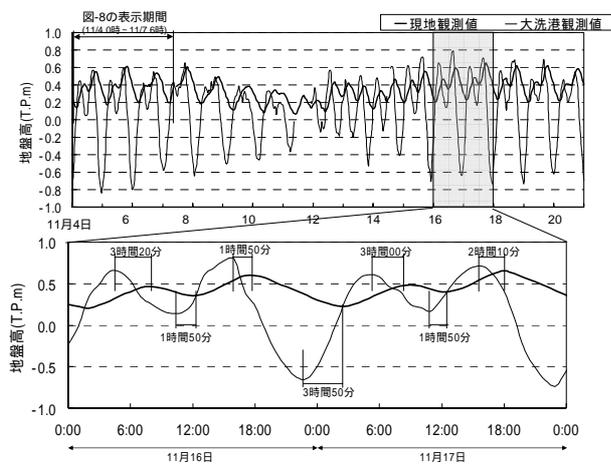


図-3 大洗港と濁沼の水位変化

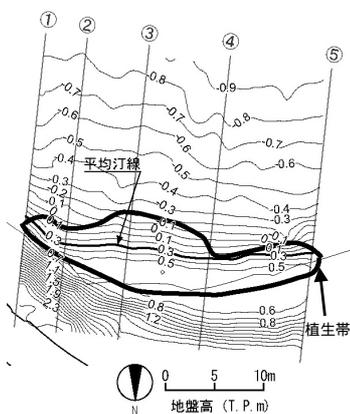


図-4 調査区域(狭域)の深浅図

区は前報¹⁾において検討を加えた場所のひとつにあたり、また 1961 年と 1998 年の空中写真比較によれば、1961 年には沈水・抽水植物が湾奥の湖岸沿いに生育していたが、1998年までに東岸にコンクリート堤防、湾奥の若宮川河口に水門が整備された結果、東岸ではほとんど植生帯が見られなくなった。一方で波浪の影響を受けにくく、土砂の堆積しやすい湾奥部では抽水植物群落の生育が見られる¹⁾。

2. 観測項目

現地観測では、対象地区の地形、水位、底質、塩分、植生状況を調査した。図-2 には調査区域と測点配置を示す。湖底地形(広域)は、湾奥から岸沖方向に5 m 間隔で60 測線、横断方向に20 m 間隔で8測線を設け、これらの互いに交差する測線上において音響測深機積載の測量船を走らせて測量した。また整備予定箇所周辺(狭域)の水域では、岸沖方向に2 m、横断方向に1 m 間隔で、陸域では岸沖方向2 m、横断方向に2 m 間隔でレベルと間縄を用いた詳細測量を行った。

水位は図-2 に示す沖合 32 m 地点(平均水深1m程度)に水圧式小型軽量波高計を設置し、1 時間おきに0.2 秒間隔で10 分間測定した。測定期間は2005 年10月21 日~11 月21 日である。塩分の観測では、自記式小型メモリー塩分計12 台を湖底上10cmに設置し、10月21 日~11 月7 日に連続観測を行った。塩分データは1 分間隔で記録した。塩分計の設置地点は図-2 のa~lの12 点である。また、図-2 の測線に沿って水深毎にエクマンバージ採泥器を用いて底質を採取し、粒度分析を行った。植生に関しては、測線 上において陸域は2 m、水域は1m間隔で植物種を調査した。

3. 観測結果

(1) 潮位

宇多・山本²⁾の観測によれば、濁沼では大洗の潮位と比較し約3 時間の位相遅れを伴う。図-3 には大洗と濁沼の潮位観測の結果を示す。一例として大潮期の11 月16 日、17 日の水位変動を拡大して示すが、大洗の潮位が最も低くなる干潮時と比較すると2~4 時間、満潮時には2~3時間の時間遅れとなっている。11 月4 日から11 月20 日まで17 日および最上下限水位はT.P. +0.3 m ±0.2 mであった。

(2) 湖浜地形特性

広域調査区域は、図-2に示すように、沿岸方向の幅・奥行がともに約 200 m の「コ」の字形の湾入部であり、最奥部には若宮川が流入している。また河口周辺にはほ

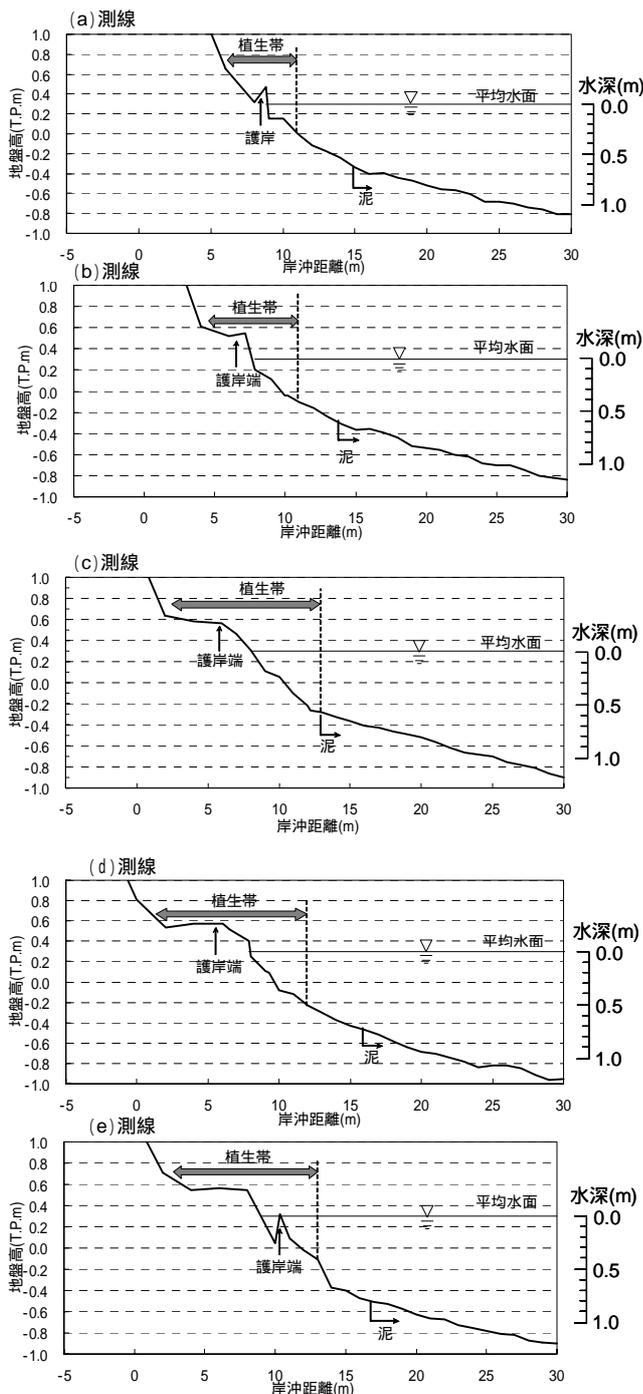


図-5 調査区域(狭域)の断面図

表-1 ヨシ帯の生育限界および砂泥境界

測線	ヨシ帯沖側限界地盤高 (T.P.m)	ヨシ帯沖側限界の平均水深 (m)	泥砂境界地盤高 (T.P.m)	泥砂境界の平均水深 (m)
	0.0	0.3	-0.3	0.6
	-0.1	0.4	-0.3	0.6
	-0.3	0.6	-0.3	0.6
	-0.2	0.5	-0.5	0.8
	-0.1	0.4	-0.5	0.8

ば直線状の護岸が整備されている。この護岸は河口部において前出し形式で造られたために、背後の湿地と湖岸とが連結することによって安定した基盤となっていたヒメイトンボの生息適地を狭める結果を招いた¹⁾。また若宮川河口の西側は一面密生したヨシで覆われているのに対し、東部の護岸は直接湖面に晒されており、湾入部の東西で護岸前面の植生の範茂状況が大きく異なる。これは西岸と比較して東岸では波の作用が著しいことを示唆する。また湾入部の隅角部には波の作用により砂礫が堆積し、そこがヨシなどの生育基盤となっている¹⁾。

図-2には湾入部の深淺図も示す。図の等深(高)線はT.P. 0.0 m 基準での標高であり、平均水深は0.3 m を加算した値となる。以下、この種の測量結果はとくに断らない限りこれと同じ方法で示す。若宮川河口沖では、河川から流出したと見られる土砂が堆積して形成されたテラス状の突出部が見られる。この突出地形の東側では等深線が凹状である。この湾入地形に湾口から波が入射する結果、東部の護岸線に対しては波が大きく斜め入射することになり、湾奥へ向いた強い沿岸漂砂を発生させる条件となっている。これに対し湾入部の西側では等深線の沿岸方向勾配が緩く、また湖底勾配も相対的に緩やかであり、湖浜の安定性は東西で大きく異なり、西側は東側と比較して安定度が高い。このこともまた湾入部両岸での植生の範茂状況の相違する理由を与えている。

図-4は、図-2に示す狭域の区域の深淺図である。平均汀線は+0.3 m (太線表示)で与えられる。これによれば+0.5 m からほぼ-0.2 m までの等深線は汀線とほぼ平行に延びており、-0.3 m になってはじめて汀線と連動した場所的变化が見られなくなる。そして+0.5 m ~ +0.6 m の間には広い平坦面が形成される一方、沖合の-0.3 m 以深では緩勾配となる。これらより、+0.5 m 付近の平坦面は砂がバームを形成しつつ前進した際形成された堆積平坦面を、また主として-0.3 m 以浅の水域で波による砂移動が活発なことが示唆される。

図-5(a)~(e)には、図-4に示す5測線の縦断形と、植生繁茂域、底質が砂礫または泥で覆われた区域を示す。底質組成は長靴で湖底面を歩いた際の足裏の感触で確認したものである。また、各測線ごとにヨシ帯の沖側限界を定める地盤高(平均水深)および底質が砂礫から泥へと変化する地点の地盤高(平均水深)を表-1にまとめて示す。これによればヨシ帯の沖側限界の地盤高は-0.3 m (平均水深0.6 m)であり、一方砂泥からなる湖底が始まる限界水深は東部では-0.3 m(平均水深0.6m)、西部では-0.5 m(平均水深0.8m)程度にある。

(3) 湖浜状況

対象地区の現地状況については、前報¹⁾において2004年11月の踏査結果について述べたが、重要な点を再掲する。最奥部の護岸と植生帯を撮影したのが写真-1である。護岸の曲線部分では、その裏側に大きな窪みが見える。



写真-1 湖岸の陥没状況

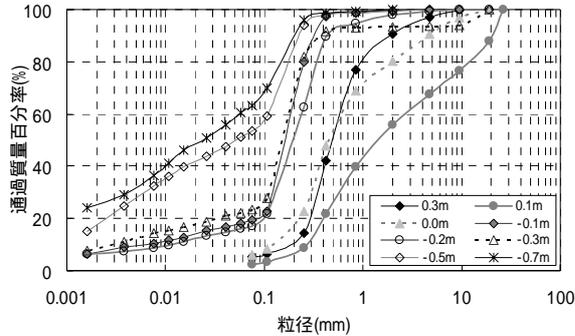


図-6 各水深における粒径加積曲線

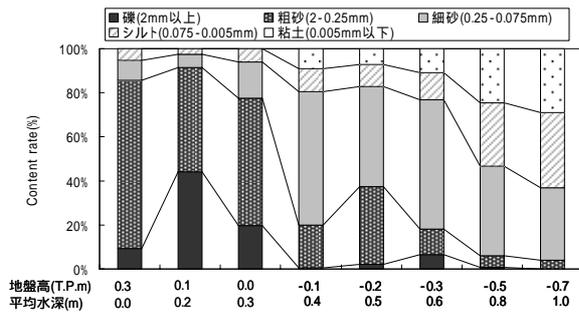


図-7 各水深における粒径含有率分布

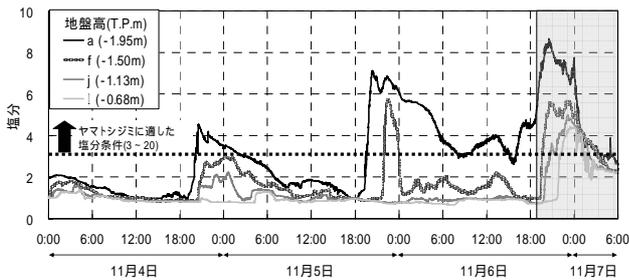


図-8 代表地点の塩分時系列変化

この窪みは、南西方向からの波浪が護岸の曲線部分に集中して著しい越波となり、その結果戻り流れによって背後の土砂が洗い出されて形成されたと考えられる。また供給された土砂は前方のヨシ帯のある付近に運ばれ堆積することとなる。この安定した堆積域を自然の原理に忠実な方法で拡大しようとするのが本研究の狙いである。

(4) 底質特性

一般に、砕波帯付近における波の作用は水深の増加とともに弱まり、波による地形変化の限界水深 (h_c) 付近で海底の地形変化はほぼなくなる。同時にこの水深を境として、 h_c 以浅では d_{50} が 0.2 mm 程度の砂が海底面を覆うのに対し、それ以深では海底面をシルト質が覆うようになることが知られている³⁾。表-1 によれば、 h_c は測線 ~ では -0.3 m (平均水深 0.6 m) 付近にあり、湾入部の中央に近い測線 ~ では -0.5 m (平均水深 0.8 m) とやや深くなるようである。

この点を定量的に調べるために、図-5(C)の測線に沿って +0.3 m (平均水深 0.0 m) から -0.7 m (平均水深 1.0 m) までの 8 点で底質を採取し、乾燥後ふるい分け分析を行った。図-6 は各点の粒径加積曲線をまとめて示したもので、また図-7 は水深ごとの粒径含有率分布である。これらによると、汀線付近の +0.3 m (平均水深 0.0 m) と 0.0 m (平均水深 0.3 m) では礫または粗砂が 75 % 以上を占めるが、-0.1 m (平均水深 0.4 m) ~ -0.3 m (平均水深 0.6 m) では砂分の含有率が 80 % 以上と圧倒的に高まる。しかしそれより沖の -0.5 m (平均水深 0.8 m)、-0.7 m (平均水深 1.0 m) では逆にシルト・粘土の含有率が著しく高まる。全体として 3 つの粒径分布群に区分され、常時波の作用を受ける汀線付近ではほぼ 0.5 mm 以上の粗な粒径で構成されているが、水深の増加とともに砂分の含有率が 80 % 以上となり、さらに水深の大きな -0.5 m (平均水深 0.8 m) と -0.7 m (平均水深 1.0 m) では砂分の含有率は低下し、シルト・粘土の含有率が 60 % 以上となる。以上の点より、測線 ~ では波による地形変化の限界水深 (h_c) は -0.3 m (平均水深 0.6 m) にあると推定される。

(5) 湖底塩分の観察結果

図-8は、図-3 に示したように、大潮時において海水

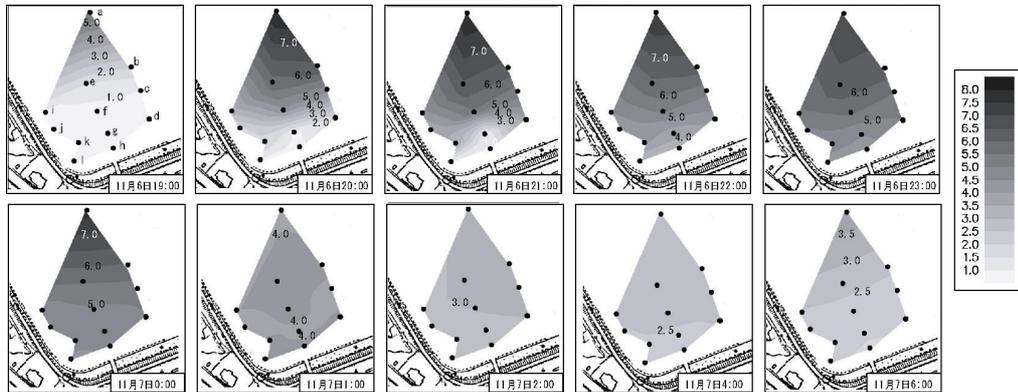


図-9 塩分平面分布(2005年11月6日 19:00~11月7日 6:00)

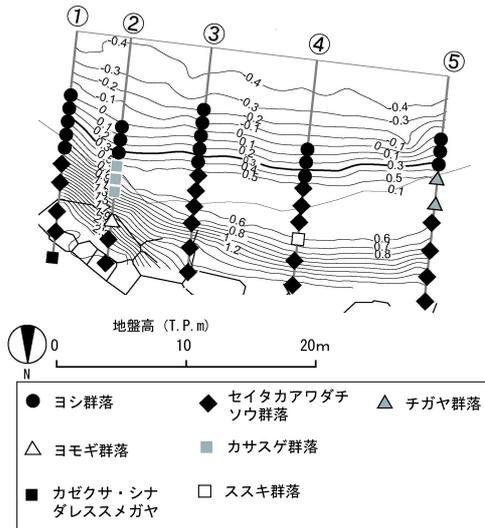


図-10 植生群落の平面分布図

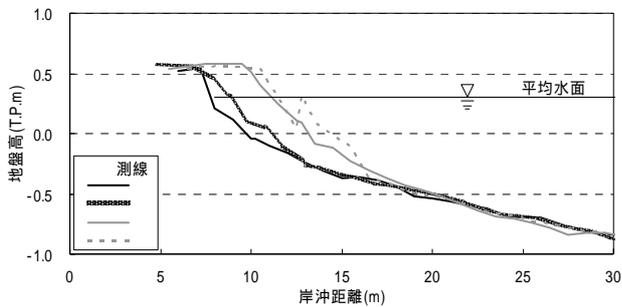


図-11 測線 1 ~ 5 の縦断形の重ね合わせ

の顕著な遡上が見られた2005年11月4日から11月6日6時までの塩分の観測データのうち、代表的な測点a, f, j, l (測点位置は図-2参照)の塩分の時系列である。大潮期のため、潮位の上昇とともに塩分の遡上が見られ、塩分は水深が大きい場所ほど高い。

図-9は、2005年11月6日19時~11月7日6時の塩分の平面分布である。11月6日の19時には湖岸周辺の塩分は低かったが、11月6日23時までに急激に塩分が高まった。その後時間経過とともに塩分が低下したものの、塩分の上昇期と比較するとその変化は緩やかである。

(6) 植生分布

図-10は植生群落の平面分布である。+0.5m~+0.6mの間の平坦面は大部分がセイタカアワダチソウの群落で覆われている。一方、砂礫で覆われた+0.4m~-0.2mの間にはヨシ群落がある。砂礫地の陸側のほとんどはセイタカアワダチソウが繁茂しているが、標高がそれより0.1m低い、+0.4mより沖側ではヨシに対して良好な空間となっている。しかし、 h_c である-0.3mより沖側ではヨシの生育が見られない。このことから、この地区においてヨシの繁茂を考慮した環境復元を行うには、繁茂域の砂浜高の上限標高が+0.5m、下限値が-0.3mの範囲に緩斜面が存在することが必要と考えられる。

4. 考察

(1) 縦断形の重ね合わせ分析

図-5は、ある観測日における湖浜の縦断形を示したものであり、これから湖浜の縦断形の時間的変化の特徴を調べることはできない。しかし、沿岸漂砂の作用によって地形変化が生じる際には、縦断形変化のエルゴード性を利用することにより、空間的に測られた縦断形を時間的変化に置換して縦断形の時間変化過程を明らかにすることができる⁴⁾。いま測線 1 ~ 5の縦断形に関し、測線 1を基準として水平方向に縦断形を平行移動させ、陸上部と沖合の湖底形状が最もよく一致するようにして重ね合わせたのが図-11である。測線 1 ~ 5の縦断形は、東側から護岸前面に沿って沿岸漂砂によって運ばれてきた砂礫が堆積してできたものである。沿岸漂砂によって運ばれた砂が堆積してできた湖浜にあつては、一般に陸上の堆積限界はバーム高 (h_R) で、また湖面下では緩勾配で重力による土砂の落ち込みがない場合、波による地形変化の限界水深 (h_c) までの間で地形変化が生じ、この間で汀線の前進にあわせて縦断形があたかも平行移動したかのようにして変形が起こる。このことを考慮して図-11を参照すると、測線 1の断面に徐々に砂が堆積した結果汀線が前進し、湖浜の厚みが増したように見える。この時の地形変化はほぼ+0.5mから-0.3m(平均水深0.6m)間で生じたことがわかり、この湖浜にあつては、 $h_R=+0.5m$ 、 $h_c=-0.3m$ (平均水深0.6m)となる。

(2) ヨシ帯の生育条件

本調査によれば、ヨシ生育域は+0.5mから-0.3mであり、この水深帯はほぼ既往研究^{8),9)}と一致している。湖岸に人工護岸が建設される以前の昭和30年代では、この水深帯が広く分布していた¹⁾。よってこのようなヨシの生育環境である水深帯を広く造成することがヨシ帯の再生・拡大につながると考えられる。そこで、現状のヨシ帯の前面に土砂を投入し、浅場を造成することとする。

(3) その他生物の生息・生育条件

砂礫質の底質中にて水中の有機懸濁物を餌としているヤマトシジミの生息条件^{10),11)}として、底質はシルト分が25%以下で細砂分が多く、塩分は3~20、水深は幅広く生息するとされている。図-12は、細砂分とシルト粘土分の含有率の水深分布を再整理したもので、3次曲線近似で示している。シルト粘土分の含有率は水深が浅い場所では小さいが、水深の増加とともに単調に増加する。これに対して細砂分は-0.2m付近にピークを有する。図には生息に適しているシルト粘土分の含有率上限値25%を示すが、この条件を満足し、かつ細砂で湖底面が覆われる区域は-0.2mを中心として±0.1mの狭い帯状区域であることが分かる。一方、塩分は図-8に示したよ

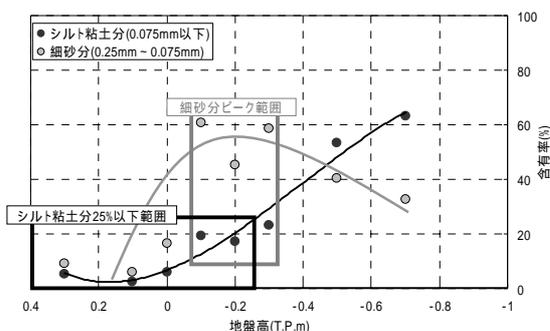


図-12 細砂分とシルト粘土分の含有率の水深分布

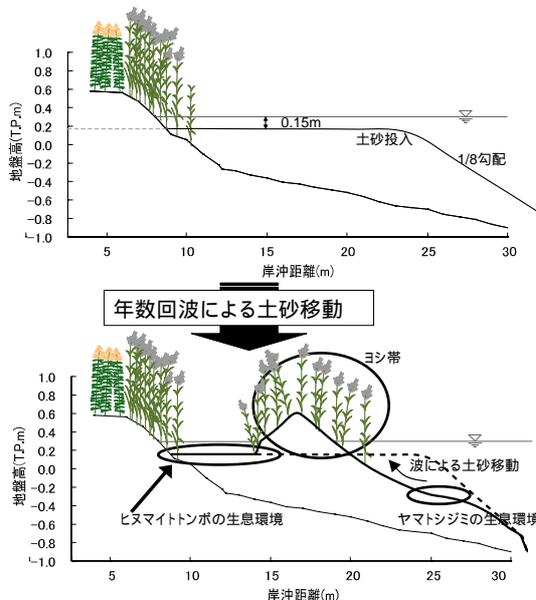


図-13 湖岸再生のイメージ図

うに、本地区前面(地点I:T.P.-0.68m)では、大潮時の遡上が最も著しい条件下でのみ4となる。底質と塩分の観点から、ヤマトシジミの生息に適した範囲は、限界水深(h_c)付近の細長い区域のみに限られる。

ヒヌマイトンボの生息条件としては⁷⁾、ある程度水深が小さい静穏な植物帯が必要となる。本地区では、堤内に重要な繁殖地があることから、それとの連続性を保ちつつ小さい水深帯を造成し、かつ波浪作用を抑えるバリアー(植生帯も含む)を創出することが有効と考えられる。

(4) 環境に配慮した湖岸再生法

実測データをもとに具体的な湖岸再生法について検討する。まず図-4によれば、現況の平均汀線は若宮川河口から延びる護岸線に対して約25°右回りに傾き、その法線は約S 7°Wを向く。現況汀線の背後には安定した堆積平坦面が存在することから、現況汀線は湾入部からの卓越入射波の方向と直角となって安定していると考えられる。したがってヨシ帯の再生に必要な浅場の安定性を確保するには、新たな汀線は実測汀線を平行移動したものとすればよいと考えられる。

一方、縦断形に関しては、図-11によればバーム高(h_R)は+0.6 m にあり、この地区の地形形成を支配する

波の波高とほぼ等しい。また、浅場形成のために投入する土砂の法肩位置において、波浪の作用でバリアーを形成する方法を考えた。この場合、バリアーが形成される平坦面の水深が問題となり、宇多ら⁵⁾の移動床実験によれば換算沖波波高(H_0')によりほぼ $1.3H_0'$ 以下となる。この地区は $H_0'=0.3$ mであるため浅瀬の水深は39 cm 以下となる。また、バリアーの急速な形成を期待すること、ヒヌマイトンボの生息には水深が0.15 m 程度必要なことから、平坦面の水深を0.15 m とする。投入土砂の粒径および初期勾配を現地とほぼ同一とするならば、波浪条件はほぼ変化せず、縦断形は実際に砂礫が堆積して形成された図-5の測線と同様となり、波による岸向き漂砂の作用により図-13に示すバリアーと内湖が形成されると推定される。なお、縦断形変化とその安定性に関する詳細検討は、混合粒径砂を対象とした海浜変形モデル⁶⁾により可能であるが、本研究では実態論に基づいて湖岸再生の基本的考え方を明らかにすることに主眼があるので、それらの検討は今後の課題としたい。また、土砂投入に際しての他流域からの土砂の搬入は生物学的な遺伝的攪乱を引き起こす恐れがあるため¹⁾、酒沼への流入河川の河口部などに堆積している土砂を利用し、その粒径加積曲線が図-6において+0.3 m ~ -0.3 m の地点の測定値に含まれるものを用いる必要がある。

謝辞：本論文の内容は、酒沼植生等再生整備検討委員会において検討されました。検討委員及び関係各位の多大なご助言とご協力に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 宇多高明, 照沼孝雄, 見澤正勝, 熊谷明子, 新沢 丘, 内田 肇: 湖岸植生帯の新しい再生手法 - 茨城県酒沼の例 -, 河川技術論文集, No.11, pp. 511-516, 2005.
- 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, No.7, pp.1-22, 1986.
- 3) 宇多高明: 日本の海岸侵食, pp.442, 山海堂, 1997.
- 4) 宇多高明: 海岸侵食の実態と解決策, pp.304, 山海堂, 2004.
- 5) 宇多高明, 山本幸次, 永瀬恭一, 五十嵐竜行: バリアー形成過程に関する実験的検討, 海岸工学論文集, No.41, pp.551-555, 1994.
- 6) 宇多高明, 石川仁憲: 実務者のための養浜マニュアル, pp.170, (財)土木研究センター, 2005.
- 7) 宮下 衛: ヒヌマイトンボ生息地の立地条件とその復元に関する一考察, 環境システム研究論文発表会講演集, No.28, pp.475-483, 2000.
- 8) 三木 茂: 山城水草誌, p.76, 1937.
- 9) 大滝末男, 石戸忠: 日本水生植物図鑑, p. 263, 北陸館, 1980.
- 10) 丸 邦義: 北水試だより, 北海道立水産試験場, No.21, pp.6-13, 2000.
- 11) 中村幹雄: 日本のシジミ漁業, p.7, たたら書房, 2000.

(2006.9.30受付)