

## 湖沼における沈水植物帯再生技術の開発に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 26

担当チーム：水環境研究グループ（河川生態）

研究担当者：萱場祐一、大寄真弓、片桐浩司  
傳田正利

### 【要旨】

我が国の多くの湖沼は、流域の開発に伴う水質悪化や、治水、利水目的の水位管理、湖岸堤築造等の人為的インパクトを受けてきた。このような湖沼では、沿岸植生帯が衰退した場所も見られ、中でも植物体の全ての部分が水中に存在する沈水植物は、減少の度合いが著しい。近年、浅い湖沼における湖岸植生の役割についての関心が高まっており、湖岸植生帯の復元が試みられている。沈水植物の再生に関しては各地で試みられているものの、現在の湖沼環境下における再生手法の確立には、未だ至っていない。

このような背景のもと、本研究では、沈水植物群落が消滅した霞ヶ浦（西浦）において、既存の消波構造物（以下離岸堤とする）により背後に創出される静穏な水域を、沈水植物群落再生可能場所として着目した。まず、離岸堤の配置、形状による背後水域の底質環境の違いを把握し、次に、離岸堤背後水域の異なる物理環境下における沈水植物の移植を実施した。移植実験終了時の沈水植物の生存率及び物理、化学環境の関係性を把握することで、沈水植物の生育に必要な離岸堤背後水域の環境条件を明らかにした。また、移植実験結果から明らかになった沈水植物の生育できる環境を創出することが可能な離岸堤防の配置について、シミュレーション手法を用いて明らかにした。

キーワード：沈水植物、離岸堤、背後水域、底質粒径、副離岸堤、配置シミュレーション

### 1. はじめに

我が国の多くの湖沼は、流域の開発に伴う水質悪化や、治水、利水目的の水位管理、湖岸堤築造等の人為的インパクトを受けてきた。このような湖沼では、沿岸植生帯が衰退した場所も見られ、中でも植物体の全ての部分が水中に存在する沈水植物は、減少の度合いが著しい。

本研究の対象湖沼とした霞ヶ浦（西浦）は、茨城県南東部に位置し、琵琶湖に次ぐ全国第2位の広さ（220km）をもつ海跡湖である。霞ヶ浦は、海浜並みの強い波浪が、年間を通して発生する湖沼として知られている。

かつての霞ヶ浦の主要な水生植物は沈水植物群落であり<sup>1)</sup>、1970年代には、湖岸から500～700m沖まで沈水植物群落が繁茂していたことが報告されている<sup>2)</sup>。しかしこれらは1980年代半ばまでにほぼ消失し<sup>3)</sup>今日に至っても湖内での回復はみられていない。

湖沼の沈水植物帯は、魚類への産卵場・隠れ場の提供、底泥の巻き上げ抑制、水質浄化等の機能を有すると言われており、健全な生態系の回復のためにも、沈水植物帯の再生が急務である。しかし、湖沼における沈水植物帯の再生技術は未だ確立されていない。

そこで本研究では、湖沼における沈水植物群落の再生

技術を確立するために、波浪対策として設置された既存の離岸堤により創出される背後の静穏な水域を、沈水植物の再生場所として着目した。既往研究<sup>4)</sup>では、離岸堤のない水域に移植した沈水植物は移植後1ヶ月未満で流失したのに対し、離岸堤の背後水域においては、移植個体が定着し、その後の経年的な生育が確認されている。また、離岸堤の配置方法（単列配置、千鳥配置 図-1）の違いにより、優占する種が異なるという結果が得られている。しかし、既往研究では、離岸堤の配置方法の違いにより、背後水域にいかなる環境条件が形成され、それが種の生存にどのように影響するのかは明らかにされていない。



図-1 霞ヶ浦(西浦)の離岸堤（左：単列配置 右：千鳥配置）

一般的に、沈水植物の生育に適した底質は、砂あるいは砂泥と言われており、シルト分が堆積し、嫌気状態が

進行した底泥環境は、沈水植物の生育には適さないと考えられる。離岸堤の背後水域では、本来の目的である波浪の低減効果により、沈水植物の生育が可能な静穏域を創出する一方で、有機物の蓄積による嫌気化や、生物に悪影響を及ぼす硫化水素の発生などのマイナス側面が指摘されている<sup>3)</sup>。しかし、どのような離岸堤により、どのような底質環境が創出されているのかについては、明らかにされていない。そこで、本研究では、霞ヶ浦(西浦)に設置されているすべての離岸堤の背後水域において、底質粒形調査を実施し、離岸堤の配置方法と底質の粒径、シルトの堆積状況の関係性を把握した。

次に、配置方法、離岸距離が異なる単列、千鳥配置の離岸堤背後水域に沈水植物の移植を行い、移植個体の生長に寄与する環境条件を明らかにした。この際、物理環境調査に加え、溶存酸素量、窒素、リン等の化学環境についても調査対象とし、生育条件を把握した。また、離岸堤の形状と移植個体の生存率との関係も明らかにした。

最後に、海岸工学で用いられるシミュレーション手法を用いて、上記において、明らかにした生育条件を創出する可能性が高い千鳥配置の離岸堤の詳細な形状を明らかにした。

これらの調査、実験の解析結果から、本研究では、現在の霞ヶ浦(西浦)湖内において、沈水植物の生育を可能にする場の条件、場の条件を離岸堤という構造物を用いて、創出する際の設計手法について提案を行うものである。

## 2. 離岸堤背後水域における底質調査

### 2.1 方法

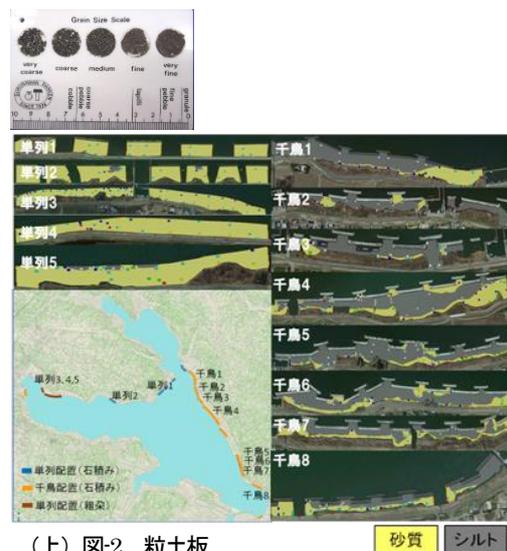
霞ヶ浦(西浦)に設置されているすべての離岸堤の背後水域において、底質環境の調査を実施した。調査対象とした離岸堤は、「石積み(直径1m程度の巨石を積み上げたもの)」「かご組み(蛇かご工に直径10~30cm程度の石を詰めたもの)」及び粗朶消波工の改良(木杭の枠に石袋を詰めたもの)とし、緊急保全対策事業で設置された粗朶消波工や、養浜事業で設置された突堤工は対象としていない。離岸堤は主に左岸に集中しており、千鳥配置のものが大多数を占めている。千鳥配置の離岸堤が数kmに渡って連続している箇所では、踏査によって底質状況に大きな差がないことを確認し、連続区間の代表的な1箇所を選定した。底質の状況については、離岸堤と湖岸を結ぶ測線を8本設け、測線上を胴長で限なく歩き、踏んだ感触が変わる地点で底質をすくい、粒土板(silt, very fine, fine, medium, coarse, very coarse)の6区分図

-2)で粒径を確認、記録した。また底質の変化点の位置情報の記録を行った。調査水域は作業性を考慮し水深80cm以浅とした。

### 2.2 結果と考察

2.1の調査により作成した離岸堤背後水域における底質の分布状況を図-3に示す。

砂質の平面的な分布は、単列、千鳥という離岸堤の配置形状によって異なっていた。単列配置の離岸堤背後水域では、底質は主に砂質であったが、千鳥配置の背後水域では、砂質が広がる範囲は見られたものの、これは施設端部や湖岸の屈曲部など、隣接した離岸堤間の距離が離れ、風波の影響を受けやすい場所に集中しており、ほとんどの場所でシルト(silt)の堆積が卓越していた。シルトの堆積厚さは、離岸堤設置からの経過年数及び湖底の地盤高により異なっていたが、設置後の年数が経った離岸堤ほどシルトの堆積が顕著であった。深いところではシルト層が1m以上堆積し、硫化水素臭がする等、嫌気的な底質環境が形成されていた。既往研究<sup>4)</sup>で単列、千鳥配置の離岸堤背後水域の各1箇所を波高計を設置し、単列、千鳥のそれぞれの配置の消波効果を観測したところ、千鳥配置の離岸堤は、単列配置と比較して波浪抑制効果が非常に高いことが明らかになっている。しかしながら、高い波浪抑制効果のため、背後水域の水の交換がされにくく、細かい粒径の底質が堆積し、離岸距離が小さい離岸堤ほど、嫌気的になりやすいと考えられる。千鳥配置の離岸堤による高い波浪抑制効果は、沈水植物の再生に有効であると考えられるが、嫌気的な底質環境の改善が必要と考えられる。



(上) 図-2 粒土板

(下) 図-3 離岸堤背後水域の底質粒径分布状況

## 2. 3 離岸堤を活用した沈水植物の再生

水生植物群落が消失、あるいは衰退した湖沼において、植生再生を検討する場合、静穏域の創出が必要と判断され、人工的な消波構造物が設置される場合が多い。しかし、消波構造物が、設置後 1~2 年程度で破損し、消波効果が維持されず、植生が定着できない事例や、逆に、過度な消波効果のために、2 年程度で背後水域が嫌気的になり、目的とする植生が消失、あるいは別な植生に遷移する事例も散見される。また、植生再生という目的で設置された消波施設は、維持管理を継続的に実施することが難しく、経年的に植生再生が成功していない事例が多い。

この点を考慮すると、治水目的で設置された霞ヶ浦(西浦)湖内の離岸堤は、河川管理者の維持管理行為が及ぶ構造物であり、消失した沈水植物の再生に、経年的に活用することが可能と考えられる。3 章では、配置、形状の異なる離岸堤により創出される背後水域の環境と、沈水植物の生存率との関係性を把握を目的として実施した、移植実験及び解析結果について述べる。

## 3. 沈水植物帯再生に必要な生育条件の特定

単列、千鳥それぞれの配置の離岸堤の背後水域に沈水植物を移植し、植物体の生存率と物理、化学環境との関係性の把握を試みた。

### 3. 1 方法

#### (1) 植生、環境データの取得

湖内の 7 地点(図-4)に調査ラインを設定し(図-5)、ライン上の計 49 箇所(各 5~8 箇所)に 1970 年代に湖内で優占したホザキノフサモ(*Myriophyllum spicatum*)、ササバモ(*Potamogeton malaiianus*)を移植し、7 月~9 月の生長量(湿重量)を計測した。

各調査ラインに水位計を設置し、移植期間の水位を計測したほか、現地で採水をおこない化学環境(NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、PO<sub>4</sub>-P、T-N、T-P)の分析を行った。49 箇所の移植箇所において、水深、泥厚、D<sub>0</sub>、水温、照度、周辺植生を計測した。

#### (2) 統計解析

離岸堤の形状(千鳥・単列配置)による移植個体の生存率の比較を U-test により行った。各調査地の環境特性を把握するために、主成分分析を行った。

## 3. 2 結果

### (1) 個体の生存

図-6 に調査地毎の生存率を示す。ササバモは千鳥配置

の調査地で 70%以上の生存率を示した。ホザキノフサモは千鳥配置の島波、船津で 50%以上の生存率を示した。一方、単列配置の田伏では、2 種ともに生存した個体はみられなかった。生存率を離岸堤の形状で比較すると(U-test)、ササバモでは、千鳥配置で生存率が高く( $p < 0.001$ )、約 81%の個体が生存した。ホザキノフサモでも、同様に千鳥配置で生存率が高く( $p < 0.001$ )、約 52%の個体が生存した。

### (2) 環境因子の集約と調査地の特徴

次に、個体の生長に影響をあたえた環境因子を把握するため、主成分分析による環境因子の集約を行った(図-7)。因子負荷量 0.7 以上を対象にすると、第 1 主成分は、泥厚、NH<sub>4</sub>-N、PO<sub>4</sub>-P(正方向)と水位変動(負方向)で構成され、波浪による攪乱と泥の堆積を示した。第 2 主成分は、水温、T-N、T-P(正方向)と周辺植生(負方向)で構成され、植生の繁茂と栄養塩の吸収を示した。第 3 主成分は照度(正方向)と水深(負方向)で構成され、水深の増加と照度の低下を示した。



(上) 図-4 調査地の配置  
(下) 図-5 調査ライン

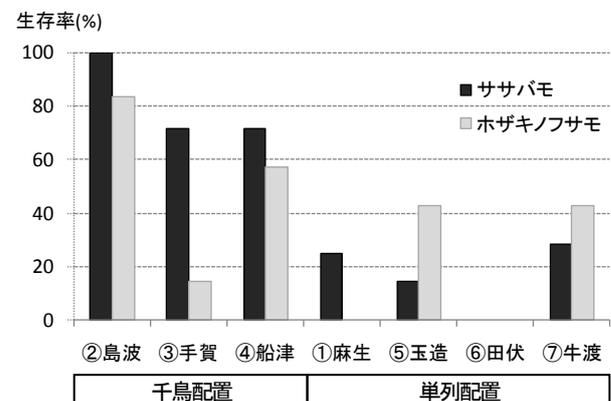


図-6 調査地における個体の生存率

各調査地の特徴をみると、生存率が最も高かった島波では、水位変動が少なく厚い底泥で特徴づけられた。一方、個体が消失した田伏は、水位変動が大きく底泥の少ないことで特徴づけられた。

### (3) 生長に影響を与えた環境因子

各主成分から2種の生長率ともっとも高い相関をもつ因子をそれぞれ抽出し、生長率と各因子との関係性について解析した。ササバモの生長率については、泥厚、周辺植生と水深がそれぞれ採用され、底泥が厚くなり、周辺植生(浮葉植物)が繁茂し、水深が深くなるにしたがって生長が抑制されることが示された(図-8)。またホザキノフサモについては、泥厚とT-Nがそれぞれ採用され、底泥が厚くなりT-Nが多くなることで生長が抑制されることが示された(図-9)。

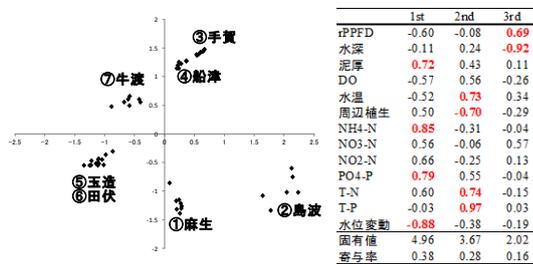


図-7 主成分分析結果

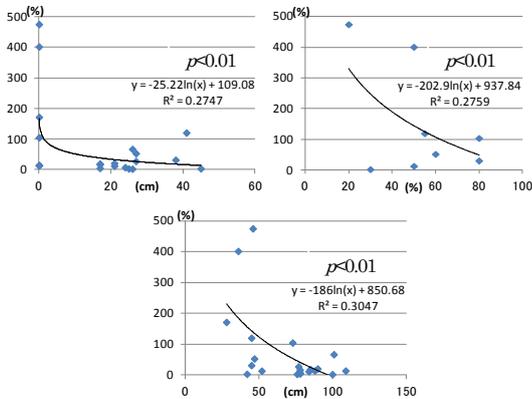


図-8 ササバモの生長と環境因子との関係 (左上: 泥厚、右上: 周辺植生、下: 水深)

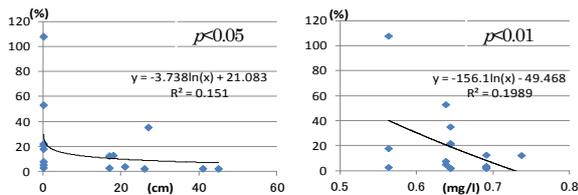


図-9 ホザキノフサモの生長と環境因子との関係(左: 泥厚、右: T-N)

## 4. 沈水植物帯再生に必要な生育条件の抽出

### 4. 1 はじめに

2章と3章の検討において、千鳥配置の離岸堤では、波浪(水位変動)抑制効果が確認され、沈水植物が生育できる静穏域が形成される一方、泥厚が堆積した嫌気的な環境が、沈水植物の生育を抑制する可能性があることが確認された。

しかし、千鳥配置の離岸堤の波浪抑制効果により創出される静穏域は、波浪の増加により沈水植物の生育適地がなくなった霞ヶ浦においては貴重な区域であり、静穏域の活用が沈水植物の再生には望ましいと考えた。

そのため、千鳥配置の離岸堤の詳細な配置形状を調整し、底質環境の改善が可能な海岸工学の数値シミュレーションを用いて、以下に検討した。

## 4. 2 方法

### (1) 千鳥配置の離岸堤の詳細内配置形状の検討方法

千鳥配置の離岸堤を含め、離岸堤周辺の流況の形成には、離岸堤の開口部が重要な役割を果たす。離岸堤の開口部背後は波浪抑制効果が少ないため、離岸堤背後に生じる循環流により侵食する可能性が高いことが指摘されている<sup>5)</sup>。しかし、この特性は、開口部の設計形状により離岸堤背後に生じる静穏状態を制御できること、静穏域形成の変化に伴う底質の移動を期待できることを示す。

千鳥配置の離岸堤においては、副離岸堤(沖合いの離岸堤)が湖岸側の離岸堤の開口部へ透過する波浪エネルギーを抑制する効果がある。副離岸堤を湖岸域側の離岸堤側へ近づければ、開口部へ透過する波浪エネルギー減少し、副離岸堤を湖岸域側の離岸堤側へ離せば、開口部へ透過する波浪エネルギーが増加する。

本検討では、上記の特性を利用して、この副離岸堤をと湖岸側の離岸堤の距離を変化させることにより、開口部から離岸堤背後部へ達する波浪エネルギーの増加可能性を検討した(図-10)。

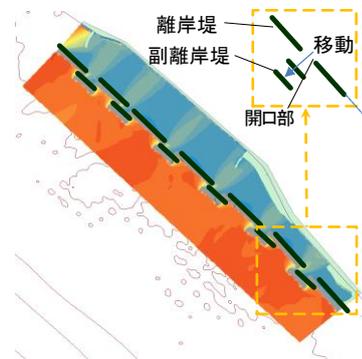


図-10 離岸堤(副離岸堤)の移動状況

## (2)解析方法及び解析条件

本検討では、エネルギー平衡方程式を用いた多方向不規則波の変形計算モデルを実装<sup>6)</sup>したEGWAVE（株式会社水域ネットワーク社製、ver. 1. 013）を用いた。

霞ヶ浦左岸の千鳥配置の離岸堤を対象に、離岸堤を構成する副離岸堤を沖合に10m間隔で移動し、波浪の抑制効果を波高で確認した。

## 4. 3 結果

図-11 (a)、図-11 (b)、図-11 (c) に、現状、副離岸堤を沖合に20m移動、副離岸堤を沖合に50m移動した結果を示す（赤は底面せん断応力が高く、青は低いことを示す）。図-11 (a) ～図-11 (c) の黄色部は底質が移動を始める底面せん断応力を示す。

副離岸堤を沖合に移動させることにより、離岸堤背後部の底面せん断応力を上昇させることが可能となり、底質移動の可能性が高まることが確認出来た。また、副離岸堤の移動距離は、現段階では20m程度が適切と推定している。

離岸堤の詳細な配置形状の決定は、治水能力（消波効果）との調整が必要となるため、本検討だけでは離岸堤の詳細な配置形状の提案を行うことはできない。しかし、副離岸堤を操作することにより、沈水植物の生育域再生にとっての千鳥配置の難点となる、底質の嫌気化の抑制や泥厚の堆積を改善できる可能性が確認できたことは、今後の研究進展にとって大きな成果といえる。

今後は、現地観測とシミュレーションを併用し、離岸堤の配置形状を変化させることによる沈水植物の生育域の再生技術を確立する予定である。

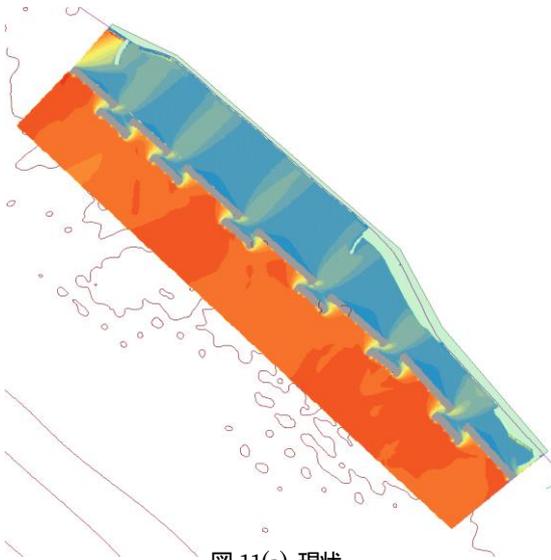


図-11(a) 現状

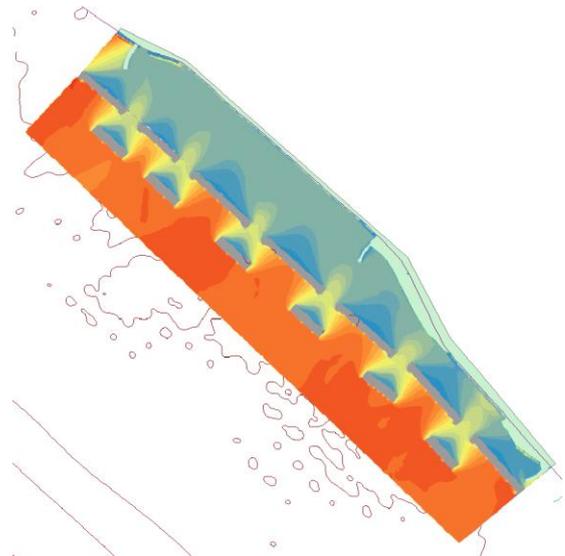


図-11(b) 副離岸堤 沖合20m移動

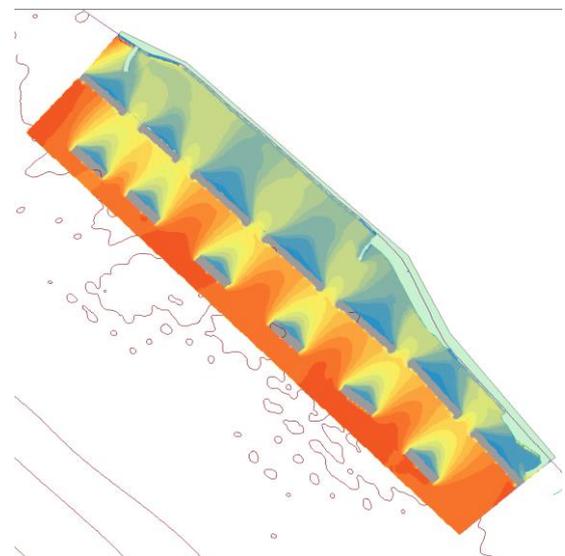


図-11(c) 副離岸堤 沖合50m移動

## 5. 今後の展望

本研究により、千鳥配置の離岸堤の背後水域には、シルト分が堆積する傾向があることが分かった。また、離岸堤の背後水域に沈水植物（ササバモ、ホザキノフサモ）を移植し、移植個体の生存率と物理、化学環境との関係性を分析した結果、千鳥配置背後水域で、沈水植物の生存率が高いことが明らかになった。千鳥配置背後水域は、水位変動が少なく、沈水植物の生存には適しているが、過剰な底泥の堆積や他の植生との競合は、個体の生長にとってはマイナスとなることが明らかになった。とくに20cmを超える底泥の堆積は2種の生長を大きく低下させた(図-8、9)。また80%を超える浮葉植物の繁茂、75cm

を超える水深はササバモの生長量を半減させ(図-8)、0.7mg/l を超える T-N 濃度は、ホザキノフサモの生長量を10%以下に低下させた(図-9)。この理由として、底泥の堆積は嫌気化を促し、水深の増加は生長に必要な光量を低下させること、また浮葉植物の繁茂は競争排除を、T-Nの増加は藻類などの繁茂を促すことが考えられる。生存率の高い千鳥配置の背後にはこうした沈水植物の生育に適さないエリアが出現すると考えられる。

また、海岸工学で用いられる数値シミュレーションを千鳥配置の離岸堤の詳細な配置形状検討に適用し、副離岸堤を沖合に移動することにより、波浪抑制・底質環境改善を通して、沈水植物の再生域を創出できる可能性を把握できた。今後は、この知見を活かし、沈水植物の生育に適した背後水域環境を創出する離岸堤の配置について、河川管理者に提案を行っていきたい。

#### 参考文献

- 1) 春日清一：霞ヶ浦植生帯の崩壊とその要因、霞ヶ浦研究会報、7号、pp. 27-30、2004。
- 2) 坂本清：目で見ると霞ヶ浦、嵩書房、1976。
- 3) 加茂川優紀：霞ヶ浦湖岸植生帯の保全に関する研究、東京大学大学院新領域創成科学研究科修士論文、2012。
- 4) 大寄真弓・矢島良紀・佐貫方城・三輪準二：霞ヶ浦における沈水植物移植生育実験。河川技術論文集 17、pp. 519-522、2011。
- 5) 土木学会海岸工学委員会編：海岸施設設計便覧、pp. 440-pp. 441、丸善、2000。
- 6) 間瀬肇・高山知司・国富將嗣・三島豊秋：波の回折を考慮した多方向不規則波の変形計算モデルに関する研究、土木学会論文集、No. 628/II-48、pp. 177-187、1999

# DEVELOPMENT OF RESTORATION METHODS OF THE LITTORAL VEGETATION IN THE LAKES

**Budgeted** : Grants for operating expenses

General account

**Research Period** : FY2011-2014

**Research Team** : Water Environment Research  
Group(River Environment)

**Author** : KAYABA Yuichi

OOYORI Mayumi

KATAGIRI Koji

DENDA Masatoshi

**Abstract** : Resently, many Japanese lakes have been degradation such as water quality deterioration by development of basin, water level management and bank construction for the purpose of flood control. In such lakes, littoral vegetation such as the submerged plant communities decreased remarkable. Today, contribution to biological diversity of the littoral vegetation attracts attention, and it has been conducted restoration of the littoral vegetation zone in various regions.

In this study, we paid attention to the calm area behind the offshore dike in the Lake Kasumigaura (Nishiura) where the submerged plant communities disappeared in the past. We investigated the bottom particle size, and conducted the transplant experiment of the submerged plants at the calm area behind the two type offshore dikes. As a result, the submerged plants survived in the area with a few water level fluctuations, and the growth of the submerged plants were controlled as the mud depth thickened.