

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24310053

研究課題名(和文)沈水植物復活阻害要因の解明と復活後の持続的生態サービス利用に関する研究

研究課題名(英文) Study to elucidate obstructive factor against recovery of submerged plants and to design sustainable use of aquatic ecosystem after the recovery of submerged plants

研究代表者

山室 真澄 (Yamamuro, Masumi)

東京大学・新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：80344208

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,200,000円

研究成果の概要(和文)：日本の平野部では1950年代後半から全国的に沈水植物が衰退し、未だ回復していない湖沼が多い。水草類は富栄養化や護岸工事によって衰退したとされ、復活すると水質が浄化されるとしてヨシやアサザが植栽されている。本研究では、沈水植物が復活しない原因として除草剤とアメリカザリガニの捕食を想定し実験を行った結果、アメリカザリガニの捕食者を加えた池では沈水植物が複数年にわたって繁茂したが、除草剤の侵入によって消滅した。沈水植物が繁茂するようになった湖沼で繁茂前後の水質を比べて検討した結果、水質浄化効果は無いことが明らかとなった。ヨシ・アサザについても植栽によりかえって有機汚濁負荷が増加することがわかった。

研究成果の概要(英文)：Submerged aquatic plants disappeared during late 1950's in the lakes in plains in Japan, and they have not been recovered yet in most of the lakes. The cause of the decline is attributed to eutrophication and shore protection work, and reeds and fringed water-lilies are planted to decrease COD of lake water. We hypothesized herbicide and red swamp crayfish are suppressing the recovery of the submerged aquatic plants. At the experiment ponds with predators of the crayfish, submerged plants could survive till the intrusion of herbicides. The comparison of water quality before and after the intrusion of submerged plants in Lake Shinji revealed they don't have ability to purify water. Incubation experiments showed that plantation of reeds and fringed water-lilies would increase the COD of the lakes.

研究分野：水圏環境学

キーワード：ヨシ アサザ 水質浄化 自然再生 沈水植物 除草剤 アメリカザリガニ 富栄養化

### 1. 研究開始当初の背景

日本を含む先進国の平野部の湖沼では、水草群落は縮小・消滅している例が多い。そして欧米では沈水植物（特にシヤジクモ類）の維持・復活が湖沼生態系の回復手法として最も有効であるとされている。

日本の平野部の湖沼では、1950年代後半から1960年代前半の10年の間に全国的に沈水植物が衰退した。この原因について申請者らは除草剤使用が原因と考えているが、霞ヶ浦や手賀沼など関東地方の指定湖沼では、アメリカザリガニをはじめとする草食動物による捕食の影響も大きいと考えられた。

日本では水草群落（例えば浮葉植物のアサザや抽水植物のヨシ）の発達は水質浄化機能があるとして、植栽が行われている水域が多い。しかしアサザやヨシの群落の発達は、流動の減少と有機物供給の増加により、貧酸素化をもたらす可能性がある。また貧酸素化まで至らなくても、溶存有機物を供給することで環境基準であるCODを増加させ、植栽によって逆に水質が悪化する可能性もある

### 2. 研究の目的

本研究では水草類（特に沈水植物）が復活しない原因を解明することと、水草の植栽（特にアサザやヨシ）によって生じる弊害を明らかにすることを目的にした。

### 3. 研究の方法

関東地方の湖沼（手賀沼・霞ヶ浦など）で沈水植物が復活しない原因を特定するために、人工池での植栽実験、埋土種子の再生実験、沈水植物実生の除草剤感受性実験を行った。水質浄化や自然再生等を目的として行われている水草植栽が環境に与える影響を検討するために、植栽地で堆積物を採取し有機物蓄積状況などを分析した。また植栽が行われた場所の高度成長期以前の状況を、米軍空中写真を用いて解析した。さらに沈水植物が繁茂するようになった宍道湖において、その原因の検討と、沈水植物が水質にどのような影響を与えたかを検討した。水質に与える影響については、実験室実験でも検討を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 人工池での植栽実験

縦横13×5mの人工池3面のうち、1面にはライギョを、1面にはクサガメをアメリカザリガニ補食者として導入した。残り1面はコントロールとして動物を導入しなかった。2012年度に沈水植物（ガシヤモク、ササバモ、セキショウモ）を植栽したところ、糸状藻類に覆われても、沈水植物は3面とも順調に生育した。2013年度においても3面全てから沈水植物が発芽し、生育期間中は繁茂が見られた。しかし10月にはクサガメを導入した区画では水草が衰退した。原因としてクサガメがいなくなったことが考えられた。またコントロール区画には水路を通じてライ

ギョが移動していたことが、沈水植物の繁茂につながったと考えられた。2014年5月も沈水植物の発芽が観察されたが（図1）、7月には糸状藻類も含めて大型植物が3面全てで消失した（図2）。原因として、6月に発生した豪雨によって、周辺の水田などから除草剤が混入したと考えられた。2015年6月現在も、糸状藻類を含めて3面とも大型植物は繁茂していない。



図1 2014年5月



図2 2014年7月

#### (2) 埋土種子の再生実験

2012年12月、手賀沼水道橋の西側と東側で掘削作業を実施した。ここでは1997年頃、堤防工事の掘削によってできた水たまりに多様な沈水植物が再生したことから、埋土種子が存在する可能性が高いと判断した。しかし、いずれの場所も可能性のあるところを何箇所も掘ったが、沈水植物の種子を含んでいると確信できる土壌を得ることができなかった。多少可能性があると考えられた土壌をバット15基に撒きだしたところ、2年以上経過して、シヤジクモ類の発芽が観測された。このことから、水質浄化機能があるとされ、かつては手賀沼にも普通に生息していたシヤジクモ類については、現時点では埋土種子から再生できる可能性が皆無ではないと判断した。

2013年度には手賀沼ビオトープから埋土種子を含む土20kgを提供頂いて撒きだしを行った。現在、経過観察中である。

#### (3) 沈水植物実生の感受性実験

人工池での植栽実験では、2014年度に沈水植物が消滅し、その原因として水田除草剤の影響が疑われた。そこで人工池で植栽していたセキショウモについて、水田除草剤が散布される時期の河川水と湖水が実生の発芽に与える影響を実験した。採水は2014年5月21日に霞ヶ浦流入河川中流域と霞ヶ浦湖岸で行った。14日から晴天が続いていたが、21日早朝から雨が降り出し、7時から16時までまとまった雨が降ったため、水田に貯まっていた除草剤が河川水に流入し、さらには湖水に流入したと考えられた。実験の結果、大形実生は河川水と湖水とともに生残したが、初生根は河川水と湖水で純水よりも早く消失した。また大形実生の側根は河川水と湖水で生長が抑制された。小型実生については、湖水では生残したものの、河川水では枯死した（図3）。このことから、水田に散布される除草剤が河川や湖沼に拡散し、水草の発芽・伸長を抑制している可能性があると考え

られた。

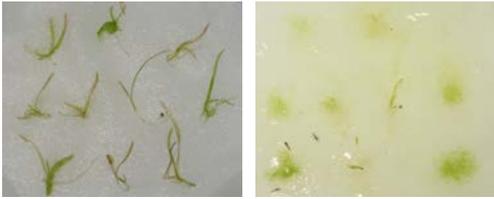


図3 河川水実験結果(左:実験開始時、右:枯死した小型実生)

(4) 水草植栽地堆積物の有機物蓄積状況

島根県に位置する宍道湖では、7カ所において浅場造成や植生再生事業が行われており、水際にヨシが植栽されている地区や植栽したヨシを波浪から守るために、消波施設が設置されている地区がある。この中から図4に示す4地区について、堆積物の表層2cmを採取して分析した。

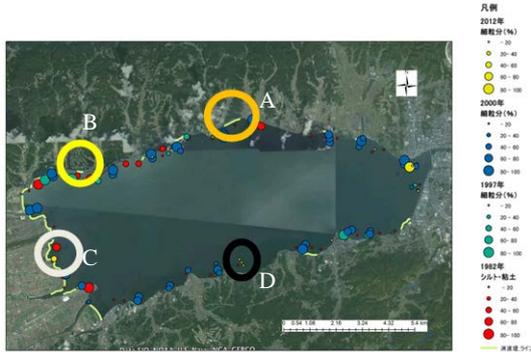


図4 宍道湖における堆積物採取地点

炭素の結果を図5・6に示す。(青:消波堤有り、赤:消波堤無し、緑:ヨシ帯、内側は岸側、外側は沖側を示す。黒:基準点)。地点A・Bともに消波堤のある地点で炭素濃度が高く、基準値よりも大幅に高かった(図5)。またC地点では消波堤が無いために有機物の蓄積は他の地点より少なかったが、その安定同位体比がヨシ(-27.79‰)と近似しており、有機物供給源としてヨシが大きく寄与していると推定された(図6)。

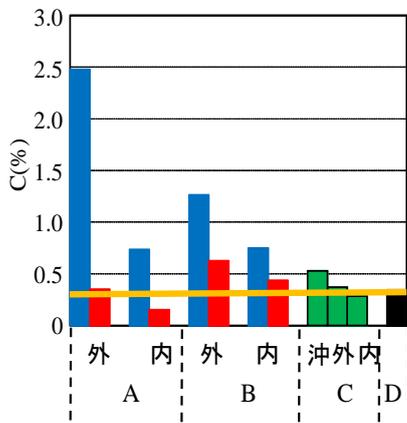


図5 堆積物の炭素濃度(%)

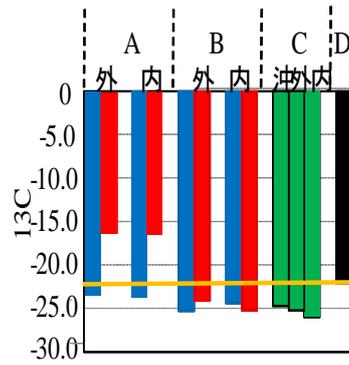


図6 堆積物の炭素安定同位体比(‰)

底質の全硫化物は、地点A・Bにおいて消波堤の内側で濃度が高かった(図7)。

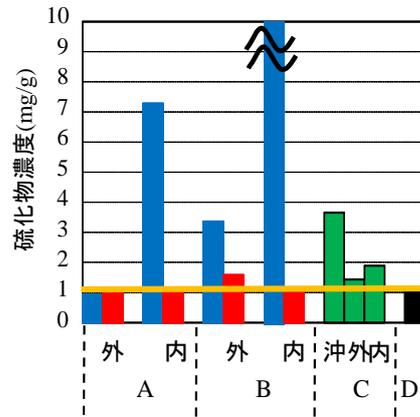


図7 堆積物の硫化物濃度(mg/g)

以上の結果から、消波堤によって本来は波による攪乱で有機物がたまりにくい波打ち際に有機物が貯まりやすくなること、また消波堤を造らなくてもヨシの植栽によって有機物が貯まりやすくなること示唆された。

(5) 米軍空中写真による護岸工事以前の湖岸状況の復元

日本の平野部の多くの湖では、護岸工事や富栄養化によって沈水植物やヨシ原が減少したと考えられ、ヨシについてはその「再生」工事が各地で行われている。島根県に位置する宍道湖でも護岸工事によってヨシ原が失われたとして、各所でヨシ植栽が行われるようになった。一方、1960年代以降沈水植物はほとんど無い状態だったが、2000年代後半になってオオササエビモが大量に繁茂するようになった。本研究では宍道湖を対象に、1947年10月に撮影された米軍空中写真を用いて、沈水植物を含む水草の分布範囲を復元した。沈水植物の判読は、「水域や砂地より暗く、輪郭部が丸みをおび、波の下に存在する」という基準に従って行った。

写真判読の結果、沈水植物以外の水草(ヨシを含む抽水植物・浮葉植物)は湖内では確認されず、抽水植物が確認されたのは流入河川の一部に限られた(図8)。浮葉植物が水

面まで葉を伸ばす沈水植物（現在繁茂しているオオササエビモなど）は、全写真で確認できなかった。沈水植物の面積は約 3km<sup>2</sup>と計算された。また当時 3m とされていた透明度は、本研究の結果では 4m 以上と判断された。

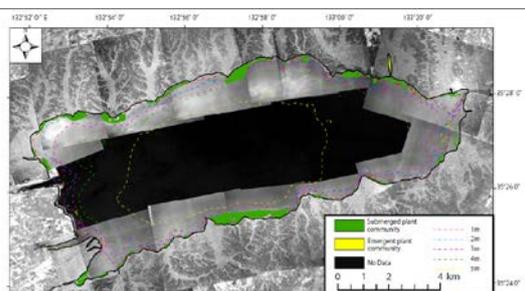


図8 写真判読による植生分布

現在は泥質である水深 4m の湖底の一部は、光を強く反射し白くなっていることや、一部の写真で白い部分に砂漣が認められたことから、砂質であったと推定された。沈水植物は、宍道湖北岸中央部で最深となる水深 4m まで繁茂していた。

吉村 (1937) は 1930 年代の平野部の湖沼について、沈水植物帯は水深 2~4m に分布するとしている。従って当時の宍道湖程度の透明度を有する他湖沼でも、①写真の欠損、②光の反射や波により湖底が見えない、③撮影焦点などの問題が無い写真については、湖底に繁茂する沈水植物を米軍空中写真から判読できる可能性がある。

湖岸の水際に抽水植物が見られない状態は宍道湖だけの特徴ではなく、面積が大きい湖沼では風の吹送距離が長くなることから波浪が強く、植生のない砂浜が湖岸に占める割合が高くなる。琵琶湖の場合、砂や礫だけで植生がほとんどない湖岸が全体の 30%、岩石や山地斜面が湖岸になっている部分が全体の 17%と、湖岸の半分近くで植生が存在していない (金子ほか 2012)。また 14% を占めるとする植生湖岸の大部分が植生として「ヨシ」と記されている。ヨシは抽水状態 (水ヨシ) よりも完全な陸上 (陸ヨシ) の方が生育がよいこと (吉良 1991) から分かるように、ヨシと記載されていることが即ち抽水植物群落とは限らない。

湖沼においては「水質汚濁や護岸工事によって損なわれた植生帯を回復させる」ことを目的とした事業が各地で進んでいるが、水質汚濁が始まったのは 1960 年代であり、それ以前にどこにどのような水草群落が分布していたのか記録されている湖沼はほとんどない。従って「損なわれた植生帯の回復事業」が、本当に損なわれた場所で損なわれた種を対象に行っているとは限らない。

本研究の結果から、米軍写真により抽水植物や浮葉植物だけでなく、全国的な衰退以前の沈水植物の分布も復元できる可能性があることが示唆された。今後、高度経済成長期に富栄養化や護岸工事などで攪乱を受けて

きた湖岸域において水草を対象にした自然再生事業を行うに当たっては、米軍空中写真を参照して、それらの攪乱以前の情報を確認することが望まれる。

#### (6) 宍道湖における近年の沈水植物大量繁茂の原因とその影響

Scheffer (2001) は浅い湖沼では沈水植物が優占して透明度が高い状態か、植物プランクトンが優占して透明度が低い状態のどちらかで安定するとした Alternative stable state 論を展開した。しかし近年、沈水植物が繁茂するようになった宍道湖では、植物プランクトンの減少が期待されるにも関わらず、2010 年からアオコが発生するようになった。本研究では、宍道湖で近年になって沈水植物が繁茂するに至った要因とその水質に与える影響を解明するために、浮遊物質濃度、透明度、植物色素濃度などの光環境に関わる要因や水温・塩分など淡水性沈水植物の発芽・初期成長に影響する要因などの長期変動とともに、そもそも宍道湖で沈水植物が衰退するきっかけとなった除草剤使用が近年どのように変化したのかを検討した。

宍道湖では 2008 年秋に漁網に水草が大量付着したと報告されていることから、本研究では前年の 2007 年に沈水植物の繁茂が始まったと仮定し、湖心部での水質 (水温、電気伝導度、浮遊物質濃度、植物色素濃度、透明度) の長期変動 (2001 年 1 月から 2012 年 12 月) と、2002 年から 2012 年までの水田除草剤年間販売量を検討した。また沈水植物が発芽する 5 月における湖内 7 地点での水質を、繁茂前 (2001~2006 年) と繁茂後 (2007~2012 年) とで比較した。

水温と電気伝導度は全地点において繁茂後の方が高かった。光環境に関わる浮遊物質濃度と透明度は地点間で傾向が異なったが、植物色素濃度は全地点で繁茂後に増加していた。全水質項目において繁茂前後の 6 年間の平均値を比べたところ、植物色素濃度は繁茂後が有意に高かった。

宍道湖周辺で販売された水田除草剤の有効成分量は、2006 年度の 4291kg から 2007 年度の 3305kg と激減し、以後 2000kg 台にまで減少した。以上より宍道湖で沈水植物が繁茂するようになった原因は、2007 年度以降に水田除草剤使用量が減少したためである可能性が高いと判断した。

Yamamuro (2012) は、沈水植物衰退の原因として除草剤の影響を日本では特に考慮すべき理由として、日本の平野部では農耕地の大部分が水田であり、畑の作物と異なり水田除草剤では田植えから 1 ヶ月で年間使用量の大部分を散布すること、また畑では散布された除草剤が土壌を通じて流出するのに対して水田では水路から直接流出することなど、欧米との農業形態の違いを指摘している。

水田除草剤が散布される大型連休直後から 1 ヶ月後くらいの時期は、沈水植物の発芽

や初期成長だけでなく、多くの動物にとっても発生期や初期成長期に重なり、生態系全体にリスクを与えている可能性がある。しかし、現在どのような水田除草剤が流入しているのか、実態が把握されている湖沼は極めて少ない。生態系の攪乱要因として、富栄養化による濁度の増加や公共工事など目に見える影響だけでなく、目に見えない化学物質の影響にも関心を高める必要がある。

#### (7) アサザとヨシから溶出する有機炭素量とその分画

水中の有機物濃度が増加すると、その分解時に酸素が消費されて貧酸素化しやすくなる。このため、日本では水域における有機物汚濁指標として、河川では生物化学的酸素要求量 (BOD)、湖沼及び海域では化学的酸素要求量 (COD) を用い、水域毎に定めた基準値以下にすることが義務づけられている。

湖沼法に関する環境省の解説では、湖辺の植生に期待される水質浄化効果として、「刈り取り等の管理を通じた窒素、リンの直接の取り出しのみでなく、有機物を分解する微生物の生息環境の提供、湖水の流速の低下や障害物の増加による浮遊物の沈降等による水質の改善等、多様な効果が期待される。」とし、水質の改善に資する植物として抽水植物ではヨシ・マコモを、浮葉植物ではヒシ・アサザを挙げている。この中で、実際に植栽されている代表種は、ヨシとアサザである。しかし水質浄化とは COD で表される湖水中の有機物を減らすことである一方、アサザやヨシは有機物でできていることを考えると、アサザやヨシ自体が有機物負荷にならないのか、検討の余地がある。本研究では湖岸もしくは湖岸近傍で前年に成長・枯死したヨシやアサザから供給される溶存有機物と酸素消費が湖沼水質に与える影響を見積もるため、20°C・100 日間・暗条件での分解・溶出実験を Milli-Q 水と手賀沼湖水を用いて行った。また溶存有機物の分画も行った。

100 日後に得られた濃度から計算した植物体炭素量あたりの溶存有機炭素量を比較すると、ヨシ葉と茎では Milli-Q 水・湖水でそれぞれ  $43.4 \pm 1.54 \text{ mg C g C}^{-1}$ ・ $43.7 \pm 1.51 \text{ mg C g C}^{-1}$ と、水条件による違いはほとんど見られなかった。これに対しアサザ葉柄では Milli-Q 水・湖水でそれぞれ  $17.7 \pm 2.76 \text{ mg C g C}^{-1}$ ・ $73.0 \pm 1.89 \text{ mg C g C}^{-1}$ と、水条件の違いで4倍以上の差が生じた。アサザ葉身では Milli-Q 水・湖水でそれぞれ  $163 \pm 5.4 \text{ mg C g C}^{-1}$ ・ $267 \pm 7.5 \text{ mg C g C}^{-1}$ だった。湖水条件で比較すると、アサザ葉身はヨシ葉と茎の6倍、葉柄では2倍近くの溶存有機物を供給した。湖水条件で行った実験の100日後の溶存有機物の分画では、ヨシ葉と茎は疎水性酸と親水性画分の割合がほとんど等しくなり、この2画分で溶存有機物の96.4%となった。アサザ葉柄では疎水性酸の割合が全体の48.4%で、アサザ葉身では親水性画分の割合が全体の

46.2%で、それぞれ最も多い画分となった。以上より、ヨシやアサザの植栽は、本来改善が望まれる環境基準 (COD) に対して悪影響を及ぼし、水質を改善するどころかむしろ悪化させる方向に進行することが示唆された。

アサザとヨシはともに海外では侵略的外来種とされ、種多様性の低下や環境変化などの弊害が報告されている (例えば Larson 2007)。湖沼水質改善の為に水生植物を利用する対策は、本来目的とした有機汚濁負荷の改善どころか汚濁の増加にしかならないことを鑑み、再検討されるべきだろう。

#### <引用文献>

金子有子ほか (2012) 湖岸生態系の保全・修復および管理に関する政策課題研究－湖岸地形と生物からみた琵琶湖岸の現状と変遷および保全の方向性－。滋賀県琵琶湖環境科学研究センター研究報告所，第7号：113-149.

吉良竜夫 (1991) ヨシの生態おぼえ書き。琵琶湖研究所報，第9号：29-37.

Larson, D. (2007) Growth of three submerged plants below different densities of *Nymphoides peltata* (S.G.Gmel.) Kuntze. *Aquatic Botany*, 86: 280-284.

Scheffer, M. (2001) Alternative attractors of shallow lakes. *The Scientific World*, 1: 254-263.

Yamamuro, M. (2012) Herbicide-induced macrophyte-to-phytoplankton shifts in Japanese lagoons during the last 50 years: consequences for ecosystem services and fisheries, *Hydrobiologia*, 699: 5-19.

吉村信吉 (1937) 湖沼学，548pp. 三省堂出版，東京.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計10件)

①加茂川優紀、山室真澄、霞ヶ浦アサザ植栽地での消波工内外の底質、陸水学雑誌、査読有、77巻1号、2016、2016年発行予定、2015年5月8日受理

②藤井伸二、カドハリイの越冬芽の形態と分類学的ノート、分類、査読有、2015、15巻、2015年8月発行予定

③藤井伸二、上杉龍士、山室真澄、アサザの生育環境・花型・逸出状況と遺伝的多様性に関する追試、保全生態学研究、査読有、20巻1号、2015、20巻、pp.71-85

- ④上原達弥、山室真澄、アサザとヨシから溶出する有機炭素量とその分画、陸水学雑誌、査読有、2015、76巻、pp. 1-10
- ⑤山室真澄、神谷宏、石飛裕、宍道湖における沈水植物大量発生前後の水質、陸水学雑誌、査読有、2014、75巻、pp. 99-105
- ⑥山室真澄、日本の汽水湖沼での異常繁殖が懸念される淡水産沈水植物・浮葉植物の繁茂が確認された塩分範囲、陸水学雑誌、査読有、2014、75巻、pp. 113-118
- ⑦平塚智子、山室真澄、国内におけるハス群落管理対策の事例、水草研究会誌、査読有、2013、99巻、pp. 38-43
- ⑧Ayanori Yamaki, Masumi Yamamuro, Floating-leaved and emergent vegetation as habitat for fishes in a eutrophic temperate lake without submerged vegetation, *Limnology*, 査読有、2013、14巻、pp. 257-268  
DOI: 10.1007/s10201-013-0403-2
- ⑨小室隆、山室真澄、1940年代に撮影された米軍空中写真を用いた宍道湖における水草群落分布範囲の推定、応用生態工学、査読有、2013、16巻、pp. 51-59
- ⑩Masumi Yamamuro, Herbicide-induced macrophyte-to-phytoplankton shifts in Japanese lagoons during the last 50 years: consequences for ecosystem services and fisheries, *Hydrobiologia*, 査読有、2012、699巻、pp. 5-19  
DOI: 10.1007/s10750-012-1150-9

[学会発表] (計 11 件)

- ① 安部雄大、山室真澄、宍道湖の浅場造成地における堆積環境、第 17 回河川生態学術研究会、2014 年 11 月 12 日、発明会館 (東京都港区)
- ② 山室真澄、上原達弥、COD を指標としたヨシとアサザによる水質浄化機能の定量化、応用生態工学会第 18 回大会、2014 年 09 月 19 日、首都大学東京南大沢キャンパス (東京都八王子市)
- ③山室真澄、水域における自然再生事業と環境教育、日本陸水学会第 79 回大会、2014 年 09 月 13 日、つくば国際会議場 (茨城県つくば市)
- ④Masumi Yamamuro, Towards the sustainable bivalve fisheries in coastal lagoons, VI EUROLAG & VII LAGUNET Conference, 2013 年 12 月 18 日、Lecce

(イタリア)

- ⑤小室隆、山室真澄、宍道湖における水辺植生帯および隣接水域の環境変遷、日本陸水学会第 78 回大会、2013 年 09 月 11 日、龍谷大学瀬田キャンパス (滋賀県大津市)
- ⑥宮澤雅光、山室真澄、湖沼の植物群落における流れ特性から見た環境変化作用、日本陸水学会第 78 回大会、2013 年 09 月 11 日、龍谷大学瀬田キャンパス (滋賀県大津市)
- ⑦上原達弥、山室真澄、水生植物由来の難分解性溶存有機物の解明、日本陸水学会第 78 回大会、2013 年 09 月 11 日、龍谷大学瀬田キャンパス (滋賀県大津市)
- ⑧山室真澄、宍道湖ではなぜ沈水植物が復活したのか、水草研究会第 35 回全国集会、2013 年 08 月 24 日、国立科学博物館総合研究棟 8 階大会議室 (茨城県つくば市)
- ⑨小室隆、Sergey K. Krivonogov、山室真澄、宍道湖における沈水植物相復元手法の検討、応用生態工学会 3 学会合同大会、2012 年 9 月 8 日、東京農業大学 (東京都世田谷区)
- ⑩加茂川優紀、山室真澄、霞ヶ浦アサザ植栽地での消波施設建設による堆積環境変化に関する検討、応用生態工学会 3 学会合同大会、2012 年 9 月 8 日、東京農業大学 (東京都世田谷区)
- ⑪Masumi Yamamuro, Takashi Komuro, Reconstruction of submerged aquatic vegetation in Lake Shinji, ASLO Aquatic Science Meeting 2012, 2012 年 7 月 9 日、琵琶湖ホール (滋賀県大津市)
6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
山室 真澄 (YAMAMURO, Masumi)  
東京大学大学院新領域創成科学研究科・教授  
研究者番号：80344208
- (2) 連携研究者  
藤井 伸二 (FUJII, Shinji)  
人間環境大学人間環境学部・准教授  
研究者番号：40228945
- 百原 新 (MOMOHARA, Arata)  
千葉大学大学院園芸学研究科・准教授  
研究者番号：00250150
- 林 紀男 (HAYASHI, Norio)  
千葉県立中央博物館生態・環境研究部生態学研究科・上席研究員  
研究者番号：60250156