

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：82101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23510038

研究課題名(和文) 浮遊アオサによる極端な優占現象(グリーンタイド)が干潟の生態系機能へ及ぼす影響

研究課題名(英文) Effects of green tide formed by free-floating Ulva species on ecological functions in tidal flats

研究代表者

矢部 徹 (YABE, TOHRU)

独立行政法人国立環境研究所・生物・生態系環境研究センター・主任研究員

研究者番号：50300851

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円、(間接経費) 1,290,000円

研究成果の概要(和文)：調査対象地は、近年グリーンタイドが発生している東京湾奥に位置する谷津干潟とした。谷津干潟のグリーンタイド主要形成種は遺伝子解析の結果、年間を通じて侵入種ミナミアオサであった。その生物量は春に増加した後、夏に激減し、秋から回復し冬に最大となった後、初春に半量程度に減少した。培養試験の結果、侵入種ミナミアオサは在来種よりも高温でより高い相対成長速度を示した一方、冬期水温付近では成長せず、現場の生物量変化と合致した。干潟表層水の栄養塩類分析の結果、隣接する裸地干潟とは異なり、年間を通じて干潟による栄養塩吸収傾向が認められた。グリーンタイドが干潟の生態系機能に及ぼす多面的な影響が明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：In order to evaluate the quantitative effects of the green tide formed by Ulva species on an ecosystem function in the tidal flat, Yatsu tidal lagoon where the green tide developed throughout the year was selected. By applying a newly developed molecular identification method, we found Ulva ohnoi, which is considered as invasive species, is the dominant species in the tidal. Large accumulation of U. ohnoi was observed from spring to early summer, but was sharply declined in midsummer. The biomass was recovered in fall, and reached its maximum in winter. Indoor culture assays showed that relative growth rate at a higher temperature in U. ohnoi was higher than that in native species U. pertusa. Both species did not grow at the water temperature correspond to that in winter. Analyses of surface water reveal that green tide has important ecological functions in nutrients and carbon cycle.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学、環境影響評価・環境政策

キーワード：グリーンタイド ミナミアオサ 谷津干潟 遺伝子解析 侵入種 生物量 物質収支

1. 研究開始当初の背景

近年、様々な侵入生物に関する研究が実施されてきており、これまでに遺伝的多様性や共存多種への影響などのいわゆる生物多様性への影響が数多く報告されている(日本生態学会 2003; 自然環境研究センター 2008 等)。我が国の沿岸域においても、東京湾、大阪湾、博多湾などの閉鎖性海域において侵入種ミナミアオサ (*Ulva ohnoi*) を含む海藻アオサ類の大量繁茂(グリーンタイド)が確認されており、悪臭や漁業被害、景観悪化など生態系サービスの低下が引き起こされている(能登谷ら 2001)。

申請者らは室内実験によってアオサ類が海水中から窒素、リン等の栄養塩類(石井ら 2001a) や鉄、亜鉛、銅などの重金属類(Tatsumoto et al. 2004) を効率良く吸収することを明らかにしており、沿岸域の物質収支へ多大な影響を与えることを見積もっている(石井ら 2002a; 2002b; 町田ら 2005)。一方で、申請者らの東京湾における研究や矢持ら(2003)等による大阪湾における研究でも、沿岸域における窒素やリンなどの物質収支に対して「アオサ類」としての寄与が見積もられているにとどまっておらず、形態分類が困難である(嵐田ら 2003) ため問題となっている種の識別まではなされてこなかった。上記のミナミアオサと国内における代表的な在来種のアオサ (*Ulva pertusa*) では生物季節性(フェノロジー)が異なることが指摘されて(平岡ら 2002) おり、干潟等浅海域の生態系機能に対して両種が及ぼす影響も異なることが予想されるが、この問題は解明されていない。

2. 研究の目的

本研究では、対象とする現場干潟において、現地調査により得られたアオサ類サンプルを用いて遺伝子解析を行い、アオサ類の種別現存量とその季節変化を定量的に把握する。同時に、航空写真解析および GPS を用いた現地踏査により現場干潟におけるグリーンタイド発生面積を見積もる。さらに、海水、底泥、アオサ類を含む底生生物を現地で採取し、種の同定と個体密度、海水、底泥に含まれる窒素、リン、炭素および硫化物等の濃度を経時的に計測する。室内実験によりアオサ類各種の増殖速度および栄養塩および炭素の吸収特性を明らかにし物質収支への寄与を推定する。

～ から得られた結果を利用して、干潟の生態系機能(生物生息場機能、生物地球化学的機能、水文学的機能)への影響を、特にアオサ類の種(侵入種、在来種)ごとのフェノロジーに留意して定量的に評価を行う。

侵入種に関しての研究事例として、遺伝的多様性や共存他種への影響などがこれまで

数多く報告されているが、栄養塩類の吸収や炭素固定など物質収支へ侵入種が及ぼす影響を議論した事例はきわめて少ない。

アオサ類の生理生態学的特性についてはこれまででも多くの報告がなされてきたが(能登谷 2001)、それらは形態分類による種の決定、あるいは生息環境から推測される種の推定によって対象種を決定しており、Shimada et al. (2003)、Hiraoka et al. (2004) によって整理されたアオサ類の遺伝子レベルでの分類のもとで進められた同分野研究は見当たらない。

グリーンタイドを形成するアオサ類は種ごとにフェノロジーが異なり、在来種アオサが衰退する夏季に侵入種ミナミアオサは増殖期となるとされている(平岡ら 2002)。そのため同じ季節であってもそれぞれの増殖活性や栄養塩類吸収および炭素固定活性やそれらの季節変動パターンも異なるものと予想されるが、上記に関する報告例も見当たらない。さらに、大量に繁茂するアオサ類の現存量に関する定量的な研究事例もきわめて少なく、定性的な情報に限られていた。これはグリーンタイドを形成する浮遊アオサ類のバイオマスに関する適切な評価手法が決定されていなかったことに起因する。

アオサ類の現存量調査や室内実験による栄養塩類吸収速度および炭素固定速度の推定は、種を区別し実施することから、グリーンタイドが沿岸域の物質収支に及ぼす影響の中で、侵入種が関与する部分を評価することが可能となる。とくに侵入種ミナミアオサは在来種とは異なり、高水温期に繁茂するため、沿岸域の基礎生産に多大な影響を及ぼしていることが予測され、沿岸域の物質収支を論じる上でも重要な情報を得ることが予想される。

3. 研究の方法

(1) グリーンタイド形成アオサ類の種別現存量

調査対象地は、侵入種ミナミアオサを含むグリーンタイドが発生しており、かつ物質収支を捉えやすい形状である東京湾奥に位置する谷津干潟とした。谷津干潟におけるグリーンタイドについては、過去の発生面積や季節的消長に関するデータの蓄積がある(Yabe et al., 2009)。本対象地において、基本的に月 1 回のアオサ類のバイオマス調査を実施した。サンプリングには予備検討の結果得られたサイズの方角枠を用いた。サンプルは干潮時に現地で行き取り、各枠 1 箇所重なり層数を求めた。調査で得られた約 50 個体を用い、遺伝子解析により種同定を行い、グリーンタイド形成アオサ類の種別現存量の季節変化を見積もった。

(2) グリーンタイド発生面積の季節変化

現地調査と同時期に撮影された航空写真

と GPS を用いた現地踏査による観測結果から、本対象地におけるグリーンタイド発生面積の季節変化を見積もった。さらに発生面積データと上記の種別現存量データから同干潟における侵入種ミナミアオサと在来種アナオサの現存量を推定する。

(3)底生生物調査と海水環境および底質環境
谷津干潟における底生生物については 1 月から 7 月まで 2 箇月に 1 回、干潮時に 25cm 四方、深さ 15cm の方形枠を 3 個設置し、全量を採取し、目合い 1mm のメッシュで篩った後に生物種の同定と個体密度を計測した。採取時には、堆積しているアオサ類もあわせて採取しここから得られたサンプルと、地表面および底質内から得られたサンプルを分けて評価を行った。

海水環境については干潮時の約 1 時間前に当たる下げ潮時と約 1 時間後に当たる上げ潮時に表層水を採取し、ガラス繊維フィルター（グレード GF/F, GE ヘルスケアジャパン）にて濾過後、オートアナライザーによる各態無機窒素濃度、リン酸態リン濃度および全有機体炭素計による溶存無機炭素の計測を行った。

底質環境については、底質直下 5cm 層における底質間隙水を採取し表層水同様に分析を行った。干潮時における現地調査の際に多点 ORP 電極を用いて底質内の深度別計測を行った。同時に、底質表層を採取して実験室で酸揮発性硫化物および強熱減量を計測した。

(4)アオサ類各種の増殖制限要因の検討

高水温期に増殖期があるとされる侵入種ミナミアオサは冬から春に繁茂するとされる在来種アナオサよりも高水温帯で最大増殖速度が観測されることが予想されたため、事前に遺伝子解析により種を決定した侵入種ミナミアオサと在来種アナオサを用いた。増殖実験を実施するに当たってははじめに温度による成熟誘導条件を確認した。その上で培養にはインキュベーターを用い、水温（6、11、20、25、30）を制御した。庫内光量についても成熟誘導を起こさない程度の受光量とされた弱光（岸田，2003）で $65 \mu\text{mol photon m}^{-2} \text{s}^{-1}$ までに抑えた。現地で採取したアオサ類から直径 25mm の円状サブサンプルを分取し、3 枚 1 組として実験に供した。培地には人工海水マリンアート SF-1（富田製薬 KK）と藻類培養液 KW 2 1（第一製網 KK）を純水で希釈して用いた。実験期間は 7 - 10 日程度とし、重量相対成長速度を算出した。

(5)栄養塩類吸収速度および炭素固定速度の季節変動の推定

谷津干潟におけるアオサ類のバイオマス調査結果から、実験前後 3 ヶ月相当の平均バイオマスを算出した。干潮時に現地で採集し

たアオサ類を海水で軽くすすぎ、過剰な水分を簡易脱水機で処置した後、上記バイオマス当量を野外試験に供するサンプルとした。

ガス透過性の極めて低い透明プラスチック袋とそれに加え光透過性も極めて低いアルミ蒸着袋を、それぞれ明条件、暗条件用反応容器として用意した。各容器には定量済みのアオサ類サンプルと現地海水 6 l を試水として投入し、現場海域に 2 時間程度固定した。対照として各容器には海水のみを充填した。いずれも試水投入時には気相が混入しないように調整した。

実験終了後、試水を約 150mL 分取し、オートアナライザーによる各態無機窒素濃度、リン酸態リン濃度および全有機体炭素計による溶存無機炭素の計測を行った。アオサ類サンプルは実験室に持ち帰った後、湿重量および 80 - 48 時間以上の乾燥処理後に重量を測定した。同時に直径 16mm の円状サブサンプルを分取し、100%メタノールを溶媒とした乳鉢による粉碎による色素抽出を行い、Porra et al. (1989) の式に基づいてクロロフィル a 量の計測を行った。それらの経時変化から、アオサ類による乾燥重量あたり、あるいはクロロフィル a 量あたりの栄養塩類吸収速度および炭素固定速度を推定した。

(6)物質収支へ及ぼす影響の定量化

栄養塩類吸収速度および炭素固定速度の季節変動の推定値の結果に谷津干潟の平均水量を乗じて、谷津干潟で優占する侵入種ミナミアオサを対象として干潟の物質収支に及ぼす影響を定量的に見積もる。

以上の結果を利用して、干潟の生態系機能としての生物生息場機能、生物地球化学的機能、水文学的機能への影響を、アオサ類のフェノロジーに留意してまとめる。

4. 研究成果

(1)グリーンタイド形成アオサ類の種別現存量

アオサ類の現存量の調査に適切な方形枠サイズは 50cm 四方で、繰り返し数は 12 以上であり、本研究では 12 とした。その結果、アオサ類現存量の季節変動が明らかになった（図 1）。春に徐々に増加し 5 月に 150gDW m^{-2} 程度を示したが、夏には 10gDW m^{-2} 以下にまで激減した。秋には回復し 12 月には 300gDW m^{-2} を超えたが、2 月に再度 100gDW m^{-2} 程度まで減少した。層数は春に平均 2-3 層から 4 層まで増加し、夏に激減し平均 1 層、秋に回復し平均 6-7 層程度まで回復していた。

アオサ類の種同定については従来、PCR 法により ITS 領域を増幅しダイレクトシーケンシングによって塩基配列を決定し行われてきたが、シーケンシングには時間とコストがかかり、本研究のような多量のサンプルを対象とする定量的種同定には実用的な遺伝マーカーの開発が必要であり、予備試験を通じて開

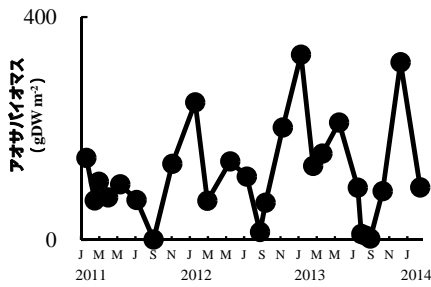


図 1.アオサ類現存量経月変化

発，検証した遺伝マーカーを用いることで周辺干潟での出現が確認された3種のグリーントイド形成アオサ（アナアオサ、ミナミアオサ、リボンアオサ）の簡便かつ低コストな種判別が可能となった。その結果，谷津干潟では春に溇筋など局所的に在来種アナアオサが出現したものの，全域ではミナミアオサが優占しており，本研究の固定調査点ではミナミアオサの出現頻度は調査期間（2011年1月～2014年2月）を通じて1078個体中1074個体（99.6%）であった。アナアオサは残りの4個体（0.4%）であり，25回の調査のうちでも3回しか出現せず，1回の調査での最大値で5%出現した（2011年2月）のみであった。

(2)グリーントイド発生面積の季節変化

本対象地におけるグリーントイド発生面積の季節変化を見積もることを目的として，谷津干潟の干潮時に撮影された可視航空写真，同時に撮影された近赤外フォルスカラー

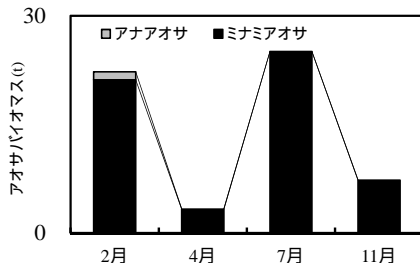


図 2. 谷津干潟アオサ現存量の推定結果

航空写真を取得し，GPS を携帯した現地踏査の結果を教師とし，アオサ類の分布面積を計算した結果，2月に約22ha，4月に約4ha，7月に約27ha，11月に約4haの分布が確認された。種組成の結果と現存量の結果を乗じて谷津干潟におけるミナアオサの最大現存量は7月に約25t，アナアオサについては2月に約1tと推定された（図2）。

(3)底生生物調査と海水環境および底質環境

谷津干潟における底生生物はアオサ類が衰退し腐敗する夏に種数，個体数いずれも大きく減少した。生活場所で区分したところ，地表面より上，すなわち堆積しているアオサ類の隙間に生息する葉上生活者の種数は底質内生息者とほぼ等しく，個体数については冬・春で2倍以上計測された（図3）。葉上生活者を合わせて計上した結果を，谷津干潟に隣接しグリーントイドの発生しない三番瀬干潟と比較したところ，冬には谷津干潟で約

2 倍の種数が出現した。個体数も夏で約 3 倍、冬で約 25 倍にまで増加した。侵入種ミナミアオサが優占することで干潟の生態系機能のうち生息場供給機能について量的に正の効果を示すことが明らかとなった。

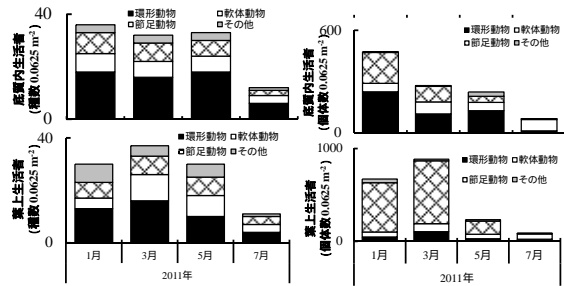


図 3. 底質および葉上におけるベントスの種数（左），個体数（右）の経月変化

表層水中の栄養塩類を測定した結果，隣接する三番瀬干潟などの既知の裸地干潟とは異なり，一年を通じて全窒素（TN）と全りん（TP）ともに下げ潮の方が上げ潮よりも低濃度であることが明らかとなり，干潟内での栄養塩吸収傾向が明らかになった（図4）。

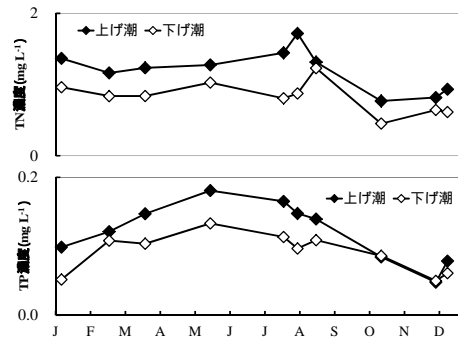


図 4. 下げ潮時，上げ潮時における表層水中全窒素・全りん濃度の経月変化

一方，底質直下深度 5cm の間隙水中の溶存態全窒素（DTN）と溶存態全りん（DTP）は，盛夏から初秋にかけて1桁オーダーで上昇した後に減少した。また底質直下 0-5cm 層の酸揮発性硫化物（AVS）は春から初夏にかけて上昇する傾向が見られた。したがって，底質環境においてはアオサ類の衰退（バイオマス減少）にともなう還元化および間隙水中の栄養塩類濃度の上昇と，その後のアオサ類の再生（バイオマス回復）にともなう間隙水中の栄養塩類濃度の低下という，アオサ類のフェノロジー（生物季節性）にあわせた変化が生じていることが明らかとなった。一方で，これら底質表層での変化は干潟の直上海水中における栄養塩類濃度の変動には大きく影響しない可能性が示唆された。

(4)アオサ類各種の増殖制限要因の検討

アオサ類の培養実験を試みる際に，サンプル移動時や一時保管の際に4の低温に曝されることがなければ繁殖誘導の確率を大幅

に下げることができることが確認された。

そこで、アオサ類の培養試験に必要な条件検討の結果、重量相対成長速度を求めたところ 20-30 °C ではミナミアオサは 10(%day⁻¹)を越える値を示し、アナアオサでは 11-25 °C で 6(%day⁻¹)を越える値を示した。その結果 20 °C 以上の条件ではミナミアオサの成長が卓越すること、一方で 12-2 月の水温に相当する 6 °C では両種ともほぼ 0(%day⁻¹)であった(図 5)。

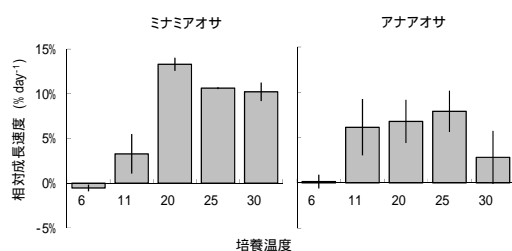


図 5. ミナミアオサ, アナアオサの水温-成長特性

(5) 栄養塩類吸収速度および炭素固定速度の季節変動の推定

アオサ類乾重 1g あたりの無機態窒素およびリン酸態リン吸収速度の推定結果は、日中光合成をしている条件下でそれぞれ 0.03-0.19, 0.001-0.028 mg gDW⁻¹ h⁻¹, 夜間呼吸のみをしている条件下で 0.02-0.15, 0.004-0.028 mg gDW⁻¹ h⁻¹であった。同様に日中の無機態炭素固定速度は真の光合成速度として 2.7-9.8 mgC gDW⁻¹ h⁻¹であった。クロロフィル a 量あたりに換算すると 0.7-2.4 mgC μg chl. a⁻¹ h⁻¹であった。夜間に計測される無機炭素放出速度は呼吸速度であり 1.2-4.8 mgC μg chl. a⁻¹ h⁻¹であった。

Little & Little (1980) による機能分類群ごとの炭素固定速度に関する報告によれば、アオサ類は最も炭素固定速度が高い膜状形態グループに属し、さらにその平均値 5.2 mgC gDW⁻¹ h⁻¹ よりもはるかに高い値を示すことが明らかになった。

呼吸速度と窒素吸収速度は夏だけ高く、他の季節は低い。光合成速度とリン吸収速度は夏から秋にかけて高い季節が続くことが明らかになった。

(6) 物質収支へ及ぼす影響の定量化

これまでの結果から、谷津干潟でグリーンタイドを形成しているアオサ類の 99% 以上は侵入種のミナミアオサであり、本種が最大で谷津干潟の面積の約 3/4 を占め、現存量では 25t に至ること、および 1 日あたりの栄養塩類吸収速度や炭素固定速度の実験結果を乗じて物質収支への影響を評価した(図 6)。

その結果、谷津干潟全体での日中の窒素の吸収速度は 0.81-1.62 tN day⁻¹, 夜間は、0.06-0.79 tN day⁻¹, リンでは日中 0.07-0.24 tP day⁻¹, 夜間 0.04-0.29 tP day⁻¹ を示し

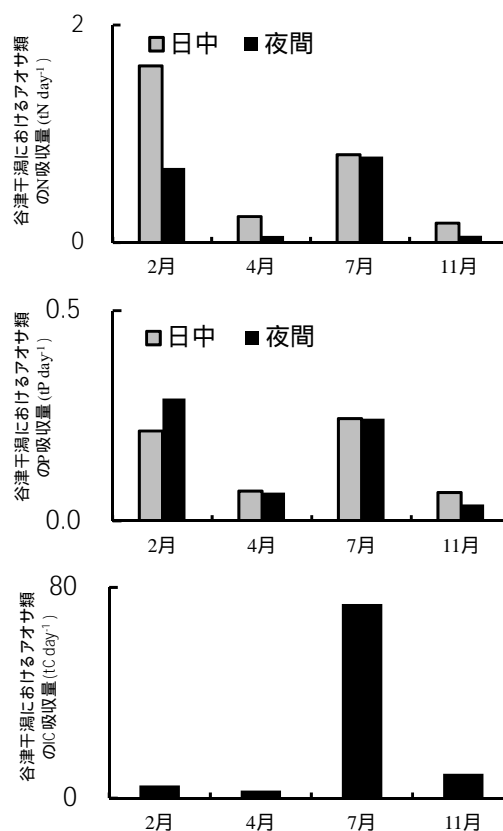


図 6. アオサ類による 1 日あたりの全窒素(上), 全リン(中), 無機炭素(下)の吸収(固定)速度

た。それらの結果から、昼夜あわせた年間の総吸収量は窒素 406t, リン 113t と計算され、その NP 比は日中平均値が 4.8, 夜間が 2.5 となった。Xiao ら (2014) によれば中国でグリーンタイドを起こしている近縁種スジアオノリの成育に関する最適 NP 比 (重量比) は約 5 とされ、本結果と近い値であった。

無機態炭素の吸収速度は 3-74 tC day⁻¹ であった。年間の総吸収量に換算すると炭素約 8300t と計算された。

以上の結果、侵入種ミナミアオサが谷津干潟に分布を広げ優占種となったことにより、アオサ類の枯死に伴う底質の還元化がおきる夏に硫化物の増加と悪臭の素となる硫化水素の発生がみられたものの、底生生物の生物量や種数については増加がみられ、栄養塩吸収や炭素固定能といった生態系サービスについても向上がみられたことが明らかとなった。

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 0 件)

〔学会発表〕(計 8 件)

矢部徹, アオサのひみつ, ラムサール条約登録 20 周年記念谷津干潟の日アオサについて考える集い(招待講演), 2013 年 10 月 27

日，谷津干潟自然観察センター（千葉）

中村雅子・矢部徹・相崎守弘，ガンカモ類の原単位算出および積上げ法による負荷量算出の提案，2013年9月13日，日本陸水学会第78回大会（大津），同講演要旨集，113．

有田康一，矢部徹，玉置雅紀，中村雅子，中嶋信美，林誠二（（独）国環研），石井裕一（（公財）東京都環境公社東京都環科研），北村立実（茨城県霞ヶ浦環科セ），芝原達也（（社）UMS），谷津干潟におけるアオサ類の消長と水質環境，2013年3月11日，第47回日本水環境学会年会（大阪），同講演要旨集，134．

矢部徹，有田康一，玉置雅紀，中村雅子，林誠二（（独）国環研），石井裕一（（公財）東京都環境公社東京都環科研），芝原達也（（社）UMS），浮遊アオサによる極端な優占現象は干潟の生態系機能を低下させているのか？，2013年3月7日，日本生態学会第60回大会（静岡），同講演要旨集，347．

中村雅子，矢部徹（（独）国環研），芝原達也（（社）UMS），有田康一（（独）国環研），石井裕一（（公財）東京都環境公社・東京都環科研），相崎守弘（島根大），林誠二（国環研），谷津干潟に飛来する水鳥による栄養塩輸送量，2013年3月7日，日本生態学会第60回大会（静岡），同講演要旨集，363．

中村 雅子，矢部徹，牛山克巳，神谷要，石井裕一，相崎守弘（2011）ガンカモ類越冬池と中継池における水質季節変化の違い，2011年09月22日，日本陸水学会第76回大会（島根），同講演要旨集，227．

Nakamura M., Yabe T. (NIES), Kamiya K. (Nakaumi Waterbirds International Exchange Foundation Yonago Waterbirds Sanctuary), Ishii Y. (Tokyo Metropolitan Research Institute), Aizaki M. (Shimane Univ.). Rapid and Delayed effects of Nitrogen and Phosphorus from Waterfowl Migration in a bird sanctuary pond, 15 Aug. 2012, The 7th Symposium on Limnology and Aquatic birds (Kristianstad, Sweden), Proceedings, 19-20.

中村雅子，矢部徹（（独）国環研），神谷要（中海水鳥国際交流基金財団），相崎守弘（島根大）ガンカモ類による負荷量がネグラ水域に及ぼす影響を予測する 2011年09月18日，日本鳥学会 2011年度大会，同講演要旨集，124．

〔図書〕（計0件）

〔その他〕

報道関連情報

グリーンタイドに関する取材対応

- ・森林文化協会 雑誌グリーン・パワー（2014年4月号）海のいのちと環境 / 「グリーンタイド」とは？（山本智之）
- ・朝日新聞 「探訪！研究者たちの現場 海を巡る(3)緑色の海藻大発生之谜」2012年4月6日
- ・TBSテレビ「Nスタ」
- ・テレビ朝日「鉄腕ダッシュ」
- ・日経エコロジー2012年1月号「グリーンタイド（緑潮）」

アウトリーチ活動

環境省関東地方環境事務所「国指定谷津鳥獣保護区保全事業」に関するヒアリング対応

6．研究組織

(1)研究代表者

矢部 徹 (YABE. Tohru)
独立行政法人国立環境研究所・生物・生態系環境研究センター・主任研究員
研究者番号：50300851

(2)研究分担者

玉置 雅紀 TAMAOKI, Masanori)
独立行政法人国立環境研究所・生物・生態系環境研究センター・主任研究員
研究者番号：00311324

(3)協力研究者

石井 裕一 (ISHI, Yuichi)
公益財団法人東京都環境公社東京都環境科学研究所・調査研究科・研究員
研究者番号：80551027

中村 雅子 (NAKAMURA, Masako)
独立行政法人国立環境研究所・生物・生態系環境研究センター・リサーチアシスタント

有田 康一 (ARITA, Koichi)
独立行政法人国立環境研究所・生物・生態系環境研究センター・NIES ポスドクフェロ