

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 24 日現在

機関番号：16201

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26281009

研究課題名(和文) 瀬戸内海の栄養塩濃度減少と植物プランクトンの応答

研究課題名(英文) The decrease of nutrient concentration and its response of phytoplankton in the Seto Inland Sea, Japan

研究代表者

多田 邦尚 (Tada, kuninao)

香川大学・農学部・教授

研究者番号：80207042

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,000,000円

研究成果の概要(和文)：近年の瀬戸内海において、栄養塩濃度の減少の原因の解明と、栄養塩濃度減少に対して海洋生態系を支える植物プランクトンの応答について研究した。播磨灘、備讃瀬戸をモデル海域とし、栄養塩の供給源として海底堆積物からの栄養塩の溶出が重要である事を見出し、その測定法や溶出量の推定法を検討した。また、河川水調査や陸域からの栄養塩供給源の変化にも注目した。さらに、海洋の有機物分解に伴うケイ素(Si)の再生速度と窒素(N)やリン(P)の再生速度との差や栄養塩濃度比(N:P:Si比)の変化、および栄養塩濃度減少に伴う植物プランクトン群集(主に珪藻類)の種組成変化とその将来予測についても検討した。

研究成果の概要(英文)：Nutrient decrease in the Seto Inland Sea, Japan, was investigated. We try to find out the reason of the nutrients decrease and we found the importance of nutrient release from the bottom sediments as nutrient source in the Harima-Nada and Bisan-strait, Seto Inland Sea, Japan. Moreover, we examined about the measurement and prediction methods. Also, we focused on the nutrient loading from the land and we conducted the measurements of nitrogen and phosphorous concentrations of river water. Moreover, the response of phytoplankton assemblage to the decrease is discussed, because the phytoplankton is the primary producer of a marine ecosystem and supports that. The decompositions of organic matter originated from the diatoms were tested and the nutrient release was discussed with tracing the N:P:Si ratio and predicted the change of phytoplankton assemblage.

研究分野：生物・化学海洋学

キーワード：生物海洋 栄養塩 堆積物 植物プランクトン

1. 研究開始当初の背景

瀬戸内海は国内最大の閉鎖性海域であり、高度経済成長期にはその環境は著しく悪化していた。しかし、瀬戸内法の施行(1973年)以降は、NやPの排出総量規制等の効果で栄養塩(無機態のN,P,Si)濃度は減少した。特に90年以降は、無機態窒素濃度が減少し(Nishikawa *et al.* 2010)、赤潮(植物プランクトンの異常増殖)の発生件数も最盛期の1/3に減少している。ところが、近年は、むしろ水質が改善しすぎて漁獲量が激減、あるいは、栄養不足による養殖ノリの色落ち被害が多発している。しかしながら、植物プランクトン量の指標である海水中のクロロフィル a (Chl a : 光合成色素) 濃度には顕著な減少傾向は認められない。一方で、申請者らは植物プランクトン群集の種組成が変化していることを明らかにしてきた。即ち、鞭毛藻類の割合が減少して珪藻の割合が増加、さらには、珪藻のなかでも *Skeletonema* 属の割合が減少し、*Chaetoceros* 属などの割合が増加する傾向があるという結果を得ている。

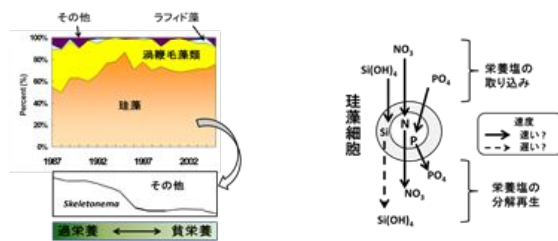


図1 栄養度とプランクトン種組成変化(左)、珪藻細胞の栄養塩吸収と分解再生(右)

また、海域に流入したNやPは植物プランクトンの光合成に利用されて有機物が生産され(NPの消費)同時に、有機物が分解して無機態のNPが再生されている(上図)。瀬戸内海での光合成の主役は珪藻である。珪藻はその細胞の周囲にケイ酸質の殻をもつため、増殖にはNPの他にSiを必要とし、しばしばSiが増殖制限因子となる。NPが十分に存在しSiによる珪藻の増殖制限が起こると、Siを必要としない鞭毛藻類が増殖することになる。鞭毛藻類には、有害赤潮となる種が多い。その意味でも、NPとSiの再生速度(海域への回帰速度)は、現場の栄養塩濃度比(N:P:Si)と、出現する植物プランクトン種を予測するうえで、非常に重要である。

2. 研究の目的

瀬戸内海の栄養塩濃度の減少原因を探るとともに、栄養塩動態について検討し、更に、栄養塩濃度減少に対する植物プランクトン群集の応答についても考察する事を目的とした。

3. 研究の方法

(1) 栄養塩濃度低下の原因解明

海水中の栄養塩濃度の変動を把握するために、瀬戸内海の播磨灘の定点(Stn. NH, 水深35m; 34°28'N, 134°24'E)で、栄養塩濃度を測定した。また、堆積物からの栄養塩溶出が、沿岸海域の栄養塩供給源として重要であることがわかったので、柱状堆積物試料(コア)を採取し、コアインキュベート法により、栄養塩の溶出量を測定した。さらに、8月に12本のコアを採取し、コア中の底生生物(ベントス)個体密度も計数し、その測定に堆積物中のベントスが与える影響について調査した。

(2) 陸域からの栄養塩負荷の検討

播磨灘において、GIS(地理情報システム)を用いて流域の土地利用について調べ、原単位法による生活系から発生する負荷量の推定を行った。また、備讃瀬戸東部の高松地先の海域において、河川流量と河川および下水処理場における全窒素濃度を用いて窒素負荷量を推定した。尚、河川の流量は分布型水文流出モデル(石塚・江種(2008)、石塚ら(2010))を用いて推定した。平均流量とTN濃度を乗じてTN負荷量を試算した。

(3) 有機物の分解と栄養塩の再生

瀬戸内海東部・志度湾において、植物プランクトンネット(北原式、目合60 μ m)を用いて有光層内で鉛直曳きして採取した試料を、室内で分解実験に供した。三角フラスコを用い、ろ過海水2リットルに分解用試料を添加し、現場温度(9~31 $^{\circ}$ C)、暗条件でマグネチックスターで海水が均一になる様に攪拌しながら20日間培養した。その間、経時的に、200mLをサンプリングし、懸濁態有機窒素、生物起源ケイ素、栄養塩濃度を測定した。

(4) 植物プランクトン群集の変化

播磨灘から単離された珪藻種を用いて、様々な光条件で増殖速度を測定し、珪藻類の光応答を調べた。培養は、株を得た際の現場水温下で、光周期を現場明暗周期に調整し、光量子量が 19, 38, 75, 150 および 300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ の条件下で行った。

また、播磨灘・備讃瀬戸海域で 2013 年に発生した *Coscinodiscus wailesii* の大增殖についてその原因を解明した。解析には香川県水産試験場が実施している浅海定線調査結果(2012年1月から2013年12月)と気象庁の気象観測データ(1981年1月から2013年12月)を使用した。

4. 研究成果

(1) 海水中の栄養塩濃度

研究期間内の Stn. NH の栄養塩濃度の変動を見てみると、 $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ 濃度は 0.08 ~ 5.15 μM 、 NH_4^+ 濃度は 0 ~ 2.74 μM 、 PO_4^{3-} 濃度は 0.07 ~ 0.74 μM 、 $\text{Si}(\text{OH})_4$ 濃度は 1.42 ~ 17.27 μM の範囲で変動していた。 NH_4^+ 以外の栄養塩は全て 12 月に最も高い濃度を示していた。 $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ 濃度を見たところ、6 ~ 9 月にかけては表層では 0.31 ~ 0.58 μM と低く、底層では 3.25 ~ 5.15 μM と高かった。水温、塩分で判断したところ 6 ~ 9 月にかけては成層しており、これにより底泥から溶出した栄養塩が底層に留まり、且つ表層から沈降した有機物の分解によって再生された栄養塩も表層へは供給されなかったためと考えられる。10 ~ 12 月にかけては表層、底層とも 4.8 μM 程度まで上昇しており、鉛直混合によって海水が均一に混合されたためと考えられる。他の栄養塩に関しても同様のことが考えられた。しかし DIN ($\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$) 濃度は 2015 年 1、2 月および 2016 年 1 月の表層でそれぞれ 1.67、0.73、2.59 μM とノリ色落ちを起こすとされる 3 μM (松岡ら 2005) を下回っていた。

Stn. NH における 2012 年 1 月から 2016 年 1 月の表層 DIN 濃度(多田・一見・山口研究室データベース)と比較すると、2014 年までの Stn. NH においては表層 DIN 濃度は 10 月から 11 月にかけて高い値を示し、12 月に一度減少するものの、1 月には 3 μM を上回っていた。しかし本研究期間の 2015 年、2016

年の 1 月には 3 μM を下回っていた。

(2) 底泥からの栄養塩の溶出

播磨灘の代表定点から柱状堆積物試料(コア)を採取して、コアインキュベート法により、灘全域の底泥からの栄養塩の溶出量を見積もった。その結果、夏の成層期において、窒素では堆積物からの TN、DIN 溶出量が、それぞれ 96.7、46.4 ton day^{-1} と見積もられた。これは、陸域から播磨灘への TN 発生負荷量の 38.0 ton day^{-1} (環境省, 2013) の 2.5 倍となり、陸域よりも底泥からの供給量の方が大きいことがわかる。また、TN、DIN の河川流入量の 18.5 ton day^{-1} 、14.5 ton day^{-1} (山本ら 1996) と比較すると、それぞれ 5.2 倍、3.2 倍となった。同様に、リンについても、底泥からの TP、DIP の溶出量は 3.8、1.2 ton day^{-1} であり、TP 溶出量は、TP 発生負荷量(1.8 ton day^{-1} 、山本ら 1996) の 2.4 倍となる。いずれにしても、播磨灘への NP 供給量としては、陸域からよりも底泥の方が大きいことがわかった(多田ら 2014)。

(3) 栄養塩溶出量予測

播磨灘・大阪湾において、コアインキュベート法により、底泥からの栄養塩の溶出量を測定し、同時に表層泥(1 ~ 2cm 層)中の TN 含量を測定した。DIN の溶出速度は、泥温と表層堆積物窒素含量に比例しており、この両者から DIN の溶出速度は予測可能であることがわかった。

(4) 底泥からの栄養塩溶出測定に及ぼすベントスの影響

前述のように、コアインキュベート法においてコアに混入するベントスの影響が懸念されている。柱状堆積物コアを 12 本採取し、堆積物からの栄養塩溶出にマクロベントスが与える影響について検討した。その結果、各コア内の栄養塩濃度を経時変化でみると、DIN、 $\text{Si}(\text{OH})_4$ および PO_4 は各コア間で経時変化のバラつきが大きかった。例えば DIN では、12 本(No.1 ~ No.12)のコアの溶出 flux は No.5 が最も高い値で 15.7 $\text{mmol}/\text{m}^2/\text{d}$ を示し、最も低い値では 2.2 $\text{mmol}/\text{m}^2/\text{d}$ であった。このように、DIN、 PO_4 、 $\text{Si}(\text{OH})_4$ は各コア間で溶出 flux が大きく変動していた。一方、柱状堆積物コアで採取

されたインキュベートコア内のマクロベントス個体数を計数すると、379~5,303 個体/m²と変動しており、多毛類が全体の 89%を占めるものから、貝類が 67~75%を占めるものまで大きく変動した。以上のように栄養塩溶出 flux とインキュベートコア内のベントス個体数はともに大きく変動していたが、両者の間には一定の関係は見いだせなかった。即ち、ベントス個体数が高いほど、栄養塩溶出 flux が高いという関係は見いだせなかった。さらに、多毛類、ホトトギスガイを、毎月の観測時にコア内に混入していた年間平均個体密度を遥かに上回る密度で添加して、栄養塩溶出速度を測定した。その結果、多毛類は高密度下であっても、栄養塩溶出 flux に顕著な影響は与えないと示唆された。一方、ホトトギスガイはコア内で高密度であれば、栄養塩溶出 flux に影響を与える可能性があること示唆された(Tada *et al.*, 2016)。

(5) 陸域からの栄養塩負荷の検討

播磨灘において、GIS を用いて流域の土地利用について調べ、原単位法によって生活系から発生する負荷量の推定を行ったところ、流域圏全体では、森林が 68%、水田が 15%、建物用地が 9%を占めていた(2006 年現在)。これは 1976 年に比べて水田と森林がともに減少しており、水田はその 47%が建物用地に、森林は主にゴルフ場に転用されていた。また、備讃瀬戸東部の高松地先の海域において、河川流量と河川および下水処理場における全窒素濃度を用いて窒素負荷量を推定した。また、平均流量と TN 濃度を乗じて TN 負荷量を試算した。この海域における河川と下水処理場の負荷総量は、それぞれ、約 560、約 1,700kg/day となり、下水処理場からの負荷が河川の 3 倍程度である結果が得られた。この結果は、河川流域の小さい香川県の高松地先(備讃瀬戸東部)においては、下水処理場からの負荷が海域への栄養塩供給に対しては重要であることを示している。また、この海域では、岡山県側の影響が香川県側よりも大きかった。環境省が実施している負荷量調査報告書(2015)および日本下水道協会下水道統計(2014)を用いて、窒素・リンの負荷量の特徴と海域における栄養塩管理に向

けた下水処理場の可能性について検討を行った。その結果、播磨灘流域圏および備讃瀬戸流域圏を構成する三県(兵庫県(大阪湾を除く)、岡山県、香川県)の TN、TP の負荷量は多少の違いはあるものの現状(平成 25 年)ではほぼ同じ量であることが分かった。将来的に下水道整備により、処理される可能性のある発生源について負荷量を調査した結果、香川県では、TN について 6~20%、TP については 16~37%も減少することが試算された。一方、兵庫県では、下水道整備率がすでに高いことから、香川県に比べると負荷量は緩やかな減少傾向を示すと考えられる。つまり、岡山県、香川県では下水道整備により、負荷量は今後さらに減少する可能性を有することが示唆された。

以上のことから、播磨灘、備讃瀬戸海域においては、河川流量の違いが海域への窒素・リン負荷量への違いを生じさせており、海域ごとに特徴が異なることが示された。一方で、人口減少や社会経済活動の鈍化、下水道整備率の上昇といった長期的な陸域負荷量の低下を考えると、下水処理場からの負荷量の増加の影響は相対的に大きくなる。そのため、今後の総量規制に対しては、各海域に流入する陸域圏の地形的・社会的特徴が異なることを考慮したゾーニングを行ななどの、よりきめ細やかな対策が必要である結果が示された。

(6) 有機物の分解と栄養塩の再生

分解実験において、抗生物質を添加したものと、添加しないものについて比較した(図 2)。抗生物質添加のものは、N、P、Si の全てについて分解再生されていない。これは、珪藻殻の Si の分解再生が単なる物理化学的な分解溶出では無い事を示しており、珪藻細胞は表面

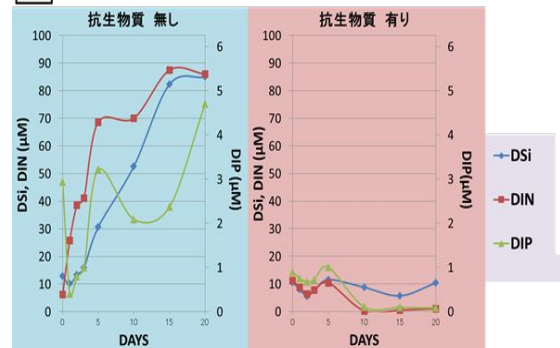


図 2 抗生物質添加の分解実験

いる (Biddle and Azam, 1999) ためと考えられた。さらに、2013年6月～2014年8月にかけて計5回の分解実験を実施した。その結果、計5回のうち4回の栄養塩分解再生傾向は良く似ていた (図3)。即ち、Siの再生速度は、N、Pに比べて遅い傾向にある。即ち、植物プランクトン由来のデトリタスが分解して再生されてくる栄養塩の Si/N 比は低くなることが予想された。

尚、2014年8月の Si の分解再生の傾向のみ、他の回と異なっているが、試料の顕微鏡観察の結果から、これはこの月の植物プランクトン群集の違いよりも、現場でプランクトンネットで採取された試料中に珪藻の死骸が多く認められたためと考えられた。

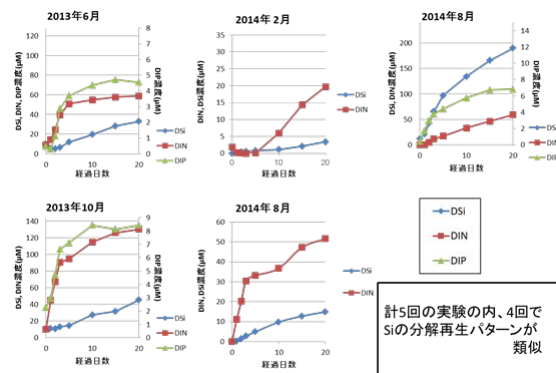


図3. 計5回行った分解実験における栄養塩 (7) 植物プランクトン群集の変化

4, 5 および 6 月は *Skeletonema* 属と *Chaetoceros* 属のどちらも観察されなかった。7 月に *Skeletonema* 属 1 種、8 月に *Chaetoceros* 属 4 種、9 月に *Skeletonema* 属 4 種と *Chaetoceros* 属 2 種、10 月に *Skeletonema* 属 1 種と *Chaetoceros* 属 1 種、12 月に *Chaetoceros* 属 2 種を得た。1, 2 および 3 月は *Skeletonema* 属と *Chaetoceros* 属のどちらも観察されなかった。実験結果より各株の、最大増殖速度 μ_m 、最大増殖速度の半分

の速度を示す光量子量 I_k' 、立ち上がり勾配といった増殖パラメーターを得た。*Skeletonema* 属と *Chaetoceros* 属の増殖パラメーターはそれぞれ *Skeletonema* 属 ($\mu_m=1.25\sim 2.47$ 、 $I_k'=14.23\sim 51.42$ 、 $=0.022\sim 0.051$)、*Chaetoceros* 属 ($\mu_m=1.59\sim 3.36$ 、 $I_k'=29.68\sim 75.49$ 、 $=0.017\sim 0.032$) であり、より低い光環境において *Skeletonema* 属の方が高い増殖速度を示すことがわかった。以上のことから、水質改善

による透明度の上昇から水中の光量子量が増加し、*Chaetoceros* 属をはじめとする他の珪藻種も増殖しやすい環境となったために、*Skeletonema* 属の優占度が低下したと考えられた。

また、播磨灘・備讃瀬戸海域で 2013 年に発生した *Coscinodiscus wailesii* の大増殖についてその原因を解明した。近年、瀬戸内海東部海域の栄養塩濃度は減少傾向にあり (Nishikawa *et al.* 2010) *C. wailesii* の大規模な発生は認められていなかった。しかし、低栄養塩濃度環境の下でも、鉛直混合期に、豊富な降水量、高い全天日射量と長い日照時間、更に深い有光層という条件が整えば、*C. wailesii* の大規模なブルームが形成されることを示した。

(8)まとめ

本研究の期間内では、播磨灘海域の栄養塩濃度は冬季にはノリの色落ちの目安となる DIN が $3\mu\text{M}$ 以下を記録するなど、低濃度が確認された。沿岸海域における栄養塩の供給源には、陸域から (主に河川) 外洋域から、および海底からの三つの起源が考えられるが、海底泥からの栄養塩溶出が非常に重要であることがわかった。また、その栄養塩溶出速度は現場の泥温と表層泥との間に比例関係が認められ、泥温と TN 含量から推測できた。但し、底泥からの栄養塩溶出量の測定には、方法による測定値の違い等、さまざまな問題が指摘されている。今回は、そのうち、栄養塩溶出量の測定におけるペントスの影響に関しては、ほぼ無視できることを明らかにした。一方、陸域から流入する N や P については、今後の土地利用形態の変化が及ぼす影響も考慮すべきであると考えられる。また、下水道整備が進めば、下水処理場からの負荷量は相対的に大きくなるため、今後の総量規制に対しては、各海域に流入する陸域圏の地形的・社会的特徴が異なることを考慮したゾーニングを行ったよりきめ細やかな対策が必要であると考えられる。

植物プランクトン由来のデトリタスと考えられる有機物を用いた分解実験では、珪藻細胞殻を構成する生物起源ケイ素が、有機物の膜に覆われており、この膜をバクテリアが

分解しない限り、Si が再生されてこないと考えられた。さらに、Si の再生はNやPに比べ遅い傾向があり、Si 欠損仮説を支持する結果であった。しかし、これは海水中の Si/N 比を低下させるはずであるが、実際の瀬戸内海の海水中の Si/N 比はわずかに上昇傾向にあり、この結果で現状を説明する事はできない。また、近年、瀬戸内海の植物プランクトン群集組成では珪藻の占める割合が増加し、且つ珪藻類では、これまで優占種であった *Skeletonema* 属の優占性が低下しているが、その理由の第一として光が考えられた。また、栄養塩濃度が低下し、高濃度の栄養塩に適応した種の *Coscinodiscus* 属は近年、大増殖が観察されていなかったが、2013年に大増殖した。このことから、降雨や光条件、および海水の鉛直混合などの条件が揃えば、低濃度下でも大増殖すると考えられた。栄養塩濃度の低下への植物プランクトンの応答は、単純ではなく、栄養塩濃度条件以外の要因（降雨、光、鉛直混合等）が複雑に影響していることが考えられた。

<引用文献>

- Biddle, K.E. and Azam, F.: Accelerated dissolution of diatom silica by marine bacterial assemblages, *Nature*, 379, 508-512(1999).
- 石塚正秀、江種伸之：農業用水取水ルールを考慮した分布型水文流出モデルによる紀の川流出解析、*水工学論文集*、52:391-396(2008)。
- 石塚正秀、吉田秀典、宮崎孟紀：レーダー・アメダス解析雨量を用いた中規模河川流域の流出解析と降雨特性分類に基づく検証、*土木学会論文集B*、66-1:35-46(2010)。
- 松岡聡・吉松定昭と・小野哲・一見和彦・藤原宗弘・本田恵二・多田邦尚：備讃瀬戸東部（香川県沿岸）におけるノリ色落ちと水環境、*沿岸海洋研究*、43, 77-84(2005)。
- Nishikawa, T., Hori, Y., Nagai, S., Miyahara, K., Nakamura, Y., Harada, K., Tanda, M., Manabe, T. and Tada, K.: Nutrient and phytoplankton dynamics in Harima-Nada, eastern Seto Inland Sea, Japan during a 35 year period from 1973 to 2007, *Estuar. Coast*, 33, 417-427(2010).
- 環境省：平成 24 年度水質総量削減に係る発生負荷量等算定調査業務報告書。環境省水・大気環境局(2013)
- 多田邦尚・西川哲也・樽谷賢治・山本圭吾・一見和彦・山口一岩・本城凡夫：瀬戸内海東部海域の栄養塩低下とその低次生物生産過程への影響、*沿岸海洋研究*、52, 39-47 (2014)。
- 山本民次・北村智顕・松田 治：瀬戸内海に対する河川流入による、淡水、全窒素および全リンの負荷、*広島大学生物生産学部紀要*、35, 81-104 (1996)。

5. 主な発表論文等 〔雑誌論文〕(計 4 件)

1. Tada, K., Koomklang, J., Ichimi, K. and Yamaguchi, H.: Negligible effect of the benthic fauna on measuring the nutrient upward fluxes from coastal sediments, *Journal of Oceanography*, 査読有、(in press).
2. 多田邦尚・大山憲一・白土晃一・益井敏光・深尾剛志・吉松定昭：2013年に播磨灘・備讃瀬戸（香川県沿岸）で発生した *Coscinodiscus wailesii* の大増殖。日本水産学会誌、査読有、81, 979-986 (2015)。
3. 多田邦尚：沿岸海域における溶存ケイ酸と生物起源ケイ素およびその循環、*水環境学会誌*、査読無、37, 379-384 (2014)。
4. 多田邦尚・西川哲也・樽谷賢治・山本圭吾・一見和彦・山口一岩・本城凡夫：瀬戸内海東部海域の栄養塩低下とその低次生物生産過程への影響、査読有、*沿岸海洋研究*、52, 39-47(2014)。

6. 研究組織

- (1)研究代表者 多田 邦尚(TADA, Kuninao)
香川大学・農学部・教授
研究者番号：80207042
- (2)研究分担者 石塚 正秀 (ISHIZUKA, Masahide)
香川大学・工学部・准教授
研究者番号：50324992
- (3)研究分担者 山口 一岩 (YAMAGUCHI, Hitomi)
香川大学・農学部・准教授
研究者番号：50464368
- (4)研究分担者 一見 和彦 (ICHIMI, Kazuhiko)
香川大学・瀬戸内圏研究センター・教授
研究者番号：70363182
- (5)研究分担者 本城 凡夫 (Honjo, Tsuno)
香川大学・瀬戸内圏研究センター・特任教授
研究者番号：80284553