

## 〈論文〉

## 汽水湖阿蘇海における底質酸素消費速度の推定とリン収支の定量評価

川口 衛<sup>1)</sup>, 佐藤 圭輔<sup>2)</sup>, 森 颯人<sup>1)</sup>, 管原 庄吾<sup>3)</sup><sup>1)</sup>立命館大学大学院 理工学研究科  
(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1 E-mail: rv0036he@ed.ritsumei.ac.jp)<sup>2)</sup>立命館大学 理工学部  
(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1 E-mail: k-sato@fc.ritsumei.ac.jp)<sup>3)</sup>島根大学大学院 総合理工学研究科  
(〒690-8504 島根県松江市西川津町 E-mail: suga@riko.shimane-u.ac.jp)

## 概要

汽水湖の環境改善にむけた施策設計のために、汚濁問題が表面化している阿蘇海を対象として、底質が湖水や物質収支に与える影響を分析した。特に底質酸素消費量 (SOD) に着目してその影響因子を分析すること、リンの空間分布に着目して堆積量と物質収支を推定することを主目的とした。その結果、SODは1.21~1.71 gO/m<sup>2</sup>/dayとなり、最深部で最大値を、H<sub>2</sub>Sなど還元物質とその流動性などの影響を受けて総じて高い値を示した。また、底質には流出入量差の3~13年分のリンが堆積 (124~577 ton) していると推定され、底層水のTP (表層水の数倍以上) は底質からの溶出の影響を受けていると推察された。

キーワード：汽水湖、底層の貧酸素化、底質酸素消費速度 (SOD)、栄養塩溶出、リンの物質収支

原稿受付 2018.6.27 原稿受理 2018.9.4

EICA: 23(2・3) 152-163

## 1. はじめに

我が国における水環境は、明治以後の経済発展・産業近代化に伴い工場などからの排水が拡大し、水銀汚染や富栄養化などに代表される水質汚染が問題となってきた。そうした環境問題への対策の為に、近年においては、一律排水基準や環境基準の制定、下水処理場の普及などの水質改善事業が実施されてきた。水環境へ排出される汚濁物質は低減してきており、河川における生物化学的酸素要求量 (以下 BOD) の環境基準達成率では 1975 年の約 57% に比べ 2015 年では約 96% とその改善がみられている<sup>1)</sup>。しかしながら閉鎖性の水域では、プランクトンによる栄養塩固定や底質からの栄養塩類の溶出など内部負荷が原因となり、湖沼における化学的酸素要求量 (以下 COD) の環境基準達成率 (2015 年度) は約 59%、閉鎖性海域では約 63-93%<sup>1)</sup> と未だに課題が残っている。そのような閉鎖性水域の中でも、特に宍道湖やサロマ湖に代表される汽水湖では、COD の環境基準達成率 (2010 年度) が約 10% 程度<sup>2)</sup> と著しく低い。この要因としては、汽水湖ではその流域の最下流に位置することから、有機物や栄養塩類など様々な物質が集積する<sup>3)</sup> ことや懸濁物質が海水による作用で凝集沈殿すること<sup>4,5)</sup> に加えて、淡水と海水との密度差により通年で塩分躍層を形成することが挙げられる。

汽水湖に流入した有機物等の汚濁物質は、湖内で凝

集・沈殿した後に、還元的な有機汚泥として底質に固定される。塩分躍層下では、この底質に含まれる有機物を微生物が分解することで、活発な酸素消費が行われることに加え、その鉛直混合阻害も影響し、貧酸素・無酸素化が進行しやすい<sup>6)</sup>。溶存酸素の減少により酸化還元電位が低下すると、湖底に堆積している底質からのリンや重金属類の溶出が進み、富栄養化等の水環境問題を長期化させる<sup>3,6-10)</sup>。この貧酸素化による影響は富栄養化に留まらず、硫酸還元細菌により海水由来の硫酸イオンが硫化水素に還元され<sup>11)</sup>、これを含む水塊が風波や潮汐の影響により表層に押し上げられたときに青潮が発生すると言われている<sup>12)</sup>。さらには、硫化水素自体が被酸化物として多量の酸素を消費するので、より一層の硫酸イオンの還元や重金属類・栄養塩の溶出が行われる。こうした汽水湖ならではの貧酸素水塊形成機構によりもたらされる底質 (底層環境) の性状は、湖全体の環境を左右する重要な因子と考えられている<sup>13)</sup>。

このような問題を踏まえてわが国では、一部の水域を対象に底層溶存酸素に関わる環境基準<sup>14)</sup>が制定された。今後汽水湖でも底層環境の改善に向けて様々な対策が検討されていくと考えられるが、その抜本的な解決に向けて、流域政策が汽水湖の環境・持続性改善にどのような効果を有するか総合的に評価するべきである。しかしながら、その際に最も重要な情報となる対象水域の“物質収支 (ストックとフロー)”や“底質

による影響の大きさ”などが明確となっていない場合が多い。京都府北部に位置する阿蘇海もそのような汽水湖の一つである。

阿蘇海は、日本三景の一つである天橋立により外海から閉鎖された汽水湖として有名である<sup>15)</sup>。阿蘇海はその容積に対して外海と通じる2本の水路が小さく、十分な水交換が行われていない。そのため河川から流入する汚濁物質の多くは阿蘇海で滞留しているうちに沈降・堆積し、底質の軟泥化が進んでいる。結果として、現在の阿蘇海のCODは1980年代よりも高い水準を維持している<sup>16)</sup>。実際に富栄養化によってマダキやアオサが大量発生し、景観や水質の悪化による生態系への影響が深刻な問題となっている<sup>17, 18)</sup>。これらの問題に対し、物質収支や汚濁機構に係る調査としては、昭和50年代に京都府によって実施・集約されたもの<sup>19)</sup>がある。また、最近では底質からの溶出抑制と底生生物の生息環境改善を目指し、シーブルー事業(H5~H30, 覆砂工)などが行われているが、事業計画面積が約4%に留まり、阿蘇海全域への環境改善効果という点では十分とは言い難い。有効な対策を考えるためにも、汽水湖における先行研究(物質動態に関するもの<sup>20-25)</sup>、改善手法に関するもの<sup>26, 27)</sup>を参照し、前回の大規模調査から数十年経過した現在の阿蘇海の汚濁状況やそのメカニズムを調査することが求められている。

本研究は、阿蘇海における汚濁物質の存在量と流出入量を明らかにし、底質性状が湖水(特に底層水)にもたらす影響とその因子を解明することを目標に実施した。この目標を達成するため、底質酸素消費量(Sediment Oxygen Demand: 以下SOD)<sup>28)</sup>を指標として、以下の分析を行った。

- ① SODや溶存酸素(以下DO)の経時変化を定量し、その値に影響する物理化学的因子の影響を評価
- ② 貧酸素条件下における、底質からの溶出する栄養塩類の分析
- ③ 水質・底質の空間分布調査を通じて、リンの物質収支と底質からの影響を評価

## 2. 方 法

### 2.1 研究対象の汽水湖<sup>19)</sup>

本研究での調査は閉鎖性海域である阿蘇海およびその外海との接続水路(Fig. 1)にて実施した。阿蘇海は、その面積が4.62 km<sup>2</sup>(基盤地図情報により水涯線を定義)、平均水深が8.4 m、容積が4.2×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>の汽水湖である。外海の宮津湾とは、天橋立によって隔離されており、表流水としての水の出入りは野田川、男山川、三田川、大橋川、真名井川および宮川の6河川

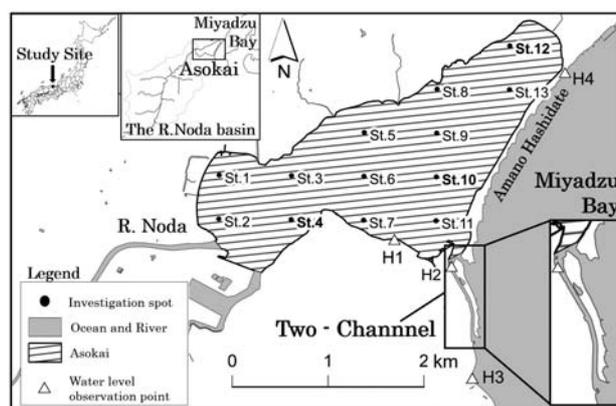


Fig. 1 Distribution of sampling points for lake water and bottom sediment (St) and water level observation points (H) in Aso-kai Lagoon

からの流入に加え、2本の水路を通じた外海との流出入(水交換)である。既報値<sup>19)</sup>による概算では、阿蘇海における水理的滞留時間は1か月~数か月程度とされており、年間数百%を超える水交換速度となっている。しかしながら、海域からの流出入の寄与が大きく、強固な塩分躍層により、底層水の交換は限定的である。一方、阿蘇海の流域人口は4.3万人程度、流域面積は約136 km<sup>2</sup>で、野田川流域がその80%を占めている。

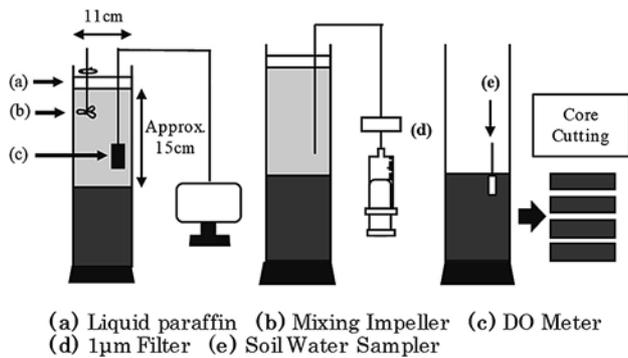
### 2.2 現地調査と分析実験の方法

#### 2.2.1 底質のサンプリング方法とSOD試験方法

SOD試験に用いた不攪乱底質試料のサンプリングは、夏季(2017年9月19-20日)と冬季(2018年3月24-25日)に実施した(Table 1)。不攪乱底質試料の採取地点は、野田川河口(St. 4)、湾央最深部(St. 10)、湾奥部(St. 12)の3地点に設定した。採泥作業は、調査船上から不攪乱柱状採泥器(HR型、離合社)を用いて行った。採取した試料には直ちに密閉操作を行い、不攪乱・冷蔵状態で実験室へ運搬し、SOD試験と溶出試験を行った。採泥時には泥温と酸化還元電位(以下ORP)の現地測定を行い、また、同地点の底層水(海水)のサンプリングも同時に行った。

Table 1 Aso-kai Lagoon field survey schedule and contents

Survey contents	2016	2017		2018
	Oct. 25-27th	Mar. 11-13th	Sep. 19-20th	Mar. 24-25th
24 hour water quality survey in a channel	○			
Investigation of seasonal change of water and sediment quality in Aso-kai Lagoon	○	○	○	
Sampling of sediments for SOD and measurement of its indicators			○	○
Water level observations in Aso-kai Lagoon and Miyadzu Bay	○	○	○	○



**Fig. 2** Experimental and operation procedures using undisturbed bottom sediment samples: (1) measurement procedure of sediment oxygen demand (SOD), (2) procedure of stationary elution test and sampling of right overbottom water, (3) sampling method of pore water in bottom sediment, and layer division of samples

SOD 試験は底質調査方法<sup>29)</sup>を参考に、持ち帰った不攪乱底質試料をそのまま利用し、20℃恒温条件にて実施した (**Fig. 2**)。本試験にはアクリル製円筒管 (内径 11 cm×長さ 50 cm) を利用し、卓上スタンドに取り付けられた攪拌機と DO 計を管上方から差し込んだ。採泥時に採取した底層水は、溶存酸素を飽和させた後にカラム内の不攪乱底質の直上水と置換し、その上端は流動パラフィンを用いて気相からの酸素供給を遮断した。SOD 試験には、それぞれ 1~2 L 程度の直上水を利用した。試験中には、試料が巻き上がらない程度かつ、十分に混合する程度の緩やかな速度 (70 rpm 程度) にて直上水を攪拌した。また、直上水の DO は、DO 計 (PS-2196, 島津理化学) を用いて 1 秒ごとに、2~3.5 日間にわたって測定した。

底質による酸素消費は、化学的酸化による消費と有機物等の生物的酸化による消費に分類することができる<sup>30,31)</sup>。この化学的酸素消費は還元物質による化学反応によって生じる酸素消費であるため、短期間で観測するとより優先しやすいことが報告されている<sup>30,32)</sup>。そのため、SOD の算出には、その計測時から直線的に DO が減少するとされている 6-10 時間分の計測データが利用されている<sup>30,33,34)</sup>。本研究における SOD の算出も線形的 DO が減少している初期 10 時間以内の概ね線形的な DO 消費速度を SOD として定義した。

### 2.2.2 底質性状の分析と溶出試験法

SOD 試験に用いたものと同様の柱状管を用いて、不攪乱底質試料を 20℃ の恒温室で静置することで貧酸素状態における溶出試験を実施した。SOD 試験とは対照的に、攪拌は行わず、一定 (水相中央部) の場所まで試験器具外からチューブを固定させ、指定の日付にてガラスシリンジ (VAN 白硬注射筒, 翼工業) を用いて採水と濾過を行った。分析時まで還元状態 (試験機器内部状況) にて保存するため、ガラスシリンジ内で完全に気密させ保存した。いずれの試料にお

いても、試験開始後と一定日数 (10, 75 日) 経過後に直上水の採水を行い、全リン (以下 TP) およびリン酸態リン (以下  $\text{PO}_4\text{-P}$ ) を測定した。冬季試料に関しては、底質からの溶出量の短期的変化を捉えるために、5 日目までの毎日と 7 日目、10 日目、75 日目以降に直上水の採水を行い、水素イオン指数 (以下 pH)、酸化還元電位 (以下 ORP)、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、アンモニア態窒素 (以下  $\text{NH}_4\text{-N}$ ) および硫化水素 (以下  $\text{H}_2\text{S}$ ) 濃度をそれぞれ測定した。また、ミズツール (DIK-8392, 大起理化学工業) を用いた底質間隙水の採取も行った。

溶出特性や DO 消費特性に与える影響を分析するために、夏季の底質コアを 4 cm 厚で層分けし、その湿試料および間隙水に対して、含水率、アルカリ性過マンガン酸カリウムによる酸素要求量 (以下  $\text{COD}_{\text{OH}}$ )、全炭素 (以下 TC)、全窒素 (以下 TN)、TP、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、酸揮発性硫化物 (AVS) および金属類 (Fe, Mn および Al) をそれぞれ測定した。また、冬季では別途 KK 式コアサンプラーを用いて同地点での採泥を行い、表層から 4 cm まで 1 cm 厚で層分けし、含水率、 $\text{NH}_4\text{-N}$  および  $\text{H}_2\text{S}$  をそれぞれ測定した。

本研究に関わる分析操作と定量方法は以下の通りである。試料水の浮遊物質量 (以下 SS)、TP、 $\text{PO}_4\text{-P}$  および  $\text{NH}_4\text{-N}$  は下水試験方法<sup>35)</sup>を、 $\text{COD}_{\text{OH}}$  は工場排水試験法<sup>36)</sup>を、pH と ORP はそれぞれポータブル型水質計 (pH メータ D-54, 堀場製作所) を用いて分析した。 $\text{H}_2\text{S}$  は、ガラスシリンジを用いた溶存硫化物の抽出方法<sup>37)</sup>を用い、667 nm における吸光度 (UV-2600, 島津製作所) で定量した。底質に関して、TC および TN は CN コーダー (NC-22F, 住化分析センター) を用いて、Fe, Mn および Al は、ICP-OES (Agilent 720, Agilent Technologies) を用いて、TP に関しては底質試験方法<sup>29)</sup>における硝酸-硫酸分解法を用いて、AVS に関しては検知管法 (ヘドロテック-S 330, ガステック) を用いてそれぞれ分析を行った。

## 2.3 阿蘇海における物質収支と湖内環境の観測方法

### 2.3.1 阿蘇海および外海の水位観測と接続水路における流量推定

阿蘇海では、潮汐によって海水の流入が発生する<sup>19,38)</sup>。この現象の主な外力は阿蘇海と外海との水位差であるため、**Fig. 1** に記した 4 地点 (H1~H4 地点) にて、10 分間隔の水位観測を行った。絶対圧型水位計 (In-Situ Rugged TROLL100) の設置場所は、阿蘇海内に 1 か所、接続水路 (小天橋付近) に 1 か所、外海の南北にそれぞれ 1 か所ずつとし、2015 年 11 月以降、2018 年現在も連続的な水位観測を行っている。取得したデータは同時に京都府宮津庁舎にて計測した

気圧によって補正され、水位に換算した。2015～2016年に実施した接続水路における流量観測結果<sup>39)</sup>と水位差との関係を利用することで、流量の経時変化と年間流量を推定した。

### 2.3.2 阿蘇海と外海の接続水路における水質調査

接続水路における水質調査は、2016年10月25-27日に実施した(Table 1)。阿蘇海と外海との接続水路を対象に、潮汐などに伴う汚濁負荷の流出入量を経時的に観測した。水路中央の表層水はバケツにて、底層水は採水口が底層に設置した自動採水機(ISCO6712型)にて、それぞれ30分間隔で24時間(表層水は日中のみ)分の流水を採取した。底層には2波長・磁気式の高濃度濁度計(JFEアドバンテックINFINITY-Turbi)も合わせて設置し、5分間隔で濁度の計測を実施した。なお、阿蘇海と外海との接続水路は2本あるが、本水質調査はそのうち流量の多い北側の1水路(大天橋)のみを対象として実施し、流出入時(水交換時)のTP負荷量を算出した。なお、TP負荷量の算出には、2.3.4で推定した両水路の流量と本調査によるTP測定値を利用した。

### 2.3.3 阿蘇海の湖内環境に関する現地調査

阿蘇海における水質および底質の空間分布に関する現地調査は、夏季(2016年10月26-27日)および冬季(2017年3月11-13日)の2季節でそれぞれ実施した(Table 1)。主な調査地点は経緯度格子点(南北15°間隔、東西30°間隔)に基づいて設定した13地点(Fig. 1)とし、それぞれの地点で水深の測定(アクアソナー、PS-7)、エクマンバージ採泥器(宮本理研)を用いた採泥、エンジンポンプ(工進KH-25)を用いた汲み上げ採水と高濃度濁度計を用いた濁度の鉛直分布観測(冬季のみ)および、多項目水質計(U-53G, HORIBA)を用いた塩分(PSU)、水温およびDOの鉛直分布観測を行った。濁度計を用いた調査は南北7.5°間隔、東西15°間隔で計43地点で行った。採水には測深目盛りを付した20m採水ホースを利用し、5m(夏季)もしくは3m(冬季)深度ごとのサンプルを各1L(夏季)ずつ、もしくは2L(冬季)ずつ採取した。採取した試料に関しては、それぞれ水試料に対して水温、SS、DOおよびTPを、底質に対してはTPを測定した。

### 2.3.4 リン堆積量と収支の定量評価方法

リン堆積量を算定するために、採取された底質性状と塩分躍層の観測水深(2~4m)および文献値<sup>19)</sup>を参考に有機汚濁した軟泥(乾泥の密度:2.455 g/cm<sup>3</sup>、間隙水の密度:1.035 g/cm<sup>3</sup>)が4m以深に50cm程度堆積していると仮定した。泥深50cmまでの底質乾泥および底質間隙水中に対するTP濃度には、それぞれ夏季底質の実測値を用いて算定された95% C.I.(n=13)を設定した。また、含水率には不攪乱底質

(夏季3地点)における鉛直分布をそれぞれ地点ごとに考慮し、それらの95% C.I.(n=3)を設定した。次に、本研究の調査から得られた地点水深からスプライン内挿法を用いて作成したコンター図を使用し、阿蘇海における4m以深の境界を特定することで、阿蘇海の底質の体積を求めた。以上より、底質乾泥および底質間隙水中に対するTP濃度の95% C.I.と底質乾泥重量および間隙水量とをそれぞれ乗じてリン堆積量を求めた。

阿蘇海の最大流域である野田川からの流入負荷量は、野田川下流の堂谷橋地点で設定された水位-流量の回帰式(2)、(3)<sup>39)</sup>と比流量-TP負荷量の回帰式(4)<sup>39)</sup>を用いて算出した。

$$Q_r = 0.545 \times H_r^{5.63} \quad (0 < H_r \leq 1.51) \quad (2)$$

$$Q_r = 25.1 \times (H_r - 0.70)^2 \quad (H_r > 1.51) \quad (3)$$

$$L_m = 0.30 \times Q_m^{1.28} \quad (4)$$

ここで、 $Q_r$ は流量(m<sup>3</sup>/sec)、 $H_r$ は水位(m)、 $L_m$ は比負荷量(gP/sec/km<sup>2</sup>)、 $Q_m$ は比流量(m<sup>3</sup>/sec/km<sup>2</sup>)である。式(2)、(3)で推定された流量 $Q_r$ は、野田川流域面積(103 km<sup>2</sup>)で除すことで比流量 $Q_m$ に換算された。本研究では、2014年の1時間ごとの野田川(堂谷橋地点)水位データ<sup>40)</sup>を用いることで、野田川を通じて阿蘇海に流入する負荷量を算定している。

阿蘇海と外海との流出入負荷量の計算は、阿蘇海と外海との接続水路2本における合算流量は、両海域の水位差との回帰式(5)を用いることで求めた<sup>39)</sup>。

$$Q_c = 1.22 D - 6.67 \quad (5)$$

ここで、 $Q_c$ は2水路合算流量(m<sup>3</sup>/s)、 $D$ は阿蘇海-接続水路の水位差(m)を示している。水位差 $D$ の設定には、阿蘇海(H1地点)と接続水路(H2地点)の1時間ごとの水位データを利用し、接続水路調査における実測流量との関係にて式(5)の係数と定数を算出した。水路流水中のTPには2.3.2の夏季調査における実測平均値を両水路の濃度として利用し、式(5)で推定される流量に乗じることでリン負荷量を算定した。

## 3. 結果1: 底質による酸素消費とその影響因子

### 3.1 SOD試験の結果と考察

夏季および冬季のSOD試験の結果をFig. 3abに、試料ごとのSODと底質含有物質濃度の測定結果(層分けされた試料濃度も含む)をTable 2に示した。泥温およびORPの一部については、機器の不調により

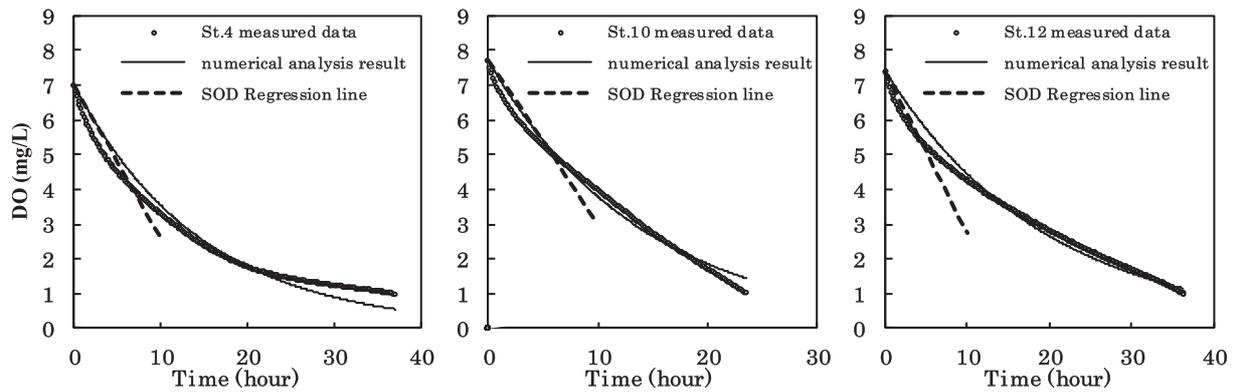


Fig. 3a. Determination of DO consumption characteristics over time (DO consumption rate during the first 10 hr (SOD, regression line)) and fitting of oxygen consumption curve with first-order reaction assumed for undisturbed bottom sediment in summer

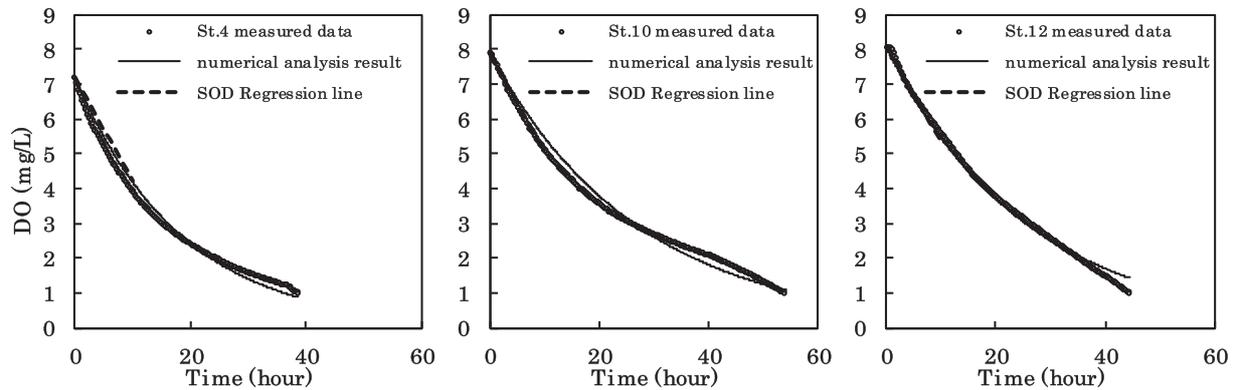


Fig. 3b. Determination of DO consumption characteristics over time (DO consumption rate during the first 10 hr (SOD, regression line)) and fitting of oxygen consumption curve with first-order reaction assumed for undisturbed bottom sediment in winter

Table 2 Fundamental characteristics, concentrations of substances contained, and sediment oxygen demand measured in bottom sediment collected in winter and summer

		St.4	St.10	St.12	St.4	St.10	St.12
Season		Summer			Winter		
SOD (gO/m <sup>2</sup> /day)		1.21	1.54	1.71	1.47	1.41	1.34
SOD Measurement Time (hour)		6	5	4	7	9	6
Sediment Temp. (°C)		24	—	23	—	—	14
ORP (mV)		-450	—	-440	-340	-380	-435
Water depth (m)		8.0	13.0	8.0	6.4	12.6	7.5
TPsed (mg/g)		0.9	0.7	0.7	—	—	—
Fe (mg/g)		18.3	15.1	19.6	—	—	—
Mn (mg/g)		0.3	0.2	0.3	—	—	—
Moisture Content (Vol %)	0-1 cm				73.8	85.1	77.9
	1-2 cm				70.6	83.9	75.7
	2-3 cm	90.4	93.2	92.7	72.6	83.6	74.6
	3-4 cm				77.4	81.0	80.2
TC (mg/g-dry)	0-1 cm				33.9	35.9	34.0
	1-2 cm				38.5	37.4	38.2
	2-3 cm	46.2	43.0	50.7	41.6	35.9	36.8
	3-4 cm				43.4	28.1	37.3
TN (mg/g-dry)	0-1 cm				2.40	3.26	3.23
	1-2 cm				2.80	4.01	7.87
	2-3 cm	3.42	3.32	5.70	3.14	3.10	3.89
	3-4 cm				3.15	3.96	4.91
AVS (mg/g-dry)	0-1 cm				2.21	6.89	0.90
	1-2 cm				3.98	6.23	0.74
	2-3 cm	2.71	9.00	1.08	5.39	6.52	0.78
	3-4 cm				6.58	4.31	1.06

欠測となった。また、冬季の不攪乱試料は、層分けされたことによる試料不足によって、一部の測定項目 (TP<sub>sed</sub>, Fe および Mn) が欠測となった。季節間で SOD を比較すると、冬季の方がやや低い値 (平均で 10% 程度低い値) となったが、大きな差は見られなかった。一方で、地点間で測定値を比較すると、冬季では 3 地点で大差が見られなかったが、夏季では最大で 1.5 倍程度の差が確認された。具体的には湾中央最深部 (St. 10) や湾奥 (St. 12) で高い値となったが、野田川河口 (St. 4) では低い値を示した。このため、特に有機物の内部生産が活発な夏季には、流れが滞留しやすい場所や水深の深い場所において被酸化物の堆積効果が SOD を上昇させるものと考えられたが、不攪乱底質の表層 (夏季は 0-4 cm, 冬季は 0-1 cm) における TC, TN, AVS, Fe および Mn の含有物質濃度 (Table 2) と SOD との関係性を分析した結果、両者には明確な関連性が見られなかった。その一方で、SOD に与える別の影響としては、底質相と直上水相との水・物質交換性 (流動性)、すなわち底質からの被酸化物 (DOC, NH<sub>4</sub>-N, H<sub>2</sub>S など) の溶出・移行特性が挙げられる。不攪乱底質の表層における含水率 (Table 2) を物質流動性の指標の 1 つとして、SOD との関係性を分析した結果、限られたデータ数ではあるが、夏季においては正の相関を示唆する結果が得られた。このことから、有機汚濁化が著しく進み、強い還元状態に置かれた底質 (ヘドロ) には、そもそも被酸化物が多く含まれているため、SOD の測定値 (10 時間以下の線形的な短期酸化速度) が底質含有物質の大

小よりも、むしろ流動性の影響を強く受ける可能性が高いものと推測された。

一方、St. 4 でやや低い SOD となった原因の 1 つとして、調査前日の台風出水による土砂堆積が影響した可能性がある。St. 4 の底質には、黒色還元泥の上層に 5 mm 程度の黄色堆積層が確認されており、これによる覆砂効果も SOD の結果に影響を及ぼしたことが示唆された。今回調査で阿蘇海にて定量した SOD は、琵琶湖におけるそれらの報告値に対して 1.5~3 倍程度 (両水域の最深部ベースでは最大で 7 倍程度)<sup>32, 41)</sup> となり、汽水湖では前述のような閉鎖性水域としての水理学的特徴に加えて、海水による有機汚濁化の促進や硫化水素等の発生がこの数値の差に影響をもたらしているものと考えられた。

### 3.2 酸素消費速度の経時変化とその影響因子

河川・水環境での DO 消費速度は、例えばストリーター・フェルプスの式で表されるように、有機物分解などの一次反応にて示されている<sup>42-44)</sup>。様々な形態で構成される被酸化物を対象とした DO 消費速度の場合には、化学的酸化による比較的速い酸素消費と生物的酸化による比較的緩慢なそれに区別されることもある<sup>27, 30, 31)</sup>。底質による DO 消費速度も両機構によるもので構成されると考えられるが、本稿では両者を区別せずに単一の DO 消費速度定数を特定し、各試料間の類似性を考察した。両者を区別しなかった理由としては、対象底質は高濃度の H<sub>2</sub>S を含むなど強い還元状態にあること (Table 2 および Table 3),

**Table 3** First-order rate constant of DO consumption in undisturbed bottom sediment in winter and summer, and concentration distribution of H<sub>2</sub>S and COD<sub>OH</sub>, NH<sub>4</sub>-N, and PO<sub>4</sub>-P contained in pore water in bottom sediment

	St.4	St.10	St.12	St.4	St.10	St.12
Season	Summer			Winter		
Sampling Frequency (times)	446	284	437	466	650	534
Observation Period (hour)	37.1	23.6	36.3	38.8	54.1	44.4
C <sub>0</sub> (mg/L)	7	7.7	7.4	7.2	7.9	8.1
K (1/h)	0.068	0.071	0.051	0.055	0.037	0.039
Coefficient of determination	0.960	0.987	0.974	0.986	0.986	0.995
H <sub>2</sub> S (mgS/L)	0-1 cm			2.7	20.6	6.2
	1-2 cm			12.0	35.8	16.3
	2-3 cm	—	—	24.7	64.7	20.2
	3-4 cm			22.8	68.6	32.6
COD <sub>OH</sub> (mg/L)	0-1 cm			5.6	3.8	2.6
	1-2 cm			4.3	3.0	4.8
	2-3 cm	14.0	14.2	6.7	4.3	4.8
	3-4 cm				4.4	4.2
PO <sub>4</sub> -P (mg/L)	0-1 cm			—	—	—
	1-2 cm			—	—	—
	2-3 cm	3.20	2.26	1.83	—	—
	3-4 cm				—	—
NH <sub>4</sub> -N (mg/L)	0-1 cm			5.6	3.8	2.6
	1-2 cm			4.3	3.0	4.8
	2-3 cm	—	—	—	4.3	4.8
	3-4 cm				4.4	4.2

SOD 試験が外部からの酸素を遮断したバッチ試験で実施されていること (Fig. 2), SOD 試験において必ずしも明確に一次反応速度を変化させる挙動が見られなかったこと (Fig. 3ab) が挙げられる。

回帰分析に用いた式 (式(1)) には一般的な一次反応を考慮した。ここで,  $C$  は DO (mg/L),  $C_0$  (mg/L) は DO の初期濃度,  $K$  ( $\text{hour}^{-1}$ ) は反応速度定数,  $t$  (hour) は反応時間を示す。本解析では SOD の計測時間 (初期 9 時間以下) にはこだわらずに, Table 3 の測定時間に示されるように DO が 1.0 mg/L を下回るまで継続的に測定した値を利用した。

$$C = C_0 \times \exp(-Kt) \quad (1)$$

Fig. 3ab にフィッティングした一次反応曲線を, Table 3 に導出した反応速度定数  $K$  と底質間隙水中の物質濃度 ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{COD}_{\text{OH}}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$  および  $\text{NH}_4\text{-N}$ ) をそれぞれ対象試料別にまとめた。一次反応が仮定された曲線の適合性はいずれも良好 (全て  $R^2 > 0.96$ ) であることを確認した。季節間で定数  $K$  を比較すると, 冬季 ( $0.037 \sim 0.055 \text{ hour}^{-1}$ ) よりも夏季 ( $0.051 \sim 0.071 \text{ hour}^{-1}$ ) の方がやや大きい値となった。前節の SOD 試験の結果でも述べたように, 底質相と直上水相との流動性が寄与したことに加えて, 直上水に対する底質の還元力の違いが影響したと考えられる。実際に, いずれの地点においても夏季の底質の方が低い ORP ( $\leq -440$ ) を示していた (Table 2)。一方, 冬季試料については, 塩分躍層下での湖水鉛直混合や低水温による微生物活動 (硫酸還元菌など) への影響が関与して底質層内の還元力がやや低減していることが示唆された。

地点間の定数  $K$  の大小関係について比較した結果, 季節間では類似の傾向を見出すことは出来なかった。夏季試料の定数  $K$  は, 最深部である St. 10 (水深 13.0 m) で最も大きく, 水深の浅い St. 12 (水深 8.0 m) で小さい値となっていた。ここでも ORP や AVS など還元ポテンシャルが影響したものと推定され, 実際の試料泥色も St. 12 だけは黒緑色 (他は黒色) を呈し

ていた。冬季試料の定数  $K$  は, St. 12 で最も大きい値であったが, 反応曲線の適合性がその他底質と異なっていることに留意が必要である。St. 12 の底質中の ORP は最も低い値であったが, 底質間隙水 (表層 1 cm) の  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{COD}_{\text{OH}}$  および  $\text{NH}_4\text{-N}$  はその他底質のそれらよりも低い値であったため, DO 消費に与える優先機構や被酸化物の構成がやや異なっていることを示唆した。

Table 3 に示したように, 1 cm ごとに層分けして測定された底質間隙水の  $\text{H}_2\text{S}$  濃度の結果からは, いずれの地点においても表層からの泥厚 2~3 cm 程度以深で濃度変化が小さくなる傾向が確認された。一般に底質酸化層の厚みは表層から 5 mm 程度までとされている<sup>13)</sup>が, それより下の数 cm までの間隙水も底層水の還元に寄与していることが本研究の結果から推察された。4 cm 以深 (最大 28 cm 程度まで) の傾向として特徴的な点としては, 乾泥中の AVS や TC, TN が深度方向にやや減少傾向であったため, 嫌気性微生物群の長期的な消費が影響した可能性が示唆された (Fig. 4)。一方, TP や金属類 (Fe, Al, Mn) については深度方向への大きな変化は確認することが出来なかった。

#### 4. 結果 2 : 栄養塩類の溶出特性

夏季および冬季底質における溶出試験の結果を Table 4 に示した。なお, この試験中は貧酸素状態が維持されていることを確認している。概ね平衡状態に達していると考えられる 75 日目の直上水中の  $\text{PO}_4\text{-P}$  は夏季で  $0.05 \sim 0.95 \text{ mg/L}$ , 冬季で  $0.83 \sim 1.86 \text{ mg/L}$  となり, 環境水としては一部の結果を除いて高い値であることと, 季節による差異と地点による差異のいずれもが確認された。これらの差異は, 含水率による流動性, 還元性の強さに加えて可溶性リンの割合や溶出速度などが複合的に影響したものと推察された。特に St. 10 では両季節とも最大値となっており, 底質間隙水の  $\text{PO}_4\text{-P}$  (Table 3) と溶出試験後の直上水のそれとの差が小さい ( $1.3 \text{ mg/L}$  程度) ことを考慮しても,

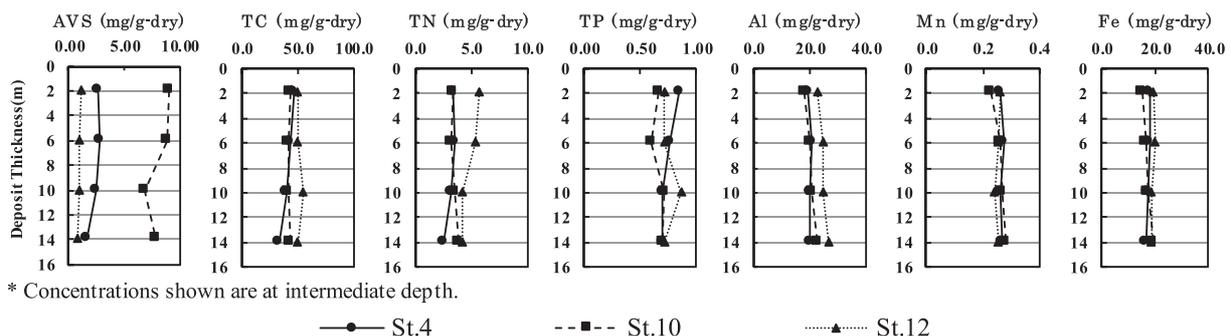


Fig. 4 Analysis result of substances (AVS, TC, TN, TP, Al, Mn, and Fe) contained in summer bottom sediment divided into 4-cm-thick layers

**Table 4** Concentration change of PO<sub>4</sub>-P and NH<sub>4</sub>-N in elution test for bottom sediment in winter and summer

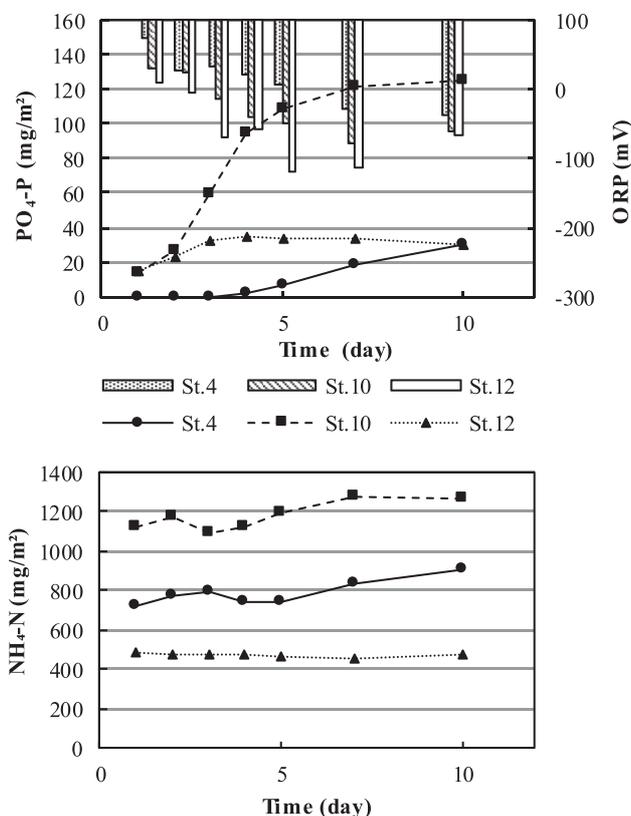
Season		St.4	St.10	St.12	St.4	St.10	St.12
		Summer			Winter		
PO <sub>4</sub> -P (mg/L)	0 day	0.04	0.04	0.04	0.00	0.07	0.08
	10 day	0.00	0.56	0.44	0.20	0.86	0.20
	≥75 day	0.05	0.95	0.55	1.61	1.86	0.83
NH <sub>4</sub> -N (mg/L)	0 day	—	—	—	4.02	6.25	2.59
	10 day	—	—	—	6.23	8.74	3.18
	≥75 day	—	—	—	8.93	7.93	4.39

流動性の寄与を受けた可能性が高いと考えられた。なお、夏季の St. 4 においては、前章でも述べたように台風出水による覆砂効果により、PO<sub>4</sub>-P の溶出が制限された可能性がある。

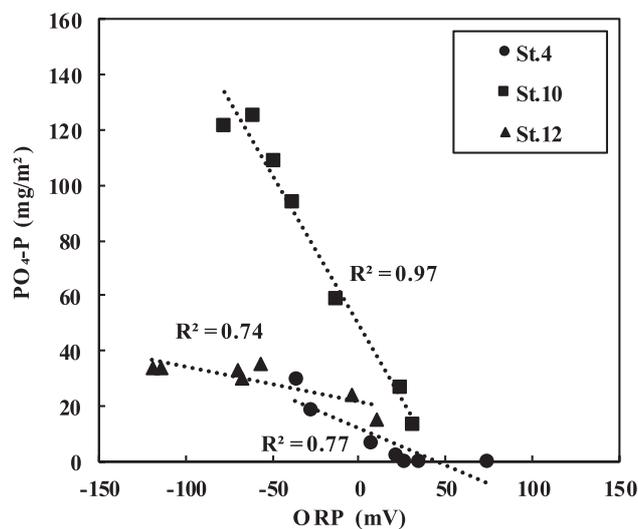
溶出試験後の直上水の NH<sub>4</sub>-N については、冬季底質のみの結果を示しているが、PO<sub>4</sub>-P の結果と比較すると NH<sub>4</sub>-N の方が早い段階で平衡状態に近づいていることや、75 日目以降の地点間の濃度比が類似していること、間隙水との濃度差がほぼ見られないことがわかる。濃度の差異には、上述した PO<sub>4</sub>-P と同様の溶出影響が予測されたが、いずれも直上水の NH<sub>4</sub>-N は 4 mg/L を超えており、底質からの溶出の寄与が大きいことが示唆された。

続いて、冬季底質で実施された溶出試験の結果（経日変化）を Fig. 5 に示した。直上水の PO<sub>4</sub>-P は、ORP の減少に伴って、いずれも上昇する傾向が確認された。しかし、地点間の比較では溶出による PO<sub>4</sub>-P の到達濃度や経日変化に違いが認められた。特に

St. 10 では早い段階で高い濃度に達したが、この結果は、先に述べた H<sub>2</sub>S の大きさや後述する現地底層水の PO<sub>4</sub>-P の結果とも整合している。PO<sub>4</sub>-P の形成過程について地点間の比較を行うために、PO<sub>4</sub>-P と ORP との関係性を Fig. 6 に示した。いずれの地点においても、ORP と PO<sub>4</sub>-P との間には明確な負の相関が示されたことから、PO<sub>4</sub>-P 溶出は還元状態の進行とともに線形的に促進されるが、その傾きは異なっていることが分かる。これらの違いには、可溶性リンの分解特性（例えばリンを吸着した水酸化第二鉄、酸化鉄の硫化反応に伴う溶出<sup>13)</sup>や、汽水域底質での嫌気性微生物による有機物分解など）と流動性の両者が影響したと推測される。一方で、直上水の NH<sub>4</sub>-N（経日変化）は、試験開始後すぐに平衡状態に達しており、その後は緩やかな上昇が確認された。両者の溶出機構の違いについては今後の詳細な分析が必要であるが、阿蘇海底層では一年を通じて貧酸素状態が継続しているため、PO<sub>4</sub>-P と NH<sub>4</sub>-N のいずれにおいても底質から底層水への恒常的な溶出負荷が大きいと推察された。



**Fig. 5** Elution characteristics of PO<sub>4</sub>-P and NH<sub>4</sub>-N and variation of ORP over time in winter bottom sediment



**Fig. 6** Relation between PO<sub>4</sub>-P concentration and ORP in elution test for winter bottom sediment (St. 4, St. 10 and St. 12)

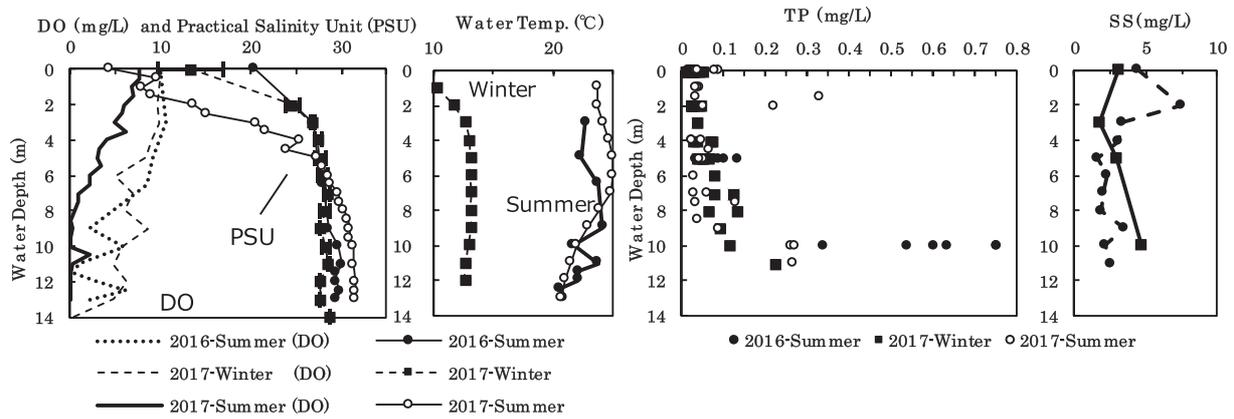


Fig. 7 Vertical profiles of salinity, dissolved oxygen, water temperature, total phosphorus, and suspended solids in Aso-kai Lagoon (comparison of summer and winter in 2016–2017)

## 5. 結果 3：阿蘇海におけるリン収支と湖内水質に与える底質の影響

### 5.1 水質の鉛直プロファイルと底質の影響

阿蘇海における塩分濃度 (PSU) と DO (mg/L) の鉛直プロファイルを図 7 に示した。両季節とも水深 2~4 m 程度で塩分濃度の急激な変化が見られていることから、比較的浅い水深で 1 年を通じて強固な塩分躍層が維持されていることがわかった。また、躍層以深は海水 (30~35 PSU) に近い塩分濃度 (27~30 PSU) であることも合わせて確認された。水深 4 m 程度までの範囲で淡水による塩分希釈効果が見られたが、その大きさは河川からの影響を受けて地点により大きく異なること、2017 年夏季の出水影響時には水深 4 m 程度までの塩分濃度が半減したこともわかった。上記出水影響時は本調査前 3 日間の先行積算降雨量が 190 mm (宮津) に達し、阿蘇海流域-阿蘇海の面積比 (20:1) と蒸発散を考慮すると、概算では同期間において 2~3 m 程度の淡水が阿蘇海に流入した結果となり、本研究による観測結果 (一時的な希釈規模) に概ね一致するものと考えられた。

夏季においては塩分躍層のほかに、それより深い水深 6~8 m で弱い水温躍層も観測された。清水ら<sup>45)</sup>によると、6~11 月には阿蘇海で水温躍層が形成されるとされており、本調査の結果もそれに従う結果となった。このことから夏季においては特に強い鉛直混合阻害が生じているものと考えられた。一方、冬季における底層水の水温は、表層水のそれより約 1.26 倍 (約 3°C) 高く、夏季とは異なるプロファイルになっていた。これらの結果から、夏季から冬季にかけて水温躍層が不安定化し、本研究の冬季調査時には表層水を除いて弱い混合状態になったものと考えられた。

DO については、季節によらず水深 3~4 m までは 5 mg/L 以上であったが、それ以深では季節間で異なる傾向となった。夏季には弱い水温躍層が確認されて

いることもあって、深くなるほど線形的に DO が減少し、8 m 以深の底層水は多くの地点で 2 mg/L を下回る水準になっていた。冬季には水温躍層が確認されなかったこともあって、最底層を除いて深度による DO の減少傾向は緩やかであった。これらの結果は、季節によって実質的な水交換速度 (滞留時間) が異なること、言い換えれば中底層への DO 供給が限定されることを示しており、底質と底層水あるいはそれらと中表層水との物質交換にも影響を与えると推察された。

そうした季節による躍層や DO の違いが、TP の鉛直プロファイル (図 7) にどのような影響を与えているかを考察した。なお、採水時に底質の巻き上げ・混入の可能性が考えられたため、最底層の測定結果は省いている。いずれの季節においても、表層から中層 (水深 5 m 程度) までの TP の変化は緩やかな上昇であったが、底層 (水深 10 m 程度) の TP は表層のそれに比べて著しく高い値 (数倍~10 倍程度) となった。中底層水の SS はいずれも 5 mg/L を下回っており、懸濁態のリンが TP の増減に与えた影響は限定的である。こうした底層における高い TP は、塩分躍層による湖水鉛直混合への制限と、特に夏季の水温躍層による DO 供給制限に伴って、貧酸素化が恒常化していることを裏付けている。

### 5.2 阿蘇海におけるリン堆積量の推定

底質に含有する TP の 95% C.I. を算定した結果、乾泥の TP で 0.38~0.54 mg/g-dry、底質間隙水中の TP で 3.15~5.42 mg/L と算定された。また、含水率の 95% C.I. は、49~81 wt% と算定された。採取された底質はいずれも強い還元状態にあることから、間隙水中の TP は高い値となったが、底質リンに占める間隙水のそれは 1.2~2.5% 程度であることが分かった。一方、阿蘇海における底質の体積を推定した結果、阿蘇海は沿岸部から急激に水深が深くなるため、4 m 以

深の面積は阿蘇海全体のおよそ81% (3.7 km<sup>2</sup>) を占める結果となった。含水率の鉛直分布に留意して、底質間泥および底質間隙水中のTPの95% C.I. 値と底質乾泥重量 (31 万 ton) および間隙水量 (129 万 m<sup>3</sup>) とをそれぞれ乗じて合計されたリン堆積量は、124~577 ton 程度と推定された。

### 5.3 阿蘇海におけるリン収支の推定

野田川を通じて阿蘇海に流入する負荷量を算定した結果、約 39.8 ton/year と推定することができた。阿蘇海流域と野田川流域の面積比は 136 : 103 であり、単純にその面積比を負荷量に乗じると阿蘇海流域全体からの負荷量は 52.6 ton/year と概算することができた。

続いて、阿蘇海と外海との流出入負荷量を推定した結果、外海から阿蘇海へ流入するリン負荷量は約 14.4 ton/year、阿蘇海から外海へ流出する負荷量は約 20.9 ton/year と推定された。この結果から、外海へ流出するリンの約7割が阿蘇海へ戻っている (正味3割が外海へ流出している) ことが明らかになった。阿蘇海流域からのリン負荷量と比べると、正味の流出量は約12% であり、残りの88% (46.1 ton/year) が阿蘇海に蓄積していることが明らかとなった。阿蘇海におけるリン堆積物の多くは、河川から懸濁態として阿蘇海へ流入・沈降したものであると考えられるが、海水に含まれる金属イオンとの吸着・凝集作用も堆積量を増加させる要因<sup>4,5)</sup> になっていると考えられた。

本研究で推算された阿蘇海におけるリン収支を Fig. 8 にまとめた。阿蘇海の海水中に含まれるリン存在量は、本調査に基づいて5 m 水深幅ごとの平均濃度を設定し、それぞれの海水量を乗じることで推定した。その結果、水深0~5 m で0.44~1.36 ton、水深5~10 m で1.0~1.64 ton、水深10 m 以上で0.62~

2.11 ton となり、阿蘇海 (海水) 全体で 2.33~4.21 ton 程度であると推算された。前節で示したように、阿蘇海底質中のリン堆積量は124~577 ton であったことから、海水中のリン総量はその0.4~3.4% 程度に過ぎないことが明らかとなった。一方、流域および外海からの流出入負荷量が毎年同程度だとすると、阿蘇海にはおよそ3~13年分程度のリンが蓄積していると考えられた。

以上をまとめると、底質におけるリンのストック量は膨大であり、底層水への溶出を介した中表層水への富栄養化への寄与も容易には改善されないことが予想された。例えば、覆砂工やエアレーションによる環境改善効果を推定するには、短期的効果と長期的効果の両面を考慮して施策設計されることが望ましいと考えられる。

## 6. ま と め

本研究では、汽水湖の環境・持続性改善にむけた施策設計のために、汚濁問題が表面化している阿蘇海 (汽水湖) を対象として、底質が湖水や物質収支に与える影響を分析した。特に底質酸素消費量 (SOD) に着目し、その影響因子を解明すること、貧酸素化の進行により発生する栄養塩類の溶出特性を分析すること、阿蘇海におけるリンの空間・鉛直分布に着目して堆積量と物質収支を予測することを目的として実施した。得られた主な結果を下記に示す。

- (1) 阿蘇海底質の SOD は、夏季で 1.21~1.71, 冬季で 1.34~1.47 gO/m<sup>2</sup>/day となり、最深部で最大値を、また、H<sub>2</sub>S などの影響を受けて琵琶湖の 1.5~3 倍程度の値を示した。また、強い還元状態に置かれた底質の SOD は、含有物質の大小よりも被酸化物の流動性 (移行性) の影響を強く受けていることが示唆された。
- (2) SOD 試験における DO の経時変化は、一次反応を仮定した場合の適合性が良好であり、反応速度定数は夏季の方がやや大きく、底質の流動性、還元性および微生物活性によって影響を受けたものと推定された。また、深さ 4 cm 程度までの底質間隙水が底層水の酸素消費に寄与している可能性が示唆された。
- (3) 溶出試験の結果からは、上記 (1) と (2) で示した流動性、還元性の強さに加えて、底質中の可溶性リンの割合や溶出速度などが複合的に溶出量に対して影響を与えることが示唆された。また、阿蘇海底層では一年を通じて貧酸素状態が継続するため、PO<sub>4</sub>-P と NH<sub>4</sub>-N のいずれにおいても底質から底層水への恒常的な溶出負荷が大きいと推察された。

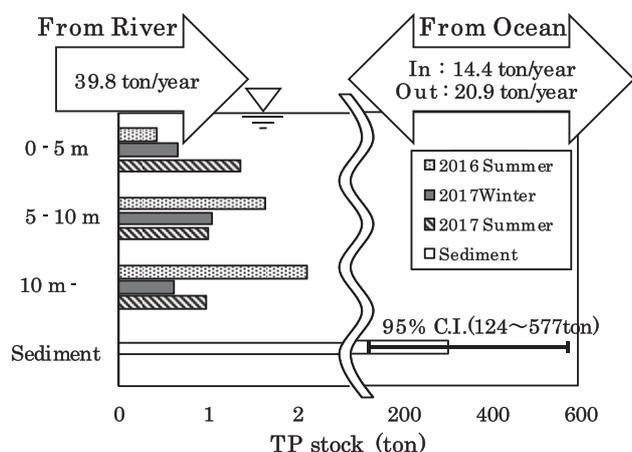


Fig. 8 Mass balance of total phosphorus in Aso-kai Lagoon (comparison of total phosphorus inflow loads from rivers and total phosphorus runoff and inflow in contiguous channel to sea area, and total phosphorus accumulation in lake water and bottom sediment)

- (4) 阿蘇海において、夏季には塩分・水温躍層が卓越した成層状態、冬季には明確な水温躍層が形成されない一部混合状態であることが確認された。また、底層水は恒常的に貧酸素化していること、底層水の TP は表層水の数倍～10 倍以上となっていることから、底質からの溶出影響を受けていることが分かった。
- (5) 阿蘇海におけるリン収支を算定した結果、流入した負荷量の約 88% が阿蘇海に残り、底質へのリン蓄積が進んでいること、その蓄積量 (124～577 ton) は負荷流出入量差の 3～13 年分に相当すること、海水中のリン存在量は底質蓄積量の 0.4～3.4% 程度であることも明らかとなった。

全国各地にある閉鎖性の汽水域では、その多くが同様の水質・底質問題を抱えており、環境持続性に関わる深刻な問題であるにも関わらず、ほとんど未解決の状態が続いている。底質からの栄養塩溶出現象をモデル化するなど、汚濁に係る現象論として研究成果を整え、底質環境を改善する具体的な事業効果を事前予測し、その取り組みの実行と実績の積み上げが期待される。

## 謝 辞

本研究は、文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業 (平成 26～30 年度) および公益財団法人河川財団の河川基金助成事業 (平成 28～29 年度、平成 30～31 年度) の支援を受けて実施されました。現地調査の際には、京都府丹後広域振興局と溝尻漁港の皆様にご協力を頂きました。また、分析方法などにおいては島根大学環境分析化学研究室の皆様にご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 環境省 水・大気環境局：平成 27 年度公共用水域水質測定結果 (2015)
- 2) 環境省：日本の汽水湖、第三章「汽水湖の現状と課題」、pp. 71-79 (2014)
- 3) 環境省：日本の汽水湖、第二章「汽水湖の特徴」、p. 7 (2014)
- 4) 小田一紀、宋元平、芝村圭、農本充：塩水中における微細土粒子の凝集・沈降過程に関する研究、海岸工学論文集、Vol. 46, pp. 981-985 (1999)
- 5) 三村信男、加藤始、斉藤敦志、田切康博：河口・沿岸海域におけるシルトの凝集と沈降に関する研究、海岸工学講演会論文集、Vol. 33, pp. 347-351 (1986)
- 6) 菅井隆吉、西尾正博、溝山勇、清家泰：汽水湖宍道湖における湖底堆積物からの無機栄養塩の回帰速度、陸水学会誌、Vol. 73, pp. 179-186 (2012)
- 7) 菅井隆吉、牟田口勝平、松本宗人：宍道湖における微成層の形成とその変化、陸水学雑誌、Vol. 47, No. 4, pp. 315-324 (1986)

- 8) Krom, M. D. and R. A. Berner: Adsorption of phosphate in anoxic marine sediments, *Limnology and Oceanography*, Vol. 25, pp. 797-806 (1980)
- 9) Aoyama, I. Behaviour of Iron and Manganese in an Aquatic Environment, *Japanese Society of Soil Physics*, No. 67, pp. 11-18 (1993)
- 10) 神谷宏、石飛裕、井上徹教、中村由行、山室真澄：夏季の宍道湖の底層水に蓄積する栄養塩の起源、陸水学雑誌、Vol. 57, No. 4, pp. 313-326 (1996)
- 11) 畑幸彦：沿岸海域の底土堆積物中における硫化物の生成、水産大学校研究業績、No. 457, pp. 37-83 (1965)
- 12) 渡辺正孝、木幡邦男：内湾の環境保全、赤潮の発生機構と青潮の生成環境、環境科学会誌、Vol. 8(4), pp. 449-460 (1995)
- 13) 高安克己 編『汽水域の化学』講師グループ著：汽水域の化学、たたら書房、p. 38 (2001)
- 14) 環境省水・大気環境局水環境課：「水質汚濁に係る環境基準についての一部を改正する件」、平成 28 年環境省告示 37 号、<http://www.env.go.jp/press/102287.html> (2018 年 5 月 22 日閲覧)
- 15) 京都府環境部自然環境保全課、「阿蘇海」、京都府レッドデータブック、<http://www.pref.kyoto.jp/kankyo/rdb/geo/db/sur0022.html> (2018 年 5 月 22 日閲覧)
- 16) 京都府環境部環境管理課：平成 28 年度公共用水域及び地下水の水質測定結果(概要)、pp. 1-7 (2016)
- 17) 京都府 丹後広域振興局企画総務部 企画振興室：阿蘇海・啓発パンフレット (2018 年 5 月 22 日閲覧)
- 18) 環境省 水・大気環境局水環境課 閉鎖性海域対策室：阿蘇海におけるケーススタディ、地域が主体となる閉鎖性海域の環境改善の手引き、pp. 99-121 (2018)
- 19) 京都府宮津保健所衛生課 京都府公害対策技術者会議：阿蘇海の汚濁機構 (1987)
- 20) 木戸健一郎、斉藤直、魚谷律人、桑原智之、相崎守弘：中海浚渫窪地における N・P・S の溶出速度の見積もりと石灰灰造粒物を用いた覆砂の効果、水環境学会誌、Vol. 37, No. 3, pp. 71-77 (2014)
- 21) 神谷宏、管原庄吾、嵯峨友樹、佐藤紗知子、野尻由香里、岸真司、藤原敦夫、神門利之：浅い汽水湖沼における夏季に堆積物から溶出したリンの湖底への再沈降割合とその機構、陸水学雑誌、No. 76, pp. 139-148 (2015)
- 22) 管原庄吾、田林雄、神谷宏、清家泰：毎日採水によって明らかとなった洪水による栄養塩負荷の定量化斐伊川におけるケーススタディ、陸水学雑誌、Vol. 78, pp. 97-103 (2017)
- 23) 菅井隆吉、伊藤健、西尾正博、溝山勇、管原庄吾、清家泰：二つの繋がった汽水湖における湖底堆積物からの窒素、リン及び DOC の回帰速度から見た水域の特性評価、陸水学雑誌、No. 76, pp. 35-44 (2015)
- 24) 神谷宏、大城等、嵯峨友樹、佐藤紗知子、野尻由香里、岸真司、藤原敦夫、神門利之、管原庄吾、井上徹教、山室真澄：浅い湖沼における滞留時間と栄養塩濃度が湖内での COD 生産に与える影響、応用生体工学、Vol. 17(2), pp. 79-88 (2015)
- 25) 中村由行、井上徹教、山室真澄、神谷宏、石飛裕：未攪乱底泥コアを用いた連続培養系での酸素消費・溶出実験、海岸工学論文集、No. 43, pp. 1091-1095 (1996)
- 26) 斉藤直、木戸健一郎、須崎萌実、桑原智之：汽水湖(中海)における水底泥中の有機物形態と覆砂の影響評価：土木学会論文集 B3(海洋開発)、Vol. 72, No. 2, pp. 640-645 (2016)
- 27) 田中宏史、重松孝昌、遠藤徹：還元物質の酸化速度を考慮した底層への酸素供給による環境改善効果に関する研究、土木学会論文集 B2(海岸工学)、Vol. 67, No. 2, pp. 1096-1100 (2011)
- 28) Hanes, B. N. and Irvine, R. L.: New technique for measuring

- oxygen uptake rates of benthic systems, Journal of Water Pollution Control Federation, Vol. 40(2), pp. 223-232
- 29) 環境省水・大気環境局：底質調査方法(2012)
- 30) 徳永貴久, 速水祐一, 木元克則：有明海奥部の2定点における底層水の生物的酸素消費と化学的酸素消費, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 72, No. 1, pp. 12-21 (2016)
- 31) Wang, W.: Fraction of sediment oxygen demand, Water Research, Vol. 14, pp. 603-612 (1980)
- 32) 霜島孝一, 今井章雄, 高津文人, 小松一弘, 佐藤貴之, 富岡典子, 篠原隆一郎, 三浦真吾, 奥居紳也, 桐山徳也, 岡本高弘：湖沼における底泥酸素消費量測定法の開発と湖沼環境評価への応用, 水環境学会誌, Vol. 40, No. 1, pp. 21-29 (2017)
- 33) 徳永貴久, 磯野正典, 松永信博：有明海泥質堆積物の再懸濁時における酸素消費 室内実験による検討, 土木学会論文集B, Vol. 65, No. 4, pp. 269-276 (2009)
- 34) 入江政安, 窪田勇輝, 中辻啓二, 西田修三：都市海浜における底質の非一様性を考慮した酸素消費量の推定, 土木学会海岸工学論文集, Vol. 54, pp. 1026-1030 (2007)
- 35) ㈲日本下水道協会：下水試験方法上巻(2012)
- 36) 日本工業標準調査会：JISK0102 工場廃水試験方法(2016)
- 37) 菅原庄吾, 坂本達也, 鮎川和泰, 木元克則, 千賀有希子, 奥村稔, 清家泰：砂泥堆積物中溶存硫化物の簡便な現場抽出/吸光度定量及びその有明海北東部堆積物への適用, BUNSEKI KAGAKU, Vol. 59, No. 12, pp. 1155-1161 (2010)
- 38) 上田彬博, 濱根貴志, 筒井剛毅, 鯨奈順子：阿蘇海の水質汚濁機構における閉鎖性水域としての特性に関する研究 内海水と外海水との交換率, 水質汚濁研究, Vol. 12, No. 10, pp. 635-645 (1989)
- 39) 佐藤圭輔：流砂減少に着目した出水時における汚濁負荷特性の解明と阿蘇海環境の持続可能性評価, 平成26-27年度河川整備基金助成事業実績 成果報告書(2017)
- 40) 京都府建設交通部砂防課：京都府河川防災情報, <http://chisuibousai.pref.kyoto.jp/> (2018年5月22日閲覧)
- 41) 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター：調査解析1北湖深層と湖底環境の総合評価, 琵琶湖環境科学センター 研究報告書(H26~H28), No. 13 (2017)
- 42) 細井由彦, 村上仁士, 上月康則：底泥による酸素消費に関する研究, 土木学会論文集, No. 456, II-21, pp. 83-92 (1992)
- 43) 東野誠, 神田徹：底泥による静水での溶存酸素消費に関する基礎実験, 水工学論文集, Vol. 41, pp. 439-444 (1997)
- 44) 細川恭史, 三好英一, 堀江毅, 中西弘, 村上健：再浮遊した海域底泥の酸素消費実験, 衛生工学研究討論会講演論文集, Vol. 17, pp. 59-66 (1981)
- 45) 清水芳久：富栄養化問題の底質対策・汚濁源対策に対する総合評価による統合的流域管理法の構築, 平成22年度河川整備基金助成事業実績成果報告書(2011)

## Estimation of the Sediment Oxygen Demand and Phosphorus Mass Balance in Brackish Lake Aso-kai Lagoon

Mamoru Kawaguchi<sup>1)†</sup>, Keisuke Sato<sup>2)</sup>, Hayato Mori<sup>1)</sup> and Syogo Sugahara<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University

<sup>2)</sup> College of Science and Engineering, Ritsumeikan University

<sup>3)</sup> Graduate School of Science and Engineering, Simane University

† Correspondence should be addressed to Mamoru Kawaguchi :

(Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University  
E-mail : rv0036he@ed.ritsumei.ac.jp)

### Abstract

In order to design to improve the environment of the brackish lake, the influence of bottom sediment on lake water and a pollutant material balance were analyzed on the Aso-kai Lagoon where the pollution problem occurred as one of the brackish lake.

Especially focusing on Sediment Oxygen Demand (SOD), main purposes of this research were set to evaluate SOD influence factors and to estimate accumulation volume and mass balance of total phosphorus in the Aso-kai Lagoon.

As a result of this research, SOD were detected as 1.21~1.71 gO/m<sup>2</sup>/day, indicating the maximum value at the deepest point, generally high values due to the influence of reducing substances such as hydrogen sulfide and its exchangeability by the fluidity. In addition, the TP (124 to 577 tons) for excess inflow load of 3 to 13 years was accumulated in the sediment, and the TP concentration of the bottom water was several times or more than the surface water, which was presumed to be influenced by TP elution from the sediment.

**Key words :** brackish lake, oxygen deficiency of bottom water, sediment oxygen demand, nutrient release, mass balance of phosphorus