

〈研究発表〉

阿蘇海における汚濁物の底質ストック量の解明と物質収支の定量評価

川口 衛¹⁾, 佐藤 圭輔²⁾, 民田 純一³⁾

¹⁾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)

²⁾立命館大学 理工学部 准教授
(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1 E-mail: k-sato@fc.ritsumei.ac.jp)

³⁾名古屋市 上下水道局

概要

閉鎖性海跡湖である阿蘇海では、周辺河川および外海からの汚濁負荷流入、湖内での物質沈降などによって、富栄養化や底質軟泥化が問題となっている。対して、覆砂やアオサ回収などが行われているが、対象域は限定され、富栄養化の根本的な解決には至っていない。新たな改善策設計のため、本稿では阿蘇海湖水と底質の性状およびリン堆積量の評価を行い、集水域からの流出入負荷を推算して、阿蘇海におけるリンの物質収支を概算した。その結果、2016-2017年の実測調査に基づく、阿蘇海底質には数十年分の外部負荷（リン）が堆積していると予測された。

キーワード：閉鎖性汽水湖、現地観測、栄養塩類、物質収支、底質

原稿受付 2017.7.14

EICA: 22(2・3) 49-53

1. はじめに

経済発展に伴って発生した水質汚濁は、環境基準の達成率ベースでは年々改善傾向にあるが、湖沼、特に汽水湖ではその限りではない。汽水湖では、海水（硫酸イオン）の流入や密度成層化による鉛直混合阻害（底層への酸素供給の不足）が影響し、底質からの硫化水素発生やリン溶出が問題となっている¹⁾。これらの問題の抜本的な解決に向けては、具体的な対策を講じる前に、流域政策が閉鎖性水域の環境・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“閉鎖性水域の物質収支（ストックとフロー）”が明確となっていない場合が多い。

本研究では、現地観測機器、サンプリング機器およびモデルシミュレーションの活用を通じて、汚濁物の物質収支（本稿ではリン収支）を明らかにする手法開発を目指すこととした。ストック量としては、環境水と底質の両方を対象とした。汽水湖を対象とするため、水質分布やその変化（空間・鉛直分布の季節特性）、それらと躍層化との関連性を考慮した。ストック量の大半を占める底質堆積量についても、現地調査に基づいてリン濃度の空間分布とその変動幅を考慮し、総量を概算した。外部集水域からの流出入負荷量の算出には、本研究の実測値と既報論文によるシミュレーション推定値²⁾を活用した。

研究対象地は、京都府にある阿蘇海を選定した。阿蘇海は日本三景の一つである天橋立により外海と区切

られた閉鎖性の海域（汽水湖）である³⁾。阿蘇海はその容積に対して外海へと通じる二本の水路が小さく、海水交換への効果は限られている。そのため流入する汚濁物質の多くが阿蘇海に堆積し、底質の軟泥化が進んでいる。結果として近年では水質が悪化傾向にあり、全リンや全窒素などの環境基準は達成できていない⁴⁾。富栄養化やカキの大量発生、底質ヘドロ化などによる悪臭や景観悪化、生態系損失などの問題が発生しており、観光地としての経済的価値の損失が危惧されている⁵⁾。これらの問題への取り組みとして覆砂事業などが行われているが、阿蘇海全域への環境改善効果という点では十分とは言えない。

2. 現地調査と実験方法

2.1 阿蘇海と外海との接続水路における現地調査

接続水路調査は、2016年10月25-27日に実施された。阿蘇海と外海との接続水路（大天橋）を対象に、潮汐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された自動採水機（ISCO 6712型）にて、それぞれ30分間隔で24時間（表層水は日中のみ）分の流水が採取された。底層には2波長・自記式の高濃度濁度計（JFEアドバンテック INFINITY-Turbi）も合わせて設置され、5分間隔で濁度の計測が実施された。なお、阿蘇海と外海との接続水路は2本あり、本稿ではそのうち流量の多い北側の1水路を対象としたが、先行研究¹¹⁾にて両水路のADCP流量観測調査

(2015-2016年)を実施しているため、本研究ではこれらのデータも利用することとした。

2.2 阿蘇海の季節変化に関する現地調査

阿蘇海の調査は秋季(2016年10月26-27日)および春季(2017年3月11-13日)にそれぞれ実施された。主な調査地点は経緯度格子点(南北15"間隔, 東西30"間隔)に基づいて設定された13地点とし, それぞれの地点で水深の測定, 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)を用いた吸引採水および高濃度濁度計を用いた濁度の鉛直分布観測(春季のみ)を行った(Fig. 1-2)。濁度計を用いた調査では南北7.5"間隔, 東西15"間隔で測定を行った。採水には測深目盛りを付した20m採水ホースを利用し, 5m(秋季)もしくは3m(春季)深度ごとのサンプルが各1L(秋季)ずつもしくは2L(春季)ずつ採取された。



Fig. 1 A Picture of Sediment and Water Sampling

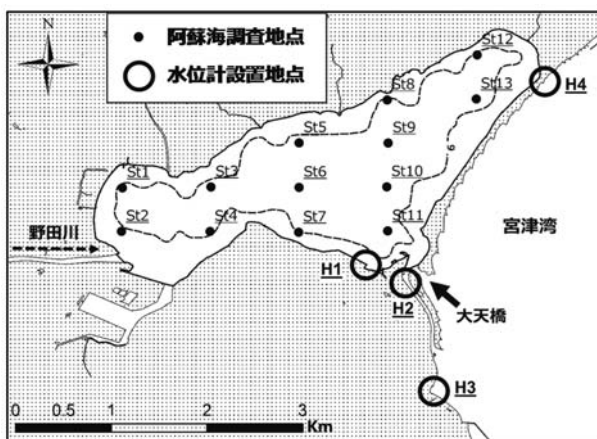


Fig. 2 Sampling Point Distribution in Aso-kai Lake

2.3 阿蘇海および外海の水質観測

阿蘇海では潮汐によって海水の流入が発生する。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. 2に示した4地点(H1~H4地点)にて10分間隔の水質観測を行った。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, 同時に京都府宮津庁舎にて気圧計測を行った。常時測定された水位計・気圧計による計測データは, 現地調査のタイミングで回収された。

2.4 実験方法

水試料のSS, TPは下水試験法⁶⁾に従って測定された。阿蘇海で採取された水試料には塩分が含まれるため, 試験法に従ってその影響を除去した。DOは蛍光式溶存酸素計(HACH HQ30d)を用い, EC, ORP, pHはそれぞれに対応したセンサー(HORIBA D-50シリーズ)を用いて測定した。EC測定の際には, 温度を同時に測定し, 換算式(UNESCO 1983)⁷⁾を用いて実用塩分(以下, 塩分と記す)濃度に変換した。

底質試料の乾燥減量, 強熱減量およびTPは底質調査法⁸⁾に, 重金属濃度は下水試験法⁶⁾に従って測定された。ORPは前述同様のセンサを用い, TCとTNはCNコーダ(NC-22F, 住化)を利用して測定された。

3. 阿蘇海における水質の測定結果

3.1 塩分濃度の鉛直プロファイル

秋季および春季調査時の塩分濃度(PSU)の鉛直プロファイルを図3に示した。図中のプロットおよびエラーバーは深度ごとの平均値と標準偏差を示し, その下に各サンプル数を付記した。両季節ともに深くなるほど25-30 PSU程度まで塩分濃度が高くなるという典型的な深度依存性(塩分成層特性), ごく表層にのみ淡水による塩分希釈効果がそれぞれ確認されたが, 各季節の濃度レベルや空間的な濃度分布にはやや異なる傾向が示された。

春季調査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, 秋季調査時の水温の鉛直分布(底層ほど低い)とは真逆になっていた。清水⁹⁾によると, 6~11月には阿蘇海で温度成層が形成されるとされており, 両調査で観測された温度の鉛直分布はこの報告に従う結果となった。すなわち秋季調査では, 温度に加えて塩分による成層効果が重なり, その結果鉛直混合が起こりにくいため, 数m以上の深度では急激に, その以深では緩やかに塩分濃度が上昇した。冬季から春季にかけて水温による密度不安定効果が塩分成層を破壊し, 本研究による春季調査時には表層水を除いて十分な混合状態になったものと考えられる。中低層水のDOは, 春季でより高い傾向(Fig. 3)を示しており, 上述の鉛直混合状態を支持する結果となった。これらのことは, 季節によって阿蘇海における実質的な水交換速度(滞留時間)が異なることを示唆する結果である。

Fig. 3の結果は全ての調査地点の結果を同一深度の平均値としてまとめて示したものであるが、地点ごとの塩分濃度の鉛直プロファイルと比較するために、地点ごとに表層塩分濃度で各深度の塩分濃度を除した(Fig. 4)。その結果、両季節ともに中底層水の塩分濃度が表層水のそれの1~2倍程度となり、地点間のバラツキがやや小さくなる傾向が見られた。逆に、河川など淡水流入の影響を受けやすい地点の表層水では、塩分濃度が下がるため、中底層水の塩分濃度は相対的に高くなることが明確に示された。

3.2 TPの鉛直プロファイル

TPの測定結果を深度ごとに示した(Fig. 5)。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、底質直上水(地点ごとの最深部)の測定結果は省いている。いずれの季節においても表層水に比べて

底層水のTPが数倍~10倍程度高い濃度を示す結果となった。また、秋季と春季の結果を比較すると、表層~中層(5m程度)までの範囲では大きな差異は見られなかったが、水深10m程度の最底層水においては秋季の方が著しく高い傾向(平均で6倍程度)が示された。10m程度の最底層水でTPが高く、季節による違いが見られたのは、底質へのリン堆積が進んでいるとともに貧酸素化による底質からのリン溶出が影響したためである。3.1で述べたように特に成層化が明確に確認できる秋季のような条件では、鉛直混合による底層への酸素供給が制限され、貧酸素化が生じやすい¹⁰⁾。

TPの鉛直プロファイルとその季節変化を考慮して、阿蘇海湖水全体におけるTP存在量を概算すると約0.3~1.5 tonとなった。

4. 阿蘇海におけるリン収支の推定

前章にて成層期には塩分・温度躍層が生じていること、それによる溶出が特に底層水質の悪化に影響している可能性を示した。このことから、阿蘇海での根本的な環境改善を行うためには、底質への対応を考慮することが必須と考えられた。本章では富栄養化の制限因子の一つである栄養塩(リン)を対象とし、底質における堆積量とその変動要因となる河川・水路からの流入負荷量を推定することによって、阿蘇海における物質収支を評価した。

4.1 底質のリン堆積量

底質のリン堆積量を推定するために、まずは底質に含有するTP平均値の95% C.I.を算定した。その結果、湿試料中のTPで0.38~0.54 (mg/g)、底質中の間隙水中のTPで3.15~5.42 (mg/L)と算定された。軟泥(ヘドロ)化している底質は嫌気状態となっており、間隙水のTP濃度は高い値となった。続いて阿蘇海における底質の体積を推定した。有機物やリンなどを多く含有する軟泥は、概ね水深6m以上の場所に、50cm程度の厚さで堆積している⁹⁾ことを仮定し、本研究で作成された阿蘇海の水深マップ(スプライン内挿法を利用)から底質体積を推定した。

TPと底質堆積量を乗じて推定されたリン堆積量は、370~798 ton程度と評価された。阿蘇海水に存在するリン総量は、底質に堆積するその量と比較すると1%にも満たない値となり、ほぼ全てのリンが底質中にストックされている結果となった。

4.2 阿蘇海におけるリン収支

阿蘇海におけるリン堆積の履歴や量的な変化を評価するために、最大流入河川である野田川と水路(阿蘇

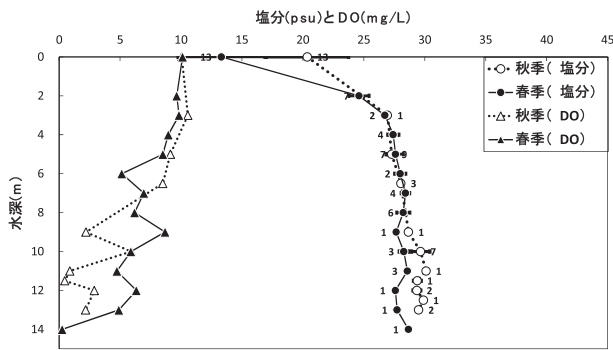


Fig. 3 Vertical Profile of the PSU and DO

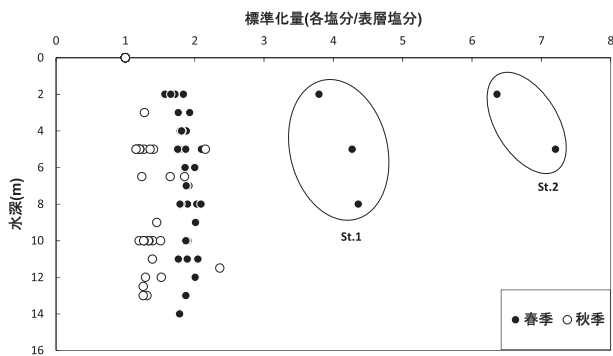


Fig. 4 Vertical Profile of the Normalized PSU

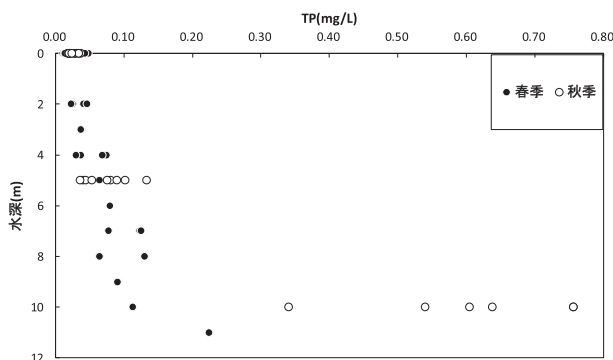


Fig. 5 Vertical Profile of the TP

海と外海との接続水路)において流出入負荷量を推定した。野田川からの流入負荷量は、水位-流量の関係式(式1-2)¹¹⁾と比流量-TP負荷量の関係式(式3)²⁾を用いて算出した。

$$Q=0.5448 \times H 5.6277 \quad (0 < H \leq 1.51) \quad \text{式1}$$

$$Q=25.088 \times (H-0.70)^2 \quad (H > 1.51) \quad \text{式2}$$

$$Y=0.30X1.28 \quad \text{式3}$$

Q: 流量 (m³/sec) H: 野田川(堂谷橋地点) 水位(m)

Y: 比負荷量 (gP/sec/km²) X: 比流量 (m³/sec/km²)

式1-2で推定された流量Q (m³/sec)は、野田川流域面積(103 km²)で除すことで比流量X (m³/sec/km²)に換算された。2014年を対象に1時間ごとの水位データ¹²⁾を入手し、流量およびリン負荷量を算定した結果、野田川を通じて阿蘇海に流入するリン総量は約39.8 (ton/year)と推定された。

続いて、阿蘇海と外海との流出入負荷量の計算を行った。阿蘇海と外海との接続水路における流量Yは、本調査によって導かれた水位差Dとの関係式(式4)¹³⁾が用いられた。回帰分析の際には、水位差Dに本研究で継続的に観測されている阿蘇海(H1地点)と接続水路(H2地点)との水位差を、一方、流量推定値にはADCPによる2水路の観測値¹¹⁾を利用した。水路流水中のTPには秋季調査における実測平均値(大天橋)を両水路の濃度として利用し、流量推定値と乗じることで水路を通じたリン負荷量を算出した。

$$Y=1.222D-6.67 \quad \text{式4}$$

Y: 2水路合算流量 (m³/s)

D: 阿蘇海水位-接続水路水位 (m)

計算の結果、外海から阿蘇海への流入するリンの総量は約14.4 (ton/year)、阿蘇海から外海へ流出する量は約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割が阿蘇海に戻っていること(正味3割が外海へ流出していること)が明らかとなった。河川(野田川)からの流入量に比べると、接続水路から海域への正味の流出量は約16%であり、残りの約84%(33.3 (ton/year))が阿蘇海に蓄積していると推測された。リン堆積物の多くは、河川からSS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、阿蘇海滞留時の海水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¹⁴⁾となっている。

前節で示された通り、阿蘇海底質中のリン堆積量は370~798 tonとし、河川・接続水路を通じたリン負荷の流出入量が毎年同じだと仮定すると、阿蘇海には約11~23年分(物質滞留時間に相当)のリンが蓄積していると試算される。試算値には不確実性を有してい

るが、いずれにしても長期に渡るリンの蓄積が続いていることは確かであり、阿蘇海の水質問題を解決するためには底質環境に対する抜本的な対策が不可欠であると言える。

5. まとめ

阿蘇海汚濁の現況を物質収支の側面から把握し、環境改善の必要を議論するために、本研究では阿蘇海の実測調査を行った。特に、阿蘇海におけるリンの空間・鉛直分布に着目し、現地観測と定量実験とを併用して堆積量の定量に取り組んだ。また、阿蘇海と外海との接続水路においてもリン負荷量の実測を行い、河川を通じたリン流入負荷量の推定値と合わせて、最終的に阿蘇海におけるリン収支を定量的に推定した。これらの結果から得られた主な成果を以下に示す。

- (1) 阿蘇海において、秋季には塩分・水温躍層が卓越した成層状態、春季には明確な水温躍層が示されない混合状態にあることが示された。
- (2) 阿蘇海において、海水のTPは底層水で高く、その傾向は最底層水において季節的な差異(秋季で著しく高い傾向)が示された。貧酸素化による底質からの溶出が影響していると予測された。
- (3) 実測分析に基づいて推定された阿蘇海水中のリン総量(0.3~1.5 ton)は、阿蘇海底質におけるリン堆積量(370~798 ton)の1%にも満たない値となった。
- (4) 河川から阿蘇海へのTP流入負荷量(39.8 (ton/year))に対して、接続水路から外海への正味の流出負荷量は約16%であり、残りの約84%(33.3 (ton/year))が阿蘇海に蓄積していると推測された。この結果、阿蘇海には約11~23年分のリンが蓄積していると試算された。

全国、全世界各地にある閉鎖性の汽水域(受水域)では、その多くが同様の水質汚濁問題を抱えており、環境持続性に関わる深刻な問題であるにも関わらず、ほとんど未解決である。底質からの栄養塩溶出現象をモデル化するなど、汚濁に関わ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評価し、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)、公益財団法人河川財団の河川基金助成事業(平成26~27年度、平成28~29年度)の支援を受けて実施されました。

参考文献

- 1) 環境省：日本の汽水湖，第三章「汽水湖の現状と課題」，pp. 71-92, 2014.
- 2) 山村大樹：流域環境情報を利用した野田川流域モデルの高度化と阿蘇海汚濁機構の解明，立命館大学大学院理工学研究科修士論文，pp.19-22, 2015.
- 3) 京都府：阿蘇海，レッドデータブック，2015，<http://www.pref.kyoto.jp/kankyo/rdb/geo/db/sur0022.html>.
- 4) 京都府丹後保健所，野田川及び阿蘇海の水質について（環境基準の年度別達成状況），2013.
- 5) 宮津市：美しく豊かな阿蘇海をつくり未来につなぐ条例，条例第13号，2016.
- 6) 日本下水道協会：下水試験法，2012.
- 7) UNESCO：algorithms for computation of fundamental properties of seawater, pp.6-9, 1983.
- 8) 環境省 水・大気環境局：底質試験法，4節一般項目，2012.
- 9) 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.
- 10) 環境省：日本の汽水湖，第二章「汽水湖の特徴」，pp.7-8, 2014.
- 11) 佐藤圭輔：流砂現象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.
- 12) 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/>
- 13) 民田純一：閉鎖性汽水域における汚濁物質動態の解明：流砂観測手法の設計と負荷量推定への適応，p.68，立命館大学大学院理工学研究科，修士論文，2016.
- 14) 三村信夫，加藤始，斎藤敦志，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，第33回海岸工学講演会論文集，1986.