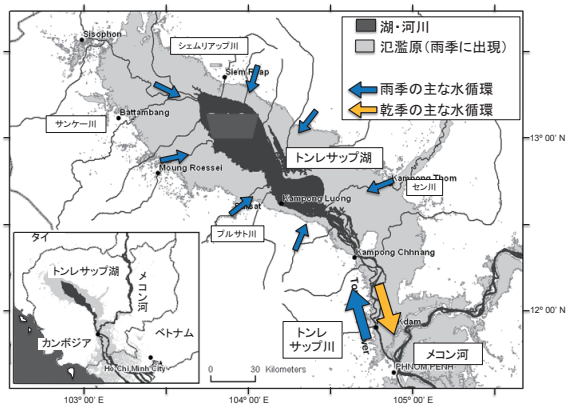
トンレサップ湖水系の地表水循環
― 多元素分析による解析で見えてきたこと ―

吉　川　　尚
（東海大学海洋学部）

1. トンレサップ湖の環境変化

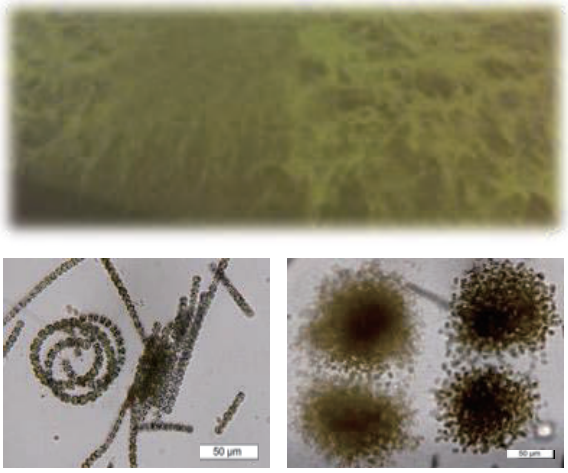
カンボジアにあるトンレサップ湖は、東南アジア最大の淡水湖で、琵琶湖の４倍（乾季の面積比）もある広大な湖です。雨季には、メコン河からの水がトンレサップ川を経由して湖内に大量に流入し、湖から溢れ出した水により広大な氾濫原が出現します（図 1）。地元住民にとって、トンレサップ湖とその氾濫原は、漁業や農業、水運等の産業を支えるだけでなく、古くから歴史・文化を育んできた大切な存在です。



Modified from the original file (TonleSapMap.png) created by Mkummu (copyright holder) (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:TonleSapMap.png).

図 1. トンレサップ湖の地表水循環の概要。雨季にはメコン河からの水が流入し、逆に乾季には湖水が流出する。また、雨季には広大な氾濫原が出現する。

しかしながら、近年、そのトンレサップ湖の環境や生態系が大きく変化しています。まずは、人口増加を背景とする水質汚濁・過剰漁獲・土地開発等といった、主に湖や氾濫原の内部に起因する変化があります（図 2）。それらのうち水質汚濁は、生活・産業排水中に含まれる様々な物質が、河川等を通じて湖に流入することで起こります。次に、トンレサップ湖の場合、国際河川であるメコン河水系の一部をなしており、より大きな空間スケールの影響もあります。例えば、メコン河上流部で中国やラオス等が大規模ダムを設置することで、メコン河や湖の水位が不安定化したり、氾濫原が縮小する等の影響が懸念されています。一方で、トンレサップ湖の水質の変化は、下流域にあるベトナムのメコンデルタの水質・生態系に影響を与えている可能性もあります。さらに、地球規模の気候変動により、湖水の集水域における降水量の変化も懸念される等、トンレサップ湖の現状と将来は楽観視できない状況にあります。



Anabaena affinis　　*Microcystis aeruginosa*

図 2. 乾季の湖北部でみられたアオコ（上）。富栄養化により藍藻（下）が異常発生し、湖面が緑色に着色していた。

2. ICP-MS による湖水や河川水の多元素分析

こうした環境変化が懸念されるトンレサップ湖で、私たちの研究チームは、水質と地表水循環について調べました（Yoshikawa et al. 2020）。具

体的には、湖水や周辺の河川水を採取してその元素組成を分析しました。生物の身体は様々な元素で構成されており、必要な元素が環境や食物中に不足していると、それ以上増えることができません。逆に、過剰な量の元素や有毒な元素の存在は、生物の生存に有害です。つまり、湖水の元素組成を調べることで、湖の生態系の健全性に関する基礎情報が得られます。さらに、湖水の元素組成を周囲の河川水と比較することで、湖水とその中に含まれる元素の由来を推定することも可能となります。湖の地表水循環については、その概要は先述した通り調べるまでもなく分かっているのですが（図 1）、メコン河とその他の河川が湖水やその含有元素の供給源としてどれだけ貢献しているのかといった、定量的な知見は得られていません。

私たちが用いた ICP-MS（誘導結合プラズマ質量分析装置）では、少量の試料中に含まれる約 50 種の多元素の濃度を、一度に分析することができます。現地調査では、カンボジアの共同研究者とともに漁船や自動車を使って、湖や周辺の河川を巡って、水試料を採取しました（図 3）。暑い中、慣れない状況での調査は大変ですが、実際の現場の様子を知っておくことは、後で分析データを解釈する際に役立ちます。

図 3. 湖の水上家屋（左上）。湖内は漁船で調査した（右上）。河川は岸辺から採水した（左下）。水試料はフィルターで懸濁物をろ過除去後（右下）、元素濃度を分析した。

3. トンレサップ湖水系の地表水循環

日本に持ち帰った湖や河川の水試料を ICP-MS で分析し、得られた元素組成の特徴に基づいて統計的に解析（クラスター解析）した結果、各地点の水試料は A、B、C の 3 グループに分けられました（図 4）。グループ A は、Si（ケイ素）、Al（アルミニウム）、Fe（鉄）の割合が高いのが特徴で、岸辺が赤土だったシェムリアップ川等の水が該当していました。グループ C は、Na（ナトリウム）が多いことが特徴で、生活排水が多く流れこむシェムリアップ川河口等の水が該当しました。グループ B には、水試料の大部分が該当したので、さらに B1、B2、B3 の 3 つのサブグループに分けました。サブグループ B1 は、Ca（カルシウム）が比較的多く（図 4）、メコン河の水は雨季・乾季ともにこれに該当しました（図 5、図 6）。サブグループ B2 は、Si、Al、Fe が比較的多く、雨季・乾季のセン川、雨季のサンケー川、プルサト川等が該当しました。サブグループ B3 は、Na が比較的多く、乾季の湖、トンレサップ川、サンケー川、プルサト川等が該当しました。

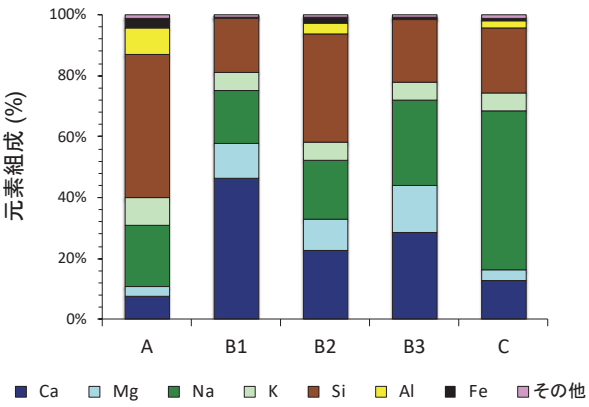
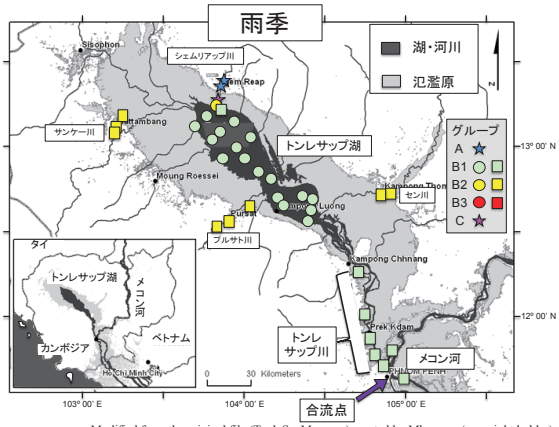


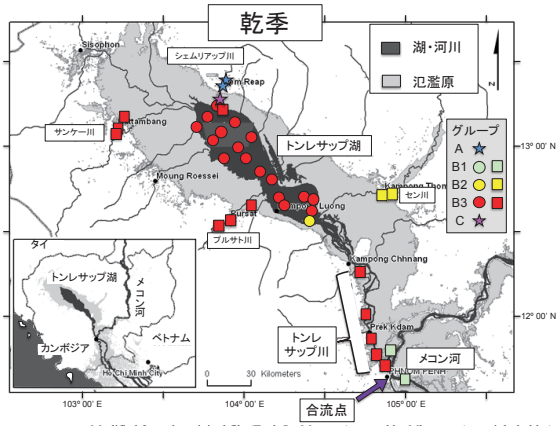
図 4. 水試料の各グループの元素組成の特徴。

雨季と乾季における水試料の各グループの水平分布（図 5 と図 6）から、トンレサップ湖水系の地表水循環について、以下のことが分かってきました。雨季には、トンレサップ湖の水と元素の大部分は、トンレサップ川を通じてメコン河から流入し、他の河川の影響は小さいことが示唆されます。一方、乾季では、湖水の元素組成には、周囲の小河川や湖底からの溶出等の影響が大きく、雨季にメコン河から供給された水や元素の影響はあ



Modified from the original file (TonleSapMap.png) created by Mkummu (copyright holder) (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:TonleSapMap.png).

図 5. 元素組成の特徴で分類した、水試料各グループの水平分布（雨季）。



Modified from the original file (TonleSapMap.png) created by Mkummu (copyright holder) (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:TonleSapMap.png).

図 6. 元素組成の特徴で分類した、水試料各グループの水平分布（乾季）。

まり残ってないことが示唆されます。また、メコン河は、トンレサップ川との合流地点の上流・下流で元素組成が変化してないことから、トンレサップ湖がメコン河に与えている影響も大きくはないようです（ただし、特定の元素や物質によっては影響している可能性はあります）。

4. 水源としての評価・潜在的なリスク

ICP-MS 分析では、試料中にわずかしか含まれない微量元素の情報も得られるため、飲料水に人体に有害な元素が含まれてないか、安全チェックにも用いられています。トンレサップ湖で水上生活を営む人々は、食事の煮炊き等に日常的に湖水を使っています。また、雨季に氾濫原に溢れ出した湖水の一部は地下水となり、乾季に飲料水となっている可能性があります。さらに、農・水産物を通して有害元素を摂取する可能性もあり、トンレサップ湖の水の安全性について、監視・モニタリングすることは重要です。

特に、As（ヒ素）については、世界各地で地下水の汚染が深刻な問題となっており、カンボジアでもメコン河やトンレサップ川流域等が高リスク地帯とされています。そこで、本研究の分析結果を、世界保健機関のガイドライン（WHO 2011）と比較しみると、乾季の湖水の As 濃度は 0.9–3.5 μg L^{-1} と多くの地点で基準値（10 μg L^{-1}）の 1/10 を超えており、今後注意が必要な状況でした。また、乾季の湖水の As 濃度は、トンレサップ川及びメコン河（1.5–2.2 μg L^{-1}）に比べて高い地点が目立ち、湖底からの溶出が影響している可能性が考えられます。雨季の湖水の As 濃度（0.8–1.4 μg L^{-1}）は、メコン河（0.7–1.5 μg L^{-1}）等と同程度で、概ね基準値の 1/10 以下でした。

他に健康被害が懸念される元素としては、マンガン（Mn）や亜鉛（Zn）等がありますが、これらの湖水中の平均濃度（Mn: 2.5 μg L^{-1}, Zn: 1.6 μg L^{-1}）は基準値（Mn: 400 μg L^{-1}, Zn: 3000 μg L^{-1}）より 2–3 桁低い値であり、トンレサップ川やメコン河の水（Mn: 63 μg L^{-1}, Zn: 21 μg L^{-1}）と比べても 1 桁低い値でした。Mn や Zn の濃度が湖で河川より低くなった理由として、湖ではこれらの金属元素の多くが鉄（Fe）等とともに水和物や酸化物のコロイド粒子を形成し、水底へ堆積することで、水中から除去されることが考えられます。

5. おわりに

私たちが行った調査により、トンレサップ湖水系の地表水循環に伴う元素の挙動が可視化され、水源としての湖水の安全性に関する基礎情報が得られました。一方で、まだ未解明な部分も色々と残されています。例えば、調査は、雨季と乾季に 1 回ずつしか行っていないため、季節変化の詳細は不明ですし、湖水の安全性についても確定的なことは言えません。また、私たちの調査では地表

水（地面の上にある湖水や河川水）を採取しましたが、地下水については調べていません。他チームによる天然ラドン（^{222}Rn）の分布調査等による研究（Burnett et al. 2017）では、トンレサップ湖におけるリン（P）の供給源として、氾濫原に溢れた湖水が地下水となって再流入する経路が重要である可能性が示唆されています。さらに、将来、湖の富栄養化が進み、底層で貧酸素水塊が発生するようになった場合は、嫌気的な環境となった湖底で As が溶出してくる潜在的なリスクがあります。

私たちの調査で用いた ICP-MS 分析では、元素の化学形態（無機態か有機態か、酸化数等）の情報は得られないため、環境中の挙動や生物に対する毒性等を評価する上で制約があります。一方、ICP-MS 分析は、少量の試料で多くの元素の情報が一度に得られる利点があります。その長所を生かしつつ、他の分析手法も適宜組み合わせることで、上述した未解明の点についても明らかにしていくことが可能と考えています。

なお、本稿でご紹介した研究成果は、以下の方々との共同研究で得られたものです（敬称略、所属は調査当時）：高木映、石川智士、申基澈、中野孝教（地球研）、堀美菜（高知大学）、Hort Sitha、Eng Chaesan、Srun Limsong（カンボジア王国水産局）。

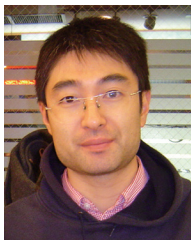
文献

W. C. Burnett, G. Wattayakorn, R. Supcharoen, K. Sioudom, V. Kum, S. Chanyotha, R. Kritsananuwat, (2017) Groundwater discharge and phosphorus dynamics in a flood-pulse system: Tonle Sap Lake, Cambodia. Journal of Hydrology 549: 79–91.

T. Yoshikawa, A. P. Takagi, S. Ishikawa, M. Hori, T. Nakano, K.-C. Shin, H. Sitha, E. Cheasan, S. Limsong (2020) Major and trace elements in the surface water of Tonle Sap Lake, Mekong River, and other tributary rivers, Cambodia. Environmental Monitoring and Assessment 192: 467. https://doi.org/10.1007/s10661-020-08292-4.

WHO (2011) Guidelines for drinking-water quality. 4th ed. Geneva: World Health Organisation.

著者情報



吉川　尚（東海大学海洋学部水産学科教授）。2002 年東京大学大学院農学生命科学研究科博士課程修了、博士（農学）。東京大学アジア生物資源環境研究センター研究機関研究員、近畿大学水産研究所 COE 博士研究員、東京大学大学院農学生命科学研究科助教、東海大学海洋学部水産学科講師等を経て、2019 年より現職。

（2021 年 3 月 31 日掲載）