

平成 30 年 6 月 3 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05114

研究課題名(和文) 強塩基性・高アルカリ度な巨大閉鎖性塩湖、トルコ・ワン湖の特征的陸水科学過程

研究課題名(英文) Characteristic limnological processes of a huge closed saline lake with strong basicity and high alkalinity, Lake Van in Turkey

研究代表者

杉山 雅人 (SUGIYAMA, Masahito)

京都大学・人間・環境学研究科・教授

研究者番号：10179179

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：ワン湖(トルコ)とイシククル湖(キルギス)の陸水科学過程の調査を行った。ワン湖では塩基性とアルカリ度が以上に高いために、1)湖水でU・V・Mo・Wが高度に濃縮されていた。2)Sr・Baは逆に濃度低下が激しく湖内で活発に除去されていた。3)リン酸濃度は高いが、クロロフィル濃度は低く生物生産は活発でない。4)リン酸は、 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ や $\text{Ca}_5\text{OH}(\text{PO}_4)_3$ として飽和状態に近い。一方、イシククル湖では1)湖環流の存在が明瞭に観測された。2)クロロフィル極大が湖の中層に存在するという特異的傾向にあった。

人工湖水の作成法について検討した。塩湖にも応用できる方法を創案した。

研究成果の概要(英文)：Limnological processes of Lakes Van (Turkey) and Issyk-Kul (Kyrgyz) were studied. Following processes were observed in Lake Van with strong basicity and high alkalinity. 1) U, V, Mo and W were highly concentrated in lake water. 2) Inversely, Sr and Ba were at very low concentration and were actively removed in the lake. 3) Although phosphate concentration were high, chlorophyll was at low concentration level and biological production was not so active. 4) Phosphate was saturated in the lake as $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ or $\text{Ca}_5\text{OH}(\text{PO}_4)_3$ salts.

In Lake Issyk-Kul, 1) Lake water gyre was clearly observed. 2) The water depth with chlorophyll maximum concentration was observed at the middle layer of the lake.

Method for the preparation of artificial lake and river waters was studied and was developed to be applied to saline lakes.

研究分野：水圏化学・分析化学

キーワード：ワン湖 イシククル湖 強塩基性 高アルカリ度 塩湖 生物地球化学過程 環流 生物群集解析

1. 研究開始当初の背景

塩湖の環境に関する現状と学術的特徴

塩湖は水中の総塩分が 0.5 g/L 以上の湖であって、地殻運動によって形成された構造湖、岩塩地帯での溶食湖など成因はさまざまである。近年では地球温暖化に伴う乾燥気候の強まり、灌漑のための過度な取水による流入水の減少などによって、今後、世界各地で塩湖の濃度上昇や淡水湖からの変質が起こると懸念されている(読賣新聞, 2014年6月2日)。ひいては、湖の消失も危惧されている。かつては湖として世界第4位の広さを誇ったアラル海ではこのことが既に現実となった(朝日新聞, 2014年10月3日)。中国やモンゴルでも多くの湖が消失した(Liu et al., *Environ. Sci. Technol.*, **47**, 12107 (2013))。

塩湖は湖水中の Ca^{2+} 濃度とアルカリ度 ($[\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}]$) の大小関係によって、a) $2[\text{Ca}^{2+}] < [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}]$ の湖と b) $2[\text{Ca}^{2+}] > [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}]$ の湖に大別される。a) の湖では、塩分上昇により CaCO_3 が沈殿して HCO_3^- と CO_3^{2-} が湖水中に残って濃縮され、アルカリ度と塩基性の増加が起こる。この典型がワン湖である。b) の湖では CaCO_3 沈殿の生成に伴って Ca^{2+} が湖水中に残存・濃縮されて、アルカリ度は低く pH は中性付近となる。死海はこの形式の湖である。

ワン湖の学術的特徴と研究の動向

塩分濃縮は湖の陸水学的特性にさまざまな影響を与える。中でも強塩基性と高アルカリ度という特異な水質を招く a) の湖で、興味深い特性の変容が起こる。ワン湖では、全域・全水深にわたって pH は 9.6~9.9、アルカリ度は 140~160 meq/L と異常に高く、U や V などの微量元素も極めて高い濃度で溶存している(Yaman et al., *Clean-Soil Air Wat.*, **39**, 530 (2011); Reimer et al., *Aquat. Geochem.*, **15**, 195 (2009))。この水質のためか、ワン湖での棲息魚類は固有種であるコイ科の *Chalcaburnus tarichi* の1種のみである(Sari, *Environ. Biol. Fish.*, **81**, 21 (2008))。 CaCO_3 が容易にかつ多量に析出するため、湖特有の微生物群集によって CaCO_3 を主成分とする世界最大のマイクロバイアライト(microbialites、微生物マット)が湖底に形成されている(Budakoglu, *Geomicrobiol. J.*, **26**, 146 (2009))。しかしながら、塩分濃縮の過程でどうしてこのような特徴が形成されたのか、また、湖水の流入・蒸発といった物理学過程がどのようなバランスにあるのか、そしてそれが現在の湖の化学・生物学過程とどのように関連しているのかの研究は殆どない。しかし、そうした研究は、世界各地で湖の塩水化と容積縮小が懸念されている現在、極めて重要性を増している。また、日本では、琵琶湖を始めとして a) の水質にある湖沼や河川が多数存在する。それ故、ワン湖の研究は、日本の陸水の塩水化に関する研究にもつながることになる。
課題に関連する応募者のこれまでの研究成果

研究代表者の杉山はモンゴルでの湖の研究において、a) の塩湖には U や V が濃縮されていることを報告するとともに(Sugiyama et al., *Proc. Mongolian Acad. Sci.*, **194**, 101 (2009))、複数の塩湖の消失を目にしてきた。2013年5月にはワン湖を予備調査して、U・V・W が湖水中に高度に濃縮されているのを確認した。琵琶湖や日本河川での研究から上記元素に加え Al や陰イオン界面活性剤などアニオンを形成して、中性 pH 領域で特異的に水和酸化鉄に吸着する元素や分子は、湖水や河川水の塩基性化に伴って堆積物から溶出し、水中濃度が高まることを明らかにしてきた(Harita et al., *Limnol. Oceanogr.*, **50**, 636 (2005); Sugiyama et al., *Limnol.*, **6**, 117 (2005); Kanao et al., *Limnol.*, **3**, 1 (2002)ほか)。連携研究者の大久保、中野も国内外の湖を調査して、その物理学・化学・生物学過程の相互関連について研究してきた。

こうしたことを基礎にして、応募者らは本研究を計画した。

2. 研究の目的

本研究は、トルコ東部に位置し、強塩基性と異常に高いアルカリ度を示す巨大閉塞塩湖であるワン湖(強塩基性塩湖としては世界最大である。Reimer et al., *Aquat. Geochem.*, **15**, 195 (2009))を対象とした総合科学研究である。将来、地球温暖化と水利用量増大のために世界各地で出現が懸念される塩湖についての理解を深め、物理学・化学・生物学にわたる湖の特徴的陸水科学過程を解明し、ワン湖の保全に資する知見を得ることを目的とする。ワン湖と流入河川での複合的総合科学調査を中心に、(1)河川水・湖水の流入・蒸発過程と流動・循環機構の解析、(2)主成分・栄養塩・微量元素分布と生物群集組成の測定による物質循環・生態系形成機構の解明とその相互関連の解析、(3)(1)と(2)を総合した塩湖形成の物理学過程とそれに伴う化学過程・生物学過程の変動機構の解析、を行う。

3. 研究の方法

上述の研究目的(1)~(3)に関連する次の小項目 ~ について明らかにする。
ワン湖ならびにその流入河川での総合科学調査と長期連続観測から

(1)の目的に関連して、湖水の流入量と蒸発量を定量的に測定して、水収支のバランスを明らかにする。湖水の密度・水温成層に関する物理構造とその季節変化を明らかにする。(2)の目的に関連して、水収支バランス、湖水・河川水の化学組成・濃度分布に基づき、湖での物質収支のバランスと化学動態を、特に主要成分・高濃縮微量元素について明らかにする。微生物群集分布と基礎生産・消費量の測定から湖の生物生産・有機物収支のバランスと生物群集の季節変動を明らかにする。上述とを比較・総合

して湖の化学過程と生物学過程との関連を究明する。

蒸発濃縮による高塩分湖水形成の室内模擬実験から

(3)の目的に関連して、塩湖形成・塩分濃縮を駆動する物理学過程とそれに伴う湖の化学過程の変動を、特に主要成分・pH・高濃縮微量元素について明らかにする。

～ の項目に基づく総合解析から

(3)の目的に関連して、塩湖形成・塩分濃縮の物理学過程とそれに伴うワン湖に特異的な主要成分組成・微量元素濃縮・生物群集分布を説明するワン湖型塩湖形成モデルを提案する。

これらを行うにあたっての湖や河川での観測項目は次の通りである。

物理指標と一般水質項目

流向・流速、流量、水温、電導度、溶存酸素、クロロフィル蛍光、pH、濁度、透明度。これらは主にCTD(電気伝導度・水温・水深自動測定装置)、ADCP(流向・流速計)、多項目水質プロファイラーにより鉛直方向に連続測定する。湖内の観測定点で、この測定を繰り返して水平・断面分布図を描く。

化学分析

溶存物質(栄養塩、無機・有機炭素、無機主要イオン、微量生元素、高濃縮微量元素、重金属)、懸濁物質・沈降粒子・堆積物(クロロフィル、溶存物質と同じ項目)。

生物群集解析

湖水・沈降粒子中の動植物プランクトン・バクテリアの種組成と個体数。DNA解析。炭素・窒素の安定同位体比測定。

培養実験

基礎生産量・植物プランクトンによるN・P取込速度。

自動測器による長期自動連続観測

流向・流速、水温・密度、風向・風速、気温・湿度、電導度の連続自動測定ができるメモリー計測計を湖と河川に繋留して、数ヶ月間の長期連続観測を行う。

4. 研究成果

(1) 平成27年度(2015年)

平成27年9月20日から26日にかけてトルコ・マラティアに渡航し、共同研究覚書を策定した。Inonu大学・Tolga Depci 准教授、Yuzunc Yil 大学・Tijen Uner 准教授との間で覚書について議論し、第一次案を得た。帰国後、電子メールでの議論を行って最終案を作成した。

平成28年3月26日から31日にかけてトルコ・ワンに渡航した。トルコ側研究者との間で覚書に調印した。ワン湖3地点、流入河川1地点において物理学・化学・生物学の総合調査を行った。サーミスタ・チェーンを湖に繋留して、鉛直方向における水温変動の長期連続観測を開始した(このサーミスタ・チェーンは平成28年9月に回収の予定であったが、後述するトルコの治安悪化のために

現在もなお回収できていない。今後、渡航の計画を立て回収を図る)。化学・生物学調査のために、湖水・河川水の採取、ならびに一般的水質項目(水温、電気伝導度、溶存酸素濃度、pH)の現場観測を行った。予想通り、pHは高い値にあって、9.6を超えていた。湖水・河川水試料については、日本に持ち帰って、現在も分析を続けている。

湖水の蒸発濃縮実験を行うための予備研究として、人工湖水の作成法について検討した。塩湖にも応用できる人工湖水・河川水調製法を創案した。この成果は、

M. Sugiyama, S. Wu, K. Hosoda, S. Mochizuki, T. Hori: Method for the preparation of artificial lake and river waters. *Limnology and Oceanography: Methods*, **14**, 343-357 (2016).

として公表した。

琵琶湖やバイカル湖などでの研究結果とともにワン湖での研究成果の一部を纏めて、

杉山雅人: 陸水域における微量元素の生物地球化学過程. *海洋化学研究*, **28**, 47-63 (2015).

杉山雅人, 望月陽人: 湖におけるリンの分布と循環. *地球環境*, **20**, 35-46 (2015).

として公表した。ワン湖では、

- ・ 強塩基性・高アルカリ度な水質のためか、溶存態リン酸は3~6 $\mu\text{mol/L}$ と高い値にあるのにクロロフィル濃度は夏季でも0.1~0.9 $\mu\text{g/L}$ と低く生物生産は活発ではない。
- ・ リン酸は、 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ や $\text{Ca}_5\text{OH}(\text{PO}_4)_3$ として飽和状態に近い。

ことを明らかにした。

(2) 平成28年度(2016年)

7月にアンカラ・イスタンブールでクーデター未遂、ワンで爆破テロ事件などが発生し、トルコの治安が急激に悪化した。外務省からも7月に海外安全ホームページなどを通して渡航自粛の要望が発出された。このため、8月に予定していたワン湖調査を中止し、トルコの治安回復を待った。しかし、10月になっても状況の改善がみられなかったため、研究計画調書で述べたように、研究対象湖の変更を検討した。ワン湖ほどには塩基性もアルカリ度も高くはないが、水深が400mを超える塩湖がキルギスにあるので、この湖(イシククル湖)での調査を行うことにした。このため11月23日から30日にかけてキルギスに渡航した。

イシククル湖の3地点と流入河川2地点で調査を行った。多項目水質計による鉛直方向の水質変動(水温、電気伝導度、溶存酸素濃度)を測定した。湖水・河川水を採取し、日本に持ち帰った。現在もこの試料の化学分析と生物群集解析を続けている。水温躍層が1日で10m近くも上下するなど、興味深い陸

水物理構造が明らかになった。

(3) 平成 29 年度 (2017 年)

平成 29 年度になってもトルコの治安はさほどには回復しなかった。このため当年度もイシククル湖での研究を行った。8 月 18 日から 9 月 4 日にかけて、キルギスに渡航した。イシククル湖では横断観測を含む計 8 地点で、河川と地下水については計 6 地点で調査を行った。湖では全ての観測地点で多項目水質計による鉛直方向の水質変動 (水温、電気伝導度、溶存酸素濃度等) を測定し、水質断面図の取得に成功した。その結果、湖環流の存在が明らかになった。クロロフィル極大が湖の中層に存在するという特異的傾向にあることも分かった。湖水・河川水・地下水を採取し、日本に持ち帰った。この試料の化学分析と生物群集解析を行っている。

ワン湖での研究成果の一部を、

A. Mochizuki, T. Murata, K. Hosoda, A. Dulmaa, C. Ayushsuren, D. Ganchimeg, V. V. Drucker, V. A. Fialkov, T. Depci, T. Üner, F. Oğhan, M. Sugiyama: Distribution of trace elements and the influence of major-ion water chemistry in saline lakes. *Limnology and Oceanography*, **63**, 1253-1263 (2018).

として公表した。ワン湖では

- ・ 流入河川水に比べ湖水で U・V・Mo・W が高度に濃縮されている。
- ・ Sr・Ba は逆に濃度低下が激しく湖内で活発に除去されている。
- ・ これらにはワン湖の水質が強塩基性で高アルカリ度であることが大きく影響している

ことを明らかにした。

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 5 件)

杉山雅人: 陸水域における微量元素の生物地球化学過程. *海洋化学研究*, **28**, 47-63 (2015). 査読無

杉山雅人, 望月陽人: 湖におけるリンの分布と循環. *地球環境*, **20**, 35-46 (2015). 査読有

M. Sugiyama, S. Wu, K. Hosoda, A. Mochizuki, T. Hori: Method for the preparation of artificial lake and river waters. *Limnology and Oceanography: Methods*, **14**, 343-357 (2016). 査読有

望月陽人: 陸水域におけるウランの分布と動態ならびにその支配要因. *陸水研究*, **4**, 17-26 (2017). 査読有

A. Mochizuki, T. Murata, K. Hosoda, A. Dulmaa, C. Ayushsuren, D. Ganchimeg, V. V. Drucker, V. A. Fialkov, T. Depci, T. Üner, F.

Oğhan, M. Sugiyama: Distribution of trace elements and the influence of major-ion water chemistry in saline lakes. *Limnology and Oceanography*, **63**, 1253-1263 (2018). 査読有

[学会発表](計 2 件)

望月陽人, 細田耕, 杉山雅人: 炭酸化学種が支配する塩湖湖水中の微量元素の分布と動態. 日本陸水学会第 80 回大会、北海道大学水産学部、2015 年 9 月 28 日(3C08) J. Park, S. Sugawara, M. Egawa, Y. Seike, M. Sugiyama: A comparative study on the elution mechanism of silicate by hydrogen sulfide in bottom sediment of some lakes with anoxic hypolimnion. 17th International Symposium on River and Lake Environment, March 28, 2017, Ritsumeikan University, Japan.

[図書](計 1 件)

杉山雅人: 2-1-1 湖沼, 2-1 地球上での存在, 2 リンの地球科学, pp 34-35, リンの事典 (大竹久夫ほか編), 朝倉書店, 2017. 査読無

[産業財産権]

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉山 雅人 (SUGIYAMA, Masahito)
京都大学・大学院人間・環境学研究所・教授
研究者番号: 10179179

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

大久保 賢治 (OKUBO, Kenji)
岡山大学・大学院環境生命科学研究所・教授
研究者番号: 50135612

中野伸一 (NAKANO, Shinichi)

京都大学・生態学研究センター・教授
研究者番号: 50270723

(4) 研究協力者

程木 義邦 (HODOKI Yoshikuni)
京都大学・生態学研究センター・特定准教授

研究者番号：60632122

齋藤 圭 (SAITO Kei)
法政大学・大学院人文科学研究科・
博士後期課程大学院生

望月陽人 (MOCHIZUKI Akihito)
京都大学・大学院人間・環境学研究科・
博士後期課程大学院生