

<研究ノート>中央アジア・イシク湖及びその流域の水質に関する地理学的研究

著者	齋藤 圭
出版者	法政大学地理学会
雑誌名	法政地理
巻	51
ページ	35-44
発行年	2019-03-20
URL	http://doi.org/10.15002/00021656

中央アジア・イシク湖及びその流域の水質に関する 地理学的研究

齋藤 圭

イシク湖は、塩湖として世界的にも代表的な湖として知られている。元来、塩湖は、湖水蒸発に伴う湖水の低下が継続的に生じ、塩分が濃縮されることから形成される。しかし、イシク湖では、亜寒帯湿潤気候に位置しており、湖水への流入水が流出水を上回ること、湖水位が上昇しながら、さらに塩分濃度が増加していることが特徴である。そこで、イシク湖及び流入する河川水や地下水の水質の特徴を明らかにするため、2015年夏季のイシク湖及び河川水・地下水の水質特性をまとめた。イシク湖に流入する河川水の水質は、主にCa-HCO₃型であり、湖水はNa-Cl(Mg-SO₄)型であった。一方、湖周辺の地下水はCa-HCO₃型やNa-HCO₃型、Na-Cl型、Na-Cl-SO₄型など多様な水質パターンとなった。水の水質の変化は、蒸発濃縮により、Na⁺、Cl⁻、Mg²⁺、SO₄²⁻などのイオンが高濃度になることが知られていることから、周辺の地下水は、湖水の水量だけでなく水質にも大きく影響を与えていると考えられる。これは、河川水中に含まれるNa⁺、Cl⁻、Mg²⁺、SO₄²⁻は微量であることから地下水由来の水質を支持するものである。これに加えて、河川水の湖への影響は、人為由来に伴う成分の寄与が示唆されるものがあり、今後、イシク湖周辺が発展していく際にも自然環境保護の観点から継続的な調査が望まれる。

キーワード：中央アジア、亜寒帯湿潤気候、半乾燥地域、塩湖、地下水

Keywords：Central Asia, Subarctic humid climate, Semi-arid area, Saline lake, Ground water

I はじめに

塩湖は「水中の塩分が1L中500mg以上含まれる湖」と一般的に定義される。塩湖では降水量より蒸発量の方が上回り、溶存化学成分は湖水中に濃縮されるか、もしくは溶解度積に達して沈殿除去される。そのため、高塩分となった水は、飲料水源ならびに農業用水としての価値は小さく、人間とのかかわりも限られていることから、塩湖の湖沼学的研究は少ない(中原ほか：1999)。しかし、水資源としての価値は小さいものの、その体積(水量)や水質は、人為的活動や気候変動に対して鋭敏に反応する側面を持っており、地球規模から流域規模まで幅広い環境の変化を捉える重要な役割を担っているとされている(堀内ほか：1999)。

塩湖の水質形成の過程は、湖ごとに異なり、五

大陸内陸部各地には、海塩由来のほか、地質由来などがあり、異なる組成を持つ塩湖も存在する(Hammer：1986)。これは流入水におけるわずかな水質組成の違いが、蒸発濃縮により塩湖の水質に大きな変化として反映されているためである(望月ほか：2014)。例えば、流入水中にHCO₃⁻が豊富に含まれ、湖水の水質がCa²⁺<HCO₃⁻の状態である場合、湖の蒸発濃縮が進行するにつれてCa²⁺がCaCO₃として除去され涸渇するが、HCO₃⁻は流入水から供給され続け、湖水中で濃縮されるため、湖水の水質は最終的に主にNa-Cl-CO₃型になるとされている(Eugster and Hardie：1978)。流入水の水質は、その湖の流域の地質や土壌などの影響を強く受けることから、塩湖の水質形成の把握には、流域の地質・気候条件などの違いまで考慮することが重要である。また、こうした塩湖の水質形成の過程を明らかにするためには、様々な環境下にある塩湖や濃縮段階

の異なる塩湖を比較しながら研究を進める必要がある。

中央アジア諸国のひとつであるキルギスに位置するイシク湖 (Lake Issyk-kul) は、天山山脈の支脈に囲まれた構造湖で、約 2,000 万年前に出来た古代湖の 1 つだと言われている (国際湖沼環境委員会: 2003)。中央アジアはユーラシア大陸の乾燥帯に位置し、年平均降水量が 300 mm にも満たない地域が大半を占めている。この地域に分布する湖の大半は塩湖で、日本を含む湿潤地域に多く分布する淡水湖とは異なる性質が認められる。また、イシク湖は、中国の新疆ウイグル自治区に分布する艾丁 (アイディン) 湖やアラル海と比べ塩分濃度が低く (塩分濃度: イシク湖 0.6%, 艾丁湖 3.9%, アラル海 \geq 3.0%; 国際湖沼環境委員会: 2003, 堀内ほか: 1999, 中原ほか: 1999)、気候変動により一時的に開放湖になった記録があることなどが特徴的な湖である (Ricketts et al.: 2001, 国際湖沼環境委員会: 2003)。しかしながら 1986 年以降から現在にかけて、突如、塩分濃度が高まっていることが報告されている (Kawabata et al.: 2014, Karmanchuk: 2002, 齋藤: 2019 投稿中)。イシク湖の水位は 1928 年から下降傾向にあったが、1998 年以降は上昇傾向にある (福寫: 2006, Romanovsky et al.: 2013)。これらの先行研究を踏まえると、水位が低下していた 1998 年以前の塩分濃度の増加は蒸発濃縮によるものだと考察できるが、水位が上昇に転じた 1998 年以降も塩分濃度が増加し続けている要因については不明である。こうしたイシク湖の水質形成機構を把握するためには、本湖及びその集水域全体の河川水、周辺地下水の水質が湖水に与える影響や、湖水における蒸発濃縮、生物活動に伴う湖の水質の変化を同時に把握する必要がある。

そこで、本研究では、塩湖の水質形成過程及びイシク湖の物質収支を解明するため、2015 年に行った調査結果を基にイシク湖流域の水質の特徴を把握することを目的とする。

II 地域概要

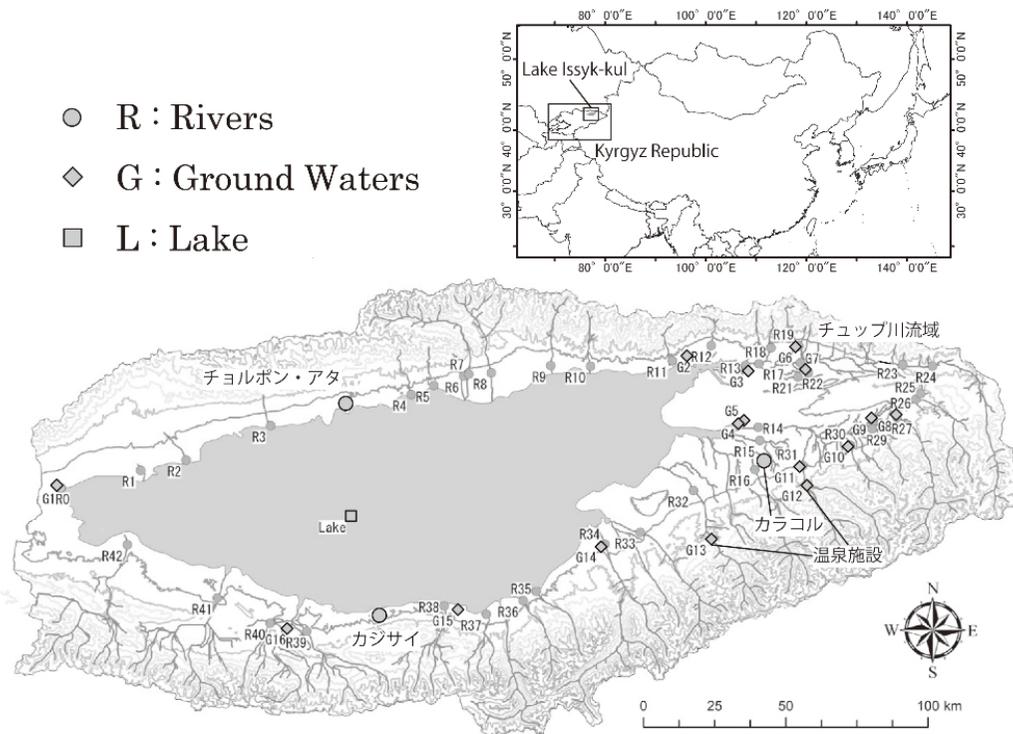
1. イシク湖集水域

イシク湖 (Lake Issyk-Kul) は北緯 $42^{\circ} 25'$ 、東経 $77^{\circ} 20'$ に位置し、湖面標高 1607 m、流域最高標高 3,000 m を超える 2 つの山脈に南北で挟まれた構造湖である (第 1 図)。日本でいえば北海道の室蘭とほぼ同じ緯度に位置しており、本湖の流域の広くはケツペンの気候区分における亜寒帯湿潤気候 (Dfb) に分類され、天山山脈を越えた反対側に広がるタクラマカン沙漠やカザフステップといった砂漠気候 (BW) やステップ気候 (BS) とは異なり比較的森林の多い気候環境となる。湖水面のある 3 地点の 1950 年から 1980 年までの 30 年平均では気温 7.3°C 、降水量 258 mm、可能蒸発散量 836 mm で、降水量よりも蒸発散量の方が上回り、降水量が最も多い 6 月の山地での積雪が流域河川の主な水源となっている (Tsigelnaya: 1995, Savvaitova and Petr: 1992)。

調査対象となった時期の 2012~2015 年では、湖東部 (湖の東側) の年平均降水量が 291 mm で、南部 (311 mm)、北部 (312 mm) と比べ低い。3 年間の年平均気温では湖北部が 8.0°C と最も高く、南部が 7.0°C 、東部が最も低い 6.3°C となる。季節変化は 3 地域とも同じで、11 月から 2 月の冬季にかけて日最低気温が -10°C 近くとなり、6 月から 9 月の夏季にかけて日最高気温が 20°C 以上となる。近年の傾向としては降水量が増加しており、特に 2015 年の降水量は 2012 年から 2015 年にかけて最も多かった (第 2 図)。

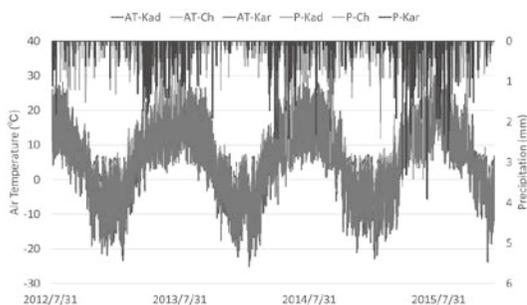
イシク湖流域の主な表層地質は、イシク湖に流れ込む河川からの運搬により、湖周辺の平坦な土地では軟砂礫層に覆われている。一方、流域の山地流域では花崗岩等の深成岩が大きな割合を占めており、さらに一部の地域では石灰岩層も多くみられる (齋藤: 2019 投稿中, Soloviev: 2011)。また、集水域南東部の一部の地域では火山岩が存在し、これらは 1 世紀と 7 世紀に噴火した天山山脈の中央部の火山の影響を受けて、形成されているものだと考えられている (後藤: 2012)。さらに、湖南東部や北東部の山麓部には陸成堆積岩や

- R : Rivers
- ◇ G : Ground Waters
- L : Lake



第1図 地域概略

(等高線は湖に最も近い線を標高2000 mとし、500 m 間隔で表記)



第2図 1時間当たりの気温と降水量の変化

(2012~2015年, Meteoblue.comよりデータ引用。凡例のKadはカジサイ, Chはチョルボン・アタ, Karはカラコル)

フリッシュ層がみられ、構造湖の特徴を有している(齋藤:2019投稿中)。

本湖流域の主な土地利用は、イシク湖西部と東部で大きく異なり、西部では河川周辺に畑地が点在するも荒地が大きな割合を占める。一方、東部では森林や草地が多く、平野部では畑地が多い

(齋藤:2019投稿中)。イシク湖の湖岸には主要河川の下流域に町が形成され、特に東部の平野では小規模な町(チュップ川流域に点在)が比較的多く、南東部、西部、北部中央には規模の大きい町(バルクチ等)が形成されている(齋藤:2019投稿中)。イシク湖全域において民家では排水処理設備が整っておらず、水洗式トイレはほとんど見られない。町での生活水は共同井戸が利用されており、町村内の至る所に汲み上げ式の井戸が設置されている。さらに、南東部の山脈の川沿いには温泉が湧き出しており、それを利用した保養施設も見られる(第1図)。

2. イシク湖

イシク湖は、面積6,236 km²(琵琶湖の9倍)、最大水深668 m、貯水量1,738 km³、集水域面積22,080 km²、湖水面標高1,607 m(2011年時点)で、2,000万年前に出来た古代湖の1つだと言われて

いる (Romanovsky et al.: 2013, 国際湖沼環境委員会: 2003). 水温の鉛直構造は2月から3月にかけて循環期が訪れる1回循環湖である (国際湖沼環境委員会: 2003). 約6900~4900年前に気候変動によって閉塞湖となり, 淡水湖から塩湖へと変化したと考えられ, 現在では塩分が0.6%の塩湖である (Ricketts et al.: 2001). 過去の水位変動については, 湖成段丘のボーリングコア試料を基に湖成堆積物とそれ以外の堆積物を分類され, ^{14}C 年代の結果と当時の水位に関する歴史史料と比較した研究が進められている. その結果, 小氷期と重なる1500年から1820年までは水位上昇がピーク (標高1620 m) にまで達し, 流出河川が存在したと考えられている (奈良間: 2012). さらに, 近年では気候変動による降水量の変化に伴い, 1927年の観測開始時から1998年までに水位は3.31 m低下し, 1998年から2012年まででは約1 mの水位上昇が認められている (Romanovsky et al.: 2013).

III 研究方法

イシク湖及びその流域で2015年8月下旬に現地観測と試料採取をし, 主要化学成分分析を行った. 現地観測項目は, 集水域河川及び湧水では気温, 水温, 電気伝導度 (EC), pH・RpHの測定をした. 採水した試料はその日のうちに簡易ろ過¹⁾し, 帰国後にメンブランフィルター²⁾にて再度ろ過を行った. その後, 主要化学成分 (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^-) の測定を行った³⁾.

2015年の試料採取地点は湖心1地点, 河川36地点, 地下水16点である. 河川では湖に流入するほぼ全域の河口域28点 (R0~R16, R32~R42) と平野が広がる東部の支流15点 (R18~R31) で行った. なお, R1~3, R23~26, R41の7地点は, 2012~2014年のいずれかに実施し, R1~3, R41は河口域で, R23~26は湖東部の上流域で採水を行った (第1図). 地下水は湖周辺部及び東部でみられる汲み上げ式の井戸水や湧水から採水した (G1~11, G14~16). さらに, 湖南東部の保養施

設が管理している温泉からも採水を行った (G12, 13).

IV 結果及び考察

1. 現地調査結果 (水温, EC, pH)

イシク湖とその流域の現地調査で得られたEC, pH, 水温の特徴について第1表にまとめた. イシク湖のECは表層で855 mS/m, 深水層である50 mで884 mS/mであった. 2013年 (856 mS/m) と2014年 (859 mS/m) の調査 (齋藤: 2019投稿中) よりもECが低く, これらの年よりも年間降水量が多かったことから, 2015年では表層でのEC値が濃度の低い雨水や河川水によって希釈されたものだと考えられる. pHは8.9で, 2013年, 2014年と同じであった. イシク湖流域の地下水のECは, 温泉水やECが100 mS/m以上と極端な値を示す地点を除くと, 平均して38.3 mS/mであった. 地点で大きめに分類すると, 30.0 mS/m以下の地点 (G3, G10, G11, G14) と40.0 mS/m以上の地点 (G1, G2, G6~8, G15, G16), 極端にEC値が高い地点 (G4, G5), 温泉水 (G12, G13) に分けられる. pHは8.0以上のアルカリ性を示す地点の他, 7.5前後の弱アルカリ性を示す地点があるが, RpHではいずれも8.0前後となる. 水温は扇状地周辺にある地点が約11.0°Cで, 湖岸周辺や湖東部の平野にある地点が約15.0°Cと大きめに分類できる. 温泉水の水温は35°C~40°Cであるが, 施設内で温度調節をされており, 自然状態の水温ではない. 各地点では, G1, G6, G8, G10, G11, G14はpHが8.0, 水温が河川水に近い11.0°C前後であり, 扇状地の扇状部もしくは扇端部の井戸水であることから, 扇状地を流れる河川の伏流水の涵養が考えられる. G2, G3, G4, G5, G7, G9, G15, G16は湖岸周辺や湖東部の平野に位置しており, 扇状地周辺の地点よりも平均値である38.3 mS/mより高い傾向にある. 極端なEC値を示すG4 (138 mS/m), G5 (110 mS/m) の周辺の特徴としては, G4では町周辺の崖沿いから塩び管を通じて流れ出しており, また, G5では町の中にある共同井戸とし

第1表 2015年水質調査結果(調査地点順)

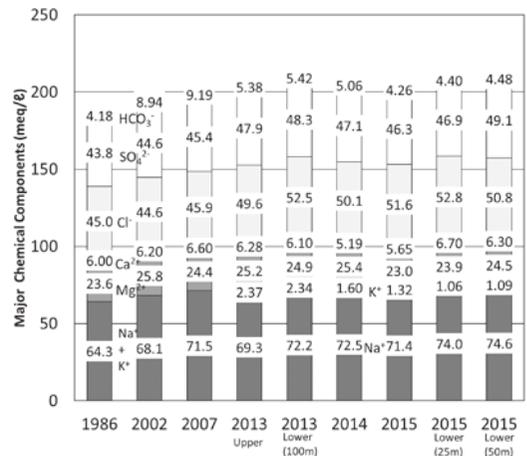
Date	Loc.	AT	WT	EC	pH(RpH)	Major chemical components (mg/ℓ)							
		°C	°C	mS/m		Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
2015/8/21	Lake	23.0	19.6	855	8.9(8.9)	1640	51.7	113	280	1830	260	2220	0
2015/8/21	Lake25m	23.0	7.3	877	8.9(8.9)	1700	41.5	134	290	1870	269	2250	0
2015/8/21	Lake50m	23.0	5.3	884	8.9(8.9)	1710	42.7	126	298	1800	274	2350	0
2015/8/27	R0	25.3	15.5	69.0	7.8(8.1)	48.6	1.57	85.5	15.8	35.5	246	100	15.9
2015/8/22	R4	24.6	10.4	36.0	8.4(8.2)	8.05	3.43	61.0	9.80	12.4	168	34.0	4.01
2015/8/22	R5	25.0	11.1	16.0	8.3(8.2)	3.72	1.50	29.2	3.87	1.19	102	6.63	2.13
2015/8/22	R6	24.8	12.5	14.0	8.1(8.1)	5.72	1.18	24.9	3.25	2.75	87.8	8.47	2.27
2015/8/22	R7	24.9	9.9	14.0	8.1(8.1)	4.09	1.83	27.7	2.93	2.23	75.9	20.2	2.19
2015/8/22	R8	25.0	12.1	13.0	8.1(8.1)	3.26	1.55	26.9	2.46	2.27	74.6	18.8	2.66
2015/8/22	R9	24.0	12.0	14.0	8.5(8.5)	4.07	1.44	27.6	3.53	1.79	81.6	17.6	2.41
2015/8/22	R10	23.3	11.2	13.0	8.1(8.1)	2.12	0.65	25.0	2.84	2.40	78.0	11.8	2.27
2015/8/22	R11	23.0	12.8	16.0	8.2(8.2)	3.87	1.00	28.9	4.03	2.05	93.7	13.2	1.64
2015/8/22	R12	23.5	13.9	12.0	8.3(8.3)	4.68	0.87	24.0	2.19	2.88	79.5	5.02	2.10
2015/8/22	R13	25.9	18.1	40.0	8.2(8.3)	14.1	1.73	54.8	7.48	11.7	201	38.7	1.12
2015/8/22	R14	27.1	12.8	22.0	8.1(8.1)	7.51	0.79	37.8	3.87	10.5	112	21.8	1.02
2015/8/23	R15	27.5	15.0	49.0	8.2(8.3)	14.4	5.60	67.1	11.5	8.95	250	37.1	3.90
2015/8/26	R16	17.3	6.7	16.0	8.2(8.2)	4.62	2.74	27.2	5.91	4.76	62.7	40.4	3.12
2015/8/23	R17	21.7	13.9	40.0	8.1(8.2)	18.2	3.44	49.1	9.61	21.1	207	21.0	1.22
2015/8/23	R18	23.4	13.1	15.0	8.2(8.2)	5.09	1.69	27.5	2.84	2.12	91.2	5.41	2.74
2015/8/23	R19	27.3	15.1	23.0	8.5(8.5)	8.98	0.81	37.4	4.15	8.97	124	15.3	3.32
2015/8/23	R20	18.2	12.5	39.0	8.2(8.3)	11.7	1.14	56.4	7.04	10.8	197	39.1	0.00
2015/8/23	R21	17.2	14.5	42.0	8.0(8.1)	10.1	0.93	62.2	7.44	9.62	222	33.6	0.00
2015/8/23	R22	18.1	16.0	84.0	7.6(8.1)	40.7	2.99	89.2	21.2	40.2	432	35.8	0.00
2015/8/25	R27	22.0	8.0	18.0	8.1(8.1)	5.14	0.61	35.2	4.40	3.24	87.0	27.5	1.84
2015/8/25	R28	20.9	9.0	20.0	8.0(8.0)	5.51	4.28	36.2	3.22	7.26	96.2	25.5	1.86
2015/8/25	R29	22.0	11.0	18.0	8.2(8.2)	6.87	1.35	35.3	3.61	9.66	89.7	18.1	2.00
2015/8/25	R30	21.1	9.5	13.0	8.2(8.2)	4.30	1.00	25.4	3.15	1.92	78.5	12.9	2.42
2015/8/25	R31	21.1	8.0	14.0	8.2(8.2)	4.42	1.69	27.0	2.97	3.14	75.0	19.4	1.93
2015/8/26	R32	22.1	9.4	20.0	8.3(8.1)	10.3	1.81	33.4	6.02	15.0	84.8	27.1	1.58
2015/8/26	R33	14.1	9.5	19.0	8.2(8.2)	3.33	1.42	35.4	5.14	3.16	89.5	33.9	2.05
2015/8/26	R34	15.0	9.1	28.0	8.2(8.2)	10.2	1.79	42.2	5.98	4.28	108	66.0	2.14
2015/8/26	R35	12.2	10.9	14.0	8.1(8.0)	4.21	1.09	28.4	2.64	5.08	77.9	11.8	2.29
2015/8/26	R36	16.3	10.0	12.0	8.0(8.0)	2.64	1.28	24.1	2.55	1.52	63.4	25.2	2.08
2015/8/26	R37	19.8	15.5	19.0	8.2(8.3)	4.64	2.08	32.7	4.28	5.40	110	9.83	2.38
2015/8/26	R38	26.0	14.1	18.0	8.2(8.3)	6.76	1.92	29.6	4.00	7.65	100	10.6	2.49
2015/8/27	R39	18.4	8.5	14.0	8.3(8.2)	5.50	1.36	25.4	3.28	3.22	83.8	6.82	3.14
2015/8/27	R40	17	7.5	22.0	8.3(8.3)	7.45	3.43	34.7	5.25	8.69	111	23.0	1.80
2015/8/27	R41	16	10.5	31.0	8.4(8.4)	9.22	2.95	46.8	9.42	4.64	157	31.2	1.75
2015/8/27	R42	21.9	11.5	42.0	8.3(8.4)	12.3	2.06	51.1	16.2	6.67	206	50.1	1.14
2015/8/27	G1	25.5	13.5	43.0	8.0(8.0)	19.1	0.99	58.1	11.3	12.7	198	49.8	3.03
2015/8/22	G2	22.1	11.9	40.0	8.0(8.1)	44.3	2.08	41.2	7.25	15.5	184	31.3	5.42
2015/8/23	G3	24.0	13.0	27.0	7.5(7.8)	14.0	0.12	44.8	4.79	8.48	132	24.2	4.18
2015/8/23	G4	26.2	11.5	138	7.4(7.8)	66.9	10.0	154	46.6	88.1	312	197	194
2015/8/23	G5	26.5	12.0	110	7.7(7.9)	148	16.2	87.9	23.8	122	231	221	0.00
2015/8/23	G6	22.5	14.9	40.0	8.1(8.2)	30.6	0.67	45.8	7.79	24.6	176	38.9	6.30
2015/8/23	G7	—	12.1	53.0	7.6(8.0)	23.3	0.22	83.7	12.3	24.4	230	54.9	0.00
2015/8/25	G8	20.2	11.0	49.0	7.7(7.8)	12.9	1.83	70.5	9.43	10.6	274	15.7	3.34
2015/8/25	G9	22.9	16.0	32.0	7.5(7.8)	13.0	1.99	57.6	0.03	7.01	145	42.0	3.62
2015/8/25	G10	28.0	7.0	21.0	8.0(8.1)	3.78	0.49	41.9	2.65	3.39	125	9.04	0.97
2015/8/25	G11	25.0	11.5	26.0	8.0(8.1)	6.90	1.97	45.9	5.52	2.83	117	43.5	1.65
2015/8/25	G12	—	35.0	61.0	8.9(8.7)	139	0.53	18.7	0.58	85.4	110	135	0.00
2015/8/26	G13	—	40.0	1540	7.8(7.7)	2520	34.8	1520	0.00	6100	15.3	559	867
2015/8/26	G14	14.9	11.1	27.0	8.1(8.1)	6.88	2.32	42.1	6.56	6.41	102	64.5	2.41
2015/8/26	G15	20.0	15.0	56.0	7.8(8.1)	34.5	3.76	73.4	14.0	58.7	221	41.2	5.11
2015/8/27	G16	18.5	16.5	46.0	8.3(8.1)	52.1	2.27	45.8	6.98	21.7	206	39.0	1.61

て利用されているが、自噴していることから被圧地下水の可能性が考えられる。pHでは7.5前後の地点が多いが、G2, G16は8.0以上であった(G2: 8.0, G16: 8.6)。水温では12.0℃前後(G2~4, G7)もしくは15.0℃前後(G9, G15, G16)で、扇状地周辺の地点よりも水温が高い。温泉水であるG12, G13は、それぞれ湖南東部山脈沿いにあるが、G12は東側、G13は南側に位置している。G12はECが61.0 mS/mで、特にpHが、イシク湖以外ではみられない、8.9の強アルカリ性を示す。G13はECが1540 mS/mでイシク湖の約2倍であり、流域内で最も高い。河川水については、ECが平均して25.3 mS/mであった。湖北、湖南部では20.0 mS/m以下が多く、東部のチュップ川を代表とする河川流域内に農地が存在する地点では30.0 mS/mを超える(齋藤: 2019投稿中)。2015年でも同様の傾向を示したが、ECの値は平均値よりもさらに低い20.0 mS/m以下の地点では2012~2014年時と比べ5.00 mS/m以上低く、平均以上の値を示すチュップ川流域では5.00 mS/m以上高い。EC値が低い原因は2015年の降水量が2012~2014年と比べ多く、融雪出水によって希釈されたからだと考えられる。チュップ川流域でEC値が高い原因については、貯水池として支流が堰き止められている箇所があり、EC値の低い地点と比べ融雪出水の影響をあまり受けていないことが考えられる。pHは全域で8.0~8.3の強アルカリ性を示し、2014年よりも高い値を示した。2015年は全域的に河川水中に占めるCa²⁺とHCO₃⁻の割合が高いことから、pHが高くなったと考えられる。

2. 水質分析結果

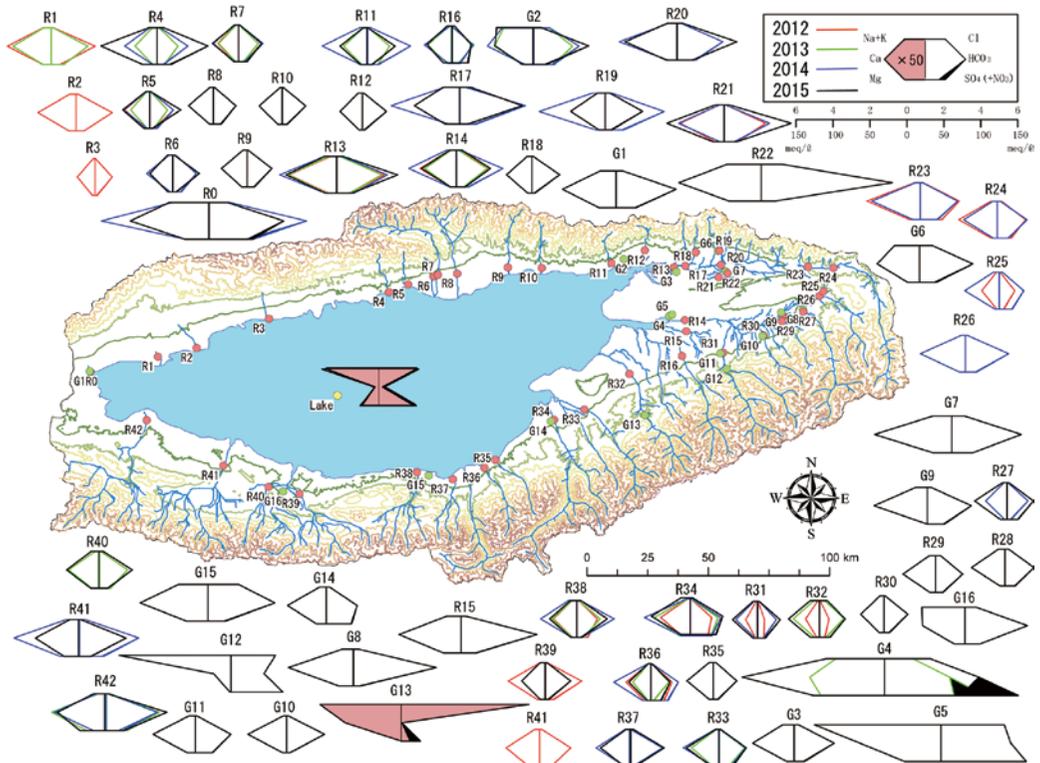
イシク湖の水質はNa—Cl (Mg—SO₄)型で、pHは8.9~9.0の高アルカリ性を示す。透明度は約20 mで、生物生産活動がほとんど見られず、非調和型のアルカリ栄養湖である(Romanovsky: 2002)。近年の水質の傾向では、1986年以降塩分濃度が増加しており、特にNa⁺, Cl⁻濃度の増加が顕著である。しかし、2007年以降、TDS値は増加しているにもかかわらず、Ca²⁺とHCO₃⁻濃度

は減少傾向にある。Na⁺, Cl⁻濃度の増加については、農地などからの人為由来成分も含まれていることが指摘されており、Ca²⁺とHCO₃⁻濃度はCaCO₃もしくは貝殻として除去されているとされる(齋藤: 2019投稿中)。塩湖の水質はまず蒸発濃縮によってCa²⁺と炭酸塩鉱物の析出によって変化する。その際、2 [Ca²⁺] > [HCO₃⁻] + 2 [CO₃²⁻]である場合、CaCO₃の沈殿析出によってCa²⁺が濃縮され、流入水の水質によって更に水質タイプが変化していく(望月ほか: 2014)。イシク湖の水質は[Ca²⁺] + [Mg²⁺] < [SO₄²⁻]かつ[Ca²⁺] < [Mg²⁺]であるため、Ca-硫酸塩鉱物、Mg-硫酸塩鉱物へと析出されていく際に、Ca²⁺とMg²⁺が涸渇しSO₄²⁻が濃縮された結果、現在への水質へと変化したものだと考えられる。この時、Na⁺, Mg²⁺, Cl⁻が水中に残されているのは、塩化ナトリウムとMg-硫酸塩鉱物の溶解度積が比較的多いためである。これらの変化を考慮すると、イシク湖の水質は、表層から深層までNa—Cl (Mg—SO₄)型であるため、前述の蒸発濃縮によって炭酸化学種が涸渇しているが、水位が上昇していることから、流入してくる河川水や地下水の影響により水質が決定されると考えられる。事実、イシク湖の水質の経年変化を見ると(第3図)、2007年から2015年にかけてCa²⁺とHCO₃⁻濃度が減少し、Na⁺, Mg²⁺, Cl⁻,



第3図 イシク湖の水質経年変化

1986~2007年: Kawabata et al (2014), 2013~2014年: 齋藤 (2019投稿中) よりデータ引用

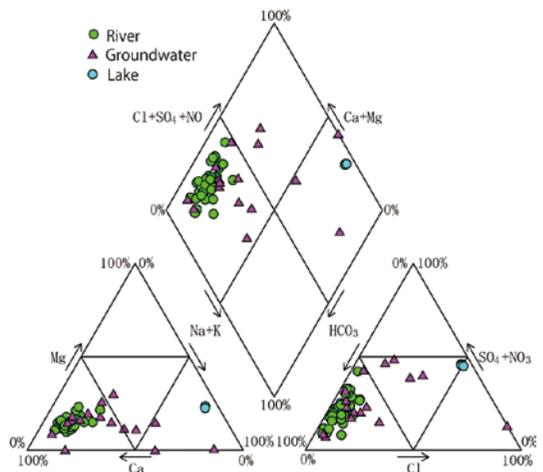


第4図 水質組成の空間分布 (2012~2015年)

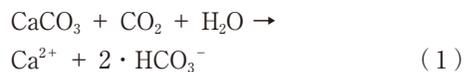
2012~2014年データ：齋藤 (2019 投稿中) よりデータ引用

SO_4^{2-} の濃度が増加していることがわかる。したがって、イシク湖では、蒸発濃縮による水質変化と流入による水質変化の両方の可能性から、考察を深めていく必要がある。

はじめに、流域の水質の特徴を把握するため、イシク湖周辺の河川水の水質組成についてみると (第4図, 第5図), 多くはCa-HCO₃型となり河川のそれぞれの水質に大きな差異はみられない。Ca-HCO₃型は浅層地下水や河川水で多くみられる水質組成で、イシク湖周辺で広がる、石灰岩 (CaCO₃) の影響を強く受けていることが考えられる。これは一般的に、大気もしくは土壌・地層中のCO₂を含んだ水は石灰岩や炭酸塩鉱物と接触すると次式の形で、Ca²⁺とHCO₃⁻が水の中に溶け込むためである。また、pHがアルカリ性であることもそれを示唆している。以下に、化学反応式を示す。



第5図 水質組成の割合 (2015年)



地下水の水質組成ではCa-HCO₃型と、浅層

地下水でよくみられる地点が多いが、Na — HCO₃ 型 (G2, G16) や、温泉水等では Na — Cl · SO₄ 型 (G5, G12), Na — Cl 型 (G13) など地域によって水質が大きく異なる (第4図, 第5図). Na — HCO₃ 型の水質の場合は、地下水と岩石の相互作用の時間が関与しており、地下水と岩石との接触時間が長くなると、Ca²⁺ を多く含む地下水と粘土鉱物との間で次式の陽イオン交換反応が行われ、地下水中の Na⁺ 濃度が増加するによって、以下のように計算される (三木ほか: 1979, 羅ほか: 2000).



ここに、X は粘土鉱物である。よって、岩石との接触時間が長いことから、Na — HCO₃ 型は深層地下水であることを示す。Na — Cl 型は地下深部にある化石海水起源であると言われる、ジオプレッシャー型熱水の基本的な水質タイプである (大木ほか: 1992)。Na — Cl · SO₄ 型は、日本ではグリーンタフ地域に賦存する Na · Ca — Cl · SO₄ 型が陽イオン交換されることによって形成されるが (佐々木: 2008, 松葉谷: 1991), 本流域のグリーンタフの存在については不明である。

これら流域の水質の特徴を踏まえ、イシク湖の水質変化について考察すると、湖水の蒸発濃縮による水質変化が生じた場合、Na⁺, Mg²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ が水中に蓄積されることから、流入水におけるこれら化学成分の溶存量を把握することが重要となる。各地域の各化学成分濃度の違いをみると (第4図), EC 値がイシク湖の約2倍高いことから溶存成分が多く、Na — Cl 型の水質が確認される G13 があるイシク湖南東からの地下水がイシク湖の水質形成に強い影響を与えていると考えられる。これに加えて、Na — Cl · SO₄ 型の G5, G12 や Na — HCO₃ 型の G2, G16 といったように、イシク湖の水質形成に影響を与えられ、イシク湖の水質には、流域からの地下水の流入であると考えられる。さらに、イシク湖周辺で多くみられる Ca — HCO₃ 型であっても、Na⁺, Mg²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ 濃度に違いがみられる

ことから、それらの地点についてさらに考察をする。地下水では G4, G7, G15 の化学成分濃度が他の地下水の地点よりも比較的高い。なお、これらの地点は湖面との標高差が約 50m であることから、湖水の浸透はないものだと考えられる。G4, G7 は Na⁺, Mg²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ 濃度すべてが高く G15 は Na⁺, Mg²⁺, Cl⁻ 濃度が高い。その他では、G1, G14 の SO₄²⁻ 濃度、G6 の Na⁺ 濃度が高い。河川での Na⁺, Mg²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ 濃度の違いについてみてみると、R0 は Na⁺, Mg²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, 全ての濃度が他の河川の地点よりも高く、R22 は Na⁺, Mg²⁺, Cl⁻ 濃度が高い。R0 は、町付近のビーチの側を流れる小河川で、町を流れている形跡がないことから、扇状地を流下する際に伏流水になっている可能性がある。R22 は、湖東部を流れる大河川、チュップ川支流の溜池であることから、地下水の混入が考えられる。その他、R34 では SO₄²⁻ 濃度が高く、R42 では Mg²⁺, SO₄²⁻ 濃度が高い。2012~2014 年での調査では、Na⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ 濃度の高い地点の中には、化学肥料などが起源で、無機汚染の指標となる NO₃⁻ 濃度の高さと同様に化学肥料の硫酸などがある (日本水道協会: 2015, 永井: 1991)。顕著な例として、大規模な農地が広がる湖東部にある湧水、G4 (Na⁺: 66.9mg/L, Cl⁻: 88.1mg/L, SO₄²⁻: 197mg/L, NO₃⁻: 194mg/L) があり、日本の環境基準の約4倍を上回る (環境省: 2019)。このことから、今現在で人為によるイシク湖の水質への極端な影響はないにせよ、今後の開発次第では水質が悪化する可能性もあると考えられる。

V おわりに

本研究では 2015 年、夏季のイシク湖及び河川水・地下水を調査し、主要化学成分の分析結果から、河川水・地下水の水質の特徴とイシク湖の塩分濃度の変化の現状について調査した。本研究の

結果をまとめると以下の点が明らかになった。

- ・イシク湖の EC は 2015 年、降水量が多かったことから、2013 年、2014 年より表層の EC は低く、深水層である水深 50m の EC は 2013 年と同程度であった。
- ・2015 年のイシク湖流域は降水量が多かった年であることから、河川水の EC が全域的に低かった。しかし、湖東部のチュップ川流域など、溜池に利用されている地点は EC が 2014 年と同じ程度か、もしくは高かった。
- ・イシク湖流域の地下水は扇状地周辺、平野部で水質が異なり、特に平野部では被圧地下水や人為汚染された地下水などもみられる。
- ・イシク湖の TDS は 2007 年から 2015 年にかけて増加しており、蒸発濃縮の影響により Ca^{2+} と HCO_3^- 濃度が減少し、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 濃度が増加している。
- ・イシク湖流域の地下水の多くは $\text{Ca} - \text{HCO}_3$ 型であったが、 $\text{Na} - \text{HCO}_3$ 型、 $\text{Na} - \text{Cl} \cdot \text{SO}_4$ 型、 $\text{Na} - \text{Cl}$ 型などもみられた。
- ・温泉水の水質は $\text{Na} - \text{Cl} \cdot \text{SO}_4$ 型と $\text{Na} - \text{Cl}$ 型で、特に $\text{Na} - \text{Cl}$ 型はジオプレッシャー型熱水だと考えられ、化石海水の影響が示唆された。
- ・イシク湖の水質形成は、流域の水質が影響しており、その中でも $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ 型の水質が確認される G13 があるイシク湖南東からの地下水の流入が大きく関わっている。
- ・河川や地下水の中には、人為由来の Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} の混入が示唆されており、今現在、イシク湖の水質への大きな影響は無いと考えられるが、今後の地域の発展の際には注意する必要がある。

以上の点から、イシク湖の水質は、蒸発濃縮による水質変化の過程の中で、主に地下水の流入による影響により現在の水質へと変化していったと考えられる。しかし、人為由来の成分が蓄積されやすいイシク湖では将来的に過度な土地開発が進むと、水質の変化や塩分濃度の急激な増加の可能性がある。イシク湖周辺はキルギス周辺国やロシ

アにとって保養地としての需要が高く、現在、中国とロシアを中心としたユーラシア経済圏は急速に成長しており、その影響により湖周辺の町は今後も発展していくことが想定される。そうした背景から、イシク湖の水質変化については継続的な調査をしながら、自然、人為双方の視点から考察していくことが必要である。

本研究では水質形成機構の全容を把握し切れていないとは言い難い。今後、水循環に伴う物質収支について把握するための LQ 式法を用いた湖へ流入する 1 年間の化学成分の供給量に関する定量的な議論や蒸発による水質組成の変化を把握するための河川水、地下水、湖水サンプルを用いた蒸発実験が必要とされる。また、生物活動などによる水中からの除去や水収支とイシク湖のイオン濃度変化の関係についても不明な点が多く、生物環境の調査も必要とされる。更に、湖の水収支と物質収支の関係を明らかにするためにも、湖水位、河川流量の連続観測、蒸発量を求めるための気象観測といった水収支に関する継続性のある基礎データの蓄積が必要となる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、法政大学文学部地理学科の前空英明教授と小寺浩二准教授、元日本大学（現三重大学名誉教授）の森和紀先生より常日頃からご指導、ご鞭撻を賜わり、本稿を草するに際しても貴重な示唆を頂きました。現地ガイドやドライバーの方々には、調査中に有意義な情報の提供と通訳をして頂きました。また、匿名査読者の方からも多くの助言を頂きました。心より感謝を申し上げる次第です。ここに記して厚くお礼を申し上げます。

注 記

- 1) ADVANTEC 製定性ろ紙、孔径 $5 \mu\text{m}$ を使用
- 2) ADVANTEC 製、孔径 $0.20 \mu\text{m}$ を使用
- 3) 島津 IC10ADVP 及び島津 TOC-V_{CSH} を使用

参考文献

- 大木靖衛, 佐藤 修, 汗木 滋 1992. 北部フォッサマグナのジオプレッシャー熱水系に起因する地震と地すべり. 月刊地球 号外 No.5. 121-125.
- 後藤秀昭 2012. プレートテクトニクスからみた中央アジアの大地形. 帯谷知可, 北川誠一, 相馬秀廣 (編), 朝倉世界地理講座——大地と人間の物語——

- 中央アジア 5. 14-15.
- 齋藤 圭 2019. 中央アジア・イシク湖とその集水域
河川及び地下水の主要溶存成分. 日本水文科学会
投稿中.
- 佐々木宗建 2008. 地下水水質の形成過程の基礎的数
値解析. 地質調査研究報告 59 (1/2). 117-122.
- 中原紘之, 石田紀郎, 辻村茂雄, 川端良子 1999. 乾燥
地における大規模感概と河川・湖沼の水質・生態系
— 中央アジアの河川・湖沼の水質・生物相の特徴
と変化 —. 水文・水資源学会誌, 12(2). 177-189.
- 永井 茂 1991. 地下水汚染の水文学的アプローチ
— 無機汚染の実態と問題点 —. 地下水学会誌
33. 145-154.
- 奈良間千之 2012. 中央ユーラシアの自然環境と人間
— 変動と適応の一万年史 —. 窪田順平 (監), 奈良
間千之 (編), 中央ユーラシア環境史 第1巻 環境変
動と人間. 288.
- 福嶋義宏 2006. 中央アジアの天空の湖, イシククル
湖の長期水位変化. 水利科学 49-6. 74-91.
- 堀内清司, 渡辺真木, 北岡豪一 1999. 乾燥地域の水
— 中国新疆地域を例として —. 日本水文科学会
誌, 29(3). 111-122.
- 松葉谷 修 1991. 熱水の地球化学. 裳華房. 139.
- 望月陽人, 細田 耕, 杉山雅人 2014. 塩湖での微量
元素の動態 — 炭酸化学種濃度との関係 —. 陸水
研究 1. 49-63
- 森 和紀 1981. 塩湖の水質と循環, 部分循環水域の
維持機構と物質代謝 (その2). 文部省科学研究費総
合研究 A. 235-239
- 三木一美, 吉沢 浦 1979. トンネル湧水の発生
形態と水質変動について. 土木学会論文報告集
282. 31-43.
- 羅 漢金, 坂本 康, 西田 継 2000. 地球化学的水
質分類による地下水水質形成システムの検討—新潟
県小国・小千谷・小出地域の地下水について—. 環
境システム研究論文集 28. 95-103.
- Eugster, H. P. and L. A. Hardie 1978. Saline Lakes. In
Lakes: Chemistry, Geology, Physics, A. Lerman
(ed.), Springer-Verlag, New York. 237-293.
- Hammer, U. T. 1986. Saline lake ecosystems of the
world. DR, W. Junk Publishers. 125.
- Karmanchuk, A. S. 2002. Water Chemistry and Ecology
of Lake Issyk-Kul. NATO Science Series 13. 13-
26.
- Kawabata, Y., Kurita, T., Nagai, M., Aparin, V., Onwo-
na-Agyeman, S., Yamada, M., Fujii, Y. and Kataya-
ma, Y. 2014. Water Quality in the Lake Issyk-kul
and the River Flowing into It. 砂漠研究 24-1. 105-
108.
- Rickets, D. R. Johnson, C. T. Brown, T. E. Rasmussen,
A. K. Romanovsky, V. V. 2001. The Holocene paleo-
limnology of Lake Issyk-kul, Kyrgyzstan: trace ele-
ment and stable isotope composition of ostracodes.
Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology
176. 207-227.
- Romanovsky, V. V. 2002. Water level variations and
Water balance of Lake Issyk-kul. Lake Issyk-kul: Its
Natural Environment. J. Klerkx and B. Imanackun-
ov (Eds), Kluwer Academic Publishers. 45-57.
- Romanovsky, V. V., Tashbaeva, S., Cretaux J.F., Cla-
mant, S. and Drolon, V. 2013. The closed Lake Is-
syk-Kul as an indicator of global warming in Tien-
Shan. Natural Science 5-5. 608-623.
- Savvaitova, K. and Petr, T. 1992. Lake Issyk-Kul, Kir-
gizia. Int. J. Salt Lake Res. 21-46.
- Soloviev, S. G. 2011. Geology, mineralization, and fluid
Inclusion characteristics of the Kensu W-Mo skarn
and Mo-W-Cu-Au alkalic porphyry deposit, Tien
Shan, Kyrgyzstan. Economic Geology 106(2). 193-
222.
- Tsigelnaya, I. D. 1995. Issyk-Kul Lake, In A. F.
Maudych [ed.], Enclosed seas and large lakes of
Eastern Europe and Middle Asia. SPB Pub 1. 199-
229.

参照ウェブサイト

- 環境省 2019. 人の健康の保護に関する環境基準.
<https://www.env.go.jp/kijun/wt1.html> (最終アクセス
日: 2019年1月10日)
- 国際湖沼環境委員会 2003. 世界湖沼データベース.
<http://wldb.ilec.or.jp/Details/Lake/ASI-55> (最終アク
セス日: 2017年5月16日)
- 日本水道協会 2015. 水質基準などの解説. [http://
www.jwwa.or.jp/mizu/about.html](http://www.jwwa.or.jp/mizu/about.html) (最終アクセス
日: 2018年2月15日)
- Meteoblue.com. キルギス気象データ. [https://www.
meteoblue.com/en/weather/archive/export/prince-
ton_united-states-of-america_5102922](https://www.meteoblue.com/en/weather/archive/export/princeton_united-states-of-america_5102922) (最終アクセ
ス日: 2016年10月20日)