

ボリビア Tuni 湖流域の水環境調査*

東北大学 大学院工学研究科 梅田 信

東北大学 大学院工学研究科 朝岡良浩

1. はじめに

ボリビア多民族国は南米に位置する内陸国である (図-1 参照). 首都ラパスは, アンデスの高山域の盆地に位置し, 水資源の多くを高山域の降水に依存している. 特に氷河の融解を起源とする表流水が, 水資源の多くを占める. 近年, 氷河融解の進行により, 一時的な水資源の増加がみられる. しかし, ラパスを含むアンデス高地は, 降水の少ない半乾燥地域であり (図-2 参照), 少雨による渇水が発生することも多い. またラパス市及び近郊のエルアルト市では, 人口集中に伴う都市域の拡大と耕作地の拡大によって水需要は増加している. さらに, 気候変動に伴う水循環システムの変化が予想されており, 将来的に氷河が融解し消失した後の水資源の確保が大きな課題となっている. こうした自然環境と社会環境の変化に対応した水資源システムの再構築による, 十分かつ安定した水供給の確保は, 国内で大きな関心となっている.

こうした課題に対処するため, 筆者らを含む日本とボリビアの共同研究グループが, 気候変動による氷河の減少に伴い懸念される将来的な水資源不足への対応について検討を開始したところである. そこで, 当該研究において対象となる Tuni ダム湖およびその流域について, 予備調査として現地踏査を 2009 年 12 月 2~3 日に実施した. 調査内容は, 流域の概要などを現地の共同研究者 (サンアンドレアス大学水理研究所-Instituto de Hidraulica e Hidrologia, IHH) などに聞き取りを行うことに加え, 簡易方式による水質計測を実施した. 本論文では, この結果を踏まえて, 現地の状況に関して紹介をする.



図-1 ボリビア及びラパス市の位置

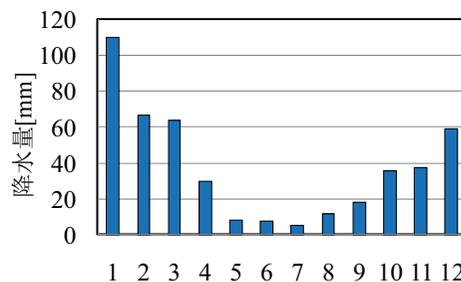


図-2 ラパスの月別平均降水量

*Field observations on aquatic environments in Tuni Reservoir basin, by Makoto Umeda and Yoshihiro Asaoka (Tohoku University / JST, SATREPS)

2. 研究対象地域の概要

Tuni 湖は、ラパス市から北北西に約 30km に位置する貯水池である。1977 年に完成したロックフルダムである。総貯水容量は $24.7 \times 10^6 \text{m}^3$ 、満水時の水位高度は 4,437m である（写真-1, 2）。この貯水池からエルアルト市内の浄水場へ $1.0 \text{m}^3/\text{s}$ の水が送られており、エルアルト市に 80%、ラパス市に 20% の比率で配水される。

図-3 に示すとおり、Tuni 湖への流入する河川は、大きく 3 つに分けられる。またそれぞれの流域の最上流部には氷河が存在していることが大きな特徴である。流域の一つは、Tuni 湖へ直接流入する Tuni 氷河流域である。流域面積は約 10km^2 である。あとの二つは、河川が直接 Tuni 湖へ流入するのではなく、人工的な導水路を経由して流入している。一つは Tuni 氷河の西側に位置する Condoriri 氷河流域で、Tuni 湖への集水面積は約 15km^2 である。もう一つは、Tuni 湖の東側にある Huayna Potosi 西氷河流域で、集水面積は約 35km^2 である。なお、これらのほかに、湖へ直接流入する残留域や図-1 でやや細い線で示した河川があるが、これらは常時は（特に乾期には）ほとんど水が流れていないようである。このことは、半乾燥地というこの地域の特徴を示しているとともに、氷河の融解による流出水の主要河川での重要性を示唆するものと考えられる。

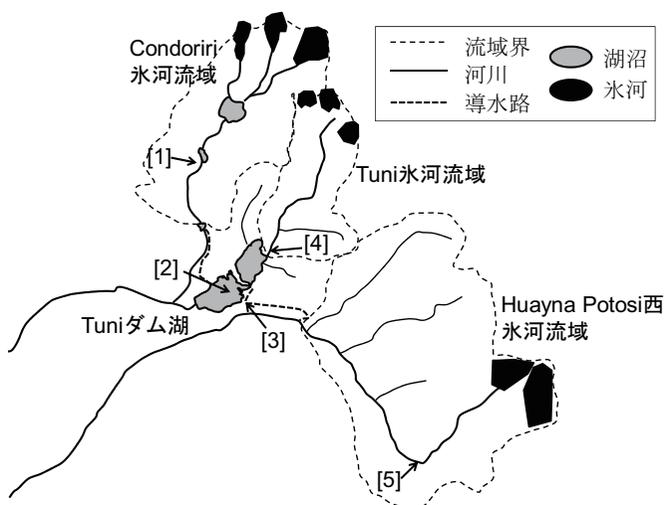


図-3 Tuni ダム湖流域の概略と調査地点



写真-1 Tuni 貯水池（容量 24.7 百万 m^3 、高度 4,437m）



写真-2 Tuni 湖面（中流部から下流を望む）

3. 研究対象地に関する既存の観測態勢

IHH の共同研究者から、本研究の対象地とその周辺における、これまでの種々の観測状況について聞き取りを行った。その概要は以下の通りである。現在、IHH はフランスの研究機関（開発調査研究所－Institut de Recherche pour le Développement, IRD－）と共同で Zongo 氷河（本研究対象地の東方で隣接する流域）の気象観測を 1991 年から実施している。この調査は、GLACIOCLIM（Les GLACIers, un Observatoire du CLIMat）という氷河観測プロジェクトに参加している。観測項目は放射 4 成分、気温、湿度である。データは氷河観測プロジェクト GLACIOCLIM のホームページから取得可能とのことである。

Tuni 湖の水位データは、ラパス・エルアルト水道公社（EPSAS－Empresa Publica Social de Agua y Saneamiento－）が 1996 年から観測開始しており、日単位のデータがある。また Tuni 湖に流入する支川の upstream（Huayna Potosi West, Tuni bajo [写真-3, 4], Condoriri [写真-5, 6]）で気象観測と流量観測が行われている。なお、流量データは 15 分間隔のデータから日データに平均化される。それぞれの気象観測項目と期間は表-1 のとおりである。現在測定が継続している 2 地点において、電源は太陽光発電とバッテリーのハイブリッドであるが、ソーラーパネルは盗難を試みた形跡が見られる（写真-6）。

Tuni 湖流域外の気象自動観測ステーションについては、国立気象水文協会（SENAMHI－Servicio Nacional de Meteorologia e Hidrografia－）が Tuni 湖から約 32km 離れた地点（ラパス市内）で正味放射量、気温、風速、湿度、降水量を観測している。測定期間は 1960～2007 年で、測定間隔は基本的に 15 分となっている。その他、ラパス市内 4 地点、エルアルト市内 2 地、チチカカ湖付近（Tuni 湖から西方に約 35km 離れたチチカカ湖岸の Batallas 及び Huarina）の 2 地点で気温・湿度・雨量（Pluviografo）を観測している。なお、ラパス市内の 1 地点においては、1950 年から 2002 年まで日射量、降水量、気温の測定が行われていた。

これらの地域における降水の分布については、地形の影響やチチカカ湖からの水蒸気の影響などがあり、かなり複雑である。IHH の共同研究者も降水分布に関するモデルの構築がまだ不十分であると考えているということである。



写真-3 Tuni bajo 観測所（流量堰と気象観測機）



写真-4 Tuni bajo 観測所（下流側から）

表-1 Tuni 湖周辺の観測状況

観測地点	期間	測定項目	測定間隔
HuaynaPotosiWest	1999年12月～2006年		
Tuni bajo	1999年12月～継続中	気温, 湿度, 流量	15分
Condoriri	1999年9月～継続中	気温, 流量	15分



写真-5 Condoriri 観測所



写真-6 ソーラーパネル (補助状況と悪戯跡)

4. 今回の調査結果

今回の調査は、2009年12月2～3日に実施した。調査内容は、前章で述べたような流域の概要をIHHの共同研究者などに聞き取りを行うことに加え、簡易方式による水質計測を実施した。測定事項は、水温、pH、電気伝導度の計器測定（東亜ディーケーケー(株)製）に加えて、参考としてパックテスト（(株)共立化学研究所製）を用いた栄養塩濃度等の測定も行った。調査地点は、図-3に示す5地点（[1]～[5]）である。Tuni湖及び主要な流入河川で測定した。

Tuni湖は中心部に突き出る半島のより二つの湖に分断され、人工水路で繋がっている（写真-3）。水路の水深は3.5mであり、2009年10月に掘削されたものである。それ以前は、水位の低い時期（乾期）にTuni湖が半島で二つに分断されていた。

この掘削水路の直上流側でHuaynaPotosiからの導水路の放流が行われている（写真-4）。この水路は、1986年にTuni湖左岸に水路を設けられたものである。1995年には水路が拡大されたということである。図-3において破線で示されたのがこの水路である。水路は、半島下流で合流するのが自然であると思われるのを、敢えて湖上流部まで延伸しているのは、河川水に含まれる土砂（主として微細成分）を堆積させるためである。



写真-3 貯水池上下流を結ぶ掘削水路



写真-4 HuaynaPotosiからの導水路の放流



写真-5 HuaynaPotosi 川の取水（分派）堰



写真-6 堰上流の土砂堆積状況

HuaynaPotosi 川は、Condoriri 川より濁度が高い傾向にあるとのことである。Tuni 湖への導水路の取水堰（写真-5）の付近には、浚渫を行った土砂が堰の左右岸に盛られており、このことから土砂流出が多いこと推察される（写真-6）。調査時の HuaynaPotosi の河川水は微細土砂で茶色く濁っていた。さらに HuaynaPotosi 川の上流域に廃鉱山がある。流量堰の上流において、水力発電所とそこへの水路があるが、発電所は2年前から停止している。HuaynaPotosi 川の上流域には湿地が存在し、乾季には面積が減少し雨季に増加する。

一方、Condoriri からの導水路は、1995年に設置されたものである。地図等から確認する限り、この水路は、Condoriri 流量堰の下流にある小規模な治水用ダムの下流側で取水されていると思われる。なおこの導水路の流量は測定されていない。Condoriri 氷河の下流には、比較的大きな氷河湖（写真-7）が存在している。

水質の測定結果（2009年12月2日実施）を表-2, 3に示す。氷河からの流出水であるということに加え、標高が高いため、水温は10℃程度と概ね低い。パケットテストの測定結果はあくまで参考値であるが、どの地点も概ね清澄な水質であると言えそうである。ただし、Tuni 川と Huayna Potosi 川の河川水は、目視では土砂による濁りがやや目立っていた。その影響か、Huayna Potosi の水路において COD がやや高めにでている。なお Tuni 川の水色は Tuni 湖の色と近く、やや緑色掛かった白濁色であった（写真-3, 4）。HuaynaPotosi 川の廃鉱山に関しては、下流の HuaynaPotosi 流量堰での pH 測定結果が7.6であったことから、重金属類の流出のような影響は、ほとんど無いものと考えられる。



写真-7 氷河湖と Condoriri 氷河



写真-8 Condoriri 観測所直下に広がる湿地

表-3 水質測定結果（計器測定）

地点	測定 時刻	水温	pH	EC
		[°C]	[-]	[mS/m]
[1] Condoriri 川	10:37	10.3	7.79	9.46
[2] Tuni 湖左岸	11:55	11.9	7.51	9.94
[3] Huayna 水路	12:24	10.8	7.79	9.94
[4] Tuni 川	14:53	11.5	7.64	4.77
[5] HP 西氷河下流	17:39	8.3	7.73	9.66

表-2 水質測定結果（パックテストの簡易測定）

地点	測定 時刻	COD	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	PO ₄ -P
		[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]	[mg/L]
[1] Condoriri 川	10:35	0.5	<0.2	<0.005	<0.2	<0.02
[2] Tuni 湖左岸	11:55	2	0.2	0.005	0.2	0.03
[3] Huayna 水路	12:20	4	0.3	<0.005	<0.2	0.03
[4] Tuni 川	14:45	2	0.2	0.005	0	0.02

5. おわりに

今後より詳細な調査，検討を進め，熱帯氷河を持つ流域に関する知見を増やすとともに，ボリビアの水資源管理に寄与する成果を出していきたい。

謝辞：本研究は，地球規模課題対応国際科学技術協力事業(SATREPS, JST/JICA)の支援を受けて実施された。