

ボリビアの Tuni 貯水池における水温分布に関する数値解析*

東北大学 工学部 谷 慧亮

東北大学 大学院工学研究科 梅田 信

サンアンドレアス大学 マルセロ ゴリティ

1. はじめに

近年気候変動は世界中の多くの人たちに関心を持たれている大きな問題の一つである。地球温暖化は、低地よりも標高が高い地域で大きな影響を与えると指摘されている。南米のアンデス高地の熱帯氷河は、標高 5,000m 付近に存在し、ボリビア多民族国の首都ラパスの主要な水源となっている。降水量が少ない乾季の時期でも氷河からの融解水により家庭や農業、工業用の水を供給することができる¹⁾。しかし氷河の減少により深刻な水不足の問題が起こる可能性が出てくる。ラパス市と近郊のエルアルト市では近年人口の集中やそれにとまなう都市域や耕作地の開発により水の需要は増加しているため水資源の確保は喫緊の課題である。

ラパス市とエルアルト市の水源の一つに Tuni 貯水池がある。気候変動の影響で氷河が融解し、貯水池の水量と水質の変化が変化することが懸念されている。水質変化を検討する上で、水質環境の形成に水温が大きく関係するため気候変動による水温分布の変化を予測する必要がある。本論では将来予測において用いる貯水池の水温解析モデルの再現計算について報告する。

2. 調査・研究方法の概要

Tuni 貯水池は、ラパス市から北北西に約 30km に位置する、ラパスへの水道用水の供給を目的に建設されたダム貯水池である。総貯水容量は $24.7 \times 10^6 \text{m}^3$ で、毎秒 $1 \text{m}^3/\text{s}$ の水をエルアルト市内の浄水場へ送る役割を果たしている。貯水池の周辺流域は、乾季の時期には雨がほとんど降らず、渇水する地点もいくつか存在する半乾燥地である。そのため氷河が水源として果たす役割は大きい。湖内の連続的な水温の鉛直分布および水位変動を計測するために自記式水温計(Onset Computer 社製 ティドビット v2)と水位計(Onset Computer 社製 HOBO U20 ウォーターレベルロガー)を貯水池の最深部に設置した。計測期間は 2010 年 9 月 21 日から 2011 年 8 月 27 日で、1 時間間隔の計測を行った。水温計は水面から深さ方向に 1m 間隔で設置した。水位計は最低水位付近に留まるように設置した。図-1 に Tuni 貯水池流域の概略と計測地点を示す。

水温分布の計算は、水平的な水温分布を一様と仮定する鉛直一次元の数値解析モデルを

* Numerical simulation of water temperature distribution in Tuni reservoir, by Keisuke Tani, Makoto Umeda and Marcelo Gorrity

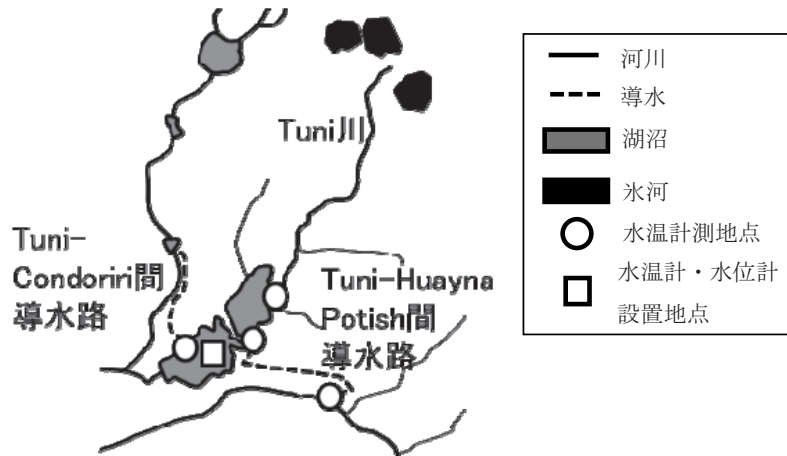


図-1 Tuni 貯水池流域の概略と計測地点

用いた。流入水は表層近くに流れると仮定し、密度が大きい水が上の層にある場合は上下の層の完全に混合するとした。

貯水量の収支は以下の式で計算される。

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (1)$$

ここで、 V は貯水量(m^3)、 Q_{in} は流入量(m^3/s)、 Q_{out} は放流量(m^3/s)を示す。これにより湖の水位が計算される。

気象条件による水面での熱収支 S は以下の式で計算される。

$$S = (1 - ref)\beta\phi_0 - \phi_e - \phi_c - \phi_{ra} \quad (2)$$

ここで、 ref は水面反射率、 β は水面吸収率、 ϕ_0 は日射量($kcal/m^2/day$)、 ϕ_e は潜熱($kcal/m^2/day$)、 ϕ_c は顕熱($kcal/m^2/day$)、 ϕ_{ra} は長波放射($kcal/m^2/day$)である。潜熱および顕熱は以下の Rohwer の式を用いて計算した。

$$\phi_e + \phi_c = (0.000308 + 0.00015U) \rho (e_s - H e_a) \left\{ L_v + C_w T_s + \frac{269.1(T_s - T_a)}{(e_s - W e_a)} \right\} \quad (3)$$

ここで、 U は風速(m/s)、 e_s は表層水温に相当する飽和蒸気圧($mmHg$)、 e_a は気温に相当する飽和蒸気圧($mmHg$)、 H は相対湿度、 L_v は蒸発の潜熱($kcal/Kg$)、 C_w は比熱、 T_s は表層水温($^{\circ}C$)、 T_a は気温($^{\circ}C$)である。 e_s 、 e_a 、 L_v は以下の式を用いて求めた。なお以下の式の e_s 、 e_a の単位は hPa である。

$$e_s = 6.112 \exp \left\{ \frac{17.67 T_s}{T_s + 243.5} \right\} \quad (4)$$

$$e_a = 6.112 \exp \left\{ \frac{17.67 T_a}{T_a + 243.5} \right\} \quad (5)$$

$$L_v = 595.9 - 0.54 T_s \quad (6)$$

長波放射は以下の Swinbank の式を用いて計算した。

$$\varphi_{ra} = 0.97k\{T_w^4 - 0.937 \times 10^{-5} \times T_a^6(1.0 + 0.17C_d^2)\} \quad (7)$$

ここで k は Boltzman 定数(kcal/m²/day), T_w は表面水温(K), T_a は気温(K), C_d は雲量である。水中での日射の伝達は以下の Lambert-Beer の式を用いて計算した。

$$\varphi_z = (1 - ref)(1 - \beta)\varphi_0 \exp(-\eta z) \quad (8)$$

ここで, φ_y は深度 z (m)における日射量(kcal/m²/day), η は減衰係数である。パラメータ ref , β , η の値は, それぞれ一般的に用いられる 0.06, 0.5, 0.5 とした。

シミュレーションへの入力データは, 貯水池の標高毎の体積, 流入出量, 流入水温, 気象条件(気温, 日射量, 風速, 湿度, 雲量)である。気象データは, 東北大学とボリビアのサンアンドレアス大学水理研究所(IHH-Instituto de Hidraulica e Hidrologia-)が共同で Tuni 貯水池の脇において計測したデータが, 2011年6月から10月上旬の気温, 日射量, 風速, 湿度について得られた。この気象の観測には HOBO U30-NRC データロガー(Onset Computer 社製)を用いた。湖畔での計測データがないものに関しては, 国立気象水文協会(SENAMHI-Servicio Nacional de Meteorologia e Hidrografia-)がエルアルト国際空港において毎日計測している気温, 風速, 湿度, 雲量のデータ²⁾を利用した。この測定地点はラパス市から約30km離れており, Tuni 貯水池よりも標高が約350m低い。そのため気温は標高補正を行い, 2.2°C引いた値を計算に用いた。しかし流入量, 流入水温, 日射量に関しては十分な量のデータを得られなかったため, データの推定を行い算出することにした。

流入量は(1)式の関係を用いて, 1時間毎の貯水量の変化量と取水量の差から算出した。取水量は貯水池管理者の情報から常に 1m³/s と仮定した。流入水温は, Tuni 貯水池で2009年

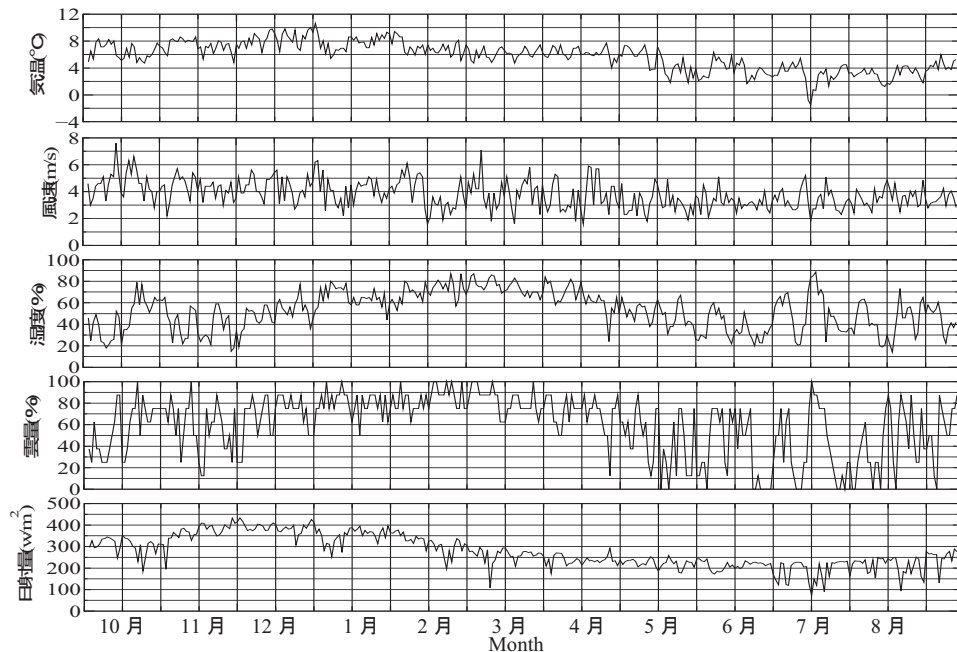


図-2 シミュレーションに入力した気象データ(2010年9月～2011年8月)

12月と2011年9月に測定した流入口付近の水温データの平均し、年間の水温を一定と仮定して与えることにした。日射量は、実測値がある2011年6月から8月の期間で可照時間、雲量、湿度、降水量から重回帰分析を行い、日射量の推定式を求めた。

シミュレーションに入力した気象データを図-2に示す。

3. 結果と考察

貯水池における貯水量の変化と推定した流入量を図-3、水温の計測結果および流入水温として用いる水温の平均値を表-1、日射量を推定する際に用いたデータおよび日射量の実測値と予測値を比較したグラフを図-4に示す。重回帰分析を行った結果、得られた日射量の予測式は以下に示す。

$$\varphi_0 = 114.3N_0 - 0.4C_d - 1.1H - 5.3W - 1002.8 \quad (9)$$

ここで、 N_0 は可照時間である。重回帰分析により得られた決定係数 R^2 は0.53である。

数値解析モデルを用いて鉛直水温分布の計算を行った結果、2010年9月から2011年8月の期間での計算値を図-5、Tuniでの観測データがある2011年6月から2011年8月の期間での計算値を図-6に、それぞれ実測値と併せて示す。

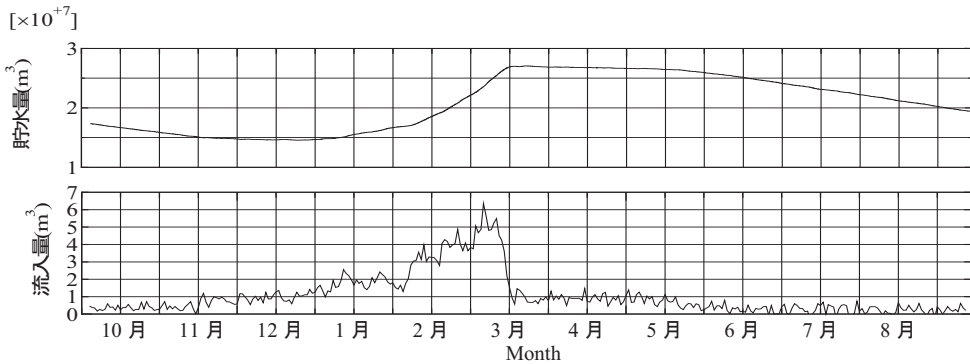


図-3 貯水池における貯水量の変化と推定した流入量(2010年9月～2011年8月)

表-1 水温計測結果と平均値

地点	調査日	時刻	水温
A:Tuni 川流入口	2009/12/2	11:55	10.5°C
	2011/9/21	14:45	11.5°C
B:Tuni-Condoriri 間導水路流出口	2011/9/21	10:45	6.0°C
C1: Tuni-HuaynaPotoshi 間導水路流出口	2009/12/2	12:25	10.8°C
C2: Tuni-HuaynaPotoshi 間導水路流入口	2011/9/21	14:45	14.7°C
	2011/9/22	15:10	15.9°C
	2011/9/25	10:40	9.2°C
上記のデータの平均値			11.2°C

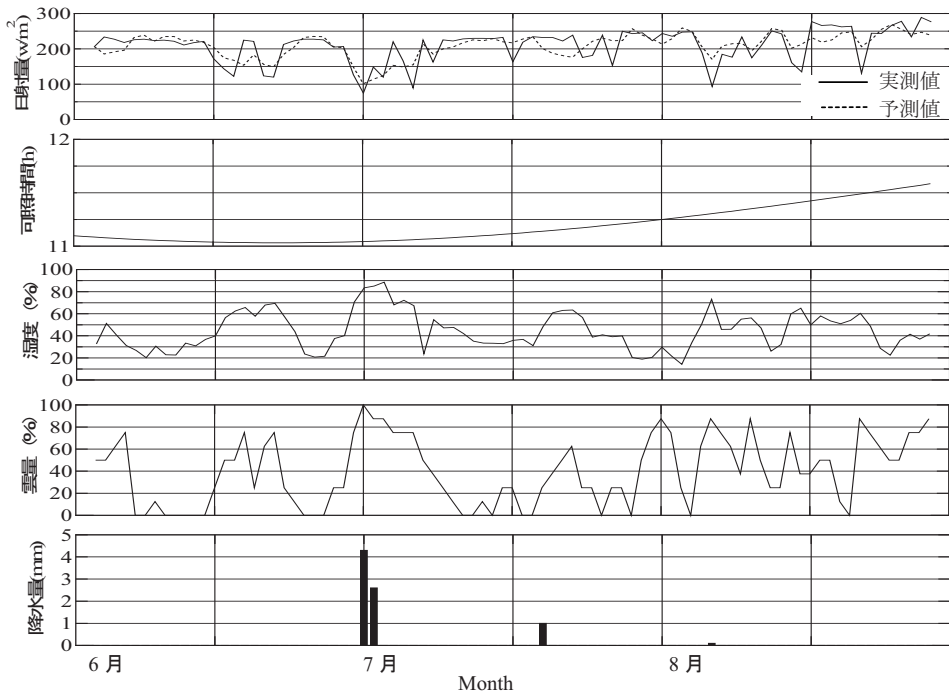


図-4 日射量の推定式作成に用いた気象データと推定式から求めた日射量
(2011年6月～2011年8月)

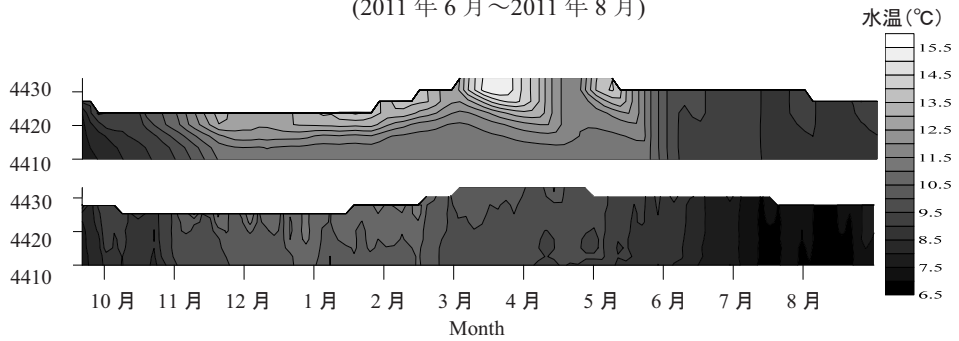


図-5 水温分布(2010年9月～2011年8月)

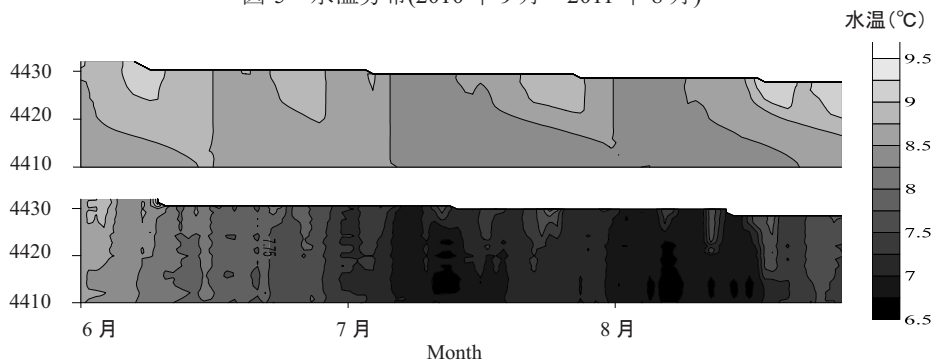


図-6 水温分布(2011年6月～2011年8月)

実測結果より、Tuni 貯水池はごく小さい水温成層しか形成しないことが分かった。年間を通して水温の変化が小さいことも特徴的である。年間で計算した結果、12月から5月にかけて水面から10mの部分の水温が実際の水温よりも2~4℃高くなった。Tuniの観測データがある期間での計算でも1~2℃ほど水温が高くなる傾向が見られた。これはシミュレーションに入力した流入水温が実際よりも高い、もしくは湖の熱収支や水温の拡散を計算で十分に表現しきれていない結果と思われる。

4. おわりに

Tuni 貯水池に関する水文データや気象データが現段階では十分に得られていない状況であるが、新たな情報が手に入り次第シミュレーションへの入力データをより実際に近いものにしていき再現計算の精度を向上させていきたい。また Tuni 貯水池の水深毎の水温変化が少ない状況を再現するには熱収支や湖内の水の流動に関する計算を見直してモデルを改良していく必要がある。

謝辞：本研究は JST/JICA 地球規模課題対応国際科学技術協力事業「氷河減少に対する水資源管理適応策モデルの開発」の成果の一部である。ここに記して関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) Rocío Urrutia, Mathias Vuille : Climate change projections for the tropical Andes using a regional climate model : emperature and precipitation simulations for the end of the 21st century, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 114, D02108, 15PP., 2009
- 2) Senamhi HP, <http://www.senamhi.gob.bo/>