

4. アンデス高山域の貯水池における水環境解析と 気候変動の影響予測

谷 慧亮^{1*}・梅田 信¹・朝岡 良浩¹

¹東北大学大学院工学研究科（〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06）

* E-mail: tani@kasen.civil.tohoku.ac.jp

南米中部に位置するボリビアの首都ラパスではアンデス高地の氷河融解水を主要な水源としている。しかし将来の気候変動により今後30年から40年の間に氷河が消失することが予測されている。本研究では、首都圏に水を供給するトゥニ貯水池について、大気大循環モデル（GCM）の出力結果を利用して現在から約100年後の貯水池の水温及び水質の指標となるクロロフィルaの変化に着目した予測計算を行った。解析した結果、植物プランクトンによる深刻な汚濁は起こらないと予想された。貯水池及び流入河川の栄養塩濃度は高いが、水温が植物プランクトンの増殖に寄与する程高くないことがプランクトンによる汚濁を抑制していると考えられる。

Key Words : climate change, tropical glacier, reservoir, water resources, water quality

1. はじめに

気候変動は、近年の世界中で関心が高まっている問題の一つである。IPCC 第4次評価報告書¹⁾によると、将来の世界平均気温は、どのような経済成長を遂げようと現在よりも早いペースで温暖化が進むことは避けられないと予測されている。気候変動により影響が大きく受けると懸念されることに、水資源および水環境の問題が挙げられる。

本研究で対象とするのは、流域に氷河を持つような高山域にある貯水池の水環境である。氷河を水源とする都市は世界中にいくつか存在する。本研究の対象地である、南米中部のボリビアの首都ラパスは、低緯度ながらアンデス高地に位置するため水源地域に氷河を持つようなやや特殊な環境の地域である。ここは、年間降水量が約600mmの、降水の少ない半乾燥地域であるが、氷河の存在により飲料水や発電、農業用水の安定した供給が可能となっている。しかし気候変動により現在氷河の融解が進んでおり、今後30年から40年の間に氷河が消失すると予測されている²⁾。またラパス市の近隣都市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。そのため自然環境と社会環境の変化による水不足が将来起こると懸念されている。

一方、本研究の対象地のような低緯度かつ高標高に位置する湖沼の水環境についての工学的な研究事例は必ずしも多くない。緯度が低く、標高が高いという地理的な条件から、強力な日射（特に紫外線）による水質的および生物学的な影響に関して着目した研究などが行われている例はある³⁾。また、氷河に関しては前掲のIPCC報告書も含め、気候変動の影響が顕著に出やすいと考えられていることもあり、氷河からの流出河川の水質形成については、ある程度研究が進められている^{4,5)}。しかしながら、高標高における湖沼を含む水環境については、比較的基礎的な調査解析事例^{6,7)}が多い。

本研究では、南米の熱帯氷河域にあるダム貯水池を対象として、まず水質環境の基礎的な現地観測を実施した。さらに、この貯水池は周辺都市における重要な水資源であることから、気候変動による水質的な影響を評価、展望するために、湖沼や貯水池の水質解析モデルを構築し、将来的な気象条件を考慮した数値シミュレーションを行い、気候変動の影響について議論した。

2. 研究対象地概要

トゥニ貯水池は、ボリビア多民族国の行政上の首都ラパス市から北北西に約30kmに位置するダム貯水池であ

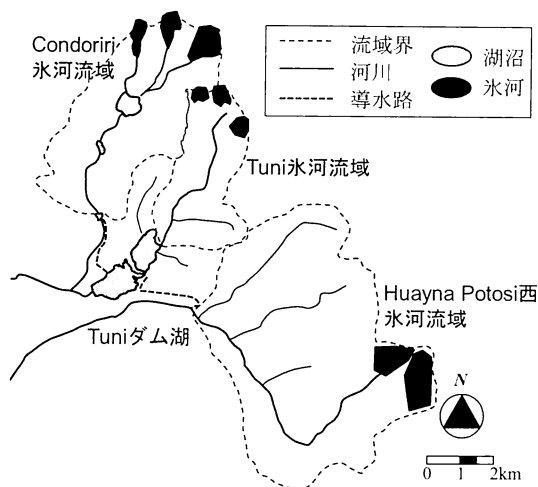


図-1 トゥニ貯水池と流域の概略図

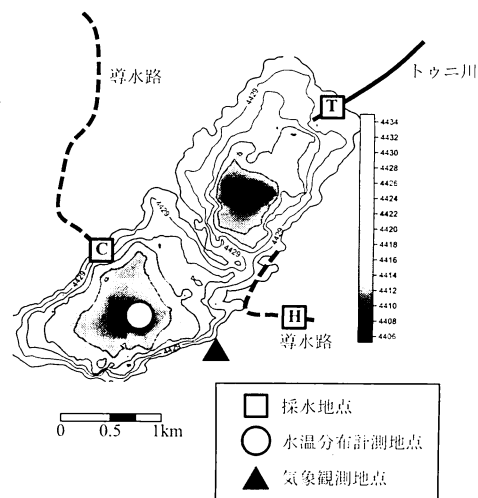


図-2 トゥニ貯水池と周辺調査地点

る。ラパス市への水道用水の供給を目的に1977年に建設された。総貯水容量が $24.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、最大水深が約30mという規模は、我が国の貯水池と比較すると標準的なものといえるが、満水位が標高4,435mという高地に位置するという点が、環境的な特徴と言える。図-1にトゥニ貯水池の流域概要を示す。貯水池は3つの流域からの流入水により構成されている。それぞれの流域の上流端には、氷河が存在しているが、いずれも温暖化の影響により年々縮小している。

貯水池の運用は、概ね年間を通じ、 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ の水を取水し、エルアルト市内の浄水場へ送水している。当該地域の季節変化は、夏季(概ね10月頃から4月頃)が雨季にあたり、冬季が乾季になっている。貯水池へ直接流入する河川は、北から流れてくるトゥニ川のみであるが、雨季(12月1日から4月30日)には他の2河川からの導水で満水にし、乾季の水供給に備える運用をしている。乾季には貯水池への導水をせず、下流の集落の水利用のために全量流下している。

3. 現地観測方法

貯水池内では、水温の鉛直分布及び水位変動を計測した。水温分布は、自記式水温計(Onset Computer社製 ティドビット v2)を水面から深さ方向に1m間隔に湖底まで設置して測定した。貯水位は、水位計(Onset Computer社製 HOBO U20 ウォーターレベルロガー)を最低水位付近に設置した。設置地点は、図-2に示したように、概ね貯水池の最深地点となるように設置した。計

測期間は2010年9月21日から2011年8月27日である。流入河川の水温は、直接流入が常時あるトゥニ川で計測した。水温は、流量計速のために流入口付近の堰に設置した水位計(HOBO U20 ウォーターレベルロガー)に付随する水温計を用いて、2011年6月16日から10月11日に計測を行った。

気象条件は、HOBO U30-NRC データロガー(Onset Computer社製)を湖畔に設置して、2011年6月11日から10月11日の期間で、気温、日射量、風速、湿度の計測を行った。気象条件に関しては、本研究で計測したデータ以外に、ボリビア国立気象水文協会(SENAMHI, Servicio Nacional de Meteorologia e Hidrografia)が貯水池から約30km離れたエルアルト国際空港において、気温、風速、湿度、雲量、降水量の観測を毎日行っており⁸⁾、このデータも解析に用いた。なお、気温については貯水池と空港の標高差が約350mあるため、気温減率 $0.6^\circ\text{C}/100\text{m}$ を考慮して補正を行った。

水質要素については、2011年9月下旬と11月下旬に貯水池内及び流入河川で採水調査を実施した。採水した試料は、その場でポアサイズ $0.25 \mu\text{m}$ のメンブレンフィルターでろ過し、実験室に持ち帰った後に分析を行った。分析は、イオンクロマトグラフィー(日本ダイオネクス株式会社製 DX-120)により、無機態窒素(アンモニア、亜硝酸、硝酸の各態窒素)およびオルトリン酸態リンを計測し、TOCについてはTOC計(株式会社島津製作所製 TOC-5000A)を用いて測定した。植物プランクトンの現存量は、2010年9月21日に多項目水質計(JFEアドバンテック製, AAQ-1183)を用いて、クロロフィル a の鉛直分布を計測した。図-2に現地観測地点を示す。

4. 水質解析手法

(1) 水質解析モデル概要

気候変動による水質変化として、本研究では水温（および水温躍層のような水温構造）と、有機物量の変化として植物プランクトンの増殖について検討を行った。水温の変化自体は、水利用に対して直接影響を与えるものではないが、生物化学的な反応速度に影響を与える。その結果、種々の水質的な要素に変化をもたらすことから検討対象とした。植物プランクトンは、水道水としての利用を考える際、浄水処理工程や飲用する際の問題（臭いなど）を引き起こす可能性があるため考慮した。

本研究では鉛直一次元解析により水温及び水質の分布を計算する解析モデルを用いた。貯水池を層状に分割し、水平方向の水温・水質項目を一樣と仮定して鉛直分布の計算を行う。水の流入出による貯水量変化や気象条件による水面の熱収支、各層への熱の拡散を計算するものである^{9,10}。水質解析は、松尾・岩佐（1985）¹¹⁾に準じたモデルを構築した。これは、植物プランクトンを中心として、無機態および有機態の窒素とリンの物質循環を考慮する低次生態系モデルである。

植物プランクトンの増殖率 G_p は、水温や光量、栄養塩濃度（窒素、リン）および植物プランクトン自身の数密度増加による影響を考え、以下の式で計算される。

$$G_p = (F_I F_S F_N F_T) G_{\max} \quad (1)$$

ここで、 F_I は光強度による影響関数、 F_S は混雑効果関数、 F_N は栄養塩濃度による影響関数、 F_T は水温による影響関数である。それぞれ以下のように表される。

$$F_I = \frac{I_y}{I_s} \exp \left(1 - \frac{I_y}{I_s} \right) \quad (2)$$

ここで、 I_y は水中照度 ($\text{J/m}^2/\text{day}$)、 I_s は最大比増殖率を与える最適照度 ($\text{J/m}^2/\text{day}$) である。照度が最適照度を超える場合に強光障害により植物プランクトンの増殖が抑制されることを表している。 I_y は以下のLambert-Beer式で表される。

$$I_y = (1 - \text{ref}) I_0 \exp(-\kappa y) \quad (3)$$

ここで、 α は水面反射率、 I_0 は水面における有効短波放射量 ($\text{J/m}^2/\text{day}$)、 κ は消散係数、 y は水深 (m) である。また、

$$F_S = \exp(\mu_s) \quad (4)$$

で、 μ_s は混雑効果係数である。

$$F_N = \frac{C_{IN}}{K_{IN} + C_{IN}} \frac{C_{IP}}{K_{IP} + C_{IP}} \quad (5)$$

ここで、 K_{IN} 、 K_{IP} はそれぞれ無機態窒素と無機態リンの半飽和定数、 C_{IN} 、 C_{IP} はそれぞれ無機態窒素と無機態リンの濃度 (mg/l) である。また F_T は以下の式で表される。

$$F_T = \left[\frac{T}{T_s} \exp \left(1 - \frac{T}{T_s} \right) \right]^3 \quad (6)$$

ここで、 T は水温 ($^{\circ}\text{C}$)、 T_s は最適水温 ($^{\circ}\text{C}$) である。

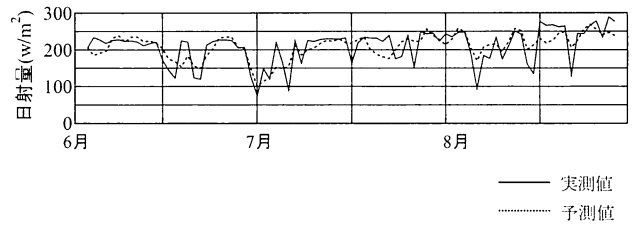


図-3 日射量の実測値と予測値(2011年6月～2011年8月)

水温が最適水温よりも低い場合は増殖速度は水温の上昇とともに増加し、反対に最適水温よりも高い場合は水温による増殖の阻害を受けることを表現している。 I_s , ref , K_{IN} , K_{IP} , T_s の値はそれぞれ、 1.46×10^7 ($\text{J/m}^2/\text{day}$)、0.06, 5.0×10^{-3} (mg/l), 5.0×10^{-4} (mg/l), 23 ($^{\circ}\text{C}$) とした。

(2) 再現性の検証方法及び入力データ作成手法

解析モデルの再現性検証は、詳細な計測データの得られている水温分布について実施した。計算期間は湖内の水温を連続観測した期間と同じ2010年9月から2011年8月とした。その際、計算条件として与える必要がある物理量のうちには、全期間で計測されていないものもある。それらは、次のように推定をして与えた。流入量は、トゥニ川からの流量および他の2河川からの導水量のいずれもダム管理者が常時の計測を行っていない。そこで、本研究で計測した1時間毎の貯水位から、貯水量の変化を求め、これに取水量を加えて流入量を算出した。取水量は管理者の情報から常に 1m^3 と仮定したが、収支が合わないときのみ取水量が変化すると仮定して調整した。流入水温は、計測を行っていない期間については、計測で得た水温データを平均した値を毎時間一定で与えた。気象条件は、湖畔で計測していない項目である雲量に加え、その他の項目（気温、湿度、風速）も湖畔で計測ができなかった期間については、エルアルト空港で計測されたデータを利用した。ただし、気温はトゥニ貯水池との標高差を考慮して 2.1°C を減じて与えた。また日射量は、SENAMHIによるエルアルト空港での測定項目に入っていない。そこで、湖畔の観測データがある2011年6月から8月の期間で可照時間、雲量、湿度、降水量を説明変数とした重回帰分析を行い、日射量の推定式を作成し、データがない期間の日射量を推定した。作成した重回帰式は次のようなものである。

$$\varphi_0 = 114.3N_0 - 0.4C_d - 1.1H - 5.3W - 1002.8 \quad (7)$$

ここで、 φ_0 は日射量 (W/m^2)、 N_0 は可照時間 (h)、 C_d は雲量 (%), H は湿度 (%), W は降水量 (mm/day) である。日射量の実測値と予測値の比較を図-3に示す。相関係数は0.73であり、概ね十分な推定結果と考えられる。再現計

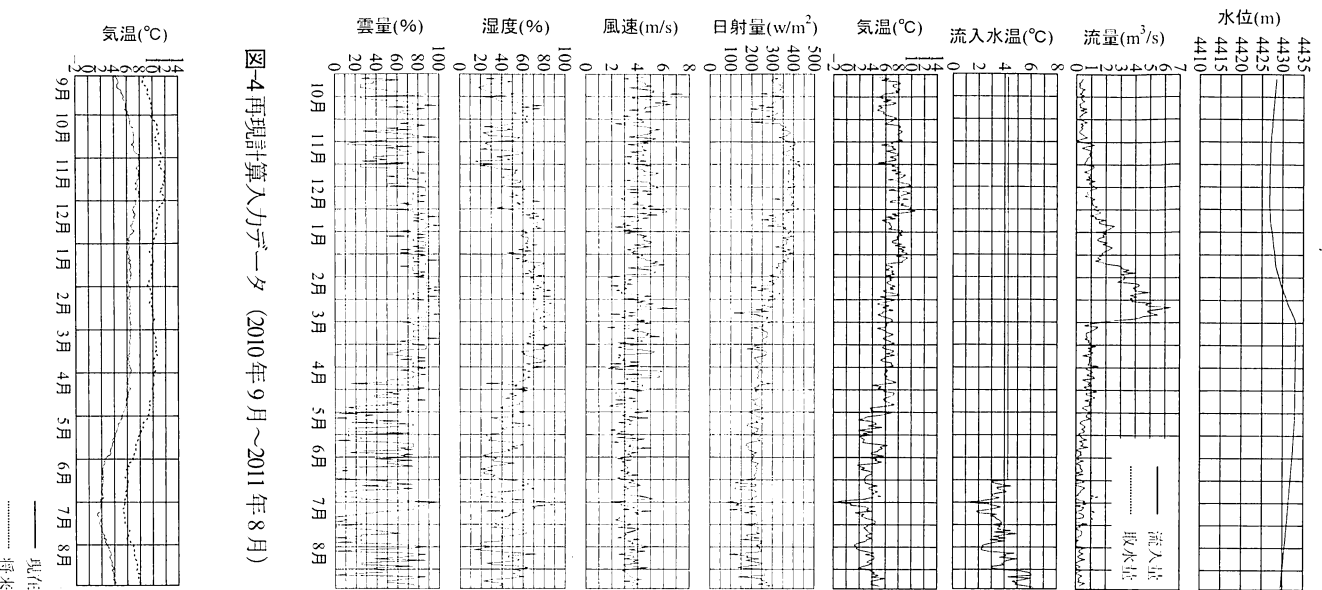


図 4 再現計算入力データ (2010 年 9 月～2011 年 8 月)

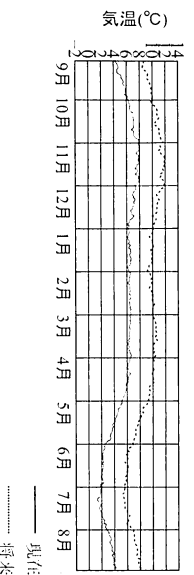


図 5 GCM 出力による現在と将来の気温データの比較

算に使用した水位、流入出量、流入水温、気温、日射量、風速、湿度、雲量を図 4 に示す。

(3) 将来予測計算の条件

気候変動の影響を受けた将来のトウニ貯水池について、水源としての水質を評価するための解析を行った。気象条件については、Mizuta et al.¹²⁾ や Kishio et al.¹³⁾ による気象庁気象研究所 20 km メッシュ全球大気循環モデル (MRI-GCM20) の出力結果を利用した。本研究で対象としたのは、現在 (1979 年～2003 年) と将来 (2075 年～2099 年) の期間で、将来における温暖化ガスの排出シナリオについては SRES の A1B シナリオに基づいた計

算結果を利用した。

一般に GCM の出力結果と実測値の間にはバイアスが生じるため、利用する際には何らかの補正が必要となることが多い。本研究では、水温に大きく影響を与える気温に関して、次のとおり単純な方法により、補正を行った。現在の 25 年間にについて、対象地域を含むグリッドにおける GCM の出力気温と実測気温の平均気温を求め、その差を GCM の気温に加えて補正気温とした。補正量は、 1.4°C であった。補正後の気温について現在と将来の 25 年分データを日ごとに平均した値を図 5 に示す。また 25 年間の気温データを全て平均すると現在と将来で気温差が 3.8°C となった。

流入水温については、トウニ氷河流域上端部の氷河と貯水池の距離が約 5km 離れているため、氷河融解水が流入水温に与える影響は小さいと考えられる。そこで、トウニ川水温と気温の観測値から関係式を作成して算出した。関係式を以下に示す。

$$T_w = 0.87T_a + 1.5 \quad (8)$$

ここで、 T_w は水温 ($^{\circ}\text{C}$)、 T_a は当該時刻及び前 2 時間の移動平均気温 ($^{\circ}\text{C}$) である。実測値と推定値の相関係数は 0.77 であった。

流入出水量については、過去の貯水池運用実績が不明であったため、現在条件の全期間について、再現計算で用いた 2010 年 9 月から 2011 年 8 月の設定流入出量を毎年与えた。また、将来条件に関しては、上流端に現存する氷河の融解が進み、対象時期には消失していることが予想される²⁾。さらに、本研究で参照した MRI-GCM20 の予測結果では、対象地域の年平均降水量が現在と比較して 2 倍弱ほどに増加している。これらの影響から、流入量および年間の流量変動パターンもかなり大きな変化を受けると想像される。しかしながら、流量の変化を妥当に見積るためには、降雨流出状況の推定に加えて、氷河からの融解流出量および、現在には氷河流出水によって涵養されている氷河直下の湿地を含む流域の流出過程を推定する必要がある。さらに貯水池運用に関しては、導水に関する季節的な運用方針に加え、給水対象地域の水利用を含めた総合的な水源管理のシナリオを想定する必要がある。ここに挙げた事項は、いずれも工学的な水源管理の点から重要なものであるため、いずれは考慮する必要がある。しかし、本論文の段階では、気温変化に伴う貯水池の水質への影響を中心とした評価を目的として、湖水の熱収支および植物プランクトンの増殖に対する影響のみを評価検討することとした。

流入水質についても、流域の流出過程の変化により将来的に影響を受ける可能性が高いところであるが、本研究では、流量と同様に現在と将来とで変化が無いという扱いとした。また 3 流域でそれぞれ異なる季節的な変化

表-1 河川水質の測定結果

1) 2011年9月

地点	TOC [mg/l]	NH4-N [mgN/l]	NO3-N [mg/l]	PO4-P [mgP/l]
C	2.75	0.068	0.329	0.542
T	1.15	0.110	0.306	0.542
H	2.13	0.075	0.268	0.102
	2.33	0.091	0.271	0.431

2) 2011年11月

地点	TOC [mg/l]	NH4-N [mgN/l]	NO3-N [mg/l]	PO4-P [mgP/l]
C	1.40	0.061	0.316	0.190
T	1.34	0.117	0.288	0.574
H	1.73	0.075	0.274	0.532

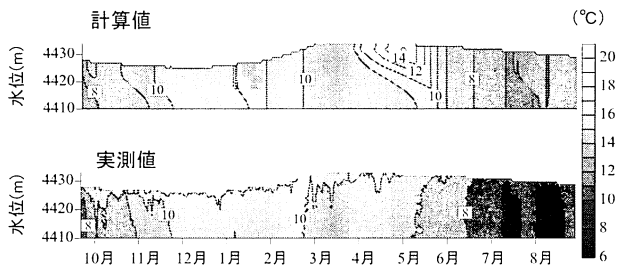


図-6 再現計算結果(2010年9月～2011年8月)

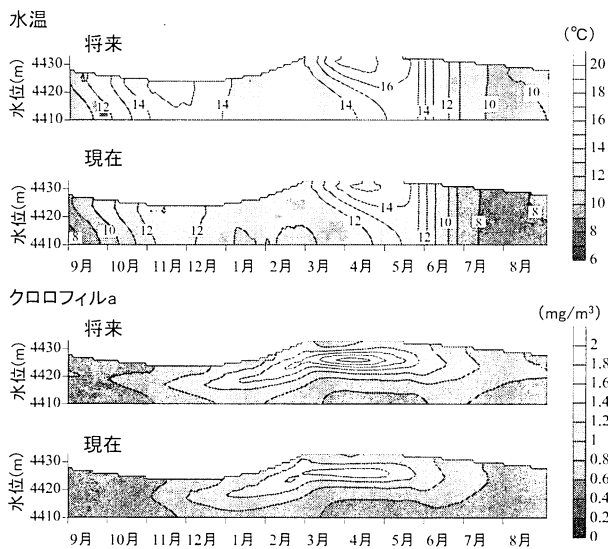


図-7 水質予測解析結果

や水質特性をもつことも想定されるが、本論文では各項目の全採水地点の平均値を常時一定に与えた。

5. 観測および解析の結果と考察

(1) 観測結果

貯水池への流入河川および水路における測定結果を表-1に示す。データ数が少ないため必ずしも断定はできないが、流域間で大きな差は無いように思われる結果であ

る。流域内には、家畜の放牧を除いては人為的な負荷源がほとんどないのだが、特にリン酸態リンの濃度が非常に高いのが特徴である。現時点では、はっきりとした理由が不明であるため、今後より詳細な調査を実施して水質形成過程を突き詰める必要があると考えられる。貯水池の水質計算で用いるため、全データを平均したところ、TOC、アンモニア態窒素、硝酸態窒素およびオルトリン酸態リンの濃度は、それぞれ1.74mg/l、0.09mgN/l、0.29mg/l、0.43mgP/lとなった。貯水池内で実施した水温分布の連続観測結果については、次節で計算結果とあわせて示す。

(2) 再現計算結果

鉛直水温分布の計算値及び実測値を図

-6に示す。実測値より、トゥニ貯水池では年間を通してほとんど水温成層を形成しないことが分かる。計算により、その状況を概ね再現することができた。誤差については、水温以外のデータが不足する条件で、3月下旬から5月上旬の期間に、表層水温が約2℃から3℃上昇する程度に抑えられた。水温の計算値が高くなる要因としては、気象条件から計算される水面の受熱が大きいことや入力した流入水温が高いことが考えられる。また、計算では水温が水深方向に一様になるのに時間がかかるが、実際の貯水池では数日で混合する。これは風や気温の日変動により、湖内の循環流が生じていることによるものと思われる。

(3) 結果及び考察

現在及び将来の25年分の解析結果を日ごとに平均した結果を図-7に示す。GCM出力結果については、気温以外の気象条件に現在と将来で大きな変化は見られなかった。水中照度に影響する日射量については現在と将来の差が約2W/m²と小さかった。そのため、解析結果の違いに影響を与えるのは主に気温及び流入水温と思われる。クロロフィルaについては、観測データが少ないため十分な検証が行いにくいだが、2010年9月に計測した分布から、概ね近いレベルの計算になっていることを確認した。2075年から2099年には温暖化の影響で水温は全体的に約2℃から3℃上昇し、クロロフィルaは約1倍から2倍の増加という結果が得られたが、深刻な汚濁を示す数値ではない。流入させた窒素とリン濃度は低い値ではなく、リン濃度についてはOECDの栄養度区分で示されている富栄養の基準0.03mg/m³を10倍以上上回っている。栄養塩負荷が大きいにも関わらず植物プランクトンの大增殖が起こらない要因としては、貯水池の水温が、気候変動により水温が上昇しても年間を通して20℃を下回っていることが考えられる。この解析により、トゥニ貯水池では水

温が植物プランクトン増殖の制限要因となると推測された。

6. まとめ

本研究では、トゥニ貯水池の水質予測を目的として、水質解析モデルの再現性及び気候変動による水温上昇が植物プランクトンの増殖にどれほど寄与するのかについて検証を行った。再現計算では、水深方向にほぼ一様となるトゥニ貯水池の水温分布を概ね再現することができた。特に現地の気象データが揃っている 2011 年 6 月以降については誤差を 1°C 以下に抑えられた。水質解析を行った結果、現在から約 100 年後に水質が大幅に悪化することはないと予測された。これは貯水池の水温が植物プランクトンの増殖に寄与する程上昇しないことが要因と考えられる。本研究では気候変動による水温上昇のみしか考慮していないが、実際には氷河消失により流入量が将来減少すると予測されている。また、流入水質の季節変化や将来変化も加味すべき事項である。現在、定期的に貯水池及び周辺流域において採水や計測器を用いた水質調査を行っている。今後は水温上昇以外の要素にも着目し、より精度の高い水質予測を行っていききたい。

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。また、文部科学省21世紀気候変動予測革新プログラム「超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究」の出力結果を利用した。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) IPCC: Climate Change 2007 - The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, *Cambridge University Press*, Cambridge, 2007.
- 2) Ramirez, E., Asaoka Y. and Ledezma : Characterization of tropical Andean catchments using high resolution satellite images: Tuni Condoriri

- Bolivia, *AOGS 2011*, Taipei, 2011.
- 3) Cabrol, N. A. et al. : The High-Lakes Project, *J. Geophys. Res.*, Vol. 114, G00D06, doi:10.1029/2008JG000818, 2009.
- 4) Tockner, K., Malard, F., Uehlinger, U. and Ward, J. V.: Nutrients and organic matter in a glacial river-floodplain system (Val Roseg, Switzerland), *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 47, pp.266-277, 2002.
- 5) Williams, M. W., Knauf, M., Caine, N., Liu, F. and Verplanck, P.L. : Geochemistry and source waters of rock glacier outflow, Colorado front range, *Permafrost and Periglacial Processes*, Vol. 17, pp. 13-33, 2006.
- 6) Wang, J., Zhu, L., Daut, G., Ju, J., Lin, X., Wang, Y. and Zhen, X. : Investigation of bathymetry and water quality of Lake Nam Co, the largest lake on the central Tibetan Plateau, China, *Limnology*, Vol. 10, pp. 149-158, 2009.
- 7) Guenter, G. and Beulker, C.: Limnology of center Lake Cuicocha, Ecuador, a cold water tropical lake, *Internat. Rev. Hydrobiol.*, Vol. 94, pp.103-125, 2009.
- 8) SENAMHI. ERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA - Bolivia: Información Base de Datos, <http://www.senamhi.gob.bo/sismet/index.php>.
- 9) 梅田信, 田中仁, 小西絵里子, 佐々木幹夫 : 十三湖における塩分と溶存酸素の変動に関する観測と解析, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp. 1051-1055, 2008.
- 10) Pracoyo A., 梅田信, 田中仁, 佐々木幹夫, 長崎勝康 : 十三湖におけるヤマトシジミ産卵期の塩分・水温と稚貝生息数に関する検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 67, pp. I_1001-I_1005, 2011.
- 11) 松尾直規, 岩佐義朗 : 合流部を有する貯水池での富栄養化シミュレーション, 水理講演会論文集, pp.359-364, 1985.
- 12) Mizuta, R., Oouchi, K., Yoshimura, H., Noda, A., Katayama, K., Yukimoto, S., Hosaka, M., Kusumoki, S., Kawai, H. and Nakagawa, M.: 20-km-Mesh Global Climate Simulations Using JMA-GSM Model—Mean Climate States—, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol.84, No.1, pp.165-185, 2006.
- 13) Kitoh, A., Ose, T., Kurihara, K., Kusunoki, S., Sugi, M. and KAKUSHIN Team-3 Modeling Group: Projection of changes in future weather extremes using super-high-resolution global and regional atmospheric models in the KAKUSHIN Program: Results of preliminary experiments, *Hydrological Research Letters*3, pp.49-53, 2009.