

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 25 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24404015

研究課題名(和文) 熱帯氷河とその流出水が形成する水質・生態環境とそれに対する気候変動の影響評価

研究課題名(英文) Study on Aquatic and Ecological Environment Formed by a Tropical Glacier and the runoff water and Impact Assessment from Climate Changes

研究代表者

梅田 信 (Umeda, Makoto)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10447138

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 7,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究対象は、熱帯氷河という地理学的特徴であることに加え、半乾燥地域であるために、水資源の多くを氷河の融解水に依存しているという工学的な特徴がある。本研究では、氷河流域からの流出水の水質形成および水質に影響を及ぼすと考えられる渓流内植生と、下流都市の水源として用いられている貯水池の水質、水質について、現地調査により種々のデータを取得した。さらにこれを元にして解析モデルを構築し、現況解析および将来予測を行った。これらにより、対象域における水質形成過程が、ある程度明らかになった。

研究成果の概要(英文)：The study area is located in the high mountainous region of Andes altiplano, which characterizes itself as tropical glacier. The glacier is also important in terms of hydraulic engineering, because it is one of the major water resources to the metropolitan city located in the downstream of the river. In this study, we made field investigations on water quality formation and aquatic vegetation in the river made from runoff water from glacier, and developed numerical analysis model for those processes in the river basin including the water resources reservoir. Those elucidated water environmental formation processes in the river and the reservoir of our study area.

研究分野：水工学

キーワード：気候変動 河川環境

### 1. 研究開始当初の背景

地球温暖化により氷河の融解および消失が顕在化していることは、IPCC の報告書などにより、広く知られるようになった。氷河の融解と消失は、それにより形成される氷河湖決壊による洪水発生や将来的な水資源の枯渇などにつながり、下流で暮らす人々に対する脅威となりうることから工学的な意味からも重要な研究課題である。

本研究の対象は、南米ポリビア国のアンデス高山域に位置するコンドリリ氷河である。この氷河の特徴の一つは、低緯度（南緯 16 度）に位置する熱帯氷河ということである。熱帯氷河は、夏期において降水による涵養と気温上昇による融解が同時に生じることが、他の地域の氷河と大きく異なる。実際、ポリビア高地は、夏期 = 雨期、冬季 = 乾期という二極的な気象条件を持っている。気候変動により融解と涵養のバランスが崩れると、氷河の消失および下流域の環境変化が一気に進む可能性が高い。

コンドリリ氷河のもう一つ特徴に、氷河下流に広く形成されている湿地環境が挙げられる。氷河からの流出水は、この湿地を涵養しつつ、自身の水質を形成している。しかしながら、温暖化が進むことにより、植生環境の変化とそれに伴う水質変化が生じる可能性がある。氷河の融解水は、ポリビアの首都ラパスにおける重要な水資源であるため、水質が将来的にどのような変化をするのかも懸念事項といえる。

### 2. 研究の目的

ポリビアのコンドリリ氷河を対象として、流出河川の水環境（特に水質）形成の観点から、熱帯氷河にできる雪氷微生物生態系と下流に形成されている湿地生態系のそれぞれについて現地調査を実施する。雪氷微生物に関しては遺伝子解析を適用した手法により、また湿地生態系に関しては生態系構造解析に基づいた有機物フローの解析により、生態環境の検討を行う。また、物質循環の解析については、水中の主要イオンの計測に加え安定同位体を用いて、空間的な水質変動の把握と栄養塩（窒素の起源、変成プロセス）の解析を行う。さらに、この結果に基づいて、環境解析モデルを構築して、当該氷河周辺の水環境および流出水質に対する温暖化による影響評価と将来予測・展望を行う。

### 3. 研究の方法

#### (1) 調査研究実施地域とその特徴

調査対象とする氷河は、南米にあるポリビア多民族国の首都ラパスから、北に約 35km の標高約 4,800m に位置するコンドリリ氷河である。対象範囲は、氷河からの流路延長が約 10km までの河川域とした。この範囲の下流端は、取水用の堰が設置されており人工的な影響が大きくなることと、氷河の直下から存在する湿地が概ねこのあたりで消失する

ことを考慮して設定するものである。なお、この氷河の流出水は、ラパスにおける水資源の一部として、本研究の対象領域よりも下流にある貯水池で取水されている。対象流域部は、上流部には氷河（山地形状から 3 つに分かれて分布）とそこからの流出水で形成されている溪流がある。中流部以降、河道の勾配がやや緩くなっている範囲においては、溪流の周辺で湿地が形成されている。

栄養塩に関する安定同位体に関わる調査、分析としては、次のように実施した。氷河からの融解水の水質およびそれを起源とする表流水の流下過程における水質の変化を評価するために、氷河の末端部より融解してきた水およびその表流水を上流から下流（トゥニ貯水池への流入地点）までの複数地点において水試料の採取を行った。また、氷河の氷試料やトゥニ貯水池の水試料の採取も行った。大気沈着硝酸の同位体組成を決めるために降雪試料の採取も行った。採取した水試料は、直ちに 0.2  $\mu\text{m}$  のフィルターでろ過し、分析するまで冷蔵保存した。N03-の各同位体組成の測定には、McIlvin and Altabet (2005) が開発し、Tsunogai et al. (2008) が改良した化学法 (Chemical Conversion 法) を使って試料中の N03-を N20 に変換し、これを連続フロー型の質量分析システム (Komatsu et al. 2008) で定量を行った。

溪流内植生に関する調査は次のように行った。対象区間は、コンドリリの上流側に設定をした。アンデス高地では、乾季と雨季の二期に大きく分けられる。そこで、それを考慮して、乾季としては 2012 年 7 月、2013 年 8 月に、雨季としては 2013 年 2 月に現地調査を行った。水質に関しては、現場で計測できる水温、EC、pH などは持ち運び式の現場用計測器 (Multi3420, Xylem 社製) により計測した。その他の分析が必要な総窒素、総リンなどに関しては、現場で採水後に実験室へ持ち帰り、分析を行った。植生は、河道内の各地点で 50cm 四方の区画を設定し、ここから植生を採取し、重量、種などに関する分析を行った。

河道内の水質と植生の変化に関しては、上記の実測結果を基に解析モデルを組み立てた。水質部分に関しては、窒素、リンについての流下過程における変化を考慮するものである。ただし、観測として得られた情報に限りがあったことから、必ずしも厳密に条件を与えることができない点もあり、それについては、流量や集水面積から負荷量を設定する経験式を作成し、与えることとした。植生部分の解析は、水温、光量、栄養塩濃度から成長速度を求め、呼吸や死滅から減耗速度を求める構成式を設定して、消長を求めるものとした。本研究のモデル化の特徴は、水質と植生の相互作用を考慮したことである。すなわち、植生（主として沈水植物）の成長で水中の栄養塩を吸収し、枯死により栄養塩が帰還する過程を考慮した。

気候変動による将来の温暖化に関しては、より直接的には水域の水温変化として発現することが想定される。水温は、生物化学的な反応の速度などを規定する最も基本的な水環境パラメータと考えられる。また本流域の氷河融解水は、下流のダム貯水池で貯留された後、取水され、さらに下流の大都市であるラパスとエルアルトの水道水として供給される水資源となっている。従って、この貯水池における水環境の評価に関しても、本対象地に関わる重要な要素であると考えられる。そこで、この貯水池（Tuni 貯水池）の水環境に関しても調査検討を実施した。

貯水池内の水温の鉛直分布及び水位変動を連続計測した。水温分布は、自記式水温計を、表層水温として水深 0.5m および水深 1m から深さ方向に 1m 間隔で湖底まで設置して測定した。貯水位は、水位計を最低水位付近に設置して計測した。これらの測器を、貯水池中央部に設置し、1 時間間隔で計測を行った。

貯水池の水温解析は、鉛直一次元解析モデルにより検討を行った。これまでに、日本国内の多数のダム貯水池の水温解析や湖沼の水温、水質解析で実績のあるモデルをベースとして用いた。この解析モデルでは、連続条件により水の流入出による貯水量変化と、気象条件による水面を通じた熱収支、および鉛直方向の水温の拡散から、経時的な水温成層構造の計算を行った。水面における熱収支のうち、各熱損失分については、長波放射量、潜熱輸送量、顕熱輸送量を考慮している。

#### 4. 研究成果

栄養塩（硝酸）に関する分析からは、次のような結果が得られた。降雪中の  $\text{NO}_3^-$  の  $\delta^{17}\text{O}$  値は +25‰ であり、一般的な降水（降雪）中の  $\text{NO}_3^-$  の平均的な値を持つことが確認された。これに対し、氷河に含まれる  $\text{NO}_3^-$  の  $\delta^{17}\text{O}$  値は、ワイナポトシ氷河で +6% 程度、コンドリリ氷河で +11% 程度と降雪の値に比べて低いことが確認され、氷河の末端部に含まれる  $\text{NO}_3^-$  の 25% および 45% が大気由来の  $\text{NO}_3^-$  であり、残りは氷河の中で再生した  $\text{NO}_3^-$  であることが分かった。表流水中の  $\text{NO}_3^-$  については、上流から下流に向かって  $\text{NO}_3^-$  の  $\delta^{17}\text{O}$  値が低くなる傾向が見られ、再生  $\text{NO}_3^-$  の割合が下流に向かって増加していく様子が確認された。2 つの流域の間で  $\text{NO}_3^-$  の濃度および同位体組成に系統的な違いが見られ、流域の地形や植生等の違いによって窒素循環が変わってくるということが考えられた。

河道における水質と植生に関しては、コンドリリ川における水質観測の結果に基づいて、栄養塩挙動および主要イオン組成の形成過程について検討を行った。その結果、雨季と乾季による差および流域内地質が、水質形成に大きな影響を及ぼしている可能性が高いことが示された。また植生に関しても、雨季と乾季の別で顕著な差が観測された。また

河川水の栄養塩濃度と植生現存量に相関が高いことが分かった。

これらの調査結果から、アンデス高地の氷河下流河川域という特徴的な現場における現地観測により、希有な調査データを取得することができた。さらに、水環境要素である水質と植生に関する解析を行い、そこにおける水環境特性を示したことで、高標高地域の河川環境研究の進展に寄与する有用な成果が得られたものと考えられる。

対象河道部における水質と植生現存量についての予測解析モデルを構築し、その結果、河川水の栄養塩濃度の時空間分布特性と水生植生現存量を、概ね表現できる解析方法を構築することができた。

河川内の水温形成過程に関する解析からは、流下過程における変動について、計測を行った 2 つの流域（コンドリリと隣のワイナポトシ西）においてに氷河末端から 1km 付近で約 4 まで上昇しており、これらの測定地点はワイナポトシ西流域ではやや小規模な氷河湖、コンドリリ流域では氷河直下から流れている渓流河川といった環境の違いがあるにも関わらず、同程度の昇温が生じていることが分かった。また、氷河の最近傍の測定地点では水温差が小さいが、下流の地点では季節感での水温差が開き、気温差よりもやや大きい傾向が見られた。雨季と乾季では、氷河融解水の流量に差があり、流下に伴っても流量は変化することから、流下時間も時空間的な変動があると考えられる。このことも水温の変化に影響を及ぼすと考えられる。将来的に気候変動（温暖化）の影響から、本対象流域においても氷河が衰退し、河川流量およびトゥニ貯水池への流入量が大幅に減少することが予想されている。このため、氷河の後退にともなう、水量の変化は大きいと考えられるが、ある程度（数 km 以上）流下した段階では、河川水温に対する氷河衰退の影響は小さいと考えられる。

貯水池内の水温形成については、観測結果より時空間的な変化は必ずしも大きくはないことがわかった。高標高域の湖沼における詳細な水温観測データが得られ、このようなデータは従来多く得られておらず、関連分野の発展に寄与する観測成果が得られたと考えられる。予測解析の結果としては、次のような結果が得られた。まず、温暖化により流域内の氷河が消失した後は、トゥニ貯水池への年間総流入量が約 37% にまで減少する見込みとなった。貯水池水温の現地計測の結果等によると、湖水の熱収支が、日本国内で通常見られるものと異なった傾向であり、平均気温よりも表層水温の方が 2 から 9 程度高かった。さらに、水温解析モデルによる計算からは、現在と将来（今世紀末）のトゥニ貯水池内の水温を比べると、将来条件の方が成層化は弱まる傾向が予測された。ただし、年ごとの水量の変動が大きくなる影響から、水温の変動も大きくなる結果が得られた。これ

らのことから、氷河が衰退した後の Tuni 貯水池では、流量減少に応じた導水や取水等のダム運用規則の見直しが必要になると予想される。また、湖内水温の変動の変化が植物プランクトンの発生量に影響する可能性があり、水温・水質環境のモニタリングがより重要になると考えられる結果が得られた。

また、ここまでに構築した解析方法や水温、水質などに関する情報を用いて、コンドリリ川の植生と水質環境についても将来展望計算を行った。対象年代は、現在から約 25 年後の 2039 年とした。この将来期間においては、降水量および氷河からの融解水量が変化するため、河川流量も変化する。その影響により、植生および水質に影響が見られるという結果が得られた。このような本研究の成果は、今後の対象地域における水源としての環境管理に寄与しうるものであり、工学的に有用な知見が得られたと考えられる。

以上より、本事業における研究成果は、熱帯氷河下流河川という特殊な河川環境に関する重要な知見を導出することができ、高山域の陸水学研究分野の発展に寄与しうるものと考えられる。また下流に位置する大都市に関わる水源環境管理という視点から工学的に重要な成果が得られたと考えられる。

#### 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 9 件)

(1) Evelin Humerez and Makoto Umeda: Macrophyte model for a tropical glacier river in the Bolivian Andes, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol.71, pp.1\_7-1\_12, 2015, 査読有.

(2) Evelin Humerez and Makoto Umeda: Seasonal and spatial variation of stream water quality in the Royal Range of Andes, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol.70, No.4, pp.1\_1255-1\_1260, 2014, 査読有.

(3) 谷 慧亮, 梅田 信, 朝岡良浩, 山崎 剛: アンデス高地の貯水池における水温変化特性に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.70, No.4, pp.1\_1627-1\_1632, 2014, 査読有.

(4) 谷 慧亮, 梅田 信, 木内 豪, 朝岡良浩, Marcelo Gorritty: アンデス高山域の貯水池と流域における水環境に対する気候変動の影響評価, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.69, No.4, pp.1\_1501-1\_1506, 2013, 査読有.

〔学会発表〕(計 22 件)

(1) Evelin Humerez, Makoto Umeda, Influence of nutrients in water and sediments on

macrophyte growth in a glacier river in the Bolivian Andes, 19th IAHR - APD Congress, 2014 年 9 月 24 日, Water Resources University (Hanoi, Vietnam).

(2) 中川書子, 大山拓也, 小松大祐, 角皆潤, 梅田信, 朝岡良浩, マルセロゴリティ: 硝酸の同位体組成を指標に用いたボリビア熱帯氷河流域における窒素循環解析, 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012 年 5 月 23 日, 幕張メッセ国際会議場(千葉県千葉市).

(3) 谷慧亮, 梅田信, 朝岡良浩: 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, 土木学会地球環境シンポジウム, 2012 年 9 月 13 日, 京都大学(京都府京都市).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

梅田 信 (UMEDA, Makoto)

東北大学 大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 10447138

(2) 研究分担者

中野 和典 (NAKANO, Kazunori)

日本大学 工学部・准教授

研究者番号: 30292519

中川 書子 (NAKAGAWA, Fumiko)

名古屋大学 大学院環境学研究科・准教授

研究者番号: 70360899

真砂 佳史 (MASAGO, Yoshifumi)  
東北大学 大学院工学研究科・助教  
研究者番号： 50507895  
(H25年度より連携研究者)

(3)連携研究者  
( )

研究者番号：