

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：32665

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2015～2016

課題番号：15H06642

研究課題名(和文) 気候変動に対する雪氷微生物の応答を考慮した氷河融解・流出モデルの構築と水資源評価

研究課題名(英文) Modeling glacier melt and runoff considering the response of glacial microbes to climate change and water resources assessment

研究代表者

朝岡 良浩 (ASAOKA, Yoshihiro)

日本大学・工学部・准教授

研究者番号：00758625

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、ポリビア多民族国に分布する熱帯氷河を対象として、雪氷微生物の繁殖に伴うアルベド低下に着目した氷河融解・流出モデルの開発と水資源評価を行った。

衛星リモートセンシング画像を用いて氷河域と氷河消耗域の長期的な縮小を示した。また、氷河融解・流出モデルを現地の水源域に適用して、雪氷微生物によるアルベド低下に伴い雨季の融解速度と河川流量が増加することを示した。さらに、氷河の後退が貯水池から首都圏への水供給と貯水池の下流への水供給に及ぼす影響を示した。

研究成果の概要(英文)：This study developed a glacier melt and runoff model considering the effect of glacial microbes on glacier albedo and investigated effect of glacier retreat on water resources management. Study area is a high mountainous area in the Andes, Bolivia and it is partially covered by tropical glaciers.

Estimation result derived from satellite remote sensing showed long-term shrinkage of glacial area and its ablation area. A glacier melt and runoff model was applied in the study area and result showed that low albedo due to glacial microbes enhanced melt rate and river discharge in the rainy season. In addition, this study evaluated the effect of glacier retreat on the amount of water supply from reservoir to urban area and that to the downstream area of it.

研究分野：水文学

キーワード：熱帯氷河 アルベド 水資源運用 ポリビア多民族国

1. 研究開始当初の背景

本研究の対象は、南米大陸ボリビア多民族国のアンデス高地に分布する熱帯氷河である。氷河の融解水は、ボリビア国の首都圏における主要な水資源であるが、高度 4000m を超えるラパスの水源域は、温暖化の顕著な地域とされ、氷河の後退は水資源の確保という点で懸念事項といえる。このような課題に対して、数値モデルを用いて気候変動下の氷河融解量や水資源量を推定する研究が実施されてきた。

氷河と大気とのエネルギー交換において、雪氷面のアルベド低下がすると、日射の吸収量が増加することから、融解速度が増加する。近年のグリーンランドや一部の山岳氷河の研究により、氷河上に生息する微生物の繁殖によりクリオコナイト粒とよばれる暗色物質が形成され、雪氷面のアルベド低下によって氷河融解を促進することが報告されている。ボリビアの熱帯氷河は、気候変動による気温上昇が顕著であり、融解量の増加と融解期間の長期化により雪氷藻類とクリオコナイト粒が増加すると考えられる。さらに熱帯の豊富な日射量の条件下において、雪氷面のアルベド低下はより多くの日射エネルギー吸収となり、氷河融解に及ぼす影響が大きい。

以上の背景を踏まえて、熱帯氷河の変動と水資源量を推定するためには、雪氷藻類とクリオコナイト粒によるアルベド低下を考慮した氷河融解・流出モデルを開発する必要がある。

2. 研究の目的

本研究はボリビア国の熱帯氷河を対象として、雪氷微生物とクリオコナイト粒による氷河のアルベド低下を考慮した氷河融解・流出モデルの構築を目的とする。そのため、従来の氷河融解・流出モデルのアルベド推定スキームを改良する。さらに、ボリビア国の首都ラパスの水源域となるトゥニ貯水池の集水域に上記の氷河・融解流出モデルを適用して、水資源量を推定する。貯水池の水運用を考慮して貯水量を計算し、首都圏・貯水池周辺への水供給に及ぼす影響について評価することも本研究の目的とした。

3. 研究の方法

(1) 研究対象地域

本研究の対象地域は、南米のボリビア多民族国の首都ラパスから北に約 35km に位置するトゥニ貯水池の集水域(図1)である。トゥニ貯水池から首都圏の浄水場へ導水管を介して 1 m³/s を送水している。トゥニ貯水池にはトゥニ川が自然流入しており、さらに雨季にはコンドリリ川とワイナポトシ川から入

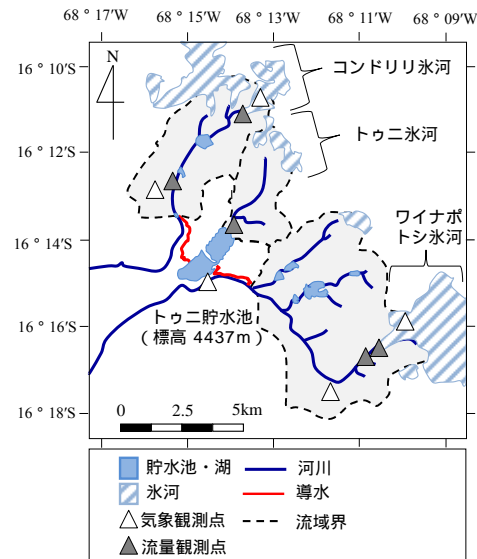


図1 研究体地域の概要と氷河分布

工水路を介して導水している。トゥニ川、コンドリリ川、ワイナポトシ川の上流域にはトゥニ氷河、コンドリリ氷河、ワイナポトシ西氷河を代表とする複数の氷河が分布している。対象地域に気象観測 5 地点、水位観測 5 地点を含む水文・気象モニタリング網が設置され、2010 年から稼動している。本研究の実施期間を含む 6 年以上の観測データを蓄積し、これらのデータに基づいて氷河融解・流出モデルを開発・検証した。

(2) 衛星リモートセンシング

トゥニ貯水池に流入する 3 河川の流域に分布する氷河域を抽出するために、LANDSAT8/OLI および LANDSAT5/TM のデータを用いた。氷河の抽出は、可視域の赤 (LANDSAT8/OLI のバンド 4、LANDSAT4/TM のバンド 3) と短波長赤外 (LANDSAT8/OLI のバンド 6、LANDSAT4/TM のバンド 5) の波長帯のデータから NDSI (Normalized Difference Snow Index) を算出し、衛星画像の各メッシュが雪氷であるかを判定した。空間分解能は約 30m である。NDSI の閾値は、(a)LANDSAT 衛星の画像よりも高分解能である ALOS/AVNIR の画像から作成した True カラー画像に基づいて設定する方法と、(b)LANDSAT 衛星から作成した True カラー画像に基づいて設定する方法を用いた。氷河上の平衡線高度は、地形データから kinematic equilibrium line attitude (kinematic ELA) を抽出する手法 (Leonard et al., 2003) を用いて推定した。地形データには ASTER GDEM を用いた。

(3) 氷河融解・流出モデル

氷河融解・流出モデル(Kinouchi et al., 2013)は、対象とする流域を100mの標高帯に分割し、さらに各標高帯を氷河域と非氷河域に分類し、それぞれの水収支から流出量を計算する。氷河・積雪の融解量は気温と日射量を入力値とする手法(Pellicciotti et al., 2005)をベースとしている。流出モデルは、日単位で各標高帯の水収支から表面流出量と中間流出量を算出し、各標高帯における流出量の合計値を対象地域の総流出量としている。水収支は氷河・積雪の融解量、蒸発散、昇華、浸透、貯留、表面流出、中間流出を考慮している。

氷河融解モデルにおいて、従来のアルベド推定スキームは、新雪からの経過時間に応じてアルベドが減少し、さらに積雪の厚さに応じて下層の氷河表面のアルベドを考慮し、雪氷面のアルベドを推定する手法をベースとしていたが、本研究では氷河アルベドの終局値を修正して、雪氷微生物とクリオコナイト粒によるアルベド低下を反映できるようにした。

氷河融解・流出モデルによる河川流量の数値実験は、4種類の氷河面積を想定したケースと、氷河なしを想定したケースの合計5種類を実施した。

(4) 貯水池の水運用の評価

上述のとおり、トゥニ貯水池にはトゥニ川が自然流入しており、雨季にはコンドリリ川とワイナポトシ川から導水している。乾季においては、上記の2河川から貯水池に導水せず、全水量が下流に流下している。一方で、トゥニ貯水池は年間を通じて首都圏の浄水場へ送水しており、さらに満水時に流入がある場合、洪水吐から放流している。以上を踏まえて、貯水池の水収支に基づいた年間の貯水量の変化を推定し、都市域への送水量とダム下流側への河川流量を評価した。3河川から貯水池への流入量・導水量は、氷河融解・流出モデルによる推定値を用いた。

4. 研究成果

(1) 氷河域の変動

LANDSAT衛星のデータを用いて1987年8月から2016年9月までの氷河域の経年変化を解析したところ、Tuni氷河は1987年8月の面積の約20%、コンドリリ氷河は約30%、ワイナポトシ西氷河は約40%まで減少していることが明らかになった。さらに3氷河のkinematic ELAを抽出した結果、トゥニ氷河は約4930m、トゥニ氷河は4900m、ワイナポトシ西氷河は5030mと推定され、氷河の消耗域は1984年から2014年の期間にトゥニ氷河が0.66km²、コンドリリ氷河が0.80km²、1.39km²する結果と推定され、消耗域の縮小が著しいことが示唆された。

(2) 氷河融解・流出モデルの適用

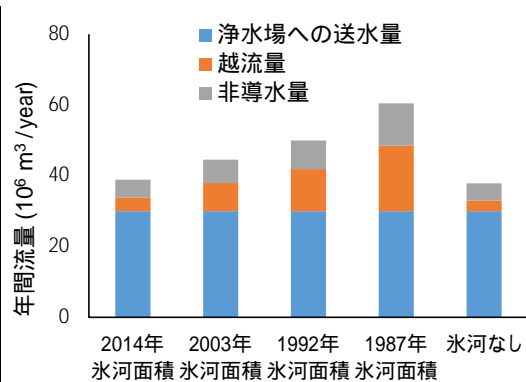


図2 氷河面積とトゥニ貯水池の水運用の内訳

熱帯集束帯付近かつアンデス高地に位置する対象地域の気候特性に対して、気温と入射量を入力値として氷河融解量を推定する手法が適用可能であることを示した(Fuchs et al., 2016)。また、氷河融解・流出モデル(Kinouch et al., 2013)を対象地域に適用して、4年代(2014年、2003年、1992年、1987年)の氷河面積を想定した数値実験と氷河域をなしとした数値実験を実施した。モデルに入力する気象データは5ケースに共通して2011年7月1日から2013年7月1日の気象観測データを用いた。4年代の氷河面積を想定した数値実験の結果と氷河なしを想定した数値実験の差分をとり、氷河融解による流出量を算出した。2104年の氷河面積(4.9km²)を想定した数値実験において、年間流出量に対する氷河融解による流出量の寄与率は約5%と推定した。同様に、年間流出量に対する氷河融解水の寄与率は、2003年の氷河面積(5.9km²)を想定した数値実験において18%、1992年の氷河面積(7.3km²)を想定した数値実験において28%、1987年の氷河面積(8.7km²)を想定した数値実験において42%と推定した。氷河融解水の寄与は、雨季の開始から約4ヶ月間(9月~12月)に集中し、1987年の氷河面積を想定した数値実験では65%、1992年相当の氷河面積を想定した数値実験では54%、2003年の氷河面積を想定した数値実験では43%、2014年の氷河面積を想定した数値実験では21%を占めた。氷河融解による流出量が9月~12月の期間に集中した要因として、熱帯氷河の気象特性が関係すると思われる。乾季(5月~10月)と比較して雨季(11月~4月)の気温は年平均気温に対してやや高く、大気中の水蒸気量も増加する。そのため、下向き長波放射量が卓越して氷河融解が促進される。また、雨季の前半(11月~1月)に比べ、雨季の後半(2月~4月)には積雪量が多く、氷河が融解せず氷河上の積雪が融解するなどの要因によって、氷河融解による寄与が9月~12月の期間に集中したと考えられる。

(3) 貯水池の水運用に及ぼす影響

トゥニ貯水池の水収支式、水運用規定、氷河・融解流出モデルの出力値を用いて貯水量

と水資源配分を推定した。これらの推定は、氷河融解・流出モデルの数値実験と同様に全5ケース(4年代の氷河面積と氷河なし)を実施した。3月15日を満水と仮定した1年間のトゥニ貯水池における貯水量を計算した。全5ケースの中で氷河面積が最大であった1987年の氷河面積を想定した数値実験が、全5ケースの中で1シーズ雨後に満水に達する時期が最も早い。また1992年の氷河面積を想定した数値実験は19日、2003年の氷河面積を想定した数値実験は32日、2014年の氷河面積を想定した数値実験は48日遅れた。図2にトゥニ貯水池集水域の水資源配分の内訳を示した。この図において、非導水量は乾季においてコンドリリ川とワイナポトシ川から導水されない河川流量を示し、乾季における貯水池下流域の水資源となる。越流量は貯水池が満水時に洪水吐から越流する流量を示し、貯水池は主に雨季に満水になることから、雨季におけるダム下流域の水資源となる。一方で、貯水池から連続的に首都圏の浄水場へ送水していることから、貯水池からの送水量は首都圏の水資源となる。1987年の氷河面積に対して2014年の氷河面積は43%減少しており、それに伴い貯水池からの越流量が80%減少、非導水量が58%減少していると推定された。以上より、氷河後退の影響は貯水池下流域の水資源、特に雨季に影響を及ぼすことを数値実験によって示した。

(4) 雪氷微生物によるアルベド低下を考慮した氷河融解・水資源量の推定

氷河融解・流出モデルのアルベド推定スキームを修正して、雪氷微生物によるアルベド低下を考慮して水資源量を推定した。アルベド推定スキームは、現地アルベド測定値および既往研究を参考にして、氷河アルベドの最大値(終局値)を調整した。水資源量の数値計算は4ケースの氷河面積を想定した計算を実施した。計算結果より、特に雪氷微生物の増加によるアルベド低下に伴い、河川流量は1987年の氷河面積を想定した数値計算において総流出量が $0.089\text{m}^3/\text{s}$ 増加し、1992年の氷河面積を想定した数値計算において総流出量が $0.053\text{m}^3/\text{s}$ 増加、2003年の氷河面積を想定した数値計算において総流出量が $0.033\text{m}^3/\text{s}$ 増加、2014年の氷河面積を想定した数値計算において総流出量が $0.013\text{m}^3/\text{s}$ 増加する結果となった。年間のハイドログラフを比較すると、特にアルベド低下による影響は雨季に大きくなることが明らかになった。

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6件)

松木 翔太, 朝岡 良浩, 木内 豪, ポリビア・トゥニ貯水池集水域の氷河縮小が流出量に及ぼす影響, 土木学会論文集

G(環境), 査読有, Vol.72, No.5, 1_45-1_51, 2016.

DOI:10.2208/jscej.72.1_45

Shota Funaki and Yoshihiro Asaoka, Long-term change in ablation area of tropical glaciers by Landsat data, Procedia Engineering, 査読有, Vol.154, pp.168-175, 2016.

DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.438

Pablo Fuchs, Yoshihiro Asaoka and So Kazama, Modelling melt, runoff, and mass balance of a tropical glacier in the Bolivian Andes using an enhanced temperature-index model, Hydrological Research Letters, 査読有, Vol.10, No.2, 51-59, 2016.

DOI: 10.3178/hrl.10.51

吉澤一樹, 風間聡, 朝岡良浩, 地形情報を用いたポリビア・アンデス山脈における氷河後退の統計解析, 土木学会論文集B1(水工学), 査読有, Vol.72, No.4, 1_469-1_474, 2016.

DOI: 10.2208/jscejhe.72.1_469

松木翔太, 朝岡良浩, 木内豪, ポリビア熱帯氷河の縮小が貯水池集水域の水資源運用に及ぼす影響評価, 東北地方の雪と生活, 査読無, 第31号, 41-47, 2016.

松木翔太, 朝岡良浩, 木内豪, アンデス地域における熱帯氷河の縮小を考慮した流出解析, 東北地域災害科学研究, 査読無, 第52巻, 91-96, 2016.

[学会発表](計11件)

寺沢星泉, 朝岡良浩, 木内 豪, 熱帯アンデス地域の気候擾乱が氷河融解・流出量に及ぼす影響, 平成28年度東北地域災害科学研究集会, 陸前高田コミュニティホール(岩手県陸前高田市), 2016年12月24日.

松木翔太, 朝岡良浩, 若林裕之, 熱帯氷河の流動速度推定に向けた合成開口レーダー利用に関する基礎的検討, 平成28年度東北地域災害科学研究集会, 陸前高田コミュニティホール(岩手県陸前高田市), 2016年12月24日.

松木翔太, 朝岡良浩, 木内 豪, ポリビア熱帯氷河の縮小が貯水池集水域の水資源運用に及ぼす影響評価, 2016年度日本雪氷学会東北支部大会, 東北大学(宮城県仙台市), 2016年5月13日.

松木翔太, 朝岡良浩, 木内 豪, 熱帯アンデス氷河の縮小が水資源運用に及ぼす影響評価, 平成27年度土木学会東北支部技術研究発表会, 岩手大学(岩手県盛岡市), 2016年3月5日.

松木翔太, 朝岡良浩, 木内 豪, アンデス地域における熱帯氷河の縮小を考慮した流出解析, 平成27年度東北地域災害科学研究集会, 杉妻会館(福島県福島市),

2016年1月8日。

田中聡太,竹内 望,朝岡良浩,植竹 淳,
ボリビア・コンドリリ氷河の雪氷藻類群
集 - 南アメリカ大陸の雪氷藻類の特異
性 - ,雪氷研究大会 2015,信州大学(長
野県松本市)2015年9月14日。

吉澤一樹,朝岡良浩,風間 聡,ボリビ
ア・熱帯氷河群における融解特性評価,
土木学会平成27年度全国大会 第70回
年次学術講演会,岡山大学(岡山県岡山市),
2015年9月16日。

朝岡良浩,木内 豪,アンデス山脈トゥ
ニ貯水池流域における水運用の氷河融解
水への依存性,2015年度日本雪氷学会東
北支部大会,日本大学(福島県郡山市),
2015年5月15日。

他3件

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

朝岡 良浩 (ASAOKA, Yoshihiro)

日本大学・工学部・准教授

研究者番号: 00758625

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし