アジア高山域起源の大河川流域における 21 世紀の氷河融解の進行と 年流出量変化への影響

GLACIER MELT RESPONSE
AND ANNUAL HYDROLOGICAL IMPACT
THROUGHOUT TWENTY-FIRST CENTURY
FOR MAJOR RIVER BASINS ORIGINATING IN HIGH MOUNTAIN ASIA

渡辺恵¹・Sujan Koirala²・平林由希子³・鼎信次郎⁴
Megumi WATANABE, Sujan KOIRALA, Yukiko HIRABAYASHI, Shinjiro KANAE

¹学生会員 東京工業大学大学院情報理工学研究科 学生 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

²正会員 博士 (工学) Department of Biogeochemical Integration, Max Planck Institute for Biogeochemistry 研究員
(Jena, Thüringen, 07745, Germany)

³正会員 博士 (工学) 東京大学大学院工学研究科 准教授 (〒113-8656 東京都文京区弥生 2-11-16)

⁴正会員 博士 (工学) 東京工業大学理工学研究科 教授 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

It is unclear glacier melt response (e.g., the magnitude and timing of changes in glacier melt) and the extent of contribution of glacier melts towards river flow in the context of climate change for major river basins originating in High Mountain Asia. Here we evaluate glacier melt response to climate change at major river basin scale for 11 basins using glacier melts estimated by a glacier model. Furthermore, we attempt to add the runoff outputs of climate models with the glacier melts into a “total runoff” to reveal the hydrological impact of the glacier melts. Our simulation implied that the glacier melt response of climate change is regionally different. However, the annual total runoff would increase caused by primarily an increase in non-glacier melt components across 11 basins until the end of 21st century. The relative contribution of glacier melts to the total runoff would significantly decrease towards the end of 21st century in some basins and it might have implications on seasonal water supplies.

Key Words : glacier melt, runoff, GCM, glacier model, High Mountain Asia

1. はじめに

カラコルム山脈やヒマラヤ山脈などから成るアジア高山域の氷河からの融解水は、インダスやガンジス、長江、黄河などのアジアの主要な大河川の起源となっている。このアジア高山域では、過去数十年において昇温に起因する氷河の質量損失が観測されており、21世紀を通して加速することが予測されているため¹⁾、氷河融解がアジアの大河川の水資源へ甚大な影響を及ぼすことが懸念されている^{2,3)}。

気候変化により氷河質量が加速的に損失する場合には、多くの氷河において氷河からの融解水が一時的に増加する。しかし、さらに融解が進行して氷河が縮退すると、毎年の氷河からの融解水量は増加から減少へ転じることが知られている (図-1)⁴⁾。このような氷河の気候変化への応答としての融解量の変化は、氷河下

流の水資源を考える上で重要な情報であるが、氷河融解の進行度合いや氷河融解量が増加から減少に転じる時期などは、限られた氷河についてしか予測されていない。たとえば、インダスやガンジス流域内の一部の氷河からの融解量は、21世紀の半ばから後半にかけて増加から減少へ転じることが予測されている^{5,6)}。しかし、アジアの大河川の水資源の将来展望を考える上では、このような一部の氷河からの融解量だけではなく、アジア高山域におけるすべての氷河からの融解量の将来変化を求め、気候変化に対するアジア高山域全体としての氷河の応答や、流域や気候区などの領域毎の氷河の応答の違いを明らかにする必要があると思われる。

また、氷河融解量の変化は下流の大流域などにおける広域水資源へ影響を与えることが懸念されているが、アジア高山域下流の大河川を対象に氷河融解量を考慮して流出量の将来予測を行った研究は、1-2 例に限られ

図-1 氷河融解の進行と氷河融解量の時間変化

ており、かつ大河川の上流域のみに着目している^{7),8)}。たとえば、ガンジス、ブラマプトラ、サルウィン、メコンの上流では降水の増加が主原因となって将来の流出量の増加が予測される一方で、インダス上流では氷河融解水の増加が主原因となって流出量が増加することが予測されている⁷⁾。しかしながら、広域水資源への氷河融解の影響を評価するためには、上流域だけではなく、流域全体について見通す必要がある。また、アジア高山域の氷河を起源とする流域の特徴は様々であり、上記の5河川以外の他の流域の流出についても調査する必要がある。加えて、将来予測にはモデルによる不確実性がともなうために、既存研究とは異なる氷河モデルなどを用いることにも意義がある。

以上の背景より、本研究では、まず、アジア高山域全体や、アジア高山域内の領域毎（流域）の氷河融解量の将来変化を独自の氷河モデルを用いて明らかにし、アジア高山域における氷河の気候変化に対する応答の整理を行う。次に、アジア高山域が流域に含まれるすべての大河川を対象に氷河融解量を考慮した流域全体の河川流出量の将来予測を行い、氷河融解が下流の水資源に及ぼす影響を定量化することを目的とする。

2. 手法

(1) 概要

対象とする流域は、アジア高山域の氷河を起源とする11の大河川流域（インダス、ガンジス、ブラマプトラ、長江、黄河、タリム、アムダリア、シルダリア、イラワジ、サルウィン、メコン）である（図-2）。氷河融解量の将来変化を明らかにするため、氷河モデル出力値の氷河融解量を利用して解析を行う。また、各流域の水資源への氷河融解の影響を評価するため、氷河モデル出力値の氷河融解量と、GCM出力値の河川流出量を利用する。ここでは、氷河融解量と河川流出量を足し合わせることで、流域内のすべての流出量（総流出量）を表現することを行う。

なお本研究は、氷河融解と水資源に関する研究の第一段階であるため、氷河内部における氷河融解量の一時的な貯留や、氷河融解量と河川流出量の流域河口までの輸

図-2 対象流域

TAR: タリム, SYR: シルダリア, AMU: アムダリア,
IND: インダス, GAN: ガンジス, BRA: ブラマプトラ,
IRR: イラワジ, SAL: サルウィン, MEK: メコン,
YAN: 長江, YEL: 黄河

送過程を計算していない。そのため、1年以上の期間であれば、氷河内部の一時的な氷河融解水の貯留が無視でき⁹⁾、流域内の水収支は、ほぼ釣り合いがとれるという想定に基づき、氷河融解量、河川流出量、総流出量のすべてについて、年平均値を用いて、解析・議論を行う。

(2) 氷河融解量（氷河モデル）

本研究で用いた氷河モデル（HYOGA2）¹⁰⁾は、日気温と日降水量を入力値として氷河質量収支を計算する。氷河融解量は、積算気温法に基づいて計算される。積算気温法に必要な氷河上の積雪と氷河の融解係数は、観測値の長期平均に最も近づくようにキャリブレーションされ、0.5°グリッド毎に決定している。気温は、0.0065°C/mの一定の気温減率で標高帯毎に変化させた。また、降水は雪として降る場合のみ、質量収支に影響すると想定している。積雪は、氷河上に1年以上残留した場合に涵養に使われる。氷河面積の計算は、面積・体積の関係式を適用してもとめた。

ただし、過去期間は、観測を基にした降水と気温データ（H08）¹¹⁾を与えたシミュレーションであり、将来期間は、GCMの降水と気温とをH08を用いてバイアス補正を適用したもの¹²⁾を氷河モデルに与えたシミュレーションである。

HYOGA2の過去シミュレーションの結果は、観測値の質量収支を用いた検証により、その妥当性が示されている¹⁰⁾。モデル出力値の質量収支と、観測値の質量収支との平均二乗誤差は、既存の全球氷河モデルの誤差推定値の範囲内となることが確認されている¹⁰⁾。

(3) 河川流出量（GCM）

河川流出量は、各GCMが算定した流出量を、Global Soil Wetness Project 2（GSWP2）¹³⁾による複数陸面モデルのマルチモデル平均の月流出量解析の気候値に合うように補正して利用した。河道モデル、the Catchment-based

Macro-scale Floodplain Model (CaMa-Flood)¹⁴⁾を利用することにより、補正前、補正後それぞれのGCM出力値の流出量から、河川流量をもとめ、Global Runoff Data Center (GRDC) の67地点の観測値の河川流量と比較し、検証を行った。検証の結果、補正前後の相関係数は、0.89から0.95へ向上し、その妥当性が確認された。

(4) シミュレーション設定

気候変化への顕著なシグナルを検出するため、将来期間(2006-2099年)では、RCP8.5の気候シナリオに基づいてシミュレーションを行う。用いるGCMは、CMIP5(第5期結合モデル相互比較計画)に提出された、6つのGCMの出力値を利用する。GCMの選出は、(1)独立した研究機関により開発されていることと、(2)日流出量、氷河モデルの入力値となる日地表面気温と日降水量の出力値の利用可能性の2点を条件とした。これにより、CCCma-CanESM2, CNRM-CM5, INM-CM4, MPI-ESM-LR, MRI-CGCM3, NCC-NorESM1-Mの6つが選出された。利用可能なGCMをすべて利用する理由は、GCM選定による不確実性の幅を示すためである。

(5) 各出力値の解析方法

氷河モデル出力値の氷河融解量と GCM 出力値の河川流出量の解析方法は以下のとおりである。

a) 氷河融解プロセス

将来期間(2006-2099年)において、氷河の気候変動への応答として、氷河融解量の将来変化の長期的な傾向を把握するため、Mann-Kendall法¹⁵⁾により、有意な上昇傾向あるいは下降傾向の検定を行った。Mann-Kendall法は、データの大小関係や順序関係に基づいて傾向を推定する手法である。本研究では、有意水準5%を有意判定の基準とした。

b) 氷河融解の水資源への影響

総流出量と、総流出量に占める氷河融解量の割合である氷河寄与率の二つを、流域毎に求める。ここで、前述したとおり、氷河融解量を求めるために利用したHYOGA2の質量収支と、河川流出量を求めるために利用したGCMの流出量は、それぞれ妥当性が検証されている。したがって本研究では、HYOGA2とGCMの2種類の出力値を足し合わせることで、総流出量を求める。なお、氷河を涵養する積雪以外の季節的な融雪と氷河上の降雨からの流出は、GCM出力値の河川流出量に含まれる。

3. 結果

氷河面積は、ガンジス流域を除く10流域で、21世紀末まで減少を続けた。氷河融解量(流域内のすべての氷河から流出される氷河融解量の流域平均値)の2006-2100年の将来変化のトレンド解析結果から、ガンジスを除く10

図-3 氷河面積変化と氷河融解量変化

青線：氷河面積変化率(%)は流域合計値を示す(2006-2015年平均値比)。赤線：氷河融解量変化率(%)は流域平均値(2006-2015年平均値比)。すべて氷河モデル出力値。各細線：6つのGCMの年平均値、陰影部：GCMの幅、各太線は20年の移動平均値。

図-4 河川流出量・総流出量変化

各流域平均値を示す。緑線：GCM から算定された河川流出量 (mm/yr)；青線：氷河融解量と河川流出量を足し合わせた総流出量 (mm/yr)。各細線：6つのGCMの年平均値、陰影部：GCMの幅、各太線は20年の移動平均値。

表-1 氷河寄与率 (%) の変化 (1961-1970 年平均値と 2091-2100 年平均値比較。氷河融解量 (mm) の変化を括弧内に付記。)

	TAR	YAN	YEL	MEK	IND	BRA	IRR	SYR	AMU	SAL	GAN
1961-1970 av.	43(13)	0.2(1)	0.2(0)	0.04(0)	20(30)	4(25)	0.02(0)	2(3)	14(18)	2(9)	1(4)
2091-2100 av.	30(17)	0.2(1)	0.3(0)	0.04(1)	8(20)	2(17)	0.00(0)	2(3)	10(18)	1(9)	1(8)

流域を、図-3のように3タイプに分けた。タイプ1のインダス、ブラマプトラ、イラワジの3流域は、下降傾向を示した。タイプ2のタリム、長江、黄河、メコンの4流域は上昇傾向を示した。タイプ3のシルダリア、アムダリア、サルウィンの3流域は有意な傾向が得られなかった。

河川流出量と、氷河融解量と河川流出量とを足し合わせた総流出量は、いずれの流域においても、21世紀末まで増加した(図-4)。総流出量は、多くの流域で河川流出量の増加に伴って増加した。一方、総流出量に占める氷河融解量の割合である氷河寄与率は、いくつかの流域において、21世紀末にかけて著しく減少することが予測された(表-1)。タリム、インダス、ブラマプトラ、アムダリア、サルウィン流域などで顕著な減少が予測された。

4. 考察

(1) 氷河融解プロセス

a) 氷河融解タイプの分類

タイプ1の氷河融解量の21世紀における下降傾向

(図-3)は、氷河融解プロセス(図-1)の後半部分に位置する減少時期に相当する可能性がある(図-5(a))。つまり、タイプ1では氷河融解プロセスが比較的早く進行するので、タイプ1を融解早型と分類する(図-5、図-6)。融解早型では、シミュレーション期間である21世紀には、すでに氷河融解量の減少傾向を示すため、氷河融解量の増加から減少への転換点は、21世紀の初期以前であると推測する。一方、タイプ2の氷河融解量は、21世紀には上昇傾向にある(図-3)。この上昇傾向は、氷河融解の前半部分に位置する増加時期に相当する可能性がある(図-5(b))。すなわち、タイプ2では氷河融解プロセスが比較的遅く進行するため、タイプ2を融解遅型と分類する。タイプ2の氷河融解量は、シミュレーション期間中には、まだ増加傾向にあるため、一般的な氷河融解プロセス(図-1)³⁾を踏まえると、その転換点は、シミュレーション期間以降である22世紀もしくはそれ以降に訪れると推測する。タイプ3の氷河融解量は21世紀中、顕著な傾向を検出することができなかった(図-3)。氷河融解プロセスのどの時期に位置しているのか不明瞭であり、変動型と分類

図-5 氷河融解タイプ分類

タイプ1-3は、図-3のタイプ1-3に相当。黒実線は、図1に示す長期的な融解量変化の概念図、青破線矢印は、本研究算定結果である氷河融解量変化(2006年-2099年(赤枠内))と、本研究の算定結果から推測する2006年以前の融解量変化の概念図を示す。(a)、(b)の青文字で示した年代は、融解量のピーク期。

した(図-5(c))。

b) 氷河融解タイプの地理特性

融解早型に分類したインダス流域内の一部の支流域では、既存研究により、氷河融解の転換点は2050年前後であることが予測されている^{5,6)}。しかしながら、インダス流域内のすべての氷河を対象とした本研究では、融解ピークは20世紀以前であることが示唆された。個別の氷河を対象とした場合と流域すべての氷河を対象とした場合では氷河の応答は異なることがわかった。さらに流域によっても氷河の応答は異なるため、単一の氷河、単一流域の氷河は複数の流域における地域代表性は示さないと考えられる。

3 タイプの氷河融解プロセスの進行速度の違いは、氷河が存在する領域の平均気温の違いによってもたらされるものと推測する。図-7より、融解早型では、氷河の存在する領域の年平均気温が比較的高いのに対し、融解遅型では、氷河の存在する領域の年平均気温が比較的低いことがわかる。本研究で利用した氷河モデルを用いた温暖化実験では、氷河の融解量は、積算気温法により計算され、融氷限界気温を超えた気温上昇量に伴って増加するため、融解早型と比較すると、融解遅型の氷河の縮小は穏やかに進行したと考えられる。なお、氷河の存在する領域の年平均降雪量を解析した結果、氷河融解タイプを特徴づけるための顕著な傾向を示さなかった(紙面の都合上、図には示さない)。また、本研究で用いた氷河モデルでは、降水は雪として

図-6 氷河融解タイプ分布図

図-7 氷河領域の年平均気温

各流域の氷河の存在する領域の年平均気温(20年移動平均値)。赤、黒、緑各線:6つのGCMの平均値;陰影部:GCMの幅。

降る場合のみ、質量収支に影響すると想定しているため、降雨量は氷河融解量に影響を与えない。

(2) 氷河融解の水資源への影響

a) 総流出量

いずれの流域においても、降雨起源の流出が卓越する河川流出量の増加が主要因となっており、年総流出量は増加することが予測された(図-4)。年平均流出量の増加予測は、インダス、ガンジス、ブラマプトラ、サルウィン、メコンの上流からの流出量が、21世紀の中頃に増加するとする既存研究の予測結果⁸⁾に一致する。氷河融解量の将来変化が下降傾向を持つ融解早型の流域においても、氷河融解量の減少分を河川流出量の増加分が相殺している。年間降水量が少なく、氷河への依存度が高いタリム、シルダリア、アムダリアなどにおいても、氷河融解水以外の要素が主要因となっており、年平均総流出量は増加することが新たに分かった。

b) 氷河寄与率

いくつかの流域では過去から将来の顕著な氷河寄与率の減少が予測され(表-1)、氷河融解水の卓越する乾季などの水供給への影響が深刻化することが示唆され

た。インダス流域やブラマプトラ流域では、氷河融解量の減少と河川流出量の増加により、氷河寄与率は21世紀末にかけて減少することが予測された。アムダリア流域、サルウィン流域では、氷河融解量はほぼ変化せず、河川流出量が増加したことにより、氷河寄与度は減少することが予測された。特筆すべきは、タリム流域のケースで、氷河融解量は将来増加することが予測されたにも関わらず、河川流出量の増加はさらにそれを上回るため、顕著な氷河寄与率の減少が予測された。

5. 結論

本研究では、氷河融解量の将来変化を解析することにより、各流域の氷河の気候変化への応答について議論した。また、氷河融解量と、河川流出量とを組み合わせることで、流域全体における氷河融解の水資源への影響を定量化した。

(1) 氷河融解プロセス

氷河の気候変化への応答は、氷河の存在する地理条件(氷河の存在する領域の年平均気温)により異なる。氷河融解の進行度合いの違いから、ガンジスを除いた10流域を3タイプ(融解早型、融解遅型、変動型)に分けた。また、各タイプの氷河融解量の転換点は、融解早型では21世紀の初期以前、融解遅型では22世紀以降であると推測する。

(2) 氷河融解の水資源への影響

年総流出量は、主に氷河融解水以外の要素の増加が要因となって、対象の全11流域で、将来増加することが予測された。氷河融解量の変化は、アジア高山域下流の大河川の年総流出量の変化にはあまり寄与しないことが明らかとなった。しかしながら、氷河融解量の減少が要因となって氷河寄与率が将来著しく減少することが予測されたインダス、ブラマプトラでは、乾季などの水供給に特に深刻な影響を及ぼす可能性がある。

(3) 課題

季節毎の流出量への氷河融解の影響を定量化することは、本研究の次のステップとして残されている。また、対象期間の短さや、限られた氷河モデルや気候シナリオを用いることは、結論へ不確実性をもたらす可能性があるため、22世紀以降の継続的なシミュレーションや、マルチモデル、マルチシナリオを用いることも今後考慮する必要がある。

けた。

参考文献

- 1) IPCC 2014 Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Cambridge: Cambridge University Press)
- 2) IPCC 2007 Climate Change 2007: Impacts, Adaptation, and Vulnerability Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Cambridge: Cambridge University Press)
- 3) Barnett, T. P., et al.: Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438, 303-309, 2005.
- 4) Jansson, P., et al., T.: The concept of glacier water storage – a review, *J. Hydrol.*, Vol.282, pp.116-129, 2003.
- 5) Rees H. G. and Collins D. N.: Regional differences in response of flow in glacier-fed Himalayan rivers to climatic warming, *Hydrol. Processes*, 20, 2157, 2006.
- 6) Immerzeel WW, et al.: Rising river flows throughout the twenty-first century in two Himalayan glacierized watersheds, 10.1038/NGEO1896, 2013.
- 7) Immerzeel WW, et al.: Climate Change Will Affect the Asian Water Towers, *Science*, 328, 1382,, 2010.
- 8) Lutz A., F., et al.: Consistent increase in High Asia's runoff due to increasing glacier melt and precipitation, *Nat. Clim. Change*, 2014.
- 9) Curry, K. M. and Paterson, W. S. B., *The Physics of Glacier* Fourth Edition, Elsevier, 2010
- 10) Hirabayashi, Y. et al.: Projection of mass changes of glaciers under a high-emission climate scenario by a global glacier model HYOGA2, *Hydro. Res. Letter*. 7(1) 6-11., 2013.
- 11) Hirabayashi Y, et al.: A 59-year (1948–2006) global near-surface meteorological data set for land surface models. Part I: Development of daily forcing and assessment of precipitation intensity, *Hydro. Res. Letter* 2: 36–40, 2008.
- 12) Watanabe S, et al.: Intercomparison of bias-correction methods for monthly temperature and precipitation simulated by multiple climate models, *J. Geophys. Res.* 117: D23114, 2012.
- 13) Dirmeyer, P A, et al., : Multimodel Analysis and Implications for Our Perception of the Land Surface, *B. Am. Meteorol. Soc.* 87 1391-1397, 2006.
- 14) Yamazaki, D, et al.: A physically based description of floodplain inundation dynamics in a global river routing model, *Water Resources*, 47, W04501, 10.1029/2010WR009726, 2011.
- 15) Gilbert, R.O. : 16.4 Mann-Kendall Test, *Statistical methods for environmental pollution monitoring*, ISBN 0-442-23050-8, 1987.

謝辞：本研究は JSPS 科研費 25008718, 24560617, 23226012, JSPS「アジア研究教育拠点事業」の助成を受

(2014. 9. 30 受付)