

平成 30 年 4 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06228

研究課題名(和文) 過去数百年における氷河変化の復元、検出、原因特定

研究課題名(英文) Reconstruction, detection and attribution of the past glacier mass changes over the last several centuries

研究代表者

平林 由希子 (Hirabayashi, Yukiko)

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：60377588

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：広域氷河質量変化の観測値と再解析による復元値を整備し、4種の気候実験(全ての外力を考慮して過去を再現した実験、温室効果ガスなど人為的影響のみを考慮した実験、太陽活動や火山噴火など自然外力のみを考慮した実験と、外部からの外力を何も考慮しない気候の内部変動のみを計算する実験)を用いて、過去の氷河質量変化の検出と原因特定を最適指紋法で解析した。その結果、過去の自然起源の外力は、過去の氷河質量を増加させる寄与があったこと、人為的気候変化は氷河の減少傾向に寄与していること、また、人為的気候変化による影響の方が大きいため、結果として過去の氷河質量は減少傾向であることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：We collect observed and constructed mass balance changes of glaciers at global scale and apply an optimal fingerprinting technique to observed and reconstructed mass losses as well as multi-model general circulation model (GCM) simulations of mountain glacier mass to detect and attribute past glacier mass changes. The results indicate that human-induced increases in greenhouse gases have contributed to the decreased area-weighted average masses of analyzed glaciers at global scale. The effect was larger than the mass increase caused by natural forcing, although the contributions of natural and anthropogenic forcing to decreases in mass varied at the local scale. We also showed that the detection of anthropogenic or natural influences could not be fully attributed when natural internal climate variability was taken into account.

研究分野：水文学

キーワード：地球温暖化 氷河 最適指紋法

### 1. 研究開始当初の背景

最新の「気候変動に関する政府間パネル (IPCC) による第5次評価報告書 (AR5)」では、過去の様々な変化と、それらの将来予測が報告された。その中でも、陸上の氷河はこの数十年に多くの地域で縮退が進んだと推測され、氷河融解水の減少が下流域の乾燥・半乾燥地における農業用水の不足につながると危惧されること、また、海への氷河融解水の流入量の増加が、熱膨張に次ぐ海面上昇の原因となることなどが指摘されている。このように、地球温暖化による氷河の変化とその影響を調べることは、世界の水資源や水環境を考えるうえで非常に重要である。

観測から検出された過去の気候変化に対する気候モデルの再現性と、その変化への人間活動の寄与を調べる代表的な科学研究手法の1つに、気候変化の検出と原因特定 (Detection and Attribution: D&A) が挙げられる。この D&A 手法は、長期観測データが得られる降水や気温などについてのみ主に適用されてきた。たとえば、20世紀後半の地表気温の上昇や豪雨の増加は、人為起源の温室効果ガスの影響を無視しては説明できないことなどが D&A により明らかにされた。しかし、氷河は過去の長期観測データがほとんど存在しないことや、現在の気候モデルでは氷河の堆積・融解過程を陽にモデル化できていないこと、既存の氷河モデルにはデブリによる長期熱収支変化の影響が考慮されていないことが原因となり、氷河変化に対して D&A が適用された例は無い。

### 2. 研究の目的

本研究では、世界で初めて氷河変化に D&A 手法を適用し、「最新の気候モデル出力を用いた場合、過去から現在までのグローバルな氷河変化は適切に再現できるのか？ また、その過去から現在の氷河変化には、どの程度、人為起源の温室効果ガス等による影響 (人為的気候変化) が寄与しているのか？」という問いに対して答えをだすことを目的とする。

また、「将来の氷河融解に起因する世界の水資源変化とその社会影響について、現時点におけるもっとも妥当な将来推計とその不確実性の幅は、どのようになるか？」についても検討を行う。

### 3. 研究の方法

本研究計画は以下の3つから成り立つ。

1. 高速化やデブリと熱収支過程の組み込みなど、長期間の実験に必要な氷河モデルの改良を行う。
2. 現地観測や氷河長さの復元データ等を利用すると共に、全球氷河モデルによる過去の氷河再解析と氷河復元実験を実施して、作成されたデータから過去の氷河質量の変化を検出する。
3. 氷河モデルに気候モデルの様々なシナリオ実験 (気候内部変動実験、過去再現実験、

自然強制力実験、人為強制実験) を与えた、氷河気候実験を実施する。また、内部変動実験を用いて2で検出された変化が有意かどうか判定すると共に、気候モデルの再現性を評価する。

4. 氷河変化の原因特定を行い、氷河融解に起因する水資源の最適推定や、推計に対する不確実性について検討する。

### 4. 研究成果

氷河の過去の気候実験 (過去の全ての外力を考慮して過去再現を再現した ALL 実験、温室効果ガスなど人為的影響のみを考慮した GHG 実験、太陽活動や火山噴火などの外力のみを考慮した NAT 実験の3つの実験と、外部からの外力を何も考慮しない気候の内部変動のみを計算する CTL 実験の計4種類) を用いて、過去の氷河質量の変化に対する Detection and Attribution (D&A; 変化の検出と原因特定) 解析を実施した。具体的には、気候実験を適用した世界の85の氷河において、1949年から2003年の時系列データを作成した。これには、観測データの収集、過去再解析データによる氷河質量の復元と、複数気候モデルによる過去再現気候実験それぞれについて、時系列データを作成した (図1)。

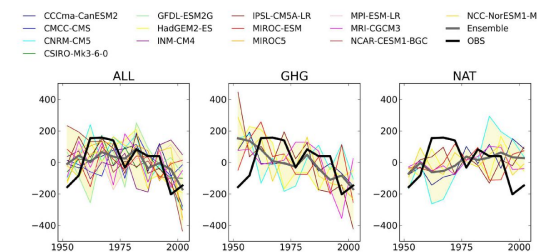


図1 全球に分布する85氷河から推計した広域氷河質量収支の推計結果。黒線が観測データ、色線が各気候モデルによる過去再現実験、灰色が気候モデルのアンサンブル平均。左が全ての外力を考慮した過去再現実験、真ん中が人為的気候変化のみを外力とした実験、右が自然由来外力のみを外力とした気候実験を示す。シェードは気候モデルの最大・最小の幅。1950-1980年平均からの偏差について、5年平均値を示す。

次に、それらのデータに D&A の手法の1つである最適指紋法を適用し、過去の氷河変化に対する、人為的気候変化 (人間活動による温室効果ガス排出が原因の人為的温暖化や、大気中のエアロゾル濃度の変化による気候変化影響など) の寄与を定量化した (図2)。

その結果、過去の太陽活動や火山噴火などの自然起源の外力は、過去の氷河質量を増加させる寄与があったこと、人為的気候変化は氷河の減少傾向に寄与していること、また、人為的気候変化による影響の方が大きいため、結果として過去の氷河質量は減少傾向であることが明らかになった。

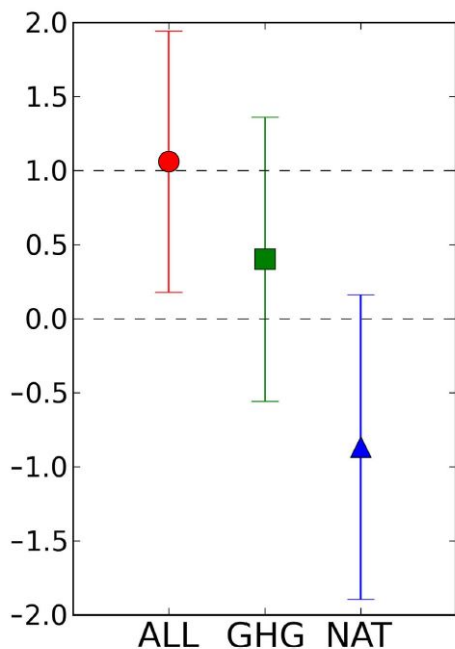


図 2 最適指紋法による、広域氷河の質量収支に対する各実験の寄与度。全球に分布する 85 氷河の面積重みづけ平均に対する結果。幅は内部変動による自然変動の幅を示す。

また、8800 年の CTL 実験による氷河質量の自然変動を解析し、最適指紋法に導入した。その結果、気候の内部変動を考慮した場合に、全ての外力を考慮した ALL 実験では、内部変動よりも有意な過去の变化傾向がみられるものの、その変化に対する自然由来外力 (NAT) と人為的気候変化による外力 (GHG) の寄与は気候の内部変動の範囲内にあるということが判明した (Hirabayashi et al., 2016)。

最後に、このような得られた結果についての不確実性についての検討を行った。具体的には、気候実験に使用した気候モデル (GCM) を用いた氷河質量収支の計算を行う際の、GCM による気象外力の違いが結果に及ぼす影響について検討した。

その結果、GCM の降水量のバイアスを補正する際に用いた元の降水量データが最終的に算定される氷河質量収支に与える影響は、複数 GCM 間の降水量のばらつきによる影響と同程度であること、また、複数 GCM 間の気温のばらつきに起因する氷河質量収支の違いは、降水量に起因する違いよりも大きくなる場合が多いという結果が得られた (渡辺ら, 2018)。また、本研究課題に使用した全球氷河モデルの氷河融解計算について、それまでの積算気温法からエネルギー収支法に変更し、氷の上の砂や石などのデブリ被覆を考慮した場合の結果の違いについて検討した。同モデルを中央ヨーロッパの Gries 氷河において検討したところ、デブリを考慮しない場合には、氷河の融解量を約 28% 過小評価することがあり得ることを示した (佐々木ら, 2018)。

気象外力によるばらつきが原因で氷河質

量の増減のシグナルが変わるわけではないこと、デブリに被覆された氷河の割合は全球ではあまり多くないことから、これらの不確実性の研究が前年度までの主な結論を覆すとは考えにくい。氷河モデルに与える気象外力について不確実性の幅を検討する必要があること、エネルギー収支モデルを用いて同様の研究をさらに実施する必要があることが示唆された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

渡辺 恵, 柳川 亜季, 平林 由希子, 渡部 哲史, 坂井 亜規子, 鼎 信次郎 (2018), アジア高山域における気象外力に起因する氷河融解量予測の不確実性, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.74, No.4, 1\_211-1\_216.

佐々木 織江, Yong Zhang, 平林 由希子, 鼎 信次郎 (2018), 衛星観測を用いた中央ヨーロッパにおける氷河のデブリ被覆分布推定とデブリの影響評価, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.74, No.4, 1\_895-1\_900.

Hirabayashi, Y., K. Nakano, Y. Zhang, S. Watanabe, M. Tanoue, S. Kanoe (2016): Contributions of natural and anthropogenic radiative forcing to mass loss of Northern Hemisphere mountain glaciers and quantifying their uncertainties, Scientific Reports, 6, 29723.

Zhang, Y., Y. Hirabayashi, K. Fujita, S. Liu, Q. Liu (2015): Heterogeneity in supraglacial debris thickness and its role in glacier mass changes of the Mount Gongga, Sci. China Earth Sci., 59, 170-184.

Zhang, Y., H. Enomoto, T. Ohata, H. Kitabata, T. Kadota, Y. Hirabayashi (2016): Projections of glacier change in the Altai Mountains under twenty-first century climate scenarios, Clim. Dyn., 47, 2935-2953.

Zhang, Y., Y. Hirabayashi, Q. Liu, S. Liu (2015): Glacier runoff and its impact in a highly glacierized catchment in the southeastern Tibetan Plateau: past and future trends, Journal of Glaciology, 61, 713-730, doi:10.3189/2015JoG14J188.

〔学会発表〕(計 7 件)

渡辺恵, 平林由希子, 渡部哲史, 吉川沙耶花, 鼎信次郎, GCM に起因する氷河モデルを用いた氷河面積予測差, 水文・水資源学会 2016 年度総会・研究発表会, 福島, 2016 年 9 月 15-17 日

Sasaki, O., O. Noguchi, Y. Zhang, Y. Hirabayashi and S. Kanae, Development of a high resolution map of debris on glaciers including whole Himalaya Alps region derived from multi-temporal ASTER images, The International Science Conference on MAHASRI, Tokyo Metropolitan University, Tokyo, Japan, 2-4 March 2016.

Hock, R., B. Marzeion, A. Bliss, R. Giesen, Y. Hirabayashi, M. Huss, V. Radic and A. Slangen, GlacierMIP - A model intercomparison of global-scale glacier mass balance models and projections, AGU Fall meeting, San Francisco, USA, 14-18 December, 2015.

Sasaki O., O. Noguchi, Y. Zhang, Y. Hirabayashi and S. Kanae, Global-scale analysis of satellite-derived debris distribution on glacier, AGU Fall meeting, San Francisco, USA, 14-18 December, 2015.

前田英俊, 平林由希子, 全球氷河モデルによる小氷期前後の氷河の前進と後退の再現性評価, 水文・水資源学会 2015 年度総会・研究発表会, 東京, 2015 年 9 月 9-11 日

Tanoue, M., S. Watanabe, T. Tsunekawa, N. Hanasaki, and Y. Hirabayashi, Impact of terrestrial glacier meltwater on water availability, Asia Oceania Geosciences Society, 12th annual meeting, together with the 7th Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources Conference, Singapore, 2-7 August, 2015.

Watanabe, M., S. Koirala, Y. Hirabayashi, A. Yanagawa and S. Kanae, A model estimate of glacier melts responses to climate change in high mountain Asia, Asia Oceania Geosciences Society, 12th annual meeting, together with the 7th Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources Conference, Singapore, 2-7 August, 2015.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

平林 由希子 (HIRABAYASHI, Yukiko)

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：60377588