

総説

ヒマラヤ氷河スキャンダルとその後

藤田 耕史^{1*}

要 旨

2009年にScience誌の指摘で明らかになった、IPCC第四次報告書におけるヒマラヤの氷河に関する誤った記述は、「ヒマラヤ氷河スキャンダル」もしくは「グレーシャーゲート」などと呼ばれ、その後、他の分野においても信頼性に乏しい記述が次々と明らかになったこともあり、IPCC全体の信頼性を揺るがす一大スキャンダルとなった。その一方で、世界の氷河研究コミュニティがヒマラヤを含むアジア高山域の氷河に目を向けるきっかけにもなり、ここ数年の短期間に数多くの研究成果が発表された。本稿では、このヒマラヤ氷河スキャンダルの経緯と原因、IPCCの対応を振り返ると共に、このスキャンダル以降に発表された論文を概観し、アジア高山域における氷河研究の現状と今後の展望を述べる。

キーワード：ヒマラヤ、氷河、IPCC

Key words: Himalaya, glacier, IPCC

1. はじめに

1.1 グレーシャーゲート/ヒマラヤ氷河スキャンダル

IPCCの第四次報告書(IPCC AR4)は2007年に出版され、気候変動に対する政策決定のための情報を提供している。その第二作業部会(WG2)報告書(Cruz *et al.*, 2007)の10章6.2節において、ヒマラヤの氷河が取り上げられている(表1)。この節の中の、「ヒマラヤの氷河が現在世界のどこよりも速く縮小しており、2035年までにそのほとんどが消失すると見込まれる」という記述に対し、2009年11月発行のScience誌において、「ヒマラヤのメルトダウンの兆候なし」との刺激的なタイトルによるレポートが掲載され(Bagla, 2009)、いわゆる「グレーシャーゲート/ヒマラヤ氷河スキャンダル」のきっかけとなった。このレポートの根拠とされたのは、インドのエネルギー省が発行したDiscussion Report(Raina, 2009)で、IPCC AR4で氷河後退の例として取り上げられたイン

ドヒマラヤ・ガンゴトリ氷河の2004年と2008年の末端の写真が示され、近年ほとんど後退しておらず、IPCC AR4で主張されていた「急激な氷河縮小」に異論が出ている、と指摘した。ほぼ同時期に発覚した、イーストアングリア大学気候変動ユニットを舞台とするEメールのハッキング・流出事件(クライメイトゲート事件)と合わせ、IPCC報告書の信頼性を揺るがす一大スキャンダルとなった。

1.2 直後の反応

Cogley *et al.* (2010)はScience誌への投書、という形で、これらの誤った記述がどこに端を発しているかについて紹介した。曰く、この記述は、この節の執筆担当者であるSyed I. Hasnainが、New Scientist誌のインタビュー記事(Pearce, 1999)の中で言及した、自身の未出版レポート(Hasnain, 1999)を根拠としており、そのNew Scientist誌の記事をWorld Wildlife Fundが報告書(WWF, 2005)の中で引用し、そのWWF(2005)をHasnain自身がIPCC報告書で引用する、という複雑な経緯を経たとのことである。一部のメディアから厳しく指摘されたように、「情報ロン

¹ 名古屋大学大学院環境学研究科

〒464-8601 名古屋市中千種区不老町 F3-1 (200)

* 連絡先: cozy@nagoya-u.jp

ダリング」と言われても仕方のない引用方法であった。また、ヒマラヤの氷河面積の縮小予測として紹介された「現在の 50 万平方 km が 2035 年に 10 万平方 km へ減少」という記述は、Kotlyakov (1996) による世界の氷河面積の縮小予測であり、元文献では 2350 年とされていたことも、重大な誤りとして指摘されている。なお、当時の見積によればヒマラヤの氷河面積は 3 万 3 千平方 km である (Dyurgerov and Meier, 2005)。なお、筆者の調べた限り、この問題に関する調査報告としては、ウェブ上の資料ではあるものの、Banerjee and Collins (2010) が、詳細かつ根拠を明示している点で最も秀逸な資料である。

1.3 IPCC の対応

この出来事をきっかけとして、氷河以外にも「不正確な記述」が次々と指摘され、IPCC は査読システムの見直しを迫られたが、ここでは、件のヒマラヤの氷河に関する節がどのように訂正されたかについてのみ述べる。筆者は J. Graham Cogley の誘いを受け、2011 年 7 月から 8 月にかけて、第二作業部会報告書の共同責任者である Chris Field, 10 章の責任著者である Rex Victor O. Cruz を交えてこの節の訂正について議論を進めた。訂正に当たっては、IPCC AR4 出版時における知見に限る、という制約のもとでの作業となった。2011 年 10 月の最終案の提出後、正式な声明発表や通知はなかったものの、IPCC のホームページには Errata として反映されている (http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg2/en/ch10s10-6-2.html)。しかしながら、リンク先は訂正の全容がわかりづらいので、表 1 にどのように訂正されたかについて記す。見ての通り、記述のほぼ半分が削除される結果となった。問題となった氷河縮小の将来予測に関する記述だけでなく、最近話題となっているススや人間活動の影響を示唆した記述についても、「当時はこの話題を扱った論文は無かった」ため、削除された。また、ヒマラヤ全域を網羅する氷河変動に関する研究は当時非常に限られており、元原稿が述べていたような、「ヒマラヤの氷河は他の地域よりも縮小が顕著である」ことを示す論拠は無く、議論の中で筆者が紹介した、Karma *et al.* (2003) が全般に縮小傾向にあることの唯一の根拠として引用される

こととなった。

2. その後展開された研究

このスキャンダルをきっかけに、ヒマラヤの氷河に対する注目が集まったものの、IPCC AR4 の記述が間違いであることははっきりしている一方で、「では、ヒマラヤの氷河では何が起きているのか？」という疑問に答えられる研究は、個別の氷河を対象としたいくつかの例を除き (*e.g.* Fujita *et al.*, 1997, 2001)、ヒマラヤ全体を評価できるようなものは皆無であった。そしてこのスキャンダル以降、ヒマラヤをターゲットとした氷河研究は爆発的に増えていった。以下では、2009 年以降に出版された論文から、ヒマラヤもしくはアジア高山域といった、比較的広域な地域を対象とした研究について、現地観測、モデリング、衛星観測というアプローチ別にその概要を紹介する。

2.1 現地観測

Fujita and Nuimura (2011) は、1970 年代に観測が始められたネパールの 3 つの氷河について、GPS 測量により 1990 年代後半からの氷河変動量を求めた。それによると、湿潤な東ネパールの 2 つの氷河では縮小速度が加速している一方で、乾燥している西ネパールの氷河では縮小速度が若干鈍化していることが明らかになった。さらに、アジア高山域を網羅する領域にて、質量収支モデルをもちいて平衡線高度のトレンドの空間分布を求め、全般に温暖化傾向を示す近年においても、氷河縮小の空間分布は非一様であることを示した。

Yao *et al.* (2012) は、近年、中国科学院チベット高原研究所が推進しているプロジェクト「Third Pole Environment」の一環としておこなっている氷河質量収支のモニタリングの成果をまとめた。湿潤な東チベット～ヒマラヤでは、氷河縮小速度は顕著であるものの、カラコルム～パミールにかけての中央アジアでは、氷河縮小の程度は小さく、Fujita and Nuimura (2011) がモデル計算で示した空間的不均一を観測的に裏付けた。図 1 に、Fujita and Nuimura (2011) と Yao *et al.* (2012)、および World Glacier Monitoring Service のデータ (WGMS, 2008, 2012) から利用可能な最近の質量収支の分布を示す。現地観測にもとづきつつ、

表 1 IPCC AR4 WGII 10.6.2 Himalayan glaciers の元の記述 (左) と訂正版 (右). 新たに加えられた記述を太字で, 削除された記述を取消線で示してある. なお, ここでのみ示された文献は引用していない.

Himalayan glaciers cover about three million hectares or 17% of the mountain area as compared to 2.2% in the Swiss Alps. They form the largest body of ice outside the polar caps and are the source of water for the innumerable rivers that flow across the Indo-Gangetic plains. Himalayan glacial snowfields store about 12,000 km³ of freshwater. About 15,000 Himalayan glaciers form a unique reservoir which supports perennial rivers such as the Indus, Ganga and Brahmaputra which, in turn, are the lifeline of millions of people in South Asian countries (Pakistan, Nepal, Bhutan, India and Bangladesh). The Gangetic basin alone is home to 500 million people, about 10% of the total human population in the region.	Himalayan glaciers cover about three million hectares or 17% of the mountain area as compared to 2.2% in the Swiss Alps. They form part of the largest body of ice outside the polar caps and are the a source of water for the innumerable rivers that flow across the Indo-Gangetic plains. Himalayan glacial snowfields store about 12,000 several thousand km³ of freshwater. About 15,000 Himalayan glaciers form a unique reservoir which supports perennial rivers such as the Indus, Ganga and Brahmaputra which, in turn, are the lifeline of millions of people in South Asian countries (Pakistan, Nepal, Bhutan, India and Bangladesh). The Gangetic basin alone is home to 500 million people, about 10% of the total human population in the region.
Glaciers in the Himalaya are receding faster than in any other part of the world (see Table 10.9) and, if the present rate continues, the likelihood of them disappearing by the year 2035 and perhaps sooner is very high if the Earth keeps warming at the current rate. Its total area will likely shrink from the present 500,000 to 100,000 km² by the year 2035 (WWF, 2005).	Glaciers in the Himalaya are receding faster than in any other part of the world (see Table 10.9) and, if the present rate continues, the likelihood of them disappearing by the year 2035 and perhaps sooner is very high if the Earth keeps warming at the current rate. Its total area will likely shrink from the present 500,000 to 100,000 km² by the year 2035 (WWF, 2005). Many Himalayan glaciers are retreating (Karma et al., 2003; and see examples in Table 10.9).
The receding and thinning of Himalayan glaciers can be attributed primarily to the global warming due to increase in anthropogenic emission of greenhouse gases. The relatively high population density near these glaciers and consequent deforestation and land-use changes have also adversely affected these glaciers. The 30.2 km long Gangotri glacier has been receding alarmingly in recent years (Figure 10.6). Between 1842 and 1935, the glacier was receding at an average of 7.3 m every year; the average rate of recession between 1985 and 2001 is about 23 m per year (Hasnain, 2002). The current trends of glacial melts suggest that the Ganga, Indus, Brahmaputra and other rivers that criss-cross the northern Indian plain could likely become seasonal rivers in the near future as a consequence of climate change and could likely affect the economies in the region. Some other glaciers in Asia – such as glaciers shorter than 4 km length in the Tibetan Plateau – are projected to disappear and the glaciated areas located in the headwaters of the Changjiang River will likely decrease in area by more than 60% (Shen et al., 2002).	The receding and thinning of Himalayan glaciers can be attributed primarily to the global warming due to increase in anthropogenic emission of greenhouse gases. The relatively high population density near these glaciers and consequent deforestation and land-use changes have also adversely affected these glaciers. The 30.2 km long Gangotri glacier has been receding alarmingly in recent years (Figure 10.6). Between 1842 and 1935, the glacier was receding at an average of 7.3 m every year; the average rate of recession between 1985 and 2001 is about 23 m per year (Hasnain, 2002). The current trends of glacial melts suggest that the Ganga, Indus, Brahmaputra and other rivers that criss-cross the northern Indian plain could likely become seasonal rivers in the near future as a consequence of climate change and could likely affect the economies in the region. Some other glaciers in Asia – such as glaciers shorter than 4 km length in the Tibetan Plateau – are projected to disappear and the glaciated areas located in the headwaters of the Changjiang River will likely decrease in area by more than 60% (Shen et al., 2002).

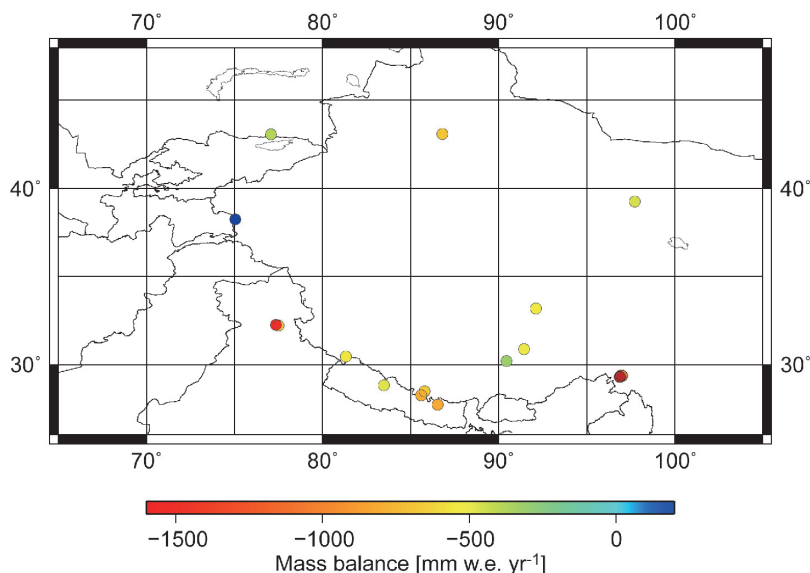


図 1 最近十年間程度の現地観測による質量収支 (WGMS, 2008, 2012; Fujita and Nuimura, 2011; Yao *et al.*, 2012).

空間的に広い範囲を扱った研究は、ヒマラヤ氷河スキャンダルの後においても上記の二編のみといってよい。図 1 を見ても明らかなように、現地観測にもとづく氷河変動の研究は空間的広がりを議論することが難しく、近年は氷河変動の現地観測データを検証データとしてもちい、衛星データや数値計算などで空間的な広がりを議論する、というアプローチが取られている。

2.2 モデリング

氷河の質量収支や変動を数値計算モデルによって見積もることは、全球的には海水準上昇への寄与を、地域的には持続的水資源の変動を、評価する上で重要である。特に、チベット高原を中心とするアジア高山域は、下流の 14 億人の人口へ水を供給する Asian Water Tower と称され (Immerzeel *et al.*, 2010)、氷河融解水の河川流量への寄与と、その将来予測に社会的関心が集まっている。全球の氷河縮小を見積もる研究は、観測例に基づいた Meier (1984) を嚆矢とし、Oerlemans and Fortuin (1992) による質量収支モデルをもちいたアプローチ、さらに、氷河のサイズ別の変動を考慮した van de Wal and Wild (2001)、Raper and Braithwaite (2006) などがある。これらの先行研究の概要については、藤田 (2006) による解説を参照して欲しい。2007 年の IPCC AR4 出版以降も、全球の

海水準上昇への寄与については多くの研究があるが、アジア高山域に言及、または焦点を当てた研究としては、Hirabayashi *et al.* (2010) と Radić and Hock (2011) がある。これらの研究のコンセプトは基本的に Raper and Braithwaite (2006) と同じであるが、最新の GCMs (general circulation models) のアウトプットや独自にまとめた気候データを氷河質量収支、流出等を計算するための入力データとすることや、最新の氷河台帳を使用することなどにより、先行研究に対する新規性を打ち出している。

一方、河川流出に対する寄与の側面を論じた研究としては、Immerzeel *et al.* (2010) と Kaser *et al.* (2010) がある。Immerzeel *et al.* (2010) は GCMs のアウトプットを氷河変動を考慮した質量収支モデルの入力にもちい、チベット高原に源流を持つ五大河川 (インダス、ガンジス、ブラマプトラ、黄河、揚子江) に対する氷河融解水の寄与を見積もると共に、将来予測をおこなった。その結果、インダスとブラマプトラにおける氷河融解水の寄与が大きく、将来の氷河縮小に伴い、春先における河川流量の減少が顕著である一方で、ガンジス、黄河、揚子江においては、現在の寄与も将来の変化も小さいと結論づけた。一方、Kaser *et al.* (2010) は、簡略化した氷河融解モデ

ルをもちい、世界各地の氷河融解を求めた。この研究のユニークなところは、氷河融解水の量的寄与を議論するのではなく、降水と氷河融解の季節パターンを比較したところにある。氷河の融解がピークを迎える夏季に降水ピークが重なる気候においては、氷河が水資源として果たす役割は小さい一方で、夏季に乾期となる地域、特に乾燥域においては、氷河融解水の存在が渇水期の河川流量を補っているため、氷河の消長は重要となる。この視点から Immerzeel *et al.* (2010) を見直すと、彼らが対象とした河川のうち、インダス以外は夏季モンスーンの影響下にあるため、依存する人口の多少にかかわらず氷河の役割は小さい。また、Immerzeel *et al.* (2010) において、乾燥域を流れるタリム、アムダリヤ、シルダリアが解析の対象からは外されたことは残念である。

水資源としての氷河融解水の役割については、氷河縮小が進んでいる現状において、縮小による過剰な水が供給されている、という理解は広く浸透している一方で、氷河の消失によって突然河川流量が枯渇する、といったような表現がままある (*e.g.* Bajracharya and Shrestha, 2011)。しかしながら、氷河が消失した地表面にも降水は降ることを考えれば、氷河という水資源が無くなっても、降水-蒸発に応じた河川水は存在するため、枯渇とは誤解を与える表現といえる。直接これらのことに言及はしていないものの、Immerzeel *et al.* (2012) や Sakai *et al.* (2012) は、それぞれ異なる手法、時間スケールで、氷河変動を考慮に入れた流域スケールの河川流量の変動を論じている。Immerzeel *et al.* (2012) はネパールヒマラヤのランタン流域における河川流量の将来予測を見積もった。氷河縮小が進むにつれ、氷河融解水の寄与が減っていく一方で、GCMs によって予測される降水量の増加により、春先の季節積雪の融解水と夏季の降水の寄与が増えていく様子が見てとれる。Sakai *et al.* (2012) は各種代替指標を入力データとして、チベット高原北部、祁連山における過去二千年間の河川流量の復元をおこない、考古資料との比較検討を通じて干ばつの原因について論じた。河川流量における氷河融解水の寄与の増減は、氷河面積の多少ではなく、氷河が縮小傾向にあるか拡大傾向にあるかが重要であることを示し

た。このように、氷河変動を水資源の視点から扱う研究においては、氷河融解水の影響だけではなく、降水や降雪、さらには氷河変動の影響も併せて評価する必要がある。しかしながら、降水の「量」の復元や将来予測は、古気候研究や気候モデリングの分野において、不確実性が大きいとされており (*e.g.* Kang *et al.*, 2002)、この種の研究の大きな制約要因となっている。

2.3 衛星観測

ヒマラヤ地域へのアクセスの困難さを考えれば、ヒマラヤ氷河スキャンダル以降、もっとも生産的であったのが衛星データを利用した研究であることは当然と言えるだろう。同スキャンダルを意識しておこなった研究ではないだろうが、出版されたタイミングとしてもっともタイムリーであったのが、Matsuo and Heki (2010) による、重力観測衛星 GRACE のデータを利用したアジア高山域における氷河変動量の見積である。当時、GRACE データを利用した雪氷域に対する研究は、特にグリーンランド氷床をターゲットに盛んにおこなわれていたが、これをアジア高山域に応用したのが Matsuo and Heki (2010) で、2003 年から 2009 年にかけての氷河変動量を $-47 \pm 24 \text{ Gt yr}^{-1}$ と見積もった。この論文に明示的には記されていないが、アジア高山域の氷河面積 ($120,200 \text{ km}^2$) で割ると $-391 \pm 200 \text{ kg m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ となり、期間は異なるものの、当時知られていた質量収支の傾向 ($-374 \pm 474 \text{ kg m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, 1996-2003, Dyurgerov and Meier, 2005) に対し、整合的な結果であると思われた (表 2)。

これに対し、二年後に出版された Jacob *et al.* (2012) は、GRACE データから全球の氷河損失量とその海水準上昇への寄与を評価する中で、アジア高山域の氷河変動分布を -4 Gt yr^{-1} とし、この地域の氷河縮小の傾向が Matsuo and Heki (2010) の見積に比べ一桁も小さいと主張した。特に、チベット高原上の氷河変動は $+7 \text{ Gt yr}^{-1}$ 、つまり氷河は増加している、と主張し、現地観測を続ける中国人研究者の反発を招いた。これ以降出版された氷河変動を見積もる論文の多くは、この Jacob *et al.* (2012) を強く意識した内容となっている。先に紹介した現地観測の結果は、パミール高原以外は氷河縮小を示している (Yao *et al.*, 2012) (図

1). この不一致の原因の一つとして、氷河縮小で失われた質量がチベット高原上に点在する湖へ再配分されていることを、GRACE データでは分離できていない可能性について、国際会議の場などで指摘されていた。Zhang *et al.* (2013) はこの点に着目し、衛星に搭載されたレーザー高度計 (ICESat) のデータから、チベット高原上の湖について近年の水位変化を解析し、湖水の変動量を $+4.3 \text{ Gt yr}^{-1}$ と見積もった。解析対象が高原上の湖面積の約半分 (53%) であることを考えれば、チベット高原全域での湖水変動量は、Jacob *et al.* (2012) が示した同地域の質量増加 ($+7 \text{ Gt yr}^{-1}$) とほぼ同程度である。このことから、Jacob *et al.* (2012) が見積もった氷河変動量には、湖に再配分された湖水が含まれており、結果として氷河変動を捉えていない、と指摘している。

衛星データから氷河の変化量を見積もる研究においては、異なる時代に撮像された衛星データからデジタル標高データ (DEM) を作成し、その差分から氷河表面標高の変化量を求める手法が主流である。ヒマラヤ地域においては、Berthier *et al.* (2007), Bolch *et al.* (2011), Gardelle *et al.* (2012), Nuimura *et al.* (2012), Vincent *et al.* (2013) などがインドヒマラヤやネパールクンブ地域、カラコルムなどにおいて、流域・山域スケールでの見積をおこなっている。ヒマラヤ山脈全体、といったような広範囲を対象に、このアプローチをもちいて同一の期間、同種の衛星データを利用して氷河変動を求めた研究は無いものの、ヒマラヤ、カラコルムにおける最近の知見をまとめた Bolch *et al.* (2012) による解説論文によれば、ヒマラヤの氷河は、東ヒマラヤで顕著な縮小を示し、カラコルムでは微増しているという、地域的偏差については、現時点でコンセンサスを得ているといっていよう。

そんな状況の中、Kääb *et al.* (2012) は、ICESat データを利用し、ヒマラヤ・カラコルムにおけるここ十年程度の氷河変動量を明らかにした。ICESat は高さ方向の誤差が数 cm と極めて高精度であるが、極軌道であることと一点の観測範囲 (footprint) が 70 m 四方と広いことから、観測頻度が多く地形が穏やかな極域においては多くの成果が得られているものの、急峻地形では同じ場所

の計測が困難なことで、低緯度故に観測頻度が少ないヒマラヤ地域では使えないと考えられていたが、Kääb *et al.* (2012) は、2000 年 2 月のスペースシャトルミッションで作成された、現在の高分解能 DEM の基準ともいえる SRTM (分解能 3 秒角、約 90 m 四方) を参照 DEM とし、SRTM からの変化量を ICESat で求めた。SRTM の高さ精度は、ヒマラヤ地域においては約 12~13 m 程度あるため (e.g. Fujita *et al.*, 2008; Nuimura *et al.*, 2012), 点毎の結果は誤差が大きく使いものにならないが、地域ごとに多数あるデータに対し最小二乗回帰線を求めることで、誤差 (標準誤差) を低減させ質量収支の傾向を求めた。異なる質のデータを組み合わせた、秀逸なアイデアが光る研究といえる。ヒマラヤ・カラコルムを対象とした Kääb *et al.* (2012) の結果 ($-210 \text{ kg m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) は、現地観測にもとづく全球平均の氷河縮小傾向 ($-750 \text{ kg m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$, Cogley, 2009) に比べて顕著に小さい値であり、「ヒマラヤの氷河が他の地域よりも顕著に縮小しているわけではない」という Bolch *et al.* (2012) の主張を裏付けた。一方でこの結果から見積もられる氷河損失の総量 (-12.8 Gt yr^{-1}) は、同じ地域における GRACE データからの見積 (-5 Gt yr^{-1} , Jacob *et al.* 2012 の表 1 の 8c. Himalaya and Karakoram) よりも十分に大きな負の値であった。失われた雪氷体の密度の仮定に不確実性は残るものの、多くのノイズを含む GRACE データに比べると、より確実な値を提示した研究として評価できる。また、デブリに覆われた氷河の低下速度が、そうでない氷河の低下速度と同程度であり、野外実験などで確認されているデブリの融解抑制効果が氷河変動にはあまり影響していない様子が示唆された。この原因については、Sakai *et al.* (2000, 2002) が提案した、池や氷壁における選択的融解過程が候補としてあげられる。詳細は坂井 (2001) による解説を参照して欲しい。氷河変動の空間分布については、それまでも指摘されていたカラコルムでの氷河の増加傾向 (e.g. Gardelle *et al.*, 2012) と、変動傾向の非一様な分布 (Fujita and Nuimura, 2011) などが明瞭に捉えられていた。

Kääb *et al.* (2012) の対象地域はヒマラヤとカラコルムに限られていたが、この手法を全球に適

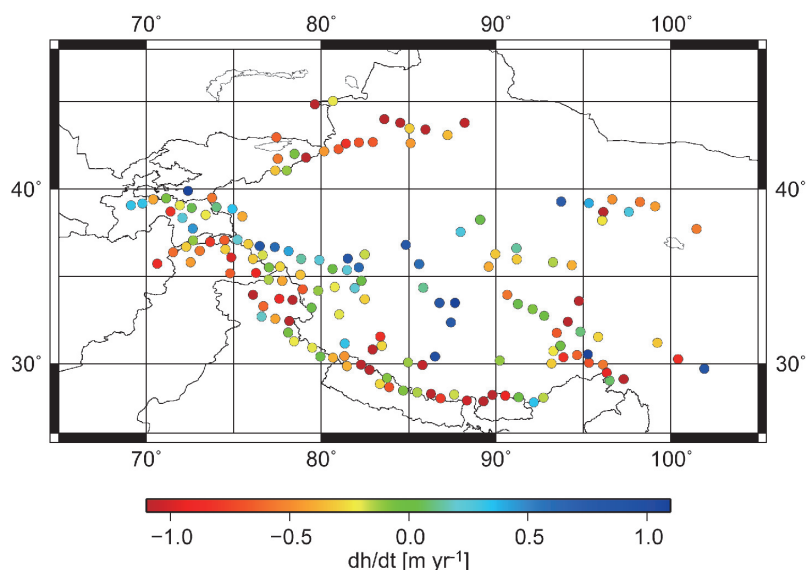


図 2 ICESat と SRTM から得られた氷河表面標高変化 (dh/dt) の分布 (Gardner *et al.*, 2013 を改変).

表 2 Gardner *et al.* (2013) がまとめた, 2003 年から 2009 年にかけてのアジア高山域における近年の氷河変動傾向 (1~4). 2~4 のデータについては, 引用元の手法を用い Gardner *et al.* (2013) が再計算した値である. 参考のため, Matsuo and Heki (2010) と Dyrugorov and Meier (2005) の値も示してある (5, 6). 誤差は Gardner *et al.* (2013) が採用した 2σ に統一した. Matsuo and Heki (2010) については Gt yr^{-1} から $\text{kg m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ を, Dyrugorov and Meier (2005) については $\text{kg m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ から Gt yr^{-1} を, Gardner *et al.* (2013) で使用された氷河面積 ($120,200 \text{ km}^2$) を使って求めた. また, Dyrugorov and Meier (2005) の期間は 1996 年から 2003 年である.

手法	質量収支 (Gt yr^{-1})	質量収支 ($\text{kg m}^{-2} \text{yr}^{-1}$)	引用文献
1. ICESat	-29.0 ± 13.4	-240 ± 110	Gardner <i>et al.</i> (2013)
2. GRACE	-14.0 ± 17.0	-117 ± 141	Jacob <i>et al.</i> (2012)
3. GRACE	-23.0 ± 24.0	-190 ± 200	Wouters <i>et al.</i> (2008)
4. Glaciological	-86.0 ± 26.0	-720 ± 220	Cogley (2009)
5. GRACE	-47.0 ± 24.0	-391 ± 200	Matsuo and Heki (2010)
6. Glaciological	-44.9 ± 56.9	-374 ± 474	Dyrugorov and Meier (2005)

用したのが Gardner *et al.* (2013) である. このうちアジア高山域では, Jacob *et al.* (2012) の結果に比べ, 氷河の縮小傾向はより負の傾向が示されているが, それでもなお現地観測の内挿による推定 (Cogley, 2009) に比べると小さい. カラコルムにおける正の傾向は現地観測 (Yao *et al.*, 2012) や他の手法による解析 (Gardelle *et al.*, 2012; Vincent *et al.*, 2013) でも得られているが, チベット高原

上にみられる正の傾向は Yao *et al.* (2012) の結果とは異なっていた (図 2). 表 2 に Gardner *et al.* (2013) でまとめられた, アジア高山域における氷河変動の推定値をあげる. GRACE データには多くのノイズが含まれており, その除去手法が個々の論文の新規性を担保している. 表 2 を見ても明らかのように, 手法による差異は未だ大きく, 十分にコンセンサスを得ているとは言い難い状況に

ある。

文 献

3. 今後の展望

上記 Kääb *et al.* (2012) に対する紹介記事 (Cogley, 2012) に、ヒマラヤにおける氷河変動に関して取り組むべき課題がいくつか挙げられているが、その一つが質量収支の見積に観測手法による大きな差異があることである (表 2)。Bolch *et al.* (2012) でもこのことは指摘されており、現地観測がアクセスの良い、比較的低標高の氷河でおこなわれていることが、この不一致の一因としている。事実、温暖化していても、未だ融解が生じていないような高標高における質量収支の現地観測データはないが、高標高の涵養域では質量収支が正であることが期待できることから、流域、山塊スケールでの質量収支を見積もる際に正の側に補正される可能性はある。しかしその一方で、高標高に端を発するような氷河はより大きな負の質量収支を示す低標高まで達しており (Karma *et al.*, 2003)、縮小過程にある氷河全体の質量収支としてはより大きな負の値を取る可能性もある。また、このような大型氷河ほど気候変化への応答がゆっくりであることも、より大きな負を示す一因となりうる (Kuhn *et al.*, 1985)。このように、低標高の氷河ほど近年の温暖化に敏感に応答し、より大きな負の質量収支となっている、という主張は、必ずしも定量的に評価されたものではなく、今後の研究が待たれるところである。この他、本稿では詳しく触れなかったが、デブリ被覆域における顕著な氷河表面の低下については、氷河融解に関するデブリの断熱効果についての知見とは矛盾しており、これらの素過程の観測、解析も重要と指摘されている (Cogley, 2012)。以上をまとめると、下流域をデブリに覆われ、かつ高標高まで達する大型氷河の質量収支の観測が、現在最も求められていると言えよう。ヒマラヤ山脈の氷河の多くは中腹にアイスフォールを有しているため、高標高涵養域にアクセス可能な氷河は極めて限られるが、現地観測による質量収支の素過程の理解は、衛星データ解析全盛の現代においてこそ、重要であると思われる。

- Bagla, P., 2009 : CLIMATE CHANGE No sign yet of Himalayan meltdown, Indian report finds. *Science*, **326**, 924-925, doi : 10.1126/science.326.5955.924.
- Bajracharya, S.R. and B. Shrestha, 2011 : *The Status of Glaciers in the Hindu Kush-Himalayan Region*, ICIMOD, Kathmandu, Nepal, 127 pp.
- Banerjee, B. and G. Collins, 2010 : Anatomy of IPCC's mistake on Himalayan glaciers and year 2035. In the YALE forum on Climate Change and the Media. <http://www.yaleclimatemediaforum.org/2010/02/anatomy-of-ipcch-himalayan-glacier-year-2035-mess/>
- Berthier, E., Y. Arnaud, R. Kumar, S. Ahmad, P. Wagnon and P. Chevallier, 2007 : Remote sensing estimates of glacier mass balances in the Himachal Pradesh (Western Himalaya, India). *Remote Sens. Environ.*, **108**, 327-338, doi : 10.1016/j.rse.2006.11.017.
- Bolch, T., T. Pieczonka and D.I. Benn, 2011 : Multi-decadal mass loss of glaciers in the Everest area (Nepal Himalaya) derived from stereo imagery. *Cryosphere*, **5**, 349-358, doi : 10.5194/tc-5-349-2011.
- Bolch, T., A. Kulkarni, A. Kääb, C. Hugel, F. Paul, J.G. Cogley, H. Frey, J.S. Kargel, K. Fujita, M. Scheel, S. Bajracharya and M. Stoffel, 2012 : The state and fate of Himalayan glaciers. *Science*, **336**, 310-314, doi : 10.1126/science.1215828.
- Cogley, J.G., 2009 : Geodetic and direct mass-balance measurements : comparison and joint analysis. *Ann. Glaciol.*, **50**(50), 96-100, doi : 10.3189/172756409787769744.
- Cogley, J.G., 2012 : CLIMATE SCIENCE Himalayan glaciers in the balance. *Nature*, **488**, 468-469, doi : 10.1038/488468a.
- Cogley, J.G., J.S. Kargel, G. Kaser and C.J. van der Veen, 2010 : Tracking the source of glacier misinformation. *Science*, **327**, 522, doi : 10.1126/science.327.5965.522-a.
- Cruz, R.V. *et al.*, 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*, edited by M. L. Parry *et al.*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 469-506.
- Dyrgerov, M.B. and M.F. Meier, 2005 : *Glaciers and the changing Earth system : A 2004 snapshot*. Occasional Paper No. **58**, Inst. Arct. Alp. Res., Univ. of Colorado, Boulder, Colorado, 117 pp.
- 藤田耕史, 2006 : 氷河変動と海水準に関する最近の研究. 雪氷, **68**, 625-637.
- Fujita, K. and T. Nuimura, 2011 : Spatially heterogene-

- ous wastage of Himalayan glaciers. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **108**, 14011–14014, doi : 10.1073/pnas.1106242108.
- Fujita, K., M. Nakawo, Y. Fujii and P. Paudyal, 1997 : Changes in glaciers in Hidden Valley, Mukut Himal, Nepal Himalayas, from 1974 to 1994. *J. Glaciol.*, **43**, 583–588.
- Fujita, K., T. Kadota, B. Rana, R.B. Kayastha and Y. Ageta, 2001 : Shrinkage of Glacier AX010 in Shorong region, Nepal Himalayas in the 1990s. *Bull. Glaciol. Res.*, **18**, 51–54.
- Fujita, K., R. Suzuki, T. Nuimura and A. Sakai, 2008 : Performance of ASTER and SRTM DEMs, and their potential for assessing glacial lakes in the Lunana region, Bhutan Himalayas. *J. Glaciol.*, **54**(185), 220–228, doi : 10.3189/002214308784886162.
- Gardelle, J., E. Berthier and Y. Arnaud, 2012 : Slight mass gain of Karakorum glaciers in the early 21st century. *Nat. Geosci.*, **5**, 322–325, doi : 10.1038/ngeo1450.
- Gardner, A.S., *et al.*, 2013 : A reconciled estimate of glacier contributions to sea level rise : 2003 to 2009. *Science*, **340**, 852–857, doi : 10.1126/science.1234532.
- Hasnain, S.I., 1999 : *Report on Himalayan glaciology : Appendix 6, unpublished minutes of the July 1999 meeting*, Bureau of the International Commission for Snow and Ice.
- Hirabayashi, Y., P. Döll and S. Kanae, 2010 : Global-scale modeling of glacier mass balances for water resources assessments : glacier mass changes between 1948 and 2006. *J. Hydrol.*, **390**, 245–256, doi : 10.1016/j.jhydrol.2010.07.001.
- Immerzeel, W.W., L.P.H. van Beek and M.F.P. Bierkens, 2010 : Climate change will affect the Asian water towers. *Science*, **328**, 1382–1385, doi : 10.1126/science.1183188.
- Immerzeel, W.W., L.P.H. van Beek, M. Konz, A.B. Shrestha and M.F.P. Bierkens, 2012 : Hydrological response to climate change in a glacierized catchment in the Himalayas. *Clim. Change*, **110**, 721–736, doi : 10.1007/s10584-011-0143-4.
- Jacob, T., J. Wahr, W.T. Pfeffer and S. Swenson, 2012 : Recent contributions of glaciers and ice caps to sea level rise. *Nature*, **482**, 514–518, doi : 10.1038/nature10847.
- Kääb, A., E. Berthier, C. Nuth, J. Gardelle and Y. Arnaud, 2012 : Contrasting patterns of early 21st century glacier mass change in the Himalaya. *Nature*, **488**, 495–498, doi : 10.1038/nature11324.
- Kang, I.S. *et al.*, 2002 : Intercomparison of the climatological variations of Asian summer monsoon precipitation simulated by 10 GCMs. *Clim. Dyn.*, **19**, 383–395, doi : 10.1007/s00382-002-0245-9.
- Karma, Y. Ageta, N. Naito, S. Iwata and H. Yabuki, 2003 : Glacier distribution in the Himalayas and glacier shrinkage from 1963 to 1993 in the Bhutan Himalayas. *Bull. Glaciol. Res.*, **20**, 29–40.
- Kaser, G., M. Großhauser and B. Marzeion, 2010 : Contribution potential of glaciers to water availability in different climate regimes. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **107**, 20223–20227, doi : 10.1073/pnas.1008162107.
- Kuhn, M., G. Markl, G. Kaser, U. Nickus, F. Obleitner and H. Schneider, 1985 : Fluctuations of climate and mass balance : different responses of two adjacent glaciers, *Z. Gletscherkd. Glazialgeol.*, **21**, 409–416.
- Kotlyakov, V.M., 1996 : The future of glaciers under the expected climate warming. *Variations of Snow and Ice in the past and at present on a Global and Regional Scale*, edited by V.M. Kotlyakov, UNESCO, Paris, 61–66.
- Matsuo, K. and K. Heki, 2010 : Time-variable ice loss in Asian high mountains from satellite gravimetry. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **290**, 30–36, doi : 10.1016/j.epsl.2009.11.053.
- Meier, M.F., 1984 : Contribution of small glaciers to global sea level. *Science*, **226**, 1418–1421.
- Nuimura, T., K. Fujita, S. Yamaguchi and R.R. Sharma, 2012 : Elevation changes of glaciers revealed by multitemporal digital elevation models calibrated by GPS survey in the Khumbu region, Nepal Himalaya, 1992–2008. *J. Glaciol.*, **58**, 648–656, doi : 10.3189/2012 JoG11J061.
- Oerlemans, J. and J.P.F. Fortuin, 1992 : Sensitivity of glaciers and small ice caps to greenhouse warming. *Science*, **258**, 115–117.
- Pearce F., 1999 : *New Scientist*, **162**, 18.
- Radić, V. and R. Hock, 2011 : Regionally differentiated contribution of mountain glaciers and ice caps to future sea-level rise. *Nat. Geosci.*, **4**, 91–94, doi : 10.1038/ngeo1052.
- Raina, V.K., 2009 : *Himalayan Glaciers : A State-of-Art Review of Glacial Studies, Glacial Retreat and Climate Change*, Discussion Paper, Ministry of Environment and Forests, Government of India, New Delhi, 60 pp.
- Raper, S.C.B. and R.J. Braithwaite, 2006 : Low sea level rise projections from mountain glaciers and icecaps under global warming. *Nature*, **439**, 311–313, doi : 10.1038/nature04448.
- 坂井亜規子, 2001 : 岩屑に覆われた氷河の融解過程. 雪

- 氷, **63**, 191-200.
- Sakai, A., N. Takeuchi, K. Fujita and M. Nakawo, 2000 : Role of supraglacial ponds in the ablation process of a debris-covered glacier in the Nepal Himalayas. *Int. Assoc. Hydrol. Sci.*, Publ. **264** (Symposium at Seattle 2000 - Debris-covered glacier), 119-130.
- Sakai, A., M. Nakawo and K. Fujita, 2002 : Distribution characteristics and energy balance of ice cliffs on debris-covered glaciers, Nepal Himalaya. *Arct. Antarct. Alp. Res.*, **34**, 12-19.
- Sakai, A., M. Inoue, K. Fujita, C. Narama, J. Kubota, M. Nakawo and T. Yao, 2012 : Variations in discharge from the Qilian mountains, northwest China, and its effect on the agricultural communities of the Heihe basin, over the last two millennia. *Water History*, **4**, 177-196, doi : 10.1007/s12685-012-0057-8.
- van de Wal, R.S.W. and M. Wild, 2001 : Modeling the response of glaciers to climate change by applying volume-area scaling in combination with a high resolution GCM. *Clim. Dyn.*, **18**, 359-366.
- Vincent, C., A. Ramanathan, P. Wagnon, D.P. Dobhal, A. Linda, E. Berthier, P. Sharma, Y. Arnaud, M.F. Azam, P.G. Jose and J. Gardelle, 2013 : Balanced conditions or slight mass gain of glaciers in the Lahaul and Spiti region (northern India, Himalaya) during the nineties preceded recent mass loss. *Cryosphere*, **7**, 569-582, doi : 10.5194/tc-7-569-2013.
- WGMS, 2008 : Fluctuations of Glaciers 2000-2005, Volume IX, World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland, 266 pp.
- WGMS, 2012 : *Fluctuations of Glaciers 2005-2010, Volume X*, World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland, 336 pp.
- Wouters, B., D. Chambers and E.J.O. Schrama, 2008 : GRACE observes small-scale mass loss in Greenland. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L20501, doi : 10.1029/2008GL034816.
- WWF, 2005 : *An Overview of Glaciers, Glacier Retreat, and Subsequent Impacts in Nepal, India and China*, World Wildlife Fund Nepal Program, Kathmandu, Nepal, 70 pp.
- Yao, T. *et al.*, 2012 : Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. *Nat. Clim. Change*, **2**, 663-667, doi : 10.1038/nclimate1580.
- Zhang, G., T. Yao, H. Xie, S. Kang and Y. Lei, 2013 : Increased mass over the Tibetan Plateau : from lakes or glaciers? *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 2125-2130, doi : 10.1002/grl.50462.

Himalayan Glaciergate and its aftermath

Koji FUJITA^{1*}

¹ Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University,
Furo-cho F3-1 (200), Chikusa-ku, Nagoya, 464-8601 Japan

* Corresponding author: cozy@nagoya-u.jp

Abstract: In 2009, a report has highlighted inadequacies in a 2007 report by the Intergovernmental Panel on Climate Change, and then the present status of Himalayan glaciers and their fate are a matter of great concern. Various studies have been published during the succeeding years, as a consequence of “the Himalayan Glaciergate”. In this review article, I describe how the inadequate descriptions have been embedded in the IPCC report and how the IPCC had corrected the inadequacies. I also present an overview of relevant studies dealing with Himalayan and/or Asian glaciers in terms of in-situ observation, modeling, and remote-sensing approaches.

(2013 年 6 月 3 日受付, 2013 年 6 月 23 日改稿受付,
2013 年 6 月 24 日受理, 討論期限 2014 年 7 月 15 日)