最近の研究から

ヒマラヤにおけるリモートセンシングを用いた氷河研究の動向

縫村崇行

1. はじめに

ヒマラヤの氷河研究は1970年代より日本の研 究者による「ネパール・ヒマラヤ氷河学術調査隊」 (Glaciological Expedition of Nepal: GEN) プロ ジェクトによる現地観測など、主に日本の研究者 によって行われて来た (渡邉・上田, 2001). しか しヨーロッパなどの氷河研究と異なり、その多く は標高が高く、交通網も整っていないため、現地 観測によるデータの取得には多くの困難がつきま とう. 加えて、ヒマラヤ山脈沿いには多くの国境 が存在しており、政治的な理由から現地における 観測が制限される地域も多い. このため現地観測 の行われた地域は限られており、氷河の現地観測 データに選択的バイアスが存在しているとの指摘 もある (Gardner et al., 2013). このような理由か ら、近年の数多くのヒマラヤの氷河研究はヨー ロッパの研究者らによる、リモートセンシング データのみを用いたアプローチが盛んに行われて きた (e.g. Berthier et al., 2007; Quincey et al., 2007; Scherler et al., 2011; Bolch et al., 2008; Bolch et al., 2011; Pieczonka et al., 2011). 一方. 観測実績のある日本の研究者らは、現地観測デー タがあることを生かしてリモートセンシングと両 方を組み合わせたアプローチが主に行われてきた (e.g. Fujita et al., 2009; Fujita and Nuimura 2011; Nuimura et al., 2011; Nuimura et al., 2012).

氷河変動として容易に捉えることのできるものとして、幾何学的な変化(面積・体積の変化)がある。とくに面積変化は光学衛星画像や空中写真などから容易に観測可能なことからリモートセンシング研究の草創期から多くの地域を対象に行われてきた。光学衛星画像や空中写真を用いた氷河

1 名古屋大学大学院環境学研究科

〒464-8601 名古屋市千種区不老町 F3-1

* 連絡先: nuimura@nagoya-u.jp

マッピングは容易であるがいくつかの問題点があ ることも知られている. 特にヒマラヤで多くを占 める表面をデブリ(岩屑)に覆われたデブリ氷河 においては、氷河消耗域の氷河末端の判定が困難 であり (Racoviteanu et al., 2009), ある閾値を用 いて画像から氷河を自動抽出したのち、目視によ る修正が不可欠である. また、氷河の手動抽出は 境界の判別に解析者の主観が介在するため、個人 差が大きく、氷河の長さ変化の観測などの際は注 意が必要となる (Le Bris and Paul, 2013; Paul et al. 2013). 最近ではデブリ氷河の消耗域を 2 時期 の合成開口レーダー(SAR: Synthetic Aperture Radar) より得られ、氷河の流動や融解に伴う微 小な地形変化を示すコヒーレンス値の強弱を用い て抽出を試みた研究もあるが (Frey et al., 2012), 目視による修正が必要な状況は変わらない. この ような背景から、ヒマラヤのようなデブリ氷河が 多く占める地域では、氷河体積変化すなわち氷河 表面の高度変化の観測が重要と考えられてきた.

2. 氷河の高度変化

高度変化の観測手法として古くから行われているのは写真測量法による地形観測である。ネパールでは 1990 年代にフィンランドの協力で実施された空中写真から写真測量法により地形観測を行い作成した 1:50,000 地形図がネパール測量局より発行されている(朝日,1998)。しかし元データの空中写真は、閲覧は可能であるがコピーは許可されていない。

ヒマラヤにおいて数少ない空中写真測量の先行 研究としては Gruen and Murai (2002) と Pieczonka et al. (2011) がある. Gruen and Murai (2002) では 1984 年に実施された空中写真よりエベレスト 周辺のデジタル標高モデル (DEM: Digital Elevation Model) を作成し、それをもとに National

	a trada arms to	1 1 10 5 1 1 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10		
表	Ⅰ 本榀で取り	上げられた衛星デー	タリフ	スト

衛星、センサー名	センサー種類	空間解像度	運用期間
Corona KH-4B	パンクロマティック	2. 7-7. 6 m	1967–1972
Hexagon KH-9	パンクロマティック	6-10 m	1973-1980
SPOT*1, HRV	パンクロマティック*2	10 m	1986-
SRTM	SAR	C バンド: 3 秒角(90 m), X バンド: 1 秒角(30 m)	2002
ICESat	レーザー高度計	_*3	2003-2009
Terra, ASTER	可視近赤外*⁴	15 m	1999–
ALOS, PRISM	パンクロマティック	2.5 m	2006-2011
ERS-1/-2	SAR	25 m	ERS-1: 1991-2000, ERS-2: 1995-
GRACE	_*5	300-400 km	2002-

*1 ここで示しているのは SPOT 1~4 号のデータ. 2002 年に打ち上げられた SPOT5 号ではパンクロマティック解像度は $2.5\,\mathrm{m}$ に向上している. *2 本稿で取り上げたステレオ視可能なパンクロマティック以外にも可視近赤外バンド(解像度 $20\,\mathrm{m}$)がある. *3 ICESat は衛星軌道上の離散的な測点データ. *4 ステレオ視可能な可視近赤外バンド以外にも短波長,赤外バンド(解像度はそれぞれ $30,90\,\mathrm{m}$)がある. *5 $2\,\mathrm{tm}$ 0 GRACE 衛星間の距離測定により重力異常を計算している.

Geographic からエベレスト周辺の 1:50,000 地形 図が発行されている。Pieczonka *et al*, (2011) で は同じ 1984 年の空中写真を用いて DEM を作成 し、他のリモートセンシングによる DEM との比較により氷河表面の高度変化を求めている。

このような数少ない空中写真を補うものとしては、1995年に米国の軍事偵察衛星の機密解除されたことにより利用可能となったCorona KH (Keyhole) 4B や Hexagon KH-9といった衛星画像がある(表1). これらの衛星画像は地表面をステレオ撮影しているため、実体視判読による地形学的研究が可能である. しかしいずれの画像も複雑な歪みを伴い、写真測量法によるDEMの作成は困難であった. 一方、1986年に打ち上げられた

フランスによる SPOT(Satellite Pour l'Observation de la Terre)衛星シリーズの HRV センサーの画像でもステレオ視は可能で、写真測量法による DEM の作成ができる(表 1). しかし、その入手価格は非常に高額である. このような理由から 1990 年代までは現地測量以外の手段によるヒマラヤ地域の DEM を入手するには、高額な SPOT HRV(High Resolution Visible)画像を購入するか、一部の例外的に撮影された空中写真を入手する以外にはなかった.

そのような状況は、2000年のスペースシャトル・エンデバーによって取得されたSRTM(Shuttle Radar Topography Mission)によって、大きく変わることとなった(表1).SRTMはCバンドと

表 2 SRTM X-band との比較から得られた SRTM C-band の表層雪の透過量 (ma⁻¹) について、Gardelle *et al.* (2013) と Kääb *et al.* (2012) の比較. Bhutan と Everest 地域、West Nepal と Spiti Lahaul 地域について Kääb *et al.* (2012) ではそれぞれ一つの地域として透過量を見積もっている。Gardelle *et al.* (2013) より引用 (CC BY 3.0).

Sub-region	Gardelle <i>et al.</i> (2013)	Kääb <i>et al</i> . (2012)	
Hengduan Shan	1. 7	N/A	
Bhutan	2. 4	2.5±0.5	
Everest	1.4		
West Nepal	N/A	1.5±0.4	
Spiti Lahaul	N/A	1.0_0.1	
Hindu Kush	N/A	2.4±0.4	
Karakoram East	3. 4	2. 4±0. 3	
Karakoram West	5. 1		
Pamir	1.8	N/A	

X バンドそれぞれで取得された DEM が一般公開 されており、Cバンドのデータは高緯度を除くほ ぼすべての地域をカバーしており米国地質調査所 (USGS: United States Geological Survey) のサイ ト (http://srtm.usgs.gov/) からダウンロードが 可能である. X バンドのデータは一部地域のみで 観測されており、ドイツ航空宇宙センター(DLR: Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt) サイト (http://www.dlr.de/) から入手可能であ る. 仕様書による標高精度は 16m (Farr et al., 2007) とあるが、実際の標高精度は 10m 程度 (Rodriguez et al., 2006) と報告されている. 氷河 研究においても C バンド SRTM は多く利用され ているが、標高依存のバイアス (Berthier et al., 2006; Berthier et al., 2007) や, 氷河涵養域での表 層雪の透過バイアス (Rignot et al., 2001; Berthier *et al.*, 2006; Nuth and kääb, 2011) などが知られて いる. 前者の標高依存バイアスは DEM の解像度 によるものであると Paul (2008) では指摘してい るが、Gardelle et al. (2012) では地形の曲率で説 明可能としている.後者の表層雪の透過バイアス については、Xバンドの波長では影響が小さいと

考えられることから、Gardelle et al. (2012) では C・X 両バンドが観測されている地域で比較することにより、その地域での C バンド SRTM の透過バイアス量を推定しており、Gardelle et al. (2013) ではヒマラヤ広域で透過バイアスを推定している。一方、Kääb et al. (2012) では、C バンド SRTM の透過バイアスをレーザー観測のICESat データ (表1) との比較によりヒマラヤ広域で推定している (表2).

1999 年に打ち上げられた Terra 衛星に搭載されている ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) センサーのデータも近赤外のバンド3においてステレオ撮影が実施されており、写真測量法によって DEM が作成可能である (表1). また SPOT HRV データを始めとする商用衛星と比べ価格は非常に低く、氷河研究のみならず多くの研究分野で活用されている. ASTER による DEM は SRTM と異なり観測幅 60 km のシーン単位であるため、広域の解析のためにはユーザーによってモザイク処理を行う必要があるのが欠点であったが、2008 年にASTER GDEM (Global Digital Elevation Model)

として全球モザイク処理を行った DEM が、日本の経済産業省と NASA (National Aeronautics and Space Administration) の協力により提供が始まった (Hayakawa et al., 2008). この ASTER GDEM は SRTM と異なり複数時期の標高のモザイクであり、特定の時間のスナップショットではないため、表面標高の変化速度を計算することができない点に留意する必要がある.

SRTM と ASTER GDEM の比較として, (1) 低標高の丘陵地においては ASTER GDEM の方 がやや優れている (Hayakawa et al., 2008), (2) 氷河の存在する急峻な山岳地域においては SRTM の方が優れている(Frey and Paul, 2012). (3) 氷河以外の地形において ICESat (Ice, Cloud, and land Elevation Satellite) データとの標高値と の比較からは GDEM の方がノイズが多い (Gardner et al., 2013) などの報告があり、全体的 には GDEM は SRTM より精度が劣るという意 見が多く見られる. また氷河涵養域のような高標 高の雪氷域では、地表面が新雪に覆われている事 が多くコントラストが低いため、ASTER のよう な写真測量法による DEM の精度は低いことが知 られている. しかしながら西ヒマラヤ (インド北 西部)ではSRTMデータには欠損が多く、このよ うな地域においては ASTER GDEM の有用性は 高い (Frey et al., 2012). その他の地域でもカラ コルム、中国の横断山脈などで SRTM の欠損が 多い地域が見られる.

ステレオ視可能であり低価格で入手可能であるという点では、2006年に打ち上げられ、2011年5月まで運用されていた ALOS(Advanced Land Observing Satellite)衛星の PRISM(Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping)センサーがあり、空間解像度に関しては ALOS PRISM では 2.5 m と ASTER 可視近赤外域の 15 m より大幅に高い能力を有していた(表 1). Lamsal et al. (2011)では写真測量法により ALOS PRISM から 2 m の高解像度 DEM を作成し、米国軍事偵察衛星 Corona の画像の歪みが小さい中央部分のみから作成した DEM と比較することにより、ネパールヒマラヤのイムジャ氷河湖の拡大とその周辺地形の変化を明らかにしている.

以上のように 2000 年以降, 安価または無償で 利用可能なリモートセンシング DEM が多く出て きたことにより、氷河表面の高度変化の研究は大 きく進歩することとなった。そしてこれらのデー タ入手の容易化に加え、近年注目されるのが過去 の衛星画像資産の活用技術の進歩である. 前述の 米国軍事偵察衛星の Corona と Hexagon には複雑 な歪みが含まれており、歪みがほとんどない画像 中央部以外の DEM の作成は困難であった. Hexagon 衛星画像については Surazakov and Aizen (2010) にて画像上の浮標 (メスマーク) の位置情 報をもとに歪み補正を行うプログラムを ENVI ソフトウェア上の IDL プログラミング言語にお いて実装した. これにより歪み補正した画像を通 常の空中写真測量ソフトウェアで処理し、DEM の作成が可能となった. Pieczonka et al. (2011) では、オーストリアの Joanneum Research グルー プにより開発された RSG (the Remote Sensing software package Graz) に含まれている Corona 歪み補正プログラムを用いて作成された DEM を 氷河表面の高度変化計算に初めて用いた.

これらのリモートセンシング DEM は、いずれ も連続的に地表面の標高を取得することで、地形 変化を空間的に把握できるのが特徴である。これ に対して最近, ある地域における氷河表面の高度 変化は同様な傾向を示すという仮定のもと、離散 的にしか標高を取得できていないが観測精度は優 れている ICESat データを用いて、ヒマラヤ周辺 の広域にて氷河表面の高度変化を離散的に求め. 空間補間により氷河変動量を求めたのが Kääb et al. (2012) である. また, Gardner et al. (2013) は 同様な手法で全球の氷河変動量を求めている. い ずれの研究も ICESat のノイズ除去や SRTM な どの他の DEM との比較、空間内挿において多く の仮定を置いているが、得られた結果は既存のリ モートセンシング研究と整合的な結果である. 現 地観測ベースの研究との比較からは系統的に小さ い氷河減少量が得られており、既存の現地観測 データには減少量の大きい氷河に選択的バイアス がある可能性を示唆している.

3. 氷河の流動速度

氷河上のある範囲における高度変化は、質量収

支(氷河消耗域においては融解量)とその範囲への氷の流出入量で決まる(Cuffey and Paterson, 2010). よって氷河変動を見るうえで、氷河の高度変化が融解の影響と氷の流出入量どちらの影響が大きいのかを見積もるためには氷河の流動速度の空間分布は重要である。また、大きなデブリ氷河において消耗域の氷河流動分布から得られる停滞域と氷河湖の発生しやすい場所には関係性があるとの報告もあり(Scherler et al., 2011)、氷河湖の発生・発達予測という点でも重要である。

リモートセンシングを用いたヒマラヤの氷河流動速度の観測としては、古くは Seko et al. (1998) がある. Seko et al. (1998) では複数時期の SPOT HRV 画像により、対応する氷河上の特徴点を手動抽出することでネパールヒマラヤのクンブ氷河の流動速度を明らかにした. 近年では、画像処理技術により異なる時期の光学画像やレーダー画像にて対応する地表点を自動抽出して面的に多くの範囲をカバーするように観測することが可能となり(Kääb, 2002)、これらはピクセル・オフセット・トラッキングやフィーチャー・トラッキングと呼ばれている(Yasuda and Furuya, 2013).

このフィーチャー・トラッキング法において, 異なる時期の衛星画像から対応する点を判定する 手法は大まかに面積相互相関法と位相限定相関の 2つの手法がある。前者は計算の際に基準窓と移 動窓のグリッド値の相関を計算し、最も相関係数 の大きい移動窓を採用するやり方である. 相関係 数を計算する際に窓の中心と周縁部で重みを変え る. 窓内のグリッド値を規格化するなど様々な手 法があるが、基本的にプログラミングとしての実 装が容易で、フィーチャー・トラッキング法が普 及し始めた頃から多く使われている(Kääb, 2002; Luckman et al., 2007; Bolch et al., 2008; Scherler et al., 2008). しかし微小な移動量の検出は苦手な ため、低解像度の衛星画像 (Landsat ETM+など) を用いる場合は流動速度の大きな氷河の流動速度 計算に限られ (Sakakibara et al., 2013). 流動速度 の小さい中央~東ヒマラヤなどの氷河では高解像 度の衛星画像が必要となる. 後者の位相限定相関 法では基準窓と移動窓の画像をフーリエ変換によ り位相成分を抽出し、2時期の位相成分から移動 量を検出する手法である。 ENVI ソフトウェアの プラグインの COSI-Corr が開発されて以降, 容易に計算ができるようになった (Leprince et al., 2007). 面積相互相関法と比べて微小な移動量も検出可能なため流動速度の小さい氷河にも適用可能である. しかし計算対象の氷河表面が, サーモカルスト・氷河上の池の消長による変化や, 氷河の屈曲部で歪みが大きいといった場合には適用が難しい. 地表面変化への頑健さという点では面積相互相関法が勝っており, 使用の際には対象の氷河に応じて適切な手法を選択する必要がある.

その他の流動観測手法としては、短い期間での 微小な流動速度の観測に有効な SAR インター フェロメトリが挙げられる。Quincey et al. (2007:2009)ではネパールのクンブ地方において、 ERS (European Remote sensing Satellite) -1/-2 SAR インターフェロメトリ (表 1) にて流動速度 の観測を行なっている。スナップショットでの流 動速度が観測できるので流動の季節変動などを見 られるという利点がある。しかし観測精度は衛星 の視線方向に強く依存するため、観測対象の氷河 の流下方向に気をつける必要がある。

4. ヒマラヤにおける氷河の特徴

4.1 デブリ氷河と氷河湖の発達

前述のとおりヒマラヤの多くはデブリ氷河が占 めており、デブリ層の存在は氷河の熱収支を通し て氷河変動に大きく影響を与えることが知られて いる (Scherler et al., 2011). このように氷河変動 にとって重要な要素であるデブリ層の厚さを間接 的に見積もる手法として、熱赤外画像を用いてデ ブリ氷河の熱抵抗値を Suzuki et al. (2007) では 求めている. この熱抵抗値はデブリ層の厚さを熱 伝導率で除した値で定義される. Suzuki et al. (2007) ではネパールヒマラヤのクンブ地方にて 熱抵抗値により間接的にデブリ層の相対的な厚さ を広域に求め、従来指摘されていた末端に氷河湖 がある氷河でのデブリ層が薄い傾向、末端に氷河 湖のない氷河で下流に行くほどデブリ層が厚くな る傾向を定量的に示すことに成功した. しかしり モートセンシングによる熱赤外バンドは一般的に 空間解像度が粗いため (ASTER: 90 m, Landsat: 60 m)、大まかな分布傾向を把握するにとどまり、 氷河の融解を促進すると考えられている氷河上の

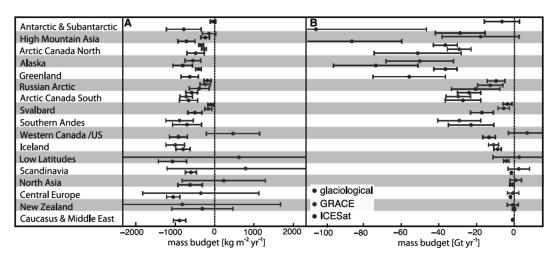


図 1 Gardner *et al.* (2013) より引用. 各地域にて3つの異なる観測手法で得られた質量変化の比較. それぞれの地域の段にて、上から順に ICESat, GRACE, 現地観測の値となっている. From (Gardner *et al.*, 2013). Reprinted with permission from AAAS.

池の存在とデブリ層の厚さの影響を分離することは難しいのが欠点である.近年デブリカバー域においてもデブリフリー域に匹敵する表面低下量が観測されており(Bolch et al., 2011: Nuimura et al., 2012: Kääb et al., 2012: Gardelle et al., 2013),氷河上の池の存在による融解促進効果(Sakai et al., 2000: 2002)の影響が大きいことが考えられ,デブリ層の厚さと氷河上の池の存在を分けて評価する手法が望まれる.

氷河湖のない氷河では末端に近づくほど流動速 度は急速に減速し、上流から供給されるデブリが 集積するためデブリ層は厚くなる。そのため末端 付近では大きい浮上速度と断熱効果による融解抑 制により氷河の低下量は小さくなる. 末端よりも やや上流側で氷河の低下量が大きくなるため、氷 河消耗域では傾斜が緩やかになっていく (Quincey et al., 2007). 一方, 末端に氷河湖のあ る場合はカービング効果(Sakai *et al.*, 1998)によ り流動速度はほとんど減速せず、上流から運ばれ てくるデブリは氷河末端から氷河湖へと供給され るためデブリ集積は進まない (Suzuki et al., 2007). そのため末端付近では小さい浮上速度と カービング効果によって氷河の高度低下と氷河の 上流方向への拡大が促進される. 氷河湖のない氷 河であっても、末端よりもやや上流で氷河の低下 が進んで、消耗域全体の傾斜が緩やか($<2^{\circ}$)に なり(Reynolds, 2000),流動速度が減速($<10\,\mathrm{m}$ a $^{-1}$)すると,氷河湖の形成および発達が進むことが知られている(Quincey et~al., 2007).Sakai and Fujita(2010)では ASTER の DEM から読み取った地形情報(デブリ氷河消耗域の傾斜と低下量)で前述の条件を表現することで,ヒマラヤのデブリ氷河で氷河湖の発達しやすさを定量化した.

4.2 広域観測で捉えられた氷河変動

Matsuo et al. (2010) や Jacob et al., (2012) の重 力衛星 GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) (表 1) による. アジア広域での氷河 変動量の推定は、従来の測地学的なヒマラヤ氷河 変動観測とは一線を画す新たな研究手法で、アジ ア高山域の氷河変動量を Matsuo et al. (2010) で は $-47\pm12\,\mathrm{Gt\,a^{-1}}$, 一方, Jacob et al., (2012) では $-4\pm20\,\mathrm{Gt}\,\mathrm{a}^{-1}$ と求めており、GRACE によるア ジア高山域の計算結果では大きな年々変動が得ら れているため、異なる解析期間を扱う際は注意が 必要だと述べている. 重力シグナルから氷河変動 とその他の成分(地下水など)を分離する際のモ デルにより結果や誤差量は大きく異なるため. Bolch *et al.* (2012) では従来のリモートセンシン グ DEM による測地学的な結果とは分けて考える 必要があると指摘している. 前述の ICESat を用 いた広域観測結果 (Kääb et al., 2012; Gardner et Hindu Kush

Karakoram

Pamir

Total

_	11445 01 411	(三012) 《大皇《旧七时》	111415445 61 61. (2010)	= 1 Jucos et al. (2012)	, IE C. 23, I C C C
	Sub-region	Gardelle <i>et al.</i> (2013) (1999-2011)	Kääb <i>et al.</i> (2012) (2003–2008)	Matsuo <i>et al.</i> (2010) (2003-2009)	Jacob <i>et al.</i> (2012) (2003–2010)
	Hengduan Shan	-3.8±3.8	-	-	-
	Bhutan	-0.9 ± 0.5	-2.1±0.6	-	-
	Everest	-1.6±0.8	-2.4±0.7	-	-
	West Nepal	-2.2±1.0	-2.2±0.8	-	-
	Spiti Lahaul	-4.1±1.3	−3. 4±0. 5	-	-

 -1.2 ± 0.4

 -0.80 ± 0.8

 -12.8 ± 3.5

表 3 ヒマラヤ及びその周辺域での質量変化の推定値 (Gt a⁻¹). Gardelle *et al.* (2013) をもとに (CC BY 3.0), Kääb *et al.* (2012) の質量変化を計算. Matsuo *et al.* (2010) と Jacob *et al.* (2012) の値を追加している.

al., 2013) や、現地観測結果と比べてみると、GRACEによる氷河変動量は現地観測結果よりは顕著に少ないが ICESat による広域観測結果とは比較的近い (図 1).

 -0.7 ± 1.0

 $+1.9\pm3.1$

 $+1.3 \pm 1.3$

 -10.1 ± 5.5

ヒマラヤでの地域的な氷河変動の傾向としては、GRACEによる観測(Matsuo et al., 2010;Jacob et al., 2012)、ICESatによる広域観測(Kääb et al., 2012;Gardner et al., 2013)、その他のリモートセンシング DEMによる広域観測(Gardelle et al., 2013)、いずれでもカラコルムとその周辺地域では氷河の停滞または増加傾向、その他の全ての地域では減少傾向が見られる点では整合的である(表 3)。このカラコルムにおける氷河の拡大傾向は、従来現地調査からも指摘されており(Hewitt, 2005)、カラコルムアノマリーと呼ばれているが明確な原因はまだわかっていない。

5. おわりに

現地観測データの蓄積の多い欧米の氷河と異なり、ヒマラヤ地域の氷河研究においてはリモートセンシングデータの活用が不可欠となる. 従来、リモートセンシングデータは現地観測データとく

らべて観測精度が劣ると考えられていたが,近年のリモートセンシング研究(e.g. Kääb et al., 2012; Gardner et al., 2013) からは逆に現地観測を実施している氷河の選択的バイアスを示唆しており,観測対象の氷河の空間代表性に対する疑問が投げかけられている. これまでの氷河観測の多くは現地観測を基準に,これまで現地で観測していたもの(e.g. 高度変化,流動速度)を空間的に補間するものとしてリモートセンシングデータを扱ってきたが,容易に入手・解析ができ当たり前のように使う時代では,リモートセンシング観測の補助データ(e.g. 地上基準点,SAR校正コーナー反射鏡)としての現地観測計画の立案も有効と考えられる.

 -4 ± 20

 -47 ± 12

文 献

朝日克彦, 1998: ネパールの新しい地形図とその問題点. 地理, 43, 81-85.

Berthier, E., Y. Arnaud, C. Vincent, and F. Rémy, 2006: Biases of SRTM in high-mountain areas: Implications for the monitoring of glacier volume changes. *Geo*-

- physical Research Letters, 33, L08502.
- 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 Sensing of Environment, 108, 327–338.
- Bolch, T., M. F. Buchroithner, J. Peters, M. Baessler, and S. R. Bajracharya, 2008: Identification of glacier motion and potentially dangerous glacial lakes in the Mt. Everest region/Nepal using spaceborne imagery. Natural Hazards and Earth System Science, 8, 1329– 1340.
- Bolch, T., T. Pieczonka, and D.I. Benn, 2011: Multidecadal mass loss of glaciers in the Everest area (Nepal Himalaya) derived from stereo imagery. *The Cryosphere*, 5, 349–358.
- Bolch, T., A. Kulkarni, A. Kääb, C. Huggel, 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.
- Cuffey, K. M., and W. S. B. Paterson, 2010: *The Physics of Glaciers*. Elsevier, Amsterdam, 704 pp.
- Farr, T.G., P. A. Rosen, E. Caro, R. Crippen, R. Duren, S. Hensley, M. Kobrick, M. Paller, E. Rodriguez, L. Roth, D. Seal, S. Shaffer, J. Shimada, J. Umland, M. Werner, M. Oskin, D. Burbank, and D. Alsdori, 2007: The Shuttle Radar Topography Mission. Reviews of Geophysics, 45, 1–33.
- Frey, H., and F. Paul, 2012: On the suitability of the SRTM DEM and ASTER GDEM for the compilation of topographic parameters in glacier inventories. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18, 480-490.
- Frey, H., F. Paul, and T. Strozzi, 2012: Compilation of a glacier inventory for the western Himalayas from satellite data: methods, challenges, and results. *Remote Sensing of Environment*, 124, 832–843.
- Fujita, K., and T. Nuimura, 2011: Spatially heterogeneous wastage of Himalayan glaciers. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 108, 14011–14014.
- Fujita, K., A. Sakai, T. Nuimura, S. Yamaguchi, and R. R. Sharma, 2009: Recent changes in Imja Glacial Lake and its damming moraine in the Nepal Himalaya revealed by in situ surveys and multi-temporal ASTER imagery. *Environmental Research Letters*, 4, 045205.
- Gardelle, J., E. Berthier, and Y. Arnaud, 2012: Impact of resolution and radar penetration on glacier elevation changes computed from DEM differencing. *Journal of Glaciology*, 58, 419–422.

- Gardelle, J., E. Berthier, Y. Arnaud, and A. Kääb, 2013: Region-wide glacier mass balances over the Pamir-Karakoram-Himalaya during 1999–2011. The Cryosphere, 7, 1263–1286.
- Gardner, A. S., G. Moholdt, J. G. Cogley, B. Wouters, A. A.
 Arendt, J. Wahr, E. Berthier, R. Hock, W. T. Pfeffer, G.
 Kaser, S. R. M. Ligtenberg, T. Bolch, M. J. Sharp, J. O.
 Hagen, M. R. van den Broeke, F. Paul, 2013: A
 Reconciled Estimate of Glacier Contributions to Sea
 Level Rise: 2003 to 2009. Science, 340, 852–857.
- Gruen, A., and S. Murai, 2002: High-resolution 3D modelling and visualization of Mount Everest. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 57, 102–113.
- Hayakawa, Y.S., T. Oguchi, and Z. Lin, 2008: Comparison of new and existing global digital elevation models: ASTER G-DEM and SRTM-3. Geophysical Research Letters, 35, L17404.
- Hewitt, K. 2005: The Karakoram Anomaly? Glacier Expansion and the "Elevation Effect," Karakoram Himalaya. Mountain Research and Development, 25, 332–340.
- 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.
- Kääb, A. 2002: Monitoring high-mountain terrain deformation from repeated air- and spaceborne optical data: examples using digital aerial imagery and ASTER data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 57, 39–52.
- Kääb, A., E. Berthier, C. Nuth, J. Gardelle, and Y. Arnaud, 2012: Contrasting patterns of early twenty-first-century glacier mass change in the Himalayas. *Nature*, 488, 495–498.
- Lamsal, D., T. Sawagaki, and T. Watanabe, 2011: Digital terrain modelling using Corona and ALOS PRISM data to investigate the distal part of Imja Glacier, Khumbu Himal, Nepal. *Journal of Mountain Science*, 8, 390-402.
- Le Bris, R., and F. Paul, 2013: An automatic method to create flow lines for determination of glacier length: A pilot study with Alaskan glaciers. *Computers & Geosciences*, **52**, 234-245.
- Leprince, S., S. Barbot, F. Ayoub, and J. P. Avouac, 2007: Automatic and Precise Orthorectification, Coregistration, and Subpixel Correlation of Satellite Images, Application to Ground Deformation Measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45, 1529–1558.
- Luckman, A., D.J. Quincey, and S. Bevan, 2007: The

- potential of satellite radar interferometry and feature tracking for monitoring flow rates of Himalayan glaciers. *Remote Sensing of Environment*, **111**, 172-181
- Matsuo, K., and K. Heki, 2010: Time-variable ice loss in Asian high mountains from satellite gravimetry. *Earth and Planetary Science Letters*, **290**, 30–36.
- Nuimura, T., K. Fujita, K. Fukui, K. Asahi, R. Aryal, and Y. Ageta, 2011: Temporal changes in elevation of the debris-covered ablation area of Khumbu Glacier in the Nepal Himalaya since 1978. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 43, 246–255.
- 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. *Journal of Glaciology*, 58, 648–656.
- Nuth, C., and A. Kääb, 2011: Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change. *The Cryosphere*, 5, 271–290.
- Paul, F. 2008: Calculation of glacier elevation changes with SRTM: is there an elevation-dependent bias? *Journal of Glaciology*, 54, 945–946.
- Paul, F., N.E. Barrand, S. Baumann, E. Berthier, T. Bolch, K. Casey, H. Frey, S.P. Joshi, V. Konovalov, R. Le Bris, N. Mölg, G. Nosenko, C. Nuth, A. Pope, A. Racoviteanu, P. Rastner, B. Raup, K. Scharrer, S. Stefen, and S. Winsvold, 2013: On the accuracy of glacier outlines derived from remote-sensing data. *Annals of Glaciology*, 54, 171–182.
- Pieczonka, T., T. Bolch, and M.F. Buchroithner, 2011: Generation and evaluation of multitemporal digital terrain models of the Mt. Everest area from different optical sensors. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66, 927-940.
- Quincey, D. J., A. Luckman, and D. I. Benn, 2009: Quantification of Everest region glacier velocities between 1992 and 2002, using satellite radar interferometry and feature tracking. *Journal of Glaciology*, 55, 596–606.
- Quincey, D. J., S. D. Richardson, A. Luckman, R. M. Lucas, J. M. Reynolds, M. J. Hambrey, and N. F. Glasser, 2007: Early recognition of glacial lake hazards in the Himalaya using remote sensing datasets. *Global and Planetary Change*, **56**, 137–152.
- Racoviteanu, A. E., F. Paul, B. H. Raup, S. J. S. Khalsa, and R. Armstrong, 2009: Challenges and recommendations in mapping of glacier parameters from space: results of the 2008 Global Land Ice Measurements

- from Space (GLIMS) workshop, Boulder, Colorado, USA. *Annals of Glaciology*, **50**, 53-69.
- Reynolds, J.M. 2000: On the formation of supraglacial lakes on debris- covered glaciers. *IAHS Publication*, **264**, 153–161.
- Rignot, E., K.A. Echelmeyer, and W. Krabill, 2001: Penetration depth of interferometric synthetic aperture radar signals in snow and ice. *Geophysical Research Letters*, **28**, 3501.
- Rodriguez, E., C. S. Morris, and J. E. Belz, 2006: A global assessment of the SRTM performance. *Photogram-metric Engineering & Remote Sensing*, 72, 249–260.
- Sakai, A., and K. Fujita, 2010: Formation conditions of supraglacial lakes on debris-covered glaciers in the Himalaya. *Journal of Glaciology*, 56, 177–181.
- Sakai, A., M. Nakawo, and K. Fujita, 1998: Melt rate of ice cliffs on the Lirung Glacier, Nepal Himalayas, 1996. Bulletin of Glacier Research, 16, 57-66.
- 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. *IAHS Publication*, 264, 119–130.
- Sakai, A., M. Nakawo, and K. Fujita, 2002: Distribution characteristics and energy balance of ice cliffs on debris-covered glaciers, Nepal Himalaya. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 34, 12-19.
- Sakakibara, D., S. Sugiyama, T. Sawagaki, S. Marinsek, and P. Skvarca, 2013: Rapid retreat, acceleration and thinning of Glaciar Upsala, Southern Patagonia Icefield, initiated in 2008. Annals of Glaciology, 54, 131-138.
- Scherler, D., S. Leprince, and M.R. Strecker, 2008: Glacier-surface velocities in alpine terrain from optical satellite imagery -Accuracy improvement and quality assessment. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3806–3819.
- Scherler, D., B. Bookhagen, and, M.R. Strecker, 2011: Spatially variable response of Himalayan glaciers to climate change affected by debris cover. *Nature Geoscience*, 4, 1-4.
- Seko, K., H. Yabuki, M. Nakawo, A. Sakai, T. Kadota, and Y. Yamada, 1998: Changing surface features of Khumbu Glacier, Nepal Himalayas revealed by SPOT images. *Bulletin of Glacier Research*, 16, 33–41.
- Surazakov, A., and V.B. Aizen, 2010: Positional accuracy evaluation of declassified Hexagon KH-9 mapping camera imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 76, 603-608.
- Suzuki, R., K. Fujita, and Y. Ageta, 2007: Spatial distribution of thermal properties on debris-covered

glaciers in the Himalayas derived from ASTER data. Bulletin of Glaciological Research, 24, 13-22. 渡邉興亜, 上田 豊, 2001: ヒマラヤ氷河調査事始め, 雪氷, 63, 147-157. Yasuda, T., and M. Furuya, 2013: Short-term glacier velocity changes at West Kunlun Shan, Northwest Tibet, detected by Synthetic Aperture Radar data. *Remote Sensing of Environment*, 128, 87–106.

Recent studies of Himalayan glaciers using remote sensing

Takayuki NUIMURA1

¹ Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, F3-1, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya * Corresponding author: nuimura@nagoya-u.jp (2013 年 6 月 14 日受付, 2013 年 8 月 20 日改稿受付, 2013 年 8 月 21 日受理)