

# 重力衛星でみるアジア高山域の

## 山岳氷河の融解

日置 幸介・松尾 功二  
へき こうすけ まつお こうじ

筆者：北海道大学理学院自然史科学専攻

### 要旨

南のヒマラヤ山脈から北の天山山脈に至るアジア高山域にはアラスカに次ぐ大量の山岳氷河が存在する。GRACE衛星で計測された2003-2009の間の重力変化は、これら氷河の融解速度が年間五十ギガトン程度であることを示した。これは過去数十年の平均融解速度を大きく上回る。アジアの氷河の急速な融解は全球的な海面上昇の一因であるだけでなく、将来のアジアの水資源に暗い影を落とす。

### 1.はじめに

夏にインド洋から吹く湿ったモンスーンはヒマラヤ山脈に衝突し、山脈南麓に世界有数の降水量をもたらす。高山域に降る夏の雪は大規模な山岳氷河となる。一方チベット高原西縁のカラコルム山脈では、偏西風がもたらす冬の降雪が大量の山岳氷河を発達させる。これらに北方の天山山脈やパミール高原の氷河を加えたアジア高山域の山岳氷河群(図1a)には、中低緯度地域では世界で最も多くの陸氷が貯蔵されており、「第三の極」と呼ばれる(Qiu, 2008)。地球上の陸氷の大部分は南極とグリーンランドの氷床が占める。しかし海面上昇の原因としては、はるかに少量の山岳氷河や氷帽の融解の寄与の方が大きい(Meier et al., 2007)。中でもアラスカ南東部の氷河群は全融解量の半分近くを占め、アジア高山域や南米パタゴニアの氷河群がこれに続く(Kaser et al., 2006)。

高度500kmの極軌道を周回する双子衛星からなるGRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment、2002年打上げ)は全球の重力場を時間分解能約一カ月、空間分解能数百キロで測定することができる。これを使うと広大な山岳氷河地域全体の質量減少を直接測ることができる。これまでに南東アラスカやパタゴニアの氷河融解量がGRACEのデータ解析によって求められた(Chen et al., 2006; 2007)。Meier(1984)は、温暖化による氷河融解量は、季節的な体

積変化に比例すると考えた。一年のうちに大量の降雪と融解を繰り返す氷河ほどわずかな温度上昇でバランスが崩れて融解量が上回るからである。Meier則は、現地調査に基づく1961-2003の平均的な氷河融解量に良くあてはまる(Dyurgerov and Meier, 2005)(図2の白丸)。過去十年程の間にGRACEや高度計などの測地学的観測で得られた融解量もこの法則にほぼ従うが、上記の二倍近い融解量を示し(図2の黒と灰色の丸)、山岳氷河の融解が全球規模で加速しつつあることを示唆する。本研究はアジア高山域に焦点を当て、GRACEデータから氷河の融解量を推定する。なお本稿は英文論文Matsuo and Heki(2009)の日本語版であり、技術的な詳細はそちらを参照されたい。

### 2. 重力変化から推定する氷河融解量

地球重力場は球面調和関数を組み合わせてモデル化され、月毎のGRACEデータはそれらの次数60次までの係数(ストークス係数)から構成される。我々は2002年4月から2009年4月までの82個の、テキサス大学が解析したレベル2データ(RL04)を用いた。短波長ノイズを軽減するため平均半径400 kmの空間フィルター(Wahr et al., 1998)を施し、ジオイドの扁平を示す $C_{20}$ 項は衛星レーザ測距による値(Cheng and Tapley, 2004)に置き換えた。またSwenson and Wahr(2006)に倣って位数11以上のストークス係数から次数5の多項式を用いて縦縞成分を軽減した。なお次数1次の地球重心の並進項は考慮していない。

アジア高山域の三点における重力の時系列を図1bに示す。精度の落ちる最初の年を除いた2003年5月-2009年4月の平均トレンドを、季節変化(年周+半年周)と直線変化を仮定して求めた。三点とも負の傾き(太い直線)を示し、氷河の融解が生じていることを示唆する。重力変化はしばしば地球表層に仮定した水の層の厚さ変化で表現される(Wahr et al., 1998)が、アジア高山域の2003-2009の期間の水厚変化の地理的分布を図3bに示す。一方図3aは全体で年間47Gtの氷河の融解量を、各々の氷河の面積に応じて比例配分し、GRACEデータと同じ空間フィルターを適用したものである。両者は良く一致する。

年間47Gtという値は現地調査に基づく1961-2003年の平均的な融解量(Dyurgerov and Meier, 2005)の約二倍であり、アラスカやパタゴニアと同様な氷河融解の加速がアジア高山域でも進行していることを示す。一般にヒマラヤのような夏降雪型の氷河が温暖化に敏感である(Fujita and Ageta, 2000)ことから、妥当な結果といえる。図1bの重力時系列をみると、減少は必ずしも直線的でない。中でもB点は前半の増加が後半で減少に転じている。この地域の氷河はヒ

マラヤと対照的に冬季積雪型であり、その経年変化の挙動も異なるのであろう(Hewitt, 2005)。

インド北部では灌漑のための過剰な地下水汲み上げが、地下水の水位低下や水質低下などの問題を引き起こしており、パンジャブ、ハルヤナ両州では年間1-2 mに及ぶ地下水位の低下が報告されている。本研究では北部インド平地に10Gtの地下水の年間減少率を仮定した(図3の破線の四角の内部)。この問題に関してGRACEデータに基づく二つの論文が最近発表された。Rodell et al. (2009) は北部インドで17.7 Gtの地下水が毎年減少しているとし、Tiwari et al. (2009) は、北部インドからバングラデシュにかけて広大な地域で54 Gtの地下水が毎年失われていると報告している。北部インドはヒマラヤから数百キロしか離れておらず、GRACEの空間解像度では山岳氷河の融解と平地の地下水枯渇は分離できない。上記2論文の地下水減少量の見積もりはいずれも我々の仮定より有意に大きい、そのかなりの部分は氷河融解の信号が漏れ込んだものだろう。

### 3. 考察

#### 3-1. 重力変化とチベット高原の上昇

世界の屋根として知られるチベット高原は地質学的な時間スケールで蓄積された地殻の厚化と上昇の結果である。地質年代におけるチベット高原の標高は15Maから今まではほぼ一定だったと思われる(Spicer et al., 2003)。また過去35Maの間チベット高原は南から北へ順次成長していったらしい(Rowley and Currie, 2006)。これらから現在の上昇速度は北部チベットやヒマラヤ山脈を除くと年間数mmを超えないだろう。一般に造構的な隆起は極めてゆっくりでありアイソスタシーを大きく乱さず(フリーエア重力異常の変化を伴わず)進行する。最近のヒマラヤの上昇「パルス」でさえ90万年を要しており(Amano and Taira, 1992)、過去の氷床の消失に対する粘性応答である後氷期回復(GIA, Glacial Isostatic Adjustment)の時間スケールより二桁程長い。ヒマラヤ山脈では上昇とともに浸食によって大量の土砂が海に運ばれている。浸食は上昇の結果であり、上昇より速く進行することはない。したがって浸食も重力を大きく変化させることはないであろう。

一方GIAは、マントル物質の流れによる質量の実質的な増加を伴うためGRACEでも重力増加が観測される(Tamisiea et al., 2007)。そのため現在山岳氷河の融解が進行する地域でGIAが生じていれば、氷河融解による重力減少が部分的にマスクされ、融解量を低く見積もる恐れがある(e.g. Chen et al., 2007)。チベット高原には最終氷期に大規模な氷床はなかったと考

える研究者が多いが、一枚の大きな氷床に覆われていたという説も根強い(Kaufmann and Lambeck, 1997; Wang, 2001; Kaufmann, 2005)。次に全地球測位システム(Global Positioning System, GPS) 観測のデータを用いて考察する。

#### 3-2. GPSでみたチベット高原の現在の隆起

チベット高原を含む中国の水平速度場はGPS観測によってかなり良くわかっている(e.g. Wang et al., 2001)。またヒマラヤ山脈は年間5 mmを超える速さで隆起しつつあるらしい(Bettinelli et al., 2006)。しかしチベット高原内部の上下速度については文献が少なくまた精度も悪い(e.g. Xu et al., 2000)。ラサ(LHAS)は十分な長さの連続観測データが存在するチベット高原唯一のGPS点として国際地上基準座標系(International Terrestrial Reference Frame, ITRF)の一角を占める。ここではLHASの上下速度はほぼゼロとされていた(Altamimi et al., 2007) が、これはチベット高原の平均的な上昇速度を年間8 mmとしたXu et al., (2000)と矛盾する。

ITRF2005 (Altamimi et al., 2007)から提供されているLHASの鉛直座標の時系列には、モンスーンに伴う降水の荷重に起因する大きな季節変動が見られる(松尾、日置、本特集号)。その中から季節変化が規則的な2000.5年以降のデータだけを取り出すとLHASの上下速度は年間約3 mmの有意な隆起となる。この隆起は造構的なのか、或いはGIA起源なのだろうか。Kaufmann (2005)によると、チベット高原にかつて大きな氷床があったとするGIAのモデル(TIBET-4 model)は、ラサ付近に年間3 mm程度の隆起を予測し、GPSの結果と符合する。チベット高原でTIBET-4モデルに基づくGIAが生じていると仮定し、それがもたらす重力増加を差し引くと、アジア高山域の氷河融解量は年間61 Gtに上方修正する必要が生じる(図2の三角)。しかしチベット南部に位置するラサはヒマラヤ山脈に比較的近いことから、造構的な隆起がここまで及んでいる可能性もある。その場合は隆起に伴う重力変化が無視できるため、アジア高山域の氷河融解量の推定値は年間47 Gtのままで良い。現時点ではチベット高原に大規模な氷床が存在した確固たる証拠に乏しいため、図2ではアジア高山域の氷河融解速度の推定値として、GIAの影響を考慮したものと無視したものの双方を併記している。将来チベット高原全域を密に覆うGPS点で上下速度が得られればこの問題も解決するであろう。

#### 3-3. 山岳氷河の融解と海面上昇

アジア高山域における年間47 Gtの氷河融解は、海

水準の変化に換算すると年間 0.13 mmの上昇となる。図2の比例関係を世界全体の山岳氷河の季節的な体積変化である~661 km<sup>3</sup> (Meier, 1984)に外挿すると、世界中の山岳氷河は年間264 Gt融けていることになる。これは年間0.73 mmの海面上昇に相当するが、この値はIPCCの報告(Bindoff et al., 2007)にある山岳氷河の融解による1993-2003の期間の海面上昇の値に近い。

アジア高山域の氷河の融解は、海面上昇に加えてもう一つの社会問題をもたらす。多くの人口を抱えるアジアを流れる大河川の多くがその地域に源流を持つ。ガンジス川、インダス川、揚子江、黄河、メコン川等である。例えばインダス川とガンジス川の流量は雨季と乾季で大きな差を示すが、乾季における流量の多くは氷河の溶け水に由来する。アジア高山域の氷河消失は、乾季における川の流量の激減を意味し、現に著しい水位低下を示す地下水と相まって将来の農業への深刻な影響が懸念される(e.g. Barnett et al., 2005)。

#### 参考文献

- Altamimi, Z. et al., J. Geophys. Res. 112, B09041, doi:10.1029/2007JB004949 (2007).
- Amano, K., Taira A., Geology 20, 391-394 (1992).
- Barnett, T. P. et al., Nature 438, 303-309 (2005).
- Bettinelli, P. et al., J. Geod. 80, 567-589 (2006).
- Bindoff, N. L. et al., 2007. in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge Univ. Press, New York, 2007), Chap.5.
- Chen, J. L. et al., Earth Planet. Sci. Lett. 248, 368-378 (2006).
- Chen, J. L. et al., Geophys. Res. Lett. 34, L22501, doi:10.1029/2007GL031871 (2007).
- Cheng, M., Tapley, B. D., J. Geophys. Res. 109, B09402, doi:10.1029/2004JB003028 (2004).
- Dyrurgerov, M., Meier M.F., *Glaciers and the Changing Earth System: A 2004 Snapshot.*, Occasional Paper 58, Institute of Arctic and Alpine Research, University of Colorado, Boulder, 118pp (2005).
- Fujita, K., Ageta, Y., J. Glaciology 46, 244-252 (2000).
- Hewitt, K., Mountain Res. Development 25, 332-340 (2005).
- Kaser, G. et al. Geophys. Res. Lett. 33, L19501, doi:10.1029/2006GL027511 (2006).
- Kaufmann, G., J. Geodyn. 39, 111-125 (2005).
- Kaufmann, G., Lambeck, K., Quat. Res. 48, 269-279 (1997).
- Matsuo, K. and K. Heki, Earth Planet. Sci. Lett., doi:10.1016/j.epsl.2009.11.053, 2009.
- 松尾功二、日置幸介、月刊地球 (本特集号)
- Meier, M. F., Science 226, 1418-1421 (1984).
- Qiu, J., Nature 454, 393-396 (2008).
- Rodell, M. et al., Nature 460, 999-1002 (2009).
- Rowley, D. B., Currie, B. S., Nature 439, 677-681 (2006).
- Spicer, R. A. et al., Nature 421, 622-624 (2003).
- Swenson, S.C., Wahr, J., Geophys. Res. Lett. 33, L08402, doi:10.1029/2005GL025285 (2006).
- Tamisiea, M. E. et al., Science 316, 881-883 (2007).
- Tiwari, V. M. et al., Geophys. Res. Lett. 36, L18401, doi:10.1029/2009GL039401 (2009).
- Wahr, J. et al., J. Geophys. Res. 103, 30205-30229 (1998).
- Wang, H., Geophys. J. Int. 144, 448-458 (2001).
- Wang, Q. et al., Science 294, 574-577 (2001).
- Xu, C. et al., Earth Planets Space 52, 735-739 (2000).

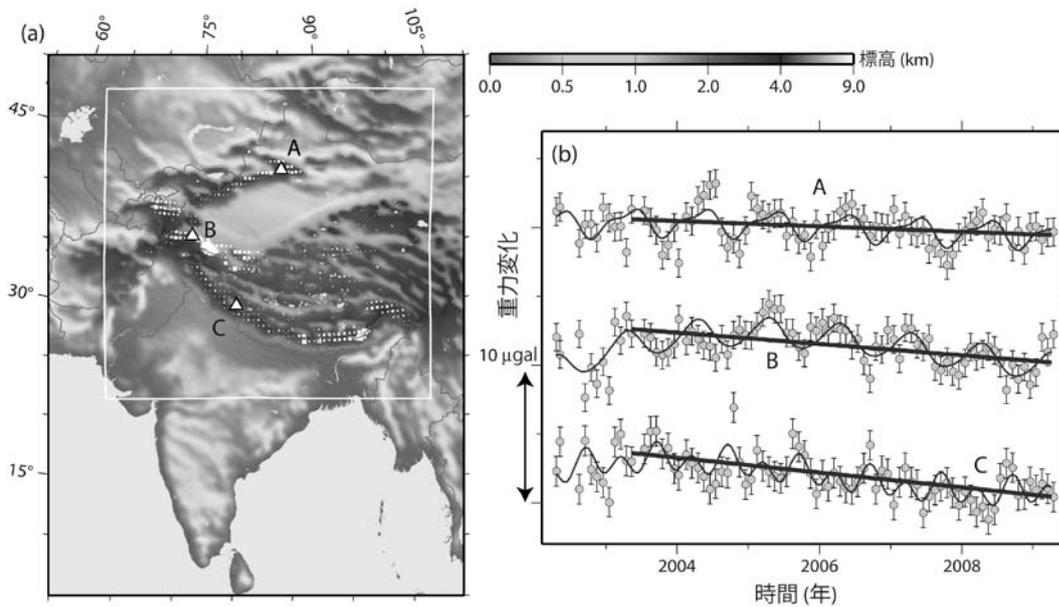


図 1. (a) アジア高山域における氷河の分布 (白い小さな点)。A, B, C の三点における GRACE で観測された重力変化を (b) に示す。エラーバー ( $1\sigma$ ) のついた白丸が一月毎の重力の値、曲線はそれらを三次多項式と季節変化でモデル化したもの。太い直線は 2003 年 5 月から 2009 年 4 月にかけての平均トレンドを示す。(a) の白い四角が図 3 で示される領域に相当する。

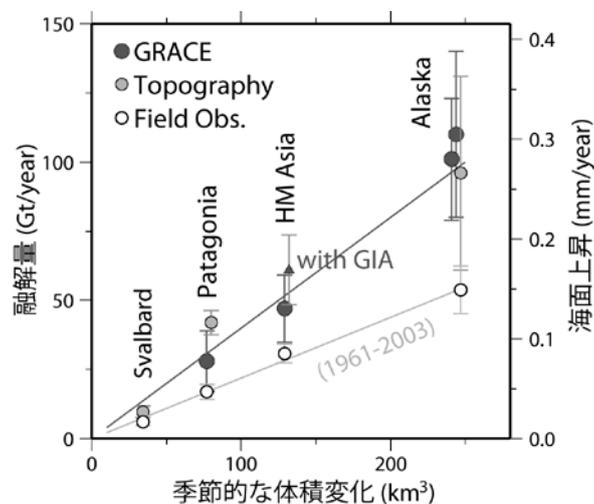


図 2. 世界の主な山岳氷河群の年間融解量の重力(黒)、地形 (灰色)、現地観測 (白) による推定値 (縦軸) は、体積の季節変化 (横軸) とほぼ比例関係にある (Meier, 1984)。もしチベット高原で後氷期回復 (GIA) が起こっていれば、融解量の推定値は三角で示すように上方修正される。データの詳細は Matsuo and Heki (2009) を参照のこと。年間融解量に対応する海面上昇速度を縦軸の右側に示す。現地観測から見積もった 1961-2003 の平均的な融解量は Dyurgerov and Meier (2005) による。重力や地形からの推定はいずれも過去十年程のものであり、氷河の融解が加速していることを示す。

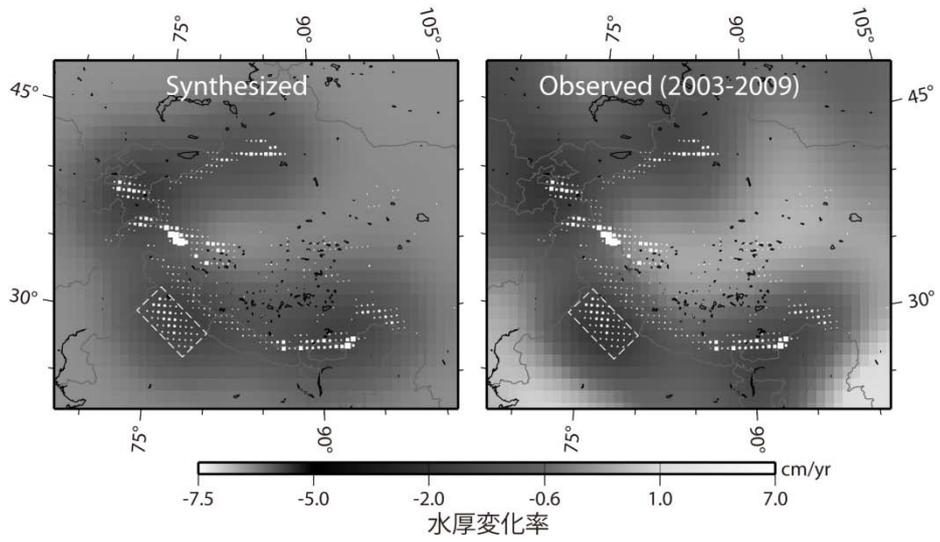


図 3. アジア高山域 (図 1a の四角の領域) において GRACE で観測した重力変化を地表の水の厚さの変化に換算したもの (右側)。左側は観測に近いパターンを再現するために、年間 47 Gt の氷河 (白い点) の融解と年間 10 Gt の北部インドの地下水の減少 (破線の四角の内部) を仮定して GRACE と同じ空間フィルターを施したもの。