

重力測定衛星 GRACE を用いた ヒマラヤ高山帯における氷河質量変動の検出

ESTIMATION OF GLACIER MASS CHANGES IN HIMALAYA ALPINE REGION
INFERRED FROM GRACE SATELLITE GRAVIMETRY

佐々木 織江¹・Hyungjun Kim²・平林 由希子³・山田 花グレニス⁴・鼎 信次郎⁵
Orië SASAKI, Hyungjun KIM, Yukiko HIRABAYASHI, Hannah G. YAMADA, Shinjiro KANAE

- 1 学生会員 東京工業大学大学院 理工学研究科 学生 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)
2 非会員 工博 カリフォルニア大学水循環モデルセンター 研究員 (240K Rowland Hall, Irvine, CA, USA 92697)
3 正会員 工博 東京大学 工学系研究科総合研究機構 准教授 (〒113-0032 東京都文京区弥生 2-11-16)
4 学生会員 東京工業大学 情報理工学研究科 学生 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)
5 正会員 工博 東京工業大学 情報理工学研究科 准教授 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

The disappearing of glaciers in Himalaya alpine region, in where hundreds of millions of people rely on melting glaciers for water, has been reported by recent studies. However, the estimation of change in glacier mass still has a significant challenge because of a limited observational methodology to understand hydrological processes in Himalaya region. In this study, we estimate the ice loss rate for the Himalaya alpine region for the period January 2003 through December 2008, mainly using terrestrial water storage (TWS) variations observed by the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE). To separate the effect of the other TWS components, simulated soil moisture, snow mass and river storage are calculated by using the Minimal Advanced Treatment of Surface Interaction and Runoff (MATSIRO) land surface model (LMS). The methodology using GRACE data and LMS result is similar to one of previous studies. In addition, we also use groundwater withdrawal data, and our estimated glacier mass change is compared with glacier model (HYOGA) results. Finally, it is estimated that the melting rate of the glacier mass over target region is approximately 4.7 Gt/year. Although we believe that our methodology is the newest comparing previous one, our estimated value is much underestimated than HYOGA results. Our methodological experience and information will be helpful to better understand glacier mass change.

Key Words : glacier, Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE), himalaya alpine region

1. 研究背景・目的

山岳氷河は貴重な水資源であり、世界人口の 1/6 以上の人々が氷河の融解水が流入する地域で生活している¹⁾。特にアジア圏では 14 億人以上の人々がインダス川、ガンジス川、ブラフマプトラ川、長江、黄河の水を利用しており、これら巨大河川に水を供給しているヒマラヤ高山帯の氷河は重要な役割を担っている。中でもインダス川とブラマプトラ川の流域では、氷河の融解水が果たす役割が特に大きい²⁾。

氷河が下流地域に対して果たす役割が大きい理由は、気温への感受性にある。雨期に涵養した氷河は、ゆっくりと下流へ移動し、その融解水を河川へと流すため、下流地域の水不足を緩和し農工業を豊かにしてきた。しかしながらその感受性ゆえ、気候変動の影響を受けやすく、ヒマラヤ高山域では近年著しい氷河の後退が観測されている³⁾。気候変動が引き起こす過剰な融解は、洪水や雪崩、泥流を引き起こし、さらに長期的には下流地域で得られる淡水量を減少させる^{4),5)}。

このような背景の中、ヒマラヤ高山帯における氷河の質量変動の検出・予測は早急の課題であるが、ヒマラヤ

における氷河の質量観測データは非常に少ない。これは、ヒマラヤの地形の複雑さや個々の氷河面積の小ささ、上空の雲の厚さ等に起因する。また実測値の不足がシミュレーションの精度向上を阻んでいるという問題もある³⁾。

一方、2003 年に打ち上げられた双子衛星 GRACE (Gravity Recovery and Climate Experience) は、地球の重力場を観測し、そこから地球表面における貯水量の変化を検出することができる。GRACE はこれまでに南極の氷床の質量減少⁶⁾、インドの地下水減少⁷⁾、河川流量の変動⁸⁾等の検出に成功しており、GRACE を用いればヒマラヤにおける陸貯水量の変動を直接観測することができる。しかしながら、GRACE が観測できる値は、地下水、河川流量、積雪量等、あらゆる陸貯水変動の合計値であるため、要因の特定が難しいという弱点を持っている。事実、ヒマラヤ周辺で GRACE により観測された質量減少シグナルについては、地下水の取水が原因であるという意見⁷⁾と、氷河の後退が原因であるという意見⁹⁾の二つが発表されており、真相は解明されていない。

そこで本研究では、GRACE を用いてヒマラヤ周辺の全質量変動を調べ、その後、陸面モデル、地下水の取水量予測、氷河変動モデルを用いてその要因を分離するこ

とで、氷河の質量変動を推定することを試みた。次章で利用データおよび手法を説明し、3章にて結果の検証、4章にてまとめと結論を述べる。

2 データと手法

(1) 対象地域

ヒマラヤ高山域における氷河質量変動を求めるに当たり、図1(a)に示す4つのエリア(A, B, C, D)を対象とした。これは、1グリッド当たりの氷河面積が比較的大きい地域を3地域(A, B, C)と、GRACEによる減少シグナルが目立つ地域を1地域(D)選出したものである。また、前章でも述べたように、この4地域の付近に見られる減少シグナルについては、対立する二つの論文が発表されているため、この地域を対象とすることで真相の解明も期待できる。なお、A, B, Cの3地域はいずれも10,000km²を越える氷河面積を有している。参考のため、図1(b)に氷河の面積分布を示す。

(2) GRACEによる全陸貯水量変化

対象地域における陸貯水量変動を調べるため、GRACEによる観測データ(2003年1月から2007年12月までの全95個)を使用した。

GRACEは重力測定ミッションの一環で2002年に打ち上げられた衛星であり、地球の重力場を時間解像度1ヶ月、空間解像度1度で観測している。GRACEによって観測された地球の重力場はしばしば球面調和関数で表され、その係数(ストークス係数)は60次まで計算される。一ヶ月という短期間で変化する重力場は、主に地球表面の貯水量の変化に依るため、ストークス係数の変化から陸貯水量の変化を計算することができる。この計算はいくつかの研究機関によってなされており、陸貯水の変化量まで変換されたデータをレベル2データと呼ぶ。このレベル2データは、南極から北極へと走るストライプ状のノイズを含んでおり、ノイズの除去が課題となっている。それに対して、ストークス係数同士の干渉を取り除くことでノイズを大幅に軽減させたレベル2データがテキサス大学より2010年8月に発表された(CSR,

Release04.1, ss201008)。このデータはさらに300kmのガウジアンスムージングも適用することで、ノイズがほぼ完全に除去されている。そこで本研究では、このテキサス大学によって解析されたレベル2データを使用した。

(3) 陸面モデル MATSIRO

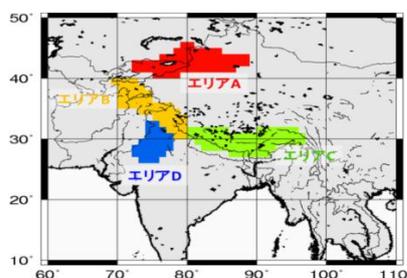
GRACEから得た全陸貯水量の変化を各要因(地下水、河川流量、積雪量etc...)に分離していくため、陸面モデルを用いて、土壌水分、河川流量、積雪量を2003年1月から2007年12月までの期間で計算した。

本研究で用いたモデルは、陸面モデル Minimal Advanced Treatment of Surface (MATSIRO)¹⁰と河川流出モデル Total Runoff Integrated Pathway (TRIP)¹¹を枠組みとして構築されており、河川貯留量を計算できる陸面モデル⁸⁾である。時間解像度と空間解像度はGRACEと等しく、それぞれ1ヶ月、1度である。

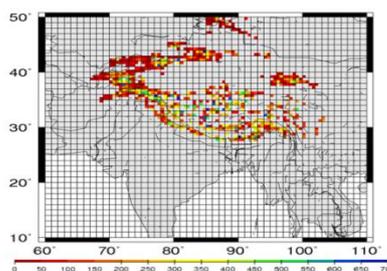
陸面モデルの出力の精度は入力降水量データに大いに依存するため、複数種類の降水量データを用いる方が精度良く出力できる。そのため入力には表2に示す5種類の降雨量データを用いた。さらに入力に用いる河川流速は、0.5m/s~0.8m/sの4種類の流速を選出し、最も流量を良く表現できているものを用いた。これは、本研究の対象地域のような積雪の融解の影響を受けやすい流域での流速は比較的速いためである。

以上から得られた土壌水分、河川貯留量、積雪量の合計をモデルから出力した陸貯水量(氷河を含まない)とし、以後「MATSIROによる陸貯水量」と略す。なお、ここでの土壌水分は浅い地下水貯留量の変動も表している。この陸貯水量変化とGRACEから得た陸貯水量変化との差から氷河の融解量を推定する。

なお、モデルの出力をGRACEの観測値と比較するためには、GRACEの値に適用された複数のフィルターと同様のフィルターを適用し、同様の誤差を与える必要がある。そのため本研究ではまず、モデルの出力を60次までのストークス係数へ展開した。その後、60次までのストークス係数から質量変動を再計算すると共に、半径300kmのガウジアンスムージングを適用することで、



(a) 対象地域



(b) 氷河の面積分布 [km²]

図-1 対象地域

表-1 本研究で用いた降雨量観測データの詳細

Product	Type	Spat. Res.	Temp. Res.	Period
GPCC full [Rudolf and Rudel, 2005]	Gauge	1.0°	Monthly	1901 – 2007
PREC/L [Chen et al., 2008]	Gauge	1.0°	Monthly	1948 –
CPC unified [Chen et al., 2008]	Gauge	0.5°	Daily	1979 –
GPCP v2 [Adler et al., 2003]	Satellite-Gauge	2.5°	Monthly	1979 –
CMAP [Xie and Arkin, 1997]	Satellite-Gauge	2.5°	Monthly	1979 –

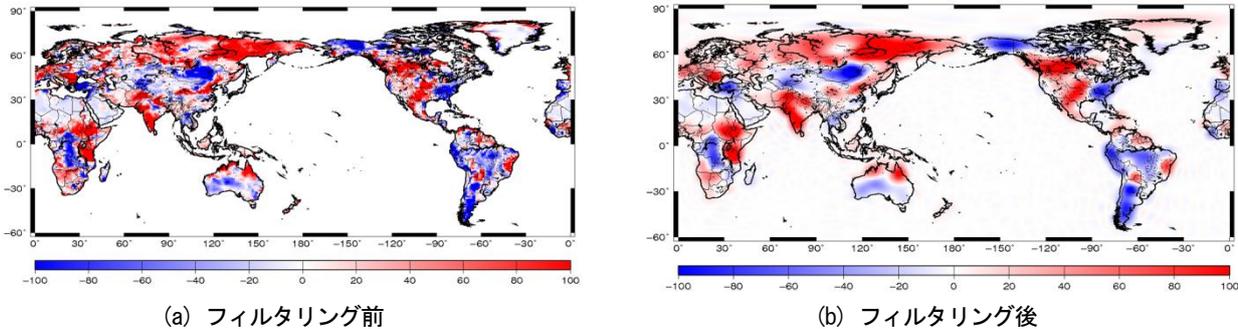


図-2 2003年から2007年間の陸貯水変化[mm]

GRACE のデータ形式と同様の形へと変換している。このフィルターにより、モデルから出力された値は空間的に広がり、局所的なシグナルは周辺に分布される。MATSIROによって計算された2003年から2007年までの陸貯水量変化の図を図2(a)に、上記フィルター適用後の図を図2(b)に示す。

(4) 地下水取水量の推定

(3)では、ヒマラヤ高山域における陸貯水量変化の要因として、大気陸面モデルを用いて土壌水分、河川貯留量、積雪量を計算した。しかしヒマラヤ高山域において他に考える必要がある要因として、地下水の取水量が存在する^{8),12)}。そこで本研究では、国別取水統計値をもとにし、以下の方法で地下水取水量の推計した。

地下水取水量を推計するに当たり、まず、全取水量を目的ごとに3種類（農業用水+工業用水+生活用水）に分類し、各々を空間解像度0.5度で推計した。その後、全取水量中の地下水取水量が占める割合を求めることで、地下水取水量を推計した。なお、推定に使用したデータは、国別生活用取水データ、国別工業用取水データ、国別工業用取水データ（AQUASTAT1）、灌漑地面積の時系列全球分布（HIM）、人口分布（HYDE）、および国別の地下水取水（AQUASTA, WRI, IGRAC）である。推計方法の要点は以下の通りである。

各取水量（農業用、工業用、生活用）を求めるに当たり、まず、国別の灌漑地当たり農業用取水量、国別の人口一人当たり工業用取水量、国別の人口一人当たりの生活用取水量を算定した。それらを、農業用取水量は灌漑地に比例し、工業用および生活用取水量は人口分布に比例するという仮定のもと、灌漑地分布データおよび人口

分布データと組み合わせることで空間解像度0.5度の取水量分布を推計した。続いて、国別の地下水取水量データと上記方法で得た全取水量を用いて、全取水量中に占める地下水取水量の割合を国別に推定した。全取水量中に占める地下水取水量の割合と全取水量とを0.5度グリッドごとに乗ずることで、空間解像度0.5度の地下水取水量分布を推定した。

次に結果の検証を行った。国土が大きく、灌漑農業がさかんであり、かつ国内の取水量統計値が揃っている地域として、アメリカ合衆国およびインドを選出し、検証を行った。州ごとに統計値と推定値を比較し、決定係数を求めたところ、アメリカ合衆国では $R^2=0.77$ 、インドでは $R^2=0.85$ という値を示した。

(2)~(4)のデータを用いれば、GRACEより得た全陸貯水量変化から、土壌水分、河川貯留量、積雪量、地下水取水量を分離することができる。対象地域であるヒマラヤ高山帯においては、上記の4種類の要素を分離した後に残ったシグナルは、氷河の変化量であると仮定できる。

(5) 氷河の質量変化推定

一方で、近年の氷河数値モデル研究の発達により、数値モデルによる氷河の動向を算出することが可能となった。本研究では、氷河の質量収支を計算できるモデルHYOGA¹³⁾を用いて氷河の質量変化を算出し、(4)までに求めた氷河質量変化の値と比較した。

HYOGAは降水量と気温を入力とし、時間解像度1日、空間解像度0.5度で氷河の質量収支を計算するモデルである。このHYOGAによって得られた2003年1月から2007年12月までの計算結果を使用した。

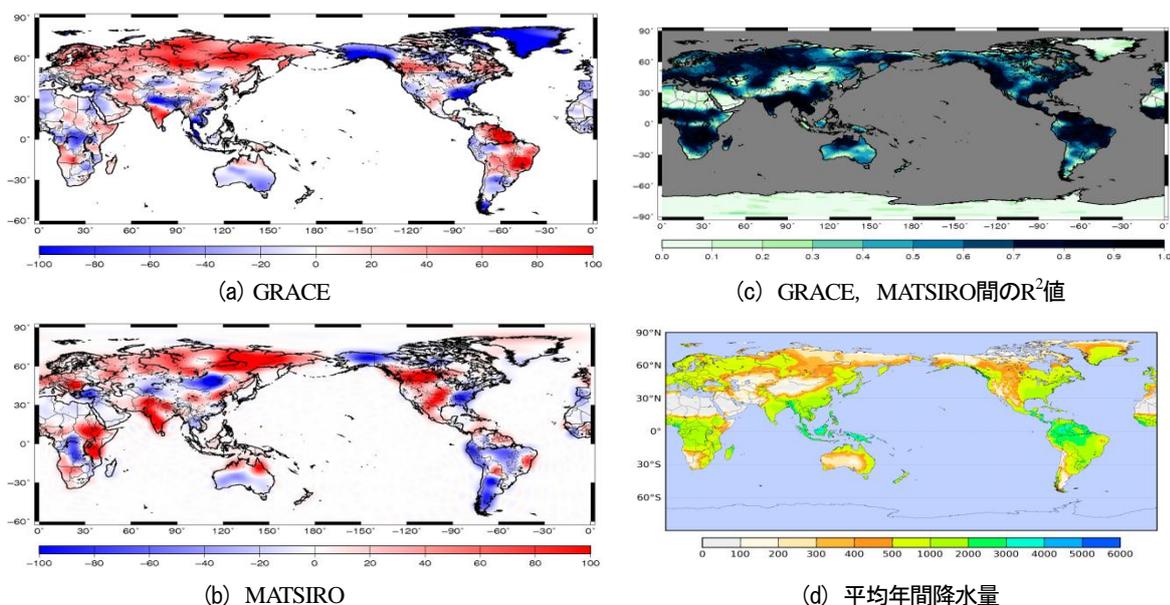


図-3 2003年から2007年間の陸貯水変化[mm]

3 結果と考察

(1) 空間分布

陸貯水量変化の空間特性を見るため、2003年から2007年間の陸貯水変化量の空間分布を解像度1度で求めた。図3の(a)、(b)はそれぞれGRACEから得た貯水量変化、およびMATSIROから得た貯水変化量である。なお、単位は水当量[mm]であり、海上の値は計算していない。

全体的な傾向は一致しているように見えるが、この二つの結果を定量的に比較するため、グリッドごとに時系列データの相関(2003年1月～2007年12月)を取った。図3(c)がその決定係数 R^2 値である。図より、降水量の少ない地域において R^2 値が小さい傾向が読み取れる。これは、乾燥地帯では陸貯水量の絶対値が小さいために、 R^2 値が小さくなる傾向があるためである。参考のため、平均年間降水量の分布図を図3(d)に示す。次に乾燥地域を除いた地域に目を向けると、 R^2 値は概ね0.7以上の値を示している。これはGRACEによって観測された全陸貯水変動と、MATSIROによって出力された陸貯水(土壌水分、積雪量、河川流量の和)変動とがおおよそ一致していることを示している。一方で、乾燥地域でなく、かつ、 R^2 値が低い地域では、MATSIROの出力(土壌水分、河川貯留量、積雪量)に含まれない他の質量変化要因が働いている可能性が高い。

以上をふまえて対象地域における決定係数に注目する(図4(d))。このうち、中国北西部からモンゴル全域およびパキスタンより西は乾燥しており、 R^2 値は必然的に低くなる地域である。しかしながらインド北部はその限りではなく、 R^2 値の小ささは他の変動要因の存在を予測させる。また、図4は対象地域の拡大図であり、(a)、(b)、(c)はそれぞれ、図3(a)、(b)、(c)に対応している。(d)は地下水の取水量推定値の空間分布にGRACEと比較するため

のフィルターを適用したものである。

地下水の取水量分布図(d)で高い値を示す地域において、(a)、(b)を見ると、モデルの出力(b)では減少シグナルが見られないが、GRACEの観測値(a)では強い減少シグナルが見られる。また、GRACEの観測値は、ブラフトラ川流域からキルギス近辺にかけて、くの字型に減少シグナルを見せている。これはヒマラヤ高山域の形と一致しており、氷河融解の影響も拾い上げられていると考えられる。

(2) 時系列変化

次に、GRACEの観測値およびMATSIROの計算結果から得た陸貯水量の時系列変化を対象地域(エリアA~D)ごとに比較する。図5に、2003年1月から2007年12月までの5年間の陸貯水量、およびその線形トレンドを示した。青の実線がGRACEによって観測された陸貯水量変化、点線がトレンド、同様に赤色がMATSIROによる計算結果である。エリアAにおいては、MATSIROとGRACEの線形トレンドはほぼ一致しているが、残りの3地域(B、C、D)においては、MATSIROから出力した貯水量の上昇傾向に、GRACEの観測した陸貯水量は減少傾向にある。

(3) 氷河質量変化量とその検証

(2)より、MATSIROから得られる陸貯水量(土壌水分、河川貯留量、積雪量の合計)の変化率と、GRACEによって観測された全陸貯水量の変化率との間には差があり、全ての地域においてGRACEによる観測値の減少率の方が大きいことがわかる。これは、GRACEが地下水取水と氷河融解のシグナルを捉えたものであると仮定できる。そこで、対象地域4地域において、GRACEによる陸貯水変化量とMATSIROによる陸貯水変化量(土壌水分、

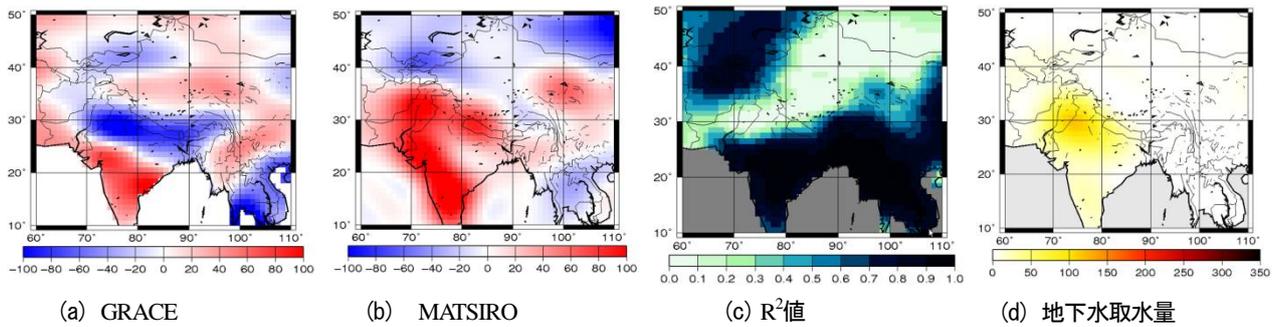


図-4 2003年から2007年間の陸貯水変化[mm]

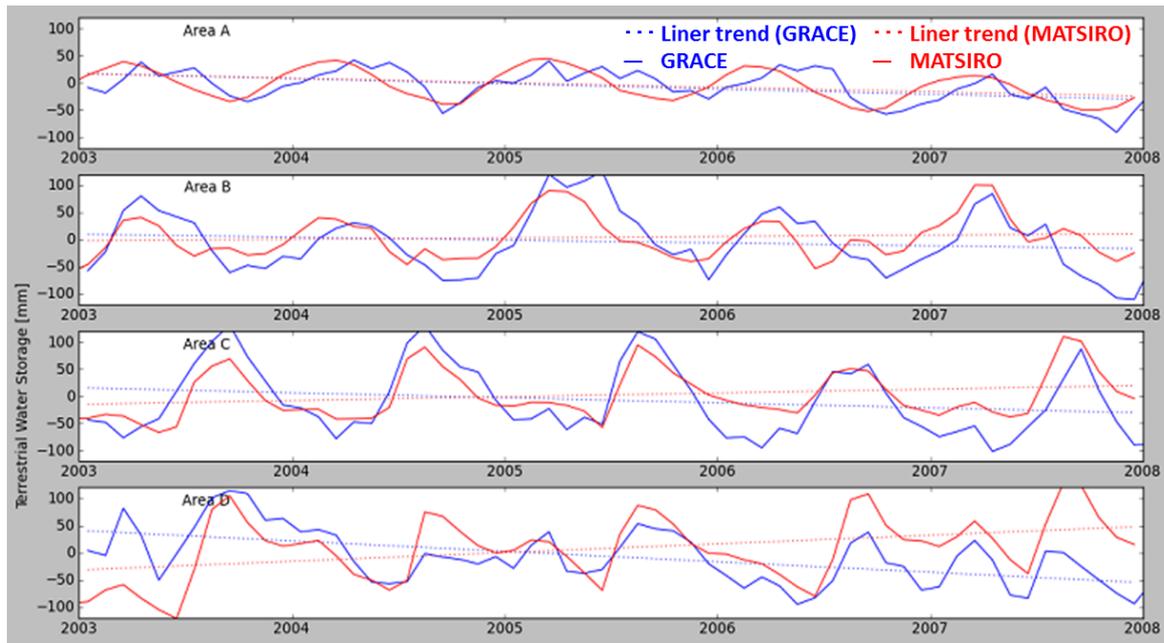


図-5 陸貯水量の経年変化[mm]

河川貯留量、積雪量)との差を計算し、そこから地下水取水量を差し引くことで氷河の融解量を推定した。表2に結果および算出に用いたGRACEによる陸貯水変化量、MATSIROによる陸貯水変化量、地下水取水量推定値、HYOGAによる計算結果を示す。

表2より、本研究で用いた推計方法では、エリアA、B、およびDにおいて、氷河が増えているという結果になった。しかしながら、HYOGAによる計算結果においても、過去の観測結果においても、この地域の氷河は減少しており、この結果と一致しない。

GRACEを用いた過去の研究には、氷河を推定した研究も地下水を推定した研究も存在するが、どちらも他方の要因を軽視するものである。両要因が混ざり合う南アジアにおいて、GRACEという周囲の減少シグナルの影響を受けやすいツールを用いて推定する場合、双方の変化量を推定し、さらにシグナルの空間的漏洩を考慮することが重要である。例えば、Rodell et al., (2009)は、エリアDにおけるGRACEの減少シグナルは、ほぼ全て地下水の減少であると言っており、氷河の影響を軽視している。エリアDは、内部にこそ氷河は全く存在しないが、

周辺地域に氷河が存在するため、氷河の影響が漏れ混む可能性が強い。これは、GRACEのデータが球面調和級数の和で表されており、半径300kmのガウジアンスムージングを適応されていることに起因している。そのためエリアD内部のみでなく、周辺部分の影響を考慮する必要がある。本研究では、HYOGAの出力をGRACE同様に球面調和級数に展開した後、ガウジアンスムージングを適用したことにより、エリアD内部において氷河融解シグナルの漏洩を検出した(表2より2.1km³/year)。

以上をふまえると、氷河と地下水のどちらか一方を軽視して結論を出すのではなく、全てを考慮することが重要であると言える。本研究で推定した氷河の融解量推定値こそ現実の値と相反するものであったが、各要因を特定するこの手法は、GRACEの持つ「空間像解の悪さ」と「変化要因特定の困難さ」という2つの弱点をカバーするものである。地下水の取水量や、陸貯水量、氷河融解量等のより細かい情報を集め、各変動要因の推定をより正確に行うことで、実地観測の難しいヒマラヤ高山帯の氷河を検出する有効な手法へと成長することが期待できる。

表-2 対象期間（2003–2007）における陸貯水量変化および氷河質量変化。GRACEによって観測された陸貯水量，MATSIROを用いて出力した陸貯水量（土壌水分，河川流量，積雪量），地下水取水量の推定値，GRACEからMATSIROと地下水推定値を引くことで求めた氷河の質量変化，および水文モデルHYOGAを用いて計算した氷河質量変化を記載した。なお，これらの値は全てGRACEと比較するためのフィルター適用後の数字である。

		A	B	C	D
全陸貯水量変化(GRACE)	km ³ /year	-5.1	-2.5	-6.1	-5.8
陸貯水量(MATSIRO)	km ³ /year	-4.4	1.2	4.6	4.8
地下水取水量の推定値	km ³ /year	1.5	13.3	6.0	30.5
氷河質量変化(This study)	km ³ /year	+0.8	+9.6	-4.7	+19.9
HYOGA 出力	km ³ /year	-8.9	-10.3	-14.2	-2.1

4 結論とまとめ

本研究では，重力測定衛星 GRACE が観測した全陸貯水量変化から，変化要因を分離していくことで氷河の融解量を推定することを試みた。変化要因として，まず大気陸面モデル MATSIRO から，土壌水分，河川貯留量，積雪量の3種類の値を計算し，その後，統計値を用いて地下水の取水量を推計した。なお，GRACE の観測値は球面調和関数で表現されているため，他の出力と比較する際には，必ず他の出力を一度球面調和係数へと展開し，300km のガウジアンスムージングを適用することで，GRACE と同様のデータ形式に変換した。

MATSIRO から得た陸貯水量は，乾燥地域を除けば，GRACE の観測値との相関係数が大きく，MATSIRO および GRACE の双方の有用性と，陸貯水が上記3種類で説明できる地域の多さを示した。しかしながら，乾燥地域以外にも R² 値が小さい地域が数カ所存在しており，それらの地域ではモデルに含まれない他の変動要因が働いている可能性がある。インド北部もその一つである。

ヒマラヤ高山域において，MATSIRO から得た陸貯水量と，GRACE が観測した陸貯水量と比較すると，どの地域においても GRACE の減少量が MATSIRO の減少量を上回り，これは地下水取水，氷河の融解の2点が原因であると仮定した。そこで GRACE が観測した陸貯水減少量から地下水取水量を差し引くことで，氷河変化量を推定した。結果は，エリア C を除く3地域で氷河が増加してしまい，現実とは相反するものとなった。しかし今回試みた手法は，GRACE の弱点である空間解像度や変動要因特定が困難という点をカバーするものである。地下水取水量や陸貯水変動に関するより細かい情報を集め，質量変化の要因分離方法の精度を上げることで，実地観測の難しいヒマラヤ高山帯の氷河を検出する有効な手法へと成長することが期待できる。

謝辞：本研究は CREST『世界の持続可能な水利用の長期ビジョン作成』（代表：鼎信次郎），最先端・次世代研究開発プログラム『山岳氷河の融解が世界の水資源逼迫に与える影響』（代表：平林由希子）から支援を受けました。ここに記して深く謝意を表します。

参考文献

- 1) IPCC, 2007, Climate Change 2007;
- 2) Immerzeel, W. W., L. P. H. Beek, and M. F. P. Bierkens (2010), Climate change will affect the Asian water towers, *Science*, 328, 1382-1395, doi:10.1126/science.1183188
- 3) Fujita, K and Nuimura T (2011), Spatially heterogeneous wastage of Himalaya glaciers, *PNAS* submitted
- 4) Ageta, Y. et al., (2000), Expansion of glacier lakes in recent decades in the Bhutan Himalayas, in *Debris-Covered Glaciers*, edited by M. Nakawo, C. F. Raymond, and A. Fountain, *IAHS Publ.*, 246, 165-175
- 5) Thayyen, R. J., and J. T. Gergan (2009), Interactive common on “Role of glaciers in watershed hydrology: Himalayan catchment perspective”, *Cryosphere Discuss.*, 3, C146-C151
- 6) Velicogna, I (2009), Increasing rates of ice mass loss from the Greenland and Antarctic ice sheets revealed by GRACE, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L19503, doi:10.1029/2009GL040222
- 7) Rodell, M., Velicogna, I., and Famiglietti, J. S (2009), Satellite-based estimates of groundwater depletion in India, *Nature* 460, 999-1002
- 8) Hyungjun K., Pat J.-F. Yeh., T. Oki., and S. Kanae (2009), Role of rivers in the seasonal variations of terrestrial water storage over global basins, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L17402, doi:10.1029/2009GL039006
- 9) Matsuo, K., and Heki, K (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
- 10) Takata, K., S. Emori, and T. Watanabe (2003), Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff, *Global Planet. Change*, 38(1-2), 209-222, doi:10.1016/S0921-8181(03)00030
- 11) Oki, T., and Y. C. Sud (1998), Design of Total Runoff Integrating Pathways (TRIP)—A global river channel network, *Earth Interact.*, 2, 1-36, doi:10.1175/1087-3562(1998)002<0001:DOTRIP>2.3.CO;2.
- 12) Tiwari, V.M., J. Wahr, and S. Swenson (2009), Dwindling groundwater resources in northern India, from satellite gravity observations, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L18401, doi:10.1029/2009GL039401
- 13) Hirabayashi, Y., Doll, P. and Kanae, S (2010), Global-scale modeling of glacier mass balances for water resources assessments: glacier mass changes between 1948 and 2006, *J. Hydrol.*, Vol.390, pp.245-256 (2011. 9. 30 受付)