

衛星画像を用いたボリビアの氷河域の 推定手法の開発と氷河分布解析

ESTIMATION OF THE TROPICAL GLACIER IN BOLIVIA USING SATELLITE IMAGERY

渡辺恵¹・中野一成²・平林由希子³・川越清樹⁴・朝岡良浩⁵・鼎信次郎⁶
Megumi WATANABE, Kazunari NAKANO, Yukiko HIRABAYASHI, Seiki KAWAGOE,
Yoshihiro ASAOKA, Shinjiro KANAE

¹学生会員 東京工業大学大学院情報理工学研究所 学生 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

²学生会員 東京大学大学院工学研究科 学生 (〒113-8656 東京都文京区弥生2-11-16)

³正会員 東京大学大学院工学研究科 准教授 (〒113-8656 東京都文京区弥生2-11-16)

⁴正会員 福島大学大学院共生システム理工学研究所 准教授 (〒960-1296 福島県福島市金谷川1)

⁵正会員 東北大学大学院工学研究科 助教 (〒980-8570 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-06)

⁶正会員 東京工業大学 情報理工学研究所 准教授 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

Mountain glaciers are one of key elements to indicate current climate change considering their contribution to sea-level rise and to water resource change through regional hydrological processes. This study estimated the area and location of tropical mountain glaciers in Bolivia using satellite imagery. Previous studies have produced datasets of global glacier information, but the area/location information of mountain glaciers in Bolivia is not stored in those datasets due to limited field measurement data. In this study, we developed a couple of satellite remote sensing measurement methods so that the area/location information of tropical mountain glaciers in Bolivia was obtained at a country-wide scale for the first time.

Key Words: *Bolivia, mountain glacier, glacier inventory, satellite imagery*

1. はじめに

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第4次評価報告書では山岳氷河、氷帽の融解は海面上昇の要因として熱膨張に次ぐ要因であると報告されている¹⁾。また山岳氷河や氷帽はグリーンランドや南極の棚氷と比べ、その面積や体積当たりの減少に対して海面上昇への寄与率が非常に大きいことが明らかにされている²⁾。さらに1995年から2005年にかけて氷河質量の加速度的な損失が観測された²⁾。山岳氷河や氷帽の融解は海面上昇への寄与のみでなく、地域的な水資源に与える影響も非常に深刻なものであると懸念されている。したがって山岳氷河や氷帽の広域的な分布情報は非常に重要である。

現在世界中の氷河の個数や面積等に関して様々な報告がなされており、全球を対象とした山岳氷河、氷帽の分布情報をとりまとめたデータベースもいくつか構築されている。その代表的なものがNational Snow and Ice Data Center (NSIDC) によりデータが公開されている World Glacier Inventory (WGI) (http://nsidc.org/data/glacier_inventory/) と後に説明する the Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS)

Glacier Database (GGD) (<http://www.glims.org/>)である。WGIは航空写真や地形図、衛星画像により得られた面積や位置などの氷河情報を蓄積している (World Glacier Monitoring Service, 1989) が未だ全球の氷河面積の4割ほどしかカバーされていない³⁾。一方でGGDは高性能光学センサ Advanced Spaceborne Thermal Emission and reflection Radiometer (ASTER) により得られた氷河情報を蓄積したデータベースである。しかしGGDはWGI以上にデータ整備の未完地域を残している。

本研究では、WGIとGGDの双方のデータベースにおいてデータ整備が未完であるボリビアの北部に位置するアンデス山系の熱帯氷河 (Lon.: -69~67°, Lat.: -15.5~-18°) に着目する。この地域の氷河は夏季に涵養と消耗が同時に起こることおよび降水量が比較的少ないことが特徴として挙げられる。

アンデス山系の氷河においては継続的な現地観測データが不足しているため、本研究では衛星画像を用いて氷河域の推定を行った。衛星画像を用いて氷河域を推定する研究はこれまで数多く行われており、推定手法としては電磁波の反射特性を利用し、可視光の赤もしくは近赤

表-1 手法毎の衛星のデータセット

| Method | Satellite name | Sensor | Returning cycle | Spatial resolution | Date of photographing | Operator |
|---------------------|----------------|------------|-----------------|--------------------|------------------------|-------------------------------------|
| Method1 (2005) | SPOT | VEGETATION | About 1 day | 1 km | 1998/8-2009/8 | Centre National d' Etudes Spatiales |
| Method2 (1990+2005) | Landsat | TM+, ETM+ | 16 days | 30 m | 1990/8/20 2005/8/27 | Earth Observation Satellite Company |

外と中赤外の比率を閾値として用いることにより氷河を地表から抽出する手法がよく知られている。その他にも the normalized difference snow index (NDSI) などを用いて推定されることもある。使用される衛星画像は ASTERをはじめ、Landsat ETM+, SPOT, SAR など様々な衛星の画像が利用されている⁴⁾。衛星・センサを利用した手法の利点は、今後も継続的な観測を行うことができ、かつ広範囲の氷河の推定を行うことができる点にある。しかしながら衛星画像解析においては、時空間変化により氷河表面の反射特性が大きく異なる。したがって各々の季節と地域に適した手法を開発する必要がある⁵⁾。本研究ではデータ整備の未完であるボリビアの熱帯氷河を対象に以下の2点を目的とする。

- (1) 衛星画像を用いた氷河域推定手法を開発すること
- (2) 氷河域の位置と面積情報を示すこと

2. 手法

(1) 氷河域推定手法の開発

2種類の手法を開発し、実験的に氷河域を推定した。

a) 手法1

手法1はCenter National d' Etudes Spatiales の運営する地球衛星探査機SPOT4、5号に搭載されたVEGETATION センサ(表-1)の画像を用い、後に詳しく説明するs3指標を閾値とした手法である。その特徴は解像度が粗いものの、時間分解能が高く、データ数が多いことにある

(表-1)。以下に手法の具体的な説明を記す。閾値として用いたs3指標は積雪と植生の分光反射特性を利用して開発された⁶⁾。積雪分光反射特性では、波長1.0 μ m以下で反射率が高く、波長が長くなるとともに反射率が減少し、波長1.4 μ m以上で反射率が極端に短くなる特徴を有する。また、植生の分光反射特性では、波長0.7 μ m付近と波長1.4 μ m付近を境に反射率に大きなギャップがある。s3指標の式を以下に示す。

$$s3 = \frac{Nir1(Vis - Nir2)}{(Nir1 + Vis)(Nir1 + Nir2)} \quad (1)$$

Vis: 可視域の反射率 (Band2)

Nir1: 近赤外の反射率1 (Band3)

Nir2: 近赤外の反射率2 (Band4)

この指標は衛星ADEOS-IIに搭載されているGLIセンサの観測波長帯を想定した場合、閾値は0になることを観測から確認している⁶⁾。同様にLandsat7衛星のEMT+センサに適用した場合も閾値を0と仮定している⁷⁾。また、SPOTのVEGETATIONセンサの観測波長帯に適用し、同じく閾値を0として適用した場合も指標の有効性が証明されている⁸⁾。従って本研究においても既存研究に従ってs3指標が0以上を満たすことを氷河の条件とした。さらにs3指標のみでは湿地等のエラーを取り除くことができないため標高も条件に加え、氷河域は標高4000m以上と設定した。対象地域において積雪量と融解量のほぼ等しいフィルンラインは4000m以上⁹⁾であるため、消耗期の末期に4000m以下に氷河は存在しないと仮定し標高4000m以上の条件を加えた。標高データはNASAにより開発されたThe Shuttle Radar Topography Mission(SRTM)の1kmグリッドのデータを使用した。

b) 手法2

手法2(詳しくは¹⁰⁾に記載されている。)はアメリカ航空宇宙局(NASA)が打ち上げた地球観測衛星Landsat7号に搭載されたETM+(the Enhanced Thematic Mapper Plus)センサによる画像を用い、Band4(近赤外)とBand5(中赤外)の比率とBand3(可視光, 赤)を閾値とした手法である。特徴としては少ないデータ数であるが、高い空間分解能を持っている点と、全球に対応した閾値を設定している点が挙げられる。以下に手法の具体的な説明を記す。Landsat TMの画像を用いた既往の研究では、電磁波に対する反射率が他の物質に比べ、氷河と雪の場合はBand4で大きく、Band5で小さいことからBand4とBand5の比率をとって適当な閾値で区切るにより、氷河と雪を植生や土壌などからはっきりと分けることができる¹⁰⁾¹¹⁾とされている。具体的な閾値はGGDのデータを参考にGGDでデータベース整備が完了しているBritish Columbia, Caucasus, Swiss, Himalayaの一部の画像において本研究からもとめた氷河域面積が最もGGDの氷河域面積に近づく値として3.6に設定した。しかしながらBand4/Band5の閾値の設定だけでは画像の切れ端や谷部分などのGGDでは氷河と判定されていないピクセルも氷河と判定されてしまうため、GGDのデータで氷河の有無に顕著な違いのあるBand3の閾値を50とし、50以上を満たすことも氷河の条件とした。GGDからの誤差の平均は約19.4%となっている。また、山岳氷河の数値計算モデルにより算出さ

れた氷河面積データ³⁾と比較すると、南アメリカ地域では約49%の誤差がある。さらにGGDのデータに近づけるために、上記の閾値の設定の他にフィルタリングを行った。フィルタリングは周囲の9×9ピクセルの内部に氷河のピクセルが4割以上であれば中心のピクセルを氷河である、4割未満であれば中心のピクセルは氷河でないとしてアベレージフィルタリングをかけた。フィルタリングをすることでGGDのデータに近づけることができ、その効果はLandsat TMの画像で実証されている¹²⁾。最後に手法1と同様に湿地等のエラーを取り除くため、氷河域は標高4000m以上と設定した。標高データはNASAより開発されたASTER（高性能マルチバンド光学センサ）GDEM（全球標高データ）約30mグリッドのデータを使用した。

(2) 画像の選定

解析に用いる画像は氷河の消耗期の末期の8月の画像を選定した。消耗期の末期を選定することで季節性の雪の影響を取り除くことができると報告されている⁴⁾。対象期間はSPOTのデータが利用可能である1998年～2009年とした。SPOTは1998年～2009年まで対象地域の毎年のデータが得られるが、Landsatは1999年のエリア10、2005年のエリア1～9のデータのみ使用できる。エリア1～10に関しては結果と考察で説明する(図-3参照)。

3. 結果と考察

(1) 手法1と手法2の比較

図-1は手法1、2により推定した氷河域を示した図であ

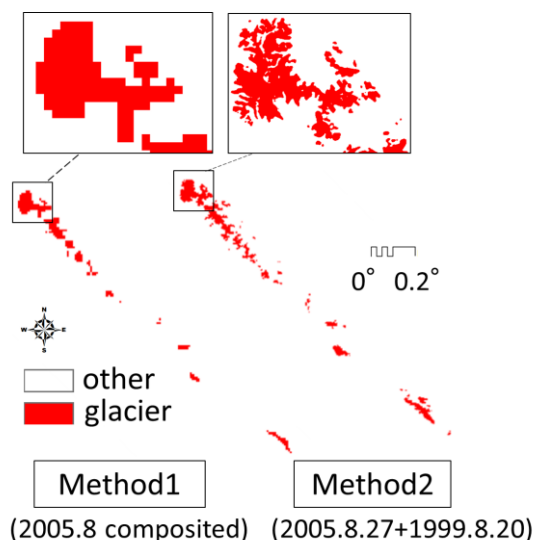


図-1 手法1と手法2の氷河分布
対象地域(Lon.: -69°~67°, Lat.: -15.5°~18°)

る。2つの手法で同様の氷河の概形が捉えられている。しかし手法1においては解像度が粗いために1km²以下の大きさの氷河が抽出されていない。特に末端の小さな氷河が抽出されていないことが読み取れた。

表-2は手法1と手法2の氷河塊の数と氷河域総面積を表している。なお、氷河塊は連続する一続きのピクセルを一つの氷河塊と定義した。氷河塊の数は大きく異なるが、この誤差は解像度の違いによるものであると予想される。図-2から、手法2により対象地域においては1km²以下の小さな氷河が多く存在することが明らかとされた。実際には1km²以下の氷河は多数存在しているが、手法1では複数の1km²以下の氷河が1つの氷河塊として見なされているため、手法2よりも氷河塊の個数が少ないと考えられる。また、総面積には約28%の違いがある(表-2参照)。ここで図-4のエリア別の氷河域面積の分布に着目する。エリア分類は図-3のように対象地域の氷河を特徴的な10カ所のエリア1～10に分類したエリアになっている。なお、図-4では手法2において得られるデータと比較するため、エリア1～9は2005年のデータ、エリア10は1999年のデータを示している。図-4によるとエリア1～9は手法1が手法2よりも上回る値を示す。手法1は手法2よりも解像度が粗いために氷河の輪郭が単純化されてしまい、手法2よりも氷河域が多く見積もられていると考えられる。エリア10では手法2が手法1を上回る値を示す。手法2では抽出され、手法1では抽出できない小さな氷河

表-2 氷河塊の数と氷河域総面積 (2005年, 1999年)

| Method | Number of glaciers | Total area (km ²) |
|---------------------|--------------------|-------------------------------|
| Method1 (2005) | 20 | 291 |
| Method2 (1990+2005) | 186 | 210 |

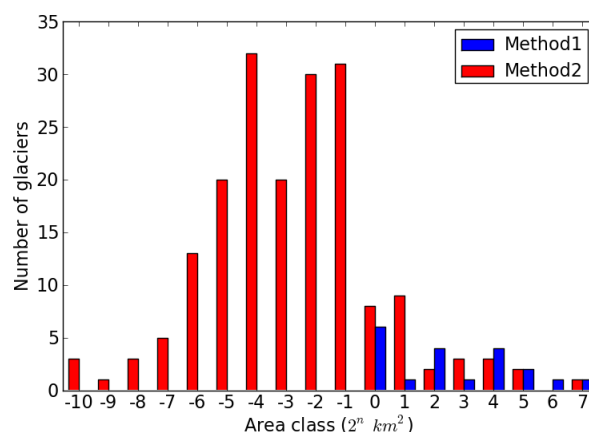


図-2 氷河塊の面積階級別分布 (2005年)

縦軸: 面積階級ごとの氷河塊の個数(手法2は2005年と1990年の合計), 横軸: 氷河塊の面積階級2ⁿkm²ごとの階級分け(n)

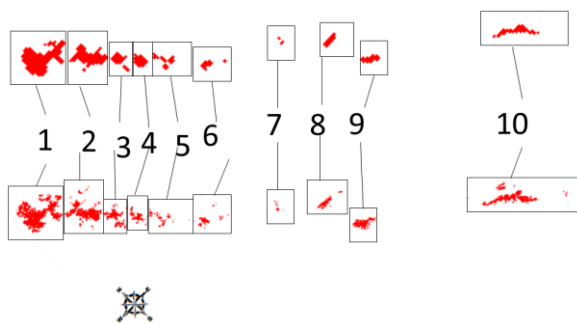


図-3 氷河のエリア分類図
対象地域 (Lon.: -69~-67°, Lat.: -15.5~18°)

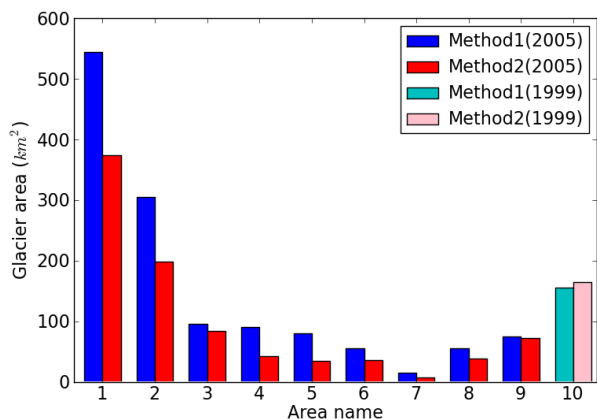


図-4 手法1, 2のエリア別氷河域面積 (2005年)
縦軸: 氷河域面積 (km²), 横軸: エリアの名前

表-3 手法1, 2の氷河域総面積に占める
エリア別氷河域面積の割合 (%)

| Area name | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Method1 | 37.5 | 21.0 | 6.5 | 6.2 | 5.5 | 3.8 | 1.0 | 3.8 | 5.2 | 9.6 |
| Method2 | 35.6 | 18.8 | 8.0 | 4.1 | 3.3 | 3.4 | 0.7 | 3.6 | 6.9 | 15.6 |

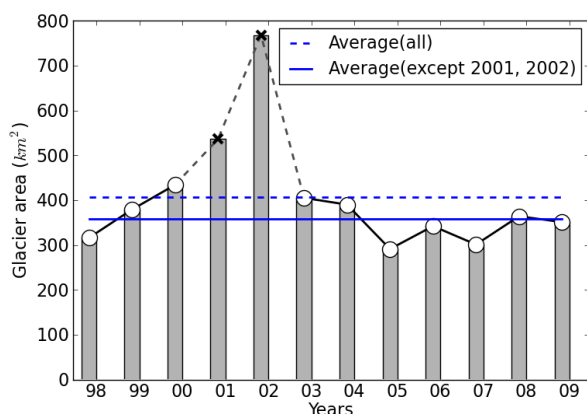


図-5 氷河域総面積時系列変化
縦軸: 氷河域面積 (km²), 横軸: 年,
青点線: 全ての年の経年平均値,
青実線: 2001年と2002年を除いた経年平均値

の存在により違いが発生すると考えられる。つまり手法1と手法2の差は一定の方向性を持っていて、この誤差は解像度の違いにより発生する不可避な誤差であることが分かった。

表-3は、手法1, 2それぞれの氷河域総面積に占めるエリア1~10の氷河域面積の割合を示す。手法2のエリア10のみ1990年のデータを用い、その他は2005年のデータを用いている。表-3によれば氷河域面積は手法1と手法2双方においてほぼ同様の分布を示すことが分かった。

全体として手法1と手法2において、総面積は約28%の誤差があるものの、氷河塊の数の誤差は解像度の違いによるものであり、概形とエリア別氷河域面積分布は類似しているの2つの手法でほぼ同じ場所の氷河を捉えていると考えられる。従って手法1, 2はともに氷河域推定手法としての有効性を持っていると言える。手法1, 2は解像度や閾値設定が異なり、それぞれの年やエリアの違いによって面積に差が生じるので、特徴に合わせて利用する必要がある。手法1, 2の適用例として手法1は空間分解能の低さが不利点であるが、広域氷河の気候変動への応答や水資源への影響を評価するために貢献できると言える。手法2は時間分解能の低さと画像の多さにより手間がかかることが不利点であるが、氷河変動動態の解明のため、階級別分類や標高別分類を行うことができる。総面積の誤差は今後改善の余地があるものの、観測データの不足するボリビアにおいて衛星画像から推定した広域氷河域の情報は貴重なデータである。

(2) 氷河域総面積時系列変化

図-5は手法1の氷河域総面積の時系列変化を示している。総面積の時系列変化は激しい変動を示している。2001年, 2002年は特異な値を示し、特に2002年においては経年平均値の2倍近い値を示した。2001年と2002年が特異な値を示す理由として年を越した雪の影響であると予想される。GGDの氷河の定義においても雪原は主たる氷河からできる限り切り離すべきと明記されており⁴⁾、氷河域推定には雪の影響の最も少ない年の画像を選定することを推奨している¹²⁾。したがって本研究においては1998年から2009年間の経年平均値(約406km²)からの差が120km²以上の年は雪原の影響が大きいとみなし、2001年と2002年は氷河域推定に適さず、信頼性の低い値として除外した。経年平均値は2001年と2002年を除外した場合は約357km²、2001年と2002年を除外しない場合は約406km²と大きな差がある。

(3) 氷河塊の位置, 面積情報

表-4は手法1と手法2の2005年(1999年)の氷河塊の大きさ順上位20位の位置と面積情報を示している。なお氷河塊は(1)で述べた定義と同じ定義である。(2)で述べたように本研究で得られた結果は雪の影響を含んでいる。

表-4 氷河塊の位置、面積情報（左:手法1, 右:手法2, 各々の手法において氷河塊の大きさ上位20位順に表示）

| # | Lat | Lon | Area(km ²) | # | Lat | Lon | Area(km ²) |
|----|--------|--------|------------------------|----|--------|--------|------------------------|
| 1 | -15.53 | -69.14 | 108 | 1 | -16.36 | -68.51 | 68 |
| 2 | -15.53 | -69.13 | 60 | 2 | -17.45 | -67.39 | 28 |
| 3 | -15.56 | -69.10 | 26 | 3 | -16.49 | -68.39 | 25 |
| 4 | -15.53 | -69.13 | 18 | 4 | -17.15 | -67.78 | 14 |
| 5 | -15.55 | -69.11 | 16 | 5 | -16.54 | -68.34 | 12 |
| 6 | -15.53 | -69.13 | 15 | 6 | -16.44 | -68.42 | 11 |
| 7 | -15.55 | -69.11 | 11 | 7 | -17.02 | -67.83 | 6 |
| 8 | -15.54 | -69.12 | 10 | 8 | -16.61 | -68.29 | 5 |
| 9 | -15.54 | -69.13 | 5 | 9 | -16.77 | -68.15 | 5 |
| 10 | -15.54 | -69.13 | 4 | 10 | -16.35 | -68.46 | 3 |
| 11 | -15.54 | -69.13 | 4 | 11 | -16.58 | -68.36 | 3 |
| 12 | -15.54 | -69.13 | 3 | 12 | -17.40 | -67.38 | 2 |
| 13 | -15.53 | -69.13 | 3 | 13 | -17.41 | -67.37 | 2 |
| 14 | -15.54 | -69.12 | 2 | 14 | -16.68 | -68.25 | 2 |
| 15 | -15.56 | -69.10 | 1 | 15 | -16.38 | -68.43 | 1 |
| 16 | -15.56 | -69.10 | 1 | 16 | -16.59 | -68.30 | 1 |
| 17 | -15.54 | -69.12 | 1 | 17 | -16.68 | -68.22 | 1 |
| 18 | -15.54 | -69.12 | 1 | 18 | -16.63 | -68.25 | 1 |
| 19 | -15.53 | -69.13 | 1 | 19 | -16.77 | -68.17 | 1 |
| 20 | -15.53 | -69.13 | 1 | 20 | -16.66 | -68.24 | 1 |

解析からは2001年と2002年を除外したが、その他の年も少なからず雪の影響を含んでいるはずである。そこで氷河塊の位置、面積情報は1998年から2009年の中で最も影響の少ない年と考えられる2005年の情報を代表値として表した。この根拠を以下に示す。衛星画像から氷河域を抽出する際、雪の影響を取り除くために氷河質量が著しく減少している年の画像が適しているとされている¹²⁾。本研究の対象地域に含まれるChacaltaya氷河とZongo氷河（16° 15'S, 68° 10'W）の質量収支は2005年に非常に低い値を取ることが現地観測データから明らかにされている¹³⁾(Edson Ramirez, 私信)。また、図-4の手法1の総面積時系列変化においても2005年が最小値を示した。以上の理由により本研究の解析期間において2005年が最も信頼性の高い位置、面積情報を示すと考えられる。

表-4の氷河塊は2つの手法で得られた氷河塊の各々上位20位までを示しているの、手法1と手法2において番号が等しいものが同一の氷河塊を指し示していない。また、2つの手法とも、衛星画像と標高データを合わせる際にデータ処理上で発生するエラーを含んでいる。氷河のリモートセンシングにおいて処理エラーと呼ばれ、除去が容易ではないエラーとなっている⁴⁾。この点も2つの手法間で位置情報に誤差をもたらすと予想される。

本研究で定義した氷河塊は連続した個々の氷河を一つの塊としており、氷河の流動を考慮した上での分類ではない。しかしながら気候変動への広域氷河の応答や氷河融解の水資源への影響を評価する十分有用な情報であると言える。本研究で得られた氷河面積、位置情報は将来の氷河数値モデルの改善に貢献できると言える。

(4) 気象データと氷河面積の比較

時系列変化、エリア別変化の結果から、本研究で抽出された氷河域は年によりエラーが大きく異なり、雪の影

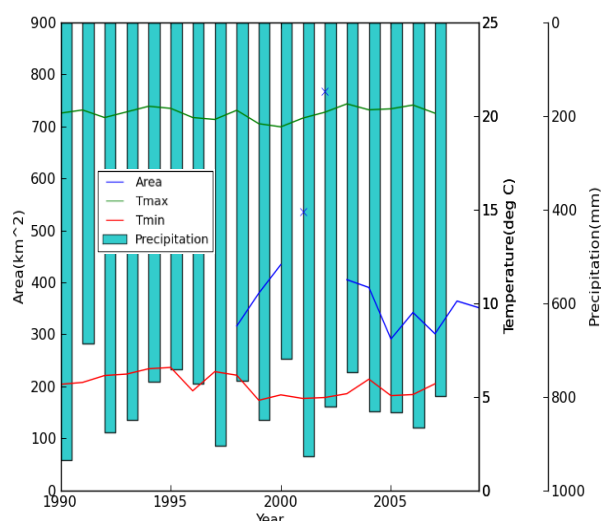


図-6 手法1の気象データとの時系列変化の比較
棒: 年降水量[mm], 青線: 氷河域総面積[km²],
緑線: 年最高気温[°C], 赤線: 年最低気温[°C]

表-5 気象データと氷河域面積の相関係数

| | 年降水量 | 年最高気温 | 年最低気温 |
|------|------|-------|-------|
| 相関係数 | 0.20 | -0.16 | -0.46 |

響を取り除けていないことが考察された。このエラーの原因が雪であるか否かを明らかにするため、気象データと氷河面積の時系列変化の比較を行った。

年降水量、年最高気温、年最低気温¹⁵⁾を用いて領域全体の氷河面積変動の考察を行った(図-6)。表-4より年降水量とは正の相関、年最高気温と年最低気温とは負の相関が見られた。しかし年降水量と年最高気温に関してはほとんど相関がないと言える。3つの中で最も相関係数が大きいのは年最低気温であった。本研究で得られる氷河面積のデータ数が少ないことと降水量、気温の氷河面積変化への影響はタイムラグがあることが考えられるため、今後氷河面積データの蓄積やタイムラグを考慮した解析が必要である。今回の解析のみではエラーの原因が雪か否かを判断することはできなかった。

4. まとめ

本研究ではボリビアにおける衛星画像を用いた氷河域推定手法の開発、氷河域の位置と面積情報を示すことを目的とした。以下に得られた結果を述べる。

2つの手法を用いて対象地域に適した衛星画像解析による氷河域推定手法の開発を行った。その結果、2つの手法の氷河分布図、エリア別面積分布や総面積の比較から広域氷河の推定手法としての有効性が証明され、各々

の手法の特徴が明らかとなった。手法1では多くのエリアにおいて、解像度が粗いために手法2よりも多くの氷河域を見積もってしまう傾向がある。しかしながらエリアによっては手法2の法が手法1よりも多く見積もる場合もあるので年やエリアに合わせて各手法を使い分ける必要がある。

氷河域抽出の手法開発において季節性の雪の影響の少ない画像の選定が最優先事項となることが明らかにされた。主に氷河面積時系列変化から雪の影響を完全に除去することができていないことが分かった。消耗期の末期を選定することで季節性の雪の影響を取り除くことができると報告されている⁴⁾が、本研究の結果では消耗期の末期を選定しても季節性の雪を排除できないことがわかった。しかし10年ほどの短期間内では質量収支を考慮して画像を選定することにより氷河域を推定できた。

既存のデータベースでデータ整備が未完である地域において、多少の誤差は含んでいるものの広域氷河の面積と位置情報を示すことができた。これらの情報はこれまで数多く報告されている³⁾¹⁶⁾氷河の数値モデルのパラメータ設定に有効な情報である。現地観測データの不足する地域における氷河面積の推定や将来の氷河変動予測に貢献できると言える。

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），地球規模課題対応国際科学技術協力事業（SATREPS）『氷河減少に対する水資源管理適応対策モデルの開発』（代表研究者：田中仁），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）支援を受けました，ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) IPCC AR4 (Intergovernmental Panel on Climate Change fourth assessment report): Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp996, 2007.
- 2) Meier M F., Dyurgerov M B., Rick U K., O'Neel S., Pfeffer W T., Anderson R S., Anderson S P., Glazovsky A F.: Glaciers dominate eustatic sea-level rise in the 21st century. *Science* 317, pp1064-1067, 2007.
- 3) Radić V. and Hock R.: Regional and global volumes of glaciers derived from statistical upscaling of glacier inventory data. *J. Geophys. Res.* 115, F01010, 2010.
- 4) Racoviteanu A. E., Paul F., Raup B., Khalsa S. J. S., Armstrong R.: 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) 2009.
- 5) Raup B., Kaab A., Kargel J.S., Bishop M. P., G. Hamilton, Lee E., Paul F., Rau F., Soltesz D., Khalsa S.J.S., et al.: Remote

sensing and gis technology in the global land ice measurements from space (glims) project. *Computers & geosciences*, 33(1), pp104-125, 2007.

- 6) 斎藤篤思・山崎剛: 積雪のある森林域における分光反射特性と植生・積雪指標, *水文・水資源学会誌*, Vol.12, No.1, pp.28-38, 1999.
- 7) 島村雄一, 泉岳樹, 中山大地, 松村洋: 積雪指標を用いた積雪水当量・融解量の推定—黒部湖水域を事例に—, *水文・水資源学会誌*, Vol16, No. 4, 2003
- 8) 朝岡良浩, 小南裕志, 竹内由加里, 大丸裕武, 田中信行: 衛星観測に基づく積雪水量の考域推定と融雪係数の地域特性. *水文・水資源学会誌*, Vol.20, pp519-529, 2007.
- 9) 藤井理行, 上田豊, 成瀬廉二, 小野有五, 伏見碩二, 白岩孝行(1997): 氷河 基礎雪氷学講座IV, 古今書院, pp312
- 10) 中野一成: 衛星画像を用いた山岳氷河の広域モニタリングの自動化に関する研究, 東京大学, 工学部, 社会基盤学科, pp1-78, 2011.
- 11) Bayr K. J., Hall D. K., Kovalick W. M.: Observations on glaciers in the eastern Austrian Alps using satellite data, *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 15, No.9, pp1733-1742, 1994.
- 12) Paul F.: Changes in glacier area in Tyrol, Austria, between 1969 and 1992 derived from Landsat 5 Thematic Mapper and Austrian Glacier : *int. j. remote sensing*, Vol. 23, No. 4, pp787-799, 2002.
- 13) Paul F., Andreassen L. M.: A new glacier inventory for the Svartisen region, Norway, from Landsat ETM+ data: challenges and change assessment, *Journal of Glaciology*, Vol. 55, No.192, 2009.
- 14) Soruco A., Vincent C., Francou B., Ribsterin P., Berger T., Sicart J E., Wagnon P., Arnaud Y., Favier V. and Lejeune Y.: Mass balance of Glaciar Zongo, Bolivia, between 1956 and 2006, using glaciological, hydrological and geodetic methods, *Annals of Glaciology*, Vol. 50, No. 50, pp1-8, 2009.
- 15) Hirabayashi Y., Kanae S., Masuda K., Motoya K. and Döll A P.: 59-year (1948-2006) global near-surface meteorological data set for land surface models. Part I: Development of daily forcing and assessment of precipitation intensity. *Hydrological Research Letters*, 2, pp36-40, 2008.
- 16) Hirabayashi Y., Doll P. and Kanae S.: Global-scale modeling of glacier mass balances for water resources assessments: Glacier mass changes between 1948 and 2006, *Journal of Hidrology* 390, pp245-256, 2010.

(2011. 9. 30受付)