# 熱帯氷河地域の土砂生産定量化の解析

福島大学大学院共生システム理工学研究科　川越　清樹
福島大学共生システム理工学類　今泉　直也
サンアドレス大学　Ramiro Pillo Zola
東北大学大学院工学研究科　朝岡　良浩

## 1．はじめに

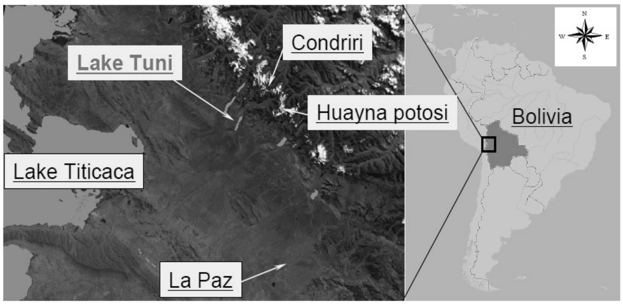


図-1　研究対象地域

人為起源の温室効果ガス排出による気候システムの温暖化が推計されており，多くの数値気候モデルの出力結果を用いた解析から水循環の変化，途上国の人口増加による水資源不足が危惧されている[1)]。こうした背景より，気候変動と将来の社会発展に適応できる水マネジメントの検討が必要とされている。水循環の変化に関しては，短時間の降水量増大，無降雨期間の長期化極端な降水事象だけにとどまらず雪氷域融解の影響も指摘されており，IPCC第4次評価報告書では，人間による消費，農業，エネルギー生産のための水の利可能性に重大な影響を与えると記載している[2)]。氷河融解を考慮した場合，顕著な変動の推測される地域が低緯度でありながら高標高に分布する「熱帯氷河」である。全球における熱帯氷河の99%は南米のアンデス山脈に存在し，既に流域等の地域単位の評価ではあるもののアンデス山脈内の幾つかの氷河融解の報告がなされている[3)]。この周辺は人口増加の著しい地域でもあり，現状でも水資源が切迫している問題を有している。そのため，早急の水マネジメントを必要とする地域である。

当該研究の対象領域であるボリビア国，ラパスは，南米アンデス山脈の標高4,000m以上に存在する氷河からの融解水を生活、農業、発電、工業等に利用し，生計を営んでいる。しかしながら、気候変動による気温上昇の影響により近年では氷河が急速に消失していることが明らかにされている[3)]。また，ラパス首都圏に約200万人の人口が存在しているが、周辺村落部からの人口流入により人口増加の傾向にある。こうした気候システムの温暖化，社会情勢の変化に従い，2009年から水供給が需要に対して不足しており，将来的な水マネジメントの検討が切望されている地域である。

氷河融解の問題は水マネジメントにおいて，単純な水量減少を示唆するだけのものではない。氷河融解が進行した場合，植生の乏しい地表面に裸地が広がることとなる。植生などの降水衝撃吸収効果がないため裸地に関すれば，降水による浸食作用が働きやすい土地被覆である。そのため，氷河融解は，地表面からの土砂流出現象の活発化を促す要因になりうる。こうした土砂流出は，河道への土砂流入も促進させるため，貯水池などの水源への堆砂を進行させる。したがって，有効貯水率を減少させることも予測される。こうした過程を考慮すると，水マネジメントとして氷河融解による土砂生産，および貯水池の堆砂の検討も必要になる。

---

* Sedimentation produces analysis in tropical glacier zone, Faculty of Symbiotic Systems Science, Fukushima University by Seiki Kawagoe and Naoya Imaizumi, San adres University by Ramiro Pillco Zola, Tohoku Univercity by Yoshihiro Asaoka.

本研究では，水マネジメントに対する土砂影響の把握を目的に，ラパスにおける上水道の水源であるTuni湖(図-1　参照)に対する土砂生産を気候システムの温暖化による降水状況にあわせて定量化させる取り組みを試みた。

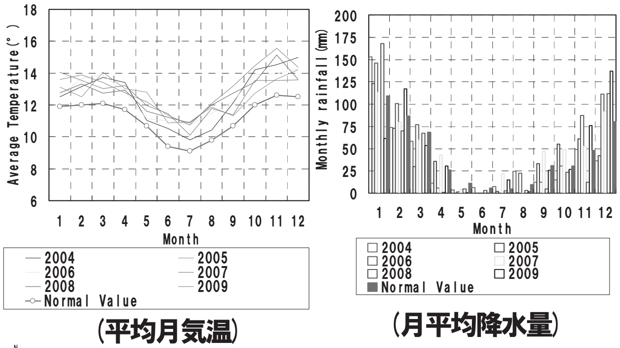


図-2　ラパス気象状況

## 2．研究の流れ，およびデータセット

研究は以下の①から③の流れに示すとおりに実施した。これらを空間的(マップ情報)に捉えることのできる成果にすることに取り組んだ。

① 現状時の高解像度降水量分布データ，および数値気候モデルの出力データによる現在から将来(2050年期, 2100年期)に対する月降水量変化の解析

② 降水解析データを利用した土砂浸食量解析

③ 気候システム温暖化による総合解析

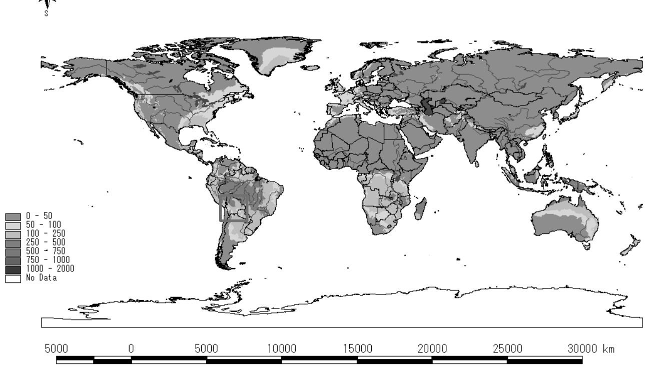


図-3　1960年から1990年の1月降水量分布
(Hijmans, R.J. et al[4]の解析結果をマップ化)

### (1) 降水量について

現状時の降水に関しては，現況の月降水量分布を求めるため，Hijmans, R.J. et al[4]により開発された高解像度(空間解像度1km×1km)の月降雨量分布データについてボリビア領域のみ抜き出し利用することとした。参考として，図-2にラパス領域の気象状況をまとめた。ラパスを含むAndes山脈付近の海抜標高3,000m以上の地域は，乾季と雨季が明瞭に区別される気候帯を呈しており，5月から8月までは少雨かつ低温の乾季，それ以外は比較的に多雨かつ高温の雨季と区別される。図-2より，気温状況から年間の各月を通じて平年値(1960年から1990年のデータより取得)より約1℃から2℃の平均気温上昇の傾向が認められる。また，降水状況から，雨季に関して降雨量が増加していることが見てとれる。2004年から2009年の平均月降水量と平年値の降水量を比較すると，11月，12月，1月の降水量増加が著しく増加している。11月と12月は約10mm，1月は約20mmの降水量増加を示す。これらから以下の①，②に示す現況のLa Pazの気象的特徴が明らかにされる。

① 年間を通じて平均気温が上昇している。

② 雨季の著しい降水量増加が認められる。

将来気候に関しては，全球に対する数値気候モデルの出力データを利用する。利用したモデルは，Gleckler et al[5]により評価されたModel Climate Performance Indexの上位半分に属するものであり，モデル出力による気温上昇量の差異(以下　推定影響幅と記載する)を3等分に分類して，各々の領域に該当する気候モデルを抽出して解析することとした。こうした複数のモデルを解析に利用することで，一意的なものにとどまらずに多岐的な気候システム温暖化の影響の幅を議論することが可能になる。なお，現在まで開発されている主たる全球気候モデルのアウトプットはグリッドセル解像度0.5°から2.5°程度である。そのため，Tuni湖等の小規模領域に直接該当させることは困難である。また，モデルの出力データ自体が，各々のモデルのバイアスを含むためモデ

ル間の数値の不確実性が含まれる。数値気候モデルの空間解像度を細分化すること，モデルのバイアスを補正することが解析を行う上で必要になる。そこで，以下の処理で，細解像度化，バイアス補正を行った。

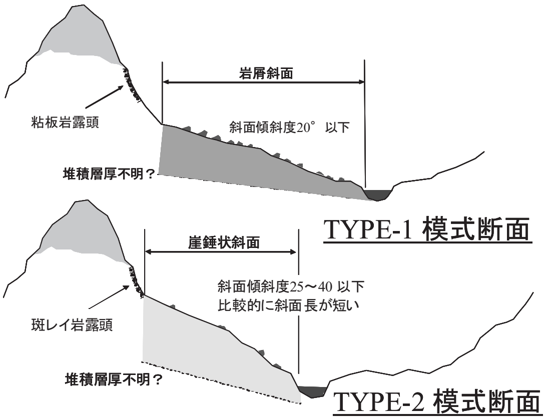


図-4 Tuni 流域模式断面図

① Hijmans, R.J. et al(2005)による空間解像度1km×1kmの月降雨量分布データをボリビア領域のみ抜き出し。
② 各数値気候モデルの20世紀再現計算(1990年期)月降水量データを空間解像度1km×1kmに重み付き距離平均法を用いて内挿補間する。
③ 各数値気候モデルの2050年期(2046年-2065年平均月降水量), 2100年期(2085年-2099年)の月降水量データを空間解像度1km×1kmに重み付き距離平均法を用いて内挿補間する。
④ 20世紀再現計算と2050年期(2046年-2065年平均月降水量), 2100年期(2085年-2099年)の月降水量データを用いて各モデルの現在比降水量変化率を空間解像度1km×1kmの分布で示す。
⑤ 現在比降水量変化率とHijmans, R.J. et alよる月降雨量分布データを掛け合わせることで2050年期(2046年-2065年平均月降水量), 2100年期(2085年-2099年)の空間解像度1km×1kmの月降水量データを作成する。

簡易的であるが，①から⑤の処理により，月に応じた細解像度1km×1kmの降雨空間分布を求めることができる。なお，本解析に利用した数値気候モデルは，気温と降水量の変化率の大きな数値気候モデルであるMIROC3.2Mdres(JAPAN，空間解像度280km×280km)，推定影響幅全体の下から1/3のモデルであるMRI-CGCM2.3.2(JAPAN，空間解像度280km×280km)，気温と降水量の変化率の小さなモデルであるCSIRO MK3.0(Australia，空間解像度190km×190km)，推定影響幅全体の上から1/3のモデルであるGFDL CM2.1 (USA，空間解像度250km×200km)である。

### (2) 土砂生産量について

土砂生産量の推計に関しては，基本的に地形，地質，および土壌，土地被覆，そして降水量データが必要である。平成21年5月踏査を参考にTuni湖周辺の地表状況を整理すると，河道渓岸に土砂堆積する緩やかなモレーン状の斜面が広がり，土砂流出した形跡が認められている。モレーンは，岩塊混り砂質土(TYPE-1)，砂質土優先(TYPE-2)に分類され，相対的に砂質土優先は急斜面を呈する(図-4 参照)。

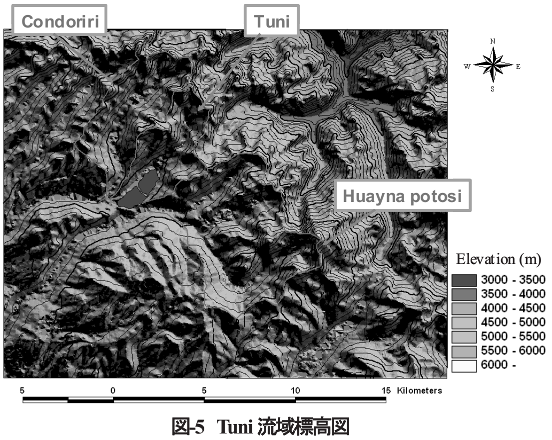


図-5 Tuni 流域標高図

その後背には急峻な露頭斜面が広がり，露頭より供給されたと思われる岩塊が急峻な斜面尻に分布する。土砂供給源になりうる急峻な露頭斜面と河道までのアプローチは目測50m程度であり，急峻な斜面から一気に河道に土砂が流入しにくいと推測される。こうした背景を考慮した場合，以下に示す①から③の土砂生産から河道への流入プロセスが考えられる。

① 急峻な山岳地から岩塊混じり土砂が生産される。
② 河道の渓岸に岩塊混り土砂，砂質土がモレーン状に堆積する。
(なお，岩塊混り土砂，砂質土状はモレーンの傾斜により異なり，モレーンが急斜面であれば岩塊は破砕されやすく，土砂移動の中で細粒化する。)
③ 降水，氷河融解等によりモレーン状地形の土砂が河道へ供給

こうした現象観察から地すべりや崩壊というマスムーブメントに示される現象よりも表層からの雨食による土砂生産の過程が推測される。そのため，本解析では土砂浸食により土砂生産現象を捉えることとし，米国農務省より開発されたRUSLE式[6)]を利用して土砂生産量の定量化を試みた。以下にRUSLE式を示す。

$$E = R \cdot K \cdot C \cdot LS \cdot P \quad \text{………………………………...…………………(1)}$$

ただし，*E*:土壌浸食量(単位換算でkg/30m×30m・monthへ)，*R*:降雨係数　降雨の浸食エネルギー(tf・m2/km2・h)，*K*:土壌係数(土壌に合わせて係数値が設定されている。グライ台地土として換算。)，*C*：作物係数(本解析では考慮せず。)，*LS*:地形係数(斜面長，斜面傾斜度を利用して導出。)，*P*：保全管理係数(本解析では考慮せず。)である。降雨係数*R*については降雨データより算出した。地形係数*LS*は米国航空宇宙局，および米国地質調査所と共同で開発した光学センサASTERによって取得したデータを処理した空間解像度30m×30mの標高データを利用した(**図-5参照**)。なお，標高データの空間解像度30m×30mより，以降，降雨等のデータは30m×30mに内挿処理して解析を実施した。土壌係数*K*については，現地調査より砂質土優先という結果が得られるため，グライ台地土の係数を解析に利用した。作物係数*C*は当該地域で耕作が行われていないため考慮しないこととした。また，保全全管理係数*P*も流域内に土砂を制御する河川構造物がほとんど存在していないことから考慮しないこととした。

## ３．降雨量解析結果

降雨の解析結果として，**図-**6にボリビア全土の気候変動による平均月降水量の推移図を示す。図には2050年期，2100年期における数値気候モデル毎の現在比変動率を示しており，気候変動に応じた月降水量変化が理解できる。解析結果より，最大月降雨を示すモデル上限から，2050年期は現在比1.25前後，2100年期は現在比1.25～1.60範囲で降水量増加が見込まれることが明らかにされた。モデルの上限値を参考にすれば，気候変動に従い降水量の増加が比例勾配的に認められることを示している。一方，モデルの下限値を参考にすると，現在と比較しても降水量が低下する可能性を示すモデルも存在する。これらモデル出力の上下限値より，ボリビア国においては一概に気候システムの温暖化が降水量増加を促していないことを示している。そのため，一意的な数値気候モデルを利用して将来的な影響を見積もるのではなく，複数のモデルを利用して影響の幅を捉える必要性が示唆される。こうした結果を踏まえて，本研究では，こうした複数モデルの上限値，下限値を利用しながら総合的に気候システムの温暖化影響を見積もることとする。**図-**7は，ボリビア国の2050年時最大月降水量の空間分布を示したものである。

なお，月別の数値気候モデルは，総じて，雨季(11月-12月,1月-4月)に降水量増加する傾向を示している。この傾向は，現在の傾向を示している雨季の著しい降水量増加と一致しており，将来的に雨季期間の降水に起因した現象の顕在化を示唆するものである。

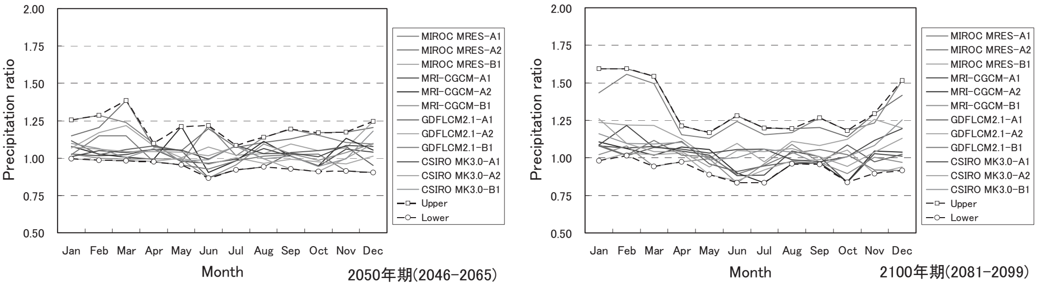


**図-6 ボリビア国の現在比降雨量の推移**

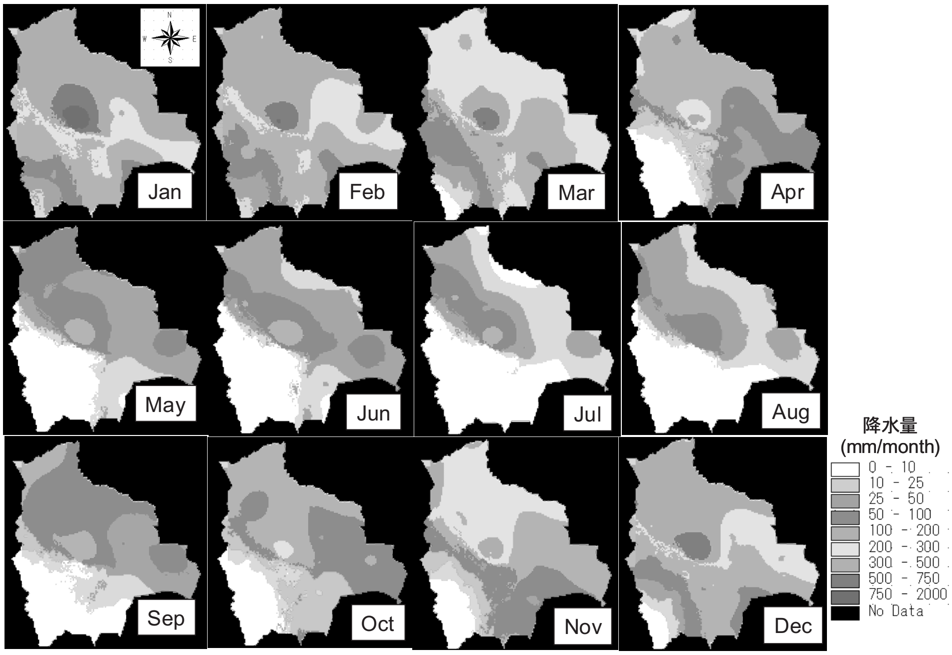


**図-7 ボリビア国の 2050 年時月最大降水量分布**

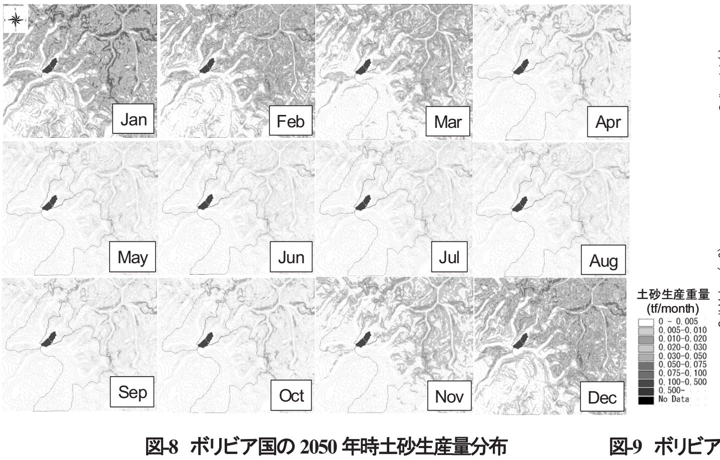


**図-8 ボリビア国の 2050 年時土砂生産量分布**

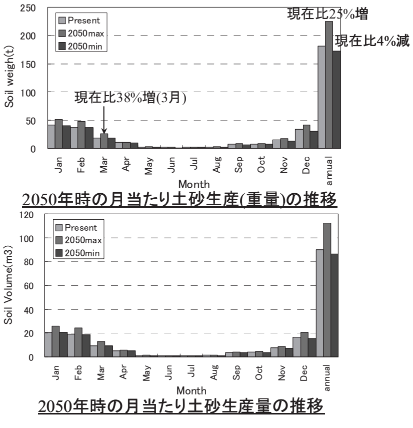


**図-9 ボリビア国の 2050 年時月当たり土砂生産量分布の推移**

## ４．土砂生産量解析結果

土砂生産の解析結果として，**図-8**に2050年最大月降水量時のTuni流域の土砂生産量(重量)のマップを示す。また，**図-9**に2050年時の月当たり土砂生産量の推移を示した。土砂生産量は飽和土相当として単位堆積重量2.0tf/m$^3$(≒20kN/m$^3$)と換算し求めている。解析結果より雨季を中心に土砂生産が活発化する様子が示され，12月，1月は特に河道への流入が指摘されるモレーンでの増加が見込まれている。また，気候変動状況の見地より，気候モデルの最大値を参考にすれば，3月は2050年時の現在比との増加率が最も大きい38%の土砂生産増加率を示すことが明らかにされた。これら結果より，貯水池堆砂進行の促進が雨季に促されることが有力視される。なお，気候モデルの最小値を参考にすると現在よりも土砂生産量が減少するものの，最大値との相対誤差を比較すると現在との幅が比較的に小さくなることが明らかにされている。

## ５．おわりに

数値気候モデル, および数値地理データを利用し, 気候システムの温暖化による土砂生産量の解析を試みた。結果として，気候システムの温暖化により，ある程度の影響幅をもちながら土砂生産は変化するものの，予測最大月降水量が発生した場合には，予測最小月降水量よりも土砂生産の影響度が高まる予測を得た。また，現状の傾向と一致した雨季の土砂生産量増加が認められることも明らかにされた。そのため，特に雨季に対する土砂動向，および土砂流入制御のメンテナンスに努めるべきと見解される。

また，当該評価については，氷河の被覆位置，現状のキャリブレーションした調査結果が含まれて射ないことから，更にこれらの検討も加え，精度の高い評価を行わなければならないといえる。引き続き継続調査を実施し，モデル，および解析精度の向上に努める意向である。

**謝辞**：本研究は，地球規模課題対応国際科学技術協力事業(SATREPS)の援助による GRANDE によって実施されました。ここに記して謝意を示す次第である。

### 参考文献

1) 例えば沖 大幹，鼎 信次郎：地球表層の水循環・水収支と世界の淡水資源の現状および今世紀の展望，地學雜誌，Vol. 116，No. 1，pp.31-42，2007.
2) 文部科学省，経済産業省，気象庁：環境省(2007) IPCC第4次評価報告書統合報告書政策決定者向け要約, http://www.env.go.jp/earth/ipcc/4th/interim-j.pdf (Cited 2011/12/31).
3) Bernard Francou, Edson Ramirez, Bolivar Caceres, and Javier Mendoza : Glacier Evolution in the Tropical Andes during the the Last Decades of the 20th Century, A Journal of the Human Environment Vol.29, Issue.7, pp.416―422, 2000.
4) Hijmans, R.J., S.E. Cameron, J.L. Parra, P.G. Jones and A. Jarvis : Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology 25: pp.1965-1978, 2005.
5) P. J. Gleckler, K. E. Taylor and C. Doutriaux , Performance metrics for climate models, Journal of geophysical research, 113, D06104 doi:10.1029/2007JD008972, 2008.
6) Mitchell,J.k., and Bubenzer,G.D：Soil loss equation, Soil Erosion, Chap.2. pp.17-62, John Wiley and Sons, 1980.