

# ボリビア Tuni 湖周辺の降水・流出特性\*

東北大学工学部 石垣康之

東北大学大学院工学研究科 朝岡良浩

東北大学大学院工学研究科 有働恵子

東北大学大学院工学研究科 真野 明

## 1. はじめに

近年、地球温暖化によりアンデス山脈にある熱帯氷河の融解が加速してきており、この融解水を重要な水資源とするボリビアの首都ラパス、隣接都市エルアルトでは将来深刻な水不足が生じると懸念されている。熱帯氷河は安定した水資源としての役割を果たし、飲料水、水力発電ならびに農業用水の貴重な供給源である。また河川流量への寄与も高く、氷河流域の河川や支流に至り、降水量が少ないことに起因する水不足を補っている。世界的に地球温暖化問題への関心が高まっているが、温暖化は世界に一樣に現れるのではなく、極地や高地に特に大きな影響を及ぼすと指摘されている<sup>1)</sup>。アンデス高地は南米の貧困地域であり、かつ気候変動に脆弱な地域である。また歴史的に先住民が多く、ラパスをはじめ都市が集中していることから氷河融解の影響は極めて大きいと考えられる。気温が上昇し、氷河融解が加速すれば、(1) 水をめぐる社会情勢の不安定化、(2) 観光業、手工業、伝統農業衰退による失業率の増加、(3) 低地への人口移動、(4) アンデス住民文化の崩壊、など社会・経済基盤に深刻な影響を与える<sup>1)</sup>ことが考えられる。このような問題に対処するために現地での流出予測ならびに氷河が融解し消失した時の代替となる水資源の確保が課題となってくる。以上の点から、まずボリビア Tuni 湖流域における水収支の現状について理解し、将来の流出予測に結び付けることが必要となる。

そこで本研究では、両都市の主要水源である Tuni 湖の集水域を対象として、現地データから降水 - 融解 - 流出の現象を解明すること、また気象庁の全球数値予報モデル(Global Scale Model, GSM)を用いて統計的ダウンスケーリングを行い、Tuni 湖における月間降水量を算定することを目的とする。

## 2. 対象地点

ボリビアは南米大陸南緯 16~17 度、西経 68~69 度付近に位置する内陸国である (図-1)。Tuni 湖に流入する河川は大きく 3 つあり、それぞれの流域に氷河が存在している。Tuni 氷河流域からは直接河川が流入しているが、Condoriri 氷河流域と Huayna Potosi 氷河流域からは人工的な導水路を経由して流入している<sup>2)</sup>。この地域は乾燥地帯であり、雨季と乾季における河川の流れが異なるのも特徴である。降水量と流出量のデータ分析を行う上で、図-2 に示す 4 地点で観測されているデータ

---

\*Precipitation and runoff characteristics around the Lake Tuni in Bolivia, by Yasuyuki ISHIGAKI, Yoshihiro ASAOKA, Keiko UDO and Akira MANO



図-1 ボリビアの位置

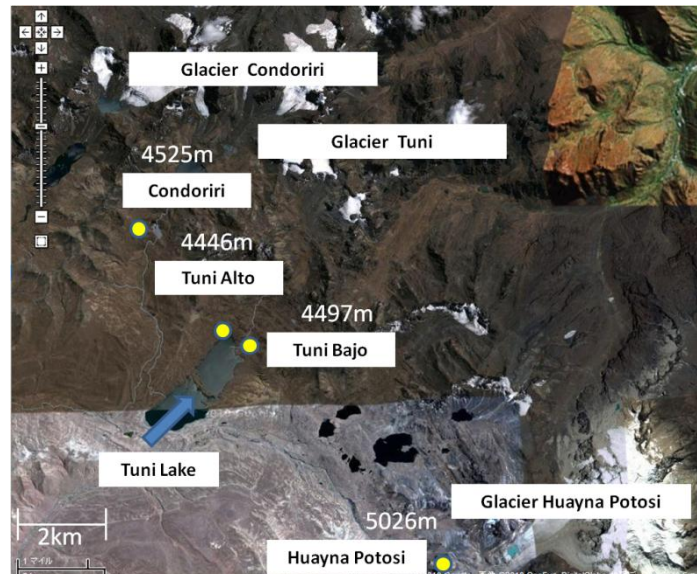


図-2 対象地点

を用いた。Condoriri (標高 4525m), Tuni 湖付近に位置する Tuni Alto (標高 4446m), Tuni Bajo (標高 4497m), そして Huayna Potosi (標高 5026m) である。なお流域面積は Condoriri が  $15\text{km}^2$ , Huayna Potosi が  $35\text{km}^2$ , Tuni Bajo が  $10\text{km}^2$  である。

### 3. 研究方法

#### 3.1 現地データの分析

まず、各地点で 30 分ごとに計測されている降水量、流出量を積算して年間降水量、年間流出量を算出し、各地点の差異を把握すると同時に 1 年間の推移を解析する年を決定した。次に、月間降水量、月間流出量を算出し、各地点における季節性の変化と傾向(雨季・乾季)を分析した。本研究では雨季を 11 月から 3 月、乾季を 6 月から 8 月と設定して解析した。流域面積が分かっている 3 地点 (Condoriri, Tuni Bajo, Huayna Potosi) については流出量の単位を mm に変換し、月間降水量と月間流出量を比較した。

#### 3.2 全球数値予報モデルの出力分析

数値予報とは、物理学の方程式により風や気温などの時間変化をコンピュータで計算して将来の大気の状態を予測する方法である。まずコンピュータで取り扱いやすいように、規則正しく並んだ格子で大気を細かく覆い、各々の格子点の気圧、気温、風などの値を世界中から送られてくる観測データを使って求める。これをもとに未来の気象状況の推移をコンピュータで計算する。この計算に用いるプログラムを「数値予報モデル」と呼んでいる。

GSM の出力分析を行う際、気象庁が提供する格子点データのアーカイブ (東京大学生産技術研究所喜連川研究室<sup>3)</sup>, 京都大学生存圏研究所<sup>4)</sup>) を利用した。GSM は 2002 年 5 月 1 日から配信が開始され、2007 年 11 月 21 日にモデルが改良された。旧モデルは 12 時間予報、新モデル更新後の 2007 年 11 月 21 日以降は 6 時間予報である。使用した予報データは、Tuni 湖の観測所 (南緯 16.24

度, 西経 68.25 度) が含まれる格子の積算降水量, 鉛直流・東西流の平均風速である. モデルの概要は表-1 のとおりである. 統計的ダウンスケーリングには後述するニューラルネットワークを用いた. 降水量に関して, Tuni 湖の観測値は月間値であり, 観測値と予報値を比較するために予報値を積算して月間降水量を算出した. また Tuni 湖の予報値は, 格子点 4 点の予報値を距離の逆数に基づく重み平均で加重平均することによって推定した. その方法は以下の式で表される.

$$P_{Tuni} = \frac{\sum_{i=1}^4 w_i P_i}{\sum_{i=1}^4 w_i}, w_i = \frac{1}{d_i^2}$$

$P_{Tuni}$  : Tuni 湖の観測値  
 $P_i$  : 各格子点の予報値  
 $w_i$  : Tuni 湖と各格子点の重み係数  
 $d_i$  : Tuni 湖と各格子点の距離

表-1 GSM の概要

モデル名	旧モデル (2002 年 5 月 1 日 - 2007 年 11 月 20 日)	新モデル (2007 年 11 月 21 日 - 現在)
初期値	00,12UTC	00,06,12,18UTC
予報時間	12 時間予報	6 時間予報
格子系 (等緯度等経度)	1.25 度	0.5 度

### 3.3 Artificial Neural Network (ANN) の適用

Artificial Neural Network とは人工神経網のことで, 脳機能に見られるいくつかの特性を計算機上のシミュレーションによって再現することを目指した数学モデルである. 今回は Tuni 湖の観測値を教師信号として入力することで出力データが最適化される教師あり学習を行っている. ANN の概要は図-3 のとおりである. 入力データとして, 月間降水量, 500hPa・700hPa における鉛直流と東西流の月間平均風速を使用し, 降水量に関して Tuni 湖の観測値に近似するように予報値の補正を行った.

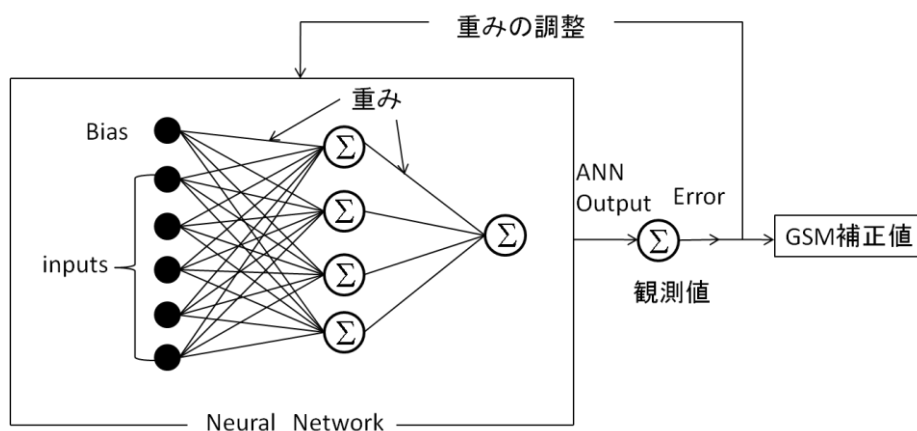


図-3 ANN

## 4. 結果と考察

### 4.1 水収支

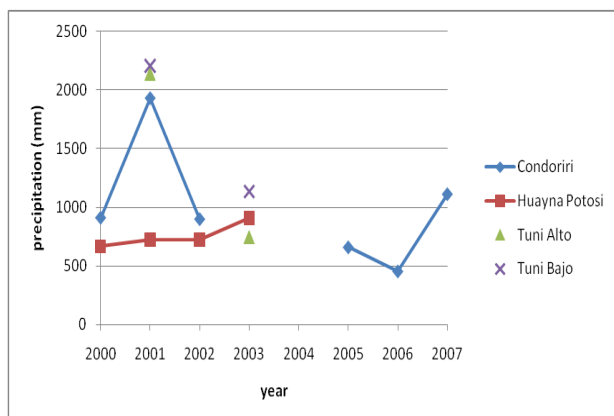


図-4 年間降水量

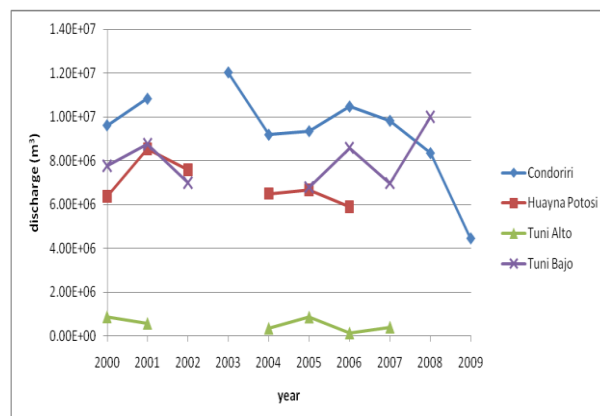


図-5 年間流出量

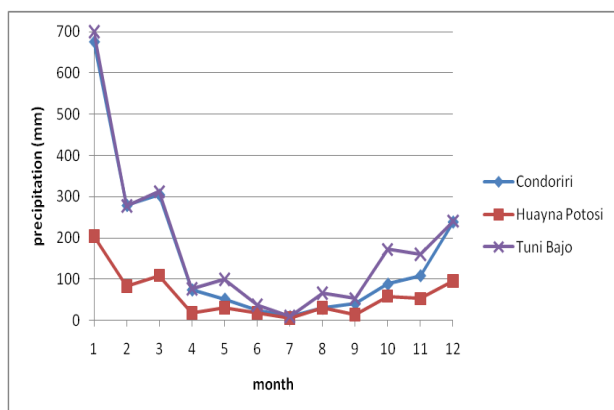


図-6 月間降水量 (2001)

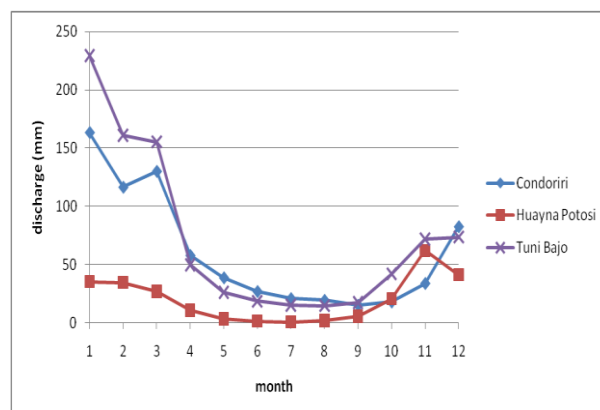


図-7 月間流出量 (2001)

図-4に年間降水量，図-5に年間流出量を示す．年間降水量に関してはデータの欠損が多く，4地点の降水量を比較できる年が2001年に限定された．そこで2001年の降水量を見てみると，標高が最も高いHuayna Potosi (5026m)で最小値を示していた．年間流出量に関しては年ごとの傾向が見られず，Tuni Altoにおいて流出量が極端に少ないということが確認できる．これはTuni Altoの集水面積が小さく，かつTuni氷河からの融解水が寄与していないためと考えられる．

図-6，図-7に2001年の月間降水量と月間流出量を示す．月間降水量に関してはCondoririとTuni Bajoで1年を通じてほぼ同じ値をとっており，Huayna Potosiで最小値をとっていた．また乾季の降雨はごく僅かであり，雨季と乾季の降水量の差が大きいことが確認できる．月間流出量に関しては3地点とも雨季に多く，乾季に少ない傾向を示した．

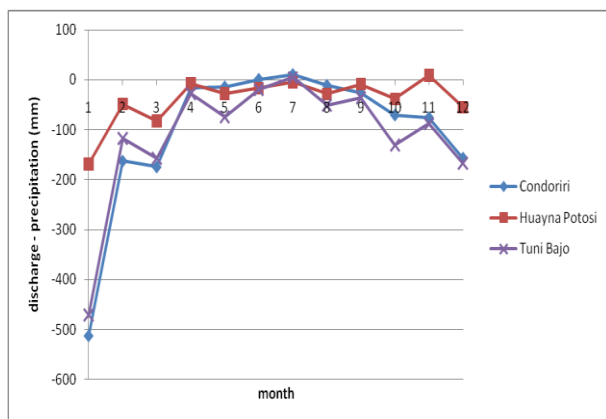


図-8 月間流出量と月間降水量の差 (2001)

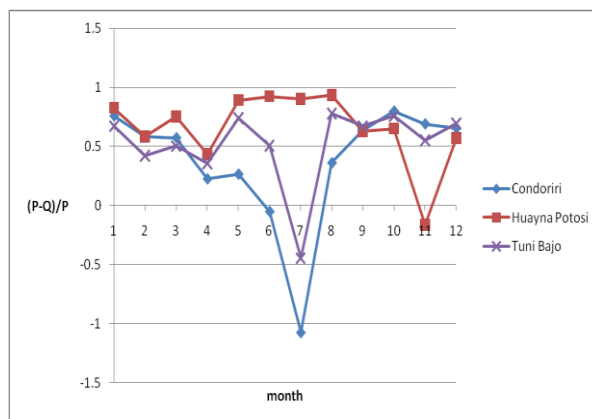


図-9 降水量に対する貯留と蒸発散の割合 (2001)

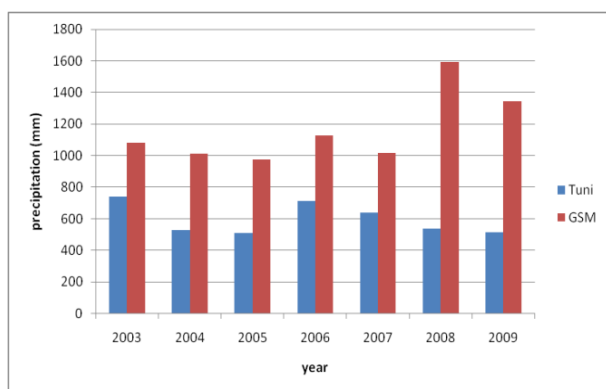


図-10 観測値と予報値の比較 (2003-2009)

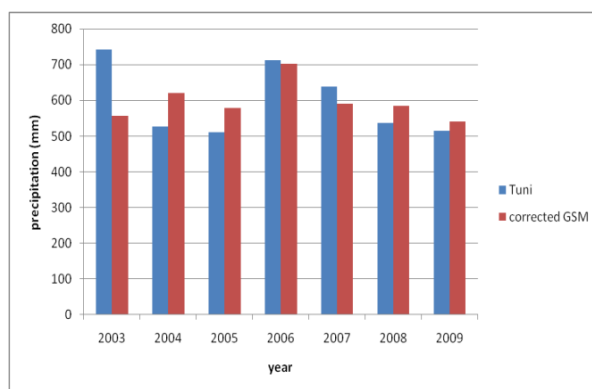


図-11 観測値と補正值の比較 (2003-2009)

次に本研究では以下の水収支式を仮定して解析を行った。

$$P + SGM = Q + E + \Delta S$$

$P$  : 降水量,  $Q$  : 流出量,  $E$  : 蒸発散量,  $\Delta S$  : 貯留量,  $SGM$  : 融雪量と氷河融解量

図-8 に 2001 年の月間流出量と月間降水量の差, 図-9 に 2001 年の月間降水量と月間流出量の差を月間降水量で無次元化した値を示す。図-8 より, 乾季には 3 地点とも流出量と降水量の差が小さくなっており, 乾季の流出量は降水量が少ないことから氷河融解水が大半を占めていると推察される。図-9 より, 雨季には 3 地点とも降水量に対する貯留と蒸発散の割合が高いことが確認できる。乾季において, Condoriri と Tuni Bajo ではマイナス値をとっていることから貯留分が放出されており, Huayna Potosi ではプラス値をとっていることから蒸発散で多く失われていると考えられる。

#### 4.2 ダウンスケーリング

図-10, 図-11 に 2003 年から 2009 年までの年間降水量について Tuni 湖観測値と予報値, Tuni 湖観測値と補正值を比較したものを示す。図-10 より, 年間では予報値が常に過大評価となっていることが分かる。旧モデルから新モデルに移行し, 格子系が小さくともその傾向は変わらなかった。しかしながら, 図-11 より ANN を適用した後の補正值は, 過大評価が改善される傾向が確認された。そこで, 次に 2009 年の月間降水量の推移について分析した。

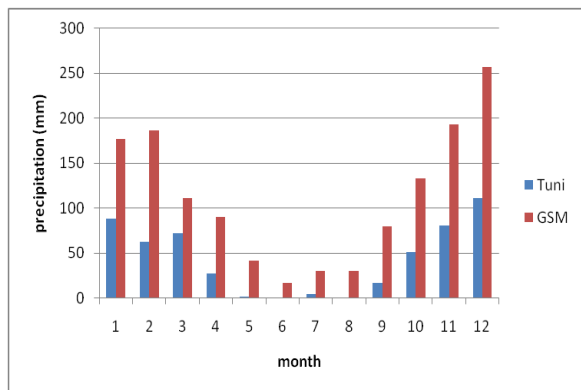


図-12 観測値と予報値の比較 (2009)

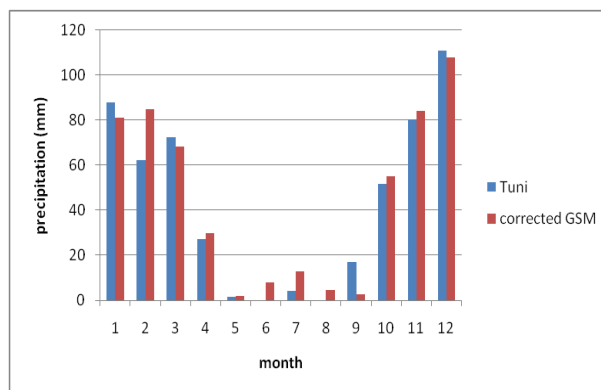


図-13 観測値と補正值の比較 (2009)

図-12、図-13に2009年の月間降水量についてTuni湖観測値と予報値、Tuni湖観測値と補正值を比較したものを示す。相関係数は予報値が0.95、補正值が0.97となり、1年を通じて見ると双方とも観測値と相関が強い。図-12より、予報値は雨季において特に過大評価となっており、雨季の降水過程が複雑であると考えられる。図-13より、ANNを適用すると雨季の降水量が観測値に近似するように補正されていることが分かる。以上より、ANNを適用することでTuni湖における月間降水量の算定が可能であることが確かめられた。

## 5. 結論

現地データの分析から、乾季の流出量は氷河融解水が大半を占めており、雨季は降水量に対する貯留と蒸発散の割合が高いことが推察できた。また乾季において、CondoririとTuni Bajoでは貯留分が放出されており、Huayna Potosiでは蒸発散で多く失われている可能性があること示唆された。GSMの出力分析から、ANNを適用することで補正值はTuni湖観測値とほぼ一致し、Tuni湖における月間降水量の算定が可能であることが確かめられた。これにより、Tuni湖において日降水量までダウンスケーリングを行った詳細な流出解析が可能になる。今後は、経験式を用いて蒸発散量を推定することで流域水収支を考慮した氷河融解水の算定を行い、その後に既存の流出モデルを用いて将来の流出予測を行う予定である。

謝辞：本研究はJST/JICA地球規模課題対応国際科学技術協力事業「氷河減少に対する水資源管理適応策モデルの開発」の成果の一部である。ここに記して関係各位に謝意を表す。

## 6. 参考文献

- 1) 山口和敏, 地球温暖化による熱帯アンデスの氷河消失, ラテンアメリカ時報 No.1382, pp.6-12
- 2) 梅田 信, 朝岡良浩, ボリビア Tuni 湖流域の水環境調査, 東北地域災害科学研究, 第 46 巻, pp.167-172
- 3) 気象庁提供の GPV (格子点データ) アーカイブ, <http://dias.tkl.iis.u-tokyo.ac.jp/gpv/>
- 4) 気象庁データ, <http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/>
- 5) 気象庁 HP, <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>