

ボリビア

氷河減少に対する水資源管理適応策モデルの開発

氷河と共に暮らす
都市の水を守る

地球温暖化で氷河が後退し、水資源に黄信号がともるボリビア。東北大学大学院工学研究科の田中仁教授をリーダーとするSATREPSのプロジェクトが、氷河減少と水資源の関係を明らかにした。

氷河から解け出した水の流れる川。

ボリビアの首都圏では氷河から解け出す水を利用

ボリビア多民族国（通称ボリビア）は南米の熱帯域、南緯約10度～23度に位置する内陸国で、面積は日本の約3.3倍、人口は約1,000万人。地形や気候はアンデス山脈を境に大きく異なり、西側は標高3,000メートル以上の冷涼な高地、東側はリャノと呼ばれるアマゾンの熱帯平原である。

地球温暖化の影響は、ボリビアの高地にも及び、1990年以降、氷河が急速に後退している。標高約3,600メートルにある首都ラパスは、近郊も含め約200万人が暮らしており、この地域の水道水の一部は氷河から解け出す水でまかなっている。そのため、「巨大な真水の貯蔵庫」である氷河の後退によって、首都圏の水資源が将来枯渇するのではないかと不安がある。

この現実を重く受け止めたボリビア政府は、気候変動下の水資源についての科学的知見や技術を提供してもらえるよう日本

に要請してきた。以下の3つを目的として、2010年4月から今年3月まで5年間のプロジェクトがスタートした。

- (1) 氷河の分布する流域の水文^{すいもん}・気象・水質の観測網と、多面的に水資源変動を評価するモデルの構築
- (2) 氷河縮退・消失に伴う水資源の展望と社会経済の変動を考慮して水道計画立案を支援する水マネジメントモデルの開発
- (3) ボリビアの水資源政策を科学的に支援する人材の育成

プロジェクトは田中さんを中心として、雪氷、流出、土砂、水質、水マネジメントの5つのグループから構成される（P.9右上図）。ボリビア側は、国立サンアンドレス大学の水理水文研究所と衛生研究所が参加し、研究の後半では、環境・水資源省やラパス市・エルアルト市上下水道公社との連



ラパス、トゥニ貯水池と2つの氷河。
●は気象観測点、●は流量観測点。

携も深まった。さらに、東北大学の田中研究室に在籍していたボリビア人留学生が通訳や観測で両国の橋渡しとなった。

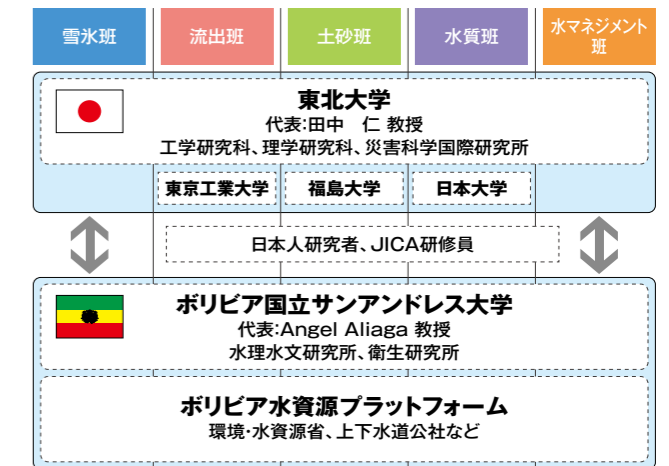
※ 水文：雨や雪などの降り方、蒸発、浸透、川・湖沼・地下水の移動など、地球上の水の循環。



田中仁 たなか・ひとし
東北大学大学院工学研究科 教授

1984年、東北大学大学院工学研究科博士課程修了。工学博士。90年、東北大学工学部土木工学科助教授。96年より現職。2009年にSATREPS「氷河減少に対する水資源管理適応策モデルの開発」研究代表者（15年3月に終了）。

プロジェクト体制



プロジェクトは東北大学を中心に5つのグループで構成され、ボリビアのサンアンドレス大学と共に行われた。

氷河や川の流域を自動観測装置でモニタリング

2010年、プロジェクトは観測網の整備と、そのデータを活用して水資源を見積もるモデルの構築に向けて動き出した。現在の水資源の量から将来の水資源がどうなるかを予測するためには、降水量や気温、河川の流量などのデータが必要となる。河川の流量を測るのは、季節や気象条件によって氷河がどのくらい解けて、河川の流量がどれくらい増えるかなどの関係を見るためである。

日本では、アメダスのような気象観測システムが全国に張り巡らされ、主要河川の流量なども常に計測されている。しかし、ボリビアにはこのような観測システムも過去のデータもないので、観測機器の設置が最初の大きな仕事になった。

5年の限られた期間で、すべての氷河を調べることはできない。そこで、トゥニ貯水

池の流域を調査地域に指定し、自動観測装置を設置してデータを採取することになった。トゥニ貯水池は首都圏の水道水のおよそ30パーセントをカバーする水源となっている（右下写真）。

「この流域には3つの大きな氷河がありますが、観測機器の設置と管理は楽ではありませんでした」と、当時、東北大学特任助教として現地で指揮をした朝岡良浩さん（現在は日本大学工学部准教授）は振り返る。

「氷河は標高5,000メートルを超える高地にあります。私たちは高山病に苦しみながら観測機器を設置しました。氷河の他に貯水池と氷河の間にも観測機器を設置しましたが、ケーブルや無線でデータを送受信できる環境がないので、定期的にデータを回収しに行かなければなりませんし

た。その役割はサンアンドレス大学が務めました。彼らも大変だったでしょう」。

予想外の苦労はほかにもあった。「私たちの研究が誤解されて反対運動が起こったこともあり、設置した観測機器が盗難にあったりもしました。そのため、初めの数年は思うようにデータが採れませんでした。しかし、地域の人々に根気強く説明を繰り返すことで理解が得られました。3年目からはモニタリングがうまくいき、プロジェクトもスムーズに進んでいきました」。

プロジェクト2年目の2011年には東日本大震災が起こり、東北大学も被害を受けた。田中さんの研究室がある建物は倒壊の危険性があるとして立入禁止となり、当時、東北大学に在籍していたボリビア人の研究員が事情により帰国することになった。そんな逆境もプロジェクトは乗り越えた。



トゥニ貯水池の水源となっているトゥニ・コンドリリ氷河（左）とウイナ・ボトシ氷河（右）。
トゥニ貯水池。首都圏の水道水のおよそ30パーセントをカバーする水源。

ボリビアに合わせた水資源変動の評価モデルを作る

次のステップは、モニタリングのデータをもとに、水資源の変動を見積もるモデルを構築することだった。

モデルは、数式で表現される。例えば、30年後の気象予測データを数式にあてはめると、30年後に利用できる水資源量の予測値が求められる。

プロジェクトは、日本で評価の高い「水資源管理モデル」をボリビアにあてはめようとしたが、そのままでは使えなかった。標高4,000～5,000メートルの高地では、気象の物理過程が標高の低い日本とは異なるからである。

「四季のある日本と違って、ボリビアは雨季と乾季の2つの季節に分かれます。雨季は1～2月ですが、このとき標高が高いところでは雪が降り、この時期に雪も氷河も解けます。一方、乾季には日が照っていて雲ひとつない天気が続きます。私たちの感覚では、この時期に氷河が解けるとは思いますが、

そうではないのです。雲がないために放射冷却が起り、氷河の表面から熱が奪われて温度が下がり、なかなか解けないのです」。

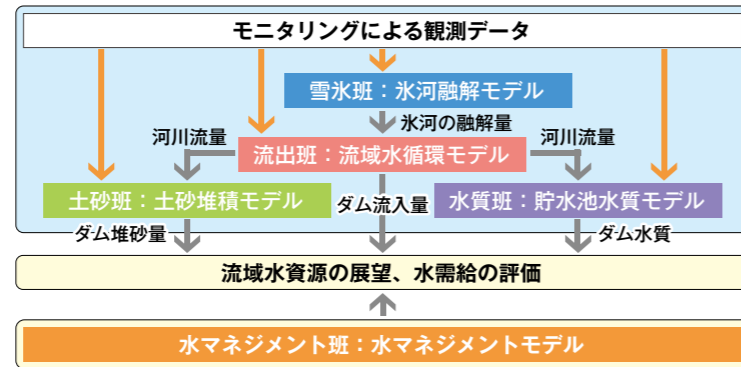
田中さんはボリビア高地特有の現象にも気づいた。

「日本のダム湖では表層水温は気温とほぼ等しいのが普通ですが、ボリビアの高地では、表層水温が気温よりも高くなっていま

した。空気の密度が薄いので、水面と大気の間で熱が伝わりにくいからです」。

日本とは異なる物理現象を次々に見つけ出し、日本で用いていたモデルをボリビアの高地仕様に置き換えて精度を高めていった。その結果、「水資源管理適応策モデル」(下図)を形成する5つのモデルが各グループの手により完成した。

水資源管理適応策モデル



モニタリングのデータをもとに、5つのモデルが作成された。



氷河の上に観測機器を設置した日本とボリビアの研究者。

氷河湖堆積地形で水分を吸収する割合（浸透能）を調べる研究者。

モデル活用のマニュアル作成を留学生が橋渡し

水資源管理適応策モデルを、ボリビアの研究者たちが活用できるように、マニュアルを作成した(P.11 右上)。ボリビアの研究者のほとんどは、スペイン語しか話さない。日本人研究者は、日本語と英語しか使えない。その両者の橋渡しをしたのが、英語とスペイン語ができるボリビアからの留学生たちだった。彼らが通訳やデータのやり取りに活躍し、三位一体で研究を進め、マニュアルを作成することができた。

水資源管理適応策モデルと、そのマニュアルが完成しても、実際にモデルがボリビ

アの社会で使われなければ、プロジェクトの目的は達成されない。

「私たちの提供したモデルが社会的に実証され、社会の中で意思決定に使われていくのが、最も望ましい形です。研究者・技術者へのトレーニングやセミナーの機会を設けて、モデルの浸透を図る努力をしてきましたが、具体的にどんな政策を実施するかの意思決定にまでは達していません。これにはもう少し時間が必要で、社会実装も具体的にどのように実現していくか、どのようにフォローアップしていくか、現地の方と

一緒に考えていこうとしています」。

プロジェクトの後半には将来を見すえて、省庁と大学など多くの人が集って水資源管理を話し合うための仕組みづくりも行われた。

「ボリビアの省庁は、水問題や気候変動、気候変動への適応などの問題に非常に関心が高いのですが、省庁と大学の研究者たちとのつながりは希薄でした。そこでプロジェクト5年目の2014年10月に、ボリビア環境・水資源省、上下水道公社など水に関連する機関や大学の研究者などを集めて水資源問題の情報交換や議

論を深めるための『ボリビア水資源プラットフォーム』を設立しました。今後は、私たちの研究成果をどのようにして生かしていくかの議論もする予定で、これに関してはJICAが支援していくことになっています」。



氷河融解モデルの研究者向け研修の様子。



El proceso de la dinámica de sedimentos inicia con el ciclo hidrológico, fenómeno en el que se presenta la producción de sedimentos, transporte y sedimentación (eq. Fig.1.1). La dinámica de sedimentos se genera en geosfera, siendo el ciclo del agua la fuerza impulsora. El agua se debe usar de tal forma de preservarla y no afectar ciclo de natural y la vida misma.

Sediment dynamics generate in geosphere, and water cycle is this driving force. We must use water to keep on life in natural water cycle.

Fig.1.1 Proceso de Dinámica de Sedimentos

ボリビアの研究者や技術者に水資源管理適応策モデルを説明するマニュアルの一部。

科学的に支援する人材の育成

地球温暖化に伴う気候変動は、これから長い期間にわたって影響すると考えられている。ボリビアも、気候変動に適応した水資源管理に、自立して取り組んでいかなければならない。この観点から、プロジェクトの目的に「人材の育成」も掲げられている。プロジェクトに参加した研究者や学生の中から、将来、水資源管理に携わる人材が育ってほしいというのが、田中さんの思いだ。

「3年前からボリビアの留学生が私の担当する土砂グループに参加してくれました。彼女はこの3月末に修士課程を終えて帰国しましたが、これからも私たちとつながりを持ってボリビアの水資源管理に貢献してほしいと思っています。このプロジェクトで彼女のような人材が育ちつつあるのはうれしいですね」。

朝岡さんは、プロジェクト期間中、延べ300日以上ボリビアに滞在して現地の研究者や学生と苦楽を共にした。

「最初はお互いが手探りの状態で、相手の言うことに納得がいかないこともあったと

思いますが、3年目、4年目になると、心が通じ合うのが実感できるようになりました。私がボリビアに行くと毎回パーティーを開いてくれるし、一緒に観測に行こうと誘ってくれたり、次はいつ来るのかと聞いてくれたりするようになったんです。心が通じ合うことでプロジェクトが円滑に展開し、結果が出るようになりました」と朝岡さんは振り返る。

「2年目、3年目に並行して日本で修士課程の留学生を指導しました。4年目に彼はボリビアに帰って、今は、サンアンドレス大学で働いています。データが欲しいというときにすぐしてくれるし、彼とは共同で論文を書いたりしています」。朝岡さんと留学生の交流は今も続いている。

日本は社会基盤が整っているが、途上国ではまだまだ整備されていない。朝岡さんは土木工学が専門で、「途上国では自分の専門が役立つ分野が多いのも醍醐味です」と言う。「気候変動の起こりやすいラパスでひと足早く学んだことは、これからの日

本で生かすことができるはずですよ」。

最後に田中さんが語ってくれた。

「世界にはいろいろな生活があり、日本が蓄積してきたものが、世界のさまざまな場所に役に立つことがあります。それは、自分の足で探さないと、なかなか見つかりません。積極的な気持ちで、皆さんには世界の役に立つことにチャレンジしてほしいと思います。それが日本の責務でしょう」。



プロジェクトへの感謝としてサンアンドレス大学から贈られた盾を持つ、田中さん(中央)、朝岡さん(右)、研究員(当時は博士課程の留学生)のブラディミル・モヤさん(左)。

プロジェクトが明らかにした水資源の現状と将来の展望

● 氷河分布

2040年までに氷河面積は現在の約40～50パーセントまで減少、年間融解量は現在の30～40パーセントまで減少する(気温の上昇0.24～0.44度/10年、降水変化なしの条件)。

● 総流量・都市域への水供給

現状の流量に対して氷河融解水(融雪水は含まない)の占める割合は約10パーセント。現状のトゥニ貯水池は1立方メートル/秒の割合で都市域に送水。現状では、この90パーセント(0.9立方メートル/秒)が送水されているが、氷河の融解水がない条件では85パーセントに下がる。

● 流域土砂生産

地球温暖化が進んで降水量が増えると、土砂の量も増える。降水量が0.89～1.15倍になると、氷河からの融解水がない場合でも、土砂の生産量は、0.88～1.45倍になる(貯水池に土砂が堆積すると貯水量が減るので、土砂生産量の増加は好ましくない)。

● 貯水池の水質

氷河後退の影響は極めて小さい。気候変動の影響により約2度の水温上昇が見られるが、水質悪化の可能性は小さい。