

地球規模課題対応国際科学技術協力

(防災研究分野「開発途上国のニーズを踏まえた防災科学技術」領域)

ブータンヒマラヤにおける氷河湖決壊洪水に関する研究

(ブータン)

平成 22 年度実施報告書

代表者：西村浩一

名古屋大学大学院環境学研究科・教授

<平成 20 年度採択>

1. プロジェクト全体の実施の概要

本プロジェクトは、現存するブータンおよびネパールの氷河湖について、衛星データ解析によって氷河湖の危険度に関する客観的評価・再抽出をおこない、そのデータを元に、特に調査・対策が遅れているマンデチュー流域を対象として、現地調査と決壊時のハザードマップを作成するとともに、適切な早期警戒システムを提案することを目的とする。プロジェクト初年度である 2009 年度は、6 月にブータンにおいてキックオフ会合を行い、名実ともにプロジェクトが発足した。7 月から 10 月にかけて、上流域の氷河湖調査および中流域の地形調査をおこなった。この間、国内では衛星班とプロセス班による研究会が開催され、衛星データによる客観的な氷河湖抽出の手法について検討を行うとともに、衛星「だいち」および TERRA-ASTER のデータを用いた解析を開始し、氷河湖の抽出作業等を進めている。12 月にはプロジェクトメンバー全体による研究会を開催し、現地調査、衛星解析の報告および情報共有、次年度の調査の打合せなどを行った。3 月には合同調整会議(JCC)および研究報告会(SWS)を開催するとともに、衛星データ、地形判読の研修を行い、中流域の地形調査も実施した。第二年次である 2010 年度は、5 月に中流域にて社会調査を実施するとともに、幕張にて開催された地球惑星科学連合大会にて氷河湖のセッションを設け、ブータンカウンターパートによる成果発表を含む、プロジェクトの活動のアピールを行った。8 月には別のブータンカウンターパートが、土砂災害対策についての現地研修と土木学会主催のシンポジウムでの発表を行った。8 月には活断層調査を実施し、9 月から 10 月には上流域においてプロジェクトとしての本調査と相手国研究機関において物理探査、GIS、洪水解析の研修を行った。初年度の成果としては、氷河湖の発生、拡大に関する論文が 3 編出版されたほか、国内外の学会においても 10 回以上にわたり研究報告が行われた。二年次は論文 1 編、著作 7 編、学会発表 37 件(うち国際学会 15 件)が研究成果として報告された。

2. 研究グループ別の実施内容

◆プロセス班(研究題目:氷河湖形成と決壊過程の解明)

①研究のねらい

衛星データ(ASTER)を用いた氷河湖の危険度再評価を進め、特にブータン領域において調査優先度の高い氷河湖を選定するとともに、マンデチュー上流域において現地調査を実施し、危険とされた氷河湖周辺の状況確認と湖盆測定を行う。

②研究実施方法

ASTER 可視近赤画像により氷河湖を抽出するとともに、デジタル標高データから氷河湖湖面に対する角度を計算し、GIS 上で可視化する。現地調査はマンデチュー上流域において、2009 年秋に予備調査、2010 年 9 月～10 月の期間に本調査を実施する。

③当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

2009 年度にはブータン領域の衛星解析を終了し、氷河湖の危険度のランク分けの作業を進めた。マンデチュー流域については 7 月までに予備解析を行い、現地調査メンバーに提供した。(成果 1、活動 1-2)。これらの事前解析をもとに、マンデチュー源流部の予備的調査を実施し、パイロットサイトとして 3 つの氷河湖を抽出し(成果 3、活動 3-3)、次年度以降の現地調査の計画および安全対策を立案した。また、パイロットサイトとして提案された一つの氷河湖に自動気象観測装置を設置し(活動 2-2、2-3、4-2)、二つの氷河湖のモレーンから土

質試験試料を採取した(活動 4-1)。

2010 年度には、マンデチュー流域において、事前解析で地形的に危険と評価された、もしくは既存インベントリー(ICIMOD, 2010)において危険と評価されている氷河湖について、湖水深の測定および周辺踏査を行い決壊危険度の再評価を行った(プロジェクト目標1、成果 1、)。初年度に設置した自動気象観測装置のデータ回収並びにメンテナンスを行い、さらに4箇所において小型の観測装置を新たに設置した(活動 2-2、2-3、4-2)。これらの装置についてはカウンターパート側が主体となって今後の観測を継続する。また、クリーン型氷河のGPS 測量、氷河の経年変化の比較用の写真撮影、および写真測量用の画像撮影を行った(成果 2、活動 2-3、活動 4-1)。

④カウンターパートへの技術移転の状況(日本側および相手国側と相互に交換された技術情報を含む)

2009 年度には簡易測量機器による地形データの取得、および取得データの室内解析の指導と、ブータン側スタッフによる実践を行った。また、氷河変動および氷河湖決壊洪水によって形成された地形や堆積物に関する調査(地形や堆積物の見分け方、サンプリング方法等)の現地指導を行った(プロジェクト目標 2)。一方、ブータン側からは氷河域調査に関し、AWS 設置地点の選定、およびパイロットサイトやキャンプ地の選定など今後の計画立案の指導を受けた。

2010 年度にはカウンターパートの氷河部門スタッフ 1 名(相手国側プロジェクトマネージャー)を日本へ招聘し、氷河・氷河湖の解析、写真測量技術、および学会発表の準備から報告までに至る手法の指導を行った。マンデチューおよびチャムカールチューの現地調査において、氷河・氷河湖の測量技術、および氷河・周氷河や GLOF に関する特徴的な地形や地質に関する判読の指導を行った。

⑤当初計画では想定されていなかった新たな展開があった場合、その内容と展開状況(あれば)

2009 年度にはポチュー流域で、過去に決壊洪水が発生した二つの谷を視察した。その結果、洪水による地形と堆積物を明確に識別でき、荒廃した河畔に植生が復帰するには 20 年程度を要したことを確認した。

2010 年度にはマンデチュー流域東部と源流の山城を同じくするチャムカーチューにおいて、既存インベントリーにおいて危険と評価されている氷河湖について水深測定および周辺踏査を行い、決壊危険度の再評価を行った。実施経費については当初ブータン側でカバーする予定であったが、予算の問題から実現できなかった。しかし計画の立案と現地の作業、および今後の課題の提案についてはブータン側スタッフが率先して行った。本プロジェクトが終了した後のブータン独自での現地調査実施に向けて、この調査で得た経験は大いに役立つと考えられる。

◆衛星班(研究題目:衛星データによる地形情報を用いた氷河湖拡大履歴の解析研究)

①研究のねらい

危険な氷河湖の再抽出と危険度評価、氷河湖の形成・拡大メカニズムの解明、および過去に GLOF が発生した氷河湖の調査に資するために、ブータン・ネパールヒマラヤ地方における多時期の人工衛星画像の解析および衛星データによる地形・標高情報データセットの整備を行う。また、本データセットを用いた氷河湖形成に関する解析、GLOF 発生時の洪水氾濫解析等を他班と協力のもと実施する。

②研究実施方法

多時期の衛星画像を一律に扱うために、全ての衛星画像のオルソ補正(正射投影)処理の実施、現状把握を

目的として衛星「だいち」(ALOS)搭載 PRISM/AVNIR-2 のオルソ補正画像を用いたパンシャープン画像(高解像度パングロ画像と中解像度カラー画像の合成による高解像度疑似カラー画像)の作成、および氷河湖抽出・インベントリ作成を実施する。また合わせて PRISM では高精度な地形・標高情報の抽出を行う。多時期の衛星データとしては、1960年代のCORONA、1980-90年代のSPOT-1/2、1990年代後半のLandsat およびJERS-1/OPS、2000年代のASTER, ALOSを想定する。(成果1、2、活動2-1、3-1)

③当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

予定通り進捗している。2009年度から継続的にALOS PRISM/AVNIR-2の良好なデータが取得され次第、標高データ(DSM)算出とオルソ補正処理を施し、ベースマップとなるパンシャープン画像を作成した上で氷河湖の抽出を行っている。2010年11月時点で、一部雲が残るがブータン国内のおよそ70%のパンシャープン画像の整備と60%程度の氷河湖抽出が終わっている。図2.1は本プロジェクトを通じて整備したALOS/AVNIR-2オルソ補正画像に抽出した氷河湖をプロットしたものである。また図2.2はマンデチュー流域に位置するメツォタ湖付近の拡大で黄色が本プロジェクトで抽出したALOSベースの氷河湖、緑が2010年度現地調査によるGPS計測結果、赤が既存の氷河湖インベントリを示したものである。本プロジェクトで整備している氷河湖インベントリと既存のものは整備年代が異なるが、現地調査と比較の結果、高精度で抽出できていることが確認できる。国連や関係機関からの要望もあり、2011年2月25日にはマンデチュー流域における氷河湖インベントリを評価版として一般公開しプレスリリースを行った(http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/bhutan_gli/index.htm)。

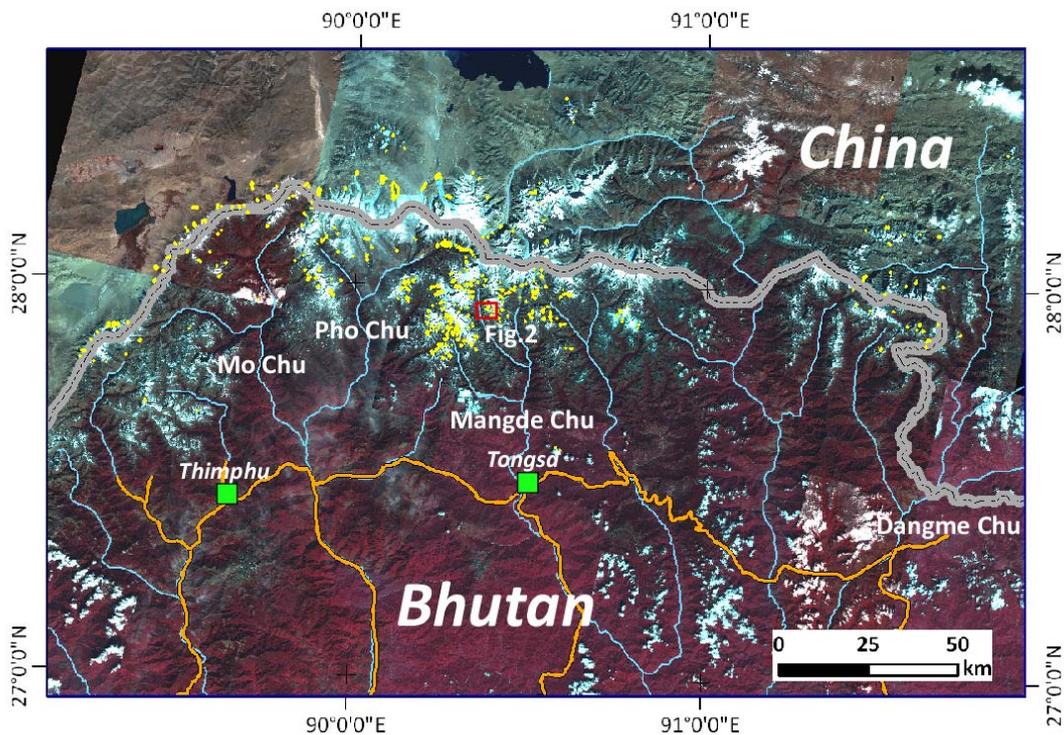


図 2.1 : AVNIR-2 オルソ補正画像に抽出した氷河湖(黄色)を重ねて表示

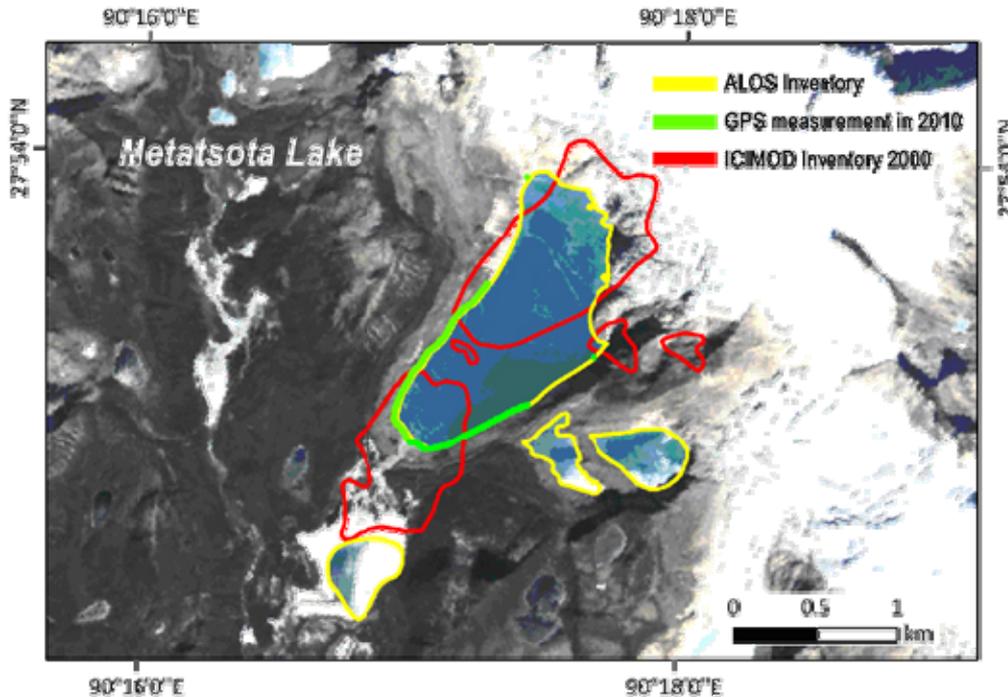


図 2.2 : 抽出した氷河湖(黄)、現地調査結果(緑)と既存の氷河湖インベントリ(赤)の比較例

④カウンターパートへの技術移転の状況(日本側および相手国側と相互に交換された技術情報を含む)

2010年3月に相手国カウンターパートにおいて衛星画像解析に関する初期研修を実施した。二日間の研修に12名が参加し、衛星画像解析の基礎的な講義と実際にデータを用いた実習、さらに外部でGPS計測の実習などを行った。2010年9月の中流域調査においてGPS計測と地表面反射率計測のOJTを実施した。

また、2011年1,2月には2名の若手研究者をICHARMによるGISと洪水解析の研修(JICA長期研修)に派遣したが、当初計画されていた衛星班本邦研修が実施できなかった点は残念である。2011年3月には相手国において衛星画像解析に関するフォローアップ研修を三日間実施し、6名の参加者があった。帰国後すぐにカウンターパートメンバーからデータ提供依頼があり、研修の効果が着実に根付いているものと考えられる。

⑤当初計画では想定されていなかった新たな展開があった場合、その内容と展開状況(あれば)

当初、衛星画像解析手順の統一化を図るための手法検討、精度検証に当初の想定以上に時間を要した。また実施に当たっては予想以上に人的リソースを必要とすることから、来年度の対応を検討する必要がある。ALOSデータの雲等による未整備領域については引き続き観測を継続する。

◆アセス班(研究題目:モレーン内部構造解析/GLOFハザードマップ作成)

①研究のねらい

氷河湖決壊洪水の発生素因となるモレーン内部構造を解明し、地盤工学特性とともに、対象氷河湖決壊のリスクの定量的評価を行う。また、想定される決壊モデルの構築、洪水氾濫シミュレーションを実施し、保全対象となる下流集落やインフラ施設への被災リスクを評価する。さらに、氷河湖決壊洪水がもたらす溪岸浸食のポテンシャルを評価することにより、末端斜面削剥に伴う地すべり安定性について検証し、統括的なGLOFハザードマップの構築、ならびに早期警戒システムのデザインを提示することを目的とする。

②研究実施方法

- 【PDM 活動 4-1】 現地調査および物理探査によりモレーン内部構造を把握し、氷河湖決壊洪水に対する脆弱性を評価する。
- 【PDM 活動 4-2】 ヒマラヤ地域における氷河湖決壊履歴に基づき、決壊洪水の再現解析を実施する。
- 【PDM 活動 4-3】 対象氷河湖について決壊流出解析および洪水氾濫解析を実施する。
- 【PDM 活動 4-4】 マンデチュー下流域の地形地質調査により、河川沿いの不安定斜面を抽出し、河岸浸食危険箇所を含めたハザードマップを作成する。
- 【PDM 活動 5-1】 マンデチュー下流域の村落・インフラ施設に係るインベントリー調査を実施する。
- 【PDM 活動 5-2】 ハザードマップをもとに危険村落の抽出・社会調査を実施し、洪水到達予測時間を勘案したうえで、適切な早期警戒システム計画を立案する。

③当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

- 【PDM 活動 4-1】 対象氷河湖モレーンの土質試験サンプルを採取し、決壊モデル・流出量解析の基礎資料とするため室内土質試験を行った(H21 年度)。また、対象氷河湖モレーンにおいて物理探査(比抵抗 2 次元探査、微動アレイ法地震探査)を実施しモレーン内部の構造解析を実施した(H22 年度)。
- 【PDM 活動 4-2】 1994 年に決壊したルナナ地域ルゲ湖を対象として、決壊洪水の再現解析を行った。また同手法ならびにハザードマップ作成についてカウンターパート側への技術支援を行った(H22 年度)。
- 【PDM 活動 4-3】 マンデチュー流域のザナム C 湖およびメタツオタ湖の決壊洪水を想定して流出解析を実施し、下流村落ジーザム村における浸水位の推定を行った(H21 年度)。湖盆調査結果を踏まえてこれら修正、ならびに他氷河湖の決壊モデルを検討中(H22 年度)。
- 【PDM 活動 4-4】 マンデチュー下流域クンガーラブテン村周辺の地すべり地形密集地域について、空中写真判読により地すべり地形の抽出を行った。また、2003 年にマンデチューを一時的に堰き止めたジョグタン村の河道閉塞について現地調査を実施(H21 年度)。下流域の地すべり地について抽出作業を継続中(H22 年度)。
- 【PDM 活動 5-1】 マンデチュー流域のジーザム村、ラフェ村、ティンティビ村、ならびに他流域における社会調査を実施し、各流域の防災行政ならびに社会的脆弱性について調査した(H22 年度)。
- 【PDM 活動 5-2】 本期間における進捗なし。

④カウンターパートへの技術移転の状況(日本側および相手国側と相互に交換された技術情報を含む)

【土質試験】

地質鉱山局には他ドナー等から供与された複数の土質試験器があるが、そのうち多くは、部品の欠損、スタッフの経験不足により、これまで満足に使用されていなかった。本研究事業では、供与された土質試験器ならびにその他各試験器に関する技術移転を行い、地質鉱山局の土質試験に関する技術向上に貢献した。

【物理探査】

モレーン内部構造解析のための物理探査機(McOHM Profiler 4)一式を専門家携行機材として購入し供与する。本物理探査機の使用手法や解析手法について、氷河湖モレーンにおける現地



図 2.3 物理探査技術移転

調査で技術指導を行うとともに、基礎地盤調査や地すべり調査への展開を含めて、約 1 ヶ月間の OJT を実施した。

【洪水解析/GIS】

1 次元非定常流解析の汎用プログラムである HEC-RAS ならびに 2 次元浸水解析モデル FLO2D を用いて、洪水解析のトレーニングを約 1 週間実施した。また、解析結果をハザードマップとして展開するためのツールとして GIS の基本的な操作法、ならびに危険氷河湖判定のための空間解析手法についての現地トレーニングを 1 ヶ月間実施した。



図 2.4 洪水解析技術移転

【斜面解析】

地すべり地形判読に関する、空中写真・衛星画像を用いた基本指導ならびに現地調査における OJT が実施された。地すべり地形抽出は氷河湖決壊洪水リスク評価の目的のみでなく、道路防災や震災時の天然ダム形成リスク評価等、技術の拡張性が高く、地質鉱山局の日常の実務にも貢献できるものである。



図 2.5 地形判読技術移転

⑤当初計画では想定されていなかった新たな展開があった場合、その内容と展開状況(あれば)

2009 年度

GLOF に関連して、隣接する流域であるポチューーに関して、ゾン(県庁)基礎保護のための河岸浸食防止と流木対策に関する助言を求められた。これに対して、旧流路に規制された越流の危険性を指摘し、必要な対策工(護岸工+鋼製スリットダム+導流溝)を立案し、C/P 側スタッフとともにプナカゾンカク知事に提案した。本件に関しては引き続き必要な助言を行う(PDM プロジェクト目標 3)。

2010 年度

GLOF の発生メカニズムとそれにとまなう災害状況を把握することを目的として、2009 年 4 月の Tshojo 氷河異常出水(ブータンでは最新の GLOF イベント)の現地踏査を行った。その結果、決壊の規模、発生時の土砂流出状況等が明らかにされた(活動 1-3、2-3)。

GLOF のトリガーの一つとされる地震について、その発生傾向を明らかにする手法として活断層(地表地震断層)の抽出がある。しかし、これまでブータンでは活断層の広域的な抽出は行われておらず、経験を要する判読作業の知識・技術も無かった。そこで 2 年次から日本側メンバーに活断層研究者 1 名を加え、活断層の抽出とその技術指導を行った。活断層マップの作成においては、相手国側スタッフ 1 名に可能な限り作業に立ち会ってもらい判読手法の指導を行い、地形判読に関する技術向上に貢献した。

3. 成果発表等

(1) 原著論文発表

- ① 本年度発表総数(国内 1 件、国際 1 件)
- ② 本プロジェクト期間累積件数(国内 1 件、海外 4 件)
- ③ 論文詳細情報

Sakai A, Nishimura K, Kadota T, Takeuchi N. (2009) Onset of calving at supraglacial lakes on debris covered glaciers of the Nepal Himalayas. *Journal of Glaciology*, **55**(193), 909-917. (原著論文・査読あり)

Fujita K, Sakai A, Nuimura T, Yamaguchi S, Sharma RR. (2009) Recent changes in Imja Glacial Lake and its damming moraine in the Nepal Himalaya revealed by in-situ surveys and multi-temporal ASTER imagery. *Environmental Research Letters*, **4**, 045205. doi:10.1088/1748-9326/4/4/045205. (原著論文・査読あり)

Sakai A, Fujita K. (2010) Formation conditions of supraglacial lakes on debris-covered glaciers in the Himalayas. *Journal of Glaciology*, **56**(195), 177-181. (原著論文・査読あり)

小森次郎, 小池徹, 檜垣大助, Tshering Phuntsho. (2010) 2009 年のブータンの自然災害 -地象・水象・気象災害-. *自然災害科学*, **29**(2), 233-243. (原著論文・査読あり)

Ukita J, Narama C, Tadono T, Yamanokuchi T, Tomiyama N, Kawamoto S, Abe C, Uda T, Yabuki H, Fujita K, Nishimura K (2011) Glacial lake inventory of Bhutan using ALOS data: Part I. Methods and preliminary results. *Annals of Glaciology*, **52**(58), 65-71. (原著論文・査読あり)

(2) 特許出願

- ① 本年度特許出願内訳(国内 0 件、海外 0 件、特許出願した発明数 0 件)
- ② 本プロジェクト期間累積件数(国内 0 件、海外 0 件)

4. プロジェクト実施体制

(1) 「プロセス班」グループ(研究題目:氷河湖形成と決壊過程の解明)

- ① 研究者グループリーダー名: 西村浩一 (名古屋大学大学院環境学研究科・教授)
- ② 研究項目
 - 1) ASTER データを利用した初期の氷河湖危険度解析
 - 2) ブータンにおける現地調査をおこなう氷河湖の選定
 - 3) 現地調査による、氷河湖の湖盆図観測や湖に接する氷河の動態観測
 - 4) 氷河湖形成過程解明のための解析
 - 5) 氷河湖拡大履歴のインベントリ作成

(2) 「衛星班」グループ(研究題目:衛星データによる地形情報を用いた氷河湖拡大履歴の解析研究)

- ① 研究者グループリーダー名: 田殿武雄 ((独)宇宙航空研究開発機構・主任研究員)
- ② 研究項目
 - 1) 過去の GLOF 事例を対象に衛星データ解析にもとづいた地形解析
 - 2) プロセス班と連携しつつ TERRA/ASTER データによるベースマップの作成
 - 3) 高解像度・高精度の ALOS/PRISM による詳細標高データの抽出および検証
 - 4) 多年・複数衛星センサのオルソ補正画像による氷河湖拡大履歴のインベントリ整備

- 5) アセス班と連携しつつ洪水氾濫解析・ハザードマップへの応用
- 6) ブータン国研究者に対する衛星画像解析技術に関する研修の実施(現地・日本国内)

(3)「アセス班」グループ(研究題目:モレーン内部構造解析/GLOF ハザードマップ作成)

①研究者グループリーダー名: 小池徹 ((株)地球システム科学・技術主任)

②研究項目

- 1) 物理探査手法を用いた対象モレーンの内部構造解析
- 2) 地質工学的性質に基づいたモレーンの強度設計
- 3) 内部構造および地質工学的性質を考慮したダム決壊モデルの策定
- 4) マンデチュー流域の洪水流により不安定化が懸念される斜面の抽出(判読と現調)
- 5) 流出解析を二次元氾濫解析による氾濫シミュレーション解析の実施
- 6) 4),5)の結果に基づいたマンデチュー流域のリスクエリアの抽出
- 7) マンデチュー流域コミュニティの社会的脆弱性を考慮したハザードマップの整備
- 8) 上記研究成果に基づいた早期警戒システムの基礎設計の実施

以上