

ネパール・セティ川災害（2012年5月5日）

現地調査報告書



2012年9月

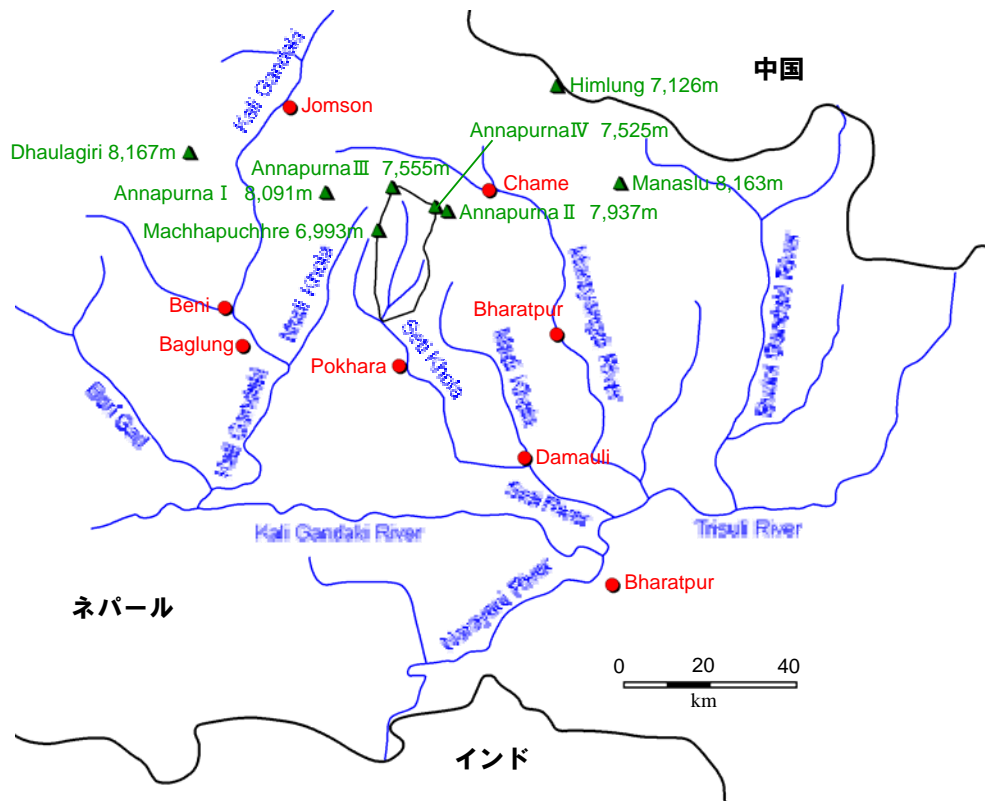
NPO 法人ネパール治水砂防技術交流会

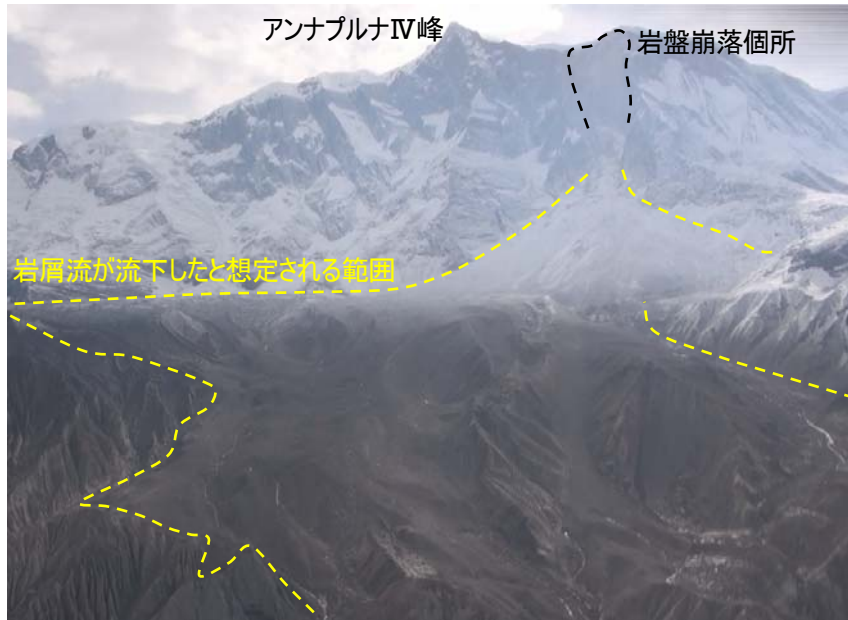
一般社団法人国際砂防協会

口絵



セティ川流域 (Google earth から作成)

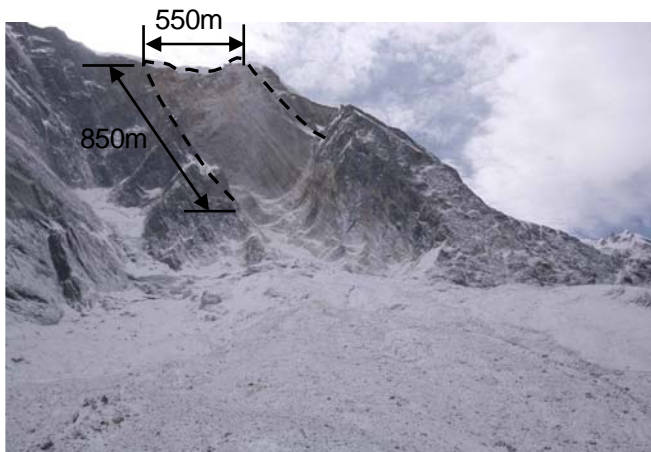




アンナプルナIV峰西壁で発生した岩盤崩落の全景 (写真中央に平らな面が見られる)



土柱状をなす湖成堆積物 (写真右側の方は頂部が丸みを帯びている)



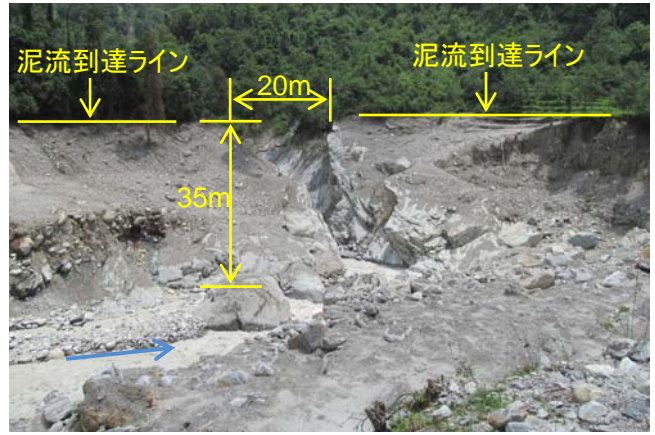
アンナプルナIV峰西壁で発生した岩盤崩落(画面中央が岩盤崩落個所であり、麓部の緩斜面には粉碎した岩片が見られる)



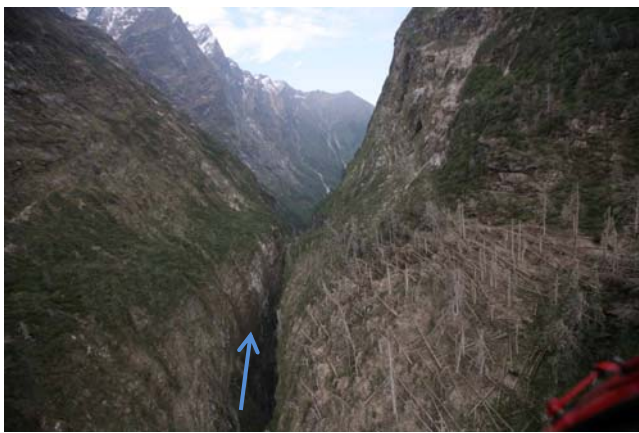
セティ・ゴルジュを形成(写真下方には岩屑流による泥の付着がみられる)



セティ・ゴルジュの河床部



Kapuche の狭窄部(河道閉塞後に決壊)



下流側に向かって倒れる樹木(樹木の表面には泥の付着がみられる)



Kapuche の狭窄部直下の河道



Kapuche の閉塞により湛水した Yomo(写真中央に流されずに残った人家がみられる)



Kharpani 吊り橋付近での被害発生(写真中央の吊り橋が閉塞し、洪水が左岸の段丘面に乗り上げた)

目 次

1. はじめに	1
2. 調査の目的及び調査方針	3
3. 調査団員	3
4. 日程	4
5. 被害概要及び政府・国際機関等の対応	5
6. 調査結果と提言	6
6.1. 現地調査の準備	6
6.2. 発生域の地形・地質、岩盤崩壊と岩屑なだれ発生 の考察	9
6.3. 岩盤崩壊・洪水流下経過の考察	24
6.4. 岩屑なだれ突入点からカラパニまでの泥流流下	26
6.5. ピーク流量の推定	30
6.6. ヒアリングで得られた災害発生前の諸現象	38
6.7. 岩屑なだれから泥流への移行について	41
6.8. 調査結果のまとめ	42
6.9. 今後の課題	45

参考資料

参考 1 面談者リスト	参-1
参考 2 被災者・関係者へのインタビュー	参-3

別添資料

別添 1 写真集	
別添 2 入手したビデオ	

1. はじめに

2012年5月5日午前、アンナプルナIV峰西壁の岩盤崩壊を起因とする洪水^{*1)}がセティ川を流下し、沿川の集落や観光地を襲った。現地の被災状況については、在ネパール日本大使館星野書記官から逐次報告を受け、NPO法人防災情報研究所の「Saboお知らせ」やOCHA (United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs) の一連の Situation Report (No.1~No.5) からも有益な情報を得ることができた。

NPO法人ネパール治水砂防技術交流会 (NFAD) は、今回の災害が大規模な土砂災害の様相を呈していること、ICIMOD (International Centre for Integrated Mountain Development) などの調査報告において、さらに詳細な原因究明の調査の必要性が勧告されていること、また、この災害のメカニズムを調べることはネパールヒマラヤ周辺の今後の防災にとって重要であることなどを鑑み、調査団の派遣を決定し、現地調査経費等について一般財団法人砂防フロンティア整備推進機構の木村基金へ助成を申請した。

これを受けて、大井、檜垣、八木、臼杵、吉野の5名からなる調査団が急遽編成された。大井、檜垣、八木により、ICIMOD、DWIDP (Department of Water Induced Disaster Prevention)、大学関係者等の人脈ネットワークから詳細な情報を収集するとともに、臼杵、吉野が衛星画像などを取り寄せて事前に分析し、国際機関、メディア・Blogなどからも多くの情報を収集して調査準備を進めた。

事前に多くの情報を収集したものの、現地状況については依然として不明な点が多く、調査実施の決定には多少時間を要した。しかし、調査団員が同時に調査できる期間は限られていたこと、なるべく早くに現地調査を実施する必要があるとの判断から、現時点で把握している情報をもとに、災害発生から約1カ月後の6月2日~6月10日に現地調査を実施することとした。

この時期、ネパールは雨季であったが天候に恵まれたこと (午前は曇りまたは晴れ、午後は雨)、また、万全なロジスティクスが功を奏し、当初予定した行程どおりに現地調査を実施することができた。「ヘリコプター調査」では、アンナプルナIV壁西壁で発生した岩盤崩落箇所の周辺を何度も巡回し、岩盤崩壊や岩屑流について多くの知見を得ることができた。さらに、マチャプチャレ、アンナプルナIII峰及び同IV峰に囲まれた円形の小盆地にランディングし、氷成堆積物の採取も行った。このほか、「セティ川沿いの調査」では、激しい河岸浸食と狭窄部におけるダムアップを確認することができた。

現地調査では被災者や災害を目撃した人々にインタビューを行った。通訳を介しての会話であったが、数多くの貴重な証言を得ることができた。このほか、学校やVDC事務所 (村役場) にもインタビューも行った。突然の訪問であったにも関わらず、熱心にインタビューに応じて下さり、多くの情報や資料を提供して頂いた。

帰国当日 (6月9日) の午前、主要な政府機関や援助機関の代表者にカトマンズの駐ネパール日本国大使公邸へ参集して頂き、今回の現地調査の緊急報告会を行った。短い時間で

はあったが、熱心な質疑応答が行われ、ネパール防災関係機関の今回の災害に対する多大な関心と、私ども調査団に対する期待の大きさを実感した。調査団としても、今回の現地調査結果を関係機関と共有するために、何らかの会合を設けたいと考えていたので、このような防災機関の幹部を集めて報告する機会を与えて頂いたことに対し、高橋大使及び大使館関係者に感謝の意を述べた。

帰国後、現地調査結果や収集した資料等をもとに本報告書を取りまとめた。ヘリコプターによる発生源の調査、河川沿いの踏査、目撃者や被災者とのインタビューといった実証的な調査により、これまでの ICIMOD などの調査で不明であったいくつかの点が明らかとなった。しかし、今回の短期的な現地調査によって全てが解明されたわけではなく、依然として多くの研究課題が残されている。今回の報告書の提言が、ヒマラヤ及び周辺における防災対策に有効活用され、今後の研究進展の礎となることを期待する。

*1 上流の発生源から下流に至るまで、岩屑なだれ、泥石流、洪水等流下形態が異なるので、本文では使い分けているがここでは総称的に洪水とした。

2. 調査の目的及び調査方針

1) 調査の目的

- ① 災害発生の原因とメカニズム
- ② セティ川における災害の再発可能性と警報・避難等の防災に関する提言
- ③ セティ川以外の地域における同様な災害発生の可能性の検討

2) 調査方針

- ① ヘリコプターによる調査、現地踏査、被災者・目撃者へのインタビュー等の実証的な調査の実施
- ② ネパール政府、国際機関、大学、メディア等との緊密な連携及び情報収集
- ③ 調査結果の公表とネパール国内との連携による今後の防災対策及び研究への活用

3. 調査団の編成

現地調査は、特定非営利活動法人ネパール治水砂防技術交流(NFAD)が、一般社団法人国際砂防協会の協力を得て実施した。

メンバー表

大井英臣	団長, NFAD (ネパール治水砂防技術交流会) 理事長, 国際砂防協会会長
檜垣大助	NFAD メンバー, 日本地すべり学会会長, 弘前大学教授
八木浩司	NFAD メンバー, 山形大学教授
臼杵伸浩	NFAD メンバー, 砂防専門家, アジア航測株式会社
吉野弘祐	シミュレーション専門家, アジア航測株式会社

4. 日程

	八木、	桧垣、大井・白杵・吉野
6/2 (土)	羽田 0:20→BKK4:50 TG661 BKK10:15→KTM 13:30 TG319 【KTM 泊】	
6/3 (日)	午前 情報収集	羽田 0:20→BKK 4:40 TG661 BKK10:15→KTM 13:30 TG319
	午後 ヘリコプターパイロット、旅行エージェントと打合せ 内務省訪問 (大井)	【KTM 泊】
6/4 (月)	ヘリコプターによる移動 KTM 6:40→Karuwa 7:30 ヘリコプターによる調査 8:00～9:40 現地調査 Kapuche、Sano Khobang (被災者の集団移転地)	【Karuwa 泊】
6/5 (火)	現地調査 (大井:午前 Machapuchare VDC 職員インタビュー於 Karuwa)	【Karuwa 泊】
6/6 (水)	早朝 (6:30-8:00) Kapuche 再調査 (Gorge を目指したが河岸決壊に阻まれ実現せず) 午前 Karuwa→Kharapani。 午後 Kharapani 周辺インタビュー	【Kharapani テント泊】
6/7 (木)	Kharapani→Pokhara (車両) Pokhara→KTM (空路) 【KTM 泊】	午前 Diplang 小学校訪問 午後 Kharapani→Pokhara (車両)。途中 SardiKhola VDC 訪問。 【Pokhara 泊】
6/8 (金)	KTM 13:30→BKK 18:15 TG320 BKK 22:10 TG640	早朝 SetiKhola 峡谷 Pokhara→KTM (空路) 午後 報告書作成 【KTM 泊】
6/9 (土)	成田 6:20	9:30～11:00 号国会 (大使公邸) KTM 13:30→BKK 18:15 TG320 BKK 22:10 TG640
6/10 (日)		成田 6:20

5. 被害の概要、政府・国際機関等の対応

1) 被害の概要（内務省資料）

死者・行方不明	<ul style="list-style-type: none"> 死者 40 人。内 28 人は身元が確認され家族に引き渡されたが残り は身元不明。外国人はウクライナ人 3 人。 行方不明 32 人*
建物	家屋 20 戸、公共建物 1、寺院 2
インフラ施設	道路 500m、吊り橋 2、水道施設 2
被害総額	NRs 85,000,000**

*OCHA 資料では 30 人

**OCHA 資料では NRPs 49,628,000

2) 政府、国際機関等の対応

5月5日	<ul style="list-style-type: none"> 政府は「災害救援委員会」を設置。「緊急オペレーションセンター」が活動を開始。 内務省・軍は、ヘリコプターと捜索・救援隊を現地へ派遣。 カスキ県災害救援委員会、軍隊、警察、赤十字、国連機関等が捜索・救援活動開始。
5月6日	<ul style="list-style-type: none"> 首相が被災地視察。内務大臣、マオイスト党党首随行。家族を失った家族に NRs125,000、家を失った家族に NRs25,000 の支給を発表。
5月8日 ～9日	<ul style="list-style-type: none"> 合同調査団（DDRC、ICIMOD、警察、赤十字、国連機関等）による被害調査
5月9日 ～10日	<ul style="list-style-type: none"> ICIMOD 専門家チームによる現地踏査（内務省職員同行）

なお、OCHA の Situation Report は No.1(5月6日)～No.4(5月10日)まで4回出された。政府からの国際救援活動要請は出されなかった。

6. 調査結果と提言

6.1. 現地調査準備

今回の災害現象の報道や HP、インターネット記事では、フラッシュフラッド・洪水・ランドスライド・土石流などさまざまな用語が使われている。実際、ハイヒマラヤの土砂移動発生場から山麓の都市ポカラに達するまでに、土砂移動の形態は変化している。ここでは、現地調査にもとづき、災害全体あるいは災害を起こした現象全体を指す場合は、洪水 (flood)あるいはフラッシュフラッド、運動タイプの推定にもとづく土砂移動現象を指す場合は、岩盤崩壊・岩屑なだれ・泥流・土石流などの用語を用いることとした。

この災害では、発生直後から、マスコミ記事やインターネットで、被災状況・洪水流下状況を捉えた画像などが多数公開された。また、洪水発生当時ポカラに滞在していた伏見硯二氏（元ネパール JICA シニアボランティア）からも洪水状況調査報告(伏見, 2012)を入手した。これら既往資料をもとに、各研究者より、洪水発生直前にセティ川最上流部アンナプルナIV峰西面・マチャプチャレ峰東側で大規模崩壊または雪崩の発生が指摘されていた。そこで、これら上流域で発生した現象確認と下流域の洪水発生との関係を調査するため、上流域におけるヘリコプター調査を計画した。また、1日先行してカトマンズに入りした八木が、既に現地調査を実施した ICIMOD の S.Bajracharya 博士に面会し、情報収集を行った。

6.1.1. カトマンドゥでの情報収集

5月末に現地調査を行った Bajracharya 博士から、セティコーラ（コーラ(Khola)はネパール語で中・小規模の河川の意）で発生したフラッシュフラッド災害の上流域における現象の情報を以下に示す。

- ① アンナプルナIV峰西面の崩壊にともなう岩屑なだれと砂塵（ロックフラワー）がアンナプルナIV峰西面の基部の沢に流れ込んだ。しかし、岩屑なだれによる降灰域は、アンナプルナIV峰西面基部に限定され狭く、下流に流れた細粒物質の土砂量をこの降灰地域だけで賄えるかは疑問である。このため岩屑なだれによって強風や震動を引き起こされたことよってセティコーラ源流部の河床に溜まった細粒物質が地すべりを引き起こしたことも考慮しなくてはならない。
- ② ゴルジュ区間右岸の岩盤崩落により、セティゴルジュ(狭窄部)周辺に小規模な閉塞をもたらしていた、あるいは洪水流によってゴルジュ壁の崩壊があった可能性がある。崩壊物質は現在でも残されていることが ICIMODO 撮影の画像に残されていることから、それを乗り越えて流れたことで段波が発生した可能性がある。

- ③ 本川を流れた土石流が支川を閉塞し、支川に形成された天然ダムの決壊が継続したため段波状に3時間泥流・土石流を引き起こした可能性がある。支流の合流点を閉塞した証拠となる流木の存在や木々のなぎ倒され方の分析が必要である。

以上のヒアリング結果を基に、調査方針を検討し、以下の点に留意してヘリ調査の実施方針を決定した。

- ①岩屑なだれの衝撃による震動によって新たな細粒物質が流れたとしても、小盆地内の周辺斜面を崩壊させることは考えにくく、別の供給元を検討する必要がある。たとえば、ゴルジュ底に堆積していた細粒物が衝撃で液状化し流下した可能性も視野に入れ、小盆地内の周辺斜面での新たな地すべり・崩壊の有無を確認するとともに、ゴルジュ内および岩屑なだれ通過部の地形変化に注目する。
- ②セティゴルジュ右岸の岩盤崩落箇所が一時的に河道を閉塞したかどうかを確認する。
- ③段波的挙動を示した泥流の原因として指摘されている支川の河道閉塞の痕跡の有無について確認する。

以上を踏まえて、次のような現地調査を実施した。

1) ヘリコプター調査

6月4日(月)にカトマンズより直接被災地域にあるカルワ(Karuwa)に入り、荷物を下ろした後セティ(Seti)川に沿って北上し、アンナプルナ西側にある崩壊地、その流下範囲の海拔3500-5000mにある緩斜面をなす地域、その下流のセティ川狭窄部から多数の犠牲者を出したカラパニ(Kharapani)にかけての河川状況を調査した。

2) 現地踏査

大きな泥流被害を受けたのは、最奥集落マチャプチャレ(Machapchare) VDCのサダル(Sadal)、ヨモ(Yomo)、サルデイコーラ(Sardi Khola) VDCの、カラパニ、プルジュンコーラ(Purujung Khola)である。これら地域について、6月4日~7日に現地踏査を行った。これらの調査範囲を図6.1.1に示す。

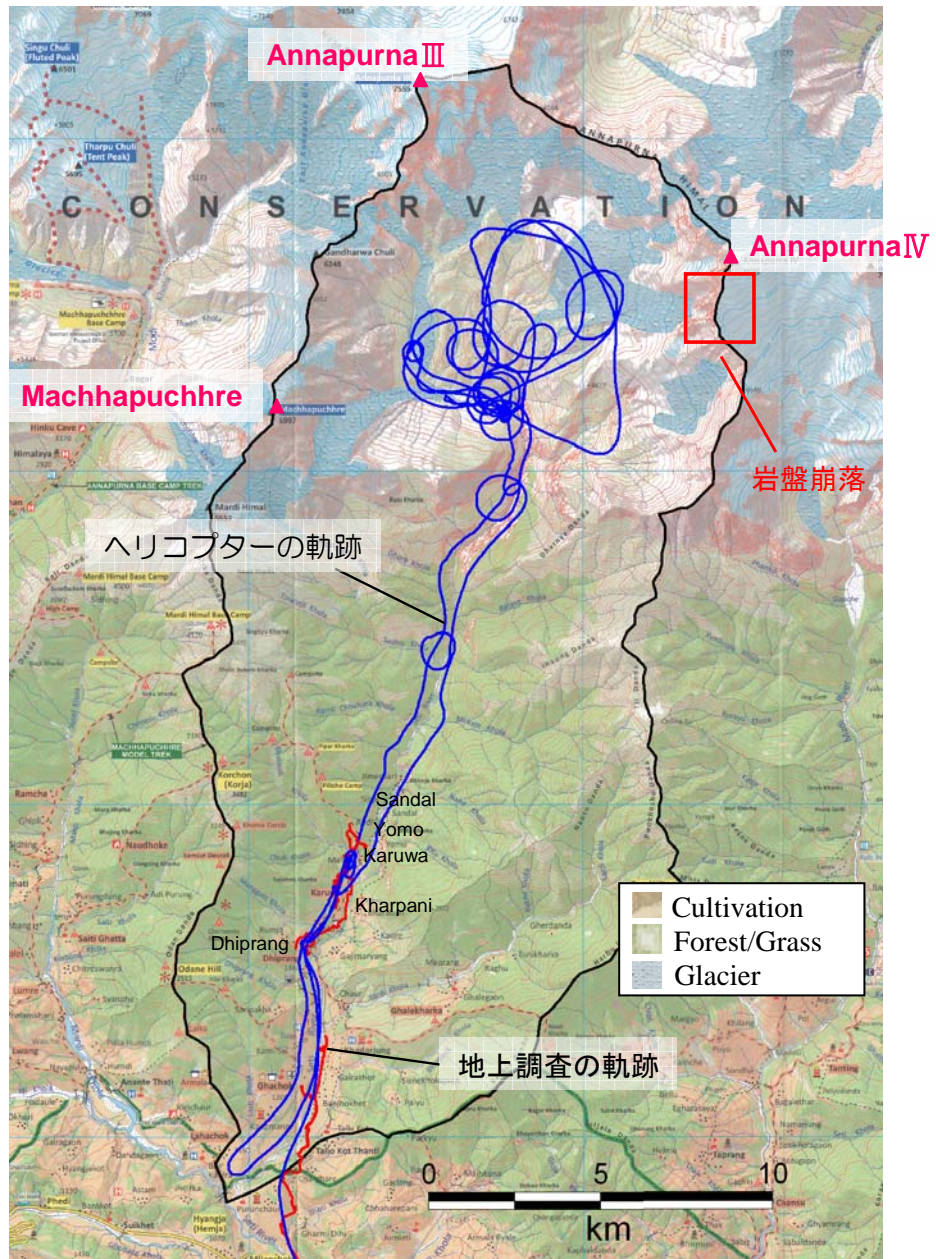


図 6.1.1 ヘリコプター調査及び現地踏査のルート

6.2. 災害発生域の地形・地質、岩盤崩壊と岩屑なだれ発生 の考察

6.2.1. 災害地域の地形・地質概観

アンナプルナヒマールは、海拔 8091m のアンナプルナ I 峰を主峰とし、東をマルジャンディ川、西をカリガンダキ川に限られ東西 90km に亘って 7000m 以上のピークが 10 座以上連なる山塊である。アンナプルナヒマール南面は、モディコーラおよび調査対象のセティコーラなどの河川の源流域となっており、前者はアンナプルナ I 峰およびそれらを取り囲む 7000m 峰 6 座、後者はマチャプチャレ、アンナプルナ III 峰および同 IV 峰に囲まれた円形の小盆地状地形をそれぞれ呈している(口絵)。

セティコーラ源流部の小盆地谷底は、周囲の 7000m 級の主稜線から流下した氷河が集合して形成された直径約 6km、谷底高度 3400~4600m の凹地である(口絵、図 6.2.1)。この小盆地状地形は、現在のセティゴルジュ上部に沿って発達する U 字谷に切られるように南側に狭く開いている(写真 6.2.1)。小盆地状地形内には層厚約 1000m の層理構造の発達した石灰質泥層 (marl) が堆積するが、侵食によって土柱状あるいは屏風状の地形を呈している(写真 6.2.2)。この堆積物は、ここにかつて湖盆が存在したことを示しており分布高度から、氷河湖堆積物と考えられる。

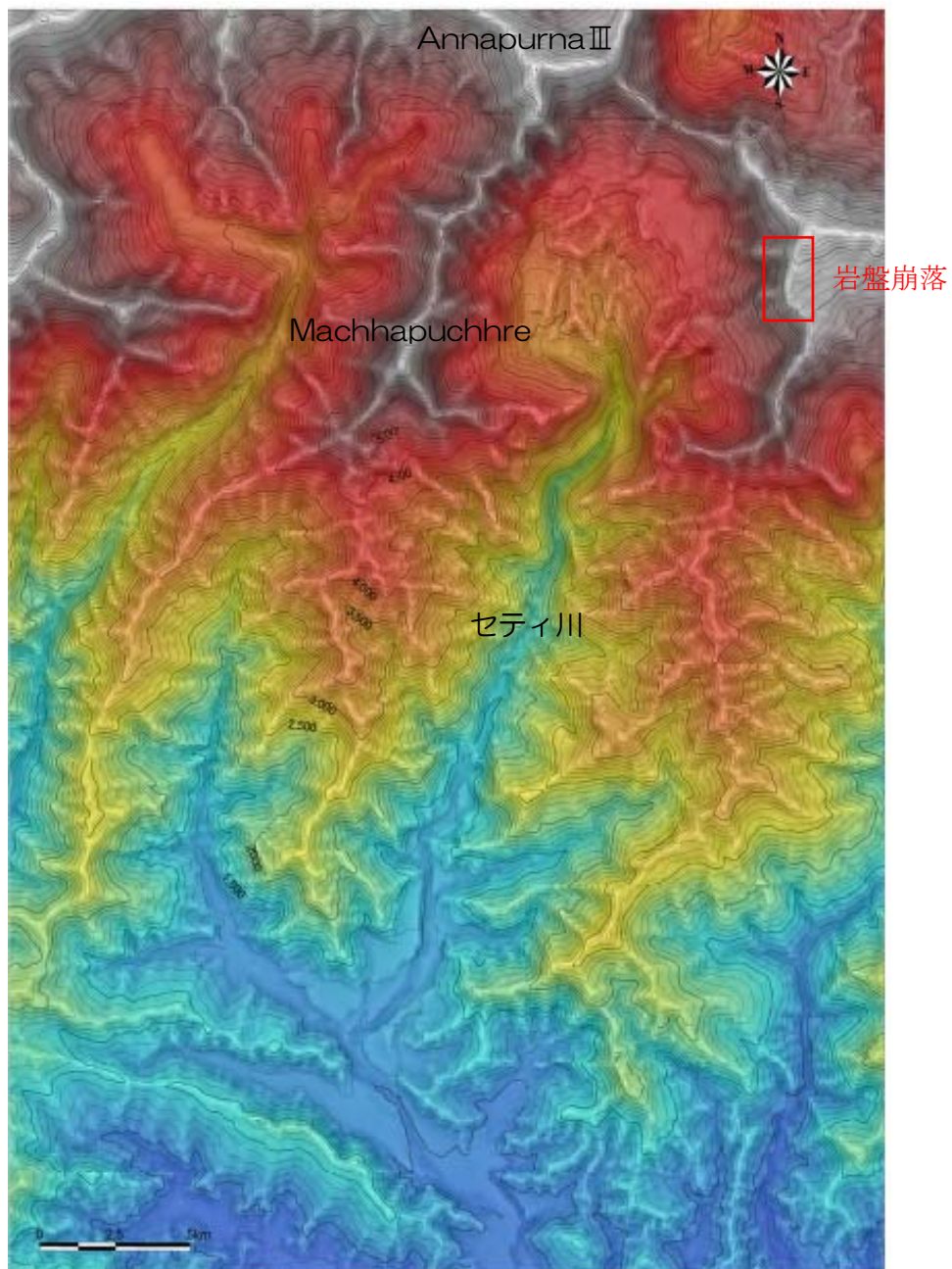


図 6.2.1 等高線図 (SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)より作成)



写真 6.2.1 小盆地状地形から下流側への流出口となったU字谷とそれをさらに下刻するセティ・ゴルジュ



写真 6.2.2 セティ・コーラ源頭部に分布する氷河湖成の石灰質泥層と
屏風状・土柱状地形群

すなわち現在の小盆地状地形開口部は、最終氷期末までモレーン等の氷成堆積物で閉塞され大規模な氷河湖が存在したと考えられる。セティコーラ下流にあるポカラ盆地には、発達年代が 12,000 年前および 700 年前頃とされる厚い土石流からなる段丘が広く発達している (Yamanaka et al.,1982; Koirala,1998)。それらはアンナプルナヒマール内での氷河湖決壊 (GLOF) によって土石流が流下して発達したことが示唆されている。従って、小盆地状地形開口部を閉塞していた氷成堆積物が決壊し背後の氷河湖水が流出した後、石灰質泥層からなる氷河湖堆積物がバッドランド的に侵食され、屏風状・土柱状地形が形成されたのであろう。なお、土柱状・屏風状地形群は、稲が畝をなす水田に似ていることから、人々は古よりこの盆地底の景観を *full of grain*、*Harvesting field* と呼んできた。それが「豊穰の女神」を意味するアンナプルナの語源ともなっているとのことである。

この小盆地状地形を取り囲む山群の地質は、テーチスと呼ばれる石灰岩質堆積岩から構成される。それらは、下位より古生代オルドビス紀・ニルギリ層群、シルル紀ヘデボン紀・ソンプレ層群から構成される。それらの岩層は、それぞれ微細結晶質石灰岩・ドロマイト質砂岩・石灰質頁岩・シルト岩、および珪質岩層を挟んでドロマイト質黒色頁岩・石灰岩互

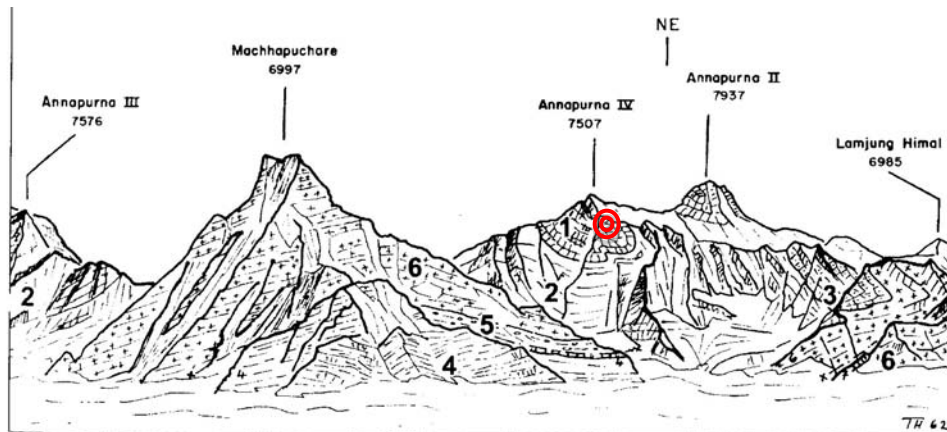


Fig. 44 The Annapurna Range seen from the south (from airplane, Hagen, 1968).
 1-2: Tethys sediments (1: Devonian, 2: Silurian-Ordovician-Cambrian), 3-6: Higher Himalayan gneisses (3: Calcsilicate rocks, 4: Paragneisses, 5: Mixed gneisses and migmatites, 6: Granite-gneisses) (G6).

図 6.2.2 マチャプチャレ・アンナプルナIV峰周辺の地質とスケッチ
 (赤丸印付近から下部が崩壊した)

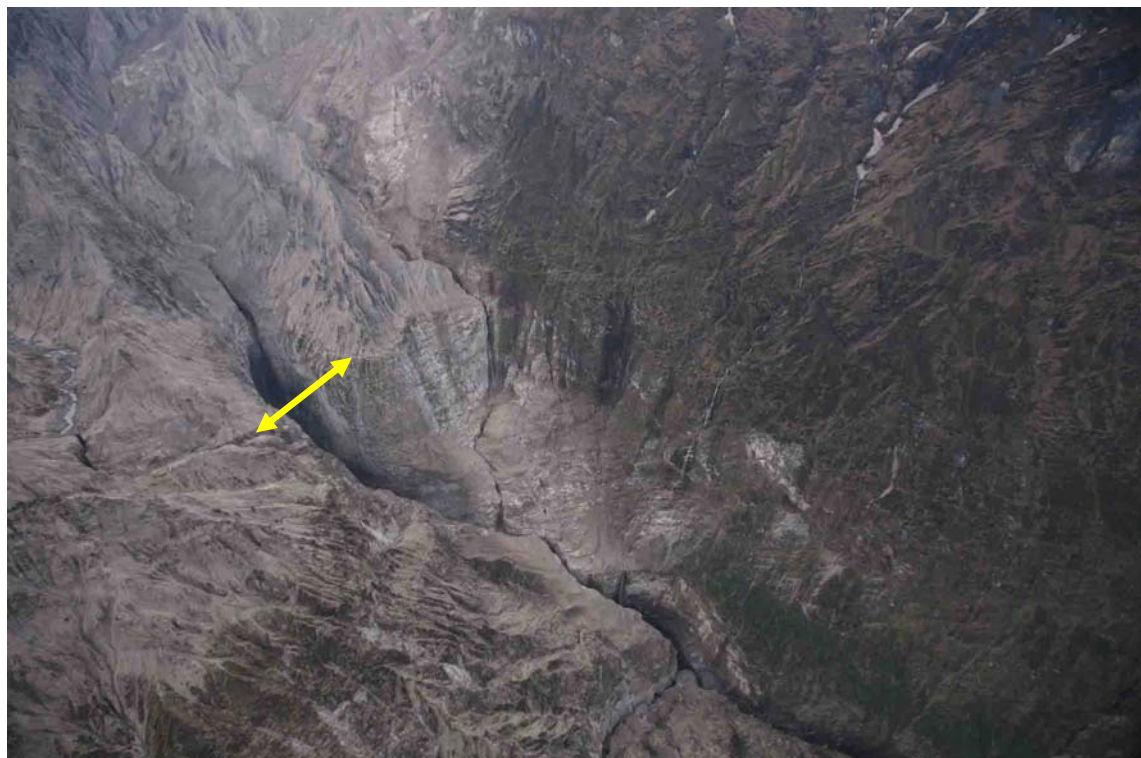


写真 6.2.3 marl 下位のニルギリ層群を下刻して発達するスリット状のゴルジュ
 黄色矢印部に marl とニルギリ層群の境界がある

層である。以上の堆積岩類は、アンナプルナ デタッチメントと呼ばれる正断層に沿った北側への変位に伴って折りたたまれたように激しく褶曲している (Godin et al.,1998)。アンナプルナIV峰南には南にプランジした軸面を持つ褶曲が認められる (図-6.2.1 : Upreti & Yoshida ed,2005)。

現在の水流は、小盆地状地形外側に続く U 字谷の谷底を谷中谷状に下刻してゴルジュを形成している。また小盆地状地形内で石灰質泥層 (marl)は下流側で既に基底まで侵食され、下位に分布するニルギリ層群を溶食しながらスリット状に下刻し 200m 以上の深いゴルジュを形成している(写真 6.2.3)。

6.2.2. 岩盤崩壊と岩屑なだれ

岩盤崩壊はアンナプルナIV峰から南に派生する標高点 6,998m にかけての稜線西面で発生した(写真 6.2.4)。崩落物質は、基部で粉碎され氷河上に飛散するとともに、岩屑なだれとして氷河の下位にある石灰質泥層 (marl:旧氷河湖堆積物) 分布域を流れ下った(写真 6.2.5)。



写真 6.2.4 アンナプルナIV峰南の標高点 6,998m 付近直下西向き斜面で発生した崩壊
(粉碎された岩屑は崩壊後の降雪で覆われ白くなっている)
崩壊部分で南(画面右)に傾斜するニルギリ層群の層理の発達がよくわかる



写真 6.2.5 氷河上に飛散したボウルダーを含む岩屑

画面中央下部の白輝部は氷河末端(赤丸部)。氷河両脇のモレーンリッジが丸くなっている



写真 6.2.6 岩屑流の流下した谷地形

①～④までの谷のうち画面右側(南側)の③・④谷に沿って丸みを帯びた地形になる



写真 6.2.7 岩屑なだれの通過で侵食された地表
谷地形④(写真 6.2.6) 左岸上部に残された爆風による侵食痕(矢印)

アンナプルナIV峰西面直下の氷河末端から流下する4本の谷に沿って、石灰質泥層 (marl) がなす鋭利な尖った針状の形状を示す土柱状地形表面や尾根が、丸みを帯びていることから、岩屑なだれの通過に伴って表層侵食が強く働いたものと考えられる。また、石灰質泥層からなる屏風状・土柱状地形が、より南側の谷に沿ったものほど丸みを帯びて、本来の尖った鋭利な形態を残していないことから、岩屑なだれの主体は谷③および④に沿って流れたものと考えられる。また、谷②と③とを境する屏風状の地形(比高 100-200m)は、基部で侵食受けているが上部では強い侵食を受けていないように感じられる。従って、岩屑なだれは、ロックフラワー(岩屑由来の土煙)を1,000m以上の高さに巻き上げながら流下したが破壊力を持った岩屑なだれの高さは100mを超えることはなかったのではなかろうか。谷地形④左岸上部の側壁には岩屑流の通過に伴って谷壁斜面に筋状の侵食痕が残されている(写真 6.2.7)。地表を侵食出来る程度の破壊力のある爆風の高さは、地形図から判断してここではせいぜい5-60m程度であったようである。しかし、谷③と④を流れた岩屑なだれは、下流側で合流し一部はゴルジュに流れ込みながらも、多くはニルギリ層群の石灰岩層の上部を流れ下っている。そして小盆地状地形の開口部(セティゴルジュの開始点:アンナプルナIV峰西面から流下する河川とマチャプチャレ東面およびアンナプルナIII峰南東面



写真 6.2.8 セティゴルジュ開始点付近の地形と岩屑なだれの流下痕

谷③、④は合流後石灰岩の急崖をジャンプし赤○印周辺に落下。谷②に沿った岩屑なだれも同様。谷①に沿った岩屑なだれ(淡緑矢印)は、画面左中央の尾根上部に駆け上がりながら森林をなぎ倒しながら土砂を付着させた。

から流下する河川の合流点)手前で大きくジャンプしセティゴルジュ開始点付近の針葉樹林を直撃し、それらをなぎ倒した(写真 6.2.8, 写真 6.2.9)。亜高山帯針葉樹林の樹高は30-40m、石灰質泥層 (marl:旧氷河湖堆積物) の下位にある石灰岩層は、雨水や融雪水が細く深いゴルジュを形成している。岩屑なだれの流下通路の縁部には泥層が厚く付着していることから、この時点で一部の岩屑は水を巻き込んで泥流化していた可能性がある。

合流部下流側の上部斜面(河床からの比高100-200m)には針葉樹や落葉樹がセティ・ゴルジュを取り巻くように群生している。それらは下流側方向に倒れたり上部が折れたりし、上流側にのみ泥が付着している(写真 6.2.10)。これらの事実は、岩屑なだれ(一部泥流化)が石灰岩層上部から合流点になだれ落ちる際、流下方向に爆風を引き起こしながら細粒岩屑を飛散させたものと考えられる。また、岩屑なだれ本体は(写真 6.2.9)に示した針葉樹が倒れた斜面下部の谷壁斜面よりも上流、合流点から上流よりのスリット状のゴルジュ(写真 6.2.8)からセティゴルジュに流入したと考えられる。



写真 6.2.9 なぎ倒された針葉樹林

上は全体写真、左は拡大写真

セティゴルジュ開始
点に接した尾根上にあ
った針葉樹林がなぎ倒
されている。

ボウルダー大の岩屑(白
色～灰色)が土砂中に点
在している。

矢印は針葉樹の倒れた
方向



写真 6.2.10 岩屑なだれ通過時に爆風としぶきでなぎ倒された針葉樹林
写真 6.2.9 で示した場所の対岸(下流側)

6.2.3. 地形観察から見た岩屑なだれの移動と泥流への変化

上部ではロックフラワーによる地表全域での降灰が多く、一方、セティゴルジュに近づくにつれ重い泥質物質が流下通路に沿って厚く地表を覆っているように見られた。これは、この岩盤崩壊に起因する岩屑なだれが、流下とともに谷沿いの水を付加していったものと推定される。すなわち岩盤崩壊が氷河上面に衝突することで岩屑なだれへと変化し、速度を抑制する緩傾斜帯がない状態で平均傾斜 8.5 度の区間を 10km に亘って流下した。その結果、岩屑なだれは速度を緩めることなく、氷河上から旧氷河湖堆積物分布地域を通過する際は、主に地表に対する侵食力が加わり細粒物質を巻き込みながら流下した。その後旧氷河湖堆積物の分布域の谷底(谷①、②、③、④)を通過するうちに流路沿いの水を巻き込んで一部高密度流化した。また、別の流路を通過してきた高速の高密度流同士が合流し、最後に 300m 程度落下してセティゴルジュ開始点付近の尾根に衝突し、最終的にセティゴルジュに流入した。またより北側の経路(谷①)を通過したものは南側の経路を通過したものに比べやや遅れて対岸の尾根を乗り越えながらセティゴルジュに突入していった。以上のようなプロセスでセティゴルジュに流入したデブリは、より豊富な水量によって完全に泥流化しさらに 20km 以上を段波的な特徴を加えながら流下した。

6.2.4. 岩盤崩壊地の諸元

図 6.2.3 に示す崩壊前後の衛星写真(Landsat7)からは、アンナプルナIVの西側斜面の崩壊地及び直下に広範囲に堆積した土砂が確認できる。崩壊地の諸元(崩壊幅、崩壊深、崩壊長)については、崩壊前後の Landsat7 により観測された衛星写真及び、ヘリから撮影した写真をもとに推定した。解析に用いた衛星写真を以下に示す。

表 6.2.1 崩壊前後の衛星画像撮影日

	撮影日
崩壊前	2012/4/20
崩壊後	2012/5/6

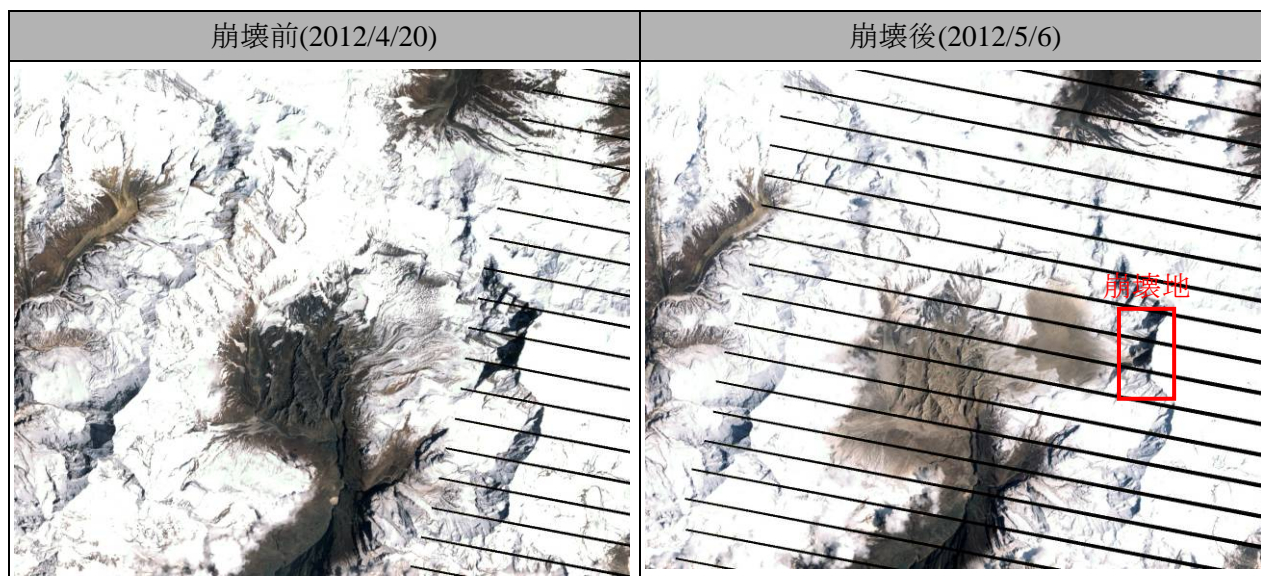


図 6.2.3 崩壊前後の衛星写真(Landsat7 画像)

推定した岩盤崩壊地の諸元を以下に示す。

表 6.2.2 岩盤崩壊地の諸元

	計測値(m)	根拠
①崩壊幅：B	約 550	衛星写真から判読
②崩壊深：D	約 100(最大) 約 70(平均)	衛星写真から判読
③崩壊長：H	850	崩壊幅 550m を元に、ヘリからの写真より推定

①崩壊幅

崩壊幅は、衛星写真から崩壊地を判読し、GIS を用いて計測した。

②崩壊深

崩壊深についても同様に、衛星写真から崩壊地を判読し、GIS を用いて計測した (図 6.2.4)。

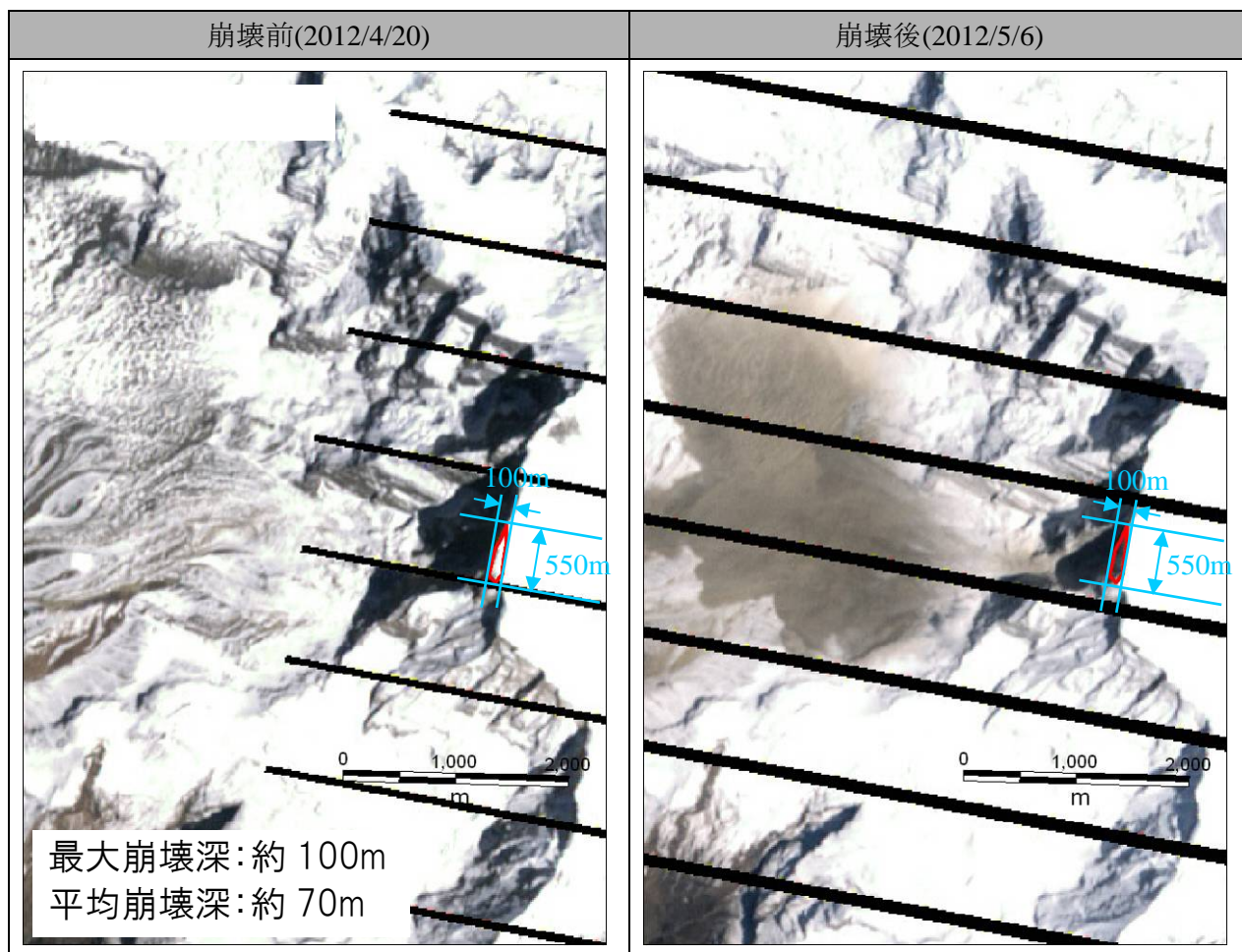


図 6.2.4 崩壊前後の衛星写真からの規模推定

③崩壊長

①で求めた崩壊幅 550m を元に、ヘリから撮影した写真より推定した (図 6.2.5)。



図 6.2.5 ヘリ調査撮影写真(2012/6/4)からの規模推定

④ 崩壊土砂量の算出

崩壊土砂量 V_1 は、以下の式より算出した。

$$\begin{aligned}V_1(m^3) &= B(m) \times D(m) \times H(m) \\ &= 550(m) \times 70(m) \times 850(m) \\ &= 32,725,000(m^3)\end{aligned}$$

この結果アンナプルナIVの西側斜面の崩壊土砂量は約**3,273万 m^3** と算出された。

6.2.5. 流出土砂量の推定

図 6.2.4 に示す崩壊前後の衛星写真(Landsat7)からは、アンナプルナIVの西側斜面直下に広範囲に堆積した土砂が確認できる。土砂の堆積が確認できる範囲は比較的勾配が緩やかであり、堆積域よりもさらに西側では勾配が急になる。すなわち、岩盤崩落による生産された土砂は、その一部が斜面直下の勾配の緩やかな部位に堆積し、それ以外の土砂は岩屑なだれとして流下したと推定される。画像の広範囲に堆積した土砂には、上述した岩屑なだれに伴う爆風や高速崩落土砂による緩勾配域での湖成堆積物や氷河堆積物の侵食もかなり含まれていると推定される。

ここでは、土砂が堆積している面積を GIS により算出し、堆積深を想定することにより、斜面直下の堆積土砂量及び下流に流出した土砂量を推定した。

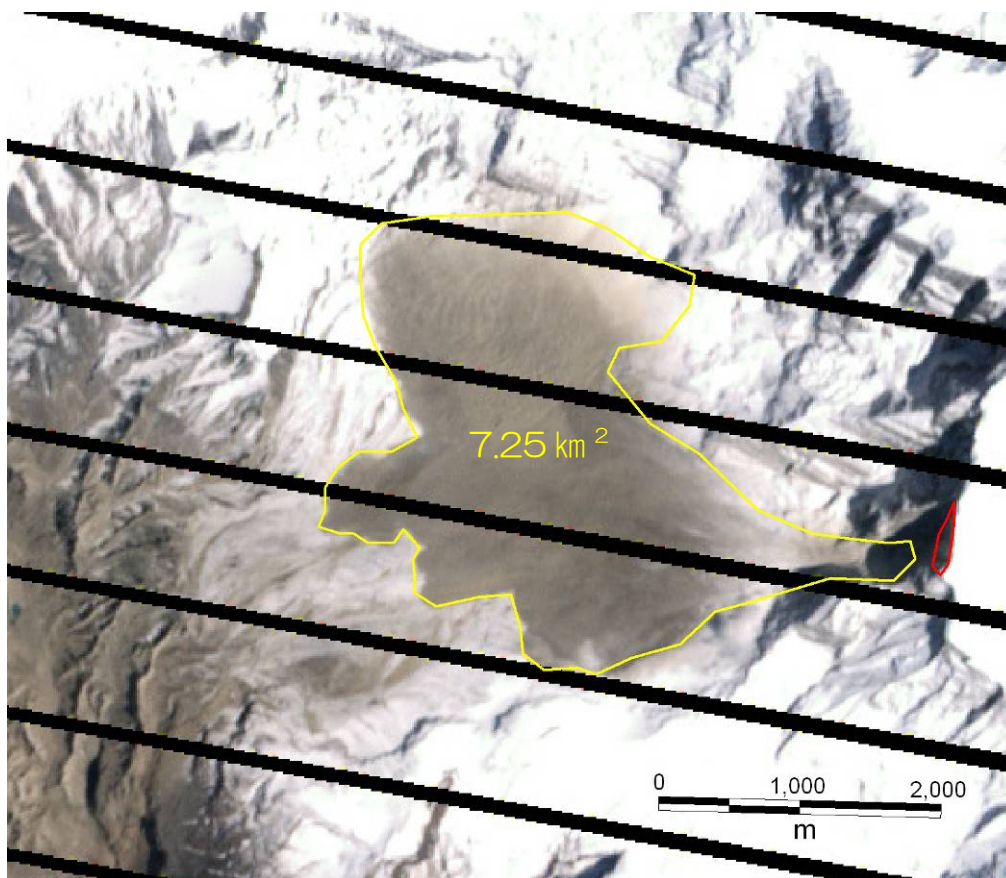


図 6.2.6 崩壊土砂の堆積範囲

ヘリから撮影した写真や、ビデオ撮影映像等を確認すると、図 6.2.6 の黄色で示した堆積部については積雪が見られ、堆積状況は明確に確認できなかったものの。現地で細かい土砂が薄い層を形成して堆積している状況が見られたことから平均厚さを 2m 程度と想定した。

堆積域の諸元は以下の通りである。

表 6.2.3 堆積域の諸元

	計測値	根拠
①堆積域の面積：A	7.25km ²	衛星写真から判読
②堆積厚：h	2m	現地調査より推定

堆積土砂量 V_2 及び流出土砂量 V_3 は、以下の式より算出した。

堆積土砂量 V_2

$$\begin{aligned} V_2(m^3) &= A(m^2) \times h(m) \\ &= 7,250,000(m^2) \times 2(m) \\ &= 14,500,000(m^3) \end{aligned}$$

流出土砂量 V_3

$$\begin{aligned} V_3(m^3) &= V_1(m^3) - V_2(m^3) \\ &= 32,725,000(m^3) - 14,500,000(m^3) \\ &= 18,225,000(m^3) \end{aligned}$$

以上の結果から、今回の崩壊によるアンナプルナIVの西側斜面直下の堆積土砂量は約 **1,450 万 m³**、セテイ川への流出土砂量は約 **1,823 万 m³**と算出された。ただし、元地形からの岩屑流に伴う侵食も含めた地形変化量の推定によってこの値は変わる。

6.3. 岩盤崩壊・洪水流下経過の考察

今回の現地調査結果とインターネット等に公開された既往の調査・検討結果を照合し、岩盤崩壊から洪水が発生した過程を推定した。アンナプルナIV峰の岩盤崩壊発生時刻については、洪水発生当日に飛行中の Avia Club Nepal の軽飛行機パイロット A. Maximov 氏が撮影したビデオの映像比較

(Petley, 2012c) が重要な情報を提供している (図 6.3.1)。最初に何も変状の無かった映像から 1 分 16 秒後の映像では、アンナプルナIV峰南側の西壁を隠すように土煙が上がっている(画像下)。岩盤崩壊に伴うこのようなダストが発生することは既に知られており (Bandari and Kumar, 2000 ; Wiczorek, et al, 2000)、今回も 5 月 6 日の Landsat7 画像で崩壊斜面東側の広範囲にダストの堆積が見られる (Stark and Petley, 2012)。また、コロンビア大の C. Stark、G. Eksrom は、同大の地球地震観測ネットワークの記録を確認した結果、この地域での地震発生が捉えられており、それがランドスライド発生であることを指摘している (Petley, 2012b)。彼らの地震波逆解析結果を以下に示す。

- ① ランドスライド発生：2012 5/5 9 時 9 分 56 秒 (ネパール時間)
- ② 流下時間：103 秒
- ③ 最大衝撃力： $1.2 \times 10^{14} \text{ N}$ 、質量 $1.4 \times 10^{11} \text{ kg}$
- ④ 流下距離：1040m
- ⑤ 高さ：350m
- ⑥ 最大加速度： 0.85 m/s^2
- ⑦ 最大速度：24m/s

一方、脚注には、塊状の移動体と仮定した逆解析のため誤差があるとして、経験的に、その中間値程度として推定したことが紹介されている (Petley, 2012c)。

- ① 質量： $5 \times 10^{10} \sim 2 \times 10^{11} \text{ kg}$
- ② 流下距離：2910～740 m
- ③ 落下高さ：970～250m
- ④ 最大加速度： $2.4 \sim 0.6 \text{ m/s}^2$
- ⑤ 最大速度：67～17 m/s



図 6.3.1 A. Maximov 氏による映像(Avia Club Nepal)

これについて、コロンビア大学地球研究所の Kim Martineau (2012)は、その後の Stark and Eksrom の分析結果として、780 百万 feet^3 (7,200 万 m^3)の岩が崩落、雪氷を取りこんで 160 マイル/時 (256km/h)の速さでセテイ川に突っ込んだと紹介している。

地震波の継続時間は、岩壁での崩落物質の衝突に始まりさらに岩屑なだれとなってセテイ川へ流れ込むまでの動きの時間を捉えていると推定される。すると、岩盤崩壊発生は9時9分56秒またはその少し前となり、Maximovの映像の時間差である1分16秒前にはとくに異常は見られないことから、岩盤崩壊発生時刻は9時9分内外と推定される。また、カラパニでの洪水波到達は9時38分とされている（ピクニック来訪者のビデオ記録）（Dahal,2012）。したがって、土砂は岩盤崩壊発生から30分でカラパニまで約30kmを移動したことになる。

6.4. 岩屑なだれ突入点からカラパニまでの泥流流下

海拔 3000m 付近から始まるセテイ川狭窄部（ゴルジュ）に入り込んだ岩屑なだれ物質（アンナプルナ西壁からの崩落岩屑は積雪や氷河表面に落ちたため、氷雪の解け水が混じった可能性もあり一部泥流化していたとみられる）は、泥を大量に含んで河川水と混じり泥流を形成したと推定される。ICIMOD が認定した右岸の新規崩壊（図 6.4.2：以下、写真撮影位置および集落位置を図 6.4.2 に示している）付近から下流では、河床より数十 m 以上の高さで河川沿いに連続して植生が破壊された状況はないので、主な運搬媒体は風でなく水であったと推定される。

しかし、谷壁斜面基部の樹木は無くなっており、第 1 番目河道屈曲点（写真 6.4.2）では、左岸の泥流衝突斜面で高さ 30m 以上の崩壊が生じており、狭搾部の右岸斜面は高さ 150m の崩壊が生じている。さらに、第 2 番目河道屈曲点（写真 6.4.3）でも左岸攻撃斜面で高さ 25-30m まで植生が失われ、泥流が、河岸斜面での侵食とその上の谷壁斜面で土砂堆積を起こしたと考えられる。第 2 番目屈曲点までのセテイ川は河道が狭く、発生前の河道周辺の堆積物はこの地点より下流に比べ少なかったと思われる。第 2 屈曲点の下流では、



写真 6.4.1 右岸岩盤崩壊



写真 6.4.2 第 1 屈曲部左岸での河岸侵食



写真 6.4.3 第 2 屈曲部左岸での河岸侵食



写真 6.4.4 Sadal(左下)から Yomo にかけての被災状況

今回の洪水で移動堆積した河床堆積物が広がっている。左岸サダルの段丘では土砂堆積を免れ人家が残っている（写真 6.4.4 の手前の人家）。この場所ではあきらかに右岸の攻撃斜面側の洪水到達高さが左岸の段丘より高い（写真 6.4.4）。

サダル下流側の左岸にあったヨモ集落では、13 軒あった人家が 2 軒を残すのみで現在居住者はなく、ここでは 1 名が亡くなっている。集落の載る低位段丘面上には径 2m を超える礫は稀で、多くは細粒堆積物からなる。この段丘の河岸侵食がどの程度あったかは、1991 年撮影の空中写真との比較が必要である。ヨモの下流、右岸にあるカプチェの集落の直下流で河道は急に東に曲がり（第 3 屈曲点）、そこは幅 20m 程度の基盤岩からなるゴルジュとなっている（

図 6.4.1）。洪水到達高（植生の破壊ゾーンの現河床からの高さ）はヨモ低位段丘下端からそこへ向かって水平あるいはやや逆傾斜となっている。このこととカプチェの複数住民へのヒアリングから最初の洪水波襲来後 5 分位水（あるいは土砂）が広がった状態（住民の言ではサガ）だったことから、泥流の最先端到達後、一時的にダムアップし、その高さは現河床から 35m に達したと考えられる。

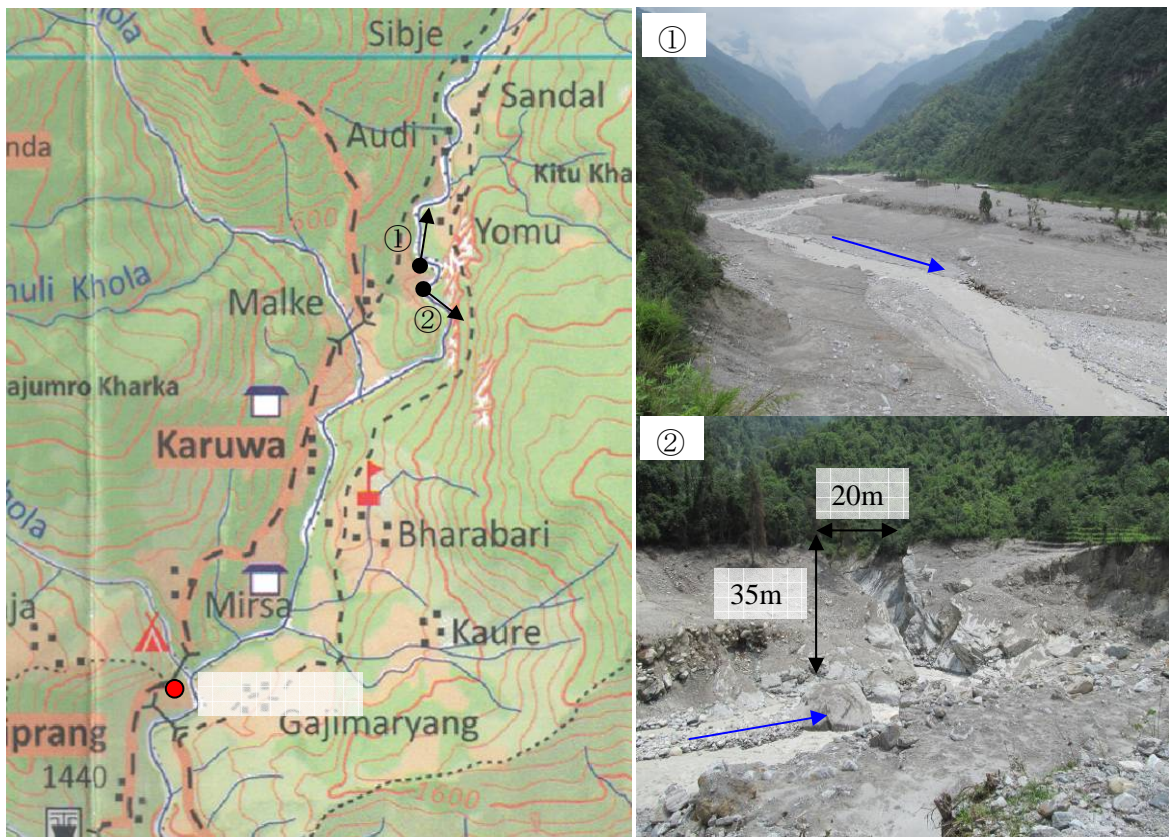


図 6.4.1 Yomo 周辺の河道閉塞が発生したと考えられる狭窄部

この地点から下流 1km までは平均河床勾配 5 度で川幅もせまく、第 3 屈曲点の天然ダム決壊で土石流に近い状態が発生したと推定される。この洪水波は次の屈曲部であるカラパニのつり橋付近に達した。当時の洪水状況目撃者の証言（複数）から、最初のごく短時間流木や礫・泥によるダムアップが生じた可能性があり（写真 6.4.5①②）、その結果、狭搾部を作っていた左岸低位段丘に載る 7 軒の来訪者用建物や食堂などが流され（写真 6.4.5③）、河床に近いキャンプ場や温泉浴槽なども流され 35 名という多数の犠牲者を出す結果となった

各所で見られる河道両側の段丘や突部に堆積した細粒土砂は、径 20cm 以下の角礫と粘土が優勢で、円礫また片麻岩の礫は少ない（写真 6.4.6）。これは、細粒土砂の起源の多くが、上流部のテーチス堆積岩起源あるいは湖成堆積物であったことを示す。カラパニまで岩盤崩壊発生時刻である 9 時 9 分から 30 分弱の高速で泥流が達した原因は、次のように推定される。

- ① 上流部は、極端な V 字谷やカルストの峡谷が続き、河床の堆積土砂が第 1 屈曲点より上流で少なかったため、泥水主体の流れで河床の抵抗が小さかった。
- ② 岩屑なだれが河川に流入した地点からカラパニまで直線かつ河床勾配が急勾配であった。

なお、セティゴルジュから下流は原生林が続き、インターネット公開ビデオでしばしば見られるような多量の流木が供給されたと推定される。

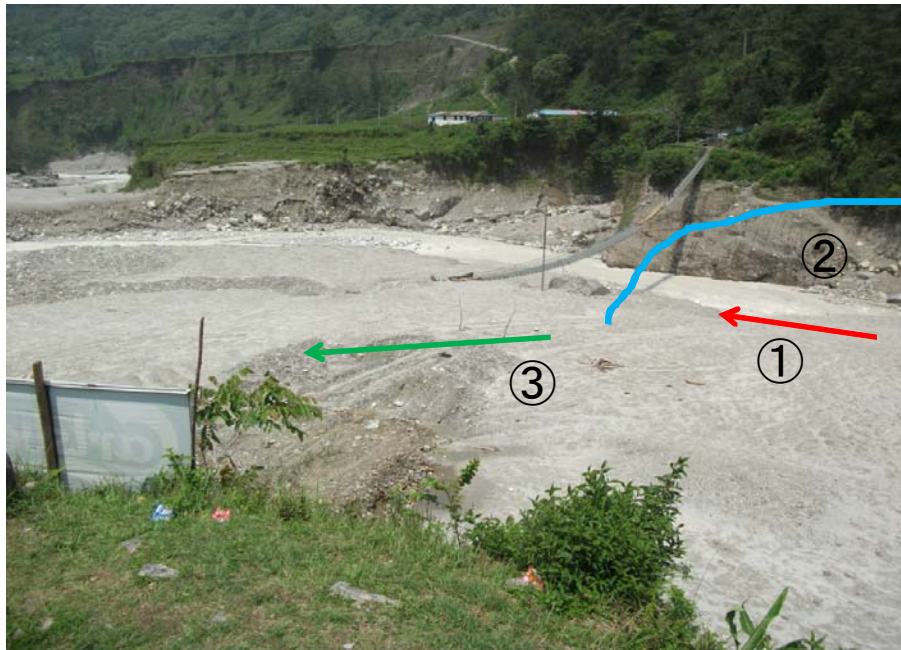


写真 6.4.5 カラパニ吊り橋付近での被害発生



写真 6.4.6 低位段丘を覆う小角礫が混じる泥質堆積物

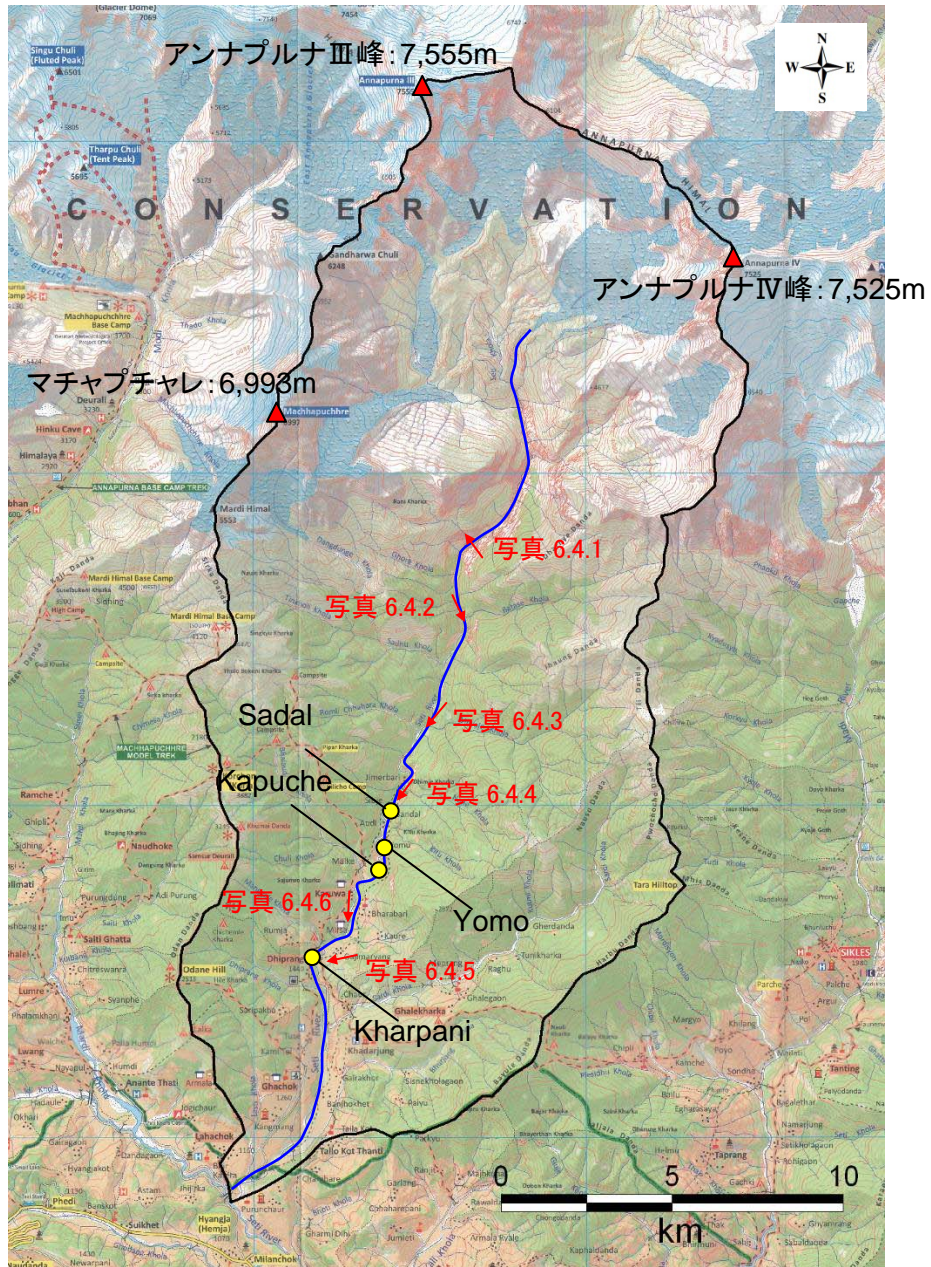


図 6.4.2 写真撮影位置図

6.5. ピーク流量の推定

6.5.1. 断面調査

洪水時のピーク流量を推定するため、セティ川の上流の3箇所の洪水痕跡を対象に、レーザ距離計を用いて流下痕跡の幅、河床からの比高及び河床勾配を計測した。断面計測箇所、計測値及び算出された各地点のピーク流量を図 6.5.1 に示す。



図 6.5.1 断面計測箇所

6.5.2. ビデオ画像解析

現地調査で入手したカラパニ(図 6.5.1 の②)の泥流到達時のビデオ映像をもとに、泥流先頭部の平均流速を推定した(図 6.5.2)。

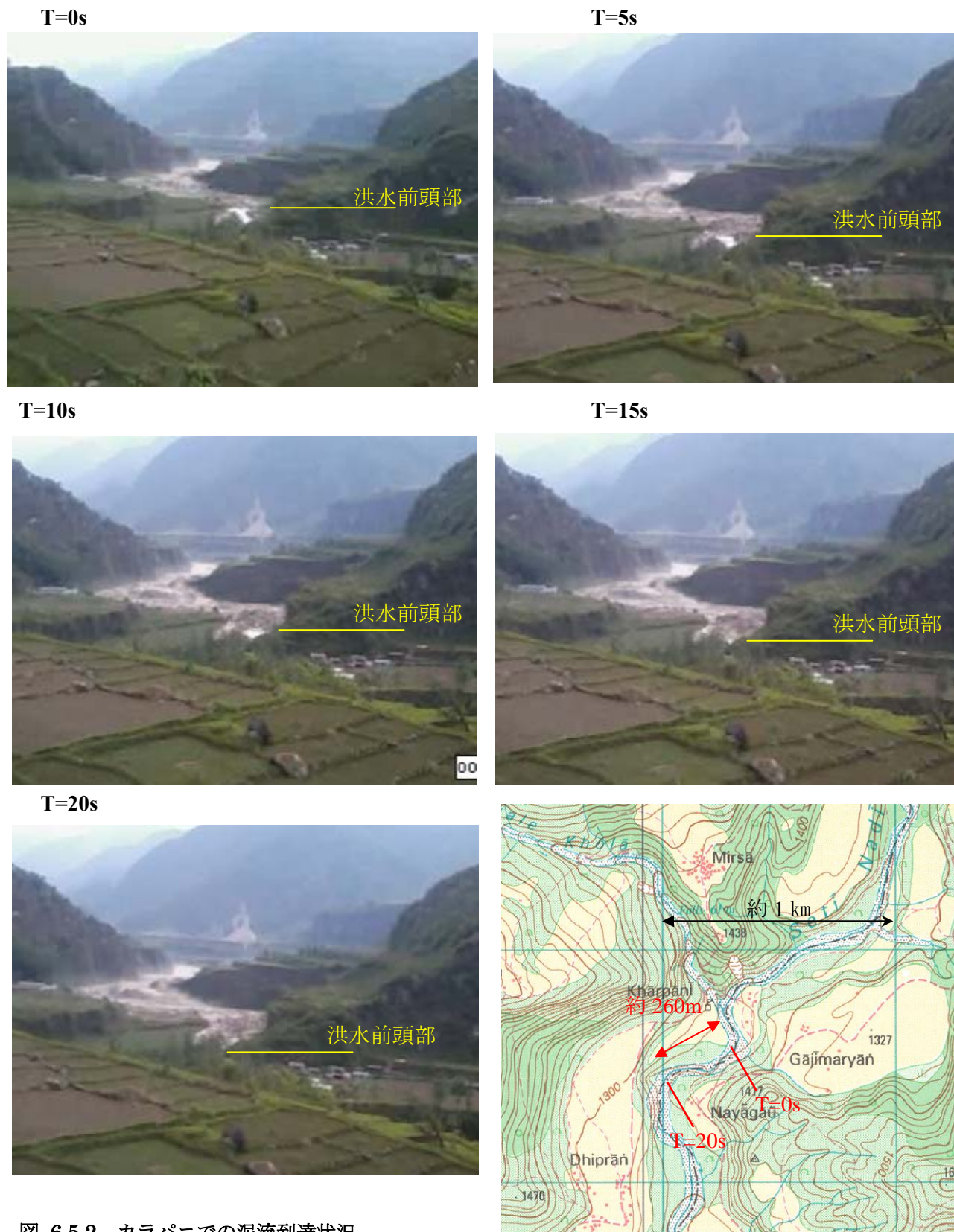


図 6.5.2 カラパニでの泥流到達状況

ビデオ解析の結果、泥流の先頭部は、260m の距離(l)を 20 秒で移動しており、以下の式を用いて流速を算出した。

$$\begin{aligned}v(m/s) &= l(m) \div T(s) \\ &= 260(m) \div 20(s) \\ &= 13(m/s)\end{aligned}$$

その結果、カラパニでの洪水先端部の平均流速は、約 13m/s(46.8km/h)と算出された。これは、桜島野尻川の 7.8～13.6m/s と同程度であり、焼岳上々堀沢の土石流観測結果である 3.4～6.8m/s よりも速い。

6.5.3. ピーク流量推定

カラパニの映像解析と断面計測結果を元に、カラパニでのピーク流量の算出を行った。なお、ピーク流量算出においては、洪水痕跡を泥流ピーク発生時の断面と仮定した。

$$\begin{aligned} Q_{\max} (m^3/s) &= a(m^2) \times v(m/s) \\ &= 648(m) \times 13(s) \\ &= 8,424(m^3/s) \end{aligned}$$

ここに、 a は流下断面積である。

この結果、Kharapaniでのピーク流量は、約8,400m³/sと算出された。なお、算出されたピーク流量からマンニングの粗度係数を逆算すると、0.083と算出される。これは、山地河川の一般的な値(0.03～0.05：河川砂防技術基準)よりも大きい。

その他の地点(図 6.5.1)中の①及び③)についてもピーク流量を算出した。なお、算出にはマンニング式を用いることとし、粗度係数は、①については土石流の流下区間であるため②より大きい0.1を、③については掃流区間であるため当該区間の一般的な値である0.03を設定した。なお、いずれの断面も両岸がほぼ垂直な段丘であるため、矩形断面として計算した。

①断面

$$\begin{aligned} Q_{\max} (m^3/s) &= \frac{A}{n} \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2} \\ &= \frac{900}{0.1} \cdot \left(\frac{60 \times 15}{2 \times 15 + 60} \right)^{2/3} \cdot 0.087^{1/2} \\ &= 12,333(m^3/s) \end{aligned}$$

③断面

$$\begin{aligned} Q_{\max} (m^3/s) &= \frac{A}{n} \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2} \\ &= \frac{275}{0.03} \cdot \left(\frac{55 \times 5}{2 \times 5 + 55} \right)^{2/3} \cdot 0.052^{1/2} \\ &= 3,291(m^3/s) \end{aligned}$$

図 6.5.1 の①と③でのピーク流量は、それぞれ約12,300m³/s、約3,300m³/sと算出された。①断面で12,300m³/sであったピーク流量が、約8km下流の③断面では3,300m³/sまで減衰している。

6.5.4. 泥流を発生させるために必要な水量

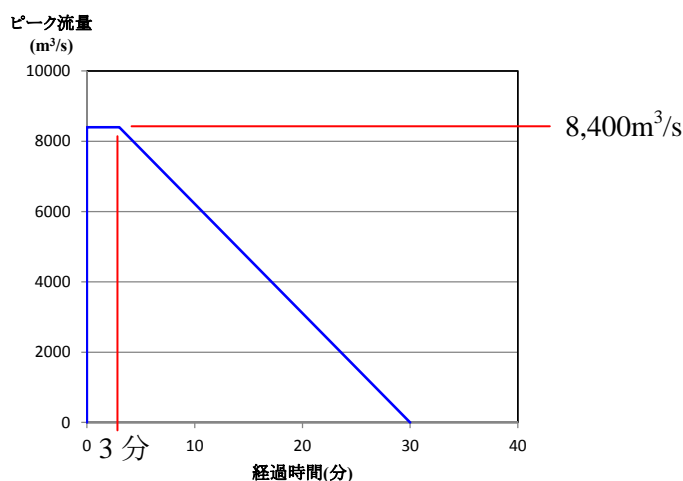
現地調査の結果、源頭部付近のゴルジュには、ほとんど土砂が残存しておらず、供給源は不明であるが、多量の水を伴って下流へ流下し、これにより大洪水を発生させたと考えられる。

ここで、現地でのヒアリング等から、流出した水の総量を推定した。

Mr. Santos Rai (16 才) カラパニのレストランのボーイ。

- ・直前に強風が吹き、2人の女性 (College students) が吹き飛ばされ、建物の屋根が飛ばされ、それから洪水が来た。
- ・流木が吊り橋に引っ掛かり川を block、流れが左岸側に回った。
- ・3分位洪水が段丘上を走った。それから30分位で元の水位に戻った。

上記の証言から、3分間ピークが継続し、泥流が30分間継続したとし、以下のようなハイドログラフ形状を想定した。



以下の式より、土砂込の総流量 Q は、832 万 m^3 となる。

$$Q = \frac{(3 + 30) \times 60 \times 8,400}{2} = 832 \text{ 万 } m^3$$

ここで、土砂濃度を 10%と仮定すると、水の総流量 Q_w は、748 万 m^3 となる。

$$Q_w = Q \times 0.9 = 748 \text{ 万 } m^3$$

6.5.5. 洪水波速度の推定

収集した資料及び現地でのヒアリングより、各現象が発生した時刻は以下の通りである。9:09 にアンナプルナIV峰西側斜面で岩盤崩落によると思われる煙を確認し、3分後の9:12 にセティ川のゴルジュに土砂が流入した。さらに26分後の9:38 にカラパニで泥流の先頭部が撮影されている（Dahal, 2012 : 図 6.5.3）。なお、図 6.5.4 に示すとおり、アンナプルナIV峰西側斜面からセティ川ゴルジュ入り口あたりの距離が約10km、セティ川ゴルジュ入り口あたりからカラパニまでの距離はおよそ20kmである。

①9:09 源頭部で煙を確認



78 秒
→



※A. Maximov 氏（Avia Club Nepal）による映像

↓ 3 分後

②9:12 セティ川ゴルジュに土砂流入

↓ 26 分後

③9:38 Kharpani に洪水波到達



図 6.5.3 カラパニでの洪水前後の状況（Dahal, 2012）

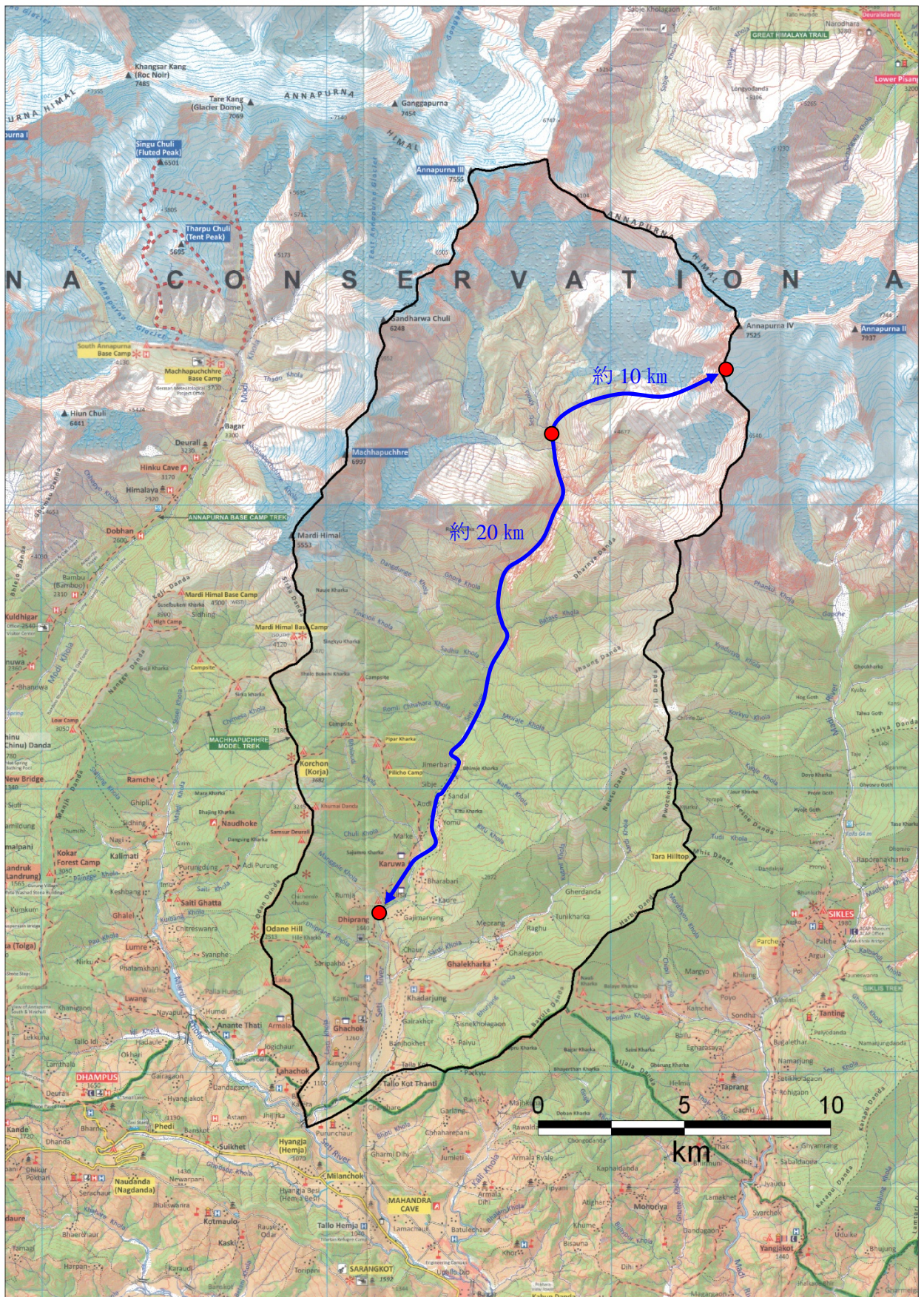


図 6.5.4 アンナプルナIV峰西側斜面からカラパニまでの距離

(1) 岩屑なだれの速度の推定

以上のことから、岩屑なだれの速度(V_1)を以下の式より算出し、その結果、岩屑なだれの速度は、**約 55.6m/s(200km/h)**と推定された。

た。

$$\begin{aligned}V_1(m/s) &= L(m)/T(s) \\ &= 10,000(m)/3 \times 60(s) \\ &\cong 55.6(m/s) = 200(km/h)\end{aligned}$$

(2) 洪水波速度の推定

同様に、洪水波速度(V_2)を以下の式より算出し、洪水波速度は、**約 12.8m/s(46.2km/h)**と推定された。これは 6.5.2 で算出した洪水波速度(13.0m/s)とほぼ同程度である。

$$\begin{aligned}V_2(m/s) &= L(m)/T(s) \\ &= 20,000(m)/26 \times 60(s) \\ &\cong 12.8(m/s) = 46.2(km/h)\end{aligned}$$

ビデオ画像から算出したカラパニでの洪水波速度は 13.0m/s であり、カラパニより上流では河床勾配が急勾配のため、流速も大きかった推定される。すなわち、現地でのヒアリングによる「河道閉塞により 5 分程度湛水した」という情報からみても概ね妥当であると考えられる。

6.6. ヒアリングで得られた災害発生前の諸現象

今回の洪水のカラパニにおけるピーク流量は、約 8,400m³/sと大きく、これほどの洪水を発生させる水がどこから供給されたのかが不明である。上流域には、氷河湖の形成は確認されていないため、5月5日の岩盤崩落前に、既にセティコーラ上流域に天然ダムが形成されていて、これが今回の岩盤崩落に伴う泥流によって決壊し、ピーク流量を著しく増加させた要因となったのではないかという可能性を検証するため、現地の人々を対象に、先行時期の天候・積雪、河川水の異常の有無についてヒアリングを実施した。質問した（付属資料：インタビュー参照）。図 6.6.1 に、ヒアリングで得られた現象とその時期を示す。

その結果、①この冬は、高山で積雪が例年より多かった、②4月下旬に降雨があった、③今回の災害の7-10日位前に河川水の色が黒・赤（実際は茶色と思われる）く濁った、④河川水位は結構変動した（ただし、3-4月の融雪期間は日変化で変動する）といった証言が、ヨモ・カプチェ住民・カラパニ周辺の住民から複数得られた。

また、⑤上流で音や煙が立つのを見た、⑥上流の2か所で水がたまっていた（サダル上流の河道屈曲点と思われる）という証言もあったが、これらの詳細は、その後当人に会う機会がなく聞き取ることができなかった。

これらの証言から、上流部で融雪水は多かったと推定され、4月下旬頃（ランドサット画像では4/20には海拔約4000m以上に積雪があり、それは5/6には融けている）に湖成堆積物からなる小起伏地で融雪が進み、何らかの土砂流出が起こって河川が濁った可能性がある。とくに、⑥については、目撃時期や箇所、規模を把握する必要があり、今回の泥流のピーク流量を検討する上で、今後確認が必要な極めて重要な情報である。

さらに、晴天で事前に地震も無く、突如襲った今回の洪水をどのようにして察知したか、災害発生直前の諸現象についてもヒアリングを行った（図 6.6.2）。上流側の住民からのヒアリングの結果について、以下に述べる。

カプチェ・サノコバン（主にヨモの元住民の証言）では、揺れと音（泥流到達5~20分位前）・強風と煙（直前）の順に多くの人を経験している。音はヘリコプターなどが近づくような音で住民の多くは上を見上げた。しかし、揺れと組み合わせてみると、泥流が揺れと音を生じていたとみられる。煙は水煙であろう。下流のバラウデイ・カラパニは屈曲部で、上流方向が見通せない位置にあり、直前に認知するにはやや遅いが、揺れを感じており、音は直前になって聞いている。また、冷たい強風が洪水波到達前に吹いた、強風で温泉場・つり橋の人が飛ばされた、屋根が飛んだ、という証言も複数あった。

さらに、注目されるのは、バラウデイの住民が、泥流を察知してカラパニに携帯電話をかけ危険を知らせ、受けた住民が温泉場にいる人に叫んだが信用されなかった、という証言があった。五感で確認できなかったため、避難行動に移れなかったと考えられる。

住民聞き取りから得られた事前の現象

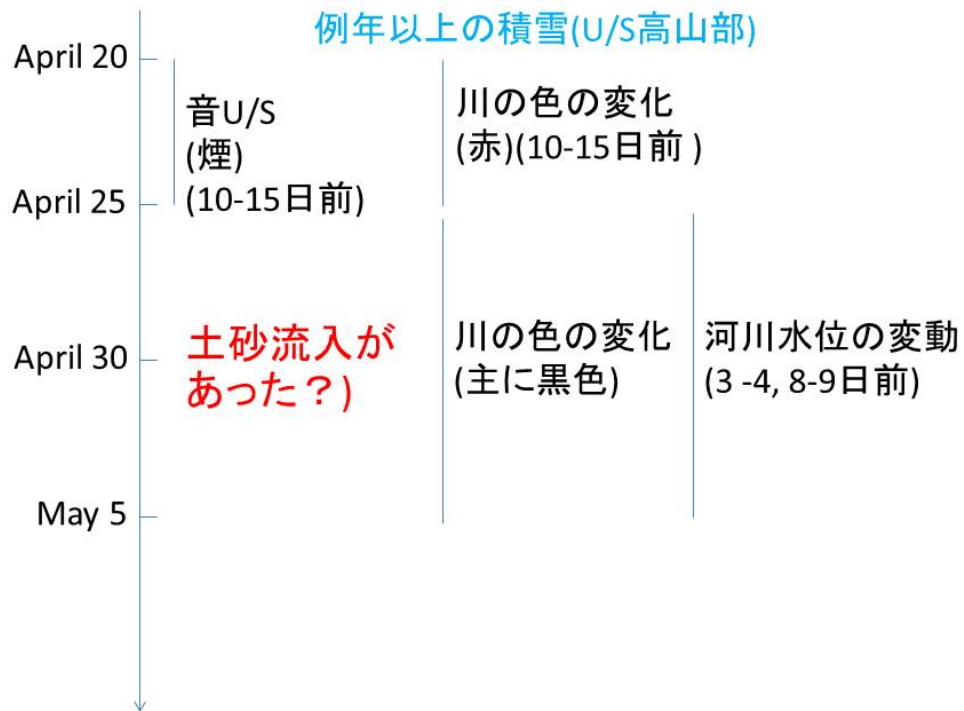


図 6.6.1 住民ヒアリングから得られた事前現象 (約2週間以内)

住民聞き取りから得られた直前・直後の現象

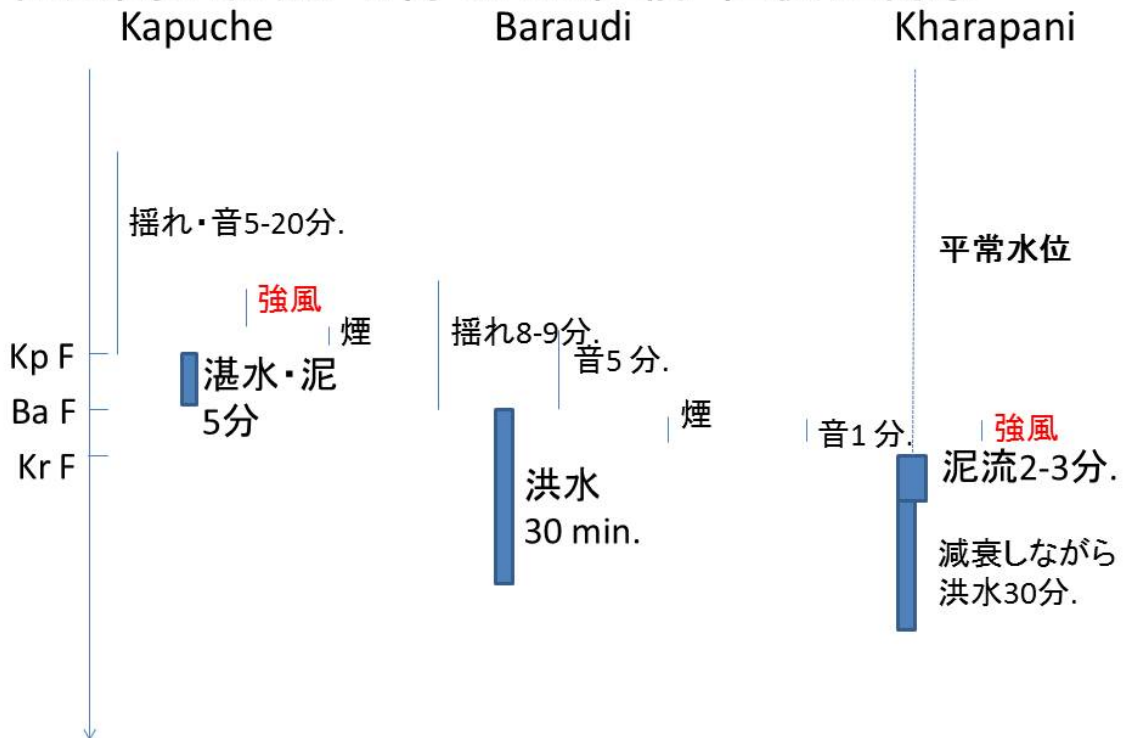


図 6.6.2 住民ヒアリングから得られた直前・直後の現象

6.7. 岩屑なだれから泥流への移行について

6.5 で述べたように、時間経過からみて岩屑なだれが速やかに泥流に移行したことは間違いない。一方、6.2.2 でセティゴルジュ突入前に岩屑なだれが一部泥流化していた可能性を指摘した。この間で考えられる泥流化に必要な水の供給源として、発生前の Landsat 7 画像に顕著な氷河湖は見られないことから、以下のようなことが考えられる。

- ① 岩盤崩壊を生じた西壁基部から小盆地上部にかけて見られる岩屑に覆われた氷河が崩落岩盤の衝突で融解
- ② 岩盤崩壊前の稜線に存在した氷帽(Ice cap)が崩落し急激に融解
- ③ 岩屑なだれ流下域の流水や融雪期にあつて水分を含んだ Marl 堆積物が侵食され下流に運ばれた

しかし、崩落物質の衝突（それに伴う高温が発生しても）によって氷体が瞬間的に融解するとは考えにくく、多量の水を伴う高密度流が約 8～9km の距離を岩屑なだれと同程度の高速で流下することも想定しづらい。また、大規模に氷河が侵食された痕跡は、調査時の地形には確認できなかったことなどから、①のような現象が起きたとは考えにくい。また、③についても爆風による高速な移動では運ばれにくいと考えられる。②については、氷体が粉碎され塊状になり岩屑なだれの移動物質として運搬されている途中で融解した可能性はあると考えられる。写真画像から氷体厚さを 60m、崩壊面積を岩盤崩壊と同じ 550m×100m、密度 0.9 とすると水量にして約 300 万 m³ となり、6.5.4 で推定した泥流総水量 748 万 m³ の約 40%となるが、これが一挙に融解し泥流に変化したとは考えにくい。

伏見(2012)は、セティ川では泥質の流れが 10 日以上も続き、その間、当地域では驟雨があつたが、そのような降雨や融雪水だけでは泥流の水供給としては不十分で、氷河やモレーン中に存在した水のサージなどの可能性も指摘した。

一方、セティゴルジュ付近は、石灰岩中に著しく幅の狭く深い峡谷をなしている。6.6 では、今回の洪水より 1－2 週間前に河川が濁る、流量の顕著な低下が見られたなどの住民証言があつたことを述べた。これらから、例年より積雪の多かった Marl 堆積エリアから 4 月下旬に細粒土砂が融雪水や降雨で運ばれ、それがゴジルジュを埋めて滝壺付近まで湛水を生じたところに、岩屑なだれによる多量の土砂突入でゴルジュでの水位が上がり、埋積土砂の決壊を生じて泥流化したという現象も想定される。石灰岩質の地層に形成されたゴルジュのため、鍾乳洞のように地下で広がっている可能性もある。この仮説は、下流の洪水堆積物が泥主体であることも説明できる。

6.8. 調査結果のまとめ

以上の調査・分析結果から、2012年5月5日にセティ川で発生したフラッシュフラッドは、次のような過程を経て発生したと考えられる。

- ① 9時9分頃にアンナプルナIV峰のすぐ南の尾根部(海拔7,000m)から西面岩壁にかけて岩盤崩壊が発生した。
- ② 崩落土砂が、アンナプルナIV峰西麓に広範囲に広がっていた湖成の石灰質泥堆積物(Marl)や氷河堆積物からなる緩傾斜地(海拔3000~4500m)上を岩屑なだれとなって高速で移動した。
- ③ 岩屑なだれは、鋸状の凹凸著しい地形をなしていた②の石灰質泥堆積物を巻き込んでセティ川ゴルジュに入りこみ、その後、泥流となってサダルから下流の集落や温泉地を襲い、少なくとも72名以上の犠牲者を出した。

岩盤崩壊箇所から約30km下流にある多数の犠牲者を出したカラパニ(海拔約1,200m)には9時38分に洪水波が到達しているため、岩盤崩壊箇所からカラパニまでの岩屑なだれ・泥流全体としての平均流速は約60km/h(16.7m/s)であった。また、既に報告されている地震波解析や当時の空中からの観察結果を合わせて考えると、岩盤崩壊～岩屑なだれの土砂移動速度は200km/h(55.6m/s)に達すると推定された。

岩屑なだれのセティ川突入点付近では、河床から200m以上の高さに泥の付着した樹木や倒木が多数見られ、岩屑なだれに伴い泥を伴った爆風が発生したことがわかる。また、発生前後の衛星画像の比較及びヘリコプターによる観察から、岩盤崩壊の規模は長さ850m、幅550m、崩壊土砂量は約3千万 m^3 に達したと推定される。

被災地での住民へのヒアリングや地震記録から、岩盤崩壊の直接の誘因は、地震・豪雨・融雪のいずれも考えられない。流れ盤をなす石灰岩質堆積岩が露出していることからロックスライドとして発生した可能性がある。そして、不安定物質は崩壊発生域にはほとんど残っていない。

ヨモ、カプチェでのヒアリングと河道両側の植生破壊状況から、カプチェ付近の河道屈曲・狭窄部で5分程度の一時的ダムアップが生じたと考えられる。その決壊でここから下流の泥流は再び大きなエネルギーを得た可能性があり、約3km下流のカラパニでは、ヒアリングから、流木を多量に含んだ泥流が瞬間的につり橋でダムアップを生じ、温泉施設や食堂のあった低位段丘を越流し被害が大きくなったとみられる。現地でも得られたカラパニでの洪水ビデオ画像による洪水波速度は13m/sで、前述の岩盤崩壊発生点からカラパニまでの平均流速12.8m/sとほぼ同じである。また、この泥流の推定されるピーク流量は、ヨモで12,300 m^3/s 、カラパニで8,300 m^3/s であるが、その下流約5kmでは3,300 m^3/s まで減少している。

泥流堆積物の特徴として、ICIMOD (2012)も指摘しているように、表層ではどこでも非常に細粒物質が多く、含まれる礫も径数十 cm 以下の角礫が多い。したがって、運搬された細粒物は、河床堆積物の二次移動ではなく、上流とくに湖成堆積物や氷河堆積物の岩屑なだれ通過時の侵食が起源となっていると考えられる。また、多量の流木は、今回の調査域より下流で撮影された画像でも見られるが、その原因は、サダルから上流が極端な V 字谷で河道周辺を原生林が覆っていたことにある。ブータンの氷河湖決壊洪水でも同様の理由で流木が多量に発生し、つり橋に引っかかり氾濫被害を大きくした (Higaki and Sato, 2012)。

住民ヒアリングからは、今回の泥流発生より 1~2 週間程度前に、上流域で河川を濁らせ河川水位を低下させるような何らかの土砂流出があった可能性がある。2011 年冬は高山で積雪が多く、その融雪が関係している可能性も考えられる。5 月 5 日より前に上流 2 か所で河道閉塞を見たとの情報もあり、その確認が必要である。また、当日の泥流到達直前現象として、最上流部の集落では、揺れと音を約 5~20 分位前から感じていた。直前に強風と煙（水煙？）を多くの人が経験している。これらは、泥流の接近によるものであると推定される。しかし、これら集落より 2~4km 下流で、河道が屈曲して上流の見通しが悪いバラウデイ・カラパニは直前現象の認知は遅かった。冷たい強風が洪水波到達前に吹いて温泉場・つり橋の人が飛ばされた、屋根が飛んだ、という証言もあった。大規模岩盤崩壊時に爆風が吹く事例は報告があるが、今回の強風の原因は不明である。

泥流災害の犠牲者は、約 15 年前に開設され休日で賑わって温泉地カラパニに集中した。また、河道で砂利採取していた人も犠牲になっている。一方、セティ川上流部では河岸段丘が発達し、ほとんどの集落はその上にあって被害は少なかった。また、低位段丘上にあって多数の人家が流出したヨモでは、直前現象を察知し間一髪で斜面へ駆け上がって難を逃れた。一方で、バラウデイから携帯電話でカラパニ近くにいた住民に伝えられた洪水襲来情報は、温泉地にいた人々の避難には繋がらなかった。河川が屈曲して音の察知も直前までできず好天も手伝って、来訪者には避難を促す叫び声も信用されなかったと考えられる。家や農地を失った被災者は、政府の斡旋で河床から約 250m 位高い緩傾斜地に移転する準備をしている。

硬質岩からなるハイヒマラヤでは大規模な岩盤崩壊は頻発するとは考えにくく、今回も誘因は不明である。湖成堆積物を主にするアンナプルナの各峰に囲まれた小盆地状地形は、土柱状の地形が主体で、大きな氷河湖も地すべりも無く大規模な土砂移動は起こりにくいように見える。崩壊斜面に不安定物質はほとんど残っていないので、近いうちに今回規模以上の泥流が発生する可能性は高くないと推定される。

しかし、氷河侵食を受けた急峻な岩斜面が、末端にあった氷河が縮小することで末端での支えを失い岩盤崩壊を起こすケースは報告されている (Ballantyne, 2002)。航空機調査や

高解像度の衛星画像判読などで小起伏地周辺の岩盤斜面の状況を確認する必要がある。また、今回の泥流が運んだ多量の土砂や河岸侵食斜面からの土砂の2次移動による土砂流出に注意が必要である。

今後同様な現象がどこで発生するかについては、現時点でその具体的予測は難しいところがある。しかし、場の条件として、急で長大な谷壁斜面の基部や前面に細粒物質層が広く分布し崩壊物質がその上を走って谷底内に流入しやすい場合、泥流が山麓部まで到達しやすくなると思われる。さらに、このマチャプチャレ・アンナプルナⅢ・Ⅳ峰に囲まれた小盆地的地形を取り囲む岩壁斜面を見渡しても、同様な現象が過去に発生していたのではないかと考えられ、岩盤剥離跡の明瞭な箇所が存在する（写真 6.8.1）。従って人口の比較的多い山麓地域に接した高起伏山岳地域では、今後、崩壊跡の目視調査が必要である。



写真 6.8.1 アンナプルナⅢ峰南側の東向き斜面に見られる崩壊跡
中央やや左の明褐色部

6.9. 今後の課題

今後の課題として以下のようなことが挙げられる。

- ① 岩盤崩壊の発生原因及び現象把握手法の検討—飛行機で確認できる氷河や岩盤上のキレットなど大規模な岩盤崩壊の前兆が生じていないか確認が必要である。また、前述したように、アンナプルナ西壁下部の氷河の後退による末端応力解放の可能性は無いのか、過去の空中写真と現在の氷河（岩石被覆氷河）の比較を行う必要がある。
- ② 泥流発生メカニズムの検討—岩屑なだれによる石灰質泥堆積物(Marl)の侵食（爆風・崩落物質のインパクト）はどの程度であったか、現地調査による確認を行う必要もあろう。また、今回の泥流発生に必要な多量の水供給源の仮説として、本災害に先行したゴルジュの閉塞を挙げたが、直接的にそれを示す事実の探索が必要である。
- ③ 住民証言の検証—泥流発生前のセテイ川上流で河道閉塞を目撃したとの証言の確認を含め、今回の泥流規模を大きくさせる事前現象が生じていなかったかさらに調査が必要である。
- ④ 突発洪水襲来危険域の抽出—ヒマラヤ高山域において危険な氷河湖だけでなく、この地域と同様に、岩盤斜面の下方に過去に大規模な氷河湖や Landslide Dam で長期間湖水化したために泥質堆積物が広範囲に広がっている箇所、そして大規模な地すべり・深層崩壊の危険性の高い斜面の密集する地域の把握が必要である。とくに、本地域のように住民の行動範囲が高山域に及んでいない流域では、住民による前兆現象把握が難しい。そこで、既往地質調査資料からここに述べたような地域を選定し、航空機などを用いた地形調査や高解像度立体視が可能な得られる衛星画像を用いて大規模ランドスライド危険斜面有無のチェックを行うべきである。
- ⑤ 防災教育と簡易な手法での早期警戒システム—今回の災害では自ら目・耳で認知したり、上流住民からの携帯電話情報など直前情報による避難が、生死を分けた面がある。普及しつつある携帯電話等による情報伝達と瞬時の理解・行動はまず人的被害を減らす第一の手段と言える。外来者を含めた効果的な防災啓発を図る手法を講じる必要がある。たとえばカラパニのような観光地では、今回の災害にも触れた防災啓発現地語パンフレットを作成・備え置きし、監視カメラを兼用した上流山城を映し出す映像を TV モニターで見せることも考えられる。
- ⑥ セテイ川沿いでは、今回の洪水で河道周辺に不安定土砂が堆積し、今後も小規模でも洪水・土砂災害の危険の高い状態が続くと想定される。同様な状況は、多量の土砂移動で荒廃した近年 GLOF が流下した河川や、シワリク山地・マハバラート山地の河川のように土砂流出の著しい河川でも見られる。そこで、沿川の踏査、危険集

落のリストアップ、空中写真判読と踏査による簡易なハザードマップ作成、直前現象の把握や簡易雨量計による地域レベルでの洪水警報、防災教育・訓練さらに簡易な護岸工事など、突発大規模災害の懸念される流域での総合的水・土砂減災プログラムをモデル的に作成することが必要ではないかと考えられる。その検討においては、ネパール政府内務省・灌漑省治水砂防局などが主導的に行うことが望まれる。

この災害発生情報はネパールの新聞紙上だけでなくインターネットでも情報が早くから公開された。登山家野口健氏は、氏のHPで翌5月6日にその惨状を伝えている。野口氏は、その中で、GLOFやこのようなヒマラヤ起源の突発洪水災害への備え（防災啓発）の重要性を訴えている。

参考

- Ballantyne, C.K. (2002) Paraglacial Geomorphology. *Quaternary Science Reviews*, 21, 1935-2017.
- Bandari P. K. and Kumar K. (2000) : Malpa rock avalanche of 18 August 1998. *Landslide News* 13, 18-20.
- Dahal R. K.(2012) Why 1255 flash flood in the Seti River? - a brief report.
http://www.ranjan.net.np/ranjan/index.php/in-english-seti_5/27_2012
- 伏見硯二(2012) セティ川洪水・マディ川氷河湖決壊洪水（GLOF）調査報告(手記)
- Godin,L. & Brown,R.L. (1999):High strain zone in the hanging wall of the Annapuruna detachment, central Nepal Himalaya. *Geological Society of America Special paper* 328, pp.199-210.
- Higaki, D. and Sato, G.(2012) Erosion and sedimentation caused by glacial lake outburst floods in the Nepal and Bhutan Himalayas. *Global Environmental Research*, vol. 16, pp.71-76.
- ICIMOD (2012a) Seti flash flood on 5th May 2012 in Seti River, Pokhara, Nepal.
[http://geoportal.icimod.org/NAE/NewsDetail.aspx?NewsID=318%20\(5/7,2012\)](http://geoportal.icimod.org/NAE/NewsDetail.aspx?NewsID=318%20(5/7,2012))
- ICIMOD (2012b) Seti flash flood reconnaissance visit, ICIMOD HP:
[http://www.icimod.org/?q=7134\(5/10,2012\)](http://www.icimod.org/?q=7134(5/10,2012))
- Koirala, A. (1998):Report on engineering and environmental geological map of Pokhara valley. Dept. Mines and Geology, Kathmandu, Nepal, pp1-20.
- Martineau K. (2012) Investigating Giant, Unseen Landslides. 6/12, 2012 State of the Planet,Columbia Univ.,
<http://blogs.ei.columbia.edu/2012/06/12/investigating-giant-unseen-landslides/>
- Petley, D. (2012a) Flash flood in Nepal kills at least 15, with up to 36 more missing. *The Landslide Blog*, 5/6, 2012,

<http://blogs.agu.org/landslideblog/2012/05/06/flash-flood-in-nepal-kills-at-least-15-with-up-to-36-m-ore-missing/>

Petley, D. (2012b) Using seismic data to analyse the Seti River landslide in Nepal, The Landslide Blog. 5/9,2012.

<http://blogs.agu.org/landslideblog/2012/05/09/using-seismic-data-to-analyse-the-seti-river-landslide-in-nepal/>

Petley, D. (2012c) More information on the landslide that caused the Seti Flood in Nepal., The Landslide Blog 5/12, 2012,

Petley, D. (2012d) Understanding the Seti River Landslide in Nepal, The Landslide Blog.

<http://blogs.agu.org/landslideblog/2012/05/23/understanding-the-seti-river-landslide-in-nepal/>
5/23, 2012.

Stark C. and Petley D. (2012) Landslide and deadly flood in Nepal. Nasa Earth Observatory Subscribe Today.

Upreti, B.N. & Yoshida, Mitsuo (2005): Guidebook for Himalayan Trekkers, Series No.1, Geology and natural hazards along the Kaligandaki valley, Nepal. p.165, Dept. Geology, Trichandra Campus, Tribhuvan University, Kathmandu Nepal

Yamanaka, H., Yoshida, M. & Arita, K. (1982): Terrace landform and Quaternary deposit around Pokhara valley, central Nepal. Journal of Nepal Geological Society, vol.2 Special Issue, pp113-142.

Wieczorek, G. F., et al (2000) Unusual July 10, 1996, rock fall at Happy Isles, Yosemite National Park, California, GSA Bulletin, vol. 112, pp.75-85.

参考資料

参考資料 1 面談者リスト

参考資料 2 被災者・関係者へのインタビュー

参考資料 1 面談者リスト

日本大使館	高橋邦夫*	大使	
	榊原修一*	公使参事官	
	星野久史*	書記官	
JICA ネパール事務所	河崎充良*	所長	
	藤井智*	次長	
内務省	Mr.Lakshimi Prasad Dhakal*	Joint Secretary	
	Mr. Bal Krishna Panthi	Under Secretary	
DWIDP	Er. Prakash Paudel	Director General	
	Mr. Mathura Dangol	Deputy Director General	
	Mr. Shanmukhesh Chandra Amatya*	Chief, Landslide Section	
	Mr. Kendra Bahadur Shrestha	Engineer	
Tribhuvan Univ.	Dr. Bishunu Dangol*	professor	
UNDP	野田章子*	Country Director	
OCHA	Mr. Ram Prasad Luetel*	Disaster Response Specialist	
	Mr. Andrew Martin		
ICIMOD	Mr. Shamjwal Bajracharya*	Remote Sensing Specialist	
	Ms. Nira Gurung	Communication officer	
Nepal Risk Reduction Consortium	Moira Reddick*	Coordinator	
Shaplaneer	勝井裕美	ネパール事務所長	
モンタディオコンサルテイング	菅沼一夫		

*大使公邸での報告会参加者

参考資料 2 被災者、関係者へのインタビュー

6月4日

老人男性（74才）Kabuche

- ・3人の息子（一人はマレーシア）と1人の娘がある。
- ・このような災害は初めての経験。
- ・対岸の Yomo では13戸あったが11戸流失した。2戸残っているが住めない。Kabuche には被害はなかった。
- ・25分位前に地震のような揺れがあった。轟音がとどろき大型ヘリの低空飛行かと思った。白煙が立ち上った。

6月4日

老人男性（50才）Sano Khobang（被災者の移転地）。Sano Khobagn は山の中にあり、蛭が密生する急な foot path を1時間弱。村人は雨の降りしきる中、テントの中で薪を囲んで暖を取っていた。



- ・自分は Yomo 生まれだが、このような災害は初めて。
- ・Yomo は70年位前から木を切って人々が住み始めた。

Yomo は土地が肥沃なので野菜生産などで裕福だった。被災した13家族のうち3家族は3年前に Dading District から Yomo へ来たばかりだった。Dading は洪水などもあり貧しい。

13家族のうち6家族が Sano Khoban に来て家を再建中。

- ・政府からの支援は土地と米2袋だけ。

6月5日

少年。Yomo

- ・2戸残った家の1つが彼の家（白い屋根）。
- ・裏山へ避難し2日間過ごした。



6月5日

Mr. Arjun Bhandari, Sub-Secretary of Machapuchare VDC Tel:9816101503

Machapuchare VDC を訪問する旨前もって伝えておいたが、VDC Chairman は所用で不在になるので Mr. Bhandari を Karuwa まで寄越してくれた。VDC は Dibrang にあり、Karuwa まで徒歩で1時間余。

- ・Machapuchare VDC の死者は7人。

Yomo(1), Dibrang (2), Mirsa(4)

- ・ Sano Khobang では 21 戸建設予定。
- ・ 被災者への国の支援
 - 住宅建設用土地
 - 住宅再建費 全壊家屋 NRs100,000、半壊家屋 NRs50,000。

6 月 4 日、6 月 5 日

青年 Karuwa ダカールで 4 年間働いていた。英語が流暢。河川右岸に沿って Yomo 下流狭窄部手前まで、及び上流 Yomo 対岸まで案内してもらう。



- ・ 事前現象：1 カ月位前、川の水の色が変化。15 日位前、白煙。

- ・ 2 地点で川が block され Saga (湖、ocean の意味) が形成された (約 5 分)。

案内役ラム氏：Seti Khola の流量は、朝は高地は凍るので比較的少なく、夕方は多い。

6 月 6 日

Ms. Dhul Maya Tamang (55 才) Chipreti/Sardi Khola VDC。Tatopani から約 1 km 下流。道路脇の粗末な掘立小屋に住む。



- ・ 主人は河原で砂利採取に従事していて亡くなった。政府から見舞金は 125,000Rps。子供はいない。5 年前にポカラからここへ来た。
- ・ 災害の日、川は流れが止まり dry になった (約 5 分間)

6 月 6 日

Tatopani Riverside Viewpoint Restaurant のオーナー 5 ヶ月前にオープンしたばかり。



- ・ 轟音がとどろき、地震のような揺れが 1 分間位あった。
- ・ 危険の知らせが来たが誰も信じなかった。
- ・ 3 人の英国人がレストランの横の高台で一部始終を写真に撮っていた。

6 月 6 日 (6 月 7 日にも再度インタビュー)

Mr. Santos Rai (16 才) 上記レストランのボーイ。



- ・ 直前に強風が吹き、2 人の女性 (College students) が吹き飛ばされ、建物の屋根が飛ばされ、それから洪水が来た。
- ・ 流木が吊り橋に引っ掛かり川を block、流れが左岸側に回った。
- ・ 3 分位洪水が段丘上を走った。それから 30 分位で元の水位に戻った。

6月7日

老人 レストランの横の高台でインタビュー。

- ・両親と使用人（1人）が被災。死体が見つからないので政府からの見舞金をもらえない。
- ・天気は良かった。・洪水は1回だけだった。
- ・河川の流量は、洪水が来る直前まで大きな変化はなかった。



もう一人の壮年が参加。

- ・吊り橋上流の河床で擁壁建設工事に従事していた。
- ・洪水が見えたので逃げ、間一髪助かった。



6月7日 9:30~12:00

小学校 (Shree Annapurna L.S. School)

アポなしで訪問したが、Mr. Girdari Lamsal 校長（46才）と数名の教師が親切に対応してくれた。

教師が自ら撮影したビデオ及び他の人からもらったビデオを後日送付してもらうことになった。



「他のグループから、氷河にクラックがあり同じような災害が起きる可能性があるといわれたが、どう考えるか？」という質問があった。「直ちに大災害を引き起こすような状況は見られなかった」と答えた。

6月7日 15:00-15:30

Ms. Ganga Acharya, Sardi Khola VDC

Sardi Khola VDC の被害 :

- ・死者・行方不明 17人(下の Village 別の合計と合わない)
- Ward 1 13人 Gaina Khola(3), Bhurjung Khola(2),
Koakarsari(4), Bajokhet(2),
Chauva(2)

Ward 7 3人

Ward 9 2人

- ・家屋の流失 12戸



6月7日 16:30-17:30

Mr. Santos Tamurakar, Bhurjung Khola のレストラン兼ホテルの主人

- ・Bhurjung Khola から多くの人が Tatopani へレストランや砂利採取などで働きに行く。
- ・父は家の中に埋まったまま発見された。義理の妹はまだ発見されていない。