

ネパールにおける土砂災害防止対策計画のため
の応用地形学的調査手法の開発

(課題番号 12680460)

平成 12 年度～15 年度科学研究費補助金 (基盤研究 C(2))

研究成果報告書

平成 16 年 3 月

(2004 年 3 月)

研究代表者 桧 垣 大 助

(弘前大学・農学生命科学部・教授)

はしがき

ヒマラヤ山脈を擁するネパールでは、地すべり・河岸侵食・土壌浸食などの土砂災害が大きな問題となっている。しかし、経済的制約のため、多くの防災対策を、地質ボーリングなど精査を経ずに、対象箇所周辺の地形・地質踏査結果、空中写真、地形図の分析から計画しなければならないのが実態である。これらの限られたデータから最も容易に把握できるのが地形であり、そこから、現在の地形変化プロセスと、対象箇所周辺の地形発達史を読み取ることができる。前者は、直接土砂災害の原因となるものであり、後者は、対象箇所の地盤構造を作ってきた歴史で、災害をひき起こす現象のタイプや規模、活動性などを規定する。

本研究の目的は、ネパールヒマラヤの現在の地形変化プロセス・地形発達過程と災害現象との関係を調べ、さまざまなタイプの土砂災害への防災対策を計画するのに必要な応用地形学的調査の視点を提示することである。具体的対象は、ネパールの最重要産業である農業に対し大きな脅威となっている河道拡大・土壌侵食・地すべりであり、以下の内容で研究を行った。

1) 低ヒマラヤを中心に近年急速に進んでいる土壌侵食について、とくにガリー・表面侵食で荒廃した地区を対象として、既往の侵食対策の効果を、侵食量観測や植生回復状況の調査から検討し、現在の地形変化プロセスとガリー・表面侵食の発達段階に応じた土壌侵食対策の選定のしかたを検討する。

2) 近年の開発進行とともに河岸侵食が大きな問題となってきた亜ヒマラヤ（シワリク山地）に発源する河川について、同山地の地形発達過程と現在の地形変化プロセスを調べ、それがどう河岸侵食・河道拡大に結びついているか検討する。そこから、同山地の応用地形学的な防災対策計画の視点を考える。

3) 主として低ヒマラヤ（中央山地またはミッドランド）の代表的な地質の地域を対象に、地すべり地形の分布図を作成し、その分布と地質や斜面勾配の要素から地すべり発生危険箇所を把握する手法を検討する。

4) 低ヒマラヤにおける災害時のランドスライドの分布とその自然地理属性から発生危険箇所を把握する手法を検討する。

また、ネパールに適した応用地形学的調査は、研究成果の普及のため現地技術者へその技術が移転されることも重要である。そこで、最終年度にはネパールで防災技術者を集めたセミナー（ネパールにおける地形災害と防災に関するセミナー、主催：ネパール地すべり学会）を行った。

研究組織

研究代表者：桧垣大助（弘前大学農学生命科学部教授）

研究分担者：八木浩司（山形大学教育学部教授）

海外共同研究者：ヴィシユヌ ダンゴル（トリプバン大学トリチャンドラキャンパス地質学科）

研究協力者：ソハン クマル ギミレ（岩手大学大学院連合農学研究科・院生）

タラ バッタライ プラサド（トリプバン大学トリチャンドラキャンパス地質学科・院生）

キショル クマル カルキ（ネパール政府水資源省治水砂防局）

交付決定額

	直接経費	間接経費	合計
平成12年度	700千円	0千円	700千円
平成13年度	1,400	0	1,400
平成14年度	800	0	800
平成15年度	500	0	500
合計	3,400		3,400

研究発表

(1)学会誌等

D. Higaki, H. Yagi, K. Asahi and N. Miyake : Landslides in the late Quaternary deposits in the Bhote Koshi area, central Nepal, Journal of Nepal Geological Society, 22, 505-512. 2000.

V. Dangol : Landslide hazard mapping in Nepal: Case studies from Marin Khola (Eastern Nepal) and Syangja District (Western Nepal), Int. Congress Interparevent 2002 in the Pacific Rim, vol.2, 607-618, 2002.

D. Chamlagian and V. Dangol : Landslide hazard evaluation in and around the Ilam Hydropower project, Eastern Nepal Himalaya, Journal of Nepal Geological Society, 27, 131-143, 2002.

Ghimire, S. K., Higaki, D. and Sato, G. : Measurement of surface, rill, gully erosion and streambank erosion in a Siwalik watershed of Nepal, 東北地域災害科学研究, 39, 171-176, 2003.

Ghimire, S. K., Higaki, D. and Bhattarai, T. P. : Flash floods in the Siwaliks: consequences and countermeasures- A case study in Nepal, 1st.Int. Conference on Hydrology and Water Resources in Asia Pacific Region, 833-838, 2003.

(2) 口頭発表

八木浩司・手塚博子：ネパール・低ヒマラヤ帯中部における地すべり地形分布と現在の地すべり活動，日本地すべり学会 39 回研究発表会講演集，603-606，2000.

八木浩司・手塚博子：ネパール・低ヒマラヤ帯中部の地すべり地形分布図(1/5 万)，日本地すべり学会 40 回研究発表会講演集，603-606，2001.

桧垣大助・K. K. Karki：ネパールにおける持続可能な防災対策の検討—土壌浸食を例に一，平成 13 年度砂防学会研究発表概要集，248-249，2001.

桧垣大助：ネパールに多発する土砂災害の地形・地質特性から見た防災の課題，日本地すべり学会 41 回研究発表会講演集，109-112，2002.

Ghimire, S. K., Higaki, D. and Bhattarai, T. P. and Sato, G. : Monitoring of erosion-susceptible slopes in the Siwaliks of Nepal, 平成 15 年度砂防学会研究発表概要集，106-107，2003.

Ghimire, S. K., Higaki, D. : Mapping, monitoring and development mechanism of torrent-bank ephemeral gullies in the Siwalik Hills, Nepal, Abstract volume of Int. Conference: Gully Erosion in Mountain Areas, Digne-les Bains, France, 66-67, 2003.

Higaki, D., K. K. Karki and C. S. Gautam : Soil erosion control measures on degraded sloping lands- A case study in Midlands of Nepal, Abstract volume of Int. Conference on the Great Himalayas: Climate, Health, Ecology, Management and Conservation, 39, 2004.

H. Yagi and T. Abe : Landslide distribution in the mid-eastern part of the Lower Nepal Himalayas with special reference to geology and geomorphology, Abstract volume of Int. Conference on the Great Himalayas: Climate, Health, Ecology, Management and Conservation, 123, 2004.

S. K. Ghimire, D. Higaki and T. P. Bhattarai : Changes in land use and stream course: Implications for the sustainable management of natural resources, Abstract volume of Int. Conference on the Great Himalayas: Climate, Health, Ecology, Management and Conservation, 81, 2004.

H. Yagi : Landslide distribution in the mid-eastern part of the Lower Himalayas with special reference to geology and geomorphology, Abstract of Seminar on Geomorphic hazard and its mitigation in Nepal (Nepal Landslide Society), 1-2, 2004.

D. Higaki : Geomorphological approach to countermeasure planning against erosion and sedimentation disasters: Some case studies in Nepal, Abstract of Seminar on Geomorphic hazard and its mitigation in Nepal (by Nepal Landslide Society), 3, 2004.

本研究を実施するにあたり、ネパール政府水資源省治水砂防局の歴代所長および JICA 災害軽減プロジェクト (DMSP) の歴代リーダーおよび比留間雅紀氏、M. ラジバンダリ、B. チャパガイン、シャンブー氏には現地調査・資料収集等でお世話になった。記して謝意を表す。

もくじ

1	ネパールにおける自然地理的地域区分と起こりやすい土砂災害—応用地形学的視点		
		梶垣大助	1
2	荒廃した斜面における対策工計画のための応用地形学的調査		
		梶垣大助	3
3	亜ヒマラヤの河岸侵食・河道変化と流域の地形発達・現在の地形プロセス—防災計画への応用地形的視点		
		梶垣大助・ソハン クマル ギミレ	8
4	ネパール低ヒマラヤ帯中東部における地すべり分布と地形地質特性		
		八木浩司	15
5	自然地理/地質条件の評価によるランドスライドハザードマッピング手法の適用		
		ヴィシュヌ ダンゴル	20
	発表論文等		25

成果の概要

1、ネパールにおける自然地理的地域区分と起こりやすい土砂災害—応用地形学的視点

桧垣大助

ネパールでは、インドプレートのユーラシアプレートへの衝突による衝上断層の形成と隆起による山地の発達過程の結果、地質・地形構造の異なる5つの自然地理的地域に区分される(WECS, 1987)。すなわち、北から南へ、a)ハイヒマラヤ(High Himalaya), b)高山地(High Mountains), c)中央山地(Middle Mountains), d)シワリク山地(Siwaliks), e)テライ平原(Terai)、である(図-1)。これらの地域では、その地形・地質構造発達史を反映して、起こりやすい土砂災害のタイプが異なっている。

1)ハイヒマラヤ・高山地：氷河湖決壊洪水とそれに伴う河岸斜面でのランドスライド発生と天然ダム形成(これは以下の2)―4)のすべての地域に影響する)・決壊、氷食を受けた地域におけるモレーン・融氷河堆積物での河岸侵食や背後斜面からの地下水供給に起因する地すべり(桧垣・八田, 1999)など。

2)中央山地：中生代以前の堆積岩や変成岩の層理や片理面が傾斜していることや断層・褶曲が発達することによる流れ盤斜面での岩盤崩落、受け盤斜面でのトップリングによる崩壊(阿部ほか, 1999)、千枚岩質変堆積岩での地すべりとそれに珪質岩・眼球片麻岩を伴う斜面(MCT沿い)での大規模地すべり・崖錐での地すべり(たとえば Higaki, et.al., 2000 : 八木・手塚, 2000)、農地での土壌浸食(とくに隆起した小起伏面や段丘面など厚い風化層や脆弱な堆積物を持つ地形面で著しい)、湖成堆積物を持つ盆地の下刻する河川沿いでの地すべり、また全域を通じて土石流(Upreti and Dhital, 1996)、など。

3)シワリク山地：固結度の弱い堆積岩と礫層からなるシワリク山地での崩壊・ガリー侵食・段丘での河岸侵食、地層が北傾斜の同斜構造からなるため流れ盤斜面での小規模地すべり、Dun 盆地(インナーテライとも言うシワリク山地内部の盆地)近傍では河岸侵食と河道変化、など。

4)テライ平原：沖積平野のため、河道変化(拡大)、洪水氾濫、河床上昇など。

防災対策の検討には、各地域の広域的な地質・地形特性とその発達史(たとえば、木崎編, 1988)を理解しておくことが有効となる。

Types of Water Induced Hazards in Different Physiographic Regions of Nepal

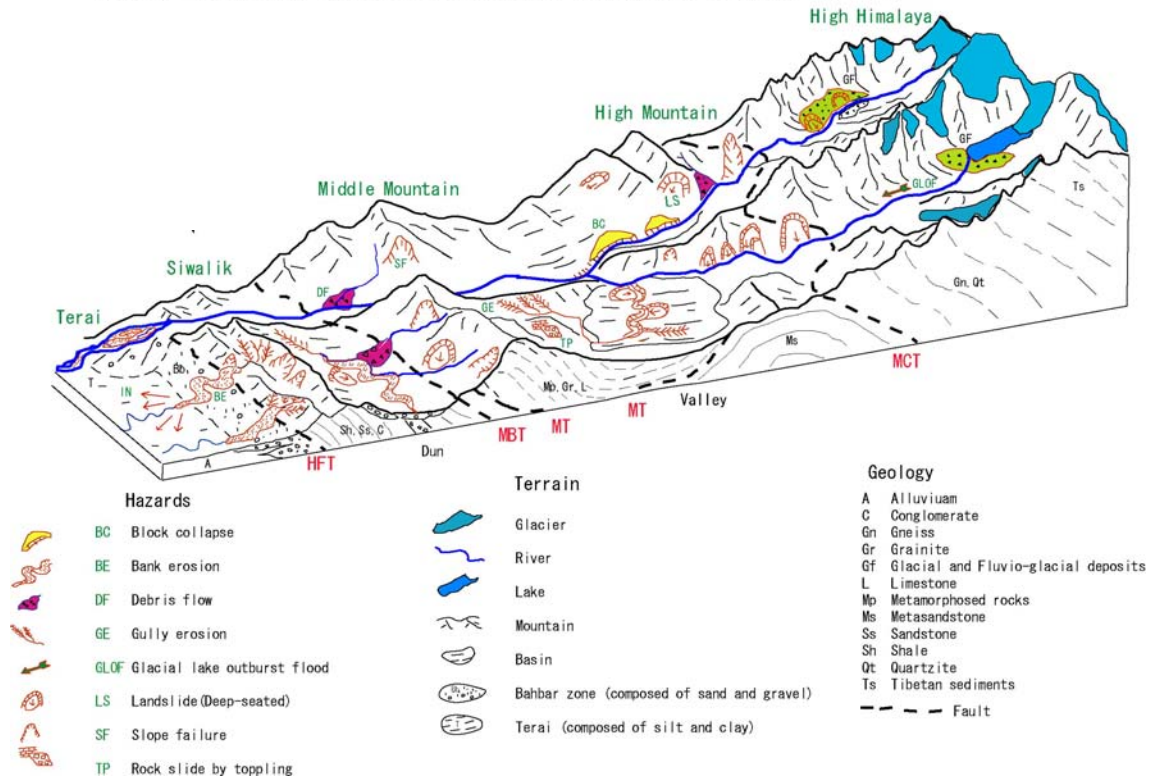


図-1 ネパールの自然地理的地域区分 (WECS, 1987 一部改変) に土砂災害ハザードの分布を重ね合わせた各地域に起こりやすい災害の分布概念図

文献

阿部真郎・桧垣大助・Vishnu Dangol(1999) : 中央ネパールにおける地形及び地質, 地質構造と斜面変動. 地すべり 36-3, pp.108-116.

桧垣大助・八田珠郎(1999) : ネパールヒマラヤの氷河起源堆積物に発生した地すべり, 1999年度地すべり学会講演集, 53-56.

Higaki, D. Yagi, H. Asahi, K. and Miyake, N.(2000) : Landslides on the late Quaternary deposits in the Bhote Koshi area, central Nepal., Journal of Nepal Geological Society, 22, pp.505-512.

木崎甲子郎編著(1988) : 上昇するヒマラヤ, 214p. 築地書館.

Upreti, B.N. and Dhital, M.R.(1996) : Landslide studies and management in Nepal., ICIMOD occasional paper, 87ps. International Center for Integrated Mountain Development.

WECS.(1987) : Erosion and sedimentation in the Nepal Himalaya, Kefford Press, Singapore.

八木浩司・手塚博子（2000）：ネパール低ヒマラヤ帯中部における地すべり地形分布と現在の地すべり活動，日本地すべり学会講演集，603-606.

2、荒廃した斜面における対策工計画のための応用地形学的調査

桧垣大助

2.1 はじめに

土壌浸食は、土地荒廃と農地生産性を低下させ、また下流への細粒土砂の生産源となって灌漑施設でのシルト堆積の原因と考えられるなど、近年、重要な流域環境問題の1つとなっている。とくに表面侵食とガリー侵食は著しい土地荒廃を引き起こす。ここでは、10年間の侵食モニタリング結果から、ガリー侵食・表面侵食機構を明らかにし、また地形から見られる侵食の進捗程度を考慮した適切な対策工選定について検討した結果を述べる(Higaki, et. al, 2004)。調査箇所は、JICA/ネパール政府水資源省治水砂防センタープロジェクト(DPTC)のモデルサイトとなったトリスリ郡ピパルタール(DPTC, 1999)である(図-2.1)。

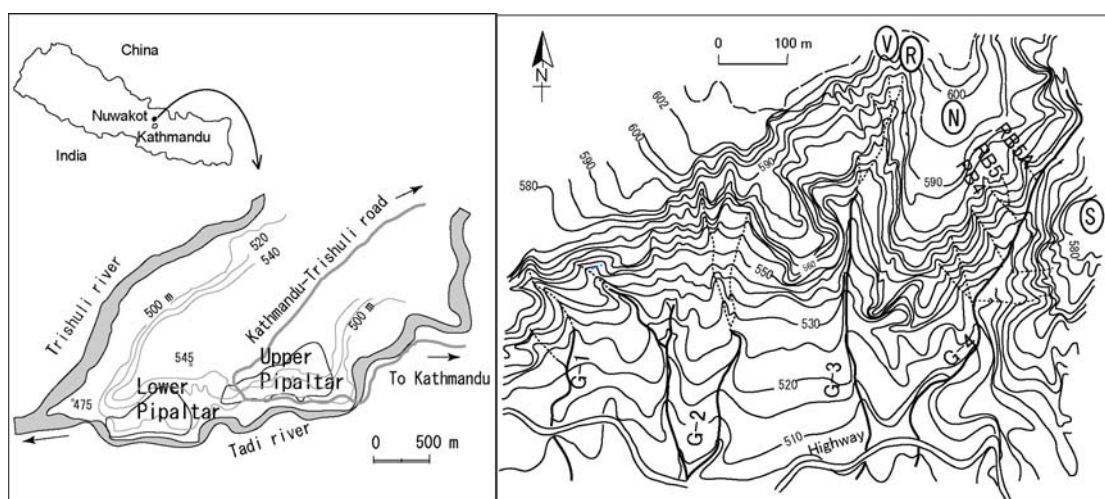


図-2.1 調査箇所の位置と地形及びモニタリング箇所

2.2 対象箇所の概要

ピパルタールは、アッパーピパルタール(UP)とローワーピパルタール(LP)からなり、ともに厚さ50m以上の砂礫層または砂層とその上位のラテライト化した洪水ローム層で構成される河岸段丘の段丘崖斜面に位置する(図-2.2)。



図-2.2 調査地の状況

前者では、ガリー侵食・表面侵食機構のモニタリングと適切な対策工の検討を行い、後者では、住民参加による侵食対策の検討を行った。これらの箇所は今から訳 40 年前の森林伐採後に斜面侵食が活発化したとされる(DPTC, 1999)。

2.3 ガリー侵食モニタリング結果

DPTC では、1993 年にこの地区をモデルサイトとし、4つのガリーを対象として 1994 年 1 月から 1998 年までガリー冠頭部の侵食速さの観測を行った。また、DWIDP (DPTC 終了後治水砂防局 (DWIDP) となった) で 2000 年に、また著者らが 2003 年に観測した。対象は、ガリー-G1、ガリー-G4 の RB4, RB5, RB5A である (図-2.1)。また、対策として、1989-1991 年にネパール政府土壌保全流域管理局 (DSCWM) が樹木植栽を G-1 で行い、1997 年に竹 100 本植栽を RB5A で、蛇かご谷止工(H=2m)と PNC 板による水路工 (縦侵食防止) が 1994-1995 年に RB4 で施工された。1998 年には RB5 で谷止工と竹植栽が行われた。

図-2.3にガリー頭の後退量(1994-2000年)を各年の雨季・乾季ごとに示す。マイナス値は、乾季のラテライトの収縮クラック形成による基準線から冠頭までの距離拡大を示す。雨季には、クラックに沿って土塊が崩落し、その土砂はガリー底からやがて侵食されていき、それが冠頭壁の不安定化を招くという侵食プロセスでガリー侵食が進むことがわかった。これらのガリー頭後退速さは侵食対策導入後大きく減少していることが読み取れ、対策の効果が現れている。とくに、竹は、侵食低減のほかに住民に多用途に利用され有効な対策である。2003年9月には竹が繁茂し本数も増えていたが、ガリー底の崩落土砂が軟質でガリー底で水分が供給されやすいことで竹が繁茂し、それが土砂を捕捉したためガリー侵食が減ったのであろう。

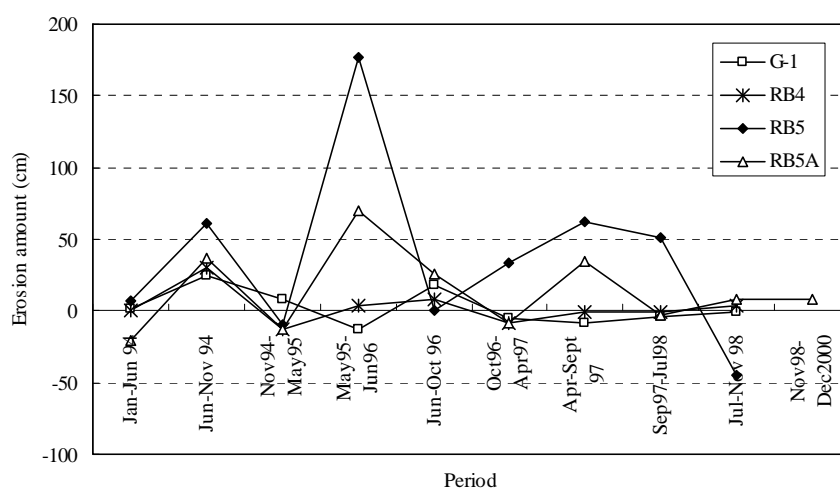


図-2.3 ガリー侵食量の推移 (1994-2000年)

2.4 表面侵食の観測

4つの地形条件、傾斜、植生被覆の異なる斜面がDPTCによって選定され、各斜面に鉄ペグ30-50本を打ち込み、その地表部分の長さ変化を測ることで侵食量観測が1994年1月(一部は1997年のみ)から行われた。すなわち、急傾斜(30度)の小尾根上の裸地(R)、草本に覆われた谷型斜面(30度)(V)、緩傾斜(10度)の裸地(S)と、尾根—山腹斜面にある緩(10度)～急(30数度)な裸地(N)である。表-2.1は、1994-2004年1月の間の年平均表面侵食量を期間ごとに示している。平均は0.03-1.53cm/yである。斜面Sでの侵食速度はR、Vよりはるかに小さく、斜面Nでも10度以下の部分では0.15cm/yと30度以上でリルの発達する部分での3.62cm/yよりずっと小さい。つまり、リルの発達しない段階での緩斜面(10度以下)では侵食は非常に少なく、そこで植生が回復しないのは、ラテライトの酸性と硬いクラストを形成する地表面で種子が流亡してしまうためと考えられる。

そこで、1998年6月にNの緩斜面部に数段の平坦面を人力で造成し、ライザーの部分に段丘礫層から取った礫を積み階段工(teracing works)を施工し、平坦面を付近の農家から購入した堆肥で覆った。同年7月には堆肥中の種子から発芽した草本が繁茂し、2003年9月には階段工の草本被覆も増えていた。これは、今後の自然緑化(森林回復)を期待させるものである。

表-2.1 表面侵食量の推移(cm/y) (1994-2004年)

Period/ Site	R	V	S	N
Jan 1994-21 Sept 1997	1.03	0.63	0.03	
8 Jun 1997-21 Sept 1997				1.53 (0.15:<10° 3.62:>30°)
21 Sept 1997-23 Dec 2000	0.54	-0.58		
23 Dec 2000-5 Dec 2002	-0.23			
5 Dec 2002-13 Jan 2004	1.07			
23 Dec 2000-13 Jan 2004		0.01		

* minus value is due to deposition or vegetation growth

2.5 応用地形学的視点での調査による効果的なガリー・表面侵食地策工計画

ローワーピパルタルでは、段丘面が厚さ10m以上の厚い砂層からなる。これは、タディ川とトリスリ川の合流点に近く河床勾配が緩くなり洪水砂層が堆積しやすかったか、GLOF堆積物の可能性もある。その結果、ガリーの運搬物質が細粒となるため河床勾配は緩い。このため、2m程度のふとんかご砂防ダムでも十分に堆砂を期待でき、実際、DSCWMによる施工後1年で砂が堆積した。礫の衝突の心配もないため、堆砂地に住民参加で改良型の草本で屋根材にもなるネピアグラスが播種された。その後、写真-2.1, 2.2に見られるようにネピアグラスとその他の現地性草本がガリー周辺を覆い、緑化が進んだ。また、ネピ

アグラスの種子を売ることによって、住民は現金収入を得ることができ（カルキ・桧垣, 1998）、貧困軽減にも繋がっている。

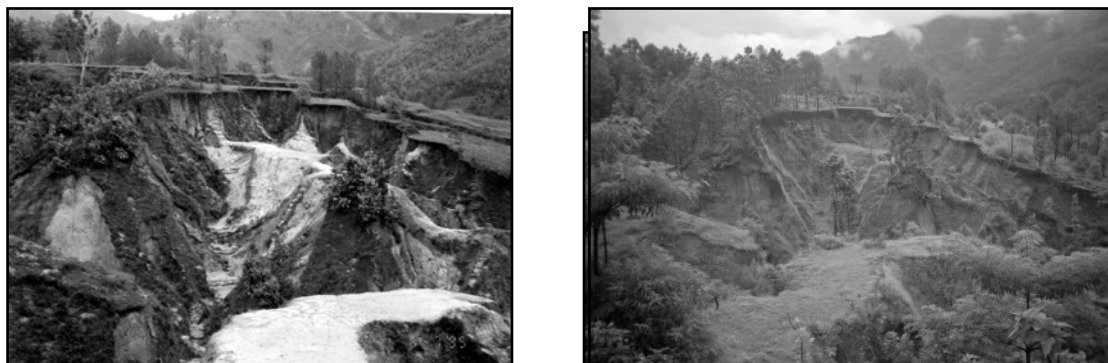


写真 2.1 1995 年 7 月（左）と 2003 年 7 月（右）のガリーで荒廃した流域の草本被覆状況

ガリー侵食は風化層の厚い所で起こるが、隆起した小起伏面がそれに当たり、中央山地には各所に見られる（岩田, 1985）。ネパール中部カブレ郡にある Jikhu Khola 流域もその 1 つで、そこでは空石積谷止工だけでラテライト上に生じたガリーを安定化させ、現在はサル(Shorea Robosta)の森林に回復している。これは、風化しやすい千枚岩からなり、厚い風化残積土が地表を覆うため、ガリーは礫を運ばず、そのため衝撃に弱い空石積谷止工でもガリーを安定化できたものである（桧垣, 2000）。また、上述の竹でガリー侵食を大幅に軽減させたのも、ガリーの活発な侵食が、洪水砂層起源のラテライト層にあって下位の段丘礫層に及んでいないため、主な運搬物質が細粒であることも功を奏していると言える。カトマンズ盆地のような湖成層が段丘化している所でも、同様に細粒物質のためガリー侵食が進みやすく、その対策工計画には同じ視点が適用できる。

表面侵食では、前述のように、急斜面でのリル侵食が主要なプロセスで、それがガリー形成に発展する。それが及ばないラテライトからなる段丘面または尾根斜面頭部の緩斜面では侵食が微弱なので、緑化が有効な対策となる。それは、森林回復へも繋がり、森林に依存してきた山間農民の生活向上に直接資する。

以上のように、現在の地形プロセスとその土地の地形形成過程を考えることで、低コストな効果的防災対策計画が可能となる。

文献

DPTC (1999) : Final report on Pipaltar Model Site, Water Induced Disaster Prevention Technical Centre(JICA/HMG. Nepal), 54p., Kathmandu.

Higaki, D., Karki, K.K. and C. S. Gautam (2004) : Soil erosion control measures on degraded sloping lands – A case study in Midlands of Nepal, Abstract volume of Int. Conference on Great Himalayas: Climate, Health, Ecology, Management and

Conservation, p.39, Kathmadu.

桧垣大助(2000)：ネパールにおける低コスト工法について, SABO, 66, 25-30. (砂防地すべり技術センター発行)

岩田修二(1985)：侵食平坦面と河岸段丘, 木崎甲子郎編「上昇するヒマラヤ」, pp.115-128, 築地書館.

K. K. カルキ・桧垣大助(1998)：ネパールにおける住民参加による土壌保全の意義, 砂防と治水, 122, 59-62.

3、亜ヒマラヤの河岸侵食・河道変化と流域の地形発達・現在の地形プロセス —防災計画への応用地形的視点

梶垣大助・ソハン クマル ギミレ

3.1 シワリク山地の地形発達と河岸侵食・河道変化をもたらす現在の地形プロセス

シワリク山地は、海拔 400–1500m 程度の山地で、どこでも水系密度が高く、崩壊やガリー・土壌侵食が活発、河道幅が広い(Higaki, 1998)という地形をなす。図-3.1 は、同山地の地形発達史と現在の洪水・土砂災害を起こす地形プロセスとの関係を示したものである。図では、隆起の歴史、山地を構成する物質の形成史、山地内の流域の上流から下流への地形構成の特徴と発達過程を示している。なお、隆起と外シワリク山地の地形形成については、木村の一連の研究（たとえば木村, 2000）があり、隆起時期についてはそれを参考にした。

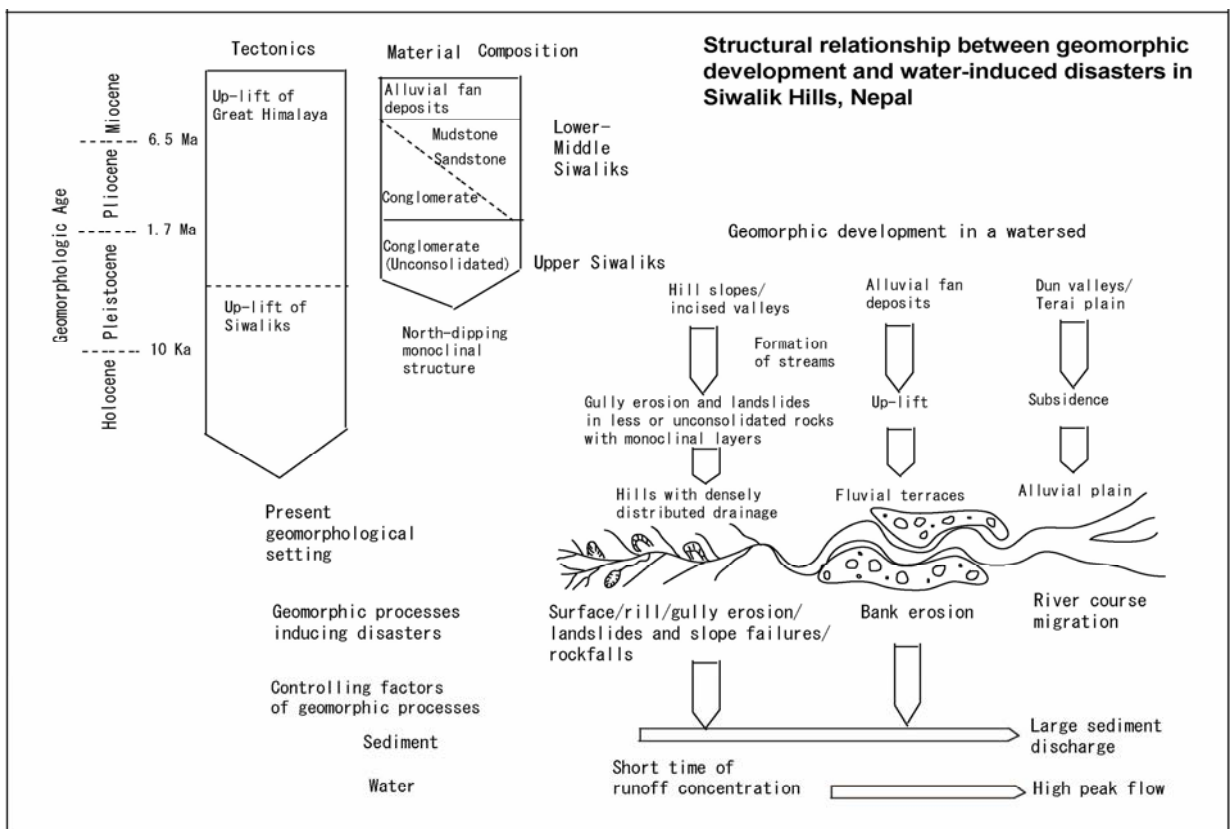


Fig. 3.1 シワリク山地の地形形成過程と流域の現在の地形形成プロセス（梶垣原図）

1) 隆起と山地構成物質：山地を構成するのは、中新世～第四紀の沖積平野～扇状地性堆積物であるシルト・砂・砂礫層やその互層で未固結のためガリー侵食と風化を受けやすい。南側にある衝上断層(Himalayan Frontal Thrust : HFT)の活動で、地層は北傾斜している。

2)流域の地形構成の特徴とその発達過程：山地の隆起に伴って流域が作られ、初期に扇状地であった所がさらに隆起して河岸段丘化した。下流部では沈降してテライ平原/Dun 盆地ができた。その結果、現在の流域の地形は、隆起の活発な a)山地斜面・侵食谷域, b)河岸段丘域と、沈降する c)沖積平野域の3つのセグメントに分けられる。a)では、ガリー侵食・風化層の土壌侵食が活発となる。その結果、水系が発達し高密度水系網ができた。

3) セグメント区分ごとの地形プロセス, 起こりやすい災害：水系に挟まれた北向き斜面が流れ盤となるため、シルト層を挟むと小規模な地すべりが起こる。また、礫層が多い扇状地性のシワリク層上部で崩壊・落石が多い。b)では、シワリク層礫層起源の礫が河岸段丘と現河床の粗粒物質となっているので、礫径が両者とも同じなため河岸侵食を受けやすく、下流での河道変化の要因にもなっている。a), b)が下流への主な土砂生産源である。c)では、河床と周辺土地の比高がほとんど無く、Flash flood による氾濫が起きやすい。その結果、河道変化が進み、近年、流域の中で河道面積が最も拡大しているセグメントである。

4) 災害要因としての土砂・水流出と地形発達：以上のような地形発達の結果、a)での斜面侵食と b)での河岸侵食が多量の土砂の生産源となっている。また、未固結物質上での地すべりも含めた斜面侵食が高密度水系網を発達させ、その結果、降雨の流出が非常に速くピーク流量の大きい Flash flood を生じさせていると考えられる。

3.2 シワリク山地カジュリ川流域における侵食プロセスと河岸侵食・河道変化

調査地域のカジュリ川（ネパール語でコーラ）は、ネパール東部ウダイプール郡にあるトリジュガ川の右支川であり、流域面積 2.84km² と 1.74km² のカジュリ川とムサー川からなる。流域は海拔 150-400m 程度で、山地の基盤地質は、シワリク中部層の砂岩・シルト岩・礫岩と同上部層の砂礫層からなる。また流域の地形は、上流から丘陵斜面、高位河岸段丘、低位段丘面、氾濫平野からなる（図-3.2）（Ghimire, et. al, 2003）。

流域では、前述のように樹枝状水系が密に発達し、さまざまな侵食を受けやすい斜面が発達する。それは、1, 降雨時に侵食を受けるほとんど鉛直に近い崖（VC）、2, 下部がガリー侵食を受けることの多い崩壊斜面（SF）、3, 斜面末端が河川侵食を受けて発生する崩壊と地すべり（LS）、4, 河岸侵食崖（CB）、である。このうち、地すべりは、シワリク中部層シルト岩の流れ盤斜面（斜面が北向き）に slump タイプのものが見られるが箇所は多くない。これらの侵食されやすい斜面の分布は地形区分と対応しており、図-3.3 のように整理できる。

これらの斜面の侵食速さについて、2002年雨季に、埋め込んだピンの地表高さの計測（SF, LS）、及び河岸侵食とガリー頭部侵食（VC, SF, CB）については固定点からの河岸やガリー冠頭への距離変化を調べた。また、森林に覆われた丘陵斜面と裸地斜面でも侵食測定ピンによる erosion plot を設けた（図-3.4）。VC, SF は、流域最上流部に典型的に見られ、しば

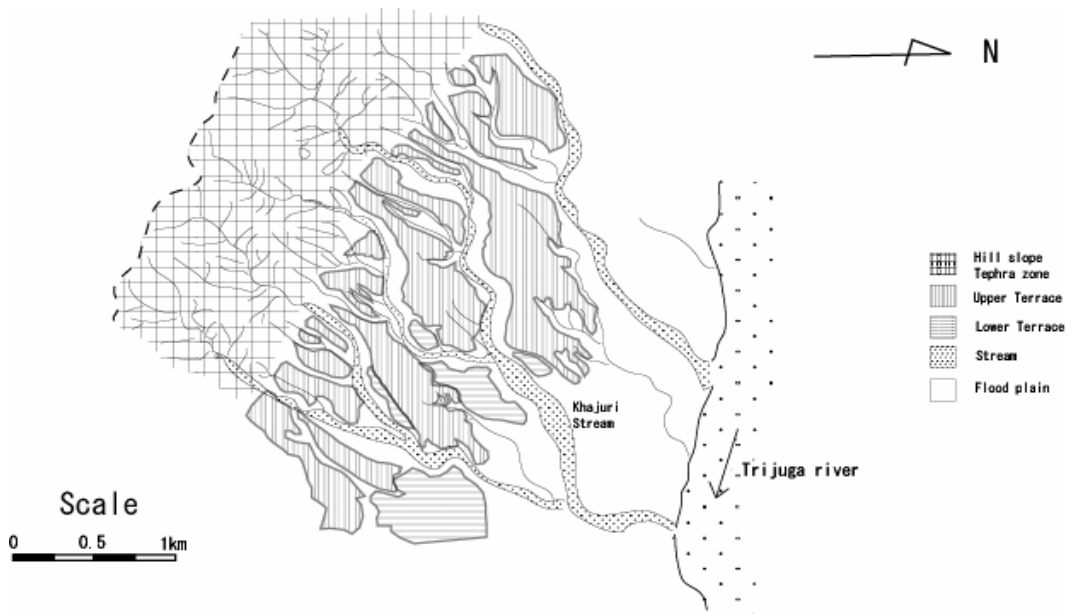


Fig.3.2 Geomorphological map (Ghimire et.al, 2003)

Morphological Unit	Uppermost hillslope	Upper fluvial terrace	Lower fluvial terrace	Flood plain	Legend	
Elevation (m)	>280	220-280	200-220	<200		
Materials					Sand stone	Landslide
River morphology					Conglomerate	Slope failure
Land use	Forest	Forest/shurbs/agric. land	Shrubs/agric.land/house	Agric. land/houses	Clay stone	Cut bank
Erosion-susceptible slopes					Top soil	
VC					Fine sand	
SF						Erosion Process
LS						Head retreat by scouring of free face
CB						Sidewall collapse by underscoring
						Rill erosion on landslide surface, toe cutting
						Selective scouring followed by over topping

Fig.3.3 Types and distribution of erosion-susceptible slopes (Ghimire, et. al, 2003)

しばガリーを形成している。それは、crest, free face cliff, debris slope と pediment surface からなる。Free face cliff はガリー後退の最前線となり crest slope との間に遷急線が存在する。Debris slope はガリー底の下刻と側方侵食で発達する。図-3.3 に示すように、河岸構成物質はシルト岩、砂岩と礫岩互層か段丘では礫層となることがあり、河岸侵食は、河岸物質の選択的な侵食によって進む。すなわち、Flash flood の際、砂礫層が選択的に侵食を受けてオーバーハングが形成され、その後凸部が崩落する。

表-3.1 は、2002, 2003 年雨季 (6-9 月) の各斜面における平均的侵食速さを示す。ガリー侵食はきわめて速く、また、河岸侵食は大きい日雨量を記録した 2002 年には 0.25-4m に達した。いっぽう、森林に覆われた斜面と裸地斜面では年平均侵食深 0.8 - 1.6mm と侵食速さはそれほど大きくない。

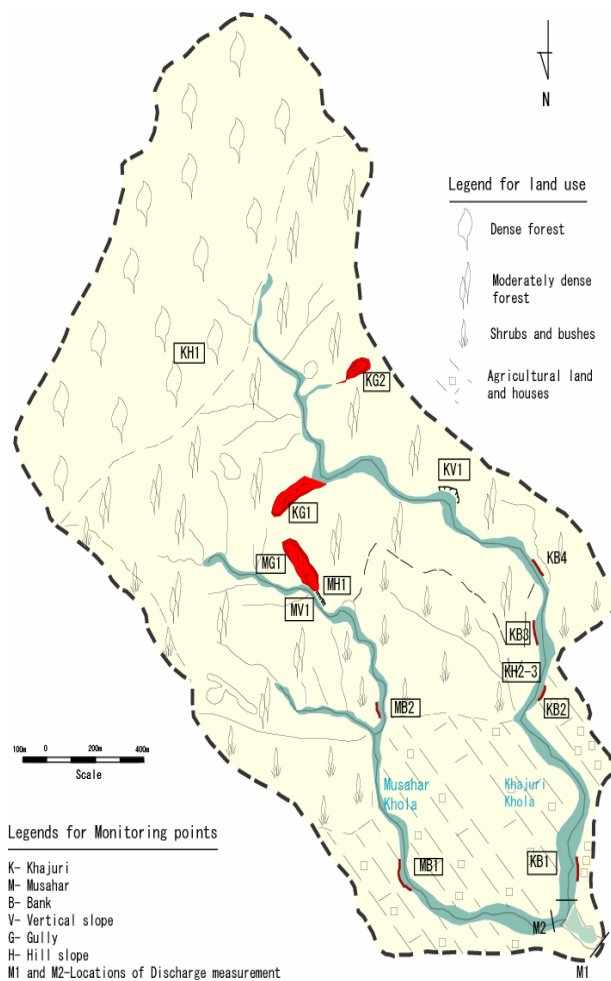


Fig.3.4 Location of monitoring points in Khajuri watershed

Table 3.1 : Amount of erosion from unstable slopes (May 2002- Aug 2003)

Type of unstable slope	Amount of erosion
Free cliff retreat (Type A)	0.03 to 0.90 m
Gully Sidewall erosion (Type B)	0.09 to 0.25 m
Rill erosion of slope failures (Type C)	2.0 to 7.5 cm
Bank erosion (Type D)	0.25 to 4.0 m
Surface erosion	
Dense forest (Av. slope -30deg.)	6 mm to -4.5mm 1.6 mm (av.)
Dense forest (Av. Slope-10deg.)	4 mm to -4 mm 1.4 mm (av.)
Shrub land (Av. slope 30deg.)	4 mm to -2 mm 1.2 mm (av.)
Shrub land (Av slope 10deg.)	1.5 mm to 0 mm 0.8 mm (av.)
Bare land (Av slope 40deg.)	70 mm to -0.5 mm 9 mm (av.)

Note: minus values indicate deposition

カジュール川下流のデウリで雨量観測 (Hobo 社製バケツ式雨量計と on-set データロガ

一) を行った。また、連続した護岸工が 1997-8 年 DPTC によって設置されているカジュリー川とムサール川合流点で河道断面測量を行い、そこでの水位と流速の目視観測を降雨イベントごとに行って流量を求め、降雨イベントごとのハイドログラフを作成した。なお、雨季であっても降雨時以外に河川に水流は無い。図-3.5 は、2002 年 6 月 6 日-7 月 9 日の間の 7 回の降雨イベント時の結果である。流量は、ピークへと急激に増加し、流出時間は 1.5-5 時間と短いのが特徴である。流域の各河川上端（ガリー状であることが多い）は稜線から数 m 程度であり、しかも水系が密であるため、このような流出が生じていると考えられる。

また、カジュリー、ムサール川で洪水流出中に数回流水を採取して浮遊砂量を計測した。これらの値に各洪水流出での総流量を乗じることで、1 洪水イベントの総浮遊砂量を求め、それを流域面積で除して比流出浮遊砂量とし、それと雨量との関係を示したのが図-3.6 である（対象 2002, 2003 年雨季）。この結果から、20mm 以上の雨量の降雨イベントでは、少なくとも 200t/km² の土砂流出があると言える。2002, 03 年で平均的には 20mm 以上の降雨イベントが年 35 回あることからすると（過去 30 年では両年の年総雨量は平均的なものであった）、年比流出浮遊砂量は少なくとも 7,000t/km² に及び、既往のネパールヒマラヤでの値(表-3.1)と較べても最大級の土砂流出量となる。また、これは流域での年平均侵食速さにして 5mm に相当する（単位堆積重量=1.4g/cm³）が、浮遊砂だけからの値なので、実際はこれより大きい。

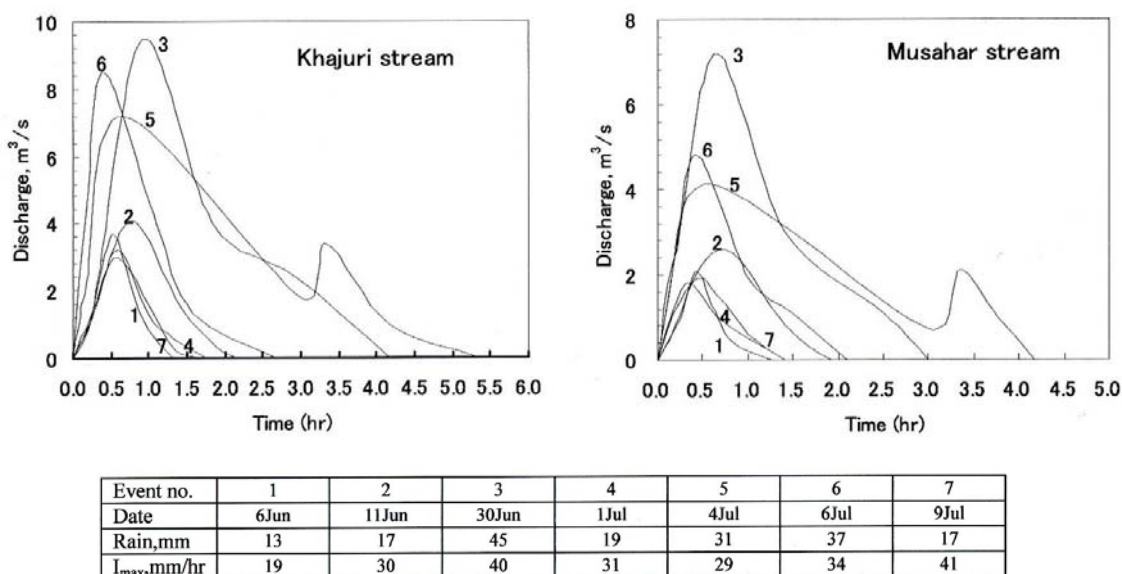


Fig.3.5 hydrograph and rainfall

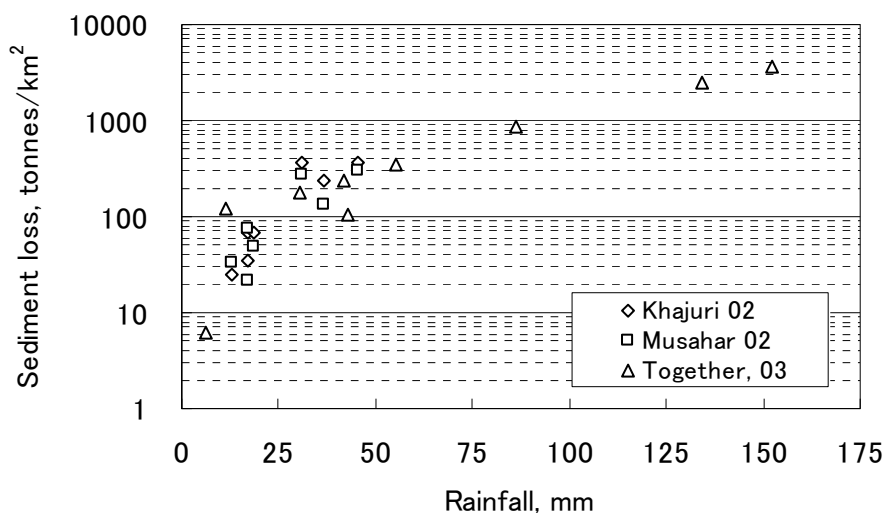


Fig. 3.6 Suspended sediment loss measured in Khajuri stream

以上から、シワリク山地での単位面積からの土砂流出量は非常に大きく、急激にピークに達する Flash flood タイプのため、氾濫平野では洪水氾濫がきわめて起きやすい状態にあることがわかる。これは、氾濫平野での河道拡大、河道変化の大きな原因となる。また、段丘発達域では、河岸物質である砂礫のほとんどがやはり河成のシワリク上部層礫層から供給されるため、その礫径構成と現河床のそれに大差が無い（シルト岩・砂岩からの崩落物はスレーキングが速く河成礫とならない）。これは、河岸の被侵食性が高いことを意味し（Higaki, 1998）、急激な洪水流出とともに河岸侵食の大きな要因である。また、空中写真の経年比較によるガリーエリアの地形推移を見ると、ガリー集中域からの土砂生産が流域で重要なウエイトを占めている（Ghimre, et al., 2003）。

なお、流域の近年の土地開発による森林被覆面積の変化と河道拡大の関係については、1964年以降の経年的な空中写真の比較によって現在検討中であるが、近年の急激な河道拡大がとくに氾濫平野で進んでおり、また、流域の土地被覆の変化では1964-1992年に大きく森林面積が減少したが、その後はその変化が少ない（Ghimire et. al, 投稿中）。これらの因果関係は、河岸侵食モニタリング結果も考え合わせ、検討を進めていく予定である。

文献

Ghimire, S.K., Higaki, D. and Sato, G. (2003) Measurement of surface, rill, gully and stream bank erosion in a Siwalik Watershed of Nepal, 東北地域自然災害科学研究, 39, pp.171-176.

Ghimire, S.K., Higaki, D., Bhattari, T. P. and Sato, G.(2003) : Monitoring of erosion susceptible slopes in the Siwaliks of Nepal, 平成 15 年度砂防学会研究発表概要集, 106-107.

Higaki, D.(1998) : Erosion and sedimentation problems in Nepal from the viewpoint of

morphological development., *Journal of Nepal Geological Society*, 18, pp.309-318.

木村和雄(2000): ヒマラヤ前縁における地形列の生成とアクティブテクトニクス, *地学雑誌*, 109-1, pp.56-72.

4、ネパール低ヒマラヤ帯中東部における地すべり分布と地形地質特性

八木浩司

4.1 はじめに

地すべりは、特有の地形・地質条件下で発生することが経験的に知られている。従って、過去の地すべり地形の発生場を用いて、地すべりが発生しやすい場の岩相、地質構造および発生領域における斜面勾配を明らかにしていくことは極めて重要で、地すべり災害を回避し人的経済的被害を少なくしていくことに貢献できるものである。これまで筆者らは、ネパール低ヒマラヤ帯において、空中写真判読による地すべり地形分布図を作成し、また、その分布と地形・地質属性評価からの地すべり危険箇所把握手法を検討してきた(たとえば Yagi and Nakamura, 1995; 八木・手塚, 2000; 八木・手塚, 2001, Yagi and Abe, 2004)。

ここでは、このような観点からネパール低ヒマラヤ帯中東部における地すべり地形分布を 1992 年撮影の 1/5 万空中写真判読を行って明らかにした例について述べる。

調査地域は北緯 27 度から北緯 27 度 30 分、東経 85 度 45 分から東経 86 度の範囲で、総面積 2585 平方キロの地域である。本地域は西部でロシコーラ川の流域、中部及び北部でスンコシ川中流部、南部でマインコーラ川の流域にあたる。調査地域内で地形図上に表現可能なおおむね 2ha 以上地すべり地形として 1479 箇所が判読された (図-4.1)。

4.2 調査地域における地すべり分布と地質

地すべり分布図より、15ha 以上のやや規模の大きな地すべり地形がスンコシ川よりも北側の地域に高い密度で分布することに対して、同川より南の地域では地すべり地形の集中した分布は認められないことが明らかとなる。

本調査地域には、眼球片麻岩、斑状結晶変岩、千枚岩、粘板岩等のミッドランド層群およびカトマンズ層群の結晶片岩質あるいは石灰質な岩体、さらにはシワリーク層および花崗岩が分布する。地すべり分布図と地質分布図のおおまかな比較から地すべり分布の地域性は発生場の地質条件(岩相および地質構造)が大きく関わっていることが本地域に分布することが予察された。そこで地すべり地形と発生場の地質との対応関係を明確にするために、すべての地すべり地形ごとにその発生場の岩相と地質構造を対応させ、地すべり発生地点数やある地質帯の面積に対する地すべり地形面積の占有率を検討した。その結果、花崗岩や珪岩および石灰質岩地域で地すべりの発生頻度や地すべり占有率が低いことに対して、ミッドランド層群の千枚岩、粘板岩および千枚岩質結晶変岩など変堆積岩地域で一般に発生頻度や地すべり占有率が高いことが明らかとなった。また珪岩地域でも千枚岩層を介在する場合は地すべりの占有率が高くなる。

地質構造との関係から見れば、地すべり地形はほとんどの変堆積岩帯において流れ盤斜面に卓越的に分布する。また、同一岩質であれば受け盤よりも流れ盤においてより発生頻

度および地すべり占有率が高くなっている。

4.3 地すべり発生域における斜面勾配と限界斜面勾配

岩相・地質構造以外で重要な地すべり発生要因として発生域における斜面勾配をあげることが出来る。すわなち地質的に岩盤の強度が弱ければより小さな斜面勾配で地すべりは発生する。筆者は 1479 箇所すべての地すべり地形について発生域域（元斜面）の斜面勾配を測定するとともに、それらを地質タイプと斜面タイプすなわち受け盤・流れ盤毎に区分整理した。例として、千枚岩地域や、粘板岩地域における斜面勾配ごとの地すべり発生件数と累積頻度分布を Fig. 4.2 及び Fig.4.3 に示した Table 4.1 にはすべての地質帯について、地すべりの累積発生頻度と斜面勾配の関係において、発生頻度がそれぞれ 0,10,20,30,40% を示す斜面勾配を示した。これらのデータより、千枚岩の流れ盤地域ではもっとも緩い勾配（6度）で地すべりが発生し始める。地すべりの発生開始斜面勾配に関して言えば、ミッドランド層群の千枚岩質岩、粘板岩、粘板岩質頁岩地域は千枚岩地域に次いで順に緩やかである。すなわち、これらは地すべりの発生開始勾配が地すべりの発生しやすさの判定指標の一つとして用いることが出来ることを示唆している。

千枚岩や粘板岩地域で地すべりが急激に増加し始める斜面勾配は、地すべりの累積発生頻度がおおよそ 20% 付近にある（図 4.2, 4.3）。このような斜面勾配を地すべり発生の限界斜面勾配と呼ぶことにし、各地質帯毎に比較した（表 4.1）。筆者はこの限界斜面勾配を、実際に発生した岩盤地すべりをもとに得られた等価摩擦係数に相当するものとする。地すべり占有率や地すべりの発生頻度と同様、地すべり発生の限界斜面勾配は千枚岩、千枚岩質珪岩、粘板岩、粘板岩質頁岩の順で大きくなる。

地すべりハザードマップの作製において、様々な発生要因の重みづけによって得点化を図り地すべりの発生しやすさが評価される。本研究で示した地質・岩相、地質構造、ごとの地すべり発生頻度や占有率の地質帯毎の順位、地すべり発生の限界斜面勾配は、数千から数万平方キロにわたる広範な地域を対象とした地すべりハザードマップ作製においてはその危険度評価のための有効な指標として活用できるものと考えられる。

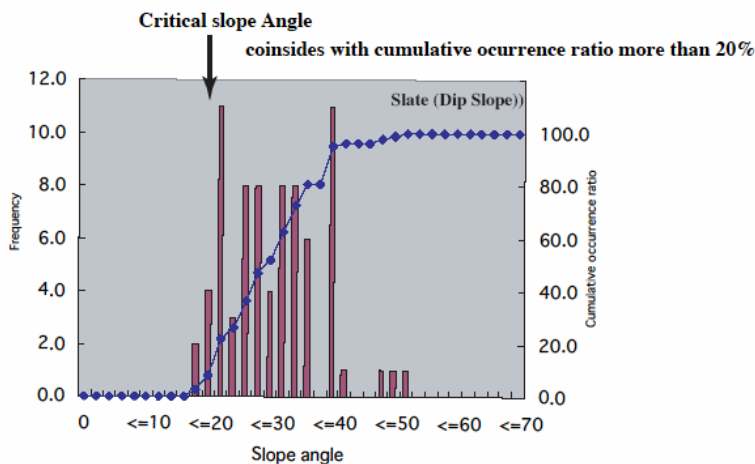


Fig. 4.2 Landslide distribution and slope angle in Slate zone (Dip slope)

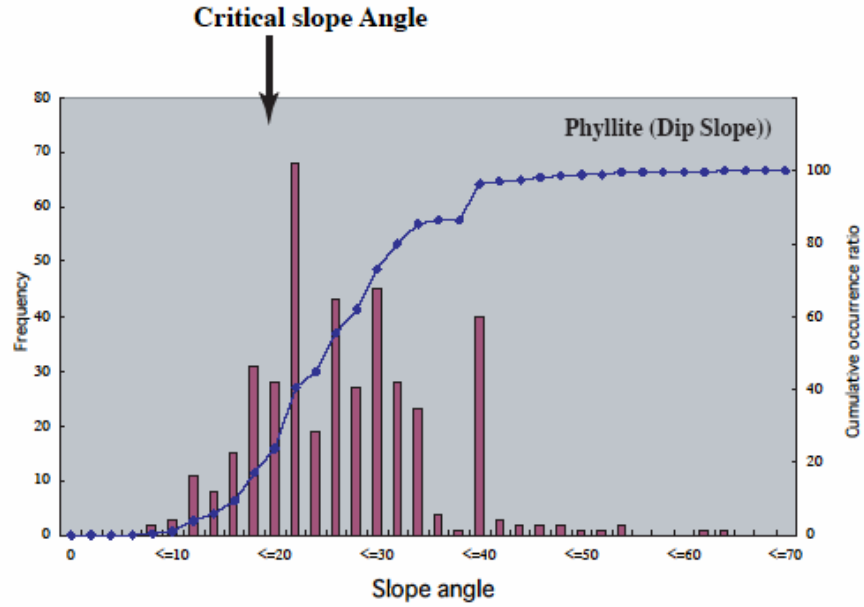


Fig. 4.3 Landslide distribution and slope angle in Phyllite zone (Dip slope)

Table 4.1 Which lithological zone is prone to slide easier? Landslide distribution in each geological zone and slope angle of landslide occurrence

Geological Zone	Lithology	Distribution				Distribution for slope type			Distribution for slope type(%)			Slope Angle in Source Area for Cumulative Occurrence Ratio											
		Total area(ha)	Landslide area (ha) in source area	Landslide sites no.	Landslide occupancy rate (%)	Anti-dip slope (ha)	Dip slope (ha)	Intermediate (ha)	Anti-dip slope (%)	Dip slope (%)	Intermediate (%)	Dip Slope				Anti-dip Slope				Intermediate Slope			
SIWL	Lower Siwalik	1100	0.0	0	0.0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	10%	20%	40%	0	10%	20%	40%	0	10%	20%	40%
INTR	Granite	3300	10.0	8	0.3	0	7.0	3.0	0.0	70.0	30.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
KTM	Sandstone/Limestone	2800	42.5	40	1.5	22.5	14.0	6.0	52.9	32.9	14.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
KTM	Quartzite	6700	175.0	81	2.6	57.5	91.0	26.5	32.9	52.0	15.1	21	23	29	33	-	-	-	-	-	-	-	-
KTM	Marble	1600	42.0	31	2.6	7.5	30.0	4.5	17.9	71.4	10.7	14	22	28	33	-	-	-	-	-	-	-	-
SIWL	Middle Siwalik	5700	149.5	66	2.6	52.0	87.0	10.5	34.8	58.2	7.0	11	17	19	22	-	-	-	-	-	-	-	-
KTM	Schistose Marble	3100	92.0	47	3.0	21.5	57.0	13.5	23.4	62.0	14.7	14	22	22	26	-	-	-	-	-	-	-	-
KTM	Limestone	1500	42.5	19	2.8	3.5	37.0	2.0	8.2	87.1	4.7	17	18	20	23	-	-	-	-	-	-	-	-
SIWL	Upper Siwalik	3000	94.0	41	3.1	21.0	71.5	1.5	22.3	76.1	1.6	14	21	22	26	-	-	-	-	-	-	-	-
INTR	Gneiss	2100	75.0	52	3.6	36.0	36.0	3.0	48.0	48.0	4.0	21	22	23	28	-	-	-	-	-	-	-	-
INTR	Basic Rock	600	21.5	11	3.6	3.0	11.5	7.0	14.0	53.5	32.6	25	26	26	26	-	-	-	-	-	-	-	-
MD	Amphen/Feldspathic Gneiss	700	31.5	7	4.5	1.5	30.0	0	4.8	95.2	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
KTM	Mica Schist	6300	305.0	144	4.8	69.0	221.5	14.5	22.6	72.6	4.8	14	21	22	29	14	21	25	30	-	-	-	-
MD	Slaty shale	900	46.0	9	5.1	10.0	35.0	1.0	21.7	76.1	2.2	21	22	25	28	-	-	-	-	-	-	-	-
MD	Slate	5200	538.0	200	10.3	132.0	341.5	64.5	24.5	63.5	12.0	14	20	22	29	-	-	-	-	-	-	-	-
MD	Phyllitic Quartzite	1000	122.5	38	12.3	19.5	79.5	23.5	15.9	64.9	19.2	14	18	21	27	-	-	-	-	-	-	-	-
MD	Phyllite	22900	3825.5	685	16.7	918.5	2563	344.0	24.0	67.0	9.0	6	16	19	22	8	21	24	29	16	20	22	27

MID:Midland metasediment Group, KTM:Kathmandu Group, SIWL:Siwalik, INTR:Intrusive Rock

Critical slope Angle

文献

Yagi, H. and Nakamura, S.(1995) : Hazard mapping on large-scale landslides in lower Nepal Himalayas, Proceedings of Int. Seminar on water Induced Disaster, pp.162-168. Water Induced Disaster Prevention Technical Centre, JICA and HMG Nepal. Katmandu.

八木浩司・手塚博子(2000) : ネパール・低ヒマラヤ帯中部における地すべり地形分布と現在の地すべり活動, 日本地すべり学会 39 回研究発表会講演集, 603-606, 2000.

八木浩司・手塚博子(2001) : ネパール・低ヒマラヤ帯中部の地すべり地形分布図(1/5 万), 日本地すべり学会 40 回研究発表会講演集, 603-606, 2001.

Yagi, H. and Abe, T.(2004) : Landslide distribution in the mid-eastern part of the Lower Nepal Himalayas with special reference to geology and geomorphology, Abstract volume of Int. Conference on the Great Himalayas: Climate, Health, Ecology, Management and Conservation, 123, 2004.

5、自然地理/地質条件の評価によるランドスライドハザードマッピング手法の適用

ヴィシュヌ ダンゴル

ネパールにおけるランドスライドのハザードマッピング手法提案の中で、Deoja, et.al.(1991)のものは、道路沿いのマッピングを主としてよく使われている。斜面危険度評価は、土木地質、斜面傾斜と方位、水文要素と土地利用要素の配点から得られる。また、Wagner, et.al.(1990)は土性斜面と岩盤斜面に対して、斜面傾斜、岩種、岩盤構造、土層厚さ、水文条件、水文地質、地殻変動の条件に配点してランドスライドハザードマッピングをコンピュータ上で行うためのSHIVAというプログラムを提示した。ここでは、これらの手法で1993年と1998年に起こった崩壊・地すべり事例から、その発生地域のランドスライド発生危険度評価を行ってみた。

まず、ネパール中部のMarin Khola (Kholaは中小河川の意)で1993年7月の豪雨時に生じた斜面崩壊集中域で、土木地質図、土地利用図、水文地質図、地形構造図を作成、土性斜面と岩盤斜面に分けてそれぞれの要素に対し点数評価(rating)を行い総合点を算出、それを危険度とした。

1) 岩盤斜面の危険度要素 (表-5.1)

- 岩盤構造は、亀裂や層理面などの不連続面や楔状部の斜面に対する方向をシュミットネットにプロットして、それを評価点数表(表-1)にあてはめる。

Table 5.1 Hazard rating for rock slope (Modified from Deoja et al.,1991)

Component	Characteristics				Rating
	Expected Mode of Failure				
	Central Wedges (Number)	Lateral Wedges (Number)	Plane Failure	Topple Slope >60 Degree	
Structural	0	0	0	1	5
	0	1	0	0/1	7
	0	>1	0	0/1	14
	0	0	1	0/1	10
	0	1	1	0/1	17
	0	>1	1	0/1	23
	1	0	0	0/1	15
	1	1	0	0/1	21
	1	>1	0	0/1	27
	1	0	1	0/1	25
	1	1	1	0/1	28
	1	>1	1	0/1	34
	>1	0	0	0/1	21
	>1	1	0	0/1	27
	>1	>1	0	0/1	33
	>1	0	1	0/1	29
	>1	1	1	0/1	34
>1	>1	1	0/1	40	
	Possible circular failure (for very random orientation in soft or very weathered rock)				30
Geo-mechanical (Lithological)	High rock mass strength				5
	Medium rock mass strength				7
	Weak rock mass strength				10
Hydrogeological	Dry and rain induced				5
	No springs, seeps				8
	Permanent springs and streams				10
Seismo-tectonic	Minor fault or fold axis				10
	Major fault or fold axis				20
Land use	Forest				0
	Cultivated land				5
	Dry barren land				8
Rockslide	Rockslide				12

- ・ 岩盤強度は、不連続面の開口と風化の程度および不連続面の波状形態や荒さによる摩擦の要素を評価する。
- ・ 水文地質は、地下水・表層水の状況を評価する。
- ・ 地殻変動要素は、断層・褶曲があるか評価する。
- ・ 土地利用では、岩盤への水の浸透を促進するか評価する。森林ではそれは少ないが、耕地や荒地で大きくなる。
- ・ 岩盤すべりの要素は、それが再活動するか拡大するかを評価する。

2) 土性斜面の危険度要素 (表一2)

- ・ 土壌タイプと傾斜：土性斜面では、安定度は透水性，摩擦角，粘着力で決まる。透水性の良い沖積土、崩積土（いずれも山地斜面）では粘着性が低く間隙水圧も発生しにくく安定度が高い。
- ・ 土壌深さ：これが厚いと地下水位は低いことが多く、薄い方が豪雨後飽和しやすく安定度が低い。
- ・ 水文地質：湧水・河川からの浸透水が考えられると危険度が高い。
- ・ 水文動態：流水や河川による洗掘可能性を評価する。
- ・ 土地利用：耕地では、降雨時の土壌の飽和を招きやすく、また荒地ではガリー侵食からスライドに発展する。
- ・ 地殻変動：地震時に土壌層が不安定化しやすい。そこで、主要な断層・褶曲軸があれば評価する。
- ・ ランドスライド・ガリー：周辺域にこれらがあればその拡大・再活動の面から評価する。

Table-5.2 Hazard rating for soil slope(Modified from Deoja et al.,1991)

Component	Characteristics		Rating
	Type of Soil	Slope	
Soil type/Slope	Alluvium	<25 degrees	8
		25-40 degrees	10
		>40 degrees	12
	Colluvium	<25 degrees	9
		25-40 degrees	11
		>40 degrees	13
Residual	<25 degrees	11	
	25-40 degrees	13	
	>40 degrees	15	
Depth	Thick (>6 m)		10
	Medium (3-6 m)		12
	Shallow (1-3 m)		15
Hydrogeological	Dry and rain induced		5
	No springs, rare seeps		7
	No springs, seeps		10
	Rare springs, seeps		12
Hydro-dynamical	Springs and seeps		15
	Low gradient		5
	Medium gradient		10
Land use	High gradient		15
	Forest		0
	Dry cultivated land		5
	Dry barren land		8
Seismo-tectonic	Wet cultivated land		10
	Minor fault or fold axis		8
	Major fault or fold axis		15
Landslide and Erosional Gully	Presence of landslides and erosional gullies		15

以上から、それぞれの斜面タイプを点数評価し、表-3 で危険度レベルを3段階に分けた。

以上述べた手法で、ネパール東部イルム郡のイルム水力発電プロジェクト周辺地域についてもランドスライドハザードマップを作成した (Chamlagain, 2002) (図-5.1)。

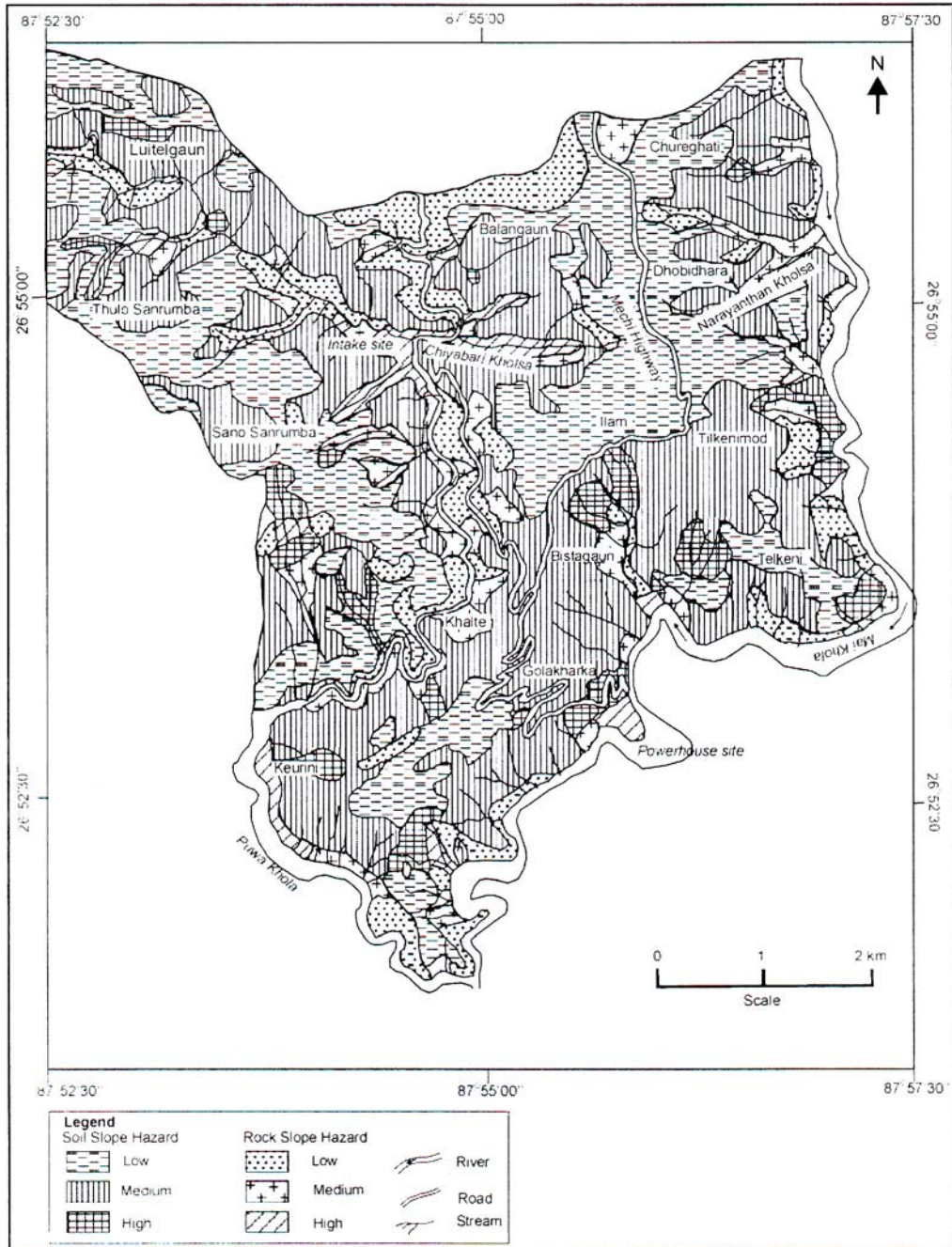


Fig.5.1 Hazard map of the Ilam hydropower project and adjacent area

次に、1998年ネパール中部シアンジャ地区で発生したランドスライドのインベントリーマップを作成し、ランドスライドに関連する要素の分布をGISデータとして統計解析し、ハザードマッピングした事例について述べる(Dangol, 2002)。なお、ここで、ランドスライドにはさまざまなマスマーブメントタイプを含む。

地形図から地域の起伏、水系、構造、崩壊、土地利用を読み、また空中写真からランドスライドやその他の不安定斜面の分布（崩壊地形で森林に覆われたものも含め）や地質に関する情報を得る。既存の地質図と1970-97年の平均降雨値(DHM)も用いる。その後、現地調査でチェックを行う。GISのベースマップには1/25,000地形図を用い、対象地域のDEMを作成し、地質、土地利用、DEM、傾斜分布、斜面方位、河川からの距離分布、道路からの距離分布、断層等の地質構造からの距離分布、降雨分布の各図を作成した。これらの分布図とランドスライドインベントリーマップとを重ね合わせ、それぞれの要素ごとのランドスライド分布密度と全域のそれを計算した。その後、要素ごとのランドスライド分布密度を階級区分し、その全域での密度に対する比の自然対数を次式で求め、各要素の重み付け点数とした(Landslide Index Method)。

$$\ln W_i = \ln(\text{Densclas}/\text{Densmap}) = \ln(\text{Npix}(S_i)/\text{Npix}(N_i) / \sum \text{Npix}(S_i) / \sum \text{Npix}(N_i))$$

ここに、 W_i : ある要素の階級に与える重み、 Densclas : その要素階級でのランドスライド密度、 Densmap : 図面全体のランドスライド密度、 $\text{Npix}(S_i)$: ある要素階級でランドスライドを含むピクセル数、 $\text{Npix}(N_i)$: ある要素階級のピクセル数

そして、対象地域の各箇所の危険度点数を、これら要素の累加点として計算し、そこから3段階に危険度を分けて示したのが図-2である。なお、計算式は以下のようである。

$$W = W_{\text{slope}} + W_{\text{geol}} + W_{\text{land}} + W_{\text{dem}} + W_{\text{aspect}} + W_{\text{river}} + W_{\text{structure}} + W_{\text{road}} + W_{\text{path}} + W_{\text{rain}}$$

危険度中、高はドロマイト、スレート、変堆積岩分布域に相当し、草地は危険度中、森林と耕地は危険度が高くなっている (p. 参照)。

文献

- D. Chamlagain ,V. Dangol : Landslide hazard evaluation in and around the Ilam Hydropower project, Eastern Nepal Himalaya, Journal of Nepal Geological Society, 27, 131-143, 2002.
- Deuja,B., Dhital, M., Thapa, B., Wagner, A.: Mountain risk engineering handbook, International Centre for Integrated Mountain Development (ICINOD), Kathmandu,

1991.

V. Dangol : Landslide hazard mapping in Nepal: Case studies from Marin Khola (Eastern Nepal) and Syangja District (Western Nepal), Int. Congress Interparevent 2002 in the Pacific Rim, vol.2, 607-618, 2002.

Wangner, A., Leite, E., Oliver, R.: A landslide hazard mapping software (version 1.0),2 volumes. ITECO and University of Lausanne, Switzerland, 1990

添付発表論文リスト

D. Higaki, H. Yagi, K. Asahi and N. Miyake : Landslides in the late Quaternary deposits in the Bhote Koshi area, central Nepal, Journal of Nepal Geological Society, 22, 505-512. 2000.

八木浩司・手塚博子：ネパール・低ヒマラヤ帯中部における地すべり地形分布と現在の地すべり活動，日本地すべり学会 39 回研究発表会講演集, 603-606, 2000.

八木浩司・手塚博子：ネパール・低ヒマラヤ帯中部の地すべり地形分布図(1/5 万)，日本地すべり学会 40 回研究発表会講演集, 603-606, 2001.

桧垣大助・K. K. Karki : ネパールにおける持続可能な防災対策の検討—土壌浸食を例に一，平成 13 年度砂防学会研究発表概要集, 248-249, 2001.

V. Dangol : Landslide hazard mapping in Nepal: Case studies from Marin Khola (Eastern Nepal) and Syangja District (Western Nepal), Int. Congress Interparevent 2002 in the Pacific Rim, vol.2, 607-618, 2002.

D. Chamlagian and V. Dangol : Landslide hazard evaluation in and around the Ilam Hydropower project, Eastern Nepal Himalaya, Journal of Nepal Geological Society, 27, 131-143, 2002.

Ghimire, S. K., Higaki, D. and Sato, G. : Measurement of surface, rill, gully erosion and streambank erosion in a Siwalik watershed of Nepal, 東北地域災害科学研究, 39, 171-176, 2003.

Ghimire, S. K., Higaki, D. and Bhattarai, T. P. : Flash floods in the Siwaliks: consequences and countermeasures- A case study in Nepal, 1st.Int. Conference on Hydrology and Water Resources in Asia Pacific Region, 833-838, 2003.

Ghimire, S. K., Higaki, D. and Bhattarai, T. P. and Sato, G. : Monitoring of erosion-susceptible slopes in the Siwaliks of Nepal, 平成 15 年度砂防学会研究発表概要集, 106-107, 2003.

Ghimire, S. K., Higaki, D. : Mapping, monitoring and development mechanism of torrent-bank ephemeral gullies in the Siwalik Hills, Nepal, Abstract volume of Int. Conference: Gully Erosion in Mountain Areas, Digne-les Bains, France, 66-67, 2003.

S. K. Ghimire, D. Higaki and T. P. Bhattarai : Changes in land use and stream course: Implications for the sustainable management of natural resources, Abstract volume of Int. Conference on the Great Himalayas: Climate, Health, Ecology, Management and Conservation, 81, 2004.

Higaki, D., K. K. Karki and C. S. Gautam : Soil erosion control measures on degraded sloping lands- A case study in Midlands of Nepal, Abstract volume of Int. Conference on the Great Himalayas: Climate, Health, Ecology, Management and Conservation, 39, 2004.

H. Yagi and T. Abe : Landslide distribution in the mid-eastern part of the Lower Nepal Himalayas with special reference to geology and geomorphology, Abstract volume of Int. Conference on the Great Himalayas: Climate, Health, Ecology, Management and Conservation, 123, 2004.