

速報

ネパール・クンプ地方「1995年パンガ雪崩」報告¹⁾

山田知充²⁾, 伏見碩二³⁾, R. Aryal⁴⁾, 門田 勤⁵⁾
藤田耕史⁵⁾, 瀬古勝基⁵⁾, 安成哲三⁶⁾

1. はじめに

ベンガル湾で発達した低気圧の接近に伴って1995年11月9日から11日にかけてネパールからチベット高原がその影響下に入り、寒気と共に多量の降水がもたらされた。そのため標高4000m以上のヒマラヤ高山地域では降雪となり、とくに東ネパールには多量の雪が降り積もった。この豪雪は交通を途絶させ、放牧中の多数のヤクなど家畜を死亡させたのみならず、急峻なヒマラヤ山地に堆積した積雪は各地で雪崩を発生させ、低地では豪雨による土石流が多発した。当時クンプ氷河に入っていた文部省国際学術研究の氷河調査隊が豪雪後の11月14日、クンプ渓谷沿いに以下のような雪崩跡を目撃している。

- クンプ氷河末端左岸周辺 (上部の壁の下)
- ベリチェ下流 (幅20m, 長さ100mの表層雪崩)
- パンボチェからタンボチェの間
(谷沿いの右岸に一ヶ所)
- タンボチェ下流の谷
(兩岸に一ヶ所ずつ湿雪全層雪崩)

これから、ヒマラヤ全域では如何に多くの雪崩が発生したかは容易に推測できる。

ネパール内務省の発表によると、この季節外れの多量の降水は、表1の様に、南下した寒気による凍死者も含めてネパール全土で63名(ネパール人41名, 外国人22名)

もの死者を出し、積雪に閉じ込められた550余名がヘリコプターで救助されると言う大災害をもたらした。表1

表1 1995年11月9日-10日の寒気を伴った多量の降水のため発生した雪崩, 土石流及び寒波によるネパール全国の被害状況

The loss of lives and properties caused by avalanches and landslides happened due to heavy precipitation and also cold wave coming down from the north from 9 to 10 November, 1995. (Source: Ministry of Home Affairs, His Majesty's Government of Nepal)

	Avalanche	Landslide	Frozen to death	Total
Death	33	20	10	63
Injured	1	2	-	3
House destroyed	3	17	-	20
Animal shelter destroyed	1	10	-	11
animals	-	>116	-	>116

に挙がっている死亡した家畜の頭数は中央ネパールのマナンでの土石流によって死亡した家畜についてのみであり、実態はこの何倍にもなろうと言われている。

なかでも世界最高峰チョモランマ(エベレスト)峰を擁する東ネパール・クンプ地方ドゥド・コシ地域の観光地、ゴーキョ(Gokyo)付近のパンガ(Pangka, 図1)で発生した雪崩は山小屋1棟を押し潰し、死者24名、軽傷者1名、行方不明1名(ネパール内務省の統計では死亡と認定)を出し、夏の放牧期に家畜と共に過ごす小屋(カルカ)1棟も破壊されるという大きな被害をもたらした。

パンガの雪崩遭難者はヒマラヤ観光開発株式会社(東京都港区・宮原巍社長)とその現地法人トランス・ヒマラヤン・ツアー社が手配したトレッキング(山歩き)・ツアーに参加者した日本人客12名と同行のインストラクター1名及びツアーのスタッフ(シェルパ)13名と山小屋の経営者夫妻2名であった。日本人13名は全員死亡したが、幸いネパール人スタッフ2名は体の一部が雪崩に

1) Report of avalanche accident at Pangka in 1995, Khumbu region, Nepal

2) 北海道大学低温科学研究所
〒060 札幌市北区北19条西8丁目
現在JICA氷河専門家としてネパール政府水資源省に出向中。
c/o JICA Nepal Office, P.O. Box 450, Kathmandu, Nepal

3) 滋賀県立大学環境科学部
〒522 彦根市八坂町2500

4) Department of Hydrology and Meteorology, Ministry of Water Resources, His Majesty's Government of Nepal.
c/o P.O.Box 406, Babar Mahar, Kathmandu, Nepal.

5) 名古屋大学大気水圏科学研究所
〒464-01 名古屋市千種区不老町

6) 筑波大学地球科学系
〒305 つくば市天王台1-1-1

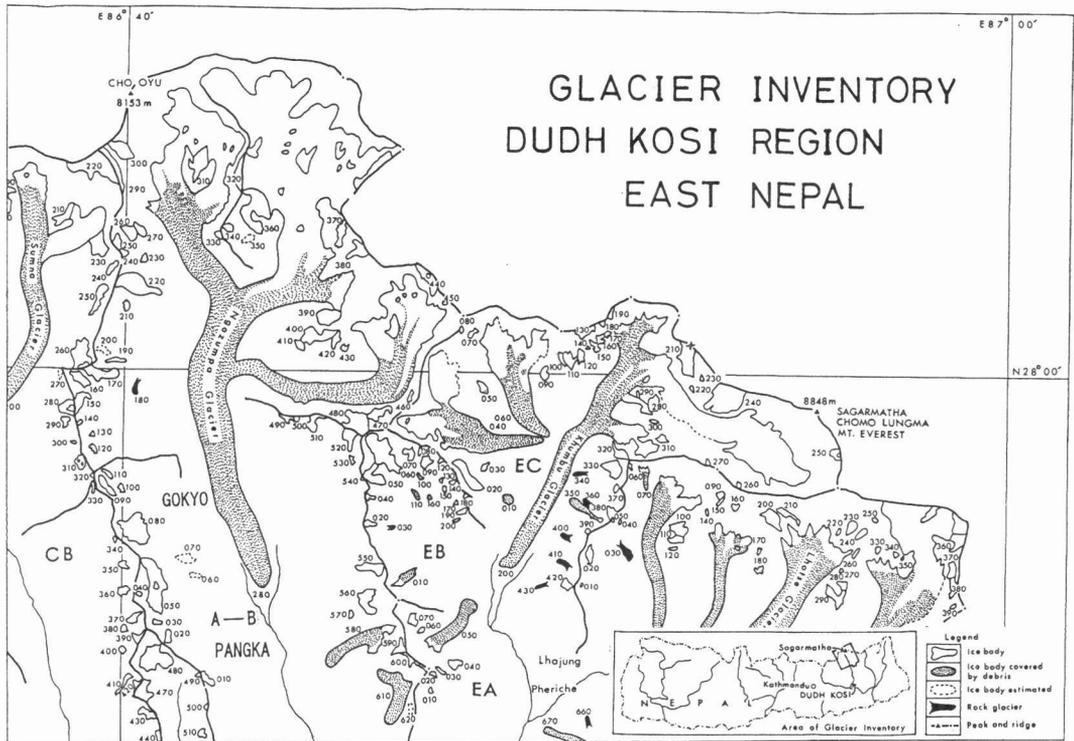


図1 東ネパール・クンプ地方ドゥド・コシ地域の氷河分布とパンガおよびゴークョの位置を示す図。
Glacier inventory of Dudh Kosi region, East Nepal, and both locations of Pangka and Gokyo are indicated.

埋まりながらも自力で難を逃れ、他の1名は捜索隊により奇跡的に雪崩の下から軽傷で救出されたのはせめてもの救いであった。

登山中に雪崩に会う登山家は珍しいことではない。雪崩の危険のある斜面を登らざるを得ないからである。しかし単にヒマラヤ山麓の山歩きを楽しむトレッキング中にこれほど多くの一般観光客が雪崩にあって死亡したという例は、極めてまれで恐らく歴史上初めてのことで、この雪崩をここでは「1995年パンガ雪崩」と呼ぶことにする。

日本雪氷学会は、ネパール政府水資源省水資源委員会 (Water and Energy Commission Secretariat: WECS) の要請により、今後の雪崩対策に有用な資料と情報を得ることを目的として、「1995年パンガ雪崩」を記録に留めることとなった。今回の雪崩を総合的に捉えるため、雪崩の現地調査を実施すると共に、当時クンプ地方において調査活動を実施していた文部省国際学術研究氷河調査隊による観察と気象資料、ネパール水気

象局が取得した気象資料等を用いて雪崩発生前後の現地の気象・積雪状況や豪雪をもたらした総観的な気象状況を調べることにした。ここでは今回の雪崩について報告すると共に、本来好天が持続するポストモンスーン期にこのような多量の降水現象がどの程度の頻度で発生するかもインド気象局の解析結果をもとに検討した。

2. 雪崩の現地調査

雪崩調査地域一帯は多量の積雪のため通行不能となり、地上からの接近は雪崩の危険もあって困難であった。そのため救援活動が一段落した雪崩発生から8日目の11月18日、ヘリコプターによって雪崩現場のパンガに直接入った。調査は21日まで行い、22日朝再びヘリコプターの迎えを受けて現場を後にした。雪崩調査は、被害を免れたパンガの山小屋 (写真1の矢印) を拠点に実施された。

パンガは標高4500mにあるため、調査に従事するメンバーは既に高地順化が出来上がっている必要があった。さもないと高度障害のため生命の危険すらあるからであ



写真1 ゴーキョ川上空からパンカとゴジュンバ氷河末端モレーンの斜面を見る(共同通信社写真部・富田晴海氏撮影)。矢印の先に被害を逃れたM3モレーン上の山小屋がある。その左手斜面がなだれた斜面である。

Pangka and the avalanche slope looking upstream over Gokyo River from a rescue helicopter. Arrow shows the un-destroyed house of Pangka located on the moraine of M3. The moraine of M3 is clearly seen on the photo. A white massive slope seen in the center-right on the photo is the end moraine slope of Ngozumba Glacier of the biggest glacier in Nepal Himalayas.

る。幸い、前述の水河調査隊が、ネパール政府水資源省水文気象局の共同研究者であるネパール人と共に高地での調査活動を実施した直後であったことから、素早く調査隊を編成することが出来た。

現地では以下の様な調査が実施された。

- ① 自然積雪の断面観測およびシャベルテスト
- ② 自然積雪の深さの多点観測
- ③ 自然積雪の積雪水量の多点観測
- ④ 雪崩のデブリの断面観測
- ⑤ デブリの深さの多点観測
- ⑥ デブリの積雪水量の多点観測
- ⑦ 雪崩斜面の深さの広域多点観測による発生域と走路(雪崩斜面)の同定
- ⑧ 雪崩地図作成によるデブリ域と雪崩斜面の測量(平板測量)
- ⑨ 雪尺による融雪量観測
- ⑩ その他

3. 雪崩現場の状況と雪崩の概要

雪崩現場であるパンガはネパール最大級の氷河、ゴジュンバ氷河末端から約1km下流の右岸に位置する。ゴジュン

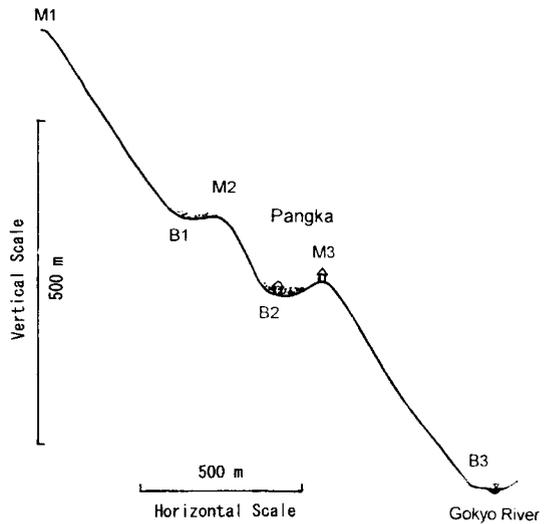


図2 パンガ後背斜面(図1)の断面図。3段のモレーン、M1、M2、M3とパンガの位置を示す概念図。

Conceptual figure of the avalanche slope along AB line in Fig. 1 which showing three steps of the moraines. M1, 2 and 3 (ridges) and B1, B2 and B3 (bases). Pangka is located in between B2 and M3. Dotted points indicate the debris of the avalanche.

ンバ氷河のある溪谷には河川名がないのでここではゴキョ川と呼ぶことにする。右岸にはかつての氷河前進期に形成されたサイドモレーンが3段見られる。このモレーンを上部から順にM1、M2、M3、それぞれの基部をB1、B2、B3とすると、図2に概念的に示した様に、パンガはM2モレーンの斜面基部B2とM3モレーンのリッジ上にかけて位置している。ゴキョ川上空からパンガ、ゴジュンバ氷河末端モレーン方面を見た写真1に明らかなようにM3モレーンは明瞭に認められる。矢印の黒点はM3モレーンのリッジ上に建っていて難を免れた山小屋で、調査の拠点となった。写真右中央部の白い斜面はゴジュンバ氷河のエンドモレーンの斜面である。パンガには図3、写真2に示すように観光客相手の山小屋と夏の放牧時に使う小屋とが合わせて5軒建っていた。図3の塗りつぶした長方形が今回雪崩に破壊された山小屋と放牧小屋で、遭難事故にあった山小屋は南側の小屋である。白い長方形は難を免れた小屋を示す。パンガのデブリ領域は図3に示す様におよそ幅50m、長さ320mの範囲にあり、面積は16100m²であった。

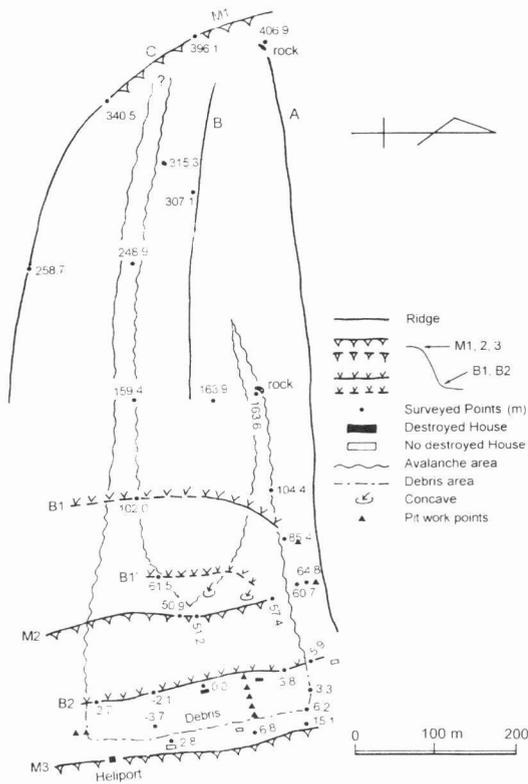


図3 雪崩斜面とデブリ領域。図中の数字は、倒壊した山小屋こからの比高(m)である。

The avalanche slope and its debris area in Pangka. Numbers in this figure are the relative height from the destroyed lodge.

「1995年パンガ雪崩」は、雪崩を免れた山小屋の経営者や生き残ったネパール人の証言によると、1995年11月10日8時30分から9時30分までの間に発生した。雪崩はM1のモレーン斜面から発生し、M1斜面基部のB1とM2モレーンのリッジの間の平坦面に雪崩の一部が図2に点々で示したように堆積し、主力はM2モレーン斜面の表層の積雪を巻き込みながら、M2モレーンの斜面直下(B2)に立っていた山小屋を倒壊させ、B2とM3モレーン間の平坦面で止まった。M3モレーンのリッジにまでは及んでいない。デブリは純白かつ濡れた形跡がないので雪崩の種類は乾雪表層雪崩と断定できる。しかし、点発生か面発生かは不明である。デブリの末端から雪崩が発生した最高点と思われるM1モレーンのリッジを見通した角度、いわゆる雪崩の見通し角は26度であった。

倒壊された山小屋は雪崩によって運ばれることなくそ

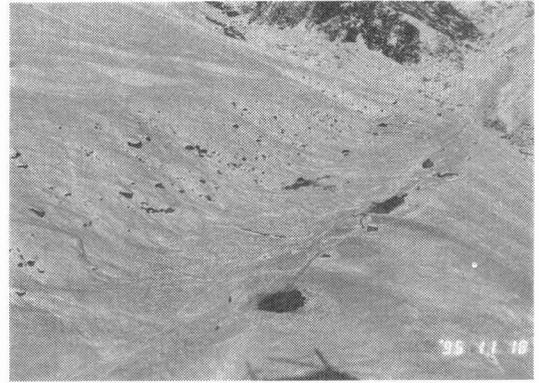


写真2 パンガと雪崩跡。雪崩は左手斜面から落下し、M3モレーンのリッジ手前で止まった。写真にある手前円形の裸地はモレーンM3リッジ上の仮設ヘリポート。踏み分け道がヘリポートからモレーンのリッジ上を被害を免れた山小屋に向かい、次いで山小屋斜め左前方の雪崩で倒壊した山小屋に向かっている。雪崩発生後にもお50-60cmの降雪による積雪の深さがあり、デブリ跡を覆ってしまった。しかし雪崩のデブリ跡は雪面に凹凸があるために、写真手前に見られるような平滑な雪面を持つ自然積雪とは容易に見分けられる。

Pangka and the debris area of the avalanche. Avalanche had fallen down from the left slope but did not reached the ridge of M3 moraine ridge seen in right, fortunately. A snow free spot of circle shape in the foreground of the photo shows the heliport temporarily made for the rescue team on the ridge of M3 moraine; from heliport the path on the snow goes to the un-destroyed lodge from the avalanche then down left to the destroyed lodge. Though 50-60 cm of snow continuously fell after the avalanche and covered the debris, the debris area is easily identified by an uneven snow surface different from a smooth surface of natural snow seen near the heliport.

の場に押しつぶされる形で倒壊していた。加えて、雪崩の運動方向に直行する壁は破壊されて原型を留めていないが、平行する壁は破壊されずに残っていることからみても、雪崩の破壊力は大きなものではなかったようである。

4. 雪崩発生前後の気象

4.1 総観的な気象状況

表2 1985年10月と1995年11月の異常降水時に於けるネパール全国の降水量分布

Total amount of precipitation during two heavy precipitation events happened in the post-monsoon seasons of November 1995 and October 1985 in Nepal

	Lat. N	Lon. E	Altitude (m)	9-10 Nov. 1995(mm)	16-20 Oct. 1985(mm)
Dadoldhura	29° 18'	80° 35'	1865	11	5
Dipayal	29° 15'	80° 57'	617	>15	10
Dhangadhi	28° 41'	80° 36'	170	tra	0
Birendranagar	28° 36'	81° 37'	720	55	13
Jumla	29° 17'	82° 10'	2300	74	6
Dang	28° 03'	82° 30'	698	117	no data
Bhairawa	27° 32'	83° 28'	120	77	37
Pokhara	28° 13'	84° 00'	827	81	82
Simara	27° 10'	84° 59'	130	65	no data
Kathmandu	27° 42'	85° 22'	1336	62	71
Nagarkot	27° 42'	85° 31'	2150	102	94
Okhaldhunga	27° 19'	86° 30'	1720	82	81
Biratnagar	26° 29'	87° 16'	72	70	183
Dhankuta	26° 59'	87° 21'	1160	216	145
Taplejung	27° 21'	87° 41'	1732	153	90

降雪開始前後の地上天気図を見ると、ベンガル湾で発生したサイクロンはヒマラヤ山脈へ向かう北向きのコースを取っている。11月になると通常は亜熱帯偏西風ジェット気流がヒマラヤ南縁に沿って吹き始めるため、その影響で東へと流されネパールに影響を与えることがないのに、今回のサイクロンは、11月10日になっても依然亜熱帯偏西風に流されることなくネパールなどの地域に影響を与えたのである。この間のネパール全国の降水の様子を見ると、表2に示したように、東ネパールでは降水量100mmを越える観測点が2点あるが、西では10mm前後と少なく、降水量は東部ほど多い。

前述の文部省海外学術研究の一環として、標高3800mのシャンボチェ (Syamboche, 図1参照) に自動観測ステーションが設置され、各種気象要素が観測されている (Ueno *et al.*, 1996)。

熱線の取り付けしていない普通の転倒昇型雨量計で測った総降水量は122.5mmを記録しており、同時に測られている気温から判断すると、ほとんど全て雪として降ったことがわかる。この値は雨量計で測った降雪の降水量なので、実際の降水量はこれよりも2-3割は多く、150mm程度はあったであろう。この値はシャンボチェの60km南に位置するオカルドンガ (Okhaldhunga) の約1.8倍に達する。また、後に示すように、パンガの積雪の水量は平均161mmあり、融けてはいないが蒸発と地面での融解を考えると降水量は少なくともこれ以上であったと言えるので、オカルドンガの2倍はあり、

表3 11月14日のクンプ渓谷に沿った積雪量と11月9-10日の総降水量の高度分布
Snow depth along the Khumbu valley measured on 14 November, 1995 and total precipitation at Pangha and Syamboche from 9 to 10 November, 1995.

Place	altitude(m)	snow depth(cm)
Gorak Shep	5,200	120
Periche	4,250	60
Orsho	4,070	40
Pangboche	3,950	10-20
Tanboche	3,870	0-5

	altitude(m)	precipitation (mm)
Pangka	4,500	161.0
Syamboche	3,800	122.5

高度が高いほど強制上昇流による降水増幅効果 (Seko, 1987) のため降水量が多くなっている。

気温が低い時期に降水があると、低高度まで積雪域が広がる。氷河調査隊が降り止んでから4日目の11月14日にクンプ渓谷沿いに測定した積雪深を見ると表3に示した様に50cmを越える深い雪はペリチェ (標高4200m) 付近まで及んでおり、高度が下がるほど減少し、タンボチェ (3867m) まで積雪が認められた。同日観察したシャンボチェ (3800m) には11日以降の好天で積雪は融解し去り、日陰を除いて積雪は見られなかった。

降雪の前の11月7日と降雪後の22日のSPOT衛星画像

をみると、今回の降雪で雪線が4000m付近まで降下したことが分かる。また、ネパール政府水資源省水文気象局 (Department of Hydrology and Meteorology) で取得された NOAA の衛星画像によると、降雪域はネパールヒマラヤ地域のみならず、チベット高原南西部の マナサロワール湖付近を西端とする、チベット高原のほぼ全域に及んでいた。

4.2 現地の気象、積雪状況

雪崩発生前後の現地の気象及び積雪状況については、同じキャンプ地方の「クンプ氷河」消耗域 中流部 右岸の標高5200mにあるゴラクシェップ (Gorak Shep, 5200m) に滞在していた前述の氷河調査隊による観察がある。また、同隊は標高約5000mのクンプ氷河上で気温の観測を、さらに標高3800mのシャンボチェに設置した自動気象観測ステーションで各種気象要素を測定している。雪崩発生現場のパンガは標高約4500mなので、両測点の中間標高にあり気温も両観測値のほぼ中間値にあると考えられる。パンガの天気は、パンガがゴラクシェップから12kmしか離れていないのでゴラクシェップと同じ様に推移したと考えて差し支えなかろう。

調査隊のゴラクシェップでの観察によると11月8日まで続いていたポストモンスーンの好天は、ベンガル湾からの低気圧の接近に伴って一転悪化し、9日午前10時頃から降雪が始まり、夕刻には10cmに達し、雪崩が発生した10日朝には60-70cmとなる。降雪は10日午後も止むことなく降り続き、夜になってようやく降り止む。11日は朝から風もなく快晴で、積雪の深さは120cm程に達していた。11日以後はポストモンスーンの好天に戻った。11月9日に降り出して以来、風向は南向きであったが、10日の昼前には北向きに変っていた。

捜索隊が12日に撮影した雪崩を免れた山小屋の屋根に積もっている積雪の写真から、12日の屋根雪の積雪深は約90cmあることが分かった。降雪終了後8日経った11月18日に調査に入った時点での自然積雪の深さは70-80cmに減っていた。一般に屋根雪は地上の積雪に比べて少ないので、パンガー帯には12日に90cmを越える積雪があったと推定される。後述する様にパンガの積雪は表面にメルト・フリーズ・クラスト (Melt-freeze crust) 層が形成され、積雪下の地面は湿っていたが、積雪層内には融解水が浸透した形跡はなく乾いていた。地熱による融解とメルト・フリーズ・クラスト形成による積雪の深さの減少、及び自重による積雪層の圧密とそれに伴う積雪表面の沈降を考慮すると、雪が降り止んだ11日朝のパンガの積雪の深さはゴラクシェップと同程度の120cm

前後あったとみなしてよいであろう。

以上の天気の変移に関する考察から、雪崩は積雪が50-60cmに達した降雪中に発生し、発生後も倒壊した山小屋に60-70cmも降り積もり、最終的には積雪の深さは120cm程度に達したとみなされる。そのため、倒壊した山小屋と雪崩斜面を見た写真3を見ると分かる様に、雪崩の跡は積雪に覆い隠されて良く分からなくなっていた。なだれた斜面は、雪崩なかった斜面が未だ雪で真っ白に覆われているのに比べ岩が一部露出しているという違いはあったが、なだれた部分と自然積雪のままの部分との境界を明瞭に視認することは出来なかった。雪崩跡は斜面積雪の広域多点に亘る積雪深観測と断面観測によって推定せざるを得なかった。一方、斜面最下部のデブリ領域は雪に覆い隠された後も表面が凸凹していたので、表面が平滑な自然積雪域と明瞭に区別することができた。

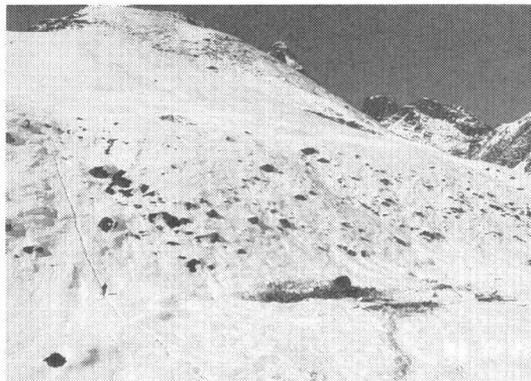


写真3 遭難現場の倒壊した山小屋の跡と後背雪崩斜面。雪崩後に引き続き降り続いた50-60cmの降雪による積雪の深さのため、雪崩跡は埋まってしまつて識別できない。

Destroyed lodge where victims were buried and the avalanche slope behind the lodge. The trace of the avalanche is difficult to identify because snow with the depth of 50-60 cm successively fallen after the avalanche is completely covering the trace.

クンプ氷河 (標高5000m) とシャンボチェ (3800m) の気温変化を見ると8日までは図4の様に日中気温が上昇し夜間のみ氷点下に下がる規則正しい変化をしていたものが、降雪が始まったと思われる9日午前9時頃から急激に気温は下がり、以後降雪が止み好天となった11日まで気温はほとんど氷点下にあった。気温から見てもシャンボチェにも降雪があり、積雪が積もったという住民の

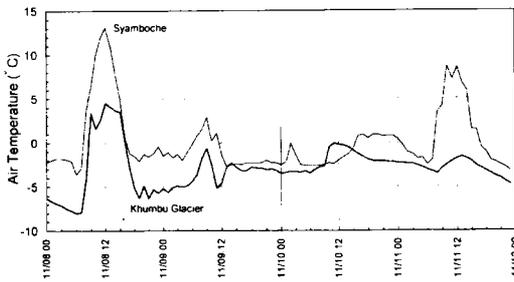


図4 クンプ氷河（標高5000m）とシャンボチェ（3800m）における雪崩前後の気温変化。Temperature on the Khumbu Glacier (5200m a.s.l.) and at Syamboche from 8th to 11th November, 1995.

証言が裏付けられる。11日以降の好天と気温の上昇でシャンボチェの積雪は急激に融解し去ったことが分かる。クンプ氷河の気温が11日も上昇していないのは、センサー（センサー高120cm）が雪に埋まってしまったためである（名大大大気水圏研，坂井談）。シャンボチェの気温と逆転する10日9時頃に埋まったのであろう。両地点の気温の推移から見て、パンガの降雪は乾いた雪であったと推察され、雪崩は乾雪雪崩であったことを裏付けている。

5. 雪崩現場の積雪状況

自然積雪とデブリの積雪構造や密度、硬度など物理的性質を観察するため図3の▲印の地点で断面観測を行った。斜面下部からデブリ末端にかけて一直線に横断する5点の測点はデブリ領域のうち比較的深い場所で実施した断面観測点である。

斜面直下からデブリ末端付近までは表層30-40cmの新雪を除くと全層デブリで占められており、デブリ末端部に至ってようやく地面からある深さまでが自然積雪となり、その上部にデブリが乗る。デブリの末端付近を除くともともと積もっていた自然積雪は雪崩により攪乱を受け、もとの構造を留めていない。デブリは層構造が乱れていることと内部に僅かな汚れを含んでいることから識別できたが、色や硬さでは自然積雪と明瞭に見分けることが困難なほど特徴のないものであった。

自然積雪(N)とデブリ(D)の密度、ラム硬度、雪温の分布を図5に示す。N1、N2は自然積雪の典型例で密度の深さ分布が一樣と言う特徴がある。N1の表層密度が大きいのはたまたま密に詰まったメルト・フリーズ・クラスト層を測定したからである。自然積雪の密度範囲はほとんど0.20~0.25g/cm³で、全層密度は平均0.22g/cm³程度である。積雪水量は平均161mm (=16.1g

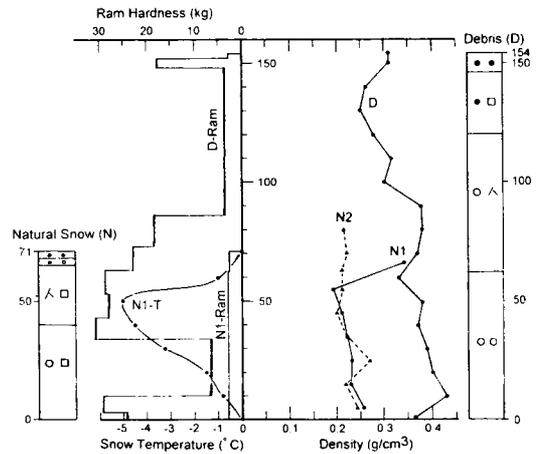


図5 自然積雪(N1, N2)とデブリ(D)の断面観測結果。最上部のざらめ(●印)で表した積雪層はメルト・リフリーズ・クラスト(melt-refreeze crust)である。/印はこしまり雪、○印はしまり雪、□印はこしもざらめ雪を示す。Results of the pit works for natural snow (N1 and N2) and debris of the avalanche (D). Uppermost layer indicated by the granular snow mark (●) being a melt-refreeze crust layer. /;lightly compacted snow, ○;compacted snow, □;solid-type depth hoar.

/cm²)であった。積雪は融けてはいないが蒸発と地面での融解による質量の減少を考えると、パンガの降水量は少なくともこれ161mm以上はあったと言える。従って、降雪直後の深さ120cmの積雪の全層密度は0.14g/cm³程度と推定され、新雪がふんわりと積もっていた状況がイメージできる。自然積雪もデブリも平均粒径はメルト・リフリーズ・クラスト層で1mm、しもざらめ層で0.5mm程度であった。

調査時点における雪温は、積雪断面観測結果の一例を示した図5の新雪層の雪温分布N1-Tに示した様に、表面と地面に接する積雪以外は0℃以下で雪は乾いており、融解水の浸透した形跡はなかった。好天の11月18日から22日の間、3本の雪尺を設置して融雪量の観測を行った結果、この間の積雪表面の低下は平均3.2cmであった。この表面低下は、この間、日中ですら融解が認められなかったことから、蒸発と圧密によって生じたと考えられる。好天の続いた調査期間中にも融雪がなかったという事実は、11日以来の好天にもかかわらず積雪は乾き雪で濡れた形跡がないという観察と符合する。

積雪表面には自然積雪、デブリにかかわらず1-8

cmの硬いメルト・リフリーズ・クラスト層が形成されていた。12日現場に降り立ったトランスヒマラヤ社の社員による「雪の表面に手を置いててももぐらない」との証言(田近談)から、このメルト・リフリーズ・クラストはすでに12日には形成されていたと解釈できる。

自然積雪の深さは平坦面でも斜面上でもほぼ一定していて70-80cmであった。積雪はメルト・リフリーズ・クラスト層に覆われ、地面は未凍結で充分湿っていたことから、メルト・リフリーズ・クラストの形成と積雪表面からの蒸発、地面における融解及び自重による圧密によって積雪深は降雪直後の120cmから75cm前後まで減少したのであろう。

図5の層構造図に示すように最上部のざらめゆきの印で表現したメルト・リフリーズ・クラスト以下の積雪層には、自然積雪とデブリとを問わず、しもざらめゆきの発達が見られた。積雪層下方ほどしもざらめ化は弱くなりしまり雪が勝ってくる。しもざらめ化の程度は斜面積雪の方が平坦地の積雪より強い。もともと密度が小さく締まらない雪がしもざらめ化したため、ラム硬度は非常に小さい。特に自然積雪では7地点で測定した平均ラム硬度が5kg以下に過ぎず(図5 N1-Ram参照)、ラム硬度計はメルト・リフリーズ・クラストを突き破ると一気に地面まで貫く場合が多かった。そのため山靴をはいて歩くと、積雪表面から地面まで足を踏み抜くこととなり、歩行はきわめて困難で作業能率を著しく阻害した。

図5に示したデブリは観測中最大密度で比較的硬いデブリの例であるにもかかわらず、密度はほとんど $0.40\text{g}/\text{cm}^3$ 以下であり、一番硬い層でもラム硬度は図の様にただか30kg程度に過ぎない。他にもデブリの10地点でラム硬度測定を行ったが、測定した最大値で48kg、平均ラム硬度13kg程度で、雪崩のデブリの雪質としては意外に軟らかい。断面観測のピットはデブリでも平角スコップで容易に掘れた。また、捜索隊は倒壊した建物の建材除去にふるはしを使ったが、雪そのものを掘り起こすにはスコップで充分であったと証言しているのも頷ける。デブリ域で広域多点に亘って測定したデブリの深さの最大値は170cmでデブリとしては以外に浅い。デブリの全層密度の最大値は図5のデブリが最大とはいえ、それでも $0.34\text{g}/\text{cm}^3$ を越えない。積雪水量の最大値は $48.5\text{g}/\text{cm}^2$ で、これも自然積雪のただか3倍に過ぎない。

6. 雪崩の規模と特徴

なだれた積雪の量即ちデブリの量を見積もるため、デブリ領域の面積を測量すると共に、積雪深と積雪水量を

多数測定した。積雪深は50地点について、1地点当たり数m四方を少なくとも3点測定して平均値を求め、その測点の値とした。また、積雪水量は53地点で測定した。

1地点当たり2回測定し、値が10%以上違う時には再測定し、その地点の平均的な水量を求めた。なお、自然積雪域でも積雪深を100地点以上、積雪水量は23地点で測定した。

積雪の深さ(H)と積雪水量(Hw)の関係を図6に示す。この図では測定値を原点と結んだ直線の傾斜が大きいほど積雪の全層密度が大きいことになる。図には点線で等密度線を描いてある。これを見ると分かるようにデブリの全層密度はほとんど $0.22-0.30$ の間に入っており、深いほど全層密度が大きい傾向がある。ここに示したデブリのHとHwの関係をを用いて50地点のデブリの深さの測定値を水量に換算した。これに直接積雪水量を測定した53地点を加えて、合計103地点のデブリ領域の水量の値から、デブリ領域全体に堆積している積雪の総水量をまず算出した。この値からもともとそこにあった自然積雪の水量(161mm)を差し引くことによってデブリの総量を求めたところ、約2,100トンと見積もられた。これはデブリの水量として平均 130mm ($13.0\text{g}/\text{cm}^2$)堆積していることに相当する。

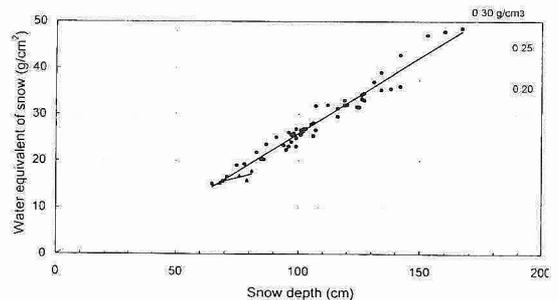


図6 自然積雪の深さ及びデブリの深さと積雪水量の関係。黒丸はデブリを▲は自然積雪を示す。点線の直線は等密度線である。

Relationships between snow depth and water equivalent of snow for debris of the avalanche and natural snow. Dotted lines showing iso-density lines. Solid circles: debris snow, solid triangles: natural snow.

山靴をはいた斜面積雪上の歩行は極めて困難かつ非効率であったため、充分な測点は得られなかったが、斜面積雪の深さ、積雪水量および断面観測から雪崩の走路を推測したところ、走路は図3に示した様に2本あること

が認められた。これをもとにして算出した雪崩斜面の面積はおよそ72,000m²と見積もられた。

広域に測定した斜面の自然積雪の深さは70-80cm程度であり、積雪が雪崩として落下した斜面積雪の深さは40-50cmであった。この事から雪崩は調査時の積雪層を基準にすれば30cm程度が雪崩となって落下したと考えられる。雪崩発生時はもっと表層の積雪密度は小さかったと考えられるから、なだれた表層の厚さはもっと厚かったであろう。雪崩斜面の面積72,000m²から発生した雪崩の質量は、積雪表層の密度が0.2g/cm³程度であることから、約4,300トンとなり、B2-M3平坦面に堆積した量2,100トンの2倍以上となる。

この矛盾は、一つにはM1モレーン斜面基部B1とM2モレーンのリッジ間の平坦面に堆積しているデブリを勘定に入れていないことである。しかし、そのデブリの量については時間的制約のため詳細な観測を実施することが出来なかった。この平坦面の積雪の深さを観測した結果によると1mを越える地点は広くなく、かつ積雪水量調査用のスノーサンプラーが容易に貫入し密度も硬度も小さかったことから、たとえデブリが溜まっていたとしても一段下のB2-M3平坦面に堆積したデブリの5割を越えることはないと考えられる。たとえ5割堆積しているとしても4300-(2100×1.5)=1150トンのデブリ

が行方不明となる。

その原因としては、雪崩斜面の面積を大きく見積もってしまったか、なだれた表層の積雪の深さを過大に見積もってしまったか、なだれた積雪表層の密度を過大に与えたか、雪崩走路上にデブリが一部堆積し平坦面での堆積量が減ってしまったかであろう。

7. ポストモンスーン期の異常降水現象

平年は連日好天が続くポストモンスーン期に、今回のような異常な降水がもたらされる頻度はどの程度あるのだろうか。ポストモンスーン期の異常降水がサイクロンによってもたらされた例は過去にもある。1985年の10月、ほぼ同じコースを取ったサイクロンにより、ランタン谷のキャンチェン(3,920m)で100mmを超える降水が観測され(Takahashi *et al.*, 1987)、ヤラ氷河末端付近のキャンプ(5,040m)では1mを越す積雪となった。このサイクロンによってもたらされた降水量は表2に示したように、東ネパールで特に多い点も共通している。さらに、INSAT衛星画像(インド気象局提供)によると、サイクロンの通過後、チベット高原タングラ山脈にまで積雪が及んでいるのが確認できた。

このように、1995年と1985年のサイクロンによる降水イベントはいくつかの共通点があるが、10月は雨期から

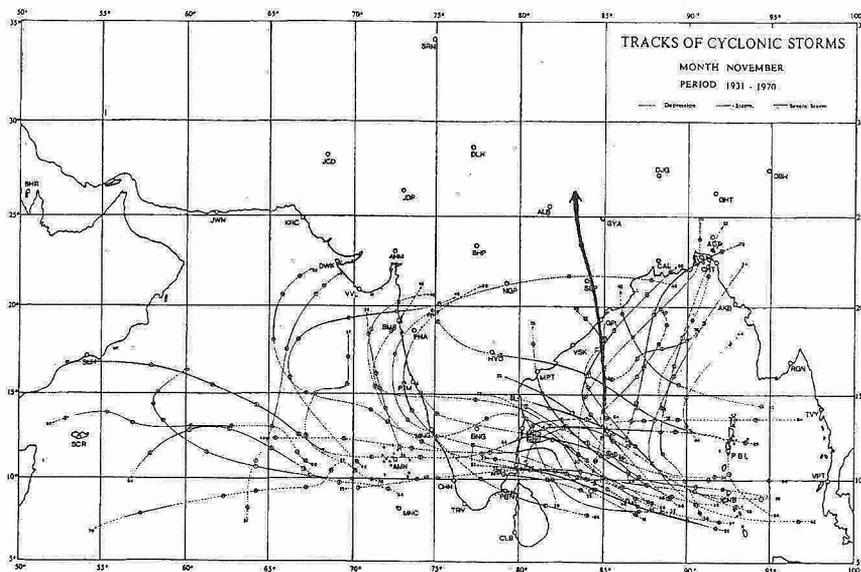


図7 1995年11月のサイクロンの進路(太矢印)と、1931年から1970年の11月に於けるサイクロンの進路(インド気象局)

The cyclone route of November 1995, indicated by a solid arrow and statistics of the cyclone route in November from 1931 to 1970 (Source: India Meteorological Department).

乾季への遷移期と言えるのに比べて、11月はすでに乾季であり、ジェット気流がヒマラヤ山脈の南に安定して吹き初める月である。従って11月には、ベンガル湾で発生したサイクロンは、この偏西風ジェットに流される形で、通常、東よりへ転向するため、10月より、サイクロンがヒマラヤに向かうコースを取る確率は少ないといえる。インド気象局による、サイクロンのコースの気候統計値によると、11月のサイクロンは、赤道域で西よりのコースを取るか、それ以外は、ベンガル湾の付け根まで北上後、偏西風によって北東向きにコースを変える。過去80年間の内、10月には、北緯25度まで北上した16回のイベントが記録されているが、11月では1回の記録しかない。少なくとも、1891年から1970年の80年間の期間中では、ネパールに達するような北、もしくは北西よりのコースを取ったサイクロンは11月には記録されておらず、今回の事例は稀な現象であるといえる(図7)。この傾向は、カトマンズに於ける月降水量(1921年から1992年の統計、観測点は、インド大使館、および、カトマンズ国際空港)にも現われており、10月に100mmを超えるイベントは過去11回あるが、11月では1回しかない。

このようなサイクロンの転向の年々変動を支配する偏西風ジェットは、1995年11月は、ヒマラヤ南面に低気圧を形成するように蛇行しており、あたかもモンスーン期のモンスーントラフに添うようにサイクロンが流された。ポストモンスーン期の大雪を導く、偏西風ジェットパターンが現われるメカニズムについては、さらなる北半球スケールでの解析研究が必要である。

本調査発足の経緯と謝辞

今回の調査はネパール政府による雪崩調査の要望を、折りから国際協力事業団(JICA)の氷河専門家として当地の氷河湖決壊洪水被害の防止対策への指導助言のためネパール政府水資源省水資源委員会(Water and Energy Commission Secretariat, WECS)に派遣されていた山田知充(北大低温研)がその後方支援活動を目的として日本雪氷学会氷河情報センター内に設置されているネパール雪氷研究支援委員会委員長の渡辺興亜(国立極地研)に伝えたことから始まった。ネパール政府の要望は幸い受け入れられ、同センター内に本雪崩の現地調査支援を目的とした組織、雪崩・豪雪災害臨時調査委員会が以下の構成で直ちに設置された。

委員長：上田豊(名大大気圏研)

委員：渡辺興亜、山田知充、伏見碩二(滋賀県立大学)、高橋修平(北見工大)、小林俊一(新潟大学)、秋田谷英次(北大低温研)、対馬勝年(富山大)

委員会により現地の山田と緊密に連絡・調整がなされつつ調査隊派遣の具体化が計られた。素早く対応された渡辺興亜ネパール雪氷研究支援委員会委員長を始め雪崩・豪雪災害臨時調査委員会の 上田豊委員長以下各委員の方々、及びネパール政府からの要望に対し日本雪氷学会として人材と資金の支援を素早く決断された若浜五郎学会長に深甚なる謝意を表します。なお、本調査経費の大部分は日本雪氷学会井上フィールド科学研究基金から支出された。

WECS 長官の G. R. Bhatta 博士は雪崩発生直後に調査の必要性を判断され、ネパール政府部内の調査に必要な諸手続をすばやく実行された。WECSの氷河湖決壊洪水対策研究室(Glacier Lake Outburst Flood Study Unit in WECS)の責任者 Rizal氏と同室員 D. Bhattarai氏には調査実施上必要な具体的な許認可業務を滞りなく遂行され、例えば日本から金曜日の午後3時過ぎに到着した伏見教授のトレッキングパーミッションをその日の内に取得させ、翌日7時発のヘリで現場に向かうという効率的なオペレーションを可能ならしめた。また、水文気象局の Kiran Shankar 長官と同 Snow and Glacier Hydrology Unitの責任者 A. Pokhrel氏には調査隊のネパール側カウンターパートとして高度順化の済んでいる同局職員の派遣を積極的に推進された。これらネパール側関係者の熱心な対応がなければ素早い調査隊の編成と早期の調査活動は不可能であった。これらネパール側関係者の皆さんに心から感謝致します。

当時クンプ氷河の調査に入っており、豪雪時にはゴラクシェップに滞在していた文部省国際学術研究の氷河調査隊(研究代表者：名大 大気圏研 上田豊教授)の幸島司郎、竹内望、坂井亜規子、山口悟各氏には貴重な現地の気象状況の情報を、また雪崩前後のクンプ氷河上で坂井氏によって測定された気温資料及び同氷河研究グループがシャンボチェに設置した自動気象観測ステーションの気温と降水量の資料提供をうけるとともに、上田豊・矢吹裕伯・坂井亜規子各氏には原稿を校閲していただいた。また、雪崩現場に駆けつけ捜索活動を展開された、ヒマラヤ観光開発株式会社社長宮原巍氏と東京農業大学山岳部の谷川太郎氏・松原尚之氏・小西浩文氏からは捜索活動期間中の積雪や雪崩の状況に関する貴重な情報を提供頂いた。また、現地取材を行った共同通信社写真部の富田晴海氏には写真1の提供を願った。株式会社大林組カトマンズ事務所の田辺勝義所長、栃本雄一所員には、雪崩測量に使うため平板測量機材の借用を申し出たところ、あいにく当該機材が無かったにもかかわらず急遽手作りで使用可能な機材をご用意頂いた。ここに本調査でお世

話になった以上の方々に深く感謝の意を表します。

文 献

- Seko, K. 1987: Seasonal variation of altitudinal dependence of precipitation in Langtang Valley, Nepal Himalayas. *Bull. of Glacier Res.*, No.5, 41-47.
- Takahashi, S., Motoyama, H., Kawashima, K., Morinaga, Y., Seko, K., Iida, H., Kubota, H., and Tradahr, N. R., 1987: Meteorological features in Langtang Valley, Nepal Himalayas, 1985-1986. *Bull. of Glacier Res.*, No.5, 35-40.
- Ueno, K., Iida, H., Yabuki, H., Seko, K., Sakai, A., Lhakupa, G. S., Kayastha, R. B., Pokhrel, A. P., Yasunari, T. and Nakawo, M., 1995: Establishment of GEN Automatic Weather Station (AWS) in Khumbu Himal. *Bull. of Glacier Res.* (submitted)

(1996年1月29日受付, 1996年2月16日受理, 討論期限1996年9月10日)