

ブータン王国ウォンディポダン周辺の河成段丘の 地質と氷河湖決壊洪水堆積物

茂 木 睦*

GLOF Sediments and Geology of River Terraces in Wangdi Phodrang District, Bhutan
Mutsumi MOTEGI *

Abstract

Several fluvial terraces and other flat surfaces are well developed in Wangdi Phodrang District along Chang Chhu (Puna Tshan Chhu) in central Bhutan.

The low terrace of 5 m to 18 m in relative height is widely distributed, preserving the river flat reliefs on the surface. The middle terrace of 20 m to 50 m in relative height is well developed from Wangdi Phodrang to the upper reaches. The high surfaces of 110 m in relative height are distributed only in Wangdi Phodrang Town and Bajo Monastery Hill, which is 2 km upstream from the former.

Geology of the middle terrace is mainly composed of a well rounded and imbricated boulder bed with several sand beds of lesser amount.

Geology of the high surface in Wangdi Phodrang Town is composed of two members: the underlying 50 m -thick massive huge boulder bed and the 60 m-thick mudflow deposits overlying the former horizontally. The huge boulder bed continues to the imbricated boulder bed of the middle terrace, suggesting that the mudflow forming the high surface is younger than the middle terrace.

On the opposite bank of Wangdi Phodrang Town, there are huge mudflow deposits, which have flowed down towards Wangdi Phodrang Town. Judging from the stratigraphic relation with middle terrace deposits, flow direction, elevation, size, and lithology, the mudflow can be safely correlated with the mudflow at Wangdi Phodrang Town.

Then, the mudflow may once have formed natural dam by covering the river flat gravel bed of the middle terrace. Estimated height of the dam is 1310 m a.s.l., and the crest was almost 1000 m wide.

While Bajo Monastery Hill is composed of two geological members, the northern major portion of the hill is brown-colored massive sand of over 20 m thick, which are delta fan deposits of a tributary named Limte Chhu, while massive white sand distributed locally at southern downstream side of the hill is abutting on the former. Groundwater drilling on the middle terrace revealed that the well rounded boulder bed is thinly overlaid by white silty sand, which continues to the massive white sand at Bajo Monastery Hill. This evidently suggests that the massive white sand bed is younger than the middle terrace boulder bed.

* ブータン王国地質調査所 (国際協力事業団・派遣専門家)

* Geological Survey of Bhutan, JICA Expert

Judging from massive appearance without stratification and mixed occurrence with blocks and fragments of varved clay, the genesis of the massive white sand at Bajo Monastery Hill without doubt resulted from turbidity current of the Glacier Lake Outburst Flood (GLOF)

When the GLOF flowed into the deep lake formed by the mudflow dam, the suspended sand, as well as transported blocks of varved clay, may have been settled in the lake. Concurrently, the GLOF may have destroyed the natural dam and drained the lake. Only a small portion of the GLOF sediments remained at the riverside stagnate concavity in the Bajo monastery area.

The above-mentioned Quaternary geo-history constructed from field evidence is identical to the legend of the Wangdi Phodrang district.

The legend is that an ancient lake was drained in one night by God, who was angry with the impious inhabitants. The upper reach of the lake in the legend is Punakha Town, which is at an elevation of 1340 m. Therefore, the size of the lake in the legend is as same as the size estimated by geology.

The legend may suggest that the GLOF event was observed by ancient inhabitants settled in this area.

キーワード：ブータンヒマラヤ, 河成段丘堆積物, GLOF (氷河湖決壊洪水), 氷縞粘土, GLOF 堆積物
Key words: Bhutan Himalaya, river terrace deposits, GLOF (Glacier Lake Outburst Flood), glacial varves, GLOF sediments

1. はじめに

ブータン地質調査所は, 1983年の発足以来資源探査や地すべり調査などに追われ, 基礎的な地質調査は行われていなかった。さらに, ブータンは観光目的以外での入国・滞在がむずかしいため, 外国人地質家の調査も少ない。地形・地質や資源の総合的文献は, ブータン国内に支所を持つインド地質調査所の報告 (Bhargava, 1995 など) 以外には, Gansser (1983) ESCAP (1991) 富樫 (1995), Motegi (1998) など, 限られている。

筆者は1994年からブータンを調査し, 1997年以降は国際協力事業団から三度にわたりブータン地質調査所に派遣されて, 調査技術の指導と各地の地質調査を行った。

その間, 高田 (1992) によって議論されたウォンディポダン地区の第四系についても, 各地形面の地質, とくに中位段丘の礫層と礫種の分布, さらにそれを覆う地層について, おもに1万分の1地形図をもちい, 実測を併用して詳しい調査を

行った。その結果, 高田 (1992) の報告とは異なる知見を得たので報告する。

最近, ヒマラヤ山脈の各地から氷河湖決壊洪水 (Glacier Lake Outburst Flood: 以下 GLOF と略称) が報告されており, ブータンも例外ではない (たとえば, Watanabe and Rothachar, 1996)。今回の調査を行った地域では, 地形形成に与える GLOF の重要性がすでに指摘されており (高田, 1992), 今回の調査でも中位段丘を GLOF 堆積物が覆っていることが判明した。

この地域には, “一夜で消失した大きな湖” についての伝説があり, この伝説と GLOF および地形発達との関係にもふれ, 地形形成における GLOF の重要性を指摘したい。

II. ブータンの地形と地質の概要

ブータンは東部ヒマラヤの南面に位置しており, チベットとインドに挟まれた東西約 330 km, 南北約 180 km で, 面積 46500 平方キロ, 人口 58 万 2000 (1994 年) の小さな密教王国である (図 1)。

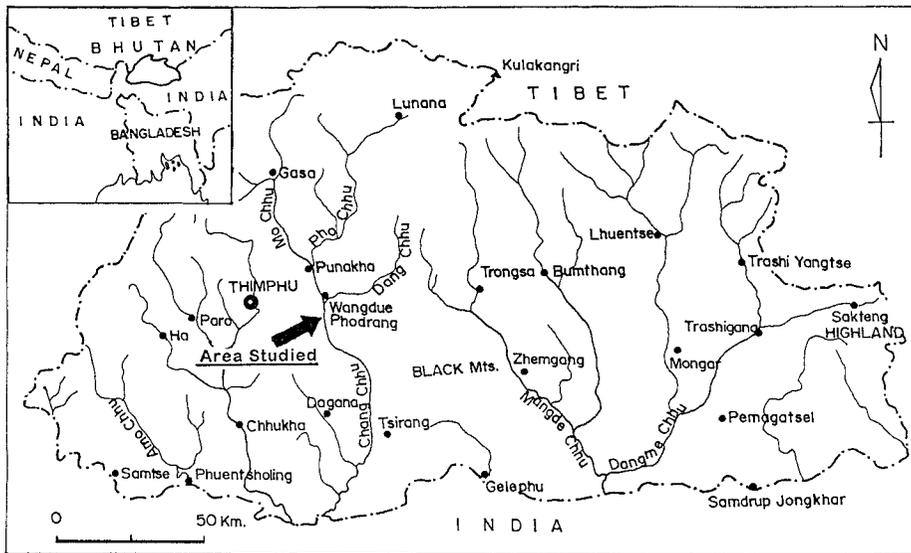


図 1 ブータン全図と調査地区 .

Fig. 1 Index map of Bhutan showing the area studied .

ブータンの主要部については高田(1992)によって地形概説がされ、接峰面図がつけられている。Motegi(1998)はブータン全域にわたる接峰面図を作成し、3000 m、4000 m、および5000 mの各等高線が、ブータン東南部のサクテン高地を除くと西から東に行くほど北にシフトする傾向があること、また河川縦断図でも、急勾配の地区を挟んだ上流側と下流側の標高差が東に行くほど小さくなることを述べ、ブータン西部の隆起量が東部よりも大きいものと解した。

ブータンの地質は、国土の大部分が変成岩類とその上に乗るテチス堆積岩類でしめられ、ほかに南部山麓に幅せまく分布する Gondwana を含む非変成ないし弱変成の古期堆積岩類と、山麓の一部に分布するシワリク層群に大きく4区分される。

ブータンの変成岩類は、Nautiyal *et al.* (1964) によって片麻岩を主とするティンブー層群と、結晶片岩と石灰岩を主とするパロ層群にわけられ、それぞれは衝上断層で切られて、くり返し分布しているとされている。しかし、パロ層群の対比については議論が多い(たとえば、Jangpangi, 1978; Chaturvedi *et al.*, 1983 など)。

変成岩類の最下部にはときに厚さが100mをこえる眼球片麻岩があり、従来この下底を限る断層が主中央衝上断層(Main Central Thrust: MCT)とされてきた。しかし、最近のブータン地質調査所によるティンブー地域の図幅調査では、地質構造上のはるか上位まで眼球片麻岩をともなう衝上断層(MCT)がくり返し出現している。

ブータンのテチス堆積岩類は変成岩類を覆って4カ所に分布しているが、北部国境付近のテチス堆積岩類については資料がなく、東部のサクテン高地では先カンブリアという以外に情報がない。

ブータン中部のテチス堆積岩類は先カンブリアのマオコーラ統と、オルドビス紀から下部石炭紀にわたるブラックマウンテン統にわけられている(Chaturvedi *et al.*, 1981)。このテチス堆積岩類はインド平原から20 kmの距離にあり、もっとも低い標高(2000 m)に分布している。マオコーラ統の最下部は黒雲母ざくろ石片岩からはじまり、上部に向かって変成度は弱くなる。

ブータン北西部のテチス堆積岩類は、ブータン中部のマオコーラ統に相当するチェカ層にはじまり、Gondwanaの植物化石を産する地層から中生

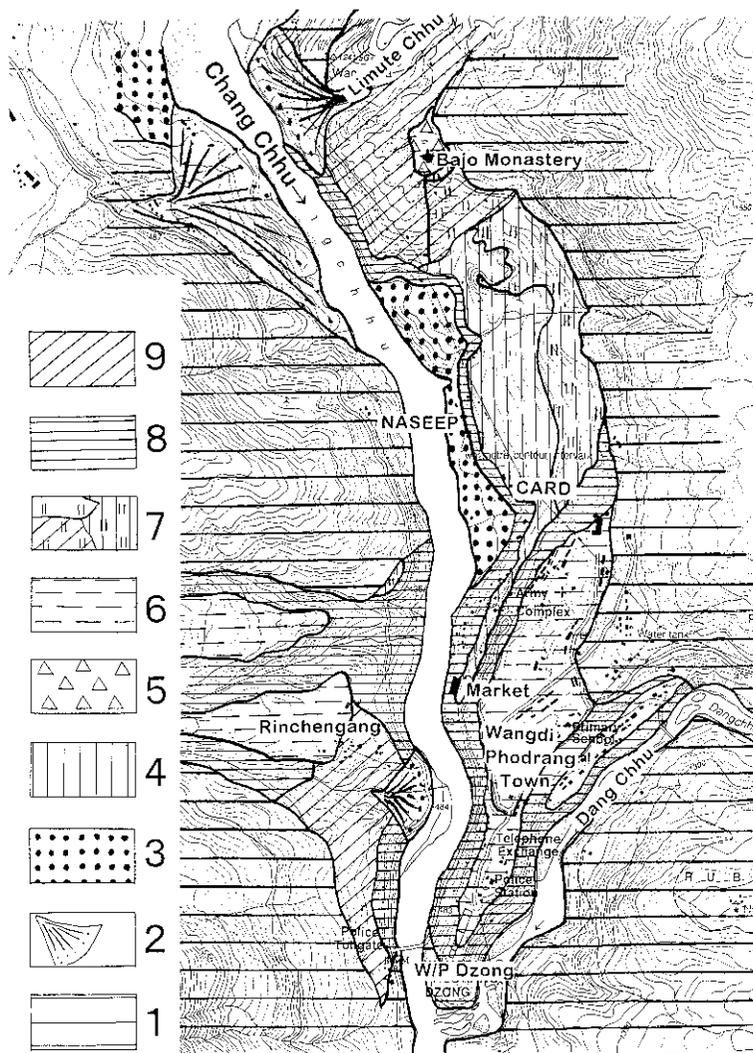


図 3 地形面分布図 .

1. 基盤岩山地, 2. 扇状地, 3. 低位段丘面, 4. 中段丘面, 5. 高位平坦面 1 (リムテチュウ塊状砂層堆積面), 6. 高位平坦面 2 (泥流堆積物堆積面), 7. GLOF 堆積物堆積面 (模様入り記号は他の地形面に GLOF 堆積物が載っていることを示す), 8. 急崖, 9. 急斜面
等高線は 10 m 間隔 . 川に近い緩斜面は 2 m ごとの助曲線が入っている .

Fig . 3 Map of geomorphic surfaces .

1. basement rock mountain, 2. fan, 3. low terrace, 4. middle terrace, 5. high surface 1 (depositional surface of Limute Chhu delta fan massive sand) 6. high surface 2 (depositional surface of mudflow) 7. depositional surface of GLOF sediments (patterned symbol shows the sediments distributed on other geomorphic units) 8. cliff, 9. steep slope
Contour interval is every 10 meters with supplementary contour of 2 meters at gentle sloped area

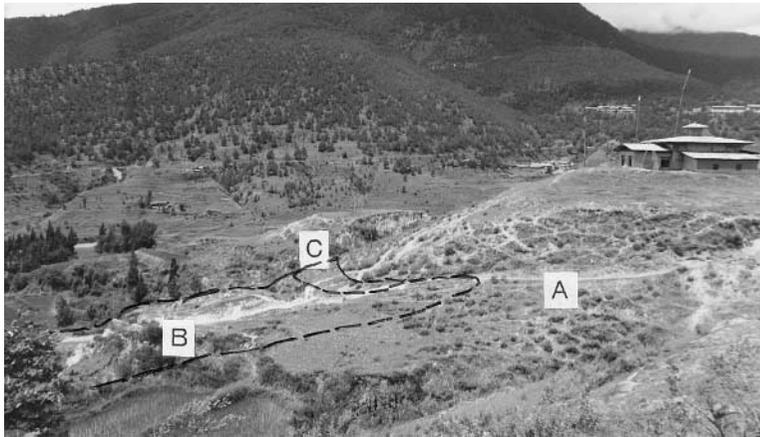


写真 1 バジヨ僧院（右上，改修中）の丘の南面の地質．

- A：リムテチュウ三角州状堆積物（赤褐色塊状で粗粒の砂層）．
- B：三角州状堆積物にアバットする GLOF 堆積物（白色塊状の砂層）．
- C：おもに氷縞粘土が占めている GLOF 堆積物の堆積面（緩斜面）．

Photo 1 Geology of southern slope of the Bajo Monastery hill
(Monastery is under renovation)

- A：Limte Chhu delta fan deposits(reddish brown massive coarse sand)．
- B：GLOF sediments(white massive sand)abutting on the delta fan．
- C：Sedimentary surface of the GLOF sediments mainly composed of huge blocks of varved clay．

位には他の堆積物が見られない。したがって、この緩斜面は堆積面と考えられる（図5）。

ウォンディポダンの町とバジヨ僧院の丘の、ふたつの高位平坦面の間にあるバジヨ村には比高約 20 m から 50 m、標高 1220 m から 1250 m で、川に向かって一様に約 6° 傾斜している平坦面（中位段丘面）がある（図3）。

さらに、チャン・チュウの近くには比高 2 m から 18 m の平坦面（低位段丘面）があり、地形面上には旧河道などの微地形が明瞭に保存されている。

なお、調査地域の upstream を概査したところ、これら中位段丘と低位段丘は、上流約 20 km にわたりほぼ連続して観察できる。しかし、チャン・チュウ沿いの諸所に分布する 100 m 以上の比高をもつ平坦面（おもに耕地）は、いずれも地すべりの頂部か泥流堆積物の堆積面であり、連続した地形面として認めることはできなかった。

なお、高田（1992）の表 1 に示されている各地形面の標高は、ブータン測量局の水準点にくらべ

ると全体として約 40 m 高くなっている。同表の比高や分布図、記述から推定すると、L2, L3, L4 が本稿の低位段丘に、L1 が中位段丘に、また M2, M3, M4, M5 が高位平坦面に相当すると思われる。

National Environmental Commission (1993) によると、上流約 10 km のプナカで東に分かれる支流、ポ・チュウの上流約 85 km にあるルナナ村（3700 m）からさらに上流約 20 km 付近の氷河湖地帯では GLOF が頻発し、チャン・チュウはくり返し GLOF に襲われている。最近では 1950 年夏、1960 年夏、1968 年 9 月に GLOF の記録がある。さらに、著者がウォンディポダンに滞在していた 1994 年 10 月 7 日にも GLOF が発生している。

このうち 1960 年の GLOF は、1637 年建立のプナカ・ゾンがはじめて被害を受けた GLOF であり、これは 17 世紀なかばから 300 年以上のあいだ大きな GLOF が発生しなかったことを意味する。

1968 年の GLOF は、バジヨ僧院と、切手にも描かれたウォンディポダンの伝統的構造の美しい木

橋を破壊し、18名の人命が失われた。

さらに1994年10月7日には、ルナナ村の上流で標高4600mの氷河湖、ルゲ・ツォ（湖）のモレーンダムの一部が決壊して、湖水の一部1800万m³が排水されて（Multidisciplinary Team, 1994）23名の死者を出し、プナカ・ゾンに被害を与えるGLOFがあった。プナカに到達するまでの平均流速はWatanabe and Rothachar（1996）が12 km / hr と推定しているが、5万分の1地形図の図上距離から計算すると16.6 km / hr である。

以上のように、1638年から1950年まではプナカ・ゾンに被害を与えるようなGLOFはなかったが1950年以降は頻繁にGLOFが発生している。

IV. ウォンディポダン付近の地質

図4にウォンディポダン付近の地質を示した。

1) 基盤岩

ウォンディポダン付近の変成岩類は、ウォンディポダン・ゾンの下部に露出しているカヤナイトを含む片麻岩から上位に、黒雲母ざくろ石片岩、珪岩、石灰岩、黒雲母片岩と累重している。走向はNE SWからNW SEまで変化し、北にゆるく傾斜している。

2) 低位段丘構成物

低位段丘はおもに15cm以下の礫と淘汰の良い細粒の砂からなり、表土は発達していない。雨期には段丘面上の旧河道は湛水し、この段丘面に建設した井戸の地下水位は河川水位と連動して上下するなど、低位段丘は水理地質的には川原に近い。

3) 中位段丘構成物

バジヨ村の中位段丘面では、国際協力事業団の地下水調査ボーリングが3孔掘削されている（JICA, 1996）。下流側の農業試験所（CARD）構内で近接して実施したTB-1とTB-3の2孔は、いずれも地表近くで礫を含むシルト層を貫いてから礫層に入っている（図5）。また、上流側のバジヨ僧院の丘の麓で実施したTB-2孔は粗粒の砂を3m貫いてから礫層に入っている（図5）。

これらの礫層は中位段丘のほぼ最上部をしめており、円磨された20cm前後の片麻岩礫・珪岩礫を主とし、礫が密接してインブリケートしており、

礫径のバラつきが少ないという特徴的な礫層である。礫層の厚さはボーリングでは16m、地表ではチャン・チュウ沿いの道路の崖で5mあり、いずれもインブリケーションが顕著である。

礫層の下位には厚さ2.5mないし5mで連続性の良い砂層がある。その下位には厚さ6mの砂礫層が崖をつくっている。TB-2孔のボーリングではさらに2mの砂層、4mの礫層、3mの砂層、2.5mの礫層とくり返して、基盤岩に達している。

4) GLOF 堆積物

チャン・チュウの川岸はほとんど白色の砂浜である。その大部分は1994年のGLOFがもたらしたものであるが、GLOF以前の川岸も同様な白色の砂浜であった。したがって、この白色の砂はチャン・チュウがくり返しGLOFの影響を受けていることを反映していると思われる。

同様な白色の砂は段丘の堆積物にも認められる。

バジヨ僧院の丘の地質は別項で述べるが、高位平坦面1から約10mさがった幅のせまい緩斜面から丘の麓まで連続する露岩は、川岸の砂と区別できないほど似ている白色塊状の砂と、それに含まれる湖成堆積物の大塊や岩片からなっている。この堆積物は、あとで述べるように中位段丘の礫層を覆っているGLOF堆積物であり、中位段丘以後のGLOFを示している。

また、種子公社（NASEEP）の裏では、中位段丘の最上部の礫層よりも下位の砂質堆積物が崖をつくっており、その中に厚さ30cmの白色の砂のバンドが挟まれている。

この中位段丘の砂とバジヨ僧院の丘の白色塊状の砂、および川岸の1994年GLOFの砂を検鏡した結果、1994年GLOFの砂とバジヨ僧院の丘の砂はよく似ており、やや角がとれた長石と角ばった石英を主とし、その他の鉱物として雲母のほかシリマナイトとカヤナイトを含んでいる。中位段丘の中の白色バンドの砂粒は、やや角がとれているが、細粒のため石英、長石、雲母以外は同定できなかった。しかし、鉱物組成が単純で有色鉱物を含まないことは共通している。

これら時代が異なるGLOFによってもたらされた白色の砂の中で、中位段丘に挟まれる白色の砂

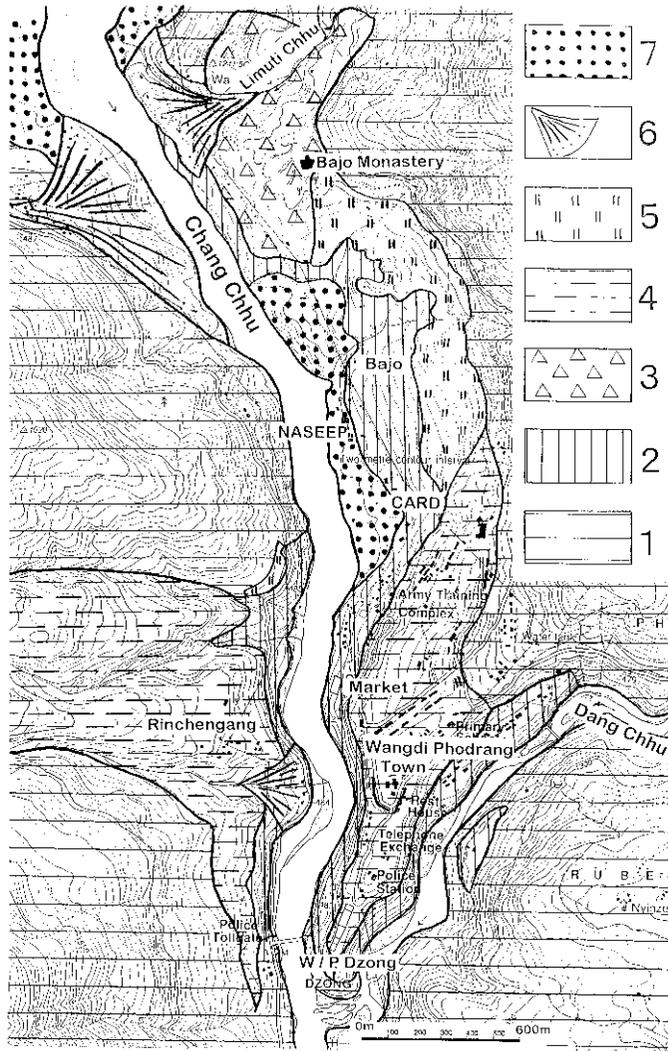


図 4 ウォンディポダン地区地質図。

1. 基盤岩, 2. 中位段丘堆積物およびウォンディポダン面の下位の合流点の礫層, 3. リムテチュウ塊状砂層, 4. 泥流堆積物, 5. 氷河湖決壊洪水堆積物, 6. 扇状地堆積物, 7. 低位段丘堆積物
等高線は 10 m 間隔。川に近い緩斜面は 2 m ごとの助曲線が入っている。

Fig. 4 Quaternary geological map of Wangdi Phodrang area.
1. basement rock, 2. middle terrace deposits and confluence boulder bed, 3. Limute Chhu massive sand, 4. mud flow deposits, 5. GLOF sediments, 6. fan deposits, 7. low terrace deposits
Contour interval is every 10 meters with supplementary contour of 2 meters at gentle sloped area.

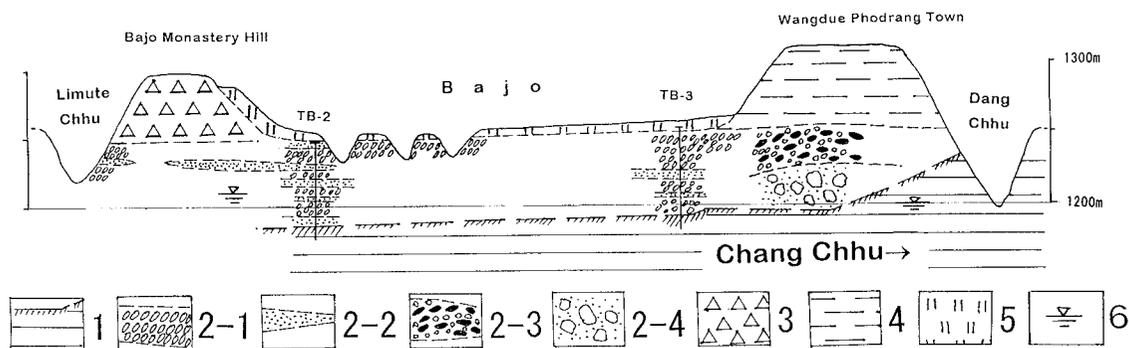


図 5 模式地質断面図。

1. 基盤岩, 2 1. 中位段丘の礫層, 2 2. 中位段丘の砂層, 2 3. ウォンディポダン面の下位の合流点の礫層 (テチスの礫岩礫を含む “層理構造がはっきりしない礫層”), 2 4. ウォンディポダン面の下位の合流点の礫層 (“巨大岩塊が散在する地層”), 3. リムテチュウ塊状砂層, 4. 泥流堆積物, 5. 氷河湖決壊洪水堆積物, 6. 河川水位

Fig. 5 Schematic geological profile.

1. basement rock, 2 1. middle terrace boulder bed, 2 2. middle terrace sand bed, 2 3. confluence boulder bed with Tethyan boulders, 2 4. confluence boulder bed with huge blocks, 3. Limute Chhu massive sand, 4. mudflow deposits, 5. GLOF sediments, 6. riverwater level

は、当地域でもっとも古い GLOF の証拠と考えられる。

5) ウォンディポダンの高位平坦面 2 の地質

図 5 に示したように、この地区の地質は平坦面を形成している厚さ約 60 m の泥流堆積物と、その下位にある厚さ 50 m をこえる礫層とにわけられる。

上位の泥流堆積物は塊状無層理で乱雑な堆積物であり、小さなざくろ石をもつ黒雲母片岩の角礫を含む。この泥流の表面に近い部分では厚さ約 80 cm、長さ 2.5 m の扁平な岩塊がほぼ水平に堆積している。一方、泥流の基底は 30 cm 以下の角ばった岩塊を多量に含んでおり、マーケット付近の道路分岐点 (1251.6 m) で下位の礫層を水平に覆っている。泥流の表面はゆるやかな小起伏を示しながら東方に漸次高度を増し、町の東部で基盤岩にアバットしている。

泥流堆積物の下位には高田 (1992) が「層理構造がはっきりしない礫層」と「巨大岩塊が散在する地層」と呼んだ地層がある。

「層理構造がはっきりしない礫層」には、中位段丘の礫層に特徴的な「よく円磨されてインプリケーションの顕著な礫層」と、「巨礫を含む乱雑な礫層」が混在しており、露頭では「巨礫を含む乱

雑な礫層」が中位段丘の礫層を削り込み、一部では礫層を取り込んでいるのが観察される (写真 2)。つまり、高位平坦面の下にある「層理構造がはっきりしない礫層」と中位段丘の礫層とは指交関係にある。

この「巨礫を含む乱雑な礫層」の礫質を見ると、卵大からこぶし大の、円磨された珪岩の礫を含む珪岩がしばしば巨礫として含まれており、珪岩の礫は引き伸ばされている (写真 3)。これは最下部テチス堆積物のチェカ層に特徴的な礫岩であり、ほかに類似の岩相はない。チェカ層の分布から見て東方のブラックマウンテン山地からダン・チュウによって運ばれたものである。

この「珪質礫岩の巨礫を含む乱雑な礫層」は、チャン・チュウの左岸で、かつ橋の上流側約 700 m から 1200 m の範囲で、標高は中位段丘とほぼ同じく約 1250 m 以下に限られて分布している。ときには風化殻をもつ礫もこの礫層に含まれており、見かけ上は扇状地の礫に近い。

同じ範囲の右岸では、中位段丘の礫層がリンチェンガン村の北方約 600 m の標高 1250 m 付近で、泥流堆積物に覆われて分布しているが、ここではテチス起源の礫を含む礫層は見られない。

「巨礫を含む乱雑な礫層」の下位には左岸の崖に

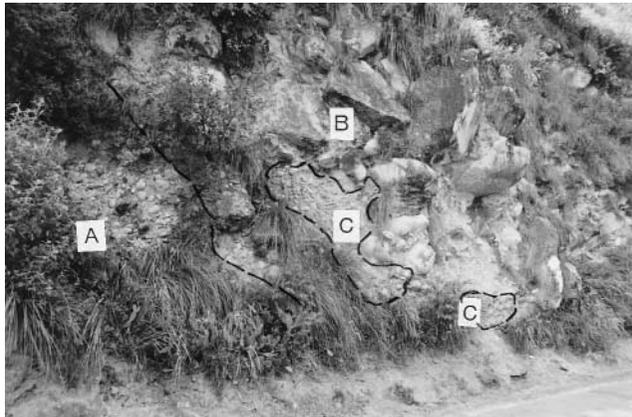


写真 2 ウォンディポダンの下位の崖でみられる“層理構造がはっきりしない礫層”。

- A : よく円磨されてインブリケーションの顕著な中位段丘の礫層 .
 B : 中位段丘の礫層を削り込んでいる“巨礫を含む乱雑な（合流点の）礫層” .
 C : 乱雑な（合流点の）礫層に取り込まれた中位段丘の礫層 .

Photo 2 Boulder bed without wtrratification at Wangdi Phodrang cliff.

- A : Well rounded and imbricated boulder bed of the middle terrace.
 B : Confluence boulder bed cutting the middle terrace boulder bed.
 C : Middle terrace boulder bed captured in the confluence boulder bed.



写真 3 乱雑な礫層の中にある“引き延ばされた珪岩の礫をふくむ珪岩の巨礫”。

Photo 3 Large boulder of quartzite conglomerate with elongated pebbles, found in the confluence boulder bed.

だけ見られる「巨大岩塊が散在する地層」が続いているが、両者の礫質にはとくに変化はない。対岸から観察すると、この「巨大岩塊が散在する地層」は、下流部から上流に行くにしたがって層理面が上流側へ傾斜するようになっている。

6) パジヨ僧院の丘の高位平坦面 1 の地質

この丘の地質は、中位段丘の礫層を覆ってこの地区だけに分布する「赤褐色塊状で粗粒の砂層」と、これにアバットしている「氷縞粘土の大塊を含む白色塊状の砂層」からなっている。

「赤褐色塊状で粗粒の砂層」は、粒度や岩質がリムテ・チュウ最上流部のリムカ村（標高 2150 m : 図 2）に見られる湖成堆積物の構成物質と酷似している。分布がこの地区だけに限られていることも考えると、この湖成堆積物の一部がチャン・チュウとの合流点に急激に運ばれ、三角州状に堆積したものと考えられる。この砂層の上位には、僧院



写真 4 氷縞粘土(壁土用の粘土として採掘されている)。

Photo 4 Varved clay (being mined as plaster material).

改修工事のピットに出現した厚さ 1 m ほどの淘汰の良い細礫まじりの川砂が乗っている。

写真 1 と模式断面図 (図 5) に示したように、この赤褐色塊状で粗粒の砂からなる丘の南東部、つまり下流側の斜面に「氷縞粘土の大塊を含む白色塊状の砂層」がアバットしている。この白色塊状の砂層は、丘の頂上の高位平坦面 1 から約 10 m 下方に、最大幅 5 m で延長 20 m ほどの緩斜面を形成している。この緩斜面は、層序的に白色塊状の砂層の最上位をしめる湖成堆積物がしめており、山道沿いに 10 m 以上にわたり露頭している。

これは高田 (1992) が記述した「氷縞粘土様の湖成堆積物」である。

この湖成堆積物には白色と暗色の明瞭なラミナが単調にくり返されており (写真 4)、やや粗粒の白色部から上方に細粒になる級化が認められる。白色部と暗色部をあわせた 1 セットの厚さは 10 mm ないし 18 mm であり、最大の露頭では 158 セットまで数えられる。湖成堆積物が岩相・厚さともほぼ変化なく単調にくり返すのは氷縞粘土に特徴的である。また、ブータン地質調査所の Yeshy Dorji によれば、同様な氷縞粘土は約 100 km 上流の氷河湖跡から上流の、各氷河湖跡に見られるという。

バジョの丘に見られる氷縞粘土は一見水平に成層しているように見えるが、じつは 13 m にもおよぶ大きな岩塊で、横に追跡すると層理面に直交す

る割れ目が多くなり、さらには数 10 cm の塊に分かれて乱雑な走向傾斜を示すようになる。下位の層準では径 5 cm ほどの扁平な岩片となって砂層の中に散点し、砂層はシルト質となってくる。この扁平な氷縞粘土片が散点している白色塊状の砂層は丘の麓の民家まで連続しており、実測したところ厚さは 41 m であった。

この砂層の下部は、厚さ 18 m の淡褐色ないし灰白色でやや粗粒の砂層に漸移しているが、これには氷縞粘土片は含まれていない。TB-2 孔のボーリングでは、この砂層は地表下 3 m で中位段丘の礫層を覆っている (図 5)。

このようにバジョ 僧院地区では高位平坦面 1 をつくる三角州状粗粒堆積物と、それにアバットしている氷縞粘土を含む白色塊状の砂層が、ともに中位段丘の礫層を覆っている。

V . 高位平坦面の形成過程

1) ウォンディボダンの高位平坦面 2 の形成過程

前述のように「層理構造がはっきりしない礫層」と「巨大岩塊が散在する地層」は分布が左岸に限られ、含まれている巨礫に東方山地起源の礫岩礫 (写真 3) があることや、堆積物の層相から、左岸支流のダン・チュウによって供給されてチャン・チュウとの合流点に扇状地状に堆積した礫層と考えられる。礫岩礫の分布から見ると、当時のダン・チュウの合流点は現在よりも約 1000 m 上流側にあったと考えられる (図 6 1)。

この礫層は中位段丘に特徴的な礫層を取り込んでいたり (写真 2)、同じ標高に分布していたりするので、中位段丘と同時代の地層であることは間違いない (図 5, 6 1)。

つぎに、この礫層を標高 1250 m 付近で覆い、標高約 1310 m の平坦面をつくって左岸の山腹にアバットしている泥流の起源であるが、地形から見て東側の山地から流下したとは考えられない。

近隣の大規模な泥流でウォンディボダンに向かって流れているものは、西方対岸にあるリンチェンガン村が乗っている泥流 (以下リンチェンガン泥流) だけである (図 3, 4)。

この泥流はほぼ西から東へ向かって流下してい

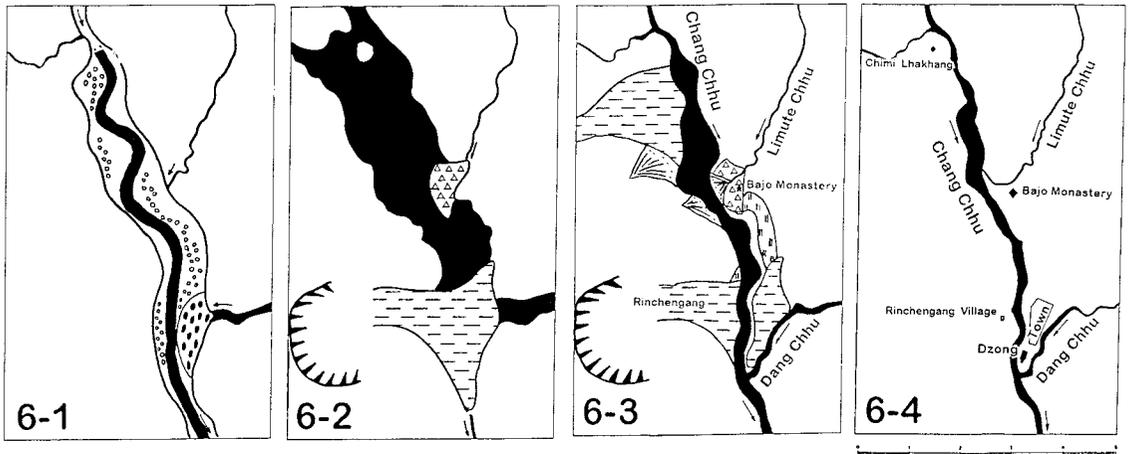


図 6 地形発達模式図。

各図の範囲は東西 5 km, 南北 8.1 km. 地質記号は図 3, 4 に同じ。

- 6 1. 中位段丘礫層堆積期：河川礫と合流点の扇状地礫（黒楕円）の分布。
- 6 2. リンチェンガン泥流と湖水域，およびリムテチュウの三角州状塊状砂層。
- 6 3. 低位段丘堆積期の河床と地質。
- 6 4. 現在の河床と主要地点。

Fig. 6 Schematic illustrations on landform development.

Each area is 5km × 8.1km. Symbols are the same as Figs. 3 and 4.

- 6 1. Distribution of river flat gravel and confluence gravel (solid ellips) during the depositional stage of the middle terrace.
- 6 2. Ringchengang mudflow, massive dand of Limute Chhu felta gan and dammed-up eater srea.
- 6 3. Geology and river flat area at the stage of low terrace.
- 6 4. Present river flat area and main landmarks.

るが約 7° の緩傾斜面は西方山腹の標高 1600 m 付近まで追跡できる。さらにその西方には巨大崩壊跡と見られる弧状の急斜面がある。航空写真から判読すると標高 2000 数百 m 付近に生じた大規模地すべりの末端部が、標高 1600 m 付近で泥流となり、約 700 m の幅で東に流下したものと見られる。

この泥流が形成している地形面の標高、流下している方向、含まれている角礫の岩質、ウォンディポダンとの位置関係などから考えると、この泥流がチャン・チュウの川原の礫を覆い、川をこえて合流点の礫層を覆って対岸の山腹に達し、標高約 1310 m のウォンディポダンの町の平坦面を形成したと考えるのがもっとも妥当である。

これによって標高 1310 m で幅広い平坦な頂部をもつ自然のダムが形成され、1250 m のチャン・チュウの川原は水面の標高 1310 m の湖となり、水深約 60 m の湖が形成された（図 6 2）。

一方、ウォンディポダンから東に向かう国道沿いの標高約 1320 m には、当時のダン・チュウの河川堆積物が見られるので、ダン・チュウも合流点をふさがれて湖が形成されたと考えられるが（図 6 2）、泥流ダムの下流側に出口ができて現在の流路をとって排水されたものであろう。

以上述べてきたように、ウォンディポダンの崖に露出している乱雑な巨礫層は、中位段丘の礫層と、支流のダン・チュウから供給された合流点の礫層とが混在しているために複雑に見えているものである。

また、この礫層を水平に覆う泥流堆積物の堆積面が高位平坦面を形成しているの、見かけ上の地形面の新旧と層序関係は逆になっている。

なお、前述した「巨大岩塊が散在する地層」が上流側に傾斜していることについて、高田（1992）はこれを地殻変動の結果と解し、その上に重なる

地層に変形が見られないことから、間に不整合の存在を予想した。しかし、この地層は分布がこの地点だけに局限されていて礫質が東部山地起源を示していることから、まぎれもなくダン・チュウとの合流点に堆積した地層である。一見傾動のように見える上流側に傾斜する層界面は、扇状地状に堆積した地層を、河川が直線状に削ったためにできた見かけの傾斜であり、同様な現象はこの対岸で現世の扇状地を道路が横切っている所でも見られる。

2) バジヨ僧院の丘の高位平坦面1の形成過程

前述のように、この丘の地質は「赤褐色塊状の粗粒の砂層」と、これにアバットする「氷縞粘土の大塊を含む白色塊状の砂層」からなっている。このうち「赤褐色塊状の粗粒の砂層」は上位の砂層との境界が急傾斜であり、かつ分布が局部的であることから、支流のリムテ・チュウとの合流点に形成された三角州状堆積物と見られる。

この三角州状堆積物の下流側にアバットしている「氷縞粘土の大塊を含む白色塊状の砂層」は、バジヨ僧院の丘の麓で中位段丘の礫層を覆っている白色砂層まで、露頭がほぼ連続している。

この連続露頭から浅い谷をへだてた 150 m ほど南の小集落の丘には、中位段丘の礫層をうすく覆って灰白色のシルト質細砂層が堆積している。

さらに、700 m 南の CARD 構内で実施した TB-1, TB-3 のボーリングで、地表直下で捕捉された礫を含むシルト層は、標高や下位の礫層との関係から見て、あきらかにこの灰白色シルト質細砂層に連続している（図 5）。

このようにバジヨ僧院の丘からバジヨ村にかけては、リムテ・チュウの合流点の三角州状堆積物と、それにアバットしている氷縞粘土の大塊を含む白色塊状の砂層、およびそれに連続するシルト質砂層が、ともに中位段丘の礫層を覆っている。つまり、ここでも高位平坦面をつくる地層は中位段丘よりも新しいことになる。

つぎに、この白色塊状で氷縞粘土の大塊や破片を含む砂層の堆積環境については、この白色の砂層が塊状無層理であること、氷縞粘土の大塊が破壊されずに運ばれてきていることなどから、比重

の高い流体として運ばれ、短時間で堆積したものと考えられる。

この比重の高い流体を形成したイベントとしては、氷縞粘土片が全体に含まれていることから、氷河湖周辺に起源する破壊的なイベントであり、GLOF（氷河湖決壊洪水）と考えるのが自然であろう。

つまり、氷河湖が何らかの原因で決壊して比重の高い混濁流を形成し、その流動過程で取り込んだ氷縞粘土の大塊を、混濁流に浮いた状態で下流まで運んだものと考えられる。この混濁流は自然のダム湖に至って流速が遅くなり、懸濁物の白色の砂や氷縞粘土の大塊は短時間で沈殿し、厚い白色塊状の堆積層が形成されたものであろう。

一方、標高 1300 m 近くに厚さ 41 m の地層がごく短時間で堆積したということは、当時、水深が 41 m 以上で水面の標高が 1300 m 以上の水域がこの地区に広がっていたことを意味するが、これは前項で考察した自然のダム湖の規模と矛盾せず、その存在を支持する。

またバジヨ僧院の丘には「氷縞粘土の大塊を含む白色塊状の砂層」の堆積面が小規模な緩斜面として残っており、その上位には堆積物が認められないことから、この大規模な GLOF（以下巨大 GLOF という）によって大量の堆積物がもたらされたと同時に自然のダムは破壊されて、湖は消滅したものと考えられる。

大量にもたらされた堆積物の大部分は湖が排水されるとともに流失したが、バジヨ僧院の丘の三角州状堆積物の下流側のよどみにあった堆積物は、流失せずに残ったものであろう（図 6 3）。

なお「氷縞粘土の大塊を含む白色塊状の砂層」の下位にある、厚さ 18 m で淡褐色ないし灰白色の氷縞粘土片を含まない砂層は、鉱物組成が同じなので同一の成因と考えられるが、同時の堆積物か、あるいは巨大 GLOF に先行する別の GLOF があったのか不明である。

VI. ウォンディボガン地区の第四紀地史

以上の議論から復元される地史は次のようにまとめられる。

1) 中位段丘の礫層堆積期、チャン・チュウの川原にはよく円磨された片麻岩・珪岩の礫が堆積していた。東から合流するダン・チュウは、径3mをこえる巨大岩塊やテチスの珪質礫岩の巨礫を供給して、チャン・チュウ左岸の合流点に扇状地状に礫層を堆積していた。当時の合流点は、現在のウォンディポダンの橋の上流1000m付近と推定される(図61)。

2) ウォンディポダンの西方対岸(チャン・チュウ右岸)に大規模な地すべりが発生し、リンチェンガン泥流が生じた。この泥流はチャン・チュウの川原をうめて左岸の山腹まで達し、標高1310mで、幅の広い平坦な堤頂面をもつ自然のダムを形成した。その結果、チャン・チュウとダン・チュウの両河川にダム湖が形成された(図62)。

チャン・チュウの湖水域は、ダムの標高から見ると上流のプナカの町まで達する長さ10kmあまりで、水深約60mであったと推定される。ダン・チュウは下流側に流路を変えて湖を排水し、合流点は約1km下流に移動した。

3) 自然のダム湖ができたあと、赤褐色で粗粒の砂がリムテ・チュウの上流から急激に供給され、チャン・チュウとの合流点に三角州状に塊状の砂層が堆積した(図62)。

4) チャン・チュウ上流の氷河湖地帯において、巨大GLOFが発生した。GLOFは砂やシルトを懸濁し、氷縞粘土の大塊を浮かせた混濁流として上記のダム湖に達した。そこで流速がさがったため、氷縞粘土の大塊や懸濁した白色の砂は沈殿し、白色で塊状無層理の厚い地層が堆積した。

同時にこの巨大GLOFによって自然のダムが破壊されたため、堆積したばかりのGLOF堆積物の大部分は、湖水の排水とともに流失した。しかし、リムテ・チュウ合流点の三角州状堆積物の下流側に堆積した氷縞粘土を含む白色塊状の砂層は、河岸のよどみにあったためか流失せずに残った。かくして湖は消滅した(図63)。

VII. 巨大GLOF 発生場所と時代

1800万m³の水が流出した1994年10月7日のGLOFでは、ウォンディポダンにある電力局の観

測所では30分間に水位が6m上昇し、その時点の流量は2500m³/sec.と推定された(JICA, 1996)。

これから推察すると、リンチェンガン泥流が形成したダムを破壊した巨大GLOFは、洪水がつぎつぎに下流の氷河湖を決壊するなどして、きわめて大量の水が流下したものと考えられるが、その発生場所を特定する資料はない。

1994年10月7日のGLOFの発生直後に、発生源のルゲ・ツォ地域を調査したYeshy Dorjiの話によれば、ルナナ村のツォ・ジュ(Tshoju)という集落に氷縞粘土を覆う広大な草場が広がっており、地形から約1km×5kmの巨大な湖があったと推定されるという。この村名は“最後の湖”という意味で、流域では最下流で最大の氷河湖であったと思われるとのことであり、これは巨大GLOFの発生源のひとつの候補地かもしれない。

つぎに、この巨大GLOFの時代であるが、ダムを形成している泥流とGLOF堆積物のいずれも中位段丘を覆っているため、巨大GLOFの発生は中位段丘以後の事件である。

また1638年築造のウォンディポダンのゾンは泥流堆積物が削られてできた細長い尾根をえらんで建てられており、巨大GLOFによるダムの破壊はゾンの建立よりも古いことになる。

一方、ウォンディポダン地区には、かつて存在した大きな湖について次のような伝説がある。「往時、ウォンディポダンに大きな湖があり、上流側はプナカ(標高1300m)まで続いており、水面はクジュラ僧院(標高2100m)まであった。住民は湖から各種の恩恵をうけていたが、不信心者がわがまま勝手な行いをするので神様が怒って湖の堰堤を断ち切り、湖は一夜にして干上がってしまった」というものである。

水面の標高は信じがたいが、水面の延長規模は前項までに議論してきた泥流による自然のダム湖の規模と一致する。また、一夜で干上がったという言い伝えも、GLOFによってダムが破壊されたとすれば首肯できる時間である。

したがって、この巨大GLOFが発生した時代は、住民の記憶・伝承にのこるほどの時代ということになり、ヒマラヤの山間盆地という条件を考える