

パンジャール州 Bhatpur におけるトレンチ掘削調査に基づく ヒマラーヤ前縁帯活断層の最新活動

熊原 康博
群馬大学教育学部

1 はじめに

本研究は、パンジャール州において、ヒマラーヤ前縁帯活断層を対象にトレンチ掘削調査を行い、地層の断層変形を基に過去の大地震の時期、規模について議論したものである。ヒマラーヤ前縁付近のインダス文明が急激に衰退、あるいは都市拠点の移動が生じた自然環境的な直接的・間接的な原因の一つとして、インド・ユーラシアプレート境界で発生する大地震が想定される。ヒマラーヤ前縁では、最近約 100 年間にこれまで M8 を超える地震が、ヒマラーヤ前縁帯活断層 (Himalayan Frontal Thrust: HFT) などの活動によって発生している (図 1)。しかしながら、さらに古い地震に関する情報については、歴史史料が整備されていないことや、トレンチ掘削調査などの古地震学的な調査がほとんど行われていないことから、この地域で、どのような地震が過去に生じていたのかについてほとんど解明されていない。したがって、まずは、この地域でどのような地震が過去に発生していたのかを正確に明らかにすることが必要といえる。本研究では、これまで古地震学的な調査が行われておらず、インダス文明期の遺跡に比較的近い地点を対象にトレンチ掘削調査を実施した。

2 調査周辺の HFT

研究地域は、Chandigarh 北西方約 90km 付近のシワーリク丘陵西縁である (図 2)。昨年の子察的調査によって以下の点を明らかにした。

- ・シワーリク丘陵北西縁では、HFT のトレースに沿って撓曲崖、断層崖の断層変位地形が認められること。
- ・特に、Bhatpur 周辺では、シワーリク丘陵の開析谷の中には、高度の異なる段丘面が 2 面 (H, L 面) が認められ、谷口でこれらの連続が絶たれていること (図 3)。
- ・また、両段丘面と現河床との比高はそれぞれ 5 m、15 m であり、同じ断層面で繰り返し活動する変位の累積性が読み取れること。

なお、断層の下盤側は、沖積面が丘陵の出口を中心に扇状に傾斜していることから、より新期の扇状地性堆積層に埋積されていると見られる。

3 トレンチ掘削調査

トレンチ掘削調査は、Bhatpur において H 面を切る断層崖の基部を中心に断層に直交する方向に掘り (図 4)、その大きさは長さ 22 m、深さ最大 8 m であった。安全のためトレンチ壁面は南壁面は緩傾斜にしたため、地層の観察は垂直に近い北壁面のみで行った。トレンチ壁面からは、未固結な河川堆積層や斜面堆積層と、それらの一部を明瞭に変位させる断層が認められた (図 5、図 6)。以下では、地層の層相や層序、年代について述べた後、断層構造について記載する。なお、AMS 年代測定値は表 1 にまとめた。

1) 地層

河川堆積層は、層相の違いと地層の不整合から大きく 6 つに区分し、断層上盤側下位から上

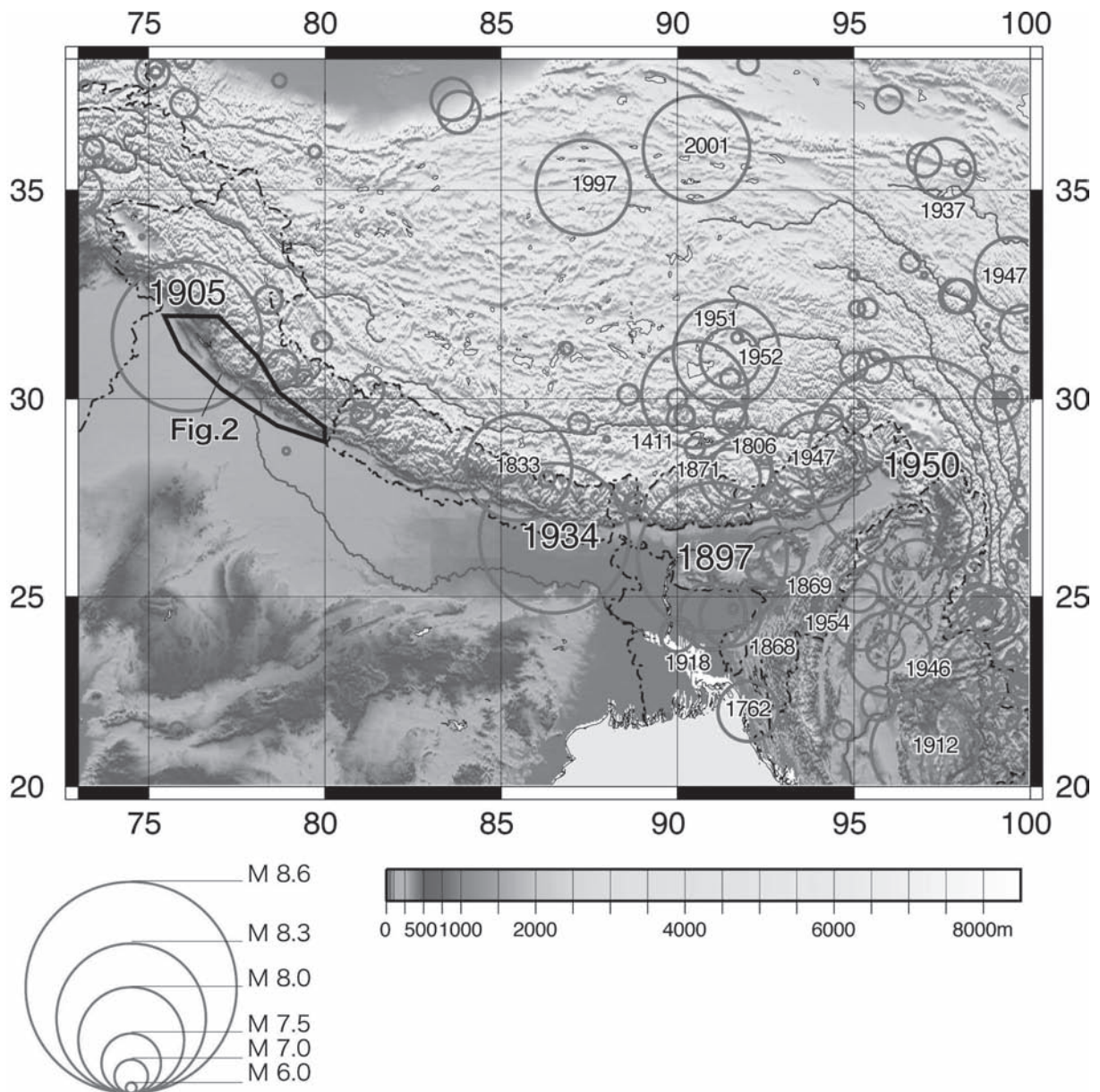


図 1 ヒマラヤ周辺の歴史地震 ($M > 5$)

震央のデータは、Utsu (1996) による。年代を示した地震は $M > 7.5$ 以上 (太文字は $M > 8.3$ 以上) である。

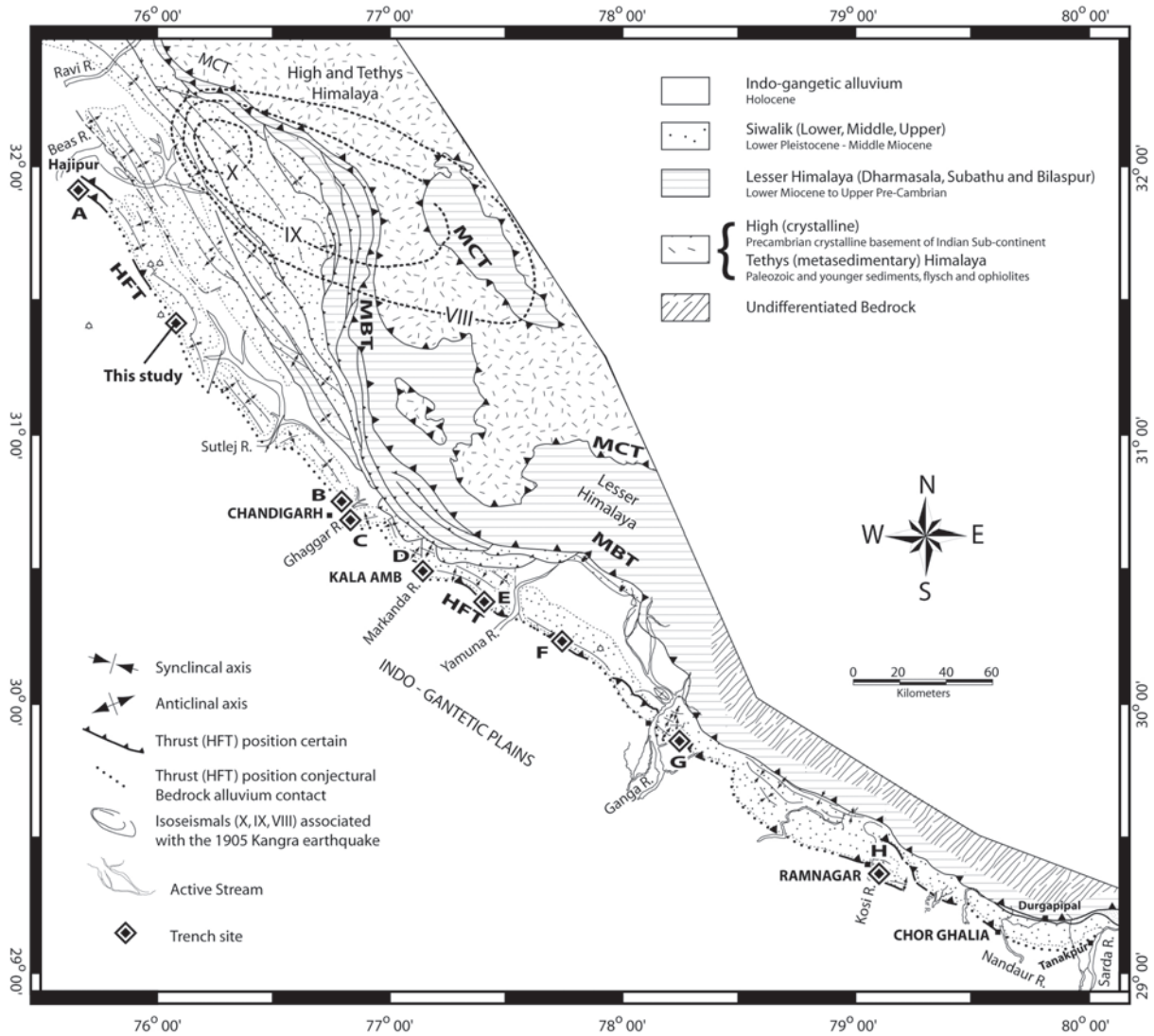


図2 インド北西部の地質概観とトレンチ調査地点

トレンチ A: Malik et al.(2010), B: Malik et al.(2008), C: Kumar et al. (2006), D: Kumar et al. (2001), E ~ H: kumar et al.(2006)

位に向かって順に1～6層とした。

1層：全体的に赤オレンジ色を呈し、淘汰が悪く、礫支持の礫層である。礫の大きさは中礫サイズである。壁面では、上位の2層との境界や地層中の礫の配列はWを横に置いた特異な形状をなす。

2層：やや赤色化した淘汰された礫支持の中礫サイズの円礫層である。1層との境界はやや凹凸があり不整合の関係で接する。また細砂の薄層が認められる。

3層：砂やシルトの互層で4層程度の有機質に富む層が見られる。一部に不連続な中礫のレンズが認められる。AMS年代測定値は4点行い、西暦1200-1450年のAMS年代測定値が得られた。

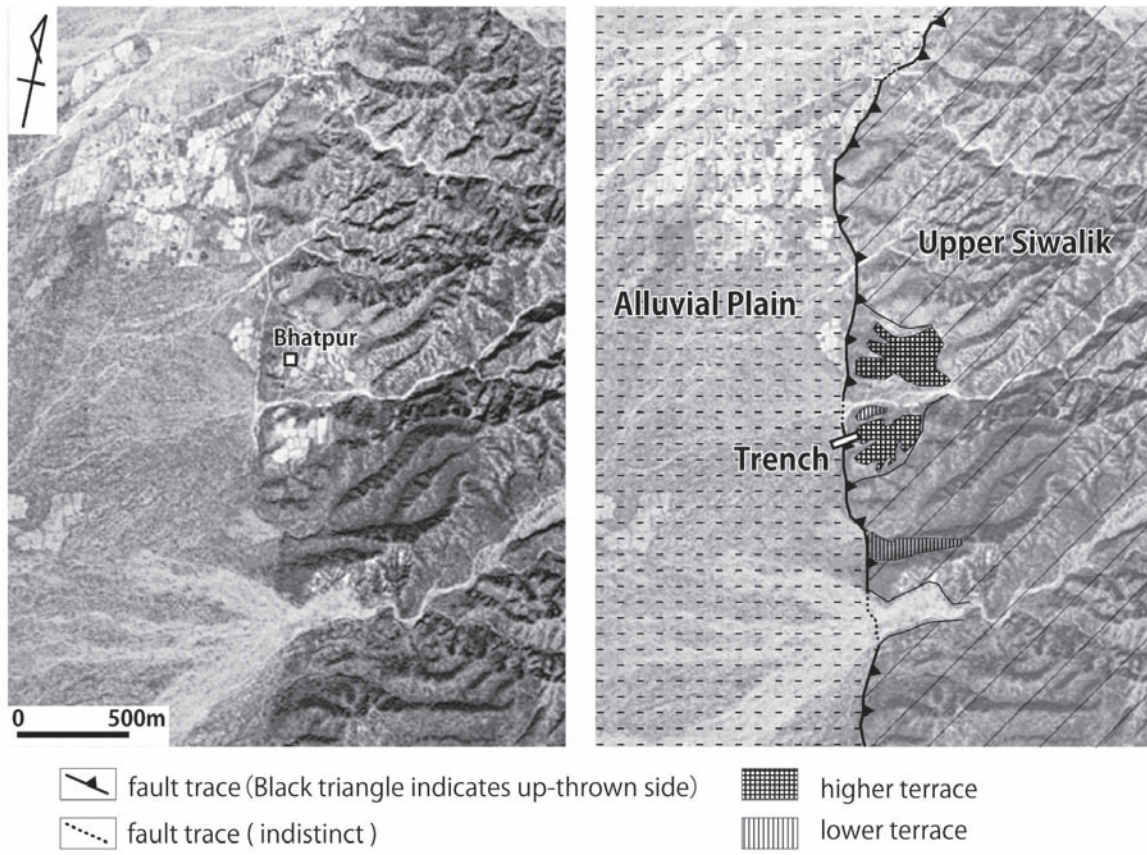


図3 Bhatpur 周辺の断層変位地形とトレンチ掘削調査地点



図4 H面上からの断層崖とトレンチ

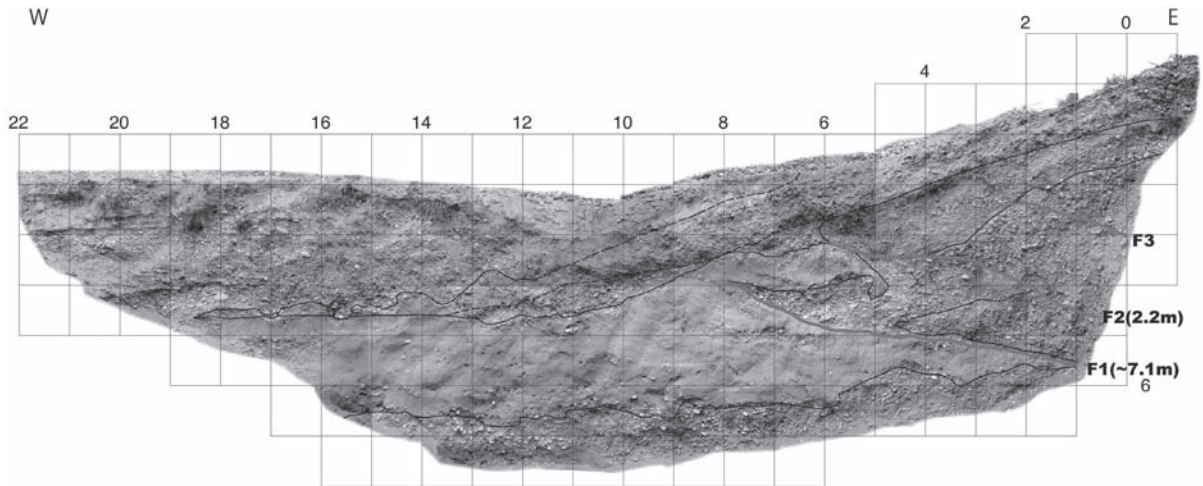


図5 トレンチ壁面のログ（北壁面）

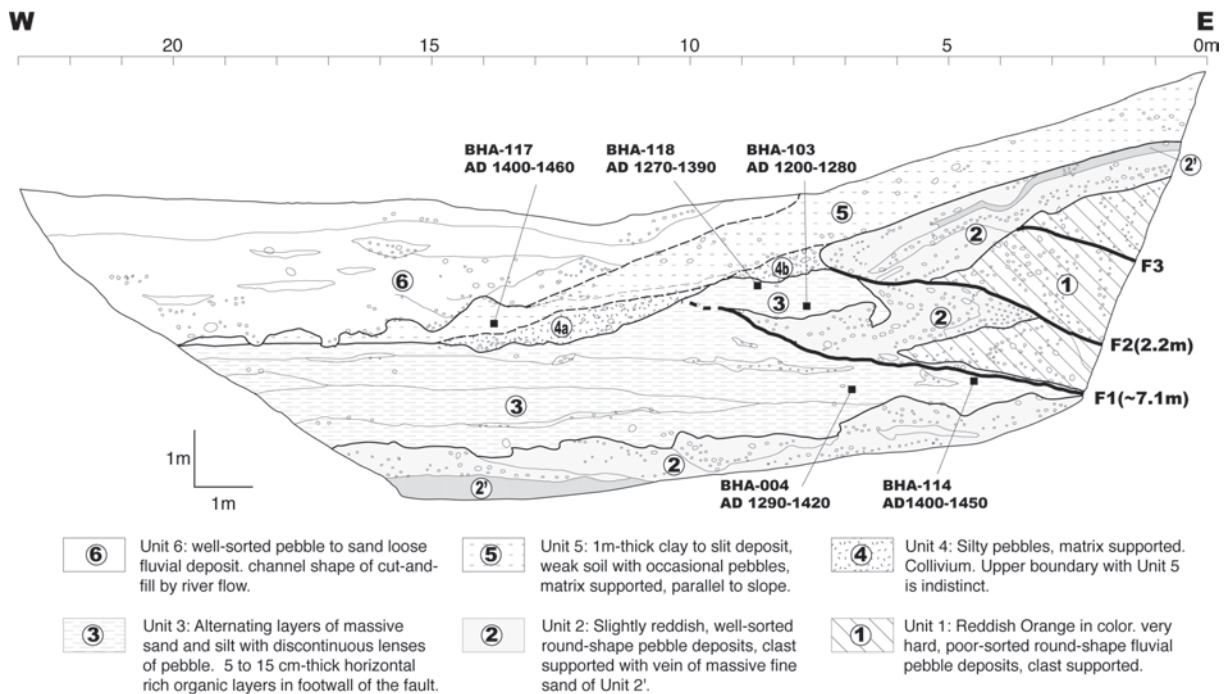


図6 トレンチ壁面のモザイク

4層：シルト質中礫層である。地層は、分布の状態から二つに分けられ4a層と4b層とした。4a層は後述するF1断層の下盤側、4b層はF2断層の下盤側に主に堆積する特徴をもつ。全体的に西側へ向かってやや傾斜した地層である。4層上位から西暦1400-1460年のAMS年代測定値が得られた。

5層：層厚約1mの粘土からシルト質土壌であり、一部に礫が混じる。斜面の勾配に平行な斜面堆積物である。4層や6層との境界は不明瞭である。

6層：チャンネル構造が卓越したよく淘汰された中礫から砂の地層である。

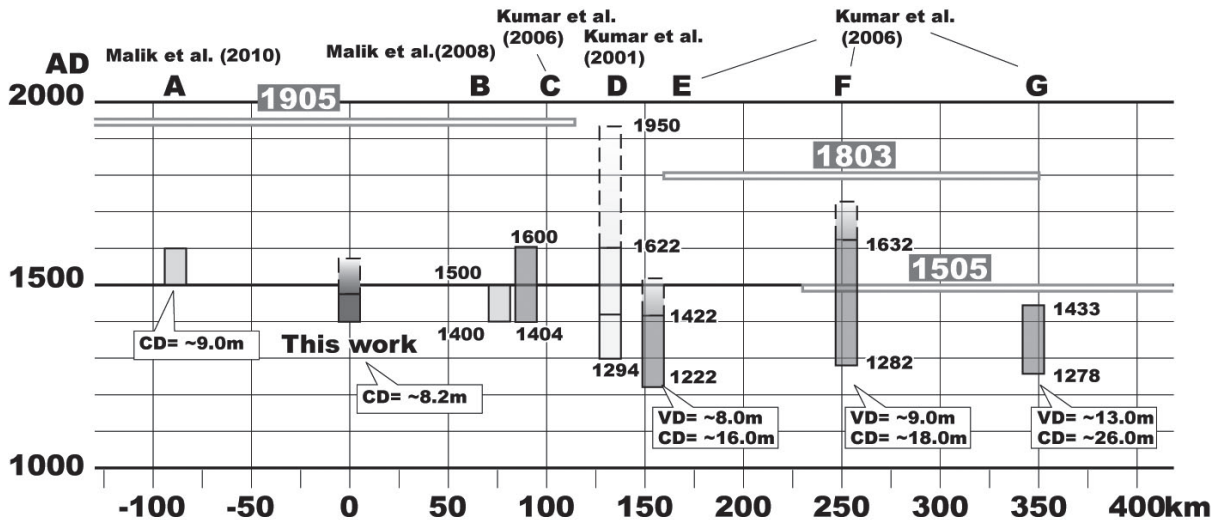


図7 インド北西部ヒマラーヤ前縁に沿ったトレンチ調査結果

表1 AMS年代測定結果

| Location | Sample | Lab Number ^a | $\delta^{13}\text{C}$ (‰) | ^{14}C age ^b ($\pm 2\sigma$) | Calendar Age Range ^c ($\pm 2\sigma$) |
|----------|---------|-------------------------|---------------------------|--|---|
| Unit | BHA-103 | Beta-277869 | -25.7 | 780 \pm 40 | A.D. 1200-1280 |
| Unit | BHA-117 | Beta-277871 | -25.0 | 480 \pm 40 | A.D. 1400-1460 |
| Unit | BHA-118 | Beta-277872 | -24.8 | 680 \pm 40 | A.D. 1270-1320, 1350-1390 |
| Unit | BHA-004 | Beta-279001 | -23.2 | 600 \pm 40 | A.D. 1290-1420 |
| Unit | BHA-114 | Beta-279002 | -24.7 | 490 \pm 40 | A.D. 1400-1450 |

^aSamples are processed and ^{14}C measurement are performed at Beta Analytic Radiocarbon Dating Laboratory.

^bReported ^{14}C ages use Libby's half-life of 5568 years, relative to A.D. 1950.

^cIntCal04 is used for calculation of Calendar Age.

2) 断層構造

トレンチ壁面からは3つの断層面が認められた。すべて東側に向かって緩く傾斜する断層で、下部からF1～3と呼ぶ。

F1: 断層の傾斜は、トレンチ東端では10°であるが、断層の先端付近では20°となる。断層は3層までを明瞭に切断し、4a層に覆われる。断層運動に伴い断層上盤側の地層は褶曲変形をうけて、礫が再配列している。断層上盤側の3層の年代が断層下盤側の年代よりも古いことは、F1によって3層が断層変形を受けたことを示す。

F2: トレンチ東端付近の傾斜は25°であるが、西に向かうにつれ緩くなり水平に近くなる。断層は2層までの地層を変形させ、4層あるいは5層に覆われる。F1によって褶曲変形を受けた1層が切断されていることから、F2はF1の後に生じたことが読み取れる。

F3: 断層の傾斜は18°である。断層は1層を明瞭に変形させ、F3の上盤側の1層の礫層が褶曲変形を受けている。ただし2層には変形が及んでいない。

4 断層発生イベントの検討

1) 最新活動

上述したように、F2 は、F1 によって変形された地層をさらに変形させていることから、F2 の活動は F1 の活動よりも新しいことは確実であり、最新活動は少なくとも F2 の活動といえる。そのため F2 の活動時期を地層の層序から検討する。4b 層が F2 の下盤側に厚く堆積していることを考えると、4b 層は F2 の活動時に発生したオーバーハングした地層が崩落したものか、あるいは一時的に形成した断層崖を埋積した Colluvium である可能性が高い。したがって、F2 の活動は、2 層堆積後、4b 層形成直前に発生したといえる。しかしながら、F2 周辺は 3 層がないため、F2 の活動が 3 層の前後どちらで生じたものかは不明である。

一方、F1 層は、3 層を変形させて 4a 層に覆われている。4a 層は断層下盤側で主に堆積し、上盤側にはほとんど認められないことを考えると、4a 層は 4b 層と同様に F1 の運動時に形成された崩落したオーバーハングの地層か Colluvium と解釈することができる。したがって、F1 の活動は、3 層堆積後、4a 層形成直前に発生したといえる。

以上のように、F1 と F2 の活動は、前後関係が明らかに認められるものの、地層の欠如から両断層の活動間にどのぐらいの時間差があるのかを示すことは難しい。ただし断層運動の直接的な痕跡といえる 4a,4b 層とも近接し 5 層の斜面堆積層と同様に埋積されることを考えると、両断層は同じイベントで生じ、ほぼ前後して破断が発生した可能性が高い。

地層の年代から最新活動時期を議論すると、F1, F2 をともに覆う 5 層の年代が西暦 1400-1460 年であることから、これ以前に発生したといえる。断層変位を受けた地層で最も新しい年代は、F1 の下盤側から採取した炭の年代である西暦 1400-1450 年である。断層を覆う地層の年代値は、地層の年代よりも古い試料が混入する場合が多い。ただし本試料は炭であり、この部分では炭が比較的濃集していることから現地性の可能性が高いと判断した。5 層の年代と 3 層の年代が極めて近いことを考えると、F1 と F2 の時代差はなくほぼ同時に発生したとみなせる。したがって、最新活動時期は 1400-1460 年の間といえる。

この最新活動時期における断層の変位量を検討する。F1 のネットの変位量は 3 層と 2 層の境界を指標として、少なくとも 7.1 m 以上である。一方、F2 のネットの変位量は、約 2.2 m である。従って最新活動時期においては、少なくとも 9.3 m 以上の変位があったことが推定される。

2) それ以前の活動

F3 は、1 層を変形させ 2 層に覆われることから 1 層と 2 層の堆積期間中に断層運動が生じたことが推定される。ただし、1 層と 2 層の境界面に変形が認められないことから、2 層堆積前に断層変位が浸食され境界面が平滑化されたことが考えられ、その変位量は不明である。

5 議論

1) 最新活動時期の変位量に基づく地震規模

Wells and Coppersmith (1994) は世界で発生した 244 個の地震とその起震断層の諸特徴（断層長、単位変位量など）から経験的な関係式を求めている。本研究では、Wells and Coppersmith (1994)

この式を基に、推定される地震の規模（モーメントマグニチュード（ M_w ））を推定した。ただし、本研究では、一地点のデータであることから、本研究で得られた変位量を最新活動時の最大の変位量と見なすこととした。最大変位量と M_w の関係式は下記の式である。

$$M_w = 6.69 + 0.74 \log(MD)$$

ただし、MD は最大変位量を示す。本研究で得られた変位量は 9.3 m を代入すると、 $M_w = 7.4$ が得られ、少なくとも $M_w = 7.4$ 以上の地震が発生した可能性が高い。

2) インド北西部におけるトレンチ掘削調査結果との比較

インド北西部のヒマラーヤ前縁では、これまで7つのトレンチ掘削調査が実施され、最新活動時期について明らかにされている（図7）。本研究の調査地点は、これまで長さ約 180km にわたり空白域だった地点のほぼ中間地点にあたり、パンジャブ州における最新活動に伴う地震の時期や規模を推定する大きな手がかりとなりうる。本研究の調査地点の 90km 南では、HFT の最新活動が 1400 ~ 1500 (Malik *et al.* 2008)、西暦 1404-1600 年 (Kumar *et al.* 2006) であったこと、90km 北では西暦 1500 ~ 1600 年 (Malik *et al.* 2010) であったとされる。本研究で得られた年代もこれらの年代幅に含まれ、同一の活動でこれらの変位が生じた可能性はある。仮に、4箇所地点で明らかになった活動が同一のものとした場合、その長さは 180km に及ぶ。断層変位の長さから予想される地震の規模は、Wells and Coppersmith (1994) の下記の式により、 $M_w = 7.7$ と予想される。

$$M_w = 5.08 + 1.16 \log(SRL)$$

ただし、SRL は断層変位の長さを示す。

6 まとめ

本研究では、パンジャブ州 Bhatpur において、HFT を横切るトレンチ掘削調査を行った。その結果、1400-1460 年頃に HFT の活動があったこと、その際、少なくとも 9.3 m 以上の変位があったことを明らかにした。本研究では、地震の履歴についてインダス文明期の時代に遡ることはできなかったが、パンジャブ州のヒマラーヤ前縁では、少なくとも $M_w = 7.4$ 以上の大地震が過去に生じていたことは確実である。最後の活動から現在まで、550-600 年経過していることを考えると、プレート境界にもかかわらず、比較的長期の静穏期が存在する可能性が高い。インダス文明期においても、おそらく同様に長く続いた静穏期の後、大地震を経験した可能性があり、頻繁に地震が生じなかったことがインダス文明の発展の素地となったのではなかろうか。逆に、巨大地震が発生した結果、河道変化などの理由により、生活環境が激変し。インダス文明が衰退、あるいは都市拠点の移動が生じた可能性もある。

【引用・参考文献】

- Ambraseys, N. and D. Jackson (2003) A note on early earthquakes in northern India and southern Tibet. *Current Science* 84(4): 570–582.
- Kumar, S.G. Wesnousky, T.K. Rockwell, D. Ragona, V.C. Thakur and G.G. Seitz, (2001) Earthquake recurrence and rupture dynamics of Himalayan Frontal Thrust, India. *Science* 294: 2328–2331.
- Kumar, S.G. Wesnousky, T.K. Rockwell, R.W. Briggs, V.C. Thakur and R. Jayangondaperumal (2006) Paleoseismic evidence of great surface rupture earthquakes along the Indian Himalaya. *Journal of Geophysical Research* 111: B03304.
- Malik J.N., T. Nakata, G. Philip, N. Suresh and N.S. Viridi (2008) Active fault and paleoseismic investigation: evidence of historic earthquake along Chandigarh Fault in the frontal Himalayan zone, NW India. *Journal of Himalayan Geology* 29(2): 109–117
- Malik J.N., A.K. Sahoo, A.A. Shah, D.P. Shinde, N. Juyal and A. K. Singhvi (2010) Paleoseismic evidence from trench investigation along Hajipur fault, Himalayan Frontal Thrust, NW Himalaya: Implications of the faulting pattern on landscape evolution and seismic hazard. *Journal of Structural Geology*, Volume 32, Issue 3: 350-361.
- Malik J.N., T. Nakata, G. Philip, N. Suresh and N.S. Viridi(2008):Active fault and paleoseismic investigation: evidence of historic earthquake along Chandigarh Fault in the frontal Himalayan zone, NW India. *Journal of Himalayan Geology* 29 (2): 109–117.
- Wells D.L. and K.J. Coppersmith(1994) New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.84, No.4: 974-1002.