調査報告

CORONA 偵察衛星写真の判読に基づく 2005 年パキスタン地震の 起震断層の認定

Recognition of active faults generating the 2005 Pakistan earthquake based on interpretation of
the CORONA satellite photographs

熊原 康博・中田 高

KUMAHARA Yasuhiro and NAKATA Takashi

本研究では、2005 年 10 月に発生したパキスタン地震 ($M_w=7.6$) の起震断層を明らかにするため、CORONA 偵察衛星写真を用いて断層変位地形の判読をおこなった。その結果、長さ 66 km、北西-南東走向、右横ずれ変位成分をもつ北東側隆起の逆断層タイプの活断層が認められた。活断層の特徴が地震のメカニズム解と整合すること、断層トレースに沿って地表地震断層が生じていることから、この活断層は本地震の起震断層であると認定される。この活断層をバラコットー ガリ (Balakot-Garhi) 断層と呼称する。断層破壊方向と断層トレースの分岐パターンとの関係によると、震源付近から両端に向かって断層破壊が伝播したことが推定され、実際の震源過程と調和している。地震前後の衛星画像から地震に伴う斜面崩壊を抽出すると、震源周辺及び断層トレースから上盤側 5 km 以内に斜面崩壊が多いことが明らかになった。

After the M_w 7.6 2005 Pakistan earthquake, we interpreted the CORONA satellite photographs in the earthquake-hit area to recognize the causative fault. We found a 66 km-long NW-SE striking thrust fault with right-lateral slip components. Because the focal mechanism of the earthquake matched the characteristics of the active fault from the view of its location, strike and slip sense, and also the fieldwork revealed the surface rupture followed the trace of the fault at a lot of places, the fault must be responsible for the 2005 Pakistan earthquake. The middle part of the fault accords with the 16 km-long Tanda fault found by Nakata et al. (1991), however we newly named the fault related to the earthquake as Balakot-Garhi fault by taking names of the major town near the terminus of the fault. According to an empirical theory between the geometric pattern of fault's bifurcation and direction of the rupture propagation, the rupture along the fault might propagate from around Muzaffarabad to its both ends, which is concordant with the rupture process of the earthquake. Based on comparison between the satellite imageries before and after the earthquake, the slope failures triggered by the earthquake were concentrated around Muzaffarabad close to the epicenter, and in the hanging side of the fault within 5 km width from the fault trace.

キーワード： CORONA 偵察衛星写真，活断層，2005 年パキスタン地震，バラコットー ガリ断層，断層
変位地形

Key words: CORONA satellite photograph, active fault, 2005 Pakistan Earthquake, Balakot-Garhi fault,
Tectonic landform

I はじめに

2005 年 10 月 8 日現地時間の早朝、Mw7.6（アメリカ合衆国地質調査所（以下 USGS とする））の大地震がパキスタン北部カシミール地方のムザファラバード (Muzaffarabad) 周辺で発生した (図 1)。この地震によりパキスタン側だけでなくインド側を含め 86,000 人以上の住民が命を落とす記録的な惨事となった。山岳地域であるこの地域では、激しい地震動に伴い、多くの地滑りや斜面崩壊によって住宅が押しつぶされ、道路が寸断されるなど、

物的被害も甚大なものとなった。

USGS によると、この地震の震央は、イスラマバード (Islamabad) から 95 km 北、ムザファラバードから約 20 km 北東、 34.493° N, 73.629° E であった。規模の大きい地震であったこと、震源の深さが 26 km と比較的浅いことから、地震断層が地表に生じている可能性が地震直後から推定されていた。USGS による地震のメカニズム解からは、震源断層は北西-南東走向で右横ずれセンスを含む逆断層と予測されていた。斜面崩壊や被害の大きい集落も、震源地域の北西-南東走向の帯状地域に

図 1 2005 年パキスタン地震の震源地域の活断層、および地震のメカニズム解と余震分布
地震のメカニズム解、および余震分布は、USGS ウェブサイト

(<http://earthquake.usgs.gov/recenteqsww/>)による (2005 年 10 月 18 日閲覧)

Figure 1 Active faults in the epicentral area of the 2005 Pakistan earthquake with its aftershock distribution and focal mechanism

Focal mechanism and aftershock distribution: U. S. Geological Survey website
(<http://earthquake.usgs.gov/recenteqsww/>), browsed on 18th Oct 2005

集中する傾向があった。

多くの研究者は、当初、ヒマラヤ山脈内南部を東西にはしる、過去の収束帯である主境界スラスト (Main Boundary Thrust) 上の活断層の再活動によって、この地震が発生したと捉えていた。この地域の主境界スラストは、北西-南東方向の軸をもつ対曲構造をなしており、小縮尺の地図を見る限り、主境界スラストのトレースにはほぼ一致している。しかし、この付近の主境界スラストの断層面は北西傾斜であるのに対し、地震のメカニズム解からは、地震断層の断層面が北東傾斜であることが想定され、断層面の傾斜の方向が異なっている。一方、我々は、タンダ断層 (Tanda fault) (Nakata et al. 1991) が、この地震の起震断層ではないかと予想した。タンダ断層は、ムザファラバード周辺に発達する更新世の段丘面を切る北西-南東走向の逆断層であり、断層の位置や走向、変位様式の点で、起震断層として適当であった。ただし、断層の長さが 16 km しかなく、地震の規模からいえばかなり短いものであった。

我々は、地震発生直後から、1970 年代初頭に撮影された CORONA 偵察衛星写真を用いて、震源地域の地形判読を実施した。その結果、タンダ断層がさらに北西や南東方向に延びることを明らかにし、このことを速報として発表してきた。その後、パキスタンと日本の合同現地調査によって、我々が見いだした活断層上で地表地震断層が生じたことが明らかとなり (Kaneda et al. 2006), タンダ断層とその延長部が今回の地震の起震断層であることが確実となった。意外なことに、この地震は、ヒマラヤ地域で地表地震断層の出現が確実に認められた最初の地震である。

本論文では、CORONA 偵察衛星写真を用いた判読に基づいて認定された震源地域の活断層を記載し、その特徴を検討する。この検討に先立ち、震源地域のテクトニックセッティングと CORONA 偵察衛星

写真の概要について述べる。

なお、この地震をもたらした断層の名称は、研究者によっては、バラコット-バー断層 (Balakot-Bagh fault), ジェラムスラスト (Jhelum thrust), ムザファラバード断層 (Muzaffarabad fault) と異なっている。我々は、確実に認定できる活断層の両端に位置する大きな町であるバラコットとガリ (Garhi) の名前をとって、この地震をもたらした断層をバラコット-ガリ断層 (Balakot-Garhi fault) と呼ぶ。

なお、本論文は、バラコット-ガリ断層の断層変位地形を記載した Kumahara and Nakata (2006) を基に、起震断層の認定や活断層の特徴を中心にまとめたものである。

II テクトニックセッティング

2005 年パキスタン地震の震源地域を含むカシ米尔地方は、インド-ユーラシアプレートの衝突によって形成されたヒマラヤ山脈西端付近にあたる (図 1)。両プレート間における収束速度は、

HKZ: Hazara-Kashmir Syntaxis, B-GF: Balakot-Garhi fault, JF: Jhelum fault, M: Muzaffarabad

図 2 ヒマラヤ西部の地質構造
Burg ほか (2005) を改変

Figure 2 Simplified geological structure of the western Himalaya
Modified from Burg et al. (2005).

nuvel-1 モデルによると 40～50 mm/yr. (DeMet et al. 1994) と見積もられているが、ヒマラヤ山脈では、その内の 20 mm/yr.程度であるとされる (Bilham et al. 1997) .

この付近の地質構造 (図 2) は、東西にのびる帯状構造で特徴づけられ、これは北から主カラコラムスラスト (Main Karakoram Thrust) , 主マントルスラスト (Main Mantle Thrust) , 主境界スラスト (Main Boundary Thrust) と収束帯が順に南へ移動

した結果とされる (Coward et al. 1982) . 現在では第三紀堆積層とガンジス平原 (Gangatic Plain) を画するヒマラヤ前縁帯活断層 (Himalayan Frontal Fault) がプレート間の収束帯である (Nakata et al. 1991; Yeats et al. 1992) . 2005 年パキスタン地震の震源地域は、モラッセ性の第三紀堆積層と結晶質弱変成岩の境界である主境界スラストに近く、中でも北北西方向を軸とする主境界スラストの対曲構造の西翼近傍に位置する.

A. Map

B. Cross section

図 3 震源地域の地質

パキスタン地質調査所 5 万分の 1 地質図 VI 巻, 13, 14, 16, 17 号をもとに作成.

Figure.3 Geology of the epicentral area

After 1:50,000 Geological Map Series Vol.VI, No.13, 14, 16 and 17 published by the Geological Survey of Pakistan

パキスタン地質調査所が作成した詳細な地質構造図をみると、ムザファラバードから北部では、インド地殻の基盤を構成する先カンブリア紀の地層（ムザファラバード層）が露出する（図3）。一方、ムザファラバードから南では、中新世前期の堆積層であるムレー（Muree）層とその上位層のカムリアル（Kamlial）層が発達する。両地層とも砂岩主体であるが、ムレー層にはシルト岩、頁岩などを含む。

なお、ムザファラバードから南にジェラム川に並走してのびるジェラム断層（Tapponnier et al. 2006）は、主境界スラストの断層面を利用した活断層である。断層トレースに沿っては河谷が系統的に左にずれており、左横ずれが卓越する活断層とみられる。

ヒマラヤ周辺の比較的規模の大きい地震をまとめたリスト（Ambraseys and Douglas 2004）によると、震源地域周辺では1555年、1842年、1878年、1885年、1974年にそれぞれマグニチュード6以上の地震が発生している。ただし、震源地域から最も近い1878年（M6.8、アボッタバード（Abbottabad）周辺）の地震でさえ、震源から60 km 離れている。このことから、今回の地震は、少なくとも500年以上にわたり蓄積されてきた地殻の歪みによって発生したと考えられる。

III CORONA 偵察衛星写真の概要

本研究では、震源地域の活断層や地形面を認定するために、CORONA 偵察衛星写真の実体視判読を行った。CORONA 偵察衛星写真は、1950～70年代のいわゆる冷戦中に、アメリカ合衆国が旧共産圏及びその周辺諸国を中心に撮影した軍事偵察目的の写真であり、1996年から一般に有償で公開されている¹⁾。CORONA 偵察衛星写真は、1959年から1972年までのCORONA プロジェクトで得ら

れた衛星写真の総称であり、運用期間や仕様の違いなどによりキーホール（Key Hole (KH)）-1, 2, 3, 4, 4A と 4B に細分される。それぞれのキーホールは、衛星を打ち上げるごとに付されるミッション番号でさらに細分される。なお、衛星を回収できない場合や何らかのトラブルにより衛星写真が得られていない場合、そのミッション番号は欠番となる。

CORONA 偵察衛星写真はモノクロである。このうち、KH-4, 4A と 4B では、2つのカメラが衛星に搭載され、互いのカメラが約30°異なる角度で固定されている（図4）。そのため、異なる角度から同じ地域を撮影したペア写真が入手でき、地表のステレオ画像を得ることができる。特に、CORONA プロジェクトの最後の活動に当たるKH-4B では、最大1.8 mの空間解像度をもつ高解像度の写真を撮影している。KH-4B の写真1枚の

図4 CORONA 偵察衛星写真 KH-4B の概要
Figure 4 Outline of the KH-4B CORONA satellite photographs

大きさは縦 7 cm, 横 80 cm であり, これは縦約 14 km, 横約 188 km の地上範囲に相当する. 一般的に南北方向に撮影するため, 縦が南北, 横が東西にあたることが多い. なお, 写真の中央部ではほぼ鉛直方向から撮影しているため歪みが小さく, 実体視判読が容易であるが, 横方向に長いフィルム両端に向かうほど俯瞰したアングルとなり, 歪みの影響で実体視判読が困難となる.

本研究で使用した CORONA 偵察衛星写真は, 1971 年 9 月 15 日に撮影された KH-4B に該当する高解像度のものであり, ミッション番号は 1115-1 である. このミッションの写真は, プレがなく, 雲がほとんどないため, 地表の様子を詳細に捉えている. さらに震源地域はちょうど写真中央部にあたるため, ほぼ鉛直方向から撮影された写真を利用することができ, 実体視判読が容易であった.

今回地震が発生したカシミール地方は, その帰属を巡りインドとパキスタン両国間で衝突が繰り返された地域にあたるため, 活断層研究で必要不可欠な資料である航空写真の入手は極めて困難と

いえる. しかし, コロナ偵察衛星写真は, このような国際的な紛争地域もくまなく撮影しており, 活断層研究をはじめとする地形学的な研究に極めて有用なツールとなりうる (熊原・中田 2000).

IV バラコットー ガリ断層の変位地形

バラコットー ガリ断層の変位地形について, 便宜的に 3 つの地域 (ムザファラバード周辺, 北部地域, 南部地域) にわけて (図 5), その記載をおこなう. なお, 本稿では断層変位の特徴を典型的に示す地形のみを記載するにとどめており, 断層変位地形の詳細な記載については, Kumahara and Nakata (2006) を参照されたい.

断層変位の重要な変位基準となる段丘面の区分・対比は, 以下のような手順で行った. まず, ジェラム川やその支流沿いに発達する極めて連続性のよい段丘面を中位段丘 (Middle Terrace) とした. この段丘面は, 開析谷が発達しているものの, 面の保存はよい. それよりも数 10 m 程度高位に位置し, 尾根上に発達する段丘面や, 面の形状をわずかに保持している段丘面を高位段丘 (Higher Terrace) とした. 一方, 中位段丘よりも, 10 数〜数 10 m 程度低位にあり, 開析谷がほとんどなく連続的に発達するものを低位段丘 (Lower Terrace) とした. このように流域全体を 3 つの段丘面に大きく区分した. さらに地域ごとに発達する比高差数 m 程度の段丘面を細分し, 中位段丘 1 (Middle Terrace 1) と数字を付した. ムザファラバード周辺やバラコット周辺など, 中位段丘と低位段丘の間に多くの段丘面が発達し, 正確に区別することが難しい地域もあった. 断層の長期的な活動性を定量的に把握するためには, 段丘面の正確な対比と年代を決定する必要がある. 段丘面の厳密な対比は今後の課題といえる.

1. 北部地域 (バラコットームザファラバード)

バラコットからムザファラバードにかけては, 断層トレースは山地の西側斜面の山地と丘陵の境界にあたる傾斜変換線に沿って分布する. この区間の断層トレースは, バラコット周辺を除いて全

図 5 バラコットー ガリ断層のインデックス
Figure 5 Index map of the Balakot-Garhi fault

般に不明瞭である。

確認できる断層トレースの北端は、バラコットの北北西約 4 km の地点である。バラコットの北北西約 2 km にあるケツアラシュ (Khetsarash) では、離水した蛇行状の河道跡を断層トレースが横切っており、河道上に比高約 20 m 東側隆起の低断層崖が形成されている。

バラコット周辺では、北に向かって複数の断層トレースが分岐する (図 6)。ほとんどの建築物が倒壊し、多数の死者が生じたバラコット市街地の丘陵 (図 7) は、北北西に延びる分岐断層に向かって約 20° 傾動する河成段丘起源の地形面とみられる。さらに、バラコットの北では、低位段丘面上に、長さ 200 m 程度の並走する 2 本の断層トレースが形成する地溝状の断層変位地形も認められる。パトラー (Battorah) では、断層トレースが山地と丘陵の境界に延びる主断層と、丘陵の中を直線的に延びる副次的な断層に分岐する。北西にのびる副次的な断層に沿っては、段丘面の上流側が低下する逆向きの低断層崖が形成されている。ジャビ (Jabbi) では、断層トレース上で河谷が系統的に右横ずれしている。

2. ムザファラバード周辺

バラコットー ガリ断層のほぼ中央に位置するムザファラバード周辺では、断層トレースの平面形は、ニラム (Nilam) 川付近で大きく北に向かって湾入する複雑な形状をもつ (図 8, 9)。最も典型的な断層変位地形は、ムザファラバードの北約 2 km にあるバンディミールフムダニ (Bandi Mir Humdani) で認められる。ここでは、ニラム川沿いに形成された高さの異なる少なくとも 5 段の段丘面が発達している (図 10)。断層トレースは、ニ

Legend

- Red solid line indicates active fault trace
- Red broken line indicates indistinct trace of active fault
- Arrows indicate direction of horizontal slip motion
- Comb indicates down-thrown side along the faults
- Arrows indicate flexure scarp
- Spindle-shaped line with two-headed arrows indicates active folding on surface
- Black dot line indicates stream offset by faulting
- Black broken line indicates lineament presumed to be active

図 6 バラコット周辺の断層変位地形
Figure 6 Tectonic landform around Balakot

図 7 地震後のバラコット市街地の丘陵
Figure 7 The Balakot hill after the earthquake

図 8 ムザファラバード周辺の断層変位地形
Figure 8 Tectonic landform around Muzaffarabad

図 9 ムザファラバード周辺の段丘区分
Figure 9 Classification of fluvial terraces around Muzaffarabad

ラム川に対してほぼ直交しており、これらの段丘面が変位を受けて、北東隆起の明瞭な断層崖が形成されている。これらの段丘面は、高位の段丘ほど断層崖の比高が大きく、このトレースに沿って繰り返し断層変位が生じていることがわかる。さらに、断層崖より上流側では、中位段丘 1 と 2 がともに上流側に向かって傾斜し、低位段丘 1 の勾

図 10 バンディミールフムダニ周辺の断層変位を受けた段丘面群
Figure 10 Deformed terraces in Bandi Mir Humdani

図 11 バンディミールフムダニにおける断層変位を受けた段丘の縦断面
測線は図 9 にしめす。

Figure 11 Profile of terraces across the fault scarp in Bandi Mir Humdani

Location of the profile is shown on Figure 9

配もほぼ水平でニラム川の河床勾配よりも緩やかである（図 11）。したがって、この地域の変位地形からは、北に傾斜する低角な逆断層が想定される。地震断層を横切るトレンチを掘削した調査（近藤 2006）では、これを支持する断層露頭が認められた。なお、地震断層は、この断層崖の直下、あるいはやや南側に出現し、高さ約 2~3 m の崖として認識される（Kaneda et al. 2006）。

バンディミールフムダニより北西では、断層トレースが北東-南西走向に変化し、断層トレース上では、河谷が系統的に左に屈曲している。断層トレースは西に向かって分岐する形状となる。さらに北西では、北西方向に延びる直線的な谷が続くものの、バットランド化した崩壊地形によって断層トレースの正確な位置を認定することは難しい。

一方、バンディミールフムダニより南東では、河谷が右に屈曲するとともに、明瞭な三角末端面

が認められる．さらに南東に向かっては，ジェラム川本流右岸に沿って発達する段丘面が撓曲変形している．

このように，バンディミールフムダニ周辺では断層トレースが複雑に湾曲し，かつ，走向の変化に伴い横ずれ変位が逆転する特異な断層トレースをなしている．

3. 南部地域（ムザファラバードーガリ）

ムザファラバードからガリまでのジェラム川本流の右岸に沿っては，現河床から比高 50m 程度の中位段丘が連続的に広く発達している．また現河床から比高数 m 程度の低位段丘が，ジェラム川本流や本流に注ぐ支流に沿って認められる．一方，高位段丘は尾根上に点在する．断層トレースはジェラム川の右岸にほぼ平行に認められ，高さの異なるこれらの段丘面が北東側隆起の累積的な断層変位を受けている．

セリカタ (Sehli Katha) では，写真判読によって認定された活断層トレース上に，地震断層が出現していることが，現地調査 (Kaneda et al. 2006) によって明らかにされた．一部では，北東側隆起の垂直変位だけでなく，河谷の系統的な右屈曲も認められる．マルシペイン (Malsi Pain) では，低位

図 12 マルシペインにおける活断層と段丘区分
Figure 12 Active fault and classified terraces around Malsi Pain

図 13 マルシペインの断層崖
Figure 13 Fault scarp in Malsi Pain

段丘・中位段丘・高位段丘がそれぞれ累積的に北東側隆起の断層変位を受けている (図 12, 13)．マッラダドゥ (Marra Dadu) では中位段丘が約 23 m の北東隆起の断層変位を受けている．ガリから南東においても，さらに約 10 km にわたって北東側隆起の断層変位が認められる．その途中で断層トレースはジェラム川を左岸へとわたる．バガサル (Bagasar) では，ジェラム川へ注ぐ支谷に発達する段丘面が変位し，支流の流向（東流）に対して逆向きにあたる西向きに断層崖が形成されている (図 14)．これより南東にあるチッカル (Chikar) からバー (Bagh) では，長さ約 23 km にわたって，サブヒマラヤ堆積岩の層理面がなすリニアメントが発達するものの，段丘面の変位や河谷の屈曲など活断層の存在を示す明確な断層変位は認められない．

図 14 バガサル周辺の活断層と段丘区分
Figure 14 Active fault and classified terraces around Bagasar

V 議論

1. 活断層の特徴

CORONA 偵察衛星写真を用いた地形判読から認められたバラコットー ガリ断層の特徴を以下にまとめた。

1) 長さ走向

変位地形を伴う活断層として認められる断層の長さは、バラコットの北からガリの南方約 15 km 南までの約 66 km である。さらにチッカールからバーまでのリニアメントの範囲も含めると約 89 km となる。

バラコットからガリまでのおおよその走向は、北西-南東である。詳細にみると、ムザファラバードの約 10 km 北西にあたるバトラー周辺を境に、その南北で走向が変化する。北部のバラコットからバトラーからまでの走向は N60°E である。一方、バトラーから南部は、ムザファラバード周辺で断層トレースが局地的に大きく北に向かって湾入するものの、チッカール、さらにはバーまでは、ほぼ N45°E を示す。

2) 変位様式

ムザファラバードからチッカールまでは、北西-南東走向の断層線に沿って、北東側隆起の低断層崖や撓曲崖が連続し、かつ系統的な河谷の右屈曲が発達することから、右横ずれ成分をもつ北東傾斜の断層面をもつ逆断層であると想定される。ムザファラバードから北部でも同様に、河谷の系統的な右屈曲と北東側隆起の低断層崖が認められるが、垂直変位を示す変位地形は少なく、むしろ右横ずれを示す変位地形が多い。

ムザファラバード周辺では、断層トレースの走向が 90°変化し、局地的に北東-南西走向となり左横ずれ変位を示す。これは、断層トレースが一般的な断層トレースの走向に直交する圧縮性ジョグの形状といえる。

3) 地質構造との関係

バラコットー ガリ断層と地質構造の関係は、ムザファラバードを境に南北 2 つのタイプに区分できる (図 3 参照)。ムザファラバードより北部では、断層を境に、上盤側にインド地殻の基盤をな

す先カンブリア紀の地層、下盤側に中新世前期の堆積層が分布する。この関係からバラコットー ガリ断層の長期にわたる活動によって、先カンブリア紀の地層の上に不整合に堆積していた中新世前期の堆積層が剝離され、先カンブリア紀の地層が断層上盤側の地表に露出したと考えられる。

一方、ムザファラバードより南部では、断層トレースは中新世前期の堆積層中にのびている。ただし、断層は中新世前期の堆積層中のムレー層とカムリアル層のおおよその境界に沿って発達していることから、断層は両地層の層理面を利用して活動していると考えられる。

以上地質構造と断層トレースの位置関係から、本断層は、過去の収束帯である主境界スラスト上の活断層ではなく、サブヒマラヤ内で発達する活断層であるといえる。

2. 2005 年パキスタン地震の起震断層の認定

パキスタンと日本の合同野外調査 (Kaneda et al. 2006) によると、バラコットー ガリ断層に沿って地表地震断層が認められることと、地表地震断層の変位様式と活断層のそれがほぼ一致していることから、本断層が 2005 年パキスタン地震の起震断層であるといえる。

また、変位地形を伴う 66 km の範囲は、パキスタンと日本の合同野外調査によって地震断層が認められている範囲にほぼ相当する。したがって結果論となるが、地震前に CORONA 偵察衛星写真を用いてこの断層を判読していたとすると、今回の地震断層に相当する範囲を認定することは可能であったといえる。モーメントマグニチュードと断層長の経験的な関係 (Wells and Coppersmith 1994) に基づくと、今回の断層長 66~89 km からは、Mw 7.2~7.3 の地震が予想される。しかし、この断層の活動によって、実際に発生した地震は Mw 7.6 であった。これは、そもそもこの経験式から外れた地震である可能性と、起震断層が地下でさらに延びている可能性が想定される。

3. ジェラム断層の特徴とバラコットー ガリ断層との関係

ジェラム川に沿って南へのびるジェラム断層は、一見すると、バラコットー ガリ断層から分岐した断層のように見える（図 1 参照）。特にジェラム断層の北端にあたるムザファラバード付近では、両断層が最も近接しており、その距離は約 500 m しかない。

しかし、ジェラム断層は左横ずれ変位が卓越する断層であり（Tapponnier et al. 2006），バラコットー ガリ断層とは変位の向きが逆である。地質断面図（図 3 B 参照）に示すように、ジェラム断層は主境界スラストの断層面を利用して活動している。両断層は、地表付近では近接するものの、断層面の傾斜の向きが相反しており、地下深くなるほど両断層の距離は離れる。今回の地震では、ジェラム断層に沿って地表地震断層が出現したとする報告がないことから、両断層は異なる断層系であるとみられる。

なお、筆者らの地形判読によると、断層の北端にあたるムザファラバード周辺から、南に向かって長さ約 50 km にわたって発達していることが明らかになった。

4. 断層トレースの分岐パターンから推定される断層の破壊伝播モデル

地震に伴う破壊の伝播方向は、地表での地震動の強さに関連し、結果として地震被害の程度に強く影響を及ぼす。そのため、破壊の方向を事前に推定することは、地震被害の軽減に大きな役割を果たすと考えられる。中田ほか（1998）は、これまで出現した地震断層を対象に、トレースの分岐パターンと破壊の伝播方向に一定の関係があることを見いだした。すなわち、破壊は、開始地点から両末端に向かって進み、末端に向かって開く分岐が生じることから、地表における破壊の痕跡である断層トレースも同様の分岐パターンを持つという関係であり、逆に断層トレースの分岐パターンから破壊の開始位置と伝播方向を推定できるとするアイディアである。ここでは、中田らのモデルを用いて、断層トレースの分岐パターンからみたこの断層の破壊の伝播方向を検討する。

バラコットー ガリ断層の幾何学的な平面パター

ンは、バトラーから北では、北に向かって分岐するトレースをもち、特にバラコット周辺では複数に分岐するがすべて北に向かって分岐している（図 15）。一方、ムザファラバードから南では、分岐断層の長さは短いものの南東にむかって分岐している。ガリ周辺では、明瞭に南へ南東に向かって分岐している。このように、バラコットー ガリ断層は、認定した断層トレースの範囲で両端に向かって分岐するという特徴をもち、分岐の向きが逆転する境は、ムザファラバード周辺となる。この断層の震央と断層トレースが最も近接するのはムザファラバード周辺であり、断層の破壊がムザファラバード周辺から生じたと考えることと整合的である。また、破壊の伝播は、ムザファラバード付近から両末端に向かって進んだと考えられる。

ムザファラバード付近では、断層トレースが一般的な断層トレースの走向に直交する圧縮性ジョグの形状となっており、圧縮性ジョグが破壊の開始点であるという佃（1991）の指摘とも整合的である。

図 15 バラコットー ガリ断層の平面形と破壊伝播方向

Figure 15 Geometry of the Balakot-Garhi fault and direction of rupture propagation

5. 地殻変動モデルと断層トレースの関係

Fujiwara et al. (2006) は、地震前とその後の ENVISAT データによって導かれる SAR の解析から、地震に伴う広域的な地殻変動を明らかにしている (図 16)。この文献によると、地殻変動が最も著しい地帯は、バラコット-ガリ断層の地表トレースから北東側の近傍周辺に一致している。一方、この断層の南西側では、断層に伴う地殻変動が全く検出されていない。すなわち、バラコット-ガリ断層-ガリ断層が境となってコサイスマミックな地殻変動が規定されており、このことは、Kaneda et al. (2006) と同様、本断層が 2005 年パキスタン地震の起震断層であることを裏付けるものといえる。

SAR の解析では、本研究で最近の地質時代に活動した証拠が認められない南部のリニアメントに沿っても、コサイスマミックな地殻変動を検出しており、断層変位が地表に生じている可能性がある。

6. 断層トレースと斜面崩壊の関係

地震発生前後の震源地域を撮影した画像を比較することで、地震時に発生した斜面崩壊のみを抽出することが可能となる。本研究では、地震発生前に撮影された CORONA 偵察衛星写真と、地震後の 10 月 27 日に撮影された SPOT5 画像を用いて、

図 16 SAR 画像解析によるコサイスマミックな地殻変動と断層トレース (Fujiwara et al. 2006)

Figure 16 Coseismic crustal deformation of the 2005 Pakistan earthquake by SAR image matching, with the fault trace (Fujiwara et al. 2006)

斜面崩壊地形を抽出して両者の比較をおこなった。それによると、以下のことが明らかとなった (図 17)。

- ・この地震に伴う大規模な斜面崩壊はムザファラバード周辺に集中している。
- ・多くの斜面崩壊は、断層トレースから幅約 5 km 以内で生じている。
- ・断層トレースの上盤側にあたる北東側で斜面崩壊が多い。

斜面崩壊は、地震動の強さだけでなく地表の傾斜や地質の違いなど様々な要因が複雑に影響しているが、今回の地震では、断層の上盤側にあたる震源に近い地域で斜面崩壊が多いことが明らかとなった。また、ムザファラバード北部は、SAR の解析ではコサイスマミックな地殻変動が著しい地域にあたるが、斜面崩壊が特に集中する地域ともなっている。これは、同じ地質及び地形条件である周辺地域よりも斜面崩壊の集中が著しいことから、斜面崩壊の発生が地震動だけでなく、地殻変動の影響も受けていることが推察される。

図 17 地震に伴う斜面崩壊の分布

Figure 17 Distribution of landslides triggered by the earthquake

V おわりに

本研究では、2005 年パキスタン地震の起震断層を明らかにするため、震源地域を対象に CORONA 偵察衛星写真を用いて断層地形の判読をおこない、長さ 66 km、北西-南東走向、右横ずれ変位成分をもつ北東側隆起の逆断層タイプのバラコット-ガリ断層を認定した。本断層は、その走向や変位様式が地震のメカニズム解と整合することや、断層トレースに沿って地表地震断層が生じていること、バラコット-ガリ断層が境となるコサイスマックな地殻変動が認められることから、2005 年パキスタン地震の起震断層といえる。

今後、トレンチ掘削調査などによる本断層の活動履歴と、段丘面の編年や段丘面の絶対年代によるより長期的な断層活動の解明が待たれる。

謝 辞

本論文の執筆にあたっては、名古屋大学環境学研究所 鈴木康弘先生には、その機会を与えて頂いた。匿名の査読者には論文を改善する丁寧な指摘を頂いた。記してお礼申し上げます。

本論文は、平成 18 年度広島大学研究支援金、および平成 18 年度文部科学省科学研究費補助金(若手研究(B))(研究代表者:熊原康博)、課題番号 18700684)の一部を利用した。

注

1) <http://edcscns17.cr.usgs.gov/EarthExplorer/>

このサイトでは、必要な範囲について衛星写真の有無だけでなく、写真のプレビュー画像で雲の有無、写真のブレなどが確認した上で、購入できる。公開当初は、画像データはポジ・ネガフィルムあるいは印画紙の媒体であった。現在では、インターネットを通じた Tiff 形式のスキャン画像のダウンロード、もしくは画像データを入れた CD や DVD の送付へと変わっている。

(2007 年 2 月 22 日受付 2007 年 3 月 7 日受理)

文 献

- 熊原康博・中田 高 2000. 発展途上地域における米軍偵察衛星写真の地形学的研究への応用. 地誌研年報 9: 129-155.
- 近藤久雄 2006. 2005 年パキスタン地震の古地震学的背景. AFRC NEWS No.57: 1-3.
- 佃 栄吉 1991. 断層の幾何学的バリアと破壊プロセス. 地学雑誌 100: 417-438.
- 中田 高・島崎邦彦・鈴木康弘・佃 栄吉 1998. 活断層はどこから割れ始めるのか?—断層の分岐形状と破壊伝播方向—. 地学雑誌 107: 512-528.
- Ambraseys, N.N., and Douglas, J. 2004. Magnitude calibration of north Indian earthquakes, *Geophysical Journal International* 159: 165-206.
- Bilham, R., K. Larson, J. Freymuller, and Project Idylhim Members, 1997, Indo-Asian convergence rates in the Nepal Himalaya. *Nature* 386: 61-67.
- Burg, J.-P., Célrier, C., Chaudhry, N.M., Ghazanfar, M., Gnehm, F., and Schnellmann, M. 2005. Fault analysis and paleostress evolution in large strain regions: Methodological and geological discussion of the southeastern Himalayan fold-and-thrust belt in Pakistan. *Journal of Asian Earth Sciences* 24: 445-467.
- Coward, M.P., Jan, M.Q., Rex, D.C., Tarney, J., Thirlwall, M., Windley, B.F., 1982. Geotectonic framework of the Himalaya of N. Pakistan. *Journal of the Geological Society of London* 139: 299-308.
- DeMets, C., Gordon, R.G., Argus, D.F., and Stain, S., 1994. Effect of recent revisions on the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophysical Research Letters* 21: 2191-2194.
- Fujiwara, S., Tobita, M., Sato, H.P., Ozawa, S., Une, H., Koarai, M., Nakai, H., Fujiwara, M., Yurai, H., Nishimura, T., and Hayashi, F. 2006. Satellite data gives snapshot of the 2005 Pakistan earthquake. *EOS* 87: 73-77.
- Kaneda, H., Nakata, T., Tsutsumi, H., Kondo, H., Sugito, N., Awata, Y., Akhtar, S.S., Majid, A., Khattak,

- W., Awan, A.A., and Yeats, R.S. 2006. Surface rupture of the 2005 Kashmir, Pakistan, earthquake and its active tectonic implications. *Eos Trans. AGU Fall Meeting Supplement* 87(52), Abstract T31G-05.
- Kumahara, Y., and Nakata, T. 2006. *Active faults in the epicentral area of the 2005 Pakistan earthquake*. Research Center for Regional Geography, Hiroshima University Special Publication No.41.
- Nakata, T., Tsutsumi, H., Khan, S.H., and Lawrence, R.D. 1991. *Active Faults of Pakistan, map sheets and inventories*. Special Publication, Research Center for Regional Geography, Hiroshima University Special Publication No.21.
- Tapponnier, P., King, G., and Bollinger, L. 2006. Active faulting and seismic hazard in the western Himalayan syntaxis, Pakistan. Extended abstract of international conference on 8 October 2005 Earthquake in Pakistan: Its implication & hazard mitigation: 6-7.
- Wells, D.L., and Coppersmith, K.L. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, *Bulletin of the Seismological Society of America* 84: 974-1002.
- Yeats, R.S., Nakata, T., Farah, A., Fort, M., Mirza, M. A., Pandey, M.R., and Stein, R.S. 1992. The Himalayan frontal fault system. *Annales tectonicae* VI: 85-98.

<著者略歴>

熊原 康博（くまはら やすひろ）

1975年生まれ。広島大学大学院文学研究科博士課程後期地理学専攻修了。博士（文学）。広島大学総合博物館助手。専門は自然地理学・変動地形学。現在、ネパールにおける活断層の活動履歴の解明に取り組む。

中田 高（なかつ たかし）

1942年生まれ。東北大学大学院理学研究科博士課程地学専攻修了。理学博士。広島工業大学環境学部教授。専門は自然地理学・変動地形学。日本、アジア各地をフィールドとして活断層研究をおこなう。著書に中田 高・今泉俊文編『活断層詳細デジタルマップ』（東京大学出版会）。