

11 - 9 人工衛星によるパキスタン北部地震の地殻変動の検出

The Crustal Deformation of the Northern Pakistan Earthquake of 8 October 2005 Detected by a Satellite

国土地理院
Geographical Survey Institute

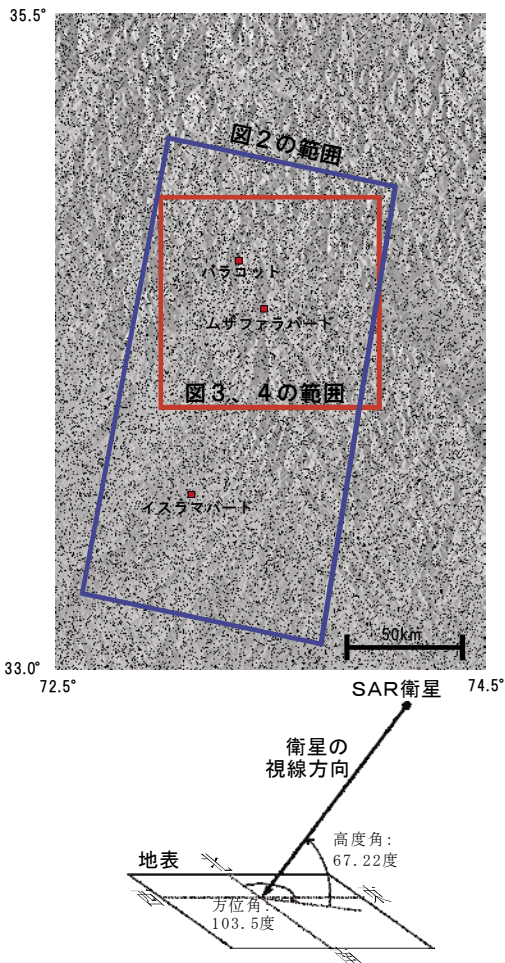
人工衛星によるデータを用いて、10月8日にパキスタン北部で発生した地震（M7.6）の地殻変動を詳細に捉えた。

欧州宇宙機関の ENVISAT（エンビサット）の合成開口レーダー（SAR）データを用いて面的な地殻変動を求めたところ、観測された地殻変動が1 m以上になる地域は震源の北西から南東にかけて帯状に約90kmつながっていることがわかった（第1～4図）。最大の地殻変動は、甚大な被害が発生したムザファラバード北部にあり、隆起量に換算すると6 mほど隆起していることがわかった（第5・6図）。

震源地付近には、北東側隆起、右横ずれ（南西側から見て北東側が南東方向に水平移動）の活動を示す北西－南東方向に延びる活断層があることが知られている。検出された地殻変動はこの活断層に沿っており、変動の向きも整合することから、この活断層が活動したことがわかった（第5・6図）。また、モデル計算から、断層が最大約9 mすべったことがわかった（第7図）。

一方、別の高分解能衛星画像から地震に伴う斜面崩壊を抽出したところ、活断層に沿って、その北東側に斜面崩壊が集中していることがわかった（第8・9図）。

参考 URL <http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/pakistan/>



第1図 各画像の範囲

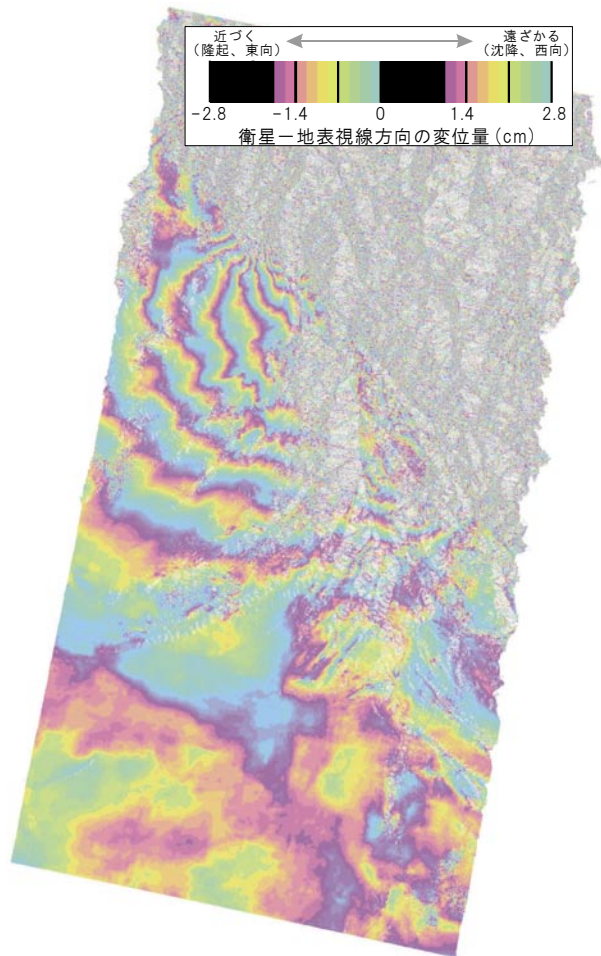
○測定方向 (第1図下)

- ・ENVISATは、東南東側の上空、斜め上方方向からの観測を行い、人工衛星-地表間の視線方向に沿った地殻変動を検出しており、各方向(上下、東西、南北)の変動量は直接求めている

Fig.1 Region of each image

○Measuring direction (bottom figure)

- ・ENVISAT had done observations diagonally downward in the East-Southeast above the target and detected the deformation in the line-of-sight direction between the satellite and the ground surface. The displacement in each direction (North-South, East-West and Up-Down) has not been figured out directly.



第2図 干渉 SAR 画像

○利用データ

- ・人工衛星: ENVISAT (エンビサット) [欧州宇宙機関 (ESA)]
- ・データ日時: 地震前 2005年9月17日, 地震後 10月22日

○干渉 SAR

- ・縞模様が混み合っている場所ほど大きな変動があった場所
- ・図中央付近で約 25cm 衛星方向に近づいた
- ・測定精度が高い (~数 cm) もの、変動が数 m を超えたり、地形が急峻になると計測できない

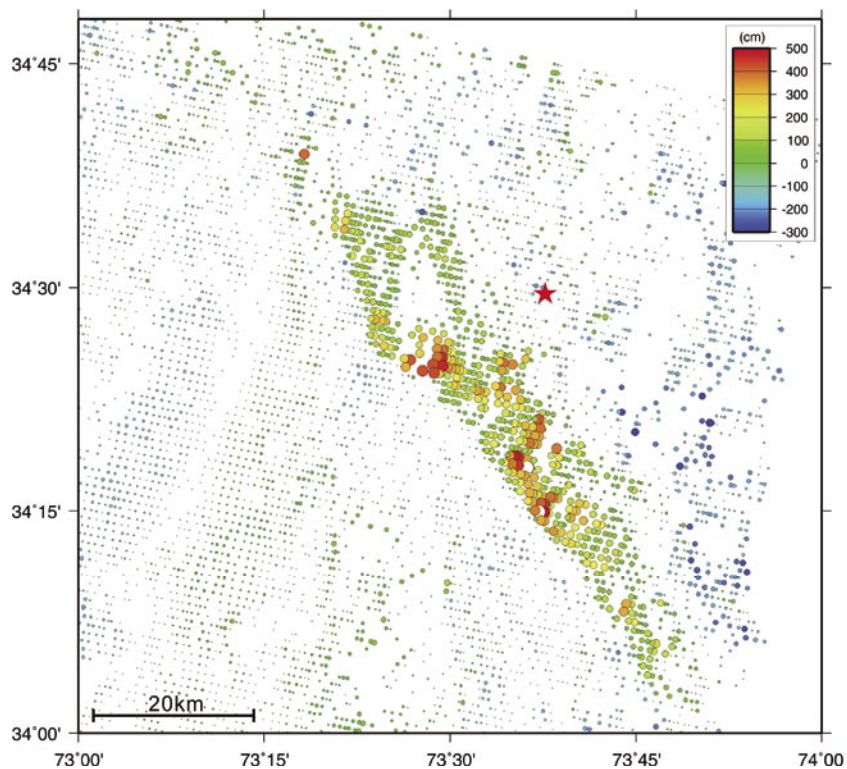
Fig.2 InSAR image

○Data source

- ・satellite: ENVISAT of The European Space Agency (ESA)
- ・observation date: Sep 17, 2005 (before the earthquake), Oct 22, 2005 (after the earthquake)

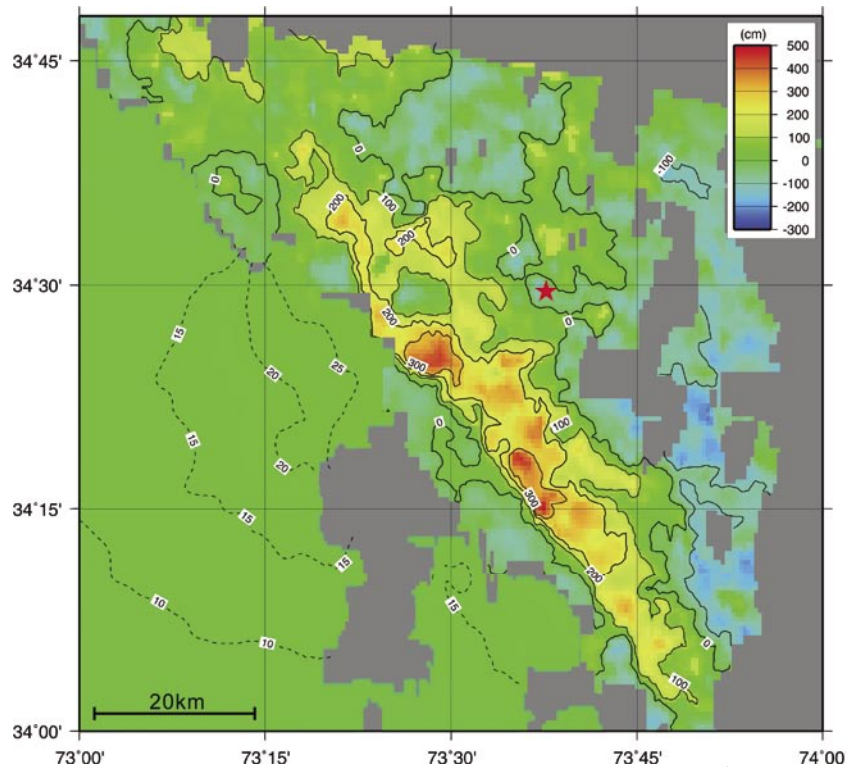
○InSAR (Synthetic Aperture Radar Interferometry)

- ・The finer color pattern, the greater deformation it is.
- ・The place near the center of Fig.2 came approx. 25-cm closer the satellite.
- ・This technique has high measurement accuracy (~a few cm) but is not available to measure more than several-meter deformation or precipitous terrains.

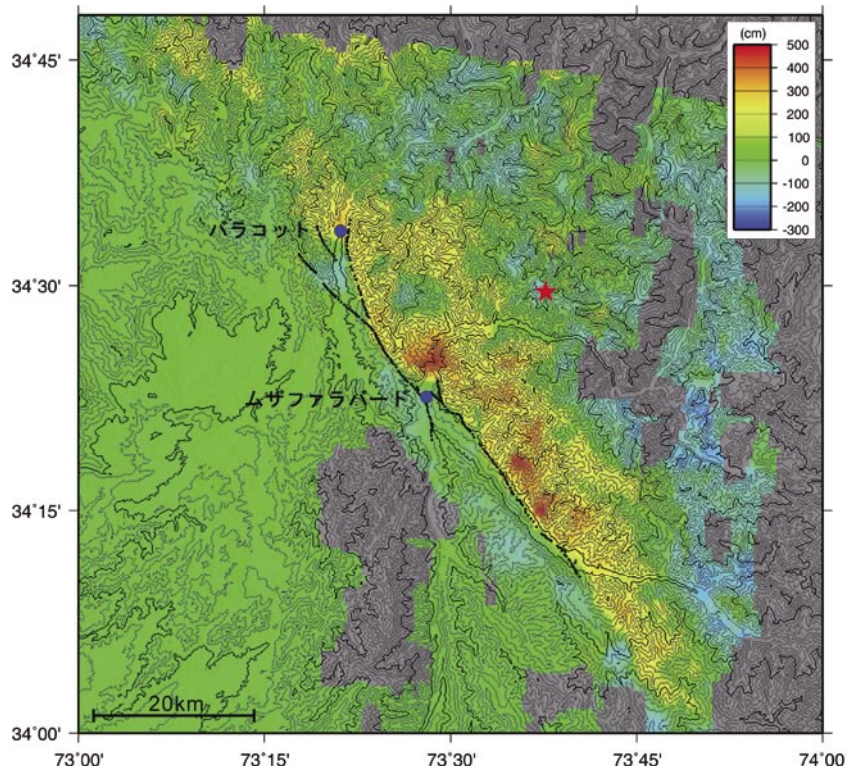


第3図 2枚の SAR 画像のずれを利用した変位検出(衛星-地表視線方向の変動量:cm, ★:USGSによる震源位置)
 ・国土地理院で開発した手法で、測定精度は落ちる(～1m)ものの、干渉 SAR で計測できなかった北東側で数mを超えるような地殻変動が帯状に広がることを捉えた。

Fig.3 Displacement detection using the difference between 2 SAR images(line-of-sight surface displacement: cm, ★ : the epicenter by USGS)
 ・ This method, developed by GSI, has found several-meter-scale crustal deformation extending in a strip-shaped in the Northeast. Its measurement accuracy is lower (~1m) than that of InSAR, but it has succeeded in detecting this deformation that is impossible to measure with InSAR.

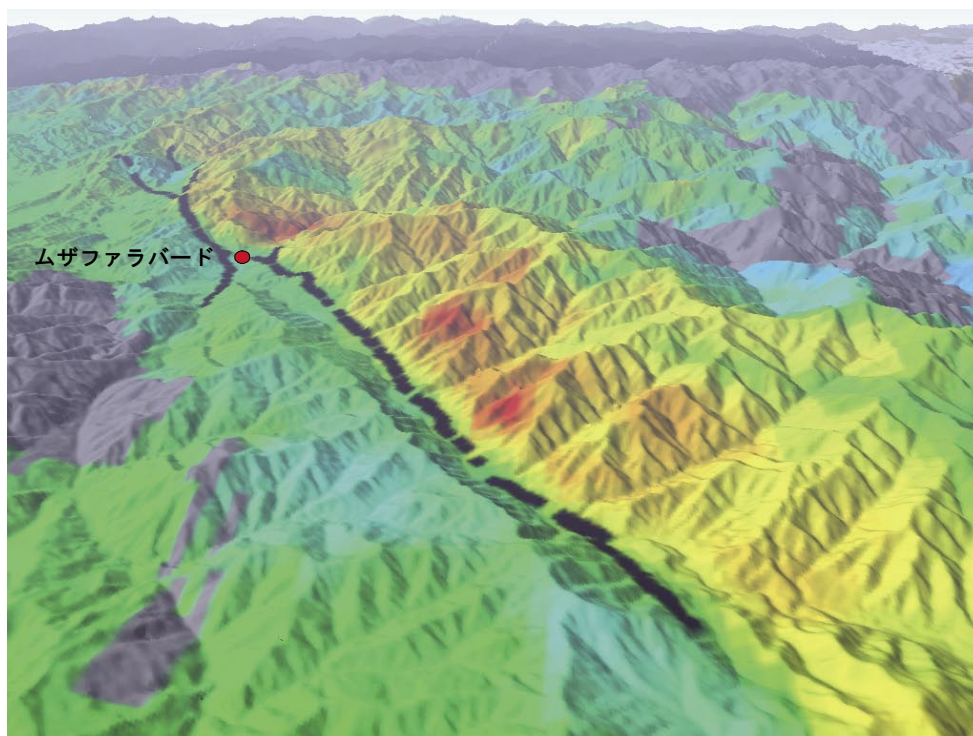


第4図 第2・3図を合成して作成した地殻変動分布（衛星—地表視線方向の変動量:cm, ★:USGSによる震源位置）
 Fig.4 Distribution map produced by synthesizing Fig.2 and Fig.3 (line-of-sight surface displacement: cm, ★: the epicenter by USGS)



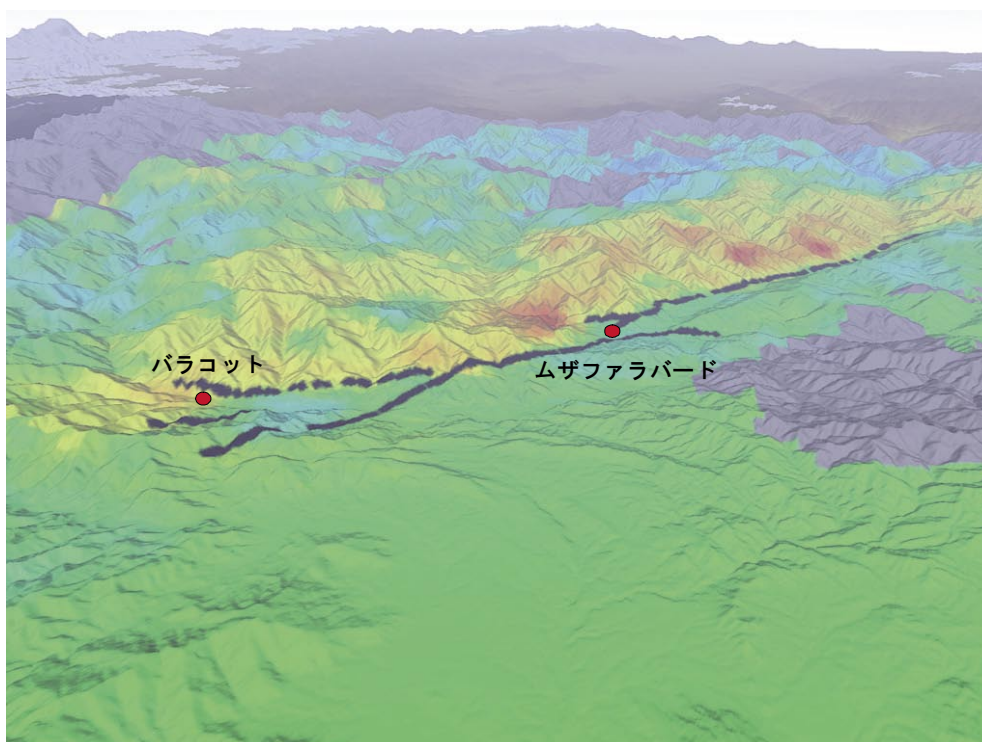
第5図 地殻変動と標高、既知の活断層位置を重ね合わせた図
 Fig.5 Crustal deformation map superimposed on topography and the location of known active faults
 標高は200mごと(SRTM), 黒太線は活断層位置 [中田・熊原(2005)*], ★はUSGSによる震源位置.

- 第5図の活断層は、地形学的な解析によって認定されたものであり、北東側隆起の逆断層、右横ずれと判定されている。今回、国土地理院が検出した地殻変動は、この活断層に沿っており、変位の向きも整合している。従って今回の地震は、この活断層の活動によるものと判断される。なお、これらの既知の活断層より南側にも断層運動が広がっていることがわかる。
 - 活断層の動きの方向を仮定して換算すると、隆起量は図の約1.3倍となるため、今回の地震で甚大な被害が生じたムザファラバード北部では最大6m、バラコット北部では最大4mを超える隆起があったことになる（最大の変動量は、ムザファラバードの北方約5km、衛星に近づく方向に4.7m移動、断層運動を仮定すると、約6m隆起、南方向に約6m、西方向に約4mの変動）。
 - * http://www.fal.co.jp/geog_disaster/files/20051018_research_doc.pdf
中田高（広島工業大学）・熊原康博（広島大学）：「パキスタン北部地震震源地域の活断層（予察）」
The contour lines are every 200-m (SRTM). The bold black lines are the location of active faults [Nakata & Kumahara (2005)*], ★ : the epicenter by USGS
 - The active faults in Fig.5 and Fig.6 had been identified and determined from geomorphologic analysis to be reverse dextral strike-slip faults with uplift on the northeast side. This crustal deformation detected by GSI is along these active faults and both were consistent in their displacement directions. Therefore, this earthquake is considered to be generated by the movement of these active faults. Additionally, it shows the fault movement occurred also in the southern extension of these known active faults.
 - If we convert it with the assumed direction of the active faults, the amount of uplift is 1.3 times as much as Fig.5. That means there was a maximum of 6-m uplift in the north of Muzaffarabad, a heavily damaged area, and a maximum of 4-m uplift in the north of Balakot.
- *http://www.fal.co.jp/geog_disaster/files/20051018_research_doc.pdf



第 6 図 (1) 地殻変動と活断層の鳥瞰図 (南側より)

Fig.6 (1) Bird's-eye view of crustal deformation and active faults (from the south)

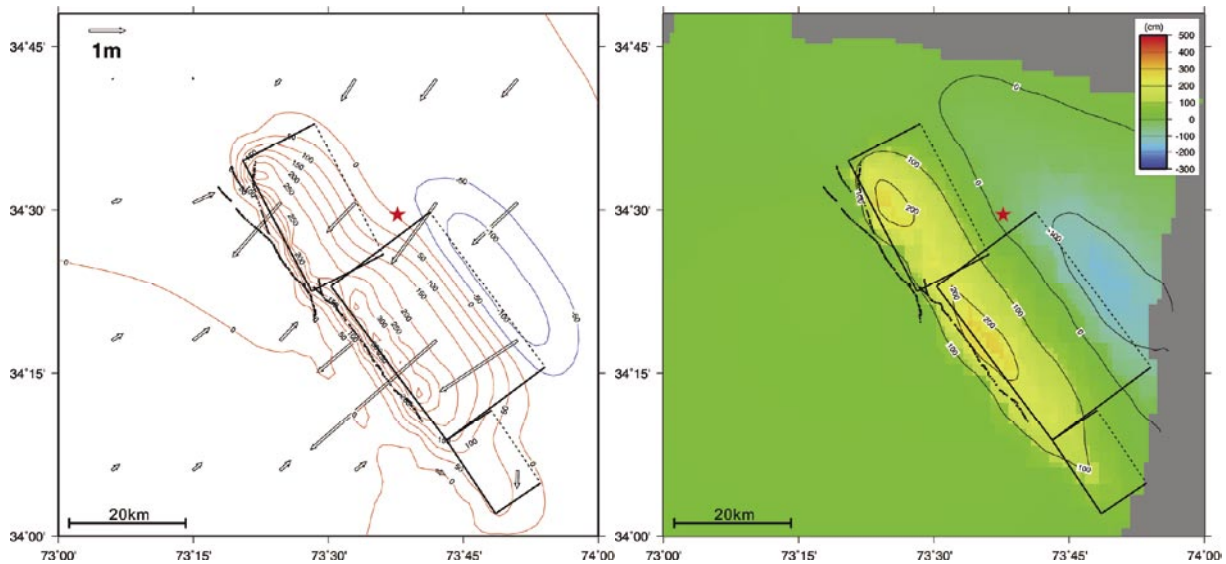


第 6 図 (2) 地殻変動と活断層の鳥瞰図 (西側より)

図 6 の作成にはフリーソフトウェア「カシミール 3 D」(<http://www.kashmir3d.com/>) を使用した.

Fig.6 (2) Bird's-eye view of crustal deformation and active faults (from the west)

Fig.6 was created in a freeware “KASHIMIR 3D” (<http://www.kashmir3d.com/>).



第7図 断層モデルによる変動量計算値の分布

左図：矢印は水平方向のモデル変動量，赤・青線は上下方向のモデル変動量（cm）

右図：SAR衛星-地表視線方向のモデル変動量（cm，第4図に相当する量）

矩形3カ所がインバージョンによって推定された断層の位置で，破線側のほうが深い．★はUSGSによる震源位置．黒点線は既知の活断層位置（第5図と同様）．

北側断層 走向 332° 傾斜 38° 滑り角度 104° 幅 17km 長さ 25km 上端深 0.3km すべり量 6.0m

中央断層 走向 323° 傾斜 16° 滑り角度 92° 幅 22km 長さ 32km 上端深 1.5km すべり量 8.6m

南側断層 走向 325° 傾斜 33° 滑り角度 103° 幅 11km 長さ 15km 上端深 1.5km すべり量 2.2m

3つの断層の合計マグニチュードは7.6（USGSの地震波によるマグニチュードも7.6）

- 第7図の断層モデルは第4図の人工衛星による地殻変動量をもとに数値計算によって求めた．3枚の矩形断層がそれぞれ一様なすべり量をもってすべったと仮定して計算している．

- 各断層ともに，北東側隆起の逆断層で右横ずれ成分（南西側から見て北東側が南東側に水平移動）をもつ．形状は南西側が地表に近く，北東側が深い．

Fig.7 Calculated crustal deformation by a simulated faults model

Left: Arrows show horizontal displacement. Red and blue lines show upward and downward displacement, respectively. (cm)

Right: Line-of-sight displacement (cm)

Three rectangles are the calculated faults positions and broken lines show the deeper side of each fault. Red star shows the epicenter by USGS. The black dotted lines are the location of active faults [Nakata & Kumahara (2005)]

Each fault parameter:

North: strike 332deg. dip 38deg. rake 104deg. width 17km length 25km depth 0.3km slip 6.0m

Center: strike 323deg. dip 16deg. rake 92deg. width 22km length 32km depth 1.5km slip 8.6m

South: strike 325deg. dip 33deg. rake 103deg. width 11km length 15km depth 1.5km slip 2.2m

Mw=7.6 (USGS M=7.6)

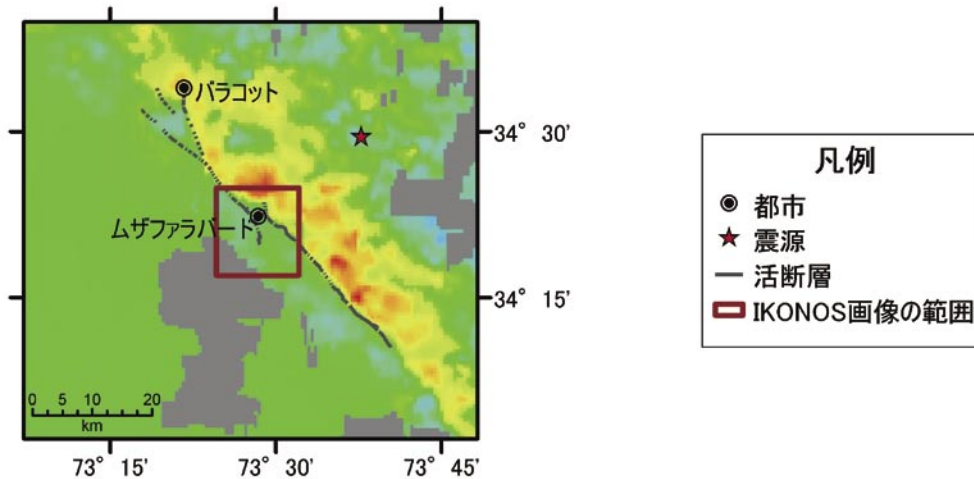
- The fault model is calculated using the SAR observation data shown in Fig.4. We assume that each fault slipped uniformly in each fault plane.

高分解能衛星画像で抽出した斜面崩壊の分布

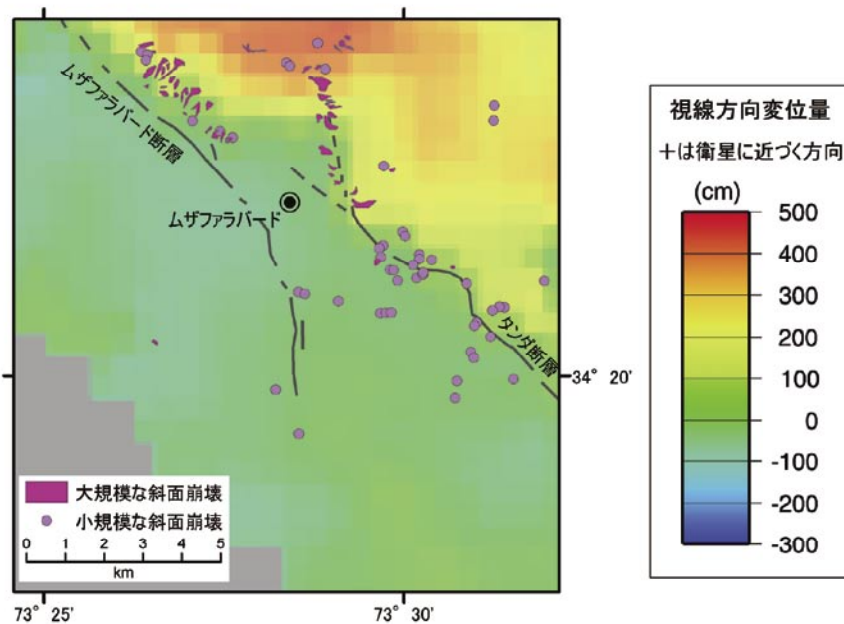
- Web上 (<http://www.spaceimaging.com/gallery/asiaEQViewer.htm>) で公開されている高分解能衛星 IKONOS (分解能約 1 m) の地震前後の画像を比較して、地震に伴い発生した斜面崩壊を抽出した。解析した衛星画像の範囲を第 8 図に示す (ムザファラバード周辺)。

撮影日 地震前：2002年9月22日, 地震後：2005年10月9日

- 検出された斜面崩壊数は約100。
- 大規模な斜面崩壊は、活断層の北東側すなわち隆起側に集中している。



第 8 図 解析した IKONOS 画像の範囲 (背景の色は第 4 図の画像を使用)
 Fig.8 Area of IKONOS imagery (The background color is the same as Fig.4)



第 9 図 IKONOS 画像で抽出した斜面崩壊の分布 (背景の色は第 4 図の画像を使用)
 Fig.9 Distribution of landslides, interpreted IKONOS imagery. (The background color is ditto.)