

「InSAR で検出されたアフガニスタンのゆっくり地震の推移」  
芹澤伸隆

(The evolution of a slow  
earthquake in Afghanistan  
detected by InSAR)  
Nobutaka Serizawa

北海道大学理学部地球科学科地球物理学宇宙測地研究室4年  
(1月30日提出)

## 要旨

この論文は、Furuya, and S. P. Satyabala (2008)を元にしてしているものであるが、彼らの論文以降のデータが手に入ったので、それを用いてゆっくり地震のその後を調べた物である。

まず、今回の観察の手法となっている InSAR について説明する。InSAR とは、現地に行かずとも「空の上から」のデータのみで、極めて高い空間分解能を持つ画像を得ることの出来る技術である。この技術を用いた理由は、通常 GPS などでは必ず必要になる地上測定点が全く要らないことである。このため、火山や森林、紛争地帯など容易に立ち入れない所の地殻変動の観測が出来ることが大きな利点である。

初めに、InSAR の原理、SAR のデータから干渉画像の作成原理、地殻変動の検出を視覚化していることを述べる。

InSAR の原理とは、「ヤングの実験」を元にした干渉によるものであり、干渉によって生じた干渉縞がそのまま地殻等の変動を表している。数学的には、2 枚の SAR のデータ画像を持ってきて、2 枚の複素共役の掛け算を規格化する事で干渉画像が得られる。

次に、この技術を用いて、アフガニスタンにある Chaman 断層を観測する。この断層は、2005.10/21 に Mw 5.0 の地震が発生したが、元々、Chaman 断層におけるプレート運動は 2~4cm/年と推定されており、今回観測している地点は、プレート運動から予想される地震の規模・回数に比べても、他の断層に比べても、明らかに地震の数・規模が小さいため、地震を抑えている要因があるのではないかと考えられた。そして観測した結果が、断層におけるゆっくり地震である。ゆっくり地震とは、何らかの原因によってずれた断層が、そのままスライドし続ける事を言う。ゆっくり地震によって断層が徐々にすべるということは、本来蓄えられる筈のモーメントが放出されていることになるので、モーメントが溜まらなければ大きな地震は起きないと言える。

そのゆっくり地震が未だに起きているのかどうかを調べる事が本論の主な内容である。

ゆっくり地震の継続を調べるために、新しく得られた 3 枚のデータと過去のデータとの干渉画像を作成し、変動を視覚化する。また震源近傍だけでなく、他の地点でもゆっくり地震により断層がずれているのか調べるため、断層に対して(およそ)直角に線を取り、その線と、作成した 9 枚の干渉画像の同地点における断層のずれの変化をまとめ、その度合いを視覚化した。

# 目次

- 1 : InSAR とは何か
- 2 : Chaman 断層におけるゆっくり地震について
- 3 : 断層における $M_w$ の変化
- 4 : 結論・課題
- 5 : 謝辞
- 6 : 参考文献

## 1: InSAR とは

現在、地殻変動を観測する際には、三角測量やGPSなどの様々な測量技術が利用されている。

本研究では、その中の一つである干渉合成開口レーダー(InSAR)を使用し、地震などによる地殻変動の検出をする。

ここでは、アフガニスタンにおける Chaman 断層に焦点を置いて解析を行った。InSAR とは、人工衛星からマイクロ波を照射し、その反射波を同じ箇所でも複数測定して得られたデータを、干渉させることによって、地表の標高やその変化の映像を得るものである。

この技術の利点は、地上観測点が必要無く、きわめて高い空間分解能を持つ画像として、地殻変動の分布を「空の上」から得られることが挙げられる。

欠点としては、人工衛星を利用するため時間分解能が低いことが挙げられる。

例えば、今回の場合は35日/枚で撮影されたデータを使用しているため、それ以内での変位は撮影前後にわたって変位していなければ、確認する事が出来ない。

### 1 1: InSAR の原理

InSAR の原理は、光の波動性の証明として有名な「ヤングの実験」によって成り立っている。

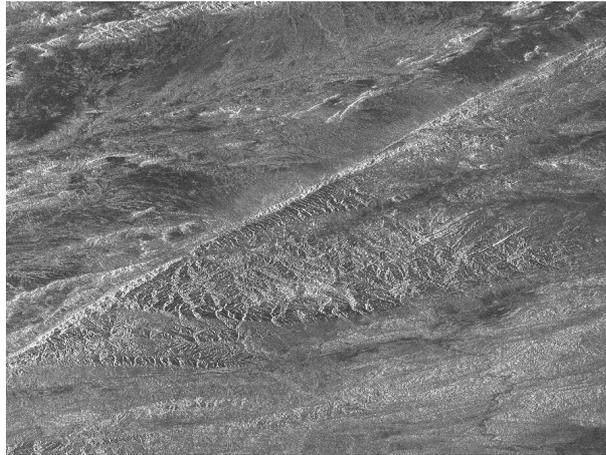
位相のそろったコヒーレントな波が2つのスリットを通過して、壁に当たると、波動の行路差に応じて、同位相部分では強め合って明るくなり、逆位相部分では打ち消し合って暗くなる。そして、壁には「干渉縞」と呼ばれる縞模様が現れる、と言うものだ。これと同様に、InSAR においても「干渉縞」が得られる。数学的には、2枚のSLC画像(以下画像1・2とする)を持ってきて、画像1と画像2の複素共役の掛け算を規格化することで得られる。

ただし、この処理を施す前に「位置合わせ(画像マッチング)」と呼ばれる画像1と画像2の各ピクセルの対応付けをしなければならない。衛星は回帰軌道を通って同一地域を撮影すると言っても、ピクセルレベルで厳密に一致することはまず無いからだ。なので、軌道上から得られる2次元画像である画像1のあるピクセル(レンジ座標  $x_1$ ・アジマス座標  $y_1$  とする)と画像2のピクセル( $x_2, y_2$ )を対応付けた上で、干渉処理をする必要がある。この対応付けは、0.5ピクセル程度以下の精度で行わないと、干渉画像その物が得られなくなってしまうので、重要な処理である。

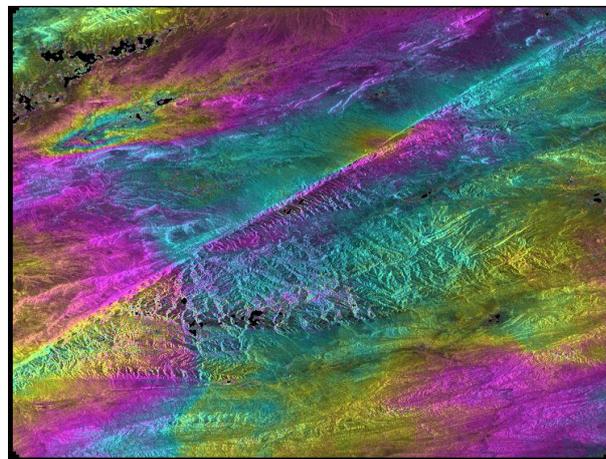
### 1 2: InSAR による地殻変動検出

平坦な場合の干渉縞(軌道縞 orbital fringe あるいは flat earth fringe と呼ぶ)は、衛星の軌道データから計算できるので、それを利用して、InSAR から「地形縞」だけを抽出し、数値地図を作ることが可能である。また、衛星の回帰周期の間に、地震などで地殻変動が生じた場合には、軌道縞、地形縞に加えて、「変動縞」としての地殻変動のシグナルが現れる。この時、地殻変動シグナルを抽出するには、軌道縞と地形縞を除けばよい。地形縞については、別途利用できる高分解能な数値地図(Digital Elevation Model: DEM)を用いて計算するのが簡略であり、日本では国土地理院の50メートルメッシュ数値標高があり、海外については北緯南緯60°以内ならば、米国がスペースシャトルを用いて行った Shuttle Radar Topography Mission(SRTM)によるDEMが2003年から利用できるようになった:約90m(正確には3

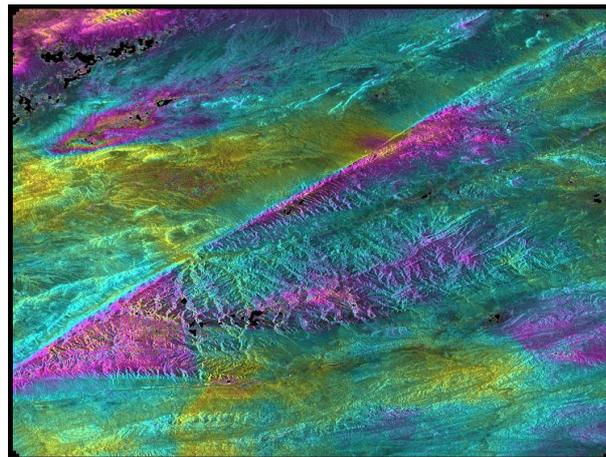
秒角)メッシュである。DEMに要求される分解能は高ければ高い方が良く、1km程度の分解能では不十分な場合が多い。



第1図:Chaman 断層の SAR 画像(2007.9/04)



第2図:2005.7/26\_2007.9/04の干渉画像



第3図:大気遅延・軌道誤差をできるだけ除去した干渉画像

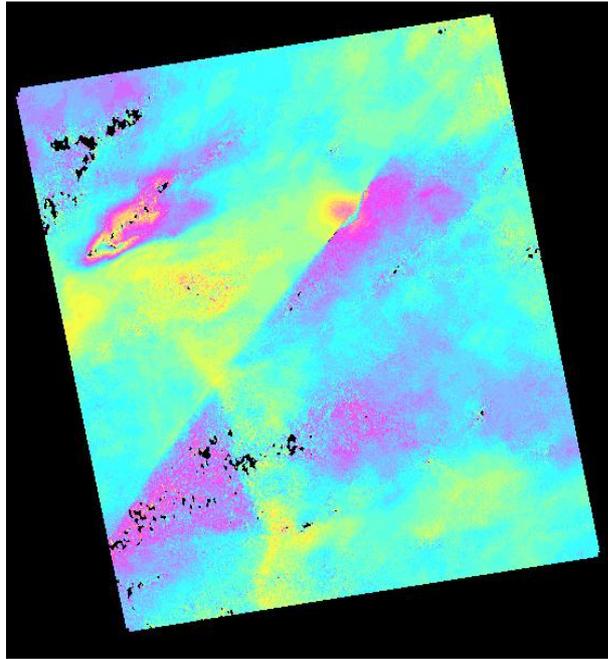
第1図は、2007年9月4日に撮影された SAR 画像である。これと、あらかじめ撮影してあった画像(ここでは2005年7月26日撮影のものを使用する)を前述の「位置合わせ」でそれぞれのピクセルを対応させ、初期干渉画像を得る。初期干渉画像から得られる干渉縞の間隔(空間的な勾配)は、2つの軌道の間隔に応じて変化する

ので、軌道間距離が短いほど、軌道縞は疎らになる。次に、軌道情報と地形情報 (DEM) に基づいて、初期干渉画像に対応する干渉縞をシミュレートしたものを作り、2枚の差をとれば変動縞が得られる。これが第2図に示されている。実際、第2図の中心部分で地震に伴う変動の位相変化が得られており、ここまで来れば検出成功である。しかし通常、第2図の段階はまだ途中結果で、ここからさらに3つは手順が必要である。1つは、衛星軌道データの不正確さに伴い、軌道縞が補正しきれておらず、長波長の干渉縞が残存しているため、軌道情報の再推定(補正)が必要である。大抵の場合、軌道縞の補正誤差は長波長であり、そのために、空間スケールが小さい現象に対してはあまり問題にならない。2つ目は、第2図の段階では位相データは $2\pi$ の任意性が残っているため、視線方向距離の変化に直すことが出来ない。 $2\pi$ の任意性を取り除く作業を「位相アンラッピング」(phase unwrapping)と呼び、地球物理学上の定量的なデータにするためには不可欠な作業である。地表面が平坦な場合やノイズが少ない場合にはそれほど難しい処理では無いが、地形起伏が大きい時や、干渉性(コヒーレンス)が低い場合の位相アンラッピングは必ずしも単純ではなく、不可能な場合も度々ある。

コヒーレンスとは、干渉縞がよく見えている状況を「コヒーレンスが高い」といい、物理的にはある時期に得られた反射波の波形と別のある時期で得られた反射波の波形がよく似ていることに対応する。マイクロ波が反射されるターゲットの特性が時間的に変化しなければ、コヒーレンスは高くなる。例えば、マイクロ波の波長により、植生や積雪の有無による影響が生じるので、波長が短いと影響を受けやすく、コヒーレンスが低くなる時がある。

話を戻し、3つ目はこの問題は、第2図はレーダーデータそのものであるレンジアジマス座標(地上物体のレンジ方向とアジマス方向への投影)のままであるため、通常見慣れている緯度経度座標やUTM座標に変換する必要がある。これは「ジオコーディング」と呼ばれ、レーダーデータのレンジアジマス座標と地図上の緯度経度座標とを対応付ける作業である。ただ、この作業は、実を言うと既に「初期干渉画像に対応する干渉縞をシミュレートしたもの」を作成する際に必要であり、緯度経度の地図をレーダー座標に対応させるための表は作成済みである。したがって、第2図を緯度経度の座標上へ変換するのは、これとは逆の作業をすることになる。

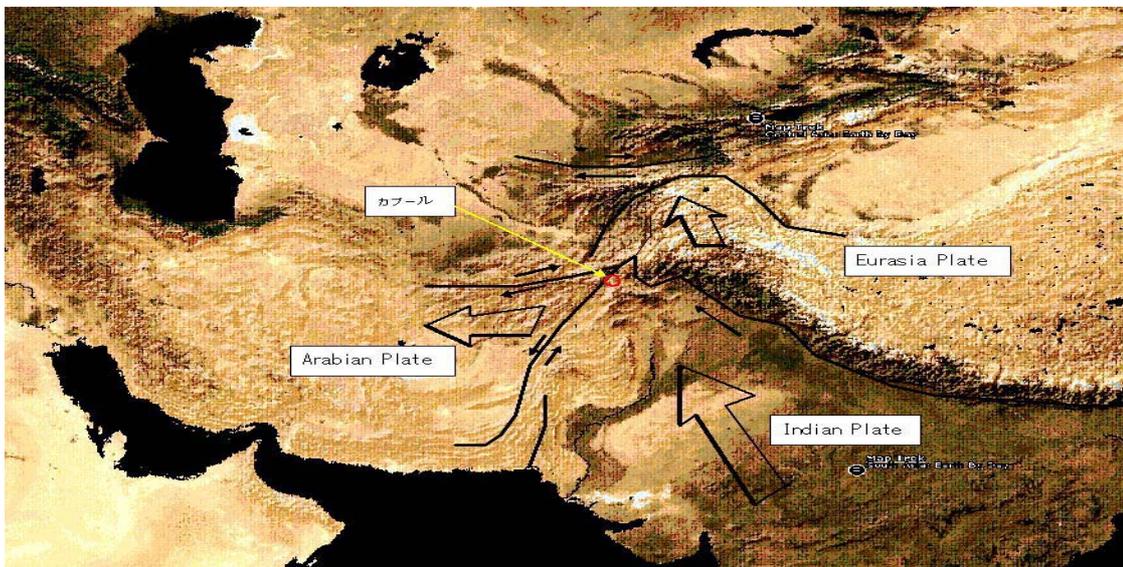
この3つの手順を踏んだ上で作成されたのが第3図である。だが、よく見ると振幅はそれほど大きくないものの、明らかに地震や断層とは無関係なシグナルが散見される。この原因が大気電波伝搬遅延であることは、理論的にも経験的にも明らかになっていて、GPSによる精密干渉測位でも問題になっていた大気遅延シグナル(ノイズ)と同じ物理的な原因による。InSARの場合には、2枚のSAR画像に対応する2つの異なる瞬間での、極めて高い空間分解能の大気分布状態を反映してしまう効果であるために事態はより複雑になってしまう。これを補正・解消するためには、SAR画像とは独立な数値記象データで直接補正する方法と、地殻変動はある一定期間よりも長い時間スケールで見れば線形(もしくは空間的には「じっと」している)と仮定できるのに対して、大気遅延分布は時間軸上でも空間的にもランダムといえることを利用して、何枚もの干渉画像を集めて、それらを重ね合わせ、共通する地殻変動のシグナルを抽出する方法がある。後者は、Stackingと呼ばれ、独立な大気データが無くても可能な点で有用な手段ではあるが、何枚ものデータが必要になるため、長期間にわたってデータを蓄積する必要がある。今回は十分なデータがあったので、後者の方法を用いて、2枚の干渉画像を合成しその平均をとり、さらに地殻変動のみに焦点を当てるために、変動以前の地表高度を差し引く(第4図)。これにより、対象がより明らかとなり、変動の明瞭化が出来た。



第4図:2005.7/26\_2007.9/04の干渉画像と  
2005.8/30\_2007.9/04の干渉画像を平均化した画像

## 2:Chaman 断層におけるゆっくり地震について

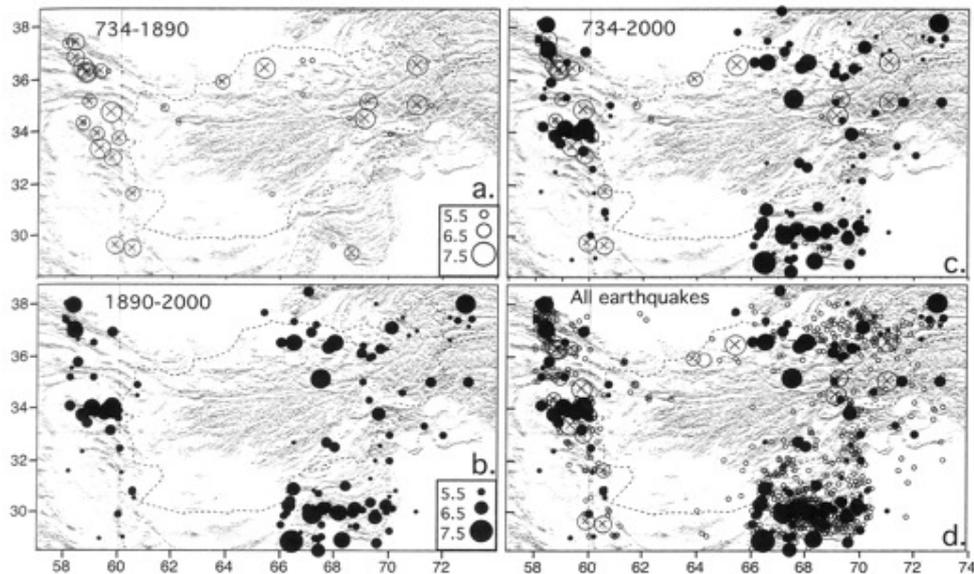
Chaman断層とは(第5図参照)、インドプレートとユーラシアプレート間の、900kmに及ぶトランスフォーム断層であり、プレートは2~4cm/年の速度で動いていると考えられている。



第5図:インド~アフガニスタン間のプレート分布図  
([http://afghanforum.web.infoseek.co.jp/photos/map2/map2\\_22.jpg](http://afghanforum.web.infoseek.co.jp/photos/map2/map2_22.jpg) より。)

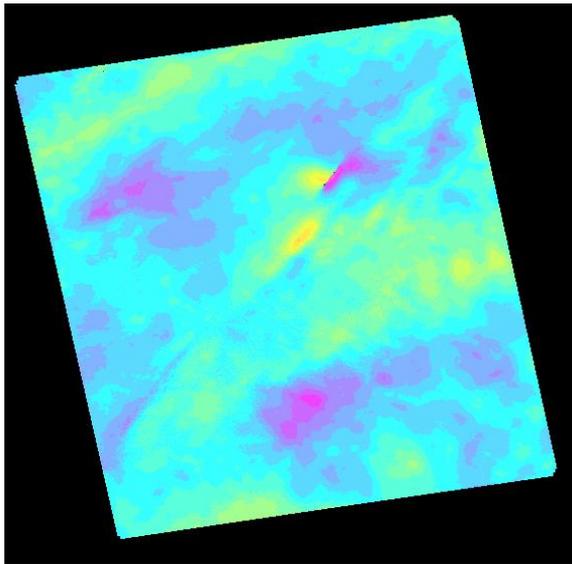
2005.10/21にMw 5.0の地震が発生し、その後の1年間で、断層に沿って少なくとも50km以上のずれが確認された。記録を調べてみても、Mw 5.0の地震から1年間にわたって、他の地震による断層のずれは報告されていないので、ゆっくり地震

であると言うことが出来る。また、これが地震に起因するものと言えるのかどうかについては、地震発生以前の記録(第6図)を調べた結果、少なくとも1.5年間に地表ですべりが見られなかったため、2005.10/21の地震が原因であると考えられる。そして、このゆっくり地震は1年以上継続し、トータルのMwはMw 6.0程度に相当する事がわかっている。

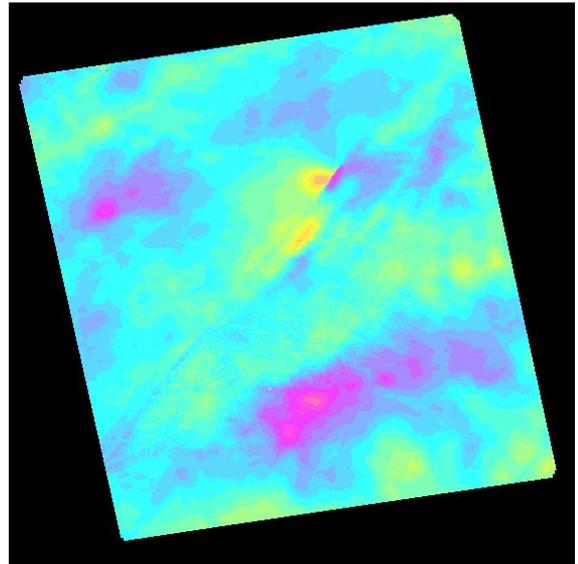


第6図:過去約1300年以内にアフガニスタンで発生したMw 5.5以上の地震

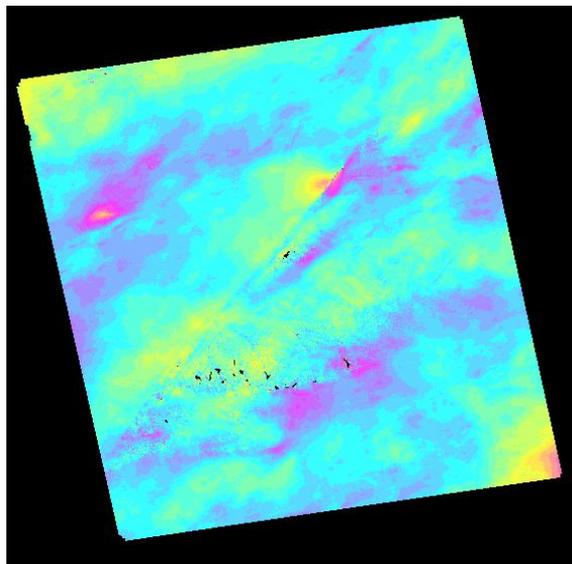
これにより、Chaman 断層の中でも、今回観測しているところ(Chaman 断層:北緯32度、東経69.5度付近)は過去約1300年においても、数えるほどしか地震が発生していない事が見て取れる。一方、断層の両端は大きな地震が何度も発生していることが見て取れ、観測している一帯が空白であることをよりいっそう際立たせている。このChaman 断層におけるプレート運動は2~4cm/年と推定されており、本来ならば今回観測している場所も、Mw 7.0クラスの地震が200年周期で、または、Mw 5.0クラスの地震が2年周期で発生していてもおかしくないはずであるが、記録によると、今回の地震が過去30年以内で2番目に大きな地震であることを示している。つまり、この周辺は数えるほどしか地震が発生して居らず、しかもMwが断層の規模に比べてあまりにも小さいと言える。このことから、この一帯をInSARを用いて調べた結果、断層が少しずつずれていることがわかり、ゆっくり地震が発生している事がわかった。このゆっくり地震により、本来蓄えられるであろうモーメントが放出され、結果、地震発生数が少なくなっているのではないかと想像できる。例えば、ゆっくり地震によって10kmの断層がずれた場合、その時失われるモーメントは $3 \times 10^{17} \text{ Nm}$ にも達し、これはMw 5.0の地震約8回分に相当する。具体的に断層がどのように変化しているかは、干渉画像(第7図)より、左上が衛星の視線距離(LOS)に近づく方向に推移し、右下が遠ざかる方向に推移している。つまり、南西側・北東側にそれぞれ移動しているのが見て取れる。9枚の干渉画像(第7図)を時系列ごとに見ていくと、初めは震源地付近だけに変化が見られていたものが、時が経つにつれ、断層全体に広がっていることがわかる。かなりの距離があるのに、徐々にずれていることは、相当な量のモーメントが失われているであろう事が容易に想像できる。



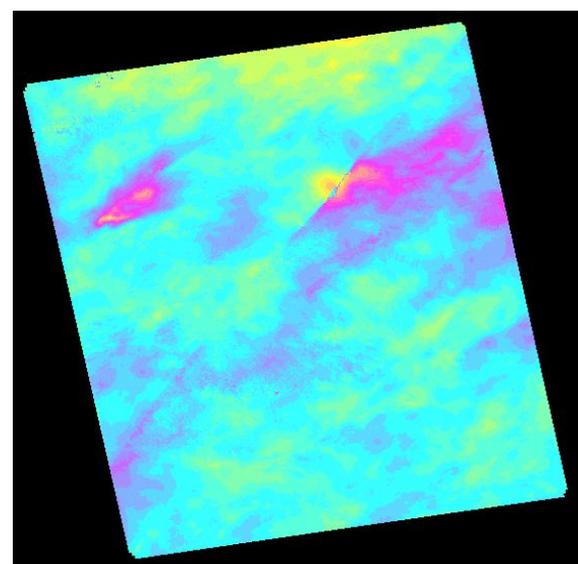
a:2005.11/8



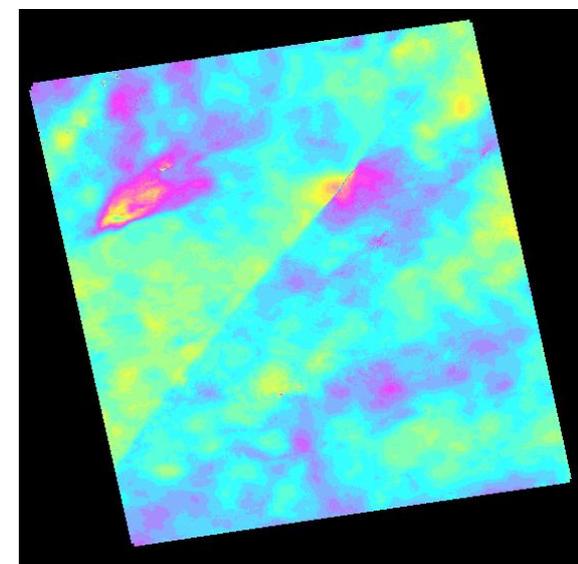
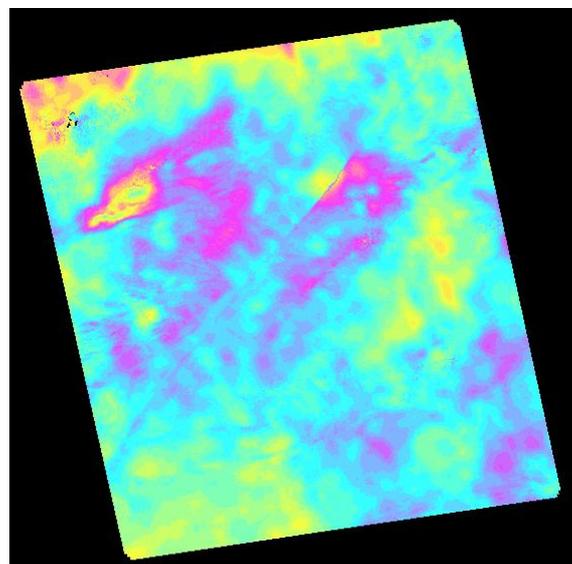
b:2005.12/13



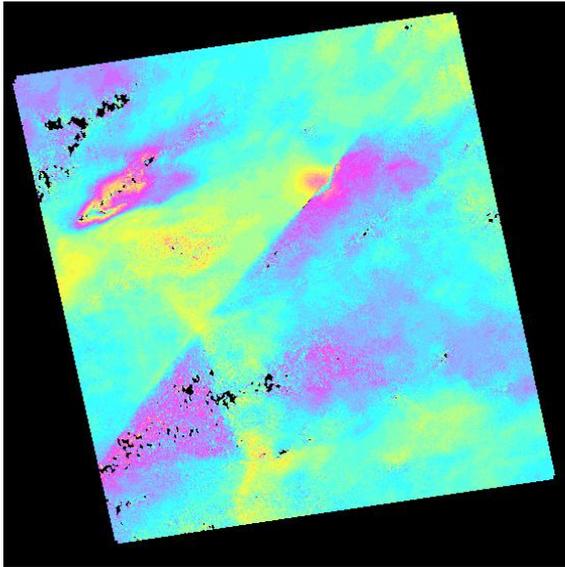
c:2006.2/21



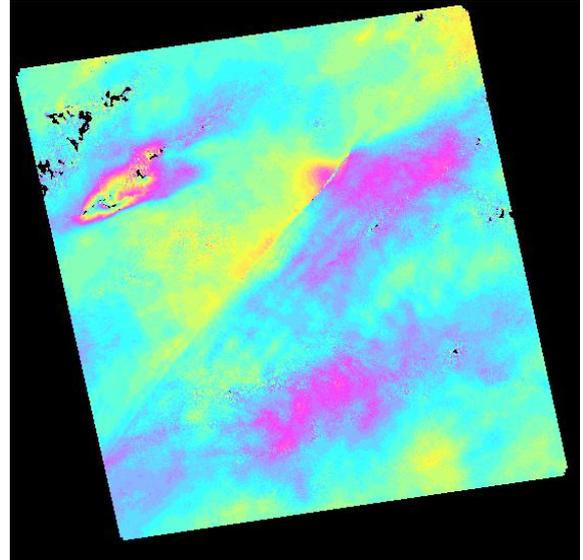
d:2006.5/02



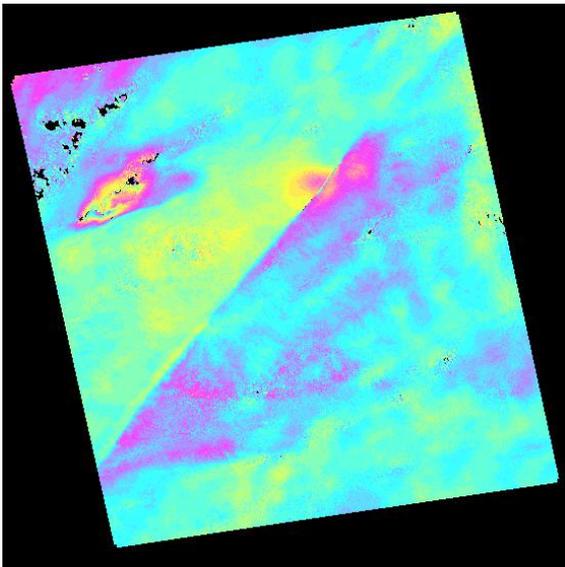
e:2006.9/19



f:2006.10/24



g:2007.9/04



h:2007.10/09



1.4cm~0~1.4cm

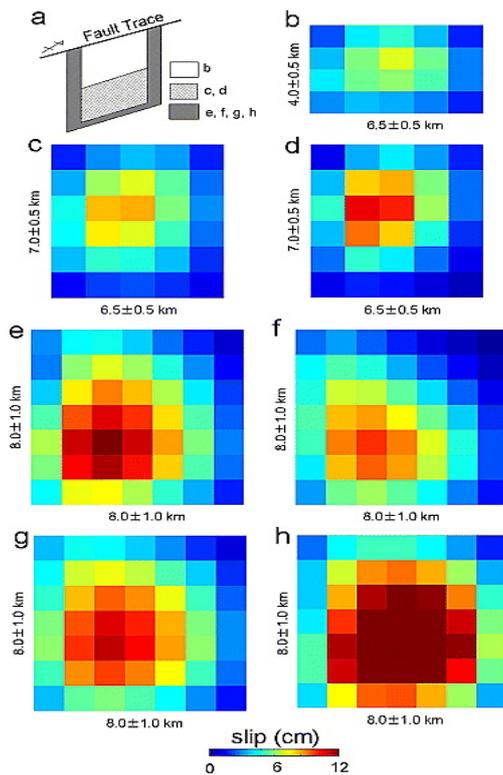
今回使用した波長:5.3GHz  
図の大きさ:約100km×100km

i:2007.11/13

第7図:(a)~(i);地震発生の約1ヶ月後から約2年後までの干渉画像

### 3:断層におけるM<sub>w</sub>の変化

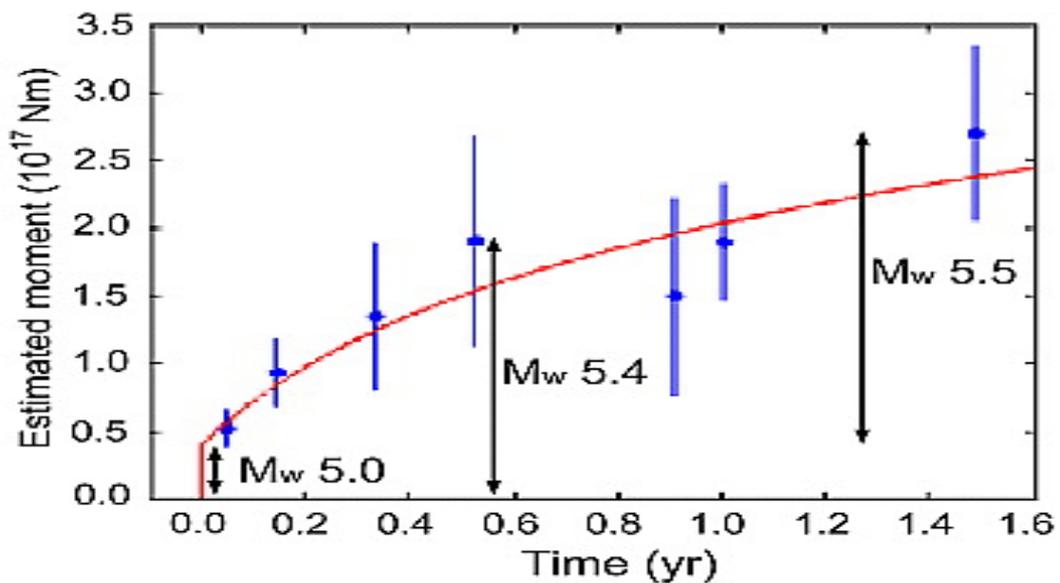
モーメントは、断層のすべり量と滑った面積に比例するので、震源近傍におけるM<sub>w</sub>の変化を知るために、断層に垂直になるような断面図(第8図)を作成し、ずれの大きさを調べた結果(第9図)、地震発生当初はM<sub>w</sub> 5.0だったのが、時間が経つにつれ増大し、最終的にはM<sub>w</sub> 6.0程度に相当する事が判明した。このことから、本来蓄積されるモーメントがゆっくり地震という形で消費されていることが理解できる。また、震源近傍だけでなく、それ以外の断層の変化も調べてみると、明らかにずれていることがわかる。



第 8 図: 震源近傍の断面図

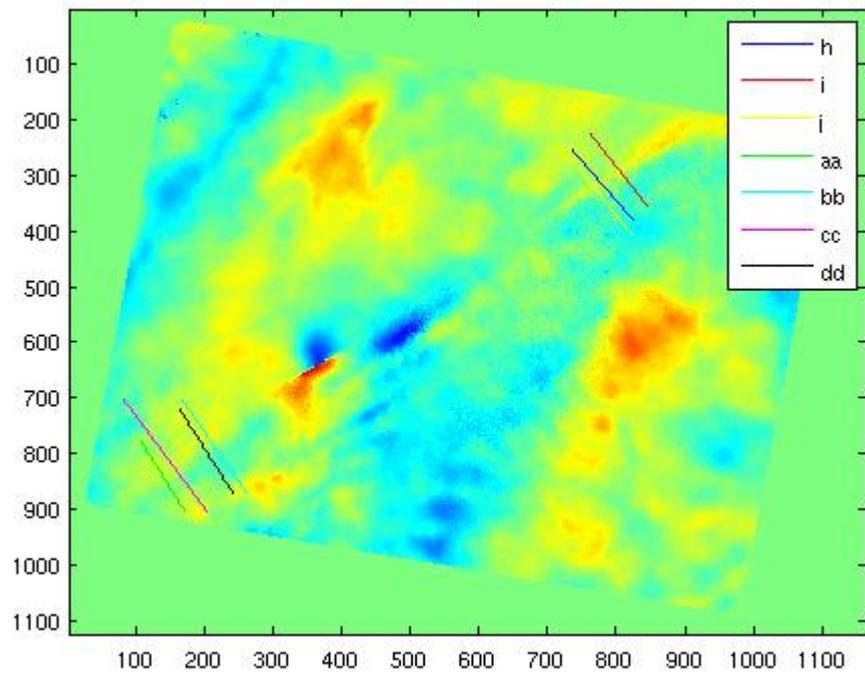
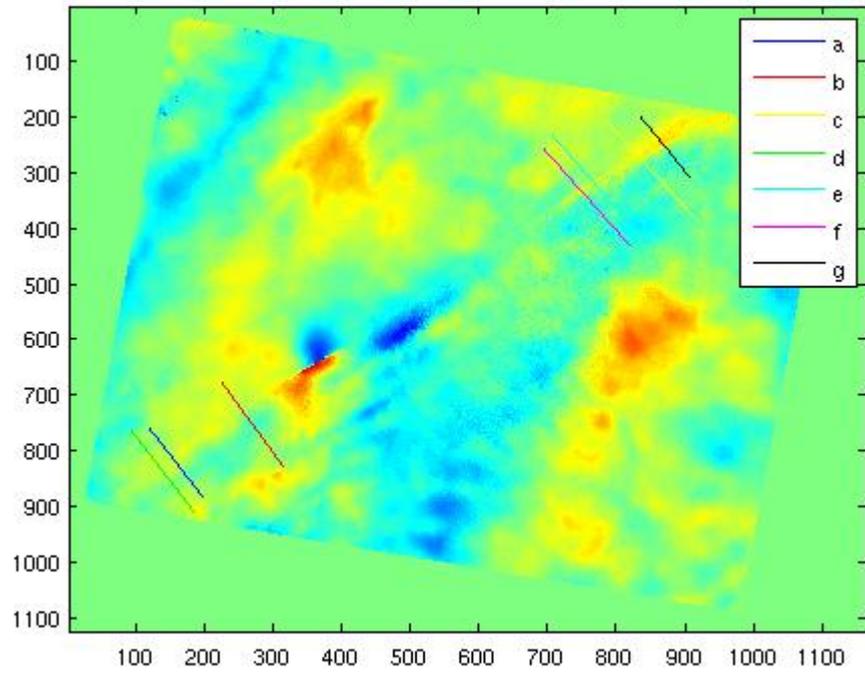
(b)2005.11/8。 (c)2005.12/13。 (d)2006.2/21。 (e)2006.5/02。 (f)2006.9/19。  
 (g)2006.10/24。 (h)2007.4/17。

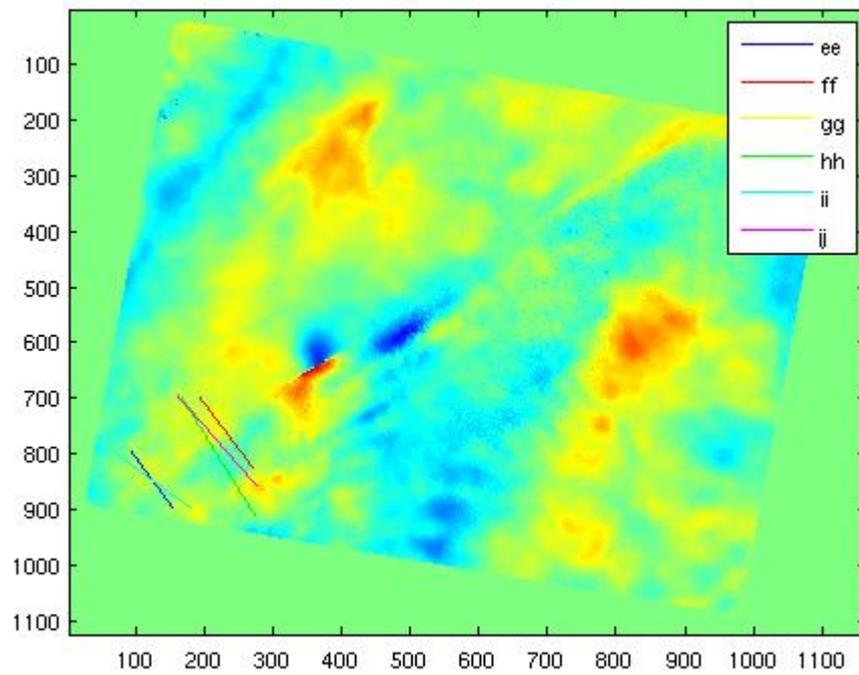
(M. Furuya, and S. P. Satyabala (2008), Slow earthquake in Afghanistan detected by InSAR. GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 35, L06309, doi:10.1029/2007GL033049.)



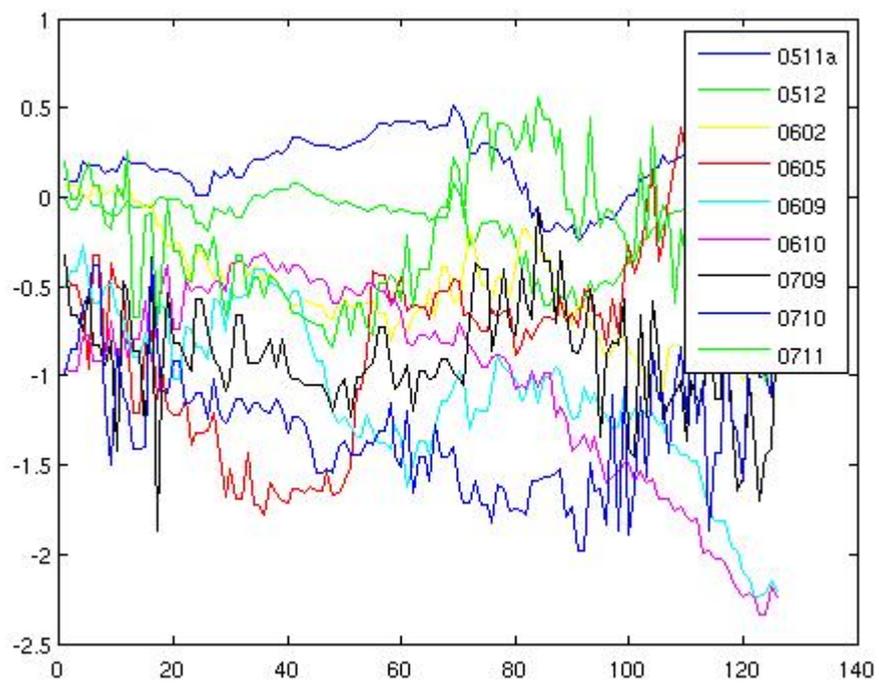
第 9 図: 震源近傍における  $M_w$  の変化 (~2006)

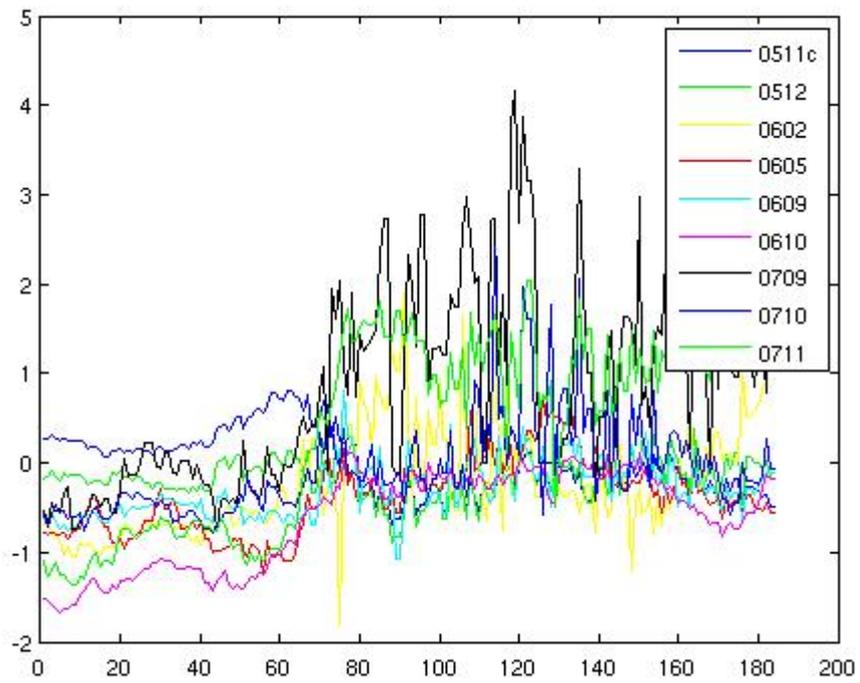
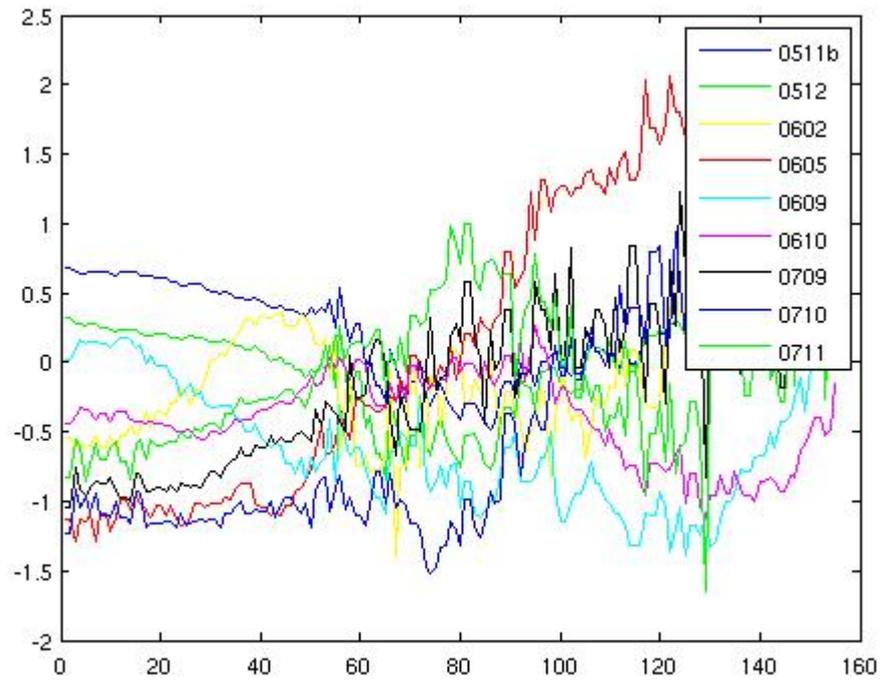
(M. Furuya, and S. P. Satyabala (2008), Slow earthquake in Afghanistan detected by InSAR. GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 35, L06309, doi:10.1029/2007GL033049.)

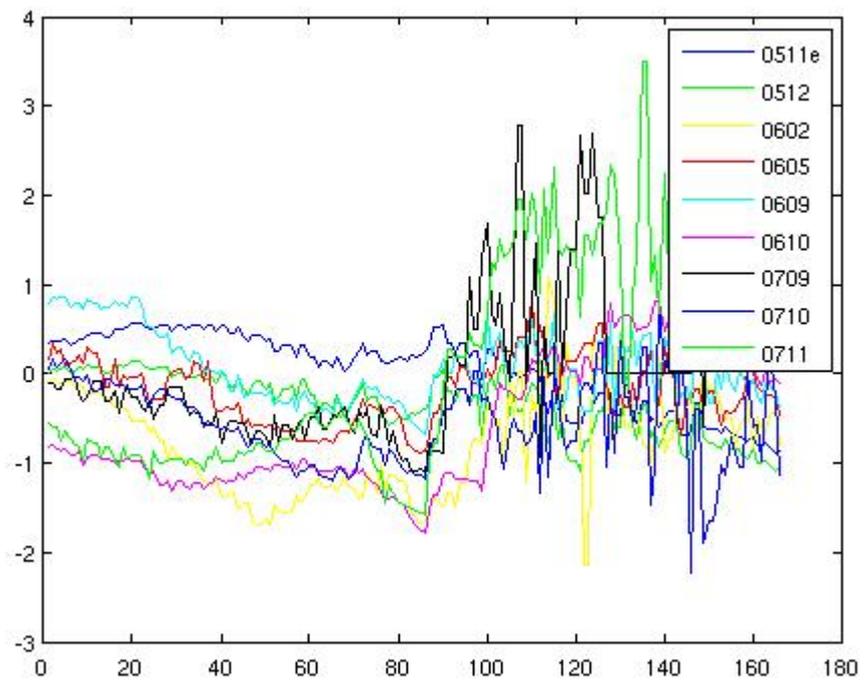
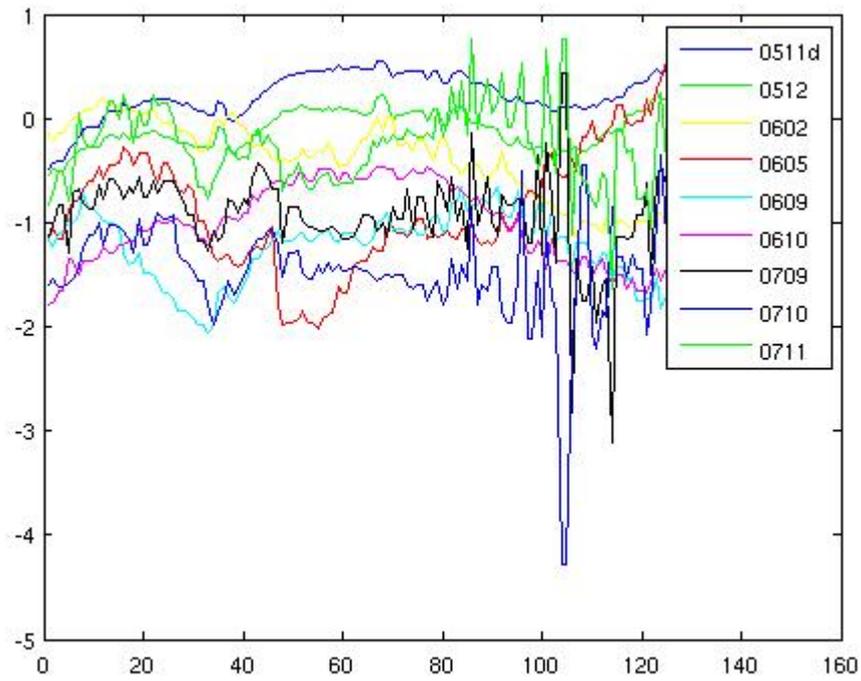


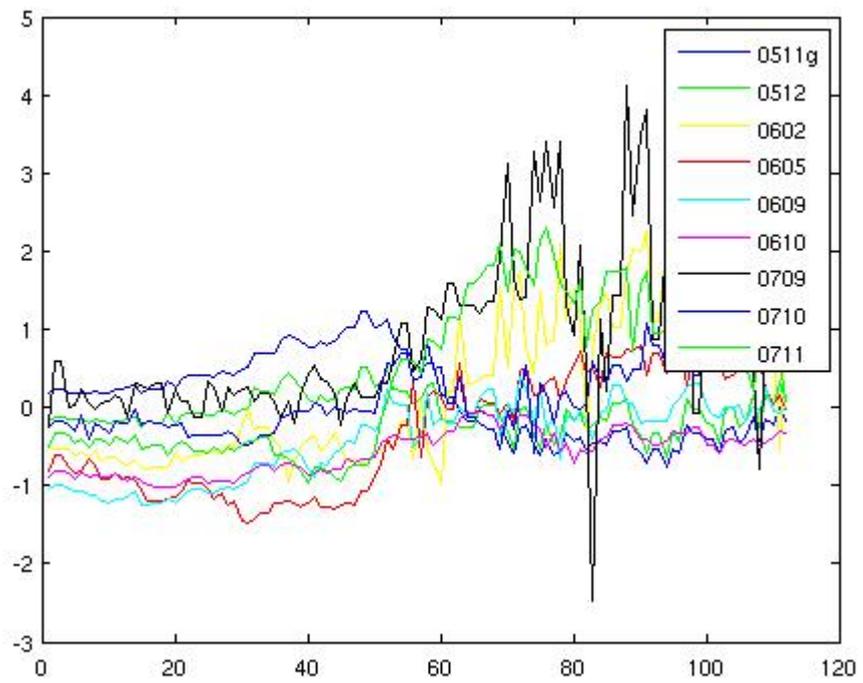
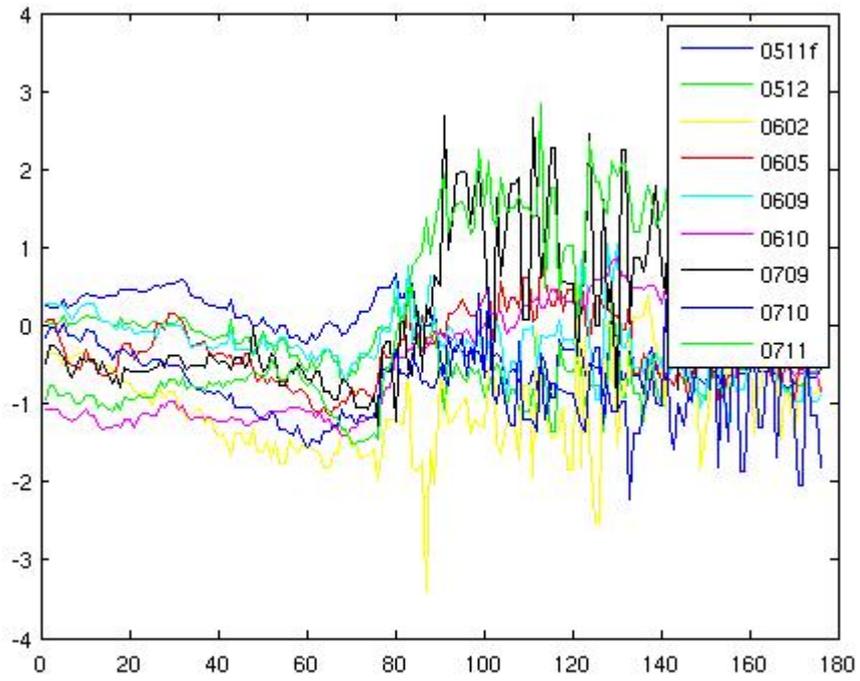


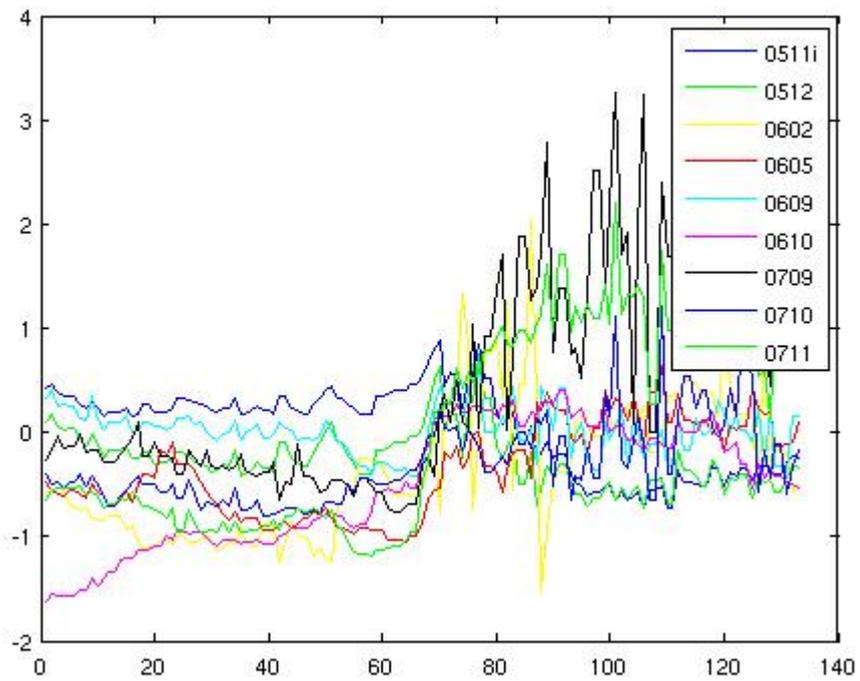
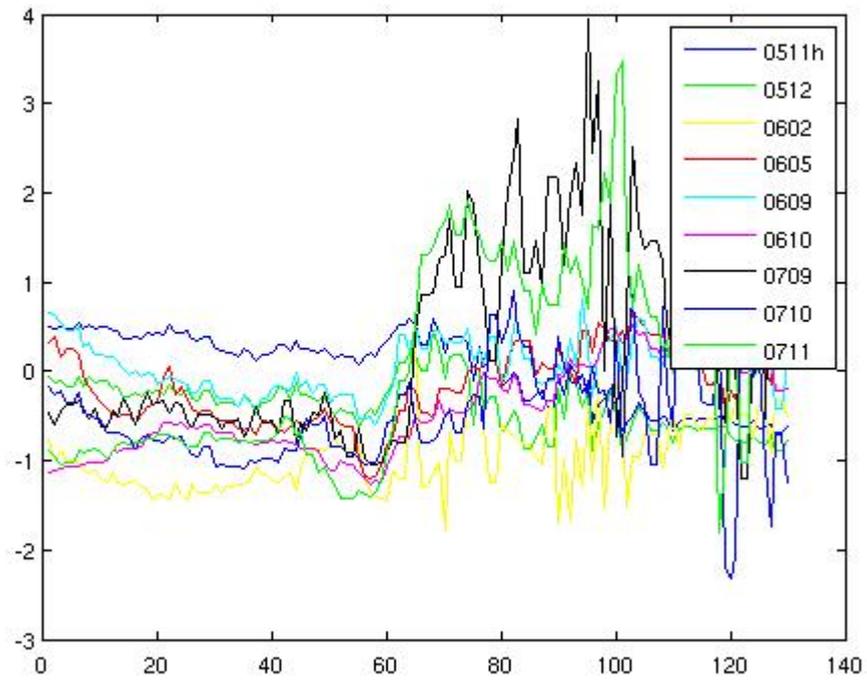
第10図:第11図に対応する断線的位置

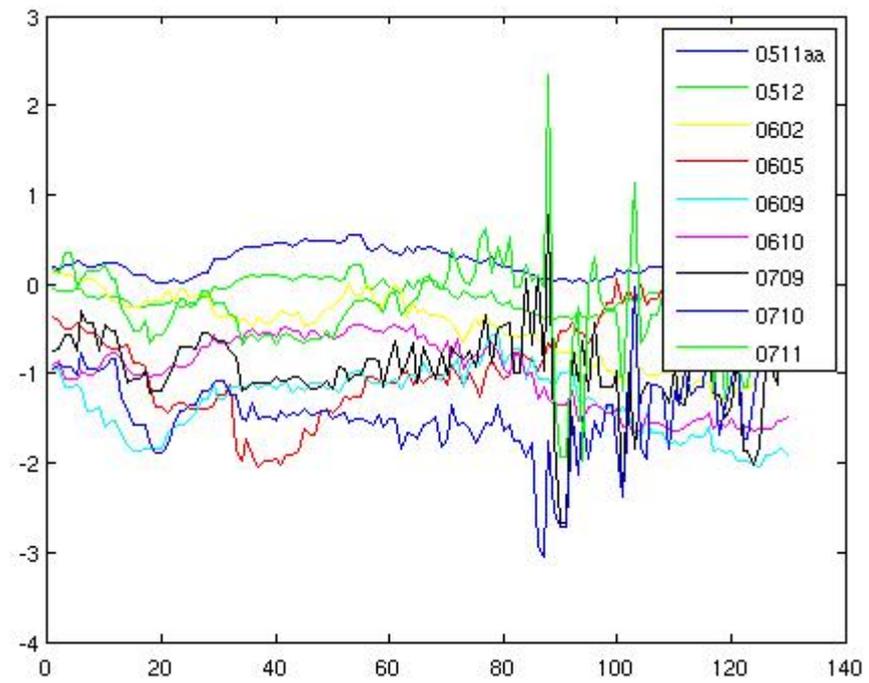
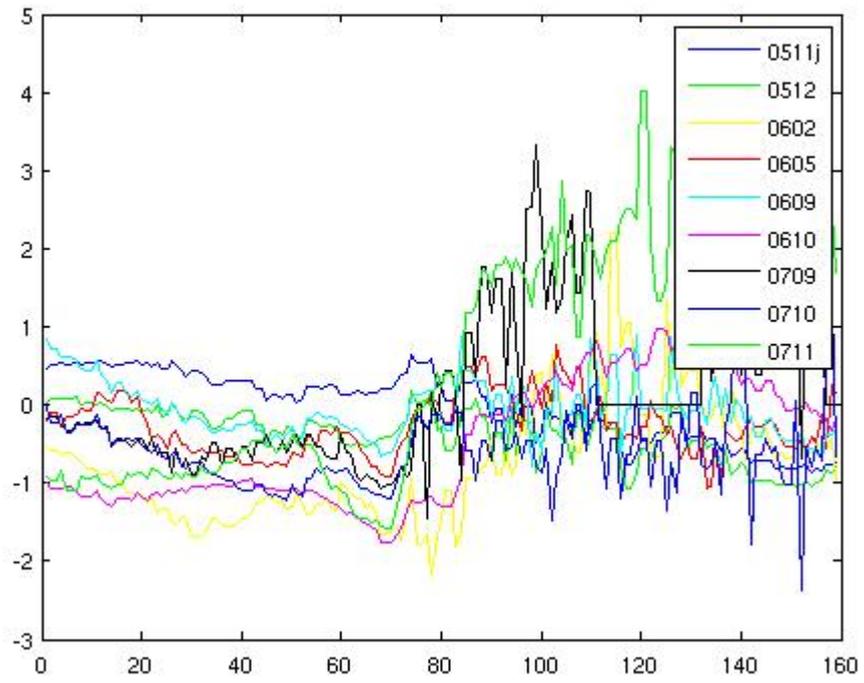


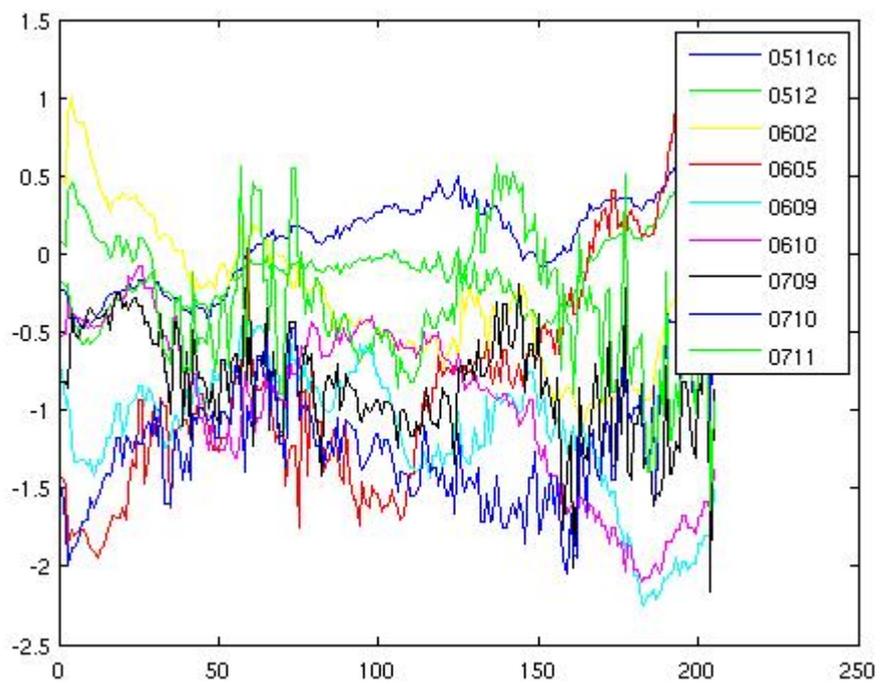
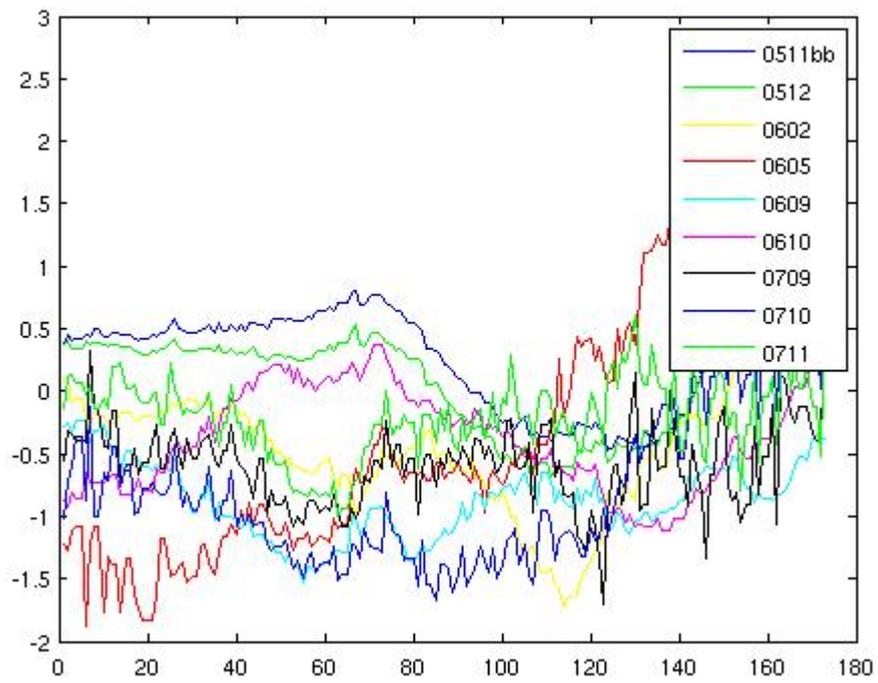


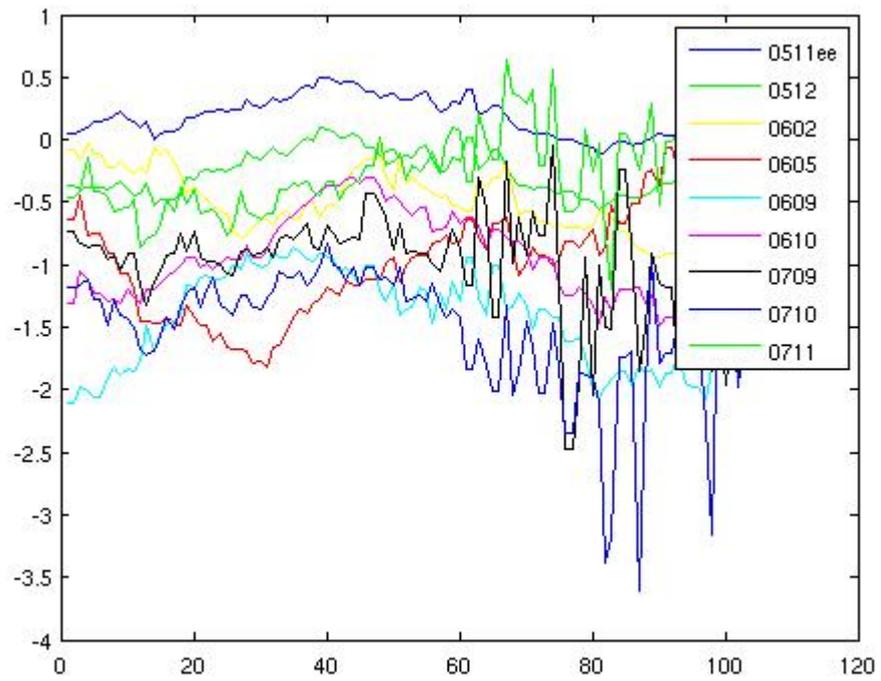
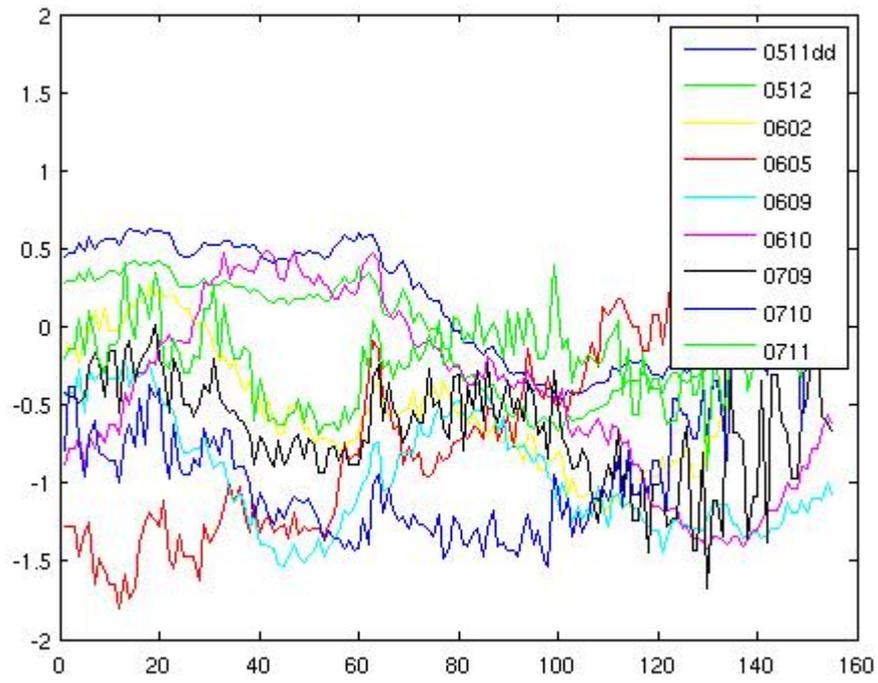


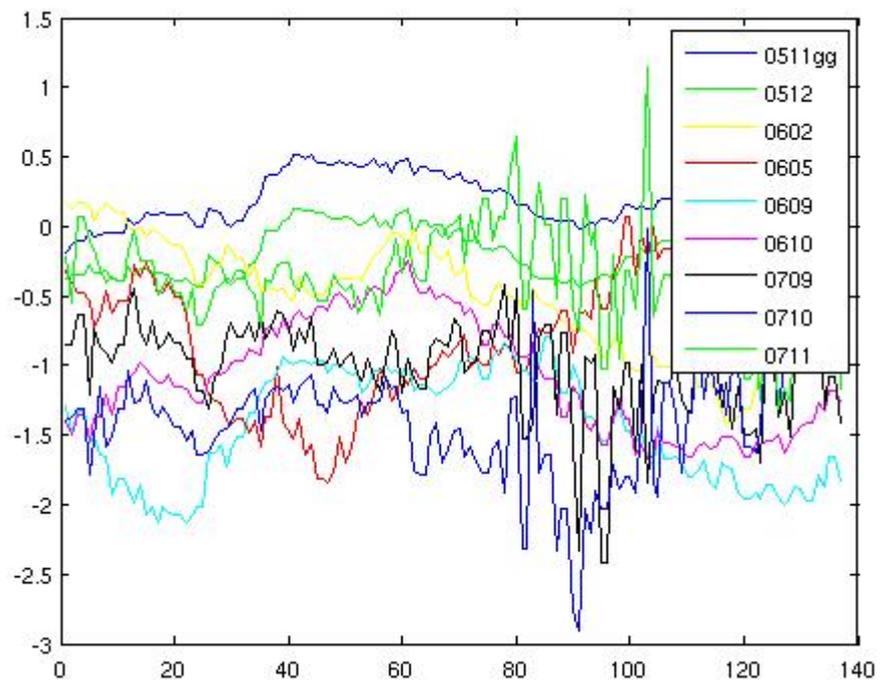
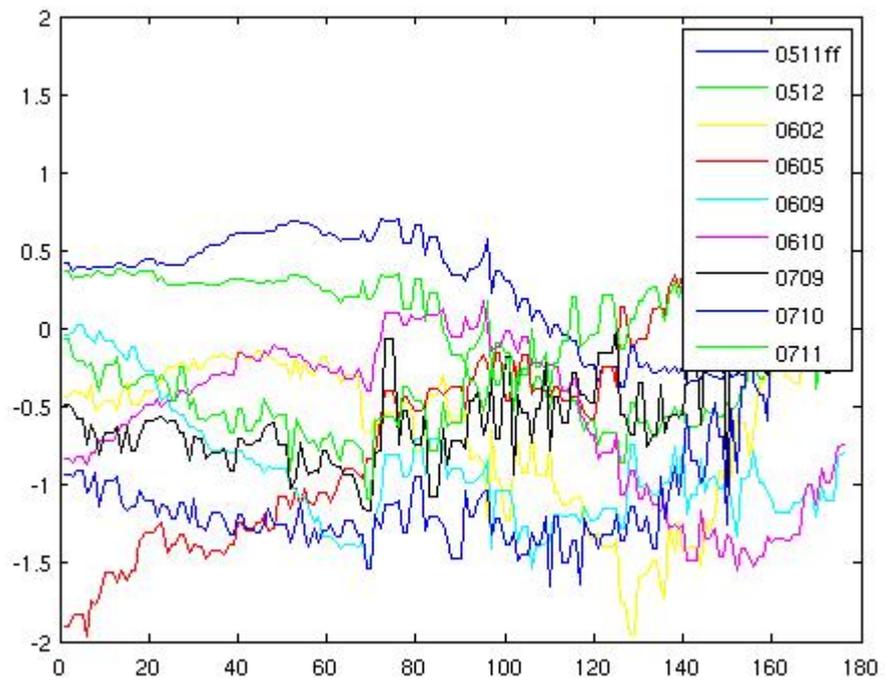


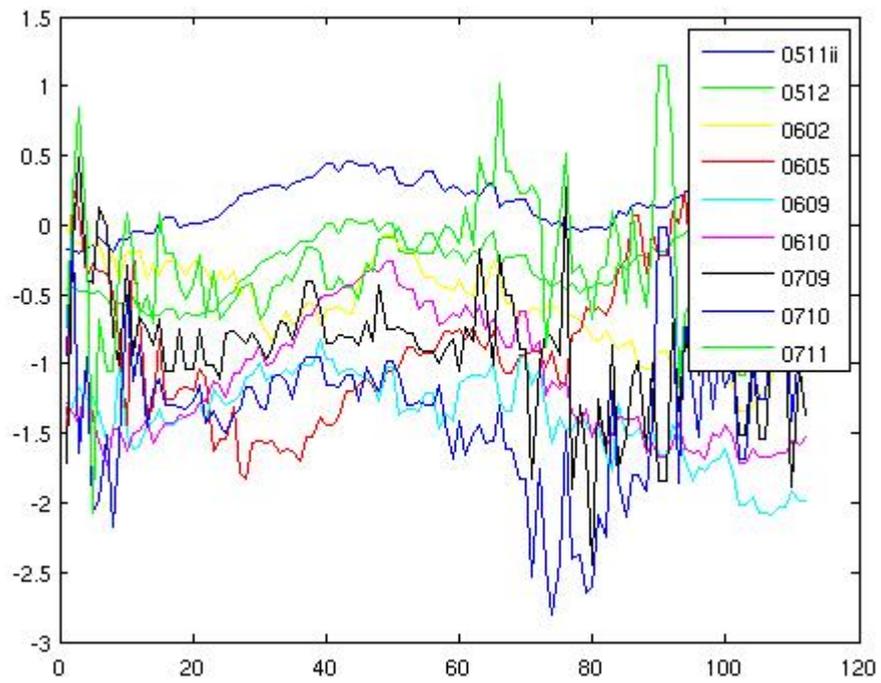
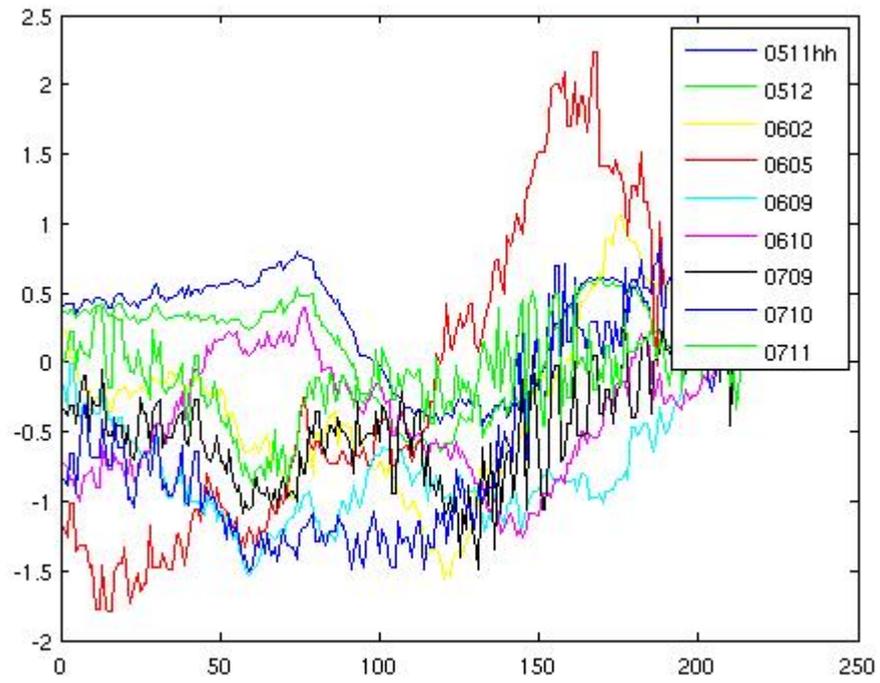


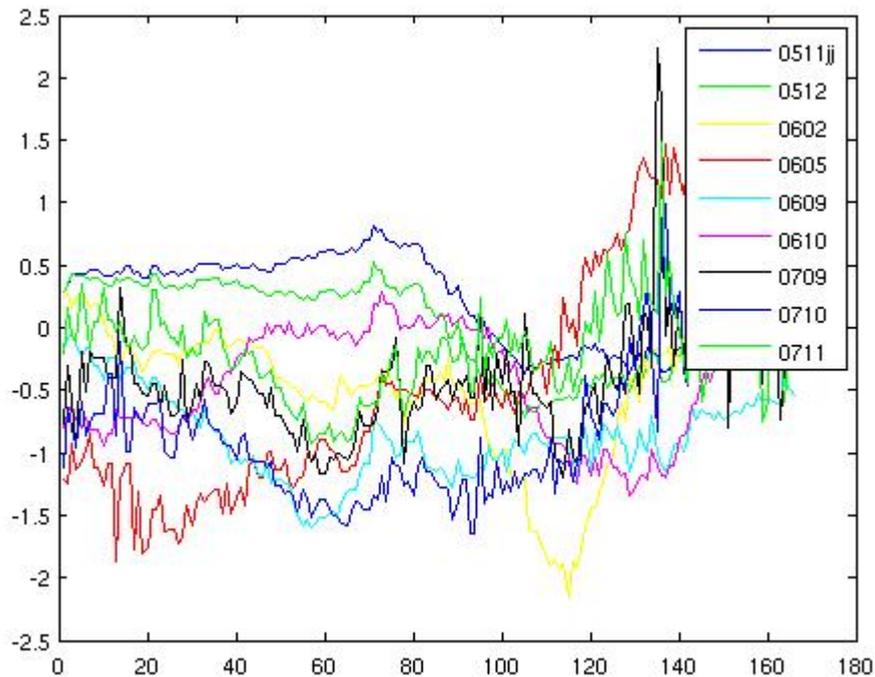












第11図:断線それぞれにおける断層のずれの変化

そして第11図を見るに、ずれの大きさは小さくなってきているものの、継続して動いているように見える。最終的に収束するであろうが、いつ収束するのかは、まだまだ先になりそうだ。

#### 4: 結論・課題

以上の事から、チャマン断層の周りのプレート運動により、ゆっくり地震が比較的穏やかな地震(Mw 5前後)と同時に起きて、グローバルな地震ネットワークで検知されない多数の小さな地震(無感地震)が、Mw 7.0クラスの巨大地震の代わりに深部で起こっていることを表している。一方、ゆっくり地震はこのまま収束すると思われたが、2008.10月末~11月初頭にかけて、この近辺で中規模(M5の後半からM6の前半)の地震が起きたので、この地震がゆっくり地震に何らかの影響を与えたのかどうかを調査してみたい。

#### 5: 謝辞

担当教諭の古屋先生には多大な協力をして頂いた。ここに記して謝する。

#### 6: 参考文献

Ambraseys, N., and R. Bilham (2003), Earthquakes in Afghanistan, Seismol.

Res. Lett., 74, 107-123.

Furuya, and S. P. Satyabala (2008), Slow earthquake in Afghanistan detected by InSAR. GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 35, L06309, doi:10.1029/2007GL033049.

古屋正人 (2006), 地殻変動観測の新潮流InSAR, 測地学会誌, 第52巻, 第4号, 225-243頁