

2007年5月のラオスの地震 (Mw6.3) と同年6月の  
雲南の地震 (Mw6.1) に伴う地殻変動の検出

Co-seismic deformation of the two earth-  
quakes at Laos (May 2007, Mw6.3) and Yun-  
nan (Jun 2007, Mw6.1)

北海道大学理学院 自然史科学専攻 宇宙測地学研究室 2年

芹澤 伸隆

2012年2月8日

## 要旨

近年の宇宙測地技術の発展により、現在では衛星を利用した様々な方法で地表の観測が可能となっている。地表変動を測るのに有効な宇宙測地技術の一つとして、合成開口レーダー(Synthetic Aperture Radar; SAR)がある。地殻変動の研究分野においては、GPS も良く使われているが、いつ発生するかわからない地震に伴う地殻変動を、地上に観測点を必要とすることなく広く面的に捉えられるという点は、非常に有用性が高い。本研究では、ALOS (Advanced Land Observing Satellite; 日本名「だいち」) に搭載された合成開口レーダー PALSAR の観測データを用いて、2007年5月16日にラオスで発生した Mw6.3の地震と、その約2週間後の2007年6月2日にラオスの国境に近い中国・雲南で発生した Mw6.1の地震について解析を行い、地殻変動を検出した。

この地域は、従来のプレートテクトニクスによればユーラシアプレートとなるが、最近の見方では、インド・オーストラリアプレート、フィリピン海プレート、北側がユーラシアプレート (あるいはサウスチャイナブロック) に囲まれた領域(スンダブロック)であり、地震の発生した箇所は、ユーラシアプレートとスンダブロックとの境界付近と考えられているが、GPS による観測点が少ないため、明確な調査は行われていなかった。

そこで、L-バンドの ALOS/PALSAR データより InSAR を用いることで、二つの地震に関連する地殻変動を検出し、簡単な断層モデルによって変動をどの程度まで説明出来るかを試みる。さらに、gmsh を用いて三角形要素のメッシュからなる、実際の断層に比較的近いと思われる断層モデルを作成し、変動のより詳しい説明を試みる。干渉画像・断層モデルを作成して行く上で、ラオスの地震は、2つの断層が同時に動く共役断層であった可能性が高いことが分かったため、それが確かに共役断層なのかを地質学的な研究も絡め、確かめていく。

# 目次

1. はじめに	4
1.1 宇宙測地技術の進歩と地殻変動	4
1.2 地殻変動の検出	5
1.2.1 GPSとInSAR	5
1.2.2 SAR衛星「だいち」	6
1.3 SARの仕組み～SLC画像作成と高分解能実現のジオメトリ	7
1.3.1 SAR衛星は何をしているのか？	7
1.3.2 パルス圧縮技術 (Pulse compression technique)	8
1.3.3 合成開口とは？	9
1.4 研究目的	10
2. 観測地域と解析手法	10
2.1 観測地域と近辺のテクトニクス	10
2.2 使用データ	14
2.2.1 ALOS/PALSARデータ	14
2.2.2 数値標高モデル (Digital Elevation Model : DEM)	16
2.3 SARデータを用いた解析	16
3. 観測結果	18
3.1 地震時地殻変動(雲南)	18
3.1.1 Global CMT 解・USGSとの比較	19
3.1.2 断層モデルの推定(一様滑りの矩形断層モデル)	20
3.1.3 フォワードモデリングとGmsh	23
3.2 地震時地殻変動(ラオス)	26
3.2.1 余効変動	29
3.2.2 Global CMT 解・USGSとの比較	31
3.2.3 断層モデルの推定(一様滑りの矩形断層モデル)	32
3.2.4 フォワードモデリングとGmsh	35
3.2.5 ラオス近辺の断層	38
4. 結論	40
5. 謝辞	41
6. 参考文献	41

# 1、はじめに

## 1.1 宇宙測地技術の進歩と地殻変動

近年の宇宙測地技術は急速に進歩してきた。1970年代以降はVLBI (Very Long Baseline Interferometry)、SLR (Satellite Laser Ranging)、GPS (Global Positioning System) などが発達し、これらは現在の地球物理学的研究において必要不可欠なものとなった。地殻変動の分野においてはGPSによる研究が現在でも主流であるが、近年ではSAR (Synthetic Aperture Radar : 合成開口レーダ) を用いた研究もよく見られるようになってきた。1992年にカリフォルニアで起こったLanders地震による地殻変動をInSAR

(Interferometric SAR : 干渉SAR) で捉えたMassonnet et al. (1993) という有名な論文がある。地震時地殻変動の分布を鮮やかな虹色の図で表現したのである。当時Natureの表紙を飾ったあの衝撃的な報告は、ただ単に人目を引きつける美しい図だったというわけではない。InSARは地表に観測点を必要とすることなく、天候に無関係で広範囲かつ高分解能で変動を検出することができるのだ。この手法は、地表に観測点を設置できない場所 (例えば山岳地帯) で地殻変動を検出するのはもちろん、氷河、氷床の流動や森林伐採の推移など多方面で応用されている。本研究での観測地域であるラオス北部、中国・雲南南部でも、GPS観測点が少ない地域であったので、この手法は大いに有用性があったと言える。

2006年には、JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency : 宇宙航空開発研究機構) によって、日本のSAR衛星「だいち (ALOS)」が打ち上げられた。このALOSの打ち上げ以降、2007年に新潟県中越沖地震、2008年には中国・四川省の大地震、岩手宮城内陸地震、2010年には南米チリ地震など多くの大地震が起こっており、それぞれの地震に伴う地殻変動がALOSのデータを用いて解析されている。最近では、山岳氷河の流動モニタリングにもALOSが使われており、ALOSの存在する意義は大きい。残念ながら、2011年4月22日に発生した電力異常によって、同年5月12日に運用が終了されてしまった。とはいえ今後の計画として、後継機ALOS-2が計画されており、これからもALOSによるSARデータを用いた研究は日々行われていくことだろう。

## 1.2 地殻変動の検出

宇宙測地技術を用いた地殻変動の研究では、近年は主にGPSかSARを用いた研究が多い。本研究のような地震時の地殻変動の検出をする際には、どちらかが使われていると言っても過言ではない。ここにGPSとSARの比較と、今回用いたSAR衛星の紹介をする。

### 1.2.1 GPSとInSAR

一番の大きな違いは、地表に観測点を必要とするか否かということである。GPSは地表の受信機に向けて宇宙から電波を送信し、かかる時間を測定することでその位置を特定している。日本国内にはGPSの電子基準点が約1200か所もあり、世界最高の分布密度を誇っている。これが、地震の多い日本でGPSによる地殻変動の研究が進んでいるゆえんである。これだけの観測点が多いと、日本のどこで地震が起こってもたいていは詳細な観測データが得られ、解析が可能となる。しかし、得られるデータは前もって設置されたある観測点での3次元変位である。

一方、SARは地表に観測点を必要とすることなく、地殻変動の変動を面的に捉えられることが最大の利点である。いくらGPS観測点が多い日本でさえ、観測点が少ない地域はある。そんなところで地震が起こり地殻変動を解析したいとなれば、SARの出番である。SAR衛星は地表に向けてマイクロ波を射出し、その反射波の強さから対象物の物理的性質を調べることができる。SARの歴史は1864年のマクスウェルの電磁場理論に始まり、初期のSARは軍事用に開発されたものであった。その後、1970年代に民間にSAR技術が公開され、現在に至るまで様々な技術向上と衛星の打ち上げが行われた。SARを応用したInSARが注目を集め始めたのは1990年代になってからのことである。

	干渉SAR	GPS
(A) 地上の観測施設	不要	受信機が必要
(B) 面的情報	可能	不可能
(C) 連続観測	不可能	可能
(D) 観測時期	数十日に1回(最短46日)	24時間可能

表1.1 : GPSとInSARの比較

(参考 : 国土地理院 HP

<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/mechanism/mechanism05.html>)

### 1.2.2 SAR衛星「だいち」

2006年、JAXA（Japan Aerospace Exploration Agency：宇宙航空開発研究機構）によって陸域観測技術衛星「だいち（ALOS：Advanced L-band Observing Satellite）」が打ち上げられた。この衛星の特徴はフェーズドアレイ方式Lバンド合成開口レーダ（PALSAR）というセンサーを持ち、最高10×10mの分解能で地表の情報を面的に取得できることである。フェーズドアレイ方式とは、照射するマイクロ波の位相面の向きを変えることでアンテナの向きを変えずにマイクロ波の照射方向を変えることが出来る方式のことである。また、Lバンドという長い波長（23.6cm）を用いることで地表の植生の影響されることなくデータを得られる。さらにPALSARには5つの異なった観測モードがある。単偏波高分解能モード（FBS）、二偏波高分解能モード（FBD）、多偏波モード（POL）、ScanSARモード、そして直接伝送モードである。それぞれが異なる用途を持ち、多方面に運用されている。本研究ではFBSとFBDのデータを用いて解析を行なった。地殻変動を検出するという点では、ScanSARが最近注目を集めている。ScanSARは、広域観測モードと呼ばれ、その観測幅はなんと350kmである。2008年に起きた中国四川地震、2010年に起きたチリ地震、2011年に起きた東北地方太平洋沖地震など、広大な範囲で変動が発生した地震に対して有益であることから、解析に用いることが増えている。



打ち上げ	2006年01月24日
軌道高度	約700km
重量	約4 t
回帰日数	46日
アンテナサイズ	8.9m×3.1m
観測波長	Lバンド (23.6cm)
分解能	7~44m
オフナディア角	8~60度
走査幅	40~70km

図1.1：SAR衛星だいちの概観  
(画像，衛星データ©JAXA)

表1.2：衛星データ

## 1.3 SARの仕組み～SLC画像作成と高分解能実現のジオメトリ

### 1.3.1 SAR衛星は何をしているのか？

SAR衛星だいちはどのように地表のデータを取得しているのか、下図に簡単な模式図を示した。この図は1つのレーダアンテナを持つ衛星（実開口レーダ）の場合である。SAR衛星は衛星の進行方向（＝アジマス方向）に対し、右斜め下方向（Slant Range方向：今後はRange方向と呼ぶ）に向けてマイクロ波を連続的に送信し、その反射波を解析することで対象物の大きさや表面の性質を調べることができる。このようなレーダの空間分解能はアンテナの大きさに比例して向上する。また、周波数が一定のマイクロ波の場合、そのパルス幅に反比例する。ということは、できるだけ大きく出力の大きいアンテナを作れば高分解能が実現できるのだが、実際の宇宙空間で実現するには限界がある。そこで、SARの高分解能を実現させたパルス圧縮技術と合成開口について説明する。

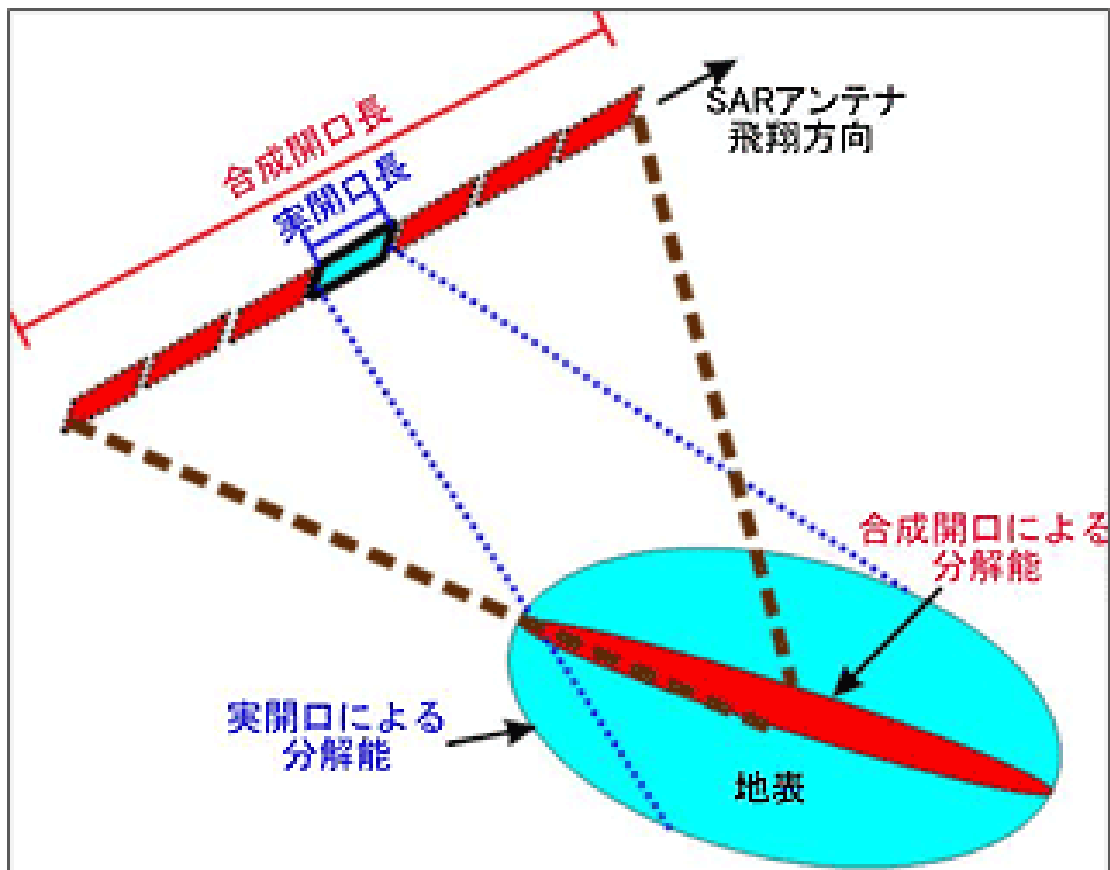


図1.2 SARのジオメトリ

(参考：国土地理院 HP

<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/mechanism/mechanism01.html>)

### 1.3.2 パルス圧縮技術 (Pulse Compression Technique)

パルス圧縮技術とは、周波数に変調をかけた長い送信パルスを使い、受信パルスに適切な処理をほどこすことでRange方向の高分解能を得る技術である。現在のSARのほとんどは、この技術を用いて高分解画像を生成している。

周波数が時間  $\tau$  と共に線形に変化するマイクロ波パルスは FM (Frequency Modulation) パルス、もしくはチャープ (chirp) パルスと呼ばれ、次の式で表せる。

$$v(\tau) = \text{rect}(\tau/T_p) \cos\{2\pi(f_c\tau + K_r\tau^2/2)\} \quad (1.1)$$

ここで、 $\text{rect}(\tau/T_p)$  は長さ  $T_p$  の矩形関数、 $T_p$  はパルス持続時間、 $\tau$  は時間変数、 $f_c$  は中心周波数 (Centre Frequency)、 $K_r$  はチャープ率である。チャープ信号の位相は、

$$\psi(\tau) = 2\pi(f_c\tau + K_r\tau^2/2) \quad (1.2)$$

と表せるので、瞬間周波数 (Instantaneous Frequency) は、

$$f(\tau) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\psi}{d\tau} = f_c + K_r\tau \quad (1.3)$$

となり、時間とともに線形に変化することがわかる。

地上のセンサーからの距離  $R$  に 1 点だけ点反射源がある場合を仮定すると、 $t$  ( $=2R/c$ ,  $c$ : 光速) 秒後に返ってくる反射波は次の式ようになる。

$$v_r(\tau) \propto \text{rect}(\tau - t/T_p) \cos\{2\pi(f_c(\tau - t) + K_r(\tau - t)^2/2)\} \quad (1.4)$$

これがセンサー上で得られる生データ (Raw Data) である。しかし、このままでは周波数が高すぎるので、ローパスフィルター (Low-pass Filter) をかけて、低周波な複素数データにする。この処理は IQ-Demodulation と呼ばれ、通信工学の分野では有名な手法である。

$$v_r(\tau) = \text{rect}(\tau - t/T_p) \exp(-i4\pi R/\lambda) \exp\{i\pi K_r(\tau - t)^2/2\} \quad (1.5)$$

ところが、実際に返ってくる反射波は一般にノイズが多いため、我々はこれから本来の反射波だけを抽出したい。そこで整合フィルター (Matched Filter) を使い、受信データとの相関をとることで反射信号を抽出する。すると最終的に得られる反射波  $v_{\text{out}}$  は、次のようになる。

$$v_{\text{out}}(\tau) = T_p \text{sinc}\{K_r T_p(\tau - t)\} \quad (1.6)$$

上式を見てみると、最終的に得られた波形は sinc 関数の形になっている。



sinc 関数とは波形の真ん中だけが‘鋭く’尖った形をしている。最初の波形と最終的に得られた波形を比べると、パルスが圧縮されたかのように見える。圧縮前のパルスの Range 分解能 $\Delta r$ は、

$$\Delta r = \frac{ct_p}{2} \quad (1.7)$$

であるが、パルス圧縮技術を用いた場合、圧縮後のパルス幅は $1/K_r T_p$ なので、Range 分解能 $\Delta r_{out}$ は、

$$\Delta r_{out} = \frac{ct_p}{2} = \frac{c}{2K_r T_p} = \frac{c}{2B_w^r} \quad (1.8)$$

$$B_w^r = K_r T_p \quad (1.9)$$

ここで、 $B_w^r$ はバンド幅 (Bandwidth) である。圧縮後の分解能は最初に比べて、 $K_r T_p^2$ に圧縮されたことがわかる。これがパルス圧縮技術の概要である。

なお、この節では Range 方向のパルス圧縮について触れたが、実は Azimuth 方向にも似たような処理が施される。Azimuth 方向の分解能を向上させるためには、ドップラー効果を考慮したパルス圧縮技術が用いられている。これを行わないと、その分解能は実開口レーダと変わらないことになってしまうのだ。また Azimuth 方向に関しては、次節で述べる合成開口という技術も利用して、分解能を高めている。

### 1.3.3 合成開口

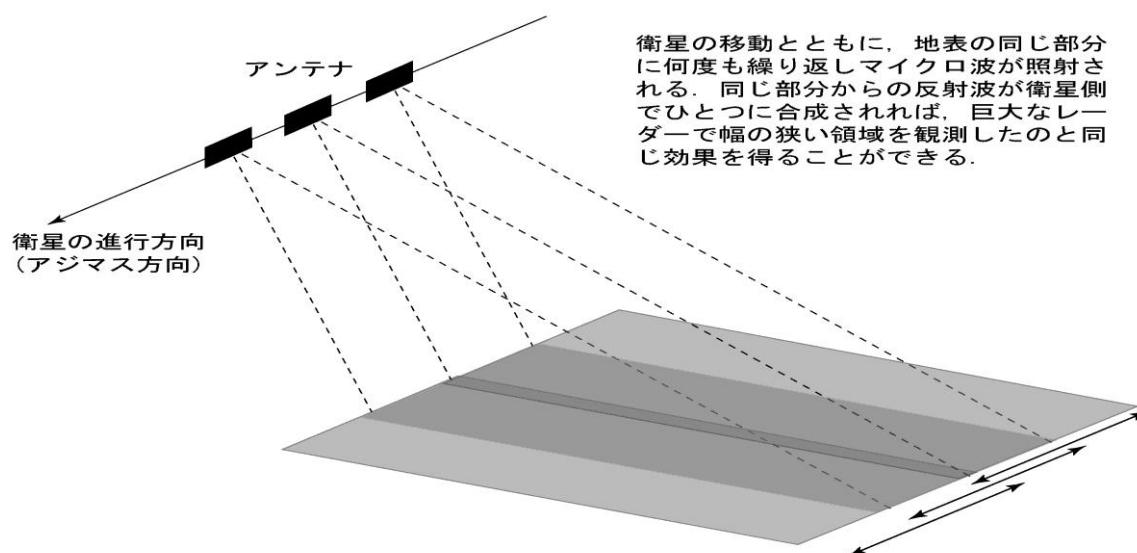


図1.4：合成開口の仕組み (参考：測地学テキスト

<http://wwwsoc.nii.ac.jp/geod-soc/web-text/part2/2-4/2-4-1-4.html>)

前節で分解能向上のためにパルス圧縮技術について説明した。実は、Azimuth 方向の分解能向上のためにもう 1 つ使われている技術が合成開口である。合成開口とは言葉の通り、衛星が動きながらパルスを連続的に送信することで、あたかも空間に巨大なアンテナがあるかのように‘合成’する技術のことである。この技術とドップラー効果を利用したパルス圧縮技術を用いると、結果として Azimuth 方向の分解能 $\Delta a$ は式で表せる。

$$\Delta a = \frac{D_A}{2} \quad (1.10)$$

この式を見ると、Azimuth 方向の分解能は、衛星の高度や使う波長に依存せず、アンテナの幅だけで決まることになる。これは、SAR において非常に特徴的な結果である。

## 1.4 研究目的

ラオス周辺は GPS 観測点が少なく、また、L-band 以外の X-band・C-band(Envisat)などでは植生が密であるため木の上のほうの葉っぱの部分で電波が反射してしまい、地面まで電波が到達せず、2回の SAR 観測で大きな違いが生じて、うまく干渉しなくなってしまうので、干渉画像から変動を読み取ることは難しかった。これにより、この地域一帯はほとんど研究の対象になっていなかった。そこで今回、L-band である ALOS/PALSAR を利用することによって初めて、InSAR による地震時地殻変動の観測と、そこから得られたデータを基にした断層モデルの構築を行い、変動の詳細を説明することを試みるのが本研究の目的である。

## 2.観測地域と解析手法

### 2.1観測地域と周辺のテクトニクス

ラオスは国土の多くが山岳で占められており、近隣に比べ森林資源が多く残っている国である。この地域は、従来のプレートテクトニクスによればユーラシアプレートとなるが、最近の見方では、インド・オーストラリアプレート、フィリピン海プレート、北側がユーラシアプレート（あるいはサウスチャイナブロック）に囲まれた領域(スンダブロック)であり、地震の発生した箇所は、ユーラシアプレートとスンダブロックとの境界付近と考えられている。

表2.1、表2.2には地震の CMT(Centroid Moment Tensor)解を示してある。CMT 解とは、有限の断層を一つの点からの力源によるとして、遠地実体波の解析から推定される解である。断層面に加えて場所や深さ、モーメントマグニチュード( $M_w$ )も推定される。



図2.1：観測地域(ラオス)

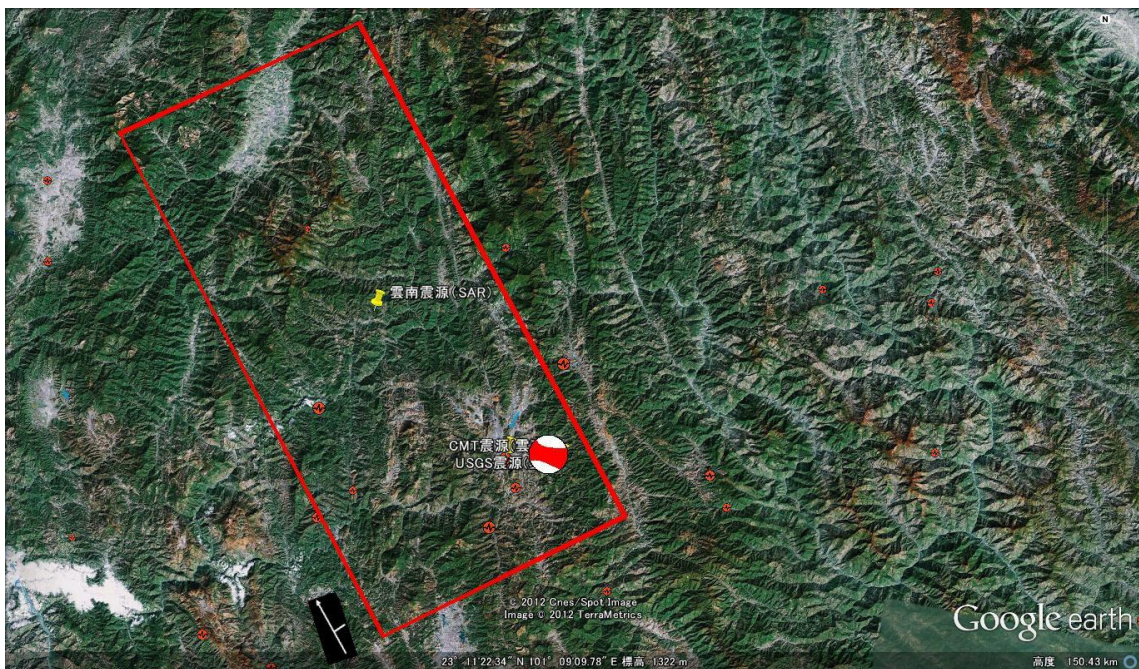


図2.2：観測地域(雲南)

赤枠内の中央のピンの位置が震源で、右下の赤白球は Global CMT による震源球である。



Date	2007/05/16	Mw	6.3
Latitude	20.52 N	Fault plane	(1) Dip=81° Strike=324°
Longitude	100.89 E		
Depth	12.6 km		(2) Dip=89° Strike=54°

表2.1：地震のGlobal CMT解(ラオス)(<http://www.globalcmt.org>)

Date	2007/06/02	Mw	6.1
Latitude	23.02 N	Fault plane	(1) Dip=63° Strike=146°
Longitude	101.13 E		
Depth	12.0km		(2) Dip=69° Strike=247°

表2.2：地震のGlobal CMT解(雲南)(<http://www.globalcmt.org>)

Dip（傾斜角）：断層面と水平面のなす角

Strike（走向）：断層面と水平面の交線が北の方向となす角

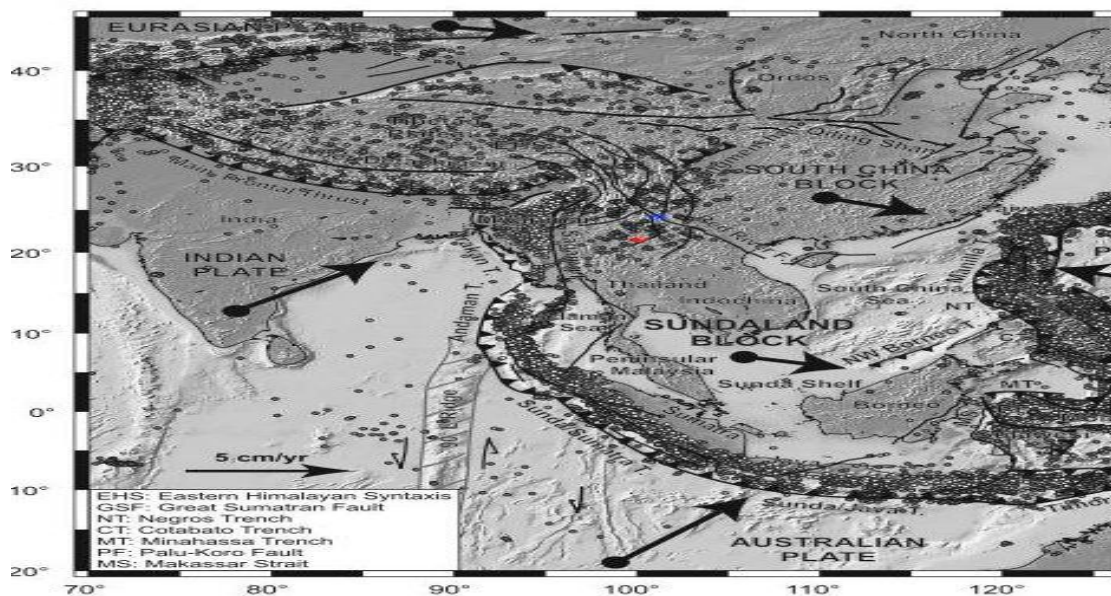


図2.3：近辺のテクトニクス(Simons et al. 2007,JGR)

赤○：ラオス、青○：雲南

図2.3より、ラオス・雲南の地震はスンダブロックとユーラシアプレートとの

境界で発生したことが分かる。

この地域は、Red River 断層や Sagaing 断層のような、北西から南東方向に走る右横ずれ型の断層の他に、北東から南西方向に走る左横ずれ型の断層も存在している。

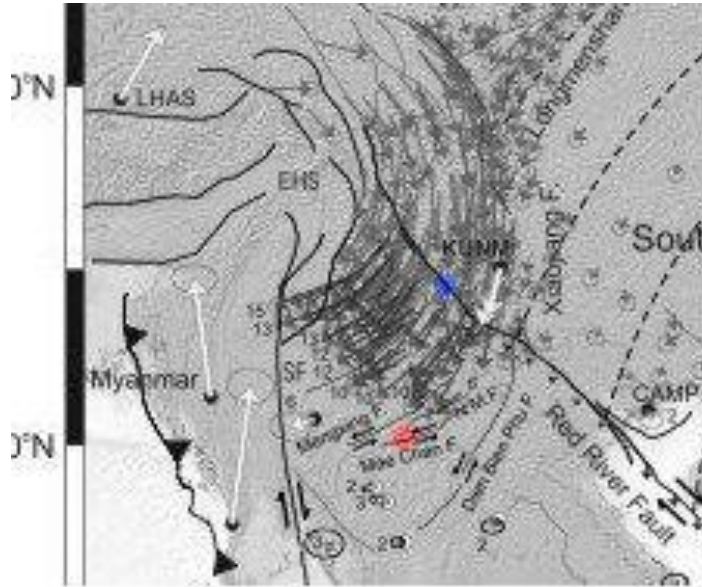


図2.4：近辺の断層(Simons et al. 2007, JGR)

赤○：ラオス、青○：雲南

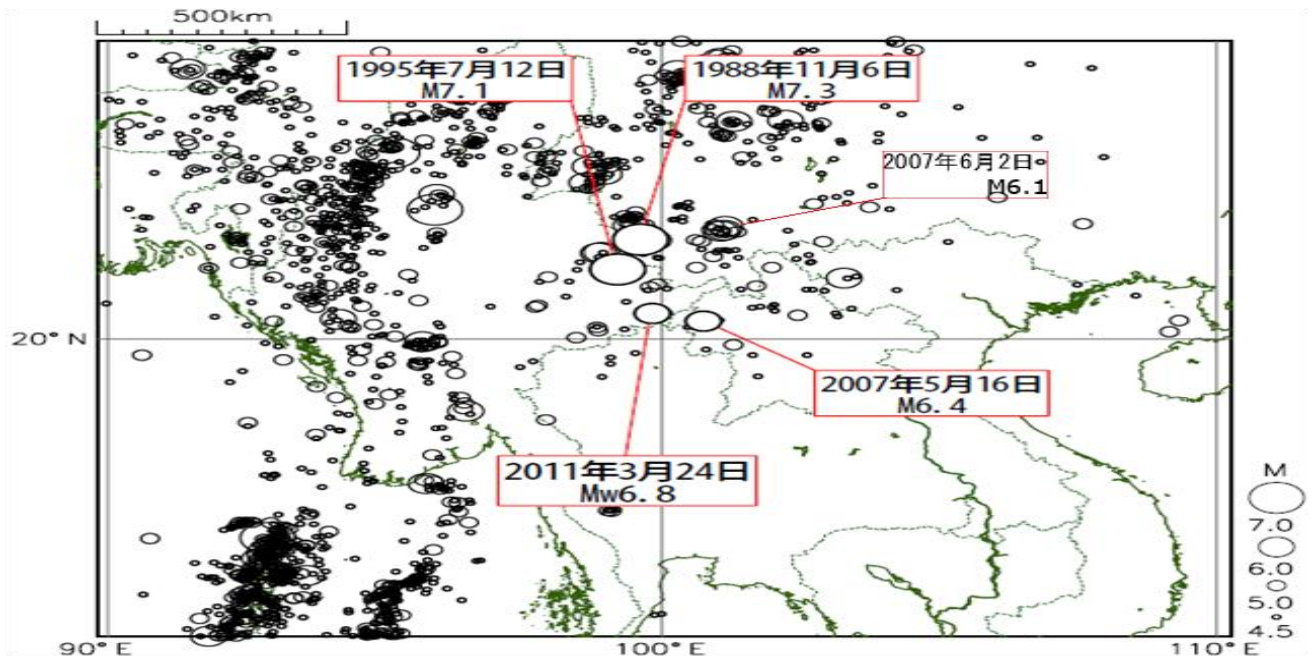


図2.5：近辺で発生した地震(気象庁地震予知情報課

<http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/world/20110324/tc201103242255.pdf>)

また、周辺の GPS 観測点は図2.6からも分かるとおり、南に偏っており、震源付近にはほとんど観測点が置かれていない。そのため、図2.5より観測地周辺は地震がいくつか発生していることが分かっているにもかかわらず、日本やアメリカ西海岸のような密な GPS 観測網が有るわけではないので、詳細な地殻変動の様子はまるでわかっていないのが現状である。

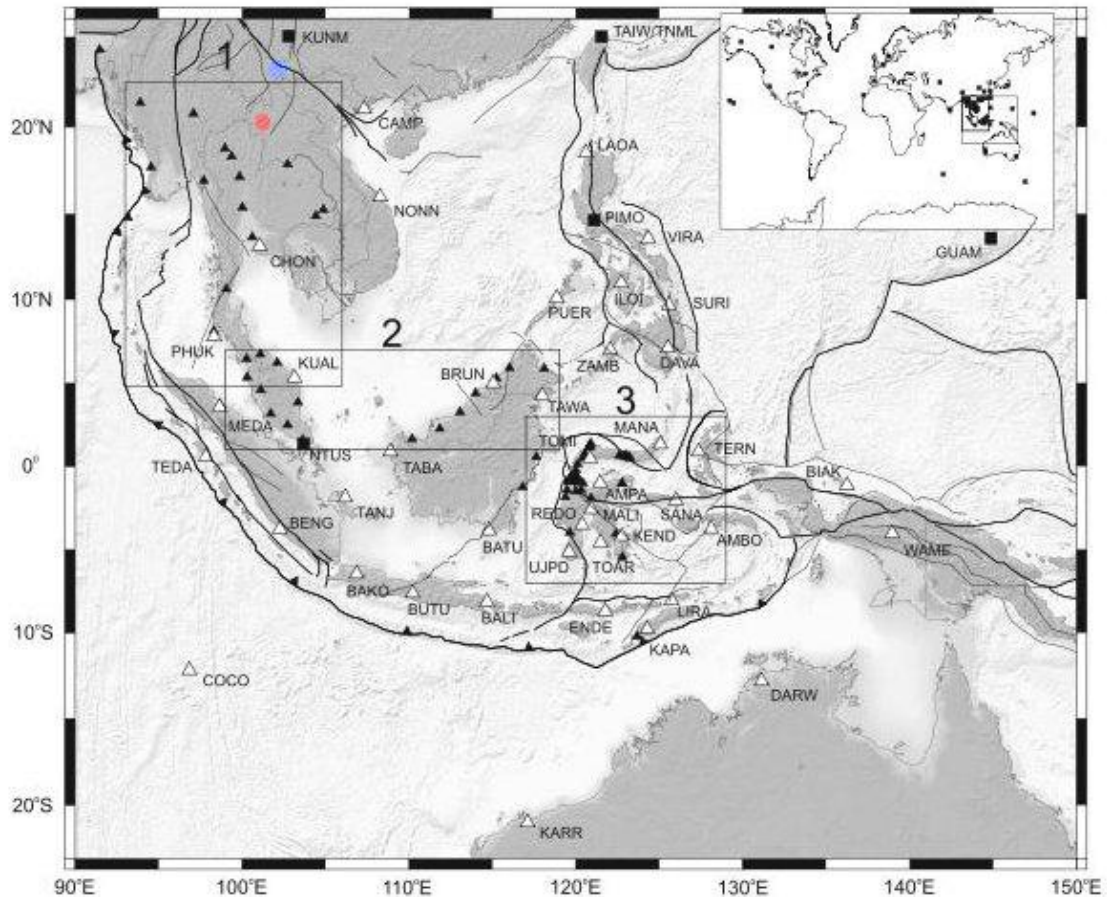


図2.6 : 周辺の GPS 観測点(Simons et al. 2007,JGR)

赤○ : ラオス、青○ : 雲南

△ : GEODYSSSEA (Geodynamics of South and Southeast Asia) points

▲ : new densification points

■ : IGS points

## 2.2 使用データ

### 2.2.1 ALOS/PALSAR データ

InSAR に用いたデータを次に示す。SAR 解析によって地震による地殻変動を



検出するためには、地震発生日を跨ぐ2つのSLC画像が必要である。ここで地震前の日付のデータを Master、地震後の日付のデータを Slave と呼ぶ。なお、表中には (YYYYMMDD=西暦、月、日) のように記載した。B-perp とは SLC が撮影された2つの時刻の衛星の位置のずれを表しており、基線長と呼ぶ。時と場合にもよるが、目安として1000m 以下だとうまく干渉処理が行われる。Span はデータ間の経過時間(単位：日)を表している。Span が長すぎると、画像マッチングの際にノイズが発生しやすくなり、干渉画像が作成できない事もある。次の表中でA～Dはラオスの地震時地殻変動、E～Gはその余効変動を調べるためのデータのペアであり、YAは雲南の地震時地殻変動を調べるためのペアである。

	Master_Slave	Mode	Bperp	Span(days)
A	20070102_20080822	FBS/FBD	-181	596
B	20070217_20070705	FBS/FBD	318.61	133
C	20070217_20070820	FBS/FBD	403.89	179
D	20070217_20001005	FBS/FBD	388.26	225
E	20070705_20070820	FBD/FBD	85.37	46
F	20070705_20071005	FBD/FBD	69.76	92
G	20070820_20071005	FBD/FBD	-15.61	46
YA	20070131_20070618	FBS/FBD		138

表2.3：解析に使用したデータ

軌道は全て Ascending(昇交軌道)で、観測 Path：484, Frame：390・400(ラオス)。観測 Path：483, Frame：440・450(雲南)。使用した波長：1.27Ghz、画像の大きさは約180km×120km である。

震源が Frame の端にかかっていたため、隣接する Frame を結合させ干渉画像を作成する必要があった。なので、通常より画像が大きくなっている。

なお、本研究では、ALOS/PALSAR センサーが得る FBS と FBD のデータを用いている。FBD は FBS に比べ、用いているバンド幅が半分の長さ (FBS：28MHz, FBD：14MHz) であり、分解能が半分になっている。このままでは FBD と FBS でのマッチングは出来ないので、複素画像を作成する際に処理を行い、干渉画像を作成できるようにする。また、解析には Gamma (Wegmüller and Werner, 1997) のソフトウェアを用いた。

## 2.2.2 数値標高モデル(Digital Elevation Model; DEM)

SAR データを処理する際に、地形の影響を除去するために用いるのが数値標高モデル(DEM)である。本研究では SRTM4の DEM を使用した。SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)とは、NASA のスペースシャトルに搭載したレーダーで地球の数値標高モデルを作成することを目的としたミッションのことであり、このモデルを改良したものが SRTM4である。空間分解能は90m メッシュで、データはインターネット上からダウンロードできる (<http://srtm.csi.cgiar.org/>)。

## 2.3 SARデータを用いた解析

2つの複素画像 (SLC1, SLC2) から、InSAR による干渉画像を作るまでは、下の表のようないくつかの段階が存在する。

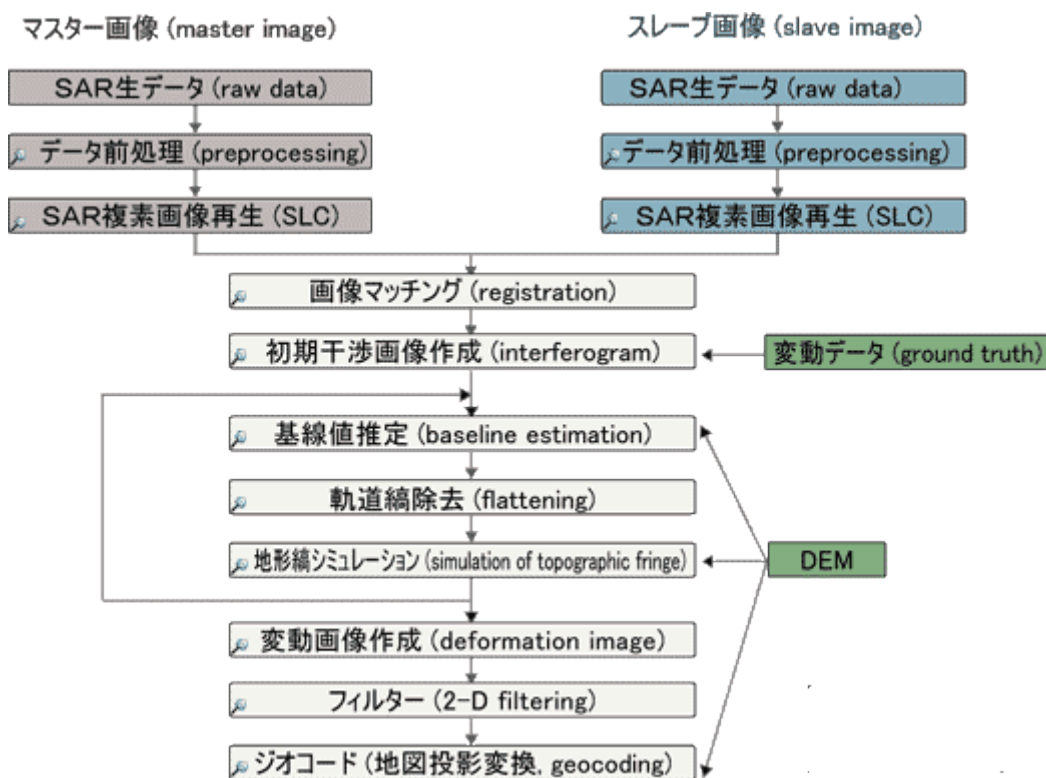


図2.7 : (参考 : 国土地理院 HP

<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/mechanism/mechanism10.html>)

地殻変動を検出するためには、地震を跨ぐ2つの異なる日付の SAR データを‘干渉させる’必要がある。基本的な原理は、高校物理で学ぶヤングの実験で理解できる。2つの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



ると波の光路差に応じて、同位相では強め合って明るくなり、逆位相では弱め合って暗くなる。そして、壁には干渉縞ができる。同様の縞が、InSARでも得られる。数学的には2つのSLC画像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、この作業は位置合わせ(Matching)という作業を終えてからである。データを干渉させるためには同一の軌道(Path)の同一の場所(Frame)の2つのデータを用いるのだが、同じpath, frameと言ってもピクセルレベルまで同じというわけではない。各ピクセルごとの位置合わせを行った上で干渉させなければならないのである。その上、Modeの異なる画像の場合、そのままではマッチングを行えないため、SLC画像を作成するときにModeを統一する処理を行う必要がある。この処理を経て、初期段階の干渉画像が得られる。

ここで生成された初期干渉画像には様々な‘縞’が含まれる。

$$\Delta\varphi = \varphi_{\text{orbit}} + \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{ion}} + \varphi_{\text{displace}} + \varphi_{\text{noise}} \quad (2.1)$$

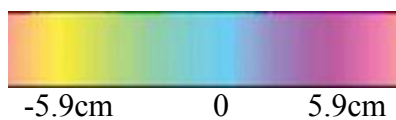
まず、軌道縞( $\varphi_{\text{orbit}}$ )である。これは2つのSARを取得したときの軌道のずれに起因するものである。SARデータを干渉させる際の目安として用いられる指標にBperpという値がある。これは2つの異なる日付に撮像された衛星の位置の差(衛星間距離)を衛星視線方向Bとそれに垂直に投影したものである。それぞれが軌道のずれに相当するもので、この値が小さいほど軌道縞は小さくなる。次に、地形縞( $\varphi_{\text{topo}}$ )を取り除く。これは、地形が様々な形に歪んでいるために、縞も歪むというものである。これを取り除くために、2.2.2で述べたDEMを用いる。衛星の軌道データとDEMを用いて地形縞のシミュレーション画像を作成し、初期干渉画像から差し引くという作業を行う。このシミュレーション画像には変動縞( $\varphi_{\text{displace}}$ )は含まれていないので、地形縞だけを取り除くことができる。

あとは、位相アンラップとジオコーディング(座標変換)を行えば干渉画像の完成である。位相アンラップとは不連続な位相をつなげる作業である。そして、レーダ座標からUTM座標へ直せば、干渉画像の完成である。干渉画像を作る‘究極’の目的は変動縞だけを取り出すことであるが、それは難しい。なぜなら、大気や電離層によるマイクロ波の遅延によるエラー( $\varphi_{\text{atm}}$ 、 $\varphi_{\text{ion}}$ )を補正する処理はGammaでも可能だが、それらの影響を完全に消し切るのは現在でも困難であるためだ。また、位相アンラップの際にもエラーが出るがあるので、最終的に得られる干渉画像には何かしらのエラー( $\varphi_{\text{noise}}$ )が残るものである。しかし、これらのエラーは変動量に比べれば十分小さいことが多いので、解析をする際には基本的に無視している。

### 3. 観測結果

#### 3.1 地震時地殻変動(雲南)

ペアの差分干渉解析を図3.1に示した。カラースケールは、

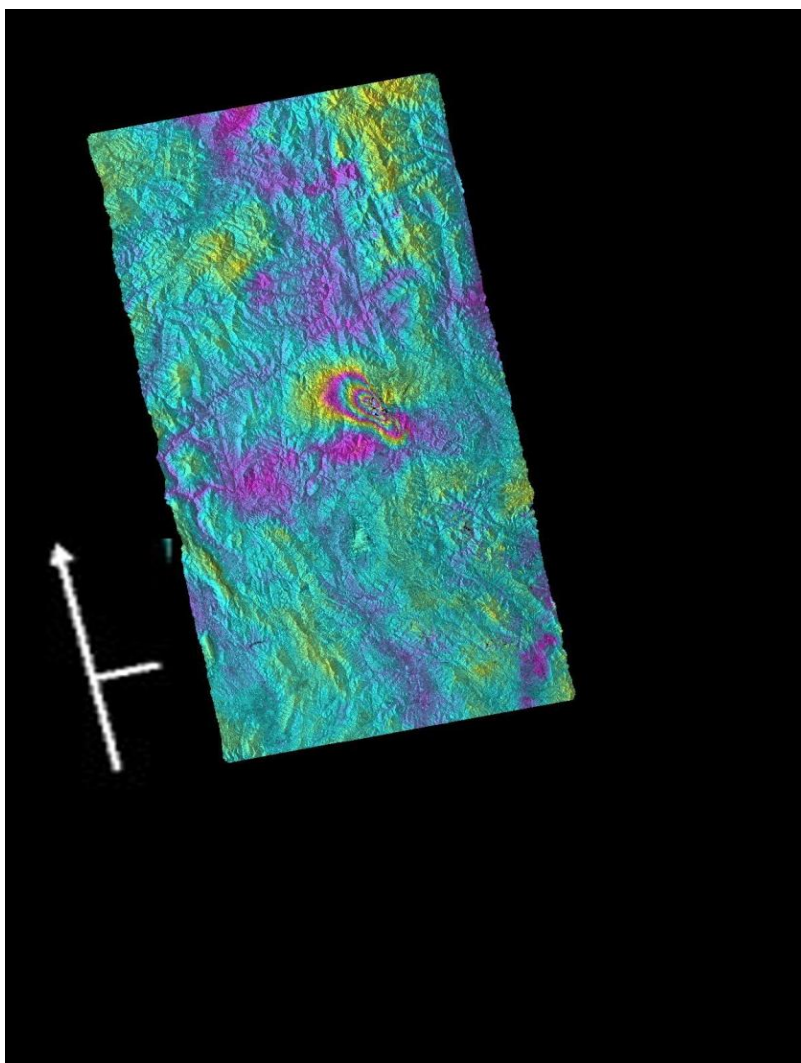


であり、符号については、プラスが衛星視線方向に遠ざかる変動、マイナスが衛星視線方向に近づく変動を表している。

各ペアの結果の東西・南北・鉛直方向への感度は、

$$0.62 \times U_e + 0.11 \times U_n - 0.78 \times U_z \quad (3.1)$$

で表わされる。



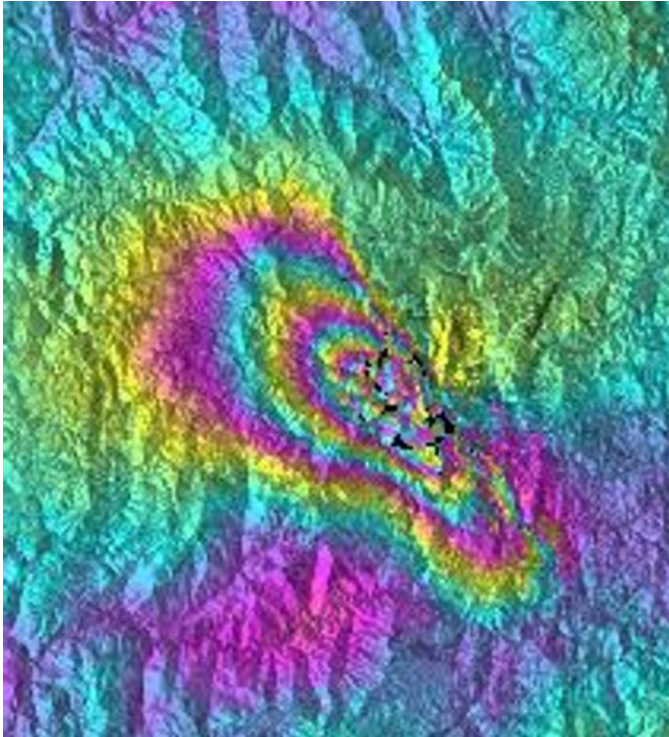


図3.1 : YA:2007/01/31\_2007/06/18の干渉画像と震源の拡大図

図を見ると、画像の中央付近に「目玉」のような縞模様があることに気づく。これは地震に伴う変動が現れたものである。変動量は、約70cmであり、衛星に近づく変動であることが分かる。また、Red River 断層と同じ傾きをもっているため、右横ずれ断層であると考えられる。

### 3.1.1 Global CMT 解・USGS との比較

図3.1の干渉画像よりデータ(図3.2)を求め、Global CMT 解・USGS との比較を行う。Global CMT 解・USGS による震源の位置を UTM 座標に直し、画像から見てとれる震源の位置と比較すると、Global CMT 解・USGS 共に南東にずれており、その距離は直線距離で、Global CMT 解とは約35km、USGS とは約30km 離れていることが分かった。Global CMT 解と震源とは一致しないのが普通だが、Mw6程度の地震の断層が10~15kmであることを考えると、明らかにずれていると言える。ずれの理由としては観測地点の偏りが一番影響を与えていると考えられる。

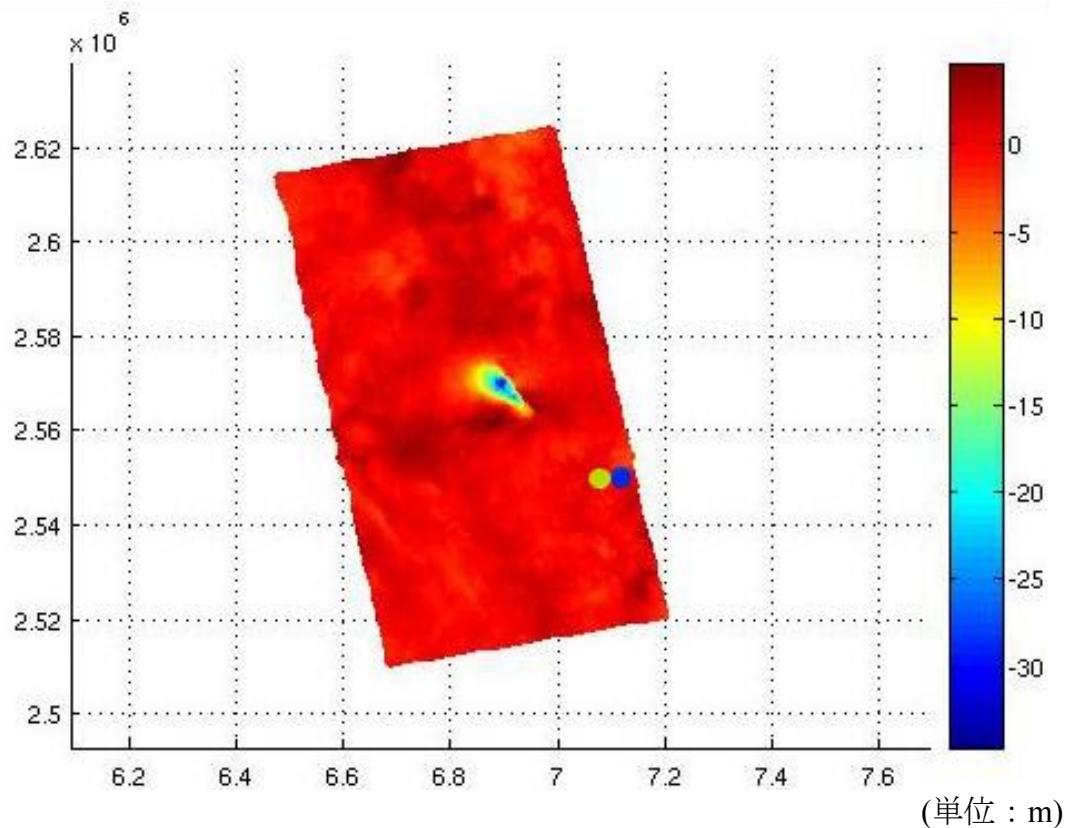
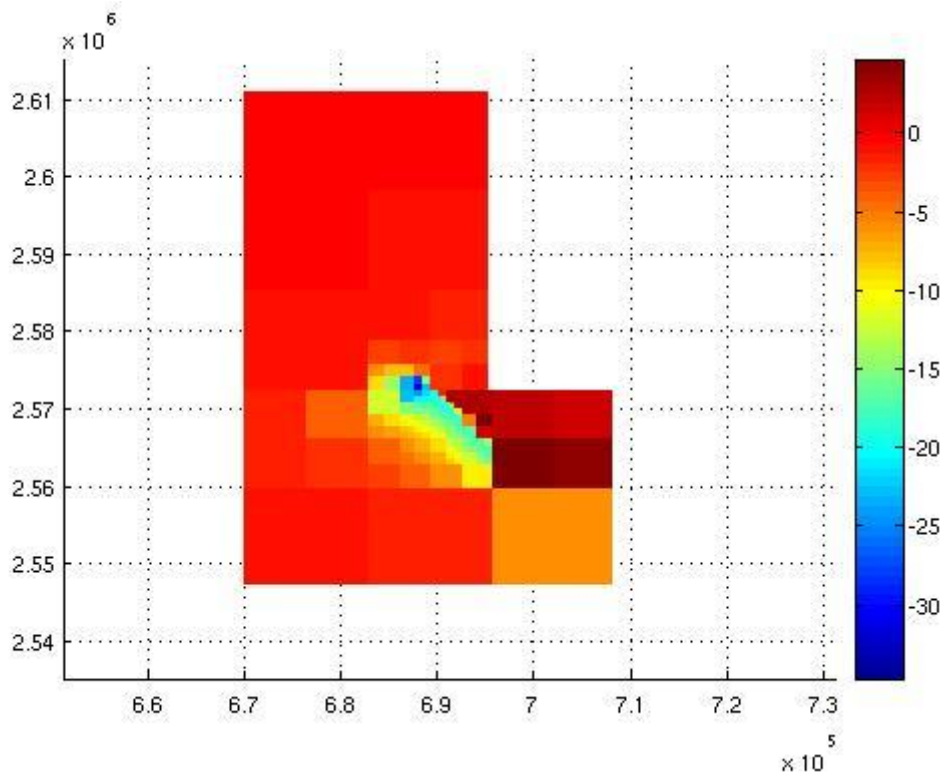
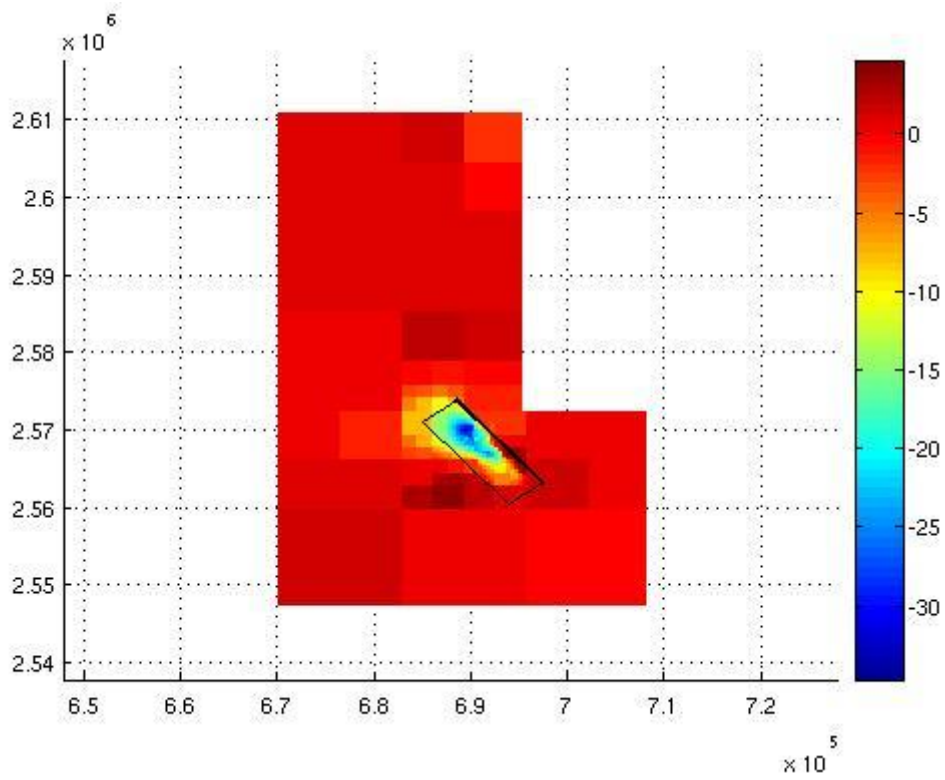


図3.2 : データ(ns : 2.57e+6、 es : 6.90e+5)  
 青○ : Global CMT 解(ns : 2.55e+6、 es : 7.18e+5)  
 黄○ : USGS(ns : 2.55e+6、 es : 7.10e+5)

### 3.1.2 断層モデルの推定(一様滑りの矩形断層モデル)

データ(図3.2)をもとに、半無限弾性体を仮定した一様滑りの矩形断層モデルを用いて、断層モデルの推定を行った。図3.3上の黒い線で囲まれている部分が、今回推定した断層の位置を表している。さらに、このモデルから計算値を求め、データとの比較を行う。



(単位 : m)

図3.3(上) : 観測値及び仮定したモデルの位置  
 (下) : 矩形断層モデルから得られた計算値

この矩形断層モデルの計算値から  $M_w$  を求め、Global CMT 解との比較を行う。 $M_w$  は以下の式で表わされる。

$$M_w = \{\log(M_0) - 9.1\} / 1.5 \quad (3.1)$$

$$M_0 = \mu \times S \times D \quad (3.2)$$

ここで、 $\mu$  は媒質の剛性率、 $D$  は震源断層の平均すべり量、 $S$  は震源断層の面積である。

Global CMT 解によると、雲南は走向：146°、傾斜角：63°、Depth：12km。

矩形断層モデルは、走向：140°、傾斜角：55°、Depth(底)：約7kmと設定している。

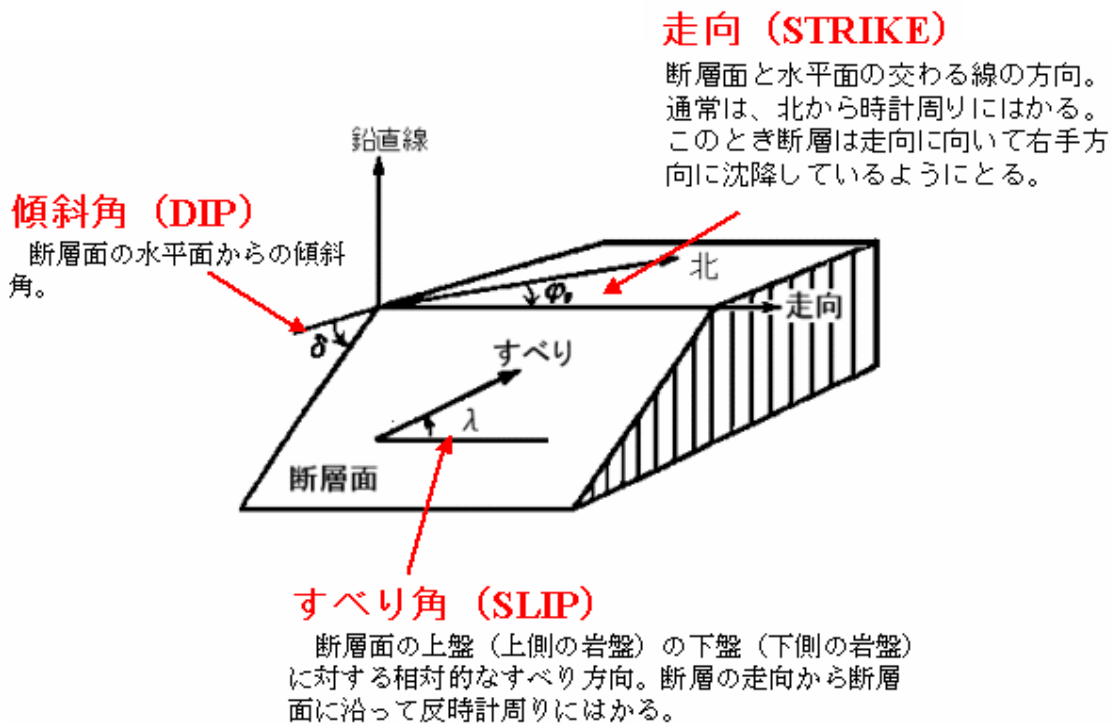


図3.4：断層パラメータ(参考：気象庁 HP

<http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/mech/kaisetu/mechkaisetu2.html>)

剛性率：30Gpa、面積：14km(横)、8km(縦)、平均滑り量：1mとした場合、矩形断層モデルの  $M_w$  は、

$$M_w = 6.28 \quad (3.3)$$

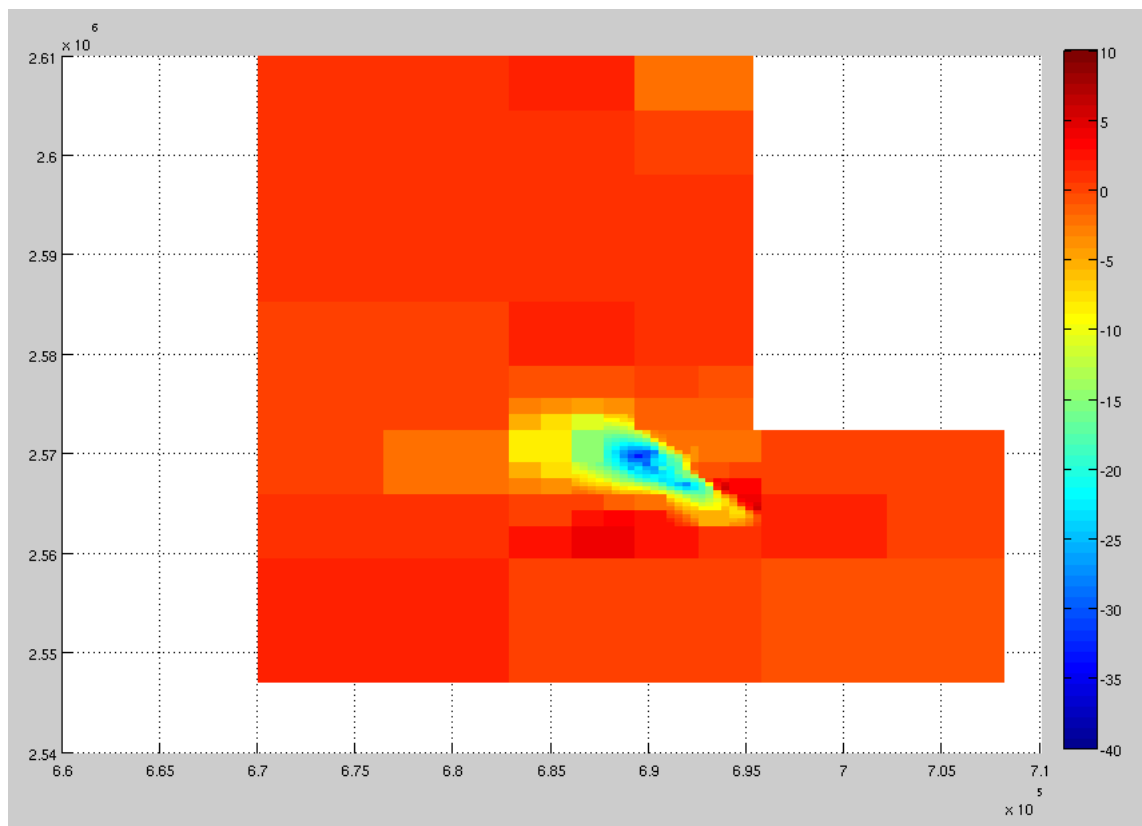
(Global CMT 解の  $M_w=6.1$ )

となる。



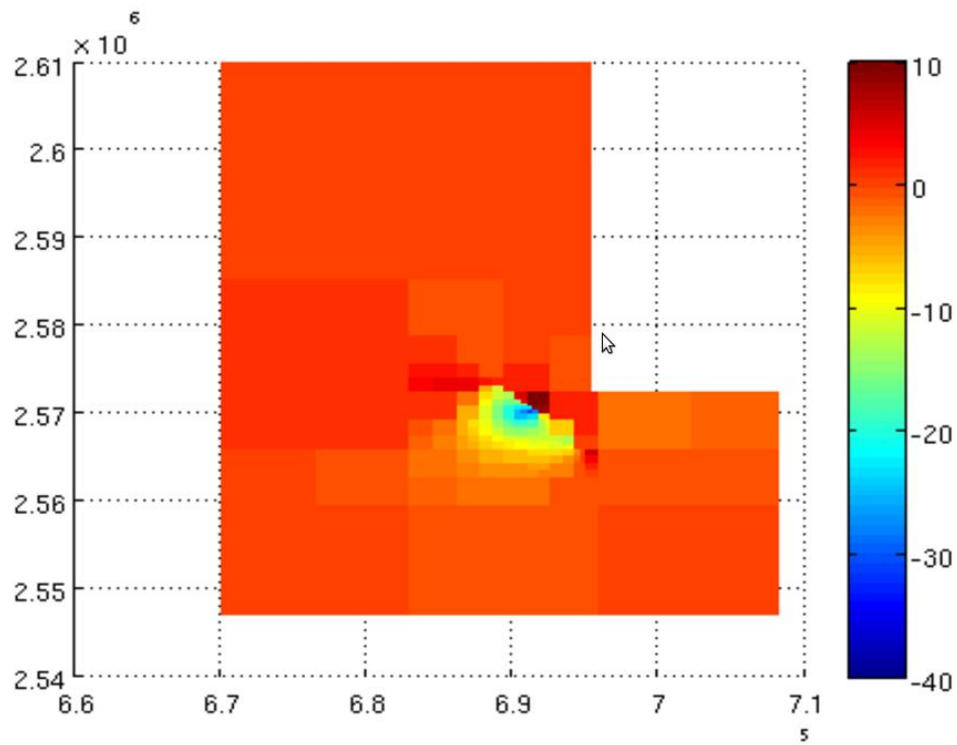
### 3.1.3 フォワードモデリングと Gmsh

一様滑りの矩形断層モデルは現実の断層を表すモデルとしては不十分である。なぜなら野外観測で見られる地表断層や、観測データから推測される形状は非平面であることが多いためである。そこで、三角形要素を用いた非平面形状断層モデルの推定も行った。三角形要素を用いることで、自然な曲面を描くことができ、より現実的なジオメトリを作成することが可能である。そして、この形状を作成するためにGmsh というソフトを用いた (Geuzaine and Remacle, 2009)。このGmshは任意の点を直線や曲線で結び、その面をできる限り均等な正三角形で切り分けてくれるというものである。そして、三角形要素ごとの食い違い量と地表変動をMeade (2007) で公開されているMatlabのスクリプトを用いて計算した。



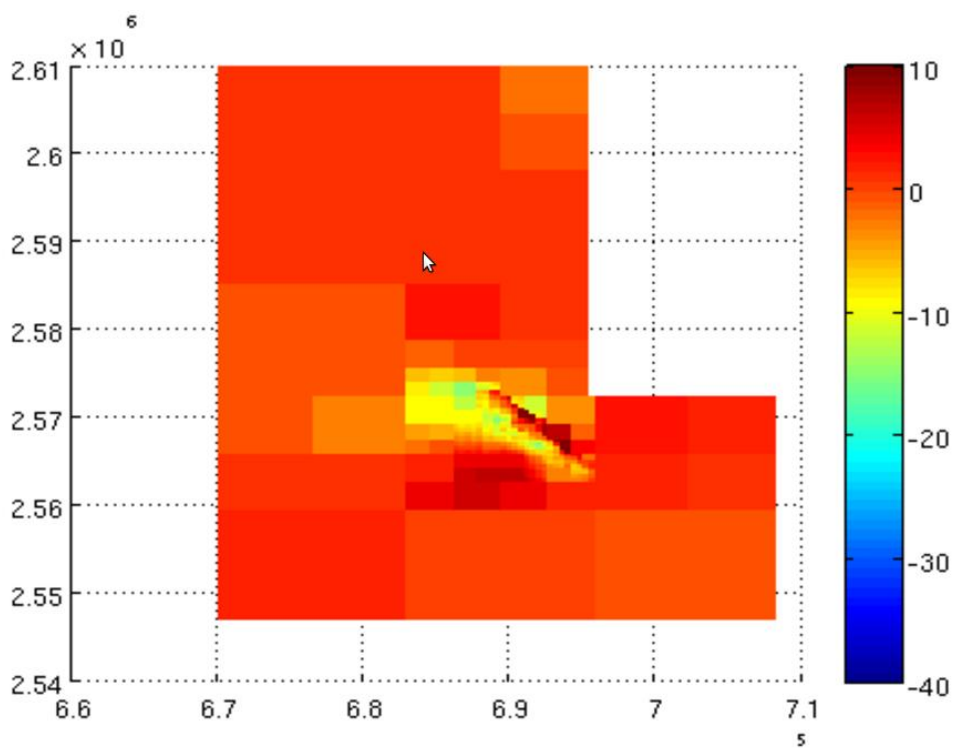
(単位 : m)

図3.5 : 観測値(雲南)



(単位 : m)

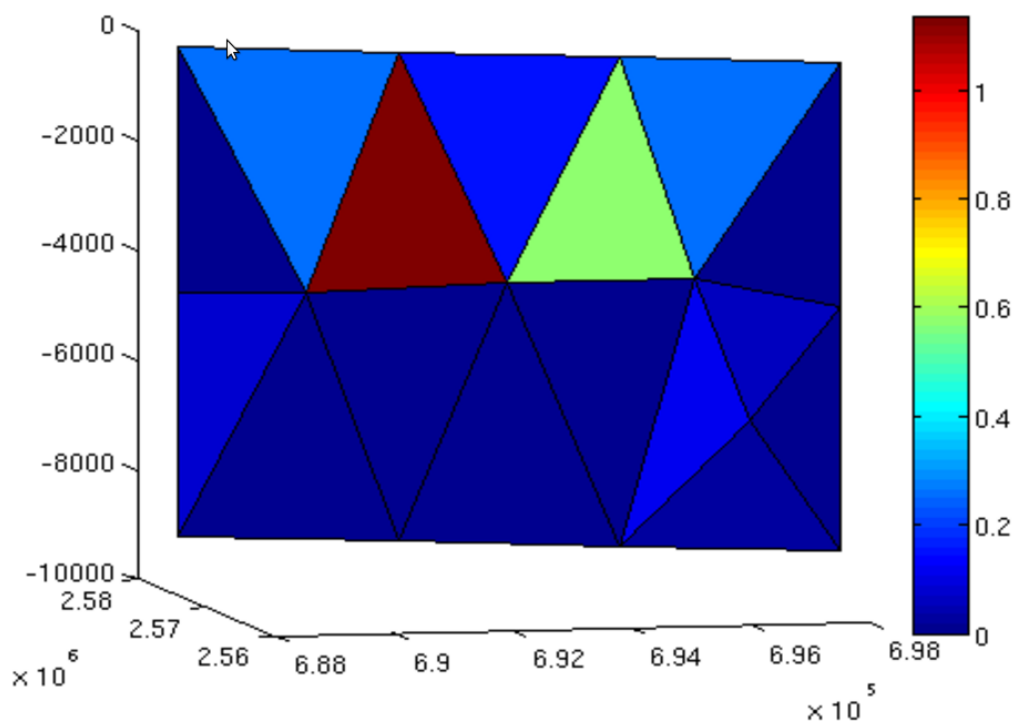
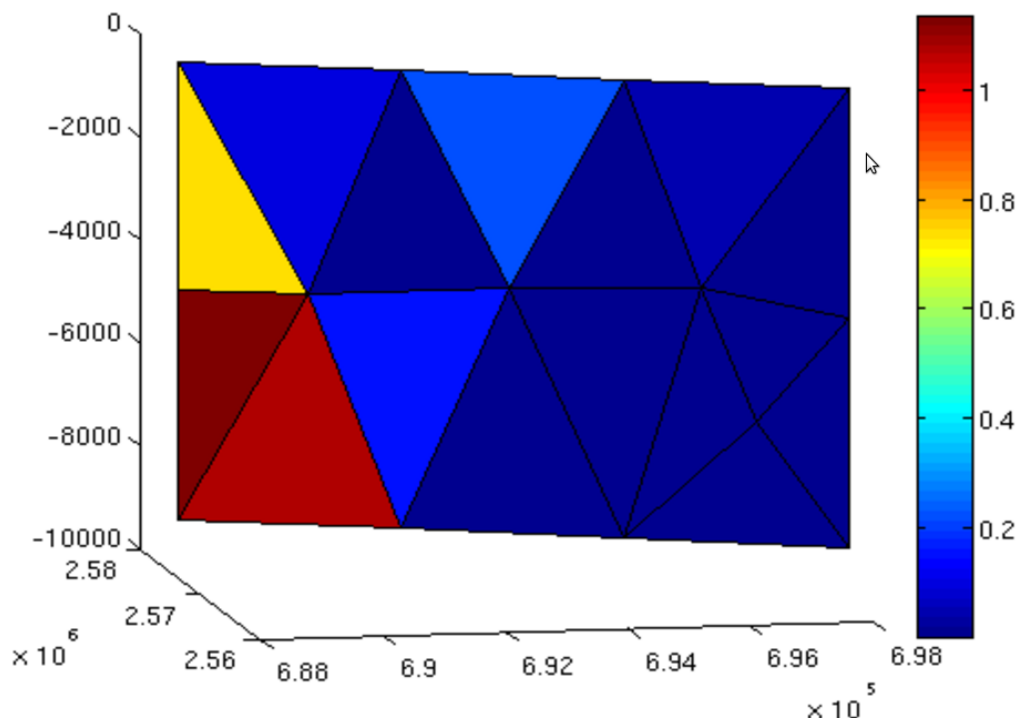
図3.6 : Gmsh で作成した断層モデルによる計算値



(単位 : m)

図3.7 : 観測値と計算値の残差





(単位 : m)

図3.8 : 計算値の横ずれ成分(上)、縦ずれ成分(下)

計算値から  $M_w$  を求めると、

$$M_w = 6.04 \quad (3.4)$$

$$M_0 = 1.45e + 18 \quad (3.5)$$

となり、Global CMT 解( $M_w 6.1$ )により近くなっており、残差も小さいことから、実際の断層にかなり近づいたと言っているように思える。

### 3.2 地震時地殻変動(ラオス)

各ペアの差分干渉解析を以下の図に示した。いずれの結果についてもカラースケールは同じである。

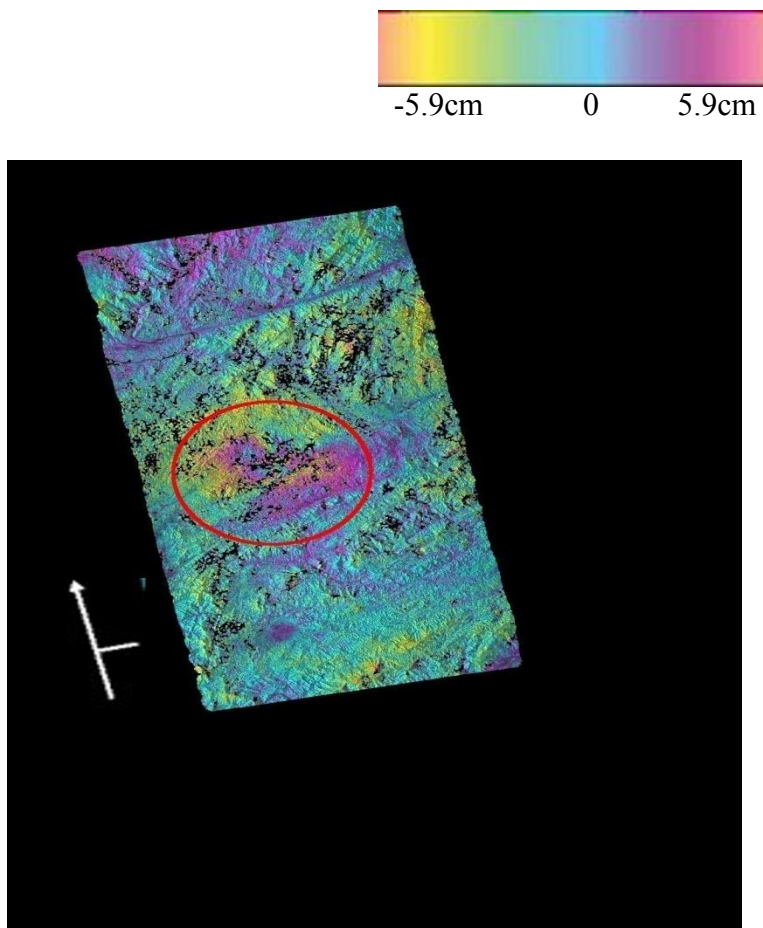


図3.9 A : 2007/01/02\_2008/08/22

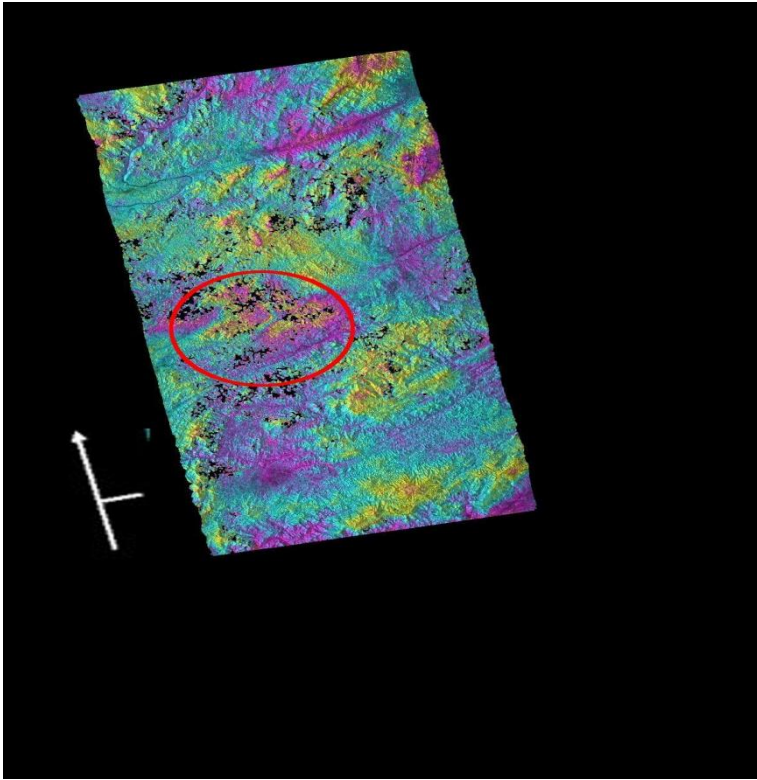


図3.10 B : 2007/02/17\_2007/07/05

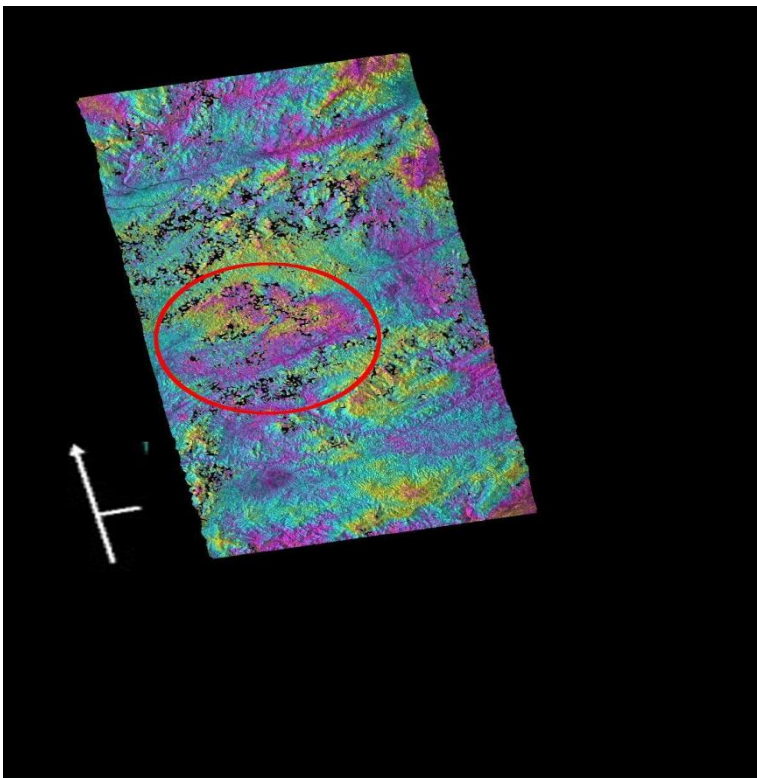


図3.11 C : 2007/02/17\_2007/08/20

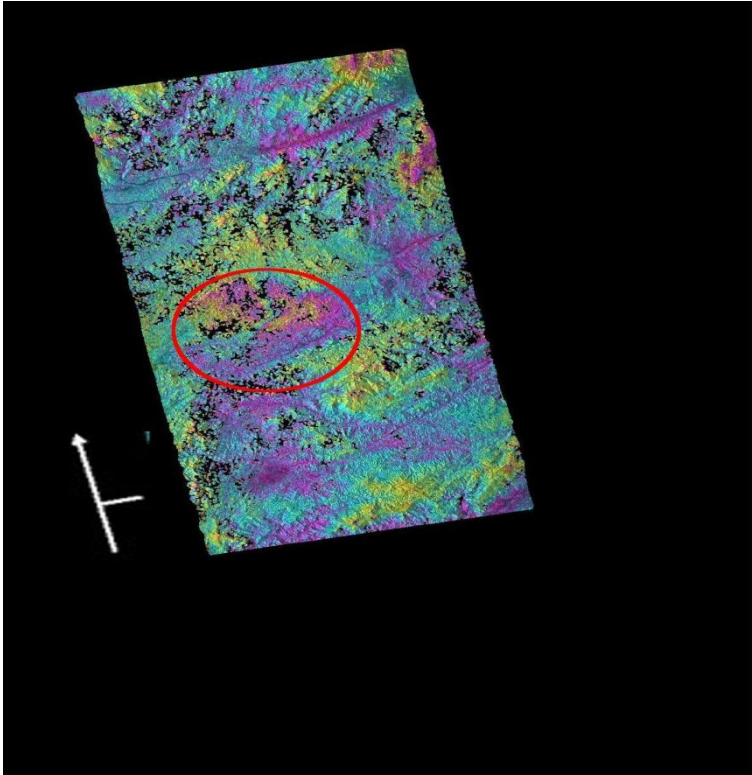


図3.12 D : 2007/02/17\_2007/10/05

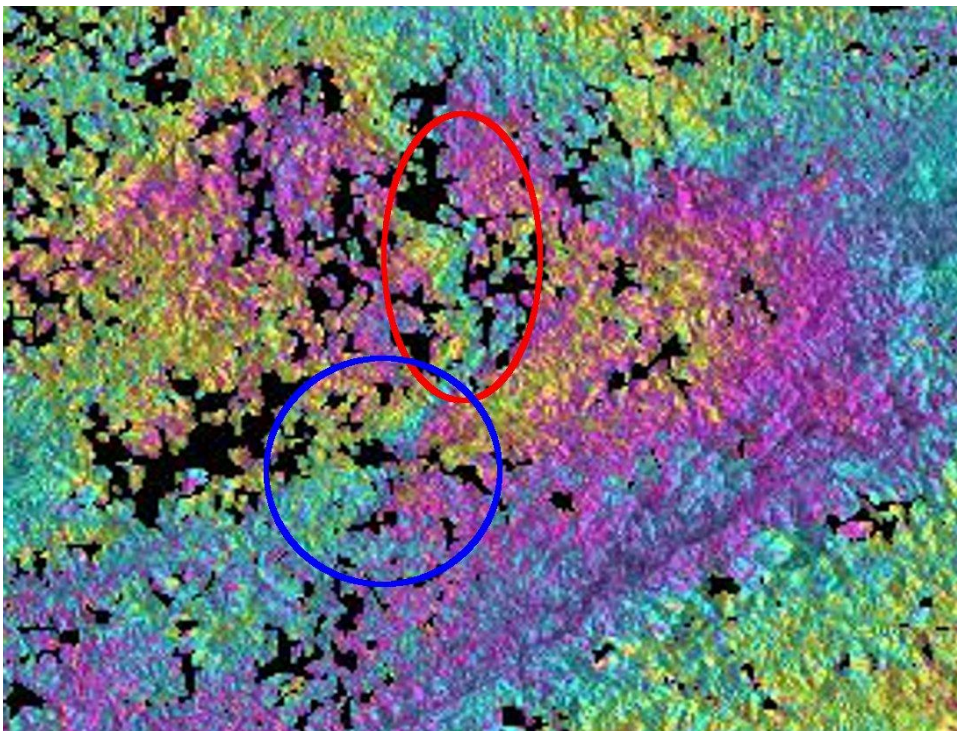


図3.13 : 震源の拡大図

A~D 及び拡大図を見るに、南東が衛星より遠ざかり、北西が衛星に近づく方向に動いている(青○)だけでなく、そのすぐ上(赤○)では東西に変動しているようにも見える。変動量は南北が約12cm、東西が約20cm で、青○・赤○それぞれ動いているとすると、青○は左横ずれ断層、赤○は右横ずれ断層だと考えられる。

### 3.2.1 余効変動

ラオスの地震については、地震を含まないデータも得ることができたので、余効変動の有無も調べてみた。使用したデータは表2.3の E~G の3枚である。

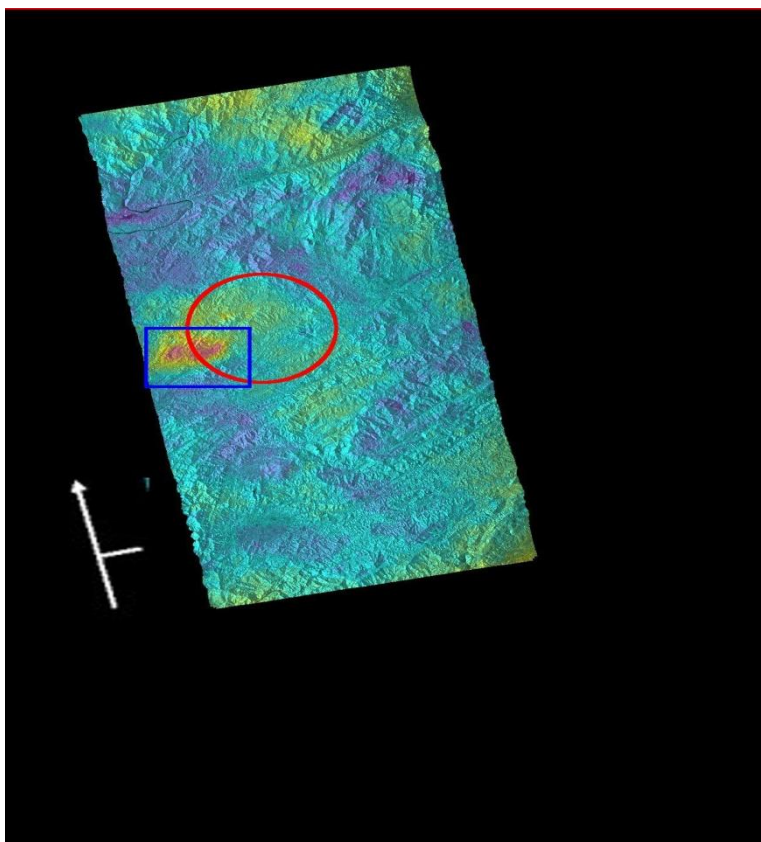


図3.14 E : 2007/07/05\_2007/08/20



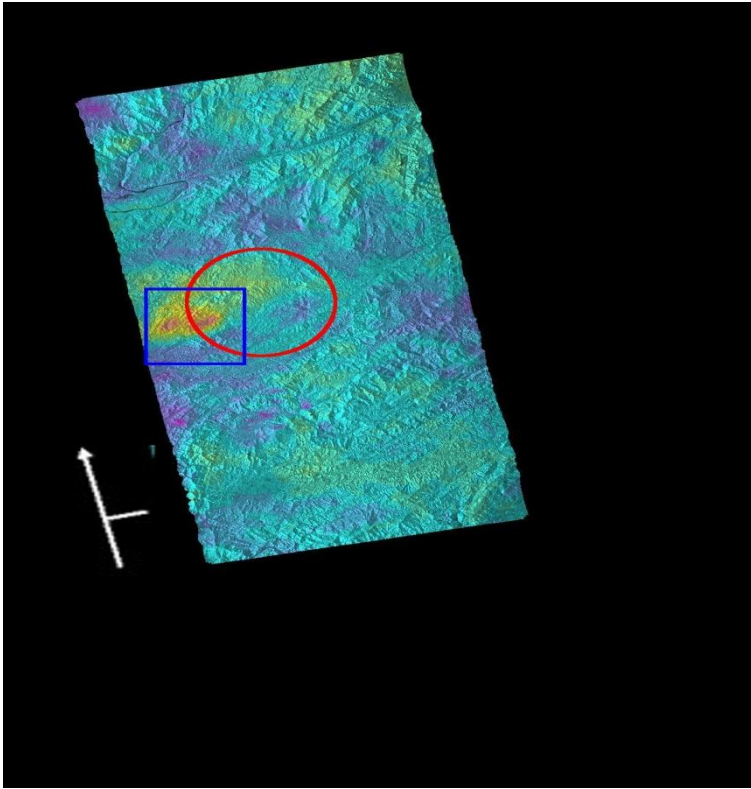


図3.15 F : 2007/07/05\_2007/10/05

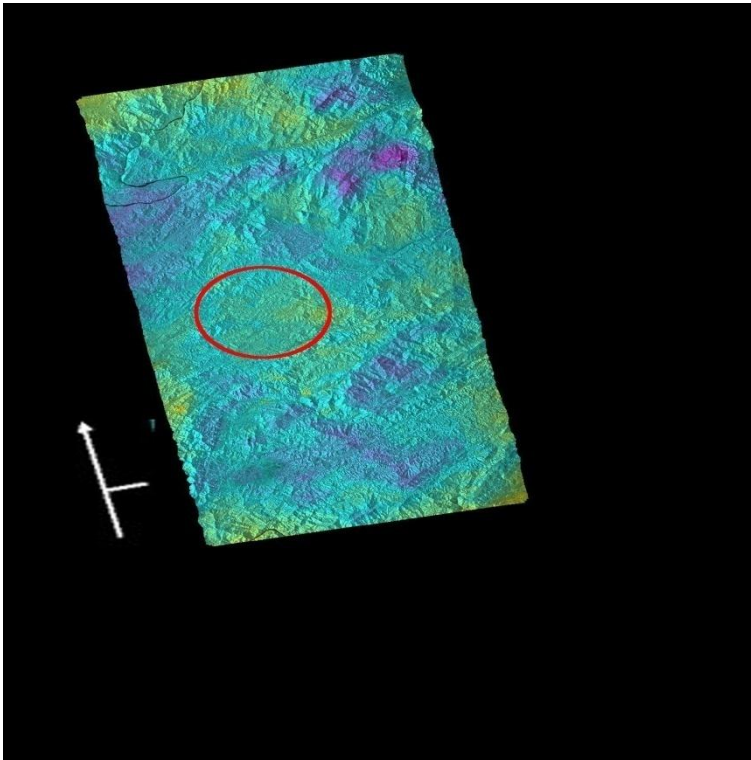


図3.16 G : 2007/08/20\_2007/10/05

E~GはA~Dに比べ、明らかに変動しているようには見えない。ただ、E・Fは本来の震源の位置(赤○)のやや南西(青□)に少しだけ変動が出ているようにも見えるが、これは大気遅延によるノイズだと考えてよい。なぜなら、E・Fは使用しているデータのマスターが同じ日付(2007/07/05)であり、Gではそのような変動は一切見られないためである。

### 3.2.2 Global CMT 解・USGS との比較

図3.9の干渉画像(A)よりデータ(図3.17)を求め、Global CMT 解・USGS との比較を行う。Global CMT 解・USGS の位置を UTM 座標に直し、画像から見てとれる震源の位置と比較すると、Global CMT 解は南東に、USGS はほぼ真南にずれており、その距離は直線距離で、Global CMT 解とは約25km、USGS とは約22km 離れていることが分かった。雲南のときと同様に、Global CMT 解と震源とは一致しないのが普通だが、Mw6程度の地震の断層が10~15km であることを考えると、やはり明らかにずれていると言え、その具体的な要因も不明である。

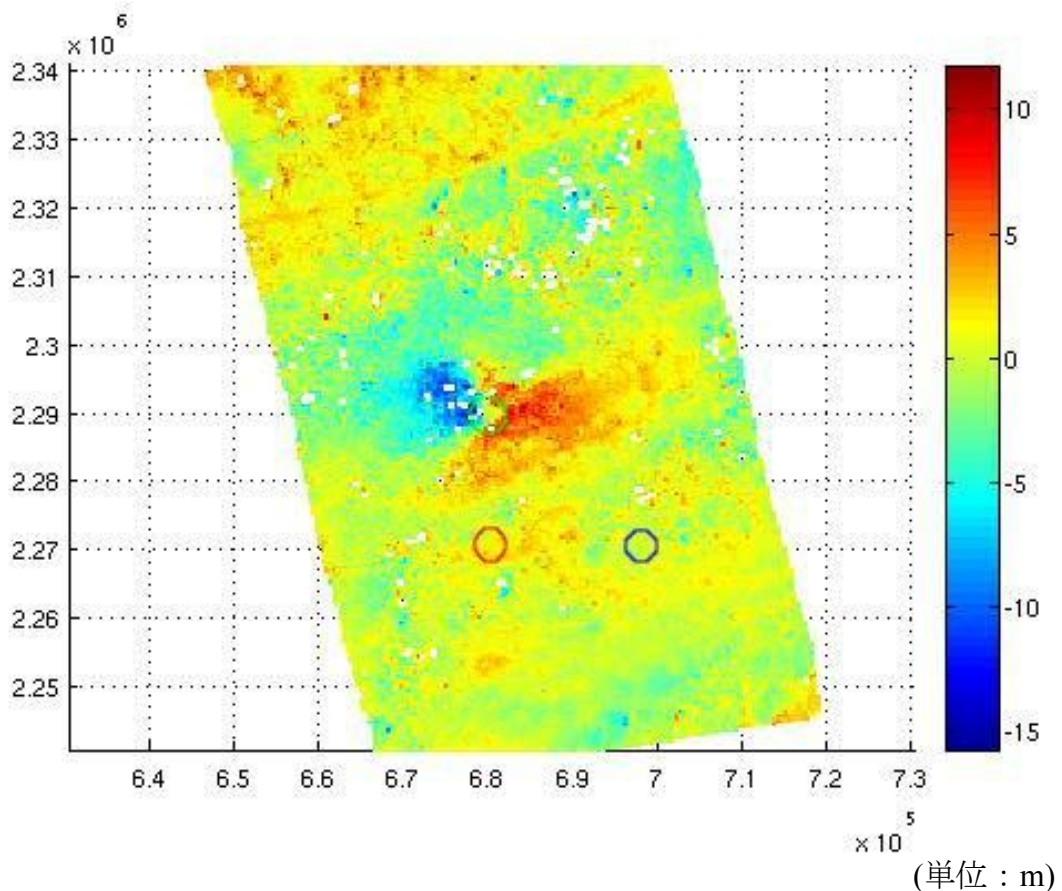


図3.17 : 緑○ : データ(ns : 2.29e+6、 es : 6.82e+5)  
 青○ : Global CMT 解(ns : 2.27e+6、 es : 6.97e+5)  
 黄○ : USGS(ns : 2.27e+6、 es : 6.81e+5)

### 3.2.3 断層モデルの推定(一様滑りの矩形断層モデル)

データ(図3.17)をもとに、半無限弾性体を仮定した一様滑りの矩形断層モデルを用いて、断層モデルの推定を行った。図中の黒い線で囲まれている部分が、今回推定した断層の位置を表している。

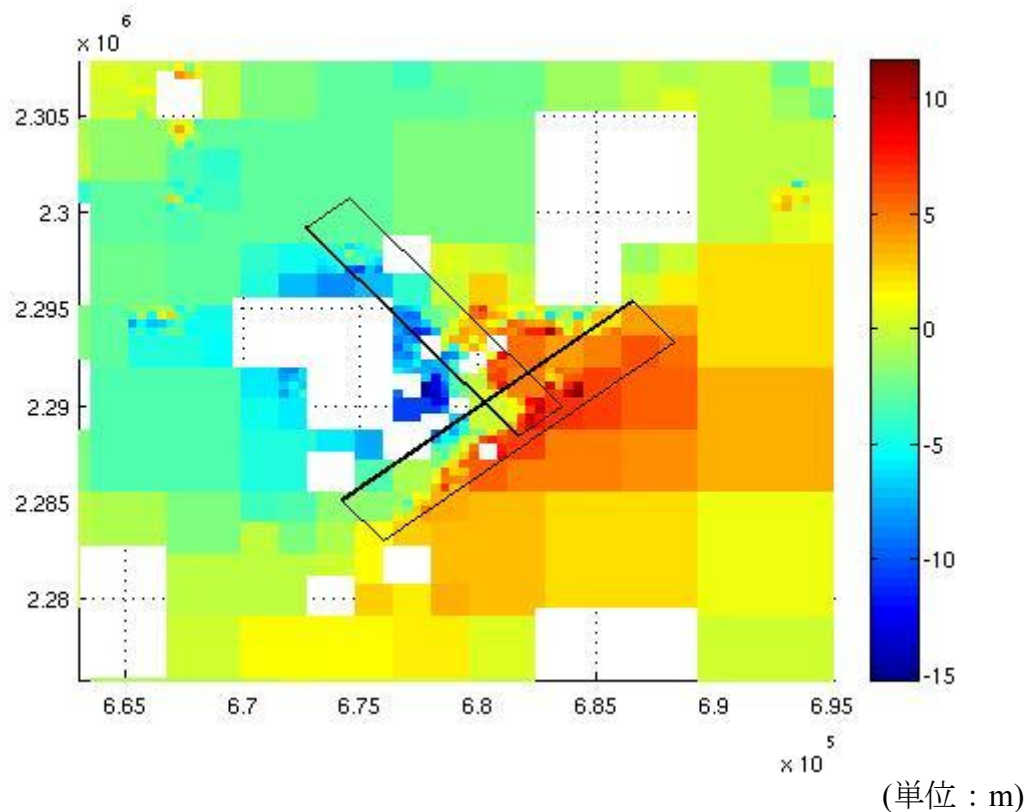


図3.18：観測値及び推定した断層モデルの位置

この図から、干渉画像のときよりもはっきりと北東方向と北西方向へそれぞれ変動しているように見ることができる。ラオスの断層面の **strike** は $54^\circ$ と $324^\circ$ であり、図の仮定した断層モデルと **strike** が一致していることもあり、どちらか一つの断層ではなく、2つとも動いた(共役断層)のではないかと考えたほうが変動を説明する上で一番説得力がある。よってここからは、ラオスの断層は共役断層であるということの証明を目指す。



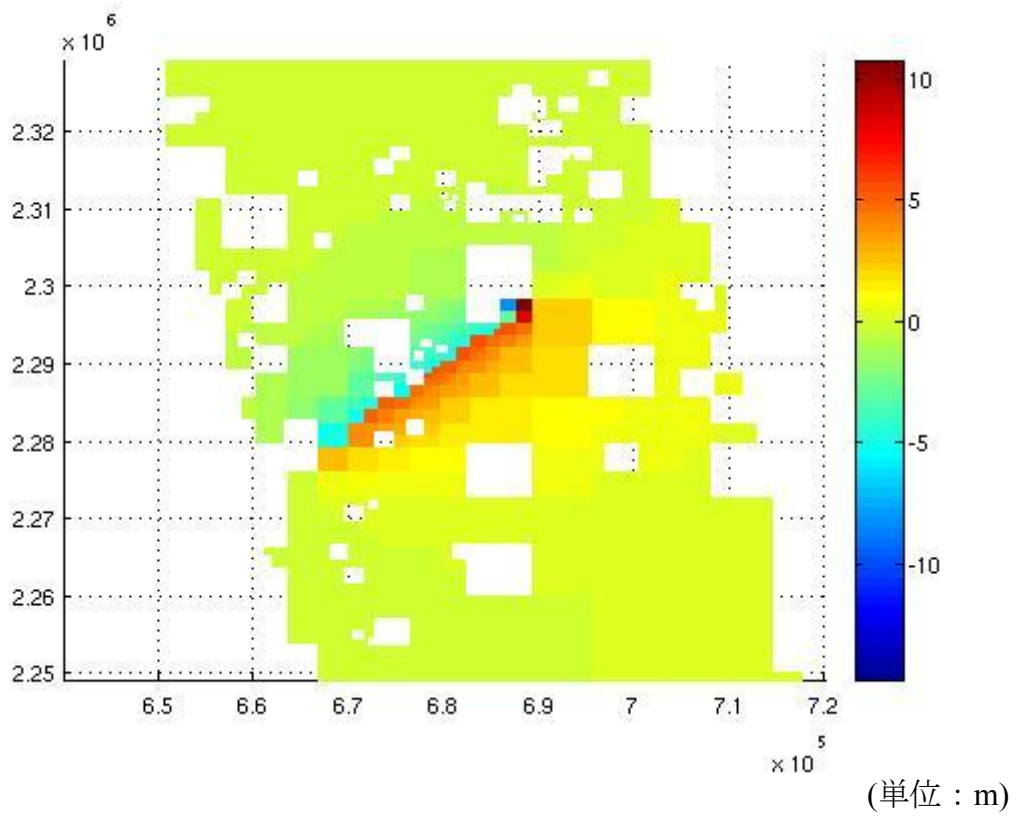


図3.19 : 北東方向の断層モデルによる計算値

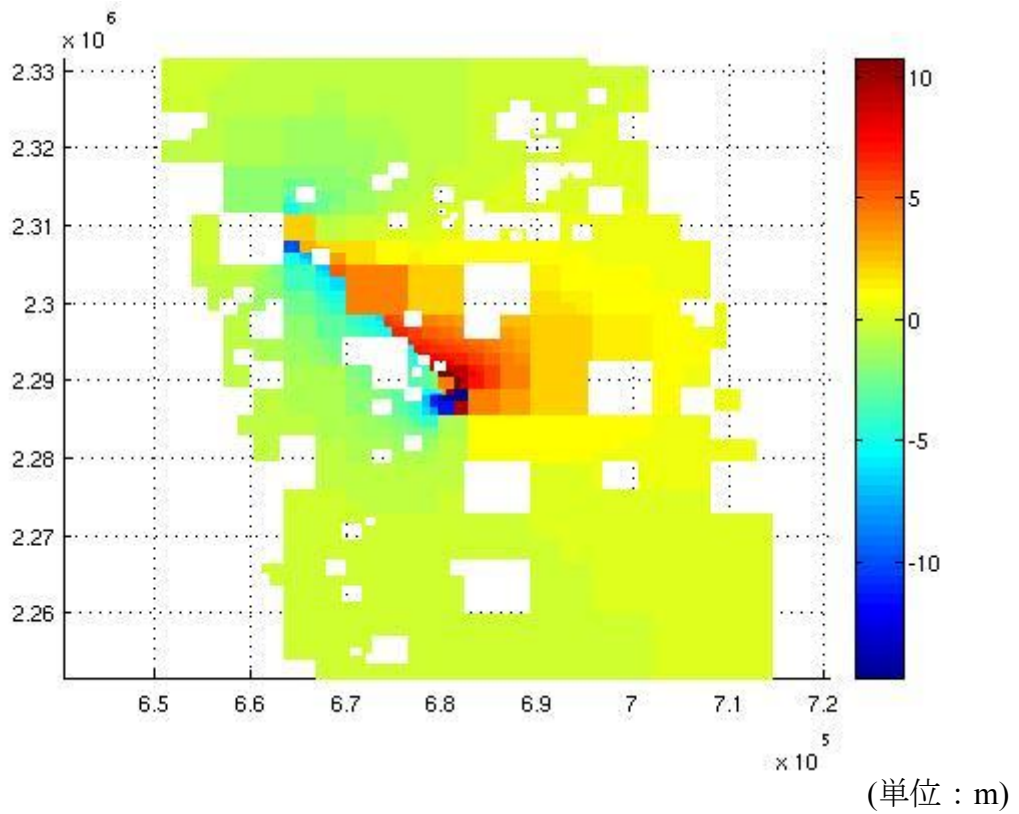


図3.20 : 北西方向の断層モデルによる計算値

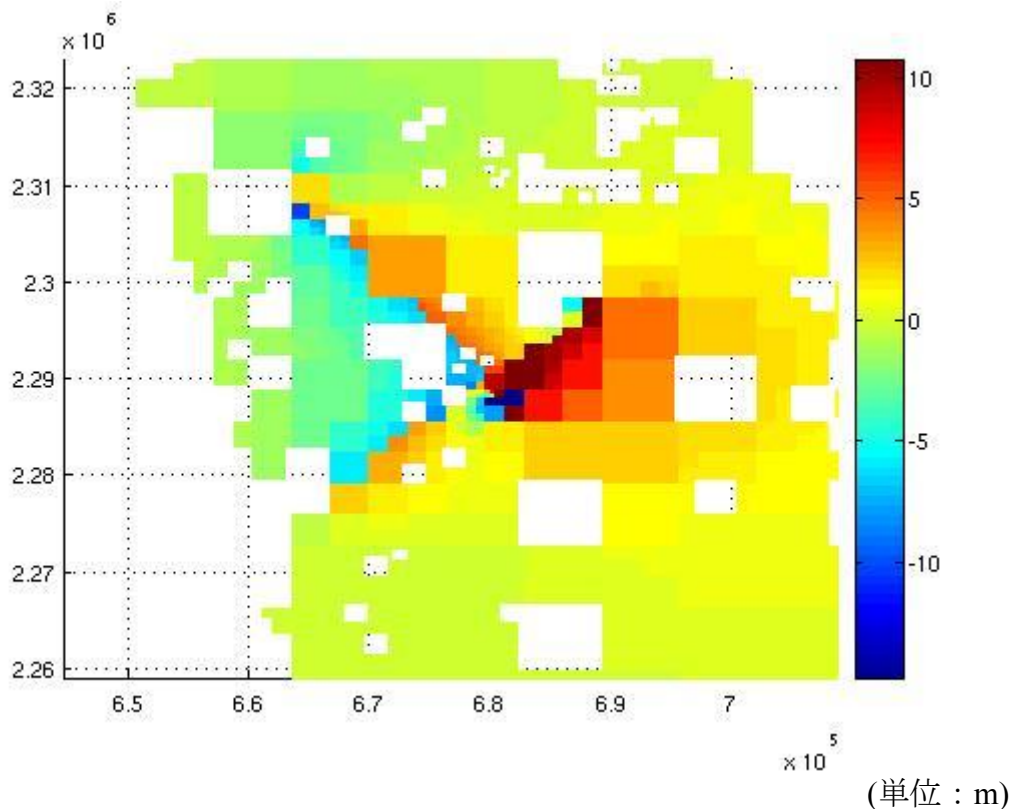


図3.21 : 単純に図3.19と図3.20を足し合わせて作成した計算値

Global CMT 解によると、ラオス(A : 北東-南西方向、B : 北西-南東方向)は、  
 走向(A) : 54°、傾斜角 : 81°、Depth : 12.6km  
 走向(B) : 324°、傾斜角 : 89°、Depth : 12.6km

なので、矩形断層モデルは、  
 走向(A) : 50°、傾斜角 : 80°、Depth(底) : 約16km  
 走向(B) : 320°、傾斜角 : 80°、Depth(底) : 約14km

と仮定し、  
 (A) 剛性率 : 30Gpa、面積 : 20km(横)、16km(縦)、平均滑り量 : 0.1m  
 (B) 剛性率 : 30Gpa、面積 : 20km(横)、14km(縦)、平均滑り量 : 0.2m  
 とした場合、矩形断層モデルの  $M_w$  は、

$$(A) : M_w = 5.92 \quad (3.6)$$

$$(B) : M_w = 6.08 \quad (3.7)$$

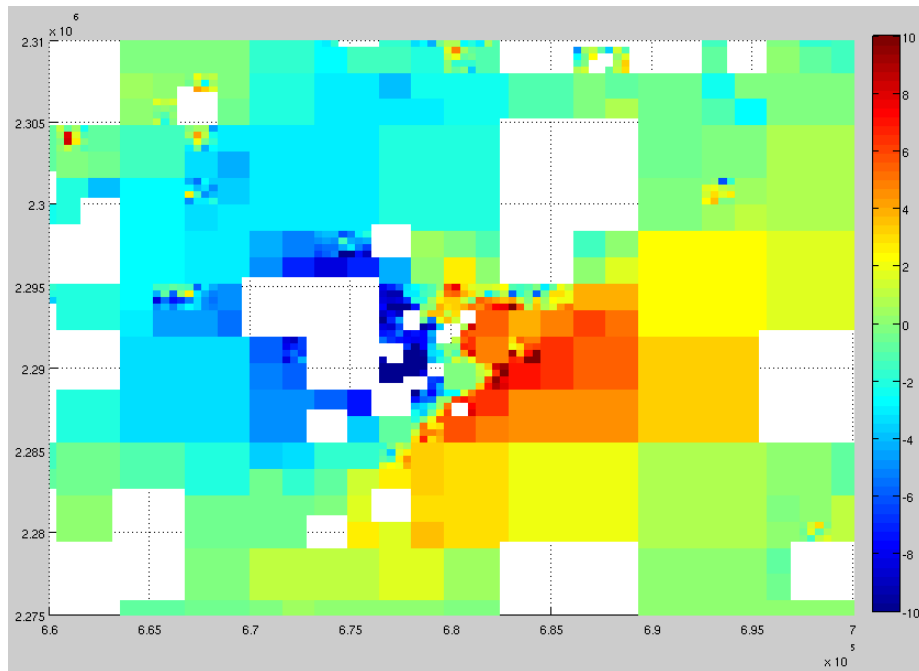
$$(A) + (B) : M_w = 6.21 \quad (3.8)$$

(Global CMT 解の  $M_w=6.3$ )

となる。

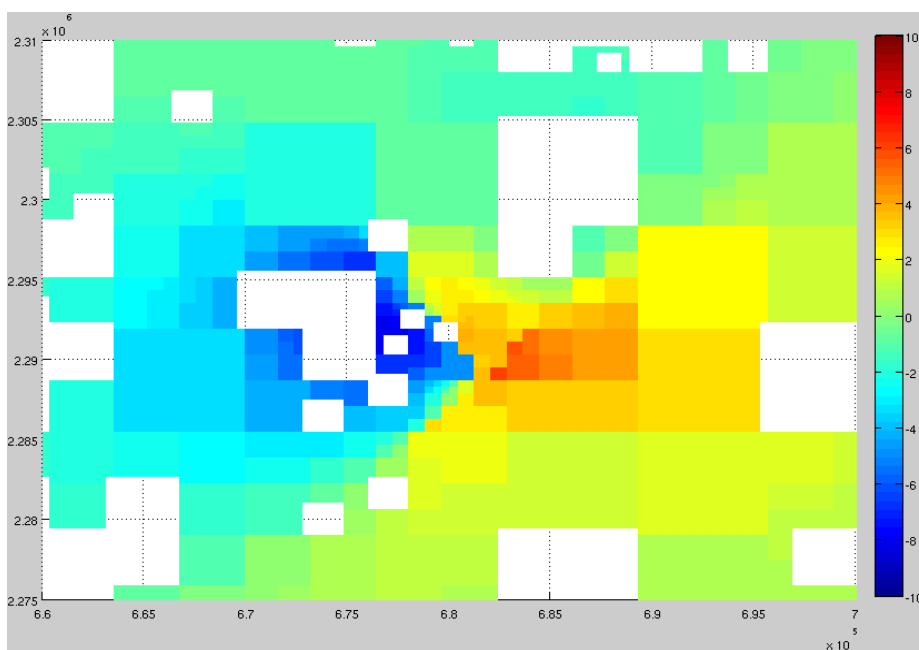
### 3.2.4 フォワードモデリングと Gmsh

やはり一様滑りの矩形断層モデルは現実の断層を表すモデルとしては不十分であるので、三角形要素を用いた非平面形状断層モデルの推定も行った。



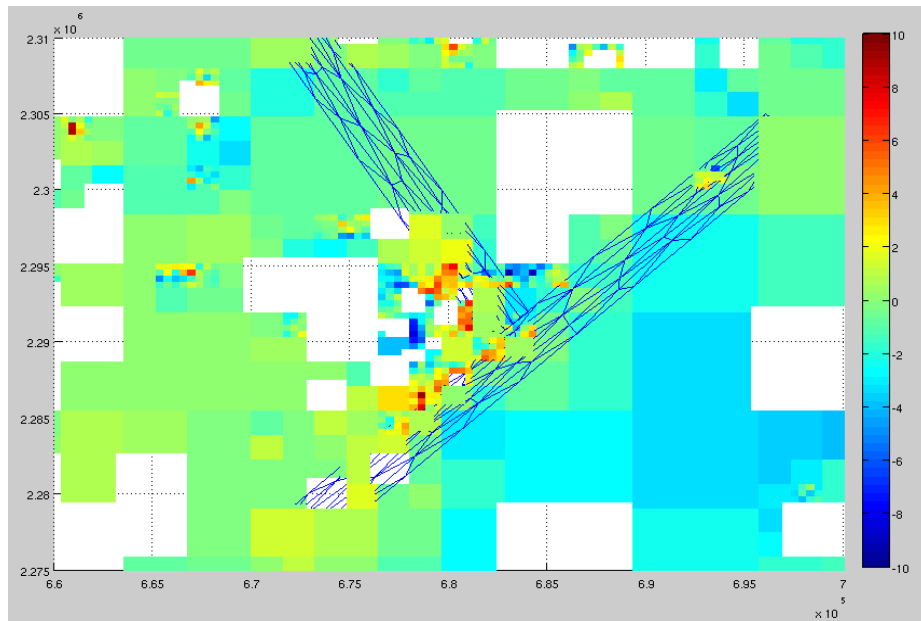
(単位：m)

図3.22：観測値(ラオス)



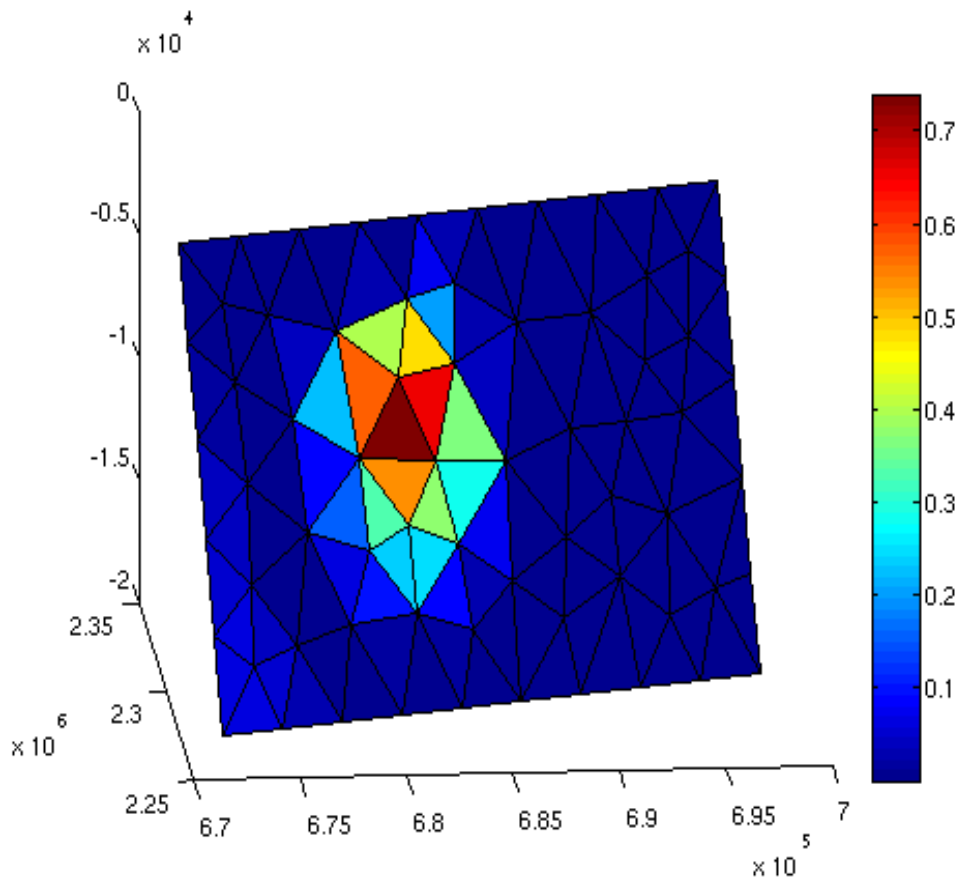
(単位：m)

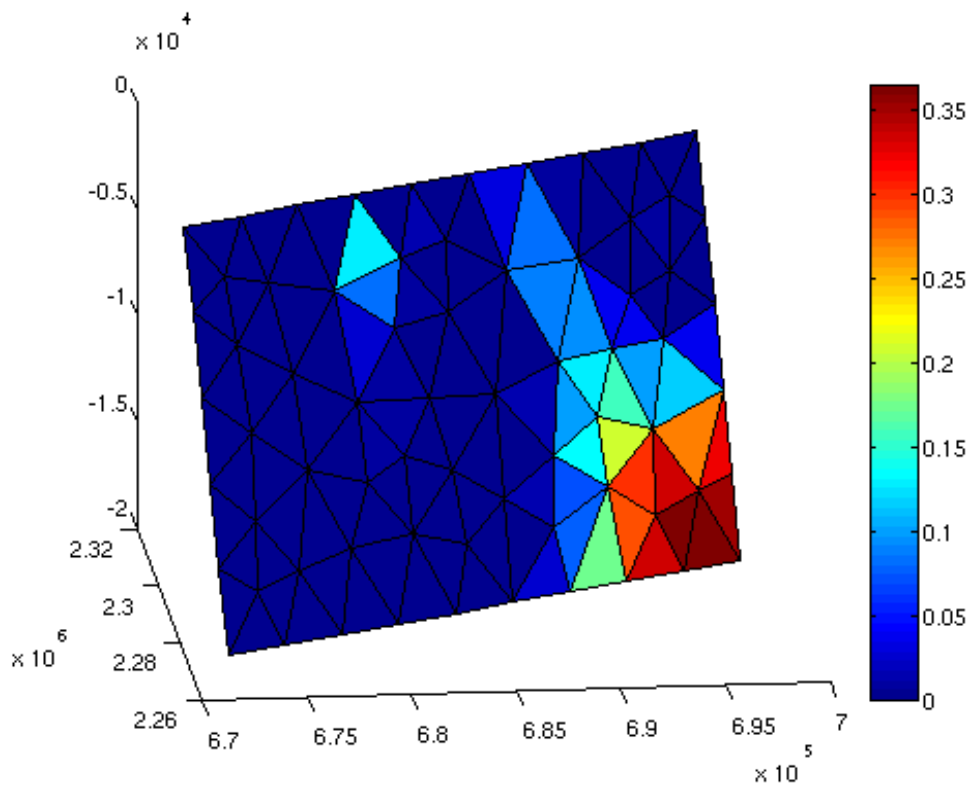
図3.23：Gmsh で作成した断層モデルによる計算値



(単位：m)

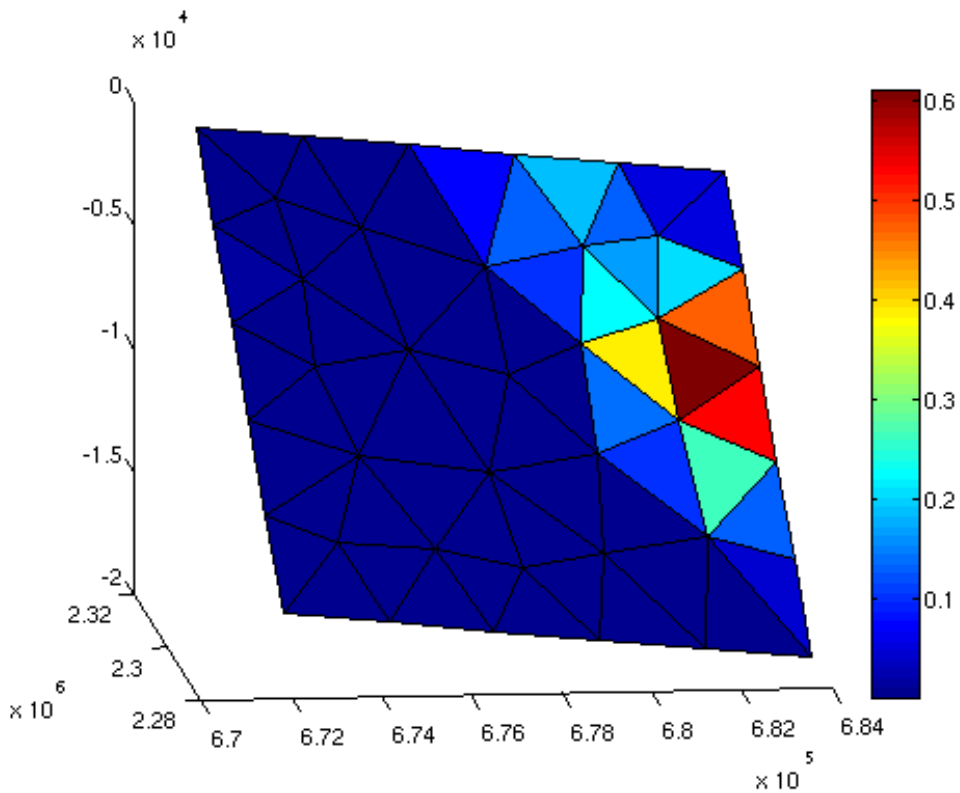
図3.24：観測値と計算値の残差及び推定した断層モデル

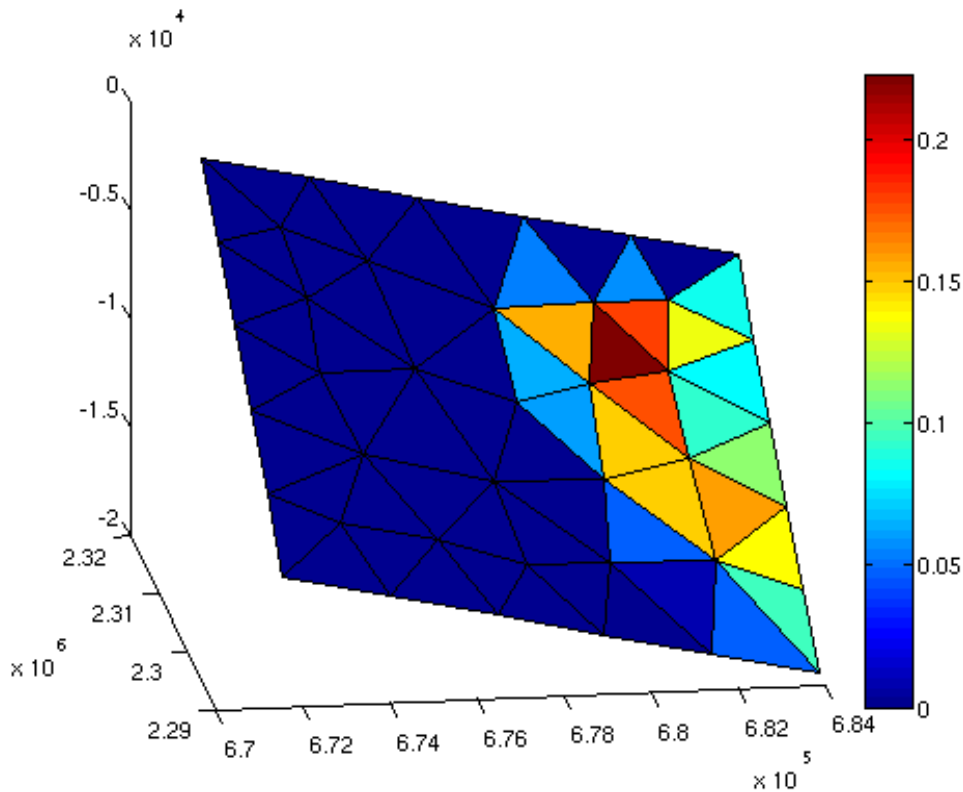




(単位：m)

図3.25：左横ずれ断層(北東-南西方向)モデルの計算値の横ずれ成分(上)、縦ずれ成分(下)





(単位 : m)

図3.26 : 右横ずれ断層(北西-南東方向)モデルの計算値の横ずれ成分(上)、縦ずれ成分(下)

計算値から  $M_w$  を求めると、

$$M_w = 6.10 \quad (3.9)$$

$$M_0 = 1.80e + 18 \quad (3.10)$$

$$M_w = 5.97 \quad (3.11)$$

$$M_0 = 1.14e + 18 \quad (3.12)$$

$$(A) + (B) : M_w = 6.25 \quad (3.13)$$

となり、Global CMT 解( $M_w 6.3$ )により近くなっており、残差も小さいことから、実際の断層にかなり近づいたと言っているように思える。

### 3.2.5 ラオス近辺の断層

改めてラオス近辺の断層について調べてみると、図2.4(再掲)や図3.27の通り、Red River 断層や Sagaing 断層のような、北西から南東方向に走る右横ずれ型の

断層の他に、北東から南西方向に走る左横ずれ型の断層も存在していることが地質学的/地形学的な研究からわかっている。

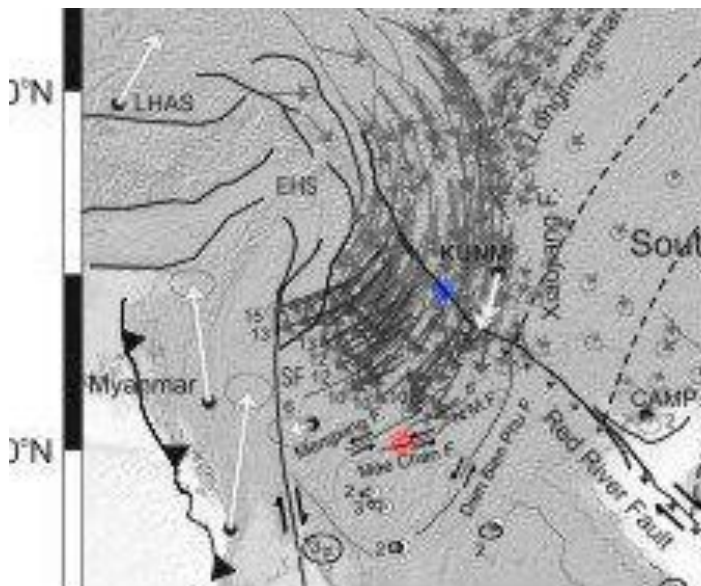


図2.4：近辺の断層(Simons et al. 2007,JGR)

赤○：ラオス、青○：雲南

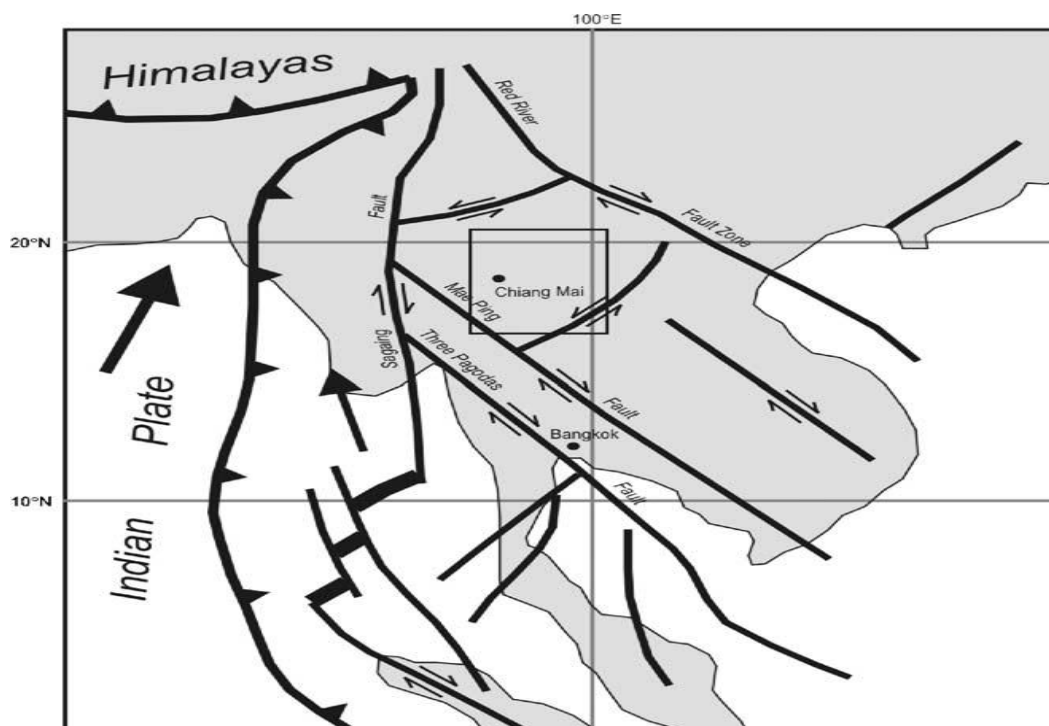


図3.27：地質学的な研究から明らかになっている断層  
(B.P. Rhodes et al. / Journal of Asian Earth Sciences 24 (2004) 79–89)

## 4. 結論

2007年5月16日にラオス北部で起きた地震と、その約2週間後の2007年6月2日に中国・雲南で起きた地震の地殻変動を干渉 SAR (InSAR) で検出した。

雲南は地震を含むペア1つしか用意できなかったが、ラオスは地震を含むペアを4つ、含まないペアを3つ得られたため、地震による地殻変動だけでなく、地震後の余効変動も調べることができた。その結果、得られた干渉画像から、ラオスの地震による2ヶ月後以降の余効変動は無いことが分かった。それぞれの干渉画像より、雲南は衛星から遠ざかる方向に動いており、その変動量は約70cm、ラオスは南東が衛星より遠ざかり、北西が衛星に近づく方向に動いているだけでなく、そのすぐ上では東西で変動しているようにも見え、その変動量は南北が約12cm、東西が約20cmであった。

干渉画像のデータから見てとれる震源に比べ、Global CMT 解及び USGS で公表されている震源の位置が明らかにずれていた。雲南は直線約35km(Global CMT)と直線約30km(USGS)、ラオスは直線約25km(Global CMT)と直線約22km(USGS)であった。Global CMT 解はその性質上震源と一致しない事が普通であるが、一般的に知られる断層の長さ(Mw6の場合、10~15km)を超えてずれている。観測点の偏りが一番大きな原因であると考えられるが、他にも要因が存在するかは調べきれなかった。

干渉画像のデータとそれを基にした観測値から、ラオスで起きた地震が共役断層である可能性が高いことが分かった。左横ずれの断層だけでも右横ずれの断層だけでもこの地震を説明するのは難しく、また、地質学的な研究から周辺の断層を見てみても、有名な右横ずれ断層である Red River 断層や Sagaing 断層のほかに左横ずれの断層が、右横ずれ断層と垂直に交わるような形で存在しているため、共役断層になりうることも分かった。

一様滑りの矩形断層と三角形要素を用いた非平面形状断層モデルのそれぞれで構築し変動の説明を試みた。一様滑りの矩形断層はあくまで単純なものなので、Global CMT 解とは顕著にずれていたが、三角形要素を用いた非平面形状断層モデルはその計算値が観測値に近いものを作り出すことができ、断層の横ずれ成分・縦ずれ成分それぞれの可視化も出来たため、断層の動きをより細かく説明できた。この結果からも、ラオスの地震は共役断層であると考えたほうが変動を説明できることが分かった。



## 5. 謝辞

本研究で用いたPALSARデータはPIXELにおいて共有しているものであり、宇宙航空研究開発機構（JAXA）と東京大学地震研究所との共同研究契約によりJAXAから提供されたものである。PALSARデータの所有権は経済産業省およびJAXAにある。本研究の一部は、東京大学地震研究所特定共同研究（B）

「SARを用いた地震火山活動に伴う地殻変動の検出」で行われた。

本研究を進めるにあたって、指導教官である古屋正人教授には研究指導者として研究テーマの提供から学会等の発表指導まで多岐にわたって面倒を見ていただいたことに大変感謝しています。入院や就職活動などで研究室に来ることが少なく、研究時間が短くなってしまったなかでも、相手をして下さり本当に有難うございます。また同研究室の日置幸介教授、固体系ゼミの小山順二教授、蓬田清教授、吉澤和範准教授、勝俣啓准教授、にはゼミや学会発表の練習で大変有意義なアドバイスを頂きました。この場を借りてお礼申し上げます。本研究室の学生の皆様とは、普段から一緒に部屋で研究・勉強をしていることもあって学内外の様々な場面でお世話になりました、いろいろと迷惑をおかけして大変申し訳ございません。世の中はいろいろ辛気臭いことが多いですが、皆様の幸せ・発展を心よりご祈念申し上げます。

## 6. 参考文献

Brady P. Rhodes, Robert Perez, Apichard Lamjuan, Suwith Kosuwan (2004) :  
*Kinematics and tectonic implications of the Mae Kuang Fault, northern Thailand.*  
*Journal of Asian Earth Sciences* 24 79–89

W. J. F. Simons, A. Socquet, C. Vigny, B. A. C. Ambrosius, S. Haji Abu, Chaiwat Promthong, C. Subarya, D. A. Sarsito, S. Matheussen, P. Morgan, and W. Spakman  
(2007) : *A decade of GPS in Southeast Asia: Resolving Sundaland motion and boundaries.* / *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 112, B06420,  
doi:10.1029/2005JB003868

USGS (<http://earthquake.usgs.gov/>)

Global CMT (<http://www.globalcmt.org>)

気象庁地震予知情報課

(<http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/world/20110324/tc201103242255.pdf>)

気象庁HP (<http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/mech/kaisetu/mechkaisetu2.html>)

国土地理院HP (<http://www.gsi.go.jp/sokuchi/sar/index.html>)

測地学テキストHP (<http://wwwsoc.nii.ac.jp/geod-soc/web-text/index.html>)

Google earth (<http://earth.google.com>)