

## 衛星 SAR 画像分析による 2004・2005 年スマトラ沖地震に伴う隆起沈降域の把握

## Uplift and Subsidence Associated with 2004 and 2005 Sumatra Earthquakes Revealed by Satellite SAR Imagery

## 地理地殻活動研究センター

飛田幹男・今給黎哲郎・水藤 尚・加藤 敏・林 文・村上 亮

Geography and Crustal Dynamics Research Center

Mikio TOBITA, Tetsuro IMAKIIRE, Hisashi SUITO, Min KATO, Fumi HAYASHI and

Makoto MURAKAMI

測地部 藤原 智

Geodetic Department Satoshi FUJIWARA

## 要 旨

2004 年・2005 年スマトラ沖巨大地震を発生させた総延長 1000km を超える震源域の地殻変動の全体像を把握するため、光の加色混合法を利用して、人工衛星搭載合成開口レーダー (SAR) の強度画像から地表面粗度の変化抽出を行う新しい分析法を開発した。この分析法は、変動量の計測はできないものの、隆起・沈降域の分布把握に有効であり、また、津波遡上域の把握も可能である。他機関が実施した現地調査等の観測と矛盾がないことが確認された。SAR 画像分析の結果、破壊域の範囲、隆起・沈降域が明らかになり、離水・沈水面積が計測された。2004 年と 2005 年の地震の震源域はそれぞれ 1320km と 350km と推定された。隆起沈降の境界は海溝から 145km 東のラインにほぼ一致しており、今回の破壊域でのプレート間カップリングの深さが一様であると推定される。

## 1. はじめに

スマトラ沖で 2004 年と 2005 年に相次いで発生した 2 つの巨大地震によって甚大な被害が出た。この地域では過去にも巨大地震とそれに伴う津波が発生して被害が出ており、今回の地震に伴って海溝沿いのどの部分が破壊されたかを把握することで、次の地震がどこ

で起こりうるかを推定する材料が得られる。

2004 年 12 月 26 日に発生した M9.3 のスマトラ沖地震の震源断層の長さは、地震波による解析によって当初約 1000km より短いと報告されたが、北部でゆっくりとした破壊が起こった場合等、実際の破壊域はより長い可能性がある。プレート運動によって蓄積された歪エネルギーの解放という観点からは、地殻変動データから断層運動が起こった領域を推定することが重要である。

破壊域の広がり を正確に推定する 1 つの方法は、地殻変動の分布を調べることである。GPS による観測 (Vigny et al., 2005, Banerjee et al., 2005) 及び Microatoll (小型の冠状の珊瑚) の測定 (例: Sieh et al., 1999; Zachariasen et al., 2000) によって、限られた数十箇所の地殻変動及び上下変動が測定されているが、今回の地震においては、(1) 破壊域が広範囲にわたること、(2) 軍事基地が存在すること、(3) 原住民保護のための進入制限があること、(4) 武装勢力が存在すること、(5) 津波で橋・道路が破壊されたこと等の理由により、破壊域全体をカバーする観測は報告されていない。

これらの困難に影響されずに広範囲にわたる地殻変動の様子を把握するため、人工衛星に搭載された合成開口レーダー (SAR) センサーが取得した SAR 画

表-1 人工衛星 SAR データと計算潮位

| 図の<br>番号 | 島名          | データ取得日(UTC)        | 人工衛星名       | 軌道の<br>飛行方向 | 入射角<br>(度) | 偏波    | 潮位<br>(cm) |
|----------|-------------|--------------------|-------------|-------------|------------|-------|------------|
| 5 (a)    | Interview   | 03年10月 4日/05年1月 2日 | RADARSAT-1  | 南行          | 44         | HH/HH | +45/-28    |
| 5 (b)    | N. Sentinel | 03年10月 4日/05年1月 2日 | RADARSAT-1  | 南行          | 44         | HH/HH | +38/-25    |
| 5 (c)    | S. Sentinel | 03年10月 4日/05年1月 2日 | RADARSAT-1  | 南行          | 44         | HH/HH | +36/-24    |
| 5 (d)    | Simeulue    | 03年 7月22日/05年2月17日 | RADARSAT-1  | 北行          | 47         | HH/HH | -15/-2     |
| 5 (e)    | L. Andaman  | 03年10月 4日/05年1月 2日 | RADARSAT-1  | 南行          | 44         | HH/HH | +35/-23    |
| 5 (f)    | G. Nicobar  | 92年12月27日/05年1月12日 | ERS-1/ERS-2 | 南行          | 23         | VV/VV | +24/+3     |
| 5 (g)    | NW Sumatra  | 03年 7月22日/05年2月17日 | RADARSAT-1  | 北行          | 47         | HH/HH | -11/+2     |
| 6 (a)    | Tuanku      | 05年 2月 4日/05年4月15日 | ENVISAT     | 北行          | 42         | VV/VV | -10/-4     |
| 6 (b)    | Bangkaru    | 05年 2月 4日/05年4月15日 | ENVISAT     | 北行          | 42         | VV/VV | -10/-5     |
| 6 (c)    | Nias        | 05年 2月 4日/05年4月15日 | ENVISAT     | 北行          | 42         | VV/VV | -10/-5     |

2つの偏波と2つの潮位はそれぞれ2つのデータ取得日に対応している

像を利用した、2005年3月28日に発生したM8.7の地震についても同様の分析を行った。

## 2. 衛星 SAR 画像による海岸線変化及び津波遡上域の分析

### 2.1 用いたデータ

カナダの RADARSAT-1 衛星に搭載された SAR センサーが取得したデータ、及び欧州宇宙機関 (ESA) の ENVISAT 衛星に搭載された SAR センサー “ASAR” 及び ERS-1 衛星、ERS-2 衛星に搭載された SAR センサーが取得したデータを用いた。これらの SAR センサーが送受信するマイクロ波は、それぞれ、5.30GHz、5.33GHz、5.30GHz、5.30GHz の C バンド (波長約 5.6cm) の周波数帯に属する電磁波である。

合計約 60 シーン分の RAW データを用いた。その内の主なものについて、表-1 に、分析対象となる島の名称、SAR データの取得日、人工衛星名、軌道の飛行方向、マイクロ波の入射角、偏波、計算潮位 (NAOTIDE; Matsumoto et al., 2000) を示した。本研究では、精密な画像の比較を行うために、同一センサーが同一の場所から地震の前後に取得したデータのみを比較した。偏波と潮位が 2 つずつ記載されているが、これらは地震前後の 2 つのデータ取得日に対応している。Greate Nicobar 島に関しては、ERS-1 衛星と ERS-2 衛星のデータを使用した。

SAR 画像取得時の潮位が異なる場合には、たとえ地殻変動がなくても海岸線変化が見られるなど、潮位差は私達の分析法にとって誤差源となる。そこで、地震前の SAR 画像の観測日時を検索した後、同一観測角での観測が次に可能な日時を計算し、両日時における計算潮位差が小さな場合に、SAR データ取得の観測要求を出すことを基本とした。

海岸線変化抽出にいたる解析手順は、図-1 のとおりである。

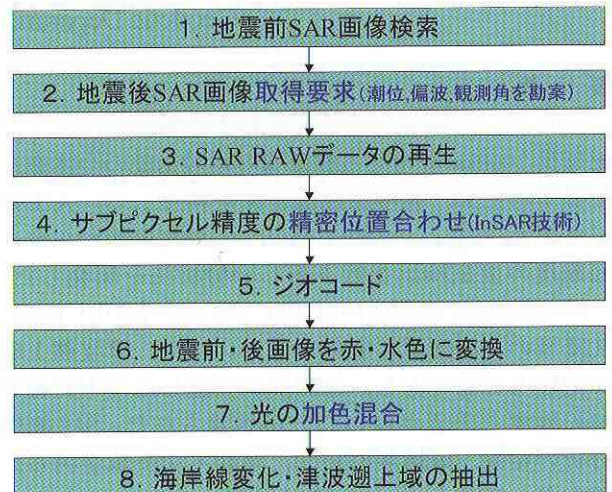


図-1 レーダー画像による海岸線変化抽出の流れ

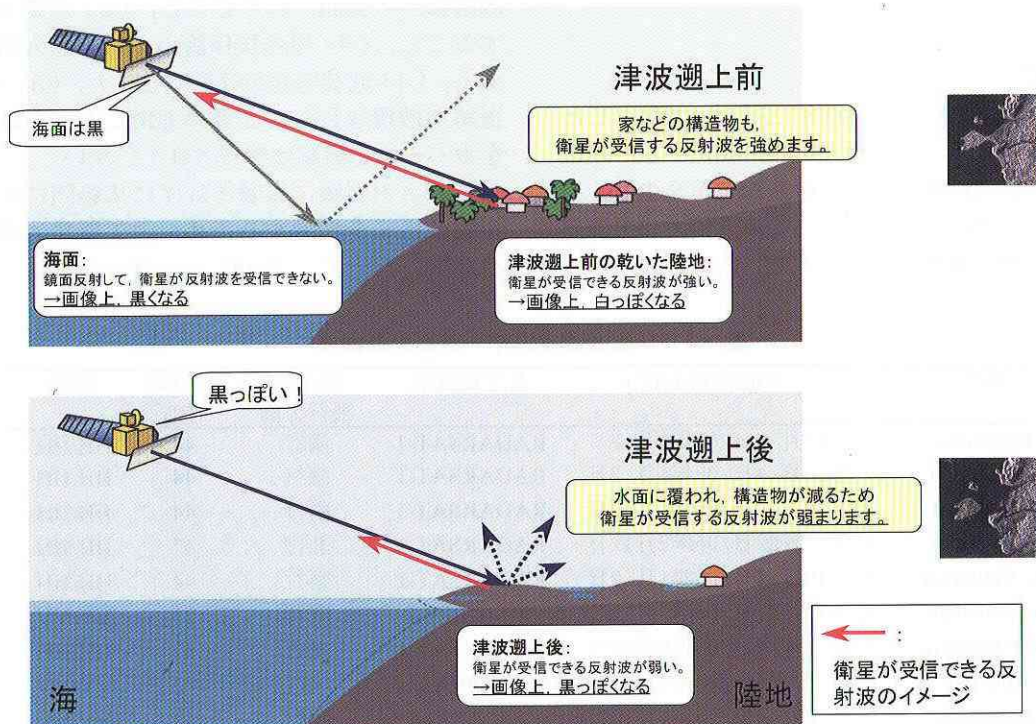


図-2 レーダー画像による津波遡上域・海岸線変化抽出の原理

## 2.2 変化抽出の原理

SAR の観測では、図-2 に示したように人工衛星から斜め下に向かってマイクロ波を照射し、地表からの反射波を受信する。こうしたマイクロ波の照射源方向への反射のことを正確には後方散乱というが、本論では簡明のため反射と呼ぶことにする。反射波の強度は、地表面の粗度（粗さ）に依存する。波のない滑らかな海面では、マイクロ波が鏡面反射し衛星方向への反射がほとんどないため、SAR 画像中、黒く表される。一方、陸地の粗度は高く、マイクロ波が反射されるため、SAR 画像中、白く表される。このような SAR 画像の性質を利用して、地表面の粗度の変化を抽出する。

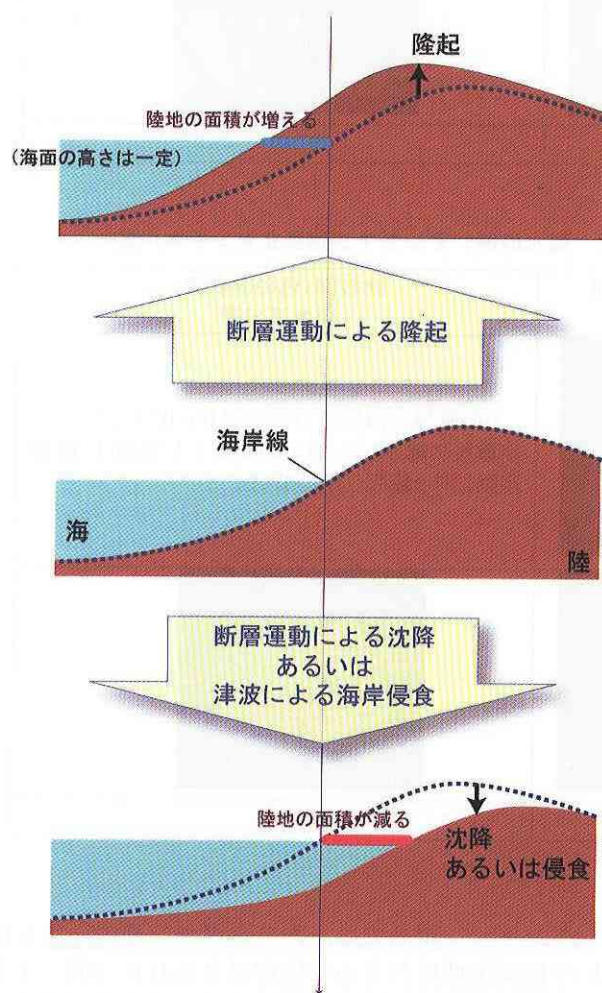


図-3 海岸線変化と隆起、及び沈降・海岸侵食

図-3 に、断層運動による隆起及び沈降が生じた場合の海岸線変化を模式的に示した。隆起の場合には、海岸線が海側に移動する。このことを離水といい、新たに陸地になった海岸を離水海岸という。一方、沈降の場合には、海岸線が陸側に移動する。このことを沈水という。海岸線が陸側に移動し、陸地面積が減る原因としては、沈降の他、津波による浸食も

ある。

図-2 には、津波遡上前後の陸の変化も示してある。津波の遡上によって、家屋等の人工構造物や森林等が破壊され粗度が小さくなった場合には、反射波の強度が減少し、SAR 画像上で暗く変化するので抽出が可能である。

さて、地震前後の 2 つの SAR 画像を比較することは容易ではあるが、この比較を効率的かつ正確に行うために次のような分析法を考案した。この分析法では、光の加色混合の原理を用いる。

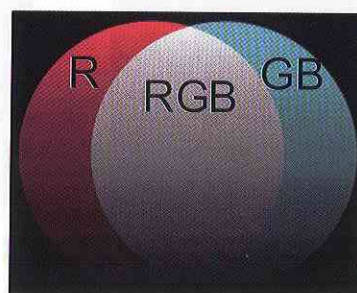


図-4 加色混合の原理

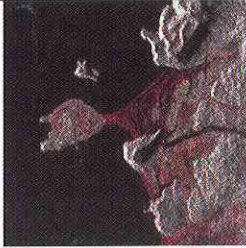
光の緑 (Green) と青 (Blue) を混合すると水色 (Cyan) となるが、さらに、この水色と赤 (Red) を混合すると白になる (図-4)。

SAR 画像は、反射波の強度に応じて、グレースケールで表現される (例：図-2、右側の画像)。考案した分析法では、地震前の SAR 画像をグレースケールから赤の濃淡であるレッドスケールに変換する。同様に、地震後の SAR 画像をグレースケールから水色の濃淡であるシアンスケールに変換する。これらの、レッドスケールとシアンスケールを加色混合するとグレースケールが得られる (図-4)。

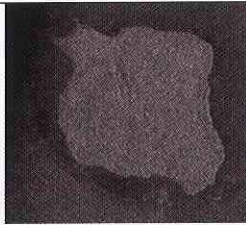
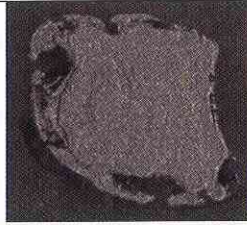
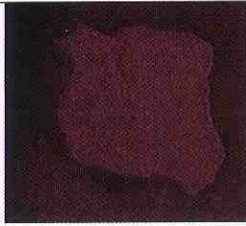
地震前後で地表面の粗度に変化がなければ、この加色混合によって、グレースケールとなるが、もし、地震前に陸だったところが地震後、海になった場合には、赤に黒が加色混合され、赤になる (表-2)。逆に、地震前に海だったところが地震後陸になった場合には、黒に水色が加色混合され、水色になる (表-3)。

前者の例を示す表-2 は、地震前に半島だった地形が地震による沈降と津波による侵食によって島になった例である。変化のない陸地部分は、光の加色混合によって、グレースケールで表されている。陸域の海岸部で薄い赤の部分はわずかに滑らかになった場所で、津波の遡上が原因と考えられる。

表－2 反射強度変化に注目した海岸変化・津波遡上域分布の抽出。沈水の例。スマトラ島西岸 Sudhen 岬。

|         | 地震前 2003/07/22<br>レーダー画像                                                          | 地震後 2004/12/31<br>レーダー画像                                                          | 比較図(色の混合後)<br>沈水域・津波遡上域分布                                                                                                  |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 元画像     |  |  | 下の画像で海岸付近の赤い(R)ところが、地震後に沈水した場所である。主な原因は、断層運動による沈降と津波による浸食が考えられる。<br>薄い赤の場所は、反射強度が少し減少した場所であり、津波による破壊・浸食で表面が滑らかに変化したと考えられる。 |
| 色変換後の画像 |  |  |                                          |
| 潮位      | -11 cm                                                                            | -10 cm                                                                            |                                                                                                                            |

表－3 反射強度変化に注目した海岸変化分布の抽出。離水の例。アンダマン諸島北センチネル島。

|         | 地震前 2004/06/03<br>レーダー画像                                                            | 地震後 2004/12/30<br>レーダー画像                                                            | 比較図(色の混合後)<br>離水域分布                                                                  |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 元画像     |  |  | 下の画像で海岸付近の水色(G+B)のところが、地震後に離水した場所である。主な原因は、断層運動に伴う隆起と考えられる。                          |
| 色変換後の画像 |  |  |  |
| 潮位      | 88 cm                                                                               | 25 cm                                                                               |                                                                                      |

### 3. 分析結果

飛田・水藤(2005a), 飛田・水藤(2005b), Tobita 他(2006)で、分析結果の一部を速報的に報告したが、ここでは、その後の分析結果も合わせて報告する。

#### 3.1 2004年12月26日の地震に伴う海岸線変化

図－5に2004年の地震に伴う海岸線変化分析結果の一部を示す。アンダマン諸島の西側に位置するインタビュー島(図－5(a)), 北センチネル島(b), 南センチネル島(c)では、明らかに隆起が見られる。北センチネル島での隆起による離水は顕著で、海岸線から垂直に測った離水距離は最大1.6kmである。

アンダマン諸島では、南アンダマン島の一部を除いてほぼ全域にわたって隆起が見られた(図－7参照)。特に、西側で離水量が大きく、島全体が東向きに傾斜するような変動が見られる。

シムルエ島(図－5(d))では、最大300m(離水距離)離水した。大ニコバル島(図－5(f))は、特に西岸の沈降が大きく、西向きの傾動が見られる。最大600m(沈水距離)沈水した。

スマトラ島北部西岸(図－5(g))は、沈降が見られる。最大沈水距離は600m、津波の最大遡上距離は4500mと計測された。

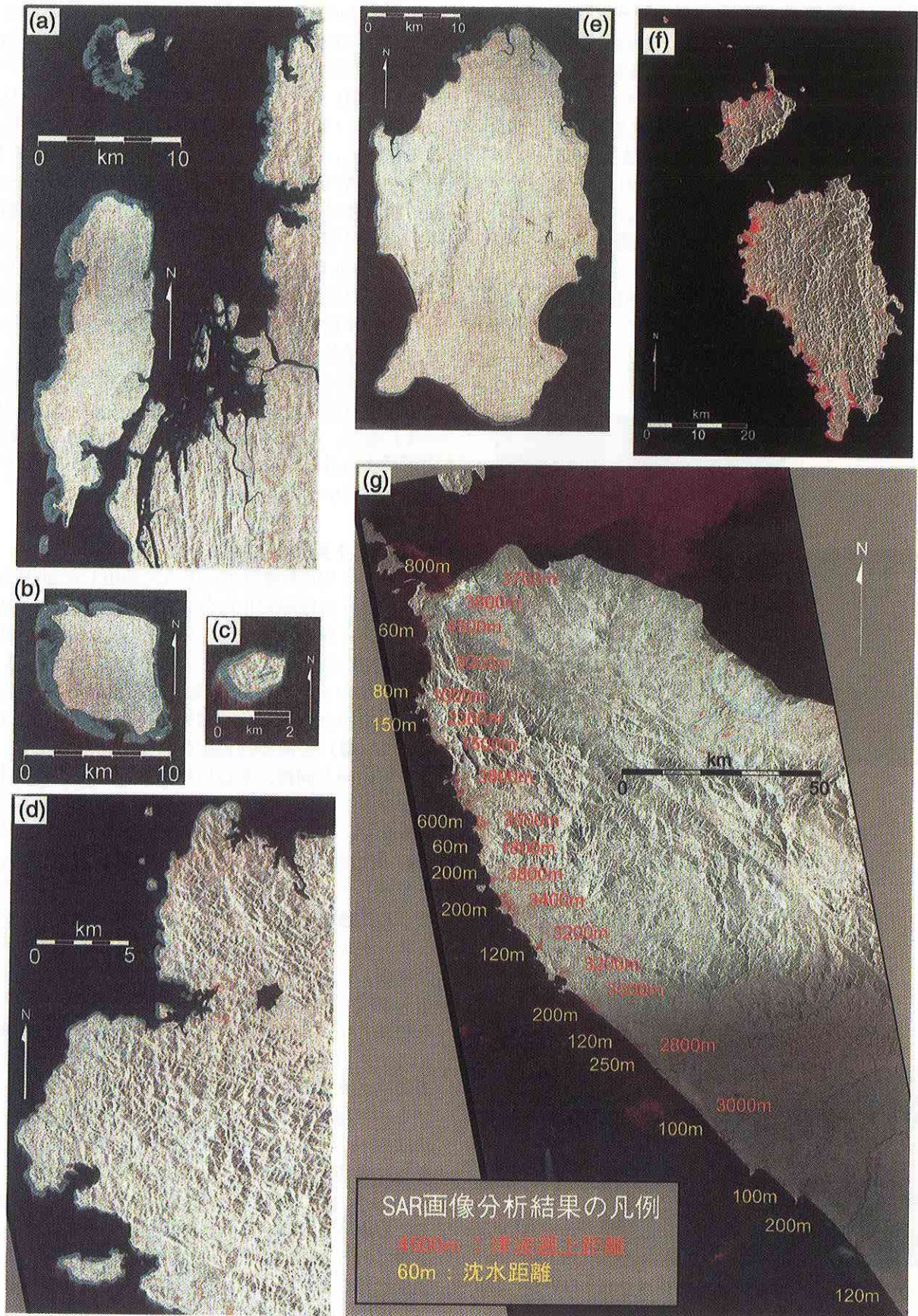


図-5 2004年の地震時に生じた海岸線変化を SAR 画像分析によりとらえた例。(a) インタビュー島、(b) 北センチネル島、(c) 南センチネル島、(d) シムルエ島、(e) 小アンダマン島、(f) 大ニコバル島、(g) スマトラ北西部

### 3.2 2005年3月28日の地震に伴う海岸線変化

図-6に2005年の地震に伴う海岸線変化を示す。赤で示した部分は、地震後に反射強度が減少した地域であり、パニャ (Banyak) 諸島トゥアング (Tuangku) 島に分布している (図-6 (a))。水色で示した部分は、地震後に反射強度が増加した地域であり、パニャ諸島バンカル (Bangkaru) 島 (図-6 (b)) 及びニアス島の北西岸 (図-6 (c)) に分布している。これらは、地震の断層運動により生じた地盤の隆起・沈降を示していると考えられる。

ニアス島北西岸には、最大約1kmの離水海岸、及び、長さ約1.5kmの島が出現した。一方、トゥアング島の海岸は、最大約100m沈水 (水没) した。

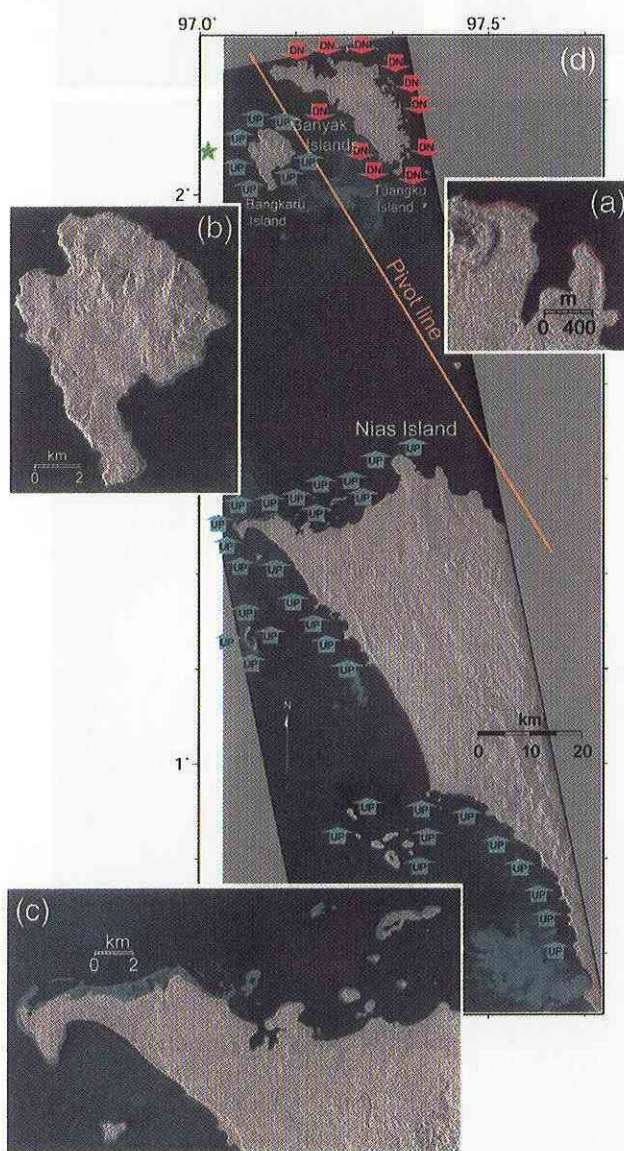


図-6 2005年の地震による海岸線変化。ENVISAT SARを使用。(a)トゥアング島、(b)バンカル島、(c)ニアス島、(d)総括図

ニアス島の北西海岸での隆起は他にも報告例があるが、「約10の島 (最大長径1.5km) が新たに出現したこと」の報告は私達のものが最初である。

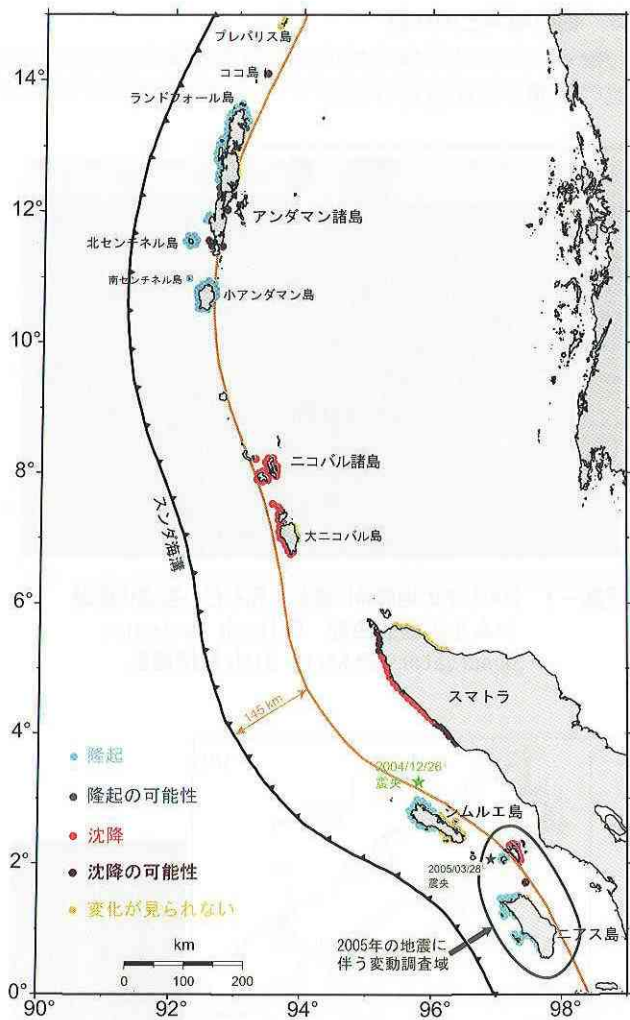
図-6 (d) で、矢印中の「UP」は隆起、「DN」は沈降を表す。パニャ諸島の西側の島バンカル島が隆起なのに対し、東側のトゥアング島は沈降しており、パニャ諸島は全体的に東へ傾動した。これら2つの島の間に隆起と沈降の境界線がある。この境界線は、上下変動がゼロの線であり、傾動の軸とも考えられる。Caltech Tectonics Observatoryの研究グループではこの線を“pivot line”と呼んでおり、これにならない本論でも、隆起・沈降の境界線をピボットラインと呼ぶ。

なお、図-6の分析結果作成に使用したSARデータ取得時の計算潮位にはわずか6cmの差しかない (表-1) ため、潮位差に起因した誤差は小さい。また、場所による計算潮位差も1cm程度しかなく、この誤差も同様に小さい。

### 3.3 上下変動の全体像

図-7にSAR画像分析によって抽出した2004年の地震に伴う海岸線変化の分布をまとめた。パニャ諸島とニアス島を含む緑色の楕円内に、2005年の地震による海岸線変化を加えた。図-7には、図-5, 6で示さなかった島々の情報も含めた。分析結果は、水色、暗い水色、赤色、暗い赤色、オレンジ色の5色の丸 (●) を海岸部に配置することで示した。これまでの例と同様、水色は海岸線が海側に移動した離水を示し、赤色は海岸線が陸側に移動した沈水及び侵食を示している。変動がない場所はオレンジ色、隆起・沈降の可能性がある場所は暗い水色・暗い赤色で示した。SAR画像分析を行わなかった場所には、こうした●を配置していない。

スンダ海溝から東に145kmのラインをオレンジ色で描画した。このラインは都合良く隆起域と沈降域を分割する。140kmや150kmでは都合が悪いことから判断して、145kmという数字の誤差は±3km程度と考えられる。スンダ海溝の線は、Bird (2003) によるものである。なお、USGSが1998年に発表したプレート境界データの場合、スンダ海溝の位置と形状はBird (2003) と比べて最大48km異なるが、これを元に等距離線を描いても隆起沈降域の分割がうまくいかない。USGSのデータは1987年の古い資料を基に作成されており、やはり新しいデータほど、より正確であるといえる。図-7のラインはGISで精密に描画したもののだが、当初画像ソフトで描いたラインより正確に、隆起沈降域を分割することができた。



図ー7 SAR 画像分析によって抽出した 2004 年・2005 年の地震に伴う海岸線変化の総括図。2005 年分は図右下の緑色線楕円内。それ以外は、2004 年分。スンダ海溝から東に 145km の位置にオレンジ色の線を描画した。スンダ海溝の位置は Bird (2003) による。

3.4 陸地面積変化

GIS ソフトウェアを利用して、海岸線変化により生じた陸地面積の変化量を計測した。この結果を表ー4に示す。最初の 5 行が 2004 年の地震によるもの、次の 3 行が 2005 年の地震による面積変化を示している。

スンダ海溝に近い震源断層の真上の島々では、島が隆起・離水することで、新たな土地約 144km<sup>2</sup> が生まれた。一方、海溝からもう少し離れた島々では、沈降及び海岸浸食によって、海岸線が陸側に移動して、合計約 33km<sup>2</sup> の土地を失った。

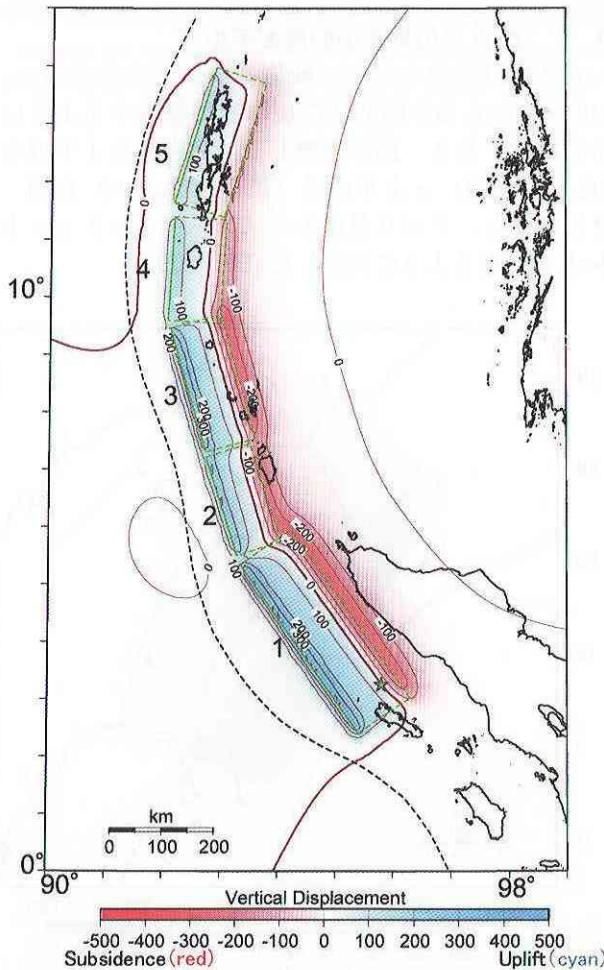
表ー4 2004 年・2005 年の地震による陸地面積の変化

| 島名          | 沈水面積 (km <sup>2</sup> ) ↓<br>(面積減少) | 離水面積 (km <sup>2</sup> ) ↑<br>(面積増加) | 島の面積 (km <sup>2</sup> ) | 割合 (%) |
|-------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|--------|
| アンダマン諸島     | -                                   | 114.3                               | 6,408.0                 | 1.78   |
| 北センチネル島     | -                                   | 15.2                                | 59.7                    | 25.46  |
| 大ニコバル島      | 15.9                                | -                                   | 1,045.1                 | 1.52   |
| スマトラ島 (アチエ) | 15.7                                | -                                   | 55,390.0 (アチエ州)         | 0.03   |
| シムルエ島       | -                                   | 9.2                                 | 1,844.0                 | 0.50   |
| ニース島        | -                                   | 19.1                                | 5,625.0                 | 0.34   |
| バンカル島       | -                                   | 1.3                                 | -                       | -      |
| トゥアング島      | 1.1                                 | -                                   | -                       | -      |
| 合計          | 32.7                                | 143.9                               |                         |        |

上の 5 島は 2004 年、下の 3 島は 2005 年の地震による面積変化

4. 断層モデル

4.1 2004 年の地震の断層モデル



図ー8 2004 年の地震の断層モデルによる上下変動量

表ー5 2004 年の地震の断層パラメータ

| 断層<br>番号 | 緯度<br>(deg) | 経度<br>(deg) | 深さ<br>(km) | 長さ<br>(km) | 幅<br>(km) | 走向<br>(deg) | 傾斜<br>(deg) | すべり角<br>(deg) | すべり量<br>(m) | Mw   |
|----------|-------------|-------------|------------|------------|-----------|-------------|-------------|---------------|-------------|------|
| 1        | 2.40        | 95.40       | 10.        | 400.       | 120.      | 325.        | 8.0         | 100.0         | 12.0        | 8.76 |
| 2        | 5.50        | 93.28       | 10.        | 200.       | 90.       | 342.        | 8.0         | 90.0          | 9.0         | 8.39 |
| 3        | 7.30        | 92.72       | 10.        | 250.       | 100.      | 344.        | 8.0         | 100.0         | 11.0        | 8.54 |
| 4        | 9.60        | 92.05       | 10.        | 200.       | 100.      | 3.5         | 8.0         | 105.0         | 6.0         | 8.30 |
| 5        | 11.65       | 92.15       | 10.        | 270.       | 100.      | 17.         | 8.0         | 120.0         | 5.0         | 8.34 |

津波の数値シミュレーションで使用されている断層モデルの中から、海洋研究開発機構（JAMSTEC）（[http://www.jamstec.go.jp/jamstec-j/sumatra/3\\_2/Fig1.html](http://www.jamstec.go.jp/jamstec-j/sumatra/3_2/Fig1.html)）の断層モデルを参考にして、5枚の断層面を想定した。続いて SAR 画像から得られた隆起沈降の分布（図-7）に整合するように、断層の位置、走向、すべり角、断層の長さ、幅を調整した。深さ及び傾斜角は山中氏（東京大学地震研）の結果を用いている。すべり量は断層面1,2によるすべりの合計がモーメントマグニチュード  $M_w=8.8$  となるように調整して、次に全断層のすべりの合計が  $M_w=9.0$  となるように残りの断層面のすべり量を調整した（図-8、表-5）。

#### 4.2 2005 年の地震の断層モデル

八木氏（筑波大学）の断層パラメータを参考に、SAR 画像から得た隆起沈降境界線に整合するように断層位置、長さ、幅を調整し、計算された上下成分（色と等高線）と水平成分（黒のベクトル）を図-9に示した。すべり量はモーメントマグニチュード  $M_w=8.7$  となるように調整した（表-6）。

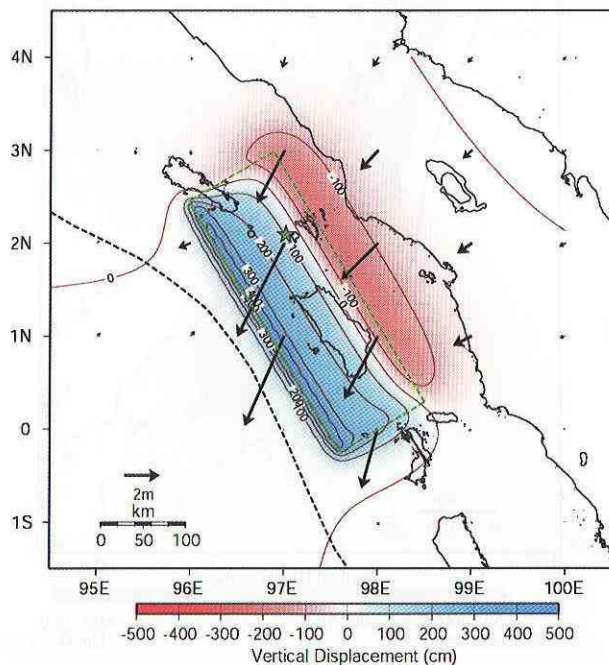


図-9 2005 年地震の断層モデルによる上下変動量と水平変動ベクトル

表-6 2005 年の地震の断層パラメータ

| 緯度<br>(deg) | 経度<br>(deg) | 深さ<br>(km) | 長さ<br>(km) | 幅<br>(km) | 走向<br>(deg) | 傾斜<br>(deg) | すべり角<br>(deg) | すべり量<br>(m) | $M_w$ |
|-------------|-------------|------------|------------|-----------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------|
| 0.25        | 97.60       | 10.        | 350.       | 120.      | 329.        | 14.         | 115.          | 11.5        | 8.71  |

#### 5. 他の観測との比較

使用した SAR 画像分析法の妥当性を検証するため、他の観測との比較を行った。

Girls standing on a dead Porites microatoll uplifted about 95 cm (37 inches) during the earthquake.



写真-1 2004 年の地震時に隆起し死んだ小型環状珊瑚。シムルエ島北西部。Caltech Tectonics Observatory の Kerry Sieh 教授撮影。

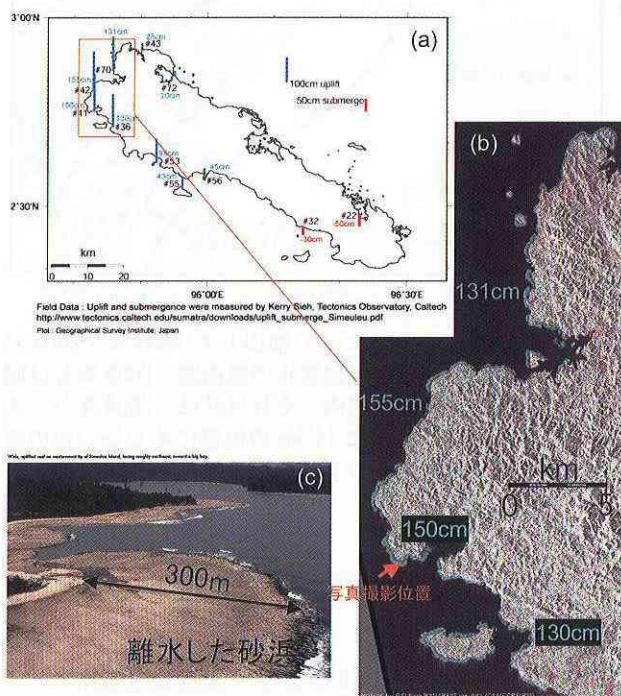


図-10 (a) Caltech Tectonics Observatory による 2004 年の地震時の隆起（水色）・沈降（赤色）量を筆者がグラフ化したもの。(b) SAR 分析画像にだ図。(c) 300m にわたって離水した海岸。シムルエ島北西部。同研究室の Kerry Sieh 教授がヘリコプターから撮影。写真撮影位置を (b) に橙色で示した。

写真-1 は、地震によって 95cm 隆起した小型環状珊瑚 (microatoll) に子供達がのっているシムルエ島北西部の写真である。これを撮影したカリフォルニア工科大学テクトニクス研究室 (Caltech Tectonics

Observatory) ケリー・シー (Kerry Sieh) 教授及び同僚の話によると、図-5 (d) と図-6 (c) に見られるシムルエ島北西部とニアス島北西部の隆起はほとんどが珊瑚礁または珊瑚起源の砂浜であるという。

同研究室では、現地でヘリコプターや船をチャーターし、海岸で珊瑚礁の測量を実施することで、隆起量・沈降量を測定している (Meltzner, 2006)。図-10 (a) は彼らによる 2004 年の地震時の隆起(水色)・沈降(赤色)量を筆者がグラフ化したものである。図-10 (b) は SAR 分析画像に彼らが測定した隆起量を水色の数字で書き込んだ図である。図-10 (c) は、300 m にわたって離水したシムルエ島北西部海岸の写真である。以上から、私達の分析結果と彼らの測定は矛盾することがなく、極めて良い一致が認められる。

図-5 (d) を見たケリー教授から、「水色のリボンはまさに現地で見てきた離水域と驚くほどよく一致している」というコメントをいただいた。また、図-6 (c) を見た同研究室の Richard Briggs 氏は、「上下変動の分布が全体として把握できるので、現地調査の前に SAR 分析画像が提供されれば、計画を立てるのに有効。SAR 画像による隆起沈降域の分析結果は細かいところまで現地調査と良く一致している。」と評価してくれた。

図-11 は同研究室の Aron Meltzner 氏がヘリコプターから撮影した写真と私達の SAR 分析画像である。SAR 画像 (c) と写真 (e) は同一の場所であり、非常に良く整合している。写真は現地の状況(砂洲であることを)に詳細に表しているが、SAR 画像では長径の変化が定量的に把握できる。また、SAR 画像 (d) と写真 (f) はどちらも Bawa 島のもので、板状珊瑚が隆起して海岸線が変化したことがわかる。

最大 600 m の沈水距離が計測された(図-5 (g))スマトラ島北部西海岸では、その原因に沈降が含まれるかどうかについては、私達の結果からは断定が難しいが、この場所を調査した日本及び米国の研究者は、海の中に椰子の木が生えている様子などから、沈降があったと報告している。

大ニコバル島最南端にあるインディラポイント灯台が約 4 m 沈降したという地震前後の写真付きの報告があり ([http://cires.colorado.edu/~bilham/IndonesiAndaman2004\\_files/IndiraPointSubsidence.htm](http://cires.colorado.edu/~bilham/IndonesiAndaman2004_files/IndiraPointSubsidence.htm))、図-5 (f) の結果と矛盾しない。

以上のように、私達の SAR 画像分析法はこうした他の直接的な観測結果と矛盾しないことが確認された。

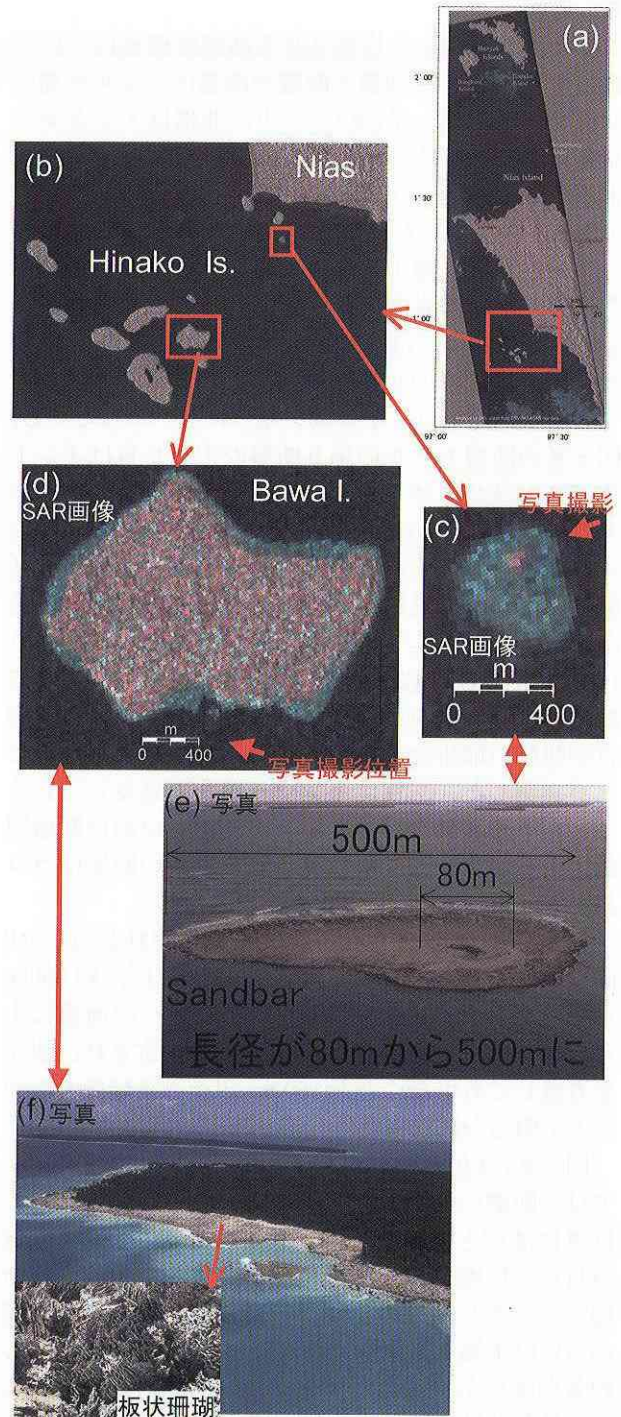


図-11 2005年の地震時に隆起したニアス島西岸・ヒナコ諸島。(a)のニアス島西岸とヒナコ諸島の部分を拡大したSAR分析画像が(b)。(b)の内、ニアス島西岸の小島とヒナコ諸島バワ島のSAR分析画像を拡大したのが(c)と(d)。(e)と(f)の写真はCaltech Tectonics ObservatoryのAron Meltzner氏がヘリコプターから撮影したもの。ただし、写真(f)の左下は海岸で撮影した板状珊瑚。(a)~(d)の水色部分が隆起による離水海岸を示す。

## 6. 考察

まず、本研究から推察される断層破壊域について議論する。2004年地震の断層の南端はシムルエ島の北部である(図-7, 8)。一方、北端はアンダマン諸島北端のランドフォール(Landfall; インド領)島より北側でココ(Coco; ミャンマー領)島より南側である。少なくともプレパリス島(Preparis Is.; ミャンマー領)より南であることは間違いない。なぜなら、図-7の海岸線変化総括図に示したように、ランドフォール島では明確に隆起が見られるのに対し、ココ島では沈降の可能性があり、一方、その北側のプレパリス島では上下変動が見られないからである。図-8の断層モデルの第5断層のすべり角はインドオーストラリアプレートのプレート運動方向がスンダ海溝に対し斜めになっていることもあり、120度(表-5)で、右横ずれ成分が含まれ、このため第5断層の北側には沈降域が現れる。この沈降域にココ島が位置すると考えると説明が自然である。このように2004年地震の破壊域は、シムルエ島北部から北に約1320kmもの総延長を持ち、初期の地震波による解析や津波の解析結果よりも長い距離が破壊されたことが判明した。当初ミャンマー領まで延長していることも予想されたが、ミャンマー領ココ島は断層運動によるわずかな沈降は見られたものの断層はココ島までは達していないことがわかった。

2005年の地震による断層破壊域の総延長は、SAR画像分析と調和する断層モデルによれば、約350kmと推定された。2004年と2005年の2つの地震による断層破壊域の総延長は、1670kmと推定され、誤差を考慮しても少なくとも1600km以上の総延長をもつことが明らかになった。

図-8, 9からわかるように今回動いた断層においては、断層の上端から下端に向かって4分の3程の位置に隆起と沈降の境界が位置するので、SAR画像分析結果は断層の下端の位置を主に拘束する。逆断層であるため断層の上端付近は隆起が見られ、下端あるいは下端より東側では沈降となる。これらから、顕著な隆起が見られたアンダマン諸島の西岸やシムルエ島北部は断層の真上だったことがわかる。

次に、スンダ海溝から145km東の線(図-7中オレンジ色の線)を境に西側で隆起、東側で沈降の傾向がみられたことに関して議論する。このような傾向はどのようなプレート間相互作用で説明できるであろうか。図-12はプレート沈み込み境界における地震時の隆起と沈降の様子を表す模式図である。陸側のプレートの下に沈み込む海側のプレートに引きずられて下向きに変形した陸側のプレート先端部(黒; “BEFORE”)が跳ね上がって(赤; “AFTER”)地震を発生させる際、図のように隆起と沈降が生じる。震源断層の上端部付近の島では隆起、下端部付

近の島では沈降となる。この図で隆起と沈降が入れ替わる場所がピボットラインに相当するが、今回の地震では、この位置がスンダ海溝から東に約145kmに位置すると考えられる。約1600kmにわたる破壊域全体で、ピボットラインが145kmのラインにほぼ一致していることから、今回の破壊域では、プレート間カップリングの深さが一様であると考えられる。

アンダマン諸島、シムルエ島、ニアス島、バンカル島が、図-12に示したように震源断層の真上に位置していたと考えれば、東向きの傾動が説明できる。同様に、大ニコバル島、スマトラ島西岸が震源断層の下端よりも陸側に位置していたと考えれば、西向きの傾動が説明できる。

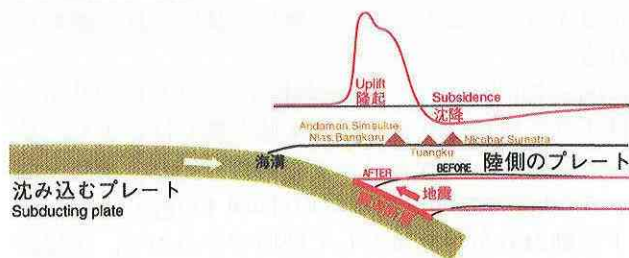


図-12 プレート沈み込み境界における地震時の隆起と沈降。沈み込むプレートに引きずられて下向きに変形した上側のプレート先端部が跳ね上がって地震を発生させる。このとき、図のように隆起と沈降が生じる。断層の上端部付近の島では隆起、下端部付近の島では沈降となる。隆起と沈降の境界がピボットライン位置となる。

私達の SAR 画像分析法では、上下変動のセンス(隆起か沈降か)だけしか把握できず、上下変動量の計測はできない。しかし、次のような長所がある。

- 1) 雲や昼夜に影響されず、確実に画像が取得できるため、災害前後の有効な画像が得られる可能性が高い。光学画像中の雲は地表を遮蔽するだけでなく、雲の影が変化抽出を困難にしている。
- 2) 1シーンの観測面積が大きいので、災害の全体像を把握するのに適している。
- 3) 同一衛星位置から撮影した画像が多く、災害前後の画像比較が容易・正確である。光学画像の場合には、異なる衛星位置から異なる時刻に画像取得が行われることが多く、自動での変化抽出が困難である。一方 SAR は自らマイクロ波を発射するアクティブセンサーであり安定した画像データが取得される。
- 4) サーチ機能を有する。例えば、新島出現の様子が自動的に抽出できる。現地調査計画にも有効である。

今回用いた衛星 SAR 画像分析法を今後用いる機会が想定されるため、本研究から得られた教訓を以下にまとめておきたい。

- 1) SAR の入射角は大きい方がよい。入射角が 30 度より小さい場合には、小さな波浪からの反射波を受信してしまい、海と陸の区別がつきにくく海岸線の抽出が困難である。
- 2) SAR の偏波は、VV (垂直偏波で送信したマイクロ波を垂直偏波で受信) より HH (水平偏波で送信したマイクロ波を水平偏波で受信) がよい。水平偏波の方が海面で鏡面反射しやすく、海岸線の抽出が容易である。偏光サングラスと同様の原理である。ただし、偏光と偏波は振動方向が垂直の関係に定義されている。
- 3) SRTM (スペースシャトル地形データ) と衛星画像など異なる性質のデータを比較することは、非常に困難かつ不正確である。
- 4) SRTM は地表面でなく Canopy (枝葉最上部) の標高を計測したデータセットであるから、隆起沈降量を定量的に求めるのには適さない。
- 5) L バンド干渉 SAR が必要である。今回の SAR データ解析の当初目標は、干渉 SAR による地殻変動量計測であったが、適用が困難であった。理由は、L バンドの SAR 衛星データは入手できないからである。L バンド SAR なら植生があっても干渉可能である。また、フリンジレートが低いので、地殻変動量が大きくても計測可能である。さらに、Phase Unwrapping もしやすい (藤原・飛田, 1999; 飛田, 2003)。

## 9. まとめ

2004 年・2005 年の巨大地震を発生させた震源域の地殻変動の全体像を把握するため、光の加色混合法を利用して、人工衛星 SAR の強度画像から地表面粗度の変化抽出を行う新しい分析法を開発した。この分析法は、変動量の計測はできないものの、離水・沈水域がどこに分布しているかを把握するのに有効であり、また、津波遡上域の把握も可能である。また、現地調査等他の観測と比較して、矛盾がないことが確認された。

SAR 画像分析の結果、破壊域の範囲、隆起・沈降域、主な場所の離水面積・沈水面積が明らかになった。2004 年及び 2005 年の地震の震源域はそれぞれ 1320km 及び 350km、合計 1670km と推定された。

約 1600km にわたる破壊域全体で、ピボットラインが海溝から 145km 東のラインにほぼ一致していることから、今回の破壊域では、プレート間カップリングの深さが一様であると考えられる。また、島々の隆起と沈降及び傾動の方向については、プレート沈み込み境界におけるプレート間相互作用モデルによりピボットラインとの位置関係で説明できる。

既存の断層モデルを SAR 画像分析による隆起沈降域に整合するように修正することによって、新たな断層モデルを作成した。

## 謝 辞

研究遂行上、ご指導をいただいた海津優、熊木洋太、津澤正晴、宇根寛各氏に感謝いたします。

## 参 考 文 献

- Banerjee, P., F. F. Pollitz, and R. Bürgmann (2005): The size and duration of the Sumatra-Andaman earthquake from far-field static offsets, *Science*, 308, 1769-1772.
- Bird, P. (2003): An updated digital model of plate boundaries, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 4(3), 1027, doi:10.1029/2001GC000252.
- 藤原智, 飛田幹男 (1999): 地殻変動検出のための干渉 SAR 画像作成技術, *日本測地学会誌*, 第 45 巻, 283-295.
- Matsumoto, K., T. Takanezawa, and M. Ooe (2000): Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model: A Global Model and a Regional Model Around Japan, *Journal of Oceanography*, 56, 567-581.
- Meltzner, A. J., K. Sieh, M. Abrams, D. C. Agnew, K. W. Hudnut, J. P. Avouac, and D. H. Natawidjaja (2006): Uplift and Subsidence Associated with the Great Aceh-Andaman Earthquake of 2004, *J. Geophys. Res.*, Res., doi:10.1029/2005JB003891.
- Sieh, K., S. N. Ward, D. Natawidjaja, and B. W. Suwargadi (1999): Crustal deformation at the Sumatran subduction zone revealed by coral rings, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 3141-3144.
- 飛田幹男 (2003): 合成開口レーダー干渉法の高度化と地殻変動解析への応用, *測地学会誌*, 49, 1-23.
- 飛田幹男, 水藤尚 (2005a): 人工衛星画像を用いた海岸線変化抽出による 2004 年スマトラ沖地震・インド洋津波に伴う隆起・沈降域の把握, *地震予知連絡会会報*, 第 74 巻, 580-585.
- 飛田幹男, 水藤尚 (2005b): 衛星レーダー画像を用いた海岸線変化抽出による 2005 年 3 月 28 日スマトラ沖地震に伴う隆起・沈降域の把握, *地震予知連絡会会報*, 第 74 巻, 586-588.
- Tobita, M., H. Suito, T. Imakiire, M. Kato, S. Fujiwara, and M. Murakami (2006): Outline of vertical

- displacement of the 2004 and 2005 Sumatra earthquakes revealed by satellite radar imagery, *Earth Planets Space*, Vol. 58 (No. 1), e1-e4.
- Vigny, C., W. J. Simons, S. Abu, R. Bamphenyu, C. Satirapod, N. Choosakul, C. Subarya, A. Socquet, K. Omar, H. Z. Abidin, and B. A. Ambrosius (2005): Insight into the 2004 Sumatra-Andaman earthquake from GPS measurements in southeast Asia, *Nature*, 436, 201-206.
- Zachariasen, J., K. Sieh, F. W. Taylor, and W. S. Hantoro (2000): Modern vertical deformation above coral microatolls, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 90, 897-913.