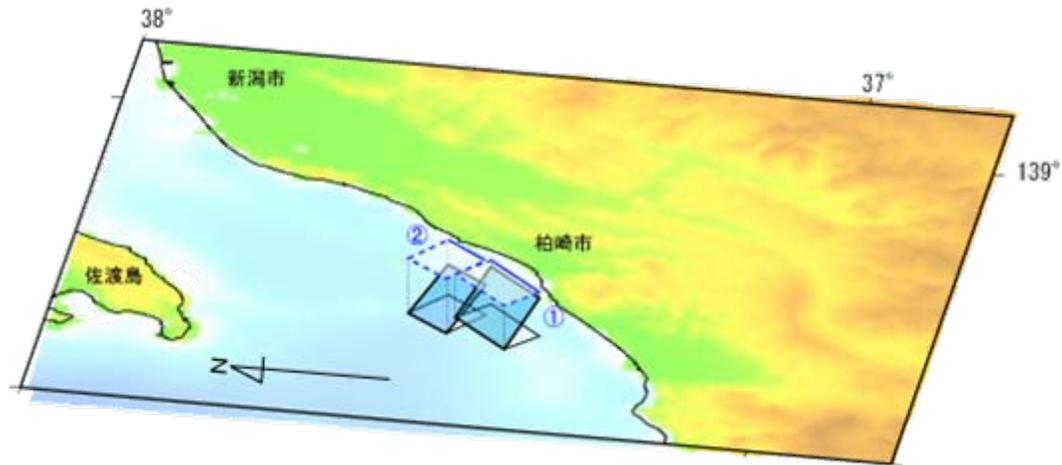


平成19年(2007年)新潟県中越沖地震に伴う地殻変動と震源断層モデル



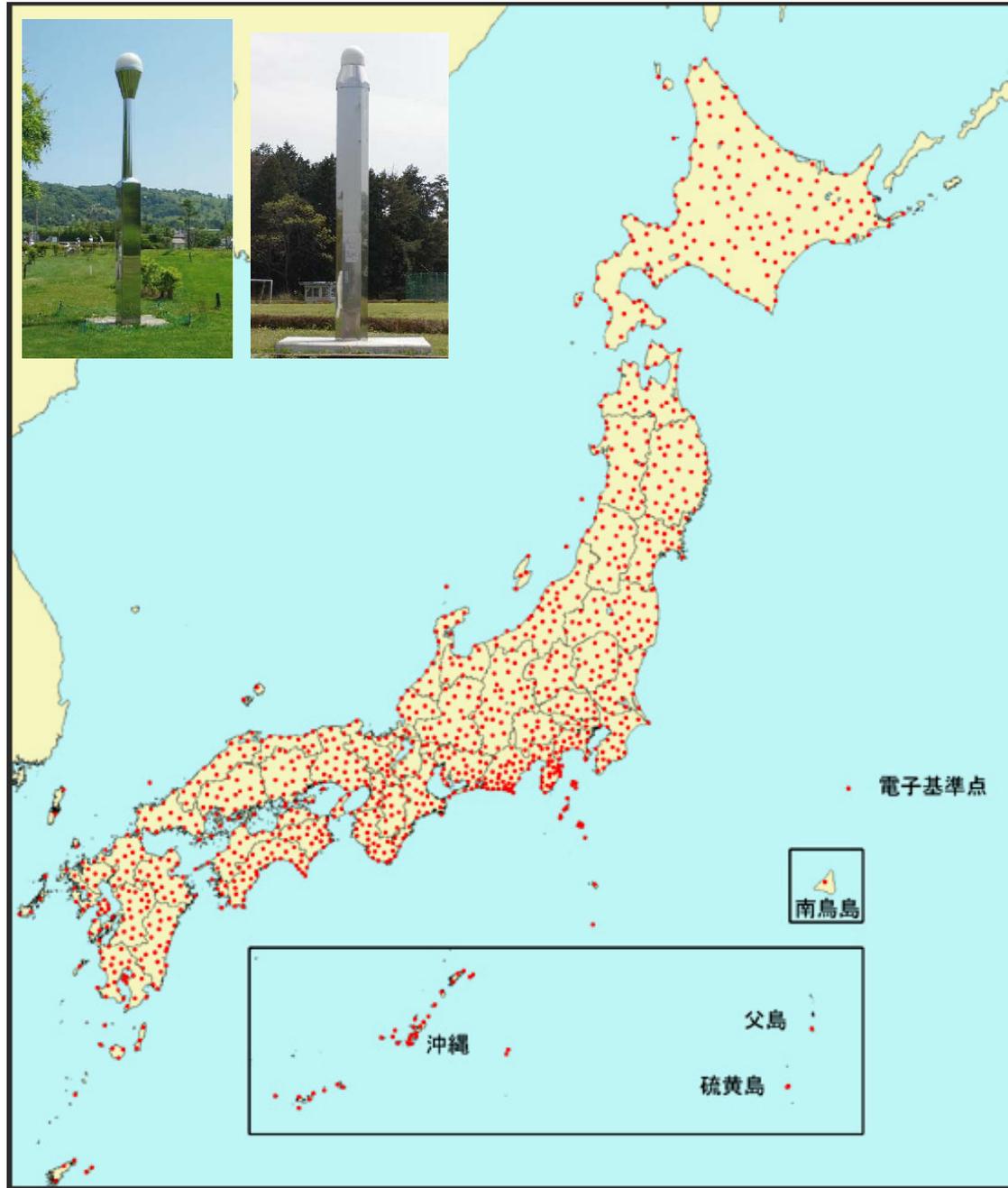
国土交通省 国土地理院
地理地殻活動研究センター
地殻変動研究室長

とびた みきお
飛田 幹男

全国GPS連続観測網 (GEONET)

電子基準点：
測量の基準点
地殻変動監視
1,233点

約99%に相当する1,218点がリアルタイムデータ配信機能を有している



合成開口レーダー（SAR）による面的地殻変動観測 地球観測衛星「だいち」を利用した地殻変動



水準測量

2007年7～8月に国土地理院 機動観測班
が 緊急測量を実施。



観音岬北部



柏崎刈羽原発

水準測量 計画図

平成19年7~8月

平成19年新潟
県中越沖地震

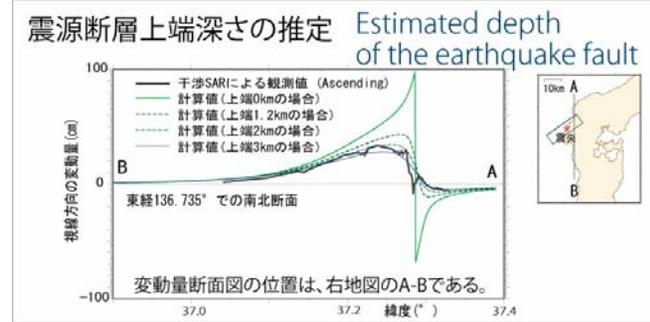
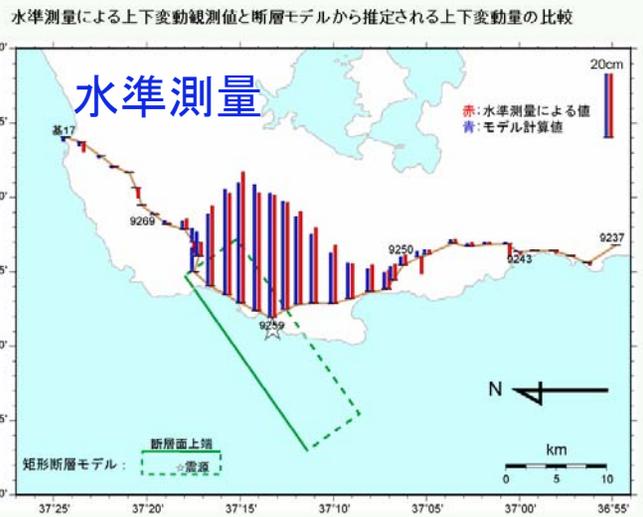
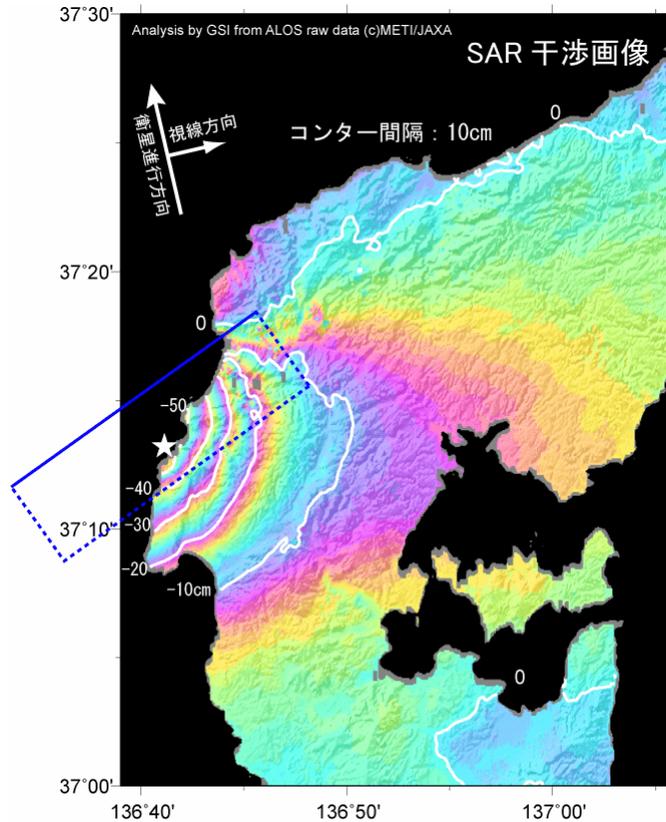
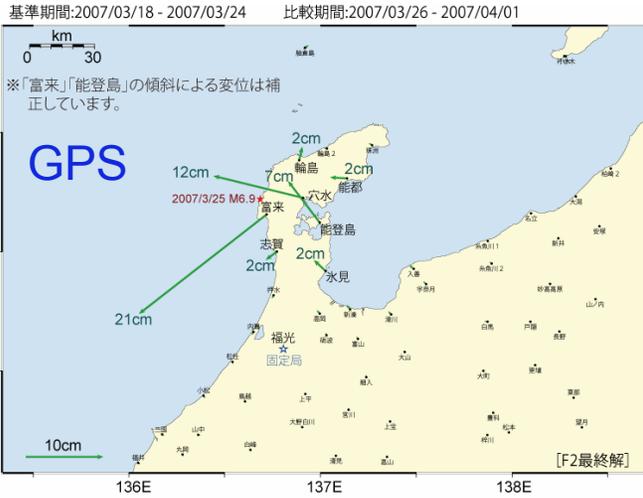
- 凡 例
- : 変更計画観測路線
 - : 観測終了路線
 - : 水準点
 - : 電子基準点



平成19年8月1日現在

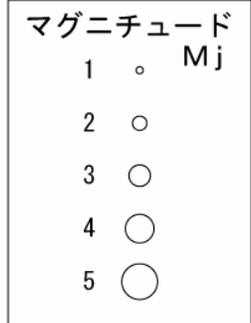
(前回観測時期は、平成18年9-10月)

過去の成功例：平成19年能登半島地震に伴う地殻変動と震源断層モデル



過去の成功例：平成19年能登半島地震に伴う地殻変動と震源断層モデル

37°30'N

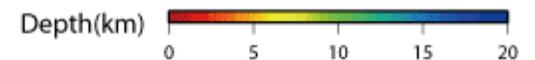
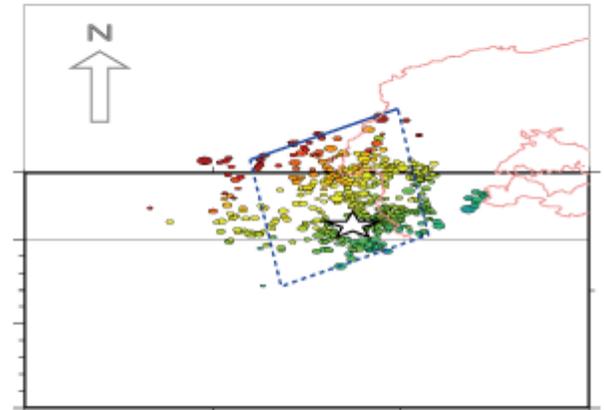


震源のプロットは3月25日から3月26日での一元化震源データによる

20km

136°30'E

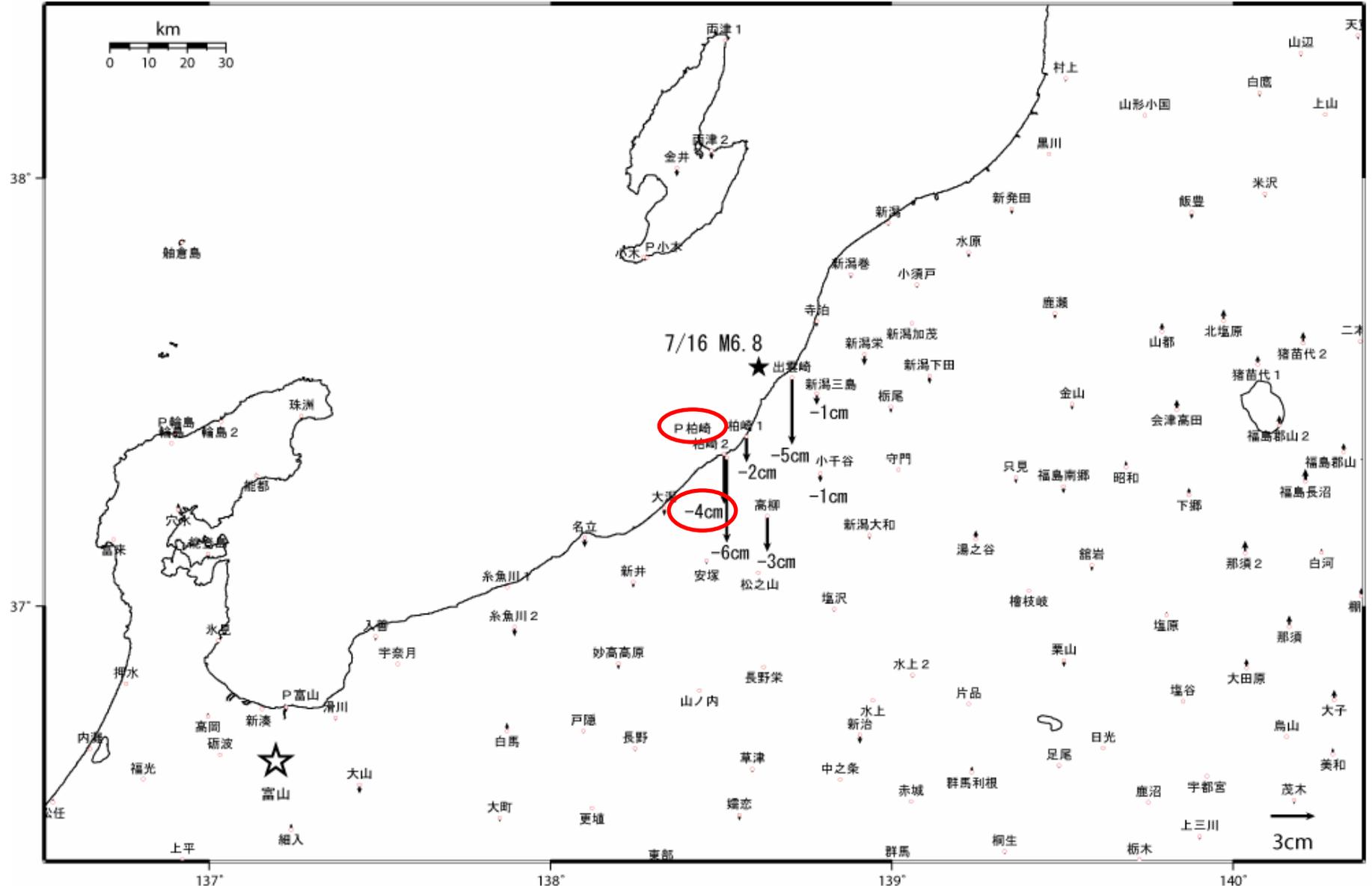
37°00'N



GPSによる地殻変動 平成19年新潟県中越沖地震

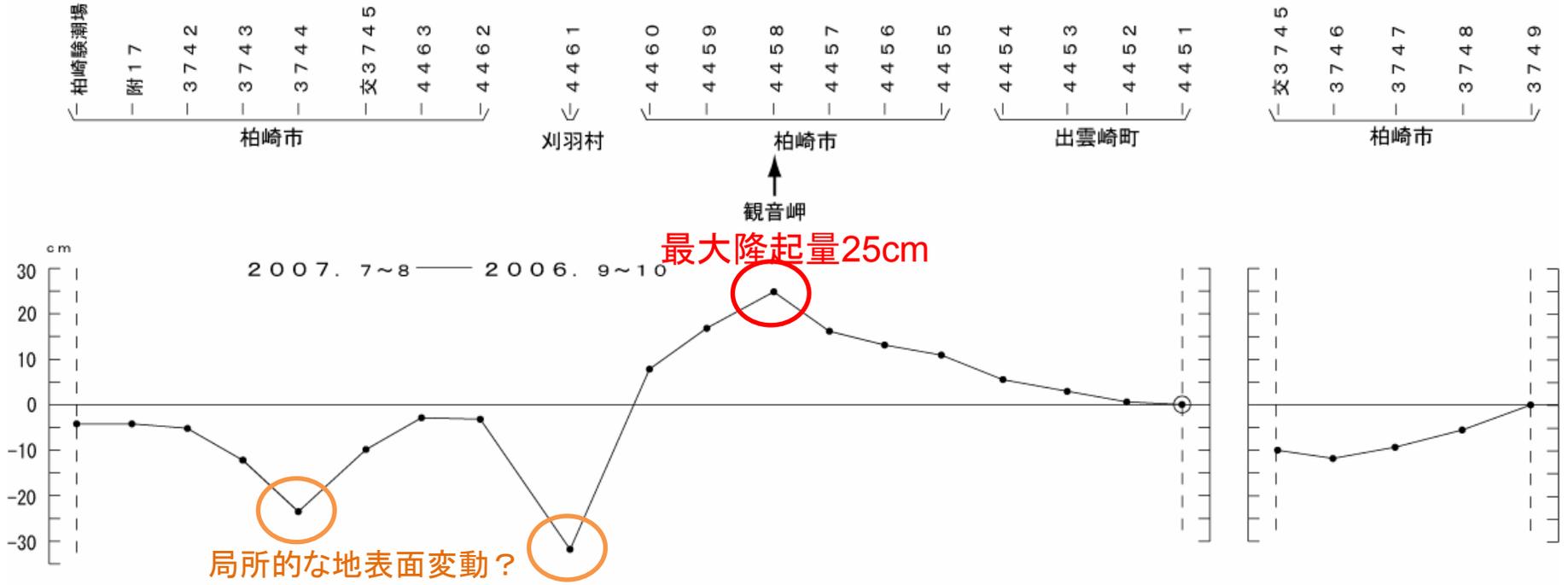
上下変動ベクトル

基準期間：2007/07/10 - 2007/07/15
 比較期間：2007/07/17 - 2007/07/22



水準測量による地殻変動 平成19年新潟県中越沖地震

柏崎市～出雲崎町間の上下変動

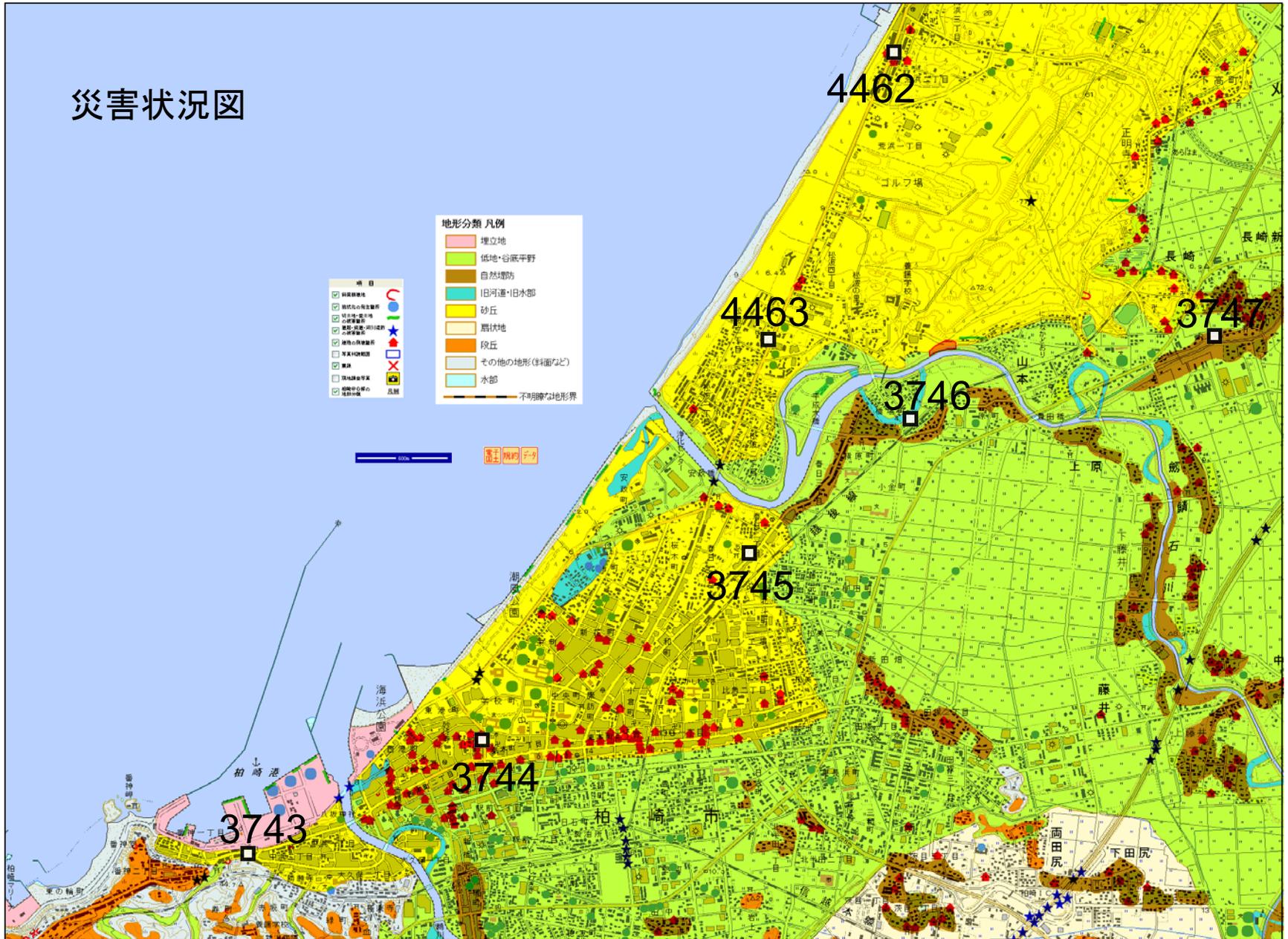


- 凡例
- : 観測終了路線
 - : 水準点
 - : 電子基準点

0 5km

水準点の位置(柏崎市周辺)平成19年新潟県中越沖地震

災害状況図



水準点の位置(柏崎市周辺)平成19年新潟県中越沖地震

災害状況図

平成19年(2007年)新潟県中越沖地震 災害状況図



項目

- 斜面崩壊地
- 液状化の発生箇所
- 切土地・盛土地の被害箇所
- 道路・鉄道・河川堤防の被害箇所
- 建物の倒壊箇所
- 写真判読範囲
- 震源
- 現地調査写真
- 柏崎中心部の地形分類

印刷 計測

ズーム

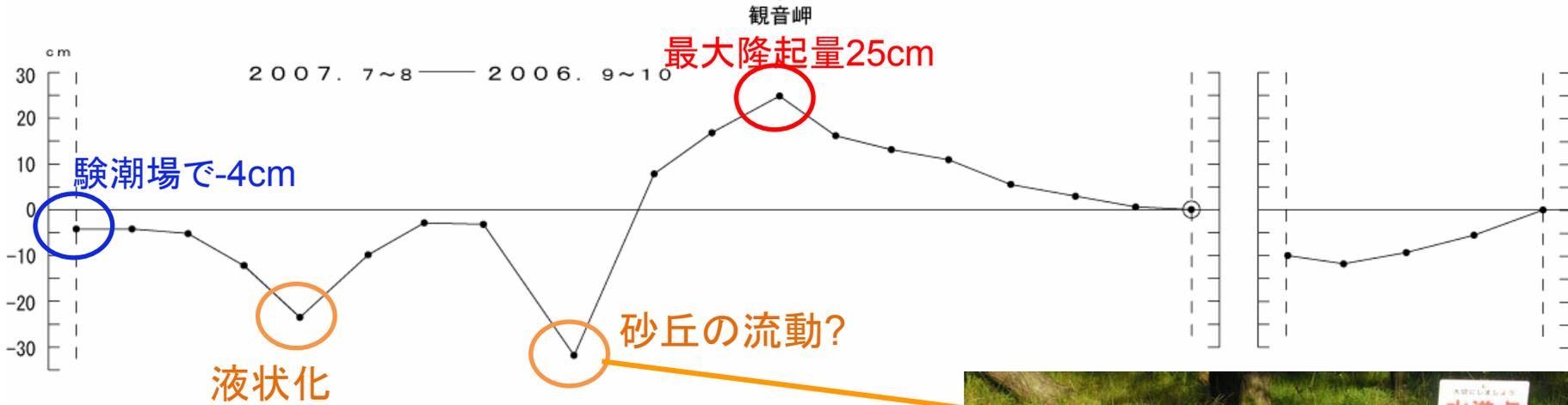
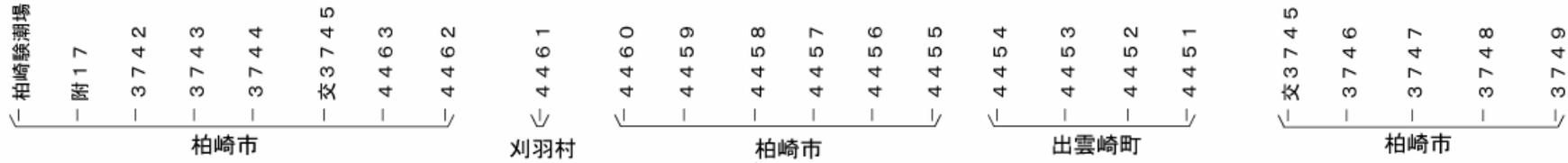
移動

属性表示 白地図化

Help window

水準測量による地殻変動 平成19年新潟県中越沖地震

柏崎市～出雲崎町間の上下変動



「柏崎験潮場で-4cm」は、独立の観測であるGPS, 水準測量と整合。そして、潮位観測も...



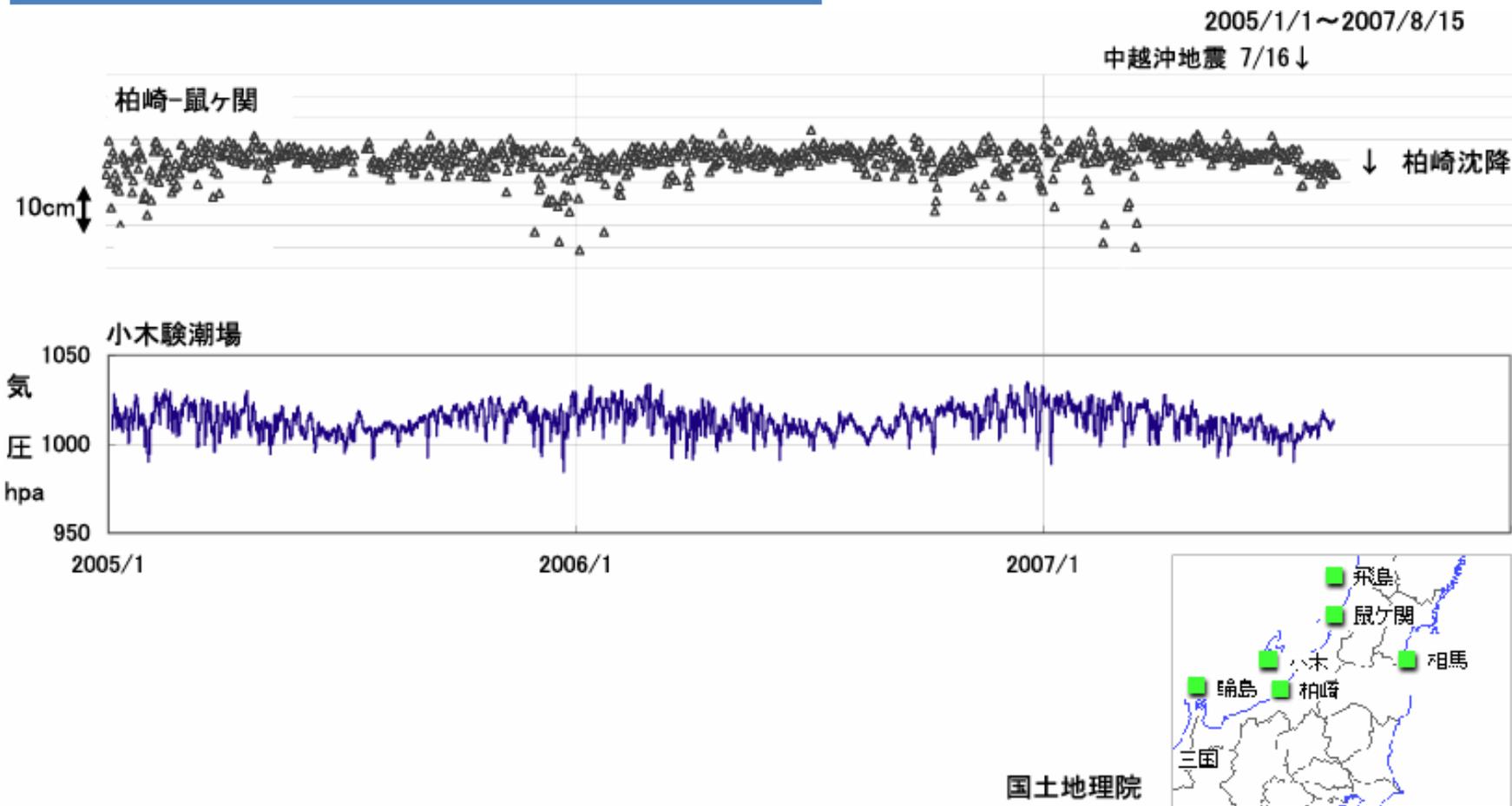
- 凡例
- : 観測終了路線
 - : 水準点
 - : 電子基準点

水準点4461 原発東側隣接 亀裂など変状なし



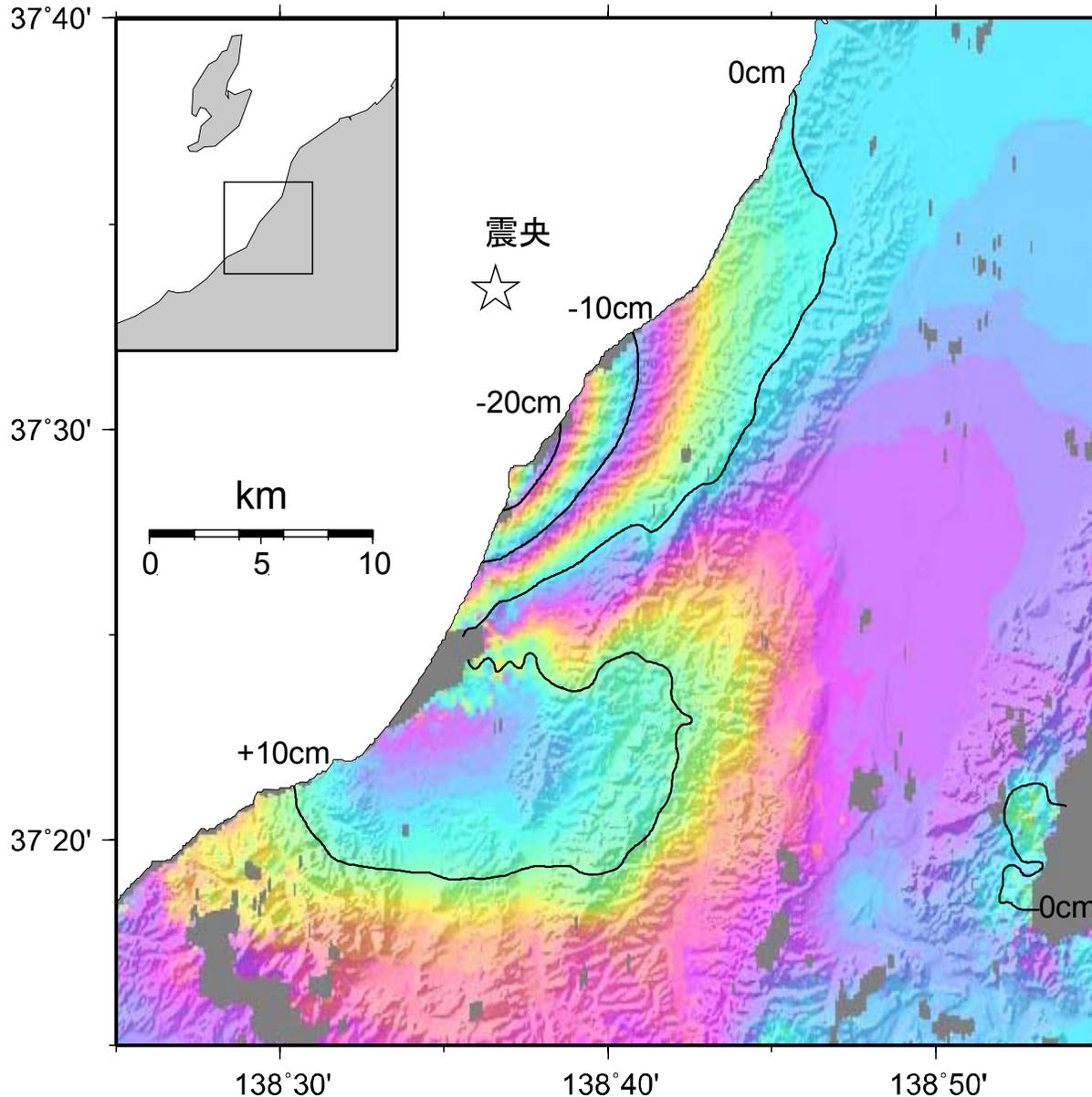
新潟県中越沖の潮位差(日平均値)

柏崎験潮場は約4cmの沈降

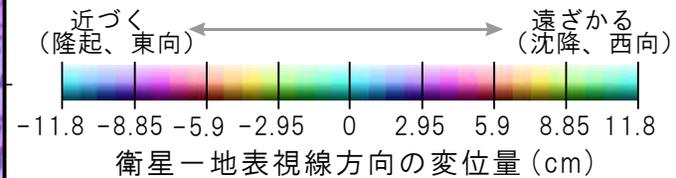


SARによる地殻変動マップ 平成19年新潟県中越沖地震

「だいち」によるSAR 干渉画像 (Descending34.3° 2007/1/16-7/19)



東南東上空の仰角約50°
の「だいち」から撮影した
SAR画像を干渉解析した
もの



Analysis by GSI from ALOS raw data (c)METI,JAXA

震源断層モデル比較 平成19年新潟県中越沖地震

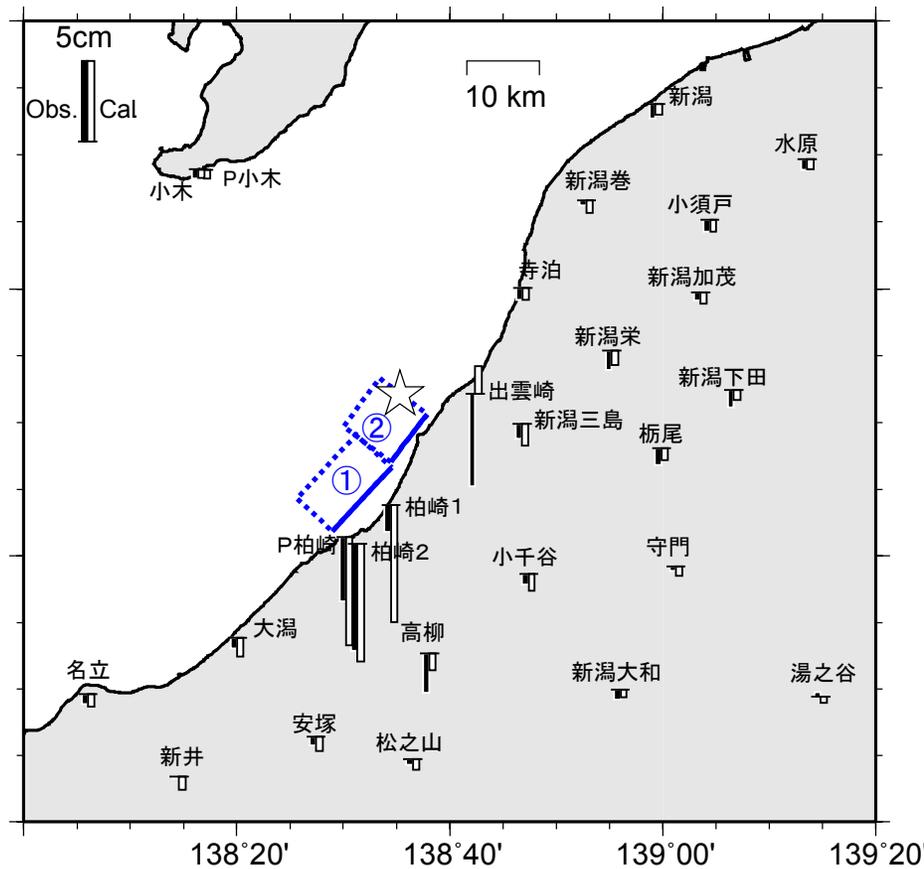
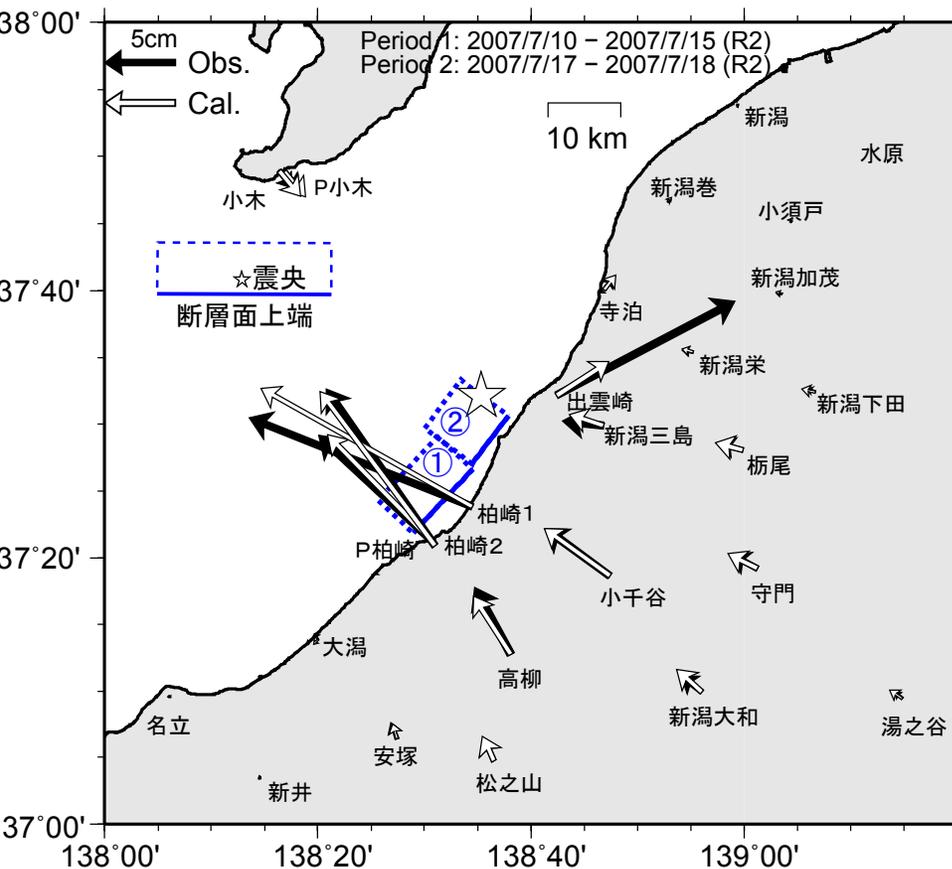
震源断層モデル	地殻変動データの残差	震源分布(地震研)との整合性	その他	総合評価
モデル1 (北西傾斜) 震源域北東部で北西傾斜，震源域南西部で南東傾斜の断層を仮定したモデル	 $\chi^2=1,153$ モデル2, 3に比べるとGPSデータと水準データの残差がやや大きい。	   震源域北東部では， <u>矩形断層が北西傾斜の余震分布に対応し，本震の震源付近を通過する。</u> 震源域南西部では，余震よりかなり浅い。	震源域北東部と南西部で断層の深さや傾斜角にオフセットがある。	
モデル2 (南東傾斜)	 $\chi^2=1,027$	 震源域北東部では，矩形断層が南東傾斜の余震分布に一部対応しているが，本震の震源とはかなり離れる。 震源域南西部では，余震よりかなり浅い。	震源域北東部と南西部で断層の深さや傾斜角にオフセットがある。	
モデル3 (北西+南東傾斜) 震源域北東部で北西傾斜，震源域南西部で南東傾斜の断層を仮定したモデル	 $\chi^2=999$	   震源域北東部では， <u>矩形断層が北西傾斜の余震分布に対応し，本震の震源付近を通過する。</u> 震源域南西部では，余震よりかなり浅い。	震源域北東部と南西部で断層の深さや傾斜角にオフセットがある。	
モデル4 (余震域) 余震分布に整合するように，震源域北東部ではT型，震源域南西部では^型に断層を仮定したモデル	 $\chi^2=15,746$ 余震域の深さに変動源をおいても，地殻変動は全く説明できない。	 余震域に整合するような矩形断層を仮定している。		 地殻変動データを全く説明しない。
モデル5 (南東傾斜+分岐) 主断層として震源域全体を南東傾斜の断層面で表し，震源域南西部に北西傾斜の分岐断層を仮定したモデル	 $\chi^2=1,460$ GPSデータの残差がやや大きい。	 主断層の矩形断層は南東傾斜の余震分布におおむね対応しているが，分岐断層に対応するような余震分布は見られない。	分岐断層が高角(傾斜角70°以上)であるが，高角な逆断層は，物理的に動きにくいと考えられる。	

※震源分布は，東京大学地震研究所によるものを基準としている。

北西傾斜モデル 電子基準点観測との比較

水平

上下



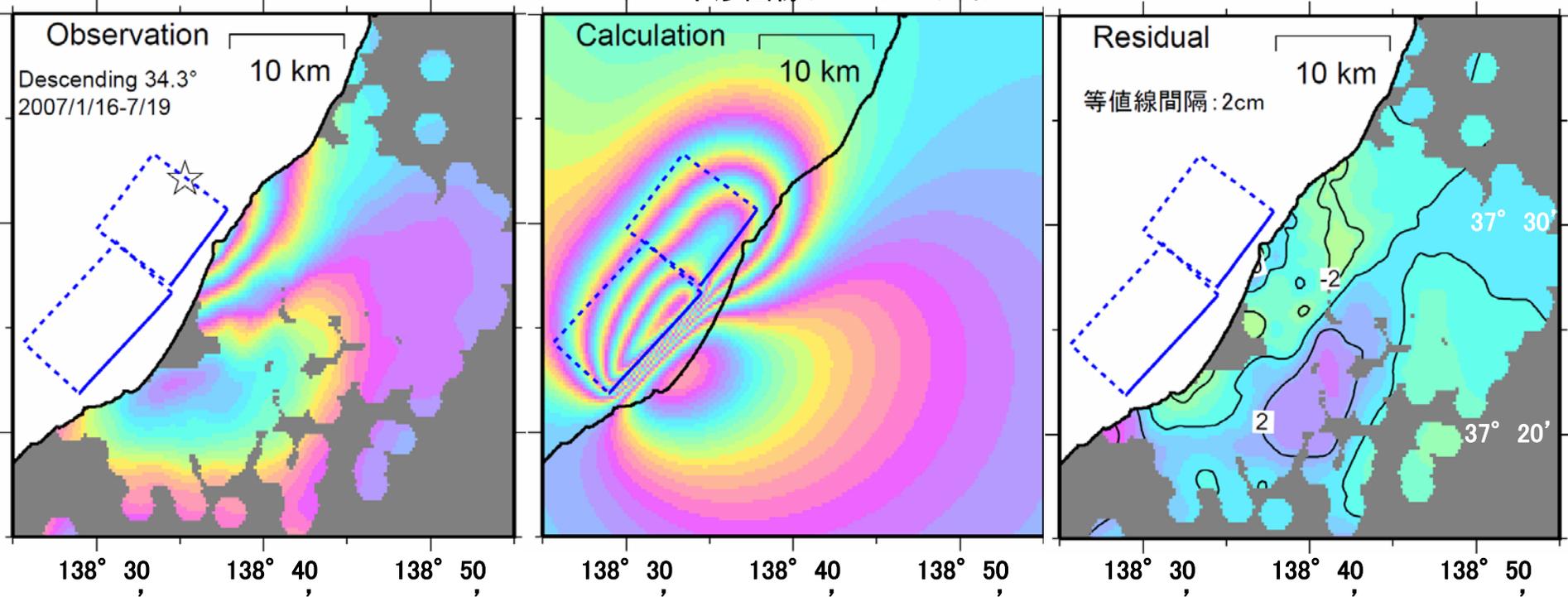
- ① 37.444 138.575 D 1.4km L 12.1km W 11.2km Strike 223 Dip 53 Rake 87 Slip 1.25m Mw 6.40
 - ② 37.511 138.631 D 5.9km L 8.3km W 10.8km Strike 217 Dip 41 Rake 104 Slip 1.75m Mw 6.38
- Total Mw 6.59 (Rigidity:30GPa)

北西傾斜モデル 合成開口レーダー干渉解析との比較

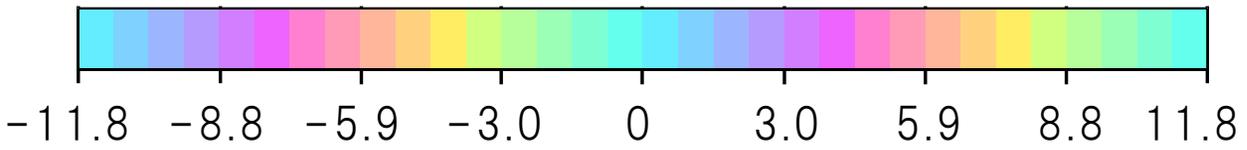
A 「だいち」によるSAR 干渉画像

B 断層モデルによる
干渉画像シミュレーション

C AとBの差分

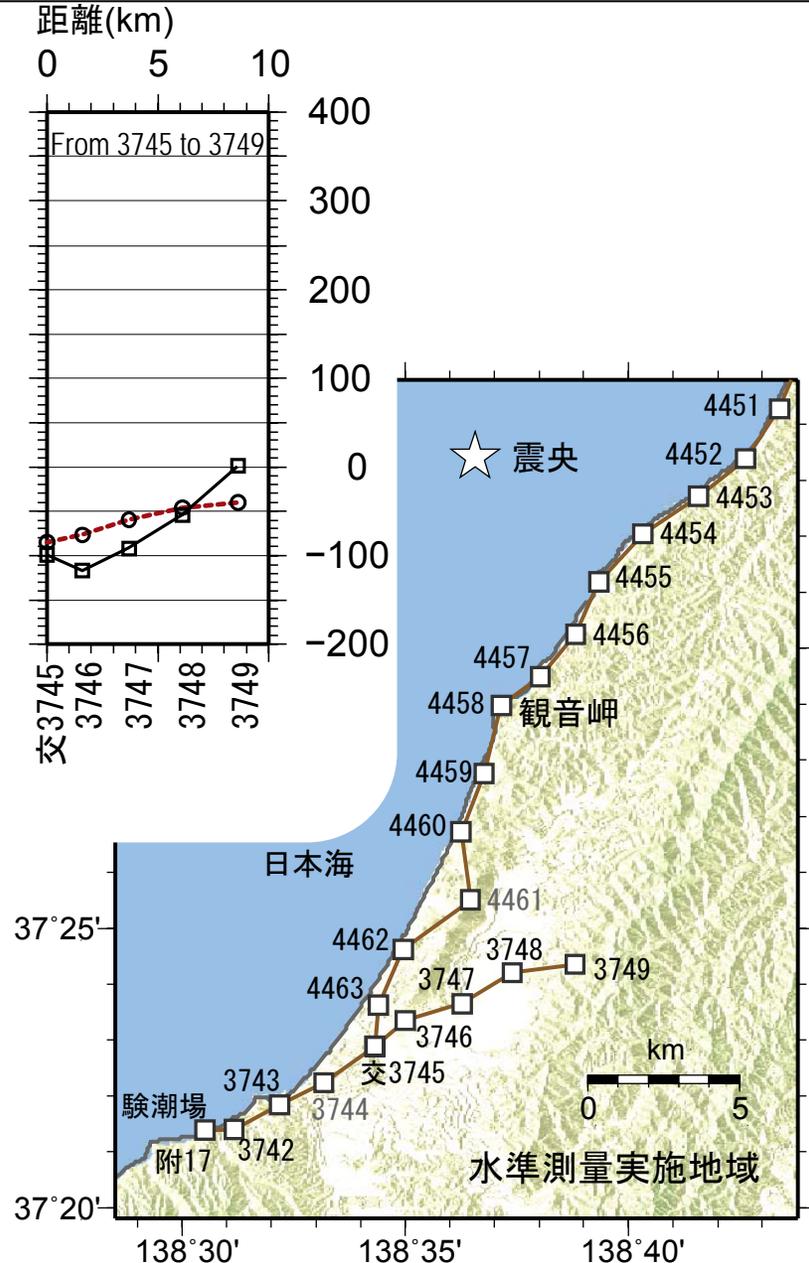
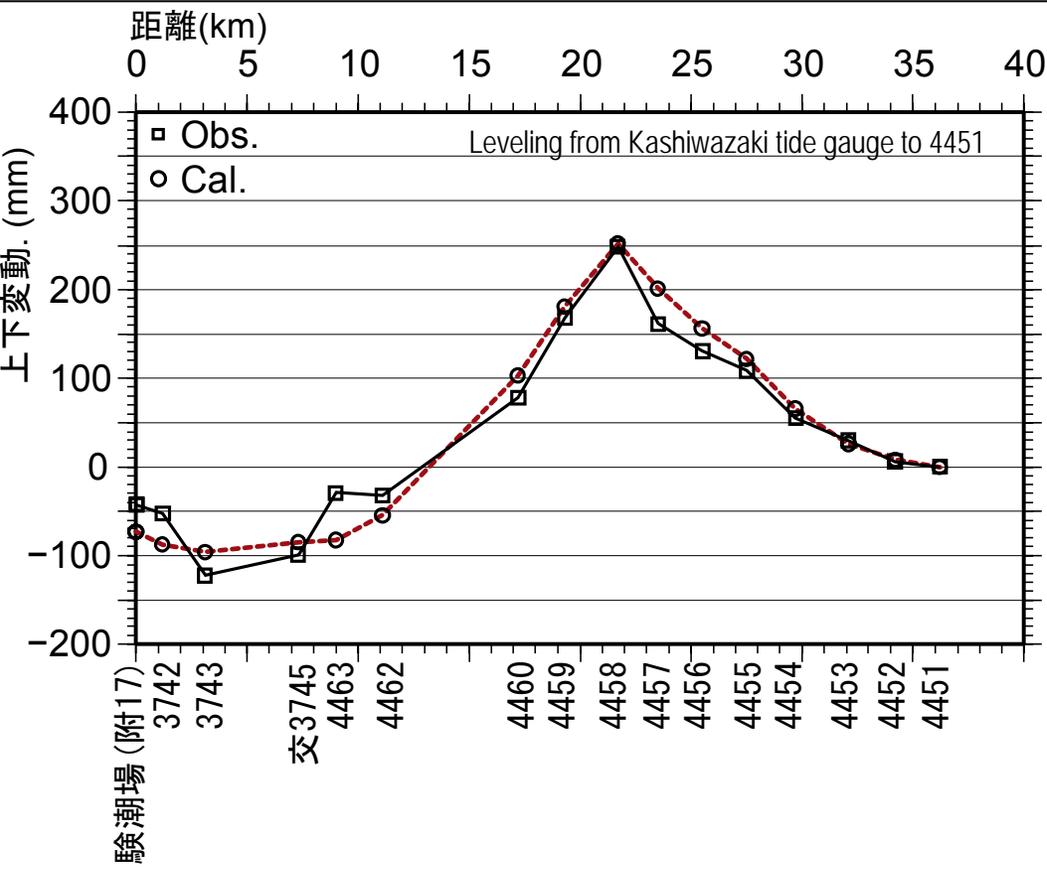


近づく (隆起、東向) 遠ざかる (沈降、西向)



衛星-地表視線方向の変位量 (cm)

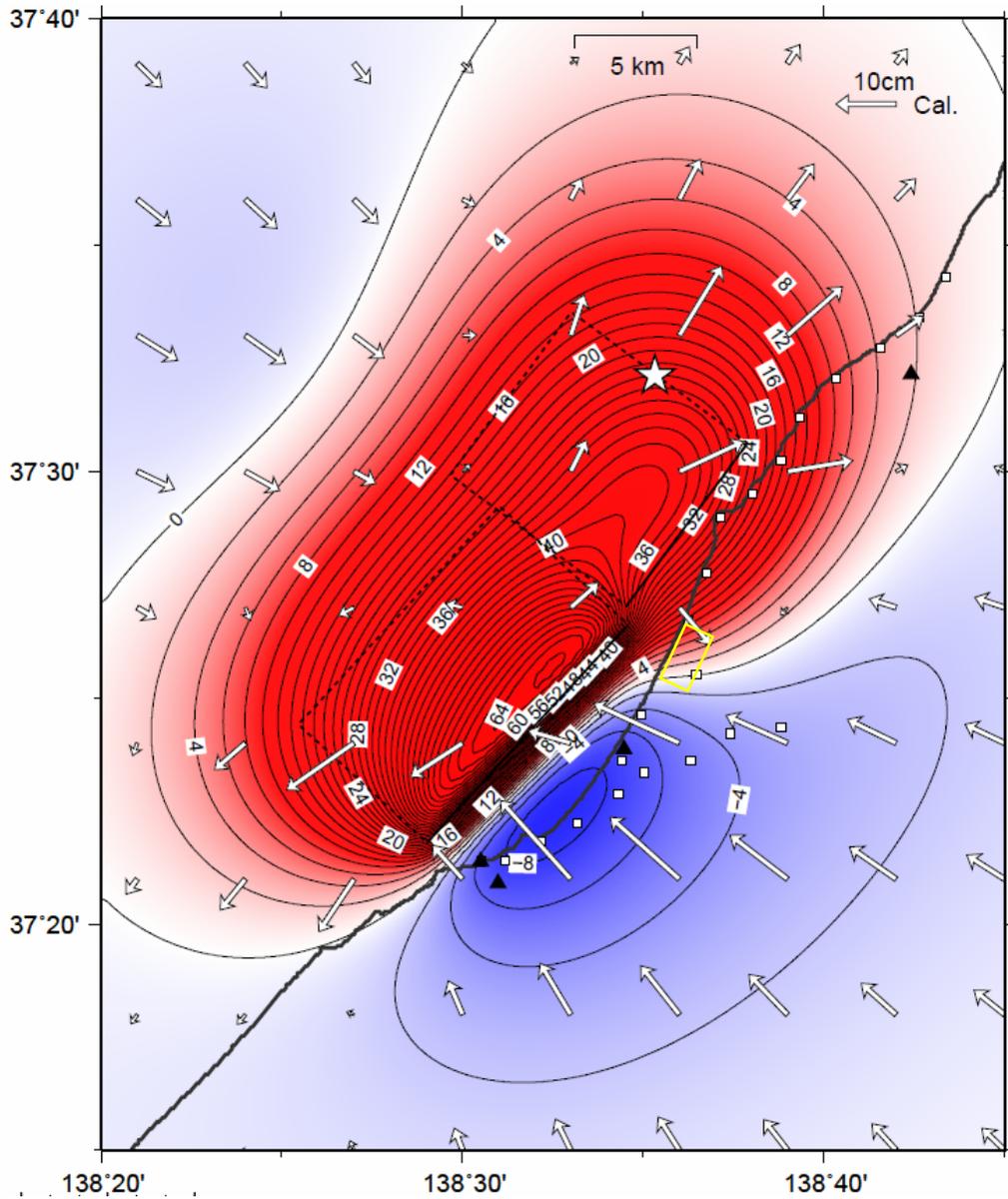
北西傾斜モデル 水準測量との比較



観測日：
平成19年7月20日～8月9日 (前回観測：平成18年9～10月)

* 水準点3744と4461のデータは、周囲の水準点と比べて大きく沈降しているためモデル解析には用いていない。

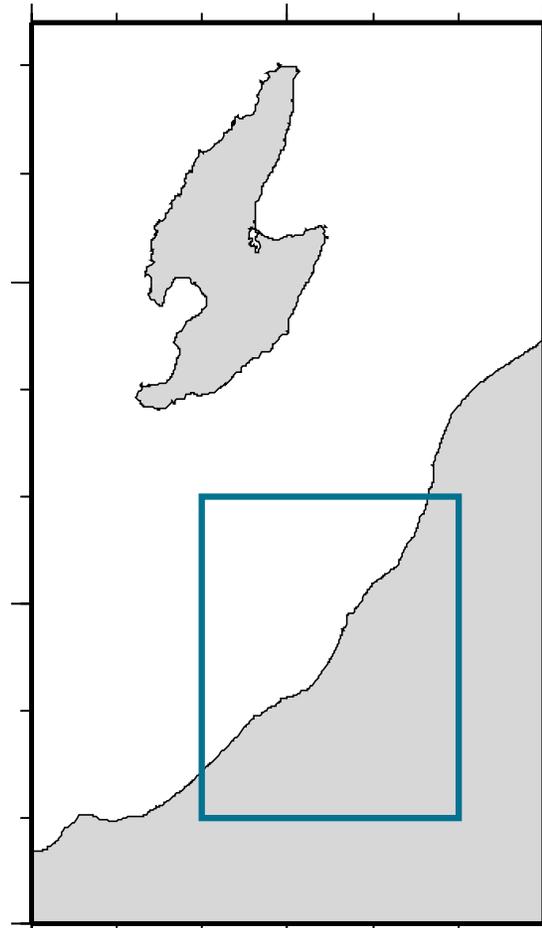
北西傾斜モデル モデルによる水平・上下運動

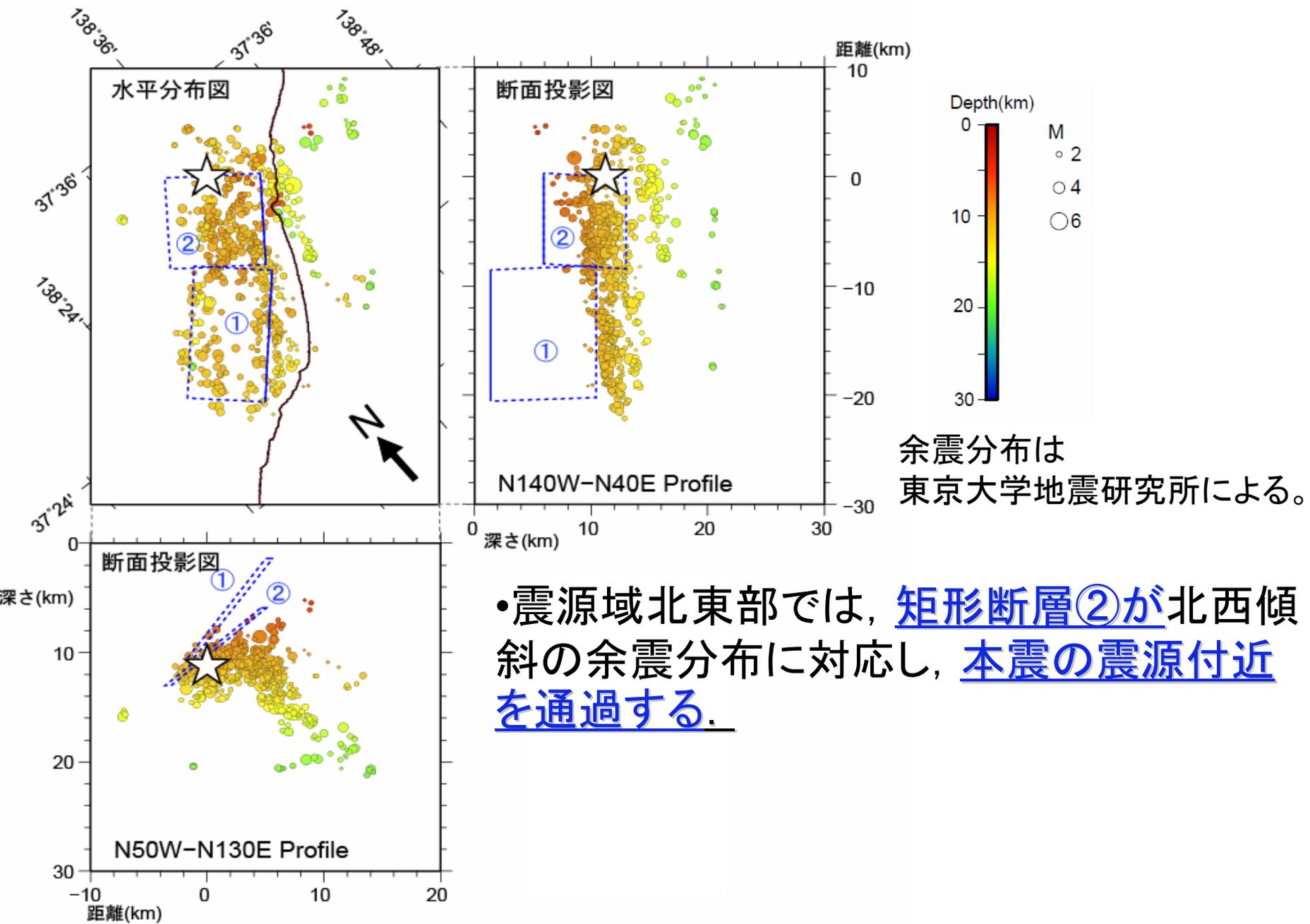


赤色は隆起を、青色は沈降を示す。
等値線の間隔は太線4cm, 細線2cm。

← モデルによる水平変動ベクトル
(地表面)

- ▲ 電子基準点
- 水準点



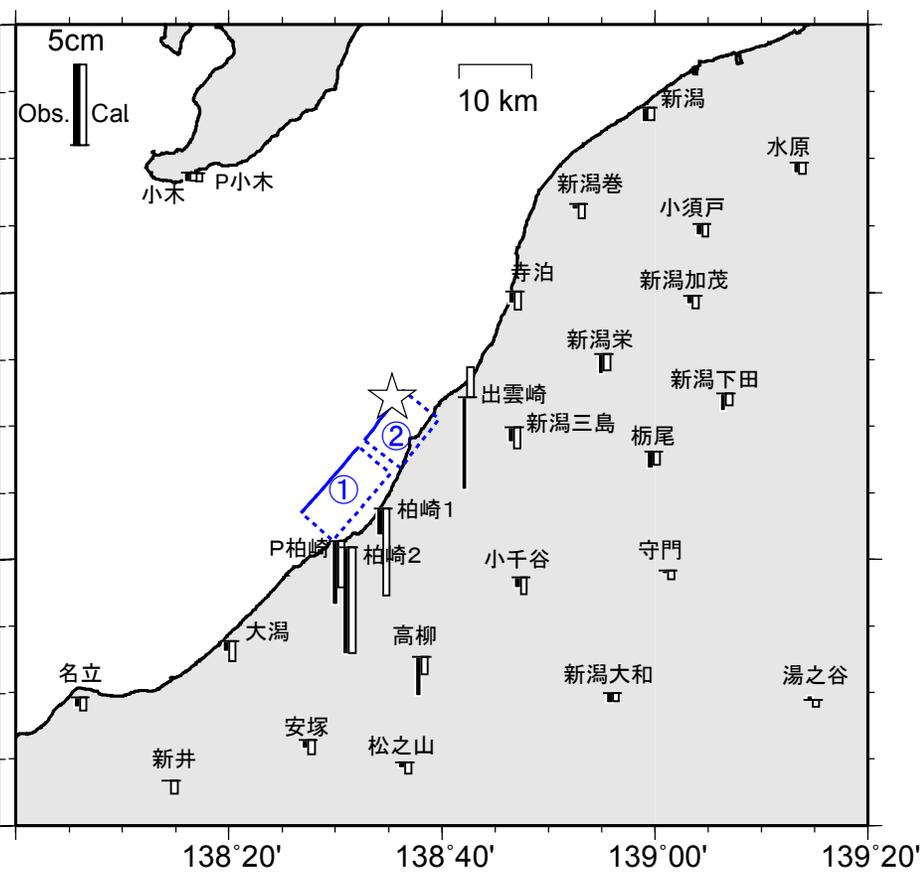
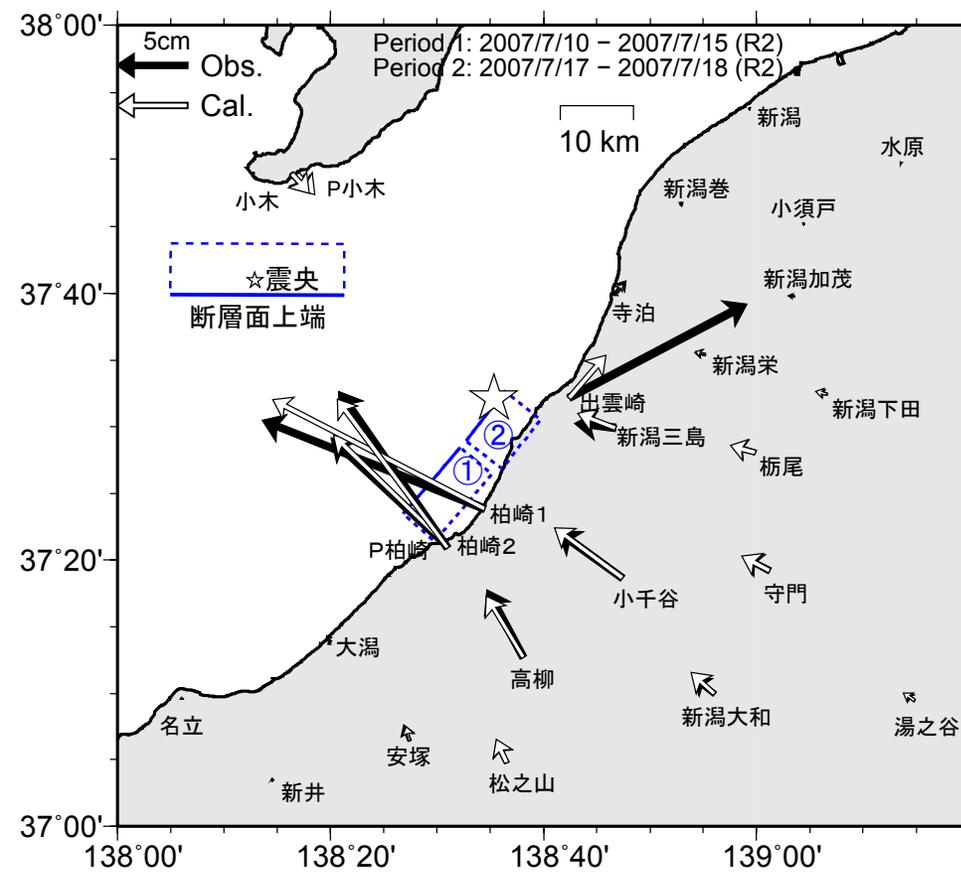


•震源域北東部では、矩形断層②が北西傾斜の余震分布に対応し、本震の震源付近を通過する。

南東傾斜モデル 電子基準点観測との比較

水平

上下



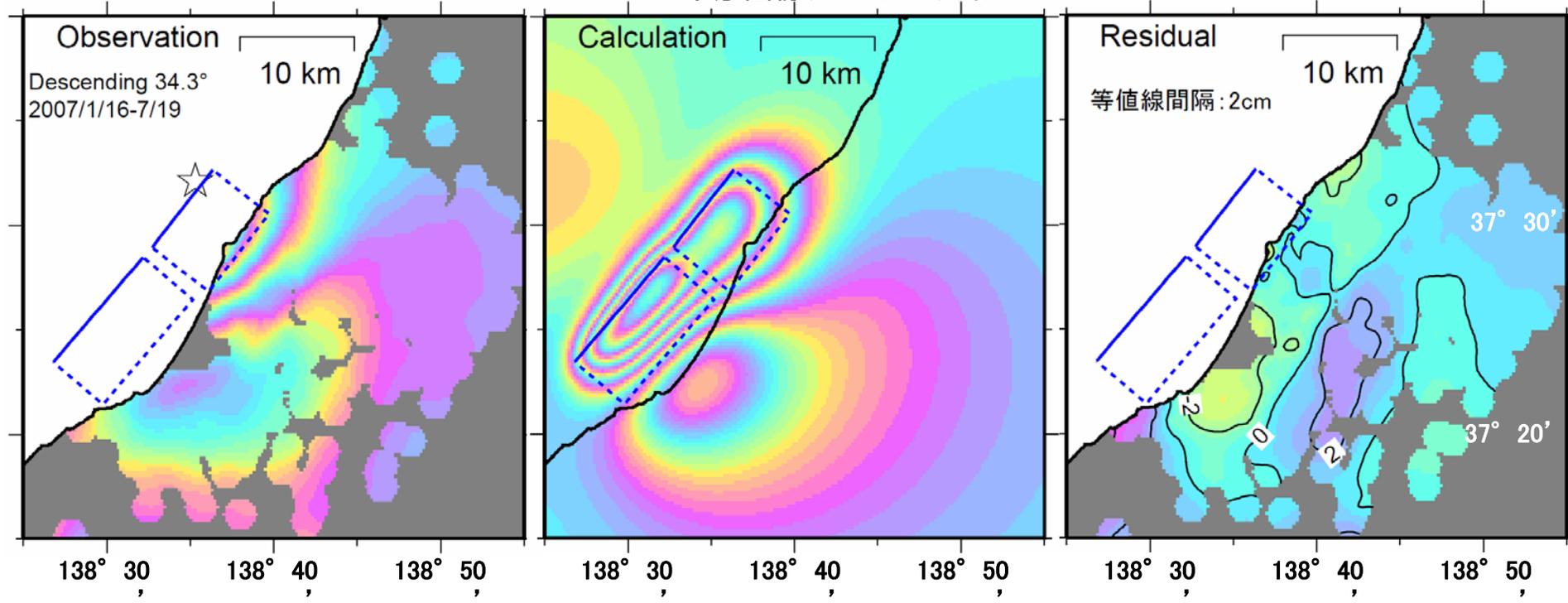
- ① 37.391 138.447 D 2.9km L 12.2km W 6.6km Strike 41 Dip 30 Rake 85 Slip 1.95m Mw 6.38
- ② 37.482 138.545 D 3.7km L 8.7km W 9.5km Strike 38 Dip 48 Rake 93 Slip 1.45m Mw 6.30
- Total Mw 6.55 (Rigidity:30GPa)

南東傾斜モデル 合成開口レーダー干渉解析との比較

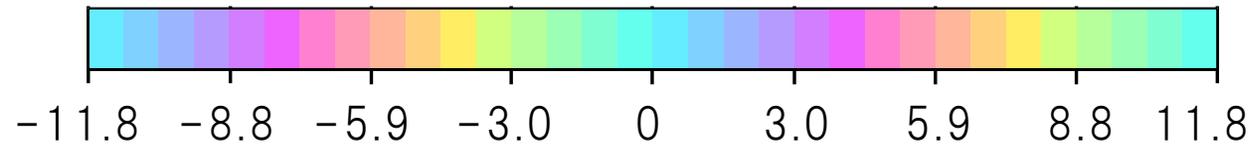
A 「だいち」によるSAR 干渉画像

B 断層モデルによる
干渉画像シミュレーション

C AとBの差分

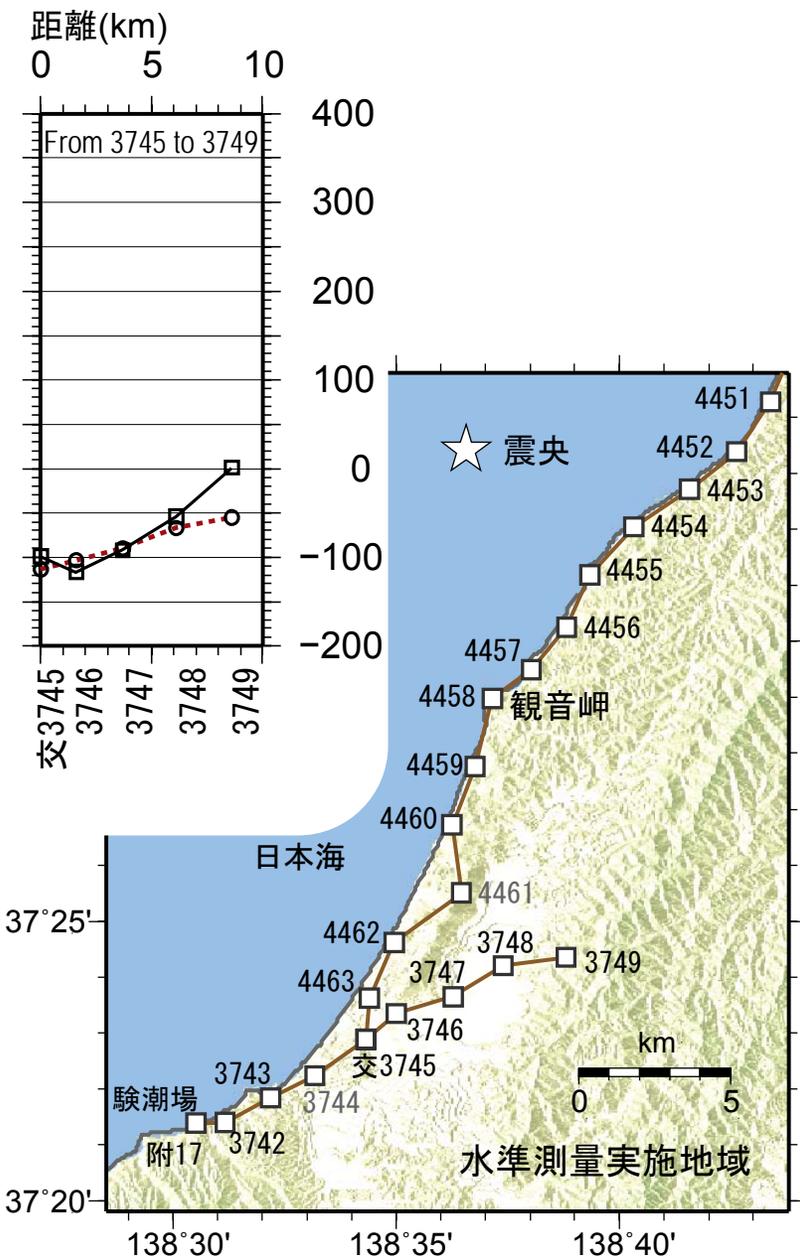
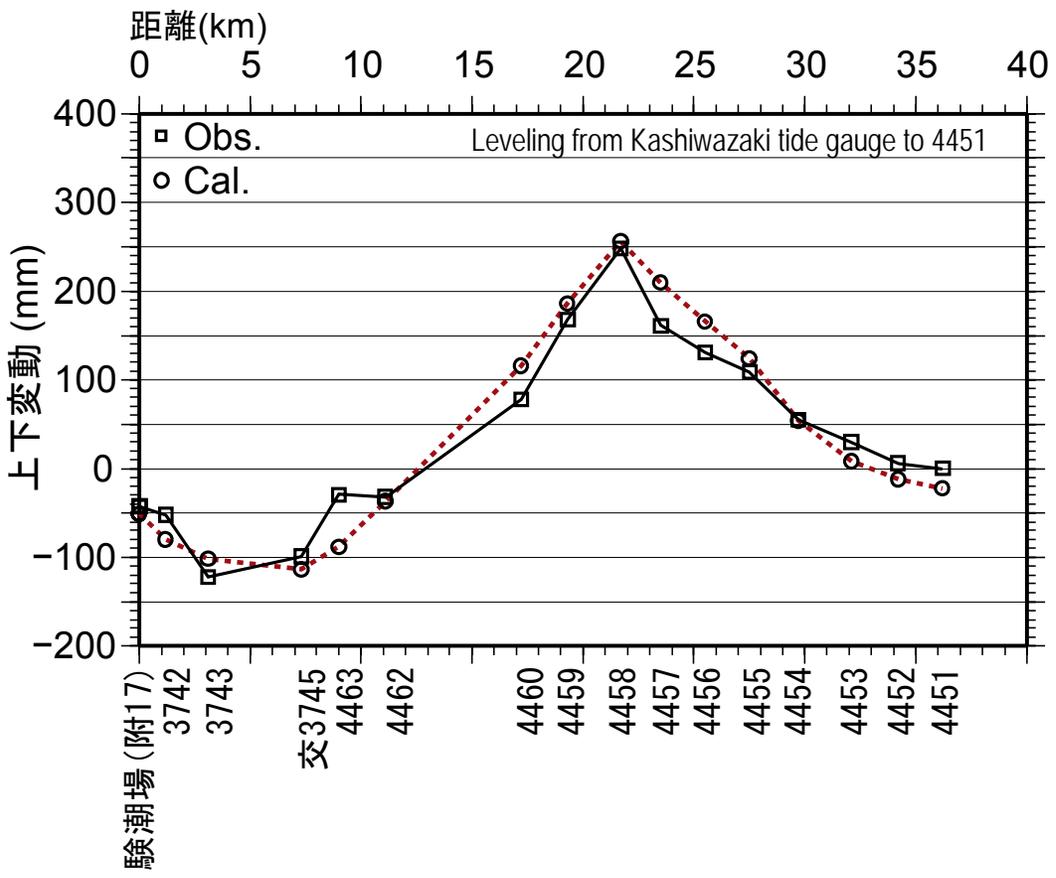


近づく (隆起、東向) 遠ざかる (沈降、西向)



衛星-地表視線方向の変位量 (cm)

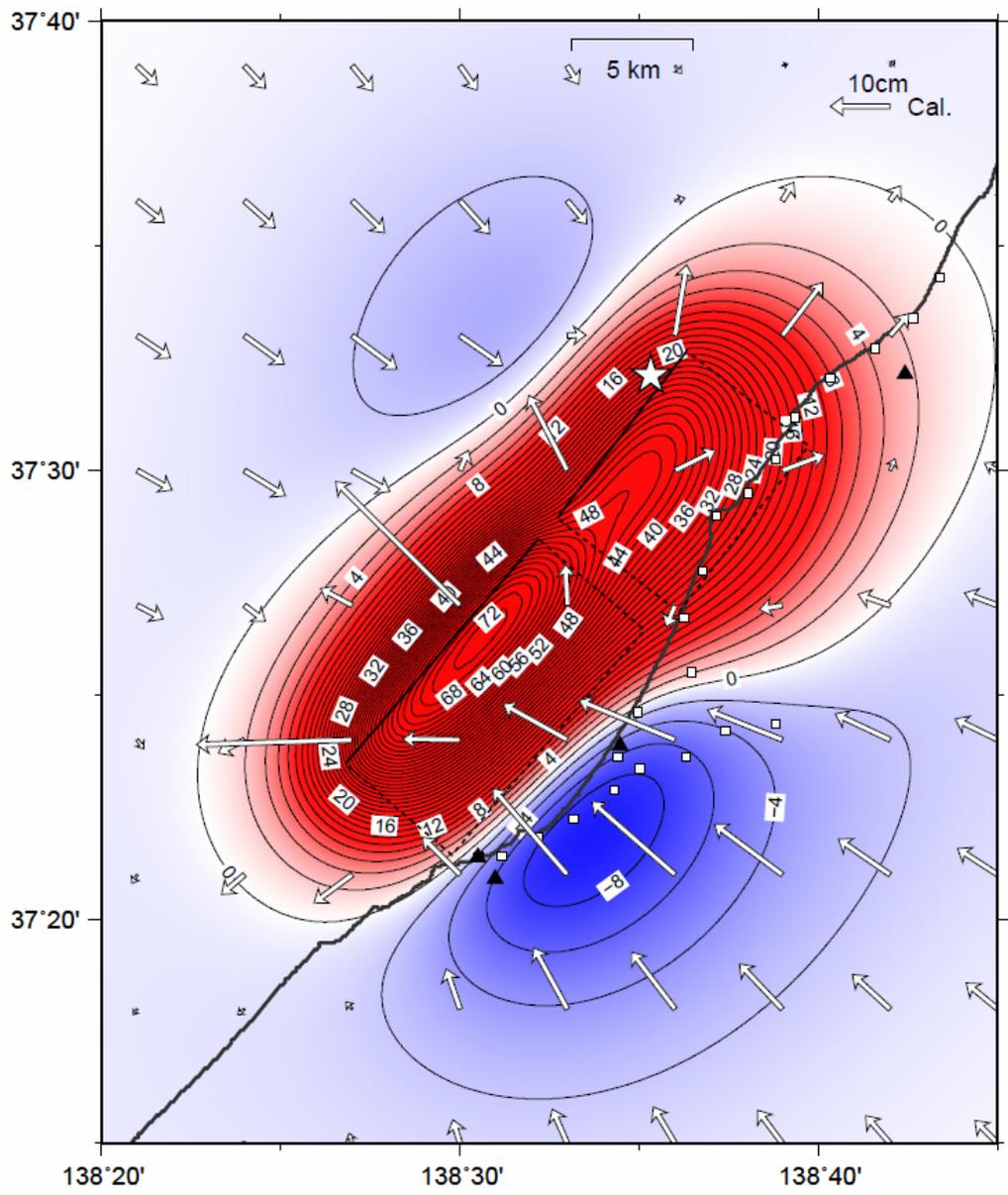
南東傾斜モデル 水準測量との比較



観測日:
平成19年7月20日～8月9日 (前回観測: 平成18年9～10月)

* 水準点3744と4461のデータは、周囲の水準点と比べて大きく沈降しているためモデル解析には用いていない。

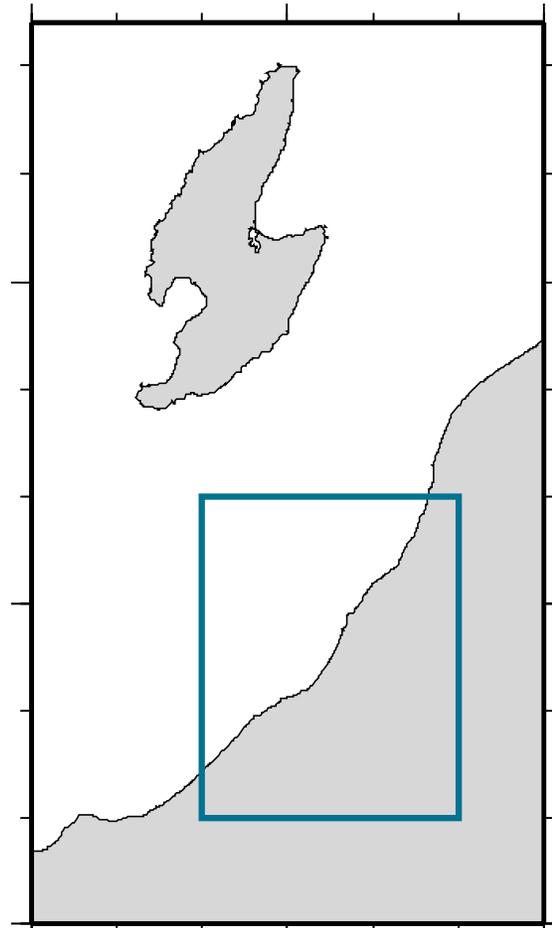
南東傾斜モデル モデルによる水平・上下運動

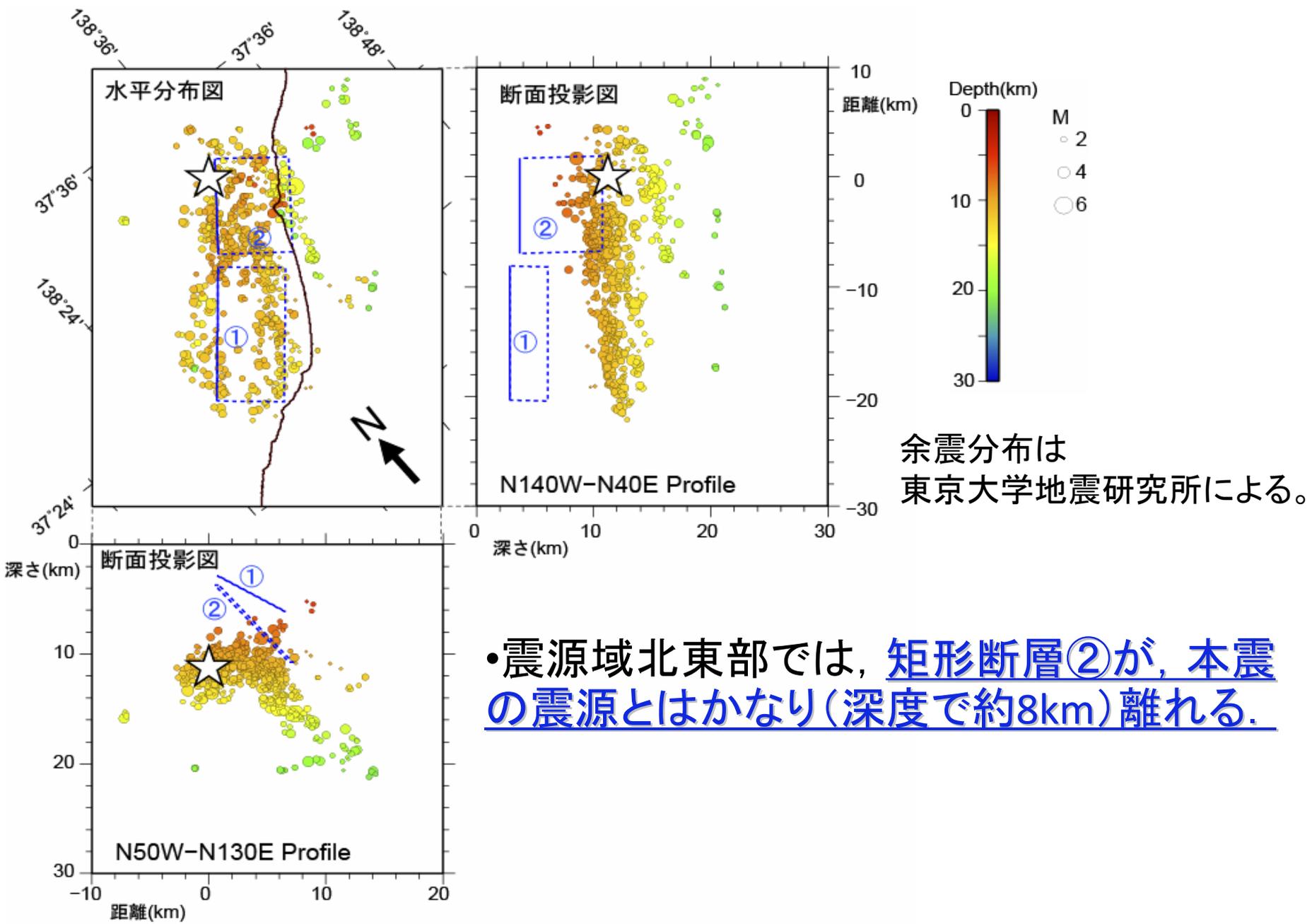


赤色は隆起を，青色は沈降を示す。
等値線の間隔は太線4cm，細線2cm。

← モデルによる水平変動ベクトル
(地表面)

- ▲ 電子基準点
- 水準点





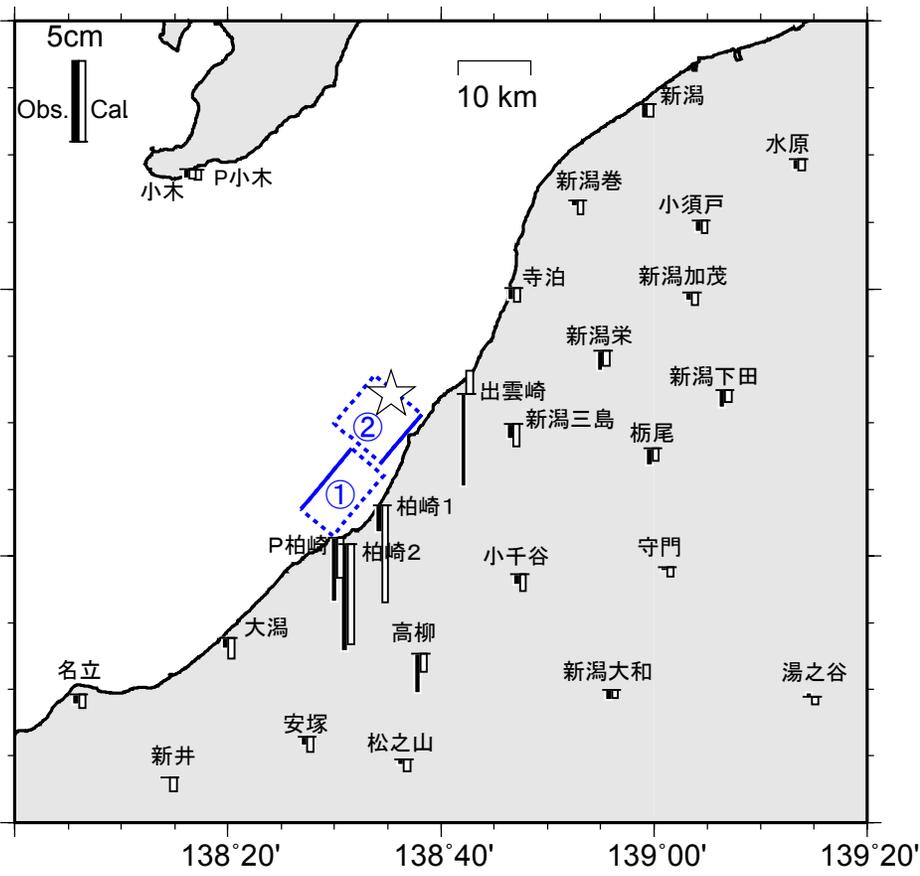
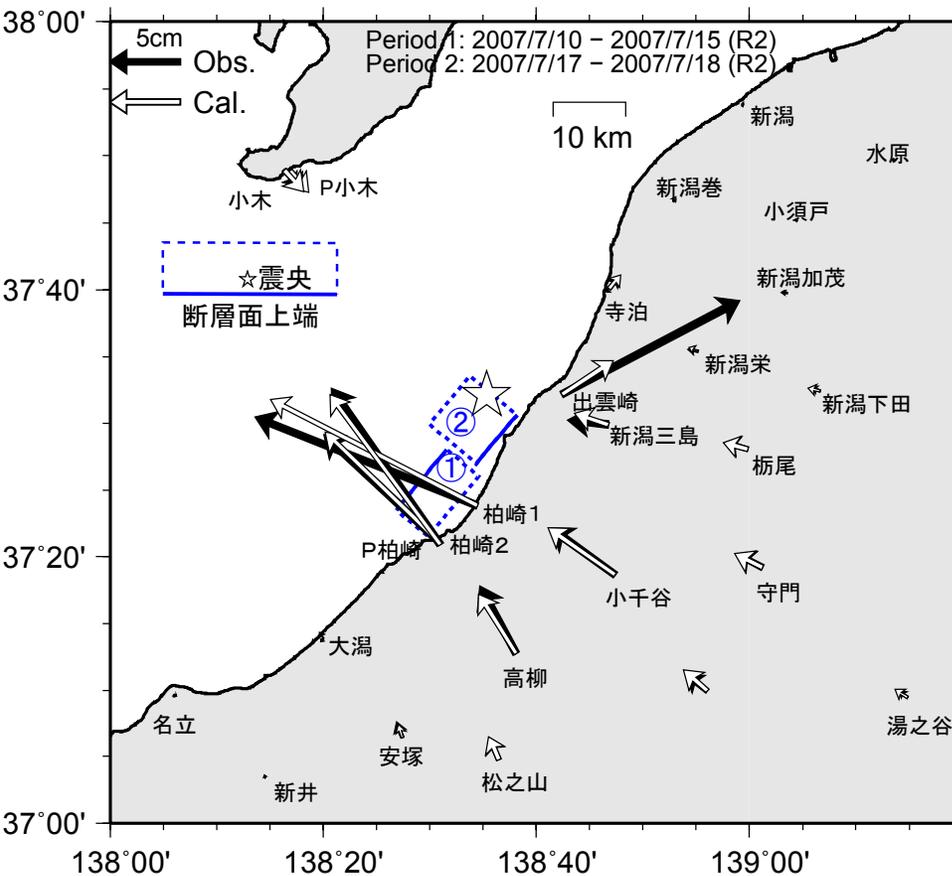
余震分布は
東京大学地震研究所による。

• 震源域北東部では、**矩形断層②**が、**本震の震源とはかなり(深度で約8km)離れる。**

北西＋南東傾斜モデル 電子基準点観測との比較

水平

上下



① 137.392 138.448 D 2.6km L 10.9km W 6.7km Strike 40 Dip 30 Rake 86 Slip 2.02m Mw 6.36

② 37.511 138.636 D 5.2km L 8.8km W 11.2km Strike 220 Dip 41 Rake 103 Slip 1.51m Mw 6.36

Total Mw 6.56 (Rigidity:30GPa)

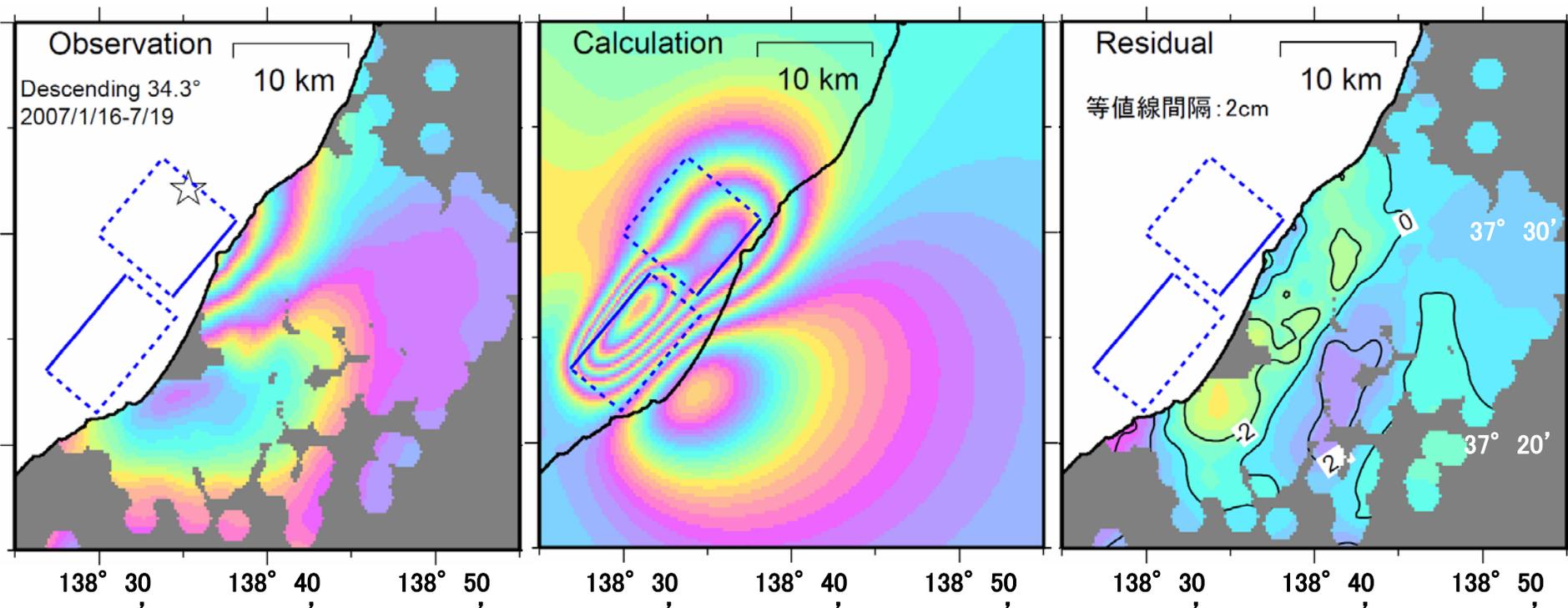
モデル3

北西+南東傾斜モデル 合成開口レーダー干渉解析との比較

A 「だいち」によるSAR 干渉画像

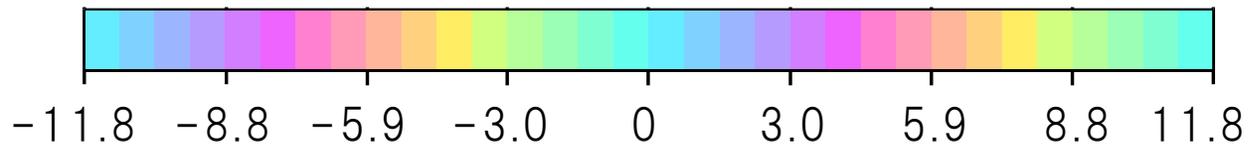
B 断層モデルによる
干渉画像シミュレーション

C AとBの差分

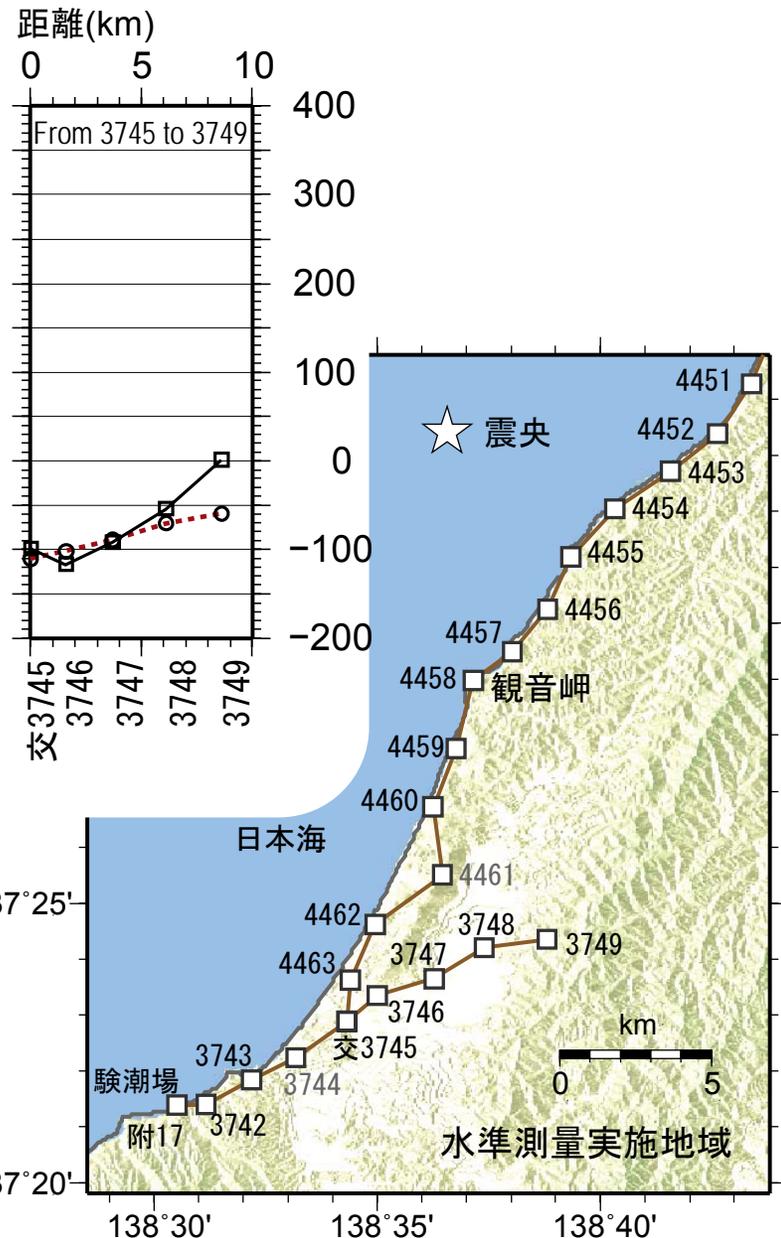
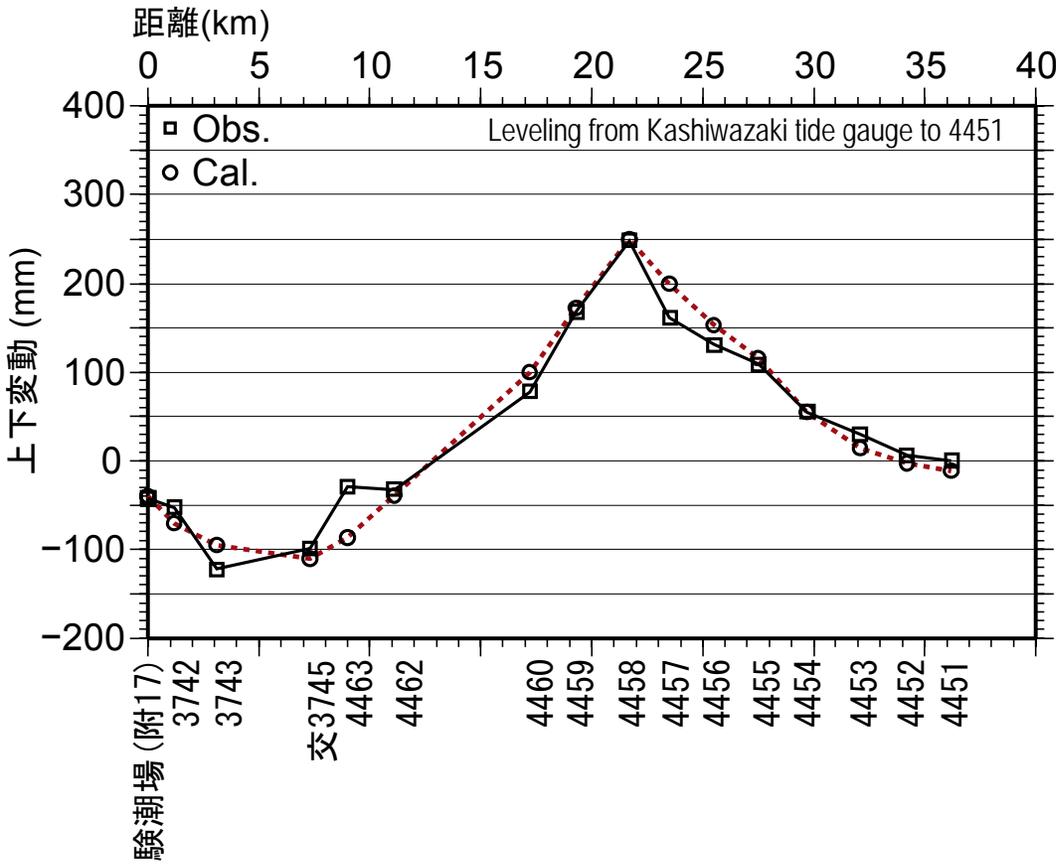


近づく
(隆起、東向)

遠ざかる
(沈降、西向)



衛星-地表視線方向の変位量 (cm)

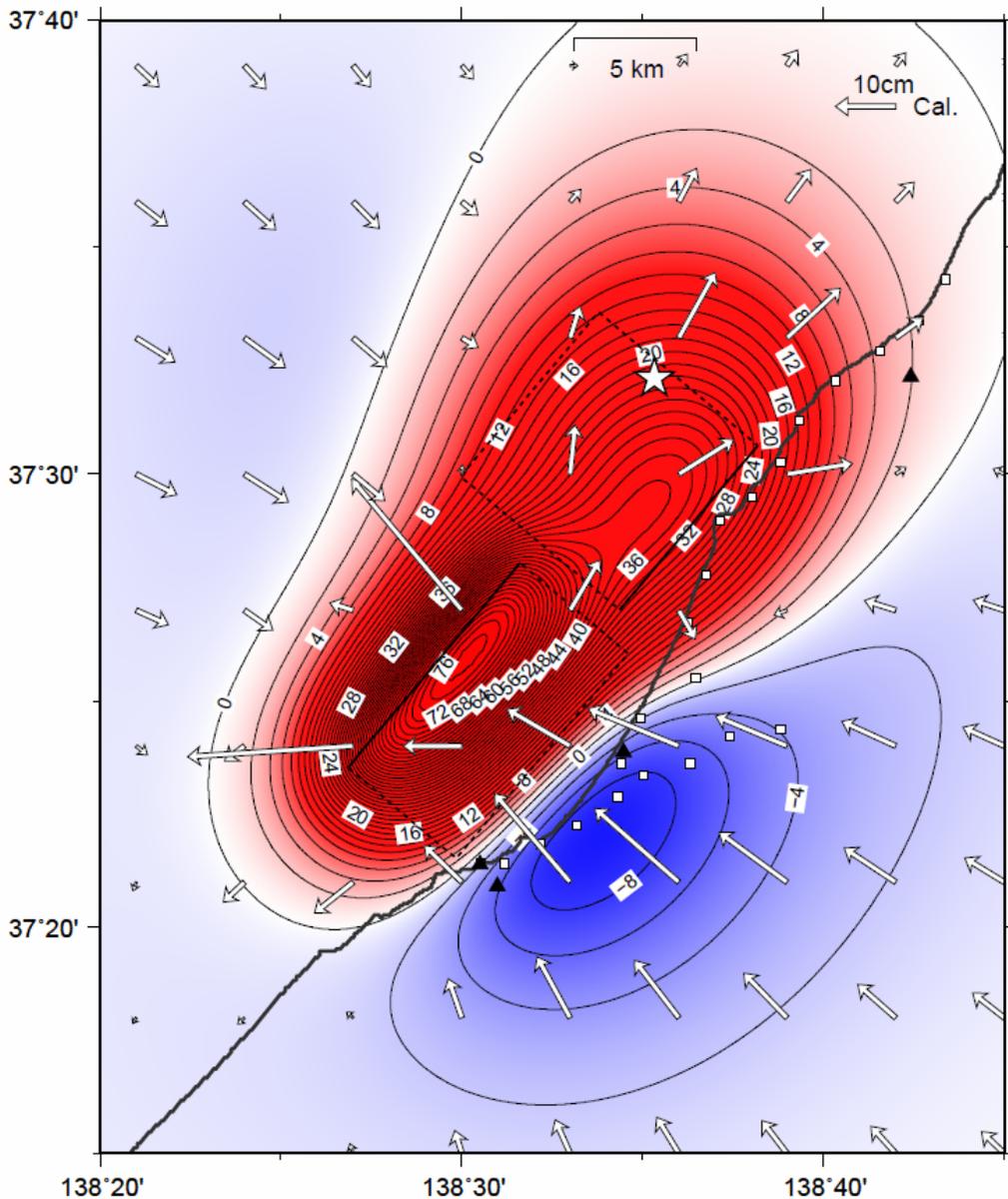


観測日:
平成19年7月20日～8月9日 (前回観測: 平成18年9～10月)

* 水準点3744と4461のデータは、周囲の水準点と比べて大きく沈降しているためモデル解析には用いていない。

北西+南東傾斜モデル

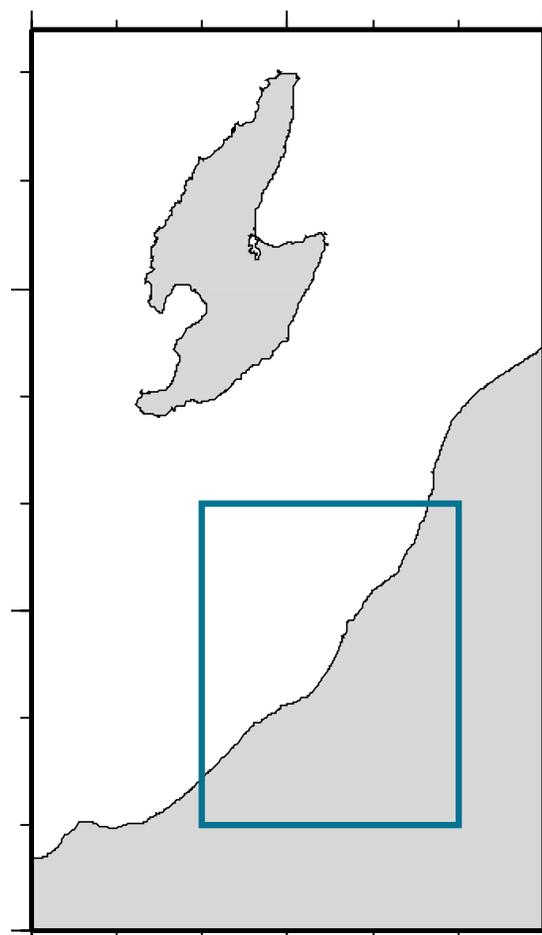
モデルによる水平・上下運動



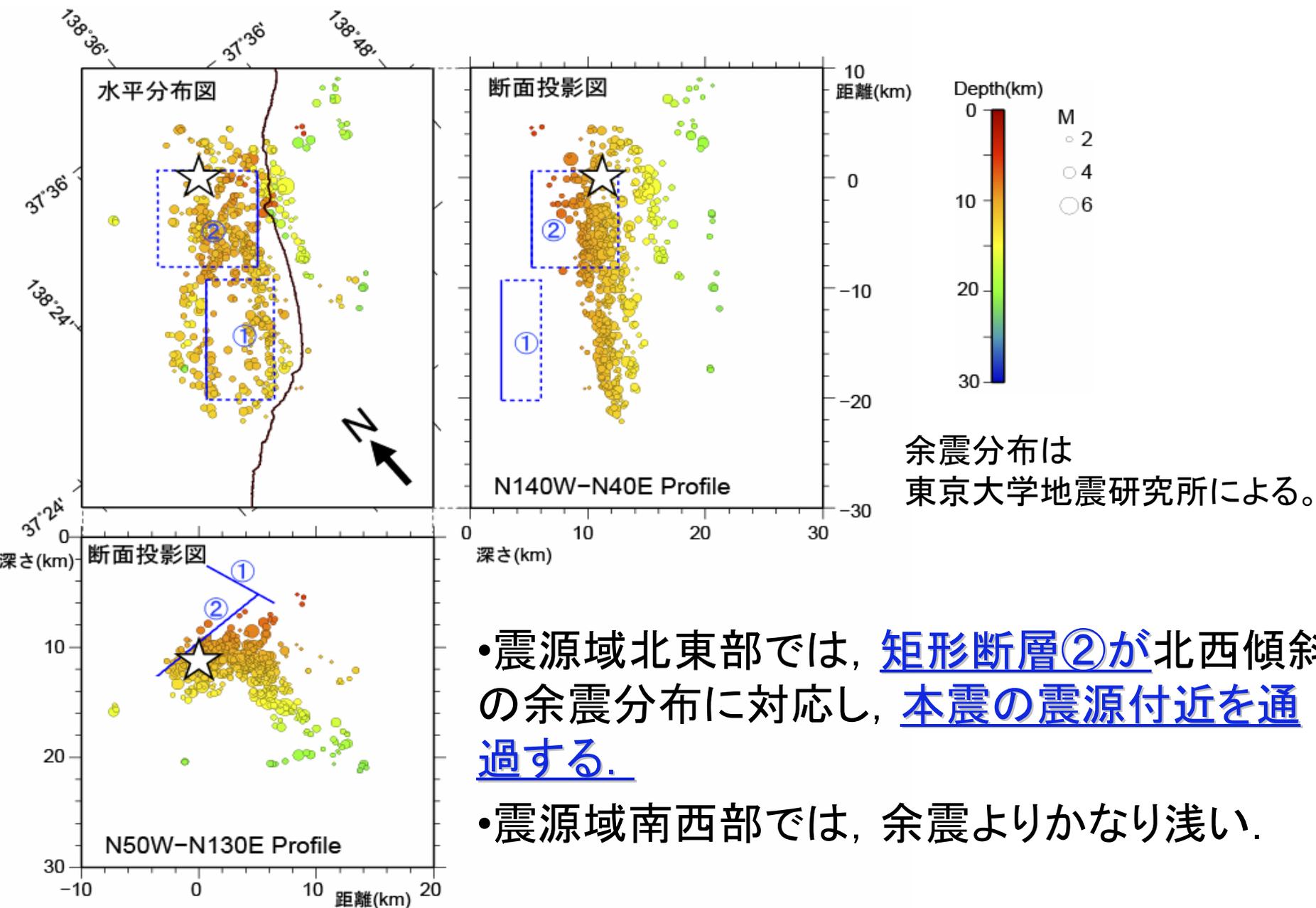
赤色は隆起を、青色は沈降を示す。
等値線の間隔は太線4cm, 細線2cm。

← モデルによる水平変動ベクトル
(地表面)

- ▲ 電子基準点
- 水準点



モデル3 北西+南東傾斜モデル 地震分布の位置関係



•震源域北東部では、矩形断層②が北西傾斜の余震分布に対応し、本震の震源付近を通過する。

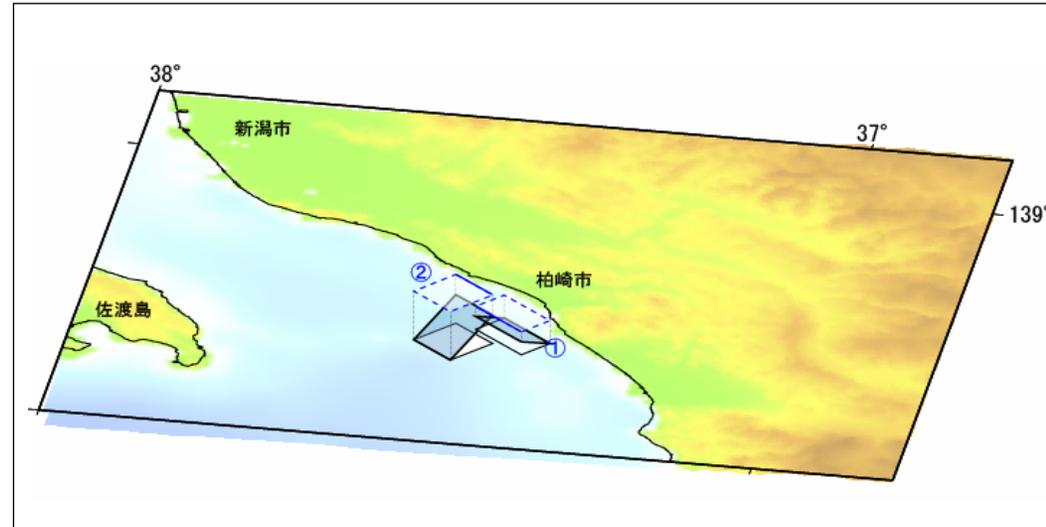
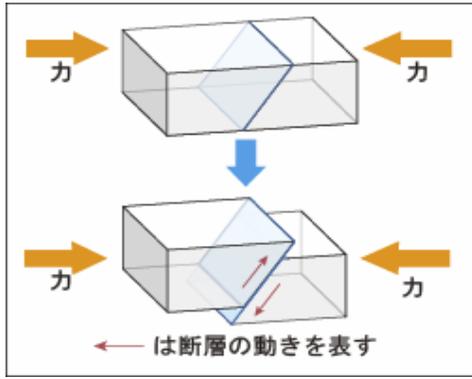
•震源域南西部では、余震よりかなり浅い。

北西+南東傾斜モデル 概念図

断層パラメータ

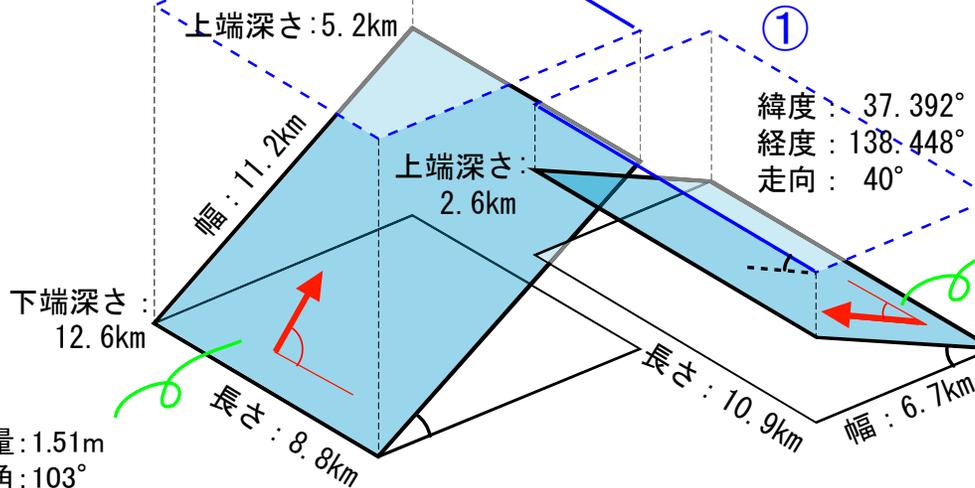
	緯度	経度	上端深さ	長さ	幅	走向	傾斜角	すべり角	すべり量	モーメントマグニチュード
①	37.392°	138.448°	2.6km	10.9km	6.7km	40°	30°	86°	2.02m	6.36
②	37.511°	138.636°	5.2km	8.8km	11.2km	220°	41°	103°	1.51m	6.36

Total Mw 6.56



緯度：37.511°
経度：138.636°
走向：220°

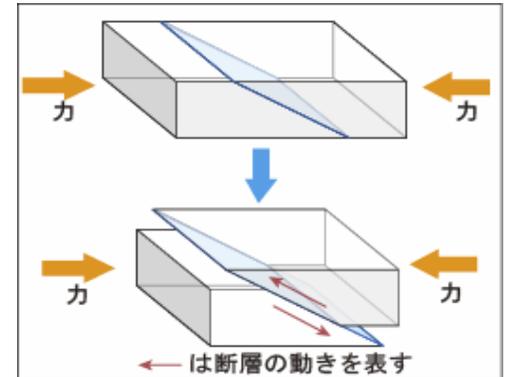
緯度：37.392°
経度：138.448°
走向：40°



すべり量：2.02m
すべり角：86°

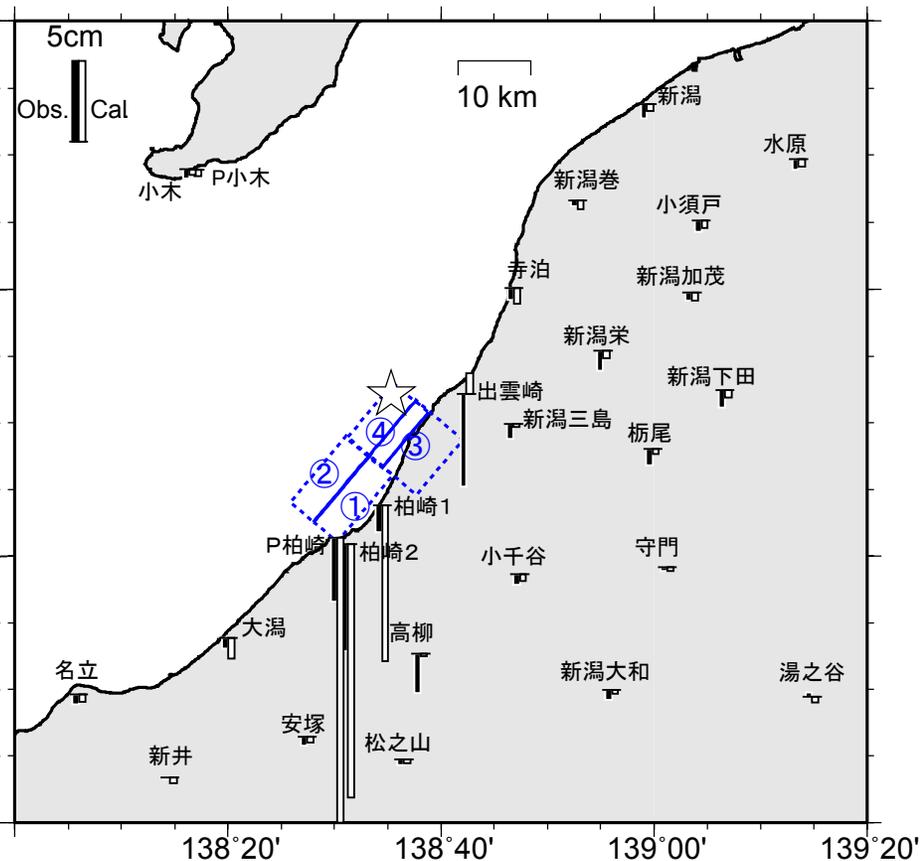
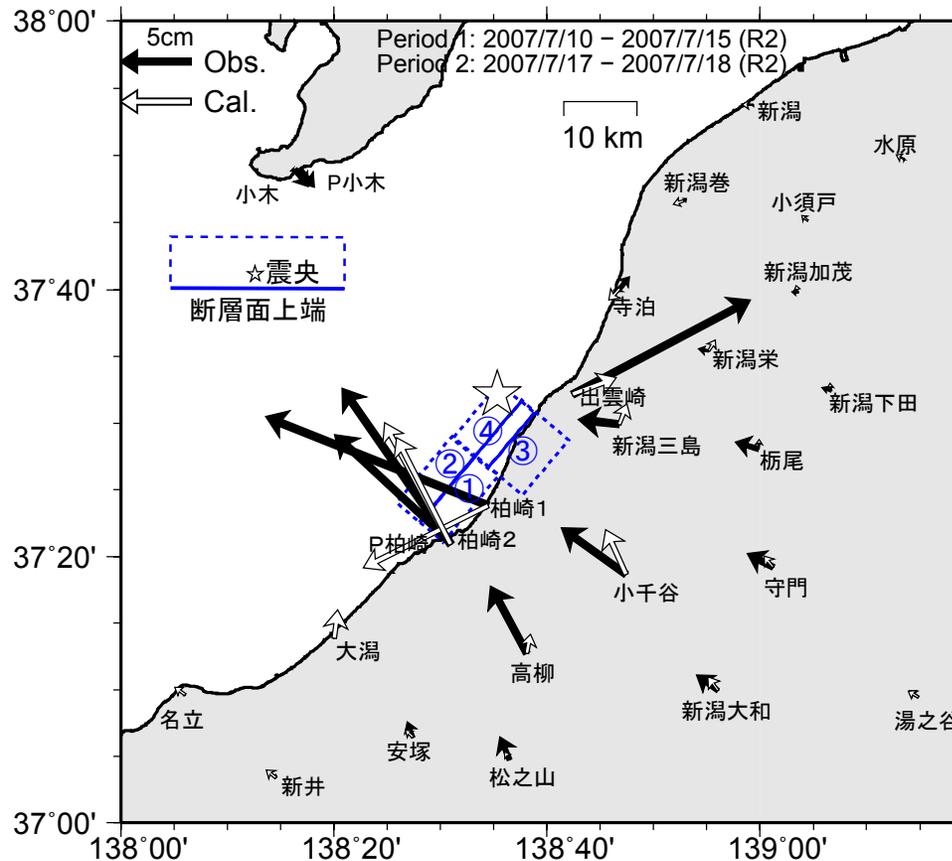
下端深さ：6.0km
傾斜角：30°

すべり量：1.51m
すべり角：103°



余震域に合わせたモデル 水平

電子基準点観測との比較 上下



- ① 37.376 138.468 D 8.0km L 12.0km W 6.0km Strike 40 Dip 45 Rake 276 Slip 1.20m Mw 6.21
 - ② 37.459 138.555 D 8.0km L 12.0km W 6.0km Strike 220 Dip 45 Rake 226 Slip 3.20m Mw 6.49
 - ③ 37.459 138.555 D 8.0km L 10.0km W 12.0km Strike 40 Dip 45 Rake 315 Slip 0.64m Mw 6.17
 - ④ 37.513 138.647 D 6.0km L 10.0km W 9.0m Strike 220 Dip 45 Rake 51 Slip 4.18m Mw 6.63
- Total Mw 6.84 (Rigidity:30GPa)

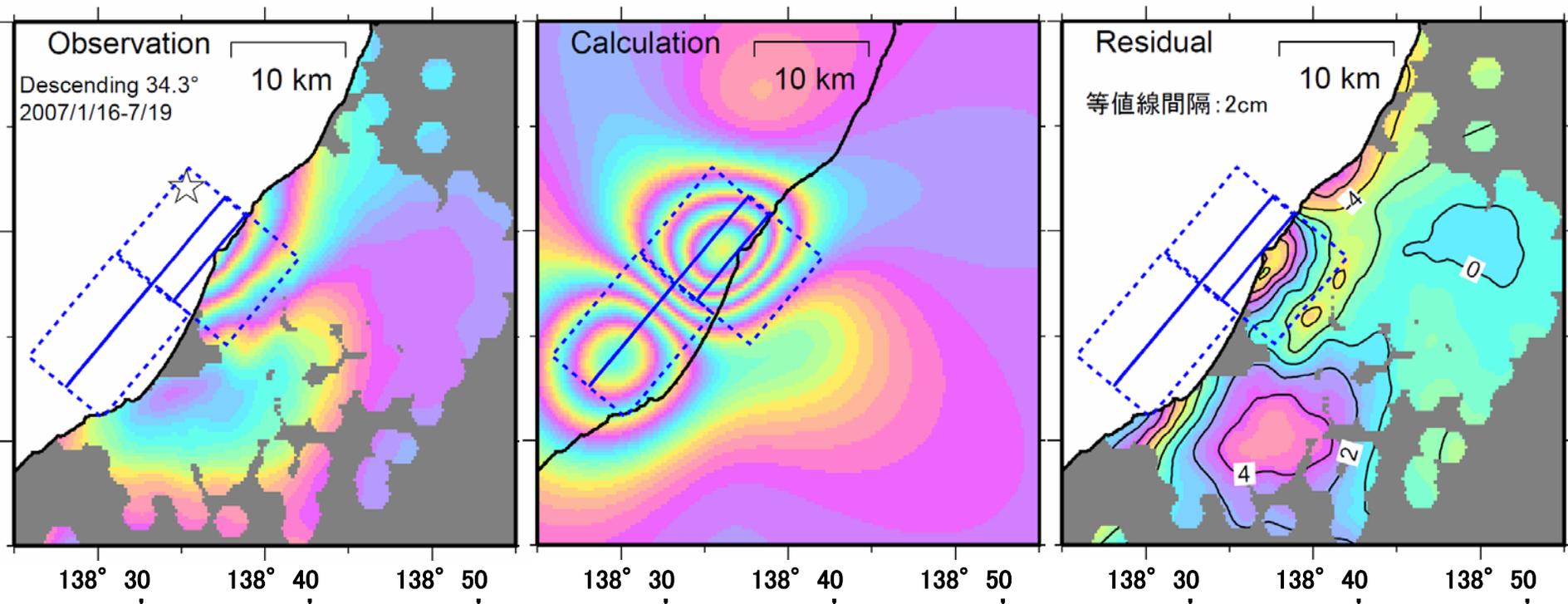
モデル4

余震域に合わせたモデル 合成開口レーダー干渉解析との比較

A 「だいち」によるSAR 干渉画像

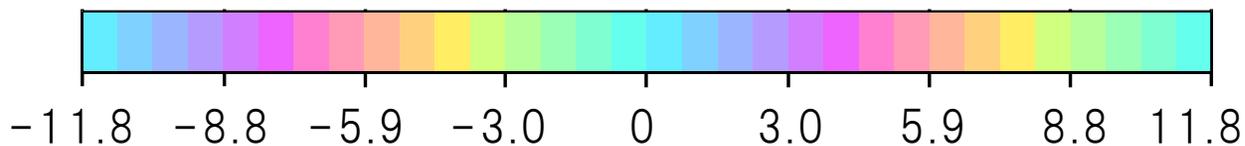
B 断層モデルによる
干渉画像シミュレーション

C AとBの差分



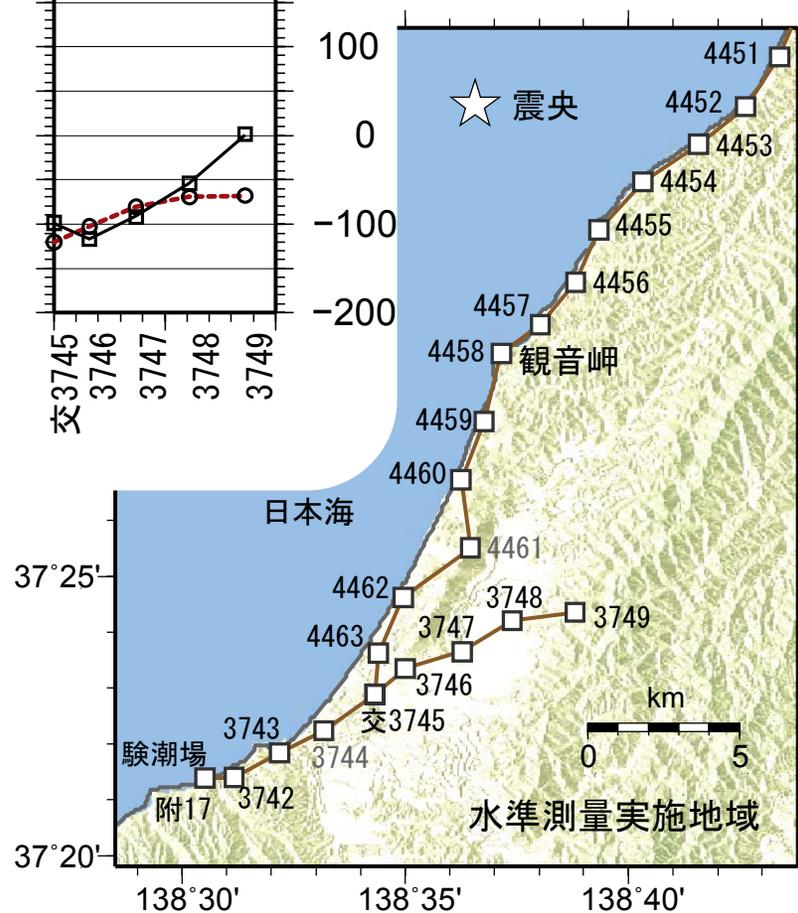
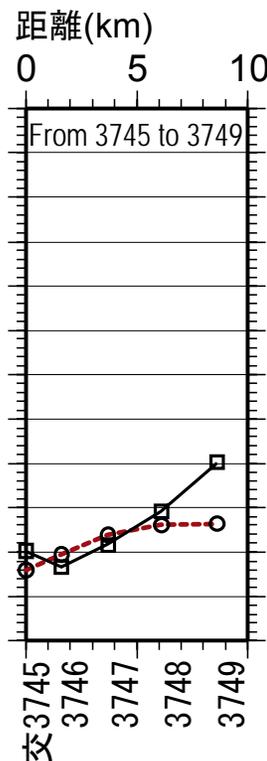
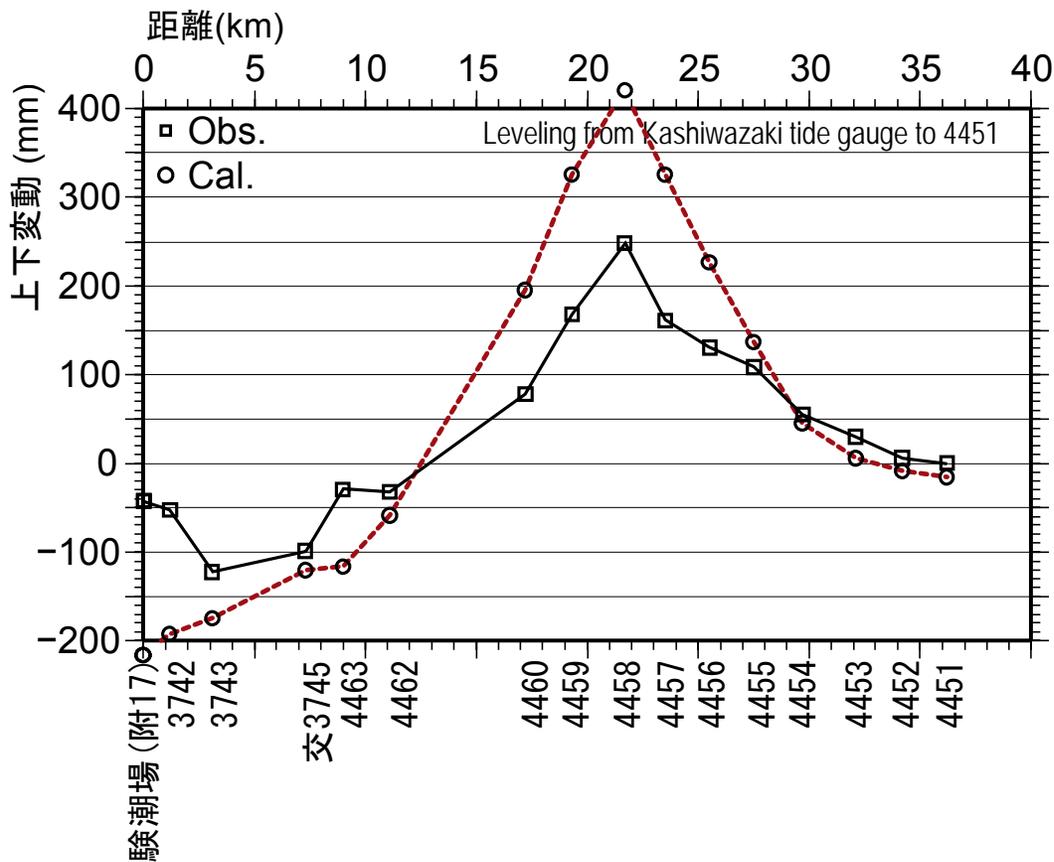
近づく
(隆起、東向)

遠ざかる
(沈降、西向)



衛星—地表視線方向の変位量 (cm)

余震域に合わせたモデル 水準測量との比較

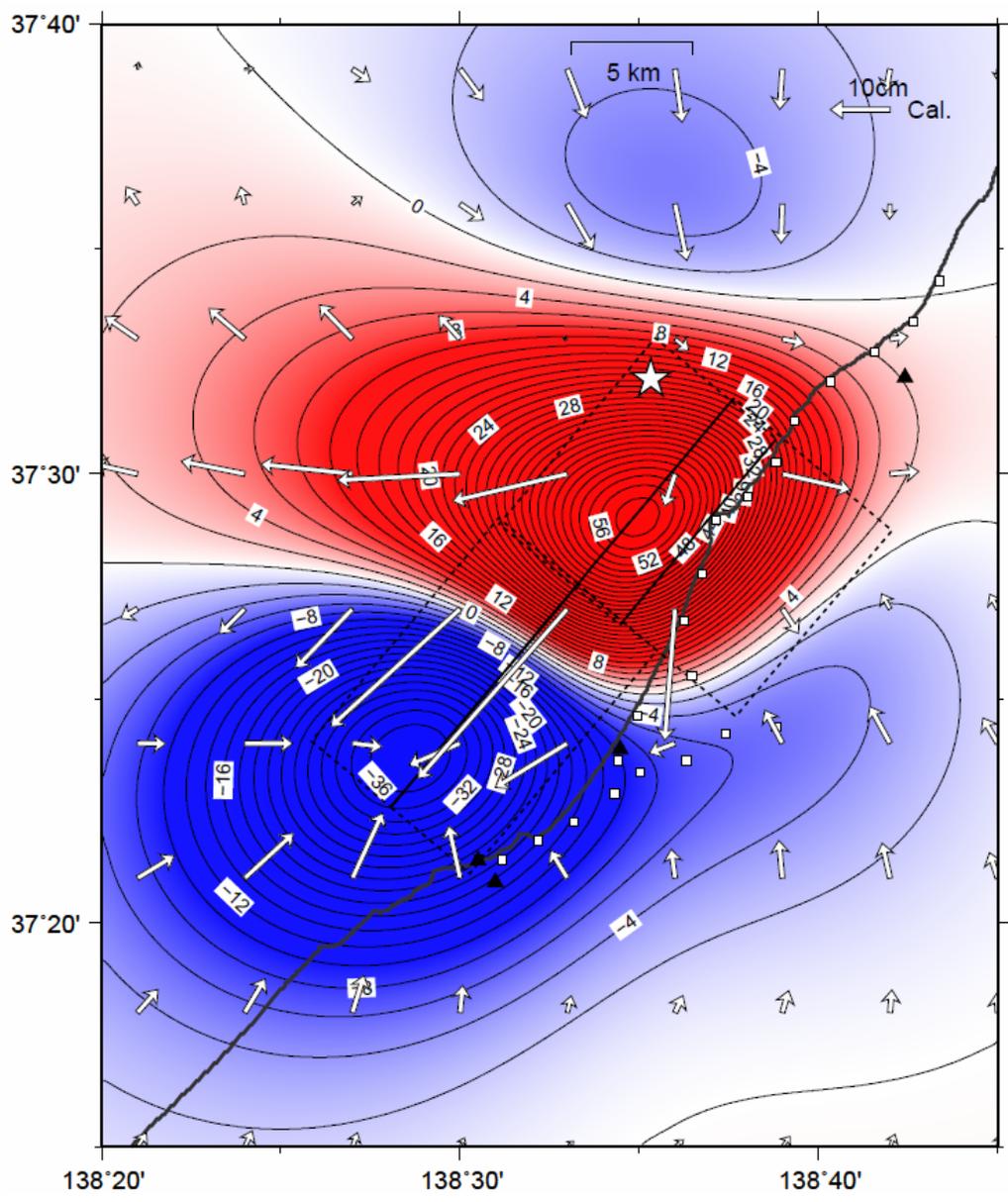


観測日：
平成19年7月20日～8月9日 (前回観測：平成18年9～10月)

* 水準点3744と4461のデータは、周囲の水準点と比べて大きく沈降しているためモデル解析には用いていない。

余震域に合わせたモデル

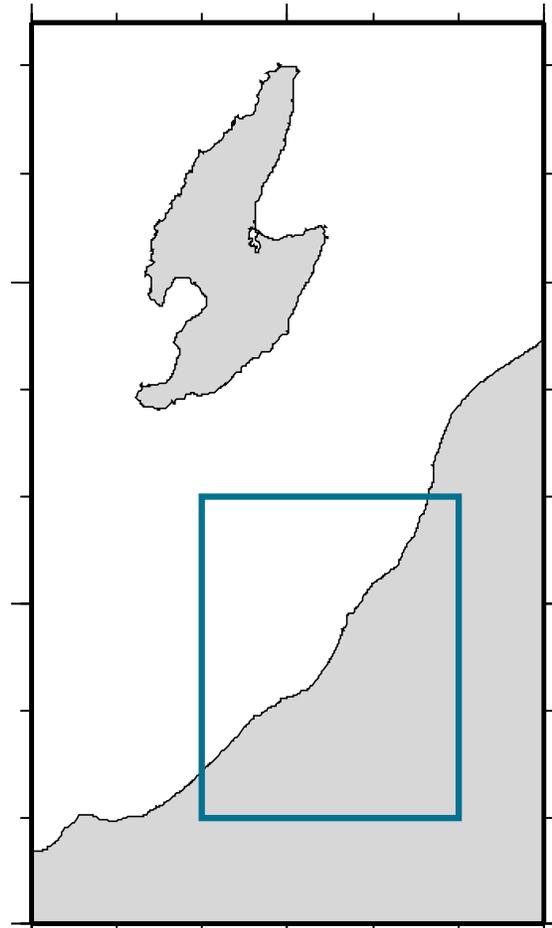
モデルによる水平・上下運動



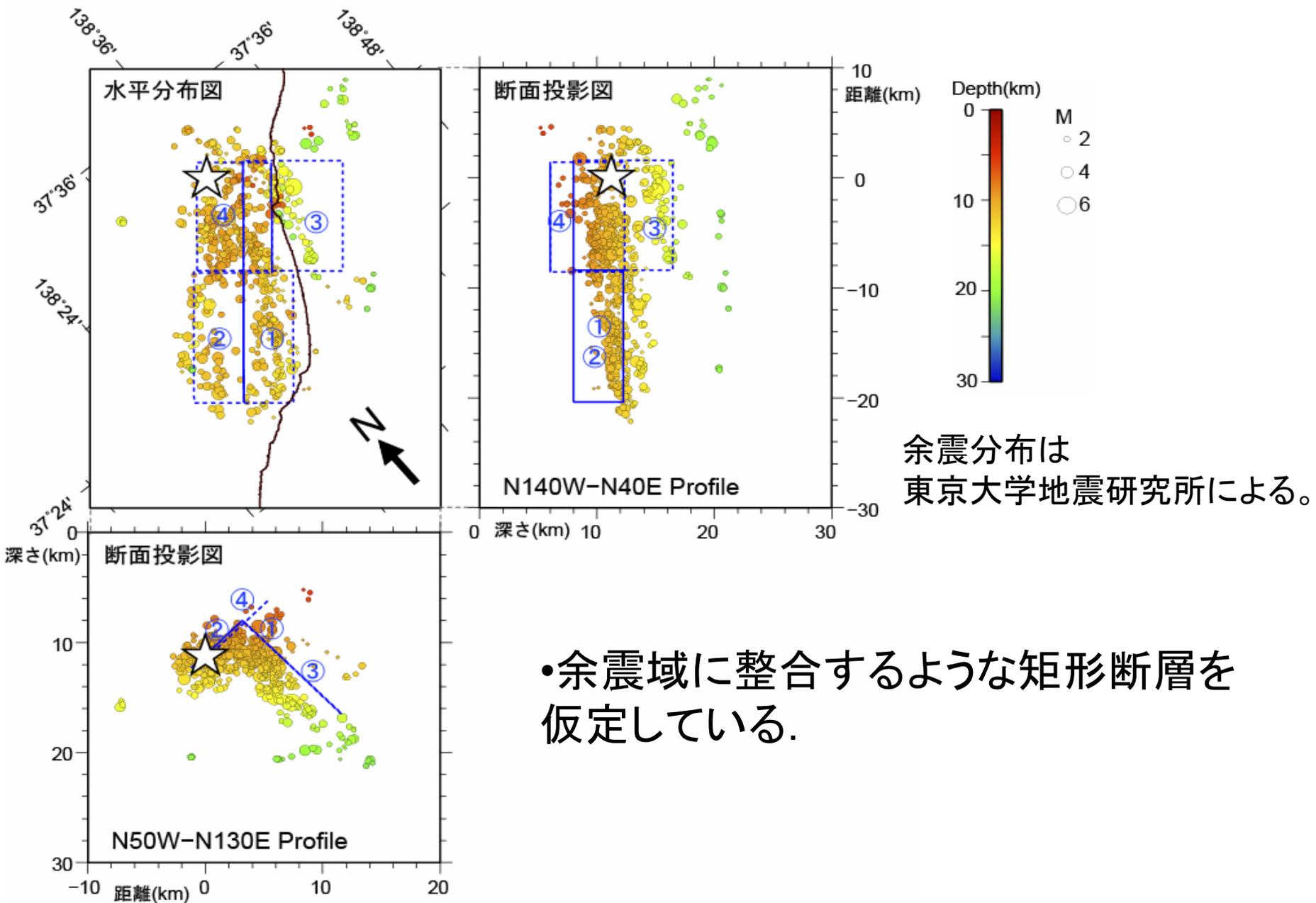
赤色は隆起を、青色は沈降を示す。
等値線の間隔は太線4cm, 細線2cm。

← モデルによる水平変動ベクトル
(地表面)

- ▲ 電子基準点
- 水準点



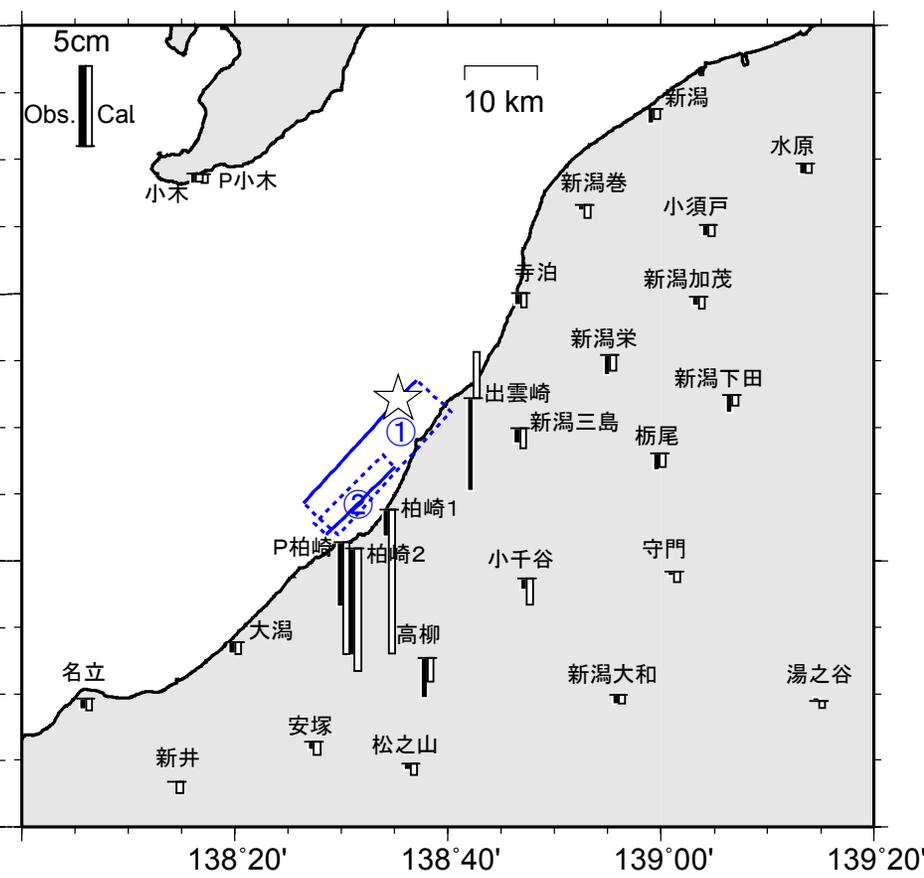
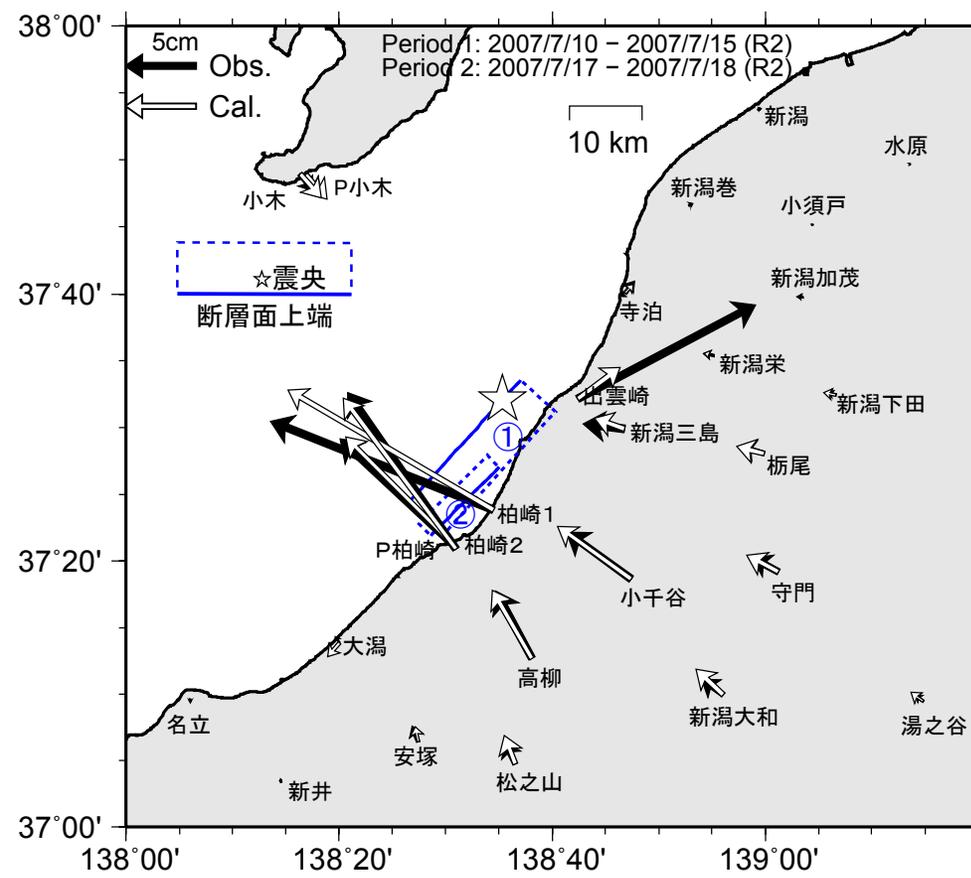
モデル4 余震群に合わせたモデル 地震分布の位置関係



南東傾斜(十分岐)モデル 電子基準点観測との比較

水平

上下



- ① 37.405 138.441 D 5.8km L 23.2km W 9.9km Strike 42 Dip 49 Rake 100 Slip 1.08m Mw 6.51
 - ② 37.451 138.584 D 2.0km L 13.4km W 9.2km Strike 225 Dip 75 Rake 82 Slip 1.27m Mw 6.38
- Total Mw 6.66 (Rigidity:30GPa)

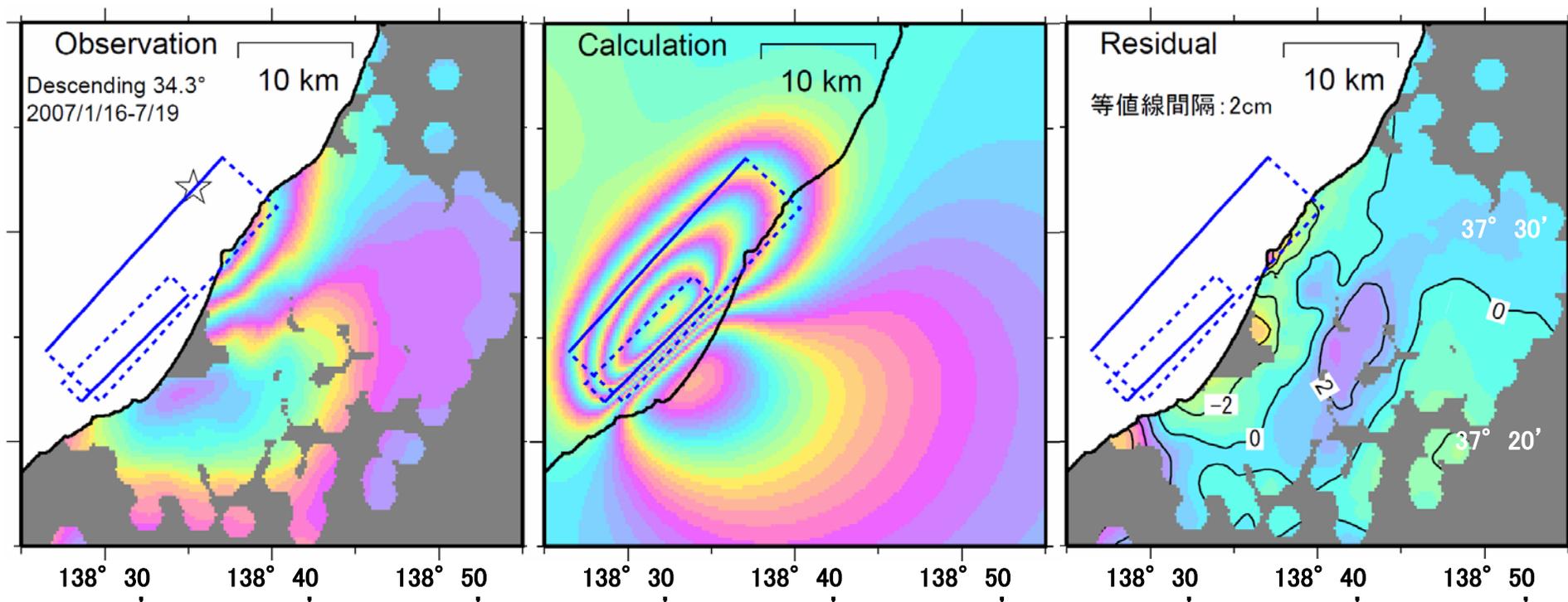
モデル5

南東傾斜(十分岐)モデル 合成開口レーダー干渉解析との比較

A 「だいち」によるSAR 干渉画像

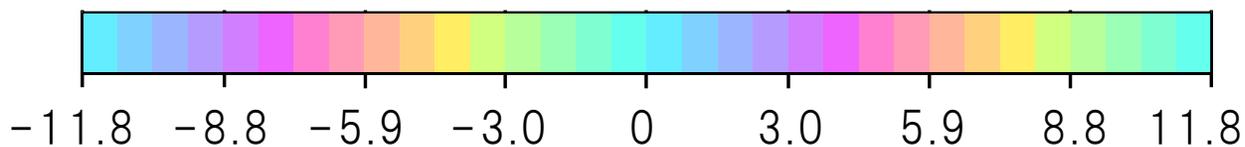
B 断層モデルによる
干渉画像シミュレーション

C AとBの差分



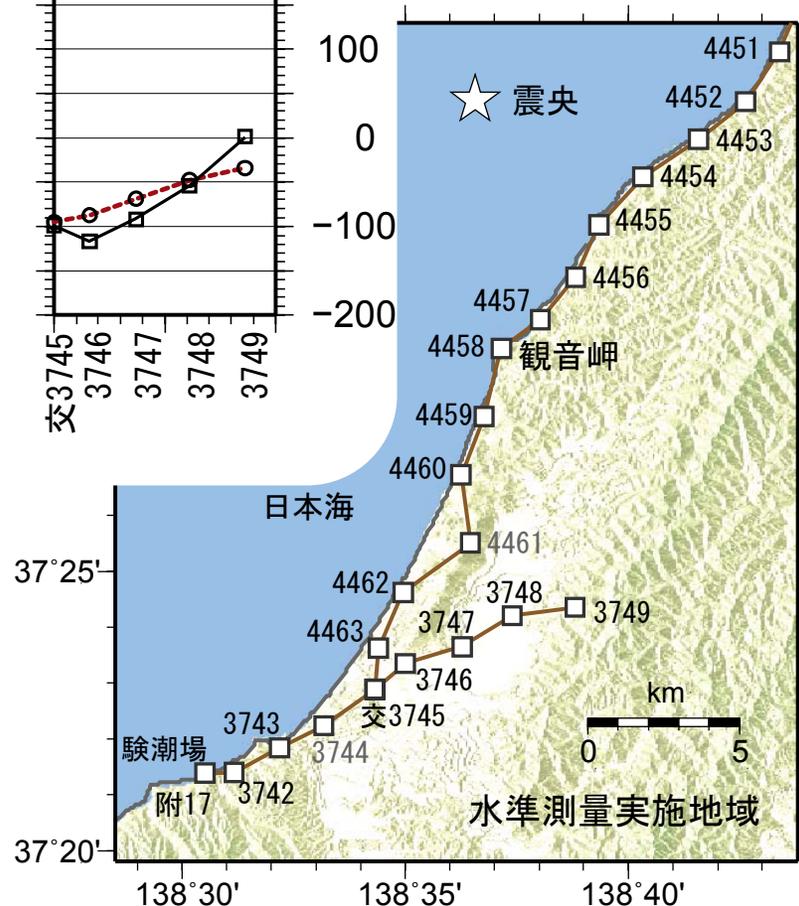
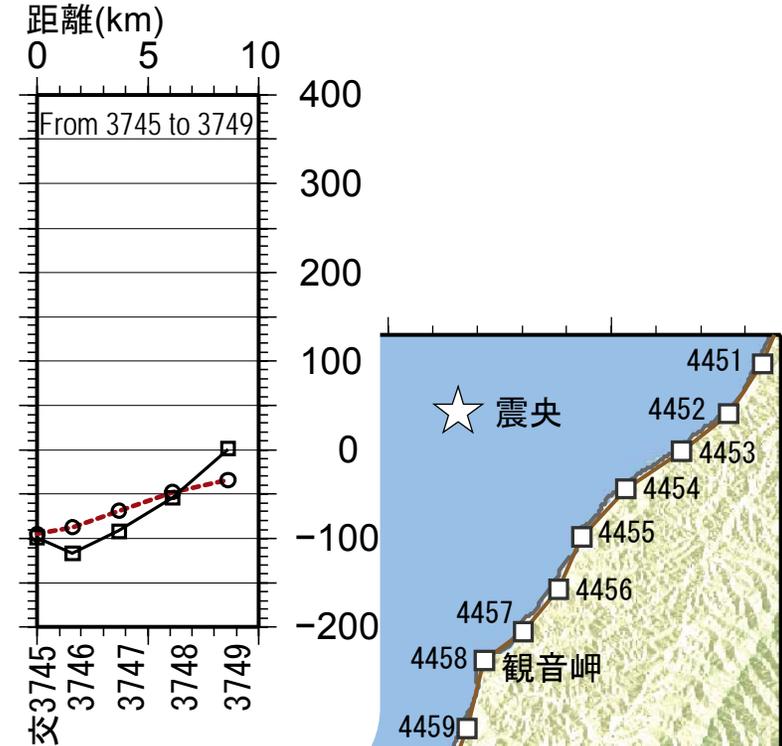
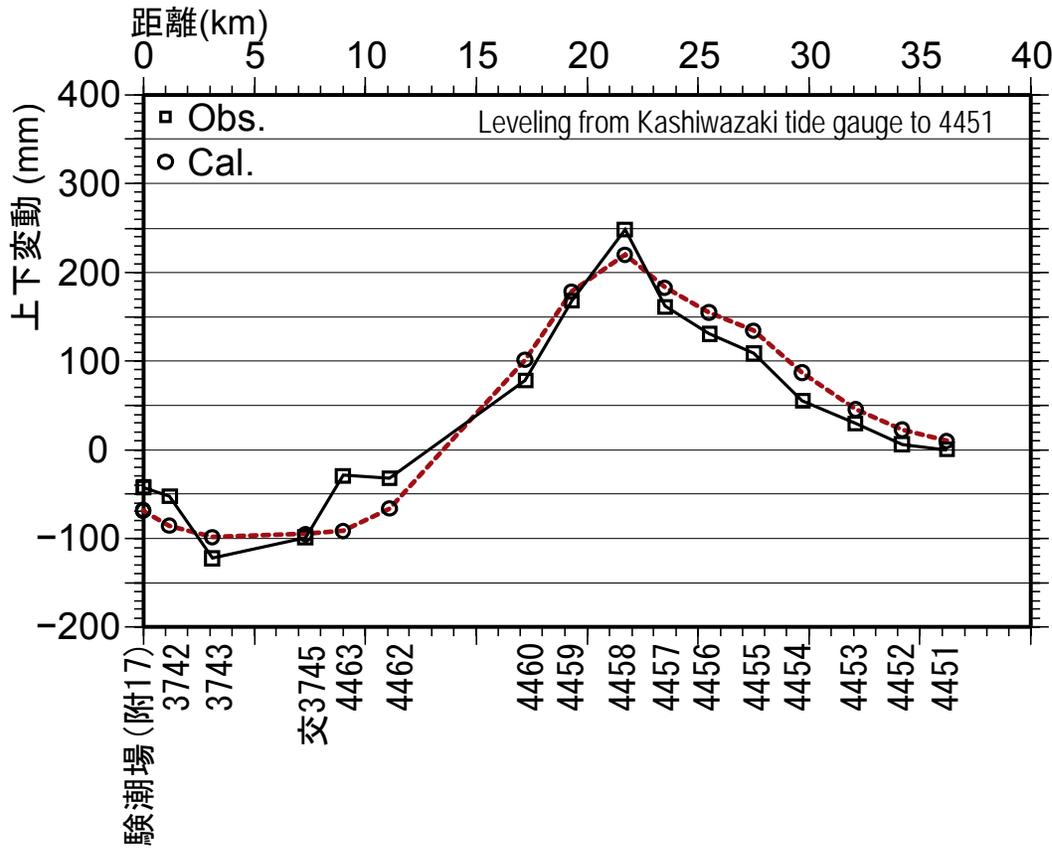
近づく
(隆起、東向)

遠ざかる
(沈降、西向)



衛星-地表視線方向の変位量 (cm)

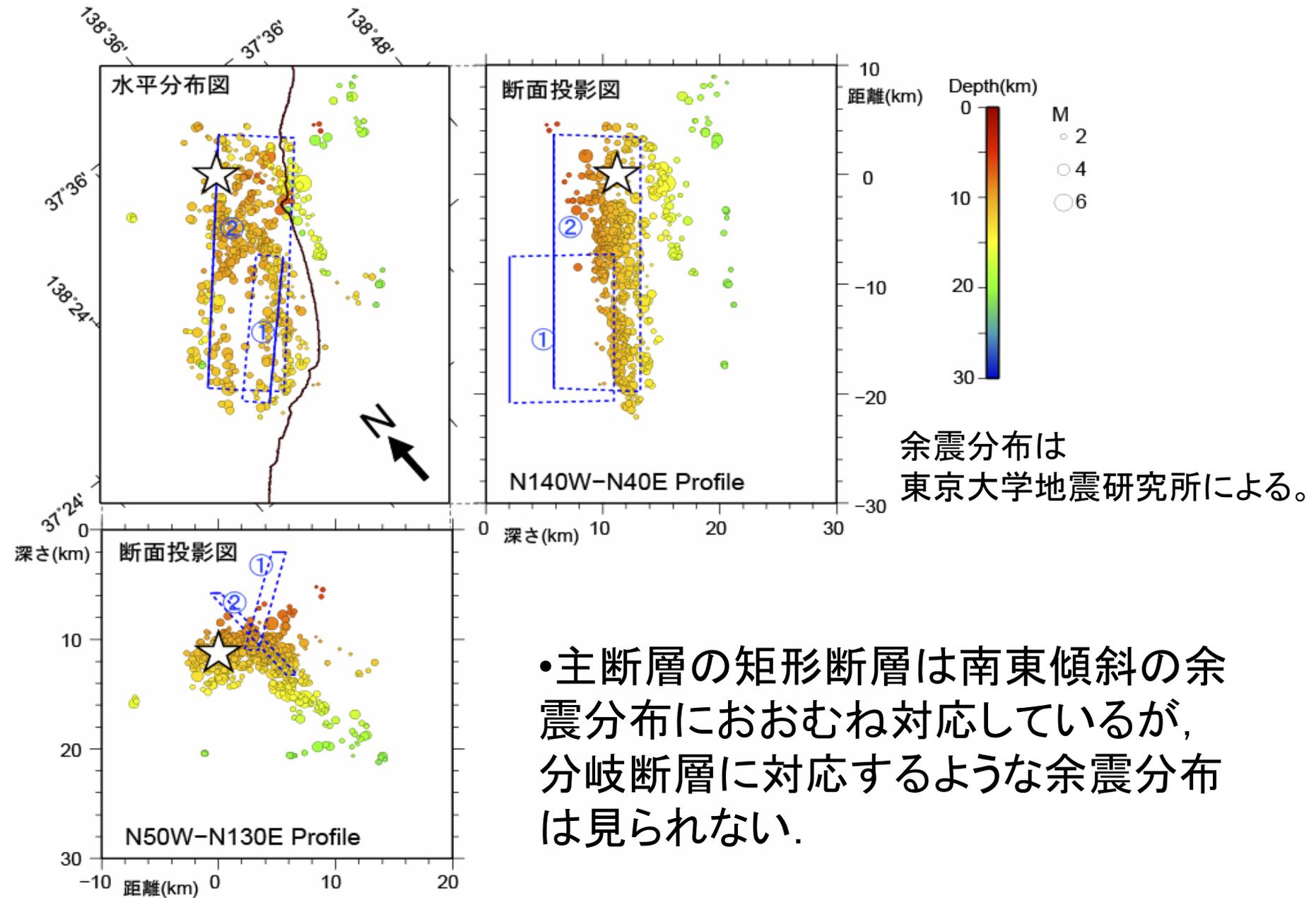
南東傾斜(十分岐)モデル 水準測量との比較



観測日:
平成19年7月20日～8月9日 (前回観測: 平成18年9～10月)

* 水準点3744と4461のデータは、周囲の水準点と比べて大きく沈降しているためモデル解析には用いていない。

モデル5 南東傾斜(十分岐)モデル 地震分布の位置関係



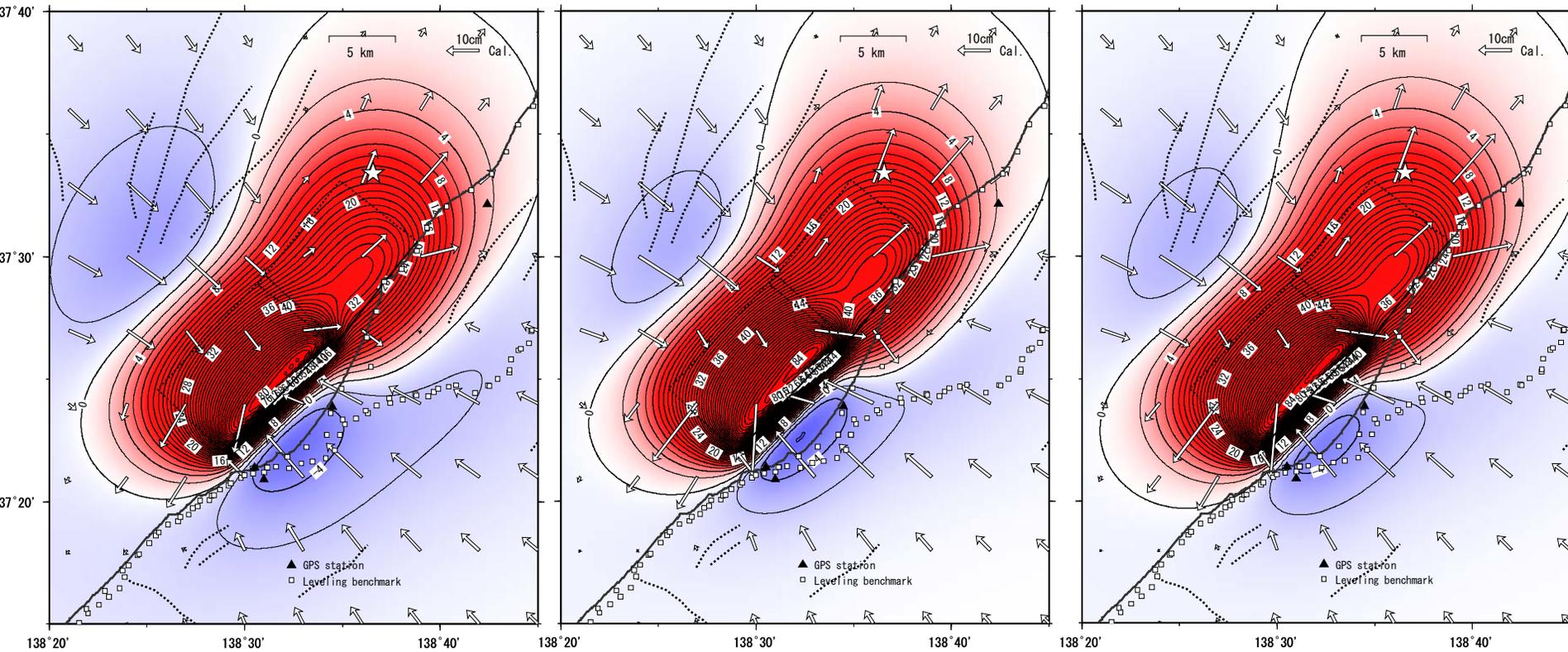
媒質の構造を変えた場合の地殻変動計算値比較

平成19年新潟県中越沖地震

(1) 均質半無限媒質で計算される地殻変動

(2) 一次元成層構造(表層のS波速度 1.27km/s)で計算される地殻変動

(3) 一次元成層構造(表層のS波速度 0.88km/s)で計算される地殻変動



深さ(km) P波速度(km/s) S波速度(km/s) 密度(kg/m³)

0.0	2.20	1.27 or 0.88	1800
1.0	2.80	1.62	2000
2.0	3.60	2.08	2200
4.4	4.40	2.54	2400
5.5	5.85	3.38	2700
21.0	6.70	3.87	3200
37.0	8.00	4.62	3300

成層構造での計算に用いた
弾性係数(弾性波速度) →

(地震研究所の速度構造に準拠)

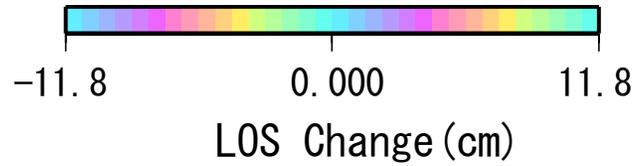
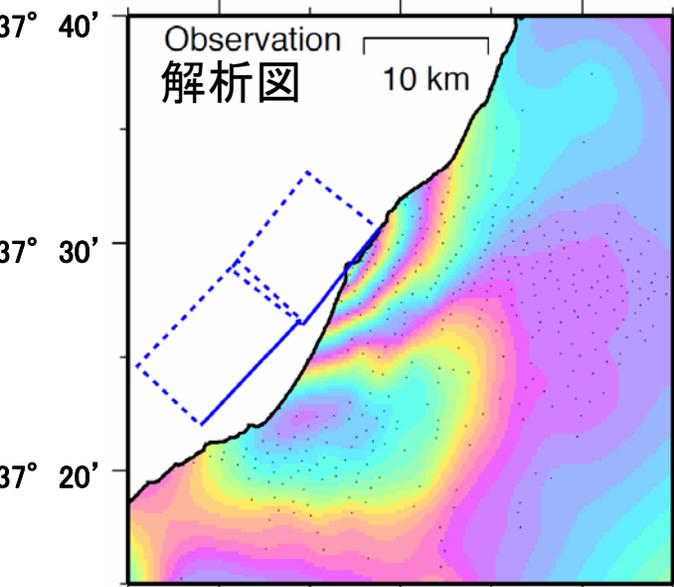
1次元成層構造での地殻変動の計算には、
EDGRN/EDCMP(Wang et al., 2003)を使用した。
また、震源断層モデルのパラメータは以下の通り。

緯度	経度	上端深さ	長さ	幅	走向	傾斜角	すべり角	すべり量	モーメントマグニチュード
37.444 °	138.575°	1.2km	11.9 km	9.8 km	223°	44°	84°	1.47m	6.41
37.511 °	138.647°	5.2km	10.0 km	9.9 km	218°	42°	110°	1.39m	6.34

(7月26日公表)

媒質を変えた場合の視線方向変動量の計算値比較

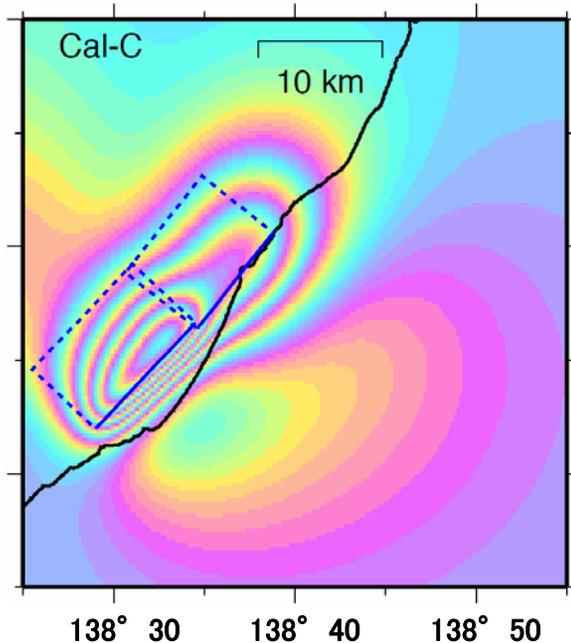
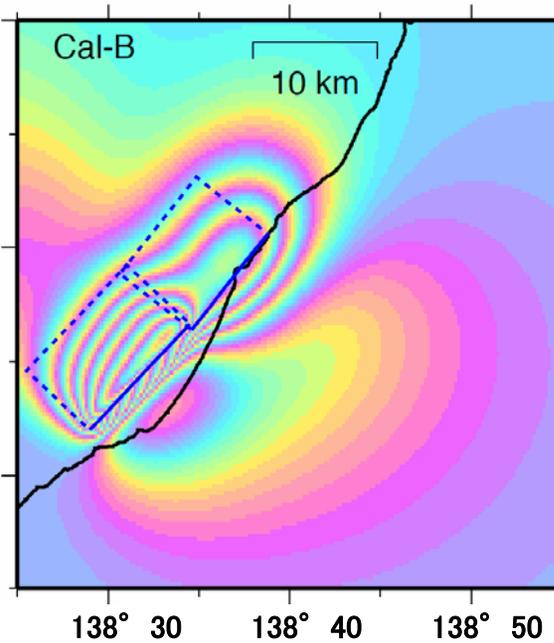
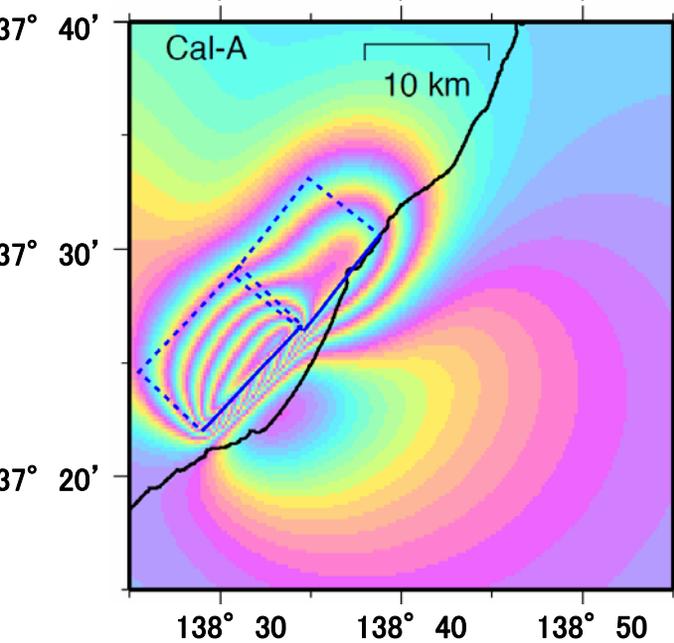
平成19年新潟県中越沖地震



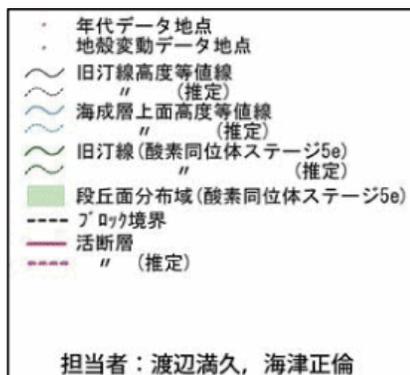
CAL-A: 均質半無限媒質で計算される地殻変動

CAL-B: 一次元成層構造(表層のS波速度0.88km/s)で計算した場合の変動量

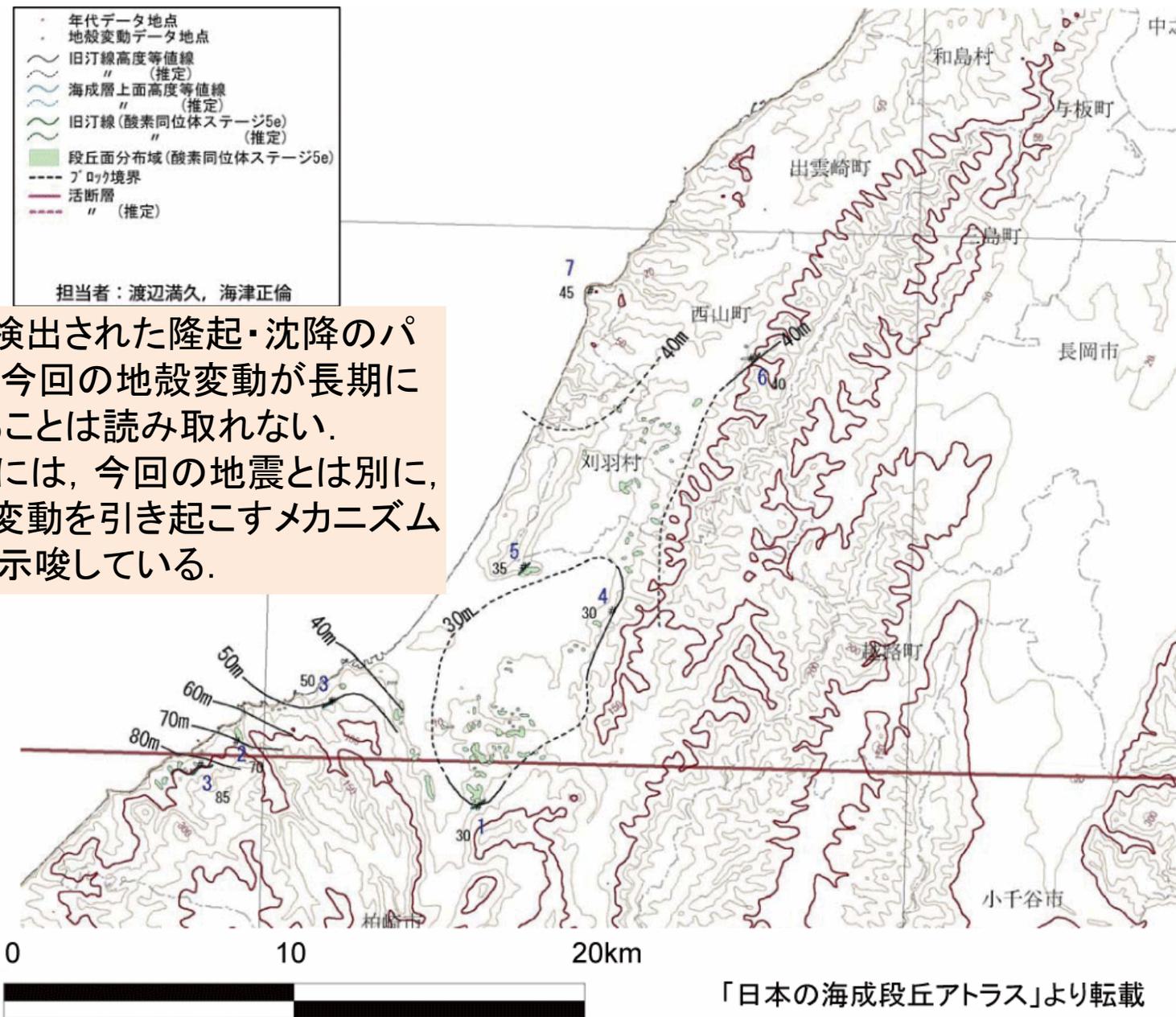
CAL-C: 一次元成層構造(表層のS波速度0.88km/s)で断層位置を1.5km深くした場合の変動量



海成段丘にみる長期的地殻変動



旧汀線高度は、今回検出された隆起・沈降のパターンとは整合せず、今回の地殻変動が長期にわたって累積していることは読み取れない。このことは、この地域には、今回の地震とは別に、今回と相補的な地殻変動を引き起こすメカニズムが存在していることを示唆している。



まとめ(1)

中越沖地震に伴う地殻変動と震源断層モデル

1. GPS, SAR, 水準測量等の**地殻変動データ**から, 震源断層面の位置, 深さ, 大きさ(幅約10km 長さ約20km), 走向(約220° or 40°), すべり量(1~2m), M_w (6.6)は**決まる**。
2. しかし, 今回の場合, 地殻変動データだけから, **断層面の傾斜方向は決まらない**。(震源断層幅方向の地殻変動プロファイルが得られる場合は決まる。例: 能登半島地震)
3. 震源断層面は, 破壊開始点である本震震源位置を通る必要がある(余震分布と断層面は一致する必要がない)
⇒ **北西傾斜のモデル1**(次にモデル3)が**有力**。
4. 地下構造(媒質)の地殻変動への影響は限定的なので, 震源断層面深さの推定誤差は小さい。
5. 今回の地殻変動は, 長期的な地殻変動パターンとは異なると見られる。

まとめ(2)

中越沖地震に伴う地殻変動と震源断層モデル

6. 今回の地震は、地震像がはっきりしない。

理由1: 複雑な震源過程

理由2: 観測・解析の確度が低い

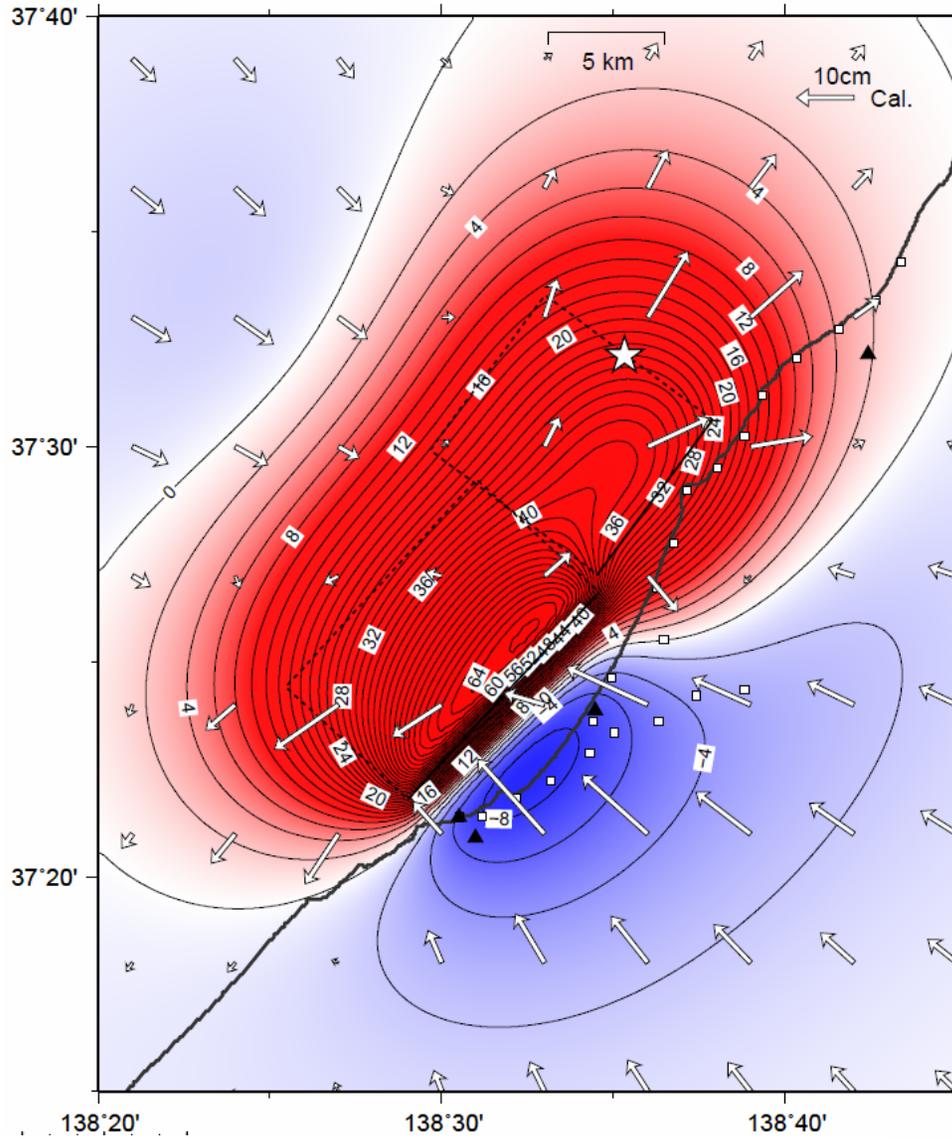
(1) 地震波: 地下浅部の低速度層

(2) 地殻変動: 震源域が海域で、断層面上のデータが不足

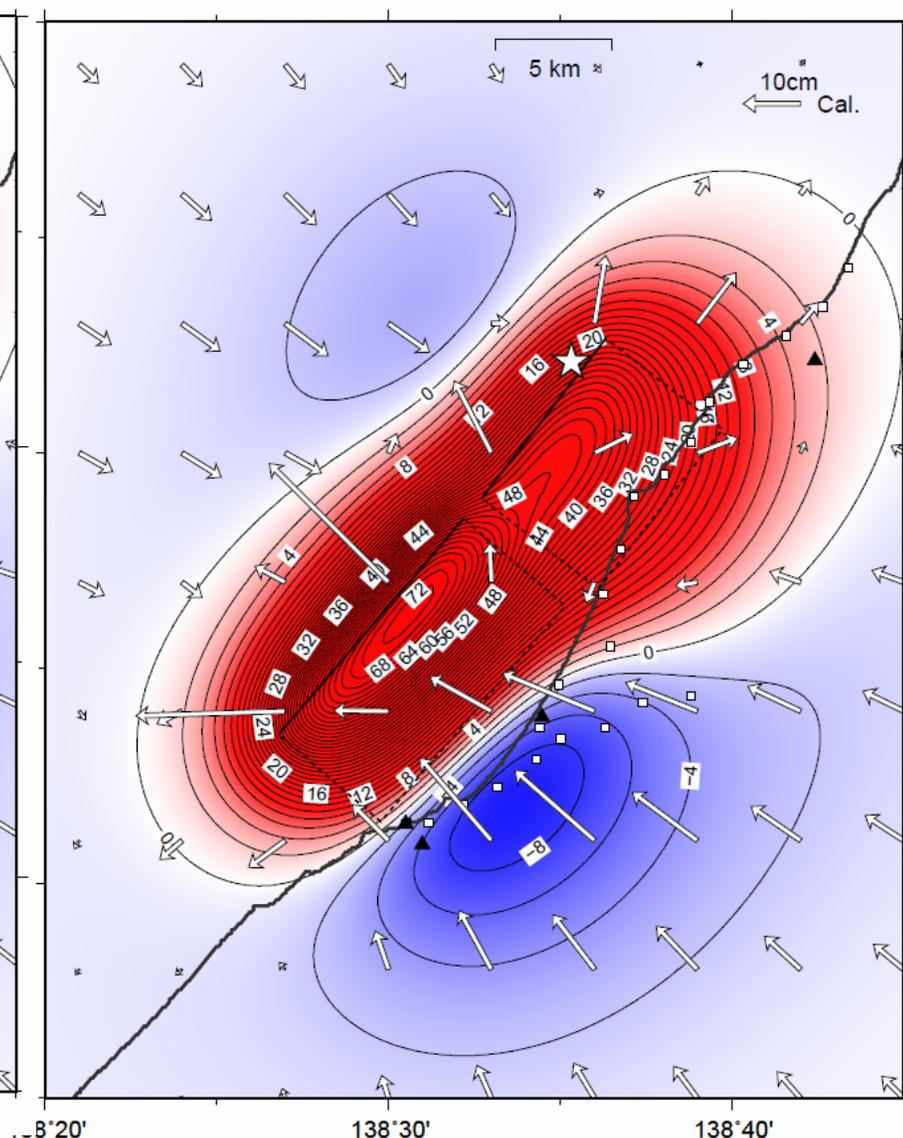
7. 陸海域の浅部・表層地盤情報の収集・公開が望まれる。

モデルによる水平・上下運動

モデル1 北西傾斜モデル



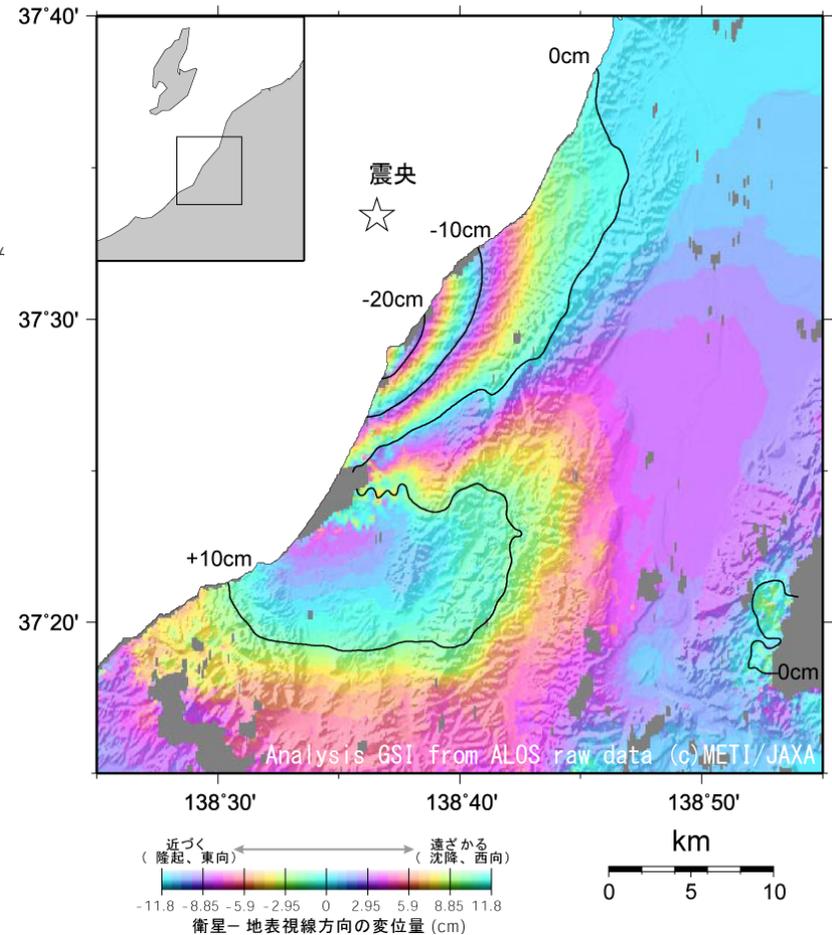
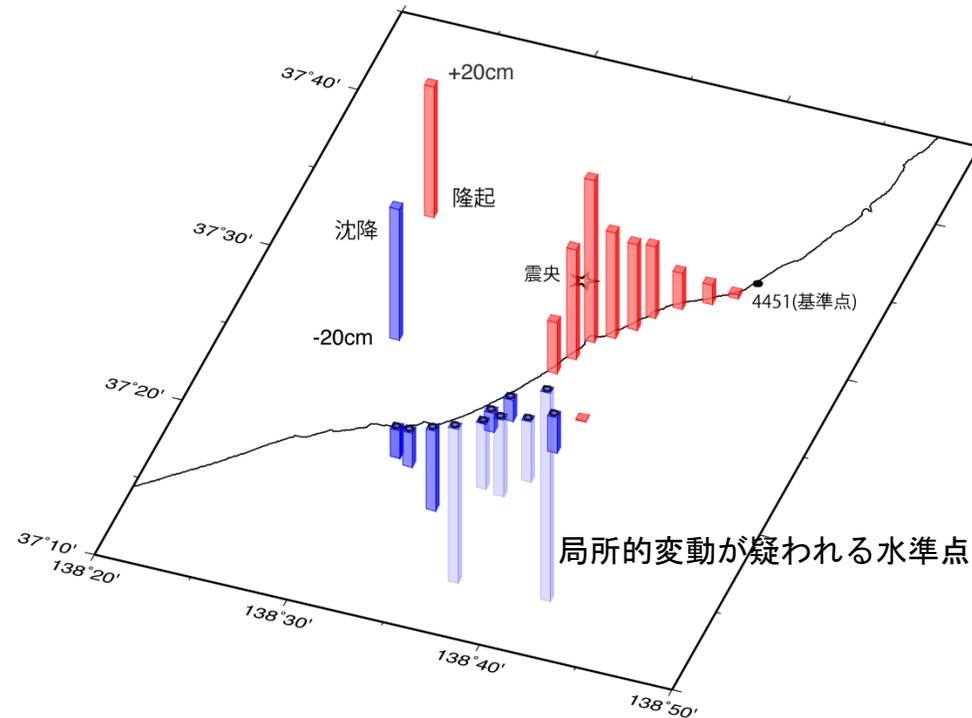
モデル2 南東傾斜モデル



上下変動

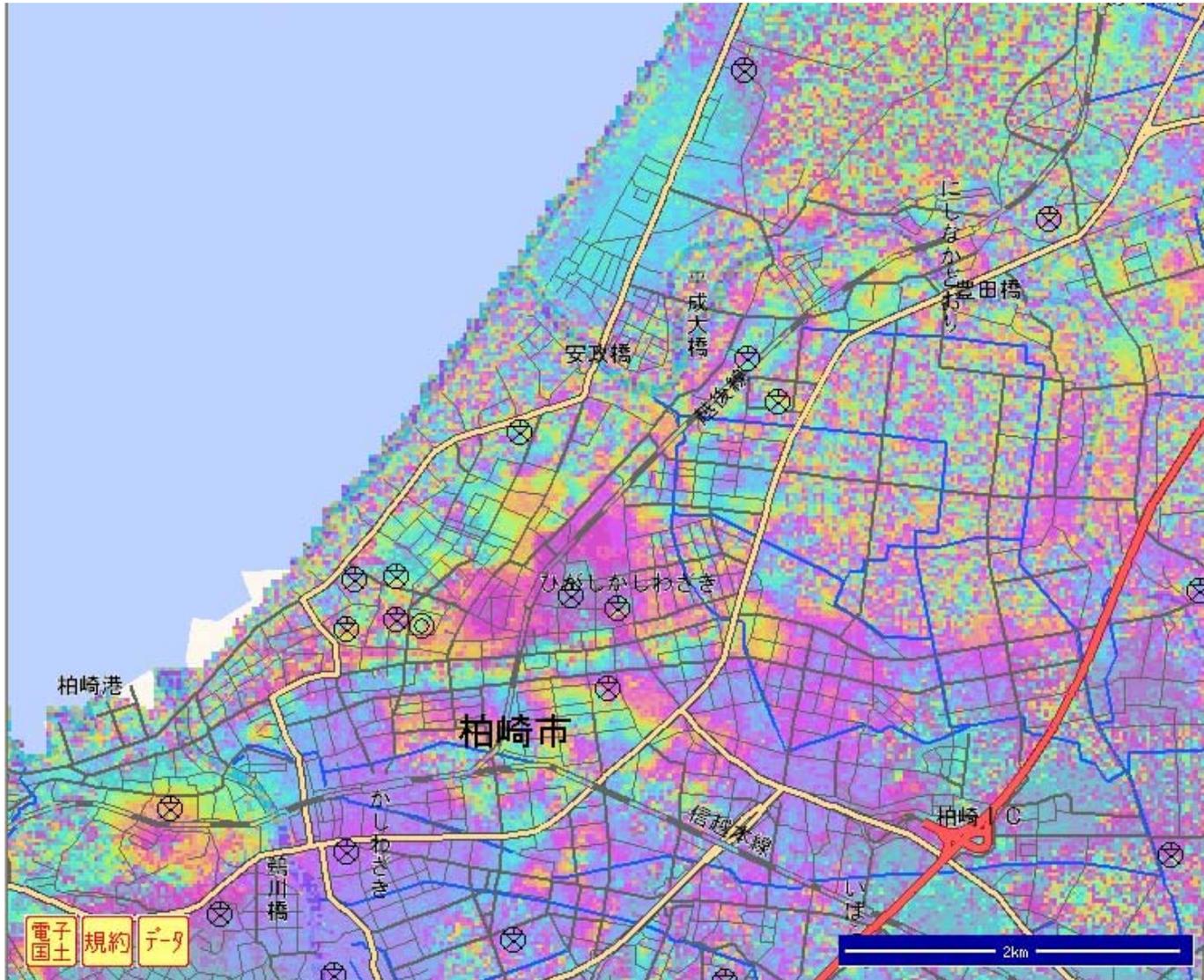
「だいち」による SAR 干渉画像
(Descending34.3° 2007/1/16-7/19)

水準測量による2007年新潟県中越沖地震の上下変動



- 柏崎市中心部が約10cm沈降している。
- 震源断層は、ほぼ海岸線に平行であると考えられるにもかかわらず、上下変動が北と南で全く異なる。

中越沖地震による地表変状



中越沖地震災害状況図

・・・砂丘の末端部に被害が集中

