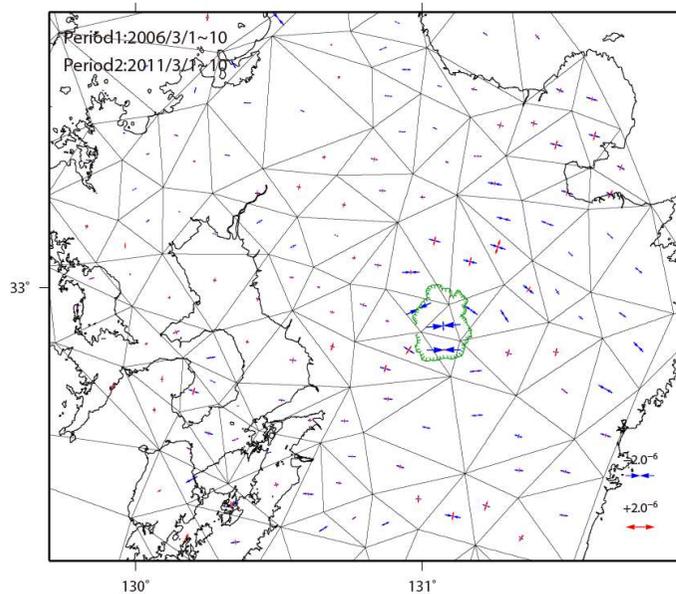
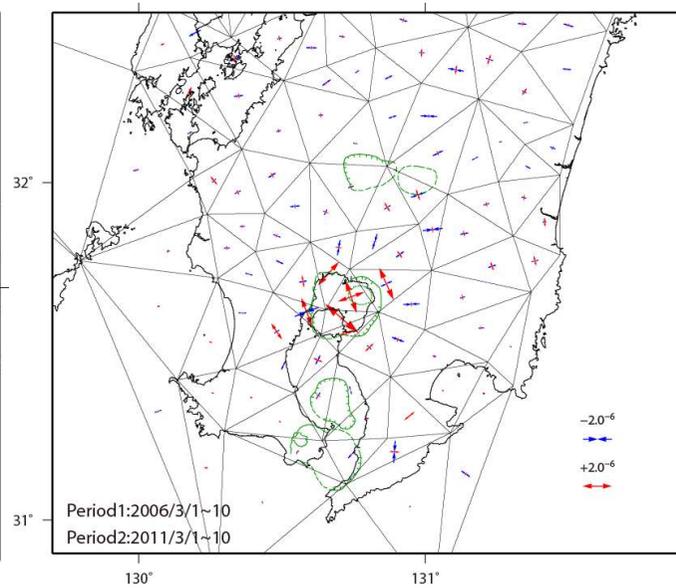


2. カルデラ火山周辺のひずみ場検討 [カルデラ火山周辺のひずみ分布]

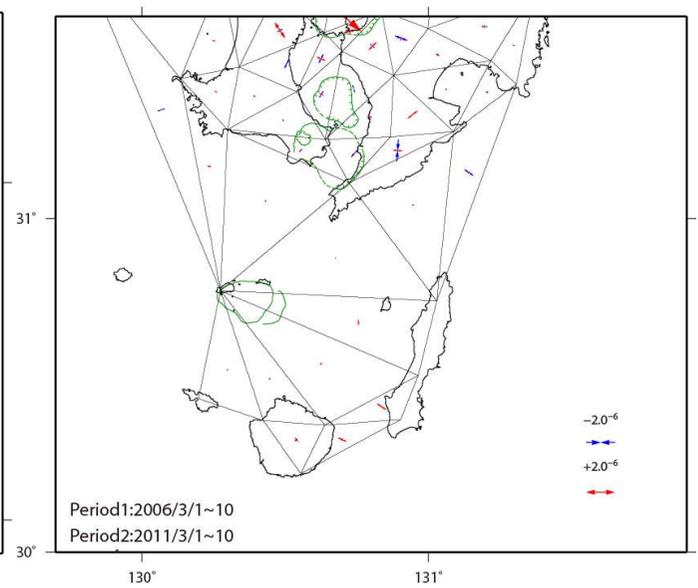
- 九州のひずみ分布において、阿蘇カルデラ周辺は東西方向の圧縮傾向、始良カルデラ周辺ではカルデラを中心とした伸長傾向が認められる。
- 加久藤・小林カルデラ、阿多カルデラ、鬼界周辺では、顕著なひずみは認められない。



阿蘇カルデラ周辺のひずみ分布

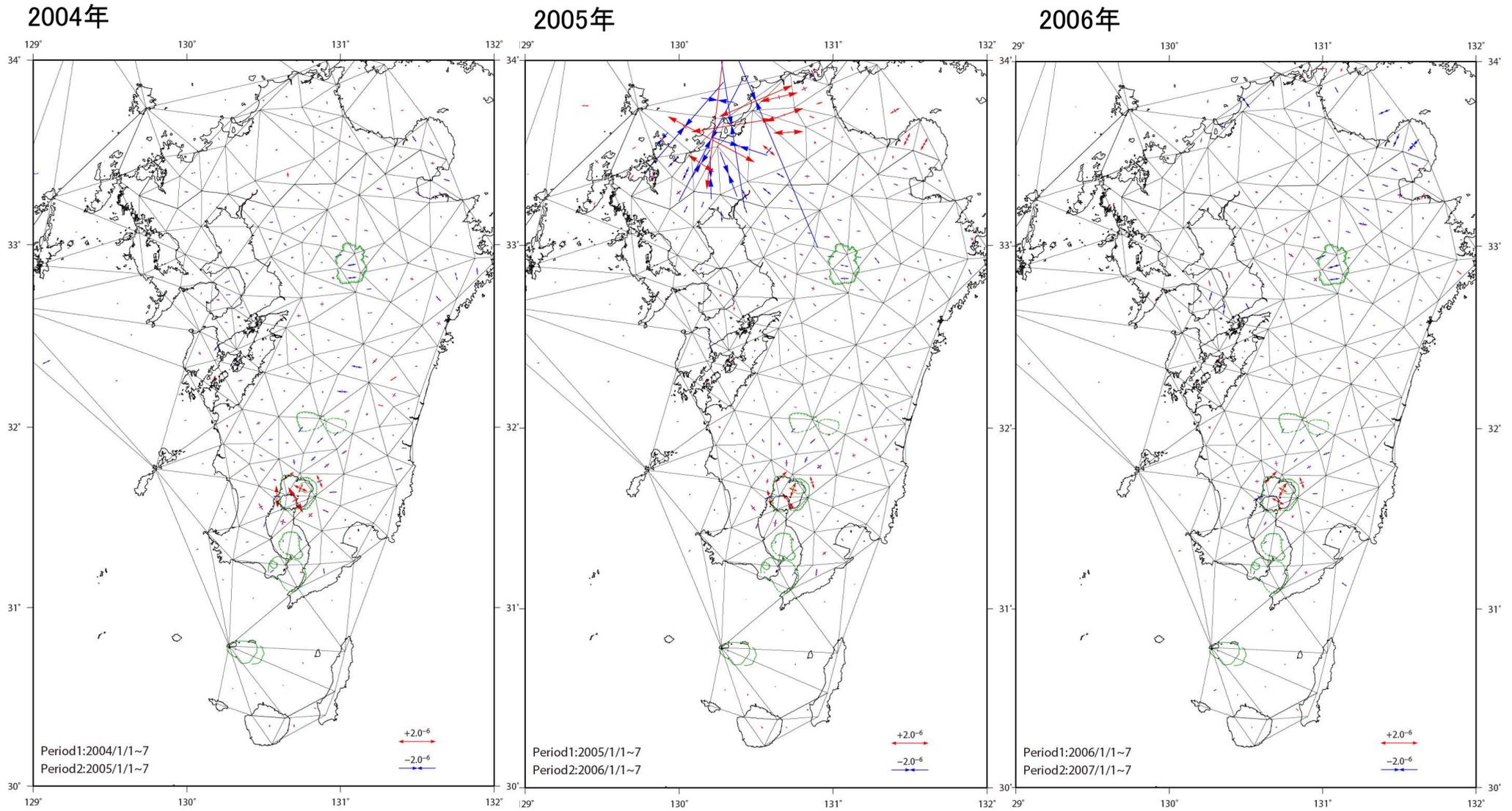


加久藤・小林カルデラ及び
始良カルデラ周辺のひずみ分布



阿多カルデラ及び鬼界周辺の
ひずみ分布

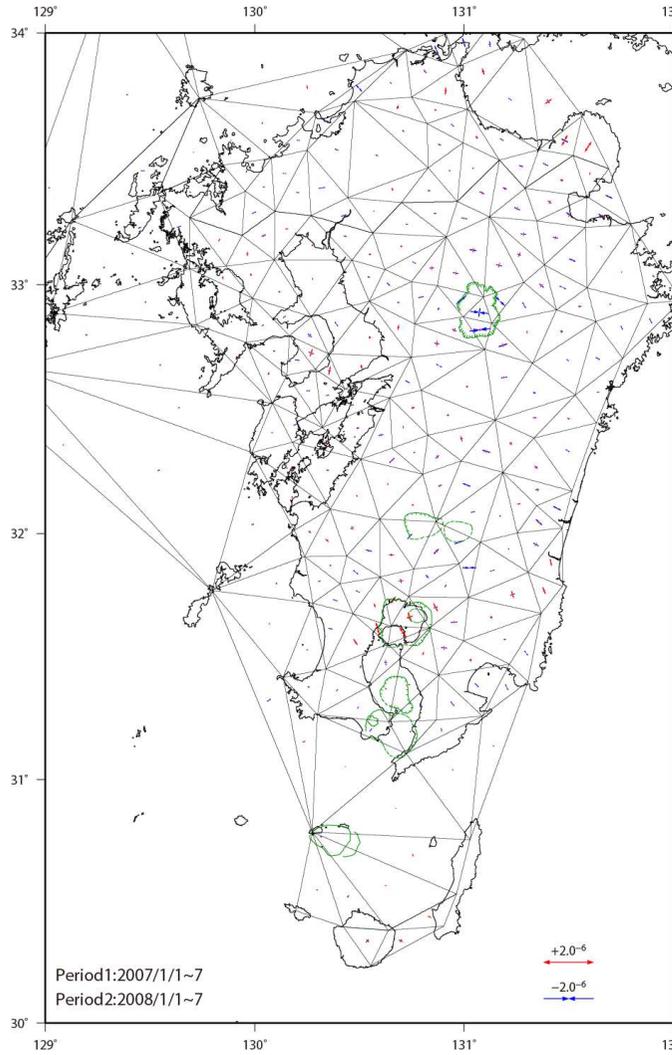
2. カルデラ火山周辺のひずみ場検討 [2004年～2006年]



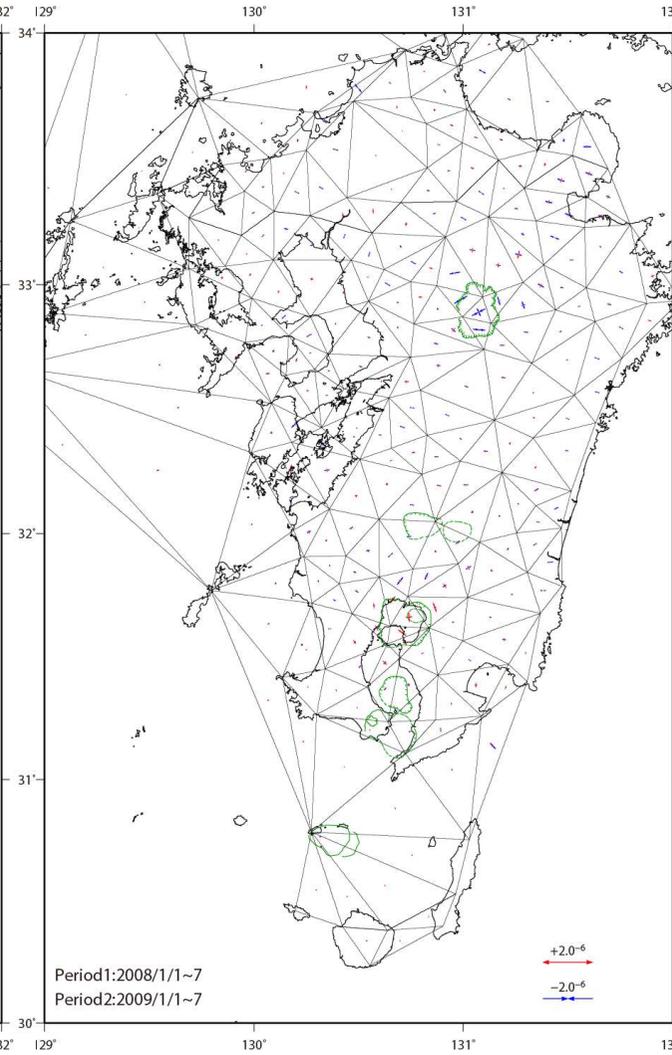
福岡県西方沖地震の影響が認められる

2. カルデラ火山周辺のひずみ場検討 [2007年～2009年]

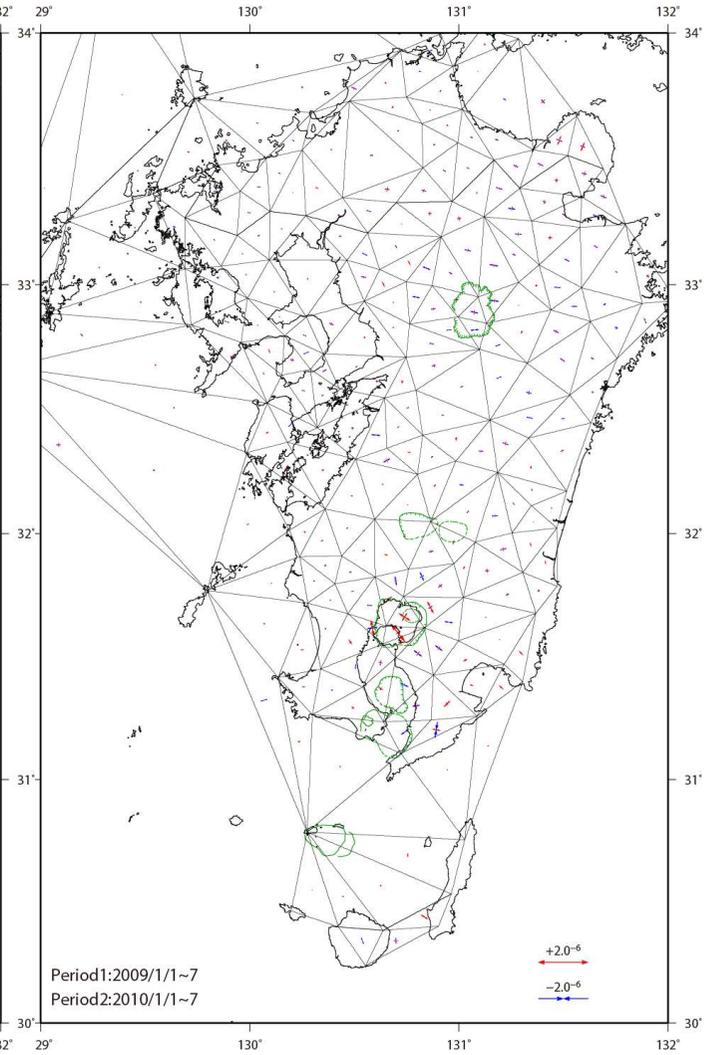
2007年



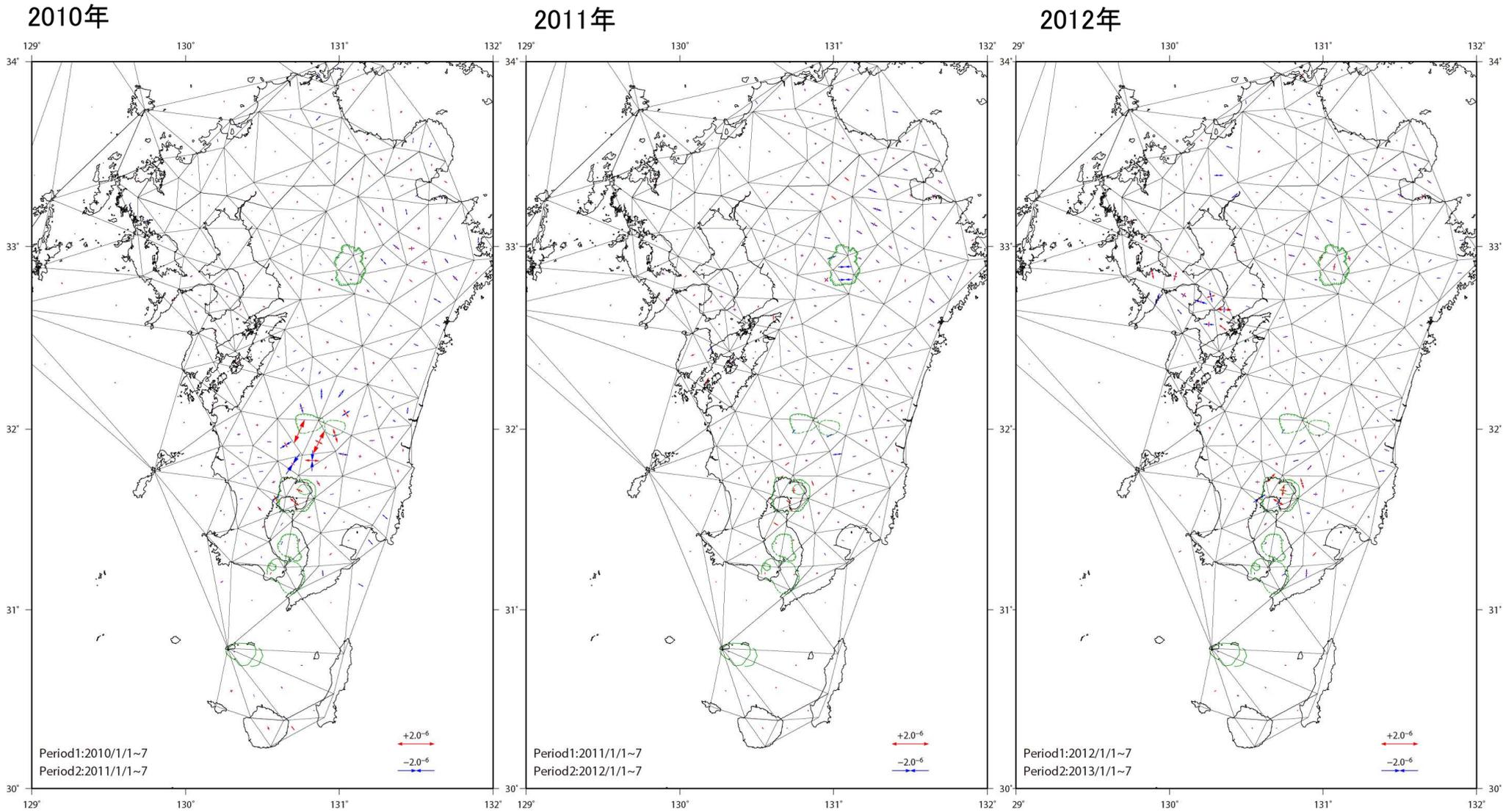
2008年



2009年

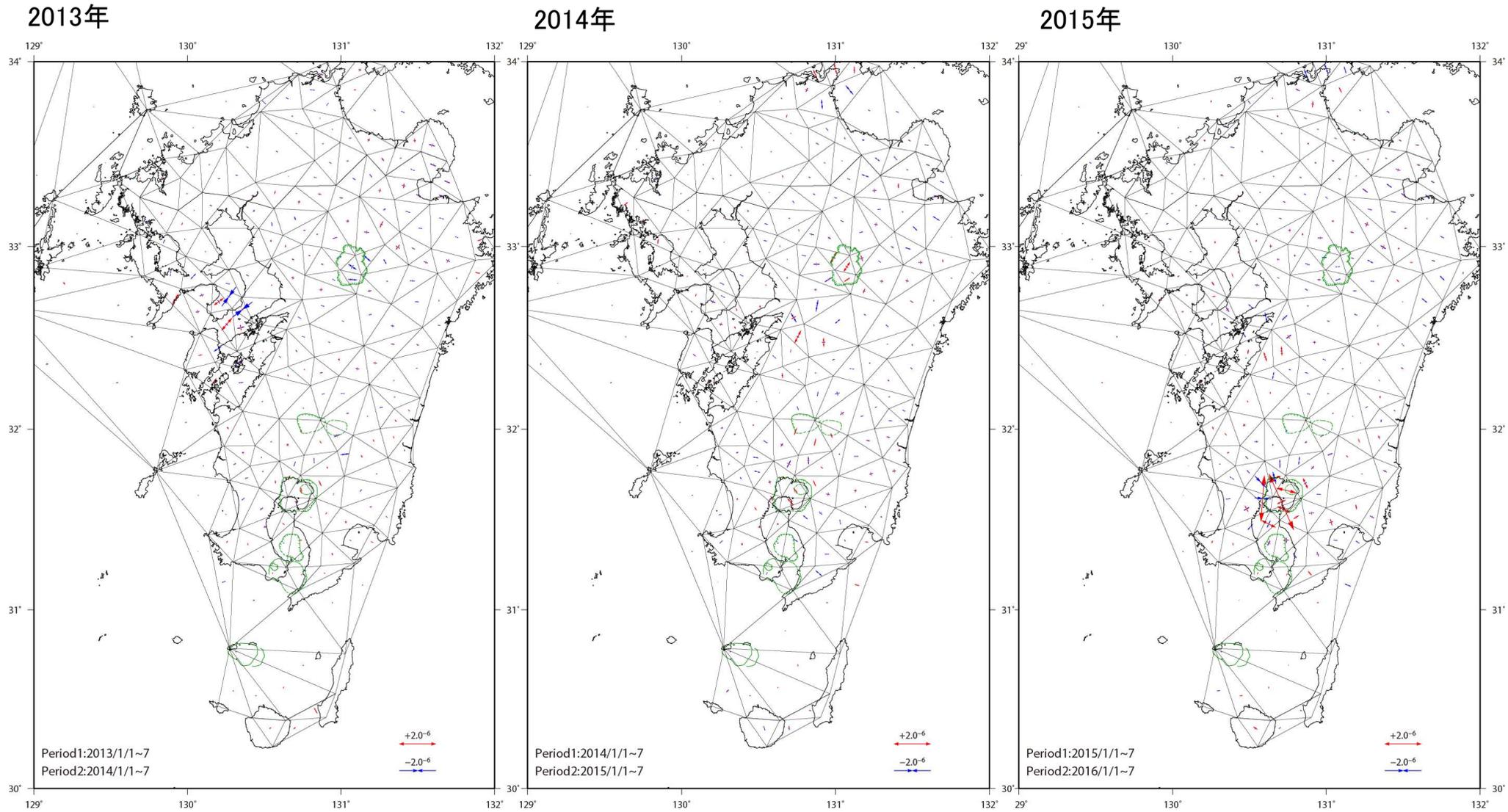


2. カルデラ火山周辺のひずみ場検討 [2010年～2012年]



霧島山周辺において膨張傾向が認められる

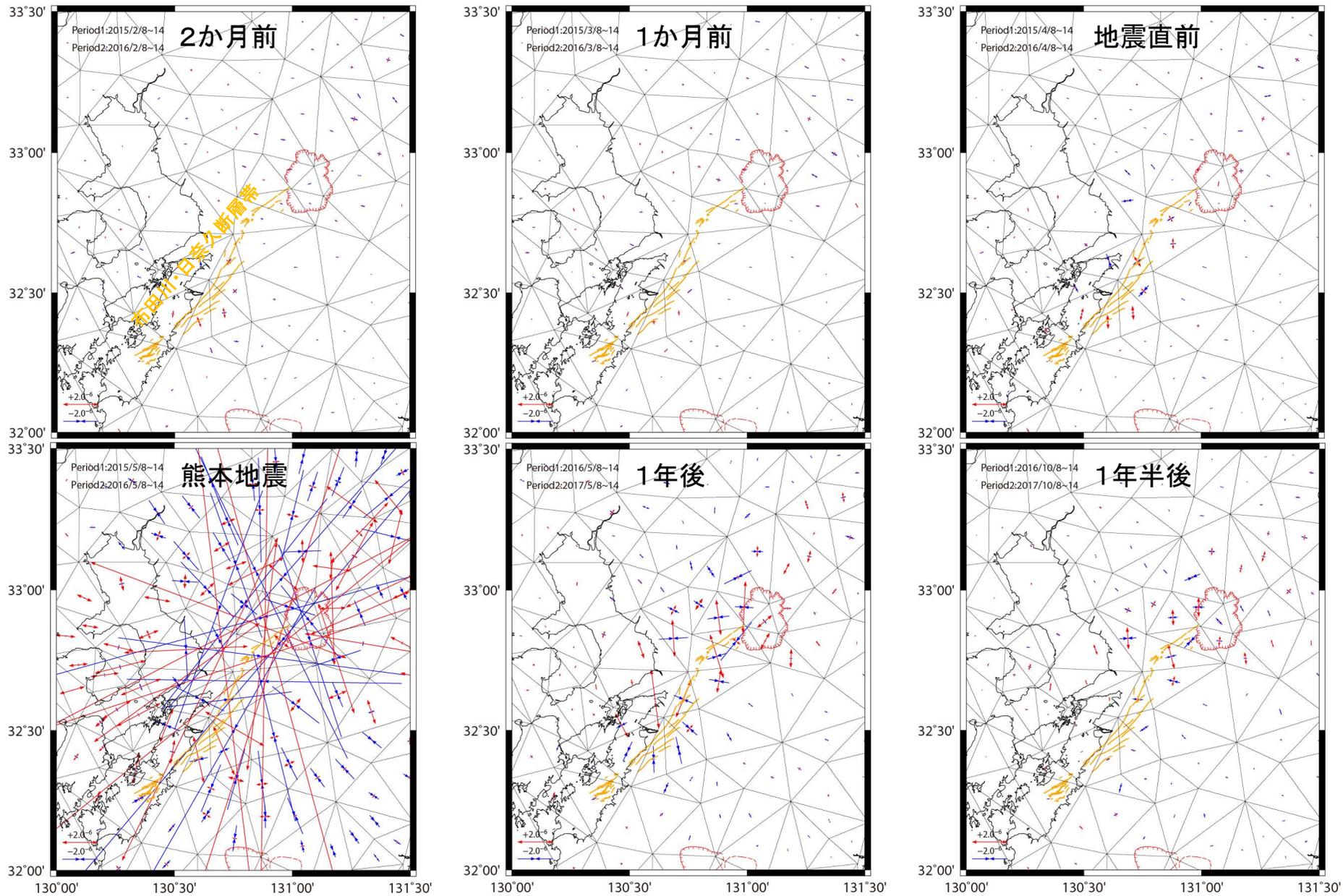
2. カルデラ火山周辺のひずみ場検討 [2013年～2015年]



桜島周辺において膨張傾向が認められる

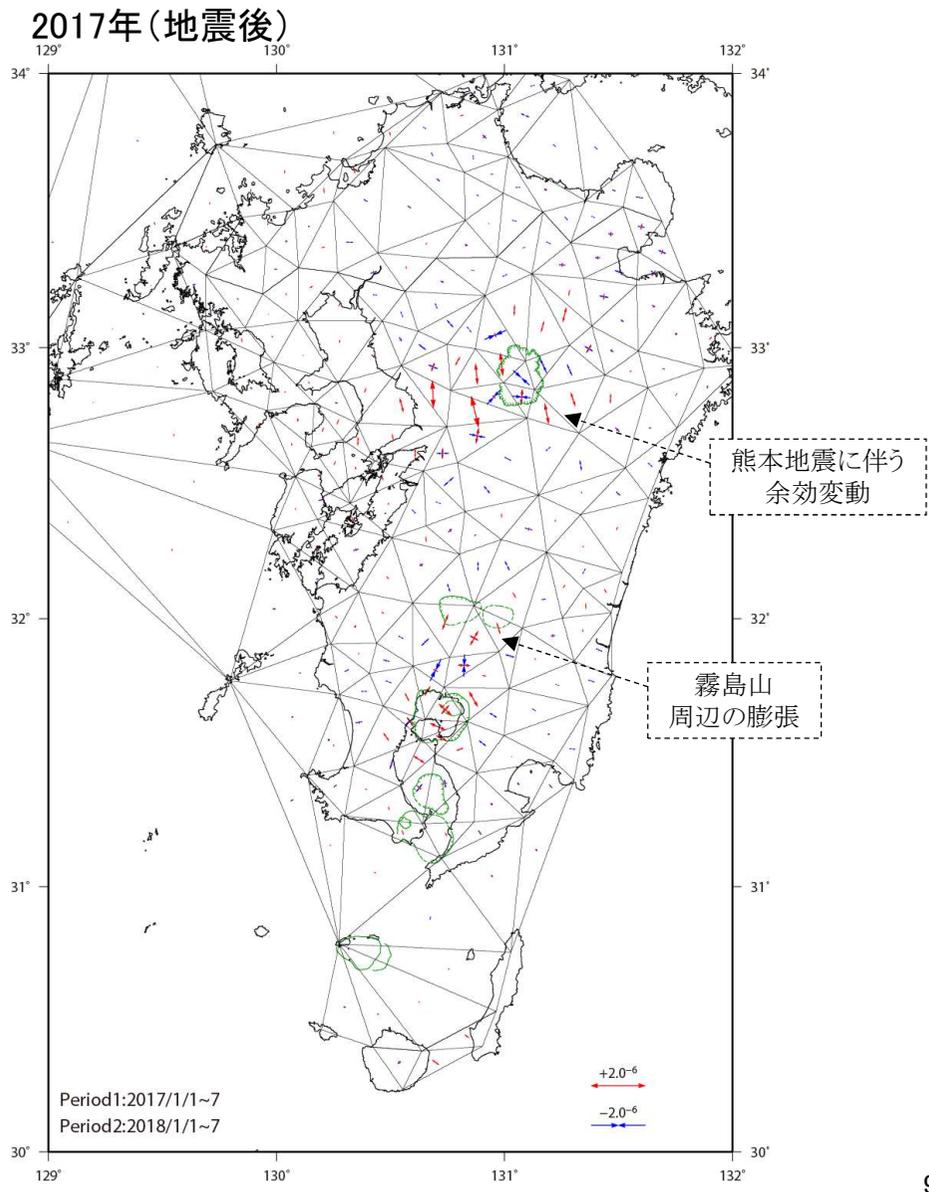
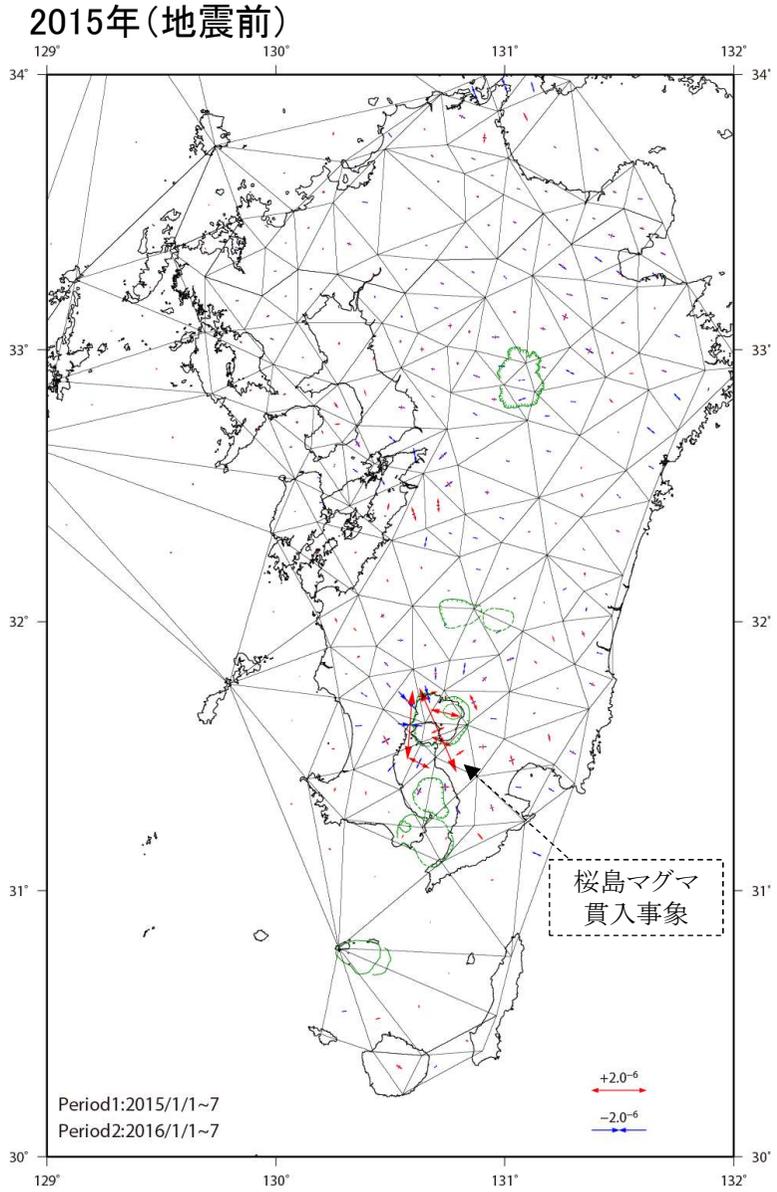
2. カルデラ火山周辺のひずみ場検討 [熊本地震の影響]

- 阿蘇カルデラ周辺では、熊本地震に伴う余効変動(東西圧縮、南北伸長)が継続している。



2. カルデラ火山周辺のひずみ場検討 [熊本地震の影響]

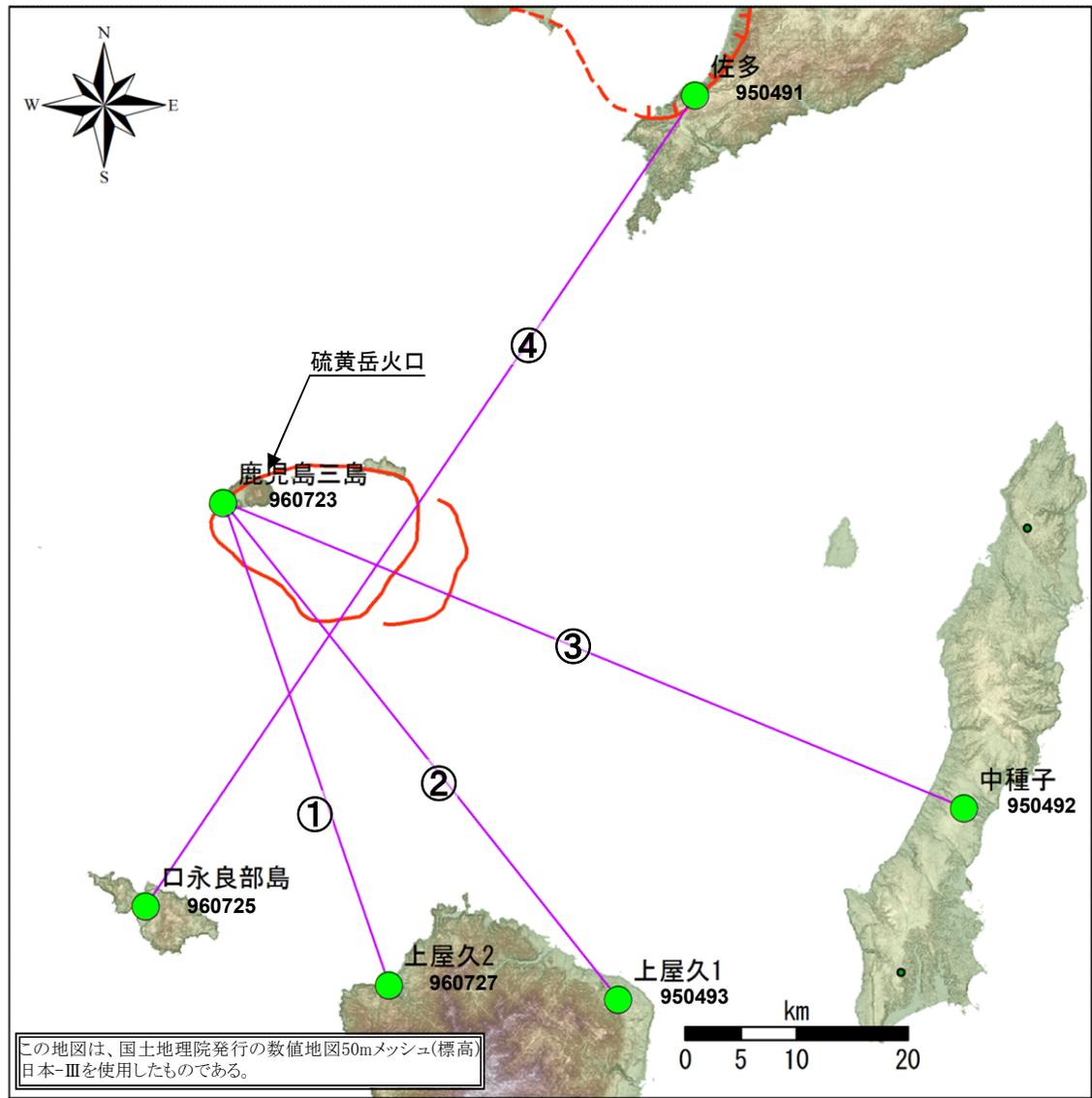
- 阿蘇カルデラ周辺では、熊本地震に伴う余効変動に限られた範囲で認められるものの、九州全域のひずみ分布については、熊本地震前後で大きな違いは認められない。



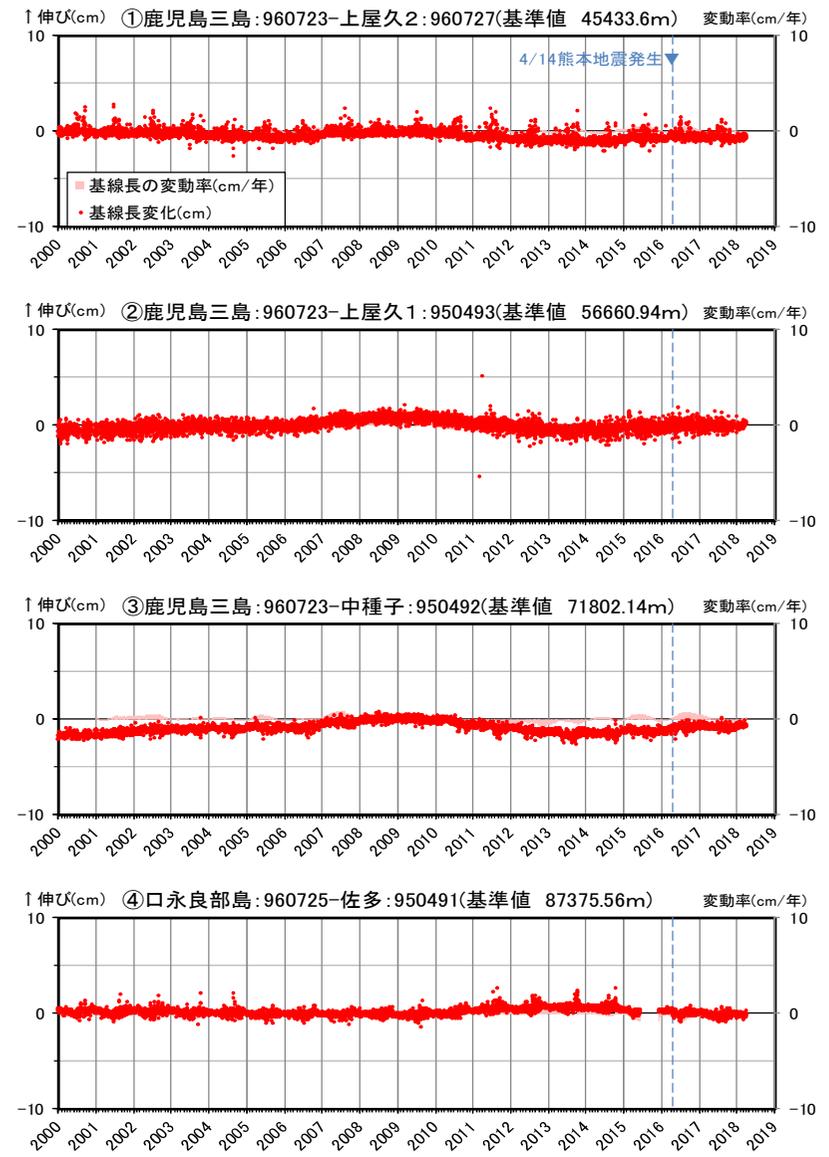
余 白

3. 鬼界の基線長変化における長期トレンド検討 [概要]

• 鬼界の基線①～④においては、周期的な長期トレンドが認められることから、その要因について検討した。



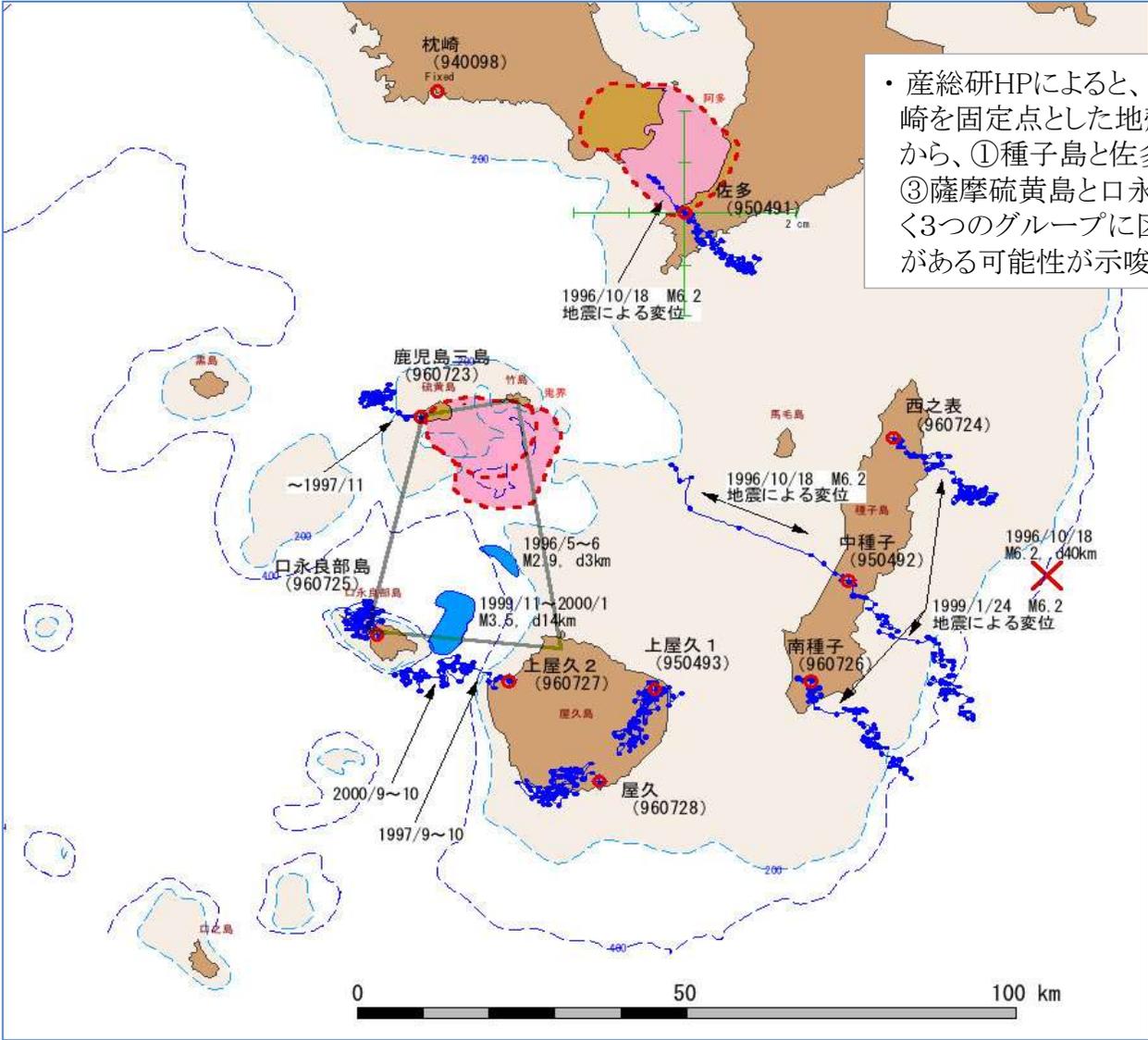
※1 ● 2017年9月末現在データ取得可能なその他のGNSS観測点
 ※2 口永良部島地点については、2015年5月29日の噴火の影響で停電が発生したことで、6月7日以降欠測。停電が解消した12月2日から観測を再開。
 ※3 2010年1月1日の基線長を基準値とし、基準値からの変化量を表示



基線①～④の時系列変化

3. 鬼界の基線長変化における長期トレンド検討 [概要]

・ 検討にあたっては、産業技術総合研究所の薩摩硫黄島HPを参考に、枕崎を固定した各観測点における座標の時系列変化及び水平変位ベクトルの確認を行った。

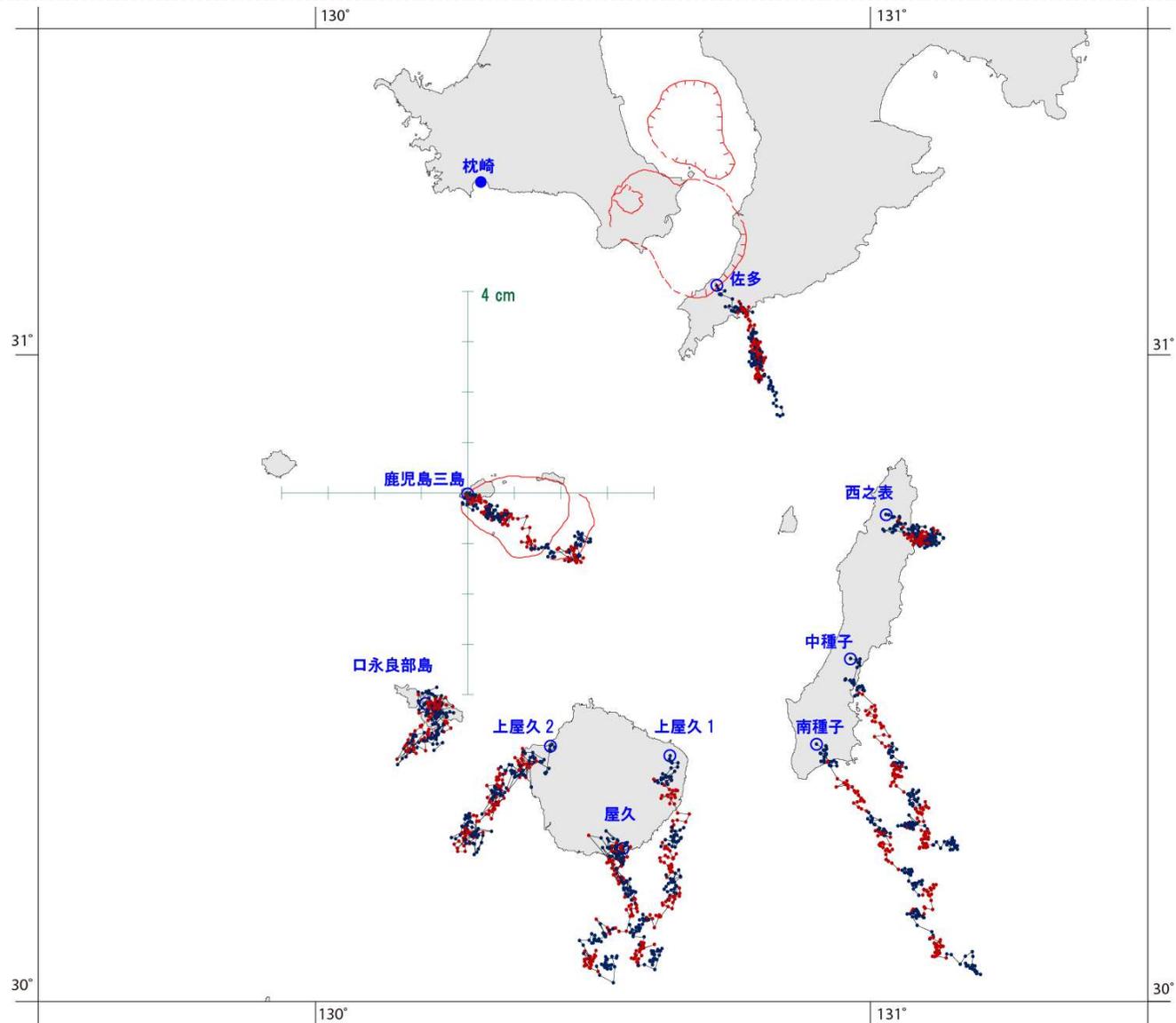


・ 産総研HPによると、鬼界周辺は枕崎を固定点とした地殻変動の傾向から、①種子島と佐多、②屋久島、③薩摩硫黄島と口永良部島の大きく3つのグループに区分され、境界がある可能性が示唆されている。

産業技術総合研究所HP: 薩南諸島のGEONET点の変動(1996年4月~2003年4月)

3. 鬼界の基線長変化における長期トレンド検討 [座標の時系列変化]

- 各観測点について、枕崎を固定点として2000年から2015年までの座標の時系列変化を見ると、近接する観測点については、類似した変動傾向を示すものの、薩摩硫黄島HPで示唆されているグループ区分と一部で異なる傾向を示す。

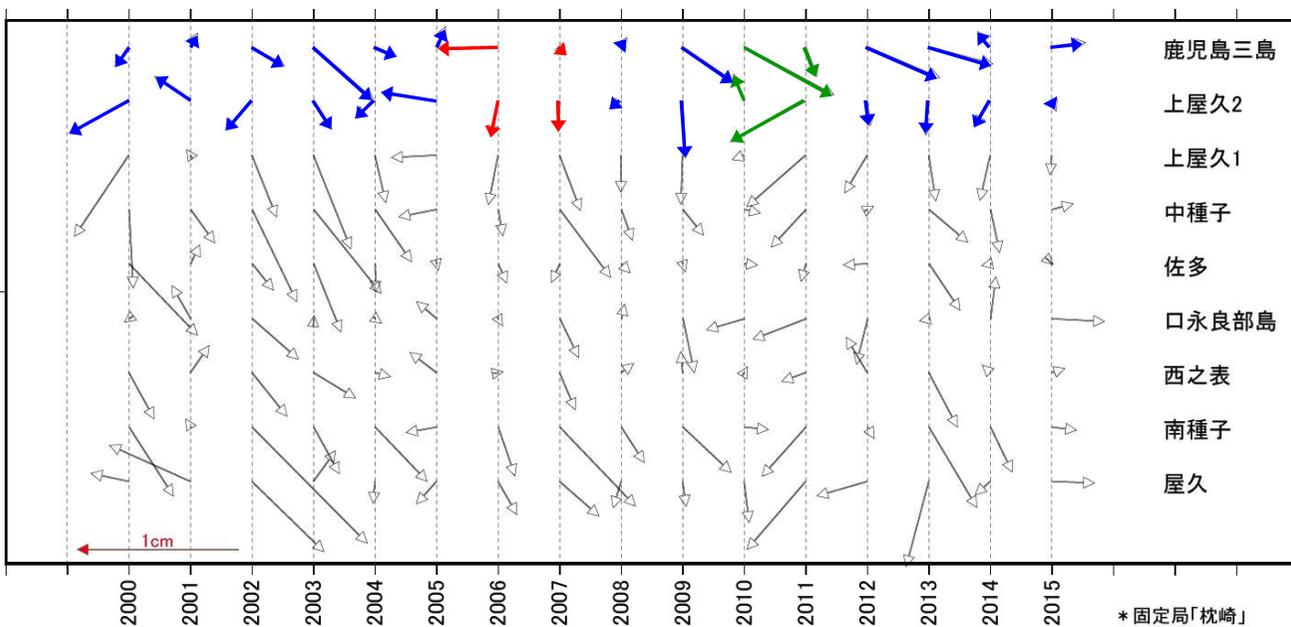
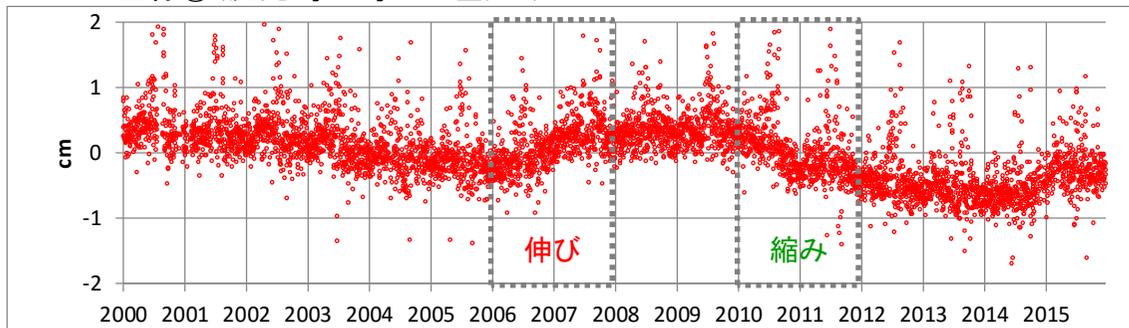


座標の時系列変化(2000年～2015年の月平均をプロット、2年ごとに色を反転)

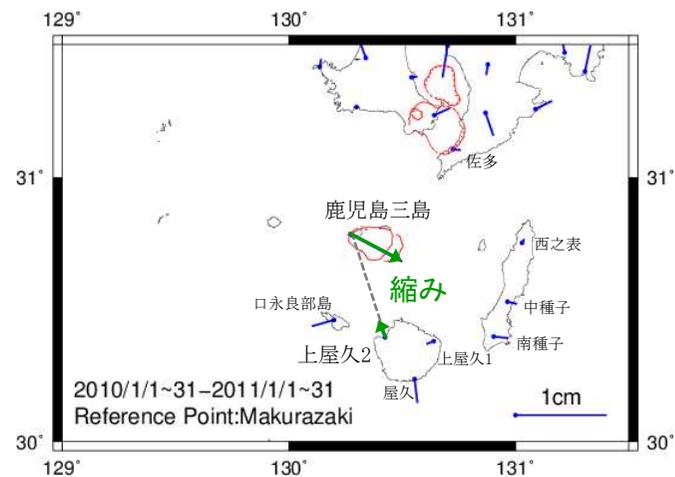
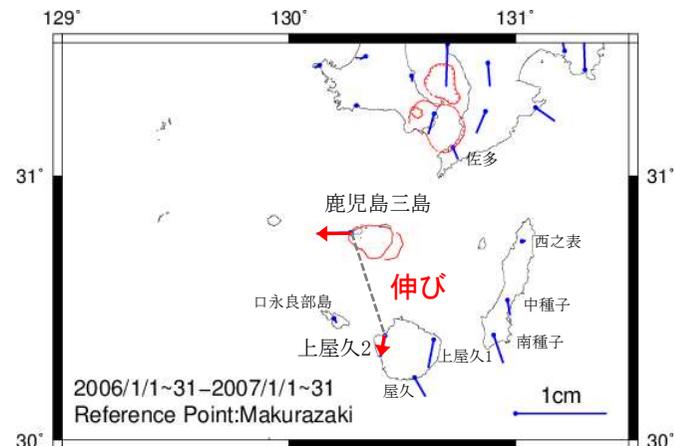
3. 鬼界の基線長変化における長期トレンド検討[水平変位ベクトル:基線①]

- 各観測点について、2000年～2015年までの各年における水平変位ベクトルと基線①～④との関係と比較した。
- 水平変位ベクトルの変動は、基線の伸び・縮みの傾向と対応はしているものの、一定の傾向は認められず、ばらついている。

基線①(鹿児島三島ー上屋久2)



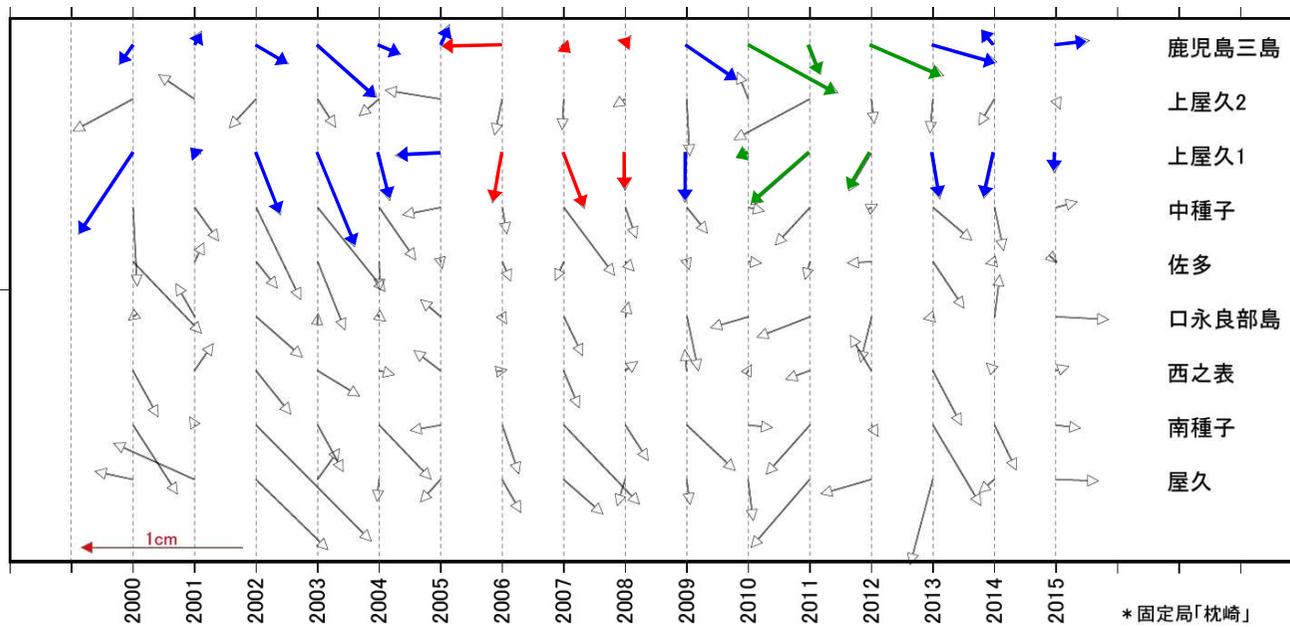
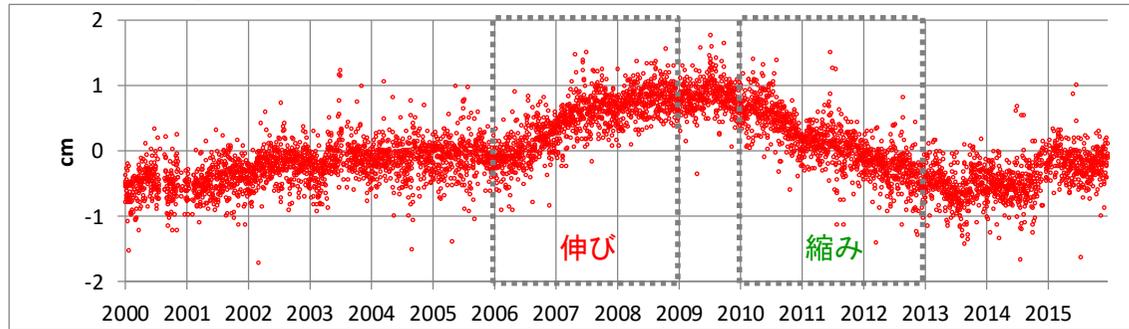
水平変位ベクトルの時系列変化



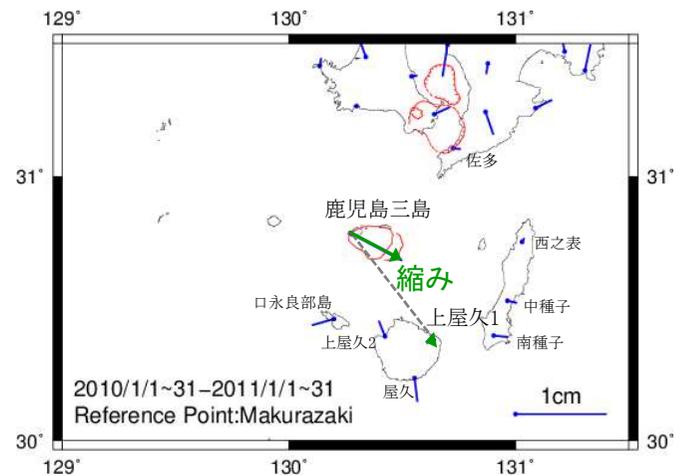
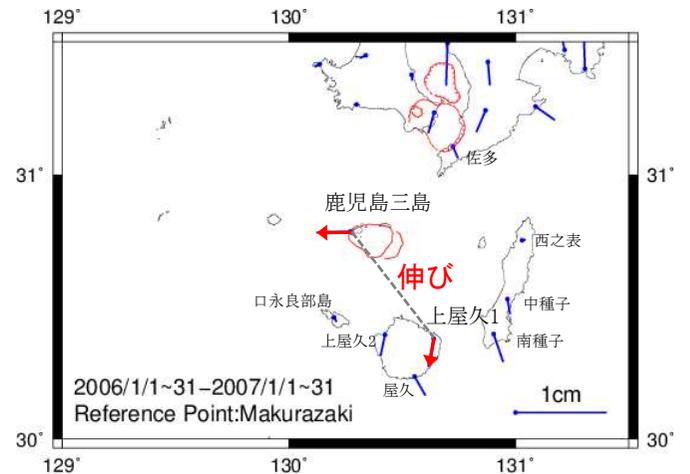
水平変位ベクトルの平面図

3. 鬼界の基線長変化における長期トレンド検討[水平変位ベクトル:基線②]

基線②(鹿児島三島-上屋久1)



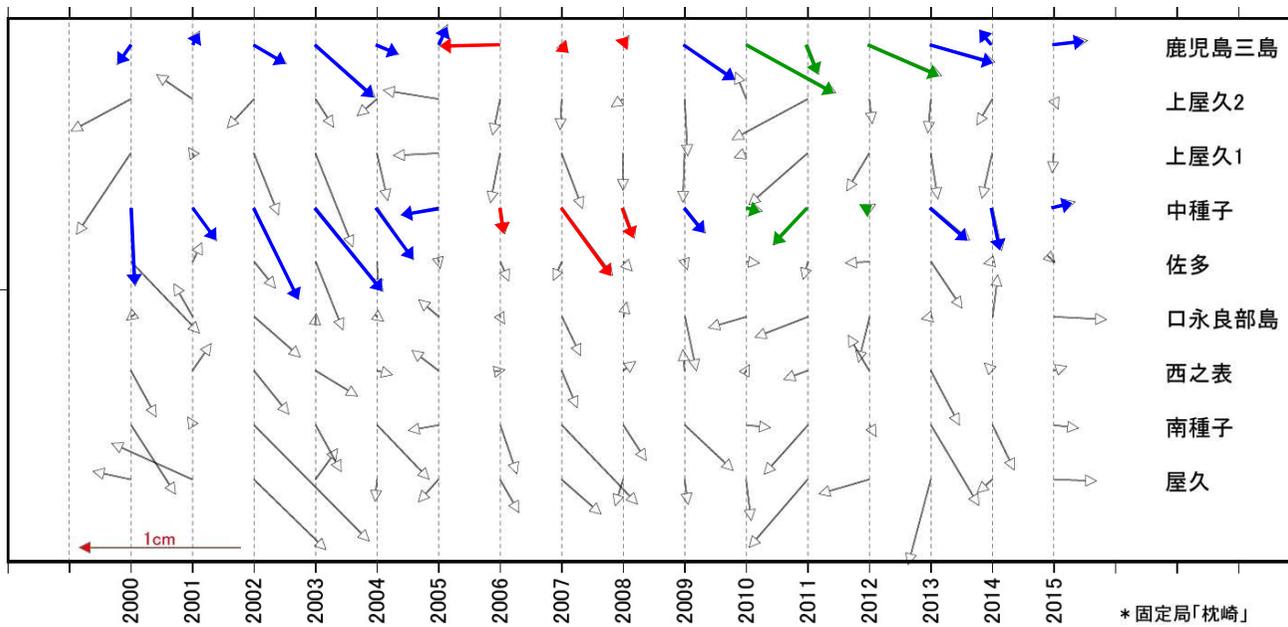
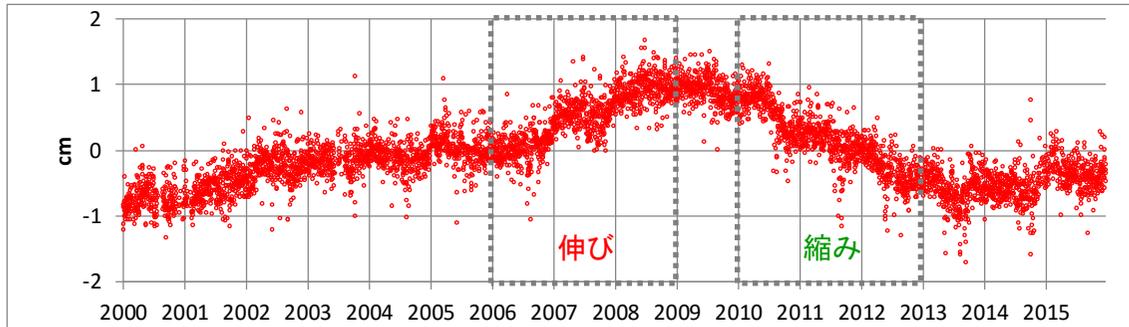
水平変位ベクトルの時系列変化



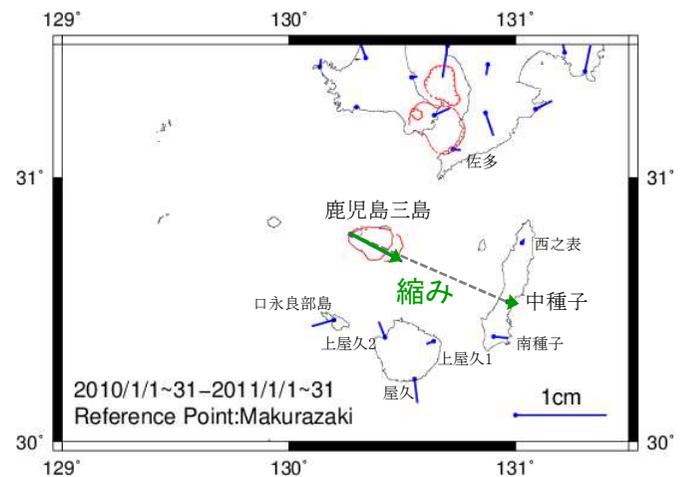
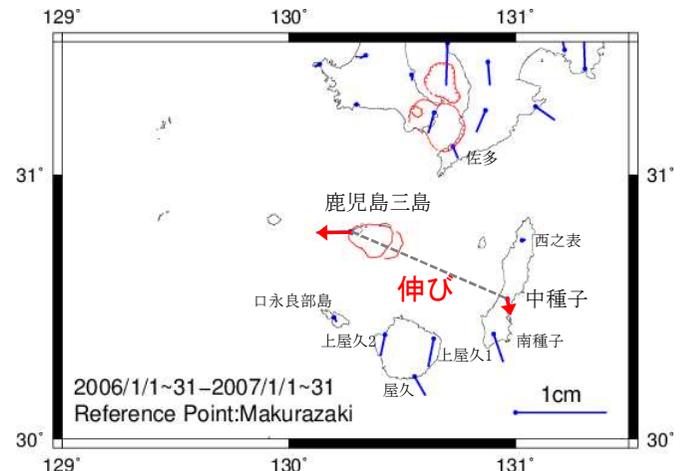
水平変位ベクトルの平面図

3. 鬼界の基線長変化における長期トレンド検討[水平変位ベクトル:基線③]

基線③(鹿児島三島-中種子)



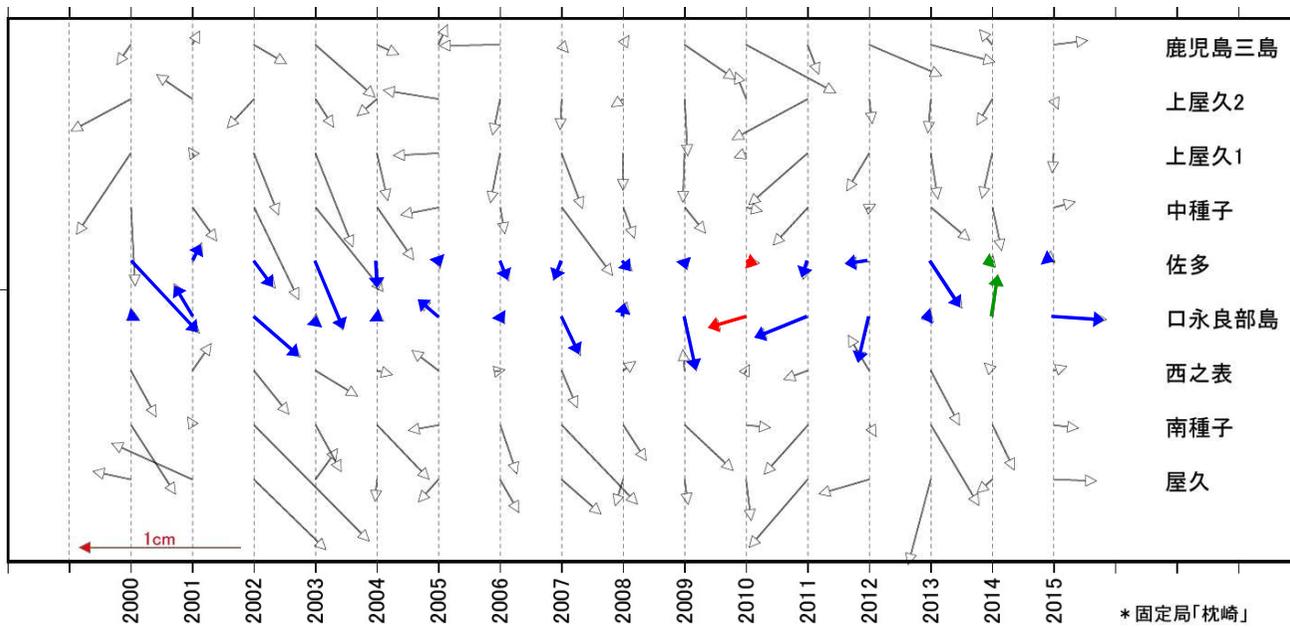
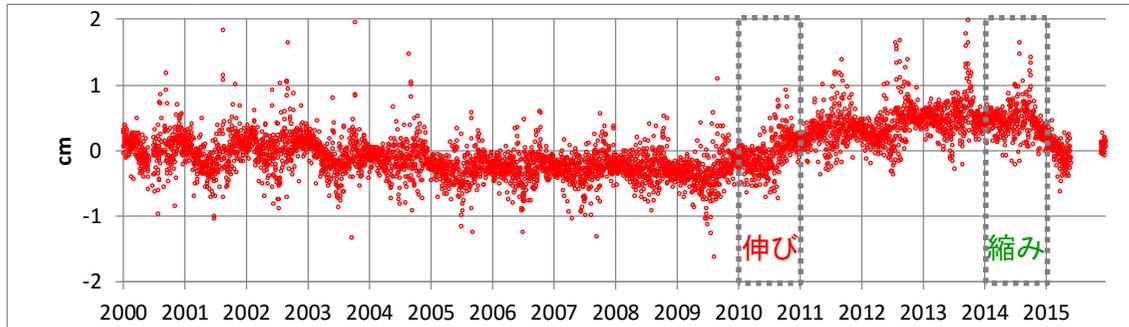
水平変位ベクトルの時系列変化



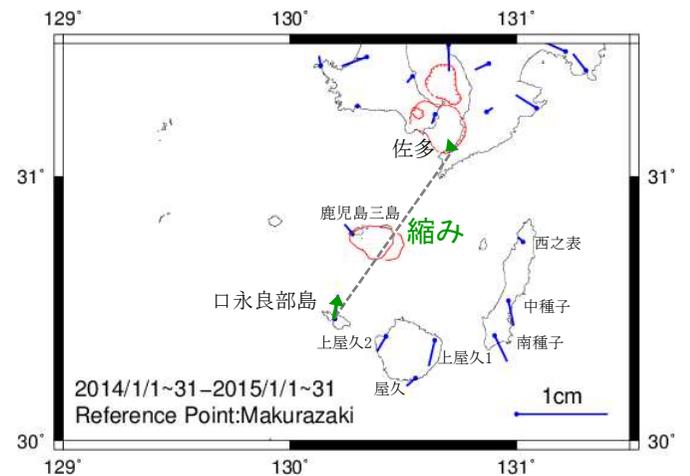
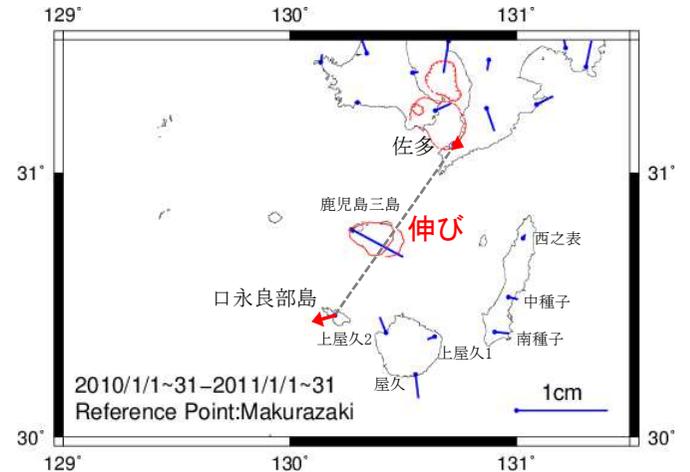
水平変位ベクトルの平面図

3. 鬼界の基線長変化における長期トレンド検討[水平変位ベクトル:基線④]

基線④(口永良部島-佐多)



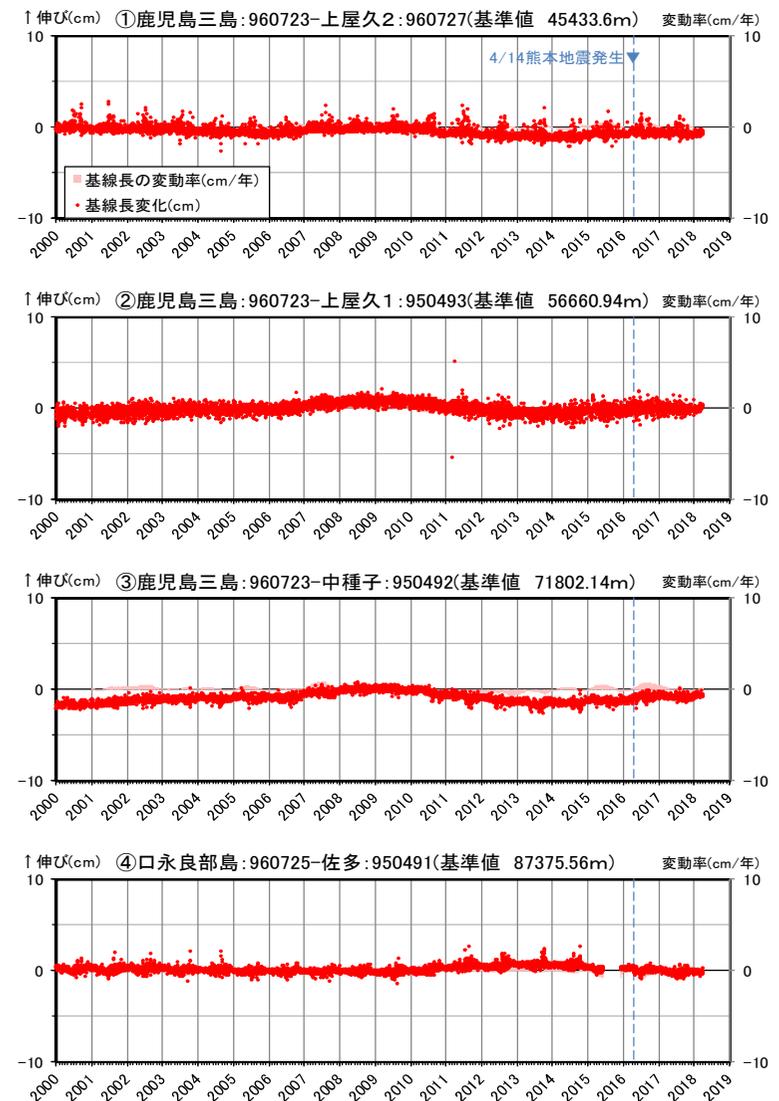
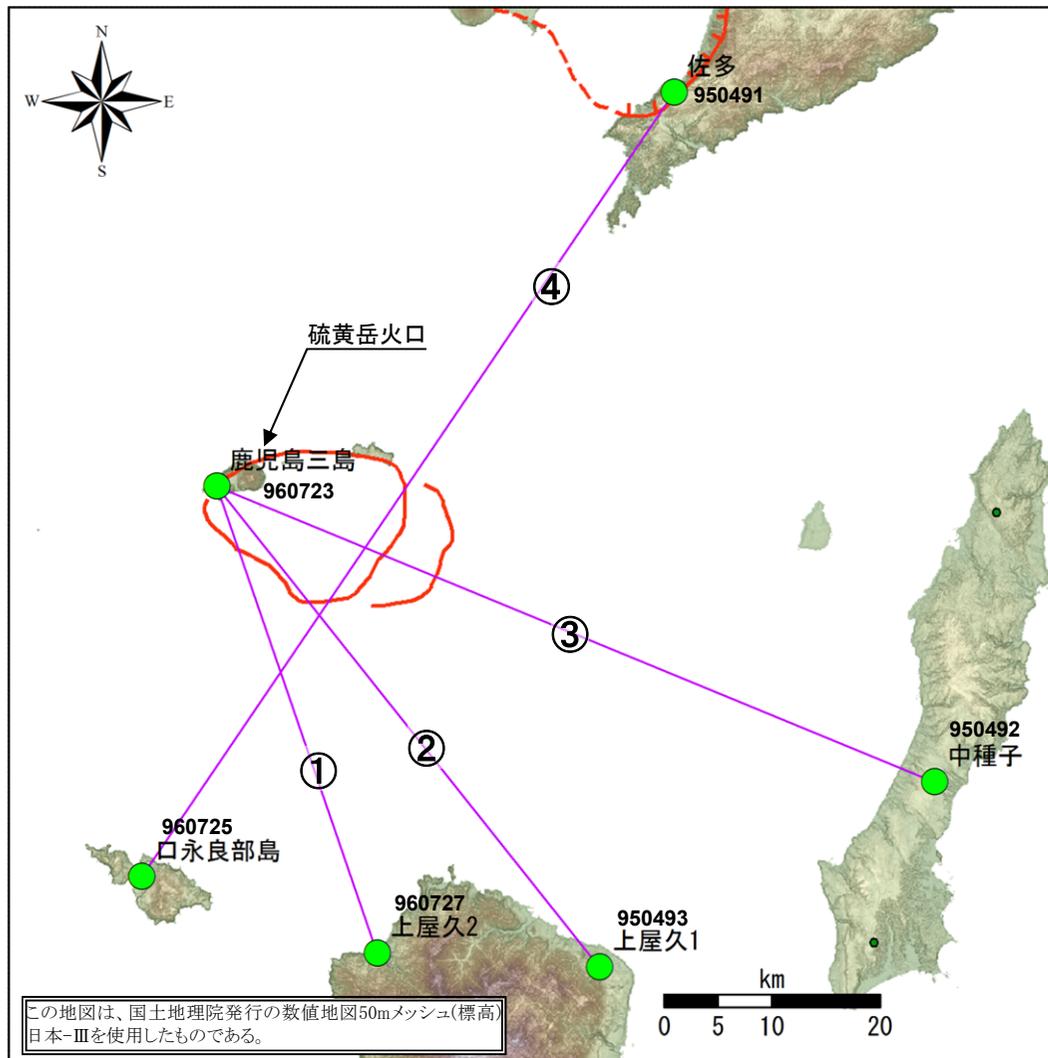
水平変位ベクトルの時系列変化



水平変位ベクトルの平面図

3. 鬼界の基線長変化における長期トレンド検討 [まとめ]

- 鬼界周辺の各観測点の変動については、一定の傾向は認められず、各年の変動方向及び変動量はばらついている。
- 観測点の組み合わせ(基線)によって、各観測点の変動が基線長変化における見掛けの長周期変動に見えると考えられる。
- 鬼界の長期トレンドについて、現時点でのひとつの考え方を示したが、引き続きデータを蓄積しながら要因分析に努めていく。

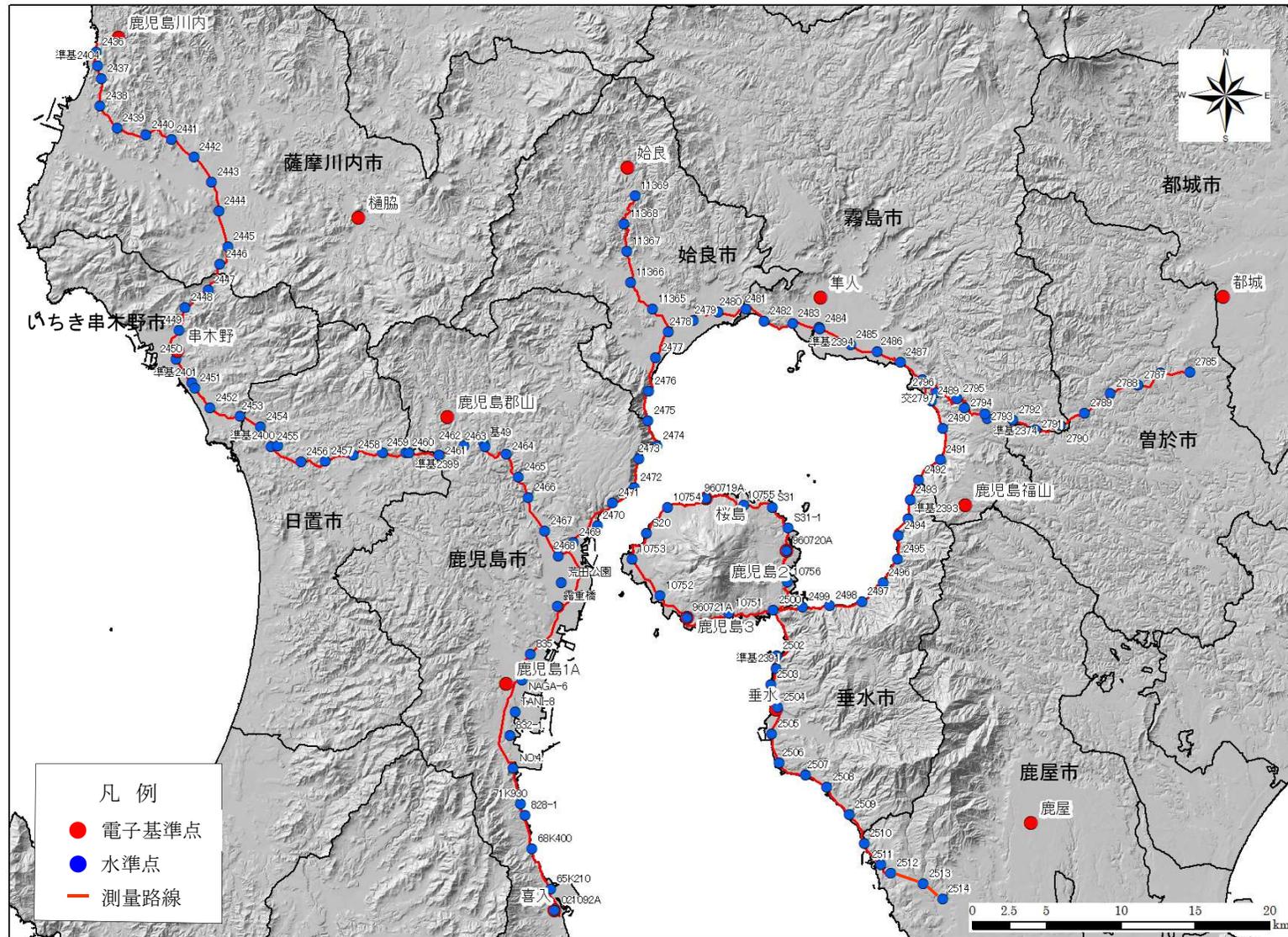


基線①～④の時系列変化

余 白

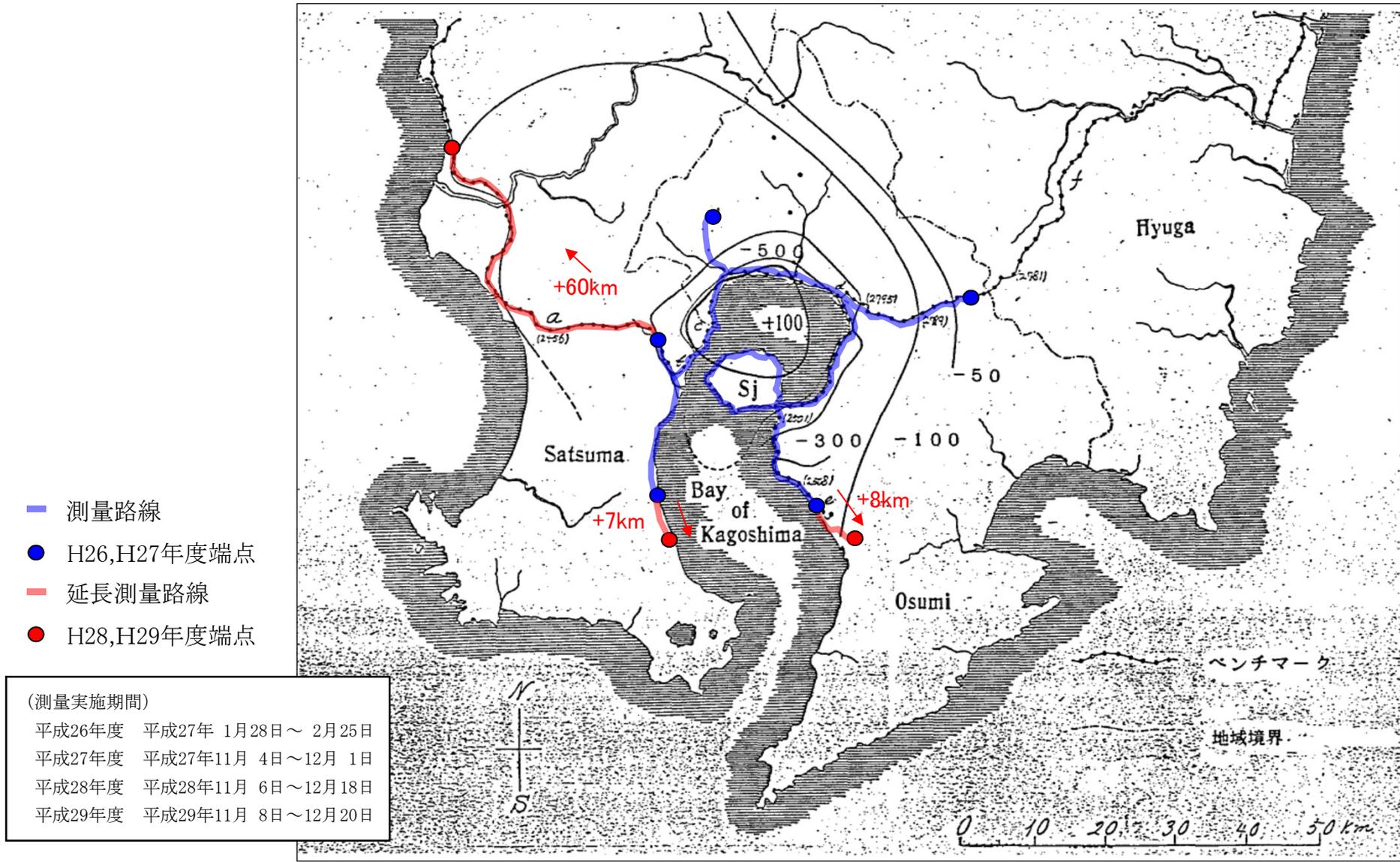
4. 始良カルデラ周辺の水準測量結果 [概要]

- ・ 始良カルデラについて、鉛直方向の地殻変動を面的に精度良く把握することを目的として、H26年度より水準測量を毎年実施。
- ・ H28年度からは、桜島大正噴火(1914年)に伴う地盤沈下が広範囲にわたって起きたことも考慮して、測量路線を延長。
(H26,H27年度:183km⇒H28,H29年度:258km)



※電子基準点は、国土地理院によるGNSS観測点で、観測路線近傍に設置されている箇所を表示。

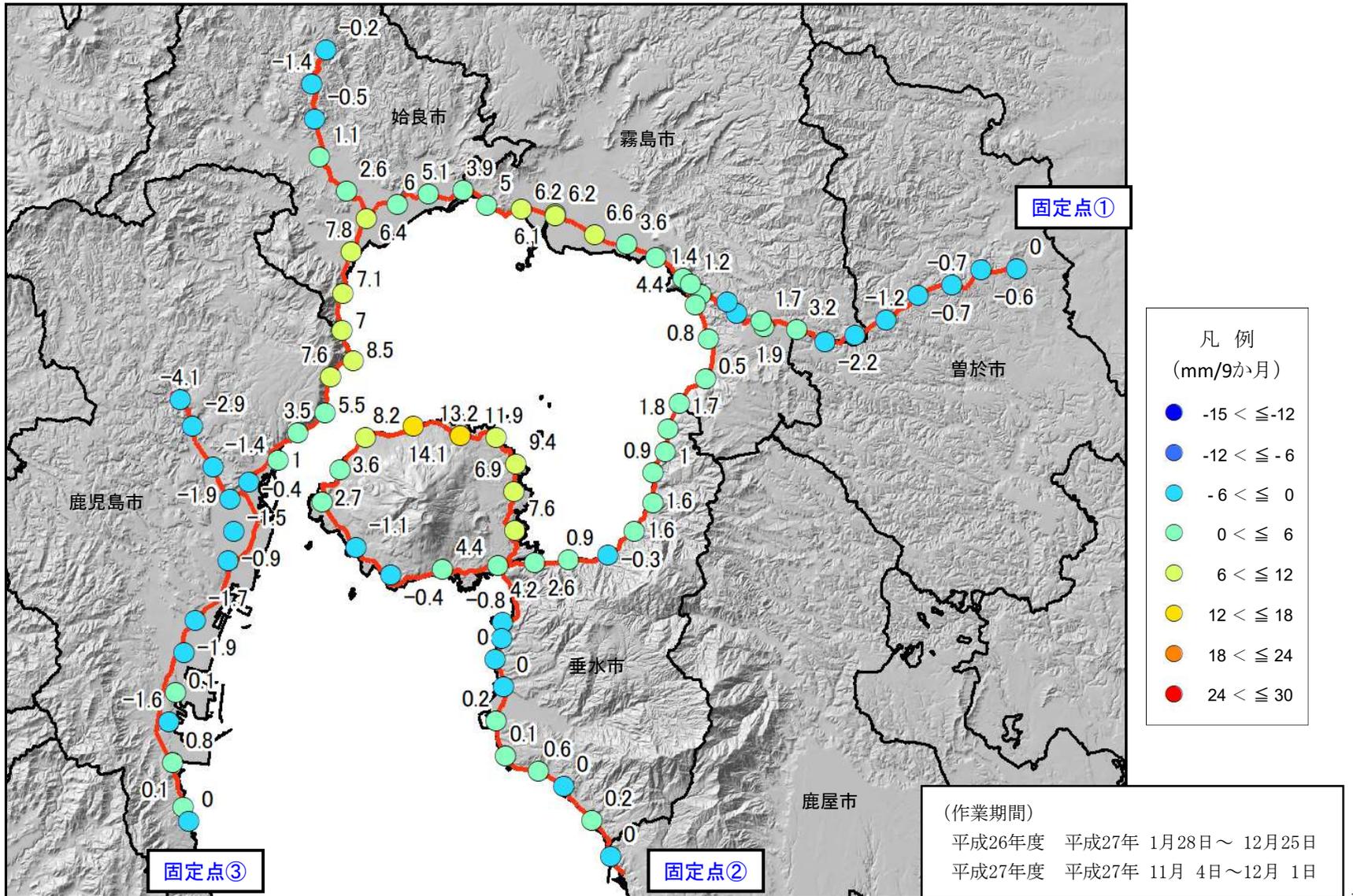
4. 始良カルデラ周辺の水準測量結果 [概要]



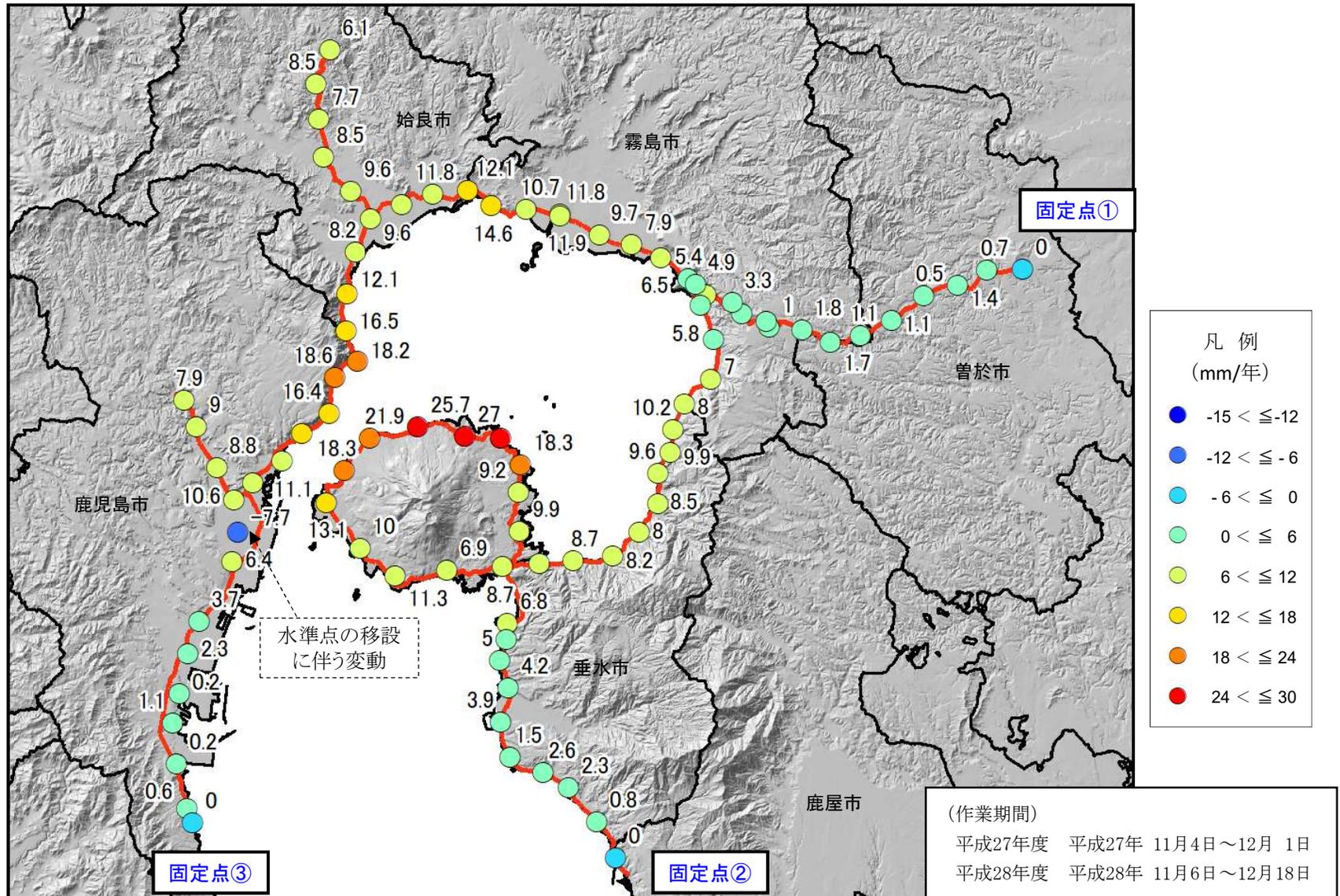
水準測量路線図(Omori,1916の大正噴火に伴う地盤沈下量に加筆)

4. 始良カルデラ周辺の水準測量結果 [H27年度上下変動量:3点固定]

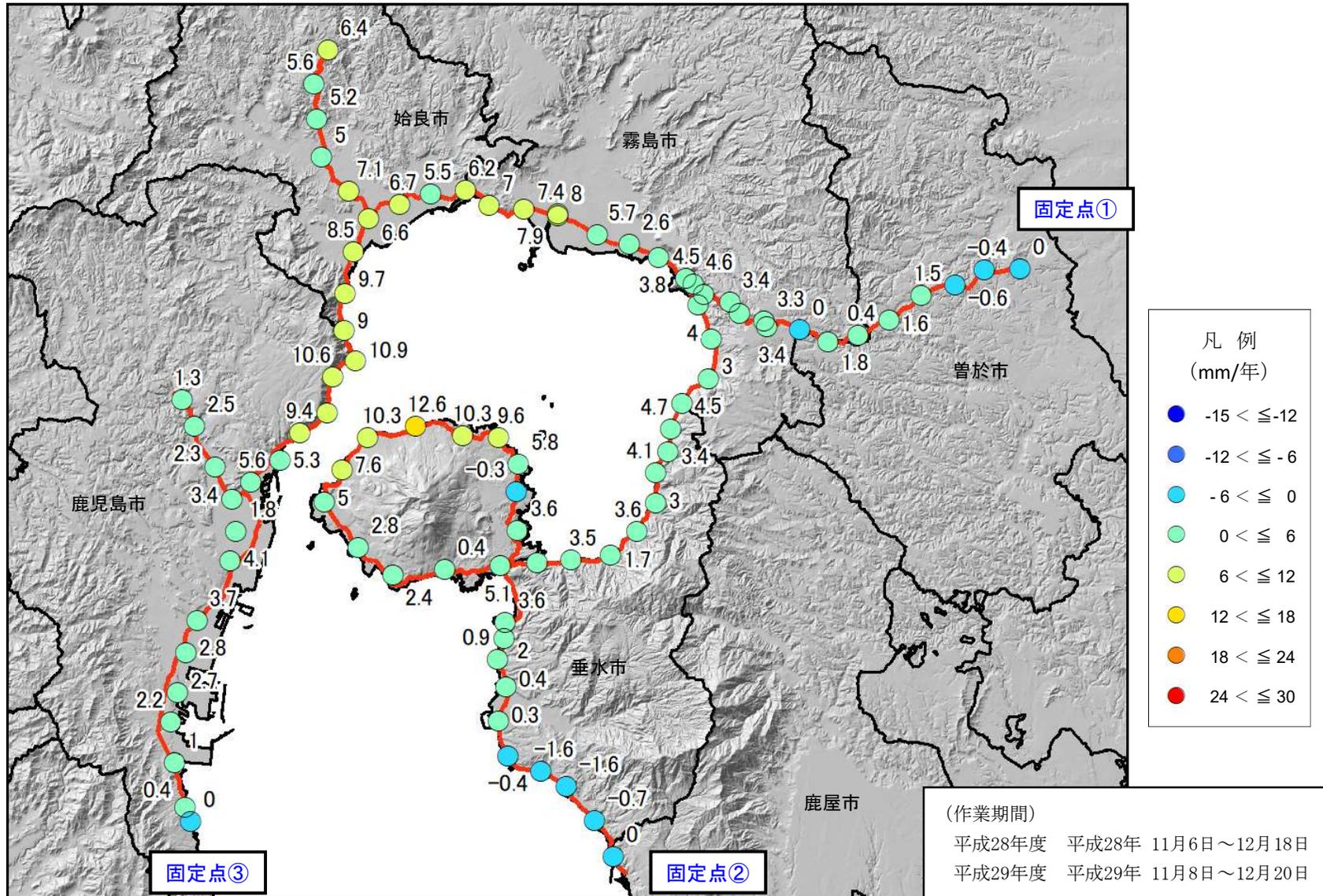
- 固定点を3点として、各年度の上下変動量を確認した結果、GNSS観測と同様の始良カルデラを中心とする隆起傾向が認められる。
- H28年度の上下変動量(H28年度標高-H27年度標高)については、変動量が大きく、桜島北部の隆起量は最大で約27mmとなる。



4. 始良カルデラ周辺の水準測量結果 [H28年度上下変動量:3点固定]

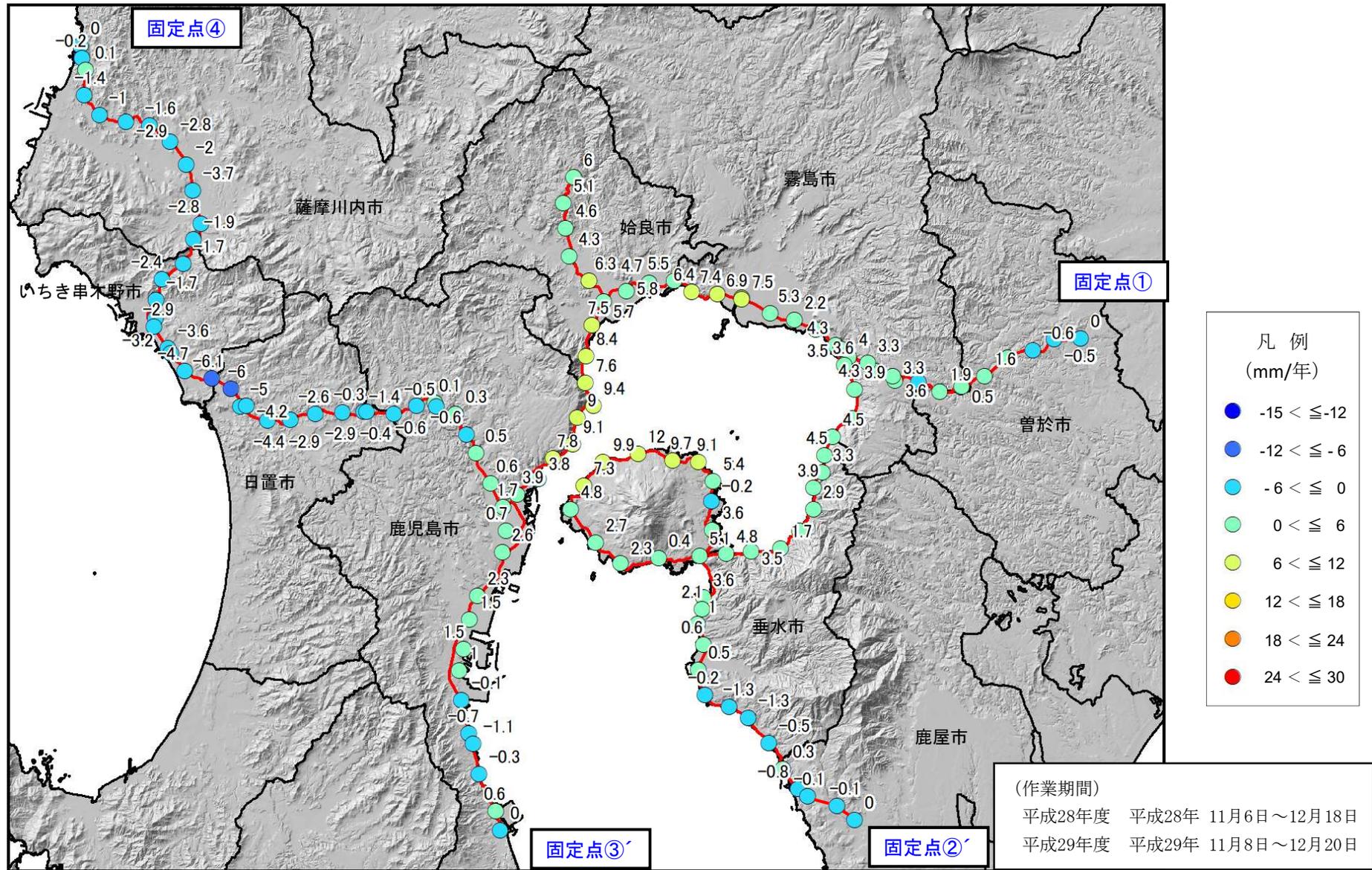


4. 始良カルデラ周辺の水準測量結果 [H29年度上下変動量:3点固定]

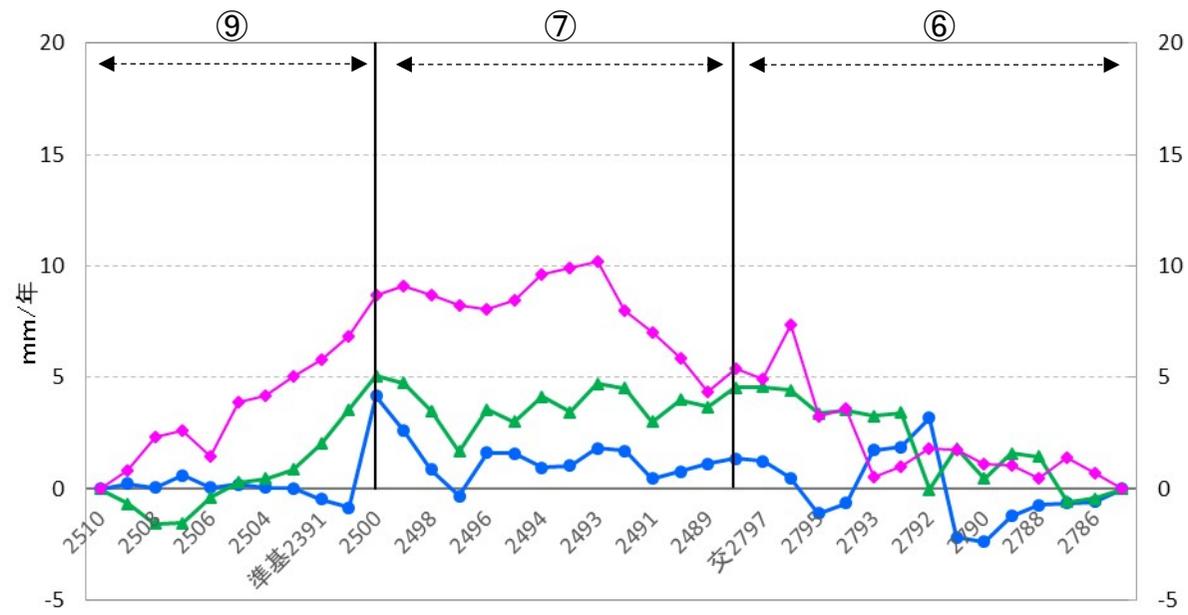
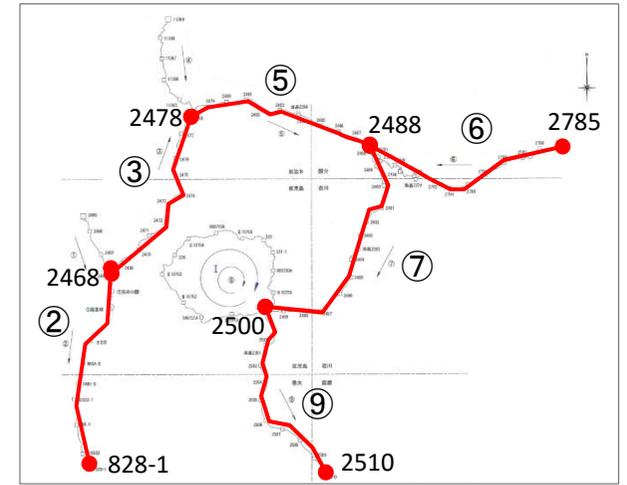
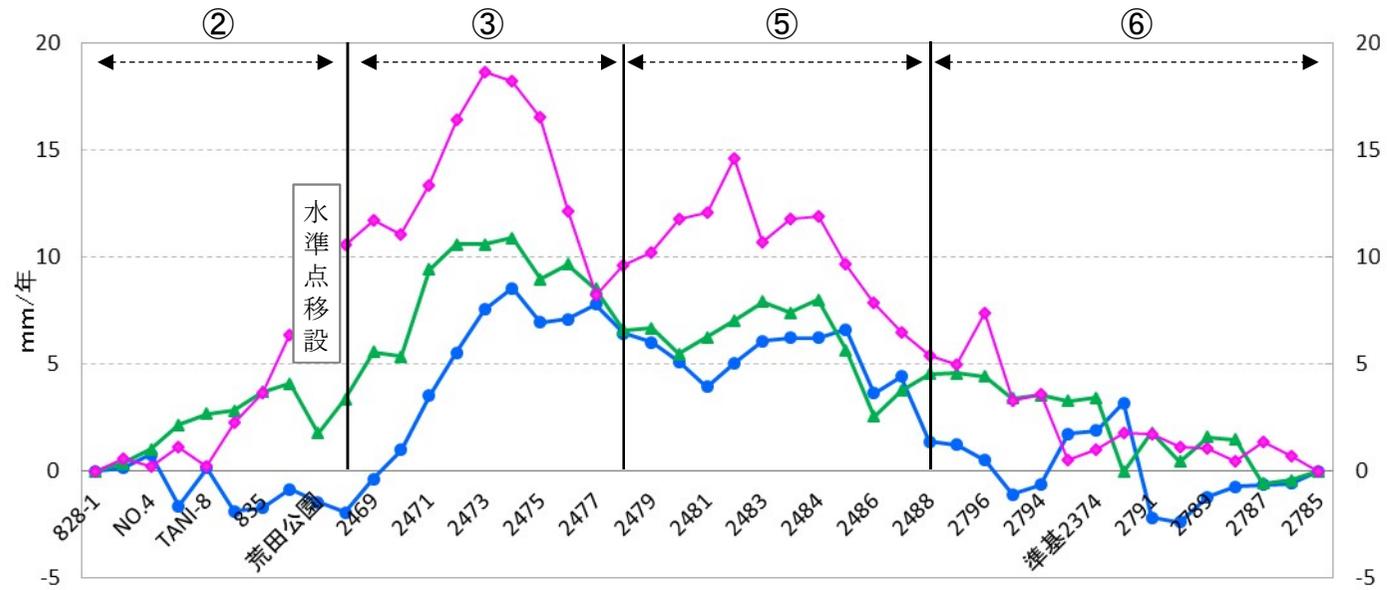


4. 始良カルデラ周辺の水準測量結果 [H29年度上下変動量:4点固定]

・ 測量路線を延長したデータを用いて、広範囲の検討として、3点固定の上下変動量を比較すると、始良カルデラ周辺の隆起量は同程度であることが確認された。

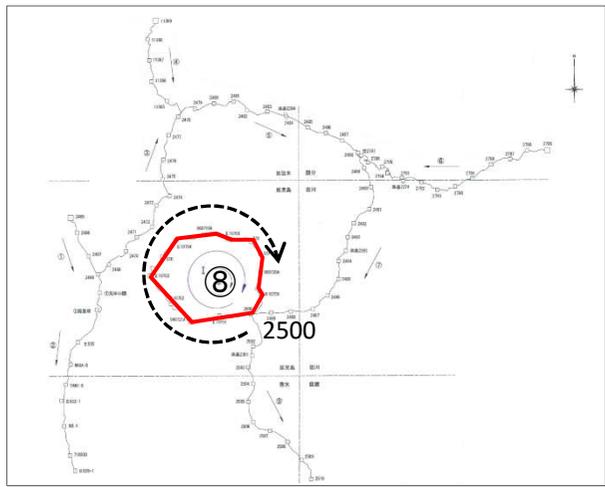
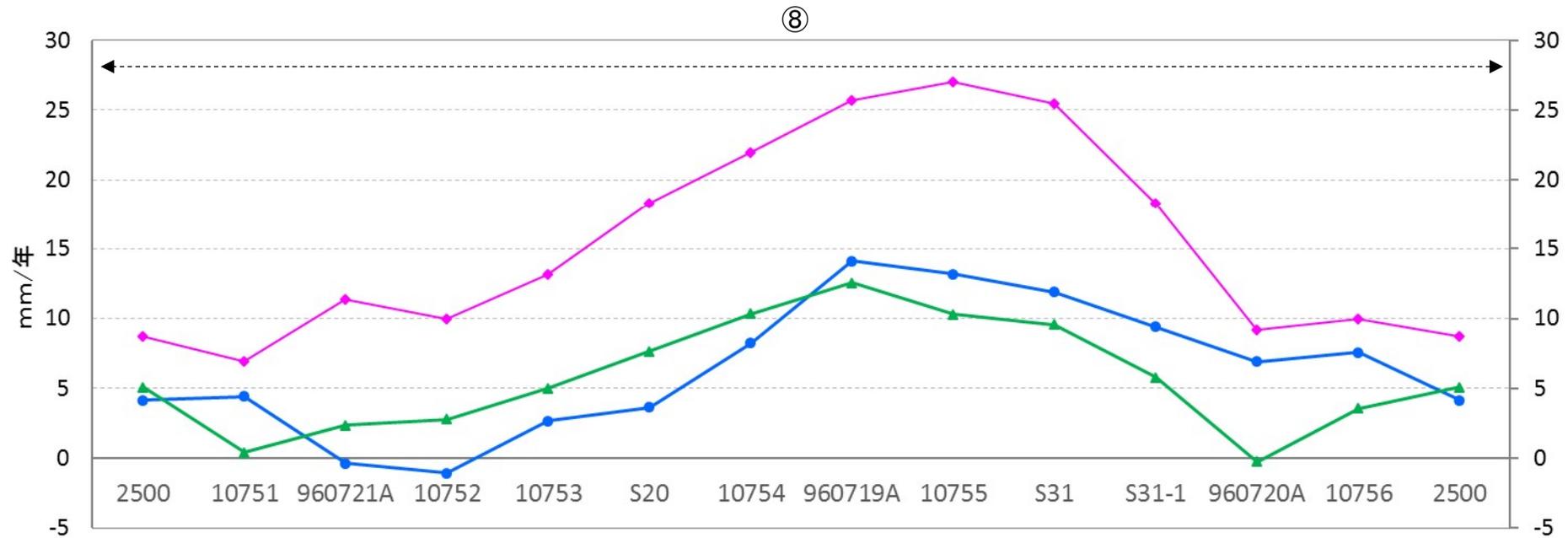


4. 始良カルデラ周辺の水準測量結果 [上下変動量の推移: 3点固定]



- 凡例
- ◆ H27年度 (mm/9か月)
 - ◆ H28年度 (mm/年)
 - ◆ H29年度 (mm/年)

4. 始良カルデラ周辺の水準測量結果 [上下変動量の推移: 3点固定]



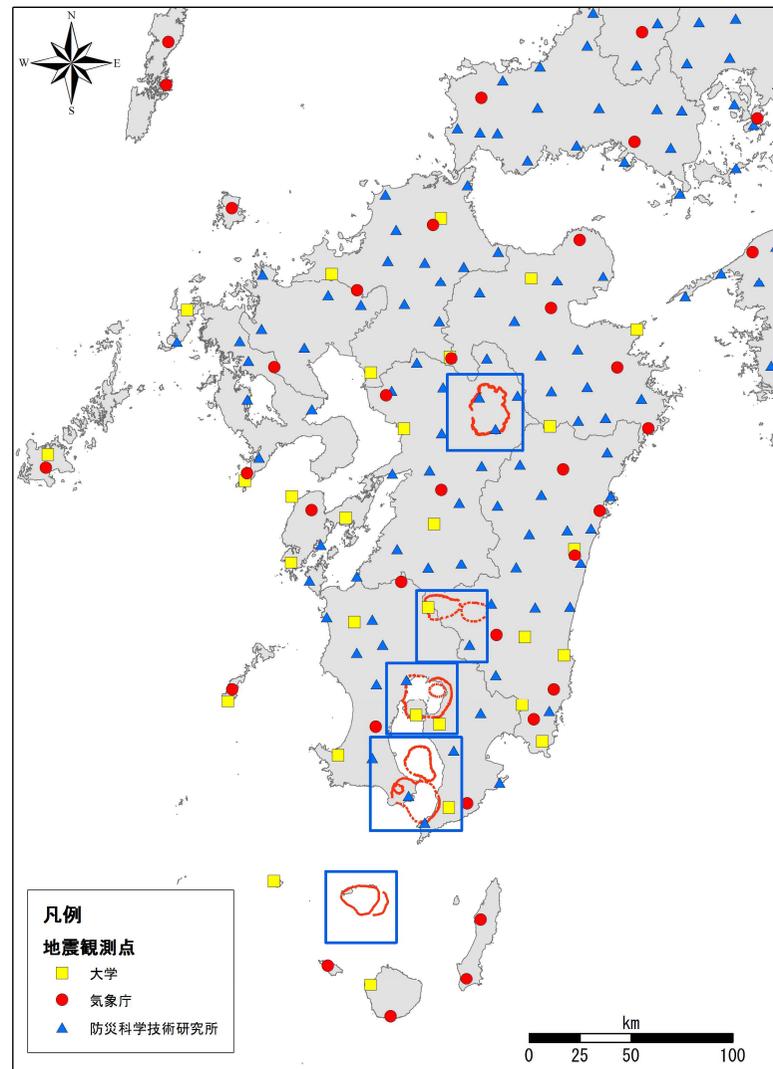
凡 例

- ◆ H27年度 (mm/9か月)
- H28年度 (mm/年)
- ▲ H29年度 (mm/年)

余 白

5. 地震検知能力の検討 [概 要]

- 地震活動の評価において、観測点数の違いが評価結果に及ぼす影響を把握しておくことは重要であることから、各カルデラ火山における微小地震の検知能力の検討を行った。
- 検討にあたっては、(1)予測解析法による検知可能なマグニチュードM及び(2)地震観測記録に基づくMcの算出を行った。



地震観測点は、地震調査研究推進本部の地震観測点一覧(2017年4月1日現在、地震調査研究推進本部調べ)による
http://www.jishin.go.jp/database/observation_database/spots/

5. 地震検知能力の検討 [予測解析法の概要]

予測解析法による検知可能なマグニチュードM

○石井・高木 (1978)を参考とした検知可能な最小マグニチュードの評価方法

①ある震源を仮定し、渡辺 (1971) の式による地震波最大振幅を算出

■経験的に導かれる地震波最大振幅とマグニチュードの関係式

$$0.85 M - 2.50 = \log A_v + 1.73 \log r$$

M: マグニチュード, A_v : 速度振幅 (cm/sec:kine),

r: 震源距離 (km) < 200km

②地震波最大振幅が観測点の検出可能振幅を超える場合にP波初動到達時刻が検出でき、検出できる観測点が4点以上ある時に震源を決定できるものとする

③震源決定される地震について、Wolberg (1967) の予測解析法※を用いて、震源位置と発生時間の誤差を算出し、震源決定精度を満たす最小のマグニチュードを求める

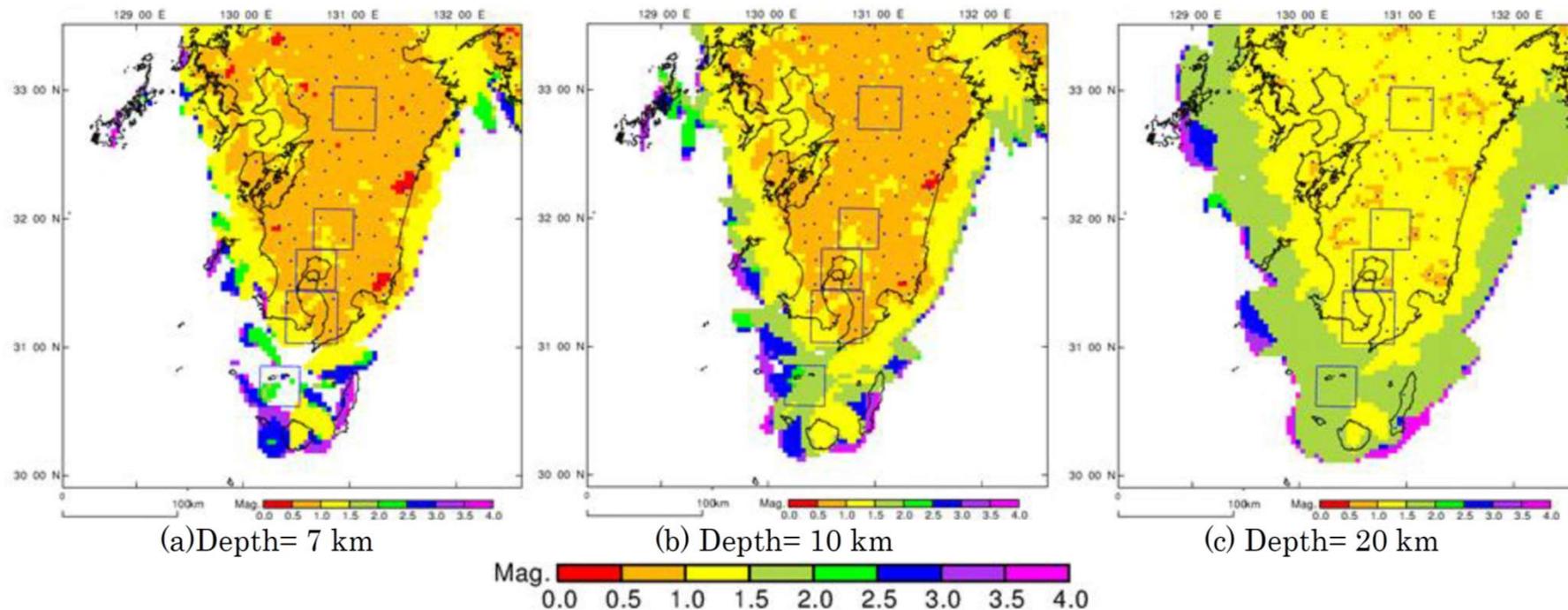
※予測解析法は、観測方程式を最小自乗法で解く際の分散共分散行列の性質を利用して精度を算出。初動データの逐次近似による解を求めることなしに、与えられたデータの組だけから直接未知量の標準偏差(震源決定精度)を計算可能。

表一 計算条件

項目	条件	備考
グラウンドノイズレベル	全点 5 μ kine	後藤他(2002)
検出可能振幅	全点 65 μ kine	
マグニチュード (M)	M=0.1~4.0, 0.1ステップ	渡辺(1971)の式
初動読み取り時間標準偏差(σT)	0.05秒	石井・高木(1978)
速度構造標準偏差(σV)	0.1km/sec	
震源深さ標準偏差(σZ)	0.1km	
震源決定精度	震源時間誤差 0.5秒未満	気象庁
地震波速度分布	vjma2001	
検討範囲	400km × 400km	
震源の深さ	7km, 10km, 20km	
震央水平間隔	東西南北とも 4km間隔	
直交座標系	国家座標系 II 系	TM 31N, 131E

5. 地震検知能力の検討 [予測解析法の結果]

- 各カルデラ火山について、予測解析法による検知可能なマグニチュードMを計算した結果、阿蘇、加久藤・小林、始良、阿多周辺では概ねM1より大きい地震を、鬼界周辺ではM1.5～2.5より大きい地震を検知可能であり、海域に位置する(地震計が少ない)鬼界の地震検知能力が相対的に低い傾向にある。



対象カルデラ	検知可能なマグニチュードMの範囲		
	D=7km	D=10km	D=20km
阿蘇カルデラ	M>0.5	M>0.5	M>1.0
加久藤・小林カルデラ	M>0.5	M>0.5	M>1.0
始良カルデラ	M>0.5	M>0.5	M>1.0
阿多カルデラ	M>0.5	M>0.5	M>1.0
鬼界	M>2.5	M>1.5	M>1.5

5. 地震検知能力の検討 [Mc概要]

漏れなく地震を検知するマグニチュードの下限 (Mc: Magnitude completeness)

○Wiemer & Wyss (2000)によるMcの計算方法

•マグニチュードMの頻度分布は、基本的に下記のグーテンベルグ-リヒターの式 (G-R式) で表される。

$$\log_{10}N = a - bM$$

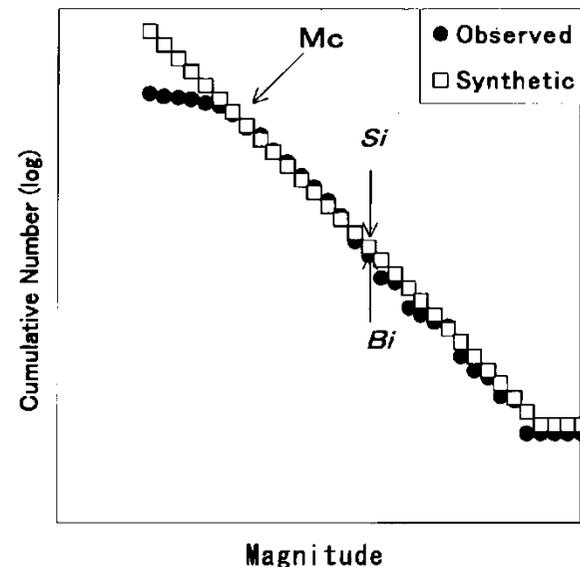
•このことを利用し、マグニチュード別の地震回数の積算曲線が直線からずれる点を、漏れなく地震を検知するマグニチュードの下限 (Mc: Magnitude completeness) として求める (右上図参照)。

•Mi以上の地震について、マグニチュードの積算が曲線からずれる程度を次式のRにより表し、これをMcの適合度と定義。

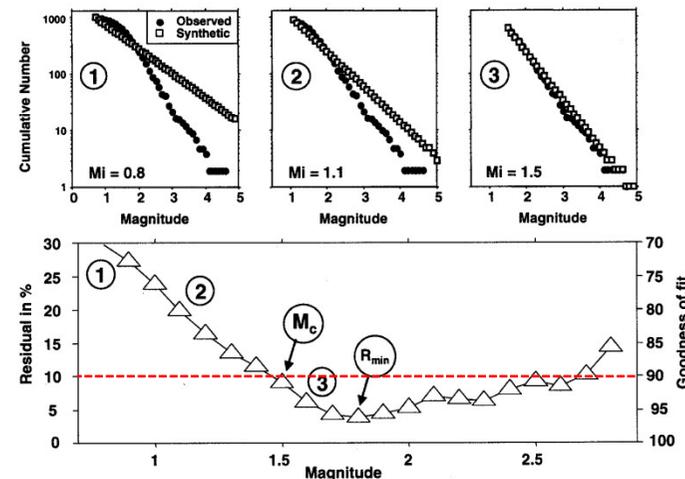
$$R(a, b, Mc) = \left[1 - \frac{\sum_{i=Mc}^{Mmax} |B_i - S_i|}{\sum_i B_i} \right] \times 100$$

•ここで、Bi, SiはそれぞれMi以上の地震における、マグニチュードのi番目の階級Miまでに観測された積算地震数とG-R式から予測される積算地震数を示す。また、係数a, bは、Mi以上の地震データから求められたG-R式の定数を、Mmaxは、マグニチュードの最大の階級を表す。

•Miを変化させるにつれて、適合度Rは変化するが、Wiemer & Wyss(2000)では、Miを小さい方から次第に増加させ、適合度が90%に達した時をMcとしている (右下図参照)。



Mcを求める概念図

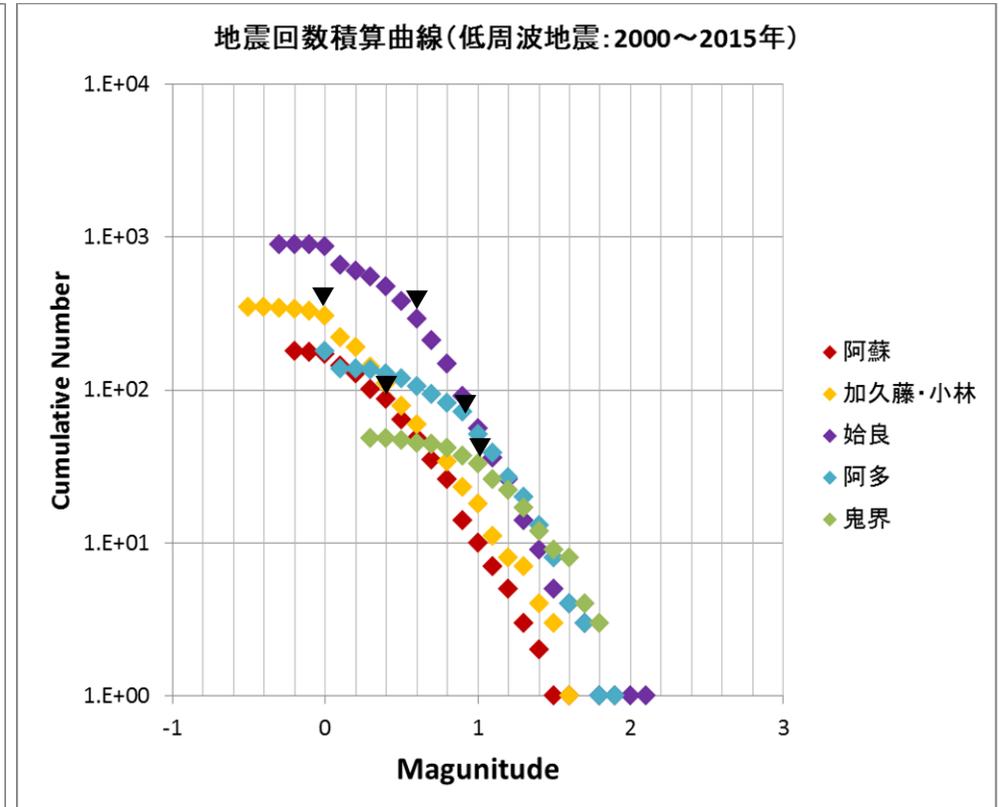
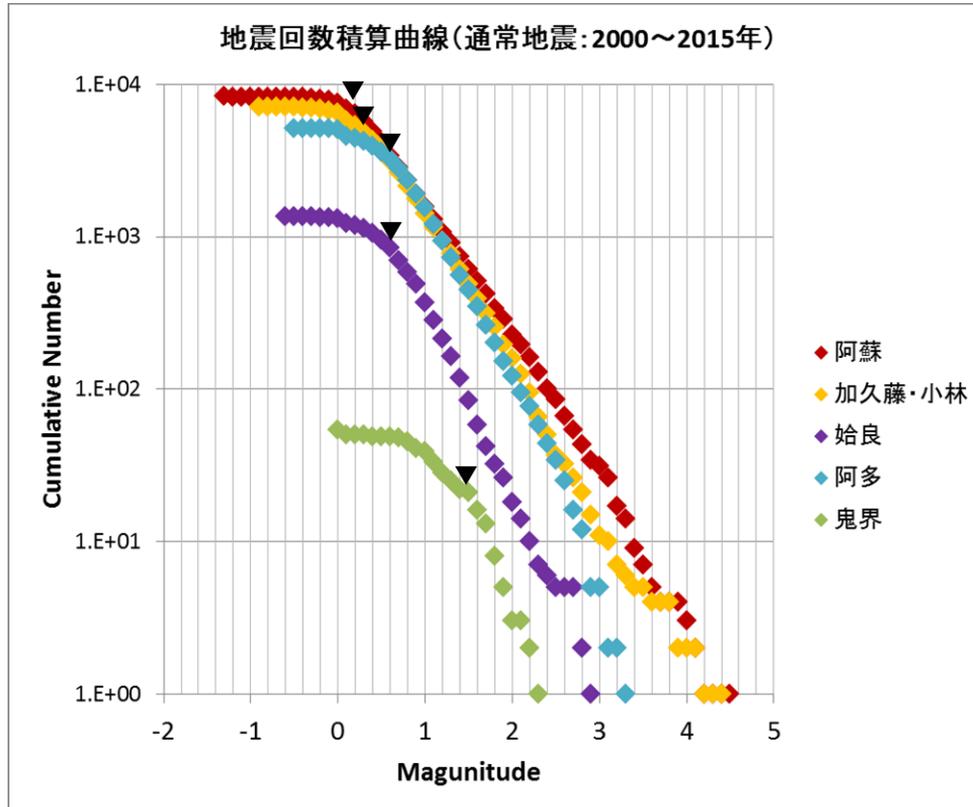


適合度Rを基に最小Mcを推定する方法の概念図

5. 地震検知能力の検討 [Mc計算結果]

- 各カルデラ火山について、通常地震及び低周波地震のMcを計算した結果、阿蘇、加久藤・小林、始良、阿多周辺で1未満、鬼界周辺で1～2となり、海域に位置する(地震計が少ない)鬼界の地震検知能力が相対的に低い傾向にある。

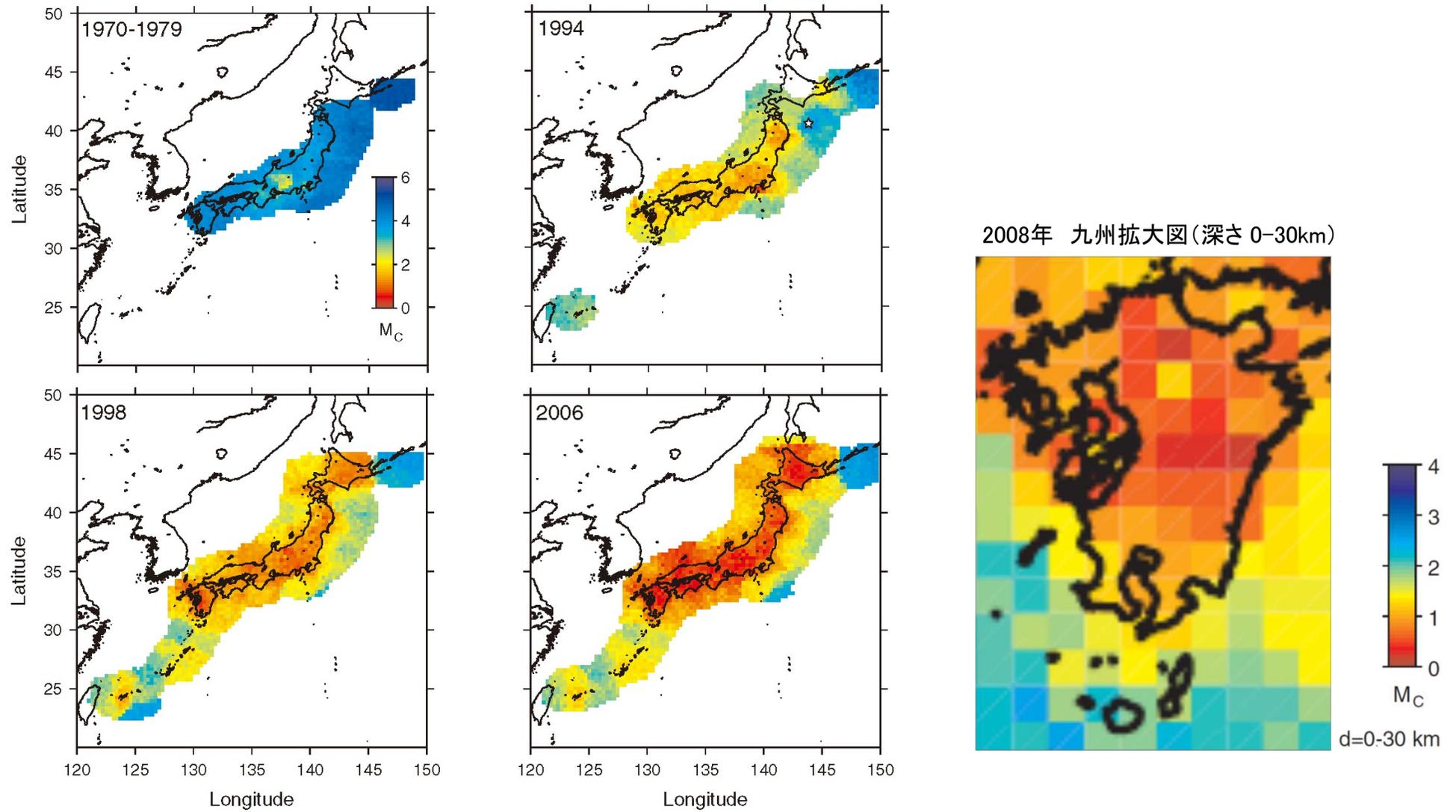
各カルデラの地震観測範囲におけるMc(2000～2015年の深さ50km以浅の震源データより計算)



条件	阿蘇		加久藤・小林		始良		阿多		鬼界	
	通常地震	低周波地震	通常地震	低周波地震	通常地震	低周波地震	通常地震	低周波地震	通常地震	低周波地震
適合度90%	0.2	0.4	0.3	0.0	0.6	0.6	0.6	0.9	1.5	1.0

5. 地震検知能力の検討 [既往文献との比較]

• Nanjo et al. (2010)によると、 M_c の値は地震観測網の整備とともに年々小さくなっており、2008年以降では、阿蘇、加久藤・小林、始良、阿多周辺で1程度、鬼界周辺で1~2程度とされており、当社評価と概ね整合的である。



日本列島の M_c の変遷 (Nanjo et al., 2010)

5. 地震検知能力の検討 [まとめ]

- 検討の結果、(1) 予測解析法による検知可能なマグニチュードM及び(2) 地震観測記録に基づくMcは概ね整合的である。
- 海域に位置する鬼界については、その他のカルデラ火山に比べて地震観測点数が少なく、地震検知能力はわずかに低いものの、いずれのカルデラ火山についても規模の大きな地震については検知できることを確認した。
- 地震活動の評価にあたっては、各カルデラの地震検知能力を踏まえた上で引き続きモニタリングを実施していく。

対象カルデラ	(1) 予測解析法による検知可能なM	(2) 地震観測記録に基づくMc
阿蘇カルデラ	M>0.5~1.0	0.5未満
加久藤・小林カルデラ	M>0.5~1.0	0.5未満
始良カルデラ	M>0.5~1.0	1.0未満
阿多カルデラ	M>0.5~1.0	1.0未満
鬼界	M>1.5~2.5	2.0未満

6. GNSS観測機器の設置 [設置状況]

＜H26・H27・H28年度実績及びH29年度状況＞

項目	内容
目的	観測点の増設により地殻変動データに係る精度の向上を図ること
H26年度 H27年度 H28年度 実績	竹 島：国土地理院の仕様と同じ GNSS観測機器を設置 黒 島：同 上 吉野町：同 上
H29年度 状況	竹 島：データを蓄積して評価を補完 黒 島：同 上 吉野町：同 上



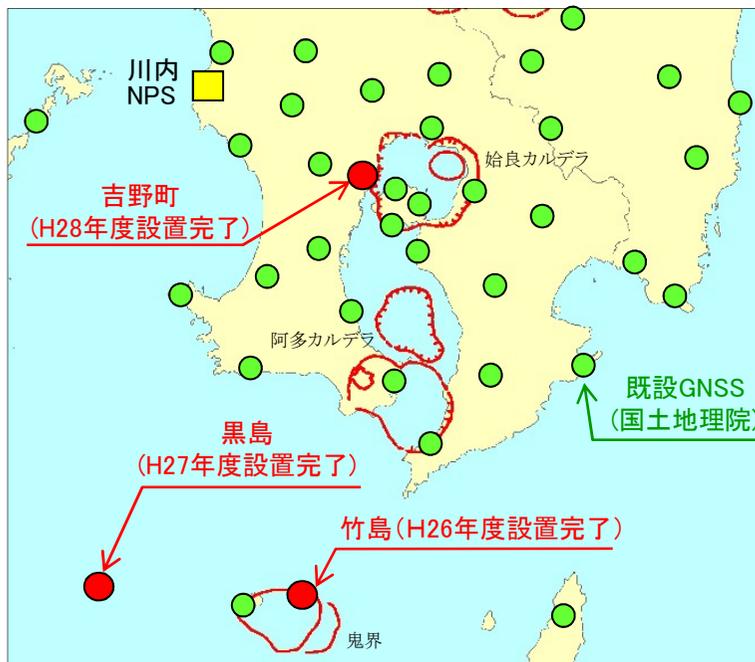
竹島の機器設置状況（H26年度）



黒島の機器設置状況（H27年度）



吉野町の機器設置状況（H28年度）

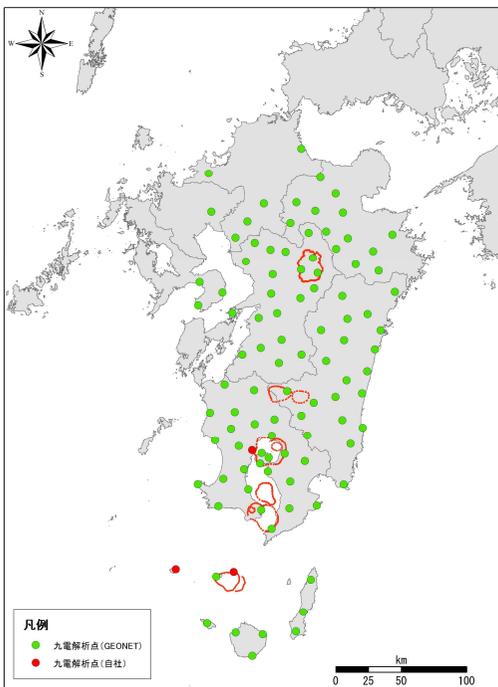
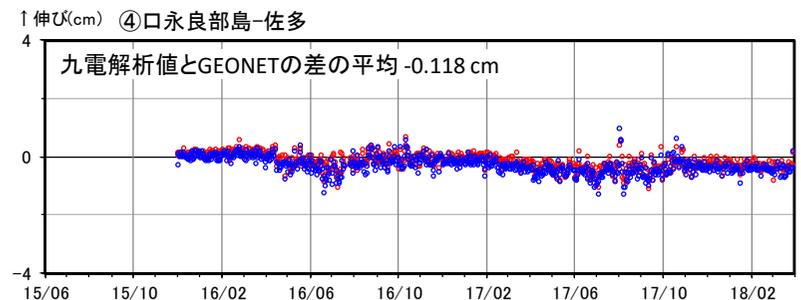
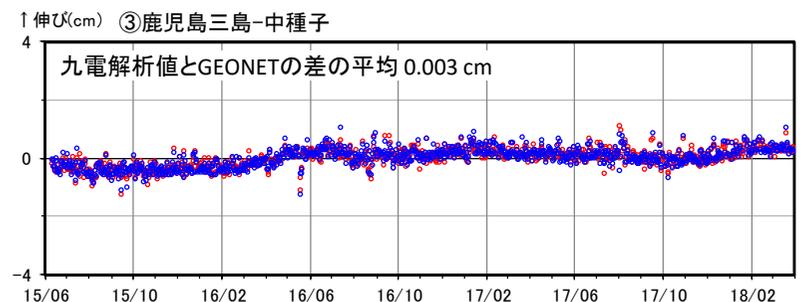
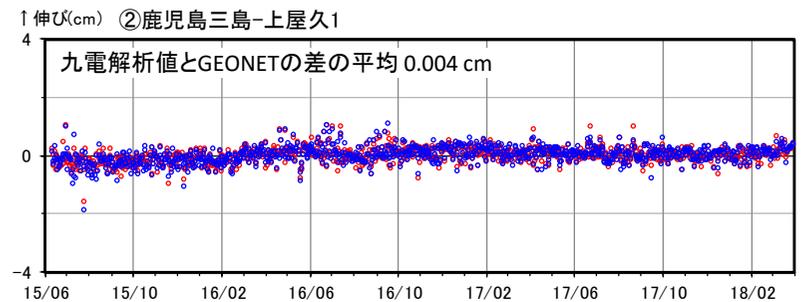
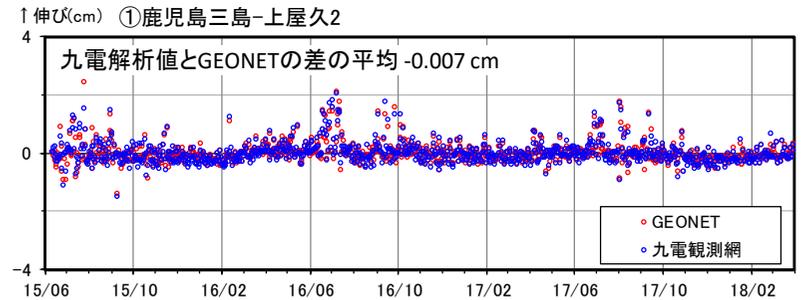


設置地点の位置図

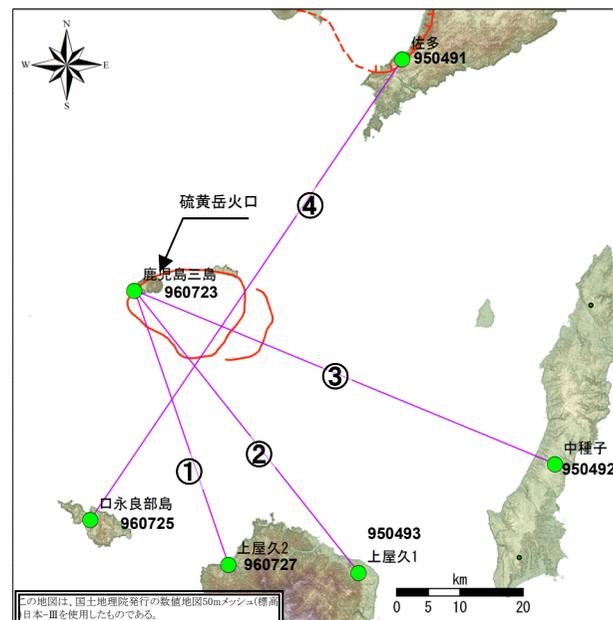
6. GNSS観測機器の設置 [解析処理について]

- ・ 当社観測点(竹島・黒島・吉野町)については、GEONETと同様のGNSS解析ソフトウェア(Bernese※)を用いた当社独自の解析を実施。
- ・ GEONETと当社解析では、主に解析点数の違い(九電:九州地方約100点, GEONET:全国約1300点)や解析固定点の違い(九電:前原・行橋・上屋久1, GEONET:つくば1)が異なる。
- ・ なお、GEONETデータと当社解析値を比較した場合、双方の解析結果は概ね同等である。

※Bernese: スイスのBern大学の研究者らにより開発されたGNSS解析ソフトウェア。測地学分野の研究者により、よく利用されるソフトウェアのひとつであり、解析の際、電離層、気象要素などの影響を補正し、精密な座標値を決定することが可能。

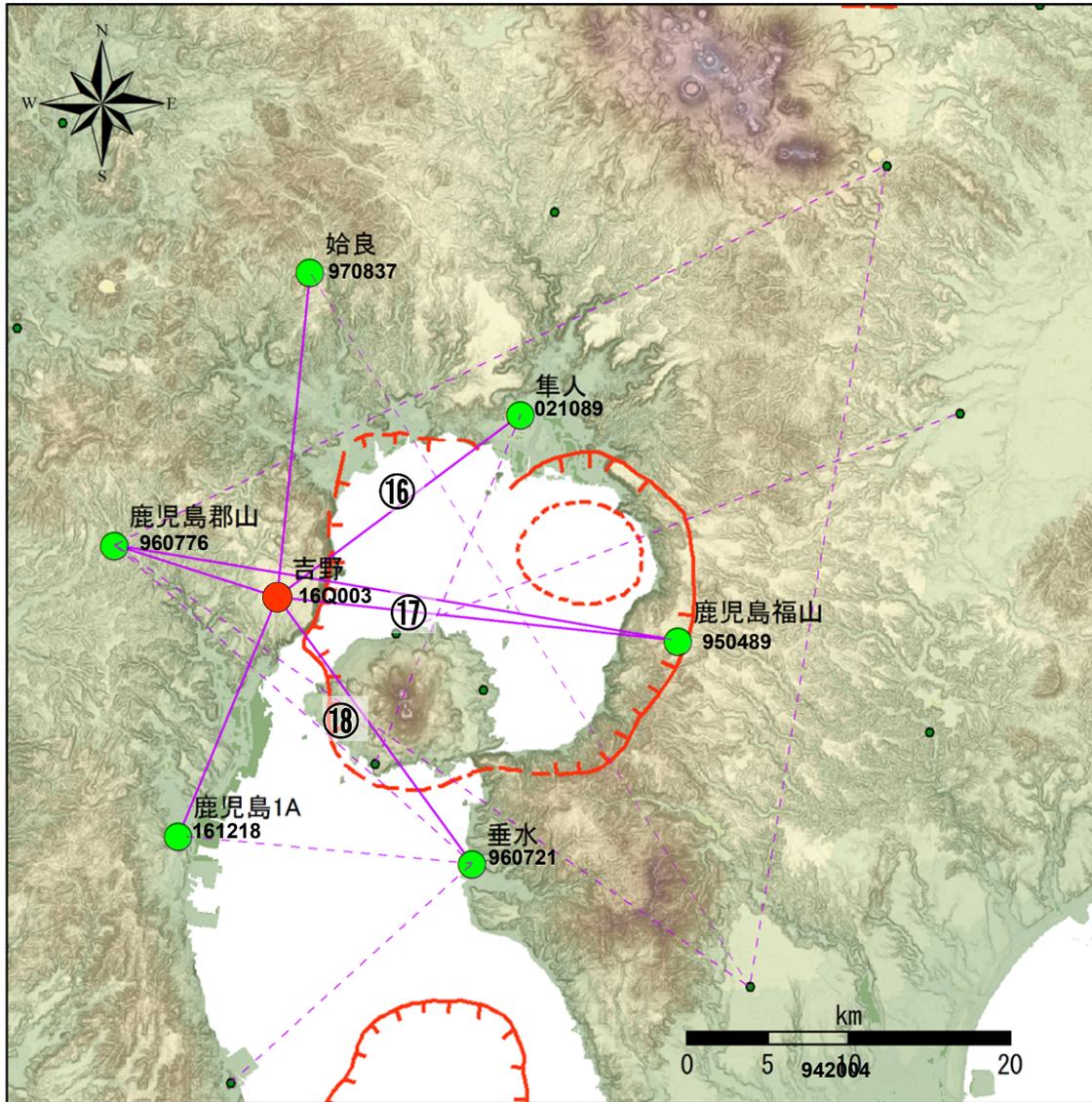


解析に用いる観測点の位置図



①～④基線位置図

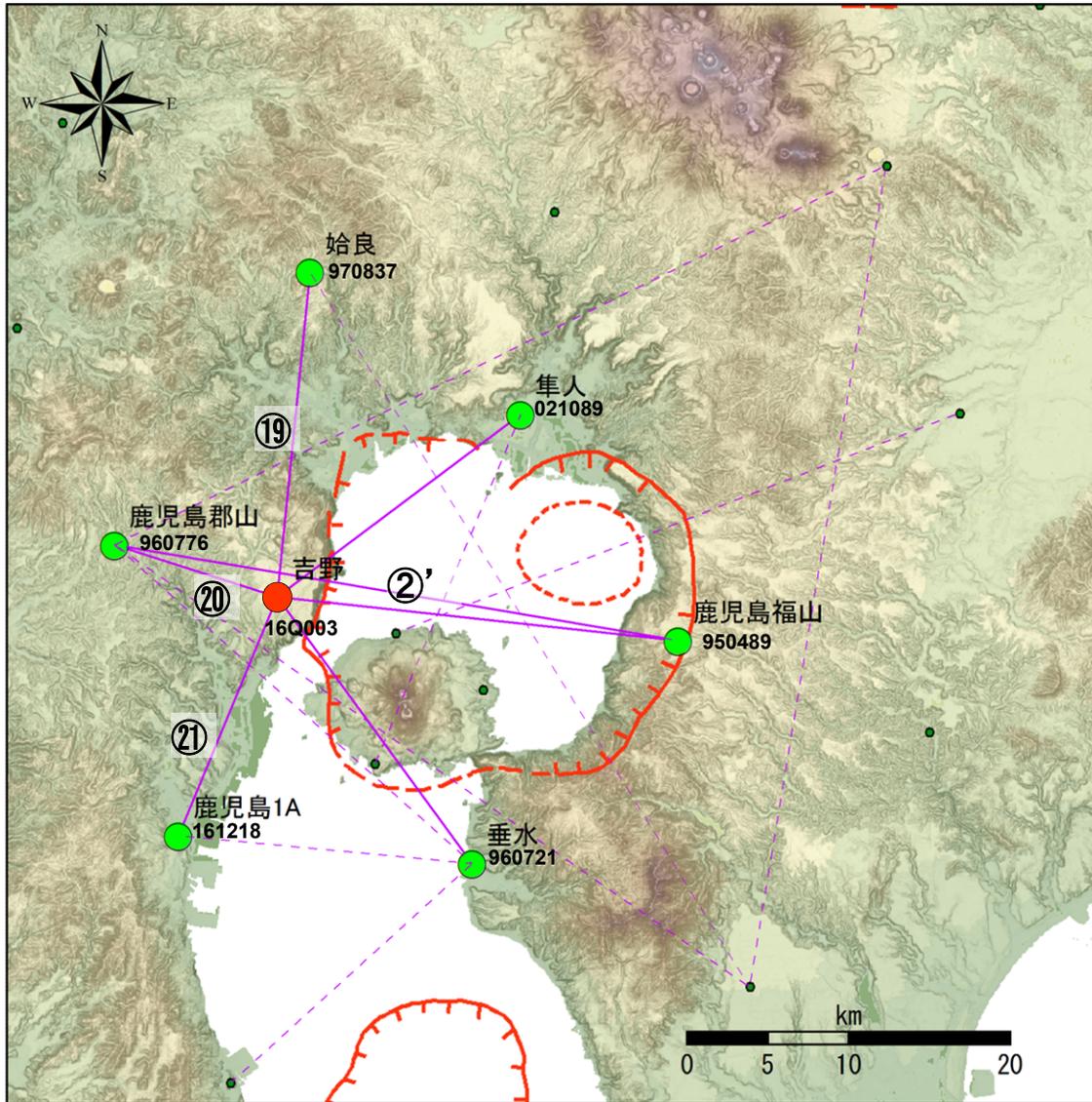
6. GNSS観測機器の設置 [始良カルデラ周辺の基線の追加]



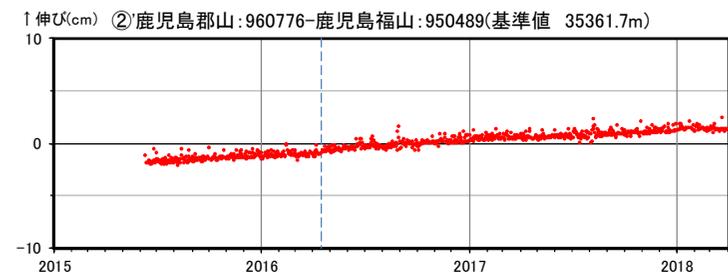
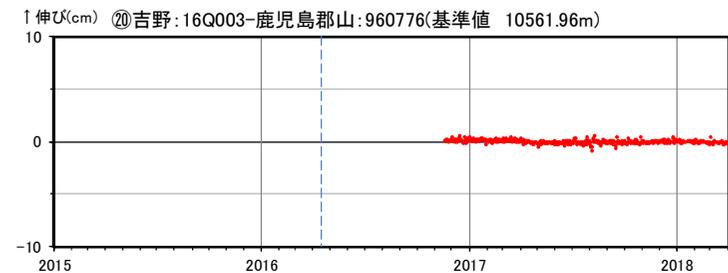
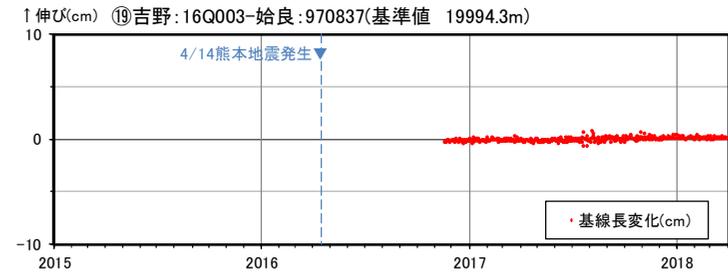
始良 GNSS連続観測による基線長変化(2015年06月11日~2018年03月31日)
 ※3 平均基線長を基準値とし、基準値からの変化量を表示

※1 ● は、2017年9月現在データ取得可能なその他のGNSS観測点
 ※2 破線はモニタリング月報におけるGEONETによる始良カルデラの観測基線

6. GNSS観測機器の設置 [始良カルデラ周辺の基線の追加]



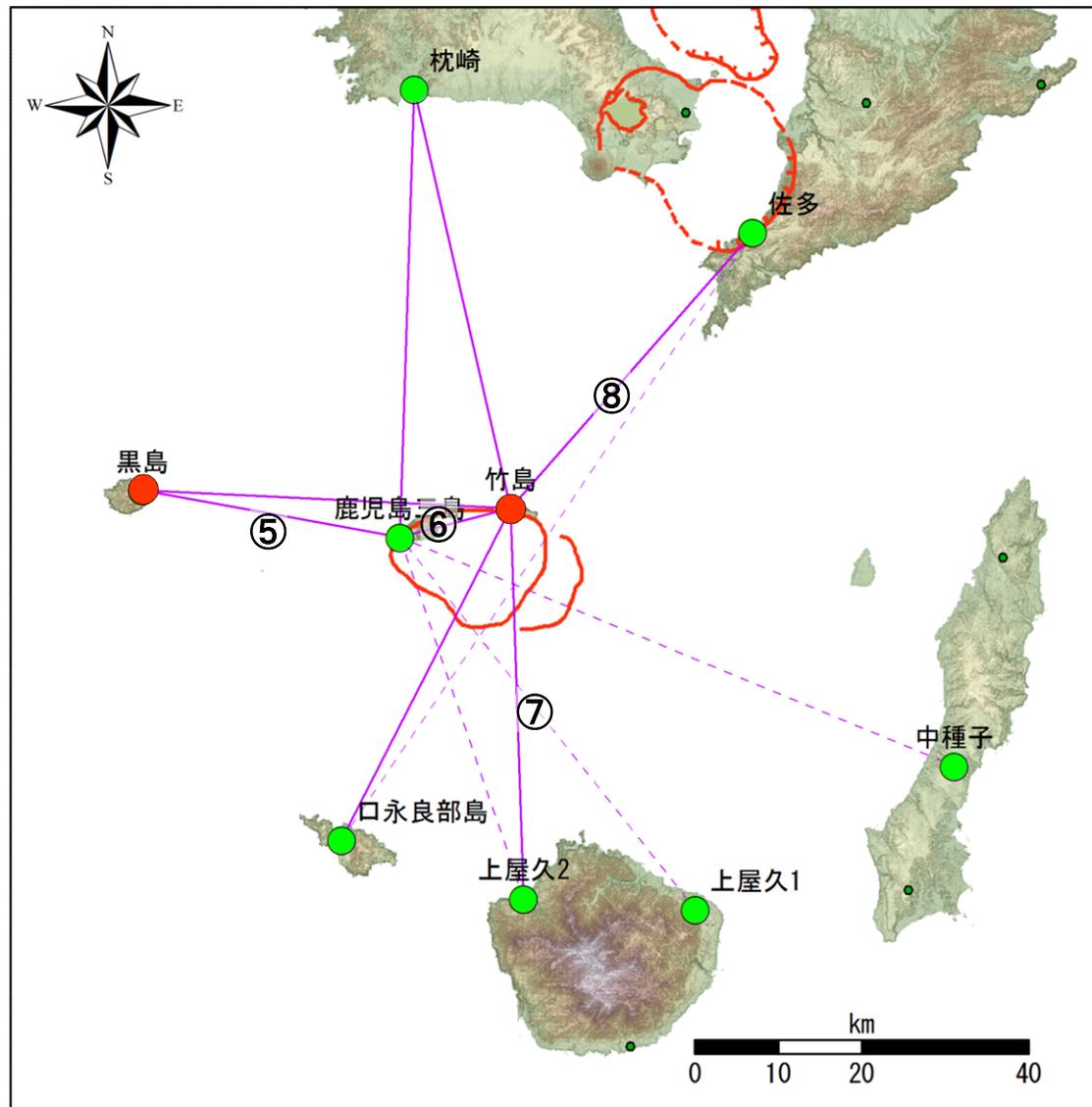
※1 ● は、2017年9月現在データ取得可能なその他のGNSS観測点
 ※2 破線はモニタリング月報におけるGEONETによる始良カルデラの観測基線



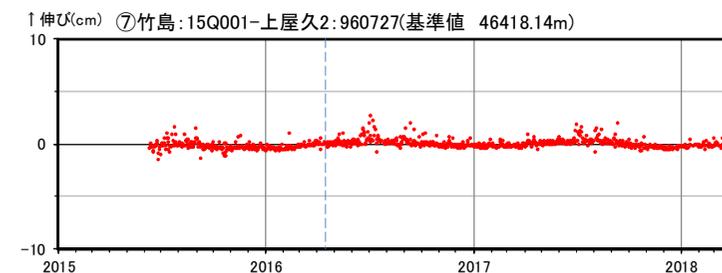
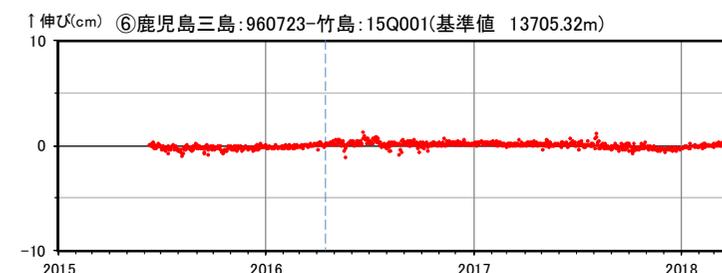
始良 GNSS連続観測による基線長変化(2015年06月11日~2018年03月31日)

※3 平均基線長を基準値とし、基準値からの変化量を表示

6. GNSS観測機器の設置 [鬼界周辺の基線]



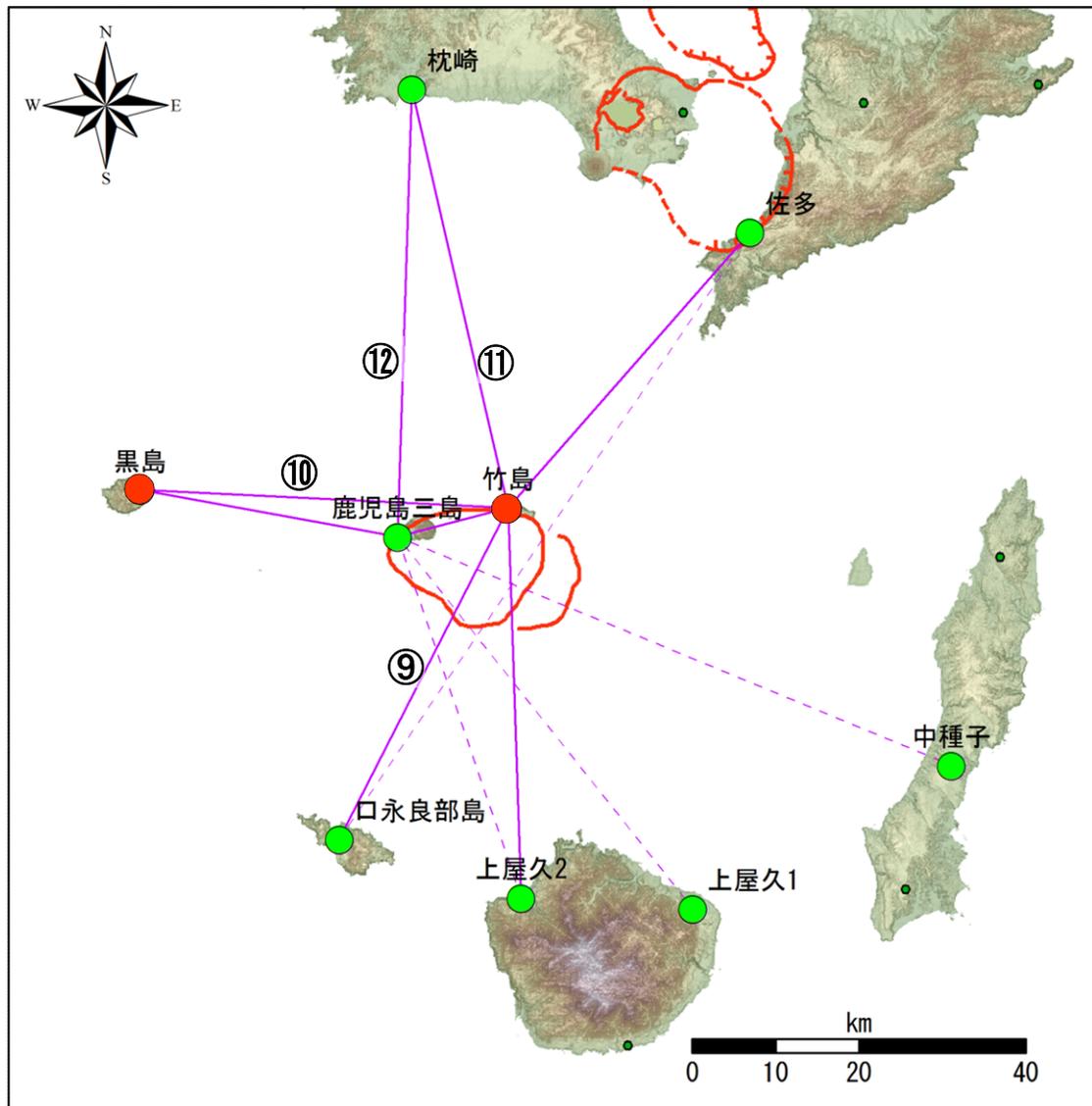
- ※1 ● は、2017年9月現在データ取得可能なその他のGNSS観測点
- ※2 破線はモニタリング月報におけるGEONETによる鬼界カルデラの観測基線
- ※3 黒島は2017年9月6日～10月31日までデータが取得できていない。



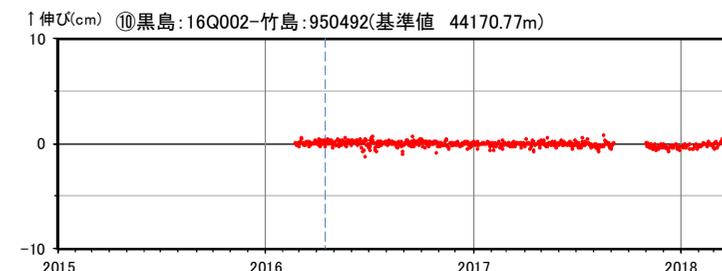
鬼界 GNSS連続観測による基線長変化(2015年06月11日～2018年03月31日)

※4 平均基線長を基準値とし、基準値からの変化量を表示

6. GNSS観測機器の設置 [鬼界周辺の基線]



- ※1 ● は、2017年9月現在データ取得可能なその他のGNSS観測点
- ※2 破線はモニタリング月報におけるGEONETによる鬼界カルデラの観測基線
- ※3 黒島は2017年9月6日～10月31日までデータが取得できていない。

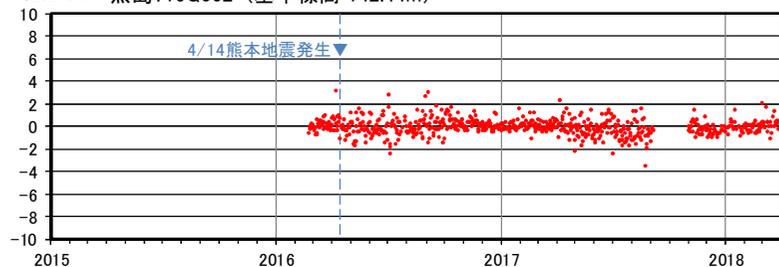


鬼界 GNSS連続観測による基線長変化(2015年06月11日～2018年03月31日)

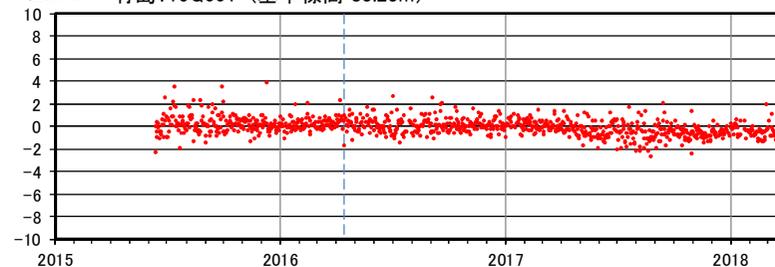
※4 平均基線長を基準値とし、基準値からの変化量を表示

6. GNSS観測機器の設置 [各観測点の鉛直変動]

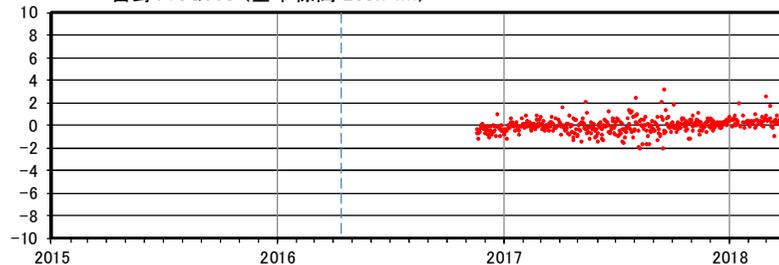
↑ 隆起(cm) 黒島:16Q002 (基準標高 142.44m)



↑ 隆起(cm) 竹島:15Q001 (基準標高 83.23m)



↑ 隆起(cm) 吉野:16Q003 (基準標高 263.74m)



鬼界 GNSS連続観測による上下動変化(2015年06月11日~2018年03月31日)

- ※1 黒島は2017年9月5日~10月31日期間のデータが取得できていない。
- ※2 平均標高を基準標高とし、基準標高からの変化量を表示