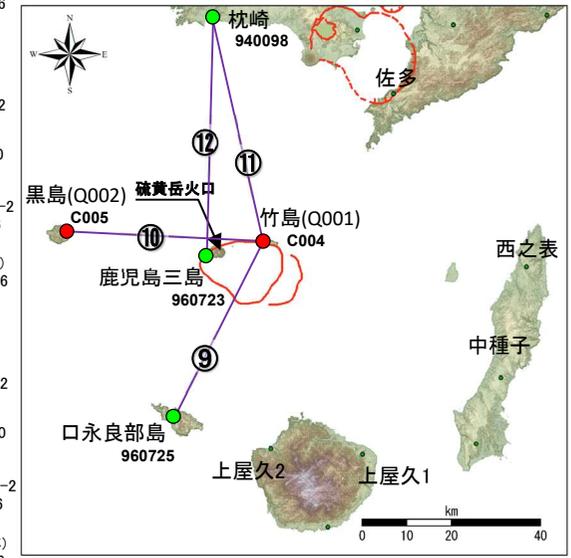
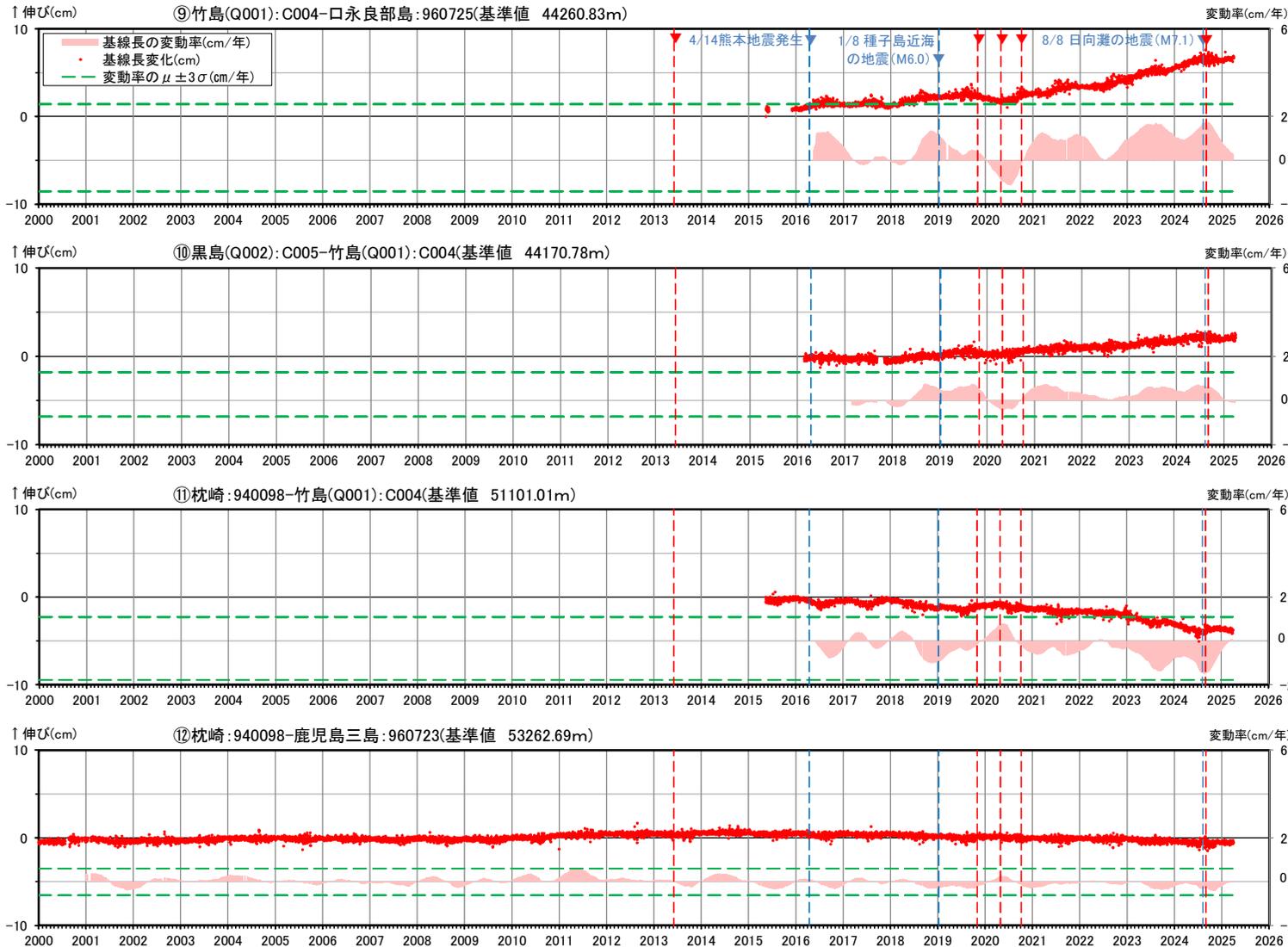


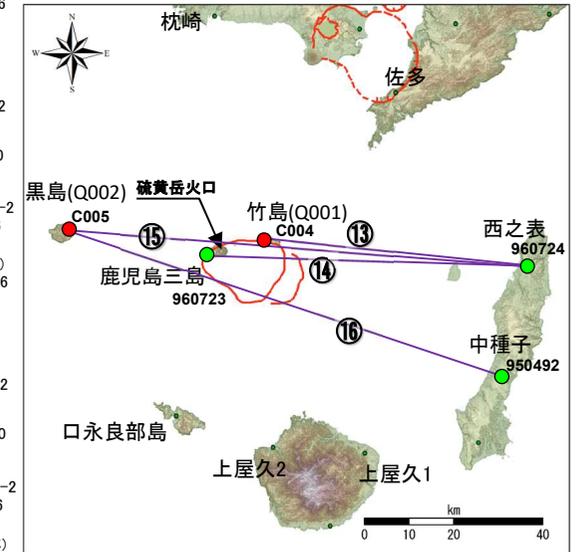
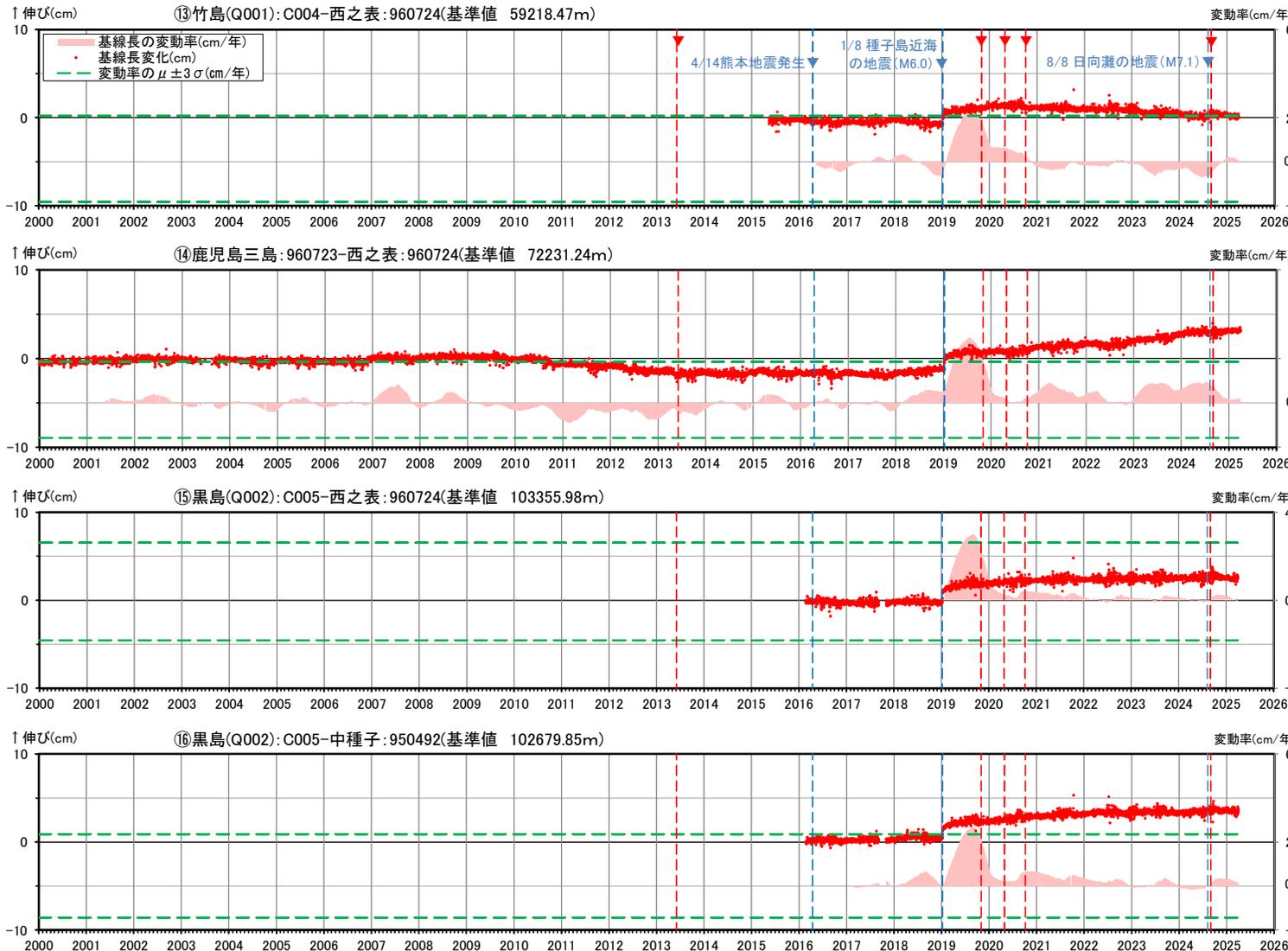
# 5. 統計的整理に基づく評価 鬼界 [地殻変動: 基線長変化]



- 国土地理院のGNSS観測点
- 九州電力のGNSS観測点
- ※1 基線⑨、⑪は2015年5月14日の基線長を、基線⑩は2016年2月22日の基線長を、基線⑫は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
- ※2 変動率は過去1年間のデータを用いて求めた近似式により算出
- ※3 2024年度以前(算出開始日～2024.3.31)の変動率の平均を $\mu$ 、標準偏差を $\sigma$ とした
- ※4 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日以降測停電が解消した12月2日から観測を再開
- ※5 黒島(Q002)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
- ※6 赤色の▼は薩摩硫黄島の主な噴火
- ※7 全ての基線において2016年4月の熊本地震と2024年8月8日の日向灘の地震時による変動を補正し図示

基線⑨～⑫の時系列変化

# 5. 統計的整理に基づく評価 鬼界 [地殻変動: 基線長変化]

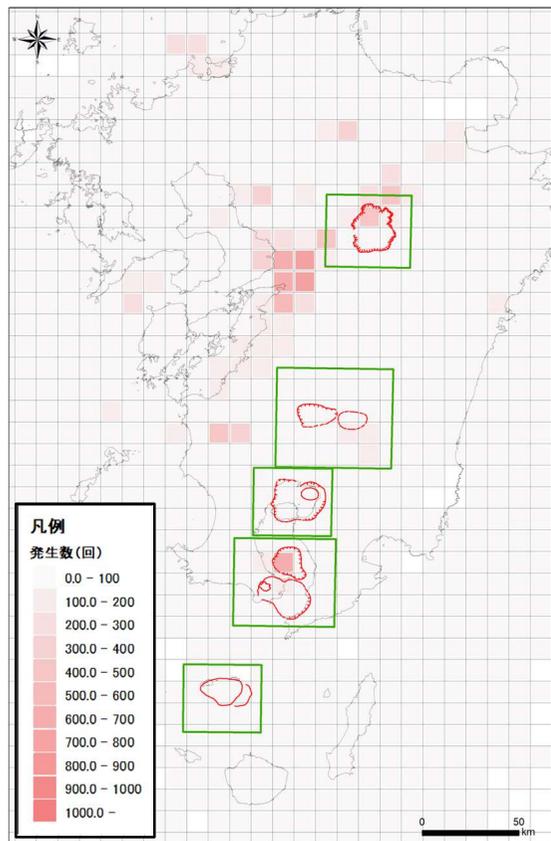


- 国土院のGNSS観測点
- 九州電力のGNSS観測点
- ※1 基線⑬は2015年5月14日の基線長を、基線⑮は2016年2月22日の基線長を、基線⑯は2016年2月23日の基線長を、基線⑭は2010年1月1日の基線長を基準値とし、基準値からの変化量を表示
- ※2 変動率は過去1年間のデータを用いて求めた近似式により算出
- ※3 2024年度以前(算出開始日～2024.3.31)の変動率の平均を $\mu$ 、標準偏差を $\sigma$ とした
- ※4 黒島(Q002)は2017年9月6日～10月31日までデータが取得できていない
- ※5 赤色の▼は薩摩硫黄島の主な噴火
- ※6 全ての基線において2016年4月の熊本地震と2024年8月8日の日向灘の地震時による変動を補正し図示

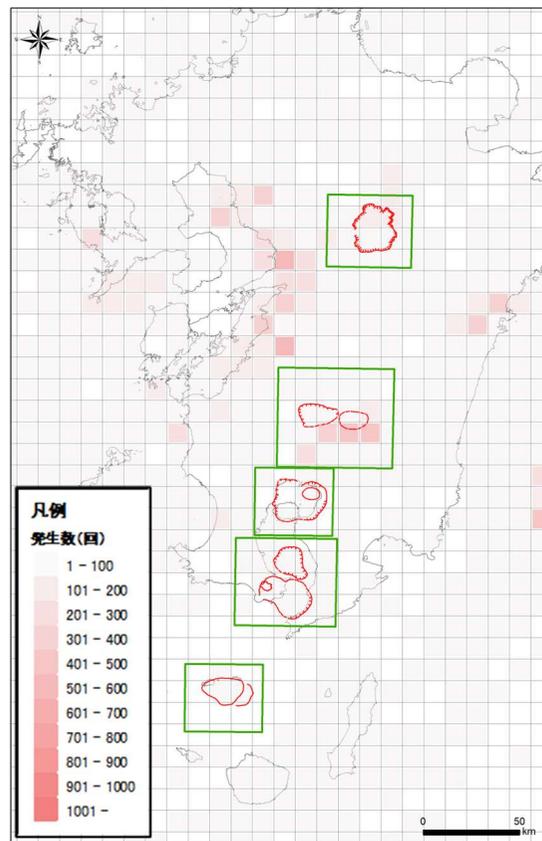
基線⑬～⑯の時系列変化

## 5. 統計的整理に基づく評価[地震活動:地震発生数]

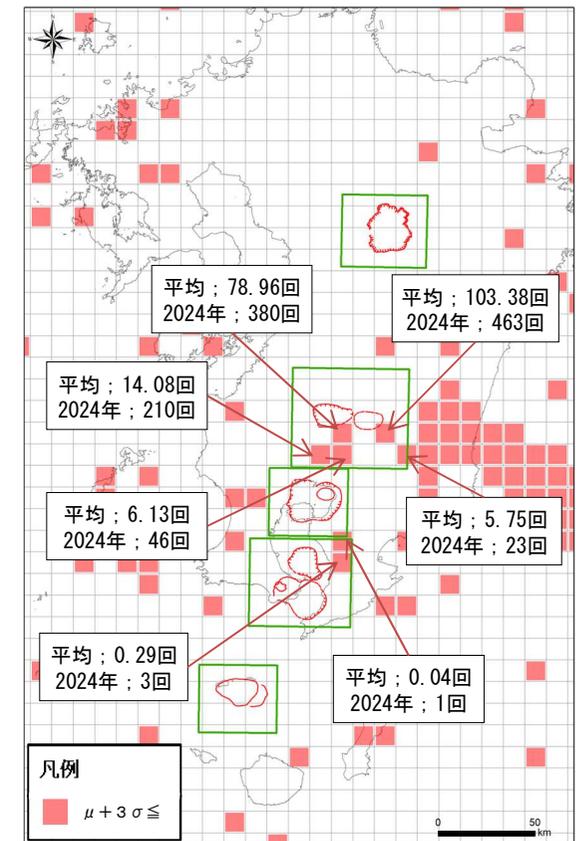
- 地震活動について、グリッド毎の地震発生数とエネルギーの「平均( $\mu$ ) + 3 $\sigma$ 」と、2024年の観測結果との比較を行った。
- 2024年の各カルデラの評価範囲において地震発生数が+3 $\sigma$ を超えるグリッドのうち、2024/8/8日向灘の地震後(8~10月)において活発な領域であった、小林カルデラ縁南東部(年間463回)・外南東部(年間23回)、加久藤カルデラ縁南部(年間380回)、また1~6月に活発であった加久藤カルデラ外南部(年間46回)・外南西部(年間210回)について、今後の地震活動に留意していく。
- その他の地震発生数が+3 $\sigma$ を超えるグリッドについては、平均( $\mu$ )の値が小さいことが原因と考えられ、2024年の地震発生数も年間10回以下と少ない。



2000年~2023年  
平均地震数(通常地震)



2024年  
地震数(通常地震)

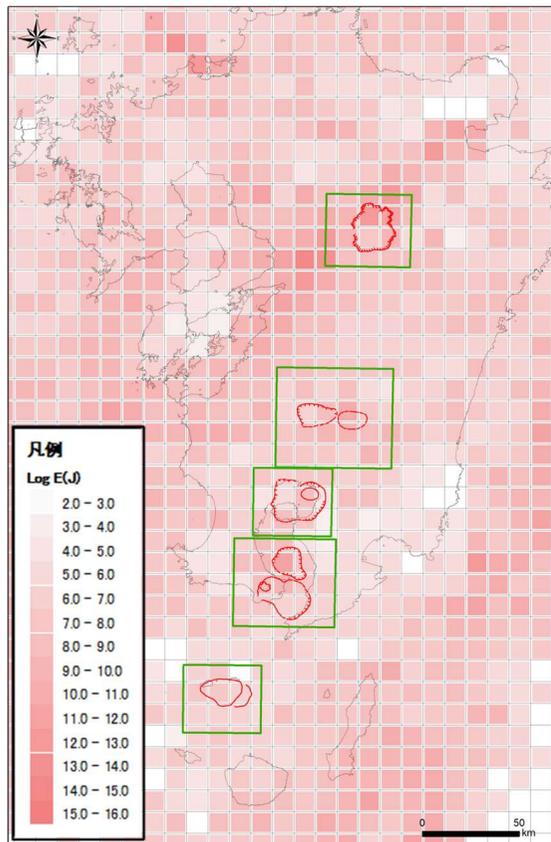


2000年~2023年平均地震数(通常地震)と  
2024年地震数(通常地震)の比較

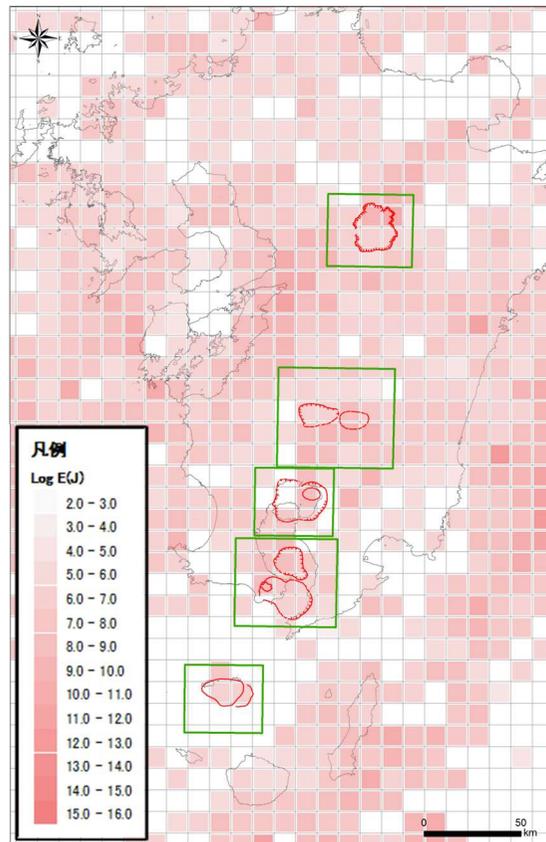
※1 グリッド毎に震源データを抽出し、各年のグリッド毎の総地震数を算出。  
 ※2 グリッドの大きさは緯度・経度それぞれ0.1度(約9km)とする。

## 5. 統計的整理に基づく評価[地震活動:地震エネルギー]

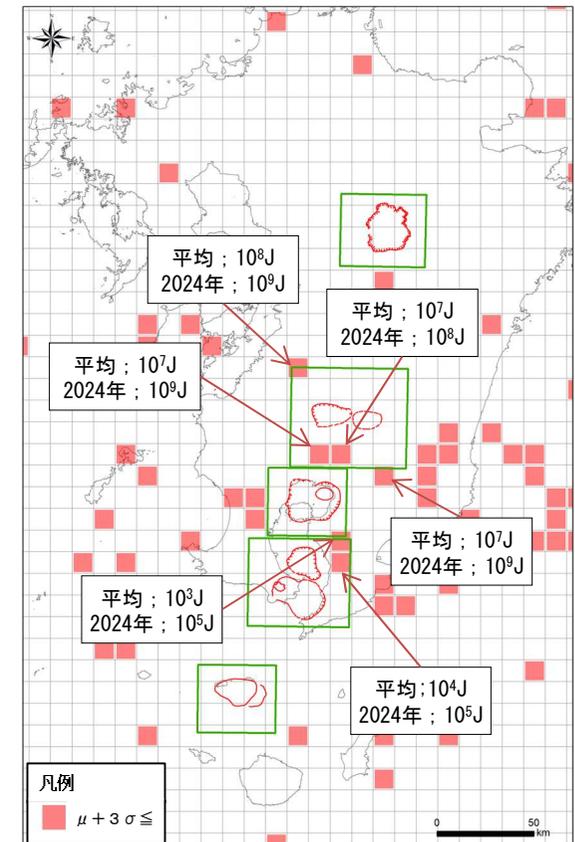
- 地震エネルギーが $+3\sigma$ を超えるグリッドについては、平均( $\mu$ )の値が小さいことが原因と考えられ、2024年の地震エネルギーも年間 $10^9\text{J}$ 以下と小さい。



2000年～2023年  
平均地震エネルギー(通常地震)



2024年  
地震エネルギー(通常地震)



2000年～2023年平均地震エネルギー(通常地震)  
と2024年地震エネルギー(通常地震)の比較

- ※1 グリッド毎に震源データを抽出し、各年のグリッド毎の総エネルギー数を算出。  
 ※2 グリッドの大きさは緯度・経度それぞれ $0.1$ 度(約 $9\text{km}$ )とし、地震エネルギーの算出には下記の式を使用。  
 $E = 10^{(4.8 + 1.5 * M)}$  (E:地震エネルギー(J:ジュール)、M:マグニチュード)

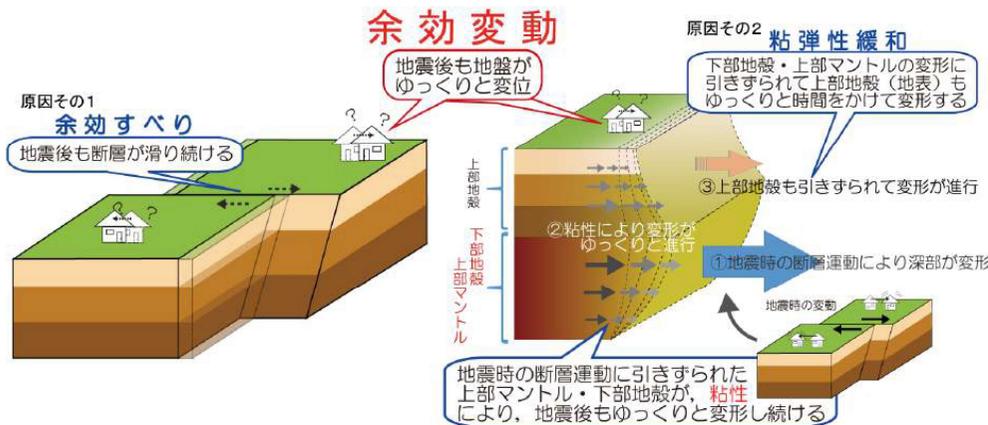
## 6. 2024年8月8日の日向灘の地震による余効変動の分離に関する検討

- 大規模な地震では、地震時だけでなくその後も地面がゆっくり動き続ける現象が観測され、余効変動と呼ばれている。余効変動には、普段の地殻の動き(プレート運動)による「定常変動」、短期的な変動として地震の時に滑った所が地震後も引き続きゆっくりと滑っている「余効すべり」、長期的な変動として地下深くで柔らかくなった地殻や上部マントルが地震の影響を受けて長期にわたり動いている「粘弾性緩和」の3つが主要な要素と考えられている。
- 「余効すべり」は対数(log)的な変動で時定数も短く、「粘弾性緩和」は指数(exp)的な変動で時定数も長い。これらの対数・指数関数の混合モデルを用いることで、場所によって異なる複雑な余効変動の振る舞いを近似できるようになるとされる(例えばTobita, 2016)。
- 2024年8月8日に発生したM7.1の日向灘の地震後に、これまでの地殻変動傾向と異なり、南東方向へ変動する観測点が広範囲で観測された。そのため、余効変動の数値モデルを推定し、観測点や基線長変化に余効変動以外の影響がないか検討を行った。

余効変動 = 「短期間の変動」 + 「長期間の変動」 + 「定常的な変動」

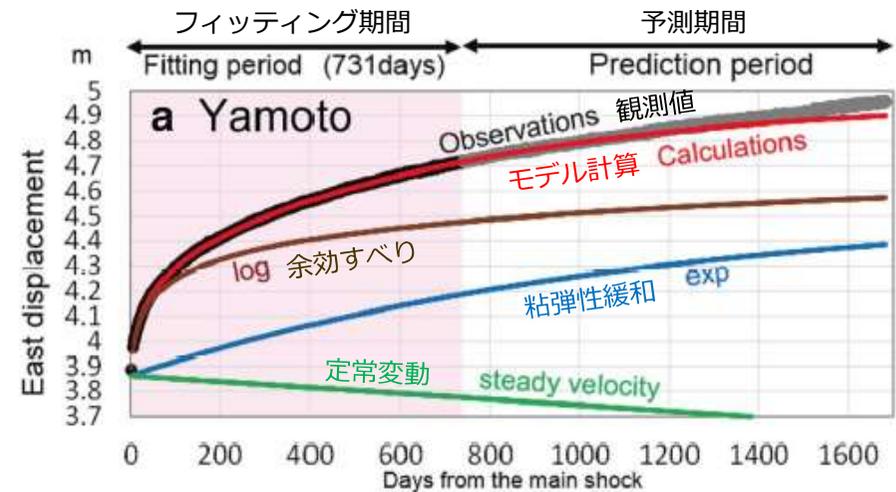
「余効すべり」

「粘弾性緩和」



第3図 余効変動の発生機構に関する概念図。熊本地震では、粘弾性緩和と余効滑りを原因とする変動が進行したと考えられる。

熊本地震の余効変動(国土地理院(2018);地震予知連絡会会報第100巻)



余効変動の数値モデルによる各変動の動き  
Tobita (2016)に加筆

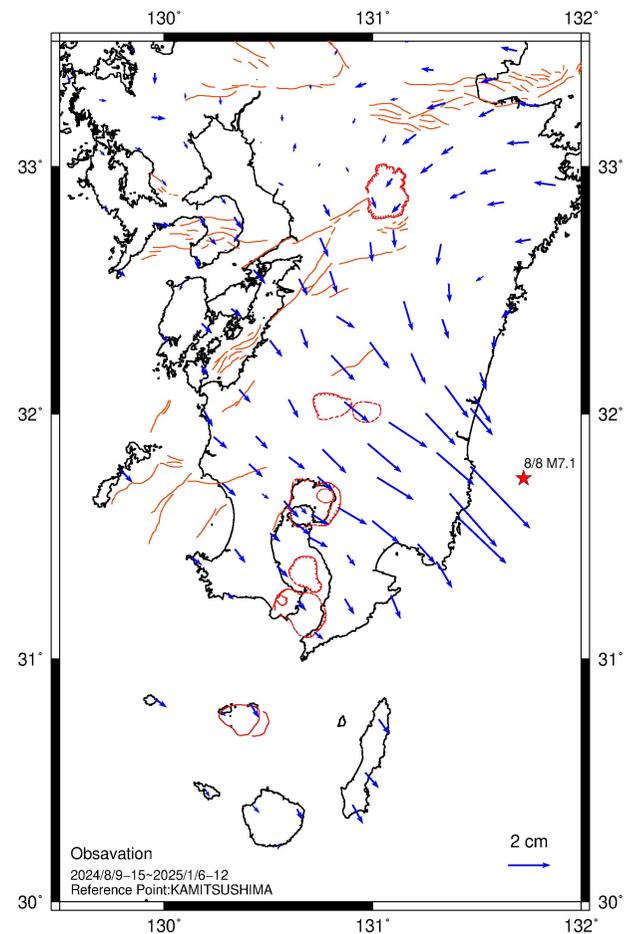
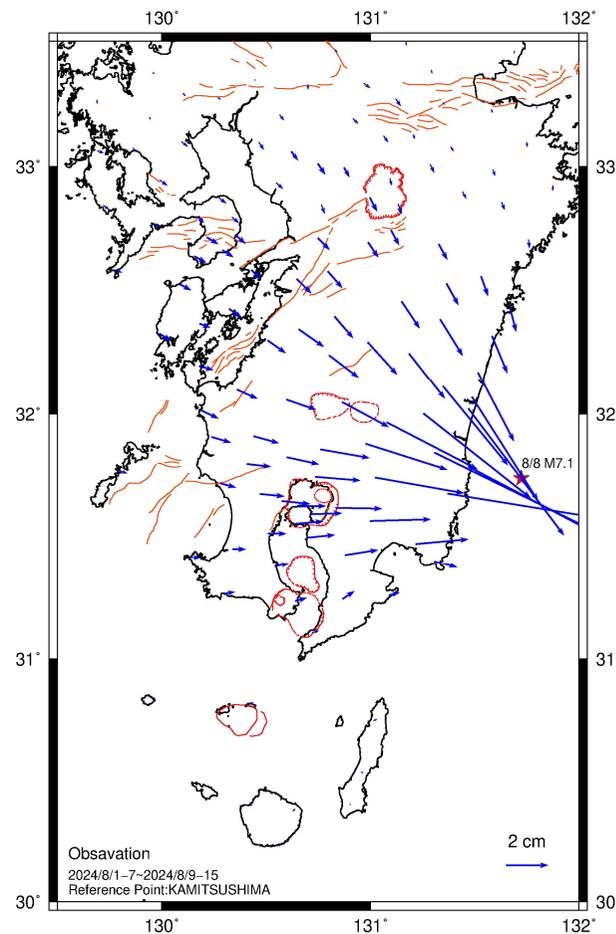
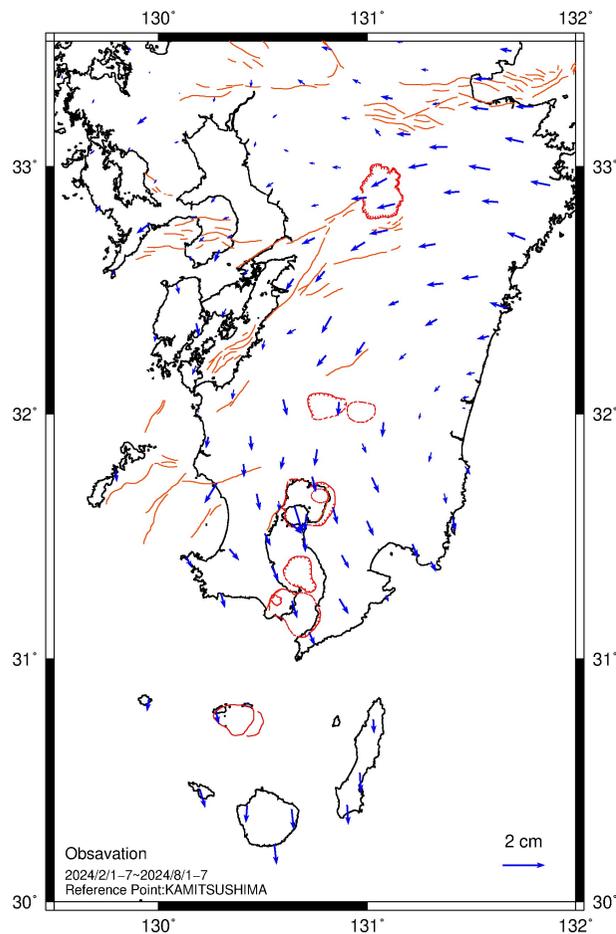
## 6. 2024年8月8日の日向灘の地震による余効変動の分離に関する検討

- 2024年8月8日に発生したM7.1の日向灘の地震により、震源方向への成分(特に北西-南東)が多い基線において伸びの傾向が確認され、変動ベクトル図においても九州の広範囲で広域地殻変動とは異なる地震後の変動が確認され、日向灘の地震による余効変動と考えられる。

地震前(約半年)  
定常変動の期間

M7.1地震時

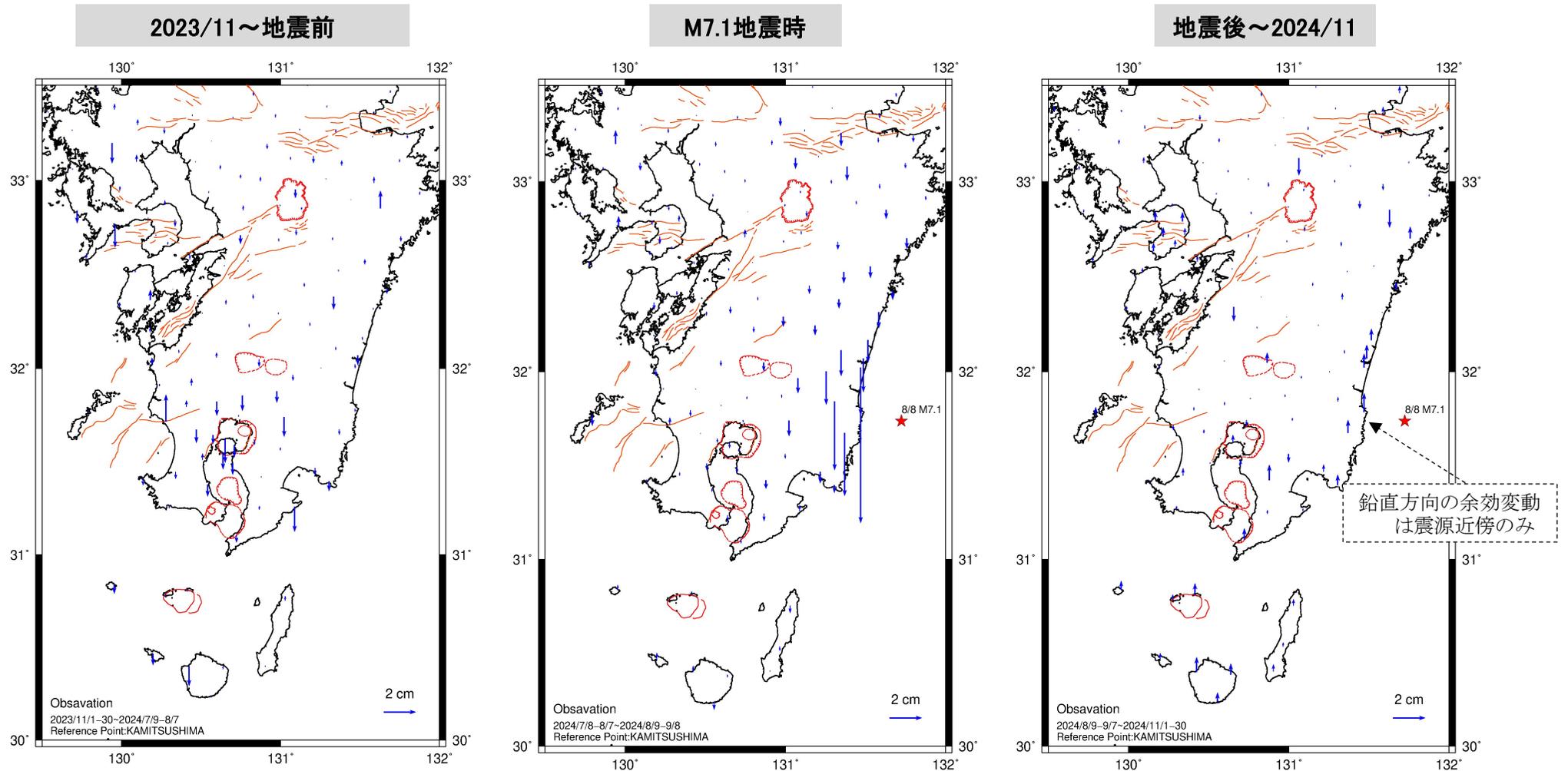
地震後(約半年)  
余効変動が認められる期間



※ 定常変動成分が加わっているため、南九州では南東方向に変動している

## 6. 2024年8月8日の日向灘の地震による余効変動の分離に関する検討

- 鉛直方向の余効変動については、地震後の変動では震源近傍の観測点において、隆起傾向が認められる。



# 6. 2024年8月8日の日向灘の地震による余効変動の分離に関する検討

- 余効変動モデルにはTobita (2016)の式を使用し、余効変動量大きい観測点(宮崎、宮崎田野、北郷)の水平成分の変動を満たす時定数パラメータを決定し、その他のパラメータは観測点ごとに非線形回帰分析から決定した。基準点は「上対馬」を採用し、フィッティング期間は4ヵ月とした。
- 余効すべりによる短期的な対数変動の時定数bは0.31、粘弾性緩和による長期的な指数変動の時定数eは226.7と求まり、既知の研究から求められた値とマグニチュードの比較から適切な値が推定できていると考えられる。

< Tobita (2016)の式 >

$$D(t) = \underbrace{a \ln(1 + t/b)}_{\text{余効すべり}} + c - \underbrace{d \exp(-t/e)}_{\text{粘弾性緩和}} + \underbrace{Vt}_{\text{定常変動}}$$

D(t) : 変位成分 (東西、南北、鉛直)

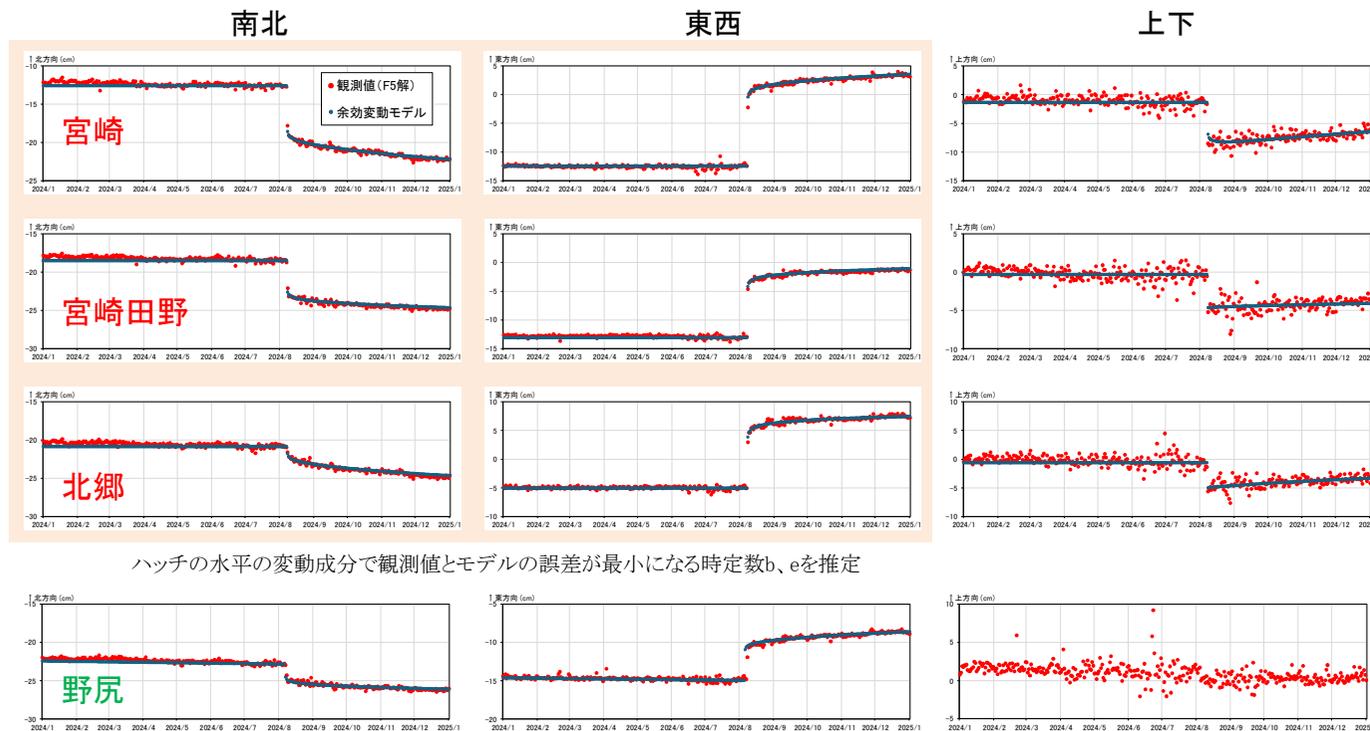
t : 本震発生からの経過時間 (日)

b, e : 対数または指数の減衰 (緩和時間) に関するパラメータ (時定数)

V : 定常速度 (広域地殻変動値)

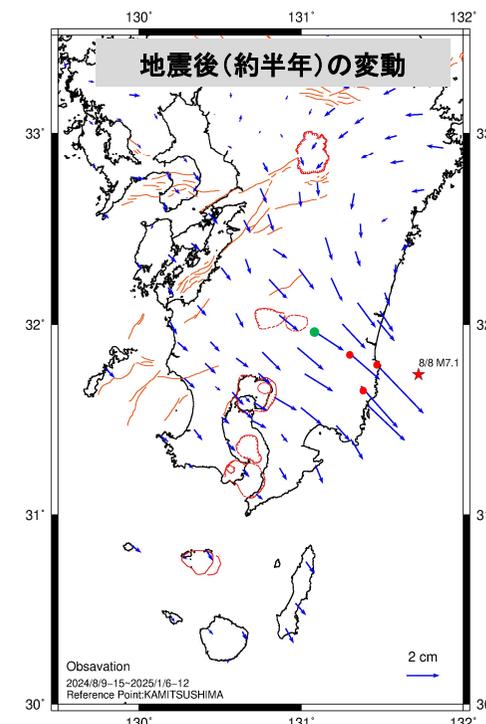
パラメータ	値	推定手法
a		各観測点で決定
b	0.31	3観測点の水平成分から
c		各観測点で決定
d		各観測点で決定
e	226.7	3観測点の水平成分から

	地震	時定数b	時定数e	
2011/3/11	東北地方太平洋地震M9.0	10.3	3306.0	Tobita (2016)
		8.27	1570.8	Takagi et al. (2019)
2016/4/16	熊本地震M7.3	0.48	303.6	Takagi et al. (2019)
2024/8/8	日向灘の地震M7.1	0.31	226.7	今回



ハッチの水平の変動成分で観測値とモデルの誤差が最小になる時定数b、eを推定

顕著に鉛直変動が確認できない観測点の鉛直変動ではモデル推定を行わない

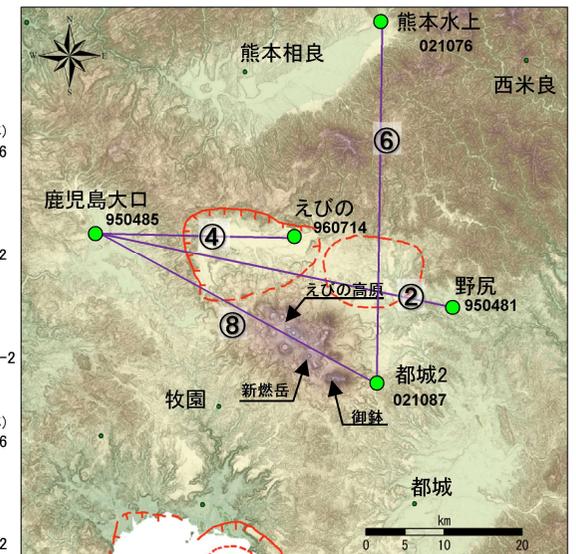
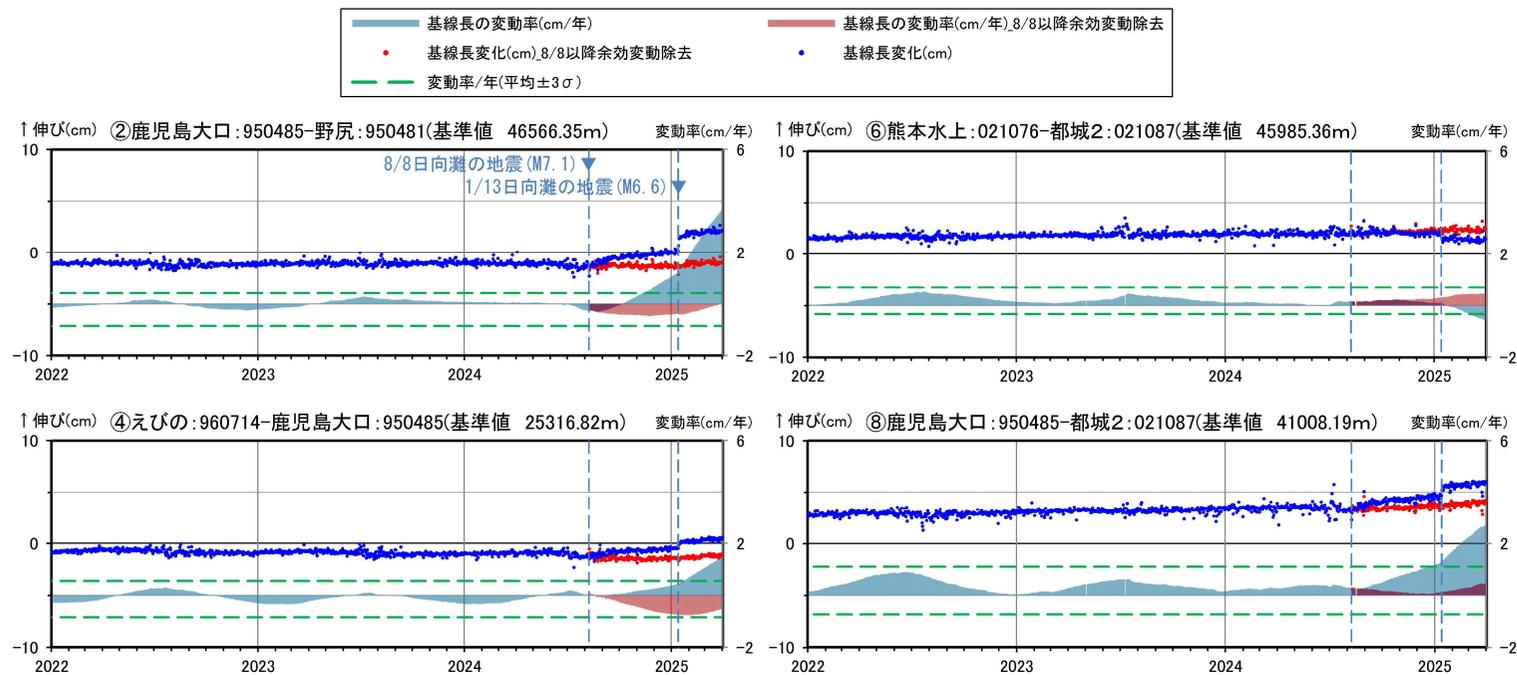


- ※1 2024/8/9-15~2025/1/6-12のデータを使用し図示
- ※2 赤丸はパラメーターb、eの推定のため使用した余効変動量が大きい観測点(宮崎、宮崎田野、北郷)
- ※3 緑丸は検証例として左で図示した観測点(野尻)



## 6. 2024年8月8日の日向灘の地震による余効変動の分離に関する検討

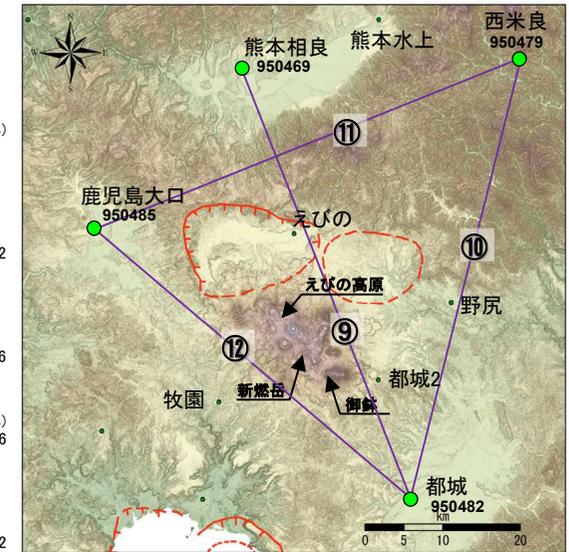
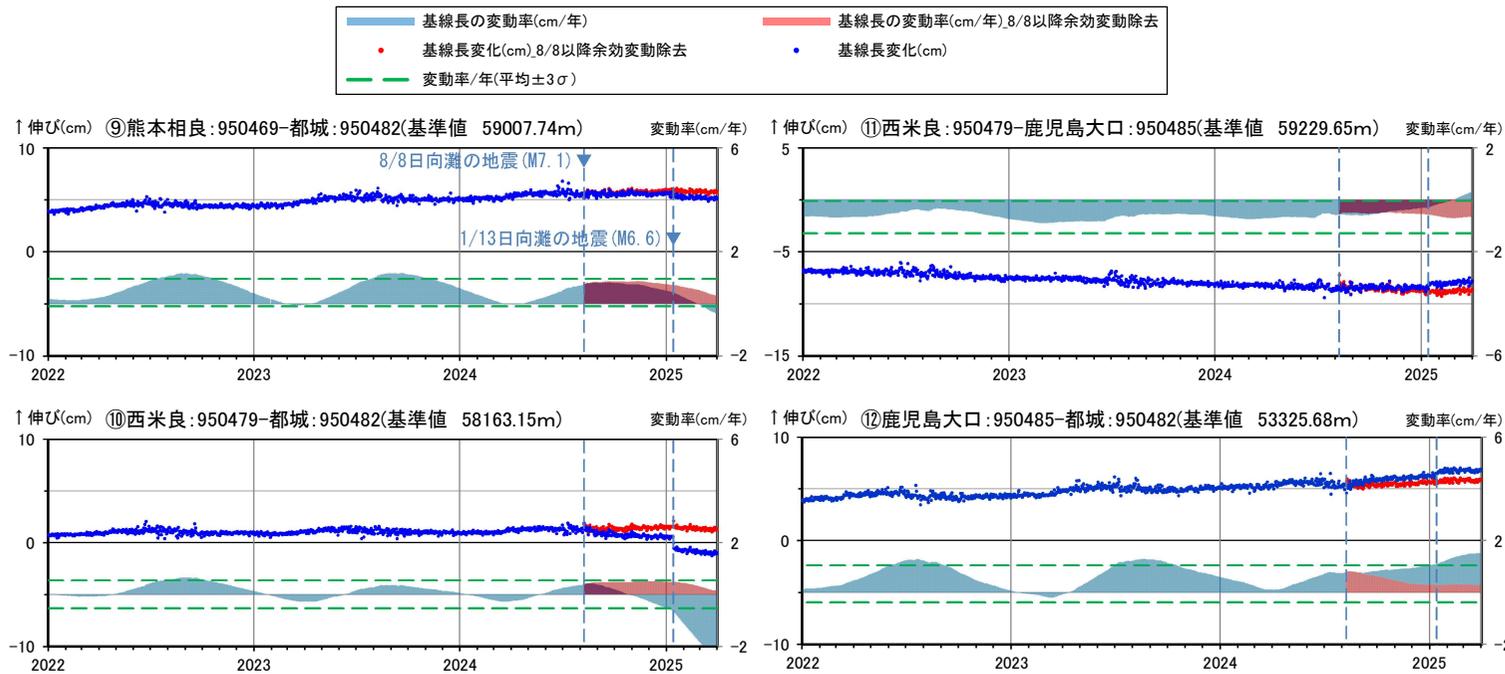
- 加久藤・小林カルデラの基線において、基線長変動率が $\pm 3\sigma$ を超える基線②、④、⑥、⑧～⑬及び⑮において、2024年8月8日の日向灘の地震の余効変動モデルを推定し、観測値から余効変動除去及び地震時の変動除去を行った結果を示す。
- 余効変動及び地震時の変動の除去の結果、 $\pm 3\sigma$ 未満となり、これまで比較しては傾向に大きな変化無いことが確認できた。



● 国土地理院のGNSS観測点

- ※1 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
- ※2 変動率は過去1年間のデータを用いて求めた近似式により算出
- ※3 熊本地震発生以前(算出開始日～2015.12.31)の変動率の平均を $\mu$ 、標準偏差を $\sigma$ とした
- ※4 全ての基線において2016年4月の熊本地震、2024年8月8日の日向灘の地震及び2025年1月13日の日向灘の地震時による変動を補正し図示
- ※5 余効変動モデルの余効変動成分のみを観測値から差し引いて図示

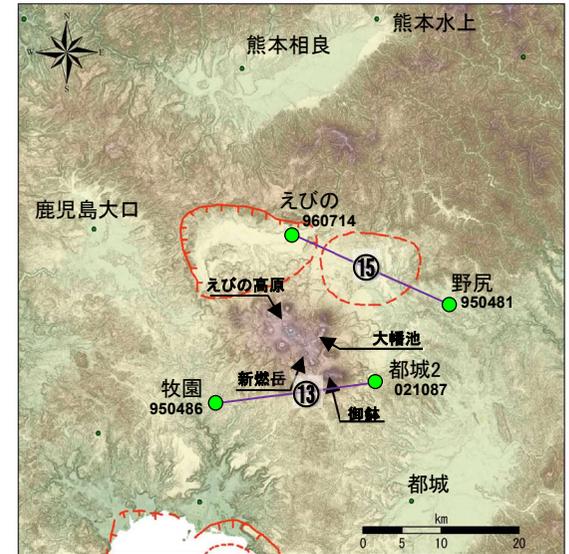
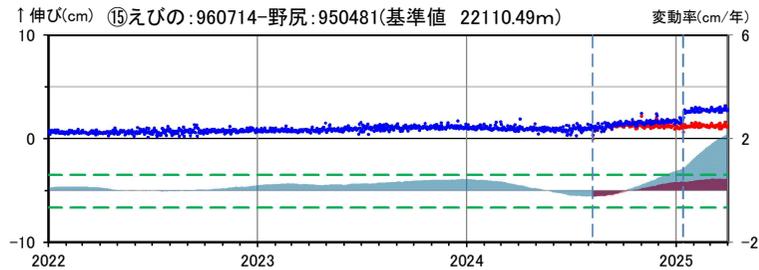
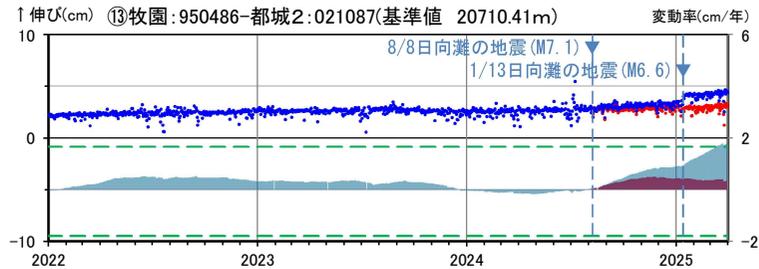
# 6. 2024年8月8日の日向灘の地震による余効変動の分離に関する検討



● 国土地理院のGNSS観測点

- ※1 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
- ※2 変動率は過去1年間のデータを用いて求めた近似式により算出
- ※3 熊本地震発生以前(算出開始日～2015.12.31)の変動率の平均を $\mu$ 、標準偏差を $\sigma$ とした
- ※4 全ての基線において2016年4月の熊本地震、2024年8月8日の日向灘の地震及び2025年1月13日の日向灘の地震時による変動を補正し図示
- ※5 余効変動モデルの余効変動成分のみを観測値から差し引いて図示

# 6. 2024年8月8日の日向灘の地震による余効変動の分離に関する検討

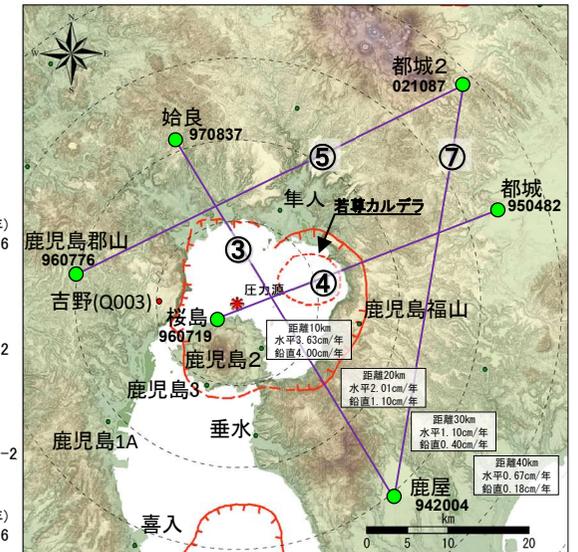
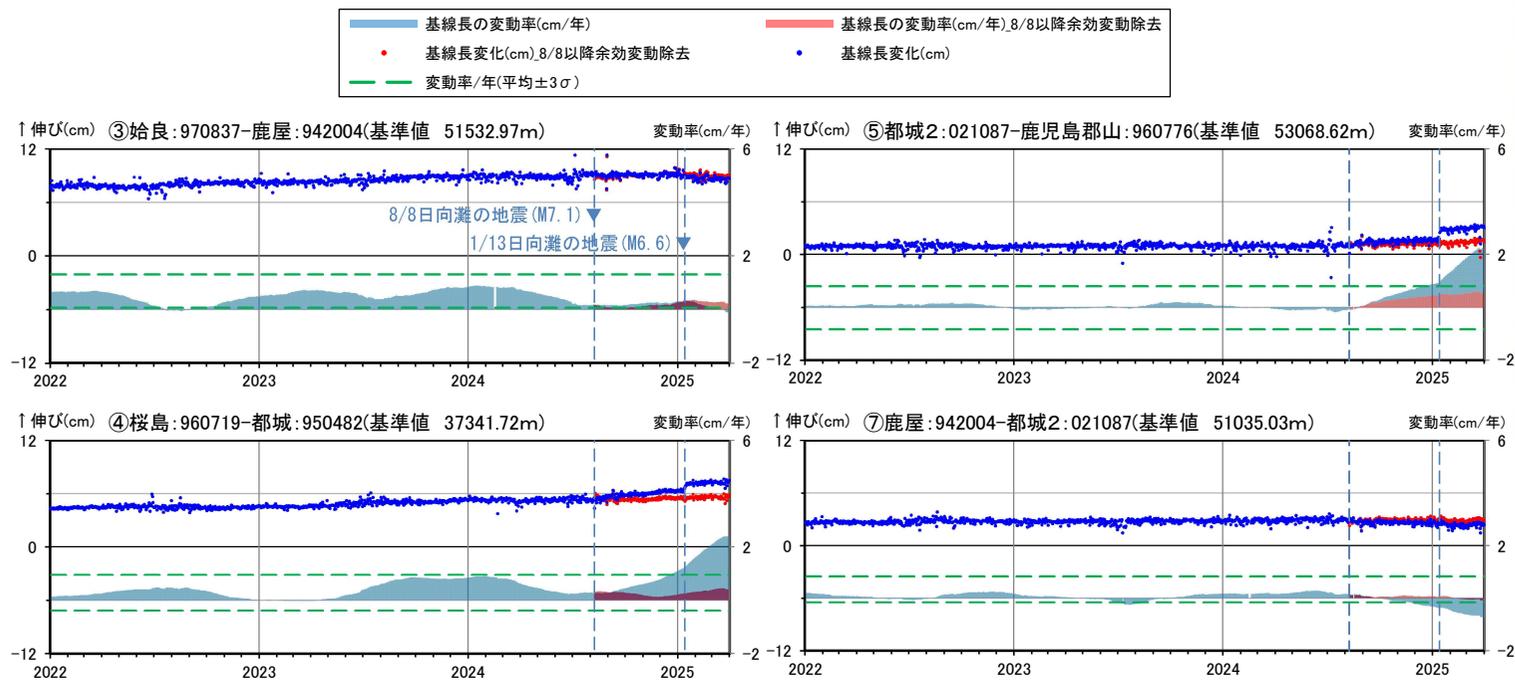


● 国土地理院のGNSS観測点

- ※1 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
- ※2 変動率は過去1年間のデータを用いて求めた近似式により算出
- ※3 熊本地震発生以前(算出開始日～2015.12.31)の変動率の平均を $\mu$ 、標準偏差を $\sigma$ とした
- ※4 全ての基線において2016年4月の熊本地震、2024年8月8日の日向灘の地震及び2025年1月13日の日向灘の地震時による変動を補正し図示
- ※5 余効変動モデルの余効変動成分のみを観測値から差し引いて図示

## 6. 2024年8月8日の日向灘の地震による余効変動の分離に関する検討

- ・ 始良カルデラの基線において、基線長変動率が $\pm 3\sigma$ を超える基線③、④、⑤、⑦、⑩、⑬及び⑭において、2024年8月8日の日向灘の地震の余効変動モデルを推定し、観測値から余効変動除去及び地震時の変動除去を行った結果を示す。
- ・ 余効変動及び地震時の変動の除去の結果、 $\pm 3\sigma$ 未満となり、これまで比較しては傾向に大きな変化無いことが確認できた。



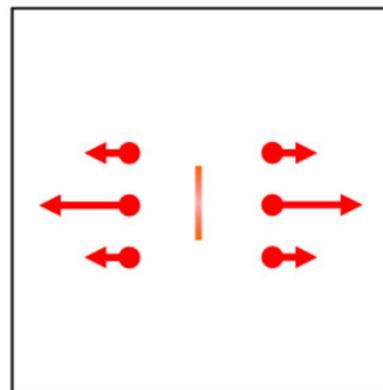
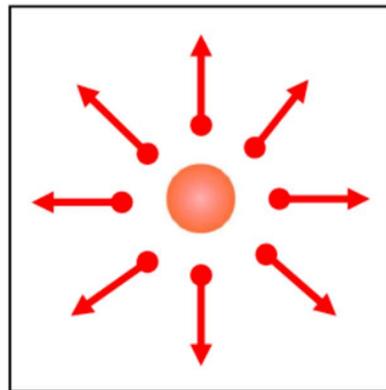
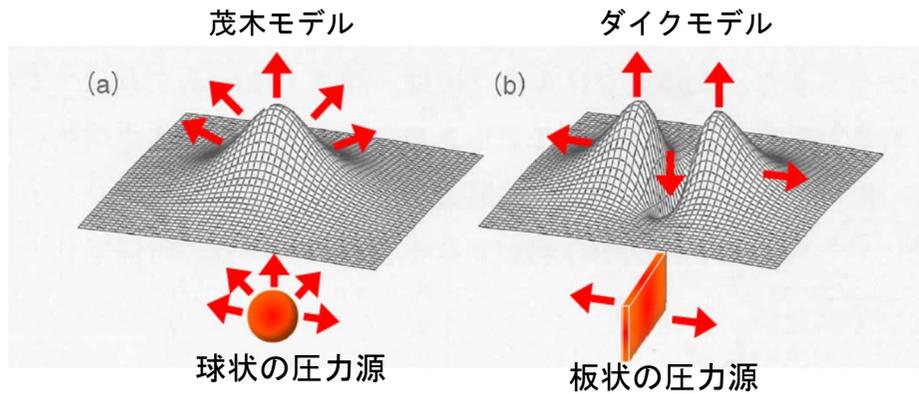
- 国土地理院のGNSS観測点
- 九州電力のGNSS観測点

- ※1 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
- ※2 変動率は過去1年間のデータを用いて求めた近似式により算出
- ※3 全ての基線において熊本地震発生以前(算出開始日～2015.12.31)の変動率の平均を $\mu$ 、標準偏差を $\sigma$ とした
- ※4 全ての基線において2016年4月の熊本地震、2024年8月8日の日向灘の地震及び2025年1月13日の日向灘の地震時による変動を補正し図示
- ※5 余効変動モデルの余効変動成分のみを観測値から差し引いて図示



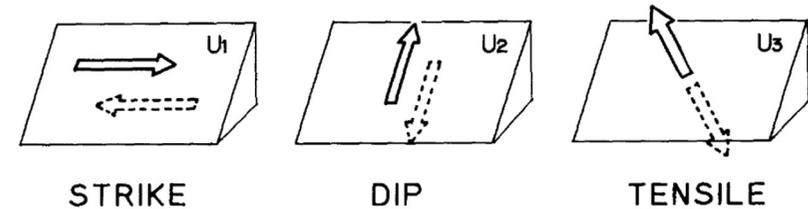
# 7. ダイクモデルを用いた基線長変化に関する検討[鬼界:概要]

- これまで、鬼界の圧力源位置は圧力源モデルとして茂木モデル(球状の圧力源)を用いた推定を実施してきた。一方、浅い地殻内においては火山活動でマグマが地殻内に貫入する際のメカニズムを説明する場合には、マグマが地殻の割れ目を押し広げながら上昇する過程として板状のダイクモデルが用いられることが多い。
- そこで今回はダイクモデルを用いた鬼界の圧力源の検討を行う。下記左図のようにダイクモデルは地殻の割れ目を押し広げるようなマグマを想定し、それらの地表変形の理論式はOkada (1985, 1992) の食い違い弾性論の開口変位(Tensile)による地殻変動の解により定式化されており、本検討ではこれを適用する。
- ダイクモデルによる検討は下記右図の流れで実施する。



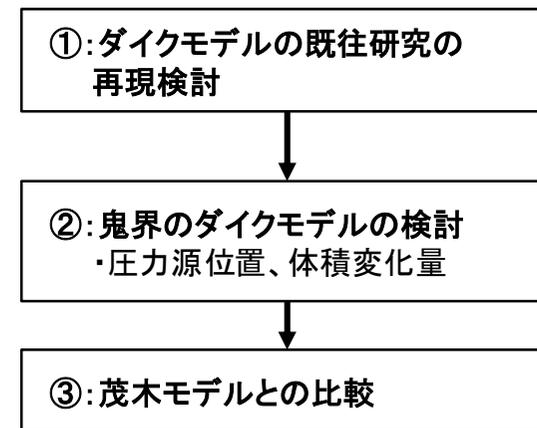
真上から見た水平方向の変動

茂木モデルとダイクモデルの違いのイメージ  
(上図は吉田ほか, 2017の図5.3を基に加筆・修正し作成)



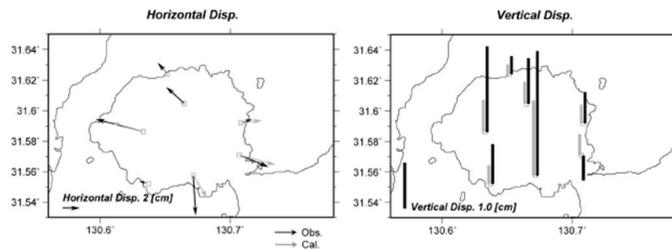
断層運動による変形様式 (Okada, 1992)

「検討フロー」

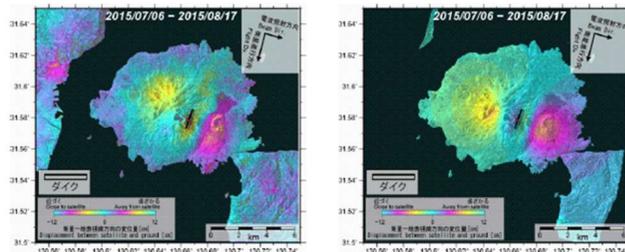


# 7. ダイクモデルを用いた基線長変化に関する検討[鬼界: ①ダイクモデルの既往研究の再現検討]

- ダイクモデルを用いた既往の再現解析を実施した。以下の既往研究におけるダイクモデルの諸元をプログラムに入力した結果、おおむね対象の観測点の変動量を再現できることを確認した。
  - 2015年8月の桜島山体膨張イベントについて、国土地理院(2015)は、だいち2号(ALOS-2)による干渉解析結果と、国土地理院の電子基準点(GEONET)及び気象庁のGNSS観測点で観測された地殻変動量に基づき、ダイク状の変動源の推定を実施している。
  - Morishita et al. (2016)では、4方向からのSAR観測を利用することによりInSARから3次元変形データを作成し、これを再現するダイクを最適化した。



GNSSによる地殻変動観測値とモデル計算値(左)水平変動、(右)上下変動



SAR干渉画像とモデル計算結果(左)干渉画像、(右)計算結果  
国土地理院(2015)

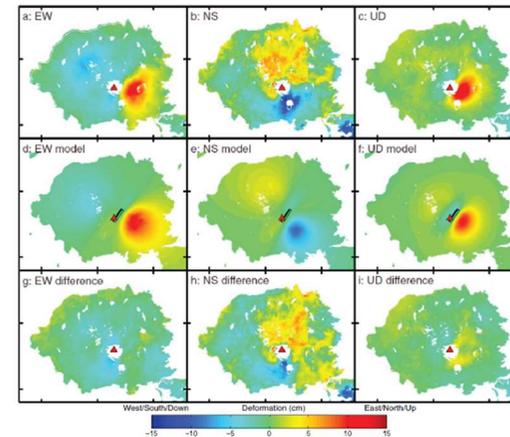


Figure 2. (a-c) Three-dimensional deformation derived from four dLOS. (d-f) Deformation calculated from the model of a dike intrusion. Rectangles indicate a horizontal location of the dike. (g-i) Difference calculated from Figures 2a-c and Figures 2d-f. Root-mean-square (RMS) of the differences of EW, NS, and UD are 1.8, 3.4, and 1.1 cm. Red triangles represent the location of Showa crater.

上段：観測値、中段：モデル計算結果、下段：観測と計算の差分  
左列：東西変位、中列：南北変位、右列：鉛直変位

Morishita et al. (2016)

## 既往研究におけるダイクモデルの諸元

	断層中心の平面位置※		長さ(m)	幅(km)	走行(°)	傾斜の方向	上端深さ(km)	下端深さ(km)	開口量(m)	体積変化量(m <sup>3</sup> )
	X(NS,m)	Y(EW,m)								
国土地理院(2015)モデル	-157502.52	-31587.05	1.41	0.78	20.00	東傾斜	0.42	1.18	1.60	1.76 × 10 <sup>6</sup>
Morishita et al. (2016)モデル	-157502.52	-31587.05	1.41	0.81	36.00	東傾斜	0.40	1.20	1.49	1.70 × 10 <sup>6</sup>

※圧力源の平面位置は、世界測地系平面直角座標Ⅱ系を使用

## 7. ダイクモデルを用いた基線長変化に関する検討[②鬼界のダイクモデルの検討]

- 鬼界についてダイクモデルを用いた基線長変化に関する検討をする。2018年～2024年の7年間の累積の変動のデータを用い、水平変動は全ての基線①～⑯、鉛直変動は黒島を固定点とした鹿児島三島と竹島の2地点を検討対象とした。各基線は2019年種子島近海の地震による影響を受けているため、地震時の変動はオフセットして計算に使用した。ダイクモデルでは断層パラメータの組み合わせが膨大となるため、以下の2ステップで最適化を行う。

### 【第1ステップ】

- 断層パラメータを大まかに絞りこむことを意図して、断層の平面位置を固定し、体積変化量(開口量)は、パラメータの組み合わせごとにRMSEを最小化するよう最適化する。なお、断層の傾斜角は第1、第2ステップを通じ、90°(鉛直)に固定する。また、RMSE算出時の(基線長):(比高)の重みは、第1、第2ステップを通じ、1:1とした。

### 【第2ステップ】

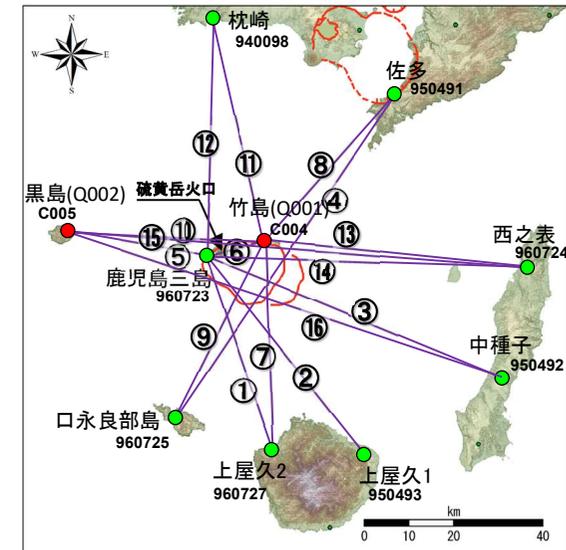
- 第1ステップでRMSE最小となった断層パラメータを起点に、平面位置の探索を実施する。ただし、平面位置の変動に伴い最適パラメータが変わる可能性を考慮し、同時に第1ステップの最適パラメータ前後区間を再度探索する。なお、体積変化量(開口量)は、パラメータの組み合わせごとにRMSEを最小化するよう最適化する。

### ○第1ステップ

パラメータ	設定	パターン数
平面位置	断層の中心を鬼界カルデラ中心位置に固定	1
断層長さ	1, 2.5, 5, 10, 20km	5
断層幅	0.5, 1.25, 2.5, 5, 10km	5
上端深さ	0.25, 0.5, 0.75, 1, 2, 3, ..... 10km	13
走向	0, 30, 60, 90, 120, 150°	6

### ○第2ステップ

パラメータ	設定	パターン数
平面位置	鬼界カルデラ中心位置を起点に、 東西: -5km～+5kmを0.5km刻み 南北: -5km～+5kmを0.5km刻み	21×21 = 441
断層長さ	第1ステップの最適値で固定	1
断層幅	第1ステップの最適値で固定	1
上端深さ	第1ステップの最適値及び前後の設定	3
走向	第1ステップの最適値及び前後の設定を5°刻み	13

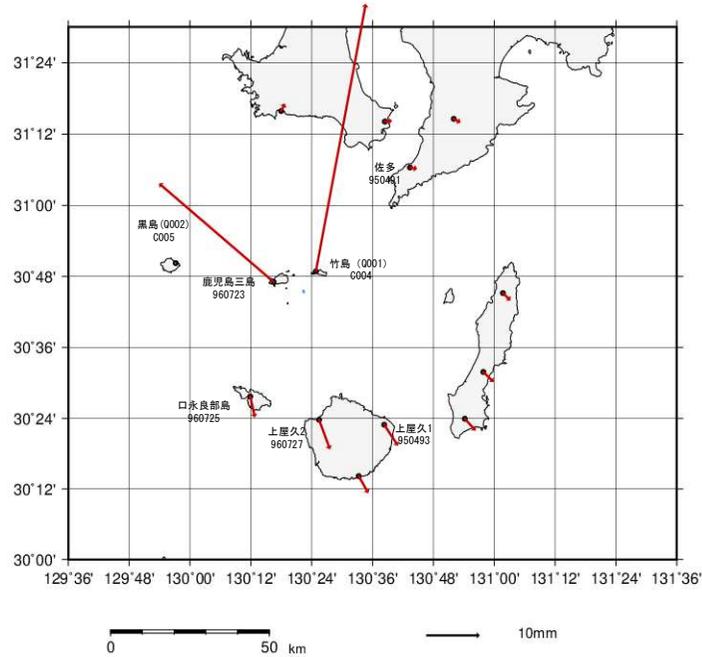


- 国土地理院のGNSS観測点
- 九州電力のGNSS観測点

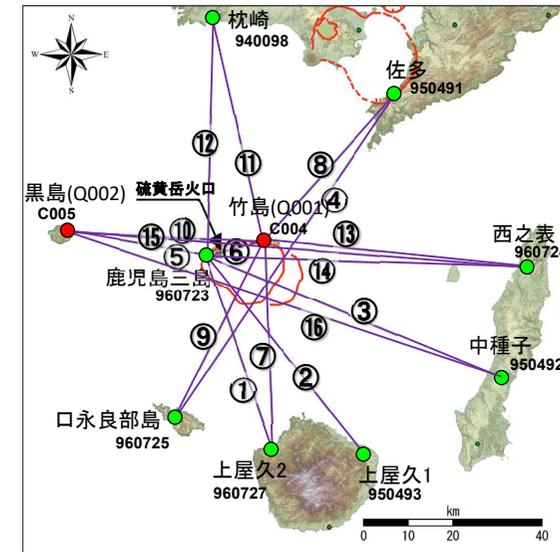
使用した基線配置図

## 7. ダイクモデルを用いた基線長変化に関する検討[②鬼界のダイクモデルの検討]

- ダイクモデルを用いた検討の結果、推定された圧力源位置及び各種パラメータを下記に示す。圧力源位置は長さ1.0km、走向160°、開口1.56mのダイクが茂木モデルとほぼ同位置に推定された。体積変化量は、0.00223km<sup>3</sup>/年となり、ダイクモデル検討でも0.01km<sup>3</sup>/年を下回る結果となった。



ダイク及びベクトル位置（黒島固定）



- 国土地理院のGNSS観測点
- 九州電力のGNSS観測点

使用した基線配置図

	圧力源平面位置※		圧力源深さ(km)		ダイク諸元				体積変化量(km <sup>3</sup> /年)	RMSE(m)		
	X(NS,m)	Y(EW,m)	上端深さ(km)	中心深さ(km)	長さ(km)	幅(km)	走向(°)	開口量(m)		基線長	比高	平均
ダイクモデル	-248411	-59995	0.5	5.5	1.0	10.0	160	1.56	0.00223	$1.08 \times 10^{-2}$	$3.04 \times 10^{-4}$	$5.55 \times 10^{-3}$

※圧力源の平面位置は、世界測地系平面直角座標Ⅱ系を使用

# 7. ダイクモデルを用いた基線長変化に関する検討[③茂木モデルとの比較]

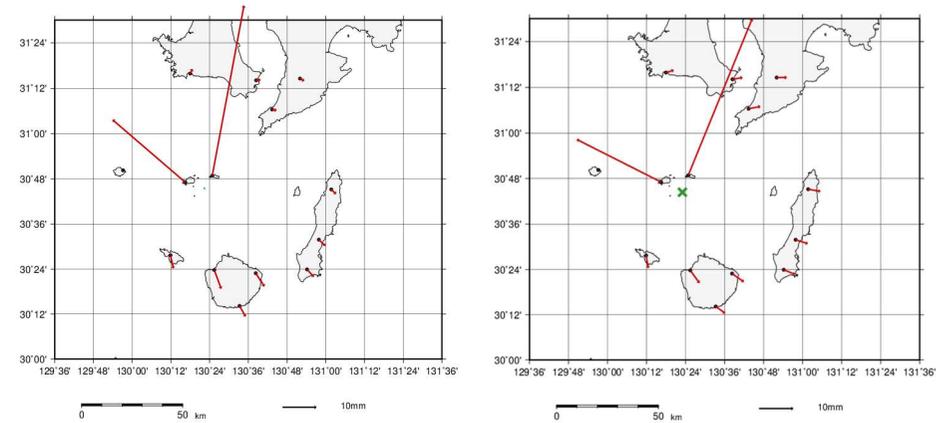
- ダイクモデルを用いた検討の結果と茂木モデル(P177)の結果を比較した。圧力源位置については、ほぼ同じ位置に推定されたが、ダイクモデルの方がやや深い位置に圧力源の中心位置が推定された。体積変化量については、ダイクモデルの方がわずかに小さい結果となった。
- RMSEは茂木モデルよりダイクモデルの方が大きくなり、現状では必ずしも茂木モデルよりもダイクモデルの方が精度がいいとは言いきれない結果となった。
- 今後、鬼界のマグマ供給率については、茂木モデルだけでなくダイクモデルでも引き続き検討を実施していく。



ダイクモデルによる各基線、鉛直変位における観測値と計算結果の比較



(参考:茂木モデル)各基線、鉛直変位における観測値と計算結果の比較



ダイクモデル(左)と茂木モデル(右)による変位ベクトル(計算)の比較 (黒島固定、7年間の累積)

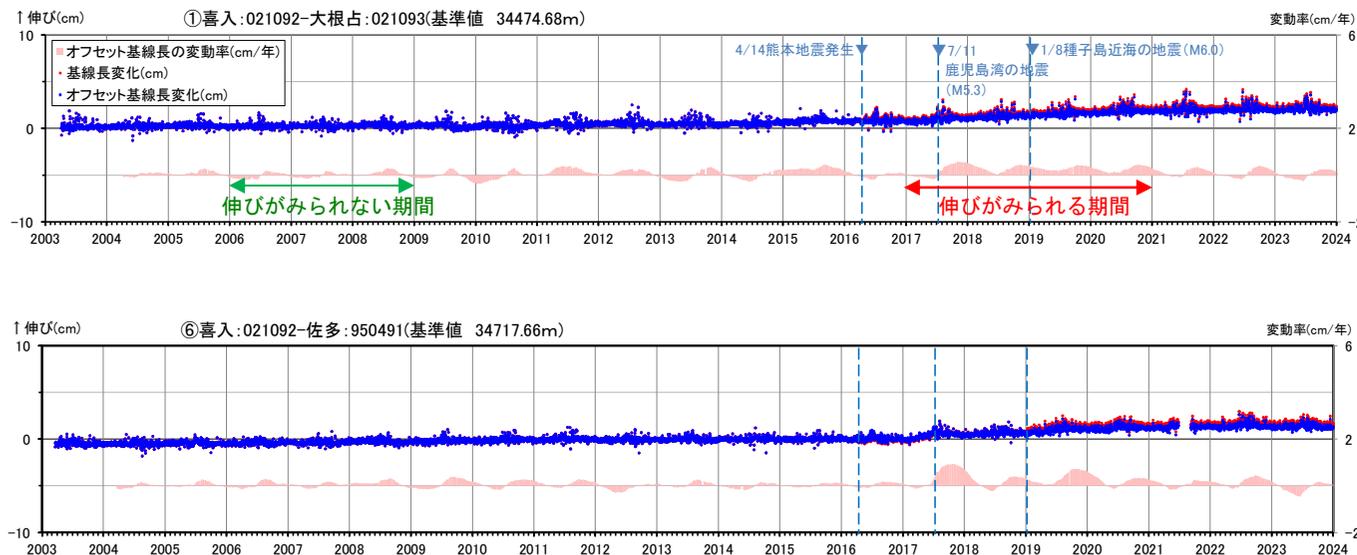
推定された圧力源位置とRMSEの比較

	圧力源平面位置※		圧力源深さ (km)	ダイク諸元				体積変化量 (km <sup>3</sup> /年)	RMSE (m)		
	X(NS,m)	Y(EW,m)		長さ (km)	幅 (km)	走向(°)	開口量 (m)		基線長	比高	平均
ダイクモデル	-248411	-59995	5.5 (上端深さ:0.5)	1.0	10	160	1.56	0.00223	$1.08 \times 10^{-2}$	$3.04 \times 10^{-4}$	$5.55 \times 10^{-3}$
茂木モデル (すべて)	-250411	-58995	2.9	-	-	-	-	0.00268	$7.47 \times 10^{-3}$	$2.04 \times 10^{-4}$	$3.84 \times 10^{-3}$

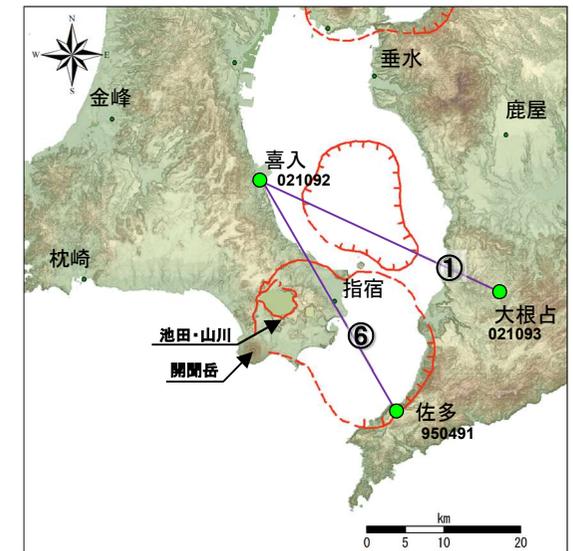
※圧力源の平面位置は、世界測地系平面直角座標Ⅱ系を使用

## 7. ダイクモデルを用いた基線長変化に関する検討[阿多カルデラ:概要]

- 阿多カルデラの基線においては2010年代中ごろから基線①、⑥においては、若干の伸びが認められたが、その他の直交する基線においては伸びの傾向が認められず、マグマが板状に貫入するような変動の可能性が考えられるため、ダイクモデルによる適用性の検討を行った。
- ダイクモデルの適用に当たっては、阿多カルデラの観測点が始良カルデラの影響を受けやすい地点にある点を考慮し、基線①、⑥の伸びがみられる2017年～2020年の4年間について、伸びがみられない2006年～2008年と対比するため、広域地殻変動及び始良カルデラからの影響を除去した各観測点のベクトル図の検討を行う。



阿多 GNSS連続観測による基線長変化(2003年01月01日～2023年12月31日)

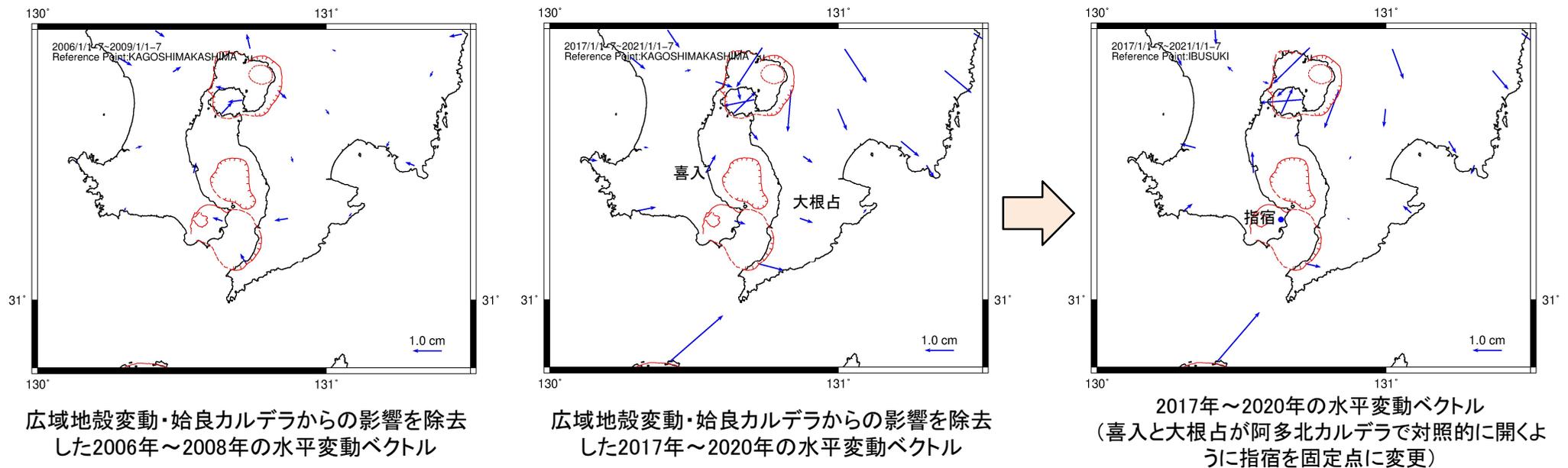


● 国土地理院のGNSS観測点

- ※1 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
- ※2 変動率は過去1年間のデータを用いて求めた近似式により算出
- ※3 佐多地点については、2021年6月27日以降データの公開が停止したが、9月8日からデータの公開を再開
- ※4 全ての基線において2016年熊本地震、2017年鹿児島湾の地震、2019年種子島近海の地震時の変動を補正して図示

## 7. ダイクモデルを用いた基線長変化に関する検討[阿多カルデラ:水平変動ベクトルによる検討]

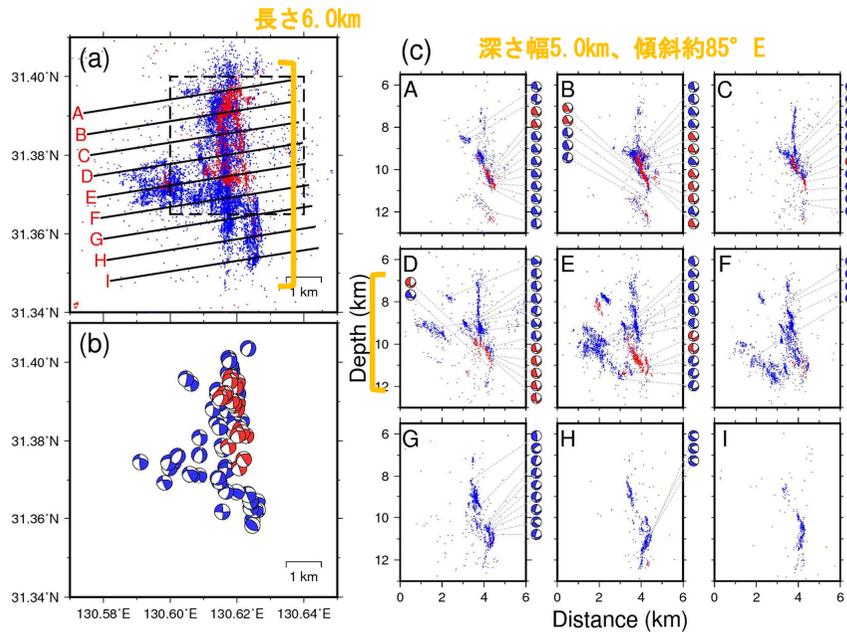
- 2006年～2008年(伸びがみられない期間)と2017年～2020年(伸びがみられる期間)の広域地殻変動・始良カルデラからの影響を除去した水平変動ベクトルを示す。
- 2006年～2008年では始良カルデラからの影響を除去したことにより、阿多カルデラの周辺の変動は小さい。一方、2017年～2020年では、始良カルデラからの影響を除去しても、大隅半島側のGNSS観測点が南東方向に動いていることが分かる。
- 次にマグマ貫入により東西に開くような水平変動ベクトルを捉えるため、「指宿」を固定点とした図を示す(右図)。4年間で「喜入」では北に0.72cm、西に0.04cm、「大根占」では南に0.06cm、東に0.03cmとなり特に有意なマグマ貫入を捉えられるような変動は見当たらず、ダイクモデルによる検討では傾向を捉えられない可能性が高いことを確認した。



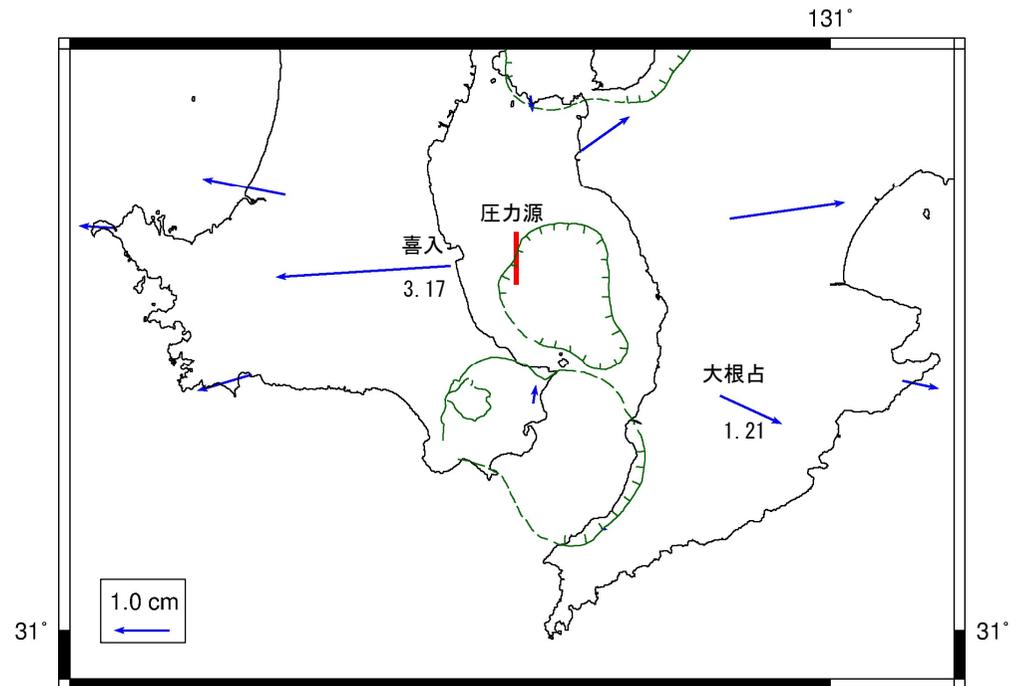
- ※1 固定局について、左2図は鹿児島鹿島(960487)、右図は指宿(950490)
- ※2 広域地殻変動の除去については、2006年-2008年の定常期間を使用した九州電力(2021)の検討手法を使用
- ※3 始良カルデラからの影響を除去については、始良カルデラ基線②(鹿児島郡山-鹿児島福山)の基線長変化を満たす供給量と井口ほか(2008)の圧力源位置を使用し、茂木モデルを仮定し観測点に与える変化量とした。
- ※4 2017年7月11日の鹿児島湾の地震(M5.3)では変位量がほぼないため除去していない。
- ※5 2019年1月8日の種子島近海の地震(M6.0)での変位は除去している。

## 7. ダイクモデルを用いた基線長変化に関する検討[阿多カルデラ:0.01km<sup>3</sup>/年のマグマ供給があった場合の検討]

- ベクトル変動では、変動量が小さく、ダイク位置について推定が難しいことが示唆された。
- 仮に2017年の鹿児島湾の地震(M5.3)の地震域にダイクが4年間0.01km<sup>3</sup>/年の体積変化量で貫入したと仮定した場合の検討を行った。貫入の位置・パラメータについてはMatsumoto et al. (2021)で推定された鹿児島湾の地震の断層面を使用した。
- 検討結果ベクトルは「喜入」で西に約3.2cm、「大根占」で南東に約1.2cmとなり、基線①の2017~2020年の4年間分のベクトル変動量(基線長変化は約0.8cm)と大きく異なる。また、多くの観測点でのベクトル方向・量についても乖離があり、少なくとも现阶段で顕著なマグマの貫入がみられるような変動はないように推察される。
- 今後、阿多カルデラの変動の傾向が変わった際には、茂木モデルとダイクモデルによる検討を引き続き行う。



2017年の鹿児島湾の群発地震について、再決定された震源と発震機構。(a) 前震(赤)と余震(青)の震源を示す図。破線の四角は(b) 発震機構を示す図。(c) (a)の垂直断面AからIに沿った前震と余震の震源と発震機構の断面図  
Matsumoto et al. (2021)の図2に加筆



ダイクの体積変化量0.04km<sup>3</sup>の水平変動ベクトル<sup>131°</sup>  
(2017年~2020年の変動ベクトルと同じ4年間で0.01km<sup>3</sup>/年の体積変化量を仮定)

Matsumoto et al. (2021)では、鹿児島湾で発生したM5.3の地震の前震と余震の震源を再決定し、時空間特性を明らかにした。深部の流体が上方に移動して断層面に侵入し、断層の強度を低下させて前震系列と潜在的な非地震性すべりを引き起こした。次に、本震破壊は、断層強度の低下と比較的強度の高い領域でのせん断応力の増加によって発生した。破壊後の流体流出に関連する間隙水圧の上昇が、上方への余震移動を引き起こしたとされている。

圧力源モデル: ダイクモデル  
経度[度]: 130.62 緯度[度]: 31.385 標高[m]: -8500.0  
走向角[度]: 0.00 断層長さ[m]: 6000.0 傾斜角[度]: 85.00 断層幅[m]: 5000.0  
(上記パラメータはMatsumoto et al., 2021の震源分布から決定)  
開口量[m]: 1.3333 開口量体積[km<sup>3</sup>]: 0.040 (0.01km<sup>3</sup>/年のレートで4年間と仮定)

( 参 考 文 献 )

# モニタリング結果と中・長期的取組みの参考文献

- (1) 国土地理院: 国土地理院による火山周辺地域における地殻変動観測の概況,  
[https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/kazan\\_index.html](https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/kazan_index.html).
- (2) 気象庁: 火山活動解説資料(九州地方の火山),  
[https://www.data.jma.go.jp/vois/data/report/monthly\\_v-act\\_doc/monthly\\_vact.php](https://www.data.jma.go.jp/vois/data/report/monthly_v-act_doc/monthly_vact.php).
- (3) 火山調査研究推進本部: 第3回(令和6年9月25日)火山調査委員会,  
[https://www.mext.go.jp/a\\_menu/kaihatu/jishin/mext\\_00095.html](https://www.mext.go.jp/a_menu/kaihatu/jishin/mext_00095.html).
- (4) 火山調査研究推進本部: 第4回(令和7年2月17日)火山調査委員会,  
[https://www.mext.go.jp/a\\_menu/kaihatu/jishin/mext\\_00135.html](https://www.mext.go.jp/a_menu/kaihatu/jishin/mext_00135.html).
- (5) 国土地理院: 電子基準点データ提供サービス, 更新:2025/4/21,  
<https://terras.gsi.go.jp/>.
- (6) 防災科学技術研究所: 検測値データダウンロード, 気象庁一元化震源要素, Hi-net高感度地震観測網, 更新:2025/4/3,  
<https://hinetwww11.bosai.go.jp/auth/JMA/?LANG=ja>.
- (7) 気象庁: 地震月報(カタログ編), 更新:2025/1/9,  
<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/hypo.html>.
- (8) Druitt, T. H., Costa, F., Deloule, E., Dungan, M. and Scaillet, B. (2012): Decadal to monthly timescales of magma transfer and reservoir growth at a caldera volcano, Nature, vol.482, pp.77-80.
- (9) 町田 洋・太田陽子・河名俊男・森脇 広・長岡信治 編(2001): 日本の地形7 九州・南西諸島, 東京大学出版会, 355 pp.
- (10) 国土地理院: 地殻変動観測の概況(2025年3月), 国土地理院による火山周辺地域における地殻変動観測の概況,  
[https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/kazan\\_monthly/2025-03.html](https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/kazan_monthly/2025-03.html).
- (11) 気象庁: 月間火山概況(九州地方), 管内月間火山概況(令和7年3月),  
[https://www.data.jma.go.jp/vois/data/report/monthly\\_v-act\\_doc/fukuoka/25m03/500\\_25m03.pdf](https://www.data.jma.go.jp/vois/data/report/monthly_v-act_doc/fukuoka/25m03/500_25m03.pdf).
- (12) 京都大学理学研究科: 阿蘇山における水準測量, 第3回(令和6年9月25日)火山調査委員会, 資料 調3-(4) 111 の活火山の調査観測結果に関する資料(中国地方、九州地方・南西諸島).
- (13) 国土地理院: 阿蘇山, 第3回(令和6年9月25日)火山調査委員会, 資料 調3-(4) 111 の活火山の調査観測結果に関する資料(中国地方、九州地方・南西諸島).
- (14) 国土地理院: 地理院地図, 更新:2025/4/3,  
<https://maps.gsi.go.jp/>.
- (15) 気象庁: 阿蘇山, 第3回(令和6年9月25日)火山調査委員会, 資料 調3-(4) 111 の活火山の調査観測結果に関する資料(中国地方、九州地方・南西諸島).
- (16) 防災科学技術研究所: 阿蘇山, 第3回(令和6年9月25日)火山調査委員会, 資料 調3-(4) 111 の活火山の調査観測結果に関する資料(中国地方、九州地方・南西諸島).
- (17) 気象庁: 令和6年(2024年)の阿蘇山の火山活動, 火山活動解説資料(年報).
- (18) 気象庁: 阿蘇山の火山活動解説資料(令和7年3月), 火山活動解説資料.
- (19) 寺田暁彦・須藤靖明・吉川 慎・井上寛之(2007): 阿蘇火山吉岡温泉で2006年に起きた地熱活動の定量的評価, 火山, , vol.52, pp.335-340.
- (20) 国土地理院: 霧島山, 第3回(令和6年9月25日)火山調査委員会, 資料 調3-(4) 111 の活火山の調査観測結果に関する資料(中国地方、九州地方・南西諸島).
- (21) 気象庁: 令和6年(2024年)の霧島山の火山活動, 火山活動解説資料(年報).

# モニタリング結果と中・長期的取組みの参考文献

- (22) 気象庁:霧島山の火山活動解説資料(令和7年3月), 火山活動解説資料.
- (23) 防災科学技術研究所:霧島山, 第3回(令和6年9月25日)火山調査委員会, 資料 調3-(4) 111 の活火山の調査観測結果に関する資料(中国地方、九州地方・南西諸島).
- (24) 気象庁:霧島山の火山活動解説資料(令和7年1, 2月), 火山活動解説資料.
- (25) 井口正人・高山鐵朗・山崎友也・多田光宏・鈴木敦生・植木貞人・太田雄策・中尾茂(2008): GPS観測から明らかになった桜島のマグマ活動, 京都大学防災研究所年報, 第51号B, pp.241-246.
- (26) 井口正人・太田雄策・中尾茂・園田忠臣・高山鐵朗・市川信夫(2013): 桜島昭和火口噴火開始以降のGPS観測-2011年~2012年-, 「桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究(課題番号1809)」平成24年度分報告書.
- (27) Kozono, T., Ueda, H., Ozawa, T., Koyaguchi, T., Fujita, E., Tomiya, A. and Suzuki, J. Y. (2013): Magma discharge variations during the 2011 eruptions of Shinmoe-dake volcano, Japan, revealed by geodetic and satellite observations, Bull Volcanol, vol.75, 695. <https://doi.org/10.1007/s00445-013-0695-4>
- (28) 江頭庸夫・高山鐵朗・山本圭吾・Muhamad Hendrasto・味喜大介・園田忠臣・松島健・内田和也・八木原寛・王彦賓・木股文昭・宮島力雄・小林和典(1997): 始良カルデラの地盤の再隆起-1991年12月~1996年10月-, 京都大学防災研究所年報, 第40号B-1, pp.49-60.
- (29) Omori, F. (1916): The Sakura-Jima eruption and earthquakes II, Bulletin of The Imperial Earthquake Investigation Committee, vol.8, pp.35-179.
- (30) 地震調査委員会(2022): 2022年10月の地震活動の評価, 毎月の地震活動, 地震調査研究推進本部.
- (31) Yurai, H. and Ozawa, S. (2013): Quasi-periodic slow slip events in the afterslip area of the 1996 Hyuga-nada earthquakes, Japan, J. Geophys. Res. Solid Earth, vol.118, 2512-2527. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50161>
- (32) Takagi, R., Uchida, N. and Obara, K. (2019): Along-strike variation and migration of long-term slow slip events in the western Nankai subduction zone, Japan, J. Geophys. Res. Solid Earth, vol.124, 4, pp.3853-3880. <https://doi.org/10.1029/2018JB016738>
- (33) Yamamoto, K., Sonoda, T., Takayama, T., Ichikawa, N., Ohkura, T., Yoshikawa, S., Inoue, H., Matsushima, T., Uchida, K. and Nakamoto, M. (2013): Vertical ground deformation associated with the volcanic activity of Sakurajima volcano, Japan during 1996 - 2010 as revealed by repeated precise leveling surveys, Bull. Volcanol. Soc. Japan, vol.58, 1, pp.137-151.
- (34) 国土地理院:桜島, 第4回(令和7年2月17日)火山調査委員会, 資料 調4-(3)-1 桜島の現状の評価及び調査研究方策(案).
- (35) 気象庁:桜島, 第4回(令和7年2月17日)火山調査委員会, 資料 調4-(3)-1 桜島の現状の評価及び調査研究方策(案).
- (36) 気象庁:令和6年(2024年)の桜島の火山活動, 火山活動解説資料(年報).
- (37) 気象庁:桜島の火山活動解説資料(令和7年3月), 火山活動解説資料.
- (38) 気象庁:若尊, 第3回(令和6年9月25日)火山調査委員会, 資料 調3-(4) 111 の活火山の調査観測結果に関する資料(中国地方、九州地方・南西諸島).
- (39) 気象庁:桜島の火山活動解説資料(令和7年2月), 火山活動解説資料.
- (40) 産業総合研究所 地質調査総合センター:2024年2月14日の桜島噴出物構成粒子の特徴, 2024年5月14日から15日の桜島南岳噴火による噴出物の特徴, 2024年7月29日の桜島噴出物構成粒子の特徴, 2024年9月18日、24~26日および27日の桜島噴出物構成粒子の特徴, 火山噴火予知連絡会提出資料, <https://www.gsj.jp/hazards/volcano/yochiren/index.html>.
- (41) 国土地理院:池田・山川・開聞岳の干渉SAR時系列解析結果(南行), 第3回(令和6年9月25日)火山調査委員会, 資料 調3-(4) 111 の活火山の調査観測結果に関する資料(中国地方、九州地方・南西諸島).
- (42) 気象庁:池田・山川, 第3回(令和6年9月25日)火山調査委員会, 資料 調3-(4) 111 の活火山の調査観測結果に関する資料(中国地方、九州地方・南西諸島).

# モニタリング結果と中・長期的取組みの参考文献

- (43) 気象庁:開聞岳, 第3回(令和6年9月25日)火山調査委員会, 資料 調3-(4) 111 の活火山の調査観測結果に関する資料(中国地方、九州地方・南西諸島).
- (44) 環境省大気汚染物質広域監視システム(そらまめくん; <https://soramame.env.go.jp/>). 更新:2025/4/14.
- (45) 小林昭夫(2012):高知市付近で1977~1980年頃に発生した長期的スロースリップ, 地震 第2輯, vol.64, pp.63-73.
- (46) 国土地理院:薩摩硫黄島, 第4回(令和7年2月17日)火山調査委員会, 資料 調4-(2) 薩摩硫黄島の現状の評価及び調査研究方策(案).
- (47) 気象庁:薩摩硫黄島, 第4回(令和7年2月17日)火山調査委員会, 資料 調4-(2) 薩摩硫黄島の現状の評価及び調査研究方策(案).
- (48) 気象庁:令和6年(2024年)の薩摩硫黄島の火山活動, 火山活動解説資料(年報).
- (49) 気象庁:薩摩硫黄島の火山活動解説資料(令和7年3月), 火山活動解説資料.
- (50) 防災科学技術研究所・日本大学文理学部:薩摩硫黄島 2024 年 9 月 1 日噴火による火山灰, 第4回(令和7年2月17日)火山調査委員会, 資料 調4-(2) 薩摩硫黄島の現状の評価及び調査研究方策(案).
- (51) 地震調査委員会(2013):九州地域の活断層の長期評価(第一版), 平成25年2月1日, 地震調査研究推進本部, 81 pp.
- (52) 高倉伸一・橋本武志・小池克明・小川康雄(2000):MT 法による阿蘇カルデラの比抵抗断面, Conductivity Anomaly 研究会2000年論文集, pp.23-30.
- (53) Hata, M., Matsushima, N., Takakura, S., Utsugi, M., Hashimoto, T. and Uyeshima, M. (2018): Three-dimensional electrical resistivity modeling to elucidate the crustal magma supply system beneath Aso caldera, Japan, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol.123, 8, pp.6334-6346. <https://doi.org/10.1029/2018JB015951>
- (54) Matsushima, N., Utsugi, M., Takakura, S., Yamasaki, T., Hata, M., Hashimoto, T. and Uyeshima, M. (2020): Magmatic-hydrothermal system of Aso Volcano, Japan, inferred from electrical resistivity structures, *Earth, Planets and Space*, vol.72, 57. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01180-8>
- (55) Aizawa, K., Takakura, S., Asaue, H., Koike, K., Yoshimura, R., Yamazaki, K., Komatsu, S., Utsugi, M., Inoue, H., Tsukamoto, K., Uyeshima, M., Koyama, T., Kanda, W., Yoshinaga, T., Matsushima, N., Uchida, K., Tsukashima, Y., Matsushima, T., Ichihara, H., Muramatsu, D., Teguri, Y., Shito, A., Matsumoto, S. and Shimizu, H. (2021): Electrical conductive fluid-rich zones and their influence on the earthquake initiation, growth, and arrest processes: observations from the 2016 Kumamoto earthquake sequence, Kyushu Island, Japan, *Earth, Planets and Space*, vol.73, 12. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01340-w>
- (56) Sudo, Y. and Kong L.S.L. (2001): Three-dimensional seismic velocity structure beneath Aso Volcano, Kyushu, Japan. *Bull. Volcanol*, vol.63, pp.326-344. <https://doi.org/10.1007/s004450100145>
- (57) Abe, Y., Ohkura, T., Shibutani, T., Hirahara, K., Yoshikawa, S. and Inoue, H. (2017): Low-velocity zones in the crust beneath Aso caldera, Kyushu, Japan, derived from receiver function analysis, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol.122, 3, pp.2013-2033. <https://doi.org/10.1002/2016JB013686>
- (58) Huang, Y., Ohkura, T., Kagiya, T., Yoshikawa, S. and Inoue, H. (2018): Shallow volcanic reservoirs and pathways beneath Aso caldera revealed using ambient seismic noise tomography, *Earth, Planets and Space*, vol.70, 169. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0941-2>
- (59) 木村育磨・大倉敬宏・松本聡・志藤あずさ・清水洋(2019):阿蘇火山周辺の3次元地震波速度構造, 日本火山学会講演予稿集, 2019年度秋季大会, p.122.
- (60) Shito, A., Matsumoto, S., Ohkura, T., Shimizu, H., Sakai, S., Iio, Y., Takahashi, H., Yakiwara, H., Watanabe, T., Kosuga, M., Okada, T., Yoshimi, M., and Asano, Y. (2020): 3-D Intrinsic and Scattering Seismic Attenuation Structures Beneath Kyushu, Japan, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol.125, 8, e2019JB018742. <https://doi.org/10.1029/2019JB018742>
- (61) 三好雅也・長谷中利昭・佐野貴司(2005):阿蘇カルデラ形成後に活動した多様なマグマとそれらの成因関係について, 火山, vol.50, pp.269-283.
- (62) 三好雅也(2013):カルデラ火山地域における大規模噴火再発の可能性評価, 平成24年度放射性廃棄物共通技術調査等事業「放射性廃棄物重要基礎技術研究調査」報告, 第2分冊, 研究報告 6.

# モニタリング結果と中・長期的取組みの参考文献

- (63) Miyagi, I., Hoshizumi, H., Suda, T., Saito, G., Miyabuchi, Y. and Geshi, N. (2023): Importance of Long-Term Shallow Degassing of Basaltic Magma on the Genesis of Massive Felsic Magma Reservoirs: a Case Study of Aso Caldera, Kyushu, Japan, *Journal of Petrology*, Vo.64, March 2023, egad009. <https://doi.org/10.1093/petrology/egad009>
- (64) 小林哲夫(2017):カルデラ噴火の前兆現象に関する地質学的研究, 平成29年度原子力規制庁請負調査報告書.
- (65) 森川徳敏・風早康平・佐藤努・高橋浩・戸崎裕貴・高橋正明・稲村明彦(2019):火山地域地下水中の放射性塩素同位体比( $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ 比)によるマグマだまり状態推定の試み:阿蘇カルデラを対象として, 日本火山学会講演予稿集, 2019年度秋季大会, p.209.
- (66) 安池由幸・西来邦章・廣井良美(2019):火山影響評価に係る科学的知見の整備, 安全研究成果報告, RREP-2019-4001, 令和元年5月.
- (67) Kawaguchi, M., Hasenaka, T., Koga, K. T., Rose-Koga, E. F., Yasuda, A., Hokanishi, N., Mori, Y., Shimizu, K. and Ushikubo, T. (2021): Persistent gas emission originating from a deep basaltic magma reservoir of an active volcano: the case of Aso volcano, Japan, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol.176, Article: 6. <https://doi.org/10.1007/s00410-020-01761-6>
- (68) 大倉敬宏(2017):測地学的手法による火山活動の観測について, 平成29年度原子力規制庁請負調査報告書.
- (69) Hashimoto, M. (2020): Postseismic deformation following the 2016 Kumamoto earthquake detected by ALOS-2/PALSAR-2, *Earth, Planets and Space*, vol.72, 154. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01285-0>
- (70) Niu, J. and Song, T.R.A. (2021): Episodic transport of discrete magma batches beneath Aso volcano, *Nature Communications*, vol.12, pp.1-12. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25883-y>
- (71) 産業技術総合研究所 地質調査総合センター(2019):日本列島及びその周辺域の熱データベース, <https://www.gsj.jp/Map/JP/geology.html>.
- (72) 大久保泰邦(1984):全国のキュリー点解析結果. 地質ニュース, 362号, pp.12-17.
- (73) 鍵山恒臣・歌田久司・三ヶ田 均・筒井智樹・増谷文雄(1997):霧島火山群の構造とマグマ供給系, *火山*, vol.42, 特別号, pp.S157-S165.
- (74) Goto, T., Oshiman, N. and Sumitomo, N. (1997): The Resistivity Structure around the Hypocentral Area of the Ebino Earthquake Swarm in Kyushu District, Japan, *J. Geomag. Geoelectr.*, vol.49, pp.1279-1291.
- (75) Aizawa, K., Koyama, T., Hase, H., Uyeshima, M., Kanda, W., Utsugi, M., Yoshimura, R., Yamaya, Y., Hashimoto, T., Yamazaki, K.'i., Komatsu, S., Watanabe, A., Miyakawa, K. and Ogawa, Y. (2014): Three-dimensional resistivity structure and magma plumbing system of the Kirishima Volcanoes as inferred from broadband magnetotelluric data, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol.119, 1, pp.198-215. <https://doi.org/10.1002/2013JB010682>
- (76) 長岡 優・西田 究・青木陽介・武尾 実・大倉敬宏・吉川 慎(2019):地震波干渉法による霧島山のマグマ供給系の解明, 日本地球惑星科学連合2019年大会, SSS17-P02.
- (77) 澁谷拓郎・寺石眞弘・小松信太郎・山崎健一・山下裕亮・大倉敬宏・吉川 慎・井口正人・為栗 健・園田忠臣(2019):地震学的手法による南九州下のフィリピン海スラブとその周辺域の構造の推定, 京都大学防災研究所年報, 第62号B, pp279-287.
- (78) Nishida, K., Mizutani, Y., Ichihara, M. and Aoki, Y. (2020): Time-Lapse Monitoring of Seismic Velocity Associated With 2011 Shinmoe-Dake Eruption Using Seismic Interferometry: An Extended Kalman Filter Approach, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol.125, 9, e2020JB020180. <https://doi.org/10.1029/2020JB020180>
- (79) Alanis, P.K., Miyamachi, H., Yakiwara, H., Goto, K., Kobayashi, R., Tameguri, T. and Iguchi, M. (2012): Seismic Velocity Structure of the Crust Beneath the Aira Caldera in Southern Kyushu by Tomography of Travel Times of Local Earthquake Data, *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, vol.57, pp.227-234.
- (80) 井口正人(2017):地震波トモグラフィによる始良カルデラ周辺の地震波速度構造調査結果及び始良カルデラの状態について, 平成29年度原子力規制庁請負調査報告書.

# モニタリング結果と中・長期的取組みの参考文献

- (81) 筒井智樹・為栗 健・井口正人(2021):人工地震記録による始良カルデラ西部の地殻内S波地震反射面の推定, 火山, vol.66, pp.71-81.
- (82) 為栗 健・八木原寛・筒井智樹・井口正人(2022):高分解能な3次元地震波速度構造解析による始良カルデラ下のイメージング, 火山, vol.67, pp.69-76.
- (83) Miyamachi, H., Yakiwara, H., Kobayashi, R. et al. (2023): Solidified magma reservoir derived from active source seismic experiments in the Aira caldera, southern Kyushu, Japan, Earth Planets Space, vol.75, Article number: 166 (2023). <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01919-z>
- (84) 関口悠子・長谷中利昭・森 康(2014):始良カルデラ火山に見られる3回のマグマ活動サイクル, 月刊地球, vol.36, 8, 303-309.
- (85) 小林 哲夫(2019):1. 地質学視点でみた桜島火山の大規模噴火, 自然災害科学, vol.38, no.3, pp.280-289.
- (86) 井口正人・太田雄策・中尾茂・園田忠臣・高山鐵朗・市川信夫(2011):桜島昭和火口噴火開始以降のGPS観測(2010年~2011年),「桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究」(課題番号1809)平成22年度分報告書.
- (87) 山本圭吾・園田忠臣・高山鐵朗・市川信夫・大倉敬宏・横尾亮彦・吉川慎・井上寛之・諏訪博之・松島 健・藤田詩織・神菌めぐみ(2013):水準測量によって測定された桜島火山周辺域の地盤上下変動-2012年11月および12月測量の結果-, 京都大学防災研究所年報, 第56号B, pp.187-195.
- (88) Hickey, J., Gottsmann, J., Nakamichi, H. and Iguch, M. (2016): Thermomechanical controls on magma supply and volcanic deformation: application to Aira caldera, Japan, Scientific Reports, vol.6, 32691. <http://dx.doi.org/10.1038/srep32691>
- (89) 味喜大介・筒井智樹・井口正人(2021):GNSS観測による始良カルデラ下へのマグマ供給率の推定, 京都大学防災研究所年報, 第64号B, pp.101-107.
- (90) 筒井智樹・味喜大介・井口正人(2024):始良カルデラにおける海底地盤変動観測装置の設置後1年間の挙動, 京都大学防災研究所年報, 第67号B, pp.79-86.
- (91) 味喜大介・筒井智樹・井口正人(2024):始良カルデラ周辺の地盤変動に関する有限要素法モデルを用いた圧力源形状の検討(続報), 京都大学防災研究所年報, 第67号B, pp.87-90.
- (92) 山本圭吾・大島弘光・前川徳光・及川 純・園田忠臣・大久保修平・田中愛幸・今西祐一・渡邊篤志・坂守・風間卓仁(2014):桜島および鹿児島湾周辺における精密重力測定(2013年10月および11月),「桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究」平成25年度分報告書.
- (93) 西潔・山本圭吾・井口正人・石原和弘・古澤 保(2001):南九州の3次元地震波速度構造, 月刊地球, vol.23, 8, 573-577.
- (94) 海野直弘・八木原 寛・仲谷幸浩・平野舟一郎(2019):阿多カルデラ周辺の地殻の3次元地震波速度構造, 及び加久藤カルデラ下の速度構造との比較, 日本火山学会講演予稿集, 2019年度秋季大会, pp.43.
- (95) 長屋暁大・藤江 剛・小平秀一・田中 聡・山本揚二郎・杉岡裕子・宮町宏樹・松野哲男・大塚宏徳・鈴木啓太・島 伸和(2023):屈折法地震波構造探査によって明らかになった鬼界カルデラ火山直下の低速度領域, 海と地球のシンポジウム2022, 6-2.
- (96) 前野 深・宮本 毅・谷口宏充(2002):鬼界カルデラにおけるアカホヤ噴火以降の火山活動史, 東北アジア研究, vol.6, pp.253-277.
- (97) Hamada, M., Hanyu, T., McIntosh, I.M., Tejada, M.L.G., Chang, Q., Kaneko, K., Kimura, J., Kiyosugi, K., Miyazaki, T., Nakaoka, R., Nishimura, K., Sato, T., Seama, N., Suzuki-Kamata, K., Tanaka, S., Tatsumi, Y., Ueki, K., Vaglarov, B.S. and Yoshida, K. (2023): Evolution of magma supply system beneath a submarine lava dome after the 7.3-ka caldera-forming Kikai-Akahoya eruption, Journal of Volcanology and Geothermal Research, vol.434, 107738. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107738>
- (98) Shimizu, S., Nakaoka, R., Seama, N. et al. (2024): Submarine pyroclastic deposits from 7.3 ka caldera-forming Kikai-Akahoya eruption, Journal of Volcanology and Geothermal Research, vol.448, 108017. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2024.108017>
- (99) 篠原宏志・斎藤元治・松島喜雄・川辺慎久・風早康平・浦井 稔・西 祐司・斎藤英二・濱崎聡志・東宮昭彦・森川徳敏・駒澤正夫・安原正也・宮城磯治(2008):火山研究解説集:薩摩硫黄島, 産総研地質調査総合センター. [https://gbank.gsj.jp/volcano/Act\\_Vol/satsumaoujima/vr/index.html](https://gbank.gsj.jp/volcano/Act_Vol/satsumaoujima/vr/index.html)
- (100) 斎藤元治(2017):火山ガスと噴火メカニズムについて, 平成29年度原子力規制庁請負調査報告書.

# モニタリング結果と中・長期的取組みの参考文献

- (101) 井口正人・高山鐵朗・味喜大介・西 祐司・斉藤英二(2002): 鬼界カルデラの地盤変動. 薩摩硫黄島火山・口永良部島火山の集中総合観測, pp.29-32.
- (102) Ozawa, S., Munekane, H. and Suito, H. (2024): Time-dependent modeling of slow-slip events along the Nankai Trough subduction zone, Japan, within the 2018-2023 period, *Earth, Planets and Space*, vol. 76, Article number: 23 (2024) . <https://doi.org/10.1186/s40623-024-01970-4>
- (103) Yu, C., Penna, N. T. and Li, Z. (2017): Generation of real-time mode high-resolution water vapor fields from GPS observations, *J. Geophys. Res. Atmospheres*, 122, 2008-2025. <https://doi.org/10.1002/2016JD025753>
- (104) 国土地理院(2018): 熊本地震の余効変動, 地震予知連絡会会報, 100(12-7), pp.405-408.
- (105) Tobita, M. (2016): Combined logarithmic and exponential function model for fitting postseismic GNSS time series after 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Earth Planets Space*, vol.68, Article number: 41. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0422-4>
- (106) Takagi, R., Uchida, N. and Obara, K. (2019): Along-strike variation and migration of long-term slow slip events in the western Nankai subduction zone, Japan, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol.124, 4, pp.3853-3880. <https://doi.org/10.1029/2018JB016738>
- (107) Okada, Y. (1985): Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol.75, 1135-1154. <https://doi.org/10.1785/BSSA0750041135>
- (108) Okada, Y. (1992): Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol.82, 1018-1040. <https://doi.org/10.1785/BSSA0820021018>
- (109) 吉田武・西村太志・中村 美千彦(2017): 火山学, 現代地球科学入門シリーズ(大谷栄治, 長谷川昭, 花輪公雄編)7, 共立出版, 408pp.
- (110) 国土地理院(2015): 平成27年(2015年)桜島の火山活動に伴う地殻変動, <https://www.gsi.go.jp/cais/topic150818-index.html>.
- (111) Morishita, Y., Kobayashi, T. and Yarai, H. (2016): Three-dimensional deformation mapping of a dike intrusion event in Sakurajima in 2015 by exploiting the right- and left-looking ALOS-2 InSAR, *Geophysical Research Letters*, vol.43, 4197-4204. <https://doi.org/10.1002/2016GL06829>
- (112) 九州電力株式会社(2021): 川内原子力発電所及び玄海原子力発電所火山活動のモニタリング評価結果(2020年度報告), 202pp. 2021年6月16日.
- (113) Matsumoto, Y., Yoshida, K., Matsuzawa, T. and Hasegawa, A. (2021): Fault-Valve Behavior Estimated From Intensive Foreshocks and Aftershocks of the 2017 M 5.3 Kagoshima Bay Earthquake Sequence, Kyushu, Southern Japan, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol.126, 5, e2020JB020278. <https://doi.org/10.1029/2020JB020278>
- (114) Wessel, P. and Smith, W.H.F. (1998): New, improved version of Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. Amer. Geophys. U.*, vol.79 , pp.579. <https://doi.org/10.1029/98EO00426>