余　白

6. マグマ供給率算定手法に関する検討（1）火山ガス放出量に基づく想定

・火山ガス（SO_2）放出量とマグマ供給率を関連付けて考察する知見もあるため、桜島において観測される火山ガス（SO_2）放出量から推定される姶良カルデラの脱ガスマグマ量と、地盤変動から算出されるマグマ供給率の比較を行った。

・篠原ほか（2008）は、硫黄岳山頂火口から放出されているマグマ性ガスの放出量と昭和硫黄島メルト包有物の揮発性成分濃度から、脱ガスマグマ量を算出している。
・この手法によると、噴火時に全ての火山ガスが脱ガスすると仮定した場合、脱ガスマグマ量は次式により表される。

$$M = \frac{a \times 365}{b \times 10^9 \times \frac{c}{100}}$$

M：脱ガスマグマ量　（km^3/年）
a：1日あたりの火山ガス（SO_2）放出量　（ton/day）
b：脱ガス前のマグマの密度　（g/cm^3）
c：脱ガス前のマグマのSO_2含有量　（wt.%）

＜ a（1日あたりの火山ガス（SO_2）放出量　（ton/day））の設計値＞

既往の文献による観測値より設定。

a（ton/day）	設定根拠
1,056	観測期間2005年-2015年（Carn et al., 2017）
1,640	観測期間1975年-2006年（Mori et al., 2013）

＜ b（脱ガス前のマグマの密度　（g/cm^3））の設計値＞

一般的な値として、2.5（g/cm^3）　と設定。

＜ c（脱ガス前のマグマのSO_2含有量　（wt.%））の設計値＞

メルト包有物の組成より設定。桜島のメルト包有物の組成を検討した文献はないため、薩摩硫黄島、阿蘇のメルト包有物の組成を適用。

c（wt.%）	設定根拠
0.372	薩摩硫黄島（Saito et al., 2001）
0.75	阿蘇（Kawaguchi et al., 2021）
0.8	阿蘇（川口ほか, 2017）

6. マグマ供給率算定手法に関する検討（1）火山ガス放出量に基づく想定

- 推定された脱ガスマグマ量（0.019～0.064（km^3/年））は、井口ほか（2013）による、桜島島内および姶良カルデラ周辺の体積変化量に火山灰放出量を加えることで算出したマグマ供給率0.0073（km^3/年）よりも大きい。
- 脱ガスマグマ量が過剰となる原因として、風早・篠原（1996）では、「噴火前のマグマ中にはSO_2を含む気泡が存在し、噴火時の過剰な脱ガスがおこると考えられる」等の指摘があり、放出された火山ガス（SO_2）にはメルト包有物に含まれないSO_2も含まれている可能性がある。
- このため、現状では火山ガス（SO_2）放出量に基づくマグマ供給率の想定には課題が残ることから、引き続き、知見の収集に努めるとともに研究の進展にあわせた検討を今後も行っていく。

＜M（脱ガスマグマ量　（km^3/年））の推定結果＞

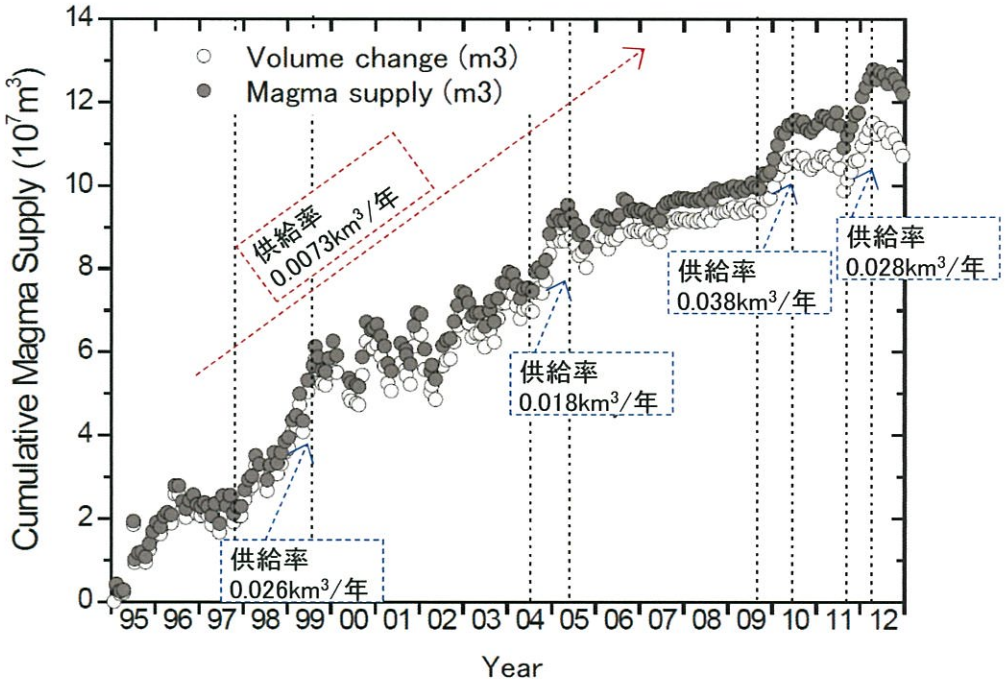
観測された火山ガス放出量から脱ガスマグマ量を推定した結果、姶良カルデラの脱ガスマグマ量は下表の通り、0.019～0.064（km^3/年）と推定された。

a	b ＼ c	0.8	0.75	0.372
1,056	2.5	0.019	0.021	0.041
1,640		0.030	0.032	0.064

風早・篠原（1996）

- 爆発的噴火時の過剰のSの成因は、1)噴火時におけるS含有鉱物の分解、2)噴火前に存在するS含有気泡などが考えられ、非噴火時には3)火道内マグマ対流も考慮し、解明していく必要がある。
- Sだけではなく、H_2OあるいはCO_2について噴火および非噴火時の収支を明らかにすることで、Sだけでは困難であった脱ガス圧力の推定や過剰のSの原因を明らかにすることができると考えられる。
- 今後、様々な噴火や脱ガス現象に際し、より多くの揮発性成分のデータを入手し、収支を明らかにすることにより、より現実的な噴火・脱ガスモデルを構築することが可能になるであろう。

＜地殻変動から算出されたマグマ供給率＞



姶良カルデラにおけるマグマ溜まりの体積変化量とマグマの供給量の推移
（井口ほか，2013に加筆）

6. マグマ供給率算定手法に関する検討（2）粘弾性モデル［背景・検討フロー］

- 現在、姶良カルデラのマグマ供給率については、茂木モデル（弾性モデル）により算出している。一方、地下深部では粘性挙動が想定されているため、本検討では、粘弾性モデルを用いて粘性挙動がマグマ供給率に及ぼす影響を検討した。
- 検討の流れとしては、まず、Yamasaki et al.（2020）を参考に大正噴火以降の地盤変動について粘弾性モデルによる再現性の確認を実施し（STEP1、STEP2）、次に、再現が良好であったパラメータを用いて現在のマグマ供給率を算出し、茂木モデルにより算出された値との比較を実施した（STEP3）。

［検討フロー］

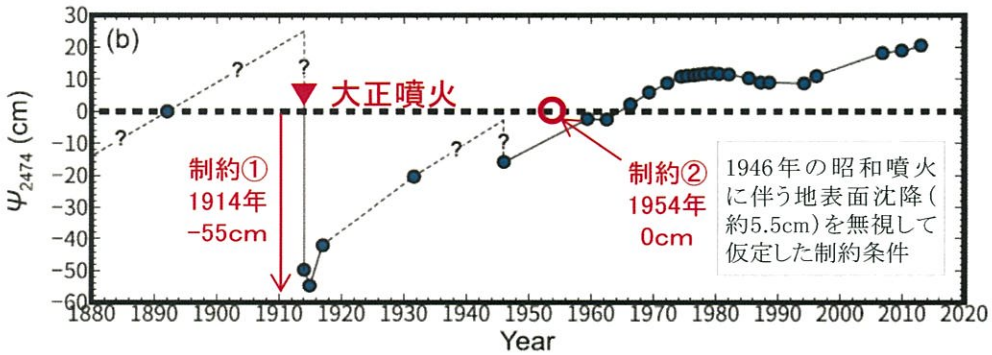
STEP1：モデルの挙動確認

↓

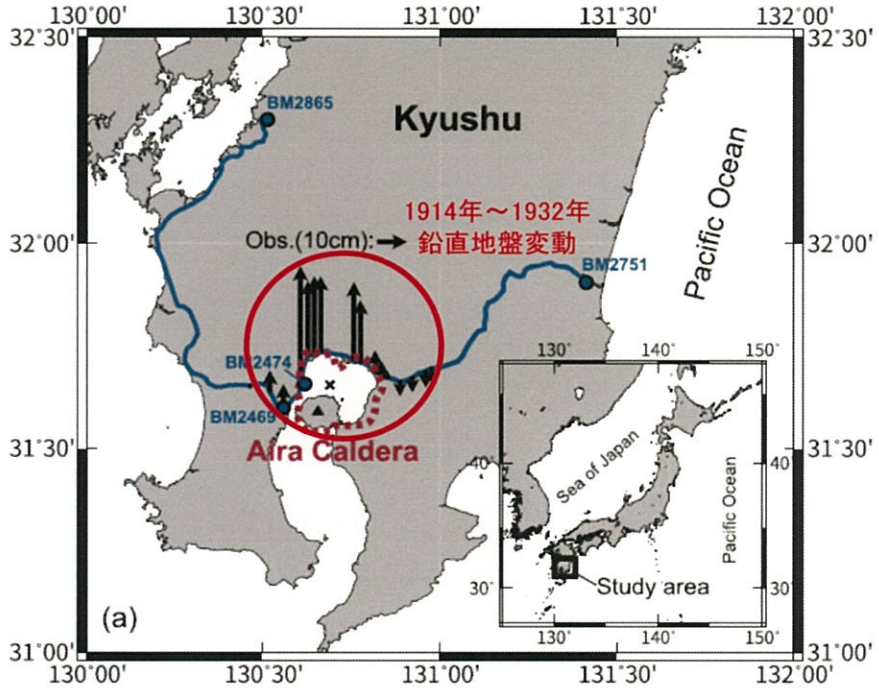
STEP2：最適パラメータの決定
① 2地点間相対変位の再現
② 時空間分布の再現

↓

STEP3：マグマ供給率の比較



STEP2①再現対象：水準点BM2474−BM2469
（Yamasaki et al., 2020に加筆）



STEP2②再現対象：姶良カルデラ周辺の鉛直地盤変動
（Yamasaki et al., 2020に加筆）

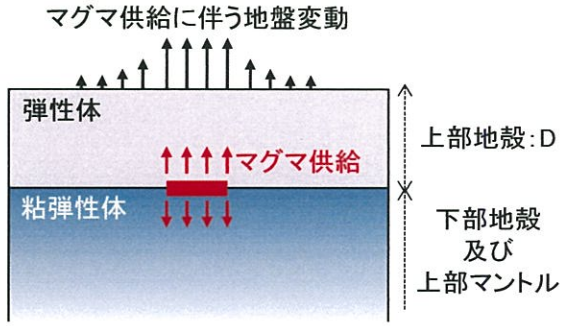
6. マグマ供給率算定手法に関する検討(2)粘弾性モデル[粘弾性モデルの概要]

・粘弾性モデルの基本設定はYamasaki et al.(2020)を参考にしており、本検討と当該文献との相違点としては、①解析モデルを「2層粘弾性モデル」としていること、②圧力源の形状を「矩形開口体」としていることが挙げられる。

・この相違点の影響を把握するため、STEP1においてモデルの挙動の確認を行った。

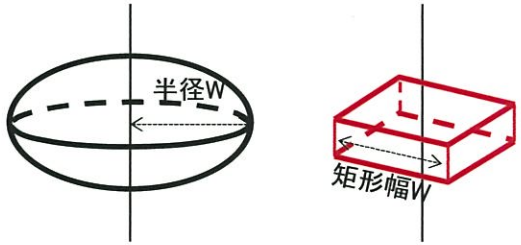
Yamasaki et al.(2020)と本検討との基本設定の比較

項　目		Yamasaki et al.(2020)	本検討
解析モデル	モデルスキーム	3次元有限要素モデル	2層粘弾性モデル
	解析領域(水平)	192×192km	ソースから70km円
	解析領域(鉛直)	3層　厚さ100km 上部地殻(弾性)D km +下部地殻(粘弾性)40-D km +マントル(粘弾性)60km	2層半無限 上部地殻(弾性)D km + 下部地殻及び上部マントル
圧力源	位置	130.689°　E , 31.654°　N (Mogi (1958)による)	同　左
	深さ	最適化対象:Dkm(上部地殻下端)	同　左
	形状	扁平楕円体	矩形開口体
	大きさ	最適化対象:W km(半径)	最適化対象:W km(矩形幅)
粘弾性モデル	構成則	Maxwellモデル	同　左
	弾性定数	全層共通:ポアソン比0.25, 剛性率3.0×10^{10} Pa	同　左
	粘性係数	最適化対象:η Pa・s (下部地殻及びマントルの粘性)	同　左
その他	マグマ供給率	最適化対象:Ω km^3/年	同　左
	マグマ蓄積時間	最適化対象:te 年	同　左



Wang et al. (2006)による粘弾性多層モデルPSGRN/PSCMPを使用

2層粘弾性モデルのイメージ



圧力源イメージ:Yamasaki et al.(2020)(左)
本検討(右)

6. マグマ供給率算定手法に関する検討(2)粘弾性モデル[STEP①モデルの挙動確認]

STEP1:モデルの挙動確認

- 大正噴火前後のマグマ蓄積から放出の過程(再蓄積または蓄積なし)における地盤高と緩和時間の関係を確認する。

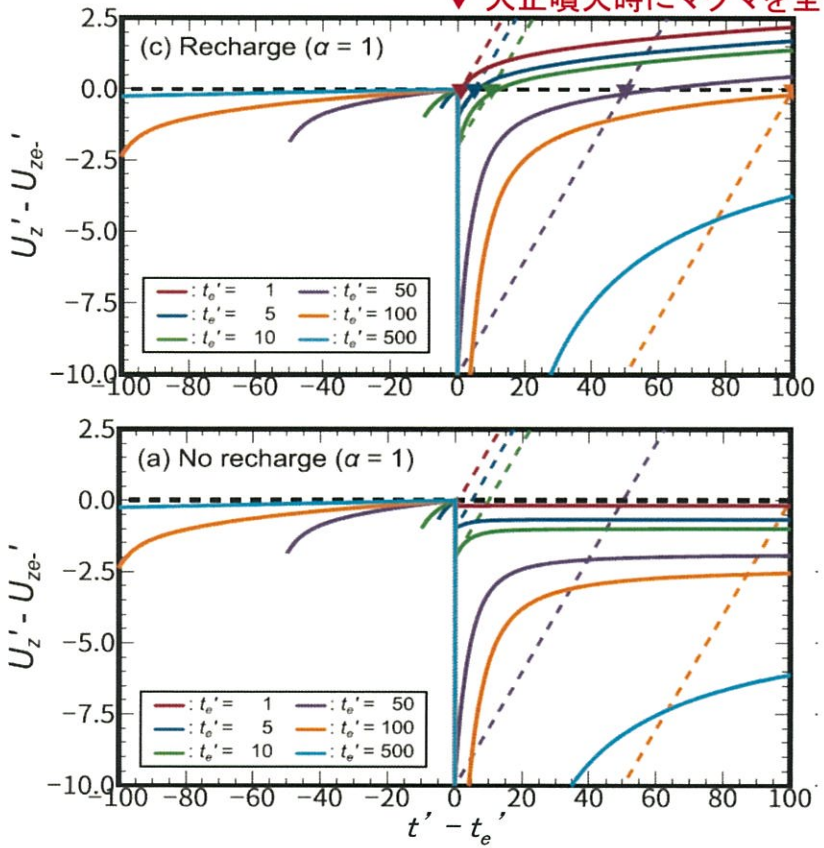
⇒ Yamasaki et al.(2020)と概ね同様の挙動を示すことから、解析モデルと圧力源の形状といった違いを踏まえたとしても、本検討のモデルは妥当なモデルであることを確認。

Yamasaki et al.(2020)と本検討との計算条件の比較

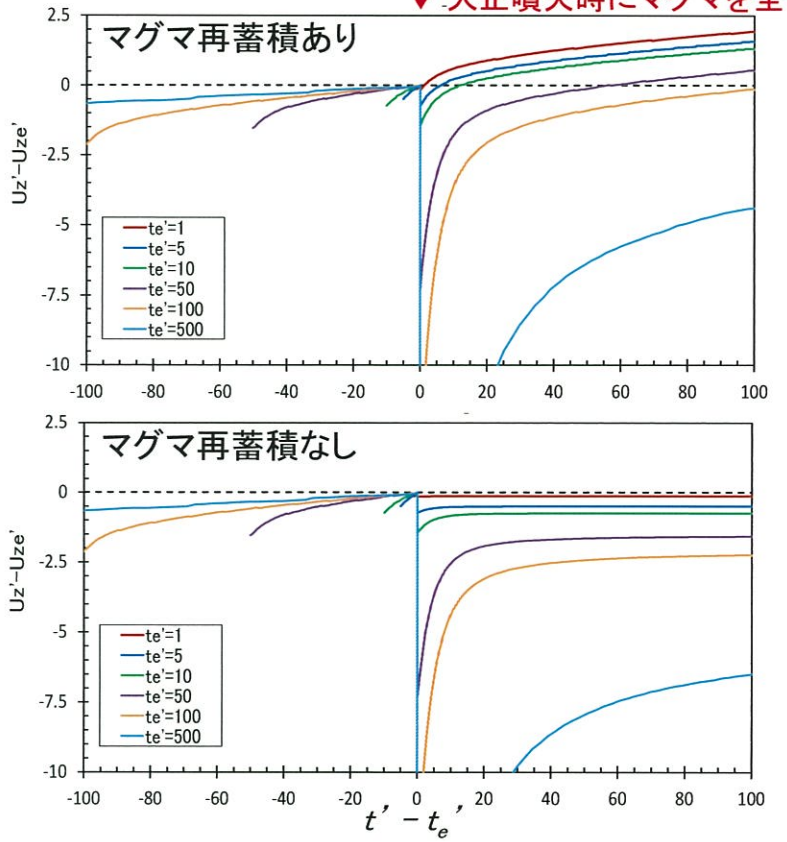
項　目	Yamasaki et al.(2020)	本検討
圧力源大きさW(km)	5(半径)	5.9(矩形幅)
圧力源深さD(km)	10	同　左
粘性係数 η (Pa・s)	5×10^{18}	
蓄積時間te´	1,5,10,50,100,500	
マグマ供給率 Ω (km^3/年)	0.01	
マグマ放出率 α ※	1,10	

※ 蓄積したマグマの1/ α を噴火時に放出

▼ 大正噴火時にマグマを全て放出



▼ 大正噴火時にマグマを全て放出



給源直上における鉛直地盤変動の推移:Yamasaki et al.(2020)(左)、本検討(右)

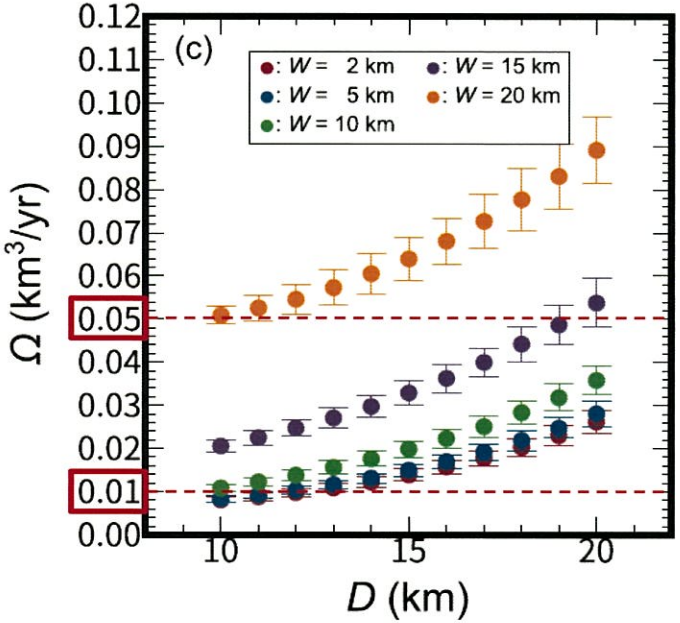
6. マグマ供給率算定手法に関する検討(2)粘弾性モデル[STEP②最適パラメータの決定]

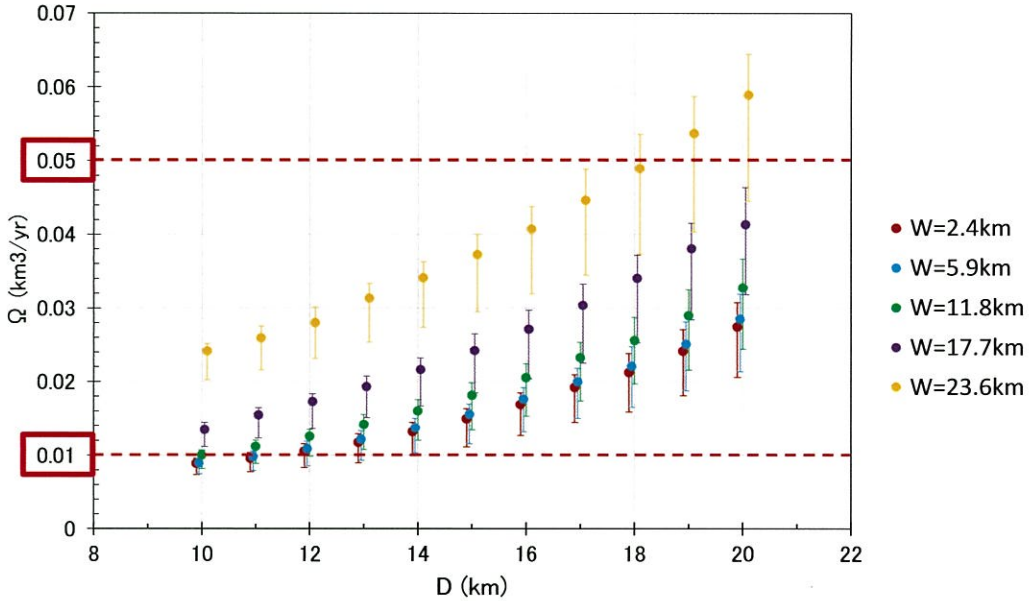
STEP2:最適パラメータの決定(①2地点間相対変位の再現)

- 2地点間の時間変化(2つの制約条件)を再現するよう、「圧力源の大きさ」、「粘性係数」及び「圧力源深さ」ごとに、マグマ供給率とマグマ蓄積時間を最適化する。

Yamasaki et al.(2020)と本検討との計算条件の比較

項　目	Yamasaki et al.(2020)	本検討
圧力源大きさW(km)	2,5,10,15,20 (半径)	2.4,5.9,11.8,17.7,23.6 (矩形幅)
粘性係数 η (Pa・s)	1×10^{18}–10^{19}	同　左
圧力源深さD(km)	10–20	
マグマ放出率 α	1	





鉛直地盤変動(1914年・1954年)で制約された圧力源深さごとのマグマ供給率:Yamasaki et al.(2020)(左)、本検討(右)

6. マグマ供給率算定手法に関する検討(2)粘弾性モデル[STEP②最適パラメータの決定]

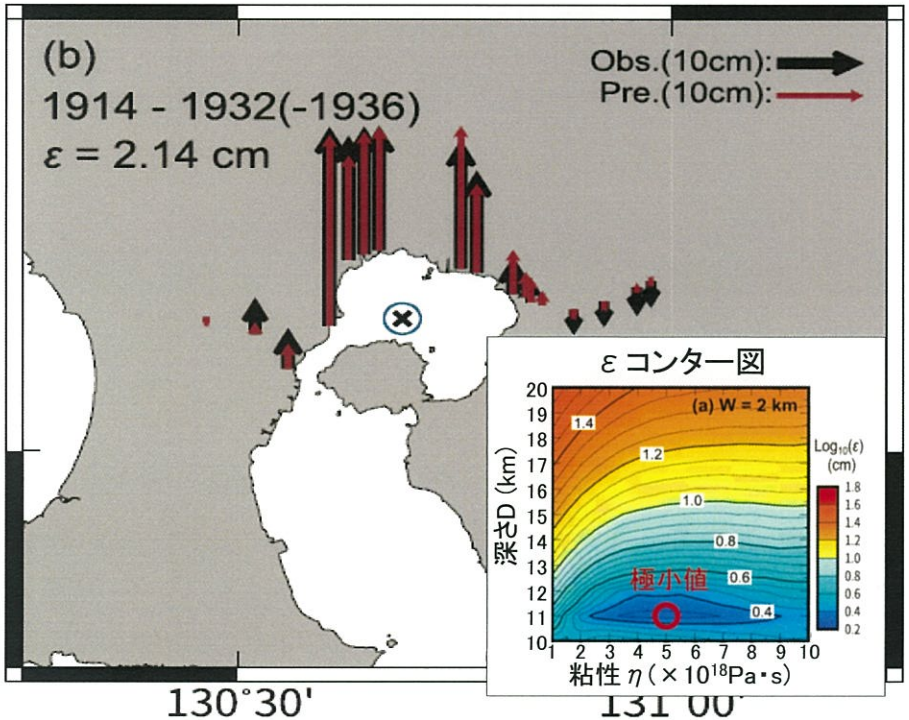
STEP2:最適パラメータの決定(②時空間分布の再現)

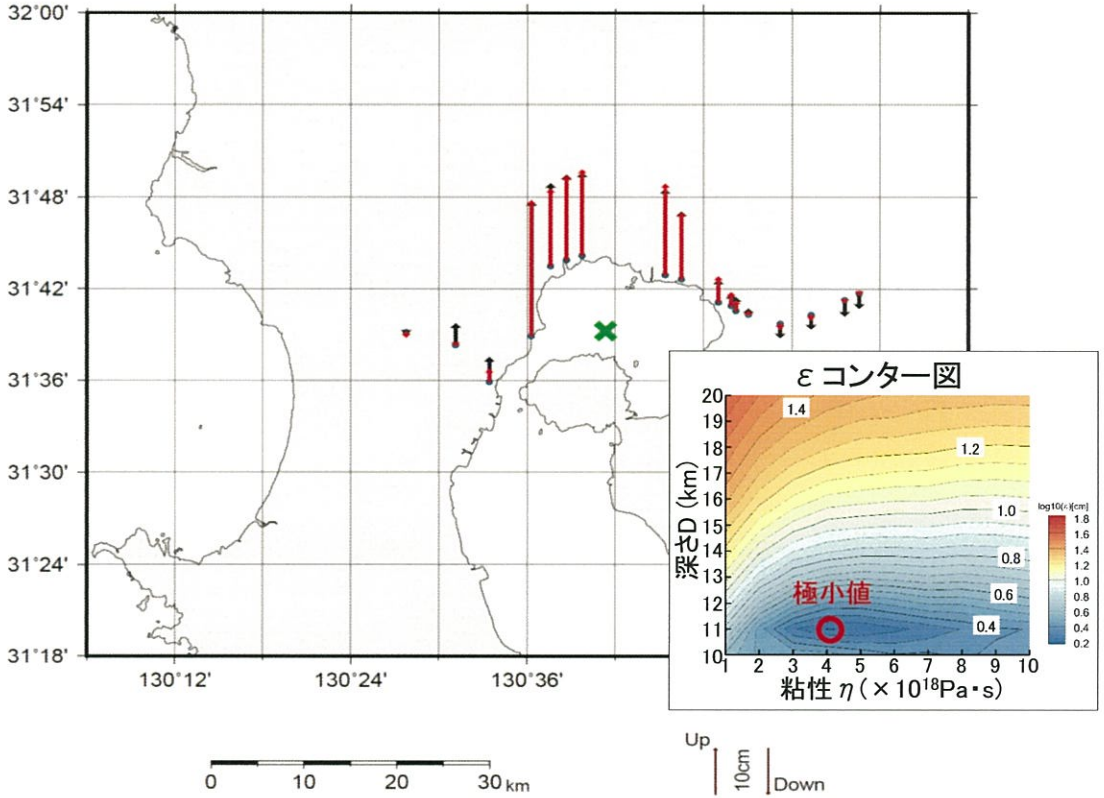
- 噴火後の急速な変位回復がみられる1914年～1932年の空間分布を再現するよう、観測値と計算値とのRMSE値 ε を極小化する最適パラメータを決定する。

⇒ 空間分布の再現性は高く、そのパラメータ(圧力源の深さ・大きさ、粘性係数、マグマ供給率及びマグマ蓄積時間)は、Yamasaki et al.(2020)との違いもわずかであることから、妥当な最適パラメータが得られていることを確認。

Yamasaki et al.(2020)と本検討との最適パラメータの比較

項　目		Yamasaki et al.(2020)	本検討
圧力源	深さD(km)	11	11
	大きさW(km)	2 (半径)	5.9 (矩形幅)
粘性係数 η (Pa・s)		5×10^{18}	4×10^{18}
マグマ供給率 Ω(km³/年)		0.009	0.009
マグマ蓄積時間te(年)		47	47





鉛直地盤変動(1914年～1932年)の再現計算結果:Yamasaki et al.(2020)(左)、本検討(右)

6. マグマ供給率算定手法に関する検討(2)粘弾性モデル[STEP③マグマ供給率の比較]

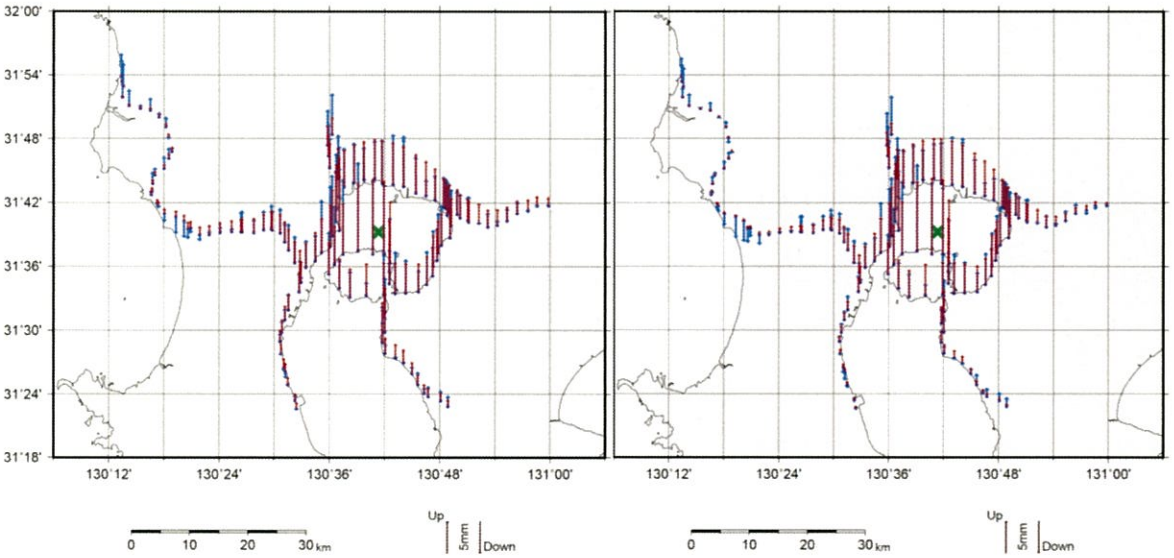
STEP3:マグマ供給率の比較

- 2016年～2017年の水準測量結果を対象に、粘弾性モデル、茂木モデルそれぞれによるマグマ供給率を算出し、双方の結果を比較する。
- さらに、当該水準測量結果を2倍、5倍にした同様の検討についても実施する。

⇒ 水準測量結果の再現性に関して、双方のモデルによる大きな違いはないことを確認。

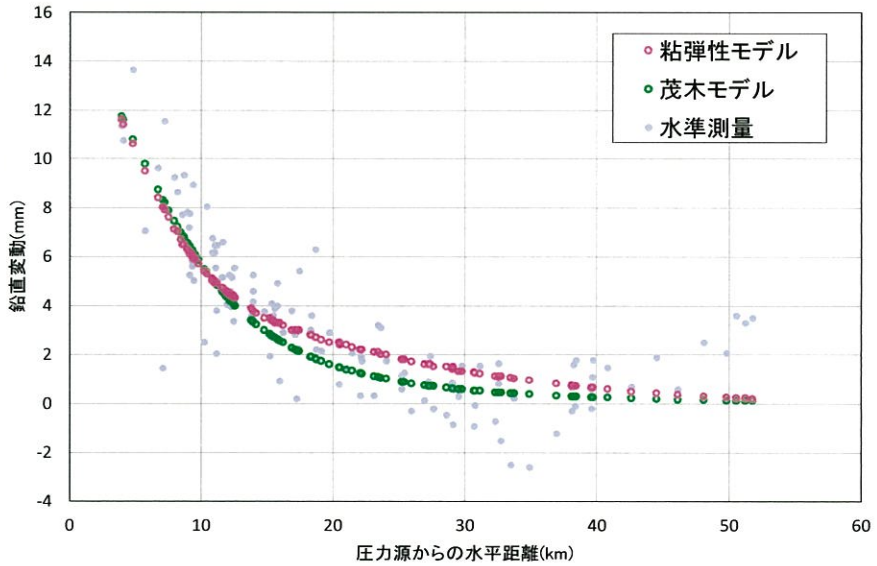
粘弾性モデルと茂木モデルとの計算条件の比較

項　目	粘弾性モデル	茂木モデル
解析領域	弾性体＋粘弾性体	弾性体
圧力源	矩形開口体	点源
基本パラメータ	STEP2最適パラメータ使用	圧力源位置(D11km)、ポアソン比(0.25)
計算方法	① 2016年まではSTEP2の条件にて計算を実施 ② 2016年～2017年の水準測量結果と計算値とのRMSEが最小となるマグマ供給率を算出	① 2016年～2017年水準測量結果と計算値とのRMSEが最小となるマグマ供給率を算出



水準測量結果の再現計算結果:粘弾性モデル(左)、茂木モデル(右)

赤線;計算結果　青線;水準測量結果



圧力源からの水平距離と鉛直変動の関係

6. マグマ供給率算定手法に関する検討（2）粘弾性モデル［STEP③マグマ供給率の比較］

STEP3：マグマ供給率の比較

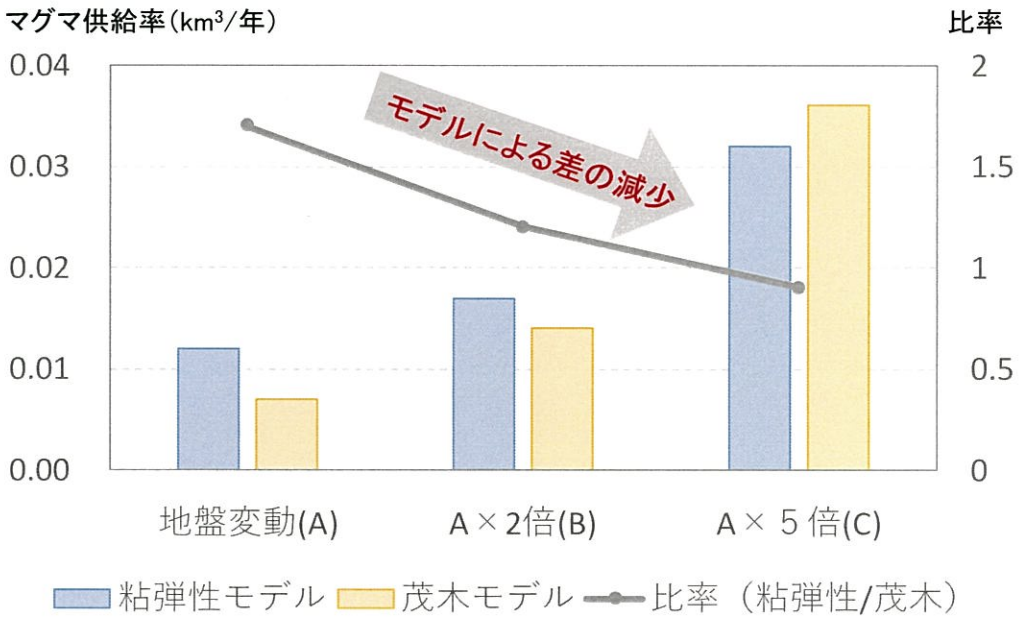
⇒ 水準測量結果を再現するマグマ供給率に関して、現状の地盤変動（A）では、粘弾性モデルによるマグマ供給率が茂木モデルより1.7倍大きいのに対し、変動量を2倍にした結果（B）では1.2倍、5倍にした結果（C）では0.9倍と変動量を大きくするにつれ、モデルによるマグマ供給率の差は小さくなる傾向にあることを確認。

水準測量結果を再現するマグマ供給率

項　目		再現計算結果		
		地盤変動(A)	A×2倍(B)	A×5倍(C)
マグマ供給率（km^3/年）	粘弾性	0.012	0.017	0.032
	茂木	0.007	0.014	0.036
比率（粘弾性/茂木）		1.7	1.2	0.9

■ **まとめ（粘性挙動がマグマ供給率に及ぼす影響）**

- 急激な地盤変動が生じる場合、モデルによるマグマ供給率の差は小さくなる。これは、粘性による影響が相対的に小さくなり、粘弾性モデルが茂木モデル（弾性モデル）と同様の挙動を示すためと考えられる。
- 当社のモニタリングにおいて、カルデラ火山に急激な地盤変動が生じた場合、茂木モデルによるマグマ供給率評価を行うことは妥当であり、判断基準に沿った適切な対応が可能であることを本検討により確認した。



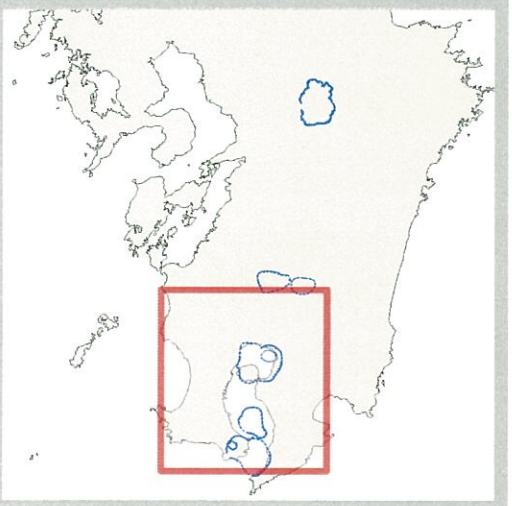
鉛直地盤変動量の増加に伴うモデルごとのマグマ供給率推移

余　　白

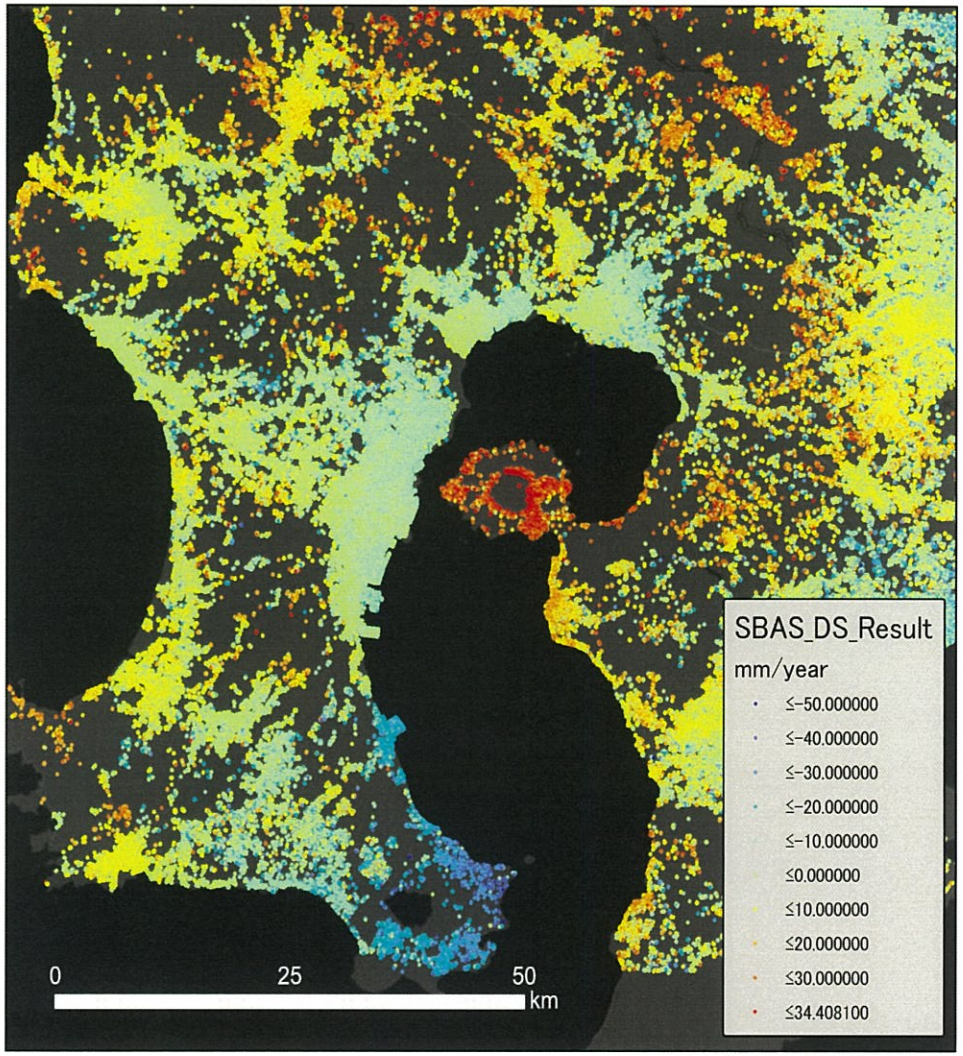
7. 干渉SAR時系列解析結果[概　要]

・姶良カルデラ周辺の面的な地殻変動を把握するため、干渉SAR時系列解析(対象期間:2018/10/7～2019/12/25)を実施した。
・その結果、桜島島内において衛星に近づく方向の変動が生じているとの結果が得られた。姶良カルデラ周辺については、顕著な隆起傾向は認められていない。

＜解析条件＞

解析手法	SBAS法
対象期間	2018/10/7～2019/12/25
衛星種別	Sentinel-1:ESA (Cバンド)
衛星進行方向	下降軌道 (Descending)
観測方向	衛星進行方向に対して右方向
レーダー入射角	ILOS(鉛直方向となす角) 35.9°　～41.8°
使用シーン数	38
解析対象範囲	

＜解析結果＞



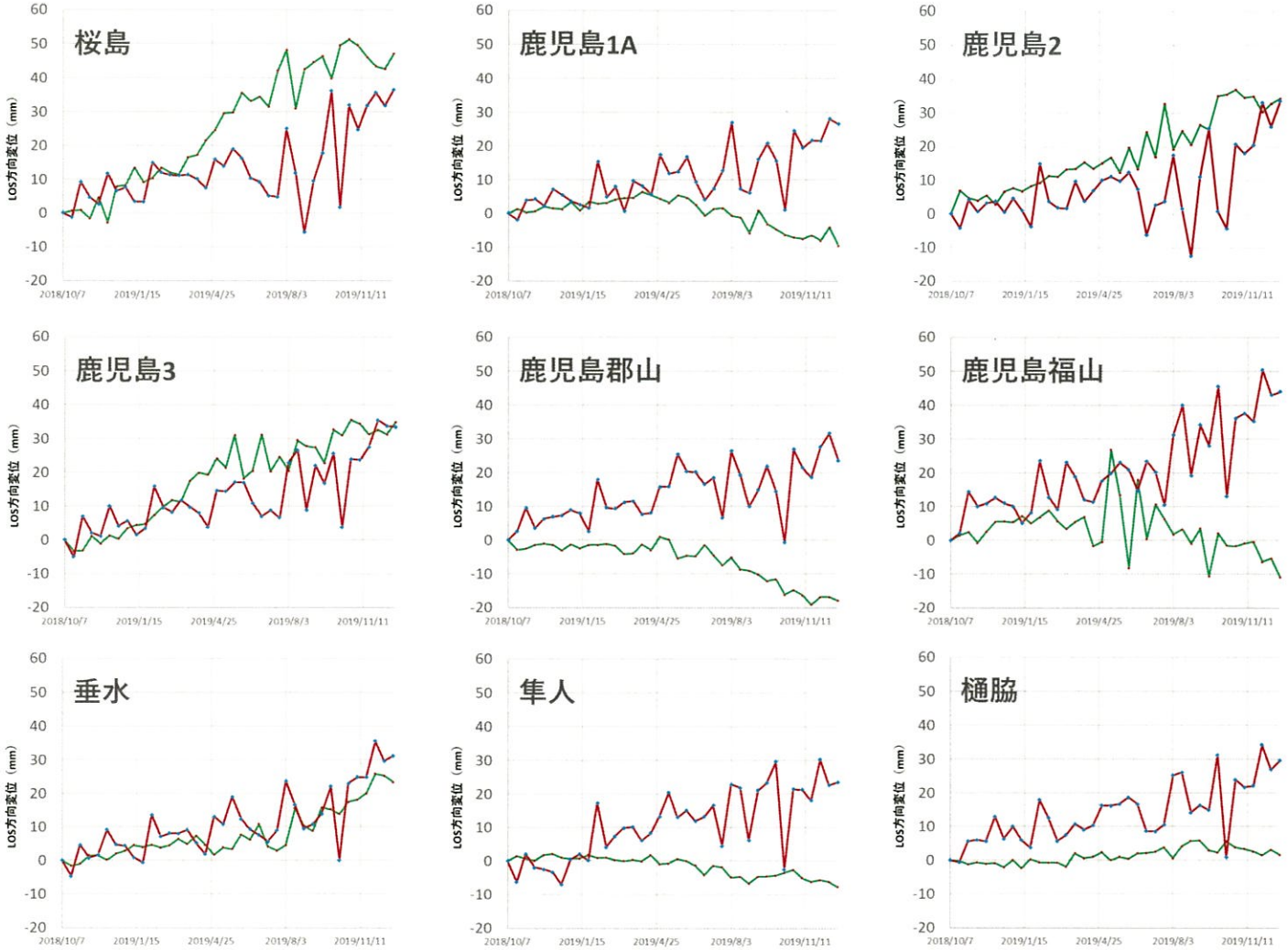
衛星から遠ざかる(沈降or西への変位)

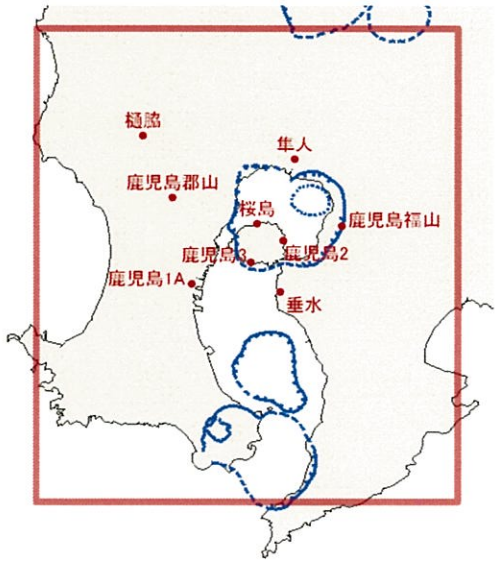
衛星に近づく(隆起or東への変位)

7. 干渉SAR時系列解析結果[今後の課題]

- 干渉SAR時系列解析においては、解析範囲の外縁側に固定点(変位≒0)を設定するため、解析範囲の中心部付近(桜島、鹿児島2、鹿児島3、垂水)以外の地点においては、GNSSの観測結果とのデータの乖離が確認された。
- 今後、解析範囲や固定点の見直し、上昇軌道データとの組み合わせ等、より高精度な干渉SAR時系列解析の方法を検討する。

＜干渉SAR時系列解析結果とGNSS観測結果の比較＞





観測点位置

SAR衛星視線方向変位

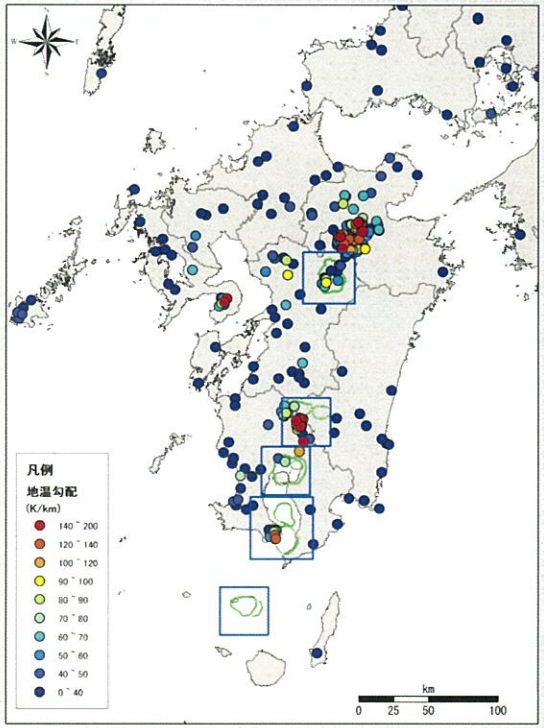
GNSS衛星視線方向変位

余　　白

8. 地下深部の熱活動の観測手法に関する検討[地温勾配・地殻熱流量・キュリー点深度]

- 各カルデラ周辺における地下深部の熱活動について把握するため、既往知見の整理を行った。
- 地温勾配、地殻熱流量、キュリー点深度線については、九州で継続的な観測は実施されていない。

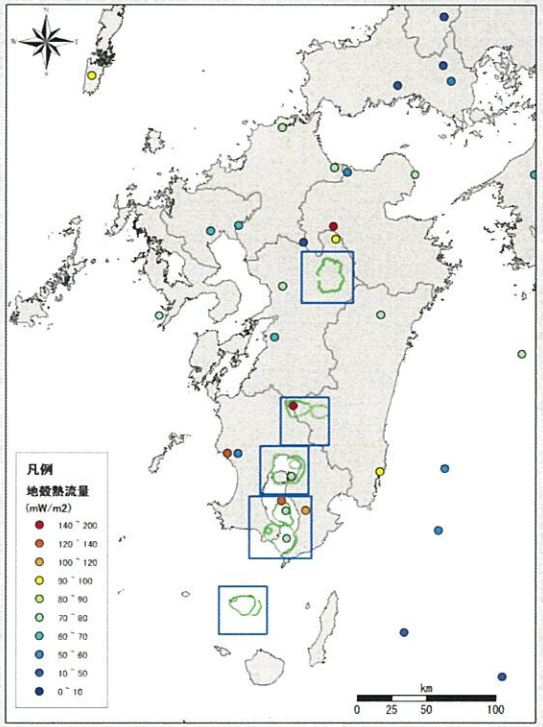
地温勾配



○田中ほか(2004)

産総研の地温勾配データベースは、300m以深の1,937地点における各坑井データの坑底温度もしくは**最高温度と"地表の基準温度の差**(各坑井から最寄りの気象官署における平均気温)**"を掘削深度もしくは最高温度を記録した深度で割ることにより、地温勾配値としている。**

地殻熱流量

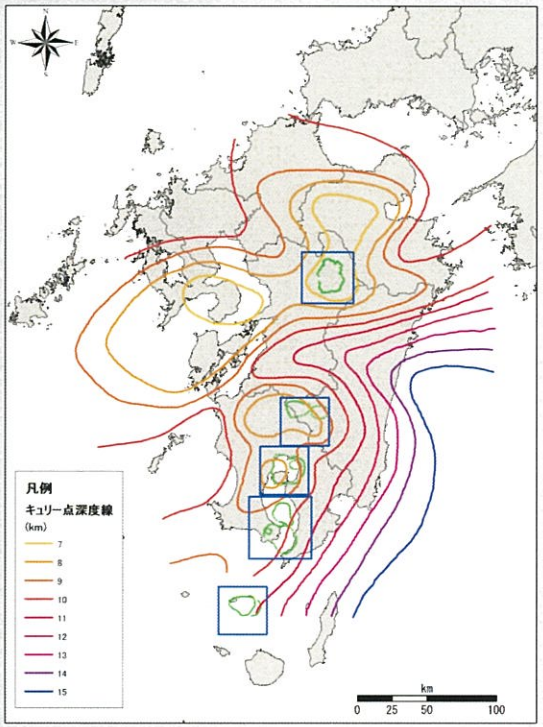


○田中ほか(2004)

地殻熱流量の値は、地温勾配とその場の物質の熱伝導率の積として得られる。

地殻熱流量は、地球内部から地表に向かって熱伝導により運ばれる熱のことで、火山や地熱地帯などで顕著に見られる物質の流動に伴って放出される熱量は含まない。

キュリー点深度線



○大久保(1984)

キュリー点法調査とは、**岩石が磁性を失う温度(キュリー点温度)に達する深度(キュリー点深度)**を通常の空中磁気データから求め、地下の広域的な熱構造を把握するものである。

キュリー点温度は岩石が含有する最も一般的な強磁性鉱物である磁鉄鉱のキュリー点温度(約580℃)にほぼ支配されると考えられる。

8. 地下深部の熱活動の観測手法に関する検討[重力観測]

- 重力観測は、火山活動に関連する火山内部の質量移動や密度変化を直接的に検知でき、かつ自由空間での質量蓄積に対しても感度を有しており、阿蘇山と桜島においては継続的な観測が実施されている。
- 重力観測による火山活動のモニタリングには、重力計の観測精度、降水や地下水流動などの陸水変動の補正、地形効果の考慮などの観点から課題があるとされているが、今後、観測方法の高度化に関する知見や観測状況について、情報を継続的に収集していく。

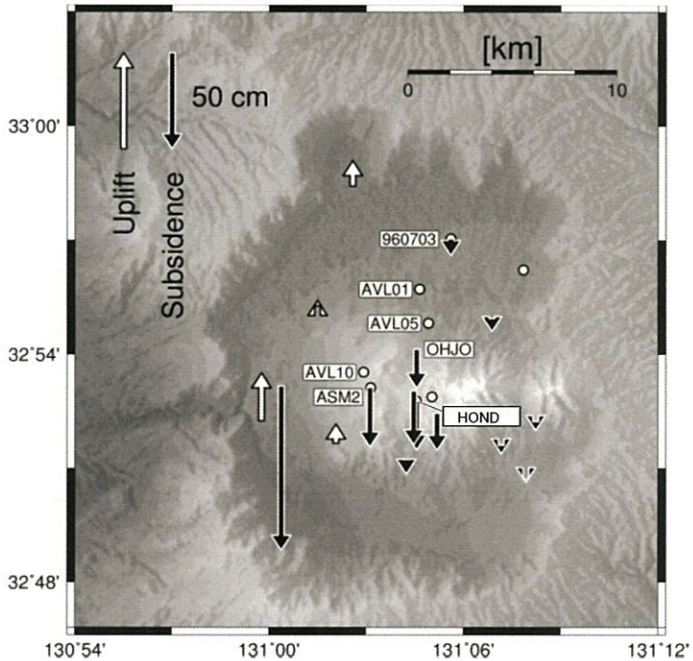
＜阿蘇火山における重力観測の例＞

2018年8月の各観測点における相対重力値（風間ほか，2019）

Gravity Point	g_i [μGal]	$g_i^j \cdot c^j - g_i$ [μGal] CG5	CG6	LC-D58	LC-G534	LC-G680
Mashiki	226155	−9	3	−20	16	9
Sakanashi	150676 ± 12	4	−8	46	−24	−16
960703A	148995 ± 26			0		
AVL01	129692 ± 18	−1	2			
AVL05	86226 ± 14	19	4	−24		
AVL10	24326 ± 13	14	4	−19		
Museum	5004 ± 13	22	−4	−19		
HondoA	0	0	0	0	0	0
AsoCC	−20307 ± 11	29	−12	−2		−16
Absolute average		14	5	18	20	13

1981年以降の阿蘇登山道路坊中線沿いの水準点の重力変化（吉川ほか，2009）

Station	Latitude (deg.)	Longitude (deg.)	Height (m)	1981 (mgal)	1993.3 (mgal)	1994.8 (mgal)	2005.11 (mgal)	2006.2 (mgal)	2008.11 (mgal)
BM 1895	131.060	32.932	530.1	11.102	11.136	11.122	11.161	11.129	11.164
AVL 1	131.077	32.925	575.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
AVL 2	131.065	32.923	629.5	-12.603	-12.618		-12.618		-12.607
AVL 5	131.083	32.910	762.6	-43.601	-43.657	-43.683	-43.614	-43.644	-43.591
AVL 7	131.065	32.907	880.8	-70.076	-70.119				-70.073
AVL 8	131.062	32.903	932.8	-81.680	-81.734	-81.764	-81.674	-81.696	-81.690
AVL 10	131.052	32.888	1043.5	-105.531	-105.613	-105.638	-105.548	-105.583	-105.533

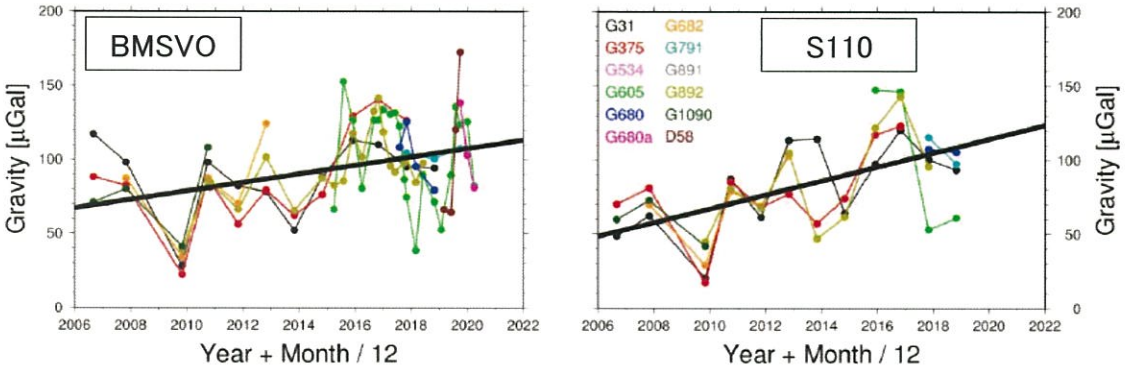


2016年熊本地震時の各GPS観測点における鉛直変動（風間ほか，2019）

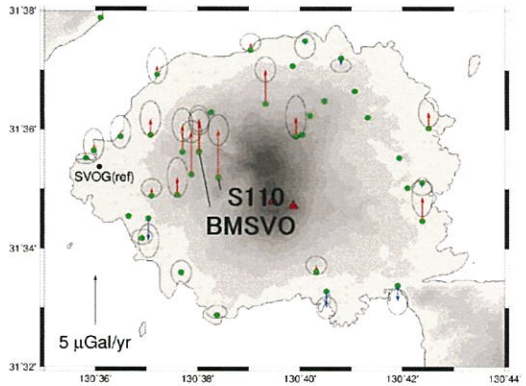
- 風間ほか(2019)は、2018年8月に阿蘇火山において相対重力測定と絶対重力測定を実施し、吉川ほか(2009)による2008年11月の観測結果と比較を行い、その変動の差異の原因について考察している。
- その結果、変動の差異の原因には熊本地震やマグマだまり収縮に伴う地面沈降の影響が考えられるが、これら2つの寄与だけでは観測された重力増加を十分には説明できないので、今後、地下水・熱水・マグマといった質量分布の時空間変化をモデル化することで、阿蘇山麓に対する山頂部の重力増加を再現できるものと期待されるとしている。

8. 地下深部の熱活動の観測手法に関する検討[重力観測]

＜桜島における重力観測の例①＞



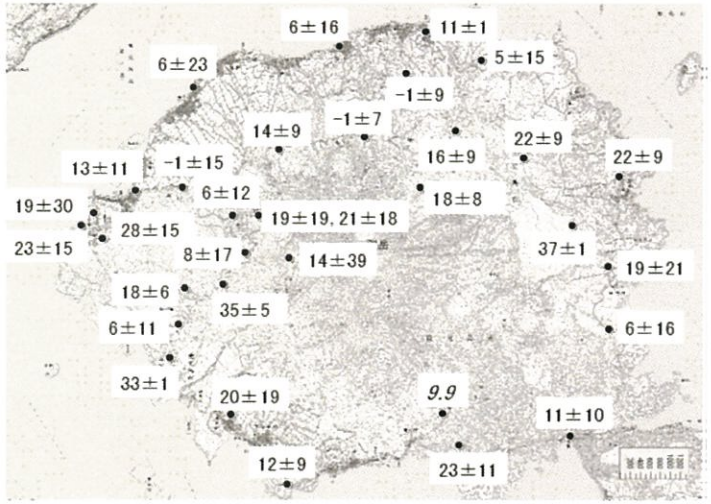
SVOGを基準としたBMSVOおよびS110の相対重力変化（風間ほか，2020）



桜島西麓のSVOG基準を基準とした各重力点における
2006年～2020年の重力経年変化（風間ほか（2020）に加筆）

- 風間ほか（2020）は、取得した重力データを解析した結果、2006年の昭和火口活動再開以降の桜島中央部での重力増加は北岳直下の海抜下3 kmにおける質量増加で説明可能であり、2000年代以降においても山体直下の質量増加は継続していると考えられるとしている。
- このような質量増加の要因として、例えば火道内マグマ対流といった火山活動（e.g.,Shinohara,2008）を長期的な質量変動として捉えている可能性や、地下水質量の増加も否定できないとし、陸水変動に伴う重力変化の寄与を観測データから適切に補正することが不可欠であるとしている。

＜桜島における重力観測の例②＞

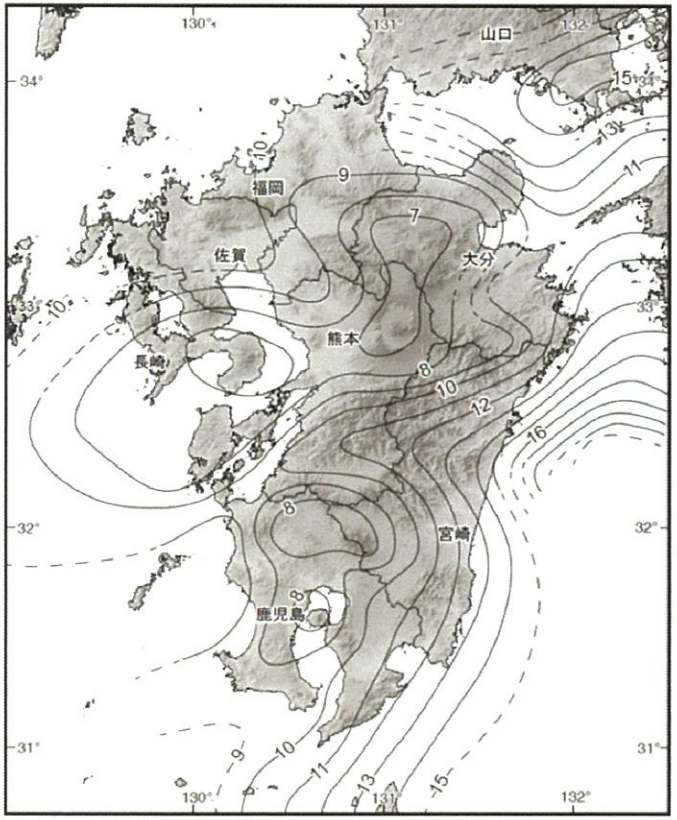


桜島における2012年10月・11月から2013年10月・11月にかけての
陸水擾乱補正後の絶対重力変化（単位：μgal）（山本ほか，2014）

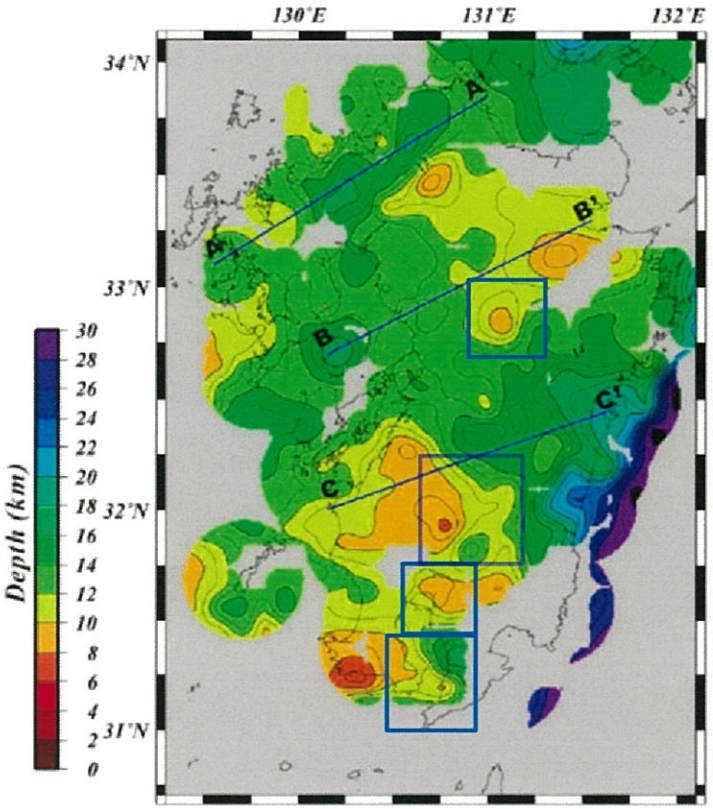
- 山本ほか（2014）は、2012年10月・11月から2013年10月・11月までの期間の絶対重力変化量を観測値より算出し、地下水擾乱補正を施している。
- また、ほぼ同期間で実施された水準測量により、地盤上下変動量は姶良カルデラ中央部地下約8.7kmの深さに存在する増圧源および桜島中央部地下約3.0kmの深さに存在する減圧源により説明可能とし、これらの圧力源から期待される重力変化と、重力変化観測値との比較を行っている。
- その結果、この地下水擾乱補正量はやや過大に見積もられている可能性があり、高精度に火山活動に関する重力変動を抽出するためには、地下水擾乱補正法をさらに高精度化する必要があるとしている。

8. 地下深部の熱活動の観測手法に関する検討[D90の平面分布]

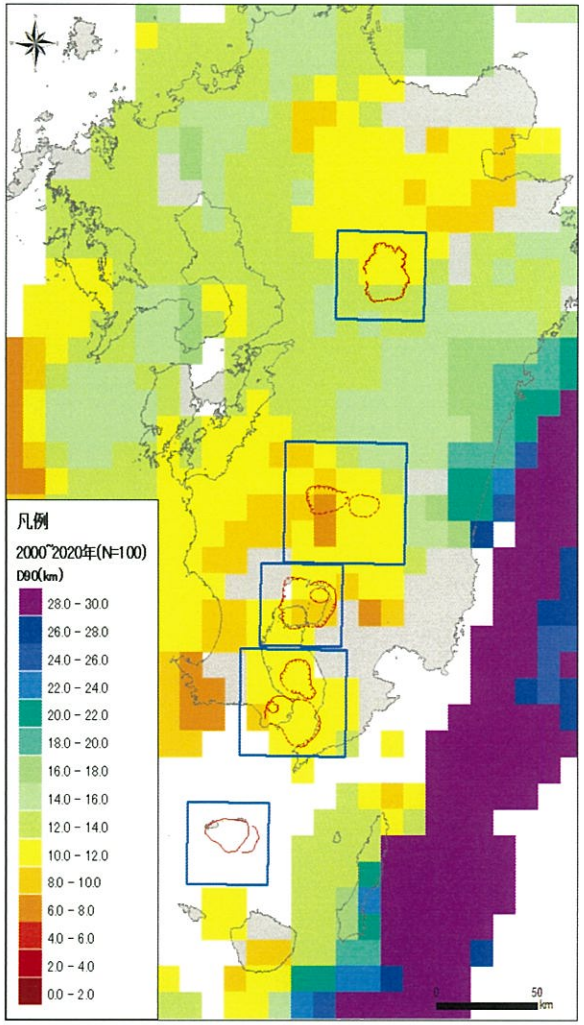
- 地震発生層の下限の深さは、温度構造に対応して変化することが知られている(Ito, 1999;Omuralieva et al., 2012など)ことから、D90の平面分布について確認した。
- 九州地域のD90平面分布は、地下の熱的状況の目安となるキュリー点深度と概ね同様の傾向である。



九州地域の温度構造(キュリー点深度分布:単位はkm)
(九州地域の活断層の長期評価(第一版)/地震調査研究推進本部(2013))



九州地域の地震発生層の下限(D90)
(防災科学技術研究所作成)に青枠※を追加
(九州地域の活断層の長期評価(第一版)/地震調査研究推進本部(2013))



当社D90検討結果

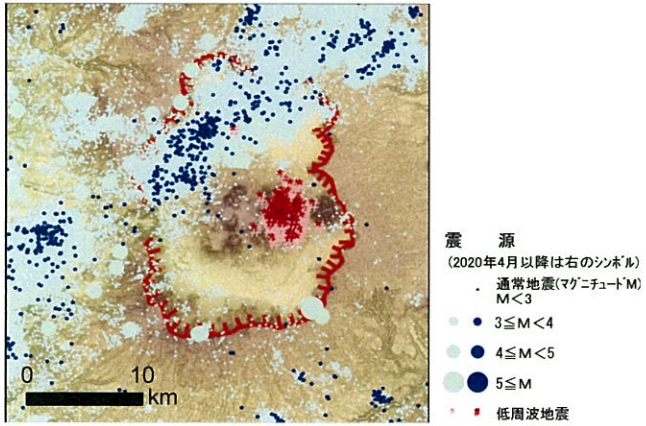
【当社検討条件】
- 伊藤(2006)を参考に、メッシュサイズを経緯度0.1度とし、経緯度0.2度の範囲で深度30km以浅の震源を抽出
- 一元化処理震源データ/気象庁・大学・防災科学技術研究所および地震月報(カタログ編)/気象庁の震源を採用

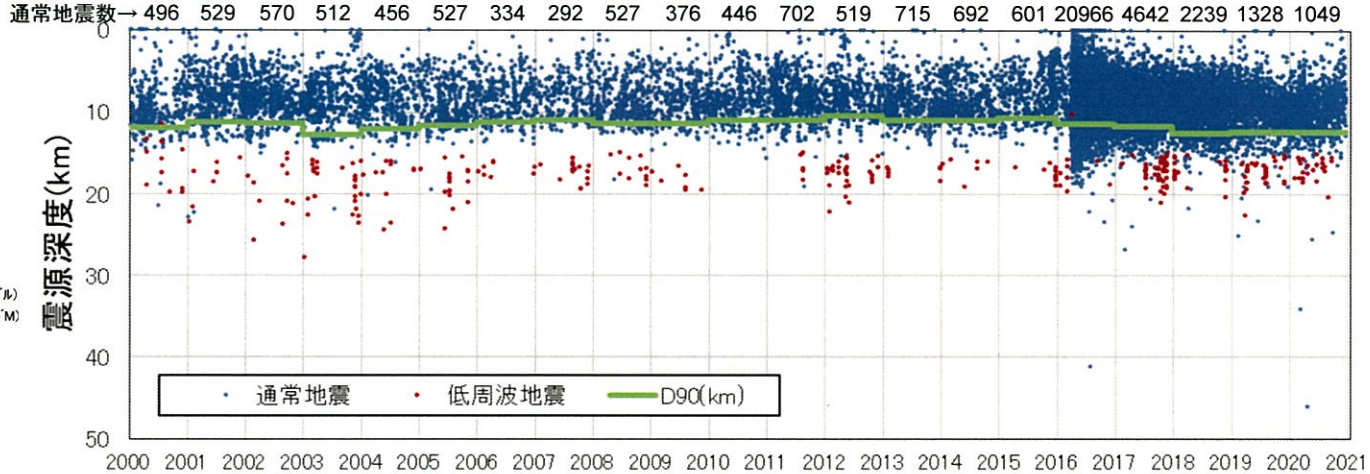
※図中の青枠は当社のカルデラ火山モニタリングにおける地震観測範囲を示す

8. 地下深部の熱活動の観測手法に関する検討[D90の時系列変化]

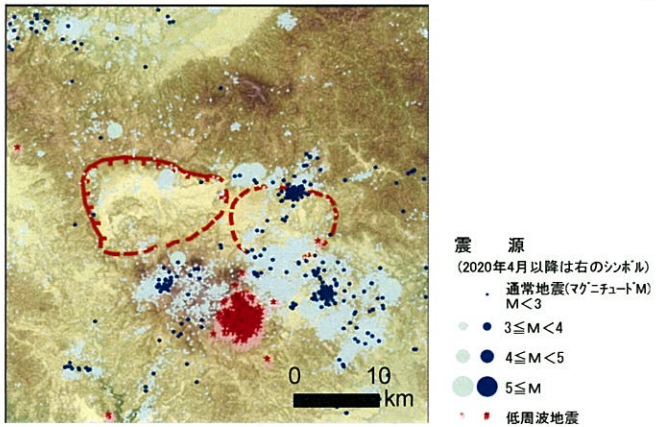
- 間接的に地下の熱的状態が把握可能と考えられるD90の時系列変化を整理した。
- 阿蘇カルデラ、加久藤・小林カルデラのD90は概ね10km付近を示している。

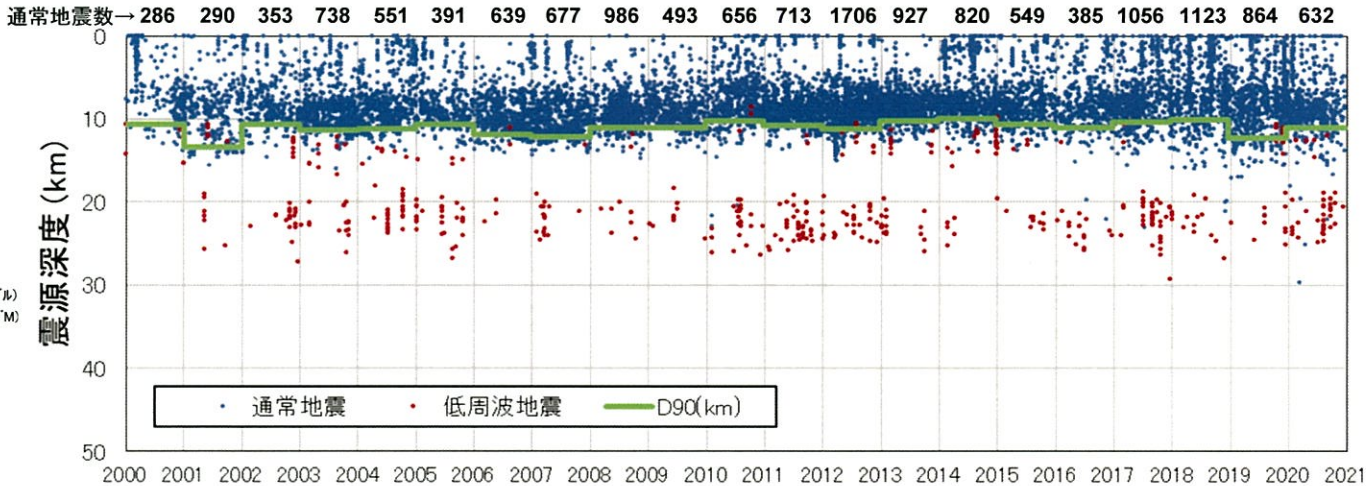
阿蘇カルデラの震源分布





加久藤・小林カルデラの震源分布





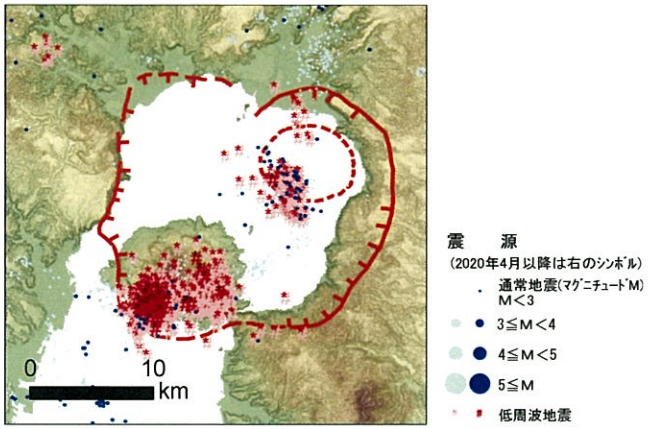
※1 震源は左図内のものを使用
※2 D90:地殻内で起こる総地震数の 90%(地表から深部に向かう方向における累積地震数)が入る深さ
※3 グラフ上の数値はその年に発生した通常地震の数

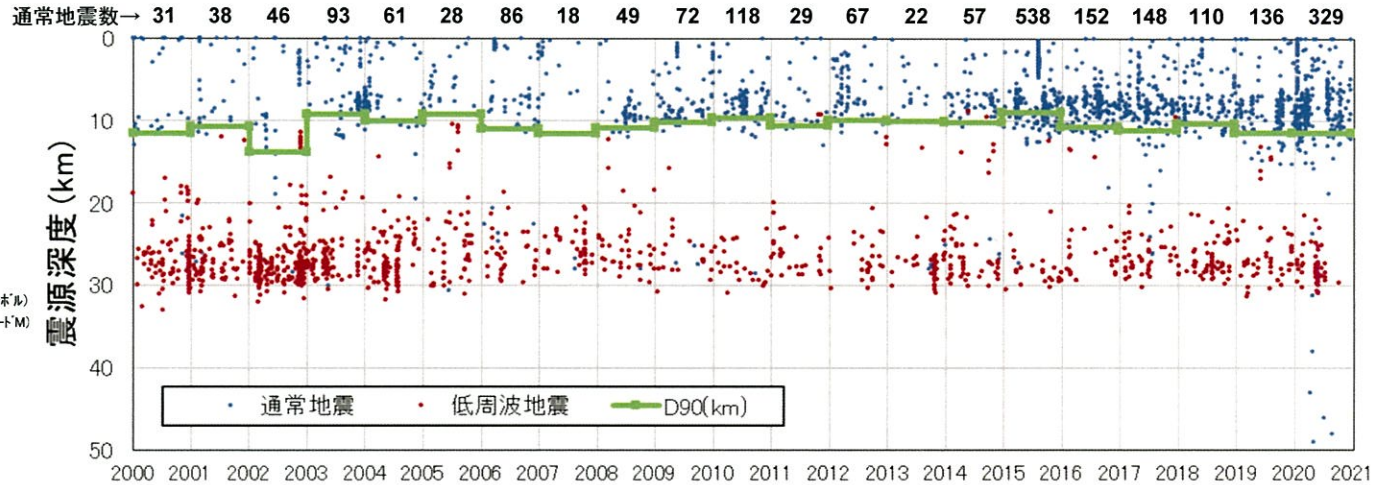
地震の震源深度とD90の時系列変化(上:阿蘇カルデラ、下:加久藤・小林カルデラ)

8. 地下深部の熱活動の観測手法に関する検討[D90の時系列変化]

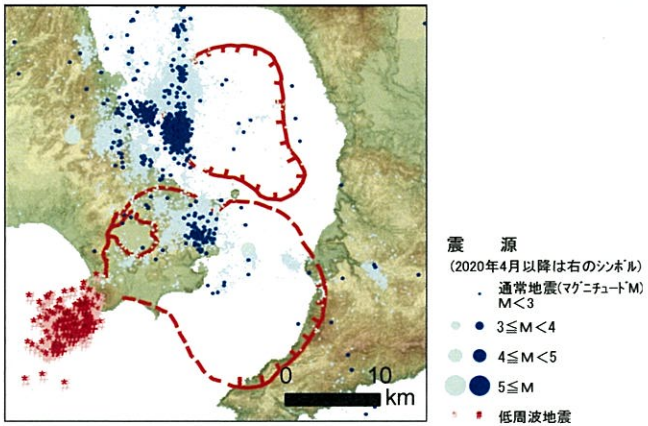
- 姶良カルデラ、阿多カルデラのD90は概ね10km付近を示している。

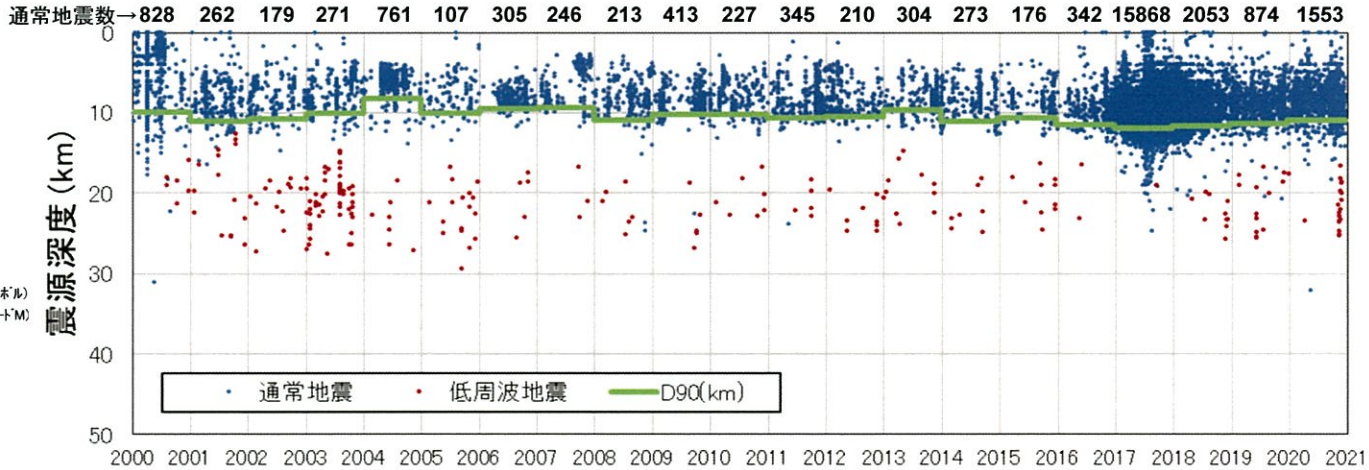
姶良カルデラの震源分布





阿多カルデラの震源分布





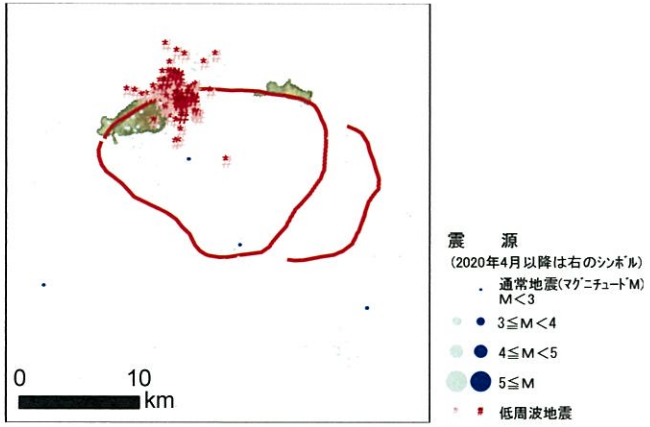
※1 震源は左図内のものを使用
※2 D90：地殻内で起こる総地震数の 90%（地表から深部に向かう方向における累積地震数）が入る深さ
※3 グラフ上の数値はその年に発生した通常地震の数

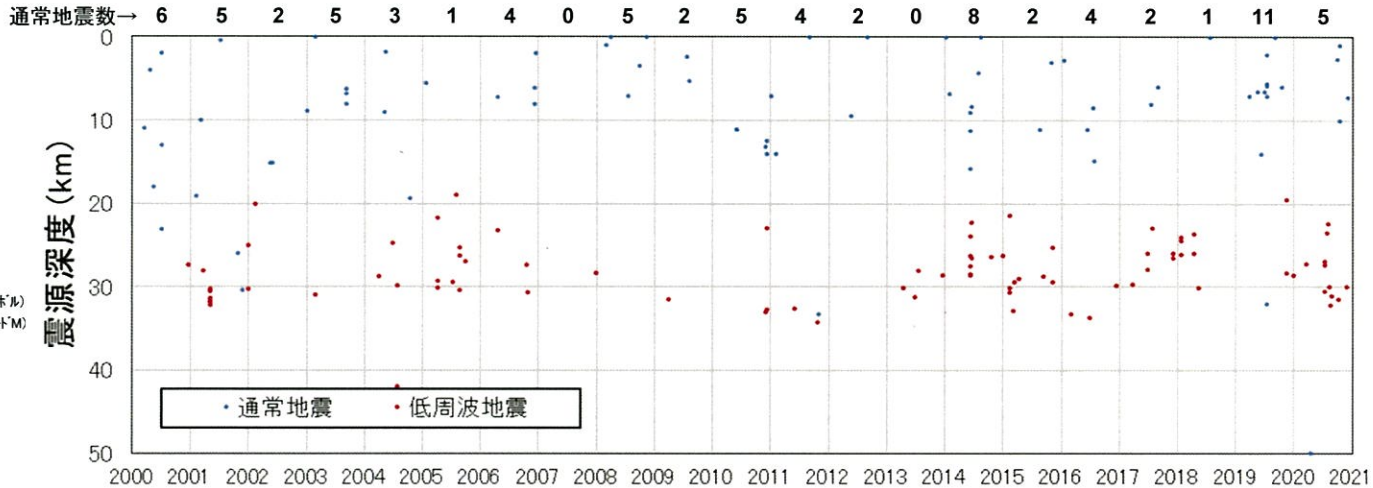
地震の震源深度とD90の時系列変化（上：姶良カルデラ、下：阿多カルデラ）

8. 地下深部の熱活動の観測手法に関する検討[D90の時系列変化]

- 鬼界は地震発生数が少ない。

鬼界の震源分布



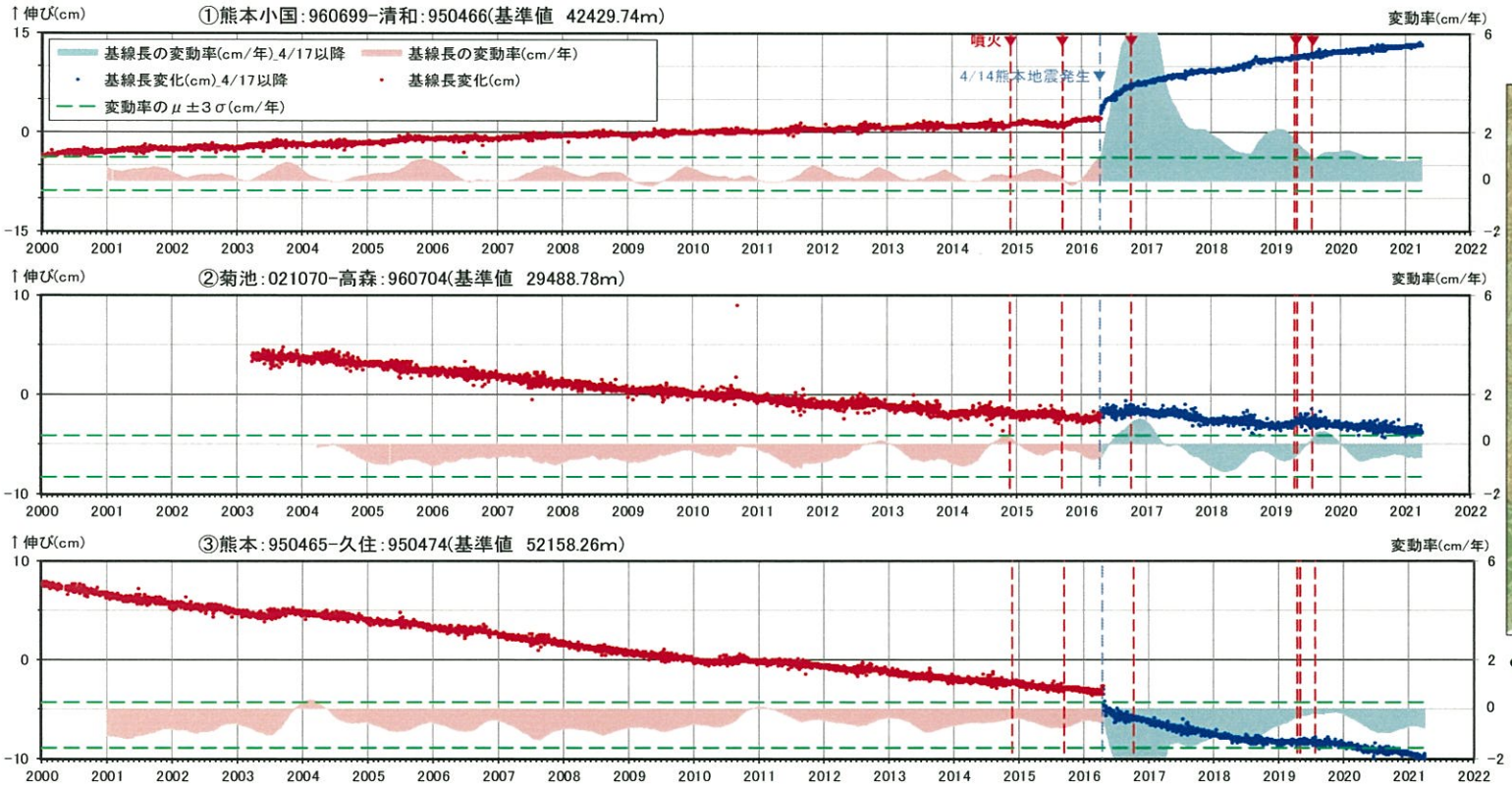


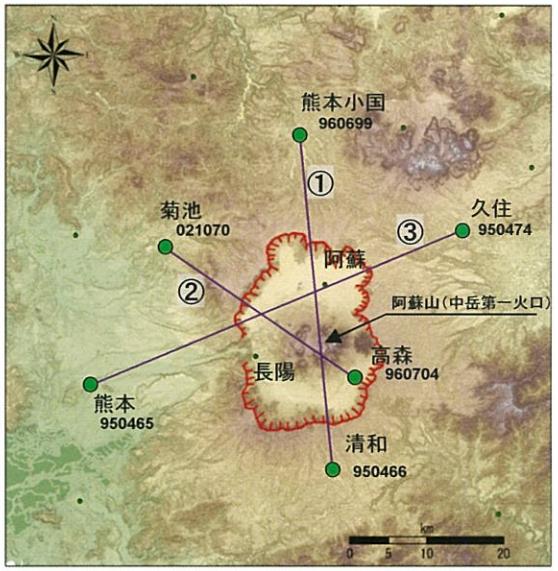
※1 震源は左図内のものを使用
※2 D90：地殻内で起こる総地震数の 90%（地表から深部に向かう方向における累積地震数）が入る深さ
※3 グラフ上の数値はその年に発生した通常地震の数

地震の震源深度とD90の時系列変化（鬼界）

9. 統計的整理に基づく評価　阿蘇カルデラ［地殻変動：基線長変化］

・基線長変化について、測地学において誤差範囲として用いられる「平均（μ）±3σ」と、2020年度の観測結果との比較を行った。
・2020年度の阿蘇カルデラの基線①（熊本小国−清和）、⑤（菊池−清和）、⑥（清和−久住）において＋3σを超える基線長変動率が見られるのは、熊本地震の余効変動の影響（P15、P16）が残っていることが原因と考えられる。



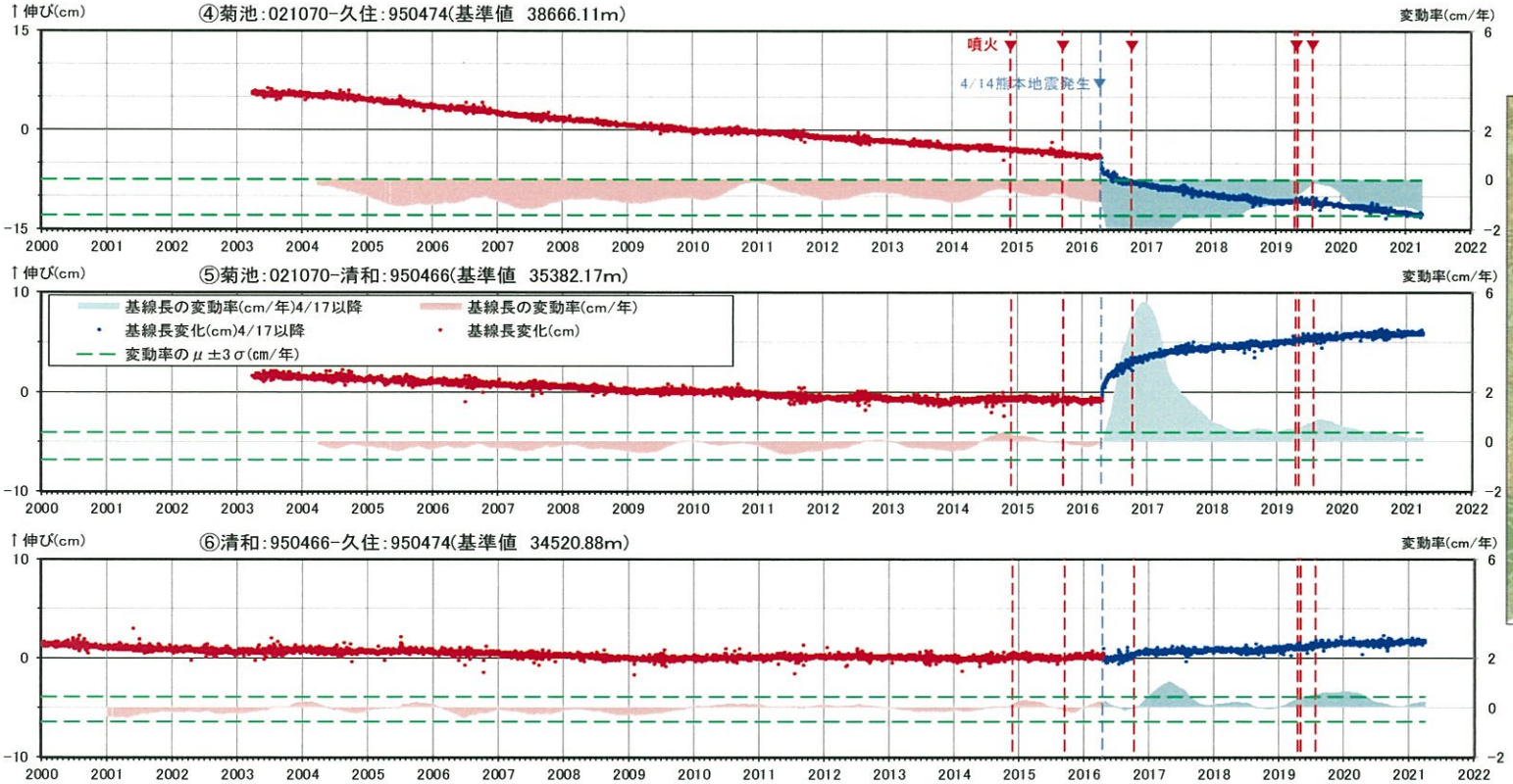


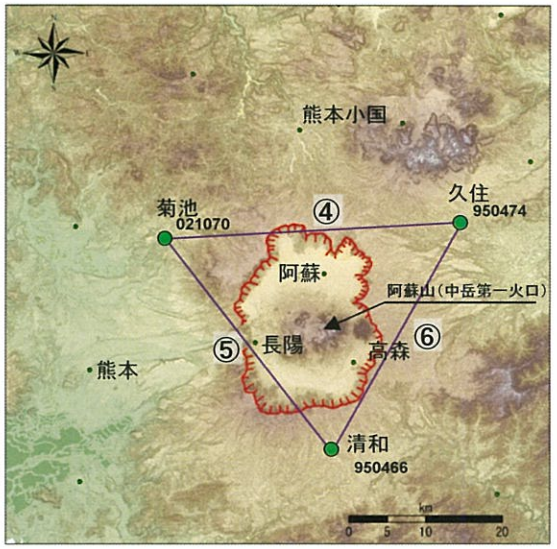
● 国土地理院のGNSS観測点

※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　赤色の▼は主な噴火
※4　観測開始から熊本地震発生以前（2001.1.1〜2015.12.31）の変動率の平均をμ、標準偏差をσとした

基線①〜③の時系列変化（熊本地震発生時の変動を補正して図示）

9. 統計的整理に基づく評価　阿蘇カルデラ［地殻変動：基線長変化］



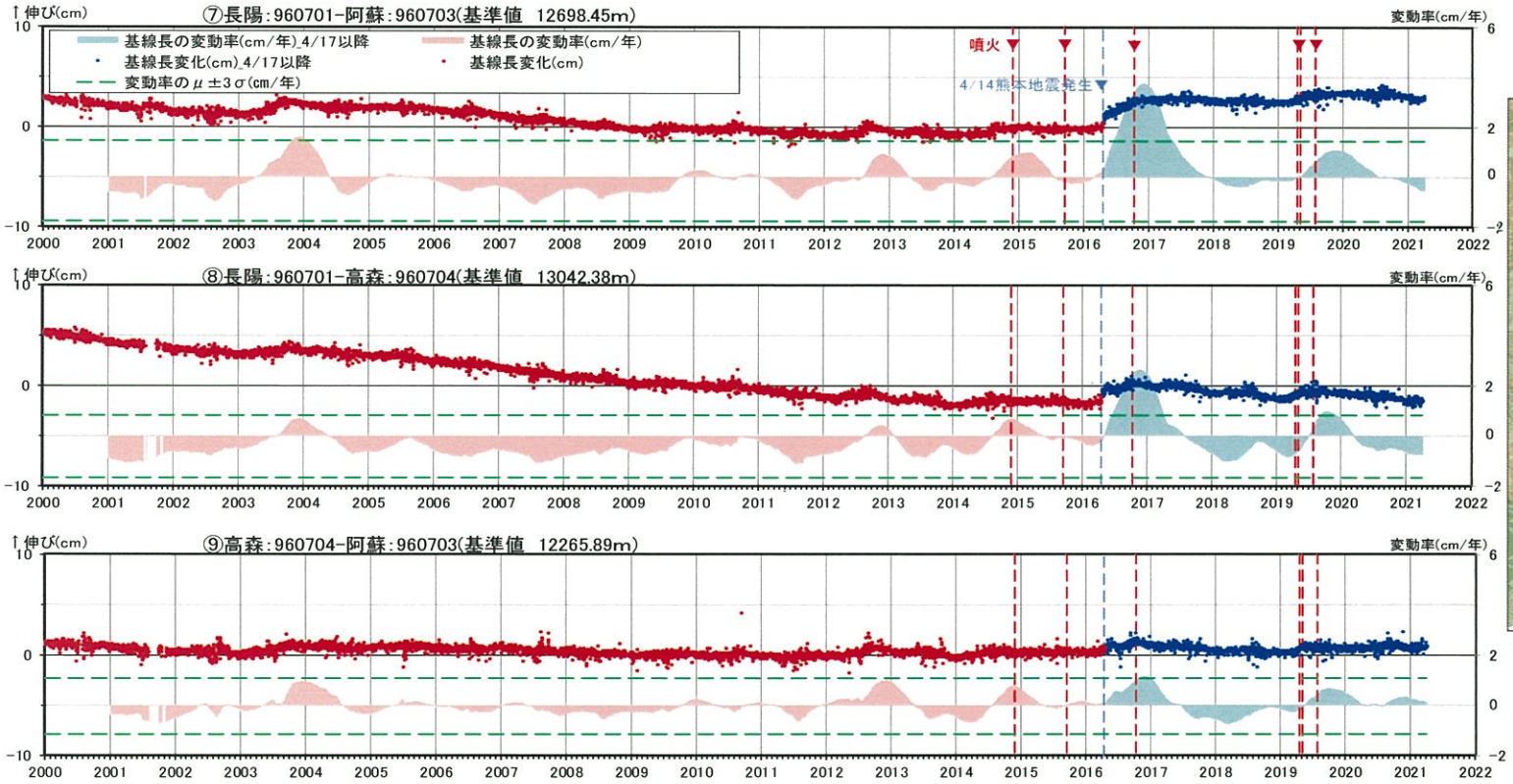


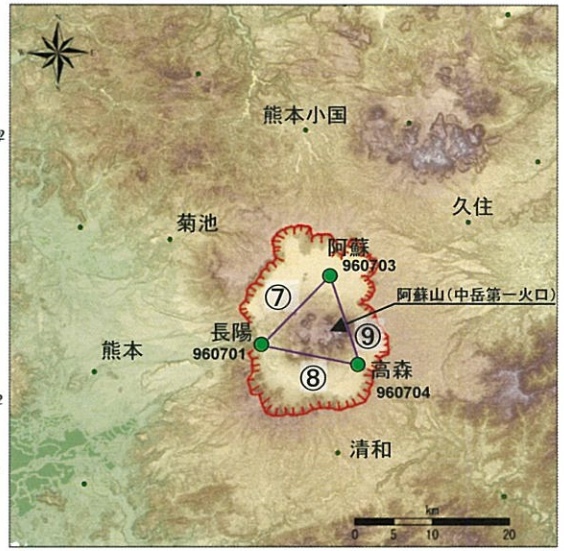
● 国土地理院のGNSS観測点

※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　赤色の▼は主な噴火
※4　観測開始から熊本地震発生以前(2001.1.1～2015.12.31)の変動率の平均をμ、標準偏差をσとした

基線④～⑥の時系列変化（熊本地震発生時の変動を補正して図示）

9. 統計的整理に基づく評価　阿蘇カルデラ［地殻変動：基線長変化］





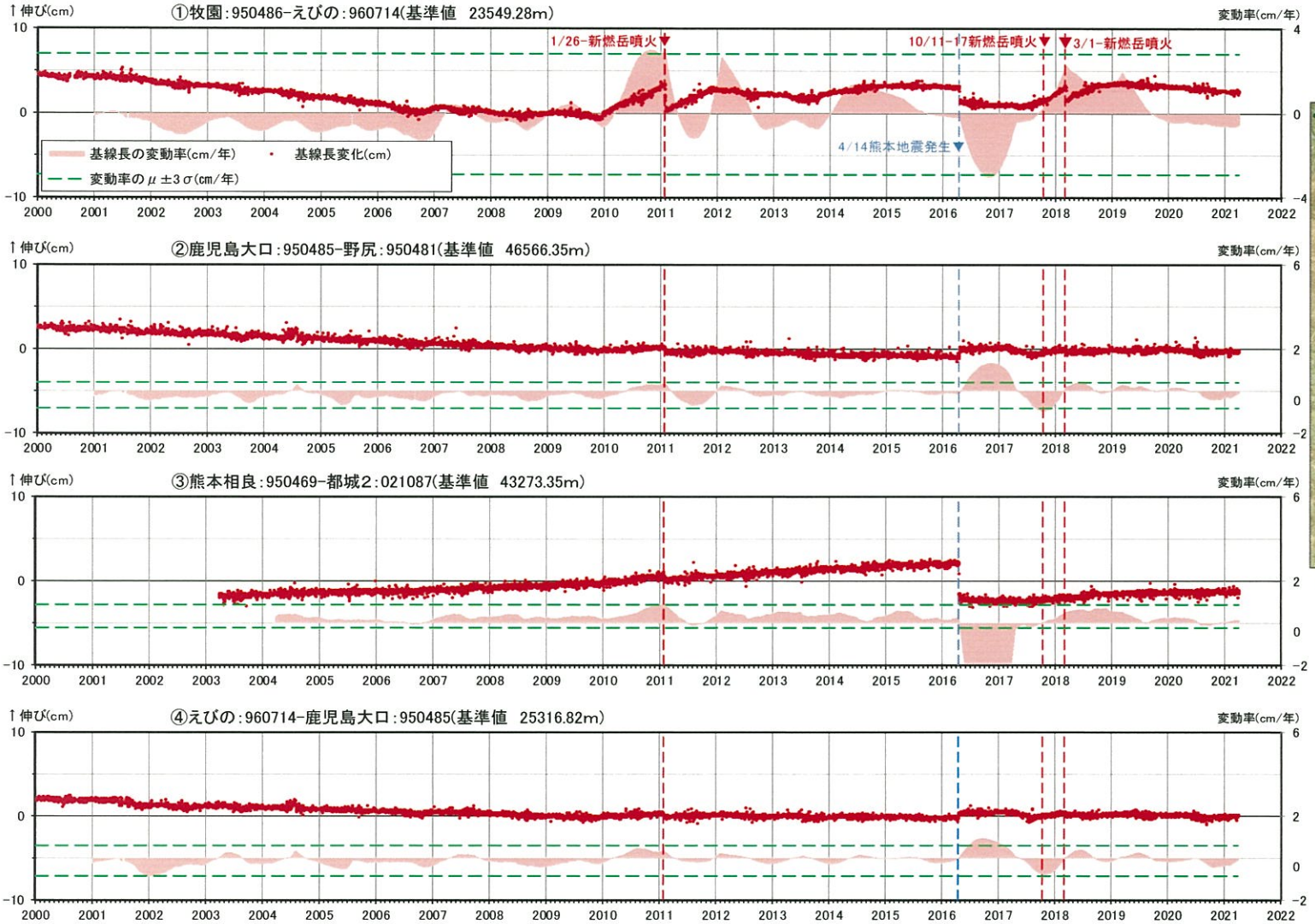
● 国土地理院のGNSS観測点

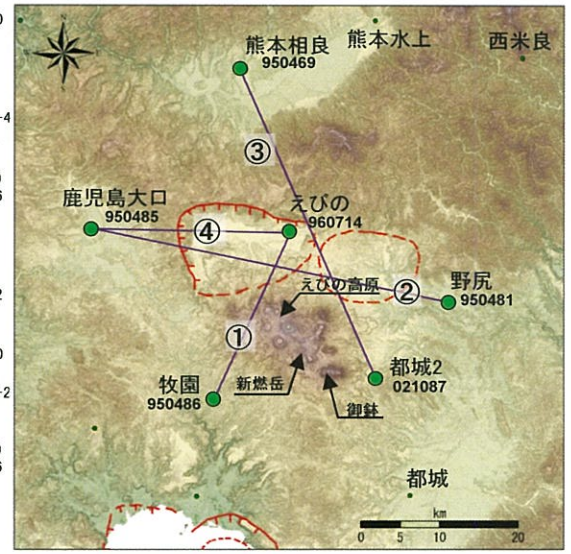
※1　2010年1月1日の基線長を基準値とし、基準値からの変化量を表示
※2　変動率は過去1年間のデータを用いて求めた近似式により算出
※3　赤色の▼は主な噴火
※4　観測開始から熊本地震発生以前(2001.1.1～2015.12.31)の変動率の平均をμ、標準偏差をσとした

基線⑦～⑨の時系列変化（熊本地震発生時の変動を補正して図示）

9. 統計的整理に基づく評価　加久藤・小林カルデラ［地殻変動：基線長変化］

・2020年度の加久藤・小林カルデラにおいては、基線長変動率が±3σを超える基線は無い。



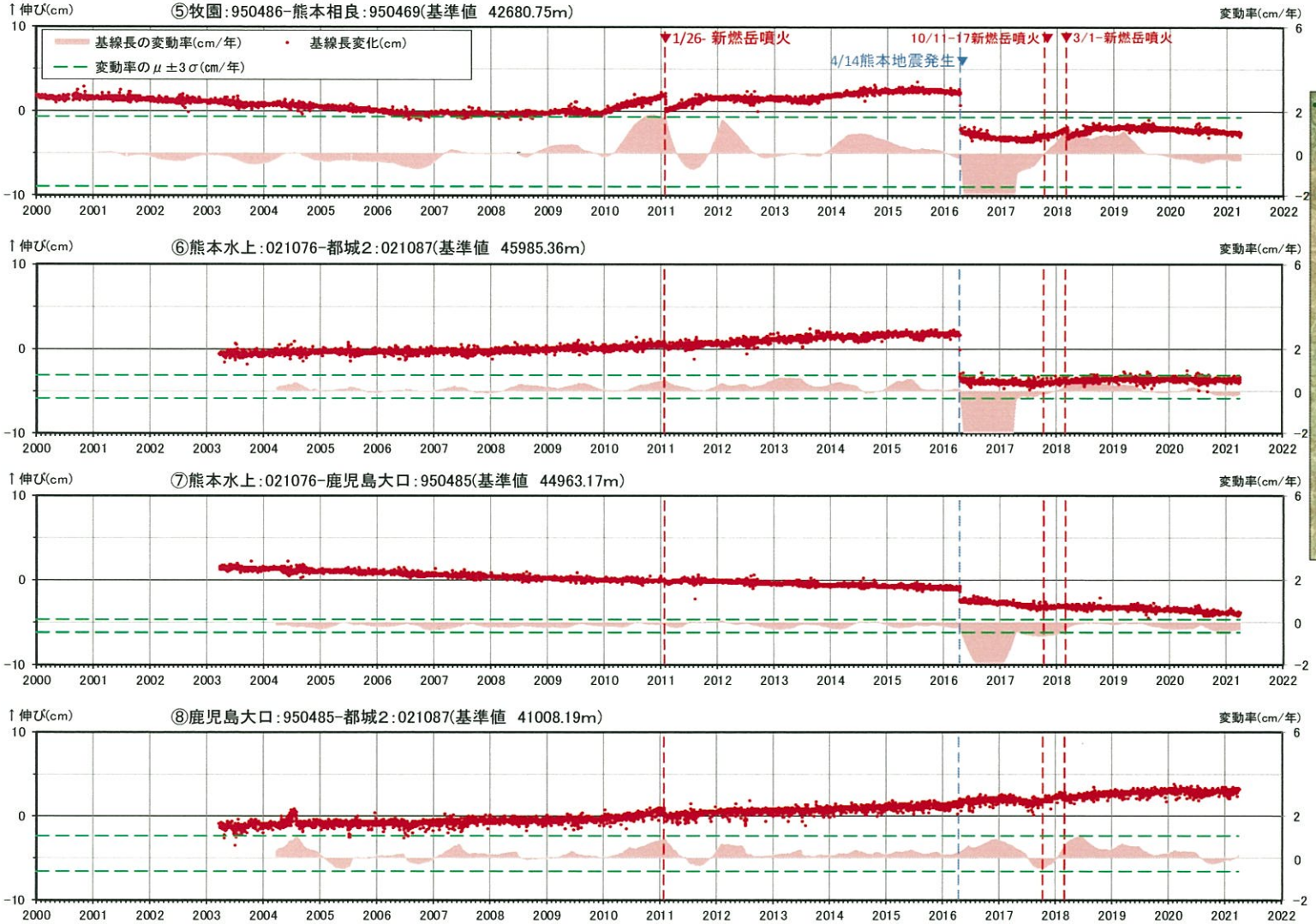


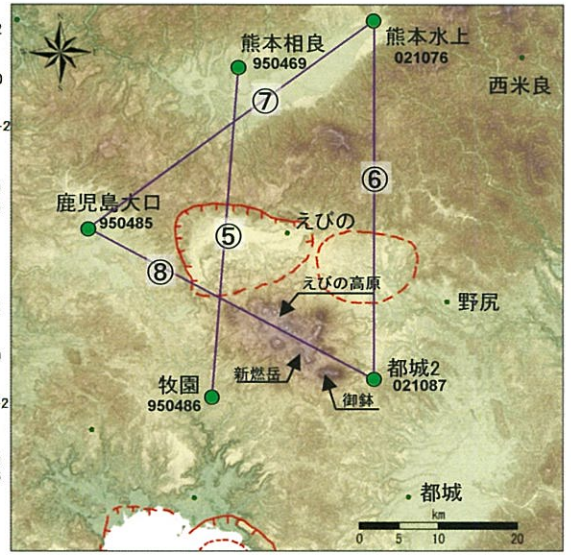
● 国土地理院のGNSS観測点

※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　観測開始から熊本地震発生以前(2001.1.1～2015.12.31)の変動率の平均をμ、標準偏差をσとした

基線①～④の時系列変化

9. 統計的整理に基づく評価　加久藤・小林カルデラ［地殻変動：基線長変化］



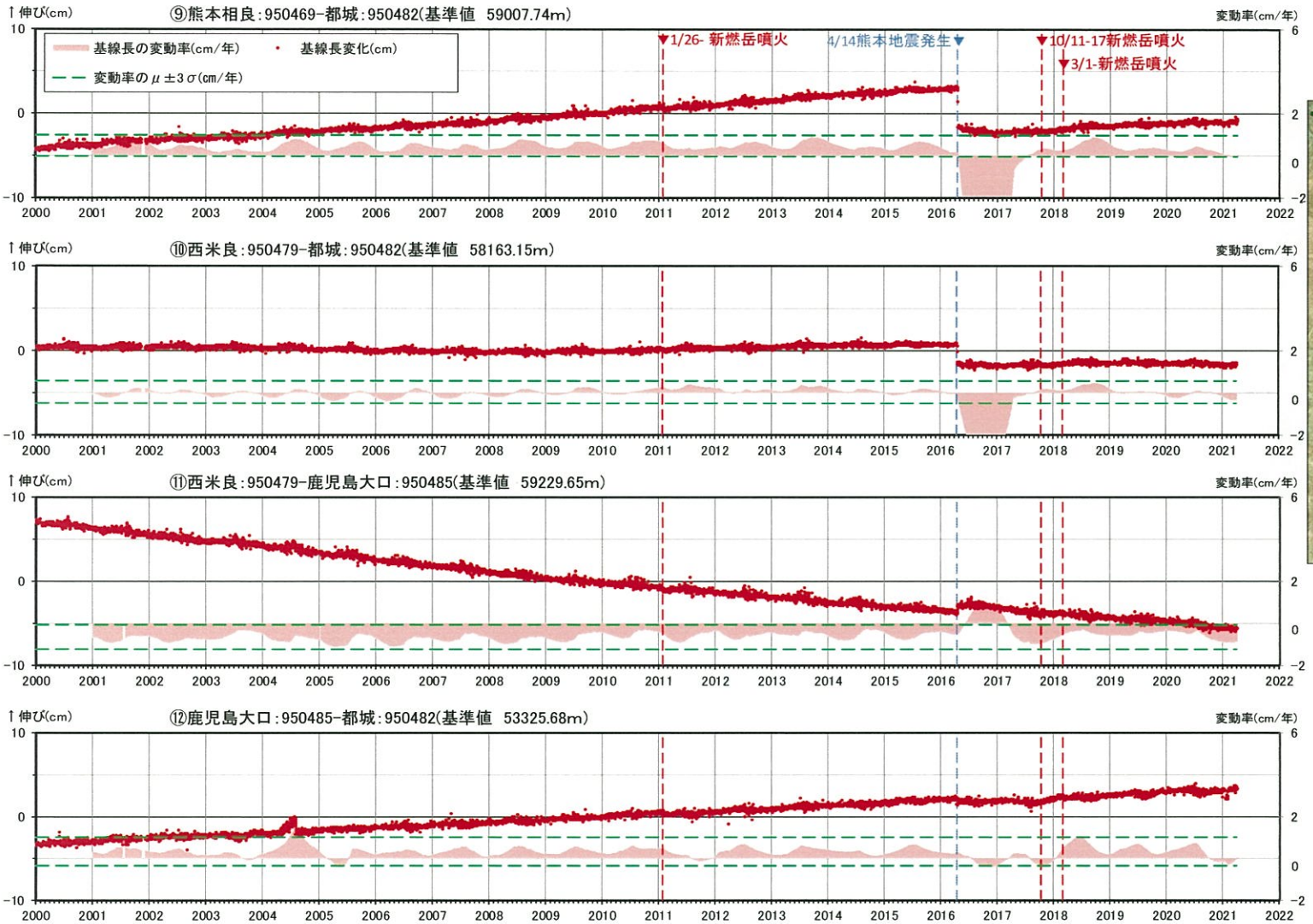


● 国土地理院のGNSS観測点

※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　観測開始から熊本地震発生以前(2001.1.1～2015.12.31)の変動率の平均をμ、標準偏差をσとした

基線⑤～⑧の時系列変化

9. 統計的整理に基づく評価　加久藤・小林カルデラ［地殻変動：基線長変化］



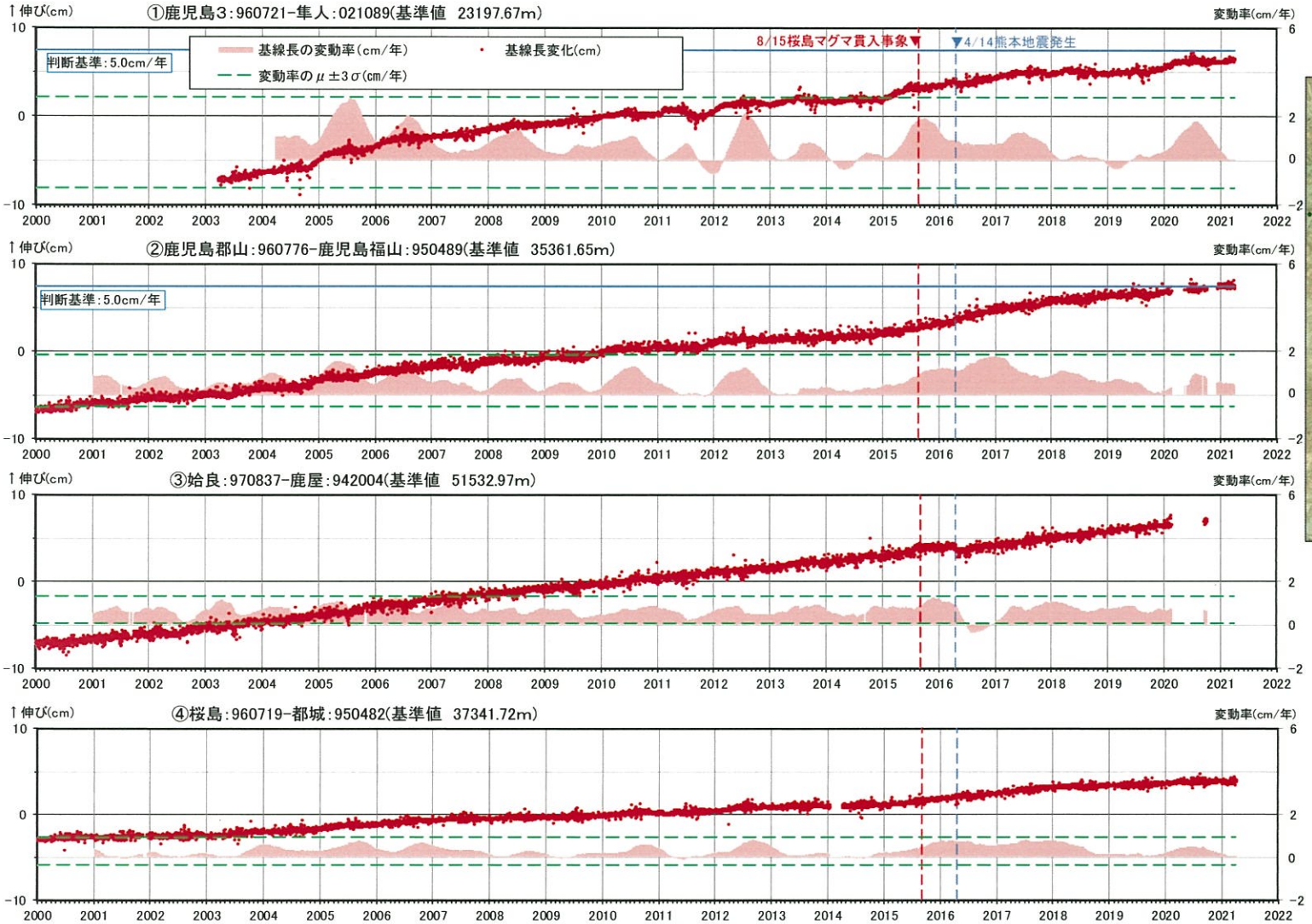
● 国土地理院のGNSS観測点

※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　観測開始から熊本地震発生以前(2001.1.1～2015.12.31)の変動率の平均をμ、標準偏差をσとした

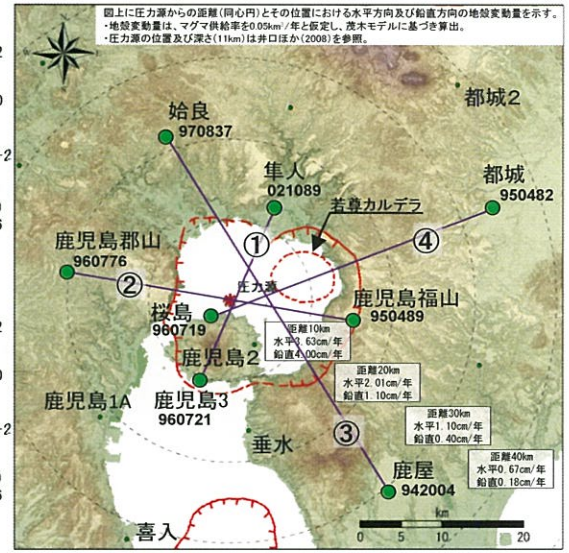
基線⑨～⑫の時系列変化

9. 統計的整理に基づく評価　姶良カルデラ［地殻変動：基線長変化］

・2020年度の姶良カルデラの基線⑨（鹿児島1A-垂水）、⑭（鹿児島1A-隼人）においては基線長変動率が＋3σを超えるものの、観測データが少ないため、今後の経過を確認していく。



基線①～④の時系列変化



● 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

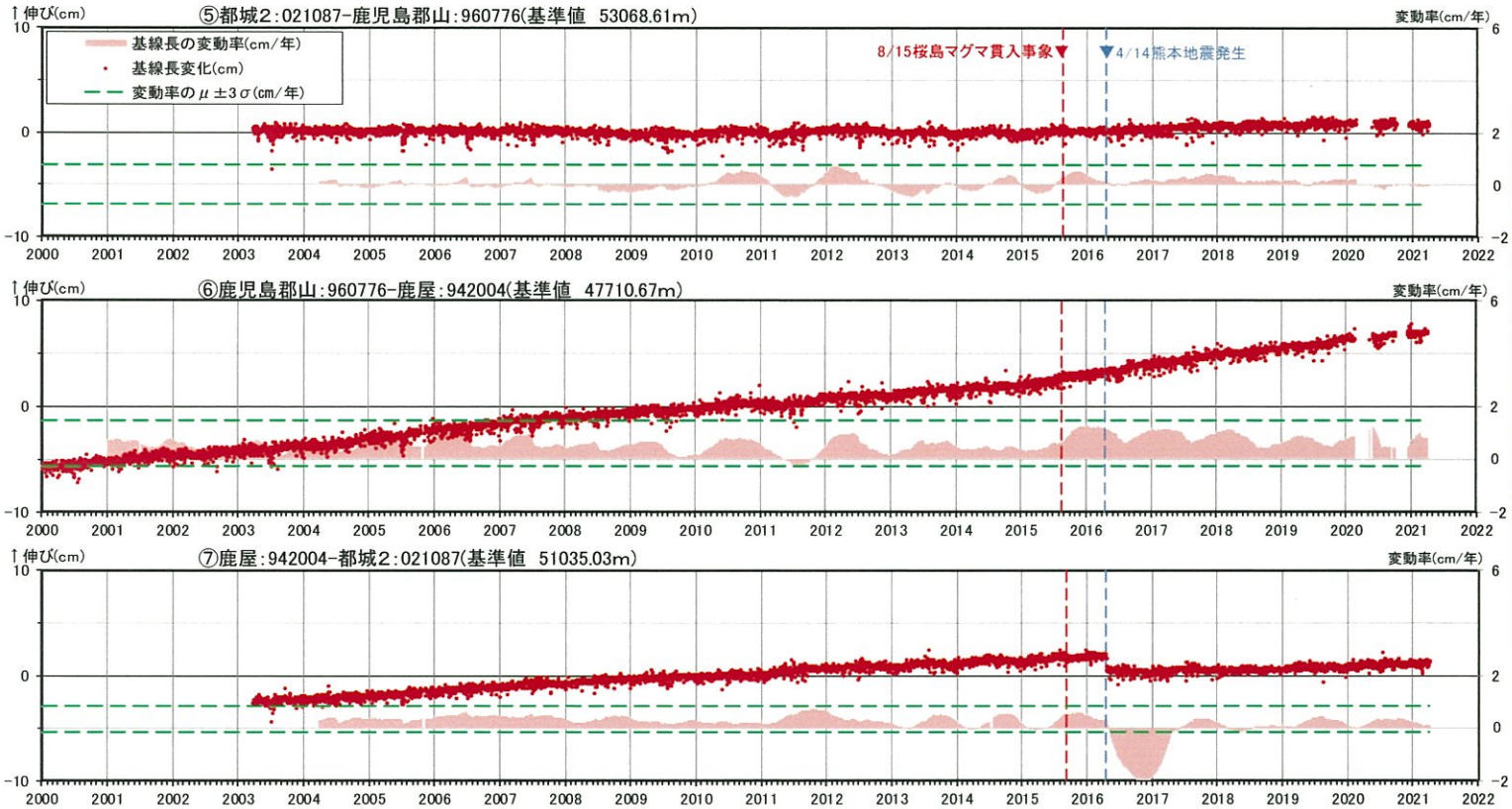
※2　変動率は過去1年間のデータを用いて求めた近似式により算出

※3　960776（鹿児島郡山）と970837（姶良）は周辺樹木等の影響によりデータ品質が悪いため、F3解析から頻繁に除外されている

※4　熊本地震の影響が残っていると考えられる姶良、都城、隼人を含む基線①、③、④では、観測開始から熊本地震発生以前（2001.1.1～2015.12.31）の変動率の平均をμ、標準偏差をσとした

※5　基線②では観測開始から2020年度以前（2001.1.1～2020.3.31）の変動率の平均をμ、標準偏差をσとした

9. 統計的整理に基づく評価　姶良カルデラ［地殻変動：基線長変化］

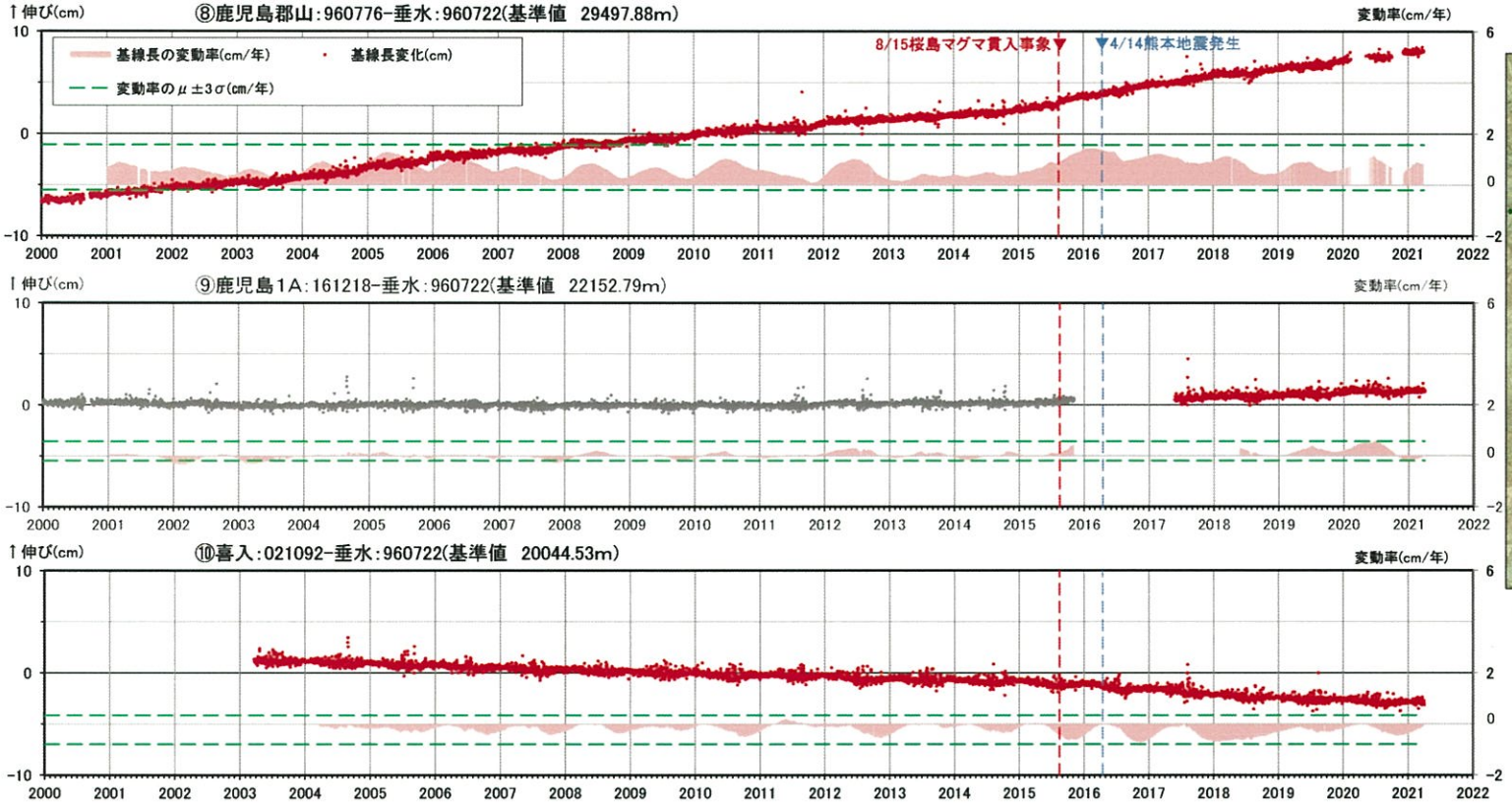


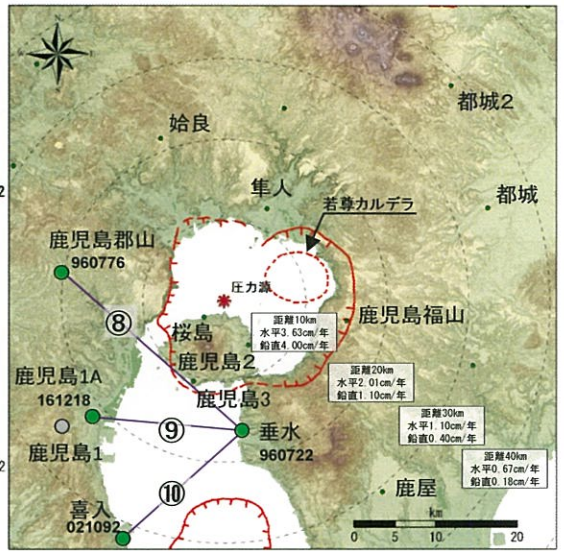
● 国土地理院のGNSS観測点

※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　960776（鹿児島郡山）は周辺樹木等の影響によりデータ品質が悪いため、F3解析から頻繁に除外されている
※4　熊本地震の影響が残っていると考えられる都城2を含む基線⑤、⑦では、観測開始から熊本地震発生以前（2001.1.1～2015.12.31）の変動率の平均をμ、標準偏差をσとした
※5　基線⑥では観測開始から2020年度以前（2001.1.1～2020.3.31）の変動率の平均をμ、標準偏差をσとした

基線⑤～⑦の時系列変化

9. 統計的整理に基づく評価　姶良カルデラ［地殻変動：基線長変化］





● 国土地理院のGNSS観測点

※1　鹿児島1地点については、観測設備の不具合により、2015年11月5日以降データが取得できない状態であったが、2017年5月23日以降、移設して鹿児島1Aとして観測を開始。2000年から2015年は鹿児島1−垂水の基線長変化の観測データ(灰色)。

※2　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

※3　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

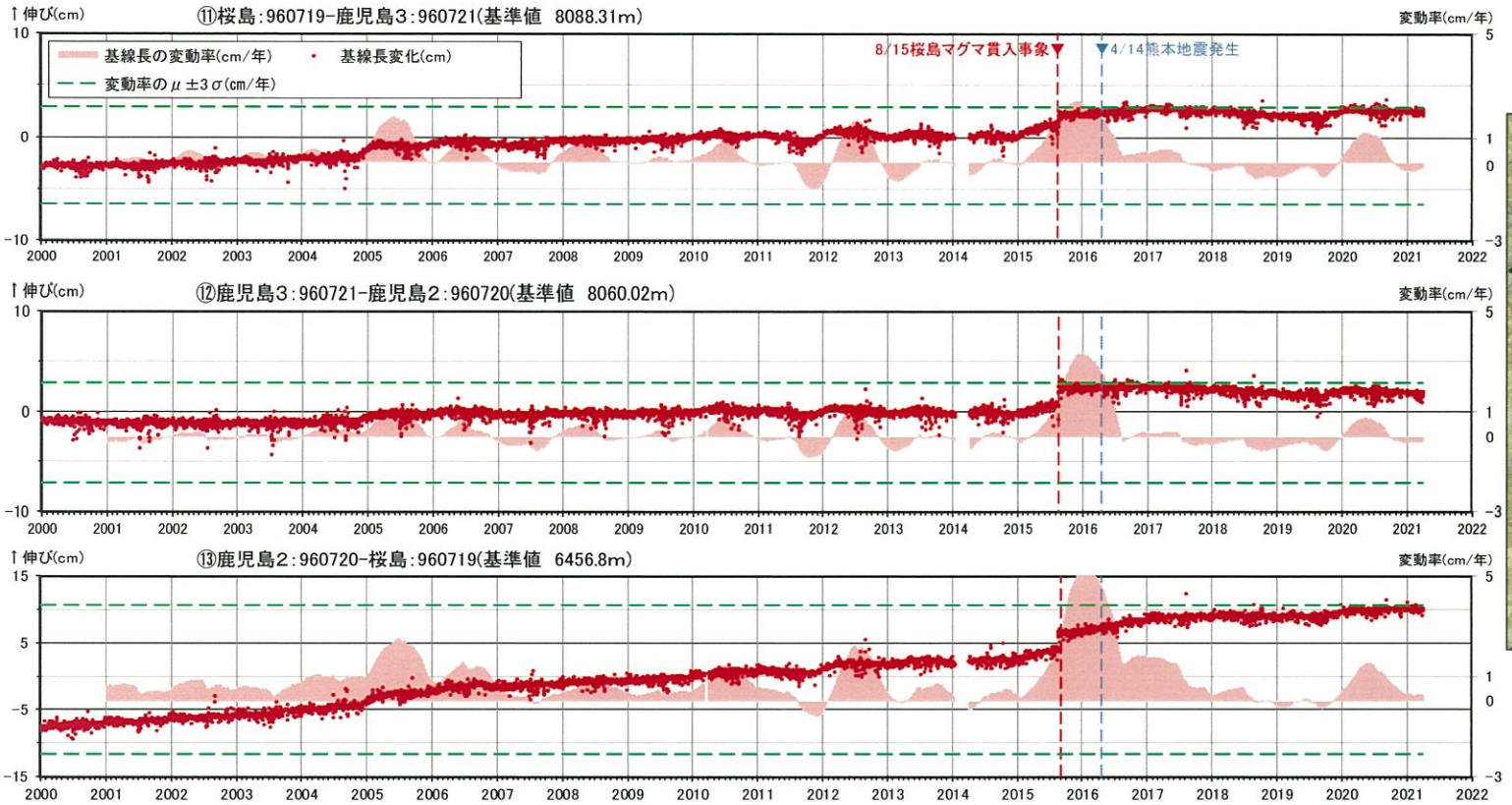
※4　960776(鹿児島郡山)は周辺樹木等の影響によりデータ品質が悪いため、F3解析から頻繁に除外されている

※5　基線⑧、⑩では観測開始から2020年度以前(2001.1.1〜2020.3.31)の変動率の平均をμ、標準偏差をσとした

※6　基線⑨では観測開始から2020年度以前(2017.5.23〜2020.3.31)の変動率の平均をμ、標準偏差をσとした

基線⑧〜⑩の時系列変化

9. 統計的整理に基づく評価　姶良カルデラ［地殻変動：基線長変化］

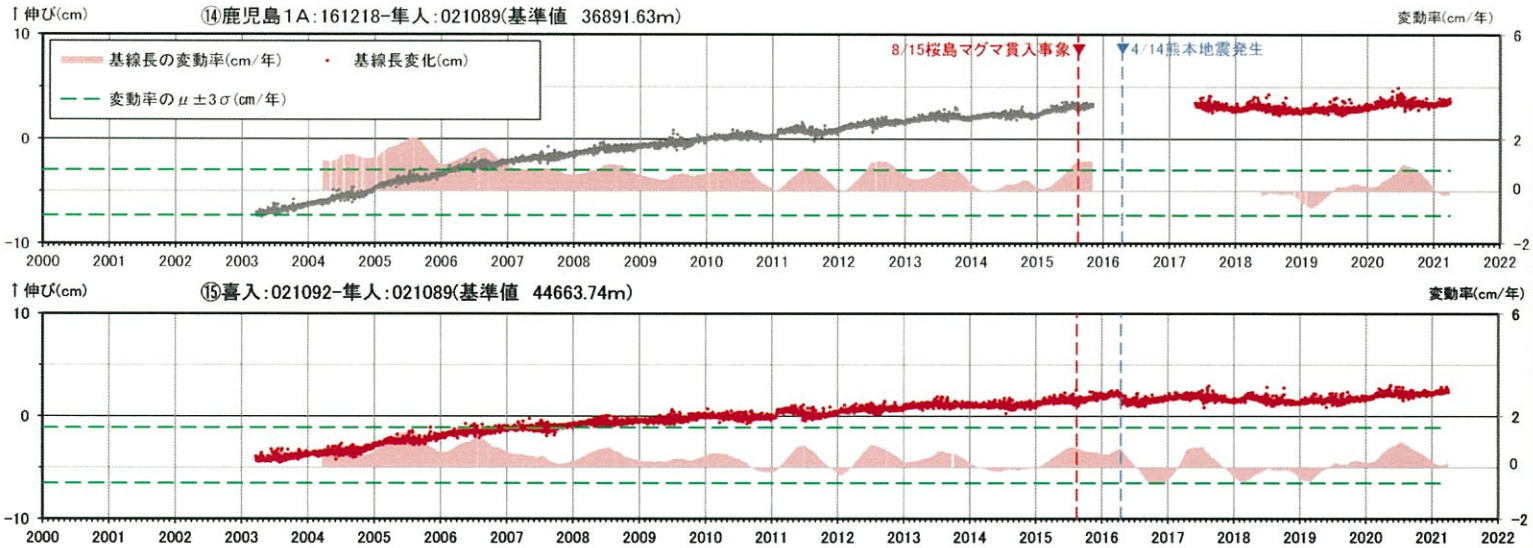


● 国土地理院のGNSS観測点

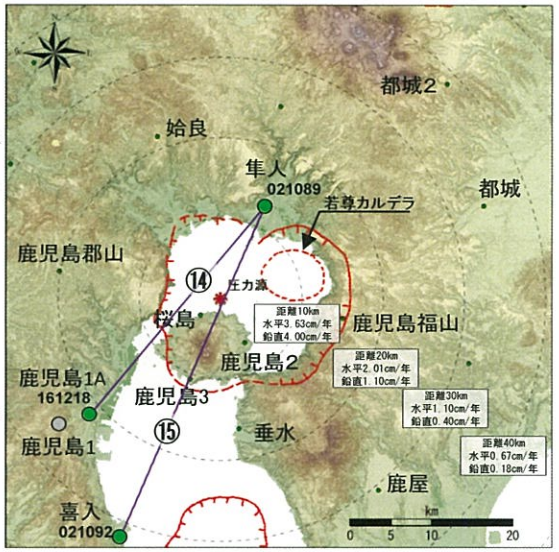
※1　2010年1月1日の基線長を基準値とし、基準値からの変化量を表示
※2　変動率は過去1年間のデータを用いて求めた近似式により算出
※3　基線⑪、⑫、⑬では観測開始から2020年度以前(2001.1.1～2020.3.31)の変動率の平均をμ、標準偏差をσとした

基線⑪～⑬の時系列変化

9. 統計的整理に基づく評価　姶良カルデラ［地殻変動：基線長変化］



基線⑭～⑮の時系列変化



● 国土地理院のGNSS観測点

※1　鹿児島1地点については、観測設備の不具合により、2015年11月5日以降データが取得できない状態であったが、2017年5月23日以降、移設して鹿児島1Aとして観測を開始。2000年から2015年は鹿児島1-垂水の基線長変化の観測データ(灰色)。

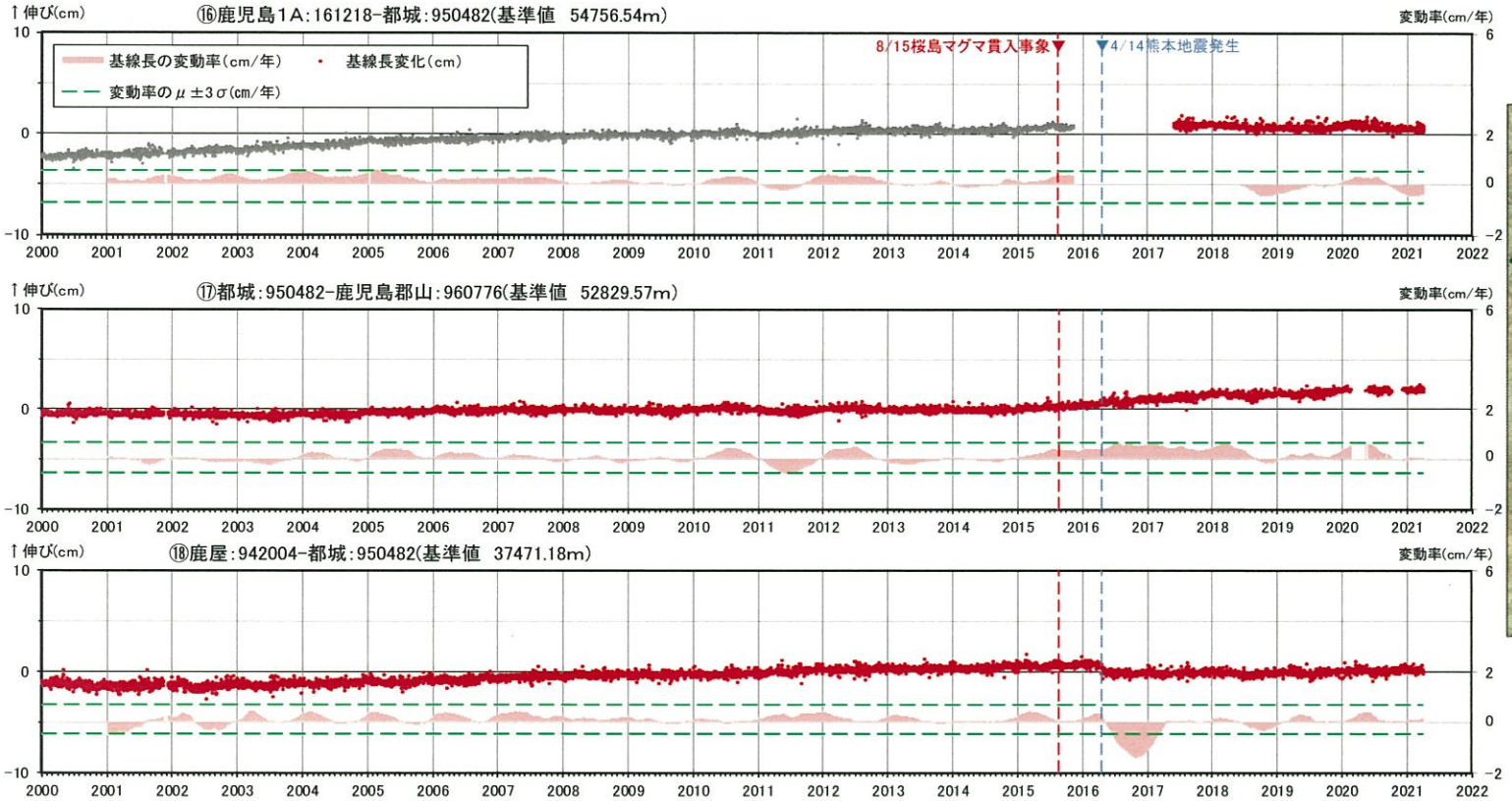
※2　2010年1月1日の基線長を基準値とし、基準値からの変化量を表示

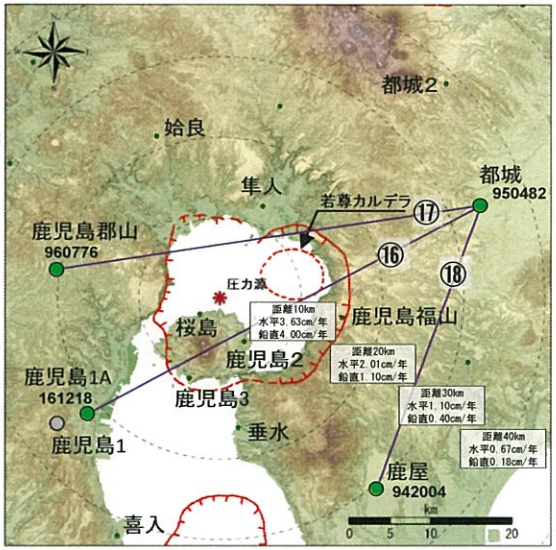
※3　変動率は過去1年間のデータを用いて求めた近似式により算出

※4　基線⑭では観測開始から2020年度以前（2017.5.23～2020.3.31）の変動率の平均をμ、標準偏差をσとした

※5　熊本地震の影響が残っていると考えられる隼人を含む基線⑮では、観測開始から熊本地震発生以前(2001.1.1～2015.12.31)の変動率の平均をμ、標準偏差をσとした

9. 統計的整理に基づく評価　姶良カルデラ［地殻変動：基線長変化］





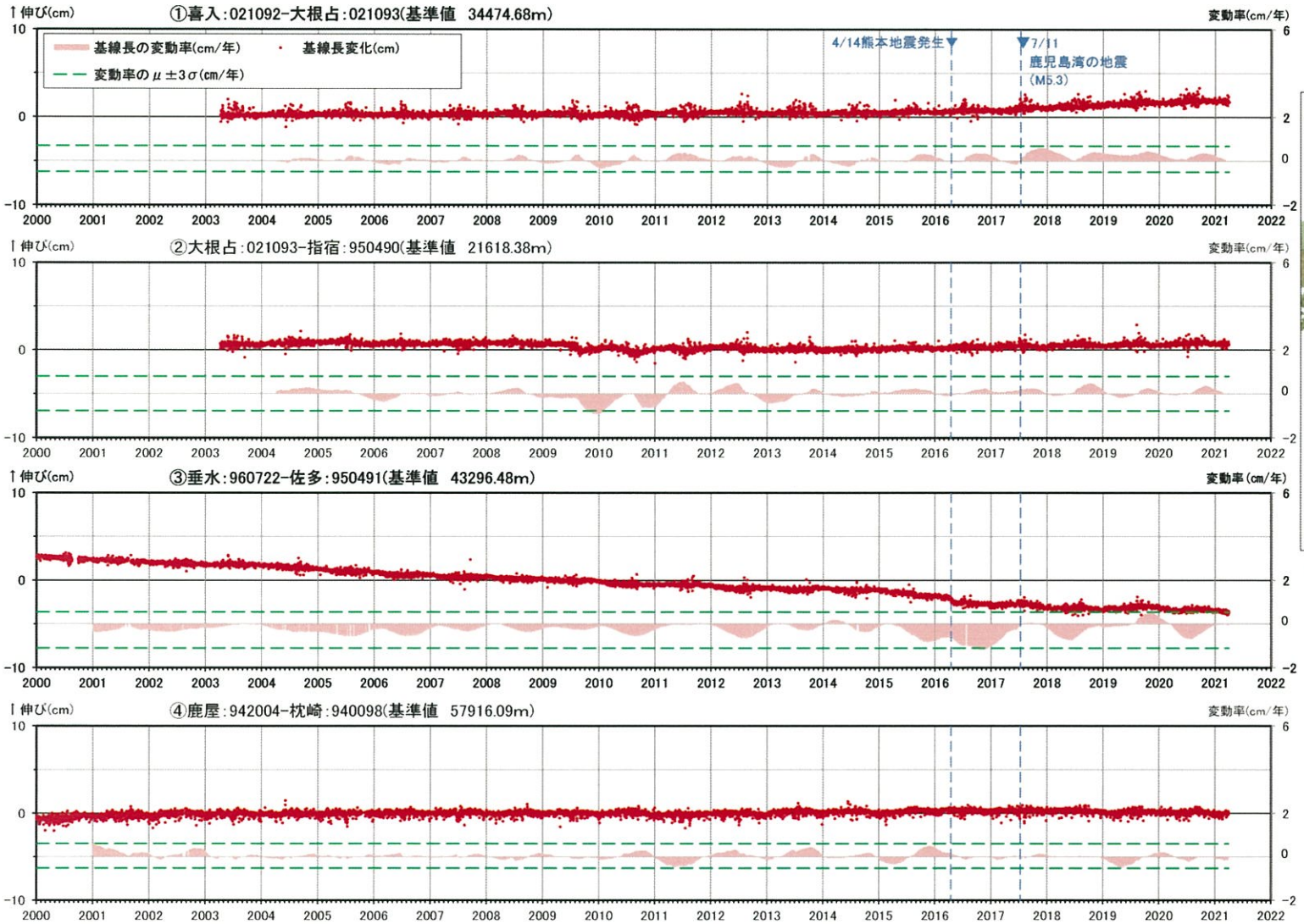
● 国土地理院のGNSS観測点

※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　鹿児島郡山の座標値は2020年2月14日以降未公開
※4　基線⑯では観測開始から2020年度以前（2017.5.23～2020.3.31）の変動率の平均をμ、標準偏差をσとした
※5　熊本地震の影響が残っていると考えられる都城を含む基線⑰、⑱では、観測開始から熊本地震発生以前(2001.1.1～2015.12.31)の変動率の平均をμ、標準偏差をσとした

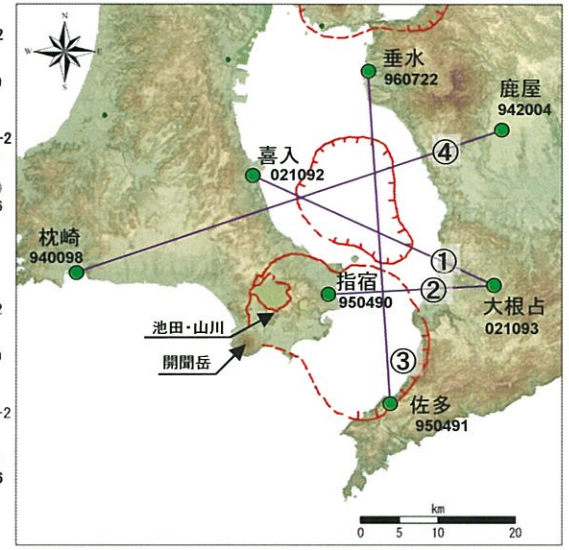
基線⑯～⑱の時系列変化

9. 統計的整理に基づく評価　阿多カルデラ［地殻変動：基線長変化］

・2020年度の阿多カルデラにおいては、基線長変動率が±3σを超える基線は無い。



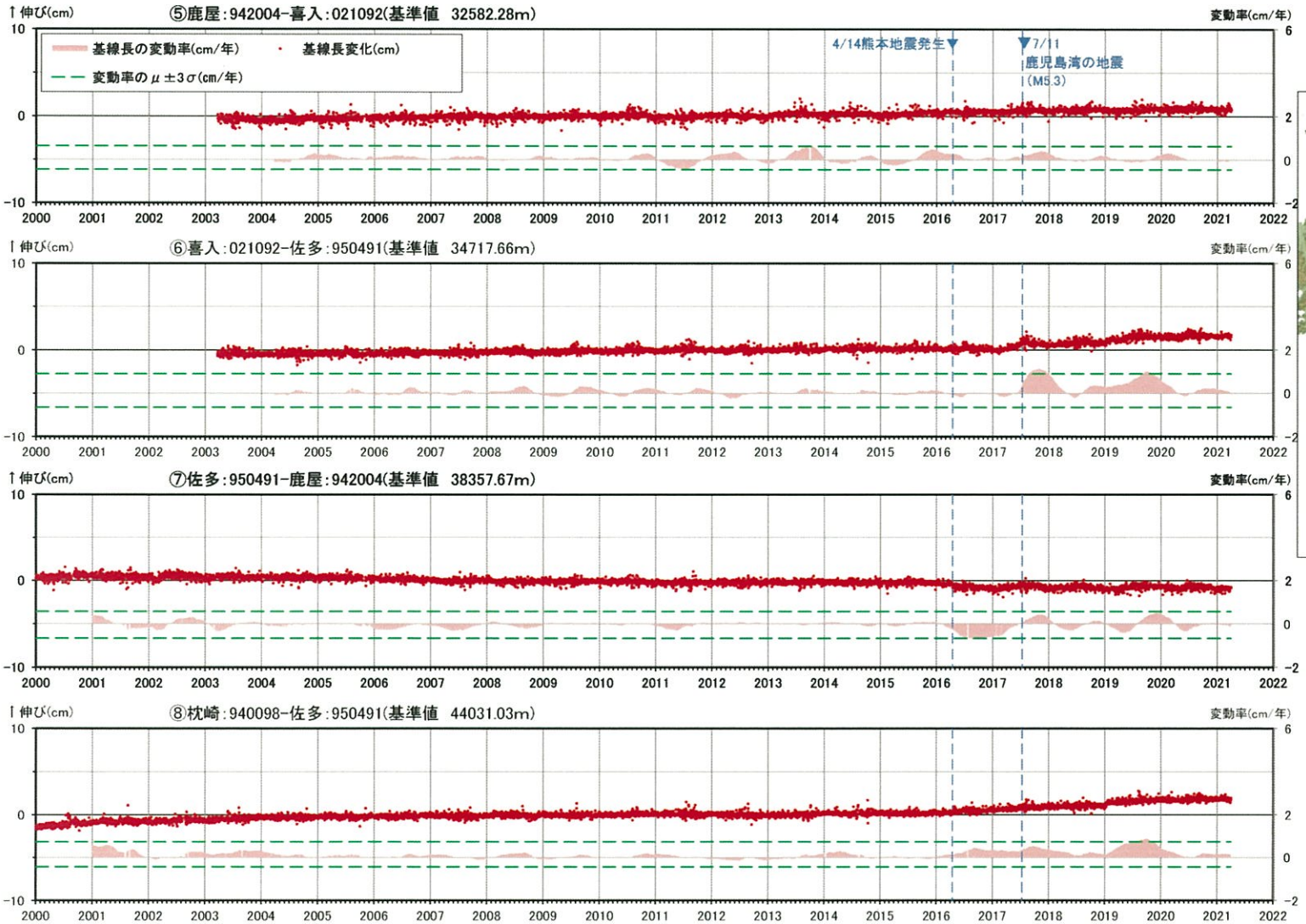
基線①～④の時系列変化

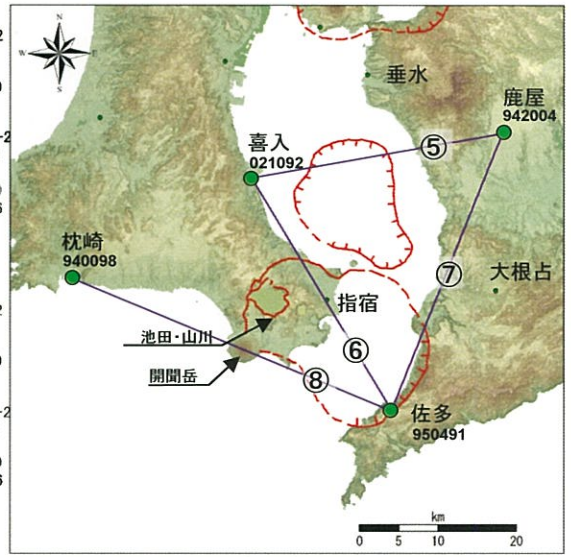


● 国土地理院のGNSS観測点

※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　観測開始から2020年度以前(2001.1.1～2020.3.31)の変動率の平均をμ、標準偏差をσとした

9. 統計的整理に基づく評価　阿多カルデラ［地殻変動：基線長変化］



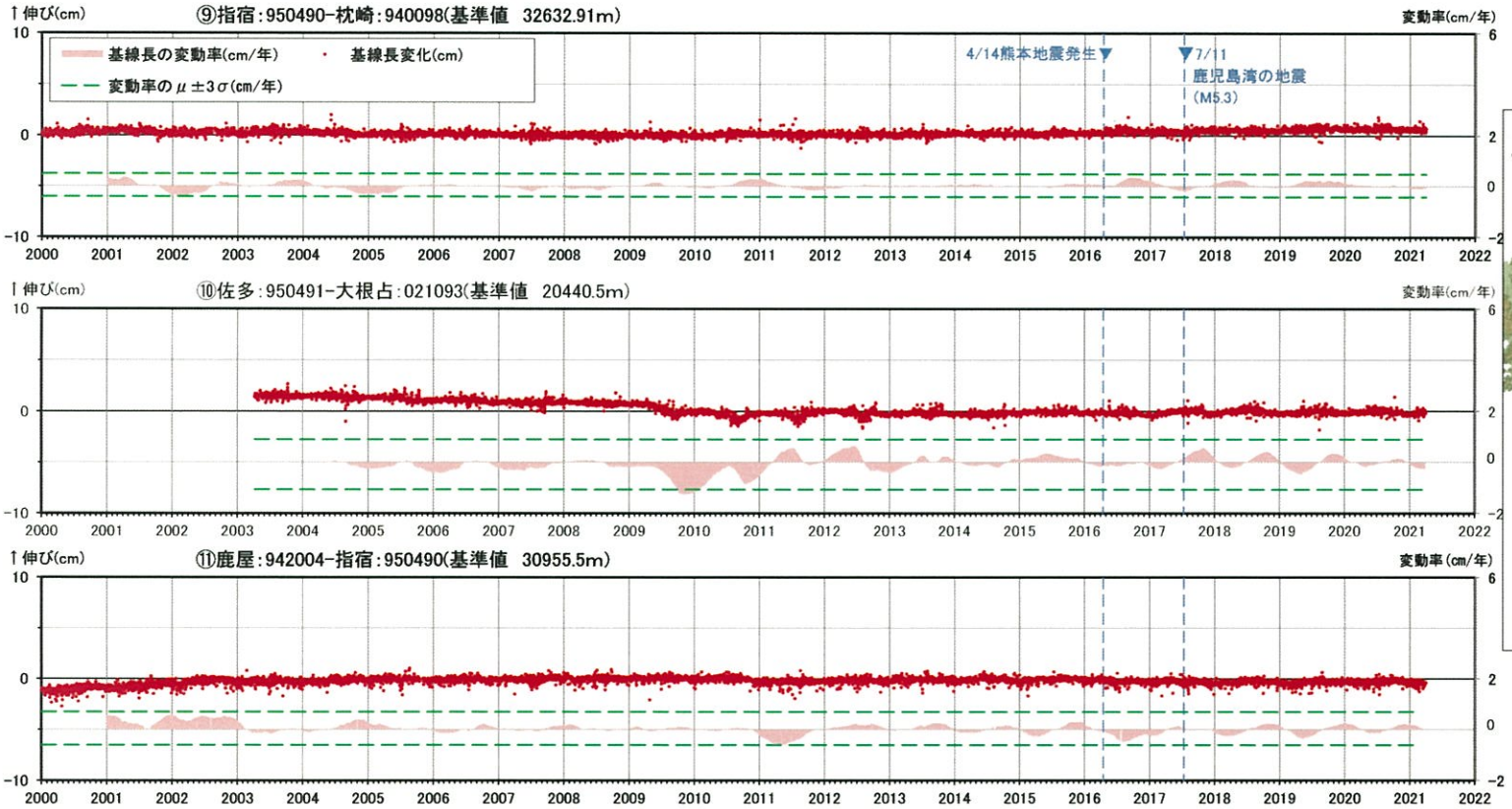


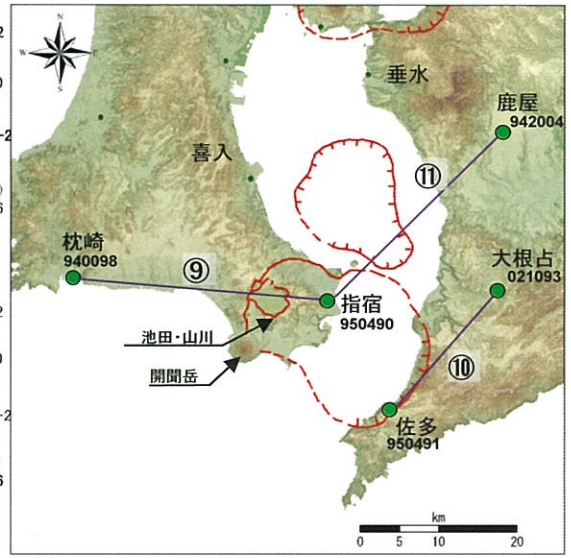
● 国土地理院のGNSS観測点

※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　観測開始から2020年度以前(2001.1.1～2020.3.31)の変動率の平均をμ、標準偏差をσとした

基線⑤～⑧の時系列変化

9. 統計的整理に基づく評価　阿多カルデラ［地殻変動：基線長変化］





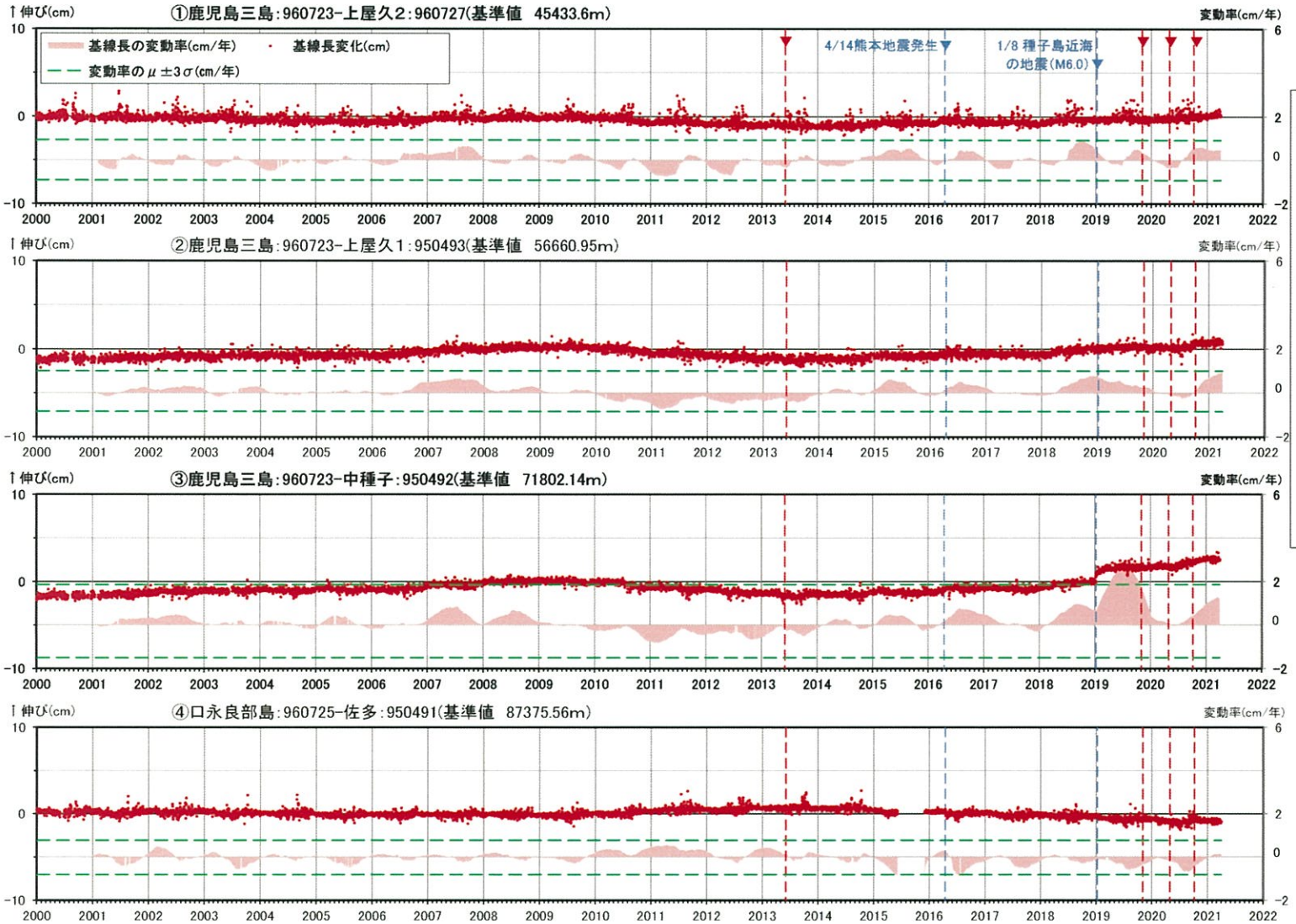
● 国土地理院のGNSS観測点

基線⑨～⑪の時系列変化

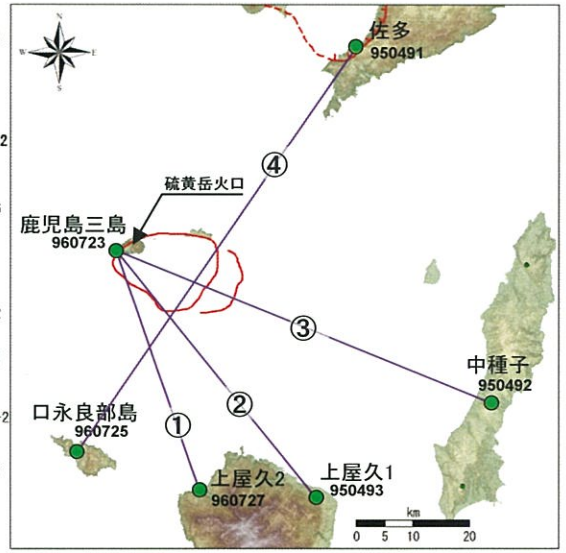
※1　2010年1月1日の基線長を基準値とし、基準値からの変化量を表示
※2　変動率は過去1年間のデータを用いて求めた近似式により算出
※3　観測開始から2020年度以前(2001.1.1～2020.3.31)の変動率の平均をμ、標準偏差をσとした

9. 統計的整理に基づく評価　鬼界［地殻変動：基線長変化］

・2020年度の鬼界においては、基線長変動率が±3σを超える基線は無い。



基線①～④の時系列変化

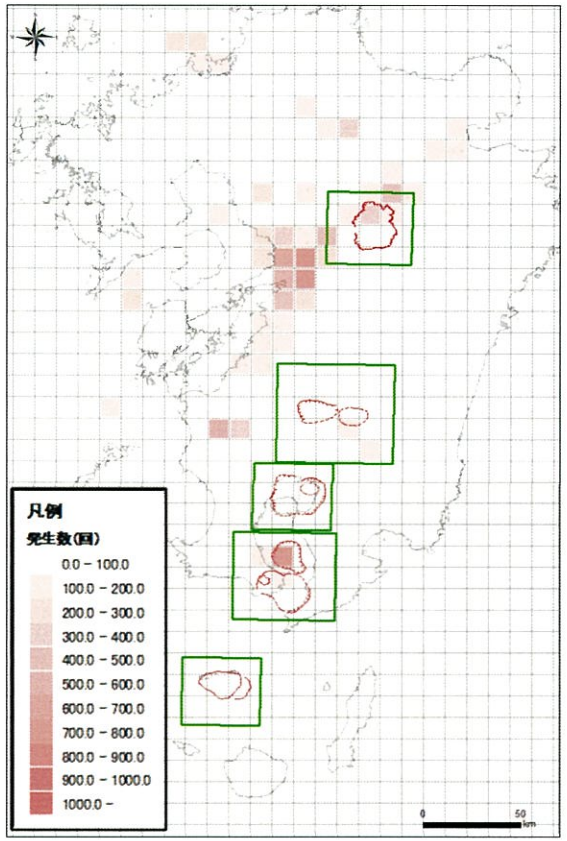


● 国土地理院のGNSS観測点

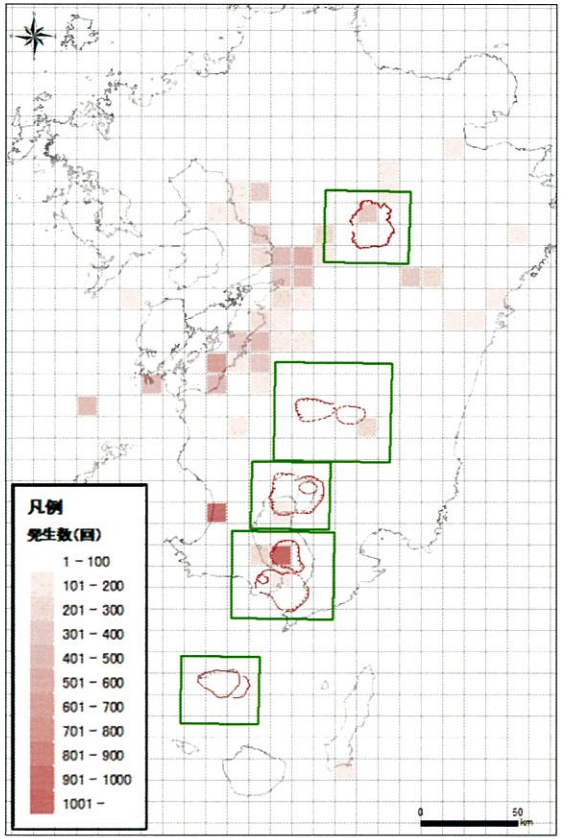
※1 口永良部島地点については、2015年5月29日の噴火の影響で停電が発生したことで、6月7日以降欠測停電が解消した12月2日から観測を再開
※2 2010年1月1日の基線長を基準値とし、基準値からの変化量を表示
※3 変動率は過去1年間のデータを用いて求めた近似式により算出
※4 赤色の▼は主な噴火
※5 観測開始から2020年度以前(2001.1.1～2020.3.31)の変動率の平均をμ、標準偏差をσとした

9. 統計的整理に基づく評価[地震活動：地震発生数]

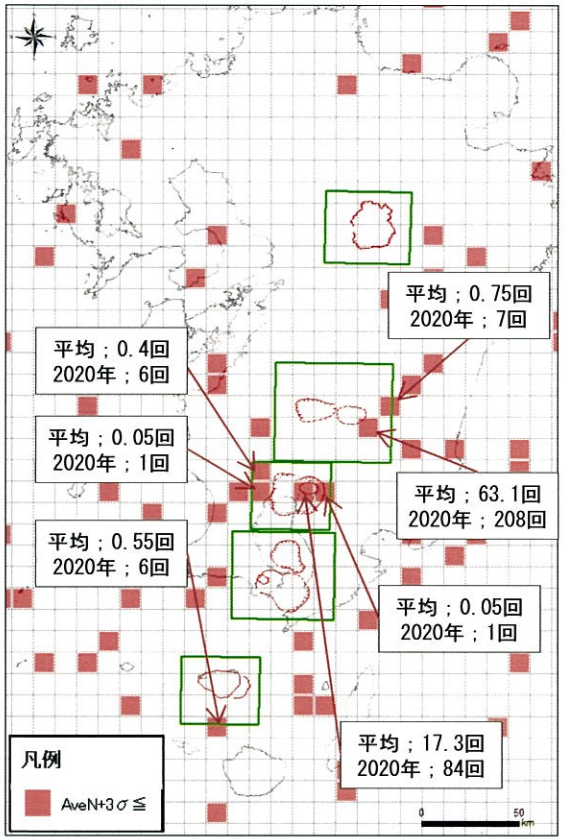
- 地震活動について、グリッド毎の地震発生数とエネルギーの「平均（μ）＋３σ」と、2020年の観測結果との比較を行った。
- 2020年の加久藤・小林カルデラ、姶良カルデラ、鬼界の評価範囲において＋３σを超える地震発生数が見られたグリッドについては、大部分が平均（μ）の値が小さいことが原因と考えられ、2020年の地震発生数自体も7回以下と少ない。
- また、加久藤・小林カルデラで年間208回、姶良カルデラで年間84回の地震が発生したグリッドにおいては地震発生数が＋３σを超えるものの、地震エネルギーは＋３σを超えないことから、今後の経過を確認していく。



2000～2019年
平均地震数（通常地震）



2020年
地震数（通常地震）

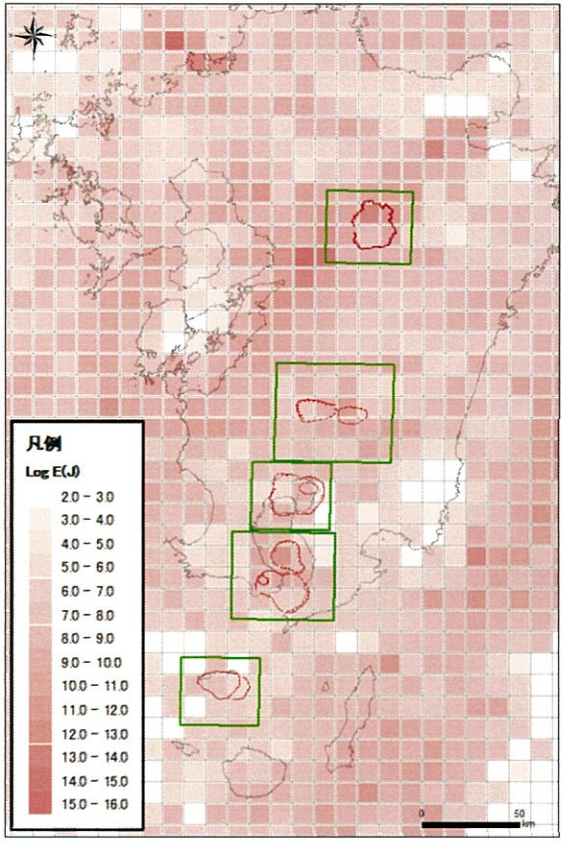


2000～2019年平均地震数（通常地震）と2020年
地震数（通常地震）の比較

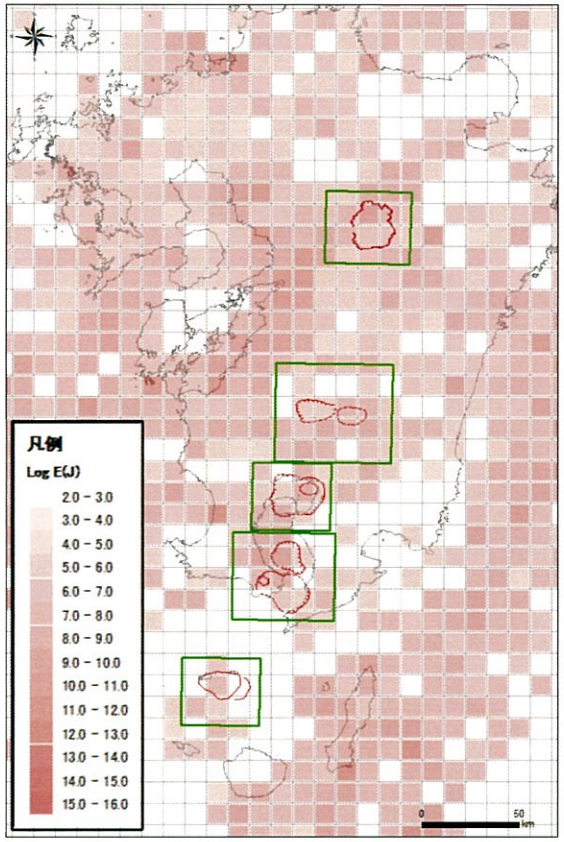
※1　グリッド毎に震源データを抽出し、各年のグリッド毎の総地震数を算出。
※2　グリッドの大きさは緯度・経度それぞれ0.1度（約9km）とする。

9. 統計的整理に基づく評価[地震活動：地震エネルギー]

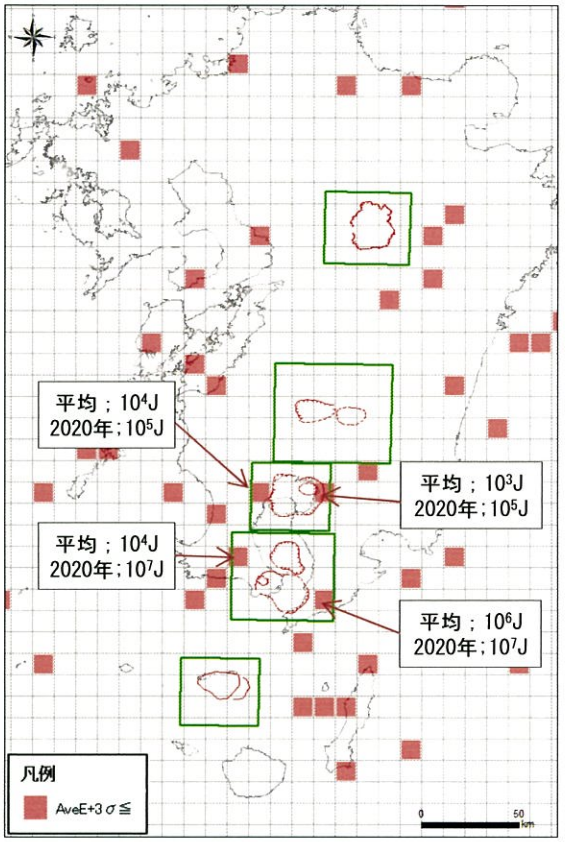
- 2020年の姶良カルデラ、阿多カルデラの評価範囲において＋３σを超える地震エネルギーが見られたグリッドについては、平均（μ）の値が小さいことが原因と考えられ、2020年の地震エネルギー自体も10^7J（1回の地震に集約してもマグニチュード約1.5の地震を生じさせる程度のエネルギー）以下と小さい。



2000～2019年
平均地震エネルギー（通常地震）



2020年
地震エネルギー（通常地震）



2000～2019年平均地震エネルギー（通常地震）
と2020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9km）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）

10. 鬼界の基線長変化における長期トレンド検討［過去の検討の整理］

・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、その原因について検討を行った。
・これまで、各観測点の水平変位ベクトル、黒潮の影響、薩摩硫黄島・口永良部島の火山活動の影響等を検討したが、今年度は広域的な動きとの関連を検討した。

2017年度報告：各観測点の水平変位ベクトル

- 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。

↓

2018年度報告①：黒潮の影響

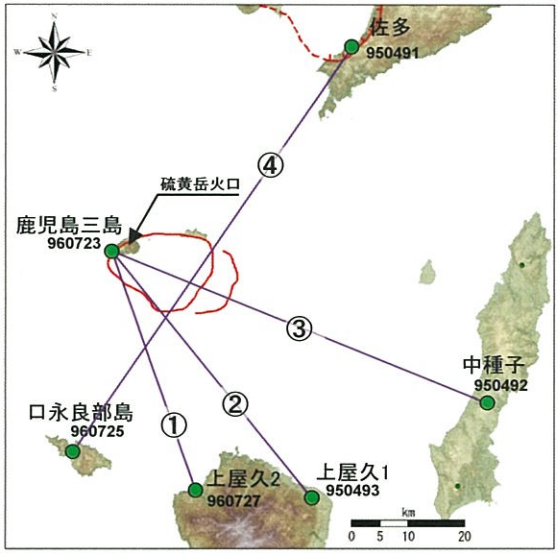
- 黒潮の位置が変化する周期は、基線長変化の周期と比較して、短い周期であり、両者間で明瞭な関係は認められない。
- 黒潮の位置の変化と各観測点の鉛直変動との間に、明確な関係は認められない。

2018年度報告②：火山活動の影響

- 薩摩硫黄島、口永良部島ともに、火山の噴火と基線長変化に明確な関係は認められないものの、関連性は否定できない。

↓

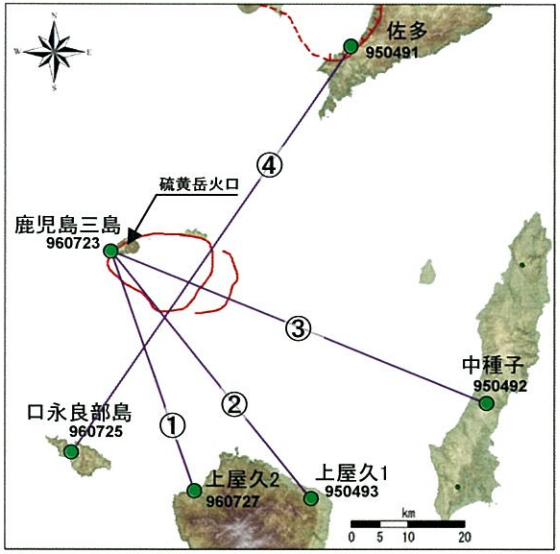
2020年度報告（今回報告）：広域的な動きとの関連



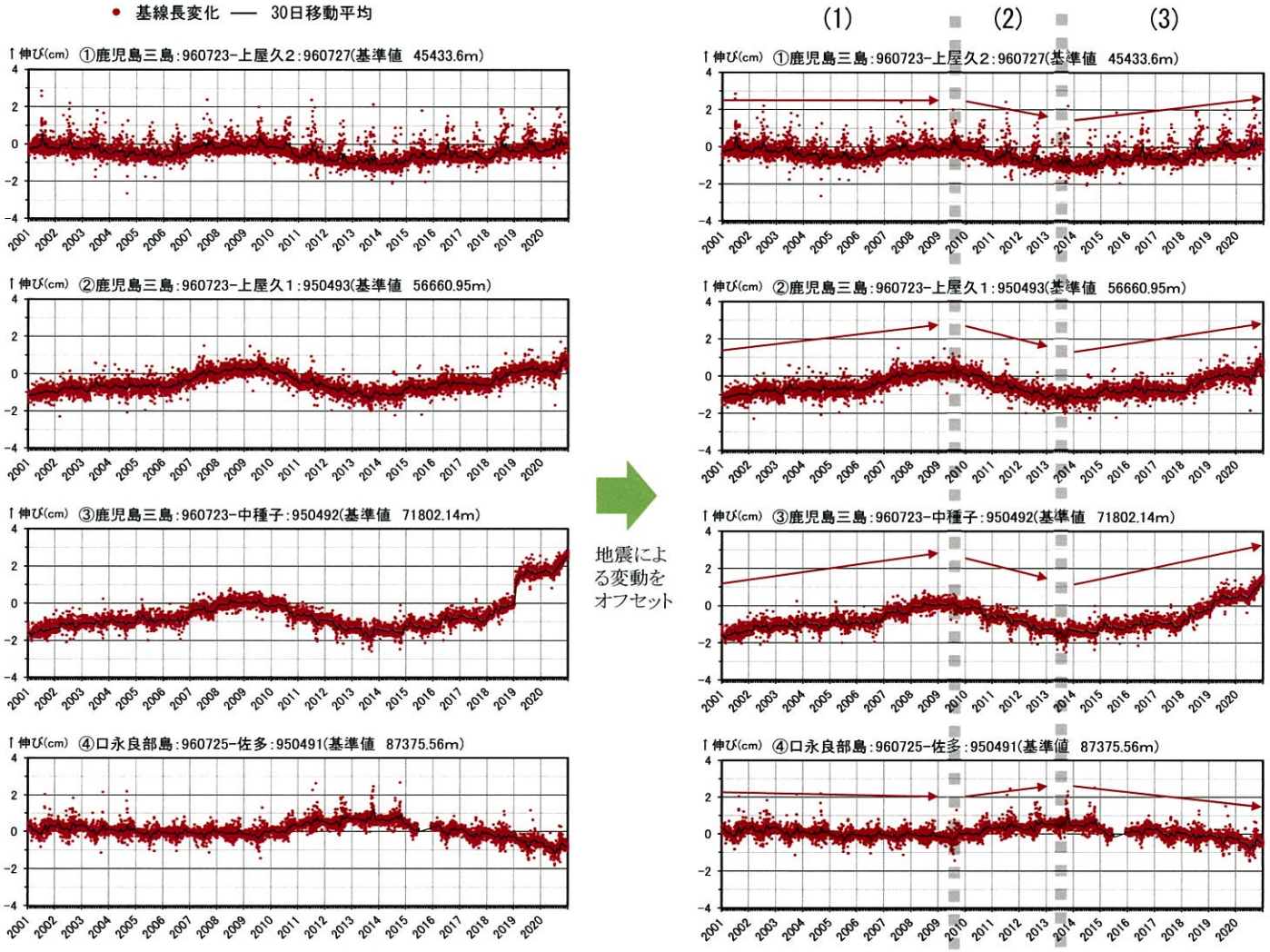
● 国土地理院のGNSS観測点

10. 鬼界の基線長変化における長期トレンド検討［基線長変化］

・鬼界の基線①～④においては、地震による急激な変動を除去しても、概ね同じ時期に基線長変化の傾向が変化しており、基線長変化はその傾向毎に3つの期間((1)～(3))に分けることができる。



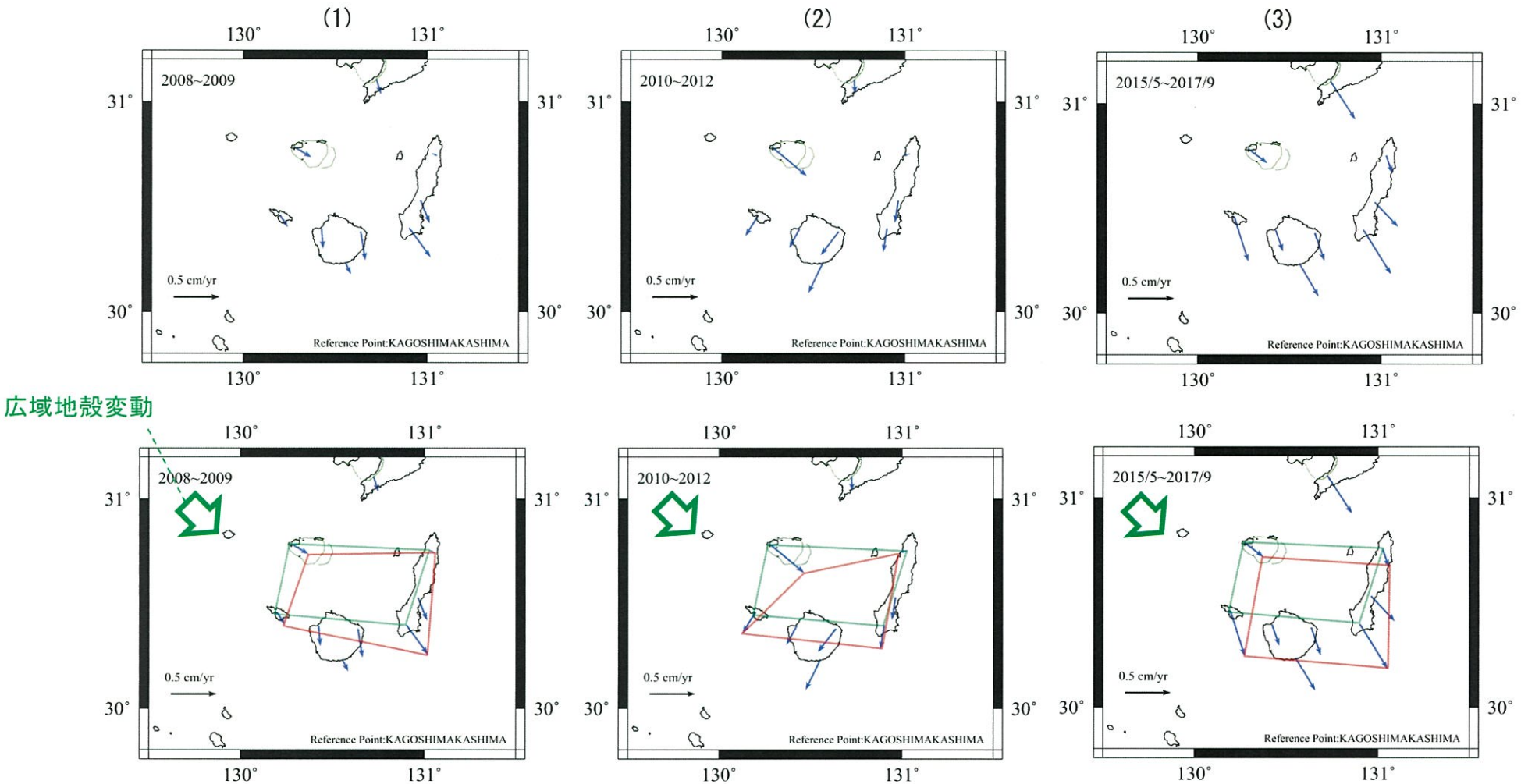
※1 ● 国土地理院のGNSS観測点
※2 基線長変化図では以下の地震による変動をオフセットして図化している。
・2011/3/11 東北地方太平洋沖地震 M9.0
・2015/11/14 薩摩半島西方沖の地震 M7.1
・2016/4/14-16 熊本地震 M7.3
・2019/1/8 種子島近海の地震 M6.0



10. 鬼界の基線長変化における長期トレンド検討[水平変位の変動]

・(1)～(3)の期間における各観測点の代表的な水平変位ベクトルを確認した結果、(1)、(3) の期間では、P105に示すような広域地殻変動による変位とほぼ同方向の南～南東方向の水平変位が見られる。

・(2)の期間では口永良部島、屋久島、種子島の各観測点において、広域地殻変動による変位と異なる南南西～南西方向の水平変位が見られる。ただし、この変位は、鬼界のマグマ供給を示唆するような放射状の変位とも異なる。



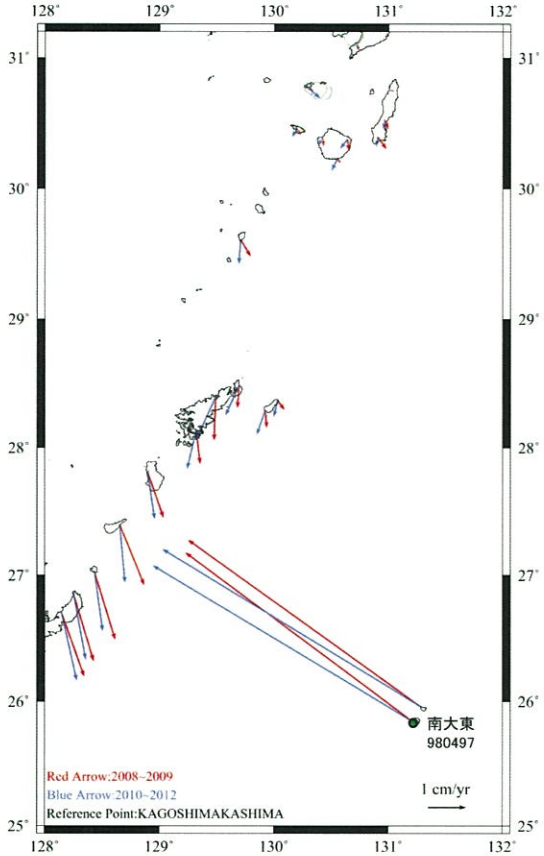
※ 基線長変化の傾向毎に区別した(1)～(3)の期間において、代表的な変動を示す時期の水平変位ベクトルを示した。

10. 鬼界の基線長変化における長期トレンド検討［広域的な動きとの比較］

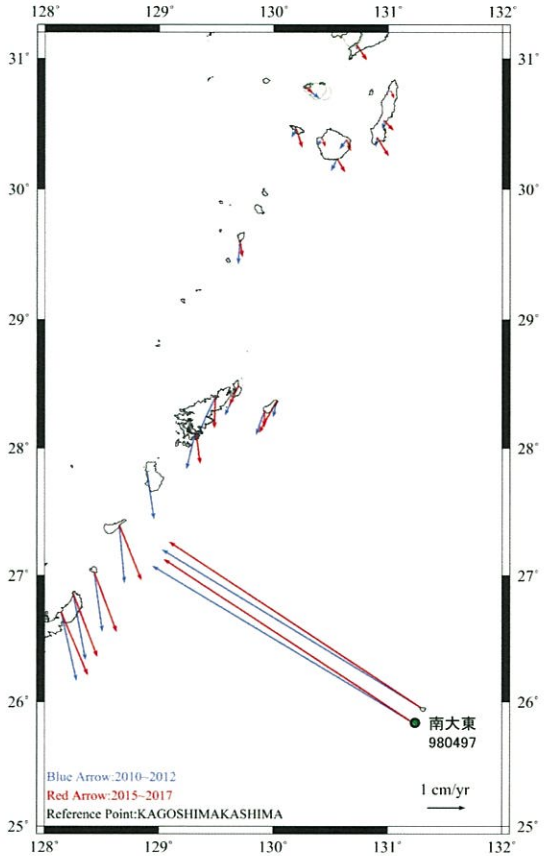
・より広域的に南西諸島の水平変位の変化も確認した結果、口永良部島、屋久島、種子島の各観測点と同様に、(2)の期間において前後の期間よりも変位の方向が南西～北西方向に変化していることが確認された。

・このことから、鬼界の基線長変化における長期トレンドは、広域的な地殻変動の影響により生じている可能性が示唆され、少なくとも鬼界の火山活動によるものではないと考えられる。

期間(1)→と(2)→のベクトル図



期間(2)→と(3)→のベクトル図



余　　白

原子力規制委員会の火山モニタリングにおける「観測データに有意な変化があったと判断する目安」を踏まえた整理

1 阿蘇カルデラ

・カルデラごとに「観測データに有意な変化があったと判断する目安」を踏まえた整理を行い、全ての監視項目において有意な変化がないことを確認した。

監視項目			確認したデータ		頁	確認結果
①主な監視項目	地震活動		・本資料		17	・地震発生領域の拡大又は消滅、新たな地震発生領域の出現は認められない ・地震発生数の急激な変化は認められない
	地殻変動・地盤変動	GNSS	・本資料		10	・既往の傾向と比較して、急激な変化は認められない ・既往の地殻変動と異なる場所での地殻変動の出現は認められない ・傾斜計・伸縮計による地盤変動の急激な傾向の変化は認められない
		水準測量	—			
		衛星観測	第147回火山噴火予知連絡会資料(その3の5) ・国土地理院(2020a)			
		傾斜計・伸縮計	第147回火山噴火予知連絡会資料(その3の5) ・気象庁(2020a)			
	火山ガス・熱活動(表面活動)		令和2年(2020年)の阿蘇山の火山活動(年報) ・気象庁(2021a) 阿蘇山の火山活動解説資料(令和3年3月) ・気象庁(2021b)			・既往の火山ガス放出場所の拡大又は消滅、放出場所の出現は認められない ・火山ガスの放出量に急激な傾向の変化は認められない
②その他の監視項目	噴出場所及び噴出物		阿蘇山の火山活動解説資料(令和3年3月) ・気象庁(2021b)			・既往の火口の拡大や消長、新たな火口や火道の形成は認められない ・マグマ成分の物理的・化学的性質に急激な変化があったとする科学的知見は認められない
	噴火様式		阿蘇山の火山活動解説資料(令和3年3月) ・気象庁(2021b)			・噴煙柱高度が数十km程度のプリニー式噴火を伴うような噴火は認められない
	地下構造		比抵抗	高倉ほか(2000)		・地殻内に推定される低速度及び低比抵抗領域の拡大又は消滅、新たな低速度及び低比抵抗領域が出現したとする科学的知見は認められない
				Matsushima et al. (2020)		
				Hata et al. (2018)		
				Aizawa et al. (2021)		
			地震波速度	Sudo and Kong (2001)		
				Abe et al. (2017)		
				Huang et al. (2018)		
				木村ほか(2019)		
				Shito et al. (2020)		
参考			岩石学	三好ほか(2005)		・カルデラ火山に有意な変化があるとする科学的知見は認められない
				三好(2013)		
			地質学	小林(2017)		
			地球化学	森川ほか(2019)		
				安池ほか(2019)		
				Kawaguchi et al. (2021)		
			測地学	大倉(2017)		
				Hashimoto (2020)		
			地温勾配 地殻熱流量	田中ほか(2004)	160	
			キュリー点深度	大久保(1984)	160	

2 加久藤・小林カルデラ

<table>
<tr><th colspan="3">監視項目</th><th colspan="2">データ</th><th>頁</th><th>評価</th></tr>
<tr><td rowspan="8">①主な監視項目</td><td colspan="2">地震活動</td><td colspan="2">・本資料</td><td>35</td><td>・地震発生領域の拡大又は消滅、新たな地震発生領域の出現は認められない
・地震発生数の急激な変化は認められない</td></tr>
<tr><td rowspan="4">地殻変動・地盤変動</td><td>GNSS</td><td colspan="2">・本資料</td><td>29</td><td rowspan="4">・既往の傾向と比較して、急激な変化は認められない
・既往の地殻変動と異なる場所での地殻変動の出現は認められない
・傾斜計・伸縮計による地盤変動の急激な傾向の変化は認められない
※ なお、新燃岳ではSAR干渉解析において、火口内の北西側を中心として衛星から遠ざかる変動が見られる。</td></tr>
<tr><td>水準測量</td><td colspan="3">—</td></tr>
<tr><td>衛星観測</td><td colspan="3">第147回火山噴火予知連絡会資料(その1の2)
・気象庁・気象研究所(2020)
・国土地理院(2020b)</td></tr>
<tr><td>傾斜計
・伸縮計</td><td colspan="3">令和2年(2020 年)の霧島山の火山活動(年報)
・気象庁(2021c)
霧島山の火山活動解説資料(令和3年3月)
・気象庁(2021d)</td></tr>
<tr><td colspan="2">火山ガス
・熱活動
(表面活動)</td><td colspan="3">令和2年(2020 年)の霧島山の火山活動(年報)
・気象庁(2021c)
霧島山の火山活動解説資料(令和3年3月)
・気象庁(2021d)</td><td>・既往の火山ガス放出場所の拡大又は消滅、放出場所の出現は認められない
・火山ガスの放出量に急激な傾向の変化は認められない</td></tr>
<tr><td rowspan="9">②その他の監視項目</td><td colspan="2">噴出場所
及び
噴出物</td><td colspan="3">霧島山の火山活動解説資料(令和3年3月)
・気象庁(2021c)</td><td>・既往の火口の拡大や消長、新たな火口や火道の形成は認められない
・マグマ成分の物理的・化学的性質に急激な変化があったとする科学的知見は認められない</td></tr>
<tr><td colspan="2">噴火様式</td><td colspan="3">霧島山の火山活動解説資料(令和3年3月)
・気象庁(2021c)</td><td>・噴煙柱高度が数十km 程度のプリニー式噴火を伴うような噴火は認められない</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="7">地下構造</td><td rowspan="3">比抵抗</td><td colspan="2">鍵山ほか(1997)</td><td rowspan="7">・地殻内に推定される低速度及び低比抵抗領域の拡大又は消滅、新たな低速度及び低比抵抗領域が出現したとする科学的知見は認められない</td></tr>
<tr><td colspan="2">Goto et al.(1997)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Aizawa et al.(2014)</td></tr>
<tr><td rowspan="4">地震波速度</td><td colspan="2">長岡ほか(2019)</td></tr>
<tr><td colspan="2">澁谷ほか(2019)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Shito et al. (2020)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Nishida et al. (2020)</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="4">参考</td><td>地質学</td><td colspan="2">小林(2017)</td><td rowspan="4">・カルデラ火山に有意な変化があるとする科学的知見は認められない</td></tr>
<tr><td>測地学</td><td colspan="2">大倉(2017)</td></tr>
<tr><td>地温勾配
地殻熱流量</td><td>田中ほか(2004)</td><td>160</td></tr>
<tr><td>キュリー点深度</td><td>大久保 (1984)</td><td>160</td></tr>
</table>

3 姶良カルデラ

<table>
<tr><th colspan="3">監視項目</th><th colspan="2">データ</th><th>頁</th><th>評価</th></tr>
<tr><td rowspan="8">①主な監視項目</td><td colspan="2">地震活動</td><td colspan="2">・本資料</td><td>55</td><td>・地震発生領域の拡大又は消滅、新たな地震発生領域の出現は認められない
・地震発生数の急激な変化は認められない</td></tr>
<tr><td rowspan="4">地殻変動・地盤変動</td><td>GNSS</td><td colspan="2">・本資料</td><td>46</td><td rowspan="4">・既往の傾向と比較して、急激な変化は認められない
・既往の地殻変動と異なる場所での地殻変動の出現は認められない
・傾斜計・伸縮計による地盤変動の急激な傾向の変化は認められない</td></tr>
<tr><td>水準測量</td><td colspan="2">・本資料</td><td>133</td></tr>
<tr><td>衛星観測</td><td colspan="3">第147回火山噴火予知連絡会資料（その2の1）
・気象庁（2020b）
・国土地理院（2020c）</td></tr>
<tr><td>傾斜計
・伸縮計</td><td colspan="3">令和2年（2020 年）の桜島の火山活動（年報）
・気象庁（2021e）
桜島の火山活動解説資料（令和3年3月）
・気象庁（2021f）</td></tr>
<tr><td colspan="2">火山ガス
・熱活動
（表面活動）</td><td colspan="3">令和2年（2020 年）の桜島の火山活動（年報）
・気象庁（2021e）
桜島の火山活動解説資料（令和3年3月）
・気象庁（2021f）</td><td>・既往の火山ガス放出場所の拡大又は消滅、放出場所の出現は認められない
・火山ガスの放出量に急激な傾向の変化は認められない</td></tr>
<tr><td rowspan="8">②その他の監視項目</td><td colspan="2">噴出場所
及び
噴出物</td><td colspan="3">桜島の火山活動解説資料（令和3年3月）
・気象庁（2021f）</td><td>・既往の火口の拡大や消長、新たな火口や火道の形成は認められない
・マグマ成分の物理的・化学的性質に急激な変化があったとする科学的知見は認められない</td></tr>
<tr><td colspan="2">噴火様式</td><td colspan="3">桜島の火山活動解説資料（令和3年3月）
・気象庁（2021f）</td><td>・噴煙柱高度が数十km 程度のプリニー式噴火を伴うような噴火は認められない</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="7">地下構造</td><td>比抵抗</td><td>—</td><td></td><td rowspan="7">・地殻内に推定される低速度及び低比抵抗領域の拡大又は消滅、新たな低速度及び低比抵抗領域が出現したとする科学的知見は認められない</td></tr>
<tr><td rowspan="6">地震波速度</td><td>Alanis et al. (2012)</td><td></td></tr>
<tr><td>井口（2017）</td><td></td></tr>
<tr><td>宮町ほか(2018)</td><td></td></tr>
<tr><td>安池ほか（2019）</td><td></td></tr>
<tr><td>澁谷ほか（2019）</td><td></td></tr>
<tr><td>筒井ほか（2020）</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="9">参考</td><td>岩石学</td><td>関口ほか（2014）</td><td></td><td rowspan="9">・カルデラ火山に有意な変化があるとする科学的知見は認められない</td></tr>
<tr><td rowspan="2">地質学</td><td>小林（2017）</td><td></td></tr>
<tr><td>小林（2019）</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="3">測地学</td><td>井口ほか（2011）</td><td></td></tr>
<tr><td>山本ほか（2013）</td><td></td></tr>
<tr><td>Hickey et al. (2016)</td><td></td></tr>
<tr><td>地温勾配
地殻熱流量</td><td>田中ほか（2004）</td><td>160</td></tr>
<tr><td>キュリー点
深度</td><td>大久保（1984）</td><td>160</td></tr>
<tr><td>重力</td><td>山本ほか（2014）</td><td>162</td></tr>
</table>

4 阿多カルデラ

<table>
<tr><th colspan="3">監視項目</th><th colspan="2">データ</th><th>頁</th><th>評価</th></tr>
<tr><td rowspan="6">①主な監視項目</td><td colspan="2">地震活動</td><td colspan="2">・本資料</td><td>71</td><td>・地震発生領域の拡大又は消滅、新たな地震発生領域の出現は認められない
・地震発生数の急激な変化は認められない</td></tr>
<tr><td rowspan="4">地殻変動・地盤変動</td><td>GNSS</td><td colspan="2">・本資料</td><td>66</td><td rowspan="4">・既往の傾向と比較して、急激な変化は認められない
・既往の地殻変動と異なる場所での地殻変動の出現は認められない</td></tr>
<tr><td>水準測量</td><td colspan="3">—</td></tr>
<tr><td>衛星観測</td><td colspan="3">第147回火山噴火予知連絡会資料(その4の2)
・国土地理院(2020d)</td></tr>
<tr><td>傾斜計
・伸縮計</td><td colspan="3">—</td></tr>
<tr><td colspan="2">火山ガス
・熱活動
(表面活動)</td><td colspan="3">第147回火山噴火予知連絡会資料(その4の1)
・気象庁(2020c)
・気象庁(2020d)</td><td>・既往の火山ガス放出場所の拡大又は消滅、放出場所の出現は認められない</td></tr>
<tr><td rowspan="5">②その他の監視項目</td><td colspan="2">噴出場所
及び
噴出物</td><td colspan="3">第147回火山噴火予知連絡会資料(その4の1)
・気象庁(2020c)
・気象庁(2020d)</td><td>・既往の火口の拡大や消長、新たな火口や火道の形成は認められない
・マグマ成分の物理的・化学的性質に急激な変化があったとする科学的知見は認められない</td></tr>
<tr><td colspan="2">噴火様式</td><td colspan="3">第147回火山噴火予知連絡会資料(その4の1)
・気象庁(2020c)
・気象庁(2020d)</td><td>・噴煙柱高度が数十km 程度のプリニー式噴火を伴うような噴火は認められない</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="4">地下構造</td><td>比抵抗</td><td colspan="2">—</td><td rowspan="4">・地殻内に推定される低速度及び低比抵抗領域の拡大又は消滅、新たな低速度及び低比抵抗領域が出現したとする科学的知見は認められない</td></tr>
<tr><td rowspan="3">地震波速度</td><td colspan="2">西ほか(2001)</td></tr>
<tr><td colspan="2">澁谷ほか(2019)</td></tr>
<tr><td colspan="2">海野ほか(2019)</td></tr>
<tr><td colspan="3" rowspan="4">参考</td><td>地質学</td><td colspan="2">小林(2017)</td><td rowspan="4">・カルデラ火山に有意な変化があるとする科学的知見は認められない</td></tr>
<tr><td>測地学</td><td colspan="2">大倉(2017)</td></tr>
<tr><td>地温勾配
地殻熱流量</td><td>田中ほか(2004)</td><td>160</td></tr>
<tr><td>キュリー点深度</td><td>大久保 (1984)</td><td>160</td></tr>
</table>

5 鬼界

監視項目			データ		頁	評価
①主な監視項目	地震活動		・本資料		85	・地震発生領域の拡大又は消滅、新たな地震発生領域の出現は認められない ・地震発生数の急激な変化は認められない
	地殻変動・地盤変動	GNSS	・本資料		82	・既往の傾向と比較して、急激な変化は認められない ・既往の地殻変動と異なる場所での地殻変動の出現は認められない ・傾斜計・伸縮計による地盤変動の急激な傾向の変化は認められない
		水準測量	—			
		衛星観測	第147回火山噴火予知連絡会資料(その2の4) ・気象庁(2020e) ・国土地理院(2020e)			
		傾斜計・伸縮計	第146回火山噴火予知連絡会資料(その2の4) ・気象庁(2020f)			
	火山ガス・熱活動(表面活動)		令和2年(2020 年)の薩摩硫黄島の火山活動(年報) ・気象庁(2021g) 薩摩硫黄島の火山活動解説資料(令和3年3月) ・気象庁(2021h)			・既往の火山ガス放出場所の拡大又は消滅、放出場所の出現は認められない ・火山ガスの放出量に急激な傾向の変化は認められない
②その他の監視項目	噴出場所及び噴出物		薩摩硫黄島の火山活動解説資料(令和3年3月) ・気象庁(2021h)			・既往の火口の拡大や消長、新たな火口や火道の形成は認められない ・マグマ成分の物理的・化学的性質に急激な変化があったとする科学的知見は認められない
	噴火様式		薩摩硫黄島の火山活動解説資料(令和3年3月) ・気象庁(2021h)			・噴煙柱高度が数十km 程度のプリニー式噴火を伴うような噴火は認められない
	地下構造		比抵抗	—		—
			地震波速度	—		
参考			岩石学	前野ほか(2001)		・カルデラ火山に有意な変化があるとする科学的知見は認められない
			地質学	小林(2017)		
			地球化学	篠原ほか(2008)		
				斎藤(2017)		
			測地学	井口ほか(2002)		
			キュリー点深度	大久保 (1984)	160	

（　参　考　文　献　）

（参考文献）モニタリング評価結果と中・長期的取組みの参考文献

(1) 国土地理院(2020, 2021)：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

(2) 気象庁(2020)：第147回火山噴火予知連絡会資料,
https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/CCPVE08.html

(3) 気象庁(2020, 2021)：火山活動解説資料(九州地方の火山),
http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/monthly_vact.php

(4) 国土地理院(2021)：電子基準点データ提供サービス, 更新:2021/4/19,
https://terras.gsi.go.jp/

(5) 防災科学技術研究所(2021)：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:2021/4/5,
https://hinetwww11.bosai.go.jp/auth/JMA/?LANG=ja

(6) 気象庁(2021)：地震月報(カタログ編), 更新:2021/4/5,
https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/index.html

(7) 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.

(8) 文部科学省研究開発局・国立大学法人九州大学(2019)：平成28年熊本地震を踏まえた総合的な活断層調査, 平成28～30年度成果報告書, 509pp.

(9) 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.

(10) 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)：姶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.

(11) 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.

(12) 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.

(13) Nishimura, T., Yokota, Y., Tadokoro, K. and Ochi, T. (2018): Strain partitioning and interplate coupling along the northern margin of the Philippine Sea plate, estimated from Global Navigation Satellite System and Global Positioning System-Acoustic data, Geosphere, vol. 14, pp.535-551, https://doi.org/10.1130/GES01529.1.

(14) Kobayashi, A. (2017)：Objective detection of long-term slow slip events along the Nankai Trough using GNSS data (1996-2016), Earth, Planets and Space, vol.69, 171, https://doi.org/10.1186/s40623-017-0755-7.

(15) 気象庁(2009)：平成 20 年(2008 年)の口永良部島の火山活動, 火山活動解説資料資料(年報).

(16) 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.

(17) 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., https://doi.org/10.1029/2018JB015951.

（参考文献）モニタリング評価結果と中・長期的取組みの参考文献

(18) Nakao, S., Morita, Y., Yakiwara, H., Oikawa, J., Ueda, H., Takahashi, H., Ohta, Y., Matsushima, T and Iguchi, M. (2013):Volume change of the magma reservoir relating to the 2011 Kirishima Shinmoe-dake eruption—Charging, discharging and recharging process inferred from GPS measurements. Earth, Planets and Space, vol.65, pp.505-515.

(19) 地震調査委員会(2013)：九州地方の活断層の長期評価(第1版)，平成25年2月1日，地震調査研究推進本部，81pp.

(20) Omori, F. (1916) :The Sakura-Jima eruption and earthquakes Ⅱ, Bulletin of The Imperial Earthquake Investigation Committee, vol.8, pp.35-179.

(21) 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.

(22) 篠原宏志・斎藤元治・松島喜雄・川辺禎久・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/satsumaioujima/vr/index.html

(23) Carn, S. A., Fioletov, V. E., McLinden, C. A., Li C. and Krotkov, N. A. (2017) :A decade of global volcanic SO_2 emissions measured from space, Sci. Rep., 7, https://doi.org/10.1038/srep44095.

(24) Mori, T., Shinohara, H., Kazahaya, K., Hirabayashi, J., Matsushima, T., Mori, T., Ohwada, M., Odai, M., Iino, H. and Miyashita, M. (2013): Time-averaged SO_2 fluxes of subduction-zone volcanoes: example of a 32-years exhaustive survey for Japanese volcanoes, J. Geophys. Res. vol.118, pp.8662-8674.

(25) Saito, G., Kazahaya, K., Shinohara, H., Stimac, J. and Kawanabe, Y. (2001) : Variation of volatile concentration in a magma system of Satsuma-Iwojima volcano deduced from melt inclusion analyses, J. Volcanol. Geotherm. Res., vol.108, pp.11-31.

(26) 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.

(27) 川口允孝・長谷中利昭・安田 敦・外西奈津美・森康(2017)：メルト包有物からみた阿蘇火山における玄武岩質マグマの揮発性成分含有量，月刊地球，号外，No.68, pp.86-91.

(28) 風早康平・篠原宏志(1996)活火山からの過剰な脱ガスについて－そのマグマ過程と機構－．地質学論集，vol.46, pp.91-104.

(29) Yamasaki, T., Sigmundsson, F. and Iguchi, M. (2020): Viscoelastic crustal response to magma supply and discharge in the upper crust: Implications for the uplift of the Aira caldera before and after the 1914 eruption of the Sakurajima volcano, Earth and Planetary Science Letters, vol.531, 1,115981, https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.115981

(30) Wang, R., F. Lorenzo-Martín and F. Roth (2006): PSGRN/PSCMP - a new code for calculating co- and post-seismic deformation, geoid and gravity changes based on the viscoelastic-gravitational dislocation theory, Computers and Geosciences, vol.32, 4, pp. 527-541. DOI:10.1016/j.cageo.2005.08.006.

(31) 田中明子・山野 誠・矢野雄策・笹田政克(2004)：日本列島及びその周辺域の地温勾配及び地殻熱流量データベース，数値地質図DGM P－5，産業技術総合研究所 地質調査総合センター．

(32) 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.

(33) 風間卓仁・吉川慎・長縄和洋・宮内佑典・大倉敬宏・福田洋一(2019)：熊本県北部における絶対重力測定および相対重力計のスケールファクター検定(2018年8月)，東京大學地震研究所彙報，94巻，1-4号，pp.13-28.

（参考文献）モニタリング評価結果と中・長期的取組みの参考文献

(34) 吉川慎・大倉敬宏・大島弘光・前川徳光・植木貞人・菅野貴之・松本滋夫・内田和也(2009)：阿蘇火山周辺における精密重力測定(2008 年11月)，第4回阿蘇火山の集中総合観測報告書, pp.18-22.

(35) 風間卓仁・山本圭吾・大柳諒・岡田和見・大島弘光・井口正人(2020)：桜島火山における繰り返し相対重力測定(2019年5月～2020年3月)，京都大学防災研究所年報, 第63号B, pp.108-117.

(36) Shinohara, H. (2008) : Excess degassing from volcanoes and its role on eruptive and intrusive activity, Reviews of Geophysics, 46, RG4005.

(37) 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・渡邉篤志・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(課題番号1809)」平成25年度分報告書.

(38) Ito, K.(1999): Seismogenic layer, reflective lower crust, surface heat flow and large inland-earthquakes, Tectonophysics, 306, pp.423-433.

(39) Omuralieva, A. M., Hasegawa, A., Matsuzawa, T., Nakajima, J. and Okada, T.(2012):Lateral variation of the cutoff depth of shallow earthquakes beneath the Japan Islands and its implications for seismogenesis. Tectonophysics, vol. 518-521, pp.93-105.

(40) 伊藤　潔(2006)：地震発生層の深さ分布と活断層のセグメンテーションとの関係，京都大学防災研究所年報，第49号B, pp.227-238.

（参考文献）目安を踏まえた整理の参考文献

(1) 国土地理院(2020a)：阿蘇山のSAR干渉解析結果について，第147回火山噴火予知連絡会資料(その3の5)九州地方及び南西諸島，p.69.

(2) 気象庁(2020a)：阿蘇山，第147回火山噴火予知連絡会資料(その3の5)九州地方及び南西諸島，pp.32-51.

(3) 気象庁(2021a)：令和2年(2020 年)の阿蘇山の火山活動，火山活動解説資料資料(年報).

(4) 気象庁(2021b)：阿蘇山の火山活動解説資料(令和3年3月)，火山活動解説資料資料.

(5) 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.

(6) 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

(7) 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

(8) 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

(9) 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

(10) 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

(11) Huang, Y., Ohkura, T., Kagiyama, 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

(12) 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.

(13) 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

(14) 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.

(15) 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.

(16) 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.

(17) 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}Cl/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.

(18) 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.

(19) 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.

（参考文献）目安を踏まえた整理の参考文献

(20) 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.

(21) 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

(22) 田中明子・山野　誠・矢野雄策・笹田政克（2004）：日本列島及びその周辺域の地温勾配及び地殻熱流量データベース，数値地質図DGM P－5，産業技術総合研究所 地質調査総合センター.

(23) 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.

(24) 気象庁・気象研究所（2020）：ALOS-2/PALSAR-2 データを用いた霧島山におけるSAR 干渉解析結果，第147回火山噴火予知連絡会資料（その1の2）霧島山，pp.68-70.

(25) 国土地理院（2020b）：霧島山のSAR干渉解析結果について，第147回火山噴火予知連絡会資料（その1の2）霧島山，pp.108-109.

(26) 気象庁(2021c)：令和2年（2020 年）の霧島山の火山活動，火山活動解説資料資料(年報).

(27) 気象庁(2021d)：霧島山の火山活動解説資料（令和3年3月），火山活動解説資料資料.

(28) 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.

(29) 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.

(30) Aizawa, K., Koyama, T., Hase, H., Uyeshima, M., Kanda, W., Utsugi, M., Yoshimura, R., Yamaya, Y., Hashimoto, T., Yamazaki, K., 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

(31) 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.

(32) 澁谷拓郎・寺石眞弘・小松信太郎・山﨑健一・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.

(33) 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

(34) 気象庁（2020b）：ALOS-2/PALSAR-2 データを用いた桜島におけるSAR 干渉解析結果，第147回火山噴火予知連絡会資料（その2の1）桜島，pp.32-33.

(35) 国土地理院（2020c）：桜島のSAR干渉解析結果について，第147回火山噴火予知連絡会資料（その2の1）桜島，p.54.

(36) 気象庁(2021e)：令和2年（2020 年）の桜島の火山活動，火山活動解説資料資料(年報).

(37) 気象庁(2021f)：桜島の火山活動解説資料（令和3年3月），火山活動解説資料資料.

(38) 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.

(39) 井口正人（2017）：地震波トモグラフィーによる姶良カルデラ周辺の地震波速度構造調査結果及び姶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.

（参考文献）目安を踏まえた整理の参考文献

(40) 宮町宏樹・高橋浩晃・青山　裕・椎名高裕・髙田真秀・一柳昌義・山口照寛・小野夏生・齊藤一真・伊藤ちひろ・村井芳夫・筒井智樹・井上雄介・竹井瑠一・山本希・平原　聡・中山貴史・東　龍介・大友周平・日野亮太・阿部英二・蔵下英司・岩崎貴哉・篠原雅尚・山田知朗・中東和夫・渡辺俊樹・前田裕太・堀川信一郎・奥田隆・辻　修平・長谷川大真・片尾　浩・澁谷拓郎・三浦　勉・中川　潤・加藤慎也・山下裕亮・松島　健・手操佳子・宮町凛太郎・Triahadini, A.・磯田謙心・清水　洋・小林励司・早田正和・仲井一穂・八木原　寛・平野舟一郎・田中康久・川崎慎治・佐藤紀男(2018)：大規模人工地震探査による姶良カルデラ及び周辺域の地殻構造の解明(2)予備的成果と2018年観測計画，日本火山学会講演予稿集，2018 年度秋季大会，p.105.

(41) 筒井智樹・為栗　健・井口正人(2020)：姶良カルデラにおける地震波反射面の検出，京都大学防災研究所年報，第63号B, pp.118-135.

(42) 関口悠子・長谷中利昭・森 康(2014)：姶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, pp.303-309.

(43) 小林哲夫(2019)：1. 地質学視点でみた桜島火山の大規模噴火，桜島の大規模噴火を考える，自然災害科学，vol.38, no.3, pp.280-289.

(44) 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.

(45) 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・神薗めぐみ(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―，「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25年度分報告書.

(46) 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

(47) 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・渡邉篤志・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.

(48) 国土地理院(2020d)：池田・山川・開聞岳のSAR干渉解析結果について，第147回火山噴火予知連絡会資料(その4の2)その他の火山(地理院)，p.57.

(49) 気象庁(2020c)：池田・山川，第147回火山噴火予知連絡会資料(その4の1)その他の火山(気象庁)，pp.105-109.

(50) 気象庁(2020d)：開聞岳，第147回火山噴火予知連絡会資料(その4の1)その他の火山(気象庁)，pp.110-112.

(51) 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, pp.573-577.

(52) 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，p.43.

(53) 気象庁(2020e)：ALOS-2/PALSAR-2 データを用いた薩摩硫黄島におけるSAR 干渉解析結果，第147回火山噴火予知連絡会資料(その2の4)薩摩硫黄島，pp.15-16.

(54) 国土地理院(2020e)：薩摩硫黄島のSAR干渉解析結果について，第147回火山噴火予知連絡会資料(その2の4)薩摩硫黄島，pp.20-21.

(55) 気象庁(2020f)：薩摩硫黄島，第146回火山噴火予知連絡会資料(その2の4)薩摩硫黄島，pp.3-11.

(56) 気象庁(2021g)：令和2年(2020 年)の薩摩硫黄島の火山活動，火山活動解説資料資料(年報).

(57) 気象庁(2021h)：薩摩硫黄島の火山活動解説資料(令和3年3月)，火山活動解説資料資料.

(58) 前野　深・宮本　毅・谷口宏充(2001)：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.

(59) 篠原宏志・斎藤元治・松島喜雄・川辺禎久・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/satsumaioujima/vr/index.html

(60) 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.

(61) 井口正人・高山鉄朗・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.