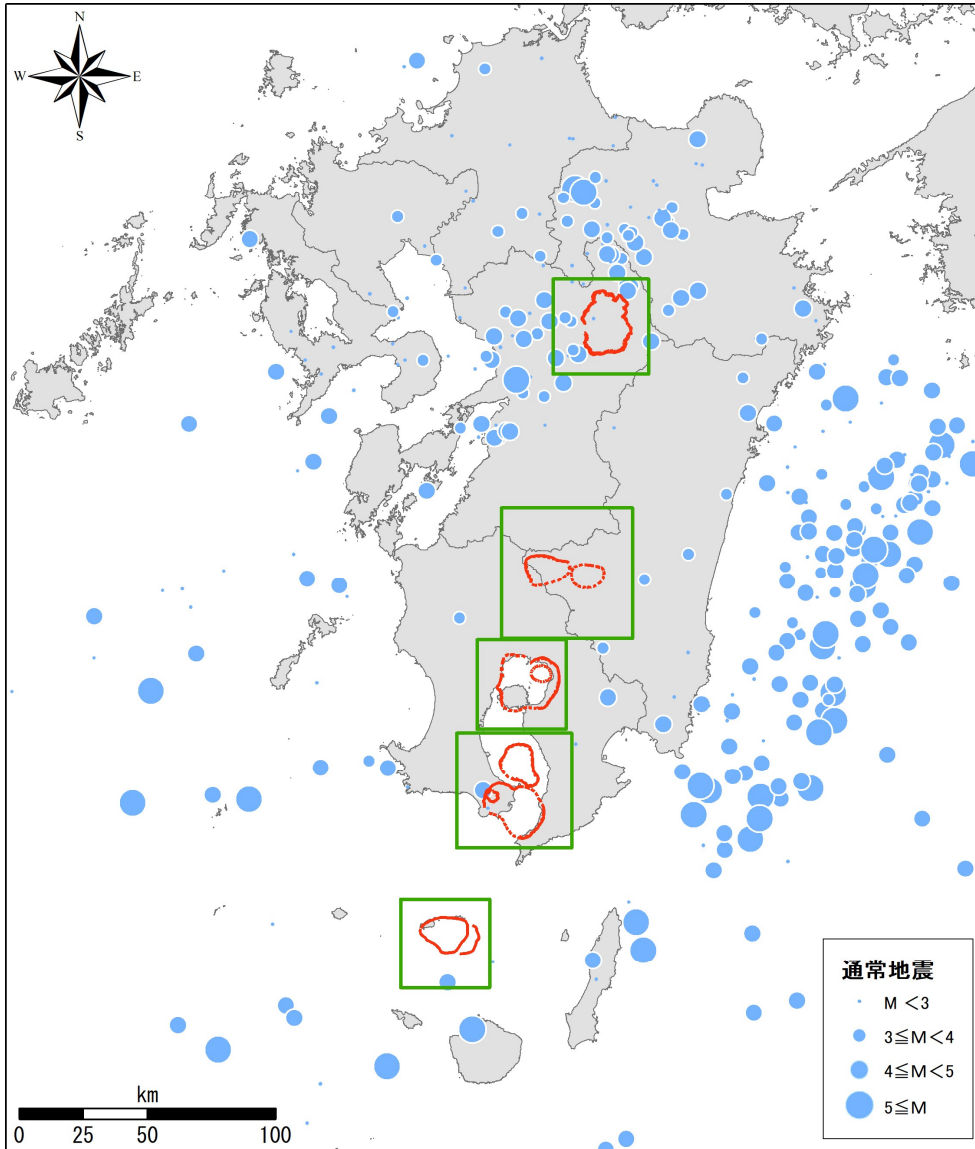
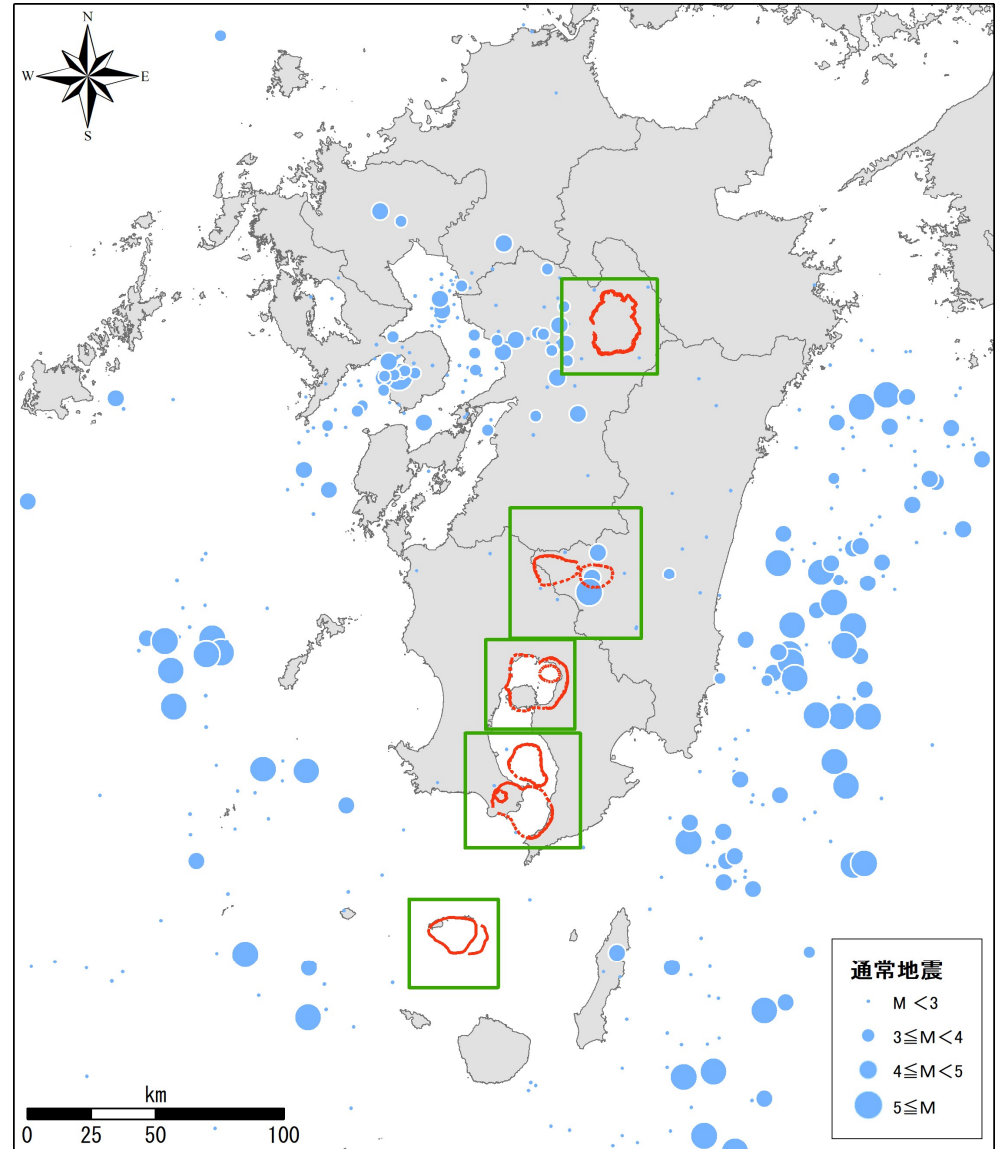


# 【参考1】九州全域の地震活動

1940年～1949年



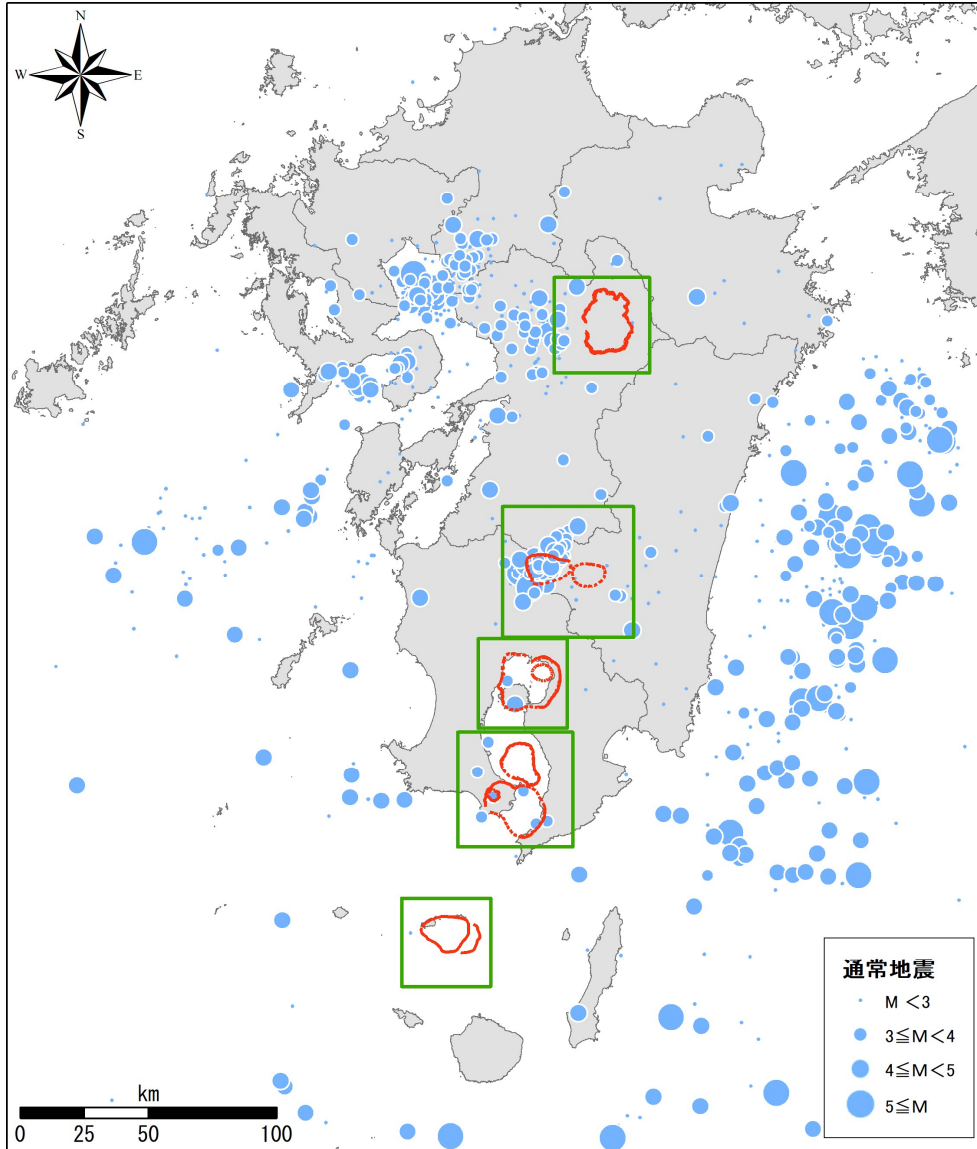
1950年～1959年



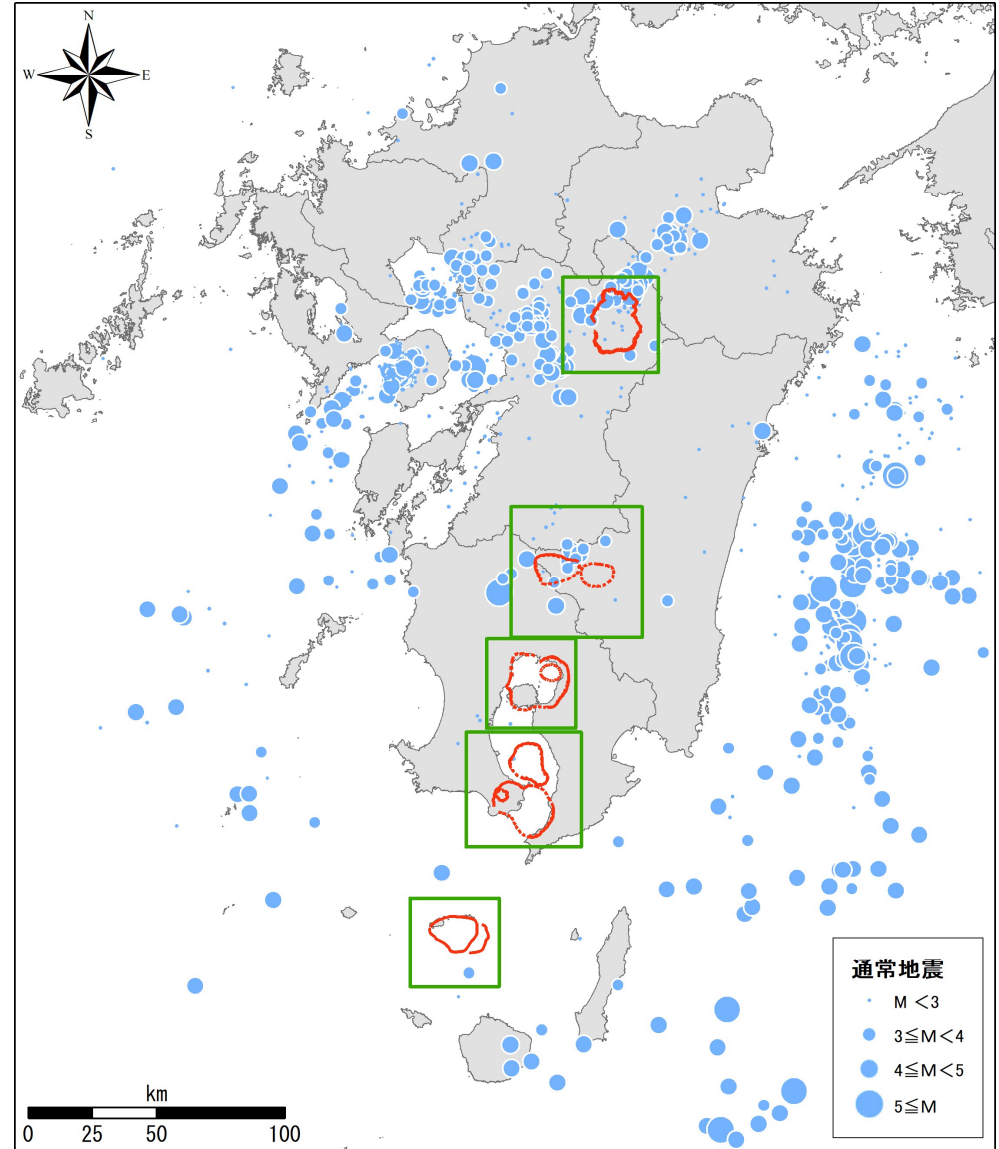
※震源は、気象庁、地震月報(カタログ編)の震源データのうち、九州地方の深さ30km以浅のもの

# 【参考1】九州全域の地震活動

1960年～1969年



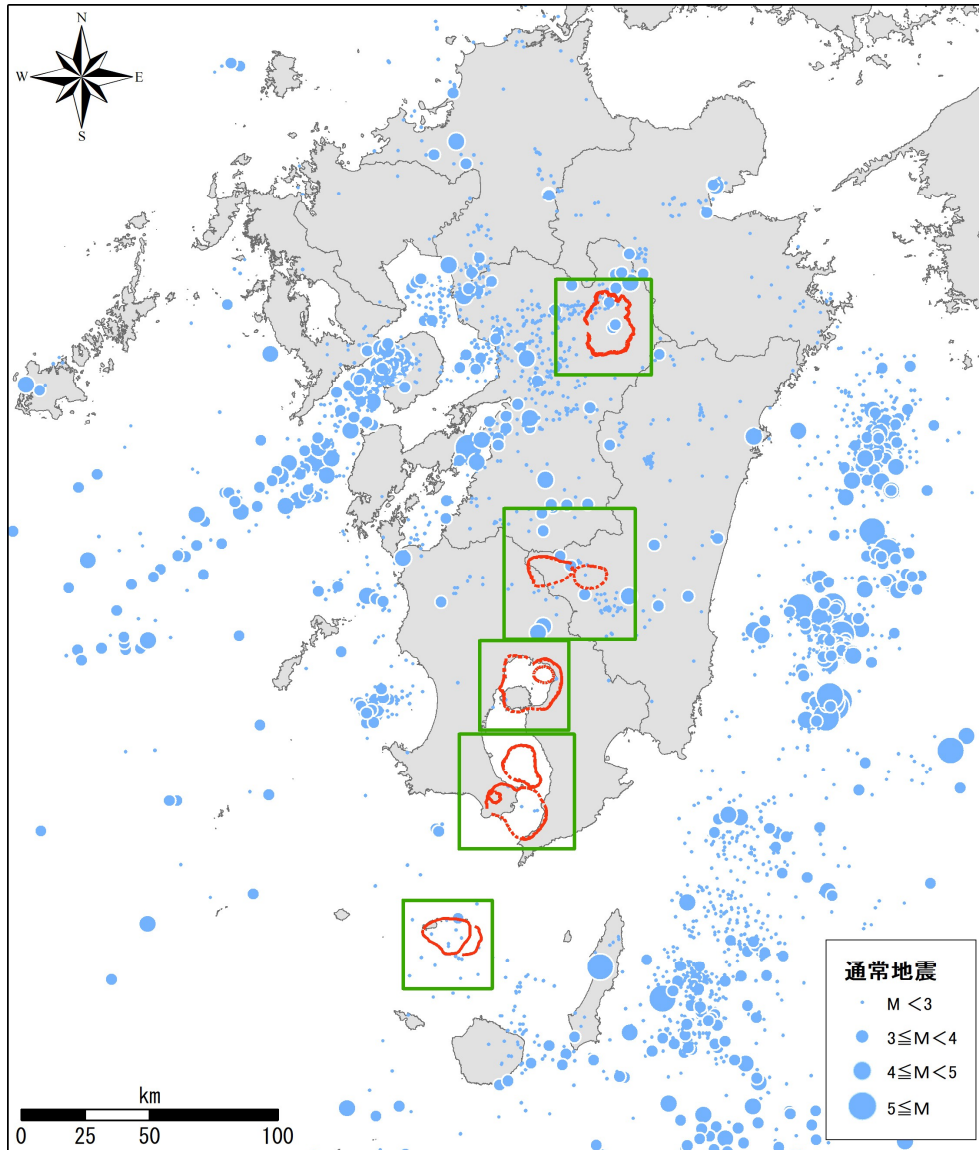
1970年～1979年



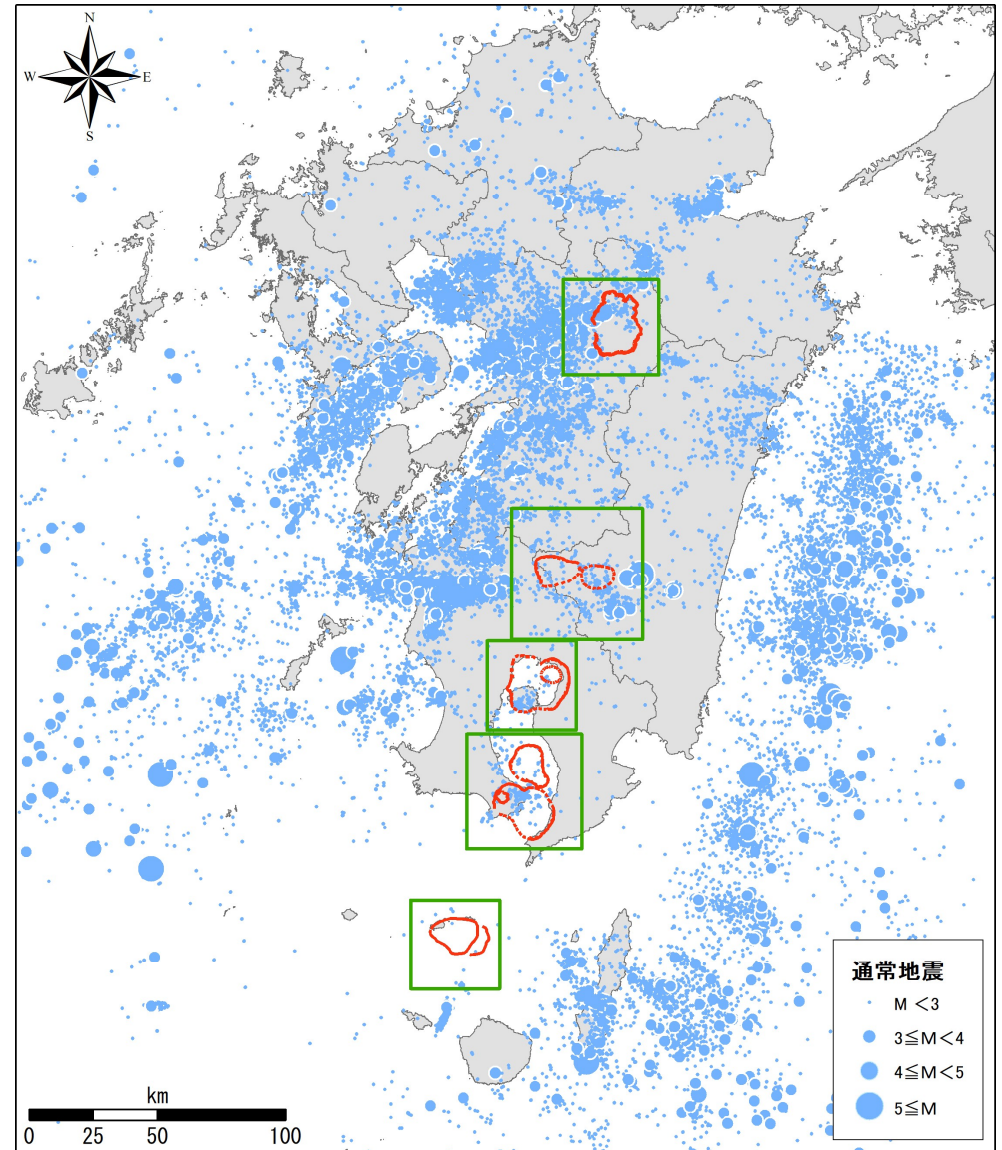
※震源は、気象庁、地震月報(カタログ編)の震源データのうち、九州地方の深さ30km以浅のもの

# 【参考1】九州全域の地震活動

1980年～1989年



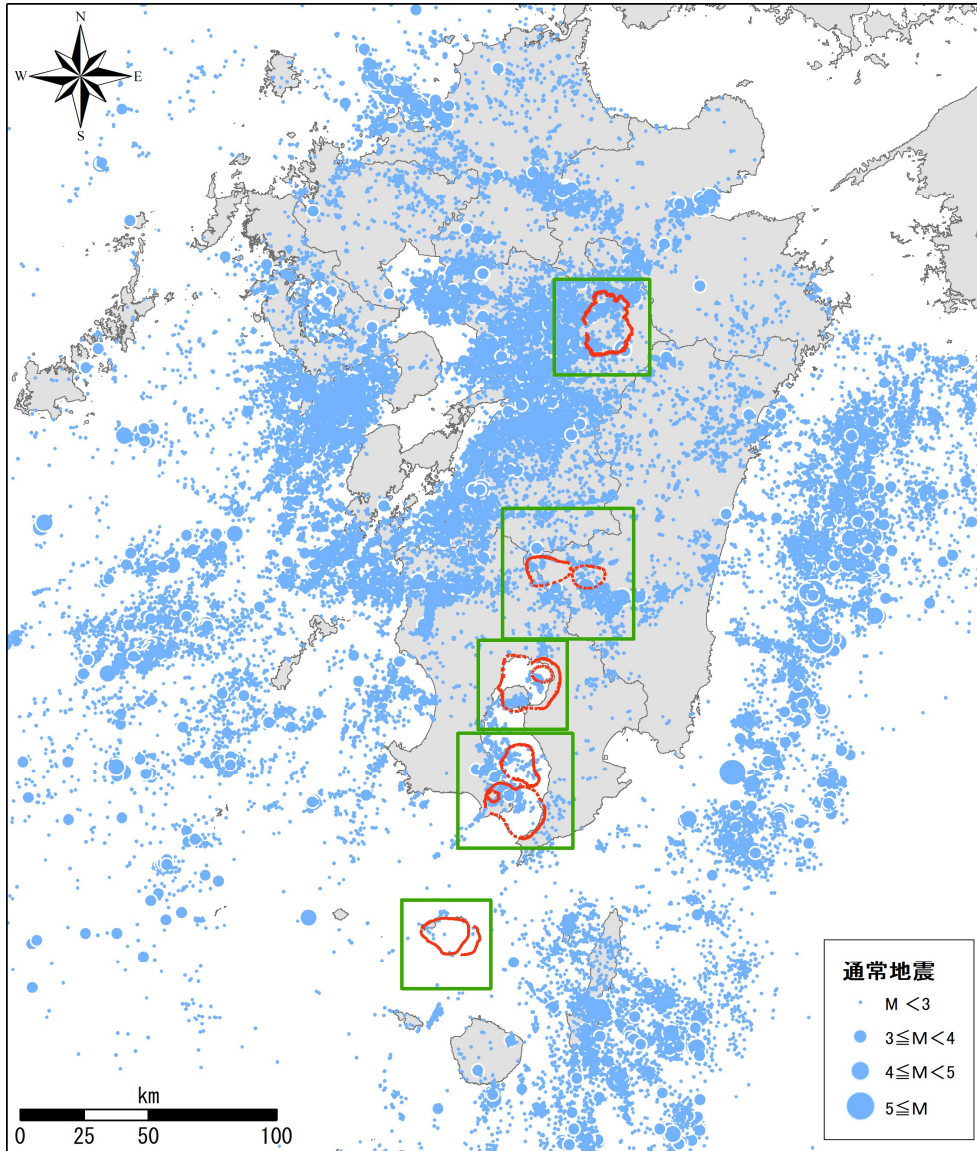
1990年～1999年



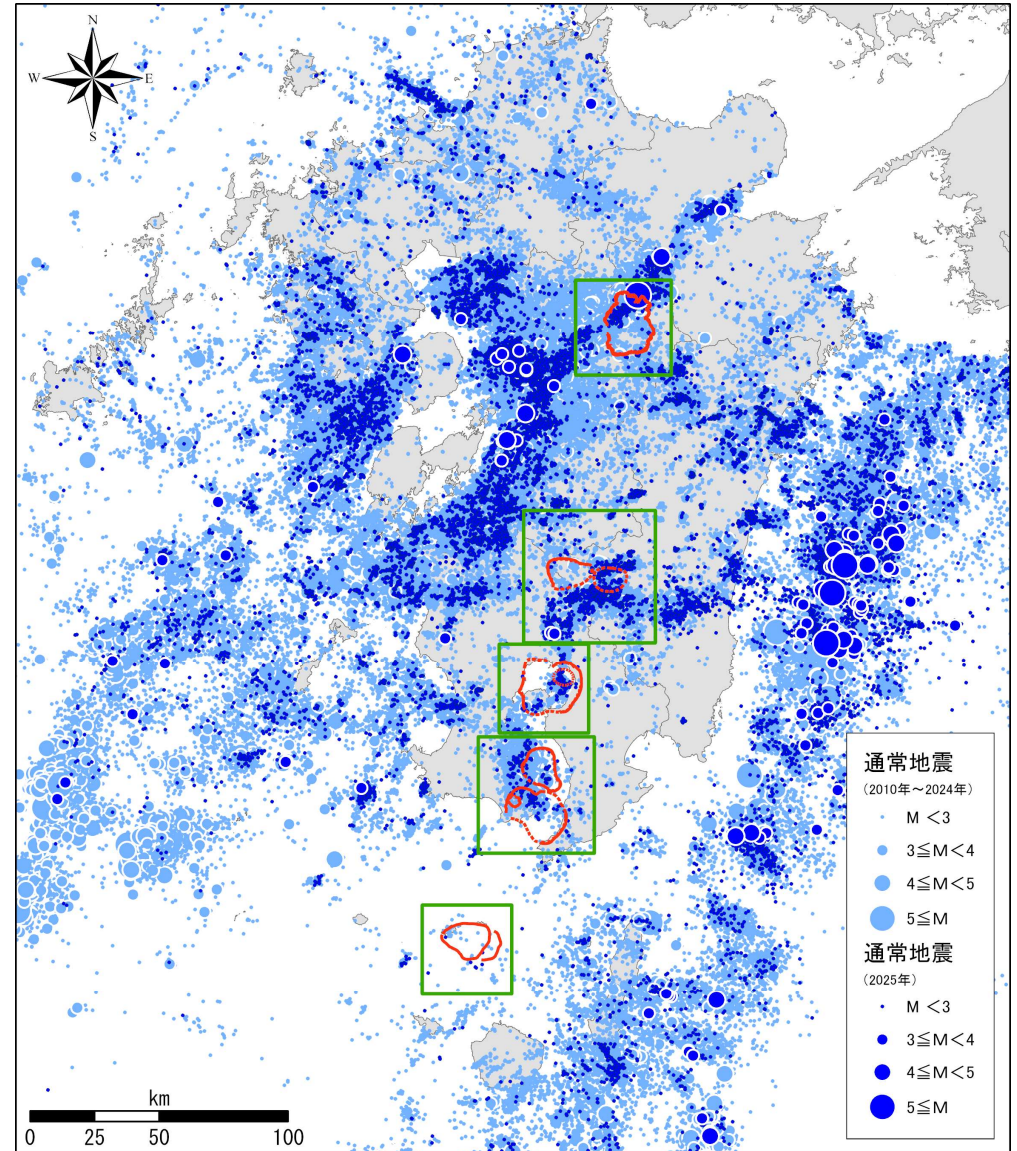
※震源は、気象庁、地震月報(カタログ編)の震源データのうち、九州地方の深さ30km以浅のもの

# 【参考1】九州全域の地震活動

2000年～2009年



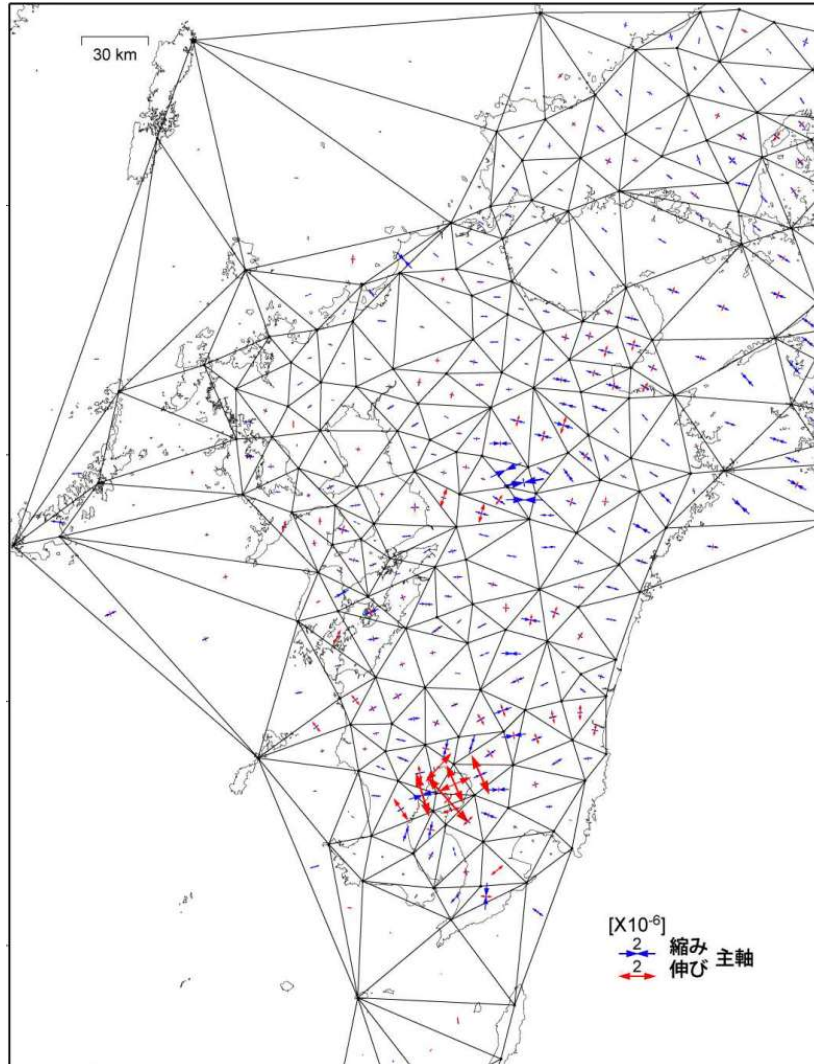
2010年～2025年



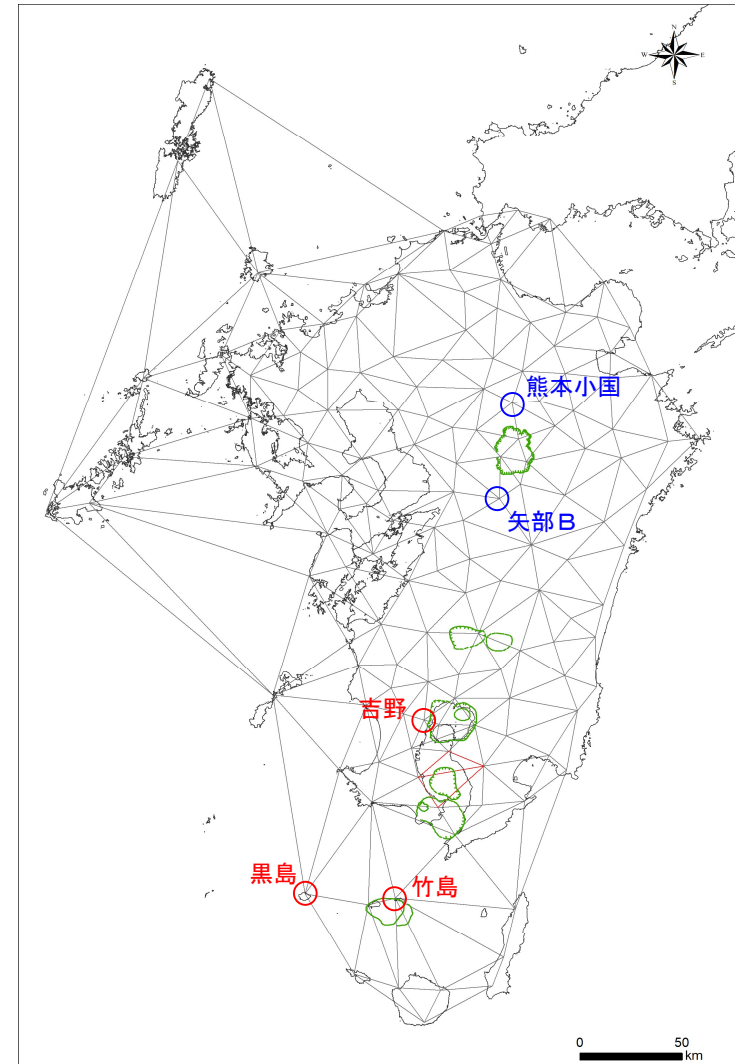
※震源は、気象庁、地震月報(カタログ編)の震源データ及び一元化処理震源データ(2024年～2025年)のうち、九州地方の深さ30km以浅のもの

## 【参考2】カルデラ火山周辺のひずみ場[概要]

- 九州全体の大局的な変動について確認するため、九州のひずみ分布を確認した。
- 解析メッシュは、地震調査委員会(2013)を基に、GNSS局「熊本小国」「矢部B」や当社GNSS局「竹島」「黒島」「吉野」の追加、阿多カルデラに係るメッシュでの桜島の影響を少なくする等の変更を行った下記の解析メッシュを用いる。



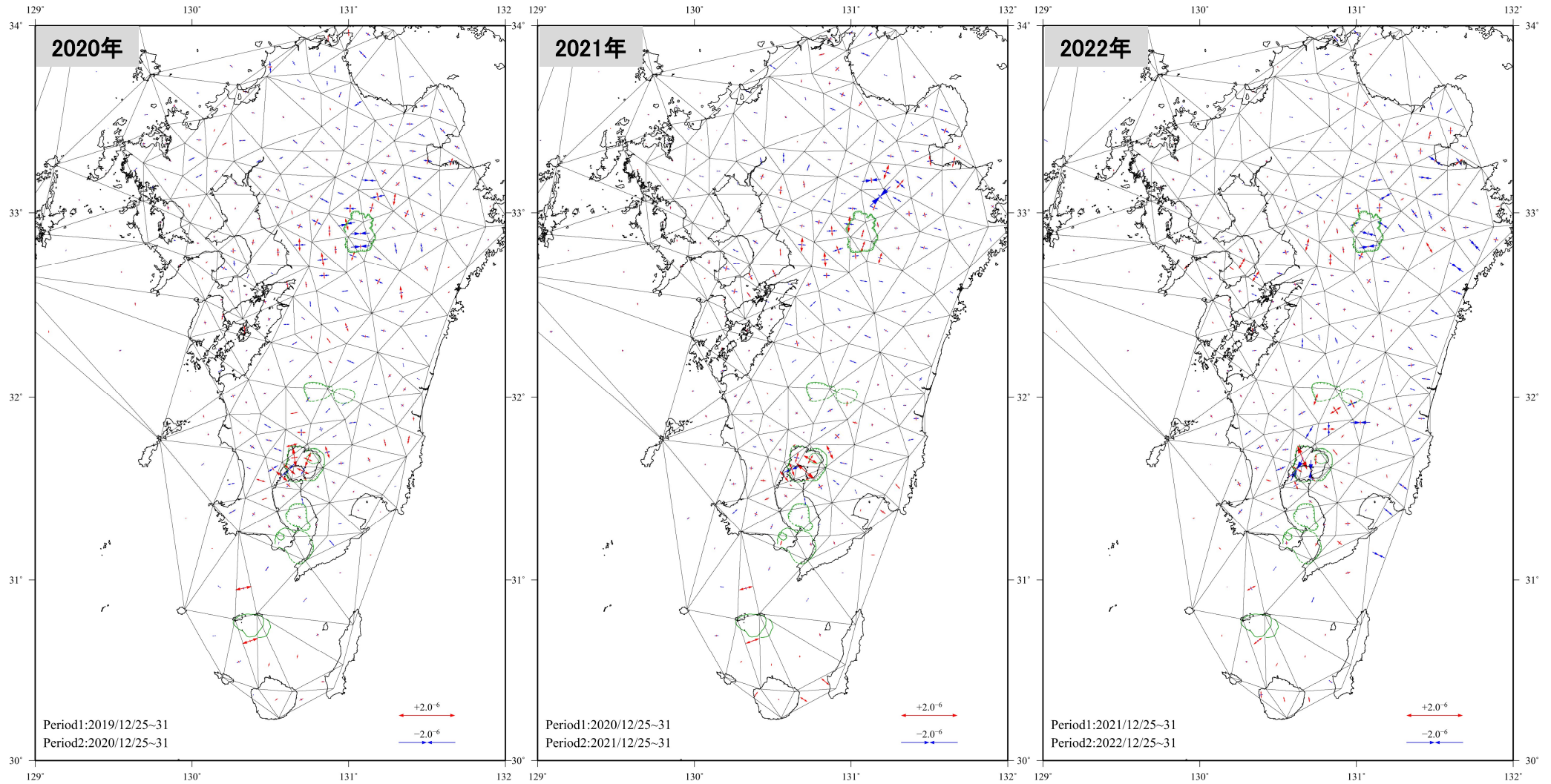
地震調査委員会(2013)の解析メッシュ【九州地域の活断層の長期評価(第一版)】



当社の解析メッシュ

## 【参考2】カルデラ火山周辺のひずみ場[水平ひずみ速度分布]

- 2025年度は、2024/8/8、2025/1/13の日向灘地震の震源方向への伸張する水平ひずみが顕著に認められ、九重付近での大きな水平ひずみは8/7に発生した大分県西部の地震に伴う局所的な変動による。
- 阿蘇カルデラで収縮傾向の水平ひずみが、霧島山では新燃岳の火山活動による膨張する水平ひずみが、始良カルデラでも膨張する水平ひずみが認められる。

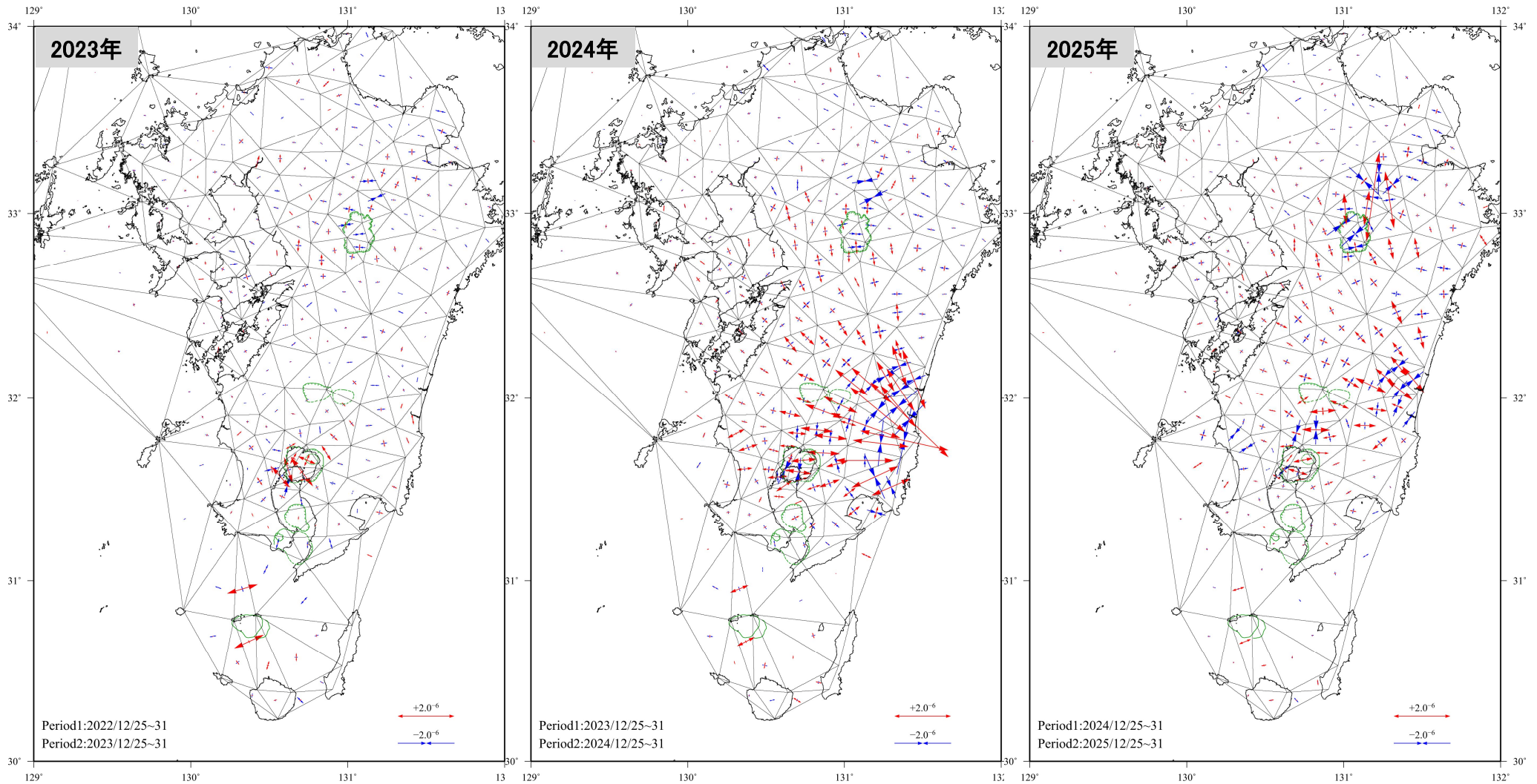


※1 2020年: 多々の代わりに新設された多々A(2020/9/3運用開始)を用いて三角形を作成、北九州2を含む三角形のひずみは2020/1/8~14 から2020/12/27~ 2021/1/2のデータで作成(北九州2は2021/1/3~2021/4/17で断続的にデータが欠如)、始良を含む三角形のひずみは2020/9/24~30 までのデータで作成(始良は2020/2/14~9/12、2020/10/1~2021/3/24でデータ欠如)

※2 2021年: 北九州2を含む三角形のひずみは2021/4/18~24 からのデータで作成(2021/1/3~2021/4/17で断続的にデータが欠如)、始良を含む三角形のひずみは2021/3/25~31 からのデータで作成(2020/10/1~2021/3/24でデータ欠如)

※3 ひずみ分布においては、P10に示した地震時の地殻変動の補正は行っていない

# 【参考2】カルデラ火山周辺のひずみ場[水平ひずみ速度分布]



※1 2023年：日向を含む三角形のひずみは2023/9/1～7 までのデータで作成（日向は2023/9/8運用停止）

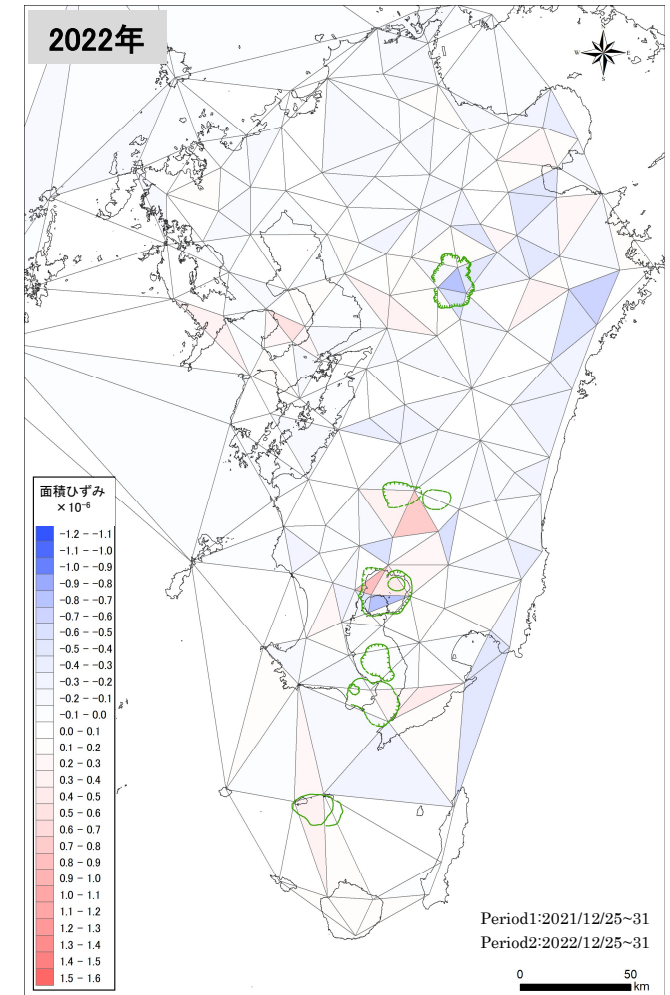
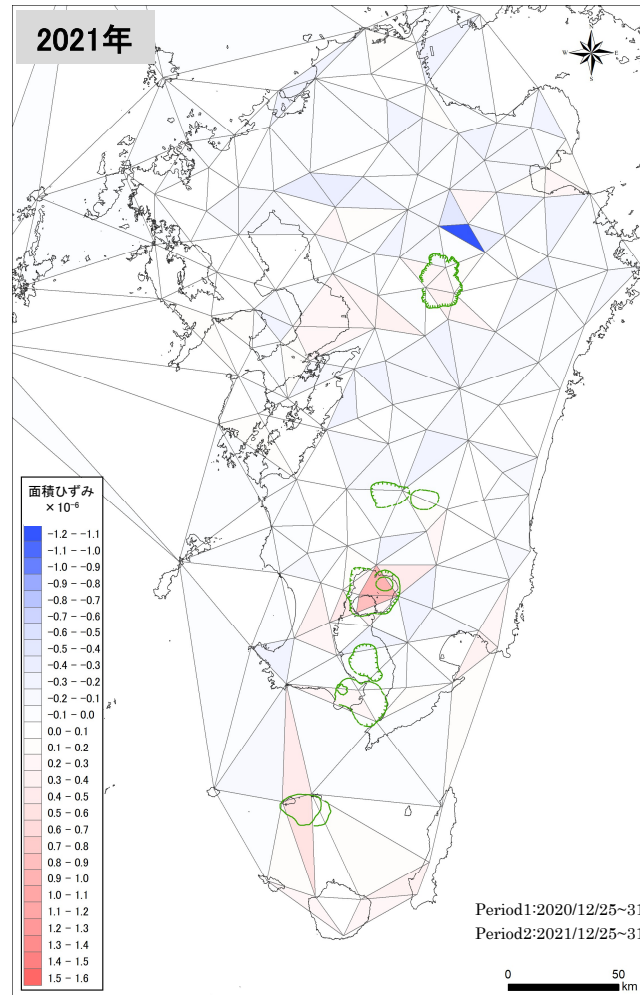
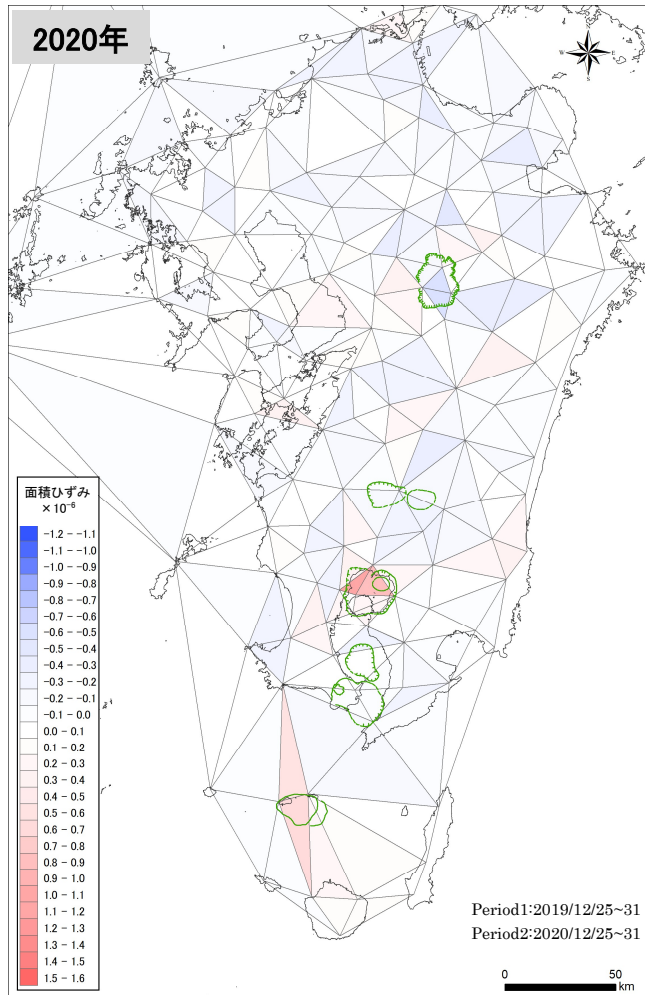
※2 2024年：日向の代わりに新設された日向A（2024/8/20運用開始）を用いて三角形を作成し、2024/8/20～26 からのデータで作成

※3 2025年：北九州2を含む三角形のひずみは2025/8/24～30までデータで作成（北九州2は2025/8/31以降で断続的にデータが欠如）、五木を含む三角形のひずみは2025/12/14～20 までのデータで作成（五木は2025/12/21以降でデータ欠如）

※4 ひずみ分布においては、P10に示した地震時の地殻変動の補正は行っていない

## 【参考2】カルデラ火山周辺のひずみ場[面積ひずみ分布]

- 2025年度は、2024/8/8、2025/1/13の日向灘地震影響による面積ひずみは2024年度と比較して小さくなってきている。九重付近では8/7に発生した大分県西部の地震に伴う局所的な変動による大きな膨張と収縮の面積ひずみが認められる。
- 阿蘇カルデラで収縮傾向の面積ひずみが、霧島山では新燃岳の火山活動による膨張する面積ひずみが、始良カルデラでは膨張面積ひずみが認められる。

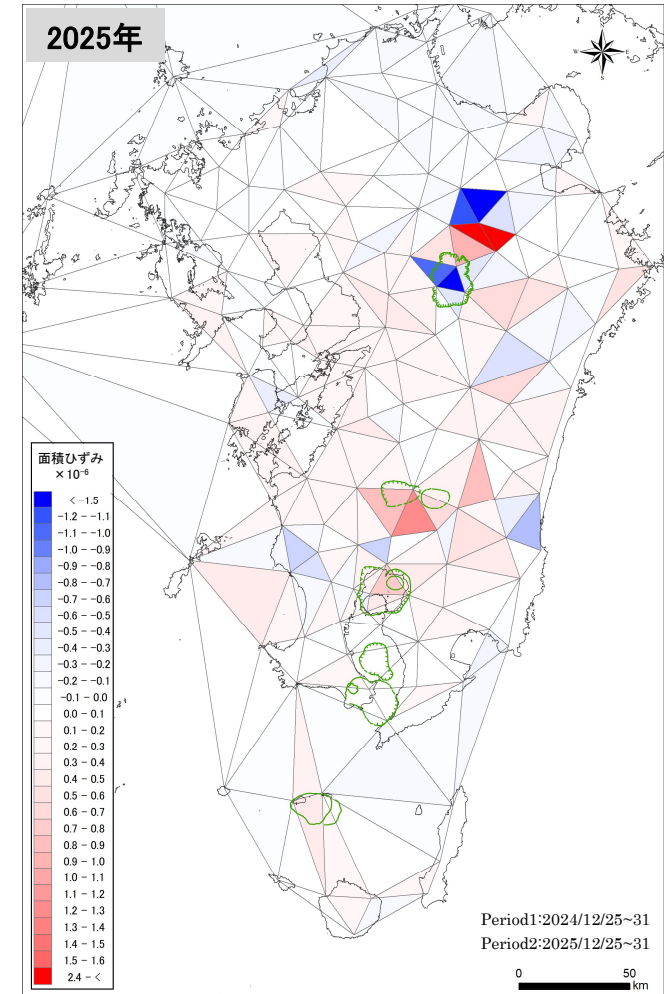
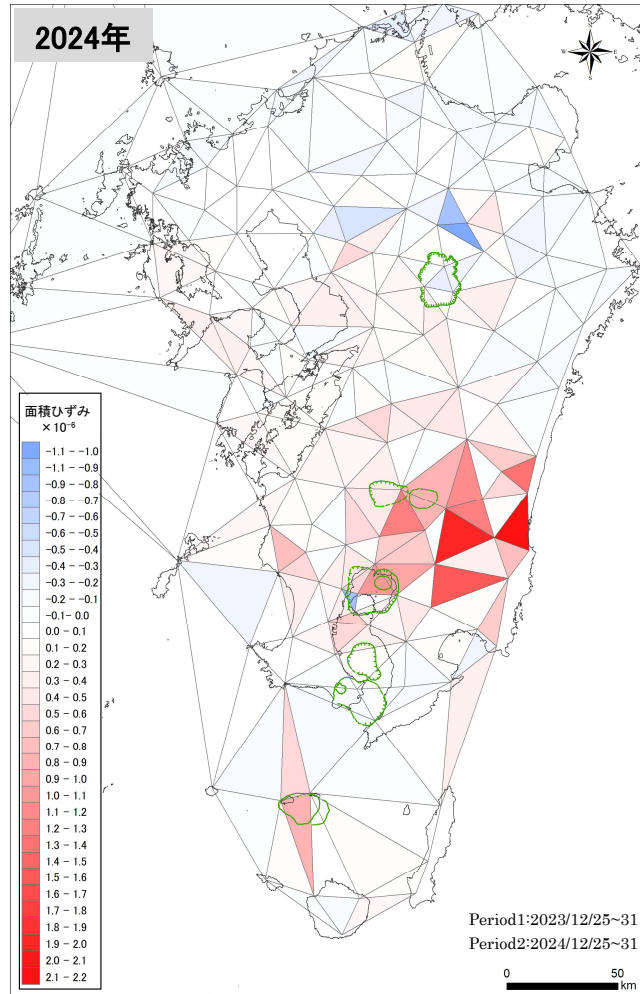
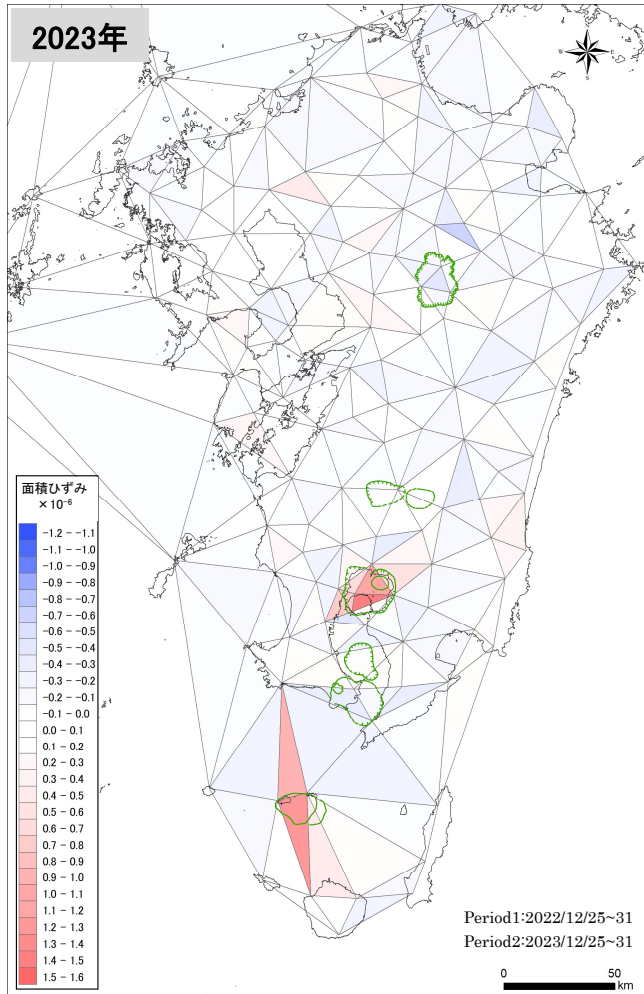


※1 2020年: 多久の代わりに新設された多久A (2020/9/3運用開始) を用いて三角形を作成、北九州2を含む三角形のひずみは2020/1/8~14 から2020/12/27~ 2021/1/2のデータで作成(北九州2は2021/1/3~2021/4/17で断続的にデータが欠如)、始良を含む三角形のひずみは2020/9/24~30 までのデータで作成(始良は2020/2/14~9/12、2020/10/1~2021/3/24でデータ欠如)

※2 2021年: 北九州2を含む三角形のひずみは2021/4/18~24 からのデータで作成(2021/1/3~2021/4/17で断続的にデータが欠如)、始良を含む三角形のひずみは2021/3/25~31 からのデータで作成(2020/10/1~2021/3/24でデータ欠如)

※3 ひずみ分布においては、P10に示した地震時の地殻変動の補正は行っていない

# 【参考2】カルデラ火山周辺のひずみ場[面積ひずみ分布]



※1 2023年: 日向を含む三角形のひずみは2023/9/1~7 までのデータで作成(日向は2023/9/8運用停止)

※2 2024年: 日向の代わりに新設された日向A(2024/8/20運用開始)を用いて三角形を作成し、2024/8/20~26 からのデータで作成

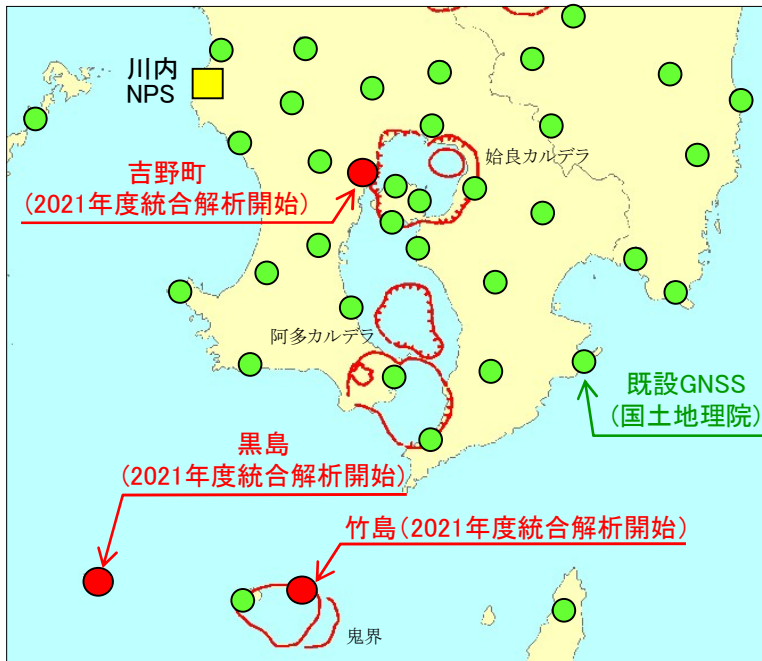
※3 2025年: 北九州2を含む三角形のひずみは2025/8/24~30までデータで作成(北九州2は2025/8/31以降で断続的にデータが欠如)、五木を含む三角形のひずみは2025/12/14~20 までのデータで作成(五木は2025/12/21以降でデータ欠如)

※4 ひずみ分布においては、P10に示した地震時の地殻変動の補正は行っていない

## 【参考3】当社GNSS機器による観測

- 地殻変動データに係る精度の向上を図ることを目的に、鹿児島県内3箇所(2014年度:竹島、2015年度:黒島、2016年度:吉野町)にGNSS機器を設置し、観測データを蓄積してモニタリング評価の補完を行っている。
- 当該観測点は既に民間等電子基準点(A級)として登録されており、2021年10月1日より全国の電子基準点との統合解析結果が 国土地理院のホームページにて公開されている。

※解析結果は、「3. モニタリング評価結果」に国土地理院GNSS機器による観測結果とともに記載。



設置地点の位置図



竹島の機器設置状況



黒島の機器設置状況



吉野町の機器設置状況

## 【参考4】知見の収集結果

・これまでに収集した知見を以下に整理した。(下線が今回追加した知見)

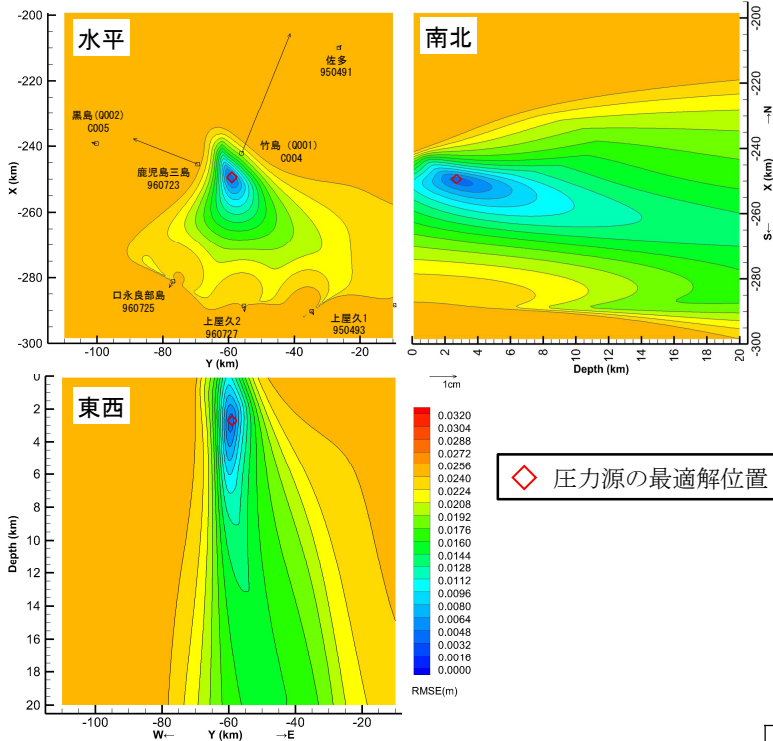
<p><b>阿蘇 カルデラ</b></p>	<p>[地下構造/比抵抗] 高倉ほか(2000), Hata et al. (2018), Matsushima et al. (2020), Aizawa et al. (2021) [地下構造/地震波速度] Sudo and Kong (2001), Abe et al. (2017), Huang et al. (2018), 木村ほか(2019), Shito et al. (2020)</p>	<p>[岩石学] 三好ほか(2005), 三好(2013), Miyagi et al. (2023) [地質学] 小林(2017) [地球化学] 森川ほか(2019), 安池ほか(2019), Kawaguchi et al. (2021) [測地学] 大倉(2017), Hashimoto (2020), Niu and Song (2021) [地温勾配][地殻熱流量] 産総研(2019) [キュリー一点深度] 大久保(1984)</p>
<p><b>加久藤・ 小林 カルデラ</b></p>	<p>[地下構造/比抵抗] 鍵山ほか(1997), Goto et al. (1997), Aizawa et al.(2014), <u>Aizawa et al.(2026)</u> [地下構造/地震波速度]長岡ほか(2019), 澁谷ほか(2019), Shito et al. (2020), Nishida et al. (2020)</p>	<p>[地質学] 小林(2017) [測地学] 大倉(2017) [地温勾配][地殻熱流量] 産総研(2019) [キュリー一点深度] 大久保(1984)</p>
<p><b>始良 カルデラ</b></p>	<p>[地下構造/比抵抗] ー [地下構造/地震波速度] Alanis et al. (2012), 井口(2017), 安池ほか(2019), 澁谷ほか(2019), 筒井ほか(2021), 為栗ほか(2022), Miyamachi et al.(2023)</p>	<p>[岩石学] 関口ほか(2014) [地質学] 小林(2017), 小林(2019) [測地学]井口ほか(2008), 井口ほか(2011), 井口ほか(2013), 山本ほか(2013), Hickey et al. (2016), 味喜ほか(2021), 筒井ほか(2024), 味喜ほか(2024) [地温勾配][地殻熱流量] 産総研(2019) [キュリー一点深度] 大久保(1984) [重力] 山本ほか(2014)</p>
<p><b>阿多 カルデラ</b></p>	<p>[地下構造/比抵抗] ー [地下構造/地震波速度] 西ほか(2001), 澁谷ほか(2019), 海野ほか(2019)</p>	<p>[地質学] 小林(2017) [測地学] 大倉(2017) [地温勾配][地殻熱流量] 産総研(2019) [キュリー一点深度] 大久保(1984)</p>
<p><b>鬼界</b></p>	<p>[地下構造/比抵抗] ー [地下構造/地震波速度] Yamamoto et al. (2025), <u>Nagaya et al. (2026)</u></p>	<p>[岩石学] 前野ほか(2002), Hamada et al. (2023) [地質学] 小林(2017), Shimizu et al. (2024) [地球化学] 篠原ほか(2008), 斎藤(2017) [測地学] 井口ほか(2002) [キュリー一点深度] 大久保(1984)</p>

余 白

( 中 ・ 長 期 的 取 組 み )

# 1. 鬼界における2018年～2025年累積変動を用いた圧力源位置の推定[茂木モデル:全ての基線]

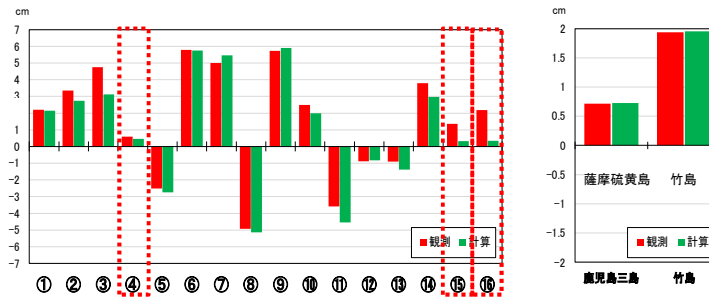
- 2024年度報告では、2018年～2024年の累積変動に茂木モデルを仮定し、基線長変化と鉛直変動のRMSE(観測値と計算値の二乗平均平方根誤差)を指標として圧力源位置を推定し、体積変化量の算定を行った。また、RMSE算出時の基線長変化:鉛直変動の重みは、1:1としている。2025年度は、2018年～2025年を対象として、8年間の累積変動に対する検討を実施する。
- 検討は全ての基線①～⑯を用い、鉛直変動は、「黒島」を固定点として「薩摩硫黄島」と「竹島」の2地点のみを用いた。RMSEは基線長変化と鉛直変動のそれぞれで求め、その平均が最小となるような圧力源位置と体積変化量をグリッドサーチを用いて推定する。
- その結果、圧力源位置の深さは2.7km、体積変化量は0.00213km<sup>3</sup>/年に推定された。



最適解位置における水平断面及び南北、東西断面のRMSEの分布

○圧力源位置の変動範囲

方向	範囲	間隔
東西方向	鬼界カルデラ中心から±20km	500m
南北方向	鬼界カルデラ中心から±20km	500m
深さ方向	中心を地表面下0.1～20km	100m

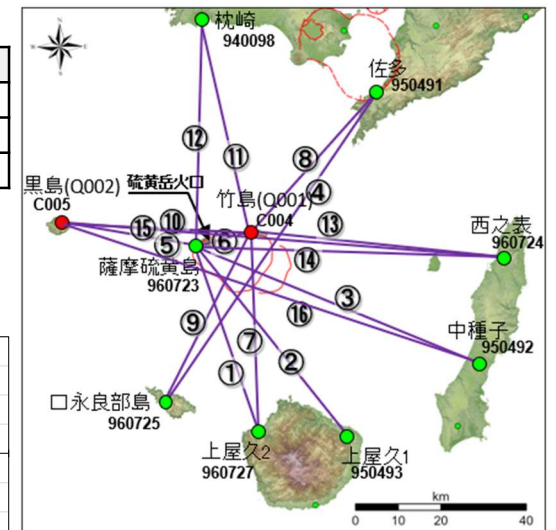


重み 基線長変化:鉛直変動=1:1

観測値と計算結果の比較(8年間累積)  
(左:基線長変化、右:鉛直変動)

推定された圧力源

圧力源平面位置*		圧力源深さ (km)	体積 変化量 (km <sup>3</sup> /年)	RMSE (m)		
X(NS,m)	Y(EW,m)			基線長変化	鉛直変動	平均
-249411	-58995	2.7	0.00213	$7.90 \times 10^{-3}$	$2.33 \times 10^{-5}$	$3.96 \times 10^{-3}$



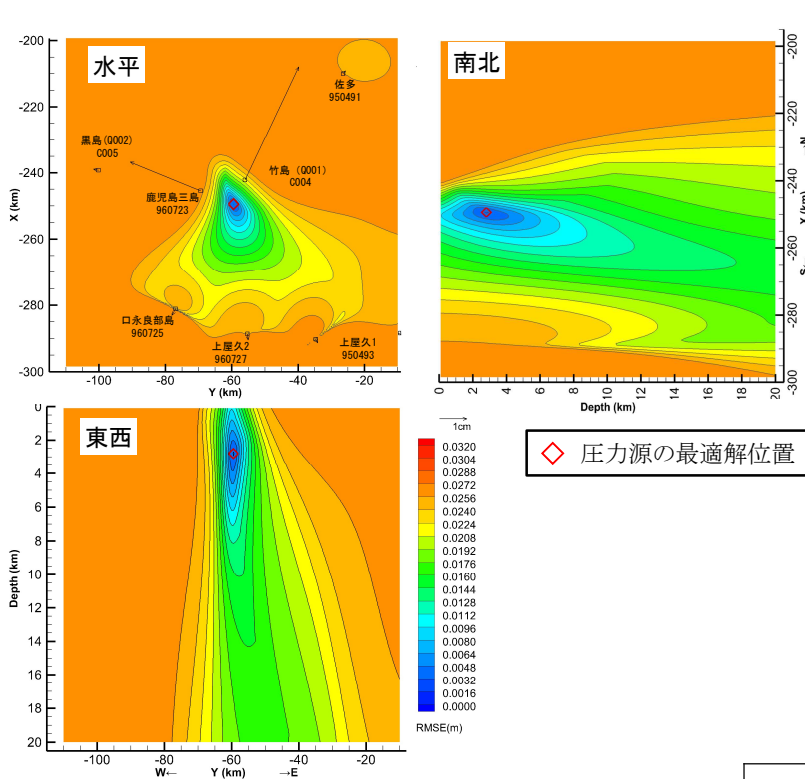
使用した基線配置

本資料で用いている図面の作成に当たっては、国土地理院基盤地図情報の「基盤地図情報(数値標高モデル)」10mメッシュを使用したものである。

\*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

# 1. 鬼界における2018年～2025年累積変動を用いた圧力源位置の推定[茂木モデル: ④、⑮、⑯を除く基線]

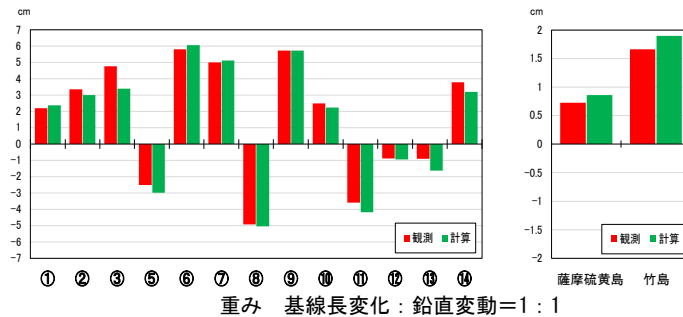
- 観測値と計算結果を比較すると、基線長変化についても概ね整合しているが比較的距離が長い基線では差が大きい傾向が見られることから、昨年同様に「薩摩硫黄島」や「竹島」をつないでいない基線④、⑮、⑯を除いた基線を用いて、圧力源位置の推定を行う。
- その結果、圧力源位置は、深さ2.8kmに推定され、すべての基線を用いた場合と比較して同程度の位置及び深さとなった。体積変化量は全基線と比較してわずかに大きくなり0.00216km<sup>3</sup>/年となった。
- 求められた誤差を比較すると、基線長のRMSEが小さくなり、平均のRMSEが小さくなった。



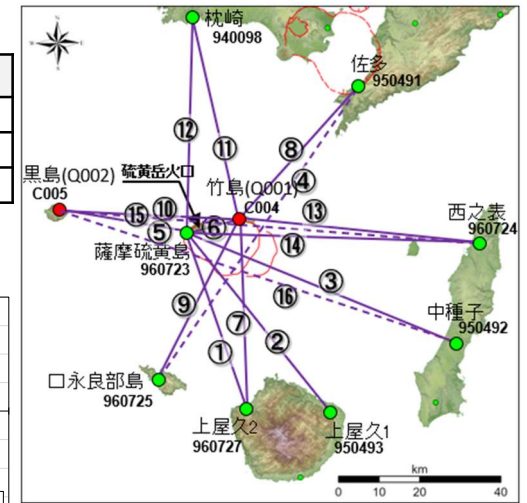
最適解位置における水平断面及び南北、東西断面のRMSEの分布

○ 圧力源位置の変動範囲

方向	範囲	間隔
東西方向	鬼界カルデラ中心から±20km	500m
南北方向	鬼界カルデラ中心から±20km	500m
深さ方向	中心を地表面下0.1～20km	100m



観測値と計算結果の比較(8年間累積)  
(左：基線長変化、右：鉛直変動)  
\*推定誤差の算出は小林(2012)による。



● 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  
(点線は除外した基線)  
本資料で用いている図面の作成に当たっては、国土地理院基盤地図情報の「基盤地図情報(数値標高モデル)」10mメッシュを使用したものである。

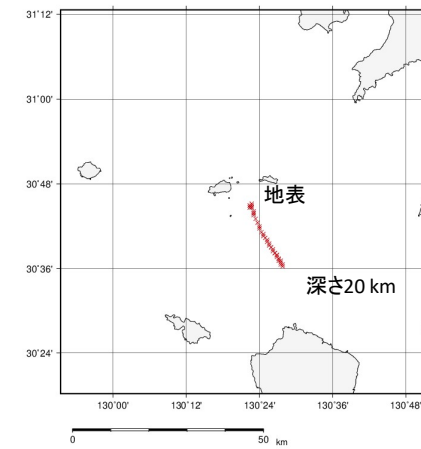
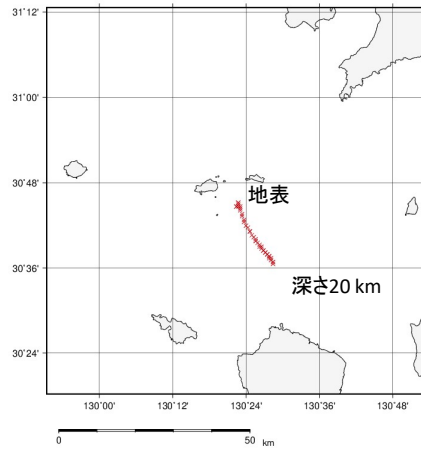
推定された圧力源の比較

	圧力源平面位置*		圧力源深さ(km)	体積変化量(km <sup>3</sup> /年)	RMSE(m)		
	X(NS,m)	Y(EW,m)			基線長変化	鉛直変動	平均
茂木モデル(全て)	-249411	-58995	2.7	0.00213	$7.90 \times 10^{-3}$	$2.33 \times 10^{-5}$	$3.96 \times 10^{-3}$
茂木モデル(④⑮⑯除外)	-249411	-59495	2.8	0.00216	$5.30 \times 10^{-3}$	$9.75 \times 10^{-4}$	$3.14 \times 10^{-3}$

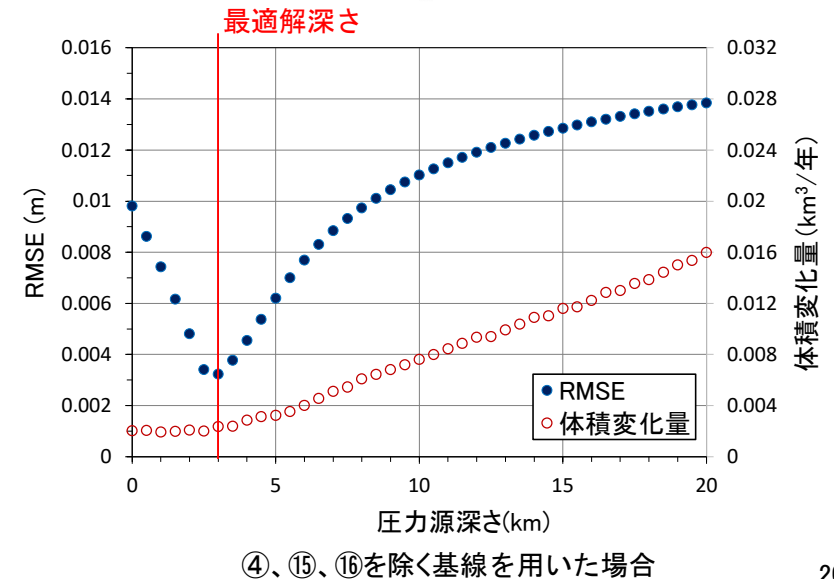
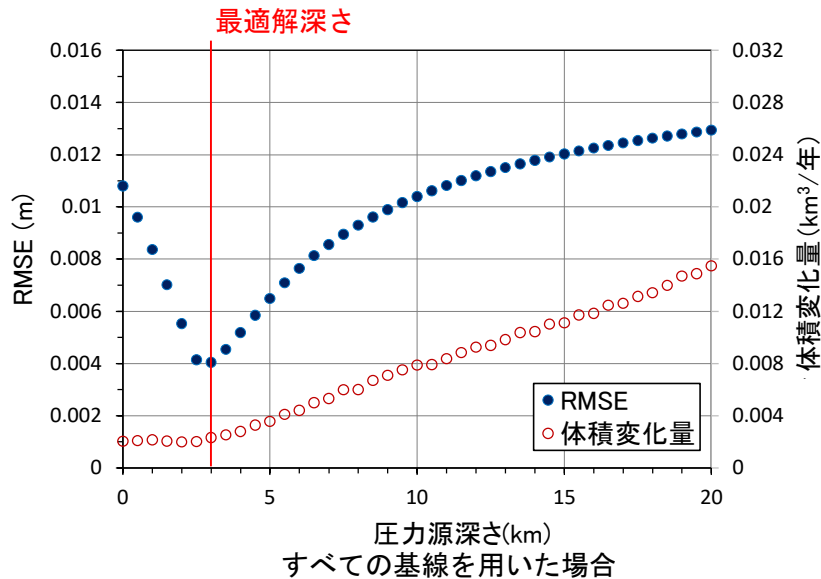
# 1. 鬼界における2018年～2025年累積変動を用いた圧力源位置の推定[茂木モデル:体積変化量とRMSEの検討]

- 推定された圧力源は深さと体積変化量がトレードオフの関係であることを踏まえ、「すべての基線を用いた場合」と、「④、⑮、⑯を除く基線を用いた場合」で深さを0.5kmごとに拘束して、圧力源位置を推定した。
- 拘束する深さが深くなると、圧力源の水平位置は南東方向に移動する傾向があり、圧力源近傍の南東方向に、拘束するGNSS観測点がないことが関係していると考えられる。「基線④、⑮、⑯を除く基線を用いた場合」は「すべての基線を用いた場合」と比較して体積変化量はわずかに大きくなるが、大きな差はない。RMSEで見ると「基線④、⑮、⑯を除く基線を用いた場合」は「すべての基線を用いた場合」と比較して、最適解深さ付近ではより小さく、最適解から深くなるとより大きくなる傾向がある。

圧力源の深さを拘束した場合の  
深さに対する水平位置の関係

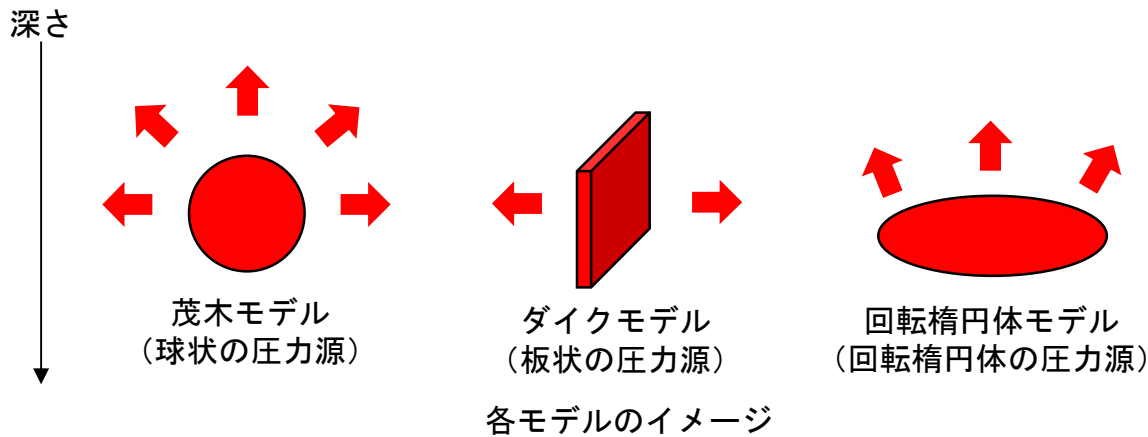


圧力源深さとRMSE及び  
圧力源の体積変化量の関係



# 1. 鬼界における2018年～2025年累積変動を用いた圧力源位置の推定[ダイクモデル及び回転楕円体モデル]

- 2024年度は、鬼界の圧力源の推定について、茂木モデル(球状)とダイクモデル(板状)を用いて検討した。今年度はそれらに加え、坂井ほか(2008)及び気象研究所(2013)による回転楕円体モデルを用いて検討した結果を比較する。
- 坂井ほか(2008)及び気象研究所(2013)では、均質弾性体に鉛直軸対称の回転楕円体による地殻変動を、FEM(有限要素法)解析に基づいた経験式を導入し、扁平率 $f$ 及び扁平率 $f$ に依存するパラメータ $h_1$ 、 $h_2$ を設定することで、より正確に再現・推定できる手法として提案されており、本検討では同手法を適用する。



$$U_z = \frac{3}{4\pi} \cdot \Delta V \cdot \frac{D+h}{((D+h)^2 + r^2)^{3/2}} \left( 1 + h_1 f + h_2 f \frac{(D+h)^2}{(D+h)^2 + r^2} \right)$$

$$U_r = \frac{3}{4\pi} \cdot \Delta V \cdot \frac{r}{((D+h)^2 + r^2)^{3/2}} \left( 1 + h_1 f + h_2 f \frac{(D+h)^2}{(D+h)^2 + r^2} \right)$$

$U_z$  : 上下変位  
 $U_r$  : 熱源の中心と観測点を結ぶ方向の水平変位  
 $h$  : 観測点標高  
 $r$  : 熱源中心と観測点間の水平距離  
 $D$  : 地表面から熱源までの深さ  
 $\Delta V$  : 熱源の体積変化量  
 $f$  : 回転楕円体熱源の扁平率  
 $h_1, h_2$  : Table 2.4.1 に示した  $f$  に依存するパラメータ

Table 2.4.1 Parameters  $h_1$  and  $h_2$  and flattening  $f$  in the Sakai model (Sakai et al., 2008).

横長の回転楕円体 (oblate)			縦長の回転楕円体 (prolate)		
$f$	$h_1$	$h_2$	$f$	$h_1$	$h_2$
-0.1111	0.3965	-1.5183	0.1	0.4542	-1.5701
-0.25	0.3764	-1.5157	0.2	0.4747	-1.5735
-0.4286	0.3485	-1.5026	0.3	0.4960	-1.5749
-0.6667	0.3190	-1.4858	0.4	0.5179	-1.5732
-1	0.2810	-1.4648	0.5	0.5396	-1.5670
-1.5	0.2390	-1.4417	0.6	0.5600	-1.5539
-2.3333	0.1895	-1.4060	0.7	0.5770	-1.5309
-4	0.1323	-1.3540	0.8	0.5873	-1.4929
-9	0.06609	-1.2944	0.9	0.5847	-1.4323

坂井による回転楕円体圧力源モデルの式 (気象研究所, 2013)

# 1. 鬼界における2018年～2025年累積変動を用いた圧力源位置の推定[ダイクモデル]

- 鬼界についてダイクモデルを用いて圧力源位置を推定し、体積変化量の算定を行った。
- 検討は全ての基線①～⑯を用い、鉛直変動は、「黒島」を固定点として「薩摩硫黄島」と「竹島」の2地点のみを用いた。RMSEは基線長変化と鉛直変動のそれぞれで求め、その平均が最小となるような圧力源位置と体積変化量をグリッドサーチを用いて推定する。
- 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、これを用いる。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込むことを意図して、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。また、RMSE算出時の基線長変化:鉛直変動の重みは、第1、第2ステップを通じ、1:1とする。

## 【第2ステップ】

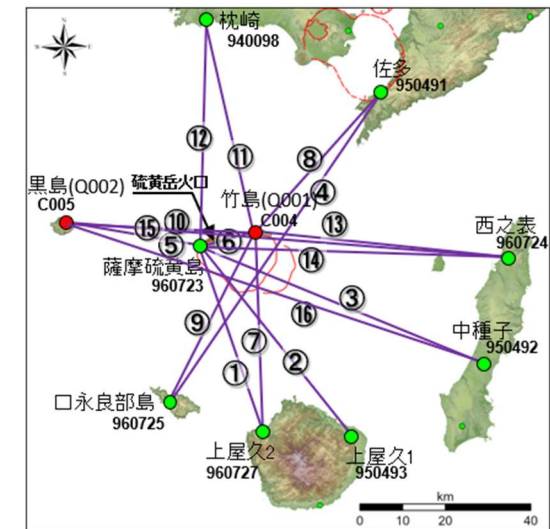
- 第1ステップでRMSE最小となった断層パラメータを起点に、グリッドサーチを用いて、平面位置の探索を実施する。ただし、平面位置の変動に伴い最適パラメータが変わる可能性を考慮し、同時に第1ステップの最適パラメータ前後の範囲を再度探索する。なお、体積変化量(開口量)は、パラメータの組み合わせごとにRMSEを最小化するよう最適化する。

### ○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
傾斜角	30, 60, 90°	3

### ○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30° を5° 刻み	13
傾斜角	第1ステップの最適値及び前後を15° 刻み	3



● 国土地理院のGNSS観測点

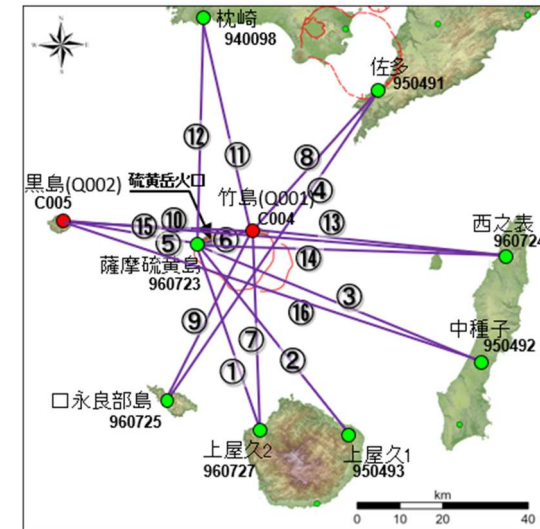
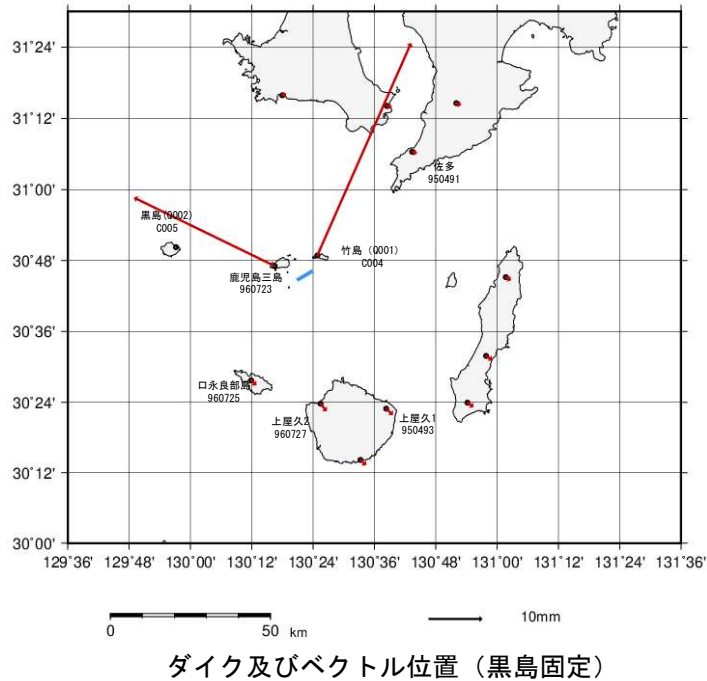
● 九州電力のGNSS観測点

使用した基線配置

本資料で用いている図面の作成に当たっては、国土地理院基盤地図情報の「基盤地図情報(数値標高モデル)」10mメッシュを使用したものである。

# 1. 鬼界における2018年～2025年累積変動を用いた圧力源位置の推定[ダイクモデル]

- 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以下に示す。圧力源位置は長さ5.0km、幅0.5km、走向240°、傾斜角30°、開口量10.47mのダイクモデルが茂木モデルとほぼ同位置に推定された。体積変化量は、0.00327km<sup>3</sup>/年となった。



- 国土院のGNSS観測点
- 九州電力のGNSS観測点

使用した基線配置

本資料で用いている図面の作成に当たっては、国土院基盤地図情報の「基盤地図情報(数値標高モデル)」10mメッシュを使用したものである。

	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 (°)	傾斜角 (°)	開口量 (m)		基線長変化	鉛直変動	平均
ダイクモデル	-248411	-59995	2.00	2.13	5.0	0.5	240	30	10.47	0.00327	$8.03 \times 10^{-3}$	$6.89 \times 10^{-5}$	$4.05 \times 10^{-3}$

※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

# 1. 鬼界における2018年～2025年累積変動を用いた圧力源位置の推定[回転楕円体モデル]

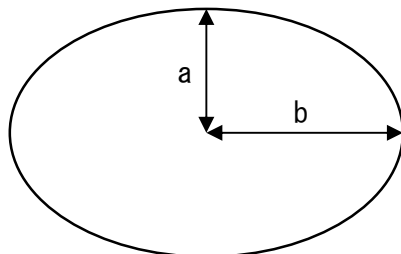
- 鬼界について回転楕円体モデルを用いて圧力源位置を推定し、体積変化量の算定を行った。
- 検討は全ての基線①～⑯を用い、鉛直変動は、「黒島」を固定点として「薩摩硫黄島」と「竹島」の2地点のみを用いた。RMSEは基線長変化と鉛直変動のそれぞれで求め、その平均が最小となるような圧力源位置と体積変化量をグリッドサーチを用いて推定する。
- グリッドサーチ範囲(圧力源位置の変動範囲)は、茂木モデルと同様とし、回転楕円体モデルは水平半径 $b$ と扁平率 $f$ を用いて最適化を行う。扁平率は $f=0$ を超えると鉛直方向に長い扁長状(縦長)の形状となる。また、RMSE算出時の基線長変化:鉛直変動の重みは、1:1とする。

## ○圧力源位置の変動範囲

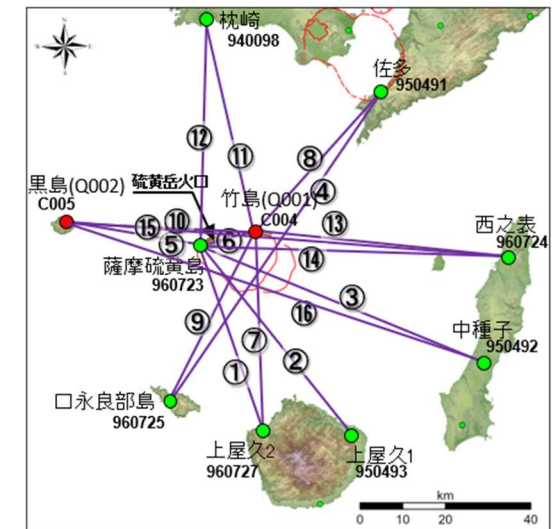
方向	範囲	間隔
東西方向	鬼界カルデラ中心から±20km	500m
南北方向	鬼界カルデラ中心から±20km	500m
深さ方向	中心を地表面下0.1～8km	100m

## ○回転楕円体モデルの設定

パラメータ	設定	パターン数
水平半径 $b$	0.5, 1.25, 2.5, 3.75, 5.0, 7.5, 10km	7
扁平率 $f=(a-b)/a$	扁平(横長)形状: $-9 \sim -0.11$ (9通り) 球形: 0 (1通り) 扁長(縦長)形状: $0.09 \sim 0.9$ (19通り)	29



回転楕円体モデルのパラメータのイメージ



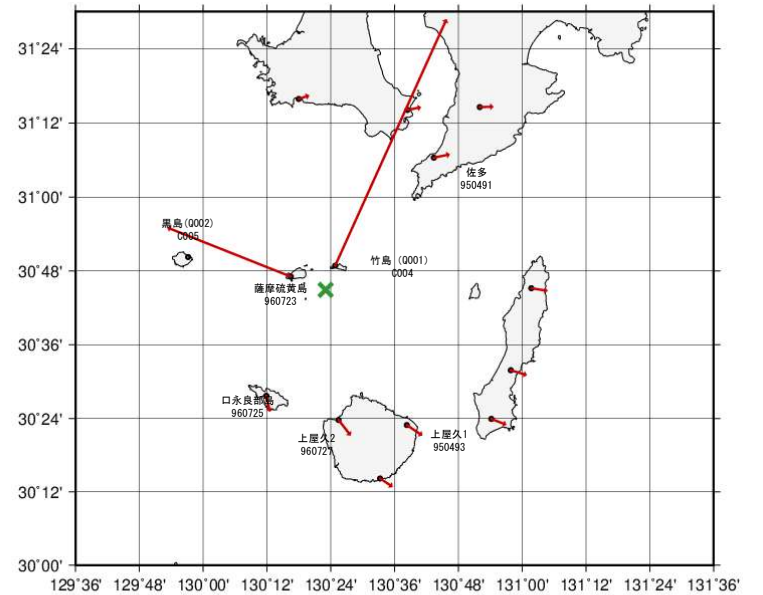
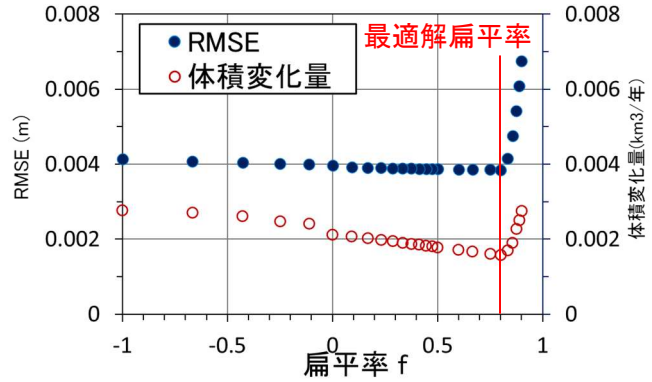
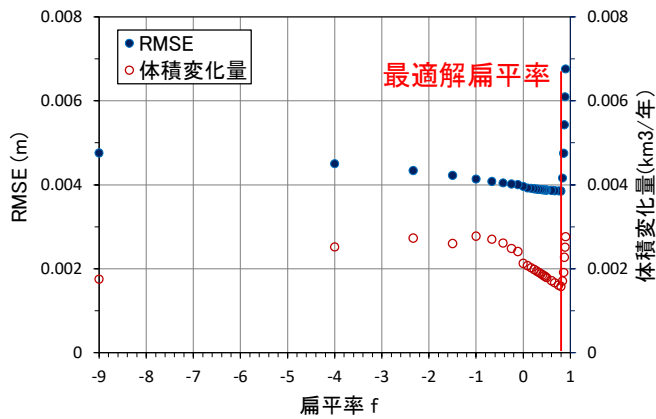
- 国土地理院のGNSS観測点
- 九州電力のGNSS観測点

## 使用した基線配置

本資料で用いている図面の作成に当たっては、国土地理院基盤地図情報の「基盤地図情報(数値標高モデル)」10mメッシュを使用したものである。

# 1. 鬼界における2018年～2025年累積変動を用いた圧力源位置の推定[回転楕円体モデル]

- 回転楕円体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。圧力源位置は半径0.5km、厚さ5.0kmの扁長(縦長)な回転楕円体が茂木モデルとほぼ同位置に推定された。体積変化量は、0.00158km<sup>3</sup>/年となり、回転楕円体モデル検討でも0.01km<sup>3</sup>/年を下回る結果となった。
- RMSEでみると、扁平率f=0.8に最適解が求まるものの、扁平率f=0～0.8では、いずれもRMSEが0.004mを下回る値となった。



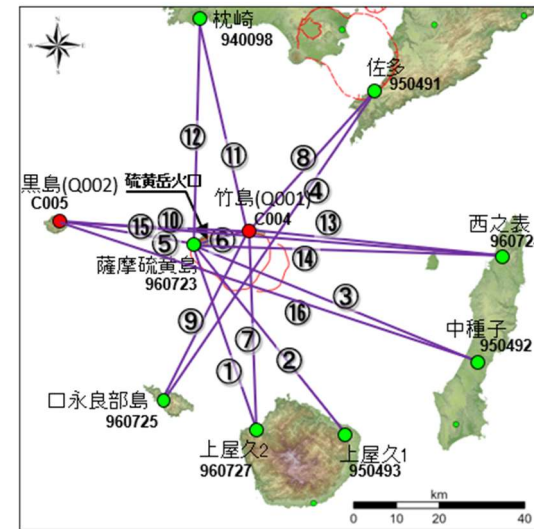
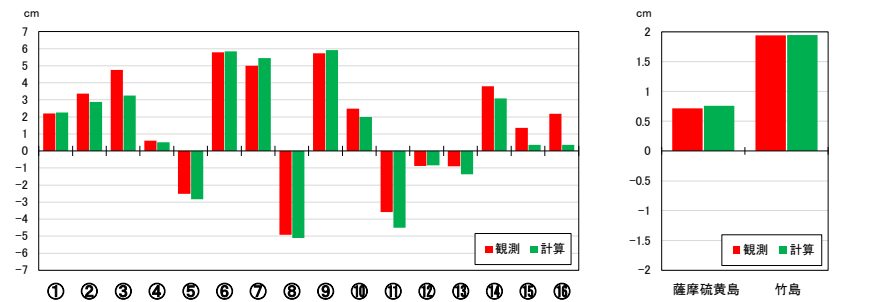
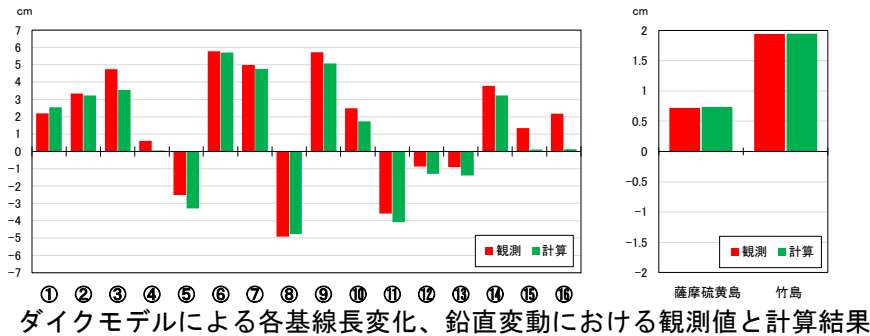
扁平率とRMSE及び圧力源の体積変化量の関係  
 左図：解析実施範囲全体の扁平率 右図：扁平率-1～1を拡大

楕円体モデル及びベクトル位置 (黒島固定)

	圧力源平面位置*		圧力源深さ(km)	回転楕円体諸元			体積変化量 (km <sup>3</sup> /年)	RMSE (m)		
	X(NS,m)	Y(EW,m)		半径 (km)	厚さ (km)	扁平率		基線長変化	鉛直変動	平均
回転楕円体モデル	-249411	-58995	2.7	0.5	5.0	0.8	0.00158	$7.51 \times 10^{-3}$	$1.92 \times 10^{-4}$	$3.85 \times 10^{-3}$

# 1. 鬼界における2018年～2025年累積変動を用いた圧力源位置の推定[各モデルの比較]

- ダイクモデル及び回転楕円体モデルを用いた検討の結果と茂木モデルの結果(P203)を比較した。圧力源位置については、ダイクモデル、回転楕円体モデル、茂木モデルともほぼ同じ位置に推定された。体積変化量については、ダイクモデルが最も大きな結果となり、茂木モデル、回転楕円体モデルの順に小さい結果となった。各モデルのRMSEは、概ね同じ結果となった。
- 鬼界は、推定される圧力源が海域に位置しており、地殻変動データが限られるため、現在の地殻変動量においては、各モデルに明瞭な差は認められなかった。
- 今後も茂木モデル、ダイクモデル、回転楕円体モデル等、複数のモデルを用いた圧力源の推定に関する検討を実施していく。



● 国土地理院のGNSS観測点  
● 九州電力のGNSS観測点

本資料で用いている図面の作成に当たっては、国土地理院基盤地図情報の「基盤地図情報(数値標高モデル)」10mメッシュを使用したものである。

	圧力源平面位置*		圧力源深さ(km)	ダイク諸元					回転楕円体諸元			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(°)	傾斜角(°)	開口量(m)	半径(km)	厚さ(km)	扁平率		基線長変化	鉛直変動	平均
ダイクモデル	-248411	-59995	2.13 (上端深さ:2.00)	5.0	0.5	240	30	10.47	-	-	-	0.00327	$8.03 \times 10^{-3}$	$6.89 \times 10^{-5}$	$4.05 \times 10^{-3}$
回転楕円体モデル	-249411	-58995	2.7	-	-	-	-	-	0.5	5.0	0.8	0.00158	$7.51 \times 10^{-3}$	$1.92 \times 10^{-4}$	$3.85 \times 10^{-3}$
茂木モデル(すべて)	-249411	-58995	2.7	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00213	$7.90 \times 10^{-3}$	$2.33 \times 10^{-5}$	$3.96 \times 10^{-3}$

\*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

余 白

## 2. 加久藤・小林カルデラ基線の地殻変動の除去に関する検討

- 2025年度の加久藤・小林カルデラのGNSS基線長変化は、広域地殻変動、2024/8/8及び2025/1/13日向灘の地震の余効変動、始良カルデラ及び霧島(新燃岳)の活動による影響を大きく受けていると考えられるため、これらの影響を除去する検討を行う。
- 検討フローを以下に示す。以下の検討により、各影響を除去した加久藤・小林カルデラの基線長変化を確認する。

### 地震時の変動を補正

各観測点の地震時の地殻変動の補正 (P48~51)



### 余効変動及び広域地殻変動の除去

- 2024年度年報の中長期的取組み「6. 2024年8月8日の日向灘による余効変動の分離に関する検討」と同様の方法を用いて影響を除去する。



### 始良カルデラの影響の除去

- 2023年度年報の中長期的取組み「2. 加久藤・小林カルデラにおける基線配置の検討」と同様の方法を用いて、始良カルデラの日変化量を全観測点の変化から除去し、始良カルデラの影響を除去



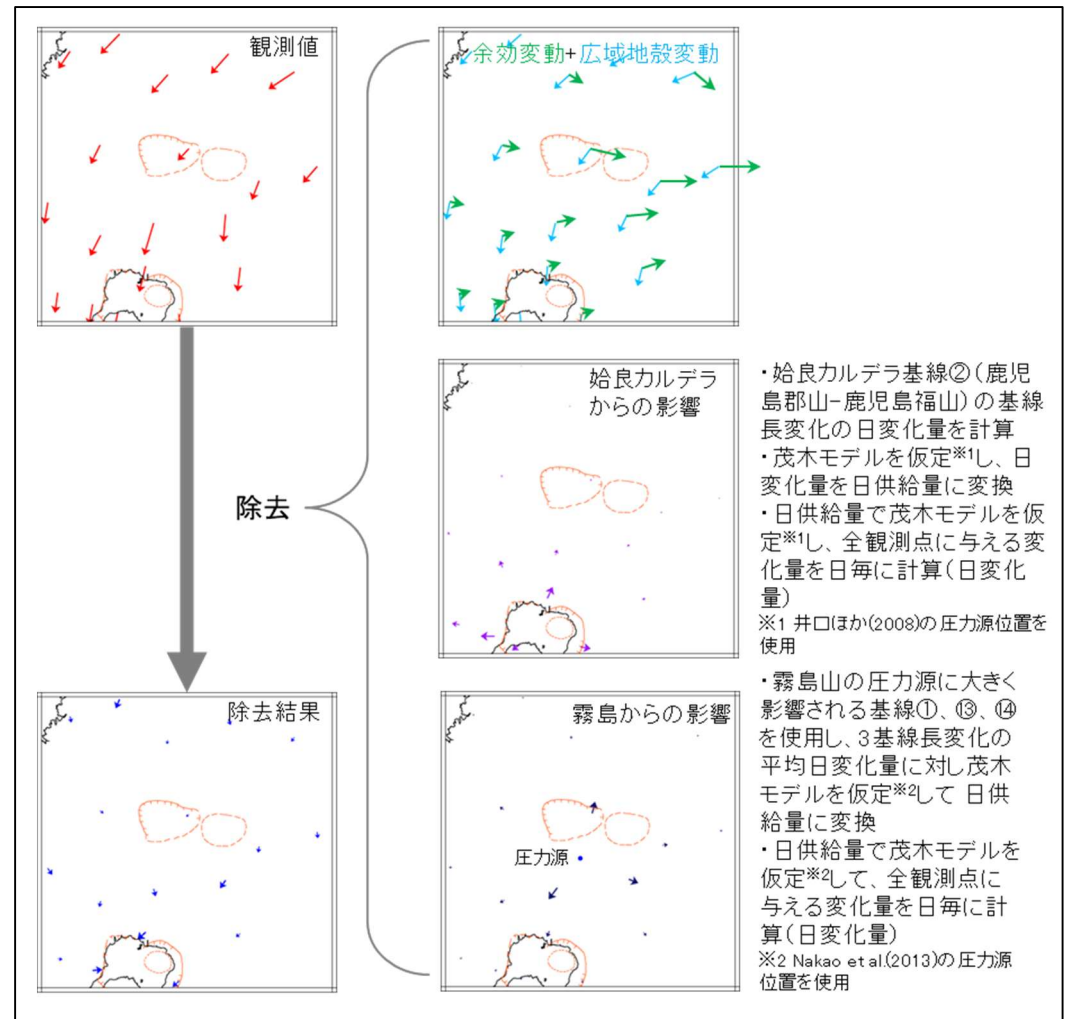
### 霧島(新燃岳)の影響の除去

- 2023年度年報の中長期的取組み「2. 加久藤・小林カルデラにおける基線配置の検討」と同様の方法を用いて、霧島(新燃岳)の日変化量を全観測点(基線)の変化から除去し、霧島(新燃岳)の影響を除去



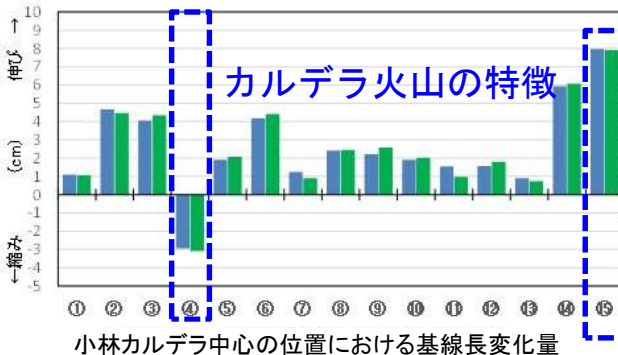
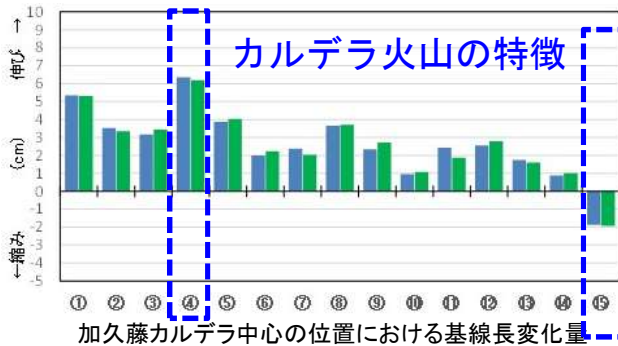
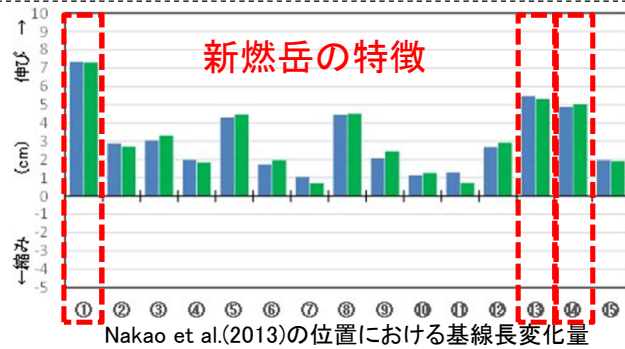
各影響を除去した基線長変化を確認 (P214)

### 補正方法のイメージ図

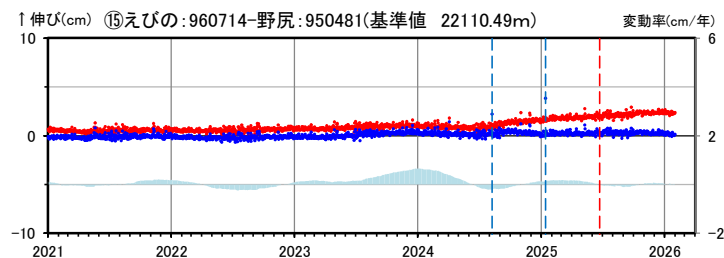
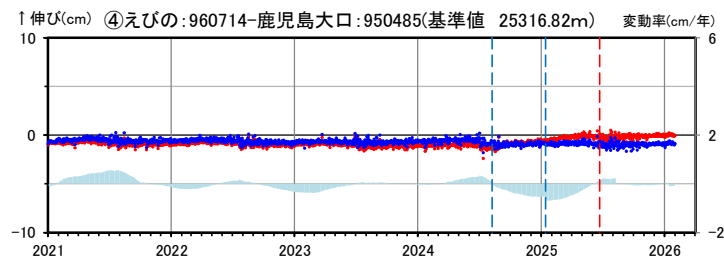
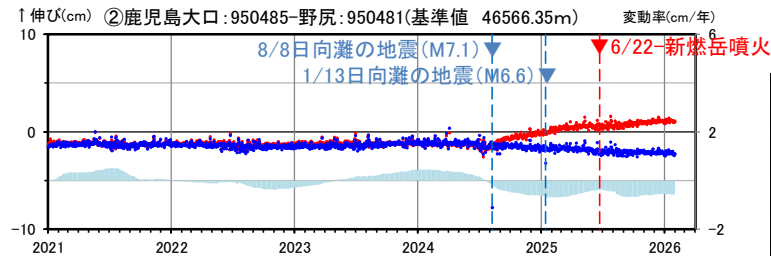


## 2. 加久藤・小林カルデラ基線の地殻変動の除去に関する検討

- 各影響を除去した基線長変化のうち、加久藤・小林カルデラの地殻変動を捉えやすいと考えられる基線②、④、⑬の結果を示す(中央図)。
- 2023年度年報の検討では、加久藤・小林カルデラ及び霧島(新燃岳)に、 $0.05\text{km}^3/\text{年}$ の圧力源(深さ $10\text{km}$ )を仮定した場合の、基線長変化量の特徴に関する検討を実施しており(左図)、加久藤・小林カルデラのリム内に圧力源が位置する場合は、影響除去後においても基線④、⑬に変動が認められると考えられる。
- 今回の結果(中央図)は、基線④、⑬の変化量は概ねフラットになっており、加久藤・小林カルデラへのマグマ供給を示唆する伸びの傾向は認められない。

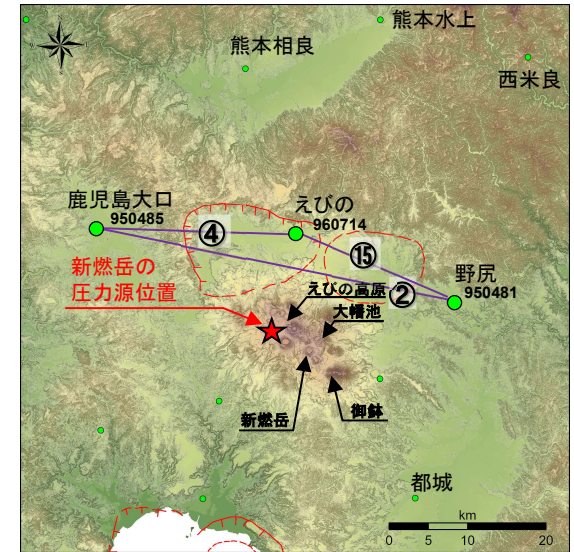


■ 残差の変動率(cm/年)  
● 基線長変化(cm)  
● 残差基線長変化(cm)



カルデラ火山の変動で特徴がある基線の時系列変化

■ 茂木モデルによる基線長変化量  
■ 茂木モデルに広域地殻変動値を加えた基線長変化量



- ※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▼と点線は主な噴火を示す
- ※4 青色の▼と点線は地震時による変動を補正した地震を示す

本資料で用いている図面の作成に当たっては、国土地理院基盤地図情報の「基盤地図情報(数値標高モデル)」10mメッシュを使用したものである。

新燃岳の圧力源位置及び加久藤カルデラ、小林カルデラの中心に、 $0.05\text{km}^3/\text{年}$ の圧力源(深さ $10\text{km}$ )を仮定した場合の、基線長変化量(2023年度年報P162~164)

### 3. 干渉SAR時系列解析

- 干渉SARについては、国土地理院による解析結果を火山活動のモニタリング評価において考慮するとともに、中・長期的取組みとして当社においても独自の時系列解析を実施してきた。
- 下表に干渉SAR、水準測量、GNSSの各観測手法の特徴を整理する。干渉SARはGNSSや水準測量と比較して精度が劣る一方で、空間解像度が高い点が特徴といえる。
- 以上を踏まえて、中・長期的取組みでは以下の観点で干渉SARに関する検討を継続的に実施する。なお、GNSSや水準測量に比べて精度が比較的低い点を十分考慮し、必要に応じてGNSSや水準測量等のデータを用いて、信頼性の向上を図る。
  - カルデラ火山周辺(始良カルデラ、鬼界)の地殻変動(隆起・沈降傾向、広がる範囲)の面的な把握
  - GNSSや水準測量の空白域や情報が不足している地域の補完
- 今後も干渉SARに関する知見を注視し、干渉SARの解析技術の高度化に関する検討を引き続き行うものとする。

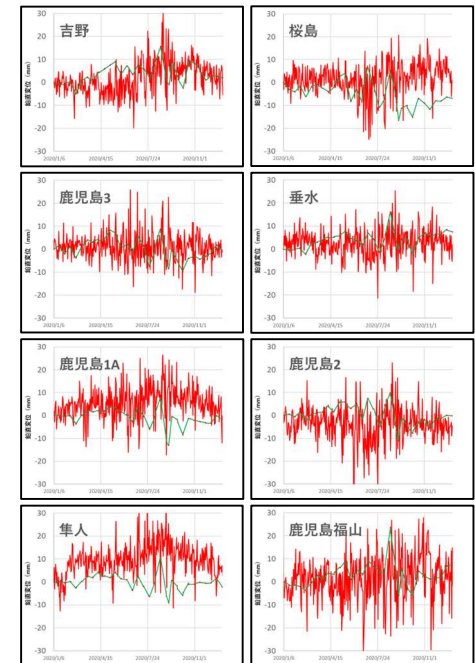
#### 【干渉SARに関する検討】

年度	衛星	解析内容
2020年度	Sentinel-1	SBAS法、解析期間1年
2021年度	Sentinel-1	SBAS法、解析期間1年、2.5次元解析
2022年度	Sentinel-1	SBAS法、GACOS、解析期間1年、2.5次元解析
2023年度	ALOS-2	SBAS法、GACOS、解析期間2年、2.5次元解析
2024年度	Sentinel-1	PS法、SBAS法、GACOS、解析期間1年
2025年度	Sentinel-1	PS法、E-PS法、GACOS、解析期間1年

#### 【各観測手法の特徴】

観測手法	精度	時間解像度	空間解像度
干渉SAR	△(視線方向: ~数cm)	○(年数回~数十回の中から任意の対象を解析可能)	◎(解像度: 数m~数10m)
GNSS	○(水平: ~数mm、鉛直: ~10mm)	◎(毎日(F5解))	△(約30km間隔、点)
水準測量	◎(鉛直: ~数mm)	△(年1回)	○(主要国道沿いに約2km間隔)

— 干渉SAR時系列解析  
— GNSS観測



【参考】GNSSによる検証(2023年度)

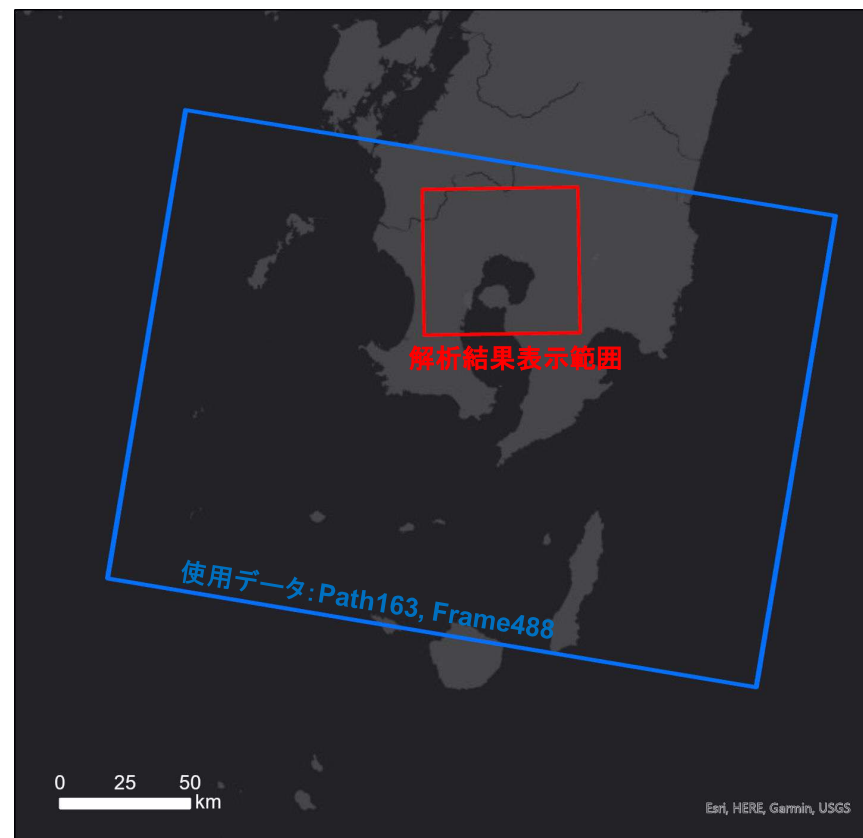
### 3. 干渉SAR時系列解析[始良カルデラ]

- 2024年度は、2021年度～2024年度のSentinel-1のデータを用い、PS法及びSBAS法を検討した。PS法とSBAS法のGNSS観測点に対する比較では、PS法の方がSBAS法よりRMSEがやや小さい傾向となったが、PS法には干渉域が狭いという傾向があった。
- これを解消するため、2025年度はPS法よりも広範囲な変位推定が可能なE-PS法による解析の検討を行う。
- 検討にあたっては、GNSS観測点の「樋脇」を固定点として、衛星の視線方向にベクトル補正を行い、E-PS法と2024年度に実施したPS法の結果を比較し、GNSS観測点の変位を基準とした場合の、干渉SARのRMSEについて検討する。
- 解析は、sarmap社の解析ソフト「SARscape6.1」を使用し、解析諸元は以下のとおりとする。

#### 【解析諸元】

解析手法	E-PS法、PS法
使用ソフト	SARscape6.1 (スイス・sarmap社)
衛星種別	Sentinel-1 (Cバンド) : ESA
大気ノイズ補正	GACOS (Yu et al., 2017) のデータを利用
使用データ	Path163、Frame488 (南行軌道)
入射角	39.1°
解像度	5m × 20m (IWSモード)
観測期間 (データ数)	2022.1.7～2022.12.21 (29シーン) 2023.1.2～2023.12.28 (31シーン) 2024.1.9～2024.12.22 (30シーン) 2025.1.3～2025.12.29 (31シーン)

#### 【解析結果表示範囲】

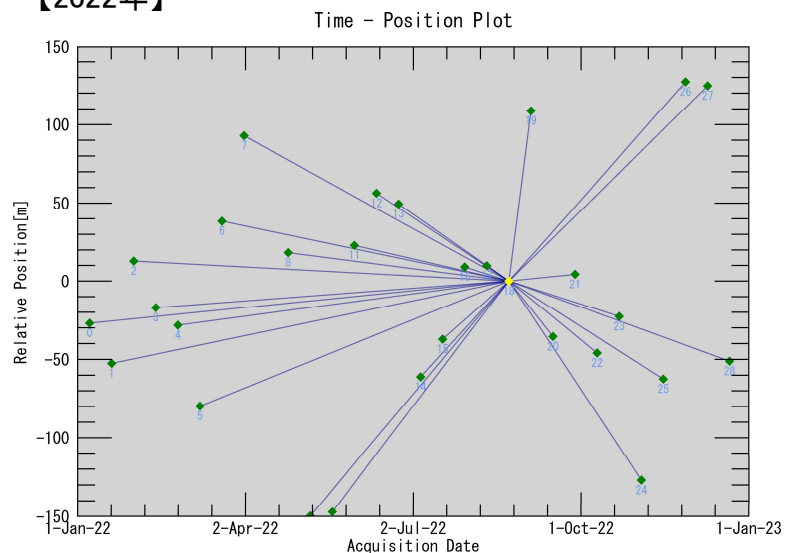


### 3. 干渉SAR時系列解析[始良カルデラ]

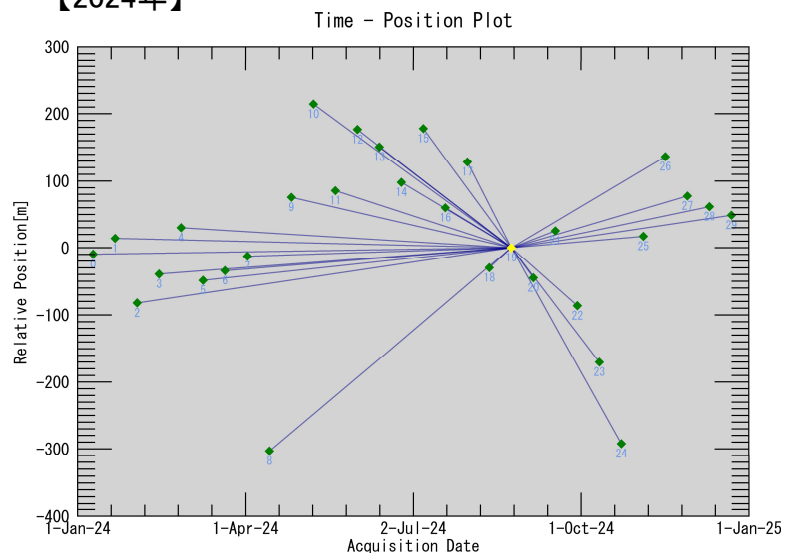
- PS法及びE-PS法のコネクショングラフを以下に示す。

#### <コネクショングラフ>

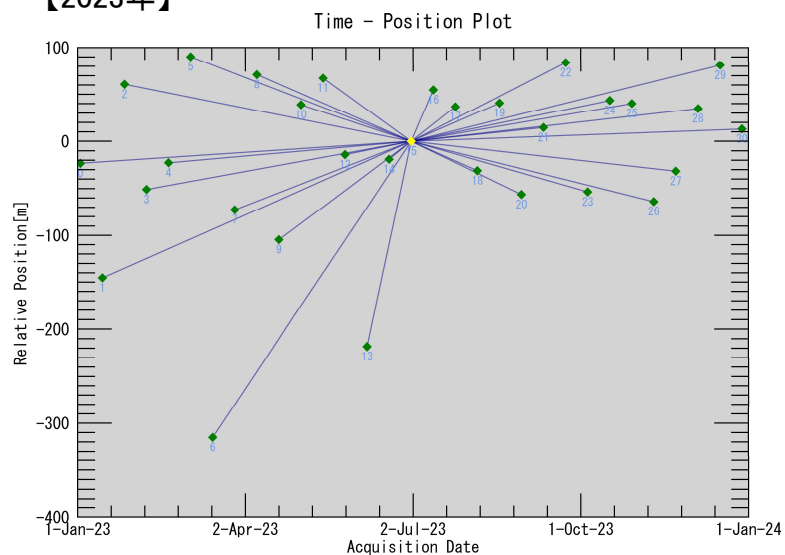
【2022年】



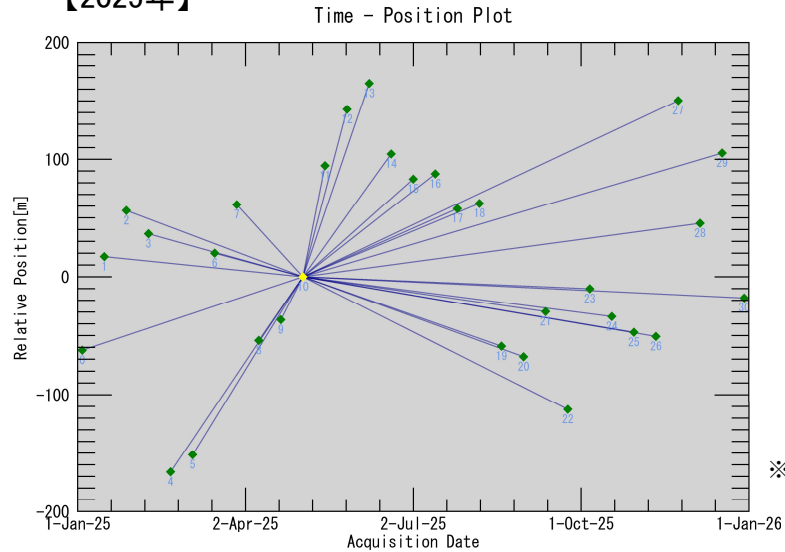
【2024年】



【2023年】



【2025年】

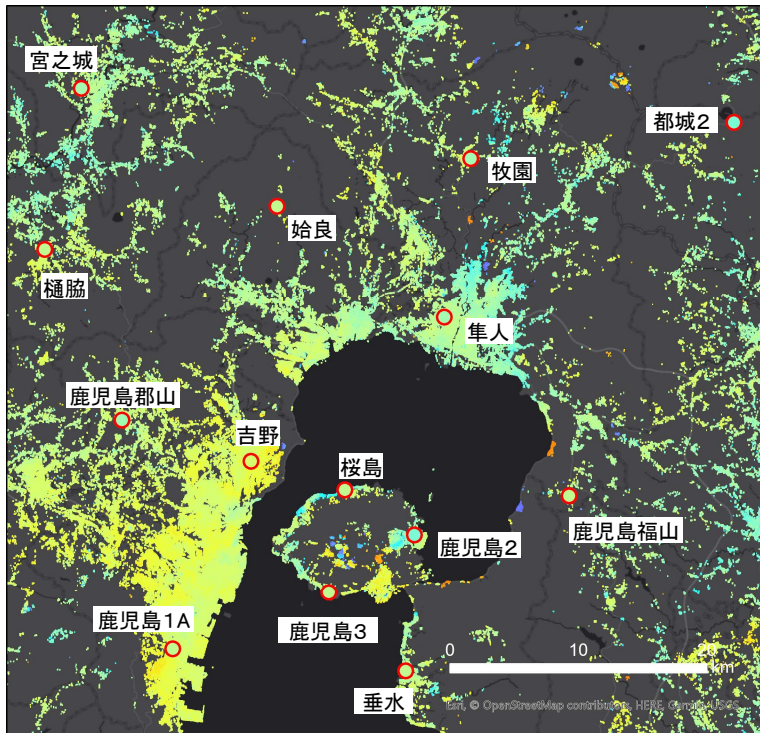


※ グラフ中の黄色の点は基準となる衛星画像、緑の各点はその他の衛星画像の取得日における基準に対する衛星軌道間の距離を示す。また、青色の線は干渉ペアを示す。 217

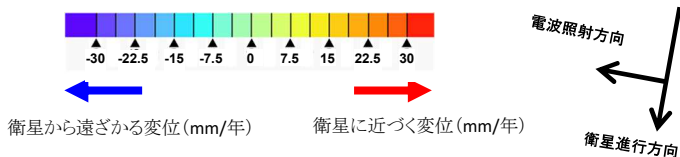
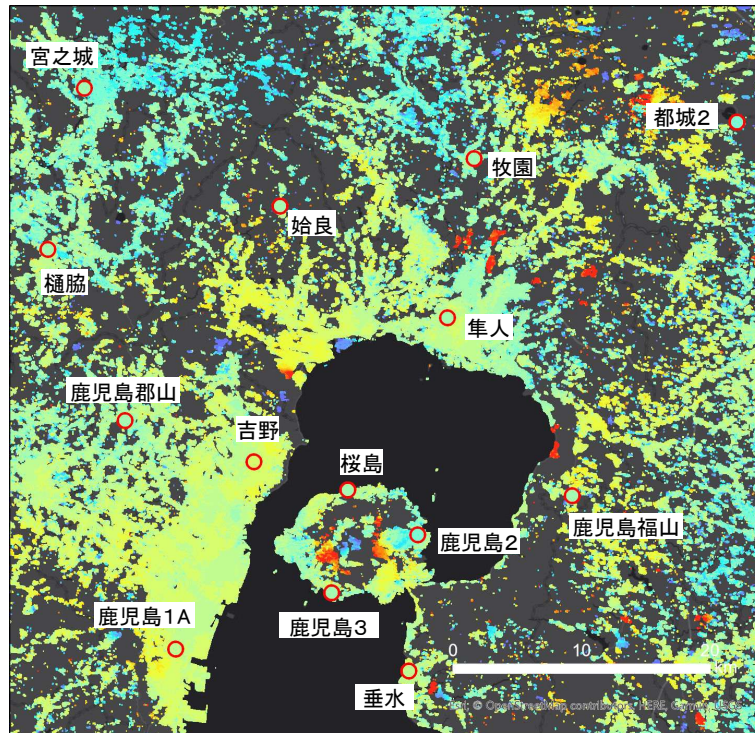
### 3. 干渉SAR時系列解析[始良カルデラ]

- 2022年のE-PS法による解析結果では、桜島の山頂付近を除き始良カルデラ周辺で顕著な変動は認められない。GNSS観測点の「吉野」や「鹿児島1A」のある鹿児島市市街地及び「吉野」と「隼人」間の始良カルデラ北西部がやや衛星に近づく変位となっている。また、「鹿児島2」のある桜島東部は部分的に衛星から遠ざかる変位となっている。
- E-PS法とPS法を比較すると、E-PS法の方が干渉域が広く、GNSS観測点との比較では、PS法の方がRMSEが小さい結果となった。

【PS法 2022年(2024年度解析結果)】



【E-PS法 2022年】



○ GNSS観測点における変位 (衛星視線方向)

【GNSS観測点との変位速度の比較】

