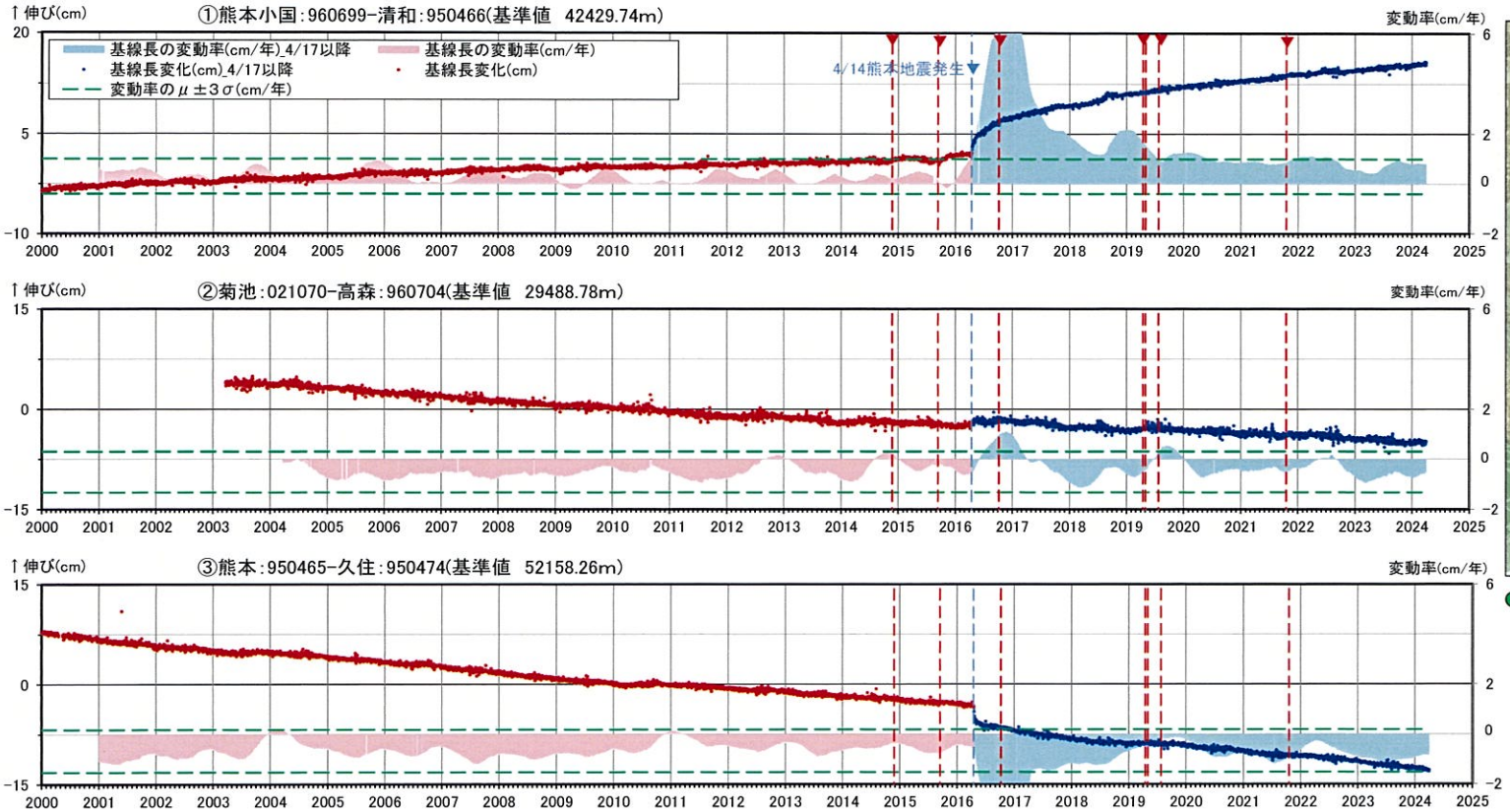
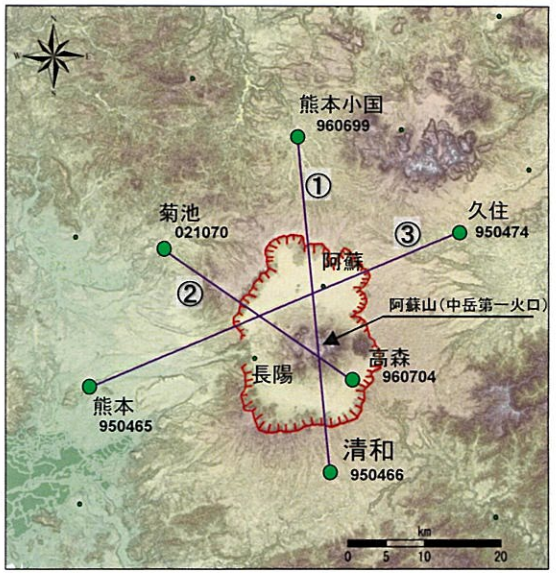
4. 統計的整理に基づく評価　阿蘇カルデラ［地殻変動：基線長変化］

・基線長変化について、統計学において誤差範囲として用いられる「平均（μ）±3σ」と、2023年度の観測結果との比較を行った。
・2023年度の阿蘇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。



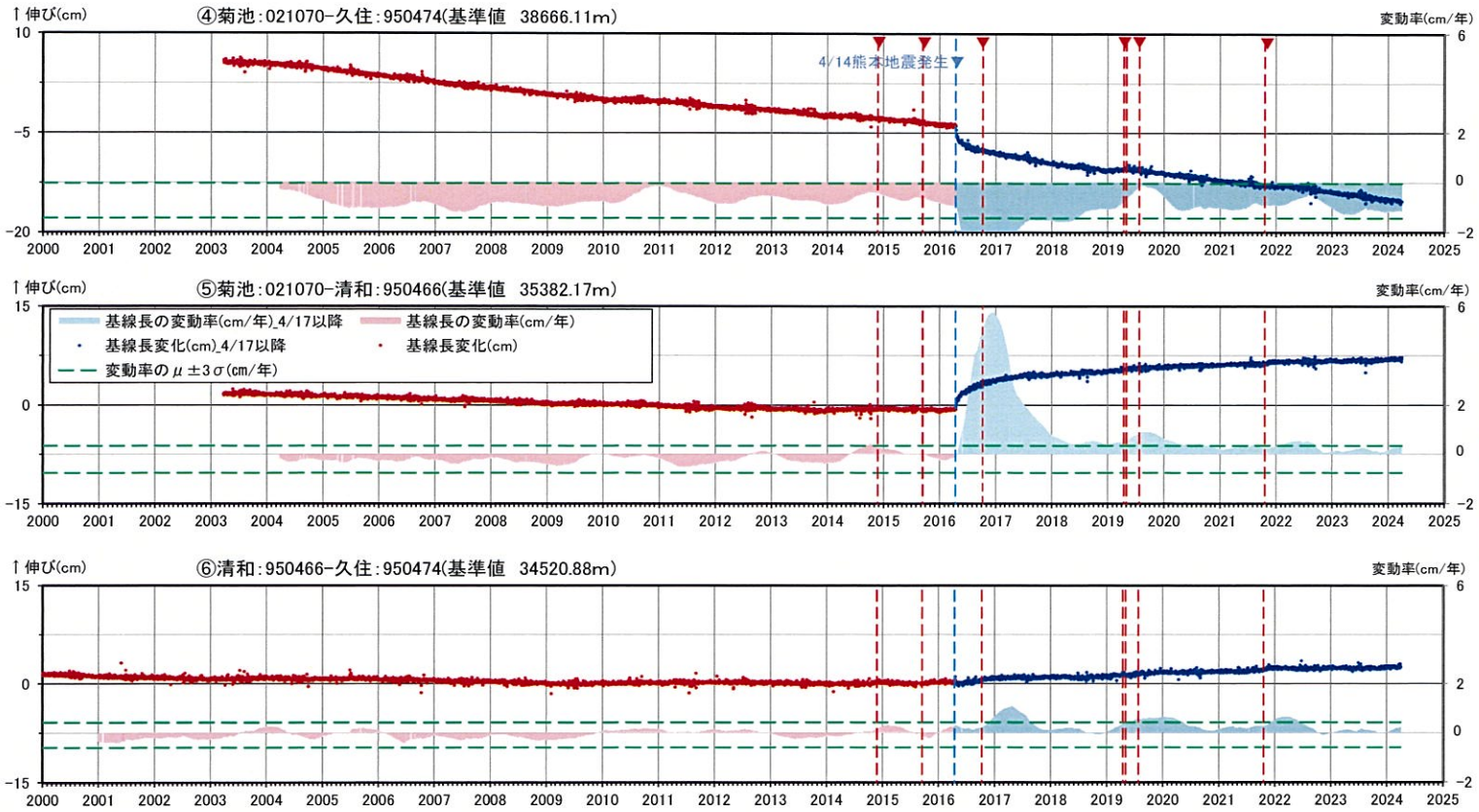


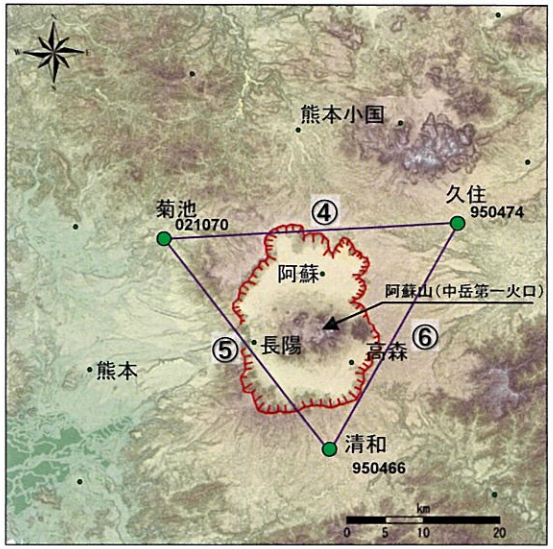
● 国土地理院のGNSS観測点

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

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）

4. 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］



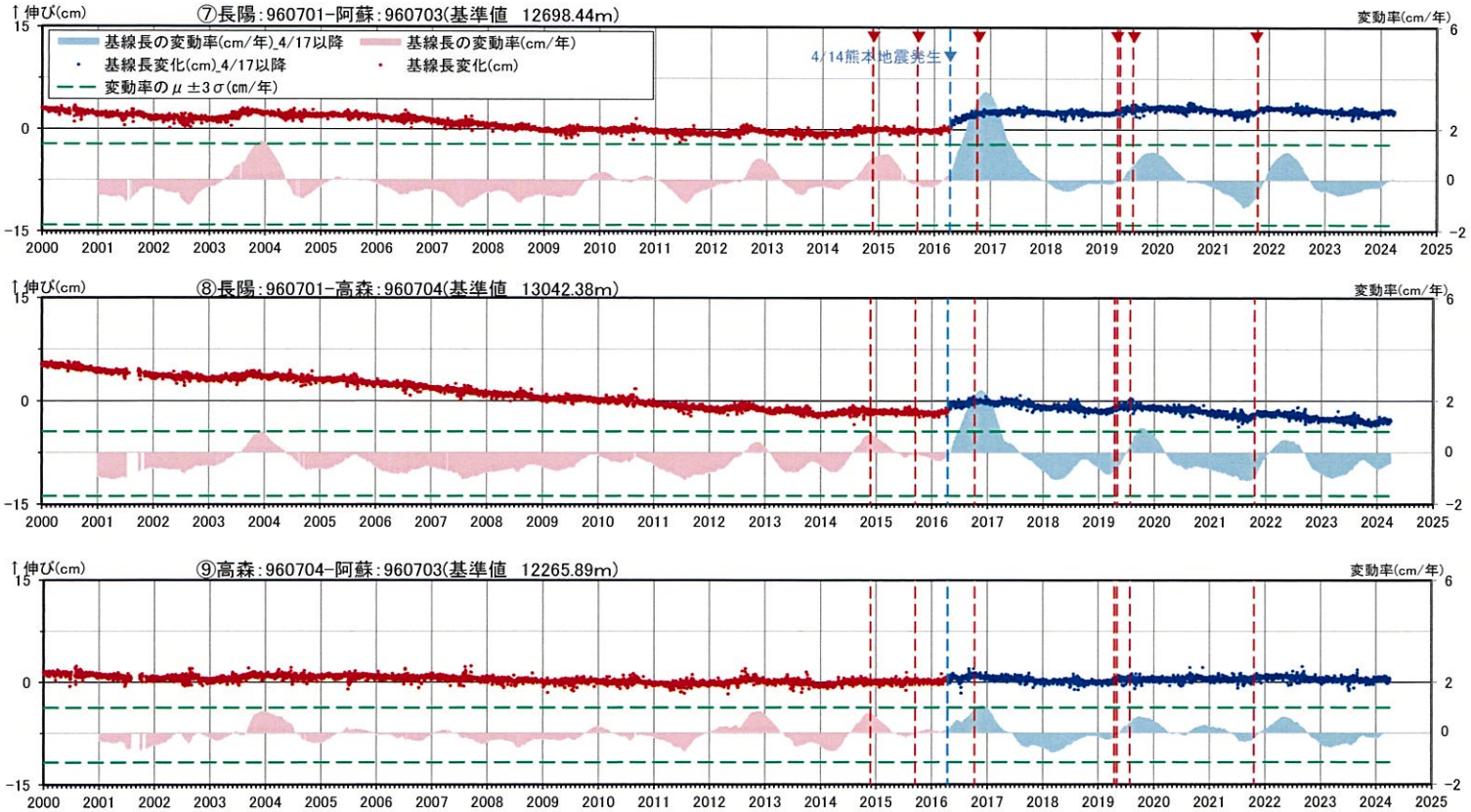


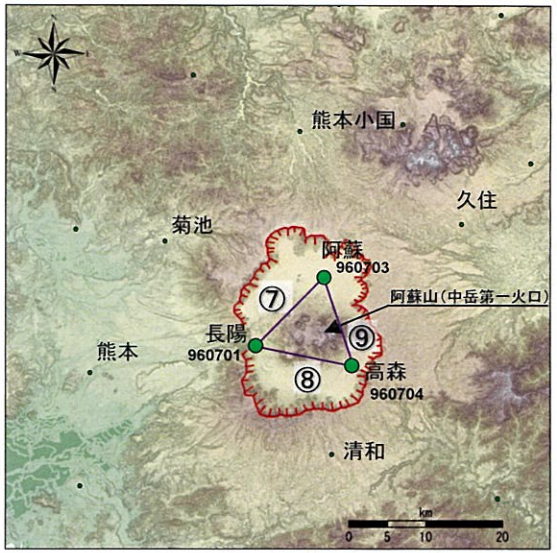
● 国土地理院のGNSS観測点

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

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）

4. 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］





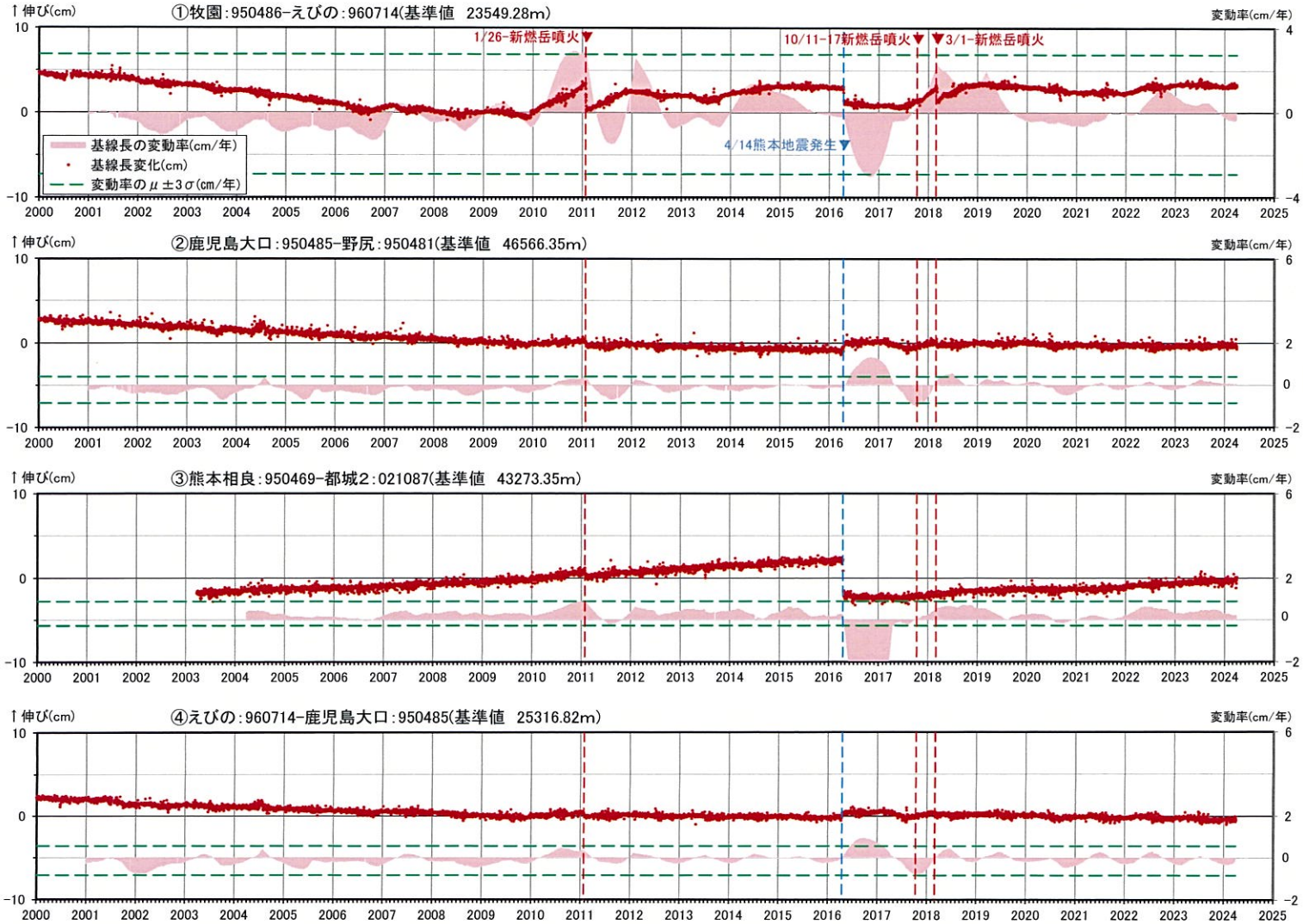
● 国土地理院のGNSS観測点

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

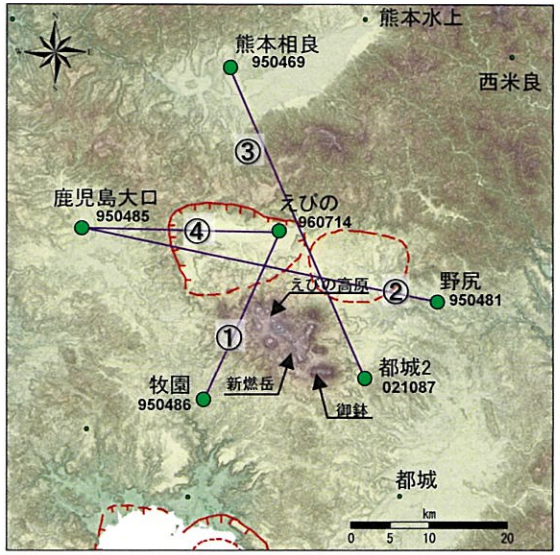
基線⑦～⑨の時系列変化（熊本地震発生時の変動を補正して図示）

4. 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］

・2023年度の加久藤・小林カルデラの基線⑨（熊本相良-都城）及び⑫（鹿児島大口-都城）において＋3σを上回る基線長変動率が見られるが、周期的な変動が認められることから、「都城」の季節的な変動が大きかったために超えていると考えられる。



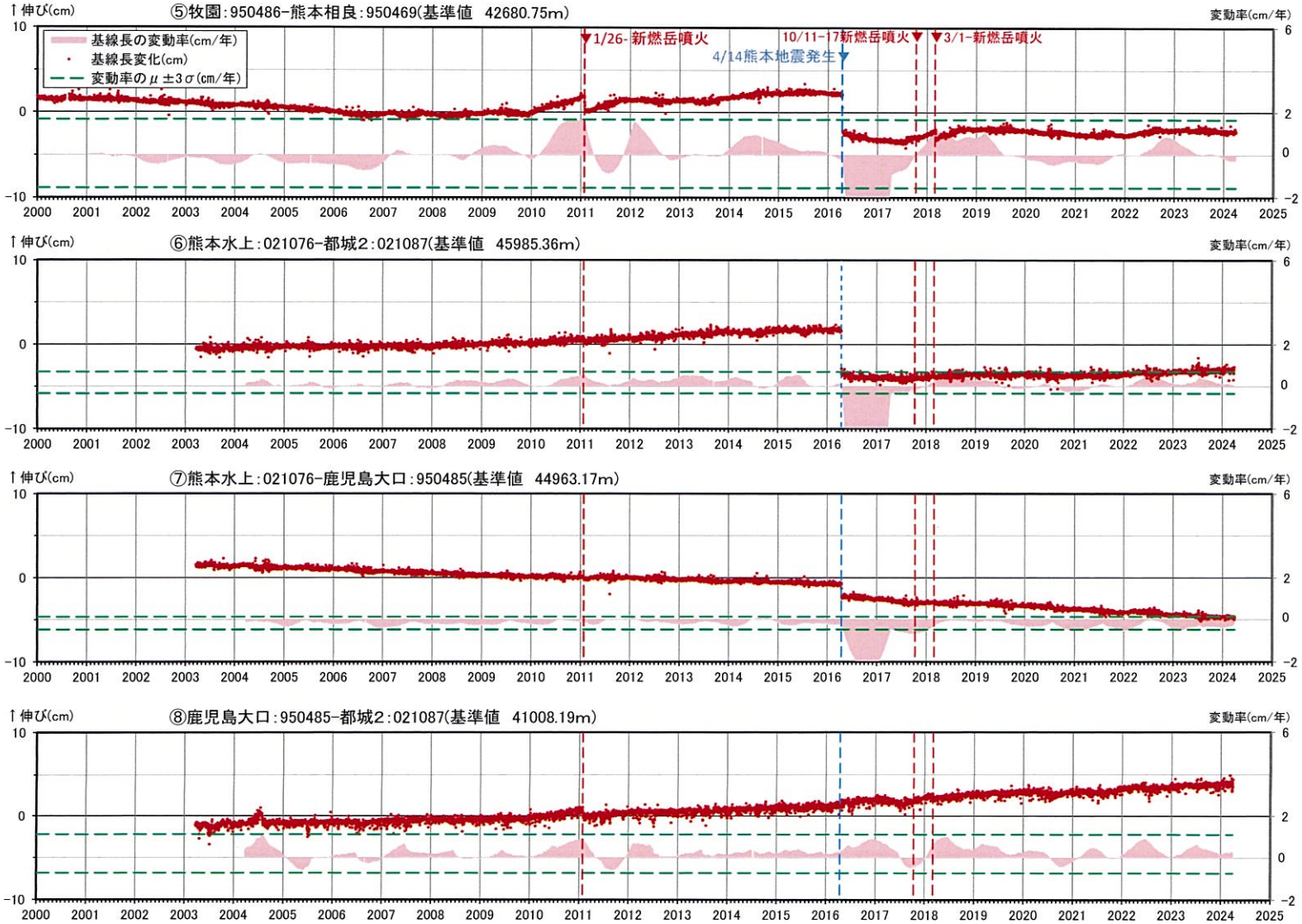
基線①～④の時系列変化

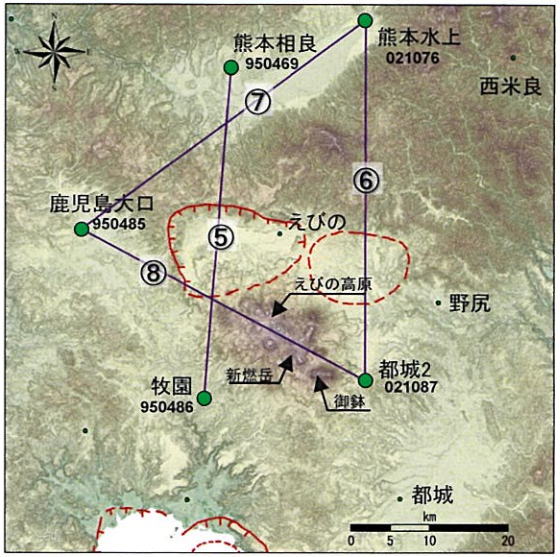


● 国土地理院のGNSS観測点

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

4. 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］



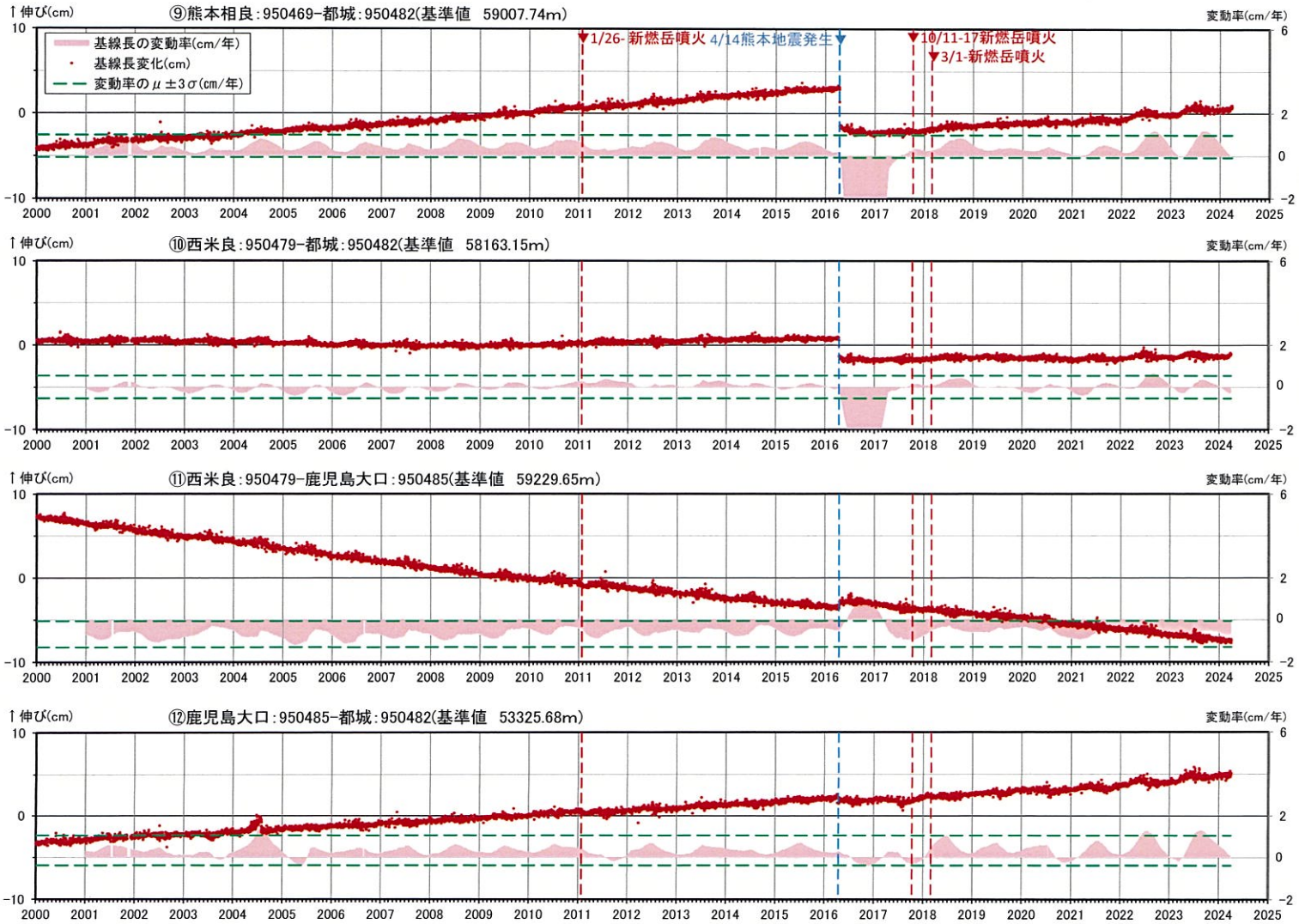


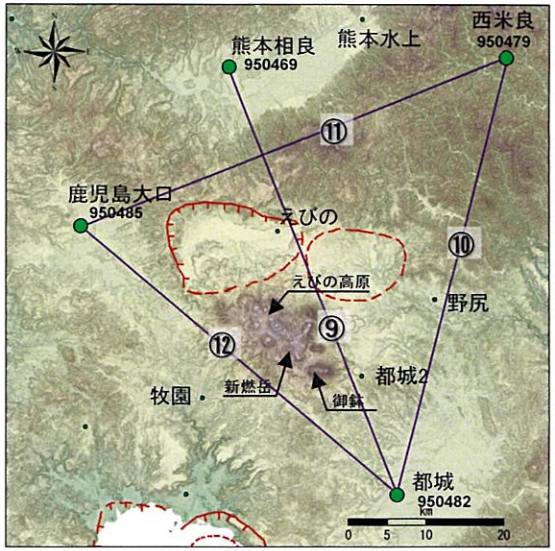
● 国土地理院のGNSS観測点

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

基線⑤～⑧の時系列変化

4. 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］





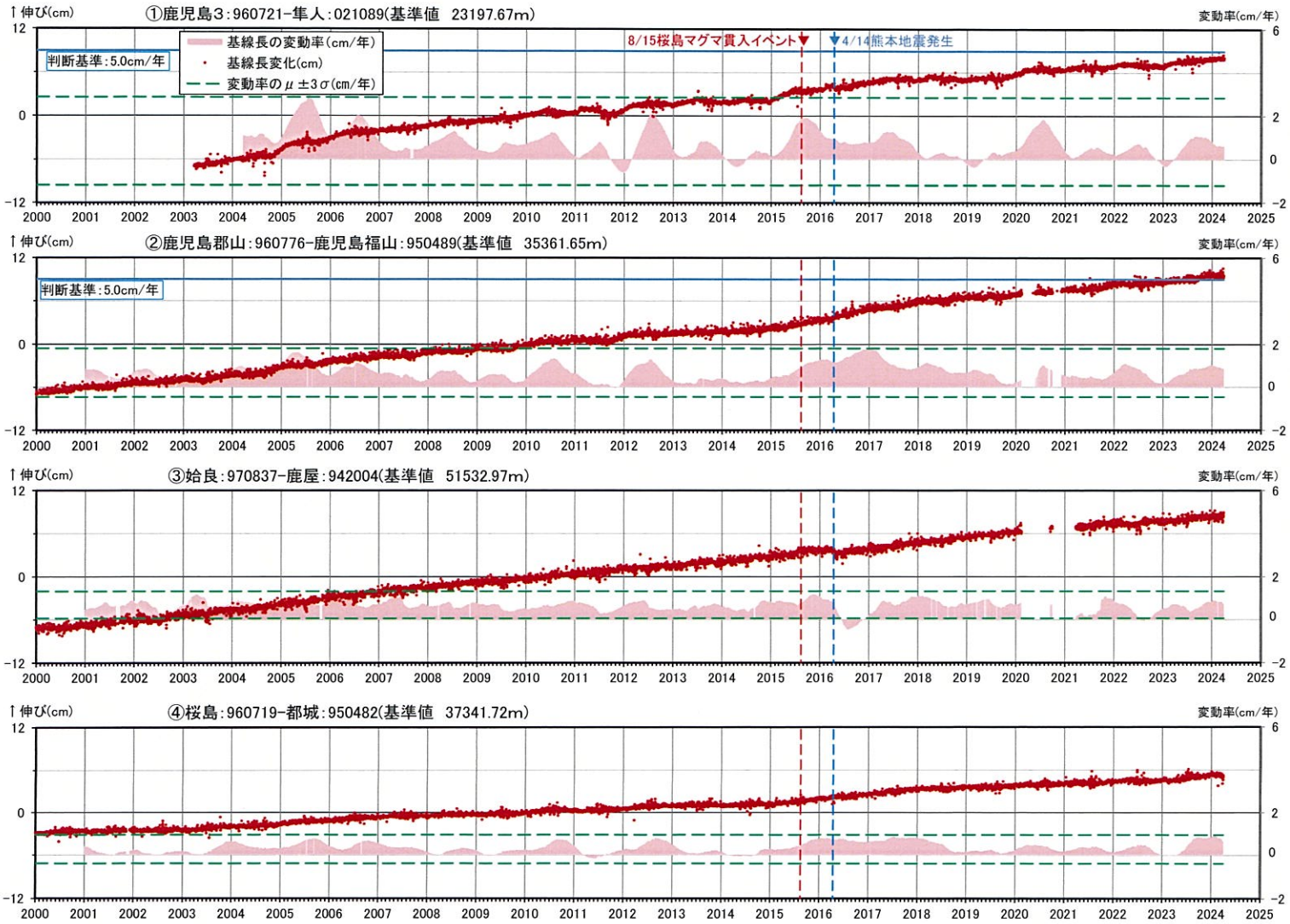
● 国土地理院のGNSS観測点

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

基線⑨～⑫の時系列変化

4. 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］

・2023年度の姶良カルデラの基線⑦（鹿屋-都城2）においては基線長変動率が－3σ をわずかに下回っており、また、基線⑰（都城-鹿児島郡山）においては＋3σを上回っているが、「都城2」や「都城」の6月末～7月初めの豪雨や季節変動の影響と考えられる。

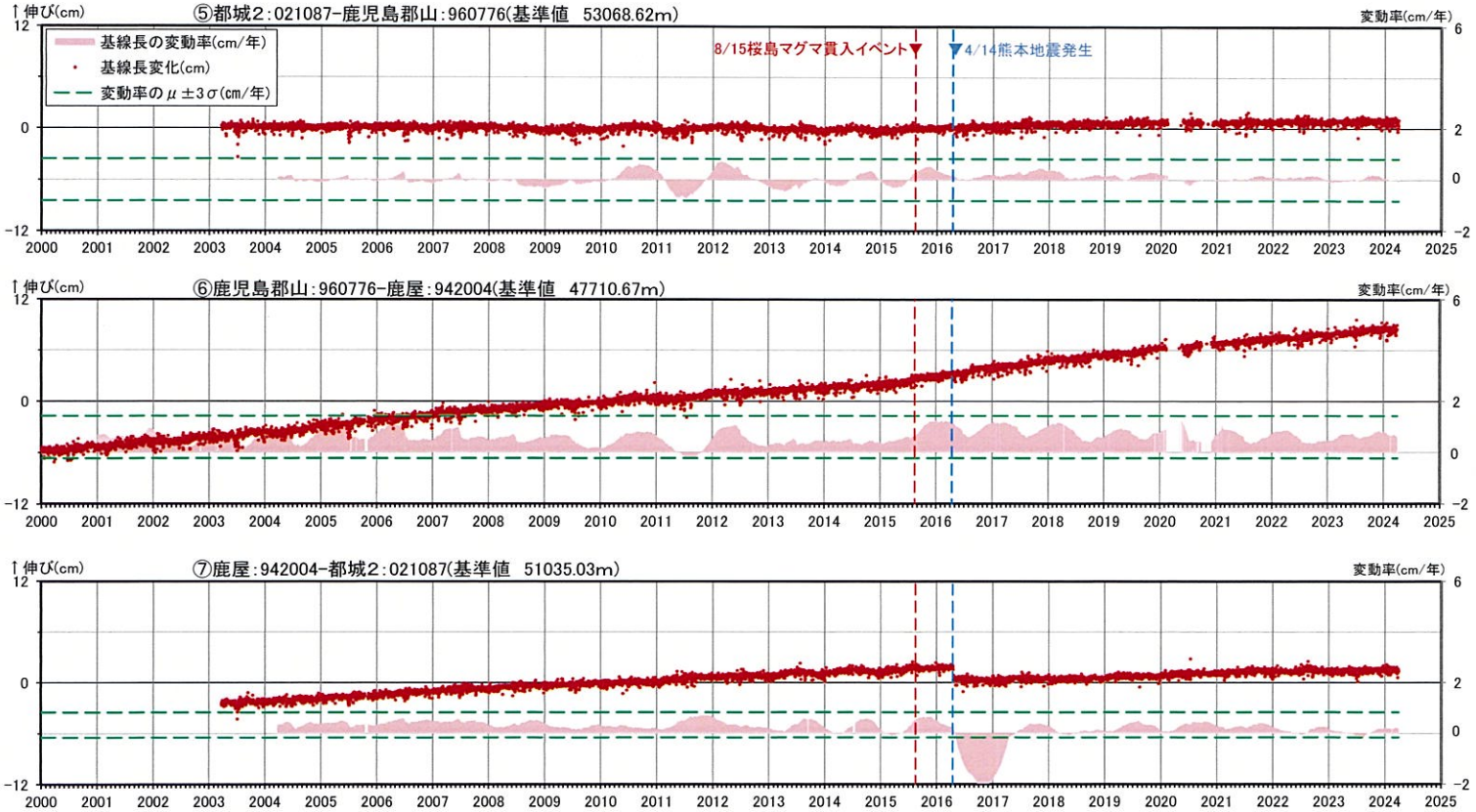


基線①～④の時系列変化

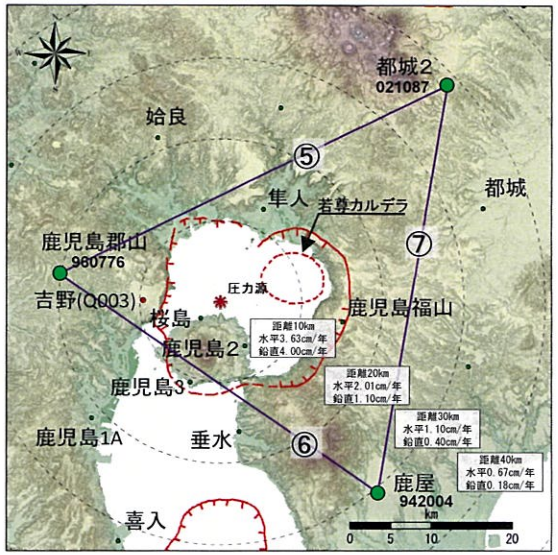
● 国土地理院のGNSS観測点
● 九州電力のGNSS観測点

※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　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、国土地理院のF5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、熊本地震発生以前（算出開始日～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2023年度以前（算出開始日～2023.3.31）の変動率の平均をμ、標準偏差をσとした
※6　赤色の▼は桜島の活動に関する公表された主なイベント

4. 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］



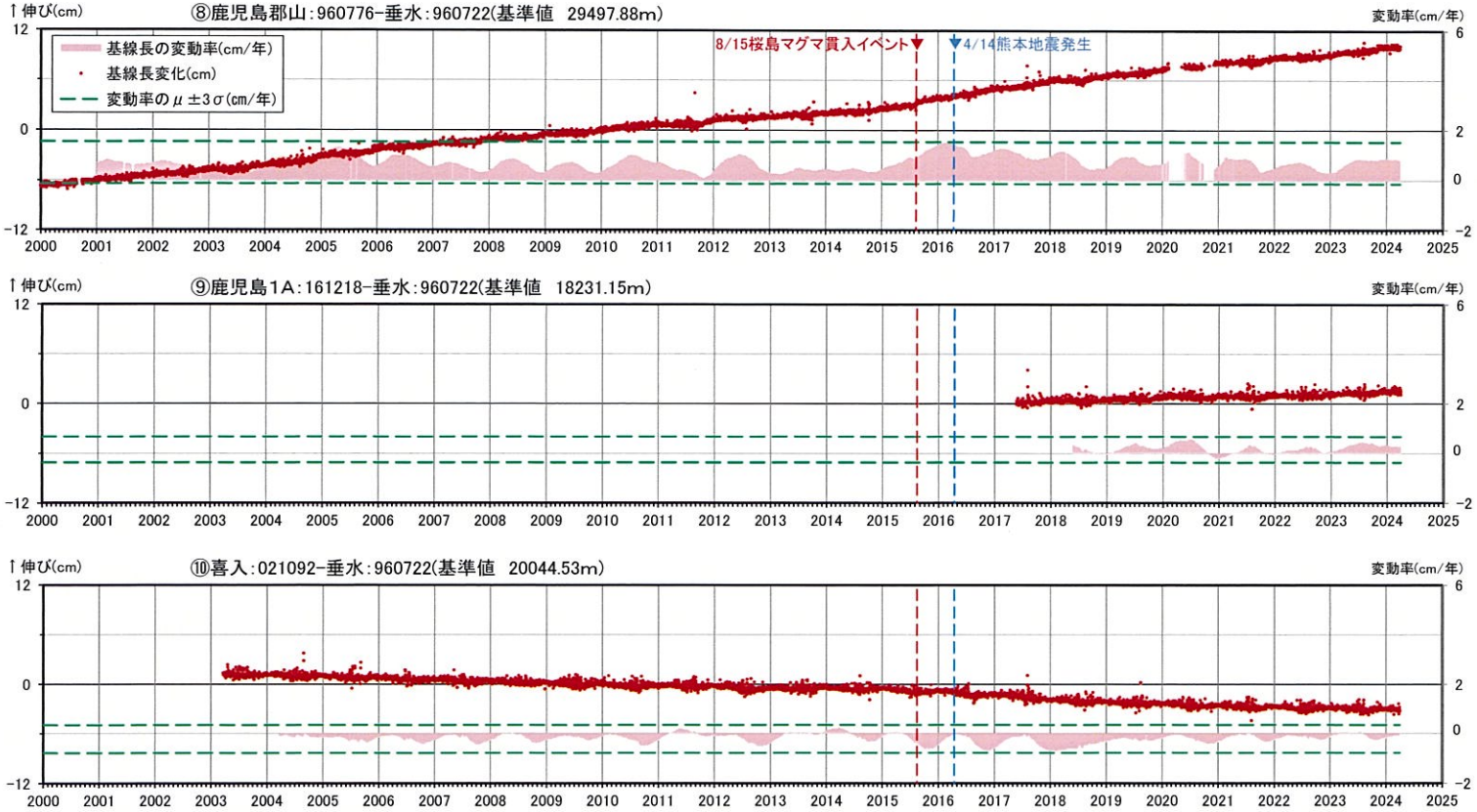
基線⑤～⑦の時系列変化



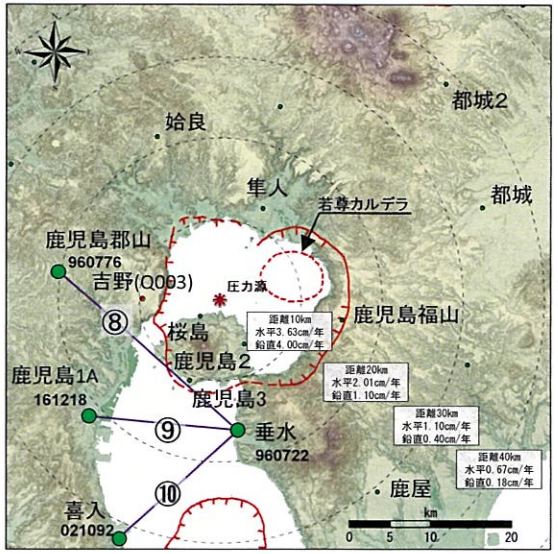
● 国土地理院のGNSS観測点
● 九州電力のGNSS観測点

※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　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、国土地理院のF5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、熊本地震発生以前(算出開始日～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2023年度以前(算出開始日～2023.3.31)の変動率の平均をμ、標準偏差をσとした
※6　赤色の▼は桜島の活動に関する公表された主なイベント

4. 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］



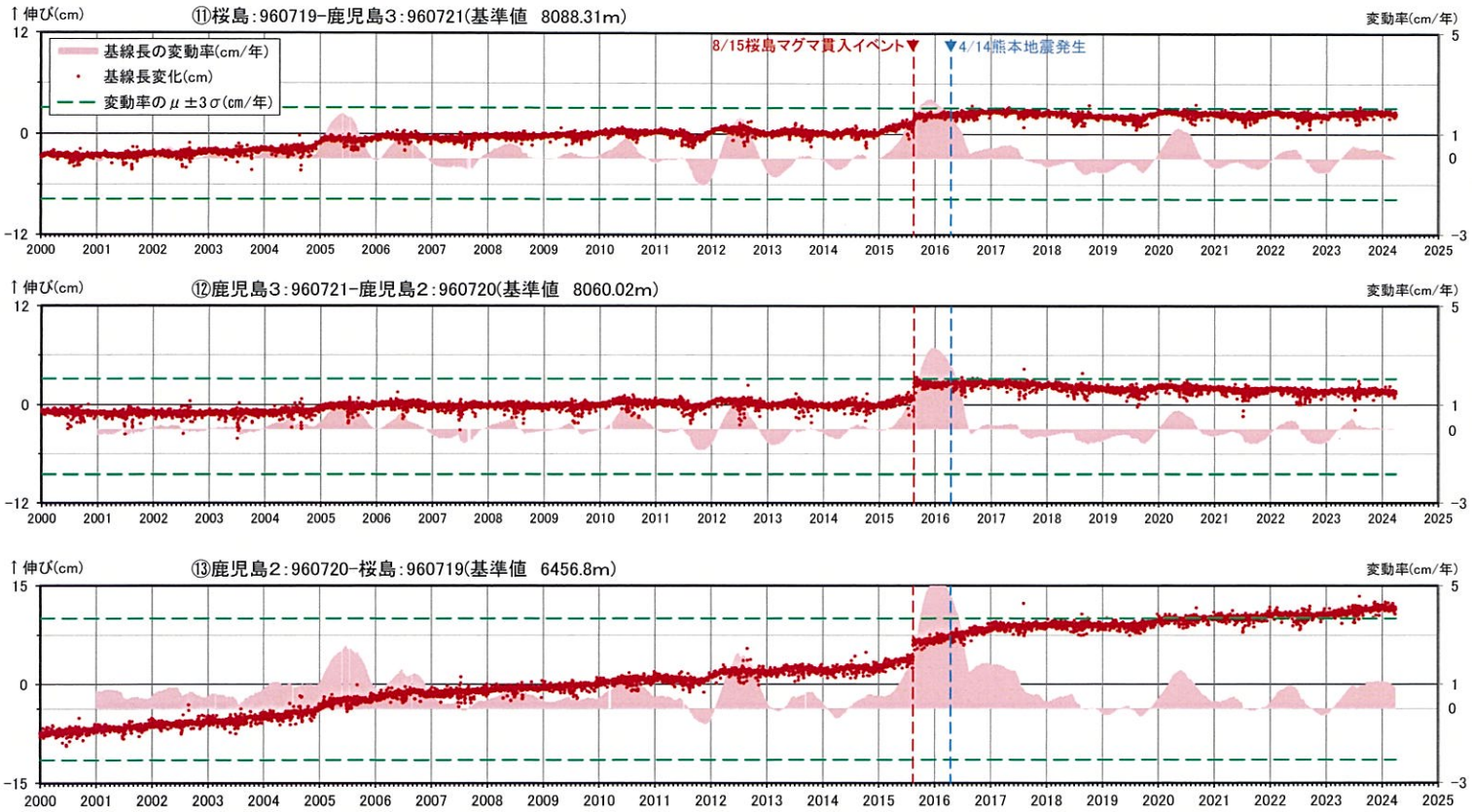
基線⑧～⑩の時系列変化



● 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。基線⑨は2017年5月24日を基準日としている。
※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、国土地理院のF5解析から頻繁に除外されている
※4　2023年度以前（算出開始日～2023.3.31）の変動率の平均をμ、標準偏差をσとした
※5　赤色の▼は桜島の活動に関する公表された主なイベント

4. 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］

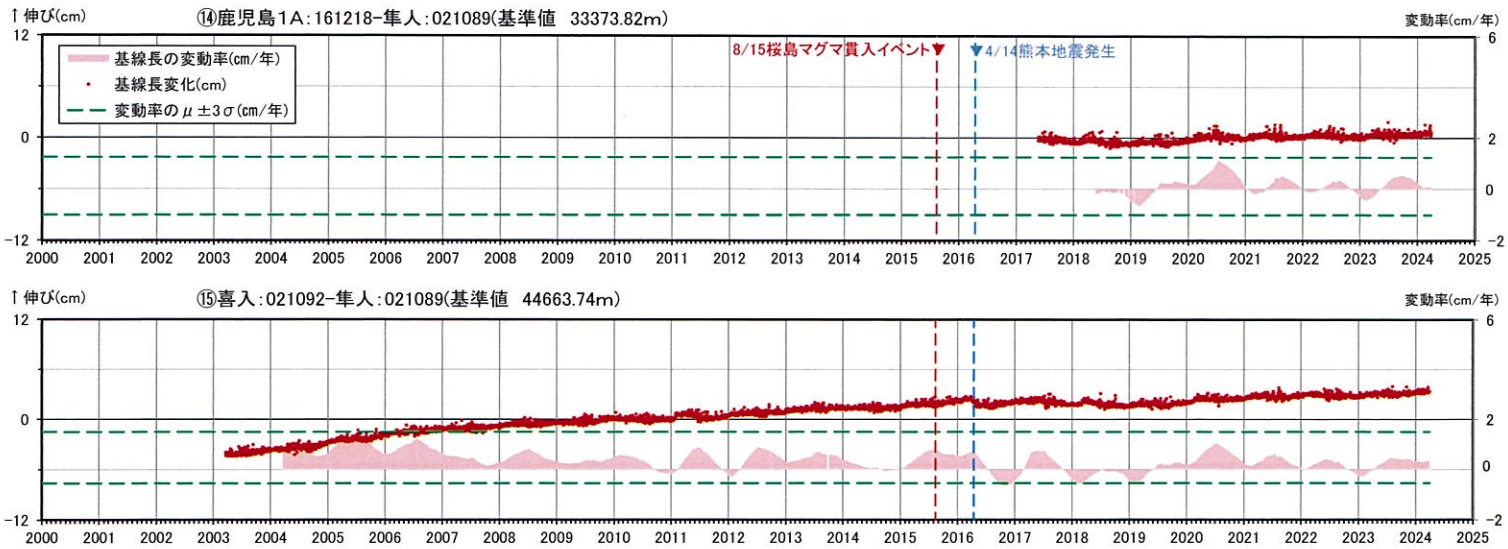


基線⑪～⑬の時系列変化

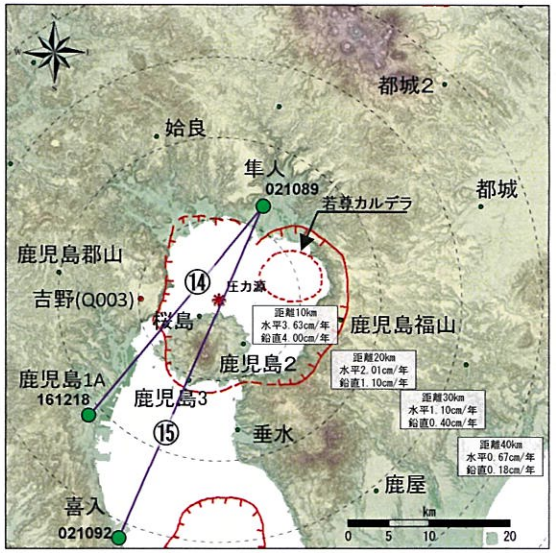
● 国土地理院のGNSS観測点
● 九州電力のGNSS観測点

※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 2023年度以前（算出開始日～2023.3.31）の変動率の平均をμ、標準偏差をσとした
※4 赤色の▼は桜島の活動に関する公表された主なイベント

4. 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］



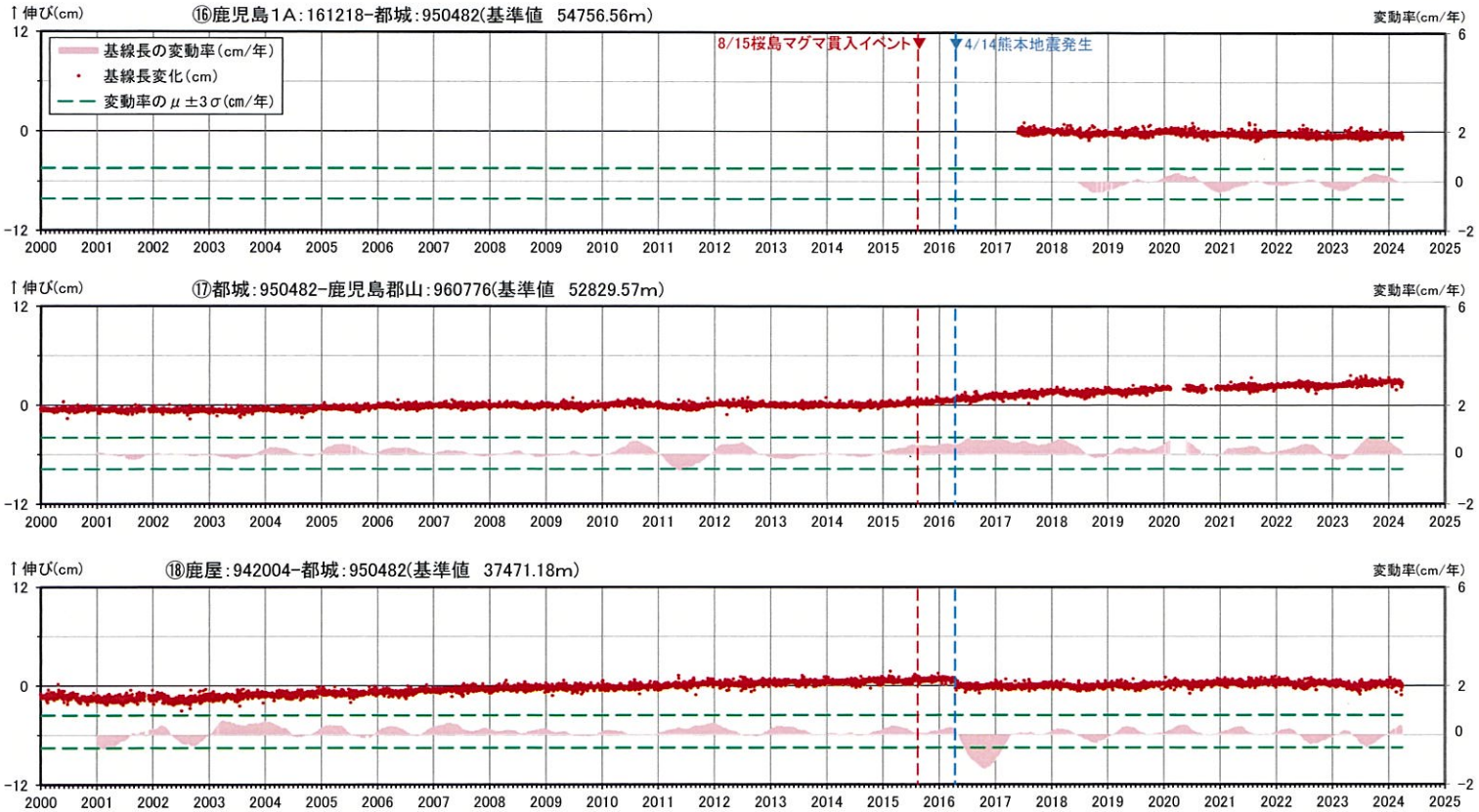
基線⑭、⑮の時系列変化



● 国土地理院のGNSS観測点
● 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。基線⑭は2017年5月24日を基準日としている。
※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⑭では観測開始から2023年度以前（算出開始日～2023.3.31）の変動率の平均をμ、標準偏差をσとした
※4　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、熊本地震発生以前（算出開始日～2015.12.31）の変動率の平均をμ、標準偏差をσとした
※5　赤色の▼は桜島の活動に関する公表された主なイベント

4. 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］

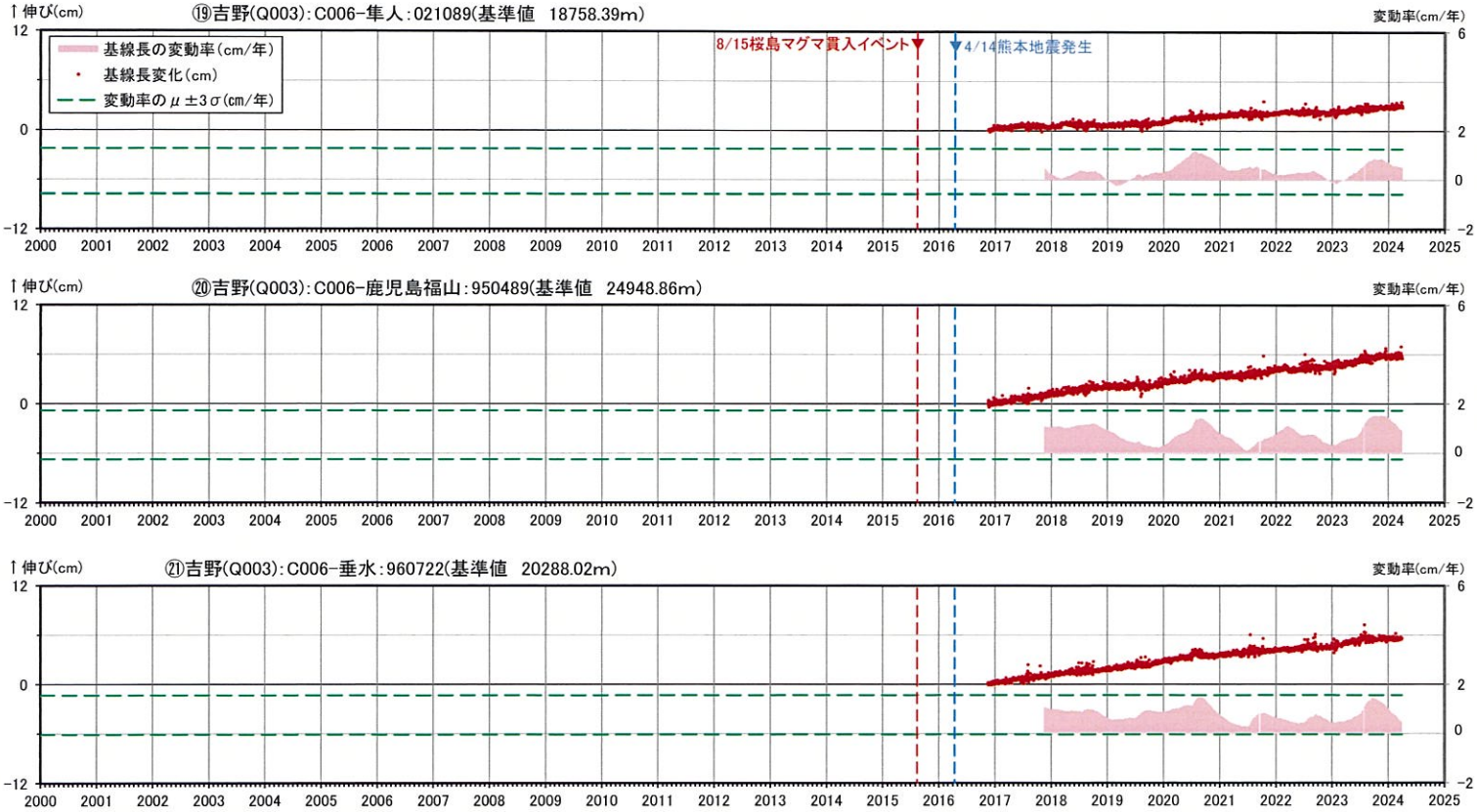


基線⑯〜⑱の時系列変化

● 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。基線⑯は2017年5月24日を基準日としている。
※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⑯では観測開始から2023年度以前（算出開始日〜2023.3.31）の変動率の平均をμ、標準偏差をσとした
※4　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、熊本地震発生以前（算出開始日〜2015.12.31）の変動率の平均をμ、標準偏差をσとした
※5　赤色の▼は桜島の活動に関する公表された主なイベント

4. 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］

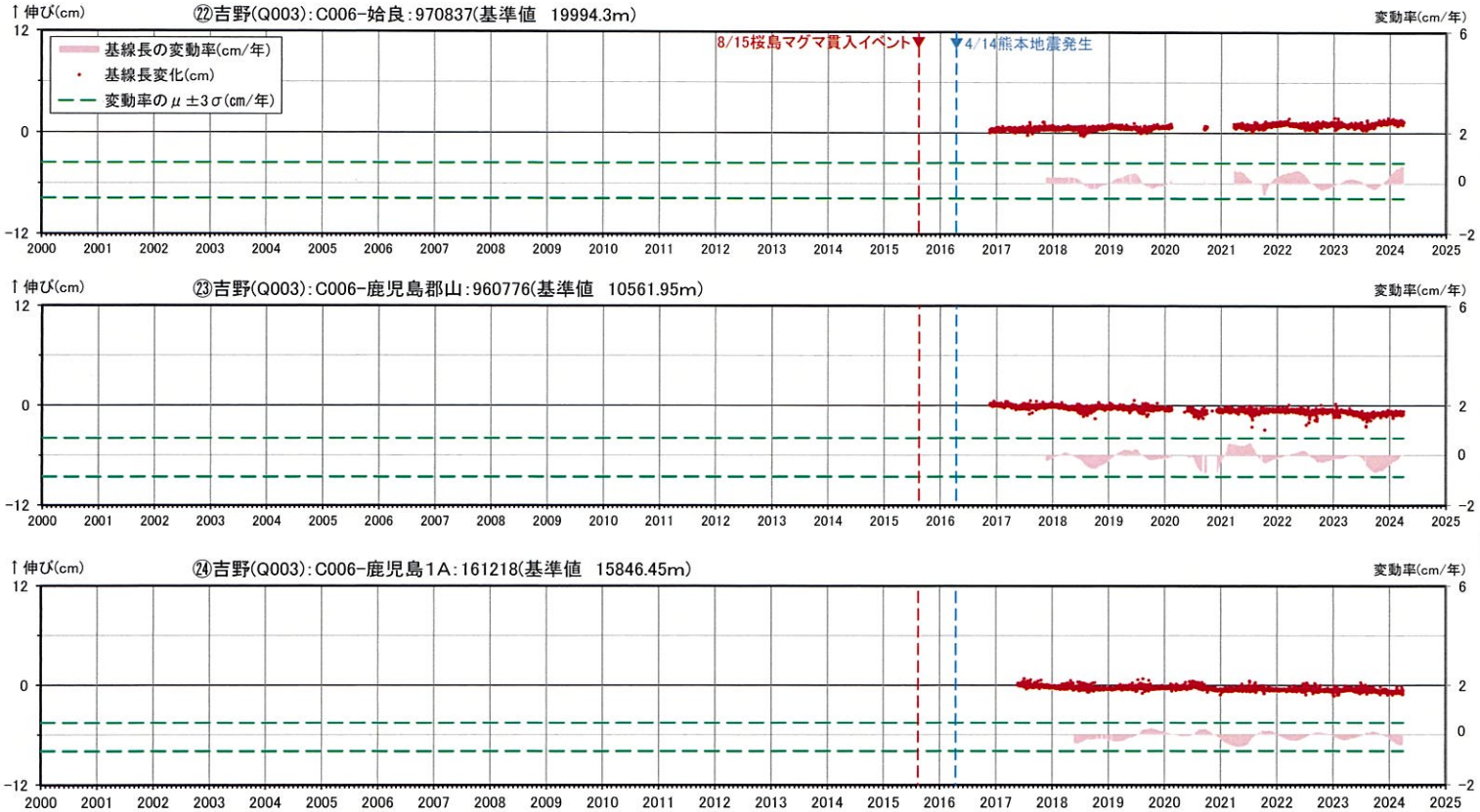


● 国土地理院のGNSS観測点
● 九州電力のGNSS観測点

※1　2016年11月17日を基準値とし、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　2023年度以前(算出開始日～2023.3.31)の変動率の平均をμ、標準偏差をσとした
※4　赤色の▼は桜島の活動に関する公表された主なイベント

基線⑲～㉑の時系列変化

4. 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］



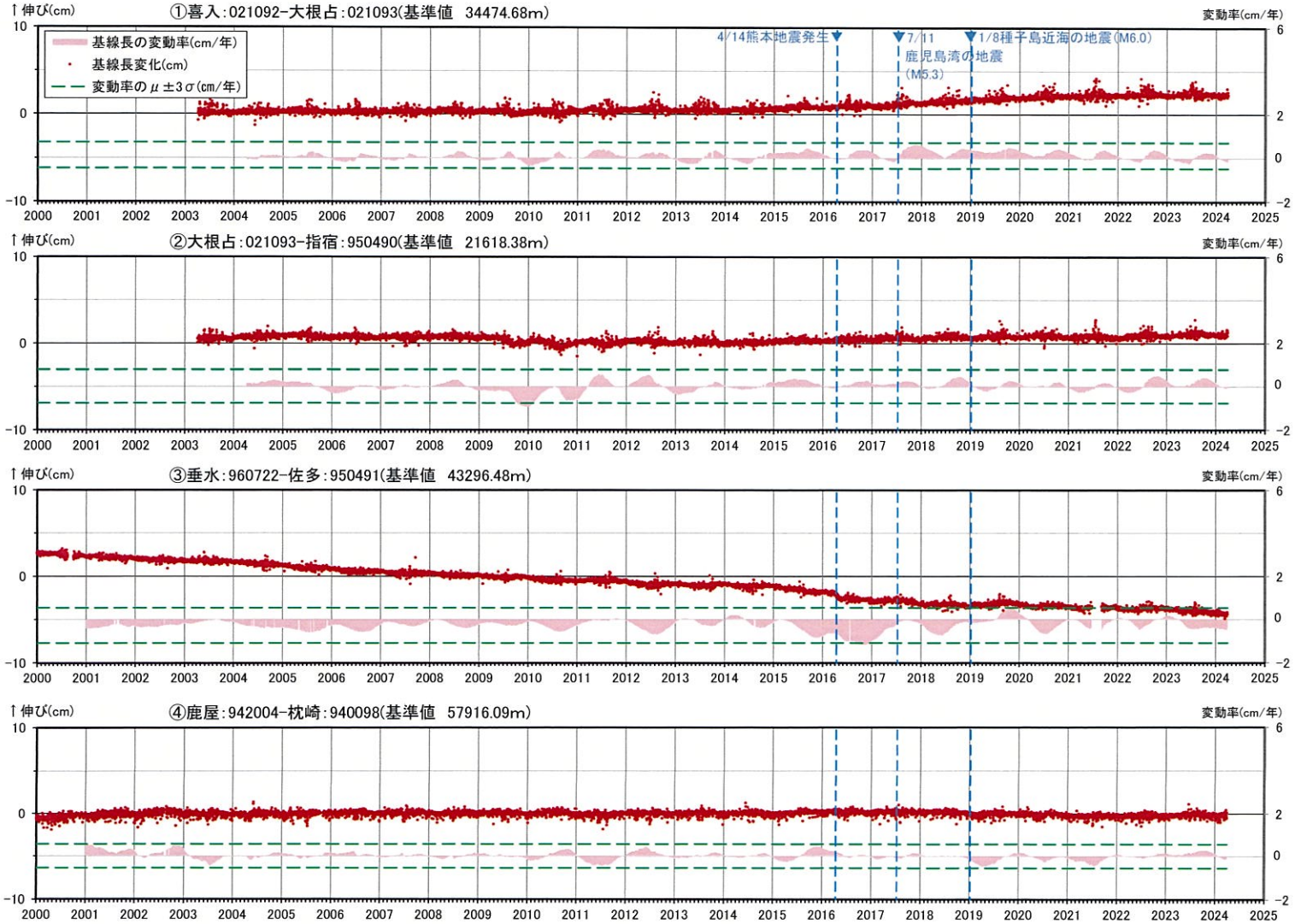
基線㉒～㉔の時系列変化

● 国土地理院のGNSS観測点
● 九州電力のGNSS観測点

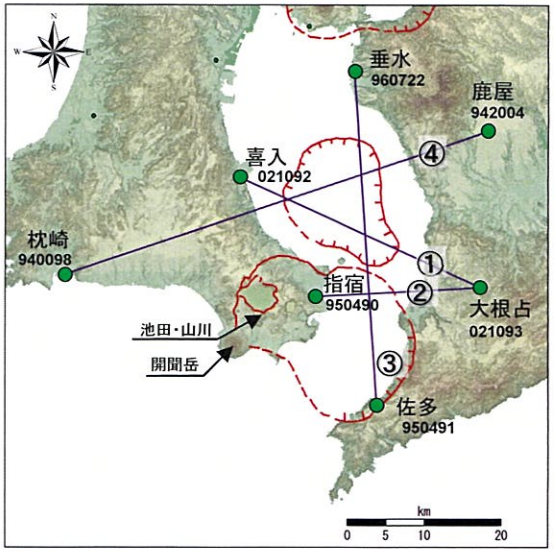
※1 2016年11月17日を基準値とし、基準値からの変化量を表示。基線㉔は2017年5月24日を基準日としている。
※2 変動率は過去1年間のデータを用いて求めた近似式により算出
※3 960776（鹿児島郡山）と970837（姶良）は周辺樹木等の影響によりデータ品質が悪いため、国土地理院のF5解析から頻繁に除外されている
※4 2023年度以前（算出開始日～2023.3.31）の変動率の平均をμ、標準偏差をσとした
※5 赤色の▼は桜島の活動に関する公表された主なイベント

4. 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］

・2023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。



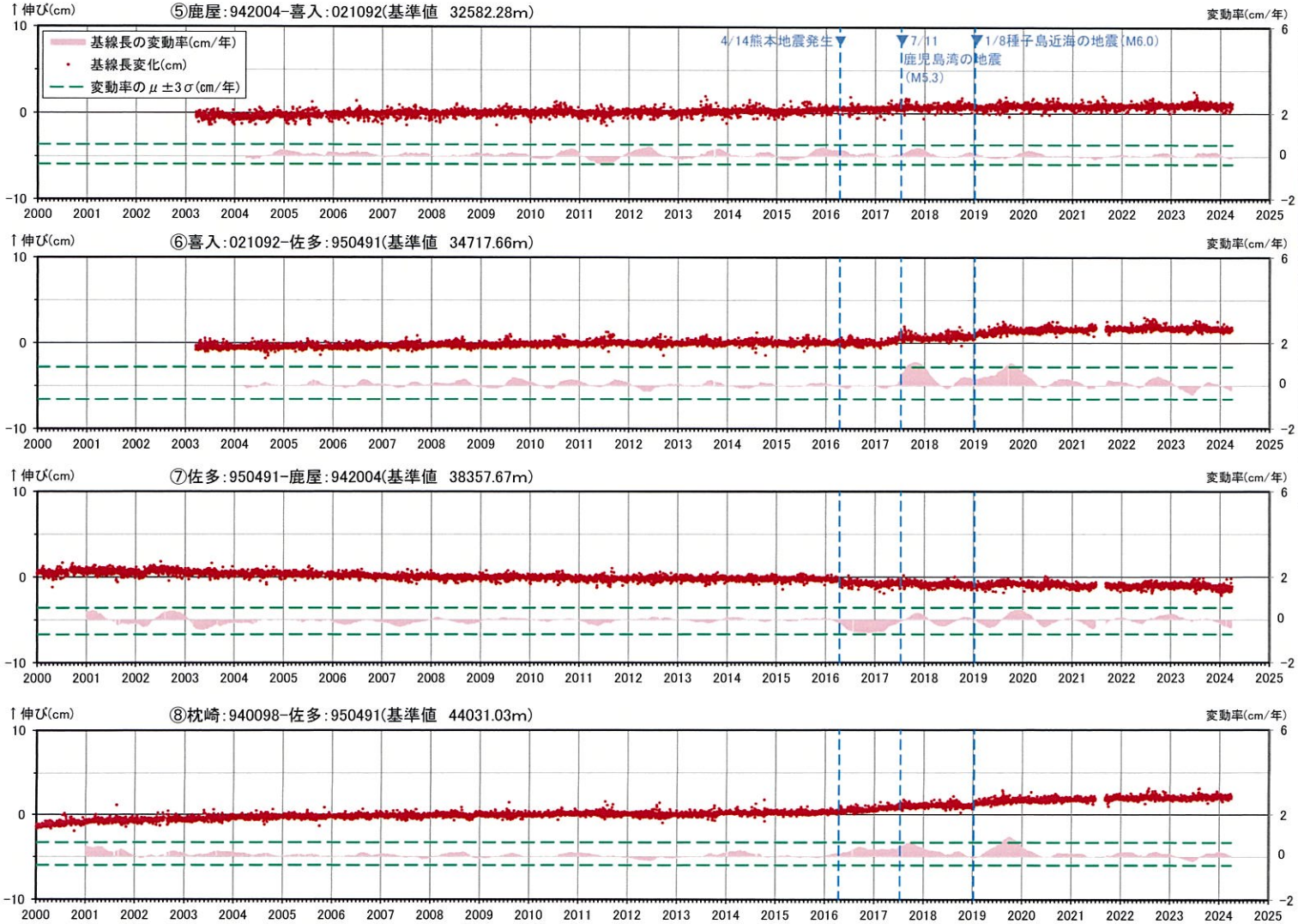
基線①～④の時系列変化



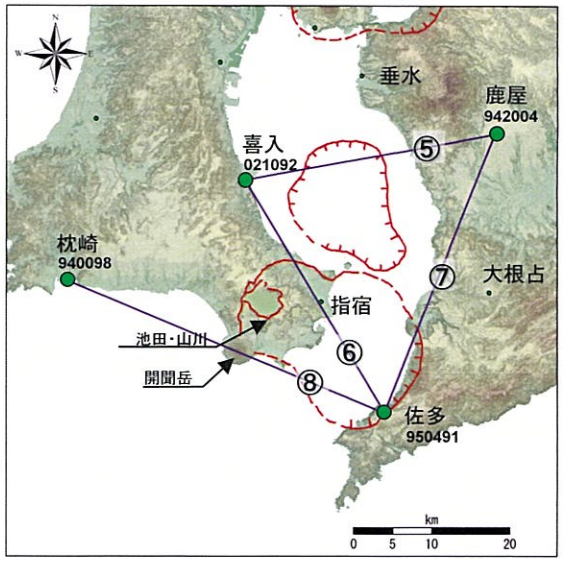
● 国土地理院のGNSS観測点

※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　2023年度以前（算出開始日～2023.3.31）の変動率の平均をμ、標準偏差をσとした
※4　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. 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］



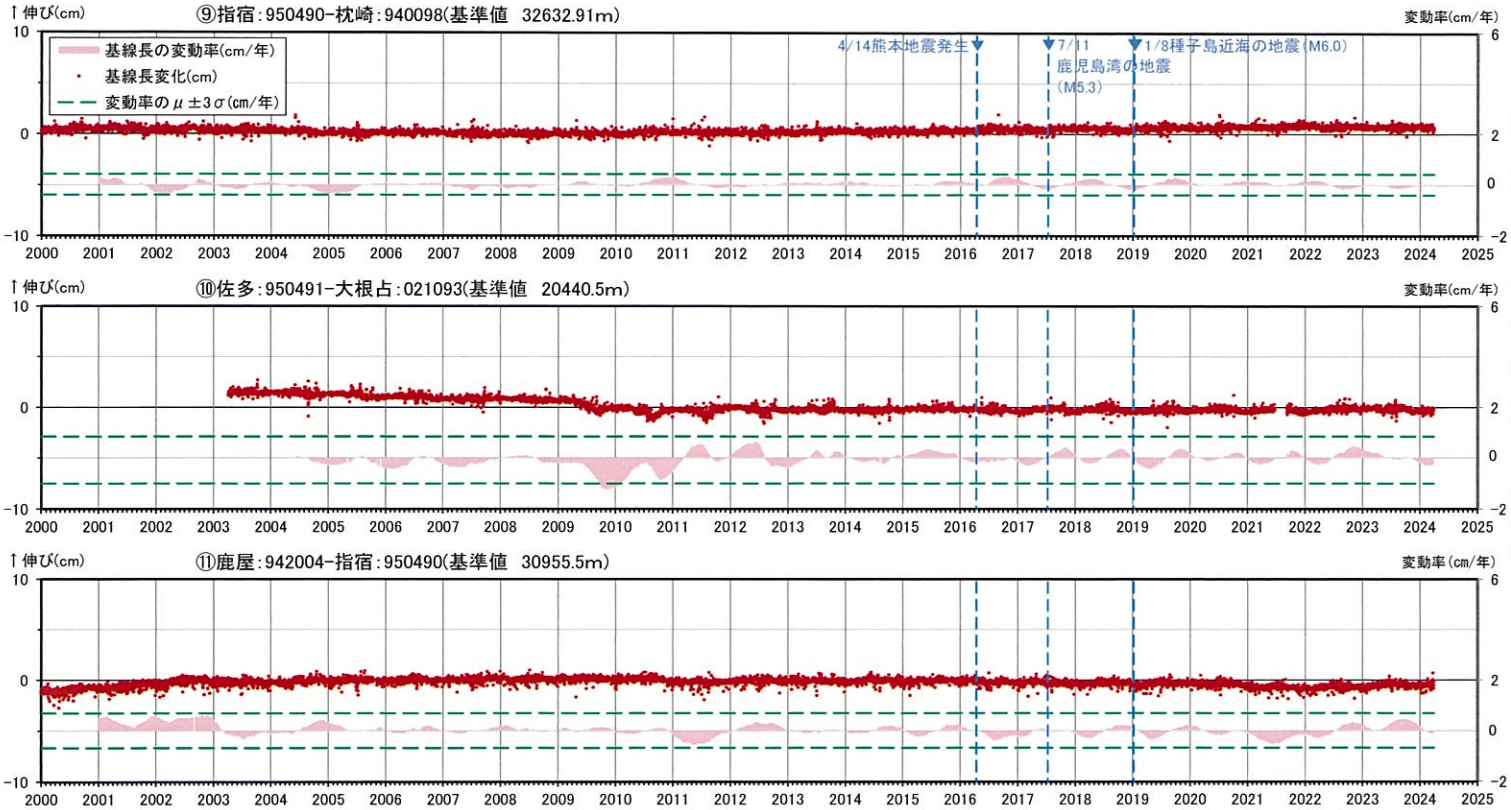
基線⑤〜⑧の時系列変化

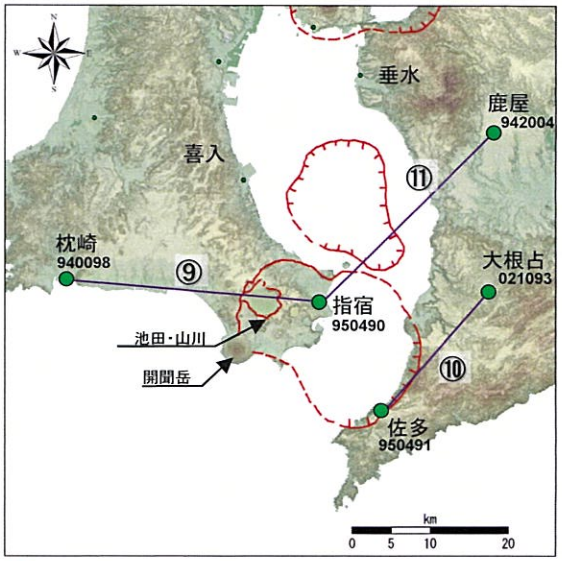


● 国土地理院のGNSS観測点

※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　2023年度以前（算出開始日〜2023.3.31）の変動率の平均をμ、標準偏差をσとした
※4　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. 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］





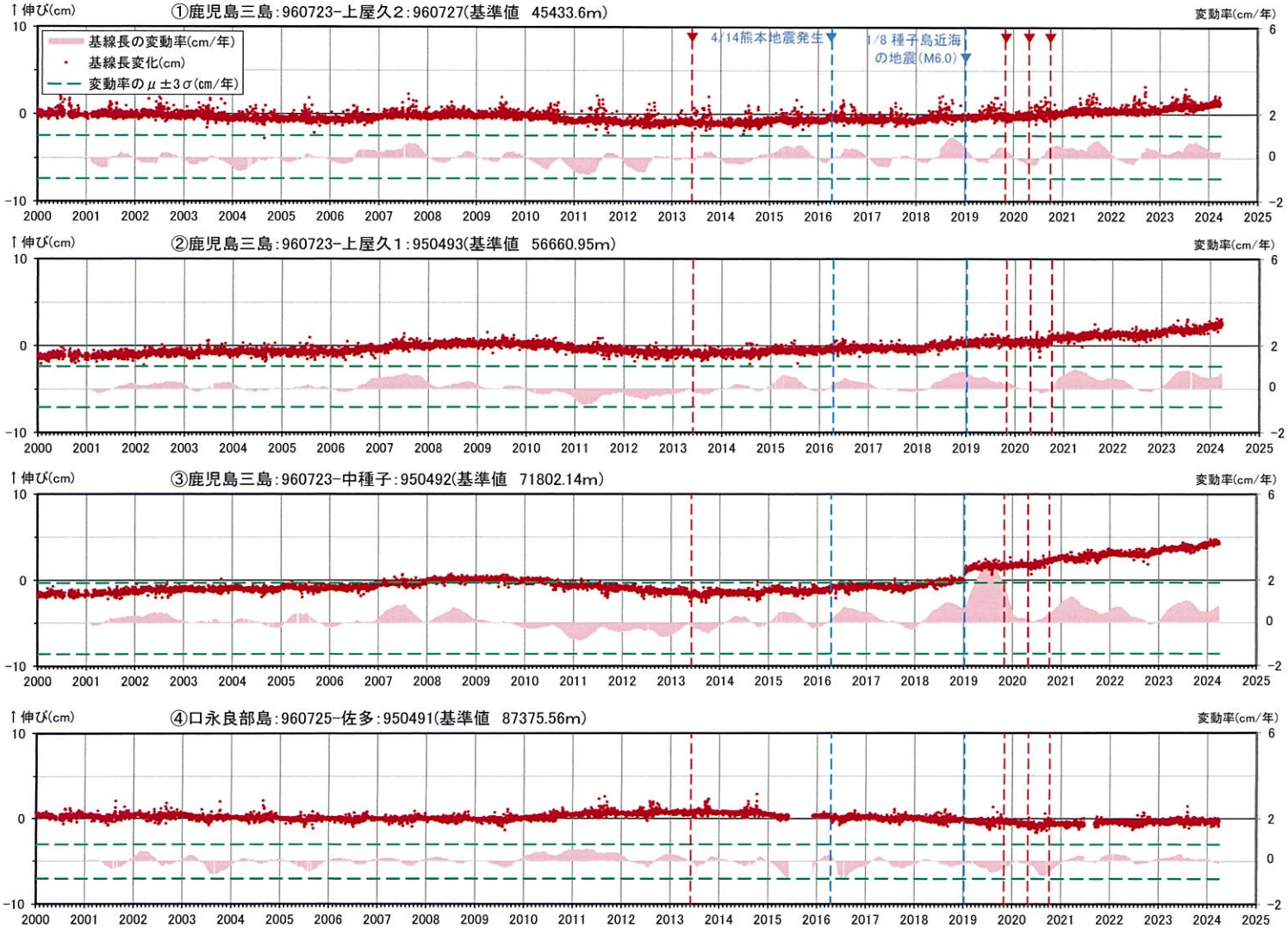
● 国土地理院のGNSS観測点

※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　2023年度以前（算出開始日～2023.3.31）の変動率の平均をμ、標準偏差をσとした
※4　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

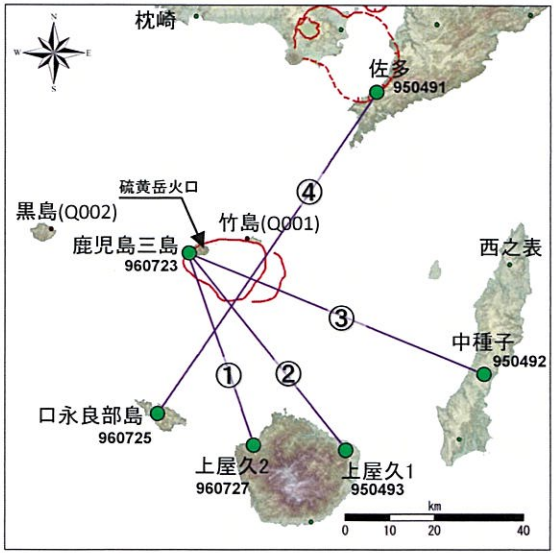
基線⑨～⑪の時系列変化

4. 統計的整理に基づく評価　鬼界［地殻変動：基線長変化］

・2023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。



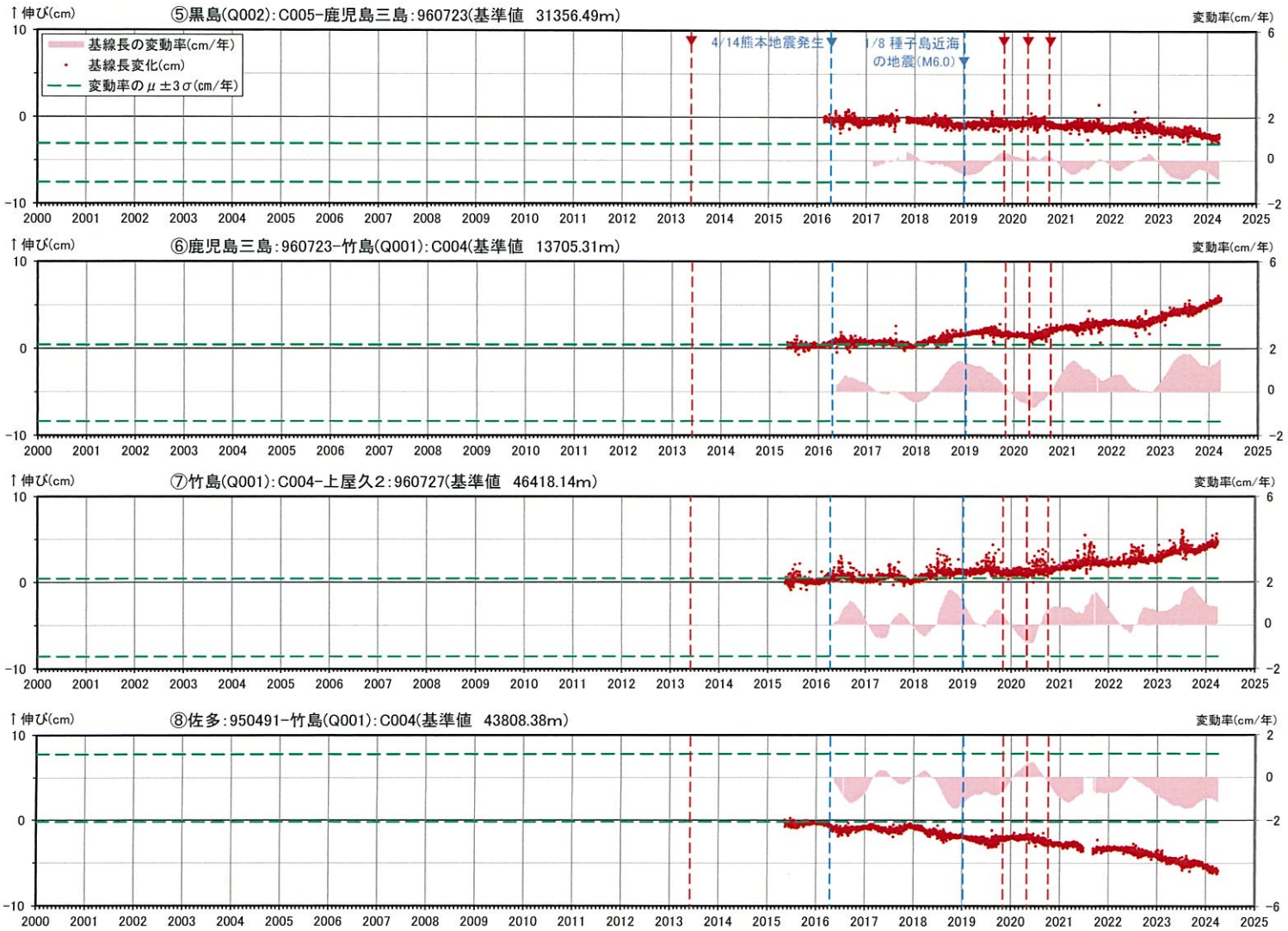
基線①～④の時系列変化

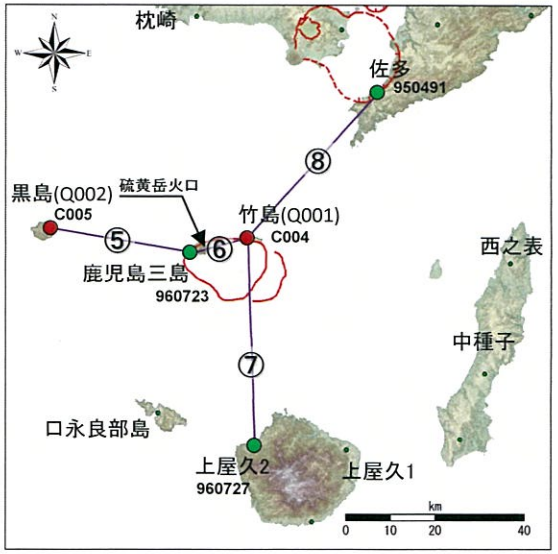


● 国土地理院のGNSS観測点
● 九州電力のGNSS観測点

※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 2023年度以前（算出開始日～2023.3.31）の変動率の平均をμ、標準偏差をσ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日以降欠測、停電が解消した12月2日から観測を再開
※5 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
※6 赤色の▼は薩摩硫黄島の主な噴火

4. 統計的整理に基づく評価　鬼界［地殻変動：基線長変化］



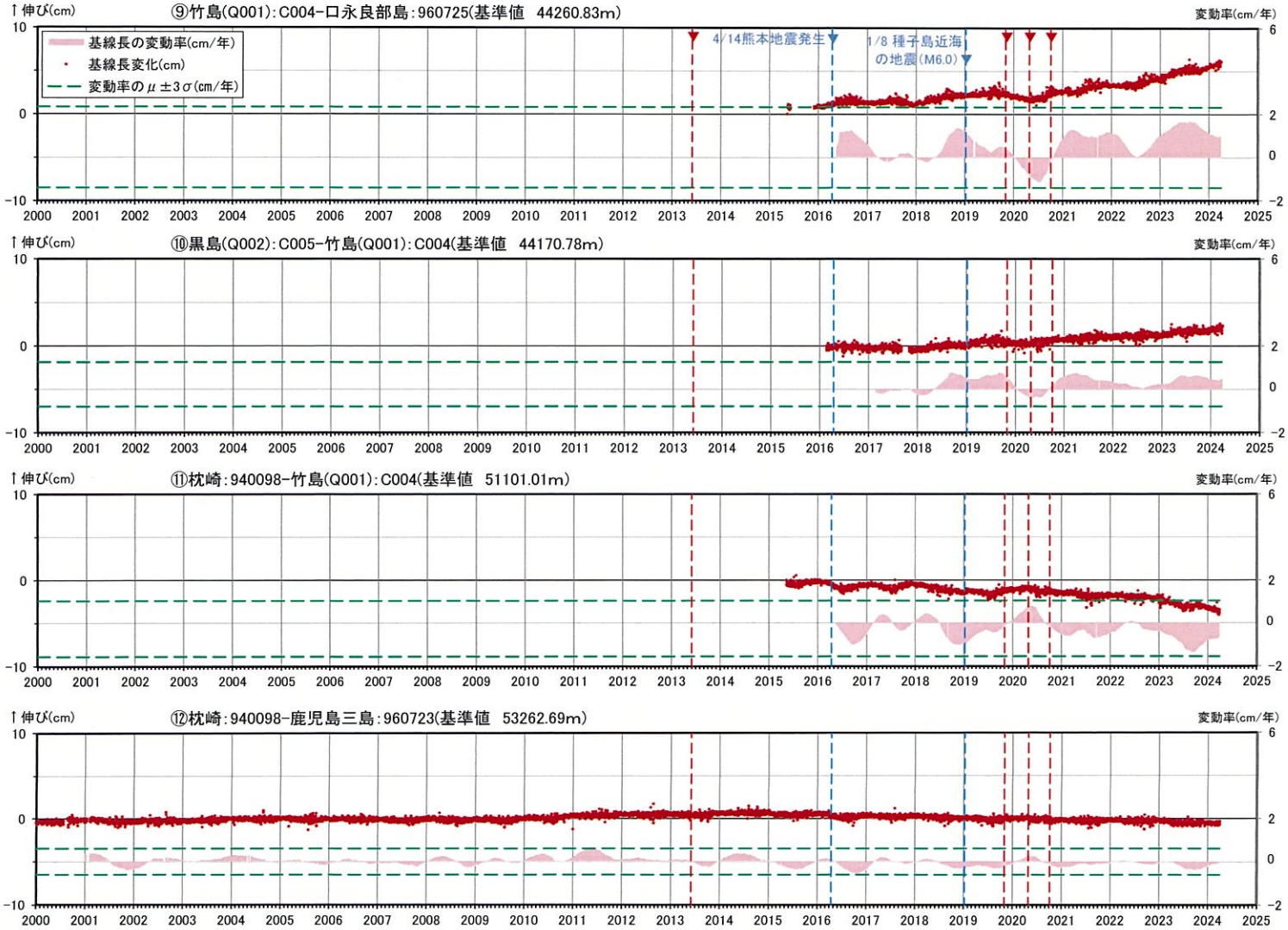


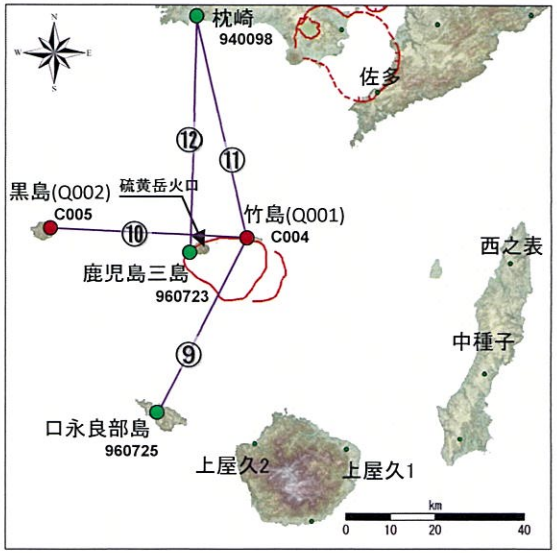
● 国土地理院のGNSS観測点
● 九州電力のGNSS観測点

※1 基線⑤は 2016年2月22日の基線長を基線⑥～⑧は2015年5月14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 2023年度以前（算出開始日～2023.3.31）の変動率の平均をμ、標準偏差をσとした
※4 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
※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

基線⑤～⑧の時系列変化

4. 統計的整理に基づく評価　鬼界［地殻変動：基線長変化］



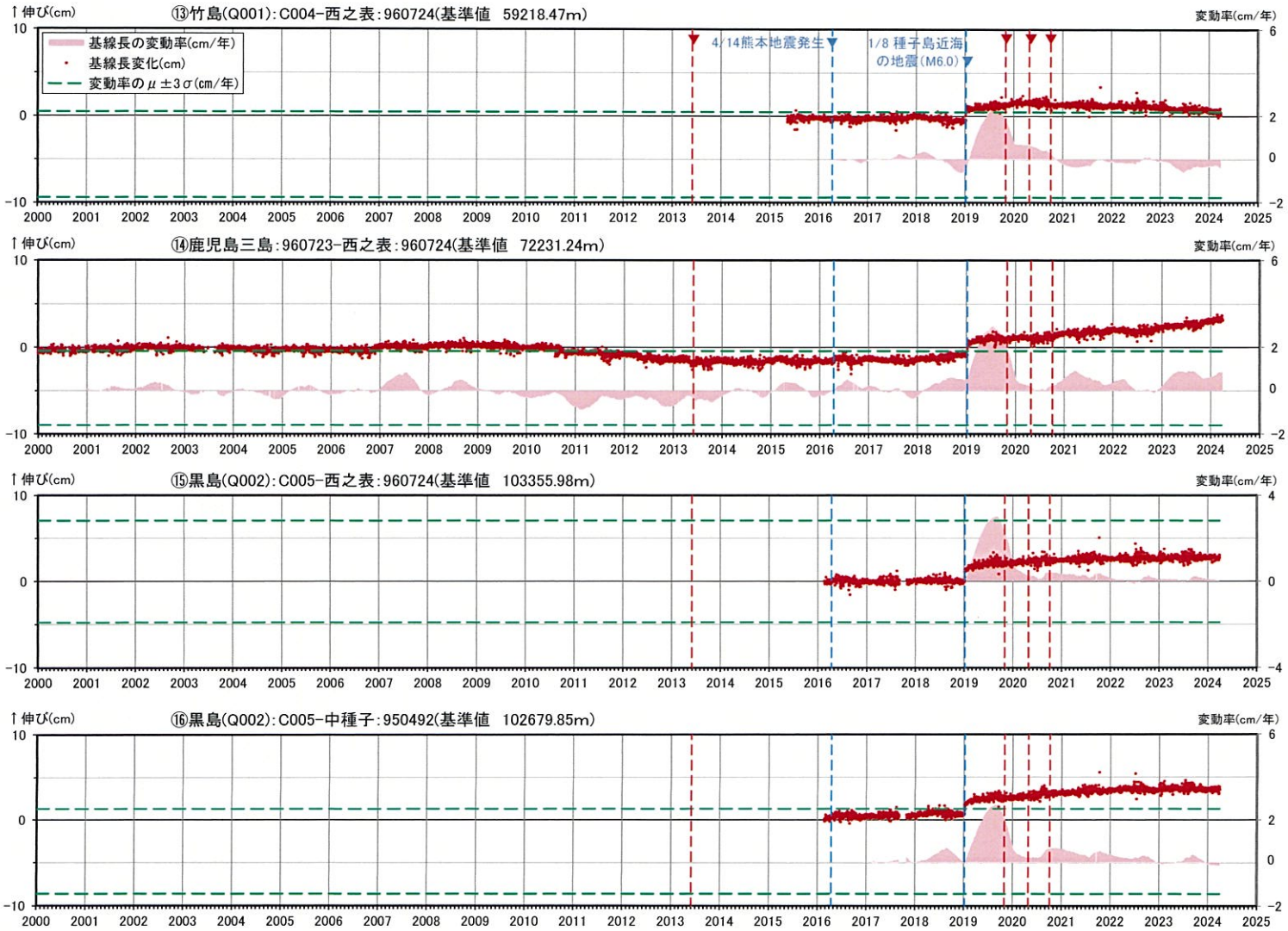


● 国土地理院のGNSS観測点
● 九州電力のGNSS観測点

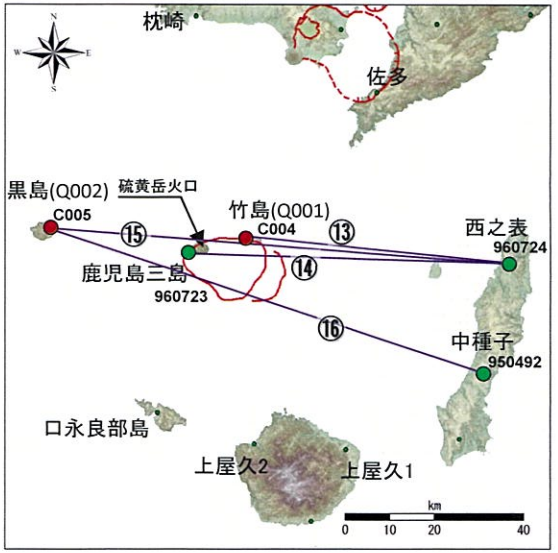
※1 基線⑨、⑪は2015年5月14日の基線長を、基線⑩は2016年2月22日の基線長を、基線⑫は2010年1月1日の基線長を基準値とし、基準値からの変化量を表示
※2 変動率は過去1年間のデータを用いて求めた近似式により算出
※3 2023年度以前(算出開始日～2023.3.31)の変動率の平均をμ、標準偏差をσとした
※4 口永良部島地点については、2015年5月29日の噴火の影響で停電が発生したことで、6月7日以降欠測、停電が解消した12月2日から観測を再開
※5 黒島(Q002)は2017年9月6日～10月31日までデータが取得できていない
※6 赤色の▼は薩摩硫黄島の主な噴火

基線⑨～⑫の時系列変化

4. 統計的整理に基づく評価　鬼界［地殻変動：基線長変化］



基線⑬～⑯の時系列変化



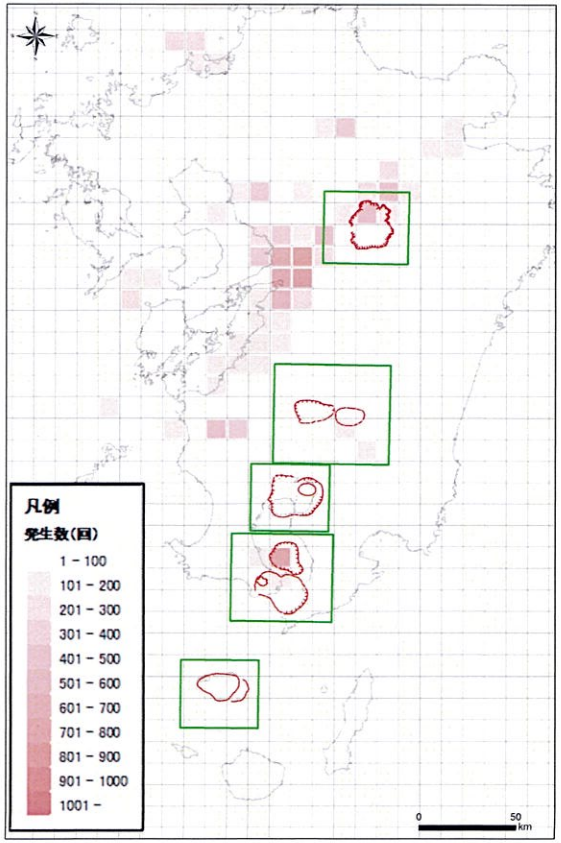
● 国土地理院のGNSS観測点
● 九州電力のGNSS観測点

※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 2023年度以前（算出開始日～2023.3.31）の変動率の平均をμ、標準偏差をσ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

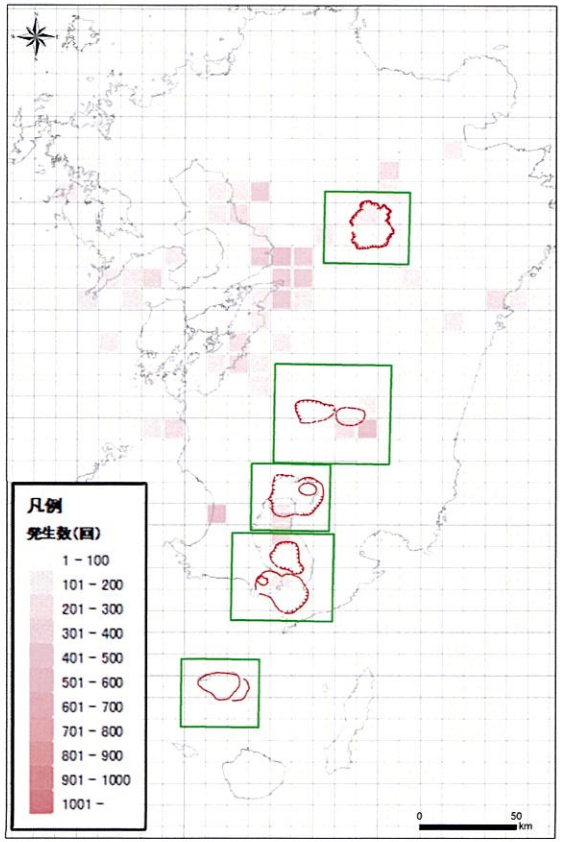
余　　白

4. 統計的整理に基づく評価[地震活動：地震発生数]

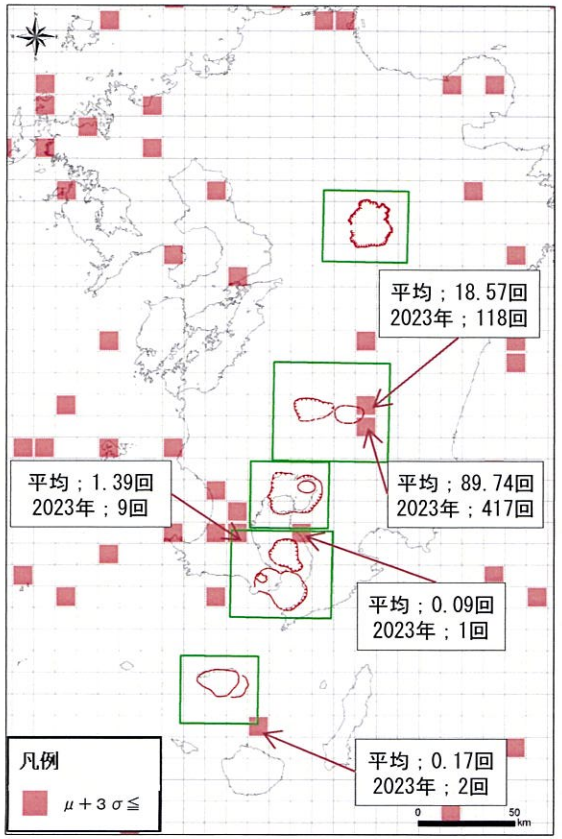
- 地震活動について、グリッド毎の地震発生数とエネルギーの「平均（μ）＋３σ」と、2023年の観測結果との比較を行った。
- 2023年の各カルデラの評価範囲において地震発生数が＋３σを超えるグリッドのうち、小林カルデラ外北東部（年間118回）、小林カルデラ外南東部（年間417回）については、今後の地震活動に留意していく。
- その他の地震発生数が＋３σを超えるグリッドについては、平均（μ）の値が小さいことが原因と考えられ、2023年の地震発生数も年間10回以下と少ない。



2000～2022年
平均地震数（通常地震）



2023年
地震数（通常地震）

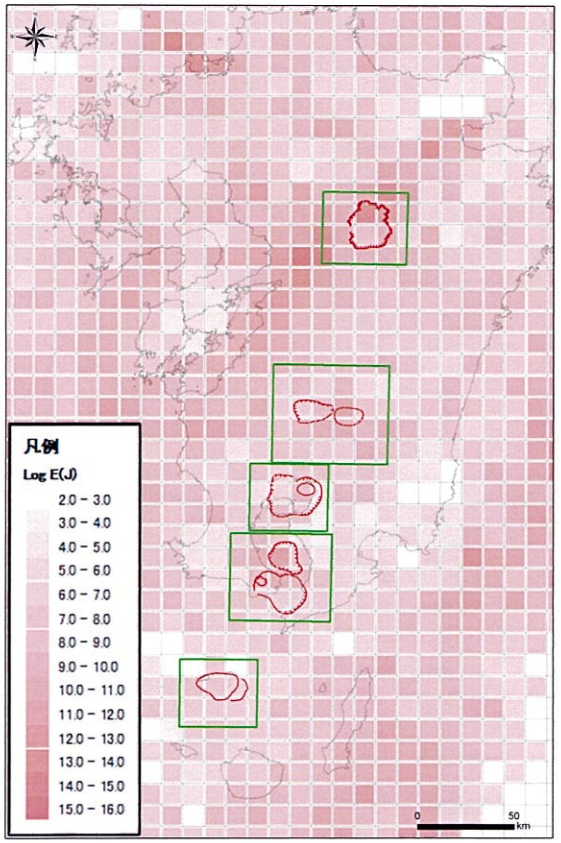


2000～2022年平均地震数（通常地震）と
2023年地震数（通常地震）の比較

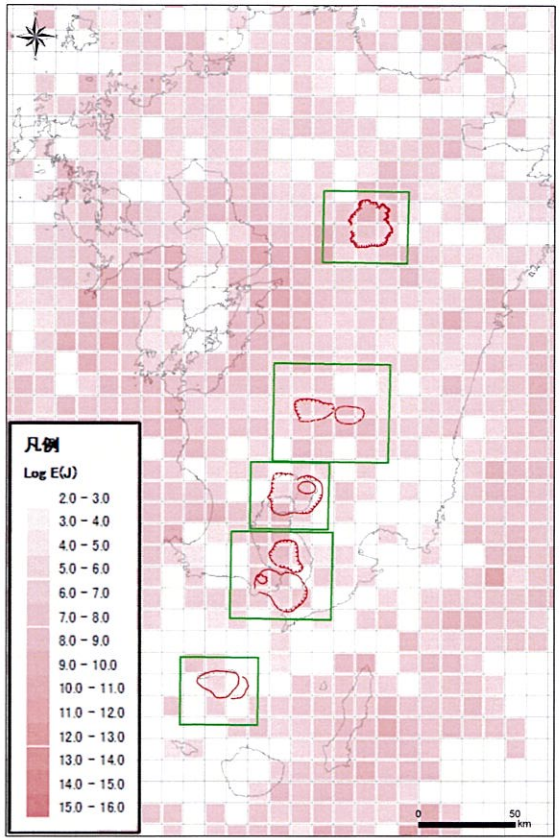
※1　グリッド毎に震源データを抽出し、各年のグリッド毎の総地震数を算出。
※2　グリッドの大きさは緯度・経度それぞれ0.1度（約9km）とする。

4. 統計的整理に基づく評価[地震活動：地震エネルギー]

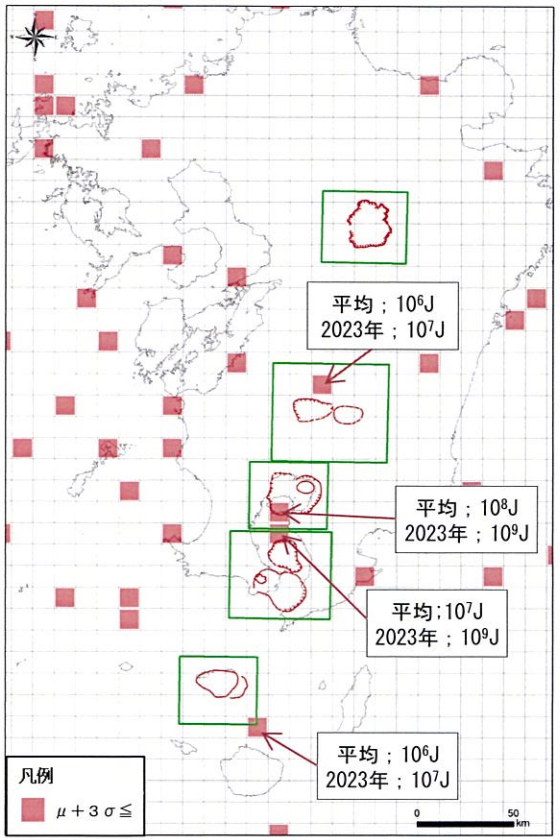
- 地震エネルギーが＋３σを超えるグリッドについては、平均（μ）の値が小さいことが原因と考えられ、2023年の地震エネルギーも年間10^9J以下と小さい。



2000～2022年
平均地震エネルギー（通常地震）



2023年
地震エネルギー（通常地震）



2000～2022年平均地震エネルギー（通常地震）と
2023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）

4. 統計的整理に基づく評価[地震活動:ETASモデルの概要]

- 先行地震による地震発生可能性の高まりの想定に有効な手法として、ETAS(Epidemic-type Aftershock sequence)モデル(Ogata, 1988)が提案されている。
- ETASモデルでは、いかなる地震も多かれ少なかれ付随する余震活動を持つという考えに基づき、時刻t以前に発生した全ての先行地震を考慮し、それらに付随する余震の発生率を算出するとともに、そのような余震の重ね合わせでは説明できない背景的な地震活動の発生率μを加え、時刻tにおける地震発生率$\lambda_\theta(t)$を表現することができる。
- 地震活動の変化が、μ、K、c、α、pの各パラメータの値の変化に反映されるものと考え、ETASモデルを用いて昨年度は過去の長期間のデータと単年データによる計算結果を比較したが、今年度は期間を揃えて計算し、地震活動状況の変化の有無を確認した。

地震発生率

$$\lambda_\theta(t) = \mu + \sum_{t_i<t} Ke^{\alpha(M_i - M_{th})} / (t - t_i + c)^p$$

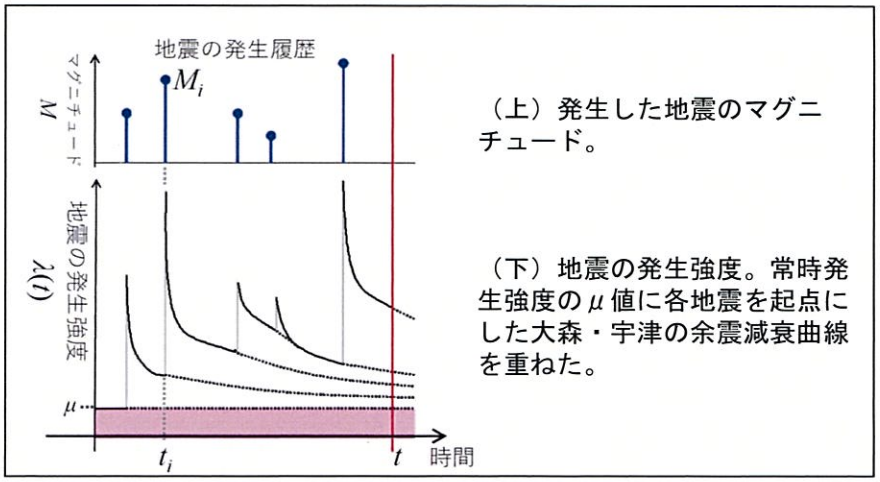
背景的な地震活動の発生率

先行地震の規模による影響の大きさ

時間経過による影響の減衰

時刻t以前に発生した全ての先行地震に付随する余震活動の発生率

$$\theta = (\mu, K, c, \alpha, p)$$



（上）発生した地震のマグニチュード。

（下）地震の発生強度。常時発生強度のμ値に各地震を起点にした大森・宇津の余震減衰曲線を重ねた。

ETASモデルの模式図
（尾形，2019）

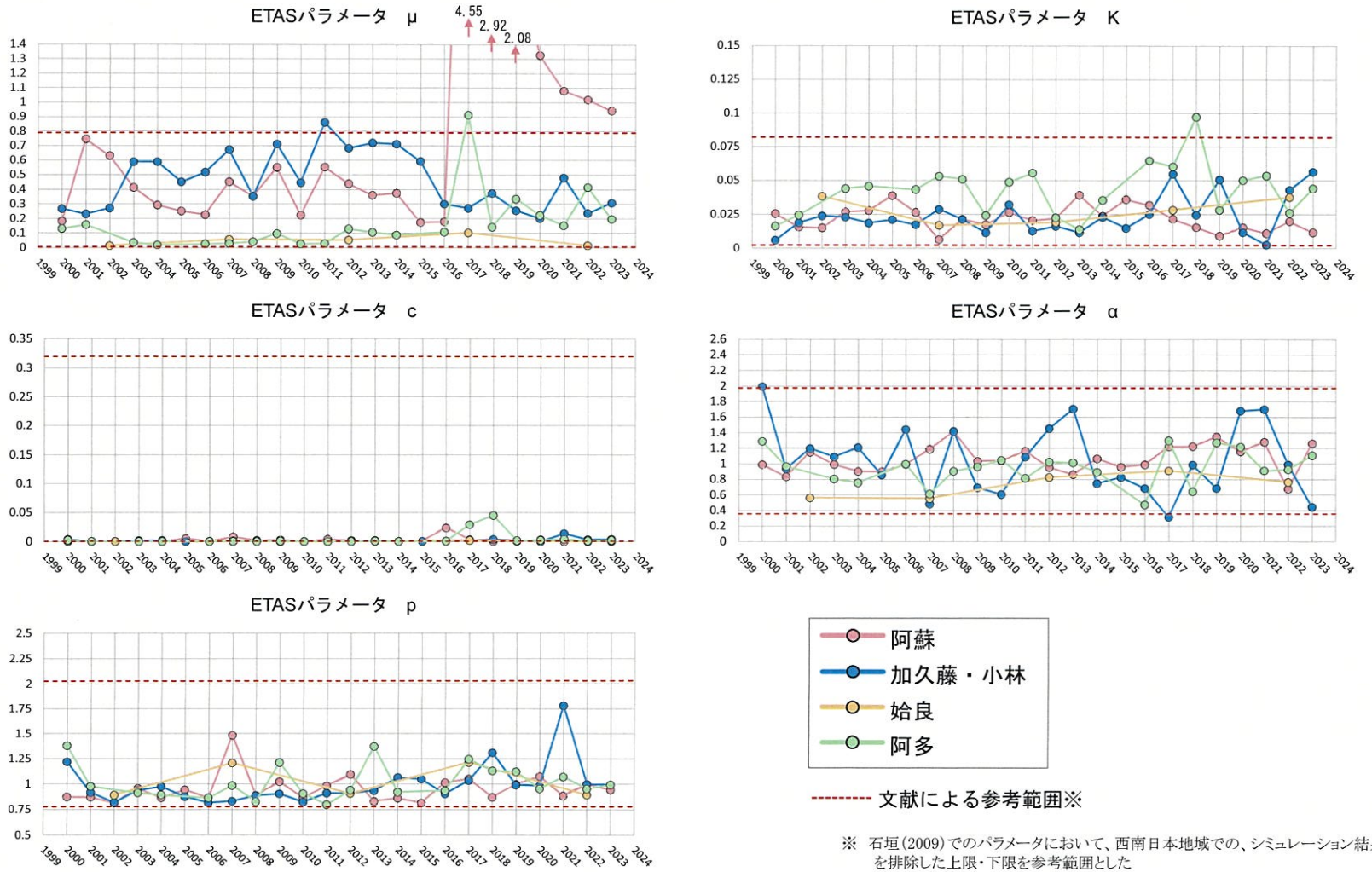
M_{th}は対象とする地震のMの閾値、t_iとM_iはそれぞれ、解析起点の時刻からtまでの期間に発生したM_{th}以上の地震の発生時刻とMを表す。
式の右辺第2項での和は、tより前に発生した地震による影響を全て足しあわせることを意味している。

推定すべきパラメータ(θ)
μ :背景的な地震活動の発生率
K :余震の生産効率
c :余震の時間的減衰の時間軸の調整
α :発生した地震のMの効率
p :余震の時間的減衰の程度

M_{th}:各カルデラの下限マグニチュード(2000～2022年データのMc値を使用)

4. 統計的整理に基づく評価[地震活動:ETASモデル(2000～2023年)]

- 2000年～2023年の1年ごとにETASモデルを用いてパラメータを算出し、時間変化が見られるか比較を行った。なお、姶良カルデラにおいては地震数が少ないため、5年ごと(但し、2000年～2023年は4年)に計算した。また、鬼界は地震活動が低調であるため対象外とした。
- 阿蘇カルデラにおいて、背景的な地震活動の発生率を示すμ値は2017年～2023年にかけて大きな値を示しているが、熊本地震の余震の影響と考えられ、地震活動の異常ではないと考えられる(次頁参照)。
- その他のパラメータにおいて地震活動の状況に大きな変化は認められない。

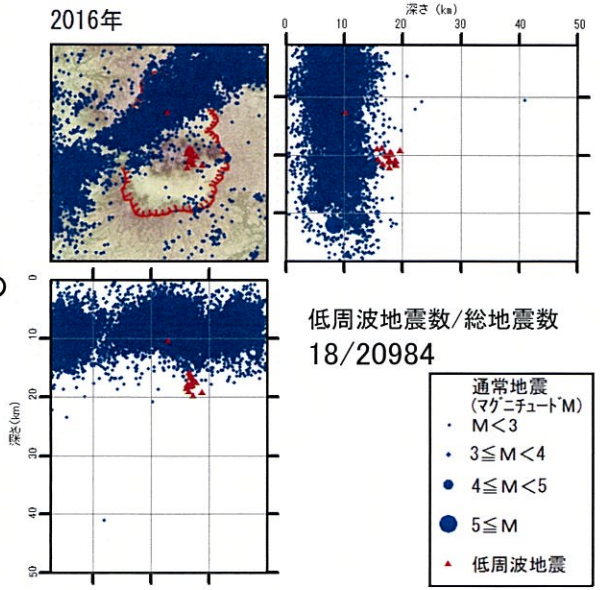


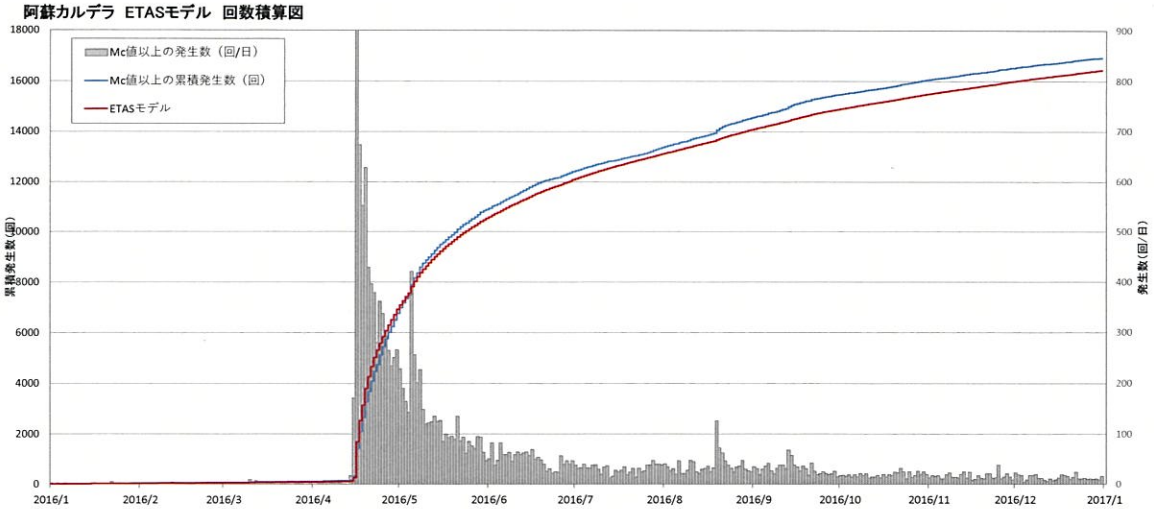
※ 石垣(2009)でのパラメータにおいて、西南日本地域での、シミュレーション結果の異常な外れ値を排除した上限・下限を参考範囲とした

4. 統計的整理に基づく評価[地震活動:ETASモデル(阿蘇カルデラ)]

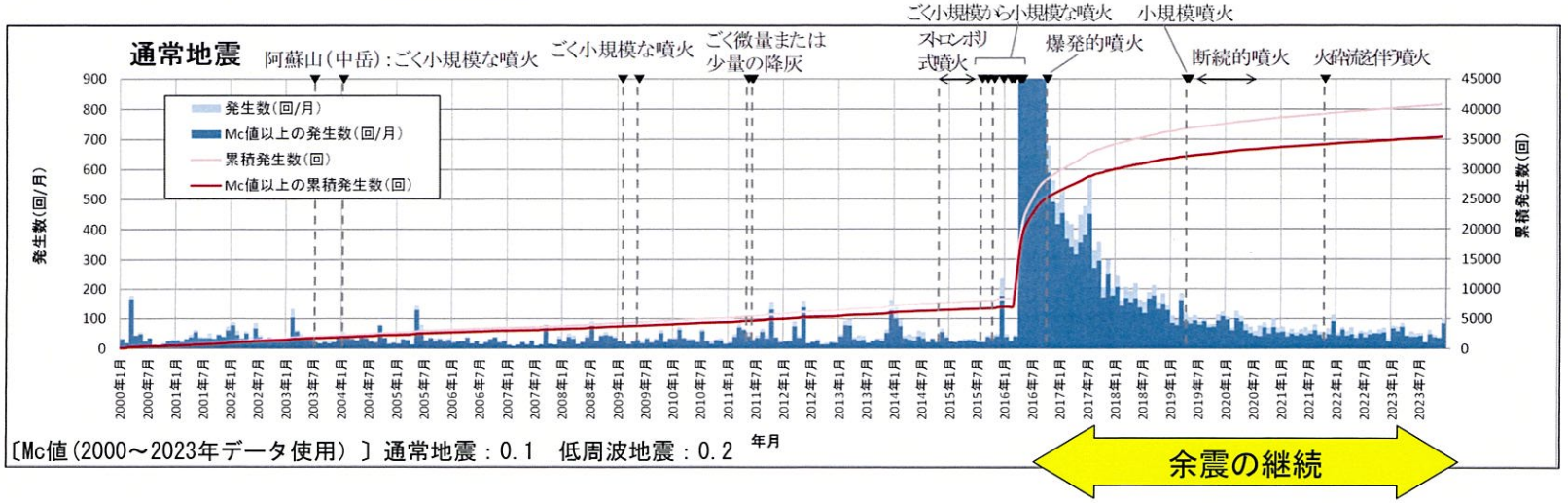
- 阿蘇カルデラにおいては、2017年～2023年にμ値がパラメータ範囲を大きく上回っている。石垣(2006)によると、パラメータμは定常の地震発生強度を表すが、大地震発生後の短期間における推定値は過大な値を取ることがあるとしている。このことから、阿蘇カルデラにおけるこの期間のパラメータの逸脱は、依然として継続している熊本地震の余震が定常の地震発生強度としてμ値に大きく反映されたものであり、地震活動の異常ではないと考えられる。

熊本地震発生時の
地震活動





2000年以降の
阿蘇カルデラ周辺の
地震発生数の推移



（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.

(2) 気象庁:第152, 153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:火山活動解説資料(九州地方の火山),
https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/monthly_vact.php.

(4) 国土地理院:電子基準点データ提供サービス, 更新:2024/4/22,
https://terras.gsi.go.jp/.

(5) 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:2024/4/5,
https://hinetwww11.bosai.go.jp/auth/JMA/?LANG=ja.

(6) 気象庁:地震月報(カタログ編), 更新:2024/4/10,
https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/hypo.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) 国土地理院:地殻変動観測の概況(2024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/2024-03.html.

(9) 気象庁:月間火山概況(九州地方),管内月間火山概況(令和6年3月),
https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/fukuoka/24m03/500_24m03.pdf.

(10) 国土地理院:阿蘇山のSAR干渉解析結果について, 第153回火山噴火予知連絡会火山活動資料 九州地方及び南西諸島 その1, pp.37.

(11) 国土地理院:地理院地図, 更新:2024/3/20,
https://maps.gsi.go.jp/.

(12) 気象庁:阿蘇山, 第153回火山噴火予知連絡会火山活動資料 九州地方及び南西諸島 その1, pp.14-26.

(13) 気象庁:令和5年(2023年)の阿蘇山の火山活動, 火山活動解説資料(年報).

(14) 気象庁:阿蘇山の火山活動解説資料(令和6年1月), 火山活動解説資料.

(15) 気象庁:阿蘇山の火山活動解説資料(令和6年3月), 火山活動解説資料.

(16) 気象庁・気象研究所: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153回火山噴火予知連絡会火山活動資料 霧島山, pp.24-26.

(17) 国土地理院:霧島山のSAR干渉解析結果について, 第153回火山噴火予知連絡会火山活動資料 霧島山, pp.38-41.

(18) 気象庁:令和5年(2023年)の霧島山の火山活動, 火山活動解説資料(年報).

(19) 気象庁:霧島山の火山活動解説資料(令和6年3月), 火山活動解説資料.

(20) 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.

(21) 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.

(22) 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.

(23) 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.

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

(25) 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.

(26) Yarai, 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.

(27) 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.

(28) 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.

(29) 国土地理院:桜島のSAR干渉解析結果について, 第153回火山噴火予知連絡会火山活動資料 九州地方及び南西諸島 その1, pp.59-61.

(30) 気象庁:桜島, 第153回火山噴火予知連絡会火山活動資料 九州地方及び南西諸島 その1, pp.44-51.

(31) 気象庁:令和5年(2023年)の桜島の火山活動, 火山活動解説資料(年報).

(32) 気象庁:桜島の火山活動解説資料(令和6年3月), 火山活動解説資料.

(33) 気象庁:若尊, 第153回火山噴火予知連絡会火山活動資料 その他の火山, pp.86-88.

(34) 産業総合研究所 地質調査総合センター:2023年10月11日～17日の桜島噴出物構成粒子の特徴, 2023年10月24日の桜島噴出物構成粒子の特徴, 2024年2月14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.

(35) 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. https://doi.org/10.1186/s40623-023-01919-z.

(36) 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姶良カルデラ下のイメージング, 火山, vol.67, pp.69-76.

(37) 気象庁:池田・山川, 第153回火山噴火予知連絡会火山活動資料 その他の火山, pp.89-90.

(38) 気象庁:開聞岳, 第153回火山噴火予知連絡会火山活動資料 その他の火山, pp.92-93.

(39) 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:2024/4/11.

(40) 国土地理院:薩摩硫黄島のSAR干渉解析結果について, 第153回火山噴火予知連絡会火山活動資料 九州地方及び南西諸島 その2, pp.14-17.

(41) 気象庁:薩摩硫黄島, 第153回火山噴火予知連絡会火山活動資料 九州地方及び南西諸島 その2, pp.3-7.

(42) 気象庁:令和5年(2023年)の薩摩硫黄島の火山活動, 火山活動解説資料(年報).

(43) 気象庁:薩摩硫黄島の火山活動解説資料(令和6年3月), 火山活動解説資料.

(44) 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.

(45) 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.

(46) 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

(47) 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

(48) 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

(49) 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

(50) 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

(51) 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

(52) 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.

(53) 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

(54) 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.

(55) 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.

(56) 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.

(57) 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.

(58) 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.

(59) 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.

(60) 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.

(61) 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.

(62) 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.

(63) 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.

(64) 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.

(65) 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.

(66) 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.

(67) 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.

(68) 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

(69) 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.

(70) 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.

(71) 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

(72) 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.

(73) 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.

(74) 筒井智樹・為栗 健・井口正人(2021):人工地震記録による姶良カルデラ西部の地殻内S波地震反射面の推定, 火山, vol.2, pp.71-81.

(75) 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, 303-309.

(76) 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.

(77) 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.

(78) 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－, 京都大学防災研究所年報, 第56号B, pp.187-195.

(79) 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

(80) 味喜大介・筒井智樹・井口正人(2021):GNSS観測による姶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.

(81) 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.

モニタリング結果と中・長期的取組みの参考文献

(82) 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.

(83) 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.

(84) 長屋暁大・藤江 剛・小平秀一・田中 聡・山本揚二朗・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.

(85) 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.

(86) 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

(87) 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

(88) 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.

(89) 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.

(90) 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 Space, vol.65, 505-515. https://doi.org/10.5047/eps.2013.05.017.

(91) 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.

(92) 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.

(93) Ogata, Y.(1988): Statistical models for earthquake occurrences and residual analysis for point processes, Journal of the American Statistical Association, vol.83, pp.9-27.

(94) 尾形良彦(2019):ETASモデル ー地震の発生強度(起こりやすさ)の評価ー, 日本地震学会広報紙「なゐふる」, no.117, pp.1-3.

(95) 石垣祐三(2009):全国を対象とした地震活動監視のための解析手法についてーM7.0 における余震活動予測を通してー, 験震時報, vol.72, pp.1-25.

(96) 石垣祐三(2006):ETASモデルを用いた地震活動の短期確率評価, 験震時報, vol.69, pp.135-154.

(97) 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.