験震時報第 77 巻
（2013）65～96 頁

2011 年霧島山新燃岳の噴火活動

The 2011 Eruptive Activities of Shinmoedake Volcano, Kirishimayama, Kyushu, Japan

福岡管区気象台*・鹿児島地方気象台

Fukuoka District Meteorological Observatory and Kagoshima Local Meteorological Observatory

(Received July 19, 2012: Accepted July 30, 2013)

ABSTRACT: Following several years of small phreatic eruption events, Shinmoedake volcano, Kirishimayama, Kyushu, Japan, began a new phase of activity on 19 January 2011. The eruption commenced with a small phreatomagmatic event followed by subplinian events on 26 and 27 January. Lava emerged as a dome in the summit crater on 27 January and filled the crater until the beginning of February. During the subplinian events and lava dome growth, deflation of the deep magma chamber was observed by tiltmeters and GPS. Eruptive activity began to decrease in March 2011 and no eruptive event occurred after the 7 September 2011 event. In response to the eruption, the Japan Meteorological Agency (JMA) issued warnings repeatedly to prepare local people and infrastructures around Shinmoedake. JMA did not raise the Volcanic Alert Level before the first subplinian event, because of a lack of clear precursory signals. We conclude that a large amount of magma moved in the shallow Shinmoedake plumbing system for a short time, based on a number of geophysical observations. It is important to detect magma movement and understand eruptive phenomena quickly in order to mitigate risks of volcanic hazards.

1　総論

新燃岳は，南九州の宮崎県と鹿児島県の県境に位置する霧島山（火山群）に含まれる安山岩質の火山である. 有史以降, たびたび噴火を繰り返しており, 霧島山では御鉢とともに活発な火山の一つである. 最近では 1716～1717 年にマグマ噴火し, 火砕流もみられた．ここ数十年では，1991 年にごく小規模な水蒸気噴火が発生して以降，比較的静穏に経過していたが, 2008 年 8 月と 2010 年 3～7 月にごく小規模～小規模な水蒸気噴火を繰り返し, 2011 年 1 月に約 300 年ぶりにマグマ噴火をした．本論では，この 2011 年のマグマ噴火を取り上げる.

気象庁は 2007 年 12 月 1 日に噴火予警報の発表と噴火警戒レベルの運用を開始した（Ikeuchi and Yokota, 2007）．噴火警戒レベルは，火山活動の状況に応じて必要となる防災対応を 5 段階に区分したもので，霧島山では 2007 年 12 月 1 日に新燃岳と御鉢を対象に運用を開始した．新燃岳の噴火警戒レベルは運用開始当初はレベル 1（平常）であった.

2008 年 8 月 22 日, 新燃岳で約 17 年ぶりに小規模な水蒸気噴火が発生した．この噴火発生を受けて，鹿児島地方気象台及び福岡管区気象台は，火口周辺警報を発表し，噴火警戒レベルを新燃岳では初めて 2（火口周辺規制）に引き上げた．しかし，その後，噴火は発生せず，地震及び噴煙活動も次第に静穏化したため, 約 2 ヶ月後の 2008 年 10 月 29 日に噴火予報を発表し，噴火警戒レベルをレベル 1（平常）に引き下げた.

2009 年 12 月頃から，国土地理院の地殻変動観測で新燃岳北西数 km の膨張を示す基線の伸びが観測され始めた（今給黎・大脇，2011）．しかしながら，この時点では, この変動が 2011 年のマグマ噴火を引き起こすことになるマグマだまりの膨張によるものとは分からなかった.

2010 年 3 月 30 日早朝，新燃岳は約 1 年 7 か月ぶりに突然噴火した．この噴火発生により，鹿児島地方気象台及び福岡管区気象台は，火口周辺警報を発表し，噴火警戒レベルを 1（平常）から 2（火口周辺規制）に引き上げた．周辺自治体は新燃岳火口から 1km 以内に立ち入ることを規制する措置をとった.

* 加藤幸司（現所属：地震火山部火山課）

その後，ごく小規模な噴火が 1 回発生したものの，2010 年 4 月中旬になると，地震活動は落ち着いたため，噴火予報を発表し，噴火警戒レベルを 1（平常）に引き下げた．しかし，2010 年 5 月 6 日に地震活動が活発化したため，噴火警戒レベルを再び 2（火口周辺規制）に引き上げた．その後，新燃岳は 5 月 27 日に小規模な水蒸気噴火したのを皮切りに，2010 年 7 月までごく小～小規模な噴火を 5 回繰り返した．2010 年 7 月以降は，噴火は発生しなかったが，火山性地震のやや多い状態が続いたため，噴火警戒レベルは 2（火口周辺規制）が継続した．

2011 年 1 月 19 日，新燃岳で約半年ぶりに小規模なマグマ水蒸気噴火が発生した．噴火は数時間で一旦おさまったが，1 月 26 日早朝，再び噴火した．そして，同日 14 時 50 分頃，突然噴火の規模が拡大し，準プリニー式噴火が始まった．この噴火により，風下側に大量の火山灰や火山れきが降り，宮崎自動車道の一部も通行止めとなった．また，噴煙は気象レーダーや衛星でも観測され，火口縁上 7000m にも達した（新堀ほか，2013）．この準プリニー式噴火発生を受けて，福岡管区気象台と鹿児島地方気象台は 18 時 00 分に，火口周辺警報を発表し，噴火警戒レベルを 2（火口周辺規制）から 3（入山規制）に引き上げた．それにより，周辺自治体は新燃岳火口から 2km 以内に立ち入ることを規制し，また災害対策本部を設置するなど本格的な応急対策をとった．

1 月 28 日に，東京大学地震研究所の上空からの観測で火口底に直径数十 m の溶岩の出現が確認された（Nakada et al., 2013）．その後，火口内の溶岩は成長を続け，1 月 30 日には直径約 500m に達したことが陸域観測衛星だいち（ALOS）に搭載された合成開口レーダーによって判明した（安藤ほか，2013）．福岡管区気象台と鹿児島地方気象台は，このような火口内の状態で爆発的噴火が発生した場合，溶岩が吹き飛ばされ，それにより火砕流が発生する可能性があると判断し，1 月 31 日 01 時 35 分に火口周辺警報を発表し，噴火警戒レベルは 3 のままではあるが，警戒範囲を火口から 2km 以内から 3km 以内の範囲に拡大する噴火警戒レベル 3（入山規制）の切り替えを行った．これにより新燃岳の南西に位置する新湯地区やその周辺道路が規制された（新湯及び湯之野温泉はそれ以前に自主避難していた）．なお，宮崎県高原町はそれに先立つ 30 日 23 時 50 分に火砕流の危険性があると判断し，町内の約 500 世帯，約 1100 人を対象に避難勧告を発令している．

最初の爆発的（ブルカノ式）噴火は，準プリニー式噴火が断続的に続いていた 1 月 27 日 15 時 41 分に発生した．その後も爆発的噴火は時々発生し，2011 年 3 月 1 日まで 13 回を数えた．そのうち 2 月 1 日 07 時 54 分に発生した爆発的噴火では，直径約 70cm の噴石が火口から約 3.2km 付近の地点に落下した．また，山麓では空振により，窓ガラスが割れ，けが人が出るなどの被害がみられた．鹿児島地方気象台及び福岡管区気象台は，この爆発的噴火発生を受けて，2 月 1 日 11 時 20 分に火口周辺警報を発表し，警戒すべき範囲を火口から 3km 以内の範囲から 4km 以内に拡大する噴火警戒レベル 3（入山規制）の切り替えを行った．これにより，霧島温泉街からえびの高原につながる宮崎県道・鹿児島県道 1 号線が通行止めになった．

2011 年 2 月上旬以降は，新燃岳の噴火は間欠的になり，その頻度や規模も徐々に低下していった．2011 年 3 月 22 日に開催された第 119 回火山噴火予知連絡会臨時会（会長：藤井敏嗣東京大学名誉教授）では，新燃岳の火山活動は「最盛期の活動に比べ低下状態で経過している」と評価された．これを受けて，同日，火口周辺警報を発表し，警戒範囲を火口から 4km 以内の範囲から 3km 以内に縮小する噴火警戒レベル 3（入山規制）の切り替えを行った．これにより宮崎県道・鹿児島県道 1 号線が通行可能となった．

新燃岳は，その後 2011 年 9 月 7 日まで時々噴火したが，それ以降，噴火は発生していない．2011 年 2 月上旬から再び観測されていた新燃岳北西数 km の地下深くのマグマだまりへのマグマの供給を示す GPS の基線の伸びは，マグマ噴火前の 2/3 程度まで回復したものの，2011 年 12 月には鈍化・低下した．火山性地震も 2012 年 3 月頃から減少し，2012 年 5 月以降は，2011 年の噴火前とほぼ同程度になった．2012 年 6 月 26 日に開催された第 123 回火山噴火予知連絡会定例会では，新燃岳浅部の活動も低下したと評価された．これを受けて，同日，福岡管区気象台及び鹿児島地方気象台は火口周辺警報を発表し，警戒範囲を火口から 3km 以内の範囲から 2km 以内に縮小する噴火警戒レベル 3（入山規制）の切り替えを行った．

鹿児島地方気象台及び福岡管区気象台は，火山災害軽減のため，火山活動の状況に応じて噴火警報の発表や火山情報の発表を行った．しかし，1 月 26 日の準プリニー式噴火では，発生前に警告を発することはできなかった．前兆現象がほとんどなく，噴火現象をみながらの対応ではあるが，噴火警戒レベルの引き上げがマグマ噴火発生の 2 時間半後だったということは，火砕流の可能性もあったことを考慮すると，遅かったといえる．また，1 月 31 日及び 2 月 1 日に噴火警戒レベル 3 の切り替えを行ったが，これは事前に想定されていなかった．これらの要因は，いずれも事前の活動経過想定が不十分だったためといわざるを得ない．また，地元自治体への火山活動に関する情報提供も十分だったとはいえず，それにより高原町が自主的に避難するなど問題があった．2011 年の噴火活動では死者は出なかったが，爆発的噴火による空振により，多数の窓ガラスが割れ，1 名が軽傷を負った．大量の降下火砕物は，風に流されて遠方まで飛散し，自動車のガラスや太陽熱温水器などを破損し，また，農作物や農地，ビニールハウスなどの農業被害がでた．また，航空機や列車の運航などにも影響があった．これらのことは，さらなる火山災害軽減には，噴火後のすみやかな降下火砕物等の情報提供が必要であることを認識させた．

2011 年の噴火活動は，気象庁の火山監視と噴火警戒レベルの運用や情報提供を考える際の一つの契機となる現象であった．そこで，火山業務のあり方を考える際の資料とすることを目的に，2011 年新燃岳の噴火活動の概要について以下にまとめた．

2　気象庁の監視・観測体制

2011 年の噴火活動開始までは，福岡管区気象台と鹿児島地方気象台は霧島山に地震計，空振計，傾斜計，GPS，遠望カメラを設置し，また，東京大学地震研究所及び防災科学技術研究所からデータの分岐を受けて，火山活動を監視していた．2011 年の噴火発生後は監視体制強化のため，気象庁は地震計を 6 点，空振計を 3 点，傾斜計を 4 点，遠望カメラを 2 点，降灰計を 2 点増設した．また九州大学及び国土地理院からのデータ分岐も開始した（図 1）．上記のテレメータ観測に加え，火口内及びその周辺の状況を確認するために防衛省や九州地方整備局，鹿児島県及び宮崎県の協力によりヘリコプターによる上空からの観測をほぼ定期的に実施した．また，噴出物調査や火山ガス観測を東京大学や産業技術総合研究所と協力して頻繁に行った．

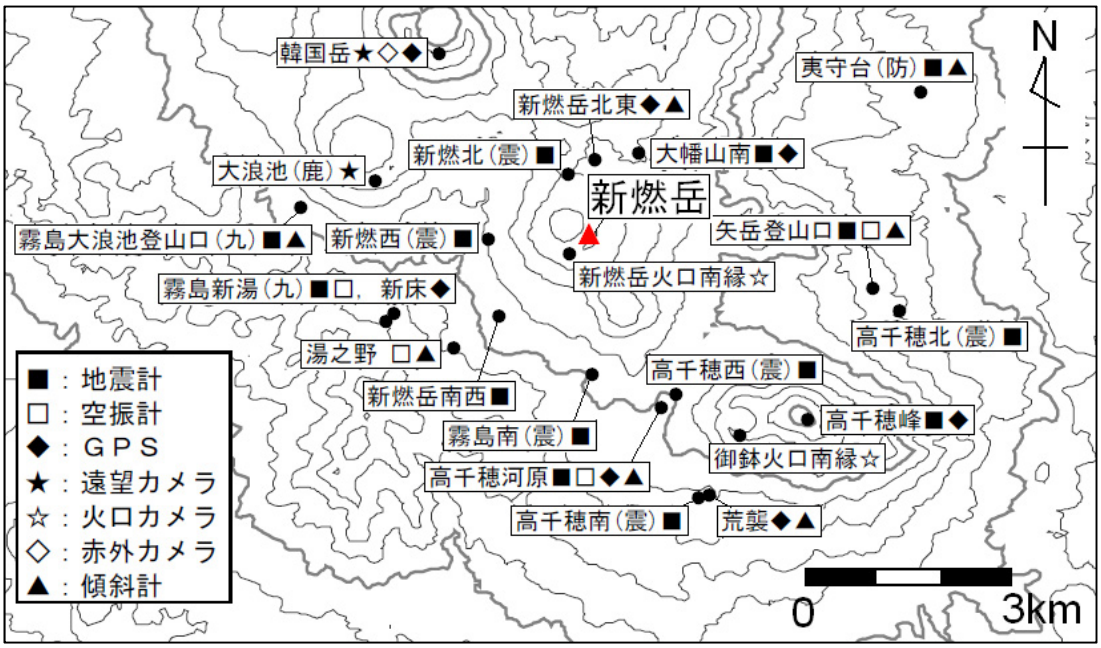


図 1　気象庁の新燃岳付近の監視体制．（震）は東京大学地震研究所，（九）は九州大学，（防）は防災科学技術研究所設置の観測点を示す．

3　活動の概要

3.1　活動経過

(1) 2011 年 1 月の噴火開始まで（2008 年～2010 年）

新燃岳の火山活動は，1991 年のごく小規模な水蒸気噴火以降，表面上は静穏な状態であった．しかしながら，2005 年から 2007 年にかけて，膨張を示す地殻変動が新燃岳火口周辺の GPS 観測により観測され（高木ほか，2011）（図 2），また地震活動の活発化も時々みられるなど（図 3），山体内部では火山活動の高まりが時々みられていた．

2008 年 8 月 19 日，新燃岳火口直下浅部を震源とするやや高周波の火山性地震が増加し始めた．そして 3 日後の 8 月 22 日，新燃岳で 1991 年以来 17 年ぶりに小規模な水蒸気噴火が発生した．噴火発生時は天候不良のため噴煙の状況は不明であったが，空振を伴った火山性微動が観測され，また風下側の高原町や小林市などで少量の降灰が確認された（図 4）．下司ほか（2010）は，この噴火の噴出物量を約 20 万トンと推定した．8 月 24 日に上空からの観測を実施し，これまで噴気等が確認されていなかった新燃岳火口内西側斜面に大きな火孔が，また火口外西側の斜面には，長さ 300～400m の新しい亀裂が形成されているのを確認した（図 5）．2008 年 8 月 22 日の噴火は数時間で終わり，その後も噴火は発生しなかった．また，噴火前から活発化していた地震活動も徐々に低下していき，噴煙活動も，噴火後，やや活発な状態が続いたが，それも徐々に低下していき，2009 年以降は低調な状況となった（図 3）．GPS 連続観測では，それまでの膨張傾向が 2007 年頃から停滞・収縮傾向に転じた（図 2）．

2009 年 12 月頃から，新燃岳北西数 km を中心とする膨張が国土地理院の GPS で観測され始めた（図 6）（今給黎・大脇，2011）．今給黎・大脇（2011）によると，この変動は新燃岳の北西数 km の深さ 6～10km と新燃岳直下の深さ約 3km の二つの圧力源で説明できる．2011 年 1 月までの体積変化量は，それぞれ 1500 万 m^3 と 100 万 m^3 であった．この地殻変動は気象庁の GPS でも，新床-新燃岳北東の基線で観測された（図 2）．

広域の GPS で新燃岳北西の膨張が観測され始めたのとほぼ同時期の 2009 年 12 月頃から，新燃岳直下浅部を震源とする火山性地震がごくわずかではあるが増加した状態となった（図 3）．そういった状況のなかで，2010 年 3 月 30 日，2008 年 8 月以来約 1 年半ぶりにごく小規模な水蒸気噴火が，突然発生した．噴煙高度は火口縁上 400m で，噴煙はほぼ白色であったが（図 7），九州地方整備局，宮崎県及び鹿児島県の協力により 3 月 30 日午後に行った上空からの観測で，新燃岳火口内の一部と火口外の西側斜面にごく少量の火山灰が堆積しているのが確認された

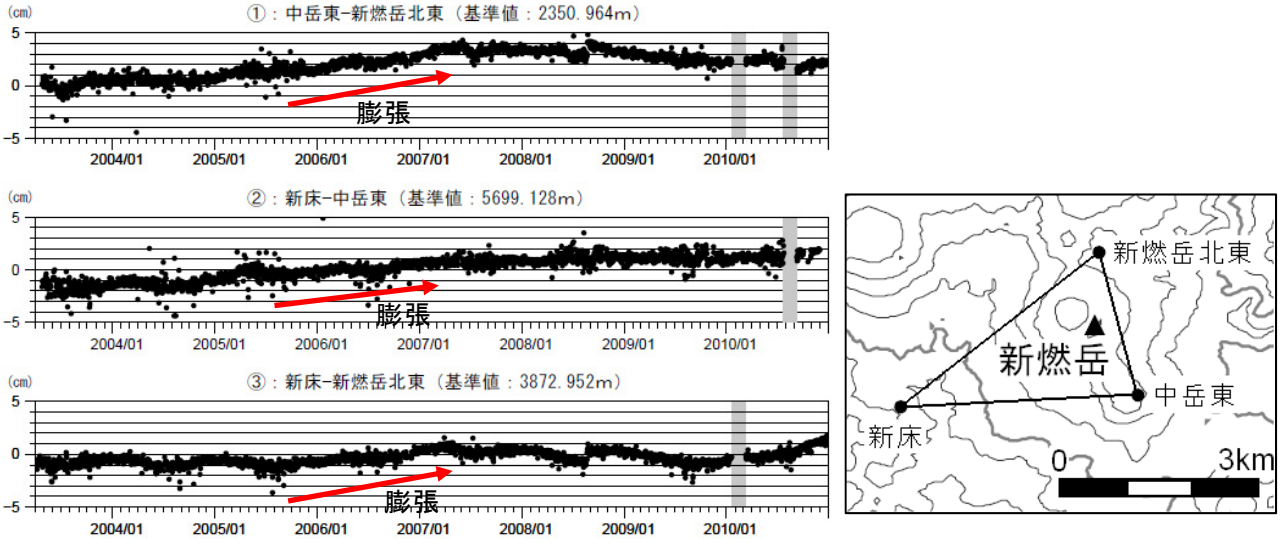


図 2　GPS 観測結果（2003 年 4 月～2010 年 12 月）．
図中の灰色部分は欠測期間を示す．

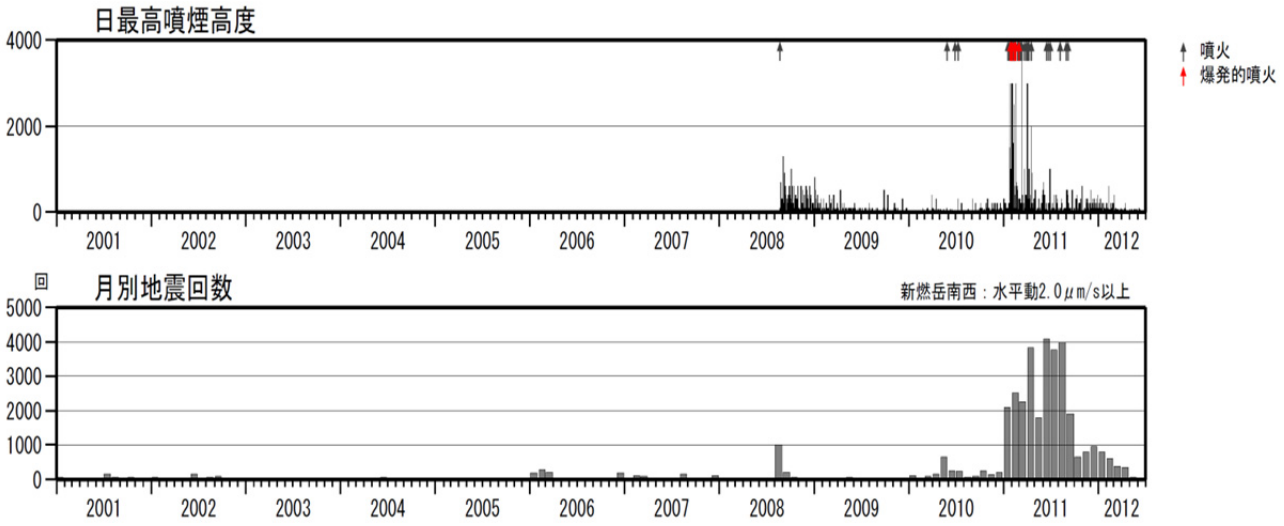


図 3　新燃岳の噴煙及び地震活動（2001 年 1 月～2012 年 6 月）.

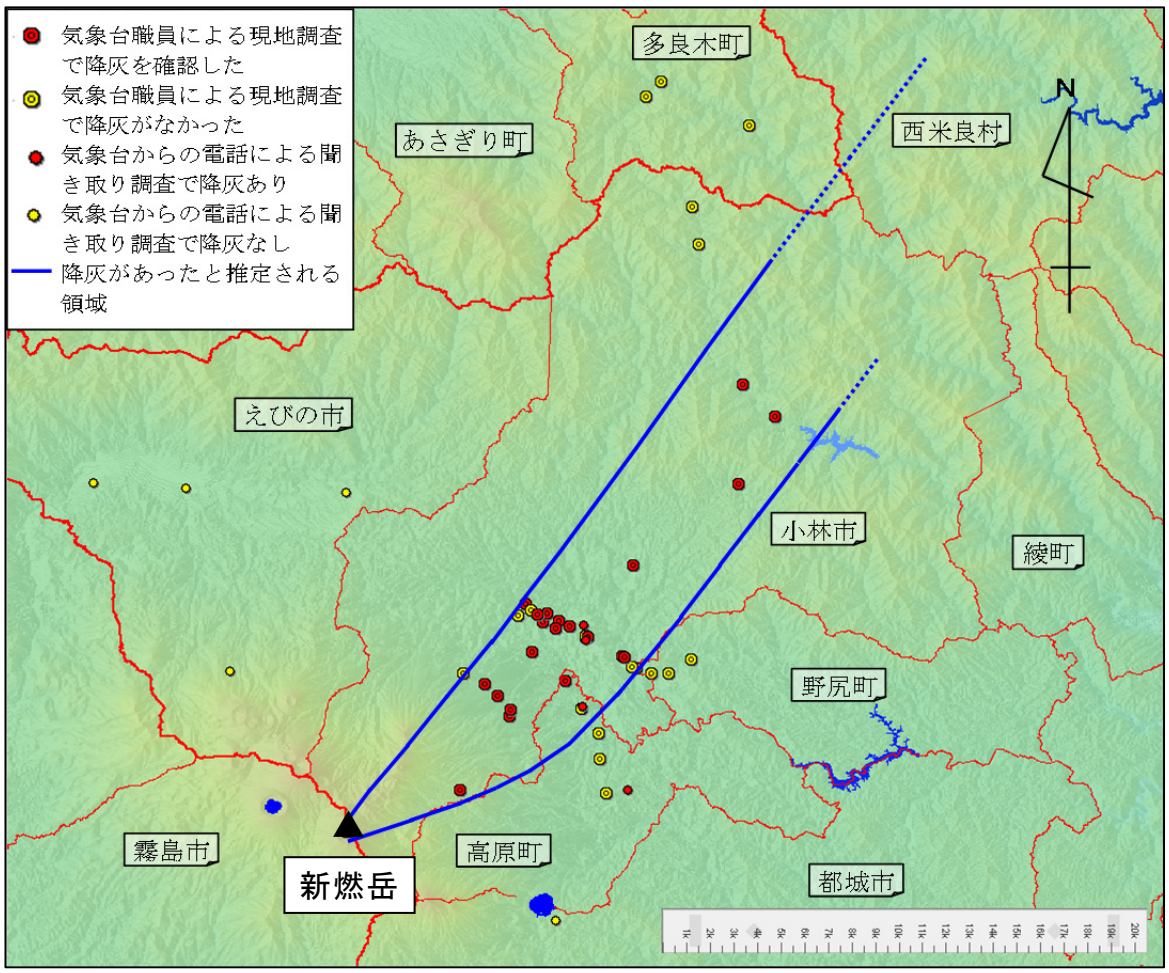


図 4　現地調査及び聞き取り調査による新燃岳 2008 年 8 月 22 日噴火の降灰分布.
この図の作成には国土地理院発行の「数値地図 50mメッシュ（標高）」を使用した.

図 5　2008 年 8 月 22 日噴火発生の 2 日後の新燃岳火口内（左）と西側斜面（右）の様子（2008 年 8 月 24 日，九州地方整備局ヘリコプターから撮影）.

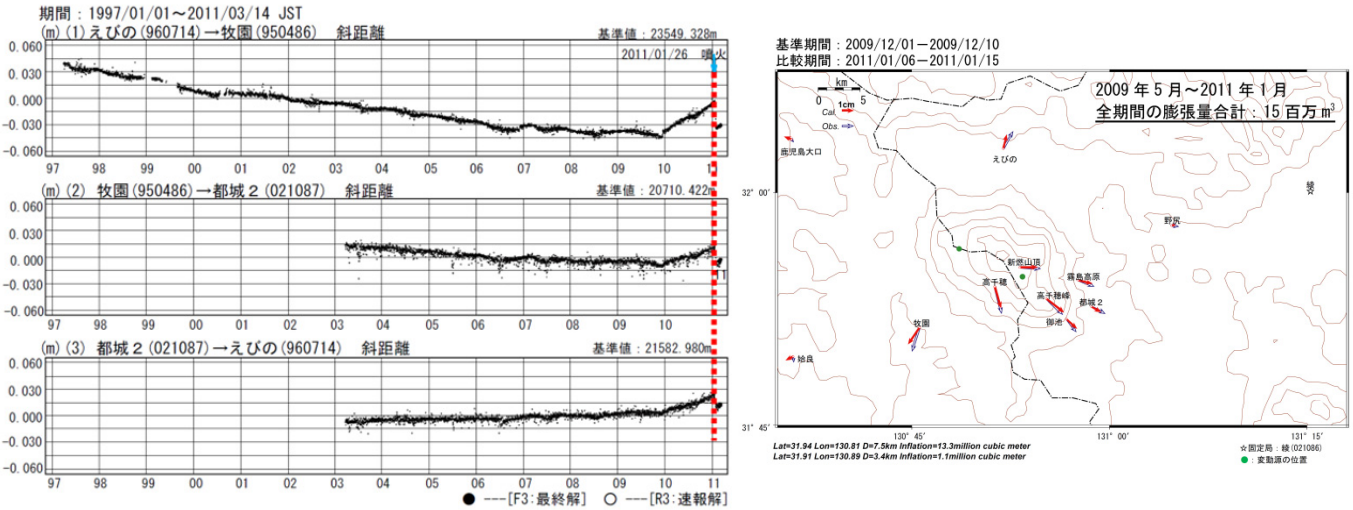


図 6　国土地理院の地殻変動観測結果（今給黎・大脇，2011）.

（図 8）. この噴火の噴出物量は数十トンと推定された（小林ほか，2011）.

2010 年 3 月 30 日の噴火以降は，4 月 17 日，5 月 27 日，6 月 27 日，6 月 28 日，7 月 5 日，7 月 10 日と，7 月までごく小～小規模な水蒸気噴火を 6 回繰り返した（表 1）. 5 月 27 日の噴火の噴出物量は数百トンと推定された（小林ほか，2011）.　Suzuki et al.（2013）によると，2010 年 3 月 30 日の噴火の噴出物は，2008 年 8 月の噴火とほぼ同様にほとんどが変質物質で構成されていたが，2010 年 5 月 27 日の噴出物には，ごくわずかではあるが本質物質と思われる発泡ガラスも認められた.

2010 年 3 月 30 日の噴火後，地震活動はやや活発化し，火口直下浅部を震源とする火山性地震が増減を繰り返した（図 3）. しかしながら，噴火発生前に地震が急増することはなく，逆に噴火後に火山性地震が増加する傾向がみられた.

2010 年 7 月 10 日の噴火以降は噴火の発生はなく，火山性地震の発生回数も減少した. しかし，2010 年 10 月頃から，地震回数はわずかながらも増加し，また噴煙量もごくわずかではあるが増加した（図 3）.

2010 年に発生した噴火 7 例のうち，5 月 27 日と 7 月 10 日の噴火では，2010 年 3 月に気象庁が新燃岳火口縁に整備した火口カメラで，噴火発生前後の火口内の状況が観測できた. この映像と地震及び傾斜記録を比較すると（図 9），火山灰噴出の数分前から，

図 7　2010 年 3 月 30 日の噴火の様子（火口の南約 8km の猪子石カメラによる）.

火山性微動と火口方向の膨張を示す傾斜変動が始まり，火山灰噴出開始にやや先行して傾斜変動は収縮に転じることがわかった（加藤ほか，2010）.

2010 年 3 月から 7 月の噴火では，噴出物量は少なく，噴出物量から噴火規模の比較は難しい．そこで噴火に伴う火山性微動の震動エネルギーで比較した（図 10）．なお，震動エネルギーの算出にあたっては，1 秒間平均速度振幅を自乗し，それとデータ間隔の 1 秒の積を積算して求めた. 図 10 をみると, 2010 年 7 月 10 日は，2010 年の一連の噴火活動では震動エネルギーは最大であったが, 2008 年 8 月の噴火と比べると 1/4 程度であり，2010 年の一連の噴火の規模は比較的小さなものであったことがわかる.

(2) 2011 年 1 月の噴火開始から準プリニー式噴火まで（1 月 19～27 日）

2011 年 1 月 19 日 01 時 27 分, 小規模な噴火が約 6 か月ぶりに発生した．噴火発生時は天候不良のため噴煙の状況は不明であったが, 降灰が火口から数 km の御池付近で約 1kg/m^2 観測され, また火口の南東の宮崎県都城市や日南市の海岸線付近でも確認された（図 11, 12）. 下司ほか (2011) や Suzuki et al. (2013) によると, 1 月 19 日の噴火で放出された火山灰中には，新鮮なマグマ物質が明らかに含まれていた．この結果は，この噴火がマグマ水蒸気噴火であり，マグマが火口近くまで上昇してきたことを示唆する．この噴火発生に先立って, 1 月 18 日に新燃岳直下の膨張と考えられるごくわずかな傾斜変動がみられた

図 8　2010 年 3 月 30 日の噴火後の火口内（上段）及び火口西側斜面（下段）の様子（鹿児島県ヘリコプターから撮影）.

（図 13）（加藤・藤原，2012）.

その後, 1 月 26 日 01 時 19 分に再び噴火が発生した．当初は，噴煙高度火口縁上 200m 程度のごく小規模な噴火であった．しかし，26 日 14 時 49 分頃，急激に噴煙の勢いが強まり，それとともに火山性微動及び空振の振幅も増大した（図 14）．噴煙高度は火口縁上 3000m 程度まで達し, 噴火は準プリニー式噴火の様相を呈した（図 15）．この準プリニー式噴火による噴煙は気象レーダーや気象衛星でも観測され，新堀ほか（2013）によると，噴煙高度は火口縁上 7000m まで達したと解析された．この噴火により，鹿児島県霧島市高千穂河原（新燃岳火口の南東約 3km）では直径 7～8cm，宮崎県都城市御池町（新燃岳火口の南東約 7km）では直径 4～6cm の降下火砕物が確認されるなど，大量の火山灰や軽石が主に風下側の宮崎県南部に降下した（図 16）．1 月 27 日に気象庁機動調査班 (JMA-MOT) が九州地方整備局と共同で実施した上空からの調査では，火口の南側から活発な灰色の噴煙が噴出し，また，火口周辺に大きな噴石が飛散しているのが確認された.

表 1　2008～2011 年の新燃岳噴火リスト.

No.	date	Plume height(m)	Max Seismic Amp. (μm/sec) (SSE)	Max Air wave Amp. (Pa) (YNN)	Remarks
1	2008/08/22 16:34	unknown	23.6	unknown	Phreatic
2	2010/03/30 08:00	unknown	15.3	-	Phreatic
3	2010/04/17 01:14	unknown	5.4	0.7	Phreatic
4	2010/05/27 15:37	>100	50.7	2.6	Phreatic
5	2010/06/27 01:35	unknown	25.6	1.1	Phreatic
6	2010/06/28 16:02	unknown	31.5	0.7	Phreatic
7	2010/07/05 11:03	-	unknown	unknown	Phreatic
8	2010/07/10 05:28	>300	101.8	4.4	Phreatic
9	2011/01/19 01:27	unknown	69.6	1.4	Phreatomagmatic
10	2011/01/22 07:30	200	unknown	-	Phreatomagmatic
11	2011/01/26 07:31	200	unknown	-	Phreatomagmatic
12	2011/01/26 14:49	3000	403.5	1.6	
13	2011/01/26 17:05	3000	52.0	9.5	Subplinian 7000m※ (Shimbori et al., 2013)
14	2011/01/26 18:50	2000	unknown	-	
15	2011/01/27 02:20	2000	98.9	9.1	Subplinian 7000m※ (Shimbori et al., 2013)
16	2011/01/27 15:41	>2500	3327.0	39.7	Vulcanian
17	2011/01/27 17:20	3000	156.9	8.5	Subplinian 7000m※ (Shimbori et al., 2013)
18	2011/01/28 12:47	>1000	773.0	81.8	Vulcanian
19	2011/01/30 13:57	unknown	829.0	21.7	Vulcanian
20	2011/02/01 07:54	2000	3767.0	458.4	Vulcanian
21	2011/02/01 23:19	>2000	3541.0	185.5	Vulcanian
22	2011/02/02 05:25	>2000	3408.0	299.6	Vulcanian
23	2011/02/02 10:47	>500	1501.0	86.5	Vulcanian
24	2011/02/02 15:53	3000	5306.0	72.4	Vulcanian
25	2011/02/03 08:09	1500	963.0	26.0	Vulcanian
26	2011/02/04 09:42	3000	290.0	15.7	
27	2011/02/06 03:16	>2000	249.4	14.9	
28	2011/02/07 06:07	1500	1313.8	16.4	
29	2011/02/07 18:09	1200	70.8	-	
30	2011/02/11 11:36	2500	3410.0	244.3	Vulcanian
31	2011/02/14 05:07	unknown	16517.0	332.1	Vulcanian
32	2011/02/18 18:16	3000	2479.0	31.4	Vulcanian
33	2011/02/24 03:38	>600	214.4	0.4	
34	2011/02/28 17:08	300	33.4	1.3	
35	2011/03/01 19:23	unknown	2485.0	69.6	Vulcanian
36	2011/03/03 18:08	>1500	140.6	5.5	
37	2011/03/08 02:50	1000	122.4	6.4	
38	2011/03/13 17:45	4000	161.1	7.2	
39	2011/03/23 08:23	1000	91.7	1.4	
40	2011/03/29 03:33	500	17.1	0.1	
41	2011/04/03 08:41	3000	135.7	2.7	
42	2011/04/09 01:06	unknown	69.4	0.7	
43	2011/04/18 19:22	2000	64.6	3.3	
44	2011/08/31 02:43	500	79.1	0.9	
45	2011/09/07 06:00	300	1.6	-	

SSE は新燃岳南西観測点，YNN は湯之野観測点を示す.

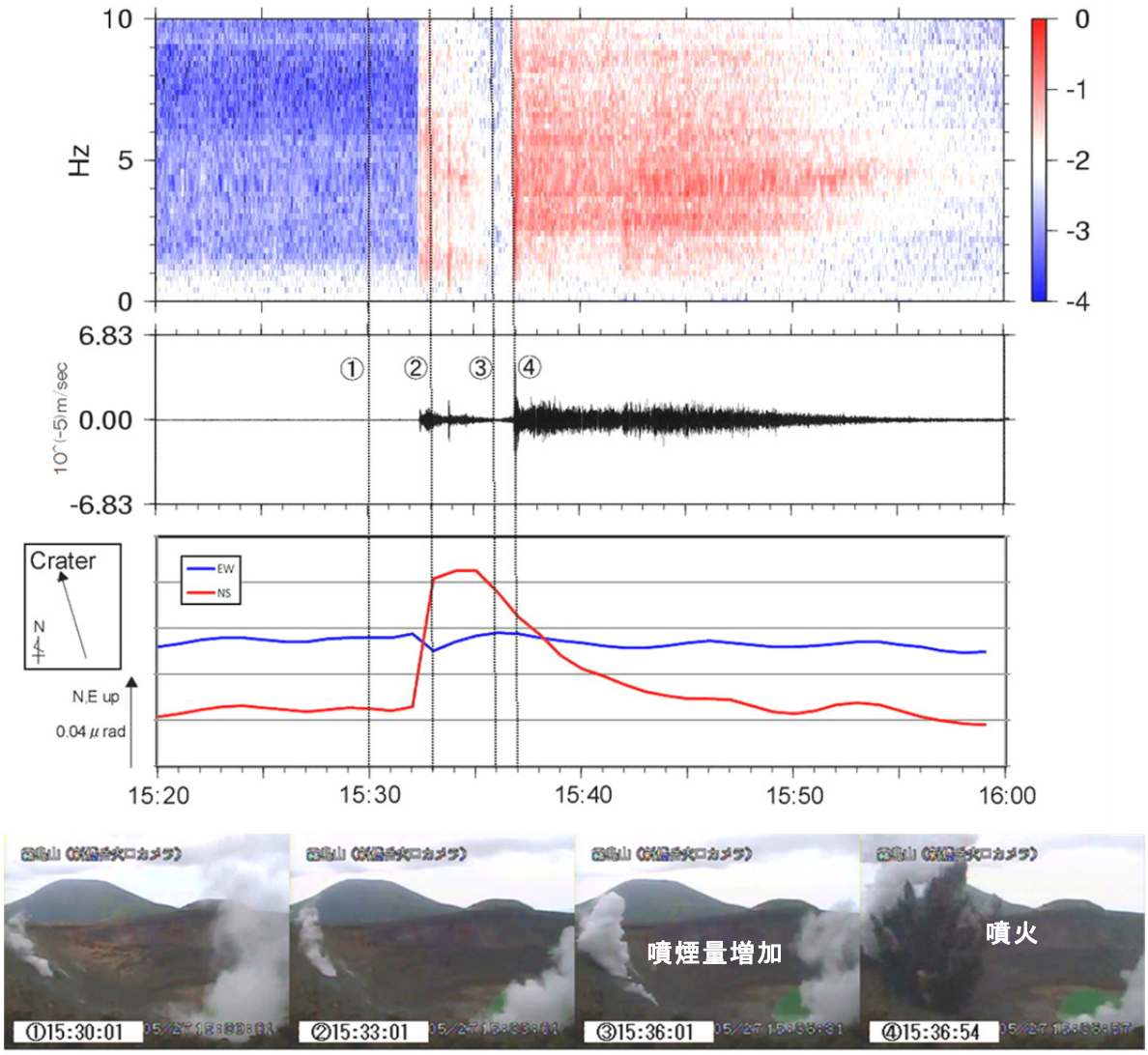


図 9　2010 年 5 月 27 日噴火前後の活動．上からランニングスペクトル（新燃岳南西上下動），震動波形（同），傾斜変動（高千穂河原），火口カメラ画像（画像の番号①～④は震動波形中の番号に対応している）．

この準プリニー式噴火発生の約 1 時間後の 1 月 26 日 16 時頃より，新燃岳の北西数 km の収縮を示す傾斜変動が観測され始めた（図 14）．国土地理院の GPS 基線長や防災科学技術研究所の傾斜計等（Kozono et al., 2013）でも同様に収縮を示す変動が観測された．この地殻変動は，微動振幅が大きく活発な火山灰噴出時に比較的大きく変動した．このことは，2009 年から膨張していた新燃岳北西数 km の地下深くの圧力源が 2011 年の新燃岳のマグマ噴火を引き起こしたマグマだまりであり，そこから新燃岳にマグマが移動し，噴出したことを示している．準プリニー式噴火は，1 月 27 日まで 3 回発生し，その総噴出量は約 1000 万 m^3 と推定された（Nakada et al., 2013）．また，3 回の準プリニー式噴火の噴出レートは，それぞれ 450～563，592～741，481～602m^3/s と推定された（Kozono et al., 2013）．

1 月 26 日の準プリニー式噴火では，噴火発生に前駆して地震増加はみられなかったが，傾斜計では，1 月 19 日の噴火と同様に新燃岳直下の膨張と考えられるごくわずかな傾斜変動が数時間前からみられた（図 13）．この変化は，東京大学地震研究所が火口近傍に設置している広帯域地震計（前原ほか, 2012）

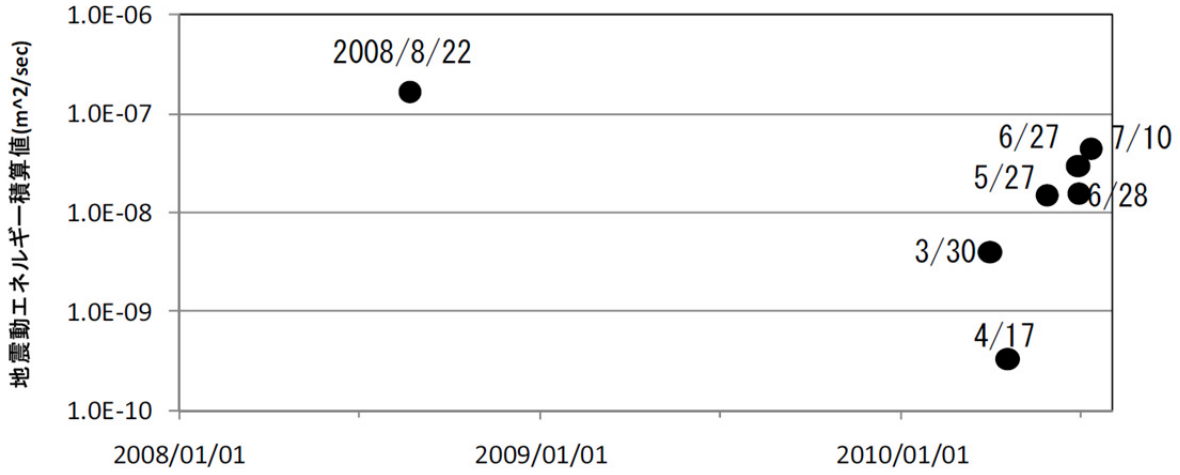
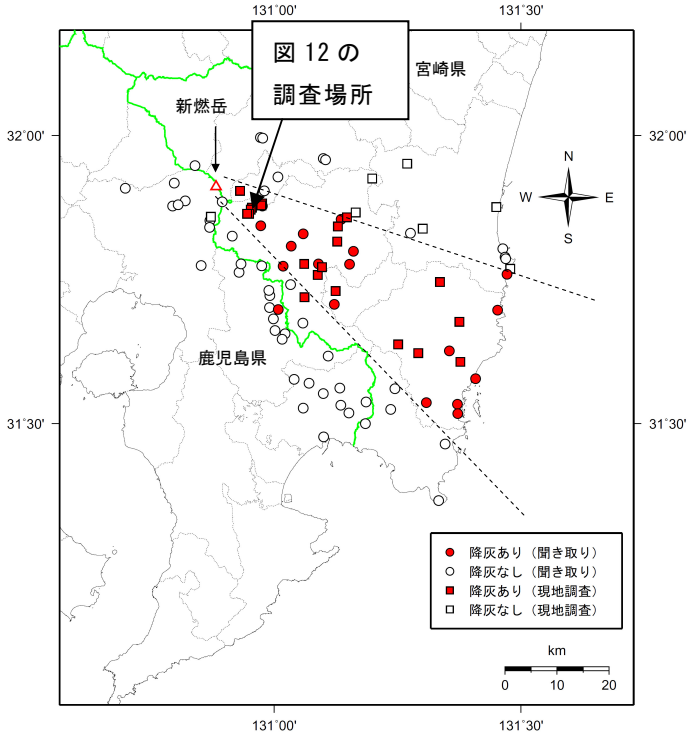


図 10　噴火に伴う火山性微動の地震動エネルギー積算値の比較.
地震動エネルギーは新燃岳南西観測点上下動の 1 秒間平均速度振幅を自乗し，それとデータ間隔の 1 秒の積を積算して求めた.



国土地理院発行の『数値地図25000（行政界・海岸線）』を使用

図 11　現地調査及び聞き取り調査による 2011 年 1 月 19 日の噴火の降灰分布.

図 12　2011 年 1 月 19 日噴火の降灰の様子. 宮崎県都城市御池付近で撮影（図 11 参照）.

や，京都大学防災研究所が新燃岳から約 18km の伊佐に設置している伸縮計（Yamazaki et al., 2013）でも観測された．加藤・藤原（2012）によると，この傾斜変動は新燃岳の海抜 0m 付近のダイクの開口で説明でき，その体積変化量は数万～数十万 m^3 と推定される.

(3) 溶岩出現から爆発的噴火の頻発（1 月 27 日～2 月上旬）

1 月 28 日，東京大学地震研究所による上空からの観測で火口底の火口湖が消失し，火口内に直径数十 m の溶岩が出現しているのが初めて確認された（Nakada et al., 2013）（なお，後の陸域観測衛星だいち（ALOS）搭載の合成開口レーダー（SAR）の画像解析により，その前日の 1 月 27 日にすでに溶岩が出現しているのが確認された（安藤，2013））．陸域観測衛星だいち（ALOS）搭載の合成開口レーダー（SAR）（安藤，2013）や，気象庁が防衛省の協力を得て実施した上空からの観測によると，その後も溶岩は成長を続け，1 月 29 日には直径が約 500m に達した．一時はその上部が鹿児島県設置の大浪池カメラからも観測されたが，2011 年 2 月上旬には成長をほぼ停

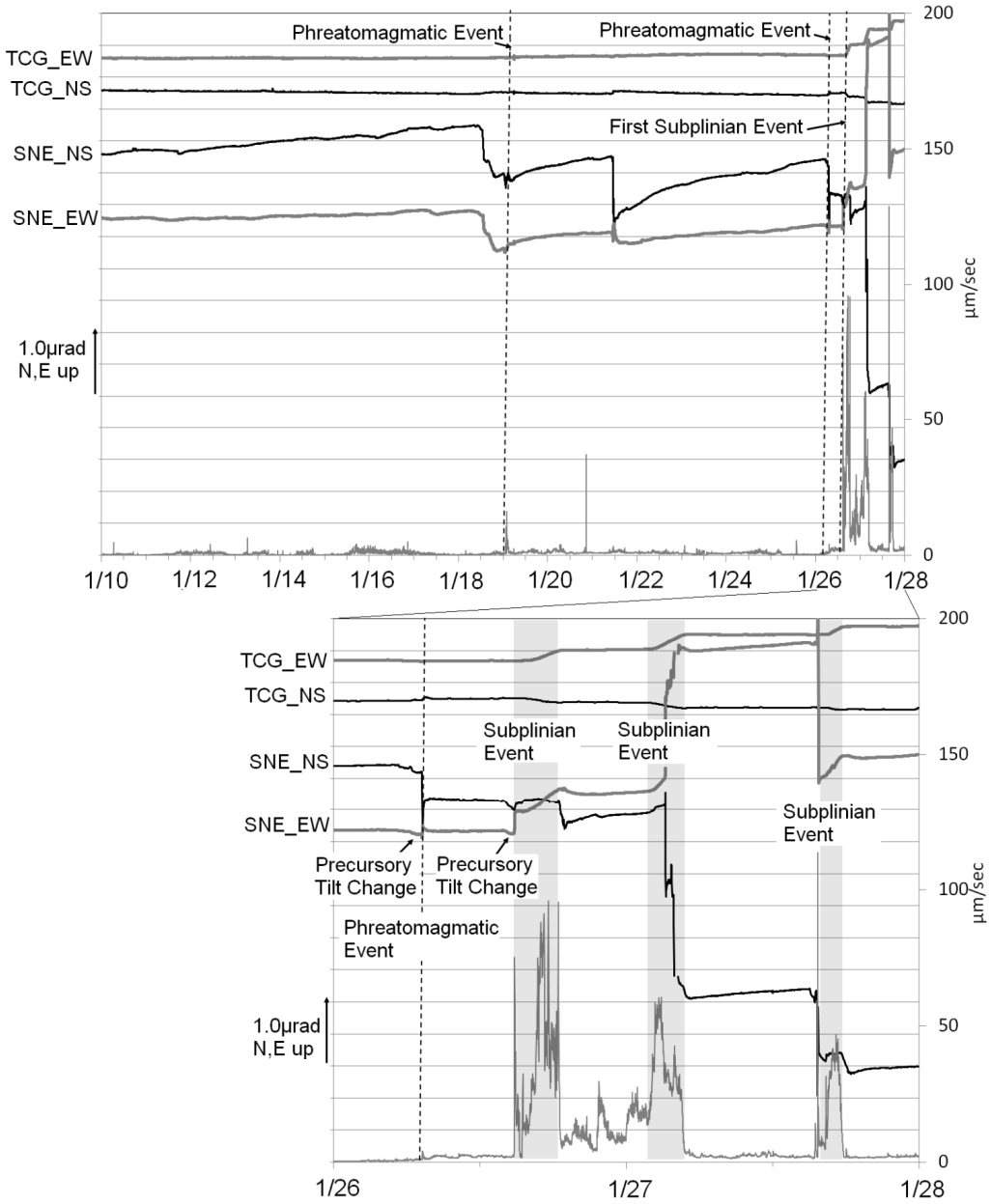


図 13　2011 年 1 月 26 日の準プリニー式噴火前の傾斜変動（TCG:高千穂河原，SNE:新燃北東）と地震計 1 分間平均振幅（高千穂河原 UD）の様子（2011 年 1 月 10 日～27 日）.

止した（図 17）．溶岩は最終的には直径約 600m，体積は約 1000 万 m^3 に達した（佐々木ほか，2011）．この火口内への溶岩蓄積に伴って，新燃岳北西数 km の地下深くの収縮を示す地殻変動が，傾斜計で観測された（図 14）．また，溶岩蓄積中の 1 月 28 日から 2 月上旬にかけて，低周波地震（BL 型地震）の群発が観測された（図 18）．なお，福岡管区気象台及び鹿児島地方気象台は，新燃岳で観測される火山性地震を以下のように分類している（図 19）．

・高周波地震（A 型地震）：比較的高周波が卓越し，P，S 相が明瞭なもの
・やや高周波地震（BH 型地震）：S 相が不明瞭で，約 3Hz 以上が卓越するもの
・低周波地震（BL 型地震）：S 相が不明瞭で，約 3Hz 以下が卓越するもの
・爆発地震：爆発的噴火に伴うもの
・調和型地震（BP 型地震）：P，S 相が不明瞭で，単一もしくは整数倍の複数の鋭いスペクトルピークを持つもの

それぞれの震源は図 20 のとおりである．

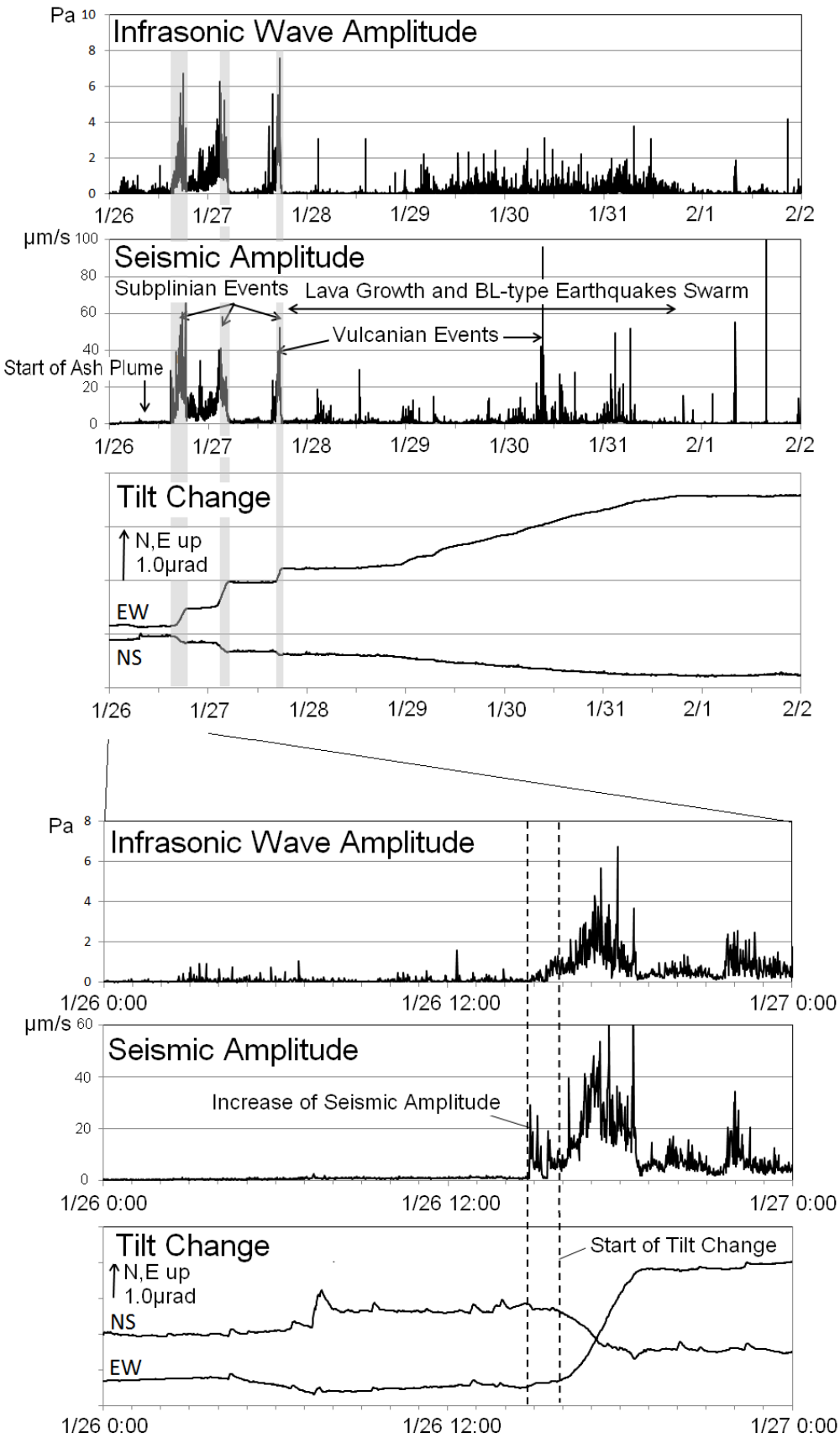


図 14 湯之野空振計，高千穂河原地震計の 1 分間平均振幅と高千穂河原傾斜変動.

図 15　2011 年 1 月 26 日の噴煙の様子（火口の南約 8km の猪子石（いのこいし）カメラ）．
上段：準プリニー式噴火前（07 時 31 分）．
下段：準プリニー式噴火（15 時 30 分）．

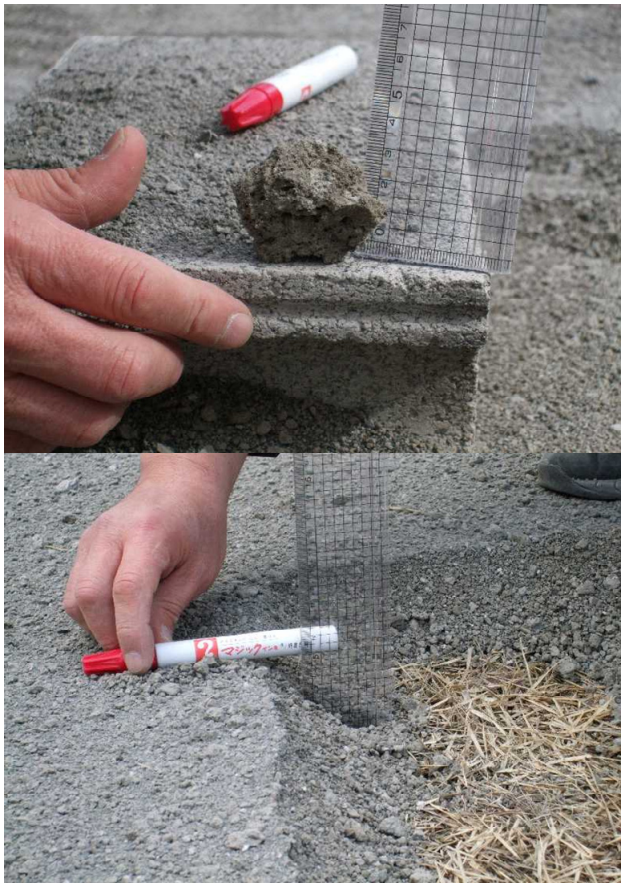


図 16 宮崎県都城市御池町（新燃岳火口から南東約 7km）の降下火砕物の状況（2011 年 1 月 27 日）．
上段：直径約 4～6cm の噴石を確認した．
下段：火山灰が約 5cm 堆積していた．

準プリニー式噴火及び火口内への溶岩蓄積に伴う傾斜変動は，茂木モデル（Mogi, 1958）を仮定すると新燃岳北西数 km の地下深くの約 1000 万 m^3 の収縮で説明できる．この量は，準プリニー式噴火及び火口底への溶岩蓄積による噴出量（約 2000 万 m^3）より少ない．しかしながら，圧力源の収縮量は圧力源の位置などによって大きく変わるので，この程度の違いならば誤差の範囲と考えることができる．したがって，この地殻変動と火山灰や溶岩の噴出から，新燃岳の北西数 km のマグマだまりから新燃岳へマグマが移動し，それによりマグマだまりは収縮し，その収縮量分のマグマが噴出したと考えられる．

1 月 27 日 15 時 41 分，2011 年の噴火活動で最初の爆発的噴火が発生した（福岡管区気象台及び鹿児島地方気象台では，爆発地震を伴い，かつ火口から約 2.6km 離れた湯之野観測点の空振振幅が 20Pa 以上の噴火を爆発的噴火として計数している）．その後，爆発的噴火は，前述も含め 3 月 1 日まで 13 回発生した．そのうち 2 月 1 日 07 時 54 分の爆発的噴火（図 21）は，一連の爆発的噴火のなかで最も爆発力が大きく，湯之野観測点で 458Pa の空振が観測された．この爆発的噴火により山麓で窓ガラスが割れ，けが人が出るなどの被害がでたほか，自治体等への聞き取り調査によると南九州の広い範囲で空振が体感された（図 22）．同日行った気象庁機動調査班（JMA-MOT）の調査では，火口の南西約 3.2km の地点で，長径 70cm の大きな噴石と，それによる直径約 6m，深さ約 2.5m の落下痕を確認した．また，火口の南西約 3km 付近でも大きな噴石を確認した（図 23，24）．2 月 1 日の爆発的噴火発生後に鹿児島県の協力を得て行った上空からの観測では，火口内に蓄積された溶岩の状況に大きな変化は認められず，爆発的噴火によって溶岩は大きく破壊されなかったことがわかった．図 25 に一連の爆発的噴火に伴う地震振幅と空振

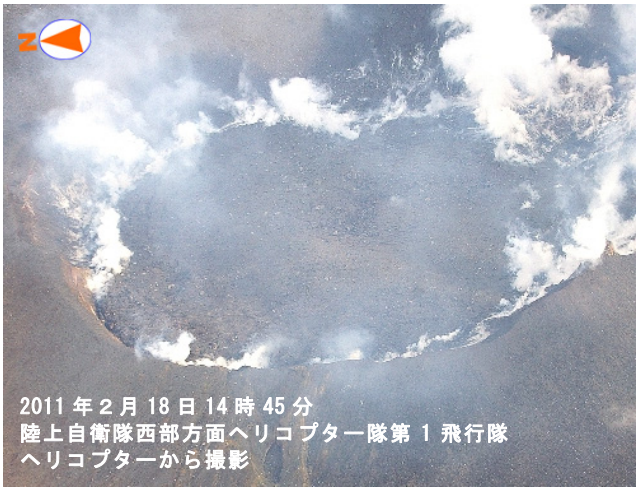


図 17　新燃岳火口内の溶岩の状況（2011 年 1 月 21 日～2 月 18 日）．火口内に溶岩が出現する前は火口内に火口湖が存在した．火口内の溶岩は徐々に平坦になっていている．

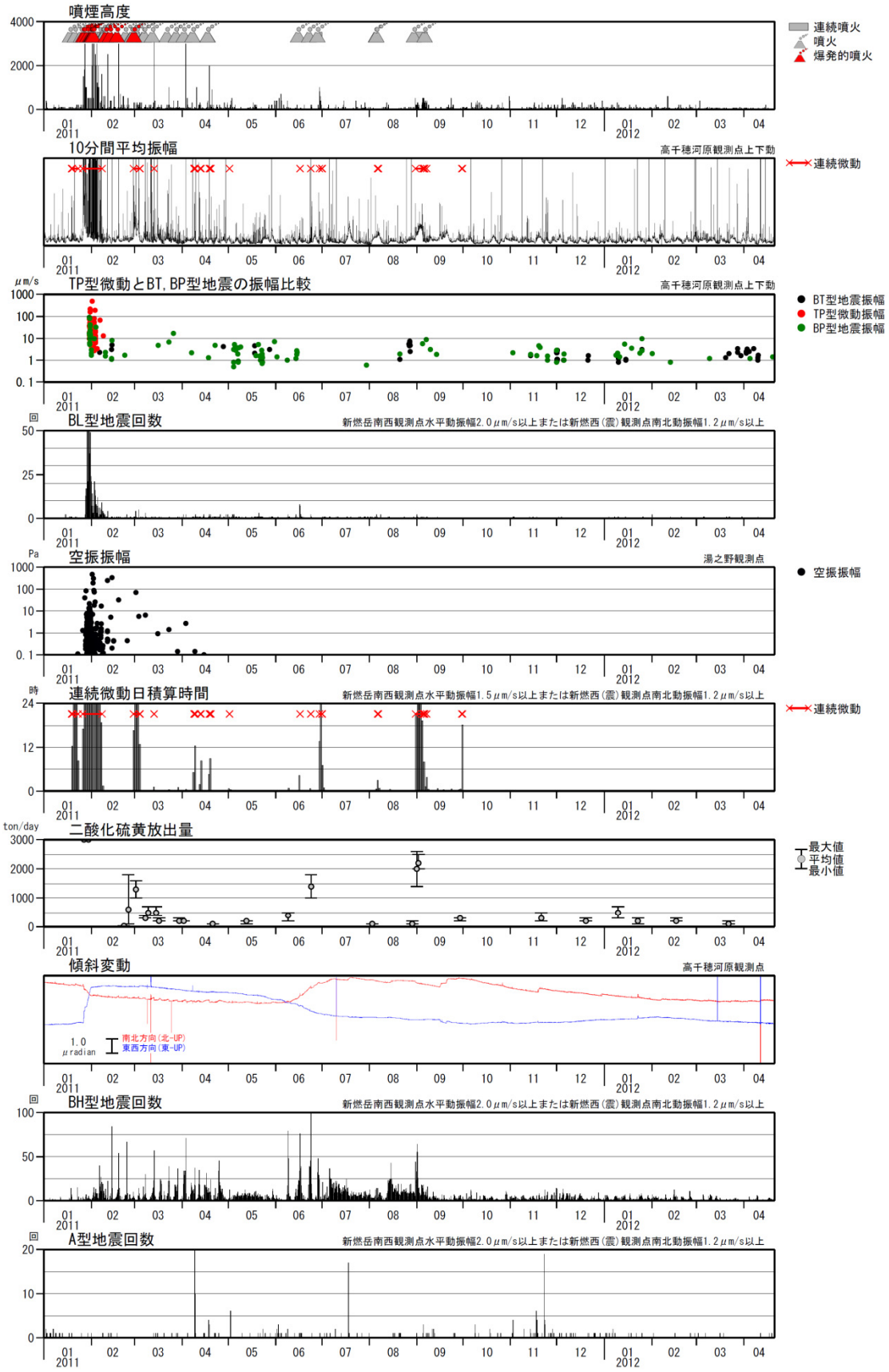


図 18　新燃岳の活動状況（2011 年 1 月～2012 年 4 月）．TP 型微動はハーモニックな微動，BP 型地震はハーモニックな地震，BT 型地震は減衰の遅い地震を示す．

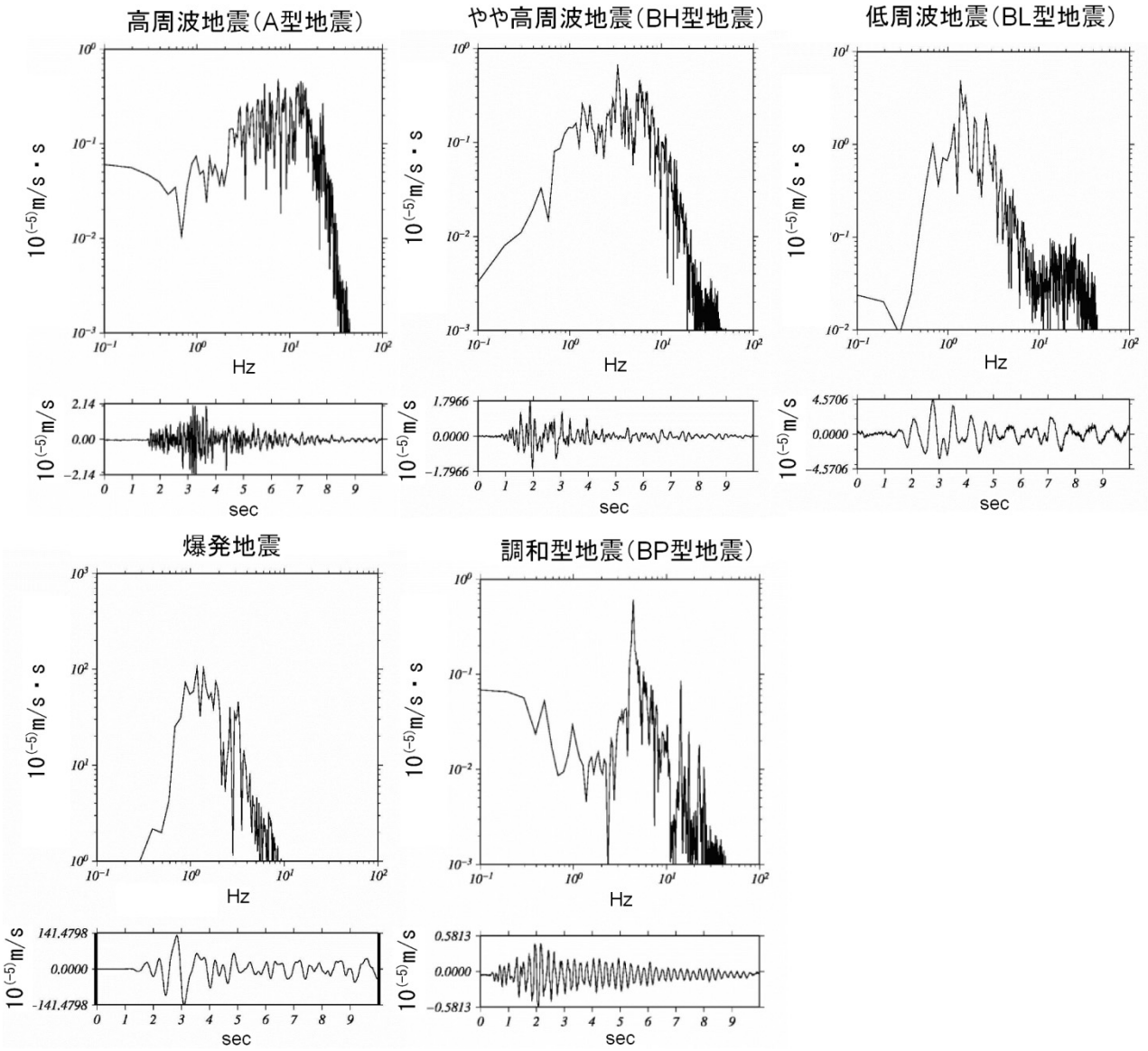


図 19　新燃岳で観測される主な地震の波形例とスペクトル（湯之野上下動）.

振幅の関係を示す．爆発的噴火の規模をほかの火山の事例と比較するために，桜島の爆発的噴火も同様に示している. なお, 観測点距離は震動振幅は 3km, 空振振幅は 5km に規格化している．これをみると，新燃岳の爆発的噴火の地震振幅と空振振幅の間にも，多少のばらつきはあるものの桜島と同様の関係がみられる. また 2011 年新燃岳の爆発的噴火の爆発力は，桜島昭和火口の大きいものと同程度，大きな噴石を 3km 以上飛散させるなど活発な噴火活動がみられた 1980 年代の桜島南岳山頂火口の噴火活動に匹敵するものであることがわかる.

爆発的噴火が頻発した 1 月 30 日から 2 月上旬にかけて，比較的振幅の大きいハーモニックな微動（TP 型）が時々発生した（図 18）．継続時間は数分～十数分であった．スペクトル構造をみると（図 26），いずれもピークを複数持ち，かつそのピーク周波数は整数倍に並んでいる．ほとんどの微動の基本周波数は，約 1Hz で，時間変化することはなかった．また，ハーモニックな微動が，爆発的噴火発生に先立って発生するといったこともなかった．ハーモニックな火山性微動は，爆発的噴火を繰り返す桜島や浅間山など（為栗ほか，2005 など）の安山岩質火山でよく観測されている．為栗ほか（2005）は，桜島のハーモニック微動を解析し，火道最上部に形成され

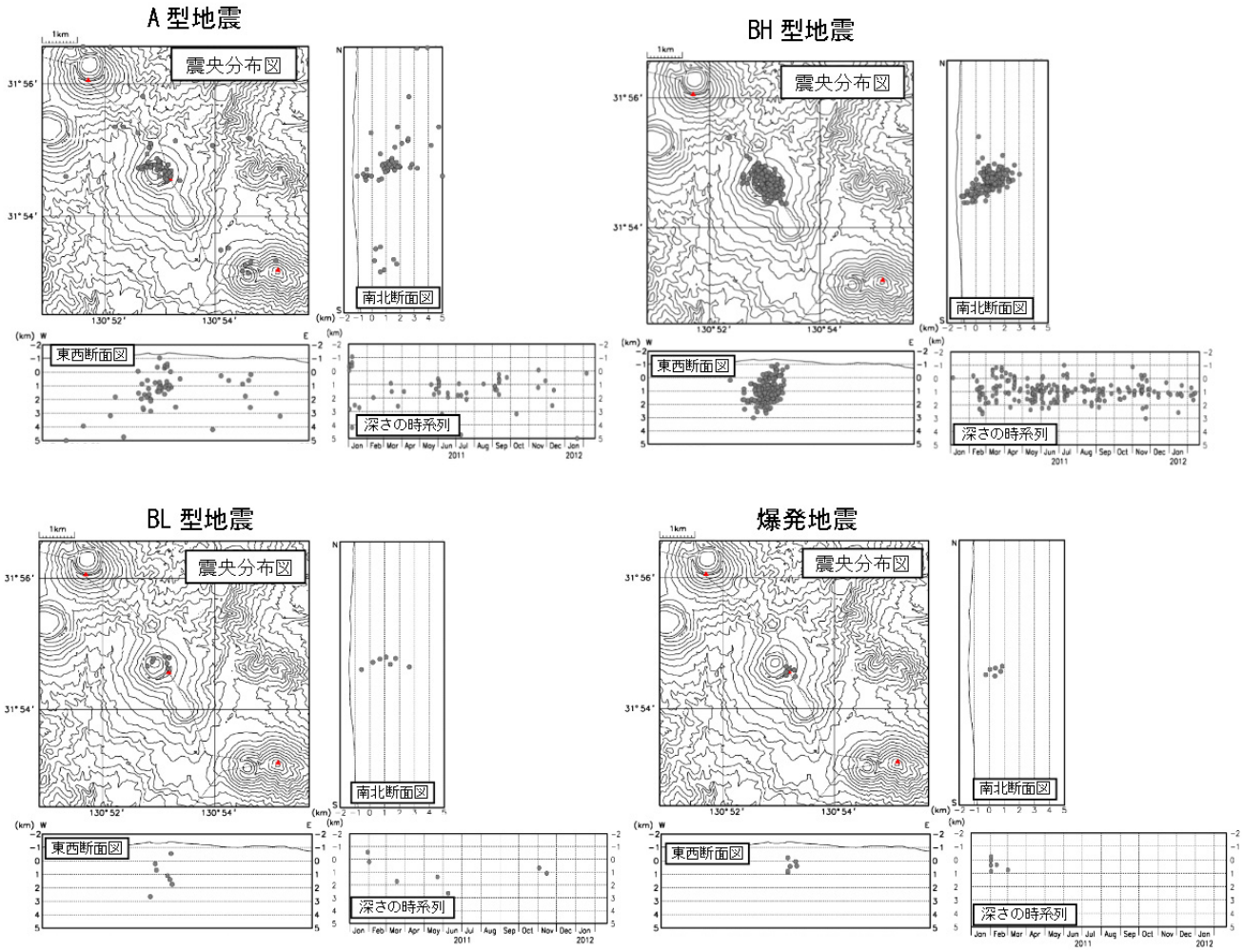


図 20　イベントタイプ毎の震源分布（2011 年 1 月～2012 年 2 月 20 日）.
震源計算にあたっては半無限速度構造を仮定し，Vp＝2.5km/sec，Vp/Vs=1.73 で計算した.

たガス溜まりの共鳴による周期的な体積変化が，微動発生に関与していると推定している．新燃岳の場合も，桜島と同様なことが起きていたのかもしれない.

(4) 2011 年 2 月中旬以降の活動

2011 年 2 月中旬以降も噴火活動は続き，2 月 14 日の爆発的噴火では，上空の強い風の影響により直径 1.5～5cm の小さな噴石が新燃岳の北東約 16km の地点に降下し，車のサンルーフ等が破損する被害があった（図 27）．また，3 月 13 日の噴火では，噴煙が火口縁上 4000m まで上がり，直径 1～4cm の小さな噴石が，新燃岳から南東約 9km の地点まで降下した．4 月 18 日の噴火では，直径約 2cm の噴石が新燃岳の東方約 9km の高原町に降下し，民家の太陽熱温水器や太陽電池パネル等が破損した（図 28）．このように，風の影響により数 cm 程度の小さな噴石が比較的遠方まで降下したが，個々の噴火の規模やその発生頻度は徐々に低くなり，4 月 18 日の噴火後は，約 2 ヶ月間噴火はなく，6 月，8 月にごく小～小規模噴火を繰り返したのちは，9 月 7 日を最後に噴火は発生していない.

国土地理院（2012）によると，新燃岳北西数 km の地下深くにあると考えられるマグマだまりは準プリニー式噴火及び火口内へのマグマ蓄積によって収縮したのち，2011 年 2 月上旬から，再び膨張を始めた（図 29）．基線の伸びは，2011 年 12 月には，準プリニー式噴火及び火口内への溶岩の蓄積の際の短縮量の 4 分の 3 にまで達したが，その後は鈍化・停滞し，2012 年 3 月に開催された第 122 回火山噴火予知

図 21　新燃岳の 2011 年 2 月 1 日の爆発的噴火による噴煙．火口の南約 8km の猪子石カメラによる．

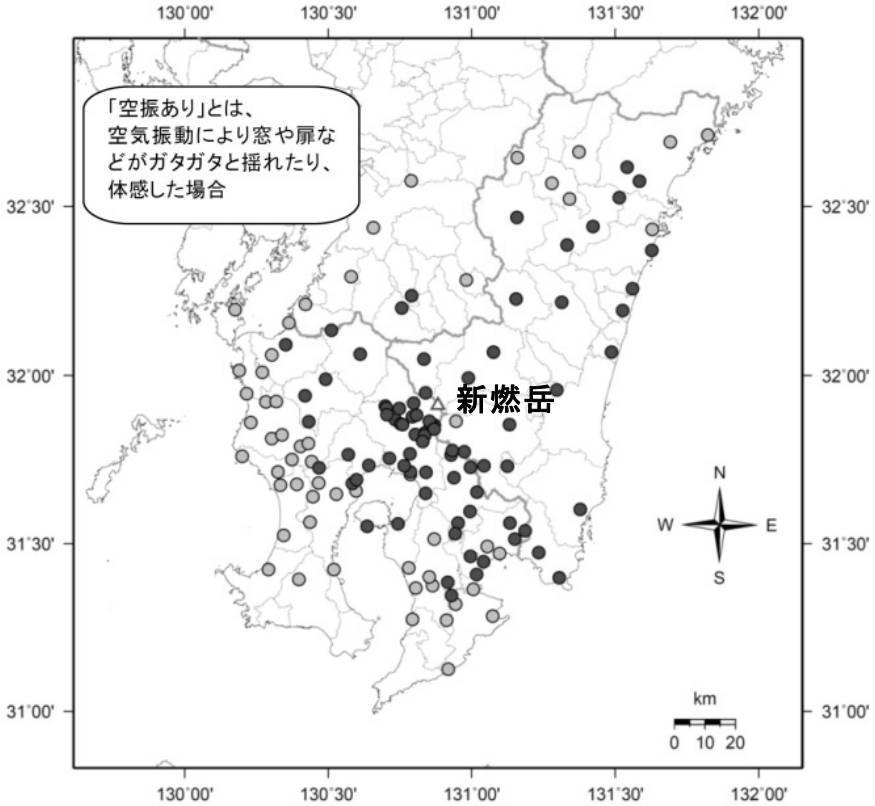


図 22　新燃岳の 2011 年 2 月 1 日の空振の聞き取り調査結果（黒丸は空振を体感した地点，灰色丸は体感しなかった地点を示す）．

図 23　2011 年 2 月 1 日の爆発的噴火に伴う大きな噴石（左）と落下痕（右）．
新燃岳火口から南西 3.2km の地点で長径 70cm, 短径 50cm の大きな噴石を確認した．この噴石による落下痕は直径 6m，深さ 2.5m であった．

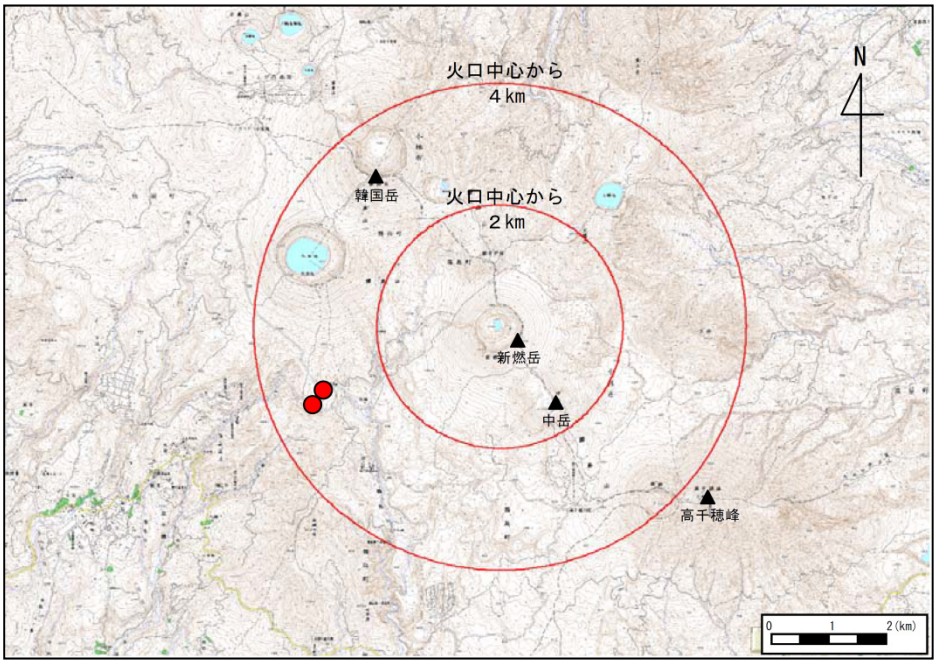


図 24　2011 年 2 月 1 日の爆発的噴火後行った現地観測により大きな噴石の飛散を確認した位置（赤丸）．

連絡会では，新燃岳北西数 km のマグマだまりへのマグマ供給は停止したと評価された．

火山性地震は噴火発生に前駆して増加し，噴火発生後，徐々に減少することを繰り返していたが，2011 年 9 月頃より減少し，2012 年 5 月以降は 2011 年 1 月の噴火活動以前の状態になった（図 3）．発生した地震のほとんどがやや高周波地震であった．

3.2　噴火に前駆する傾斜変動と地震活動

2011 年 1 月 26 日の準プリニー式噴火では，噴火発生前に新燃岳直下へのマグマ貫入を示すごくわずかな傾斜変動が観測されたが（加藤・藤原，2012），顕著な地震増加などはみられなかった．また，2011 年 1 月 27 日からの火口底への溶岩蓄積でも，顕著な前兆現象は観測されなかった．しかし，2011 年 2 月上旬以降に繰り返された噴火では，噴火に前駆して，顕著な傾斜変動とやや高周波地震（BH 型地震）の増加がたびたびみられた（図 30）．同様の変化は浅間山などの安山岩質火山でもみられている（中禮・潟山，2006）．しかし，2011 年 1 月 31 日の爆発的噴火発生前には上記のような前兆現象はみられず，また，2011 年 3 月 16～18 日，3 月 20 日，4 月 10～12 日のように変化が見られても，噴火しない場合もあった．

噴火に前駆する傾斜変動は，噴火発生の数時間～60 時間程度前から始まり，いずれの噴火も新燃岳火

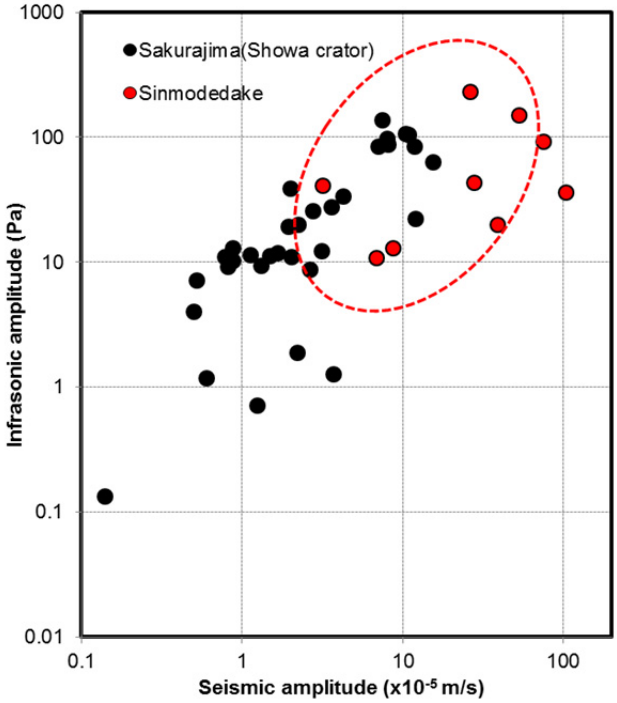


図 25　2011 年新燃岳及び桜島昭和火口の爆発的噴火に伴う震動と空振の振幅の関係．
赤点線で示したのは，井口・石原（1990）による 1980 年代の桜島山頂火口の爆発．データの震動振幅は震央距離 3km，空振振幅は同 5km で規格化してある．

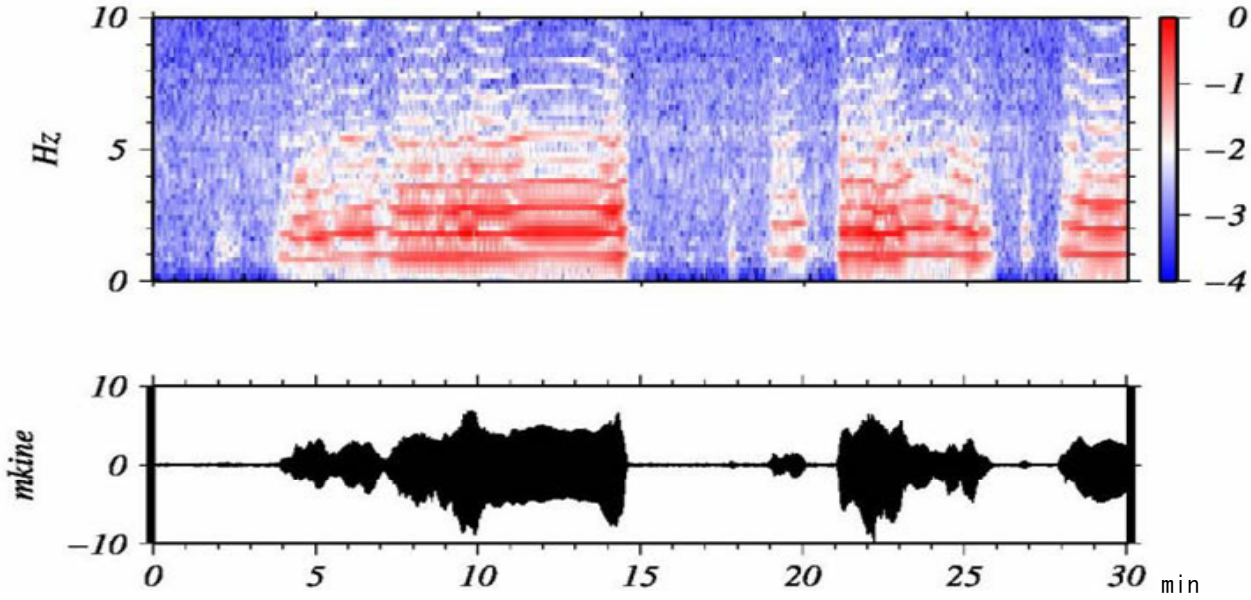


図 26　2011 年 2 月 2 日に発生したハーモニック微動のランニングスペクトルと速度波形（新燃岳南西観測点速度上下動）．

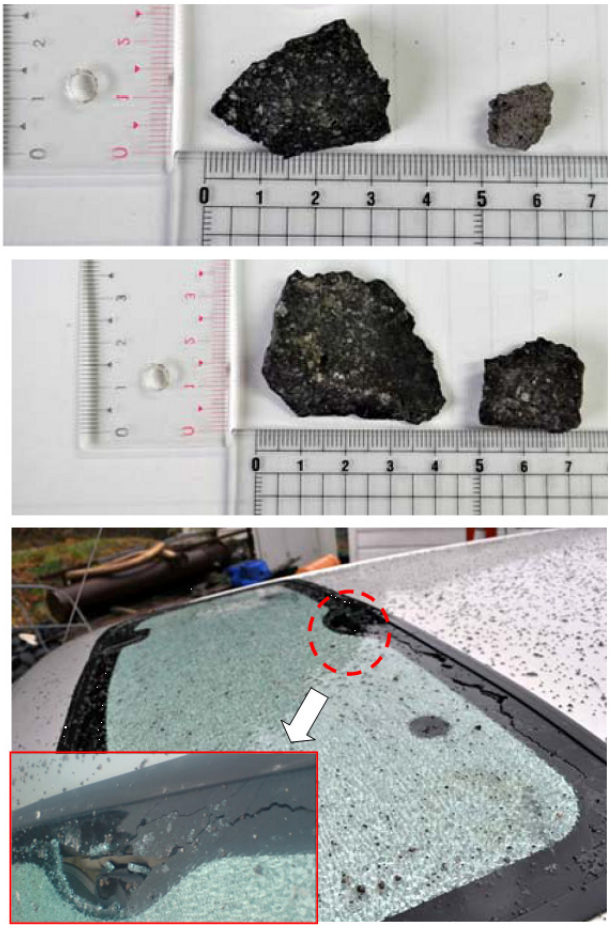


図 27　2011 年 2 月 14 日の噴火による小さな噴石の被害状況.
上段：宮崎県小林市細野（新燃岳火口の北東約 8km）での噴石.
中段：宮崎県小林市水流迫（新燃岳火口の北東約 14km）での噴石.
下段：宮崎県小林市真方（新燃岳火口の北東約 16km）　車のサンルーフに約 1.5cm の穴（赤丸）が開いていた.

図 28　2011 年 4 月 18 日の噴火後行った現地調査で，高原町（火口の東側約 9km）で確認された小さな噴石（上）と損傷した太陽熱温水器（下）.

口の北約 1.5km の新燃北東観測点（SNE）で南西方向が上昇，火口から南西約 3km の湯之野観測点（YNN）で北西方向が上昇，火口から南南東約 3km の高千穂河原観測点（TCG）では北方向の上昇を示している（図 31）．これらの傾斜変動は，新燃火口の南西約 1km の深さ約 1km 付近に位置するダイクの開口で説明できる（加藤ほか，2011）（図 31）．噴火に前駆する傾斜変動量などの時間変化をみると（図 32），2011 年 2 月 7 日頃までの噴火では，噴火発生の数十分～2 時間前から傾斜変動が始まったが，2011 年 2 月 11 日以降の噴火では 10～60 時間前から始まるようになった．また，傾斜変動量は 2011 年 2 月 14 日頃までは高千穂河原観測点で，概ね 0.04 μrad 以下であったが，2011 年 2 月 18 日以降は 0.04～0.14 μrad と大きくなっている．噴火に前駆する傾斜変動量の積算グラフをみると，その変動レートは 2 月上旬は 0.05 μrad/day であったのが，2 月中旬以降は 0.025 μrad/day と小さくなり，5 月以降はさらに小さくなっている．噴火活動も，2 月中旬頃から噴火が間欠的に起きるようになり，5 月以降はさらにその頻度が下がっており，傾斜変動レートの低下とほぼ同じ傾向を示している．このことは，傾斜変動が新燃岳へのマグマ貫入によるものとすると，マグマ貫入など地下のマグマ活動の低下と解釈することができる．

3.3　二酸化硫黄放出率

新燃岳の二酸化硫黄放出率観測は，2011 年の噴火火活動開始前は噴煙活動が低調なこと，自動車道路が火口から離れていることなどにより，2008 年 8 月の噴火後の 2008 年 9 月（10 トン/day）しか実施されておらず，2011 年 1 月 26 日の準プリニー式噴火直前の状況については不明である．2011 年 1 月 26 日以降は，噴煙量が増大したこともあり，たびたび観測を行うことができた．観測は小型紫外分光計を用いた二酸化硫黄測定装置（COMPUSS）（Mori et al., 2007）を使用し，それを車に搭載したトラバース法で行った．なお，放出率の算出にあたっては，噴煙移動速度は噴煙高度に対応する気圧面の GPV の風速値を用いている．図 33 に二酸化硫黄放出率の推移を示す．活発な噴火活動が続いていた 1 月 27 日から 2 月上旬にかけては 10000 トン/day 前後であり，火口底に溶岩が出現し始めた 1 月 28 日には 40000 トン

図 29　国土地理院による地殻変動観測結果（国土地理院，2012 より）.

/day を超えた（Mori and Kato, 2013）．しかし，噴火が間欠的に発生するようになった 2 月中旬以降は 1000 トン/day 以下に減少し，噴火の規模や頻度が低下するとともにさらに減少し，2011 年 4 月以降は数百トン/day となった．そして，2012 年 3 月以降は 100 トン/day 程度となり，2012 年 7 月以降は数十トン未満で検出限界に近い状態となっている．

3.4　火口内の溶岩の状況

福岡管区気象台及び鹿児島地方気象台は，防衛省や国土交通省，鹿児島県，宮崎県の協力を得て，ヘリコプターを用いた上空からの観測を 2011 年 1 月 26 日以降頻繁に行った（図 34a～c）．前述のとおり，1 月 27 日に初めて確認された火口底の溶岩は，その後成長し，1 月 29 日に直径約 500m に達し，一時はその上部が大浪池カメラからも観測された．2 月 2 日の上空からの観測では，溶岩の頂部が平坦になるとともに，直径約 600m に広がっているのが確認された．2011 年 2 月中旬以降は，繰り返し発生した噴火などにより，徐々に表面に亀裂が生じるなど，溶岩表面に変化がみられ，また噴火による火山灰等の堆積により火口壁と溶岩の境界が不明瞭となっていったが，溶岩の体積に大きな変化は認められなかった．2 月以降の観測では，溶岩の表面に南北に走る亀裂が認められ，3 月 11 日には，火口内の南東部に直径約 100m の火孔が確認された．4 月 26 日の観測では，溶岩の北端及び中央から北西部分に新たな亀裂が認められた．また，2011 年 9 月以降は溶岩上に水たまりが時々確認されるようになり，溶岩の表面温度の低下を示唆している．

赤外熱映像装置による観測では（図 35），2011 年 2 月上旬までは溶岩の中心付近に高温部分がみられたが，中心付近の温度は徐々に低下し，2 月下旬以降は溶岩の縁辺部の噴気等に対応した部分に高温が目立つようになった．

火口外では，2008 年 8 月の噴火で形成された火口の西外側斜面の亀裂で 2011 年 9 月以降，ごく弱い噴気や赤外熱映像装置で高温域が時々観測された（図 36）．

3.5　周辺の地震活動

次に霧島山周辺の地震活動をみる．図 37 に一元化震源を示す．新燃岳北西のマグマだまりの膨張が始まった 2009 年 12 月以降，韓国岳西方（A）の地震活動はわずかながらも活発化しているようにみえる．また，新燃岳の北東の小林市付近（C）や大浪池の南（B）などもごくわずかではあるが，活動が活発化しているようにもみえる．これらの地震活動は新燃岳北西のマグマだまりへのマグマ蓄積などの火山活動と何らかの関係があるのかもしれない．深部で発生する低周波地震は新燃岳の東方の深さ約 10～15km と 20～25km 付近に分布している．その活動は，2010 年中頃からやや活発となり，一時的な増加を繰り返した．深部で発生する低周波地震は，いくつかの火山で浅部の火山活動に先立って発生したことが報告されており（伊豆大島：Ukawa and Ohtake, 1987,

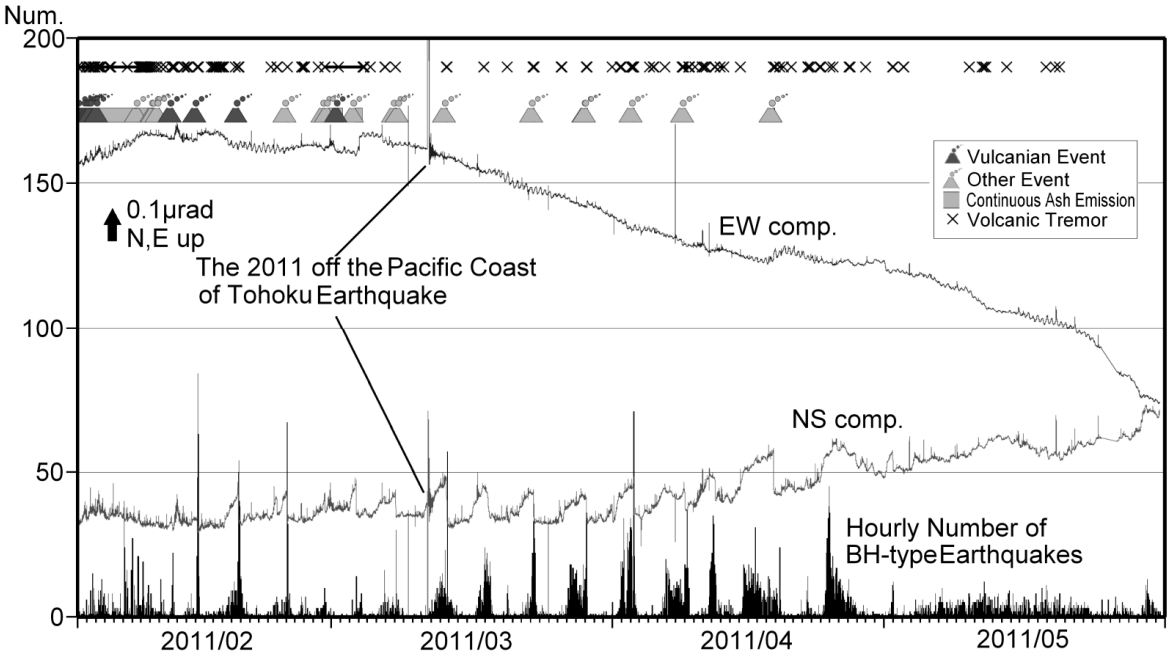


図 30　新燃岳高千穂河原傾斜計の傾斜変動と BH 型地震時別回数（2011 年 2 月 1 日～5 月 31 日）.

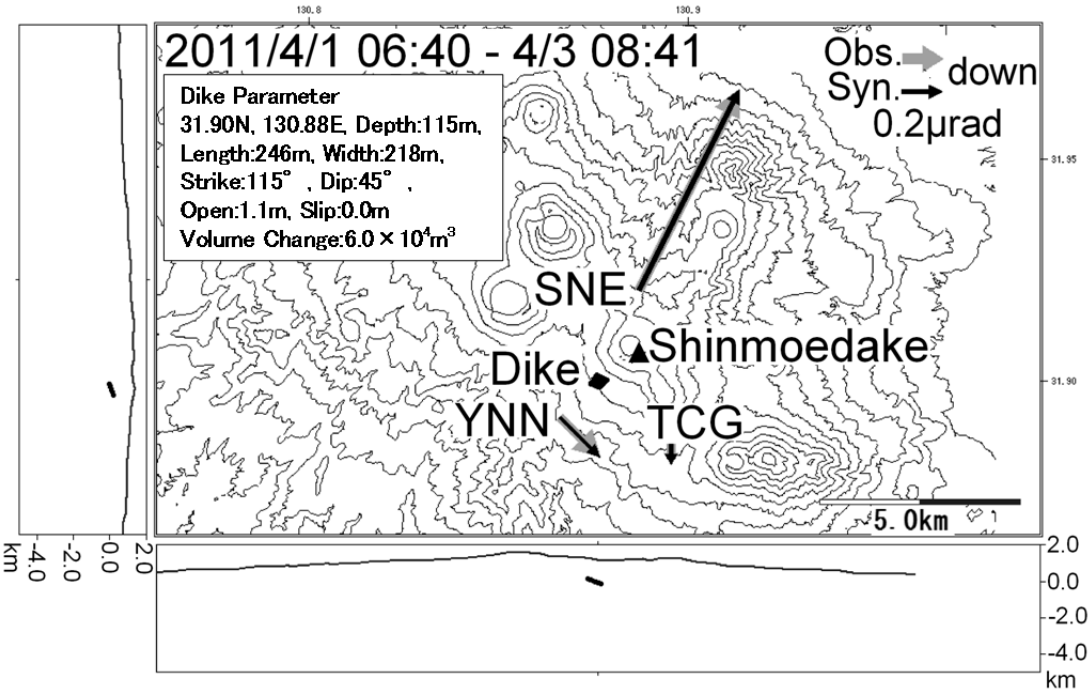


図 31　2011 年 4 月 3 日の噴火に前駆する傾斜変動とモデル計算結果.

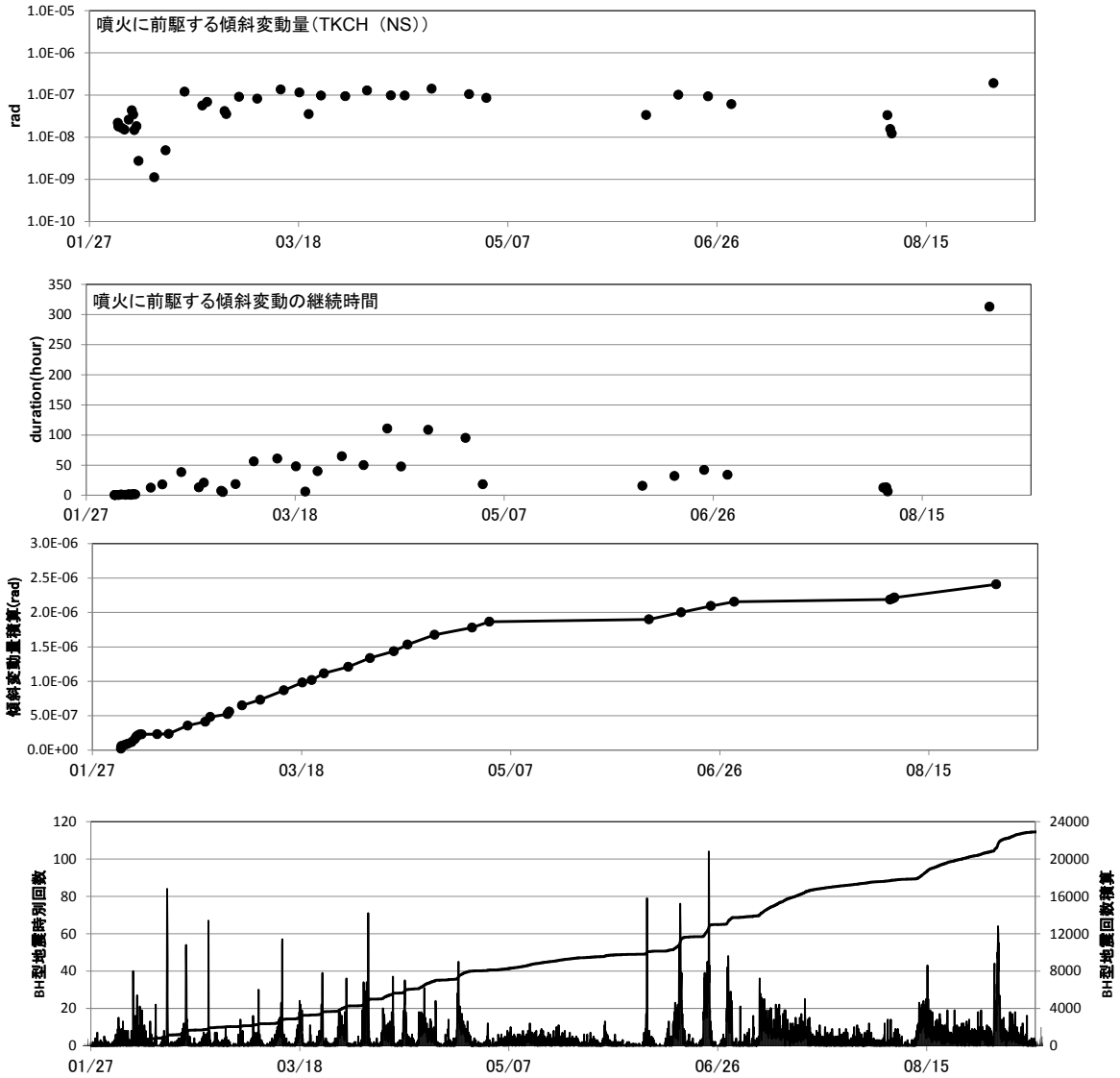


図 32　噴火に前駆する高千穂河原（TKCH）南北成分における傾斜変動量，その継続時間，噴火に前駆する傾斜変動量の積算の時系列，BH 型地震時別回数と BH 型地震の最大振幅の回数積算（2011 年 1 月 27 日～8 月 31 日）.

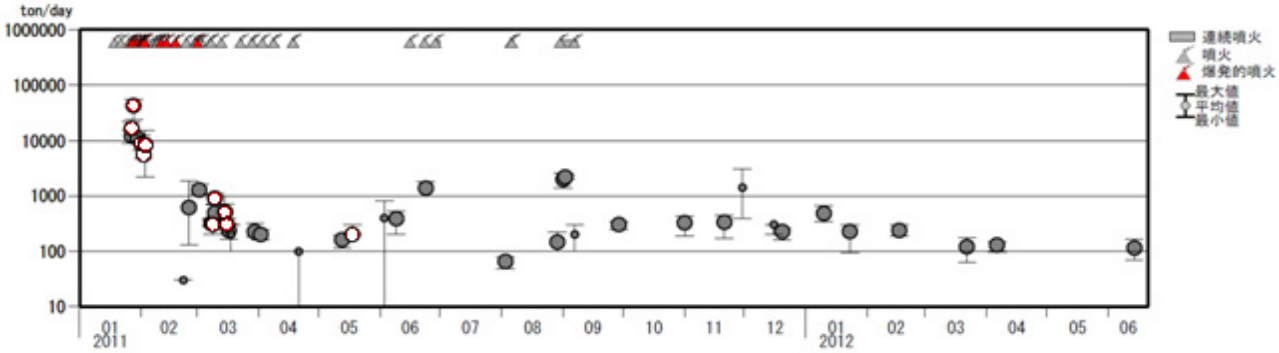


図 33　1 日当たりの二酸化硫黄放出量（2011 年 1 月～2012 年 6 月 20 日）.
白丸は東京大学，灰色丸は気象庁の観測結果を示す.
小さい丸は，風が弱いなどのため精度の低い値を示す.

図 34a　上空からの観測による新燃岳火口の状況（2011 年 1 月 21 日～2011 年 3 月 22 日）．火口内の溶岩は，当初は中央付近が盛り上がっていたが，徐々に平坦になり，それにつれて表面も亀裂などがみられるようになった．噴煙も 1 月下旬までは中央付近から噴出していたが，2 月にはほとんどみられなくなった．図中の白丸，赤丸は同じ領域を示す．

図 34b　上空からの観測による火口の状況（2011 年 4 月 26 日～2011 年 9 月 22 日）.
図中の白丸，赤丸は同じ領域を示す.

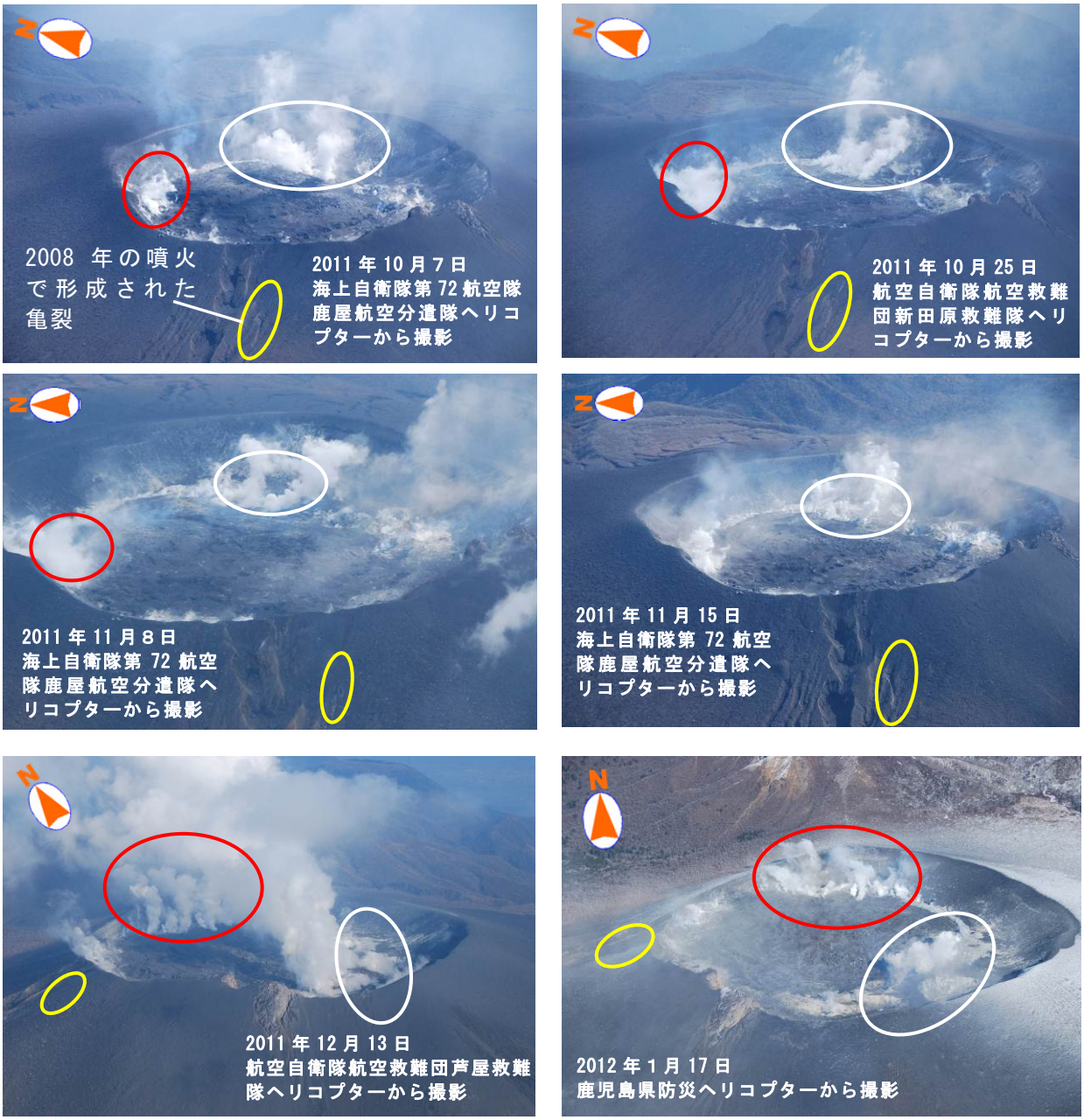


図 34c　上空からの観測による火口の状況（2011 年 10 月 7 日～2012 年 1 月 17 日）.
図中の黄丸，白丸，赤丸は同じ領域を示す.

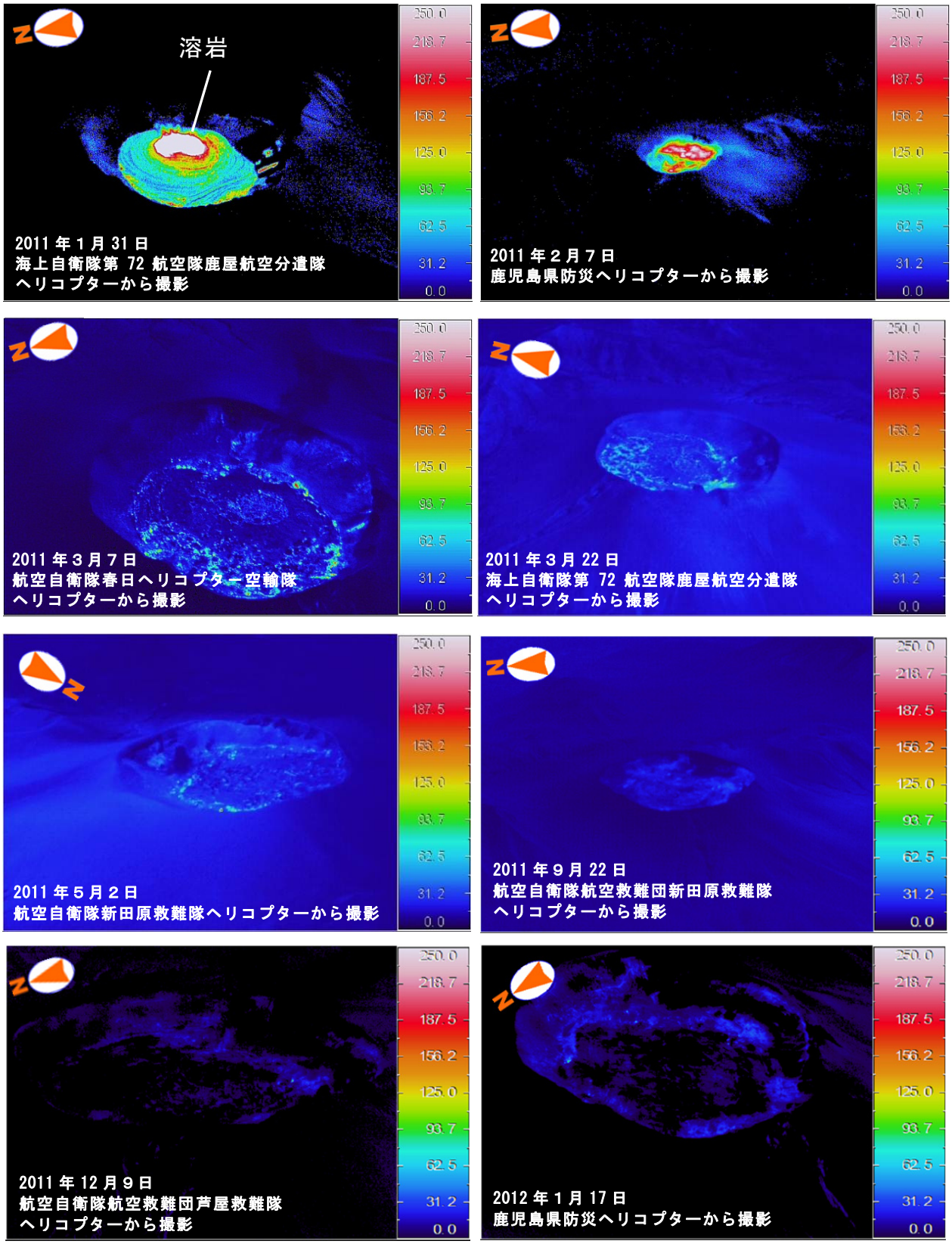


図 35　赤外熱映像装置による火口内の溶岩の温度分布（2011 年 1 月 31 日～2012 年 1 月 17 日）.

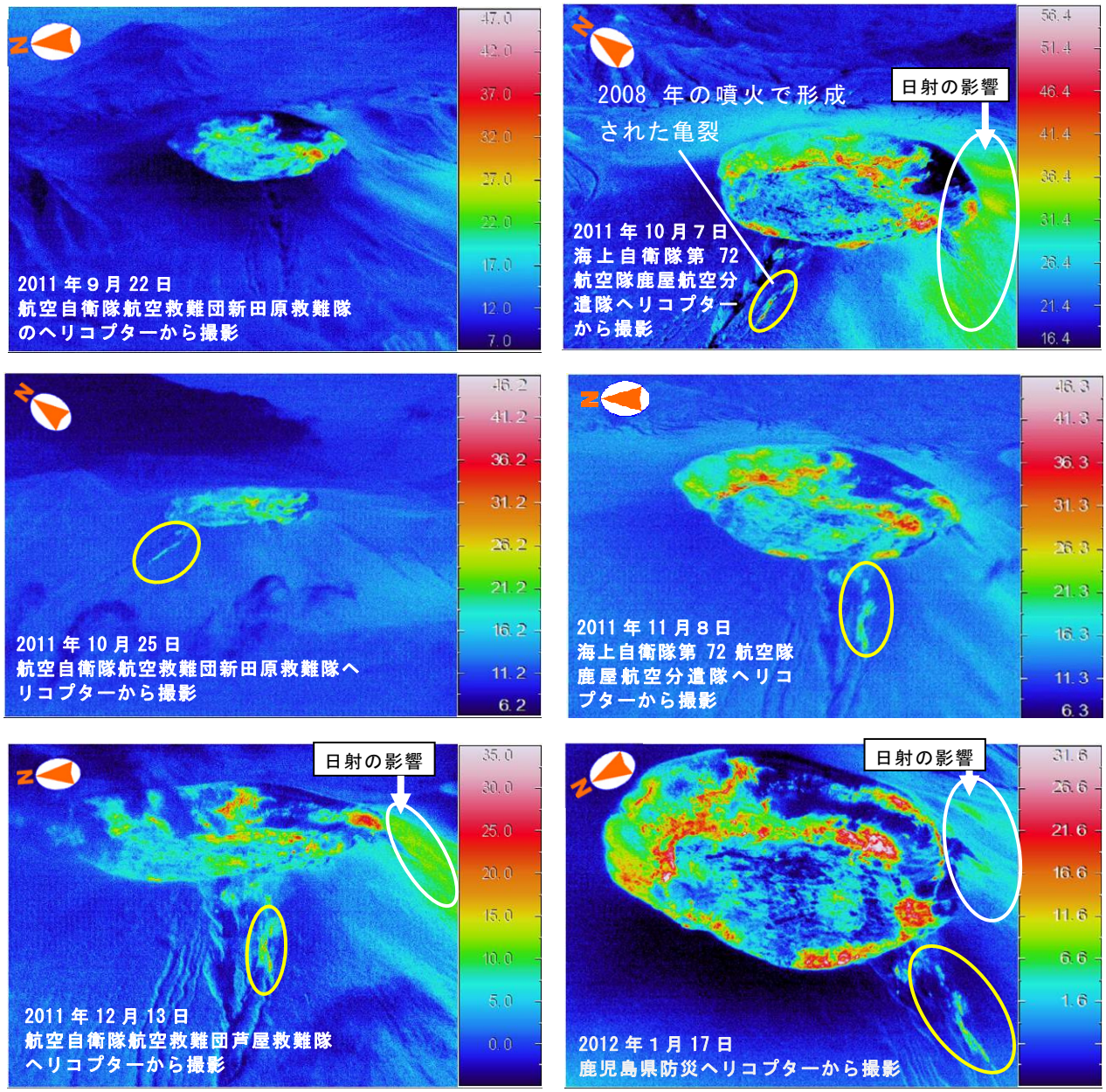


図 36　赤外熱映像装置による火口付近の温度分布（2011 年 1 月 31 日～2012 年 1 月 17 日）．
図中の黄丸，白丸は同じ領域を示す．

三宅島：藤田・鵜川，2000，岩手山：Nakamichi et al., 2003)，霧島山で観測された深部低周波地震と新燃岳の噴火活動の関連性は否定できないが，今回の噴火を引き起こしたマグマだまりが新燃岳の北西に位置するのに対し，深部低周波地震は新燃岳の東方で発生しており，直接結びつけて考えるのは難しい．

4　おわりに

図 38 に 2011 年新燃岳噴火活動の概要を示す．2011 年新燃岳噴火活動では，2011 年 1 月 26 日からの準プリニー式噴火発生前に，地震増加や顕著な地殻変動など，その後，準プリニー式噴火発生を予想させる明瞭なマグマの動きを示す現象は観測されなかった．そのため，噴火発生前に噴火警報を発表するなど警戒を呼び掛けることができなかった．しかしながら，1 月 26 日から始まる準プリニー式噴火や火口内への溶岩噴出では，それらに伴って新燃岳北西数 km のマグマだまりから大量のマグマが移動したことを示す地殻変動が傾斜計などで観測され，マグマがマグマだまりから火口へ移動したことを地殻変動

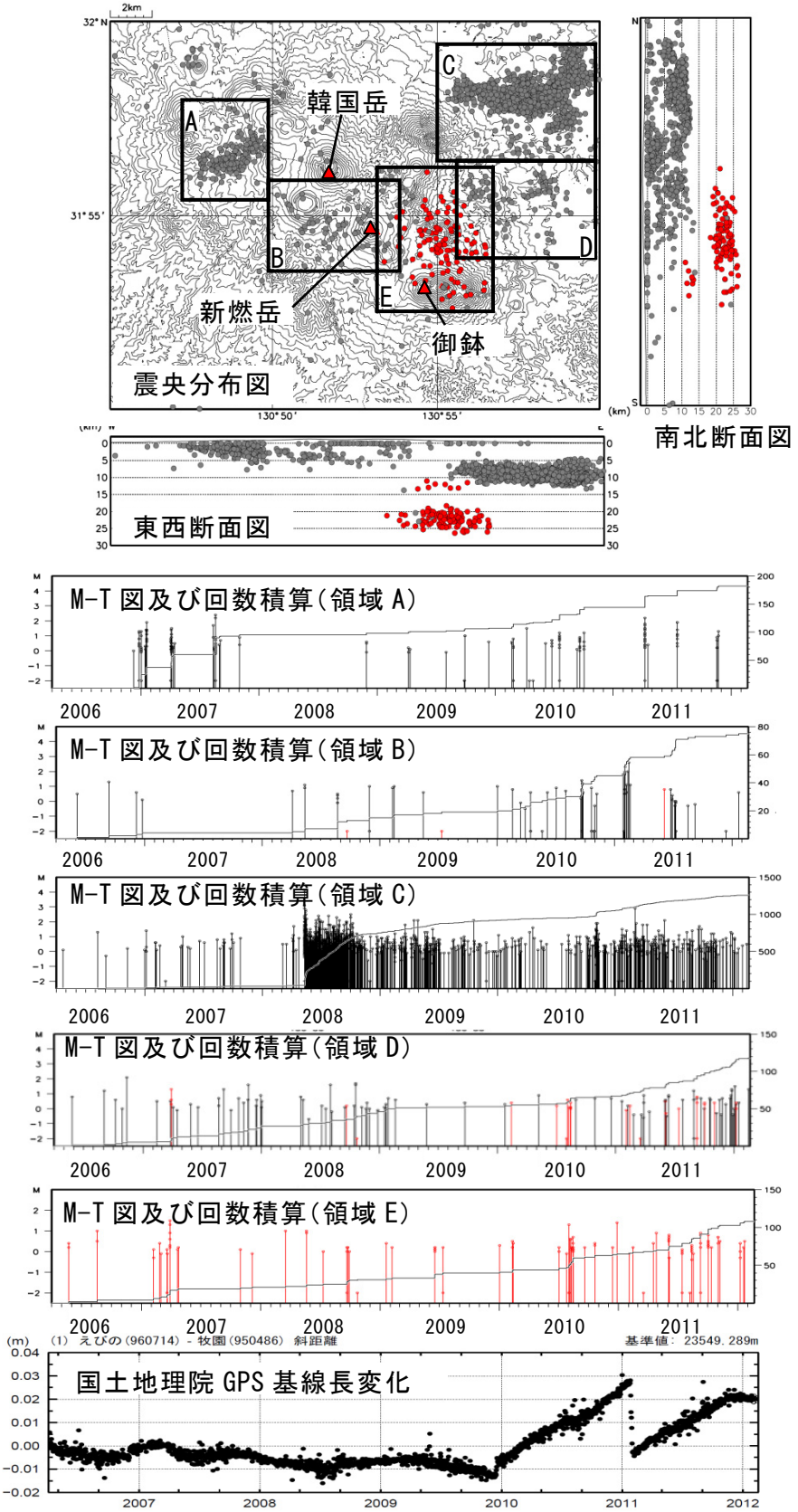


図 37　一元化震源による地震分布（赤は低周波地震を示す）及び国土地理院によるえびの-牧園の基線長変化（2006 年 4 月 1 日～2012 年 2 月 14 日）.

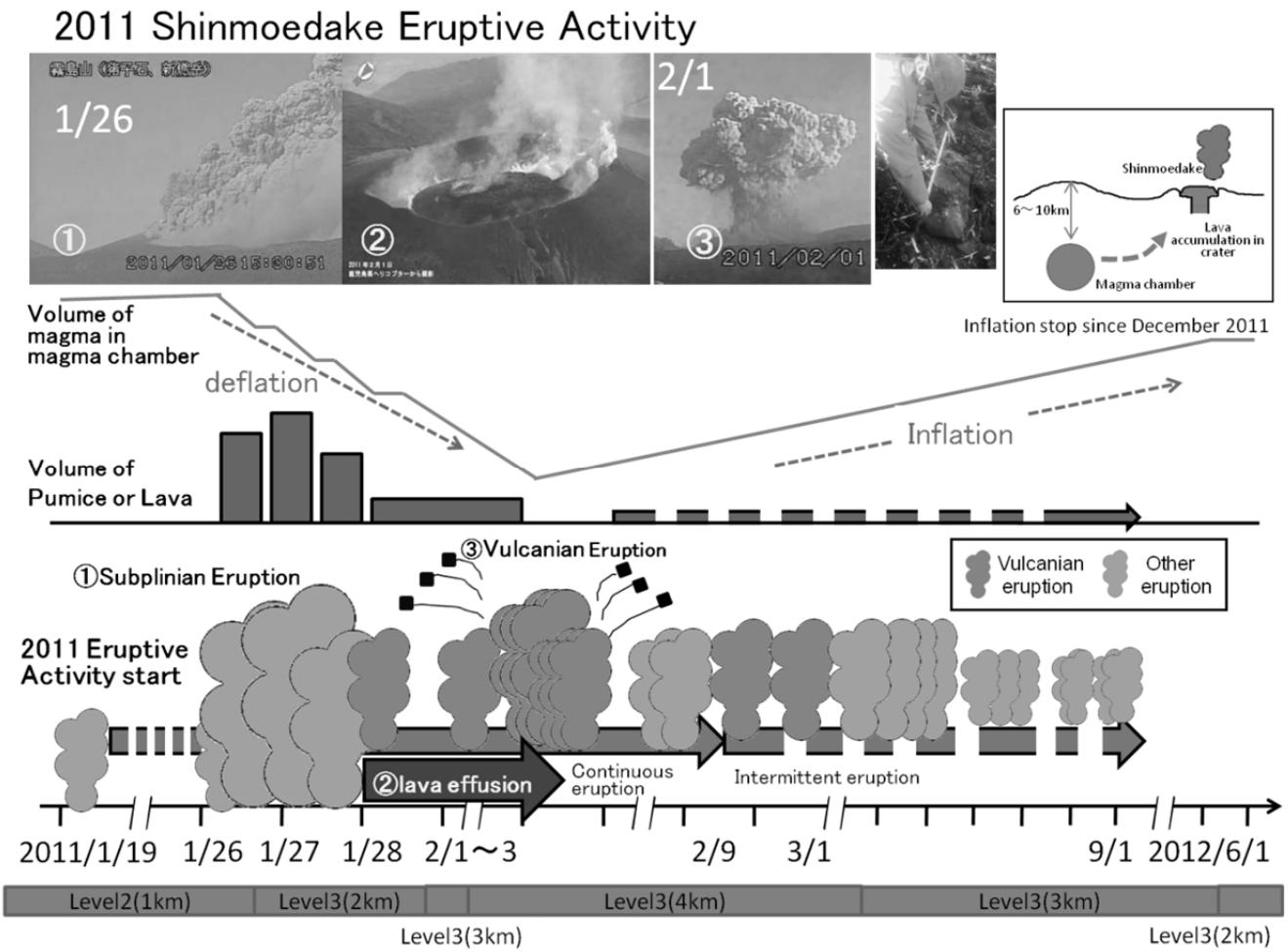


図 38　2011 年新燃岳の噴火活動概要.

と噴出現象から捉えることができた．このことは発生している現象の理解に活用された．また，2011 年 2 月上旬以降発生した噴火では，噴火発生に前駆して，傾斜変動とやや低周波地震の増加を観測することができ，新燃岳火口付近へのマグマの貫入を捉えることができ，その結果は噴火発生予測に活用された.このように,マグマの動きを捉えられた場合は，起きている火山現象を理解し，適切な防災情報を発信することができるが，マグマの動きを捉えられなかった場合は,起きている現象の理解が困難となり，防災情報の発信に遅れが生じる可能性がある．実際の火山活動の場合は，どちらかというと後者のほうが多いかもしれない．1 月 26 日からの準プリニー式噴火前のように必ずしもマグマの動きを捉える事が出来るとは限らないことを想定して，次に起こりうる現象について考え,準備を行うことが重要である.

謝辞

本論の作成に当たっては,国土地理院,鹿児島県,宮崎県，東京大学，九州大学及び独立行政法人防災科学技術研究所のデータを使用させていただきました．また，上空からの観測では，防衛省，国土交通省九州地方整備局，鹿児島県，宮崎県の協力を頂きました.査読者である山里　平博士及び菅野智之氏,また編集委員会の内藤宏人氏,坂井孝行氏,長岡　優氏から頂いた御意見は，本稿を改善するにあたり非常に有益でした．ここに記して御礼申し上げます.

文献

安藤　忍 (2013): ALOS「だいち」により観測された霧島山新燃岳山頂火口の変化について，験震時報，**77**, 99-112.

今給黎哲郎・大脇温子 (2011): 火山 GPS 統合解析データに基づく霧島山の変動源モデル，国土地理院時報，**121**，183-188.

加藤幸司・山里　平・小枝智幸・末峯宏一・松末伸一 (2010): 2010 年新燃岳の噴火活動について，日本火山学会 2010 年度秋季大会講演予稿集，P55.

加藤幸司・小久保一哉・藤原善明・松末伸一 (2011): 新燃岳噴火に前駆する傾斜変動について，日本地球惑星科学連合 2011 年大会予稿集，SVC070-P36.

加藤幸司・藤原善明 (2012): 2011 年 1 月 26 日新燃岳噴火に先行して観測された傾斜変動について，日本火山学会秋季大会予稿集，P73.

下司信夫・宝田晋治・筒井正明・森　健彦・小林哲夫 (2010): 霧島火山新燃岳 2008 年 8 月 22 日噴火の噴出物，火山，**55**，53-64.

下司信夫・齋藤元治・東宮昭彦・宮城磯治・古川竜太・中野俊・星住英夫・宝田晋治 (2011): 霧島火山新燃岳 2011 年 1 月噴火を駆動したマグマ，日本地球惑星科学連合 2011 年大会予稿集，SVC050-04.

国土地理院 (2012): 霧島山, 第 122 回火山噴火予知連絡会資料.

小林哲夫・田島靖久・筒井正明・山越隆雄・木佐洋志(2011): 霧島火山・新燃岳 2011 年マグマ噴火の先駆的噴火，日本地球惑星科学連合 2011 年大会予稿集，SVC070-P06.

佐々木寿・磯部浩平・本間信一・阪上雅之・向山　栄・中田節也・小林哲夫・村上　亮 (2011): 霧島山新燃岳における斜め写真を用いた火口内溶岩の体積推定，日本火山学会 2011 年度秋季大会講演予稿集，P13.

新堀敏基・桜井利幸・田原基行・福井敬一 (2013): 気象レーダー・衛星による火山噴煙観測　－2011 年霧島山（新燃岳）噴火事例－，験震時報，**77**，141-216.

高木朗充・福井敬一・鬼澤真也・山本哲也・加藤幸司・近澤心・藤原健治・坂井孝行 (2011): 2011 年霧島山新燃岳噴火前の山頂部地殻変動，日本火山学会 2011 年度秋季大会講演予稿集，P07.

為栗　健・Sukir Maryanto・井口正人 (2005): 桜島火山におけるハーモニック微動のモーメントテンソル解析，京都大学防災研究所年報，**48B**，323-328.

中禮正明・潟山弘明 (2006): 2004 年浅間山噴火活動に伴う傾斜変動について，火山，**51**，91-101.

藤田英輔・鵜川元雄 (2000): 三宅島で発生した深部低周波地震，火山，**45**，295-299.

前原祐樹・武尾　実・大湊隆雄・市原美恵・及川　純(2012): 2011 年新燃岳噴火の準プリニー式噴火，ブルカノ式噴火，溶岩流出に伴う傾斜変動，日本地球惑星科学連合 2012 年大会予稿集，SVC050-22.

Ikeuchi, K. and T. Yokota (2007): Volcanic disaster prevention countermeasures in terms of evacuation systems at eruptions and related phenomena, Abstract of Cities on Volcanoes 5, Shimabara, Japan.

Kozono, T., H. Ueda, T. Ozawa, T. Koyaguchi, E. Fujita, A. Tomiya, and Y. Suzuki (2013): Magma discharge variations during the 2011 eruptions of Shinmoe-dake volcano, Japan, revealed by geodetic and satellite observations, Bull. Volcanol., in press.

Mogi, K. (1958): Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surface around them, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. of Tokyo, **36**, 99-134.

Mori, T., J. Hirabayashi, K. Kazahaya, T. Mori, M. Ohwada, M. Miyashita, H. Iino, and Y. Nakahori (2007): A Compact Ultraviolet Spectrometer System (COMPUSS) for Monitoring Volcanic SO2 Emission: Validation and Preliminary Observation, Bull. Volcanol. Soc. Japan, **52**, 105-112.

Mori, T. and K. Kato (2013): Sulfur dioxide emissions during the 2011 eruption of Shinmoedake volcano, Japan, Earth Planets Space, in press.

Nakada, S., Y. Nagai, T. Kaneko, Y. Suzuki and F. Maeno (2013): The outline of the 2011 eruption at Shinmoe-dake (Kirishima), Japan, Earth Planets Space, in press.

Nakamichi, H., H. Hamaguchi, S. Tanaka, S. Ueki, T. Nishimura, and A. Hasegawa (2003): Source mechanisms of deep and intermediate-depth low-frequency earthquakes beneath Iwate volcano, northeastern Japan, Geophys. J. Int., **154**, 811-828.

Suzuki, Y., M. Nagai, F. Maeno, A. Yasuda, N. Hokanishi, T. Shimano, M. Ichihara, T. Kaneko, and S. Nakada (2013): Preparation processes and evolution of the 2011 eruption of Shinmoe-dake in Kirishima volcano-insights from ash samples, Earth Planets Space, in press.

Ukawa, M. and M. Ohtake (1987): A monochromatic earthquake suggesting deep-seated magmatic activity beneath the Izu-Ooshima volcano, Japan, J. Geophys. Res., **92**, 12649-12663.

Yamazaki, K., M. Teraishi, K. Ishihara, S. Komatsu, and K. Kato (2013): Subtle changes in strain prior to sub-Plinian eruptions recorded by vault-housed extensometers during the 2011 activity at Shinmoe-dake, Kirishima volcano, Japan, Earth Planets Space, in press.

（編集担当　坂井孝行・長岡　優）