

2015年箱根山噴火の推移について

神奈川県温泉地学研究所

1 はじめに

箱根山では、4月ごろから山体がわずかに膨張しはじめる現象が認められました。その後、5月3日に噴気活動が高まったことを受けて、翌4日には大涌谷園地の一部の閉鎖がされました。5月6日には噴火警戒レベル2の発表が行われ、大涌谷への立入が規制されるなど、小規模な水蒸気噴火への警戒が呼びかけられました。「だいち2号」の観測データを解析した結果、5月7日には大涌谷で局所的な隆起が認められ、温泉供給事業者の立入許可が一時差し止められるなどの対応が取られました。

地震活動は5月15日にピークを迎え、その後は徐々に減衰していきましたが、地殻変動は継続しました。そのような中、6月29日の昼頃、ごく小規模な水蒸気噴火が発生しました。これを受けて翌30日にレベル3の発表が行われましたが、噴火の規模は基本的にレベル2で想定されたものを越えませんでした。噴火は7月1日には停止、地殻変動も7月末ごろまでに停止し、地震回数も順調に低下したことから、9月11日に噴火警戒レベルが2に、また11月20日には噴火警戒レベルが1に引き下げられました。

この間、温泉地学研究所はさまざまな観測や解析を行い、気象庁や、他の火山観測機関と意見交換を進めるとともに、行政の防災対応を支援してきました。本報告では2015年噴火とその前後でどのような観測がされ、どのような解釈がされてきたかをまとめました。

2 GPS による観測

2.1. GPS で明らかになるマグマだまりの膨張

箱根山やその周囲には GPS の測定点がいくつかあります。ここでいう GPS とは、基本的に車のナビゲーションで使われるものと一緒ですが、遙かに高精度で、地面に固定されています。このことにより、地殻変動で地面が動くことによる、観測点の微妙な動きを測定しています。

火山は地下にマグマだまりがあります。マグマだまりには、ときどき地下深いところからマグマが供給されます。マグマの供給があると、マグマだまりはその分膨らみます。マグマだまりが膨らむ結果、火山全体も膨らみます。火山全体が膨らむと、火山を挟んだ観測点の間の距離が伸びます (図 2-1)。

温泉地学研究所で GPS のデータに注目している理由は様々ありますが、箱根山に関しては、主としてこのようなマグマだまりの膨らみを見ているかも知れないという前提で、様々な角度から検討をしています。2015 年の噴火前にも、マグマだまりの膨らみが観測されました (図 2-2)。

しかし、こうした観測データが得られるのは珍しいことではありません。マグマだまりの膨張現象は数年に 1 回程度の割合で発生しています。また、マグマだまりの膨張が起きると地震活動が活発化することも知られています (図 2-3)。

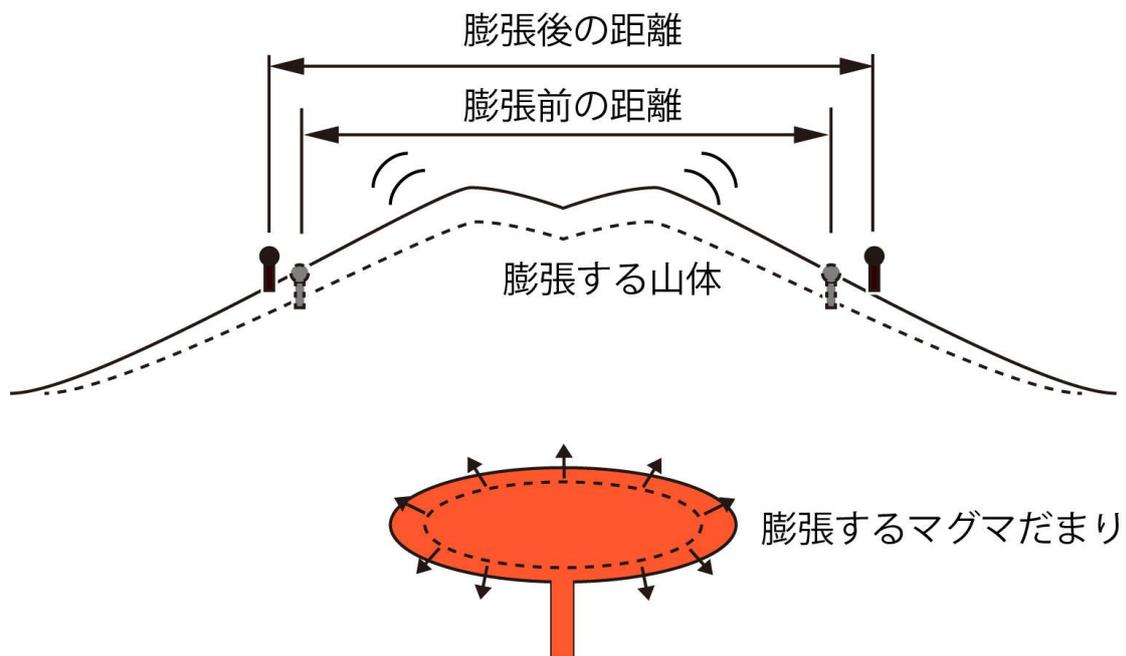


図 2-1 マグマだまりが膨張したときの影響。地下深くにあるマグマだまりが膨張すると、火山全体が膨張するため、火山を挟む観測点の距離は広がる。このイラストの膨張量は誇張して書いてあり、2015 年の例だと、観測点間の距離がもともと 10 km あったとして、マグマだまりが膨張することによって伸びた距離は 1 cm 程度。

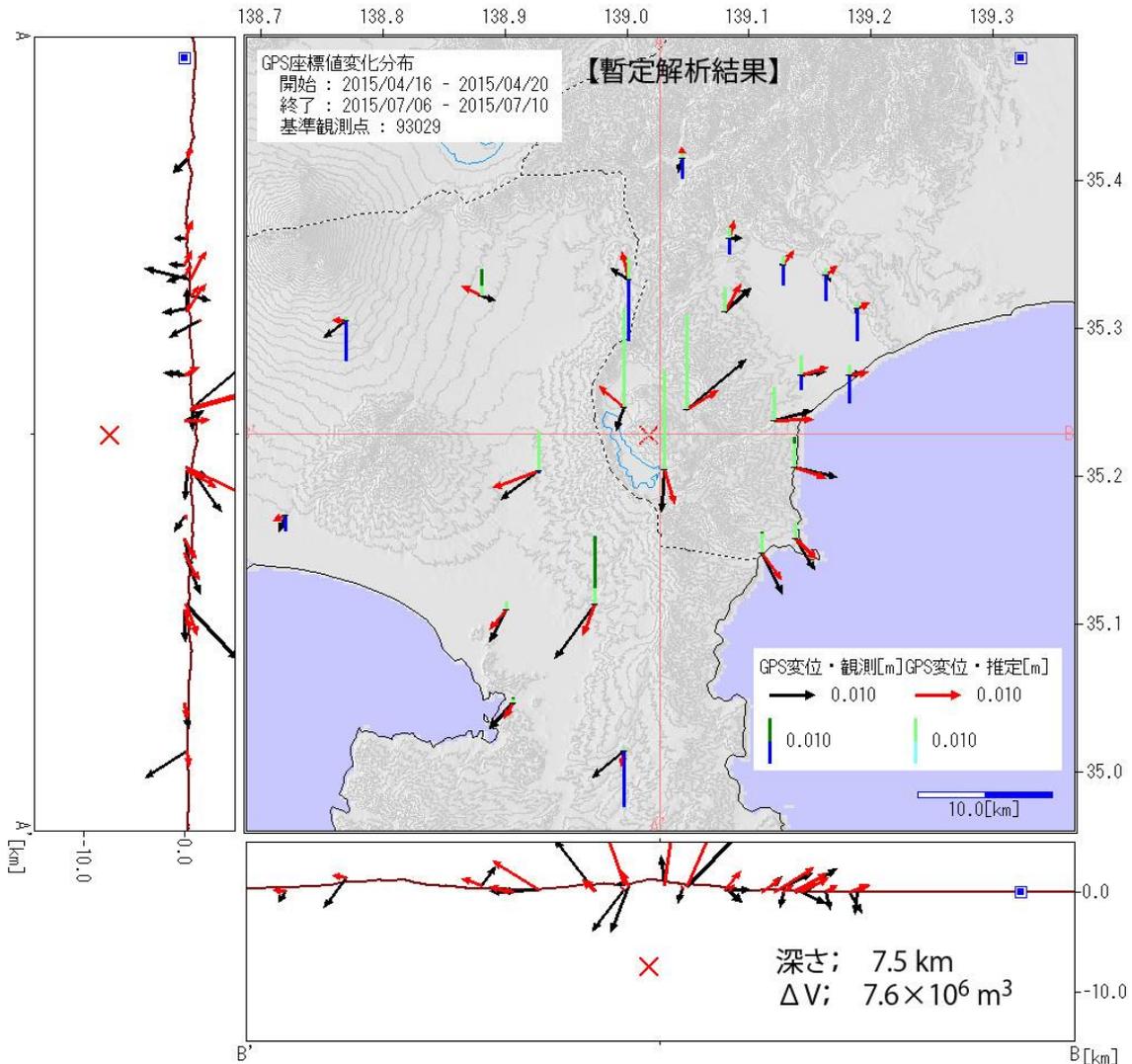


図 2-2 GPS によって観測された山体膨張。黒矢印は、観測された GPS 観測点の移動方向と移動距離を表す。箱根山の中心から、観測点が遠ざかっているように見えるのは、中心部が膨らんでいるため。赤の×印は、観測結果を基にした計算によって推定される膨らみの中心（膨張源＝マグマだまり）の位置。赤矢印は、マグマの膨張によって推定される地盤の動きを示す。ここで赤矢印は、マグマだまりが深さ 7.5km の所にあり、そこで 760 万立方メートル膨らんだときに予想される観測点の移動の様子が示されています。なお、青と濃い緑の棒は観測された GPS 観測点の垂直変位、薄い緑色の棒はマグマだまりの膨張によって推定される GPS 観測点の垂直変位を示す（垂直変位とは地面の上下方向の動きのこと）。

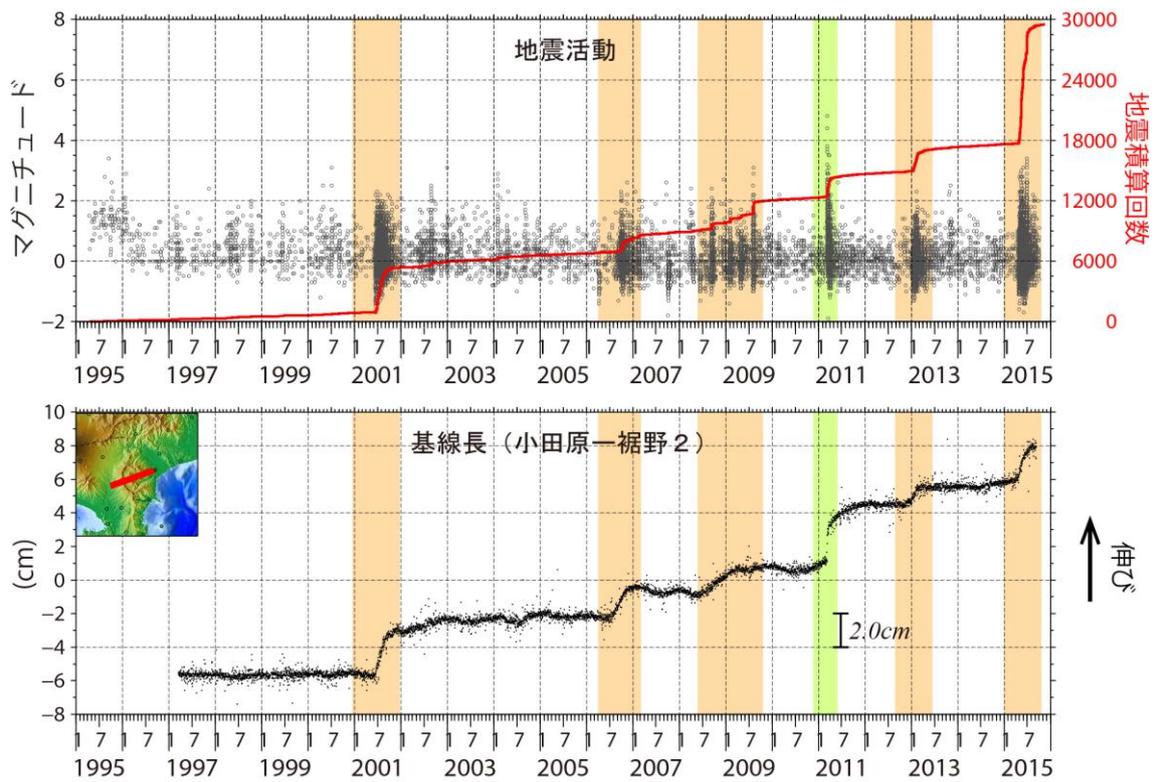
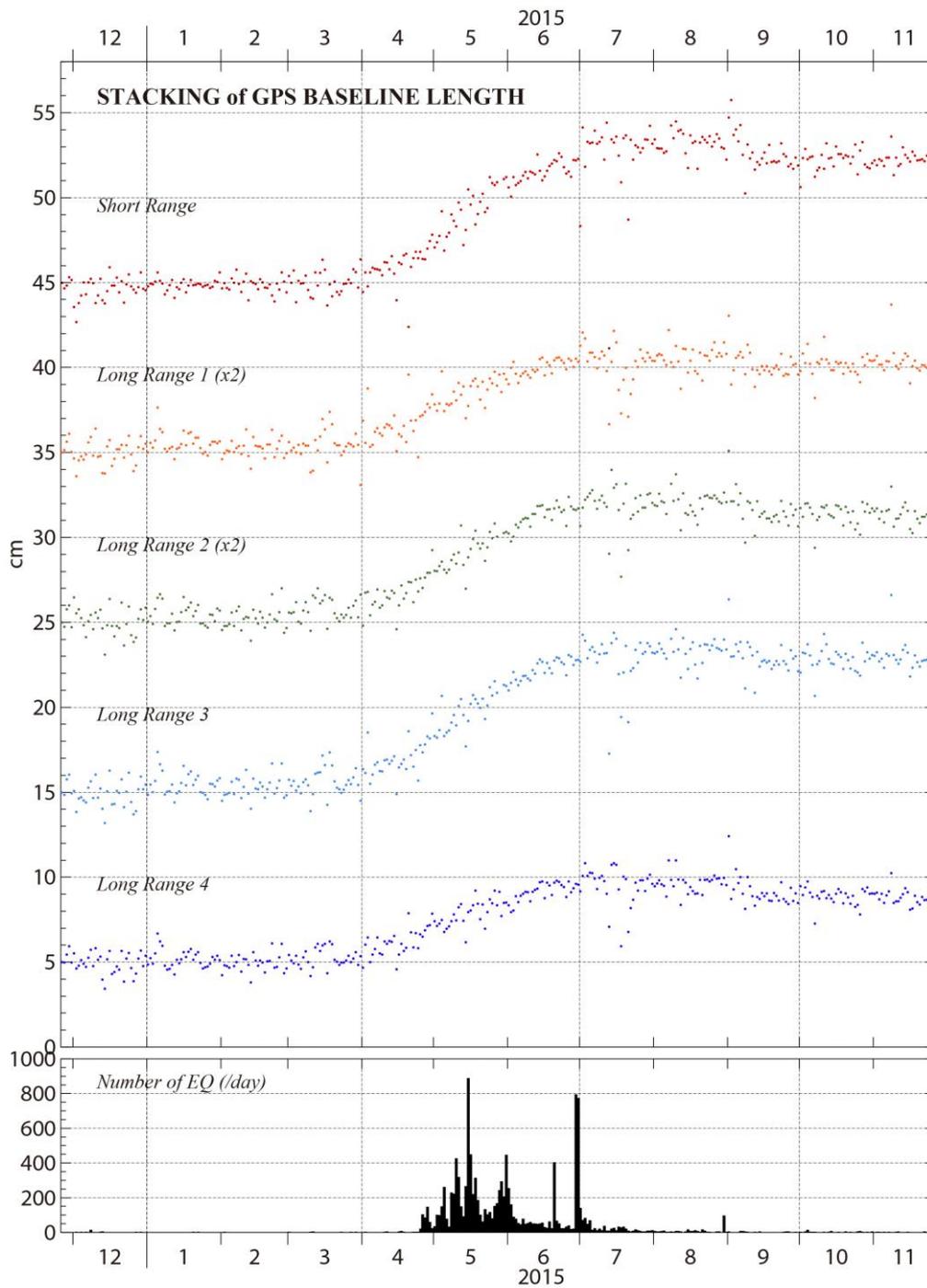


図 2-3 (上段) 箱根で発生する地震積算数、(下段) 箱根山をまたぐ小田原と裾野の間の距離 (GPS 観測結果による)。オレンジ色に塗られた部分は、火山活動の活発化に伴う群発地震や山体膨張を示す距離の伸びが観測されている時期。緑色に塗られた部分は、東北地方太平洋沖地震によって誘発された地震活動の時期を示す。

2.2. 今回の火山活動でも一番はじめに動いた GPS

温泉地学研究所のこれまでの研究で、箱根で時々起こる群発地震の少し前に、GPS でマグマだまりの膨らみとみられる現象が捉えられることがわかってきました。今回の箱根山の噴火にいたる火山活動の活発化でも、はじめに起きたのは、GPS で山体を挟む距離が伸びる現象で、4月の初め頃に起きました(図 2-4)。

マグマだまりの膨張は 7 月ごろまでにかなり鈍り、その後は停止状態にあるようにみえます (図 2-4)。



last gps data; 2015/11/23
 update; 2015/11/26 12:01

図 2-4 (上段) 複数の GPS による距離の変化を統合解析処理した結果。点 1 つが、1 日の観測データを示す。(下段) 1 日毎の地震発生数の棒グラフ。GPS の測定は誤差が大きいので、日々の測定のばらつきが大きく、変化変化の始まりを正確に捉えるのは難しいが、山体膨張を示す伸びは 4 月上旬から見えはじめ、地震活動が活発化した 4 月下旬ごろにはあきらかにばらつきの範囲を超えた伸びが見られた。7 月に入ってから、膨張を示す伸びは明瞭にみられなくなってきた。

3 地震活動の概要

3.1. 地震の分布

箱根山ではしばしば地震が観測されています。なんとなく火山で発生する地震は火山の活動と関係があるというイメージをもたれがちです。しかし、地震活動が火山活動の何を反映しているかというのは難しい問題です。たとえば、マグマの動きと地震は関係があるのでしょうか？

図 3-1 は、今回、箱根山が活発化した 4 月下旬から 8 月末までの震源の分布です。マグマだまりはこれまでに行われた色々な研究から深さ 7 から 10 km より深い所にあると考えられています（例として図 2-2）。一方、地震がおきているのは 6km より浅いところです。ですから、マグマだまりで地震がおきているわけではないといえます。

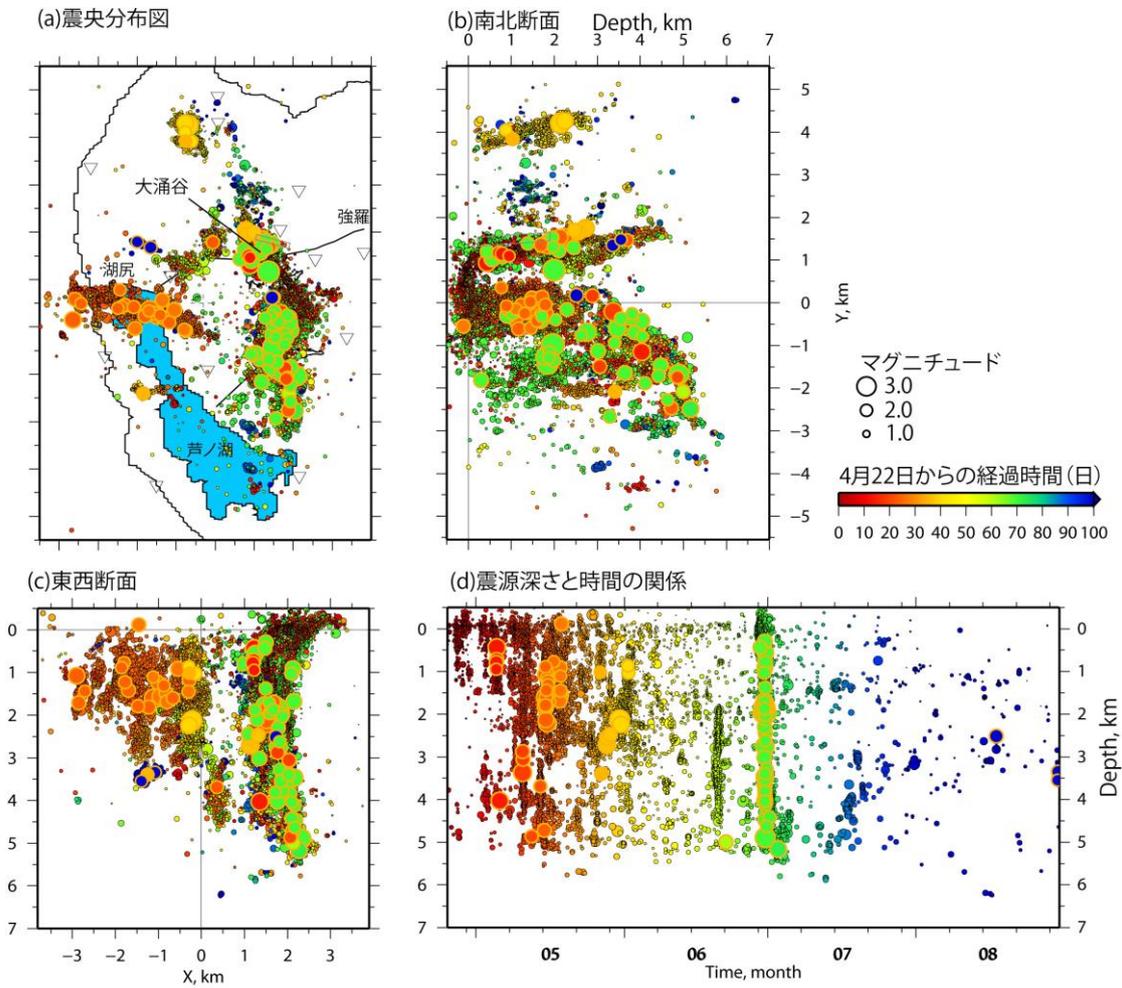


図 3-1 ダブルディファレンス法 (DD 法) を用いて精密に決定された震源分布。(a) 震央分布図 (芦ノ湖、湖尻、強羅の場所を記入)、(b) 南北方向に投影した深さ断面図、(c) 東西方向に投影した深さ断面図、(d) 震源の深さと発生時間との関係(縦軸が深さ、横軸は地震が発生した時間)。期間は 4 月 22 日から 7 月 31 日。震源の色は 4 月 22 日を基準とした経過日数を示す。○の大きさは地震の規模を表すマグニチュード (M)、M2.0 以上の地震はオレンジ色で縁取りした。

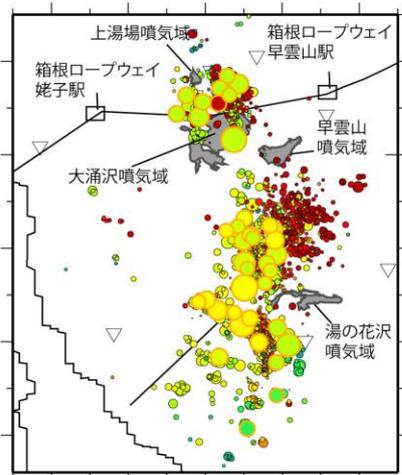
3.2. 震源深さの時間変化

そうは言っても、地震の分布を見ると深い所から浅いところまでつながっているように見えます。マグマが、深い所から浅いところに上がってきて、その過程で地震がおきているという風には読み取れないでしょうか。それを確かめたのが図 3-2 です。

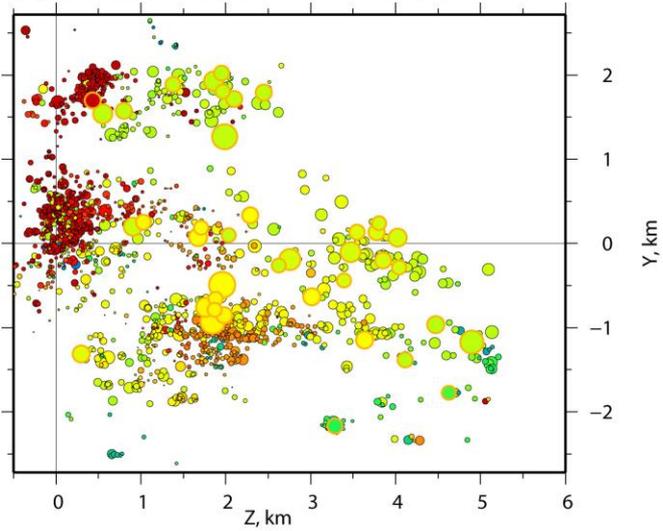
図 3-2ab は小規模な噴火が発生した 6 月 29 日から 30 日の間に発生した地震の分布を示し、図 3-2c は、震源の深さと時間の関係を示しています。もし、マグマが地下深くから上昇してきて、そのために地震がおきているとしましょう。その場合、地震もマグマの移動を反映し、地下深くで起き始めて、徐々に浅いほうで起きてくることが予想されます。ところが、6 月 29 日 12:30 の噴火開始よりも前の 7 時頃に地震がおきたのは、大涌谷、湯の花沢から早雲山の間で深さ 1km より浅いところでした。その後、地震は時間を追うごとに深い所で起きるようになりました。

こうした震源の移動パターンから、今回の噴火はマグマが上がってきたために起きたという可能性は低いと考えています。実は浅いところから、深いところへ震源が移動するのは、過去に発生した群発地震活動でも観測されており、今回が特別というわけではありません。

(a)震央分布図



(b)南北方向に投影した深さ断面図



(c)震源深さと時間との関係

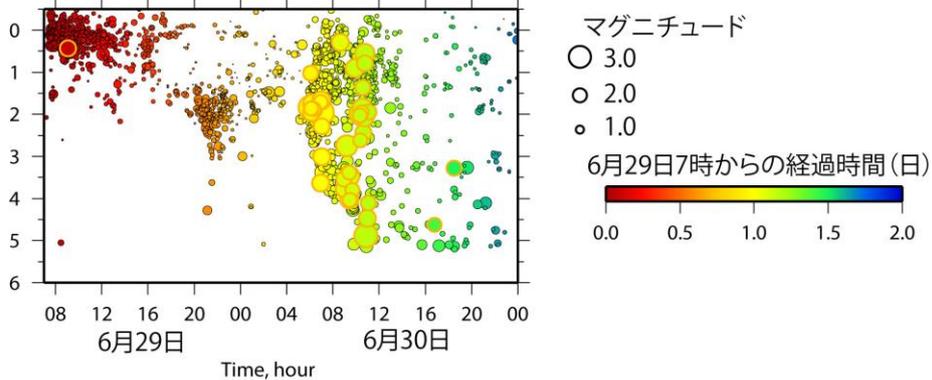


図 3-2 噴火が発生した 6 月 29 日～30 日にかけて発生した地震活動。(a)震央分布図、(b)南北深さ断面図、(c)震源深さと地震発生時との関係。いずれの図も震源が丸で示され、大きさがマグニチュード(M)に対応し、M が 2.0 を超える地震はオレンジ色で縁取りした。色は地震の発生時刻（6 月 29 日 7 時から経過時間）を示す。

3.3. 震源位置の変化

これまでは地震の大まかな分布 (3.1.) と地震のおきる深さの時間変化 (3.2.) を見てきましたが、地震が活発なエリアはどのように変化していったのでしょうか。図 3-3 では、地震発生域を大涌谷付近、駒ヶ岳付近、湖尻付近、金時山南麓付近の4つのエリアに分けて、それぞれにおける地震回数の時間変化を表しています。

この図を見ると、最初に地震が多かったのは大涌谷付近 (4月末)、その後駒ヶ岳付近 (5月11日前後) が多くなり、湖尻付近 (5月15日前後)、金時山付近 (5月末) と続きます。つまり、今回の箱根群発地震では、震源の場所が時間の経過とともに移動していったように見えます。こうした震源の移動は2001年の群発地震でも同様でした。

今回は、震源が箱根カルデラ内を一通り移動した後、6月29日にまた大涌谷付近や駒ヶ岳付近で地震が活発になりますが、その日に噴火が発生しています。

エリア別の地震発生状況 (2015/04/01~07/31)

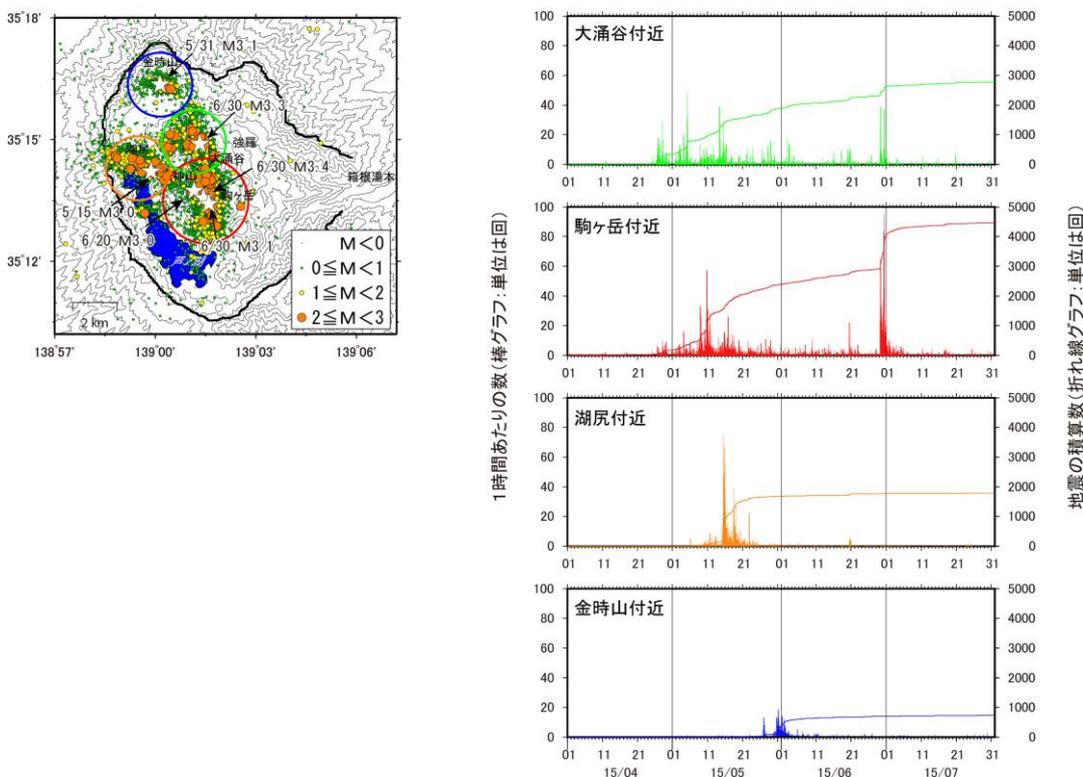


図 3-3 地震発生数のエリア別時間変化 (右)。エリアの範囲は左の地図上に円で示してある。

4 傾斜計による観測

4.1. 地震とともに起きる傾斜変化

3.3. では、地震活動のエリアが時間とともに動いてきたことを紹介しましたが、地震活動が活発なエリアの地下で何が起きていたのでしょうか。そのカギを握っているのが傾斜計のデータです。図 4-1 には、エリア毎の地震活動の時間変化と、そのエリア内に設置した傾斜変動の時間変化を示しています。エリアの名前と範囲は 3.3. で示したのと同じです。

これを見ると、あるエリアの地震活動が活発だったときに、エリア内の傾斜計も動いていることがわかります。傾斜計の動きとは、地面がわずかに傾いたことを示します。ここで示したマイクロラジアンという単位は、地面が 1 km 先で上下方向に 1 mm 動いたことを示します。非常にわずかな量ですが、傾斜計の検知能力は更に高く、わずか数千分の 1 マイクロラジアン程度変化も測定できます。

傾斜計の変化は、箱根山が比較的浅いところ（海面の高さ前後）で膨らんでいるという変化を示しています。つまり、地震活動と同時に、山が膨らむ変化があったということがわかります。また、噴火があった 6 月 29 日には大きい変化が認められました。

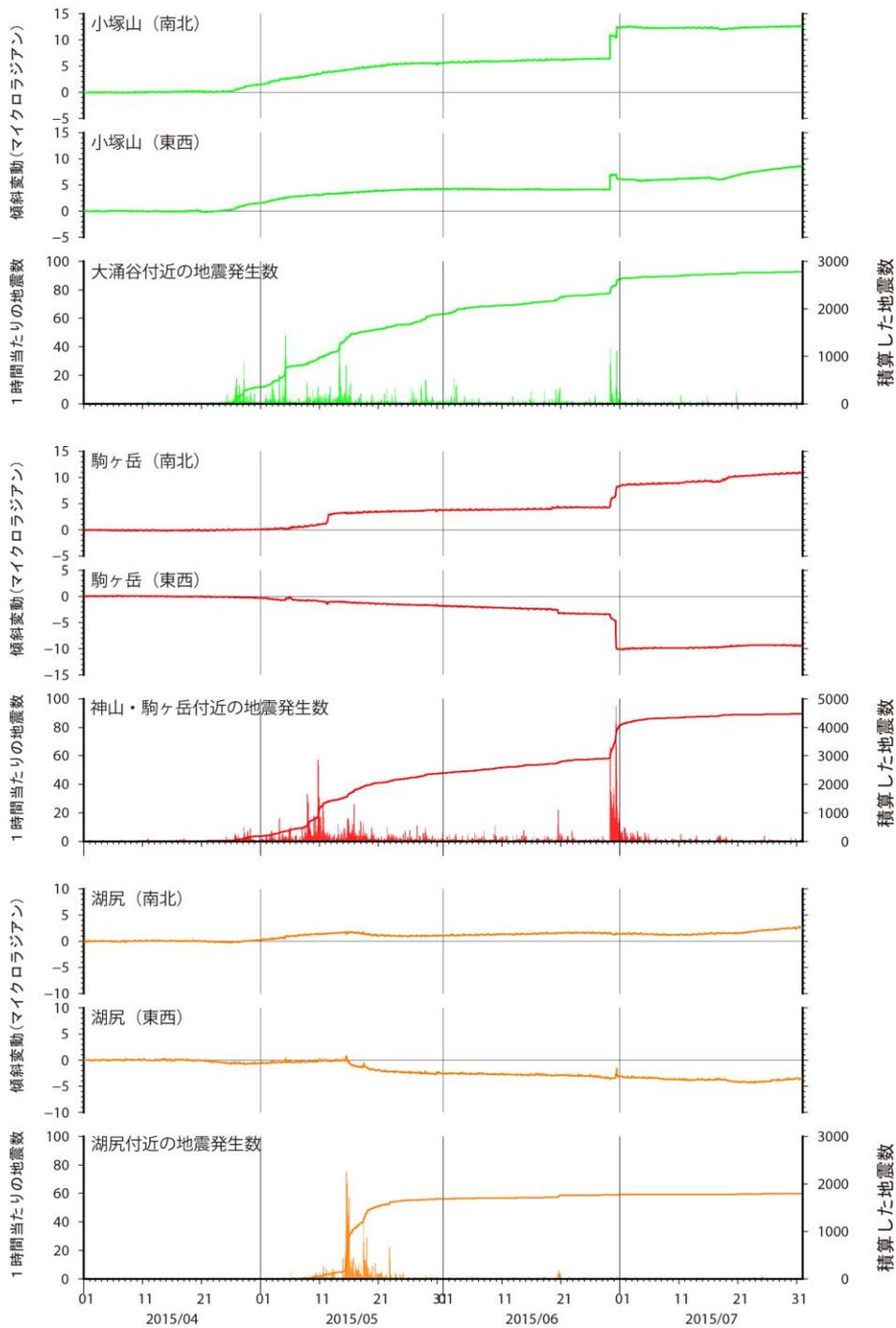


図 4-1 傾斜計で測定された 2015 年 4 月から 7 月の傾斜変動と、傾斜計のあるエリア内で発生した地震数の時間変化。地震が多発したときに、傾斜変動が大きくなるのがわかる。ただし、傾斜計には傾き以外にも、地震に揺られることで生じる「とび」や、傾斜計の位置が動く（変位する）ことによる変化も記録されている。このため、ここに示した傾斜変動量は今後の解析で変わる可能性がある。

4.2. 浅いところが膨らむ原因は？

地震活動と傾斜変動の観測から、地震がたくさん発生しているときに箱根山の地下の浅いところ（海面の高さ付近）で膨らむ現象が見られることがわかりました。GPS の場合、地下の比較的深い所、だいたい深さ 10km くらいのところが膨らむことを捉えていて、これはマグマだまりのマグマの量が増えることだと考えられています（2.1.）。一方、傾斜計の場合、地下の浅いところの膨らみを捉えています。

傾斜計のデータだけで考えると、マグマが上昇してきて、地下の浅いところの岩盤が膨らんだことも考えられます。しかし、地震はマグマの上昇を捉えているように見えません（3.2.）。

箱根山では、温泉がたくさん湧きだしていますが、この温泉のもととなっているのが熱水と呼ばれるものです。熱水は地下深くのマグマに熱せられ、高温、高圧の状態に置かれた水のことです。箱根の地震はこうした熱水が移動することによって発生すると考えられてきました。今回の噴火でも、熱水が地下の浅いところに移動することによって、地震が発生するとともに、岩盤が膨らんだと考えられます。

噴火が起きた 6 月 29 日には特に大きな変化が傾斜計で観測されました。理由は今後詳しい解析をしなくてははいけませんが、熱水が今までよりも大量に移動をして、岩盤が膨らんだためだと考えられます。一部の熱水が地表に達して発生したのが、水蒸気噴火です。

5 大涌谷での局所的な隆起

5.1. 局所的な隆起の発生

宇宙研究開発機構（JAXA）が2014年に打ち上げた陸域観測衛星「だいち2号」（ALOS-2）には、合成開口レーダー（SAR）という機械が搭載されています。地球上のどこの地点の上空にも、この衛星は定期的にやってきます。観測の指令を出すと、SARは地球表面に向けて電波を発射して、跳ね返ってきた電波のデータを取得します。次の観測でも同様にデータを取得します。この間に地面に変化が生じている場合、2つのデータには、電波の波にずれが生じます（位相のずれ）。これを計算することにより2時期における地表面の変化を知ることが出来ます。

2つのデータを干渉ペア、電波の波のずれを表した地図のことを SAR 干渉画像と呼びます（図 5-1）。図の意味を読み取るのは少し難しいのでここではスペースの都合上、説明できませんが、国土地理院のページ (<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/qanda/qanda.html>) などに詳しい解説があるのでご覧下さい。

5月6日、気象庁が箱根山にレベル2を発表したことを受けて、5月7日に「だいち2号」による緊急観測が実施されました。2014年10月9日のデータと比較した結果、5月2日頃から勢いが強くなった温泉造成用の蒸気井の周囲約200mの範囲が、最大で約6cm衛星視線方向に変位（隆起）していることがわかりました。

その後、1から2週間おきに実施された緊急観測では、継続的に衛星視線方向への変位（隆起）が認められ、積算して約30cmにもおよびました。

こうした隆起がなぜ起きたのかは、今後詳しい検討が必要ですが、蒸気井から出る蒸気の勢いが強くなったことと合わせて考えると、熱水の動きに関連していると考えられます。おそらく、地下では蒸気井めがけて熱水が集中し、地面が少し盛り上がったのだと考えられます。

なお、今回はこの隆起のことを「大涌谷での局所的な隆起」と呼んでいます。局所的な隆起域では地表で小さい亀裂が生じ、成長していったのが確認できました（図 5-2）。6月中頃には、亀裂の一部から噴気がはじまり周りに硫黄が付着するようになったものもありました。

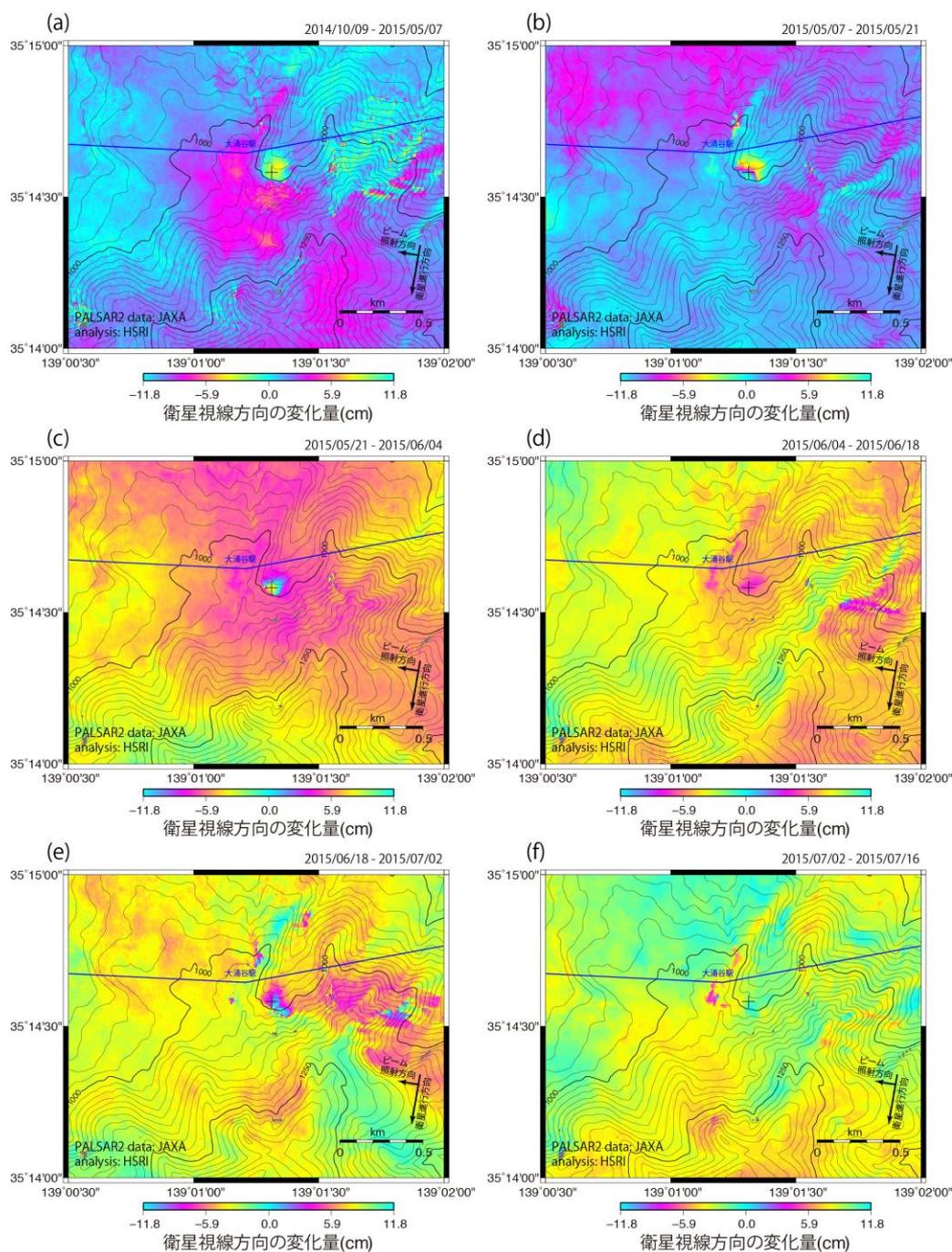


図 5-1 大涌谷と周辺の SAR 干渉画像。各画像の右上に、ペアのデータ取得日を示した。+印は噴気異常が認められた蒸気井の位置、青線は箱根ロープウェイ。7月2日までのペアでは、噴気異常が認められた蒸気井の近くに局所的な隆起がみられるが、噴火後のペア（右下の7月2日と16日のペア）では見られない。このことから、噴火前まで隆起していたが、噴火後は隆起が止まったことがわかる。ここでは南行軌道（入射角 42.8° ）における干渉ペアによる結果をまとめた。



a. 2015年5月8日撮影



b. 2015年5月27日撮影



c. 2015年6月2日撮影
※e 亀裂の形成



d. 2015年6月16日撮影
※e 亀裂に硫黄の付着が顕著に



e. 2015年6月20日撮影



f. 2015年6月26日撮影

図 5-2 大涌谷の局所的な隆起に関係するとみられる亀裂の一例。e 亀裂と呼ばれるこの亀裂は、5月の撮影では生じていなかったが、6月2日にはじめて観察された。その後、亀裂から噴気が出るようになり、周囲に黄色い硫黄が付着するようになったことがわかる。

5.2. 火口・噴気孔と局所的な隆起域

箱根山では、6月29日に噴火が始まり、新しく火口や噴気孔が形成されました。こうした火口や噴気孔は、「だいち2号」で観測された隆起域と一致していました(図5-3)。地下の熱水の力が大きくなりすぎると、土砂を押しつけて、地上に出て来るようになります。これが水蒸気噴火です。つまり、隆起は熱水が集中することによって起きていたと考えられます。衛星による観測データを元に、水蒸気噴火が起きた場所の直前の変位を観測できたのは、今回が世界で初めてかも知れません。

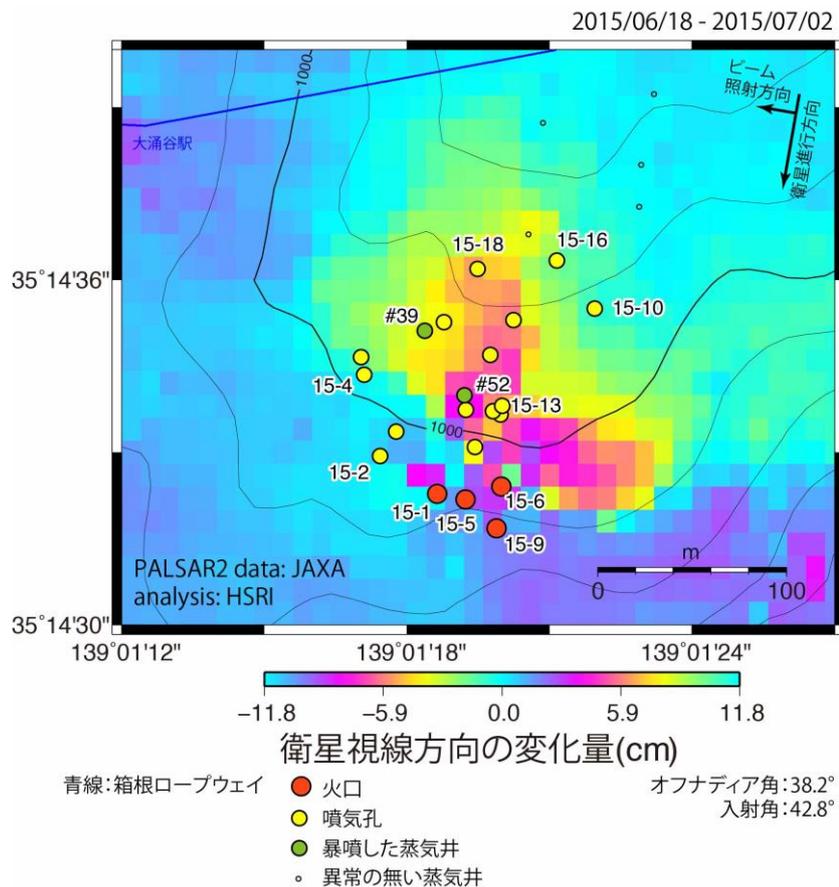


図5-3 噴火前後のペアによるSAR干渉画像と、6月29日の噴火で生じた火口と噴気孔の関係。今回の噴火の火口や噴気孔が出来たり、蒸気井が暴噴した場所が、SAR干渉画像で認められる隆起の範囲や周辺にあることがわかる。なお、この図は図5-1eを拡大して、色を少し変えたもの。

6 2015 年噴火

6.1. 噴気活動の変化

大涌谷では箱根温泉全体の約 1 割の温泉が蒸気と水を混ぜることにより作られています。蒸気は地下数十から数百メートルの井戸から出てきます。通常、このような蒸気に水をかけると、蒸気は勢いが急激に弱まり温泉が出来ます。しかし、熱水活動が活発化すると、水をかけても蒸気の勢いで吹き飛ばされて、蒸気をコントロールできない状態になります。これを暴噴と呼びます。

今回は、噴火前の 5 月 3 日に蒸気井のひとつ（39 号井）が暴噴状態にある事が確認されました（図 6-1）。前述のだいち 2 号の観測で明らかになった隆起の中心はこの暴噴状態の井戸にありました。暴噴した蒸気井は、その後噴気の勢いが弱まり 6 月はじめにはほとんど停止状態になりました。52 号井は若干活発化したように見えますが、詳しくはわかりません。

噴火後は、新しく生じた火口や噴気孔、52 号井から勢いよく噴気をしています（図 6-2）。



図 6-1 暴噴する 39 号井 (2015 年 5 月 3 日 9 時 0 分撮影)

6.2. 地表の噴気活発化

5月の初旬には、活発化した蒸気井以外に大涌谷での噴気異常はありませんでした。しかし、5月の中頃以降は活発化した蒸気井の周囲100mくらいの地面からの噴気活動も活発になりました。このため、地表付近は湯気で覆われるようになり地面の様子を確認するのが難しくなりました。



図 6-2 大涌谷駐車場近くに設置したタイムラプスカメラ（一定時間ごとに自動的に撮影するカメラ）による大涌谷の様子。目に見える噴気の量は温度や湿度、風向きによって大きく変わるので比較が難しいが、ここではほぼ1ヶ月おきに、噴気が少ないショットを選んで示した。噴気は5月末から徐々に増え始め、6月末には地表が見えにくくなった (b)。噴火時は多量の噴気が勢よく出た (c-d)。噴火後、噴気量は大きく減っていないように見える (e-f)。

6.3. 噴火の確認

地震活動は5月15日をピークとして、時々活発化しながらも数は減少していききました。6月に入ってからは地殻変動も緩やかになっていました。ところが6月29日午前7時30分過ぎから急に地震活動が活発化しました。このため、この日に予定されていた温泉供給事業者の大涌谷への立入は中止になりました。

当所に12:50ごろ電話で火山灰らしきものが降っているという通報があり現地確認をしたところ、たしかに雨に混じるような形で火山灰が降っていることが確認できました。大涌谷駐車場からは、大涌谷の谷の中でこれまでより明らかに強い噴気が見られましたが、猛烈な湯気と霧で詳しい地表の様子はわかりませんでした。我々は大涌沢を登り、噴気地帯内に火口等が出来ていないかを確認しに行きました。やはり霧で視界が悪く明確にはわかりませんでした。いままで蒸気井や噴気がなかったところから白い噴煙が勢いよく上がっているのが確認できました。また、湯気を上げながら泥水が谷底を勢いよく流れているのを確認しました(図6-3)。水蒸気噴火の際には火口から直接、高温の泥が流れ出すことがあり、熱泥流とよばれています。我々が目撃したのも熱泥流と判断されました。

このように29日は水蒸気噴火に類似した何らかの爆発現象が起きていると推定されましたが、火口は明確に確認できず、また火口と思われる位置が地すべりブロックにほど近いことから、地すべりによって誘発された爆発である可能性が否定できず、噴火という結論は持ち越しになりました。

翌30日午前に現地調査を再開したところ、幅7mほどの火口と、そこから猛烈な勢いで灰色の噴煙が噴き出していることと、たまに人頭大の噴石を高さ20mくらいまで飛ばしていることを確認しました。また、火口の周りには噴石や火山灰が積み重なって出来た噴石丘と呼ばれる丘が出来ていることを確認しました。また、この日には後述するように、29日に起きていた地震が、これまでにないタイプの特異な地震であることがわかりました。こうしたことや、前日の観察結果と併せると、29日から噴火が始まったと結論できました。

その後、大涌谷に設置していたタイムラプスカメラ(一定時間ごとに自動撮影するカメラ)の映像から、噴火の開始は29日12:30頃と推定されました(図6-4)。



図 6-3 大涌沢を流れる熱泥流（6月29日15時56分撮影）。

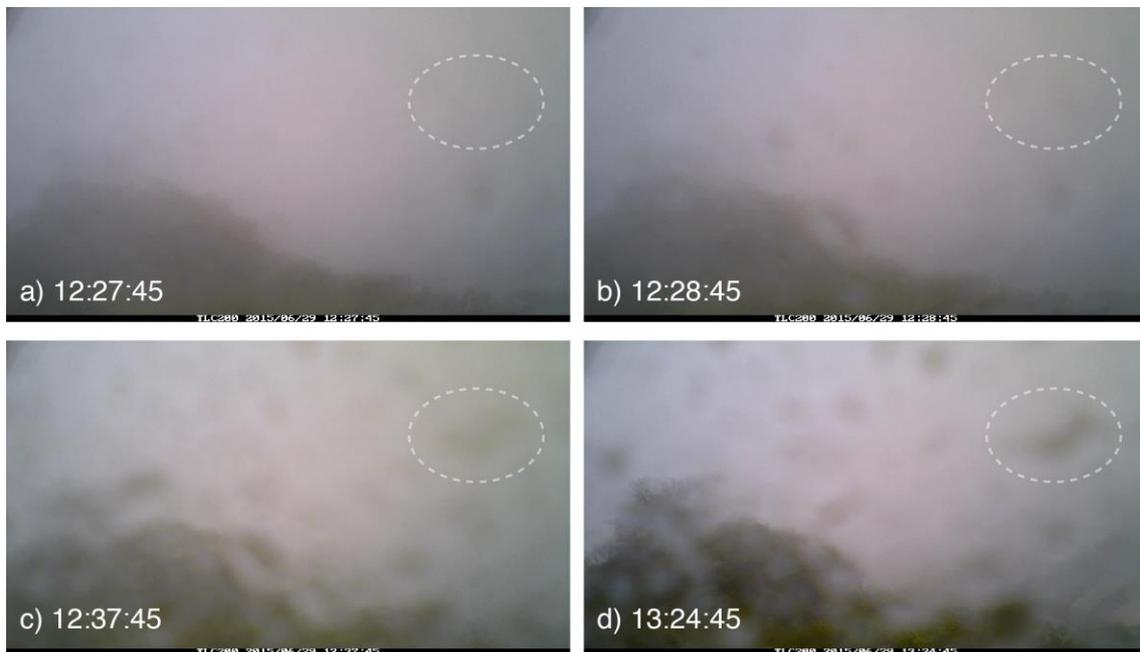


図 6-4 大涌谷駐車場近くに設置したタイムラプスカメラ（一定時間ごとに自動的に撮影するカメラ）が撮影した 6 月 29 日 12 時台～13 時台の画像。12 時 27 分 45 秒頃の画像は霧で視界が悪いが (a)、12 時 28 分 45 秒ごろに画面に水滴がつき始め (b)、12 時 37 分 45 秒頃には画面一面に水滴がつく (c)。水滴は、その後乾いていくが水滴の部分に汚れが残っているのがわかる (d)。そうした汚れのひとつを白い点線で囲んだが、当初はその部分になにも写っていない事が確認できる。以上のことから、水滴に混じった火山灰が 12 時 30 分頃に付着したと考えられる。火山灰が雨に混じるように降っていたという現地の観察と合わせて考えると、噴火の開始は 12 時 30 分頃であったと推定される。

6.4. 火口・噴気孔

梅雨時にあたっていたため、噴火後も噴火の際に生じた火口や噴気孔の実態がよくわかりませんでした。1週間ほどして天気が回復しはじめ、大涌谷の様子がわかってきました。詳しく検討をした結果、大涌谷の直径約150mの範囲内に、火口4個、噴気孔のうち活発なものが15個確認できました(図6-5)。

今回の噴火で生じた火口や噴気孔は大きさや噴出物の種類が様々でした。噴出物は大きい噴石、火山灰、水蒸気などですが、全てを出すものがある一方で、火山灰と水蒸気を出すもの、水蒸気しか出さないものとバリエーションに富んでいました。今回は、6月29日から30日にかけて噴石丘を作ったものを火口、それ以外を噴気孔と呼ぶことにしました(図6-6)。

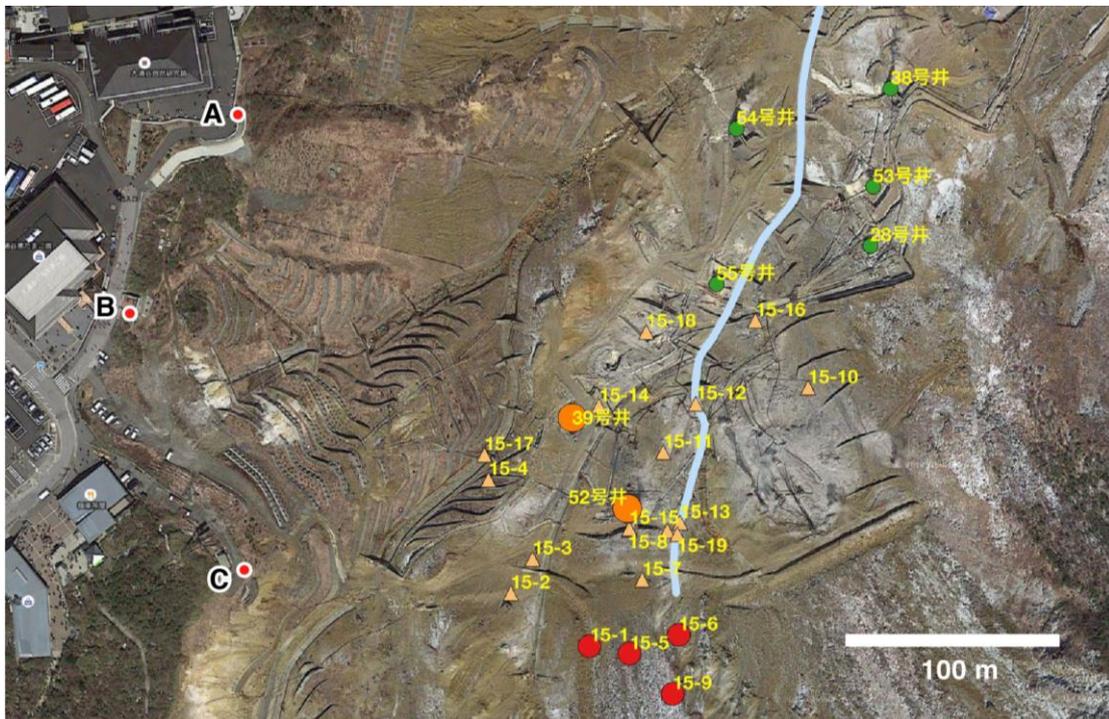


図6-5 火口と噴気孔、暴噴した蒸気井の分布。赤色の丸が火口、ピンク色の三角が噴気孔、オレンジ色の丸が暴噴した蒸気井、緑色の丸が暴噴しなかった蒸気井。上が北。左側に見える建物は、ロープウェイ大涌谷駅や土産物店など。背景にGoogle Mapsの航空写真を使用しました。

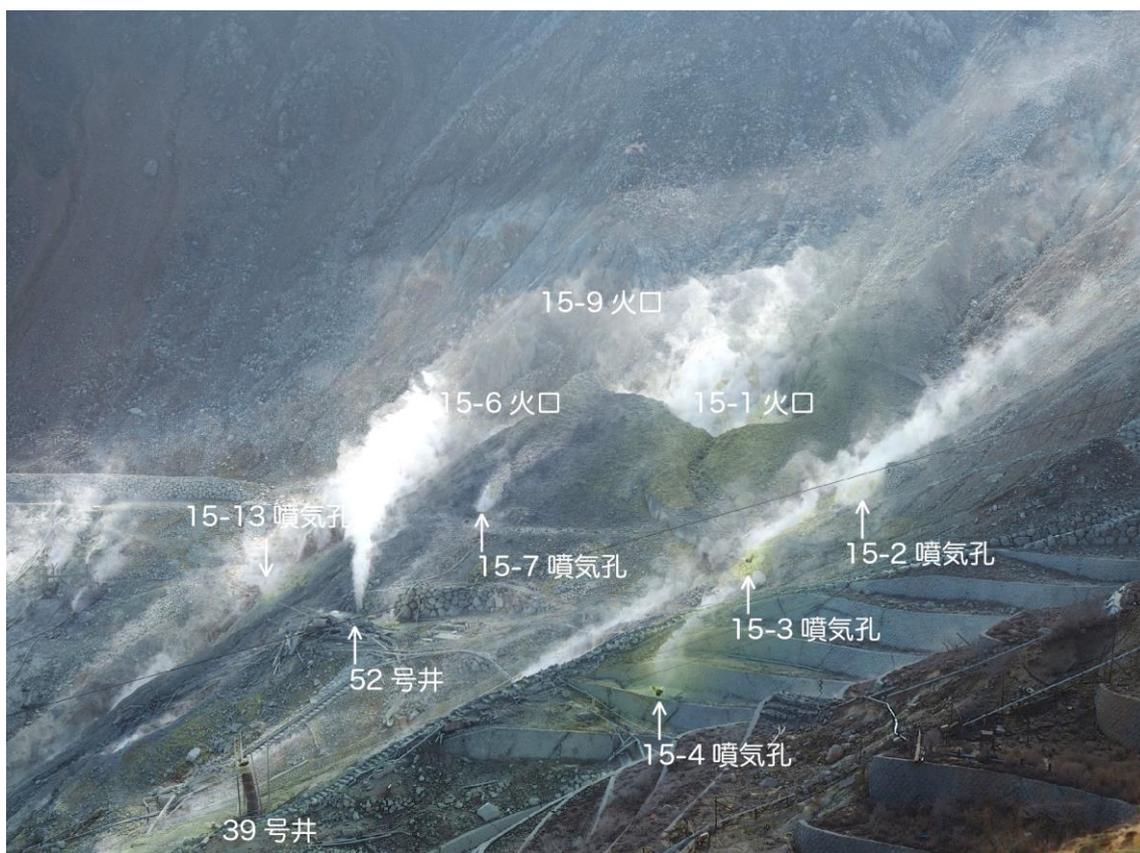


図 6-6 火口と噴気孔、暴噴した蒸気井の様子 (2015 年 10 月 22 日撮影)。この写真は噴気の影響を除くため 100 枚の写真から噴気が写っていないところを選んでつなぎ合わせた合成写真。

6.5. 噴石丘と火口の移動

噴石丘が形成されたのは、火口・噴気孔群の南端の部分でした。火口は 6 月 29 日に 15-9、30 日の日中に 15-6 と 15-5、30 日の夜以降に 15-1 が形成されたことがわかりました。新たな火口が出来ると、それまで活発だった火口は活動をほとんどやめました (図 6-7)。15-6 および 15-9 火口の周りに出来た噴石丘は 30 日の朝に崩壊しました (図 6-8)。

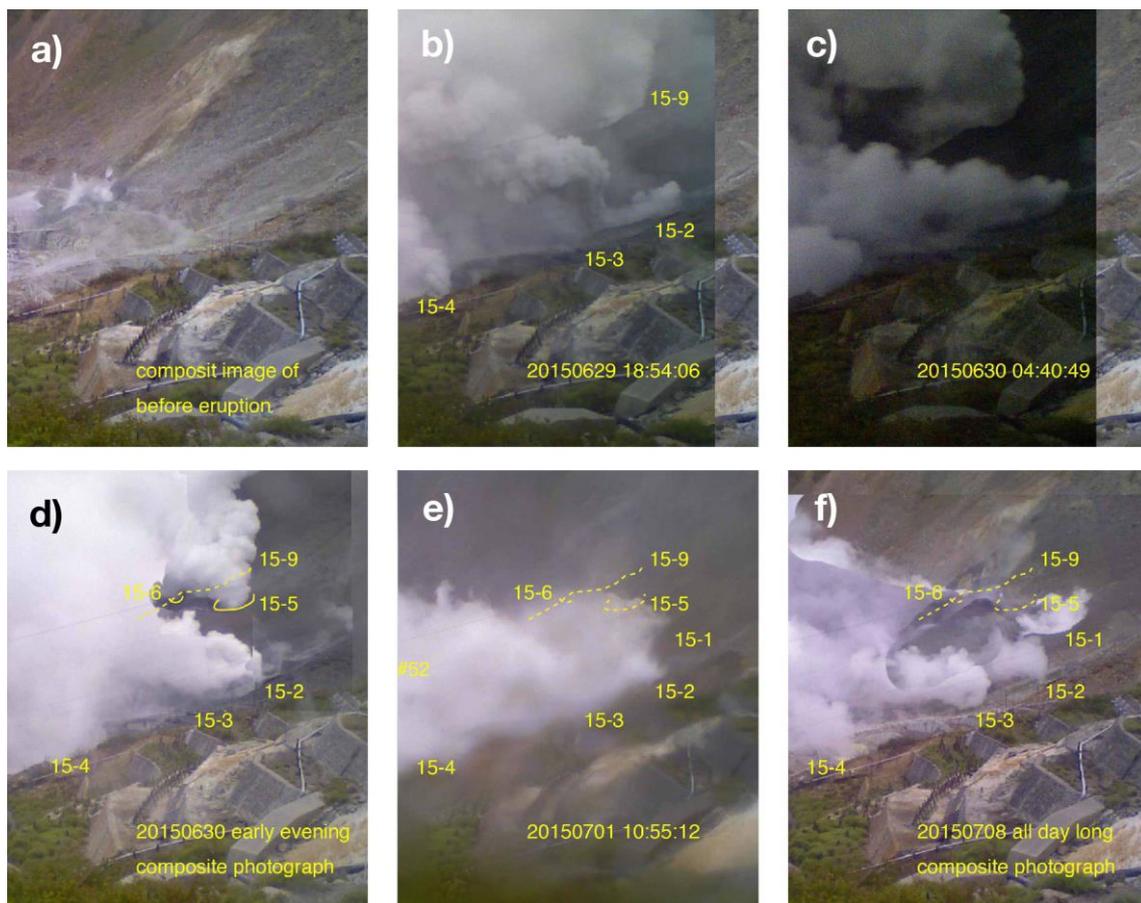


図 6-7 大涌谷駐車場近くに設置したタイムラプスカメラ (一定時間ごとに自動的に撮影するカメラ) が撮影した火口付近の画像。(a) 噴火前の合成画像。(b) 6 月 29 日 18 時 54 分頃の画像。15-9 火口が活動している。(c) 6 月 30 日 4 時 40 分頃の画像。引き続き 15-9 火口が活動している。(d) 6 月 30 日早朝の画像。15-5 および 15-9 火口が活動をしている。15-9 火口の活動は判然としない。(e) 7 月 1 日 10 時 55 分頃の画像。15-9 火口は活動をしていない。15-1 火口が活動をしているように見える。(f) 7 月 8 日全日の合成写真。15-9 火口のほか 15-6 火口、15-5 火口も活動をしていないように見える。

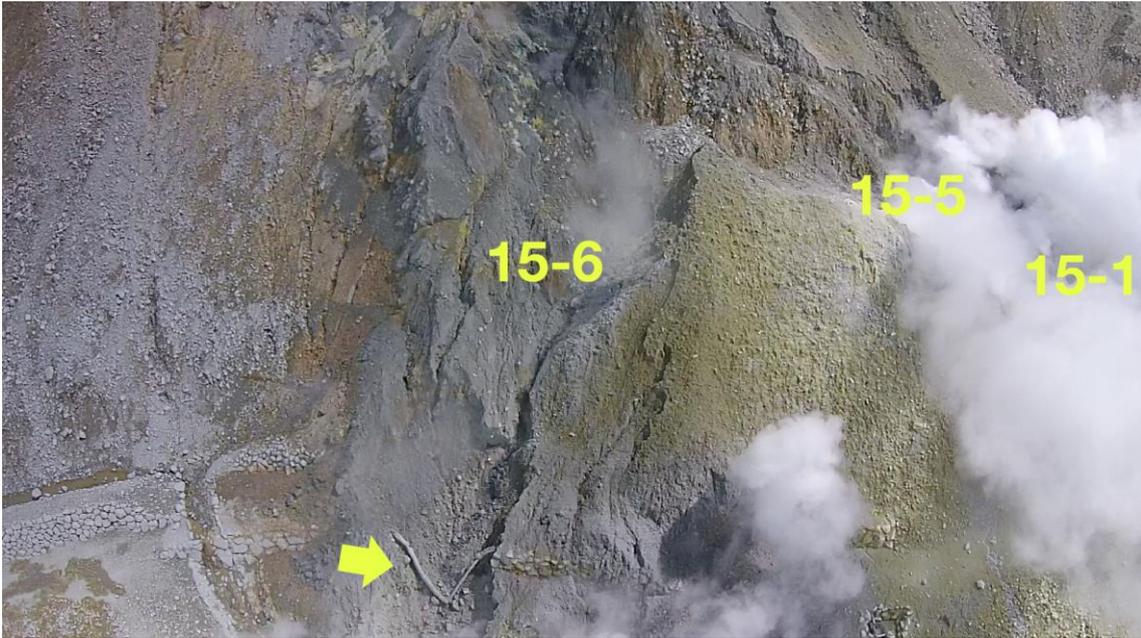


図 6-8 ドローンによる 15-6 火口付近の映像（7 月 15 日撮影）。15-6 火口付近に出来た噴石丘が崩れて流れたため、下流では浸食による溝が生じた。溝の中で、送水管が折れているの見える（矢印）。15-5 火口と 15-6 火口の間に噴石丘の残骸が見える。

6.6. 2015 年噴火の噴出量

2015 年噴火による噴出量は、産業技術総合研究所、防災科学技術研究所、山梨県富士山科学研究所などとの共同調査により、40 から 130 トン程度と推定されました（遠方に飛散した量で、火口付近に堆積した量は除く）。この噴出量はきわめて少なく、火山噴火としては最小レベルといえます。

7 特殊な地震の発生

7.1. 火山性地震

箱根山は噴火の歴史記録がなく、噴火という意味では活発な火山とは言えません。ところが地震は他の火山と比べてかなり活発に起きています。火山の比較的浅いところ(深さ 10km 程度以浅)で起きる地震は火山性地震といいますが、その発生原因は色々あります。普通の地震と変わらないものを特に構造性地震とよびます。

一方、マグマや熱水が動くときには、火山性微動という特殊な地震が観測される場合があります。構造性地震はP波とS波が明瞭に見られますが、火山性微動はこれが明瞭ではなく、小さい振幅の揺れが長時間続くことが特徴です。規模の小さな構造性的地震では、地震動の継続時間が数秒程度であるのとは対照的です。10Hz よりも高い周波数の成分が多い構造性的地震に比べ、今回観測された火山性微動はそれ以下の低い周波数の成分が目立ちます。

箱根山では 1960 年代から地震の観測を行っていますが、発生した地震はほとんどすべて構造性地震で、火山性微動は観測されたことがありませんでした。

7.2. 連続微動の発生

今回の噴火では。噴火が始まった後の 6 月 29 日 16:09 から、7 月 1 日にかけて複数回、2-8Hz の周波数帯域火山性微動が観測されました(図 7-1)。継続時間の長いイベントでは、数時間にわたりました。この火山性微動は主として大涌谷近傍の地震計で観測されたため、発震源は火口が生じた大涌谷近傍にあると考えられます。以上のことから、噴火に伴って地下で移動する熱水が、火山性微動の原因となっていると考えられます。

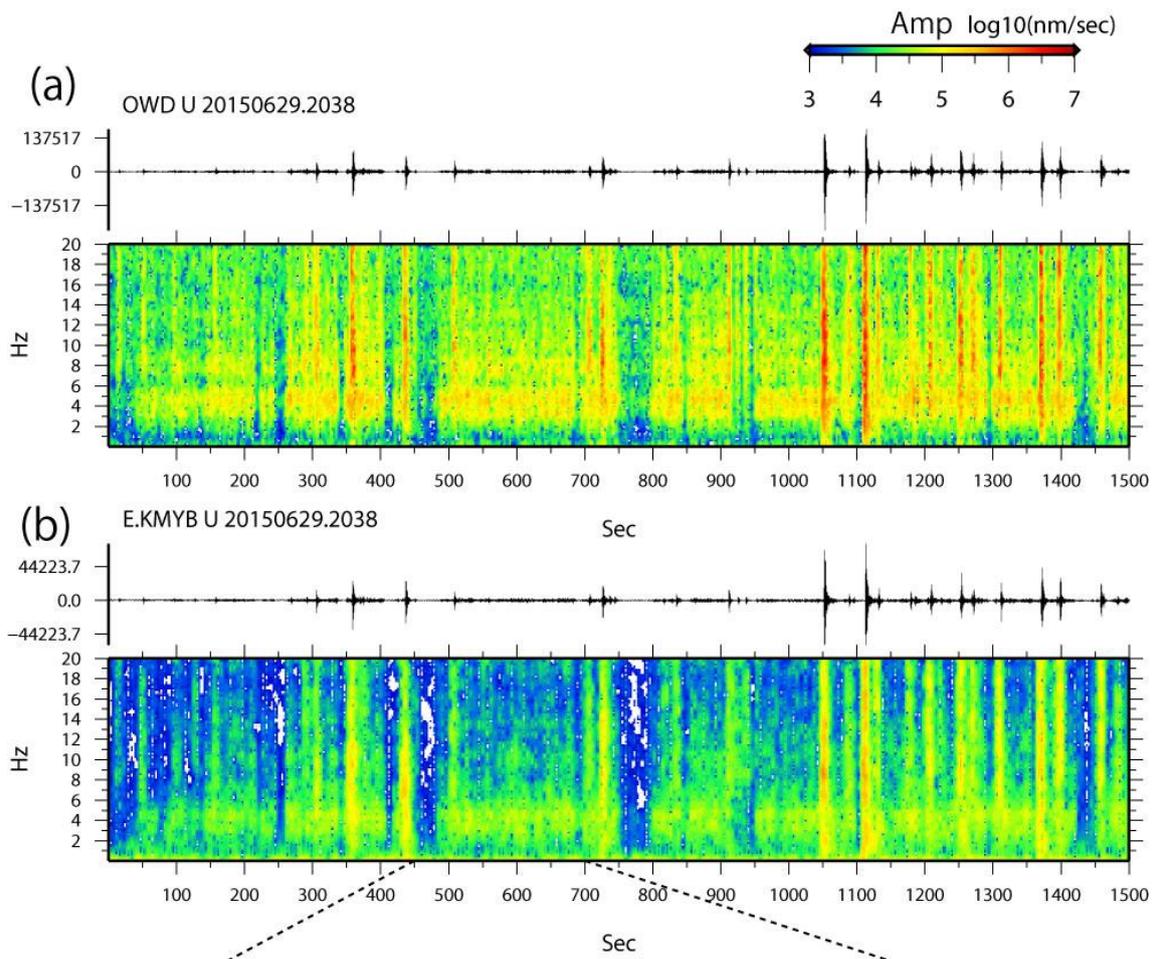


図 7-1 噴火当日の周波数スペクトルの時間変動（ランニングスペクトル）。横軸は時間、縦軸は周波数で、周波数のうちエネルギーが強いもの（＝振幅が大きいもの）ほど暖色系で示される。横軸は経過時間 2015 年 6 月 29 日 20 時 38 分からの秒数。（a）は大涌谷観測点、（b）は上湯観測点。a、b とも上は地震波形、下は周波数特性を示す。パルス状波形を示す構造性地震が間欠的に発生している一方で、2 から 8Hz を卓越周波数とする連続したシグナル（図で横に延びる赤から黄色の部分）も見られる。これが、大涌谷近傍を発震源とする、火山性微動のシグナルだと考えられる。

7.3. 開口割れ目の貫入

噴火の際には噴火口が出来ます。噴火口はだいたい丸い形をしているので、地下には土管のような穴が空いていて、そこをマグマや熱水が移動をしているようなイメージを持たれるかも知れません。しかし、実際にはマグマや熱水の通路は板状の形をしていることがほとんどです。こうした通路を開口割れ目といいます。噴火の際、マグマや熱水は自分で開口割れ目を作って上昇します。開口割れ目が作られることを貫入といいます。この時、地震が起きるとともに地殻変動が起きます。

今回の噴火では開口割れ目を作った際に発生したとみられる、周期 150 秒ほどの信号が、噴火当日の午前 7 時 32 分ごろに観測されました（図 7-2）。同様の信号は 09 時 05 分頃、10 時 16 分頃、12 時 55 分頃にも観測されました。また、同時に傾斜計に変化が見られました。総合的に考えると大涌谷から駒ヶ岳にかけて開口割れ目が貫入したと解釈できます。

また、6 月 29 日を挟む SAR の解析結果では、大涌谷から南東方向に伸びる直線を境に地盤が上下したと解釈出来る変化がありました。この変化は、開口割れ目が貫入したと考えると上手く説明が出来る可能性があります（図 7-3）。

開口割れ目の体積は現在解析中ですが概ね 10 万立方メートル程度と考えられています。

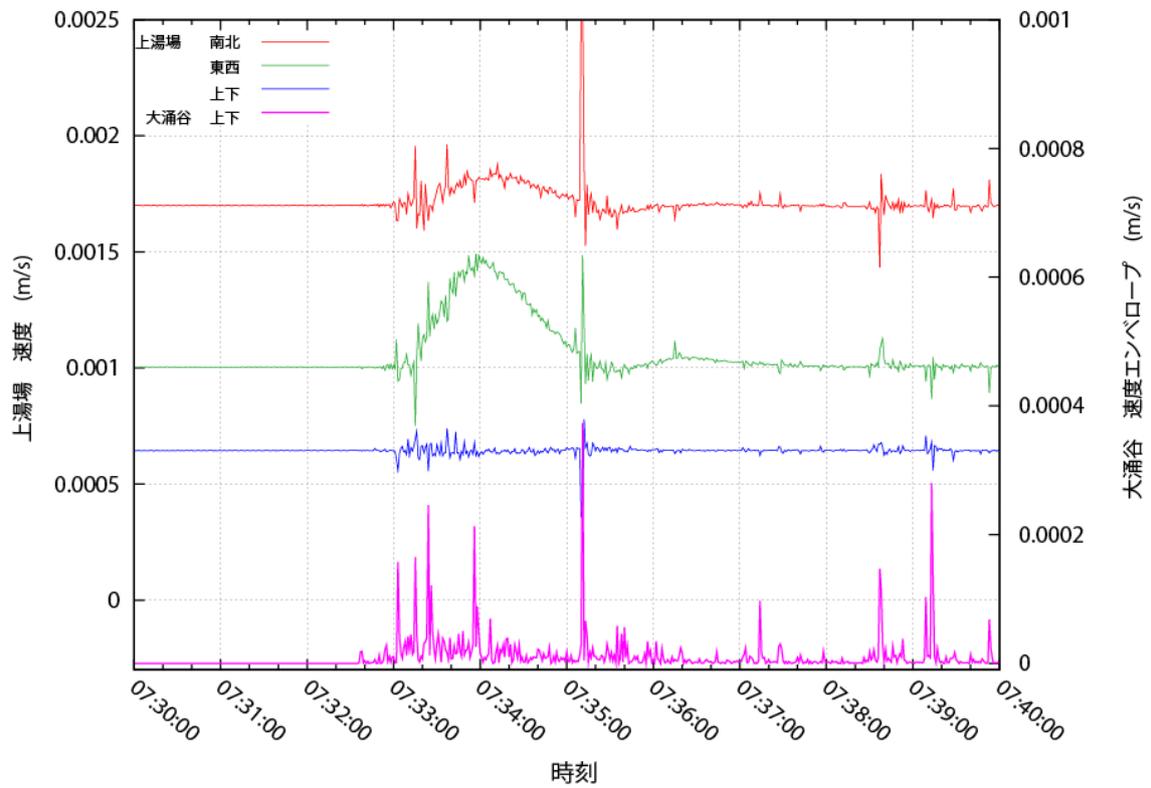


図 7-2 6月29日午前7時30分から40分の上湯場の広帯域地震計の記録と、大涌谷の地震計のエンベロープ波形（凡例を参照）。1秒ごとの値。7時32分30秒ごろの火山性微動の開始から、大涌谷の速度波形で振幅が大きくなり始めていることがわかる。一方で、上湯場の水平動の記録では、1分以上の非常に周期の長い変動が、観測されている。

8 2001年群発地震との比較

箱根山の観測史上で、地震活動、地殻変動、噴気異常が見られた群発地震活動は2001年に発生しましたが、このときは噴火には到りませんでした。この活動は10年以上経過しているため、既にたくさんの研究がされており、今回の噴火がどのような活動だったのかを考える上で、比較することは有意義です。

地震の回数が3倍近くあることや、噴火をしたことから2001年よりも2015年の活動のほうが激しかったことは明らかです。しかし、GPSで見る限りマグマだまりの膨張量や膨張速度は2つの活動で大きな違いは無いように見えます(図8-1)。また、地震回数が増減パターンもよく似ています(図8-2)。2015年の活動がとりわけ大きく特異だったようには見えません。

2001年、2015年の活動とも、地下10km程のところにあるマグマだまりへのマグマ供給を契機として、それより浅いところの熱水系が刺激されて、地震活動や、噴気活動が活発化したことには変わりないものの、2015年にはたまたま熱水の一部が地表に到達して、噴火したものと考えられます。

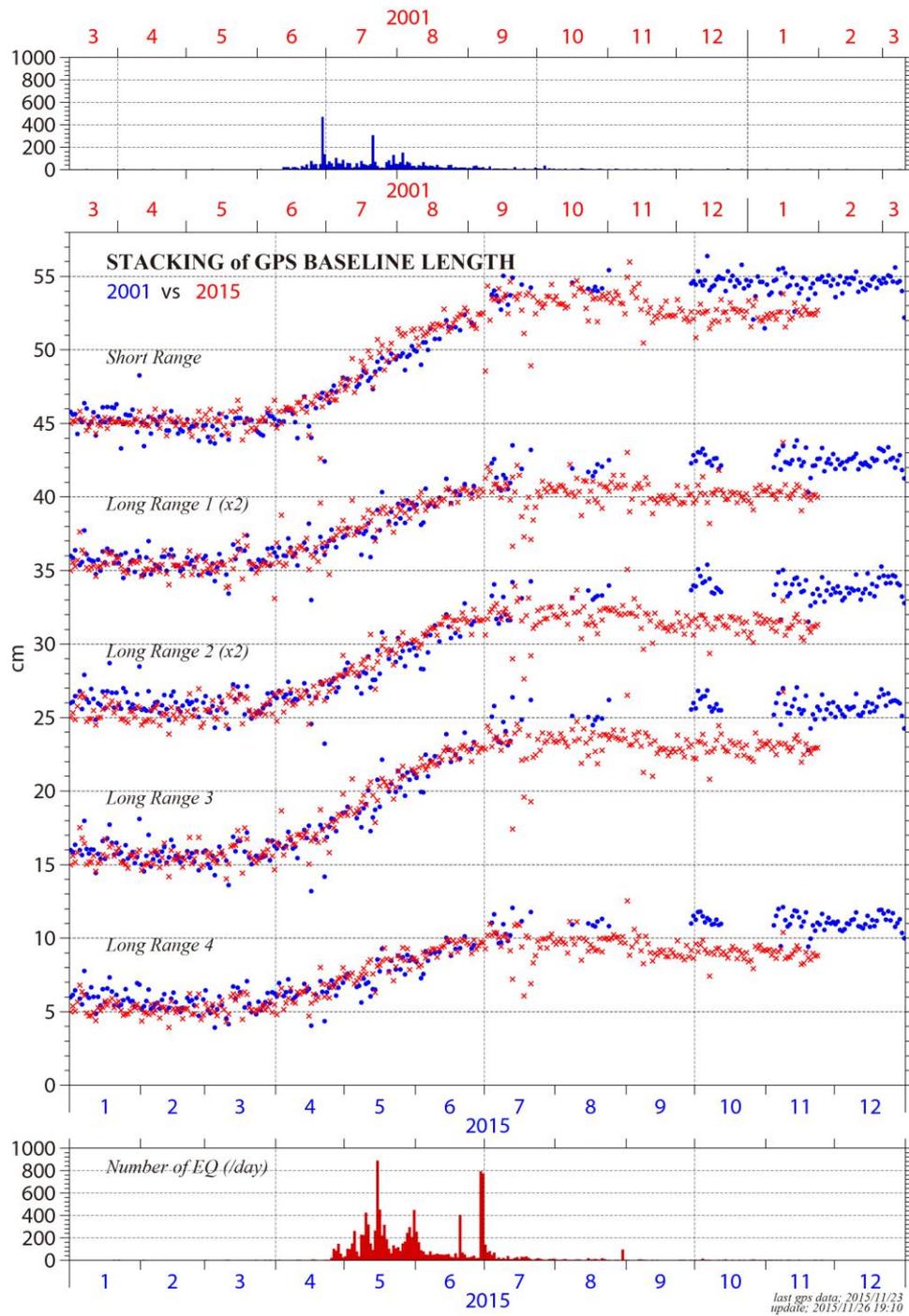


図 8-1 複数の GPS による距離の変化を統合解析処理した結果（中段）。青い●は 2001 年（日付は上の横軸を参照）、赤い×は 2015 年（日付は下の横軸を参照）を示す。山体膨張を示す伸びのスピードや変化量が、非常に似る。GPS の動きはマグマだまりの膨張を示していると考えられることから、マグマの活動は 2001 年も 2015 年も同程度だった可能性がある。上下の棒グラフはそれぞれ 2001 年と 2015 年の 1 日あたりの地震数（震源決定数）。

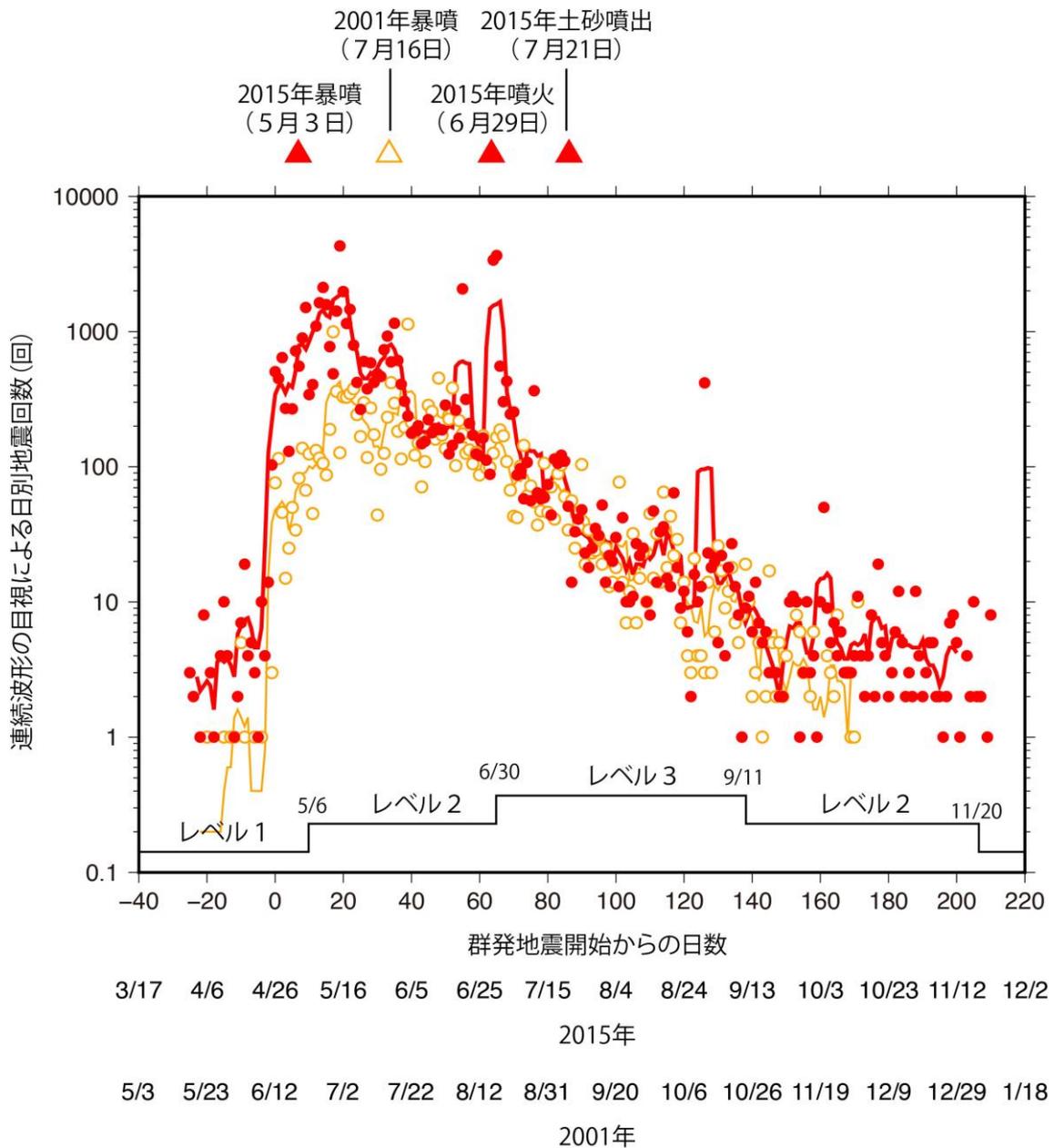


図 8-2 箱根山に設置された地震計の連続波形の目視による日別地震回数の変化と、気象庁が発表した噴火警戒レベルの推移。群発地震開始日を 0 日目として、今回（2015 年；赤丸）と 2001 年の群発地震（オレンジ色の丸）をプロットしている。最盛期の地震の回数に違いはあるが、似たようなペースで地震回数が低下していることがわかる。

9 今後の課題

レベル1に下がりましたが、活発な噴気活動は継続中です。火口・噴気孔からは火山ガスが放出されており、大涌谷の駐車場では多いときで10ppm程度の二酸化硫黄が観測されています。通常、大涌谷で放出されている火山ガスは硫化水素で、これはいわゆる玉子の腐った臭いがします。一方、二酸化硫黄は刺激臭として感じられ、ぜんそく患者など呼吸器が弱い人が吸うと数ppmで生命に危険がおよぶことがあるとされます。硫化水素以外に、二酸化硫黄が火山ガスに含まれるようになったのは、現在放出されている噴気が高温なためです。

2001年の火山活動活発化の際にも噴気が強くなりましたが、主要な噴気は暴噴した蒸気井から発生していました。このため噴気がある程度減衰した段階で、井戸に工事をほどこし、噴気を止めることが出来ました。しかし今回は多数の火口・噴気孔が自然に開口しています。このため、二酸化硫黄の濃度が下がるには、噴気の温度が下がったり、噴気の量が減ったりするのを待つ必要があります。しかし、現在のところ噴気量は噴火直後ほどでは無くなったものの、5月ごろから始まった噴気の活発化前には戻っていません(図9-1)。

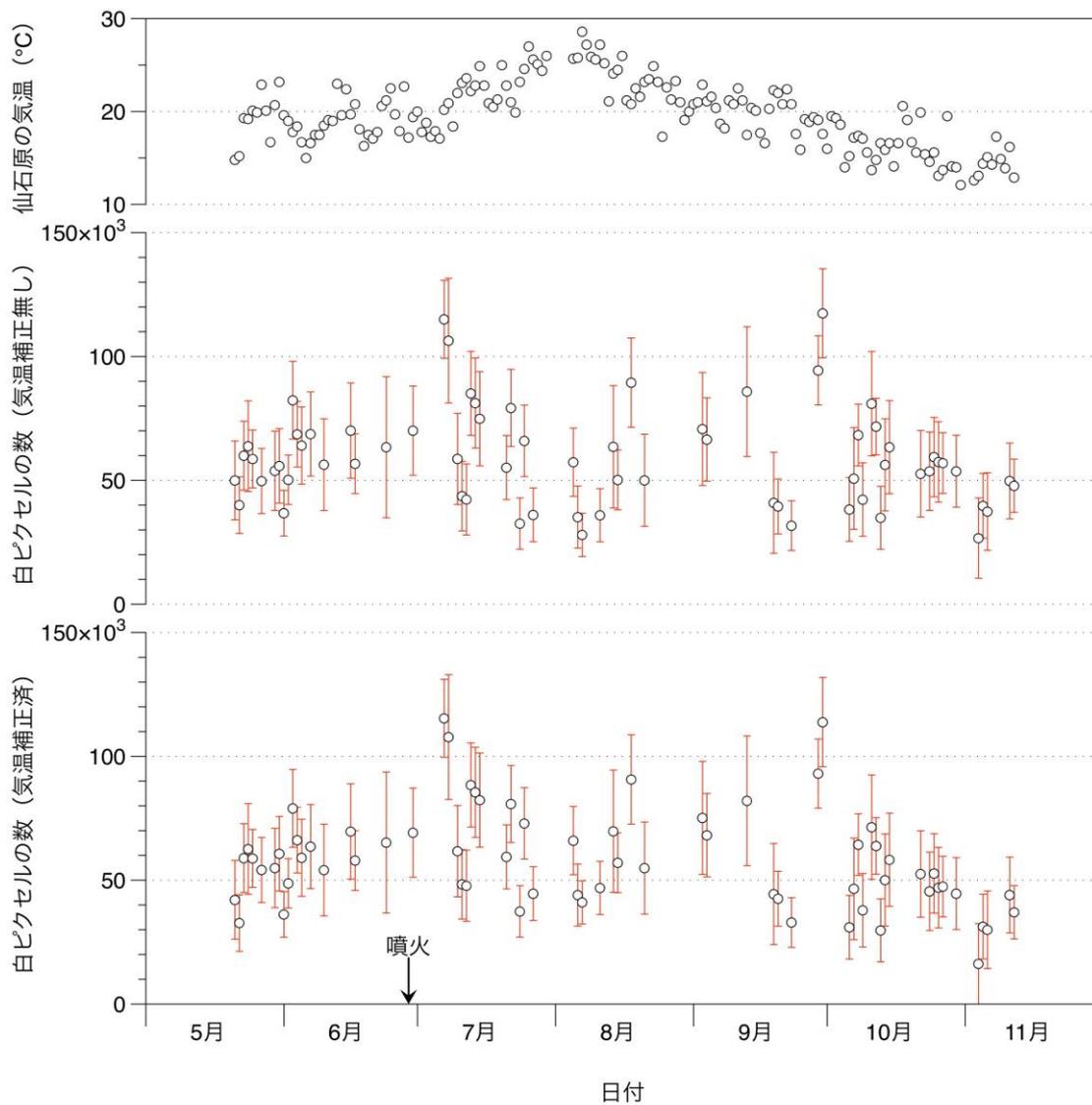


図 9-1 大涌谷に設置されたタイムラプスカメラの画像から推定される噴気量の変化（中段と下段のグラフ）と仙石原の気温（上段のグラフ）。ここでは画像のピクセル（画素）のうち白いものの数を噴気量と見なしてその時間変化を見ている。中段は気温の補正をしていないもの、下段は気温の補正をしたもの。噴気は噴火直後から 9 月ごろまで高い状態が続いていたが、10 月以降は噴火前の噴気量に戻っているように見える。

10 まとめ

以上のことをまとめると以下の通りです。

- ・ 箱根山では数年に1度くらいの頻度で、地下 10 km ほどのところにあるマグマだまりに、マグマが供給され蓄積していることが GPS の観測から明らかになっています。また、このようなマグマ供給をうけて、地震活動が活発になることがわかっています。2001 年には地震活動の他、噴気活動も活発になりました。

- ・ 2015 年の噴火の前にも、4 月初め頃から GPS で箱根山の伸びが認められ、その後、地震活動、噴気活動が活発化しました。

- ・ 2015 年噴火は 2001 年の群発地震に比べて地震活動が活発だったものの、GPS の観測から推定されるマグマだまりの膨張量や、地震活動のパターンには大きな違いが無いように見えます。

- ・ 一方で、噴火が起きた 6 月 29 日には地下浅部に開口割れ目が生じることに伴う顕著な地殻変動や地震活動が見られたほか、噴火の最中には火山性微動が認められました。

- ・ 地殻変動は 7 月末に停止したほか、地震活動も通常のレベルに戻りつつありますが、噴気活動は依然強いまま推移しています。

今回の噴火ではたくさんのデータが得られ、今後詳しく研究解析をしていく予定です。このことにより、より詳しく箱根山の地下で起きたことがわかるとともに、将来、再び箱根山の活動が活発化した際に防災上適切な判断が出来ることが期待されます。

(2015 年 12 月 15 日初版)