草津白根山に見る
不意打ち噴火のメカニズム

予想外の時期と場所で起きた噴火の背景には
地下深部のマグマ性ガスの振る舞いがある

中島林彦（日本経済新聞）　協力：大場 武（東海大学）

噴火は時に，ほとんど何の予兆もなく起こる。予兆がないと注意喚起や規制がしにくいため，火口近くに居合わせた登山客などに死傷者が出る場合がある。今年1月の草津白根山の噴火や，2014年9月の御嶽山（おんたけさん）の噴火が代表事例だ。近年の研究で，そうした不意打ち噴火の中でも火山の熱水活動が原因とみられる場合は，ある程度共通したメカニズムが存在する可能性があることがわかってきた。

（文中敬称略）

「草津白根山の1月の噴火には，びっくり仰天した」と同山の火山活動に詳しい東海大学の大場武は話す。噴火直後の新聞紙面では，何人もの火山学者が異口同音に今回の噴火の意外性を語っている。草津白根山では近年，火山活動が低下しており，噴火が切迫しているとの認識はなかったからだ。また草津白根山には複数の火口があり，噴火するとしたら高温の噴気などの活動が見られる火口だろうと予想されていたが，実際に噴火したのは有史以来，噴火が起きていないとされていた別の火口だった。

なぜ予想外の時期に，予想外の場所で噴火したのか。大場はこれまでに得られている草津白根山の地下構造の知見と，ここ数年間の火山活動の推移をもとに，1つのシナリオを提唱している。地下深部において，高温のマグマ性ガスの上昇ルートが途中で目詰まりする「シーリングゾーン」が形成されて高温ガスが地下に蓄積，それが原動力となって噴火がもたらされたという。

大場は，戦後最悪の火山災害となった2014年の御嶽山の噴火も，2015年に起きた箱根山大涌谷の有史以来初の噴火も，シーリングゾーンの噴火モデルでうまく説明できるとみている（中島林彦「箱根山大涌谷噴火を読み解く」日経サイエンス2015年11月号。別冊日経サイエンス217『大地震と大噴火』に収載）。シーリングゾーンの噴火モデルは火山活動を深く理解し，噴火の可能性を評価するのに役立つと期待されている。

ほとんどなかった直前の予兆

草津白根山はほぼ南北に連なる標高2000m級の3つの山の総称だ。南から順に本（もと）白根山（2171m），逢ノ峰（あいのみね，2110m），白根山（2160m）という。もっとも3つの山の頂は互いに1kmくらいしか離れておらず，3山全体で1つの山体を形成している。また草津白根山の東側山麓の標高約1200mには草津温泉が，西側山麓の同約1700mには万座温泉があり，いずれも名湯として知られる。万座温泉からは本白根山と白根山を望むことができる（下の写真）。

今回の噴火は本白根山で1月23日に起きた。火山噴火予知連絡会に提出された東京工業大学や東京大学，防災科学技術研究所などの資料をもとに当時の状況を再現すると，それまで静穏だった本白根山で異変が起きたのは同日午前9時59分のことだ。火山の地下を熱水や水蒸気が動くことなどによって地面が連続的に揺れる「火山性微動」が始まった。以後，その振幅は次第に増大，午前10時2分，爆発によるとみられる激しい空振（大気中を伝わる振動）が始まり，火山性微動に加えて低周波の地震も起き始めた。この時点で噴火が始まったと考えられる。火山性微動の開始から噴火までわずか3分間しかなかった。

傾斜計のデータによるとこの約3分間で，本白根山の地下浅部で圧力が急増して山体が膨張，ほぼ東西方向に長さ約500m，深さ数百m以上に達する割れ目が急激に生じた。その割れ目を伝って水蒸気が爆発的な勢いで上昇，岩石片や微小な粒子を巻き上げ，上空に向けて噴出したと推定されている。激しい空振と低周波地震が始まった午前10時2分は，割れ目に沿って複数の火口が開き，大規模な噴出が始まった時刻だ。大振幅の火山性微動はその後も約5分間継続し，これが噴火の最盛期となった（5ページの写真）。

当時，白根山と逢ノ峰の間を通って草津温泉と万座温泉を結ぶ国道は冬期閉鎖中だったが，逢ノ峰と本白根山の中間地点までスキー客を運ぶロープウエーは運行中で，ゴンドラに噴石が飛び込んできた。噴石は草津白根山東側山腹のゲレンデにいたスキー客や雪山訓練中の自衛隊員を襲い，1人が死亡，11人が負傷した。

降灰は火口から約30km遠方まで確認され，噴出物の総量は3万～5万トンと見積もられた。2014年の御嶽山噴火では多数の死傷者が出たが，噴火としては小規模で，噴出物総量は約50万トンだった。今回の噴火の噴出量はその1/10なので，かなり規模が小さいといえる（ちなみに2015年の箱根山大涌谷噴火の降灰量は約100トンで極小規模の噴火だった）。

予想外だった本白根山の噴火

実は火山学者や気象庁が噴火を警戒し，観測機器を集中的に設置していた

草津白根山の山容　万座温泉の見晴台から眺めた風景（今年4月に撮影）。画面の左端，地肌が見える山頂部を持つのが白根山。その右隣りにある手前の小山に隠れて逢ノ峰は見えないが，小山の右側に遠く見えるのが本白根山。手前に広がる谷は奥万座川の渓谷で，画面右下の谷底に小さな池のように見えるのは万座温泉の泉源の1つである湯畑。

日経サイエンス

のは，今回噴火した本白根山ではなく白根山の方だった。白根山は草津白根山を構成する3つの山の中で火山活動が最も活発である一方，本白根山や逢ノ峰については火山学者の関心を集めるような活動は見られなかったからだ。その白根山にしても，近年，火山活動は低下傾向にあり，「もうこの山はしばらく眠りにつくのだろうなあと多くの火山学者が思っていた」（大場）。

実際，気象庁は2017年6月，白根山の噴火警戒レベルを2（火口周辺の規制）から最低レベルの1（活火山であることに留意）に下げていた。これを受け，白根山の山頂域にあるレストハウスは営業を再開し，観光客で賑わうようになった。それから約半年間，火山活動に特段の変化も見られなかったところに，多くの研究機関が監視していた白根山ではなく，噴火警戒レベルの設定すらされていなかった本白根山で突如として噴火が起きたのだから，火山学者は驚いた。

しかし大場が提唱する噴火シナリオに沿って考えれば「今回の本白根山の噴火と，白根山のここ数年の活動低下はいわば表裏一体の関係にある」（大場）。白根山と本白根山の状況を紹介した上で，近年の火山活動の状況を述べ，それが本白根山の噴火とどのようにつながるかを説明する。

白根山の山頂域には大小3つの火口湖があり，最も大きな直径約300mの火口湖は「湯釜」と呼ばれ，湖底から噴出する火山性ガスや熱水のため強酸性で白く濁っている（7ページの写真左）。周辺は火山ガスや高熱のため木々が生えず，地肌がむき出しで荒涼とした風景が広がる。特に北側斜面は高温の噴気が出る噴気地帯となっている（7ページの写真右）。また湯釜周辺では，江戸時代以来，小規模な噴火が何度もあったことが記録にあり，直近では1982年～1983年に5回，1989年に1回，噴火している。

一方，本白根山の山頂周辺にも火口湖と噴気地帯があるが，火口湖は湯釜とは違って湖底から熱水や火山性ガスは流入しておらず，噴気地帯の噴気は熱くない。気温と同程度の低温噴気だ。本白根山と逢ノ峰の山頂域はいずれも白根山と違って緑に覆われ，火山活動が不活発であることが見て取れる。また両者とも記録に残っている噴火はない（逢ノ峰北西の弓池という火口湖周辺で1902年に小規模噴火があったが，弓池は白根山の領域に入ると解釈されている）。

2つの熱水溜まり

こうした草津白根山の活動は地下にある熱水溜まりに由来する。1990年代前半，第4次火山噴火予知5カ年計画の一環として草津白根山の広域で地下の電気抵抗が調べられ，2つの熱水溜まりの存在が明らかになった（右ページのイラスト）。岩盤は一般に電気抵抗が大きいが，熱水が豊富に存在する場所では電気抵抗が低くなり，熱水ばかりの場所だと電気抵抗がほぼ海水並みになる。だから電気抵抗の調査で，熱水溜まりの場所や，熱水の上昇ルートなどが推定できる。

白根山では山頂の湯釜直下の標高約2000mの領域から標高－1500m以深の領域まで電気抵抗が連続的に低くなっており，特に標高0m前後の領域の電気抵抗は海水並みの低さだった。この低電気抵抗の領域は火山性地震の震源分布とほぼ一致する。こうしたことから，白根山頂の直下にはかなり大きな熱水溜まりがあり，そこから湯釜に熱水が供給されていること，白根山頂直下を震源とする火山性地震は熱水の活動によって生じていることがわかった。この熱水溜まりから白根山の東側山麓に至る熱水の流れも電気抵抗マップから推定され，これが東側山麓の温泉（草津温泉北方にある香草温泉などの野湯）をもたらしているとみられた。

一方，逢ノ峰山頂から南東約500mの山腹の直下，標高0m前後の領域も電気抵抗が海水並みに低く，このあたりにもう1つ別の熱水溜まりが存在することがわかった。ただ，その鉛直上方の標高約1000mの領域や，鉛直下方の標高約－1500mの領域の電気抵抗は低くなっていない。これらから，この熱水溜まりは白根山直下のものより規模が小さいと考えられる。実際，この熱水溜まりに由来するとみられる火山性地震の震源分布は白根山直下の震源分布よりも限定的で，地下数百mでは火山性地震は起きていない。

また，この逢ノ峰南東の熱水溜まりから逢ノ峰と本白根山の両山頂の火口につながる熱水ルートが存在しないことも電気抵抗マップから読み取れた。この事実は，本白根山頂の火口湖で湯釜のような熱水活動の影響が見られないことと整合する。本白根山の噴気地帯の噴気温度が低い理由は，熱水溜まりから地表まで1000m程度の距離があり，高温ガスが上昇する途中で冷えるためだとみられる。また，この熱水溜まり周辺から東側山麓と西側山麓に向けた熱水の地下の流れがあることも電気抵抗マップから推定され，それぞれ草津温泉と万座温泉の泉源となっていると考えられた。

今回の本白根山の噴火や白根山の湯釜周辺でたびたび起きている噴火も，これら2つの熱水溜まりに由来すると考えられている。何らかの理由で熱水溜まりの活動が活発化し，熱水が地下浅部で沸騰して水蒸気が爆発的に発生，岩盤を破砕し，岩石片などを巻き上げながら噴出する。「水蒸気噴火（水蒸気爆発）」と呼ばれる噴火だ（ちなみに最近報じられている南九州の霧島火山とハワイ島キラウエア火山の噴火はマグマが地表に噴出するマグマ噴火で，水蒸気噴火とはタイプが異なる。桜島もマグマ噴火だ）。

つまり，本白根山が今回なぜ噴火したのかという問いは，なぜ熱水溜まりの活動が活発化したのかという問いになる。噴火の場所は本白根山山頂域の北側部分（逢ノ峰に近い側）なので，今回の水蒸気噴火は逢ノ峰南東の熱水溜まりから供給された熱水に由来するとみられる。大場によると2つの熱水溜まりは密接なつながりがあると考えられるので，それら両方の熱水溜まりのここ数年の活動状況を説明する。

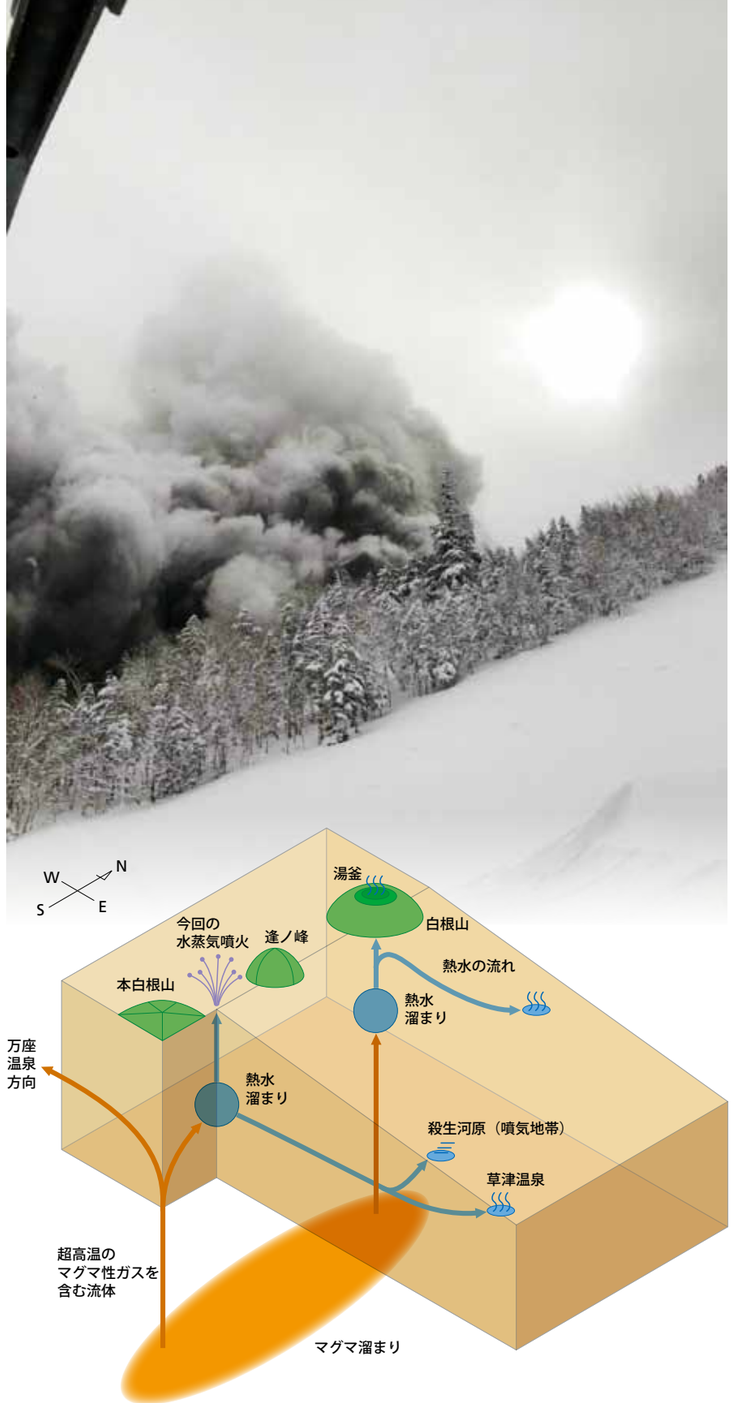
低下傾向だった熱水活動

これまで火山学者は白根山の湯釜付近での噴火の可能性を考えていたため，湯釜直下の熱水溜まりの活動を注視していたが，ここ数年，その活動は低下傾向にあった。白根山を震源とする火山性地震は2014年当時，かなり発生頻度が高く，震源は標高0mから，湯釜直下の標高2000mあたりまで広がっていたが，2015年以降，発生頻度

KEY CONCEPTS

マグマ性ガスの流路が目詰まり

- 草津白根山の1月の噴火は火山学者にとって驚きだった。予想外の時期に意外な場所で起きたからだ。
- しかし，ここ数年の火山性地震や噴気活動の推移を注意深く調べると，不意打ちのような噴火がどのようにして起きたのか推定できる。
- マグマ溜まりから上昇してくる高温ガスの流路が目詰まりして，地下深部でガスが蓄積したことが原因で，御嶽山など他の火山でも同じようなメカニズムで噴火が起きているとみられる。



時事（写真）／東海大学・大場武（イラスト）

草津白根山の地下構造　上段の写真は1月の本白根山の噴火当時の模様（浜島貝さん提供）。下段はこれまでの研究から推定された草津白根山の地下の大まかな様子。地下深部にマグマ溜まりから上昇してきた高温のガスが，白根山頂の湯釜直下にある熱水溜まりと，逢ノ峰の南東側にある熱水溜まりに供給されている。草津白根山の東側山麓と西側山麓に向かう流路もあり，草津白根山や万座温泉などの泉源となっている（万座温泉側の状況については不明な部分が多い）。今回の噴火は，マグマ溜まりから湯釜直下の熱水溜まりに向かう高温ガスのルートが，シーリングゾーンの形成によって目詰まりした結果，通常よりも大量の高温ガスが逢ノ峰南東側の熱水溜まりに供給されたために起きたと考えられる。

が低下するとともに，震源の上限が次第に低下し，2017年には標高1500mまで下がった。

火山性地震の活動低下は，地下深部のマグマ溜まりから熱水溜まりに供給されている高温のマグマ性ガスの流入量が減少したのが原因とみられる。間接証拠となるのが湯釜周辺の高温噴気地帯の変動だ。噴気には水蒸気のほかにマグマ性ガス由来の二酸化炭素や硫化水素が多く含まれ，水蒸気に対する二酸化炭素の濃度比（モル比）はマグマ性ガスの熱水溜まりへの流入量の変化を知る指標となる。大場によると，この値は定期的な観測を始めた2014年以降，2017年暮れまで一貫して低下傾向を示していた。

マグマ性ガスの熱水溜まりへの流入が減れば，熱水溜まりの温度も低下すると考えられる。地磁気は地下の温度が上がると熱消磁という現象によって磁力が弱まり，温度が下がると岩盤の帯磁によって磁力が増すが，湯釜周辺の磁力のデータを見ると，2016年以降，2017年暮れまで磁力が増す傾向にあり，地下の温度が低下傾向にあることを示していた。

このように湯釜直下の熱水溜まりの活動は詳しく把握されていたが，逢ノ峰南東の熱水溜まりの活動は噴火との関連がないとみられていたため十分な観測はされていない。ただ，火山性地震のデータは得られており，ここ数年，発生頻度に大きな変わりはなかった。火山学者はこうした状況を承知していたため，今回の本白根山の噴火は大きな驚きだった。

大場も同様だったが，噴火発生後，過去約3年間の火山性地震のデータを詳しく見直して奇妙なことに気付いた。この間，湯釜直下の火山性地震の震源の上限は標高約2000mから次第に下がって約1500mになったのに対し，逢ノ峰南東の火山性地震の震源の上限は標高約1000mから次第に上昇して1200mくらいになっていたのだ。このシーソーのような変動を手がかりに，大場はシーリングゾーンの噴火シナリオを考えるに至った。それは次のようなものだ。

シーリングゾーンの形成

草津白根山の地下には2つの熱水溜まりが存在するが，両者にマグマ性ガスを供給しているマグマ溜まりは同一のものだとみられる。白根山と本白根山の噴気地帯の火山性ガスの二酸化炭素と硫化水素の濃度比がほぼ同じであることが1つの証拠だ。また，草津白根山は数十万年前，マグマが地表に噴出する大規模なマグマ噴火を起こしており，その推定流出量から考えるとマグマ溜まりは差し渡し4km程度はあるとみられ，これは2つの熱水溜まりの分布域を包含するサイズになる。

草津白根山は活動を始めてから数十万年以上が過ぎた古い火山であり，そうした火山ではマグマ溜まりから放出されるマグマ性ガスの量は基本的にほぼ一定だと考えられる。つまり，このマグマ溜まりで生じる高温ガスのかなりの部分は湯釜直下の熱水溜まりに定常的に供給され，残りが逢ノ峰南東の熱水溜まりに向かっているとみられる。しかしながら，湯釜直下の熱水溜まりへのマグマ性ガスの供給量がここ2～3年，減っていたのも，観測データの解析からほぼ確かだと考えられる。

「これら両方がともに正しいとすれば，その絞り込まれた分のマグマ性ガスは，逢ノ峰南東の熱水溜まりの方に供給されたと解釈するのが自然だ。逢ノ峰南東の熱水溜まりはここ数年，火山性地震の発生頻度はあまり変わらないが，震源の上限が徐々に上昇している。この変化はマグマ性ガスの供給が増え，熱水の活動が活発化したことの表れとみることができる」（大場）。

通常より高温になった逢ノ峰南東の熱水溜まりでは内圧が高まり，熱水が本白根山の山頂近くにまで上昇，最終的に水蒸気噴火に至ったというのが大場の見立てだ。ではなぜ湯釜直下の熱水溜まりへのマグマ性ガスの供給が絞り込まれたのか？　その回答が「シーリングゾーンの形成だ」（大場）。

草津白根山の地下深部のマグマ溜まりから放出された推定800℃以上の超高温ガスは周辺の地下水と混ざり，高温流体となって岩盤中の細かい亀裂を伝って上昇していく。そして上昇するにつれて次第に冷え，温度が400℃くらいまで下がると，様々な鉱物が流体から析出し始める。この析出プロセスが続くと，岩盤中の亀裂が鉱物で埋められ完全にふさがる場合も出てくる。岩盤中に約400℃の等温面を描くと，マグマ溜まりの上方をドームのように覆う形になり，そのあたりで高温流体の上昇をせき止めるゾーンが形成される。これがシーリングゾーンだ。

今回の噴火の火口を特定するため，本白根山の地表面の微小な起伏が詳しく調べられたが，その過程で，今回と同様の小規模な水蒸気噴火によって形成されたとみられる火口列が多数発見された。これまで行われた本白根山の地質調査によれば，本白根山で噴火が起きたのは直近でも約1500年前とされるが，今回のような小規模な水蒸気噴火は残留する堆積物が少ないことを考えると，より新しい時代にも起きていた可能性がある。そうした噴火もシリングゾーンの形成によって生じた可能性があるだろう。

様々な噴火の様相

シーリングゾーンによって火山の熱水活動が変動するモデルは1990年代末，米地質調査所の火山学者だったフルニエ（Robert Fournier）が米国の巨大火山イエローストーンで観測されている火山性地震などの熱水活動の変動を解釈するために提唱した。大場は今回の本白根山の噴火など，比較的古い火山で起きる小規模な水蒸気噴火の多くはシーリングゾーンが関与していると考えている。ただ，シーリングゾーンの形成から噴火に至る道筋には様々なバリエーションがある。

今回の本白根山の噴火はマグマ性ガスのメインルートがシーリングゾーンで塞がれた結果，サブルートの方に通常より大量のガスが流れることによって起きたと考えられる。一方，シーリングゾーンでせき止められたマグマ性ガスが次第に蓄積，その高温高圧によってシーリングゾーンが破壊され，溜め込まれたガスがメインルートに急激に流れ込む可能性もある。

先述のように草津白根山の湯釜周辺では江戸時代以来，何度も水蒸気噴火が起きていることが知られ，直近では1989年にも起きているが，これらはシーリングゾーンの破壊シナリオによって説明できると大場はみる。2014年の御嶽山の噴火と，2015年の箱根山大涌谷の噴火もシーリングゾーンの破壊によって生じた可能性が高いと大場は話す。それらの噴火の前，マグマ性ガスの絞り込みとみられる変化が，噴気の調査で捉えられていたからだ。

シーリングゾーンの形成プロセスを考えると，シリーングゾーンは一度，破壊されても時間がたてば再び形成されるので，噴火も繰り返されることになる。「シーリングゾーンの形成や破壊の兆候をつかむため，噴気や火山性地震，地磁気などを地道にモニターすることが求められる」と大場は言う。

ただ，草津白根山のように1つのマグマ溜まりから複数の熱水溜まりに高温ガスが供給される場合，状況はより複雑になる。今回，本白根山が噴火したが，次回も続けて本白根山になるか，それとも白根山の湯釜周辺になるか，「地下深部のマグマ性ガスや熱水の動きを予想することは難しい」（大場）。白根山の場合，湯釜以外の火口湖でも噴火した記録があるので，噴火の場所を湯釜に絞り込むことはできない。「今回の噴火を教訓に，予断を持たず，草津白根山全体の火山活動をモニターする必要がある」（大場）。

実際，草津白根山の地下では新たな展開が起きつつあるようだ。大場は5月中旬，本白根山の噴火後初めて，湯釜周辺の高温噴気地帯を調査したが，噴火前の2017年11月の調査時点と様相は大きく変わっていた。噴気地帯では新たな陥没孔が出現，その孔の中では熱水が激しく沸騰していた。複数の噴気孔から噴気を採取，二酸化炭素と硫化水素の濃度を調べたところ，マグマ性ガスの急増をうかがわせるデータが得られた。また湯釜の水位は11月より高くなっていた。

「このような湯釜周辺の熱水活動の活発化は，シーリングゾーンが破壊され，高温のマグマ性ガスが湯釜直下の熱水溜まりに大量に供給され始めた可能性が高いことを示唆する」と大場は言う。1月の本白根山の噴火だけではシーリングゾーンの“ガス抜き”が不十分だったようだ。

湯釜直下では4月21日夜から火山性地震の群発が始まり，気象庁は翌22日，白根山の噴火警戒レベルを最低レベルである1（活火山であることに留意）からレベル2（火口周辺の規制）に上げたが，「この4月22日前後にシーリングゾーンが破壊されたとみられる」（大場）。

大場によると現在の湯釜周辺の状況は，1982年に湯釜で水蒸気噴火が起きる前とよく似ているという。噴気地帯や火山性地震などの活発化で終わるのか，それとも噴火に至るのか，十分な注意が必要だ。■

湯釜と高温噴気地帯　東海大学の大場武教授の研究グループは定期的に湯釜（左の写真）とその近くにある噴気地帯の調査に取り組んでいる（写真はいずれも2015年10月の調査の模様）。

東海大学・大場武

協力　大場 武（おおば・たけし）
東海大学理学部教授。専門は火山化学と地球化学で，火山性ガスと火山活動との関係に興味がある。