

火山 GPS 統合解析データに基づく霧島山の変動源モデル Source Model of Kirishima Volcano Based on GPS Integrated Analysis in Volcanic Region

地理地殻活動研究センター 今給黎哲郎・大脇温子
Geography and Crustal Dynamics Research Center
Tetsuro IMAKIIRE and Atsuko OOWAKI

要 旨

霧島山新燃岳では、2011年1月26日に本格的なマグマ噴火が始まり、1月27日にかけて大量の火山灰や軽石が火口から噴出する準プリニアン噴火となった。続いて1月28日頃から火口内に溶岩が噴出し始めた。溶岩の流出は2月1日に至って終息したが、その後は噴石や火山灰を爆発的に放出するブルカノ式噴火が、散発的ではあるが繰り返し発生している。

国土地理院では、周辺の電子基準点のデータを用いて今回の噴火発生以前から霧島山の地殻変動を監視していた。2009年12月頃までは長期的に短縮あるいは停滞傾向であった霧島山周辺の基線が、2009年12月中旬から伸張に転じた可能性があることを2010年3月末に確認して公表した。膨張性の地殻変動は2010年春以降も継続していることが観測され、GEONET（GPS連続観測システム、以下、「GEONET」という。）と気象庁及び（独）防災科学技術研究所が霧島山周辺に設置しているGPS観測点のデータも合わせて用いる火山GPS統合解析の結果も用いて、インバージョンによる膨張源の推定を行って火山噴火予知連絡会にも報告した。本稿では、霧島山新燃岳の噴火に至るまでの膨張性地殻変動の状況とそのデータから推定された変動源モデル、噴火時の収縮と噴火後の再膨張に関わる変動源モデルについて報告する。

1. 霧島山周辺におけるGPS連続観測

1.1 観測点配置

霧島山を囲むGPS観測点の配置を図-1に示す。この図で分かるように、GEONETの電子基準点「えびの」、「牧園」、「都城2」が霧島山周辺にある。国土地理院では「えびの」と「牧園」で1997年から、「都城2」で2003年から観測を継続しており、中長期的な傾向を含めて霧島山の地殻変動の状況を監視してきた。この他に、気象庁が設置したGPS連続観測点为数点あり、テレメータ観測点のデータについては、2009年から国土地理院でも提供を受けて火山GPS統合解析システムにより解析を行っている。また、（独）防災科学技術研究所が2010年に設置した「万膳」、「夷守台」のGPS観測点についても、同年6月からオンラインでの提供を受けて、火山GPS統合解析での解析を開始した。

霧島山周辺 GPS 連続観測配置

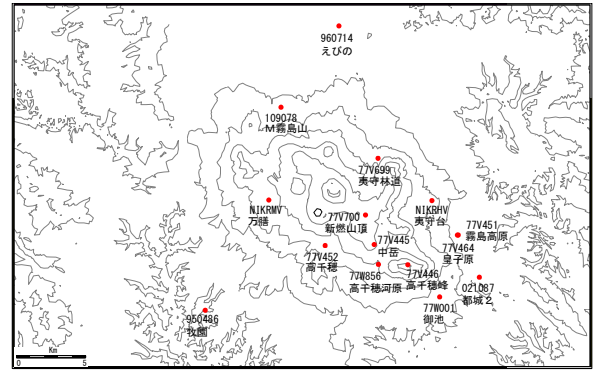


図-1 霧島山周辺のGPS連続観測点。「えびの」「牧園」「都城2」は電子基準点、「M霧島山」はGPS機動観測点、「夷守林道」、「新燃山頂」、「霧島高原」、「皇子原」、「高千穂」、「高千穂河原」、「高千穂峰」、「御池」は気象庁のGPS観測点、「万膳」、「夷守台」は（独）防災科学技術研究所のGPS観測点

1.2 火山GPS統合解析システム

火山GPS統合解析システムは、国土地理院が全国展開しているGEONETの観測網と気象庁が火山監視のために火山山体近傍に設置しているGPS観測点のデータを同時に解析することで、噴火準備過程、直前過程におけるマグマの移動を時間的にも、空間的にも詳細に追跡可能とすることを目的に開発されたものである。受信機機種、データ取得・通信に関する設定などがGEONETと気象庁観測点では異なるため、それらを調整し、解析結果を整合させるためのデータ処理戦略が組み込まれている。特に、一部の気象庁観測点では1周波のGPS受信機を使用していることから、電離層補正を行うための処理を行っていることが特徴である。24時間分のデータを用いてIGS速報暦に基づく解析（GEONETのR2解相当）とIGS最終暦に基づく解析（GEONETのF2解相当）を行っている。なお、現行のGEONETは火山GPS統合解析システムが開発された当時よりも解析戦略を進化させたR3解、F3解を算出している。広域には数mmレベルの座標差が生じることもあるが、局地的な変動を基線ベクトルや3成分時系列で確認する際には大きな影響がない。火山周辺の変動ベクトル図を作成する際には重複して座標を計算した観測点での差

(数 mm 以内)を平行移動させるような調整を行うことで GEONET 観測点と火山 GPS 統合解析点 (気象庁 GPS 観測点等)を同時に表示して監視に用いている。GEONET 以外の GPS 観測点について R3, F3 解相当の解析結果を得るシステムについては、現在開発中である。

火山 GPS 統合解析の結果については、時系列グラフ、変動ベクトル図などを火山噴火予知連絡会へ報告し、火山地域の地殻変動監視に活用している。今回の霧島山(新燃岳)の活動に関連しては、気象庁以外の観測点としては初めて、(独)防災科学技術研究所の2観測点についてのオンラインによるデータ提供を受け、火山 GPS 統合解析システムでの解析を行った。

2. 地殻変動と変動源モデル

2.1 2011年噴火前の地殻変動と火山活動の推移

霧島山周辺の GEONET による観測結果自体に関する詳細は、川元ほか(2011)で報告されているのでここではポイントとなる特徴だけ記述する。

最も観測期間が長い「えびの」-「牧園」基線は霧島山を南北に縦断しているが、1997年の設置当初から2006年頃までは短縮傾向が続いていた。しかし2006年後半から2007年にかけて伸びの傾向が見られ、2007年末頃には伸びは一旦収まったものの、それ以前と比較して短縮傾向は明瞭ではなくなった。そして2009年12月15日頃に数 mm の伸びのジャンプを示すイベントがあり、それ以降3-4 mm/月の速度での伸びの変化が始まった。霧島山を取り囲む他の2基線「牧園」-「都城2」、 「都城2」-「えびの」においても、同時期から伸びの変化が始まった。2010年夏、一時期伸びの変化が鈍ったようにも見えたが、2011年1月26日に本格的なマグマ噴火が開始するまで、ほぼ単調に3基線とも伸びが続いていた。(図-2)

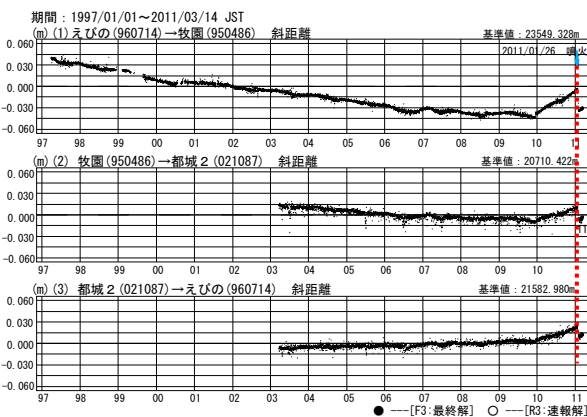


図-2 「えびの」-「牧園」, 「牧園」-「都城2」, 「都城2」-「牧園」間の基線長時系列

この時期の火山活動を振り返ってみると以下のように2006年頃から活動の高まりが見られている。なお、霧島山(新燃岳及び御鉢)の活動について火山活動度レベルが導入されたのが2005年2月、噴火警戒レベルが導入されたのが2007年12月である。

2006年2月に振幅のやや大きな火山性微動が観測され、火山性地震のやや多い状態が継続したことから活動度レベルが1から2に引き上げられ、同年5月に引き下げられるまでレベル2が続いた。また2006年12月3日に新燃岳付近で火山性地震の活動が高まり、活動度レベルが1から2に引き上げられている(その後静穏化して2007年1月9日に1に引き下げ)。2007年2月5日には御鉢で火山性微動が発生し活動度レベルが1から2に引き上げられるイベントがあった(その後静穏化して2007年3月5日に1に引き下げ)。また、同年8月には新燃岳付近で火山性地震が一時増加するといった現象が見られている。

その後、2008年8月22日に新燃岳で小噴火が発生し噴火警戒(火口周辺)が発令され、噴火警戒レベルが1から2に引き上げられた。火山性地震の活動が収まってレベルが1に引き下げられたのは同年10月29日であった。2009年から2010年初めまでの間はレベル1が続いていたが、2010年3月30日に新燃岳付近で火山性微動が観測され、噴火警戒(火口周辺)が発令されて噴火警戒レベルが2に引き上げられた。このときは同年4月16日に一旦警戒解除(レベル1への引き下げ)が行われたが、5月6日に再び地震活動が活発化したためレベル2に引き上げられ、それ以降レベルが1に引き下げられることはなく、2011年1月26日の本格的なマグマ噴火発生でレベル3に引き上げられ、現在に至っている。

2.2 2011年噴火前の変動源モデル

霧島山を囲む「えびの」-「牧園」, 「牧園」-「都城2」, 「都城2」-「えびの」の3基線で、2009年12月頃から伸びの傾向が見られ始めたことについて、国土地理院では2010年3月の時点で認識し、月例報告である「平成22年3月の地殻変動について」(2010年4月8日付)でも公表した。2010年3月30日に小噴火が発生したこともあり、山体の膨張を示す変動としてその推移に注目し、2010年6月の第116回火山噴火予知連絡会にはGEONET観測点(電子基準点)での地殻変動観測結果とそれに基づく変動源モデル(図-3)を提出して報告した。このときのモデルは、変動量がまだ小さかったこともあり、観測精度が高い電子基準点の観測結果のみを用いて作成したため、変動源の位置、特にその深さについての精度がなかった。しかし、変動源の水平位置として推定された韓国岳北西の山麓では、その近傍で

小規模な地震活動が発生していることが東京大学地震研究所により確認されており、場所が一致したことには何らかの意味があるものと考えられた。

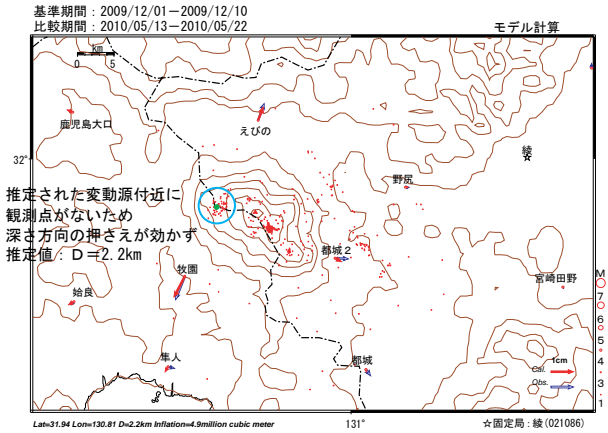


図-3 GEONET 観測点のみのデータに基づくインバージョンによる霧島山の膨張源モデル。韓国岳の北西にある微小地震のクラスタと位置が重なるが、深さが 2.2km と浅すぎる推定結果となっている。(国土地理院, 2011a)

その後も山体の膨張を示す基線長の伸びが GEONET の観測結果から得られていたため、2010 年 10 月の第 117 回火山噴火予知連絡会にも同様な地殻変動観測結果とそれに基づく変動源モデル(図-4)を提出して報告した。この時の変動源モデルについては、最初の GEONET 観測点だけにに基づくモデルから(独)防災科学技術研究所、気象庁の観測点も加えて推定を行った結果を報告した。

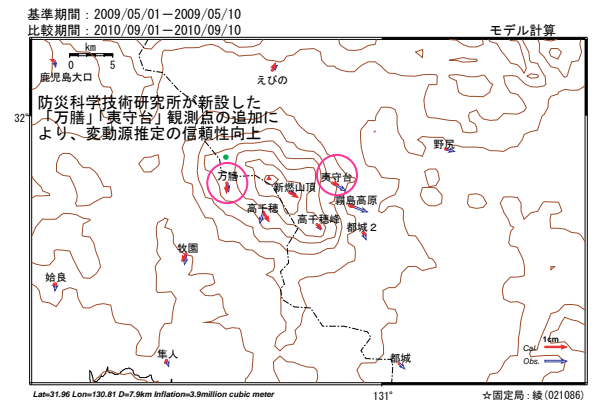


図-4 GEONET 観測点に(独)防災科学技術研究所の「万膳」,「夷守台」及び気象庁の GPS 観測点を加えたデータに基づくインバージョンによる霧島山の膨張源モデル。水平位置はほとんど前のモデルと変わらないが、深さが 7.9km と妥当な推定結果となっている。(国土地理院, 2011b)

特に、(独)防災科学技術研究所の「万膳」観測点は韓国岳の北西にあって推定された変動源の水平位置に近く、この観測点のデータは変動源の深さ推定によりよい拘束条件を与えることになったと考えられる。また、気象庁の GPS 観測点は山体の南側に多く設置されており、新燃岳近傍の地殻変動について、より高い空間分解能での推定が可能となったと考えられる。

火山 GPS 統合解析のデータによって変動源モデルはより洗練されたものになった。1 月 26 日の噴火直前までの変動には新燃岳周辺にも何らかの変動源が推定されるような特徴が確認され、韓国岳北西の深い変動源の他に新燃岳直下にも浅い変動源を置いたモデルが作成された。これについては、2011 年 2 月 3 日の火山噴火予知連絡会拡大幹事会及び 2 月 15 日の第 118 回火山噴火予知連絡会で報告を行った(図-5), (図-6), (図-7)。

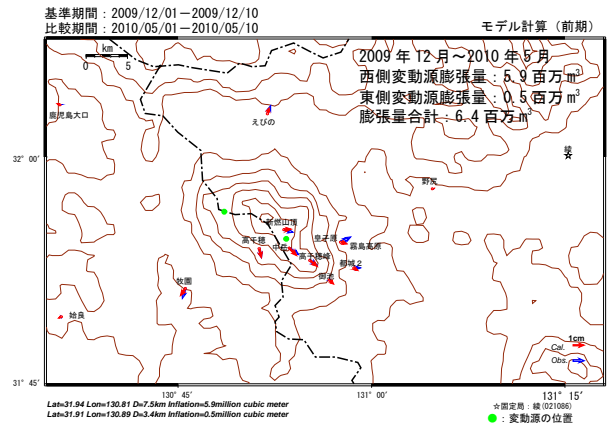


図-5 2009 年 12 月~2010 年 5 月(前期)のデータに基づく霧島山の変動源モデル。韓国岳北西の深い変動源(7.5km)と新燃岳直下の浅い変動源(3.4km)を仮定(国土地理院, 2011c)

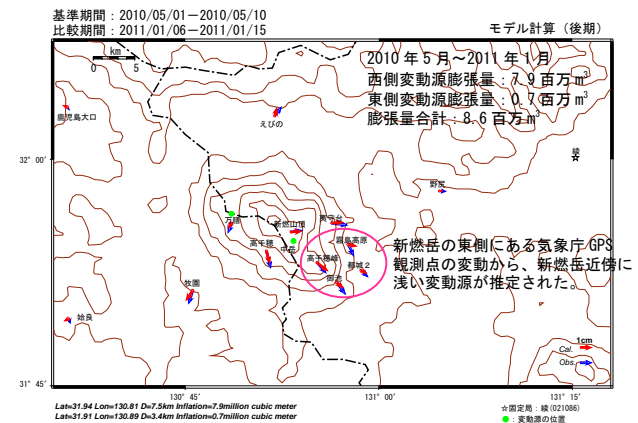


図-6 2010 年 5 月~2011 年 1 月(後期)のデータに基づく霧島山の膨張源モデル。変動源は前期と同じ場所に固定(国土地理院, 2011c)

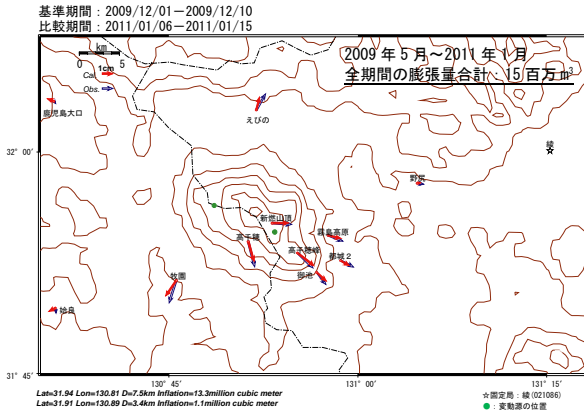


図-7 2009年12月~2011年1月のデータに基づく霧島山の膨張源モデル. 変動源は前期・後期の分割推定と同じ場所に固定 (国土地理院, 2011c)

ここでは、山体の膨張が開始した時期から噴火の時点まで、データが揃っていない観測点があることも考慮して、変動源の場所を固定した上で、膨張量を2時期に分けて計算することで、噴火前のマグマ蓄積量を算出することを試みた。結果として、噴火前の約1年間で蓄積されたマグマの量は15~16百万立方メートルと推定された。なお、この体積は噴火時に火口から放出された火砕物や溶岩の体積の推定量と比較してやや少なめであるがオーダーとしては妥当なものと考えられる。

2. 3 2011年噴火時及び噴火後の変動源モデル

1月26日の本格的マグマ噴火開始以降は、急速な山体収縮を示す地殻変動が観測された。これは1月27日から28日にかけての準プリニアン噴火で火山灰や軽石が大量に放出されたこと、28日以降2月1日頃までの間、火口内に溶岩が噴出して堆積したことなどからも、それまで地下に蓄積されていたマグマが噴火により放出され、マグマ溜まりが収縮したことに対応する地殻変動と考えられる。

「えびの」-「牧園」基線では、噴火前の約1年間で伸張した4cmに対して、2月1日までの5日間で約3cmの短縮が観測された。霧島山を囲む他の基線でも短縮が見られた。この急速な収縮は2月1日頃まで続いたが、その短縮量はいずれの基線においても約1年間で伸張した量よりも小さかった。この地殻変動に基づき収縮源のモデルが作成され、2月15日の第118回火山噴火予知連絡会及び3月22日の第119回火山噴火予知連絡会で報告した(図-8)。推定された収縮量は約10百万立方メートルと、噴火前の膨張量より少なかった。なお、新燃岳の北西に板状の収縮源を追加して計算した結果でも収縮量は約12百万立方メートルと同程度の値が求められている。

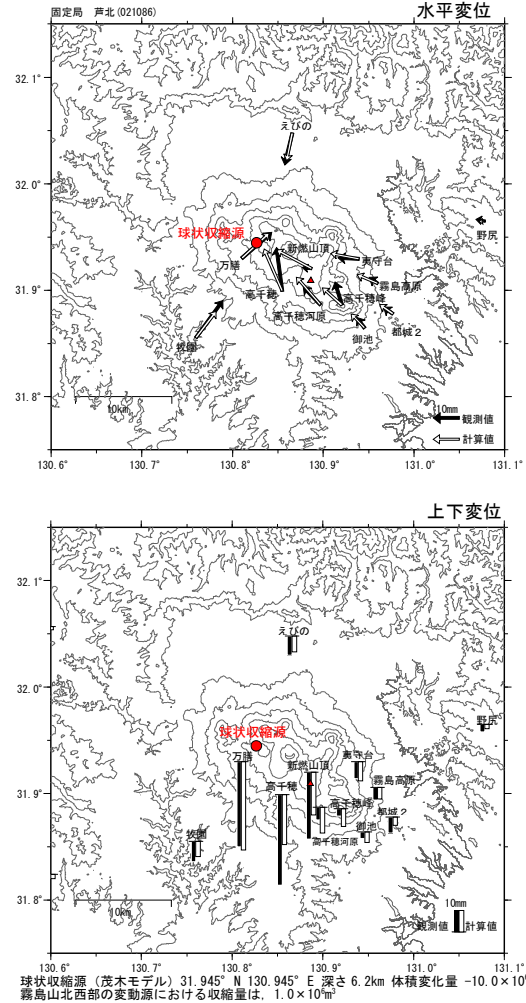


図-8 2011年1月の噴火前後のデータに基づく霧島山の収縮源モデル. 収縮源の水平位置、深さはデータに基づき推定(膨張源の推定位置とは合わせていない) (国土地理院, 2011c)

1月26日の噴火後、国土地理院では2月2日にGPS機動観測点「M霧島山」を山体の北西に追加して地殻変動の推移を観測している(針間ほか, 2011)。2月1日以降、周辺の基線ではゆっくりとした伸びが再び始まり、それが継続していることが確認されている。伸びの速度は1月26日の噴火以前と同程度であり、水平変動ベクトルのパターンなどからも深い側の変動源が膨張を継続していることが推定される。2011年6月7日の第120回火山噴火予知連絡会にも、噴火後における膨張源のモデルを報告した(図-9)。マグマの蓄積速度についても、噴火前とほぼ同じという推定結果となっている。

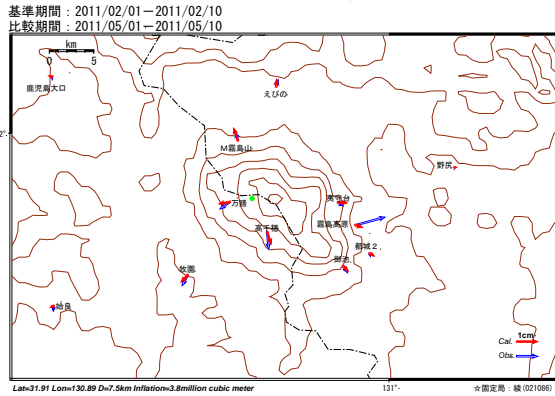


図-9 2011年1月の噴火後の再膨張の時期に対応する霧島山の膨張源モデル。収縮源の水平位置、深さはデータに基づき推定(噴火前の膨張源の推定位置とは合わせていない)(国土地理院ほか, 2011)

3. 変動源モデルと他の観測解析結果

国土地理院では、「だいち」(ALOS)搭載の合成開口レーダー(Synthetic Aperture Radar, 以下、「SAR」という。)を用いて、火山地域の地殻変動監視を行っている。霧島山周辺の地殻変動についても、SARデータの干渉解析により2011年1月噴火の前の膨張期と噴火を挟んだ収縮期について確認している。対応する干渉画像からは、これらの変動と整合する地殻変動パターンが確認されたことが報告されている。これらについては本特集の別の記事で詳しく報告されることになっているので、ここでは省略する。(小林ほか, 2011)。

霧島山周辺では、大学連合によるGPS観測も実施されており、そのデータに基づく変動源のモデルも火山噴火予知連絡会で報告されている。大学連合の解析結果では、変動源の水平位置については国土地理院によるものとほぼ同じであるものの、深さがやや深く約10kmと推定されており、そのために噴火前の変動源の膨張量も国土地理院による推定値よりも2倍近く大きく推定されている。また、噴火時の収縮量推定値も国土地理院より大きめである(鹿児島大学工学研究科ほか, 2011)。変動源位置の深さ方向の推定精度は、変動源の直上近くにある観測点のデータ(特に上下変動)に影響される。稠密な観測点をキャンペーンで展開している大学の観測網による推

定の方がより妥当な値である可能性もある。なお、国土地理院によるモデルで変動源の深さを9.5kmに固定して推定した場合、膨張量の推定値は本報告に示した推定値の約1.2倍にあたる約19百万立方メートルと試算されている。

4. おわりに

霧島山では、8月上旬現在でも山体を取り囲む基線で伸びの傾向が引き続き見られており、1月26日からの噴火に伴って短縮した基線長の1/3程度が回復している。例えば「えびの」-「牧園」基線では噴火時に約3cm短縮したところで、2月以降1cm程度の再伸張が起きている。この基線の伸びから想定されることは、韓国岳の北西地下にある深いマグマ溜まりへのマグマの供給は、1月26日から2月1日にかけて新燃岳で起きた準プリニアン噴火と火口へのマグマ噴出をはさんでも変わることなく、ほぼコンスタントに続いている。

約300年前の享保噴火の際には1716年から1717にかけての約1年半、噴火活動が断続的に続いた記録が残っている。今回の活動についても、現在ののような速度でのマグマ蓄積が続けば、1年程度で2011年1月の噴火前に蓄積・放出されたものと同程度の量のマグマが再度地下に溜まり、同じような噴火が繰り返す可能性が懸念される。GPS観測網による地殻変動監視は、そのような噴火が発生するポテンシャルが高まっているかどうかを判断する上で重要な材料となると考えられる。また、噴火直前には浅い変動源の膨張が検出される可能性もあり、その意味でも地殻変動監視は重要である。地理地殻活動研究センターでは、観測データから変動源モデルを速やかに作成し、火山噴火予知連絡会などの検討の場に提出することで、今後も火山防災に貢献していきたいと考えている。

謝辞

火山GPS統合解析のために提供された気象庁の火山GPS観測点及び(独)防災科学技術研究所のGPS観測点のデータを本稿の解析に用いました。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 針間栄一郎, 田中和之, 横川正憲, 松村泰敬, 根本盛行(2011): 霧島山(新燃岳)の火山活動に伴うGPS火山変動リモート観測装置(REGMOS)の緊急設置及び観測, 国土地理院時報, 121, 175-178.
- 鹿児島大学工学研究科, 東京大学地震研究所, 京都大学防災研究所, 防災科学技術研究所(2011), 霧島火山, 第118回火山噴火予知連絡会資料, 1-4
- 川元智司, 野神憩, 横川正憲(2011): 霧島山(新燃岳)の噴火に伴う地殻変動, 国土地理院時報, 121, 179-182.
- 小林知勝, 飛田幹男, 今給黎哲郎, 鈴木啓, 野口優子, 石原操(2011): 「だいち」SAR干渉解析により捉え

- られた霧島山(新燃岳)の火山活動に伴う地殻変動とその圧力変動源の推定, 国土地理院時報, 121, 195-201.
- 国土地理院(2011a) : 霧島山周辺の地殻変動, 火山噴火予知連絡会会報, 106, (印刷中)
- 国土地理院(2011b) : 霧島山周辺の地殻変動, 火山噴火予知連絡会会報, 107, (印刷中)
- 国土地理院(2011c) : 霧島山周辺の地殻変動, 火山噴火予知連絡会会報, 108, (印刷中)
- 国土地理院・気象庁・防災科学技術研究所(2011) : 霧島山変動源モデル, 第120回火山噴火予知連絡会資料・霧島山, 82, http://www.seisvol.kishou.go.jp/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/shiryo/120/120_no01-3.pdf