

「6月3日測量の日」 記念特別講演会

自然災害に強い国土を築くために 測量は何ができるか

日 時 平成23年6月10日午後3時

場 所 札幌東急イン

講 師 北海道大学大学院理学研究院附属 地震火山研究観測センター教授
理学博士 村上 亮 氏



はじめに

ご紹介いただきました北大の村上です。私は、昭和54年以来、永らく国土地理院にお世話になった後、4年前に北大に移りました。地理院にいた頃は、御紹介にありましたように、GPSを使った測定技術の開発をさせて頂いたり、それで取得されたデータを使って、地震発生や火山噴火メカニズム研究の仕事をしていました。また、最近では、衛星に搭載したレーダのデータを使って地殻変動を測定して、地震・火山噴火の仕組みを調べ、上手くいきそうだったら予知にもチャレンジするといったような取り組みもやってきました。現在も、測量結

果を使わせていただきながら、主に火山の研究に、引き続き携わっております。

今日は、「測量の日」の記念と言うことで、お話しをさせていただくわけですが、私の今の専門は火山噴火予知でございまして、なんとかして火山活動の予知が出来るようにしたいというところをめざして研究をしております。多くの地震や火山研究者が、日本の近代化以降の歴史を通じて、諸先輩方が蓄積された国土に関する貴重な測量結果を使わせていただき、重要な研究成果を上げています。今日は、そういった観点から測量と地震や火山噴火の研究がどうかかわっているかをお話ししようと思います。

我々の先輩方は、日本の各地を、例えば水準測量ですとか、三角測量ですとかの測量を繰り返してくださって、その膨大なデータが今、きちんと残っています。当時測っておられた方々は、それがまさか地震や火山の仕組みを明らかにするために使われるだろうってことは、予想しておられなかったのだろうと思うわけですけれども、古いデータをよくよく調べてみると、色々なことがデータから見えてきます。例えば後で有珠山の事例を紹介しようと思いますけれども、測量データの中に山の活動の歴史が

克明にきざまれていて一種の感動を覚えます。これからも、先輩の残されたデータの土台の上に、今度は現役の皆様が取ってくださるデータが積み重なって、それらが将来の研究の糧になって、地震の理解や火山噴火予知技術がこれからも進んでいくのだらうと思います。

地震や火山の研究はデータがなければできませんので、その非常に重要な部分のデータを取得し将来に残すという、測量に係わる全ての方々の努力の積み重ねが、非常に役に立っていることを中心にお話しをしたいと思います。それが、これから皆さんが仕事をされる上での何かのご参考になれば大変ありがたいと思います。

プレート運動が引き起こす地震・火山活動と地殻変動

火山噴火予知をするにあたって我々がまず知りたいことは、何故火山噴火が起きるのか？、どれくらいの期間をかけて地下で噴火の準備が進んでいるのか？、といった疑問に対する答えです。これらに答えるために、測量のデータ、測地のデータは非常に重要な情報を提供します。地震についても、測量結果は貴重な知見を与えてくれます。

今日は、主に火山の話をしてしまいますけれども、3月に起きました地震は、東北のみならず東日本全体に影響を与えましたし、北海道でも同様の出来事が懸念されていますので、火山の話に入る前に、若干、3月11日の地震についても、わかっていることを御説明します。

今回は、非常に大きな地震で、マグニチュード9というものでした。これは、日本が少なくとも近代的な計器で地震を観測するようになってから、初めて経験した規模の地震です。揺れ事態もすさまじいものだったと思われそうですが、揺れの後、高いところで約30メートル越えるような津波が襲って来て、大変厳しい被害になりました。

私も地理院におりました頃は、このように大

きな地震があると、連続GPS結果を使って地殻変動を出来るだけ早く計算して、その地震がどういったメカニズムのものだったのかを解明する仕事をしていました。1996年ころからほぼ10年以上にわたって解析を続けましたが、そのなかで経験した最大の地震は、2003年の十勝沖地震でした。その時に陸上で観測された最大の変動は、確か1メートル程度だったと記憶します。今回は、牡鹿半島付近が5メートルというとても大きい大きさで動いており、これまで経験したことのない大きさの地殻変動が、東日本全体といったような広い範囲で起きています。さらに、最近のデータをみると、海底はひょっとすると50mも水平変動したようであるということも報告されています。

何故こういう大きな地震が起きるのか、説明します。東北地方を東西に輪切りにした図1を見ていただきますと、太平洋の海底が日本列島の下に潜り込んでいて、まずこの部分を東から西の方向に強烈な力で押しつけているわけですね。どっかの時点で耐えられなくなって、それまで西に押され続けていた陸地が反発をして東に跳ねかえることがおきます。その時に地震が発生しますし、跳ね返るわけですから地面は東の方に動きまして、今回はその移動量が非常に大きかったというのが一つの特徴です。海底はそういった反動を起こすときに、たいてい盛り上がるわけです。これも5メートルとか10メートルとか、とても大きい隆起を一気にして、それが海面を盛り上げて、それが津波となって伝わって海岸を襲ったわけですね。

明治の近代化以降、日本では測量を比較的頻繁に繰り返しておりました。また、最近の15年くらいは、GPSが導入されまして、毎日の観測がなされるようになりました。これらのデータを使うと、地面がどれくらいの割合で伸びたり縮んだりし、また、隆起沈降しているかがわかります。これらの地殻変動は、つまるところ太平洋プレートが日本列島をどういった割合で

押ししているかの反映ですので、例えばある場所が大きく縮んでいると言うことは、その沖合で大きな地震が起きる準備をしている証拠であることがわかるわけです。我々は、最近の100年間のデータしか持ち合わせていなかったのも、ある意味、想像力が欠けていた面がありますが、非常に定期的にM8クラスの地震が繰り返し起きてきたため、今後も、海溝沿いではM8クラスの地震が繰り返し起こるだろうと思っていたわけです。3月11日のような形で、地震が連動して起こると言うことは、我々の体験が無かったのも、専門家ですら、多くの人は予測が出来なかったというのが現状だと思います。しかし、少数ですが、先見の明のある研究者も一部おられました。陸上で津波の痕跡を調べていた研究者たちは、東北地方を襲った数百年前の巨大な津波について気づき始めていました。しかし、大変残念なことに、その考え方がもっと普及して、実際に対策がとられるまでには至っていません。なお、同様の津波堆積物は北海道東部の太平洋沿岸でも発見されており、従来の津波防災の戦略の練り直しの作業が進んでいます。

図1を使って、火山活動のメカニズムについても御説明しておきます。海のプレートは海溝付近だけで接しているわけでは無く、

ん深い方まで沈んでいきます。あるところまで深くなると上部の地殻が重石になって、海のプレートにかかる圧力が高くなりますので、海底であったときに海水から取り込まれた水が、この深さで絞り出されます。水は軽いですから上の方に上昇します。海のプレートに覆いかぶさっている部分は、陸のプレートの下のマントルと呼ばれる部分です。この場所は、通常は岩石として固体の状態になっています。温度は1000度近くと極めて高温ですが、水がなければ岩石のままの状態に留まります。しかし、水が加わることによって融点が低くなって溶けてマグマができます。できたマグマが地上に上がってきて火山が出来るという理屈です。

北海道から東北にかけての火山の分布は、見事に海溝と並行に並んでいます。まず海溝があって、それに沿ってプレートが潜り込み、それがある程度の深さに行ったら水が吐き出されてマグマが生成され、それが上昇したところに一齐に火山が出来るので、火山はこのように海溝に平行に配列してできます。東北ですとちょうど、ほぼ真ん中あたりにいくつもの火山、例えば、岩手山、八甲田山があったり恐山があったり、十和田湖があったり、火山が並んでできています。いくつもの火山がありますが、きれいに線上に並んでいるのはそういった背景があるわけです。北海道も全く同様です。

次に、国土地理院が全国に展開した連続GPS観測網の測定結果から得られた水平変動の分布を表す図2を見ていただきます。こうやって測量をやっていると、地殻全体にひずみが溜まっている様子も見ることが出来ます。火山の近くに注目すると、例えば有珠山の周囲では、山を中心として、周囲の全体的傾向とは異なる変動の様子が見えますが、これは火山活動に関係した動きが反映されているためそのような結果になっています。地殻変動データを解析すると、火山の下でマグマ溜まりが、どれくらいの割合

日本列島付近でのプレート運動

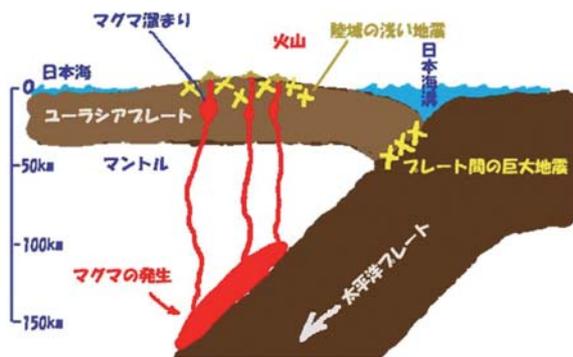


図1 東北地方プレートの断面図
(気象庁 HP より引用)

Horizontal Displacements (1997-2000)

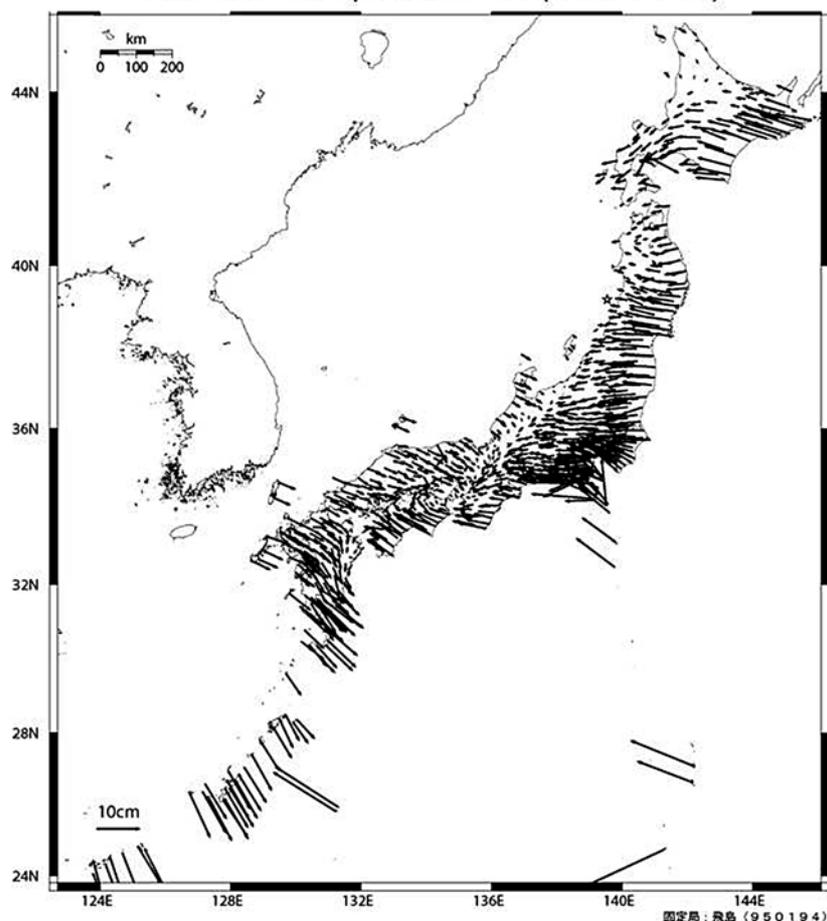


図2 国土地理院のGPS連続観測による日本列島の水平地殻変動

でふくらんでいるかについても調べることが出来ます。最初に申し上げましたように、こういったデータが100年分溜まってきますとその間に大きな地震も何度も起きますし、火山噴火も起きますし、詳細に見ていく事によって、地震活動や火山活動の仕組みが解ります。

もう一度、図2を見てください。1997年から2000年までのデータを使って作った日本の水平地殻変動速度を矢印で表したものです。それを見ても、やはり東北地方は太平洋プレートによって、年がら年中、東から押されていますので、西の方向にずっと縮んでいます。バネをずっと押し続けていたような状態なのですが、3月11日には、数百年ぶりにそのバネがはじけて、この一体で大きな地震が起きたと言うことになります。それからGPSは上下変動も測る

ことが出来まして、水準測量でももちろん同様のデータを取ることが出来るわけですが、GPSは、毎日の変化を見ることが出来ます。それが図3ですが、北海道ですと道東あたりが非常に勢いで沈降しております。この紫は沈降を表します。赤は隆起を表しますが、だいたい一番沈んでいるところで、年間5ミリメートルくらい。隆起しているところでこれも年間5ミリメートル、ですからプラスマイナスで言うと年間1cmくらい沈んでいるところと、それから隆起しているところがあります。東北地方、北海道を見ますと、太平洋側が一様に縮んで沈降している。これも、台地が地震のエネルギーを着々と溜めていた証拠です。

このように、測量のデータがあるお陰で、今どこにエネルギーが溜まりつつあるかについて

Vertical Velocity during 1996-2003

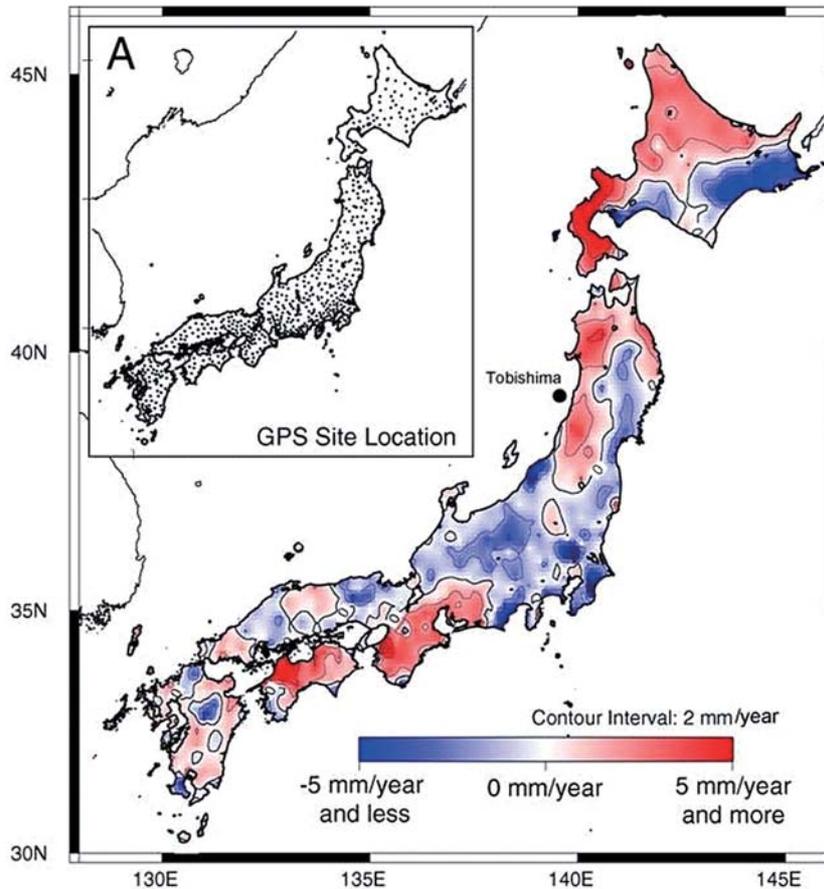


図3 GPSによる全国の上下変動

では、非常に詳しくわかっています。ついでに言いますと同様の事柄は西日本とか北海道で起こるのかと言うことが大変気になります。西日本については実は起こる可能性は十分にあると言うことがもうすでに指摘されていて、一部それに向けての対策も始まっていました。東北地方では、そういう事が起きた証拠があり、将来も発生可能性がありますよと言うことが、徐々に明らかになってきてはいたのですが、わかり始めたのがごく最近のことだったので、それが十分対策に取り入れられる前に、地震と津波が来てしまったというのが実情であります。北海道ですけれども、北海道でも実は同様の出来事があったことが、これは東北地方よりもっと早い時点でわかっていました。この10年くらいの間に、北海道地方でも非常に大きな地震が

海溝で起きて津波がかなり内陸まで押し寄せた形跡があるということがわかってきています。それはどういうふうにするかという、内陸の方に行って穴を掘って地層を見るわけです。

今回の津波の色々な映像がありましたので皆様、ご覧になったことがあるかと思いますが、津波が襲った場所は、砂だとかヘドロが溜まります。それは津波によって起きたヘドロか砂ということは非常に明瞭な特徴がありますので地層を調べていくと、これは津波が来た証拠であるということがわかる。放射性炭素という物質を使って年代を調べることも出来る。ですので、北海道の東海岸でこういった探査をやってみるとどうも内陸の奥深いところまで繰り返し大きな津波が来ていたということがわかっております。

一方、明治以降の近代的な観測データで辿れる範囲では、単独のM8クラスの地震が繰り返し起きてきたことがわかっています。M8でも十分強烈な地震ですが、それで起こる津波よりはるかに奥の内陸地域の方まで、津波が数百年の周期で繰り返し来ていることがほぼ確実になり、3月11日と同様の出来事が、北海道を将来確実に襲うことを覚悟しなければならぬことがわかりました。ですので、今後、津波対策ですとか防災対策を考える上では、確率は低いけれども、過去にそのような出来事があったわけですから、それに対しても道民の生命と財産を確実に守るために、どうすればよいかを真剣に考えて対策を打つ必要があると思います。

火山噴火予知と地殻変動

地震の話が長くなりましたが、これからは、いよいよ火山の話に入りたいと思います。北海道の火山を例にとります。北海道は繰り返し火山噴火に襲われています。しかし、最近の10年だけを見ると、2000年に有珠が噴火して以来は、比較的静かです。これはむしろ珍しい現象で、この静かな時代がずっと続くというのはおそらく期待できません。今の時点で、どの火山が次に活動を始めるかわかりませんが、結構規模の大きな噴火をする可能性がある火山がたくさんあります。その時に、犠牲者を出さない、それから財産を守ることを目標にして、防災対策を今の時点から始めておく必要があります。防災といっても、火山の場合は逃げるしか無いのですが、ただ、噴火に際してはとりあえず逃げるということが大事で、それで命を守ることができます。では、それでめでたしめでたしかというとそうではなくて、避難の状態が長期間継続すると、人間の持つ、経済的、社会的な側面が大きなダメージを受けるわけで、生物学的な生命が助かればそれでよいということではありません。何が言いたいかというと、噴火が始まるときは、生命が最優先で、速やかに逃げてい

ただくことが何よりも優先されますが、危機的状況が去った時点で、危険が去ったということのを的確に判断して、元の住居に帰っていただくことを考えなければいけないということです。噴火予知というのは始まりだけでなく、噴火の推移の様子も含めて終了までを予測する必要があります。そのような観点から、火山噴火予知の現状を言いますと、危険になりましたから逃げてくださいということについては、100%ではないにせよかなりの確率で事前にできるようになってきたと思いますが、もうこれで終わりになりましたから、どうぞお帰りくださいということを一定の根拠に基づいてというのは、技術的に難しい状況にあります。それを改善していくのが我々のこれからの課題で思っております。

これから火山噴火予知の現状をやや詳しくお話しをさせていただきますけれども、まず、測量に関係しますので、地殻変動と火山活動がどういう関係にあるのかということをお最初に御説明しておこうと思います。図4は、火山の地下の様子を模式的に示してあります。火山の下にはマグマ溜まりというものがある、この絵よりもっと深いところから、海洋プレートの潜りこみで生じたマグマが上昇してきます。マグマが生成される深さはだいたい100キロメートルくらいですが、そこからマグマが上昇する旅を始めるわけです。徐々に上がってきて、地表に



図4 火山の構造の模式図

一番火山に近いところのマグマ溜まりはだいたい5キロから10キロと考えられています。もうすでに90キロくらいの旅をしてきたマグマが、最後に一休みする場所が、この絵にありますように、5キロから10キロにありまして、噴火の準備段階として、そこにマグマが溜まります。そこにある程度溜まって、限界に近付くと、真上にも出てきたり、横に吹き出したりするというのが火山の噴火です。ですから、出てくる前にこの場所にどれくらいマグマがあるのか、蓄積が継続しているのかそうでないのかといった、マグマの蓄積に関する情報を得ることによって火山の状態がある程度わかります。つまり、この火山は、噴火の準備をしているのか、そうではないのかということが解ります。その判断に、地殻変動を用います。

マグマ溜まり内のマグマ量が増えると、マグマ溜まりはふくらみます。そのふくらみは地面に伝わりますので、山がふくらんだり、地面が盛り上がったたり、色々な地表の変化と言うのが生じます。これを測量などの手段で計測するわけです。さらに、溜まっていたマグマが、いよ

いよ地表に向かって上昇を始めますと、地表に近い分、大きな地殻変動が観測されるようになります。特に上昇時には、火口周辺に非常に大きな地殻変動が、ある場所に集中して起こるようになります。ですので、まんべんなく地表に観測器を置いておいて、継続的に観測を続けておけば、地殻変動の集中の度合いの様子から、この辺に火口ができそうだということもわかるようになりますと期待されます。また、噴火時にはマグマだまりからマグマが外に出てきますのでマグマ溜まりはしぼみます。その場合には、地表が沈降したり、距離が縮まったりしますので、そういう地表の変化からマグマ溜まりの様子を知ろうというわけです。

測地データの火山噴火予知における役割

最近のいくつかの火山噴火時の実際の観測結果として、我々はマグマ溜まりの膨張の様子を見ることが出来ています。どのような地殻変動を我々は念頭に置いて観測しているのかということもお話ししておきます。図5は火山活動に典型的な地殻変動の発生パターンです。図の上

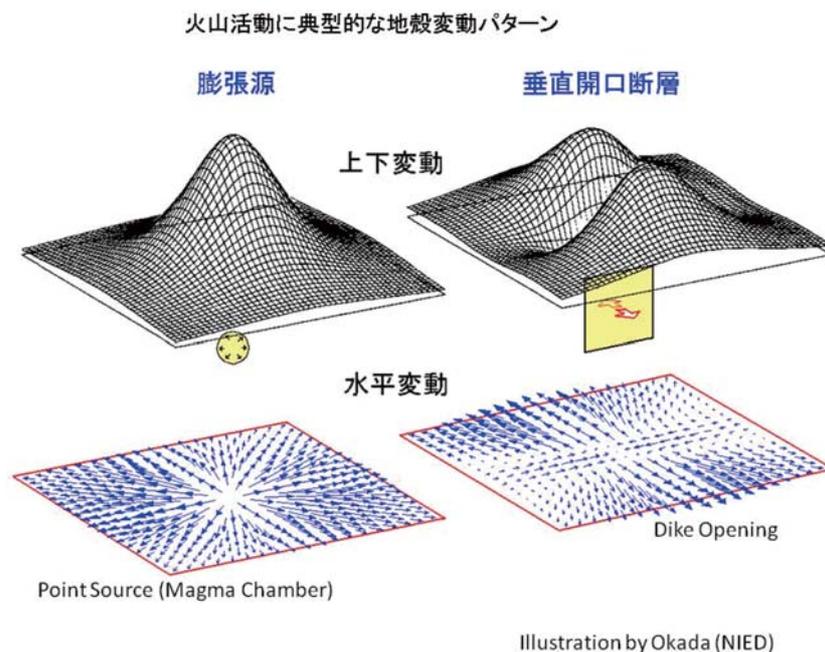


図5 火山活動に伴う典型的な地殻変動パターン
(防災科学技術研究所 HP より引用)

段に示してあるのが地表の上下変動です。下段は、水平変動をベクトルで書いたものです。火山活動に伴う地殻変動の発生の仕方によく現れるタイプの変動は、図の左側で示されているように、地下に丸く、球状の穴が空いていて、それが膨張して発生する地殻変動です。その場合、地面は、ちょうど真上を中心にして盛り上がり、遠くに行くに従ってだんだんその盛り上がり量が小さくなるような変動をします。お椀を伏せたような形で地面が変形するわけです。例えばここに水準路線があって測っていたとすると、ちょうどこのふくらみの所に来ると地面の隆起として観測しますし、また、遠ざかるに従って隆起が無くなる。そんな形になります。GPSをこのような場所に設置して地殻変動の時間的な進展の様子を見てみると、時間とともに地下の膨張が進行するのに従って、地面が徐々に盛り上がっていく様子が見えます。水平変動も説明しますと、中心から広がるような地殻変動が見えます。複数のGPSを満遍なく火山の周りに置いて、どこかを中心に広がるような変動が見えると、どうもその下にはふくらむ原因があるのだと言うことがわかります。数値的に計算すると、ふくらみの原因、これはマグマ溜まりですが、それがどの深さにあって、どれだけふくらんだかといったことまで解りません。

一方、噴火によって、マグマ溜まりがしぼんでしまった場合は、逆に沈降し、さらに中心に向かうような逆向きの水平変動になります。地殻変動を解析すると、地下で萎んだ量がわかりますし、実際に出てきた溶岩や火山灰の量と比較することも可能になります。この放射状のパターンが、火山の周辺で起きる典型的な地殻変動の発生パターンの一つです。

それからもう一つよく見られるパターンは、垂直の割れ目が地下にあった場合に発生する変動です。この割れ目にマグマを満たしてやるわけですね。そうすると割れ目が広がる訳ですが、

そのことによっても、地面、地表にも特徴的な変形が発生します。丸い空洞の場合と違って、板状の割れ目が地下で広がったときには、先ず上下変動で言うと、隆起の山が2つ出てきます。それから山の間がへこみます。そのへこみの場所をよく見てみると地下の割れ目のちょうど真上に当たっており、そこが若干へこみます。また、水平変動で言うと地面の真下で割れ目が広がっているわけですから、両方に押ししていますので、押されることによって地表が広がる。このような割れ目にともなう地殻変動は、どんな場合に起きるかという、マグマ溜まりからマグマが上昇を始めるときに、地下で割れ目を造って、その割れ目を押し広げながら地表に近づいて来ますが、そのような場合に、こういった水平変動や水平変動が観測されます。マグマ上昇の進展とともに、これらの地殻変動のパターンが成長していきますから、GPSなどの連続的な地殻変動観測によりその過程を捕まえることが出来たら、正にその場所に新たな割れ目が形成され、火口が開いてマグマが出てくる可能性を知ることが出来ます。

火山で起きる地殻変動というのは、図5で説明した2つの基本的なパターンのうちのどちらか、もしくは、その組み合わせでいたい説明することが出来ます。一点だけの観測では、変動の空間分布がわかりませんから、2つのパターンを区別することが出来ません。たくさんの観測点を火山が活動する前から配置しておいて、活動が始まったときに地殻変動がみえはじめたら、例えばそれが上下変動であったなら、一つの山なのか、若しくは二つの山があって、その間にへこみがあるのかといったことが分別できるようになりますと、どのような現象が地下で起きているのかを知ることが出来ます。

このようなデータ解析をするために、過去に先輩たちが取って下さったデータや、現在、国土地理院や大学が火山の回りで実施している色々な地殻変動が重要になるわけです。我々が

データを取る目的は、こういう変化を捉えて、それで地下で何が起きているかを速やかに知りたい。それが例えばマグマが上がってくる徴候であれば、特に、火口になりそうな場所にもし人が住んでいれば、大変危険です。噴火前に逃げていただく措置をとる。また、変動が止まれば地下でマグマの動きはなくなったということです。帰っていただいても良いという事を判断する基礎的な材料に、測量のデータを使おうと考えているわけです。

2011年霧島火山新燃岳噴火の例

ちょっと南九州の方に話は飛んでしまいますけれども、現在進行形の火山噴火の事例が大変参考になりますので、霧島で今何が起きている我々はどこまで理解できているのかについて、ご紹介して見ようと思います。図6は、地理院が測定された、非常に素晴らしいデータです。霧島の回りにいくつかGPSの点が設置されています。この15年ぐらいつと地理院がデータ蓄積をされていたわけです。火山噴火予知連絡会には、定期的に全国の火山の回りの地殻変動

データを地理院が出されているわけですが、噴火の1年前くらいから霧島火山の周囲の地殻変動の状況が、従来の様子とは違っていることに我々は気付いておりました。噴火は、ことしの1月でしたけれども、その1年くらい前から山を挟んだ距離が、それまでの短縮から、かなり速いペースでの伸びに転じていたことが、データに現れておりました。先程説明した理屈によってどうやら霧島の火山の地下のマグマ溜まりが勢いよくふくらみ始めたということが事実になったわけです。伸びに転じる前の縮んでいた原因は、はっきりしませんが、ひょっとしたらマグマ溜まりからもっと深いところへマグマが逆流していたのかも知れませんし、この辺りもプレート運動というのがありますからその影響かもしれません。しかし噴火の1年前から急に伸び始めたということについては明らかでして、霧島火山の地下にあるマグマ溜まりがふくらみ始めた証拠が捕まえていたということです。これがどんどん続くのか、何処かで止まるのか、続くのなら噴火に繋がるのではないかなどということを目撃していたわけです。そう



図6 新燃岳噴火と関連する観測データ
(原資料は、鹿児島県、気象庁、国土地理院による)

いった状況のなかで、噴気活動がだんだん活発化していった、数回の水蒸気爆発を経て、1月の本格的な噴火を迎えました。

本格的な噴火の前に水蒸気爆発が発生するには、理由があります。地下でマグマ溜まりがふくらみ始めますと、マグマより動きやすい火山ガスが、いち早く上昇してきますので、恐らく火山ガスが前兆的に、先触れ的に地下から上がってきて、地下水を熱して水蒸気爆発起こした後、いよいよ最終的にマグマが上がってきて、こういった派手な噴火を起こしたのだらうというのが現在解っているところです。

火山噴火予知を考える場合に、地殻変動観測の優れている点は、山の地下の火山活動の高まりをいち早く我々に知らせてくれることであります。そうはいつても、ふくらんでも、噴火に至らない事例もやっぱりありまして、この方法も完全というわけではありません。自然現象の予想のお手本として、天気予報の事例を参考にすると、雨が降るという予報が出て、必ず雨が降る訳ではありません。しかし、100%の的中率でなくても、天気予報は、ある程度は役に立つものとして社会生活の道具として定着しています。火山噴火予知の場合も、そろそろ山の状態が活性化の段階に来ましたよということが解ることだけでも色々な対策をすることに対しては効果があるのだらうと思います。

この新燃岳の噴火は、地殻変動と火山活動というのは、非常に密接な関わりがあるのだなと言うことを再確認させてくれた事例であります。だいたい現状では、さっきもお話したように、マグマが動き始めて来るとそれがいち早く地殻変動が教えてくれますのでマグマ溜まりにマグマが溜まり始めたところまでは、観測をしていけばほぼ確実に解ります。本当の火山噴火予知という意味ではマグマ溜まりから動き始める前に、そろそろ地表に向かって動いてくるぞというところを何とかして予測して、いつ頃噴火するということまでも言い当てたいのです

が、現状ではなかなかそれは出来ません。ただ、マグマ溜まりを出発して、マグマが地表に来るまでに5キロ、10キロありますのでマグマの動きがゆっくりしている場合には、例えば1週間かけて上がってくるようなときは、ここで説明したようにこの辺り集中し地殻変動が起きるようになりますから、それを捕まえて直前予知につなげられる可能性があります。また、マグマ上昇に伴って岩盤が押し広げられる際に地震が起きますし、地面の傾きも変わります。色々な形で観測していれば、いよいよマグマ溜まりからマグマが地表に向かって動いてき始めましたよということがわかるのだらうと思います。このようにして、直前予知を目指しています。

霧島の場合には割合静かに上がってきたので、水蒸気爆発が頻発し始めたというのが直接の前兆現象でありました。地震活動にはそれほど変化が見られなかったことも特徴の一つであります。火口周辺には、観測装置がありませんでしたから火口周辺の噴火直前の地殻変動は捉えられませんでした。少し言い足しますと、もう少したくさんの観測点を置いていけばマグマが上がって来た様子を捉えられた可能性があると思います。深いところでマグマが溜まっているよという事実がわかった時点で、もう少し火口周囲の観測点を増やしておけばよかったと言う点が、多少悔やまれます。

霧島の事例でもお分かりの通り、国土地理院が全国に展開したGPS観測装置が火山噴火予知に力を発揮しています。観測網ができた時点で、特に火山の回りに意図的に集中的に置いていたわけではないのだらうと思いますが、全国に展開した結果、火山に近い電子基準点が結果としてたくさんできましたので、それが火山の活動が始まったときに比較的敏感に地殻変動を捉えてくれ、噴火予知に大きな働きをしてくれています。

なお、新燃岳では、1月の噴火のマグマ放出に伴って、距離が一旦大きく縮みましたが、噴

火前と同様の伸びが再開して、既に伸びの量がかなりのレベルに既に達して、次の噴火が間近に迫っていることがわかっています。

北海道の火山の現状

今度は、北海道の火山の例を少し詳しく見てみたいと思います。2000年に有珠山が噴火したわけですが、噴火の前から3点のGPS観測点が国土地理院によって設置されていました。その後地理院や他の機関が観測点の数を増やされたのですが、噴火前からあったのはこの3点でした。有珠山は山体が比較的小さいです。それにも係わらず短い距離の範囲の中に観測点が充実して置いてあったのは、これらを設計された地理院の先輩が、有珠山のその活動性の高さを強く認識されていた結果、例外として特に配慮をされた結果だと想像しています。2000年に有珠山が噴火した際には、これらの観測点が非常に重要なデータを出してくれましたが、準備の成果が見事に実った大変貴重な事例だと思います。観測の観点から考えると、噴火予知は噴火前に実は勝負がついていて、予知の成否は、どれだけ事前に準備をしておくかによってほと

んど決まってしまうことをこの事例は示しています。

さて、有珠山周囲の観測点間の距離を見てみることにします。距離がもし伸びていれば地下のマグマ溜まりにマグマが溜まっていた証拠になりますし、距離が縮めば、マグマ溜まりからマグマが抜け出して地表に向かって上がってきたことを示します。図7には、1997年から2000年までの期間の距離の変化が示されています。2000年に噴火があります。これをよく見ていただくと、噴火前は、右肩上がりになっていて、距離が延びていたことがわかります。おそらく有珠山が噴火の準備をしていた証拠、非常に重要な証拠だと、今の目から見るとそういう貴重なデータだと思います。それから噴火の時には、ステップ状に落ちています。これはマグマ溜まりのマグマが地表に向かって動き始めたので、マグマ溜まりがしぼんで距離が縮んだことが原因です。その後どうなったかと言いますとさらにゆっくり距離が縮みました。これは地表近くまで来たマグマが冷える事によって収縮するわけですが、おそらくそういう現象を見ていたのだらうと思います。

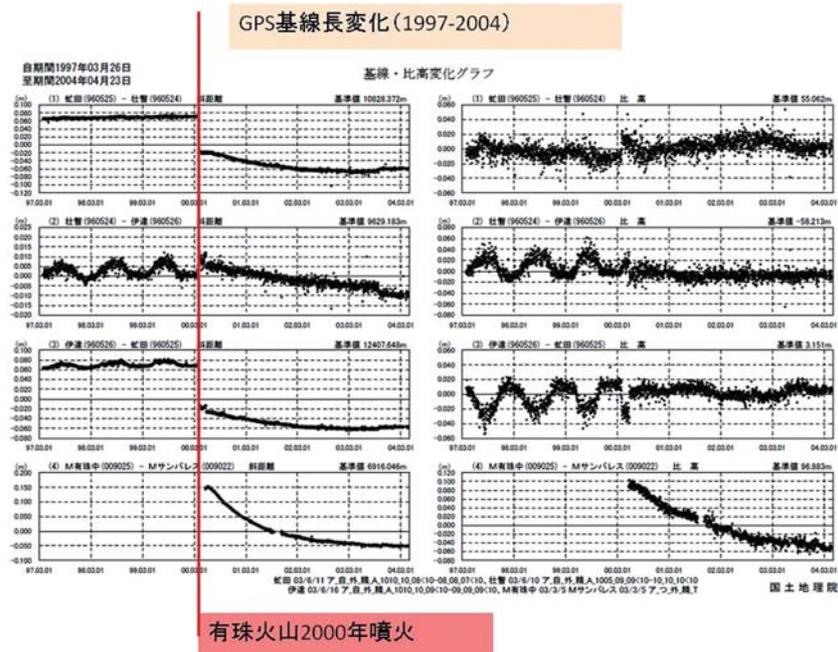


図7 2000年有珠山噴火時の地殻変動

噴火予知にとって大事なことは噴火の前に山がふくらんでいたという証拠がGPSで見えていたという事実です。もう一度グラフをよく見ていただくと、噴火前に山を囲む基線で距離が伸びて、それから噴火の時に一気に縮んでいます。マグマの動きを地上のGPSは検知していたと言うことですね。これらの知見は、有珠山の次の噴火予測を考える上で、非常に重要な出発点となります。ちなみに、現在、有珠山周囲では膨張が進行中であることがこれらのGPS観測から確かめられていて、噴火の準備を着々としているとみるべきだろうと思います。

GPSが教えてくれたことは、他にもあります。GPSは北海道全体にたくさん置いてありますので、山に近いところだけではなく、山から遠いところのGPSのデータも集めてみてその変化の様子を調べてみることもできます。図8にその結果を示します。有珠山から遠くに離れるに従って水平移動の大きさは小さくなりますが、全部有珠山の方を向いて、例えば室蘭の辺りですと北向きに噴火の時にGPSの点が動いている。一方、有珠山の北方にある点は噴火時に南に動いている。また、有珠山からの距離に関連づけてみると、遠の点ほど水平移動が小さくなっています。地殻変動のパターンの話を

先ほどしましたが、有珠山を中心にしてその方向に向かう変動が起きていますが、今の場合はみんな中心を向いていて、遠くの点ほどその動きは小さい。要するに有珠山の地下のある場所が噴火に伴って萎んだことを見事に表しています。噴火のときにはマグマ溜まりからマグマが外に出ますから、マグマ溜まりが縮んだ訳でありますけれども、その様子を見ていたのがこのデータだと言うことになります。

これがおそらくGPSの連続観測でマグマの増減を測定した世界的にも先駆けになるデータだと思いますけれども、GPSの連続観測というのは非常に火山の振る舞いを理解するのに役割が大きいということを認識させてくれた決定的な事例でした。もう一つ、このときに得た大事な教訓は、マグマが地下から上がってくる時間的な推移についても連続観測によって追跡でき、それが重要な知見をもたらしてくれたということですね。マグマ溜まりの収縮はせいぜい数日で終了しています。その後は、時間が経ってももう収縮は見られなくなった。何を言いたいかというと地下からマグマが上がってくる出来事というのは、短期間の間に終わっていて、その後は地下のマグマ溜まりからのマグマの上昇は継続しなかったという重要な事実です。地

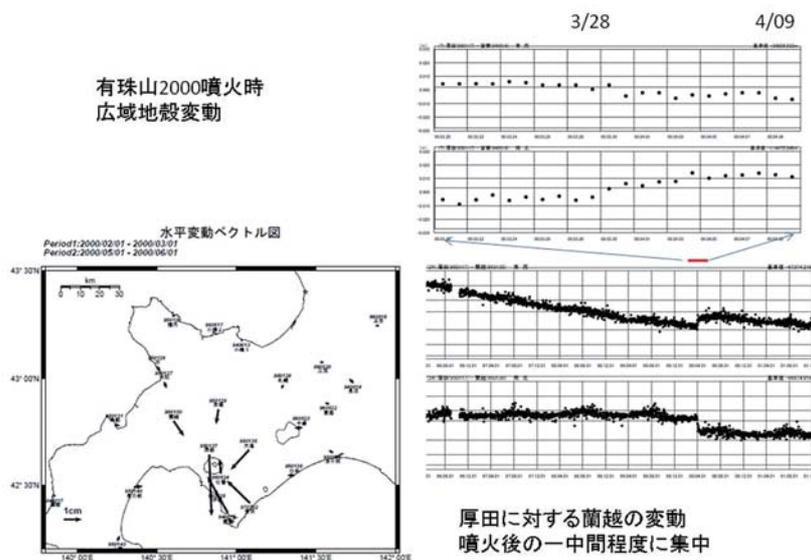


図8 2000年有珠山噴火時の広域地殻変動

下からマグマが継続的に次々に上がってきますと、その噴火は長引くということになるのですが、マグマが地表に来るのが数日間を終了したと言うことは、広い範囲に影響を及ぼすような噴火の可能性は、噴火の数日後以降は、低くなったということで、火口の近傍を除きほとんどの場所では安全だということになります。結果的に2000年の有珠の噴火では1ヶ月か2ヶ月くらいで避難を解除して、住民の方は自分の土地にお帰りになったわけですが、短期間で避難が終わらすことがなぜ可能になったかといいますと、要するに地下からマグマの動きというのが短時間で終わったことがGPSによって確認できたからからだと言うことです。噴火自体は不幸なことだったのですが、マグマの動きは短時間で終わってくれたのは、不幸中の幸いといえますか、このときの噴火はそういうタイプの噴火であったため、それほど大きな被害には繋がりませんでした。ただし、いつもそうであるとは限らないことを肝に銘じておく必要はあります。

以上の経験を通じて、測量に係わる我々の立場として、大事なことはマグマが地下から上がって来る状態が続いているのかどうかと言うことをGPSのデータや、他の測量のデータを使って判断することに全力を挙げるべきであるということです。そのデータは、避難解除の判断をする上において、非常に重要な働きをします。その時に注意しなければいけないのは、噴火が起こるとその噴火が影響を及ぼす地帯の中には観測者は入れませんので、噴火が起きてもちゃんとデータが途絶えないようにという観点から、噴火前からきちんとした観測点を造っておくというのが重要になります。その条件さえ達成できて地殻変動観測が継続できれば、そのデータを見ることによって地下からマグマの供給が継続しているのか、もう終わったのか、したがって、住民の方はもうすぐ帰れるのかと言うことを判断できます。有珠山の観測の経験は、

我々に希望を持たせてくれた大変重要なものでした。

有珠山に関しては、別の観点から、測量のデータが役に立った事があります。これは水準のデータがあることによって有珠山の活動の長期的な様子がわかってきたということでありす。2000年の噴火の際に噴火に伴う良好な地殻変動のデータが取れたおかげで、有珠山の地下にはマグマ溜まりがあってそこがふくらみながら噴火の準備をして、噴火の時にはしぼむという大まかな理屈が解ってきました。それらの基本的な背景が解った上で、もう一度、古い地殻変動データに遡って調べてみたわけです。幸い、先輩方が大変な努力をされて実施された水準測量の繰り返しの測量結果が残されています。

過去からの水準測量の結果の例として図9を見ていただきます。これが北海道の太平洋岸です。この辺りが室蘭ですかね。ここに有珠山があります。水準路線が太平洋岸沿いを走っていて、ここが結構頻繁に測られているわけです。これらの結果から、上下変動の時間変化を出して、有珠山の噴火履歴と対応させてみて興味深

1985,1986 - 1991,1992 間の水準測量

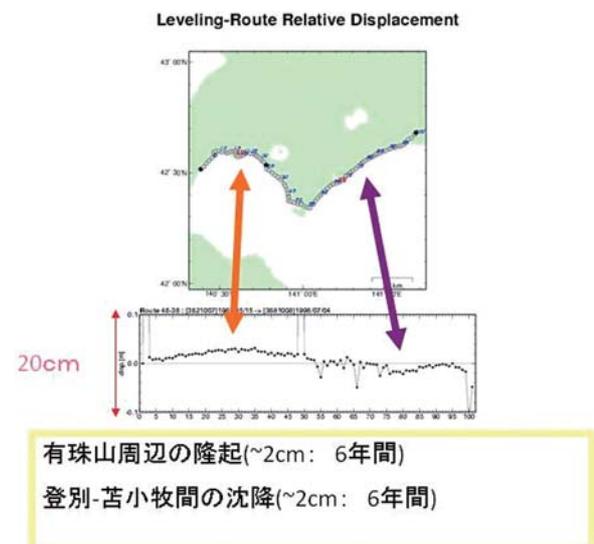


図9 1985年—1991年間の太平洋沿岸の地殻変動

いことが解りました。まず、噴火を挟まない期間は、有珠山の南側は一様に隆起していました。一方、噴火を挟む期間には同じ場所が沈降しています。これは、噴火に連動した非常に規則的な上下変動が過去から繰り返えされてきたということを示しています。

もう一度、図9を見てください。2000年噴火の15年前と5年前のデータの比較から出した、噴火前の期間の上下変動ですが、虻田の辺りが隆起しております。有珠山の地下でマグマが溜まると虻田の辺りが隆起しますので、5年間にマグマ溜まりにマグマが蓄積された証拠ということが解ります。同様のことを、例えば1905年と1954年のデータでもみてみました。これは50年間空いていておりますけれど、その間に2回噴火があったわけですが、期間が空いておりますので、ちょっとデータが暴れますけれども、ちょうど虻田とか伊達の辺りは少しへこんでいることが見て取れます。この間に2回の噴火を挟んでおりますので、大量のマグマをマグマ溜まりから出したお陰で、収支で言うと、マグマ溜まりが縮んで地面が沈降したということが解ります。それから54年と68年これは15年くらいですけれども、この間もちょっとデータがばらついていて見にくいですが、傾向を見極めてやるとやはりこの辺りが少し隆起をしておりますが、これは噴火を挟まない期間なので、ふくらんでいる。68年86年の間は、77年の噴火がありますけれども、このときはかなり大きく明瞭に沈んでいます。これらを図10にまとめると、おそらく有珠山の地下では、マグマをゆっくり溜めて噴火の時に一気に吹き出してということを繰り返しているだろうと思います。その間に測量がなされるわけですが、噴火を挟まない時期だと膨張していますので、先程見ていただいたように隆起として捉えられますし、噴火を挟むと大量のものが出ますので沈降になる。このような非常に規則的な蓄積と放出にともなう地殻変動が繰り返されてきたということがわ

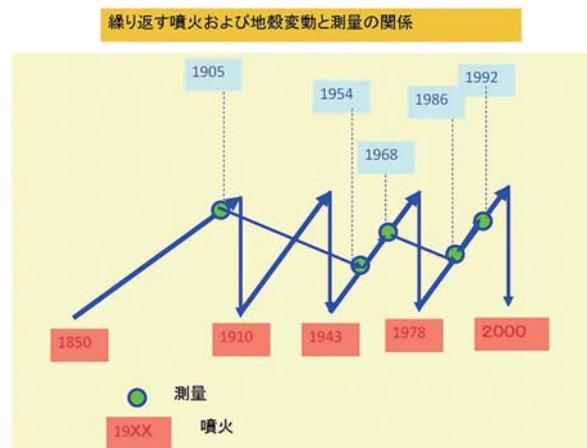


図10 有珠山下のマグマ溜まりの増減と地殻変動の関係

かります。少なくともここ100年はそうでしたし、2000年の噴火の時にもそう言った傾向がありました。ですので、地下のことですから将来必ずこれを繰り返すという補償はないのですが、かなり高い確率として、次の噴火、いつになるか解りませんが同じことが繰り返されるだろうと思います。

では、はたして現在はどうのような状況かということなのですが、先程見ていただいた基線で調べてみることにします。有珠山がここにおいてその回りに3点の国土地理院の観測点があります。例えばこの基線を見ますと、ちょうど有珠山の北東、南東の方向に、またぐような基線ですが、これが2000年の噴火ですね。噴火の直後は噴火時にせり上がってきて地表直下にとどまった浅いマグマの影響が大きかったですけれども、だんだんそれも治まって、深いところの様子が見えて来るようになります。そうするとほぼ一樣のスピードでのびているわけです。先ほども指摘しましたが、よく見ると2000年噴火以前も伸びていました。つまり、現在は、2000年噴火前の準備段階と同様の現象が進んでいる、つまり有珠山は次の噴火に向けて準備を着々と行っているらしいということが見えてきます。

1997年以前はGPSは無かったので、水準で見るしかないので、それについても先程見ていただいたように、ふくらんでは噴火でしほ

みふくらんではしぼみということをやってきました。これらを総合すると、過去の起きた現象とおそらくおなじことを繰り返す確率が高いでしょうから、有珠山ではやはり将来の噴火はあるということをお我々は覚悟する必要があるということになります。そのことを冷静に受け止めて、用意周到に、人命や社会活動に対する、インパクトをできるだけ少なくするように準備をする必要があるということです。

さらに一歩進んだ火山噴火予知の試み

最後に少し、将来への挑戦として、私が今注目している火山についてご紹介させていただいて、話を終わりにしたいと思います。

浅間山です。浅間山も最近、数年に1回、今のところは小さいものですが、頻繁に噴火をするようになりました。ここでも地殻変動を見ていると大変興味深い火山活動と地殻変動との間の関係があることに気がつきました。

図11が浅間山周辺の地図ですけれども、このように浅間山の回りに国土地理院のGPSの点があります。割合古くからある北東と南西の点を結ぶ距離を見ていると大変興味深い事に気がつきます。これが距離ですけれども、観測が始

まったのが96年くらいですが、その間に、距離が伸びて縮んで伸びて縮んでということを繰り返しています。伸びるときに噴煙高度が上がったり地震が増えたりするということに、ある時、気がつきました。それは、2004年の5月頃だったと思います。また伸び始めたので、2004年の6月に火山噴火予知連があったときに、また伸び始めましたということをお報告しました。その時は、誰も注目してくれませんでした。それから1ヶ月か2ヶ月して実際に噴火が起きました。実際に噴火が起きてしまって、実は、自分自身も大変驚きました。その後、同様の出来事が、何度か繰り返されたため、浅間山のGPSの観測結果と火山活動に強い関連性があることについて、だんだん皆さんに受け入れていただくようになりました。私は、その最初のきっかけとなるデータを提供でたとおと思っていますけれども、現在の浅間山は非常に規則正しい火山だと思おいます。

もう少しデータの期間を最近まで延ばしてみることになります。さっきご紹介したような出来事が、過去何回か繰り返されてきたわけですが、伸び始めて噴火する。先程見ていただいたのがこの2004年ですけれども、その後2008年から9

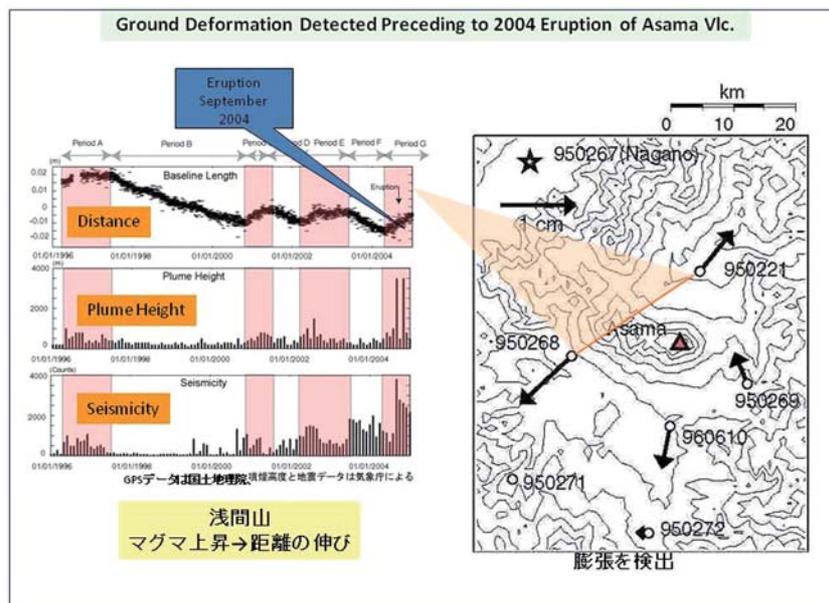


図11 浅間山の地殻変動と噴火の関係

1996年観測開始以来のGPS距離変化(膨張収縮)の規則性

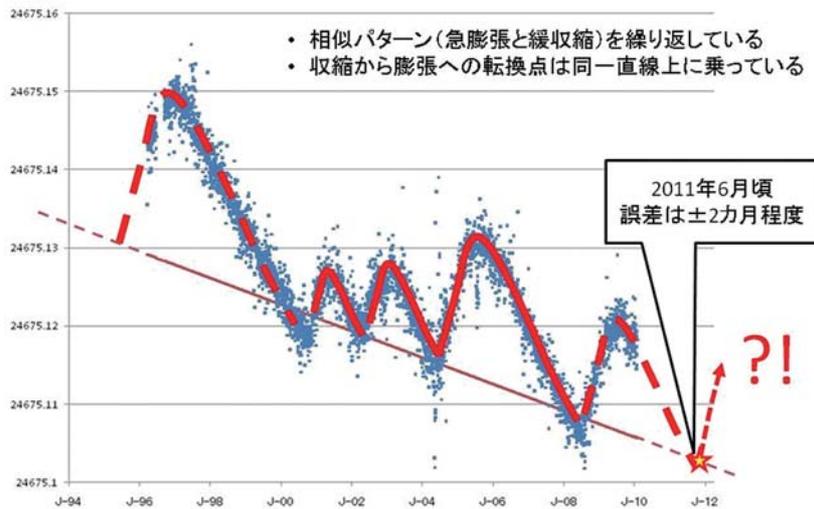


図12 地殻変動に基づく浅間山火山活動予測の試み

年にかけても同様のことがあって、その時も伸びて時間をおかずに噴火をしています。ですので、どうも GPS を見ていて、それが伸び始めたことがわかったら、そろそろ噴火が起きる可能性が高くなるといったことは言って良さそうに思います。それから GPS 以外にも色々な観測があるのですが、地震とか火山ガス、これも火山活動を高まりですとか、活動度を見る非常によいデータなんですけれども、地震発生回数、噴煙高度、さらにガスの量も、GPS が伸び始めると一斉に歩みを揃えて活発になっています。これを見ると非常に火山活動と地殻変動の間に関連性が強いということが確認できると思います。

さらに、もう一つ興味深いことは、図12のように、縮みから伸びに転じる転換点が、ある直線上に乗ることがあって、本当に活動の性質を反映しているものとするのが驚くべきことだと思います。先程説明しましたように伸び始めると噴火が起きていますから、この傾向が将来も続くとすると、暫く縮んでいてこの赤い線に達したところで跳ね返るはずなんです。その跳ね返りが起こると、間をおかずに噴火が起こる可能性が高まる訳なので、さっき述べた規則性に従って、それがいつになるんだろうということ

を考えれば良いわけですね。くどいようですが、これは地下のシステムが同じようなことを繰り返すということを前提にしたうえでの、予知のテストケースということになります。伸びて縮んでという現象が、これまで何度も繰り返されてきていますので、将来もひょっとしたらそうなるのではないかと予測するのは興味があると思うわけです。それで実際に計算してみますと、今がちょうどその時期に当たるのです。

注意深くデータ見ているんですけども、実は3月の地震があったお陰でこの辺りも非常に大きく地殻変動も乱されていて、データが非常に見にくくなってしまいました。そのせいで、ちょっと今後の状況が解らない訳ですが、ひょっとすると3月11日にあれだけの出来事があったので、もう浅間山の地下システムは全く変わってしまって、こういったことはもう繰り返されないのかも知れませんが、少し遅れて始まるかも知れません。いずれにしても、このようなデータが地下の仕組みを理解するのに、きっと何かの役に立つだろうと思って、現在もこのデータ注意深く見えています。

最後に

この辺りで終わりにしようと思いますけれど

も、まとめですが、火山や地震活動と地殻変動の関係について、いくつかの例をお話ししました。測定のデータというのは地震や火山を研究する上で非常に重要な基礎データになっている、特に火山噴火現象の予知に関しても使われ始めているということを今日はご紹介したかったわ

けです。少し端折った部分ありましたが、基本的な部分をご理解いただけたのではないかと思います。それが皆様のこれからの御活動の何らかの参考になれば大変ありがたいと思います。

どうもご静聴ありがとうございました。

氏名 村上 亮

1954年7月24日生（満57歳）

学 歴

- 1979年3月 東京大学理学部物理学科卒業
- 1989年11月 論文提出により 京都大学理学博士（地球物理学専攻）

受賞歴

- 1995年3月 日本測地学会賞坪井賞第3号受賞
（受賞対象業績：GPS 衛星の精密軌道決定）
- 2001年4月 平成13年度文部科学大臣賞（科学技術功績者表彰）受賞
（受賞対象業績：人工衛星合成開口レーダーによる地殻変動量面的観測技術の研究）
- 2007年5月 2006年度日本地震学会論文賞受賞（受賞対象論文）
Shinzaburo Ozawa, M. Kaizu, M. Murakami, T. Imakiire, and Y. Hatanaka (2004): Coseismic and postseismic crustal deformation after the Mw8 Tokachi-oki earthquake in Japan, Earth, Planets and Space, 56, 675-680.)

主な経歴

- 1979年4月 建設省国土地理院に入省
- 1985年3月 オハイオ州立大に10ヶ月間留学
- 1986年4月 国土地理院測地第二課人工衛星係長
- 2002年4月 地理地殻活動総括研究官
- 2007年4月 地理地殻活動研究センター長
- 2008年4月 北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター教授

主な研究分野

- GPS 連続観測、合成開口レーダー、測地測量結果の解析による地球ダイナミクスの研究
- 我が国の地殻変動の特性に関する研究
- 地震発生メカニズムの研究
- 火山活動メカニズムの研究
- 人工衛星等の飛翔プラットフォームを利用した地殻変動観測手法の開発
- 新しい地殻変動計測手法の開発

現在まで歴任した委員等

- 火山噴火予知連絡会委員
- 地震調査委員会委員（2008年3月まで）
- 地震調査委員会衛星データ解析検討小委員会主査
- 科学技術・学術審議会測地学分科会 臨時委員（2008年3月まで）
- 総合資源エネルギー調査会臨時委員
- 防災のための地球観測衛星等の利用に関する検討会議委員
- 地震予知連絡会委員（2008年3月まで）
- 日本測地学会評議員
- 北海道防災会議火山専門委員会委員 座長