

地殻変動解析が明らかにする地震と火山活動の関連性について

Causative relationship between volcanic activity and earthquakes revealed by crustal deformation study

地理地殻活動研究センター

Geography and Crustal Dynamics Research Center

村上 亮・西村卓也・藤原 智・飛田幹夫

中川弘之・小田切聡子・小沢慎三郎・鷺谷 威・多田 堯

Makoto MURAKAMI, Takuya NISHIMURA, Satoshi FUJIWARA, Mikio TOBITA,

Hiroyuki NAKAGAWA, Satoko ODAGIRI, Shinzaburou OZAWA, Takeshi SAGIYA, Takashi TADA

1. はじめに

火山活動と地震活動の間には、密接な関係があることが古くから知られている。そのような事例として、大地震が誘発させたと考えられる火山噴火、一連の火山活動の中で発生する比較的大きな規模の地震、火山地域で発生する群発地震などが典型的なものである。我が国における最近の活動をみても、1989年7月13日に伊豆半島伊東市沖約3kmの海底で噴火した手石海丘の噴火の直前、7月9日にやや大きな地震が発生した。また、1998年3月頃から始まった岩手山周辺の一連の火山性活動において、9月3日にM6.1の地震が岩手山の南西方向で発生しており、地震と火山の密接な関係を改めて印象づけている。

これらの地震と火山活動との間の関係は、これまでさまざまな観測手段や理論によって研究されており、ハワイの火山など、観測の環境が整いました、火山の構造がそれほど複雑でないいくつかの火山においては、両者の関係およびその物理的な背景が明らかにされている。また、最近では、人工衛星を利用した画期的な地殻変動観測システムであるGPS（汎地球測位システム）による連続観測や、合成開口レーダー（SAR）などの、新しい観測手法が登場したことによって、地震と火山活動の関係の解明に役立つ、より詳細な観測データが提供されている。今回は、それらの最新の手法による観測データを用いて、最近の伊豆半島東方沖の群発地震活動と火山活動との関係、および1998年の岩手山の一連の火山活動の中で起こったM6.1の地震と火山活動について行った研究を例にとり、最新の地殻変動観測とその詳細な解析が明らかにした地震と火山活動の関連や、宇宙技術を利用した地殻変動研究が地震・火山研究にもたらす効果について紹介する。

なお、これらの観測や解析結果は国土地理院の多くの関係者の密接な共同作業を通じてもたらされたものであることを記しておきたい。また、今回紹介する地震と火山活動の関係に関する研究成果は、地理地殻活動研究セ

ンターの地殻変動研究に関係する研究者の共同研究の成果を総合したものである。

2. 伊豆半島東部の群発地震活動

伊豆半島北東部では1978年から、毎年のように群発地震が発生している。これらの活動の当初から、国土地理院では伊豆半島において各種の精密な測量を実施し、群発地震に伴う地殻変動を明らかにしてきた。さらに、1993年からは関東・東海地域にGPS連続観測点を整備し、地殻変動を高精度かつ高い空間的密度で、しかも連続的に観測することが可能となった。これらのGPS観測システムの整備後も、1995年9-10月、96年10月、97年3月、98年4-5月の4回の顕著な群発地震活動が発生している。

これらの群発地震活動は、地下深部からのマグマや熱水のような流体が、薄い板（ダイク：dykeと呼ぶ）状に上昇してくることによって発生すると考えられている。このような流体は周囲の岩盤を押し上げ、破壊しながら上昇してくるが、その破壊現象に伴って群発地震が発生すると考えられている。また流体が周囲の岩盤を押し広げる結果、地面を変形させ、地殻変動も発生する。

1989年の群発地震活動においては、その活動中に、静岡県伊東市の東方沖の海底で噴火がおき、手石海丘が誕生した。この噴火による被害はなかったものの、群発地震の原因が、地下からの高温高压流体の上昇（すなわち火山活動）であることを如実に示すこととなった。

伊豆半島の群発地震では、ダイクが上昇したと考えられている場所で群発地震が発生するケースが多いが、そこから離れたところでも地震活動が活発化する場合もある。これはダイクが岩盤を押し広げるために、ある程度離れた場所でも周囲の岩盤にかかっている力（ストレス）が変化し、地震が誘発されることを示している。さらに、逆に周囲に発生した地震が、ダイクに働いている力を変化させ、それがダイクの活動への影響を与えることも考えられる。我々は、以下に紹介するように、観測

された事実から、このような現象が実際に起こっている証拠を捉えたと考えている。

ここでは、まず国土地理院の全国GPS連続観測システムGEONET (GPS Earth Observation Network System) と水準測量によって観測された地殻変動のデータから、最近4回の群発地震をひきおこしたダイクの位置と規模を推定した結果を紹介する。次に推定結果を用いて周囲の岩盤のストレス変化の計算を行い、地震および火山活動と比較した結果について報告する。

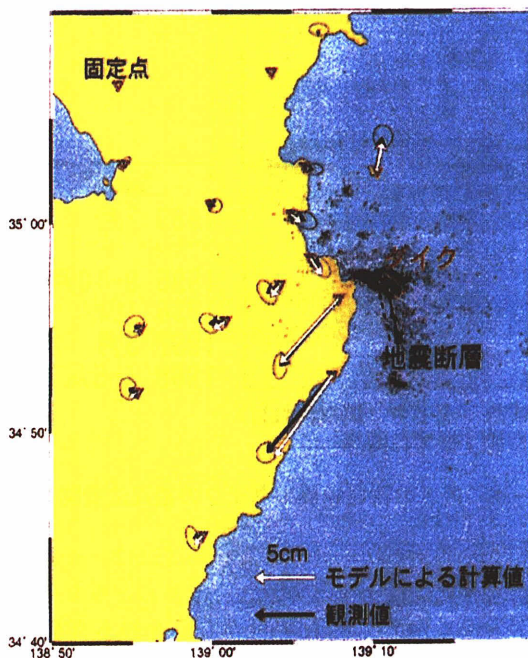
3. 伊豆東方沖のダイクモデルの推定

伊豆半島東部の群発地震活動において、最近発生したものとしては、1998年4月20日から伊豆半島伊東市の東方沖で発生した群発地震活動がある。図-1にGPSによって観測された群発地震に伴う地殻変動を示す。また群発地震活動を挟む1997年6-7月と1998年6-7月に行われた水準測量の結果を比較したところ、最大3.2cmの隆起が観測された(図-3)。これらの地殻変動のパターンはやや複雑で、1つの単純なダイクが開いたという考えでは説明できない。そこで5月3日に発生した群発活動中の最大の地震(マグニチュード(M) 5.7)による地殻変動を考慮に入れて、ダイクと地震の双方が地殻変動に影響を与えていると考え、その2つについて位置や規模を推定した。

1998年のモデル(図-2)は、西北西-東南東走行のダイクとその西端付近から南へ伸びる地震断層からなっ

ている。これらの断層の位置は微小地震の震源とも一致する。1995, 1996, 1997年の活動も同様な手法で解析し、1998年を含めた過去4回の活動においてダイクの位置と規模の推定した結果を図-4に示す。それぞれのダイク

1998年4-5月の地殻変動とモデル



国土地理院院報第93号 99/4/21

図-2 1998年群発地震活動のモデル

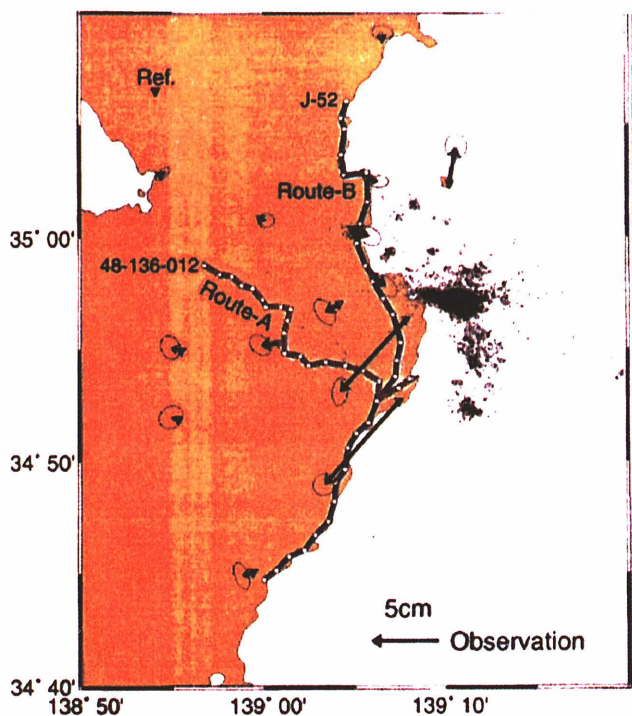


図-1 1998年の伊豆半島東部の群発地震活動

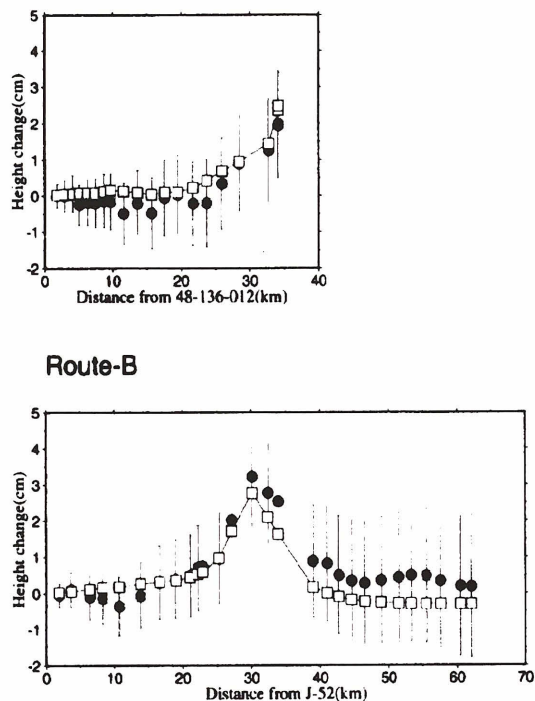


図-3 水準測量の実測値とモデルによる予測値の比較

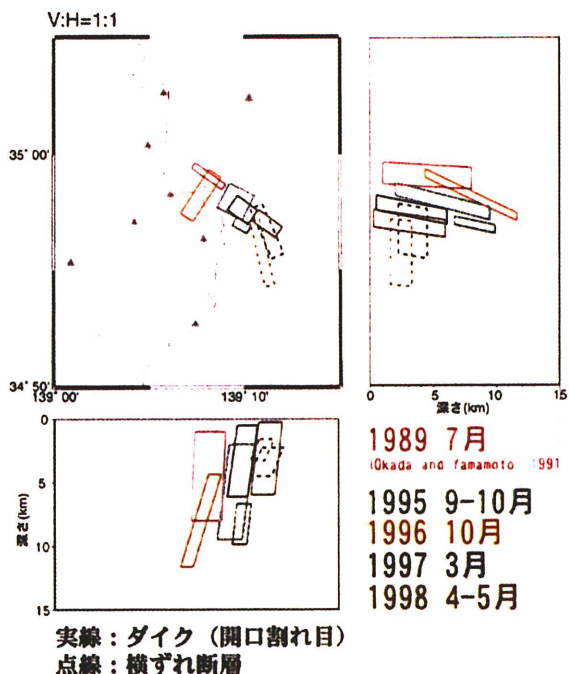


図-4 最近の群発地震のダイクの相互位置関係

は、1989年の海底噴火時のものを含めてほぼ一直線上に並ぶが、微妙に位置がずれており、ほとんど重ならないように見える。このような特徴から、今後も群発地震（ダイクの貫入）が発生するとすれば、この直線上で過去に起こっていない場所に発生する可能性があるとも考えられる。

4. 地震と火山活動の相互の影響について

1998年の群発地震活動を、地殻変動からみると比較的活動が活発な時期が3度あった。この活動期のはじめには、一連の活動の中でも比較的大きな地震が頻発しており、これらの地震は、ダイクの成長と何らかの関係があると考えられる。

地殻を構成する岩石にかかるストレスの大きさの変化が、どのような破壊（地震）を発生させるかについての指標の1つにクーロンの破壊基準がある。これは、岩石にかかっているストレスから計算されるクーロン破壊関数（Coulomb's Failure Function 以下CFFと略す）が破壊現象を支配しており、破壊（地震）は、CFFが破壊強度に達したときに発生するという考え方に基づいている。

岩石にかかっているストレスの総量を推定するのは難しいため、ここではダイクの貫入によるストレスの変化分を計算する。そしてCFFを計算し、それが増加して破壊強度に近づくのか、もしくは減少して破壊から遠ざかるのかをいろいろな場所において計算した（図-5）。その結果、1998年の群発地震の期間において、伊豆半島東方沖で微小地震が活発化した領域とCFFの増加域が発生した地域は、ほぼ一致することが分かった。

一方、地震がダイクの成長に及ぼす影響を見積もるた

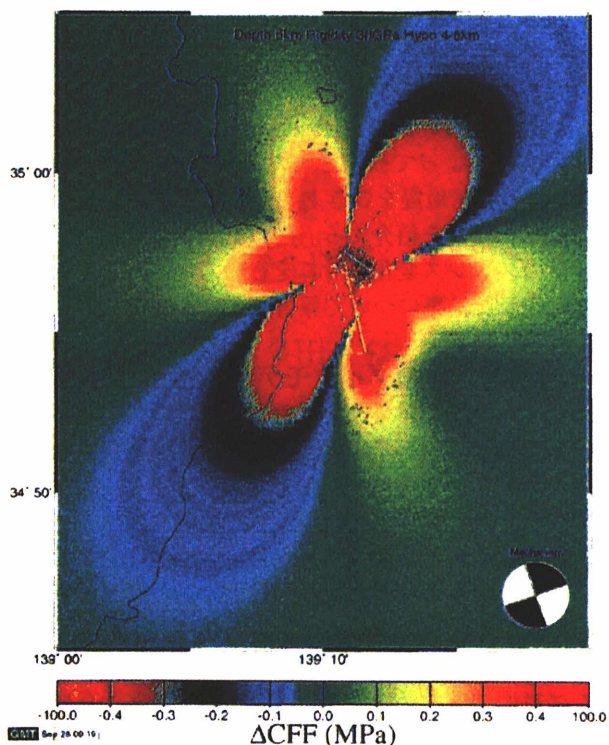


図-5 1998年群発地震活動の推定されるストレス変化量と群発地震の分布

めに、ダイクの面に対して垂直な方向のストレスの変化を計算した。ダイクの活動が活発になった4月26-28日には、周囲の地震によってダイクへのストレスは減少したと考えられる。逆に5月3日の最大地震の後、群発地震活動および地殻変動は収束に向かったが、この地震によりダイクを閉じる方向への力は増加していた。このように地震によるストレスの変化が、ダイクの活動に大きな影響を与えていた可能性が高いと考えられる。

このように、近年伊豆半島東部で発生している群発地震活動に関して、GPSと水準測量によって観測された地殻変動から、1995年以降の伊豆半島東部の群発地震活動の断層モデルを明らかにした。推定されたダイクは、すべての活動においてほぼ一直線上にあるが、互いに重ならない位置にあることが明らかになった。さらに推定したモデルを用いて、周囲の岩盤のストレス変化を計算することによりダイクの貫入と周囲の地震との相互関係の考察を行い、伊東周辺の微小地震活動がダイクの貫入によるストレスの増大によって説明できることと、地震によるストレス変化がダイクの成長に大きな影響を与えている可能性が高いことの2点が明らかになった。

5. 1998年の岩手山の火山活動

次に、1998年にあった岩手山の活動に関して明らかになった、火山活動と地震の関連の事例について紹介する。

1998年3月頃から岩手山とその周辺地域を震源域とする火山性の地震活動が活発になった。

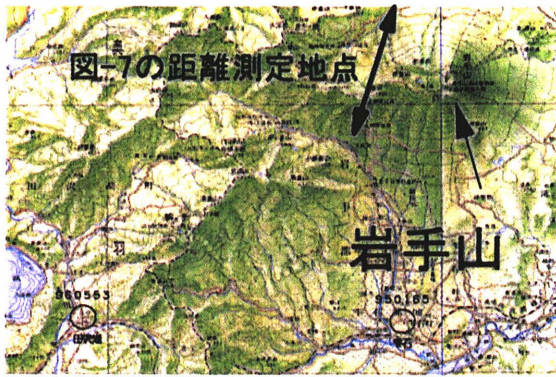


図-6 岩手山周辺の地図

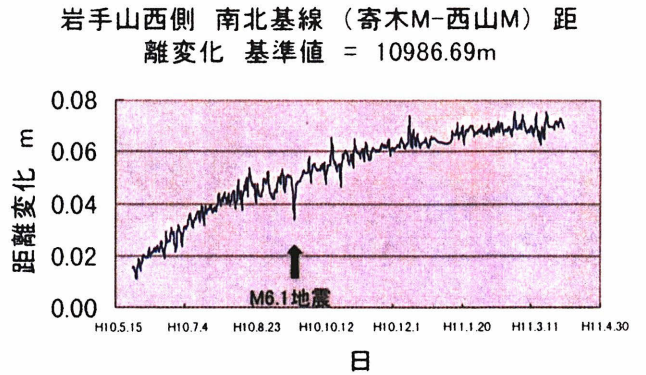


図-7 火山活動に伴う距離変化

国土地理院では観測を強化するため岩手山の山腹と周辺に臨時のGPS連続観測点を6月および10月に設置し、さらに11月からは、山頂周辺に1波受信機による独立運用型の連続観測装置を配置して、総合的に連続観測を実施している。また、光波測距儀による自動観測装置(APS)も設置し8月から観測を続けている。さらに、宇宙開発事業団より地球資源衛星「ふよう-1号」(JERS-1)の観測データの提供を受け、干渉合成開口レーダー手法(InSAR)による地殻変動解析も実施している。図-6に岩手山周辺の地図を示す。

岩手山の活動に伴う地殻変動は、さまざまな形で捉えられているが、それを最初から捉えていたのはGPS連続観測である。図-7に、GPSにより連続的に観測された観測点間の距離の変化の例を示す。これは、約10km離れた西山と寄木の間であり、岩手山を南北に挟むように位置している(図-6の地図を参照)。これが伸びたということは、何らかの原因で岩手山周辺が膨張したことを示唆している。このような、距離の伸びの変化は岩手山を取り囲む形で配置した他の多くの観測点の間でも観測されている。このような伸びが約半年続いた後、9月3日にマグニチュード6.1のやや大きな地震が発生した。この地震は、岩手山周辺では震度6を記録し、被害も生じている。この地震によって、明らかに岩手山の活動の様相は変化し、地震後は地殻変動も沈静化している。しかし、規模は小さいものの現在も地殻変動は継続している。

GPS等の観測によって、地震を発生させた断層運動によって生じた大きな地殻変動が捉えられている。これらの地殻変動は、基本的に、地下では東側から西側に向かって傾斜し南北に走る断層が、東西の圧縮の力を受け西側が東側にすべりあがった逆断層のメカニズムを考慮することで説明できる。この地震では、断層運動が地表にも顔を出しており、この付近で以前から知られていた活断層である西根断層群の北側の延長線上に、今回の地震に伴って生じた食い違いが地上を走っている。

今回の岩手山の一連の観測では、地上約570kmのはるか上空の軌道上から、我が国の地球資源衛星「ふよう-1号」(JERS-1)の合成開口レーダー(SAR)が、岩手

山周辺を44日毎に観測していた。SARは地表を約50m×50mの非常に高い空間分解能で面的に観測する。繰り返し観測されるSARの観測結果を比較することで、その間に発生した地表の変動(地殻変動)を、約1cmの精度で面的に捉えることができる。

今回は、この観測データを利用して、地震前後の岩手山周辺の地殻変動の分布の様子を面的に明らかにすることができた。図-8に今回、解析した岩手山周辺のSAR画像を示す。衛星は、観測地域上空をほぼ南北に飛行し、観測地域の東側もしくは、西側からマイクロ波を照射し観測を行っている。画像では、地殻変動の大きさが色の变化として表現されており、色の変化が大きいところが地殻変動が大きい場所である。

図-9は、地震を挟む、1997年11月と地震直後の1998年9月を比較した合成開口レーダー画像の岩手山周辺部を拡大したものであるが、岩手山の南西方向に地震によって生じた地殻変動を表す縞模様が何本も観察される。これが地震によって大きな地殻変動が発生した場所である。この画像を詳しく解析したところ、地震の断層運動に伴う変動とともに、岩手山西側の葛根田のやや北方(深さ約7km)を中心とする火山性の膨張を原因とする地殻変動があったことが明らかとなった。図-10にモデルによるシミュレーションによって再現した地殻変動を示す。図-9とパターンがよく一致しており、推定したモデルの有効性が確認される。図中の黒丸は推定される膨張源の位置である。この膨張が推定される同じ場所において、地震前の、4月から7月間の地殻変動を表す図-8の上段左端の図と下段中央の図においても、図-10の黒丸の位置の周辺で膨張を示す地殻変動が明瞭に観測されており、地震前に、このあたりに地殻変動が生じていたことは確実である。

SARの観測結果から、この地殻変動による隆起は中心の直上で約10cmであったと推定される。図-11は、この膨張が付近の歪みをどのように変化させるかを計算したもので、9月3日のM6.1地震を加速させる歪み変化成分分布(ΔCFF)を示している。図-11の黒い■は9月3日の地震の震央であるが、地震を発生させる歪み変化

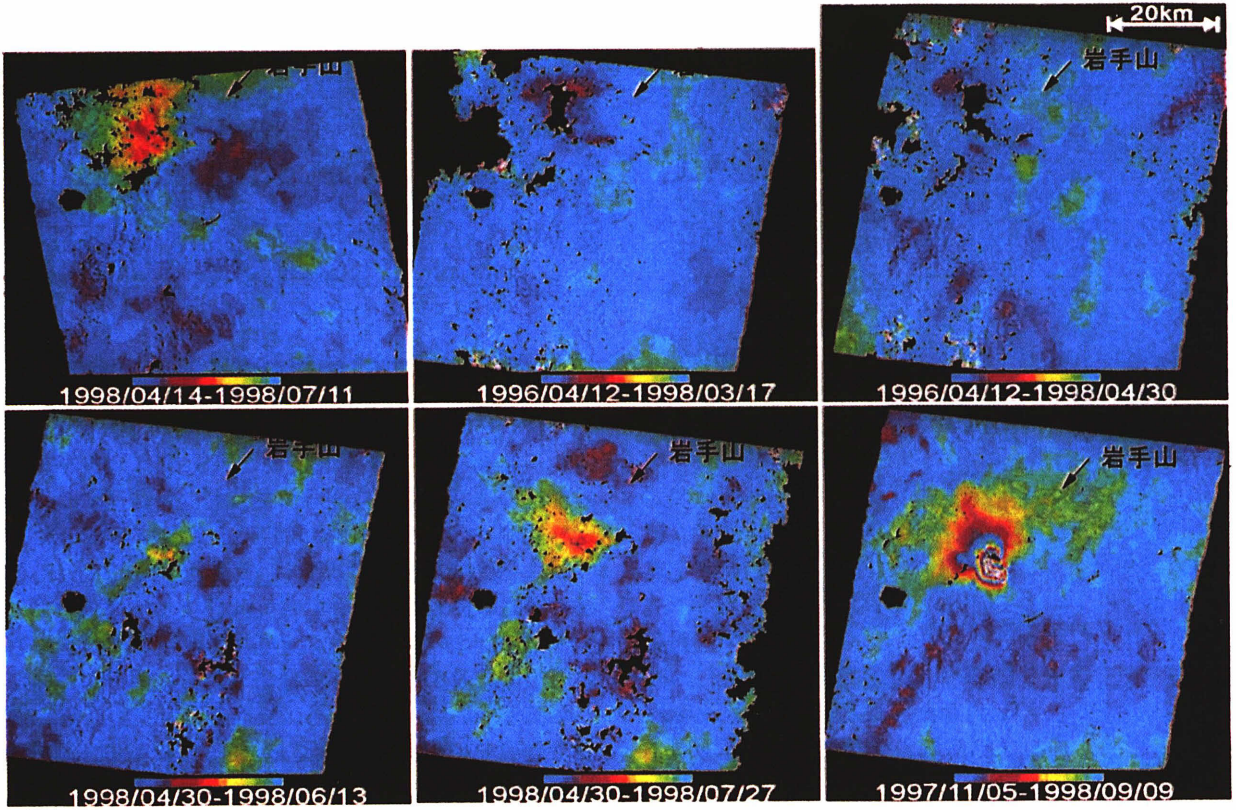


図-8 人工衛星合成開口レーダー観測による岩手山周辺の地殻変動

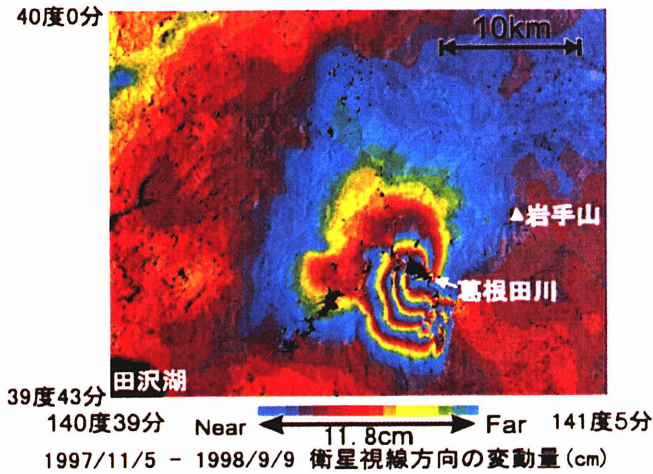


図-9 1997年11月 1998年9月間の地殻変動
岩手山の南西で発生した地震の変動が明瞭に捉えられている。

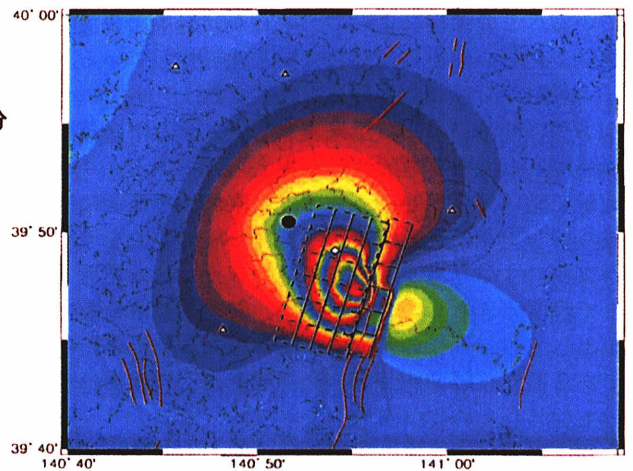
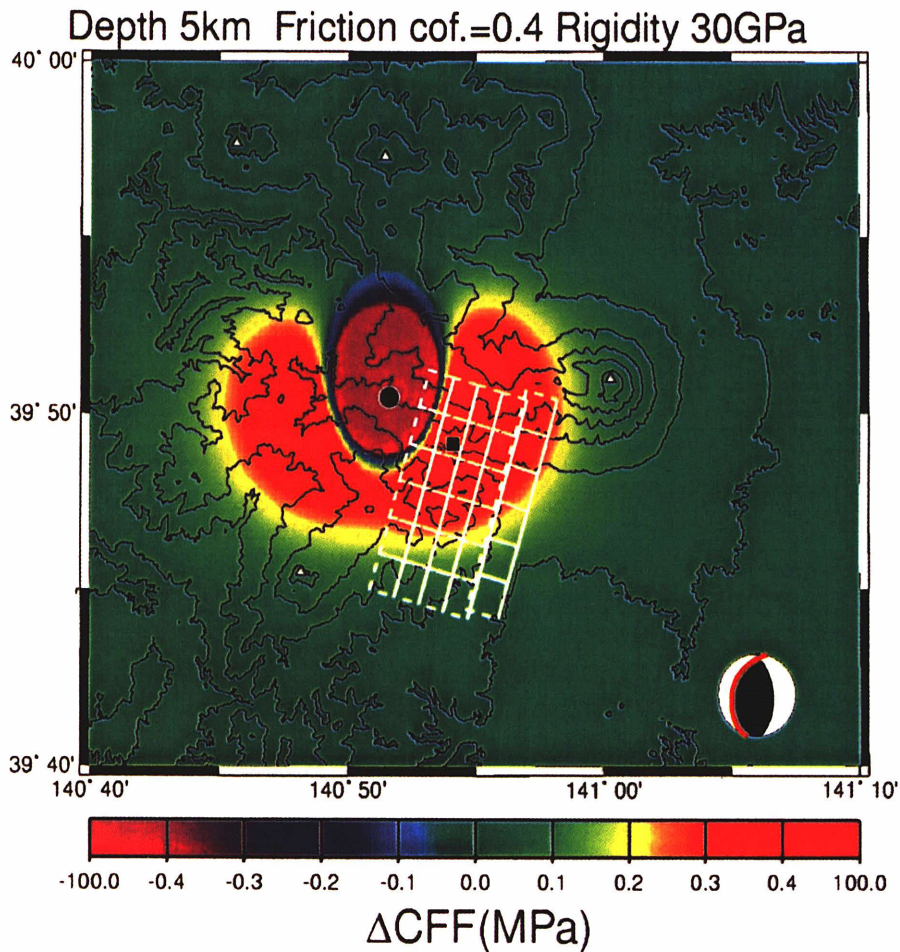


図-10 地殻変動のモデルによる推定



図一 膨張源によるストレス変化の予測と9/3のM6.4地震の発震機構の比較

成分（ ΔCFF ）の大きいところ（図中の赤色の部分）から地震が始まっていること、この場所の ΔCFF が地震時に変化した応力降下量の約10%程度と大きいことから、地震に先立つ火山性の膨張がきっかけとなって地震が惹起された可能性が高いという解釈が可能である。

なお、地震後の現在も地殻変動は継続しており、それらの変動は、上で推定された膨張源位置の周辺に分布していることが興味深い。

おわりに

本研究の明らかにした火山と地震活動の定量的関係は、これまで、ほとんど研究例がなく、今後も新たな観測事例が蓄積してゆくことによって、地震と火山の関係

をこれまで以上に詳細に明らかにすることができると期待される。また、近い将来、GPS等による地殻変動観測は、準リアルタイム的に実施されることが期待されるため、それらの解析と組み合わせることによって、火山周辺域での地震発生によるその後の火山活動への影響や、火山が地震を誘発させる危険性などを、準リアルタイムに予測する手法の開発可能性が一層高まったといえ、今後の進展が楽しみな分野である。

謝 辞

当研究では、宇宙開発事業団から提供された合成開口レーダーデータを使用した。原データの著作権は、宇宙開発事業団および通産省が保有している。

参考文献

宇津徳治 地震活動総説 pp.627-630 1999 東大出版会
 西村卓也「4-5月の伊豆半島東北部の地殻変動と断層モデル」日本地震学会1998秋期講演会予稿集
 多田 堯「岩手山火山周辺の地殻活動」1998年日本火山学会秋期講演会予稿集
 西村卓也, 村上 亮, 藤原 智, 飛田幹男, 中川弘之, 鷲谷 威, 多田 堯: 「干渉SARとGPSデータを用いた岩手山の火山活動と岩手県内陸北部の地震(M6.1)の地殻変動モデル」1999年地球惑星科学関連学会合同大会 予稿集