

「伊豆東部の地震活動の予測手法」 報告書

平成 22 年 9 月 9 日

地震調査研究推進本部地震調査委員会

「伊豆東部の地震活動の予測手法について」

(もくじ)

1. はじめに	1
2. 伊豆東部で発生する地震活動について	3
2-1 地震活動の概要	3
2-2 既往の調査研究成果	4
3. 伊豆東部の地震活動の特徴	5
3-1 マグマ貫入と地震活動について	5
3-2 マグマ貫入量と東伊豆のひずみ変化	7
3-3 マグマ貫入の深さによる活動状況の違いについて	10
3-4 最大規模の地震とその震度の推定	15
3-5 震度1以上を観測する地震の回数	16
3-6 活動期間	17
1) 「活動期間」の定義について	17
2) 複数回のマグマ貫入と活動期間	19
3) 活動期間の予測について	20
4) 活動期間についてのまとめ	20
4. 伊豆東部の地震活動の予測手法	21
4-1 本検討で抽出した地震活動の特徴	21
4-2 予測手法の基本的概念	21
4-3 監視の流れについて	23
5. 防災上の留意事項	24
6. 今後に向けて	25
7. 参考文献	26
参考資料	28
資料集	別添

1. はじめに

地震調査研究推進本部地震調査委員会（以下、「地震調査委員会」という）は、地震に関する調査研究の成果を収集・整理・分析し、主要活断層帯で発生する地震や海溝型地震について地震発生可能性の長期的な評価を行い、地震発生確率を公表している。また、地震調査委員会は余震発生確率を求める手法を標準化し、気象庁がその手法に基づいて規模の大きな地震が発生した後の余震活動の見通しを適時に発表している。

長期的な評価および余震発生確率以外は、現時点では、地震活動の推移・見通しについて予測する手法は確立されていない。しかしながら、関係機関の観測データを一元的に処理する業務の成果等、地震データの蓄積が進んでおり、過去の地震活動の特徴を抽出し整理することにより地震活動の予測的な評価が可能と考えられる事例がいくつか見出されてきている。

そのため地震調査委員会は、群発地震の性質等過去の地震活動から特徴の抽出・整理を進めるとともに、地震活動の推移・見通しについて予測的な評価手法の検討を行うため、地震活動の予測的な評価手法検討小委員会（以下、「小委員会」という）を設置した（図1）。

小委員会においては、地震・地殻変動観測データや研究成果が多く得られている伊豆東部の群発的な地震活動を対象として予測的な評価手法の検討を行い、ここにとりまとめた。

なお、本手法は過去の地震活動から抽出した特徴を基にとりまとめたものであり、過去の活動と同様の形式で発生する地震活動を予測する手法である。そのため、過去の活動とは異なる形で地震活動が発生した場合は、本手法による予測の適用外となることに留意する必要がある。

また、今回とりまとめた手法を用いて予測した地震活動の推移・見通しについて情報発表を行う際には、情報の内容や提供方策、あるいはそのような情報を受けた機関がとるべき防災対応等について、防災関係部局間で検討を進める必要がある。

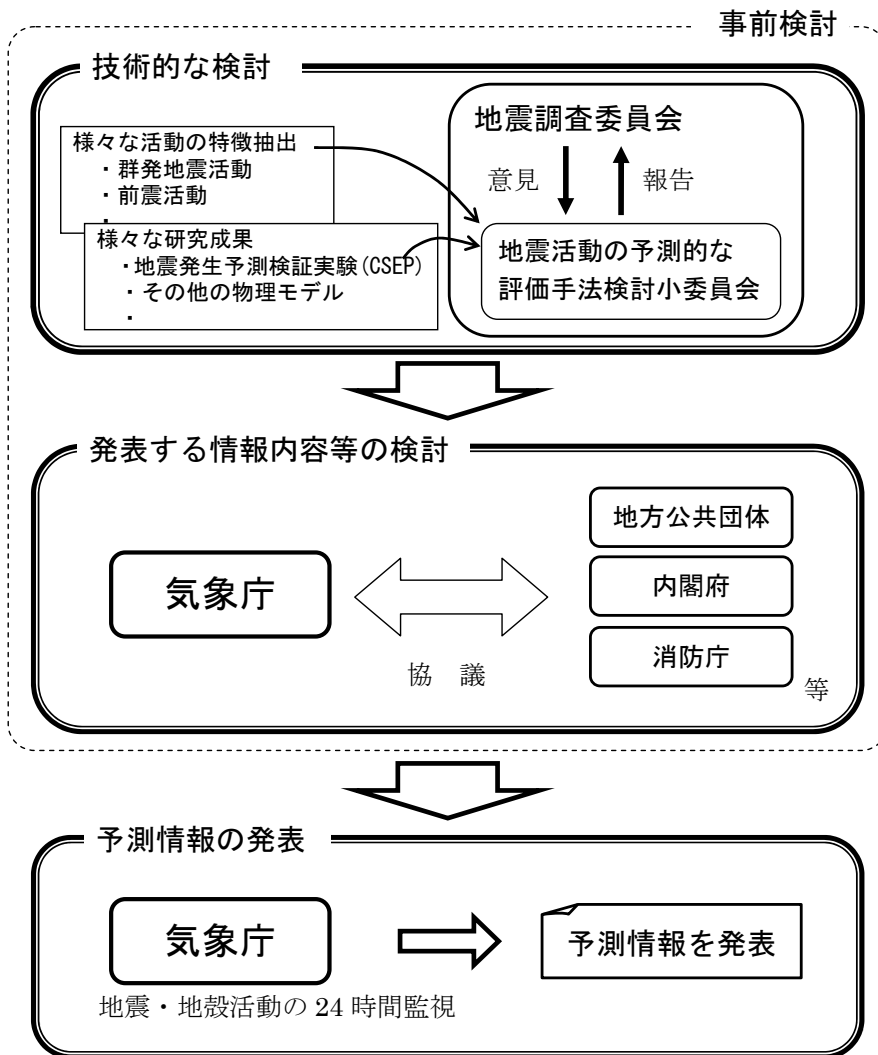


図1
 予測的情報の検討体制および
 発表体制

2. 伊豆東部で発生する地震活動について

2-1 地震活動の概要

伊豆半島東部の伊東市の沿岸からその沖合の領域（以下、「伊豆東部」と記述する）では、1978年11月23日頃から群発地震活動が始まり、11月26日頃からは体を感じる地震が多発し始め、12月3日にはマグニチュード（M）5.5の地震が発生し、熱海市網代で震度4を観測した。12月10日頃にはその活動は低下したものの、その後も活発な群発地震活動が繰り返し発生した。群発地震活動は、これまでの約30年間で46回¹（2010年8月時点）発生しており、1980年代～1990年代は毎年の様に活発な活動が発生していた（図2）。また、1989年6月30日から始まった群発地震では、地震の数が低下し始め、その後7月13日に、伊東市沖の手石海丘で海底噴火が発生した。

この地域では、1930年にも震度5を7回観測するような活発な地震活動があり、Kuno（1954）は地下深部のマグマ活動の可能性を指摘していた。

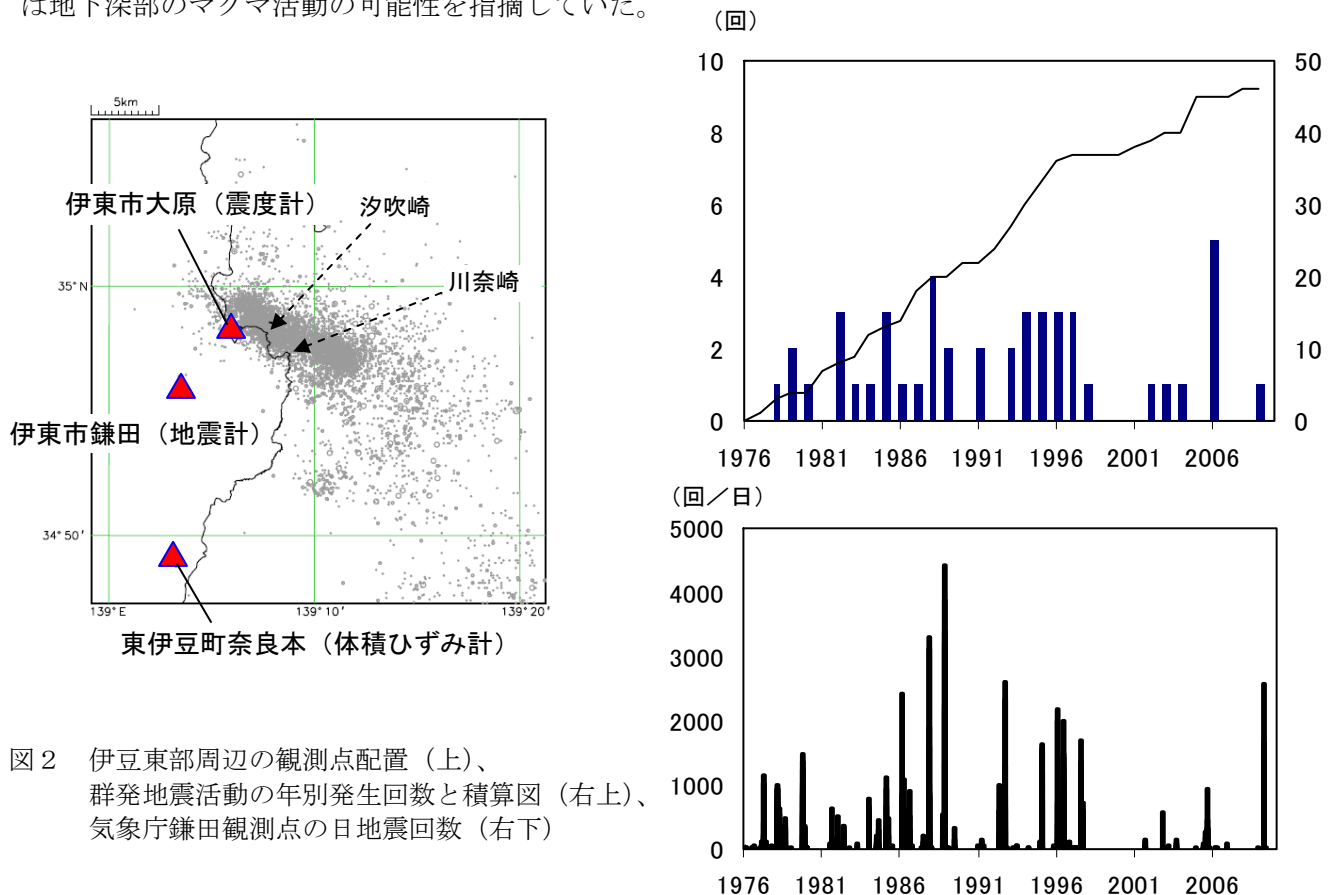


図2 伊豆東部周辺の観測点配置（上）、群発地震活動の年別発生回数と積算図（右上）、気象庁鎌田観測点の日地震回数（右下）

伊豆東部の群発地震の活動域は、主に汐吹崎から川奈崎の沖合を中心とする、北西－南東方向のおおよそ20kmの範囲にあり、群発地震は数日～10日程度、長い場合には1ヶ月程度続く場合もある。M5クラスの地震が複数発生することもある。これまでに発生した最大の地震は1980年のM6.7の地震（網代で震度5）である。また、伊豆東部の地震活動ではしばしば顕著な地殻

¹ 気象庁の鎌田地震観測点における、S－P時間6秒以内、速度型地震計の上下動成分の最大振幅40 μ kine以上（気象庁地震予知情報課，2005）の地震が、任意の24時間で25回以上観測された活動

変動が観測される。さらに、群発地震の活動域が伊東市の市街地に近いことから、M5クラスの地震が発生すると伊東市を中心として震度5弱程度の強い揺れに見舞われ、被害を伴うことがある。最近では2009年12月にM5.1、M5.0などの地震を含む群発地震活動が発生し、負傷者7名、住家一部損壊278棟などの被害が生じている（被害は総務省消防庁による）。

2-2 既往の調査研究成果

伊豆東部付近は大室山などの単成火山が分布している火山地帯であり、これらの単成火山は総称して伊豆東部火山群と呼ばれている。1989年の伊東市沖の手石海丘での海底噴火は、有史以来、伊豆東部火山群での初めての噴火であった。

伊豆東部の群発地震活動の原因として、地下深部でのマグマ活動の可能性が指摘されていたものの（例えば Kuno, 1954 など）、そのことを示す直接的な観測事実が得られていなかったが、この噴火により、これまで伊豆東部で発生していた群発地震活動の原因がマグマ貫入であったことが明らかになった。島崎（1989）や Okada & Yamamoto（1991）などは、群発地震活動の際に周辺で観測された地殻変動データを説明するために、ダイク貫入による開口型断層モデルを提案した。また、Morita et al.（2006）は、地殻変動データから推定されるマグマの体積と震源データを基にしたダイクの面積を用いて、深部マグマだまりから浅部へマグマが上昇する過程を定量的に説明した。群発地震活動の際には気象庁が東伊豆町に設置している体積ひずみ計（以下、「東伊豆」）でも縮みの変化が観測されており、宮村他（2010）は東伊豆で観測された変化量と、他の研究で得られたマグマ貫入量のデータを整理し、両者に良い相関があることを指摘している。

また、東京大学地震研究所（阿部）・気象庁地震予知情報課（1998）は、東伊豆の縮みの変化量と群発地震活動の規模との相関関係を指摘し、活動初期に出現するひずみ24時間変化量の最大値を基に群発地震活動の規模（地震回数、活動日数、日回数100回以上の日数）を予測する式を提案した。ただし、途中で活動が急変した1988年や1989年の事例については、相関関係から外れることや、最大地震の規模はひずみ24時間変化量との相関が良くないことから例外事例として扱っていた。

その後、2000年代に入ってから群発地震活動はやや低調となり、例えば2002年5月や2006年11月の活動ではひずみ変化量から予測される地震数に比べて発生した地震数は少なく、従来の回帰直線からは外れているなどの指摘がある（気象庁地震予知情報課，2002，2007）。

3. 伊豆東部の地震活動の特徴

3-1 マグマ貫入と地震活動について

2-2で述べたとおり、伊豆東部の群発地震活動は地下深部のマグマが浅部に貫入することで引き起こされている。その地下深部からのマグマの貫入量と地震活動の規模との関係について、図3は、過去の群発活動時におけるマグマ貫入量と震源分布の断面積（北西-南東方向鉛直断面上での震源域の広さ）の関係を示しているが、マグマ貫入量に応じて震源分布の断面積が大きくなっていることがわかる。また地震活動の規模（ここでは気象庁の鎌田地震観測点（以下、「鎌田」という）の地震回数）もその断面積と比例関係にある。すなわち、地震活動の規模はマグマ貫入量と相関がある。

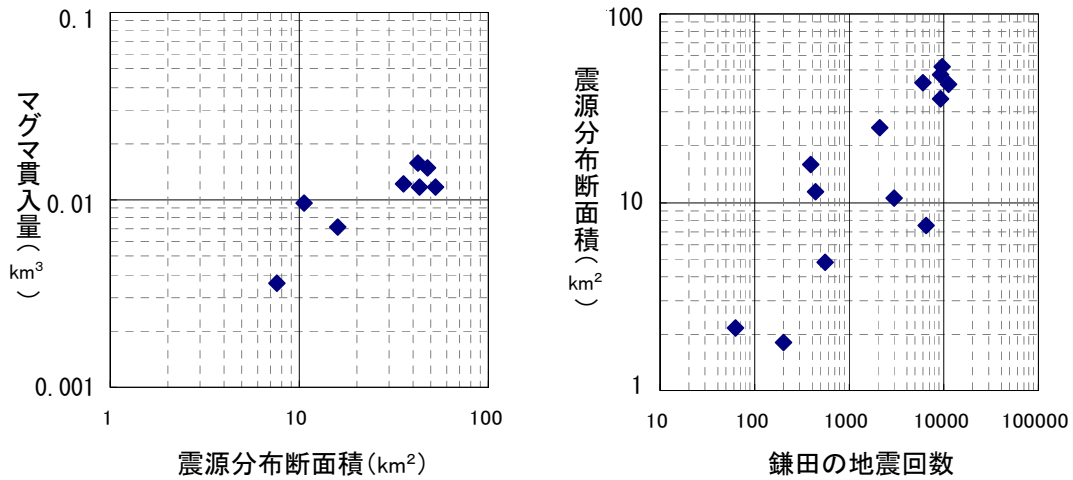


図3 マグマ貫入量と震源分布断面積(左、宮村他(2010)に掲載されたデータを元に作成)、震源分布断面積と鎌田の地震回数(右)

また、群発地震の活動時には、活動域の周辺では明瞭な地殻変動が観測される。東伊豆でも縮みの変化が観測されており、その総変化量及び24時間変化量の最大値はマグマの貫入量に対応したものとなっている（宮村他，2010：図4）。

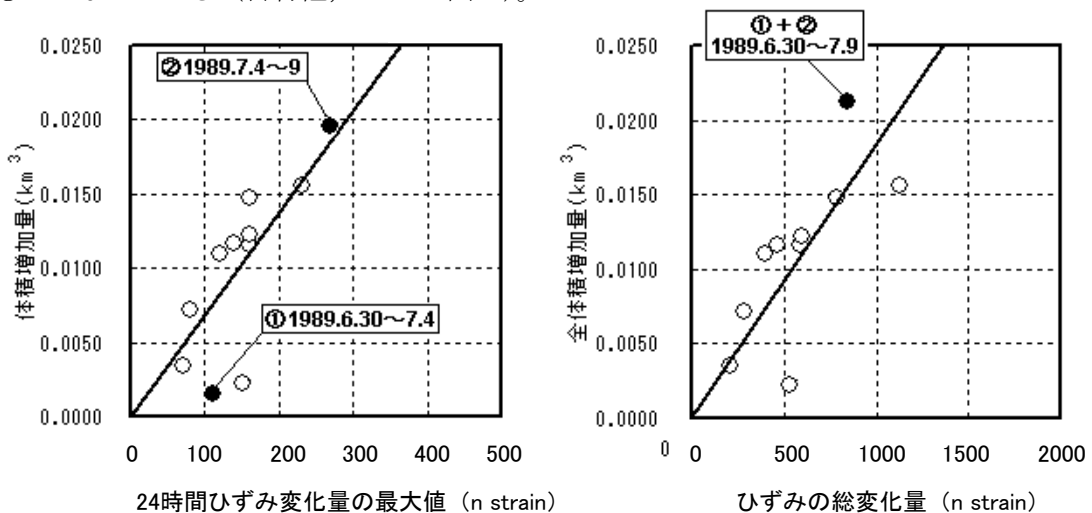


図4 マグマによる体積増加量と東伊豆のひずみ変化量

以上のように、地下深部からマグマが貫入することでその貫入量に応じた地震活動が発生し、またその貫入量に応じたひずみ変化が観測されてきている。つまり、

- ・ マグマ貫入量と地震活動の規模（地震回数）は相関がある。
- ・ マグマ貫入量と東伊豆のひずみ変化量には相関がある。

という特徴を見出すことが出来る。

なお、ひずみ変化量の「総変化量」および「24時間変化量」はそれぞれ、

- ・ 総変化量：1回の地震活動の開始時と終了時の観測値の差
- ・ 24時間変化量：1回の地震活動の活動中における24時間の観測値の差

を指す。ひずみ計の記録からの読み取りの例を図5に示す。

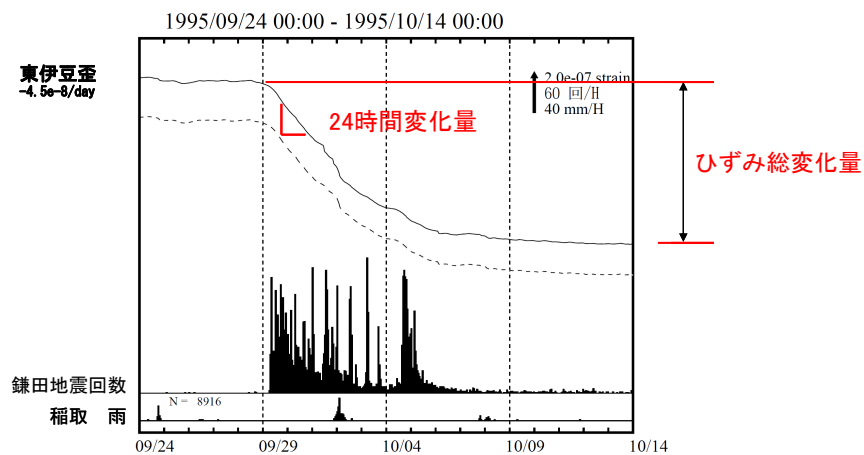


図5 ひずみ変化量の読み取り例

3-2 マグマ貫入と東伊豆のひずみ変化

3-1で述べたとおり、マグマの貫入量と東伊豆のひずみ変化量の間には相関がある。ここでは、その関係について検討する。図6に過去の地震活動における、マグマ貫入量と東伊豆のひずみ変化量との関係を示しているが、この図から、マグマの貫入量（ V 百万 m^3 ）と東伊豆の最大ひずみ24時間変化量（ S_{24} n strain）およびひずみ総変化量（ S_{total} n strain）との間に以下のような関係を導き出すことが出来る。

$$V = 7.42 \times 10^{-2} \times S_{24} \quad \dots \quad \text{最大ひずみ 24 時間変化量} \quad (1)$$

$$V = 1.92 \times 10^{-2} \times S_{total} \quad \dots \quad \text{ひずみ総変化量} \quad (2)$$

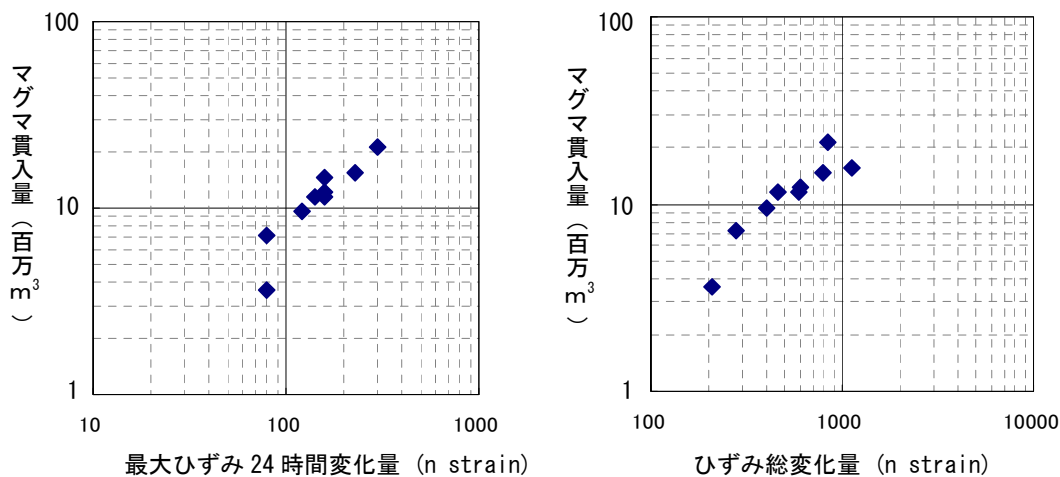


図6 マグマ貫入量と東伊豆の最大ひずみ24時間変化量、ひずみ総変化量

ここで、東伊豆のひずみ24時間変化量、すなわち変化速度とマグマの貫入量との相関について検討する。マグマがダイク状に地殻浅部へ上昇するモデルを考え、貫入するマグマの量について、開口量を変えた300万、600万、1200万 m^3 の3通りを仮定し、それぞれの場合における東伊豆のひずみ総変化量とひずみ24時間変化量の違いを比較した（図7）。この結果から、ひずみ総変化量だけでなく、ひずみ変化速度（ひずみ24時間変化量）とマグマ貫入量に相関があることが説明できる。なお、マグマの上昇は浮力に依ると考えた場合（Morita et al.,2006）、マグマおよび周囲の岩盤の物性が変わらなければ上昇速度は量に依らず一定となる。

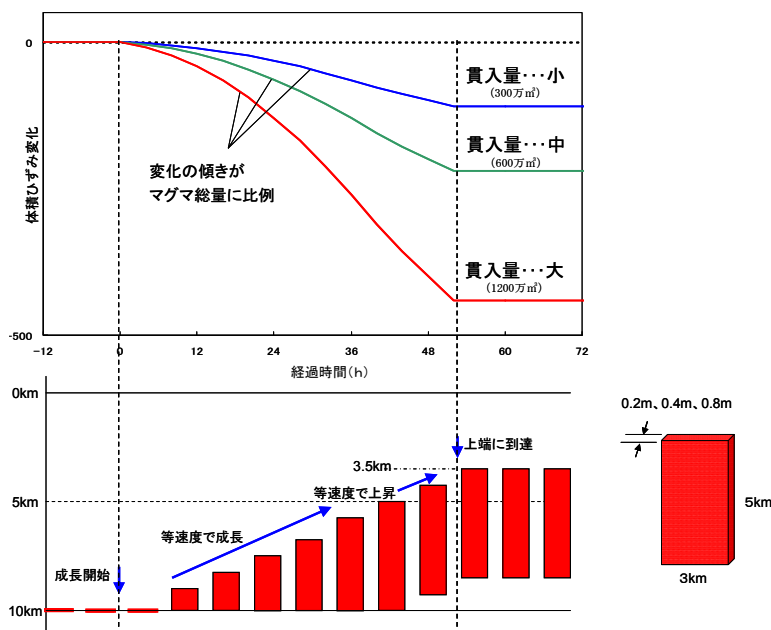


図7 マグマ貫入モデル
上：観測されるひずみ変化
下：マグマ上昇模式図

ここでは、深さ 10km から 3 km/日 で成長し、深さ 5 km まで成長した後、3 km/日 で浮上するモデルを仮定した。深さ 10km から開始することについては、東伊豆のひずみ変化の傾向から設定した。図 8 にはマグマの深さの違いによる、東伊豆のひずみ変化の違いを計算した結果を示した。マグマが深部から上昇してくる場合、概ね深さ 10km より深いところから上昇する場合には東伊豆のひずみの変化は伸びとなり、概ね深さ 10km より浅いところから上昇する場合には縮みの変化が観測されることになる。過去の群発地震活動時に東伊豆で伸びの変化が観測されたことがないことから、マグマは伊東市の東方沖の地下 10km 付近から上昇を始めるものと考えられる。

なお、国土地理院 (2006b) は地殻変動データから、地下深部に水平なマグマだまりがあり、そこからマグマが供給されるモデルを提案しており、そのマグマだまりの深さを 10km 付近としている。東伊豆のひずみ変化もこのモデルと整合している。

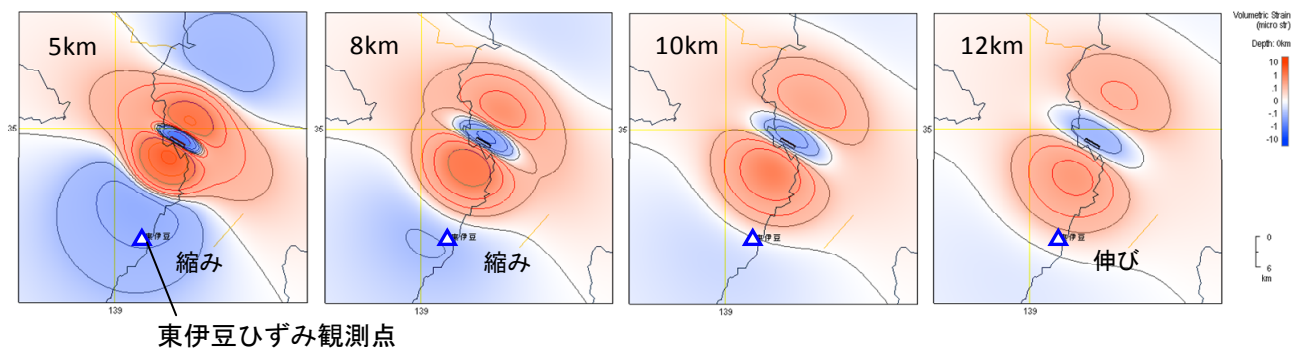


図8 マグマの深さによる、東伊豆のひずみ変化傾向の違い

以上で示したように、ひずみの総変化量はマグマの貫入量に比例している。また、ひずみ変化の傾きもマグマの総量に比例していることがわかる。3-1で述べたように、群発地震活動の規模はマグマの貫入量に比例することから、群発地震活動の規模は東伊豆のひずみの総変化量と相関があり、またそれはひずみ変化の傾き(単位時間あたりの変化量)とも相関があることになる。そして、過去の地震活動においては、東伊豆の24時間変化量の最大は活動初期に現れることが多く、この変化量を観測することで群発地震活動の規模を早い段階で予測することが可能になると考えられる。

なお、これまでの群発地震活動の際、体積ひずみ変化や傾斜変化等の地殻変動が地震活動に先行する事例があることが指摘されている(気象庁地震予知情報課,1997;防災科学技術研究所,1998など)。これは、深部からマグマが上昇する際、上昇し始めたところが高温のために脆性破壊を起こしにくい場所であると地震は発生せずに地殻変動のみが観測され、それよりも浅い場所へ上昇してくると地震が発生し始めるものと考えられる。

3-3. マグマ貫入の深さによる活動状況の違い

過去の地震活動では、2000年代に入ってから活動のように、ひずみ変化量から予測される地震数に比べて発生した地震数が少ない事例が見られる。このことについて、個々の地震活動を検討したところ、マグマが貫入した深度に依って活動の規模が大きく異なることが分かった。

図9に鎌田の地震回数と活動期間における東伊豆におけるひずみ24時間変化量の最大値の関係を示す。図中のシンボルの違いは地震活動の発生場所（深さ）の違いを示している。●は浅い場所（概ね6 km 以浅）まで震源が上昇してきた活動であり、◆は深い場所に留まっていた活動である。発生場所の違いによって活動の規模が大きく異なることがわかる。これは、マグマが何らかの原因で図7のように上昇しきれず、狭い範囲にしか貫入できなかった場合、マグマ貫入量と比較して影響面積が相対的に小さくなり、その結果群発地震活動の規模も小さくなる、と考えることで説明が可能である。

そして、図中の直線のうち、青い実線は深い場所に留まった活動の大まかな回帰直線、赤い実線は浅い場所の、特に地震回数が多いグループを結んだ線である。赤の点線は東京大学地震研究所（阿部）・気象庁地震予知情報課（1998）による回帰直線である。また東京大学地震研究所（阿部）・気象庁地震予知情報課（1998）が例外として扱った1988年（図中、18で表示）と1989年（同、20）の2事例については活動初期のひずみ24時間変化量の最大値と鎌田地震回数との関係も併せて示した（図中○）。浅い／深い、それぞれの事例でひずみ24時間変化量と鎌田の地震回数との間に相関関係が見られている。

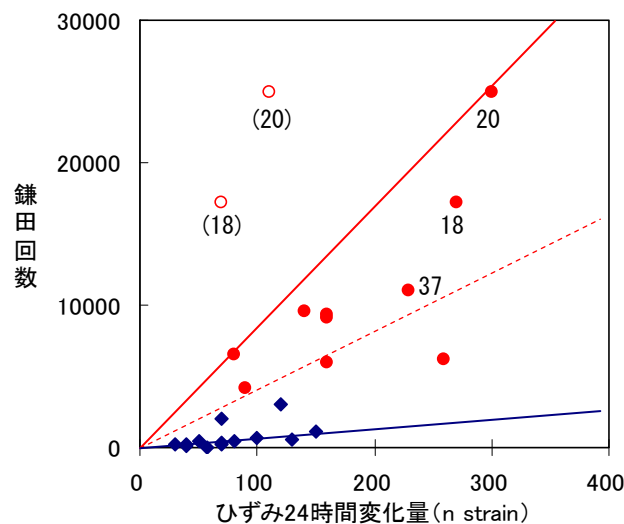


図9 東伊豆のひずみ24時間変化量と鎌田の地震回数

しかし、活動場所は活動期毎に異なることから、鎌田から震源までの距離は近い場合で、6～7 km、遠い場合には12 km 程度もしくはさらに離れる場合もある。このことから鎌田で計数している地震のMの下限は活動毎に異なっており、鎌田観測点の地震回数だけで活動規模の正確な比較はできない。そこで、以下のような方法で、全ての活動期間毎にM1.0以上の地震回数のデータセットを作成した。なお、M1.0とは近年の観測網で群発地震活動時においてもほぼ捕捉できているMの下限である。

- ・活動期間中に、気象庁によって震源決定された地震の規模別頻度分布からグーテンベルク・リヒターの式 (G-R 式) を求める。
- ・鎌田で計数している地震の下限Mの値と回数のデータを、上記の規模別頻度分布に描き加える。なお、計数している地震の下限Mは観測点からの震央距離を基に算出した (図 10)。
- ・鎌田の地震回数が概ねその G-R 式の延長上に乗ることを確認する。全ての事例で G-R 式から計算される回数の倍半分の範囲に収まっていることを確認した。
- ・G-R 式からM1.0以上の地震回数の推定を行う。

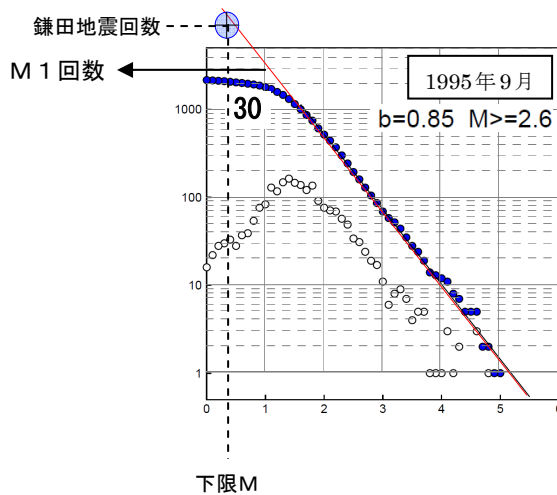


図10 Mが求められた地震の規模別頻度分布と鎌田地震回数 (青丸) 1995年9月の事例 (No.30)

このようにして得られたデータセットは全活動期間を通じた均一なものとなっていると考えられる。以下ではこの $M \geq 1.0$ の地震回数データ (以下、「M1回数」という) を活動予測の検討に用いる。

図 11 には東伊豆のひずみ 24 時間変化量の活動期間中の最大値とM1回数の関係を示した。図中の線は、図9と同様、それぞれ深い場所に留まった活動の大まかな回帰直線と、浅い活発な活動を結んだものである。

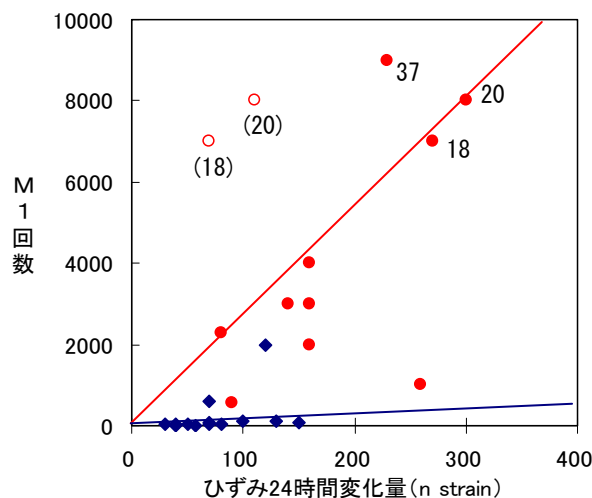


図11 東伊豆ひずみ24時間変化量とM1回数 (活動期間毎)

この図の中で、1998年4月の事例(37)は、ひずみ24時間変化量に比べてM1回数の割合が1988年、1989年よりも多くなっている。この事例(37)については、活動途中で地震が数回にわたり急増しており、複数回にわたってマグマの貫入があったと考えられる事例である。新たなマグマの貫入を繰り返し、その結果、地震回数が多くなったと考えられる。

過去の事例を検証してみると、この様に活動の最中にその様子が急変するようなケースがいくつか見いだされる。図12には1988年と1998年のケースを例として示した。図中、ひずみの変化がその前に比べて急になるとともに地震活動が高まったところを赤矢印で示した。活動の途中でそれぞれ2回と3回のマグマ貫入があったと解釈することができる。

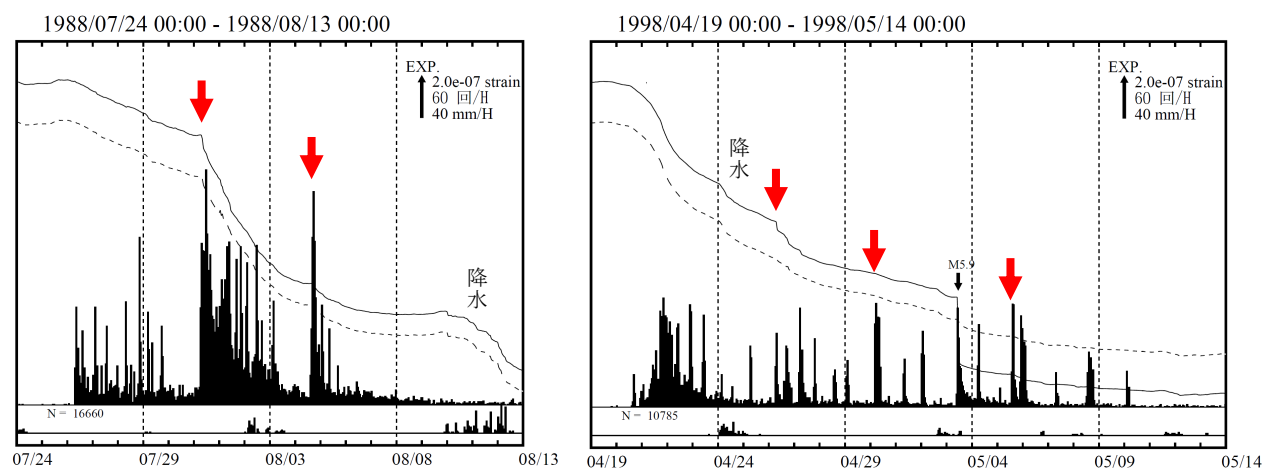


図12 ひずみの変化傾向が変わった事例 (左：1988年、右：1998年)

この様に、複数回のマグマ貫入があったと考えられる事例は上記の例以外にも見られている。このような事例については、活動初期の東伊豆のひずみ24時間変化量から活動期間全体のM1回数を予測することは困難である。そこで、ひずみ変化の様子から複数回のマグマ貫入(ステージ)があったと見られる活動については、ステージ毎にひずみ24時間変化量の最大値とそのステージ期間内のM1回数を求めた(図13)。

深い場所に留まった活動と、やや幅を持っているが浅い場所まで上昇してきた場合の活動とに分かれている。

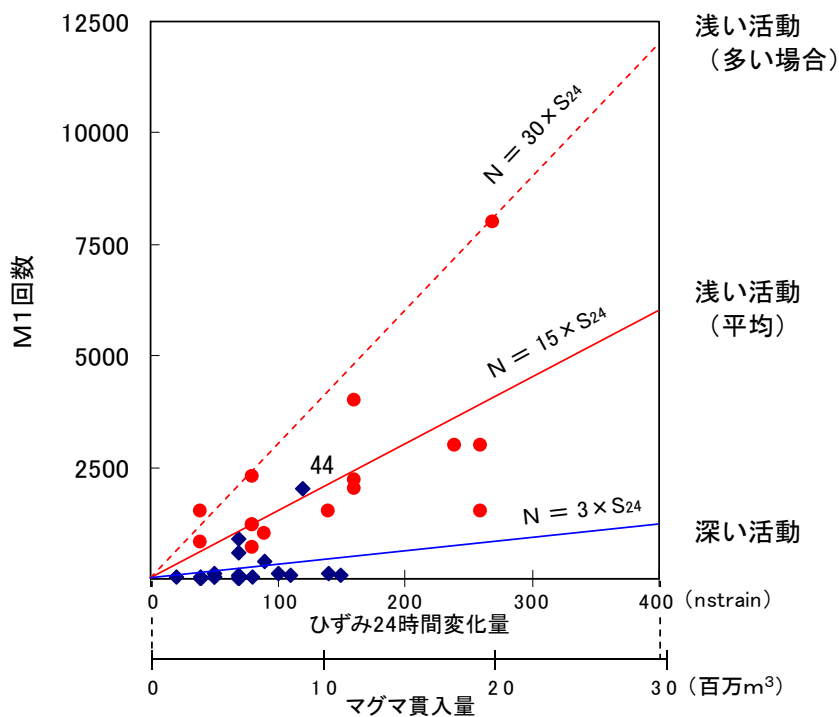


図13 各ステージにおける東伊豆のひずみ24時間変化量およびマグマ貫入量とM1回数

活動場所の深さを考慮した上で、東伊豆のひずみ24時間変化量の最大値 (S_{24} nstrain) と活動期間内に発生するM1回数 (N_{M1}) との関係を求めると、おおよそ以下のようになる。

浅い活動 $N_{M1} = 15 \times S_{24}$ (平均) (3)

$N_{M1} = 30 \times S_{24}$ (多い場合) (4)

深い活動 $N_{M1} = 3 \times S_{24}$ (5)

* 図中、44 と付したものは2006年4月の活動である。この活動の震源は概ね6~7kmよりも深く、浅深の区分では「深い活動」として整理される。ただし、その際の活動域となっている川奈崎沖の東方沖で発生する地震の震源は、過去のものも含め、他の場所よりもやや深いものも多く、この領域では地震を発生しうる深さがやや深い可能性がある。

以上で述べたとおり、マグマ貫入の深さの違いにより、地震活動の状況が異なる。そのため、地震活動のb値についても、浅い活動と深い活動に分けて検討を行った。

図14には気象庁カタログから求められる活動ごとの規模別頻度分布を重ね合わせて示した。その際、深さ6km以上まで上昇してきた活動と、それより深い場所に留まった活動とに分け、浅い活動についてはM3.0以上の積算回数を1とした場合の相対度数で、深い活動についてはM1.0以上の積算回数に対する相対度数で規模別頻度分布を示している。これを基に得られる平均的なb値は、浅い活動では0.8程度(0.7~1.0)であるのに対し、深い活動では1.1程度(1.0~1.5)の大きな値となっている。

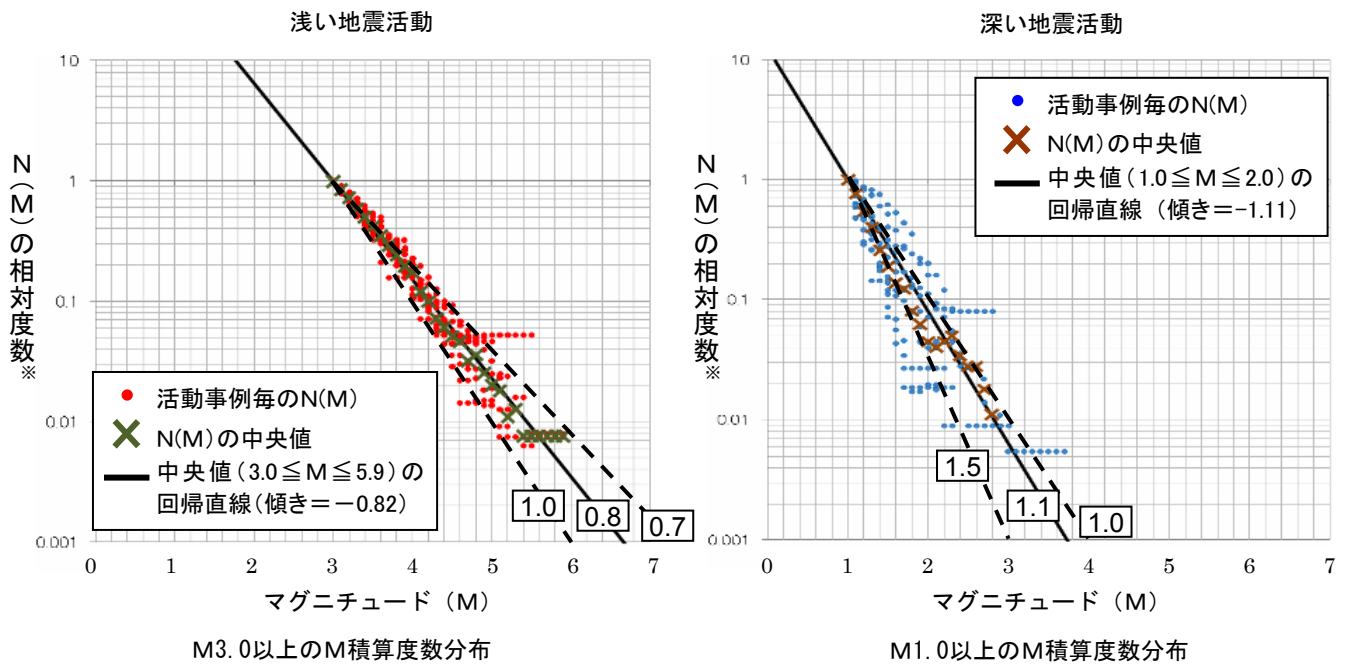


図14 浅い活動と深い活動における、規模別頻度分布の比較
 (浅い活動、深い活動の事例毎にそれぞれM3.0もしくは1.0の度数で規格化し、重ねて示した)

Wyss et al. (1997) は、深部 (概ね 7 km 以深) ではマグマ貫入が繰り返されてきて、周辺の岩盤の破碎が進行して大きな地震が起きにくくなっているために b 値が大きく、一方で浅い部分については逆に b 値が小さいことを指摘している。

以下に、マグマ貫入の深さの違いによる活動の特徴をまとめておく。

	深さ	マグマの断面積	地震回数	b 値
深い	概ね 10~6 km	小さい	少ない	大きい
浅い	概ね 6 km 以浅	大きい	多い	小さい

3-4 最大規模の地震とその震度の推定

3-3で述べたように、東伊豆の24時間ひずみ変化量から、M1回数を求めることが出来る。また、浅い活動と深い活動について、平均的なb値が求められている。そのため、G-R式を用いることにより、その活動における最大規模の地震のM（以下、「最大M」）を推定することが出来る。

最大Mの推定手法を以下に示す。

- ・東伊豆における24時間ひずみ変化量とM1回数の関係式（式（3）～（5））からM1回数を推定する。
- ・活動場所（深／浅）によって、適切な平均b値を選択する。
- ・G-R式の直線が回数 $N(\Sigma n) = 1$ となるMを最大地震の規模とする。

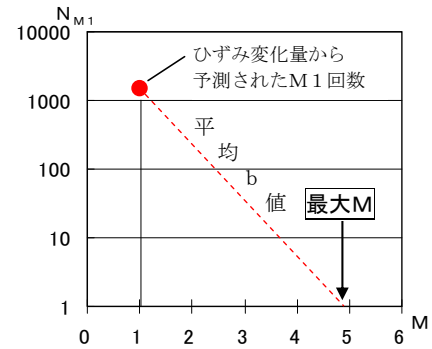


図15 最大地震の規模予測の概念図

図15にはその概念図を示した。上記の様な経験的に求められた浅い地震および深い地震それぞれの平均的なb値を用いた場合の最大Mは以下の通りである。

$$M = \log N / 0.8 + 1 \quad \dots \quad \text{浅い活動の場合}$$

$$M = \log N / 1.1 + 1 \quad \dots \quad \text{深い活動の場合}$$

この手法を過去の活動に適用して最大Mを推定し、実際に発生した最大Mとの差の頻度分布を図16に示した。多くの事例で±0.5の差に収まっており、本手法は有効であると考えられる。

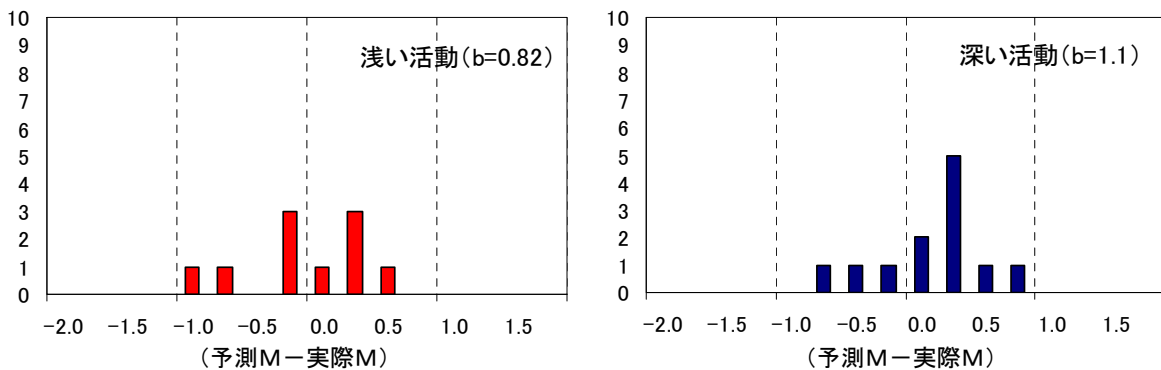


図16 過去の活動における本手法による推定値と実際に発生した地震とのMの差の頻度分布

また、最大Mを緊急地震速報で用いられている震度予測式（気象庁地震火山部，2008）に適用することにより、活動域に最も近い震度観測点である伊東市大原（伊東市役所）における最大震度を予測することも可能である。

3-5 震度1以上を観測する地震の回数

3-4では、M1回수와平均的なb値を用いることにより、最大Mを推定することが可能であると述べたが、同じ考えにより震度1以上を観測する地震の回数（以下、「震度1回数」）についても推定することが出来る。

震度1回数の推定手法を以下に示す。

- ・東伊豆における24時間ひずみ変化量とM1回数の関係式(式(3)～(5))からM1回数を推定する。
- ・震度1となる地震の下限Mを算出する。
- ・下限M以上の総地震数を震度1回数とする。

図17にはその概念図を示した。

ここで震度1となる地震の下限Mの算出方法を検討する。

これまでに伊東市大原(伊東市役所)の計測震度計で震度1(計測震度0.5)以上を観測した地震について、そのMと震央距離の関係を図18に示した。この図から、震央距離D(km)と下限Mとの間に以下のような関係が得られる。

$$M = 2.0 \times \log D + 1.0 \quad (6)$$

図中にはその線を示した。

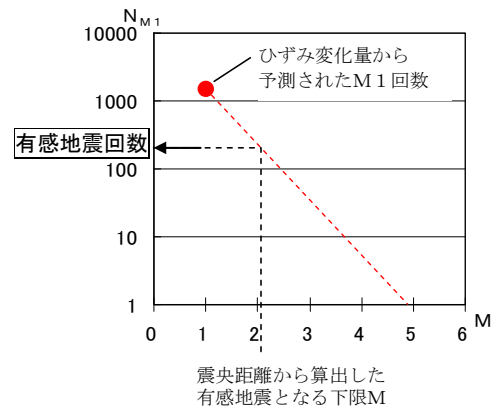


図17 震度1回数の予測概念図

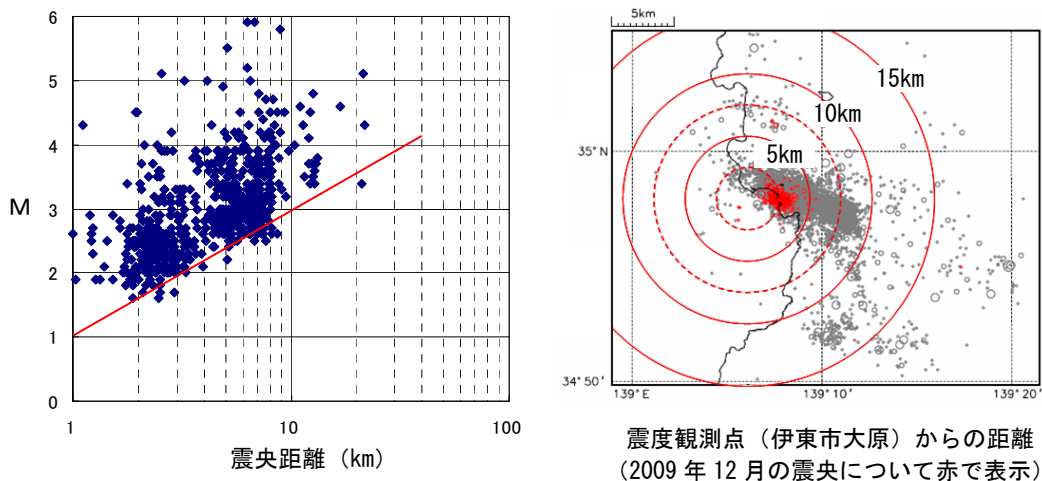


図18 伊東市大原における有感地震のMと震央距離(左)、伊東市大原からの震央距離(右)

例えば、2009年12月の活動では震度観測点から震央までの距離は概ね3kmで、M2程度で震度1が観測されることになる。この例の場合、東伊豆の24時間ひずみ変化量から予測したM1の回数(1200～2400回程度)を基に平均的なb値(浅い活動:0.8)を用いて算出した震度1回数は200～400回程度である。実際に観測された震度1以上の地震の回数は257回であった。

3-6 活動期間

1) 「活動期間」について

活動期間については、気象庁による伊豆東部の群発地震の活動期間の定義がある。表1にその定義を示す。

表1 鎌田の地震回数による活動期間の定義（気象庁）

活動開始	24時間で25回以上 (24時間の最初の時間が属している日が開始日)
活動終了	日回数10回以下が5日連続 (5日連続した最後の日が終了日)

表1における、鎌田で計数している地震の下限Mは概ねM0.5ないし1.0程度であり、このような小さな地震の発生状況を基にした活動期間は、住民が実感する（揺れを感じる）群発地震活動の期間とは乖離がある。このため、ここでは震度1以上を観測する地震が発生するような、地震活動の活発な期間を対象とする。

伊豆東部における群発地震活動はマグマの貫入によることから、マグマ活動が継続していると考えられる、地殻変動が続いている期間、すなわち東伊豆において縮みの変化が観測されている期間を活動期間とした（以下、「ひずみ期間」）。活動の開始はおおよそのノイズレベルを上回る変化が見られはじめた時刻で、数時間程度の誤差で読み取ることができる。一方、活動の終わりは、前24時間のひずみ変化量が10n strainを最初に下回った時刻とした。

このようにして求めたひずみ期間と、活動初期に観測されるひずみ24時間変化量の最大値との関係を図19に示した。複数回のマグマ貫入があった事例（図中の18,20,37）なども含まれるが、一般的に両者には相関関係のあることがわかる。

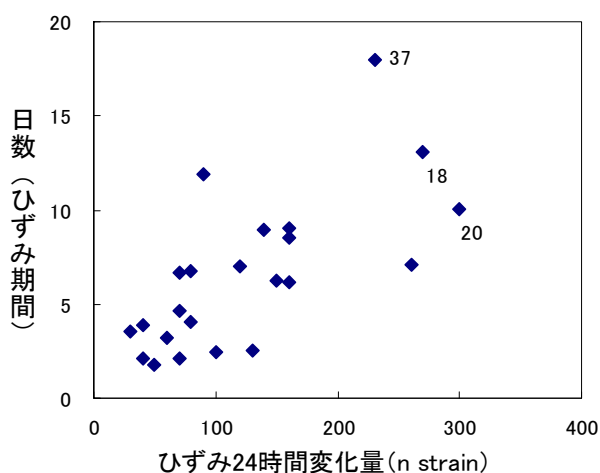
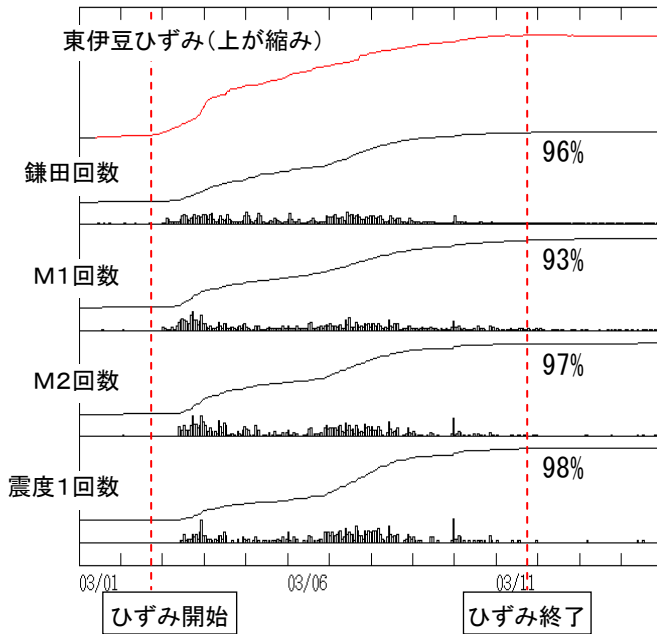


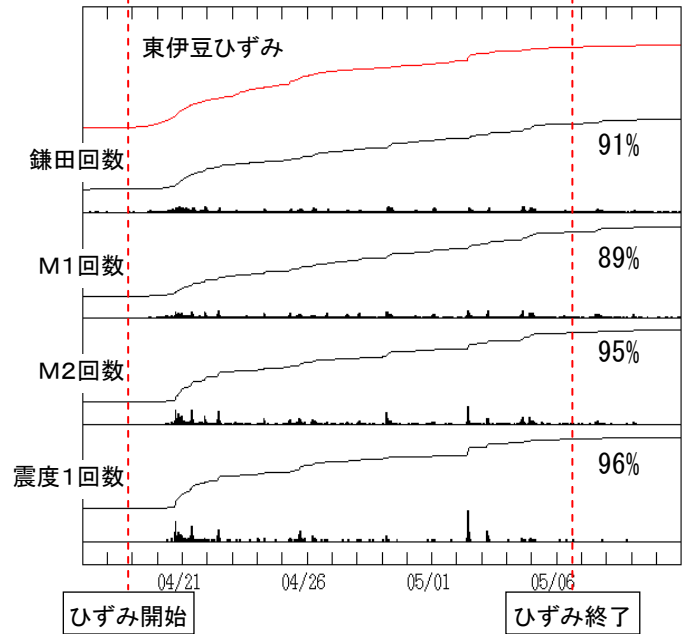
図19 東伊豆のひずみ24時間変化量とひずみ期間

ここで、今回定めた活動期間の定義についての妥当性を検証しておく。

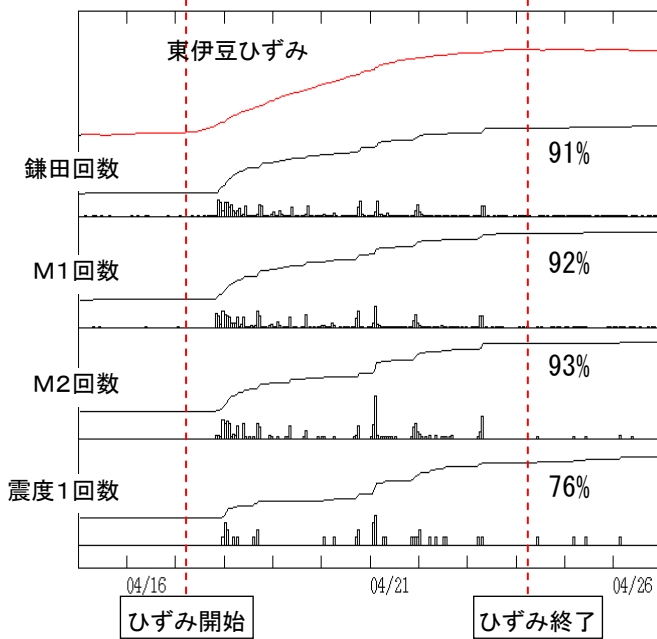
1997年3月の活動



1998年4～5月の活動



2006年4月の活動



2009年12月の活動

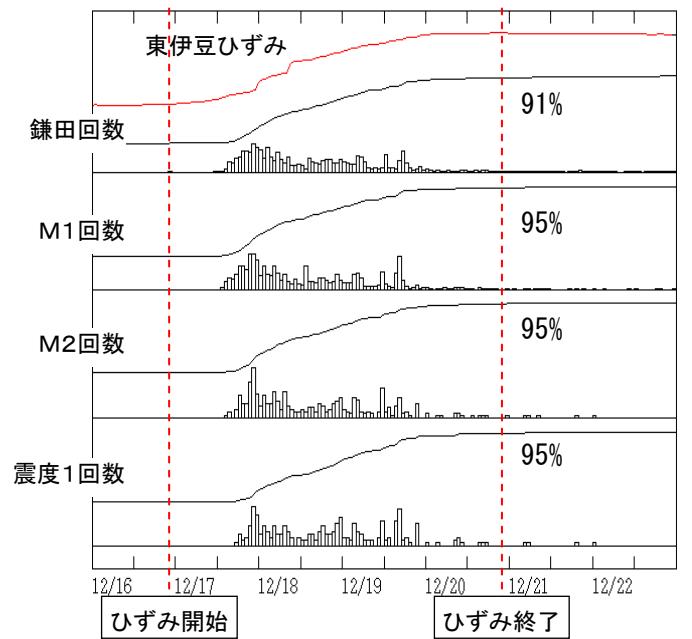


図20 ひずみ期間に発生した地震数（鎌田地震回数、M1回数、M2回数、震度1回数）の割合（鎌田の地震回数を基にした期間に発生した地震を100%とした）

図20には、東伊豆のひずみ変化（上方向が縮み）と共に、地震数（鎌田地震回数、M1.0以上の回数：M1回数、M2.0以上の回数：M2回数、震度1回数）の積算グラフを示した。それぞれの大きさは鎌田の地震回数による活動期間内の総数で規格化している。各回数積算グラフの数値（%）は、鎌田の地震回数による活動期間における総数のうちのひずみ期間内に発生した回数

の割合である。赤の破線はひずみ期間の開始と終了を示す。

鎌田の地震回数による活動期間内に発生した地震の9割がひずみ期間内に観測されている。震度1以上を観測する地震もひずみ期間内に大半が発生している。このことは、群発地震活動の主たるものはマグマ貫入によって発生していることを意味している。したがって、地震活動の活発な期間として、このひずみ期間を用いることが適当であると考えられる。

2) 複数回のマグマ貫入と活動期間

次に、1988年や1989年の事例のように、活動の途中でひずみの変化傾向が大きく変わる場合、すなわち複数回のマグマ貫入があったと考えられる活動における活動期間について検討を行ってみる。

ダイク成長モデル(図7)で示したとおり、マグマの上昇に応じてひずみ変化が観測されており、この変化が見られなくなるとそのマグマ活動が終了したと考えられる。2009年12月の活動(図20右下参照)の様に、活動初期の急激なひずみ変化の後、徐々に変化傾向は小さくなり、やがて収まっていくことが1回の活動のパターンで、その活動期間は概ね数日程度である。しかし、過去の活動においては活動期間中に落ち着きかけたひずみ変化が再び大きく変化するようなことを繰り返し、長期にわたってひずみの変化が観測された事例(図12)が見られる。これらは複数回にわたってマグマの貫入(上昇)があったものと考えられる。

そこで、これら複数回の貫入があったと見られた事例について、ひずみの変化傾向を基に活動期間を複数のステージに分け、各ステージにおけるひずみ24時間変化量とその期間を図21に示した。図には複数のステージが見られない活動についても併せて示した。また図には1ステージあたりのひずみ活動期間の頻度分布も併せて示した。

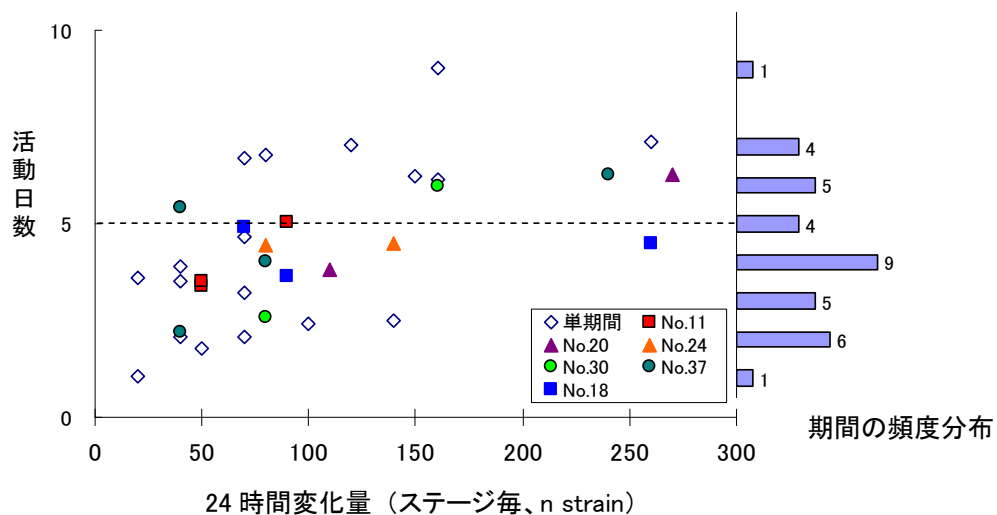


図21 各ステージの活動期間とひずみ24時間変化量(左)、活動期間の頻度分布(右)

ひずみ24時間変化量は数10 nstrainから約250 nstrainまでと大きくばらついているにも関わらず、活動期間には大きな差はない。これはマグマの上昇モデルで見たように、その上昇速度

が一定であることからマグマ活動の期間も一定であることと一致している。

また頻度分布図では1ステージあたりの活動日数は4日間程度の頻度が高い。7日以上となる事例も見られるが、これらは単ステージの活動として整理されたものばかりであり、実際は複数回の貫入があったにも関わらず、ひずみの変化傾向からは複数ステージに分けられなかった可能性もある。いずれにしても、1ステージあたりの活動日数は平均4日で、長くて1週間程度と整理される。

3) 活動期間の予測について

2) で述べたように、1回のマグマの貫入による活発な活動期間は数日程度であると言える。したがって、活動初期における主要な活動期間の予測は、概ね4日、長くて1週間程度となる。

その後、複数回にわたってマグマが貫入してくることもあるが、その場合の活動期間を事前に予測することは不可能である。そこで、マグマの動きを監視し、新たなマグマ活動が始まったと判断される場合には、さらに4～7日間程度地震活動が継続すると予測する。

なお、地震活動の終わりは、東伊豆におけるひずみ変化の終息をもって終わりとする。

4) 活動期間についてのまとめ

1) ～3) における検討結果を以下に示す。

- ・ 1回のマグマの貫入による活発な地震活動の期間は平均4日、長くて1週間程度である。
- ・ 地震活動の活動な期間は、ひずみの縮み変化の続いている期間と概ね一致する。
- ・ マグマが複数回にわたって貫入してくる場合は、貫入のたびに数日程度活動が長引く。
- ・ ひずみの縮み変化がなくなれば地震活動も終わりとなる。

4. 伊豆東部の地震活動の予測手法について

4-1 本検討で抽出した地震活動の特徴

伊豆東部の地震活動について、3章で抽出した特徴を以下に示す。

- ・ マグマ貫入量と地震活動の規模（地震回数）は比例する。
- ・ マグマ貫入量と東伊豆の24時間ひずみ変化量には相関がある。
- ・ マグマ貫入による地殻変動は地震活動に先行する。
- ・ 1回のマグマ貫入に伴う主要な活動期間は平均4日、長くて1週間程度である。
- ・ 東伊豆におけるひずみ変化が収まるとともに、主要な活動も終わりとなる。

また、地下深部におけるマグマの動きと地震活動との関係は以下のとおりである。

- ・ 地震活動に先行し、深さ10km程度からのマグマ上昇による地殻変動が始まる。
- ・ マグマが上昇し、深さ7～8kmあたりになると地震が発生し始める。
- ・ マグマが深さ4～6kmあたりまで上昇すると、地震活動は活発になる。
- ・ マグマが更に上昇すると、地震はさらに増加する。
- ・ マグマが地表近くまで上昇すると、低周波地震や火山性微動が発生し始める（1989年の噴火時の事例）。

4-2 予測手法の基本的概念

伊豆東部で繰り返し発生している群発地震活動は、マグマの地殻浅部への貫入によって発生する。また、3章や4-1に示したとおり、地震活動の規模は、地下深部から上昇してくるマグマの動きや量と相関があり、また東伊豆のひずみ変化も上昇するマグマの量と相関がある。

したがって、観測された地殻変動データを基に群発地震活動の規模を予測することが可能と考える。3章における検討を基とした予測手法の概念（予測対象、予測項目、予測の流れ）を示す。

○予測の対象とする現象

マグマ貫入によって引き起こされる地震活動

（マグマの動き自体を予測するのではなく、貫入したマグマの動きとその量を推定し、それによって発生する地震活動を予測する。）

○予測を行う項目

- ①活動期間中の最大規模の地震のマグニチュード（M）とその地震による震度
- ②震度1以上を観測する地震の回数
- ③主たる活動期間

○予測手法の概要

予測の流れを以下に記し、その概念図を図22に示す。

1) マグマ貫入に伴う地殻変動を検知

2) 検知した地殻変動よりマグマ貫入量を推定

- ・ 東伊豆の24時間ひずみ変化量とマグマ貫入量の関係式（式（1））を用いる。

*今回整理した方法は、貫入したマグマ量とその位置を直接推定するものではなく、東伊豆のひずみ変化量とマグマ貫入量との経験式に基づくものである。

3) 推定したマグマ貫入量から、地震回数を予測

- ・ひずみ 24 時間変化量とM1以上の地震回数の関係式（式（3）～（5））を用いる。

*地震回数の予測も上記と同様にひずみ変化量による経験式に基づく方法を用いた。
またマグマが深いところでとどまる場合と浅いところまで上昇する場合には関係式が異なるので、マグマの位置を監視して最適な関係式を適用することとなるが、ここでは震源の深さの変化でマグマの動きを間接的に推定する方式を用いた。

4) 最大規模の地震のM（項目①）及び震度1以上を観測する地震の回数（項目②）を予測

- ・3) で予測したM1以上の地震回数と、過去の地震活動から求められたb値から、G-R式を用いて最大規模の地震のMと震度および震度1以上を観測する地震の回数を予測する。なお、震度予測は伊東市役所（伊東市大原）を対象とする。

5) 主たる活動期間（項目③）を予測

- ・地震が多発する、主たる活動の期間を予測対象とする。
- ・1回の（マグマ貫入に伴う）地震活動期間は概ね4日、長くて1週間程度である。
- ・マグマの動きを監視し、2回目以降の貫入があればそれについて言及し、さらに4日～1週間程度地震活動が継続すると予測する。
- ・ひずみの変化が収まるとともに、主たる活動も終息したと判断する。

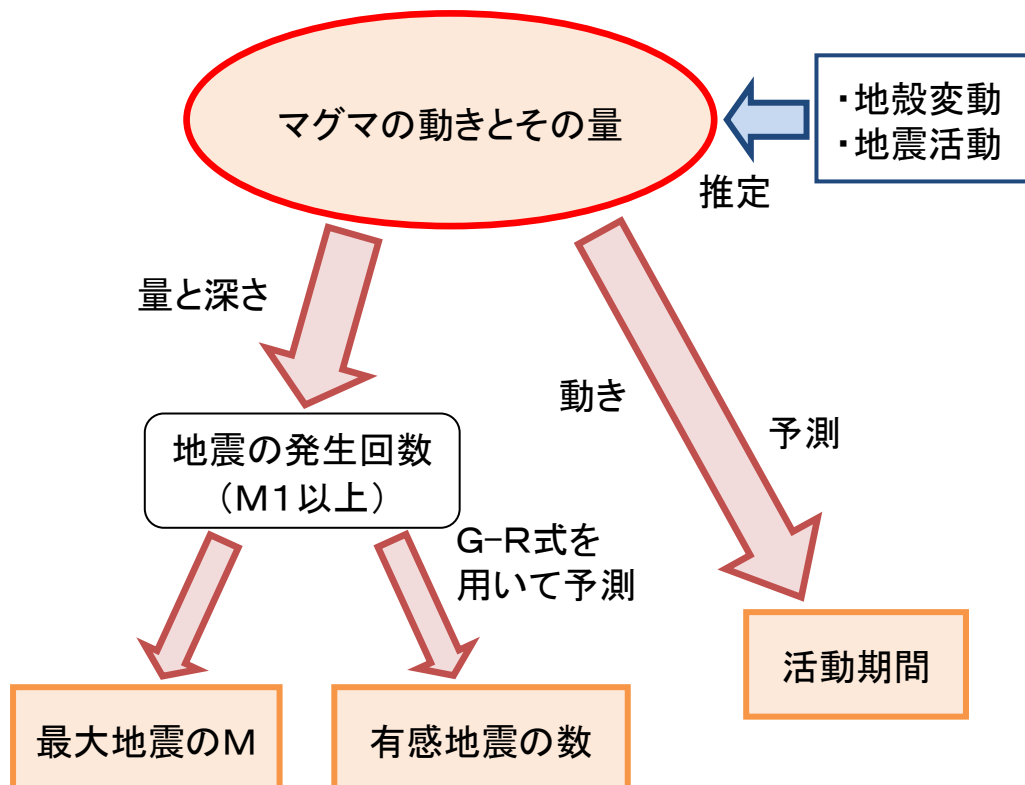


図22 予測手法の概念図

4-3 監視の流れについて

抽出された地震活動の特徴から想定される、伊豆東部の群発地震活動におけるシナリオ、および監視項目や今回とりまとめた予測手法等の概念図を図23に示す。

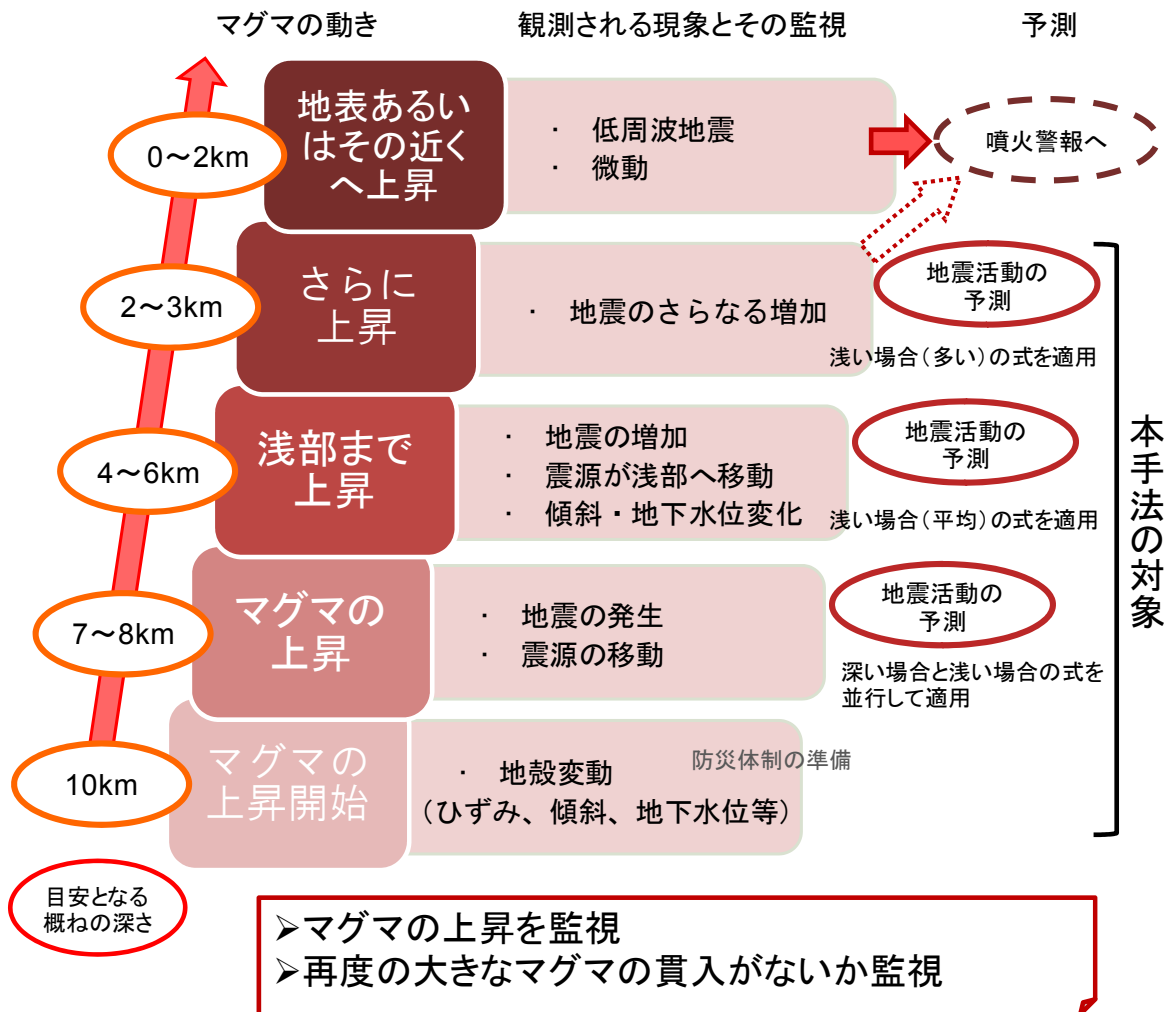


図23 マグマの動きと監視の概念図

5. 防災上の留意事項

(1) 本手法の適用対象

本手法は過去の地震活動から抽出した特徴を基にとりまとめたものであり、過去の活動と同様の形式で発生する地震活動を予測する手法である。そのため、発生場所やマグマ貫入量などが大きく異なるなど、過去の活動とは異なる形で地震活動が発生した場合は、本手法による予測の適用外となることに留意する必要がある。

(2) 群発地震活動終期に周辺で発生するやや大きな地震の対応

本手法はマグマの挙動を把握し、マグマ活動に起因する地震活動を予測するものである。3-6で示したとおり、マグマの活動が終われば活発な地震活動もほぼ終わりとなる。しかし、活発な活動が収まった後も、活動域の端あるいはその周辺で散発的にやや大きな地震が発生する事例が時々見られる。これらはマグマ貫入に伴って生じた地殻ひずみの拡散過程で発生しているものと考えられる。また、マグマ活動によるもの以外の地震が発生する可能性がある。

これらについて、現在の手法で予測することは不可能だが、このような事例のあることを周知しておくことが必要である。

(3) 火山噴火への移行

マグマの上昇によって活発な地震活動が発生するが、さらにマグマが地表付近まで上昇した場合には、1989年の群発地震活動の様に火山噴火に至る可能性がある。しかし、今回とりまとめた予測手法はあくまで地震活動の推移を対象とした予測であり、火山噴火については適用外となる。その様な事態が予想される場合には、火山情報（噴火警戒レベルや噴火警報）により噴火の可能性等が情報発表されることになる。

6. 今後に向けて

今回整理した手法は、体積ひずみ計で観測されたひずみ変化量を用いた経験式によりマグマ貫入量などの推定を行うものである。現状では東伊豆体積ひずみ観測点1点に依存しており、実際に情報発表を行うにあたっては、バックアップとなりうる観測点の整備も含めた、複数点のデータによる監視体制の検討が必要である。

また本手法の検討で明らかになったように、この群発地震活動の予測のためにはマグマの挙動をリアルタイムで把握しておくことが必須である。現在は、東伊豆のひずみ変化を用いて、簡便な方法でマグマの量を推定しているが、伊豆東部周辺には東伊豆の体積ひずみ計の他、地殻変動の観測機器が多数設置されており、今後は傾斜計や水位計など別の地殻変動データも用いて、マグマの量や位置、マグマの動きなどをリアルタイムで直接監視する手法の開発やシステムの導入についての検討が必要である。

また、過去の活動事例をさらに詳しく、精度よく整理・特徴抽出を行うには、精度の良い震源カタログが必須であり、可能な限り、多くのデータを収集・震源再計算などを行うことが重要である。

7. 参考文献

- 防災科学技術研究所 (1994) : 1993年5～6月の伊豆半島東方沖の群発地震活動とそれに伴う傾斜変動, 地震予知連絡会会報, 51, 336-340.
- 防災科学技術研究所 (1998) : 伊東沖群発地震活動に前駆する傾斜変動, 地震予知連絡会会報, 60, 334-355.
- 浜口博之・植木貞人 (1993) : 火山の構造と噴火予知, 月刊地球, 号外 No.7, 106-111.
- 早川由起夫・小山真人 (1992) : 東伊豆単成火山地域の噴火史 1 : 0～32ka, 火山, 37, 167-181.
- 気象庁地震火山部 (2008) : 緊急地震速報の概要や処理手法に関する技術的参考資料,
http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/EEW/kaisetsu/Whats_EEW/reference.pdf.
- 気象庁地震火山部火山課 (2008) : 体積歪変化量を用いた伊豆東部火山群のマグマ貫入量推定と火山活動評価の試み, 火山噴火予知連絡会会報, 95, 41-46.
- 気象庁地震予知情報課 (1987) : 伊豆半島東方沖の群発地震と東伊豆で観測された歪変化の関連について, 地震予知連絡会会報, 37, 220-223.
- 気象庁地震予知情報課 (1997) : 伊豆半島およびその周辺の地震活動, 地震予知連絡会会報, 58, 229-238.
- 気象庁地震予知情報課 (2002) : 2002年5月の伊豆半島東方沖の群発地震活動, 地震予知連絡会会報, 68, 172-176.
- 気象庁地震予知情報課 (2005) : 鎌田観測点の地震回数, 験震時報, 69, 11-133.
- 気象庁地震予知情報課 (2007) : 東海地域とその周辺地域の地震活動 (2006年5月～10月), 地震予知連絡会会報, 77, 190-215.
- 国土地理院 (2006a) : 伊豆地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 76, 215-245.
- 国土地理院 (2006b) : 地殻変動観測データで見る伊豆東部火山群のマグマシステムについて, 地震予知連絡会会報, 76, 272-284.
- Kuno, H. (1954) : Geology and petrology of omuro-yama volcano group, North Izu, J. Fac. Sci. Univ. Tokyo, Sect. 2, 9, 241-265.
- 宮村淳一・上野 寛・松島 功・阿南恒明・藤松 淳・横田 崇 (2006) : 体積歪変化量を用いた伊豆東部火山群のマグマ貫入量推定と火山活動評価の試み, 日本火山学会 2006年秋季大会講演予稿集, B28.
- 宮村淳一・上野 寛・横田 崇 (2010) : 体積歪変化量から推定した伊豆東部火山群のマグマ貫入量と火山活動評価の試み, 北海道大学地球物理学研究報告, 73, 239-255.
- Morita, Y., S. Nakao, Y. Hayashi (2006) : A quantitative approach to the dike intrusion process inferred from a joint analysis of geodetic and seismological data for the 1998 earthquake swarm off the east coast of Izu Peninsula, central Japan, J. Geophys. Res., 111, doi:10.1029/2005JB003860.
- 西村卓也 (2002) : 伊東沖と岩手山における火山性力源による地震のトリガリング, 地学雑誌, 111(2), 166-174.
- Okada, Y. and E. Yamamoto (1991) : Dyke intrusion model for the 1989 seismovolcanic activity off Ito, Central Japan, J. Geophys. Res., 96, 10362-10376.
- 酒井慎一 (1998) : 群発地震時におけるすべての地震の震源決定 (演旨), 日本地震学会講演予稿集秋季大会, 140-140.
- 島崎邦彦 (1989) : 伊豆東方沖の岩脈貫入テクトニクス, 「火山とプレートテクトニクス」中村一明, 252-256, 東京大学出版会.
- 司 宏俊・翠川三郎 (1999) : 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, 523, 63-70.
- Tada, T. and M. Hashimoto (1991) : Anomalous Crustal Deformation in the Northeastern Izu Peninsula and Its Tectonic Significance -Tension Crack Model-, J. Phys. Earth, 39, 197-218, 1991.
- Takeo, M. (1992) : The rupture of the 1989 Offshore Ito earthquakes preceding a submarine

- volcanic eruption, *J. Geophys. Res.*, 97, 6613-6627.
- 東京大学地震研究所 地震地殻変動観測センター (酒井慎一) (2002) : 伊豆半島東方沖の地震活動 (2002年5月), 地震予知連絡会会報, 68, 177-180.
- 東京大学地震研究所 (阿部勝征)・気象庁地震予知情報課 (1998) : 伊豆半島東方沖群発地震活動の直後予測, 地震予知連絡会会報, 59, 223-227.
- 上田英樹・山本英二・大久保正・村上 亮・上野 寛・宇平幸一 (2003) : 2002年5月伊豆半島東部群発地震活動に伴った地殻変動の開口断層モデル, 火山, 48, 471-477.
- Wyss, M., K. Shimazaki, and S. Wiemer (1997) : Mapping active magma chambers by b-values beneath the off-Ito volcano, Japan, *J. Geophys. Res.*, 102, 20413-20422.

(参考資料)

平成 21 年 8 月 10 日
地震調査研究推進本部
地震調査委員会

地震活動の予測的な評価手法検討小委員会の設置について

1. 設置趣旨

地震調査委員会における現状評価の高度化に資することを目的とし、過去の地震活動から特徴の抽出・整理を進めるとともに、地震活動の推移・見通しについての評価手法を検討するために、本委員会の下に地震活動の予測的な評価手法検討小委員会を設置する。

2. 審議事項

- (1) 地震活動の特徴の抽出
- (2) 抽出結果の整理・評価に基づく地震活動の予測的な評価手法の検討
- (3) その他

3. 構成員等

- (1) 小委員会を構成する委員及び専門委員については、地震調査委員会委員長が別途定める。
- (2) 委員長は、小委員会の構成員の中から主査を指名する。
- (3) 主査は、小委員会に専門家を招へいし、意見を聴取することができる。

地震調査家研究推進本部 地震調査委員会
地震活動の予測的な評価手法検討小委員会

(主 査)

島崎 邦彦 国立大学法人東京大学名誉教授

(委 員)

飯尾 能久 国立大学法人京都大学防災研究所教授
今給黎哲郎 国土地理院地理地殻活動研究センター地理地殻活動総括研究官
小原 一成 独立行政法人防災科学技術研究所地震研究部
地震観測データセンター長 (第1回～第2回)
勝俣 啓 国立大学法人北海道大学大学院理学研究院准教授
汐見 勝彦 独立行政法人防災科学技術研究所
高感度地震観測管理室長 (第3回)
清水 洋 国立大学法人九州大学大学院理学研究院教授
平田 直 国立大学法人東京大学地震研究所長
前田 憲二 気象庁気象研究所地震火山研究部第一研究室長
松澤 暢 国立大学法人東北大学大学院理学研究科教授
吉田 明夫 国立大学法人静岡大学理学部客員教授

(事務局)

鈴木 良典 文部科学省研究開発局地震・防災研究課長
北川 貞之 文部科学省研究開発局地震・防災研究課地震調査管理官
長谷川裕之 文部科学省研究開発局地震・防災研究課地震調査研究企画官
山岡 耕春 文部科学省科学官 (名古屋大学大学院環境学研究科教授)
横田 崇 気象庁地震火山部地震予知情報課長
矢来 博司 国土地理院測地観測センター地震調査官
土井 恵治 気象庁地震火山部管理課地震情報企画官 (第1回～第2回)
長谷川洋平 気象庁地震火山部管理課地震情報企画官 (第3回)
宮岡 一樹 気象庁地震火山部地震予知情報課調査官

地震活動の予測的な評価手法検討小委員会検討状況

平成 21 年 12 月 24 日

第 1 回地震活動の予測的な評価手法検討小委員会

平成 22 年 3 月 1 日

第 2 回地震活動の予測的な評価手法検討小委員会

平成 22 年 7 月 2 日

第 3 回地震活動の予測的な評価手法検討小委員会