

箱根浅発地震活動の ETAS モデル解析と火山活動度との関連の検討

石垣祐三^{*}・原田昌武^{*2}・本多 亮^{*2}・行竹洋平^{*2}・伊東 博^{*2}・明田川 保^{*2}

The ETAS Model Analysis on Seismic Swarms in Hakone Volcano with Reference to Level of Volcanic Activity

by

Yuzo ISHIGAKI^{*}, Masatake HARADA^{*2}, Ryou HONDA^{*2}, Yohei YUKUTAKE^{*2} and Tamotsu AKETAGAWA^{*2}

1. はじめに

箱根山では 2000 年以降、年 1 ~ 2 回程度小規模な地震活動が発生している。地震の規模は最大でもマグニチュード (以下、M) 3.2 であり (2009 年 8 月 6 日) 伊豆半島東方沖の一連の地震活動 (たびたび M5 クラスが発生) と比べると活動規模としては小さい。震源の深さはごく浅く (0 ~ 10km) 現地では震度 1 ~ 3 相当の揺れを観測している場合もあるが、一番近い震度計 (箱根町役場) が活動域から約 5km 離れているため、そのほとんどは気象庁の地震情報として発表されない状況である。

箱根は日本有数の観光・温泉地であり、箱根の地震活動域の真上に位置している施設も多い。そのため、群発地震が発生した時など、該当する地震情報発表がないと観光客・住民から箱根町役場をはじめ、神奈川県温泉地学研究所 (以下、温地研) などに頻繁に問い合わせがある。

一方、箱根山では 2009 (平成 21) 年 3 月 31 日に噴火警戒レベルが導入され、同日の噴火予報発表以降はレベル 1 の状態が継続している (2010 年 8 月現在)。2000 年以降の地震・火山活動に対して噴火警戒レベルを当てはめると、2001 年 6 ~ 10 月の地震活動のうち、噴気異常を伴った 7 ~ 8 月の一部期間は噴火警戒レベル (以下、レベルと記す) 2 に相当したと認識されている (例えば気象庁、2009)。

このような状況を踏まえると、箱根の地震活動を統計的に解析し、その特徴をとらえておくことは、今後の地震活動の評価に重要であると考えられる。このため、本調査では、2000 年以降の地震活動について ETAS モデル (Ogata, 1988) を用いた解析を行い、その特徴の抽出を試みる。

さらに、噴火警戒レベルとの関連性について、地震活動だけでなく、地殻変動データ、表面現象等の他の観

測要素も用いて、過去の活動がどのような状況で発生したのかを総合的に検討する。

なお、本調査に際し、気象庁震源を用いて予備調査 (ETAS 解析) を行ったが、気象庁以外他機関地震計データも用いて震源決定されるようになった (一元化: 1997 (平成 7) 年 10 月 1 日) 以降でも M のしきい値 (以下、Mth) が 0.8 であり、各時期の活動様式の違いが判然としなかった。このため、温地研の震源データ (2000 年以降の Mth は 0.3) を用いて解析を進める。温地研の地震観測・処理手法等については、神奈川県温泉地学研究所 (1999) 伊東ほか (2005) 等を参照されたい。箱根付近の震源決定における気象庁との大きな違いは使用地震観測点数が多いことである。また M の計算は、WIN system (ト部・束田、1992) の導入後 (1995 年) 速度振幅 (渡辺、1971) を用い、補助的に F-P (棚田・田中、1999) を用いられている。

2. 方法

全般的な調査方法は以下の通りである。地震活動は 2000 年以降を対象に、全期間と各活動期間について ETAS モデルと切断 G-R 分布 (例えば宇津、1978) などを適用し、そのパラメータを比較する。震源は温地研データを用い、過去の活動において地震活動の指標のほか、低周波地震活動、国土地理院の GPS データを用いた地殻変動の有無、噴気異常の有無等を比較し、さらに検討を加える。個々のデータの取り扱いやモデル採用の方法など詳細は次節以降に併せて示すこととし、ここでは本報告の中心的手法となる ETAS モデルを説明する。

ETAS モデルによるある時刻 t までの地震積算回数 $\Lambda(t)$ は、以下の式で表すことができる。

$$\Lambda(t) = \mu(t - t_0) + k \sum_{t_i < t} \exp \{ \alpha (M_i - M_{th}) \} \{ c^{1-p} - (t - t_i + c)^{1-p} \} / (p - 1) \dots (1)$$

* 横浜地方気象台 〒231-0862 神奈川県横浜市中区山手町 99

*2 神奈川県温泉地学研究所 〒250-0031 神奈川県小田原市入生田 586

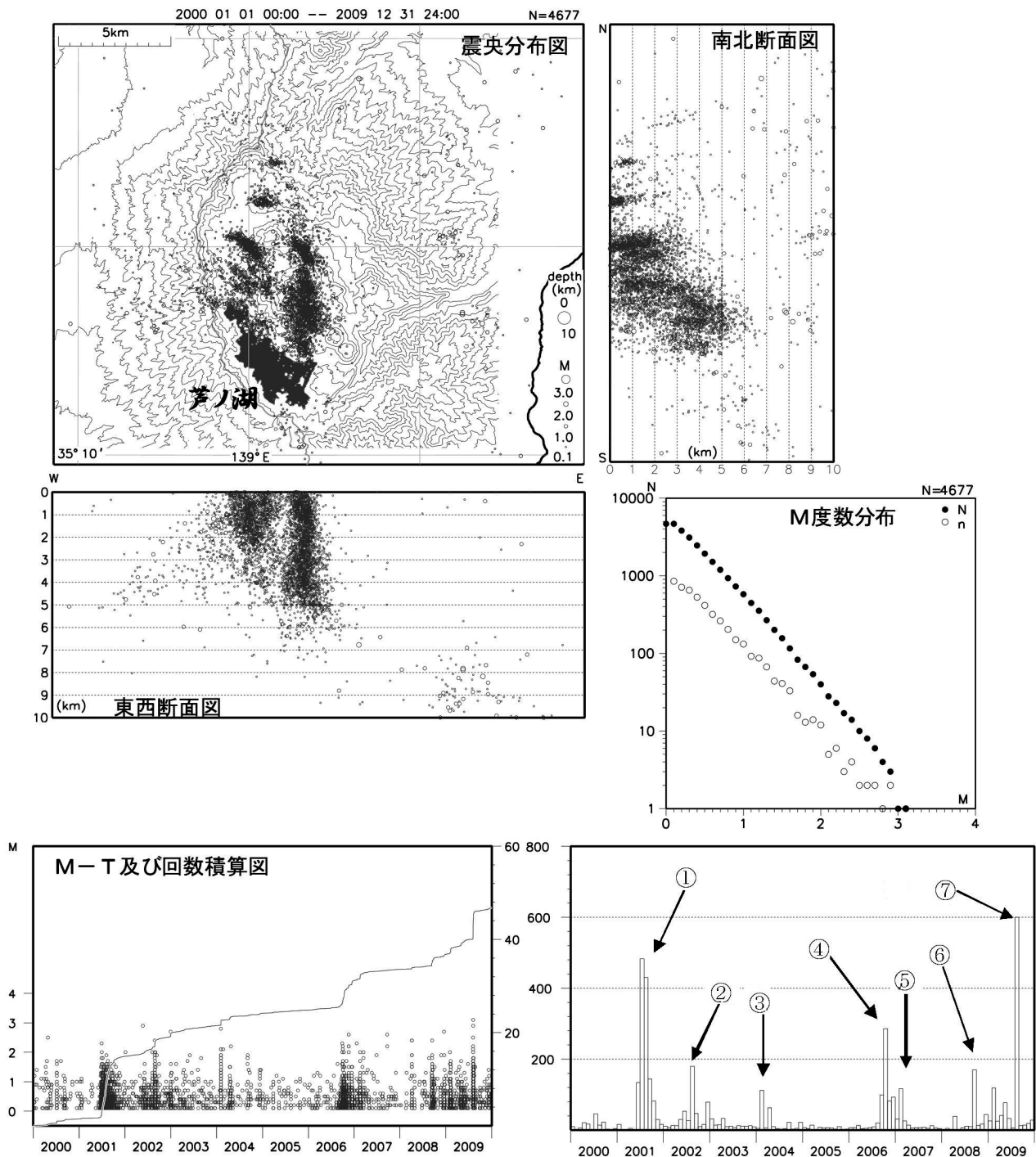


図1 箱根付近の地震活動 ($M0.1$ 以上, 深さ $0-10\text{km}$)。回数ヒストグラム内の ~ は図 2-1 ~ 図 2-7 で示す ETAS モデル解析を行った活動である。

ここで、 M_{th} は対象とする地震の M のしきい値である。 t_0 を解析起点の時刻とし、 $t_0 \sim t$ までの期間に発生した M_{th} 以上の地震の発生時刻を t_i とする。(1) 式の右辺第 2 項での和は t より前に発生した地震による影響をすべて足しあわせることを意味している。推定すべきパラメータは、活発さの程度を表す K 、発生した地震の M の効率を表す α 、時間軸の調整をする c 、時間的減衰を表

す p 、ポアソンの発生強度を表す μ の 5 個であり、これらパラメータの推定には最尤法を用いる。このパラメータによって地震活動の特徴を表すことができるほか、地震回数の期待値が同じになるように期間を区切って、実際の地震回数との比をとることにより相対的静穏化・活発化の指標にできる。さらにモンテカルロ法などを利用して、余震活動のみならず群発地震も含めた地震活動

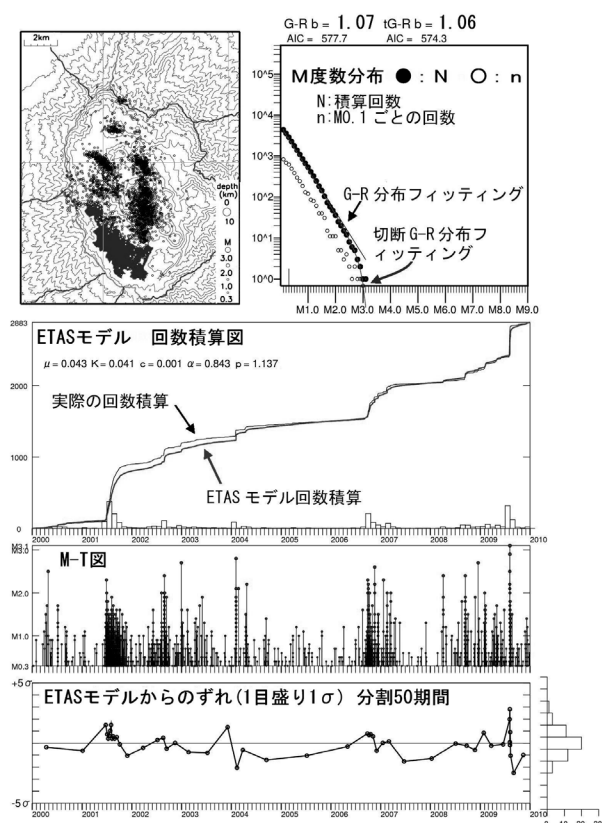


図2 箱根付近のETAS解析結果（全期間：2000 - 2009年）。対象期間のすべてのデータ（M0.3以上、深さ0-10km）を用いたETASモデル解析結果。左上：期間中の震央分布図、右上：マグニチュード度数分布、以下順に、実際とETASモデルの回数積算図、M-T図、ETASモデルからのずれ（一目盛り、1σ）、右端は各分割期間のヒストグラム。ヒストグラムが概ね正規分布に近い形になっていればETASモデルが適切であると考えられる。

の短期活動評価（石垣、2006）に資することができる。なお、Mthによらないパラメータは α 、 c 、 p の3つである。これらが実際にどのような値を採るかは b 値も含めて石垣（2008）に地域ごと掲載されている。

今回は、M7.0発生後の余震活動をシミュレーションする目的で導入した以下のMETASモデル（石垣、2008）も併せて解析した。

$$\Lambda(t) = \mu(t - t_0) + \sum_{t_i < t} k \exp \left\{ \alpha (M_i - M_{th})^\beta \right\} \{ c^{1-p} - (t - t_i + c)^{-p} \} / (p - 1) \dots (2)$$

追加したパラメータ β のとりうる範囲は1.0以上であるが、M7.0の想定で β が2.0程度以上になると余震発生回数が発散する現象が多々発生する。このことを勘案して β は[1.0, 1.85]の範囲で動かすこととする。 $\beta=1.0$ の

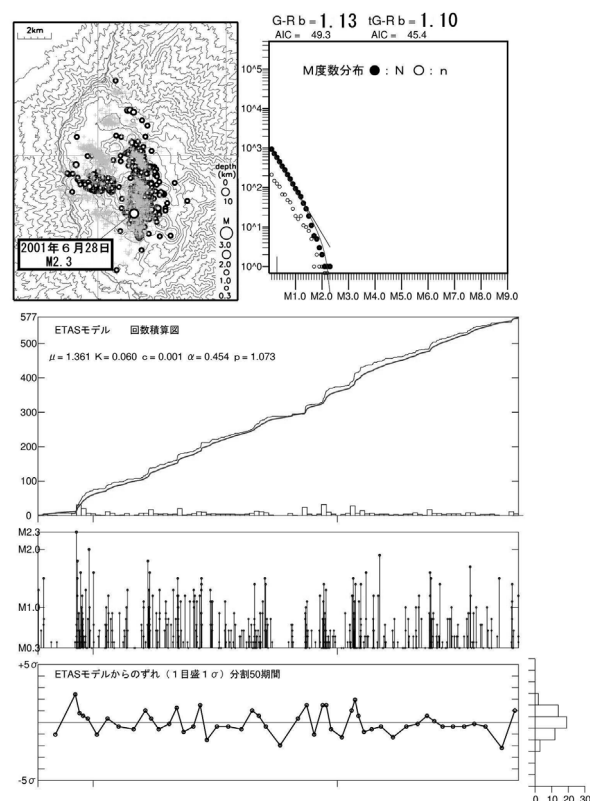


図2-1 ETAS解析結果（期間：2001/06/24 ~ 2001/08/24）。図2-1 ~ 図2-7までのM-T図、回数積算図等の期間は2ヶ月である。以下、図2と同じ表示であるが、震央分布図は当該期間の震央を濃い色で、それ以外の全期間（2000-2009年）の震源を薄い色で表示した。

場合はETASモデルと同じである。

3. 結果

3.1 ETAS解析結果

まず、全期間（2000 ~ 2009年）の地震活動について周辺地域を含め図1に示す。箱根山の外輪山の中で年1 ~ 2回程度の小規模な地震活動があるが、詳細を見ると大部分は中央火口丘直下にある。その他にも芦ノ湖の北に何カ所かに群れて発生している。また、多くの震源の深さは、5kmより浅い。

ここでは月別地震回数ヒストグラムに記した ~ の活動が高かった期間について解析する。解析期間は活動のピークを含む2ヶ月間、対象地震はMth 0.3以上、深さ0 - 10kmとした。結果は図2（全期間）、図2-1 ~ 2-7（期間 ~ ）及び表1の通りである。

表1では全期間のパラメータ及びMETASのAIC最小モデル（Akaike、1974）が $\beta=1.0$ ではなかったとき

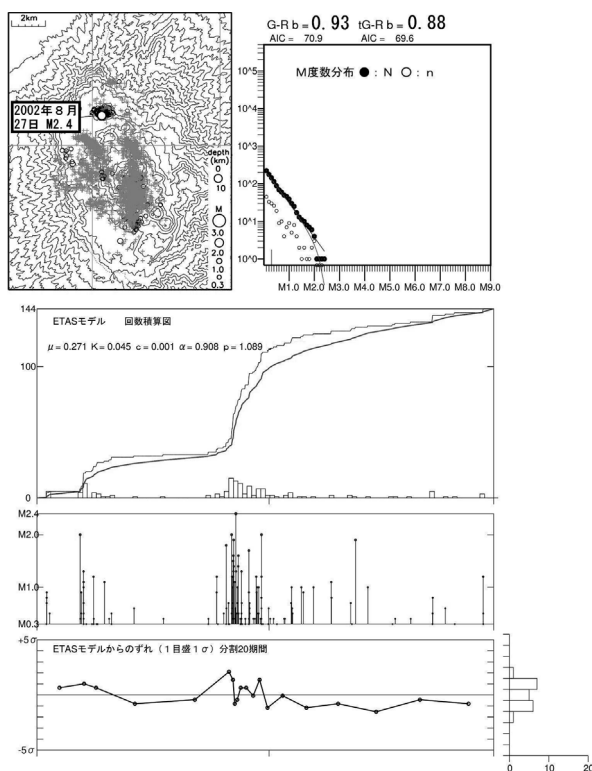


図 2-2 ETAS 解析結果(期間 : 2002/08/01 ~ 2002/10/01)。表示は、図 2-1 と同じである。

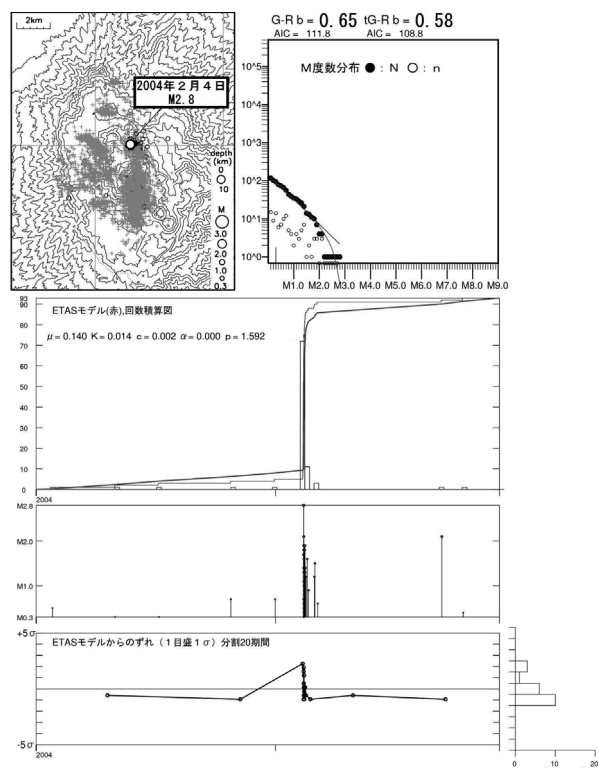


図 2-3 ETAS 解析結果(期間 : 2004/01/01 ~ 2004/03/01)。表示は、図 2-1 と同じである。

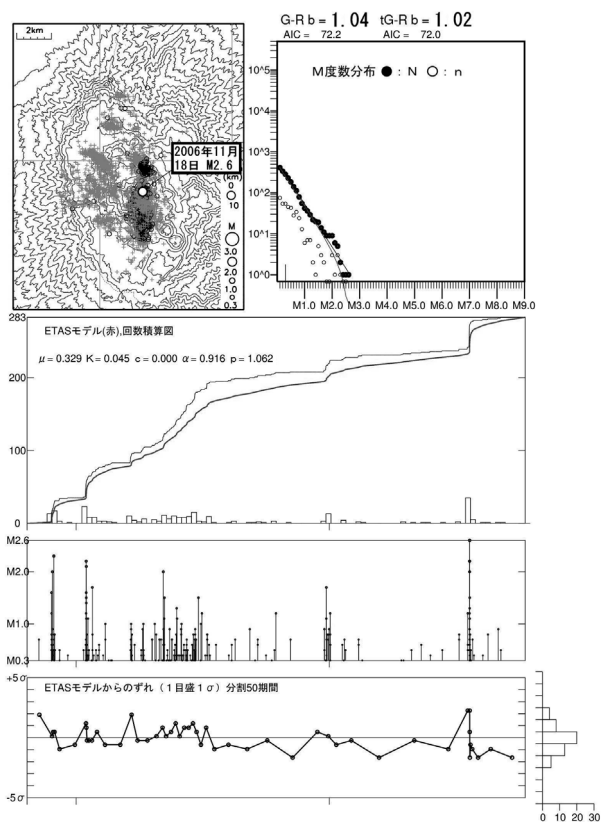


図 2-4 ETAS 解析結果(期間 : 2006/09/25 ~ 2006/11/25)。表示は、図 2-1 と同じである。

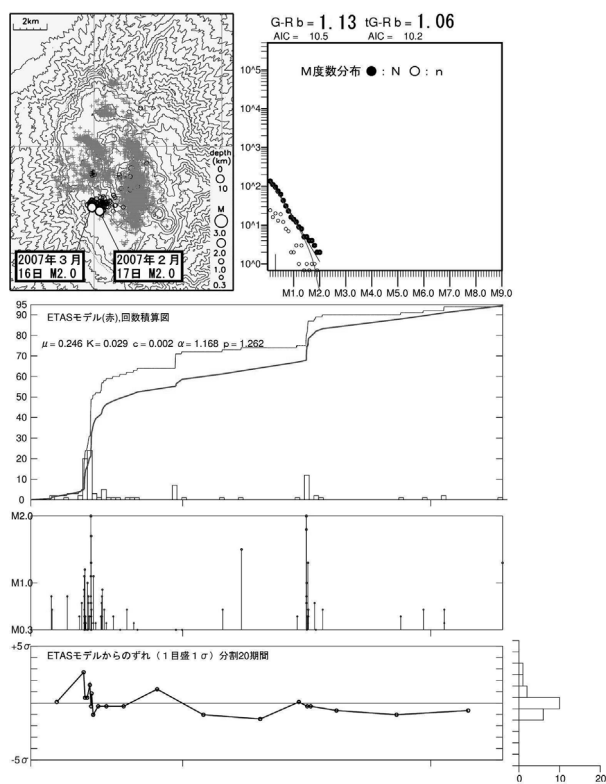


図 2-5 ETAS 解析結果(期間 : 2007/02/10 ~ 2007/04/10)。表示は、図 2-1 と同じである。

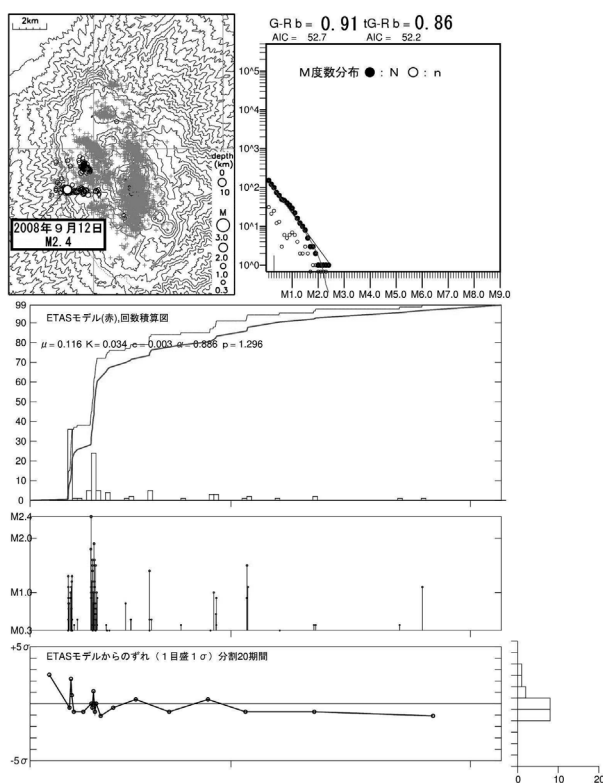


図 2-6 ETAS 解析結果（期間：2008/09/05～2008/11/05）。表示は、図 2-1 と同じである。

に METAS モデルのパラメータを併記した。METAS と ETAS モデルを比較検討した結果は、期間～と全期間について、8 期間中 6 期間が METAS モデルの方が AIC 最小を得る。しかし、個々の活動では期間の AIC 差 1.3 が最大であり、その差はわずかである。全期間でも AIC 差は 3.4 であり、顕著ではないことから、以下は ETAS モデルを適用して各期間の特徴を述べる。

全期間の ETAS モデルの α は 0.84 で、過去の活動から見るとやや群発気味の数値である（図 3、石垣（2008）の図 10 に加筆）。ただし、伊豆半島東方沖や三宅島～新島・神津島と比較するとこの α はやや大きい。伊豆半島東方沖の場合はダイクの貫入位置で地震が発生し、三宅島～新島・神津島の場合は、ダイク貫入近傍とダイクによる応力の影響を受けて誘発された新島・神津島の活動を含んでいる。このため、三宅島～新島・神津島の方が M の大小の違いによる影響が効いていて、 α が伊豆半島東方沖に比較してやや大きめの値になっている。箱根の場合はこれよりも α が大きく、地震活動はダイクの貫入と関連性はあるものの、ダイクの貫入そのものに起因する地震活動ではない可能性が示唆される。ポアソンの発生する地震は 1 日当たり 0.043 回（月当たり約 1.3 回）である。b 値は切断 G-R 分布、G-R 分布とも 1.06 程度

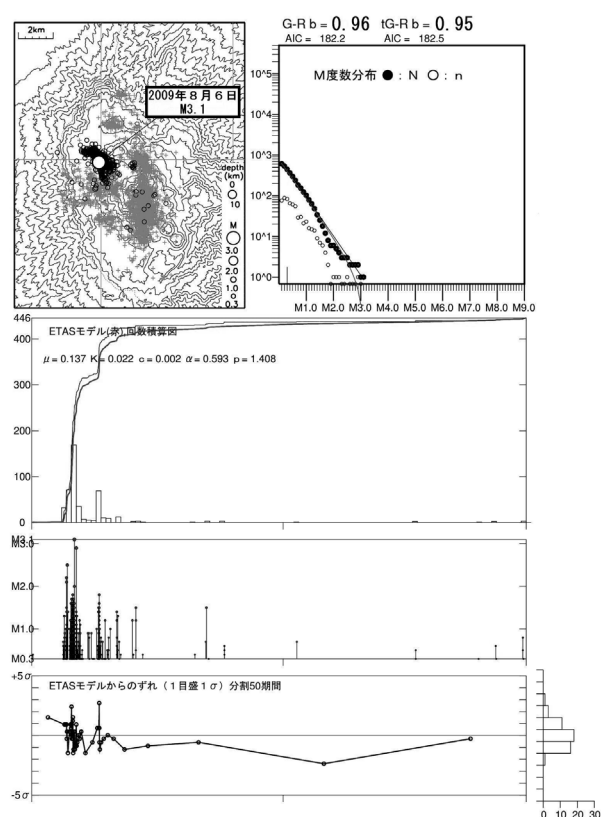


図 2-7 ETAS 解析結果（期間：2009/08/01～2009/10/01）。表示は、図 2-1 と同じである。

で通常の火山付近に発生する浅い地震と同程度である。以下、全期間モデルのパラメータと比較して各期間のパラメータの特徴を記す。

2001/06/24～2001/08/24

活動域の中心は通常の活動域（中央火口丘直下）の本体全域であるが、芦ノ湖の北側にも見られ、取り上げた活動の中で一番広範囲にわたる（棚田ほか、2002）。b 値は標準的であるが、 μ が 1.36 と全体及び他の期間の活動と比較して非常に大きい。 α は 0.45 とやや小さい。この期間の活動では顕著な地殻変動と噴気の異常（辻内ほか、2003）があった。

2002/08/01～2002/10/01

活動域の中心は全体の活動域（全期間の活動域）の北端であり、 μ が 0.27 とやや大きい。

2004/01/01～2004/03/01

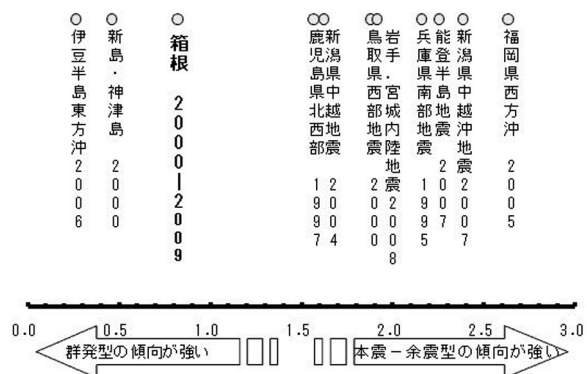
活動域の中心は通常の活動域（中央火口丘直下）の本体北側に集中している。活動はほぼ 1 日で終わっている。 α が非常に小さく、b 値も切断 G-R 分布で 0.58 とかなり小さいのが特徴である。

2006/09/25～2006/11/25

活動域の中心は通常の活動域（中央火口丘直下）の本体全域である。b 値は標準的で μ が 0.33 とやや大きい。

モデル	解析 期間	はじめ	終わり	地震 回数	深さ 下限 (km)	ML きい 値	最大 M	μ	K	c	α	ρ	β	AIC _{ETAS}
ETAS	全期間	2000/01/01	2010/01/01	2883	10	0.3	3.1	0.043	0.041	0.0010	0.843	1.137	1.00	-7298.7
METAS	AIC差	3.4						0.043	0.045	0.0010	0.701	1.138	1.30	-7302.1
ETAS	①	2001/06/24	2001/08/24	577	10	0.3	2.3	1.361	0.060	0.0008	0.454	1.073	1.00	-2114.1
METAS	AIC差	1.3						1.345	0.063	0.0008	0.433	1.071	1.85	-2115.4
ETAS	②	2002/08/01	2002/10/01	144	10	0.3	2.4	0.271	0.045	0.0012	0.908	1.089	1.00	-292.9
ETAS	③	2004/01/01	2004/03/01	93	10	0.3	2.8	0.140	0.014	0.0020	0.000	1.592	1.00	-722.8
METAS	AIC差	1.0						0.141	0.008	0.0037	0.522	1.699	1.85	-723.8
ETAS	④	2006/09/25	2006/11/25	283	10	0.3	2.6	0.329	0.045	0.0003	0.916	1.062	1.00	-1103.9
METAS	AIC差	0.1						0.331	0.048	0.0003	0.788	1.064	1.20	-1104.0
ETAS	⑤	2007/02/10	2007/04/10	95	10	0.3	2.0	0.246	0.029	0.0022	1.168	1.262	1.00	-279.2
METAS	AIC差	0.5						0.250	0.034	0.0022	0.883	1.264	1.55	-279.7
ETAS	⑥	2008/09/05	2008/11/05	99	10	0.3	2.4	0.116	0.034	0.0033	0.886	1.296	1.00	-332.8
METAS	AIC差	0.9						0.115	0.040	0.0033	0.585	1.298	1.70	-333.8
ETAS	⑦	2009/08/01	2009/10/01	446	10	0.3	3.1	0.137	0.022	0.0016	0.593	1.408	1.00	-3476.6

	μ (ポアソン)	AIC _{POI}	b	AIC _{gr}	b	AIC _{tGR}
全期間	0.789	7132.9	1.07	577.7	1.06	574.3
①	9.459	-1437.0	1.13	49.3	1.10	45.4
②	2.361	42.6	0.93	70.9	0.88	69.6
③	1.550	106.5	0.65	111.8	0.58	108.8
④	4.639	-300.6	1.04	72.2	1.02	72.0
⑤	1.610	101.5	1.13	10.5	1.06	10.2
⑥	1.623	104.1	0.91	52.7	0.86	52.2
⑦	7.311	-880.6	0.96	182.2	0.95	182.5



期間 ～ で噴火警戒レベルを導入していたら、レベル2になったステージは の期間の内一部だったと認識されている。他の活動との違いは、噴気異常と地殻変動の大きさである。地震活動の特徴としては、

図3 過去の顕著な地震活動と箱根における ETAS モデルの α 値。箱根の α 値は 0.84 であり、群発傾向ではあるが、伊豆半島東方沖や新島・神津島の活動と比較するとやや大きい。

・μ1.36、総回数 (Mth0.3) 577 回であり、ともに 7 回の活動の内最大である。

- ・活動域が広く全般にわたっている。

ことがあげられる。と の 2006・2008 年にも地殻変動が見られ、ガスの組成変化が観測された(代田・板寺、2009)が、噴気異常はない。と の共通する特徴としては μ が大きいこと、活動が集中的ではなく、断続的であったことがあげられる。

3.2 箱根の地震活動と低周波地震及び地殻変動との関連

図4に箱根の地震活動と低周波地震活動を示す。低周波地震の震源は気象庁震源を用いている。箱根の低周波地震は、通常地震活動のやや北側、深さ30km程度に発生している。通常地震活動と低周波地震の活動時期

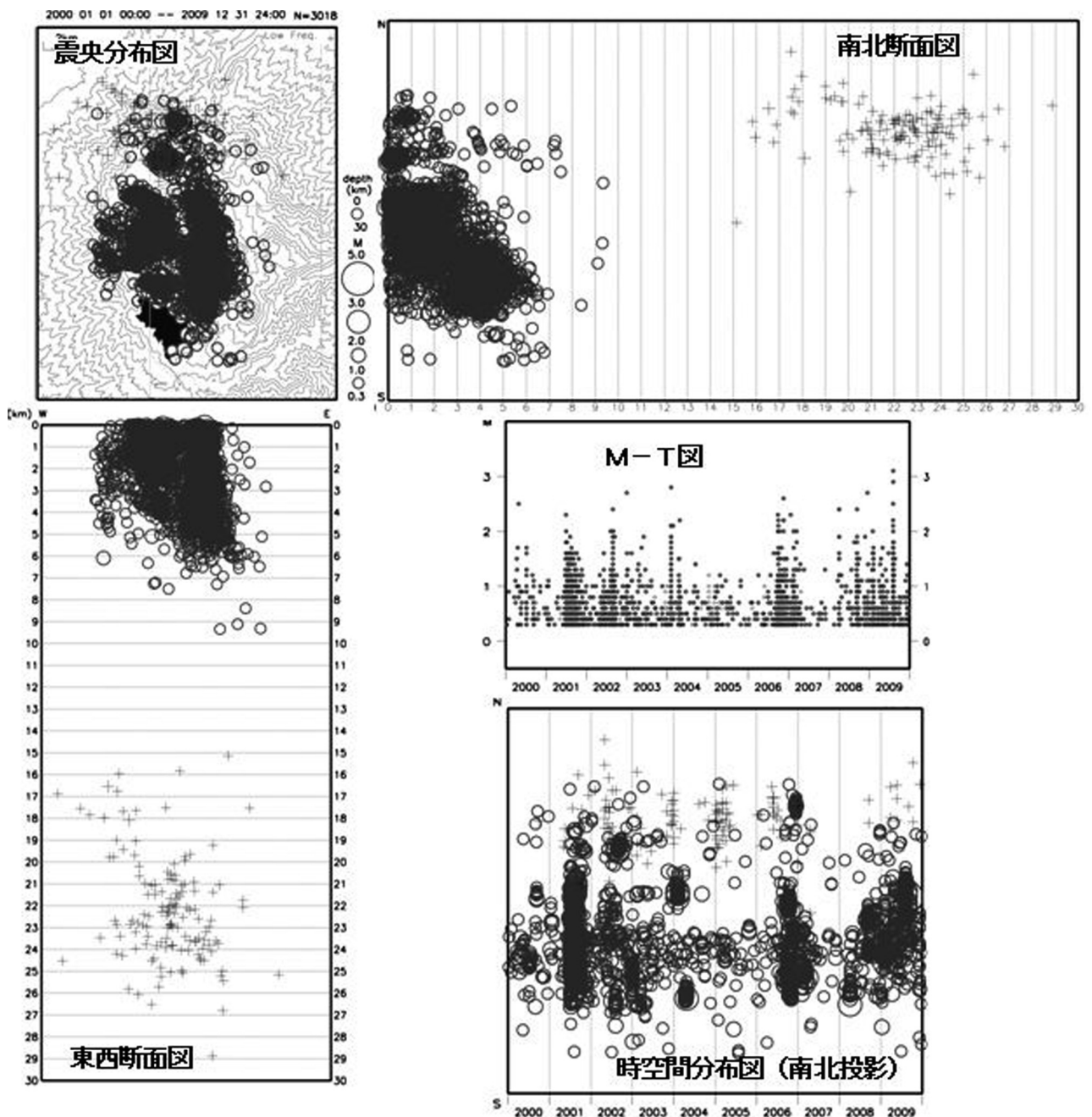


図4 箱根付近の地震活動と低周波地震活動（ $M0.3$ 以上、深さ30km以浅 + は低周波地震を示す）。

は、表示期間全体を通じて強い相関は見られない。強いといえば通常の活動が低いときに、低周波地震の活動が活発になる場合が多い傾向があるが、明瞭な相関はない。2001年7～8月の地震活動時にはわずかながら低周波地震の発生があったことが分かる。ただし、次の2つの理由により、低周波地震活動の変化を正確に把握することは難しい。1つは、通常の活動が活発になると低周波地震がマスクされてしまう可能性があることと、そしてもう一つは、気象庁の低周波地震のフラグ付与は1999年10月から行われているが、2002年10月にHi-netが導入され、それ以前よりも低周波地震が識別されやすく

なっていることである。

図5には、箱根付近の全体的な地殻変動を見るために国土地理院によるGPS観測結果（大井 - 裾野2の基線長変化）に通常の地震と低周波地震の発生状況を併せて示した。GPSは全般に伸びの傾向にあるが、伸びの変動が大きくなるときに、箱根の浅い活動が活発化する傾向がある（原田ほか、2010 a）。ただし、2009年の活動時は大きなGPS変動が見られない。また、2008年後半から2009年3月にかけては、地震活動がそれほど活発ではないが、地殻変動があった。その地震活動と低周波地震活動との相関は見られない（原田ほか、2010 b）。

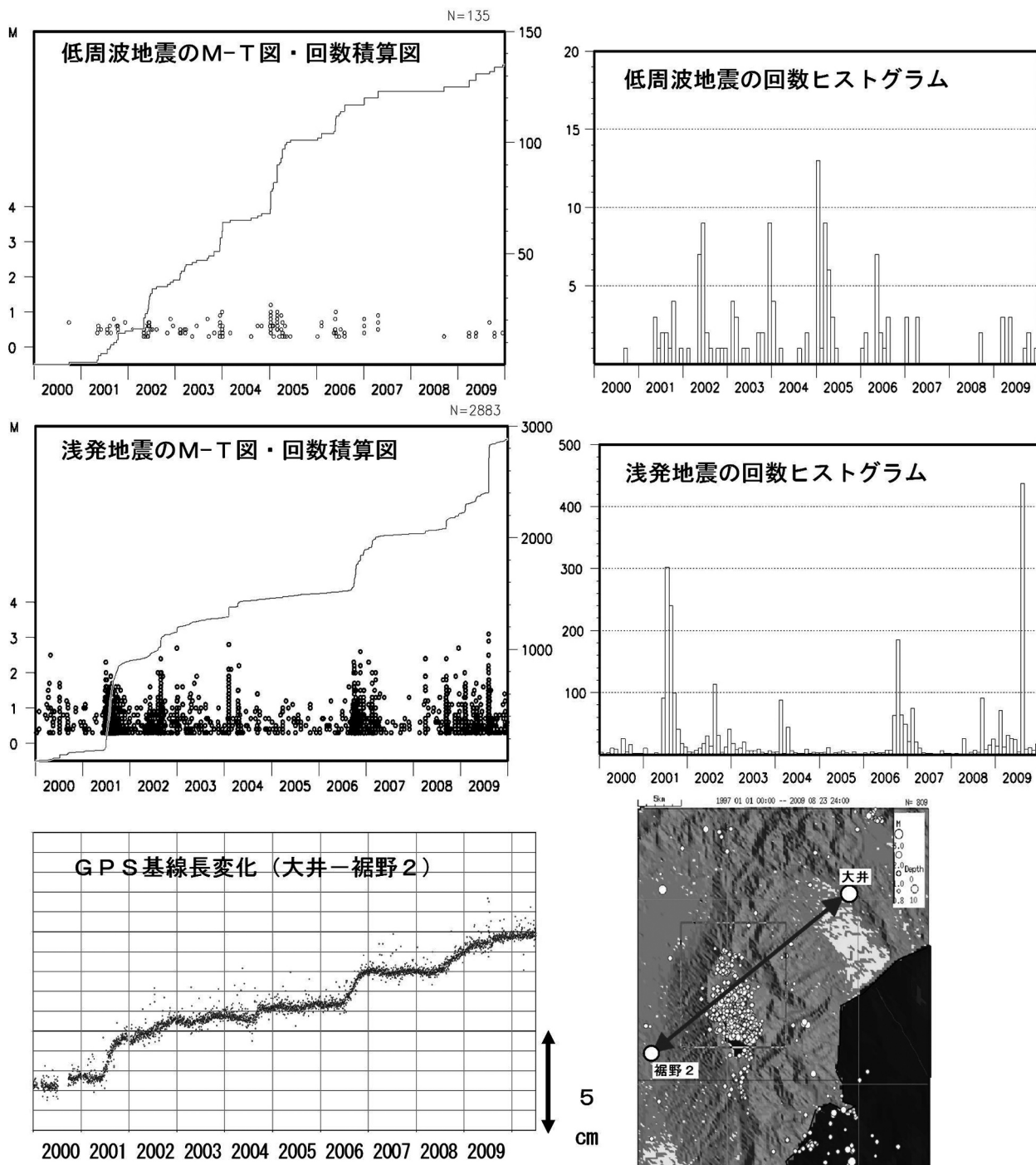


図5 箱根付近の地震活動と低周波地震活動・GPS観測結果（大井 - 裾野2の基線長変化）との比較。M0.3以上、深さ30km以浅。

4. 考察

4.1 地震活動諸量と火山活動度との関連

2001年の活動を特徴付けるひとつの現象は噴気異常であり、7月19日には大涌谷の蒸気井（52号蒸気井）が異常な圧力増加のため破壊され、大量の蒸気が噴出した（辻内ほか、2003）。またGPSでは、山体内部の動き（物質の動き）が観測された。GEONET大井 - 裾野2の

GPS基線長変化に短期間の伸びが見られる期間と噴気異常とされる時期の2001年7月19日～8月7日（8月7日は気象庁などの「噴火に結びつくとは考えていない」旨の報道発表による）にハッチをかけた図をベースとして考える（図6）。ハッチをかけた時期が火山活動の高まりと推測される。

つぎに地震活動について、2000～2009年の震源データに対して、期間60日・シフト10日とし、地震活動諸

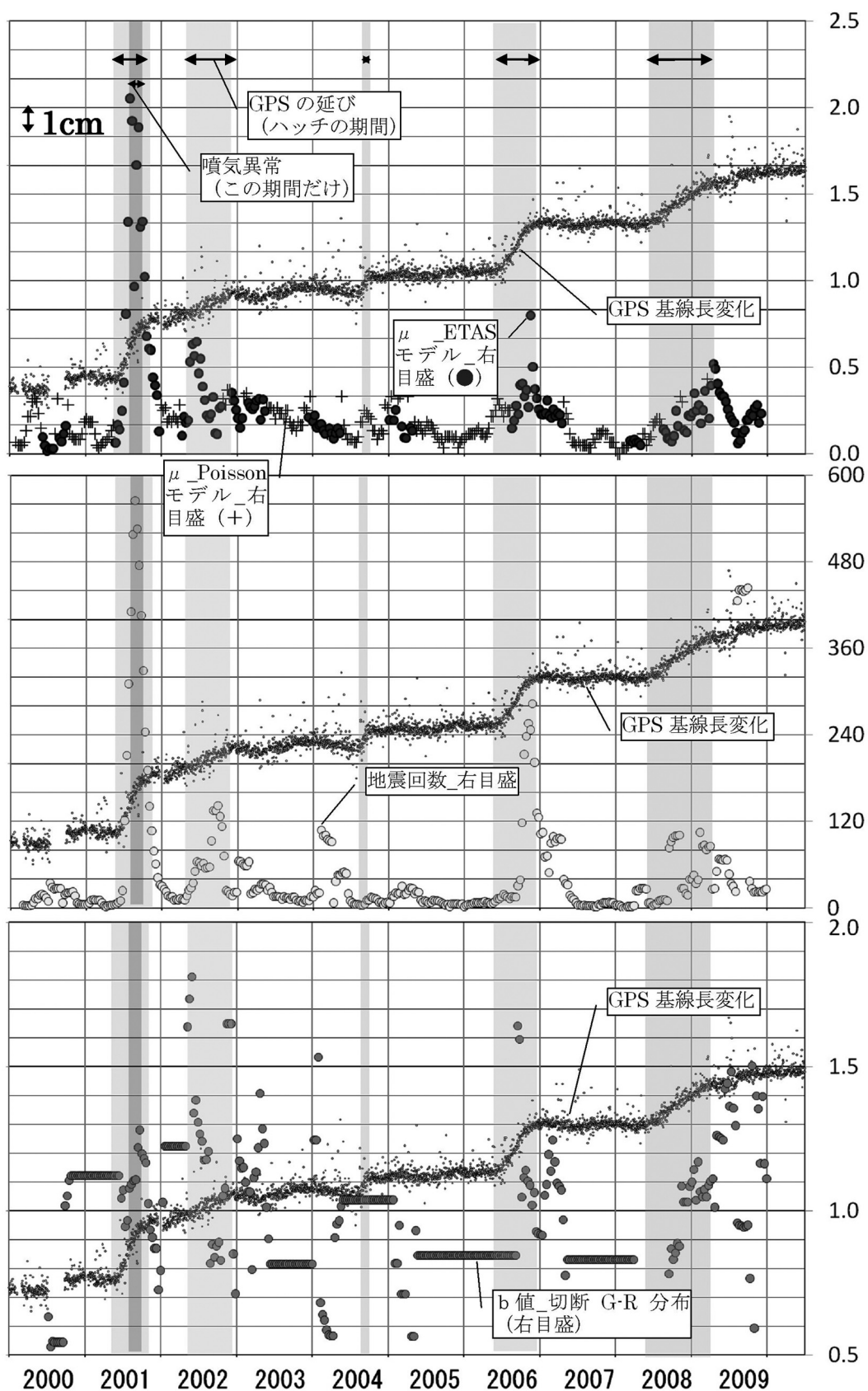


図6 GPS 観測結果と箱根の地震活動パラメータの関係。ハッチをかけた時期はGPSの短期の伸びがみられた期間であり、噴気異常が見られた時期（2001/7/19～8/7）はさらに濃いハッチをかけている。各地震活動パラメータは、スパン60日、シフト10日として求めている。上段から μ （ETASモデルは○、Poissonモデルは+でプロットしている）、 n （スパン60日の総回数）、切断G-R分布の b 値である。

量を ETAS モデルとして解析する。得られた諸量のうち、ETAS モデルの μ 、M0.3 以上の地震回数、 b 値との関係を先のベースの図に併せて示したものが図 6 である。ここで、 μ は対象期間に対し、ETAS モデルとポアソンモデルで解析し、それぞれの AIC を比較し、より小さい AIC のモデルの μ を採用した。図 6 では採用したモデルごとに別のシンボルでプロットしている。ポアソンモデルの μ は、単純に発生した地震回数を解析日数で割ったものであり、群れとなっている地震をひとつの地震で代表させる処理（デクラスティング：Reasenber, 1985）は行っていない。 b 値は全期間を通じてよりフィッティングのよい切断 G-R 分布によるものを用いた。図 6 下段を見ると b 値と GPS はほぼ無関係に見える。 b 値の地域性は強いので、箱根の地震活動域の中でも図 2-1 ~ 2-7 でみたように活動場所の違いが出たものと考えられる。

最上段の μ と中段の地震回数はハッチをかけた期間に大きくなる傾向があり、よい相関を示す。より細かくみると 2009 年の活動は μ が小さいのに対し、地震回数は急増している。これは、2009 年の活動が時間・空間的に集中していたため、ETAS の μ が小さく解析されたためである。 μ と地震回数のどちらが活動度を評価するのに適切かという問題は、2009 年の実際の評価が鍵となる。この時は大きな地殻変動が観測されていない（変動が 0.5cm 以下で非常に小さい）ので、物質の移動がなかったものと推測できる。よってこの時期の火山活動は、他の GPS が変動している時期と比較すると小さいと考えられ、 μ の方がより活動度を説明するのに適切であると考えられる。もちろん、箱根の活動域をまたぐ GPS の基線（大井 - 裾野 2）において、その全体の伸び基調に比較してやや急激な伸びが火山活動の高低を表現していると仮定しているので、定性的な検討の域を出ない。

2001 年の活動は地震活動域が広く、地殻変動、噴気異常が見られた。物理的イメージでいえば、対象とする 2000 ~ 2009 年において、より多くの物質が山体下部で移動し、地殻変動を起こし、活動域全体に地震を励起させた。つまり全体的なエネルギーが期間中最大だったと推察できる。このような目で見ると地殻変動の有無と μ が火山活動の高まりを評価するポイントになる可能性がある。

2006 年後半と 2008 年後半には 2001 年よりは小さいが明確な GPS 変動が観測されている（図 6）。原田ほか（2009）は、これら 3 回の地殻変動に対して開口割れ目断層モデルの適用が可能であるとしている。図 6 上段をみると 2001・2006・2008 年のみならず、2002 年にも

緩やかな GPS 変化とそれに同期した μ の変化が見える。上述の 3 回と同じく 2002 年の変化がダイク等の貫入によるものかは不明であるが、その可能性もあることを指摘しておく。また、火山活動度との対応は、2001 年をレベル 2、2002・2006・2008 年をレベル 1 と仮定すると、 μ が 2006 年の最大で 0.80 であることから、この数値以上では他の観測種目の値の変化や表面現象の変化に特に注目する必要があると考える。

地殻変動は緩慢な変化のため、即時に把握することは難しいが、この点 ETAS 解析は震源が決まっていれば随時モニターできるので早期把握に有利だと考えられる。2001 年の例で活動開始からの μ の安定性を見た（図 7）。6 月 24 日の解析開始から 1 日ごとの震源データを順次加えていき、6 月 28 日ではじめて ETAS パラメータが求まった（地震回数 29 回、 $\mu 1.38$ ）。その後 ± 0.5 回 / 日程度でばらつき解析地震回数が 100 回程度となる 7 月 4 日（99 回）から、他のパラメータも含めてほぼ安定した解が得られるようになった。このことから、解析対象の地震回数が 20 ~ 30 回以上になればパラメータは求まり、100 回程度で安定すること、及びばらつきも含めて考慮しても、明らかに通常より大きい μ は震源が数十個を超えるようになれば把握できる可能性があるといえ、2001 年の例では、7 月 19 日の噴気異常の 2 週間以上前から μ が 1.0 以上になっていることが確認できるとともに、注意監視体制を執ることができる。

4.2 気象庁及び温泉地学研究所のマグニチュード

温泉地学研究所データの M （以下、 M_0 と示す）は渡辺の式を用い、 A_v (cm/s) を最大速度振幅、 r (km) を観測点からの震源距離として、以下により算出されている（渡辺、1971）。

$$M_0 = (\log_{10} A_v + 1.73 \log_{10} r + 2.5) / 0.85 \quad (3)$$

一方気象庁速度 M_j は以下で定義される（舟崎・地震予知情報課、2004）。

$$M_j = \alpha \cdot \log_{10} A_v + \beta_v (\Delta / H) + C_v \quad (4)$$

ここで、係数 α は、 $1/0.85 = 1.173$ としている。 β_v は距離減衰項、 C_v は各観測点の地震計の種類や設置状況に応じた補正係数である。

M_0 と M_j の関係を箱根の活動に限って示したのが図 8 であり、図中に直線回帰の場合の回帰式を示している。直線回帰の係数が 0.85 であるが、(3) と (4) で右辺第 1 項にかかる係数はほぼ同じであり、これは第 2 項以降の差異によると見なす方が適当であろう。 M が 2 以下の場合 M_0 の方が M_j よりやや大きい。

気象庁は、検測作業をほぼリアルタイムで実行してい

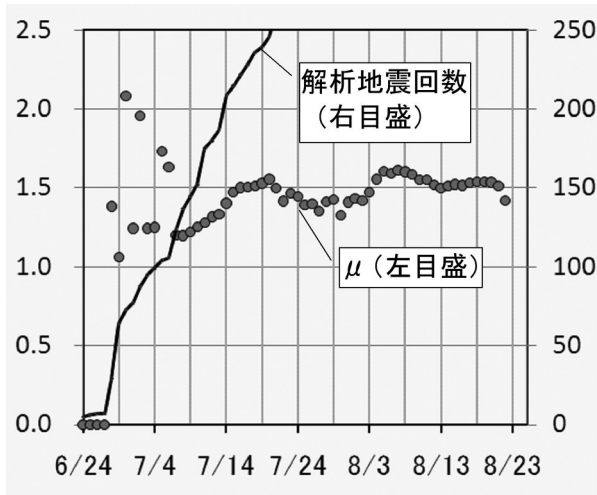


図7 2001年の活動における μ (ETASモデル)の安定性。
2001年6月24日から1日ごとに震源データを加え、
解(ETASモデルの μ)の安定性を調べた。解析した
地震回数(右目盛)も併せて表示している。

る。今回の報告のようなETASモデル解析やそれを用いた地震活動の短期評価は、このデータを用いれば迅速に評価できる。気象庁データは、1997年10月(一元化)以降Mth0.8であったが、Hi-netが導入された2002年10月以降、Mth0.5程度で推移している。Mth0.5程度では、ETASモデルで解析するには十分な数の震源データが得られる。よって、2002年10月以降の時期で、温地研データと気象庁データによるETASモデルを比較し、違いがなければ4-1節で得られた知見は問題なく適用できると考えられる。該当する時期で震源の数がほぼ同じになるのは、気象庁Mth0.5に対し、温地研Mth0.6である。

図9は2002年10月以降の両者のモデルについて示したものである。両者の地震活動諸量をみるとb値が気象庁の方が0.1ほど小さい以外、ETASパラメータについての差異はほとんど見られない。モデルと実際の過不足も同じような様相を呈している。このため、気象庁震源を用いた解析も4-1節で示した考察をそのまま当てはめることができる。また、2001年の μ 値は、温地研データのMthを0.6程度にすることで推定できる。

5. 結論

本調査において大きく以下の2点が明らかになった。
・温泉地学研究所の震源データを用いて、箱根付近の浅発地震活動についてETASモデル解析を行い、全体的な活動と過去の活発な活動時期のパラメータを比較した。その結果噴火警戒レベル2に達したと推定される2001年の活動の特徴が明確になった。すなわち、ETASの μ

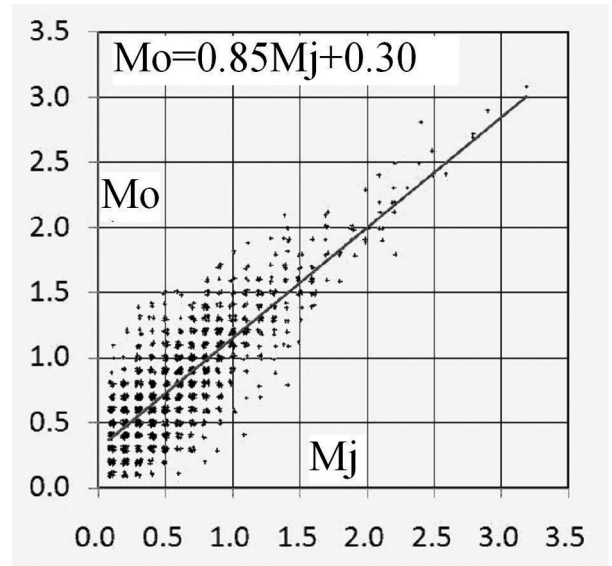


図8 温泉地学研究所Mと気象庁Mの関係。横軸は気象庁M(Mj)、縦軸は温地研M(Mo)である。データの最小単位が0.1であり、粗密の状況を示すため、元データ双方に ± 0.04 以内でランダムにばらつかせて表示している。

が他の時期に比較して顕著に大きくなった。

・ETASの μ は短期の地殻変動(GPS)とよい相関を示し、GPSが火山内部の物質移動を表現していると推測されることから、 μ の変化の追跡は噴火警戒レベルの早期推定に役立つ可能性があることが分かった。

謝辞

国土地理院のGPSデータを使用させていただきました。また、温泉地学研究所吉田所長、防災科学技術研究所棚田氏、上垣内気象庁火山課長、気象庁小久保氏に種々の指摘をいただき、改稿に役立ちました。記して謝意を示します。

参考文献

- Akaike, H. (1974) A new look at the statistical model identification, IEEE Trans. Autom. Control, AC-19, 716-723.
- 代田寧・板寺一洋(2009)箱根火山大涌谷北側斜面における噴気ガス組成の時間変化, 日本火山学会講演予稿集, 146.
- 舟崎淳・地震予知情報課(2004)気象庁速度マグニチュードの改訂について, 験震時報, 67, 11-20.
- 原田昌武・小林昭夫・細野耕司・行竹洋平・吉田昭夫(2009)富士山及び箱根火山の膨張歪と低周波地震活動, 火山, 55, 193-199.

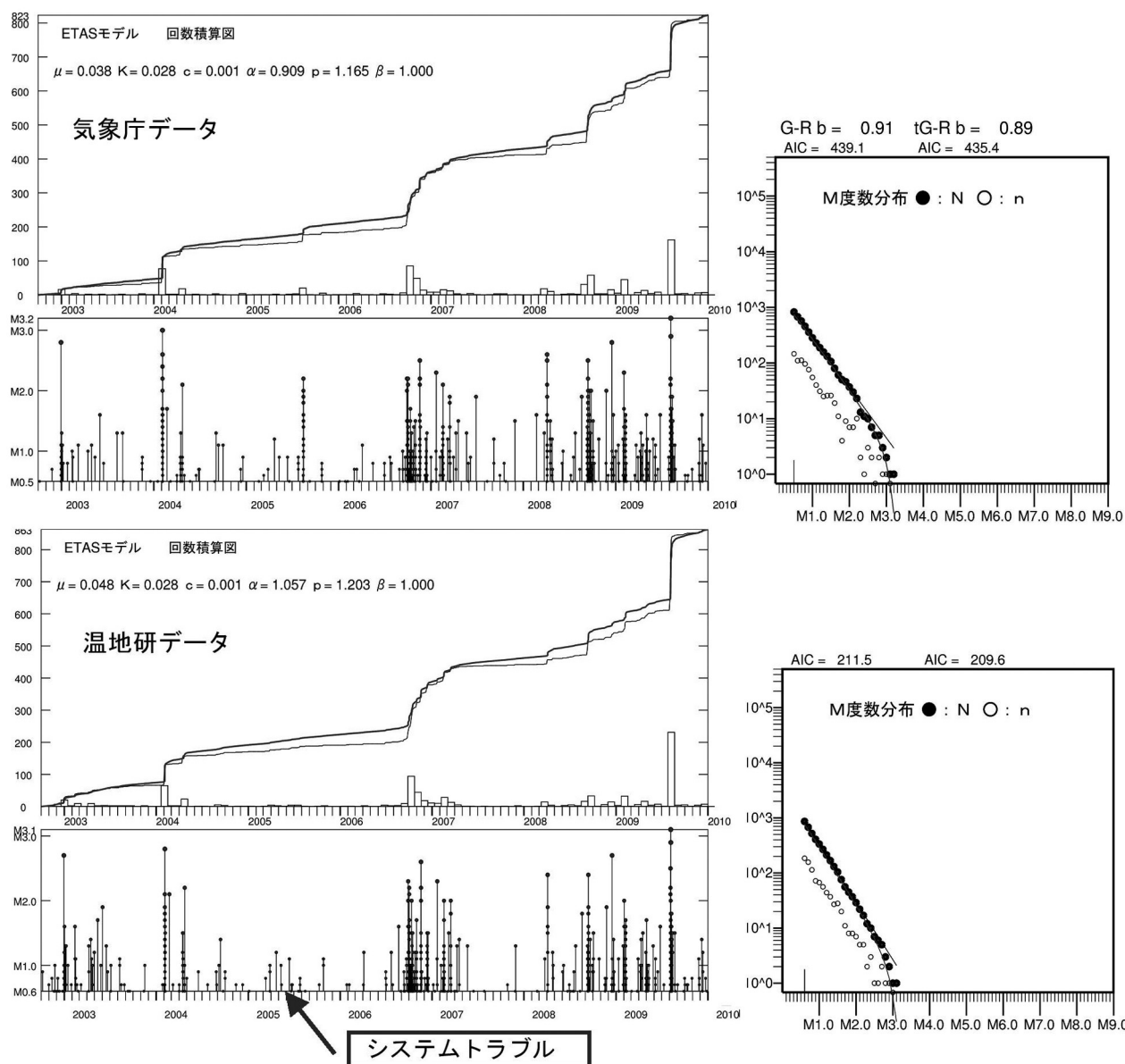


図9 温泉地学研究所データと気象庁データによる ETAS モデル・M 度数分布の比較 (2002 年 10 月 ~ 2009 年 12 月)。温地研は Mth0.6、気象庁は Mth0.5 のデータを扱っている。ETAS モデルのパラメータはほぼ似通っていることと、モデルと実際の積算曲線の推移が一致していることなどが分かる。

原田昌武・細野耕司・小林昭夫・吉田昭夫 (2010a)

2001 年箱根群発地震活動以後の箱根から富士山にかけての地殻変動, 温地研報告, 41, 7-14.

原田昌武・細野耕司・伊東博・明田川保・小林昭夫・本

多亮・行竹洋平・吉田昭夫 (2010b) 箱根群発地震活動と地殻変動, 日本火山学会講演予稿集, 121.

石垣祐三 (2006) ETAS モデルを用いた地震活動の短期確率評価, 駿震時報, 69, 135-154.

石垣祐三 (2008) 全国を対象とした地震活動監視のための解析手法について, 駿震時報, 72, 1-25.

伊東博・宮下雄次・棚田俊収・代田寧・倉石隆介・加藤正造 (2005) 新たな総合研究システムについて, 観

測日より, 55, 23-34.

神奈川県温泉地学研究所 (1999) 温泉地学研究所における「神奈川県西部地震」の取り組み, 温地研報告, 29, 3-40.

気象庁 (2001) 報道発表資料

<http://www.jma.go.jp/jma/press/0108/07a/hakone.pdf>

気象庁 (2009) 報道発表資料

http://www.jma.go.jp/jma/press/0903/17a/090317_leaflet_4.pdf

Ogata, Y. (1988) Statistical Model for Earthquake Occurrences and Residual Analysis for Point Processes J. Amer. Statist. Assoc. 83, 9-27.

Reasenberug, P. (1985) Second-order moment of central California seismicity, 1969-1982, J. Geophys. Res., 90, 54749-5495.

棚田俊收・田中丈博 (1999) 温泉地学研究所の地震観測網におけるマグニチュードの算出式 , 温地研報告 , 29 , 41-46.

棚田俊收・代田寧・伊東博・袴田和夫 (2002) 2001 (平成 13) 年箱根火山の群発地震活動について , 温地研観測だより , 52 , 1-4.

辻内和七郎・鈴木征志・栗屋徹 (2003) 箱根大涌谷で

2001 (平成 13) 年に発生した蒸気井の暴噴事故とその対策 , 温地研観測だより , 53 , 1-12.

宇津徳治 (1978) 地震のマグニチュード分布式のパラメータ推定 , 地震 2 , 31 , 367-382.

ト部卓・束田進也 (1991) ワークステーションによる微小地震観測網波形検測支援システム , 地震学会講演予稿集 , 70.

渡辺晃 (1971) 近地地震のマグニチュード , 地震 2 , 24 , 189 - 200.

