

世界各地の地熱帯に於ける地震活動の大量データ

## 地熱地帯における地震活動

京都大学理学部

久保寺 章

### Seismicity of the Geothermal Field

Akira KUBOTERA

Volcanic Laboratory, Faculty of Science, Kyoto University

#### 序

地熱開発が進められている地域では、短期あるいは常時的に微小地震観測が実施されている。地震観測の目的は地熱地帯での地下探査と地震活動の監視とに大別できる。短期の地震観測は主として前者の目的で、他方、常時の地震観測は探査と監視の両面の目的で実施されている。

地熱開発に伴って、多くの地熱地帯で微小地震の発生頻度が増加したとの報告が出されている。一般には、Geysers やイタリアの地熱地帯で代表される。蒸気卓越型の地熱地帯(Vapour-dominated geothermal field)では微小地震の活動度は生産と関係し、他方、Wairakeiなどで代表される熱水卓越型の地熱地帯(Liquid-dominated geothermal field)では熱水還元に関係が深いことが報告されている。

本稿では、地熱地帯ではどの程度の規模の地震が発生しているのか、また、この地震活動と地熱地帯の地下構造との関係を豊肥地熱地域の例を挙げて述べることにする。

#### 1. 地熱地帯に発生する地震の規模

地熱地帯に発生する地震の規模(マグニチュード)は最大どの程度であろうか。世界各地の地熱地帯での地震観測の報告から地熱地帯に発生する最大地震の規模をみると表1のようになる。

地熱地帯で発生する地震の最大の規模について論じたのはWard<sup>1)</sup>が最初であり、彼はM(マグニチュード)約4.5以上の地震は発生していないと結論している。Wardの論文が出た後も彼の推論と同じ結果が、多くの地熱地帯で得られていて、最大地震はM3前後であるとされている。

一例として、豊肥地熱地帯の例を挙げてみる。気象庁での地震観測精度は1961年以降から向上し、地震の検知能力はM3まで可能となってきた。そこで、九州中部地域でのM3以上の地震の震央を気象庁資料からプロットすると図1のようになる。

地熱地帯に発生する地震は地殻浅部に発生しており、図1では、深さ40 km以上に震源がある地震は除いてある。図1で見られる様に、震央は別府湾から島原半島に到る帯状の地域に分布しており、この南限は大分—熊本構造線となっている。地震分布域はちょうど別府—島原地溝帯の

表1 世界各地の地熱地帯で発生した地震の最大規模

地名	最大地震のM	調査実施年または群発地震発生年
U.S.A		
Salton Sea	<3.0	1975 8weeks
Mesa	<3.0	1973 5weeks
Brawley	<4.7	1975 Swarm
The Geysers	<1½ <2	1971 4weeks 1976 Sept. 20-24
Roosevelt Hot Spring	<2.8	1974, 1975
Hebgen-Yellowstone	<2.5	1972 summer
Long Valley	<2.97	1973 April 27 ~ June 2
Coso	<3.9	1975 Sept.
Snake river plane	<4.0	1963 Swarm
Iceland	<4.5	
New Zealand		
Rotoruo-Taupo	<4.8	1964-65 Swarm
Matamata	<2.9 <2.3 <3.9	1952 Swarm 1955 Swarm 1960 Swarm
Kawerau	<3.8 <3.2	1950 Swarm 1964 Swarm
Waimangu	<2.5	1960 Swarm
Tepuke	<4.5	1962 Swarm

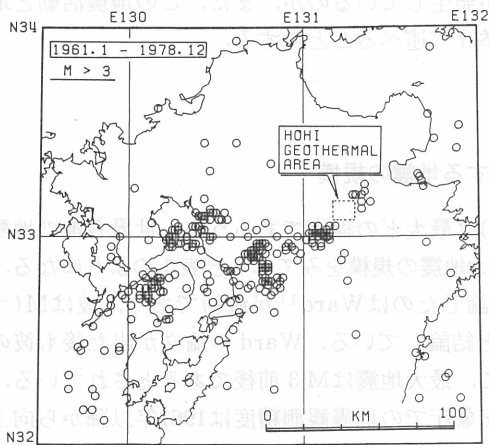


図1 気象庁による1961年以降の九州中部地域におけるM3以上の地震の震央分布

中に存在している。しかし、震央分布は連続的でなく、所々に地震が発生していない空白域が存在している。豊肥地熱地帯もこの空白域の一つであり、図から豊肥地熱地帯ではM3以上の地震は発生していないことが判る。しかし、豊肥地熱地帯の南西及び北東では後述する如く、M6級の地震が1975年に発生している。

一般に地熱地帯では規模の大きい地震が発生していない。この事実の説明としては、地熱地帯の地殻は、ある程度破砕が進行していて不均質度が高く、大規模地震発生の原因となる程、応力集中が起こりにくいためであるとされている。

### 2. 豊肥地熱地域における微小地震

我が国での地震観測事業は気象庁により実施されており、近年、地震予知計画事業の進展に伴って、地震観測の精度は飛躍的に向上し、日本の内陸部で発生するM3以上の地震は気象庁の地震観測網により検知できるようになってきた。他方、M3以下の地震は微小地震と呼ばれ、現在、大学や科学技術庁に属する微小地震観測網によって観測されている。しかし、この種の微小地震観測網は全国的には分布しておらず、地熱地帯はこれらの微小地震観測網から外れた位置にある場合が多い。したがって、地熱地帯の微小地震活動を知るためには、独自の微小地震観測網を設置して対処している。

豊肥地熱地帯では、九州電力K.K.の大岳(13.5 MW)および、八丁原(55 MW)地熱発電所が稼働しており、1977年6月八丁原地熱発電所運転開始と同時に、テレメーター方式による6点(現在7点に増強)の微小地震観測網が作られ観測が継続されている<sup>2)</sup>。この様に長期にわたって独自の微小地震観測が地熱地帯で継続して実施されている例は非常に少ない。最近では電源開発K.K.及び出光地熱開発K.K.(滝上地区)の微小地震観測網も建設され、豊肥地熱地域全域の微小地震の活動度が、より詳細に検知できるようになっている。

図2は1977年以降の九州電力K.K.の微小地震観測網によって得られた微小地震の震央分布図である。図中の×印は地震観測点であり、観測点から常時◎印の八丁原地熱発電所までデータが伝送されている。

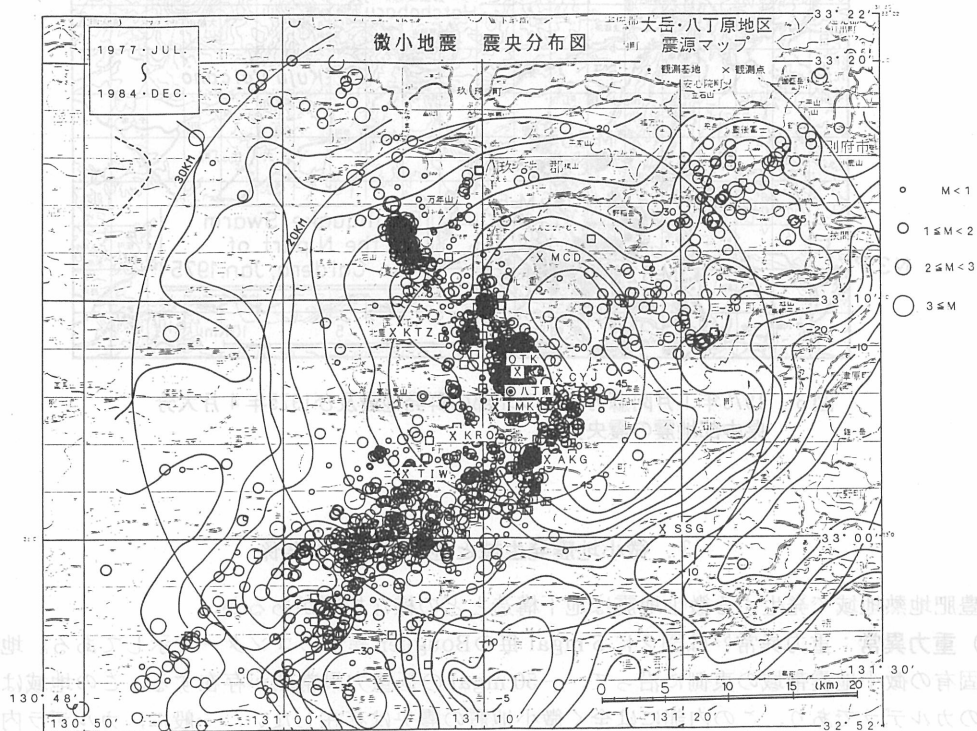


図2 微小地震 震央分布図  
(九州電力微小地震観測網による)  
◎観測基地 ×観測点

地熱地域固有の微小地震群は、八丁原及び大岳(OTK)の両地熱発電所を通り、北西-南東に延びる帯状の地帯に分布している。これと直交する南西に延びる帯状分布は、阿蘇カルデラ北部に群発する地震群であり、他の1つは北東部に点在する地震群となる。

図3に1975年1月及び1975年4月、阿蘇カルデラ北部に発生した群発地震<sup>3)</sup>(最大地震のMは6.0)及び、大分県中部地震<sup>4)</sup>の本震(M6.4)及び余震の震央分布が示してある。図3から判る様に、図2の南西部分及び北東部分に分布する地震群は、1975年に発生した2つの地震の余震活動と見られる。したがって、地熱地域固有の微小地震群は2つの地熱発電所を通り北西-南東に延びる帯状地域に分布していることが判る。

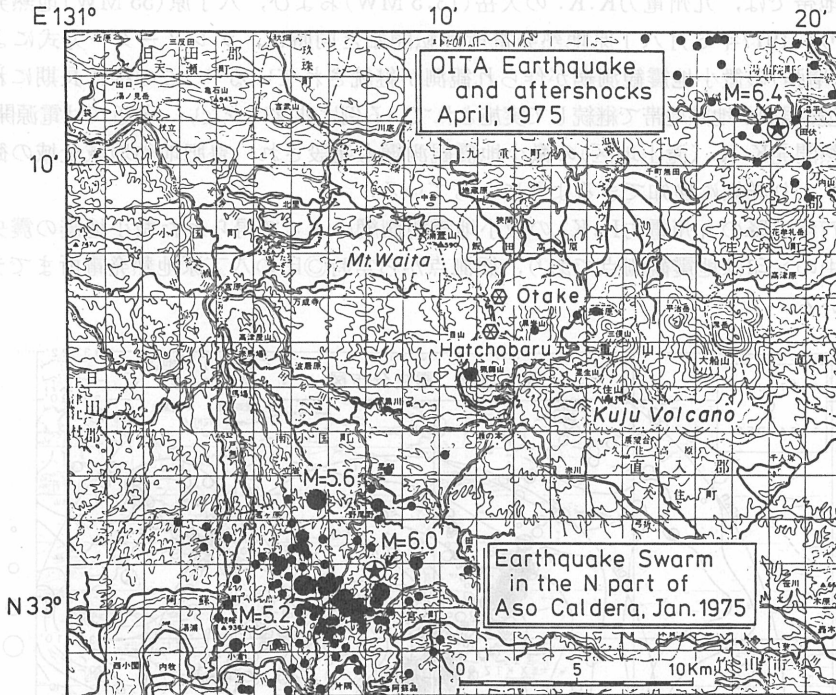


図3 1975年1月阿蘇カルデラ北部の群発地震及び1975年4月大分県中部地震の震央分布

### 3. 微小地震発生域と地下構造との関係

豊肥地熱地域で発生する微小地震は地下構造とどのような相関があるか。

1) 重力異常：重力異常<sup>5)</sup>は図2に5 mgal 毎のBouguer 異常のコンターで示してある。地熱地域固有の微小地震帯域の東側に沿って、-50 mgal の低重力異常域が存在する。この地域は火山性のカルデラであり、この内部には全く微小地震の震央は存在しない。一般に、カルデラ内では地殻の破碎が一層進行していて、応力集中が起こりにくいために地震が起こらない。ただし、カルデラ内にマグマが貫入するなどの火山活動が生じた場合には、カルデラ内でも火山性地震が発生する。カルデラから西側に順次基盤面が浅くなっている地域には、微小地震が密集して発生している。

2) 地下構造：タイムターム法によって求めた基盤面の深さが図4に示してある。図4を基にして、図5の上部に示すEW<sub>1</sub>～EW<sub>5</sub>の測線に沿った地下構造の断面が図5の下に示してある。

重力異常でみられたカルデラの部分(EW<sub>5</sub>～EW<sub>6</sub>)では基盤面は深くなっている。他方、微小地震が密集して発生しているOTK(大岳発電所)、EW<sub>4</sub>付近は基盤が急に浅くなっている場所に相当する。

3) 断層：北西-南東の走行を持つ断層群が存在し、この断層群の位置は微小地震活動が活発な帯状の部分と一致している。また、この断層群と地熱活動が盛んな地域とも一致している。したがって、地熱地域固有の微小地震活動は地下での熱水と密接に関係すると考えられる。

#### 4. 地熱地域の微小地震の発生形態は群発型である。

一般に地震活動の形式を

- ① 本震-余震型
- ② 前震-本震(主震)-余震型
- ③ 群発型

に分類している。

大部分の地震活動は①の本震-余震型であり、規模の大きい本震が最初に発生し、その後、本震よりもずっと規模の小さい余震が続く型のものである。この型のものにはM8級の巨大地震も含まれる。

松代地震や人為地震のように③の型の群発地震もしばしば発生する。この型では、大小の地震が群をなして発生し、本震・余震の区別がつけ難い。地震の最大規模はM6級である。一般には、地殻内のごく浅い場所で発生している。②の前震-本震(主震)-余震型のものは①と③の中間型のものであり、一連の地震群の中で核となるような比較的規模の大きい主震と、その前後に規模の小さい前震群と余震群とが伴う型のものである。また、この型の地震群が何回か繰返して、一連の地震群を形成することもある。地震群の性格としては、③の群発型と類似の面が多く、③の型と②の型を厳密に区別することが困難な場合が多い。

ここでは、②と③を一括して群発型の範疇に入れて、①の本震-余震型と大別することにする。

群発地震(前震-本震-余震型を含む)を原因別に分類すると<sup>7)</sup>、おおよそ図6のようになる。群発地震の発生原因は、地下のマグマに由来するもの、地殻内応力場の変化によるもの、地下へ水を圧水したり、ダムの水もれなど的人為的なものに大別できる。

最後の地下での水の作用は、岩石の割目に浸入した水のため、間隙流体圧が上昇し、破壊すなわち地震の発生を促進すると考えられている<sup>8)</sup>。

図2の微小地震の震央は帯状に分布しているが、部分的に震央が密集している所がある。この場所では、短期間のうちに群発的に微小地震が発生している。

地熱地域の微小地震が、群発的に発生することを考えると、地下での熱水の作用が、地熱地域の微小地震発生の一つの原因と考えることができる。

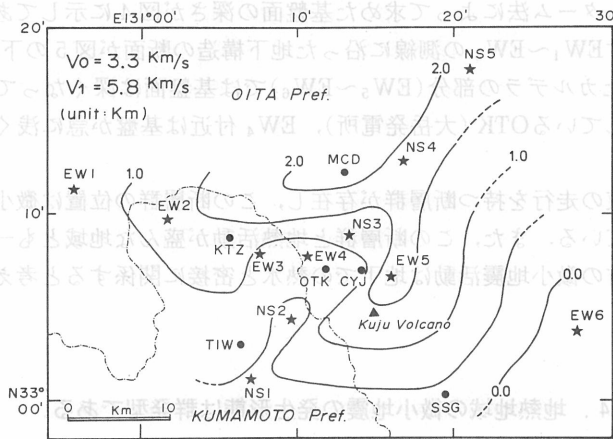


図4 タイムターン法で求めた基盤深度(コンターの数字はkm単位で、平均海水面からの深さが示してある.)

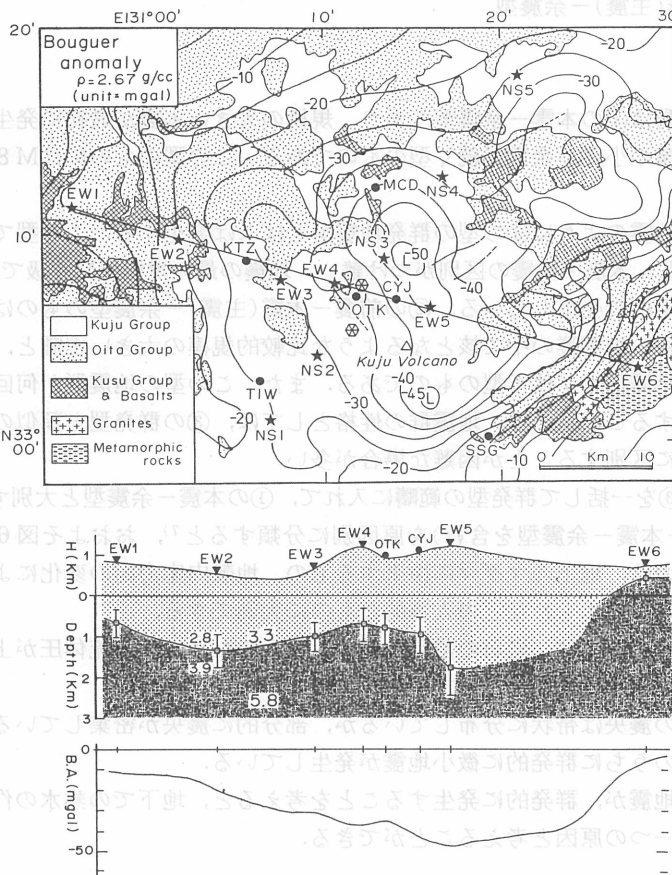


図5 <上> 断面(EW<sub>1</sub>~EW<sub>6</sub>)の位置を重力異常図及び地質図と重ねて画いてある.

<下> EW<sub>1</sub>~EW<sub>6</sub>の地下構造断面 (エラーは表層の速度を2.8~3.9 km/sに変えた場合を示す.)

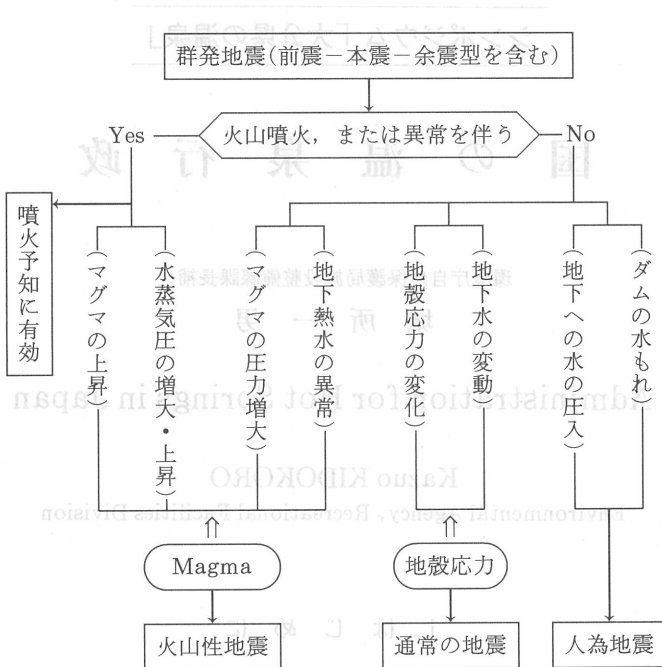


図6 群発地震の分類

文 献

- 1) Ward, P.L.: Microearthquake: Prospecting Tool and Possible Hazard in the Development of Geothermal Resources. Geothermics. Vol.1; 3-12, 1972.
- 2) 益川敏雄, 表俊一郎, 久保寺章, 三浪俊夫: 大岳・八丁原地熱発電所周辺の地震観測システムについて, 地熱学会誌, Vol.1, No.1; 3-14, 1979.
- 3) Kubotera, A., Mitsunami, T.: An Earthquake Swarm in the Northern Part of Aso Caldera and Migration of their Foci. Tectonophysics. Vol.70; 223-236, 1980.
- 4) Omote, S., Kubotera, A., Mitsunami, T.: Geophysical Studies Regarding the Oita Earthquake. J. Natur. Disaster. Sci., Vol.1, No.2; 99-116, 1979.
- 5) Kubotera, A., Tajima, H., Sumitomo, N., Doi, H.: Gravity Surveys on Aso and Kuju Volcanic Region, Kyushu District, Japan. Bull. Earthq. Res. Inst. Vol.47; 215-255, 1969.
- 6) 久保寺章, 伊藤 潔, 村上寛史, 三浪俊夫: 爆破地震動から求めた九重火山群の深部構造—Time Term法による—. 火山 Vol.27 No.2; 81-95, 1982.
- 7) 久保寺章: 群発地震に関する資料収集解析(序章), 自然災害資料解析 6; 120-126, 1979.
- 8) 大竹政和: 地震発生における間隙流体圧の役割, 地学雑誌 Vol.95 No.3; 13-31, 1986.