

## 富士山ワーキンググループ成果報告書

### 目 次

1. はじめに
2. 宝永四年(1707年)富士山噴火の概要と活動経過  
(火山噴火予知連絡会会報第 82 号に掲載)
3. 宝永四年(1707年)富士山噴火の火山活動プロセスの推定と火山情報発表タイミングの想定  
(火山噴火予知連絡会会報第 82 号に掲載)
4. 富士山において発表する火山情報と火山現象との対応(想定)
5. 富士山における地震観測及び地殻変動観測の課題について
6. 国内火山における地殻変動を伴う群発地震活動について
7. 富士山を想定したシミュレーションによる震源決定能力調査
8. 富士山の地殻変動観測網・地震観測網の検知能力について
9. 富士山に類似した火山における噴火前兆現象の調査

# 1. はじめに

## (1) 富士山ワーキンググループの設置と検討内容

富士山では、平成12年10月から12月、及び翌年4月から5月にかけて低周波地震が多発するなど、社会的にも注目を集めた。このような状況に鑑み、火山噴火予知連絡会は、富士山の火山活動の変化の現れ方や火山情報等に関する検討を行うため、平成13年5月28日の第89回連絡会において、富士山ワーキンググループ（以下富士山WG）を設置した。富士山WGでは、富士山の活動についての基礎データ収集整理、情報の発信に関する検討、及び監視観測についての検討を行った。なお、富士山における観測研究のあり方については、科学技術・学術審議会の測地学分会火山部会から平成13年6月に報告がなされている。

富士山WGは、富士山における大規模噴火の一つである宝永四年(1707年)の噴火（以下宝永噴火）について、豊富な古記録と詳細な地質調査結果を活用し、噴火の推移を明らかにするとともに、宝永噴火のマグマ供給系の考察を行い、宝永噴火に伴う地殻変動量を推定するなどの成果を得た。また、富士山の噴火プロセスについてさらに検討するため、宝永噴火以外の富士山の噴火事例や、海外の玄武岩質の火山で長い静穏期の後の噴火を近代的観測で捉えた事例について調査した。しかし、宝永噴火以外の富士山の噴火については、噴火に至る過程を示す資料はなかった。また、海外の玄武岩質の火山で長い静穏期の後の噴火を近代的観測で捉えた事例はなかった。

さらに、監視観測に関する今後の検討に資するため、富士山を対象とした地殻変動と地震観測に関する検知能力の調査を実施した。

本報告書はこれらの検討結果を取りまとめたものであり、本章ではそれぞれの成果の概要を、第2章以下には成果の全文を収録した。

なお、富士山に関する防災対策の確立とそれらの基礎となるハザードマップや防災マップの作成等を行うため、平成13年7月に、国及び関係する県、市町村により富士山ハザードマップ作成協議会（平成14年6月に富士山火山防災協議会に名称変更）が設置され、また、これらの内容を専門的見地から検討するため、学識委員と行政委員から構成される富士山ハザードマップ検討委員会が設けられた。富士山WGは、富士山ハザードマップ検討委員会からの要請を受け、検討結果を富士山ハザードマップ検討委員会に提供しており、ハザードマップ作成等に活用されている。

## (2) 宝永四年(1707年)富士山噴火の概要と活動経過（第2章）

古文書等の歴史資料や地質調査等の最近の研究成果に基づいて、宝永噴火前後の活動経過について整理し、噴火様式の変化を含む時間経過を推定した。それによると、宝永噴火に際しては、噴火以前にかなり明瞭な前兆的現象が発生していたことが分かった。すなわち、噴火発生の1~2ヶ月前には、山腹のみで有感となるような地震活動があり、十数日前からは山腹のみで有感となる地震が多発するようになり、ほぼ毎日鳴動もあった。1日前には山麓でも有感となる地震が増加し、半日前から噴火前にかけてはさらに活発となり、規模の大きい地震も数回発生した。噴火は微動や空振を伴う大量の軽石の噴出で始まり、噴煙は成層圏に達したと見られる。半日後には、噴出物が軽石からスコリアに移行した。噴出率は噴火初日（1707年12月16日）から翌朝までが最大で、その後は盛衰を繰り返しながら噴火が続いた。25日夕方から27日にかけて再び活発化したが、その間の噴出率は噴火開始当初の約4割程度であった。31日夜から1月1日未明にかけて数度の噴火のあと、一連の噴火は終息した。

## (3) 宝永噴火の火山活動プロセスの推定と富士山における火山情報について（第3、4章）

### (3-1) 宝永噴火のマグマ供給系のモデル

宝永噴火におけるマグマ供給系のモデル化を試み、宝永噴火に前駆した地殻変動を見積もるため、富士山の山頂直

下に球状のマグマ溜りと、山頂から宝永火口付近まで及ぶダイクを想定した。マグマ溜りは深さ 15km に存在し、ダイクは深さ 10km から垂直に貫入すると仮定した。そして、宝永噴火の推移に対応するようにマグマを移動させた。具体的には、噴火の約 2 ヶ月前から、マグマ溜りから既存の火道を通してマグマが上昇し始め、約 2 週間前に深さ 10km 付近に達し、そこからダイク状に貫入する。その後もダイクの貫入は継続し、噴火の数日前には深さ 5km、噴火前日には深さ 1km に達する。噴火開始後は、噴出物の放出に伴い、ダイクや深部マグマ溜りは次第に収縮するというものである。

このマグマ供給系とマグマ移動のモデルによると、期待される地殻変動の変化量は、現在の地殻変動観測網によると、噴火十数日前から噴火前日まで傾斜計のみで検出し得る程度の微小な変化量であり、ダイク頭部が深さ 1km まで達する噴火前日には、数点の GPS 観測点で数 cm 程度の変化として観測されることになる。

### (3-2) 富士山における火山情報

宝永噴火について、地震活動の経緯や上記モデルで推定された地殻変動量を基に、もし宝永噴火が現時点で発生したとして、時間的推移を含め、発表し得るであろう火山情報についての一つの考え方を示した。

しかしながら、これは、宝永噴火にのみ対応するものであって、将来の噴火に対する前駆現象の現れ方や噴火の推移は多様であると考えられる。このため、富士山において噴火前後に生起すると予想される地震活動や地殻変動、噴火の推移などとそれに応じてどのような種類の火山情報を発表していくかについて、宝永噴火の事例および他の火山での経験に基づいて一般的な考え方を整理した。

### (4) 富士山における観測網の検知能力の調査 (第 5、6、7、8 章)

富士山の定常的な活動、あるいは噴火に至る過程でのマグマの貫入に伴う地殻変動や地震活動を検出し、変動源や震源を特定しうる観測網たる要件を示すため、シミュレーションによって観測網の検知能力を評価した。

#### 1) 地震観測網

富士山の現在の地震活動度を考慮すると、地震活動度の変化を検知するための観測網としては、マグニチュード (M) 0~0.5 の地震を観測できること、また山頂部を含めて山体内で M0.5 程度以上の地震の震源を精度よく決定できることを目標とするのが適当である。一方、マグマが新たな通路を形成しながら地殻変動と地震活動を伴いつつ貫入したと考えられる国内の火山の事例について取りまとめたところ、発生した地震のモーメントの総和はモーメントマグニチュード (M<sub>w</sub>) 2.7 から 6 程度、地殻変動はモーメントマグニチュード 5.5 から 7 に相当した。地震観測網が M0.5 程度の地震の震源決定が可能な仕様になっているならば、ゲーテンベルク・リヒター則から考えて、最大地震のマグニチュードが 2.7 程度という規模の小さい地震活動であっても十分な数の震源を決定できることから、この目標設定は妥当であろう。

シミュレーション結果の一般的傾向としては、北西象限の震源決定精度は高いが、南側及び北東象限の端では観測点が限られているために相対的に低い。計画段階のものまで含めて恒久観測点のデータを一元的に集約したとする模擬的な計算では、深さ 5km、M0.2、及び深さ 10km、M0.5 の場合は、ほぼ富士山全域にわたって震源位置を良好に再現できている。深さ 15km、M0.5 では、震源決定精度はやや落ちるが、震央位置を大きく誤ることはない。以上のことから、現在計画中の観測網でほぼ必要条件を満たしていると考えられる。今後、計画中の観測点の完成後に実際のデータで評価することが必要である。なお、富士山南麓の地震の震源決定精度をさらに向上させるためには、富士山南麓にノイズレベルの低い観測点を増設することが望ましい。

#### 2) 地殻変動観測

伊豆半島東方沖の群発地震活動や三宅島の噴火の初期に貫入したマグマが約 1 千万 m<sup>3</sup> と考えられるので、富士山においても、噴火前にこれと同程度の量のマグマがマグマ溜りに蓄積し、噴火時に山体内の不特定の場所からダイクとして貫入することを想定した。

マグマの深さが 10km 程度よりも浅ければ、1 千万 m<sup>3</sup> のマグマ蓄積あるいはマグマ貫入によって、地表における変位は最大で数 mm を超え、また傾斜変化も最大で 1 μrad を超える。概ね 5km 格子内に各 1 点 GPS 観測点があれば、マグ

マの蓄積あるいはダイクの貫入が富士山の山体のどこで起こったとしても、そのおおよその位置と大きさが把握できる。また、即時的にデータを評価できる傾斜計や歪計が適切に配置されていれば、速やかに異常を検出することができる。

なお、マグマ供給系やダイクの位置や形状をより詳細にモデル化するためには、マグマ活動による変位、傾斜、歪等をさらに稠密に観測すること、また、火山活動の推移に応じた評価を行うため、準備過程を含めたから噴火過程の全体を連続的に観測を実施できるような観測網にすることが重要である。なお、今後も各地殻変動観測点のデータの精度を評価しつつ、地下のマグマの動きを評価するための観測網のあり方を検討し、構築を継続していくことが望ましい。

#### (5) 富士山に類似した火山における噴火前兆現象の調査 (第9章)

富士山と類似した玄武岩質マグマを噴出する世界各地の大型成層火山の前兆現象に関する研究事例を調査したが、長い休止期間後に噴火した火山の前兆が近代的な科学的観測により把握された噴火事例は見当たらなかった。しかし、富士山に類似した火山であるエトナ火山や、マウナロア山などの多くの噴火では、地震活動の活発化と地殻変動の異常が噴火直前2、3ヶ月前から1、2日前までに捕捉された事例が報告されている。これらの結果は、将来の富士山の噴火過程のモデルとして直接利用できるものではないが、今後の富士山の監視を行う上では十分参考になるものと期待される。

## 2. 宝永四年(1707年)富士山噴火の概要と活動経過

(火山噴火予知連絡会会報第82号に掲載)

## 3. 宝永四年(1707年)富士山噴火の火山活動プロセスの推定と

### 火山情報発表タイミングの想定

(火山噴火予知連絡会会報第82号に掲載)

#### 4. 富士山において発表する火山情報と火山現象との対応(想定)

火山噴火予知連絡会富士山ワーキンググループ

富士山ワーキンググループの成果の一つとして、宝永噴火の推移が明らかにされ、また宝永噴火におけるマグマ供給系をモデル化し、宝永噴火に前駆する地殻変動を見積もることも行われた。これら宝永噴火に関する考察と、他の火山における噴火事例を参考にして、富士山において噴火前後に生起すると予想される火山現象とそれに対応してどのような種類の火山情報を発表していくかについての考え方を第1表のように整理した。

富士山の将来の噴火に対する前駆現象の現れ方や噴火の推移には様々な変化があると考えられるので、火山現象と火山情報の時間的な推移を議論することはできないが、第1表のように、前兆的な地震活動や地殻変動、あるいは噴火現象とそれらに対応して発表する火山情報の関係をまとめておくことは有意義である。ただし、第1表は噴火の前駆現象としての激しさの順、あるいは噴火の過程の中での噴火現象の激しさの順に並べたものであるが、火山活動の推移によっては、火山観測情報→臨時火山情報→緊急火山情報の順に発表できるとは限らないことに留意されたい。

第1表 火山現象と火山情報

情報発表の元となる火山現象	発表する火山情報の種類
浅部での火山性地震・微動の発生は少ないが、地殻変動の異常が観測される、深部低周波地震活動が高まる、噴気活動が現れるなど 震源が深い火山性地震の増加 浅部で火山性地震・微動の発生が見られる 浅部低周波地震が観測される 噴気活動が活発化する	火山観測情報 (あるいは臨時火山情報)
火山性地震を伴いながら、浅部に変動源があると推定される地殻変動の異常が観測され始める 浅部で火山性地震・微動が頻発するようになる 火山性地震の規模が次第に大きくなる 小規模な噴火の発生	臨時火山情報 (あるいは緊急火山情報)
震源が浅く、体を感じるものも含めた火山性地震の多発 膨張を示す地殻変動が加速する 噴煙高度が高く広範囲に降灰 溶岩流噴火が発生し、山麓に達する恐れがある 火砕流が発生、あるいはその可能性大 顕著な噴煙活動の継続、またはその可能性大 顕著な溶岩流出が継続、またはその可能性大 積雪期において火砕流噴火が発生、あるいはその可能性大	緊急火山情報 (あるいは臨時火山情報)

## 5. 富士山における地震観測及び地殻変動観測の課題について

火山噴火予知連絡会富士山ワーキンググループ

### 1. 検討する内容について

富士山の監視観測について

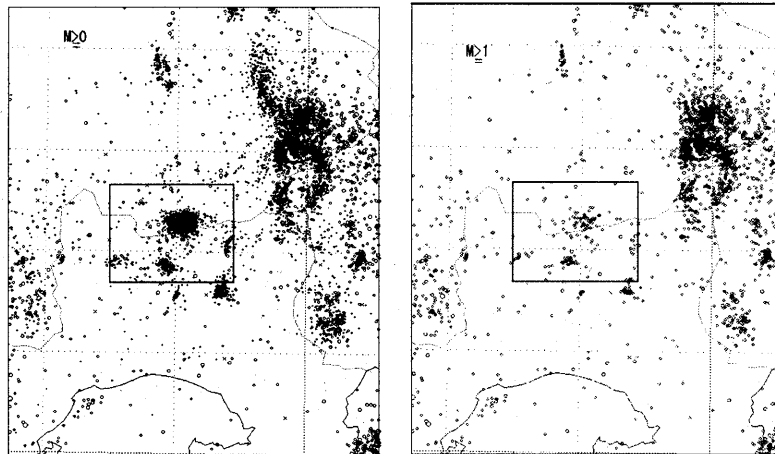
- (a) 必要な検知能力・観測精度
  - (b) 検知能力を達成するために必要な観測点配置
  - (c) 関係機関で実施しているデータの活用
- の観点から検討する。

### 2. 地震観測について

富士山の地震活動レベル変化を把握するための監視観測がどの程度の検知力を必要とするかについて、富士山で通常見られる地震活動に基づいて考察する。防災科学技術研究所における1995年4月から2002年6月までの約7年間の震源決定実績は、第1表（第1図）のようになる。このことから、富士山の通常地震活動のゆらぎを把握するには、M0.5程度以上の震源決定能力を目標にすることが適当と考えられる。

第1表 防災科学技術研究所による富士山の震源決定実績

マグニチュードの閾値	震源決定数	
2以上	9	活動度の変化を見るのは困難
1以上	約150	年20・30個程度、活動度の変化を見るには不十分
0.5以上	約550	年間約100個
0以上	約1200	年間100個以上



震源分布 (M≥0)

震源分布 (M≥1)

第1図：防災科学技術研究所の震源決定結果 1995/4～2002/6

代表的なマグニチュードの地震から期待される地震波の振幅を見積もると、第2表のようになる。ここでは、初動の検知限界は最大振幅の数分の1、またノイズレベルを0.00001cm/sと仮定した。第2表の下線付きの範囲では初動が検知できない。

第2表 各マグニチュードに対応する最大振幅 (cm/s)

震源距離, km	2	10	11.2	15	20
深さ 10km に対応する震央距離, km	—	0	5	11	17
M2	0.05	0.003	0.0024	0.0015	0.0009
M1	0.007	0.0004	0.0034	0.0002	0.0001
M0	0.001	0.00006	0.00005	<u>0.00003</u>	<u>0.00002</u>

渡辺(1971)の式:  $0.85M - 2.50 = \log A_v + 1.73 \log R$ , R: 震源距離=<200km

$$\log A_v = 0.85M - 2.5 - 1.73 \log R$$

注) 上の表の振幅は地震波の減衰を考慮していない。

山頂部を含めて富士山全域であるマグニチュードレベル以上の地震を均質に震源決定するための観測網を考える。M2 なら現状の観測網で充分であり、M1 なら現状でも可能である。M0 クラスの地震の震源決定には、山頂から 5km 以内に数カ所の観測点が必要となる。また、震源決定精度については、少なくとも計算上は現在でも 0.5km の精度がある。実際には、地震波速度構造の 3 次元的不均質の影響、低周波地震の初動検出の不確かさ等を考慮して、精度を評価する必要がある。

現在の気象庁のみの観測点配置では不十分であるが、気象庁が計画している山腹での観測を実施することや、関係機関(大学、防災科学技術研究所など)が設置する観測点データを監視に活用するなどのデータ共有化を進めることにより、富士山で M0.5 程度の地震を精度良く決定しうる観測網を実現することは可能である。

### 3. 地殻変動観測網

監視観測の目的は富士山の活動評価が可能なデータを取得することである。必要な検知能力・観測精度を考える手掛かりとなる現象は、

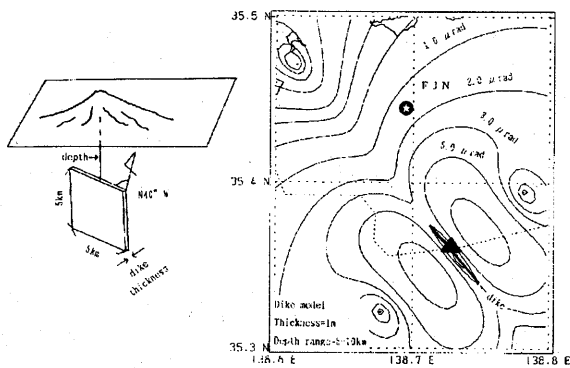
- (ア) 富士山直下 20km 以浅での岩脈貫入(岩脈の規模(幅、高さ、開口量を設定))
- (イ) 富士山直下 20km 以浅でのマグマ溜りの膨張・収縮(噴火準備過程を捉える)
- (ウ) 火道を上昇するマグマの検出

などが考えられる。なお、地下の変動源をモデル化するためには、変化の検出のための観測点配置よりさらに稠密な観測点が必要となる。

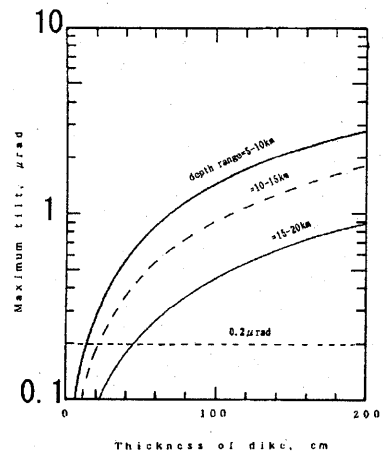
一般に、地殻変動の検出限界は、傾斜計の場合、1日当たりの変化率  $0.1 \sim 0.2 \mu\text{rad}$  程度、GPS(1周波)の場合、水平変位 5mm、上下変動 1cm 程度である。次に、マグマの移動から期待される地表変動量、あるいは岩脈貫入や球状マグマ溜りの圧力変動が与える地表の変形を見積もる。長さ 5km、幅 5km のダイクが北西—南東方向に貫入し、1m 開口した場合の傾斜変動を断層の上端の関数として第2図と第3図に、球状マグマ溜りにマグマが蓄積した場合の傾斜変動の例を第4図に示す。

#### (3) 観測データの活用について

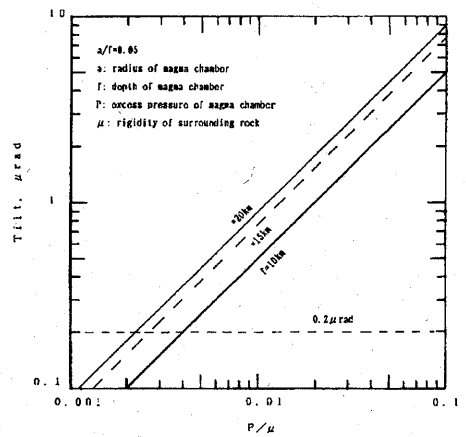
GPS が複数の観測点を持つ観測網として運用されて初めて変動が検知できるのに対し、傾斜計・体積歪計などは 1 観測点におけるデータそれ自体が意味を持つ。従って、富士山に設置されている各機関の GPS データを集中して実時間解析するとともに、傾斜計・体積歪計などのデータも集中することでより有効な監視を行うことが望ましい。また、解析結果は速やかにデータを提供した機関に配布され、研究に活用されることが必要である。干渉 SAR データについても、速やかな解析結果の情報交換・公開が必要である。



第2図 ダイクモデル (左) と最大傾斜変動の分布。  
 Dyke model for evaluating of magmatic activity corresponding to the detectable level of tilt change (left) and example of the maximum tilt change due to the model with 1-m-thick dyke.



第3図 ダイクの厚さと傾斜変動の大きさ。  
 Maximum tilt change as a function of dyke thickness.



第4図 球状マグマ溜まりモデルによる傾斜変動。  
 Tilt change caused by the spherical magma chamber model.

参 考 文 献

鵜川元雄・熊谷貞人(1994): 富士鳴沢火山活動観測施設における傾斜変動観測、防災科学技術研究所研究報告、53、35-50



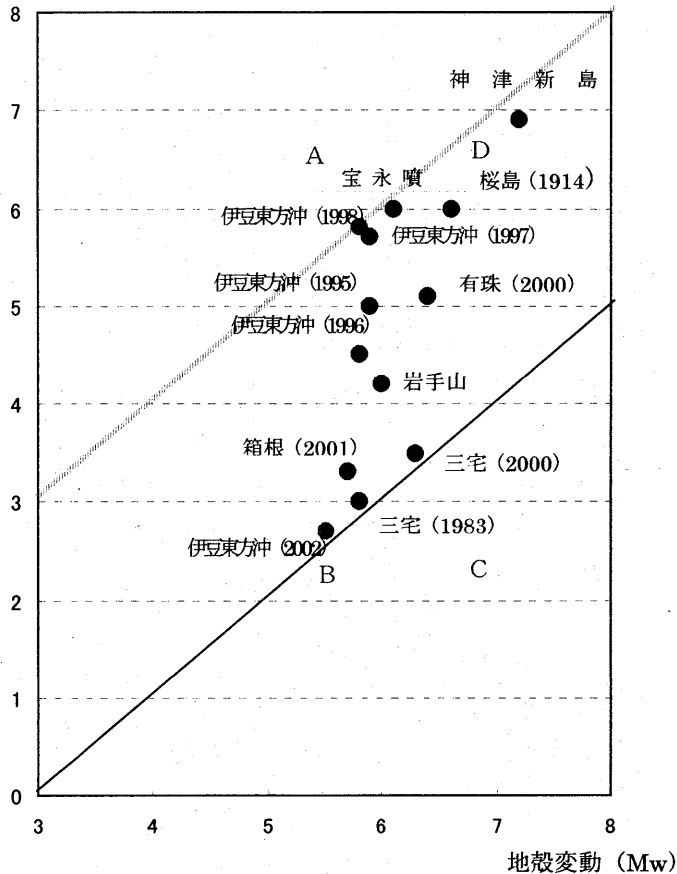
## 6. 国内火山における地殻変動を伴う群発地震活動について

火山噴火予知連絡会富士山ワーキンググループ

### 1. 群発地震活動と地殻変動

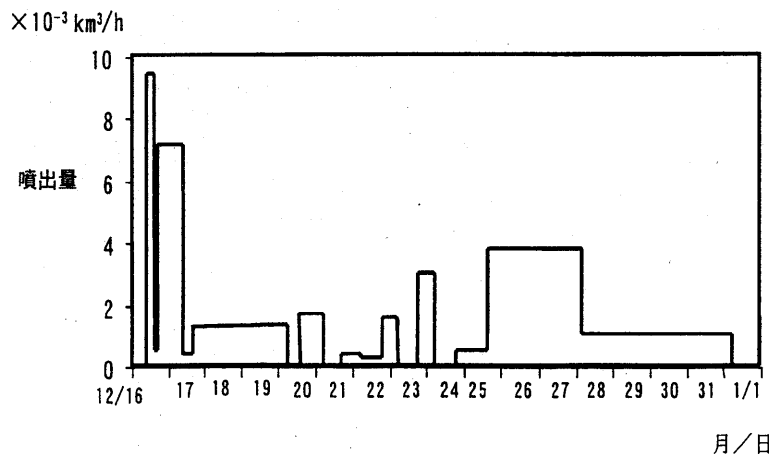
宝永噴火では、主に噴火の2週間ほど前から目立った地震活動があり、噴火前日からはM5クラスの地震を含め、一段と激しくなっていた。M5クラスの地震が4個程度、M4クラスでは10個あるいはそれ以上発生したことが想像される(林、小山(2003))。この地震活動に匹敵するような地震活動は、例えば1998年4月の伊豆半島東方沖の群発地震、あるいはそれよりもやや規模の大きい活動を想定することができる(地震研究所・気象庁地震予知情報課(1998))。

マグマ活動に起因すると思われる群発地震活動は、しばしば顕著な地殻変動を伴うことが知られているし、そのような地殻変動はコサイスミックな変動量を足し合わせただけではほとんど説明できないことが多い。マグマの貫入が、準静的に地殻変動を引き起こし、また地震活動を誘発すると考え、上垣内他(2002)は、伊豆東方沖の活動などについて、地殻変動から推定されるMwと群発地震活動の総量から推定したMwを比較し、地震活動Mwは地殻変動Mwを越えないこと、地震活動Mwは地殻変動Mwより1~3程度小さいこともあることを指摘している。第1図はそれに三宅島噴火などの事例を追加したものであるが、やはり地震活動Mwは地殻変動Mwを越えないようである。また、神津新島の場合を除くと、長方形の枠の中にほとんどが分布しているとも見られる。なお、宝永噴火や桜島大正噴火については史料から震度分布を推定し、さらにマグニチュードを推定する方法(林・小山、2002)を適用した。宝永噴火の地殻変動については、それを推定できるよ



第1図 群発地震活動におけるMwの比較

う。宝永噴火では、主に噴火の2週間ほど前から目立った地震活動があり、噴火前日からはM5クラスの地震を含め、一段と激しくなっていた。M5クラスの地震が4個程度、M4クラスでは10個あるいはそれ以上発生したことが想像される(林、小山(2003))。この地震活動に匹敵するような地震活動は、例えば1998年4月の伊豆半島東方沖の群発地震、あるいはそれよりもやや規模の大きい活動を想定することができる(地震研究所・気象庁地震予知情報課(1998))。

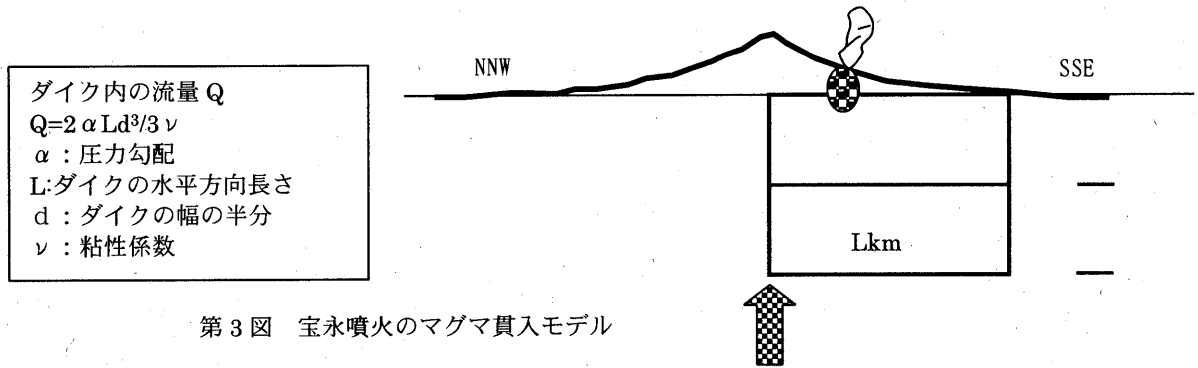


第2図 宝永噴火時のマグマ換算噴出率(宮地・小川)

うなデータはないが、後述するポアズイエ流を仮定した考察により推定したものであり、他のデータと同様にプロットするのは適切ではないかも知れない。しかし、地震活動がかなり活発であったことは確かであり、仮に神津新島(2000)のような大規模なダイク貫入があったとしても、地殻変動  $M_w$  と地震  $M_w$  の差は 11 くらいとなる。

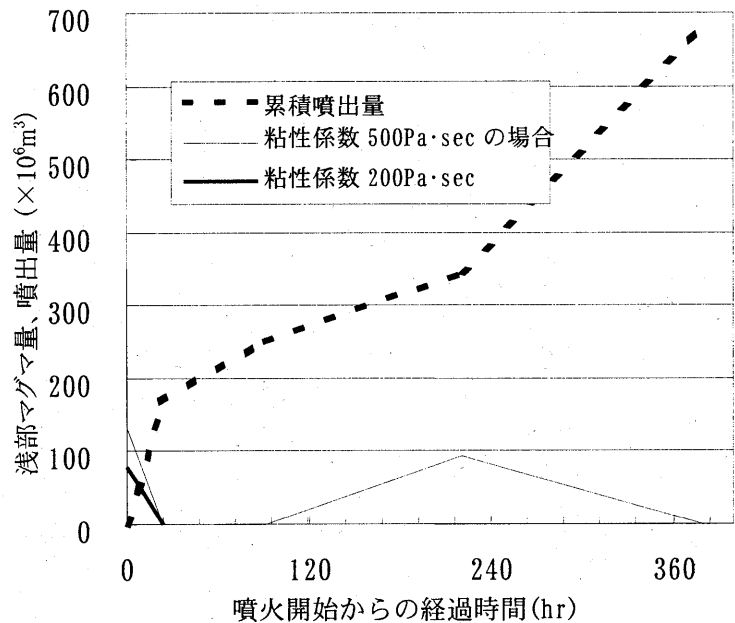
第 1 図の矩形領域の底辺 (BC) は検出できる群発地震活動の下限を、辺 (AB) は地殻変動源の推定ができる地殻変動の下限付近を表していると思われる。地殻変動  $M_w$  が 5 というのは、例えば幅 2km 長さ 2km のダイクが 1m 開口した場合に相当する。実際は、これより数倍以上規模の大きいダイク貫入でないと地殻変動のソースとして精度良く求まらないであろう。

## 2. 宝永噴火時のマグマ噴出率からの考察



第 3 図 宝永噴火のマグマ貫入モデル

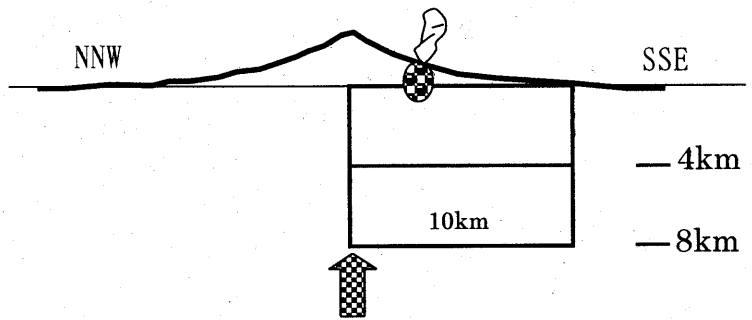
宝永噴火時のマグマに換算した放出率は第 2 図のように推定されている (宮地・小山, 2002)。このような放出率を実現するためには、ある程度以上の大きさの通路が必要となる (但し噴火継続中は通路の大きさは一定と仮定)。ここでは、第 3 図のような開口断層を想定し、マグマが地下からポアズイエ流としてこの開口断層を通過して噴出すると考えた。なお、最近の研究により、宝永噴火の前からデイサイトのマグマがすでに地表近くに存在し、それが宝永噴火の最初期に噴出したことがわかっている (小山・宮地, 2002)。ここでは、デイサイトのマグマがすでに地表近くに  $(0.5 \sim 1) \times 10^8 \text{ m}^3$  程度存在し、それが宝永噴火の最初期に噴出したと仮定した。このプリーニ式噴火の後、玄武岩質マグマの噴火に移行したので



第 4 図 マグマ収支から考察した浅部マグマ量の推移

あるが、玄武岩質マグマの粘性係数を  $(2 \sim 5) \times 10^2 \text{ Pa} \cdot \text{sec}$  とし、地殻と 10% 程度密度差があると仮定すると、浮力を受けてダイク中を上昇することによって、宝永噴火全期間にわたる供給が可能である。第 4 図では、累積噴出量を時間微分したものがその時々々の噴出量になる。ただし、条件次第では、ダイク中のマグマ流量のゆらぎや、火口直下での一時的なマグマの滞留を考える必要がある。粘性係数が  $200 \text{ Pa} \cdot \text{sec}$  ならば、最初の 24 時間程度地下浅部に存在したマグマ溜りからの噴出を考えるだけでよい。500  $\text{Pa} \cdot \text{sec}$  ならば、後半の噴出率の増加に対応するため、一時マグマを浅部の溜りに貯蔵しておくことが必要になる。なお、いずれの場合も噴出率の変化は第 3 図の深部での供給率の変化によると仮定している。

次に、このようなマグマ供給モデルから推定される地殻変動のモーメントマグニチュード ( $M_w$ ) と、前兆地震活動のモーメントマグニチュードを比較する。前兆地震活動は M5 クラスの地震 4 個を含むことから、 $M_w$  は 6 程度とする。これと地殻変動のモーメントと同程度であったと仮定すると、幾何学的形状としてダイクを仮定した場合、想定される貫入量は、 $(0.4-1) \times 10^8 \text{m}^3$  程度となる。S 波速度は  $1.4-2.3 \text{km/s}$ 、密度は  $2500 \text{kg/m}^3$  を仮定して



第 5 図 宝永噴火のマグマ貫入モデル

いる。このうち最も体積増加の少ない場合は、 $10 \text{km} \times 4 \text{km} \times 1 \text{m}$  (開口量) と見積もられる。最も大きい場合でもおよそ  $10 \text{km} \times 8 \text{km} \times 1 \text{m}$  (開口量) である (第 5 図)。第 1 図は地震活動の  $M_w$  が地殻変動の  $M_w$  よりも 0~3 程度の範囲で下回っていることを示しているが、もし、地殻変動の  $M_w$  が 7 であったとすると、体積増加量は 30 倍の  $10^9-10^{10} \text{m}^3$  となり、開口量が変わらないとするならば、断層面積が 10 倍以上必要になるし、断層面積を変えないならば、開口量が 10 m 必要となる。これだけの地殻変動があれば、何らかの形で記録に残されるとか、地形に残されると思われる。宝永噴火の前兆的地震活動は、地殻変動の規模の割には効率的に地震を励起したのかも知れない。

### 3. 前兆的地震活動 $M_w$ がより小さい場合

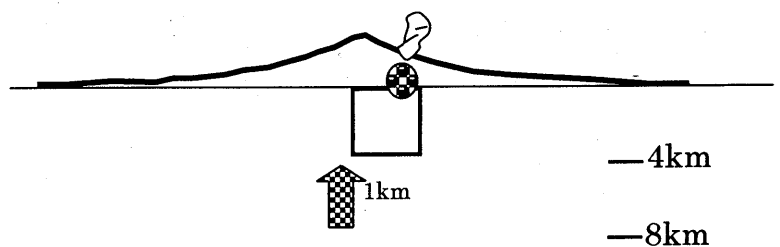
第 1 図の関係を仮定すると、地震活動  $M_w$  が 4 の場合、地殻変動の  $M_w$  は 4 から 7 程度、地震活動  $M_w$  が 3 の場合、地殻変動の  $M_w$  は 3 から 6 程度となる。剛性率を  $1.3 \times 10^{10}$  とした場合、開口量を仮定した場合の断層面積は下表の様になる。

地殻変動の $M_w$	地殻変動の $M_0$ (Nm)	$\Delta V$ ( $\text{m}^3$ )	開口量 (m)	断層面積 ( $\text{m}^2$ )
3	$10^{13.6}$	$3 \times 10^3$	0.5	$6 \times 10^3$
4	$10^{15.1}$	$9.6 \times 10^4$	0.5	$1.9 \times 10^5$
5	$10^{16.7}$	$3.8 \times 10^6$	1.0	$3.8 \times 10^6$
6	$10^{18.1}$	$9.6 \times 10^7$	1.0	$9.6 \times 10^7$

マグマが少なくとも地下数 km より深部から供給されると仮定すると、地殻変動の  $M_w$  が 3 や 4 の場合は、マグマの通路を確保するには特異的に鉛直方向に伸長する開口断層を考える必要がある。仮に断層の鉛直方向の長さが数 km で開口量が 1 m とすれば、 $M_w$  が 3 で水平方向の長さ数 m、 $M_w$  が 4 で長さ数十 m となり、先程と同様の流体力学的考察をすると、深部からのマグマの供給率は宝永噴火を想定した上述の検討結果より 3~6 桁小さくなる。上述の検討で用いた物理パラメータのうち、浮力の原動力となる密度差、粘性係数とも、マグマ供給率を 2 桁以上増やすような値はとれない。ダイク貫入を想定したマグマ供給系による限り、地殻変動の  $M_w$  が 3 や 4 程度の場合には、少なくとも大規模な噴火は考えにくい。また、地殻変動源としては微弱過ぎて観測にかからないであろう。

地殻変動の  $M_w$  が 5~6 の場合は、地震活動総  $M$  が 2~3 にとどまることも考えられる。一般的には地震活動が顕著でなくて検知力限界付近であっても、地殻変動が観測されるようになった場合は、地表に至る通路が確保されている可能性もあり注意が必要である。

地殻変動の  $M_w$  は多くの場合 5.5 程度から 7 程度となっている。5.5 程度の場合はマグマの供給源が浅ければ可能かも知れない (第 6 図)。ただし、地震活動  $M_w$  は大きくても 5 程度で、最大地震が M2 程度にとどまることも考えられる。またポアズイエ流を仮定して考察すると、深部からのマグマの供給率は宝永噴火を想定した上



第 6 図  $M_w$  が 4 の場合のマグマ貫入モデル

述の検討結果より1桁小さい程度になる。ここで検討したマグマ供給系によれば、地殻変動のMwが5.5程度の場合には、中・小規模な噴火のほか、マグマの供給が継続すれば大規模噴火も考えうる。

#### 参 考 文 献

##### ・伊豆半島東方沖

多田 堯 (1998) 私信:地質調査所・気象庁 (1998) 地震予知連絡会会報 vol160

地震研究所・気象庁地震予知情報課 (1998):地震予知連絡会会報 vol159

気象庁地震予知情報課 (2002):地震予知連絡会資料

##### ・有珠山

村上 亮・小沢慎三郎・西村卓也・多田 堯 他 (2001):2000年有珠山噴火にともなうマグマモデル GPS連続観測を主とする地殻変動データによる推定 国土地理院時報 No.95

##### ・神津島新島

Nishimura T, S. Ozawa, M. Murakami, T. Sagiya, T. Tada, M. Kaidzu and M. Ukawa(2000): Crustal deformation caused by magma migration in the northern Izu islands Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3745-3748, 2001

##### ・箱根山

国土地理院 (2001):第90回火山噴火予知連絡会資料

##### ・桜島

中央气象台 (1914):気象要覧第169号、第170号(臨時増刊)

Hashimoto, M and Tada, T (1992):A model for crustal deformations associated with the 1914 great eruption of Sakurajima volcano, Kagoshima Japan, *Tectonophysics*, 205, 427-436.

##### ・三宅島

宇平幸一・永福順則・山本博二・横山博文・荒木卓次 (1983):1983年三宅島噴火前後の地震活動、火山 三宅島噴火特集号

木股文昭 (2001):地域変動観測による三宅島における1983年噴火およびそれ以降のマグマ供給システムの検討、地球惑星科学関連合同大会予稿集 (2001)

上田英樹・藤田英輔・鶴川元雄・山本英二 (2002):傾斜およびGPSデータから推定された2000年6月26日~27日の三宅島のマグマ貫入過程 日本地震学会講演予稿集 2002年度秋季大会

##### ・富士山

小山真人・宮地直道 (2002):史料からみた宝永四年(1707年)富士山噴火の推移(改訂版),富士山ハザードマップ検討委員会第3回基図部会委員提出資料,5pp.

宮地直道・小山真人 (2002):宝永四年(1707年)噴火に伴う噴出物の堆積時間と噴出率の推移(改訂版),富士山ハザードマップ検討委員会第4回基図部会委員提出資料,3pp.

小山真人・宮地直道 (2002A):史料からみた宝永四年(1707年)富士山噴火の推移,富士山ハザードマップ検討委員会第1回基図部会委員提出資料,11pp.

林 豊・小山真人 (2003):宝永噴火に先立って発生した地震の規模の推定、歴史地震研究会

##### ・岩手山

佐藤峰司・浜口博之 (2001):1998~1999年の岩手山のマグマ貫入プロセスと地震活動、京都大学防災研究所研究集会(一般:13K-2)「マグマ活動と火山性地震・微動」

## 7. 富士山を想定したシミュレーションによる震源決定能力調査

火山噴火予知連絡会富士山ワーキンググループ

### 1. 計算方法

富士山とその周辺を緯度経度とも2分ごとのメッシュに区切り、各格子点に震源を置きマグニチュード(M)を与え、各観測点におけるP波到達時刻、S波到達時刻、最大振幅(いずれも理論値)を算出する。算出された理論走時に誤差を加え検測値を作成し、震源計算を行う。マグニチュード式は渡辺の式を使用した。各震源について100通りの検測値を作成し、震源計算を行い、元の震源とのずれを調べた。使用した速度構造は、半無限構造( $V_p$ :2.5km/s,  $V_s$ :1.4km/s)である。

#### ・震源を置いた格子点

東経 138° 35' ~55' の2分刻み (11通り)

北緯 35° 10' ~30' の2分刻み (11通り)

深さ 1、5、10km (3通り)

#### ・P波、S波走時に与える誤差 (100通り)

P波: 擬似乱数により、理論走時-誤差2%~理論走時+誤差2%の間に分布させる

S波: 擬似乱数により、理論走時-誤差4%~理論走時+誤差4%の間に分布させる

#### ・P、S走時の震源計算での使用条件

P相については、渡辺式によって計算される最大振幅がノイズレベルの5倍以上の場合に使用、S相については、ノイズレベルの3倍以上の場合に使用した(岡田・小原、2000による)。

なお、現実にはノイズレベル以下の場合でも周期等の違いから相が読める場合もあるので、この調査による結果より小さいMについても決めることが可能な場合がある。なお、計算に用いた観測点リスト(括弧内はノイズレベル(単位は $10^{-6}$ cm/s)、\*は測定値による、他は適当に仮定)は下記の通りである。

気象庁 : A点(50)、富士山8合目(30)、C点(30)、D点(30)、山梨下部(30)

東大震研: 富士山(20)、小室(20)、富士小山(20)、本栖(20)、富士桜(20)、細野尾(10)

大石(10)、俣下(10)

防災科研: 下部(5\*)、鹿留(13\*)、都留(6\*)、富士宮(47\*)、沼津(20)、南足柄(20\*)

山北(5\*)、裾野(76\*)、精進(18\*)、富士鳴沢(15\*)、富士吉原(15\*)

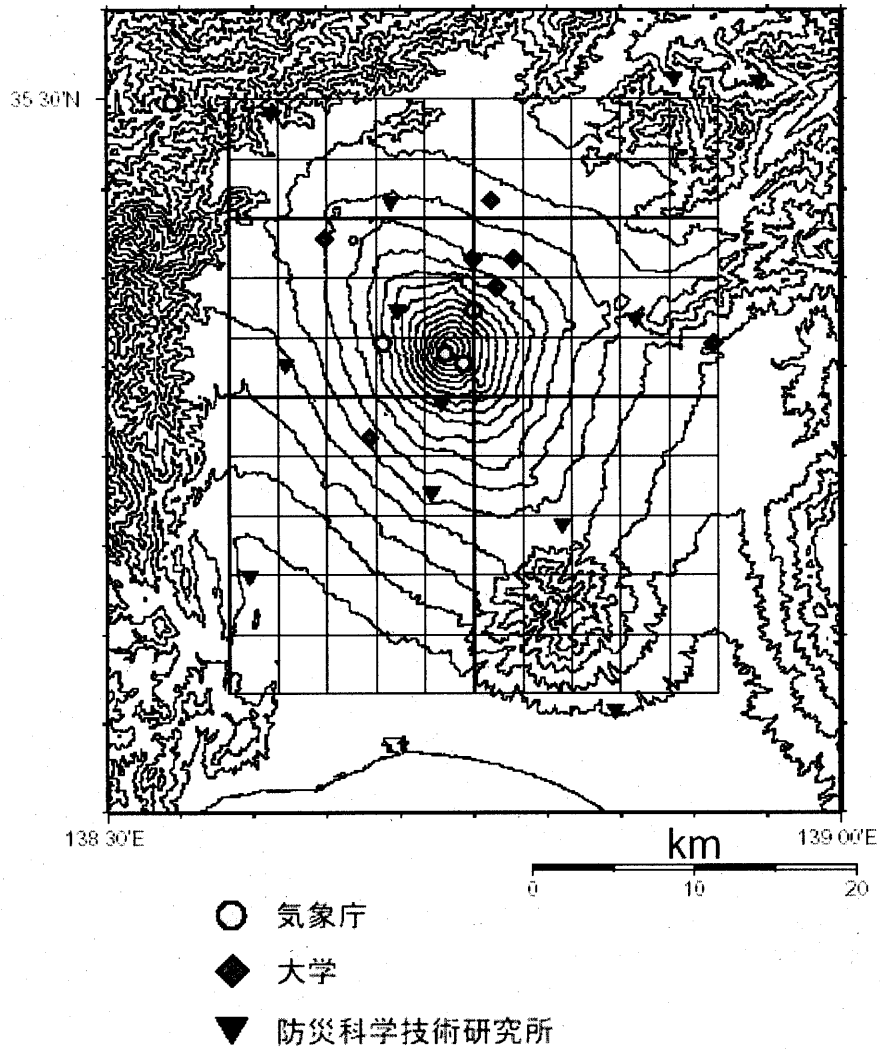
富士須走(15\*)、富士広見(15\*)、第5観測点(10)、第6観測点(10)

### 2. 結果の例

一般に、Mが大きいほど、あるいは震源深さが浅いほど、震源決定精度はよくなる。また、北西象限の震源決定精度に比べて、南側及び北東象限の端では観測点が限られているために相対的に低い。深さ5km、M0.2(第2図、第3図)、及び深さ10km、M0.5(第4図、第5図)の場合は、ほぼ富士山全域にわたって震源位置(水平面内および深さ)が良好に再現できている。深さ15kmでは、M0.2だと震源は決まるが、誤差は±1kmを越える(第6図、第7図)。深さ15km、M0.5の場合は、例えば富士山の北東象限に注目すると、北西-南東方向の誤差が±1km程度になる格子点が多く、震源が浅い場合に比べて震源決定精度はやや劣るものの、震源を把握するには大きな支障とはならないと考えられる(第8図、第9図)。現在の気象庁震源では、富士山の低周波地震活動がM0.7程度までは把握できていることから考えて、これらのシミュレーション結果は概ね妥当であろう。以上のことから、模擬的な計算では、現在計画中の観測網でほぼ必要条件を満たしていると考えられる。なお、結果の図では、震源が格子点上に密に分布していれば精度良く求まっており、そうでなければ、決定精度が落ちることを意味する。また、格子点付近に震源が全くプロットされていない場合は、震源が全く求まっていないことを示している。

参 考 文 献

岡田義光、小原一成 (2000) : 関東・東海地域の高感度地震観測点における地動ノイズの特徴、防災科学技術研究所研究報告、60、15-29

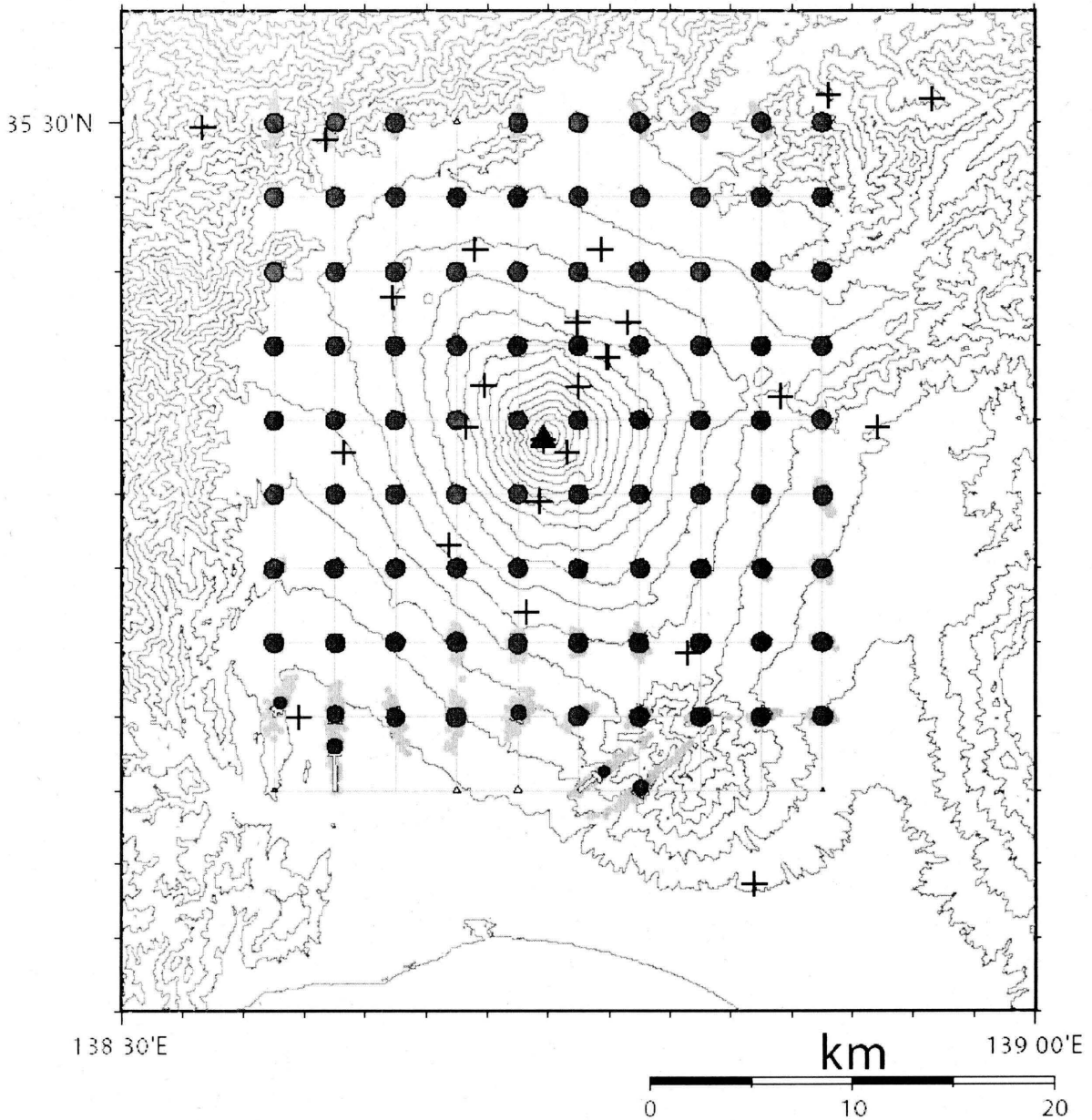


第1図 震源決定能力のシミュレーションに用いた観測点

M= 0.2

Depth= 05 km

station: JMA,ERI,NIED



- 震央の平均位置  
円の大きさが決定率を示す  
● 100% ● 75% ● 50% △ 40%以下

震央の分布  
(決定率が40%以下の場合には表示していない)

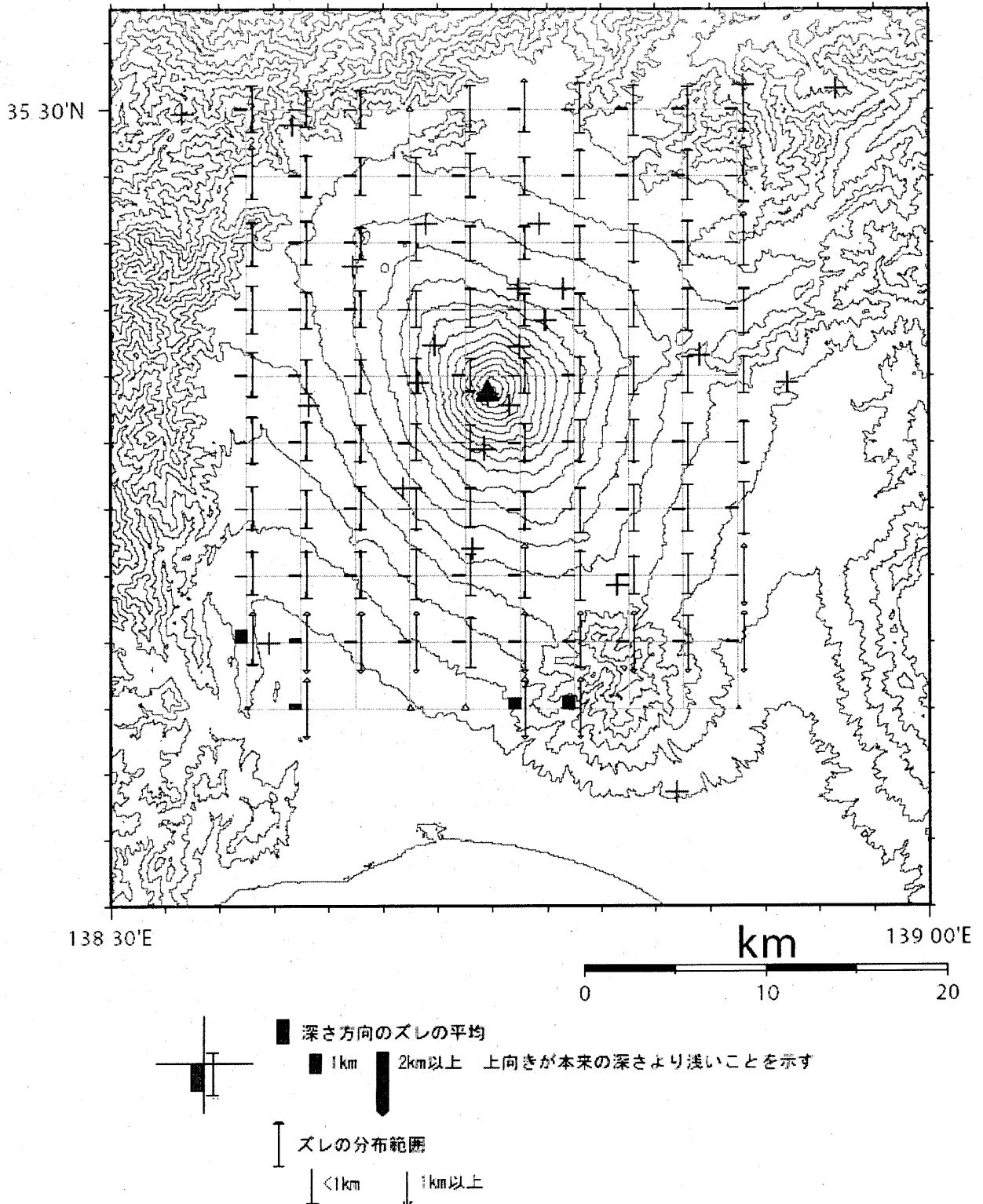
本来の震央からのズレ  
(決定率が40%以下の場合には表示していない)

第2図 深さ5km、M0.2の場合の震源決定シミュレーション結果(震央分布)等高線は200m

M= 0.2

Depth= 05 km

station: JMA,ERI,NIED



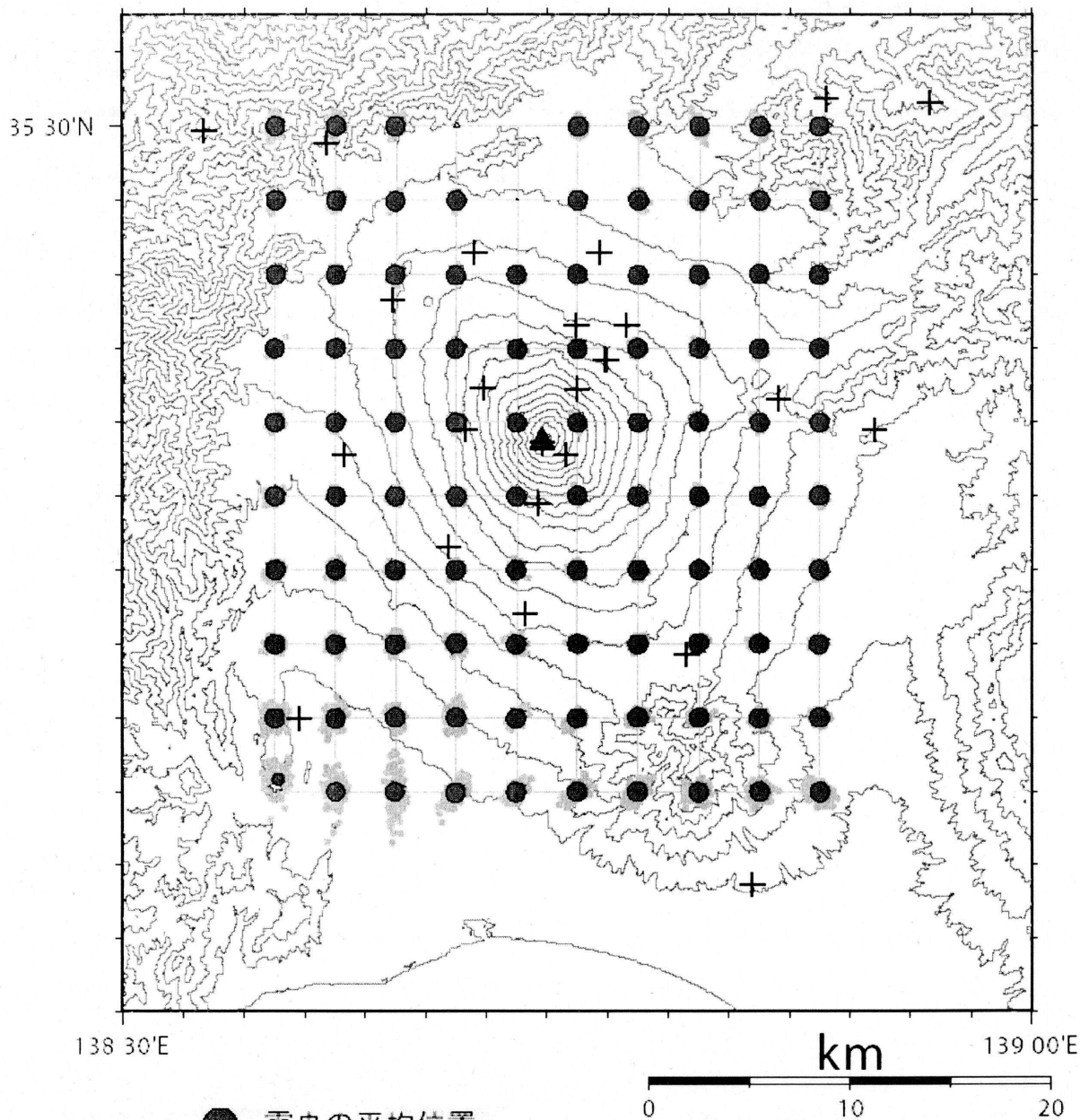
第3図 深さ5km、M0.2の場合の震源決定シミュレーション結果（震源深さ）



M= 0.5

Depth= 10 km

station: JMA,ERI,NIED



- 震央の平均位置  
円の大きさが決定率を示す  
● 100% ● 75% ● 50% △ 40%以下

震央の分布  
(決定率が40%以下の場合には表示していない)

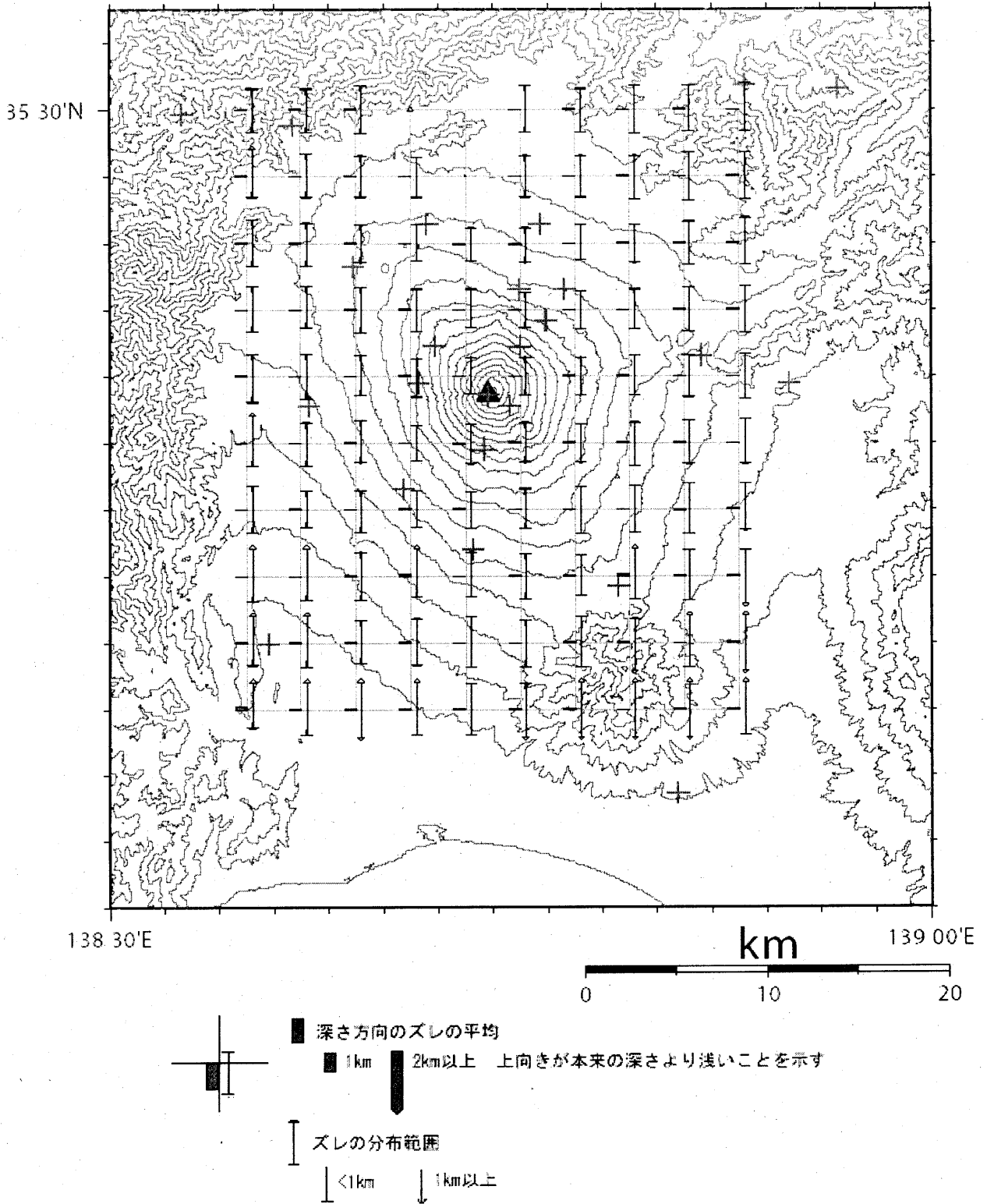
↑ 本来の震央からのズレ  
(決定率が40%以下の場合には表示していない)

第4図 深さ10km、M0.5の場合の震源決定シミュレーション結果(震央分布)等高線は200m間

M= 0.5

Depth= 10 km

station: JMA,ERI,NIED

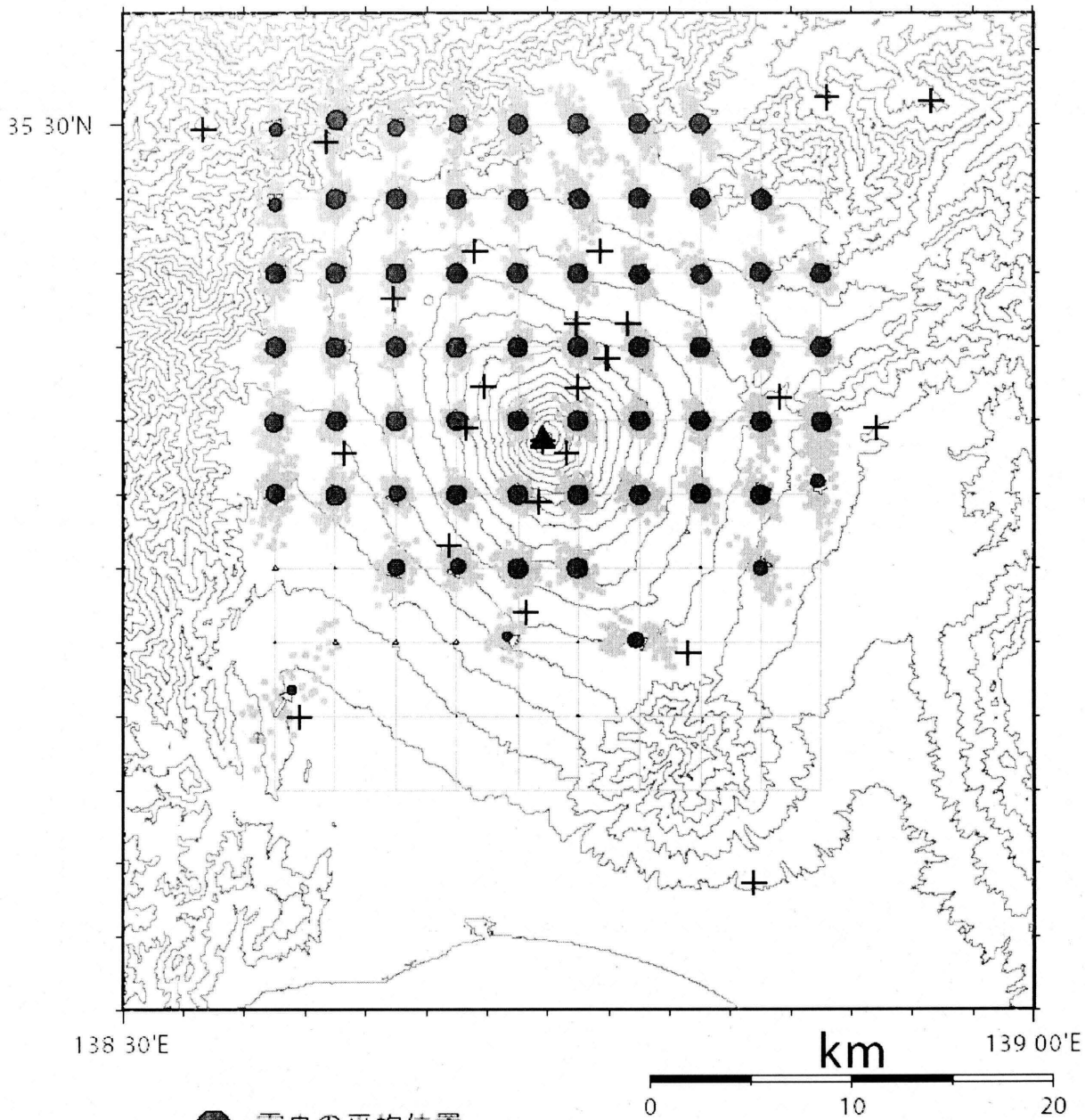


第5図 深さ10km、M0.5の場合の震源決定シミュレーション結果（震源深さ）

M= 0.2

Depth= 15 km

station: JMA,ERI,NIED



- 震央の平均位置  
円の大きさが決定率を示す  
● 100% ● 75% ● 50% △ 40%以下

震央の分布  
(決定率が40%以下の場合には表示していない)

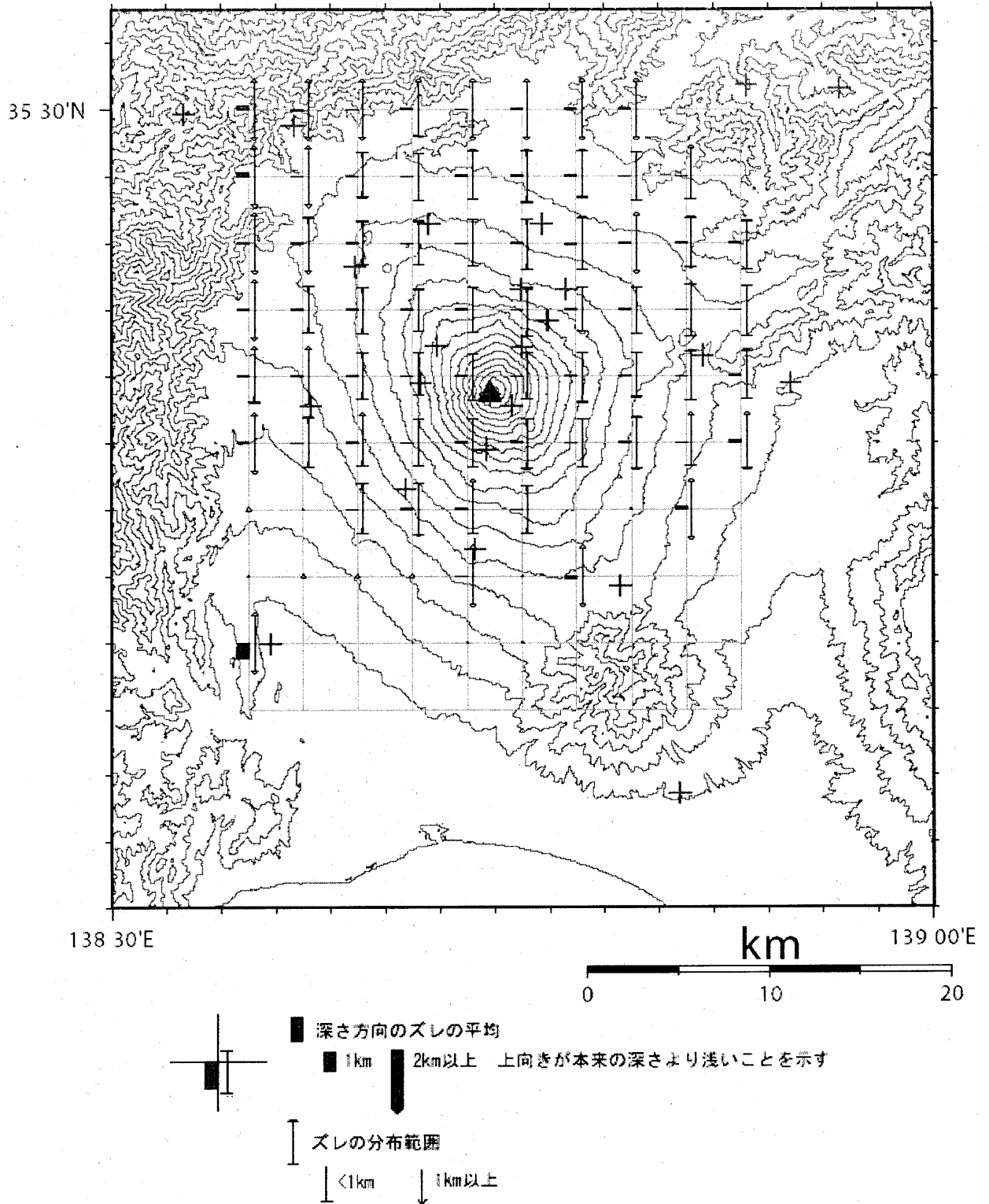
本来の震央からのズレ  
(決定率が40%以下の場合には表示していない)

第6図 深さ15km, M0.2の場合の震源決定シミュレーション結果(震央分布)

M= 0.2

Depth= 15 km

station: JMA,ERI,NIED

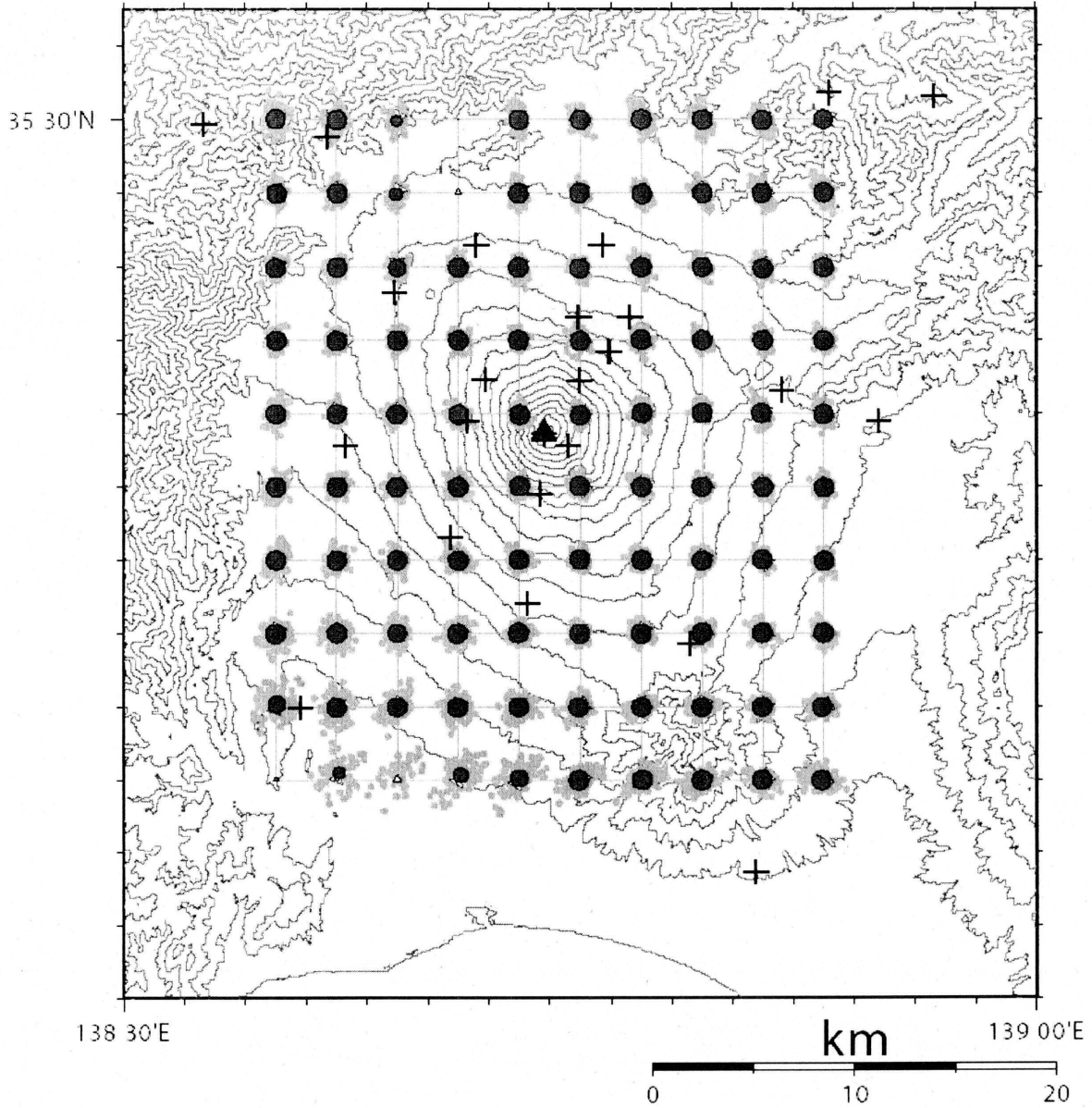


第7図 深さ15km、M0.2の場合の震源決定シミュレーション結果（震源深さ）

M= 0.5

Depth= 15 km

station: JMA,ERI,NIED



円の大きさが決定率を示す

● 100% ● 75% ● 50% △ 40%以下

震央の分布

(決定率が40%以下の場合には表示していない)

本来の震央からのズレ

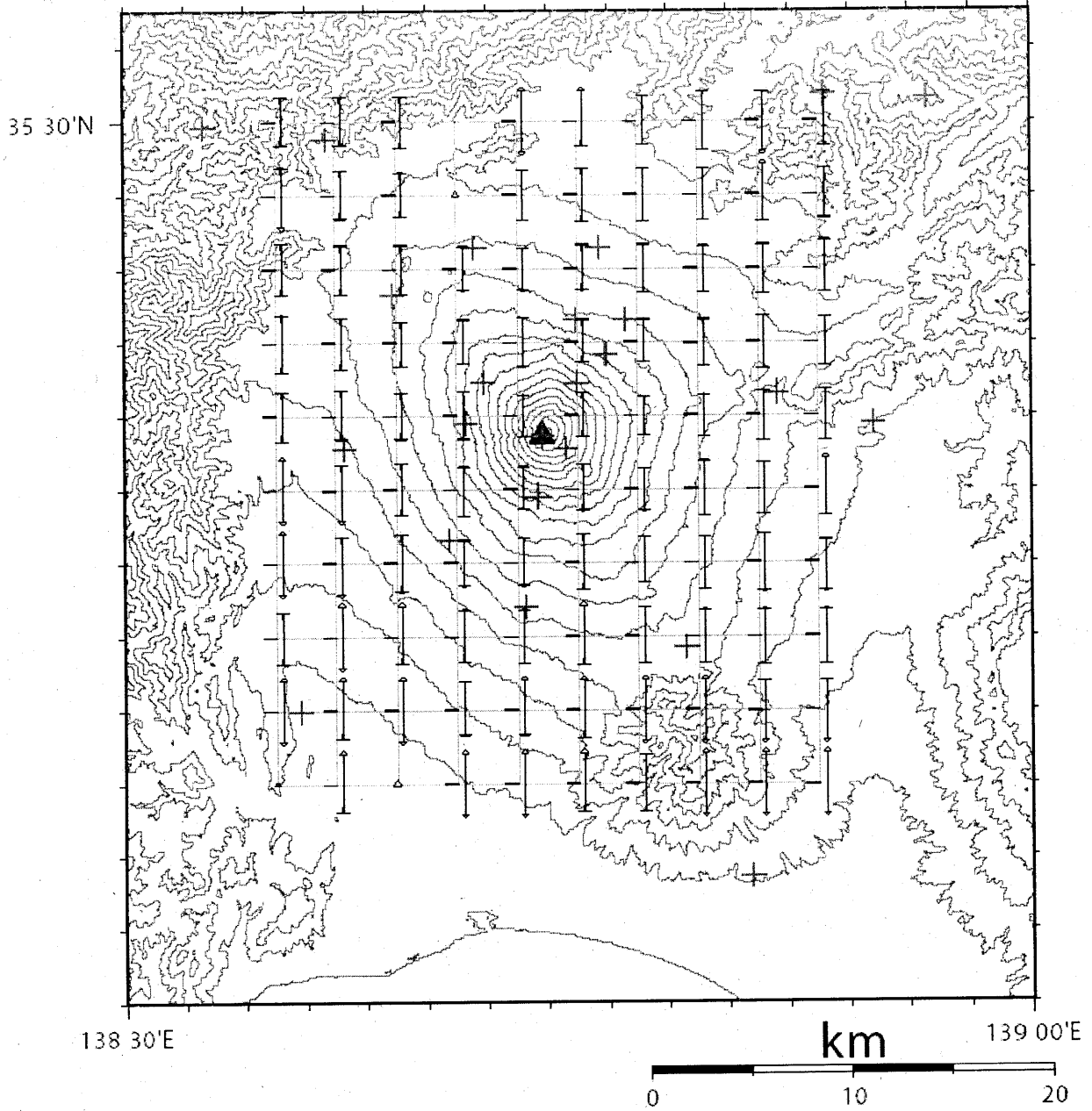
(決定率が40%以下の場合には表示していない)

第8図 深さ15km、M0.5の場合の震源決定シミュレーション結果(震央分布)

M= 0.5

Depth= 15 km

station: JMA,ERI,NIED



第9図 深さ15km、M0.5の場合の震源決定シミュレーション結果(震源深さ)

## 8. 富士山の地殻変動観測網・地震観測網の検知能力について

火山噴火予知連絡会富士山ワーキンググループ

### 1. 地震観測網

#### (1) 富士山において観測・監視の対象とすべき地震活動

地震活動から火山活動の異常を評価するためには、噴火に至る過程でのマグマの移動に伴う地震活動を検出できること、活動の評価に十分な震源精度を確保できること、さらに平常時においても地震活動度の変化を把握できることが必要である（参考文献 1）。

噴火に至る過程での地震活動の規模を推定するため、マグマが新たな通路を形成しながら地殻変動と地震活動を伴いつつ貫入したと考えられる事例を国内火山について取りまとめた。地震活動の場合、モーメントマグニチュード(Mw)に換算して 2.7~6 程度である。ちなみに宝永噴火の前兆的地震活動は Mw6 程度となる（参考文献 2）。山頂部を含めて山体内で M0.5 程度以上の地震の震源を精度よく決定できる観測網が整備されているとすると、最大地震の M が 2.7 程度の小規模な地震活動でも、グーテンベルク・リヒター則から考えて、少なくとも 100 個程度の地震は震源決定可能である。

また、統計的に有意な地震活動度の変化を把握するには、年間 100 個程度の地震を観測する必要がある。このため、富士山での過去数年間の地震の発生回数をその規模ごとに整理し、平常時の地震活動度を調査した。その結果、富士山で低周波地震活動も含めて、地震活動度の変化を把握するためには、M0~0.5 の地震を観測できること、また山頂部を含めて山体内で M0.5 程度以上の地震の震源を精度よく決定できる必要があることが分かった（参考文献 1）。

#### (2) 地震観測網の考え方

(1) で評価したように、富士山の火山活動評価のためには富士山体下の地震について、M0.5 程度の検知能力と噴火に至る過程での震源の移動を検出できるだけの震源精度の確保が必要である。このことを考慮して、現在計画中の観測点も含めた地震観測網の検知能力と震源決定精度の評価を行った。一般的傾向として、北西象限の震源決定精度は高いが、南側及び北東象限の端では観測点が限られているために相対的に低い（参考文献 3）。ノイズレベルの設定にもよるが、計画段階のものまで含めて恒久観測点のデータを一元的に集約したとする模擬的な計算では、深さ 5km、M0.2、及び深さ 10km、M0.5 の場合は、ほぼ富士山全域にわたって震源位置（水平面内および深さ）が良好に再現できている。深さ 15km、M0.5 では、震源決定精度はやや落ちるが、震央位置を大きく誤ることはない。これにより、現在整備が進められている観測網は、ほぼ必要条件を満たしていると考えられるが、富士山の震源決定精度をさらに向上させるためには、富士山南麓にノイズレベルの低い観測点を増設することが望ましい。また、今後、計画中の観測点の完成後に実際のデータで検知力を評価することが望ましい。

### 2. 地殻変動観測

#### (1) 富士山において観測・監視の対象とすべき地殻変動

伊豆半島東方沖の群発地震活動や有珠山や三宅島の噴火の初期に貫入したマグマは約 1 千万  $m^3$  程度と考えられる。また、現在富士山においてマグマの蓄積を示すような地殻変動が観測されているわけではないが、仮に、伊豆大島などで観測されている一年あたり約百万  $m^3$  程度の定常的なマグマ蓄積が存在し、10 年間程度継続した場合も 1 千万  $m^3$  となる。そこで、マグマ溜りへの蓄積が 1 千万  $m^3$  に達した、あるいは同体積のマグマがダイクに貫入した場合を想定し、これらの変動を検知するために必要な観測網について検討した。

#### (2) 地殻変動観測網の考え方

GPS の検出限界は水平方向約 0.5cm、上下方向約 1cm、また傾斜計では地球潮汐の振幅である 0.1~0.2  $\mu$  rad と設定し、1 千万  $m^3$  程度のマグマが、ダイクとして貫入した場合を想定する。この場合、ダイクが深さ 25km にあると、変位量は検出限界以下であるが、10km よりも浅ければ地表における変位は数 mm を超え、また傾斜変化も深さ 25km では 0.1  $\mu$  rad 以下であるのに対し、10km よりも浅ければ 1  $\mu$  rad を超える。また、マグマ溜りへの蓄積の場合、10km より

も浅ければ地表におけるシグナルはやはり数 mm を超える。このような地殻変動は概ね 5km メッシュ内に各 1 点 GPS 観測点があれば検知可能である（第 1 図）。また、上記傾斜変化は傾斜計が適切に配置されていれば検知することができる。

広域の変動は GPS で精度良く検知できることと、ダイク貫入のように局所的な変動に対しては、傾斜計の方が敏感であることを考慮して、GPS 及び傾斜計（さらに歪計）を相補的に活用した観測網を構築することが望ましい。なお GPS 観測点は 2 周波の受信装置を基本とし、さらに山頂部の稠密な観測網によって火山活動の推移を把握するために 1 周波受信装置も活用する。また GPS 観測データは、テレメータによる連続観測とすることは勿論、周囲 100km 程度の既存の GPS 観測網と統合して、連続リアルタイム解析が行いうるようにしておくことが重要である。

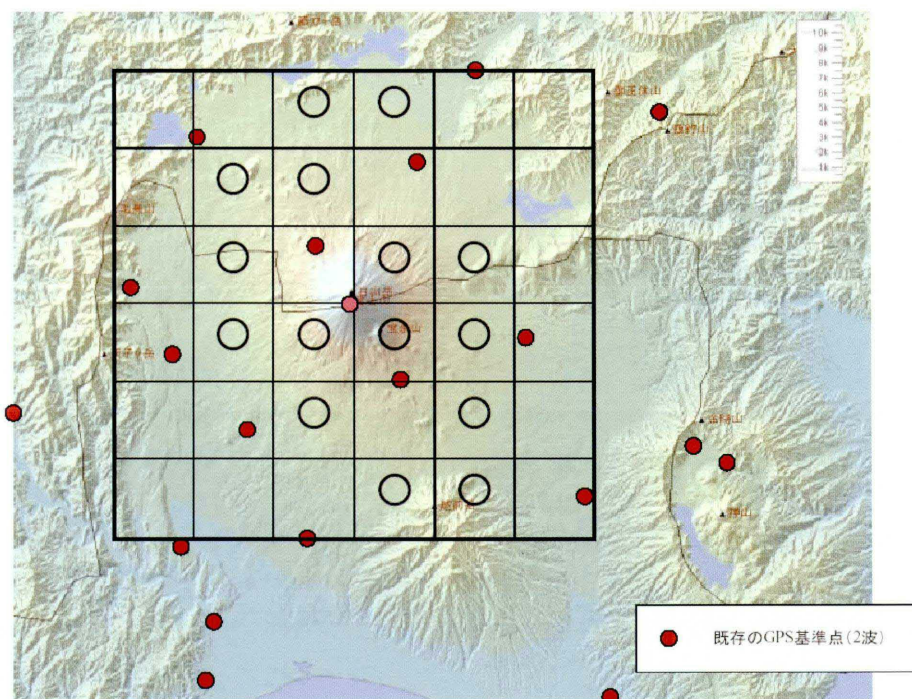
なお、マグマ供給系やダイクの位置や形状をより詳細にモデル化するためには、マグマ活動による変位、傾斜、歪等をさらに稠密に観測すること、また、火山活動の推移に応じた評価を行うため、準備過程を含めた噴火過程の全体を連続的に観測を実施できるような観測網にすることが重要である。なお、今後も各地殻変動観測点のデータの精度を評価しつつ、地下のマグマの動きを評価するための観測網のあり方を検討し、構築を継続していくことが望ましい。

### 3. その他の地球科学的観測

衛星や航空機に搭載された干渉合成開口レーダーによる観測は、広範囲の面的地殻変動を捉え、噴火発生地点を特定しうる手法として期待される。一方、比較的狭い領域にのみ観測値に変化が現れる電磁氣的観測のような観測手法については、他種目の観測成果をもとに調査対象とする場所を絞り込む、あるいは繰り返し観測を実施するなどの工夫をして、必要に応じた観測体制を検討していくことが必要である。

### 4. 関係機関の連携と速やかな情報の共有

地震観測、地殻変動観測ともに、各機関が整備した観測点のデータを共有できるようにする。また、監視を受け持つ機関においては、処理結果が速やかに関係機関で共有できるようにすることが必要である。



第 1 図 1 千万 m<sup>3</sup> 程度のマグマが、ダイクとして深さ 10km に貫入したことを検知しうる GPS 観測網の一例

### 参 考 文 献

- 1 地震観測及び地殻変動観測の課題について（本報告書）
- 2 国内火山における地殻変動を伴う群発地震活動について（本報告書）
- 3 震源決定能力のシミュレーション調査（本報告書）



## 9. 富士山に類似した火山における噴火前兆現象の調査

火山噴火予知連絡会富士山ワーキンググループ

宝永噴火については、豊富な古記録と詳細な地質調査結果を活用して、マグマ供給系の考察を含め、噴火シナリオとして取りまとめた。しかし、他の異なる規模・様式の噴火については、噴火推移に関する古記録が不十分なため、噴火シナリオを検討することは困難であった。このため、長い静穏期の後に噴火した玄武岩質の他火山の例を参照して、シナリオを検討することにした。

しかし、長い休止期間後に噴火した事例を調査した結果、国の内外を問わず、噴火前に近代的観測が行われた例はないことが判明した。たとえば237年目に噴火したカナリア諸島のラ・パルマ火山や500年以上の休止期間があるグアテマラのサンタマリア火山などである。

そのため、休止期間が長いという前提条件にこだわらず、大型の玄武岩質火山で長年科学観測がなされ、噴火の事例が豊富という条件で再度調査を行った。それらの中から、特に地震活動と地殻変動についての噴火前駆現象に着目して事例を整理した。

- (1) アイスランドのヘクラ火山では、体積歪計の変化や微小な群発地震が、噴火の直前0.5~1時間前に見られる程度で、ほとんど前兆現象がみられない。
- (2) レユニオン島のピトンデラフルネイズ火山では、噴火の数ヶ月前から山頂火口付近でインフレーションが確認できるが、噴火に先行する地震の開始は、わずか半日程度のことが多い。1990年の噴火の際には、山頂付近に多数設置した傾斜計のデータをリアルタイムでモニター、マグマの位置と移動速度を測定することに成功している。
- (3) ハワイ島のマウナロア火山では、1975年と1984年に山頂噴火とそれに引き続く割れ目噴火（北東および南西）が発生している。これら二つの噴火は類似した前兆を伴っていた。噴火の1年ほど前から山頂火口直下8km前後の地震が徐々に増加をはじめ、噴火の半年前には、火口の北西側5km深さ8kmの地点で群発地震が発生した。また、北東と南西の2方向の割れ目火口列をまたぐ距離が噴火の半年前から伸びに転じた。なお、山頂噴火から割れ目噴火開始までは平均2年、ながくても3年以内のことが多い。
- (4) イタリアのエトナ火山は、地形的にも富士山によく似た火山である。ほぼ定常的な活動をしている山頂噴火と、山頂地下からのびる岩脈によってさまざまな方向で数ヶ月から20年程の間隔で発生する山腹割れ目噴火と、山頂噴火とは岩石学的にも異なる孤立噴火の、3種類の噴火がある。最近400年間の活動は活発で、その間に約5立方キロのマグマを噴出している。山頂噴火が発生してから山腹割れ目噴火が発生するケースも多いが、山腹割れ目噴火だけがおこることもある。

1981年噴火では、噴火の3ヶ月前から、傾斜計で山頂上がりの変動が観測されている。1988年の噴火の際には、噴火の7-8ヶ月前から山頂のインフレーションがはじまっている。また、1989年噴火の直前3ヶ月前から、山頂地下10kmよりも深い地域の地震が減少、10kmより浅い地域での地震が増加している。1991年の噴火では、噴火に先立ち1年ほど前から徐々に火山性微動の振幅が増加していた。なお、エトナ火山の場合、噴火が連続的に起こっているため、静穏期の認定が難しく、観測期間のわりに前兆と判断されたものは少ない。

このように噴火前駆現象は多様多様であり、富士山の噴火シナリオに直接結び付けることは難しいが、今後の富士山の監視を行う上では十分参考になるものと期待される。この資料は火山噴火予知連絡会富士山ワーキンググループ報告書の別冊にまとめて掲載した。