

ら、今まで陸にしかなかった地震観測点が海側にもでき、はじめて震源を取り囲むような観測点配置が実現できたからである。

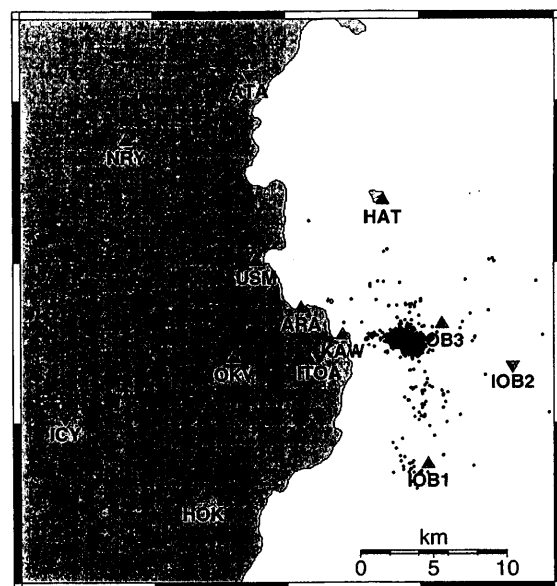
しかし、実際のデータを解析すると、海底地震計直下には極めて地震波速度の遅い層が存在し、陸上も海底も同じ地震波速度構造を用いるルーチン観測では、十分には利用されてこなかった。この地域は陸上の観測点においても、速度構造の不均質に起因すると思われる大きな観測点誤差がある。そこで、観測点補正を考慮した震源決定を行い、1995年～1998年に発生した4回の群発地震活動の震源を推定した。その結果、この4回の活動が北西・南東のほぼ同じ走向・傾斜角を持った垂直に近い同一の面上に分布し、各回の震源域は幅2～3km高さ4～5kmで、その中心は毎回ずれていることが明らかになった。各回の活動は数百メートル程度オーバーラップして分布していることも明らかになった。また個々の活動では1～3時間の間に地震が頻発するバースト活動が何回か見られる。1つのバースト活動は非常に狭い領域でかたまっていることがわかった。

上記のように近年発生した群発地震の全体の分布は明らかになった。次に個々の活動の詳細について調べた。現在のところ最も良質のデータが取得された1998年の活動について波形を用いた解析を行い、精密な震源分布を求めた。手法はGot *et al.* (1994)が開発しハワイ火山等で適用した改良マスターイベント法である。この手法の特長は(1)波形の相似性を利用して走時の読み取り精度を向上する(2)震源決定に際してはマスターイベント法を改良して可能な限り多数の地震組み合わせを用いて震源の相対位置を推定する、の2点である。

本研究では、P波及びS波の波形を解析に用い、図1に示す観測点のデータを使用した。特に、解析の鍵となる海底地震計は加速度計であり、陸上の観測点は速度計であることからその特性が異なる。また地震計の設置方向も異なるため、これらの補正を行ってから記録を使用した。

まず各観測点ごとに全ての地震の組み合わせについて、時間領域で相関係数を計算し、波形相関が最大となる2つの地震の時間差を得た。さらに相関係数が高い地震組み合わせについてはクロススペクトル法を適用した。これにより目視による初動読み取りの恣意性を排除し、読み取り精度を格段に向上させた。

震源決定にあたっては、震源決定可能な全ての地震組み合わせのデータを使用するプログラムを開発しそれを用いた。しかし本研究のように1000個以上の地震の震源を再決定する場合、地震組み合わせ数は地震数の2乗に比例して増加するため、計算時間等の関係から現実的にはこの手法を適用するのが困難になる。そこでバースト単位の震源再決定をして1バースト内の震源分布を詳細に決める解析と、全体の震源を10個のサブグループにわけて群発地震活動全体の震源分布を求める工夫をした解析の2つを行った。



● 1998年4～5月の群発地震活動の震央

▲ P波・S波

▼ P波

図1 解析に使用した地震観測点

再決定して決められた震源は走向約 110° E、傾斜角約 20° の面上に発生している（図2・図3）。地震発生領域の面積は水平方向 $2\text{km} \times$ 深さ方向 3km 程度で面の厚みは 300m ほどであり、その形状は中央に地震の発生していない領域があるリング状をしている。再決定前には分布がこれほど集中していません、面もぼやけてしか見え、特に中央の地震が発生していない領域の存在は予測できなかった。

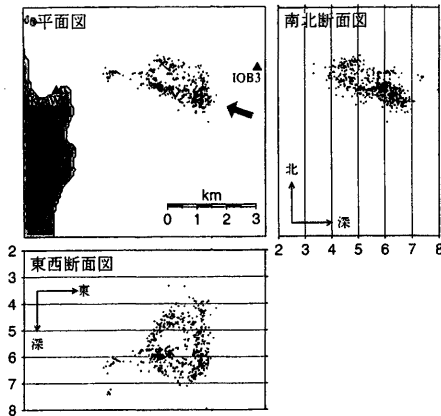


図2 再決定された1998年群発地震の震源分布

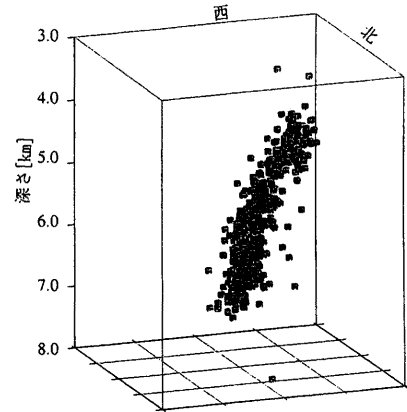


図3 南南東 (110°) 方向から見た3D震源分布

図4は面の正面から見た1日毎の震源分布図である。群発地震活動初期にはリング中央部分で地震が発生し後に外側へと活動域が広がること、1回のバースト（ \equiv 1日の活動）はそれまでに地震が起きた場所の縁にそって発生することがわかる。またバースト単位の震源再決定からは、1回のバースト内で震源は浅い方から深い方へ移動する場合が多く。その震源移動速度は $0.5 \sim 0.7\text{km/hour}$ とほぼ毎回一定していることがわかった。

震源再決定により地震は明瞭な面状の配列を示すことが明らかになったので、この分布と広域応力場との比較を行った。単独で震源メカニズムが推定されているマグニチュード5.7の最大地震の断層面（走向約 165° の左横ずれ断層型か走向約 75° の右横ずれ断層型）の方向と、群発地震の配列面の方向は明らかに一致せず、むしろ群発地震の配列面の方向は大きな地震のP軸、すなわち広域応力場の最大主圧縮軸方向と一致している。また群発地震を構成する個々の地震の断層面を一意に決めることは困難であるが、各観測点でのP波初動の押し引きや振幅の分布から、個々の地震も最大地震とほぼ同じメカニズム解を持っていることが明らかになった。つまり群発地震の分布は広域応力場の最大主圧縮軸の方向（ $N110^{\circ}$ E）に配列していると考えられる。

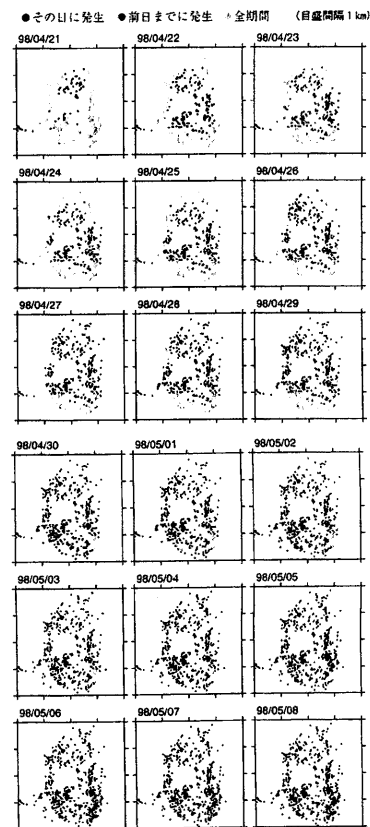


図4 群発地震発生面正面から見た1日毎の地震発生位置

伊豆半島東方沖群発地震とほぼ同時に観測される地殻変動は地下深部から浅部ダイクが貫入するというモデルで説明されてきた。しかしながら、これまでの研究では震源分布の精度が悪いため、地殻変動データだけでダイクの位置を推定する方法がとられてきた。このためダイクの位置と群発地震の震源との関係が明確ではなかった。そこで本研究で求められた震源分布から得られた場所にダイクを置き、観測された地殻変動データが説明できるかどうかを検討した。解析にはGPSによる水平変位記録と水準測量記録をデータとして用いた。その結果、震源域に厚さ4mのダイクを置くことで、水平変位及び水準測量の両方の観測記録をほぼ説明できることが示された。

以上の観測事実から以下のように考えると、群発地震活動と地殻変動を同時に説明できる(図5)。1995年からの4回の群発地震活動は全て川奈崎沖の同じ場所で始まる。このことから供給源となるマグマだまりは川奈崎沖の深さ10km以深にあると考えられる。マグマだまりの圧力が高まると、マグマは上昇しはじめる。1998年の活動においては、マグマだまり直上には1995年及び1997年の貫入物質があったため応力場が既に圧縮的になっており、そこへ貫入することは困難であった。そのため1997年の貫入域の端部にあたる張力的な場となっている部分に貫入を始めた。その後深部からのマグマの供給に伴いダイクが、最小主応力方向へ厚みを増し、マグマ先端は最大主応力方向に広がる。この影響でダイクの縁の部分では最小主応力が減少し差応力が増大する。これにより破壊基準に達した部分で、広域応力場を反映した地震が発生したと考えられる。地震活動がリングの外側へ向かうという観測事実は、ダイクが浅い部分へと貫入していくのではなく、浮力を失って面積・厚みを増すために起こっていると考えられる。

本研究では精密震源決定によって、ダイクの位置、形状、厚みが精度よく推定できた。これらの推定値はダイク成長過程の力学的シミュレーションを行う上で重要なパラメータであると考えられる。今後はこの方向の研究を進めることで、現在のところ明快な答えの得られていない、地震活動がパースト的になる原因なども解明し、群発地震に関する知見を更に深めたい。

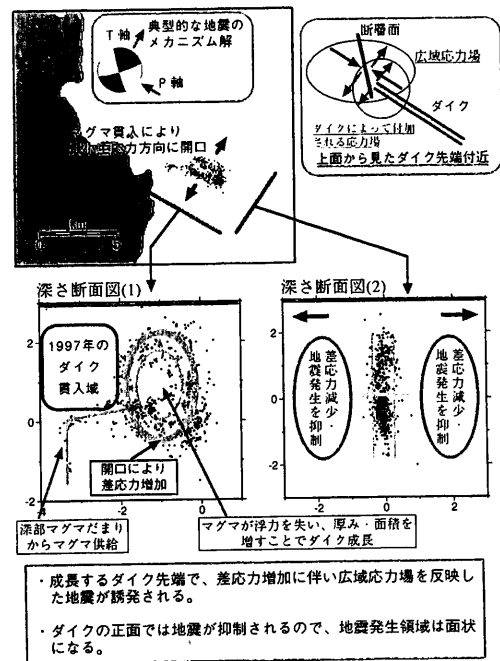


図5 群発地震活動・ダイク成長の同時発生モデル