

## 論文の内容の要旨

論文題目 Imaging dike intrusion during seismic swarms off the Izu Peninsula, Japan, and its triggering mechanism

伊豆半島東方沖群発地震に伴うダイク貫入プロセスとその発生機構

氏名 青木 陽介

伊豆半島東方沖では1978年以来毎年のように群発地震活動を繰り返しており、1989年の活動は海底噴火を伴った。これらの群発地震はダイク貫入によるものとされてきたが詳しいメカニズムについては分かっていなかった。そこで本研究では地殻変動データより群発地震中のダイク貫入過程と、群発地震活動が何によって引き起こされているのかについて考察を行う。

この地域の群発地震に伴う地殻変動はダイク貫入に伴う開口割れ目と大きな地震に伴う断層運動との組み合わせで説明できる。たとえば、*Okada and Yamamoto* [1991] は1989年群発地震活動に伴う地殻変動をダイク貫入に伴う開口割れ目と群発期間中の最大地震に伴う断層運動とでモデル化した。しかし、当時は地殻変動データが時間的、空間的に十分に整備されていなかったため、ダイク貫入の時間発展の過程は明らかになっていなかった。しかるに、近年は全地球測位システム (GPS) 連続観測システムの整備等 (たとえば *Kato et al.* [1998]) により十分なデータが得られるようになった。これらのデータを用いれば群発期間中のダイク貫入過程がより詳細に明らかになることが期待される。本研究では1997年の活動を例にとって地殻変動データから群発活動のプロセスを推定した。

まず初めに群発活動全体の変動量からソースパラメータを推定した。長さ、幅、深さ、傾き、走向、といったソースパラメータと地殻変動データとは非線形の関係にあるため Simulated Annealing (*Basu and Frazer*, [1990]) とよばれるモンテカルロ的手法を用いて非線形問題を解き、Bootstrap algorithm (*Efron and Tibshirani*, [1993]) という、同じくモンテカルロ的手法を用いてそれぞれのパラメータの信頼区間を求めた。地殻変動データはダイクと最大地震 ( $M_w=5.3$ ) に対応する断層とでよく説明できた。また、得られた解はこの地域の広域応力場 (*Ukawa*, [1991]) や地震波解析から得られた最大地震のメカニズム解 (東京大学地震研究所 [1997]) と調和的であった (図 1)。し

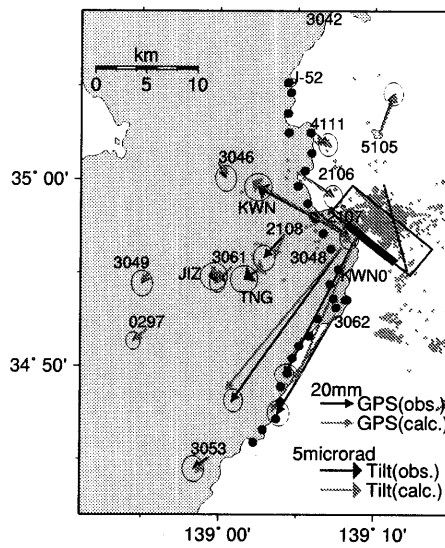
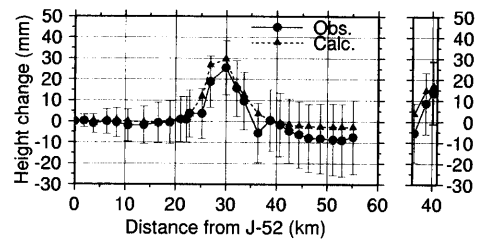


図 1: 1997年群発に伴う地殻変動。ダイク (実線) と左横ずれ断層 (破線) によって地殻変動をよく説明できる。

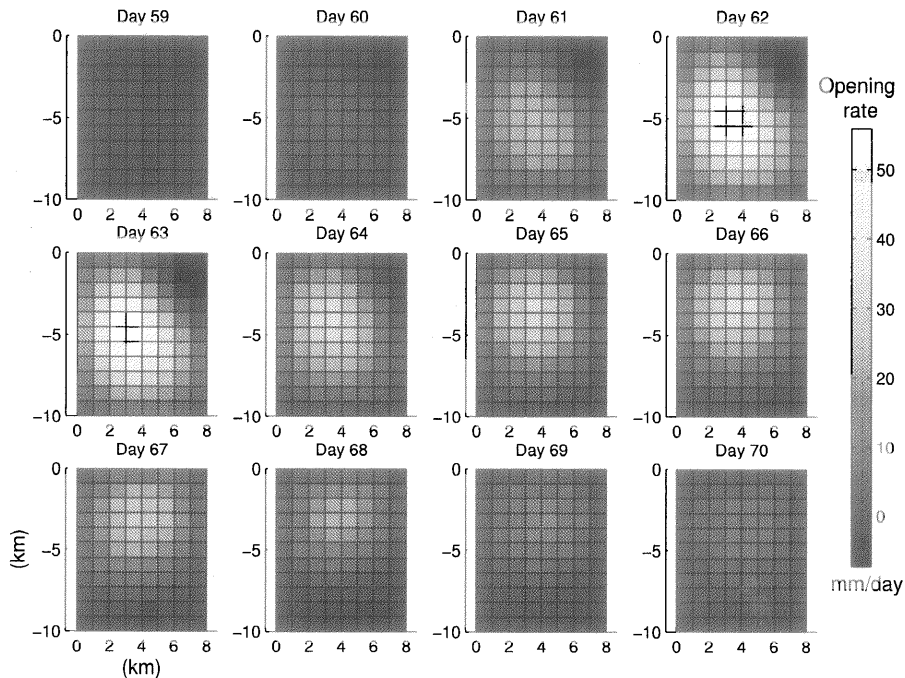


図 2: 1997 年群発地震中のダイク貫入の時間変化

かし、群発地震域は海に囲まれていて、観測点配置が群発地震域に対して偏って配置しているためダイクの位置に関しては余りよく拘束を与えることができなかった。そのためダイクの位置に関しては面状に分布している地震活動と一致するように設定した。

このように求められたソースパラメータを用いて群発地震中のダイク貫入プロセスを Network Inversion Filter (NIF) と呼ばれる方法を用いて明らかにした。NIF は *Segall and Matthews [1997]* によって理論が考案され本研究によって初めて実際のデータに適用された。この結果によると、ダイク貫入は群発活動の始まりとほぼ同時に始まり約 10 日続いていて、これは地震波エネルギー解放の時間スケール(約 3 日) と比べると非常に長い。また、地震活動は群発活動開始 12 時間ほどで約 9 キロから 5 キロまで浅くなっているのに対しダイク貫入は約 10 日間にわたって約 6 キロから 4 キロの深さにまで浅くなったことが明らかになった(図 2)。

ここまでで群発地震中のダイク貫入プロセスが明らかになったので、次に、このようなダイク貫入がどのようなメカニズムで起きているのかについて研究を行った。よく知られているように、群発地震活動は群発機関を通じて時間的に均一に起きているわけでも不規則に起きているわけでもなく間欠的なバーストで構成されていて、バースト間の時間間隔から潮汐との何らかの関係を示唆する。本研究では潮汐荷重がバースト的地震活動をどのように誘発しているのかについての研究を行った。

まず、統計的な方法を用いて潮汐荷重のどの成分がバースト的地震活動に寄与しているかを検定した。検定には地震発生と潮汐荷重の位相との関係を調べる Schuster's test (*Schuster [1897]*) と呼ばれる方法と地震発生と潮汐荷重の値との関係を調べる Kolmogrov-Smirnov test (*Press [1994]*) とよばれる二つの方法を用いた。これら二つの統計的検定の結果、群発活動の最初の数日はバースト的地震活動は貫入したダイクに垂直な潮汐応力成分が伸張になる時に発生するが群発活動の

後半においては群発活動は潮汐荷重とは関係なく発生することがわかった。

潮汐荷重による応力変化は  $10^{-3}$  MPa のオーダーであり地震に伴う応力降下量や大きな地震に伴う応力変化に比べて非常に小さい。したがってバースト的地震活動の開始直前のダイク先端での応力状態は臨界状態に近いことが示唆される。理論的考察から、ダイク先端にはその粘性によってマグマ本体は入り込めずマグマ本体からの揮発性物質によって満たされているとされている (例えば *Spence and Turcotte [1985]*)。ダイクに垂直な潮汐荷重が弱まるとダイク先端の圧力は地殻強度を越え、地殻中の流体を通じて圧力が伝播しバースト的地震活動になると考えられる。この過程はこの地域の含水率が高いことが要求されるが、地震波による速度構造探査 (*Yoshii et al., [1985]*) により地下浅部に不透水層の存在が示唆されていることからこの仮定は妥当と考えられる。バーストによってダイク先端の圧力は減少するが、マグマ本体からの脱ガスによってダイク先端の圧力状態は速やかに臨界状態に戻るであろう。群発活動後半になると、脱ガスレート低下や周囲で発生する大きな地震による応力場の摂動によりダイク先端の応力状態は臨界状態ではなくなると考えられる。そのために群発活動後期では潮汐荷重と関係なくバースト的地震活動が発生すると考えられる (図 3)。

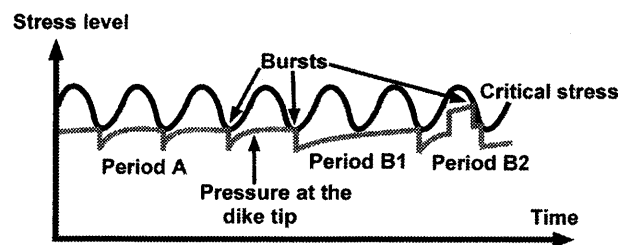


図 3: 潮汐荷重による地震発生のメカニズム。Period A ではダイクに垂直な潮汐応力が弱まったときにバーストが起きるが Period B1 では深部からのマグマ供給の減少により、Period B2 では周囲に発生する地震によって応力場が乱されるために潮汐荷重が地震を起こさなくなる。

## 参考文献

- Basu, A., and L. N. Frazer, *Science*, 24, 1409, 1990.  
Efron B., and R. J. Tibshirani, *An introduction to the Bootstrap*, Chapman & Hall, 1993.  
Kato T., et al., *Geophys. Res. Lett.*, 25, 3445, 1998.  
Okada, Y., and E. Yamamoto, *J. Geophys. Res.*, 96, 10361, 1991.  
Press, W. H., et al., *Numerical Recipes in C*, Cambridge Univ. Press, 1994.  
Schuster, A., *Proc. R. Soc. Lond.*, 61, 455, 1897.  
Segall, P., and M. Matthews, *J. Geophys. Res.*, 102, 22391, 1997.  
Spence, D. A., and D. L. Turcotte, *J. Geophys. Res.*, 90, 575, 1985.  
東京大学地震研究所、地震予知連会報、58 巻、239, 1997.  
Ukawa, M., *J. Geophys. Res.*, 96, 713-728, 1991.  
Yoshii, T., et al., *J. Phys. Earth*, 33, 435, 1985.