

ダイクの貫入活動と断層運動の相互作用： 有限要素法による数値シミュレーション

和賀俊治*・橋本 学**

(2000年5月11日受付, 2002年11月20日受理)

Interaction between Dyke Intrusion and Movements of Surrounding Faults: A Numerical Simulation with Finite Element Method

Shunji WAGA* and Manabu HASHIMOTO**

We investigate the effect of movement of nearby faults caused by an intrusion of dyke on volcanic activity. We examine two factors as indicators of the effect of faulting. One is a change in stress concentration at the dyke tip and the other is a change in opening of dyke. In this study, a finite element method is applied under a two dimensional plane stress state to incorporate geometrical relationship between the dyke and the fault. Dyke and fault are modeled as an open crack with internal pressure and a shear crack with Coulomb friction, respectively. Geometrical parameters considered are an angle, a distance between the dyke and the fault, and the length of fault. One of the most important results is as follows; when a fault with high angle against the dyke strike extends beyond the dyke tip along the propagation direction, and when the fault with low angle extends to it, the dyke propagate and open more easily than the case without fault. We apply our result to recent volcanic activities in Japan associated with the dyke intrusion, the 1986 Izu-Oshima and 1989 off Ito eruptions, and we suggest that changes in volcanic activities may have been attributed to the occurrence of moderate-sized earthquakes near the dyke tip.

1. はじめに

ダイク貫入を伴う火山活動では、やや規模の大きい地震の発生に伴い火山活動に変化がみられるケースがある。1986年伊豆大島火山噴火では外輪山北西斜面からの割れ目噴火に先立って M 4.0~5.1の地震が島北西沿岸付近で多発した(和賀・山岡, 1996)。Hashimoto and Tada (1990) が地殻変動解析より推定した開口割れ目北西端はこの群発域付近にあり、特に最大地震の M 5.1の地震は開口割れ目北西端のすぐ西側で発生した。

1989年伊東沖海底噴火では、マグマが地下から上昇を続け、それに伴い激しい群発地震が発生した。一連の活動中 M 5.5の地震が発生し、数日後海底噴火が発生し

た。このケースでは M 5.5の震源域から断層は海底噴火を引き起こしたとされるダイク北西端付近に推定された(Okada and Yamamoto, 1991)。これらの事例は、ダイクの貫入活動が地震の発生と何らかの関係があることを示唆する。

地震の発生に係るダイクの影響は次の2つが考えられる。一つはダイクの開口量の変化である(Fig. 1(a))。ダイクの開口量が変わると、ダイク中のマグマ圧に変化が生じる。これによりマグマの運動が活性化されるという考えである(例えば大倉・安藤, 1994)。

もう一つはダイク先端の応力変化である(Fig. 1(b))。破壊力学によれば、クラックはクラック先端の応力集中が媒質の物性である破壊じん性を越えると伸張し始める。ダイク付近に存在する断層がダイク先端付近の応力集中を変化させ、結果としてダイクが拡大もしくは停止することが考えられる。

ダイクは断層との相互作用によりダイク先端の応力集中および開口量に変化が生じ、結果としてダイクの貫入活動が変化することが予想される。そこで、本論はこれらに注目して定量的な評価を行う。

ここでは、断層とダイクを簡単な2次元クラックで表

* 〒253-0006 茅ヶ崎市堤 1-1-8-406
Tsutsumi 1-1-8-406, Chigasaki, Kanagawa 253-0006, Japan.

** 〒611-0011 宇治市五ヶ庄
京都大学防災研究所・地震予知研究センター
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011, Japan.
Corresponding author: Manabu Hashimoto
e-mail: hasimoto@rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp

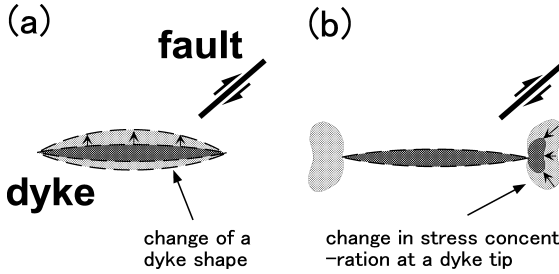


Fig. 1. Factors which are likely to change activity of dyke due to an interaction between the dyke and fault, (a) change of a dyke shape, (b) change in stress concentration at a dyke tip.

現し、ダイク近傍に存在する断層を想定する。有限要素法によりクラックの応力集中および形状を計算し、得られた結果から 1986 年伊豆大島噴火および 1989 年伊東沖海底噴火のケースでみられた地震とダイクの貫入活動の関係を考察する。

2. 計算方法

ダイクの形状およびダイク先端の応力集中を詳細に調べるため、本論では 2 次元平面応力を仮定した非線形静解析によりこれら进行评估する。数値計算は、京都大学大型計算機センターの有限要素法プログラム MSC/NASTRAN を使用した。

2-1 ダイクのモデル化

ダイクは開口クラックでモデル化する。開口クラック面上の節点は同座標に異なる節点をもつ二重節点として、これらに等分布荷重を与えることで内圧を表現する。Aki *et al.* (1977) は、キラウエア火山下のマグマ圧を 2 MPa と見積もった。Wadge (1977) は、エトナ火山における側噴火の圧力として 15 MPa と推定した。しかしマグマ圧はよく分かっておらず、観測値にもばらつきがある。ここでは、これらの事例を参考にしてマグマ圧を 10 MPa と仮定した。

2-2 断層のモデル化

断層はせん断強度をもつせん断クラックでモデル化する。せん断クラックの内面は X, Y 軸方向ともに変位拘束されない自由表面として表現され、固着・すべり・開口の変形が生じる。MSC/NASTRAN では、2 節点間の断層面の接触状態をシミュレートするのにアダプティブ GAP 要素を用いる (日本エムエスシー, 1994)。

せん断クラック面の接触は、2 節点間に配置されたアダプティブ GAP 要素の状態で判別される。アダプティブ GAP 要素の概念を Fig. 2 に示す。アダプティブ GAP 要素は、節点 Ga, Gb を通る方向を X 軸として、X 軸方向の変位差 ($U_a - U_b$) が予め設定した初期開口量 U_0 より

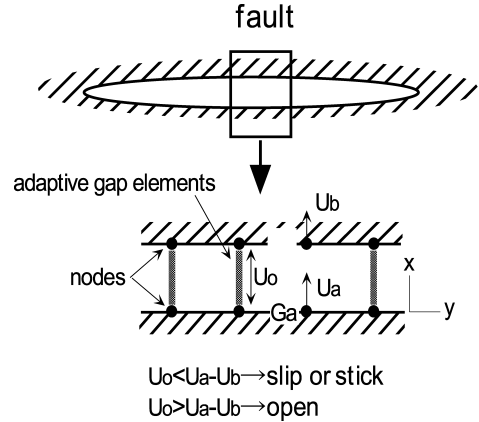


Fig. 2. Description of adaptive gap elements in MSC/NASTRAN for the judgment of contact of both planes of the fault.

大きい場合に接触状態とみなす。このとき、アダプティブ GAP 要素は周囲より大きい軸剛性 (K_a) をもつ状態になる。一方、差が U_0 と比べて小さい場合、開口状態とみなし、アダプティブ GAP 要素は小さな軸剛性 (K_b) を持つ状態になる。

2-3 せん断クラックの滑り基準

MSC/NASTRAN は、滑り基準として Coulomb の摩擦法則を採用している。2 次元平面のとき、アダプティブ GAP 要素における力の成分は、要素座標系における変位で表現される軸圧縮力 (F_x) およびせん断方向の摩擦力 (F_y) で、これらはアダプティブ GAP 要素の状態により次のように計算される。接触がなく GAP が開いているとき、

$$F_x = K_b u_x \leq 0 \text{ および } F_y = 0 \quad (1)$$

でせん断剛性がない。ここで、 K_b は開いている状態での軸剛性である。GAP が閉じて固着しているとき、

$$F_y \leq \mu_s F_x \quad (2)$$

ここで、 $F_x = K_a u_x$, $F_y = K_t u_y$ で、 K_a は閉じている状態での軸剛性、 μ_s は静摩擦係数、 K_t はせん断剛性である。一方、GAP が閉じて滑りがあるとき、

$$F_y > \mu_k F_x \quad (3)$$

ここで、 $F_x = K_a u_x$ で、 μ_k は動摩擦係数である。

2-4 モデル・パラメータ

計算に用いた各パラメータを Table 1 に示す。ダイク貫入に伴う地震の震源は数キロと浅いものが多い (山岡・他, 1988; Ukawa and Tsukahara, 1996)。この深さでは断層面に作用する垂直応力は 100~200 MPa と推定される (山口・西松, 1991)。ここでは、Byerlee (1978) による法線応力とせん断応力の関係を考慮して静摩擦係数を 0.6 とする。

Table 1. Model parameters adopted in this analysis.

<i>General Parameters</i>	
Poisson ratio	0.25
Shear modulus [GPa]	20
<i>Shear Crack Parameters</i>	
Shear stiffness [GPa]	10
Cohesion [GPa]	0.0
Static frictional coefficient	0.6
Dynamic frictional coefficient	0.4
<i>Open Crack Parameters</i>	
Internal pressure [MPa]	10
Loading steps	3

一般に、滑りが生じている時の動摩擦係数は静摩擦係数よりも小さい。そこで、滑りが生じる状態をより現実的に近づけるため動摩擦係数を採用し、その値を0.4とした。

マグマは地下数キロにあるマグマ溜まりから上昇すると考えられる。ここでは、この深さを考慮して地殻の剛性率として20 GPaを採用した。また、ポアソン比は0.25を仮定した。

2-5 応力拡大係数の評価法

二次元平面においてクラック先端付近の変位分布は、クラックの代表寸法と比較して十分小さい範囲では円筒座標により近似的に次式で表される。

$$u_i = (K_n/2G) (r/2\pi)^{1/2} f_i(\theta) \quad i=x, y \quad n=I, II, III \quad (4)$$

ここで、 K_n は応力拡大係数で、 n は変形モード、 G および $f_i(\theta)$ はそれぞれ剛性率・変位関数、 θ はX軸から右周りに測った角度、 i はX軸又はY軸方向、 r はクラック先端からの距離を示す。変位関数 $f_i(\theta)$ は開口モード型($n=I$)について

$$f_x(\theta) = \cos \frac{\theta}{2} \left(k - 1 + 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right)$$

$$f_y(\theta) = \sin \frac{\theta}{2} \left(k + 1 - 2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \right) \quad (5)$$

$$k = (3-\nu)/(1+\nu)$$

と表現される。 ν はポアソン比である。(4)および(5)式よりクラック先端付近の変位は座標により一義的に決まる。そこで、計算により求められた節点の変位を上式に代入して K_I を評価する。変位は開口クラック端の手前に設定された節点を選んだ。この節点とクラック端までの距離と、開口クラックの長さ比は1/40である。

地殻の破壊じん性はクラックの伸展、または停止を決定する重要な物性値と考えられる。過去の研究で火山岩の破壊じん性を見積もった事例があるが(例えば、Atkinson, 1984)、実際にはよく分かっておらず、 K_I の絶対値で評価することは困難である。そこで、せん断クラック

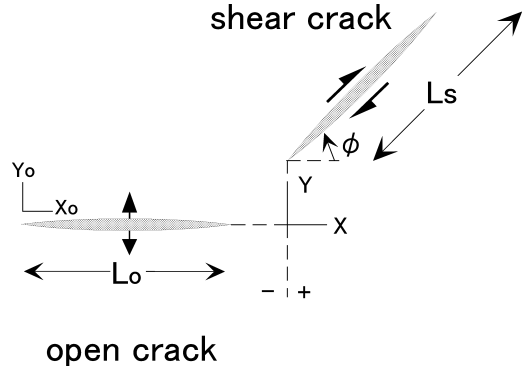


Fig. 3. Idealized model and coordinate systems.

Table 2. Geometric parameters used in this analysis.

	L_s/L_o	X/L_o	ϕ [°]
model-A	1.0	0.0	0~150 (15 steps)
model-B	0.25,1.0,4.0	-1.0~0.5	15,45,75,90

がない場合の開口クラックのモードI型応力拡大係数 K_I^* により正規化した値 K_I/K_I^* について評価する。これにより、 $K_I/K_I^* \geq 1$ のとき、開口クラックはせん断クラックがない場合と比較して伸展しやすい状態、 $K_I/K_I^* < 1$ のとき、伸展しにくい状態にあると解釈できる。

2-6 座標系と幾何学パラメータ

計算に用いた開口クラックおよびせん断クラックの座標系をFig. 3に、モデルの幾何学パラメータをTable 2に示す。開口クラックおよびせん断クラックの長さをそれぞれ L_o, L_s と表現し、開口クラックとせん断クラックの位置を表現するX-Y座標と、開口クラック、せん断クラック上の節点の位置を表現する X_o-Y_o 座標、 X_s-Y_s 座標をそれぞれ独立に与える。 ϕ はX軸に対する角度を表し、開口クラックの走向から反時計周りに計った値に相当する。

数値計算を行うにあたって4点四角要素を使用した。節点数および要素数はモデルにより若干異なり、それぞれ1400~2000および1200~1800である。数値計算の精度を確保するため、開口クラック周辺の要素は正方形になるよう配慮した。モデル外部境界は、境界面に直交する方向の変位を拘束した。外部境界は開口クラック端の応力変化に影響を及ぼす。これら为了避免するため、開口クラック端から外部境界までの距離を開口クラックの長さの5倍とした。

数値計算の効率を高めるため、開口クラックとせん断クラック端との間にY軸方向へ0.15 L_o の距離をとった。なお、開口クラックとせん断クラックの距離、せん断クラックの長さはそれぞれ L_o で正規化をおこない、

計算された開口量についても、せん断クラックがない場合の開口クラックの、 $X_o/L_o=0.5$ に配置された節点の開口量 $Y_o(\infty)$ で正規化した。

計算は、まず $X/L_o=0.0$, $L_s/L_o=1.0$, に固定して、 ϕ を $0^\circ \sim 150^\circ$ の間で 15° 刻みに変えて行った。次に、 X/L_o を $-1.0 \sim 0.5$ の範囲で変えて、せん断クラック長による効果も考慮して $L_s/L_o=0.25, 1.0, 4.0$ の3ケースをそれぞれについて計算した。 ϕ は $15^\circ, 45^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ の4ケースを想定した。

3. 解析結果

3-1 model-A

K_I/K_I^* の計算結果を Fig. 4(a) に示す。計算した ϕ の範囲内では $K_I/K_I^* > 1$ であり、開口クラックは伸展しやすい状態にある。 K_I/K_I^* は $\phi=90^\circ$ で最大となり、開口クラックとせん断クラックが直交するように配置される時、せん断クラックの効果が最も大きい。

開口量の分布を Fig. 4(b) に示す。開口量は $\phi=90^\circ$ のとき最大で、 K_I/K_I^* の最大に対応する。一方、 ϕ が低角になるほど開口量は小さくなり、 $\phi=15^\circ, 45^\circ$ のモデルで

は殆ど変化がなかった。このように、開口クラックとせん断クラックのなす角が 90° に近いほど開口クラックは伸展しやすい状態になり、これに対応して開口量も増加する。

3-2 model-B

K_I/K_I^* の計算結果を Fig. 5(a) に示す。 $X/L_o < 0$ のとき、 $\phi=15^\circ$ と $\phi=45^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ の $X/L_o=-1.0$ では、 K_I/K_I^* にほとんど変化がなく1に近い値になる。それ以外は $K_I/K_I^* > 1$ で、開口クラックが伸展しやすい状態になり、 X/L_o がゼロに近づくにしたがい K_I/K_I^* は急激に大きくなる。

例えば、 $L_s/L_o=1.0$ として $\phi=45^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ のケースをみると、 ϕ は低角よりも高角のほうがせん断クラックの効果が表れて K_I/K_I^* が大きくなる。

また、例えば $\phi=45^\circ$ の $L_s/L_o=0.25, 1.0, 4.0$ と、 $\phi=90^\circ$ のそれを比較すると、後者のほうが L_s/L_o が大きいほど K_I/K_I^* はより大きくなる傾向にあり、せん断クラックの長さによる影響が表れる。なお、 L_s が L_o より短い場合を想定して、 $L_s/L_o=0.25$ を計算したが、この場合、 ϕ や X/L_o の違いに関係なく K_I/K_I^* は1に近い値となった。

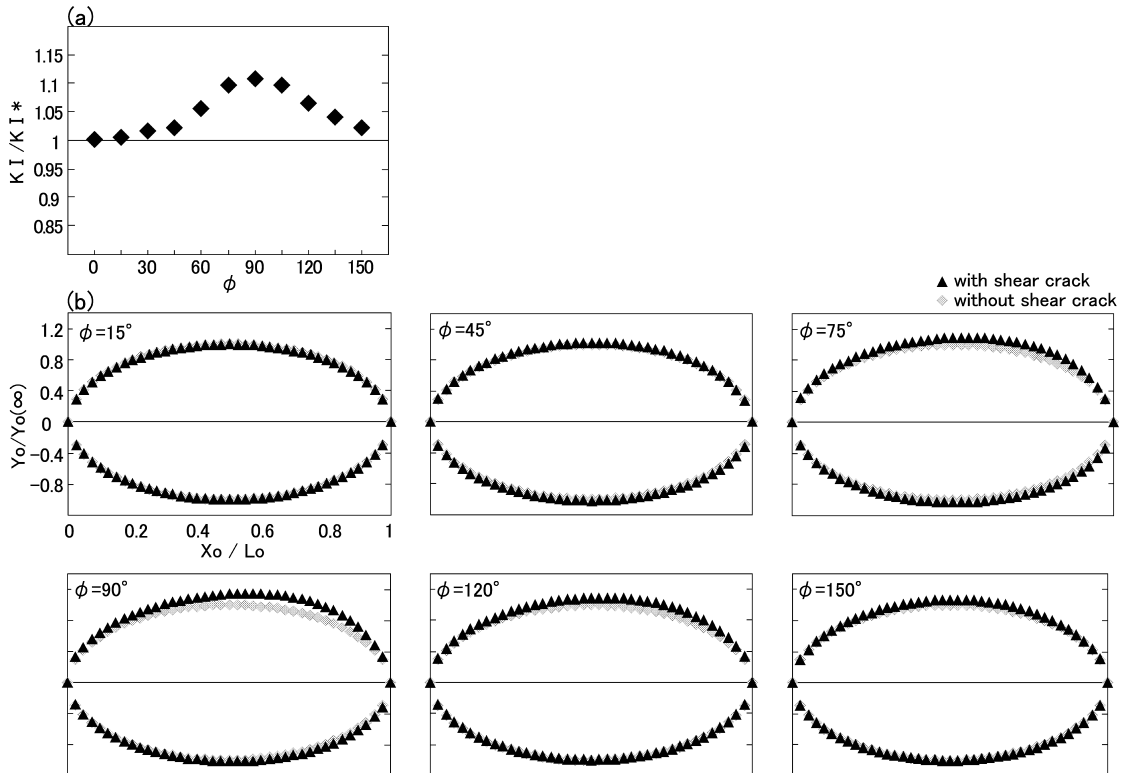


Fig. 4. Results in model A, (a) stress intensity factors, and (b) deformations of both planes of the open crack. They are normalized by the stress intensity factor and maximum opening value ($X_o/L_o=0.5$) without a shear crack respectively.

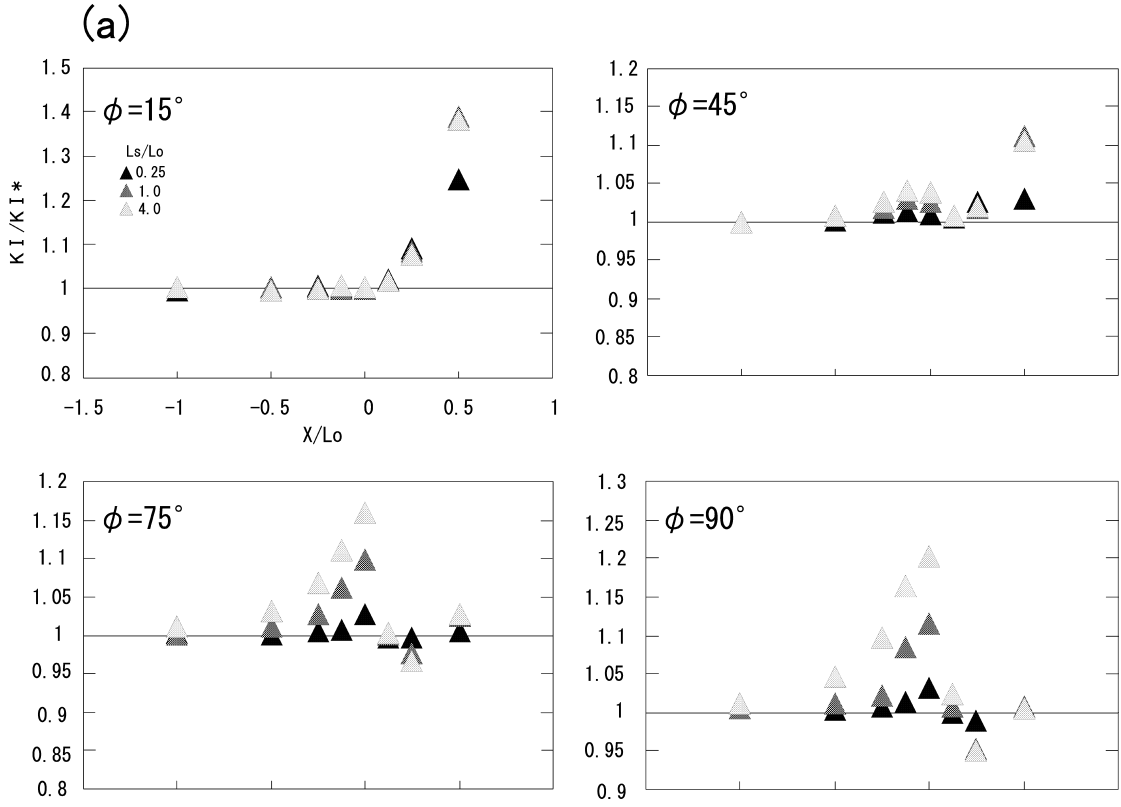


Fig. 5. Results in model-B, (a) stress intensity factors, and (b) deformations of both planes of the open crack with $L_s/L_o=1.0$, respectively. They are normalized by the stress intensity factor and maximum opening value ($X_o/L_o=0.5$) without a shear crack, respectively.

$X/L_o \geq 0$ では、せん断クラックの伸長方向は開口クラックと交差する配置になる。この配置では ϕ により K_I/K_I^* が異なる。 $\phi = 15^\circ$ のケースでは $K_I/K_I^* > 1$ となり、このとき X/L_o が大きいほど K_I/K_I^* は急激に大きくなる。例えば、 $\phi = 15^\circ, X/L_o = 0.5$ では K_I/K_I^* が約 40% 増加した。これに対して、 $\phi = 45^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ になると、せん断クラックの伸長方向が開口クラック端近くで交差する配置となる。 $X/L_o = 0.125, 0.25$ で K_I/K_I^* は減少の傾向となり、このうち $\phi = 75^\circ, 90^\circ$ のケースでは、 $X/L_o = 0.25$ で $K_I/K_I^* < 1$ となった。一方、 $X/L_o > 0.25$ になると K_I/K_I^* は増加の傾向となり、 $\phi = 45^\circ, 75^\circ$ のモデルでは $K_I/K_I^* > 1$ となった。 L_s/L_o についてみると、 $L_s/L_o = 1.0, 4.0$ では K_I/K_I^* がほとんど同じ値になり、せん断クラックの長さあまり影響されない。

開口量の分布を Fig. 5(b) に示す。ここでは、 $X/L_o = 0, 0.25, 0.5$ の計算結果について示した。これらのうち、開口量が減少するのは $\phi = 75^\circ, 90^\circ$ の $X/L_o = 0.25$ のケースで、これらは $K_I/K_I^* < 1$ となるケースに対応する。開口量の減少は例えば、 $\phi = 90^\circ, X/L_o = 0.25$ では $0.7 \leq$

$X_o/L_o < 1$ の範囲で、開口クラック端付近に限られた。

ϕ が低角だと $X/L_o = 0.5$ で大きな開口を伴うが、その分布はせん断クラックに近い一部の範囲に限られる。例えば、 $\phi = 15^\circ$ のケースでは、 $0.4 \leq X_o/L_o < 1.0$ の範囲で開口が生じ、せん断クラックがない場合と比べて開口量は約 2 倍になった。一方、 ϕ が高角では $X/L_o = 0$ で開口量は最大になる。この場合、 ϕ が低角のケースに比べて、開口クラック全体が開く傾向がみられた。

4. 議 論

本論は、簡単な二次元クラック・モデルを用いてせん断クラックの影響による開口クラックの開口量および先端の応力集中の変化を調べた。本論は開口クラックに伴う静的な変形について計算したものであり、せん断クラックの動的な破壊プロセスによる効果について考慮していない。マグマの移動速度 (Hauksson, 1983)、割れ目噴火の拡大速度 (荒牧・早川, 1984; 阿部, 1988)、震源の移動速度 (山岡・他, 1988; Brandsdottir and Einarsson, 1979) などから、ダイクの拡大速度はおよそ $0.2 \sim$

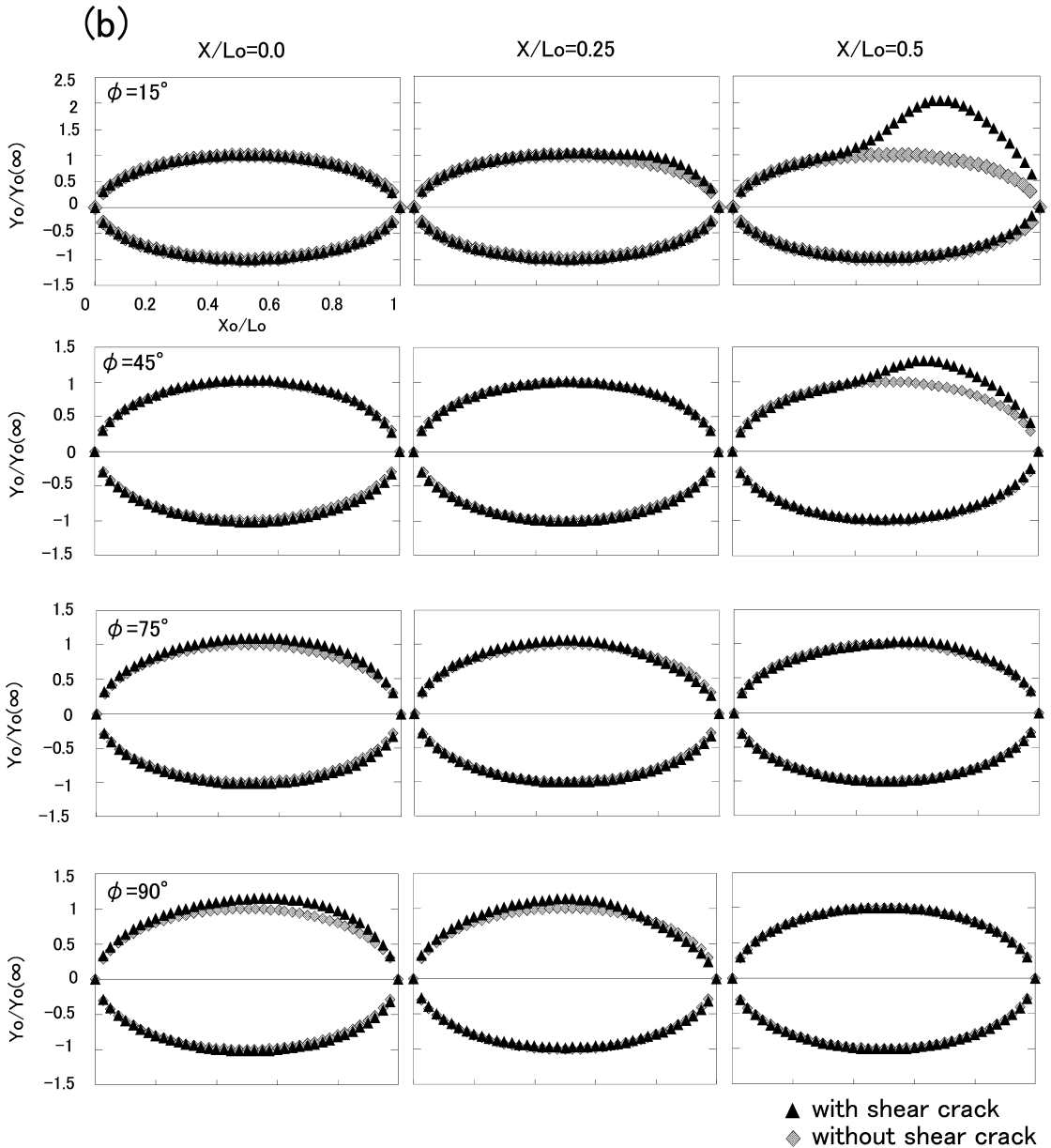


Fig. 5. Continued

0.7 m/s のオーダーと推定されるのに対して、断層の平均的な破壊伝播速度は 1~4 km/s であり（例えば、阿部, 1988）、ダイクの拡大速度は地震の破壊伝播速度に比べてきわめて小さいと考えられる。よって断層運動の動的効果は無視でき、ここで示した計算結果は第一近似的に有効であると考えられる。

結果を Fig. 6 に模式的に示す。せん断クラックによる開口クラック開口量 (Fig. 6(a)) および先端の応力集中 (Fig. 6(b)) は、主として開口クラックとせん断クラック

の距離と、双方のなす角に依存する。

結果を考慮すると、例えば、ダイク周辺にダイク長と同程度以上の長さをもつ断層があり、双方のなす角が小さく、断層の伸長方向がダイクと交わる配置で、また、双方のなす角が大きく、断層の伸長方向がダイクと交わらない配置であると、ダイクの開口量が増大する。前者のケースでは、ダイクの一部で、後者のケースではダイクの広範囲で開口を伴うことが考えられる。一方、双方のなす角が大きく、断層の伸長方向がダイクの先端付近

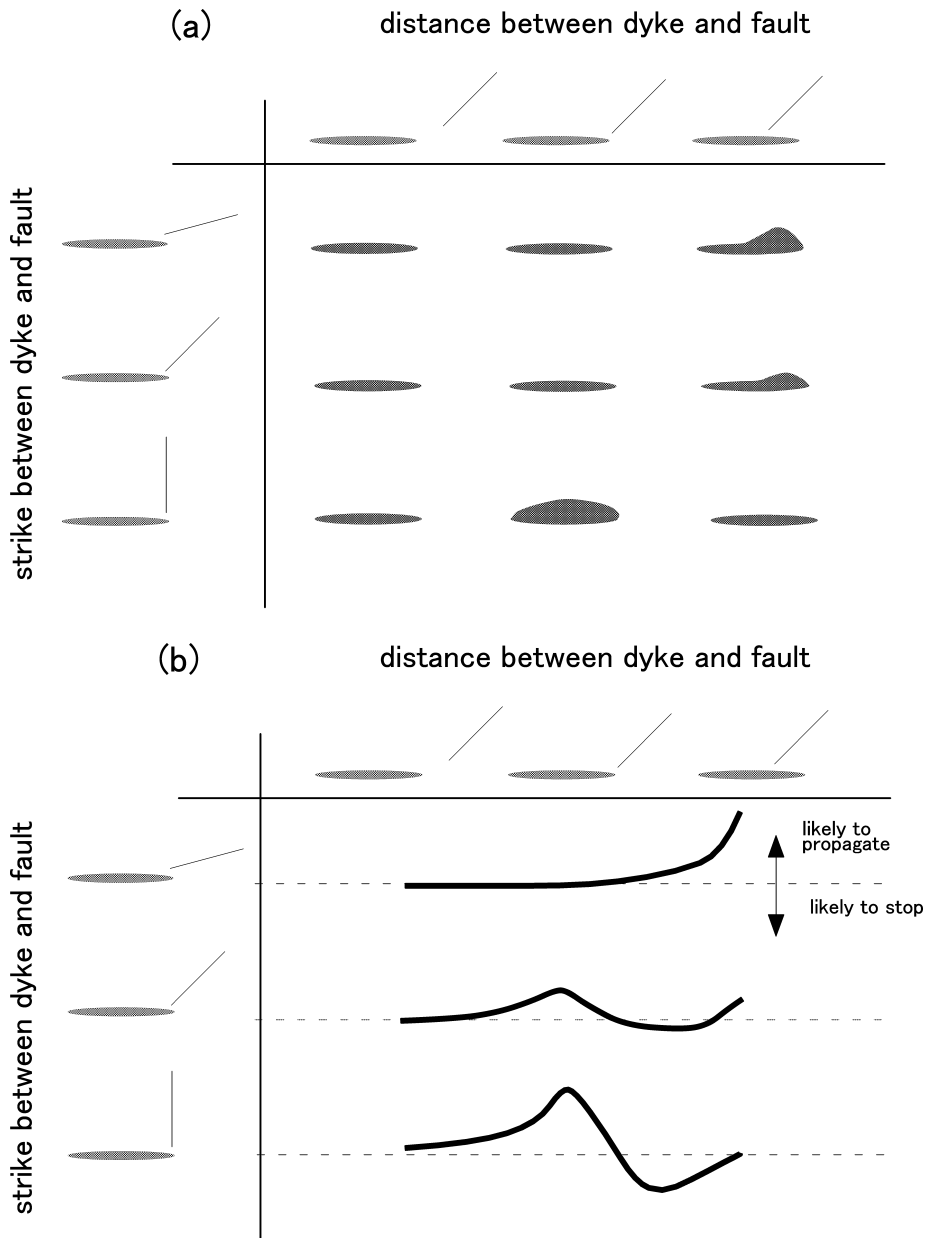


Fig. 6. A schematic idea of the results in this paper, (a) deformation of the dyke and (b) a change in stress concentration when a fault exists around the dyke.

で交わる配置だと、ダイク端の応力集中が弱められて拡大が停止することが考えられる。

以上より、ダイクと地震の発生場所からダイクが受けた断層の影響を検討してみる。ここでは、ダイクの貫入活動に伴い規模の大きな地震が発生した1986年伊豆大島噴火と1989年伊東沖海底火山噴火の事例を取り上げる。特にダイクと断層の位置に注目し、その配置から期待されるダイクの貫入活動の変化を検討して一連の火山

活動の説明を試みる。

4-1 1986年伊豆大島噴火

この事例では、大島を北西-南東方向に横切るダイクの貫入が推定された(山岡・他, 1988; Hashimoto and Tada, 1990)。また、割れ目噴火開始後、大島北西部において M 5.1 を最大とするやや規模の大きな地震 (M 4~) が多発した (Fig. 7(a))。これらのほとんどは、推定されたダイク北西端付近から大島北西岸付近の狭い

The 1986 Oshima

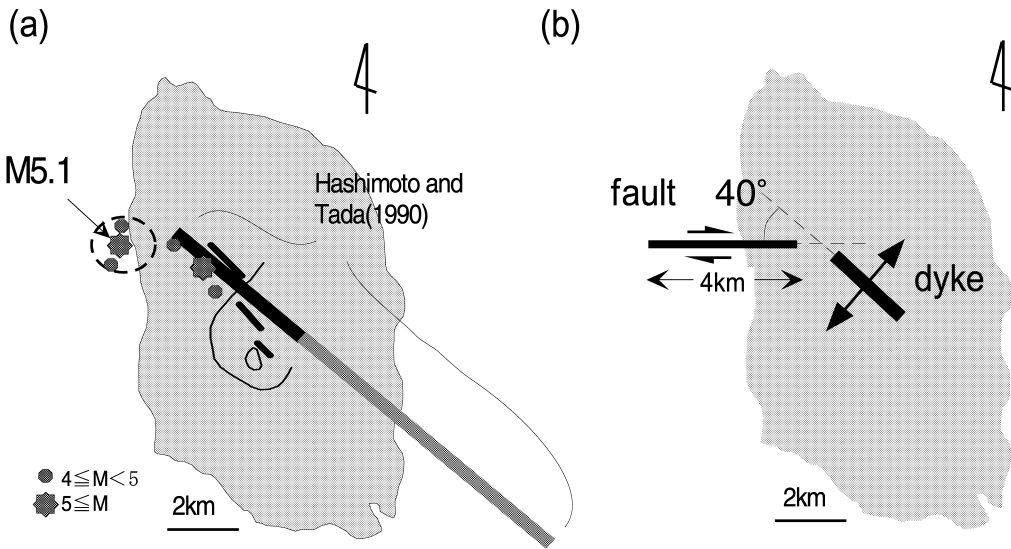


Fig. 7. (a) A distribution of epicenters and a dyke location, (b) the geometrical location between the fault and dyke associated with the 1986 eruption of Izu-Oshima volcano. Gray and black lines denote the dyke location inferred from Hashimoto and Tada (1990). The epicenter of the $M 5.1$ earthquake and a region (dashed line) west off the shore, where earthquakes ($M > 4.0$) swarmed after the beginning of the fissure eruptions, was inferred from Waga and Yamaoka (1996). Others were determined by E. R. I. Slip direction of the fault in (b) was referred to Yamaoka *et al.* (1988).

範囲で発生しており (和賀・山岡, 1996), この領域で断層が形成されたことを示す. M と断層長の経験則から推定すると $M 5.1$ の地震では約 4 km の断層が形成されたと考えられる.

この地震が発生した時, 大島北西部に貫入したダイクは割れ目噴火開始直前の地震活動域 (山岡・他, 1988), 噴火割れ目の位置・長さ (阿部, 1988) から長さ約 2~3 km 程度と推定され, 大島北西部の断層はダイクの 2 倍程度の長さだったと考えられる. 山岡・他 (1988) によれば, 地震が群発した領域は北西-南東を主圧縮軸とするストライク・スリップ型が支配的なメカニズム解である. これらを考慮すると断層とダイクのなす角は約 40° となる.

以上のように解釈すると, ダイクと断層の配置は Fig. 7(b) になる. この図の配置に従うと, Fig. 5(a) の $\phi = 45^\circ$ で $X/L_0 = -0.125$ でのケースに近く, 断層の伸長方向はダイクと交わらない. この配置だと, ダイクは拡大しやすい状態になり大島北西部への貫入が推定される. カルデラ北部で始まった割れ目噴火は, $M 5.1$ の地震発生 30 分後に外輪山北側斜面でも割れ目噴火が生じた, これは, 地震発生後もダイクが拡大を続けたことを示しており, ダイクが断層の影響を受けた可能性がある. ただし, 今回のモデルでは位置に不確実性があり決定的な

議論はできない. Fig. 7(a) では, ダイク北西端は元町直下付近に求められ (Hashimoto and Tada, 1990), ダイク端付近に断層があるように見える. これは, ダイクが拡大を続けて断層と交差する配置に至り, 結果, ダイク先端の応力集中が弱められ, 拡大が停止したものと解釈できる.

4-2 1989年伊東沖海底噴火

この事例では, 地震活動およびダイクの貫入の様子が時間変化とともに報告されている (Ukawa and Tsukahara, 1996; Okada and Yamamoto, 1991). Fig. 8(a) は Okada and Yamamoto (1991) が推定したダイクと最大地震 ($M 5.5$) の配置である. これによれば, 約 3 km のダイクと約 6 km の断層が約 20° という低角でダイクの北西端付近で交差する (Fig. 8(b)). この配置は Fig. 5(b) の $\phi = 15^\circ$ で $X/L_0 = 0.25$ に近いと考えられ, ダイク北西端付近に局所的な開口が推定される. 地震発生の数日後に海底噴火が発生したが, その位置はダイク北西端付近だった. 開口量の変化に伴うマグマ圧の変化を考慮する必要があるが, Okada and Yamamoto (1991) が指摘したように, 断層が噴火に寄与した可能性が考えられる.

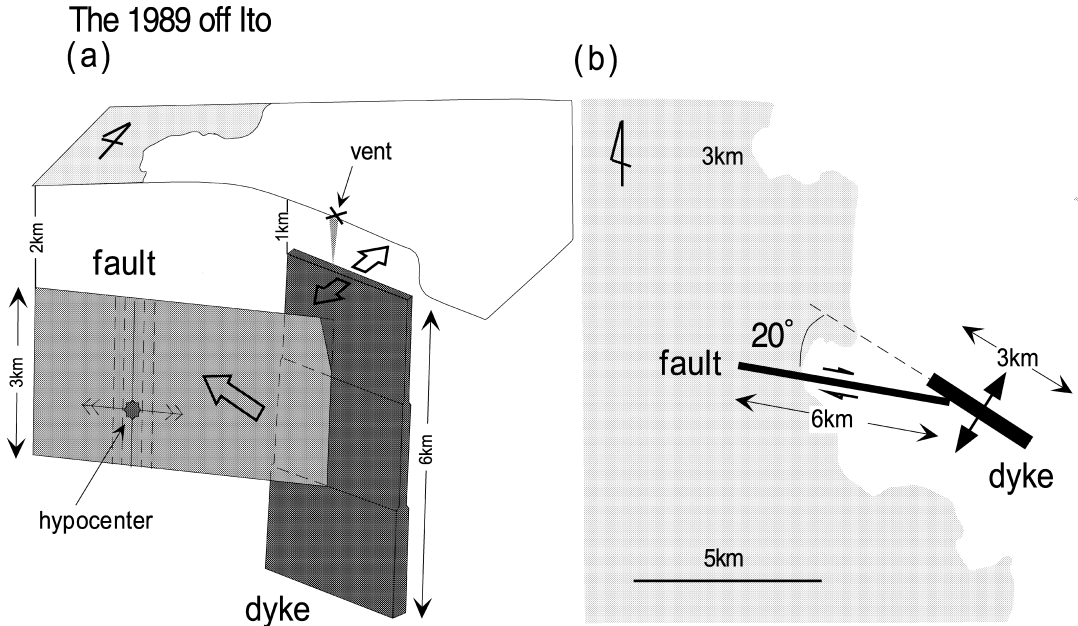


Fig. 8. (a) A spatial distribution of fault (M 5.5) and dyke locations; (b) the geometrical locations (two dimensional model) between the fault and dyke associated with the 1989 eruption off Ito (Okada and Yamamoto, 1991).

5. 今後の課題

本論は、簡単な2次元クラック・モデルにより断層がダイクに与える影響を評価し、ダイクの活動を伴った火山活動の変化を検討した。本論で示したように、ダイクと断層の幾何学的な配置は、ダイクの活動に影響を及ぼす要素と考えられる。ダイクの受ける影響は、特に、断層がダイク端付近に位置する場合にあらわれ、互いの配置のわずかな違いで受ける影響は異なることから、両者の関係をさらに調べるには断層とダイクの位置を詳細に把握する必要がある。

また、本論はダイクの形状と応力集中の変化に着目したが、ダイクと断層の相互作用により断層自身も影響を受けて、これが地震の発生と関わっている可能性がある。さらに、今回の計算では、マグマ圧の変化・地殻の破壊強度などを考慮していない。加えて、火山活動は広域応力場に強く支配されると考えられることから、今後、これらの要素も含めて詳細な関係を考察する必要がある。

6. まとめ

ダイク周辺の断層がダイクに与える影響に着目し、ダイクと断層間の距離および双方のなす角度について有限要素法により影響を評価した。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 断層の伸長方向がダイクと交わらない配置で、双方のなす角度が高角か、もしくは、断層の伸長方向がダイクと交わる配置で双方のなす角度が低角の場合、ダイクは拡大しやすい状態になり、このとき開口量も増大する。
- (2) 断層の延長がダイク端で交わる配置で、ダイクは拡大しにくい状態になるが、双方のなす角度が高角ほどその効果大きい。
- (3) 断層とダイクのなす角が高角ほど断層の長さによる影響が大きくなる。

謝 辞

本研究は和賀が京都大学大学院在学中および京都大学防災研究所における研修として行ったものである。本研究を行うにあたって、石原和弘教授、岡田篤正教授はじめ多くの方の助言を頂いた。特に、京都大学大型計算機センター・伊藤彰朗技官には汎用プログラムの扱い方でご指導を頂いた。名古屋大学大学院環境学研究科地震・火山観測研究センター・山岡耕春助教授には議論で有益な助言を頂いた。東海大学海洋研究所・楠本成寿博士には有限要素法の助言や動機付けを頂いた。この場を借りて感謝致します。

引用文献

- 阿部勝征 (1988) 伊豆大島 1986 年割れ目噴火の拡大速度. *火山*, **33**, S16-S19.
- Aki, K., Fehler, M. and Das, S. (1977) Source mechanisms of volcanic tremor: Fluid-driven crack models and their application to the 1963 Kilauea eruption. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **2**, 259-287.
- Atkinson, B. K. (1984) Subcritical crack growth in geologic materials. *J. Geophys. Res.*, **89**, 4077-4114.
- Ando, M. (1974) Seismo-tectonics of the 1923 Kanto Earthquake. *J. Phys. Earth*, **22**, 263-277.
- 荒牧重雄・早川由紀夫 (1984) 1983 年 10 月 3・4 日三宅島噴火の経過と噴火様式. *火山*, **29**, S24-S35.
- Brandssdottir, B. and Einarsson, P. (1979) Seismic activity associated with the September 1977 deflation of Krafla volcano in north-eastern Iceland. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **6**, 197-212.
- Byerlee, J. D. (1978) Friction of rock. *Pageoph*, **116**: 615-626.
- Hashimoto, M. and Tada, T. (1990) Crustal deformations associated with the 1986 fissure eruption of Izu-Oshima volcano, Japan, and their tectonic significance. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **60**, 324-338.
- Hauksson, E. (1983) Episodic rifting and volcanism at Krafla in North Iceland: Growth of large ground fissures along the plate boundary. *J. Geophys. Res.*, **88**, 625-636.
- 日本エムエスシー (1994) MSC/NASTRAN 非線形解析ハンドブック. 4 章, 24-37.
- 大倉敬宏・安藤雅孝 (1994) 1991 年ピナツボ噴火は 1990 年フィリピン地震に引き起こされたか? *地学雑*, **103**, 464-470.
- Okada, Y. and Yamamoto, E. (1991) Dyke intrusion model for the 1989 seismovolcanic activity off Ito, central Japan. *J. Geophys. Res.*, **96**, 10361-10376.
- Ukawa, M. and Tsukahara, H. (1996) Earthquake swarms and dike intrusions off the east coast of Izu Peninsula, central Japan. *Tectonophysics*, **253**, 285-303.
- Wadge, G. (1977) The storage and release of magma on Mount Etna. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **2**, 361-384.
- 和賀俊治・山岡耕春 (1996) 割れ目噴火に伴う地震の特質—1986 年伊豆大島火山噴火の場合—. *火山学会秋季大会講演予稿集*, A4.
- 山岡耕春・渡辺秀文・坂下至功 (1988) 1986 年伊豆大島噴火前後の地震活動. *火山*, **33**, S91-S101.
- 山口梅太郎・西松裕一 (1991) 岩石力学入門. 東京大学出版会, 331 pp.

(編集担当 松本 聡)