

## 広域応力場とカルデラ形状の力学的関係

楠本成寿\*・竹村恵二\*\*

(2003年4月3日受付, 2003年10月1日受理)

## Mechanical Relations between Caldera Form and Regional Stress Field

Shigekazu KUSUMOTO\* and Keiji TAKEMURA\*\*

In order to find mechanical relations between caldera form and regional stress field, we approximated collapse of a magma chamber by contraction of a small sphere in the elastic medium and estimated distribution of the plastic and/or rupturing area due to the contraction of the small sphere by the Coulomb yield criterion under an assumption of the elastic-perfectly-plastic material.

As a result, we found that the plastic area (caldera) showed a circle distribution on the surface when the regional stress field was not given or the isotropic regional stress field was given. On the other hand, when the anisotropic regional stress field was given, we found that the caldera enlarged toward the direction of the maximum compression axis (or the minimum extension axis), so that it showed an elliptic outline on the surface.

**Key words:** collapse caldera, caldera form, regional stress, magma chamber

## 1. はじめに

カルデラ（ここでは陥没カルデラ，以下同様）は基本的に円形であるが，そうでないものも少なくない（例えば，Miura and Tamai, 1998; Miura, 1999）. 円形でないカルデラの形成には，マグマ溜りの形状や広域応力場が重要な役割を果たしていると考えられている（例えば，小室, 1999; Roche *et al.*, 2000; 三浦, 2000）.

カルデラの形成メカニズムを解明するため，フィールド調査などの他，多くのアナログ実験も繰り返されてきた（例えば，Komuro, 1987; Marti *et al.*, 1994; Acocella *et al.*, 2000; Roche *et al.*, 2000）. これらの実験により，カルデラ中心部付近の逆断層やカルデラ外縁部の正断層の発達過程が明らかにされてきた. しかし，アナログ実験から応力場などの定量的な議論に発展させることは難しい. スケーリングの難しさも手伝って，広域応力場を

考慮した実験は行われていない. 数値解析手法による研究（例えば，Gudmundsson *et al.*, 1997; Gudmundsson, 1998）でも広域応力場とカルデラ形状の関係は明らかにされていない.

そこで本研究では，マグマ溜りの崩壊を弾完全塑性体内部の小球の収縮で近似し，これにより形成される3次元応力場を広域応力場と併せて評価することで，カルデラ形状と広域応力場の関係を明らかにすることを試みた.

## 2. モデリング方法

弾性体内部の小球 (Fig. 1) の収縮による3次元変位場を以下の式 (萩原, 1978) により推定した.

$$u = a^2 \Delta a r \left[ \frac{1}{R_1^3} + \frac{\lambda + 3\mu}{\lambda + \mu} \frac{1}{R_2^3} - \frac{6z(z+D)}{R_2^5} \right]$$

$$w = a^2 \Delta a \left[ \frac{D-z}{R_1^3} + \frac{2D}{R_2^3} - \frac{\lambda - \mu}{\lambda + \mu} \frac{z+D}{R_2^3} + \frac{6z(z+D)^2}{R_2^5} \right]$$

(1)

ここで  $u$  は  $r$  方向の変位であり， $w$  は  $z$  方向の変位である. また  $a$ ,  $\Delta a$ ,  $D$  はそれぞれ，小球の半径，小球の半径方向の変化量，小球の深さを表している. ここで  $a \ll D$ ,  $\Delta a \ll a$  である.  $\lambda$  と  $\mu$  はラメ定数であり， $R_1$ ,  $R_2$  は以下のように定義される.

$$R_1 = \sqrt{r^2 + (D-z)^2}, \quad R_2 = \sqrt{r^2 + (D+z)^2}$$

\* 〒424-8610 静岡市清水折戸 3-20-1

東海大学海洋学部

School of Marine Science and Technology, Tokai University, Shimizu Orito 3-20-1, Shizuoka 424-8610, Japan.

\*\* 〒874-0903 大分県別府市野口原

京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設 Beppu Geothermal Research Laboratory, Kyoto University, Noguchibaru, Beppu, Oita 874-0903, Japan.

Corresponding author: Shigekazu Kusumoto

e-mail: kusu@sec.u-tokai.ac.jp

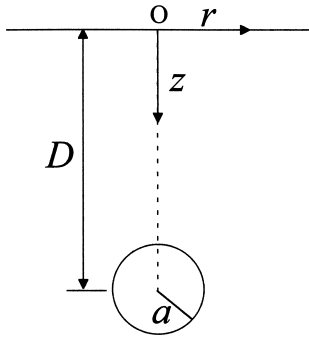


Fig. 1. Configuration of our model (spherical magma chamber). The chamber has a radius  $a$ , and its center is at depth  $D$  from the free surface.

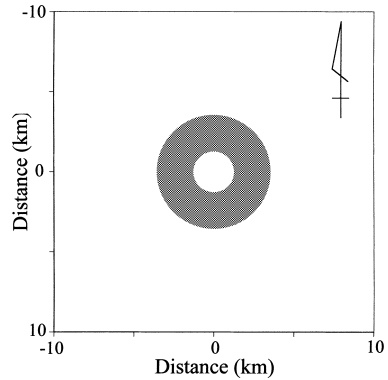


Fig. 2. Distribution of  $F$  value on the surface when the regional stress field is not given. The gray area indicates  $F \geq 1$ , and contraction of the small sphere ( $\Delta a/a$ ) is 0.015 (common in all figures).

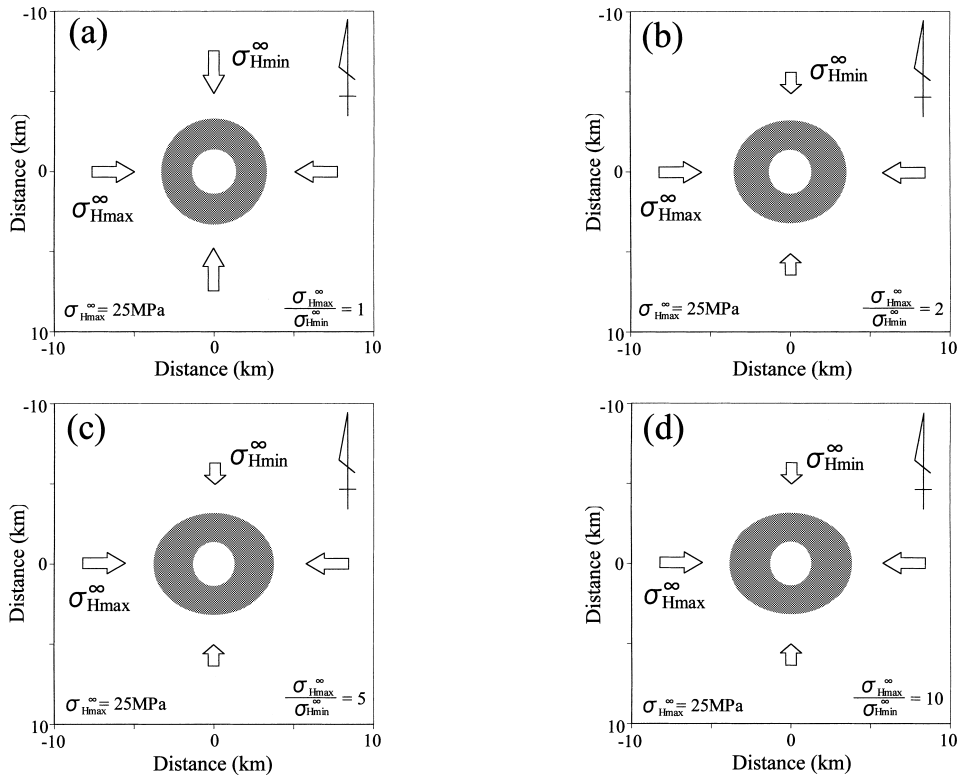


Fig. 3. Effect of the ratio  $\sigma_{Hmax}^{\infty} / \sigma_{Hmin}^{\infty}$  on the distribution of  $F$  value. The regional stress field is assumed that  $\sigma_{Hmax}^{\infty} = 25$  MPa (East-west compression). Compression is positive in this study. (a)  $\sigma_{Hmax}^{\infty} : \sigma_{Hmin}^{\infty} = 1 : 1$ . (b)  $\sigma_{Hmax}^{\infty} : \sigma_{Hmin}^{\infty} = 2 : 1$ . (c)  $\sigma_{Hmax}^{\infty} : \sigma_{Hmin}^{\infty} = 5 : 1$ . (d)  $\sigma_{Hmax}^{\infty} : \sigma_{Hmin}^{\infty} = 10 : 1$ .

半径方向の変化量  $\Delta a$  と球内部の圧力変化  $\Delta p$  には、

$$\Delta a = \frac{a \Delta p}{4\mu}$$

という関係がある。座標のとり方に差異はあるが、これ

はいわゆる茂木モデル (Mogi, 1958) である。

推定した変位場から数値微分により歪み場を求め、応力場に変換する。広域応力場の重ね合わせを行い、最終的に得られた応力場をクーロンの降伏 (破壊) 条件 (例

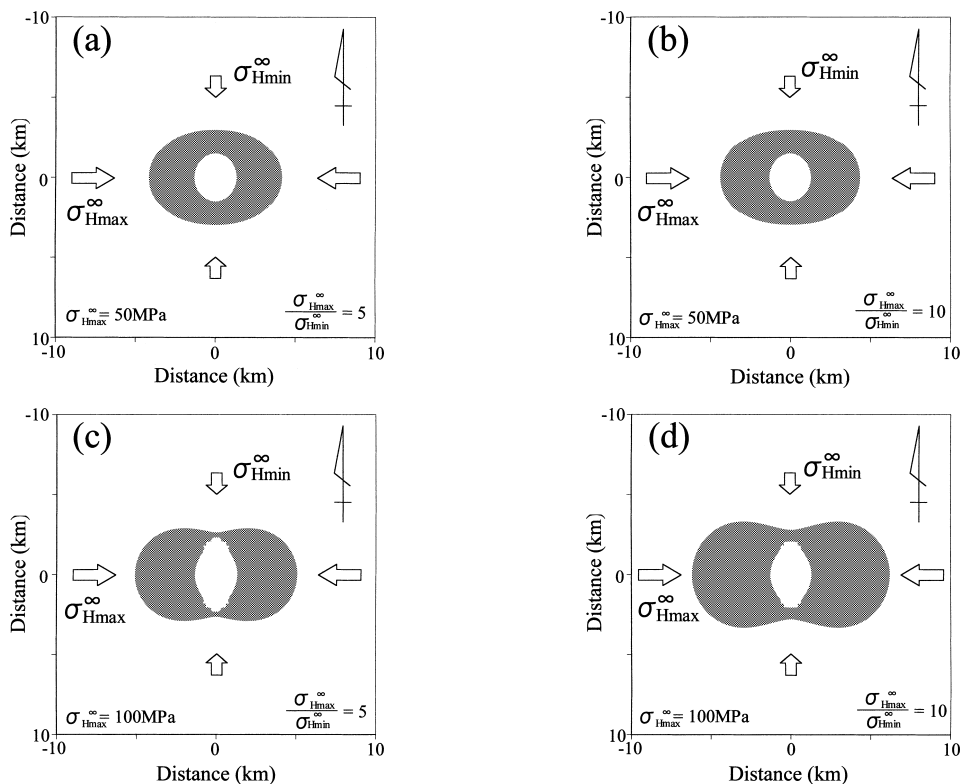


Fig. 4. Effect of the value  $\sigma_{Hmax}^{\infty}$  on the distribution of  $F$  value. (a)  $\sigma_{Hmax}^{\infty} = 50$  MPa, and  $\sigma_{Hmin}^{\infty} = 10$  MPa. (b)  $\sigma_{Hmax}^{\infty} = 50$  MPa, and  $\sigma_{Hmin}^{\infty} = 5$  MPa. (c)  $\sigma_{Hmax}^{\infty} = 100$  MPa, and  $\sigma_{Hmin}^{\infty} = 20$  MPa. (d)  $\sigma_{Hmax}^{\infty} = 100$  MPa, and  $\sigma_{Hmin}^{\infty} = 10$  MPa.

例えば, Jaeger and Cook, 1969) を用いて, 次の無次元量  $F$  により評価する.

$$F \equiv \frac{1}{c_0} \left[ \sigma_1 - \sigma_3 \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \right]$$

ここで  $c_0$  は圧縮強度であり,  $\phi$  は内部摩擦角である.

本研究では, 媒質は弾完全塑性体として振舞うと仮定した. そのため,  $F \geq 1$  のとき媒質は弾性領域から塑性・破壊領域に入る. また重力の影響は, 地殻が静水圧平衡にあることを仮定して与えられた. このとき最大主応力  $\sigma_1$  はつねに鉛直下向きで, 最小主応力  $\sigma_3$  は水平面に存在する. よって  $F \geq 1$  領域では正断層が発達する. 本研究では, この塑性領域と弾性領域の境界をカルデラの構造境界とした.

### 3. 計算結果および考察

本研究では玄武岩質の地殻を仮定して計算を行った. 玄武岩質の地殻の弾性定数として, 圧縮強度 160 MPa (例えば, 山路, 2000), ポアソン比 0.25 ( $\lambda = \mu$ ), ヤング率 40 GPa (Gudmundsson, 1988) を仮定した. 地表付近の岩石は  $30^\circ$  前後の内部摩擦角をもつ (山路, 2000) こと

から  $\phi = 30^\circ$  を仮定した.

式 (1) より,  $D, a, \Delta a$  の組み合わせによりいろいろな場合についてのシミュレーションが可能である. 本論では例として,  $a = 1$  km,  $D = 2$  km ( $D/a = 2$ ) の場合についての結果を示す. なお先述のように, 茂木モデルでは  $a \ll D$  が仮定されている. 厳密には  $D/a = 2$  は近似から外れているが, 破壊域の傾向を知る程度の議論では大きな影響はないと考えられる.

Fig. 2 は, 広域応力場が作用していない状態で小球に  $\Delta a/a = 0.015$  という収縮が生じたときの  $F \geq 1$  の分布である.  $F \geq 1$  領域では正断層が発達することから, この領域は環状断層の発生領域と解釈できる. よって広域応力場が作用しない場合, カルデラは円形になる.

Fig. 3 は, 東西方向に最大水平応力  $\sigma_{Hmax}^{\infty} = 25$  MPa をもつ圧縮応力場中で  $\Delta a/a = 0.015$  という収縮が小球に生じたときの  $F \geq 1$  の分布である. なお, 本論では圧縮を正とした.

スラブ・ブルヤリッジ・プッシュなど, プレート運動に関連した各種の応力が  $0 - 50$  MPa 程度である (例えば, Jarrard, 1986; Kusznir, 1991; Gölke and Coblenz,

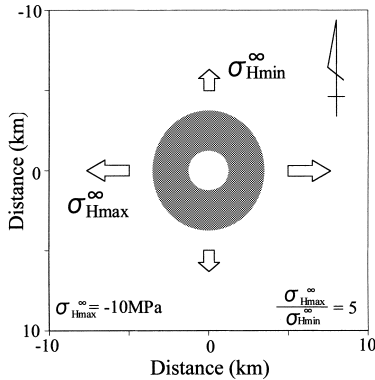


Fig. 5. Distribution of  $F$  value on the surface when the east-west extension is assumed that  $\sigma_{Hmax}^{\infty} = -10$  MPa and  $\sigma_{Hmin}^{\infty} = -2$  MPa.

1996) ことから、まず、25 MPa の圧縮応力を最大水平応力として与えた。最大水平応力と最小水平応力 ( $\sigma_{Hmin}^{\infty}$ ) の比は、順次変化させた (Fig. 3(a)–(d))。これらの図より、広域応力場が等方的である場合、カルデラは円形であるが、 $\sigma_{Hmax}^{\infty} / \sigma_{Hmin}^{\infty}$  比が大きくなるとカルデラは  $\sigma_{Hmax}^{\infty}$  の方向に発達した楕円形になり、そのアスペクト比 (長軸と短軸の長さの比) も  $\sigma_{Hmax}^{\infty} / \sigma_{Hmin}^{\infty}$  比とともに大きくなっていることがわかる。

Fig. 4 は、最大水平応力が 50 MPa、100 MPa という広域応力場中で、小球に  $\Delta a/a = 0.015$  という収縮が生じたときのカルデラ形状である。 $\sigma_{Hmax}^{\infty} = 100$  MPa で  $F \geq 1$  分布はアレイ型になる (Fig. 4(c), (d)) が、 $\sigma_{Hmax}^{\infty} = 50$  MPa ではこれまで同様、楕円形である (Fig. 4(a), (b))。楕円の形状を Fig. 3 のそれらと比較すると、 $\sigma_{Hmax}^{\infty} / \sigma_{Hmin}^{\infty}$  比が同じでも、 $\sigma_{Hmax}^{\infty}$  が大きい広域応力場中で形成されるカルデラのアスペクト比の方が大きくなっている。

Fig. 5 は、 $\sigma_{Hmax}^{\infty} = -10$  MPa、 $\sigma_{Hmin}^{\infty} = -2$  MPa という東西伸張応力場中で、小球に  $\Delta a/a = 0.015$  という収縮が生じたときの  $F \geq 1$  の分布である。このときカルデラは、最小水平応力方向に発達するが、この程度の応力場では Fig. 2 と大した差はない。なお、玄武岩の平均的な引張り強度は  $-10$  MPa 程度である (例えば、山路, 2000)。広域応力場としてこれより大きな伸張場を与えることは意味がない。したがって、最大伸張応力として  $\sigma_{Hmax}^{\infty} = -10$  MPa を与えた。

以上の結果より、カルデラの形状は  $\sigma_{Hmax}^{\infty} / \sigma_{Hmin}^{\infty}$  比だけでなく、広域応力場の大きさにも影響されることがわかった。このことは、カルデラの形状から形成時の応力場の推定が可能であることを示している。しかし、Roche *et al.* (2000) が実験で指摘しているように、カル

デラの形状は、崩壊するマグマ溜りの形状によっても規定される。さらに現在地表で観察されるカルデラは、地質学的時間スケールの中で複数回の陥没とカルデラ壁の崩壊により発達したものである (例えば、Lipman, 1976; Walker, 1984; Houghton *et al.*, 1995)。したがって、カルデラやカルデラを含んだ地域のテクトニクスを議論する際には、上述のイベントとそれらに伴う応力場の変化に留意してモデルを構築する必要がある。

なお、今回のいずれの計算でもマグマ溜り直上は  $F < 1$  となっており、破壊が発生しないことを示している。同様の現象は、アナログ実験 (例えば、Acocella *et al.*, 2000; Roche *et al.*, 2000) でも指摘されている。マグマ溜り直上の陥没運動が大きな圧縮場を形成し、一種の封圧の役目を果たしているため、せん断破壊が生じないと解釈できる。

#### 4. まとめ

本論で示したシミュレーションにより、広域応力場が作用しない場合、あるいは等方性の広域応力場中では、円形のカルデラが形成されるということが明らかになった。一方、最大水平応力と最小水平応力に差がある広域応力場中では、最大圧縮軸あるいは最小伸張軸の方向に発達する楕円形のカルデラが形成されることが明らかになった。さらに、カルデラの形状は、最大水平応力と最小水平応力の比だけでなく、大きさにも依存していることがわかった。これらより、地質学的時間スケールでの陥没頻度やカルデラ壁の崩壊とそれらに伴う応力場の変化を考慮する必要はあるが、カルデラの形状から形成時の応力場を推定できる可能性が示された。

#### 謝 辞

査読をいただいた、島根大学 小室裕明氏および電力中央研究所 三浦大助氏、ならびに編集担当の産業技術総合研究所 東宮昭彦氏から、本稿を改善する上で有益な助言をいただきました。心から感謝いたします。この研究の一部は、平成 14 年度科学技術振興調整費総合研究「雲仙火山: 科学掘削による噴火機構とマグマ活動解明のための国際共同研究」、東海大学総合研究機構研究奨励補助金を受けて行われました。記して感謝いたします。

#### 引用文献

- Acocella, V., Cifelli F. and Funicello, R. (2000) Analogue models of collapse calderas and resurgent domes. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **104**, 81–96.
- Gudmundsson, A. (1988) Effect of tensile stress concentration around magma chambers on intrusion and extrusion frequencies. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **35**, 179–194.

- Gudmundsson, A. (1998) Formation and development of normal fault calderas and the initiation of large explosive eruptions. *Bull. Volcanol.*, **60**, 160–170.
- Gudmundsson, A., Marti, J. and Turon, E. (1997) Stress field generating ring faults in volcanoes. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 1559–1562.
- Gölke, M. and Coblenz, D. (1996) Origins of the European regional stress field. *Tectonophysics*, **266**, 11–24.
- 萩原幸男 (1978) 地球重力論. 共立全書, 242 pp.
- Houghton, B. F., Wilson, C. J. N., McWilliams, M. O., Lanphere, M. A., Weaver, S. D., Briggs, R. M. and Pringle, M. S. (1995) Chronology and dynamics of a large silicic magmatic system: Central Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Geology*, **23**, 13–16.
- Jaeger, J. C. and Cook, N. G. (1969) **Fundamentals of rock mechanics**. Methuen, London, 513 p.
- Jarrard, R. D. (1986) Relations among subduction parameters. *Rev. Geophys.*, **24**, 217–284.
- Komuro, H. (1987) Experiments on cauldron formation: a polygonal cauldron and ring fractures. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **31**, 139–149.
- 小室裕明 (1999) 背弧形成初期の応力場—古第三紀の西南日本内帯. 月刊地球, **21**, 798–802.
- Kusznir, N. J. (1991) The distribution of stress with depth in the lithosphere: thermo-rheological and geodynamic constants. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, **A-337**, 95–110.
- Lipman, P. W. (1976) Caldera collapse breccias in the western San Juan Mountains, Colorado. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **87**, 1397–1410.
- Marti, J., Ablay, G. J., Redshaw, L. T. and Sparks, R. S. J. (1994) Experimental studies of collapse calderas. *J. Geol. Soc. London*, **151**, 919–929.
- Miura, D. (1999) Arcuate pyroclastic conduits, ring faults, and coherent floor at Kumano caldera, southwest Honshu, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **92**, 271–294.
- 三浦大助 (2000) 応力比からみた陥没カルデラ構造と応力場. 火山, **45**, 197–207.
- Miura, D. and Tamai, M. (1998) Intracaldera structure and megabreccias at Dorobu caldera, northeastern Honshu, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **80**, 195–215.
- Mogi, K. (1958) Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surface around them. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **36**, 99–134.
- Roche, O., Druitt, T. H. and Merle, O. (2000) Experimental study of caldera formation. *J. Geophys. Res.*, **105**, 395–416.
- Walker, G. P. L. (1984) Downsag caldera, ring faults, caldera size, and incremental caldera growth. *J. Geophys. Res.*, **89**, 8407–8416.
- 山路 敦 (2000) 理論テクトニクス入門. 朝倉書店, 287 p.

(編集担当 東宮明彦)