

- (3) Gudenberg-Richter relation.
- 4. FRACTURING AND FRACTAL SURFACE.
 - a) FRACTAL SURFACE AND ENERGY DENSITY OF FRACTURING.
 - b) FRACTAL SURFACE OF FAULT FRAGMENTS.
 - c) SELF-AFFINITY OF FRACTURE AND FAULT GEOMETRY.
- 5. ALLOMETRIC GROWTH OF FRACTURE ZONES.
 - a) FRACTAL DISTRIBUTION AND ALLOMETRIC GROWTH.
 - b) GEOMETRIC SIZE PARAMETERS OF FRACTURE.
 - c) DISPLACEMENT AND GEOMETRIC PARAMETER OF FAULTS.
 - (1) Relationship between size parameters of faults.
 - (2) D_d -T relationship of ductile shear zone.
 - d) INDIVIDUAL AND SYSTEM OF FRACTURES.
 - e) SCALING LAW OF FRACTURES IN THE SOLID EARTH.
- 6. CONCLUSIONS.
- 7. APPENDIX.
- 8. REFERENCES.

論文内容要旨

緒言

固体地球において、破壊現象は風化・侵食・断層・地震・地滑り等に伴って見られるように普遍的な現象である。

微小な破壊に関して大規模な破壊と同様な相似法則が成り立つか、それとも異なる相似法則が成り立つかを明らかにしてゆくことは、固体地球上での破壊のメカニズムや破壊領域での構造的特徴を解明する上での、一つの有力な手段である。スケールにかかわらず共通する統計的法則の存在は岩石破壊のメカニズムがスケールに依存しない破壊法則（相似法則）によって記述できる素過程の存在を示唆する。そこで、本研究は固体地球にみられる破壊のサイズ分布、形状、成長様式に関する統計的法則についてフラクタルという概念を使って再検討し、大規模な破壊から微小な破壊に至るまでの岩石の破壊をよく記述する相似法則を明らかにする。

破壊とフラクタル分布

破壊のサイズ分布は

$$N(r) \sim r^{-D} \quad (1)$$

(D: 定数, N(r): サイズ r 以上の累積個数)

で表されるべき乗法則にしたがう。この関係式は破壊現象がサイズ分布に関して尺度不変な現象である（特徴的なサイズが存在しない）ことを示唆している。つまり、この関係式は破壊のサイズ分布がフラクタルであることを意味している。そこでこの章は、フラクタルの観点から式(1)を考察し、粉砕工学の分野で知られている Gaudin-Schuhmann や Charles の経験的粉砕則を理論的に誘導し、破壊に関するフラクタル理論を構築した。この理論は乱流の β -理論に類似する。この破壊に関するフラクタル理論は破壊の三大理論（Rittinger 理論, Kick 理論, Bond 理論）を統一的に満たしている。また、破壊論的な観点から式(1)の D 値について考察すると、破壊強度学で用いられるワイプルの均一係数や破壊エネルギー密度に関係することが明らかとなる。たとえば、破壊エネルギー密度が高いほど、または物質の相対的分散強度が低いほど D 値は高い値を示す。

固体地球における破壊のサイズ分布（たとえば、断層や断層粘土のサイズ分布、地震の規模別頻度分布）においても式(1)が得られる。この章で断層や断層粘土のサイズ分布に関する D 値は断層の活動度や破砕度と関係し、地震の規模別頻度分布（Gutenberg-Richter 式）に関する D 値（Gutenberg-Richter 式の b 値の二倍）は地殻中の破壊領域の構造的不均一性（heterogeneity）に関係することを明らかにした。これらのことは岩石破壊実験（Mogi, 19621）から得られている地震および岩石の破壊パターンは物質（地殻や岩石試料）の不均一性の程度によって特徴づけられるという結論と矛盾しない。

破壊面の形状

破壊面の形状もフラクタルの典型的な例である (Mandelbrot et al., 1984)。破壊産物の比表面積 (S) は破壊産物の平均サイズ (d) とよい相関を示す。このとき破壊面の形状に関するフラクタル次元 D' は

$$S \sim d^{D'-3} \quad (2)$$

で表される。Nii et al. (1985) の破壊実験の結果を用いると、 D' 値が破壊エネルギー密度の増加に伴って増加することが明らかとなる。従って、 D' 値は破壊の強さや破壊過程の性質を知るうえで重要な指標となる。

固体地球の破壊例としてこの章では断層粘土の D' 値を検討した。その結果によると、活動度や破碎度が高い活断層ほど高い D' 値を示すことが明らかとなった。従って、断層粘土の D' 値は断層の活動度や破碎度を知るうえで重要な指標となると考えられる。

地震は固体地球 (地殻) の破壊として発生し断層を形成する。そのため断層と地震とは密接な関係を持っている。そこで、断層の形は地震を理解するうえで非常に重要であると考えられる。Okubo & Aki (1987) は San Andreas の断層線 (fault trace) を解析し、それがフラクタル構造をもっていることを明らかにした。しかし、断層線の形状に限らず、異なるスケールでの岩石の破壊形状がはたしてどれほど自己相似構造をもつものであるかは疑わしい。そこで、断層線のスケールリングにフラクタルがどこまで適用できるか再検討する必要がある。

相似変換の拡張形であるアフィン変換に呼応させて、自己相似性を自己アフィン性として一般化することができる。方向によって異なってスケールリングがなされる曲線などは自己アフィンフラクタル曲線と呼ばれる。このような曲線の自己アフィン性は式

$$X \sim N^{H_X} \quad (3)$$

$$Y \sim N^{H_Y}$$

N : 基準長で測定した曲線の長さ。

X, Y : 基準長で測定した時の曲線上の測定点 (x, y 座標点) の標準偏差値。

H_X, H_Y : 定数。

でスケールリングすることができる。もし、X, Y が互いに関係するならば、それらの関係は式

$$Y \sim X^H \quad (4)$$

$$H = H_Y / H_X$$

で表すことができる。H=1 のとき、曲線は自己相似な曲線であるのに対して、H≠1 のとき曲線は自己アフィンな曲線である。式(3)、(4)を用いて断層線 (Fig.1A, B) の自己相似性を検討した結果 (Fig. 2A, B)、これらの断層線は必ずしも自己相似な曲線ではなくむしろ自己アフィンな曲線 (A : H=0.57, B : H=0.78) を呈している。このことは断層線 (断層面) の相似性を表

すには二 (三) つのパラメータが必要であることを意味している。

破壊領域の成長

自己相似性から拡張された自己アフィン性という概念を用いてこの章では固体地球に見られる破壊領域の成長様式を明らかにする。

形成されるパターンを特徴づけるサイズを X , Y とすると式

$$Y \sim X^\beta \quad (\beta: \text{定数}) \quad (5)$$

で表されるような成長パターンが自然界に存在する。 $\beta = 1$ のとき、パターンの成長を通じて各パラメータサイズ間には相似性が保たれている。このような成長パターンを自己相似的成長と呼ぶ。一方、 $\beta \neq 1$ のとき、パターン成長を通じて各パラメータサイズ間には相似性が保たれていない。このような成長パターンを自己アフィンの成長と呼ぶ。また、式(5)で表される関係則は既に生物学や古生物学の分野においても、相対成長 (law of allometric growth) の法則として知られている。これらの分野では、 $\beta = 1$ で表される成長を等成長 (isometric) と呼ぶのに対して、 $\beta \neq 1$ で表される成長を不等成長 (anisometric) と呼んでいる。

パラメータサイズ X , Y がそれぞれ式(1)で表されるサイズ分布をとり X , Y がともに関係をもつとき式(5)の関係式が期待される。実際、断層・Pull-apart basin・クレータ・河川網や地滑り等の固体地球に見られる破壊現象のサイズパラメータ間に式(5)が成り立っている。このことは、これらの破壊現象に認められる破壊領域の成長の多くが自己アフィンの成長 (不等成長) であることを意味している。また、断層系において断層パラメータの最大値 (r_{\max}) と系内の断層パラメータの総和値 ($T = \sum r_i$) との関係は式(5)によって表すことができる。このことは、一つの断層が系全体と allometric 関係であることを示している。さらに、延性的剪断帯のサイズパラメータ (幅と移動量) 間に関しても式(5)が成り立っている (Fig.3)。このことは、式(5)が脆性的破壊領域のみでなく延性的破壊領域においても成立する関係則であることを示唆している。以上のように、破壊領域の成長に関する相似則は(5)によっ記述することができることが明らかとなった。

総括

この研究では、破壊に関する現在までの研究を総括し、フラクタルという概念によって固体地球における破壊現象をどこまで理解できるか検討し、破壊のサイズ分布、形状、成長に関する相似法則について議論した。そして、岩石破壊に見られるフラクタル構造と破壊エネルギー密度との関係を指摘するとともに岩石内の不均一性 (heterogeneity) を介した統計的な破壊メカニズムによって固体地球における破壊が記述できることを明らかにした。

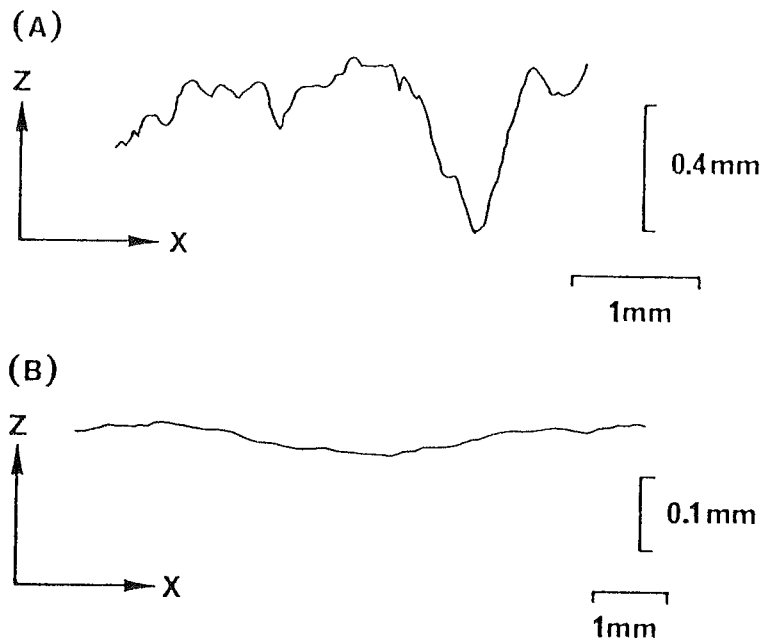


Fig.1 Fracture surface. A : Westerly Granite, 2.5x vertical exaggeration (after Power et al., 1988), B : Natural joint surface, 10x vertical exaggeration (after Brown and Scholz, 1985).

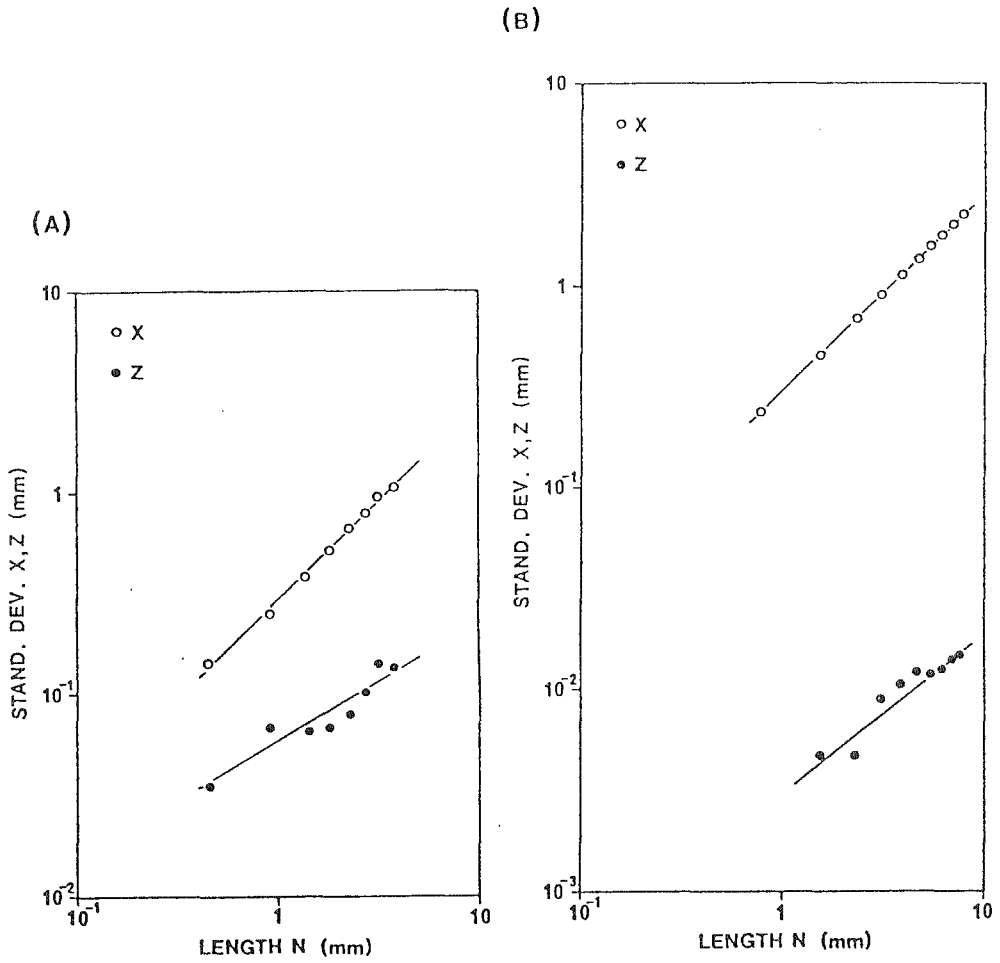


Fig.2 Dependence of the standard deviation of two coordinates X and Z on the curve length N between many pairs of points on the fault trace shown in Fig.1 A : Westerly Granite (after Power et al., 1988), B : Natural joint surface (after Brown and Scholz, 1985).

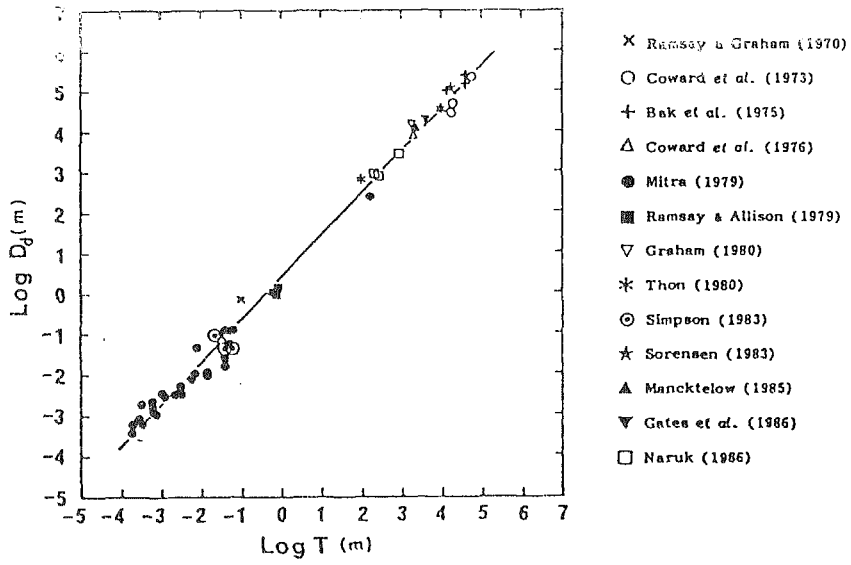


Fig3. Correlation between the displacement D_d (m) and the thickness T (m) of mylonitic zones on double logarithmic scale.

論文審査の結果の要旨

長濱裕幸提出の論文は固体地球における破壊現象の一般則に関する考察である。

破壊は風化・侵食・断層・地震など各種の地質現象に普遍的に認められる。これらの破壊現象によって生ずる破片や破断面の形態やその幾何学的特徴については多くの分野からの考察があるが、この論文ではフラクタルの概念を導入して風化岩片・侵食・崩壊と岩屑・断層と断層地塊・断層粘土・各種規模の地震の頻度などの固体地球に見られる破壊のサイズ分布・形状・成長様式に関する統計的規則性について検討し、巨大から微細に至る各様な規模を通じて岩石などの破壊を記述できる相似法則について議論している。とくに岩石などの破壊に見られるフラクタル構造と破壊エネルギー密度との関係に注目し、岩石の破壊領域内の不均一性を介した統一的な破壊の機構によってその破壊を記述し得ることを明らかにした。

この結果は固体地球において普遍的に見られる破壊現象の理解に新しい一視点を与えるもので、破壊現象一般に関する研究に貢献するに至るであろう。

以上の内容はこの論文の著者が自立して研究活動を行なうに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。よって、長濱裕幸提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。