

## Pull-apart basin の成長様式

### Growth Pattern of Pull-apart Basin

長濱 裕幸\*

Hiroyuki Nagahama

**Abstract:** Empirical relationships between the length, width, area and sediment thickness of pull-apart basins are presented. Over the wide range of scale, pull-apart basins exhibit a power law relation  $Y = aX^b$  where  $Y$  and  $X$  are their geometric size parameters and  $a$  and  $b$  are constants. This suggests that the pull-apart basins grow allometrically and their geometric scaling laws can be expressed by this power law relation.

#### はじめに

小規模な変形構造に関して大規模な変形構造と同様な相似則が成り立つか、それとも異なる相似則が成り立つかを明らかにしていくことは、変形構造の形成メカニズムやその構造的特徴を解明するうえで一つの有力な手段である (Hubbert, 1937; 太田・会田, 1962; 植村, 1986). スケールにかかわらず共通する統計則の存在は変形メカニズムがスケールに依存しない相似則によって記述できる素過程の存在を示唆する。そこで小論では、破壊領域の成長(拡大)に関する相似則を明らかにし、小規模から大規模に至る pull-apart basin の成長(拡大)様式を記述する統計則を明らかにする。

#### 破壊領域の成長様式

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(self-similarity)を自己ア

フィン性(self-affinity)として一般化することができる (Mandelbrot, 1986). この章では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破壊領域の成長様式に関する相似則について述べることにする。

形成されるパターンを特徴づける2つのサイズパラメータをそれぞれ  $Y$ ,  $X$  とすると、関係式

$$Y = aX^b \quad (*)$$

で表されるような成長パターンが自然界に存在する。成長パターンが式(\*)で表されるとき、 $Y$  と  $X$  の比成長速度  $1/Y \cdot dY/dt$  と  $1/X \cdot dX/dt$  は互いに比例関係にある。このような成長を allometric growth と呼ぶ。また特に  $b=1$  の時、成長するパターンは等方的で、成長を通じサイズパラメータ  $Y$ ,  $X$  間には相似性が保たれている (Fig. 1a). このような成長を自己相似成長 (self-similar growth) と呼ぶ。これに対して  $b \neq$

\*東京大学地震研究所, 東京都文京区弥生1-1-1.  
Earthquake Research Institute, University of Tokyo,  
No.1-1, Yayoi 1-chome, Bunkyo-ku, Tokyo, 113 Japan.

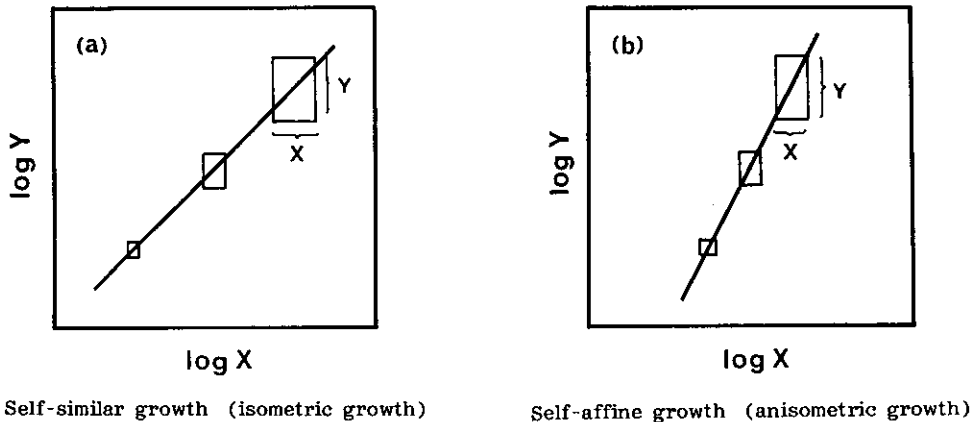


Fig. 1 Typical growth patterns observed when any two size parameters ( $Y$  and  $X$ ) are plotted against one another on double logarithmic paper. (a): Self-similar growth, (b): Self-affine growth.

1の時、成長するパターンは異方的で、成長を通じサイズパラメータ  $Y$ ,  $X$  間には相似性が保たれていない(Fig. 1b). このような成長を自己アフィン成長(self-affine growth)と呼ぶ。ここでいう自己アフィン性とはスケール不変性が方向に依存することを意味している。また関係則(\*)は既に生物学や古生物学の分野(例えば, Huxley, 1932; Huxley & Teissier, 1936; Gould, 1966)において、相対成長の法則(law of allometric growth)として知られている。この分野では、 $b=1$ で表される成長を等成長(isometric growth)と呼ぶのに対して、 $b \neq 1$ で表される成長を不等成長(anisometric growth)と呼んでいる。

長濱(1991)は破壊現象の本質だけを抽出したフラクタル破壊モデルから破壊領域の成長(拡大)様式に関する相似則が関係式(\*)によって表現されることを理論的に説明した。また、河川網(Hack, 1957; Gray, 1961; Kondoh & Matsushita, 1986; Kondoh et al., 1987), クレーター(Baldwin, 1965; Pike, 1967; Pike, 1974), 地汙り(藤井, 1969), 断層(Ranalli, 1980; Hull, 1988)などの破壊や侵食に伴って形成されるパターンを特徴づけるサイズパラメータ間には式(\*)の関係が認められる(長濱, 1991)。このことは破壊領域の成長(拡大)様式に関する相似則が関係

式(\*)で記述できることを裏付けている。

### Pull-apart basinの成長様式

Pull-apart basinは地殻に発達する一つの破壊構造である。そこでこの章では前章で述べた破壊領域の成長に関する相似則がpull-apart basinの成長様式に関しても成り立つかどうかを検討する。

#### (1) Pull-apart basinの長さと同幅

Pull-apart basinの成長様式には以下の2つのタイプが認められる。

##### a) 等方的に成長(自己相似成長)する pull-apart basin

Aydin & Nur (1982)はpull-apart basinの長さ( $L$ )と同幅( $W$ )の関係を両対数グラフに示し(Fig. 2), 式(\*)と同型の関係式 $L \sim W^{1.04}$ を導いた。この結果はpull-apart basinが長さと同幅に関し、等方的に成長(自己相似成長)することを意味している。また、トルコ地方に発達するpull-apart basin群の長さ( $L$ )と同幅( $W$ )に関するデータ(Hempton & Dunne, 1984)もAydin & Nur (1982)の結果と同様の結果を示す(Fig. 3)。これらの特徴をもつpull-apart basinは

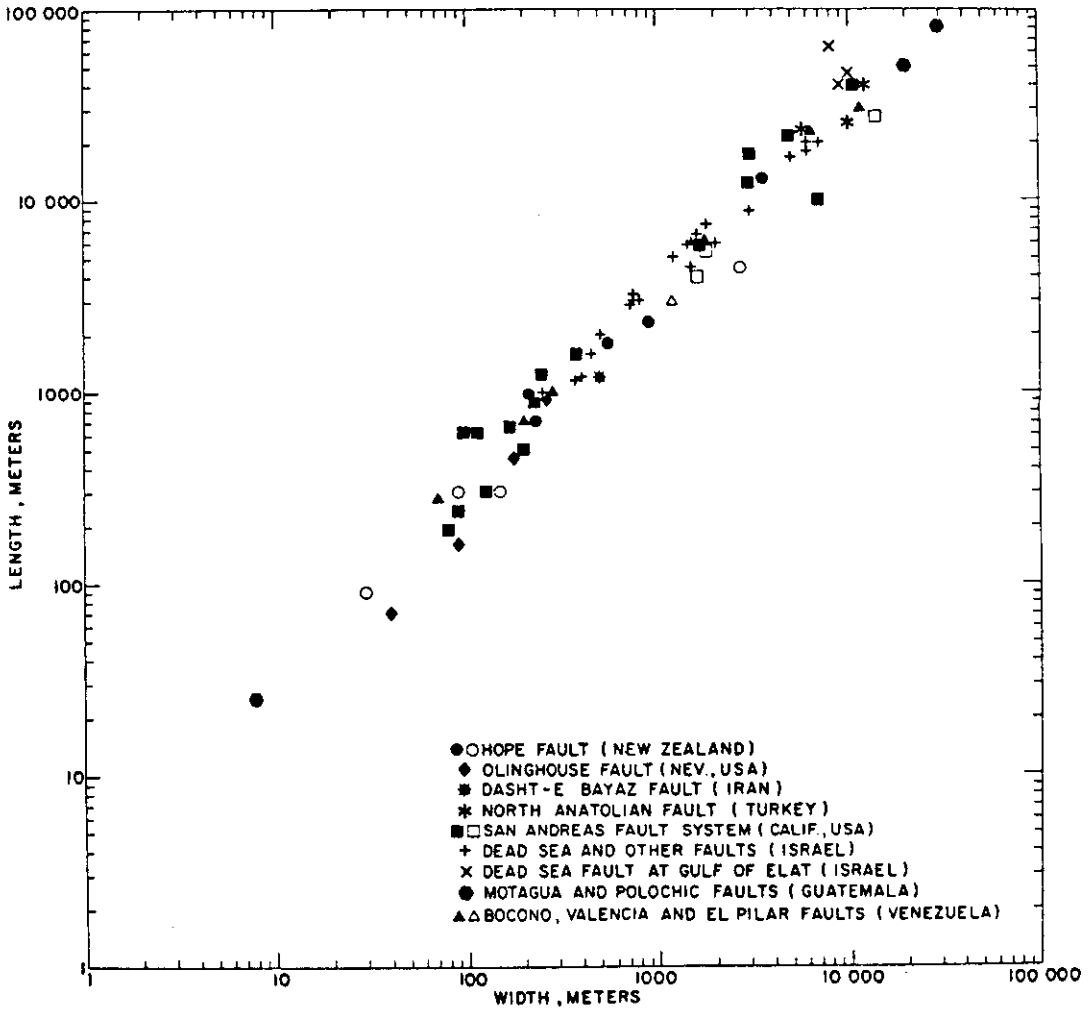


Fig. 2 Log length ( $L$ ) versus log width ( $W$ ) for pull-apart basins. (after Aydin & Nur, 1982).

basinの長さの増大に伴って、basinの幅も coalescenceに増大すると考えられている(Aydin & Nur, 1982; Hempton & Dunne, 1984). また、このように等方的に成長(拡大)する pull-apart basinの面積( $S=L \cdot W$ )には関係式 $L \sim S^{0.5}$ と $W \sim S^{0.5}$ が認められる(Fig. 4, 5).

**b) 異方的に成長(自己アフィン成長)する pull-apart basin**

等方的に成長する basin に対し、Cayman Through のように transform fault に沿って

spreading center が拡大し、細長い pull-apart basin を形成するものがある(Mann et al., 1983). このように細長い basin を形成する pull-apart basin は master fault の変位の増加に伴って細長くなると考えられている(Mann et al., 1983). このタイプの pull-apart basin は長さ と幅に関して異方的に成長(自己アフィン成長)する特徴をもっている。

**(2) Pull-apart basinの堆積物の厚さ**

Hempton & Dunne (1984)はトルコ地方に発

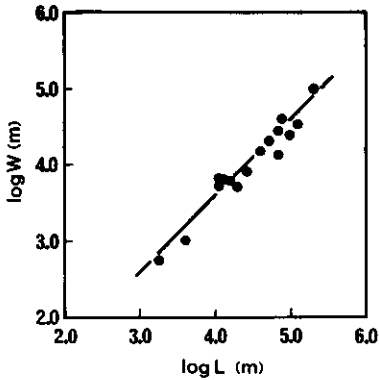


Fig. 3 Log length ( $L$ ) versus log width ( $W$ ) for Turkey pull-apart basins (Data from Hempton & Dunne, 1984). The regression line fitted to the data by the method of least squares is defined by  $\log W = \log L - 0.43$ , where  $L$  and  $W$  are in meters.

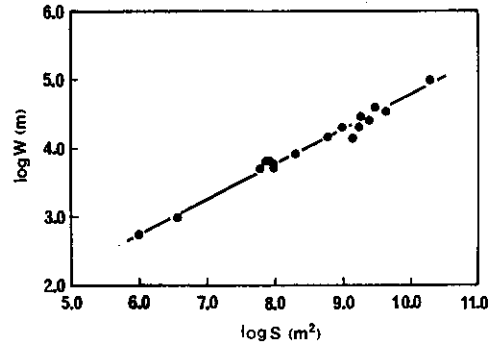


Fig. 5 Log width ( $W$ ) versus log area ( $S$ ) for Turkey pull-apart basins (Data from Hempton & Dunne, 1984). The regression line fitted to the data by the method of least squares is defined by  $\log W = 0.50 \log S - 0.26$ , where  $W$  is in meters and  $S$  in square meters.

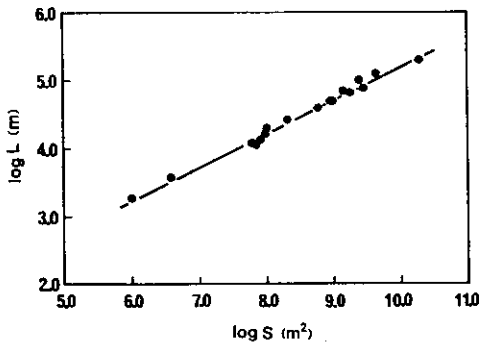


Fig. 4 Log length ( $L$ ) versus log area ( $S$ ) for Turkey pull-apart basins (Data from Hempton & Dunne, 1984). The regression line fitted to the data by the method of least squares is defined by  $\log L = 0.49 \log S + 0.28$ , where  $L$  is in meters and  $S$  in square meters.

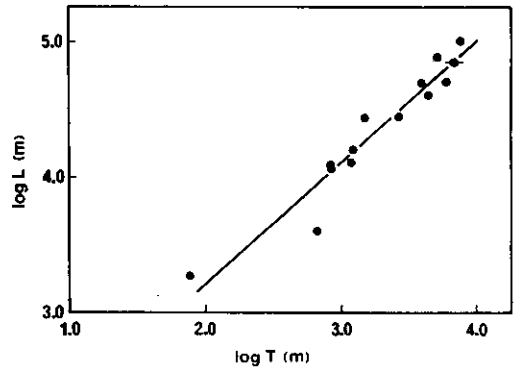


Fig. 6 Log length ( $L$ ) versus log sediment thickness ( $T$ ) for Turkey pull-apart basins (Data from Hempton & Dunne, 1984). The regression line fitted to the data by the method of least squares is defined by  $\log L = 0.91 \log T + 1.35$ , where  $L$  and  $T$  are in meters.

達する pull-apart basin 群の長さ ( $L$ ) と堆積物の厚さ ( $T$ ) との関係から関係式  $T = 0.08L + 0.26$  を導いた。しかし、この式の相関は basin の長さが長くなるにつれて低くなる。一方、関係式 (\*) を用いて Hempton & Dunne (1984) のデータを解析した結果は、pull-apart basin の長さ ( $L$ ) と堆積物 ( $T$ ) との関係が関係式  $L \sim T^{0.91}$  でよく表現されることを示している (Fig. 6)。このことは basin が長さ と 厚さ に関して自己相似的に成長することを意味している。一方、Ito

(1989) は Ridge Basin, Little Sulphur Creek Basin, Horenelen Basin と関東山地に分布する新第三系の堆積盆地の長さ と stratigraphic thickness の関係を両対数グラフで表現している (Fig. 7)。関東山地に分布する新第三系の堆積盆地を含めこの結果は pull-apart basin が長さ と stratigraphic thickness に関して、自己相似的であることを示している。

トルコ地方に発達する pull-apart basin 群は

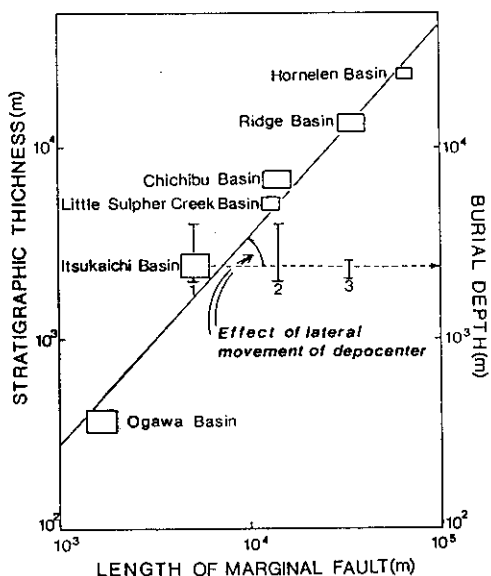


Fig. 7 Relationships between length of marginal faults in strike-slip basins, and stratigraphic thickness and burial depth (after Ito, 1989).

basin の長さ ( $L$ ) と幅 ( $W$ ) が等方的に成長 (自己相似成長) し、かつ長さ ( $L$ ) と堆積物の厚さ ( $T$ ) に関しても自己相似的に成長する。これに対して、Ridge Basin のように transform fault に沿って basin の長さ ( $L$ ) と幅 ( $W$ ) が異方的に成長 (自己アフィン成長) し、かつ pull-apart basin の burial depth ( $\cong$  true sediment thickness) は basin の長さが増大してもほぼ一定である (Fig. 7)。このようなタイプの basin は横ずれ断層の運動にともなって堆積中心 (depocenter) を一定方向に移動させながら stratigraphic thickness を増大させる特徴をもっている (Rieding, 1980)。

このように、pull-apart basin を特徴づける 2 つのサイズパラメータ間に関係式 (\*) が成り立っている。このことは pull-apart basin の成長 (拡大) が allometric であり、成長に関する相似則が式 (\*) で記述できることを意味している。

## おわりに

小論では、自己相似性から拡張された自己アフィン性の概念を pull-apart basin の成長 (拡大) 様式に適応し、pull-apart basin を特徴づける 2 つのサイズパラメータ  $Y$ ,  $X$  間に関係式

$$Y = aX^b$$

が成り立つことを明らかにした。このことは pull-apart basin の成長様式が allometric であることを意味している。その成長様式は  $b$  値によって等方的に成長 (自己相似成長) するタイプ ( $b=1$ ) と異方的に成長 (自己アフィン成長) するタイプ ( $b \neq 1$ ) とに分けられる。ここでは pull-apart basin の成長様式についてその外形から考察したが、その内部の破壊構造については何も述べなかった。はたしてその内部の破壊構造についても同様な相似則が成り立つのであろうか。また、いったい pull-apart basin の外形の成長様式がその内部構造とどのように関係づけられているのだろうか。これらの問題は pull-apart basin の構造的な特性を明かにしていくうえで今後解かなくてはならない問題の一つであろう。また自己アフィン性という概念を用いて pull-apart basin の成長に限らず他の地質現象に見られる様々なパターンを改めて見直すことにより、一見複雑に見えるパターンの中に潜んでいる規則性を見出すことができるであろう。この自己アフィン性による成長パターンの系統的な整理は今後の興味ある課題である。

## 文献

- Aydin, A. and Nur, A., 1982: Evolution of pull-apart basin and their scale independence. *Tectonics*, v.1, 91-105.
- Baldwin, R. B., 1965: The crater diameter:Depth relationship from Range VII photographs. *J. Astron.*, v.70, 545-547.

- 藤井陽一郎, 1969: 豪雨による崩壊地の大きさの頻度分布. 地震, v.22, 244-247.
- Gould, S. J., 1966: Allometry and size in ontogeny and phylogeny. *Biological Reviews*, v.41, 587-640.
- Gray, D. M., 1961: Interrelationships of watershed characteristics. *J. Geophys. Res.*, v.66, 1215-1223.
- Hack, J. T., 1957: Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland. U.S. Geol. Survey Prof. Paper, 294-B, 45-97.
- Hempton, M. R. and Dunne, L. A., 1984: Sedimentation in pull-apart basins: Active examples in Eastern Turkey. *J. Geol.*, v.92, 513-530.
- Hubbert, M. K., 1937: Theory of scale models as applied to the study of geologic structures. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, v.48, 1459-1520.
- Hull, J., 1988: Thickness-displacement relationships for deformation. *J. Struct. Geol.*, v.10, 431-435.
- Huxley, J. S., 1932: Problems of relative growth. Methuen, London.
- Huxley, J. S. and Teissier, G., 1936: Terminology of relative growth. *Nature*, v.137, 780-781.
- Ito, M., 1989: The Itsukaichimachi group: A middle miocene strike-slip basin fill in the southeastern margin of the Kanto Mountains, Central Honshu, Japan. in Taira, A. and Masuda, F., eds., *Sedimentary Facies in The Active Plate Margin*. Terra Scientific Publishing Company (TERRAPUB), Tokyo. 659-673.
- Kondoh, H. and Matsushita, M., 1986: Diffusion-limited aggregation with anisotropic sticking probability: A tentative model for river networks. *J. Phys. Soc. Japan*, v.55, 3289-3292.
- Kondoh, H., Matsushita, M. and Fukuda, Y., 1987: Self-affinity of Sciedegger's river pattern. *J. Phys. Soc. Japan*, v.56, 1913-1915.
- Mandelbrot, B. B., 1986: Self-affine fractal sets, I: The basic fractal dimensions. in Pietronero, L. and Tosatti, E., eds., *Fractals in Physics*. Elsevier Science Publishers B.V., 3-15.
- Mann, P., Hempton, M. R., Bradley, D. C. and Burke, K., 1983: Development of pull-apart basins. *J. Geol.*, v.91, 529-554.
- 長濱裕幸, 1991: 地震にともなう破壊領域の自己アフィン成長. 中川久夫教授退官記念地質学論文集(印刷中).
- 太田 裕・会田洋子, 1962: 地質構造のモデル化の方法について( I ). *地球科学*, v.63, 19-24.
- Pike, R. T., 1967: Schroeter's rule and the modification of lunar crater impact morphology. *J. Geophys. Res.*, v.77, 2097-2106.
- Pike, R. T., 1974: Depth/diameter relations of fresh lunar craters: Revision from spacecraft data. *Geophys. Res. Lett.*, v.1, 291-294.
- Ranalli, G., 1980: A stochastic model for strike-slip faulting. *Math. Geol.*, v.12, 399-412.
- Reading, H. G., 1980: Characteristics and recognition of strike-slip fault systems. *Int. Ass. Sediment. Spec. Publ.* 4, 7-26.
- 植村 武, 1986: 構造地質学における2つの禁制. 北村 信教授退官記念地質学論文集, 587-594.