

地震予知研究ノート No.4

佃 為成
(東京大学地震研究所 地震地殻変動観測センター)

2009年1月

目次

		ページ
地震予知の研究体制	佃 為成	2～7
地震研究所の予知研究	佃 為成	8～11
地震研究所改組の経過	佃 為成	12～17
付録：地震研究所改組試案（1992年）	佃 為成	18～25
付録：懇談会議事録（1992年）	佃 為成	26～36
微小地震分布	佃 為成	37
破壊の結合確率モデルと地震の規模別頻度分布	佃 為成	38～57
共存する震源クラスターのサイズと分布間隔の関係	佃 為成	58～62
地鳴り観測		
佃 為成・大橋心耳・山下晃一・菅谷茂樹・酒井真雄・鶴 秀生		63～68
地下からのサインを追って ～ 水・電気・ガス・波	佃 為成	69～80
未来へ繋ぐ ～ たかが水温・されど水温	佃 為成	81～89

共存する震源クラスターのサイズと 分布間隔の関係

東京大学地震研究所 佃 為成
〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1

Relation Between the Size and Spacing Interval of Coexisting Hypocentral Clusters

Tameshige Tsukuda
Earthquake Reserach Institute, The university of Tokyo
Yayoi 1-1-1, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032, Japan

§1. はじめに

震源分布の密度が高い領域は、多数の地震の震源域がそれぞれ極めて接近しているか、接しているか、重なり合っている。そこは大小多数の地震断層によって岩盤が破碎され、各断層が固着して安定するまでの間、力学的には不安定な領域（破壊領域）である。この領域はマクロに見ると一枚の断層面と見なしてよい場合もあるが、一般的には立体的な構造をもつ。孤立した破壊領域は、震源群の塊（震源クラスターと呼ぶ）によって認識される。

Fig. 1 には、或る一定の期間内に出現したクラスター群の例を示した。活動が非常に低調であった領域が、それぞれ半年間ぐらい活発化した。しかも震源は複数のクラスターに収まっている。それぞれの震源クラスター間に隙間があり、互いに一定の間隔を保って共存している。各クラスターがそれぞれ縄張りをもっているかのようなのである。簡単な確率統計モデルを基に、その理由を考える。

§2. 震源クラスターの大きさと分布間隔

震源クラスターについて次の仮定を設ける。1) 震源クラスターを一つの破壊単位に対応できるとする（単純化した破壊領域のモデル）。2) それぞれの破壊単位は或る一定期間活動的であり、隙間がなく隣接した他の破壊単位とは結合する（活動期間の指定と破壊単位連結の条件）。結合した破壊単位の集合はクラスターをつくる。3) 破壊単位は活動期間中、或る一定の確率で発生する。4) クラスターは階層構造をなし、注目している階層のそれぞれのクラスターの内にその下の階層のクラスター構造が存在する。同じようにクラスターの集合がその上の階層のクラスターを造る。

以下では、簡単のため或る特定の階層の震源クラスターを、大きさが代表的な長さ d の破壊単位と見なす。形状については問題にしない。ここで、クラスターという言葉についてお断りしておく。以下の議論では、破壊単位が連結したものをクラスターと呼び、震源クラスターという言葉は混乱の元になるので以後は用いない。クラスターを構成している破壊単位もクラスターであって階層をなす。一つの震源（震源域）も、§4. の最後で議論するように、これもクラスターである。

或定まった期間の破壊単位の空間分布について考える。破壊単位間の平均的な間隔（中心から中心まで）を L とする。一つの破壊単位が存在する確率 p を求める。一つの破壊単位の縄張りの体積は平均 L^3 であり、一つの破壊単位は d^3 だけの体積を占めるから、

$$p = \frac{d^3}{L^3} \quad (1)$$

であると考えられる。これはまた、破壊単位が占める領域の全空間に対する割合を意味し、空間領域の各点において破壊単位を見いだす確率と見なすことができる。

§3. ベーテ格子モデル

媒質に格子網が存在し、各格子点には、或る一定の確率 p で破壊単位が割り当てられる。格子点に存在する潜在的な破壊単位がその確率で活性化すると考えてもよい。この破壊単位が連結してもっと大きな破壊領域を生成する過程に対して浸透理論を適用する。各格子点に対しそれぞれ最近接格子と結ぶボンドを考える。ここではベータ格子（ケーリー樹ともいう）[例えば、Stauffer(1988) 参照]の格子構造を仮定する (Fig. 2)。ベータ格子では、1個の格子点から z 本のボンドが出ている。原点を定め、ボンドを経由して格子点を辿ることにしよう。原点からは z 個の格子点へ移動することができる。それぞれの格子点からはさらに $(z-1)$ 本のボンドを辿って次の格子点へ移ることができる。このベータ格子モデルでは、延びる格子はいずれも新しい位置を占める。

連結された破壊単位群が存在するとしよう。その先端格子点から $(z-1)$ 本のボンドが出ており、この先の最近接格子点は或確率で破壊単位に占有される。浸透理論では、格子点を占有している破壊単位の数の全格子点数の比をこの確率とする。ベータ格子の各格子が、破壊単位の存在空間に分布していると考え、この確率として式(1)で求めた p を近似的に用いることにする。

この確率を用いると、平均として $(z-1)p$ 個の格子点が新たに連結破壊単位群の一員として占有されることになる。その点からさらに先へ進むことができる。これが永続し、破壊単位が無限に連結する条件を求めてみる。それは、 $(z-1)p$ が 1 以上であることが必要である。この値が 1 となる臨界状態のときの p を p_c とする。

$$p_c = \frac{1}{(z-1)} \quad (2)$$

式(1)より、 p は L に依存するが、この p_c に対応する L に L_c を代入し、式(1)で定義された確率が式(2)に等しいとすれば、

$$L_c = \frac{(z-1)^{1/3}}{d} \quad (3)$$

上記の L_c より破壊単位の間隔が大きいときは、破壊単位が次々に連結することなく、それぞれ孤立して存在し得る。

Fig. 2 に示したように、 $z=1$ のときは、格子は2個しか存在しない。 $z=3$ ならば、格子は1次元な構造となる。一つの破壊単位が占める空間を立方体で近似し、パッキングを行えば、そのときの隣接する破壊単位の数、すなわちボンドの数は $z=26$ となり、破壊単位を球で近似し、最密充填を行えば $z=12$ となる。これらの場合、

$$L_c = 2.2d \text{ (球)} \quad (4)$$

$$L_c = 2.9d \text{ (立方体)} \quad (5)$$

である。ベータ格子の定義では、格子はループを作らないので、鉱物の結晶格子のような場合には適用できない。ここでは、格子としてはベータ格子を考え、破壊単位の実態として、結晶格子のような最密充填の配置を部分的に当てはめ、ボンドの数を推定した。

上の例のように z の値として、10~30 が現実的と考えられるから、Fig. 3 から分かるように、クラックは、そのサイズの2~3倍以内に接近すれば結合してしまう。逆に、この距離より離れて存在すれば、結合の確率は非常に小さく、クラスターは独立して存在することができる。

§4. Petrov のモデル

次に別の観点からこの問題を考えてみる。この取り扱いには、Petrov (1978; 1979) および佃 (2008) による。§3. と同様、存在する破壊単位同士の平均間隔を L とし、破壊単位のサイズを d とする。破壊単位の中から、 s 個を選び、それらを連結させることを考える。連結してできた大きな破壊単位群を s -クラスターと呼ぶ (Fig. 4)。考えている全領域に存在する破壊単位の数が N 個とし、 $k = L/d$ と置

く、生成される s -クラスターの数の数 N_s は、

$$N_s \sim \frac{N}{\sqrt{2\pi}} (e/k)^s s^{-3/2} \quad (6)$$

で与えられる [佃(2008)]。ここで e は exponential を表し、 $e \sim 2.7$ である。 $k < e$ ならば、 s を大きくしていくと N_s は発散する。つまり、無数の連結クラックが生じることになる。その臨界のクラック間隔 L_c は、この場合 $2.7d$ となる。この値は、前節の(4),(5)の2つの場合の中間にある。

Petrov の方法による上記の判定、すなわち、破壊単位の中心間の間隔が破壊単位の直径の約 e 倍であるかどうかによって、破壊単位群の安定性、不安定性を判定することはロシアでは実際に行われている。地震関係では、例えば Sobolev(1995) にその例が紹介されている。

§5. 結論

震源のクラスターは破壊領域あるいはマクロなクラックを反映したものと見なし、破壊領域の結合の確率を考察すれば、クラスター同士が隙間をつくって安定に存在するための条件が導き出される。その際、クラスターは階層構造をなし、それぞれの階層について、別々に取り扱うことができることを仮定した。クラスターのサイズの2~3倍の距離がそれぞれのクラスターの縄張り領域ということになる。

Fig. 1 は接近したクラスターの配置の例である。(a) や (b) では、クラスターの大きさのだいたい3倍以上の間隔を保っている。ただし、(c) では、震源精度の不確定さがあるものの、クラスターがほぼ臨界状態程度に接近して存在していた。

この小論では、臨界状態のクラスター（あるいはクラック）間隔を推定する二つの方法を示したが、結合の方向性や分枝を無視した幾何学の場合が Petrov の方法で、数学的には単純だと言える。そして、臨界状態におけるクラスター発生頻度分布の関数形が簡単に導かれることは利点の一つである。一方、ベータ格子の方法は、浸透理論の基本原則をもとに、任意の格子空間、例えば1次元や2次元、3次元の媒質空間を設定して幾何学的イメージを具体的に描くことができ、かつ考え方も初歩的でわかりやすい点に特質がある。

文献

- 丸山卓男, 1978, 分枝過程によって生ずる破壊の規模別度数分布 - 初等的解析, 地震研究所彙報, 53, 407-421.
- Petrov V. A., 1978, Macroscopic influence of thermofluctuational statistics on fracture, Publication of Institute of Physics and Technology, Leningrad (in Russian).
- Petrov V. A., 1979, Mechanism and kinetics of macrofracture, Sov. Phys. Solid State, 21, 2123-2126.
- Sobolev, G. A., 1995, Fundamental of earthquake prediction, Advanced Geophysics, Russian Experience, IssN 3, Electromagnetic Research Center, Moscow, 161pp.
- Stauffer, D. (小田垣 孝訳), 1988, 浸透理論の基礎, 吉岡書店, 188pp.
- 佃 為成, 1978, 山崎断層の地震 (1977年9月30日, M3.7) の震源付近の V_p/V_s 異常, 京大防災研究所年報, 21 B-1, 27-36.
- 佃 為成, 2008, 破壊の結合確率モデルと地震の規模別頻度分布, 地震予知研究 No.4, .
- Tsukuda, T. and Y. Oki, 1994, A destructive shallow small earthquake - The 1992 Tsunan earthquake of M4.5 in southern Niigata Prefecture, central Japan, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, 69, 19-38.
- 佃 為成・中尾節郎, 1976, 東中国・北近畿地方における微小地震系列の研究 (I), 地震2, 29, 395-410.

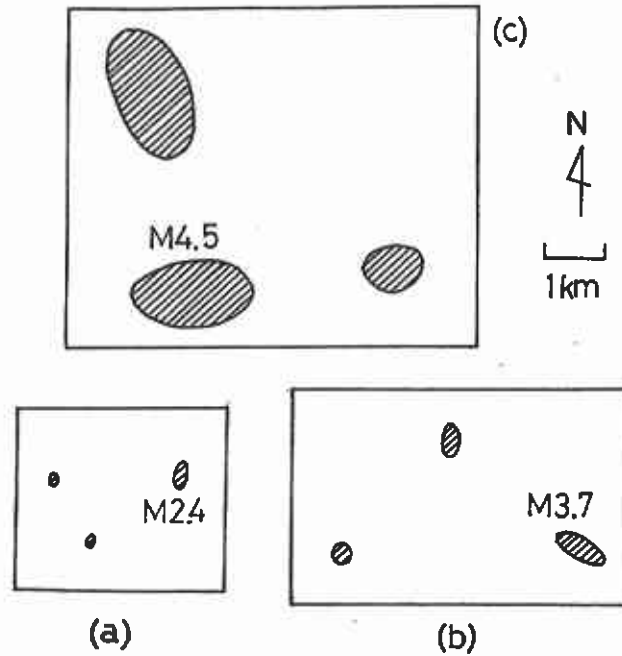


Fig. 1. Distributions of hypocentral clusters (shaded zone) which were active during a half year for each region: (a) Tottori City, (b) Ymasaki Fault region in Hyogo Prefecture, and (c) Tsunan Town, Niigata Prefecture. Data are after (a) Tsukuda and Nakao (1976), (b) Tsukuda (1978) and (c) Tsukuda and Oki (1994). The cluster which was the source of the maximum event for each region is indicated by its magnitude.

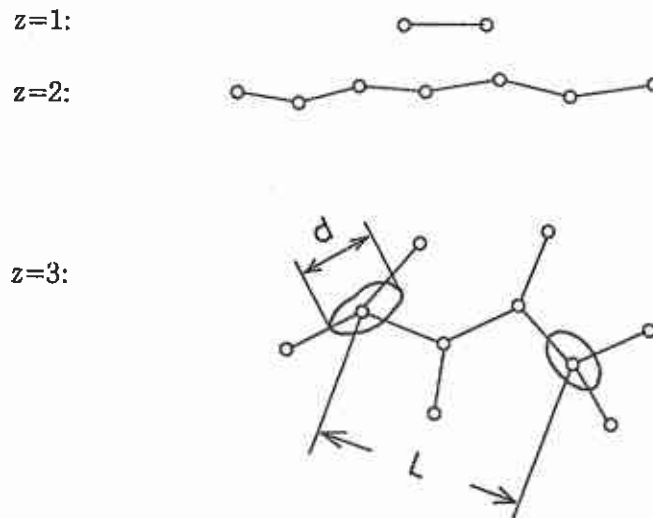


Fig. 2. Bethe lattice (or Cayley tree). A hypocentral cluster is regarded to be a crack. Cracks are assigned to grids of the lattice. L , d and z represent mean distance between two cracks, linear dimension of the crack, and number of bonds attached to a grid, respectively.

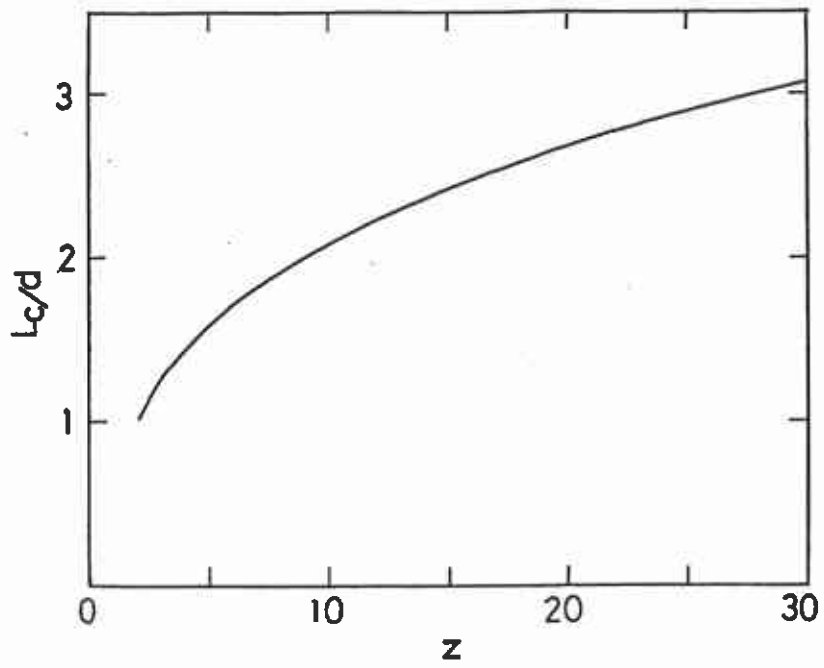


Fig. 3. L_c/d as a function of z as derived from Eq. 3.

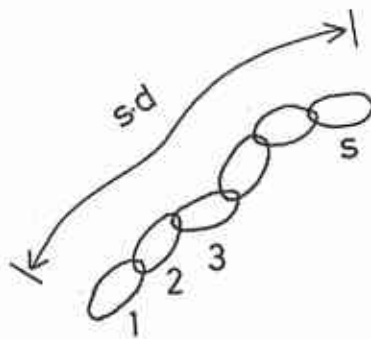


Fig. 4. Connected crack system or an s -cluster.