

断層面の不均質性の性質; 断層帯のフラクタル幾何からの帰結 Fault plane heterogeneity determined by fractal geometry of fault zones

大槻 憲四郎^{1*}Kenshiro Otsuki^{1*}¹ 東北大学理学研究科地学専攻¹Dept. Geol., Graduate School of Science, Tohoku Univ.

**** 検討 1 ****

断層(帯)面は本来的に不均質であり、それが地震の多様性の原因である。断層帯が断層セグメントとジョグから構成され、それらが階層的に自己相似であることは、実験で作った断層帯に関して既に報告した(Otsuki & Dilov, 2005, JGR)。これに地質学的な小断層、および地表に現れた横ずれ地震断層に関するデータを加え、幾何学パラメータ(セグメントの長さ $L_S(i)$ 、ジョグの長さ $L_J(i)$ と幅 $W_J(i)$ 、単位は m、 i は階層ランク)の相関を整理すると、 10^9 にわたる全スケール領域においては、以下のような規則性が見える。

$$L_S(i+1) = 0.348 L_S(i)^{0.994} \quad \text{approx.} \quad L_S(i+1) = 0.365 L_S(i) \quad \text{--- (1)}$$

$$W_J(i) = 0.0278 L_S(i)^{1.06} \quad \text{approx.} \quad W_J(i) = 0.0402 L_S(i) \quad \text{--- (2)}$$

$$W_J(i) = 0.191 L_J(i)^{0.990} \quad \text{approx.} \quad W_J(i) = 0.189 L_J(i) \quad \text{--- (3)}$$

これらは、断層帯の幾何学的不均質性のフラクタル次元が 2 であることを示す。しかし、上記の 3 つのデータセット毎には、式 (2) と (3) は $W_J(i) = b L_S(i)^H$ 、 $W_J(i) = a L_J(i)^A$ と表され、比例定数とべき数は以下の通り。

$$\text{実験の断層帯では} \quad b=0.00385, \quad H=0.642, \quad a=0.00694, \quad A=0.516$$

$$\text{地質学的小断層では} \quad b=0.333, \quad H=0.763, \quad a=0.141, \quad A=0.558$$

$$\text{横ずれ地表断層では} \quad b=0.164, \quad H=0.853, \quad a=3.18, \quad A=0.665$$

**** 検討 2 ****

地震学者は G-R 則と地震動振幅のパワースペクトル密度の k^{-2} falloff 等の経験則を満足する不均質分布を探してきた (Madariaga, 1979, JGR; Andrews, 1980, JGR; Frankel, 1991, JGR など)。その結果は、静的応力降下一定なら、 $D=2$ であるという。他方、式 (1) と (2) からは相似次元は 2 である。上述の式 $W_J(i) = b L_S(i)^H$ の H はハースト指数に相当し、 H と D は $D=E+1-H$ で関係づけられる (E はユークリッド次元)。横ずれ地震断層に関しては $H=0.853$ であったので $D=2.15$ となる。Mai & Beroza (2002, JGR) は波形インバージョン等によるすべり分布のデータを解析し、平均的には $D=2.29$ 、 $H=0.75$ とした。これらは筆者の値とほぼ一致する。

**** 検討 3 ****

式 (1) は断層全体がまず大きく 3 つのセグメントに分割されていることを示す。他方、Mai & Beroza (2002, JGR) によれば、地震断層のすべり分布の相関距離は断層長さの約 $1/3$ であり、両者は全く調和的である。このような断層から発生する地震のサブイベントは主イベントの $1/3$ の長さスケールを持っているはずであるが、Bersenev (2001, JGR) の結果はほぼ期待通りである。これらのことは、断層面の幾何が不連続的(階層的)なフラクタルであることを示す。Ben-Zion & Rice (1995, JGR) によれば、現実的な複雑なすべりパターンを実現するには強く急激な不均質性が必要だというのが、セグメント+ジョグの階層構造はそれに相応しい。

**** 検討 4 ****

Scholz (1982, BSSA) は、横ずれ地震断層の長さが地震発生層の厚さより十分長くなっても、平均すべり量 U_m は長さ L_0 に比例するとした (L -model)。これは奇妙であり、議論が続いて来た。ところが、地表で測定した長い横ずれ地震断層の U_m と L_0 と関係は

$$U_m = 0.246 L_0^{0.46} \quad \text{--- (4)}$$

であり、べき数が 1 ではない。ジョグがすべりをピン止めするため stiffness が増加するので、すべりに対して有効な断層長さは $L_0^{0.461}$ に過ぎないのだと解釈される。近年の不均質断層面に関する数値実験 (Hillers & Wesnousky, 2008, BSSA; Dieterich & Smith, 2009, PAGEOPH など) は、この現象を再現している。

破壊表面エネルギーとの関係、断層帯の進化に関しては次の機会に発表する。

キーワード: 断層面, 幾何, フラクタル, 不均質性

Keywords: fault plane, geometry, fractal, heterogeneity