的な非一様性からきているのか，それとも先端分岐成長様式に本来内在されている現象なのか，今のところ判らない．前者の場合ならばトリビアルな現象であるが，後者の場合ならば整合不整合現象，あるいはカオス現象として理解される可能性があると思われる．そのためにはまず，もう少し過飽和度を小さくして，この違った先端分岐が生じない場合が観察されるかどうかを調べる必要があろう．

さて，過飽和度が大きくなった場合の成長形態である図2や図3の場合の細部構造はどのようになっているのか見てみよう．図6に図2の場合の先端分岐領域の細部構造を示す．前にも述べたようにこの領域は放射状に広がるが，広げる役割を担っているのはこの領域の両端の結晶である．内部は先端分岐現象を示すが，結晶の本数を増やすことにはあまり寄与していない．図6で判るように，だいたい拡散長の距離（$\sim 100\,\mu$m）で並ぶようになる．ただし，このように整然と並ばないと成長を止めたり先端数を増やす先端分岐を行って，なんとか拡散長の距離で並ぶように調整しようとしているように見える．図7は図3の場合の細部構造であり，そのような例になっている．ただし，このような場合でも長時間にわたって長い距離を成長させると，整然と並ぶようになるのではないかと思われる．というのは，結晶間の拡散場を通した相互作用の距離は拡散長が目安となる．これよりも短い距離だと，溶質の奪い合いをしてどちらか一方が成長を止めることになるであろう．逆に，拡散長よりも長い距離だと過飽和度の大きい拡散場に一つの結晶がおかれた場合と等価であるから，先端数を増やす先端分岐を行い，結果として結晶間の距離を縮めようとするであろう．ただし，その場合に結晶間距離が拡散長よりも小さくなると，どちらかの結晶が成長を止めるであろうから，定状的な成長様式にはならない可能性がある．

4. まとめと今後の方針

樹枝状結晶の先端分岐成長に着目してその巨視的な構造と細部構造のその場観察を行ってきた．巨視的な構造を理解するためには一本の樹枝状結晶の先端分岐現象を理解することが必要である．定性的にはある程度の理解が可能であるが，今後は定量的な議論を行う必要がある．異方性の強さに関しては定量的な議論が〈100〉方向に関して実験的に行われている（Dougherty and Gollub (1988)）．〈110〉方向に関しても同様に調べる必要がある．そして先端分岐の間隔と過飽和度の関係を系統的に調べる必要がある．規則的先端分岐である程度の理解が定量化されたら，不規則的先端分岐の理解に関しても何らかの糸口がつかまえられよう．

参 考 文 献

Dougherty, A. and Gollub, J.P. (1988). Steady-state dendritic growth of NH_4Br from solution, *Phys. Rev. A*, **38**, 3043-3053.

本庄春雄（1989）．NH_4Cl 樹枝状結晶における先端分岐成長のその場観察，統計数理，**37**，39-45．

地震エネルギーのべき分布則からのずれの定量表現と地震活動

神戸大学 理学部　奥田　暁・大内　徹・寺島　敦

ある期間ある領域で発生する地震について，マグニチュード（M）ごとの規模別度数分布（n）は，

$$\log n(M) = a - bM$$

の指数分布に従うとされてきた．この式を Gutenberg-Richter 経験式（GR 式）という．M と地震により解放される歪エネルギー (E) の間には，

$$\log E = \alpha + \beta M$$

の関係がある．したがって，GR 式は，一連の地震活動において解放される地震エネルギーの分布に関する，べき分布則を表している．この GR 式における"b 値"は，対象とする地震活動の特徴を表すのに重要なパラメタであり，従来，その値の地域性や時間空間変化が議論されてきた．しかし，最近では"b 値からのずれ（分布の乱れ）"についても注目されている．

本研究では，Kullback-Leibler 情報量（KL 量）を統計地震学の分野に導入することで，b 値の推定法と分布のべき分布則からの乱れの表現に関する統一的な議論を提案する．さらに，大きな地震の発生に関連してみられる分布則の乱れについて，実際の地震活動に適用し解析した例を示す．

はじめに，b 値の推定法から述べる．まず，KL 情報量とは，ふたつの密度分布 $\{p_i\}$ と $\{q_i\}$ において，

$$K(p,\ q) = \sum_i p_i \log(p_i/q_i) \tag{1}$$

で定義される．両者が一致するときにゼロ，一般には分布 $\{p_i\}$ からの $\{q_i\}$ の隔たりの度合に応じた正の値を示すことで，ふたつの分布のずれの度合を表す尺度になっている．

ここで，ある地震群においてマグニチュード M_i の地震が確率 p_i で実際に観測されたとする．一方 q_i は，地震群が GR 式に従うとして，そのマグニチュード M_i に対して想定される確率と考える．具体的には，まず大きさ $M_i \sim M_i + \varDelta M$ の個数を n_i，全体で N 個の地震を観測したとすると，

$$p_i = n_i/N$$

$$q_i = (1-10^{-b\cdot\varDelta M})\cdot 10^{-b\cdot X_i} \fallingdotseq B\cdot\exp(-BX_i)\cdot\varDelta M$$

と表される（$X_i = M_i - M_0$, M_0 は最小の M, $B = b\cdot\ln 10$）．次に，与えられたデータ $n_1, n_2, n_3, \ldots, n_k$ のもとで，K を最小にするようなパラメタ b を最尤推定すれば，

$$b = (1/\varDelta M)\cdot\log\{1+(N\varDelta M/\sum X_i)\} \tag{2}$$

で与えられる．(2) 式は $\varDelta M \to 0$ の極限において，地震学における宇津・安芸の b 値の最尤推定法の式 $b = N(\log e)/\sum X_i$ に一致する．また b 値の不偏推定量は，(2) 式の N を $N-1$ に置き換えればよい．

こうして得られた b 値は，(1) 式の K を最小にするかたちになっているので，そのときの K の値をもって，実際の地震群におけるマグニチュード分布の，GR 式からのずれを表す尺度とすることができる．とくに (2) 式（あるいは宇津・安芸の式）による b 値のもとで計算される K の値を，"C 値"と定義する．つまり C 値は，最適の b 値をもってしても説明されない指数分布則からのずれ（エネルギーのべき分布則からのずれ）を表している．

KL 量を導入することで，最適とされる b 値とそのときの分布のばらつき度合とを同時に表すことが可能になる．その点で C 値は，これまでも注目されてきたパラメタである b 値とともに，より詳細に地震活動を表す補完的（complementary）なパラメタという意味あいをもつことになる．

次に，実際の地震活動に適用した結果について述べる．近年，日本および周辺域に発生した，

主な地震の前後における C 値および b 値の変化を解析した．その結果，そのいずれの場合にも，大きな地震の発生に数年先行して，その周辺領域で C 値の低下する現象が認められた．C 値が下降から上昇に転じたところで本震を含む活発な活動が始まり，余震活動中の C 値は，高い値からやがて下降する．この後 C 値は，徐々に回復する場合と，再び本震活動前に匹敵する低下をみせてから回復する場合がある．b 値については，大きな地震の発生前に，大きくなる場合も小さくなる場合もみられた．また，群発型の地震活動においては，C 値は全体に低く，その中で大きな地震の発生が C 値を激しく変動し上昇させる．

これら解析方法としては，解析対象領域の中で，その検知限界以上の地震50個ごとの b 値および C 値の時間変化を求めた．一定期間に含まれる地震の数は，各領域で著しく異ならないように，あらかじめ設定された領域の広がりの大きさにより調整される．ただし，ここで解析に用いた50個という数は，C 値の計算結果を比較するためには標本個数を揃える必要があり，同時に検知限界という制約のもと，観測される地震の総数と推定する b 値の有意性を考えあわせての経験的なものである．単位解析個数を大きくすると，C 値は同様の変動のパターンを示しながら，その値の変化の度合は全体に小さくなる．

以上の結果は，C 値の変化が地震活動の展開と密接な関係があることを示している．大きな地震の発生に先行して C 値が低下するということは，すなわち規模別度数分布が指数型に揃うことで，地震のエネルギー分布がべき分布に揃ってくることを示す．このことは，大きな地震の発生前の場に，地殻において臨界状態に近い状態が形成されることを示しているのかもしれない．

Seismogenetic Layer に生じる様々な地殻変動のパターンとそのモデル化

神戸大学 理学部　大内　徹

1. はじめに

Seismogenetic layer とは地震が発生する地殻の意味であるが，以下単に地殻とする．地殻での主な変形の機構は断層系に沿うすべりであるが，そのメカニズムの理解については二つの異なった立場がある．一つは脆性体の摩擦すべりとしてとらえようとするもの，他は準延性体の流動せん断変形として把握していくとするものである（島本（1986））．前者の立場からとしては，バネで結ばれた連性ブロックを想定するモデルがある（Bak and Tang (1989), Carlson and Langer (1989)）．本研究は後者の立場から，断層系での塑性流動に粘弾性効果を考慮したモデルにより，地殻の変形過程を記述する試みである（大内（1986, 1988））．

断層系で実際に起こっている非弾性変形のメカニズムとしては，転位すべりや微小クラックの発生・成長によるものが考えられる．地殻にはプレート運動により常に力が作用しており，エネルギーが流入しているが，それらは断層系で塑性的に解消され，普段はある種の安定状態が達成されている．しかし，すべりやクラックの発達がある程度進むと，その周辺に著しい応力の局所集中が起こり，相互干渉により非線形的に現象が進展し始める．こうして，最初一様な場であったものに，歪や応力に凹凸が生じ始める．こうした様子を反応拡散系で表現していこうというのが本研究の主旨である．