大阪と科学教育　11，21－26（1997）

地震のシミュレーションと地震予知

－“碁石モデル”の教材化－

岡　本　義　雄*

1．はじめに

大きな地震はめったに起こらないが，小さな地震はよく起こるという．地震のサイズと発生頻度の相関は，グーテンベルグ・リヒター則と呼ばれ，地震の発生に関する極めて重要な統計的法則性として広く認められてきた．しかし，その物理的根拠は今日に至るもまだ完全に説明されたわけではない．このグーテンベルグ・リヒター則の重要性に早くから気づき，その物理的意味をさぐる先駆的な研究が1970年代前半，当時，熊本大学にいた大塚道男によりなされた．これは現在，注目を浴びる“複雑系”という新たな視点で地震現象をとらえ直す手法の発端ともいうべき研究であり，学問的意義も大きいが，学校教材としても大変興味深い．

そこで，ここでは，大塚の数値実験の手法をアレンジした教室での生徒実習とそれを補完するコンピュータシミュレーションを紹介し，その教材化の意味について述べる．あわせて最近取りざたされている地震予知論争との関連についても取り上げる．

2．グーテンベルグ・リヒター則

表1は日本列島付近の北緯25～48度，東経125～150度の範囲内で，1961年から1991年までの気象庁が決めたM（マグニチュード）5以上の地震のM（0.1きざみ）と地震の個数$n(M)$を示したものである[1]．

これを横軸にM，縦軸に$\log n(M)$をとって，プロットしたのが図1である．これをみるとグラフは見事に直線に乗ってくることが分かる．これがグーテンベルグ・リヒター則（以下G－R則と表記）と呼ばれる関係で，地震のサイズと個数について場所や時間を任意にとっても，地球上どこでも，この傾向が統計的に成り立つことが確かめられている．

表1　日本列島付近の地震のMと頻度

M	5.0	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9
地震数	520	471	384	313	254	237	164	175	133	100
M	6.0	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6	6.7	6.8	6.9
地震数	84	64	49	34	33	23	27	21	14	11
M	7.0	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8	7.9
地震数	13	10	5	2	2	3	3	3	2	2
M	8.0	8.1								
地震数	0	1								

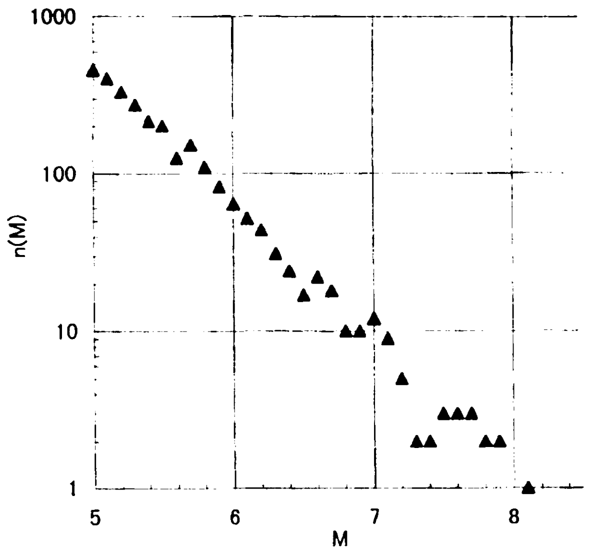


図1　日本列島付近の地震のM－頻度分布

このグラフを1次式の形に表記すると

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

と書ける**．このとき，aは縦軸の切片，bはグラフの傾きを表す．

ここで，重要なのはグラフの傾きbの値（b値と言う）である．図1よりb値を求めてみると，約1に近い値がでる．これはMの値が1大きくなると地震の発生頻度は約1/10に減ることを示している．この直線関係は，このグラフで表したM5～8の範囲に留まらず，Mのもっと小さい方まで伸びていることが微小地震の観測データからも裏付けられている．

また，b値は地域，時間によっても微妙に異なるが特に地震予知と関連して，大地震の前震ではb値が小さくなるのではないかという議論が続いている．

*　大阪府教育センター

**　G－R則は縦軸に$\log N(M)$ ｛$N(M)$ はM以上の地震の累積頻度｝ をとることも多いが，本論では計算の便宜を考え，$\log n(M)$ で統一する．

これは前震では通常の地震活動に比べて，“大粒”の地震の割合が多くなる（グラフでは直線の傾きが水平に近づく）ということを示す．したがって，地震のデータを常に監視して，統計的にb値を算出し，もし，ある地域でb値の変化（下降）が見られたら，その地域に地震が迫っているといった解釈ができるのではないかということで，地震予知の１つの戦略としてあげられている．しかし，実際には前震を持たずに起こる大地震もあり，また，通常の地震活動と前震の区別は統計処理上極めて難しく，この方法で地震が予知された例はまだ知られていない．ちなみに兵庫県南部地震の明らかな前震はわずか数個であり，統計処理の標本数には到底達しなかった．

３．大塚の“碁石モデル”

大塚道男はＧ－Ｒ則を説明するため，地震発生の簡単なモデルを考え，これを“碁石モデル”と名づけた．囲碁のゲームに似せた以下の簡単なルールによるシミュレーションである[2]．（図２）

① まず，碁盤上の１個所をランダムに選び，そこに白石を置く．これを地震の破壊の始まりとする．この白石を囲む点はａ～ｄの４点である．

② 次に，ａ～ｄで１回づつサイコロを振る権利を与え，あらかじめ決めた“当たり”の目がでた点には白石を置き，“外れ”の目がでた場所には黒石を置く．これは白石であれば破壊が伝播したことを示し，黒石であれば破壊がそこで止められたことを示す．ｅ～ｇは新たにさいころを振る権利が与えられた点である．

③ ｅ～ｇについて，またサイコロを振るが，図２ではｉ～ｈで次の権利を得る．

④ 白石がすべて黒石で囲まれる．すなわち破壊の伝播がストップした時点で碁石のかたまり中の白石の数を数え上げ（図では３個であるがこれを地震のサイズと考える），再び①に戻る．

このように，“当たり”が出続ければ，破壊が大きく成長し“大地震”となり，破壊の成長が途中で止まれば小さな“地震”で終わると考えることで，地震の発生を確率論的にシミュレーションしようとしたモデルである．大塚はこれを碁盤で実際に行うのではなく，当時，実用化されていた大型計算機で計算し，発生する“地震”のサイズと個数の関係が，ほぼＧ－Ｒ則の傾向を満たすことを明らかにした***．

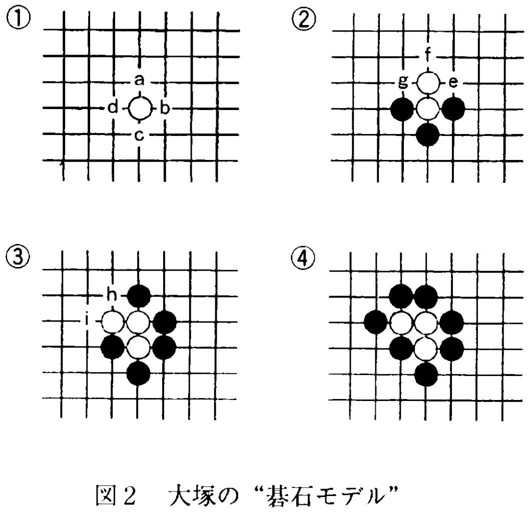


図２ 大塚の“碁石モデル”

４．“碁石モデル”の教材化

ここで，“碁石モデル”を教室で行うため，少しアレンジしてみる．以下，これを“教材化碁石モデル”と呼ぶことにする．

(1) 用意するもの：碁盤の代わりに格子（５－８㎜幅程度）を印刷した用紙，サイコロの代わりの六角鉛筆，両対数グラフ用紙

(2) 準備：サイコロの“当たり”の確率は1/3とするため，あらかじめ鉛筆の６面のうち２面に“当たり”を示すマークを付けておく．（すでに印刷されているメーカーのロゴ等を利用してもよい）

(3) 手順（図３参照）

① 格子上に目をつぶって鉛筆を立て，ランダムに１点を選び，その区画に星印を書く．これを“地震”の破壊の始まりとする．

② 星印の隣接周囲４区画について，適当に順序を示す数字を記入し，それぞれの区画で，鉛筆を転がす．この時，“当たり”がでれば，○印を，“外れ”ならば×印をその区画に記入する．（すべて×のときはサイズ１の地震の個数$n(1)$を＋１増やし，①に戻る）

③ 次に，○印の周囲４区画で○，×がまだ記入されていない区画を順序を示す数字でリストアップした後，順に鉛筆を転がし○，×を記入していく．

④ 新たに○印がついた区画については③を繰り返す．また，すべて×の区画で囲まれたときは，その時点でマーカーペン等で最初の星印と○印を塗りつぶし，その総数cを数え上げる．以後，これを破壊クラスター数と呼ぶ．（“地震”のサイズに相当）

⑤ サイズcの地震の個数$n(c)$を＋１増やし（図４に示すように，正の字を書き足していくとよい）①に戻る．

*** 大塚は当時の大型計算機の能力を考え，サイコロを振る回数を石の幾何学的配置によらず，各ステージで白石の数の定数倍と決めて解析を行った．

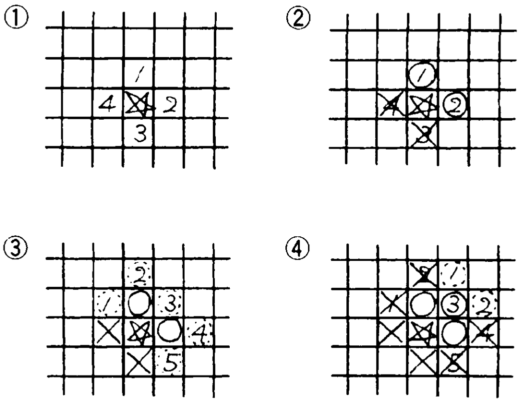


図3　“教材化碁石モデル”

⑥　このようにして，格子上にかなりの数の“地震”が溜まったら，生徒全員の分の $n(c)$ をすべて集計する．

(4) グラフの作成

上記の要領で，データが集計されたら，以下の方法でこれをグラフ化する．

①　1つの“地震”について破壊したクラスター数 c を地震のサイズと考え，$\log c$ をマグニチュードに擬することにする．したがって，横軸は c に応じて対数目盛りでプロットする．

②　一方，縦軸はクラスターサイズ c の地震の“地震頻度” $n(c)$ に応じて同じく対数でプロットする．図4に実習の1例を，図5にそのグラフを示す．

(5) 結果の分析

標本数が十分でないが，G－R則をほうふつとさせる相関関係がみえてくる．ただ，教室で行う実習

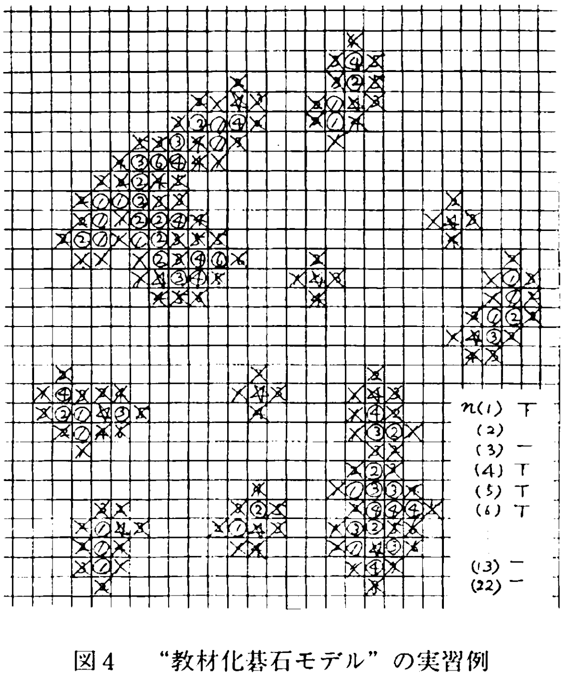


図4　“教材化碁石モデル”の実習例

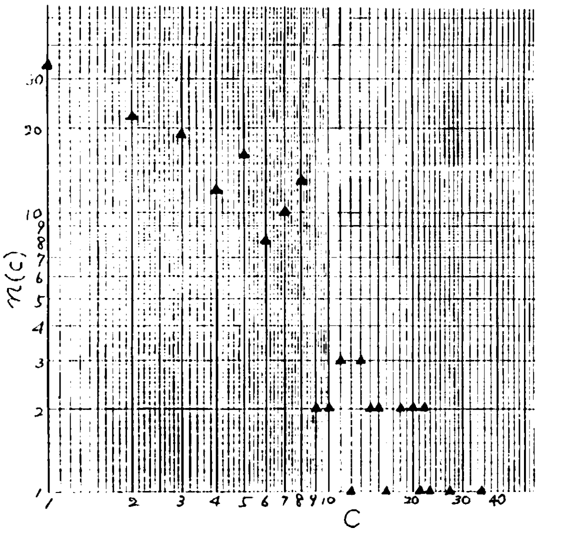


図5　“教材化碁石モデル”のサイズ－頻度分布例

では，時間の制約もあり，統計に有意な標本数を得られない場合が多い．

(6) 計算機実験

そこで，実習の結果を補完するためこの手法をパソコン上のプログラムに展開し，計算してみた．

プログラム上ではサイコロの“当たり”のでる確率 p（伝播確率）を自由にコントロールできるので，これを0.17～0.5に変更してみた．これはサイコロの

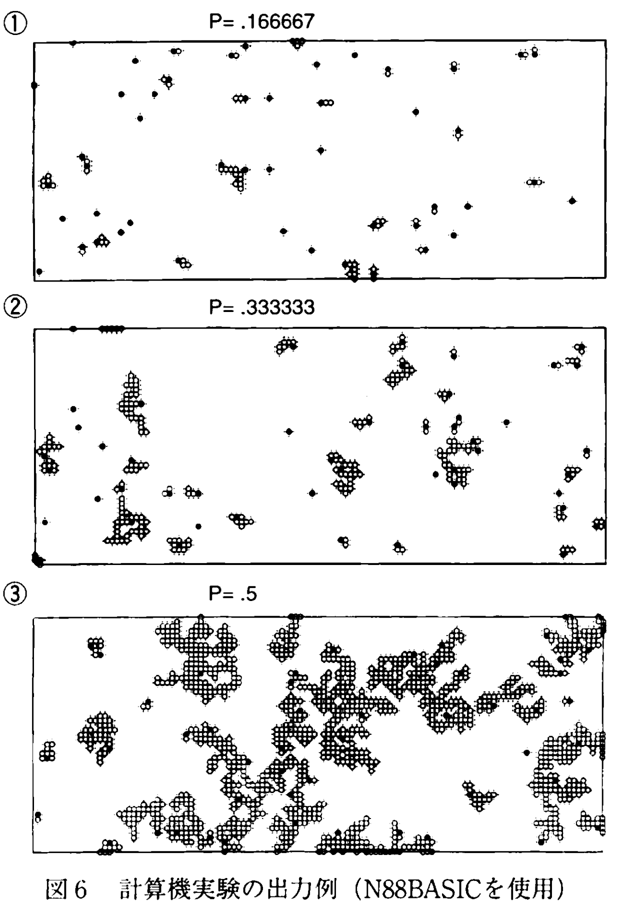


図6　計算機実験の出力例（N88BASICを使用）

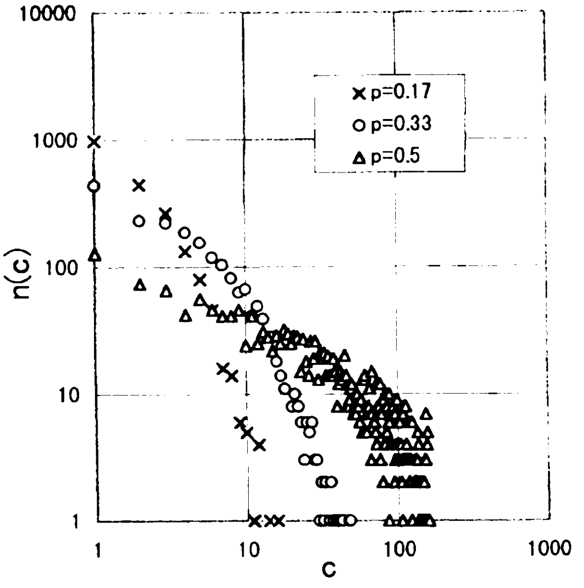


図7 計算機実験の $c-n$ 分布

“当たり”が1/6, 2/6, 3/6の時にそれぞれ対応する．

画面例を図6に，その結果のクラスターサイズ c と頻度 $n(c)$ については，両対数グラフ表示で図7に示す．なお，ここでは大塚の計算方法とは異なり，むしろ“碁石モデル”に忠実に，石をパソコンのディスプレイ上に表示していく方法で計算した．

5．考察

(1) 計算機実験の解析

シミュレーションはほぼ，G－R則の傾向を再現しているように思われる．ただ大塚の計算結果と同じくグラフはやや上方向に凸となり直線からずれる．

また，大塚はサイコロを振る回数を白石1個につき3回と指定し，p の値が1/3以上では破壊区画サイズが無限大に発散するとしているが，本論のモデルでは石の幾何学的配置に束縛されて，サイコロを振る回数はそれより平均して小さくなり，クラスターサイズが発散する p の実験値は0.5を上回る．

(2) “碁石モデル”の教材化の意味

このように簡単な論理に基づくシミュレーションを通して，G－R則の紹介と分析を兼ねた実習を教室で行うことができる．パズルゲームの要素もあり，生徒には興味を持たせやすいと思う．

また，このモデルは“地震発生”のみならず，“山火事の延焼”や“巨大分子のゲル化”，“相転移”等，今日では“浸透現象”（パーコレーション）の例として一括される，さまざまな身の回りの現象の解析にも応用されている[3]．（図6の破壊クラスターの形は水の浸透模様に似ることに注意）

一方，サイズと個数の関係がG－R則に示されるように，両対数グラフで直線になる（「べき分布」といわれる）自然現象の性質や構造は“フラクタル”（自己相似）と名付けられている[4]．　では，G－R則で示唆される地震のフラクタルな性質はどこからくるのか？

今日，この問いに答えるため，“碁石モデル”の延長上に，さまざまな数値シミュレーションが考案され，その過程で自己組織化臨界現象（SOC）など興味ある自然の振るまいも発見されている[5]．

この教材はそういった“複雑系”としての自然現象を読み解く手法の一端を教室で示す好例となる．

(3) 留意点

ただ，このモデルはあくまで自然のある性質だけを取り出す単純化と幾つかの大胆な仮定の上に成り立っている．単純にこれで地震発生がすべてシミュレーションできたと思うのは早計である．実際の地震は簡単な2次元の碁盤や紙の上ではなく，複雑な形状の地下の断層で発生すると考えられる．あくまで，自然現象の1つの新しい見方と，計算機実験の1モデルの紹介ということにも留意する必要がある．

(4) 発展

この手法では，さらに幾つかの発展が考えられる．

① 実習では，いったん×印がついた場所では2度とサイコロを振る権利を得ないとしているが，これを再度サイコロを振れるように変更する．これはいわば“敗者復活モデル”とでも呼べるモードで，どちらかというと大塚の計算の論理に近い．

② 計算機実験の伝播確率（本論では定数 p と置いた）を破壊の時系列で変化させる．例えば，破壊の初期は p が小さく，破壊が進むと p を少し大きくするなどいくつかのバリエーションが考えられる．

6．地震予知との関連

本論のモデルは地震予知との関連では“確率論的モデル”の1例といわれる．仮に，このモデルが地震発生の一面を正しく再現しているとすると，地震は「自分の大きさを地震発生の時には知らない」．別の言い方をすると，地震が発生したときそれが大きくなるか小さいままで終わるかは，偶然が決定する（サイコロを振る神のみぞ知る！）ということになり，結果として，いわゆる直前の“地震予知”が原理的に不可能という結論が得られてしまう．

これに対して，「地震が大きいか小さいかは，地震が起こる前からあらかじめ決められている」とする“決定論的モデル”も専門家からは提出され，この「地震の始まりは終わりを知っているか？」とい

う問いは現在の地震予知論争の１つの大きなテーマを形作っている[6]．

7．おわりに

簡単な論理にもとづく地震発生の数値シミュレーションを紹介した．しかし，実際の自然現象はもっと複雑に，多くの物質とエネルギーの関係の上に成り立っているはずである．あくまで，自然科学は，本物の自然を体験するなかで理解するのが一番である．バーチャルな数値計算の中に本質があると考えるのは早計である．ただ，ゲーム世代の今日の生徒たちにとってみて，ここでとりあげた実習も，自然に興味を持たせる１つの方法であると考える．

なお，地震予知については一般に多くの誤解があり，また，過剰な期待があるようにも思われる．この点に関して重要だと考える１つの見方を＜参考＞に後述する．

謝辞：この稿の手法の教材化の端緒は大阪短期大学助教授松崎光弘氏のご教示によるものです．記して感謝します．

引用・参考文献

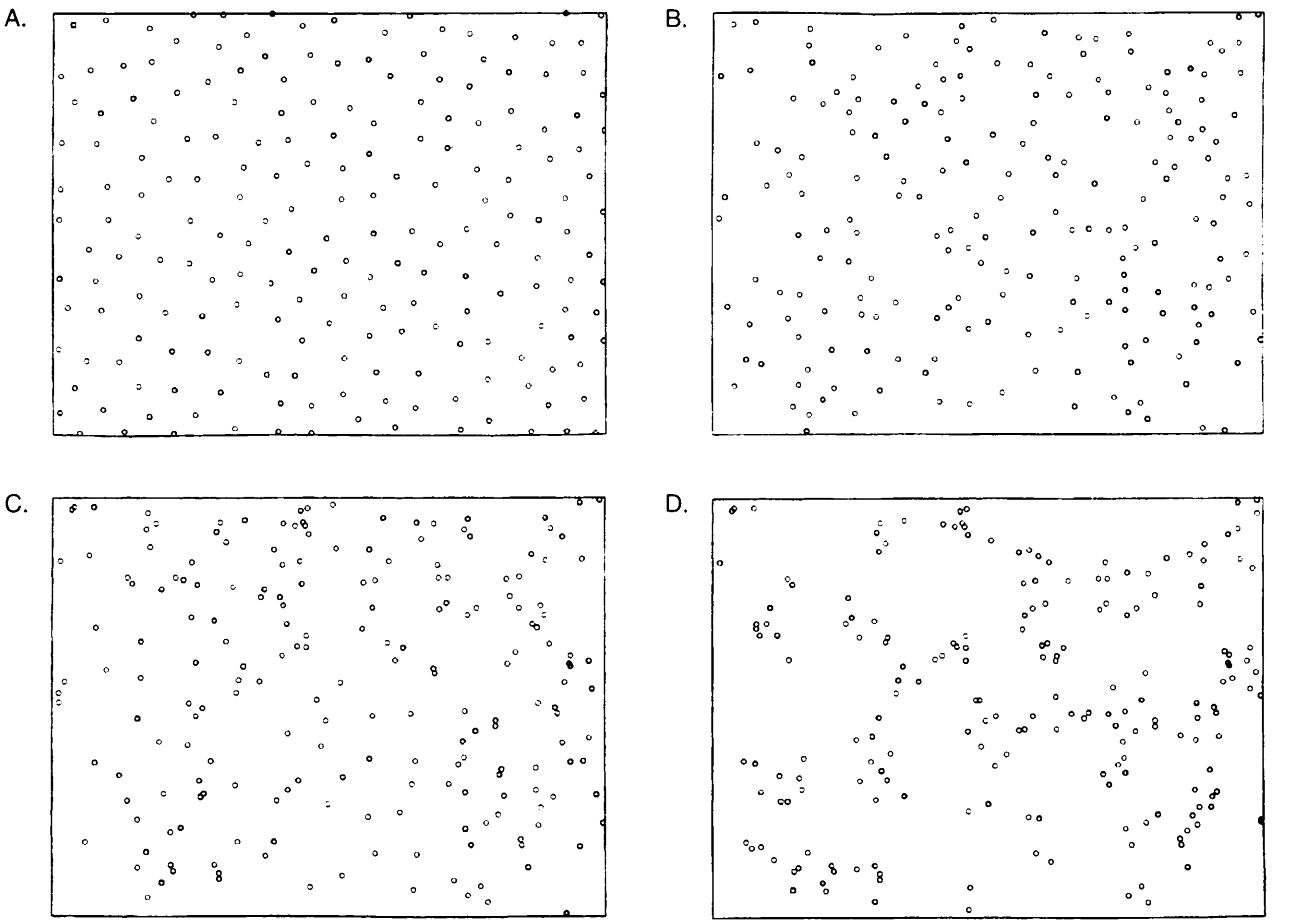
1）国立天文台編：理科年表，丸善（1995）
2）大塚道男：地震２，**24**，215（1971）
3）D.Stauffer：浸透理論の基礎，小田垣孝訳，吉岡書店（1988）
4）高安秀樹：フラクタル，朝倉書店（1986）
5）伊東敬祐：科学，**65**，257（1995）
6）深尾良夫・芝崎文一郎：科学，**65**，211（1995）

＜参考＞　地震予知の周辺（偶然さとは何か）

地震に関する質問で一番多く，また，答えに窮するのは，「最近，近畿地方の地震活動は活発化しているのか」とか「神戸の地震の際，さまざまな前兆が報告されていると聞くが，これらによる地震予知は可能か」といった質問である．これらに答えうるデータも能力もないが，これらの判断が大変難しいということだけを例を挙げて示しておく．

まず，回り道になるが，ランダム（偶然）に発生する現象とはどういう起こりかたをするかということを空間的，時間的分布のなかで見てみる．

付図１はパソコンで乱数の組を発生させ，それを



付図１　空間内でのランダムな事象配置

x，y座標に変換し，四角の枠の中に小さな○を200個プロットしたものである．(○は地震のようなある物理的事象を示すとする)

A～Dの中で枠内に完全にランダムに○を打ったのは実はCだけで，それ以外はそれぞれ隠された“仕掛け”がある．まず，Aはすでに打たれた○の近くには○を打たない．すなわち適当に○の間隔が開く条件を入れてある．Bはその条件を少しゆるめた．Dは逆にすでに打たれた○の近くに○を打ちやすくした．つまり○が密集しやすくしたものである．

これを人に選んでもらうとランダムな点の分布例として，意外とAを選ぶ人が多い．ランダム（偶然）という現象のとらえ方を我々なりの美学でゆがめてみていることを示す1例である．

実際には，何らかの原因を伴わないランダムさ（偶然さ）では必ず“見かけ上”の“群れ”（かたまり）と空白域を形成するのが普通である．ある事象がかたまって生じたとき，それがあるメカニズムによるのか，単なる偶然の産物なのかはかなり綿密な立証が必要となる．つまりある地域に地震が多発したり，その震央の場所に片寄りが生じても，それが何らかの地下の原因による明らかな活動のレベルの上昇にともなうものかどうかの判断は大変難しいことになる．

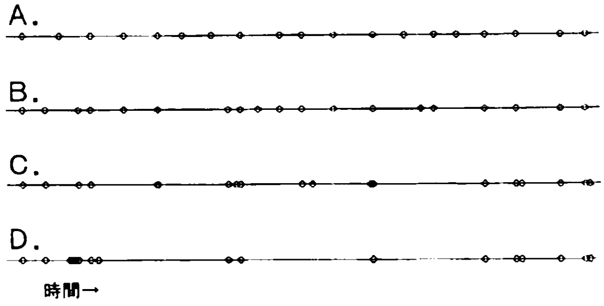
次に，時系列上でデータを考えてみる．

付図2は同じように乱数を発生させ，それをt座標（時間の経過を表す）の数と読みかえて，時系列のなかにランダムに事象を並べたものである．空間で行ったと同じように，手を加えずランダムに○をプロットしたのはCだけである．Aは事象が比較的等間隔に起こりやすいように調整してあり，Bはその条件をゆるめ，Dは逆に時系列に“群れ”ができやすいようにしたものである．

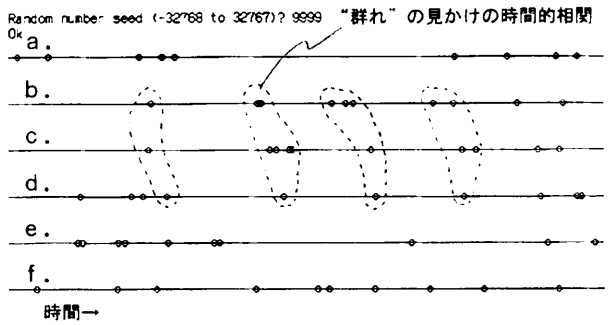
よく，“優秀なギャンブラーはツキを逃さない”とか“幸運や不幸は束になってやってくる”というが，仮に，“幸運”や“不幸”がまったくランダムに人に訪れるとしても，Cの時系列をみているとその意味が解るような気がする．

次に，ランダムな時系列を，いくつか並列に置いてみる．つまり幾つかの関連の無い現象を同じ時系列に並ばせてみたものを付図3に示す．

さて，この時系列をみていると，幾つかの時系列に事象の相関めいたものが明瞭に見えてくる．ランダムに生起する事象をさらに，無作為に並列に並べても，例えば，b～dに相関らしきものが現れてきたりする．(もちろん，ここに示した例は幾つかの試行の中でも特に相関の顕著な例を“作為的”に選



付図2　時系列上でのランダムな事象



付図3　ランダムに並べた時系列

択している点には注意が必要)

これは，仮に，ある地震が起こったとき，それに伴うある事象が時間的関連で起こったとしても，それが地震に本当に関係のある事象かどうかは相当吟味する必要があるということを示す．たかだか，数回の時間的相関があった現象だからといってそれが，地震に関係あるとか前兆であるとかいうことは，そう簡単に言えないことが分かる．ここの所を吟味しない，地震前兆論や地震予知論は無意味といえる．しかも，ことは人の命がからむだけに，専門家がおのずと慎重になる理由はこのあたりに由来する．

さらに付図3のb～dの“群れ”どうしにはなにやら“見かけ”の時間の周期性まで見えてくる．あまたの地震周期説もこういった点の検証を経ないと“科学”とはなり得ない．

地震予知に悲観的なことばかり述べたようだが，生徒たちが地震予知に興味を示すのはむしろ歓迎すべきことだと思う．その興味や畏れを自然を学ぶきっかけに変えて行きたい．地震学の1つのゴールは今もなお，地震のwhat，whyを科学し，次の地震のhow，where，whenを知ることだと思う．地道な観測を通じて，本当に地震の予知が“科学”として人々の役に立つ日がくることを願ってやまない．