

モデルを意識した地学教材，とくに地震分野

岡本義雄^o（大阪教育大学附属高等学校天王寺校舎）

要約：地学教育へのモデル教材の導入を試みる．それは地球科学の最先端の方法論である観測とモデルのコラボレーションを地学教育の柱として導入しようとするものでもある．まず，地学教育それ自身の行く末をモデルで論じたあと，具体的な地震分野を中心とした地学現象において，モデルを用いた教材を活用している例を筆者自身の開発した教材を例にあげて論ずる．あわせてこれらのモデル教材や教育の方法論の未来への意味を議論する．

1．はじめに

現代の地球科学における観測とモデルのコラボレーションの持つ意味や重要性についてはすでにくりかえし論じられており，ここではくりかえさない．むしろここでは，そうしたモデル教材を地学教育に導入する際に参考になる例や，またそのモデルが地学教育に置いて持つ意味を議論することを目的とする．

2．地学教育をとりまく背景

地学教育が衰退していると言われてから久しい．ここ数年の地学教育をとりまく悲惨な現状； 全国の高校における地学受講者（開講数）の減少（柴山，2000） 地学教員の採用減（根本，2000a；根本，2000b） 大学入試科目からの地学の排除；は，好ましくない正のフィードバックループを形成しているように見える．筆者はそれを「**地学教育をとりまくデフレスパイラル**」（岡本，2002）と名づけた．また結果として高校地学は**教科として「絶滅危惧種」**（Endangered Species）に瀕していると警告した（同上）．しかし地学教育関係者の間に危機感が高揚し，その対策に向けて足並を揃えているとは到底思えない（本稿，脱

稿まぎわの新聞でも理科教育に関する生徒の認識が話題となっている〔朝日新聞，2004〕ものの，結果に対する解説の記述が物理，化学，生物に関してだけで地学に関しては紙面にない！）．

そこで本論ではまず，この警告がどの程度，的を射ているかを検証したい．この分野では最近進展が著しい個体群生態学（Population Ecology，たとえば巖佐，1998）や環境生態学（松田，2000）などで生物の絶滅と保全の問題がさかんに議論されている．戦略として現在の個体数などの観察データを数理モデルに乗せ，将来の個体数予測を外挿しようというものである．世代交代や環境負荷など多くの生物固有の項を含むため，そのまま適用できないが 絶滅予測として大変参考になる．ここではまず彼らの方法論を参考に，地学教育の行く末を極めて簡単な方法で大胆にモデル化してみた結果を報告する．

3．朱鷺の運命と地学教育絶滅モデル

次の図1は佐渡島で昨秋，最後に残った1羽が絶滅した日本産トキ（*Nipponia nippon*）の推定個体数の推移（尾崎，1997）である．

絶滅する種の個体数推移の大筋は指数減衰に乗っているのがわかる．こうした傾向はトキに限らず，他の絶滅に瀕する生物の個体数の推移，例えばマグロなど回遊魚類の資源量に関する報告（R.Myersら，2003）などでも顕著である．

次に，個体群生態学のもうひとつの重要なポイントは，個体数の減少そのものが絶滅にいたる危険を増やすという事実である．これは主に2つの原因によると言われる．1 つは個体数の確率的な変動があるとき，個体数が少ないと個体数が簡単に0に落ちてしまうという危険である．ギャンブルの最初の持ち金との類比から Gamblers Ruin

(Raup, 1991) などと呼ばれる。他の原因としては、遺伝的な多様性の減退や環境変動への耐性の低下などが上げられ、これらが原因で絶滅に瀕した種が急速に個体数を減じていく傾向は**絶滅の渦 (Extinction Vortex)** と呼ばれている。つまり**個体数の減った種はその個体数減少そのものが絶滅の原因になる**という考え方である。

これらの点を踏まえて、ここでは大胆に日本における地学教育の絶滅年の推定を試みたい。も

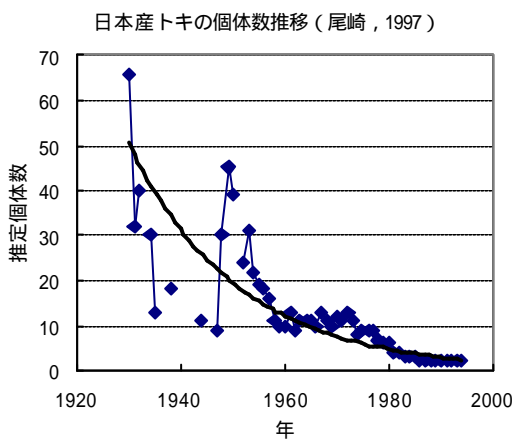


図1. 日本産トキの個体数推移 (尾崎, 1997)
戦前の個体数データはかなり不確定であるが、全体の傾向は指数近似曲線(太実線)に乗っている。なお最後の1個体(キン)は昨秋(2003年)死亡した。

ちろん一方は生物の個体数推移であり、他方は制度的かつ社会的なある集団の帰趨を考慮しており、まったく土俵が違うという批判は甘んじてうける。それより筆者には両者を取りまく環境があまりにも似ているし、関係者の関心の低さに警鐘を与えることは重要と思えたからである。

3 - 1 . モデル化の仮定

現状を次のような単純な仮定下にあると置く。

地学教育の活動度を示す各指標の傾向は今後も**指数減衰 (exponential decay)** する。

各年度の指標はその年度の で推定した数の上下に**5%のランダム変動 (fluctuation)** をする。そしてこの変動は年々積み重なる。

もちろん、この仮定が正しいものかどうかは現時点ではわからない。あくまで筆者の想像に基づくものであることを記しておく。

3 - 2 . モンテカルロ・シミュレーション

表計算ソフトで 1996 年～2000 年の全国の高校地学教科書採択数(柴山,私信)を初期値にとり、これをまず指数関数で近似する。次にこの指数関数により各年度の採択数を推測するが、これに常に 5%のランダム変動を加味し、次年度の推定数とする。この推定数を次々につないでいく。これを地学教育「**個体数推移モデル**」と名づける。この計算例を図2に示す。予測は表計算ソフトの乱数にたより、20例ほどの試行を行った結果をグラフ化したものである。

この結果からは 21 世紀の後半に絶滅がおきる可能性を示す。同様の計算を、地学を開講している全国の高校数の 1999 年と 2002 年の比較(柴山, 2002)からも推測してみた(図3)。

これらのデータは少なくとも、21 世紀前半に限れば地学教育は数を減らしながらも存える推測を示す。しかし喜ぶのはまだ早い。

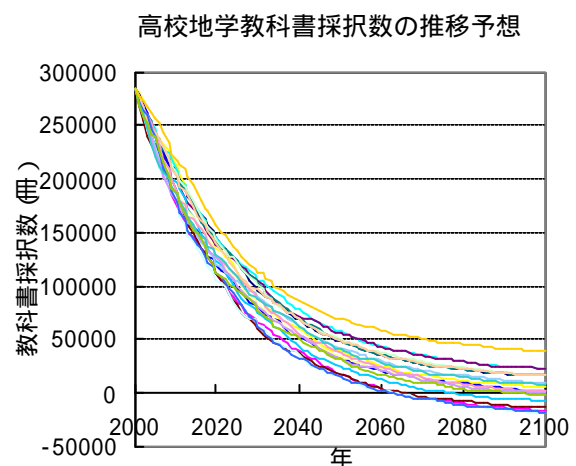


図2. 地学教科書採択数の今後の推移予測
1996年～2000年の採択実数(柴山,私信)を初期値に指数減衰近似+5%ランダム変動を加味した予測の20試行分。

ここには地学を教える教員の問題が含まれていない。根本(2000a, 2000b)は地学教員の新規採用率が全教員数のわずか0.25%と極めて低調であることを示している。これは手持ちの教員が定

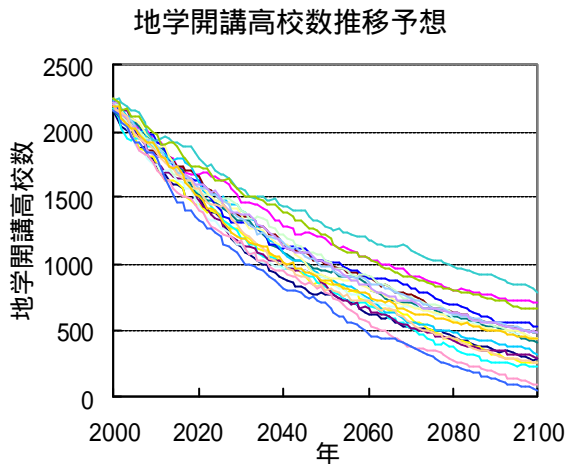


図3. 図2と同様の方法で全国の地学開講高校数の1999年と2002年のデータ(柴山, 2002)を元に推移を予測したもの。

図2に比べ初期値を反映して減少の程度はややゆるいように思われる。

年を迎えればほぼそれで終わりという危険を示す。これが何時頃なのかは全国の地学教員の年齢別分布が必要となるが、こんな基礎データすら筆者の探したかぎり見つけることはできなかった。そこでこの年齢別分布をやや荒っぽく、次の方法で推定することにした。

公表されている東京都の公立高校教員の年齢別分布を日本全国の高校教員年齢分布の標準と仮定。

地学教員が教員全体に占める割合を1%と仮定。また新規採用数は0とする。

定年は60歳とし、そこで教員は退職するものとする。

図4にその年齢別分布を示す。一目で中高年に大きく膨らんでいる様子がわかる。地学の教員はこの分布の中に含まれ、この中高年にピークを持つ分布が毎年右に1桁ずつ動いて定年の壁から消えていく。あたかも宇宙の果ての「事象の地平線」に次々と消えていく後退する銀河を見るようにさびしい光景である。

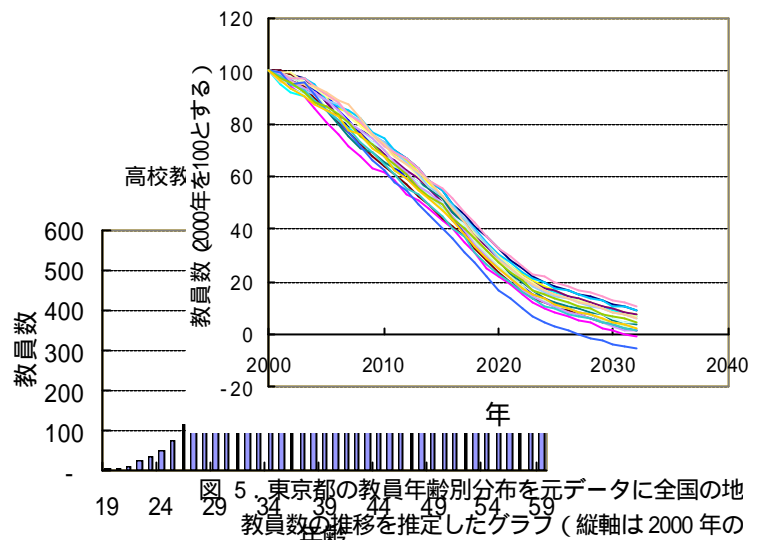


図5. 東京都の教員年齢別分布を元データに全国の地学教員数の推移を推定したグラフ(縦軸は2000年の教員数を100とする)

図4. 東京都の高校教員年齢別分布(平成15年頃)であるがベースに推定した年齢別分布の推移を置いている。わかる。この年齢別分布を全国の平均値に近づけたら見て取れる定して教員数推移計算を行う。

この分布をベースに上記個体数推移モデルを用いて地学教員の個体数推移をモンテカルロ・シミュレーションしたのが次の図5である。

この図では教科書採用数や、地学開講数でみたのより、はるかに早く個体数が0に近づこうとするのが見て取れる。乱暴な予測であるが、筆者はかなり真実に近いと考えている。なおこれら一連の予測には「絶滅の渦」に相当する効果は加味していない。

絶滅時期は地震学における有名な予測モデルの1つである「時間予測モデル」(Shimazaki & Nakata, 1980, 後章で詳述)を用いた南海地震の次の再来時期と肩を並べてしまう。まさに「南海地震の再来が早いのか? 地学教育の絶滅が早いのか?」という驚くべき結果である。

さらに「絶滅の渦」から類推すれば地学選択者の減少は参考書、問題集などの相次ぐ廃刊、それに伴う大学入試からのさらなる排除を引き起こし、地学の絶滅に拍車をかけるおそれがある。ただし、興味あることに教科書は指導要領から地学が廃されない限り出版の保障がされると聞く。教育制度がむしろ地学を絶滅から守るといふ皮肉な結果にも驚く。

以上はやや乱暴な仮定に基づいており、筆者の推測が大きはずれ、杞憂に終わることをもちろん念願している。

筆者はこのあと、この絶滅予測モデルの精度を上げるため、いろいろと画策したが、結局止めにした。それは「**モデルは将来を予測できるが、一旦死んでしまった地学教育を生き返らせることはできない**」という単純な事実気づいたからである。モデルの有効性と限界がここに見事に示されている。

地学教育の行く末にはもちろんこのほか、指導要領の改訂など政策的な部分の影響も大きく、このようなモデルだけで論じられる問題でないことは十分に承知している。それでもこの結果は計算を行った筆者自身にとっても衝撃であったことを再度記しておく。

4. モデルを用いた地学教材の紹介

これより本論に入る。地震分野を中心にモデルを教材として用いている具体例をあげる。

4 - 1. 教材モデル作成の基本方針は次のとおり。

) 基本方程式の確立しているモデル

専門家用の基本方程式（主に波動伝播の微分方程式）のうち、もっとも簡単なものを差分化して様々な境界条件の下にPCで解く。

その計算結果をレンダリングツールを用いて3D表示する。

で作成した画像ファイルを動画作成ツールで動画化（アニメーション化）する。

) 「複雑系」関連諸モデル

単純化したルールの格子モデルを作る。

プリントに実習教材として組む。平行してPCでもデモ表示、結果表示を行う。

自然をどのように単純化するかという点も教材として生かせるよう工夫する。

4 - 2. 波の伝播モデル

) 津波

津波は地震の研究分野の中で、細かい部分に目をつむると基本方程式で自然をほぼ満足する精度

で模倣することのできる例の一つである。

筆者は線形長波近似の津波の差分方程式（Abe and Noguera, 1992）をPCコード化して、様々な水深データを境界条件として教材用の津波のシミュレーションを作成してきた（岡本, 1999）。計算は通常Linux上の自作Cプログラムで行ってきたが、最近一部をWindows上の表計算ソフトExcelでも行えるようにした（岡本, 2003）。

その中から奥尻島で多くの死者を出した1993年北海道南西沖地震の津波について計算した例をここでは紹介する。

まず図1, 2は500mメッシュの水深データ（岸本・駒沢, 1995）の1km水深メッシュデータを倍に補間）を適用してこの津波を再現したモデルである。初期水位値としては断層モデルによる地殻変動をおき、計算された各時刻における波高数値データをUNIX上のフリーのレンダリングツール（Povray3.5）で水面の3D画像表示になるよう加工してある。その際、水深データも合わせて透けて見えるようにしてあるので、海底地形と津波の発達の関係がよくわかるようになっている。また各画像ファイルは動画として編集して、必要に応じてアニメーションで見ることができる。これにより奥尻島とその背後の北海道西岸で津波が高まる様子などが再現される。

次に、数値シミュレーションの有効な利用法として、用いた水深データを加工して**仮想海底地形で伝播する津波**を考える。図3は水深が陸地以外すべて2000mとしたとき、つまりプールの底のような平らな海底とそこから屹立する陸地を仮定したときの、津波の伝播の様子である。図1, 2に見られた大きな津波は姿を消し、わずかに陸地の反射による波が合成された波の高まりだけが見られる。つまり津波の再現には浅瀬の影響が大変顕著であることが見て取れる。

次に現実の水深データを用いて、**奥尻島の部分**だけ 150m の水深に島を削ったものを**図 4**に用意した。これによると島が浅瀬を形成し、その部分で波が遅れ高まる**ことが観察される**。このように海底地形と津波の発達**の関係を直感で考えられるように作成してある**。

これらの津波モデルは他に**仮想東海地震モデル**、南海地震モデルなども作成**済みで合わせて津波のメカニズムを理解する助けになる**。さらに、**仮想地形モデルをさらに改良して、単純な海底モデルで津波の発達の様子を理解できる計算を現在準備中である**。

地震波伝播

津波と同様に、地震波の地下での伝播計算も現在**専門家により、地球内部構造の推定、地表における強震動予測の2つの目的で**さかんに行われるようになってきている。現在の主流はすでに3次元格子構造を用いた計算であるが、**筆者は教材用として2次元のP-SV波およびSH波の差分方程式 (Virieux, 1986)を用いて、地球内部の断面における地震波伝播計算を行ったものを教材として用いている**。以下2例紹介する。

地殻-マントル2層モデル

高校地学でモホ面（地殻とマントルの境界面）の発見のくだりで解説される地震の屈折波が地表に向けて帰ってくる現象を説明するのは**至難の業**である。これをP-SV波の伝播シミュレーション結果で示し、**モホ面からの帰還波が確かに存在し、それが震源からある距離離れると地表近くを走る直達波を追い越してしまうことが一目で実感できる**。図6にこの計算結果の一部を示す。

地球内部構造 (PREM) モデル

地球内部を地震波が伝わる様子は高校地学で教科書にもよく出てくるが**いずれも波線で波の屈折を示したものでいま一つ実感に欠ける**。そこで、**筆者はP-SV波差分方程式 (前述)を地球内部構造モデルを境界条件として与えて解いたもので、地球内部の地震の波の伝播の様子を示す教材を作成した**。最近の地球内部構造モデルとしてはPREM (Dziewonsky&Anderson, 1981), IASP91 (Kennett

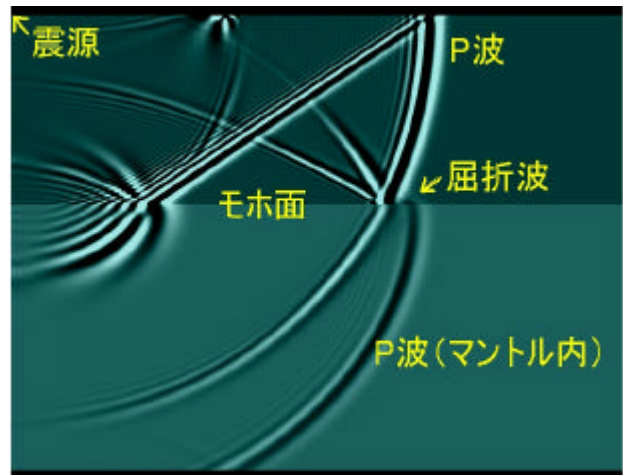


図 6.2 層構造モデル (モホ面モデル) での地震波伝播のシミュレーション

図で左上隅 (地表面) にある爆発震源からの P 波と SV 波の伝播を地殻とマントルの弾性定数と密度を境界条件として計算。モホ面から下のマントル内に地殻内に先駆する波が現れ、それから地表に帰還する屈折波 (Head Wave と呼ばれる) が発現するのがわかる。

and Engdahl, 1991) などがあるが、**波動伝播計算に必要な密度情報が入ったものとして前者を用いることにした**。これは地球内部での深さを変数とした最も基本的な1次元構造モデルである (ちなみにこれら地球内部の諸パラメータすなわち地震波速度、密度、温度などは高校教科書では深さの関数として天下にグラフが記載されるのみで、その推定方法は詳しく記述されていない。こんなところにも地球内部に関する学問が Black Box 的記述に終始し生徒の大多数が興味をもてない原因ともなっているように思う)

これを元に地球内部を 1km メッシュで区切り上記構造モデルに相当する定数を与える。その条件下で差分方程式を解くことにした。また地表からは**空気**の密度を入れて表現している。これにより地表面で発生し伝播する表面波 (Rayleigh 波) も再現できる。**図 5**にこの計算例を示す。もちろんこの計算でも各ファイルは動画として結合してある。

地球内部の構造の違いで反射・屈折する各波の様子が顕著に観察できる。とりわけ**P 波の外核への入射時に反射波が 2 種類 (PcP と PcS) 生じること、外核領域に入ったとたん S 波が消えてしま**

うことが印象的である。この計算結果を地表の各点で地震波として記録し、走時曲線に並べたものが口絵 6 である。自然地震のもの(Astiz et al., 1996)と比較しうる、みごとな走時曲線が書かれる。また津波と同じように地球内部の速度構造自体を変えて仮想地球での地震波伝播を計算することも簡単にできる。これは現在作成中である。

4 - 3 . 複雑系関連諸モデル

波の伝播は基本方程式がはっきりしていて、いわばその物理的根拠が明らかな計算モデルである。しかし地震にまつわる現象を説明しようとしてもその点がはっきりしないものは多い。しかしそのようなプロセスは 1990 年代「複雑系」諸科学の発展の下に再評価されるようになった(たとえば Bak et al., 1989)。それらに関連する教材モデルを幾つか紹介する。

) 基石モデル

小さな地震は数多いが大きな地震は少ないという一見ありふれたように見える、地震の規模と個数の関係は南カリフォルニアの地震についての初期の研究から Gutenberg-Richter 則(以下 G-R 則と略す)と呼ばれている。両対数グラフで見事な直線にのる(べき分布と呼ばれる)有名な地震の起こり方に関する経験則であるが、未だに有効な物理モデルは知られていない。大塚道男はこの関係を簡単なルールの計算モデルを作り大型計算機を用いて計算した。これが大塚(1971)の「基石モデル」である。格子上で格子の連続破壊を仮定し、その破壊が他の格子に伝播するかしないかを計算機乱数を用いて計算し、できた破壊格子の大きさを仮想地震のサイズと考えたモデルで、結果は G-R 則に似た破壊クラス分布を得た。一世を風靡するセル・オートマトンの先駆ともいえるべきモデルである。

松崎光弘(1990, 私信)はこれを生徒用にじゃんけんを用いた簡単なゲーム化をして授業を行った。これにヒントを得た筆者はさらに松崎のモデルを、格子を印刷したプリント上で鉛筆をサイコロとして用いるボードゲームに改良した(岡本, 1997a)。計算論理と作業は次のとおり。

断層面を仮定したプリントの格子上の 1 格子をランダムに選ぶ。これを仮想地震破壊の出発点とする。

この破壊が周囲 4 点の隣接格子に伝播するかどうかをさいころを振って占う。この際の伝播確率は六角鉛筆を用いるので 6 面中の決められた 2 面が出れば当たり、すなわち $1/3$ とする。そこでさいころを振る予定の隣接格子に適当にさいころを振るための順番を示す番号を書く。

番号を書いた格子について順にさいころ(鉛筆)を振る。当たりが出れば格子に \times を書く。これを隣接格子の数だけ繰り返す。

で \times を打った周囲でノーマークのサイトに番号を振り、次のさいころを振る準備をする。に戻る。

すべての破壊格子()が \times で囲まれると仮想地震の破壊は終了したと考え、その際の破壊格子の数を仮想地震の大きさと考える。この地震の大きさをプリントの欄外に統計していく。

適当なところで生徒の作った“地震”の“規模”と個数を黒板で正の字を書かせて集計し、その結果を両対数グラフに記入させる。

さらにこの作業を PC 上の簡単なコードに置き換え、生徒実習のボードゲーム結果と平行して PC での計算も画面上にデモ表示できるようにした。図 8 は生徒用のプリントにおける実行例。口絵 7, 8 は同じく PC 画面上での実行例である。PC では破壊伝播確率を自由にコントロールできるので都合よい。

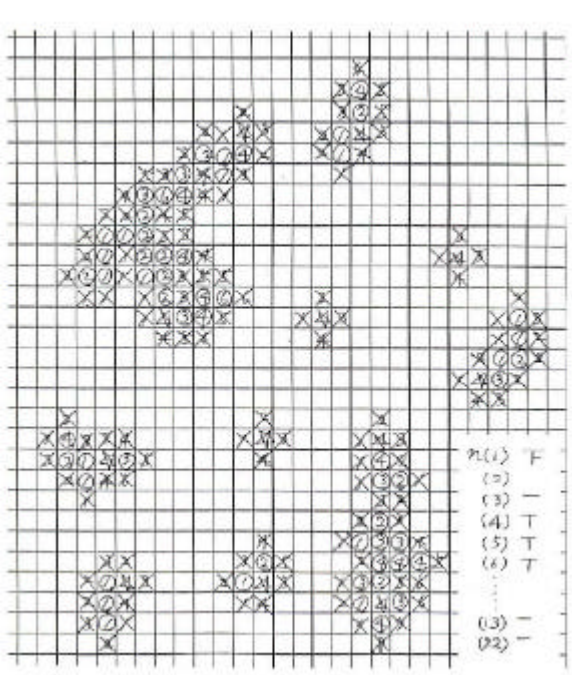


図 8. 碁石モデルをプリント上で鉛筆をさいころがわりに手作業で実習した例

印は最初に仮定した破壊の種. は隣接格子に破壊が伝播, また x は破壊伝播がストップしたことを示す. 右下は破壊格子数の順に仮想地震の数を正の字を書いて集計中の様子. 岡本 (1997) より.

いずれも規模-個数分布を両対数グラフにプロットすると期待される直線ではなく 図9のようにやや上に凸となる分布となり, 大塚の結果と類似する. しかしPC上で他の破壊クラスタの共存を許し, 破壊伝播確率をこのモデルと等価であるとされる2次元格子浸透モデルの臨界値0.59(例えば今野, 1995)に近づけると, この規模-個数分布は見事にG-R則を満足する結果となる(図10).

教材としては魅力的で生徒は大変熱心に実習を行う. しかしこのモデルの重要性はむしろその解釈にあると筆者は考えている. このモデルの重要な点は途中でサイコロを振る作業にある. つまり1つの破壊が大きな地震に発展するか小さいままで終わるかはサイコロが運命を担っている. 地震の大きさは起きたあとでないと解らずまたその大きさはサイコロを振る神のみぞ知る. つまりこのモデルが正しいとすると大地震の発生はあらかじめ決められておらず, 地震予知は原理的に不可能になってしまう. もちろん大きな地震はあらかじめ準備されているという説は現在有力であり, この

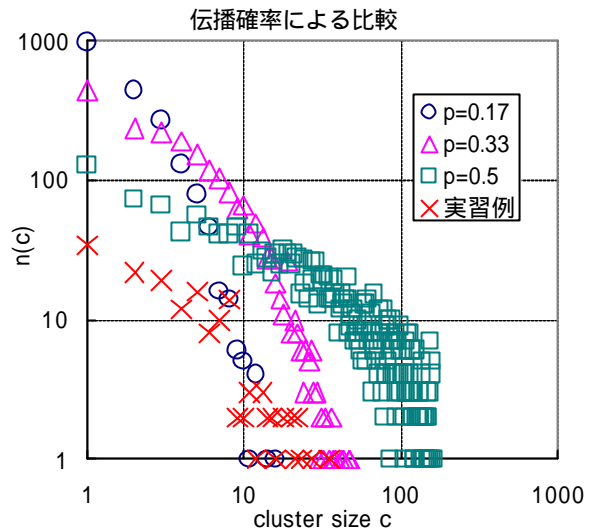


図 9. PC による碁石モデルの仮想地震規模-個数分布 (, ,)と, プリント実習の仮想地震規模 (x) 実習の伝播確率は本文中にもあるように 1/3 である. PC による計算では, 確率が上がるほど, 大規模な地震が増えていることがわかる. またその並び方は大塚 (1971) が指摘したように両対数グラフで上に凸となり G-R 則とは完全には一致しない(岡本, 1997 より).

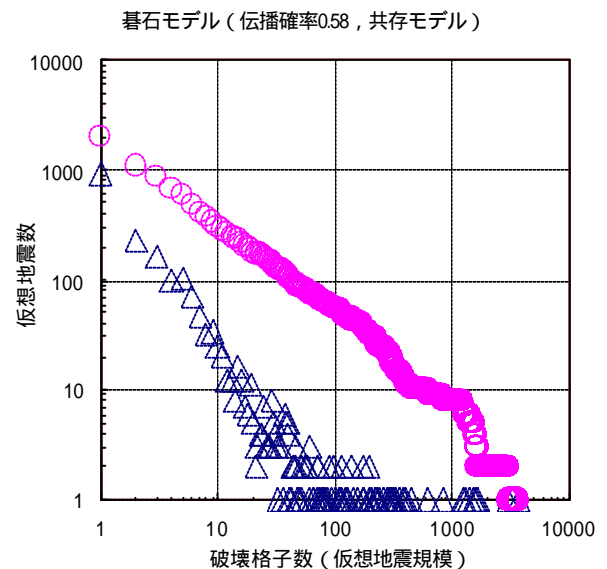


図 10. PC 画面上で 1000 個の破壊クラスタ (仮想地震) の共存を許すモードで破壊伝播確率を 0.58 (2次元浸透モデルの臨界確率近く) にセットしたときの仮想地震のサイズと個数の関係
横軸は破壊クラスタの数, 縦軸は仮想地震の規模別分布を示す. は規模別の個数, はその累積数. G-R 則に似た両対数グラフで直線になる関係(べき分布)が見られる.

点をいつも生徒と議論することになっている. 合わせてこのモデルが如何に自然を単純なモデルに置

き換えているかに注意を喚起し、モデルの有効性とその限界についても常に配慮する必要性を強調することにしている。

）砂山モデル

碁石モデルと同じように格子モデルでG-R則の根拠を示したモデルである。Bak and Tang (1989)はこのモデルから、絶えざる応力下にある地殻が地震を起こしながら自己組織化臨界状態 (Self Organized Criticality) に進化していると論じた。この過程を碁石モデルと同じように生徒実習用プリント作業用紙にしたものが図11である (岡本, 1997b)。計算論理および作業は次のとおり。

プリント格子に 0~3 の状態量を乱数で与え、状態量0のときは空白、1のときは \bullet 、2のときは \circ 、3のときは3重の丸を書いたものを用意する。

格子をランダムに選びその場所の状態量を1上げる。具体的には丸を1つ追加する。これが地殻内にじわじわとストレス(応力)が溜まっていく過程になる。

もし3重丸の場所が選ばれたときは、その場

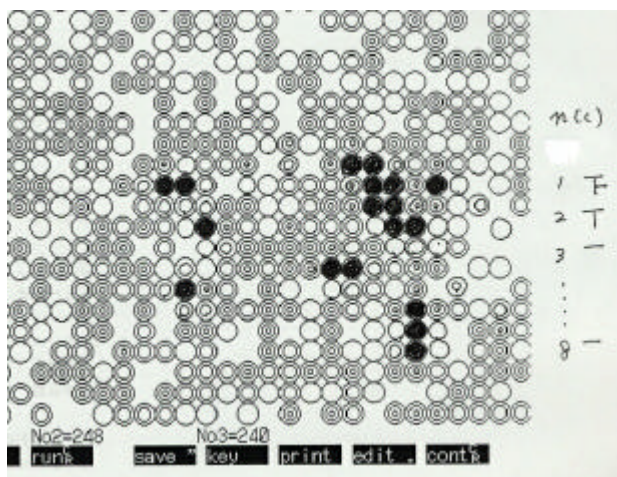


図11. 砂山モデル作業用紙 (通称「ピンズ」モデル)

状態量 0~3 は各格子に $n(t)$ の数で表現。用紙上でランダムにサイトを選ぶため鉛筆を落とし、そのサイトの $n(t)$ を1つずつ上げていく。3重丸のサイトが選ばれるとそのサイトは塗りつぶされ(破壊したとする)、そのサイトのエネルギー(+4)が周囲4サイトに+1ずつ公平に分配される。右端は破壊サイトの区画数を集計している様子。

所を塗りつぶし(ストレスに耐えられず破壊が発生したとする)周囲4点に平等に状態量を1ずつ加算する(丸を追加)。これは破壊のエネルギーが周囲に伝播することを意味する。

に戻り、これを繰り返す。

適当なところで、生徒の結果を集計し、碁石モデルと同じように、仮想地震の規模と個数の関係をグラフにする。

筆者はふざけてこれを**ピンズモデル**(麻雀牌に模して)と呼んでいる。しかし碁石モデルほど生徒には評判は芳しくない。ルールは解りやすいが**作業中に目が廻ると不評**である。これもPC用のプログラムに直して計算表示および結果集計できるものを用意している(図12)。どんな初期値から初めてもあるところで状態0~3の総数が決まった割合に進化する。そして臨界状態に達すると、ときどきシステムをゆるがすような大きな雪崩(つまり地震)が生じる。砂山モデルの特徴はここにきわめて低頻度であるが、システムサイズのカタストロフが生じることであり、モデルの上とはいえ、自然の秘めた性質を垣間見ることができる。教材から離れても地震の起こる様子をスクリーンセーバーのように眺めていると 1/f 揺らぎにも似た安らぎを感じ、興味深い。

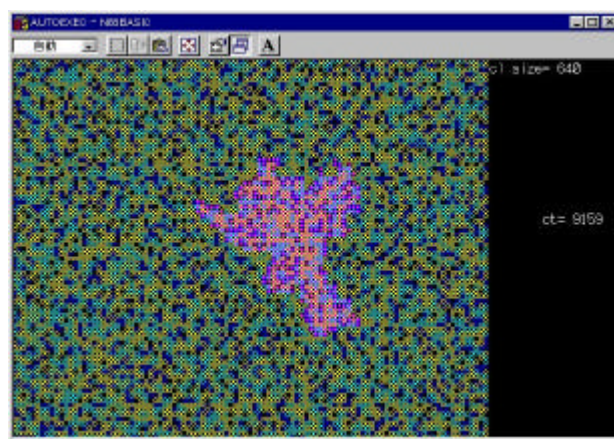


図12. PC画面上の砂山モデル。

色の違いが状態量の違いを示す。中央の塊が破壊が生じた区画。ときどき画面全体に波及するようなシステムサイズの地震が起こるのが興味深い。今は時代遅れとなった感のあるN88BASICによる実行例である。

断層地形侵食モデル

地形侵食モデル(地形進化モデル)もいくつか考案されており,諸外国で現在さかんに研究されているが国内での報告はやや少ないように思う。筆者が教材として使用しているモデルは古い Reviews of Geophysics の記事の中で紹介されていた単純な降雨-格子地形侵食モデル(F. Boger et al, 1991)を独自に改良したものである(岡本, 1998)。基本の計算論理は次のとおり。

わずかな標高偏差を与えた台地上の格子地形上にランダムに雨を降らす。

雨の降ったサイトの周囲8格子のうちもっとも標高の低いサイトに雨粒を移動させる。

その際,元のサイトの標高を $d \cdot (h_1 - h_2)$ だけ減じ,移動先のサイトの標高を同じだけ増やす。

ここで h_1 : 移動元の標高 h_2 : 移動先の標高 d は定数(通常 0.5 とする)

~ の過程をくりかえす。

雨粒がそれ以上動けない凹地や,格子の端面に設定される出口(sink と呼ばれる)に出たときは,雨粒の使命は終わり,次の雨粒が落下する(に戻る)

これが元のモデルによる侵食アルゴリズムであるが,筆者のモデルはそれに,より河川侵食の影響が強くなるように試行錯誤して改良を加えている(詳しくは岡本, 1998 参照)。

この地形モデルで,格子地形上に地震に伴う断層運動を仮定して計算したものを図13, 14に紹介する。断層に伴う運動により地形がシフトしたり,典型的な断層地形ができていく様子が観察できる。現実の地形写真などと対比させるとよくわかる。また計算のアルゴリズムは比較的分かりやすいので,これを生徒に紹介することもでき,複雑な地形に隠された意外に単純なメカニズムに興味を持たせることもできる。ここで,用いた地形の最速降下線をたどるアルゴリズム(Steepest Descending)は,様々な応用が可能であり,筆者は火山地形に適用して,火砕流の流れの再現を試行したことがある(岡本, 1998)。

4 - 4 . その他地震に関連する諸モデル

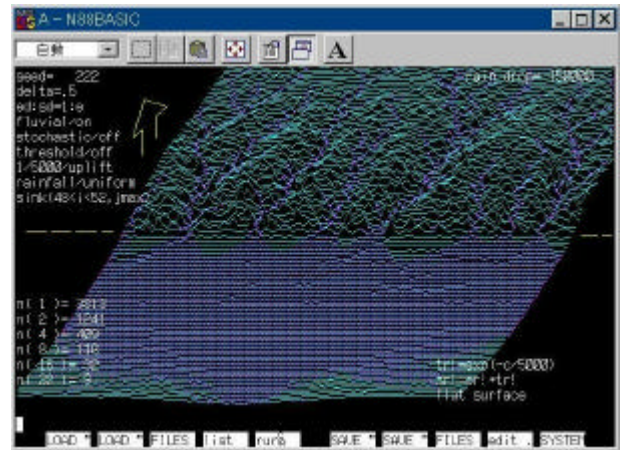


図 13 . 断層による隆起侵食モデル

格子地形の向こう側を一定の速度で隆起させ,侵食させたモデル。末端三角面や合同扇状地などの典型的な断層地形が形成される。N88BASIC による計算で各種パラメータは画面に表示させてある。

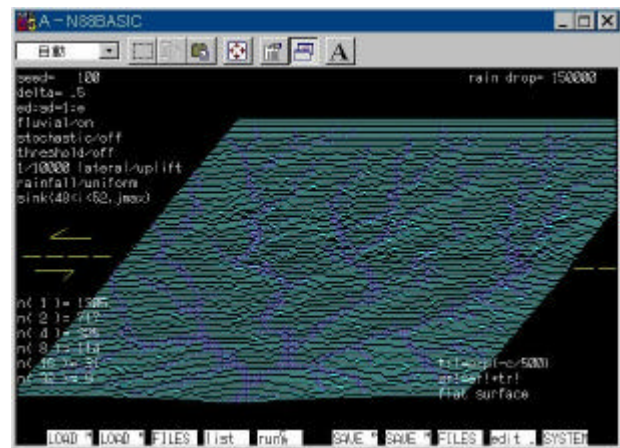


図 14 . 同じく水平横ずれ断層モデル

格子地形の向こう側半分を一定の速度で左横ずれさせ,侵食をさせたモデルで,サンアンドレアス断層などに見られる河川の横ずれ地形が再現される。図で点線の部分に左横ずれ断層をセットした。

<時間予測モデル>

地震予知に否定的な基石モデルを紹介するだけでは一方的なので,今度は地震予知の基本戦略に取り込まれている,大地震予測のための「時間予測モデル」(Shimazaki & Nakata, 1980)を最後に紹介する。この論文では地震時の地形の隆起量と次の地震発生までの間隔が比例関係にある3つの地点での観測例が示される。教材としてはこのうち,房総半島先端近くの千倉町の例を用いている。この地域の2500分の1地形図(千倉町役場作

成，図15に示す。)をもとに4段ある海岸段丘の高さと過去の地震年代をグラフ化して，次の地震を予測するものである．読み取り結果を用いて作成したグラフを図16に示す．



図 15．千葉県千倉町役場作成地形図(1/2500)より海岸段丘の部分．

4 段の海岸段丘が明らかで，これを過去の地震による不連続な隆起による形成と考え，地震の際の隆起量と地震の間隔との関係を読み取る．地形図には標高が等高線と数字で示されているので，読み取りは簡単である．むしろ，どの値を代表値として採用するかで迷う．

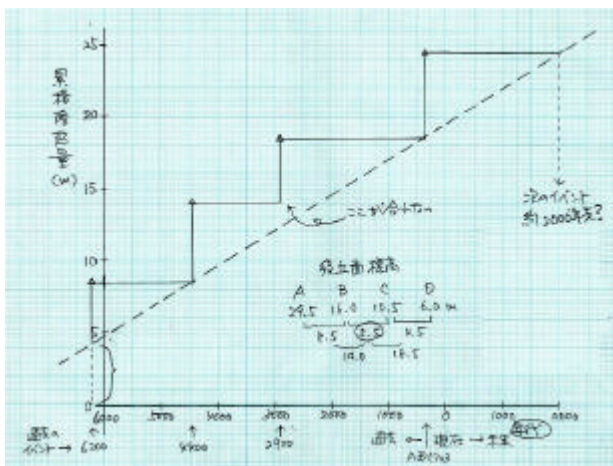


図 16．時間予測モデルのグラフ化の例

上記地形図から読み取った段丘面の高さより，過去の地震での隆起量を計算．過去の地震の年代を横軸に，累積隆起量を縦軸にとった階段上のグラフ．これから，次の地震の再来時期をおおよそ推測することができる．図 15 で段丘面の高さの読み取りをどうするかで，上図のように合わない部分がたりする．

同様の作業を南海地震の室津港の水深データの推移でも行ってみた．この結果はほぼ上記論文の

予測どおりの結果となる．ただしこのモデルが成り立つ仮定，すなわち

この地域に「固有地震」(規模と成因がほぼ同じとみなされる地震)が生じるという前提

プレートの運動速度(地下のひずみ蓄積速度)が一定

地下の応力を蓄える能力に一定の限界の存在という前提が認められたとき初めてこのモデルの有効性が論じられることには注意をはらう必要がある．

5．モデルは地学教育の未来を語るか

昨年の合同大会冊子(根本・岡本・数越, 2003)でも述べたが，地学の特性はその複雑な非線形的自然を扱う点にある．こういったシステムの全体像をとらえるには，観測機器のノイズレベルぎりぎりの困難な観測経験や，露頭を訪ね歩く野外巡検など気の遠くなる地道な“修行”と呼ぶべき経験を必要とした．これがながらく他科目の教員(非専門家)からは扱いにくい科目として避けられ，またあるときはその逆に本質を問わずに記憶だけで対処できる御し易い科目と誤解されていた．

それではモデルはそんな地学を学校で輝かせることができるか？ 筆者が考えるモデルを地学の授業で活用することの重要性は次のとおり．

- 1) 複雑な自然の特徴を抽出しながらいかに単純化できるか？を示しうる．
- 2) 単純なルールであるにもかかわらず結果に生徒の興味を引く複雑性，意外性の発露．
- 3) 仮想自然を作って 現象の違いを観察できる．
- 4) 他分野の意外なメカニズムとの共通性を探せる．
- 5) 計算機との親和性が高く，ゲーム的な手法は，生徒が親しみ易い．など．

さらに最近話題の「キッチン地球科学」の方法論(例えば栗田, 2002)，つまり身近な材料を用いた精緻なアナログ実験と，高性能の民生用機器を用いた観測，観察を併用すれば，生徒への興味付け，関心を高めることは飛躍的に高まる．21 世

紀の地球科学の教育の未来への夢と希望は限りなく広がる。しかし、それだけでももちろん十分ではない。我々は我々だけで存在しているのではないからである。

冒頭に引用した個体群生態学とその数理モデルは我々に幾つもの重要な示唆を与えてくれる。例えば、「**遺伝的多様性を失った種は絶滅しやすい**」(椿, 1997)という教訓。これを理科教育に置き換えれば、地学を排除し物理・化学・生物の3教科で理科を囲い込む動きをけん制する根拠となりうる。また、絶滅に瀕する種の個体群のうち「**小さな群ほど絶滅しやすい**」(MVP 問題, minimum viable population, 上記, 椿の文献)という教訓からは、都道府県のうち、地学開講数や教員数が特に少ない都道府県(柴山, 2000 に詳しい)に何らかの保全の手を打つ必要性をも示している。

一連の生態学関連の仮説のうち、最後の仮説は我々にさらに壮絶な未来を暗示している。それは「**赤の女王仮説**」(Red Queen Hypothesis, Valen, 1973)と名付けられる。ルイスキャロルの有名な童話「**鏡の国のアリス**」(Carol, 1872)で「**みんなが走っている国**」に入ったアリスは支配者の「**赤の女王**」から「**同じところにとどまるためには力の限り走れ。どこかに行きたければその2倍の速さで走るのだ!**」と諭される。この逸話から名付けられた仮説から、生物界のように多くの種が覇権を競っている場においては、生存に向けた自らの進化の競争を闘えない種は絶滅するだけという推理が展開される。自然科学諸領域が学校教育において自らの生存を賭けた闘いに臨んでいる今、否応なく地学教育の未来も「**力の限り、人より速く駆けなければ滅んでしまう**」という危機感を梃子にどこまで関係者が奮闘 (struggle) できるかにかかっていると筆者は考えている。

6. おわりに

筆者がふだん、授業に用いている教材モデルの中から、地震分野に関連するものを紹介した。この他にも小麦粉を用いた断層実験など幾つかのア

ナログモデルもあるが、紙面の都合で割愛した。中には根拠がかなりあやふやなものもあるが、一応、これらのモデルに関する専門家の分析には目を通してきつつもりである。ご批判やご意見をお聞かせいただきたい。またこれらの教材を通して地学が生徒にとって幾らかでも魅力的な科目に変身すれば筆者としては本望なのだがどうだろうか？

なお、ここに記した教材は筆者の個人 Web Page (URL: <http://www.osaka-kyoiku.ac.jp/~yossi/>) で詳細を公表している。教材として何かのお役に立てれば作者として望外の喜びである。

<謝辞ほか>

筆者の同僚である、大阪教育大学附属高等学校天王寺校舎教官柴山元彦博士には、苦勞して集められた地学教育の基礎データをお教えいただいた。また地学教育の行く末についても深く議論していただいた。また大阪市立大学大学院理学研究科講師根本泰雄博士は原稿を読んでいただいて有益なご指摘をいただいた。深く感謝申し上げます。さらに兵庫県立友が丘高等学校の数越達也氏をはじめ日本地震学会学校教育委員会のメンバーには地学教材について有益な議論をしていただきました。碁石モデルの教材化の端緒はかつての勤務校の同僚で現南大阪大学教授松崎光弘氏の発案によるものです。氏からは複雑系に関する数多くの貴重なご教授をいただきました。千葉県千倉町役場からは1/2500地形図を提供していただきました。これらの方々には感謝申し上げます。なお、本論は成り行き上、日本地震学会を代表する形で筆者が書き発表を行うが、もちろん筆者の個人的見解を述べたもので、学会が内容に責任を持つものではないことを付記しておく

<参考文献(引用順)>

- 柴山元彦: 全国の高校地学受講者数の現状, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集 CD-ROM, 2000
- 根本泰雄: 最近 20 年間の日本での小学校・中学校・高等学校における理科・地学教員新規採用状況, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集 CDROM, 2000a
- 根本泰雄: 最近 20 年間 (1979~1998) の小学校教員新規採用

- 状況と中学校・高等学校での理科・地学教員新規採用状況について, 地学教育, 53, 5, 239-248, 2000b
- 岡本義雄: 地学とりわけ地震教育, 次の10年, 日本地震学会 2002 年秋季大会講演予稿集, 2002
- 朝日新聞: 理数離れ, 結果に反映, 2004 年 3 月 17 日朝刊記事 .
- 巖佐 庸: 数理生物学入門, 共立出版, 1998
- 松田裕之: 環境生態学序説, 共立出版, 2000
- 尾崎清明: 日本におけるトキ絶滅の歴史, 科学 67, 703-705, 1997
- Myers, A. and Worm, B. : Rapid worldwide depletion of predatory fish communities, Nature, 423, 280-283, 2003
- Raup, D. : Extinction --Bad Gene or Bad Luck--, W·W·Norton & Company, 47, 1991
- Bak, P. and Tang, C. : Earthquakes as an Self Organized Criticality phenomenon, J. Geophys. Res. 94, 15635-15637, 1989
- 柴山元彦: 全国の高等学校における地学開講状況の変化(1999 年・2002 年), 日本地質学会第 109 年学術大会予稿集 2002 東京都: 平成 15 年度 公立学校統計調査報告書第 36 年 別教員表, 2003
- Shimazaki, K. and Nakata, T. : Time-predictable recurrence model for large earthquakes, Geophysical Research Letters, vol.7, 279-282, 1980
- Abe K. and E. Noguera B. : A fault model of the Sanriku earthquake on March 21, 1960 derived from Tsunami wave forms, Bull. of Nippon Dental Univ.Gen.Edu., 21, 25-38, 1992
- 駒沢正夫・岸本清行: 日本列島周辺域の地形データ(1 km メッシュ), 地震学会ニュースレター, 7, 3-4, 1995
- 岡本義雄: パーソナルコンピュータによる津波の数値シミュレーション - - 奥尻島周辺海域 - - 地学教育 52, 53-62, 1999
- 岡本義雄: Excel を用いた津波シミュレーション, 地学教育の活性化をめざす「情報地学」のカリキュラムとその教材開発, 科学研究費補助金研究成果報告書(代表佐藤昇), 79-83, 2003
- Dziewonski, A.M., and D.L. Anderson, Preliminary reference Earth model, Phys. Earth Planet. Int., 25, 297-356, 1981.
- Kennett, B. L. N. & Engdahl, E. R., 1991. Traveltimes for global earthquake location and phase identification, Geophys. J. Int., 105, 429-465.
- Virieux, J. : P-SV wave propagation in heterogeneous media, velocity-stress finite difference method, Geophysics, 51, 889-901. 1986.
- Astiz, L., Earle, P. and Shearer, P. : Global Stacking of Broadband Seismograms, Seismological Research Letters, 67, 8-18, 1996
- 大塚道男: 地震の起こり方のシミュレーション-第二部 地震の規模別分布-, 地震第 2 輯 24, 215-227, 1971
- 岡本義雄: 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 - - , 大阪と科学教育, 11, 21-26, 1997a
- 岡本義雄: " 碁石モデル" と " 砂山モデル" の教材化, 地球惑星科学関連学会 1997 年合同大会予稿集, 799, 1997b
- 今野紀雄: 確率モデルって何だろう, ダイヤモンド社, 22, 1995
- Meakin, P. : Diffusion limited aggregation, Reviews of Geophysics, 29, 317-354, 1991. (including [Boger et.al., 1991] as a personal communication)
- 岡本義雄: 侵食シミュレーションと " 活断層 " 地形, 地球惑星科学関連学会 1998 年合同大会予稿集, 393, 1998
- 岡本義雄: 地学教材としての火砕流シミュレーション, 地学教育, 51, 97-105, 1998
- 根本泰雄・岡本義雄・数越達也: 地震分野からみた小・中・高での地学系教育のありかた, 地球惑星科学関連学会合同大会特別公開セッション " 地学教育の昨日・今日・明日 " 講演要旨・特別寄稿, 42-45, 2003
- 栗田 敬: Invitation to Kitchen Earth Science
<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/kurikuri/Kitchen1.htm>
- 椿 宣高: 個体群の縮小と絶滅過程, 科学, 67, 740-749, 1997
- Carroll, L. 1872. Through the looking glass and what Alice found there. Macmillan, London.
- V.Valen: A new evolutionary law. Evol. Theory 1: 1-30, 1973
- 岡本義雄 yossi@cc.osaka-kyoiku.ac.jp