地震の起り方のシミュレーション

第一部 一つの機械的モデル

熊本大学理学部物理学教室 大塚 道 男

(昭和 46 年 2 月 4 日受理)

A Simulation of Earthquake Occurrence

Part 1. A Mechanical Model

Michio OTSUKA

Department of Physics, Faculty of Science, Kumamoto University

(Received February 4, 1971)

A mechanical model is proposed which has proved itself quite successful in simulating various characteristic natures of the earthquake occurrence. The structure is demonstrated with some examples of its output.

Further analysis of its operation is expected to yield important suggestions toward understanding the physical processes on which problems of earthquake occurrence are based.

§1. はじめに

日本列島周辺から発散されている地震エネルギーを年ごとに積算してみると、それが非常に特徴的な様子を 示しながら増大していることが坪井 (1964) によつて明らかにされている (Fig. 5 の挿入図参照). 笠原 (1967) はバネとスライダーを沢山もつた機械的モデルを想定しながら計算機の上で坪井の得た地震エネルギー発散の模様を simulate することを試みて可成りの成功を修めた.

笠原がエネルギー放出の面を捉えることに重点をおいたのに対し、ここに述べるモデルを想定すると、エネルギー放出の面を包括し、さらに地震の規模と頻度分布、時間間隔の分布、震源域の移動・拡大など、地震現象のもついろいろな属性に対して良好な相似性が得られる見込みがある. このモデルの構造と動作について報告するのが本論文の目的である.

§2. 笠原のモデルとその背景

筆者のモデルを提示するに先立つて、笠原のモデルとその背景についてのあらましを述べてみよう.

親バネを通じて押される一枚の板がある。この板（仮に板1と名づける）は多数の子バネを並列にもつていて、その先端にはそれぞれ小さなブロックがついている。それぞれのブロックはまた別の固定板（仮に板2と名づける）に摩擦接触をしているとしよう。親バネがしだいに押されて来ると共に板1が少しずつ板2に向かつて移動し、その結果歪エネルギーが親バネのみならず子バネのすべてにもたくわえられて来る。やがて、いずれかの子バネの反発力がブロックと板2との間の摩擦力を超えるとそのブロックに迂りを許して、そのブロックにたくわえられていた歪エネルギーを全部放出するとする。この過程が地震エネルギーの蓄積と放出に見たてられるわけである。あるバネに迂りが起るとそのたびに板1が少しずつ移動する。その結果、それまでの段階で各バネにたくわえられていた歪エネルギーの再配分が起る。そしてそのことが次の迂りの発生に影響を与える。

このようにして、一つの地震の発生が次の地震の発生に影響するというメカニズムによって、地震エネルギーの放出の均一さが支えられているという考えは、同じく地震発生のsimulationを目的とした寺田のモデル（1932）、坪井のモデル（1943）の重要な基盤をなしているものである。

坪井は日本周辺の地震エネルギーの模様を論じた1964年の論文の中で次のように述べている。

“In order that the rate of energy release in the region to be uniform as a whole, its northern end, for example, has to know what is going on in the other end which is at a distance of several thousand kilometers.”

しかしながら、地震発生に伴なつて歪エネルギーを再配分する媒介物とそのメカニズムを自然の中に求めることは可成り難かしい。このことを認めて坪井の論文は次のように続いている。

“How can this be possible in spite of the fact that the earthquake province is several hundred kilometers in horizontal extent at most.”

この種の困難は、上記いずれのモデルにも共通しているもので、永らく筆者の頭を悩ませて来たものであつた。この困難から逃れるためには、いつそこの“コントロール機構”にたよるのをやめるより他ないのではなからうか。

ここに提示するモデルは、この意味での“コントロール機構”を全く欠いていることが後述のことで了解されるだろう。そして、それでもなお、エネルギー放出の面での実際との相似性は保たれるのではないだろうか、というのがこの論文の中の一つの主張でもある。

§3. Simulator の構造

ここに提示する一つの機械的モデルをこの論文の中で仮に simulator と呼ぶことにしよう.

a) 概 観

Fig. 1 は simulator の一部分の見取図である. 固定された天井板に多数の板バネ M が左右等間隔にメッシュ状に植えつけられており, その先端にそれぞれブロック B がついて

Fig. 1. A sketch of a portion of the simulator.

て, G は矢印の方向に一定速度で進んでいるとする. 各ブロックは, さらにバネで隣り合うブロックと縦横に連結されている. 便宜上, 床板面 G 上でその進行方向に y 軸, それと直角方向 (Fig. 1 で右向きとしよう) に x 軸をとる. さて, ブロック同志の連結は, y 方向にはコイルバネ K で, x 方向には板バネ L によつてなされているものとする. 上の連結方法から解るように, ブロックの運動はすべて y 軸方向に拘束されている. このように x 軸と y 軸に非対称性があるのは明らかに好ましいことではないが, x 軸方向の運動を考慮することが今の段階で余り多くの実益をもたらさないという予想と計算時間の経済との関係から決まったもので, こうでなければならないと主張するものではない.

われわれのモデルは x 方向に 100 個, y 方向に 20 個で合計 2000 個のブロックを有する. ここで添字 i は x 軸方向に, 添字 j は y 軸と逆方向に増すものと約束し j 行 i 列のブロックを $B_{i,j}$ と呼ぼう. 左上隅のブロックは $B_{1,1}$ であり右下隅のそれは $B_{100,20}$ である. $B_{i,j}$ に連結されているバネ 5 個を Fig. 2 に示す. $K_{i,j}$, $L_{i,j}$ などはバネの呼び名をあらわすと共に, それらのバネ定数をあらわすものとする. モデルの端の影響を除くため, $K_{i,20}$ は $B_{i,20}$ (共に $i = 1, 2, \dots, 100$) に, また $L_{100,j}$ は $B_{1,j}$ (共に $j = 1, 2, \dots, 20$)

Fig. 2. Nomenclature of a block and spring system.

..., 20) に連結されている。

b) $B_{i,j}$ が元に戻ろうとする力 $F_{i,j}$

$B_{i,j}$ が Fig. 2 に示される 5 個のバネから受ける y 軸の負方向への力を求めてみよう。この力を $F_{i,j}$ と書くことにし, $B_{i,j}$ の位置を板バネ $M_{i,j}$ の支点の真下から測つて $y_{i,j}$ とする。 L, M の長さ, K の元の長さをあらゆる i, j についてすべて等しく h とすると

$$\begin{aligned} F_{i,j} = & K_{i,j} \frac{y_{i,j} - y_{i,j+1}}{h} - K_{i,j-1} \frac{y_{i,j-1} - y_{i,j}}{h} + L_{i,j} \frac{y_{i,j} - y_{i+1,j}}{h} - L_{i-1,j} \frac{y_{i-1,j} - y_{i,j}}{h} \\ & + M_{i,j} \frac{y_{i,j}}{h} = \frac{1}{h} [(K_{i,j} + K_{i,j-1} + L_{i,j} + L_{i-1,j} + M_{i,j}) y_{i,j} \\ & - (K_{i,j} y_{i,j+1} + K_{i,j-1} y_{i,j-1} + L_{i,j} y_{i+1,j} + L_{i-1,j} y_{i-1,j})] \end{aligned} \quad (1)$$

ここで

$$\frac{1}{h} (K_{i,j} + K_{i,j-1} + L_{i,j} + L_{i-1,j} + M_{i,j}) = \phi_{i,j} \quad (2)$$

$$\frac{1}{h} (K_{i,j} y_{i,j+1} + K_{i,j-1} y_{i,j-1} + L_{i,j} y_{i+1,j} + L_{i-1,j} y_{i-1,j}) = \phi_{i,j} \quad (3)$$

とおくと

$$F_{i,j} = \phi_{i,j} y_{i,j} - \phi_{i,j} \quad (4)$$

となる。

ところで今, $B_{i,j}$ のまわりの 4 つのブロックに迂りが発生しないまま G が δ だけ移動したとすると $F_{i,j}$ はどのように変化するであろうか。

与えられた条件から当然着目しているブロックの y 座標はすべて δ だけ増加する。そこで, (3), (4) 式における $y_{i,j}, y_{i,j+1}, \dots$ などにそれぞれ δ を加えて得られる力を $F_{i,j}'$ と書くと

$$F_{i,j}' = F_{i,j} + M_{i,j} \frac{\delta}{h} \quad (5)$$

が容易に導かれる。5 個のブロックの相対的位置は変化しないで板バネ $M_{i,j}$ の歪だけが δ/h だけ増加することを考えるとこのことは当然である。この段階で, もし隣接するブロックが迂りを起したとすると $F_{i,j}$ には更に余分の力が附加される。例えば $B_{i-1,j}$ が ϵ だけ迂つたとすると, それによつて $F_{i,j}$ に附加される力は $L_{i-1,j} \epsilon/h$ であることがわかる。

いずれにしても, このようにして計算された $F_{i,j}$ が $B_{i,j}$ に指定された摩擦力 $R_{i,j}^*(f)$ (の項参照) を超えたとき $B_{i,j}$ が迂りを起すものとする。 G の移動による力の増し高が, “自然増” $M_{i,j} \delta/h$ では迂りを起すに至らないとき隣のブロックの迂りによる附加力によつて迂りを起す条件に達することがある。すなわち, この simulator 内の一つの迂りはそれに隣接するブロックに迂りを誘発しやすい機構になつていのである。勿論のこと, この迂りが隣へ伝播

するかどうかは、隣のブロックの歪力がどの程度臨界値に近いかによつて決まる。

このようにして一種の連鎖反応の結果、いろいろの大きさにまで発達した迂りの塊りが発生するであろう。その塊りの一つ一つを地震一つ一つに見たて、その大きさをもつてその地震の大きさと見たてることしよう。

c) $B_{i,j}$ の迂り量

さて、(4) 式で与えられた $F_{i,j}$ が $R_{i,j}^*$ を超えたとき $B_{i,j}$ の迂りが起ることは前に述べた。ここでは、その迂りの量を求めてみよう。

$y_{i,j}$ の迂り後の値を $y_{i,j}^*$ とすると、それは $F_{i,j}$ を 0 にするようなものであるとする。この仮定は著しく問題を簡単化するのに役立つ。動力学的な観点からは不満足であるが今これはやむをえないとしよう。

(4) 式において $F_{i,j} = 0$ とおくと

$$\phi_{i,j} y_{i,j}^* - \phi_{i,j} = 0 \quad (6)$$

を得る。すなわち

$$y_{i,j}^* = \frac{\phi_{i,j}}{\phi_{i,j}} \quad (7)$$

である。(4) 式によつて

$$\phi_{i,j} = \phi_{i,j} y_{i,j} - F_{i,j}$$

であるから、この式を (7) 式に代入すると

$$y_{i,j} - y_{i,j}^* = \frac{F_{i,j}}{\phi_{i,j}} \equiv S_{i,j} \quad (8)$$

が得られる。 $S_{i,j}$ は $B_{i,j}$ の迂り量をあらわすものであるが結局これは迂りの直前にブロックが受けていた力 $F_{i,j}$ を $\phi_{i,j}$ で割ればよいことがわかる。

d) $B_{i,j}$ の迂りによつて放出されるエネルギー $E_{i,j}$

$B_{i,j}$ が迂る前後において各バネにたくわえられていたエネルギーを比較すると Table 1 がえられる。

Table 1 の第 4 列すなわち各バネから放出されるエネルギーの和を作ると、それは $B_{i,j}$ が迂ることによつて放出されるエネルギー $E_{i,j}$ をあたえる。これを実行して (8) 式を使うと

$$E_{i,j} = \frac{S_{i,j}}{2} \{ \phi_{i,j} (y_{i,j} + y_{i,j}^*) - 2\phi_{i,j} \}$$

(6) 式を使ってこれを変形すると

$$E_{i,j} = \frac{S_{i,j}}{2} (\phi_{i,j} y_{i,j} - \phi_{i,j}) = \frac{S_{i,j} F_{i,j}}{2} = \frac{F_{i,j}^2}{2\phi_{i,j}} \quad (9)$$

Table 1

バネ	たくわえられているエネルギー		放出されるエネルギー
	迂りの前	迂りの後	
$K_{i,j}$	$\frac{K_{i,j}}{2h}(y_{i,j+1}-y_{i,j})^2$	$\frac{K_{i,j}}{2h}(y_{i,j+1}-y_{i,j}^*)^2$	$\frac{K_{i,j}}{2h}S_{i,j}\{(y_{i,j}+y_{i,j}^*)-2y_{i,j+1}\}$
$K_{i,j-1}$	$\frac{K_{i,j-1}}{2h}(y_{i,j-1}-y_{i,j})^2$	$\frac{K_{i,j-1}}{2h}(y_{i,j-1}-y_{i,j}^*)^2$	$\frac{K_{i,j-1}}{2h}S_{i,j}\{(y_{i,j}+y_{i,j}^*)-2y_{i,j-1}\}$
$L_{i,j}$	$\frac{L_{i,j}}{2h}(y_{i+1,j}-y_{i,j})^2$	$\frac{L_{i,j}}{2h}(y_{i+1,j}-y_{i,j}^*)^2$	$\frac{L_{i,j}}{2h}S_{i,j}\{(y_{i,j}+y_{i,j}^*)-2y_{i+1,j}\}$
$L_{i-1,j}$	$\frac{L_{i-1,j}}{2h}(y_{i-1,j}-y_{i,j})^2$	$\frac{L_{i-1,j}}{2h}(y_{i-1,j}-y_{i,j}^*)^2$	$\frac{L_{i-1,j}}{2h}S_{i,j}\{(y_{i,j}+y_{i,j}^*)-2y_{i-1,j}\}$
$M_{i,j}$	$\frac{M_{i,j}}{2h}y_{i,j}^2$	$\frac{M_{i,j}}{2h}y_{i,j}^{*2}$	$\frac{M_{i,j}}{2h}S_{i,j}(y_{i,j}+y_{i,j}^*)$

となる。迂りが伝播して複数個の迂りの塊が生じたときは、その塊から発生する地震エネルギーは $\sum_{i,j} E_{i,j}$ である。ただし和は迂りを起したブロックの全体についておこなう。

e) パラメーターに与えられた数値

ここで具体的に simulator のもつ、諸々のパラメーターに assign された数値について言及しよう。

$$\begin{array}{ll}
 h = 2.0 \times 10^6 & \text{C. G. S.} \\
 K_{i,j} = 5.0 \times 10^{22} \times r_{K,i,j}(\sigma) & " \\
 L_{i,j} = 5.0 \times 10^{22} \times r_{L,i,j}(\sigma) & " \\
 M_{i,j} = 5.0 \times 10^{22} \times r_{M,i,j}(\sigma) & " \\
 R_{i,j} = 5.0 \times 10^{18} \times r_{R,i,j}(\sigma) & " \\
 (i = 1, 2, \dots, 100; \quad j = 1, 2, \dots, 20) &
 \end{array} \quad (10)$$

ただし $r_{K,i,j}(\sigma)$ などは中心の値 1.0 まわりに標準偏差 σ の正規分布をもつ乱数である。 σ として 0.1 の場合と 0.5 の場合を試みた。 $R_{i,j}$ の値は板バネ $M_{i,j}$ の歪 $y_{i,j}/h$ が 10^{-4} 程度になつたときの力を想定して選ばれたものである。しかし $r_{M,i,j}(\sigma)$ や $r_{R,i,j}(\sigma)$ のために任意の i, j に関して $M_{i,j} \times 10^{-4} = R_{i,j}$ が成り立っているわけではない。バネ定数は少し、小さくとりすぎていて、そのためエネルギー放出の模様などに実際との食い違いが見られるが定量的に実際との比較を試みることは後の研究にゆだね、ここではモデルの定性的な動作だけに着目したい。

f) 計算過程

次に計算のあらすじを述べてみよう。

- 1° すべての i, j につき $K_{i,j}$, $L_{i,j}$, $M_{i,j}$, $R_{i,j}$ を assign する。
- 2° 区間 $(0, 1)$ で一様分布する乱数を $r_{i,j}$ とし, $r_{i,j} \times 200$ を $y_{i,j}$ に assign する。
- 3° i, j につき順々に $F_{i,j}$ を計算し, これを $R_{i,j}^* = R_{i,j} \times r_{T,i,j,s}(\sigma')$ と比較する。(ただし $r_{T,i,j,s}(\sigma')$ は標準偏差 σ' で中心値 1 のまわりに正規分布する乱数であり, i, j により, またステップ s ごとに各回独立に変動する。
- そこで, もし $F_{i,j}$ が $R_{i,j}^*$ を超えていれば $y_{i,j}$ を $y_{i,j}^*$ に変え, $E_{i,j}$ を計算して次のブロックへ移る。超えていないか等しければ何もしないで次のブロックへ移る。
- 4° 上の操作を通じて, もし 1 個でも迂りが起れば 3° の操作を繰り返す。迂りが 1 個も発生しなければ, このステップで迂りを起したブロックの数, 位置, エネルギー等を印刷する (Fig. 3 参照)。
- 5° G を δ だけ進め——すなわちすべての i, j につき $y_{i,j}$ を $y_{i,j} + \delta$ に変えて 3° に戻る。

(注)

2° で $y_{i,j}$ に乱数を assign するのは機械が “heat up” する時間を節約するためであるが, こうしても最初のステップで半数以上のブロックが迂りを起し, その後しばらく “seismicity” の低い状態が続いた後, 約 50 ステップで定常的な有様になる。

3° で $R_{i,j}$ に小さな変動を与えるのは気圧変化や地下水流の変化など, いわゆる triggering factor の変動を想定したものである。

4° における Do loop の繰り返しは, 迂りが計算の進行方向と逆向きに起る 可能性のために必要な手段である。

5° の δ としては 1 cm を採用した。

§ 4. Simulator の動作

Fig. 3 はアウトプットの一例である。1 ステップ毎に全ブロックを示す記号が印刷される。そのステップで迂つたブロックは記号 “0” で, 迂らなかつたブロックは記号 “.” で示されている (見やすいように記号 “0” は黒くぬつてある)。各ステップの頭には, ステップ番号の他にそのステップで起つた迂りの数, 解放されたエネルギー, 過去からの積算値が印刷されている。

0 印の塊りが所々に見られ, 前述のことからわかるように, これらはそれぞれ 1 個の地震と見られるが, この中の或る特定の地震に着目してそのエネルギーを計算機に計算させることは, たやすいようで仲々難かしい注文であるらしい。困難な点は一まとまりの迂りを計算機の中で一まとまりと判定することのむずかしさから来る。そこで, ある地震のエネルギーを見積

Fig. 3. An example of output from the simulator.

Fig. 4. The relation between (the number of slips) and (the corresponding total energy release).

るのに次の仮定を用いた。地震のエネルギーは、その塊りを構成する迂りの数に比例するという事である。地震体積を見積るのに単位体積から発生するエネルギーは一定であるとした坪井 (1956) の観点に類似している。解放されるエネルギーはブロックごとに異なっているから、現在の場合、これは厳密には正しくない。しかし、迂りの個数が増大すると共に急速に正当な仮定となることが、Fig. 4 に示される。Fig. 4 はあるステップで、モデル全体に起つた迂りの個数と、そのとき放出された全エネルギー（この節の冒頭の説明及び Fig. 3 参照）の関係をプロットしたものである。点はほぼ 45° の直線に並ぶことが認められ、上の仮定を使つてもエネルギーを $\pm 20\%$ 以上誤つて見積ることはないように思われる。比例定数、すなわち1個の迂りから発生するエネルギーは 1×10^{20} erg としてよいであろう。

ここでわれわれの simulator はどれくらいのエネルギーの幅の現象を再現するかを見てみよう。仮に、Gutenberg-Richter の関係式

$$\log E = 11.8 + 1.5 M \quad (11)$$

を使つて1個の迂りに対応するマグニチュードを求めてみると 5.5 となる。同様の計算から

6個の辺りは $M=6.0$, 200個は $M=7.0$ に, そして 6300個は $M=8.0$ に対応することが解る. われわれの simulator は全体で 2000個しかブロックを持たないから, 結局われわれの simulate できるのはマグニチュードにして 5.5 から 7.0 程度の狭い範囲に限られることを覚悟しなければならない.

a) Energy の放出

Fig. 5 は放出されるエネルギーの積算値をステップ毎に示したものの

である. simulator 全体から放出されるエネルギーを下に, 中央の 200個のブロックを指定して, その部分からのエネルギーを上を示す. ただし, 小区域からのエネルギーを見積るにあたり, 辺りの重心を“震央”と考え, これがその領域内にあるものは, たとえ辺りがその領域外に侵出していても, その分のエネルギーは, この領域からのエネルギーと考えた.

比較のため, 坪井 (1964) によつてまとめられた日本周辺からの地震エネルギーの放出の模様を Fig. 5 の中央上部に挿入した. 小地域についてのプロットを見ると, こまかい点に至るまで, 現実の有様をうまくとらえていることが注目されよう. しかし, 坪井の図に記入されているようなエネルギー収支の上限および下限としての二直線を引くことは, これだけのステップの記録からは成功しない.

一方, 全体からのエネルギー放出の図では, 上の意味での二直線がほとんど完全に定義できて, たとえばステップ 79 で発生して小区域のエネルギー収支に大きな影響を与えている大事件が, 全区域の図でみれば, なだらかな大きな起伏の一部を担っているにすぎないことは興味深い. 大地震の位置づけについて, 何等から示唆を与えるものではなからうか.

ただし, われわれの simulator は現在では, まだ定量的な議論にたえないことは § 3. e) に述べた通りである. たとえば小区域のプロットが現実のエネルギー収支をうまく表現しているとしても, エネルギーの量は著しく少ないし, このとき対象になったブロック数を面積に換算すると $200\text{ km} \times 400\text{ km}$ の区域に対応し日本全体と比較するには余りに狭すぎる.

§ 2. ですでに指摘したように, われわれの simulator はある場所に一つの地震が発生したとき, 歪エネルギーを機構全体にわたつて再配分するメカニズムをもたない.

Fig. 5. The simulated energy release process.

Fig. 6. The relation between (number of slips constituting each cluster) and (the corresponding frequency of occurrence).

とく捉えていることは再三述べた。従つて地震の規模とその発生頻度の関係が地震学でよく知られた式 (11) のごとき関係をみたすかどうかについては何の保証もない。ともかく、試みに塊りの数 n と発生頻度 N を読みとつて $\log N$ を $\log n$ に対してプロットしてみると Fig. 6 のようになる。式 (10) における σ として 0.1 とした場合の結果を左に、0.5 とした場合の結果を右に示す。左の図は右の図の場合に較べて均質な地域についての結果であるとみてよい。

前述のように、このモデルでは、一つの地震のエネルギー E は ne (ただし、 e は迂り 1 個についての放出エネルギー) に等しいとしてよいから

$$\log n = \log E - \log e \quad (12)$$

の関係がある。さらに式 (11) を使うと

$$\log n = 1.5 M + c \quad (13)$$

が得られる。ただし c は定数である。

したがつて Fig. 6 で横軸に $\log n$ を目盛つたことは M を目盛つたことと同値である。ただし自然地震の $\log N - M$ のグラフと直接比較するためには $\Delta(\log n)$ の幅を一定にせねばならない。これをするには n の領域が狭すぎるのでこの詳細の検討は将来の研究にまつことにしたい。

Fig. 6 で注目したいことは $\log N$ と $\log n$ の関係が規則正しく右下りであり、式 (11) を想わせるものであること、しかも不均質な媒質に対応するものの方が下りの勾配が急であり、茂木 (1962) の指摘する所と調和していることである。詳細はともかくとして、ここでは地震の規模と頻度の関係が、このモデルに見られるような一種の連鎖反応の結果生ずるのではない

このようなメカニズムでもエネルギー収支を simulate することができるとすれば、地震エネルギー放出の uniformity をささえているのは、地下からのエネルギーの供給が一定であること (G の進行速度が一定であることに対応して) のみによつていゝるのではなからうか。

b) 迂りの規模と頻度の関係

われわれの simulator では、地震の大きさを“なだれ”の大きさのご

かという示唆にとどめる。

c) じりの起る間隔の頻度分布

a) の項で小区域として用いた同じ区域のブロックに着目して、その中にじりが発生するステップ間隔の頻度分布を調べた。Fig. 7 にその結果を示す。横軸はステップ間隔、縦軸は頻度を示す。実線は式 (10) における σ が 0.1 の場合、点線は σ が 0.5 の場合についての結果である。グラフは可成り良好な直線性を示し、実際の地震において、時間間隔が指数分布すること

Fig. 7. The relation between (interval of successive slips) and (the corresponding frequency of occurrence).

に対応して、じりの起り方が偶発的であることを示している [友田 (1954)].

d) 震源域の拡大・移動

大地震の余震域が時と共に拡大することが明らかにされ [茂木 (1968b)], 同様のことが松代地震の活動についても指摘されている [Kisslinger (1968)]. また、大地震の震央そのものがしだいに移動してゆくことも見出されている [茂木 (1968a)].

われわれの simulator に同様のことが見られるかもしれないという予想のもとにステップ 267 から 277 までの間でモデルの一部で起つたじりの発生の模様を Fig. 8 に示す。都合に

Fig. 8. The development of cluster of slips.

Fig. 9. The comparison of cluster of slips which occurred at a single step and slips which have occurred during the preceding stages.

われわれの simulator はある程度の成功をおさめているように思える。ただし茂木 (1968a) の指摘するような方向性をもった移動は見られない。これには恐らく, simulator には与えられていない重大な地球力学的な意味があるに違いない。

次に, 自然地震の頻発する場所で, 異常に静かな個所があると, その場所を埋める形で地震が起りやすいことがしばしば指摘されていることをとり上げよう (例えば茂木 (1969))。

Fig. 9 は, このことに対する simulation が起つていることを示す例である。ステップ 79 に起つた迂りの範囲を陰影をつけて示す (下図)。また, それに先立つ 28 ステップの間に一度でも迂りを経験したブロックを陰影をほどこして示す (上図)。ステップ 50 までを除外したのは simulator がこの期間では充分 “heat up” していないことによる)。さて, Fig. 9 の上下の図を比較すると明瞭に明暗の模様が入れ変つている所がある。すなわちステップ 79 で大地震が起る地域は以前から “異常に静か” だったのである。小さい迂りの塊りについてはこのような現象は見られない。

§5. おわりに

以上見て来たように, われわれの simulator の動作は可成り自然地震の特性に近い。このことは simulator の構造が自然地震を起すメカニズムの少なくとも一面を捉えていることを示していると見てもよいであろう。この simulator の動作様式を考えることにより, 自然地震発生メカニズムをさぐる糸口を見つけれられるかも知れない。そうなれば幸である。しか

より各コマに表わされているステップ数には多少がある。該当するステップ (またはステップ間) に起つた迂りを黒で, 一つ前のステップで起つた迂りをメッシで, また, それより以前の段階で迂つたものを白で示した。ただしステップ 266 以前のは示さなかった。ここで注目すべきことは黒で示される迂りはメッシまたは白の周辺から発生する確率が非常に高いことである。新たな迂りは比較的新しい “きず” のまわりに起りやすいといえよう。この点でもわ

し、まだ不完全な部分も多い。特に自然地震の起り方を著しく特徴づけている余震の現象の simulation に成功していないのは不満足である。その他 §3. e) に指摘した量的な不一致を含め、明らかに不自然な部分があいふつも見出される。たとえば震源の三次元的分布を説明できないし、地震の原因がすべてマントル物質の流れをおもわせる G のうごきにあるとしている点など、今後の研究にまたねばならない。

本研究にあたり貴重なる御意見をいただいた東京大学理学部竹内均教授、同地震研究所茂木清夫教授に厚く感謝する。また地震エネルギーの放出の模様についての図は、東京大学坪井忠二名誉教授の論文から拝借させていただいた。計算は、九州大学、大型計算機 FACOM 230-60 を使用した。

文 献

- KASAHARA, K., 1967, A Simulation of Energy Release Process in a Seismic Region, Proc. Japan Acad., 43, 483~488.
- KISSLINGER, C., 1968, Energy Density and the Development of the Source Region of the Matsushiro Earthquake Swarm, Bull. Earthq. Res. Inst., 46, 1207~1223.
- MOGI, K., 1962, Magnitude-Frequency Relation for Elastic Shocks Accompanying Fractures of Various Materials and Some Related Problems in Earthquakes (2nd Paper), Bull. Earthq. Res. Inst., 40, 831~853.
- MOGI, K., 1968a, Migration of Seismic Activity, Bull. Earthq. Res. Inst., 46, 53~74.
- MOGI, K., 1968b, Development of Aftershock Areas of Great Earthquakes, Bull. Earthq. Res. Inst., 46, 175~203.
- MOGI, K., 1969, Some Features of Recent Seismic Activity in and near Japan (2), Activity before and after Great Earthquake, Bull. Earthq. Res. Inst., 47, 395~417.
- TERADA, T., 1932, On Swarm Earthquakes, Bull. Earthq. Res. Inst., 10, 29~35.
- 友田好文, 1954, 地震の時間間隔の分布及びこれと地震動の最大振幅の分布との関係に関する統計的記述, 地震 2, 7, 155~169.
- TSUBOI, C., 1943, On Earthquake Energy (II), Kagaku, 18, 392~397.
- TSUBOI, C., 1956, Earthquake Energy, Earthquake Volume, Aftershock Area and Strength of the Earth's Crust., J. Phys. Earth, 4, 63~66.
- TSUBOI, C., 1964, Time Rate of Energy Release by Earthquakes in and near Japan—Its General Uniformity and Varidity, J. Phys. Earth, 12, 25~36.