地震の起り方のシミュレーション

第五部 余震とは何か

熊本大学理学部物理学教室 大 塚 道 男

(昭和 51 年 5 月 14 日受理)

A Simulation of Earthquake Occurrence

Part 5 An Interpretation of Aftershock Phenomena

Michio OTSUKA

Department of Physics, Faculty of Science Kumamoto University

(Received May 14, 1976)

According to the chain-reaction type source model which the author has proposed throughout this series of paper, areas of variety of size in which seismic energy is still left unliberated are known to be dispersed within the source domain of the main shock. The assumption that these regions are cause of aftershock is shown to be successfully applied in explaining various aspects of the phenomena.

§1. はじめに

このシリーズを通じて、筆者は地震の震源での破壊の形式は、一点から始まる確率的連鎖反応に似たものであろうことを主張して来た。筆者は、この過程を碁になぞらえて、碁石モデルと名付けた(大塚, 1971)が、後にこれが浸透モデルの一つのケースであることがあきらかになった(大塚, 1975a)。従つて筆者の提案は、浸透モデルが地震学に応用できるという主張であつたわけである。

筆者がこのモデルの有用性を説いたのは、地震の大きさの分布についての規則性がこれで説明できることに起因していたのであるが実際に震源でそのようなプロセスが起つているのなら、他にもその証拠がなければならない。

本稿では余震という現象をとり上げ、その解釈に浸透モデルが有効に適用されることを示したい。

余震は一般の地震活動との間を明瞭に劃する側面を幾つも備えている。例えば、余震は本震の発生を境にして急に活動度を高めること。その震源は本震の断層の位置を暗示する部分に集中して起ること、しかし、時間が経過するに従い、その活動は一定規則に従つて衰微し、同時

に震源の位置も莫然となり、遂には一般の地震活動に移行すること、一般に大きい本震程強い地震活動と大きな余震を伴う傾向があり、小さい地震では余震を伴うことが少なくなることなどである。

こうした諸々の属性を備えた余震現象が、浸透モデルを導入することにより、統一的に解釈できる可能性のあることを提案するのが本稿の目的である。

§2. 浸透モデルにおける余震とは

さて、Fig. 1 に伝播確率を 0.32 において得られた二次元正方格子における浸透図形の幾つかを示す。地震学的な解釈をすれば、黒くぬりつぶした部分は歪エネルギーがすでに解放された所、白い部分は未開放部分である。これらの図形は乱数の決める所であつて一つ一つがさぶる個性的である。筆者は、その多様性を地震波や被害状況の多様性に、またその大きさの分布を地震の大きさの分布に対応づけることを主張して来たのであつた。

Fig. 1. Examples of focal domain expected from percolation model. Regions where seismic energy is left unreleased within the focal domain are assumed to be origins of aftershocks.

ところで、Fig. 1 の各図形の中には、黒くぬつた部分の内部に点々と白い部分が残されていることが認められる。黒い部分では、すでに歪エネルギーが開放された安定状態が実現しているが、それに囲まれた未解放域は先端集中応力の作用に曝され、僅かなトリガーで安定状態へ移行しやすい、いわばメタステーブルな状態にあると思われる。

そこで、黒くぬつた部分のエネルギー開放という事件を本震の発生と考え、空白部分が次々と埋まつてゆく現象を余震現象と考えよう、というのが本稿の出発点である。

§3. 余震の規模別頻度分布

余震の観測結果を整理すると、そのマグニチュード別の出現頻度が、いわゆる Gutenberg-Richter の関係をみたすことが知られている。また、そのときに求まる B の値が、一般の地震活動におけるそれよりも大きく求まり、一見異なる母集団からのサンプリングの様に見えるという報告も多い。

§2. に述べたような余震の考え方で、上の観測事実を説明できるであろうか。そこである一つのクラスターに含まれる空白部の大きさを、筆者の常に用いる手段（大塚, 1971）によつてマグニチュードに変換し、その頻度分布を作つたのが Fig. 2 の黒丸である。黒丸の並び方は、あきらかに Gutenberg-Richter の関係を想起させるものであることに注意してほしい。

Fig. 2 の白丸は、主震を作るときに与えた伝播確率 $p=0.32$ に対応する頻度分布である。云わば主震系列の規模別頻度分布と思つてよい。地震の頻度分布形式として、白丸の並び方は適当でないのであるが、これは均一な伝播確率 p をもつ二次元格子浸透モデルに固有なもので（丸山：1975）、その点一般の地震観測に経験する直線状分布を説明するためには伝播確率に地域的なゆらぎがあることを想定すればよい

ことが大塚 (1975, b) によつて示されている。従つて、ここで筆者の主張したいことは、余震が Gutenberg-Richter の関係をみたすこと、その分布形式は本震系列のものと全く違うことである。

浸透モデルに何故空白域が発生するのか、なぜ、その大きさが規則性を示すのか、等考えなければならない問題が多く未解決であるが、少なくとも大きさの分布に関して、浸透モデルは都合のいい基盤を与えることは確か

Fig. 2. Magnitude-frequency relation of the simulated aftershocks (solid circles) and of the mainshock series (open circles).

である。

§ 4. 本震の大きさと余震活動の強さ

実際の余震活動において、本震のマグニチュードは、それに伴う余震活動にとって、決定的な意味を持つことが多い。一般的に本震が大きいほど余震活動が高く、余震も大きいものが期待される。また、小さい地震ほど余震を伴わない可能性が大きくなる等である。Fig. 1 の例では浸透図形が小さいものから順に並べてあるが、それぞれの内部にある空白部に着目するとき、元の図形が大きくなる程、独立した空白部の数が多く、最大の空白部の大きさも大きくなることを見ていただきたい。更に一番小さい図形にあつては、空白部は一つもなくなつていくことも注意してほしい。

さて、前述のように図中黒い部分の面積は、本震のマグニチュードに対応すると思われるのでこれを変換して M_0 とし、一方最大の空白部の面積は最大余震に当ると考え、これも同じ仕方にて変換する。Fig. 1 の各図の上には、その値が書いてある。こういう操作を数多くの図形についておこない、 $M_0 \sim M_1$ のグラフにしたものを Fig. 3 の黒丸で示す。

プロットの傾向をはつきりさせるために、暗い蔭を施した。Fig. 3 の白丸は UTSU (1961) によつてまとめられた実際の地震についてのプロットである。実際の地震のデータの方が遙かにバラツキの幅が大きく、その上黒丸の位置が白丸の散らばりの中央に落ちないことも不満足であるが、これはモデルにあつては恐らく実際には存在しない破壊の素量というものを考えていることと、素量からマグニチュードへの変換の方法のまずさ等に起因するものと思われる。

注目したいのは、黒丸と白丸の右上りの傾

Fig. 3. The relation between magnitudes of the mainshock and the largest aftershock. Solid and open circles correspond to the simulated and the real aftershocks, respectively.

向がよく一致していることである。このように本震の大きさが余震活動や最大余震の大きさに関係するプロセスを具体的にさし示し、量的にそれを検討できる基盤を提供できるという意味で、やはり浸透モデルは都合がいい。

§5. 津波の波源域と余震域

IIDA (1963), 羽鳥 (1974) は津波の波源域と余震域 [宇津・関 (1955), UTSU (1969)] が一致することを述べている。

Fig. 4 は、この問題について筆者の考えを模式的に示したものである。我が国に被害を与える津波地震は、一般に太平洋・フィリピン海プレートのスラストにもとづく低角断層の発生によるものと考えてよいであろう。

今、断層面上に Fig. 4 の暗部で示したようなディスロケーションが起つたとする。その結果としての弾性反撥は、そのま上の海底をゆり動かし、津波を発生する。つまり筆者の考えでは、波源域とは断層面に出来た浸透模様の形のディスロケーションの海底への投影なのである。一方、今迄述べてきたように浸透模様の中には、余震の“種”が用意されている。こう考えると、余震域が波源域と一致するという筋書きは、浸透モデルの立場からはいわば当然のことと解される。

Fig. 4. Explanation of the coincidence of the area of Tsunami origin and of aftershock activity.

§6. 震度の領域と余震域

村松 (1975) は、震度 VI の領域と余震域が一致することを見出している。村松の説明通り、震度 V を示すコンターの囲む領域は、あきらかに余震域にくらべて広すぎる。一体、震度のコンターの形と余震域の形の間に相関があることは想像できても、それが震度 V でなく VI である必然性はどこに求められるべきであろうか。

次に、この問題に触れてみたいと思うが、本題に入る前に震度 VI という尺度がもつ意味を考えてみよう。

今、Fig. 5 で暗部は限界一杯の歪をたくわえた領域であり、何かのきつかけでそのエネルギーが、右の方へ弾性波として伝わってゆく状況を示しているものとする。暗部の媒質には

$(1/2)\mu x^2$ のエネルギーが単位体積当たりたくわえられている．ここに μ は剛性率， x は限界歪の大きさを示す．今，このエネルギーが効率 100% で右方の媒質に伝わって力学的エネルギーになつたとするとその運動エネルギーの極大値は単位体積当たり $(1/2)\rho v^2$ となる筈である．

ここに， ρ は媒質の密度， v はその粒子速度の最大値である．上の両者を等置して v を求めると $v = \sqrt{\mu/\rho} \cdot x$ となる． $\sqrt{\mu/\rho}$ は S 波速度であるから，仮りにこれを 4 km/sec とし， $x = 10^{-4}$ としてみると $v = 40$ (cm/sec) となる．つまり 40 kine の附近が，粒子速度の限界値なのではないか．というのが筆者の言いたいことである．

一方震度は，加速度と対応づけられており，河角の式によると，震度 VI の下限は 250 gal になる．これが 40 kine と対応づけられるのではないだろうか．地震波のように非定常的な現象に対して，定常的な見積りをして，余り意味はないかも知れないが，一応 $|\alpha| = 2\pi f \cdot |v|$ という式を使つて必要な周波数を見積ると $f = 1$ c/s となり，余り非常識ではない値がえられる．大分荒っぽい見積りをしたが，数字の細かいことはここでは問題にしないでよい．ただ，VI という震度が，媒質の破壊する領域の近くのみで経験の近くされるものであることが言えればそれでいいのである．

もう一つ，大分地震のとき，住民を対照にして表ら (1976) のおこなつた意識調査の結果は，上に述べた筆者の推測に照して，大変興味深い．彼等は，人々が地震に際して抱いた恐怖感，消火についての義務感などが震度の函数として著しく変ること，震度 VI をこえると人々は絶望的な恐怖感におそわれ，消火活動などは不可能な状態に陥ることを見出した．震度 V 以下と全く違つたことが起ることを思わせる．この結果を筆者は次のように解釈できないかと思う．震度 VI で人が絶望的恐怖を覚えるのは，母なる大地がくづれることを直感したときの動物としての本能に根ざすものではなからうか．この解釈は，やはり震度 VI というものが媒質の破壊領域のみで経験されるものであることをさし示している．

さて，ここで主題に戻ろう．震度 VI の領域とは，上の解釈からすると破壊域に近接した地域にのみ起ることになる．Fig. 6 は内陸の地震につき，震度 VI の領域と余域の一致を説明する図である．内陸の地震にあつては，一般に断層の傾きが大きいので，震度 VI の領域が，波

Fig. 5. Estimation of the maximum conceivable particle velocity of the medium in the proximity of the source domain.

源域における場合と少し違つた解釈が必要となる他は筋書きは変らない。

§7. 余震域の拡大

茂木(1968)は大地震の余震域が時と共に拡大してゆくことを述べている。これと同様のことは観測精度の向上した今日では、小さな地震の余震にも見られることがあきらかにされている。これを浸透モデルの立場から解釈してみよう。

これまでエネルギー解放部分に囲まれた未解放部分を一つ一つの余震に対応させて考えて来たが、ここで Fig. 1 を見直すと完全に黒に包囲されてはいないがほとんど黒に囲まれていると言える部分があることに気付く。事柄が複雑になるので今迄はその部分は避けて、完全に黒に包囲された空白域のみを余震の震源と考えたのであるが、こういう不完全に取り囲まれた部分に何が起るかを考えてみよう。勿論、統計的にであるが、完全に包囲された部分と較べて、こうした部分が受けている応力は少ないであろう。その度合は包囲されている度合に依存し、例えば三方向からとり囲まれているものは二方向のものよりも強い応力に曝されていると思つてもよいであろう。応力のレベルの順位に応じて、空白域が余震になる時間が遅くなると考えよう。一方、浸透図形において、包囲の度合の少ないもの程、統計的に図形の外の方に位置すると考えるのが自然である。

かくして、本震直後には完全に黒に包囲された空白部から先ず余震となり始め、次第に図形の周辺部に存在する不完全な包囲部分の活動へと移つてゆく。これを余震の震源の位置という観点から眺めるとき、その活動域が拡大してゆくように見えるであろう。かくして、浸透図形はしだいに、陥入部分の少ない形となり、最終的には外に対してほとんどが凸な形となつて余震活動の終息を迎えるのではなからうか。

余震の時間的減衰については双曲線型の公式が当てはまることが知られている。この法則も上のような筋書きで解釈できるのではないか、というのが筆者の考えであるが、まだ具体的な方向づけは見つかっていない。

§8. Diffusion と Percolation

筆者は、基石モデルと浸透理論と題する論文の中で、“筆者にとつては捨てるにしのびない

Fig. 6. Coincidence of the area of seismic intensity of VI and of aftershock activity.

基石モデルという名前は、浸透モデルという、いささかいかめしい名前に書き改められねばならなくなつた”と書いた。筆者は、地殻の中に存在する弱線が断層の成長を阻止することを基になぞらえて基石モデルを提案したのであるが、“浸透モデル”という名前をきいてみるといかにもその方がぴつたりするように思えて仕方がない。

勿論、浸透モデルといつても、必ずしも文字通り流体の浸透に適用されねばならないものではなく、筆者の如き発想にもそれなりの意味がある。しかし、どうも流体が直接震源過程に効いているという気がする。そこで当然思い浮かぶのは地震の発生における水の重要性である (SCHOLTZ *et al.*; 1973)。筆者が断層のできる過程と思つていたのは、実は **dilatant** となつた多孔質の地殻に水がしみ込んでゆく姿ではなかつたらうか。若しそうだとしたら **percolation model** が適用されるのは寧ろ当然かも知れないのである。

ただし、厳密な用語の使い方によれば、**diffusion** は拡散であり、浸透 **percolation** とは区別される (堀, 1972)。**diffusion** では空白域は出来ない。従つて余震は起らない。この考えに立つとすれば、余震の起るのは、水の運動が、**percolation** 的であるからということになる。水が主破壊に先立ち **percolation** 的に **dilatant** な地殻に浸透し、領域が決まつた後に主破壊が起るのかも知れない。

§ 9. おわりに

最後に、これまで筆者の述べて来た余震現象の観方に対してぴつたりあてはまる記述として後藤 (1962) の論文の一節を引用させていただく。後藤の論文は次のように述べている。

“余震の分布はしばしば非常に複雑であつて、あるものは枝分れしており、あるものは洞穴状に欠けていて、そこには他の地震の余震が分布するといつた有様で、極端な場合には **focal region** は2つまたはそれ以上にちぎれている場合すらあるのではないかとさえ思える程である。” Fig. 1 の図形が示す複雑さと、多様性を考え併せると大変興味深いものがある。

謝 辞

本研究の遂行に当つては京都大学防災研究所の三雲健博士からいただいた討論が有益であつた。深く感謝するものである。

また、昭和 51 年の春季学会発表に際して、東京大学地震研究所の羽鳥徳太郎博士、および岐阜大学教育学部の村松郁栄博士から貴重なるスライドを拝借した。ここに御礼を述べる。

文 献

- 後藤賢一, 1962, 余震分布と Magnitude との関係について, 地震 2, 15, 116-121.
- 羽鳥徳太郎, 1974, 東北日本太平洋側における津波の波源, 地震 2, 27, 321-337.
- 堀 素夫, 1972, 浸透理論とその応用, 日本統計学会誌, 3, 19-28.
- IDA, K., 1963, Magnitude of Tsunamigenetic Earthquake, Aftershock Area, and Area of Tsunami Origin, Geophys. Papers dedicated to prof. Kenzo Sassa, Geophys. Inst. Kyoto Univ., 115-124.
- 丸山卓男, 1975, 「基石モデル」についての注意, 昭和 50 年度地震学会秋季大会講演予稿集, p 9.
- 茂木清夫, 1968. 大地震の余震域の拡大, 地震研究所彙報, 46, 175-203.
- 村松郁栄, 1975, 烈震域 (震度 VI) と余震域との関係, 昭和 50 年度地震学会秋季大会講演予稿集, p. 75.
- 表俊一郎・甲斐直樹・三浪俊夫, 強震度時の人間の心理・行動—大分県中部地震の場合—, 昭和 51 年度地震学会春季大会講演予稿集 p. 68.
- 大塚道男, 1971, 地震の起り方のシミュレーション, 第二部 地震の規模別頻度分布, 地震 2, 24, 215-227.
- 大塚道男, 1975a, 基石モデルと浸透理論, 地震 2, 28, 96-97.
- 大塚道男, 1975b, 基石モデルは震源モデルとして不適当か, 昭和 50 年度地震学会秋季大会講演予稿集, p. 10.
- SCHOLTZ, C. H., L. R. SYKES and Y. P. AGGARWAL, 1973, Earthquake Prediction, A Physical Basis, Science, 181, 803-809.