

# 物理モデルに基づく六日町断層の 長期評価への取り組み

長 郁夫<sup>1)</sup>・桑原 保人<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

多くの人は、旅行に出かける前に天気予報を確認したことがあると思う。気象庁の資料によると、昨今の天気予報的中確率は80%を超えるとのことである。一方、本稿のテーマである地震のほうは、「明日の地震予報」の実現に程遠い。しかし将来活動する可能性が高いと言われる活断層の周辺に住む人々にとっては、その活断層がいつ活動するのか大きな関心事であるに違いない。実際、地震国日本に住む我々の足もとには、1995年の神戸の地震を起こしたような活断層が2,000以上も走っていると言われている。

もちろん地震の研究者が何もしていないわけではない。最近では、すでに全国の主要な110の活断層について今後30年間の地震発生確率が評価されている。このような評価は長期評価と呼ばれる。政府(地震調査研究推進本部)はその成果をもとに地震危険度の予測地図を作成しているのだから、そのwebページを見たことがある読者もいるかもしれない([http://www.jishin.go.jp/main/p\\_hyoka02\\_chouki.htm](http://www.jishin.go.jp/main/p_hyoka02_chouki.htm))。個人レベルでは「30年間の発生確率」と言われてもピンとこないだろうが、防災の強化や災害軽減のための都

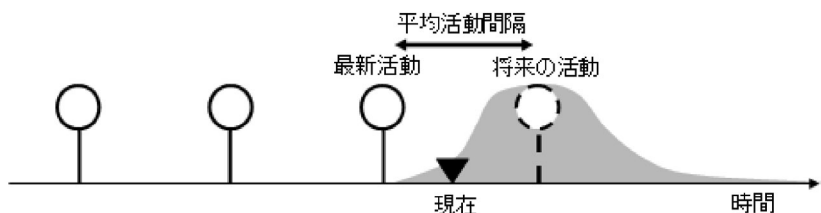
市計画というような比較的長期の計画の中では重要な情報となる。

本稿では、地震危険度予測地図作成の基礎となる、活断層の長期評価について議論する。まずは現在の長期評価法について述べておく。活断層とは、ここ100万~200万年ぐらいの間に、例えば数千年ごとに大地震を繰り返す、今後も活動する可能性のある断層を指す。その活動間隔は断層ごとに異なり、それぞれ固有の繰り返し周期を持つようである。したがって、関心のある活断層の最新の活動時期と平均的な活動間隔を地質調査等に基づいて調べれば、将来の活動時期は、

$$\text{(将来の地震活動時期)} = \text{(最新活動時期)} + \text{(平均活動間隔)} \quad (1)$$

という式で予測できる、というのが現在の長期評価の考え方である(第1図の点線)。ただし関心のある活断層の活動間隔は近隣の地震活動の影響でばらつくため、実際には平均活動間隔と標準偏差の2つで表わされる適当な確率分布(Matthews *et al.*, 2002)(同図の影部)を仮定し、今後数十年間の時間幅で地震発生確率を評価している。

このような中で、2004年10月4日、新潟県中越地震が発生した。地震発生後すぐに我々はその南部域の



第1図 式(1)のイメージ。

1) 産総研 地質情報研究部門

キーワード: 六日町断層, 活断層, 長期評価, 活動間隔, 地震発生確率, 新潟県中越地震, 応力, 誘発地震, 摩擦則, 確率モデル

地震危険度の変化に着目した(桑原ほか, 2005). 新潟県中越地震の本震とその南部域は, 以前から1828年三条地震と1847年善光寺地震に挟まれた地震空白域として大地震の発生が懸念されていた. そこに2004年の地震が発生したが, その南部は依然として空白域であり, そこにはM7クラスの大地震を起こす活断層である六日町断層がある.

しかし, 式(1)による現行の長期評価法では, 六日町断層の評価に新潟県中越地震の影響を考慮することができない. そこで我々は活動間隔のデータを確率分布にあてはめるだけの式(1)の代わりに, (将来の地震活動時期) = (最新活動時期)

+ (近隣の地震活動の1つ1つの影響を物理的に評価した場合の活動間隔) (2)

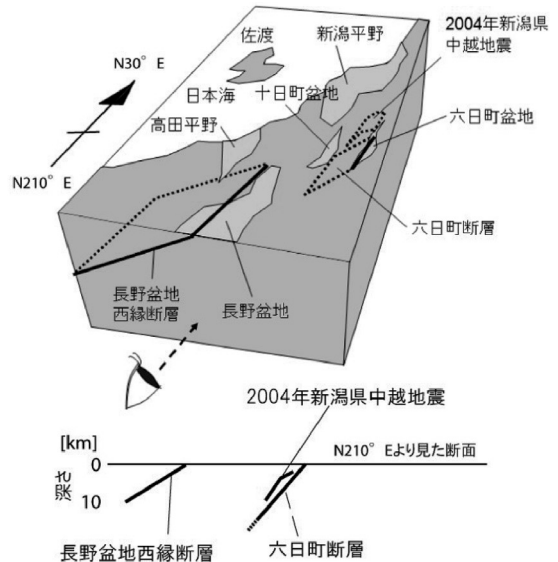
としてはどうかと考えた. 新潟県中越地震を含む近隣の地震活動の1つ1つの影響を物理的に評価することで, 活動間隔がどのように変化するかを適切に見定められないかということだ.

本論の目的は, 式(2)による六日町断層の評価への取り組みを報告することである. 結果的には, 長期評価精度向上という目標への途中経過報告となっている. 最後まで読めば, 実用化までの道のりはまだまだ長いことが分かり, 嘆息されるかもしれない. しかし天気予報にも「腹をこわしたら気象庁と唱えろ」(そのココロは「当たらない」)と言われた時代があった. 地震のほうでは, 現在, 式(1)による長期評価が一段落しつつある. 新たな展開のために今我々が何をしているのかを示し, 批判や助言を真摯に受け止めることが本当の新たな一歩につながると信じている.

第2節で中越地方の活断層について述べ, 第3, 4節で評価の枠組みと適用結果を述べる. 第5, 6節でそれぞれ評価結果の解釈と位置付けを述べる. 本稿は定性的な記述に留めるので, 更に興味があれば長・桑原(2007), Cho *et al.* (2008)を参照されたい.

## 2. 中越地方南部地域の活断層

まず本稿で取り扱う標記地方の活断層を整理しておく(第2図). 評価対象は, 前節で書いたように, 2004年新潟県中越地震の震源域に南接する六日町断層である. 近隣の地震として2004年中越地震と南西に位置する長野盆地西縁断層の活動を考慮した.



第2図 中越地方南部地域の活断層.

長野盆地西縁断層は1847年善光寺地震(第1節)を起こした断層と考えられている. 活断層の活動履歴は, 産総研(2007a), 地震調査研究推進本部(2001)の調査結果を参考として与えた. なお六日町断層の西側には十日町盆地西縁及び東縁断層(産総研, 2007b)があるが, その活動はあまり明らかになっていない. 近年実施された地下構造探査等によれば, そもそも東縁断層は地震を自ら起こし得るような起震断層ではない可能性もある(横倉ほか, 2008本特集号).

まずは, 2004年新潟県中越地震および長野盆地西縁断層の活動が六日町断層に及ぼす影響について, 六日町断層周辺の地震が同断層に及ぼす応力(断層面に作用する力)の変化を計算して, 断層を滑らせようとする力が增加するかどうかを確認した. その結果, 2004年新潟県中越地震および1847年善光寺地震の活動によって六日町断層を滑らせようとする力が, それぞれ, 0.1MPa以上増加したことが分かった(長・桑原, 2007). よって六日町断層は動きやすくなったと言える. 当然の帰結として, 六日町断層の活動時期は早められた可能性が危惧される.

## 3. 新たな評価手法の枠組み

式(2)による長期評価の枠組みとして, 次のような手順を考えた.

手順1) 現実的な活断層の構造や地震の発生様式をモデル化して(以後、活断層の物理モデルと呼ぶ)計算機に入力し、断層運動を数値シミュレーションで再現する。その際、地震の活動間隔が活断層履歴調査から得られている平均活動間隔と一致するようにモデルを調整しておく。

手順2) シミュレーション結果から地震の繰り返しの1周期分を切り出し、その開始時期を活断層調査から得られている最新地震活動時期に合わせる。そして今度は、最新活動時期以降の近隣の地震による応力変化の影響を考慮した上で、シミュレーションを再度実行する。こうして次の地震までの時間がどのように変化するかを調べる。

手順3) 手順2)で用いる情報すなわち着目断層の最新活動や近隣の地震の過去の活動時期は地質あるいは地形学的観察に基づいて推定されるので、通常は大きな推定幅がある。また手順1)で作る物理モデルにしても、断層面の形状や断層の滑り方を支配する法則、断層面の周囲の構造等に曖昧な部分がある。これに対処するために、可能な限りいろいろなケースを想定してシミュレーションを繰り返し、計算結果の統計量を議論する。

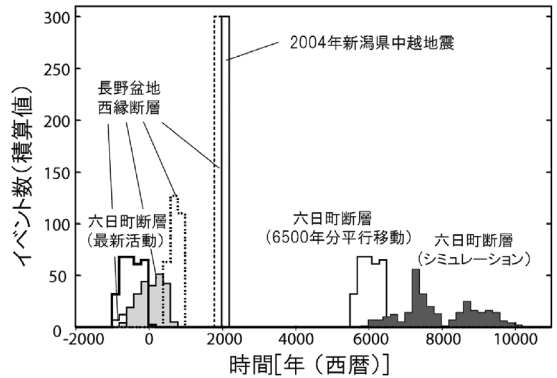
#### 4. 適用

以下に第3節で述べた手順の具体的なやり方と評価結果を述べる。

手順1) 地殻構造として均質な媒質を仮定した。断層面はまず地表の活断層トレースを直線で近似し、そこから地下深部に向かう矩形で表した(第2図)。断層面には滑り速度と滑り面の状態に依存する摩擦力(Dieterich (1979) 等)が作用していると仮定し、室内実験の結果にしたがう摩擦特性を与えた。これを六日町断層の物理モデルとする。

このような物理モデルを計算機に入力して断層運動をシミュレートすると、地震発生層と呼ばれる地殻上部(深さ2-10km程度の範囲)で地震滑りが起き、それよりも深部では断層面に沿って定常的にずるずる滑るような挙動が見られる。計算機の中で時間をどんどん進めてやると、地震発生層で同一規模の地震が一定の時間間隔で繰り返される。

この断層運動は我々の抱くイメージと良く一致している。そこで我々はこの物理モデルを採用して、2次



第3図 シミュレーション結果。

元問題としてシミュレーションを実施した。定常的な滑り速度として地形学的観察から示唆される平均的な断層のずれ速度(1年あたり0.5mm)を与えると、数千年の時間間隔で数m滑るような地震活動が起こるようになったので、活断層調査に基づく地震時の滑り量(3m)や活動間隔(6,500年)に合わせて摩擦法則のパラメータを微調整した。

手順2, 3)シミュレーション結果から地震の繰り返しの1周期分を切り出し、その開始時を実際の六日町断層の最新地震活動時期に一致すると見なした。そしてそれ以降に活動した長野盆地西縁断層および2004年中越地震の活動時期に合わせて六日町断層に応力変化を与え、六日町断層の活動時期の変化を調べた。各断層の活動時期には数百年以上の推定幅があり、我々はその推定幅の中で一様分布を仮定して実現値を与えた。

第3図はこうして300回の試行計算を繰り返した結果得られた各断層の活動時期を幅200年のヒストグラムで示したものである。活断層調査による六日町断層の最新活動時期は推定幅が900年、長野盆地西縁断層の過去4回の活動時期は最新活動を除き推定幅が300年から1,300年だったので、同図の分布幅もそれに対応して広がっている。1847年の長野盆地西縁断層(善光寺地震)及び2004年新潟県中越地震は活動時期が確定しているので、この年に対応する区間の頻度はそれぞれ300回として示されている。同図には、六日町断層の前の活動分布を単に6,500年平行移動した分布も参考としてプロットした。これは近隣の地震の影響を無視した場合の分布とみなせる。

シミュレーションで得られた六日町断層の次期活動時期の分布は式(2)の左辺に対応している。これを単なる平行移動で得られた分布と比較すれば、近隣の地震が次の六日町断層の活動時期を遅らせたことが分かる。シミュレーション結果の分布には2つの山が見えるが、前回の六日町断層の活動時期をBC500年(西暦-500年)とすると、これらの山のピークまでの時間間隔はそれぞれ7,800年、9,200年となる。近隣の地震の影響を与えない場合の活動間隔6,500年に対し、それぞれ20%、42%増となっている。

このように、第2節で述べた簡単な検討による期待とは正反対の結果が得られてしまった。遅れの割合は数10%で、到底無視できる量ではない。我々は当初は計算プログラムのバグを疑ったが、入念なチェックの挙句ついにバグは発見されなかった。その代わりに、シミュレーション結果の詳細な検討により、実は意味のある結果だったということが判明した(次節)。

## 5. 解釈

既に述べた通り、我々の活断層の物理モデルは、地震発生層の深度では断層面が地震時に一気にずれて滑り、それよりも深部では断層面に沿って定常的にずると滑っているようなものである。しかし詳細に見ると、それらの遷移領域とでも呼べるような、中間的な速度で滑っている領域がある。

遷移領域は、例えるならば、ラッシュアワーの電車の入口付近のようなものである。外からは乗客が押し寄せてくる一方、電車の中ほどでは乗客は吊革につかまって落ち着いている。電車の外は深部の定常滑り領域、電車の中ほどは、地震発生層の深度に対応する。入口付近は最も人が混雑し押しくら餓頭になっているが、地震断層の場合もこれに似て遷移領域付近は他の部分と比べておおいに歪んでいる。大きく歪んだバネには大きなエネルギーが蓄えられている。それゆえ遷移領域付近は地震滑りを生じるような地震の種になり得る。

地震滑りを開始する点は「地震の種」ではなく通常は震源核と呼ばれているので、ここでも以下ではそう呼ぼう。震源核の挙動に対する従来のイメージは、普段から目に見えない程ゆっくりした速度でずると滑っているが、時間の経過とともに滑り速度が速くなり、ある時急激に加速して地震滑りに発展する、とい

うようなものである。

今回我々は遷移領域の周辺の滑り方を丹念に調べることによって、震源核の滑り速度は時間の経過とともに単調に速くなるのではなく、地震の活動間隔の10-20%程度の周期でゆらいでいる、ということ新しく発見した。具体的には、我々の物理モデルでは震源核は1年間に数mm程度のずれ量で滑っているのだが、この滑り速度は数百年かけて徐々に速くなり、また数百年かけて遅くなる。交通渋滞だが止まりはせずにアクセルとブレーキを交互に軽く踏む時の車の動きに似ている。次の地震が起こるまでには、このような挙動が何度も繰り返されるらしい。詳しい説明は省略するが、震源核周辺の断層面の摩擦特性を考慮すると、震源核がこのように滑ることは物理的にもあり得ることのように思われる。

滑り速度のゆらぎの振幅は、初めは数%程度と微小である。しかし数千年が経過して震源核周辺に歪が蓄積すると、ゆらぎの振幅は急激に大きくなる。まるでイライラがつのってアクセルとブレーキを踏む脚に力が入るかのようなのである。歪の蓄積が限界に達すれば、ある時点でイライラが許容範囲を超えてアクセルベタ踏みとなるかのように、地震が発生する。

さて、以上は外部から何の影響も与えられない場合の震源核の挙動である。震源核に外部から応力変化が与えられた場合はどうなるか。自然発生的な滑り速度のゆらぎを凌駕するような、振幅の大きなゆらぎが新たに励起される、というのがその答えである。この新たなゆらぎの周期はもとのものと変わらないが、ゆらぎの開始位置が応力変化を与えた時期だということ、振幅が遙かに大きいことが異なる。大振幅ゆえに地震の発生時期はこの新たなゆらぎに支配される。応力変化を与える時期が早まれば大振幅のゆらぎを励起するタイミングも早まるので、地震発生時期も早まる。応力変化を与える時期が遅れた場合はその逆となる。

もちろん、応力変化の時期が早まれば地震発生時期も際限なく早まるということではない。地震発生の間近な時期に見られるゆらぎの振幅の急増のためには震源核の周辺に歪が蓄積する必要がある、これには一定の時間が必要とされるからである。

応力変化の時期が遅れば際限なく地震発生時期が遅れるということでもない。応力変化の時期を徐々に遅らせてやると、震源核周辺の歪の蓄積に要する

時間との兼ね合いから、そのうち周期的なゆらぎの波のうち1つ前のピークが地震となるからである。だから応力変化の時期を徐々に遅らせてやると、ある時突然地震発生時期が早くなるというような不連続な現象が起こる。

本稿の報告によるシミュレーションでは、六日町断層の最新活動と近隣の地震の活動の互いのタイミングではたまたま地震発生を遅らせる傾向が表れた、ということのようである。

## 6. 評価結果の位置付けと今後の課題

以上のように、我々は活断層の物理モデルを計算機に入力して時間を早送りすることにより、震源核で何が起きているかを手にとるように見ることができた。第5節で説明したようなことが震源核で起きているとは、従来はまったく知られていなかった。

ただ、ここで留意しなければならないことは、我々はシミュレーション結果からそれを把握したということである。残念ながら、現実には起きているかどうかを野外観測から明らかにすることはほぼ不可能なぐらい長時間で微小な出来事である。よって第4節の結果が正しく現実を予測しているかという点、現時点では正直なところ確信が持てない。基礎とした物理モデルが本当に現実的なものだったか、パラメータの曖昧さとして十分に広い範囲を考慮できたのか、の2点が気にかかっている。

1つ目の問題「物理モデルの現実性」とは、まず、モデル化の際に過度な簡略化がなかったかということである。例えば今回は計算コスト削減のために2次元問題としてシミュレーションを実施したが、これは過度の単純化ではなかったか。もしそうならば、計算機環境を改善して3次元問題を扱わなければならない。また摩擦法則など実験室で得られた法則は自然地震にも適用できるかという問題もある。この不安を解消するためには、現実の断層運動や活動履歴の再現性という観点でモデルの妥当性を検証する必要がある。

2つ目の問題「パラメータの曖昧さとして考慮した範囲」は、今回のシミュレーション結果は活断層の活動時期の推定幅に起因する曖昧さのみを考慮して得ら

れたものに過ぎない、ということである。今回は計算機環境による計算時間の制限からこのように対処したが、例えば摩擦法則はここで採用したもの以外にも各種存在する。これらの選択幅や摩擦パラメータの推定幅を考慮すれば、地震発生が早期化する可能性も生じるのである。

我々は提案手法による予測の実用性を検証していくために、今後はもう少しの間、上に掲げた2つの問題について検討を進めたいと考えている。

謝辞：本研究の解析では加藤尚之博士から頂いたフォートランコードを改造して用いました。

## 文 献

- Cho, I., T. Tada and Y. Kuwahara (2008) : Stress triggering of a large earthquake complicated by transient aseismic slip episodes, submitted to J. Geophys. Res.
- 長 郁夫・桑原保人 (2007) : 応力トリガリング評価法の高度化のための基礎解析. 活断層・古地震研究報告, 第7号, pp.273-292.
- Dieterich, J. H. (1979) : Modeling of rock friction: 1. Experimental results and constitutive equations, J. Geophys. Res., 84, 2161-2168.
- 地震調査研究推進本部 (2001) : 信濃川断層帯 (長野盆地西縁断層帯) の評価. <http://www.jishin.go.jp>
- Kato, N. and T. Hirasawa (2000) : Effect of large outer rise earthquake on seismic cycles of interplate earthquakes: A model study. J. Geophys. Res., 105, 653-662.
- Kato, N. (2004) : Possible effect of an intermediate depth intraslab earthquake on seismic cycles of interplate earthquakes at a subduction zone. Earth Planets Space, 56, 553-561.
- 桑原保人・今西和俊・武田哲也 (2005) : 新潟県中越地震の震源隣接域における微小地震観測. 地質ニュース, no.607, 34-38.
- Matthews, M. V., W. L. Ellsworth and P. A. Reasenber (2002) : A Brownian model for recurrent earthquakes, Bull. Seismol. Soc. Am., 92, 2233-2250.
- 産業技術総合研究所 (2007a) : 六日町断層帯の活動性および活動履歴調査. 「基盤的調査観測対象断層帯の追加・補完調査」成果報告書 No.H17-3.
- 産業技術総合研究所 (2007b) : 活断層データベース, 研究情報公開データベース. <http://riodb02.ibase.aist.go.jp>
- 横倉隆伸・伊藤 忍・山口和雄・加野直巳・大滝壽樹・牧野雅彦・住田達哉 (2008) : 反射法探査による新潟県十日町断層帯周辺の地下構造. 地質ニュース, no.649, 23-31.

CHO Ikuo and KUWAHARA Yasuto (2008) : A physical-model-based approach to long-term forecasting of the Muikamachi active fault, Japan.

<受付：2008年7月8日>