

内陸地震の物理モデルと予測

桑原保人¹⁾

1. はじめに

本稿では、活断層・地震研究センターの地震発生機構研究チームのメンバーが中心となって進める、物理モデルにもとづいた活断層の地震の発生時期と規模の予測技術確立のための研究を紹介する。物理モデルにもとづく予測がどのようなものかについては次章以後で説明するとし、まずこの章では内陸地震の予測手法の現状とその問題点を述べることにする。

内陸地震の発生時期と規模の予測は、現状では主に活断層の過去の地震発生履歴のデータと、地表トレースの幾何学的な特徴を利用して、経験的な手法によって行われている。発生時期の予測については、活断層のトレンチ調査等から得られる最新活動時期、平均時間間隔とそのばらつきのデータと、地震活動の時系列的な特徴を表現できる統計的なモデルにもとづいて、今後30年間での地震発生確率が計算され、これが活断層の長期評価結果として公表されている(島崎, 2001; 地震調査研究推進本部 地震調査委員会, 2001)。地震規模の予測については、いわゆる松田の5kmルールと言われる経験則(松田, 1990)にもとづいている。地表に現れている活断層の形状を見て、ほぼ同じ方向に延びる複数の活断層が5km以内に隣接して分布する場合、それらは連動して地震を発生させる1つの断層としてみなして活断層の長さを評価する。次に、松田(1975)の活断層の長さ地震の規模の経験則を利用して地震の規模が評価されている(地震調査研究推進本部, 1997)。

以上のように地震の発生時期と規模の予測は経験的な手法のみに頼っており、活断層に応力が蓄積し、それが臨界に達したときに地震発生に至るといふ物理的なプロセスは考慮されていない。このような

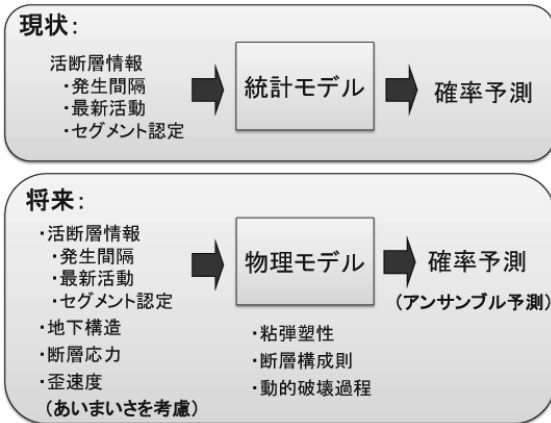
手法では、地震発生時期に関しては、数千年という非常に長い地震の繰り返し時間間隔の活断層を対象にする場合には、そのばらつきが数百年程度という値になる。そのため今後30年間でみた予測の精度は原理的にあまり良くはならないということになる。規模の予測についても、経験則を得るときに用いているデータ数があまり多くないために、信頼性や適用性に疑問が残ること等の問題がある。そして将来的にもこのような経験的な手法を用いる限り、上記のような問題点を解決することは難しいと言える。次章以後で、これらの問題点を解決する方法として物理モデルにもとづく予測を提案し、その基本的な考え方と予測手法確立に向けた研究計画を紹介する。

2. 物理モデルにもとづく予測の現状と発展性

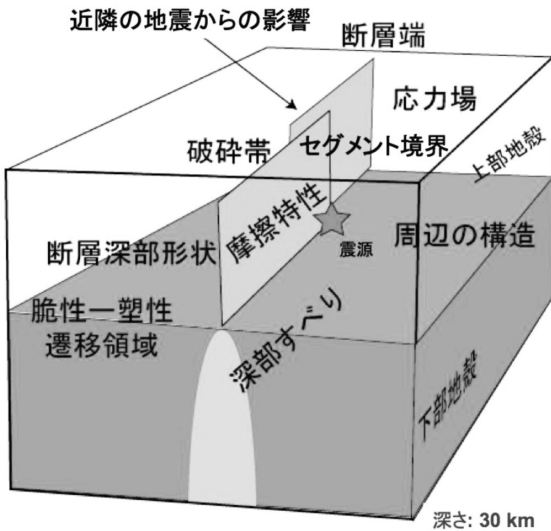
本稿で扱う物理モデルにもとづく予測とは、具体的には、内陸地震の発生や断層上の破壊伝搬の物理的なメカニズムにもとづいて、活断層の地形・地質学的情報以外にも地球物理学的な観測データを取り入れながら、計算機上で地震発生の数値シミュレーションを実施し、地震発生の時期や規模の予測を行うことを意味する。ここでは、第1図に示すように断層を含む地殻は固体力学で扱う弾性・粘性・塑性の性質をもつモデルとする。また、断層でどのようなすべりが起こるのかを記述するための法則としては、研究の進展が著しい最新の断層摩擦構成則を利用し、断層上の破壊の伝播は動的な効果も取り入れたものを考慮する。また物理モデルの中で必要な地下構造や断層にかかる応力の状態は非常に大きなあいまいさをもっていることにも注意する必要がある。これらのあいまいさを考慮した予測を行う方法として、天気予

1) 産総研 活断層・地震研究センター

キーワード: 内陸地震, 活断層, 物理モデル, 予測, 地下構造, 地殻応力, 数値シミュレーション, 連動破壊, アンサンブル予測



第1図 内陸地震の規模と発生時期の予測方法の現状と将来。



第2図 内陸地震の発生予測のための物理モデル構築に必要な研究要素。

報で用いられるアンサンブル予測の手法を参考に、あいまいな入力パラメータについて考える範囲内で可能な限り多くのシミュレーションを実施し、それらのシミュレーション結果の平均値や分散を用いることで確率予測を行うことが適当であると考えられる。

これまで、物理モデルを構築するために内陸地震の発生場を理解しようとする研究は数多くなされてきたが、物理モデルにもとづいて上記のような予測まで行おうという取り組みはほとんどなされていなかったのではないだろうか。それは次のような理由によると考えられる。実際にある特定の活断層についての地

震発生の物理モデルを構築するためには、第2図に示すような地下構造や応力状態、断層形状等のパラメータに関する具体的で膨大な調査データが必要になってくる。ところが現状では、実際の地下の応力状態や断層形状を含めた地下構造等の情報は非常にあいまいで不十分なものである。このような状況で将来の地震発生時期や規模を予測することは、場合によっては現状の経験的手法よりもさらに精度が悪くなることは容易に想像できる。また、海溝型の地震に比べ、内陸の地震の場合は断層にどのように応力が蓄積し最終的な地震発生に至るのかが分かっていないという問題もある。以上のような問題点を考えたとき、物理モデルによる予測の取り組みについての時期尚早感があったのではないと思われる。

しかし、1995年兵庫県南部地震以後に地震調査研究推進本部(1997)によって国の基盤的調査観測として整備した、Hi-netやGEONETをはじめとする地震観測網、GPS観測網や多くの活断層調査によって活断層やその周辺の地下に関する情報が格段に増えてきた。さらに飯尾(2009)に見られるような内陸地震の発生過程を説明できる可能性のあるモデルが提案されてきたこと等もあり、物理モデルによる予測への取り組みに必要な土台が整ってきた段階と考えられる。恐らく現状の知識では大型の計算機を用いて天気予報を行うように地震の予報を行うことは不可能であろうが、今後、断層形状や地下構造の探査精度向上、応力状態の解明が進み、地下情報のあいまいさを減らすことができれば、それに応じて物理モデルにもとづく予測精度の向上が期待できる。このような観点から、予測を実際に行うためには現状の我々の知識として具体的に何が不足し、今後何をやるべきかを明らかにするという意味でも、物理モデルにもとづく予測に取り組むべき時期が来ていると考える。

物理モデルによる予測を進めることによって次に述べるような利点も考えられる。2004年新潟県中越地震の直後には本震震源域周辺に分布する六日町断層帯や十日町断層帯にはたらく応力の増加が推定されたが、これらの活断層で発生する次の地震の発生時期をどの程度早めたのかは定かではない。2005年福岡県西方沖地震でも、この地震の震源域の東側に隣接する警固断層への影響が懸念されている。物理モデルにもとづいた予測の発展段階として、ある活断層の隣で大きな地震が発生した場合にその影響を

評価することが可能になると思われる。また実際に現実的な活断層の物理モデルを作成していく過程では、近隣の大地震が活断層にどのような影響を与えるかを詳しく観測し、物理モデルから予測される現象と比較しながらモデルそのものを精緻化していくことが必要である。

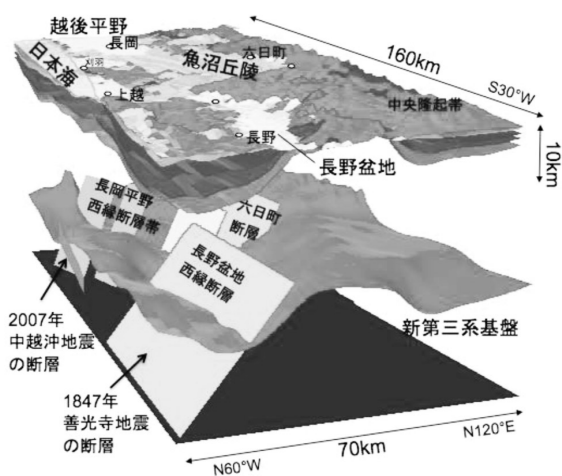
以上のような考え方のもと、我々はこれまでに主に新潟中越地域の地震発生予測モデルの構築に取り組んできた。取り組みの一部は地質ニュース2008年9月号で特集号として紹介した(例えば、桑原, 2008)。中越地域での取り組みは比較的狭い領域で短い断層区間を対象とするもので、予測シミュレーションも活断層の走向方向の構造の変化や断層の端の存在を考慮しない2次元的な取り扱いを試すのみであった。2次元的な取り扱いによる限界や予想されなかった現象も見いだされ、今後は本格的な3次元の扱いが必要と認識された(Cho *et al.*, 2009)。このような背景のもと、我々は内陸で最も発生確率の高い活断層にランクされる糸魚川-静岡構造線断層帯を主な対象として、地下構造のモデル化手法、応力状態の推定手法、情報のあいまいさの取り扱い方を含めたシミュレーション技術の向上に取り組むこととした。

3. 予測手法確立のための各研究テーマ

内陸地震の物理モデル構築のためには、第2図に示すような断層形状を含む周辺の構造、地殻応力、断層深部延長部の状態等を知らなければならない。これらの中でも特に重要で、また研究の進展が遅れていると考えられる以下のテーマについて重点的に研究を進めることとし、またそれらの情報のあいまいさを考慮したシミュレーションの取り組みを紹介する。

3.1 地下構造のモデル化

地下構造のモデル化は地震発生の物理モデル構築の基本となる。地質図等に記載された地質学的情報に加え、重力、反射法地震探査、地震波トモグラフィ等の結果や地質構造発達史等も総合的に検討して、最終的な地下構造モデルや地下深部の断層形状を推定することになる。長ほか(2006; 2008)では新潟中越地域について、長谷川・西開地(2005)に準じて地質図を元にした地質構造形成史を考慮し、3次元的な地殻構造モデルの構築法を示した。第3図



第3図 中越地域を中心とした地域を対象とした地下構造モデル(長ほか, 2008)

は中越地域を中心に、2004年中越地震、2007年中越沖地震、1857年善光寺地震の震源断層を含む領域で作成した地下構造モデルの例である。このような地下構造モデル作成は、可能な限り多くのデータをコンパイルし、地質学と地球物理学の研究者が共同して、できるだけ多くの専門家が納得できるようなものに仕上げる必要があり、多大な労力を必要とするものである。しかしこのようなモデルが完成することによって、その後長期間にわたって地域の地下構造標準モデルとして機能することになる。このモデルは、地震発生の問題以外にも、地域を対象とした様々な工学的な問題等にも応用可能になると考えられ、その効果は大きいと言えるだろう。

3.2 地下の応力状態の評価

我々は現在、1) 活断層の地震の破壊の開始点である断層最深部の深さおよそ15kmの領域、2) 地震発生層と言われるおよそ5~15kmの深さの範囲と、3) 微小地震が発生しない浅い領域での3つの深度領域に分けて、それぞれ異なる方法で応力場を評価する手法を提案している。1)の領域については活断層・地震研究センター地震素過程研究チームが実験的な手法を取り入れながら検討することになっている(増田ほか, 2009)。2)については、例えばImanishi *et al.* (2006)や今西ほか(2006)は断層近傍でマグニチュード(以下、M)0程度までの発震機構解を安定的に求

め、断層近傍の応力場を推定する手法を提案している。これは、Hi-net等の定常観測点の配置の間を埋めるようにほぼ5km間隔で臨時観測点を配置することで、活断層近傍で発生するM0程度までの微小地震のメカニズム解を求めるものである。Hi-net等の定常観測だけのデータでは通常M2程度以上の地震でないとメカニズム解が求まらず、応力場を知るために十分な数のメカニズム解データを収集するのに何年もかかっていた。これが、M0程度の小さな地震のメカニズム解までもとめることによって、例えば糸魚川-静岡構造線ではほぼ1年間の観測で十分なデータが得られるようになった。3)の浅部については桑原・木口(2006)は、応力測定値はばらつきが一般に非常に大きいため、少ない測定データでは応力場に関する結論を得ることは難しいと考え、できるだけ多くの地点で測定ができるように比較的安価に応力方位を測定する手法を提案した。これは、まず深さ20m程度のボーリング孔を掘削し、掘削直後のボーリング孔の形状変化を測定しその形状から応力場を推定しようとする方法である。現在我々はこの手法を様々な場所に適用しながら、その可能性と限界を明らかにしようとしている。特に、2)で説明した微小地震による方法が適用できないような、微小地震が起こっていない無地震の地域では、このような方法に頼る以外に応力場を推定する方法はないであろう。

3.3 情報のあいまいさとシミュレーション

計算機シミュレーションの具体的な数値計算法については、基本的には、扱う問題と計算速度・必要なメモリー容量を検討した上で選択することになる。我々は現在、2章で述べたように、実際の予測では、物理モデルのもつ不確定要素が多く、モデルの中の様々な境界条件や応力状態を変化させながら計算する必要があると考えている。そして予測としては、それらのすべての結果のアンサンブルの中での確率的な予測である、いわゆるアンサンブル予測を行おうと考えている。したがって非常に多くのパラメータで計算を行う必要があり、計算の高速性が強く要求される。このために、Kase and Day (2006)や加瀬(2009)は、地震規模の推定のためには不規則な断層形状と様々な応力状態のもと各断層セグメントの連動性を評価する数値シミュレーション技術を開発している。現状では、比較的取り扱いが容易な横ずれ断層系につ

いてはある程度高速な計算が可能になってきており、今後は糸魚川-静岡構造線断層帯にも応用できるように、逆断層系にも適用可能な計算法を開発していく予定である。

地震発生時期については、地震の繰り返しを対象にした数千年単位の地震サイクルのシミュレーションの研究を実施している。長・桑原(2007)やCho *et al.* (2009)では、新潟中越地域で地震空白域として認識されている六日町断層を想定した地震発生シミュレーションを実施した。その結果は非常に驚くべきもので、これまでの常識では2004年の中越地震は六日町断層の次の地震の時期を早める効果があるとされていたが、シミュレーションの結果は必ずしもその常識の通りにはいかないものであることを示した。ただし、このシミュレーション結果は2次元モデルでのものであり、より現実的な3次元でもそのような結果がでるのか、さらには与えた断層摩擦構成則が本当に妥当なものであるのか等、いくつかの重要な問題も残されているとされた。今後はそれらを解決するための研究が必要であると考えている。

4. まとめ

以上述べてきたように、物理モデルによる内陸地震の予測の研究は、基本的には、地質学と地球物理学で積み上げてきた既存の知識をいかに組み合わせるかで予測に結びつけるかの方法論の研究が主となるものである。現段階では実際の予測として社会に発信可能な情報を提出することはかなり難しいと考えられるが、一方で、実際に予測を行おうとすることで、これまでの知識のどの部分が不十分で、今後どのような研究の方向を取るべきかを鮮明にしてくれる。このことが予測へ向けた研究を加速させてくれるものと期待できる。

謝辞：本稿で述べた内容の多くは、活断層・地震研究センター地震発生機構研究チームのメンバーである木口 努、今西和俊、長 郁夫、加瀬祐子、多田卓、松下レイケン、中井未里の成果やメンバーとの議論にもとづくものである。記して感謝したい。

参考文献

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, 7, 273-292.
- 長 郁夫・西開地一志・柳沢幸夫・長谷川 功・桑原保人(2006): 地質構造形成史に基づく3次元地質構造のモデル化-新潟県中越地方南部の地震空白域を例として, 日本地震工学会論文集, 6, 74-93.
- 長 郁夫・桑原保人・長谷川 功・柳沢幸夫・関口春子・堀川晴央・吉見雅行・吉田邦一(2008): 新潟県中越地方の3次元地質構造モデルのデジタルデータ, 地質調査総合センター研究資料集471, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- Cho, I., T. Tada and Y. Kuwahara (2009): Stress triggering of large earthquakes complicated by transient aseismic slip episodes, *J. Geophys. Res.*, 114, B07310, doi: 10.1029/2008JB006125.
- 長谷川 功・西開地一志(2005): Geomap3Dを用いた3次元地質構造モデルの構築—つくば地域, 中越地震震源域を例として—(演旨), 情報地質, 16, 2, 76-77.
- 飯尾能久(2009): 内陸地震はなぜ起こるのか?, 174p, 近未来社.
- Imanishi, T., Y. Kuwahara, T. Takeda and Y. Haryu (2006): The Seismicity, Fault structures and stress field in the seismic gap adjacent to the 2004 mid Niigata earthquake inferred from seismological observation, *Earth, Planets, Space*, 58, 831-84.
- 今西和俊・長 郁夫・桑原保人・平田 直・Y. Panayotopoulos (2006): 糸魚川-静岡構造線活断層系中・南部域における微小地震の発震機構解, 活断層・古地震研究報告, 6, 55-70.
- 地震調査研究推進本部 地震調査委員会(2001): 長期的な地震発生確率の評価手法について 46p.
- 地震調査研究推進本部(1997): 地震に関する基盤的調査観測計画, 38p.
- 加瀬祐子(2009): 動的破壊シミュレーションから推測される連動型地震におけるすべり量と断層長のスケールング則, 月刊地球, 31, 287-293.
- Kase, Y. and S. Day (2006): Spontaneous rupture processes on a bending fault, *Geophys. Res. Lett.* 33, L10302.
- 桑原保人(2008): 中越地域の地震発生予測の研究の特集にあたって, 地質ニュース, 649, 8.
- 桑原保人・木口 努(2006): 地殻応力方位測定法-岩盤のクリープ変形を利用した新しい技術開発, 検査技術, 11, 28-33.
- 増田幸治・佐藤隆司・重松紀生・高橋美紀・上原真一(2009): 地震発生層における地震素過程の解明, 地質ニュース, 663(本特集号), 19-22.
- 松田時彦(1990): 最大地震規模による日本列島の地震分帯図, 東京大学地震研究所彙報, 65, 289-319.
- 松田時彦(1975): 活断層から発生する地震の規模と周期について, 地震2, 28, 269-283.
- 島崎邦彦(2001): 大地震発生の長期的予測, 地学雑誌, 110, 816-827.

KUWAHARA Yasuto (2009): Physical model for long-term forecasts of inland earthquakes.

<受付: 2009年9月1日>