

## 物理法則に基づく予知理論構築のシナリオ

—これからの課題と第7次計画への提案—

大 中 康 譽

東京大学地震研究所

(1992年4月20日)

地震予知を実現するためには、観測は重要な一方の柱であるが、他方の柱として地震予知理論の構築・体系化の問題がある。予知理論が確立すれば、予知観測や前兆の判定、地震発生予測などに科学的根拠と合理的指針が与えられる筈である。従って、両者の関係は車の両輪に例えられよう。科学的基盤に支えられた地震予知手法の確立を目指すには、地震発生過程と前兆現象発現のメカニズムを正しく把握し、その支配法則及び因果関係を解明し、予知理論を構築・体系化する必要がある。しかし「地震予知計画」の枠組の中で、この分野の研究は現在大きく立ち遅れているようにみえるので、今後この方面の研究を推進するためには、具体的に何をすべきかについての私見を簡単に述べたい。

地震予知計画は第6次5か年計画の最終年度を現在迎え、十分とは言えないまでも、これまでに『地震前兆現象』といわれる観測データが数多く蓄積されてきた。しかし、蓄積されたデータからは、どの地震にも共通して先行する必然的、普遍的な前兆現象が存在するのかしないのか、或いはどのような条件が満たされたとき個々の前兆項目が発現するのかといった、『地震前兆現象』の発現条件や因果関係にかかわる基本的問題についての答えを得るのは難しいというのが現状である。

以上の疑問に答えるには、地震発生過程の物理を確立することが最もオーソドックスな方法であるが、そのためにはまず、

- i) 地震発生過程を支配する物理法則 (構成関係) と
- ii) 地震が現実に発生する場の性質 (物理的, 化学的, 幾何学的)

を解明することが基本的に重要であろう。破壊過程を記述する基礎方程式 (系) が確立し、地震発生場の性質がある程度まで明らかになると、地震発生過程のモデリングや計算機を用いたシミュレーションが可能になる。計算機によるシミュレーションが困難な問題は室内実験によるシミュレーションという方法もあるが、いずれにしても、従来経験的・帰納的方法のみに依存していた予知研究に演繹的手法を導入して補完することは、これまで解決困難であった問題をより早期に解決しうるメリットがある。因果

関係の解明や予知理論構築には、演繹的アプローチをとるメリットは大きい。地震は、力学的弱面に沿って動的に伝播するすべり破壊過程であると考えられているから、力学的弱面に沿うすべり破壊過程を支配する構成関係(式)を確立することが、i)の地震発生過程を支配する物理法則を明らかにすることになる。すべり破壊過程を支配する構成関係(式)は最終的には実験的に検証する以外に方法がない。又、各種前兆現象の発現は地震が現実に発生する場の性質に強く依存する筈である。従って、リソスフェア内の個々の地震発生場の物理化学的性質や構造不均一性を把握することが極めて重要になる。

プレートテクトニクスの発展した現在、プレート境界地震のみならずプレート内地震についても、地震が同一場所で繰り返し発生することの合理的説明は可能である。直下型地震は多くの場合プレート内地震であるから、応力の蓄積過程がより複雑でかつ応力の増大速度が著しく低いという点を除けば、地震発生サイクルは基本的には変わらないと考えられる。又、近年すべり破壊核形成過程の研究(大中, 1991 参照)が進展したことにより、地震発生サイクルのシナリオをより物理的視点から描くことも可能になっている。これらを考慮して、地震発生サイクルを次の5段階に分けて考える: I) 強度の回復とテクトニック応力の増大によるリソスフェアの弾性変形(歪エネルギーの蓄積)過程, II) 不均質リソスフェアの局所的弾性変形の進行過程, III) 力学的弱面近傍における変形の局所化と局所領域における震源核(すべり破壊核)の形成過程, IV) 地震破壊(動的破壊)過程, 及び V) 地震直後の余効的調節過程。ここで, I) は定常的プレート運動に基づく広域地殻変動やバックグランド・サイズミシティによって特徴づけられよう。II) の過程における可能な前兆現象として、前震活動、ダイレイタンス(土地の隆起など)、間隙水の流動(電位、水位、比抵抗などの変動)、間隙水中の化学成分の変化などが考えられる。III) の過程の可能な前兆現象としては、断層近傍における変形の進行、震源核形成過程に伴う現象(応力又は歪変化、局所的すべりの進行、前震など)が考えられるが、これらは本震直前に震源近傍に生ずる直前先行現象であるという特徴を有する。IV) は地震破壊による、断層全域にわたる応力と歪エネルギーの動的解放過程である。V) は余効的地殻変動や余震活動などにより特徴づけられる。

さて、地震前兆現象が期待されるとすれば、上述の一連の地震サイクルのうち、II) と III) の過程である。従って、上述の II) と III) を特に念頭におき、かつ地震は力学的弱面に沿うすべり破壊現象であることを前提にして、今後取り組むべき課題について具体的に述べる。

### 1) すべり破壊過程を支配する構成関係(式)の確立

構成関係式は、変形、破壊又は流動する実在物質から成る場を記述する基礎方程式(系)の一部であるから、その確立は地震発生過程を物理的に理解する上で不可欠のものである。地震発生サイクルの I) のリソスフェアの弾性変形過程を支配する構成関係は、Hooke の法則として知られるように、既に確立している。力学的弱面に沿うすべり破壊の構成関係に関しては、脆性領域や脆性-塑性遷移領域における構成関係の基本的部分がようやく明らかにされた段階であり、今後引き続き解決しなければならない

問題は多いが、特に構成関係を規定するパラメタが、地震が現実に発生する「場」の環境下で、圧力(法線応力)、温度、水、歪速度などにどう依存するかを定量的に評価することが最大の課題である。震源核形成過程の研究が直前地震前兆現象の因果関係の解明に直結していること、かつ浅い地震の震源核は脆性ないし脆性-塑性遷移領域で形成されることを考慮すると、脆性領域及び脆性-塑性遷移領域におけるすべり破壊の構成関係を確立することが緊急の課題であることは容易に理解されよう。又、塑性領域における定常流動の構成関係式は確立しているものの、非定常過程を支配する構成関係式の確立は今後の課題として未解決のまま残されている。従って、その確立も今後の課題として重要である。

## 2) リソスフェアの非弾性変形の過程で期待される地震前兆現象の因果関係の解明

断層強度が断層を取り囲む岩体の強度に比較して著しく低い場合を除くと、断層近傍における変形の局所集中化やすべり破壊核形成に先だって、断層を取り囲む岩体内でも、内在する力学的欠陥の局所的破壊が原因で、巨視的には非弾性変形が進行する。不均質リソスフェアが非弾性変形する過程では、可能な前兆現象として、前震、間隙媒質中の水の流動(電位、水位、比抵抗などの変動)、ラドンの放射などが期待される。実際、非弾性変形過程に関係すると思われる多様な前兆的異常現象、即ち前震活動、ダイレイタンス(土地の隆起)、間隙媒質中の水の流動(電位、水位、比抵抗などの変化)、ラドン濃度のような地下水に含まれる化学成分の変化、地下水温変化などが現実に観測されている。観測されるこのような異常変化が地震前兆現象であると地震発生前に断言できるようになるには、そのような前兆的異常現象の発生機構、因果関係を解明し、かつこれらが一連の地震発生過程とどのように関連するのかを明確に示さなければならない。そのためには、個々の地震発生場における地学的特性、構造不均一性などが把握される必要がある。これら異常現象が現実の地震に先行して発現するか否かは地学的特性、構造などに強く依存するからである。

## 3) 地震発生場の物理化学的特性及び不均一性の研究

地球規模のスケールで見ると、地震が発生する領域は極めて限定されている。これは一つには温度、圧力などの環境条件により地震の発生が制約されるためである。局所的に見ると、個々の地震発生過程も温度、圧力分布を含む地震発生場の環境条件に支配されている。温度、圧力分布に加えて、物質の相違、断層構造(断層面幾何学的不均一性)、水の存在の有無、媒質の間隙の程度などは、個々の前兆項目発現の有無を規定するであろう。例えば直前の前震活動は、力学的不均一性(破壊成長抵抗の不均一分布)が短波長成分を含む浅部脆性領域で震源核が形成される場合には期待されるが、地殻深部塑性流動が卓越する領域で震源核が形成される場合には期待されない。このように地震が発生する「場」の物理化学的特性、状態及び力学的不均一性の程度を把握することは、前兆発現の予測をする上で極めて重要である。以上の地震発生場の特性の把握は、種々の地球物理的観測と地質学的調査によることになる。地震研究所は、各分野の観測の専門家を擁していることから、適当な地域を指定して、各分野の観測を

その地域に集中し、その地域の構造不均一性や場の性質を明らかにすることが可能である。このような各分野の研究の連携をはかる研究計画の進展を期待したい。

#### 4) 地震発生過程の物理的モデリングとシミュレーション

地震予知研究の将来を展望するとリソスフェアの不均質構造や個々の地震発生場の地学的特性をモデルに取り込み、物理化学的状態、条件を考慮して、変形、破壊、流動する実在物質を記述する基礎方程式(系)を解くことにより地震発生過程をシミュレートし、具体的にどのような前兆項目が何処で、どの程度、どの時期に期待されるかを定量的に予測する数理的手法による地震発生過程のコンピューター・モデリングの研究の方向が考えられる。この方向は将来の発展の方向を示していると考えられるので、これを可能とするために、前述した1)から3)の個別の問題を第7次計画で解決すべきであると考えられる。変形、破壊、流動する実在物質の基礎方程式(系)は、変形、破壊、流動の各過程を記述する構成関係式が組み込まれてはじめて完成する。しかし、1)で述べたように、構成関係はまだ不完全であって基礎方程式(系)が完成しているわけではない。同様に、「場」の物理化学的特性、短波長構造不均質性の研究も今後の課題である。従って、本格的な地震発生過程のシミュレーションは将来に残すとしても、現状でも構成関係の基本的な部分は明らかにされているので、限定されることにはなるが、計算機による地震発生過程のシミュレーションは可能である。事実、現在提唱されている構成式を基礎にした数理的手法による地震発生過程のシミュレーションは既に始まっており、震源核形成過程についての成果も得られつつある(例えば、YAMASHITA and OHNAKA, 1992)。従って、長期的視野に立った大型の本格的シミュレーション研究は将来に譲るとしても、「地震予知計画」の枠組の中で、地震発生過程のモデリングや計算機シミュレーションの研究の芽を伸ばし、スタートさせることは必要であると考えられる。研究は、部分的な観測項目のモデリングや特定の地域を想定したモデリングからスタートし、最終的には全ての観測項目を含むような総合的なモデル化を目指すものとすべきであろう。

#### 文 献

- 大中康譽(研究代表者), 1991, 準脆性及び準延性領域における構成則の確立—震源核形成過程とプレート境界の力学的挙動のモデル化—, 昭和63年・平成元年度文部省科学研究費補助金(一般研究B)研究成果報告書.
- YAMASHITA, T. and M. OHNAKA, 1992, Precursory surface deformation expected from a strike-slip fault model into which rheological properties of the lithosphere are incorporated, Special Volume of *Tectonophysics* on "Earthquake Source Physics and Earthquake Precursors" (in press).