

11-1 地殻活動予測シミュレーションモデルの開発

Development of Predictive Simulation Models for Crustal Activity

東京大学大学院理学系研究科 松浦 充宏

Graduate School of Science, The University of Tokyo

[要旨]

地震発生物理学の飛躍的な発展と計算機科学の急速な進歩を背景に、地震及び地殻変動観測網からの膨大なデータと高度な理論モデル計算を併合した大規模シミュレーションによる、日本列島域の大地震の発生予測が現実のものとなりつつある。

1. 科学的及び社会的背景

科学的な意味での地震予知の目標は、地殻変動や地震活動などの観測を通じて地殻及びマンツルの現在の状態と活動をリアルタイムで把握し、その情報に基づいて大地震の発生とそれに至る一連の過程を定量的に予測することにある。この目標を達成するには、地殻変動や地震活動などの広域常時観測システムの整備に加え、得られた膨大な観測データから有効な情報を抽出し、その情報に基づいて将来の地殻活動を定量的に予測するための現実的なシミュレーションモデル（地殻活動予測シミュレーションモデル）の開発が不可欠である。

地震発生物理学の分野では、この10年間に飛躍的な発展があった。一つは地震破壊過程を支配する物理法則として岩石実験に基づく断層構成則が導入されたことであり、もう一つはプレート運動に起因するテクトニック応力蓄積過程の定量的記述がなされたことである。断層構成則は、断層帯の微視的物理・化学過程と断層の巨視的力学挙動を結び付けるインターフェイスの役割を果たす。また、マンツルの熱対流運動の地表への現れであるプレート運動は、断層システムでの応力蓄積-解放過程を駆動する原動力に他ならない。こうした地震発生物理学の発展により、準静的なテクトニック応力の蓄積から破壊核の形成を経て動的破壊伝播に至る地震発生の全過程を統一的かつ定量的にモデル化することが可能になった。

2. 地震発生サイクルモデリングの基本概念

大地震の発生サイクルは、第1図に示すように、隣接するプレート間の相互作用に起因する地震断層域でのテクトニック応力の蓄積、地震破壊の核形成に伴う準静的な応力解放とその周辺域での応力集中、急激な応力解放を伴う動的破壊の伝播とそれに伴う地震波の放射、そして地震発生後のアセノスフェアの応力緩和によるリソスフェア内の応力再配分及び断層の固着に伴う強度回復の諸過程から成る。地震発生サイクルを構成するこれらの一連の過程は、プレート境界面の形状を含む地殻・マンツル構造が与えられれば、その構造モデルに対して計算される「すべり応答関数」と強度回復メカニズムを内包する「断層構成法則」をプレート境界面での応力-強度条件によって結合した非線形システムに、駆動力としての「プレート相対運動」を与えることで完全に記述される（第2図参照）。ここで、すべり応答関数は断層面での単位すべりに対する媒質の応力応答であり、地震発生サイクルの準静的な過程を記述する場合は、アセノスフェアの粘弾性を考慮した準静的な応答関数を用いる必要がある。一方、動的な破壊

伝播過程を記述する場合は、アセノスフェアの粘性緩和の効果は無視できるので、弾性体の動的な応答関数を用いれば良い。また、断層構成則は断層面のすべりと固着により剪断強度がどのように変化するかを巨視的關係として表したものであり、地震発生サイクルの全過程を支配する物理法則としての役割を果たす。

3. 地殻活動予測シミュレーションモデルの基本構造

1998年度から5ヶ年計画でスタートした科学技術振興調整費研究の一環として、我々CAMP (Crustal Activity Modelling Program)グループは、日本列島域の長期的地殻変動と大地震の発生過程の定量的予測を目的とする大規模シミュレーション・システムの開発を進めてきた。第I期(1998~2000)では、先ず全体モデルの概念設計を行い、その基本構成要素である日本列島周辺域の地殻・マントル構造モデル、準静的地震発生サイクル・シミュレーションモデル、動的地震破壊伝播シミュレーションモデル、及び地殻活動データ解析・同化ソフトウェアを開発してきた¹⁾。第II期(2001~2002)では、第I期で開発した要素モデル/ソフトウェアを地球シミュレータ上でシステム結合し、複雑なテクトニック環境の下にある日本列島域の長期的な地殻変動から大地震の発生までを統一かつ定量的に予測する並列シミュレーション・システムを開発する予定であり、現在はその最終段階にある。以下では、特にプレート境界での準静的地震発生サイクルのモデル化についてやや詳しく説明する。

4. 準静的な地震発生サイクルのシミュレーションモデル

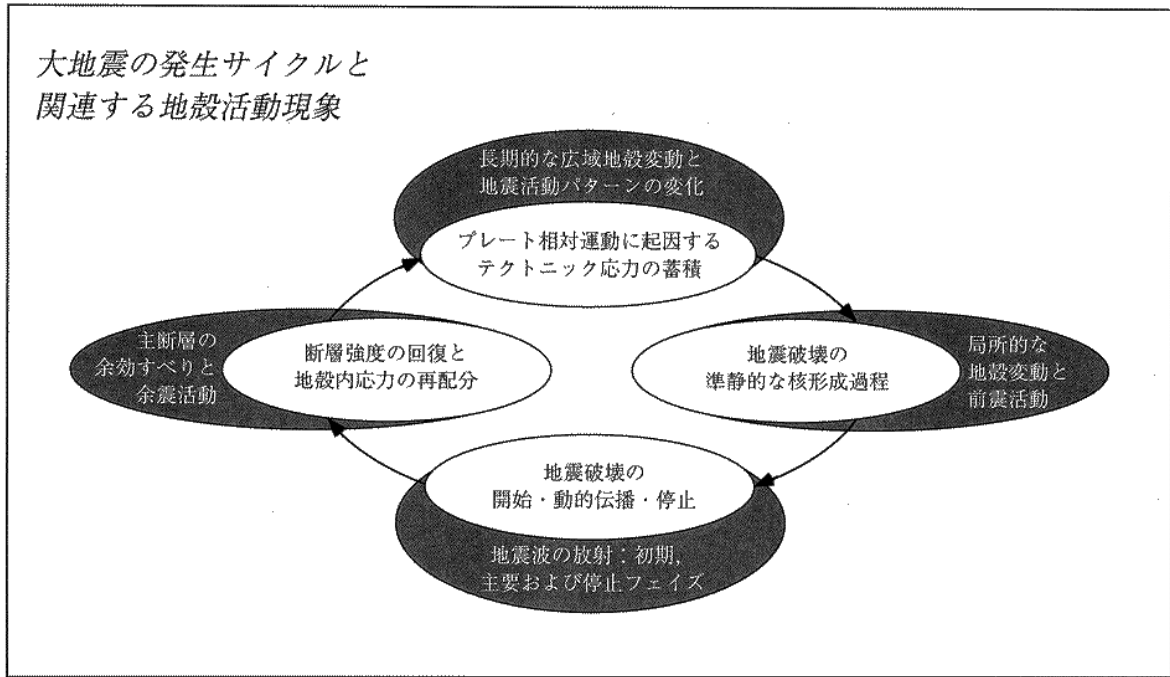
プレート境界での大地震の発生サイクルは、先ずプレート境界面の一部(地震断層域)が固着し、定常的なプレート相対運動からすべり遅れることで始まる。固着域でのすべり遅れはその縁辺部に剪断応力の集中を引き起こし、やがてそれが限界状態に達すると、プレート境界の脆性領域を完全に破断するような大地震が発生する。この時に断層面で解放される応力は、プレートの相対運動が作り出した剪断応力に他ならない。従って、断層面での動的な応力解放過程としての地震の発生を理解するには、先ずその根本原因である準静的なテクトニック応力の蓄積メカニズムを明らかにする必要がある²⁾。この問題を数理的に扱うためには、弾性的な表層とマックスウェル粘弾性的な基盤層からなる半無限2層構造媒質を考え、内部境界面上の任意の点での変位の食い違いによる準静的な応力変化(粘弾性的すべり応答)の定式化を行う必要がある。弾性的リソスフェアの下に広がるアセノスフェアの粘性率は 10^{19} Pa s程度であり、その応力緩和時間は単純計算でおおよそ40年となる。したがって、数十年から数百年スケールの大地震の応力蓄積過程を考える際には、アセノスフェアの粘性を無視することはできない。

ところで、プレート境界面上の固着域の分布が予め特定されていれば、変位の食い違い理論に基づいて、そこでのすべり遅れが周辺域に引き起こす粘弾性的応力変化を計算することができる。しかし実際には、プレート境界の固着域の分布と固着の状態は、大地震の発生によって劇的に変化するばかりでなく、次の大地震の発生に向けて地震断層域での強度回復と応力蓄積を断層構成則によってバランスさせながら時間的・空間的に変化していくであろう。つまり、地震発生1サイクルを通じてプレート境界の固着状態の時間的・空間的变化を支配しているのは、断層構成則に他ならないのである。結局、プレート境界における地震発生サイクルの物理過程は、プレート間の相対運動を駆動力に、断層構成則をすべり過程の支配法則として、統一かつ定量的に記述される。

このような考えに基づき、Hashimoto & Matsu'ura³⁾ は、Aochi & Matsu'ura⁴⁾ が断層面のすべりによる摩耗と接触による凝着を考慮して理論的に導いた「すべりと時間に依存する構成則」をすべり過程の支配法則として用い、アセノスフェアの粘弾性を考慮した3次元モデルで横ずれプレート境界に於ける準静的な地震発生サイクル過程のシミュレーションを行っている。第3図は、大小二つの地震発生域（固着域）を持つ断層システムの準静的な応力蓄積シミュレーション（Hashimoto & Matsu'ura³⁾）とシステムの応力が臨界レベルに達した後の動的な破壊伝播のシミュレーション（Fukuyama, et al.⁵⁾）をシステム結合し、完全な地震発生サイクル過程をコンピュータ上で実現してみせたものである。CAMPグループは、現在、横ずれプレート境界モデルの発展形として、日本列島域を対象とする地殻活動シミュレーションモデルを「地球シミュレータ」上で開発中である。

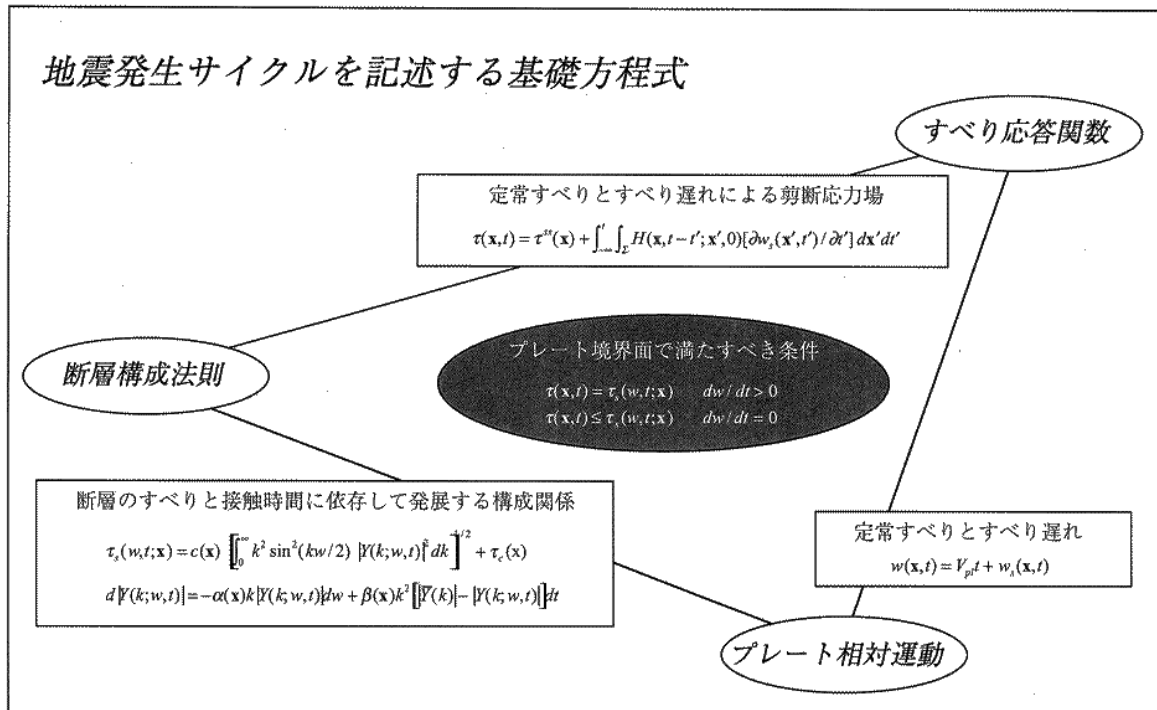
参 考 文 献

- 1) Matsu'ura, M., The crustal activity modelling program: Progress toward scientific forecast of earthquake generation, Proceedings of the 2nd ACES Workshop, ed. M. Matsu'ura, K. Nakajima and P. Mora, APEC Cooperation for Earthquake Simulation, 23-26, 2001.
- 2) Hashimoto, C. and M. Matsu'ura, 3-D physical modelling of stress accumulation processes at transcurrent plate boundaries, Pure Appl. Geophys, 157, 2125-2147, 2000.
- 3) Aochi, H. and M. Matsu'ura, Slip- and time-dependent fault constitutive law and its significance in earthquake generation cycles, PAGEOPH, 159, 2029-2047, 2002..
- 4) Hashimoto, C. and M. Matsu'ura, 3-D simulation of earthquake generation cycles and evolution of fault constitutive properties, PAGEOPH, 159, 2175-2199, 2002.
- 5) Fukuyama, E., C. Hashimoto, and M. Matsu'ura, Simulation of the transition of earthquake rupture from quasi-static growth to dynamic propagation, PAGEOPH, 159, 2057-2066, 2002.



第 1 図 大地震の発生サイクル

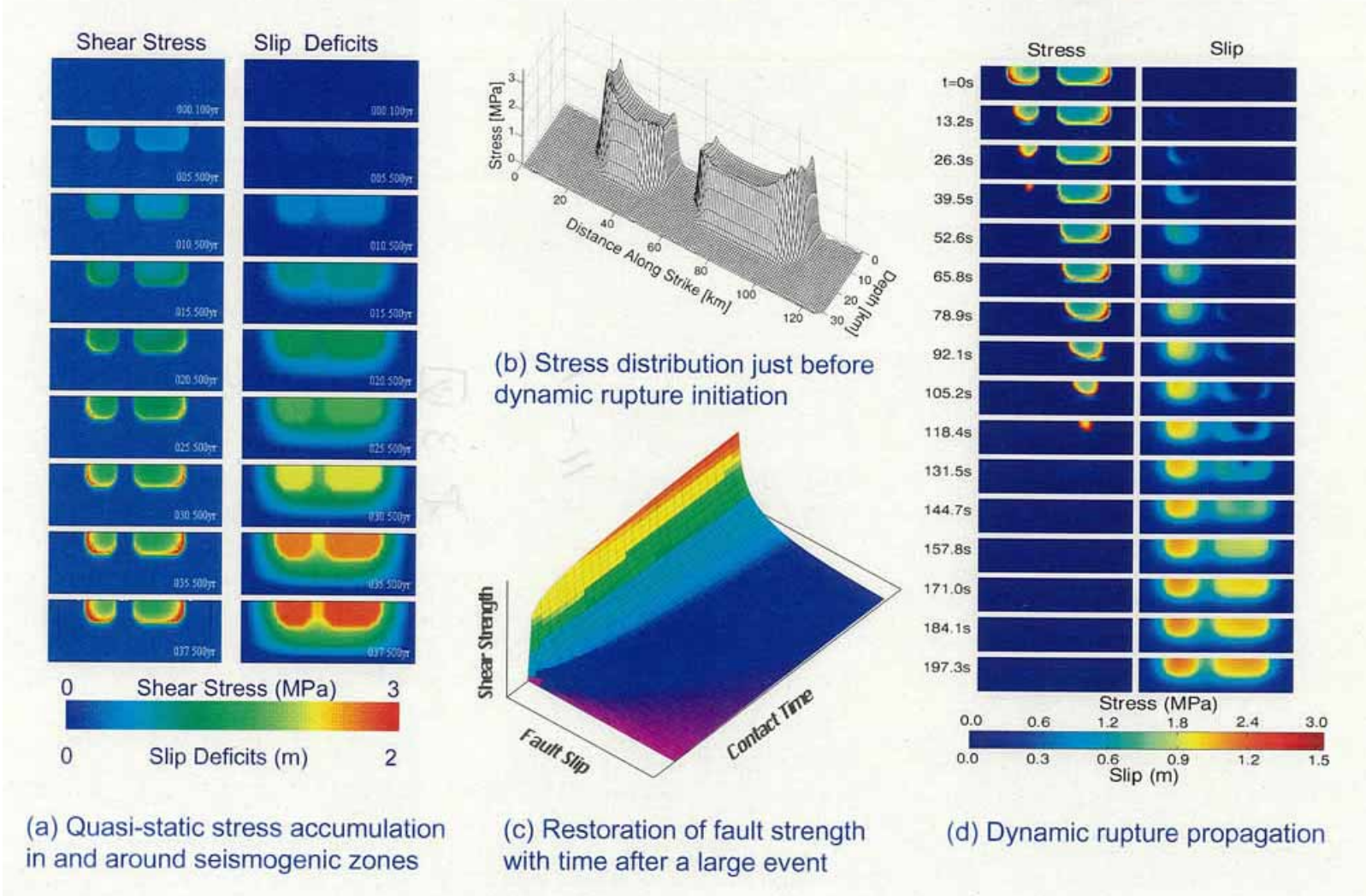
Fig.1 The entire process of earthquake generation cycles .



第 2 図 地震発生サイクルを記述する基礎方程式

Fig.2 The basic equations to describe the entire process of earthquake generation cycles .

Simulation of Complete Earthquake Generation Cycles



第3図 二つの地震発生領域を持つ断層系の完全な地震発生サイクルのシミュレーション

Fig.3 Quasi-static/dynamic simulation for the complete earthquake generation cycles on the fault system with two seismogenic regions.