

断層構成則と地震の発生過程

Fault Constitutive Laws and Earthquake Generation Processes

松浦 充宏[1]

Mitsuhiro Matsu'ura[1]

[1] 東大・理・地球惑星科学

[1] Dept. of Earth & Planetary Science, Univ. of Tokyo

地震発生物理学の分野では、この10年間に目覚ましい発展があった。その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相対運動による応力蓄積過程が定量的にモデル化されたことである。断層構成則は、断層帯の微視的物理・化学過程と断層システムの巨視的力学過程を結ぶ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と計算科学技術の急速な進歩は、断層帯の微視的物理・化学と地殻-マンツルのダイナミクスを基礎とする地震発生サイクルの全過程の現実的なシミュレーションを可能にしつつある。

地震の発生サイクルは、プレート間の相対運動に起因する地震断層域でのテクトニック応力の蓄積、破壊核形成域での準静的な応力解放とその周辺域での応力集中、地震発生時における地震断層域での急激な応力解放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がリソスフェア内に引き起こす応力再配分及び断層固着に伴う強度回復の諸過程から成る。こうした一連の過程は、基本的には、弾性-粘弾性体の運動方程式と断層構成則をカップルさせ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。弾性-粘弾性体の運動方程式は、断層面でのすべりとそれが周辺域に引き起こす応力場の変化を一意的に関係づける。しかし、それだけでは断層面でのすべりがどのように進行するかは決まらない。断層面での破壊過程がどのように進行するか、それを支配している物理法則を断層すべりと剪断応力の巨視的關係として表現したものが断層構成則である。破壊に伴うエネルギー収支という観点に立てば、断層構成則はグリフィスの破壊規準を破壊面形成の物理過程として表現したものとすることができる。

岩石の摩擦すべり或いは固着すべり実験の結果に基づいて、これまでに幾つもの異なるタイプの断層構成則が提唱されてきた。その代表的なものとして、すべりに依存する構成則 (Ohnaka et al., 1987; Matsu'ura et al., 1992) 及びすべり速度と状態に依存する構成則 (Dieterich, 1979; Ruina, 1983) を挙げることができる。これらの二つの構成則は、その特性的振る舞いに大きな違いがある。前者は、低速から高速まで加速される不安定すべりを対象とした固着すべり実験の結果に基づいている。これに対して、後者は、非常に低速の安定すべりを対象とした摩擦すべり実験の結果に基づいている。従って、動的破壊過程に於ける断層の力学的挙動を適切に表現するには、すべりに依存する構成則を用いなければならない。しかし、この構成則は地震時のすべりに伴って低下した断層強度の回復メカニズムを持っていないので、同一断層で繰り返す地震発生過程を記述することはできない。すべり速度と状態に依存する構成則では、地震破壊が開始してすべり速度が速くなると断層強度は一旦低下するが、やがて減速して速度がゼロに近づくと元の強度に戻る。しかし、その物理的メカニズムは明らかではない。そこで、Aochi and Matsu'ura (1999, 2002) は、Matsu'ura et al. (1992) が断層面のすべりに伴う変形と磨耗の理論から導いたすべりに依存する構成則を接触面の凝着とそれに続く凝着磨耗の効果を検討して合理的に拡張し、強度回復のメカニズムを内包する「すべりと時間に依存する断層構成則」を導出した。

この断層構成則は、これまで提唱されてきた種々の構成則が因って立つ基礎的実験事実（高速すべり時のすべり弱化、接触時間の対数に比例する強度回復、及び定常状態でのすべり速度弱化）を統一的に説明し得るものであり、その意味において、すべりに依存する構成則とすべり速度と状態に依存する構成則を自然な形で統合するものと言することができる。すべりと時間に依存する構成則が示すもう一つの重要な性質は、臨界変位量の接触時間依存性である。高速すべりが停止した後、剪断強度のピーク値ばかりでなく、臨界変位量もまた接触時間と共に増大していく。臨界変位量は断層面形状のフラクタル領域の上限波長に比例するので、すべりが停止した後の臨界変位量の増大は、時間の経過と共に断層面のより大きなスケールの構造が再生され、フラクタル構造がより大きな波長領域まで拡大していく過程の反映であると理解される。臨界変位量の接触時間依存性は、その破壊スケール依存性と相俟って、大地震の発生サイクルとそれに伴う地震活動を統一的に理解する上で極めて重要な意味を持つ。