

## リソスフェアのレオロジー：現状と課題

### Rheology of Lithosphere: Current Status and Future Perspectives

嶋本 利彦\*

Toshihiko Shimamoto\*

#### はじめに

この小論では、構造地質学と岩石のレオロジー(岩石力学)の研究が、リソスフェアのレオロジー的性質を決めるのにどのように貢献できるかについて述べる。構造地質学は、その誕生以来地球内部でどのような変形とテクトニクスがおこってきたかを、地質構造と変形組織の研究を通して探ってきた。断層を例にすると、世界中の多くの場所で地表に露出している深部断層岩を直接観察することによって、地殻内部の様々な深さではどのような変形が実際におこっているかを推定することができる。

一方、岩石のレオロジーの分野においては、自然界の様々な条件下で見られるのと同じ機構による変形を実験室で再現し、それらに対応する力学的性質を主に実験的に決定する試みが続けられている。そうして得られた結果は、予測可能なモデルとしてテクトニクス・地震などに関する様々な問題に適用することができる(嶋本, 印刷中)。

学問が急速に多様化するとともに総合化にむかっている今日では、我々は狭い学問分野に閉じ込めらるべきではない。構造地質学と岩石のレオロジーの研究を中心にすえながらも、関連する研究分野と連携して、地球科学上の重要な問

題に総合的に取り組むべきである。とくに我が国においては、このような研究の流れをつくりだしていかねばなるまい。ここでは、岩石のレオロジーの歴史を概観し、今後の主要な研究課題について述べておきたい。

#### リソスフェアの強度断面への道のり

脆性破壊の卓越する条件下では岩石の強度は圧力の増加とともに顕著に増加する。この著しい圧力効果は、A. Wegener と同時代の応用力学の大家・von Kármán (1911)の先駆的な研究によって実験的に示されたものである。1970年代には、脆性領域では多くの岩石がほぼ同じ摩擦強度をもつことが示された。

地下浅所では脆性的に破壊する岩石も、深所の高圧・高温下では塑性流動を示す。しかし、岩石の塑性流動を記述する流動則が実験によって決められるまでには、非常に長い下積みの研究が必要であった。D. T. Griggs が岩石力学の体系的研究を始めたのは1930年代である。これは、大陸移動説が学会の主流派から見放され、M. Ewing が当時ほとんど未知の世界であった海洋の研究に着手した時代でもあった。海の研究が海洋底拡大説に発展し、プレートテクトニクスに結晶化した1960年代には、岩石のレオロ

1994年2月1日受付。1994年2月21日受理。

\*東京大学地震研究所。Earthquake Res. Inst., Univ. of Tokyo.

ジーの研究も一大隆盛期を迎えるのである。このような流れの中で、岩石の流動則の形が大理石について初めて決定された(Heard, 1963)。1960年代の実験技術の改良と70年代のデータの蓄積によって、地殻と上部マントルを構成する主要な岩石の流動則についての実験データが揃ったのは1980年前後である。

このような実験結果を単純化して、地下深部を脆性破壊と高温塑性流動の卓越する領域に2分して強度断面を描くモデルが提唱されたのが1970年代後半である。このような強度断面を、日本列島について作成したのが第1 a, b図である。このような強度断面は、リソスフェアからアセノスフェアへの移行の予測を可能にしたという点において、プレートの輪郭を浮き彫りにした。東北日本の内陸部では、リソスフェアの厚さはせいぜい20km前後で(第1 b図)、火山周辺では10km前後に過ぎない可能性もある(第1 a図)。微小地震はリソスフェアの中心部でおこっている(第1 c図)。

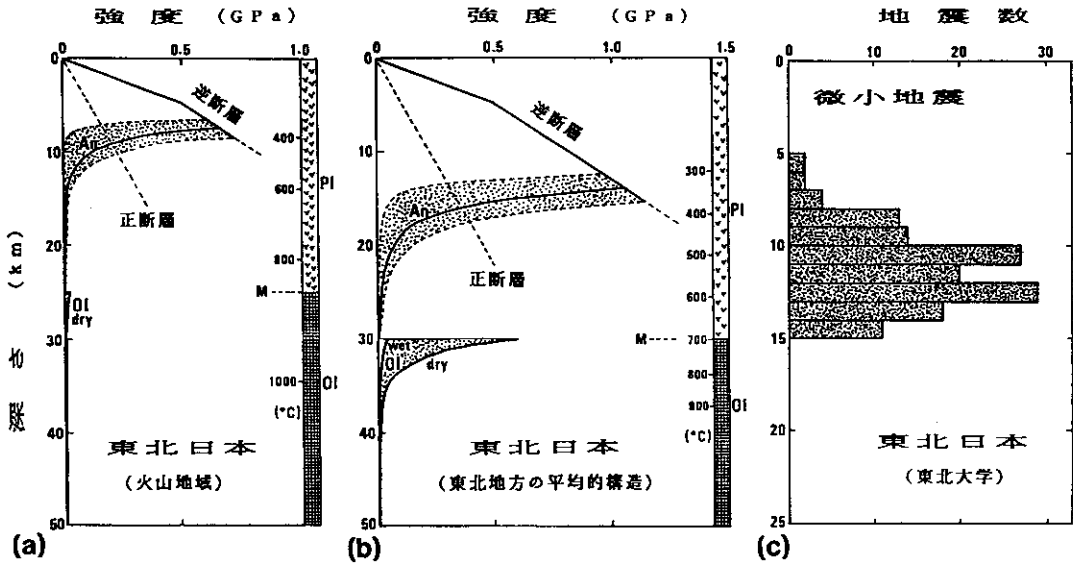
第2図は、このような強度断面に基づいて描かれた東北日本のリソスフェアの構造図であ

り、島弧の地震とテクトニクスの特徴を非常に良く説明している。例えば、日本列島内陸部の活断層はリソスフェアの薄い部分に集中的に発達している。岩石のレオロジーから導かれるこのような力学的内部構造は、島弧のテクトニクスをモデル化する上で基本的に重要な情報なのである(嶋本, 1989; Shimamoto, 1993; 参照)。

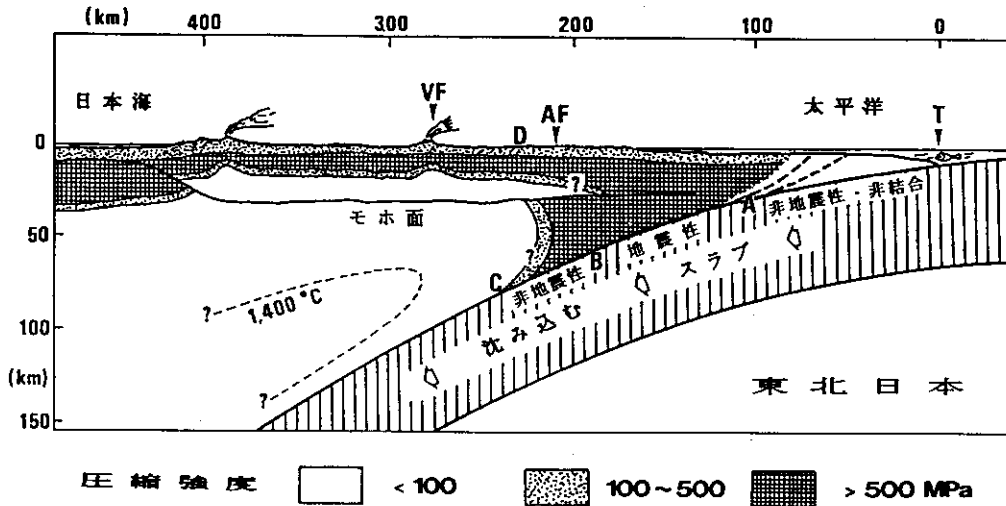
### 新しい断層モデル

地球上層部の変形は断層およびプレート境界に集中することが多いので、断層およびプレート境界のレオロジーの確立が、リソスフェアのレオロジーにおける最も重要な課題である。また、大地震が発生し、プレートの相互作用がもっとも大きいのは、強度のピーク付近である。したがって、リソスフェアのレオロジーを確立するためには、強度が最大となる付近、つまり変形が脆性から完全塑性流動へ移行する条件下における断層のレオロジー的性質を調べる必要がある。

1980年代前半から中頃にかけての私の岩塩を



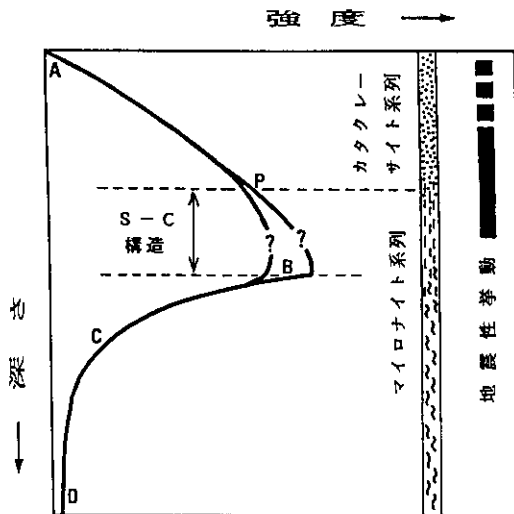
第1図 東北日本内陸部の圧縮強度断面(a:火山地域, b:平均的にみた内陸部)と地震の頻度と深さの関係(c)



第2図 東北日本の圧縮強度断面，火山フロント(VF)とアサシスミックフロント(AF)の中間あたりより内陸部のプレートは厚さがせいぜい20km前後に過ぎない。

用いた一連の剪断変形実験は，この中間領域における断層の一般的な変形様式と挙動を調べようと試みたものである(Shimamoto, 1989)。その結果，脆性領域と高温塑性領域の間には広い中間領域が存在すること(第3図のPB)，この中間領域では見かけ上既に塑性変形が卓越しており，S-Cマイロナイトとアルトラマイロナイトによく似た組織が形成されること，地震性の動きはこの中間領域の内部に及んでいることが示された。マイロナイトが形成される領域で地震がおこることは，地震の化石とも言うべきシュードタキライトと上述のマイロナイトが密接に共存する例によって確かめられている。

脆性から完全塑性流動に至る中間領域で形成された岩石が特定された意義は大きい。これらの岩石にみられる変形を再現すれば，中間領域における断層のレオロジーが確立できるからである。実験結果によれば，この中間領域では，マイロナイトに特有な面構造を作るほぼ均一な剪断変形がある臨界値に達すると変形の局所化がおこって，断層帯の内部にC面で代表されるような変形集中域が発達してくる。この変形集中域のなすパターンは，脆性剪断変形に特徴的なリーデル剪断面と類似している。このよう



第3図 岩塩の剪断変形実験の結果に基づいて提唱された新しい断層モデル(Shimamoto, 1989)。塑性変形はPあたりからおこり始め，マイロナイト系列の断層岩が形成される。断層の地震性の挙動はこれよりやや深部まで認められる。

な変形の局所化にともなって，断層の力学的性質もやや脆性的に変わって，中間領域の低圧部では地震性の挙動も認められるようになる。中

間領域では、このようにいくつかの機構による変形が複雑に混在しながら、地震を引き起こしているのである。

第3図の断層モデルを、東北日本の内陸部に對比してみよう。長年の地質学的研究によって、変成度が下部緑色片岩相(温度300℃前後)に達すると塑性変形が起り始めることが、膨大な実例によって確認されている。日本列島の地温勾配は30℃/km前後だから、深さ約10kmでこの条件はほぼ達成されているとみて良い。つまり、第3図のP点はほぼ10kmの深さに相当する。微小地震の多くは5~15kmの深さでおこっているのだから、地震発生域の下半部は、既に塑性変形の卓越する中間領域であることがわかる。

地震発生域の下限のレオロジー的意味については、専門家の間でも意見の一致が得られていない。第1a, b図の強度のピークが脆性-塑性転移点であり、それが地震発生域の下限に相当するという単純な議論がしばしばなされるが、実際にはこのような急激な変換点は存在しない。岩塩の実験結果によれば、地震はまさつの性質が負の速度依存性(高速ほどまさつ抵抗が小さい性質)から正の速度依存性になる深さよりやや浅い所、つまり脆性から延性に至る中間領域の内部(第3図)で起こらなくなる。一方、Hobbs et al. (1986)は、延性断層形成の下限が完全塑性領域内部にまで及んでいることを理論的に論じ、地震はリソスフェアがほとんど強度を失う辺りまでおこると論じた(第3図のC付近)。但し、彼らは延性断層が常に地震を起こし得ることを示したわけではない。

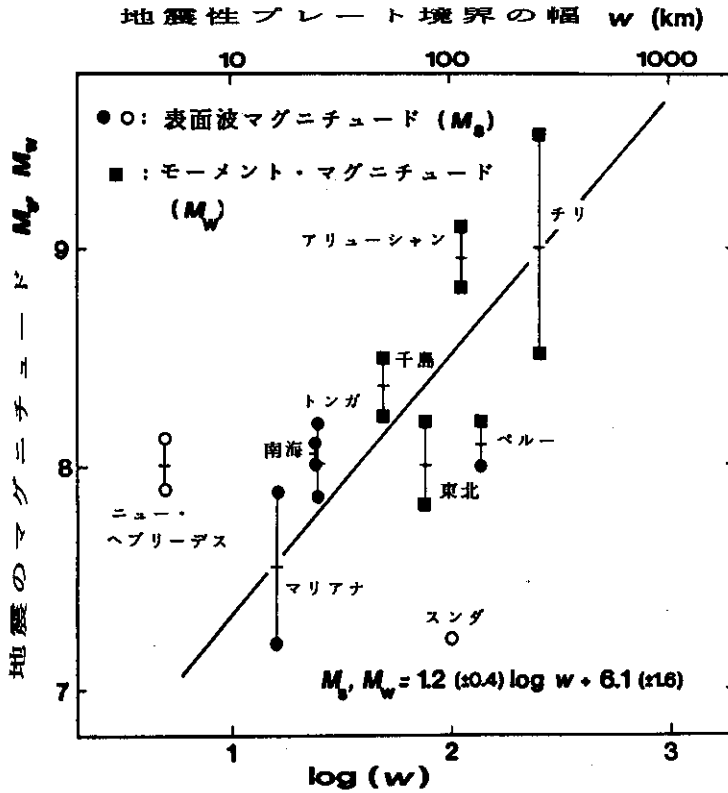
沈み込みプレート境界に関しては、プレート境界の最下部が明瞭に非地震性のはねかえりを示し、Hobbs説よりもむしろ岩塩のデータに基づく第3図のモデルの方が事実合う(次節参照)。内陸の地震についてはどちらの説が正しいのかを示唆する事実が見あたらなかった。しかし、最近、伊藤潔らによって、地震波のほぼ水平な反射面を多数含む下部地殻と地震の下限の間には約5kmのギャップがあることが示された。水平な反射面はおそらくアセノスフェアの流動(マントル・下部地殻内の対流)によって

形成されるので、この発見は地震の下限とアセノスフェアの上限の間に約5kmのギャップがあることを示唆している。内陸の地震についても、第3図のモデルの方が事実に近いと思われる。

### 岩石のレオロジーと比較沈み込み学

新しい断層モデルによって説明できるようになったのが、沈み込み帯の多様性である(嶋本, 1991; Shimamoto et al., 1993)。この15年間くらいの間に、上田誠也を中心とした人達は、「比較沈み込み学」と称して世界の沈み込み帯を比較検討し、沈み込み帯の多様性とその起源を探る研究を続けてきた。多様性は、沈み込みプレート境界で発生するスラスト型地震の規模においてとくに著しく、巨大地震をおこすチリからせいぜい中規模地震しかおこさないマリアナまで実に多様である。レオロジー的にみると、沈み込みプレート境界は、(1)ほぼ深さ30km以浅の変成作用によって多量にH<sub>2</sub>Oが放出されて微小地震もあまりおこらない領域(第2図のTA)、(2)地震性の挙動をする領域(同図のAB)、および(3)非地震性のはねかえりを示すプレート境界の下部(同図のBC)に分類できる。最初の領域の特徴は、沈み込みにともなって浅所の岩石と堆積物が常に深部にもちこまれるため、定常的に累進変成作用がおこることによって生じており、沈み込み帯に固有のものである。

沈み込みプレート境界の温度分布の見積もりから、地震をおこし得る領域の幅を様々な沈み込み帯について推定したのが第4図である。地震性の動きをする領域は、巨大地震が発生するチリでは100km以上に達しており、マリアナなどではプレート境界沿いにはかつて10km前後にすぎない。プレート境界は他の場所より冷たいのだから巨大地震が当然おこっていないはずなのに、ほとんど大地震をおこさない沈み込み帯がある。これは、プレート境界の下部と上部が非地震性となって、中間の地震をおこし得る領域が狭くなっているためである。第一近似的で半定量的な議論にすぎないが、沈み込み帯の多



第4図 スラスト型地震の規模に関する沈み込み帯の多様性。沈み込みプレート境界のレオロジーモデルから推定した地震性の挙動をし得るプレート境界部の幅と地震のマグニチュードの関係。

様性を決めているのは、プレート境界の温度分布と変成作用によって放出されたH<sub>2</sub>Oであることがわかる。

今後の課題

第3図に示された脆性／中間／塑性三分モデルは、確かに脆性／塑性二分モデルよりも現実に近い断層モデルであるが、断層帯内部の変形はもっと複雑である。断層の中心部を構成するのは、浅所では断層ガウジ、やや深い所ではアルトラカクレーサイト、中・下部地殻から最上部マントルなどの地下深所ではアルトラマイロナイトである。それらは何れも粒径がミクロン以下のオーダーに達するような極めて細粒な

岩石で、流動変形をした鉱物も塑性変形に特徴的な結晶格子の卓越配列を示さないことが多く、微視的な変形機構とその変化を判断するのも容易でない。このような細粒断層岩こそ深部断層の変位が集中する部分で最終的に形成される岩石であり、断層のレオロジー的性質を決めているはずなのである。しかし、これらの岩石の変形組織については、光学顕微鏡で組織をみるには細粒すぎることもあって、研究そのものがあまり進んでいない。

細粒断層岩のレオロジーは、より現実的な断層モデルを確立する上で大きな課題である。高温下で細粒岩石が変形すると、粒界拡散によって鉱物粒の配列が変わることによって、鉱物粒そのものはそれほど変形することなく、変形が

容易に進行する可能性がある。このような超塑性と呼ばれる変形も、拡散経路が短い細粒物質ほどおこりやすく、断層の最深部では非常に重要な変形の機構であるかもしれない。また、細粒断層岩中をH<sub>2</sub>Oが循環していると、粒界などの岩石または鉱物がより強く圧縮された側ほど溶解度が大きくなるので物質がH<sub>2</sub>Oにより多く溶解し、H<sub>2</sub>O中を拡散して低圧部で析出することによって、ゆっくりと変形が進行する現象がおこり得る。このようなH<sub>2</sub>Oを媒介とした物質移動による変形も、拡散経路が短いために、細粒物質ほどおこり易い。さらに、細粒物質ほど粒界の総面積が大きくて反応性に富んでいるので、断層帯内部では化学反応がおこり易く、変成・変質鉱物も形成され易い。化学反応の変形に対する影響についてはほとんど体系的な研究がない。変成・変質鉱物の力学的性質については、粘土鉱物が断層の強度を下げ、断層の地震性の挙動を抑える効果をもつことが示されているものの、より詳しい研究は今後に残されている。

上述のように、断層のレオロジーを確立するには、少なくとも(1)脆性/完全塑性流動の間の中間領域、(2)超細粒物質のレオロジー、(3)水を媒介とした物質移動による変形、(4)化学反応の変形への影響、の4項目の研究をおこなう必要である。それらの影響は岩石の強度を下げる方に働くが、例えば(2)の影響が強すぎると地震がおこらなくなってしまう。地震がおこっているのは事実だから、結局、地震が消えることなく岩石がどの程度弱くなり得るのが問題である。現在世界の研究者の注目を急速に集めているのが、(2)と(3)の問題である。

このような問題を実験室で調べるためには、それぞれの問題の特性にあわせた試験機を用いる必要がある。最適な試験機は市販されていないので、ほとんどの場合、研究者が設計と製作に深く関わる必要がある。私の研究室では、高

温二軸摩擦試験機・回転式高温高圧摩擦試験機・油圧サーボ式高温摩擦試験機・高温熱水変形試験機の設計・製作がほぼ終了し、上記の問題を体系的に研究する体制がもうじき整うみこみである。

## 文 献

- Heard, H. C., 1963, Effect of large changes in strain rate in the experimental deformation of Yule marble. *Jour. Geol.*, **71**, 162-195.
- Hobbs, B. E., Ord, A., and Teyssier, C., 1986, Earthquakes in the ductile regime? *Pure & Appl. Geophys.*, **124**, 309-336.
- Kármán, Th. von, 1911, Festigkeitsversuch unter allseitigem Druck, *Z. Ver. dt. Ing.*, **55**, 1749-1757.
- 嶋本利彦, 1989, 岩石のレオロジーとプレートテクトニクス. *岩波科学*, **59**, 170-181.
- 嶋本利彦, 1991, 比較沈み込み学のレオロジー的基礎, 月刊地球, 号外3, 上田誠也教授退官記念論文集, 112-117.
- Shimamoto, T., 1989, The origin of S-C mylonites and a new fault-zone model. *J. Struct. Geol.*, **11**, 51-64.
- Shimamoto, T., 1993, Rheology of rocks and plate tectonics. In E. T. Brown, ed., *Comprehensive rock engineering*, **1**, 93-109.
- Shimamoto, T., Seno, T. and Uyeda, S., 1993, A simple rheological framework for comparative subductology. *The Jeffreys Volume, Geophys. Monogr.*, AGU, **76**, 39-52.
- 嶋本利彦, 印刷中: 断層の深部を探る. 島崎邦彦・松田時彦編, 地震と断層, 東京大学出版会.