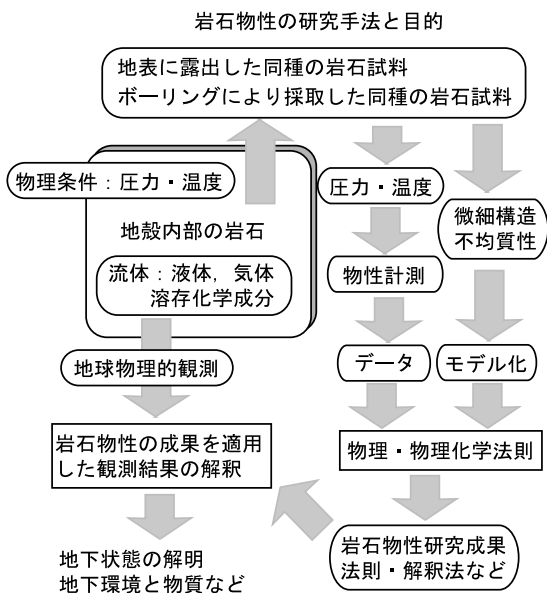


岩石の微細構造と物性：砂岩浸透率の封圧変化

西澤 修¹⁾・中島 善人²⁾・高橋 美紀³⁾・北村 圭吾⁴⁾

1. はじめに

岩石物性は岩石の物理的性質を調べる研究分野である。岩石物性の研究で得られた成果は、地球内部に関する学問分野だけでなく、石油や地熱などの流体エネルギー資源の探査・開発と管理、地下環境の保全、土木・建設、あるいは、地震による災害の予測や防止など、多くの実用分野でも利用されている。



第1図 岩石物性の研究手法と目的。地球内部の岩石は高い圧力を受けているので、同じ状態を実験室で再現する必要がある。岩石は不均質で内部に流体が含まれている。岩石の構造をモデル化し、物理・物理化学の法則を適用し、物性を理解する。こうして得た知見が地球物理観測データの解釈に使われ、地下の状態が明らかになる。

野外観測で得られたデータは、岩石物性の観点から解釈され、地下の状態が明らかにされ、調査や研究の目的が達成される。第1図は岩石物性の研究手法と目的の主要な部分を図式化したものである。

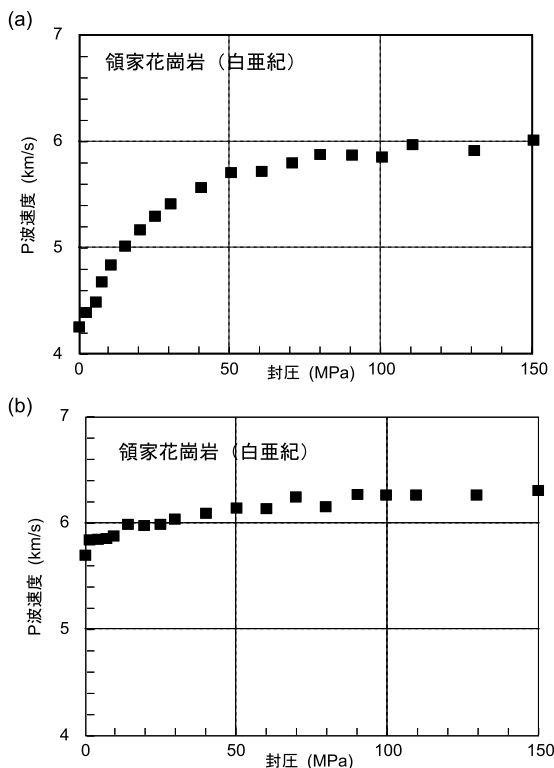
岩石は不均質な固体であるから、岩石物性の研究では不均質性が研究対象となる。鉱物学や高温・高圧実験を主体とした地球物質科学の研究では、化学組成と結晶構造で同定された均質な物質を扱うが、岩石物性の研究では各種の固体が混じりあう不均質な固体を扱う。さらに、地下には流体（液体や気体）が存在するが、流体は固体粒子の隙間や小さな割れ目の中に存在する。登山の途中で山頂付近の岩の中から湧き出る水を見ることがあるが、このような高い場所でも相当量の水が湧き出るとは岩石内部に水が含まれていることを示す。岩石の不均質性と流体の存在は、それ自体が岩石物性の重要な研究対象である。

一方、地下で岩石は高い圧力（応力）下であり、圧力（応力）の影響を考慮しなければならない。第2図は封圧下での花崗岩の地震波速度変化である。二つの試料は常圧では異なる地震波速度（4.25km/sと5.69km/s）を示すが、高い封圧では差が小さくなる。常圧での速度差は岩石に含まれる割れ目の影響である。地下の地震波速度と対比するには、封圧下での地震波速度を測定しなければならない。地殻内部では、一般に温度はそれほど高くなく、温度の岩石物性への影響は小さいが、火山地域など極端に温度が高い場所では温度の効果は無視できない。

ここでは、砂岩の浸透率の圧力変化を例として、第1図に示した岩石のモデル化による実験データの解釈の手法を、物理的視点を交えて紹介する。

1) 地圏資源環境研究部門 CO₂地中貯留研究グループ
2) 地圏資源環境研究部門 物理探査研究グループ
3) 地質情報研究部門 地震発生機構研究グループ
4) 地球環境産業技術研究機構 CO₂貯留研究グループ

キーワード：岩石物性、浸透率、微細構造、パーコレーション、砂岩、粒径分布



第2図 花崗岩の地震波(P波)速度の封圧変化。岩石試料は四国香川県中央構造線付近の白亜紀花崗岩で、異なる地点で採取したもの。常圧では両者の違いが大きいが、封圧150MPa付近では両者の差は小さい。地下深部では両者の速度に大きな違いはない。

2. 岩石のモデル化

岩石物性の研究では、岩石標本のような常温常圧の状態にある岩石ではなく、現に地下に存在する岩石を対象とするので、実験室での物性の測定では、温度・圧力、流体の存在など、地下の状態を再現しなければならない。実験室では各種機器によって岩石試料を調べ、所定の物理条件下で物性を測定できるので精密な結果が得られるが、データ量を増やすには時間がかかる。また、物理条件を精密にコントロールしても、個々の測定結果に大きな違いが見られないことも多い。無駄をなくすには実験の目的を明確にし、試料、物理条件などを目的に合わせて設定する必要がある。

一方、野外の孔井で行われる検層では、一連の計

測で多量の物性データが得られ、各物性値の間の経験的關係式が得られるが、物理条件が制御できていないので、明確な結論が得られないことも多い。両方で研究を効率的に行うためには、物性を支配する一般的なメカニズムを明らかにし、それに基づいて実験や観測の結果を解釈したほうがよい。このため、岩石物性の研究では、岩石の微細構造に基づいたモデルを作り、モデルに対して物理や物理化学の法則を適用する。

3. 岩石の成因と微細構造の特徴

岩石は不均質な固体であるので、不均質を特徴づけている岩石の微細構造によって岩石を区分する。岩石物性の研究では地質学的岩石区分をそのまま利用できない。地質学的区分では、多くの場合、岩石の時代や成因、および構成鉱物が要素となる。こうした要素は岩石物性でもある程度有用ではあるが十分ではない。地質学的に同じ岩石名を持っていても異なる物性を示す岩石もあり、また、地質学的に異なる区分に属する岩石が似たような物性を示す場合もある。

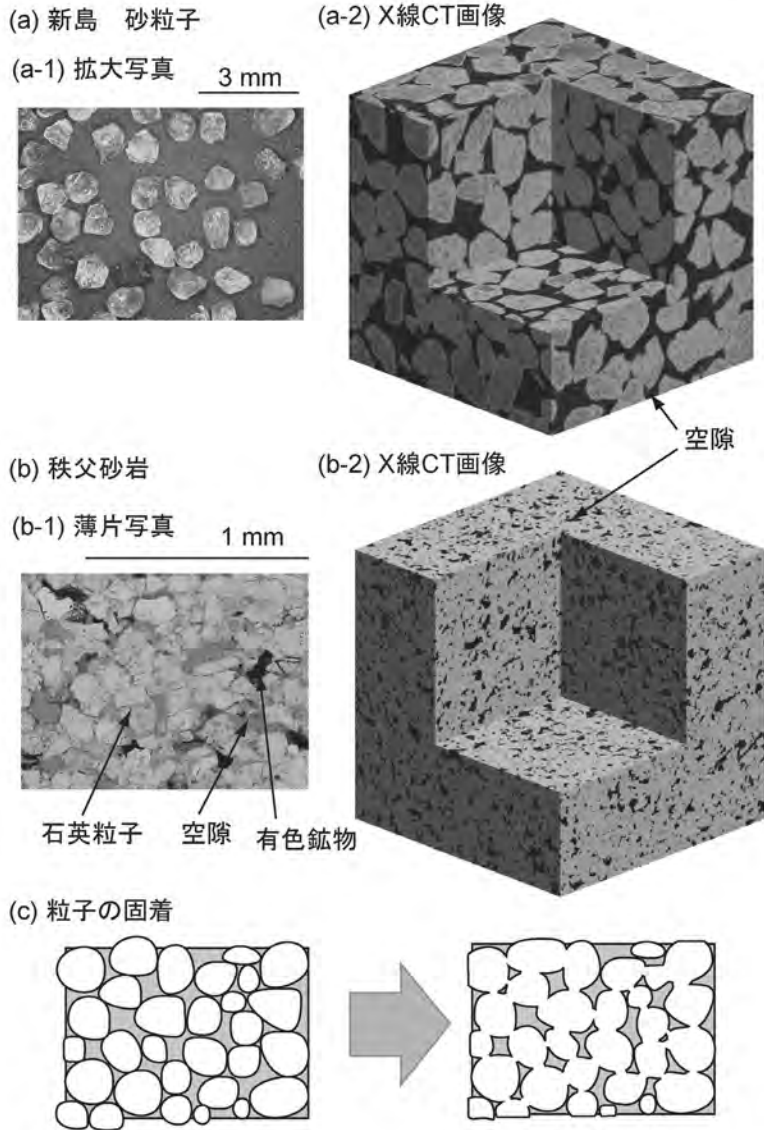
岩石の不均質を特徴づける微細構造は、構成鉱物粒子の大きさや固着の程度、鉱物粒子間の間隙の形状や大きさ、間隙の割合などである。これらは岩石が生成されるときに状況に強く依存しており、岩石成因時のさまざまなプロセスを反映している。

岩石の微細構造に関係する主要な成因プロセスは、

- (1) 溶融物質からの結晶化。
- (2) 川、海、湖など流体を介した堆積プロセス、陸・海域での斜面崩壊などによる堆積。
- (3) 陸域における火山噴火による溶岩や噴火に伴う碎屑物の堆積。
- (4) 上記成因による岩石あるいは未固結堆積物の圧力、温度、水の作用による硬化：続成作用、変成作用など。
- (5) すでにある割れ目の中の溶液(熱水など)からの沈殿や変質作用、水分蒸発後の残存物など、上記以外の成因。

である。

各プロセスで、岩石は成因を反映した微細構造を持つ。たとえば、(1)では結晶化温度が鉱物ごとに異



第3図 (a-1) 砂粒子(新島)と(a-2) 砂粒子をランダムパッキングした状態のX線CT画像, (b-1) 秩父砂岩の薄片写真と(b-2) そのX線CT画像. (b-1)では灰色の部分, (b-2)では点にする色の濃い部分が空隙. ランダムパッキング(a-2)では粒子間の隙間が大きな体積を占めるが, 粒子の結合により粒子間隙は狭くなり空隙体積が小さくなる(b-2).

なるので, 低温度で結晶化する鉱物は高温で先に結晶化した鉱物の隙間を埋め, 鉱物が密に詰まった構造となる. (2)では, 石英のような粘土化しにくい鉱物が川の流れや海の波で粒径がほぼ等しくなるよう淘汰されれば隙間の多い砂岩となり, 逆に水の動きがない場所では細かい粒子や粘土質のものが集まり泥岩となる. 淘汰の度合いが低いと, 粒径が揃わな

い石英粒子と粘土粒子などが混合した岩石となる. (3)では結晶質粒子とガラス質の細かい粒子が混合したものや, 完全に溶けた状態でガラス質あるいは非常に小さな結晶の集まりとなったものなどがある. (4)は(1)~(3)のプロセスに追加されるプロセスで, 硬化の度合いを反映した微細構造が現れる. 粒子の固着が強くなると, 隙間(空隙)が狭められたものや, 再

結晶により鉱物粒子の空隙がほぼ完全に塞がれた構造となる。(5)は生成条件が限られているが、岩石中の割れ目の中の少量の沈殿物が物性に大きな影響を与えることもある。

4. 空隙の役割

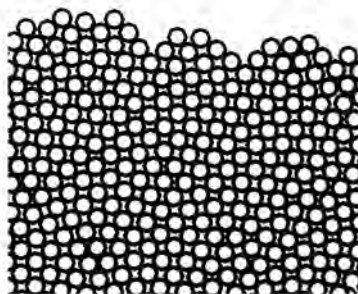
岩石の不均質性を示す微細構造は岩石中の隙間や空隙を含む。空隙には流体が存在する。流体は周囲の固体部分とは物性が著しく異なり、岩石の物性に大きな影響を持つため、微細構造の中で空隙は最も重要な要素である。空隙の構造はX線CTなどで調べることができる。第3図はその一例で、(a)は砂粒のパッキングを示す。(a-1)に示した砂粒のランダムなパッキングのX線CTの結果が(a-2)で、全体積に占める空隙の割合(空隙率)が大きい。(b)は粒子間が固着した砂岩である。(b-1)は砂岩の薄片の顕微鏡写真で、灰色の部分が空隙である。(b-2)のX線CTでは濃い色の部分が空隙である。空隙が点在しているのは、粒子の固着によって空隙部分が狭められたためである。(c)はパッキングした粒子が固着する様子を示したもので、固着の進行とともに接触部が広がり空隙部分が狭まり、空隙率が小さくなる。これに伴い、連結していた空隙が孤立するようになり、空隙内の流体のつながりが失われる。

空隙を含めた岩石の微細構造を明らかにすれば、これに基づいてモデルが作られ、物理学、物理化学、数理科学に基づいて岩石の物性が解釈される。このように演繹的に岩石物性を理解する方法は、経験的手法や統計的手法に基づくデータの解析法と対比して、ロック・フジックス(Rock Physics)的手法と呼ばれることもある。

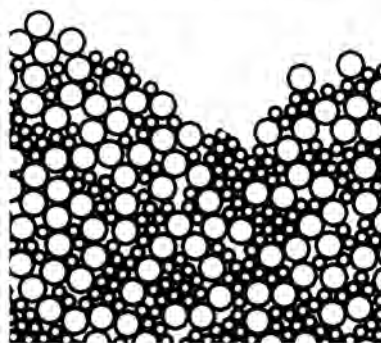
5. 岩石のモデル化

固体結晶が原子・分子の配列でモデル化されるように、岩石は微細構造に基づいてモデル化される。重要な違いは、岩石の不均質構造は結晶のように幾何学的配列の規則的繰り返しではなく、構成鉱物粒子や空隙のサイズ、配置、混合の状況などが不規則性を持つことである。岩石の物性を考える際に、構成鉱物(結晶)の物性も重要であるが、粒子の結合状況、空隙の形状とその結合の状態はもっと重要である。

(a) 同一径粒子の
ランダムパッキング



(b) 2種類の径の粒子の
ランダムパッキング

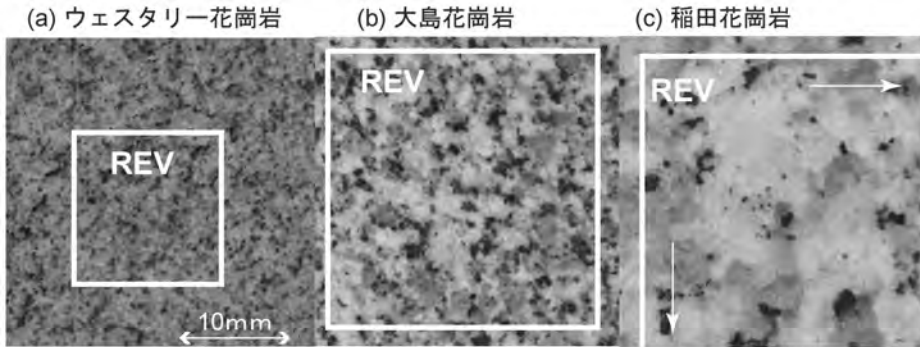


第4図 二次元ランダムパッキング(円柱のパッキング)の例。径が異なる円柱のパッキングでは、大きな径の円柱の間を径の小さな円柱がかたまりを作って充填している。(Vissher and Bolsterli, 1972, Nature 239, 504-507. より引用)

砂岩のように粒状鉱物(主として石英)で構成される岩石は、球状粒子のパッキングに基づいた微細構造モデルがよく用いられる。砂岩を構成する主要鉱物は石英であるから、石英粒子を球で近似したパッキングが最も単純なモデルとなる。

径が等しい球をランダムに詰め込むと、空隙率は39.9%となる。第4図(a)に径の等しい球の二次元ランダムパッキングの例を示す。径が異なる球の場合には大きな球の隙間に小さな球が入り込むため空隙率は小さくなる(第4図(b))。

このように、砂岩では鉱物粒子の粒径分布が微細構造を支配するため、砂岩の粒径分布は物性に影響する。砂岩の中には、板状の粘土鉱物を含むもの



第5図 最小体積要素 (Representative Elementary Volume : REV). REV以上の体積が示す巨視的物性が岩石のどの部分でも変わらないとき、この物性を岩石全体の巨視的物性とみなすことができる。REVの大きさは岩石が示す不均質サイズによって変化する。稲田花崗岩のように粒子サイズの大きいものは、REVが図面より大きくなる。以上は単に鉱物構成から判定したREVの大きさであり、割れ目を含む岩石では、割れ目の分布も考慮しなければREVの大きさを定義できない。

あり、粘土鉱物も物性に影響を及ぼす。粘土鉱物の物性は石英粒子とは大きく異なるので、そのまま粒子のパッキングモデルに組み込まれることはなく、付加的に扱われる。

パッキングした砂粒が地下に埋没し、温度・圧力による続成作用を受けると、再結晶作用や水から沈殿した鉱物によって粒子同士が結合される(第3図(c))。このとき、空隙の結合状態も変化し、岩石の物性も著しく変化する。変成作用では岩石中の空隙の形状や分布が変化し、さらに鉱物の配置や結晶軸の方向も変えられ、これらに方位依存性が現れ、岩石の物性に異方性が生じる。

空隙の形状は物性に大きく影響する。花崗岩のように結晶が隙間なく詰まった岩石では空隙は扁平な隙間でモデル化される。隙間の幅と長さの比を空隙のアスペクト比と呼ぶ。アスペクト比の小さい扁平な空隙は地震波速度に大きな影響を及ぼす。第2図で示された花崗岩の空隙率はどちらも2%程度であるが、地震波速度変化の違いは扁平な空隙(クラックと呼ばれる)の影響と考えられている。

6. 試料サイズ

物性を調べるときの試料の大きさについて述べる必要がある。岩石物性を研究する目的は、野外で観測されたデータを解釈するためである。このとき、小

さい岩石片での物性が野外観測結果と同じ巨視的物性と同等であることが保証されねばならない。岩石を細分し続ければ場所ごとに異なる不均質性を示すようになる。したがって、物性を議論するときには、どの部分を取り出してもすべて同じ性質を示すような最小の大きさを決める必要がある。この大きさをREV (Representative Elementary Volume)と呼ぶ。一般に岩石を構成する鉱物粒子が小さければREVは小さくてよいが、鉱物粒子が大きければ、REVは大きくなる。第5図は平均粒径の異なる3種の花崗岩を示す。REVのサイズはそれぞれ異なる。

7. 基本物性

流体を含む岩石の物性の中で主要なものは、1. 輸送特性、2. 力学特性、3. 電磁気特性である。輸送特性とは、岩石内部の空隙に含まれる流体の移動に関する特性であるが、岩石を流れる電流の主要なメカニズムはイオンの移動であるため、現象の類似性から、電磁気特性の一部も輸送特性とみなす場合もある。電磁気現象は、電磁場の変化が非常に緩慢な場合は、輸送特性として扱えるが、電界・磁界の変化が高速な高周波の電磁波では岩石を絶縁体とする誘電特性として扱う。両者は状況や目的に応じて使い分ける。

力学特性は、変形が完全に回復する弾性領域と、

回復不能な変形を生じる塑性あるいは破壊の場合に分けられる。弾性領域での物性は地下の探査に使われる地震波（あるいは音波）に適用できるため、非常に詳しく研究されている。

以下では岩石のモデル化と基本的物性との関連を示す一例として、輸送特性の一部である浸透率を取り上げる。

8. 多孔質岩石の輸送特性

流体を含む岩石の物性を特徴づける重要な境界は、流体移動の有無である。流体が移動しない場合は、流体と岩石を同一の系の中で扱えるが、流体が移動するとき、流体の移動に伴う物理現象、物理化学現象を考慮しなければならない。流体移動は力学的、電磁気的な物性も支配する。岩石の輸送特性はさまざまな場面で重要となる物性である。

流体が岩石中を移動するとき、流体の移動のしやすさを示すパラメータが必要である。地下の流体の多くは地下水であることから、圧力勾配と水の流速との関係を示す透水係数と呼ばれるパラメータがよく使われる。しかし、岩石の内部構造の特徴に着目すれば浸透率が有用である。浸透率は岩石中を流体が移動する際の各方向の流れに対する流路の実効断面積である。流体移動の場で流束密度（単位時間・単位面積あたりの物質の移動量）を支配するのは、それらの間の圧力勾配（ある点における圧力差＝圧力変化の微分値）と流体の粘性であるので、これらの関係式の係数が浸透率である。

単位面積あたりの流体の移動速度＝

$$\text{浸透率} \times \text{圧力勾配} / \text{粘性係数}$$

厳密には速度と圧力勾配はベクトル量であるので、浸透率はテンソル量であるが、等方性を仮定してひとつの値で表されることが多い。

実際の地下の浸透率を決めるのは地下の割れ目である。大きな割れ目の浸透率は岩石中の空隙による浸透率より数桁大きい値を示す。空隙は曲がりくねったさまざまな太さの管としてモデル化され、割れ目はランダムな凹凸を持つ面が向きあってできる隙間としてモデル化されることが多い。大きな割れ目が存在する岩体では、小さな岩石片を用いる実験室での測

定は実態を反映していない。しかし、石油や水（天然ガス）の貯留層を調べる場合には、貯留岩となる空隙率の高い砂岩や、流体移動を遮蔽する空隙率の小さい泥岩などの実験室での浸透率が重要な知見を与える。

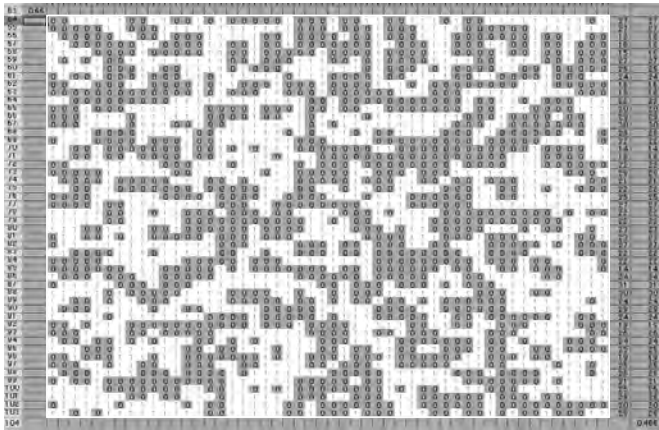
9. 輸送特性の臨界的挙動

浸透率は微細構造のわずかな変化によって桁で変化する。これは岩石の輸送特性に見られる重要な特徴である。岩石の輸送特性は、流路となる空隙のネットワークでモデル化されるが、モデルに含まれるパラメータが輸送特性を示すパラメータに対してある閾値を持つと、閾値近傍で輸送特性が急激に変化するような、臨界的挙動が現れる。

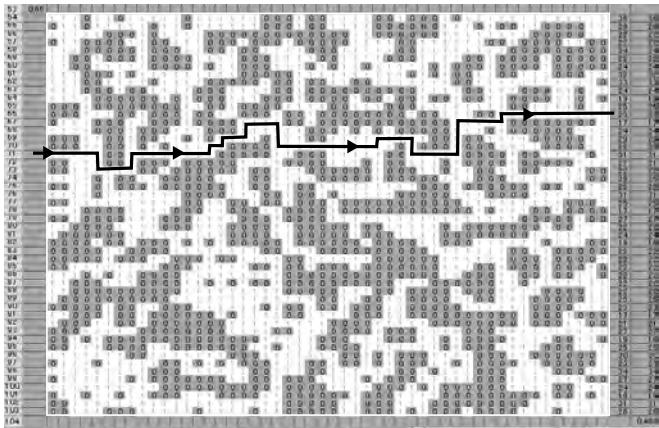
単純な例として、空隙同士のネットワークを、2次元の正方格子点を繋ぐ線でモデル化する。格子点に流体が入る確率をランダムに与え、隣接する格子点に流体が入れば両者を結合する流路ができたと思なす。この条件で50点×50点の格子点が結合する様子を示したものが、第6図(a)、(b)である。流路は格子点のあちこちに現れ、塊（クラスター）を形成する。流体が格子点に入る確率とともにクラスターの大きさも変化し、端と端を繋ぐ通路（巨大クラスター）が完成すれば流体が系を横切ることができる。第6図(c)に示すように、格子点を流体が占有する確率のわずかな違いで流路クラスターの大きさが著しく変化する場所が存在する。占有確率の増加とともにクラスターは徐々に大きくなり始め、ある場所から急激に大きくなる。流路クラスターの格子点占有率がある閾値に達すると、端と端を連結する巨大クラスターが現れる。岩石中の空隙で形成される流路でもこれと類似のことが生じていると考えれば、輸送特性が第6図(c)のように物理条件の変化に対応して急激に変化すると予想される。このような現象はパーコレーション(percolation：浸透)と呼ばれ、物質の相転移など、多くの場面で現れるため物理学で詳しく研究されている。

実際、管路を円筒管で近似すると浸透率は管の径の4乗で変化するため、管の径が小さくなれば、浸透率は著しく減少する（向かい合う平行平面の近似では、面幅の3乗）。ネットワーク内の個々の流路の流れに対する抵抗は、実効的には流路の断面に大きく依存するので、わずかな状況の変化が浸透率に大きく

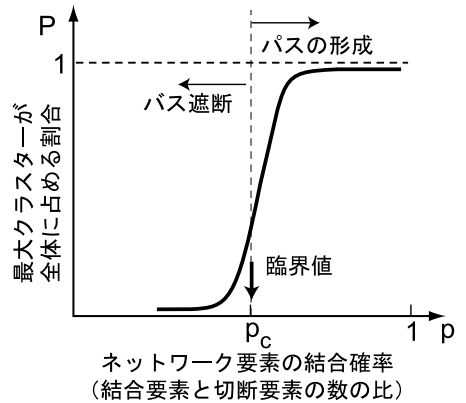
(a) パス形成なし（巨大クラスター無し）占有率 46.6 %



(b) パス形成（巨大クラスター出現）占有率 48.8 %



(c) 要素結合確率に対する変化



第6図

エクセルによる簡単なシミュレーション(50×50セル)の例。50×50のセルに1~0の数値をランダムに発生させ、閾値 p を超えた場合を“1”，超えない場合を“0”とする。“1”のセルに隣接する上下左右のセルに“1”が現れたときセル境界が結合(白色)，隣接セルが“0”の場合は遮断(灰色)とする(領域はすべて“1”のセルで囲まれている)。(a)，(b)は $p=0.66$ としたときの例で，白いセルの占有率のわずかな増加で両端を繋ぐパスが形成されることを示す。(c)はこの状況を概念的にグラフで示したもので，より正確にはもっと多数のセルを用いてシミュレーションしなければならない。

影響することが理解できる。

10. 粒状多孔質岩石の輸送特性

粒状多孔質岩石は粒子のパッキングでモデル化され，輸送特性は空隙の連結によるネットワークでモデル化され，流路のわずかな変化が浸透率を大きく変える。以下では，実例として砂岩の粒径分布と圧力下での浸透率との関係を見てみよう。

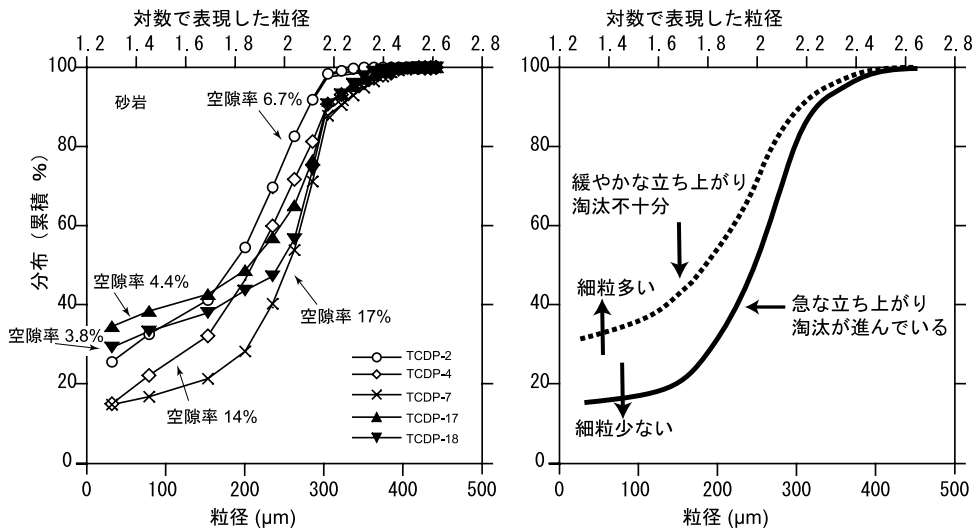
第7図は1999年の集集地震を発生させた台湾のChelungpu断層付近の調査井から得られた砂岩の粒径分布である(Takahashi *et al.*, 2005)。粒径は砂岩薄片を顕微鏡下で観測し，カウントしたデータをもとに求めた。粒子の淘汰が進んでいるものは粒径がある値に集中し，累積分布曲線は急激な上昇を示し，淘汰の度合いが低いと粒径は広い分布幅を持ち累積

分布曲線はゆるやかな上昇を示す。空隙率は微細粒子の割合の多いものほど小さくなっており，上で見た粒径の異なる粒子のパッキングが小さい空隙率を与えることを反映している。

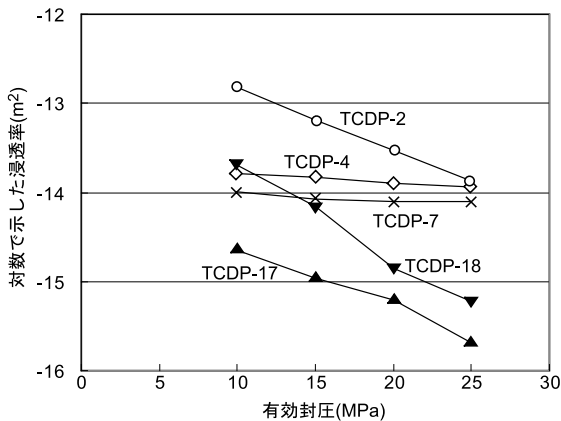
粒子の淘汰が進んだ岩石では，空隙率が大きくなり，連結した空隙ネットワークが形成されるが，淘汰の進まない岩石では，空隙率も小さく，大きな粒子の隙間に小さな粒子が入るため流路の幅が狭まり，流体は通りにくくなる。こうした微細構造の違いが圧力下での浸透率の変化に反映される。

第8図はそれぞれの浸透率の封圧に対する変化(Takahashi *et al.*, 2005)で，淘汰の進んだ岩石では封圧に対する浸透率の変化が小さいが，淘汰の進まない岩石では浸透率は封圧の上昇により急激に小さくなる。

封圧による浸透率の減少は，浸透率がパーコレー



第7図 台湾Chelungpu(車籠埔)断層掘削により得られたコア試料中の砂岩の粒径分布. 粒径分布の範囲の狭いものは累積分布曲線が急勾配となる. 細かい粒子を含む砂岩は空隙率が小さくなる.



第8図 第7図の各岩石試料における浸透率の封圧変化. 細かい粒子を多く含むものは封圧によって浸透率が小さくなるが, 細かい粒子の量が少なく粒径が淘汰されている岩石は封圧による変化が小さい.

ジョンによってモデル化される物性であることを示唆する. 岩石の中にはさまざまな幅の流路からなるネットワークが形成されているだろうから, この中の狭い流路が流動特性を支配する. つまり, 空隙ネットワークの中の隘路となる流路の挙動が全体の特性を決めるため臨界的挙動が現れ, それらの複雑な総体とし

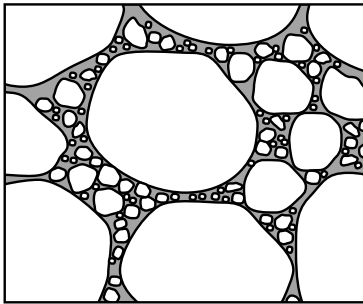
て, 桁で変化する物性の現れることが理解できる.

11. 混合粒子系の空隙ネットワークによる解釈

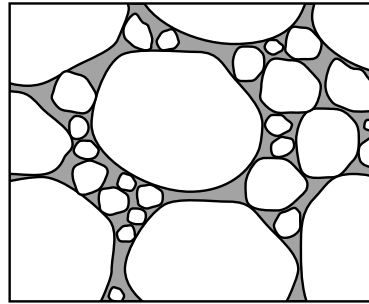
第9図は粒子が混合した状態を示したものである. (a)は同程度の粒径を持つ粒子が混合したもので, (b)は粒径の異なる粒子が混じったものである. (a)では粒子間隙が大きいので空隙率が大きくなる. (b)では大きい粒子の間隙に細かい粒子が入り込み, 間隙が粒子で埋められて空隙率は小さくなる. 岩石に封圧が加わると, 粒子は圧縮され間隙は狭められるが, 粒径が同程度であれば接触した粒子が支えあい, 粒子が破壊する圧力まで間隙をほぼそのまま保持するので, 粒子が破壊する圧力以下では大きな空隙が残される. 粒径の異なる粒子が混合したものでは, 粒径の細かい粒子が圧縮されるので, もともと狭い間隙はさらに狭くなる. 細かい粒子の中で束縛のないものは, 移動して隙間に入り込み, 目詰まりを起こすように流体の通路を塞ぐこともあり, 流路が遮断される.

実際の砂岩の浸透率の圧力変化では, 第6図のような臨界的变化は観測されないが, ネットワークの要素となる流路のサイズが第6図のモデルのように均一ではなく, さまざまなサイズのものから構成されていると考えれば, それらが複合した性質が現れる. 大きな

(a) 微細粒子の多い岩石

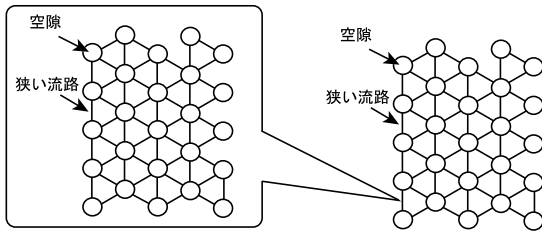


(b) 微細粒子の少ない岩石

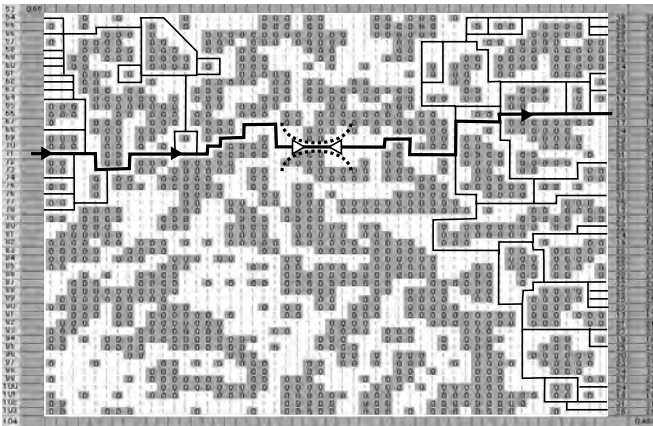


第9図 砂岩の浸透率の封圧による変化を解釈するための、微細構造モデル。微細粒子の多い岩石は粒子間により細かい粒子が入り込み、流体の流路を狭める。封圧による接触部部の圧迫は流路をさらに狭める。微細粒子の少ない砂岩は粒子が圧力で破壊されない限り、互いに圧力を支え合う。もとの流路が大きいいため接触が強化されても流路が塞がれることは少ない。

(a) ネットワークの階層構造



(b) 隘路形成



第10図 ネットワークの階層構造とネットワーク中の隘路。

- (a) ネットワークの階層構造：大きな粒子の隙間に小さな粒子が混じってネットワークを形成するとき、大きな粒子で構成された空隙を結合するネットワークの要素はさらに規模の小さいネットワークとみなすことができる。このようにネットワークの要素自身がネットワークという階層的ネットワークを考えると、輸送特性はより低位の階層（微小粒子ネットワーク）が支配することになる。
- (b) ネットワーク中の隘路：ある方向への流れは必ず隘路を通過しなければならない。隘路は複数の流路を持つクラスターどうしを結合するごく少数のネットワーク要素で構成され、特定方向への流体の流れやすさを事実上支配している。

粒子が構成するネットワークが、さらに流路の幅の小さい小規模なネットワークを結合要素とし、これらがさらに下部のネットワークを階層的に構成すると考えれば、第10図(a)のようなモデルが考えられる。下部のネットワークに臨界的の性質が見られても、ネットワーク

全体としては漸近的变化を示すことになる。

ネットワークには隘路が存在する。第10図(b)は第6図(b)で示したネットワークであるが、図の範囲内で左端から右端に到るパスの中に左右のクラスターを結合する唯一の要素が存在し、それを白三角と点線

で囲って示す。左右のクラスターの中では左右に通じる複数の経路が形成されているが、流体が左から右へ移動するには隘路を必ず通る必要がある。こうした隘路の幅は、下の階層で構成粒子が小さくなるほど狭くなるので、微細粒子の割合が大きいほど隘路の幅が狭くなり、圧力による閉鎖も受けやすくなって、浸透率の圧力依存性が顕著になる。

微細粒子の一部には粘土が含まれる。粘土は水による膨潤により流路を完全に塞ぎ、浸透率を減少させる場合がある。また、粘土中のイオンが伝導に寄与するため、電気伝導度は複雑な挙動を示し、粒子集合体のネットワークモデルから得られる伝導度にさらに付加的な伝導性を考慮しなければならない。粘土の効果についてはここでは議論しない。

12. まとめ

以上のように、岩石物性の研究ではまず単純な概念的モデルを考え、ここで生ずる物理現象を調べた上で、複雑な不均質固体である岩石の物性を説明する。これにより、現象の背後にあるメカニズムが明らかとなり、観測データから地下の状態を正確に把握することができる。岩石を複雑な系とみなし、物理的説明を放棄して経験則だけに頼っているのは、現象の本質がわからず、観測データを正しく解釈できない。少ない実験データであっても合理的な説明を探し、その原理にしたがって実験や観測の解釈を行い、検証実験を進め、別の要因を考慮しながらモデルの適用範囲を広げていく。岩石物性の研究ではこうした手法が一般的である。

なお、この記事では煩雑さを避けるため、必要なもの以外、個々の参考文献を本文中に示していない。基本的内容の多くは一般の岩石物性の教科書に出ており、力学物性を中心としたものはMavko *et al.* (1998)、より一般的なものはGuéguen and Palciauskas (1994) などがある。また、パーコレーションについては、Essam (1980)、Stauffer (1985) などがある。

謝辞：地質情報研究部門 増田幸治氏、京都大学の薛 自求氏からは有用なコメントをいただいた。

文献リスト

- Essam, J. W., (1980) : Percolation theory, Reports on Progress in Physics, Volume 43, Issue 7, pp.833-912.
- Guéguen, Y and Palciauskas, V. (1994) : Introduction to the Physics of Rocks, Princeton University Press. 邦訳：西澤 修・金川久一 訳, 岩石物性入門, シュプリンガー・ジャパン, 2008.
- 松澤進一 (1995) : 封圧下における岩石の弾性波速度測定とその適用 千葉大学理学研究科地学専攻修士論文
- Mavko, G., Mukerji, T., and Dvorkin, J. (1998) : The Rock Physics Handbook, Cambridge University Press.
- Stauffer, D. (1985) : Introduction to Percolation Theory, 1985, 邦訳：小田垣 孝 訳, 浸透理論の基礎, 吉岡書店 1990
- Takahashi, M., Kitamura, K., Masuda, K., Ito, H., Song, S-R., Wang, C-Y. (2005) : Pressurization effect on bulk properties and pore connection of sedimentary rock specimens from TCDP cores., American Geophysical Union 2005 Fall Meeting (2005/12. San Francisco), T51A-1325.
- Vissher, W. M. and Bolsterli, M. (1972) : Random packing of equal and unequal spheres in two and three dimensions. Nature 239, 504-507.

NISHIZAWA Osamu, NAKASHIMA Yoshito, TAKAHASHI Miki and KITAMURA Keigo (2009) : An Example of Microstructure-Controlled Physical Properties in Rocks: Permeability Changes under Confining Pressure.

<受付：2009年1月14日>