

氏名	うえ はら しん いち 上 原 真 一
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 2465 号
学位授与の日付	平成 14 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 地 球 惑 星 科 学 専 攻
学位論文題目	Permeability Structure of the Median Tectonic Line in Ohshika - mura, Nagano Prefecture, Central Japan 長野県大鹿村における中央構造線の透水性構造
論文調査委員	(主 査) 教 授 嶋 本 利 彦      教 授 増 田 富 士 雄      助 教 授 山 路 敦

### 論 文 内 容 の 要 旨

断層帯における流体移動は、地球内部における流体循環、地震の発生機構、石油の断層シール問題など様々な問題において重要である。しかしながら、流体移動を規定するはずの断層帯の浸透率構造については数例の測定があるだけで、体系的な研究はいまだ十分になされていない。本論文では、日本列島内陸部で最大の断層である中央構造線 (MTL) 沿いの断層岩について、高圧三軸変形試験機を用いて高圧下での浸透率の測定を行なった結果を報告する。長野県上伊那郡大鹿村の北川、安康地域に見られる MTL 露頭およびその周辺の地域では、マイロナイト (幅約 1000m)、カタクレーサイト (50-200m) および未固結断層岩 (5-30m) といった断層岩が分布している。領家帯の断層岩の母岩は主にトータル岩であり、未固結断層岩帯はその東側で三波川変成岩 (主に泥質片岩) と接している。測定試料は北川、安康地域の MTL 露頭およびその周辺から採取した。浸透率の測定に使用した試験機には油圧サーボ式間隙圧制御装置が装備されており、測定の手法としては間隙圧振動法 (間隙圧 20MPa) を用いた。間隙流体および封圧媒体には窒素を用い、室温下、有効圧が最大で 180MPa という条件で測定を行なった。また、より簡便な測定法である定差圧流量法も用いた。

有効圧を 10MPa から 180MPa に上げた際、断層ガウジの浸透率は、内部の微小割れ目の開口幅の減少や粒状部の圧密によって約 3 桁減少した。今回の測定での有効圧の範囲では、断層ガウジの浸透率は、隙間がカルサイトなどで埋められたカタクレーサイトやマイロナイトに比べて 2 桁以上大きいという結果が示された。このことから、領家帯と三波川帯の物質境界付近にある未固結断層岩帯が地下水の主な流路となっていることが予想される。粘土質なガウジは高封圧下で  $10^{-19} \text{m}^2$  という低い浸透率を示すが、このガウジの分布は非常に限られており、またその連続性は悪い (粘土質ガウジの構造は最近の活動によって乱されているように見える)。このような粘土質ガウジが MTL の断層帯深部でもあまり広く分布していないならば、断層運動時の摩擦発熱による間隙流体圧の急激な上昇 (thermal pressurization) の発生は考えにくい。有効圧の上昇と下降に伴って、未固結断層岩の浸透率は強いヒステリシスを示し、減圧時の浸透率は最高圧時の浸透率の影響を記憶する傾向が認められる。このことから、未固結岩の圧密はほぼ永久変形であることが示唆される。従って、未固結断層岩の浸透率の変遷を考える上で、過去の圧力履歴は非常に重要である。一方、カタクレーサイトやマイロナイトについてはそのようなヒステリシスは小さく、これらの浸透率の変化はほぼ弾性的な内部割れ目の開閉によると考えられる。

三軸変形試験の結果から、断層岩の浸透率は変形によって非常に大きな影響をうけることが判明した。断層ガウジの浸透率は、変形の初期段階で急激に約 2 桁下がり、その後非弾性変形領域においてもゆっくりと減少し続ける。一方カタクレーサイトについては、変形初期の浸透率の減少はガウジのそれよりも小さく、破壊が起きる前に急激な上昇が見られる。このような浸透率の変化は、変形初期のほぼ弾性的な圧縮、および破壊前後のダイラタンシーを伴う非弾性変形によく対応している。このことから、セメンテーションの進んだカタクレーサイトが地震発生の直前または地震発生時に変形するならば、カタクレーサイト帯は地下水の流路に変わりうるということが予想される。それに対し、ガウジ帯では断層運動に伴って流体が通りやすくなるとは考えにくい。従って、地震活動の前もしくは最中では、断層帯の浸透率構造がそれ以前の状況から著しく

変化する可能性がある。また、ガウジとカタクレーサイトの内部摩擦角はそれぞれだいたい36度、45度となり、典型的な脆性的岩石の値を示している。

破碎した岩石においては、割れ目が流体の通路としてきわめて重要な役割を果たしている。密な割れ目をもつ破碎帯が断層帯においてもっとも浸透率の高い部分である可能性は大きい。しかし、割れ目の分布は複雑であり、また一つ一つの割れ目の浸透率はそのスケールに依存している可能性が高く、地下深部での破碎岩の浸透率を評価することは容易ではない。本論文では、その第一歩として、天然の割れ目および表面を研磨した人工割れ目を対象に、180MPaまでの有効圧下における浸透率の測定と、その表面形状の測定およびHertz理論によるその接触変形の解析を行ない、ひとつの割れ目の高圧下における浸透率について調べた。三波川帯の泥質片岩および領家帯マイロナイト中の人工および天然割れ目について、cubic lawを仮定して浸透率の測定結果から有効圧下の開口幅を求めた。一方、割れ目の表面形状を測定し、代表的なアスペリティの接触変形の解析結果から開口幅を計算した。これらの値は完全に一致しないまでも、有効圧の上昇に伴う浸透率変化の様子の全体的な特徴はよく説明できる。微妙な食い違いは、多数のアスペリティが複雑な接触変形をしているためと考えられる。

以上のように、本論文では、MTL断層帯の浸透率構造を明らかにし、地震発生直前および地震発生時にその構造がどのように変化するかを示し、また割れ目沿いの流れを評価することを試みた。これらの結果は、断層帯における流体移動の問題を解く際に、有益な拘束条件を与える。今後、断層帯の浸透率構造を完全に理解し、地震活動サイクルにおけるその構造の変化モデルを完成させるためには、少なくとも、大きな剪断歪の浸透率構造への影響、温度の影響、地下深部での割れ目の影響の完全な評価、および地震活動休止時における断層岩の物理的・化学的な圧密とセメンテーションについて調べる必要がある。

#### 論文審査の結果の要旨

断層帯は流体の通路になっている可能性が高く、地球内部における流体循環、流体と地震発生の関わりなどを考える上で非常に重要である。しかし、断層帯がどの程度流体を通しやすいかを、地下深部の条件下で調べた研究は数例しかなく、断層帯の浸透率構造（内部構造と流体の通りやすさ）の実体はよくわかっていなかった。本研究において上原氏は、鹿塩温泉で有名な長野県大鹿村において、日本列島内陸部で最大の断層である中央構造線の巨大断層帯を詳しく調べ、ガス圧式高圧三軸変形透水試験機を用いて断層帯と母岩を構成する岩石の浸透率の測定をおこなった。浸透率は間隙圧振動法（間隙圧20MPa）と定差圧流量法を用いて測定された。間隙流体および封圧媒体には窒素を用い、測定は室温下、有効圧が最大で180MPaという条件（地下約10kmに相当）でおこなわれた。

上原氏の研究成果は以下の3点に要約される。

##### (1) 中央構造線断層帯の浸透率構造

長野県上伊那郡大鹿村の北川と安康地域に見られるMTL露頭およびその周辺地域では、マイロナイト（幅約1,000m）、カタクレーサイト（50-200m）および未固結断層岩（数m～数10m）が分布している。領家帯の断層岩の母岩は主にトータル岩であり、未固結断層岩帯はその東側で三波川変成岩（主に泥質片岩）に接している。測定試料は北川・安康地域のMTL露頭およびその周辺から採取した。本研究において上原氏はまず、地下深部の条件を再現するために、有効圧を10MPaから180MPaに順次増加させ、圧力の影響が断層岩の浸透率にどのような影響を与えるかを調べた。その結果、断層帯の中心部を構成する断層ガウジは、隙間が方解石などで埋められたカタクレーサイトやマイロナイトに比べて2桁以上大きい浸透率をもち、領家帯と三波川帯の物質境界付近にある未固結断層帯が流体の主な流路となり得ることが判明した。しかし、断層ガウジ中に部分的に存在する細粒粘土質断層ガウジは、高封圧下で $10^{-19}\text{m}^2$ という低い浸透率を示しており、断層深部では、流体を通しやすい断層破碎帯中に、流体をほとんど通さない粘土質ガウジ層が連続よく発達している可能性がある。有効圧を10MPaから180MPaまで増加させると、断層ガウジの浸透率は約3桁、固結した断層岩と母岩の浸透率は1～3桁減少することが明らかになった（流体は深部では顕著に通りにくい）。上原氏はまた、有効圧をサイクルさせた際に未固結断層岩の浸透率は強いヒステリシスを示し、最高圧時の浸透率の値が保持される傾向があることを見いだした。従って、断層帯の浸透率構造を推定するためには、未固結断層岩の圧力履歴を知る必要がある。一方、固結した断層岩と母

岩のヒステリシスは非常に小さく、それらはほぼ弾性的にふるまうこともわかった。地震時の高速摩擦運動に伴う摩擦発熱によって間隙流体圧が急激に上昇し、断層の強度を大きく低下させる可能性が古くから指摘されている (thermal pressurization)。上原氏の結果によれば、このような流体圧の増加が起こるかどうかは微妙である。深部の断層ガウジ帯が地表付近でみられるものと同様であれば、thermal pressurization が起こる可能性は低い。しかし、地表で局所的に見られる粘土質断層ガウジが深部で連続的に形成されていれば、数 km 以深において thermal pressurization が起こる可能性がある。

### (2)断層岩の浸透率に対する変形の影響

上原氏はさらに、断層岩を用いて三軸圧縮試験をおこない、断層岩の浸透率は変形によって大きく変わることを、また未固結な断層ガウジと固結したカタクレサイトでは変形の影響が全く違うことを初めて明らかにした。断層ガウジの浸透率は、変形の初期段階で急激に約 2 桁下がり、その後の非弾性変形の進行とともに浸透率はゆっくりと減少を続ける。一方、カタクレサイトでは、変形前の浸透率はガウジのそれよりも小さいが、主破壊前から浸透率は急激に大きくなり (破壊の前のダイラタンシーに対応)、ガウジとほぼ同じくらい流体を通しやすくなることが示された。これらの結果は、カタクレサイトが地震発生の前もしくは発生時に変形するならば、断層破碎帯からカタクレサイト帯に地下水の流路がスイッチする可能性があり、断層帯の浸透率構造は決して一定ではなく、地震サイクルにおいて時間的に変化しうる可能性を示した点で重要である。

### (3)破断面沿いの浸透率

断層帯においては岩石の破壊した部分がかつても流体が通りやすいゾーンとなることが多く、そこでは割れ目が流体の通路としてきわめて重要な役割を果たしている。しかし、この破断部の浸透率の完全な見積もりは現状では難しい。破壊した岩石の浸透率を推定するには、個々の破断面の浸透性 (スケールに依存している可能性が高い) と、複雑な破断系の評価が必要である。上原氏は、この複雑な問題に取り組む第一歩として、三波川帯の泥質片岩と領家帯マイロナイト中の天然の割れ目および表面を研磨した人工割れ目を対象に、180MPa までの有効圧下における浸透率を測定して、破断面の開口幅を見積もった。同時に、破断面の表面形状を測定し、Hertz 理論を適用して圧力下におかれた破断面の開口幅を求めた。両方の結果は多少食い違っているが、有効圧の上昇に伴う開口幅の減少の全体像については良い一致が得られ、接触解析が割れ目沿いの流体移動の見積もりに有効であることを示した。

以上のように、上原氏は、中央構造線断層帯の浸透率構造を明らかにし、地震発生前から地震発生時に浸透率構造が大きく変化する可能性が高いことを示すとともに、破断面沿いの浸透率を評価することを試みた。これらの結果は、断層帯における流体移動の問題を解く際に有益な拘束条件を与えるばかりでなく、今後の研究課題を浮き彫りにした。

以上の研究結果を総合的に判断して、本論文が理学博士の学位取得に十分な内容をもつものと結論した。