

第 271 回地質調査所研究発表会講演要旨*

特集：陸域地震の震源域を探る —物質科学と地震発生モデルの接点—

地表に露出するかつての震源域 —畑川破碎帯を例として—

藤本光一郎¹ 大谷具幸² 宮下由香里³ 重松紀生⁴
田中秀実⁵ 小林洋二⁶ 富田倫明⁶

地表発生過程モデル化するにあたり、断層深部の地震発生域に存在する岩石の状態を把握し、その物性や変形機構を明らかにすることは非常に重要である。かつての震源の深度の岩石がその後の地殻活動によって上昇し、現在地表に露出している場所には、かつての地震活動が岩石の変形構造として記録されている可能性がある。我々はそのような可能性がある場所の一つである阿武隈山地東部の畑川破碎帯を対象として調査を進めている。

畑川破碎帯は、南部北上帯（東側）と阿武隈帯（西側）の構造境界であるとされ、白亜紀後期の花崗岩を主な母岩として流動的な塑性変形で形成された左側ずれセンスの卓越するマイロナイトが周囲に広く分布する。マイロナイトの形成は白亜紀の花崗岩の貫入とそれほど時代の変わらない時代と考えられる。総変位量は、畑川破碎帯を挟んで分布する白亜紀以前の堆積岩や変成岩の分布などから、60 km という見積もりもある。

我々の調査の結果、真野川から富岡川まで南北約 40 km にわたり、畑川破碎帯を東西に横切るルートについて、ほぼどこでも、幅 100 m 前後のカタクレーサイト帯と、それに隣接する最大幅約 1 km のマイロナイト帯が分布し、さらに周囲の変形の弱い岩体中に幅が数 mm から数 m の時代的にはより若いと考えられる小規模な剪断帯が多数見られた。さらに、アプライトや花崗斑岩などの火成活動による岩脈や熱水活動の鉱物脈が分布する。岩脈と断層岩の切断関係から、マイロナイトの形成前からカタクレーサイト形成後まで、いくつかのステージの火成活動が見られ、畑川破碎帯の活動との関連が示唆される。

現在地表で観察される畑川破碎帯は白亜紀に活動した大規模な左横ずれ断層の 5~10 km 程度の深度を観察していると考えられ、その物質科学的な解析は陸域地震の発生機構の解明に貢献することが期待される。

(¹国際協力室, ²地殻熱部, ³地震地質部, ⁴早稲田大学, ⁵愛媛大学, ⁶筑波大学)

Keywords: Hatagawa fracture zone, Cataclasite, mylonite, granite

化学成分分析からみた畑川破碎帯における 流体活動の痕跡

大谷具幸¹

地下深部の震源域がどのような環境におかれているか推定することは、地震発生を考える上で重要である。現在、畑川破碎帯をモデルフィールドとして、陸域断層の震源域近くで形成されたと考えられる断層岩類について研究が進められており、ここでは特に、カタクレーサイトの化学成分分析の結果について報告し、深部断層破碎帯における流体活動について考察を行う。

カタクレーサイトの分布を明らかにするためにフィールド調査を行い、カタクレーサイトが中央部（重松, 1994）とあわせて南北約 40 km にわたって分布することを点的ながらも確認した。これらのカタクレーサイト中には、緑れん石、緑泥石の存在が確認された。緑れん石は 200°C 以上の変質作用により形成されることが知られており (Henley *et al.*, 1984), カタクレーサイトの形成温度も同様に 200°C 以上であったと推測される。

カタクレーサイト化の程度と化学成分の関係を検討するために、蛍光 X 線分析及び高周波誘導加熱赤外吸光度計により断層岩試料の化学成分を求めた。畑川破碎帯北部のルートではカタクレーサイト化に伴って以下の傾向が認められた。増加: K₂O, LOI, Rb; 減少: Fe₂O₃, MnO, Na₂O, Sr, Nb, Zr。また、畑川破碎帯南部のルートでは、カタクレーサイト化に伴い、増加: SiO₂, LOI; 減少: Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, P₂O₅, TiO₂, MgO, Ba, Sr, Nb, Zr という傾向が見られた。ルートによって異なる傾向が示されているが、これはカタクレーサイトの原岩の違い、あるいはカタクレーサイト化、あるいはそれに伴う変質作用が生じたときの断層破碎帯のおかれていた環境の違いを反映していると思われる。また、カタクレーサイト化に伴って H₂O⁺ が明瞭な増加を示さないことから、今回の分析結果の範囲では破碎帯における含水鉱物の明瞭な増加はなかったと考えられる。 (¹地殻熱部)

Keywords: Hatagawa fracture zone, cataclasite, chemical analysis

*平成 12 年 12 月 22 日, 23 日 本所(つくば市)において開催

畑川破砕帯近傍に分布する岩脈の K-Ar 年代と
方位分布富田倫明¹ 小林洋二¹

畑川破砕帯近傍には多くの岩脈が露出している。これらの岩脈は幅数 cm～数 m の規模で破砕帯の周辺部に主に分布し、特に花崗斑岩質岩脈の分布には指向性が見られ、岩脈貫入時に一様な最大水平主応力軸が北北西-南南東から北西-南東に存在していたことを示すものと考えられる。これらの岩脈の K-Ar 年代測定を行うことにより、畑川破砕帯の構造発達史を理解すると共に岩脈群の形成条件の解釈を行った。

畑川破砕帯近傍に露出する断層岩化の見られない未変形の花崗岩類について K-Ar 年代測定をした結果、花崗岩質の母岩と岩脈が 90 Ma～120 Ma に貫入したことが明らかとなった。この結果は久保・山元(1990)による結果に一致し、特に畑川破砕帯に見られる断層岩を貫く岩脈(93.5±4.7 Ma(全岩), 96.8±4.8 Ma(カリ長石))と断層岩の母岩となる花崗岩質岩類(97.4±4.9 Ma～114±6 Ma)は、それぞれが同時もしくは近い時期に貫入したことを示した。このことは断層岩形成と、岩脈を含む火成活動が近い時期に起こっていたことを示す。

本研究地域から西方 20 km の棚倉破砕帯近傍に分布する花崗岩体(石川岩体)において、95.6±4.8 Ma(白雲母)を示すペグマタイトから紅柱石が見いだされている(黒沢私信, 2000)。このことはペグマタイト形成当時、付近が圧力 0.4 GPa 以下の環境下(地下 10 km 以浅)にあったことを示し、現在石川岩体とほぼ同じ標高で露出する同時期の花崗岩についても同様な環境を与えることが可能である。さらに畑川破砕帯に分布するマイロナイト中の石英の C 軸フェブリック(重松, 1994)から、マイロナイトの形成は 400°C 前後で 0.4 GPa 以下の環境下で形成されたと考えられる。現在においてこのような環境に最も近い場所として、北アルプス地域が考えられる。北アルプス地域は 1 Ma 前後の花崗岩の存在し(原山, 1994)、また現在も火山活動が認められるような高温地帯の群発地震域であり、震源の最下限の深さが 7 km 以浅である(和田・伊藤, 1995)。(筑波大学)

Keywords: K-Ar age dating, Hatagawa Fracture Zone, dyke, dike

南部糸魚川-静岡構造線地域における化石震源域
—震源域の応力場解析—田中秀実¹ 重松幸志¹

糸魚川-静岡構造線の南部地域に露出する、同断層(以下南部糸静線)の断層破砕帯は、糸静線西部の赤石山地の上昇に伴って断層の深部が露出していることが知られている。最近の数年間の当地域の断層破砕帯の検討の結果、南部糸静線北部地域の断層の西側のスレートを原岩とする破砕帯には、石英脈が頻りに挟まれ、それらの石英脈は、一様に著しい波状消光を示し、癒合割れ目、変形ラメラ、キンクバンドといった、脆性と延性の中間的な性質を持つ変形様式が普通に認められた。

そこで南部糸静線北部の 2 露頭(不動橋および上湯島露頭)の破砕帯相当部分に高密度に分布している石英脈から定方位試料を採取し、(1)充填/癒合割れ目、(2)変形ラメラ極と石英 c 軸、(3)キンク帯中の石英と母晶石英の c 軸、について合計 200 の各方位測定を行い、それぞれの方位分布密度から古応力場を解析した。その結果、最大圧縮主応力軸(σ_1)が断層面に対して 60°～90°と高角度をなすことが明らかになった。また二方向に発達する微小延性剪断帯の 2 等分角を用いた場合でも、同様の σ_1 の方向を示している。このことは、拡散した延性変形から局所化した延性変形のステージにおいて南部糸静線の応力場は断層面に対して高角度を保っていたことを表している。

上記の結果を現在地表に露出している南部糸静線の断層破砕帯がかつて震源域に分布していた時の応力場として考えた場合、適当な説明モデルとして Zoback and Zoback (1980) や Mount and Suppe (1987) が San Andreas fault で行われた様々な地球物理学的観測から提案した Low drag decoupled Model が挙げられる。すなわち、断層帯の摩擦が無視できるほど小さく(Frictionless)、ほとんど分離している状態で運動していた可能性がある。南部糸静線の北部地域の断層帯の幅が、中央構造線など他の大断層と比較して極端に狭いこと(10 m 以内)、および高速破壊構造の痕跡がほとんど認められないことは、このモデルと調和している。しかしながら現在の断層面の姿勢が震源域に存在していた当時と同じであるとは必ずしも言えない点については今後の検討課題として残されている。(愛媛大学)

Keywords: Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line, ISTL, Stress orientation, Healed microcrack, Deformation lamella, Kink bands, Low drag decoupled Model, Frictionless

破壊岩石表面—水の反応経路

猿渡和子¹ 亀田 純¹ 田中秀実¹

岩石の破壊に伴う造岩鉱物と流体の反応機構の解析は、地下の断層内部で起こっている反応および物質移動の解明に役立ち、さらには地震発生の予知に貢献しうる可能性を秘めている。Kita *et al.* (1982) は石英の破壊実験を行い、山崎断層沿いでの水素ガスの発生と岩石の破壊との関連性 (Wakita *et al.*, 1980) を石英と水のラジカル反応によって説明した。しかし、断層沿いでの水素ガスの発生は、山崎断層以外では確認されておらず、最近の Tanaka and Lockner (submitted) の石英破壊実験では、水素ガスに代わって水素イオン (H⁺) の生成を報告した。今回、破壊と水素イオン濃度 (pH) の関係を定量化し、その水素イオンの発生機構を探ることを目的に、単結晶石英を使用した振揺破壊実験を行った。

出発試料として、ブラジル産の単結晶石英を粉碎し、メッシュを使用して 0.5 から 0.15 ミリメートルの粒度に揃えた。その粉碎石英 15 g と蒸留水 10 g の一定の割合で、アルミナボール (直径 2 cm) とともにナルゲン製ポリエチレン容器中に混合し、常温常圧で、0, 100, 316, 1000, 2000 回の振揺実験を行った。pH の測定には、ORION 製モデル 250 A, および同社製 Ross pH 電極 (KCl 内部溶液) を使用した。その結果、0 回振揺の溶液の pH を基準値 (約 5.35) とすると、振揺回数の増加にともない、pH の低下が確認された (2000 回で約 4.5)。

pH の低下を引き起こす要因の一つとして、振揺破壊によって生じた石英の新しい表面に起因する水の分解が考えられる。そこで、その新しい表面積の増加分を求めるためにふるいを使用した粒度解析を行い、Weibull 分布関数とフラクタル分布関数にて表面積近似を行った。その結果、振揺回数とともに細粒粒子が増加し、全表面積の増加が認められた。その表面積の増加分と pH から換算される水素イオン濃度の増加分との関係は、累乗曲線によく回帰された。こうして本実験では、石英の破壊によって形成される新しい表面と水が反応することによって水素イオン濃度が上昇し、pH が低下することが明らかになった。 (1 愛媛大学)

Keywords : fracture, surface area, quartz, water, radical reaction, pH

下部地殻の破壊と流動—日高帯の例を中心に—

豊島剛志¹ 小松正幸² 小原友弘¹ 新里忠史¹

一般にリソスフェアの強度断面では、上部において脆性破壊が下部において塑性流動が起こり、間に脆性—延性遷移領域があるとされる。事実、地表に露出した地殻

断面の多くには、下部地殻条件で形成された幅広いマイロナイト帯が認められる。これらマイロナイトでは、鉱物種・岩石種により変形挙動が異なる。例えば、斜長石はより延性的に、輝石・ザクロ石はより脆性的に振る舞う。また、下部—中部地殻の変形集中帯におけるマイロナイトの組織は一樣ではなく、強い層状構造を示す場合と、ランダムに近いファブリックをもつ場合とがある。これらは、下部地殻においても塑性流動が一樣ではないこと、鉱物種・岩石種による変形様式の違いが如実に現れることを示す。

また、上述の幅広いマイロナイト帯に重複して、ほぼ同じ深度で形成された mm オーダーの ultramylonite バンドも認められる。この形成は、おそらく水圧破碎により形成されたクラックに沿いに流体やメルト (マグマ) の浸透・貫入が起こった直後である。流体相の浸透に伴う母岩の反応軟化・強度低下が起こり、脆性破壊・歪集中が起こったと考えられる。

さらに、下部地殻においても、高速断層運動を含んで脆性破壊が卓越する状況になり得ること、脆性破壊と塑性流動がサイクリックに繰り返すことが確認される。これらの現象が起こる変形帯の多くは母岩の層構造に平行である。例えば、地震の産物であるシュードタキライトが、下部地殻条件においてマイロナイトと交互に形成される場合がある。上部地殻のシュードタキライトと産状・組織が異なる下部地殻のシュードタキライトの出現は、既存の文献によれば、深度によるアスペリティの強度、断層の有効接触面積や力学特性の変化、地殻深部の高歪速度変形による脆性変形と摩擦発熱の発生、剛体の周辺における高応力集中、均質な塑性流動中の延性不安定に起因するかもしれない。 (1 新潟大学, 2 愛媛大学)

Key Words : lower crustal deformation, plastic deformation, brittle fracturing, strain localization, mylonite, pseudotachylyte

四国西部、八幡浜大島シュードタキライトから読みとれる震源域の情報

宮下由香里¹ 小松正幸²

四国西端部、愛媛県八幡浜市沖にある大島に分布するシュードタキライトの産状と、そこから読みとれる震源域の物質科学的、地質学的情報を紹介する。

シュードタキライトは、白亜紀に中圧型の変成作用を被った大島変成岩を母岩とする。大島変成岩は火成岩起源の片麻岩 (変ハンレイ岩, 変閃緑岩, 変花崗閃緑岩) を主体とし、堆積岩起源の片麻岩 (砂泥質片麻岩, 石灰質片麻岩, 酸性片麻岩) が火成岩起源の片麻岩中に薄層あるいはブロックとして産出する。また、これら片麻岩類を貫く、少量の玄武岩および花崗岩起源の変貫入岩脈

が存在する。

原岩の組成差による縞状構造に加え、各岩相は様々な程度にマイロナイト化を被っており、面構造が発達している。野外で観察される延性的な面構造(マイロナイト面構造)は4種類に区別され、大局的には東西走向を示す。大島変成岩体は変成作用を被った場所から上昇してくる過程で、これらのマイロナイト化作用を順次被った。シュードタキライトを形成する断層運動もこの過程で被った。

シュードタキライトを伴う断層帯の特徴を以下に列挙する。

(1) シュードタキライトを伴う断層帯は、大島変成岩体中約200mの間に3帯存在し、北側の三波川南縁帯接触部に近いものほど後の変形作用を強く被っている。1帯あたりの幅は数メートル。花崗岩脈のずれから見積もられる変位は約3m。

(2) シュードタキライトを伴う断層帯は、先行するマイロナイト帯に重複し、その最も幅広く強いゾーンに集中する。

(3) とくに、種々の岩相が複合するゾーンに集中し、均質な変ハンレイ岩中には認められない。

(4) 母岩のマイロナイトは角閃岩相の条件を示し、シュードタキライト形成に伴うカタクレーサイト帯においても低変成度の含水鉱物は形成されていない。

(5) 変ハンレイ岩中のシュードタキライトは斜長石+ホルンブレンド+単斜輝石の急冷結晶の集合からなり、母岩がほぼ全溶解したことを示す。石英を含まない角閃岩の用実験結果から見積もると、溶解条件は1050~1100°C程度。

(6) シュードタキライトは延性的重複変形を被っている。母岩およびシュードタキライトには、緑簾石・アクチノ閃石・緑泥石・白雲母が形成され、緑色片岩相低温部条件に相当する。石英は再結晶している。したがって、シュードタキライトは地殻の延性~半延性領域で形成されたと考えられる。(1)地震地質部, (2)愛媛大学理学部)

Keywords: pseudotachylite, mylonite, faulting, Oshima metamorphic rocks

海溝域・地震発生過程解明のための包括的 科学計画と超深度掘削

木村 学¹

はじめに

プレート沈み込み帯は地球上で最も巨大な地震が発生し、また津波発生場所である。地震発生メカニズムを深く理解し、人類社会に及ぼす甚大な被害の軽減に有効に結びつけることは科学に課せられた使命でもあり、人類の悲願でもある。これまでの科学と技術をもってし

ても大きな未知の領域として残されている地震発生過程の理解を「新しい技術と新しい科学の総合」によって21世紀の早い時期に飛躍させることが沈み込み帯震源域掘削の最大の目的である。この研究の成功は生きた地球への理解をも飛躍させ、もって人類社会への計り知れない貢献をなすと考えられる。日本がリードする新しい統合深海掘削計画(IODP:2003年開始,2005-6年第1次超深度掘削)で最初に予定されている沈み込み帯震源域掘削をめぐる活発な議論を期待したい。

解明すべき中心問題

地震発生メカニズムの解明すべき中心問題は「震源核がどのようにして準備・形成され、破壊領域全体へ広がるのか?」という点である。

これまで、地震発生前後に起こる様々な物理的・化学的変化が記録されてきた。また地震の物理モデルが岩石を用いた室内実験や数値モデル実験により検討されてきた。しかし、極めて多様なプレート境界で発生する地震メカニズムを単純なモデルで説明することは困難を極めている。たとえばプレート境界域に存在する流体は地震発生帯の断層周辺の複雑な構造と相互作用を起し断層の力学的挙動を規制をすると考えられているが、想像の域を超えてはいない。

新しい技術による地震発生帯の直接観察・観測と新しい科学

これまでの地震発生メカニズムに関して、決定的に未知であるのは地震発生帯そのものの直接的な物理的・化学的状態とその時間変化である。これまでの知識を医学・生物学にたとえれば「人体内部の病巣の状態を直接見ず、人体表面に現れた変化や、間接的診断によって病源を類推する」ことと同じであった。医学や生物学がマクロからミクロそして遺伝子及び分子レベルに至る生きた病巣の直接観察によって革命的に飛躍し、その非平衡なシステムの安定・不安定の理解が科学のフロントを構成していることと同様に、新しい技術の超深度掘削による地震発生帯のはじめての直接観察が科学の決定的飛躍を生み出すことは疑いない。

この新しい超深度掘削技術によって予定される新しい科学は3つの構成部分からなる。その第1は「地震を発生する断層」の組成、高速すべりによる岩石の溶解を含む変形微細構造、岩石の物性、状態の直接観察・観測である(生きた断層岩の研究)。第2は掘削と平行して実行する地震発生帯を含めた岩盤全体の物性・状態のトータルな観察・観測である(掘削同時検層による研究)。第3は地震発生断層帯内部に深く装置された新しい観測機器の長時間設置による、地震発生の準備過程・発生過程・回復過程の生きた観察・観測である。

この新しい技術による科学は、従来型の観測・観察によって包囲されなければならない。

(¹東京大学大学院理学系研究科)

Keywords : subduction zone, IODP, seismogenic zone

双葉破砕帯と双葉断層

大友幸子¹

双葉断層は、阿武隈山地東縁に、約 100 km にわたり NNE-SSW 方向に延びている。その双葉断層の西側の断層岩類の分布するところが双葉破砕帯である。双葉破砕帯の活動は、先シルル紀変成岩類、上部デボン系〜ペルム系からなる南部北上帯に貫入した白亜紀花崗岩の左横ずれのマイロナイト化作用にさかのぼる。双葉破砕帯の東縁に位置する双葉断層の断層活動は、中新世には西側の地域が沈降、鮮新世には東側が沈降（大槻ほか、1977）、更新世後期以降は左横ずれを含む西側隆起（吉岡、1989）。また、平成 8 年度及び 9 年度の福島県の活断層調査によると最新活動時期は約 2000 年前で、北部の一部のみ断層活動がおこっている。中部より以南では後期更新世以降は断層活動がおこっていない（小荒井、1993 など）。

●双葉破砕帯の断層岩

(a) マイロナイト

双葉断層の中央部、小高町〜浪江町にかけて、断層西側に分布する国見山花崗閃緑岩が、つよくマイロナイト化作用を受けている。マイロナイト面構造は、NNE-SSW から NE-SW 走向で中-高角度西傾斜、マイロナイト線構造は N-S から NNE-SSW 方向で北に低角にプランジする。マイロナイト帯は約 1 km の幅を持ち、非対称微小構造から解析された剪断センスは左横ずれである。マイロナイト化の程度は、小高町では東側（双葉断層付近）に向かって強くなっているが、それより南の浪江町・双葉町ではマイロナイト化作用は弱くなりその中心部は双葉断層よりも西側に移動する。国見山花崗閃緑岩のマイロナイトの中には左横ずれのウルトラマイロナイトバンド（幅数 mm〜約 30 cm）が所々に形成している。

(b) カタクレーサイト

双葉断層に沿ってすぐ西側や、西側に離れたところに幅 100-200 m または幅数数 m の主に南北方向に連続した大規模なカタクレーサイト帯が形成されている。小高町では双葉断層沿いと国見山花崗閃緑岩と八丈石山花崗岩の境界に大規模なものが 2 列あるが、浪江町から南部になるとだんだんその配置は変化して規模も小さくなっていく。また、大規模なカタクレーサイト帯以外にも幅数 mm-数 cm の小規模なカタクレーサイトは所々に観察される。ほとんどのものはランダムファブリックの不均質なカタクレーサイトであるが、国見山花崗閃緑岩の中には面状カタクレーサイトも見いだされた。

●双葉断層（浪江町）

高瀬川南岸と高瀬川支流の寺沢の双葉断層露頭の観察

により、断層面は NNE-SSW 方向で西に低角度で傾斜している。断層の上盤側には、石灰岩や片状泥岩をブロック状に含む、厚さ数 m の黒色粘土が分布する。高瀬川南岸ではさらにその上に低角境界で国見山花崗閃緑岩のカタクレーサイトがのっている。断層下盤側には、鮮新統が分布し、断層から離れたところでは東に 5°前後の緩い傾斜であるが、断層直下では引きずられて急激に傾斜が立ち上がっている。寺沢の露頭ではこれら両者を中位段丘面堆積物が覆っている。

●双葉破砕帯と双葉断層

現在の双葉断層は、小高町付近では、カタクレーサイト帯の中に位置している。しかしそれを除くと、双葉破砕帯のマイロナイト化作用、カタクレーサイト化作用、双葉断層の後期更新世以前の断層運動は、断層岩の分布や地質学的な断層の位置から考えると、以前の断層運動によって形成された弱線を利用しているというわけではないようだ。（¹山形大学教育学部）

Keywords : Futaba shear zone, Futaba Fault, fault rocks, faulting history

野島地震断層産のシュードタキライトとガウジから解読できる地震性摩擦すべり過程

大槻憲四郎¹ 門澤伸昭¹ 長瀬敏郎²

野島断層平林産の断層岩は、花崗岩起源のシュードタキライトとガウジの細互層である。XRD と TEM 解析から、シュードタキライトは確実にガラス質である。濁沸石の存在と孔井での温度勾配によれば、断層岩の形成深度は約 3 km である。一回の地震イベントに対応する断層岩の厚さは 0.5-3 mm と異常に薄い。シュードタキライトには乱流・褶曲・回転などの構造が発達し、著しく大きな剪断歪速度を示唆する。

シュードタキライト層の熔融度は未熔融固体粒子の体積分率で評価でき、熔融度毎の温度は種々の温度指標を用いて推定した。最高到達温度は約 1300°C である。化学組成がほとんど同じである Sprey (1993) の粘性率データをもとに、H₂O 濃度を 4 wt% と仮定し、熔融度毎の粘性率を見積もった。摩擦すべり帯の幅を 1 mm、すべり速度を 1 m/s と仮定して剪断抵抗を算定した結果、熔融初期 (750-830°C) には剪断抵抗が著しく大きく、高速すべりを抑制するが、1000°C を越す付近から急激に抵抗が減少しすべりを促進することが判った。ガウジは大変細粒であること、および均質無構造ですべり集中帯も伴わない点で通常のガウジとは異なる。さらに、ガウジの中に熔融体の滴が飛び散っていることもある。これらはガウジが粉流体として fluidize したことを示唆する。このような粉流体の粘性率は極めて小さいため、ほぼ完全な応力効果が期待できる。ガウジが fluidize する前には

thermal pressurization が作動するだろうが、この機構が最も効果的に作用した場合にも同様なことが起きる。

以上のことから、地震性摩擦すべりは thermal pressurization, ガウジの fluidization, および melting という正のフィードバックが相次いで作動する過程であると言える。

(¹東北大学・理・地圏環境科学 ²東北大学・理・地球物質科学)

Keywords : pseudotachylyte, temperature, viscosity, fluidization of gouge, thermal pressurization

Thermal pressurization の数値実験とガウジの fluidization の証拠

門澤伸昭¹ 大槻憲四郎¹

実験的摩擦構成則である slip weakening friction law と rate and state dependent friction law が天然の地震に適用可能なのかは疑わしい。それは、室内と自然界とは、摩擦の物理過程が同じではないことによる。我々が兵庫県南部沖地震の地震断層である野島断層から発見した深度 3-5 km で形成された断層岩には、(1)岩石の melting, (2)ガウジの fluidization, (3) Thermal pressurization の 3 種の正のフィードバック内臓型の物理過程が記録されていた Otsuki (2000) は野島断層岩の性状から地震性摩擦すべりの物理過程を解明した。これによって、発熱帯の幅、熔融体の温度と固液体積分率の変化とともに、熔融体の粘性率の変化も概算されている。我々は断層岩より得られたこれらの情報を用い、数値シミュレーションによってこの断層岩の生成過程の再現を試みる。また今回ガウジの fluidization を断層岩の性状観察から判定する方法を発見したのでそれについての言及も行う。

Numerical model

岩石の熔融は thermal pressurization が効果的に働かず、温度上昇が速やかに起こる場合に生じ易い。Mase & Smith (1987) の thermal pressurization の過程で、熔融温度に達した時点で熔融体の剪断滑り過程にスイッチするコードを組込むことで、摩擦すべりの全過程が再現できる。Thermal pressurization の過程は Mase & Smith (1987) の式を採用し、熔融温度に到達した場合には、粘性率の温度依存性と未熔融固体粒子の体積分率依存性を加味した Otsuki *et al.* (2000) で測定された以下に示す野島断層の pseudotachylyte の温度依存型関係式を用いる。

$$\eta = 6 \times 10^{-10} \exp(27957/T)$$

熔融過程には熱拡散方程式とニュートン流体の構成式を用いる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{sf} \frac{\partial \Theta}{\partial x} \right) + \eta \left(\frac{V_y}{w} \right)^2 = \rho c \frac{\partial \Theta}{\partial t}$$

Thermal pressurization に関する Mase & Smith (1987) の式群と上記の方程式群とを、すべり速度を強制的に一定に保つ条件で計算した。

シミュレーション結果

- 1) 1 mm の幅の熔融層は熔融時に約 0.7 の摩擦係数(母岩を 0.6)を瞬間的に発生する。
- 2) 熔融層はその後速やかに剪断抵抗を減少させ、摩擦係数を約 0.1 まで減少させる。

ガウジの fluidization の判定

fluidization とは固体粒子が自由行程を持つ減少である。従って固体粒子の相互関係は以下のような特徴をもつ (1) 固体粒子の破壊は衝突が主になるため破壊頻度 (1/t) が小さい。(2) 自由行程を持つ粒子の運動速度 V は持たない粒子と比較した場合非常に大きい。これらの特徴は以下の任意視野 R における破片対発見確率の式で反映される、

$$P_{c-p} = \frac{R/V_s}{t_s + R/V_s} = \frac{R}{V_s t_s + R}$$

この方法を用いた判定結果は観測事実と調和的であった。

(¹東北大学・理・地質)

Keyword : thermal pressurization, melting of gouge, fluidization of gouge

ピストンシリンダー型三軸圧縮試験機による stick-slip 実験で形成された熔融層とその物理過程

豊田宗則¹ 大槻憲四郎¹

はじめに

Slip weakening friction law と rate and state dependent friction law の実験的摩擦構成則が自然界を正しく模擬しているかどうかは自明ではなかった。それは、摩擦の物理過程が両者で異なっている可能性があるからである。

自然界では多くの pseudotachylyte が発見されている。Stick-slip 実験でも局所的・瞬間的温度が 1175°C にまで到達したという報告 (Teufel & Logan, 1978) があるが、熔融層の形成には懐疑的な見解が多い (Yund *et al.*, 1990; Terry Tullis, personal communication).

摩擦剪断強度を 250 MPa, 滑り速度を $u = 2.00 \times 10^{-2} \text{ ms}^{-1}$, すべり時間 $t = 0.01 \text{ s}$ とすると、摩擦による発熱量 Q_f は $Q_f = \tau u t \approx 5 \times 10^4 \text{ Jm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ で表される。一方、観察された熔融層の厚さ $w = 0.5 \mu\text{m}$ を形成するのに必要なエネルギー Q は、 $Q = w \rho (c_r (T - T_0) + Q_m) \approx 1.63 \times 10^3 \text{ Jm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ となる ($T = 1000^\circ\text{C}$, $T_0 = 20^\circ\text{C}$, 岩石密度 $\rho = 2500 \text{ kgm}^{-3}$, 比熱 $c_r = 1000 \text{ Jkg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, 潜熱 $Q_m = 3.2 \times 10^6 \text{ Jkg}^{-1}$)。この誤差は熱伝導率によって失われる熱量

と解放された波動エネルギーが考えられる。

実験方法

1) 使用した試験機：通常のピストン・シリンダー型の高圧試験機。

2) 試料：花崗岩，緑色片岩，ガラス，20 mm×40 mm の円柱に整形，45 度に pre-cut した表面を 3 μ m のダイヤモンドペーストで鏡面仕上げ。

3) 実験条件：封圧は 100 MPa と 250 MPa で，常温。

4) 観察：FE-SEM ですべり面を観察。

実験結果

1) すべり量は 0.015-0.757 mm で，すべり時間は 0.01-0.05 s，応力降下は最大 400 MPa，すべり速度は 0.001-0.019 m/s であり，すべり面の 1000 倍以上の SEM 映像には，ほとんど例外なく納豆が糸を引いたような見事な溶融構造が確認された。

2) 溶融層の厚さは 0.3-3.5 μ m である。荷重-変位曲線から求めた摩擦仕事と溶融層の厚さとの間には，ほぼ比例関係が成り立っていて，計算値と調和的である。

3) 上記の結果は，実験的摩擦すべり不安定性のメカニズムが，溶融層の発生に支配されていることを示唆し，従来の実験結果を再解釈する必要がある。

(¹東北大学)

Key words : stick-slip experiment, melting, rock friction

長野県西部で見えるもの

飯尾能久¹

長野県西部地震のすべり量分布が，強震計および測地測量のデータの同時インバージョンから得られているが，正断層成分を持っていることが特徴である。日本の内陸では，逆断層と横ずれ型の地震が一般的であり，正断層の地震は大変数が少ない。長野県西部地震の断層は，この付近の西北西-東南東の最大圧縮力の向きと調和的であり，最小圧縮応力軸に直交するような断層の走向を持っているわけではない。正断層成分を持っていることは，何か特別な要因があるものと推定される。1986 年の長野県西部合同地震観測で見つかった S 波の反射面と断層面の相対位置関係が鍵であると考えられる。S 波の反射面は S 波を通さないのだから，せん断応力を支えられるとは考えられず，この面に沿ってすべりが発生する可能性がある。この反射面の直上で発生する地震は逆断層型を示すので，鉛直応力は水平面内最小圧縮応力よりも小さい。水平面内最大圧縮応力の方向と反射面の走行がほぼ一致するので，最大圧縮応力はこの面に関しては効果を持たない。よって，水平面内最小圧縮応力がこの面を滑らせ，反射面は低角逆断層のような運動を示すこととなる。この運動は，断層面上に北北東-南南西の

方向の引っ張り応力を加えることとなり，それが正断層成分を作り出したものと考えられる。

以上のことから，長野県西部地震の発生過程は以下のように推定される。反射面に沿ってゆっくりしたすべりが起こったため，断層面上における法線応力は低下し，逆にせん断応力は増加した。断層面上における応力場の変化は，反射面に近い断層最深部が最も大きく，断層の下部にゆっくりしたすべりを生じさせた。反射面および断層内の反射面に近い部分が，急激にすべらないのは，反射面に存在する熱水のためその付近の温度が高く，岩石が流動的になっているためであると考えられる。断層面上におけるすべりは徐々に脆性的な断層上部までおよび，ついに急激なすべりが始まり，長野県西部地震が発生したと推定される。

(¹東京大学地震研究所)

Keywords : S-wave reflector, Detachment, Intraplate earthquake, Strength

脆性-塑性遷移領域における破壊開始過程としての延性破壊

重松紀生¹

脆性-塑性遷移領域における塑性変形からの破壊発生過程を検討するため，阿武隈山地東縁の畑川破碎帯西側の，強く塑性変形した剪断帯中心部が粉碎組織を示す小剪断帯に着目し，断層岩の微細構造解析を行った。解析は畑川破碎帯の西側 1 km に位置する NE-SW 走向の幅約 50 cm の右ずれ剪断帯で行った。剪断帯中心部では S-C 構造が発達し，C 面に沿って粉碎構造が見られる。この粉碎構造について，C 面近傍の石英について，細粒化分率 (Xqz) の空間分布の解析，透過電子顕微鏡 (TEM) による転位および結晶粒界構造の観察を行った。ここで Xqz は石英中の粒径 30 nm 未満の粒子が占める体積分率であり，強い塑性変形を被った場所ほど大きな値を取る (Shigematsu, 1999)。

Xqz の空間分布より (1) 粉碎領域内部には，粉碎領域の方向に強塑性変形領域 (Xqz > 95%) が存在し，(2) 粉碎領域以外にも，シアバンドあるいは C 面などの変形集中領域に沿って Xqz が高い領域が見られ，(3) 微小割目の多くは粉碎領域から派生しているが，一部の微小割目は Xqz が高いシアバンドあるいは C 面などの変形集中領域からも発生している。また TEM 観察より，転位密度は低 Xqz 領域，高 Xqz 領域において大きな差がなく，両領域とも亜結晶粒界が非常によく発達し，高 Xqz 領域では粒界に沿って径数 100 nm 程の微小空洞が見られる。

石英細粒化分率の空間分布は，塑性変形の局所化と破壊発生との物理的因果関係を示している。破壊発生モデルについて，転位密度の結果，粒子内に発達する亜結晶

粒境界から、転位の蓄積による機構 (Eshelby *et al.*, 1951; Wong, T-F., 1990) は成立しない。一方、大きな塑性変形の後、微小空洞の形成、成長合体により破壊が起こることがある (延性破壊: Goods and Brown, 1979; Wilsdorf, 1983; Clift *et al.*, 1989; Ebrahimi and Hoyle, 1997; Komori, 1999; Thomason, 1999)。高 Xqz 領域の石英粒界にはしばしば微小空洞が観察され、この機構による破壊が示唆される。従って C 面に沿う粉碎領域の形成機構として、粒界に沿う微小空洞の成長合体により延性破壊に至った可能性あり、このことが脆性-塑性遷移領域における破壊発生過程として働き得ることが予想される。

(¹早稲田大学教育学部)

Keywords: Ductile fracture, fracture initiation, brittle-plastic transition, microvoid, localization of plastic strain

変形実験に見る、断層の発達と浸透率変化

高橋美紀¹

石油公団・石油開発技術センターでは油・ガスの貯留を有効に保持するシールの一つと考えられている断層のシール能力について正しく評価するための研究プロジェクトを実施している。その一環として、岩石を地下の温度・圧力条件のもと、岩石を変形させて断層の模擬物質とし、断層の発達に伴う浸透率の変化を調べることを目的に 1999 年より変形実験を行っている。用いた試験機は 1999 年に石油公団 TRC に導入され (1)、封圧 300 MPa 間隙水圧 300 MPa を最大値とし、温度 300 度まで上昇させることができる液圧媒体の三軸試験機である。実験条件として室温、封圧 50 MPa および 100 MPa で変形実験を行った。また浸透率を計測する方法として Oscillation 法 (2), (3) を用いた。これはサンプルの上流の間隙圧を周波数 ω 、振幅 A のサイン波で振動させ、サンプルを通過して減衰し、位相に遅れの出た下流の間隙圧の波を計測して浸透率を求める方法である。供試体として、A) 円柱状の Berea 砂岩サンプル (孔隙率: 15~18%)、B) pre-cut 面をあらかじめ入れた Berea 砂岩に粘土鉱物のガウジ (0.5 mm 厚の Na モンモリロナイト) を挟んで疑似断層としたサンプルと、C) 断層スミアーを再現するために、pre-cut した Berea 砂岩の中央に屏風ヶ浦で採取した泥岩 (初期孔隙率 60%) の円盤を挟んで砂泥互層中に発達する断層を模擬するものを用意した。サンプルのサイズは 40 mm 径、80~100 mm の長さの円柱形である。A) の変形以上にモンモリロナイト層の存在によって B) の浸透率が格段に低下する (Berea 砂岩が 10^{-15} m^2 以上に対し、B) は最低 10^{-19} m^2) ことがわかった。C) 泥岩層の層厚に対し 2.2 倍の変位まで与えた、断層スミアーの再現実験では、断層内に引きずら

れる泥岩が途切れることはなく、低い浸透率 (10^{-18} m^2) も変形の終了まで保持されている。

(¹石油公団・石油開発技術センター地質・探査研究室)

Keywords: Permeability, Oscillation method, Fault Gouge, Fault Smear

岩石破壊過程に対する構成則の環境依存性

加藤愛太郎¹

地震の破壊過程は、既存の弱面に沿った摩擦すべり破壊過程と、巨視的弱面を含まない岩石の破壊過程の両者から成る (Ohnaka *et al.*, 1997)。巨視的弱面を含まない岩石は、すべり破壊面がほとんど固着した状態にあり、既存の弱面のエンドメンバーに相当する。特に、震源域の深部においては温度・圧力が高いため、既存の弱面が溶着を起こし固着が進むと考えられる。また、地震波の波形解析から断層面上の破壊応力降下量は不均一に分布しており、その値は最大で 100 MPa 程度になることがわかっている (e.g., Bouchon, 1997)。このような破壊応力降下量の大きな領域は、すべり量の大きな領域と一致しており、いわゆるアスペリティであると考えられている。実際、巨視的弱面を含まない花崗岩の破壊応力降下量は、100 MPa 程度であることが室内実験で確かめられている (e.g., Kato *et al.*, 2000)。ゆえに断層面上のアスペリティは、巨視的弱面を含まない岩石がせん断破壊過程により破壊した領域に対応すると考えられる。従って、震源域とその深部における断層の構成則を理解するためには、既存の弱面に沿った摩擦すべり破壊過程と、巨視的弱面を含まない岩石の破壊過程の両者を統合的に調べる必要がある。しかしながら、既存の弱面に沿ったすべり破壊過程の実験的研究はこれまで盛んに行われてきたが、巨視的弱面を含まない岩石の破壊過程についての研究例は数少ない。

地震の発生過程を記述するためには、断層運動を支配するせん断破壊構成則が必要不可欠である。構成則の定式化において、これまで代表的なものとして、すべり速度及び状態変数依存性構成則と、すべり変位量依存性構成則の 2 つが考えられてきた。我々は地震の構成則として、摩擦すべり破壊過程と岩石の破壊過程の両者を統一的に説明できるすべり変位量依存性構成則を用いる。すべり変位量依存性構成則においては、剪断強度の変化がすべりの関数として表現される。この構成則はいくつかのパラメータによって規定され、それぞれのパラメータに温度、圧力、時間及びすべり速度依存性があると仮定する。

地震発生層においては、深さ・水平方向に温度、圧力などの地学的環境条件が変化するため、構成則を規定しているパラメータも環境条件の変化とともに変化すると

考えられる。従って、大地震を含めた自然地震の発生メカニズムを理解する上で、構成則パラメータの環境依存性を知ることは非常に重要である。我々は、巨視的弱面を含まない花崗岩を使用した岩石破壊実験を通して、構成則パラメータの温度・圧力・歪み速度依存性について研究を行ってきた (Ohnaka *et al.*, 1997; Kato *et al.*, 2000)。本稿では、これまで得られた結果をもとに、震源域での構成則パラメータの温度、圧力依存性について議論したい。湿潤状態の試料を用いた歪み速度 10^{-5} /s で行った実験結果に注目する。

最大せん断強度 τ_p に関しては、温度 300°C 以下では有効法線応力の線形関数として表現できる。つまり有効法線応力則が成立していることを示す。一方、温度 300°C 以上の τ_p は、上記の有効法線応力の線形関係から期待される値に比べ減少しており、有効法線応力だけでなく温度にも依存することがわかる。つまり、温度 300°C をさかんに、脆性領域から準脆性領域に遷移すると考えられる。温度を 420°C に固定し、有効法線応力を変化させた実験結果によると、線形関係から期待される値からの減少量は、有効法線応力が大きいほど、大きくなる傾向にある。つまり、準脆性領域においては、有効法線応力が大きいほどより塑性的な振る舞いに近づくと考えられる。

破損過程の安定・不安定性にもっとも敏感なパラメータである slip-weakening rate の最大値 $(d\tau/dD)_{\max}$ に関しては、温度 300°C 以下ではほとんど一定値をとる。一方、温度 300°C 以上では、温度の増加とともに $(d\tau/dD)_{\max}$ は減少し、破壊過程の安定性が増す。 $(d\tau/dD)_{\max}$ の減少の仕方は、有効法線応力が大きいほど、大きくなる傾向にある。つまり、温度 300°C 以上では、有効法線応力が大きい条件ほど、破壊過程の安定性が増すことを意味する。

破損過程が完了するまでに必要なすべり変位量である臨界すべり変位量 D_c については、温度 300°C 以下ではほとんど一定値をとる。一方、温度 300°C 以上で D_c は基本的に温度の増加とともに増加する。増加の仕方に、有効法線応力依存性が若干あるが明確ではない。

破損応力降下量 $\Delta\tau_p$ に関しては、温度が 300°C 以下の条件下では約 100 MPa の値をとる。温度 300°C 以上においては、有効法線応力が大きい条件下の方が、温度の増加に対して $\Delta\tau_p$ は減少する傾向にある。

以上より、地震発生層に対応する温度 300°C 以下の脆性領域においては、最大せん断強度 τ_p は有効法線応力と線形関係にあり、他のパラメータ (D_c , $\Delta\tau_p$, $(d\tau/dD)_{\max}$) はほとんど一定値をとることが予想される。一方、温度 300°C 以上の準脆性領域においては、 τ_p は温度と有効法線応力の関数で表現され、有効法線応力が大きいほど、脆性領域での線形関係から期待される値よりも減少する。 D_c は温度の増加とともに増加し、 $(d\tau/dD)_{\max}$ は

減少する。これは破壊過程の安定性が増すことを意味する。つまり、アサイズミックなすべりが起き易くなり、大地震発生前のプレスリップを引き起こす可能性がある。この準脆性領域における変化は主に温度に依存している。ただし、有効法線応力にも二次的に依存しており、有効法線応力が大きいほど破壊過程の安定性がより増す傾向にあることがわかる。

これまで多くの室内実験が行われてきたが、地震発生環境条件下における高速度すべり領域下での実験例は数少ない。高速度すべり領域では、摩擦熱の発生により断層面の溶融や thermal pressurization がおきると考えられる。このような過程が、断層の強度回復過程にどのような影響を与えるかを定量的に把握することは、地震発生サイクルを理解する上で非常に重要であり、室内実験を通して詳細に調べていくべきである。

(東京大学地震研究所)

Key words : constitutive law, shear fracture experiment, temperature, effective normal stress

精密地殻変動観測による震源域へのアプローチとその限界

鷺谷 威¹

日本列島の内陸で起きる大地震の発生過程を理解する上で、震源域の最下部および下部延長における構造やそこでの物理過程に注目が集まっている (例えば、田中ほか, 1998)。現在、糸魚川-静岡構造線北部の大町市周辺と長町-利府断層の周辺では、断層深部におけるすべり過程 (飯尾, 1996) を明らかにするために、稠密 GPS 観測網による精密地殻変動観測が実施されており、詳細な地殻変動パターンが明らかにされつつある。こうした観測は、一方では日本列島の広域変形と断層周辺の局所変形の関係を明らかにすることになり、内陸の地震を引き起こす力学的なメカニズムの理解にもつながるものである。

断層の微細構造に着目したミクロな視点からは、断層を単にすべりが生じる不連続面として捉えるのではなく、複雑な構造を持つ「帯」として認識することが重要であり、もはや「断層面」という呼び方は適当でないかも知れない。しかし、実際の地殻変動観測データから「断層面」と「剪断帯」の区別ができるだろうか？ 一例として、1 m の断層すべりが1枚の断層面で生じる場合と1~2 km 間隔で並行する10枚の断層に分散している場合 (深さ10~20 km ですべりが生じたと仮定) を比較すると、2つのモデルに対する地表変位の違いは最大変位の1割程度で、しかも違いが見られるのは断層近傍に限られる。地殻変動観測から両者を区別するのはかなり難しいと言える。すなわち、地殻変動のデータだけで剪

断帯を認識するのは困難であり、地震学・測地学・地球電磁気学・地質学など様々な分野の協力が必要不可欠である。
(¹国土地理院地殻変動研究室)

Keywords: GPS, crustal deformation, lower crust, pre-slip, fault zone

地震波でどう見えているか？

長谷川 昭¹

地表で観測された地震波から陸域地震の震源域およびその周辺がどう見えているかを報告する。

震源断層の位置・形状については、多くの場合地震(余震)の震源分布から推定されて来た。これには地震(余震)が断層面に沿って発生するという前提がある。断層帯では地震波速度異常や異方性が期待され、それらは反射波励起の要因となる。従って、反射波を用いて断層面を直接イメージングすることも可能であり、これまでに報告されて来た(例えば、平田・他, 1997)。これらは断層面が水平あるいは傾斜している場合であって、一般に断層面が鉛直であればイメージングは極めて難しくなる。ただし、Hole *et al.* (1996) のように、工夫すればある程度可能かも知れない。反射波による断層帯の内部構造の推定は一層困難である。これまでトラップ波の解析(例えば、Li *et al.*, 1994) や S 波異方性の解析により推定されて来た。この他に、走時トモグラフィや屈折法探査により、断層帯の内部が低速度となっているという報告もあるが、当然のことながら分解能は低い。震源断層の下部地殻への延長を反射波でイメージングしたとする報告は幾つかある(例えば、Brocher, *et al.*, 1994; Brewer *et al.*, 1983; Parsons, 1998)。ある場合は水平な detachment fault になり、他の場合はそのまま下部地殻全体を断ち切っているように見える。

震源断層の下部地殻への直接の延長ではないが、反射波から bright spot が見出された例は極めて多い。反射係数が異常に大きいことから fluids で満たされた層を見ているのであろう。AVO 解析やスペクトル比の解析から、反射体内部はマグマであるとの推定もある(Makovsky and Klemperer, 1999; Matsumoto and Hasegawa, 1996)。東北日本では、震源断層の直下に多数見出されている(堀・他, 1999)。地震発生との関わりが注目される。
(¹東北大学大学院理学研究科)

Keywords: seismic imaging, active fault, lower crust, bright spot

比抵抗で見る震源域

小川康雄¹

科学技術振興研究費総合研究「陸域震源断層の深部すべり過程のモデル化に関する総合研究」が平成 11 年度から開始された。このプロジェクトでは、糸静構造線北部と宮城県の長町-利府断層を主な対象として、陸域地震の発生に至る仕組みを明らかにすることを目標としている。大地震の発生が、断層深部の準静的なすべりによってもたらされるという仮説のもとに、断層深部物質の分析、下部地殻条件における岩石の破壊実験、GPS 観測、地震探査や電磁探査、数値モデル実験などを行う。このなかで電磁探査は、地殻内の流体の分布を推定するために行われる。それは、電磁探査から求められる物理量であるところの比抵抗が、岩石のマトリクスではなく、岩石の空隙を埋める流体の比抵抗とそのつながり方に支配されているからである。空隙率の高い岩石や、比抵抗の低い流体を含む岩石は、低比抵抗を示す。地震発生域の深度を地表から探るには、自然界の周期 0.01 秒～1,000 秒の電磁波を使う広帯域 MT 法 (wide-band magnetotelluric method) が適している。

講演では、平成 11-12 年度に行われた糸静線北部の広帯域 MT 法探査の結果を紹介する。観測は、富山から佐久に至る 100 km の測線上の、31 測点で行われ、鹿児島島の同時参照点データと相関処理を行うことによって、直流電圧によるノイズを低減させた。構造の走向を N 30° E と仮定して、TM モードのデータの解析をし、以下のプレリミナリーな結果を得た。糸静線東方の活褶曲帯では堆積物が 6 km 深度にも達する。この下に高比抵抗基盤があるが、さらに糸静線の直下には深度 10 km 以深に東下がりの顕著な低比抵抗異常体が存在する。これは、その東側の中央隆起帯では存在しない。このような地殻深部の顕著な低比抵抗異常は、地殻変動の大きな場所に対応している。地震の震源(気象庁データ)は、この低比高抵抗異常を避けるように高比高抵抗部に集中しているように見える。同じような構造が、東北脊梁と出羽丘陵を横切る測線(Ogawa *et al.*, 2000) や宮城県北部地域の群発地震地域(Mitsuhata *et al.*, 2000) でも見ることができる。
(¹地殻物理部)

Keywords: lower crust, fluid, Seismogenic zone, magnetotelluric method, resistivity

NMR (核磁気共鳴) 検層による含水クラックの検出

中島善人¹

NMR (Nuclear Magnetic Resonance) 検層とは、静磁場における水分子の水素原子の原子核 (プロトン) のスピンのゼーマン準位間の共鳴遷移を、ラジオ波程度の電磁波を用いて分光学的に計測する手法である。他の物理検層とは違って、水のみを (正確には水素原子を含む物質のみを) 計測できるという利点がある。また、生データは、プロトンのモル数と縦・横緩和時間であるが、適切な物理モデルを地層に対して仮定することによって、地層の空隙率や亀裂幅や浸透率に換算できるという利点もある。クラックの開口量は、地層の透水能力 (ひいては断層帯全体の水理学的進化) を左右する重要な物理量なので、それを定量的に計測できれば、当該分野の発展に貢献できるであろう。本講演では、秋田県地熱地帯で NMR 検層を実施して、火山岩中の亀裂開口量の推定を行った研究について予察的な結果を発表する。

秋田県鹿角市の澄川発電所において、深度約 100 m の試験井戸が掘削され、NMR 検層を他の物理検層とともに実施した。使用した検層システムは、Schlumberger 社の CMR である。検層速度 300 ft/hour、分解能 15 cm で坑壁の含水多孔質岩石中の水由来の NMR シグナルを、CPMG パルスシーケンスを用いて横緩和時系列データとして計測した。亀裂を胚胎する地熱貯留層は日本でよくあるタイプであるが、今回の井戸でも深度約 61 m で掘削泥の全量逸水 (毎分約 50 リットル) が起こり、EMI 検層の結果、そこに亀裂があることが分かった。NMR 検層では、自由水 (空隙サイズが 1 mm 程度以上の空隙水) のシグナル強度が亀裂幅に比例するという仮定が可能である。そこで、自由水に相当する横緩和時間 33 ms 以上のプロトンのシグナル強度から推定して、亀裂幅が 1-2 cm という予察的結果を得た。今後、ベントナイト掘削泥中の水の自己拡散係数の計測などの基礎研究が必要ではあるが、このように、NMR 検層は亀裂の開口幅を推定できる可能性があり、地層のより正確な評価に貢献できるものと思われる。 (1 地殻物理部)

Keywords: fracture detection, groundwater detection, NMR logging, fracture aperture, permeability

断層物質を考慮した高温高圧下での摩擦すべり・変形・流動実験

増田幸治¹ 藤本光一郎²

陸域震源断層の深部すべり過程を明らかにするため

に、断層物質を考慮した地震発生過程のモデル化を行う。そのためには地質学的調査を基礎とする物質科学的視点、実験的・観測的及び理論的視点から総合的に議論することが重要である。断層深部のすべり過程のモデル化のために解明しなければならないパラメータとなる条件としては、物質のほかに、粒径、温度、封圧、間隙水圧・水質、Aging の効果 (時間、水、温度、圧力)、変形速度等があげられる。特に断層深部では摩擦すべりに加えて塑性変形のみが重要になってくると考えられ、物質科学的研究からも塑性変形の証拠が示されている。従って、断層物質を考慮した実験研究においては、摩擦すべりだけでなく塑性変形も検証可能な試験装置を用いて摩擦すべり・変形・流動特性を調べることが必要である。これらの目的のために地質調査所では高温熱水条件下におかれた断層物質の変形や流体移動などの研究を行うためのガス圧式高温高圧岩石変形実験装置を開発した。特に断層物質 (および断層物質の特徴を反映した模擬断層物質) の流動特性も検証可能なように高温下での実験環境が可能な設計とした。そのために圧力媒体には不活性ガスであるアルゴンガスを採用した。実験条件としては、当面は、圧力 200 MPa、温度 1000°C、間隙圧 (水またはアルゴンガス) 200 MPa を想定している。封圧はサーボ機構によって制御できる。ガスを圧力媒体とした高温高圧試験機は国際的にはオーストラリア国立大学の Paterson 名誉教授の開発した装置などが活躍しているが、国内のものとしては京都大学に続く 2 号機である。このガス圧式高温高圧変形実験装置のテスト運転を行うとともに、断層物質の摩擦すべり特性に対する粒径の効果や、実際の脆性塑性断層帯領域から採取したマイロナイト試料の変形実験を開始した。

ガス圧式変形実験装置の設計製作では京都大学の嶋本利彦教授にご指導いただいた。

(¹地震地質部, ²国際協力室)

Keywords: Deformation Experiment, High-Pressure High-Temperature Gas Apparatus, Fault Material

断層トラップ波による断層深部構造探査

伊藤久男¹ 栗原保人¹

断層の深部構造・形態は、地震の破壊開始、伝播、停止をコントロールする重要なパラメーターである。科学技術振興調整費「陸域震源断層の深部すべり過程のモデル化に関する総合研究」においても、地震学的手法および電磁気学的手法により、主として断層の下部地震への延長部をターゲットに調査を行いつつある。

断層近傍で地震波の観測を行うとしばしば S 波の後続波として直達 S 波に比べ低周波の断層トラップ波と呼ばれる波動が観測される。断層トラップ波は低速度帯

を形成する断層破碎帯内を伝播し、震源および観測点が低速度内にある場合に観測される。トラップ波の波形は低速度帯の地震波速度、幅、減衰を表すパラメータ Q 値、トラップ波の伝播距離等に影響される。これらのことから

1) トラップ波が観測される観測点の分布、波形から低速度帯(断層破碎帯)の幅。

2) トラップ波が観測される震源と観測されない震源の組み合わせから、低速度帯(断層破碎帯)の深部での形状。

が解るとされている。

現在まで、主としてサンアンドレアス断層近傍での1992年 Landers 地震等のいくつかの地震、1995年兵庫県南部地震、トルコ地震などの大地震直後の余震観測、跡津川断層系等での観測結果が報告されている。それらの結果では低速度帯(断層破碎帯)の幅は数10~100m程度であり、S波速度の比(周囲と低速度帯内)が80~50%程度、断層は高角である、等のことが解ってきた。特に跡津川断層系の茂住延祐延断層では、地震直後でないにもかかわらず約50%もの速度低下が推定されている。

もし多くの断層破碎帯が、このような比較的薄い構造をもつならば、他の手法、例えばトモグラフィ、あるいは反射法の適用はその分解能の問題から破碎帯を探索するのは困難な場合が想定される。一方、トラップ波は低速度帯(断層破碎帯)の形態に非常に敏感であることから、破碎帯の探索に有力であると期待される。低速度帯(断層破碎帯)の形態をさらに詳しく知るためには、低速度帯の幅、速度比、 Q 値等をパラメータにし、観測波形と理論波形との比較をより高精度に行う必要がある。

(¹地震地質部)

Key word : Trapped wave, Fault zone, Low-velocity zone, Deep structure

「下部地殻のしなやかさ？」 — 構造敏感性とダイナミクス —

藤井直之¹

下部地殻の変形や応力の状態とその変動は、内陸部の地震発生層の地域性や変動の原因として重要な鍵となっているにもかかわらず、下部地殻物質については、これまであまり具体的な研究がなされてこなかった。それは地震学的にも観測しにくいことや、露頭での複雑な産状なども大いに影響しているからである。

下部地殻では、クリープ破壊(や脆性/延性遷移)の条件が、温度構造や歪み速度(あるいは応力変化速度)ばかりでなく間隙流体の浸透速度(あるいは周囲岩石の変形速度)によっても支配される。そして、いわゆる破壊

条件に適用される有効圧力の概念をそのまま適用できない。それは、高温のために間隙流体と周囲岩石が化学反応することため、流体の全圧ばかりでなく流体中の各化学種についての分圧が再結晶を伴うマクロな変形様式の主要な要因となるからである。このことは、下部地殻物質の変形と間隙流体の浸透性とを独立に扱えないことを意味し、それを象徴的に示すために「下部地殻のしなやかさ」と呼びたい。

また、下部地殻が地震発生のトリガーとなる条件や非地震発生の状態を維持する条件などについてはよく分かっていない。例えば、クリープ破壊の重要な機構である応力腐食はHイオンによってSi-Oの結合が切断される現象であるが、その反応速度は「構造敏感」である。「構造敏感性」とは、体積分率的には優位でない「不均質構造や化学種の存在」が現象を支配しており、あらゆる空間スケールでその作用が「構造」に敏感である性質をいう。

一方、島弧の下部地殻の状態は沈み込むスラブとの相互作用の揺らぎやマントルからの間欠的なマグマの貫入により、応力状態や温度構造ばかりでなく間隙流体の存在形態も変動している。下部地殻の歪み速度は、数時間から数十万年といったあらゆる時間スケールで揺らいでいるに違いない。この意味でも下部地殻の条件下での変形・破壊についての実験的研究が強く望まれる。

(¹名古屋大学・理・地震火山センター)

Keywords : flexibility of lower crust, structure sensitive, interstitial fluid, partial pressure, stress corrosion

流体移動と地震破壊の力学的相互作用による地震活動の複雑さと単純さ

山下輝夫¹

岩石実験および野外観察によれば、地震破壊の成長と地下流体の移動の間には複雑な力学相互作用が及ぼされていると考えられる。例えば、流体圧の増加がおこれば、実効封圧が低下し、地震発生を促進すると考えられる。また、地震破壊が起これば、空隙率の増大を引き起こし、一般に透水性が高まり流体移動を容易にする。これは、また地震発生に大きな変化を起こす。このように、地震破壊と流体移動はフィードバック的な非線形相互作用を引き起こす。このため、地震破壊の時空間変化はきわめて複雑化する。しかし、大規模相互作用系化するため、ある種の規則性もあらわれる。

もし、地震破壊の発生により効果的に空隙が生成されるようであれば、そのような部分では、流体の吸い込みが起こり流体圧が容易には高まらない。そのため、地震破壊の成長は相対的にゆっくりとしたものとなり、群発

的な活動となるということが数値シミュレーションにより示される (Yamashita, 1999). また, 破壊要素の相互作用により, 地震の規模別頻度分布についてのグーテンベルグ・リヒターの式も再現されることとなる. 破壊が容易には成長しないことから, b 値はかなり大きく 2 に近い値をとる. これは, 普通の群発地震の特徴をよく説明する.

空隙の生成率がそれほど大きくないときには, 一般に前震 μ 本震 μ 余震型の地震が生じる (Yamashita, 1998). この場合, 余震については大森公式およびグーテンベルグ・リヒターの式が統一的に数値シミュレーションにより再現できる. また, 余震系列については, 初期には比較的大きなイベントが起きる傾向にあるなど, 観測事実と調和的である (山下, 2000). また, 複数の流体源があったり, 未破壊領域の透水性がゼロに近いような場合は, 二次余震が生じる.

このように, 地震破壊の成長と地下流体の移動の間の相互作用を考えることにより一見多様に見える地震現象を統一的に説明できる. (1 東京大学地震研究所)

Keywords : fluid, pore, fault zone, permeability, rupture

断層物質科学を考慮した破壊核形成過程の モデル化の試み

芝崎文一郎¹

最近の地震発生の理論研究の大きな進展により, 応力の蓄積, 準静的破壊核形成, 高速破壊過程, そして強度の回復と地震発生の一サイクルを再現することが可能となった. これらのモデルは, 限られた条件下での岩石の摩擦実験で得られた構成則を基にしており, 実際の断層で起きている重要な過程を全て含んでいるわけではない. 断層物質科学は, 地震発生に伴う摩擦すべり・変形過程の情報を提供し, 地震発生過程のモデル化に対して強い制約を与える. 本講演では, 断層物質科学を取り入れた地震発生モデルの試みとして, 流動と摩擦が競合する地震発生モデルと地殻流体の挙動に関して議論する.

断層帯の直接観察により, クリープのようなゆっくりとした変形は, 非常に狭い高速破壊を起こすコアとは異なる場所で起きているということが示されている. 田中 (2000) は, 低速でべき乗クリープが支配し, 高速で摩擦特性に移行するという摩擦と流動が競合するモデルを提案した. 脆性-塑性遷移領域を考えた場合も, 流動と摩擦すべりが競合していると考えられる. 大地震発生直前の加速度的すべり過程をモデル化するためには, 流動と摩擦が競合する断層特性を考える必要がある. 芝崎ら (2000) は, べき乗クリープとすべりに依存する摩擦法則が競合する構成則を用いて, 断層深部の加速すべり過程

をモデル化を行った. モデルでは, 断層変位がプレートの相対運動から遅れると応力が蓄積する. そして, 摩擦力と流動応力が断層面での応力に釣り合うように, 流動と摩擦すべりが進行すると仮定する. シミュレーションの結果, 断層の応力の深さ分布を適切に再現することができた. 流動の割合が大きくなると加速すべりの量が大きくなる. これは, Rienen (2000) の結果とも調和的である.

地殻流体は地震発生過程に大きな影響を及ぼすが, 空隙流体圧の変化を通じて影響を及ぼす現象として, (1)地震後及び地震間における力学的及び化学的圧密, (2)核形成及び高速破壊時のダイラタンシー, (3)地震時の摩擦熱による流体圧の増加が挙げられる. 芝崎ら (2000) は, 空隙率がすべり速度に依存する方程式を用いて, ダイラタンシーと力学的圧密による断層帯の流体の挙動を調べた. 流体圧は, 破壊核形成時にダイラタンシーにより僅かに減少し, 地震時に急激に減少する. その後急速に回復するが, 地震間では殆ど一定となる. 地震サイクルに伴う流体の挙動を議論するためには, 圧力溶解クリープやシーリングによる圧密や強度回復が本質的に重要であり, その効果を調べる必要がある. (1 建築研究所)

Keywords : slip process, modeling, frictional sliding, power law creep

地殻の粘弾性と応力蓄積過程

堀川晴央¹

地殻の粘弾性が震源域近傍での応力回復に貢献しているかを探るために, 地震発生後の起震断層近傍の上部地殻内での応力の時間変化の様子を調べた. 2次元のマクスウェル型の粘弾性体中の横ずれ断層を考える. 塑性変形の部分では, 応力とひずみ速度に比例すると仮定する. 剛性率はモデル領域内で一定であるのに対して, 粘性率は深さの指数関数で小さくなるとした. 粘性率の深さ分布を規定するパラメータの値は, サンアンドレアス断層近傍での断層活動を説明しうる値 (Roy and Royden, 2000) を採用した. 系を支配する方程式はすべて線形であるので系の振る舞いを重ね合わせで表現できる. ここでは, 地震サイクルによる応力変化を, 「外力」によるローディングの項と地震の発生に伴う変化の項の2つで表し, それぞれの項の性質を独立に調べる. 地震の発生後の断層面上での応力の時間変化を見ると, プレート間地震の繰り返し間隔程度の時間 (数百年程度) では, 地震発生域で応力増加は見られない. ところが, 内陸地震の繰り返し周期程度の時間 (数千年程度) では, 地震により生じた応力降下のかかなりの部分を回復しうるということがわかった. 地震発生層にあたる範囲では, 断層の深部で顕著である. この性質はマクスウェル時間により

支配されていると考えられる。また、地震に相当するすべりを与えず、プレート運動に相当するローディングだけを加えていったところ、深さ、すなわちマクスウェル時間に応じて応力の増加の頭打ちが見られた。以上2つの項の寄与をまとめて地震サイクルを考える。実際の地球の変動の継続時間は長く、定常状態に達していると考えられるから、「外部」からのローディングによる応力は一定値に達していると考えてよいだろう。したがって、

この系での地震サイクルに伴う応力変化は、ローディングによる一定の応力値に地震の発生と粘性の緩和による応力のゆらぎがのった形で表される。そして、この緩和にかかる時間が再来周期を支配していると見なせる。よって、内陸地震の再来周期は地殻の粘性率の分布に左右されることが考えられる。

(¹地殻物理部)

Keywords : seismic cycle, recurrence time, crust, viscoelasticity, stress recovery process