

野島断層掘削コアを用いた断層プロファイルの解析

The analysis of fault profile by Nojima Fault drilling core

富田直人¹・田中秀実¹・樋口孝幸¹・
伊藤久男²・藤本光一郎³・大谷具幸³
(¹愛媛大学, ²地震地質部, ³地殻熱部)

Naoto TOMIDA¹, Hidemi TANAKA¹, Takayuki HIGUCHI¹,
Hisao ITO², Koichiro FUJIMOTO³ and Tomoyuki OHTANI³
(¹Ehime University, ² Earthquake Research Department,
³ Geothermal Research Department)

1998年6月17日

地 質 調 査 所
Geological Survey of Japan

【1】はじめに

1995年1月17日午前5時46分、兵庫県明石海峡を震央とする大地震、兵庫県南部地震が発生した。この地震により阪神地域および淡路島北部に死傷者5000名以上を出すという大惨事を引き起こした。この地震に伴い、既存の野島断層・水越撓曲などの活断層沿いに総延長10.5 kmの地表地震断層が出現した(栗田ほか, 1996, 図1)。地震防災において重要とされる活断層での地震発生過程や断層強度回復過程を知るためには地下深部での断層の物性や構造を調査する必要がある。そのため、淡路島においてこの野島断層に対し地質調査所(以下GSJ)、防災科学技術研究所(以下NIED)、が野島平林に、大学連合(以下UNIV)が富島に、それぞれ断層コア掘削を行った(図1, 図2)。

GSJコアは野島断層の地表露頭から74.6 m東側の地点で深度746.70 mまでほぼ連続的に掘削されている。野島断層の傾斜が 84° であるのに対し、それを貫くため最大 4° の傾斜で掘削され、深度624 m付近で断層ガウジに到達している(伊藤ほか, 1997)。

NIEDコアは地表露頭から300 m東側の地点で深度1838.20 mまでほぼ連続的に掘削されており、1140.65 m付近で断層ガウジに到達している。また、これより下部の1300 m, 1600 mでも断層ガウジ帯が存在している。

UNIVコアはGSJコア掘削地点からNW 40° 方向に約300 m離れた地点で深度550.70 mまでほぼ連続的に掘削されており、深度389 mで付近で断層ガウジに到達している。

【2】地質概説(図3)

淡路島北部には、六甲山地の南西方に連なる地塁状の津名丘陵が発達しており、同丘陵の北西縁は野島断層および水越撓曲などの活構造によって限られている。野島断層は北東～南西走向で長さ7 kmの、逆断層成分を伴う右ずれの活断層である。その平均変位速度は更新世末期に形成された段丘面の変位量と年代から $1\text{ m}/10^3\text{年}$ (右ずれ $0.9\sim 1.0\text{ m}/10^3\text{年}$, 南東側隆起 $0.4\sim 0.5\text{ m}/10^3\text{年}$)と求められている(水野ほか, 1990)。また水越撓曲は、野島断層の南西方に延びる長さ4 kmの撓曲構造であり、ここでは鮮新世～

更新世前期の大阪層群が北西に急傾斜している。(水野ほか, 1990).

兵庫県南部地震では既存の野島断層にほぼ一致して長さ8.8kmの地震断層が, また野島断層の南西方から水越撓曲の北東部に沿っては長さ3.0kmの地震断層が現れた. 前者は野島地震断層, 後者は小倉地震断層と呼ばれ両者からなる長さ10.5kmの断層系は北淡地震断層系と呼ばれている。(栗田ほか, 印刷中)

北淡地震断層系は, 淡路島北端部の江崎灯台付近から同島北西岩に沿って浅野南まで延びる北東-南西走向の地震断層系であり, 変位は右ずれ成分が卓越し, おおむね南東側隆起の逆断層成分をともなっている(栗田, 1996).

野島地震断層は地震断層系の主部をなしており, 江崎灯台付近から野島江崎・野島平林・野島轟木および野島暮浦を経て小倉東方までのびている. 変位は右ずれが卓越し, ほぼ全域で南東側隆起の逆断層成分をともなっている。(栗田, 1996).

小倉地震断層は地震断層系の南西部に位置し, 野島暮浦付近から小倉, 富島を経て浅野南までのびる北東~南西走向の地震断層である. 変位は右ずれ成分が卓越しており, 断層の北東部では北西隆起成分を, また中央部から南西部にかけては南東側隆起の逆断層成分を, それぞれともなっている。(栗田, 1996).

【3】 研究目的

地質調査所断層掘削コア(以下GSJコア)は地震直後の断層を掘削した世界初の重要な活断層コアである. 地表から地下700mまではほぼ連続的で, かつ風化を被っていないという点で, 保存状態が非常に良いと言える. そこで, この連続的なコアを観察することにより断層岩の分布様式, および変形変質様式を正確に知り, 地震予知につなげる事が目的である. 本研究での目的は以下の2点である.

(1) 精密柱状図の作成

既に作成されている柱状図に存在する主剪断帯(6区間)についてより正確に断層岩区分を行い, それに基づき精密柱状図を作成する.

(2) 主剪断帯の断層岩分布様式, 変形変質様式の解読

それぞれの剪断帯における断層岩研磨片の肉眼観察に基づき, その分布様式

を正確に把握することにより特徴，変形変質様式を解読する。

【4】研究方法

本研究を進めるにあたり，顕著な破碎帯を含む主剪断帯(6区間)を選抜し，総長78.92 m，コア数444片の断層岩研磨片を作成した。そして，全体の色調，長石類の色調，有色鉱物の消長，変質鉱物の様子，剪断面密度，クラックの密度，に着目し研磨片ごとに肉眼観察を行った。その記載をもとに6区間の精密柱状図を作成し，それぞれの変形変質様式を検討した。

【5】野島断層コア掘削後のコア処理方法(図4)

①樹脂による固定

掘削後の未処理状態のコアは自然状態のまま放置しておくと，雨水などの影響を受け，崩壊してしまう恐れがある。これを防止するためにコア表面を樹脂により固定する必要がある。本研究ではストルアス社製のエポキシ系樹脂EPOFIXを使用した。樹脂は主剤と硬化剤を15：2の割合で混合させ塗布するものである。使用にあたり，岩石が水分を含んでいる状態では樹脂が白濁するという特徴がある。これを避けるため，塗布直前にコアを乾燥させる必要がある。乾燥させたコアに，樹脂を塗布した。樹脂は表面固定だけでなく接着剤としての役割も果たすため，崩壊した部分のうち復元可能な部分については，よりもとの分布状態に近づくように接着を行った。塗布後は雨水の影響を受けない所で乾燥させた。なお，他にもポリエステル系樹脂など様々な種類の樹脂もあるが，EPOFIXは塗布後自然状態で乾燥し，乾燥後の強度が非常に高いため，断層岩コアの固定には最も適していると思われる。

②ポラロイドカメラによるコア箱撮影

コア箱内のコアの位置を記録するためポラロイドカメラで撮影を行った。これは，

切断などでコアを外部に持ち出した際位置が変更しないようにするためである。この写真に、この次の過程でナンバリングした数字を書き込み保存の手段とした。

③ナンバリング

続いてピースごとにナンバリングを行った。その際、作業中にコアが位置変更したり反転したりするのを防ぐために浅い方から順にナンバリングを行った。また、コアの上位下位を区別するために数字の頭が上位を示すように統一した。(コア箱ナンバー) - (ピースナンバー)の形式で示している。

④切断

ナンバリングの終了したコアについて切断を行った。まず、円柱状のコアを長軸方向にハーフカットし、片方をアーカイブ、もう一方をワーキングと定義した。ワーキングは現在地質調査所で保管されている。アーカイブについて、さらに二次切断を行った。これによりスラブ状になった方を鏡面研磨片試料に、半円柱状の薄い方を薄片試料、X線分析用試料として保存した。切断の段階で崩壊するコアについては、その度に樹脂塗布を行った。以上の作業は地質調査所の機材、施設を使用させていただいた。切り出したスラブ状試料を大学に持ち帰り、鏡面研磨片を作成した。

【6】断層岩区分

GSJ柱状図の作成や、形成進度における変形変質様式を観察するためには、より正確に断層岩区分を行うことが必要である。浅所断層岩は破壊(変形)と変質という2大要素を伴っている。そこで、この2つの要素を抑えることにより断層岩の形成過程を認識できるのではないかという考えのもと断層区分案が作成された(田中, 1997, 図5)。横軸に変形の強さを、縦軸に変質の強さをそれぞれ0~3の4段階に区分し、判別を行う。この区分案では交点のみを評価の対象とし、マスの中は対象外として扱っている。表現の仕方は、変形、変質の順に数値で示す(例えば変形2変質2なら2-2である)。そして、交点に相当する試料(8試料)を選抜し肉眼観察において基準となる標準試料とした。

また、この図において原岩が断層ガウジになる過程を考えてみると、(a) まず変形が

卓越し、カタクレーサイトになり、その後変質が卓越する過程、(b) まず変質が卓越し、変質岩になり、その後変形が卓越する過程、(c) 変形変質がともに進行し、断層角礫から断層ガウジになる過程、の3通りが考えられる。

なお、この断層岩区分図は現在検討中で、暫定案である。これから改善策を追求する必要がある。

【7】各断層岩の特徴

①弱変形変質花崗閃緑岩

有色鉱物が部分的に有色鉱物が粘土鉱物に置換されているが、ほぼ新鮮な状態で残存している。剪断面、クラックともに低密度で存在し、断層による影響が小さいと考えられる。

②変質岩

有色鉱物の割合、粒度ともに小さくなる。剪断面、クラックは低密度だが、コア全体が緑色を帯び、他のコアに比べコア全体が若干膨張している。この変質岩に区分されるコアは極めて少ない。

③断層角礫

コア全体が橙褐色を呈し、原岩構造がほぼ失われ、残存しているのはクラスト部分のみである。有色鉱物は粘土鉱物に置換されほぼ消失している。剪断面、クラックが網目状に発達し角礫化を進行させている。

④カタクレーサイト

剪断面、クラックが高密度に発達している。有色鉱物が面構造を形成しているものと、原岩構造が塊状に残存しているものが存在するが、いずれも変質による影響はほとんど見られない。

⑤ 断層ガウジ

原岩構造がほぼ完全に失われている。剪断面，クラックが高密度で存在している。灰黒色を呈するものと黄褐色を呈するものが存在する。また，面構造や縞状構造を示すものが多く存在する。

【8】 GSIコア全体柱状図

断層岩区分案をもとに持ち帰ったGSIコア(553.39～718.20m)の柱状図を作成した(樋口，1997，図6)。この柱状図中に6部分の顕著な剪断帯が確認された。これらを深度の浅い方から，USZ(590.53～599.69m)，MSZ(609.12～628.90m)，LSZ-1(631.23～635.25 m)，CZ-1(654.60～662.27 m)，CZ-2(663.31～674.19 m)，LSZ-2(701.29～713.25 m)と定義した。これら6剪断帯のうち，最もガウジ幅が厚いうえ，伊藤ほか(1996)の検層データに示されていることから，MSZがこの度の地震の際に活動した地震断層ではないかということが示唆されている。

これらの剪断帯について精密に観察を行うため，総計78.92m，コア数444片の断層岩研磨片を作成した。

【9】 主剪断帯精密柱状図

研磨片作成後，すべてのコアについて肉眼観察を行い，再度断層岩区分を行い，剪断帯別の精密柱状図を作成した(図7)。さらに，それぞれの剪断帯ごとの変形変質傾向を確認するために先に示した断層区分案の図上にプロットした(図8)。これは，各剪断帯中のすべてのコアを断層岩区分案における区分値ごとに振り分け，相対的割合を求め，図上の対応する交点にプロットしたものである。

【10】 結果

これらの精密柱状図，断層岩区分案より次のような結果が得られた。

●USZ(590.53～599.69m)

弱変形変質花崗閃緑岩区分されるものが大部分を占めるが，剪断面，クラックともに顕著で，茶褐色を帯びたコアが分布している．594.86m～595.27mの幅約40cmの断層角礫帯をはさみ，強度のやや弱いコアが分布している（付図 コアNo93-30，93-31）．研磨の段階で予想以上にコアが破壊する事が多かった区間である．このUSZでは区分図上で(1-1)，(1-2)に区分されるコアが多い．

●MSZ(609.12～628.90m)

6剪断帯の中で最もガウジ幅が厚い区間である．上盤は弱変形変質花崗閃緑岩，625.85mから断層角礫，623.07mから断層ガウジという変形変質様式であるのに対し，下盤はガウジ帯直下の625.27mから破碎の影響が小さい弱変形変質花崗閃緑岩が分布しており，断層角礫は見られない．上盤と下盤の断層岩分布は非対称である．また，MSZのガウジには以下の4種類のガウジが確認できる．

- ・黄褐色，灰緑色を呈するもの（付図 コアNo.98-29～98-2）
- ・灰黒色を呈するもの（付図 コアNo.99-3～99-5，No.99-8～99-11）
- ・黄褐色を呈し面構造を示さず角礫が取り残されているもの（付図 コアNo.99-6～99-7）
- ・黄褐色を呈し面構造を示すもの（付図 コアNo.99-11～99-12）

最も浅部の黄褐色，灰緑色ガウジは，黄褐色，灰緑色の縞状構造を示している．その下部の灰黒色ガウジとの境界が確認できる（付図コアNo.99-3）．

灰黒色ガウジは黒色，白色，灰黒色の縞状構造を示し，その面に直交する方向に，階段状の剪断面が発達している（付図コアNo.99-8）．

灰褐色ガウジに挟まれるように黄褐色ガウジが存在する．上部との関係は明瞭ではないが，下部は白色のクラストを挟み，灰黒色ガウジと接している．さらに灰黒色ガウジに注入しているが，灰黒色ガウジ中の剪断面によって切られている（付図コアNo.99-7，99-8）．この黄褐色ガウジには明瞭な面構造は確認できない．原岩組織を示す直径2～4mmの角礫が取り込まれている．

黄褐色ガウジが灰黒色ガウジを切るように存在しており、境界は明瞭である(付図コアNo.99-11)。この黄褐色ガウジは弱い面構造を示し、原岩組織を示す直径2mm～2cmの角礫が取り込まれている。このMSZでは区分図上で(1-1)、(1-2)、(2-2)、(3-3)に区分されるコアが多い。

●LSZ-1(631.23～635.25m)

全体的に茶褐色を帯びた脈が網目状に発達し、角礫化を進行させている(付図コアNo.100-38)。剪断面も比較的顕著である。634.13mに1片のみ断層ガウジが存在する(付図コアNo.101-3)。その直下に断層角礫が分布している(付図コアNo.101-5)。USZ同様研磨の段階でコアが予想以上に破壊することが多かった区間である。このLSZ-1では区分図上で(1-2)に区分されるコアが多く存在する。

●CZ-1(654.60～662.27m)

弱変形変質花崗閃緑岩が大部分を占める中、658.97mから唐突に面構造を示すカタクレーサイトが分布している(付図コアNo.103-27)。661.23mには断層角礫が明瞭な境界を有し存在している(付図コアNo.104-15)。このCZ-1のコアには剪断面が比較的顕著に見られるが、長石は乳白色を呈し、有色鉱物も残存している。カタクレーサイトはこのCZ-1より浅部には分布していない。現在の所、分布が確認されているのはCZ-1とCZ-2のみである。CZ-1では区分図上で(1-1)、(2-1)、(3-1)に区分されるコアが多い。

●CZ-2(663.31～674.19m)

上部には弱変形変質花崗閃緑岩が分布し、668.00mで茶褐色を帯びた脈により角礫化された断層角礫が分布するようになる(付図コアNo.105-23)。669.48mでカタクレーサイトと接しているが、その境界は明瞭である(付図コアNo.106-2)。CZ-2のカタクレーサイトは母岩構造が塊状に取り残された構造を示している。670.75mからのカタクレーサイトは塊状構造を示すとともに、波状の面構造を示す(付図コアNo.106-17)。全体的に長石は比較的乳白色を呈し、有色鉱物は減少しているが完全に消失していない。このCZ-2では区分図上で(1-0)、(1-1)、(2-1)、(3-1)に区分されるコアが多い。

●LSZ-2(701.29～713.25m)

弱変形変質花崗閃緑岩が大部分を占める。長石が多少変質を受け、橙色化されている。有色鉱物はほとんど消失していない。707.24mから変質岩が分布するようになる(付図コアNo.114-18,19)。コア全体が緑色を帯びている。剪断面、クラックは比較的やや発達している。有色鉱物は減少しているが完全に消失していない。また、この変質岩は、他の部分のコアに比べ若干膨張している。このような変質岩に区分されるものはLSZ-2にのみ分布しており他では見られない。このLSZ-2では区分図上で(1-1), (1-3), (1-2), (2-1), (2-2)に区分されるコアが多い。

11. 考察

GSJコアには5ヶ所の断層ガウジが確認できる。このうちMSZにはコアとして採取された断層ガウジが2.2mで、野島断層の傾斜、掘削の傾斜を考慮すると、ガウジ幅は約0.38mとなり、さらにその上盤の断層角礫は7.22mで、実際の断層角礫幅は約1.25mということになる。これらを一連の断層破碎帯と考え、6剪断帯の中で最も規模の大きいものであると言える。また、MSZには4種類のガウジが存在するが、境界が明瞭なものからステージを考えてみる。

最も上部の黄褐色ガウジ中の剪断面が灰黒色ガウジに切られている部分があるため、灰黒色ガウジの方が新しいと考えられる。

さらに、灰黒色ガウジと、その間に挟まれた黄褐色ガウジとの関係を考える。黄褐色ガウジが、灰黒色ガウジ中に注入している部分があるが、その部分と、灰黒色ガウジの縞状構造を同時に切断する剪断面が存在していることから、この剪断面が、2の間では新しいと考えられる。

そして、最下部の黄褐色ガウジだが、灰黒色ガウジを剪断面と共に切断している。

以上のことからステージとして、最も新しいものは最下部の黄褐色ガウジであると考えられる。つまり、MSZの深度 625.22m、コアNo.99-11 が兵庫県南部地震の際の地震断層であると考えられる。また、MSZ以外の断層ガウジはいずれも幅が狭いうえその周囲を弱変形変質花崗閃緑岩と接しているものが多く、断層岩と接していても、その規模が小さいということから、これらは主断層に伴う小断層であると考えられる。

また、変質変形の傾向図より、MSZは変形、変質がともに進行している傾向にあり、CZ-1, CZ-2は変形の卓越した傾向、USZ, LSZ-1は変質の卓越した傾向にあり、LSZ-2

もやや変質の卓越した傾向にあると考えられる。

CZ-1, CZ-2にはそれぞれ組織の違うカタクレーサイトが存在することが分かった。しかし、肉眼観察の時点で、そのことを立証できる事実をつかむことができなかった。LSZ-2の変質岩についても同様である。コアが膨張している理由、局所的にしか存在しない理由等、これから、肉眼観察だけでなく、鏡下観察を取り入れ、追求したいと考えている。

【12】 謝辞

本研究の進行にあたり、筑波大学の佐野広征氏には通商産業省工業技術院地質調査所滞在中、多くの御協力を頂いた。

愛媛大学愛媛大学理学部生物地球圏科学科田中研究室の山路孝昌氏、島崎直樹氏、檜晋一郎氏には、作業の手順等多くの御指導を頂いた。池田沙織氏、岩田健吾氏、岸本千秋氏、大塚隆司氏、楠義隆氏、関谷典恵氏をはじめとする先輩、同輩諸氏には多くのご協力を頂いた。以上の方々に心より感謝の意を表すると共にお礼申し上げる。

なお、兵庫県南部地震により被害に遭われた方々に心からのお悔やみを申し上げると共に、将来の防災に少しでも貢献できるよう、研究を続けていく次第である。

【13】参考文献

- 栗田泰夫, 1996, 淡路島の地震断層, 阪神淡路大震災 都市直下型地震と地質環境特性, 日本地質学会 環境地質研究委員会, 91-100
- 伊藤久男, 桑原保人, 宮崎光旗, 西沢修, 木口努, 藤本光一郎, 大谷具幸, 田中秀実, 樋口孝幸, Susan Agar, Alain Brie, 山本裕祥, 1996, 断層を貫く坑井調査による野島断層の深部構造, 物理探査, 49, 522-535
- 水野清秀, 服部仁, 寒川旭, 高橋浩, 1990, 明石地域の地質, 地域地質研究報告 (5万分の1図幅), 地質調査所90p
- 田中秀実, 樋口孝幸, 藤本光一郎, 大谷具幸, 伊藤久男, 富田直人, 印刷中, 野島断層GSJ掘削コアの断層岩分布様式、および変形-変質過程
- 樋口孝幸, 1997, 兵庫県南部沖地震の地震断層(野島断層)ボーリングコアの小構造および変形履歴, 愛媛大学理学部生物圏地球科学教室卒業論文