

中央構造線断層帯掘削と コアによる断層帯内部構造解析

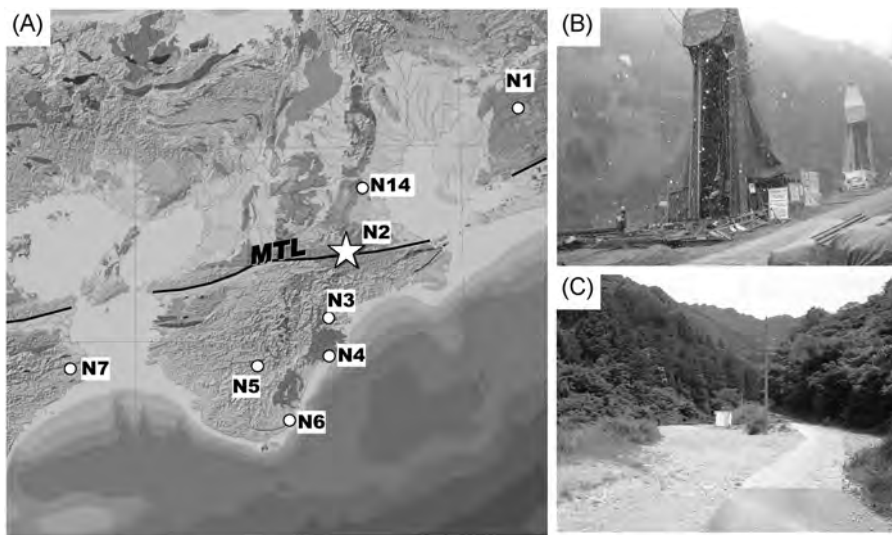
重松 紀生¹⁾・小泉 尚嗣¹⁾・藤本光一郎²⁾・古谷 直人²⁾・田中 伸明²⁾
竹下 徹³⁾・森 宏⁴⁾・Simon Wallis⁴⁾・木村 希生⁵⁾

1. はじめに

東海～四国の沖合にある駿河～南海トラフでは、100-200年程度の間隔で、M8(マグニチュード8)クラスの巨大地震が繰り返し発生しています。産業技術総合研究所(産総研)では東南海・南海地震予測のために、地下水等観測施設を2006年度から順次整備しています。これらの中の1つが飯高赤桶観測点(第1図A, 表紙のN2)で、平成20年6月に完成しました。

飯高赤桶観測点の整備の重要な意義の1つは、西

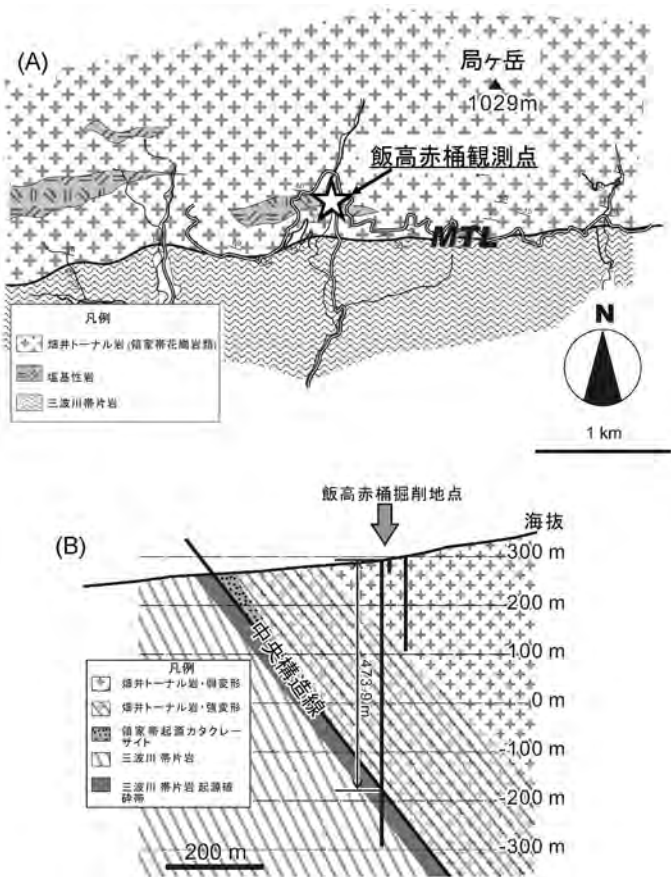
南日本内帯と外帯を分け日本の陸上で最長となる延長約1,000kmの断層である中央構造線(以下MTL)を掘削深度600mの観測井戸(孔1)が貫通したことです。MTLの周囲には断層の深部から浅部に至る様々な条件で形成した断層岩が露出しています。日本は地下10～15kmの深度を震源とする内陸活断層地震による被害も大きいですが、その震源域で起こっている現象はきちんと理解はされていません。MTL周囲に見られる断層深部からもたらされた断層岩は、活断層で起こる地震の震源域を理解する重要な手掛かり



第1図 飯高赤桶観測点の場所と風景。(A) 紀伊半島の地質図と産業技術総合研究所が整備した東南海・南海地震予測のための地下水等観測施設(コンピュータグラフィックス日本列島の地質CD-ROM版より引用)。星印: 飯高赤桶観測点。白丸: それ以外の観測点。(B) 飯高赤桶観測点, 工事中の風景。手前の槽が600m孔, 奥の槽が200m孔です。(C) 飯高赤桶観測点, 工事完了後の風景。

1) 産総研 活断層・地震研究センター
2) 東京学芸大学 教育学部
3) 北海道大学 大学院 理学院
4) 名古屋大学 大学院 環境学研究科
5) 産総研 地質情報研究部門

キーワード: 飯高赤桶観測点, 中央構造線, 断層帯掘削, 孔崩壊, 断層岩



第2図 飯高赤桶観測点付近の地質。(A) 飯高赤桶観測点付近の地質図(島田ほか, 1998を修正)。中央構造線(MTL)の約300m北に観測点はあります。(B) 飯高赤桶観測点付近の地質断面図。600m孔は掘削深度473.9mで物質境界としての中央構造線を貫通しました。

なのです(例えば, Shigematsu *et al.*, 2009)。

飯高赤桶観測点の工事は断層を貫通するという意味で大変な難工事でした。本稿では、工事を通して感じた断層帯掘削の難しさと、得られたボーリングコアに含まれる断層岩の解析計画の概略について述べたいと思います。

2. 一筋縄では行かない断層帯掘削

断層帯掘削は兵庫県南部地震以降に行われた野島断層の掘削(例えば, Ohtani *et al.*, 2000)を皮切りに、アメリカのサンアンドレアス断層のSAFOD(例えば, Hickman and Zoback, 2004; Moor and Rymer, 2007)、台湾の車籠埔断のTCDPなど(例えば, Ma *et*

al., 2006; Hirono *et al.*, 2006)世界各地で行われ、ニュージーランドのアルパイン断層でもDFDPと呼ばれる断層帯深部掘削が計画されています(Townend *et al.*, 2009)。一方で、断層帯掘削は決して簡単なことではなく、今回の工事の困難であった点を整理することで今後の同種の工事の役に立てればと思います。

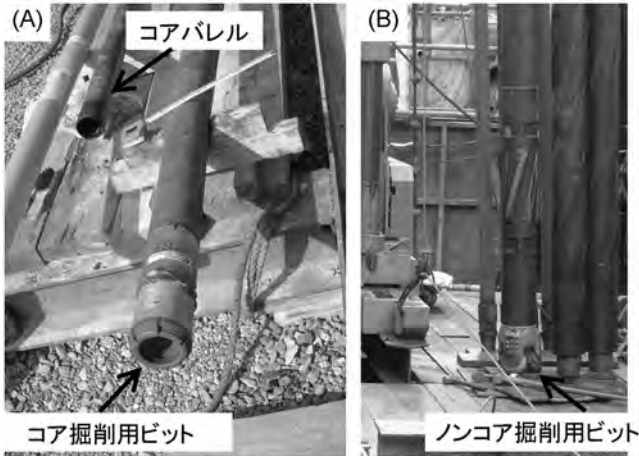
2.1 用地探し

掘削に関する作業は観測点の候補となる用地を探すことから始まりました。観測を長期にわたって行うことから、電力・電話が500m以内に供給されている公的機関所有もしくは公的機関に準ずる団体などの所有する土地であることが望まれます。また掘削深度600m(孔1)、200m(孔2)、30m(孔3)の3つの井戸を掘削するので、掘削に必要な機器を展開するのに十分な土地面積が必要です。しかし、予定現場付近は山岳地域で(第1図B, C)、条件を満たす用地候補は限られています。さらに実際には様々な法規制や時間的制約から、現在飯高赤桶観測点となっている敷地以外での工事は困難でした。なお飯高赤桶観測点は、工事前に既に電力・電話が敷地手前400mまで敷設され、地下水等の観測には申し分のない場所でした。

飯高赤桶観測点近傍には、領家帯と三波川帯の境界のMTLがあります(第2図A)。今回は、候補地決定後の地質調査により領家帯と三波川帯の境界を押さえ、これらを最小二乗法により平面回帰させ、事前にMTLの貫通深度を推定しました。推定された断層面の平面性はかなりよく、掘削深度約480mにおいて岩相境界としてのMTLを貫通する可能性が高いことが判明し、貫通を前提とした掘削計画の必要性が出ました(第2図B)。実際には473.9mにおいてMTLを貫通しています。

2.2 断層帯の掘削

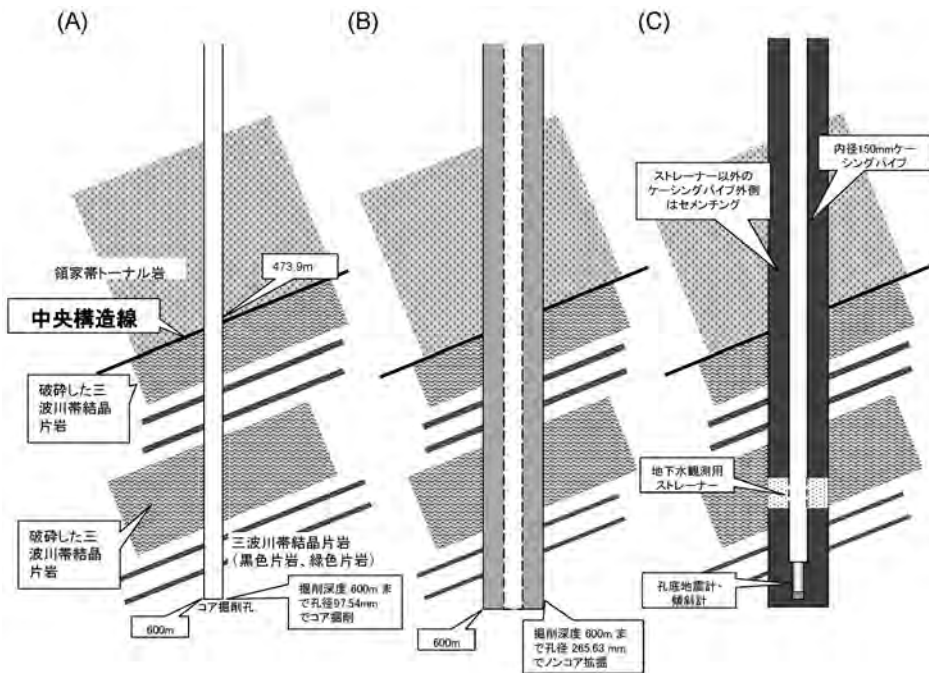
本観測点の工事が難工事となった最大の原因は、孔1におけるMTL下盤側(三波川帯側)、岩相境界の



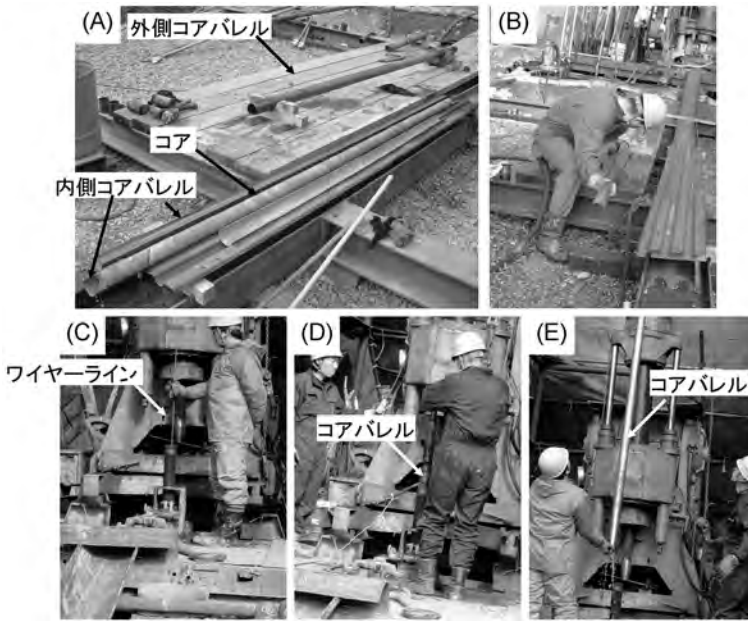
第3図 ボーリング掘削用ビット。(A)コア掘削用ビット。写真は外径97.54mmのHQサーフェスビット。写真左上にコアバレル(詳細は第5図)が写っています。(B)ノンコア掘削用のビット。写真は孔径265.63mm(10-5/8”)の孔用のもの。先端に三角錐状のビットが3つついていることからトリコンビットと呼ばれます。

473.9mから555mまでの断層による崩壊層の掘削です。計画では、まず孔径97.54mmにおいてコア掘削用ビット(第3図A)により掘削の後、ノンコア掘削用ビット(第3図B)により孔径265.63mmに孔を広げ、内径150mmのケーシングパイプを入れ、ケーシングパイプをセメントで孔内に固定するというものでした(第4図)。そしてコア掘削終了後とノンコア掘削終了後の各段階で物理検層を行う予定でした。しかし繰り返す孔崩壊から、工程、特に物理検層は変則的なものになりました。

崩壊層掘削の対策として、掘削深度400mからは三重管コアバレルを使用しています(第5図A, B)。ボーリング掘削ではコア掘削の際に、作業を効率よく進めるためワイヤーライン工法という方法を採用することがあります(第5図C-E)。これは掘削パイプ先端(第3図A)に長さ3mのコアバレルという部品を取り付け(コアバレルの長さは状

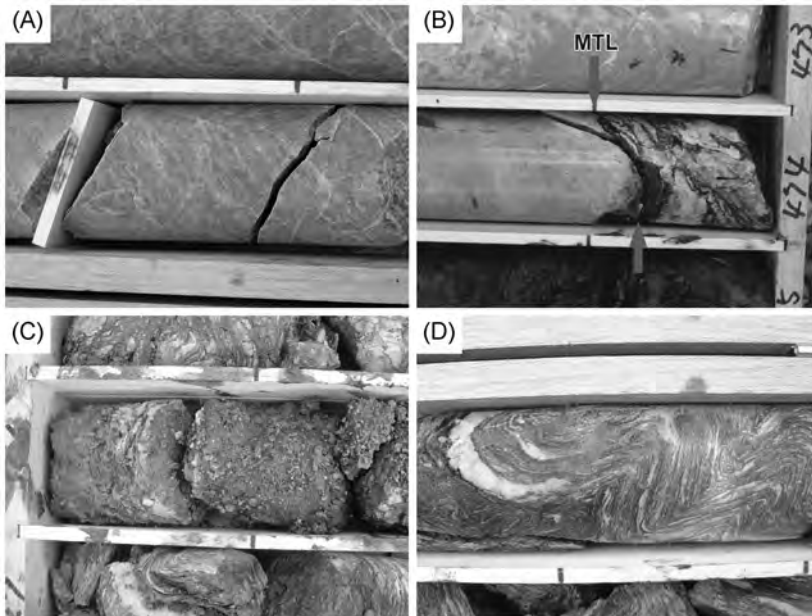


第4図 飯高赤桶観測点の当初予定600m孔掘削手順。(A)孔径97.54mmにおいて600mまでコアを採取しながらコア掘削。(B)600mまで孔径265.63mmまでノンコア掘削。(C)内径150mmのケーシングパイプ挿入後、地下水観測用のストレーナー区間以外をセメンチングによりケーシングを固定します。



第5図

三重管コアバレルとワイヤーライン工法。(A) 三重管コアバレル。外側コアバレルと内側コアバレルの二重構造になっており、掘削用パイプとあわせて三重管になっています。下に写っているコアは、樋のような形の内側管コアバレルの上に乗っています。(B) 外側コアバレルに内側コアバレルをセットしている様子。(C) ワイヤーラインによりコアを孔底からコアバレルごと引き上げています。(D) コアバレルの頭が顔を出したところ。(E) コアが収納されたコアバレルが掘削用パイプの外に出たところ。



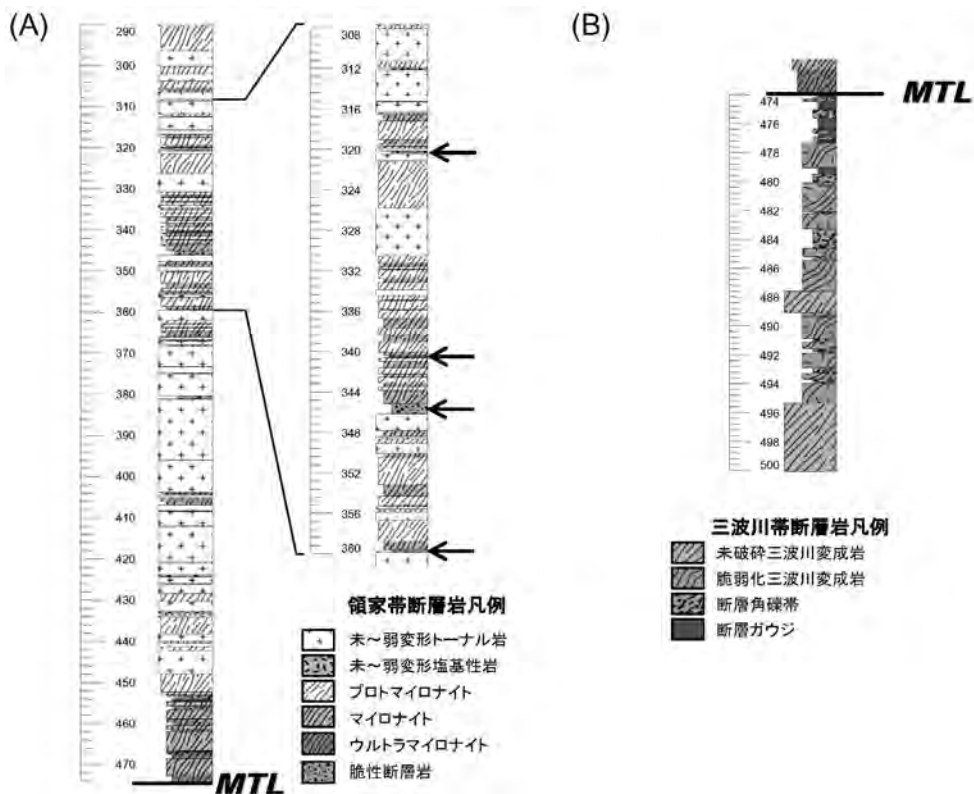
第6図

飯高赤桶観測点600m孔のコア状態。(A) 深度155.5m。比較的しっかりした畑井トータル岩の棒状コア。断層深部での塑性流動によりマイロナイト面構造が発達しています。(B) 深度473.9m。物質境界としての中央構造線。MTLの左側(浅い)が畑井トータル岩起源のウルトラマイロナイト、右側は破碎三波川帯片岩起源の断層岩。(C) 深度546m。三波川帯起源の粘土状の断層破碎帯。(D) 深度565.7m。三波川帯片岩の棒状コア。

況により3mでないこともある)、掘削するとコアがコアバレル内に収納され、原則2.8m掘削するごとにコアバレルごとコアをワイヤーラインにより回収するというものです。通常の二重管コアバレルは掘削泥水がコアの周囲でも循環するのに対し、三重管コアバレルではコアの周囲での掘削泥水の循環がなく、泥水循環によるコア流出を防ぎ、破碎帯部分でのコア回

収率を上げることができます(第5図A, B)。

掘削深度が473.9mの岩相境界としてのMTLまでは硬質のコアが採取されていました(第6図A)。しかしこれを超えると(第6図B)、本格的な崩壊層となりました(第6図C)。そこで、孔壁の泥の壁を強化させて崩壊を防ぐことを目的にいくつかの添加剤を掘削泥水に加えしました。しかし、掘削深度540mに達する



第7図 飯高赤桶の600m孔コアの掘削深度290-500mの断層岩柱状図。(A) 領家帯側の断層岩柱状図。450-473.9mと330-370mに顕著な塑性流動による延性剪断帯(マイロナイト帯)が見られます。延性剪断帯の断層岩は変形の強さに対応して、比較的変形が弱いプロトマイロナイト、それなりに変形しているマイロナイト、非常に変形が強いウルトラマイロナイトと呼び方が変わります。300-370mで見られる脆性的な断層には(右側柱状図の矢印は顕著なもの)、特徴的に濁沸石が見られます。(B) 三波川帯側の断層岩柱状図。474.5-476.4m、479-479.4mは粘土質の断層ガウジ帯になっています。

と、崩壊による抑留がたびたび発生し、さらに、550mを過ぎた段階で抑留により掘削用パイプが全く動かなくなりました。そして、ついに掘削用パイプを引き上げたものの、491m以深の50m以上が崩壊により埋まってしまったのです。

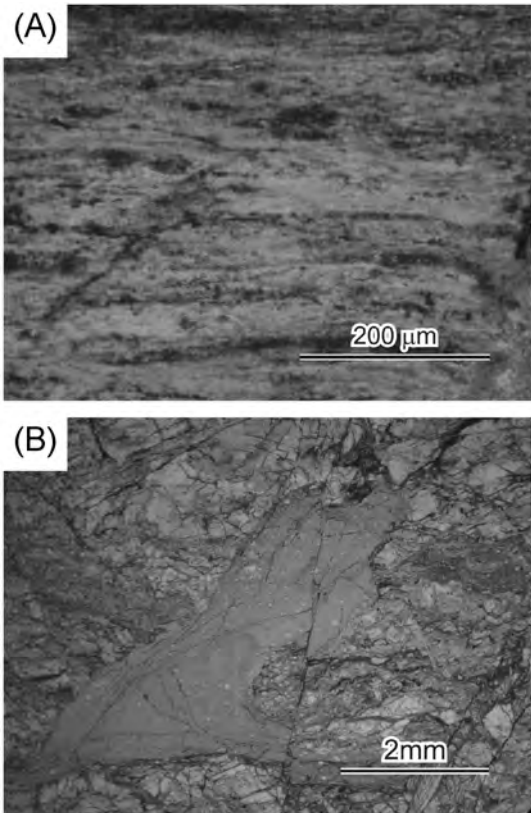
飯高赤桶観測点の孔1は上記の崩壊を革切りに、その後も473.9mから555mまでの区間で崩壊が度重なり、そのたびに工程の変更を余儀なくされ、破碎帯掘削の困難さを実感させられました。結局、着工からコア掘削孔が岩相境界としてのMTLに到達するには1ヶ月たらずしかかからなかったのに対し、孔1を完成させるまでには半年近くの時間を要したのです。飯高赤桶観測点の工事には孔1の孔崩壊以外にも様々な困難が付きまとい、現場の作業員もかなり疲労困

憊している様子でした。その後、工事は無事完了し、崩壊層部分のコアもほぼ完全に取得され、現在ではMTLの破碎帯の地下水の観測や、地震計・傾斜計・歪計による観測も順調に行われています。

3. 中央構造線の連続コアによる断層帯内部構造解析

上記のようにしてMTLを貫通したコアが得られました。現在、科研費基盤(B)「中央構造線の連続コアによる断層帯内部構造解析」により、このコアを用い、内陸活断層に沿って発生する地震の理解を目指して解析を進めています。

断層の性質は物理条件の違いにより変わり、断層



第8図 領家帯マイロナイト中の微細構造。(A) MTL直上に見られるフィロナイト(直交ニコル)。掘削深度472.95m。強い面構造が見られ、明るい部分は面構造に平行に強い配列を作る白雲母、緑泥石、やや暗い部分は非常に細粒な長石。(B)シュードタキライトの断層脈と注入脈。掘削深度461.06m。

深部での内陸地震の発生、地震の破壊の伝播はこうした多様な断層の挙動に支配されるものと考えられます(例えば、Scholz, 2002)。一方、飯高赤桶観測点で得られたコアは、長いMTLの活動履歴の中で異なる条件での断層活動を記録しています。こうしたことからコアの内部構造解析が、物理条件の違いによる多様な断層の挙動の理解につながる事が期待されます。

一方で、得られたコアによってこうした問題を解けるのかは、コア中で断層活動により形成した構造がどのような時期に、どのような物理条件を反映して形成したのかが明らかになっていないとわかりません。現在の解析の状況は、掘削深度290-500mのボーリ

ングコアを構成する断層岩の記載が終了し、断層岩の形成条件の復元を試みているという段階です。また、断層岩の形成条件を明らかにすることは、日本列島形成を考える上で大きな謎である、低圧変成岩の領家帯と高圧変成岩の三波川帯がどのように接したのかという問題にも何らかの回答を与えられるかもしれません。

断層の深部延長の岩石は、300℃以上の温度では地震性滑りを起こさずに塑性流動により延性剪断帯(マイロナイト帯)を作っていると考えられ、延性剪断帯はコアの中ではMTLの上盤側の領家帯トータル岩中の450-473.9mと330-370mに見られます(第7図A)。特に450-473.9mの延性剪断帯のMTL直上では、白雲母に富み強い面構造が発達したフィロナイトと呼ばれる断層岩が発達し(第8図A)、また地震の断層運動により岩石が摩擦融解したシュードタキライトが形成しているのが見られます(第8図B)。これらの形成条件はその鉱物組合せから、いずれも300℃付近と内陸活断層に沿った地震が発生する条件に該当するもので、内陸活断層の深部での地震の核形成の理解につながるものと期待されます。また300-370mの延性剪断帯には脆性的な断層活動が重複しているのが観察され、この断層岩には特徴的に濁沸石が見られます(第7図A)。地熱地帯における鉱物の出現温度を考えると(例えば、Henley and Ellis, 1983)、濁沸石は150-200℃で形成すると考えられ、より浅い部分での断層の性質についての情報を提供するものと期待されます。

一方、MTLの下盤側(474.9-555m)は三波川帯の片岩起源の破砕帯で掘削時に繰り返す崩壊に悩まされた部分です(第7図B)。474.9-495mの破砕帯は大部分が脆弱化した片岩からなるが、474.5-476.4m、479-479.4mは粘土質の断層ガウジ帯になっています。このように脆性領域で形成した断層破砕帯が、大部分が脆弱化した岩石から構成され、本当に断層の変位をまかなったと考えられる断層ガウジは断層破砕帯のごく一部しかないのは一般的によく報告されていることです(例えば、Cain *et al.*, 1996)。そして破砕帯からは150℃以下で形成するスメクタイトが出現します。

以上、飯高赤桶観測点には300℃以上の温度の塑性流動の痕跡、それとほぼ同じ条件での地震性挙動の痕跡であるシュードタキライト、150-200℃の条件や

150℃以下で形成した断層岩と、異なる物理条件下で形成した断層岩の存在が明らかになってきました。これらは決して一度にできたものではなく、長いMTLの活動履歴の中で現在の地表付近が隆起剝削し、異なる条件での断層活動を被ったことにより形成したもので、断層岩の形成深度と掘削深度とは全く対応しないのです。今後、さらに解析を進め深部から浅部に至る多様な断層の挙動の解明につなげたいと考えています。

4. おわりに

昨今、様々な大型プロジェクトを通じ、断層帯掘削で得られたボーリングコア解析を行う研究者が増えています。一方で、多くの研究者は掘削作業の苦勞を知らずに、あたりまえのようにコアを手に入れているのではないのでしょうか。掘削に伴う苦勞は、断層帯の研究という観点からはある意味でどうでもよい問題なので無理もないのかもしれませんが、しかしこうした苦勞があってはじめて研究成果があげられるということを研究者は意識していてもよいのではないかと思います。飯高赤桶観測点の工事で断層帯の掘削で苦勞された株式会社日さくの作業員の方々、またその関連会社の方々には頭の下がる思いがいたします。上述のコア解析により、これらの作業員の方々の苦勞に恥じないような成果を出したいと思います。

謝辞：飯高赤桶観測点の断層帯掘削にあたっては、飯高町赤桶地区の方々、特に松阪市飯高町地域振興局地域振興課の北村恭一様(当時)、赤桶区長の尾鍋裕信様、旧水道組合長の城 孝様には大変お世話になりました。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

Cain J.S., Evans, J.P. and Forster, C.B. (1996) : Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, 24, 1025-1028.
Henley, R.W. and Ellis, A.J. (1983) : Geothermal systems ancient and modern: a geochemical review. *Earth-Science Reviews* 19, 1-50.

Hickman, S. and Zoback, M. (2004) : Stress orientation and magnitude in the SAFOD pilot hole. *Geophys. Res. Lett.*, 31, doi: 10.1029/2004GL02004043.
Hirono, T., Lin, W., Y. E-C., Soh, W., Hashimoto, Y., Sone, H., Matsubayashi, O., Aoiike, K., Ito, H., Kinoshita, M., Murayama, M., Song, S-R., Ma, K-F., Hung, J-H., Wang, C-Y. and Tsai, Y-B. (2006) : High magnetic susceptibility of fault gouge within Taiwan Chelungpu fault: Nondestructive continuous measurements of physical and chemical properties in fault rocks recovered from Hole B, TCDP. *GRL*, 33, doi: 10.1029/2006GL026133.
Ma, K-F., Tanaka, H., Song, S-R., Wang, C-Y., Hung, J-H., Tsai, Y-B., Mori, J., Song, Y-F., Yeh, E-C., Soh, W., Sone, H., Kuo, L-W. and Wu, H-Y. (2006) : Slip zone and energetics of a large earthquake from the Taiwan Chelungpu-fault Drilling Project. *Nature* 444, 473-476.
Moor D.E. and Rymer, M.J. (2007) : Talc-bearing serpentinite and the creeping section of the San Andreas fault. *Nature*, 448, 795-797.
Ohtani, T., Fujimoto, K., Ito, H., Tanaka, H., Tomida, N. and Higuchi T. (2000) : Fault rocks and past to recent fluid characteristics from the borehole survey of Nojima fault ruptured in the 1995 Kobe earthquake, southwest Japan. *J. Geophys. Res.*, B105, 16161-16171.
産業技術総合研究所地質調査総合センター(2002) : コンピュータグラフィックス日本列島の地質CD-ROM版, 丸善.
Scholz, C.H. (2002) : The mechanics of earthquakes and faulting 2nd edition. Cambridge University Press, Cambridge.
Shigematsu, N., Fujimoto, K., Ohtani, T., Shibazaki, B., Tomita, T., Tanaka, H. and Miyashita, Y. (2009) : Localization of plastic flow in the mid-crust along a crustal-scale fault: insight from the Hatagawa Fault Zone, NE Japan. *J. Struct. Geol.*, 31, 601-614.
島田耕史・高木秀雄・大澤英昭(1998) : 横ずれ圧縮場における地質構造発達様式: 紀伊半島東部、領家帯南縁部のマイロナイト化と褶曲形成の時空関係. *地質雑*, 84, 825-844.
Townend, J., Sutherland, R., Ellis S., Norris, R., Little, T., Sibson, R., Therber, C., Cox, S., Stern, T., Davies, T., Prior, D., Faulkner, D. and Malin, P. (2009) : Deep Fault Drilling Project (DFDP)-Alpine Fault, NZ, Active deformation processes in the seismogenic zone of a major transpressional plate boundary. The International Continental Drilling Program.
<http://drill.gns.cri.nz/nzcdp/dfdp/index.html>

SHIGEMATSU Norio, KOIZUMI Naoji, FUJIMOTO Koichiro, FURUYA Naoto, TANAKA Nobuaki, TAKESHITA Toru, MORI Hiroshi, WALLIS Simon and KIMURA Nozomi (2009) : Drilling of the Median Tectonic Line and the analysis of the internal structure of the fault zone using the borehole core.

< 受付 : 2009年8月10日 >