

南海トラフにおける付加体先端部での変形挙動と流体挙動を明らかにすることを目的とし、国際深海掘削計画第196次航海(ODP Leg 196)が実施された。掘削困難なデコルマ帯を掘りぬくためLDWによる孔内計測のみを行う特殊な航海となった。そして今回深海掘削史上はじめてデコルマ帯の画像を得ることに成功した。

南海トラフ付加体における孔内計測

(ODP Leg 196 南海)

家長 将典
斎藤 実篤
三ヶ田 均
平 朝彦

ODP Leg 196 乗船研究者一同

1. はじめに

沈み込み帯は世界中で最も大規模な地震の発生地帯として、さらに巨大な海山を含むプレートの沈み込む場所として、また沈み込みに伴う物質循環や気候変動に影響を与える場所としても知られている。ODP Leg 196では、南海トラフ付加体先端部における初期変形様式と流体挙動を明らかにすることを目的とし、2001年5月7日から7月2日にかけて行われた。Leg 196は2つの航海から構成され、前半がロギング(検層)によるリアルタイム計測、後半がACORK設置による長期孔内計測からなり、掘削船ジョイデス・レゾリューション号により室戸沖の2地点の掘削が行われた。通常ODPの掘削ではコアの回収を第一の目標としており、ロギングはコアリングした後の補助的な役割として掘削孔に検層機器を投入し計測を実施している。しかしLeg 196では孔壁が崩壊

いえなが まさのり : 東京大学海洋研究所
さいとう さねあつ : 海洋科学技術センター深海研究部
みかだ ひとし : 海洋科学技術センター深海研究部
たいら あさひこ : 東京大学海洋研究所



図1 台湾の基隆(キールン)で出航を待つジョイデス号。

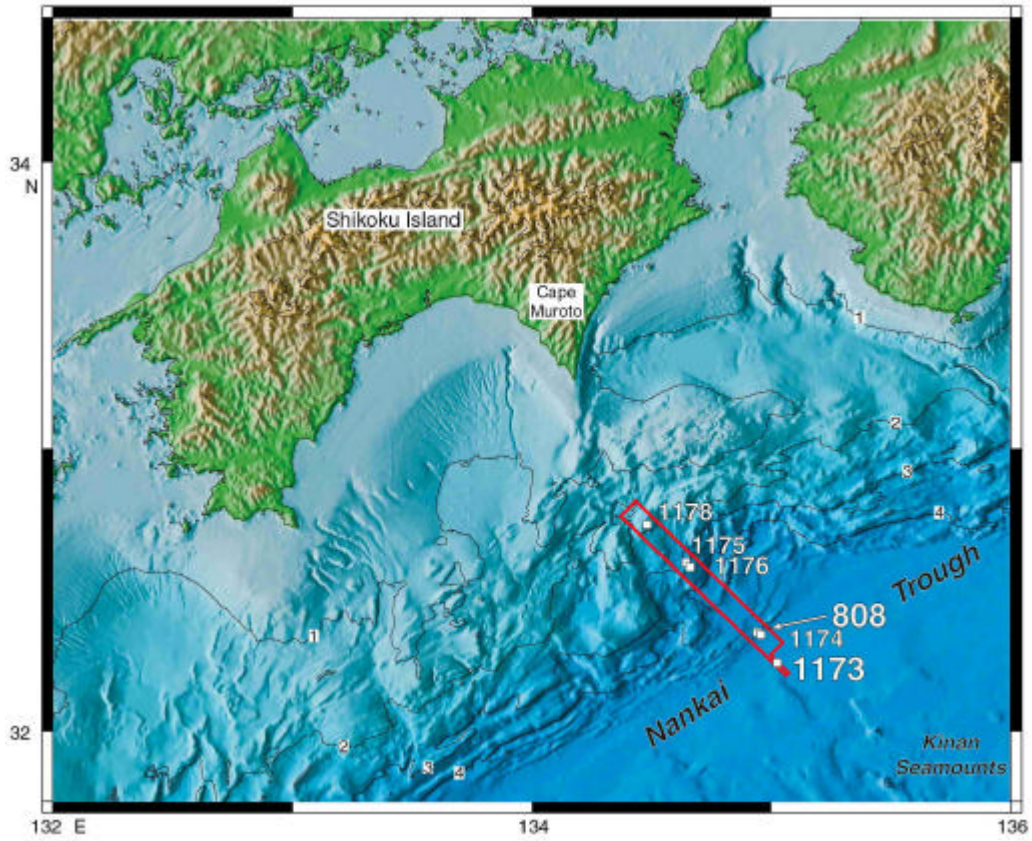


図2 ODP Leg 196の掘削地点(Site 1173,808)と以前の掘削地点.

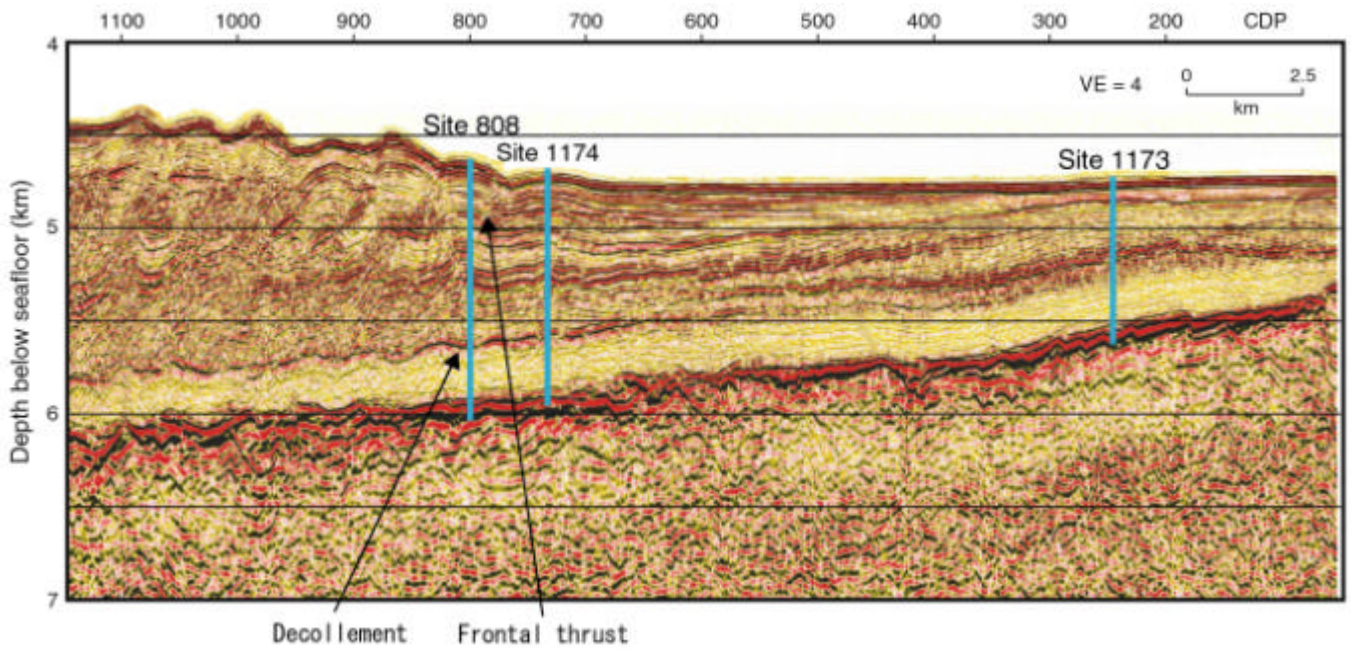


図3 反射法地震波探査図, 掘削地点, デコルマ, フロントスラストの位置を示す.

しやすい付加体先端部を確実に測定するため、掘削すると同時に計測を実施するLWD(logging-while-drilling)というロギング手法を用い、比抵抗、密度、自然線、弾性波速度の測定および比抵抗データの処理より孔壁イメージが得られた。今回の航海は、室戸沖トランセクトとしては Leg 131, 190 に続く3度目となり、今までのコア試料の測定と孔内物理計測を組み合わせることで、付加体を総合的に理解しようとする試みでもある。

2 . LWD について

掘削しながら検層する LWD は、シュルンベルジェによって開発されたツールで、検層データの質の向上、リグ時間の短縮、検層データを取得しながらの掘削が可能などの特徴が挙げられる。ビットの回転に合わせて異方比抵抗値を測定する RAB(Resistivity-At-Bit)は、地層の電気比抵抗と自然ガンマ線を計測ができる。5種類の電極が配備され、計測深度と分解能のことなる5つの比抵抗値と比抵抗による孔壁の画像を得ることができる。なかでもビット比抵抗はビットそのものが電極として機能し、まさに掘削直後の比抵抗が計測できる。今回 ODP で最初の導入となった ISONIC は音波検層機で、一つの震源と4つの受信機を持ち P 波及び S 波を計測できる ADN(Azimuthal-Density-Neutron Tool)は、ガンマ線と中性子線の放射線源と検出器が配備されている密度検層機で、周囲4方位の密度を計測する。MWD 装置(Measurement-While-Drilling)は、掘削時データをリアルタイムで船上へ転送するための装置で、泥水中に対して羽根車でパルスを与えことにより船上へ3bpsの速度で伝達し船上で計測データに変換することで、検層結果がリアルタイムモニタリング可能となる。

3 . 主な研究成果

本航海では2箇所の掘削を行った、Site 1173 はデコルマがまだ形成していない場所として、また Site 808 は付加体先端部のスラストとデコルマ帯(付加体の基底部に発達するすべり面)における初期変形様式を得るため、これらのサイトの対比により付加体における変形の発達過程を明らかにする。また両サイトはいずれも Leg 131 と 190 で掘削した地点となっており、サイト間が約 11km と非常に近く、しかも従来コアを採取した地点で再び LWD による観測を実施したのは、沈み込み帯のような圧縮場におけるコアの回収の困難さを検層により補完すること、さらに積極的にコアと検層の統合を進めることが挙げられる。

そして Site 1173 では、海洋地殻に達する 737 mbsf(海底面からの距離)の掘削に成功した。ついで Site 808 ではデコルマ帯を貫通する約 1000 mbsf まで掘り抜くことができた。とくに RAB ツールから作成した孔内画像により、ポアホールブレイクアウトをはじめ前縁部スラストやデコルマ帯の微細な構造、そしてフラクチャーや地質境界の分布など多くの構造的特長を得た。

・層序

Site 1173 の岩相はロギングによる特徴とコアデータとの対比から5つのユニットに分類でき、上位よりタービダイトの卓越する海溝軸流堆積物(Unit Ia)、鮮新世から更新世の火山灰が多く挟在する半遠洋性堆積物(Unit Ib)、中新世から鮮新世で生物擾乱が発達する細粒シルト岩の上部四国海盆相(Unit II)、中期中新世で珪質泥岩および凝灰岩からなる下部四国海盆相(Unit III)、細粒泥岩および中期中新世の火山火砕物(Unit IV)、玄武岩からなる海洋基盤(Unit V)となる。一方 Site 808 でコアユニットと対比できたものは、上位より砂泥互層の卓越するタービダイ

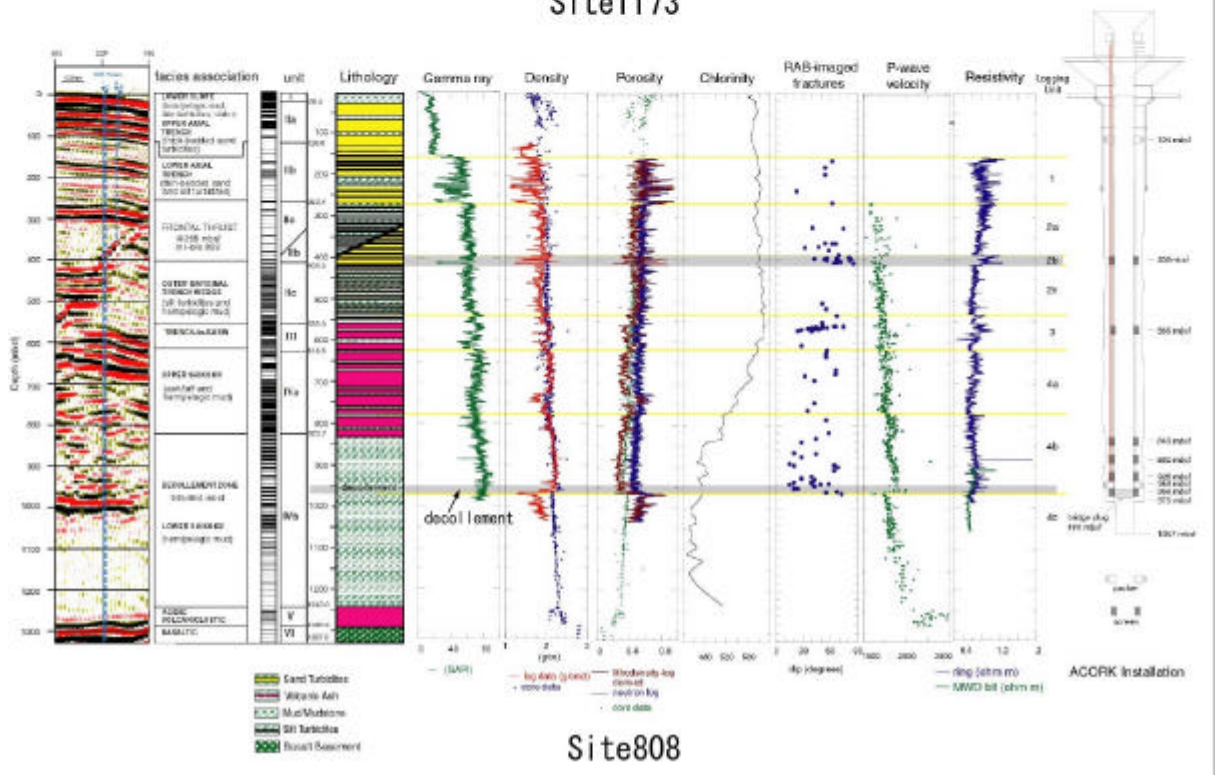
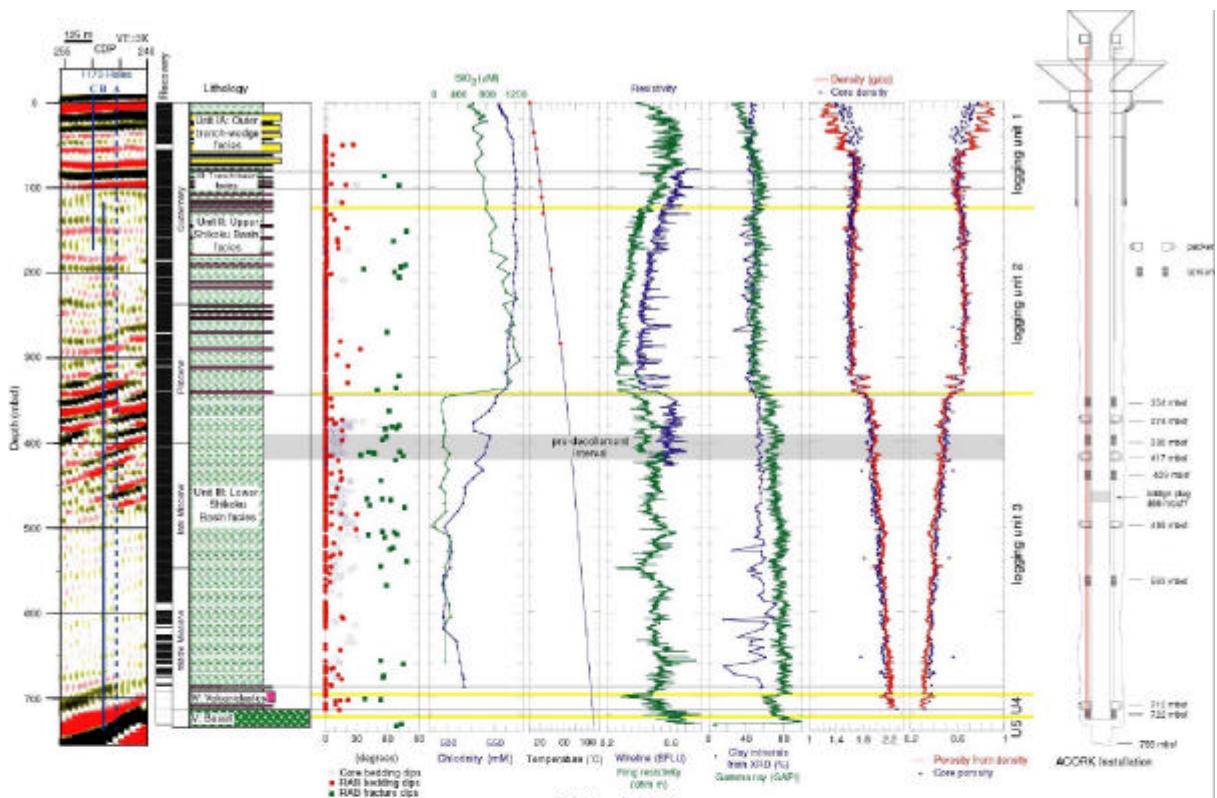


図4 Leg 196における検層結果と Leg 190のコア処理結果。

トからなる海溝軸流堆積物(Unit II), 漸移相(Unit III), 中新世から鮮新世で生物擾乱が発達する細粒シルト岩の上部四国海盆相(Unit IVa), 中期中新世で珪質泥岩および凝灰岩からなる下部四国海盆相(Unit IVb)となる。

海溝軸流堆積物は, Site 1173 での層厚が 120m 程度なのに対して海溝軸に近い 808 の方は海溝軸堆積物の供給量が多いため厚層化しており約 550m となる。間隙率は大きくばらついた分布を示すが, 深度が増すにつれ徐々に減少している。半遠洋性泥岩の上部四国海盆相の間隙率は特徴的な傾向を示し, 付加前の Site 1173 では圧密トレンドと相反し深度が増すにつれて増加するが, 付加体先端部の Site 808 では深度がまずにつれて減少する。この結果はコアの測定とも非常に良い一致を示している。また Site 1173 では, 間隙率・密度・比抵抗の急激な変化が, 上部四国海盆相と下部四国海盆相の境界で見ることができる。これらの物性値が変化する深度は, opalA から opalCT へと変化する続成境界の深度(ODP IR, 2001)と一致している。さらに Site 1173 の 330 mbsf では, 間隙率と密度双方に明瞭なキックが 2 箇所示されるが, この特徴はコアの分析でも同様の結果が示されている。下部四国海盆相の間隙率は, 圧密トレンドに一致し深度が増すにつれて減少する。下部四国海盆相の下位の火山碎屑物と玄武岩からなる海洋基盤では, 急激な電気比抵抗の上昇による変化が特徴となる。また火山碎屑物において間隙率が測定できたが, 明瞭なトレンドを示していない。

・地質構造

地層層理面の走向傾斜や断層, フラクチャー等の地質構造は, 比抵抗による孔壁イメージを解析することで得ることができる。孔壁を横切る面構造を平面に展開すると正弦波になることから, その正弦波に高相関する関数を得ることで走向傾斜を求められる(図5)。Site 1173 の地層層理面は全体にわたっ

て水平で, 顕著な変化を見ることができない。地質構造は, 変位の小さい正断層とフラクチャーゾーン以外には際だった変形を見られない。そしてフラクチャーの分布には偏りがあり, フラクチャーの集中している層準が 400 mbsf 前後に認められ, 次にデコルマが発達する場所として考えられている。またフラクチャーは全体を通して分布しており, シアストレスを受けていることを示している。

それに比べ Site 808 の上部四国海盆相から下部四国海盆相にかけて, 地層層理面の傾斜は 20 度程度となる。さらに大規模な逆断層が発達しており, 正断層の発達やフラクチャーも多く見ることができる。特にフラクチャー分布形態に違いがあり, デコルマより上位ではフラクチャーが全体に分布するが, 特にデコルマ帯とその上部には電気伝導度の高いフラクチャーが分布している。しかしデコルマの下位で

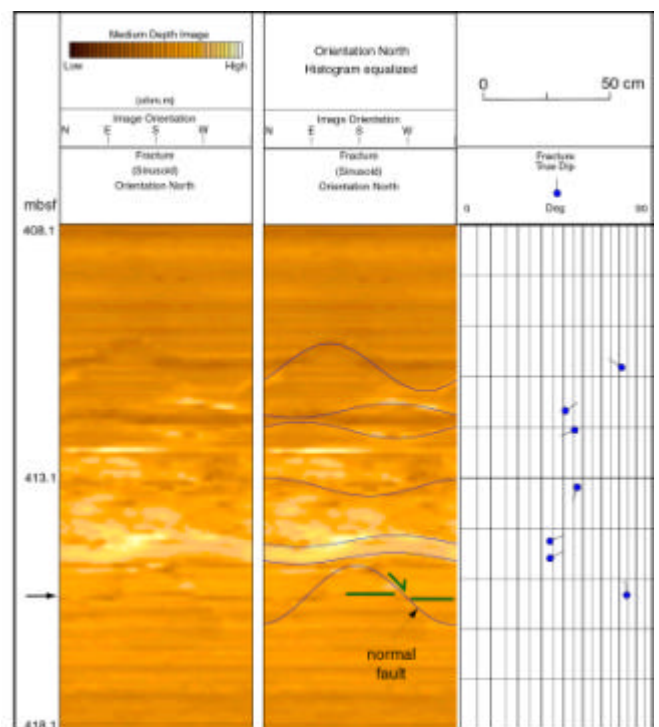


図5 比抵抗イメージとフラクチャー等の解析例(Site 1173, 408.1-418.1 mbsf)。

は流体を含むアクティブなフラクチャーを見ることができないことが、ロギングとコアの分析からわかっている。これはデコルマを境に下部四国海盆相が海洋地殻と共に沈み込んでいるため、シアストレスを受けないことからフラクチャーやシアバンドなどの発達が見られないと考えられる。そして Site 808 の最大の特徴はデコルマの存在をあげることができる。サイスミックプロファイルによって、音響インピーダンス([弾性波速度]×[堆積物密度])が負の極性を持つ反射面としてデコルマ帯が見出され、低密度で高間隙率のデコルマ帯の存在が推定された(Moore and Shipley, 1993)。しかし Leg 131 の Site 808 のコアデータからは、デコルマ帯において逆に高密度で低間隙率が示唆されており、サイスミックとコアの間に矛盾が生じていた。だがデコルマ帯のような掘削困難な場所では、コアの回収も困難で Leg 131 のコア回収率は 20%を下回っている。ここで本航海における大きな成果の一つとして、デコルマ帯における検層の成功が挙げられる。物理検層からデコルマ帯の深度は 937-965 mbsf で、上部には薄い低密度で高間隙率層が 3 枚、同様に下部に 1 枚のゾーンが観測され、さらに低密度・高間隙率のゾーンにおいて比抵抗ログから高い導電性が示されており、デコルマ帯における間隙流体の存在を現している。また千メートル近い深度における 50%近い間隙率の存在は、高流体間隙圧の存在を示唆することができる。この流体の存在とデコルマ帯の発達には大きな関係があると考えられ、今後の研究の発展が期待されている。

・ボアホールブレイクアウト

Site 808 の掘削中にボアホールブレイクアウトが発生したことが、RAB イメージによって確認された(図 6)。ボアホールブレイクアウトは、水平方向の応力に差がある場合に孔壁への応力集中により剪断破壊するために起こる現象と考えられており、プレ

イクアウトの発達している方向が最小水平圧縮応力と平行な方向となる。そしてブレイクアウトの分析結果から、リアルタイムな地殻内応力方向が特定できた。ブレイクアウトの方向は深度によらずほぼ一定の北東-南西の方向で特に上部四国海盆相に発達している、これらの結果から最大水平圧縮応力の方向が北西-南東であることが得られた。ボアホールブレイクアウトの観測により、現地測定 of 地殻内応力と地震波探査から予測できた応力方向が一致していることが確認できたことは大きな成果といえる。さらに近年応力方位だけでなく、応力値そのものの推定も行われている(Moos et al, 1990)。

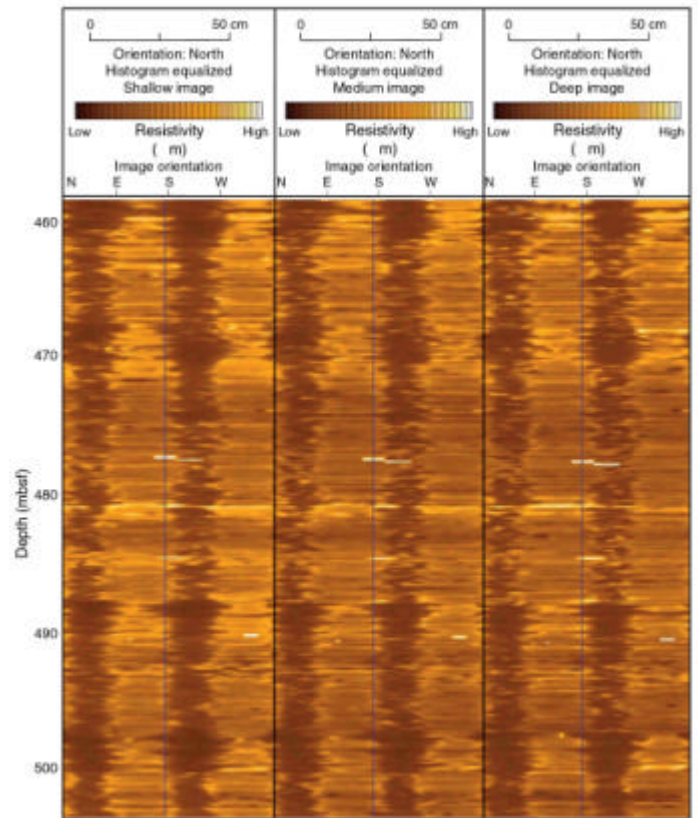


図 6 Site 808 における比抵抗画像によるボアホールブレイクアウト(計測する深度の違いによる 3 種類のイメージ)。

4 . 航海について

今回の航海では多くのトラブルに遭遇することとなった，まず5月初旬としては異例の台風との遭遇に始まった，リエントリーコーンの紛失や泥水循環モーターの破損などにより掘削作業は幾度も中断した．特に変形フロントの Site 808 の掘削は困難を極め，何度もドリルパイプがスタックし長時間の中断を余儀なくされた．これらのトラブルが多く存在しても航海終了までの時間を伸ばすことはできず，ツールを回収して高知に寄港しなければならない時間は迫っていた．このように緊迫した中で今回の最大のイベントでもあるデコルマ帯を貫通した，しかしそこで時間の猶予はなくなり，主席研究員はデコルマ帯を貫通を持って掘削終了の決断をする．そして掘削ツールを引き上げはじめるが，不運にもドリルパイプのスタックが再度発生した，3時間近くドリルパイプを操作し回収を試みるが微動だにしない，残された時間は少なく，最悪の場合ダイナマイトによってツールを爆破して引き上げるという事態が提案される．だがそうすると今回の航海における成果は皆無となってしまふ，乗船者は騒然となり行方を見守る．あと15分で事態が開かない時はあきらめようという結論となり悲壮感が船内に立ち込めた．そのとき突如ツールが動き始め，船上では歓声があがった(プロジェクトX風)．多くの深海掘削を経験しているジョイデス・レゾリューション号であっても，デコルマのような掘削困難な場所では，常に様々な要因による失敗の危険が付きまわっていることを痛感した．

5 . まとめと今後の展望

本研究では室戸沖南海トラフの孔内計測のデータを解釈することで，地質構造や付加体の発達過程を理解しようとした．沈み込み帯での付加体発達と密

接な関係のあるデコルマ帯が，どのような形で存在しているのか等，これらの疑問に対するデータが提供できたことで，ますます議論が深まってゆくだろう．今後地震発生帯を目指し，より深部への掘削が計画されているが，そのような場合にロギング，特にLWDのようなツールの重要性が考えられ，コア試料とロギングそして地震波探査の統合の重要性が増していると考えられる．

参考文献

- 氏家 恒太郎, 久光 敏夫, 平野 聡, 村上 由紀, 平 朝彦: 南海トラフ付加体の物性, 月刊 地球, 号外 No.32, 2001.
- Moore, G.F. and Shipley, T.H.: Character of decollement in the Leg 131 Area, Nankai Trough, ODP Init. Rept. 131, College Station, TX(Ocean Drilling Program), 1993.
- Moos, D. and M.D. Zoback,: Utilization of observations related to wellbore failure to constrain the orientation and magnitude of crustal stresses: Application to continental, DSDP and ODP boreholes, J. Geophys. Res., 95, B6, 9305-9325, 1990.
- ODP Leg 190 Initial Report, College Station, TX(Ocean Drilling Program), 2001.