



統合国際深海掘削計画 (IODP)  
— 2003 年から 10 年の成果 —

## ライザー掘削孔における 物理検層 (ロギング) と 現位置地層流体採取 — IODP 第 337 次研究航海の例 —

山田 泰 広  
真田 佳 典  
中村 恭 之  
Moe Kyaw

**Geophysical logging and in-situ fluid  
sampling at riser drill sites, an example of the  
IODP expedition 337**

**Yasuhiro Yamada • Yoshinori Sanada •  
Yasuyuki Nakamura • Moe Kyaw**

やまだ やすひろ : 京都大学工学研究科  
さなだ よしのり : (独) 海洋研究開発機構  
地球深部探査センター  
なかむら やすゆき : (独) 海洋研究開発機構  
地球深部探査センター  
モー キョー : (独) 海洋研究開発機構  
地球深部探査センター

ライザーシステムの採用によって、孔内状況が劇的に改善されたことと、大口径機器が使用できるようになったことから、ワイヤーライン物理検層によって多種多様な良質データと、現位置での地層流体や孔壁コア試料などが取得できるようになった。これによって科学掘削は更なる進化を遂げようとしている。

### 1. はじめに

ライザー掘削とは、掘削船と海底をライザーパイプで接続し、人工的に調整・管理した泥水をそのパイプ (および掘削孔) 内に循環させて掘削する工法で、地球深部掘削船「ちきゅう」にはそのためのシステムが搭載されている。ライザーシステムの採用によって最も重要な恩恵を受けた分野のひとつが物理検層である。物理検層には、ケーブルに接続した計測器を孔内に降下して各種の測定を精度良く実施するワイヤーライン検層と、ドリルビット直上に設置した計測器を用いることで不安定な孔内状況でも計測が可能な掘削同時検層の二種類があるが、ライザーシステムの採用は前者への貢献が特に大きい。まず、使用できる計測器のサイズ制限がなくなったことから、使用できる物理検層の種類が非常に多くなり、掘削孔径に最適な計測器を選択することができるようになった。次に、孔内状態を管理することが可能になったため、非常に良質な物理検層データを取得できるようになった。また、孔内状況を安定させることによって、孔内での地層流体の採取も可能になった。本稿では、ライザー掘削孔でのワイヤーライン検層によってどのようなデータと試料が得られるようになったのか、地球深部探査船「ちきゅう」を使って青森県八戸沖で実施された IODP 第 337 次航海での実際の計測・採水作業例を含めて紹介する。なお、ライザーシステムについては小林 (2003) や日本船舶海洋工学会海中技術研究委員会 (2010) などを、ライザー掘削を用いた堆積学的分析手法については久保ほか (2012) を参照されたい。

## 2. ライザー掘削でのワイヤーライン物理検層

本項では、物理検層においてライザーシステムを用いる利点を詳述した後、特にライザー掘削で重要となる物理検層5種目（孔壁イメージ検層、孔内環境検層、核磁気共鳴検層、MDT検層、孔壁コアリング）について紹介する。

### 2. 1 ライザー掘削の利点と欠点

ライザー掘削による物理検層への貢献は大きく3点に分類できる。第一点は大口径計測器の使用である。ライザーシステムを使用しない従来の科学掘削（ライザーレス掘削）では、ドリルパイプの中を通して海底下の孔内へと計測器を降下する必要があるため、計測器の外径をパイプの内径（約10 cm）よりも小さくする必要があり、計測器の種類が限定されてきた。また、掘削孔径が約25 cmと計測器よりもかなり大きいことから、計測器を孔壁からの適正な距離に保つことなどの孔内位置コントロールに困難性が存在した。しかし、ライザーシステムでは内径が約50 cmのライザー管を使用するため、計測器の制限はなくなり、孔壁イメージ検層、核磁気共鳴検層、孔壁コアリング、地層流体採取など大口径の多種多様で最適な計測器が使用できることとなった。

第二点は孔壁の安定化である。孔井を掘削するという事は地下に空洞ができることを意味するので、孔内の流体と孔壁が地下で孔井に作用する力を支えることになる。孔壁を構成する岩石がこの力に耐えられない場合には、孔壁が破壊することとなる。ライザーレス掘削では、孔内には海水あるいは海水にベントナイトなどを混ぜた泥水を満たしてきたが、地層の圧力は通常このような海水圧よりも大きいため、孔壁破壊と崩壊は頻繁に発生している。科学掘削では地下応力を解析する目的で孔壁崩壊現象をむしろ積極的に利用してきた（例えば Chang ほか 2010, Lin ほか 2013 など）。一方、ライザー掘削では密度を調整した掘削泥水を循環させることが可能であるため、地層の圧力をやや上回る泥水圧となるように調整した泥水を

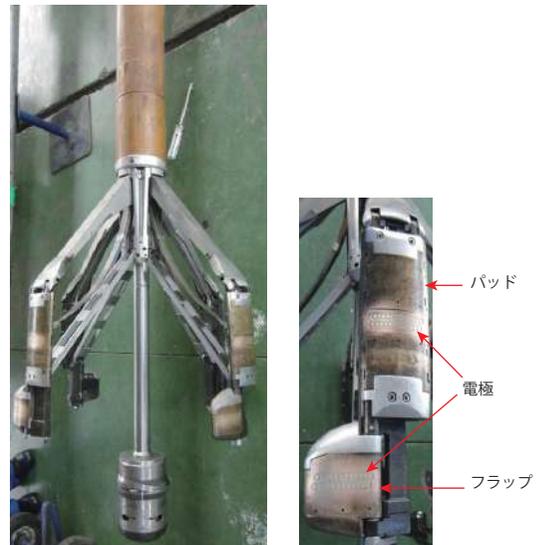


図1 337次航海におけるFMI孔壁イメージ検層ツール。(A) FMIには4本のアームにそれぞれパッドとフラップと呼ばれる小板が一つずつ取り付けられている。(B) パッドとフラップにはそれぞれ12個の電極ボタンが2列埋め込まれている。

使用することで、孔壁の崩壊を避けることが可能となる。崩壊して孔径が大きくなったり、孔壁に凹凸があったりすると、孔内計測値にも影響するので、検層データの品質の点でも孔壁の安定は重要である。

第三点は物理検層データの高精度化である。ライザーシステムの採用によって、掘削孔内に循環させる掘削泥水を管理すること、つまり泥水比重などの物理的性質と塩分濃度（電気抵抗）などの化学的性質を完全に把握することが可能となる。このことは、物理検層作業を行う際にデータ取得のためのパラメータを最適化できることと、データ取得後に適正な環境補正を行って現位置データを高精度化できることを意味している。

ライザー掘削を行うことで生じる問題点や欠点などは特にないと考えられる。商業掘削では特殊な泥水を使用することがあり、それによる制約が生じることがある。科学掘削ではこのような問題点は発生しないだろう。

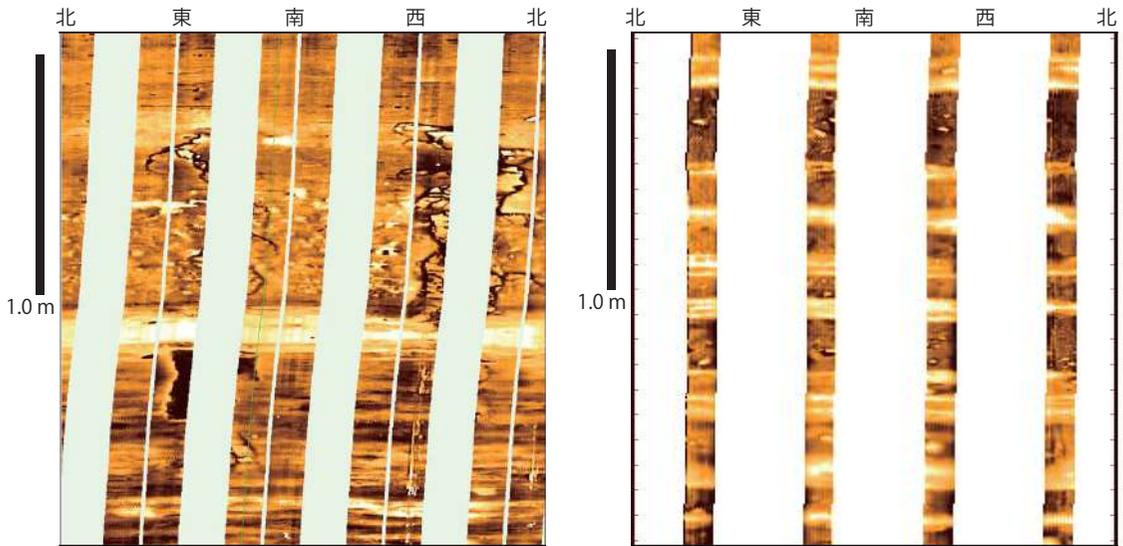


図2 FMIとSlimFMIの画像比較. 直径27cmの掘削孔での孔壁はFMIによって約60%の面積が計測可能である(左)が、SlimFMSでは直径25cmの掘削孔の約25%が計測範囲となる(右). これら2つのイメージは別の孔井である.

## 2. 2 電気抵抗による孔壁イメージ検層

孔壁イメージ検層は、孔壁を電気抵抗値や超音波反射波などを使って可視化する検層器である。岩相や地層の内部構造、地層境界、断層や亀裂、ボアホールブレイクアウトなどを高解像度で観察することができ、科学掘削では標準ツールとして位置づけられている。第337次IODP研究航海では Fullbore Formation MicroImager (FMI) (SchlumbergerTM) が用いられた(図1)。FMIは4本のアームにそれぞれパッドとフラップと呼ばれる小板が一つずつ取り付けられており、このパッドとフラップ上には合計192個の電極ボタンが埋め込まれている。アームを広げることで電極ボタンを孔壁に圧着させ、5mmの分解能で孔壁の電気抵抗イメージを取得すると同時に、対向する2本のアームで直交する2方向の孔径を計測することが可能である。FMIには計測器の方位と傾斜を計測する機能も内蔵されており、計測器の回転による孔壁イメージの方位が補正される同時に、掘削孔の方位と傾斜も記録される。

ライザーレス掘削では、検層器をドリルパイプ

を通して降下させる必要があったため、小口径の SlimFMS (SchlumbergerTM) が用いられてきた。SlimFMSは4本のアーム上に取り付けられたパッド上の合計64個の電極ボタンを使って計測するため、孔径が大きくなればパッドがカバーできない部分が増え、イメージの取得範囲が相対的に小さくなる。一方、第337次IODP研究航海はライザー掘削であったため、直径27cmの掘削孔でも孔壁の約60%の範囲をFMIでイメージでき、解釈・解析に非常に大きなインパクトを与えた(図2)。

## 2. 3 孔内環境検層

各種の検層データは、掘削孔の大きさや孔内を満たす泥水の温度や成分など、孔内環境の影響を強く受けている。ライザーシステムでは掘削泥水を完全に管理できるため、泥水の添加物成分や孔内から回収された泥水試料、孔内環境検層の計測値などを用いることで、計測値の補正が可能である。孔内環境検層からは、掘削孔の実際の直径や孔内泥水の温度と電気抵抗などを連続的に現位置で計測した値が得られる。

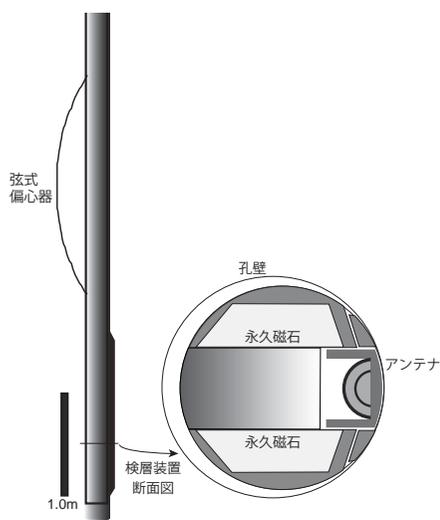


図3 核磁気共鳴検層ツール.

## 2. 4 核磁気共鳴検層

核磁気共鳴 (NMR : Nuclear Magnetic Resonance) 検層 (図3) は、まず強い磁場を発生させて地層内の核スピンの向きを強制的に揃え、そこにパルス状のラジオ波を照射して核磁気共鳴させた後に分子が元の状態に戻る際の信号を解析して、地層の物性を計測する検層である。核磁気共鳴検層ではプロトン (水素イオン) からの信号をとらえるため、水素原子を含む水や炭化水素の量や流動性を知ることができる。解析によって、孔隙率、粒子径分布のほか、孔隙に占める流動可能な水 (Free fluid) と流動しない水 (Bound fluid) の割合などが推定できる。

## 2. 5 MDT 検層

MDT (Modular Formation Dynamic Tester) (SchlumbergerTM) は、地層流体の圧力や温度、成分などの現位置での計測や流体試料の採取などの目的に応じて選択・組み合わせられた複数の機器で構成されるワイヤーライン孔内ツールである。第337次 IODP 研究航海では、自然ガンマ線センサー、電源部、ポンプ部、油圧装置、化学分析センサー部、間隙水圧と易動度 (mobility) を計測するシングルプローブ部、流体を採取する Quicksil-

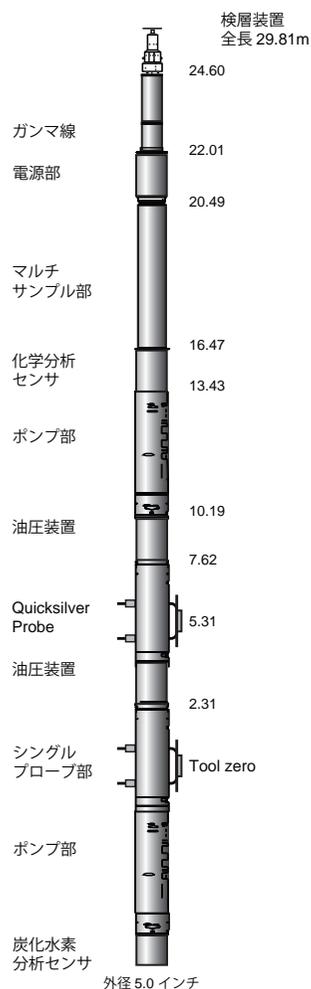
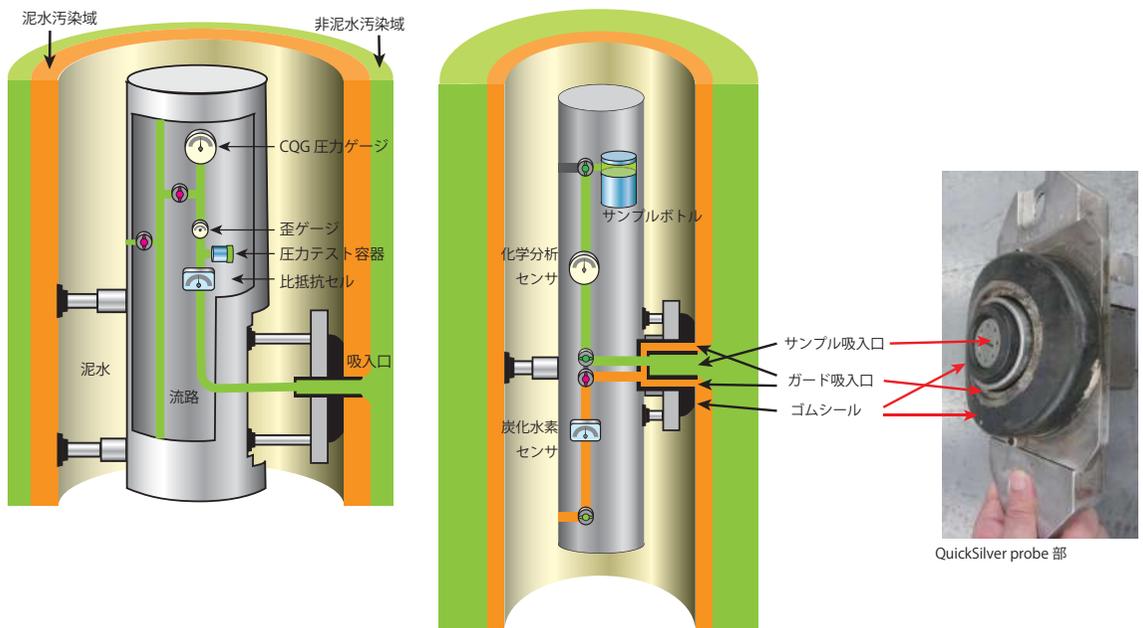


図4 MDT検層ツール. 電源部, マルチサンプル部, 化学分析センサー部, ポンプ部, 油圧装置, Quicksilver probe, シングルプローブ部, 炭化水素センサー部の各部で構成される。

ver probe (SchlumbergerTM) 部、採取した流体をサンプルボトルに格納するマルチサンプル部によって構成される検層機 (図4) を用いた。

地層の間隙水圧と易動度の計測には、シングルプローブを使用する。まずプローブを孔壁に圧着させ、通常  $5 \sim 10 \text{ cm}^3$  の間隙流体を  $30 \sim 80 \text{ cm}^3/\text{秒}$  の割合で吸引し、その後、パッドで閉鎖された内側の圧力を 300 ミリ秒間計測する (図5)。吸引流



(左) 図5 シングルプローブによる圧力計測の例. CQG : crystal quartz gauge.  
 (右) 図6 Quicksilver probe を用いた流体採取の概略図.

体量は地層の予想浸透率から見積もられるが、最終的には孔内で予察的に行われる吸引テストによって決定される。この計測には、標準、大口径プローブ、大口径パッカーの3つのプローブタイプが使用可能である。

掘削泥水は孔壁近傍の地層に浸み込むため、検層機器を用いて地層流体を採取する際にも泥水の混入は避けられない。ただし Quicksilver probe は、出来る限り掘削泥水の混入の少ない地層流体を採取することを目的として設計されている。この装置は、外側に泥水を吸引するガード吸引口を配置することで、内側に配置したサンプル吸引口への泥水の混入を少なくしている(図6)。実際の作業は下記の手順で行われる。

- (1) サンプル吸引口とガード吸引口の両方を開いて(泥水が混濁した)地層流体を吸引する
- (2) それぞれの流体を装置内に設置したセンサーで化学分析し、その結果を船上で監視する
- (3) サンプル吸引口からの流体への泥水混入が減少したと判断した時点で、サンプルボトル(図7)

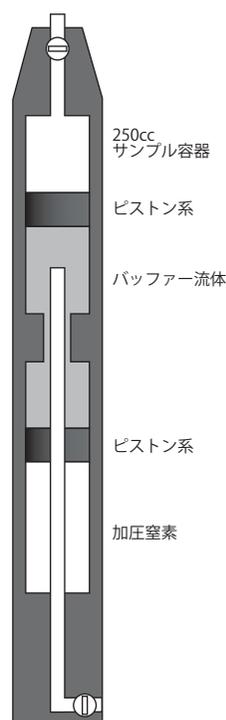


図7 サンプルボトルの内部構造概略図. 加圧窒素を用いて採取した流体の保圧を行う。

Measurement	Measuremnt range	Accuracy
Fluorescence	N/A	N/A
Resistivity	0.01 to 20ohm-m	0.0ohm-m
Density	0.05 to 1.2g/cm <sup>3</sup>	0.012g/cm <sup>3</sup>
Viscosity	N/A	N/A
Pressure	to 25,000psi	10 <sup>-4</sup> FS(Typ), 2.5x10 <sup>-4</sup> FS(max)
Temperature	to 175degC	10 <sup>-4</sup> FS(Typ), 2.5x10 <sup>-4</sup> FS(max)

表1 化学分析センサーでの計測項目, 計測範囲と精度. このセンサー (IFA) では, 流体の蛍光反応 (=炭素構成 (C1, C2, C<sub>3-5</sub>, C<sub>6+</sub>)), 電気抵抗, 密度, 粘度, 温度, 圧力を計測することが可能である.

への流路を開栓する

(4) 地層流体を採取し, 保圧・閉栓する

(5) サンプルボトルを船上で回収し, 研究者が流体と溶解ガスを分析する

手順 (2) で使用する化学分析センサーでは, 流体の電気抵抗, 温度, 圧力, 炭素構成 (C1, C2, C<sub>3-5</sub>, C<sub>6+</sub>), 二酸化炭素, 16 チャンネルのグレーティングスペクトル, 20 チャンネルのフィルタスペクトル, 密度, 粘度を計測することが可能である. これらの計測項目と範囲, その精度を表1に示す.

## 2. 6 孔壁コアリング

ライザーシステムの採用によって, 孔壁コアリング (サイドウォールコアリング) ツールを使用できるようになった. これは, ワイヤーラインを使用することで (ドリルパイプを用いるよりも) 正確な深度で岩石コアを孔壁から掘削・採取する手法で, 直径 2 cm 長さ 5 cm のコア試料を 50 箇所取得できる.

## 3. 下北沖 (IODP 第 337 次航海) での作業の実際

2012 年夏に地球深部探査船「ちきゅう」を使って青森県八戸沖で実施された IODP 第 337 次航海では, ライザーシステムを用いた掘削が採用された結果, 科学掘削での世界最深記録を達成したほか, 石炭層や軟弱砂岩層からも非常に高い回収率でコア試料が取得された (稲垣ほか, 村山ほか, 本特集号). この航海では地層からの流体採取が主目的の一つであったが, 流体採取用ツールの孔内抑留の危険性を増加させることから, ツールを長時間一箇所に留めることは許されていない. 従って, 地層の浸透性と地層流体の可動性が高く, 短時間で流体採取が可能になる箇所のみが流

体採取の候補となる. 従って流体採取作業を始める前に, このような箇所を特定できるように物理検層作業が計画・実施された. 実際には, 下記の 5 回に分割して物理検層が実施された (図 8). サイドウォールコアリングも計画されたが, 地層水採取の時間を十分確保するためキャンセルされた.

- (1) 密度検層・孔隙率検層・高解像度比抵抗検層・自然ガンマ線検層・スペクトルガンマ線検層
- (2) 孔壁画像・速度検層・孔内環境検層
- (3) 核磁気共鳴検層
- (4) 流体採取 (MDT 検層)
- (5) VSP

これらの検層作業の主な目的は, それぞれ (1) 岩種の同定, (2) 各層の詳細検討, (3) 浸透性の評価, (4) 流体採取, (5) 反射法探査と検層データの対比である. 337 次航海では, 第三回目と第四回目の間に wiper trip を実施して, 孔内状態の改善を図るとともに流体採取箇所の検討時間を確保した.

物理検層によって, 裸孔部 (約 1,200 m) の孔径は全深度にわたってビット径とほぼ同じであることがわかった. これはライザーシステムの採用によって孔壁の崩壊が全く生じなかったことが原因で, 計測条件が非常に良好であったことを示している. 掘削で出現した各地層の岩相が主に砂岩泥岩互層で, これらが典型的な検層データの特徴を示していたことと, 互層に挟まれていた石炭層や礫岩層が良いマーカー層になったことから, コア試料と物理検層データの対比は比較的容易であった. コアの採取深度は掘削用ドリルパイプの総延長で, 物理検層のデータ深度はワイヤーラインの繰り出し長であるため, これらは一般に一致しない. しかし, 337 次航海での両者の深度のズ

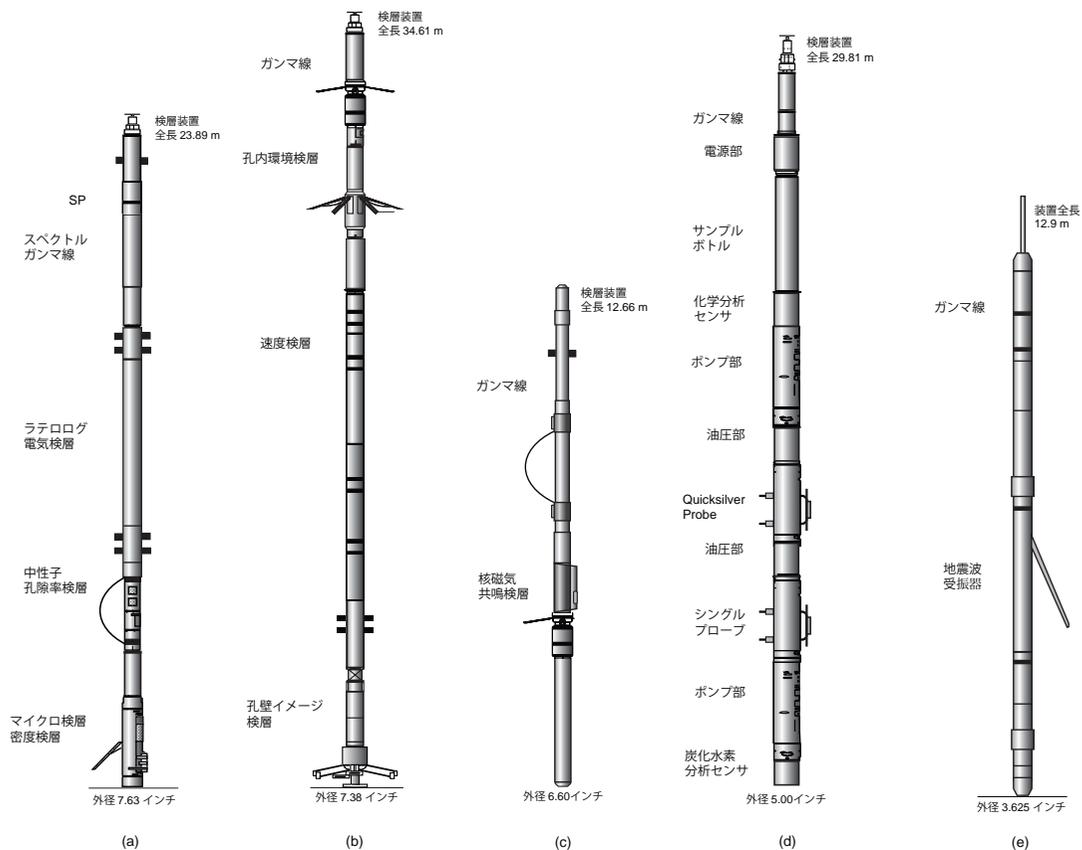


図8 337次航海で実施された5回の物理検層. (a) 第1回目, (b) 第2回目, (c) 第3回目, (d) 第4回目, (e) 第5回目.

レは全深度で 1.5 m 以下であったことが分かっている. このような高精度での深度対比が可能となったことも, ライザー掘削によって秀逸な孔内状況が達成されたことによる恩恵である.

孔壁状態が非常に良質であったことによって, 最高品質の孔壁画像データが取得されている. このデータを用いることで, 今回の掘削によって厚さ 30 cm 以上の石炭層が 13 層出現し, このうち 8 層をコアで回収できたことが分かっている. この孔壁画像データからは数 cm 程度の化石や同スケールでの堆積学的特長も数多く抽出されており, 各地層の詳細な堆積環境の復元作業などが進められている.

337次航海では, 科学掘削史上始めて, (a) 地層

の原位置での間隙水圧と浸透率の計測, (b)原位置での地層水とガスの採取, (c)原位置での地層水の化学分析, を目的とした MDT 検層が実施された. この航海では地層の浸透率が低いと予想されたので, 通常より強力なポンプを用意した. 地層流体採取に先立って, まずシングルプローブを用いて間隙水圧と浸透率を数多く計測 (PreTest と呼ぶ) した. これは流体採取箇所を最終決定すること, パッド部が繊細な流体採取用 Quicksilver probe をなるべく使用しない (傷つけない) ことが狙いである. サンプルボトルの内部は, 耐食性と耐久性の優れた Dursan (SilcoTekTM) をコーティングしたものをを用い, 使用前に純水で洗浄した. 最終的に Quicksilver probe を使用して 6ヶ所

での地層流体の採取に成功した。ただし、前に述べたように、掘削泥水は孔壁近傍の地層に浸み込むために、この方法を用いて地層流体を採取する際にはある程度の泥水混入は避けられない点に留意する必要がある。

#### 4. まとめ

ライザー掘削システムの採用によって、画期的に多種多様かつ高品質の物理検層データを取得できるようになった。また孔内状況を管理・安定させることによって、計測器を孔壁に長時間密着させる流体採取用ツールのような機器を使用することも可能になった。ライザーシステムを科学掘削で用いることによって、これまでに得られなかった種類や高品質のデータや試料を現位置で取得できるようになったことから、科学掘削は新たな時代に突入したと宣言したい。

#### 参考文献

- [ 1 ] 久保雄介, 杉原孝充, 木戸ゆかり, 真田佳典, 2012, ライザー掘削航海で望まれる新たな堆積学的分析手法, 堆積学研究, 71, 45-50.
- [ 2 ] 小林照明, 2003, ライザー掘削とは. 月刊地球, 号外40, 231-235.
- [ 3 ] 日本船舶海洋工学会海中技術研究委員会, 2010, 海中技術シリーズ 1. 海洋底掘削の基礎と応用. 成山堂書店.
- [ 4 ] Expedition 337 Scientists, Proceedings of IODP, 337. Washington D.C., (Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc.) (in press).
- [ 5 ] Chang, C., L. C. McNeill, J. C. Moore, W. Lin, M. Conin, and Y. Yamada (2010), In situ stress state in the Nankai accretionary wedge estimated from borehole wall failures, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 11, Q0AD04, doi:10.1029/2010GC003261.
- [ 6 ] Lin W., M. Conin, J. C. Moore, F. M. Chester, Y. Nakamura, J. J. Mori, L. Anderson, E. E. Brodsky, N. Eguchi, IODP Exp 343 Scientists, 2013, Stress state in the largest displacement area of the 2011 Tohoku-oki Earthquake, *Science* 339, 687-690 ; DOI: 10.1126/science.1229379.
- [ 7 ] 稲垣ほか, 本特集号.
- [ 8 ] 村山ほか, 本特集号.

