



メタンハイドレート資源開発の最新動向

3. メタンハイドレート層の検層技術と貯留層特性

藤井 哲哉 (ふじい てつや)
 鈾石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC)

高山 徳次郎 (たかやま とくじろう)
 鈾石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC)

3.1 はじめに

物理検層とは、石油・天然ガス開発や土木分野、学術調査などにおいて、坑井内に測定器を降ろし、孔壁付近の地層や岩石の物理・化学的特性を深度に対して連続的に計測する技術である^{1),2)}。メタンハイドレート（以下、MHと記す）の資源開発という観点では、資源量の評価（2章）や生産性の評価（7章で解説）を行うための基礎データを提供する、極めて重要な技術と位置付けられる。では、MH層の評価では、実際にどのような検層技術が用いられているのであろうか。

特に石油開発の分野では、古く（1920年代）から油やガス層の評価ツールとして物理検層技術が発達しており²⁾、MH層の評価も、基本的には同分野で開発された技術を応用している。しかし特徴的な違いは、①MHは地下において固体状態で存在すること、また②石油・天然ガスで探鉱対象とする深度は通常数kmの固結した岩石であるのに対し、MHが賦存する深度は安定条件の関係から海域では海底面下数百mまでに限られ、基本的には未固結層であるということである。これらの違いが、検層による評価手法にも影響してくる（後述）。

MH層を対象とした検層評価の実例としては、アラスカのノーススロープ^{3),4)}、大西洋のブレイクリッジ⁴⁾、カナダ北西部マッケンジーデルタ^{5)~8)}、東海沖の基礎試錐「南海トラフ」^{7),9)}などがある。また、最近の事例では、2005年のメキシコ湾¹⁰⁾やカナダのカスカディアマージン¹¹⁾、2006年のインド沖合い¹²⁾、2007年の韓国東方沖合い¹³⁾や紀伊半島沖の熊野海盆南部¹⁴⁾などがある。

本章では、JOGMECが経済産業省の委託により2004年に東部南海トラフで実施した基礎試錐「東海沖～熊野灘」^{15)~17)}とMH資源量の算定¹⁸⁾、さらに2007年にカナダ北西部マッケンジーデルタで実施した第二回陸上産出試験¹⁹⁾におけるMH層を対象とした物理検層評価²⁰⁾を例として、まず最初に検層技術を概観し、その後各貯留層特性について具体例を示しながら解説する。

3.2 検層技術の概要

ここでは、MH層の評価に有用な検層技術を種目別に概観し、その後MH層の認定方法について述べる。

3.2.1 ワイヤライン検層とLWD

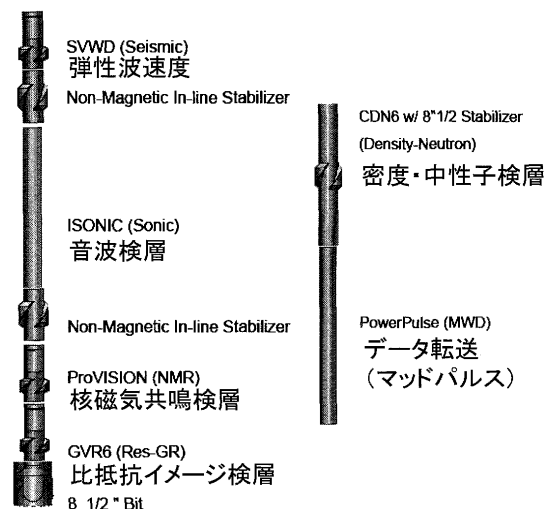
物理検層技術には、大きく分けてワイヤライン検層と掘削同時検層 (Logging While Drilling: LWD) の2

種類がある。ワイヤライン検層は、文字どおりワイヤラインケーブルの先端に測定機器を取り付けて坑内に降下させ、ケーブルを伝わる電気信号により測定値をモニター・記録する従来型のものであるが、MHが賦存する海底面下の未固結層では、掘削後に検層ツールを降下するまでの間に特に砂層が容易に崩壊 (washout) し孔径拡大するため、検層データの品質低下や測定器の降下作業トラブルを生じやすい。

一方、LWDは、ビットの直上に測定器を取り付け掘進中の泥水圧力の変化を信号 (マッドパルス) に変えて掘進と同時に測定を行う比較的新しい技術である²⁾ (図—3.1)。ビットの回転による測定値の影響を補正するなどの必要があるものの、上述の孔壁崩壊などの影響を受けにくいため、未固結層の測定には適している。また、短時間でデータ取得を行うことができ、作業時間 (リグコスト) の短縮を図ることができる。実際に、2004年の基礎試錐「東海沖～熊野灘」においては、まず16地点にてLWDデータを取得し、その後MHの濃集が示唆された地点で集中的にワイヤライン検層やコアリングを実施するという方法を採用した^{15),16)}。この方法は、その後の海域におけるMH層掘削調査^{10)~13)}の手本となっている。

3.2.2 メタンハイドレート層の認定方法

検層によるMH層の認定方法を表—3.1に示す。MH層特有の検層レスポンスは、①比抵抗の上昇、②音波速



図—3.1 基礎試錐「東海沖～熊野灘」で適用したLWDツール (Takahashi and Tsuji, 2005¹⁵⁾を編集)

度の増加, および③ NMR (核磁気共鳴) 孔隙率の減少である。

MH が地層の孔隙中を充填すると, 油やガスと同様に地層水の割合が少なくなり, 電気が流れにくくなる。つまり高い比抵抗値を示す。口絵写真—23(c), 24(b)に, 東部南海トラフの α-1 坑井における比抵抗値の例を示す。縦軸の深度の単位 mMSL (Mean sea level) は平均海水面からの深度 (m) である。MH 濃集区間の中部および上部で特に比抵抗の上昇が顕著で, 最大で約 200 ohm.m に達する。

同様に高比抵抗を示す油やガス層との違いを見分けるには, さらに音波速度やバルク密度に着目すれば良い。MH は固体の結晶のため, 音波の伝播速度が油やガスより速い。ガス層については, 極端にバルク密度が減少するので, さらに区別しやすい。

もう一つ重要なのが, 核磁気共鳴検層から得られる NMR 全孔隙率 (TCMR) の情報である。TCMR は, NMR 検層によって検知される「動き得る」水 (自由水) の割合を反映している (後述)²¹⁾。MH 中に固定された水 (水素) を検知しないため, MH ゾーンでは見かけ上低孔隙率を示す。よって密度検層から得られた全孔隙率 ϕ_d と TCMR とのセパレーション (差) を見ることで, MH が賦存するかどうかを識別することができる (口絵写真—23(f), 24(e))。

ここで一つ注意しなければならないのは, 炭酸塩鉱物充填層の存在である。同層は海底面付近でメタンが海水

中の硫酸イオンで酸化されることにより形成されるが, 海底面直下では頻繁に確認されている。同区間では検層の比抵抗値が上昇するため, 一見 MH 層と見分けが付きにくい。これを識別するには, バルク密度に着目すれば良い。すなわち, 比抵抗と同時にバルク密度も極端に上昇している区間は炭酸塩鉱物充填層の可能性が高く, 資源量算定においてはネット区間から除外する必要がある¹⁸⁾ (図—3.2)。

3.3 検層による貯留層特性の評価手法と実例

本節では, 著者が東部南海トラフおよびカナダ北西極地域で担当した MH 層を対象とした物理検層評価に基づき, 各評価手法の概要と実例を紹介する。

3.3.1 岩相および堆積相の評価

岩相および堆積相の評価は, 資源量の評価および生産シミュレーションのための地層モデルの作成の基礎となる。資源量評価においては, ネット・グロス比 (地層全体の厚さに対して, MH の濃集が期待される砂質層が占める割合: 2 章参照) を評価するために欠かせないし, 生産シミュレーションにおいては, 砂層と泥層とで MH 飽和率や分解効率が大きく異なることから, それぞれの層厚や重なり具合をどう設定するか (すなわち地質モデル構築) が重要となってくる (7 章参照)。

(1) 岩相の評価

まず岩相については, 一般には頁岩が砂岩に比べて放射性元素 (U, Th, K) を多く含むことから, 頁岩含有率 (V_{sh}) は自然ガンマ線 (以下 GR) 検層を用いて以下の式で決定する (すなわち GR 測定値が, クリーンな砂層の値から頁岩層の値にどれだけ近づいているかを見る)。

$$V_{sh} = \frac{GR - GR_{clean}}{GR_{shale} - GR_{clean}} \dots\dots\dots (1)$$

GR: 自然ガンマ線強度

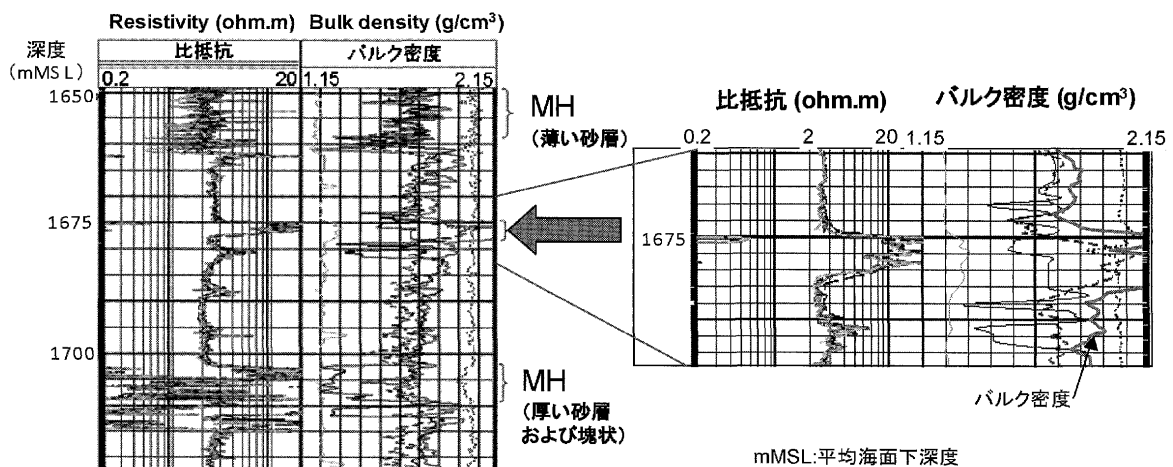
GR_{clean}: クリーンな砂岩層における GR 測定値

GR_{shale}: 頁岩層における GR 測定値

しかし, 東部南海トラフの調査海域の MH 濃集帯で

表—3.1 検層によるメタンハイドレート層の認定方法 (Fujii et al. (2009)¹⁷⁾を編集)

測定項目	純粋なMHの特性	検層レスポンス
比抵抗	無限大	高い
音波速度	水の倍以上	増加
中性子孔隙率	水の1.3倍	微増
バルク密度	0.91	微減
NMR孔隙率	0	MHの体積分だけ減少



図—3.2 東部南海トラフのLWD坑井における炭酸塩鉱物充填層の例。1675 m 付近で比抵抗とバルク密度が同時に上昇している。

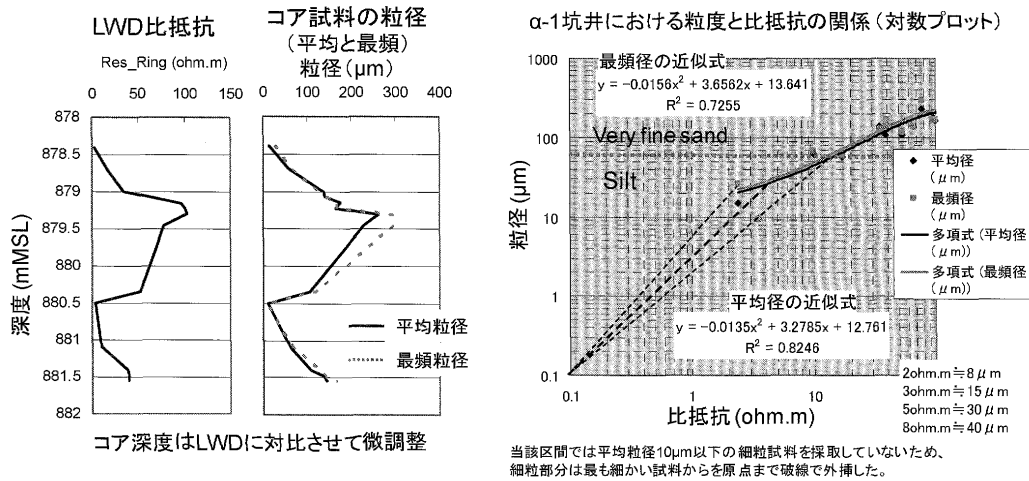


図-3.3 東部南海トラフのα-1坑井におけるコアの粒度とLWD比抵抗の関係

は、口絵写真-23(a)に示すように特にMH濃集区間の上部において砂層と泥層におけるGR測定値のコントラストが乏しく、上記手法から一義的にGRcleanとGRshaleを決めて頁岩含有率（または砂と泥の境界）を決定するのは容易ではなかった^{16),17)}。

一方、比抵抗および比抵抗イメージ(口絵写真-23(c), (d), 口絵写真-24(b), (c))を見ると、比抵抗の高い箇所（比抵抗イメージでは白い部分）と低い箇所のメリハリがはっきりしている。そこでMH濃集区間において、LWD比抵抗とコア分析で得られた粒度を比較したところ、両者に比較的良好な相関が見られた^{17),18)} (図-3.3)。この観察結果から、東部南海トラフのMH濃集帯の資源量評価に際しては、LWDの比抵抗を用いてネット・グロス比を決定した¹⁸⁾。また、生産シミュレーションのための地層モデルの構築に際しては、比抵抗イメージを用いて砂層と泥層の境界を認定し、岩相のモデルを構築した。

(2) 堆積相の評価

上述のα-1坑井などコアリングが実施された坑井においては、MH賦存層の堆積環境を明らかにするために、コアデータと検層データを用いた堆積相の解析が実施された¹⁷⁾。

手順としては、まずコアの詳細な肉眼観察を行い、堆積相の区分を行った(口絵写真-25(a))。その結果、本坑井ではA~Eの五つの堆積相が認定された。次に、主に比抵抗検層をベースとして、岩相柱状図を作成した(口絵写真-25(b))。最後に、検層から作成した岩相柱状図とコア観察による堆積相区分を対応させて、検層実施全区間における堆積相柱状図を作成した。これにより、同坑井のMH濃集区間の堆積環境は海底扇状地システム中の分岐状チャネル～舌状体であることが判明し、その後の地震探査データを用いた広域地質解釈および砂層分布の推定²³⁾の基礎データとして使用された。

3.3.2 孔隙率の評価

石油・天然ガス層の評価では、孔隙率は密度、中性子、音波、および比抵抗検層を用いて決定する。しかし、MH層は表-3.1に示したように音波検層と比抵抗検層

に特有の応答を示すため、孔隙率評価には密度検層か中性子検層を用いるのが一般的である⁷⁾。

東部南海トラフの資源量評価においては、LWDの密度検層をベースとして、以下の質量保存の式¹⁾から密度検層孔隙率(φ_d)を算定した。

$$\phi_d = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_f} \dots \dots \dots (2)$$

ρ_{ma} : マトリックス密度 (2.65(g/cm³) を使用)

ρ_b : バルク密度 (g/cm³)

ρ_f : 流体密度 (地層水の密度として、1を使用)

一般に、上記式から求めた密度検層孔隙率は全孔隙率であり、流体移動に寄与し得る有効な孔隙率φ_e(すなわち粘土(頁岩)表面への吸着水の影響を考慮した孔隙率)は前述の頁岩含有率(Vsh)を用いて以下の式で求める。

$$\phi_e = \phi_d(1 - Vsh) \dots \dots \dots (3)$$

東部南海トラフの資源量評価に際しては、コアの粒度分析の結果から、MH濃集区間の砂質層中における頁岩含有率は5%程度と少なく、またφ_dがコア分析結果(ヘリウムポロシメーターおよび水銀ポロシメーターから求めた孔隙率)と比較的合うことから(口絵写真-23(f), 口絵写真-24(e)), ネット(砂質)区間の孔隙率評価ではφ_dをそのまま使用した。

3.3.3 ハイドレート飽和率の評価

油層やガス層の水飽和率は、比抵抗検層の測定値を用いて、一般に以下のアーチーの式から算定する¹⁾。

$$Sw^n = \frac{F \cdot Rw}{Rt} \dots \dots \dots (4)$$

ここで、

$$F = \frac{a}{\phi^m} \dots \dots \dots (5)$$

Sw : 水飽和率 (water saturation)

F : 地層比抵抗係数 (formation resistivity factor)

Rw : 地層水の比抵抗

Rt : 地層の真の比抵抗 (true resistivity)

φ : 孔隙率

a : 迂回係数, m : 膠結係数, n : 飽和指数

しかしながら、上記手法による水飽和率評価では、 a , m , n などの係数や Rw (地層水比抵抗) などの未知数が多いため、評価値の不確かさが大きく、コア分析による詳細な(複数深度での)キャリブレーションが必要となる。そこで東部南海トラフの資源量評価では、MHの飽和率 Sh の評価に有効とされるNMR(核磁気共鳴)検層を用いた評価を採用した。本手法は、3.2.2で述べたTCMR(NMR全孔隙率)を、密度検層孔隙率 ϕ_d から差し引くことによって、地層中のMHの体積(Vh)を求め、さらにそれらを全孔隙率(ϕ_d)で除することにより算定する(DMR法: Density Magnetic Resonance Method^{24),25)}。

$$Sh = \frac{Vh}{\phi_d} = \frac{\phi_d - TCMR}{\phi_d} \dots\dots\dots(6)$$

NMR検層を用いてDMR法から求めたMH飽和率と、比抵抗検層でアーチーの式から求めた飽和率を口絵写真-23(g)および口絵写真-24(f)に示す。ここで用いたNMR検層(ProVISION*)は、垂直分解能が比抵抗に比べて粗いこともあり、全体的に平均化された測定値となっている。上記DMR法によるMH飽和率評価の有効性を検証するために、MH濃集区間にて圧力・温度保持コアサンプラー(PTCS: Pressure Temperature Core Sampler)¹⁵⁾を用いた全分解ガス量測定実験を行い、コアから求めた実測飽和率結果との比較を行った¹⁷⁾(口絵写真-23(g),口絵写真-24(f))。その結果、DMR法によるネット区間のMH飽和率は実測値とおおむね一致することが判明した。

比抵抗検層は、垂直分解能が高く、薄い砂層の評価には適しているが、飽和率を求めるための各パラメータの決定が難しい。一方、NMR検層は信頼性の高い測定値を提供するが、薄い砂層ではレスポンスが鈍り過小評価気味となる(口絵写真-24(f))。両者の長所を組み合わせた評価手法が現在検討されている。

3.3.4 浸透率の評価

浸透率は、地層中における流体の浸透しやすさを示すパラメータである。石油・天然ガスの貯留層と同様に、MH賦存層においても、生産性を評価する上で、最も重要な基礎パラメータである。両者の大きな違いは、MH層はハイドレートが孔隙中を埋めている初期状態の浸透率(初期有効浸透率: K_i)は小さいが、MHの分解と共に流体の通路が大きくなり、急激に増加することである。最終的に孔隙内が水のみになると、本来地層が持つ浸透率(絶対浸透率: K_a)となる(ただし実際には粒子配列の変化もある)。

石油・天然ガス開発分野では、貯留層の浸透率は比抵抗、孔隙率、水飽和率、核磁気共鳴検層、Formation Tester(圧力測定)などを用いて推定する¹⁾。ここでは、MH賦存層の浸透率評価で多用される核磁気共鳴検層を用いた初期有効浸透率の評価手法とその実例を紹介する。

核磁気共鳴検層データを用いた浸透率の評価手法としては、SDR法²¹⁾(Schlumberger-Doll Research)(K_{SDR})

およびTimur-Coates法²⁶⁾(K_{TIM})の2種類が一般的に用いられる。SDR法およびTimur-Coates法による算定式(単位md^{a)})とパラメータは、それぞれ以下のとおりである。

$$K_{SDR} = C(TCMR)^4(T_2LM)^2 \dots\dots\dots(7)$$

C: 鉱物定数 (mineralogy constant)
砂では一般に 4 md/(msec)² を使用^{2),21),27)}

TCMR: NMR全孔隙率
 T_2LM : 緩和時間(T_2)の対数平均 (msec)

$$K_{TIM} = a(TCMR)^4 \left(\frac{FFV}{BFV} \right)^2 \dots\dots\dots(8)$$

a: 定数 (一般に10000を使用)
TCMR: NMR全孔隙率
FFV: NMR自由流体体積 (Free Fluid Volume)
BFV: NMR吸着流体体積 (bound Fluid Volume)

両モデルの共通点は、変数として、NMR全孔隙率(TCMR)のべき乗を用いている点である。一方、両者の違いは、もう一つの変数として緩和時間(T_2)の対数平均値を用いるか(SDR法)、または自由流体体積と吸着流体体積の比を用いるか(Timur-Coates法)という点である(図-3.4)。緩和時間(T_2 : Transverse Relaxation Time)とは、核磁気共鳴により励起された水分子の回転運動により発生する磁場(スピン磁場)が緩和するまでの時間で、動き得る水分子が多いほど(すなわち自由孔隙が大きいほど)、時間が長くなる。この緩和時間を数100回の継続したパルスで測定して頻度分布にしたものが T_2 分布である^{2),21),26)}(図-3.4)。 K_{SDR} はパラメータ数が少ない分不確かさが低いが、 T_2 分布の平均値のみを見るので、 T_2 の短いシグナル(BFV)が全体に占める割合があまり反映されない。一方、 K_{TIM} はパラメータ数は一つ多いが、BFVが全体に占める割合が反映される。

口絵写真-23(h)および口絵写真-26(e)に東部南海

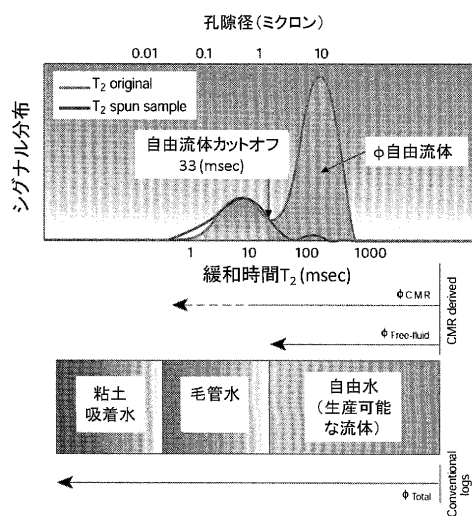


図-3.4 NMR検層による浸透率評価の原理²¹⁾

a) md (ミリダルシー): 浸透率の単位。1ダルシーは常温の水に対する透水係数 10⁻⁵ m/s にほぼ相当する。

講座

トラフ α -1坑井およびカナダマッケンジーデルタにおけるMH賦存層における上記手法を用いた浸透率の評価結果を示す。使用するモデルとパラメータの違いによるバラツキがあるものの、MH賦存層における初期有効浸透率は0.1~1 md程度と評価されている。これらの評価結果は、テスト対象区間の選定や生産シミュレーションのための基礎データ(入力値)として活用された。

3.3.5 ケースドホール検層による分解モニタリング

(1) 測定ツール

ケースドホール(ケーシングをセットした坑井)の水飽和率の測定には、比抵抗、放射線源によるツールなどが一般的に用いられる^{1),2)}。ここではカナダ北西部陸上の産出試験で、生産試験前後のMH賦存層の地層物性変化の把握を目的として2007年に実施した、貯留層水飽和率検層機(RST*: Reservoir Saturation Tool)および音波検層機(Sonic Scanner*)の二つのケースドホール検層の例を述べる。

RSTは化学中性子線源の代わりに加速器(Minitron)を使用する飽和率評価ツールで、高速中性子と地層中の原子の間の2種類の反応(中性子捕獲、非弾性散乱)を利用している。出力値の一つであるRST sigmaは、中性子捕獲反応によって励起されたガンマ線(捕獲ガンマ線)のカウント数を検知するもので、流体の飽和率に関する情報が得られる^{1),2),28)}。塩素の中性子捕獲断面積は真水や炭素に比べて大きいことから、RST sigmaは地層中の塩分濃度(すなわち水飽和率)の指標として用いられる。一方、Sonic Scannerは圧縮波、せん断波、ストーンレー波を測定できる新しい音波検層ツールであり、複数の探査深度(測定機器が地層方向に探査可能な距離)における地層の弾性/力学特性や、異方性を評価することが出来る²⁹⁾。探査深度という観点では、RST(25.4 cm)²⁹⁾よりもSonic Scanner(50~60 cm)の方が深く、MH分解評価の観点では有益である。

(2) 測定結果例

口絵写真—26(f)~(i)に測定結果例を示す。口絵写真—26(f)はRST sigmaの出力値変化であるが、試験前から試験後にかけて生産対象区間(1 093-1 105 mKB)において選択的に出力値が増加しており、MHの分解に伴い水飽和率が増加したことを示唆している²⁰⁾。口絵写真—26(h)と(i)は音波検層から得られたP波とS波の速度分布である。先に述べたとおり、MHの飽和率が高い区間では音波速度が相対的に高いが、試験実施後にS波速度が穿孔区間の下部で直下の帯水層と同レベルまで低下しているのが確認された。さらにこの低下が著しい深度がNMR検層から評価した初期有効浸透率が比較的高い区間(口絵写真—26(e)の1 102 m付近)に対応しており、浸透率の高い層から選択的に分解が進んだことを示唆しており興味深い。S波速度とNMR検層から求めたMH飽和率の関係から、MH飽和率が坑井近傍では70%から10%まで低下している可能性が示さ

れた³⁰⁾。

3.4 予測精度の現状

これまで物理検層技術を用いたMH賦存層の評価手法と事例について述べてきたが、実際の測定および解析上では、様々な予測精度上の問題点がある。第一に挙げられるのが、コア実測値を用いた検層データの較正の難しさである。東部南海トラフの例では、LWD坑井とコアリング坑井が約10 m離れていたため、特にコアの回収率が悪い区間や砂泥が薄く互層する区間での対比は容易ではなかった²²⁾。また、未固結層であるため、砂層のコア試料はMH分解後に崩れてしまうため、元来の地下状態での孔隙率や浸透率を精度よく実測することは難しい。この点は固結層のコア測定値を用いた較正と異なる点である。第二に、MH層上下の未固結層における検層データの質の悪さが挙げられる。特に海域のMH層直下は、孔壁崩壊が激しく、検層測定値の品質が著しく悪い。コアの回収率もMH濃集区間に比較して著しく悪いいため、岩相を推定することが難しい。

3.5 まとめと今後の課題

物理検層技術を用いたMH層の評価手法とその事例について、東部南海トラフとカナダ北西部の陸上産出試験を例として述べて来た。物理検層技術は、資源量の評価や生産シミュレーションの基礎データを提供する重要な技術であるが、先に述べたように海底の未固結層においてはコア実測値を用いた較正の難しさ、MH層直下の孔壁崩壊による検層データの品質低下などの問題がある。今後はこれらの技術的問題点を解決し、検層によるMH貯留層特性評価の精度を向上させる必要がある。

謝辞

本研究は、メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム(MH21)の一環として実施された。研究成果の公表を許可いただいた経済産業省・資源エネルギー庁、石油天然ガス・金属鉱物資源機構に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Schlumberger: Log interpretation principles/applications, Schlumberger Wireline and Testing, 1989.
- 2) 物理探査学会: 物理探査ハンドブック, 手法編, 第13章 物理検層, 1998.
- 3) Sloan, E. D.: Clathrate Hydrates of Natural Gases, 2nd ed., New York; Marcel Dekker Inc., p. 705 (Chapter 7), 1998.
- 4) Collett, T. S.: Well Log Evaluation of Gas Hydrate Saturations, Proceedings of SPWLA 39th Annual Logging Symposium, May 26-29, paper MM, pp. 1~4, 1998.
- 5) Miyairi, M., Akihisa, K., Uchida, T., Collett, T. S. and S. R. Dallimore: Well-log interpretation of gas-hydrate-bearing formations in the JAPEX/JNOC/GSC Mallik 2L-38 gas hydrate research well, GSC Bulletin 544, pp. 281~292, 1999.
- 6) Collett, T. S., Lewis, R. E., Dallimore, S. R., Lee, M.W., Mroz, T. H. and Uchida, T.: Detailed evaluation of gas hydrate reservoir properties using JAPEX/JNOC/GSC

*Mark of Schlumberger (Schlumberger社の登録商標)

- Mallik 2L-38 gas hydrate research well downhole well-log displays, GSC Bulletin 544, pp.295~311, 1999.
- 7) 手塚和彦・宮入 誠・内田 隆・秋久國男：メタンハイドレート層の検層解析。物理探査, Vol. 55, No. 5, pp. 413~424, 2002.
 - 8) Collett, T. S., Lewis, R. E. and Dallimore S. R.: JAPEX/JNOC/GSC et al. Mallik 5L-38 gas hydrate production research well downhole well-log and core montages, GSC Bulletin 585, 2005.
 - 9) Akihisa, K., Tezuka, K., Senoh, O. and Uchida, T.: Well log evaluation of gas hydrate saturation in the MITI-Nankai-Trough well, offshore south-east Japan, SPWLA 43rd Annual Logging Symposium, Oiso, Japan, Paper BB, 2002.
 - 10) Collett, T. S.: Gulf of Mexico Gas Hydrate JIP Drilling Program Downhole Logging Program, Cruise Report of the Gulf of Mexico Gas Hydrate Joint Industry Project, Section 3, pp. 1~12, 2005.
 - 11) Expedition 311 Scientists: Cascadia margin gas hydrates. IODP Prel. Rept., 311. doi: 10: 2204/iodp.pr.311.2005.
 - 12) Collett, T., Riedel, M., Cochran, J., Boswell, R., Presley, J., Kumar, P., Sathe, A., Sethi, A., Lall, M., Siball, V., Guerin, G., Malinerno, A., Mrozewski, S., Cook, A., Sarker, G., Broglia, C., Goldberg, D. and the NGHP Expedition 01 Scientific Party: Indian National Gas Hydrate Program Expedition 01 Downhole Log Data Report: Prepared by the Directorate General of Hydrocarbons, Ministry of Petroleum & Natural Gas (India), 2 DVD set, 2008.
 - 13) Kim, G. Y., Yoo, D. G., Kim, W. S., Lee, H. Y., Park, K. P.: Physical Properties of Gas Hydrate-bearing sediments in the Ulleung Basin, The East Sea of Korea: Preliminary Result from well-log data. Proceedings of the 6th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2008), Vancouver, British Columbia, CANADA, July 6-10, 2008.
 - 14) Kinoshita, M., Tobin, H., Moe, K. T. and the Expedition 314 Scientists: NanTroSEIZE Stage 1A: NanTroSEIZE LWD transect. IODP Prel. Rept., 314. doi: 10.2204/iodp.pr.314.2008.
 - 15) Takahashi, H. and Tsuji, Y.: Multi-Well Exploration Program in 2004 for Natural Hydrate in the Nankai-Trough Offshore Japan, Proceedings of 2005 Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA., 2-5 May 2005 (OTC17162).
 - 16) Tsuji, Y., Namikawa, T. and JOGMEC methane hydrate project team members: Methane hydrate occurrence and distribution in the eastern Nankai Trough, Japan—Findings of the METI Tokai-oki to Kumano-nada methane hydrate drilling program, in T. Collett, A. Johnson, C. Knapp and R. Boswell, eds., Natural gas hydrates: Energy resource potential and associated geologic hazards: AAPG Memoir 89, 2009.
 - 17) Fujii, T., Namikawa, T., Okui, T., Kawasaki, M., Ochiai, K., Nakamizu, M., Nishimura, M., Takano, O. and Tsuji, Y.: Methane hydrate occurrence and saturation confirmed from core samples, eastern Nankai Trough, Japan, in Collett, T., Johnson, A., Knapp, C. and R. Boswell, eds., Natural gas hydrates: Energy resource potential and associated geologic hazards: AAPG Memoir 89, 2009.
 - 18) Fujii, T., Saeki, T., Kobayashi, T., Inamori, T., Hayashi, M., Takano, O., Takayama, O., Kawasaki, T., Nagakubo, S., Nakamizu, M. and Yokoi, K.: Resource Assessment of Methane Hydrate in the Eastern Nankai Trough, Japan, Proceedings of 2008 Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA., 5-8, May, 2008 (OTC 19310).
 - 19) 安田優人・Dallimore, S. R.・MH21メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム；タスクフォース産出試験計画：メタンハイドレート第二回陸上産出試験（2007年）の報告，石油技術協会誌，Vol. 72, No. 6（Nov., 2007），pp. 603~607.
 - 20) Fujii, T., Takayama, T., Dallimore, S. R., Nakamizu, M., Mwenifumbo, J., Kurihara, M., Sato, A., Yamamoto, K., Wright, J. F. and Al-Jubori, A.: Wire-line Logging Analysis of the JOGMEC/NRCan/Aurora Mallik Gas Hydrate Production Test; in Proceedings of the VIth International Conference on Gas Hydrates, Vancouver, B.C. July 6-11, 2008.
 - 21) Kenyon, B., Kleinberg, R., Straley, C., Gubelin, G., Morriss, C.: Nuclear Magnetic Resonance Imaging—Technology for the 21st Century, Oilfield Review, Autumn 1995, pp. 19~33.
 - 22) 藤井哲哉・高山徳次郎・川崎達治・高野 修：(1) メタンハイドレート濃集帯の評価 ④詳細地質モデルの構築（坑井間対比），JOGMEC 技術センター年報，平成19年度，pp. 182~185, 2008.
 - 23) 高野 修・藤井哲哉・佐伯龍男：サイスミック層序学的手法による東海沖～熊野灘の後期鮮新世～更新世海底扇状地システムの復元と前弧堆積盆テクトニクス史の考察。日本地球惑星科学連合2007年大会（幕張），2007.
 - 24) Freedman, R., Minh, C. C., Gubelin, G., Freeman, J. J., McGuinness, T., Terry, B. and Rawlence, D.: Combining NMR and Density Logs for Petrophysical Analysis in Gas-Bearing Formations, Paper II, presented at 39th SPWLA Symposium, 1998.
 - 25) Akihisa, K., Tezuka, K., Senoh, O. and Uchida, T.: 2002, Well log evaluation of gas hydrate saturation in the MITI-Nankai-Trough well, offshore south-east Japan, SPWLA 43rd Annual Logging Symposium, Oiso, Japan, Paper BB.
 - 26) Stambaugh, B. J.: NMR tools afford new logging choices, Oil & Gas Journal; Apr 17, 2000; 98, 16; *Platinum Periodicals*, pp. 45~52, 2000.
 - 27) Kleinberg, R. L., Flaum, C., Griffin, D. D., Brewer, P. G., Malby, G. E., Peltzer, E. T. and Yesinowski, J. P.: Deep sea NMR: Methane hydrate growth habit in porous media and its relationship to hydraulic permeability, deposit accumulation, and submarine slope stability: Journal of Geophysical Research, Vol. 108, No. B10, 2508, 2003.
 - 28) Schlumberger, Introduction to cased hole logging (C.5), RST Reservoir Saturation Tool.
 - 29) Schlumberger, Wireline Services Catalog 2007.
 - 30) Inamori, T., Fujii, T., Takayama, T., Saeki, T., Yamamoto, K.: A trial of monitoring of the methane hydrate-production test by sonic well logging data, Abstracts of Japan Geoscience Union Meeting 2008, Makuhari, Japan.