

図 2.5-1 苫小牧 CCS-1 物理検層結果事例

物理検層作業で測定された温度のビルドアップ解析結果と取水井の揚水試験時に測定した温度から地温勾配を求めた (図 2.5-2)。第 1 次および第 2 次物理検層作業区間のビルドアップ温度が地温勾配より高く出ているのは、どちらも 17-1/2" (インチ) の

大坑径環境下で高粘度のベントナイト泥水を使用したため、検層作業中に掘削泥水の除熱が間に合わなかったためである。図中には、温度勾配の傾向を示すため、FMI・XPT・CMR・RCBLの測定温度もプロットした。

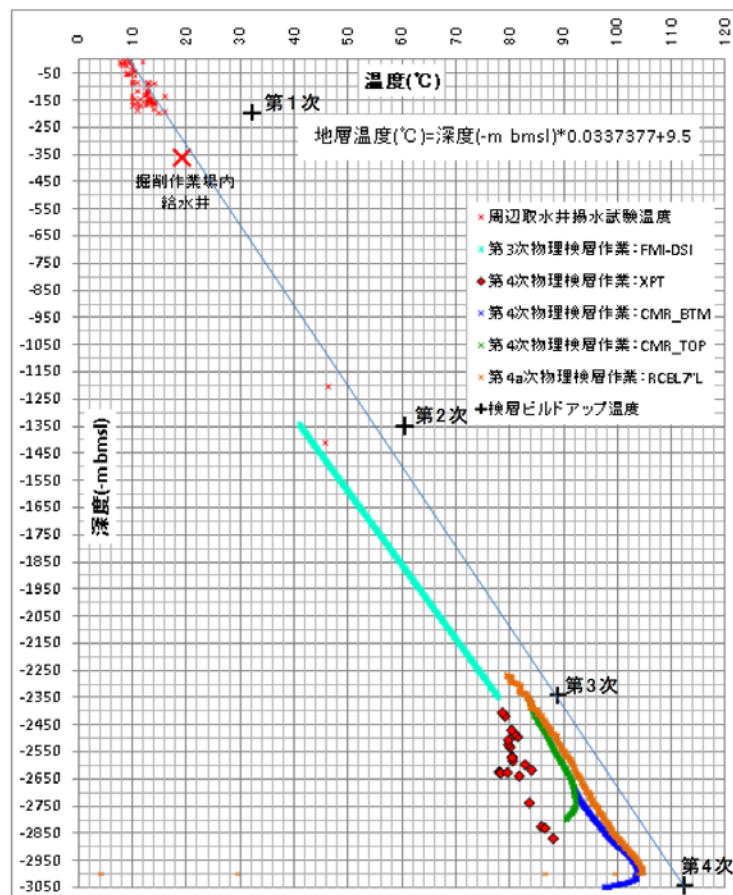


図 2.5-2 苦小牧 CCS-1 地温勾配解析結果

カッティングス試料を地表～深度 3,700m の間、分析項目により 20m～50m ごとに採取し、コア試料（直径約 10cm）を振老層泥岩で 2 回（合計 16m）、滝ノ上層 T 1 部層で 7 回（合計 115.9m）採取した。

これらの試料に関し、微化石分析（有孔虫および珪藻化石分析）、岩石鉱物分析（X線分析および薄片鑑定）および岩石物性分析（孔隙率、浸透率、スレシヨルド圧力分析など）を実施した。

有孔虫および珪藻化石分析により各地層の堆積時代を推定するとともに、周辺にある

既存坑井と対比することで地層名を確認した。有孔虫化石分析により堆積環境を推定し、振老層は中部半深海（500～1000m）、萌別層は中部半深海上部から上部半深海（200～500m）であることがわかった。

コア試料を用いた岩石物性分析により以下を確認した。

1) 滝ノ上層T1部層

- ・孔隙率：5～18%（封圧下）
- ・空気浸透率：0.001～0.01mD（封圧下）

2) 振老層泥岩層

- ・孔隙率：12.4～18.0%（封圧下）
- ・水浸透率： $8.2 \times 10^{-6}$ ～ $36.7 \times 10^{-6}$ mD
- ・スレシヨルド圧力
  - 孔径分布からの推定（N<sub>2</sub>-水系）：5.73～15.02MPa
  - 段階昇圧法（N<sub>2</sub>-水系）：水浸透率が低く長期間を要するため実施せず。
  - 残差圧力法（N<sub>2</sub>-水系）：1.29～12.3MPa以上<sup>注)</sup>（4試料）
  - 段階昇圧法（CO<sub>2</sub>-水系）：11.72MPa以上<sup>注)</sup>（2試料）

注) プレークスルーしなかったことからこの値以上のスレシヨルド圧力を有すると判断した。

### 2.5.3 リークオフテスト結果

苫小牧CCS-1の深度2,753～2,758m（垂直深度2,350.1～2,354.8m）の振老層下部において、遮蔽層強度を測定することを目的として、リークオフテストおよびエクステンディッド・リークオフテストを実施した。その結果、加圧対象の中央深度2,755.5m（垂直深度2,352.0m）におけるリークオフ圧力は45.3MPaであり、等価泥水比重で1.96であること、また閉合圧力が44.55MPa、等価泥水比重で1.93であることがわかった。

### 2.5.4 VSP結果

苫小牧CCS-1において、300～800mの間は100m間隔で、深度850～3,265mは25m間隔でVSP調査を実施することにより、深度-走時間関係を取得するとともに、坑井近傍における弾性波データを取得したことから、苫小牧CCS-1と3Dデータとの高精度な対比が可能となった（図2.5-3）。

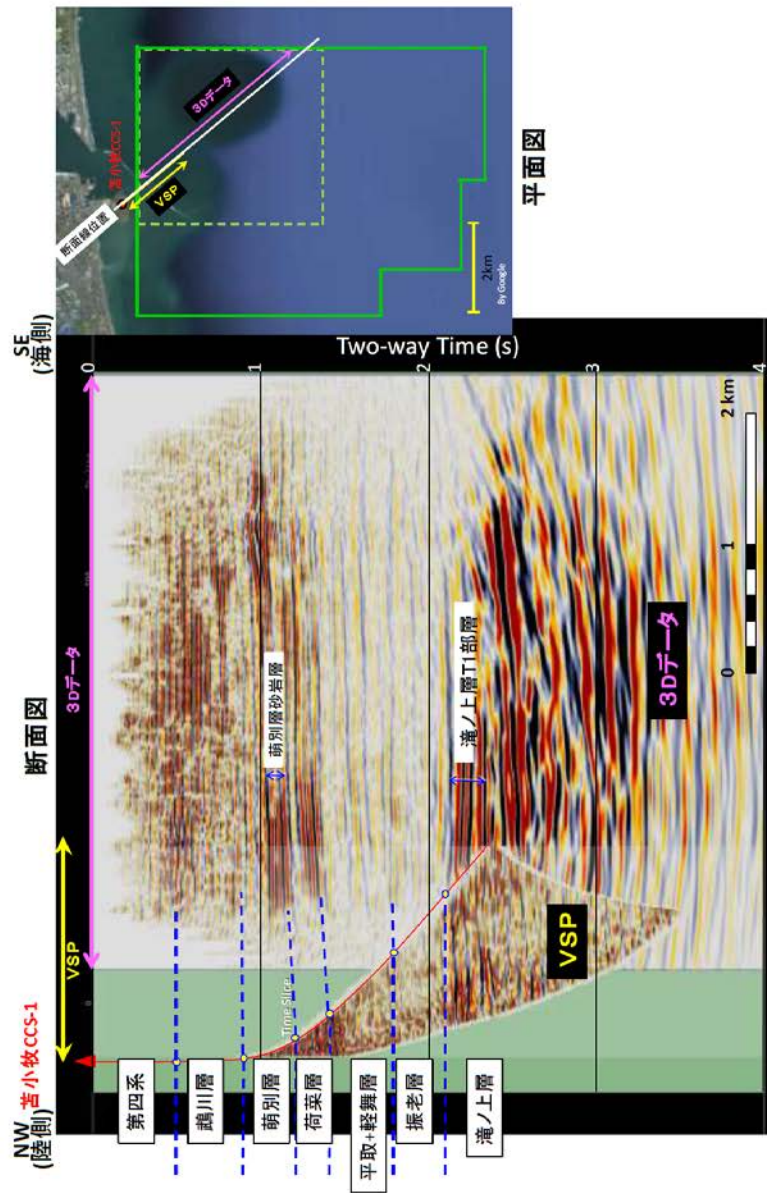


図 2.5-3 坑跡に沿う三次元断面図およびVSPイメージング断面図の対比 (縦軸は往復走時)

### 2.5.5 圧入テスト結果

圧入テストは、CO<sub>2</sub>の圧入性および貯留層評価に必要なパラメーター（圧入指数、浸透率）の把握を目的として、苫小牧CCS-1においては滝ノ上層T1部層で2回（No.1圧入テストおよびNo.2圧入テスト）、萌別層砂岩層で2回（No.3圧入テストおよびNo.3a圧入テスト）の水圧入テストを行った。

#### 1) 滝ノ上層T1部層

##### ア) No.1圧入テスト（対象区間：掘削深度3,382～3,698mの区間内で66m分）

- ・産出能力テストおよび圧入能力テストを実施したが、産出が見られず、圧入も不可能であった。
- ・上記結果および産出・圧入後の坑底圧力の解析結果から、本坑井周辺では低浸透性でほとんど圧入性は無いと判断された。

##### イ) No.2圧入テスト（対象区間：掘削深度2,907～3,289mの区間内で120m分）：

- ・産出能力テストでは最大レート約400kl/日での産出を確認した。累計産出量は157.4klであった。地層水は泥水の影響を受けており、圧入井掘削時に地層水を採取する必要がある。
- ・圧入能力テストでは最大650kl/日のレートでの水圧入を実施した。累計圧入量は129.5klであった。
- ・産出・圧入後の坑底圧力の解析結果から、本坑井周辺での貯留層の浸透率は0.68～1.18mD程度であると推測された。また、坑井近傍の浸透率が改善していることを確認した。
- ・2.7.3項で述べる3Dデータを使用した岩相分布・性状分布の推定結果と比較すると、苫小牧CCS-1付近には高浸透性の岩相は存在しない可能性が高いという結果を得ている（苫小牧CCS-1の近傍は、図2.7-2における橙色の部分に当たっているが、図2.7-3における低A I（青色）の部分には当たっていない）。

#### 2) 萌別層砂岩層

##### ア) No.3圧入テスト（対象区間：掘削深度1,150～1,182mの区間内で17.5m分）

- ・産出能力テストは、自噴しないことから実施しなかった。地層水は圧入井掘削時に採取する必要がある。
- ・圧入能力テストでは最大300kl/日のレートでの水圧入を実施した。累計圧入量は97.7klであった。



- ・圧入後の坑底圧力の解析結果から、貯留層の浸透率は25mD程度であると推測した。

イ) No. 3a 圧入テスト (対象区間:掘削深度 1,077~1,217m の区間で 57.5m 分<sup>注)</sup>)

- ・圧入能力テストでは最大 1,200k1/日のレートでの水圧入を実施した。累計圧入量は 248.5k1 であった。
- ・圧入後の坑底圧力の解析結果から、貯留層の浸透率は 9mD 程度であると推測した。

注) No. 3a 圧入テストの対象区間は、No3 圧入テスト対象区間に 40m 分の区間を加えて実施した。

## 2.6 苫小牧 CCS-2 調査結果の概要

### 2.6.1 掘削結果

2011年5月4日から6月15日までの43日間で、苫小牧 CCS-1 の北東 37 m の位置において深度 1,218 m まで掘削した。調査終了後は、耐 CO<sub>2</sub> セメントを用いて埋め立てた (廃坑作業を実施した)。

### 2.6.2 地質調査結果

苫小牧 CCS-2 の深度 993~1,218m の萌別層泥岩層および砂岩層において、直径 8cm のコア試料を連続採取した。掘削後は、苫小牧 CCS-1 との比較を目的として物理検層を実施した。

コア試料を用いて岩石物性分析により以下を確認した。

#### 1) 萌別層砂岩層

- ・孔隙率：25~40% (封圧下)
- ・空気浸透率：1~1,000mD (封圧下)
- ・不動水飽和率：27~75% (平均 51.5%、遠心分離法、1.6MPa 相当)

#### 2) 萌別層泥岩層

- ・孔隙率：32.4~37.2% (封圧下)
- ・水浸透率：0.80×10<sup>-3</sup>~1.73×10<sup>-3</sup>mD
- ・スレシヨルド圧力
  - 孔径分布からの推定：0.14~1.56MPa
  - 段階昇圧法 (CO<sub>2</sub>-水系)：0.75~1.67MPa

### 2.6.3 リークオフテスト結果

深度 989～993m の萌別層泥岩層下部において、遮蔽層強度を測定することを目的としてリークオフテストを実施した。その結果、テスト区間の中央深度 991m におけるリークオフ圧力は 14.6MPa であり、等価泥水比重 1.50 であることがわかった。

## 2.7 滝ノ上層解析結果

### 2.7.1 貯留層

滝ノ上層は火山性碎屑物を含む火山岩層であり、火山岩・凝灰岩からなる滝ノ上層 T1 部層とその下部の泥岩層からなる。滝ノ上層 T1 部層（層厚が約 600m）は、さらに下部の溶岩～凝灰角礫岩卓越層と上部の凝灰岩卓越層とに分けられる。

図 2.7-1 は、調査地点周辺の既存坑井の滝ノ上層 T1 部層における溶岩～凝灰角礫岩および凝灰岩の孔隙率と浸透率の関係をプロットしたものである。本層では、溶岩～凝灰角礫岩相では良好な圧入性状が期待できることから圧入対象となると考えた（図 2.7-1 青い楕円部）。また、凝灰岩相全体としてはそれほど良好な性状は期待できないが、部分的に高い孔隙率を有する領域が存在し、圧入対象となると考えた（図 2.7-1 赤い楕円部）。実地調査から得られた貯留層性状の概要を表 2.7-1 にまとめる。

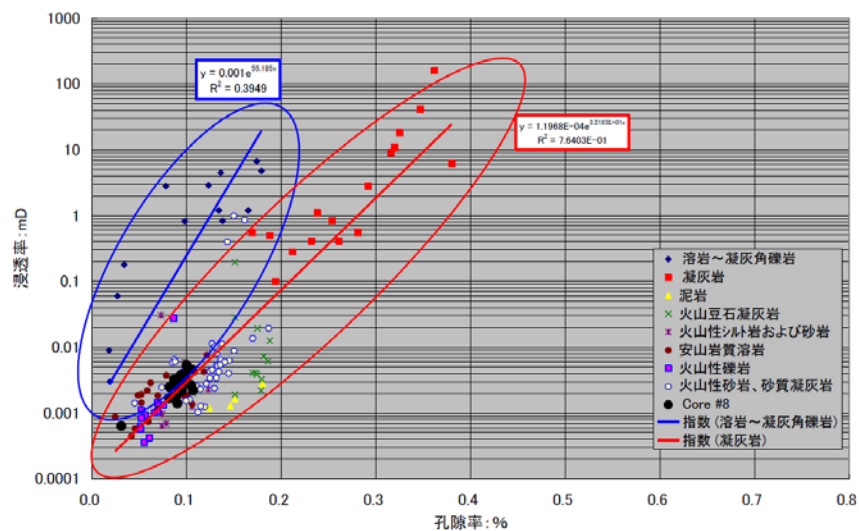


図 2.7-1 コア試料の孔隙率と浸透率のクロスプロット

表 2.7-1 滝ノ上層 T1 部層 貯留層性状一覧

項目	
対象深度	約2,400～3,000m(垂直深度)
層厚	約600m
岩相	溶岩～凝灰角礫岩、凝灰岩
孔隙率	5～18%(苫小牧CCS-1コア試験:封圧下) 3～19%(周辺坑井のコア試験:封圧下)
浸透率	0.68～1.18mD(苫小牧CCS-1圧入テスト解析結果)* 0.001～0.01mD(苫小牧CCS-1コア試験:封圧下、空気) 0.002～7mD(周辺坑井のコア試験:封圧下) 0.01mD～2.6D(坑井Aでの物理検層解析結果)
水圧入テスト (苫小牧CCS-1)	最大650kl/日(掘削深度2,907～3,698mのうち186m)*

\*圧力・温度測定結果から圧入区間は2,907～2,931mのみと判断した。

### 2.7.2 遮蔽層

遮蔽対象層となる振老層および平取+軽舞層は、約1,100mの層厚を有する。苫小牧CCS-1におけるリークオフテスト結果から、振老層下部で等価泥水比重1.96の強度を持つことを確認した。

苫小牧沖構造の西翼には断層が存在するものの、振老層および平取+軽舞層は主に泥岩からなることと、周辺坑井データを用いた地層水塩分濃度分布と地層圧力分布から、過去に遮蔽層を超えた垂直方向の地層水の移動はないと考えられる。

振老層で採取したコア試料では、水浸透率が $8.2 \times 10^{-6}$ ～ $36.7 \times 10^{-6}$ mD、スレシヨルド圧力が1.29MPa～15.02MPa以上の実測データが得られている。後者については、1.29MPaといた比較的低い分析値が得られているものの、CO<sub>2</sub>貯留条件と同様の条件で分析をしたところ、11.72MPa以上の値が得られている。

以上の条件・データから、振老層および平取+軽舞層は、良好な遮蔽性能を有する地層であると考えられる。実地調査から得られた遮蔽層性状の概要を表2.7-2にまとめる。



表 2.7-2 滝ノ上層 T 1 部層に対する遮蔽層性状一覧

項目	
層序	振老層および平取+軽舞層
岩相	泥岩
層厚	約1,100m
孔隙率	12.4~18.0%(苫小牧CCS-1コア試験:封圧下)
浸透率	$8.2 \times 10^{-6} \sim 36.7 \times 10^{-6} \text{mD}$ (苫小牧CCS-1コア試験:水浸透率)
スレシヨルド圧力	1.29~12.3MPa*以上(苫小牧CCS-1コア試験:N <sub>2</sub> -水系残差圧力法) 11.72MPa*以上(苫小牧CCS-1コア試験:CO <sub>2</sub> -水系段階昇圧法) ※ブレイクスルーしなかったことから測定値以上のスレシヨルド圧力を有すると判断。
リークオフ圧力 (苫小牧CCS-1 リークオフテスト)	45.3MPa(等価泥水比重1.96) (振老層(苫小牧CCS-1)2,352mVD(垂直深度))

### 2.7.3 地質モデル構築

#### (1) 岩相分布・性状分布の推定

滝ノ上層は、火山岩起源であることから、砂岩などの堆積岩層と比較して不均質性が高く、CO<sub>2</sub>挙動予測シミュレーションを実施するためには、空間的な岩相分布およびその性状分布の推定が特に重要となる。このため、3Dデータを活用した岩相分布・性状分布の推定を実施し、CO<sub>2</sub>挙動予測シミュレーションの地質構造モデルへ反映させた。

具体的には、まずスケルトン・アトリビュート解析と呼ばれる手法を用いて弾性波形の特徴を強調し、次にSOM (Self-organizing Maps : 自己組織化マップ) 解析による波形分類を行い、さらにクラスター解析の代表的な手法である K-means 法により各分類の境界を決定し、最後に坑井Aにおける溶岩～凝灰角礫岩の区間との比較により、この岩相を示す弾性波形を決定することにより、3Dデータ上で溶岩～凝灰角礫岩の分布領域を推定した。

そして、溶岩～凝灰角礫岩についてはコア試料と物理検層データから、AI (Acoustic Impedance : 音響インピーダンス : 密度×弾性波速度) と孔隙率とが逆相関関係にあることから、3Dデータ上も溶岩～凝灰角礫岩の分布領域ではAI と孔隙率とが逆相関関係にあると考えた。

一例として、図 2.7-2 に滝ノ上層 T 1 部層下部の岩相分布 (K-means Index) を、図 2.7-3 に3Dデータから取得した滝ノ上層 T 1 部層下部の音響インピーダンスを示す。

なお、苫小牧CCS-1が掘削された場所周辺は、高AI領域(孔隙率・浸透率が低い)

であった。

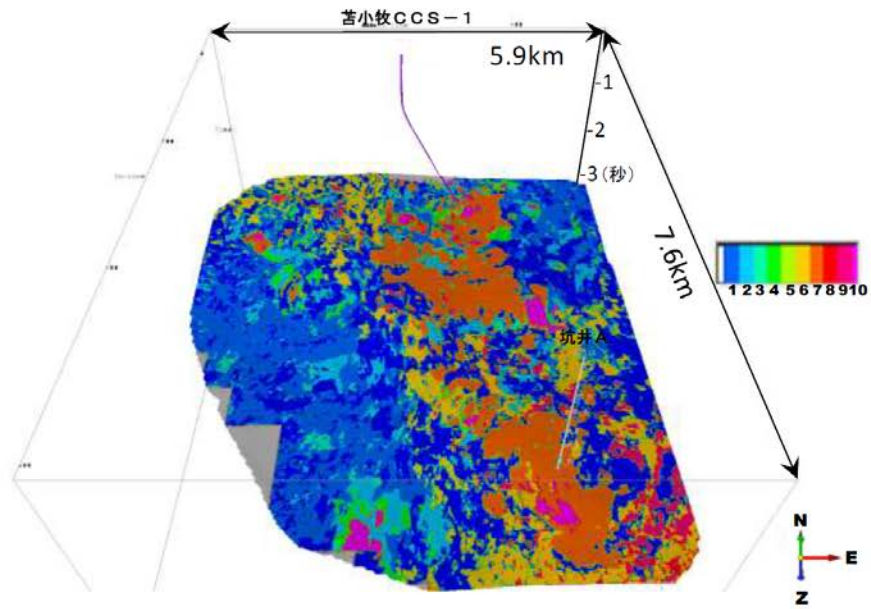


図 2.7-2 滝ノ上層 T1 部層下部の岩相分布 (K-means Index)

注) オレンジの部分が良い貯留層性状が期待される岩相 (溶岩～凝灰角礫岩相)

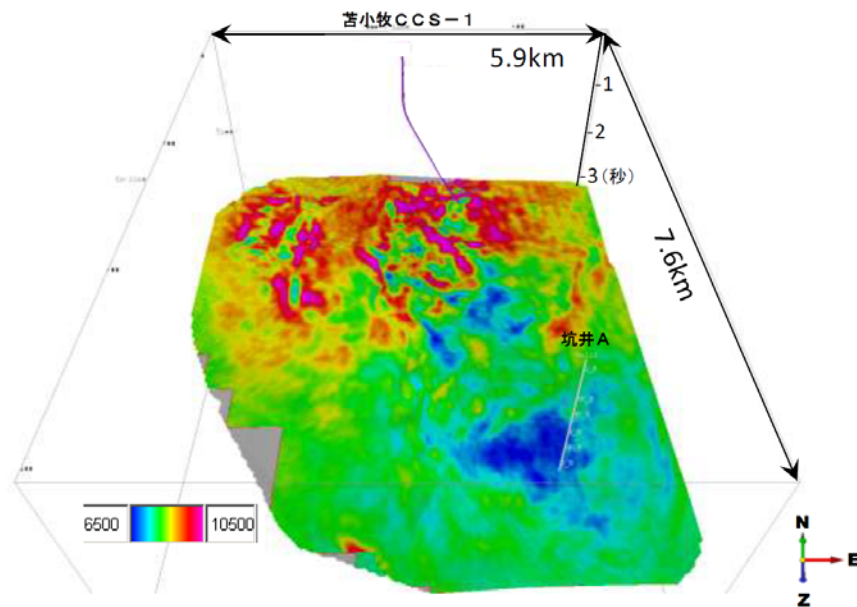


図 2.7-3 滝ノ上層 T 1 部層下部の音響インピーダンス

注) 青色の部分が低 A I で高孔隙率と考えられる箇所。高浸透率である可能性も高い。

(2) 地質構造モデル構築

CO<sub>2</sub>の挙動予測シミュレーションに必要な貯留層モデルを構築するため、3Dデータで解釈に用いた各層準の時間構造を深度構造へ変換した。

地質構造モデルの構築には、構造地質解釈で作成された層準（上位より、第四系基底・鶴川層基底・萌別層基底・荷菜層上部基底・荷菜層下部基底・平取+軽舞層基底・滝ノ上層上限（振老層基底）・滝ノ上層 T 1 部層上部基底・滝ノ上層 T 1 部層基底・滝ノ上層基底）を用いた。深度変換された滝ノ上層 T 1 部層上限のモデル断面位置を図 2.7-4 に、主要な層準の東西断面（地質モデル断面）を図 2.7-5 に各々示す。

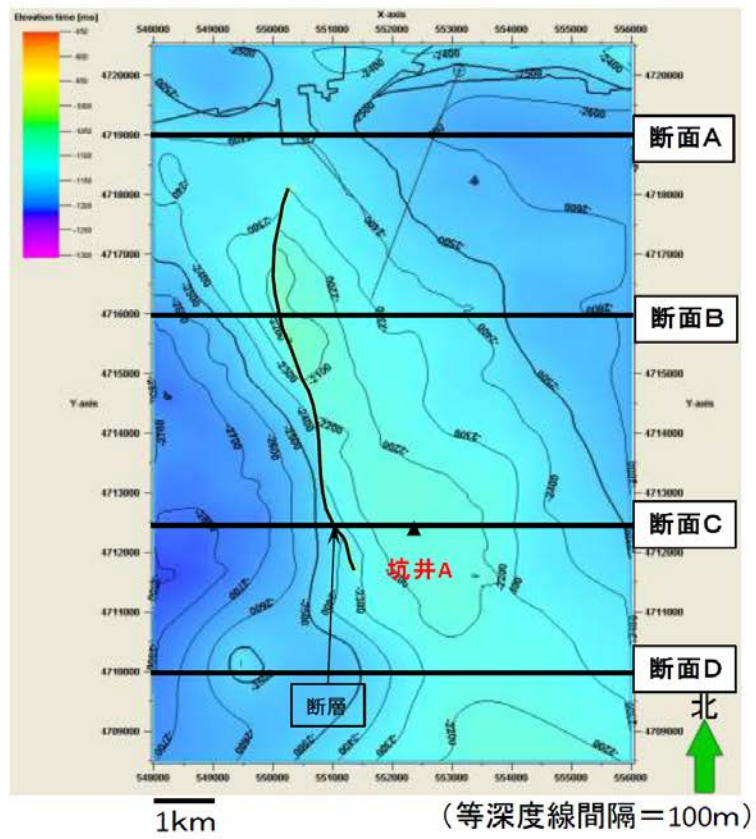
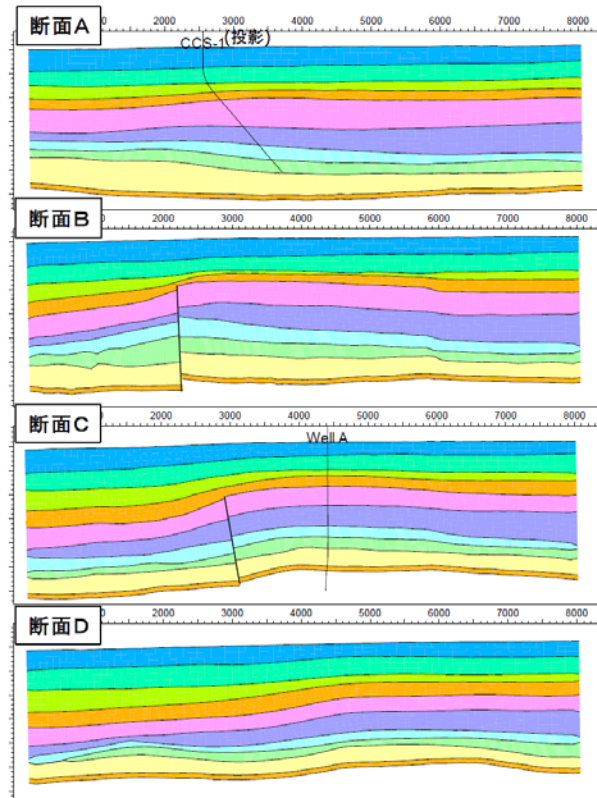


図 2.7-4 モデル断面位置 (構造図は滝ノ上層 T 1 部層上限)  
 (図中の X 軸および Y 軸は世界測地系 WGS84 の UTM54 系の座標)



- 第四系
- 鷓川層
- 萌別泥岩層【遮蔽層】
- 萌別砂岩層【貯留対象層】
- 荷菜層【遮蔽層】
- 平取+軽舞層【遮蔽層】
- 振老層【遮蔽層】
- 滝ノ上層T1部層(上部)【貯留対象層】
- 滝ノ上層T1部層(下部)【貯留対象層】

図 2.7-5 地質モデル断面  
(苫小牧 CCS-1 は投影表示)



さらに、CO<sub>2</sub>挙動予測シミュレーションを行うにあたり、各層準内に以下のようにグリッドセルを作成した。

・水平方向のグリッドセルサイズ

東西方向 (i) および南北方向 (j) : 100m

(i 方向セル数:80 セル、J 方向セル数:120 セル)

・垂直 (k) 方向のグリッドセルサイズ

鶴川層 :	3 レイヤーに分割	(k 方向セル番号 : 1~3)
萌別層 :	3 レイヤーに分割	(k 方向セル番号 : 4~6)
荷菜層上部 :	3 レイヤーに分割	(k 方向セル番号 : 7~9)
荷菜層下部 :	5 レイヤーに分割	(k 方向セル番号 : 10~14)
平取+軽舞層 :	5 レイヤーに分割	(k 方向セル番号 : 15~19)
振老層 :	5 レイヤーに分割	(k 方向セル番号 : 20~24)
滝ノ上層 T 1 部層上部 :	15m ごとに分割	(k 方向セル番号 : 25~57)
滝ノ上層 T 1 部層下部 :	15m ごとに分割	(k 方向セル番号 : 58~96)
滝ノ上層下部 :	5 レイヤーに分割	(k 方向セル番号 : 97~101)
南長沼層 :	5 レイヤーに分割	(k 方向セル番号 : 102~106)

構造モデルの鳥瞰図を図 2.7-6 に示す。滝ノ上層 T 1 部層は CO<sub>2</sub> 圧入対象層準であり、シミュレーションを詳細に行うため上下の地層よりも小さめの垂直方向サイズとなるようにした。

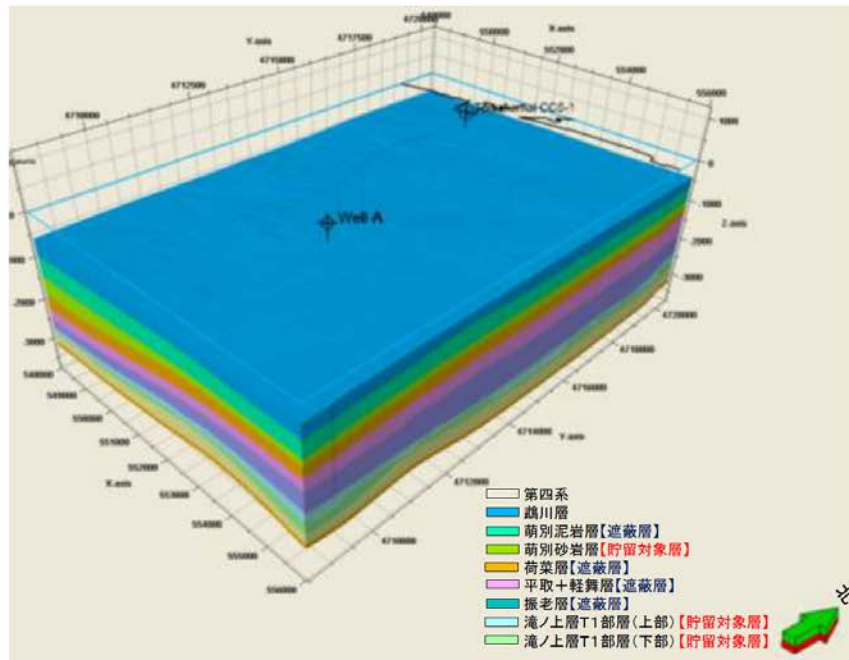


図 2.7-6 三次元地質モデル鳥瞰図

(3) 属性モデル構築

作成した構造モデルの滝ノ上層T1部層とそれ以外の層準に属性（岩相、孔隙率および浸透率）をそれぞれ与え、CO<sub>2</sub>挙動予測シミュレーションのための地質モデルを作成した。

まず、CO<sub>2</sub>圧入対象層である滝ノ上層T1部層における属性値分布は、3Dデータ、苫小牧CCS-1および坑井Aのデータより、地球統計学的手法を用いて、岩相、孔隙率および浸透率の分布が確率的に50個の具現モデルを作成した。図2.7-7に作業フロー図を示す。

まず、図2.7-2に示した3Dデータの解析により求められた3D範囲（図2.1-1）内の岩相分布を溶岩～凝灰角礫岩相（図中の橙色）と凝灰岩相（図中の橙色以外）として、構造モデルへ与えた（図2.7-7のFacies-①）。また、図2.7-3に示した音響インピーダンス（AI）の分布から岩相ごとにAIと孔隙率の関係式を用いて3D範囲内の孔隙率分布を構造モデルへ与えた。（図2.7-7のΦ-②）。また、苫小牧CCS-1および坑井Aの検層データより求められた孔隙率から坑井孔隙率（図2.7-7のΦ-③）を作成した。

次に、Facies-①から逐次インディケータシミュレーション（Sequential Indicator

Simulation : S I S) を用いて、モデル構築範囲 (図 2.1-1) 全体に拡張した岩相分布 (図 2.7-7 の Facies-④) を作成した。Facies-④が具現モデルの岩相分布となる。この岩相ごとに逐次ガウシアンシミュレーション (Sequential Gaussian Simulation : S G S) を用いて、モデル構築範囲全体に拡張した孔隙率分布 (図 2.7-7 の  $\Phi$ -⑤) を作成した。

具現モデルの孔隙率分布 (図 2.7-7 の  $\Phi$ -⑥) は、孔隙率分布  $\Phi$ -⑤および坑井孔隙率  $\Phi$ -③を使用して S G S にて作成した。なお、本 S G S のパラメータは  $\Phi$ -⑤作成時と同じ値を使用し、2つの岩相における孔隙率の出現確率は 3 D 範囲内での出現確率 (図 2.7-8) とした。

具現モデルの浸透率分布 ( $k$ -⑦) は孔隙率分布 ( $\Phi$ -⑥) に対して、苫小牧 C C S - 1 の周辺坑井と苫小牧 C C S - 1 のコア分析結果から得られた以下の岩相別の孔隙率-浸透率関係式 (図 2.7-1) を用いて作成した。

$$\text{凝灰岩相} \quad : k = 0.00011968e^{32.183\phi}$$

$$\text{溶岩～凝灰角礫岩相} \quad : k = 0.001e^{55.185\phi}$$

ここで、 $k$  : 浸透率[mD]、 $\phi$  : 孔隙率[frac]である。

本属性モデルでは孔隙率は A I より求めたが、浸透率と A I の関係については考察されていないため、10,000mD を超える浸透率が導き出されることがある。そのため、上記関係式により求められた浸透率分布に対して、10,000mD 以上の浸透率を 10,000mD とする補正を行った。

以上の作業を 1 フローとして、岩相分布 (Facies-④)、孔隙率分布 ( $\Phi$ -⑥)、浸透率分布 ( $k$ -⑦) の作成を繰り返すことにより、岩相分布・孔隙率分布・浸透率分布について確率的に 50 個の具現モデルを作成した。参考例として、50 個の内から 4 つの具現モデルにおける孔隙率分布を図 2.7-9 に示す。

他の層準における属性値は、苫小牧 C C S - 1 の振老層から採取されたコアの分析値を一樣に分布させた。

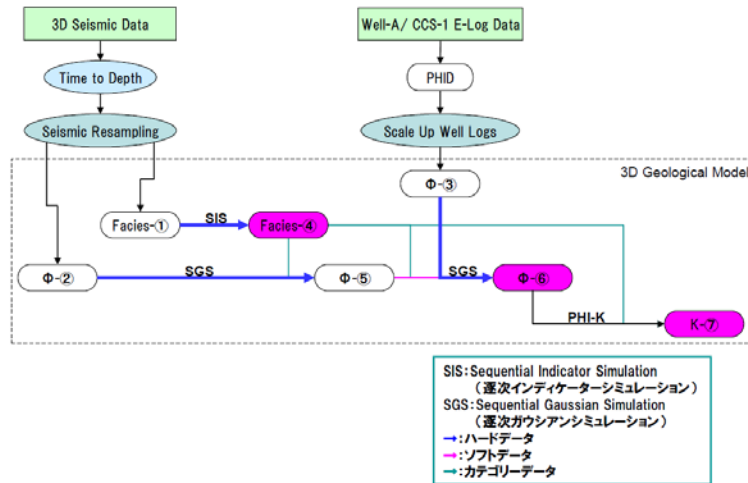


図 2.7-7 滝ノ上層 T1 部層内の属性値分布作成における作業フロー

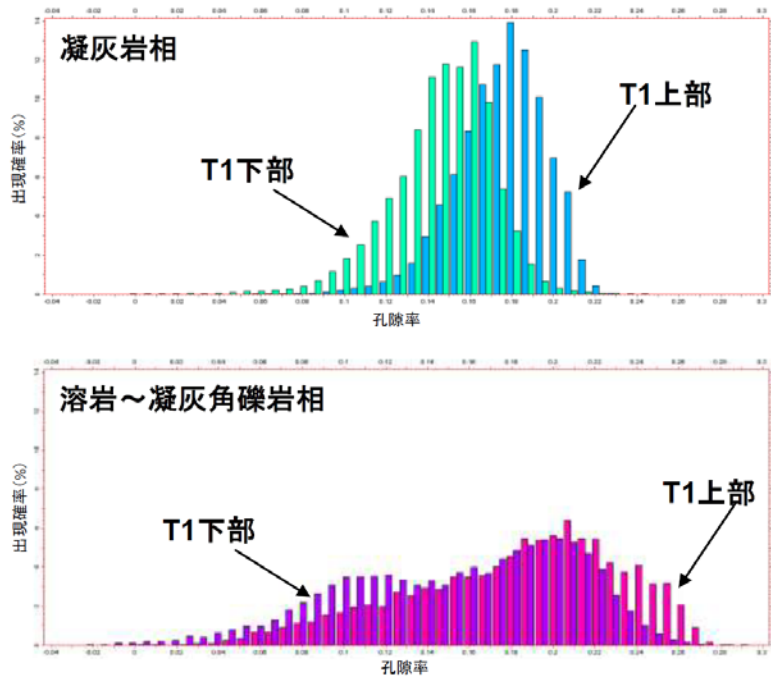


図 2.7-8 3D 探査範囲内で取得された孔隙率の出現確率

- : 滝ノ上層 T1 部層上部溶岩～凝灰角礫岩相、■: 滝ノ上層 T1 部層上部凝灰岩相、
- : 滝ノ上層 T1 部層下部溶岩～凝灰角礫岩相、■: 滝ノ上層 T1 部層下部凝灰岩相)

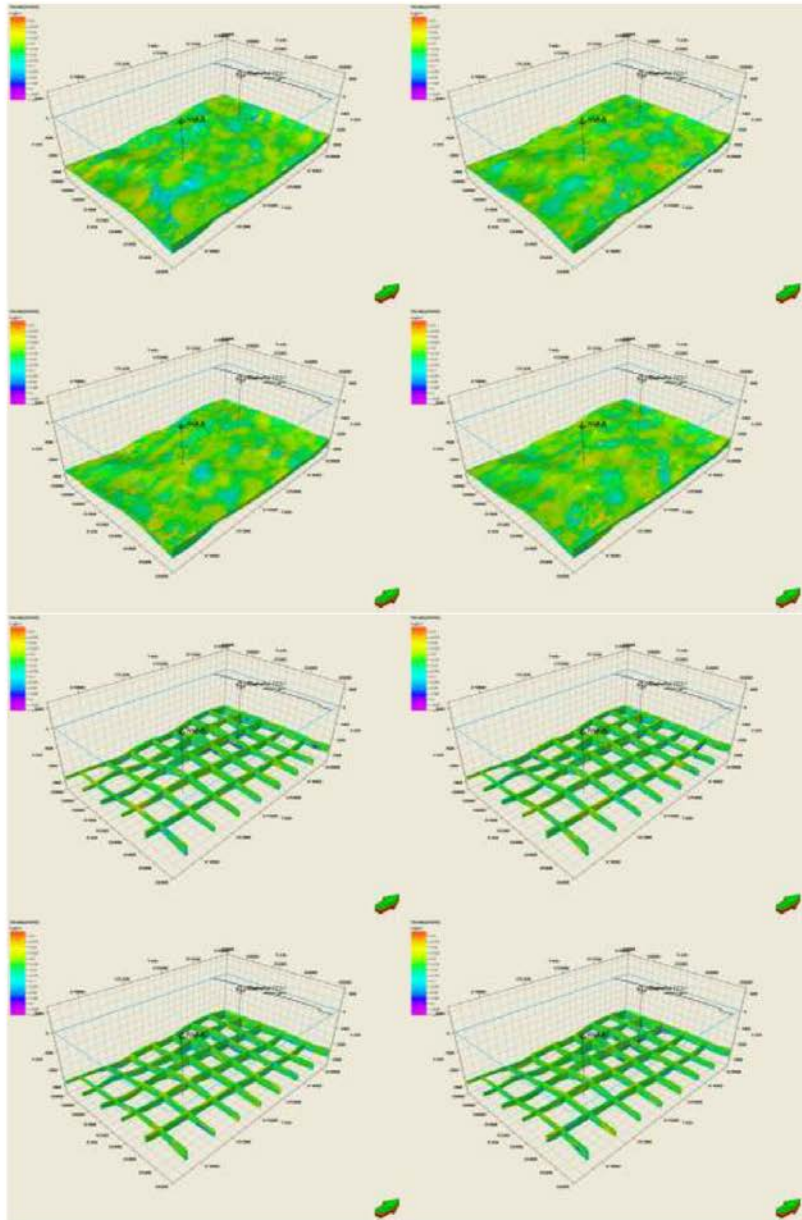


図 2.7-9 50 個の内 4 個の具現モデルの参考例：滝ノ上層 T 1 部層の孔隙率分布  
 (上図：全体表示、下図：格子状に断面を表示、図中の矢印は北を示す)



#### 2.7.4 CO<sub>2</sub>挙動予測シミュレーション

構築した50個の地質モデルを用いて、CO<sub>2</sub>挙動予測シミュレーションを行い、貯留層および遮蔽層の性能評価を実施した。シミュレーションでは、CO<sub>2</sub>を25万トン/年×3年間圧入し、圧入期間中の圧入性やその後の貯留CO<sub>2</sub>の挙動予測等を行った。CO<sub>2</sub>挙動予測シミュレーションの結果および評価については、第3章に示す。

#### 2.7.5 弾性波探査シミュレーション

CO<sub>2</sub>挙動予測シミュレーションで得られたCO<sub>2</sub>の拡がりの予測結果から、弾性波探査によるCO<sub>2</sub>賦存範囲の検出可能性等を検討することを目的として、弾性波探査シミュレーションを行った。シミュレーションでは、作成した二次元速度構造モデルを入力として差分法による二次元弾性波探査シミュレーション(P波)を実施し、合成弾性波記録を作成した。

CO<sub>2</sub>圧入前後の貯留層の変化による反射断面での応答を見るため、CO<sub>2</sub>累積圧入量12.5万トン、25万トン、50万トン、75万トンの各場合において、CO<sub>2</sub>圧入開始前の記録との差を求めた。これにより、12.5万トン圧入の時点でCO<sub>2</sub>の拡がりは認識可能であり(図2.7-10)、25万トン圧入の時点ではCO<sub>2</sub>の拡がりを明確に検知できることがわかった(図2.7-11)。これにより滝ノ上層T1部層においては、累積CO<sub>2</sub>圧入量20万トン、25万トン、30万トンという圧入過程で弾性波探査を繰り返し実施することにより、CO<sub>2</sub>の挙動(拡がっていく様子)が検知可能と判断した。

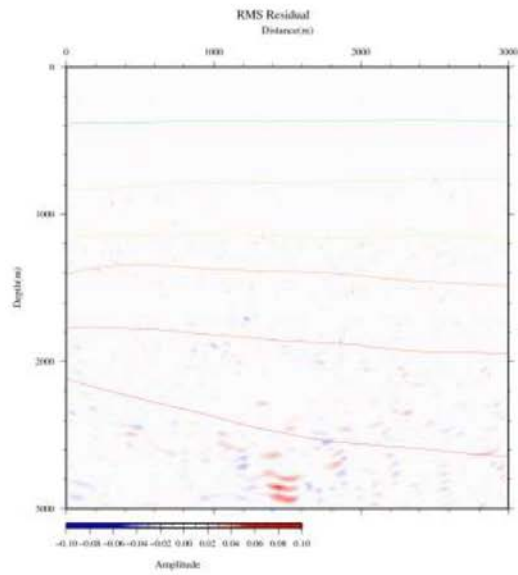


図 2.7-10 差分 (深度断面、滝ノ上層T1部層、CO<sub>2</sub>圧入 12.5 万吨圧入後)

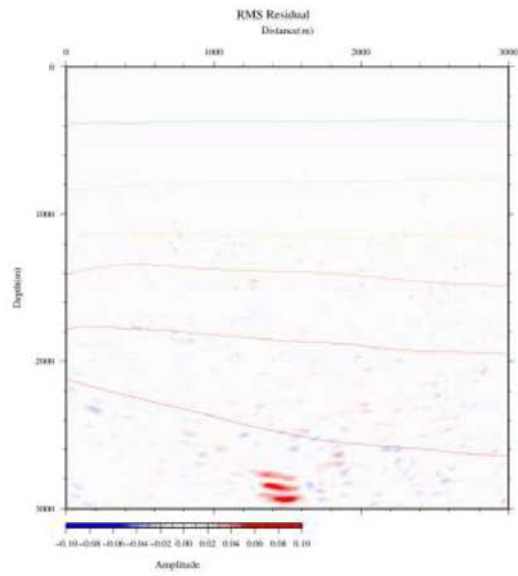


図 2.7-11 差分 (深度断面、滝ノ上層T1部層、CO<sub>2</sub>圧入 25 万吨圧入後)