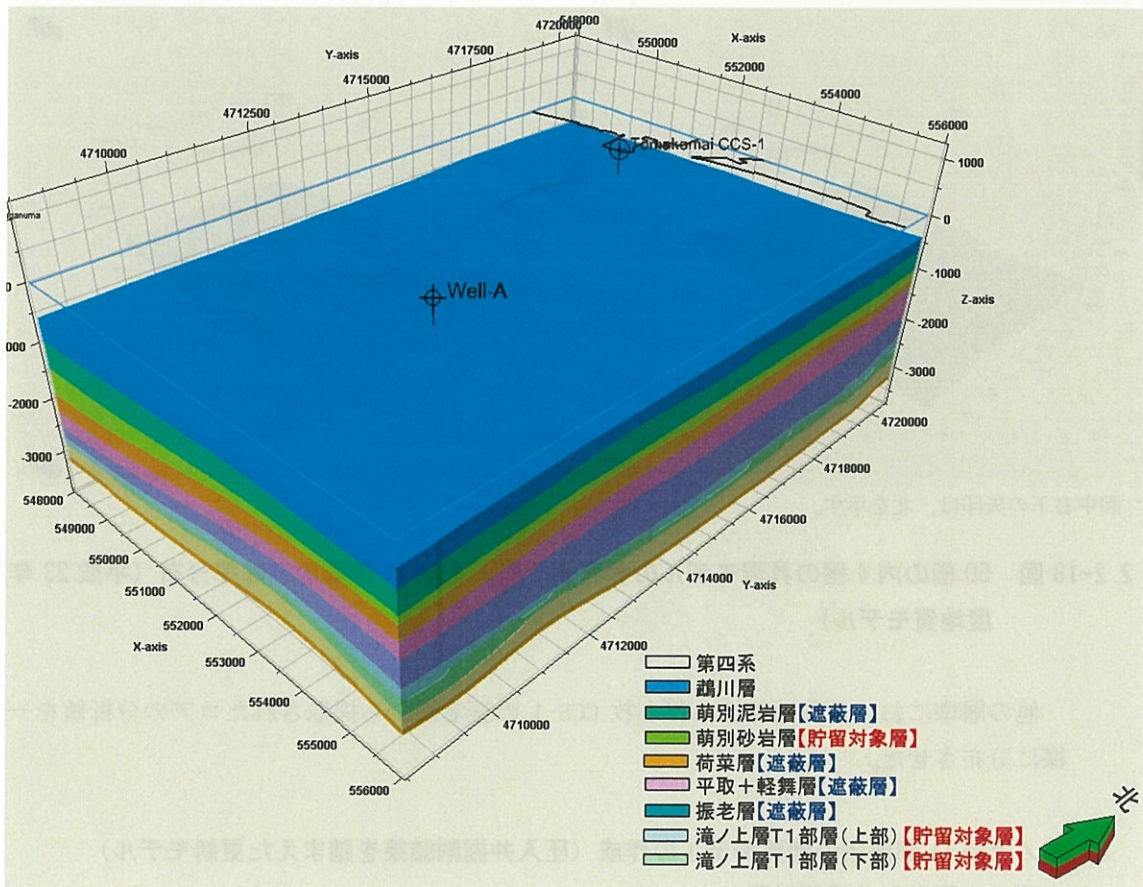


第 2.2-7 表 滝ノ上層構造モデルのグリidding

i 方向 (東西方向) セル数	100m	80 セル
j 方向 (南北方向) セル数	100m	120 セル
k 方向 (垂直) セル数		
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 T1 部層上部 :	15m ごとに分割	(k 方向セル番号 : 25~57)
滝ノ上層 T1 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、第 2.2-17 図に示す。滝ノ上層 T1 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。

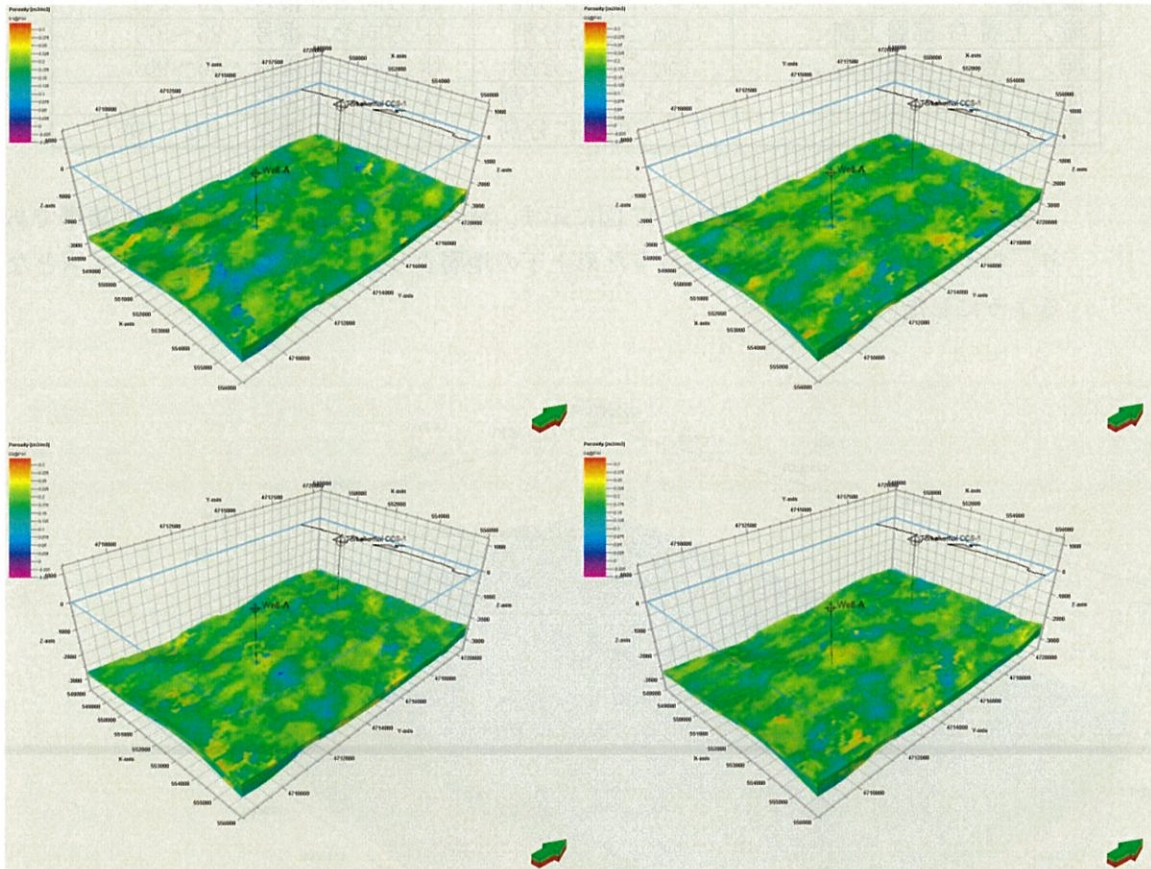


第 2.2-17 図 三次元地質モデル鳥瞰図

### c. 属性モデルの作成

作成した構造モデルの各セルに属性（岩相、孔隙率および浸透率）を与え、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、三次元弾性波探査データ、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 種類となる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、第 2.2-18 図に示す。



注：図中右下の矢印は、北を示す。

第 2.2-18 図 50 個の内 4 個の具現モデルの参考例：滝ノ上層 T1 部層の孔隙率分布（平成 23 年度地質モデル）

他の層準における属性値は、苫小牧 CCS-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。

### 1) 滝ノ上層 T1 部層用の地質モデルの作成（圧入井掘削結果を踏まえた更新モデル）

#### a. 滝ノ上層圧入井掘削結果

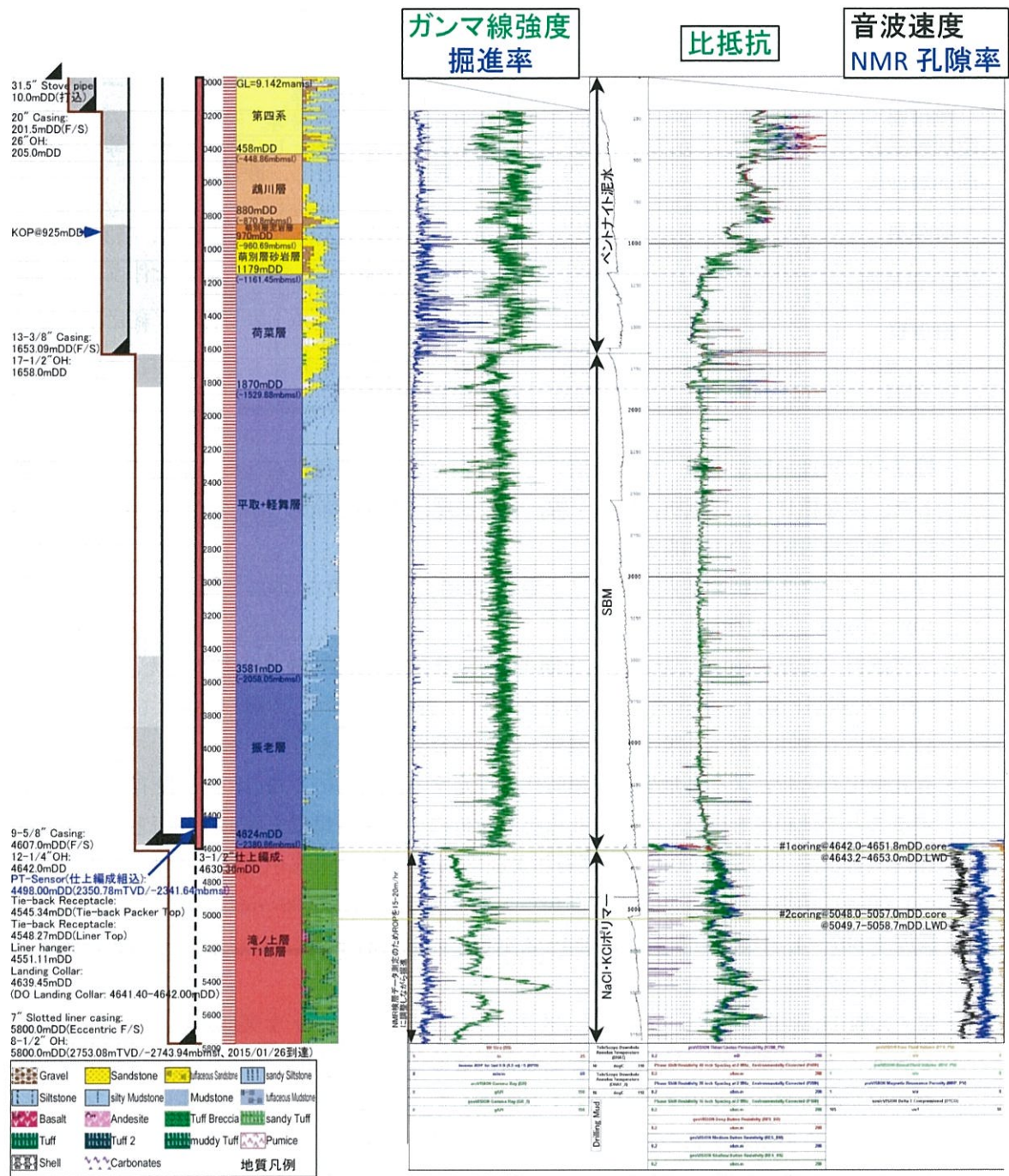
特定二酸化炭素ガスの圧入を実施する滝ノ上層圧入井は、深度 5,800m（垂直深度 2,753m）の傾斜井として掘削した。確認層序を、第 2.2-8 表に示す。



第 2. 2-8 表 滝ノ上層圧入井における確認層序と岩相

地層名	掘削深度 mMD (垂直深度 mVD)		岩 相
第四系	0	- 458	未固結砂礫, シルト等。
鶴川層	458	- 880	砂礫岩およびシルト岩等。
萌別層泥岩	880	- 970	シルト岩～泥岩主体とし, 砂岩, 礫岩等を伴う。
萌別層砂岩	970	- 1,179 (1,171)	砂岩, 礫岩を主体とし, 砂質シルト岩, 凝灰岩を伴う。
荷菜層	1,179 (1,171)	- 1,870 (1,539)	砂岩, シルト岩を主体とし, 細礫岩, 凝灰岩を伴う。
平取+軽舞層	1,870 (1,539)	- 3,581 (2,067)	シルト岩を主体とし, 泥岩, 砂岩を伴う。稀に凝灰質シルト岩～砂岩, マールを伴う。
振老層	3,581 (2,067)	- 4,624 (2,390)	泥岩を主体とし, シルト岩を伴う。稀に凝灰質シルト岩, 砂岩, マールを伴う。
滝ノ上層 T1 部層	4,624 (2,390)	- 5,800 (2,753)	凝灰岩の再堆積相を主体とし, 凝灰角礫岩を伴う。稀に泥岩を伴う。

- 掘進中に物理検層を実施 (LWD 検層) し, 岩相や物性を評価するための基礎データを取得した。主な種目は, 比抵抗, ガンマ線, 音波速度, 比抵抗画像, NMR である。第 2. 2-19 図に, 物理検層結果の事例を記す。
- カッティングス試料を地表から滝ノ上層 T1 部層までの深度 5,800m の間, 分析項目により 10m～50mVD ごとに採取した。
- コア試料 (直径約 10cm) を, 滝ノ上層 T1 部層で 2 回 (合計 18.8m) 採取した。
- これらの試料に関し, 微化石分析 (有孔虫分析), 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, 孔口半径分析等) を実施した。
- 有孔虫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 (古水深 500～1,000m), 荷菜層および平取+軽舞層は中部～上部半深海 (古水深 200～1,000m), 萌別層は中部半深海上部から上部半深海 (古水深 200～500m) との結論を得た。
- 深度 4,607～4,612m (垂直深度 2,384～2,485m) の振老層下部において, エクステンディッド・リークオフテストを実施した。
- 滝ノ上層 T1 部層を一括して仕上げ, ブラインによる圧入テストを実施した。ブラインによる圧入テストの前には, 坑内洗浄を主な目的として排泥を実施し, その後貯留層圧力の回復状況を解析するビルドアップテストを実施した。また, ブラインによる圧入テストの後に, 上昇した貯留層圧力の回復状況を解析するフォールオフテストを実施した。これらの結果から, 貯留層の浸透率を推定した。なお, この浸透率については, 垂直方向/水平方向の区別はない。



注) 貯留層区間以外では、比抵抗イメージ検層、音波検層、NMR 検層は実施していない。

## 第 2.2-19 図 滝ノ上層圧入井の物理検層結果事例

### b. 掘削時のラインによる圧入テスト等の貯留層に係るテスト結果とその見直し

#### i) 掘削時の貯留層に係るテスト

滝ノ上層圧入井掘削時に予定掘削深度に到達後、1 週間程度の排泥を実施し、低下した貯留層圧力の回復（上昇）の度合いから貯留層性状を解析するビルドアップテストを実施した。その結果、貯留層の浸透率は、 $5.25 \times 10^{-5}$  mD と解析された（第



2.2-9 表)。

第 2.2-9 表 滝ノ上層圧入井におけるビルドアップテストの解析結果

	解析結果	単位
kh (浸透率×貯留層厚)	0.030	mD・m
k (浸透率)	$5.25 \times 10^{-5}$	mD
スキんファクター	-1.72	—
ri (探査半径)	1	m

注) 貯留層層厚 (h) は、570m と仮定した。

その後、ブラインによる圧入テストを実施し、24 時間で 7kL のブラインを圧入した。なお、圧入時の貯留層上限の圧力は、遮蔽層の破壊圧の 90% を上限とした。

ブラインによる圧入テストの実施後、上昇した貯留層圧力の低下の度合いの解析から貯留層性状を解析するフォールオフテストを 12 時間の密閉時間により実施した。その結果、貯留層の浸透率は、 $1.48 \times 10^{-4}$  mD と解析された。

#### ii) 貯留層に係るテスト結果の見直し

地質モデルの修正にかかり、貯留層の浸透性を評価するために圧入井のテスト結果を見直した。フォールオフテストよりもビルドアップテストの方が解析に係る貯留層への圧力変化を与えた要因の時間 (ビルドアップテスト: 1 週間の排泥, フォールオフテスト: 24 時間の圧入) が長いと見做すため、貯留層の性状をより正確に表現していると考え、ビルドアップテストの結果を見直すこととした。

現場での解析では顕著な割れ目の寄与が認められない状況下においてスキんファクターをマイナスと解析していたが、スキんファクターを 0 として再解析した結果、第 2.2-10 表のような解析結果を得た。

第 2.2-10 表 滝ノ上層圧入井におけるビルドアップテストの解析結果の見直し

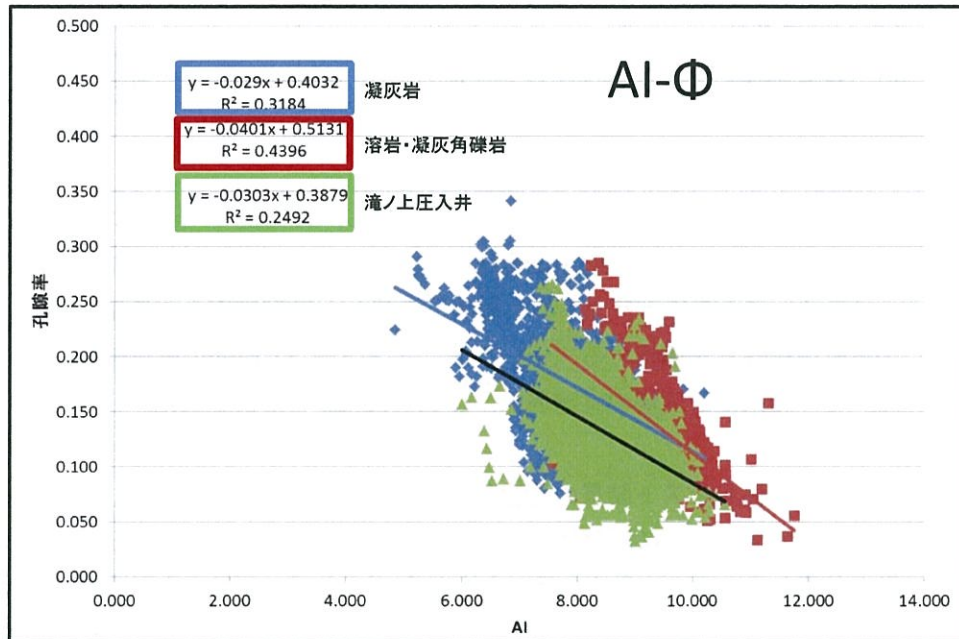
	解析結果	単位
kh (浸透率×貯留層厚)	0.28	mD・m
k (浸透率)	$7.7 \times 10^{-4}$	mD
スキんファクター	0	—
ri (探査半径)	2	m

注) 貯留層層厚 (h) は、圧入井の仕上げ深度区間 (垂直深度) である 363m と仮定した。

#### c. 岩相分布・性状分布推定の更新

滝ノ上層圧入井の掘削により確認した滝ノ上層の岩相は、凝灰岩主体 (凝灰岩: 溶岩・凝灰角礫岩 = 96:4) であった。したがって、地質モデルの岩相は凝灰岩として地質モデルを更新した。

上記ア)において地質モデルを作成する際に、調査井や周辺坑井から得られた孔隙率と三次元弾性波探査データから、坑井におけるAI値（Acoustic Impedance：音響インピーダンス：密度×弾性波速度）を解析し、坑井での孔隙率との関係をクロスプロットで作成した。滝ノ上層圧入井においてNMR検層により測定した孔隙率と、検層データから求めたAI値との対応関係をオーバーレイした（第2.2-20図）。



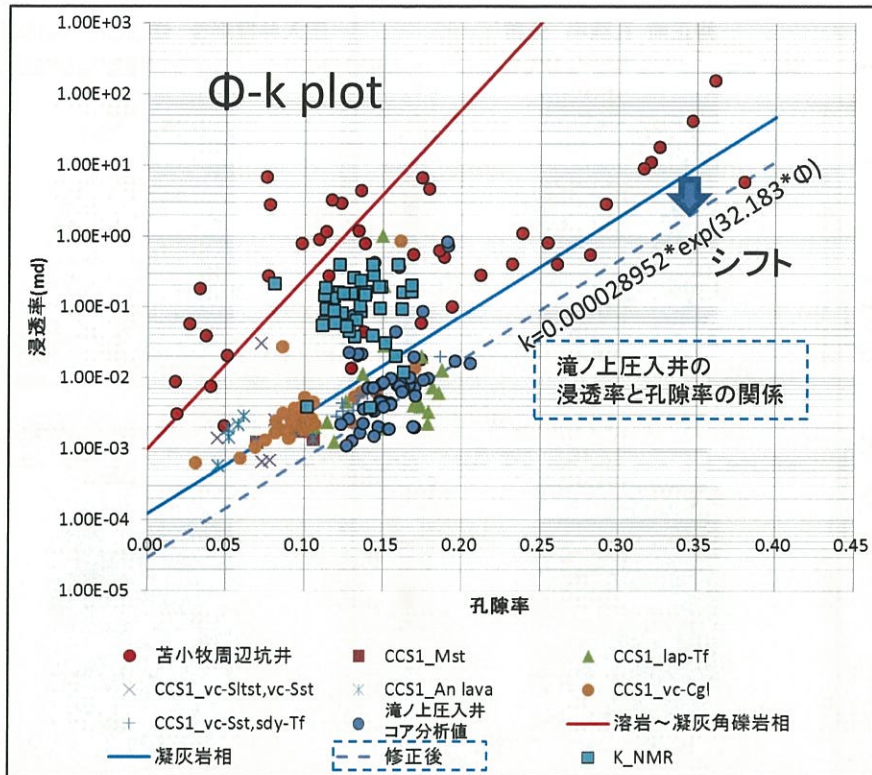
- 注：1. 赤は貯留岩として期待した溶岩・凝灰角礫岩、青は凝灰岩のAI値と孔隙率の関係を示す。緑は、滝ノ上層圧入井により解析したAI値とその深度に対応するNMR孔隙率のプロットを示す。  
 2. 修正モデルにおけるAI値と孔隙率の関係は、「孔隙率=0.0303×AI値+0.3879」を用いた。

第2.2-20図 AI値と孔隙率の関係

凝灰岩主体であった滝ノ上層圧入井の結果と、掘削前に想定した凝灰岩の回帰線の傾きはほぼ一致するものの切片が異なるので、滝ノ上層圧入井の結果を用いて地質モデルの修正を行うこととした。

滝ノ上層圧入井掘削前には、調査井および周辺坑井のコアデータを参照し孔隙率と浸透率の相関を考察した。滝ノ上層圧入井で採取したコアサンプルの分析結果およびNMR検層の結果解析された孔隙率と浸透率の関係を同一の図にプロットした（第2.2-21図）。



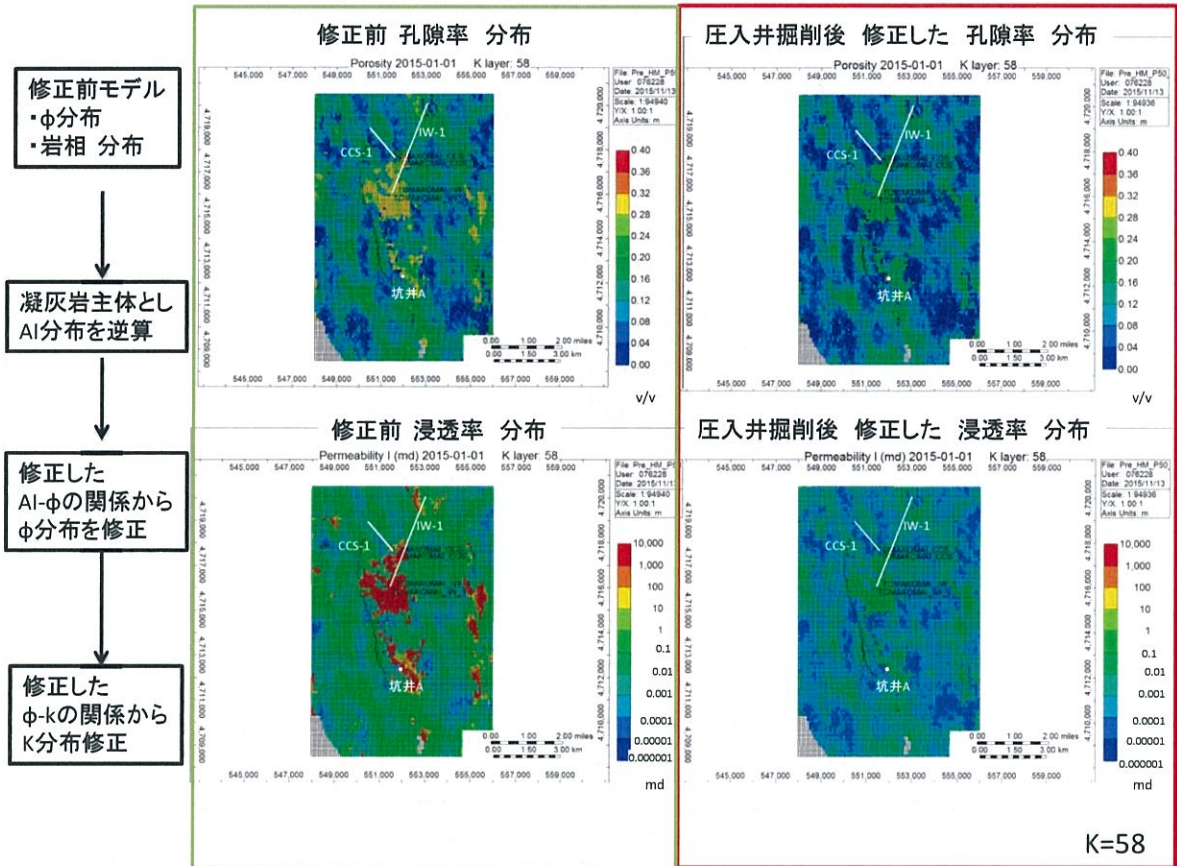


- 注：1. 苫小牧周辺坑井とは、民間会社が掘削した坑井 A。守秘義務があるため岩相の区分は公表できないが、回帰線を作成する際には使用した。K\_NMR は、滝ノ上層圧入井で取得した NMR 検層の結果から解析された浸透率と孔隙率のプロットであるが、浸透率が滝ノ上層圧入井のコア実測値よりも概して高い値を示す。これは、火山岩で NMR 検層結果から浸透率を算出する適切な式がないことが原因と考えられる。
2. 修正モデルにおける孔隙率と浸透率の関係は、「浸透率 =  $0.000028952 \times e^{32.1823 \times \text{孔隙率}}$ 」を用いた。

第 2.2-21 図 孔隙率と浸透率の関係

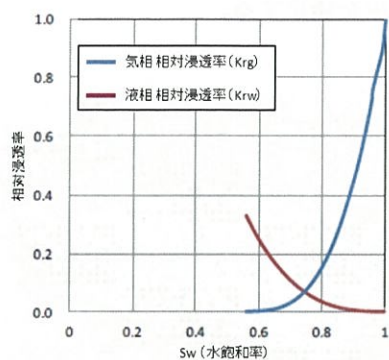
滝ノ上層圧入井の貯留層は掘削前に期待した溶岩・凝灰角礫岩がほとんどなく、96%が凝灰岩であったため、孔隙率と浸透率の相関は凝灰岩の相関式（青実線）に類似するものと仮定した。圧入井掘削前の推定では、凝灰岩の平均浸透率は、平均孔隙率 12.7%に対し  $7.2 \times 10^{-3}$  mD 程度と考えていたが、滝ノ上層圧入井のビルドアップテストの結果から、凝灰岩からなる滝ノ上層の浸透率は  $7.7 \times 10^{-4}$  mD と解析された。滝ノ上層圧入井で採取したコアの分析結果から得られた浸透率と孔隙率の関係を考慮し、圧入井掘削前に想定した凝灰岩の回帰線を下方にシフトさせ、滝ノ上層の凝灰岩における孔隙率と浸透率の相関式とした。

ここで求めた孔隙率と浸透率の関係と第 2.2-20 図で求めた AI 値と孔隙率の関係から、地質モデルを修正した（第 2.2-22 図）。なお、相対浸透率曲線および毛細管圧曲線については、修正前と同様のものを使用した（第 2.2-23 図）。三次元弾性波探査データから解析された AI 値に対応した形で、地質モデル中で細分された各セルにこれらの属性値を入力した。



第 2. 2-22 図 地質モデルにおける孔隙率および浸透率分布の更新



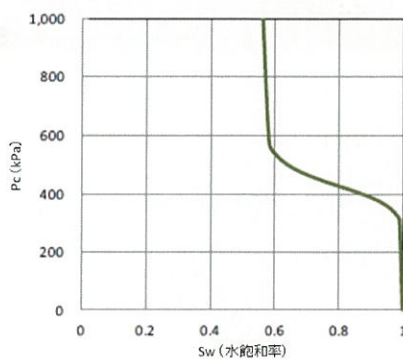


f) Viking Sandstone

CO <sub>2</sub> Saturation Fraction	Krg	Krw
0.044	0.0007	0.7156
0.066	0.0018	0.5970
0.088	0.0037	0.4927
0.111	0.0067	0.4018
0.133	0.0110	0.3232
0.155	0.0168	0.2559
0.177	0.0244	0.1990
0.199	0.0339	0.1516
0.221	0.0457	0.1127
0.243	0.0599	0.0814
0.265	0.0767	0.0567
0.287	0.0964	0.0379
0.309	0.1191	0.0240
0.331	0.1451	0.0142
0.354	0.1747	0.0077
0.376	0.2079	0.0038
0.398	0.2451	0.0016
0.420	0.2863	0.0006
0.442	0.3319	0.0000

← Bennion (2005) [1]による測定値

$$S_w = 1 - (\text{CO}_2 \text{ Saturation Fraction})$$



毛細管圧曲線の導出

- van Genuchten (1980) [2]による関数

$$P_c = P_o \times \left( [S^*]^{-\frac{1}{\lambda}} - 1 \right)^{(1-\lambda)} \quad S^* = \frac{S_w - S_{wir}}{1 - S_{wir}}$$

$P_c$ : 毛細管圧力 (kPa),  $P_o$ : 置換圧力 (kPa),  
 $\lambda$ : 係数 ( $\lambda = 0.91$ ),  $S_w$ : 水飽和率,  
 $S_{wir}$ : 残留水飽和率,  $S^*$ : 正規化された水飽和率

- Akaku (2008) [3]による経験式

$$\log P_o = -0.32931 \times \log k + 1.9259$$

- $k = 0.0072$  mD (平均浸透率) により,  $P_o = 428.1$  kPa.
- $S_{wir} = 0.558$

注:1. 上: 相対浸透率曲線, 下: 毛細管圧曲線。

- 経済産業省(2011), 「苫小牧地点における貯留層総合評価 補足説明資料」から引用。  
[http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/sangi/ccs/004\\_s02\\_00.pdf](http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/sangi/ccs/004_s02_00.pdf)
- 相対浸透率曲線および毛細管圧曲線については, 採取したコアの浸透性が低く, 新たな相対浸透率のデータを取得できなかったため, 圧入前の地質モデルと同様のものを使用した。

第 2. 2-23 図 修正モデルで用いた貯留層(凝灰岩)の相対浸透率曲線と毛細管圧曲線およびそれらの導出手法

#### d. 構造モデルの更新

構造モデルは, 滝ノ上層圧入井の掘削実績に合わせて深度データを更新した。

#### e. 属性モデルの更新

b. の手法により地質モデルの属性を更新した。更新した属性モデルの例を, 第 2. 2-24 図に示す。

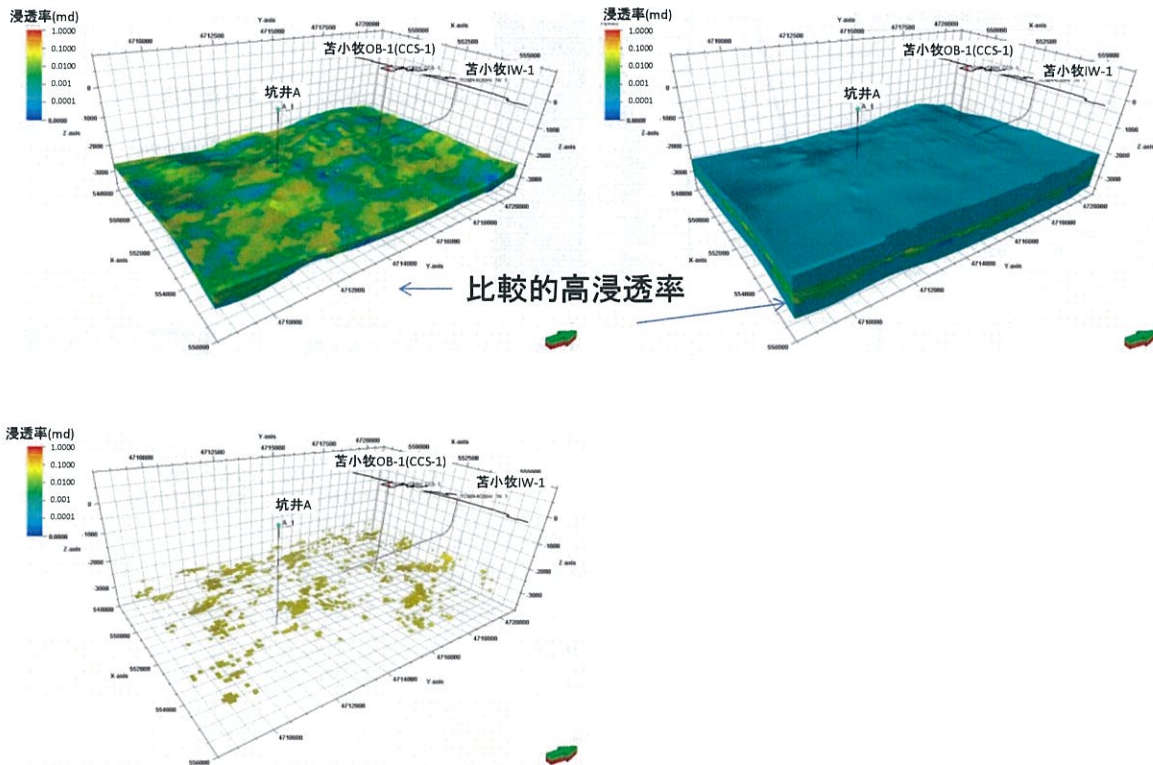
圧入井掘削前のモデルは地球統計学的に 50 種類のモデルを作成したが, 圧入井の掘削の結果, 圧入井の極近傍以外で岩相や属性を地球統計学的に推定することは困難と判断し, 1 ケース (P50 モデル。第 2. 2 節(3)④ア) c. 参照) の属性モデルを作成した。実際に CO<sub>2</sub> を圧入開始後には, 定期的なフォールオフテストの実施や繰り返し弾性波探査の実施を計

[1] Bennion, B. 2005. Relative permeability characteristics for supercritical CO<sub>2</sub> displacing water in a variety of potential sequestration zones in the Western Canada Sedimentary Basin. paper SPE 95547, p8

[2] van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of undersaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44, pp.892-898

[3] Akaku, K. 2008. Feasibility Study of Residual CO<sub>2</sub> Trapping. In “Nano-Mega Scale Flow Dynamics in Energy System”: Tohoku University Press, Sendai.

画しており、それらの結果を踏まえたうえで属性モデルを修正する。



注：浸透率>0.05mD でフィルタリング

第 2.2-24 図 更新した属性モデルの例（浸透率）

## ウ) 萌別層砂岩用の地質モデルの作成

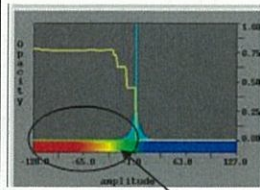
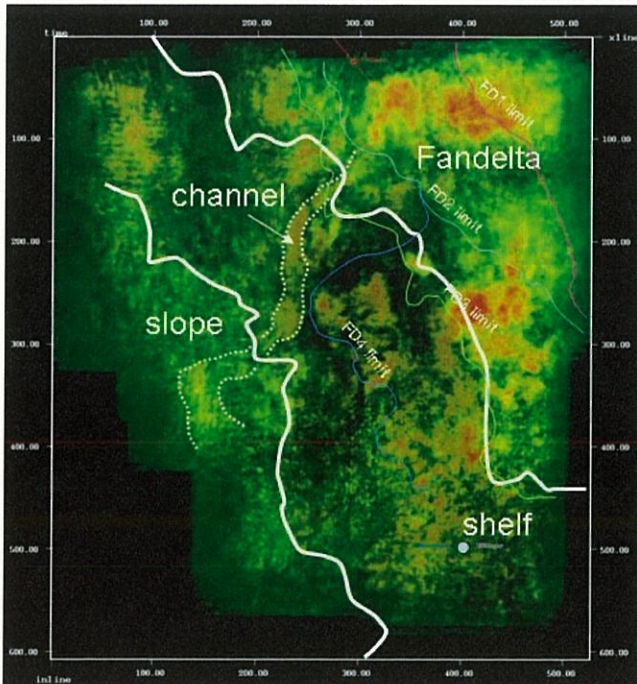
### a. 岩相分布・性状分布の推定

三次元弾性波探査の解析から、萌別層砂岩層は、沖合に前進しながら陸棚に堆積したファンデルタが発達していると推定される。ファンデルタは、砂岩を主体とした粗粒堆積物が発達する。緩やかな西傾斜を示し、層厚は約 100m である。北東部を中心に砂礫岩層の発達も示唆され、堆積物は主に北東側から供給されたと推定されている。

本層陸棚上の浅い海底で堆積したものと考えられる。砂岩の分布範囲を、苫小牧 CCS-1 および三次元弾性波探査データを用いて、堆積学的検討により推定した。

萌別層砂岩層は、シーケンス層序学上、高海水準期堆積体 (HST) に相当し、ファンデルタ、陸棚 (Shelf) および斜面 (Slope) の 3 つに分類でき (第 2.2-25 図)、砂岩の発達が最も期待できるのはファンデルタである。当該地域には少なくとも 5 つのファンデルタが北東から南西へ向かって前進して堆積したと解釈できる。堆積物の供給源は北東側と推定され、北東側程粗粒相が発達し、南西に向かって泥岩が多くなる傾向にあると考えられる。





この範囲のアンプリチュード値のみを表示。

マップの色凡例

黄色い線はopacity curveで、表示したいアンプリチュード値の不透明度を高めて可視化する。

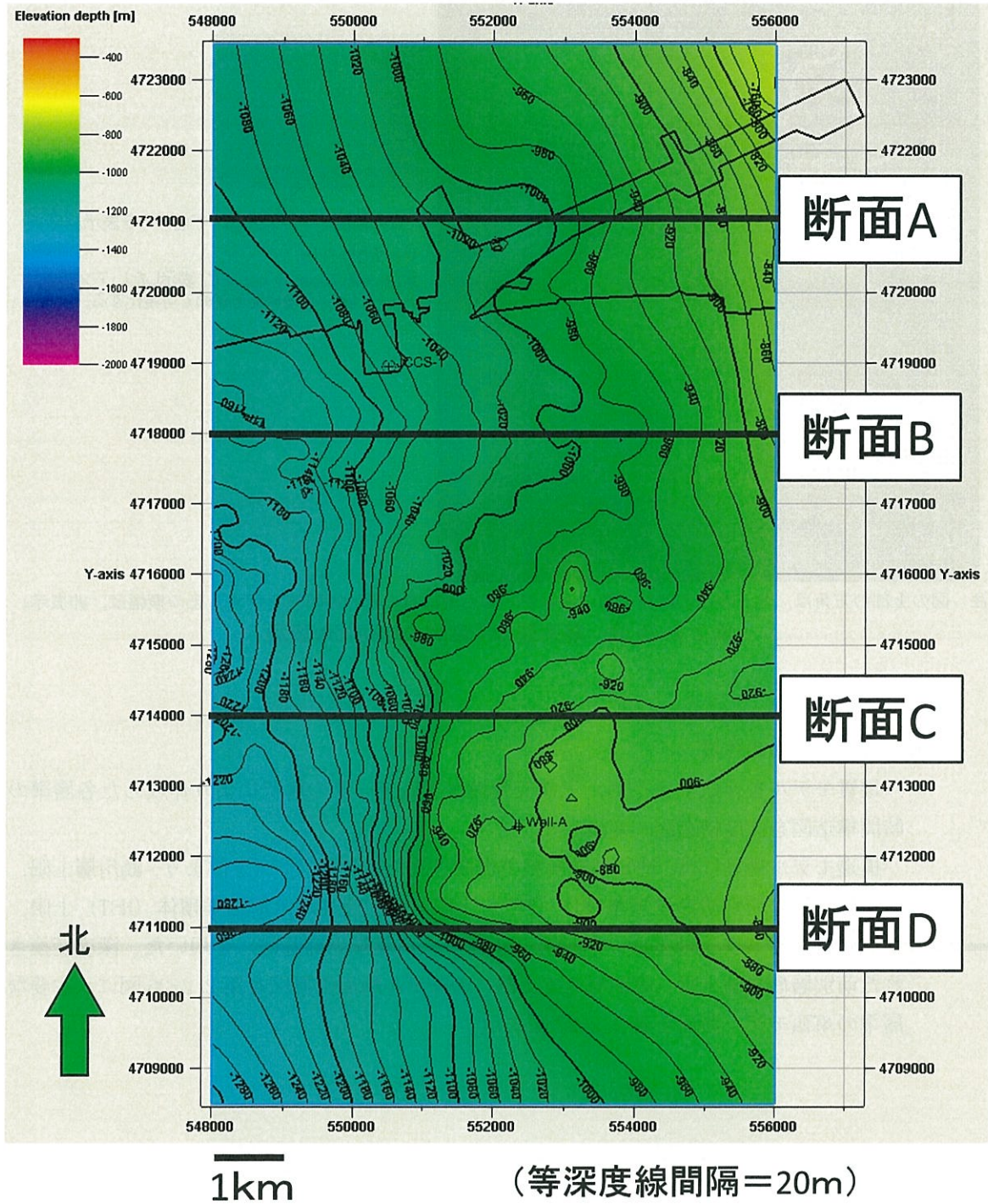
注：図の上部の方角は、北。暖色系は負の高い振幅値，寒色系は負の低い振幅値を示す。正の振幅は、非表示。

第 2. 2-25 図 萌別層 HST 区間の堆積相解釈図

#### b. 構造モデルの作成

地質モデルを作成するため、三次元弾性波探査データの解釈により作成した各層準の時間構造図を深度構造図へ変換した。

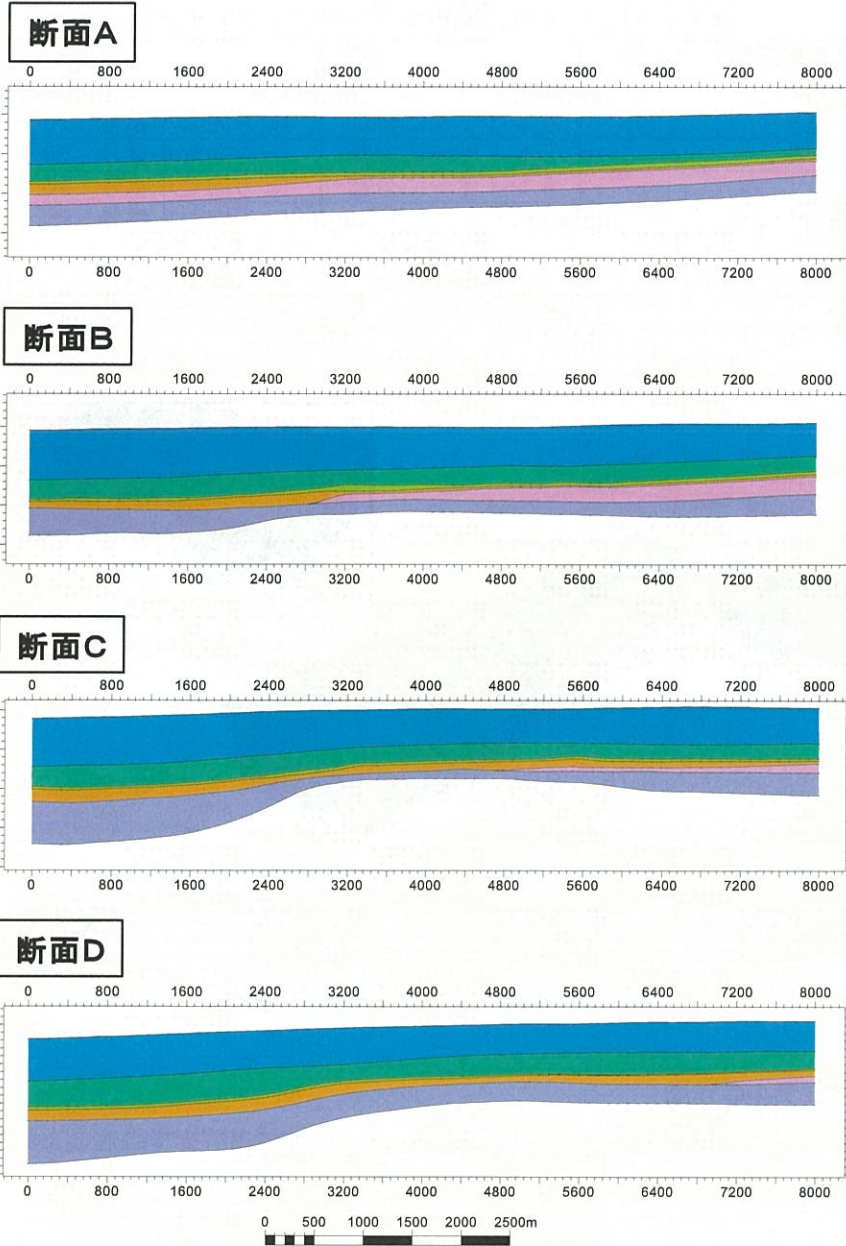
構造モデル構築には、地質構造解釈で作成されたホライゾン（上位より、鶴川層上限、萌別層上限、萌別層海進期堆積体（TST）上限、萌別層高海水準期堆積体（HST）上限、萌別層 HST デルタ上部基底、萌別層 HST 基底、荷菜層上部基底）を用いた。深度変換された萌別層砂岩層上限（萌別層 HST 上限）のモデル断面位置図を第 2. 2-26 図に、主要な層準の東西モデル断面を第 2. 2-27 図に示す。



注：図中の X 軸および Y 軸は、世界測地系 WGS84 の UTM54 系の座標。

第 2.2-26 図 モデル断面位置図（構造図は萌別層砂岩層（HST）上限）





- 第四系
- 鷓川層
- 萌別層上部【遮蔽層】
- 萌別層上部TST【遮蔽層】
- 萌別層下部HST【貯留対象層】
- 萌別層下部HSTデルタ下部【貯留対象層】
- 荷菜層

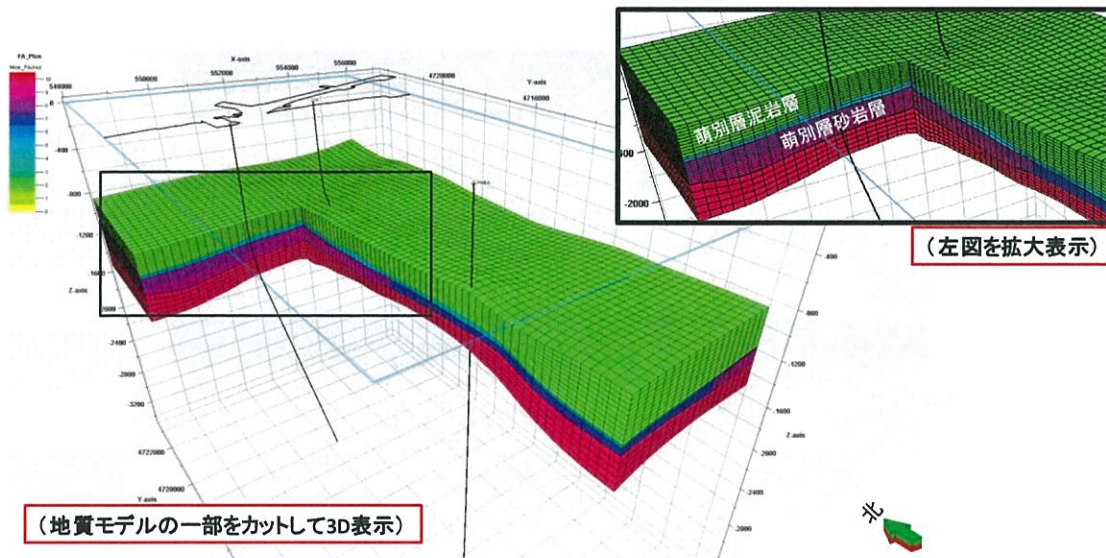
注：上から順に，断面A～D。スケールは，m。

第 2.2-27 図 モデル断面

各層準内に第 2.2-11 表のようにグリッドセルを作成した。第 2.2-28 図に，グリッドセルの鳥瞰図を示す。

第 2.2-11 表 萌別層構造モデルのグリidding

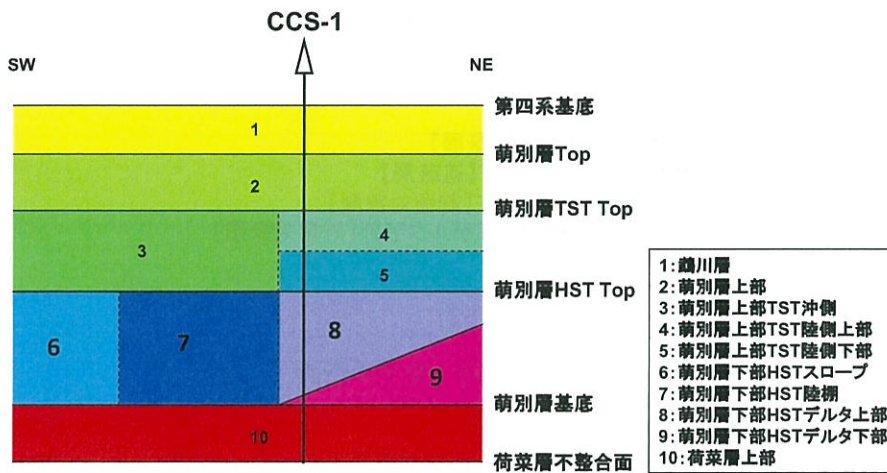
i 方向 (東西方向) セル数	200m	40 セル
荷菜層上部 :	3 レイヤーに分割	(k 方向セル番号 : 7~9)
荷菜層下部 :	5 レイヤーに分割	(k 方向セル番号 : 10~14)
平取+軽舞層 :	5 レイヤーに分割	(k 方向セル番号 : 15~19)
振老層 :	5 レイヤーに分割	(k 方向セル番号 : 20~24)
滝ノ上層 T1 部層上部 :	15m ごとに分割	(k 方向セル番号 : 25~57)
滝ノ上層 T1 部層下部 :	15m ごとに分割	(k 方向セル番号 : 58~96)
滝ノ上層下部 :	5 レイヤーに分割	(k 方向セル番号 : 97~101)
南長沼層	5 レイヤーに分割	(k 方向セル番号 : 102~106)



第 2.2-28 図 グリッドセルの鳥瞰図

c. 属性モデルの作成

構造モデルの各セルに属性を与えた。属性は、堆積相解析で設定した堆積相区分として与えた。属性モデルに与えた堆積相区分概念を、第 2.2-29 図に示す。



第 2.2-29 図 堆積相区分概念図



萌別層 HST は、堆積環境により西よりスロープ (6)、陸棚 (7)、デルタ上部 (8)、デルタ下部 (9) の 4 つに区分される。また、萌別層 TST は、沖側 (3: 泥岩層)、陸側上部 (4: 砂岩層) ならびに陸側下部 (5: 泥岩層) に区分した。

#### ④ CO<sub>2</sub> 挙動予測シミュレーション

作成した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実施し、CO<sub>2</sub> 圧入時の圧力挙動のほか、貯留層内での移動・到達範囲を推定した。CO<sub>2</sub> の圧入レートは 25 万トン/年で、3 年間の連続圧入 (計 75 万トン圧入) とした<sup>注1</sup>。

なお、後述のイ) で示す滝ノ上層圧入井の掘削結果を踏まえた予測では、圧入レートを坑底圧の規定上限圧力で制限するため、圧入は 1,500 トン/年程度の圧入レートで開始するが、圧入開始直後に坑底圧の規定上限圧力に到達するため圧入レートを下げ、その後概ね 300 トン/年程度の圧入レートで推移する。3 年間の累計圧入量は、1,000 トン程度となる。

### 7) 滝ノ上層 T1 部層における CO<sub>2</sub> 挙動予測 (圧入井掘削前)

#### a. 概要

Computer Modelling Group Ltd. 社の GEM (ver2010.12) を使用し、シミュレーションで考慮した貯留メカニズムは、以下の 3 種類である

- ・ 泥岩の毛細管圧力と低浸透性による物理的トラッピング
- ・ 残留ガス飽和率とガス相対浸透率のヒステリシスによる残留 CO<sub>2</sub> トラッピング
- ・ CO<sub>2</sub> の地層水への溶解による溶解トラッピング

圧入位置については、陸上から掘削可能な圧入井の仕様に応じて設定した。圧入井における滝ノ上層 T1 部層の全区間に対して CO<sub>2</sub> を圧入した。最終坑径を 8.5 インチ (半径 0.10795m)、チュービング径を 3.5 インチ (内半径 0.038m) とした。

圧入時に許容される最大坑底圧力については、苫小牧 CCS-1 の振老層下部でのリークオフ圧力の結果から、地層破壊圧力の 90% (41,853kPa) とした<sup>注2</sup>。

#### b. パラメータ

シミュレーションパラメータは、苫小牧 CCS-1 のデータ (圧入テスト、コア分析値、物理検層測定値等) および文献値により、第 2.2-12 表に示す値を用いた。

注1 平成 23 年度シミュレーションは 25 万トン/年の圧入レート、平成 24 年度シミュレーションは 20 万トン/年の圧入レートであるのは、CO<sub>2</sub> の供給量の見直しにより計画変更したことによる。また、保守・点検の都合、モニタリング計画との関連、貯留層の状況等により、一時的に、あるいは長期的に一方の貯留層だけに圧入するケースも想定されることから、それぞれに圧入する最大値として、圧入レートを設定している。

注2 苫小牧 CCS-1 の遮蔽層におけるリークオフテストで確認したリークオフ圧力は、その深度 (垂直深度 2,352m) で、45.3MPa (461.6kg/cm<sup>2</sup>) であった。これは等価泥水比重で 1.96g/cm<sup>3</sup> となる。この等価泥水比重から、滝ノ上層圧入井の遮蔽層深度 (垂直深度 2,418m) におけるリークオフ圧力を求め (473.9kg/cm<sup>2</sup>)、その 90% の値 (426.5kg/cm<sup>2</sup>=41,853kPa) をシミュレーション上の地層破壊圧と仮定した。