

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)
荷葉層上部 :	3 レイヤーに分割	(k 方向セル番号 : 7~9)
荷葉層下部 :	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。

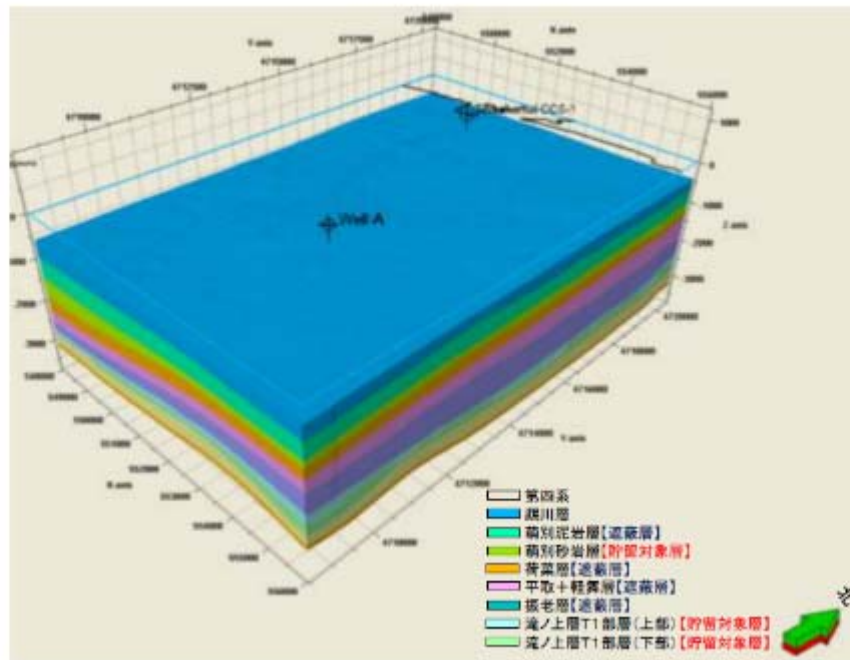


図 2.7-6 三次元地質モデル鳥瞰図

(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: SIS) 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: SGS) 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 SGS にて作成した。なお、本 SGS 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 CCS-1 の周辺坑井と苫小牧 CCS-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。

$$\text{凝灰岩相} \quad : k = 0.00011968e^{22.183\phi}$$

$$\text{溶岩} \sim \text{凝灰角礫岩相} \quad : k = 0.001e^{55.186\phi}$$

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 AI より求めたが、浸透率と AI 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 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。

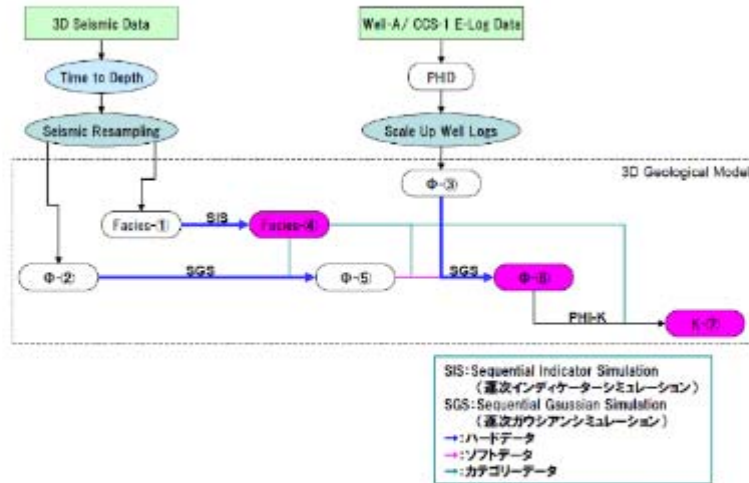


図 2.7-7 滝ノ上層 T1 部層内の属性値分布作成における作業フロー

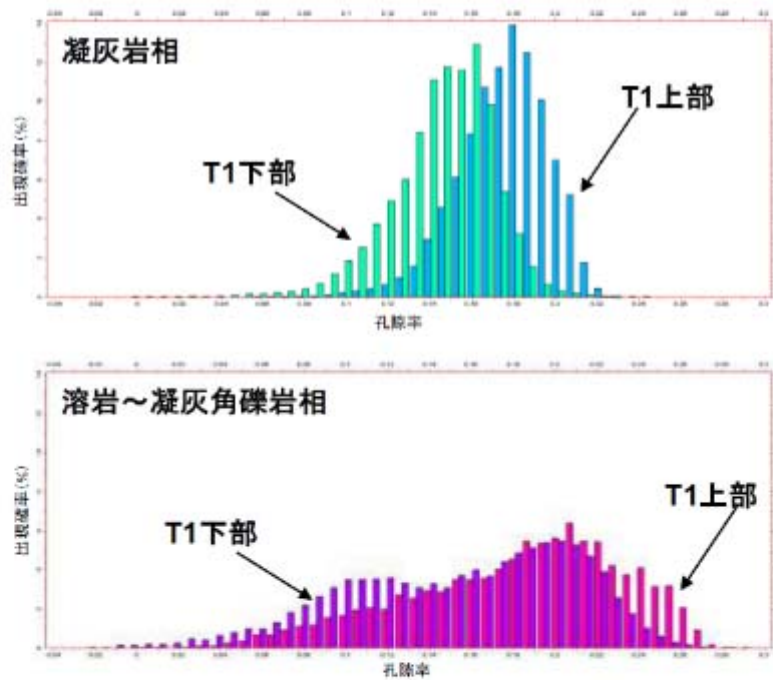


図 2.7-8 3D 探査範囲内で取得された孔隙率の出現確率

- : 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)

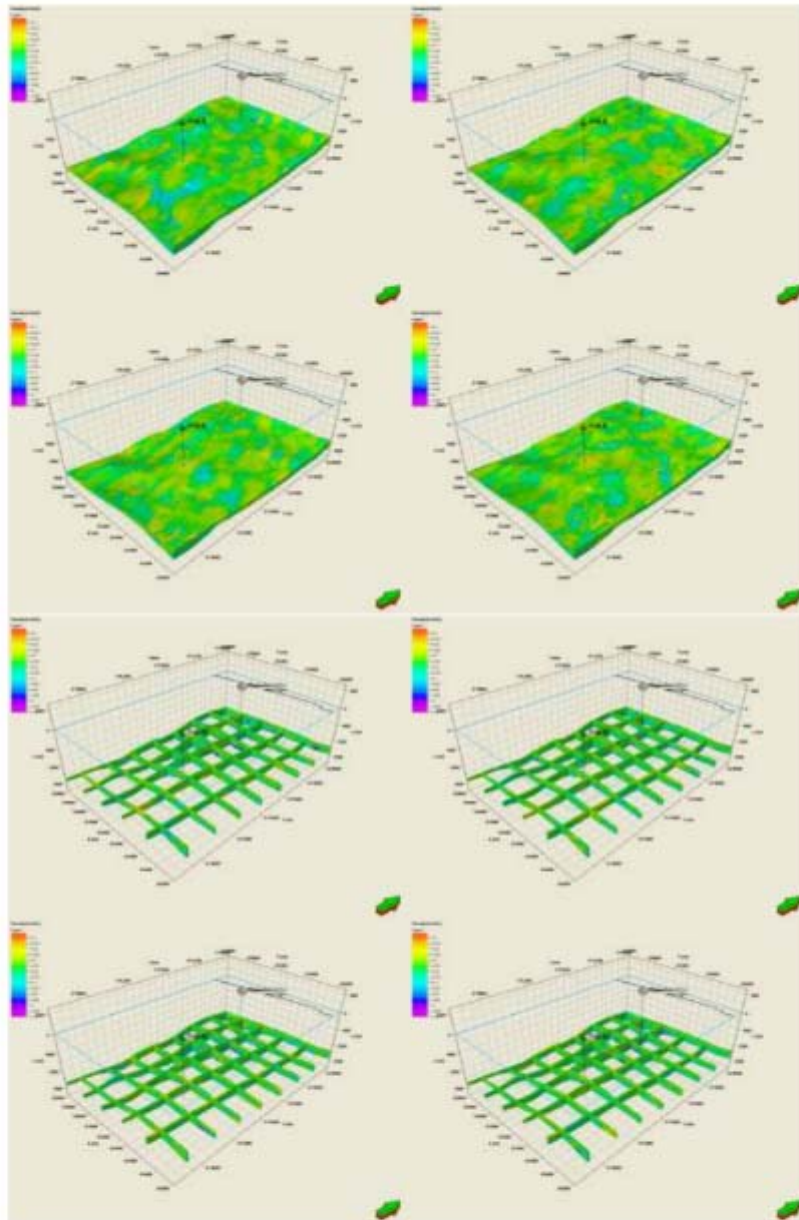


図 2.7-9 50 個の内 4 個の具現モデルの参考例：滝ノ上層 T1 部層の孔隙率分布  
 (上図：全体表示、下図：格子状に断面を表示、図中の矢印は北を示す)



#### 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、貯留層および蓋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。

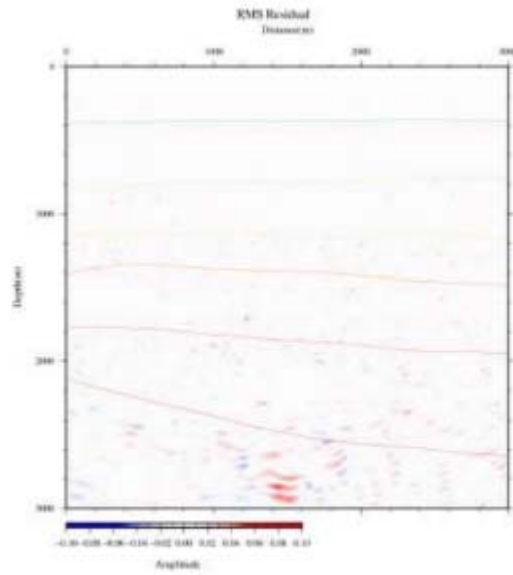


図 2.7-10 差分 (深度断面、滝ノ上層T1部層、CO<sub>2</sub>圧入12.5万トン圧入後)

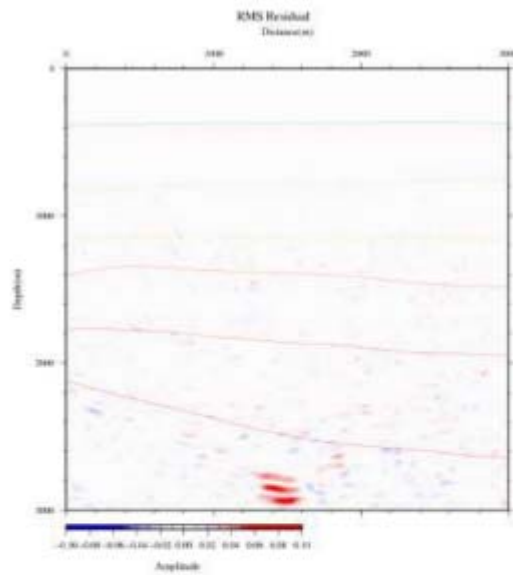


図 2.7-11 差分 (深度断面、滝ノ上層T1部層、CO<sub>2</sub>圧入25万トン圧入後)

## 2.8 萌別層解析結果

萌別層はシルト岩～泥岩からなる上部（萌別層泥岩層）と主に砂岩からなる下部（萌別層砂岩層）に分けられる。萌別層砂岩層を貯留層とし、萌別層泥岩層を遮蔽層と想定した。

### 2.8.1 貯留層

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からなり、砂岩を主体とし、砂礫岩、シルト岩を伴う。緩やかな西傾斜を示し、層厚は約100mである。三次元弾性波探査では、萌別層下部に連続の良い強反射が認められることから砂礫岩層の発達を示唆される。この強反射は検討地域の北東部で顕著であり、南および西に向かって減衰するため、砂礫岩層は北東部を中心に発達していると解釈される。

本層準は比較的浅い海底で堆積した砂岩であると考えられることから、砂岩の分布範囲については注意が必要である。そこで、苫小牧CCS-1および3Dデータを用いて、堆積学的検討を行った。その結果は以下の通りである。

萌別層砂岩層は、シーケンス層序学でいう高海水準期地積体（HST）に相当し、ファンデルタ・陸棚（Shelf）・斜面（Slope）の3つに分類できる（図2.8-1）。このうち砂岩の発達が最も期待できるのがファンデルタで、陸棚、斜面と砂岩の割合が少なくなっていく。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した。ファンデルタは、堆積物供給源である北東側がより砂岩が多く、南西に向かって泥岩が多くなる傾向にあると推定した。実地調査から得られた貯留層性状の概要を表2.8-1にまとめる。



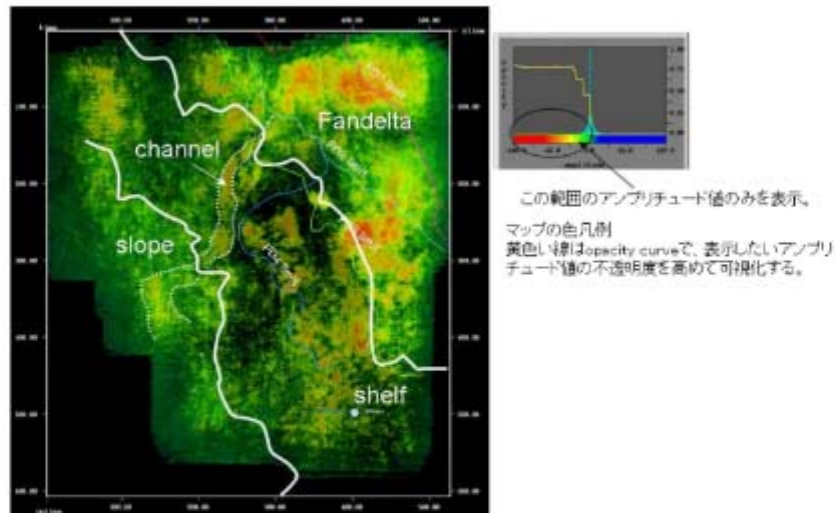


図 2.8-1 萌別層HST区間の堆積相解釈図（図の上部の方角は北）  
 （暖色系は負の高い振幅値、寒色系は負の低い振幅値を示す。正の振幅は非表示。）

表 2.8-1 萌別層砂岩層 貯留層性状一覧

項目	
対象深度	約1,100～1,200m(垂直深度)
層厚	約100m
岩相	砂岩(硬質砂岩、シルト岩を伴うファンデルタ堆積物)
孔隙率	25～40%(苫小牧CCS-1コア試験:封圧下) 20～40%(物理検層解析結果)
浸透率	9～25mD(苫小牧CCS-1圧入テスト解析結果) 1～1,000mD(苫小牧CCS-2コア試験:封圧下、空気) 1～120mD(物理検層解析結果)
水圧入テスト (苫小牧CCS-1)	最大1,200kl/日(掘削深度1,077～1,217mのうち57.5m)

### 2.8.2 遮蔽層

萌別層泥岩層は、層厚約 200m のシルト岩～泥岩からなる。微化石分析による堆積環境解析により、水深数 10～数 100m の比較的浅い海底で安定的に堆積したと推定される。周辺坑井間で対比できることから、貯留対象領域を覆う領域で十分な厚さがあり(図 2.8-2)、コア試験結果からは水浸透率が  $0.8 \times 10^{-3} \sim 1.7 \times 10^{-3} \text{mD}$ 、スレシヨルド圧力が 0.75MPa、

1.65MPa、1.67MPaの結果が得られている。

また、調査井における萌別層泥岩層下部でのリークオフテスト結果から、等価泥水比重で1.50の強度を確認している。

以上の調査、分析結果から、萌別層泥岩層は良好な遮蔽性能を有すると考えられる。実地調査から得られた遮蔽層性状の概要を表2.8-2にまとめる。

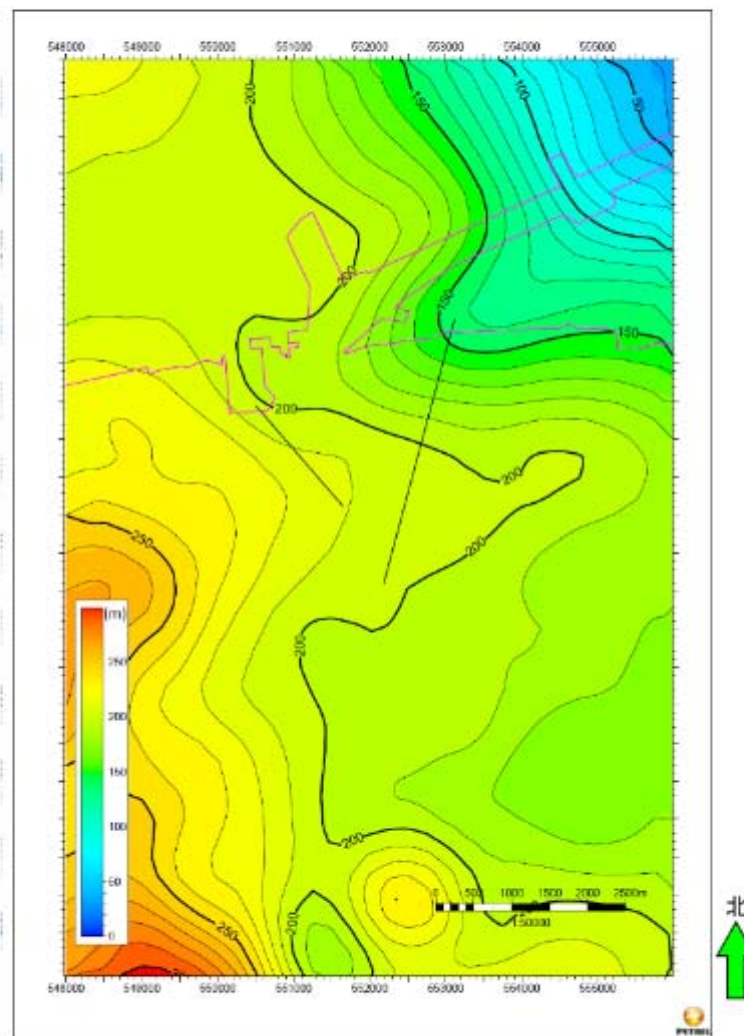


図 2.8-2 萌別層泥岩層の等層厚線図（等層厚線間隔：10m）

表 2.8-2 萌別層泥岩層 遮蔽性状一覧

項目	
層序	萌別層泥岩層(萌別層上部)
岩相	シルト岩～泥岩
層厚	約200m
孔隙率	32.4～37.2%(苫小牧CCS-2コア試験:封圧下)
浸透率	$0.80 \times 10^{-3} \sim 1.73 \times 10^{-3} \text{mD}$ (苫小牧CCS-2コア試験:水浸透率)
スレシヨルド圧力	0.75, 1.65, 1.67MPa(苫小牧CCS-2コア試験:CO <sub>2</sub> -水系段階昇圧法)
リークオフ圧力 (苫小牧CCS-2 リークオフテスト)	14.6MPa(等価泥水比重:1.50) (萌別層泥岩層(苫小牧CCS-2)991mVD(垂直深度))

### 2.8.3 地質モデル構築

#### (1) 構造モデル構築

シミュレーションを実施する際に必要な地質モデルを構築するため、苫小牧3Dデータで解釈された各層準の時間構造を深度構造へ変換した。

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、鷗川層上限、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、荷葉層上部基底)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図2.8-3、主要な層準の東西モデル断面を図2.8-4に各々示す。

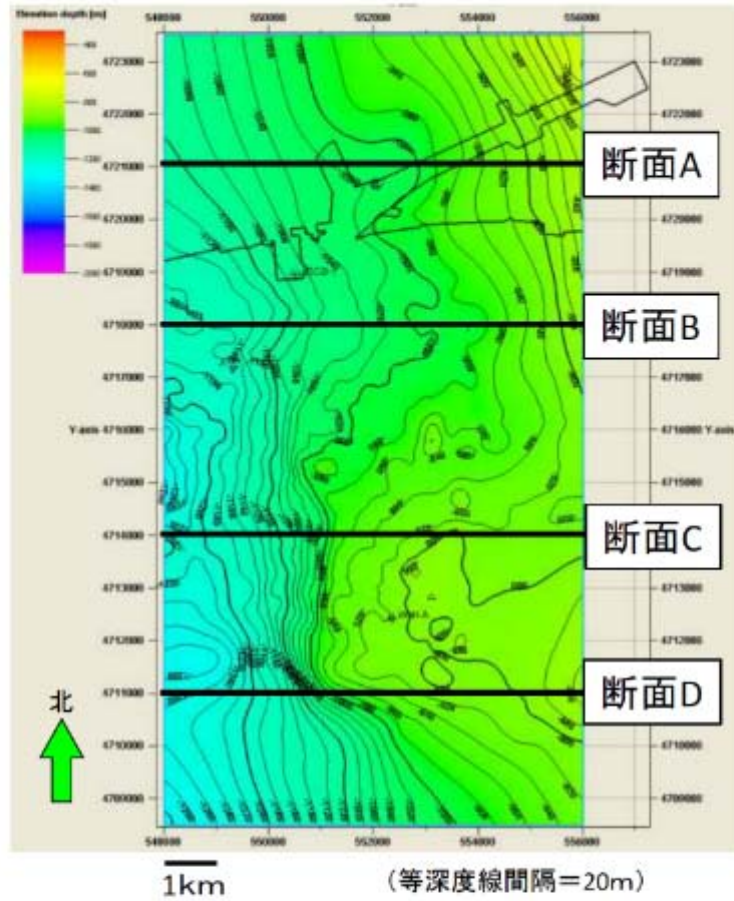


図 2.8-3 モデル断面位置図 (構造図は萌別層砂岩相 (H S T) 上限)  
 (図中の X 軸および Y 軸は世界測地系 WGS84 の UTM54 系の座標)

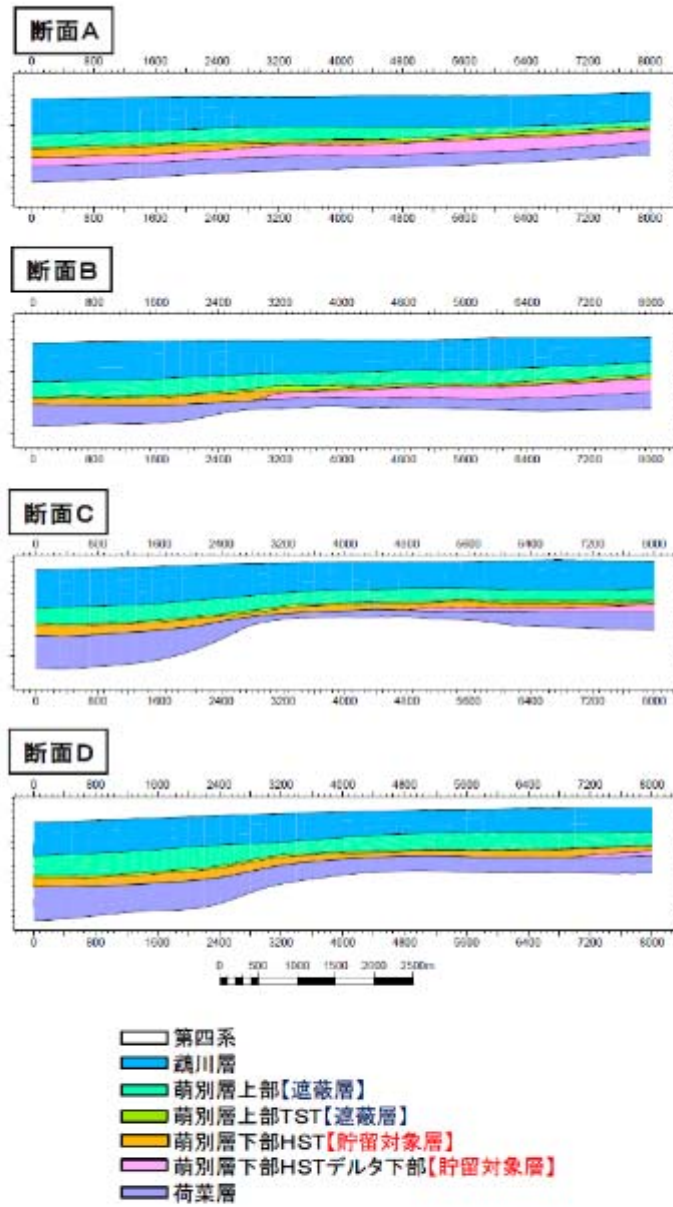


図 2.8-4 モデル断面図（上から順に断面 A~D、スケールは m）



CO<sub>2</sub>挙動予測シミュレーションを行うため、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

X方向 (i) およびY方向 (j) : 200m 8km×15km

(i 方向セル数: 40 セル、j 方向セル数: 75 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)

萌別層上部 : 10 レイヤーに分割 (k 方向セル番号: 4~13)

萌別層TST : 2 レイヤーに分割 (k 方向セル番号: 14~15)

萌別層HST上部 : 15m ごとに分割 (k 方向セル番号: 16~25)

萌別層HST下部 : 15m ごとに分割 (k 方向セル番号: 26~38)

荷葉層 : 5 レイヤーに分割 (k 方向セル番号: 39~43)

主たる遮蔽層である萌別層上部は、CO<sub>2</sub>貯留対象領域では十分な厚さがあり良好な遮蔽性能が期待できる。ただし、北東部の陸域では遮蔽層が徐々に薄化していく傾向が確認されていることから、北東部陸域においては薄い遮蔽層を設定した。

萌別層TSTについては便宜上遮蔽層と呼んでいるが、苫小牧CCS-1では上部に砂岩層、下部に泥岩層が認められたため、その両層を表現するためにレイヤー数を2とした。

萌別層HSTは、CO<sub>2</sub>圧入対象層準の萌別層砂岩相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な垂直方向のセルサイズとなるようにした。なお堆積物の堆積方向を加味して、萌別層HST上部はFollow Baseと呼ばれる手法で、萌別層HST下部はFollow Topと呼ばれる手法でレイヤーを作成した(図2.8-5)。



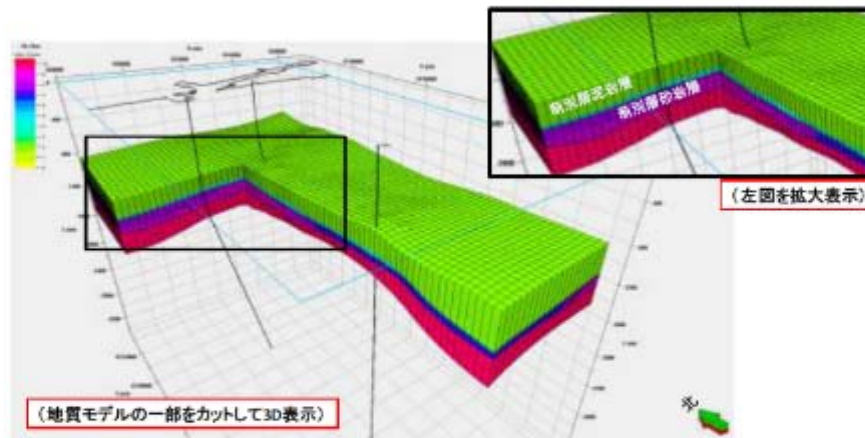


図 2.8-5 グリッドモデル概観

(2) 属性モデル構築

構築した構造モデルを基に、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図 2.8-6 に示す。前別層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。

前別層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。

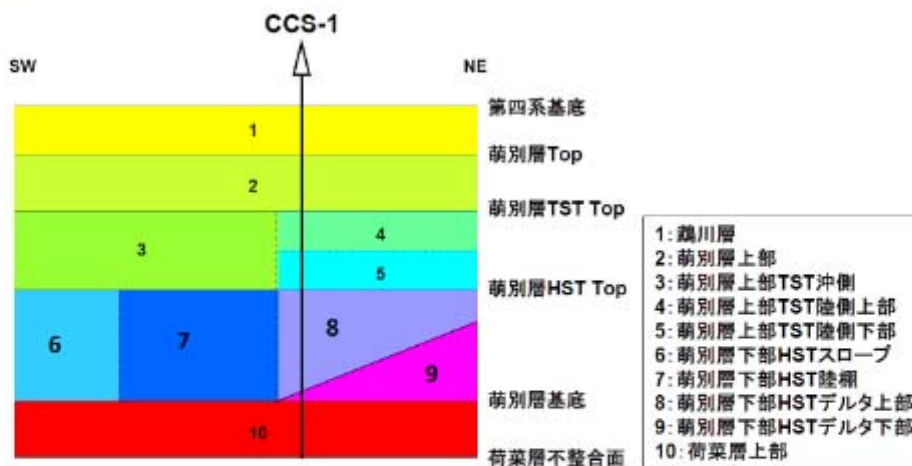


図 2.8-6 堆積相区分概念図

#### 2.8.4 CO<sub>2</sub>挙動予測シミュレーション

構築した貯留層モデルを用いて、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年を目途に圧入し、圧入期間中およびその後の長期間にわたって貯留CO<sub>2</sub>の挙動予測等を行っている。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章で示す。

#### 2.8.5 弾性波探査シミュレーション

滝ノ上層T1部層と同様に、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。

萌別層砂岩層ではCO<sub>2</sub>累積圧入量12.5万トンの時点で、CO<sub>2</sub>の拡がりは明確に検知できることがわかった(図2.8-7)。このため萌別層砂岩層においては、累積CO<sub>2</sub>圧入量10万トン、12.5万トン、15万トンというCO<sub>2</sub>圧入過程で弾性探査を繰り返し実施することにより、CO<sub>2</sub>挙動(拡がっていく様子)が検知可能と判断した。CO<sub>2</sub>累積圧入量25万トン時点の結果を図2.8-8に示す。

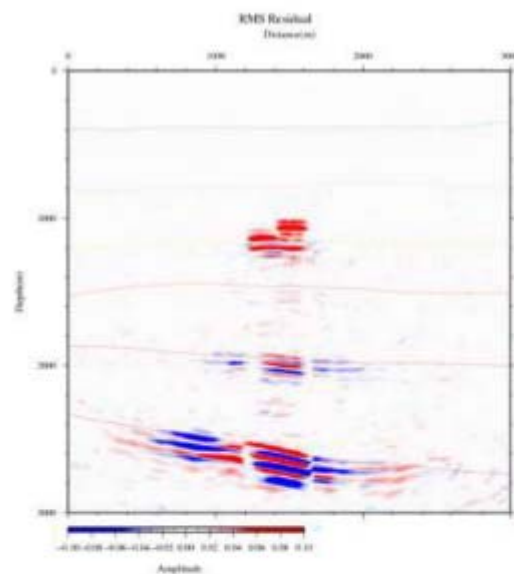


図 2.8-7 差分(深度断面、萌別層砂岩層、CO<sub>2</sub>圧入12.5万トン圧入後)

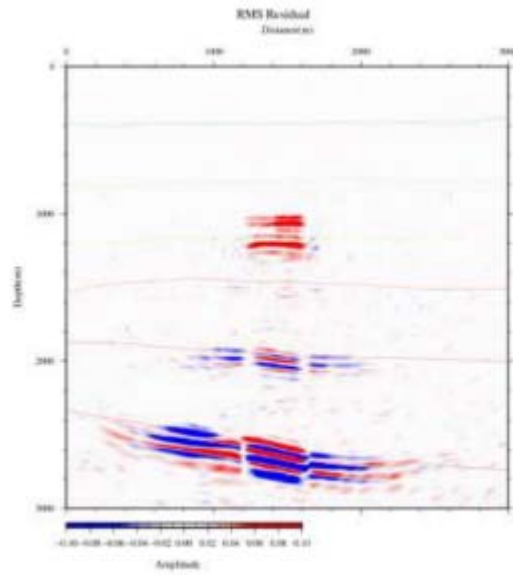


図 2. 8-8 差分 (深度断面、萌別層砂岩層、CO<sub>2</sub>圧入 25 万トン圧入後)

### 第3章 貯留層総合評価

#### 3.1 貯留層の総合評価

貯留層総合評価においては、第2章で構築した貯留層モデルを用いてCO<sub>2</sub>挙動予測シミュレーションを実施し、その結果を基に計画通りのCO<sub>2</sub>圧入が可能か、貯留層からのCO<sub>2</sub>の漏出は生じていないか、長期間にわたって計画通りの範囲にとどまっているかを評価した。以下、滝ノ上層および萌別層の評価結果について示す。

##### 3.1.1 滝ノ上層評価結果

###### (1) 貯留層評価

2.7.1で記載の通り、滝ノ上層は火山性砕屑物を含む火山岩層であり、上部の火山岩・凝灰岩からなる滝ノ上層T1部層と下部の泥岩層からなる。滝ノ上層T1部層（層厚が約600m）は、さらに上部の凝灰岩卓越層と下部の火山岩卓越層に分けられる。

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全体が圧入対象となり、凝灰岩相は部分的に高い孔隙率を有する領域が存在し、一部が圧入対象となり得ると考えられる。

###### (2) 遮蔽層評価

2.7.2で記載の通り、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、振老層下部でリークオフ圧力が等価泥水比重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、遮蔽層を超えた垂直方向の地層水の移動はないものと考えられる。

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～12.3MPa以上の実測データが得られている。後者については、1.29MPaといった比較的低い分析値が得られているものの、CO<sub>2</sub>-水系の条件で分析した場合には、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。

### (3) シミュレーション概要

#### ① 概要

構築した貯留層モデルを用いて、CO<sub>2</sub>挙動予測シミュレーションを実施した。シミュレータは、Computer Modelling Group Ltd.社のGEM (ver2010.12)を使用した。シミュレーションで考慮した貯留メカニズムは、泥岩の毛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である。

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。すなわち、CO<sub>2</sub>圧入井は陸上から南西方向に掘削すると仮定し、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が等価泥水比重で1.96であるので、貯留層上限深度での地層破壊圧力を計算し、その90%を圧入圧力上限とした。すなわち、CO<sub>2</sub>圧入井において、グリッドモデルでの貯留層最上位での垂直深度2,419.4mから地層破壊圧力を求め、この90%（41,853kPa）をCO<sub>2</sub>圧入時に許容される最大坑底圧力（貯留層上限深度での坑内圧力）とした。

CO<sub>2</sub>の圧入目標量は25万トン/年×3年として、第2章で述べた50個のモデルに対してシミュレーションを実施した。

#### ② 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、物理検層測定値など）および文献値により、表3.1-1に示す値を用いた。

表 3.1-1 シミュレーションパラメータ一覧

モデル	滝ノ上層 T 1 部層 2011 モデル		
サイズ	8km × 12km × 4,000m (ideal volume 24km × 24km × 4,000m)		
グリッド	80 × 120 × 106 Grid		
アクティブ・ブロック数	384,050		
基準温度	91.0°C (2,419.4m)		
基準圧力	34,370kPa (2,419.4m)		
CO <sub>2</sub> 圧入レート、圧入期間	250,000 トン/年 × 3 年		
圧入圧力上限	41,853kPa		
岩石性状	溶岩 (貯留層)	凝灰岩 (貯留層)	泥岩 (遮蔽層)
平均孔隙率	0.125 Bennion(2005) <sup>1)</sup>	0.127	0.150
平均浸透率 (mD)	2.7	0.0072	0.000035
圧縮率 (kPa <sup>-1</sup> )	8.073 × 10 <sup>-7</sup> 測定値		
塩分濃度 (ppm NaCl)	35,100 ([Cl <sup>-</sup> ]=21,300ppm)		
相対浸透率	溶岩 (貯留層)	凝灰岩 (貯留層)	泥岩 (遮蔽層)
気相 相対浸透率 Krg	Bennion(2005) <sup>1)</sup>		Corey (1954) <sup>2)</sup>
液相 相対浸透率 Krw			van Genuchten(1980) <sup>3)</sup>
臨界ガス飽和率 Sgc	0.04 Bennion(2005) <sup>1)</sup>		0.05
不動水飽和率 Swir	0.558 Bennion(2005) <sup>1)</sup>		0.8
最大残留ガス飽和率 Sgrmax	0.241 from default value of GEM		—
毛管圧力曲線	溶岩 (貯留層)	凝灰岩 (貯留層)	泥岩 (遮蔽層)
	Bennion(2006) <sup>4)</sup> , van Genuchten(1980) <sup>3)</sup>		測定値
Pc (kPa)	28.8	428.1	469



## 【参考文献】

- 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*.
- 2) Corey, A. T., 1954, The Interrelation between gas and oil relative permeabilities: *Producers Monthly, November, 38-41*.
- 3) van Genuchten, M. Th., 1980 A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of undersaturated soils: *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892-898.
- 4) Bennion, B., 2006 The impact of interfacial tension and pore-size distribution / capillary pressure character on CO<sub>2</sub> relative permeability at reservoir condition in CO<sub>2</sub>-Brine systems: *paper SPE 99325*.

(4) シミュレーションによるCO<sub>2</sub>の圧入挙動① CO<sub>2</sub>圧入時の挙動

50 個のモデルに対して、25 万トン/年×3 年間の挙動予測シミュレーションを行ったところ、全てのモデルにおいて 25 万トン/年×3 年間の圧入が可能であった。

そこで、このシミュレーションの結果において圧入終了時における坑底圧力（貯留層上限深度での坑内圧力）の圧力上昇量で序列をつけ、50 個のモデルの累積確率分布を作成し、圧力上昇量が当該モデル以下になる確率をそれぞれ P10、P50、P90 のパーセンタイル値として設定した（図 3.1-1）。これらの 3 つのモデルについて CO<sub>2</sub> 挙動予測シミュレーションを行った。

- 1) P10 モデル：圧力上昇量が当該モデル以下になる確率が 10%
- 2) P50 モデル：圧力上昇量が当該モデル以下になる確率が 50%
- 3) P90 モデル：圧力上昇量が当該モデル以下になる確率が 90%

これらのモデルに与えられた浸透率は図 3.1-2 のようになっている。

図 3.1-3～図 3.1-5 に 3 つの貯留層モデル（P10 モデル、P50 モデル、P90 モデル）における圧入期間（3 年間）の CO<sub>2</sub> 圧入に伴う坑底圧力、圧入レートおよび累計圧入量の時間的变化を示す。なお、3 年間の CO<sub>2</sub> 飽和率分布および溶解 CO<sub>2</sub> 分布については、3.1.1 (5) において述べる。

3 つのシミュレーションモデルにおける、圧入終了直前の坑底圧力は P10 モデルで 36,180kPa（ $\Delta P=1,800\text{kPa}$ ）、P50 モデルで 36,580kPa（ $\Delta P=2,200\text{kPa}$ ）、P90 モデルで 37,660kPa（ $\Delta P=3,290\text{kPa}$ ）であり、いずれのモデルにおいても設定した圧入圧力上限（41,853kPa）を大きく下回って、25 万トン/年×3 年間の CO<sub>2</sub> を全量圧入が可能である。また、いずれのモデルにおいても貯留層圧力は圧入終了後に速やかに低下し、圧入終了 5 年後にはほぼ初期貯留層圧力に近い約 35,000kPa（ $\Delta P=700\text{kPa}$ ）まで低下している。

なお、2.7.3 で述べた通り、滝ノ上層 T1 部層は堆積岩と比較して不均質性・異质性が

高く、掘削後の解析結果から、苫小牧CCS-1を掘削した領域は、滝ノ上層T1部層の高ΔI（低孔隙率、低浸透率）領域であることが判った。今後、滝ノ上層T1部層の低ΔI（高孔隙率、高浸透率）領域に掘削すれば、十分な圧入性能を確認できると考えられる。

② 貯留層圧力分布

3年間のCO<sub>2</sub>圧入終了時点における帯水層圧力の変化（圧入前の初期圧力からの変化量）を図3.1-6～図3.1-8に示す。いずれのモデルにおいても圧力の拡がり圧入井を中心にほぼ南北に長軸をもつ楕円状となる。

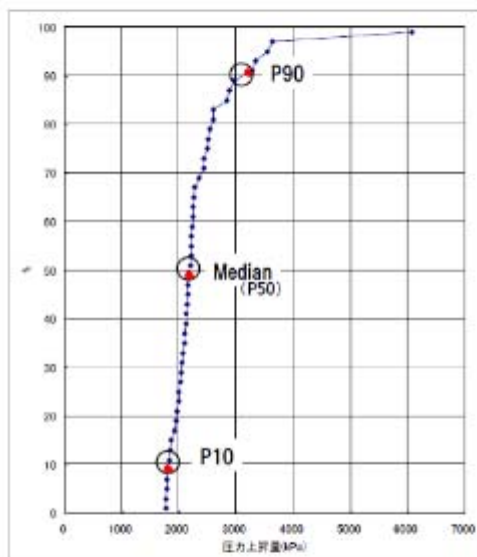


図 3.1-1 50 個のモデルの 3 年間の圧入による圧力上昇量の累積確率分布

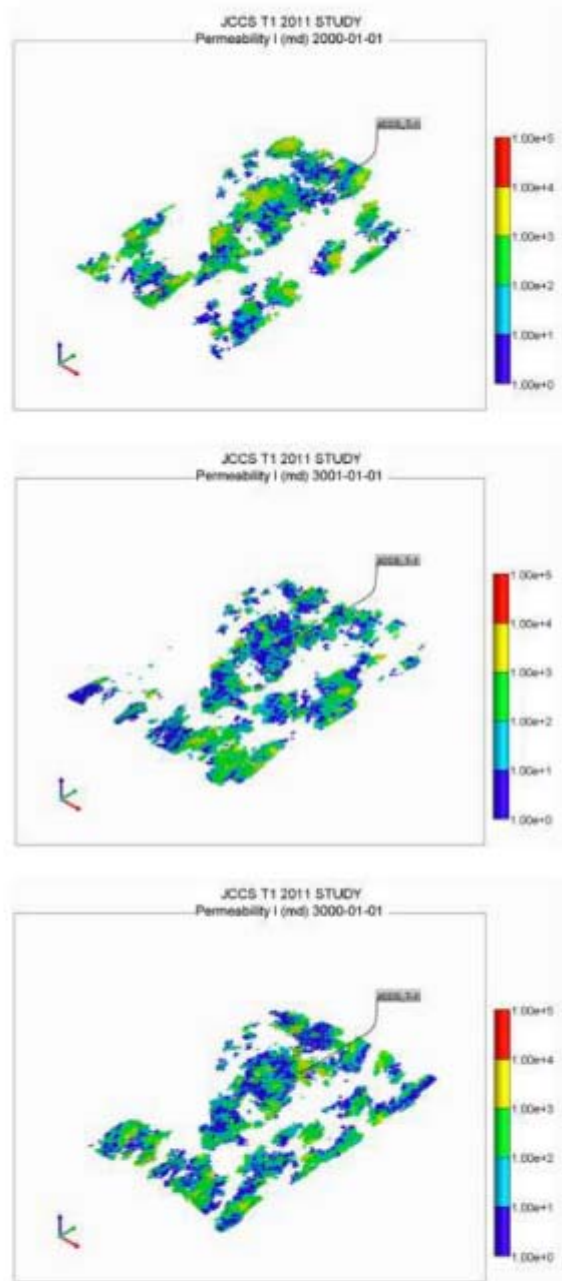


図 3.1-2 浸透率(単位 : mD)分布 (P10 モデル、P50 モデル、P90 モデル)

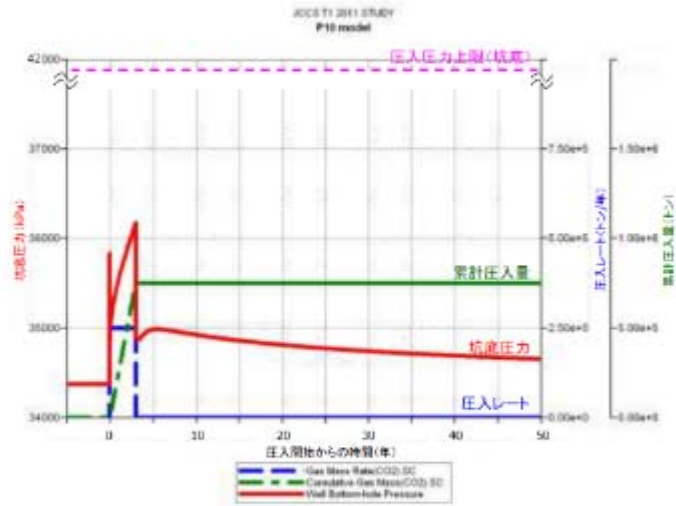


図 3.1-3 P10 モデルにおける坑底圧力の時間（年）的变化

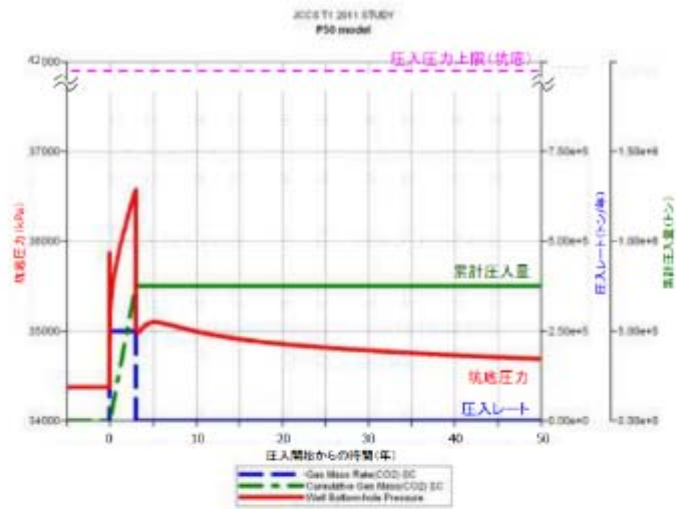


図 3.1-4 P50 モデルにおける坑底圧力の時間（年）的变化

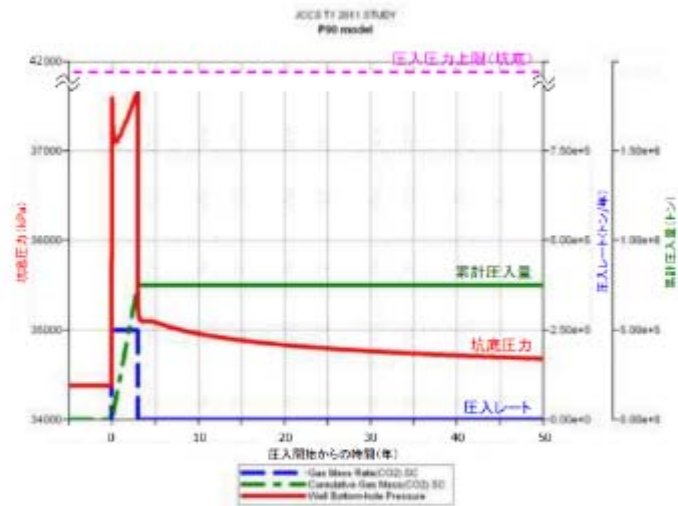


図 3.1-5 P90 モデルにおける坑底圧力の時間（年）的变化

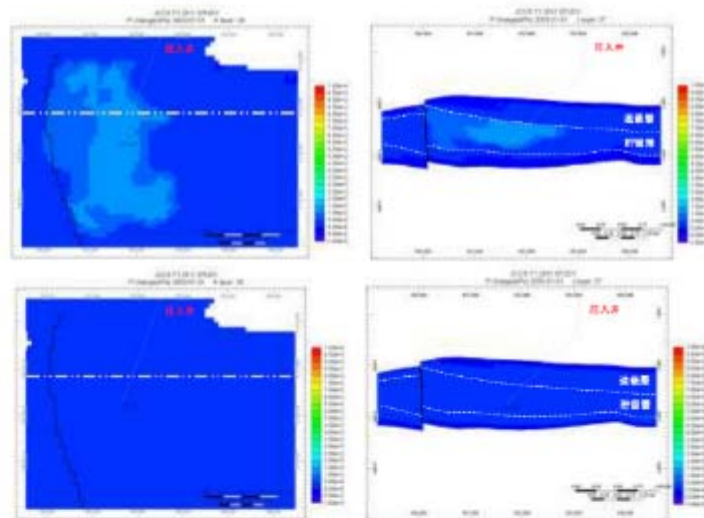


図 3.1-6 CO<sub>2</sub> 圧入前からの圧力変化量（単位：kPa）の推移（P10 モデル）  
 （上：圧入終了時（3年後） 下：50年後）  
 （左：平面分布（k 方向セル 38） 右：東西断面（位置は平面分布の点線の位置））

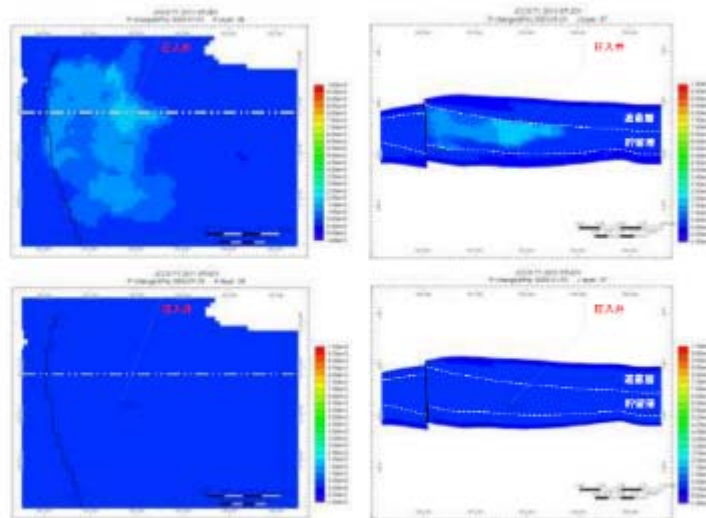


図 3.1-7 CO<sub>2</sub>圧入前からの圧力変化量 (単位: kPa) の推移 (P50 モデル)

(上: 圧入終了時 (3年後) 下: 50年後)

(左: 平面分布 (k 方向セル 38) 右: 東西断面 (位置は平面分布の点線の位置))

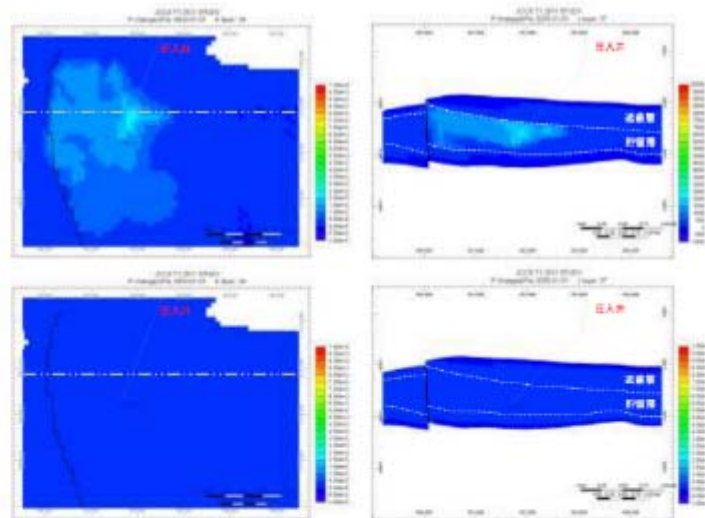


図 3.1-8 CO<sub>2</sub>圧入前からの圧力変化量 (単位: kPa) の推移

(P90 モデル) (上: 圧入終了時 (3年後) 下: 50年後)

(左: 平面分布 (k 方向セル 38) 右: 東西断面 (位置は平面分布の点線の位置))



#### (5) シミュレーションによる貯留CO<sub>2</sub>の長期挙動予測

3つの貯留層モデル(P10モデル、P50モデル、P90モデル)について、圧入開始から1,000年間(圧入3年間、圧入終了後997年間)のCO<sub>2</sub>の挙動予測シミュレーションを実施した。以下に長期的な挙動に関する各モデルの比較を示す。

##### ① 圧入に伴う貯留層内のCO<sub>2</sub>分布予測

圧入終了時点(圧入開始から3年後)、圧入開始から200年後および1,000年後におけるCO<sub>2</sub>飽和率分布を図3.1-9～図3.1-11に示す。また、CO<sub>2</sub>が地層水に溶解した状態の溶解CO<sub>2</sub>濃度の分布を図3.1-12～図3.1-14に示す。

##### 1) P10モデル

CO<sub>2</sub>は、高浸透率な滝ノ上層T1部層上部に選択的に圧入される。圧入されたCO<sub>2</sub>は西方向に伸長して拡がり、圧入終了時点で気相<sup>10)</sup>CO<sub>2</sub>は圧入井から水平的に約600m先まで、溶解CO<sub>2</sub>は約800m先まで拡がる。圧入終了後は、気相CO<sub>2</sub>はほとんど移動せず溶解によりCO<sub>2</sub>飽和率が減少する。溶解CO<sub>2</sub>は、CO<sub>2</sub>の溶解により地層水の密度が増加するため、やや下方へ移動する。遮蔽層(振老層、平取+軽舞層)へはCO<sub>2</sub>は拡がらない。

注) CO<sub>2</sub>は、温度圧力条件により液体と気体の性状を合わせ持った状態となるが、シミュレータの中では「気相」として取り扱われることから、本書では「気相」と称する。

##### 2) P50モデル

CO<sub>2</sub>は、比較的高浸透率な滝ノ上層T1部層上部に大部分が圧入されるものの、滝ノ上層T1部層下部にもある程度は圧入される。P10モデル同様、圧入されたCO<sub>2</sub>は西方向に伸長して拡がり、圧入終了時点で気相CO<sub>2</sub>は圧入井から水平的に約450m先まで、溶解CO<sub>2</sub>は約700m先まで拡がる。圧入終了後は、気相CO<sub>2</sub>は殆ど移動せず、溶解によりCO<sub>2</sub>飽和率が減少する。溶解CO<sub>2</sub>は、CO<sub>2</sub>の溶解により地層水の密度が増加するため、やや下方へ移動する。遮蔽層(振老層、平取+軽舞層)へはCO<sub>2</sub>は拡がらない。

##### 3) P90モデル

CO<sub>2</sub>は貯留層の比較的高浸透率な滝ノ上層T1部層上部に大部分が圧入されるものの、滝ノ上層T1部層下部にもある程度は圧入される。P10モデル、P50モデル同様、圧入されたCO<sub>2</sub>は坑井を中心として拡がり、圧入終了時点で気相CO<sub>2</sub>は圧入井から水平的に約400m先まで、溶解CO<sub>2</sub>は約500m先まで拡がる。圧入終了後は、気相CO<sub>2</sub>はほとんど移動せず、溶解によりCO<sub>2</sub>飽和率が減少する。溶解

CO<sub>2</sub>は、CO<sub>2</sub>の溶解により地層水の密度が増加するため、やや下方へ移動する。  
 遮蔽層（振老層、平取+軽舞層）へはCO<sub>2</sub>は拡がらない。

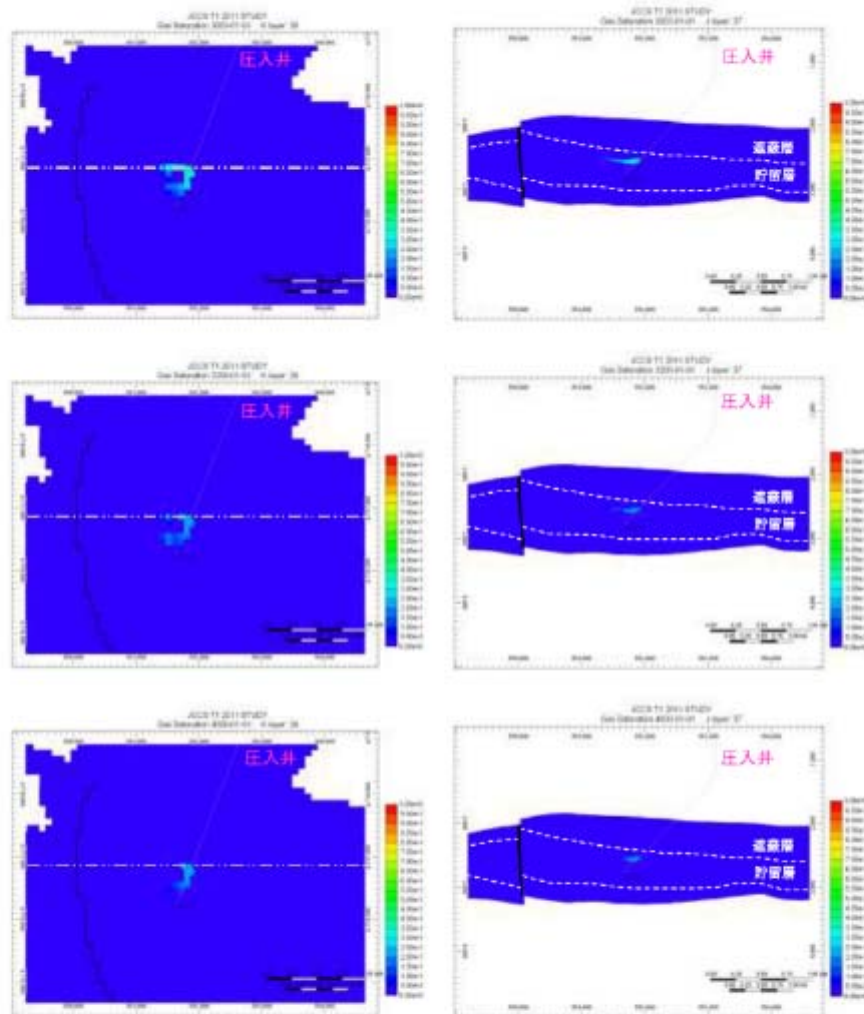


図 3.1-9 P10モデルにおけるCO<sub>2</sub>飽和率の推移

(上：圧入終了時(3年後) 中：200年後 下：1,000年後)

(左：平面分布(k方向セル38) 右：東西断面(位置は平面分布の点線の位置))

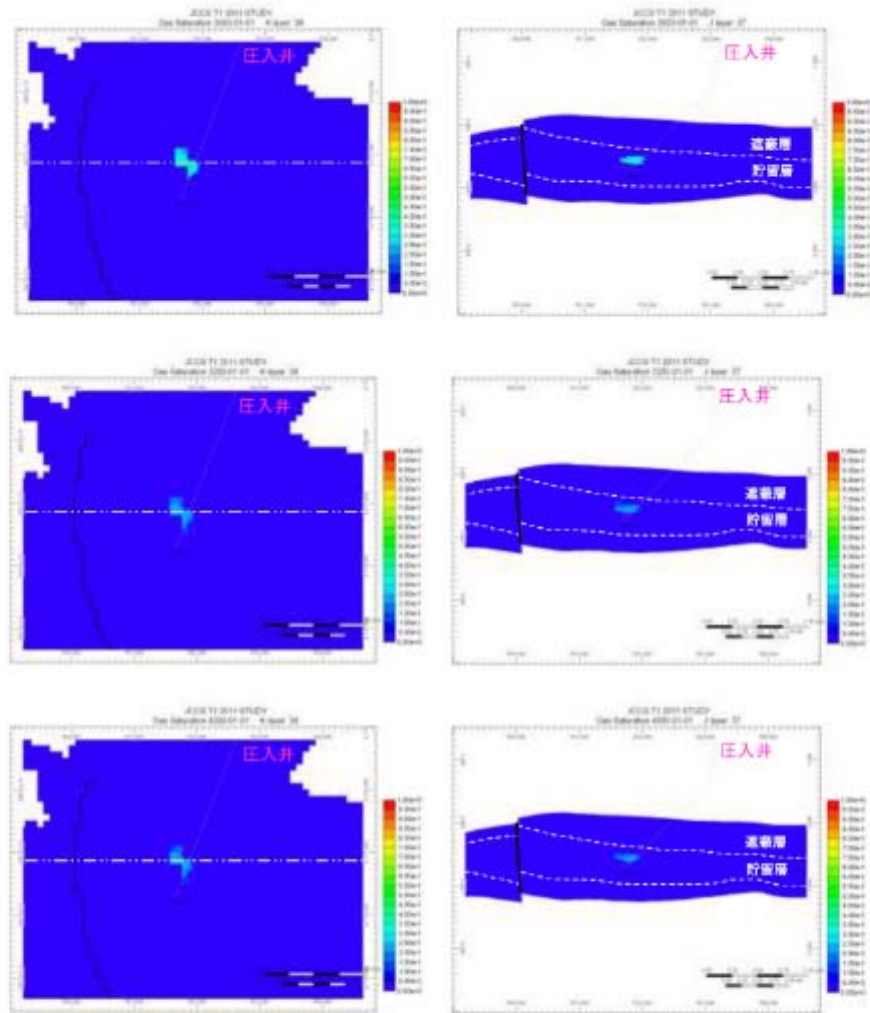


図 3.1-10 P50 モデルにおけるCO<sub>2</sub>飽和率の推移

(上：圧入終了時 (3年後) 中：200年後 下：1,000年後)

(左：平面分布 (k方向セル38) 右：東西断面 (位置は平面分布の点線の位置))

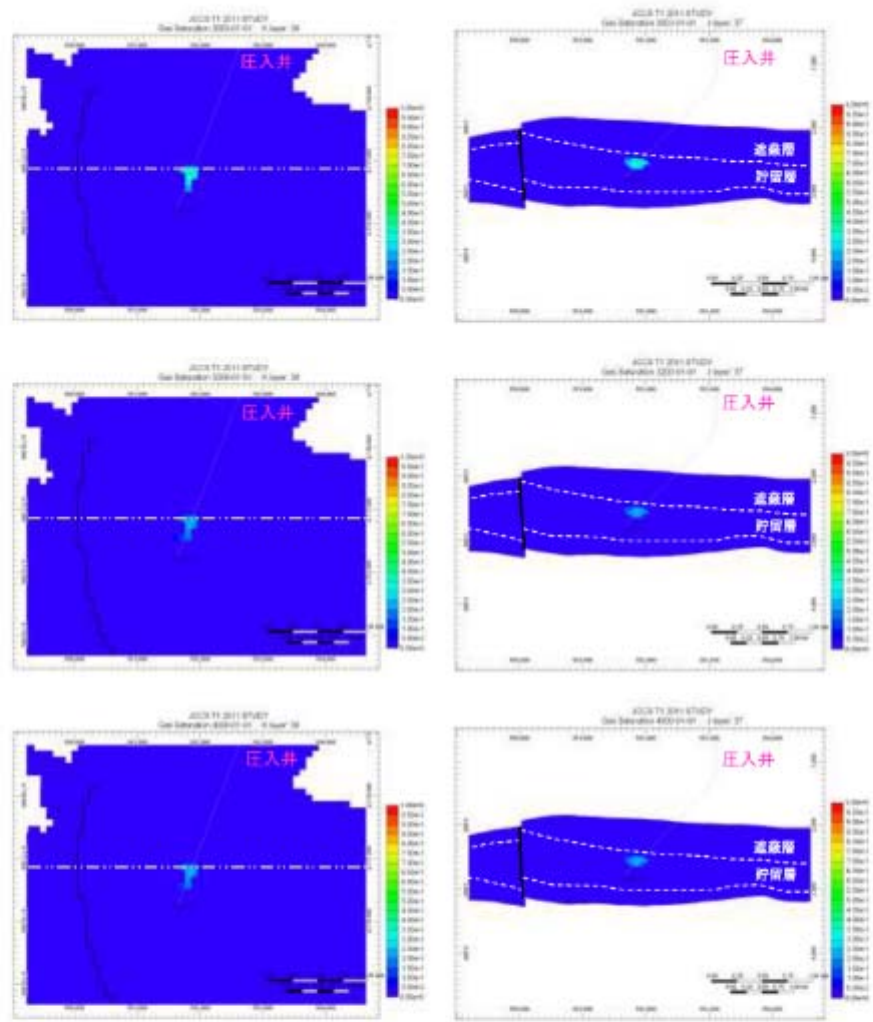


図 3.1-11 P90 モデルにおけるCO<sub>2</sub>飽和率の推移  
 (上：圧入終了時 (3年後) 中：200年後 下：1,000年後)  
 (左：平面分布 (k方向セル38) 右：東西断面 (位置は平面分布の点線の位置))

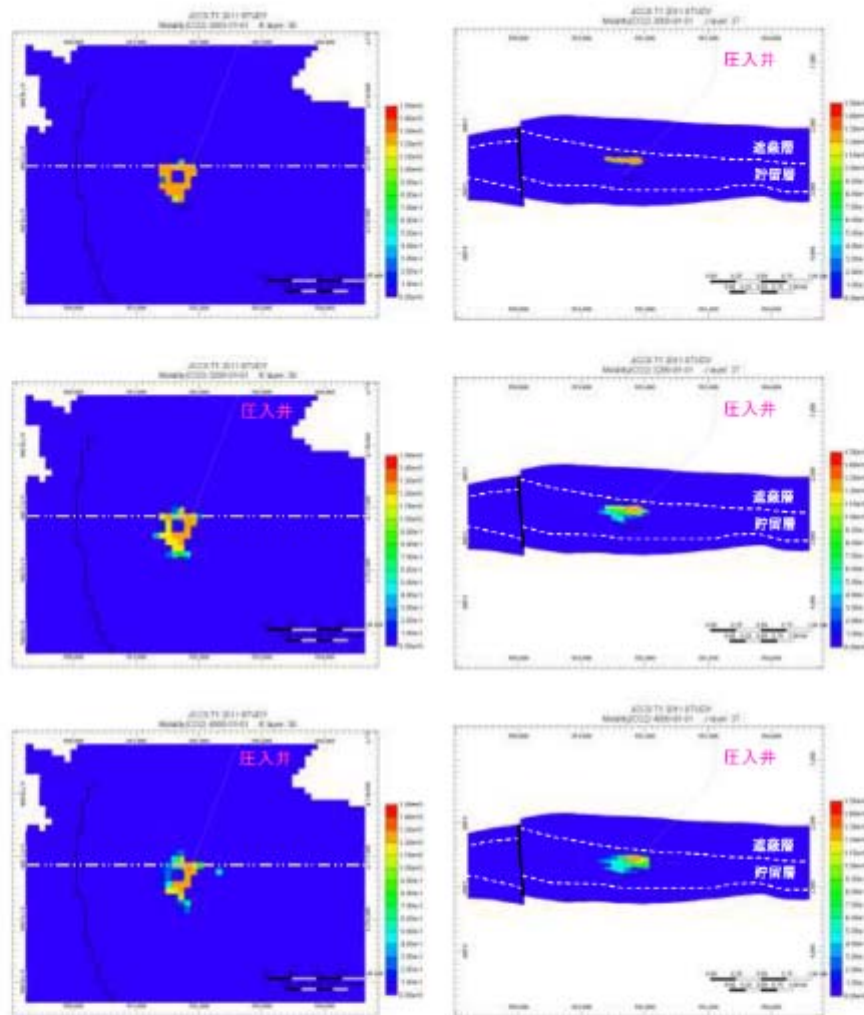


図 3.1-12 P10 モデルにおける溶解CO<sub>2</sub>濃度 (単位: mol/kg) の推移  
 (上: 圧入終了時 (3 年後) 中: 200 年後 下: 1,000 年後)  
 (左: 平面分布 (k 方向セル 38) 右: 東西断面 (位置は平面分布の点線の位置))



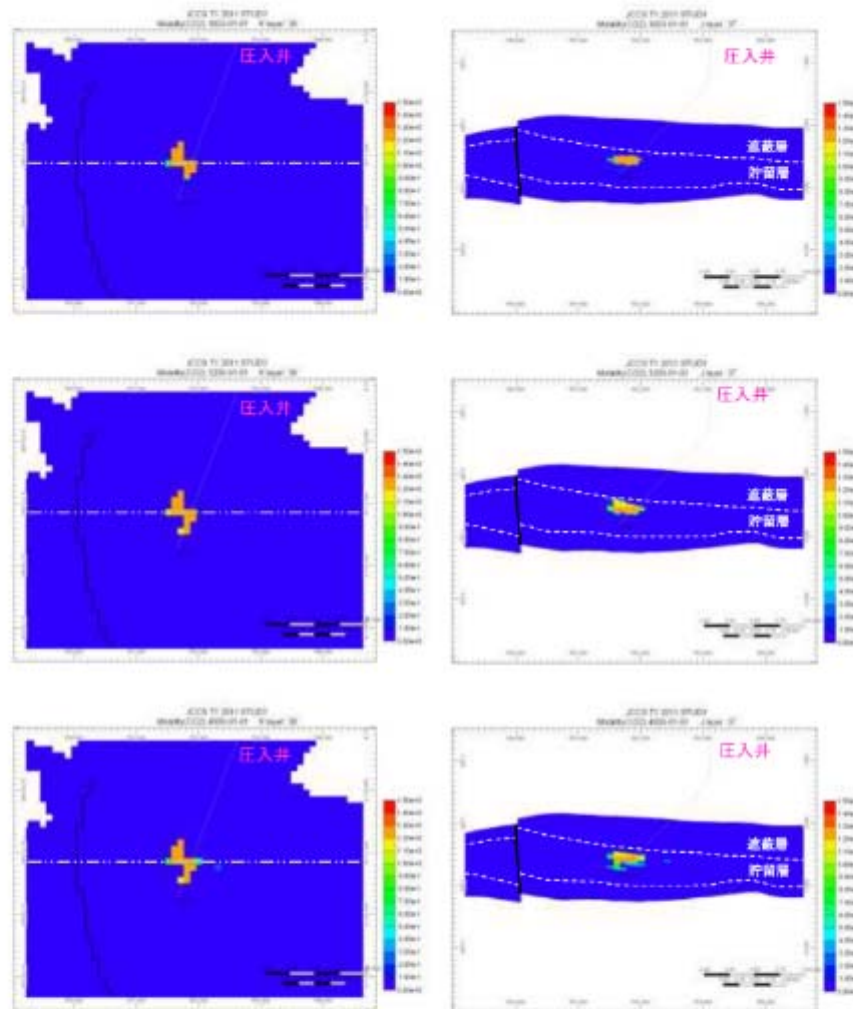


図 3.1-13 P50 モデルにおける溶解CO<sub>2</sub>濃度 (単位 : mol/kg) の推移  
 (上 : 圧入終了時 (3年後) 中 : 200 年後 下 : 1,000 年後)  
 (左 : 平面分布 (k 方向セル 38) 右 : 東西断面 (位置は平面分布の点線の位置))



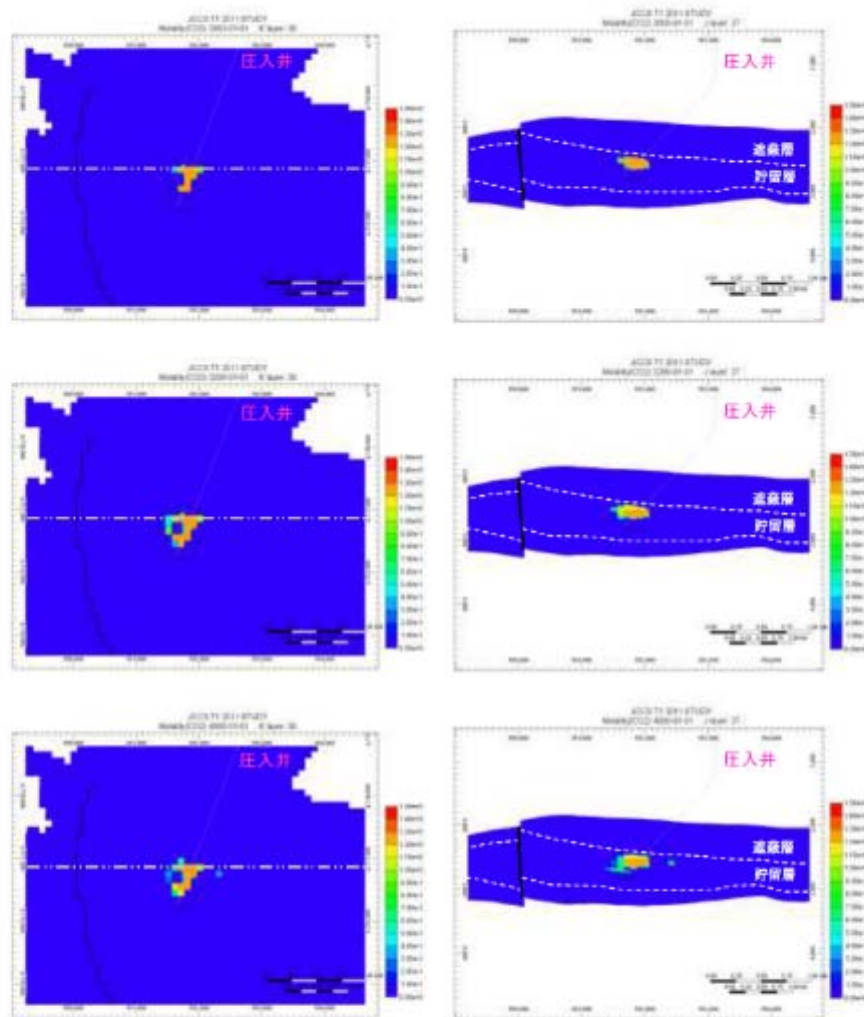


図 3.1-14 P90 モデルにおける溶解CO<sub>2</sub>濃度 (単位: mol/kg) の推移  
 (上: 圧入終了時 (3年後) 中: 200年後 下: 1,000年後)  
 (左: 平面分布 (k方向セル38) 右: 東西断面 (位置は平面分布の点線の位置))

② CO<sub>2</sub>の貯留形態ごとの割合

貯留CO<sub>2</sub>の3つの貯留形態をMovable（移動する可能性がある気相CO<sub>2</sub>）、Dissolved（溶解CO<sub>2</sub>）およびTrapped（孔隙などにトラップされ動かない気相CO<sub>2</sub>）で表現し、各モデルにおける3種類の貯留形態のCO<sub>2</sub>圧入量に対する割合について、その経時変化を図3.1-15～図3.1-17に示す。いずれのモデルにおいても圧入終了後すぐにMovableCO<sub>2</sub>量は減少し、約200年でその割合は殆ど0となる。その後、残留ガス飽和率によりトラップされたCO<sub>2</sub>が地層水に溶解することで、Trapped CO<sub>2</sub>とDissolved CO<sub>2</sub>の割合が変化していく。その割合については、1,000年後にはP10モデルにおいてはDissolved CO<sub>2</sub>量が約70%に達するのに対して、P90モデルにおいては約45%となる。この差については、圧入終了までのCO<sub>2</sub>の拡がり方による地層水との接触面積の違い、CO<sub>2</sub>が溶解し密度が大きくなった地層水の貯留層内での移動のしやすさ、貯留層内の圧力状態が原因であると考えられる。

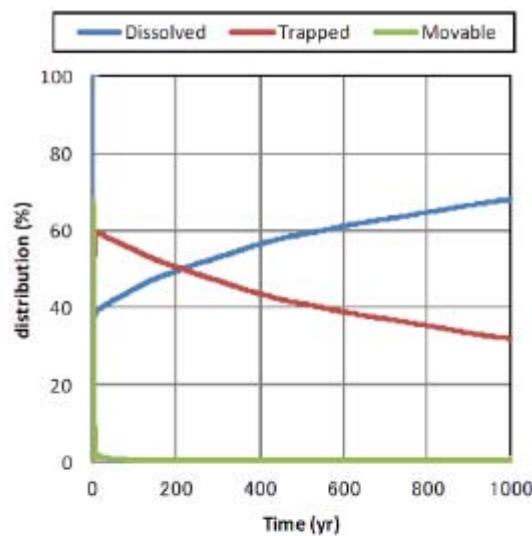


図 3.1-15 CO<sub>2</sub>の貯留フォーム（割合）の変化（P10モデル）

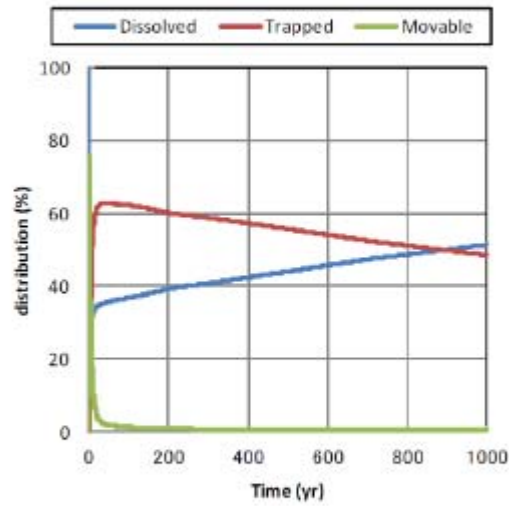


図 3. 1-16 CO<sub>2</sub>の貯留フォーム（割合）の変化（P50 モデル）

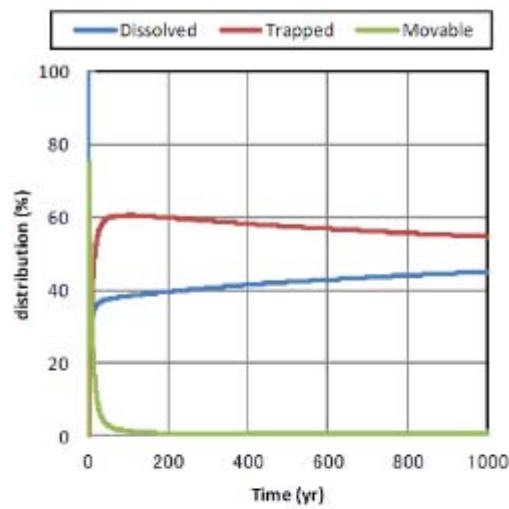


図 3. 1-17 CO<sub>2</sub>の貯留フォーム（割合）の変化（P90 モデル）

## (6) 総合評価

### ① 滝ノ上層評価のまとめ

滝ノ上層について行った貯留層および遮蔽層の評価ならびにCO<sub>2</sub>挙動予測シミュレーションの結果を以下の記述および表 3.1-2 にまとめる。

- 1) 滝ノ上層は、上部の火山岩・凝灰岩からなる滝ノ上層T1部層と下部の泥岩層からなる。本層の圧入対象層は、溶岩～凝灰角礫岩相と凝灰岩相とに大別され、凝灰岩相では、貯留層としてそれほど良好な性状は期待できないが、溶岩～凝灰角礫岩相では良好な性状が期待できる。
- 2) 滝ノ上層T1部層の上位には、主に泥岩からなる層厚約1,100mの振老層および平取+軽舞層が分布する。調査データから、苫小牧沖構造の西翼を通る断層が存在するものの、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期待できる。
- 3) 貯留層の性能、遮蔽層の健全性を評価するため、25万トン/年×3年間のCO<sub>2</sub>を圧入し、圧入終了後997年間（圧入開始から1,000年間）のCO<sub>2</sub>挙動を予測するシミュレーション実施した。シミュレーションの結果をまとめると、以下の通りである。
  - ・作成した50個の貯留層モデルの全てにおいて25万トン/年×3年間の圧入は可能であった。
  - ・気相CO<sub>2</sub>の拡がりは圧入終了時点で、圧入井から水平にP10モデルで約600m程度、P50モデルで450m程度、P90モデルで約400m程度であった。
  - ・溶解CO<sub>2</sub>の拡がりは圧入終了時点で、P10モデルで約800m程度、P50モデルで700m程度、P90モデルで約500m程度であった。
  - ・3つのモデルでは遮蔽層（振老層、平取+軽舞層）へのCO<sub>2</sub>の到達は、圧入開始から1,000年後においても確認されなかった。
- 4) 滝ノ上層は堆積岩と比較して不均質性・異方性が高く、掘削後の解析結果から苫小牧CCS-1を掘削した領域は滝ノ上層の高A I（低孔隙率、低浸透率）領域であることが判った。今後、滝ノ上層の低A I（高孔隙率、高浸透率）領域に掘削すれば、十分な圧入性能を確認できると考えられる。

### ② 総合評価

滝ノ上層への25万トン/年×3年間のCO<sub>2</sub>圧入を行った場合、滝ノ上層へのCO<sub>2</sub>の圧入は可能であり、遮蔽層（振老層、平取+軽舞層）へのCO<sub>2</sub>の拡がりはないと評価する。

表 3.1-2 海ノ上層 T1 部層貯留層総合評価のまとめ

項目		
貯留層	構造	<ul style="list-style-type: none"> <li>●北西-南南東に延びる背斜構造(苫小牧沖構造)の北東翼部。</li> <li>●圧入想定ポイントから2km程度西側に海ノ上層下位から荷菜層に達する断層の存在が推定される。</li> </ul>
	対象深度・層厚	●垂直深度:約2,400~3,000m ●層厚:約600m
貯留層	岩相	<ul style="list-style-type: none"> <li>●溶岩～凝灰角礫岩、凝灰岩</li> </ul> <p>圧入対象岩相は海ノ上層 T1 部層下部の溶岩～凝灰角礫岩相で孔隙率・浸透率が高いことが期待される岩相。</p>
	物性	●孔隙率:5~18%(苫小牧 CCS-1 コア試験:封圧下), 孔隙率: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)
		●浸透率:0.001~0.01mD(苫小牧 CCS-1 コア試験:封圧下、空気)
		●浸透率:0.002~7mD(周辺坑井のコア試験:封圧下)
●浸透率:0.01mD~2.6D(坑井 A での物理サンプル解析結果)		
圧入・貯留性能	<ul style="list-style-type: none"> <li>●【貯留層評価】3Dデータなどの解析で良好と想定している岩相を調査井(苫小牧 CCS-1)では未確認。</li> <li>●【シミュレーション】貯留性能が良好な岩相に圧入することで、25万トン/年×3年圧入可能。</li> </ul>	
凝蔽層	岩相	●泥岩(振老層～平取+軽算層)
	層厚	●層厚:約1,100m
凝蔽層	物性	●孔隙率:12.4~18.0%(苫小牧 CCS-1 コア試験:封圧下)
		●浸透率:8.2×10 <sup>-6</sup> ~36.7×10 <sup>-6</sup> mD(苫小牧 CCS-1 コア試験:水浸透率)
		●スレシヨルト圧力:1.29~12.3MPa以上(苫小牧 CCS-1 コア試験:N <sub>2</sub> -水系差圧圧力法)
		●スレシヨルト圧力:11.72MPa以上(苫小牧 CCS-1 コア試験:CO <sub>2</sub> -水系段階昇圧法) ※ブレークスルーしなかった。
透蔽性能	●リークオフ圧力:45.3MPa(等価泥水比重:1.96)(振老層(苫小牧 CCS-1)2,352m)	
坑井掘削難易度	●【シミュレーション】凝蔽層へのCO <sub>2</sub> の到達は確認されなかった。	
圧入後CO <sub>2</sub> の挙動 (シミュレーション結果)	透蔽性能	●大深度の高傾斜井となる。
	●(3年圧入後)気相CO <sub>2</sub> の拡がり:400m×600m程度。溶解CO <sub>2</sub> は550m×700m程度(P60モドル)。	
	●圧入終了後は地層水への溶解等による下方への移動が認められる。 ●200年程度で、気相CO <sub>2</sub> の拡がりに変化は見られなくなる。	



### 3.1.2 萌別層評価結果

#### (1) 貯留層評価

2.8.1で記載のとおり、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からなり、砂岩を主体とし、砂礫岩、シルト岩を伴う。緩やかな西傾斜を示し、層厚は約100mである。

萌別層砂岩層は、比較的浅い海底で堆積した砂岩であると考えられる。シーケンス層序学でいう高海水準期堆積体(HST)に相当し、ファンデルタ・陸棚(Shelf)・斜面(Slope)の3つに分類できる。少なくとも5つ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した。ファンデルタは北東部を中心に発達し、砂礫岩層は堆積物供給源である北東部がより粗粒で、南西に向かって細粒になる傾向にあると推定した。

以上のことから、ファンデルタと解釈した北東部に存在する砂礫岩層が圧入対象となり得ると考えられる。

#### (2) 遮蔽層評価

2.8.2で記載のとおり、萌別層泥岩層は、層厚約200mのシルト岩～泥岩からなる。微化石分析による堆積環境解析により、水深数10～数100mの比較的深い海底で安定的に堆積したと推定される。周辺坑井間で対比できることから、貯留対象領域を覆う領域で十分な厚さが分布する。コア試験結果からは水浸透率が $0.80 \times 10^{-3} \sim 1.73 \times 10^{-3}$ md、スレシヨルド圧力が0.75MPa、1.65MPa、1.67MPaの結果が得られている。

また、調査井における萌別層泥岩層下部でのリークオフテスト結果から、等価泥水比重で1.50の強度を確認している。

以上の結果から、萌別層泥岩層は良好な遮蔽性能を有すると考えられる。

#### (3) シミュレーション概要

##### ① 概要

シミュレータとしてGEM(ver.2010.12)を使用し、CO<sub>2</sub>挙動予測シミュレーションを実施した。シミュレーションで考慮した貯留メカニズムは、泥岩の毛管圧力と低浸透性による物理的トラッピング、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である。

第2章にて作成した属性モデルにおいて分類した堆積相区分について、シミュレーションモデルでは以下の通り大きく2種類に整理し、それぞれに岩相を設定した。



砂岩：堆積相区分4・8・9

泥岩：堆積相区分1・2・3・5・6・7・10

CO<sub>2</sub>圧入井（圧入位置）は、萌別層砂岩層を対象としたA1バージョン結果を基に、貯留CO<sub>2</sub>の拡がり三次元弾性波探査の範囲内に留まるようにすることも考慮して、想定する陸上基地からの掘削方位を設定し、仕上げ区間は圧入井の萌別層砂岩層にあたる全区間とした。また、萌別層砂岩層における坑井の最終坑径を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-2の萌別層泥岩層下部のリークオフ圧力が等価泥水比重で1.50であるので、貯留層上限深度でのリークオフ圧力を計算し、その90%を最大坑底圧力とした。すなわち、CO<sub>2</sub>圧入井において、グリッドモデルでの貯留層最上位での垂直深度が1,011.93mであることからリークオフ圧力を求め、この90%（13,410kPa）をCO<sub>2</sub>圧入時に許容される最大坑底圧力とした。

シミュレーションでは、CO<sub>2</sub>の圧入目標量を25万トン/年×3年として、表3.1-4で示す各ケースに対してシミュレーションを実施した。

## ② パラメータ

シミュレーションパラメータは苫小牧CCS-1および苫小牧CCS-2で得られたデータ（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表3.1-3に示す値を用いた。

表 3.1-3 萌別層砂岩層 シミュレーションパラメータ

モデル	萌別層砂岩層 2011 モデル	
サイズ	8km × 15km × 1,500m	
グリッド	40 × 75 × 43 Grid	
アクティブ・ブロック数	97,024	
基準温度	44.78°C (1,046.835 mVD)	
基準圧力	10,669.4kPa (1,046.835mVD)	
CO <sub>2</sub> 圧入レート、圧入期間	250,000 トン/年 × 3 年	
圧入圧力上限	13,410kPa	
帯水層容積 (面積 × 層厚 × 孔隙率)	49 × 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup>	
<b>岩石性状</b>	<b>砂岩</b>	<b>泥岩</b>
平均孔隙率	0.281	0.342
平均浸透率 (mD)	17.0	0.00173
圧縮率 (kPa <sup>-1</sup> )	1.532 × 10 <sup>-6</sup> 測定値	
塩分濃度 (ppm NaCl)	18,000 (Cl <sup>-</sup> =10,350mg/L)	
<b>相対浸透率</b>	<b>砂岩</b>	<b>泥岩</b>
気相 相対浸透率 Krg	測定値	Corey (1954) <sup>1)</sup>
液相 相対浸透率 Krw	測定値	van Genuchten (1980) <sup>2)</sup>
臨界ガス飽和率 Sgc	0.05	0.05
不動水飽和率 Swir	0.49 測定値	0.638 Bennion (2007) <sup>3)</sup>
最大残留ガス飽和率 Sgrmax	0.275 Holtz (2002) <sup>4)</sup>	—
<b>毛細管圧力</b>	<b>砂岩</b>	<b>泥岩</b>
	van Genuchten (1980) <sup>2)</sup>	
Pc (kPa)	4.04	750

## 【参考文献】

- 1) Corey, A. T., 1954, The Interrelation between gas and oil relative permeabilities: *Producers Monthly*, November, 38-41.
- 2) van Genuchten, M. Th., 1980 A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of undersaturated soils: *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892-898.
- 3) Bennion, D.B., 2007, Permeability and Relative Permeability Measurements at Reservoir Conditions for CO<sub>2</sub>-Water Systems in Ultra Low Permeability Confining Caprocks: *paper SPE 106995-MS*.
- 4) Holtz, M. H., 2002, Residual Gas Saturation to Aquifer Influx : A Calculation Method for 3-D Computer Reservoir Model Construction: *paper SPE 75502*.

## ③ ケーススタディ

以下のケーススタディを実施し、各パラメータがシミュレーションの結果に与える影響を検討した。各ケースの概要を表 3.1-4 にまとめる。

## a ベースケース (表 3.1-4 におけるケース①)

水平浸透率は苫小牧 CCS-1 圧入テストにおける圧力解析結果 (No.3 圧入テスト : 25ml, No. 3a 圧入テスト : 9ml) の平均値  $k_h=17\text{ml}$  をベースケースにおける水平浸透率 ( $k_h$ ) として設定した。垂直浸透率は水平浸透率の 1/10 ( $k_v/k_h=0.1$ ) として設定した。

## b 砂岩層の浸透率の影響 (表 3.1-4 におけるケース②~④)

砂岩の浸透率 (水平浸透率) について浸透率に振れ幅があった場合の圧入挙動について把握することを目的として、ベースケースに対して、高浸透率ケース ( $k_h=25\text{ml}$ ) および低浸透率ケース ( $k_h=9\text{ml}$ ) として検討した。

水平浸透率/垂直浸透率 ( $k_h/k_v$ ) 比についても、ベースケースの 0.1 に対して圧入テストにおける解析結果の平均値 ( $k_h/k_v=0.675$  ;  $k_h=11.475\text{ml}$ ) を与えることでその影響について検討した。

## c 遮蔽層性状の影響 (表 3.1-4 におけるケース⑤)

遮蔽層性状が劣る場合の CO<sub>2</sub> 挙動を把握することを目的として、苫小牧 CCS-2 コア試料の残差圧力測定 (N<sub>2</sub>-水系) で正しい測定ができなかった試料の測定値 (著しく低い測定値) を使用し、水浸透率がベースケースより高く ( $k_w=7 \times 10^{-3}\text{ml}$ )、スレシヨルド圧力が極端に低い ( $P_c(\text{CO}_2)=0.012\text{MPa}$  (水-N<sub>2</sub>系スレシヨルド圧力 :  $P_c(\text{N}_2)$  系 = 0.028MPa から換算)) ケースを想定して検討した。

## d 萌別層砂岩層上限の変更 (表 3.1-4 におけるケース⑥)

図 2.8-4 に示すように、ベースケースにおいて堆積相区分 5 (萌別層下部 TST-陸側下部) については、堆積相解積において対象地域全体に広がっていると仮定しているため、本来、砂礫岩層である堆積相区分 4 に CO<sub>2</sub> は移動することはない。しかしながら、もし何らかの理由で堆積相区分 4 にも CO<sub>2</sub> が貯留された場合にどのような挙動を見せるかを

把握するために、堆積相区分4のトップが萌別層砂岩層トップとなるように本来は泥岩からなる堆積相区分5に砂岩のパラメータを設定したシミュレーションを実施した。

ただし、堆積相区分4,5は圧入対象とはしないため、パーフォレーションを設定せず、圧入圧力の上限もベースケースなど他のケースと同様にした。

e 帯水層容積の影響（表3.1-4におけるケース⑦）

周辺部を含めた既存地質データから、萌別層砂岩層は、地質モデル構築範囲外側への拡がりが確認されている。ケース①～⑥では、外側の帯水層容積についても外周部セルの孔隙容積に反映させている。ケース⑦では帯水層容積を、貯留層の分布域が3Dデータの範囲内に限られるケース（シミュレーションモデルの外周グリッドのVolume Modifyを行わない）を想定した。

表 3.1-4 ケーススタディにおいて使用した各岩相に与えたパラメータ

ケース名	砂岩相				泥岩相				岩水層容積 ( $\text{Bm}^3$ )
	水平浸透率 (mD)	垂直浸透率 (mD)	垂直浸透率/ 水平浸透率	地質相	水平浸透率 (mD)	垂直浸透率 (mD)	AL/MLT 圧力 ( $\text{MPa}$ )	地質相	
	①ベースケース	17	1.7	0.1	4, 8, 9	0.00173	0.00173	0.75	
②低浸透率	9	0.9	0.1	4, 8, 9	0.00173	0.00173	0.75	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10	$49 \times 10^6$
③高浸透率	25	2.5	0.1	4, 8, 9	0.00173	0.00173	0.75	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10	$49 \times 10^6$
④高kv/kh	17	11.475	0.675	4, 8, 9	0.00173	0.00173	0.75	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10	$49 \times 10^6$
⑤過載性能 (他)	17	1.7	0.1	4, 8, 9	0.00173	0.00173	0.012	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10	$49 \times 10^6$
⑥特別層砂岩層上段変更	17	1.7	0.1	4, 5, 8, 9	0.00173	0.00173	0.75	1, 2, 3, 6, 7, 10	$49 \times 10^6$
⑦岩水層容積 (小)	17	1.7	0.1	4, 8, 9	0.00173	0.00173	0.75	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10	$3 \times 10^6$

#### (4) シミュレーションによるCO<sub>2</sub>の圧入挙動

上述の7ケースについて25万トン/年の圧入レートで3年間(75万トン)の挙動予測シミュレーションを行ったところ、ベースケースおよび高浸透率ケースにおいて25万トン/年×3年間の圧入が可能であることを確認した。

低浸透率ケースでは、圧入開始後、坑底圧力(貯留層上限深度での坑内圧力)がすぐに圧入圧力の上限(約13.4MPa)に達することから、圧入レートを14~16万トン/年に減少せざるをえなくなり、その結果、累計圧入量が45.2万トンであった。

以上の通り、貯留可能性に影響を与える要因が水平浸透率であることから、本項では水平浸透率が異なるケースのCO<sub>2</sub>圧入挙動について述べる。

##### ① CO<sub>2</sub>圧入時の挙動

###### a ベースケース

図3.1-18にベースケースにおける坑底圧力、圧入レートおよび累計圧入量の時間的変化を示す。想定圧入レートおよび期間である25万トン/年の圧入レートで3年間(累計圧入量75万トン)CO<sub>2</sub>を圧入可能であることを確認した。ベースケースでは、坑底圧力が、圧入圧力上限(13.4MPa)以下で圧入することができ、圧入終了時点での坑底圧力は13.2MPaとなった。圧入終了後に坑内圧力は大きく低下し、圧入終了5年後には10.6MPaとなり、以後ゆっくりと圧入前の地層圧(10.3MPa)に近づいていく結果が得られた。

###### b 低浸透率ケース

図3.1-19に低浸透率ケースにおける坑底圧力、圧入レートおよび累計圧入量の時間的変化を示す。低浸透率ケースでは、圧入開始後すぐに坑底圧が圧入圧力上限(13.4MPa)に達して、圧入レートを11~16万トン/年、累計圧入量が45.2万トンとなった。ベースケースと同様に圧入終了後に坑底圧力は大きく低下し、圧入終了5年後には10.7MPa程度となり、以後ゆっくりと圧入前の圧力(10.3MPa)に近づいていく結果が得られた。

###### c 高浸透率ケース

図3.1-20に高浸透率ケースにおける坑底圧力、圧入レートおよび累計圧入量の時間的変化を示す。想定圧入レートおよび期間である25万トン/年の圧入レートで3年間(累計圧入量75万トン)CO<sub>2</sub>を圧入可能であることを確認した。高浸透率ケースでは坑底圧力が、圧入圧力上限(13.4MPa)以下の圧力で圧入することができ、圧入終了時点では12.5MPaとなった。他のケースと同様に坑底圧力は圧入終了後に圧力は大きく低下し、圧入終了5年後には10.6MPa程度となり、以後ゆっくりと圧入前の圧力(10.3MPa)に近づいていく結果が得られた。



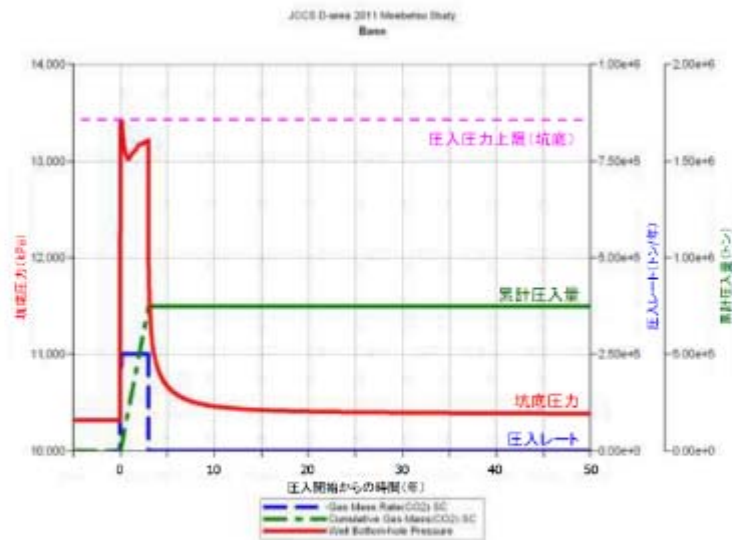


図 3.1-18 ベースケースにおける坑底圧力の時間（年）的变化

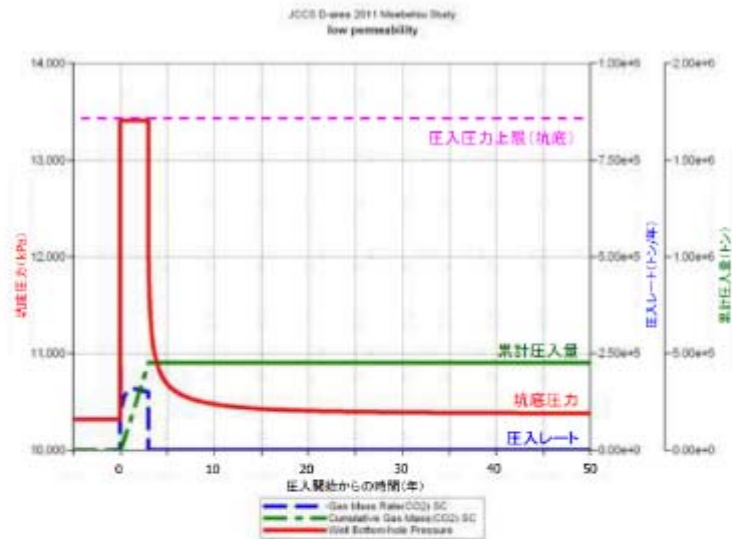


図 3.1-19 低浸透率ケースにおける坑底圧力の時間（年）的变化

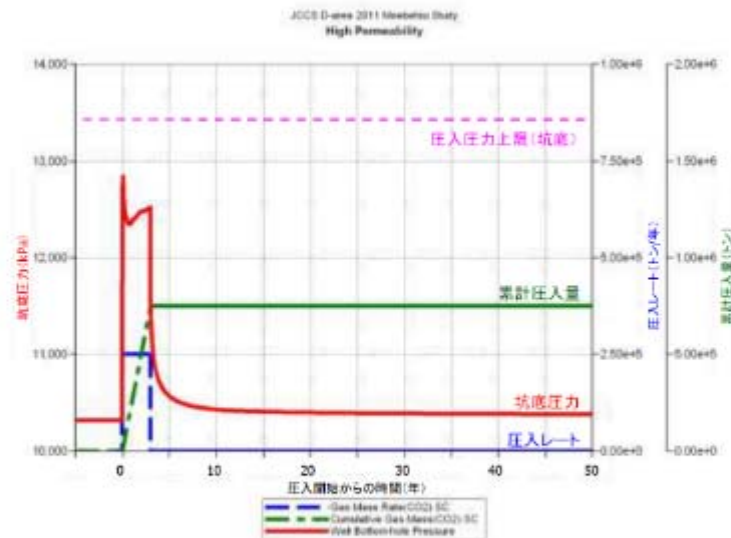


図 3.1-20 高浸透率ケースにおける坑底圧力の時間（年）的变化

② 貯留層の圧力分布

a ベースケース

図 3.1-21 にベースケースにおける圧入終了時点の圧力分布を示す。南北に約 800m、東西約 800m の範囲に 1,000kPa（圧入前の地層圧の約 10%）以上に上昇した領域が、南北に約 6km、東西約 6km の範囲に 100kPa（圧入前の地層圧の約 1%）以上に圧力が上昇した領域が確認された。しかし、20 年後までには前述の圧力上昇は見られなくなった。

b 低浸透率ケース

図 3.1-22 に低浸透率ケースにおける圧入終了時点の圧力分布を示す。南北に約 600m、東西約 400m の範囲に 1,000kPa（圧入前の地層圧の約 10%）以上に上昇した領域が、南北に約 4km、東西約 4km の範囲に 100kPa（圧入前の地層圧の約 1%）以上に圧力が上昇した領域が確認された。しかし、20 年後までには前述の圧力上昇は見られなくなった。

c 高浸透率ケース

図 3.1-23 に圧入終了時点の圧力分布を示す。南北に約 800m、東西約 800m の範囲に 1,000kPa（圧入前の地層圧の約 10%）以上に上昇した領域が、南北に約 6.5km、東西約 4km の範囲に 100kPa（圧入前の地層圧の約 1%）以上に圧力が上昇した領域が確認された。しかし、20 年後までには前述の圧力上昇は見られなくなった。

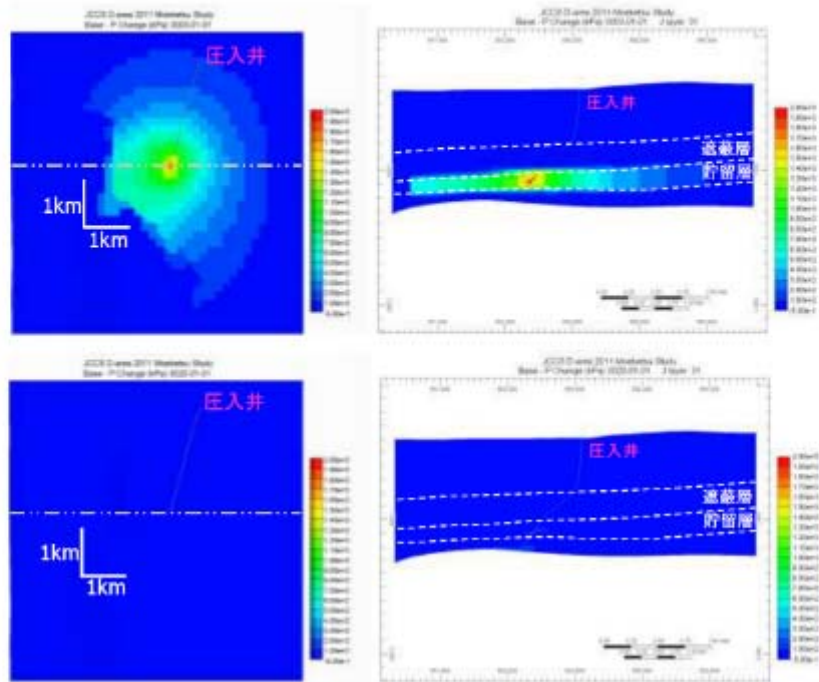


図 3.1-21 CO<sub>2</sub>圧入前からの圧力変化量（単位：kPa）の推移（ベースケース）  
 （上：3年後 下：20年後）  
 （左：平面分布（k方向セル28） 右：東西断面（位置は平面分布の点線の位置））

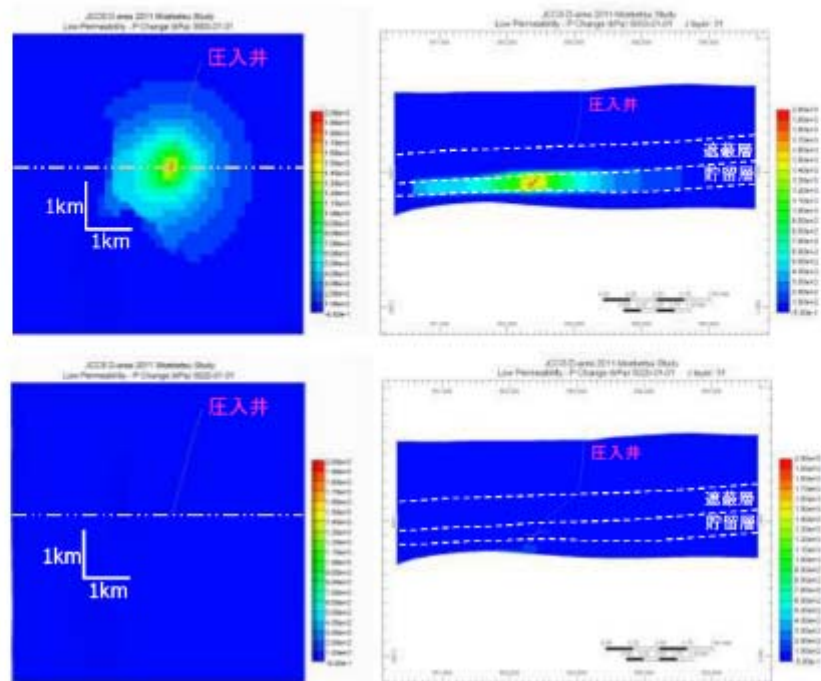


図 3.1-22 CO<sub>2</sub> 圧入前からの圧力変化量（単位：kPa）の推移（低浸透率ケース）  
 （上：3 年後 下：20 年後）  
 （左：平面分布（k 方向セル 28） 右：東西断面（位置は平面分布の点線の位置））

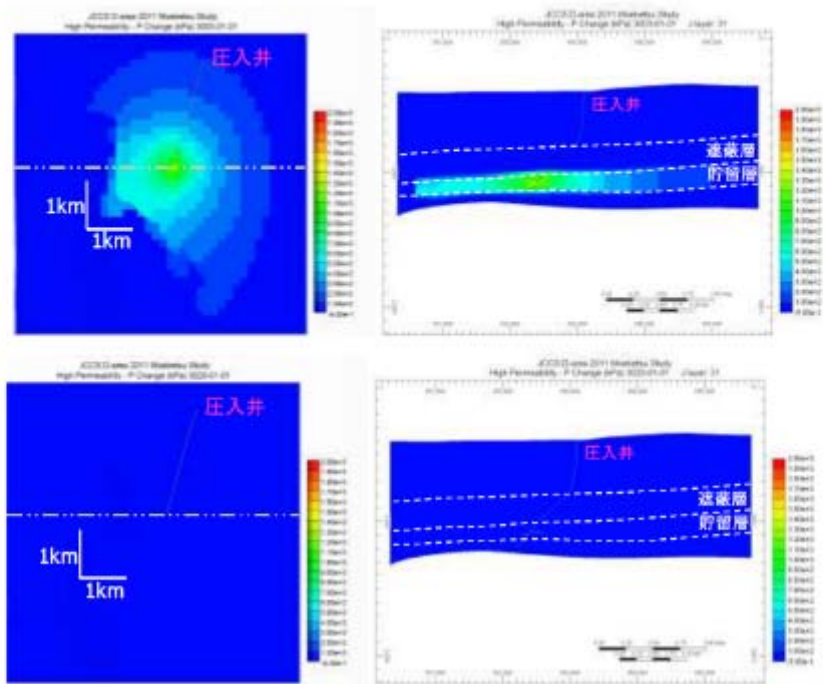


図 3.1-23 CO<sub>2</sub> 圧入前からの圧力変化量（単位：kPa）の推移（高浸透率ケース）  
 （上：3年後 下：20年後）  
 （左：平面分布（k 方向セル 28） 右：東西断面（位置は平面分布の点線の位置））

## (5) シミュレーションによる貯留CO<sub>2</sub>の長期挙動予測

### ① 圧入に伴う貯留層内のCO<sub>2</sub>分布予測

圧入終了時点（圧入開始から3年後）、圧入開始から200年後および1,000年後における気相のCO<sub>2</sub>飽和率分布を図3.1-24～図3.1-26に示す。また、CO<sub>2</sub>が地層水に溶解した状態の溶解CO<sub>2</sub>濃度の分布を図3.1-27～図3.1-29に示す。

#### a ベースケース

気相CO<sub>2</sub>は圧入井近傍において圧入終了直後で東西約400m、南北約600mに飽和率の高い範囲が広がっている。同様に、溶解CO<sub>2</sub>は圧入井近傍において圧入終了直後で東西約400m、南北約600mの範囲に広がっている。その後、CO<sub>2</sub>は水平方向にはほとんど動かなくなるが、貯留層内での上方への移動があり、遮蔽層下限までの移動が見られる。20年後以降、1,000年後まではほとんど動かなかった。一方で、溶解CO<sub>2</sub>は1,000年後まで主に垂直方向に広がった。

#### b 低浸透率ケース

気相CO<sub>2</sub>は圧入井近傍において圧入終了直後で東西約200m、南北約200mに飽和率の高い範囲が広がっている。一方、溶解CO<sub>2</sub>は圧入井近傍において圧入終了直後で東西約400m、南北約600mに広がっている。その後、CO<sub>2</sub>は1,000年後までほとんど動かなかった。溶解CO<sub>2</sub>は1,000年後まで拡がり続けた。

#### c 高浸透率ケース

気相CO<sub>2</sub>は圧入井近傍において圧入終了直後で東西約400m、南北約600mに飽和率の高い範囲が広がっている。一方、溶解CO<sub>2</sub>は圧入井近傍において圧入終了直後で東西約600m、南北約800mに広がっている。その後、CO<sub>2</sub>は水平方向にはほとんど動かなくなるが、貯留層内での上方への移動があり、遮蔽層下限までの移動が見られる。20年後以降、1,000年後まではほとんど動かなかった。一方で、溶解CO<sub>2</sub>は1,000年後まで主に垂直方向に広がった。