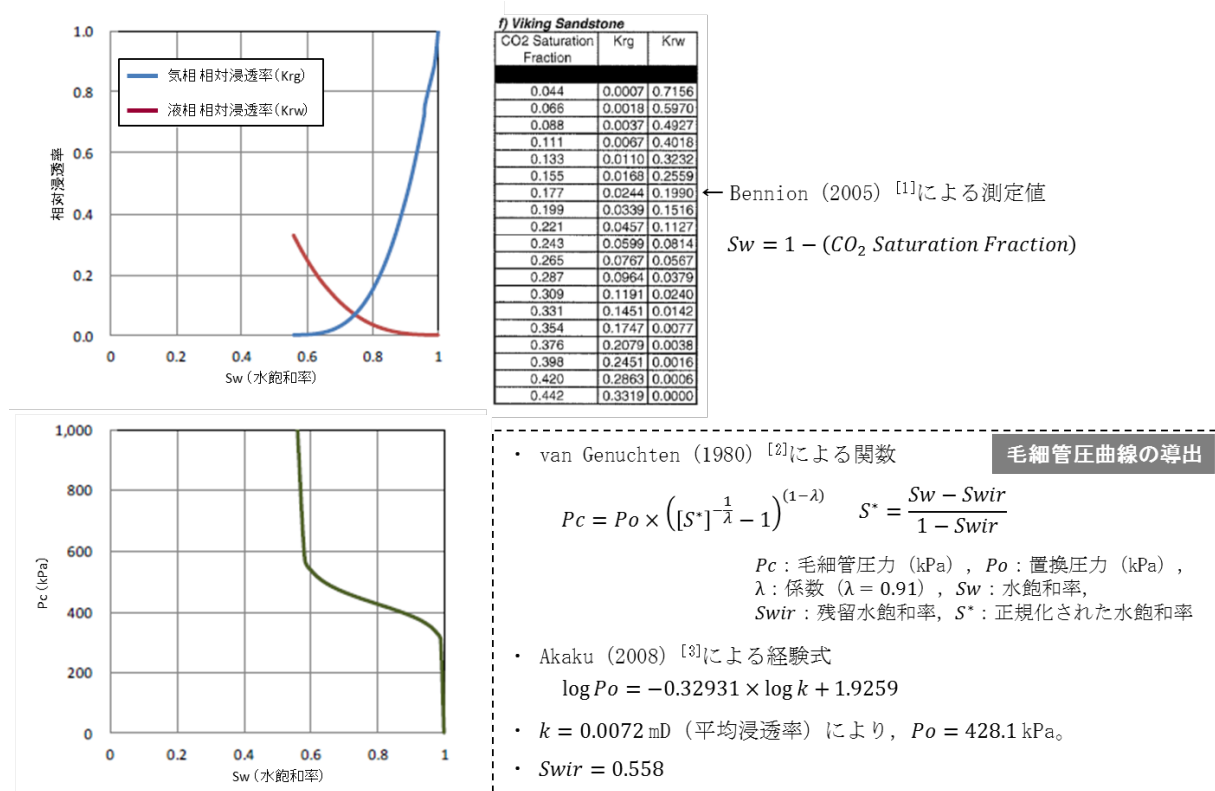




注:1. 上: 相対浸透率曲線, 下: 毛細管圧曲線。

2. 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

3. 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 4.5-12 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

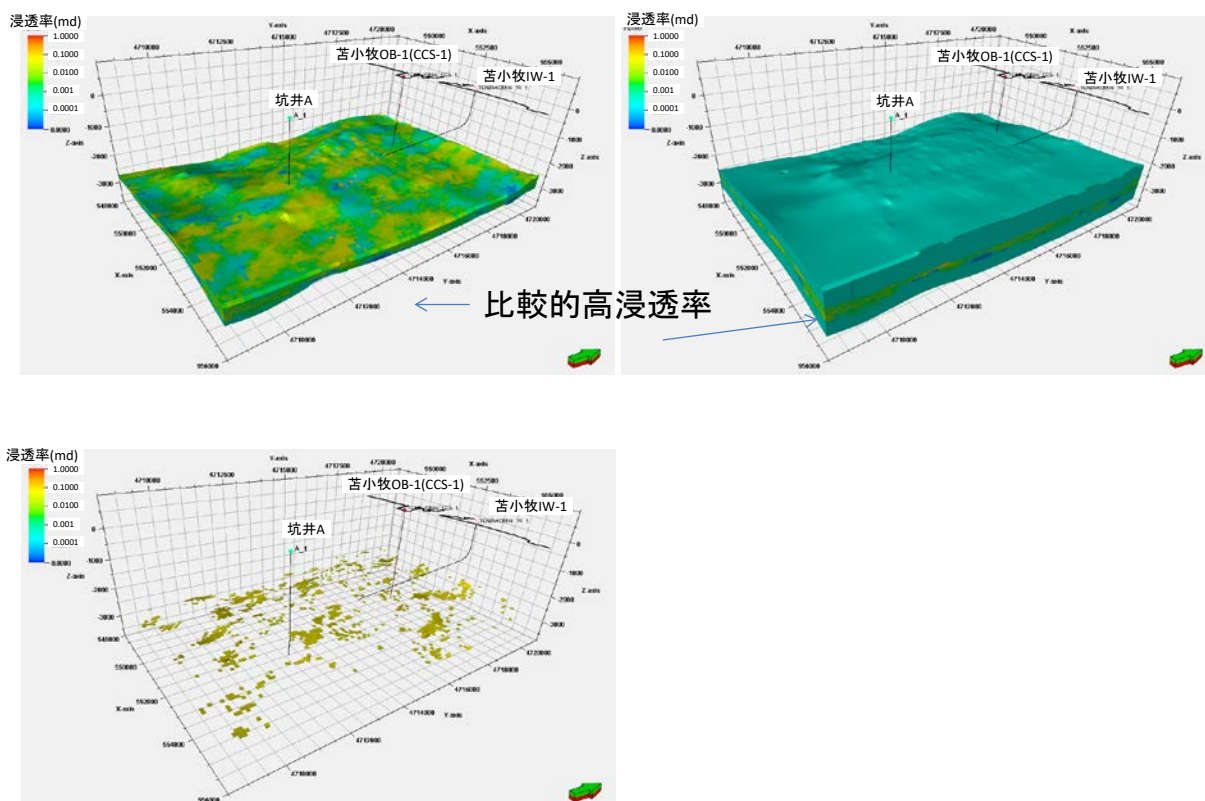
b. の手法により地質モデルの属性を更新した。更新した属性モデルの例を、第 4.5-13 図に示す。

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 4.5 節(1)②ア c. 参照) の属性モデルを作成した。実際に CO₂ 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。

^[1] Bennion, B. 2005. Relative permeability characteristics for supercritical CO₂ 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 CO₂ Trapping. In “Nano-Mega Scale Flow Dynamics in Energy System”: Tohoku University Press, Sendai.



注：浸透率>0.05mD でフィルタリング

第 4.5-13 図 更新した属性モデルの例（浸透率）

② CO₂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、CO₂挙動予測シミュレーションを実施し、CO₂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。CO₂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^{注1}。

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 CO₂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 CO₂トラッピング

^{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、CO₂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。

・CO₂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 CO₂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^{注1}。

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 4.5-5 表に示す値を用いた。

^{注1} 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/cm²）であった。これは等価泥水比重で 1.96g/cm³ 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/cm²）、その 90%の値（426.5kg/cm²=41,853kPa）をシミュレーション上の地層破壊圧と仮定した。

第 4.5-5 表 シミュレーションパラメーター一覧（平成 23 年度地質モデル）

モデル	滝ノ上層 T1 部層 2011 モデル		
サイズ	8km×12km×4km (ideal volume : 24km×24km×4km)		
グリッド	80×120×106 グリッド		
アクティブ・ブロック数	384,050		
基準温度	91.0℃ (2,419.4m)		
基準圧力	34,370kPa (2,419.4m)		
CO ₂ 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	0.127	0.15
	Bennion(2005) ^[1]		
平均浸透率: mD	2.7	0.0072	0.000035
圧縮率: kPa ⁻¹	8.073×10 ⁻⁷ (測定値)		
塩分濃度: ppm (NaCl)	35,100 (Cl ⁻ = 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 K _{rg}	Bennion (2005) ^[1]		Corey (1954) ^[2]
液相 相対浸透率 K _{rw}			van Genuchten (1980) ^[3]
臨界ガス飽和率 S _{gc}	0.04 Bennion (2005) ^[1]		0.05
不動水飽和率 S _{wir}	0.558 Bennion (2005) ^[1]		0.8
最大残留ガス飽和率 S _{grmax}	0.241		—
	from default value of GEM		
毛細管圧力曲線	溶岩 (貯留層)	凝灰岩 (貯留層)	泥岩 (遮蔽層)
	Bennion (2006) ^[4] , van Genuchten (1980) ^[3]		測定値

c. CO₂ 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。

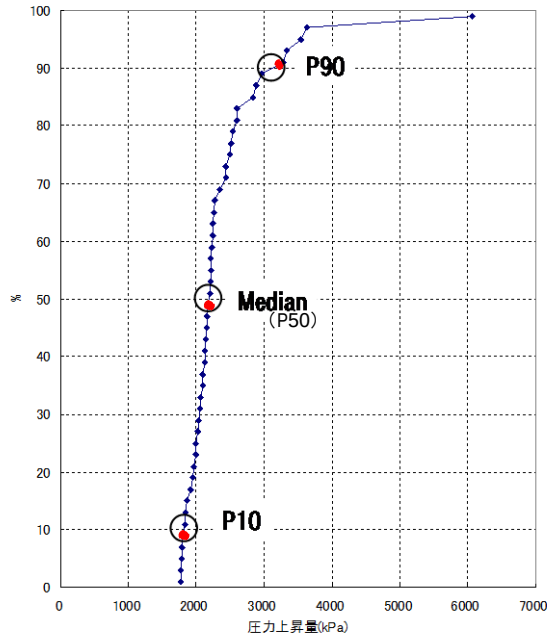
圧入終了時の坑底圧力（貯留層上限深度での坑内圧力）の圧力上昇量を序列化して、50 個のモデルの累積確率分布を作成した。圧力上昇量が当該モデル以下になる確率をそれぞれ P10, P50, P90 のパーセンタイル値として設定した（第 4.5-14 図）。

^[1] Bennion, B. 2005. Relative permeability characteristics for supercritical CO₂ displacing water in a variety of potential sequestration zones in the Western Canada Sedimentary Basin. paper SPE 95547, pp. 7-9, p. 12

^[2] Corey, A.T. 1954. The Interrelation between gas and oil relative permeabilities. Producers Monthly, November, pp. 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, pp.892-898

^[4] Bennion, B. 2006. The impact of interfacial tension and pore-size distribution / capillary pressure character on CO₂ relative permeability at reservoir condition in CO₂-Brine systems. paper SPE 99325, p. 9



第 4.5-14 図 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（平成 23 年度地質モデル）

これらの 3 つのモデルについて CO₂挙動予測シミュレーションを行った。

- a) P10 モデル：圧力上昇量が当該モデル以下になる確率が 10%
 - b) P50 モデル：圧力上昇量が当該モデル以下になる確率が 50%
 - c) P90 モデル：圧力上昇量が当該モデル以下になる確率が 90%
- 3 つのモデルに与えられた浸透率分布の例を，第 4.5-15 図に示す。

イ) 滝ノ上層 T1 部層における CO₂挙動予測（圧入井掘削結果を踏まえた予測）

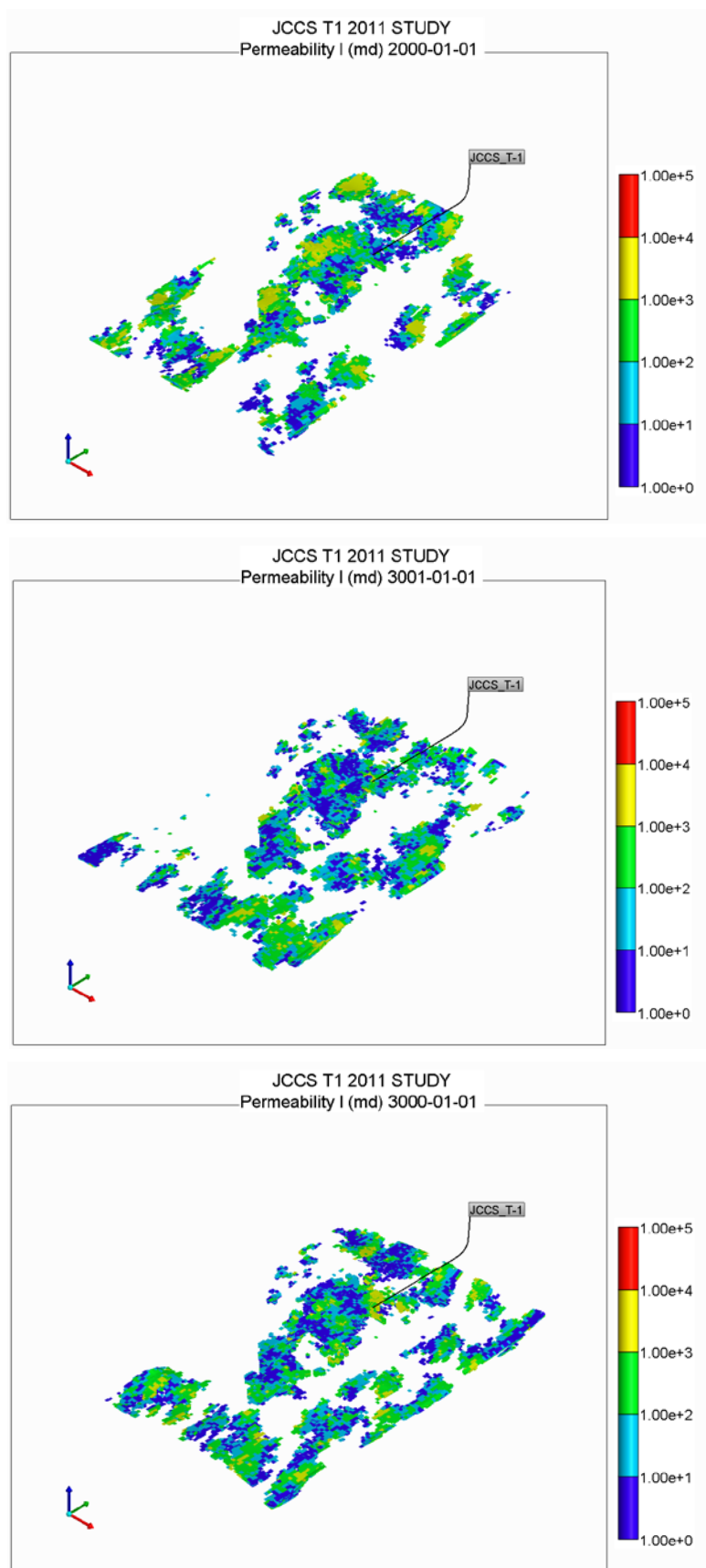
a. 概要

Computer Modelling Group Ltd. 社の GEM (ver2014.10) 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 CO₂トラッピング
- ・ CO₂の地層水への溶解による溶解トラッピング

圧入井における滝ノ上層の仕上げ全区間に対して CO₂を圧入する設定とした。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，滝ノ上層圧入井の振老層下部泥岩（遮蔽層）で実施したエクステンデットリークオフテストで取得したリークオフ圧力を地層の破壊圧と仮定し，その 90%（38,000kPa@PT センサー深度）と設定した。



注：上から順に P10 モデル，P50 モデル，P90 モデル。単位は，mD。

第 4.5-15 図 浸透率分布（平成 23 年度地質モデル）

b. パラメータ

シミュレーションパラメータは、滝ノ上層圧入井のデータ（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、第 4.5-6 表に示す値を用いた。

第 4.5-6 表 シミュレーションパラメーター一覧（平成 27 年度地質モデル）

モデル	滝ノ上層 T1 部層 2015 モデル	
サイズ	8km×12km×4km ⇒ 2km×2km×1km（セクターモデル）	
グリッド	80×120×106 グリッド ⇒ 20×20×62（セクターモデル）	
アクティブ・ブロック数	24,800（セクターモデル）	
基準温度	88.3℃（2,340m/PT センサー深度）	
基準圧力	32,600kPa（2,340m/PT センサー深度）	
CO ₂ 圧入レート，圧入期間	200,000 トン/年×3 年（設定最大レート）	
圧入圧力上限	38,000kPa（PT センサー深度）	
岩石性状	凝灰岩（貯留層）	泥岩（遮蔽層）
平均孔隙率	滝ノ上層圧入井 AI 分布から推定	0.15
平均浸透率：mD	滝ノ上層圧入井ビルドアップテスト結果等から推定	0.000035
圧縮率：kPa ⁻¹	8.073×10 ⁻⁷ （測定値）	
塩分濃度：ppm（NaCl）	35,100（Cl ⁻ = 21,300ppm）	
相対浸透率	凝灰岩（貯留層）	泥岩（遮蔽層）
気相 相対浸透率 K _{rg}	Bennion (2005) ^[1]	Corey (1954) ^[2]
液相 相対浸透率 K _{rw}		van Genuchten (1980) ^[3]
臨界ガス飽和率 S _{gc}	0.04 Bennion (2005) ^[1]	0.05
不動水飽和率 S _{wir}	0.558 Bennion (2005) ^[1]	0.8
最大残留ガス飽和率 S _{grmax}	0.241	—
	from default value of GEM	
毛細管圧力曲線	凝灰岩（貯留層）	泥岩（遮蔽層）
	Bennion (2006) ^[4] , van Genuchten (1980) ^[3]	測定値

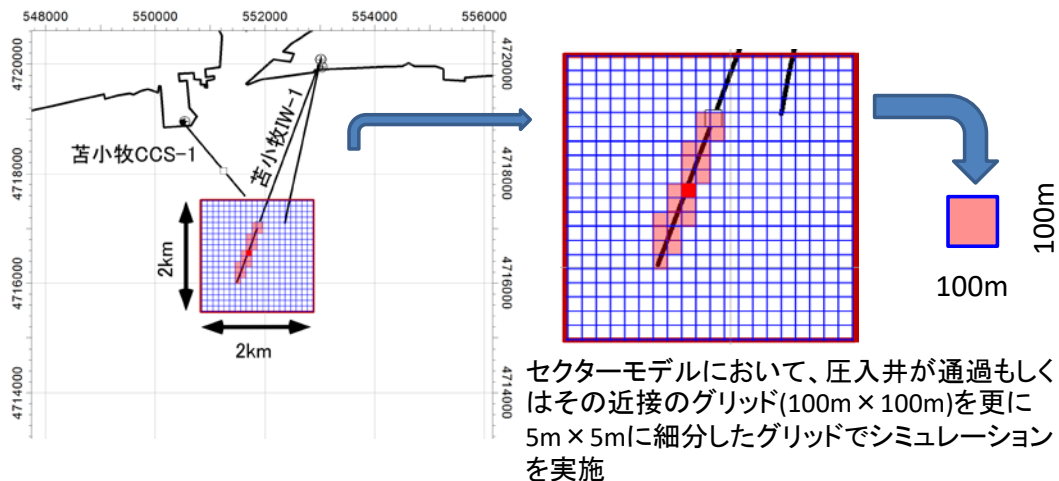
滝ノ上層の貯留岩性状が予想以上に低かったため、地質モデルの一部分を切出した 2km×2km のセクターモデルを作成した。さらにより正確なシミュレーションを実施するために、100m×100m のセクターモデルとし、滝ノ上層圧入井が通過するグリッドを 5m×5m のグリッドに細分の上、シミュレーションを実施した（第 4.5-16 図）。

^[1] Bennion, B. 2005. Relative permeability characteristics for supercritical CO₂ displacing water in a variety of potential sequestration zones in the Western Canada Sedimentary Basin. paper SPE 95547, pp. 7-9, p. 12

^[2] Corey, A.T. 1954. The Interrelation between gas and oil relative permeabilities. Producers Monthly, November, pp.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, pp.892-898

^[4] Bennion, B. 2006. The impact of interfacial tension and pore-size distribution / capillary pressure character on CO₂ relative permeability at reservoir condition in CO₂-Brine systems. paper SPE 99325, p. 9

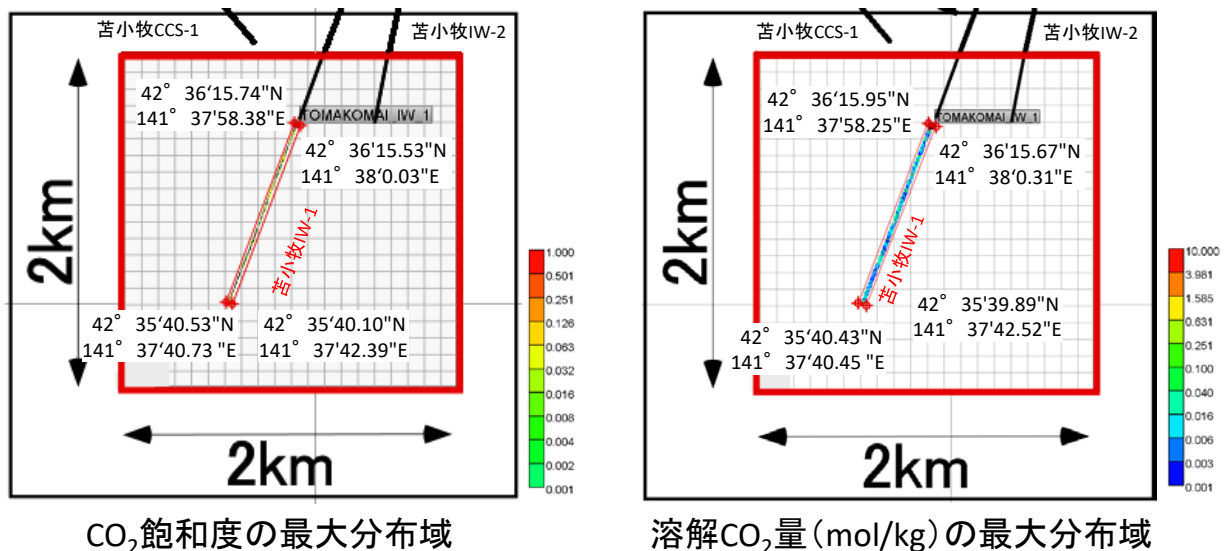


注：全域で作成した地質モデルからセクターモデル（2km×2km）を切出し、その中を100m×100mに分割した。そのうちの圧入井が通過するグリッドをさらに5m×5mに分割してシミュレーションを実施した。

第 4.5-16 図 平成 27 年度シミュレーションに用いたセクターモデルとグリッド

③ 圧入した CO₂ の平面的な分布範囲

圧入開始から 1,000 年後までの CO₂飽和度および溶解 CO₂量の分布範囲を考慮し、圧入した CO₂の平面的な分布範囲を推定した（第 4.5-17 図）。



- 注：1. 図中の滝ノ上層圧入井、萌別層圧入井および苫小牧 CCS-1 は、坑井の坑跡を上面に投影したもの。
2. 滝ノ上層圧入井の仕上げ区間全体から、CO₂が滝ノ上層中に圧入される。圧入に際し予想される CO₂飽和度および溶解 CO₂量の分布を、階調をつけて色表示した。
3. 図中の座標は、シミュレーションにより予想される CO₂飽和度および溶解 CO₂量の分布域を考慮して想定した圧入した CO₂の分布範囲を平面に投影したもの。シミュレーション結果は、三次元的にグリッド化した地質モデルを用いて実施したため、分布自体もグリッドを反映した形（四角）となる。
4. 圧入した CO₂の分布範囲は限定的となるため、滝ノ上層圧入井の圧入区間から、CO₂飽和度では 20m、溶解 CO₂量では 25m までの範囲とした。
5. CO₂飽和度の下限値は、0.001（0.1%）。溶解 CO₂量の下限値は、0.001mol/kg。

第 4.5-17 図 CO₂の平面的な分布範囲（平成 27 年度シミュレーション結果）

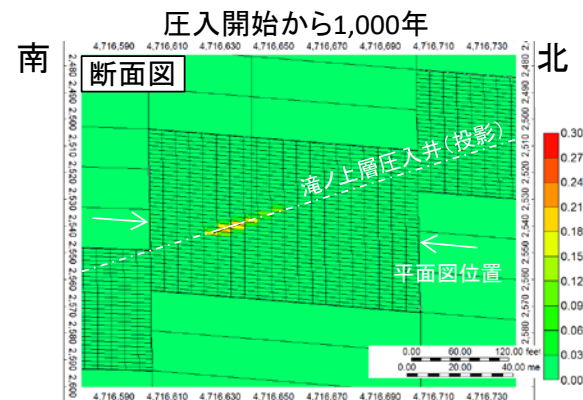
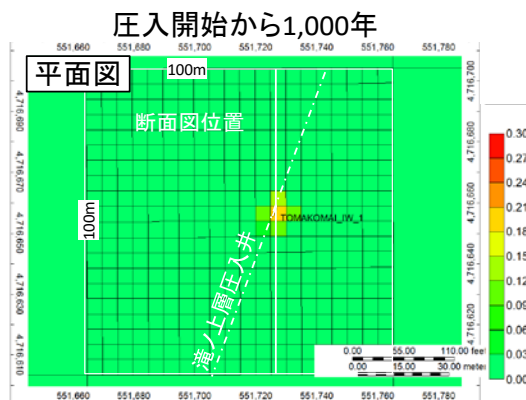
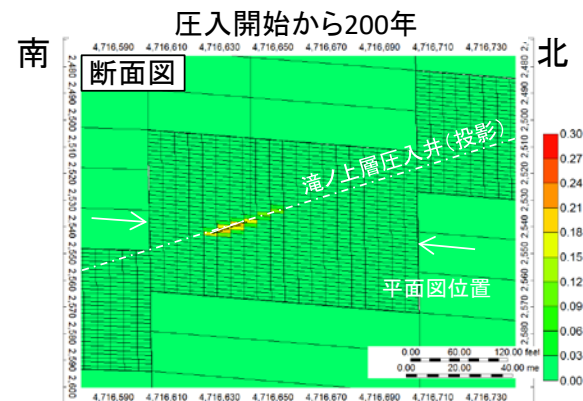
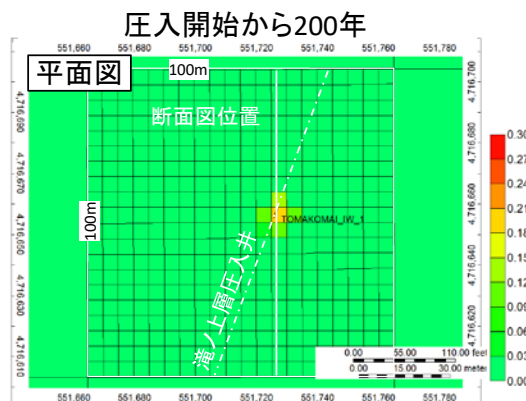
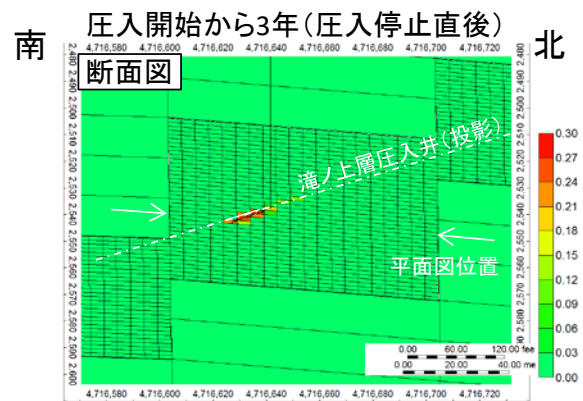
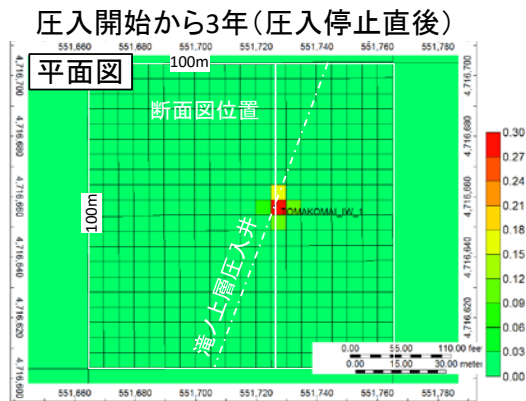
予想される CO₂飽和度の分布域は溶解 CO₂量の分布域に含まれるため、溶解 CO₂量の分布域を圧入した CO₂の分布範囲とした。

第 4.5-7 表に、CO₂の平面的な分布範囲の座標を示す。

第 4.5-7 表 海底下廃棄した CO₂の平面的な分布範囲（滝ノ上層 T1 部層）

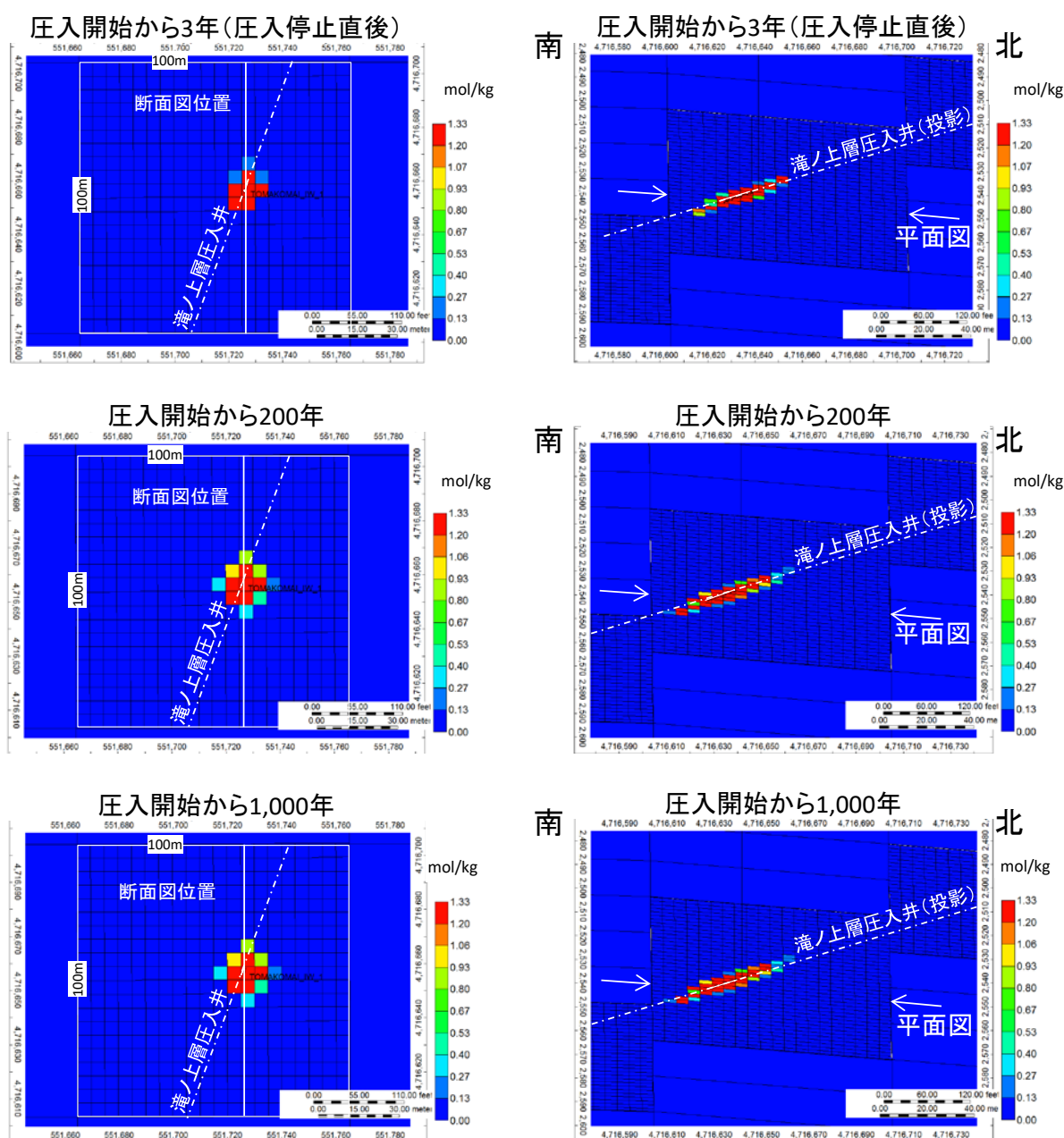
北限			南限			東限			西限		
度	分	秒	度	分	秒	度	分	秒	度	分	秒
42	36	15.95	42	35	39.89	141	38	0.31	141	37	40.45

また、CO₂飽和度の分布に対するシミュレーション結果を第 4.5-18 図に、溶解 CO₂量の分布に対するシミュレーション結果を第 4.5-19 図に示す。



- 注：1. 左：坑跡が通過する地点の平面図，右：その地点の南北方向の断面図。
 2. 上段：圧入開始から3年後（圧入停止直後），中段：圧入開始から200年後，下段：圧入開始から1,000年後。
 3. シミュレーションに使用する地質モデルを，圧入井掘削時に実施した圧力試験の結果と整合させるために，地質モデルのグリッドサイズを細分化した。平面図のグリッドは100m×100mのグリッドであるが，圧入井が通過するグリッドは5m×5m(1/20)としてシミュレーションを実施した（平面図では5m×5mのグリッド表示は省略）。圧入井が通過するグリッドは，垂直方向は約2mに分割した。

第 4.5-18 図 CO₂飽和度の推移（平成 27 年度シミュレーション結果）



- 注：1. 左：坑跡が通過する地点の平面図，右：その地点の南北方向の断面図。単位は，mol/kg。
 2. 上段：圧入開始から3年後（圧入停止直後），中段：圧入開始から200年後，下段：圧入開始から1,000年後。
 3. シミュレーションに使用する地質モデルを，圧入井掘削時に実施した圧力試験の結果と整合させるために，地質モデルのグリッドサイズを細分化した。平面図のグリッドは100m×100mのグリッドであるが，圧入井が通過するグリッドは5m×5m(1/20)としてシミュレーションを実施した（平面図では5m×5mのグリッド表示は省略）。圧入井が通過するグリッドは，垂直方向は約2mに分割した。

第4.5-19図 溶解CO₂量の推移（平成27年度シミュレーション結果）

④ 圧入したCO₂の垂直的な分布範囲

圧入開始から1,000年後までのCO₂飽和度および溶解CO₂量の垂直的な分布範囲は，第4.5-18図および第4.5-19図に示すとおり，圧入井の坑跡に沿った上下10m以内となる。

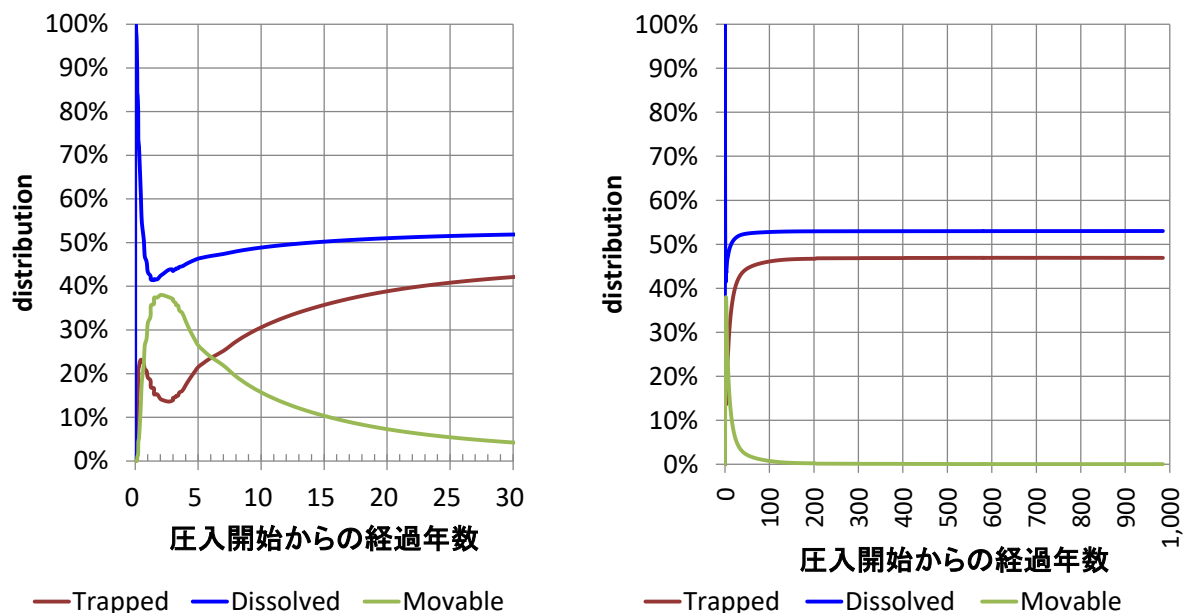
第4.5-8表に，CO₂の垂直的な分布範囲の座標を示す。なお，安全側に立ち，圧入井の貯留層区間の下50mとし，上限は遮蔽層深度としている。

第 4.5-8 表 海底下廃棄した CO₂の垂直的な分布範囲（滝ノ上層 T1 部層）

GL = 9.1m	掘削深度 (mMD)	垂直深度 (mVD)	レベル (mbmsl)	備考
滝ノ上層上限	4,624	2,390	2,381	
圧入井坑底深度	5,800	2,753	2,794	
CO ₂ 上限分布深度	—	—	2,381	遮蔽層深度
CO ₂ 下限分布深度	—	—	2,819	坑底+25m
CO ₂ 飽和度上限分布深度	—	—	2,381	遮蔽層深度
CO ₂ 飽和度下限分布深度	—	—	2,814	坑底+20m
溶解 CO ₂ 量上限分布深度	—	—	2,381	遮蔽層深度
溶解 CO ₂ 量下限分布深度	—	—	2,819	坑底+25m

注：圧入した CO₂の分布範囲は限定的となるため、下限は圧入井の坑底（圧入区間の最深部）から、CO₂飽和度では 20m、溶解 CO₂量では 25m までの範囲とした。また、上限については、遮蔽層までとした。溶解 CO₂量の方がやや広範囲に分布するため、圧入した CO₂の分布範囲は、溶解 CO₂量の分布範囲とした。

貯留 CO₂の 3 つの貯留形態を、Movable（移動する可能性がある気相 CO₂）、Dissolved（溶解 CO₂）および Trapped（孔隙等にトラップされ動かない気相 CO₂）の 3 つに表現し、CO₂ 圧入量に対する割合の経時変化を、第 4.5-20 図に示す。



注：左図；時間スケールが 0～30 年。右図；時間スケールが 0～1,000 年。

第 4.5-20 図 CO₂の貯留フォーム（割合）の変化（平成 27 年度シミュレーション結果）

圧入開始初期には圧入した CO₂のほとんどは溶解するが、貯留層の浸透性が低いために影響範囲が広がらず、すぐに溶解しきれなくなり、Movable CO₂の割合が増加する。

圧入停止後に徐々に溶解 CO₂量が増加するが、圧入停止後 50 年程度で安定する。圧入終盤より圧入井から徐々に周辺に移動した Movable CO₂がトラップされ、約 200 年でその割合はほとんど 0 となる。

圧入停止から 200 年程度以降では、Movable、Dissolved および Trapped の割合は安定する。

(2) 萌別層砂岩層における特定二酸化炭素ガスが広がる範囲

① 検討に使用した地質モデル

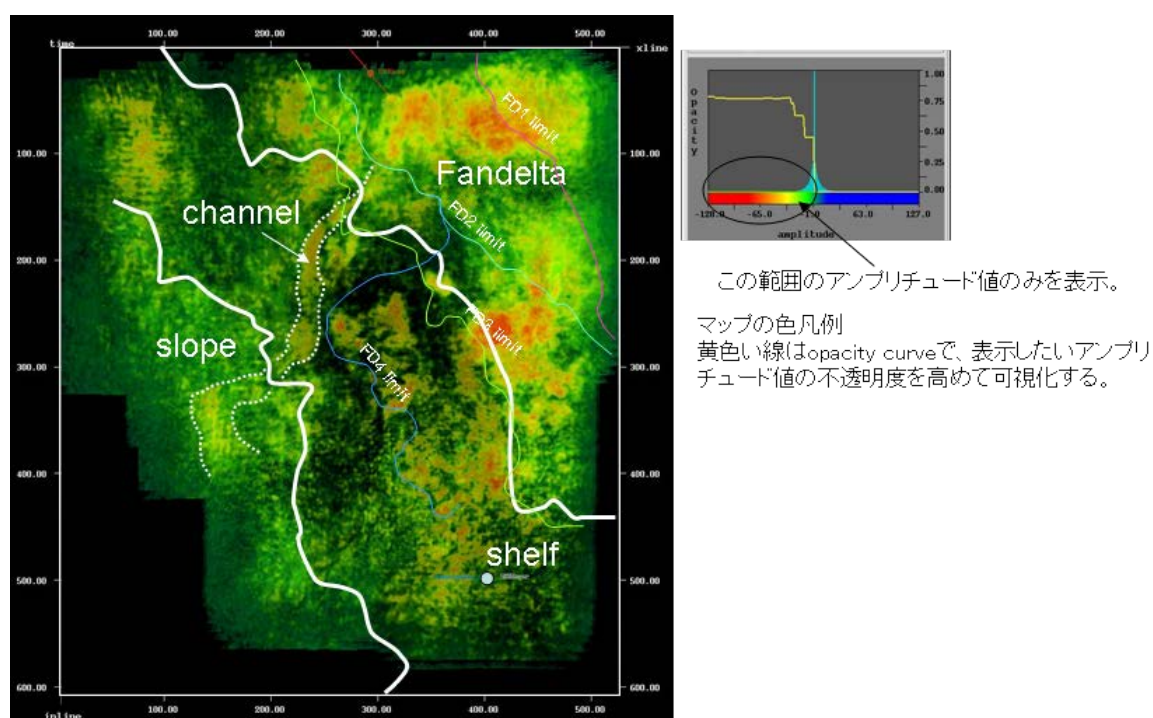
7) 平成 23 年度地質モデルの作成

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 4.5-21 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。



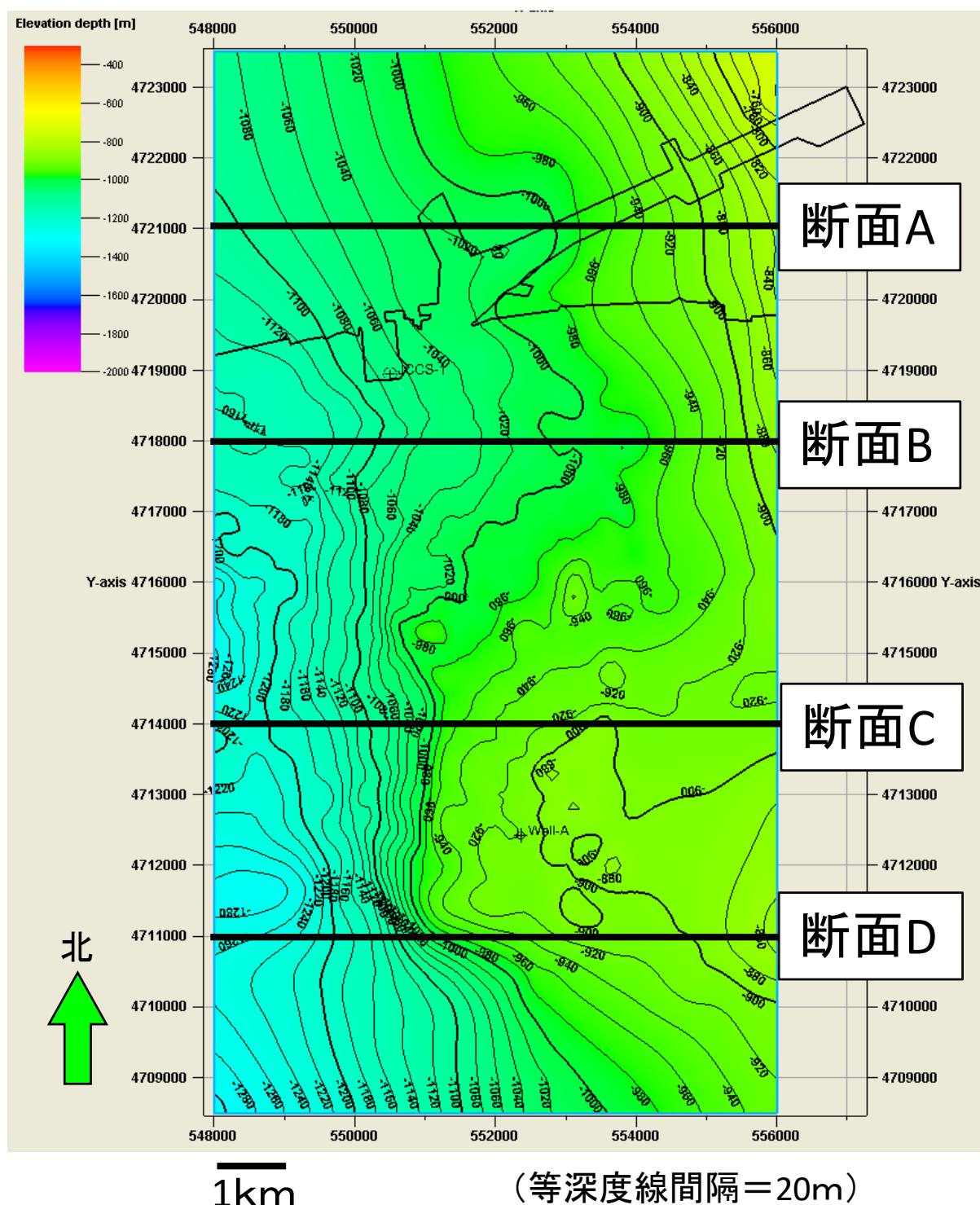
注: 図の上部の方角は、北。暖色系は負の高い振幅値、寒色系は負の低い振幅値を示す。正の振幅は、非表示。

第 4.5-21 図 萌別層 HST 区間の堆積相解釈図

b. 構造モデルの作成

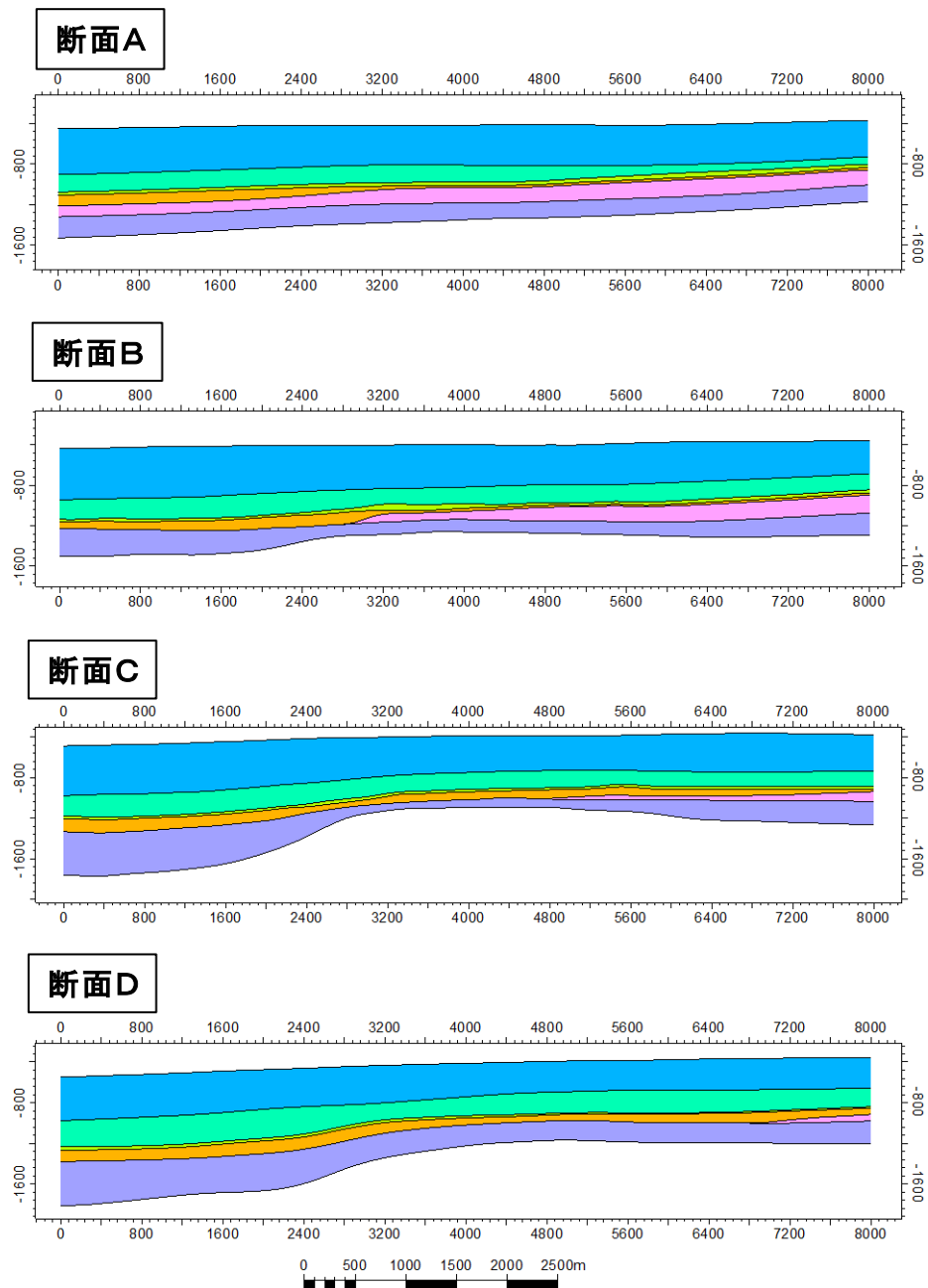
地質モデルを作成するため、三次元弾性波探査データの解釈により作成した各層準の時間構造図を深度構造図へ変換した。

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、鵜川層上限、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 4.5-22 図に、主要な層準の東西モデル断面を第 4.5-23 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 4.5-22 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
- 鵜川層
- 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】
- 荷葉層

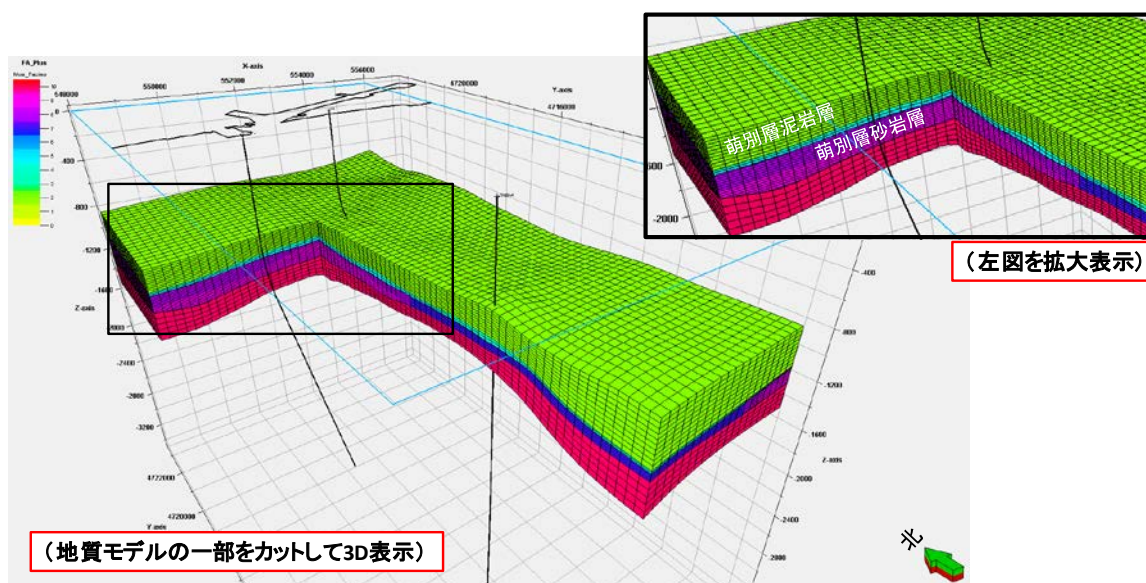
注：上から順に，断面A～D。スケールは，m。

第 4.5-23 図 モデル断面

各層準内に第 4.5-9 表のようにグリッドセルを作成した。第 4.5-24 図に，グリッドセルの鳥瞰図を示す。

第 4. 5-9 表 萌別層構造モデルのグリidding

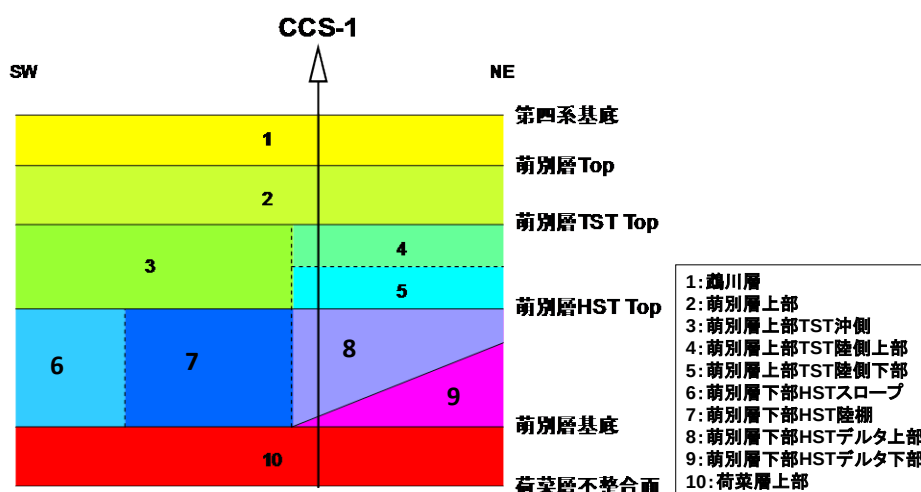
i 方向（東西方向）セル数	200m	40 セル
荷葉層上部：	3 レイヤーに分割	(k 方向セル番号：7～9)
荷葉層下部：	5 レイヤーに分割	(k 方向セル番号：10～14)
平取+軽舞層：	5 レイヤーに分割	(k 方向セル番号：15～19)
振老層：	5 レイヤーに分割	(k 方向セル番号：20～24)
滝ノ上層 T1 部層上部：	15m ごとに分割	(k 方向セル番号：25～57)
滝ノ上層 T1 部層下部：	15m ごとに分割	(k 方向セル番号：58～96)
滝ノ上層下部：	5 レイヤーに分割	(k 方向セル番号：97～101)
南長沼層	5 レイヤーに分割	(k 方向セル番号：102～106)



第 4. 5-24 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 4. 5-25 図に示す。

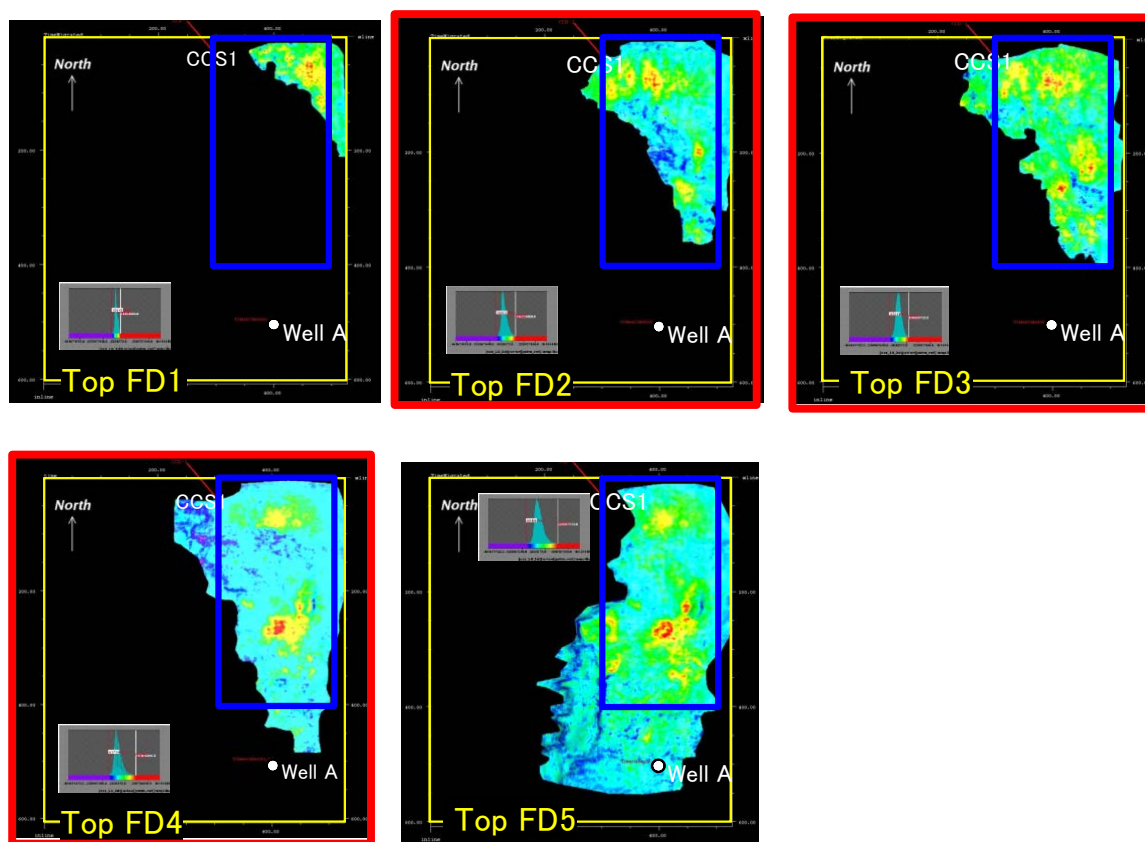


第 4. 5-25 図 堆積相区分概念図

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) およびデルタ下部 (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) および陸側下部 (5：泥岩層) に区分した。

イ) 平成 24 年度地質モデルの作成

萌別層圧入井の圧入（廃棄）位置を選定するあたり、三次元弾性波探査データおよび苫小牧 CCS-1（調査井）、苫小牧 CCS-2（調査井）、坑井 A（既存民間井）のデータを解析した。そして、当該海域の萌別層砂岩層には下位から FD1～FD5 の 5 枚のファンデルタシステムの分布を認識した（第 4.5-26 図）。



第 4.5-26 図 萌別層砂岩層に認識された 5 枚のファンデルタシステムおよび貯留層ターゲット

弾性波探査データを解析した結果、FD2、FD3、FD4 には粗粒堆積物が埋積するチャネルの発達が認識され、その重複箇所をターゲットとして萌別層圧入井の掘削位置を選定した。

② 萌別層砂岩層における CO₂ 挙動予測シミュレーション

7) 平成 23 年度シミュレーション

a. 概要

シミュレータとして GEM (ver. 2010. 12) を使用した。属性モデルにおいて分類した堆積相区分 (第 4. 5-25 図) を、以下の 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

萌別層圧入井 (圧入位置) は、萌別層砂岩層を対象とした AI バージョン結果をもとに、貯留 CO₂ の広がり が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 (CO₂ 圧入基地) 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は、苫小牧 CCS-2 の萌別層泥岩層下部のリークオフ圧力から、予測される地層破壊圧の 90% (13, 410kPa) とした^{注 1}。

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 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、物理検層測定値など) および文献値から設定した (第 4. 5-10 表)。

^{注 1} 苫小牧 CCS-2 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、その垂直深度 (991m) において、14. 6MPa (148. 6kg/cm²) であった。これは等価泥水比重で 1. 50g/cm³ となる。この等価泥水比重から、萌別層圧入井の遮蔽層下限深度 (垂直深度 1, 012. 2m) のリークオフ圧力を求め (151. 8kg/cm²)、その 90% の値 (136. 65kg/cm²=13, 410kPa) をシミュレーション上の地層破壊圧と仮定した。

第 4.5-10 表 シミュレーションパラメーター一覧（平成 23 年度地質モデル）

モデル	萌別層砂岩層 2011 モデル	
サイズ	8km×15km×1.5km	
グリッド	40×75×43 グリッド	
アクティブ・ブロック数	97,024	
基準温度	44.78℃ (1,046.835mVD)	
基準圧力	10,669.4kPa (1,046.835mVD)	
CO ₂ 圧入レート，圧入期間	250,000 トン/年×3 年	
圧入圧力上限	13,410kPa	
深部塩水層容積（面積×層厚×孔隙率）	49×10 ⁹ Rm ³	
岩石性状	砂岩	泥岩
平均孔隙率	0.281	0.342
平均浸透率：mD	17	0.00173
圧縮率：kPa ⁻¹	1.532×10 ⁻⁶ （測定値）	
塩分濃度：ppm (NaCl)	18,000 (Cl ⁻ = 10,350mg/L)	
相対浸透率	砂岩	泥岩
気相 相対浸透率 K _{rg}	測定値	Corey (1954) ^[1]
液相 相対浸透率 K _{rw}	測定値	van Genuchten (1980) ^[2]
臨界ガス飽和率 S _{gc}	0.05	0.05
不動水飽和率 S _{wir}	0.49	0.638
	測定値	Bennion (2007) ^[3]
最大残留ガス飽和率 S _{grmax}	0.275	—
	Holtz (2002) ^[4]	
毛細管圧力	砂岩	泥岩
	van Genuchten (1980) ^[2]	
P _c ：kPa	4.04	750

c. 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，第 4.5-11 表に示す。

-
- ^[1] Corey, A.T. 1954. The Interrelation between gas and oil relative permeabilities. Producers Monthly, November, pp.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, pp.892-898
- ^[3] Bennion, D.B. 2007. Permeability and Relative Permeability Measurements at Reservoir Conditions for CO₂-Water Systems in Ultra Low Permeability Confining Caprocks. paper SPE 106995-MS, p.5
- ^[4] Holtz, M.H. 2002. Residual Gas Saturation to Aquifer Influx : A Calculation Method for 3-D Computer Reservoir Model Construction. paper SPE 75502, p.7

第 4.5-11 表 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（平成 23 年度地質モデル）

ケース名	砂岩層				泥岩層				深部 塩水層 容積 (R_m^*)
	水平浸 透率 kh (mD)	垂直浸 透率 kv (mD)	垂直浸透率 /水平浸透率	堆積相	水平浸 透率 kh (mD)	垂直浸 透率 kv (mD)	スレシ ョルド圧力 (MPa)	堆積相	
1) ベースケース	17	1.7	0.1	4, 8, 9	0.00173	0.00173	0.75	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10	49×10^9
2) 低浸透率ケース	9	0.9	0.1	4, 8, 9	0.00173	0.00173	0.75	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10	49×10^9
3) 高浸透率ケース	25	2.5	0.1	4, 8, 9	0.00173	0.00173	0.75	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10	49×10^9
4) 高 kv/kh ケース	17	11.475	0.675	4, 8, 9	0.00173	0.00173	0.75	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10	49×10^9
5) 遮蔽性能（低）ケース	17	1.7	0.1	4, 8, 9	0.007	0.007	0.012	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10	49×10^9
6) 萌別層砂岩層上限変更ケース	17	1.7	0.1	4, 5, 8, 9	0.00173	0.00173	0.75	1, 2, 3, 6, 7, 10	49×10^9
7) 深部塩水層容積（小）ケース	17	1.7	0.1	4, 8, 9	0.00173	0.00173	0.75	1, 2, 3, 5, 6, 7, 10	3×10^9

1) ベースケース

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：25mD, No. 3a 圧入テスト：9mD）の平均値 $k_w = 17\text{mD}$ を、水平浸透率（kh）として設定した。垂直浸透率は、水平浸透率の 1/10（ $k_v/k_h = 0.1$ ）とした。

2) 低浸透率ケース

砂岩層の浸透率を、 $k_h = 9\text{mD}$ として設定した。垂直浸透率は、水平浸透率の 1/10 とした。

3) 高浸透率ケース

砂岩層の浸透率を、 $k_h = 25\text{mD}$ として設定した。垂直浸透率は、水平浸透率の 1/10 とした。

4) 高 kv/kh ケース

砂岩層の水平浸透率/垂直浸透率を変化させて設定した（ $k_v/k_h = 0.675$: $k_v = 11.475\text{mD}$ ）。

5) 遮蔽性能（低）ケース

苫小牧 CCS-2 コア試料の残差圧力測定で正しい測定ができなかった試料の測定値を使用し、泥岩層の水平浸透率がベースケースより高く、スレシヨルド圧力が極端に低いケースを想定した。

6) 萌別層砂岩層上限変更ケース

泥岩層のパラメータを与えている堆積相区分 5（第 4.5-25 図参照）に砂岩層のパラメータを設定した。

7) 深部塩水層容積（小）ケース

深部塩水層容積を貯留層の分布域・三次元弾性波探査データの範囲内に限定したケースを想定した。

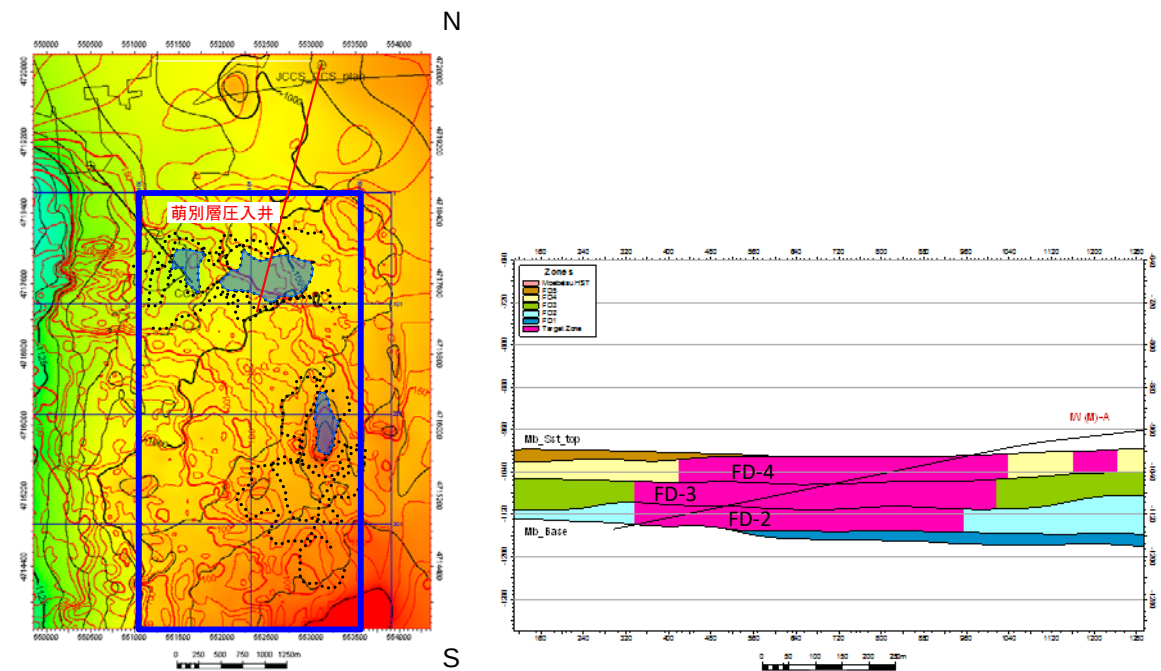
イ) 平成 24 年度シミュレーション

平成 24 年度の萌別層砂岩層での CO₂圧入長期挙動予測シミュレーションでは, FD2, FD3, FD4 に発達するチャネル堆積物の物性値を基準に, ベースケース, 高浸透率ケース, 低浸透率ケースによるシミュレーションを実施した (第 4.5-12 表)。ケース区分の基準は, 苫小牧 CCS-1 および苫小牧 CCS-2 の萌別層砂岩層の解析結果に基づいている (第 4.5-27 図)。

なお, 萌別層砂岩層における圧入圧力挙動および萌別層砂岩層への圧入による貯留層内圧力変化に関するシミュレーション結果は, それぞれ第 5.2-7 図および第 5.3-2 図～第 5.3-4 図に示した。

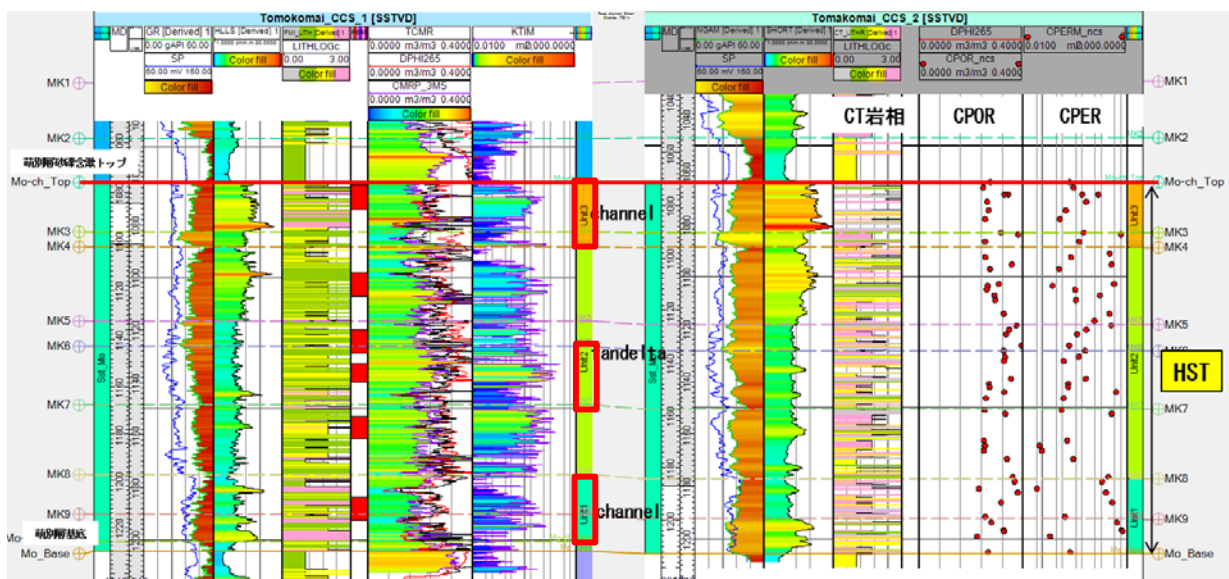
第 4.5-12 表 萌別層砂岩層で実施した CO₂圧入長期挙動予測シミュレーションのケース分け

シミュレーション	孔隙率	浸透率 : mD	根拠
ベースケース	0.281	17	CCS-1 および CCS-2 の Unit2 の平均値
高浸透率ケース	0.3	27.7	CCS-1 および CCS-2 の Unit1 の平均値
低浸透率ケース	0.3	10.2	CCS-1 および CCS-2 の Unit3 の平均値



FD2, FD3, FD4 のチャンネル堆積物の重複部が、ターゲット。

FD2, FD3, FD4 のチャンネル堆積物の物性値を変えてシミュレーション

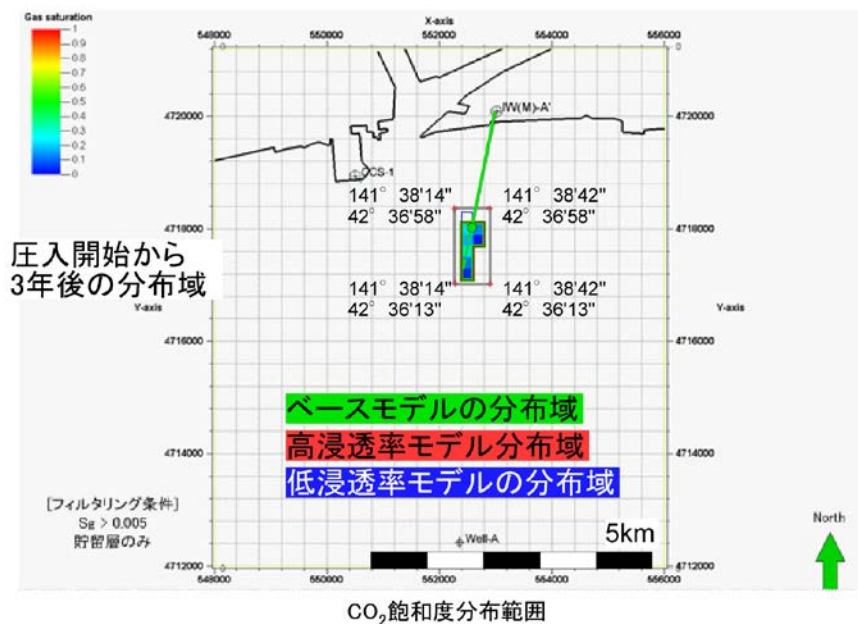


第 4.5-27 図 萌別層砂岩層での CO₂ 圧入長期挙動シミュレーションのケース分け（平成 24 年度シミュレーション結果）

③ 圧入した CO₂ の平面的な分布範囲

作成した 3 つのケースモデルについて、CO₂ を 20 万トン/年のレートで 3 年間圧入するシミュレーションを実施し、圧入から 3 年後（圧入終了時）および圧入開始から 1,000 年後の貯留層中での CO₂ の分布状況を検討した。それぞれのケースごとに、圧入開始から 1,000 年後までの CO₂ 飽和度および溶解 CO₂ 量の分布範囲を平面図に投影することにより、圧入した CO₂ の平面的な分布範囲を推定した（第 4.5-28 図および第 4.5-29 図）。その推定結果を、第 4.5-13 表に示す。

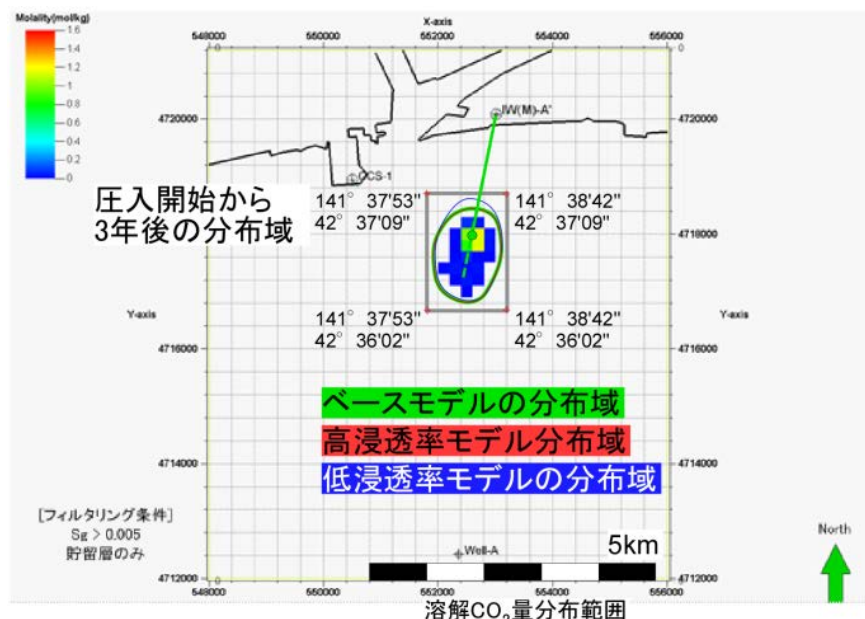
なお、掘削した萌別層圧入井の貯留層の浸透率は、ブラインによる圧入試験後のフォー
 ルオフテストの解析から 370mD と試算されており、平成 24 年度シミュレーションの予測よ
 り高くなっている。しかしながら、本井の NMR 検層から得られた貯留層の孔隙率（12～42%
 程度）は平成 24 年度シミュレーションの予測と同程度であることから、本計画を実施した
 場合の CO₂の平面的な分布範囲は、平成 24 年度シミュレーション結果と大きく変わることは
 ないと予測される。



グリッドはUTM54系。緯度経度への変換はJDG2000を使用

注：分布範囲を示す座標は、圧入開始より 1,000 年後までのすべてのモデル（ベースケース、高浸透率ケース、低浸透率ケー
 ス）の CO₂飽和度の分布域を包括する範囲を示す。着色箇所は、ベースケースにおける圧入開始から 3 年後の分布を示す。

第 4.5-28 図 萌別層砂岩層での CO₂の分布範囲（CO₂飽和度）（平成 24 年度シミュレーション結
 果）



グリッドはUTM54系。緯度経度への変換はJGD2000を使用

注：分布範囲を示す座標は、圧入開始より 1,000 年後までのすべてのモデル（ベースケース、高浸透率ケース、低浸透率ケース）の溶解 CO₂量の分布域を包括する範囲を示す。着色箇所は、ベースケースにおける圧入開始から 3 年後の溶解 CO₂量の分布を示す。

第 4.5-29 図 萌別層砂岩層での CO₂の分布範囲（溶解 CO₂量）（平成 24 年度シミュレーション結果）

第 4.5-13 表 海底下廃棄した CO₂の平面的な分布範囲（萌別層砂岩層）

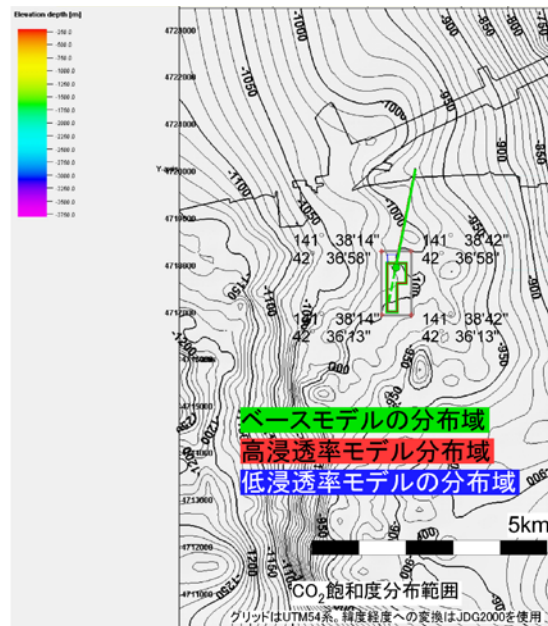
分布域	北限			南限			東限			西限		
	度	分	秒	度	分	秒	度	分	秒	度	分	秒
二酸化炭素	42	37	09	42	36	02	141	38	42	141	37	53
CO ₂ 飽和度	42	36	58	42	36	13	141	38	42	141	38	13
溶解 CO ₂ 量	42	37	09	42	36	02	141	38	42	141	37	53

注：各モデルにおいて推定される CO₂飽和度および溶解 CO₂量の平面的分布の限界を二酸化炭素の分布範囲とした。

④ 圧入した CO₂の垂直的な分布範囲

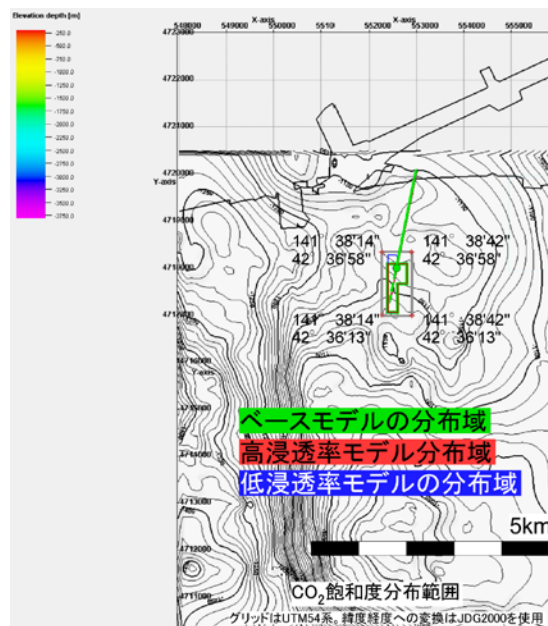
上記で検討した平面的な CO₂の分布範囲を貯留層上限構造図および貯留層下限構造図に投影して、CO₂の垂直的な分布範囲を推定した（第 4.5-30～第 4.5-33 図）。その推定した結果を、第 4.5-14 表に示す。

なお、掘削した萌別層圧入井の貯留層の浸透率は、平成 24 年度シミュレーションの予測より高くなっている。平成 24 年度シミュレーションにおいては、基本的に浸透率の垂直方向/水平方向を 0.1 と仮定しているものの、貯留層の上限には遮蔽層があるため、圧入した CO₂の上方への分布は浸透率の鉛直/水平比率の影響は受けにくいものと判断される。また、下方への移動の影響に関しては、鉛直方向に広がりやすくなるとは考えられないが、CO₂が貯留層下限まで移動した場合は、その下層の地層が遮蔽層として機能するため、CO₂の下方への移動は制限される。よって、本計画を実施した場合の CO₂の垂直的な分布範囲は、平成 24 年度シミュレーション結果と大きく変わることはないと予測される。



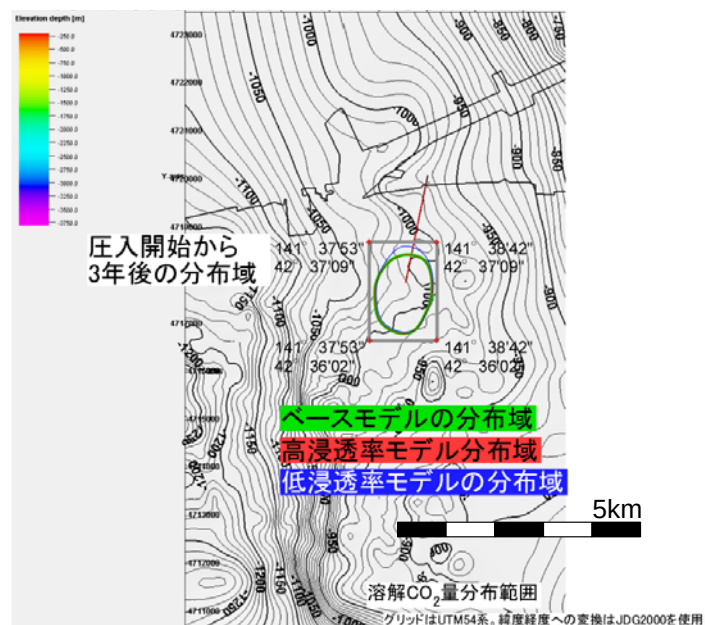
- 注：1. CO₂分布域を，構造図に投影した。
2. 最も浅い深度で，海面下940m程度まで分布するものと考えられる。

第 4.5-30 図 萌別層砂岩層での CO₂の分布範囲の上限（CO₂飽和度）（平成 24 年度シミュレーション結果）



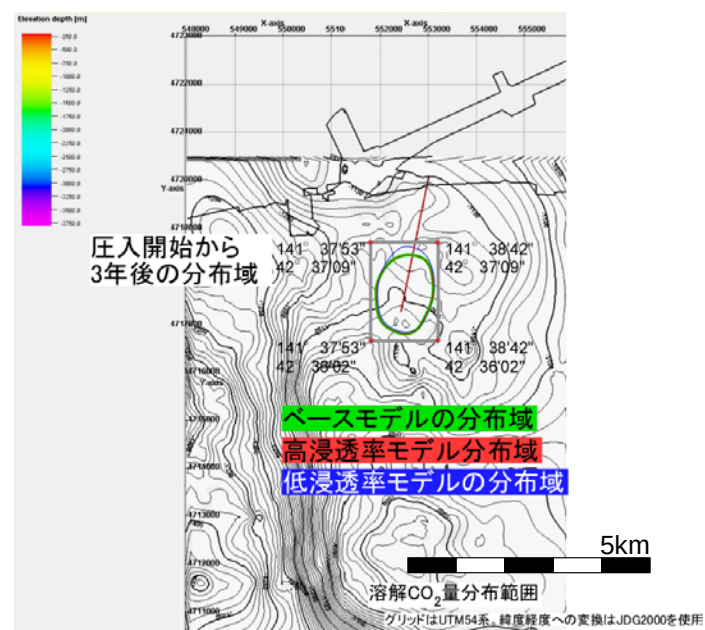
- 注：1. CO₂分布域を，構造図に投影した。
2. 最も深い深度で，海面下1,175m程度まで分布するものと考えられる。

第 4.5-31 図 萌別層砂岩層での CO₂の分布範囲の下限（CO₂飽和度）（平成 24 年度シミュレーション結果）



- 注：1. CO₂分布域を，構造図に投影した。
2. 最も浅い深度で，海面下 980m 程度まで分布するものと考えられる。

第 4.5-32 図 萌別層砂岩層での CO₂の分布範囲の上限（溶解 CO₂量）（平成 24 年度シミュレーション結果）



- 注：1. CO₂分布域を，構造図に投影した。
2. 最も深い深度で，海面下 1,170m 程度まで分布するものと考えられる。

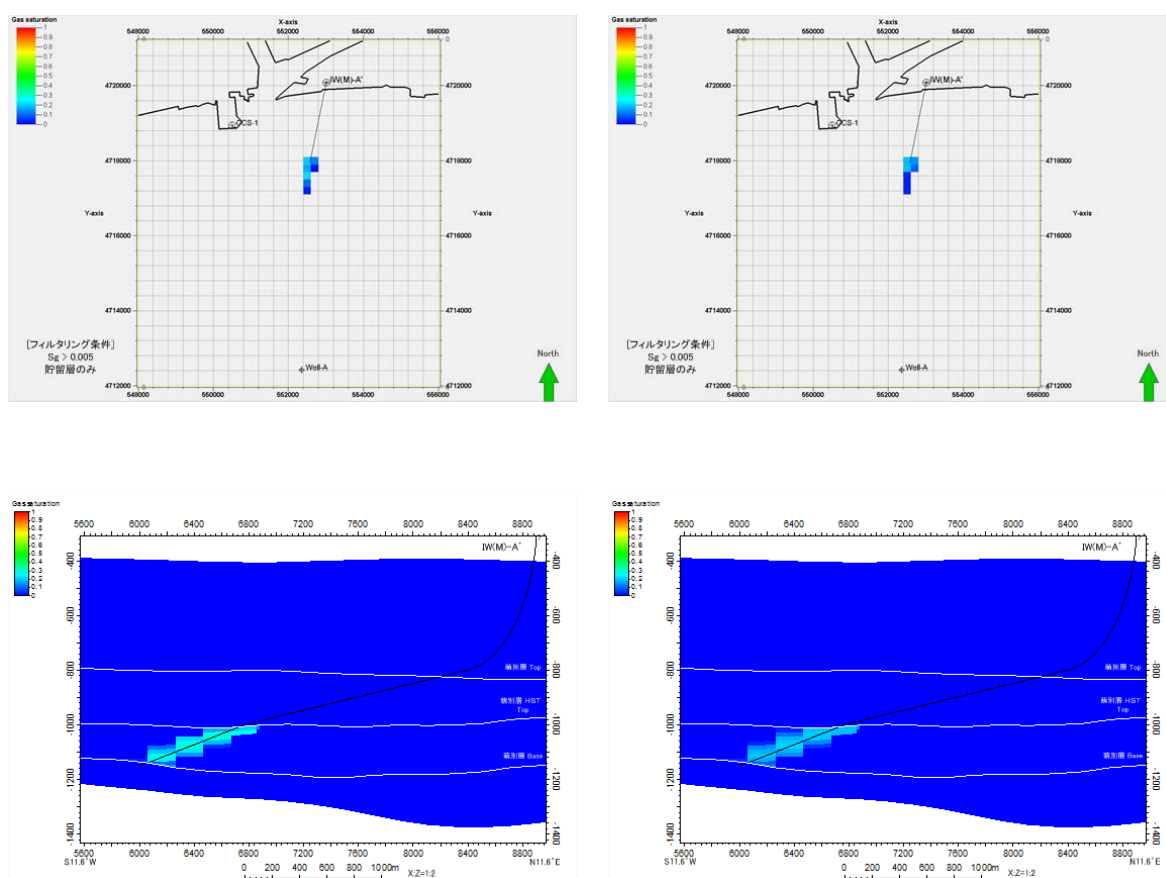
第 4.5-33 図 萌別層砂岩層での CO₂の分布範囲の下限（溶解 CO₂量）（平成 24 年度シミュレーション結果）

第 4.5-14 表 海底下廃棄した CO₂の垂直的分布範囲（萌別層砂岩層）

分布域	上限深度 (m)	下限深度 (m)
二酸化炭素	980	1,180
CO ₂ 飽和度	980	1,175
溶解 CO ₂ 量	980	1,180

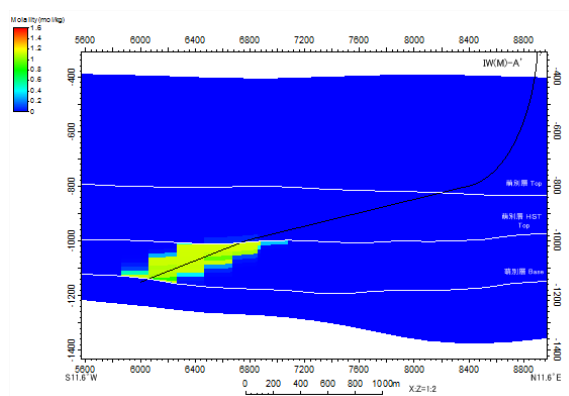
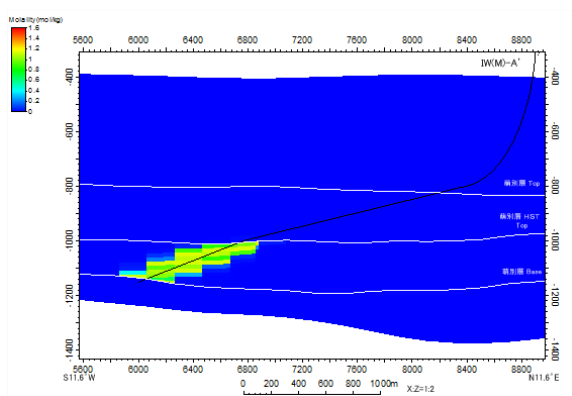
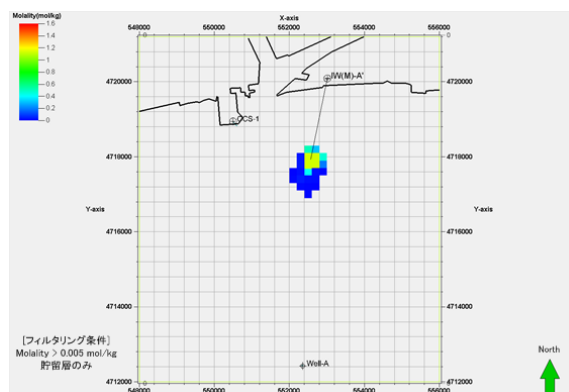
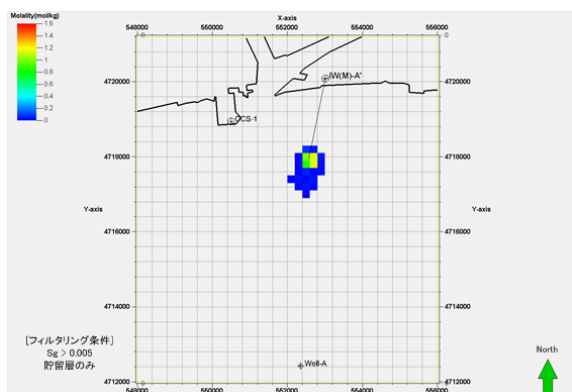
注：各モデルにおいて推定される CO₂飽和度および溶解 CO₂量の垂直的分布の限界を二酸化炭素の分布範囲とした。

また、それぞれのケースにおける CO₂飽和度および溶解 CO₂量の分布に対するシミュレーション結果を第 4.5-34 図～第 4.5-39 図に示す。



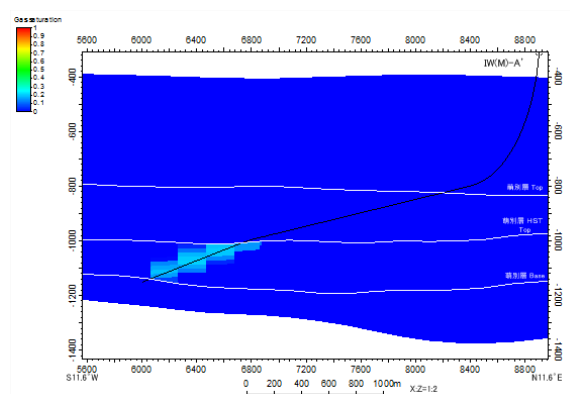
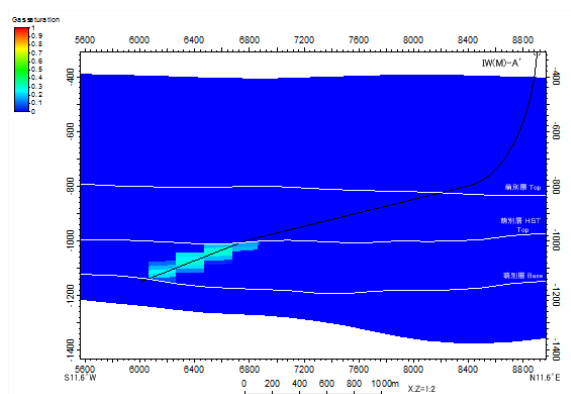
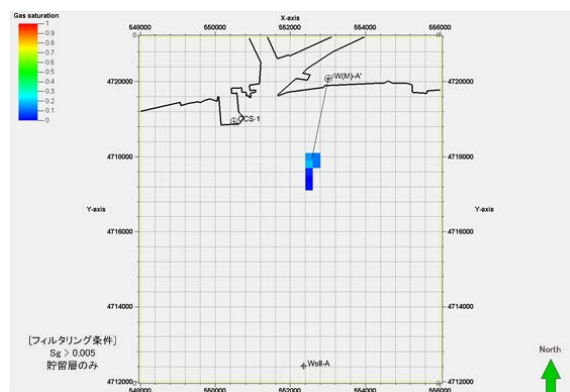
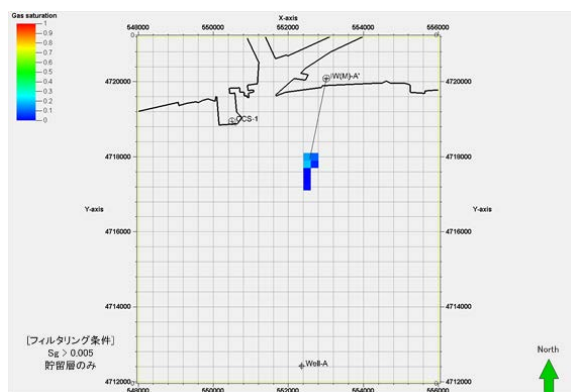
- 注：1. 左側：圧入開始から3年後，右側：圧入開始から1,000年後。
2. 上段：平面図（Sg>0.005 でフィルタリング），下段：萌別層圧入井に沿った断面図。

第 4.5-34 図 ベースケースにおける CO₂飽和度の分布（平成 24 年度シミュレーション結果）



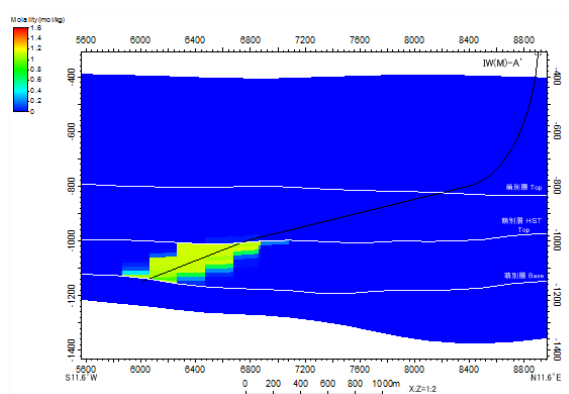
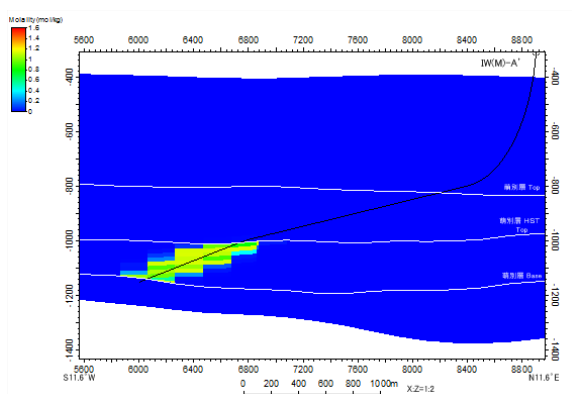
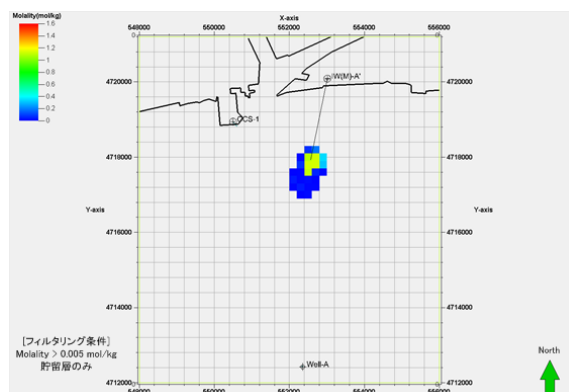
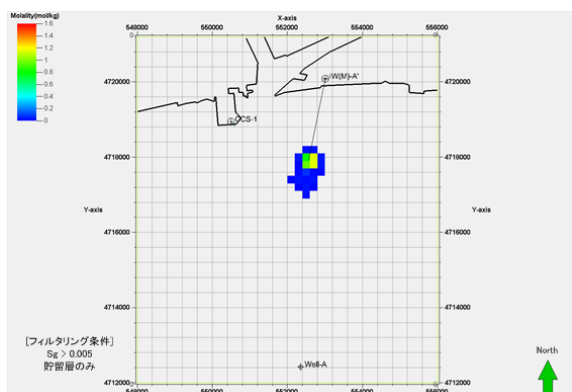
- 注：1. 左側：圧入開始から3年後，右側：圧入開始から1,000年後。
 2. 上段：平面図 ($M_{CO2} > 0.005$ でフィルタリング)，下段：萌別層圧入井に沿った断面図。

第 4.5-35 図 ベースケースにおける溶解 CO_2 量の分布（平成 24 年度シミュレーション結果）



- 注：1. 左側：圧入開始から3年後，右側：圧入開始から1,000年後。
 2. 上段：平面図 ($S_g > 0.005$ でフィルタリング)，下段：萌別層圧入井に沿った断面図。

第 4.5-36 図 高浸透率ケースにおける CO_2 飽和度の分布（平成 24 年度シミュレーション結果）



- 注：1. 左側：圧入開始から3年後，右側：圧入開始から1,000年後。
 2. 上段：平面図 ($M_{CO_2} > 0.005$ でフィルタリング)，下段：萌別層圧入井に沿った断面図。

第 4.5-37 図 高浸透率ケースにおける溶解 CO_2 量の分布（平成 24 年度シミュレーション結果）