

目次

第5章 貯留層等総合評価	5-1
5.1 圧入井、観測井における坑底圧力予実績比較	5-1
5.1.1 貯留層モデルの概要	5-1
5.1.2 グリッドモデル	5-3
5.1.3 IW-2 坑底圧力の予実績比較	5-4
5.1.4 OB-2 坑底圧力上昇値の予実績比較	5-6
5.1.5 圧入井、観測井における坑底圧力予実績比較まとめ	5-7
5.2 苫小牧 IW-2 フォールオフ解析 (FOA)	5-7
5.2.1 FOT 一覧	5-7
5.2.2 FOT 解析に用いた密閉坑底圧力データ	5-9
5.2.3 圧カデリバティブに関する考察	5-10
5.2.4 苫小牧 IW-2 フォールオフ解析のまとめ	5-12
5.3 地質構造解釈の更新	5-12
5.3.1 調査対象範囲と使用データ	5-12
5.3.2 繰り返し弾性波探査第六回モニター調査データの概要	5-14
5.3.3 坑井対比 (IW-2)	5-18
5.3.4 構造解釈および地質モデルの更新	5-23
5.3.5 4D 差分解析	5-25
5.3.6 考察	5-31
5.3.7 まとめ	5-33
5.4 ケーススタディ	5-34
5.4.1 ケーススタディの実施	5-34
5.4.2 シミュレーション結果	5-40
5.5 まとめと今後の課題	5-87

第5章 貯留層等総合評価

苫小牧地点は、2012年2月にCCS大規模実証試験の対象地点として選定され、2016年度4月より萌別層に、2018年度2月より滝ノ上層へのCO₂の圧入を開始し、2019年11月までに累計で萌別層には約30万t、滝ノ上層へは約100tの圧入を達成している。その後、現在に至るまで圧入を停止しているが、萌別層圧入井IW-2（以下、「IW-2」と称する。）の圧入実績に加え、CO₂停止中に取得した圧力データや繰り返し弾性波探査データの蓄積に合わせ、適宜、地質解釈および貯留層モデルの更新等を実施して、貯留層モデルの精度向上に努めている。

2023年度は、2022年度と同様に海洋汚染防止法に基づく監視計画に沿ってCO₂の圧力や広がりの変化が事前の予測・評価の範囲にあることを確認するため、圧力データの実績値と予測値の比較やCO₂圧入および圧入停止後の貯留層圧力推移についてのデータ解析を更新した。また、総合検討として、まず2022年度に取得した繰り返し弾性波探査データをもとに地質モデル更新の必要性について検討を行った。その結果、地質モデルの更新の必要はないとの結論に至った。次に、既存のIW-2へCO₂を圧入する場合の圧入レートと圧入区間の関係について貯留層シミュレーションにて検討し、貯留層である萌別層の特性についての検討を行った。

5.1 圧入井、観測井における坑底圧力予実績比較

萌別層の圧入井であるIW-2と萌別層の観測井OB-2（以下、「OB-2」と称する。）について、現在までの圧力・温度監視により得られたデータ（実績）と、2021年度貯留層等総合評価で更新した貯留層モデルによるシミュレーション結果（予測）を用いて、萌別層貯留層の坑底圧力の予実績比較を実施した。

5.1.1 貯留層モデルの概要

圧力を予測するために用いた貯留層モデルは2021年度から変更しておらず、設定および入力値は表5.1-1のとおりである。なお、貯留層モデルの構築方法や各パラメータの設定根拠については、2021年度成果報告書の第5章貯留層等総合評価（以下、「2021年度貯留層等総合評価」と称する。）を参照されたい。

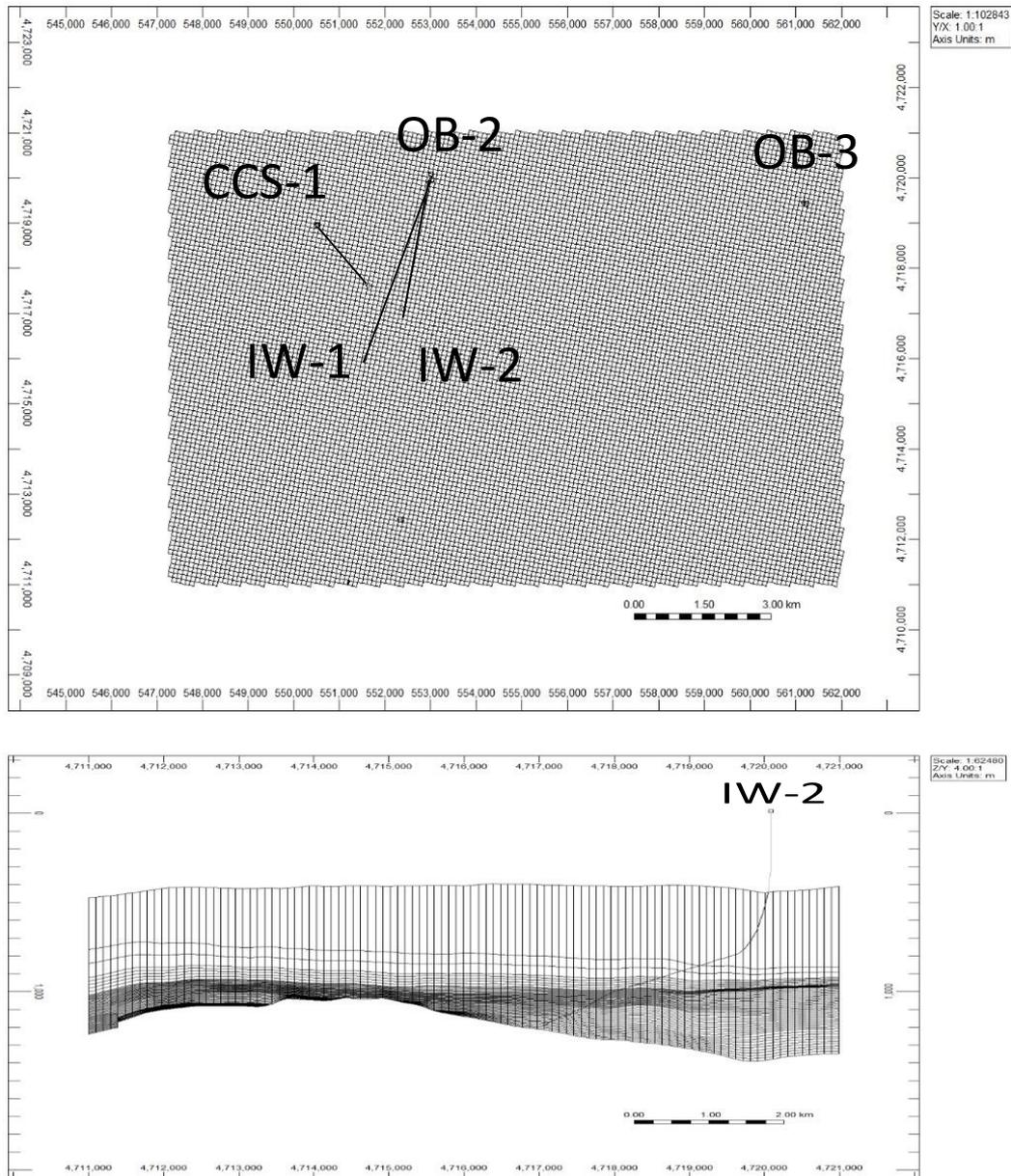
表 5.1-1 貯留層モデルの設定および入力値

モデル	2021年度モデル
サイズ	フィールドモデル：15 km×10 km×1,700 m
	セクターモデル：3 km×3 km×1,500 m
グリッド	フィールドモデル：163×126×173
	セクターモデル：31×31×48
アクティブ・グリッド数	フィールドモデル：714,013
	セクターモデル：861,753（細分化後）
基準温度	36.2 °C@920.41 mTVDSS ¹⁾
基準圧力	9,290 kPa@920.41 mTVDSS
塩分濃度 (ppm NaCl)	3,150
境界条件	フィールドモデル：開境界
	セクターモデル：閉境界
貯留層	
孔隙率	岩相ごとに設定
浸透率 (mD)	岩相ごとに設定
ネットグロス比	岩相ごとに設定
岩石圧縮率 (1/kPa)	4.54×10^{-6}
相対浸透率曲線	岩相ごとに設定 岩相 10、11：n=2.0 その他：n=3.5
ガス相対浸透率 krg	岩相ごとに設定 岩相 10、11：n=0.60 その他=0.143
水相対浸透率 krw	1.00
臨界ガス飽和率 Sgc	0.05
不動水飽和率 Swir	浸透率と孔隙率より算出
ヒステリシス (Sgrmax)	Sgc+0.5×(1-Swir-Sgc) GEM デフォルト式使用
毛細管圧力	CCS-2、OB-2、IW-2 コア試料より作成
孔隙容積 (m ³)	フィールドモデル：2.4×10 ¹¹
	セクターモデル：1.2×10 ¹⁰
遮蔽層	
孔隙率	0.299
浸透率 (md)	0.0015
相対浸透率曲線	krg 曲線：Corey ¹⁾ krw 曲線：van Genuchten ²⁾
ガス相対浸透率 krg	1.00
水相対浸透率 krw	1.00
臨界ガス飽和率 Sgc	0.05
不動水飽和率 Swir	0.638
ヒステリシス (Sgrmax)	なし

1) TVDSS : True Vertical Depth Subsea、海面下垂直深度

5.1.2 グリッドモデル

グリッドモデルは2021年度貯留層等総合評価を踏襲し、図5.1-1に示すフィールド用のグリッドモデル(以下、「フィールドモデル」と称する。)を使用した。このモデルはOB-2を含んだ広域のモデルで、IW-2の坑底圧力およびOB-2の坑底圧力上昇値の予実績比較に使用した。なお、詳細については2021年度貯留層等総合評価を参照されたい。



注) 上図：フィールドモデルの平面図 下図：フィールドモデルの坑井断面図

図 5.1-1 フィールドモデル

5.1.3 IW-2 坑底圧力の予実績比較

2021年度貯留層等総合評価で更新した貯留層モデルを用い IW-2 の坑底圧力（仕上げ区間上端深度での圧力）を予測し、圧力・温度監視により得られたデータ（実績値）を同深度（仕上げ上端深度）に換算したものと比較を行った（図 5.1-2(a)、(b)）。なお、このグラフでの予測値は 2021年度貯留層等総合評価における圧入可能量の P90 相当（具現像 13）、P50 相当（具現像 3）、P10 相当（具現像 2）の3つを採用した。

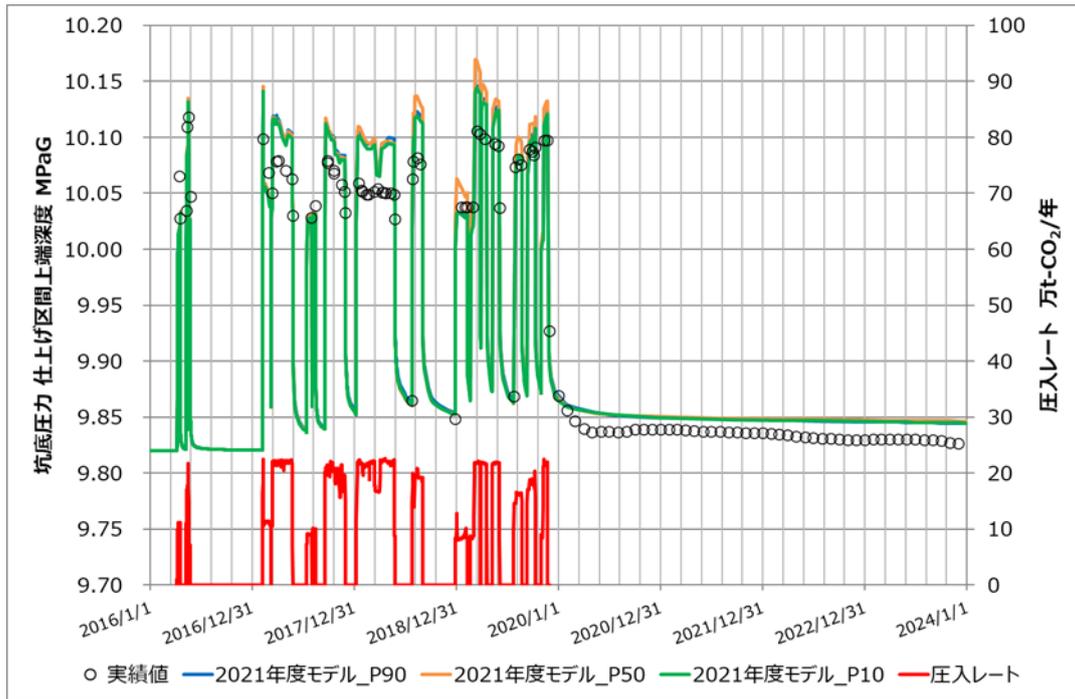


図 5.1-2 (a) IW-2 坑底圧力（仕上げ区間上端深度での圧力）の予実績比較

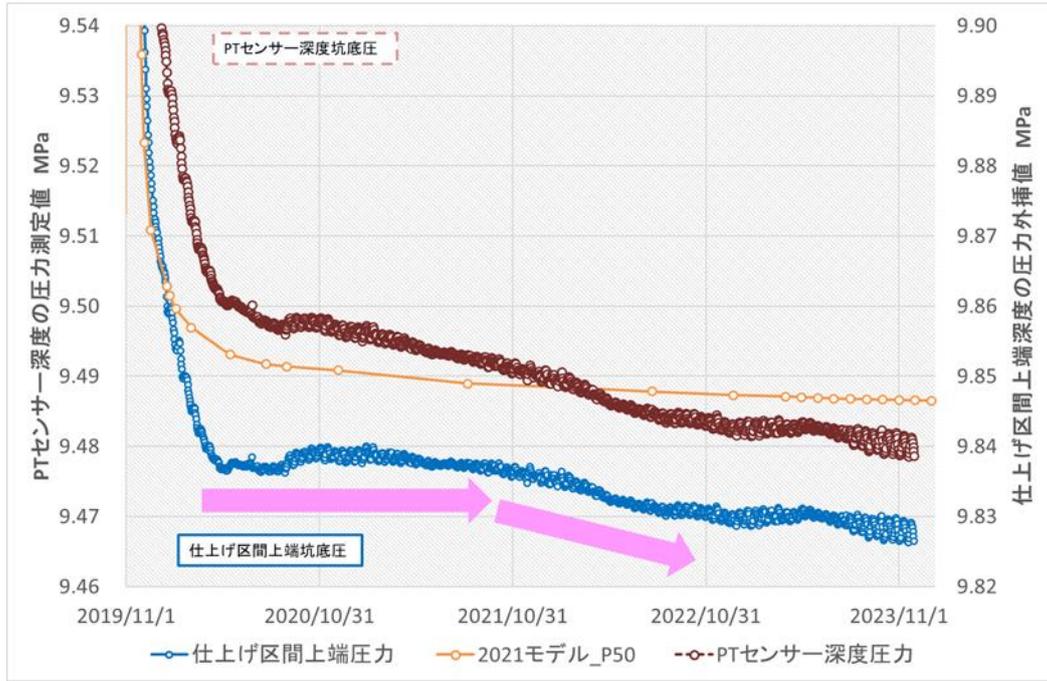


図 5.1-2 (b) IW-2 坑底圧力の予実績比較 (圧入を停止した 2019 年 11 月 22 日以降)

予実績比較にて使用した圧入中の坑底圧力実績値は、圧力・温度センサー（以下、「PTセンサー」と称する。）の深度での圧力値から仕上げ区間上端深度での圧力値に換算する際に管内流動のシミュレーションソフトウェアである「PIPESIM (Schlumberger 社製)」を使用しており、PTセンサー深度の測定圧力および温度を基に、仕上げ区間上端深度での圧力を推定した値である。

また、圧入停止中の坑底圧力実績値は、2018 年 7 月 25 日、2018 年 12 月 27 日、2019 年 7 月 24 日、および圧入終了後の 2019 年 11 月 22 日以降では、1 か月おきに月末 0 時の密閉坑底圧力を使用した。なお、使用した密閉坑底圧力は、PTセンサー深度での測定圧力および温度における CO₂ 密度が、仕上げ区間上端まで続くと仮定した場合の外挿値である。CO₂ 密度の計算はフリーソフトウェアである「EOS-SCx Ver.0.2w」を使用しており、Span and Wagner¹⁾ による CO₂ の状態方程式に基づく値である。

図 5.1-2 (a) に示すとおりフィールドモデルによる予測値では、圧入停止した 2019 年 11 月 22 日以降、坑底圧力は低下し続けている。2023 年 11 月 30 日時点においては、仕上げ区間上端深度での坑底圧力は 9.83 MPaG であった。

また、図 5.1-2 (b) は、圧入停止した 2019 年 11 月 22 日を始点として、PTセンサーの測定圧力および PT センサーでの測定圧力を仕上げ区間上端深度に深度換算した圧力値をそれぞれ示した。仕上げ区間上端深度に深度変換した圧力値は、2020 年 5 月頃よりほぼ一定に転じたように見られたが、2021 年 10 月頃より再び低下傾向を示し続けている。2023 年

11月30日時点では、PTセンサー深度の圧力が9.48 MPaGで、圧入開始前の初期圧力9.47 MPaGに非常に近づいている。

フィールドモデルによる予測値と仕上げ区間上端深度に深度換算した圧力値との差は、2020年11月30日から2022年11月30日まで20 kPa未満であり、2021年度貯留層等総合評価でのヒストリーマッチの基準である坑底圧力の目的関数が25 kPa以下を満たしている。したがって、使用モデルは必要とする予測精度を維持しており、モデル修正の必要はないと判断した。

5.1.4 OB-2 坑底圧力上昇値の予実績比較

フィールドモデルを用い、圧入開始の2016年4月6日から圧入終了の2019年11月22日までのCO₂圧入実績を入力し、OB-2の坑底圧力を計算した。2019年11月1日以降における予実績比較は図5.1-3のとおりである。なお、モデル上での坑底圧力の上昇値は圧入開始時点、つまり初期圧力をゼロとしている。初期圧力の設定方法は2021年度貯留層等総合評価のとおりで、キャリブレーション作業以降で圧入停止期間である2018年6月26日から7月25日までの1か月間の坑底圧力の平均値とし、実績値はそれ以降の測定結果を表示している。

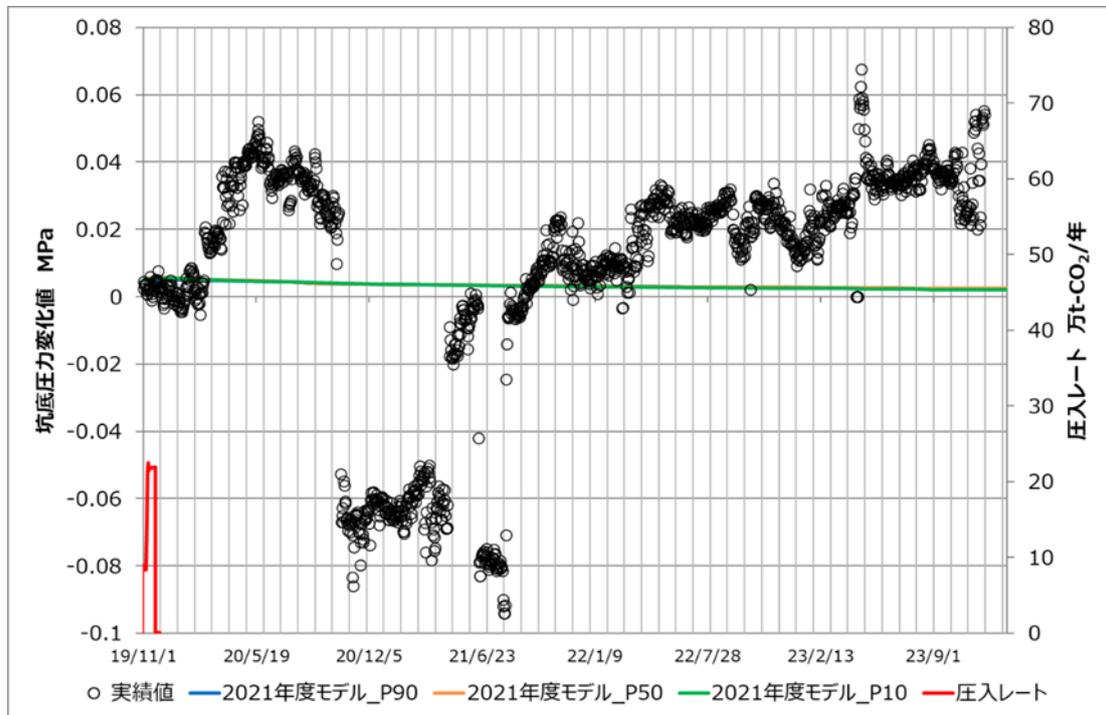


図 5.1-3 IW-2 の圧入レートと OB-2 の坑底圧力の予実績比較

図 5.1-3 に示すとおり、シミュレーションで予測した坑底圧力変化では 2019 年 12 月頃に 6 kPa 程度から緩やかに低下を続け、2022 年 11 月 30 日時点では 3 kPa 程度である。

一方、実測の坑底圧力は測定器の定期点検に伴う機器の回収・再設置や測定器の不具合等の影響により、2020 年 2 月 18 日や 2020 年 10 月 16 日、2021 年 4 月 23 日、2021 年 6 月 17 日に圧力上昇値の急変が生じていると考えており、絶対値の傾向をシミュレーションと比較して考察することが難しい。また、圧入停止期間である 2022 年 3 月から 4 月にかけて、圧力上昇値が 20 kPa 程度増大しトレンドが変化しているが、明確な原因は分かっておらずこちらも測定器の不具合と推測している。なお、圧入停止以降のその他の時期においても測定器の回収・再設置や測定器の不具合による圧力上昇値の急変は生じているが、数日あたりの変動幅は大きくとも上下に 20 kPa 程度である。これらの圧力上昇値の急変は、貯留層の異常を示す事象ではないと考えている。

5.1.5 圧入井、観測井における坑底圧力予実績比較まとめ

2021 年度に構築した貯留層モデルを用いて、新たに取得されたデータを含む IW-2 および OB-2 の坑底圧力データの実績値と予測値を比較した。長期密閉中の IW-2 の PT センサー深度における坑底圧力は、圧入停止後から現在まで継続して低下傾向を示している。PT センサーで取得した圧力・温度データに基づく CO₂ 密度を用いて、PT センサーで取得された圧力データを仕上げ区間上端深度に深度換算した圧力値は、2020 年 5 月頃から 2021 年 10 月頃に一定となる期間を除き、低下傾向を示した。モデルによる予測値は、圧入停止以降、低下傾向が継続している。圧入停止後の予測値と実績値の差は 20 kPa 未満であり、ヒストリーマッチの基準を満たすことから、モデル修正の必要はないと判断する。

5.2 苫小牧 IW-2 フォールオフ解析 (FOA)

IW-2 ではこれまでに合計 17 回のフォールオフテスト (以下、「FOT」と称する。) を実施しており、本節では圧入終了後の FOT について実測値および流動シミュレーションに基づく予測値からそれぞれ圧力デリバティブ (圧力変化を微分し、時間変化を乗じたもの) を作成し、流動様式と貯留層性状を推定した。

5.2.1 FOT 一覧

表 5.2-1 に FOT についての概要と解析の有無を示す。なお、圧入停止期間中の FOT には FOT1、2・・・のように通し番号を付けた。また、2017 年 3 月 9 日の圧入停止時については、坑口装置点検に伴う短期密閉であったことから FOT そのものから除外した。

FOT17 は、2019 年 11 月 22 日の坑井密閉以降、データ取得を継続中である。

表 5.2-1 FOT 一覧 (概要)

FOT	開始時刻	終了時刻	停止要因	測定時間	密閉前平均圧入レート	累計圧入量
				時間	t-CO ₂ /年	t-CO ₂
FOT1	2016年 4月8日 6時14分	2016年 4月8日 17時1分	外圧上昇	11	58,800	81
FOT2	2016年 4月17日 22時16分	2016年 5月7日 15時15分	圧縮機停止	473	109,351	2,558
FOT3	2016年 5月13日 1時0分	2016年 5月14日 14時19分	安全弁不具合	37	139,056	4,330
FOT4	2016年 5月24日 9時0分	2017年 2月5日 17時35分	計画密閉	6,177	71,079	7,163
FOT5	2017年 5月25日 9時47分	2017年 7月13日 16時15分	計画密閉	1,183	64,861	61,239
FOT6	2017年 8月1日 10時0分	2017年 8月3日 9時57分	計画密閉	48	88,474	65,793
FOT7	2017年 8月15日 9時0分	2017年 9月16日 12時0分	点検・修理	771	100,124	69,070
FOT8	2017年 11月30日 9時27分	2018年 1月6日 11時50分	計画密閉	890	85,159	109,250
FOT9	2018年 5月25日 9時20分	2018年 7月25日 11時36分	計画密閉	1,466	87,709	188,136
FOT10	2018年 9月1日 2時25分	2018年 12月27日 13時28分	圧縮機停止	2,819	189,602	207,209
FOT11	2019年 2月8日 8時33分	2019年 2月19日 11時18分	点検・修理	267	83,620	217,425
FOT12	2019年 3月26日 10時37分	2019年 3月28日 11時3分	供給側トラブル	48	218,008	233,438
FOT13	2019年 4月19日 13時31分	2019年 5月8日 11時28分	供給側トラブル	454	108,463	246,354
FOT14	2019年 6月4日 8時49分	2019年 7月24日 17時10分	計画密閉	1,208	78,536	261,632

FOT	開始時刻	終了時刻	停止要因	測定時間	密閉前平均圧入レート	累計圧入量
				時間	t-CO ₂ /年	t-CO ₂
FOT15	2019年 8月23日 5時19分	2019年 9月10日 11時48分	供給側 トラブル	438	137,885	274,342
FOT16	2019年 10月9日 18時20分	2019年 10月30日 11時8分	供給側 トラブル	497	80,592	288,874
FOT17	2019年 11月22日 11時30分	測定中	計画 密閉		216,498	300,012

注) FOT17の密閉時間は報告書作成段階でも測定中であるため、空白とした。また、密閉前平均圧入レートは、圧入レートの変更(オフガス供給量変更)時間を基準に算出した。

5.2.2 FOT解析に用いた密閉坑底圧力データ

図5.2-1に、PTセンサー深度における坑底圧力と坑底温度、その値から求めたCO₂密度の推移を示す。

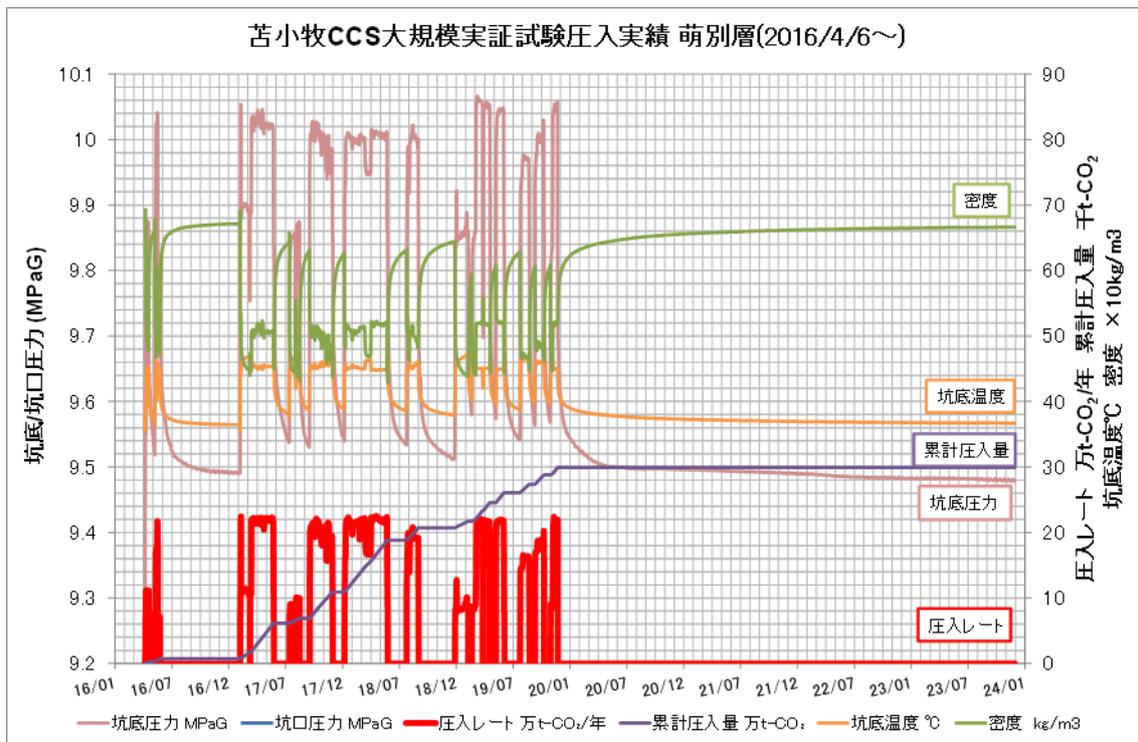


図5.2-1 PTセンサー深度における坑底圧力と坑底温度の推移

圧入中にはPTセンサー深度での坑底温度が上昇し、逆に密閉中には坑底温度が低下す

る事象が確認された。CO₂圧入時に坑底温度が上昇する現象は、地層との熱交換とCO₂の圧縮、CO₂の位置エネルギー低下によって発生することが知られており²⁾、貯留層深度(ここでは仕上げ区間上端深度)でも温度変化がある。

CO₂密度は、密閉中には圧力・温度変化に伴い、PTセンサー深度においては470 kg/m³から670 kg/m³と大きく変化する。PTセンサー深度は921 mTVDSS、仕上げ区間上端深度は973 mTVDSSであり、垂直深度で52 mの差がある。圧力・温度変化による密度変化を考慮しない場合、密度差が最大で200 kg/m³あるため、PTセンサー深度から推定する仕上げ区間上端の圧力には最大100 kPa程度の差が生じることとなる。

FOTでは、kPa単位の小さな圧力変化から流動様式や貯留層性状を推定するため、PTセンサー深度での坑底圧力で解析を実施すると上記の密度変化や垂直深度差の影響により大きな誤差を含んだ結果になるので、PTセンサー深度での坑底圧力を仕上げ区間上端深度での値に換算することとした。流動坑底圧力の換算には、通常「PIPESIM」の計算値を使用するが、同ソフトウェアは流動時の定常状態における圧力・温度プロファイルを計算する坑内流動シミュレーションソフトであるため、坑井密閉時の圧力遷移状態には適用できない。そこで、PTセンサー深度での坑底圧力・温度でのCO₂密度を用い水頭圧力を求め、仕上げ区間上端深度での坑底圧力に換算することとした。

この手法ではPTセンサー深度から仕上げ区間上端深度までの区間をPTセンサーの圧力・温度と同じと仮定しており、圧力勾配の計算ためのCO₂密度に誤差が生じ、時間が経過するにつれて精度低下が生じる可能性がある。この課題解決においても仕上げ区間での深度に対する坑底圧力・温度の連続測定が最も有効であると考ええる。

5.2.3 圧カデリバティブに関する考察

FOTの解析では両対数グラフの横軸に密閉時間、縦軸に圧力変化と圧カデリバティブをプロットし利用する(以下、「ロガーログプロット」と称する。)。同プロットを利用することで流動形態(線形流・放射状流・球状流)およびその領域を識別することが容易となる。また、タイプカーブ(解析解)と観測データを照合することで貯留層性状を推定することができる。

図5.2-2は、FOT17について坑底圧力データをParadigm社製の圧力解析ソフトである「Interpret」に入力して作成したロガーログプロットである。使用した坑底圧力は、実測値に加え、仕上げ区間上端深度に換算した坑底圧力データ、前述のセクターモデルを用いて圧入開始の2016年4月6日から2019年11月30日までのCO₂圧入実績を入力し、シミュレーションによりフォールオフ測定を再現し得られた坑底圧力データである。このシ

ミュレーション結果は、密閉後 124,872 時間 (2030 年 3 月 31 日時点) までを表示している。

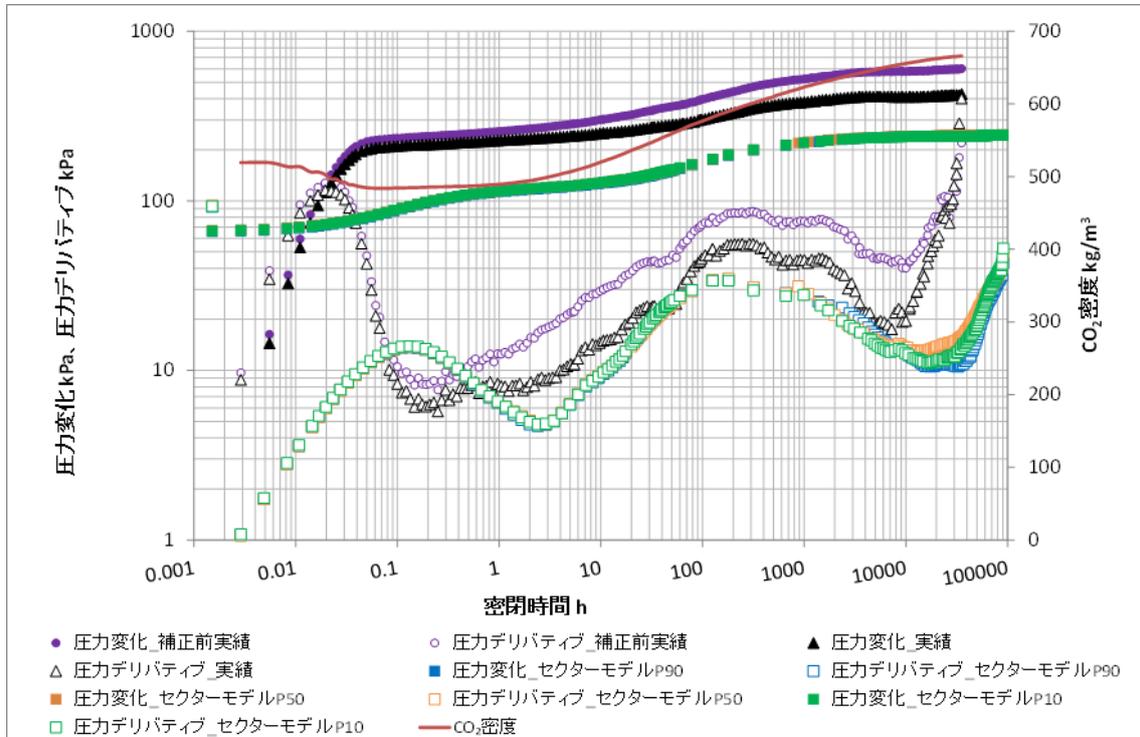


図 5.2-2 FOT17 におけるローグーログプロット

実測値 (図 5.2-2 の「圧力変化デリバティブ_補正前実績」) および仕上げ区間上端深度に換算した坑底圧力値 (図 5.2-2 の「圧力変化デリバティブ_実績」) に基づく圧力デリバティブは、密閉後 2,000 時間あたりで値が下がり、密閉後 8,000 時間あたりで傾き 1 よりも大きく上昇に転じており、圧力変化が小さくなった後、圧力低下がより大きくなったことを示す。

まず、圧力デリバティブが低下したことについては、実測値がいったんは一定になり、あたかも定圧力境界のような挙動を示したものと考えられる。次に圧力デリバティブが上昇した点については、レイトタイムにおける挙動の一例として No flow boundary を示す Slope=1 の挙動が見られる場合はあるが、圧入停止後の圧力がほぼ初期圧に戻っているため閉境界とは判断できないことや周辺に境界となるような地質条件がないこと、圧力デリバティブの傾きが 1 よりも大きいことから、そのような境界を示す挙動ではないと考えられた。この貯留層挙動以外での坑底圧力が低下していく原因としては以下のような要因が考えられる。

1) 坑内圧力勾配の変化

2) CO₂の溶解が進むことによる圧力低下

3) 超臨界CO₂飽和率の減少(水飽和率の増加)による毛細管圧力の低下による影響

以上のように、2023年度取得したデータを追加したものの、貯留層性状が推定できるSlope=0のような挙動や境界を示す挙動は確認できず、貯留層モデルの修正に資するような知見は得られなかったと判断した。

一方、シミュレーションの計算結果より作成した圧力デリバティブは、密閉後1,000時間あたりから値が降下し、P90相当具現像で密閉後30,000時間、P50相当具現像で密閉後10,000時間、P10相当具現像で密閉後20,000時間に上昇に転じている。これは数値モデルにおける管内圧力勾配は密閉300時間以降上昇し、一方でPTセンサーでの圧力の低下は継続しているものの緩やかになるため、この度合いの変化が反映している影響だと考える。しかし、このような挙動が実際に起こるかどうかについては、PTセンサー以深から仕上げ区間上端深度までの圧力勾配測定を実施するといったことで検証は可能であるが、IW-2のような高傾斜井での圧力勾配測定は測定器の抑留等のリスクが非常に高く、現在のところ実施が困難である。

5.2.4 苫小牧IW-2フォールオフ解析のまとめ

FOT17についてログ-ログプロットを作成したところ、実測値および数値解の両方において、レイトタイムにおける圧力デリバティブの降下と上昇を確認した。圧力デリバティブの上昇の傾きが1よりも大きいことや閉境界と判断できる要素がないことから、境界条件を示唆するものではなく、坑内の圧力勾配の変化等によるものと考えられる。貯留層挙動を示唆するデータとしては、密閉後8,000時間程度までを解析対象とするのが適当であり、2023年度新たに取得したデータからは、モデル更新に資するような新たな知見は得られなかった。また、数値解で見られる圧力デリバティブの上昇は、管内の圧力勾配変化を反映していると考えられるが、このような挙動が実際に発生しているかについては、PTセンサー以深の圧力勾配を測定する必要があるが、IW-2のような高傾斜井での圧力勾配測定は測定器の抑留等のリスクが非常に高く、現在のところ実施が困難である。

5.3 地質構造解釈の更新

5.3.1 調査対象範囲と使用データ

本検討では、苫小牧沖3D弾性波探査データ(2022)を使用し、地質構造解釈更新の必要性の確認と4D差分解析を実施した。調査対象範囲は図5.3-1に示す弾性波探査データの存在する赤色の範囲とし、検討対象は主に苫小牧IW-2(以降、IW-2)近傍の萌別層貯留

層とした。

上記の作業のため、以下のデータを使用した。

(坑井データ)

- ・ 苫小牧 IW-1
- ・ 苫小牧 IW-2
- ・ 苫小牧 CCS-2
- ・ 苫小牧 OB-1 (CCS-1)
- ・ 苫小牧 OB-2
- ・ 苫小牧 OB-3
- ・ 民間会社所有の坑井 (坑井 A)

(弾性波探査データ)

- ・ 苫小牧沖 3D 弾性波探査データ (2009、2010) /METI (JCCS) 取得
- ・ 苫小牧沖 3D 弾性波探査データ (2017) /METI (JCCS) 取得
- ・ 苫小牧沖 3D 弾性波探査データ (2017) の差分解析検討結果
- ・ 苫小牧沖小規模 3D 弾性波探査データ (2018) /METI (JCCS) 取得
- ・ 苫小牧沖 3D 弾性波探査データ (2019) の差分解析検討結果
- ・ 苫小牧沖 3D 弾性波探査データ (2019) /METI (JCCS) 取得
- ・ 苫小牧沖 3D 弾性波探査データ (2020) の差分解析検討結果
- ・ 苫小牧沖 3D 弾性波探査データ (2020) /METI (JCCS) 取得
- ・ 苫小牧沖 3D 弾性波探査データ (2021) の差分解析検討結果
- ・ 苫小牧沖 3D 弾性波探査データ (2022) /METI (JCCS) 取得
- ・ 苫小牧沖 3D 弾性波探査データ (2022) の差分解析検討結果
- ・ 民間会社所有の 2D 弾性波探査データ

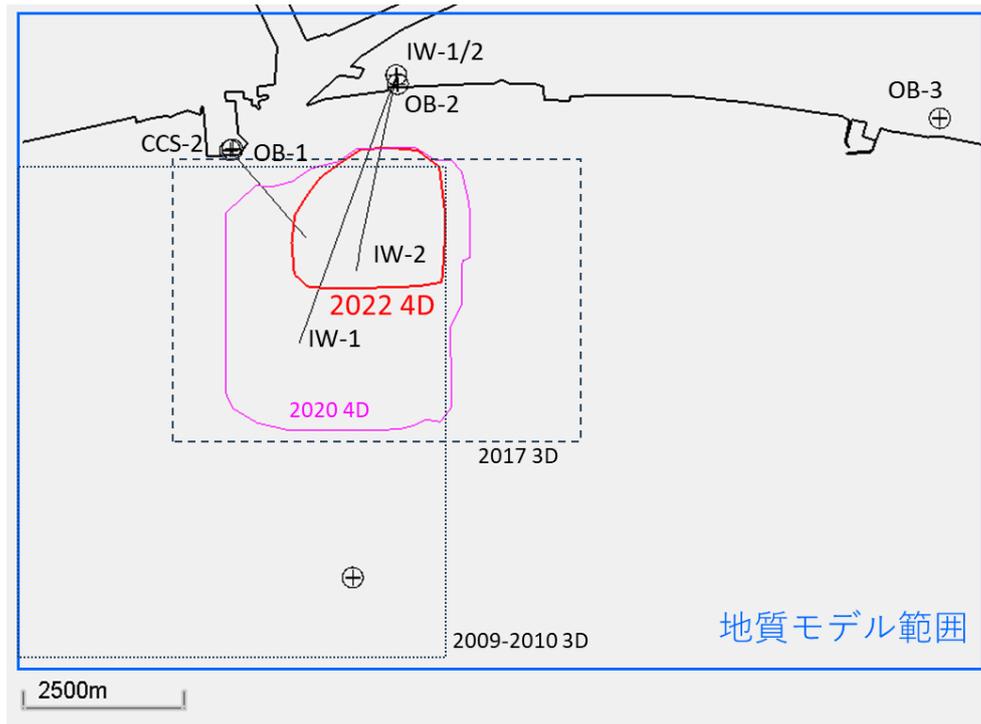


図 5.3-1 調査対象範囲

5.3.2 繰り返し弾性波探査第六回モニター調査データの概要

調査対象範囲では、2009-2010年の3D探査弾性波探査データ取得以降に複数回の繰り返し弾性波探査が実施されている。本作業では、「2022年度CCUS研究開発・実証関連事業／苫小牧におけるCCUS大規模実証試験／苫小牧におけるCCUS大規模実証試験「繰り返し弾性波探査」データ処理作業」にて実施されたタイムラプス処理（以下、「2022年度処理」と称する。）データを使用した。2022年度処理ではデータ処理範囲がIW-2周辺に限定されている（図5.3-1の赤色の枠）。使用したデータの一覧を表5.3-1に示す。

ベースライン記録と各年のモニター記録を図5.3-2に、各年のベースライン記録とモニター記録の差分記録を図5.3-3に示す。両図面の記録ともにIW-2の坑跡に沿った断面である。図5.3-2に示すように、各弾性波探査記録間においては大きな差異は観察されず、同等な品質が担保されている。マゼンタ色および緑色のホライズンはそれぞれ萌別層泥岩基底、SB3に相当し、両ホライズンに挟まれた区間が萌別層貯留層に相当する。各弾性波探査記録では萌別層貯留層が明瞭に捉えられ、図5.3-3に示す各年の差分記録にはCO₂の圧入に伴う弾性波4D応答が観察された。なお、各年によって有効なデータ範囲やトレースが異なるが、これはデータ取得および処理範囲が異なるためである。

表 5.3-1 差分解析検討結果(2022年)

	データ名	データ内容	データ種類
1	cip-stk_4D_tomakomai_0922-BALL_pzsum.sgy	Baseline 記録 (2022年処理)	重合前時間マイグレーション
2	cip-stk_4D_tomakomai_0922-2017_pzsum.sgy	2017年繰返記録 (2022年処理)	重合前時間マイグレーション
3	cip-stk_4D_tomakomai_0922-2018_pzsum.sgy	2018年繰返記録 (2022年処理)	重合前時間マイグレーション
4	cip-stk_4D_tomakomai_0922-2019_pzsum.sgy	2019年繰返記録 (2022年処理)	重合前時間マイグレーション
5	cip-stk_4D_tomakomai_0922-2020_pzsum.sgy	2020年繰返記録 (2022年処理)	重合前時間マイグレーション
6	cip-stk_4D_tomakomai_0922-2022_pzsum.sgy	2022年繰返記録 (2022年処理)	重合前時間マイグレーション
7	dif-stk_4D_tomakomai_BALLx2017_pzsum.sgy	2017年繰返と Baselineの差分記録	差分記録
8	dif-stk_4D_tomakomai_BALLx2018_pzsum.sgy	2018年繰返と Baselineの差分記録	差分記録
9	dif-stk_4D_tomakomai_BALLx2019_pzsum.sgy	2019年繰返と Baselineの差分記録	差分記録
10	dif-stk_4D_tomakomai_BALLx2020_pzsum.sgy	2020年繰返と Baselineの差分記録	差分記録
11	dif-stk_4D_tomakomai_BALLx2022_pzsum.sgy	2022年繰返と Baselineの差分記録	差分記録
12	dif-stk_4D_tomakomai_2020x2022_pzsum.sgy	2022年繰返と2020 年繰返の差分記録	差分記録

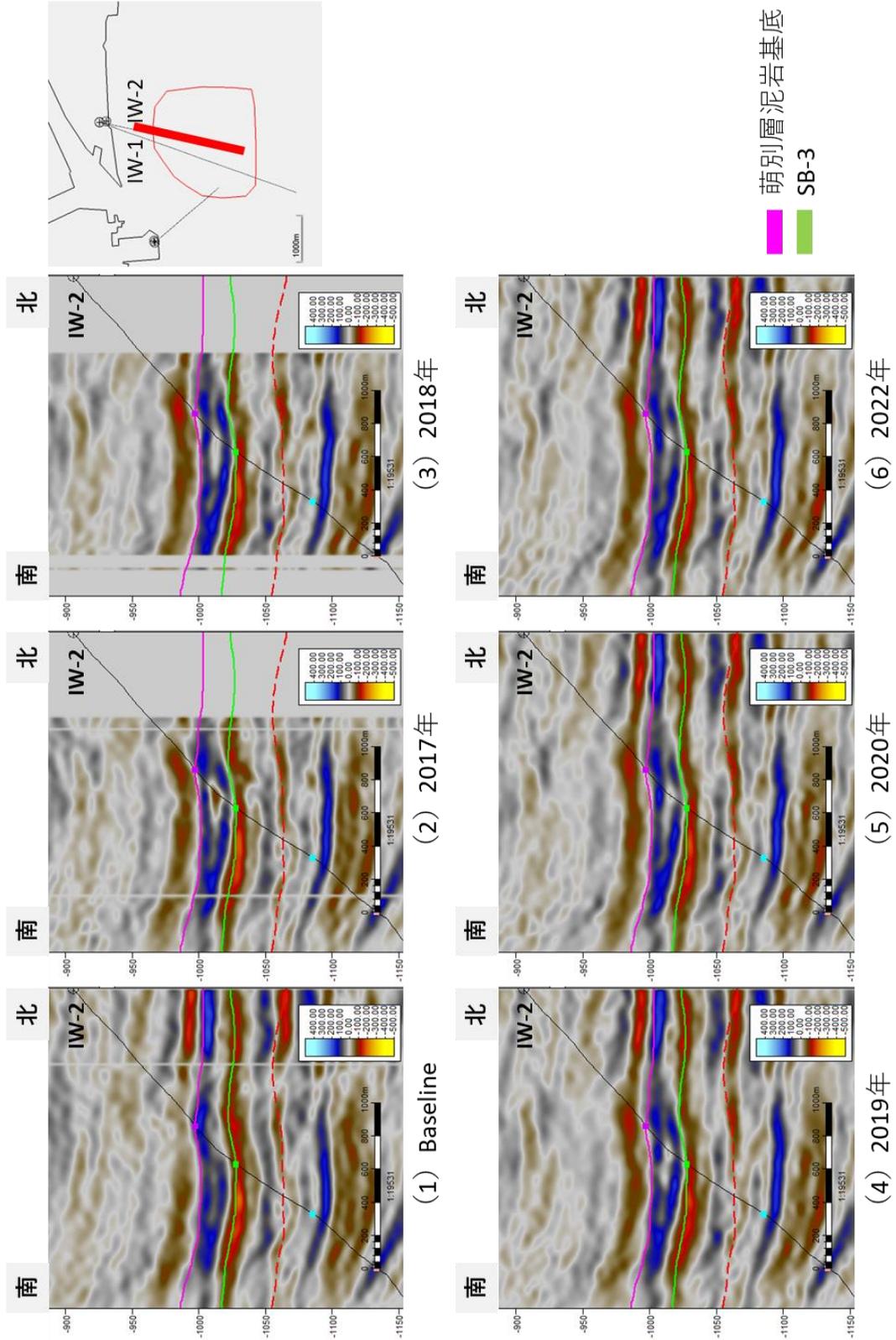


図 5.3-2 ベースライン記録と各年のモニター記録

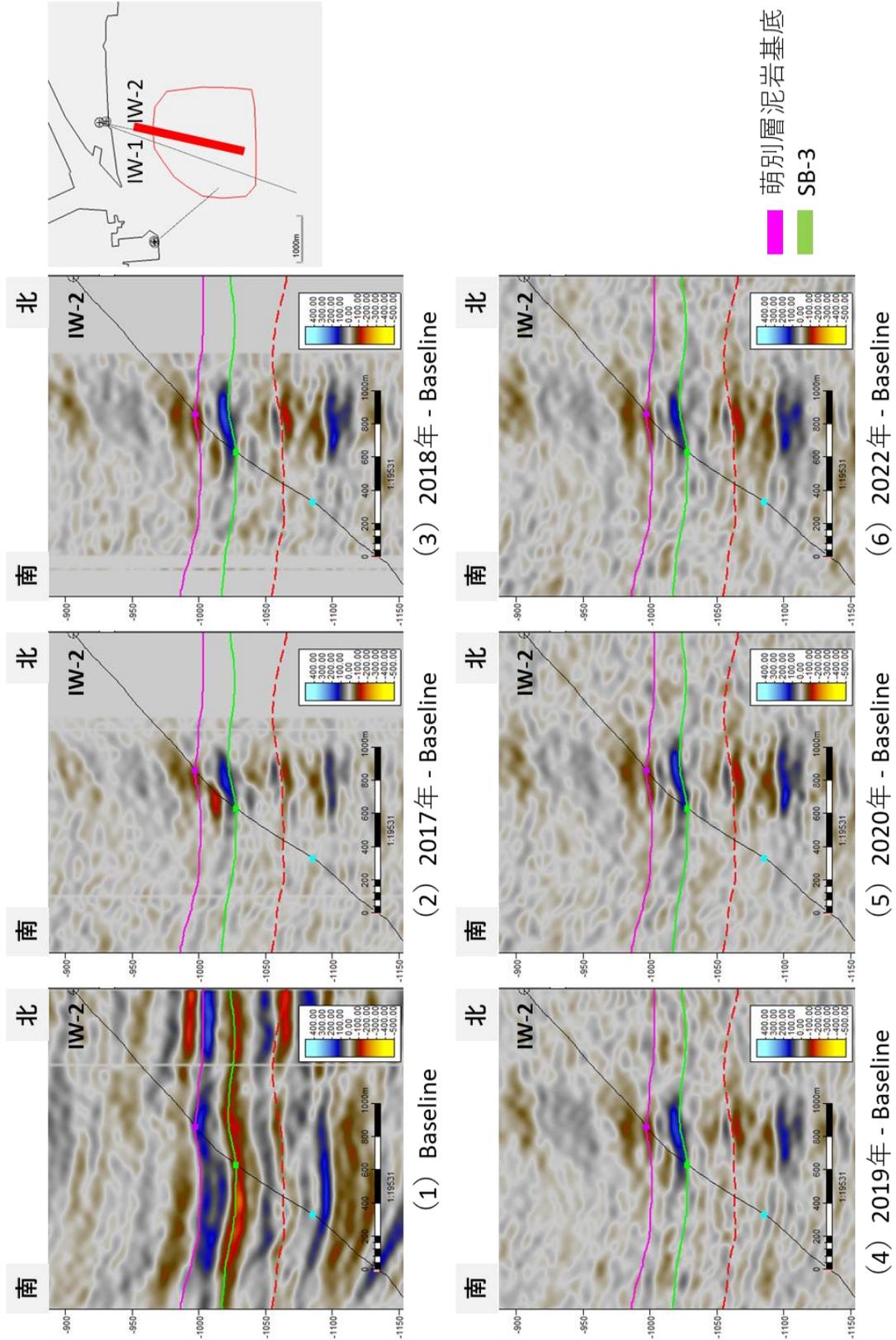


図 5.3-3 各年の4D差分記録

5.3.3 坑井対比 (IW-2)

新たに処理されたベースライン記録を用いて再解釈をするにあたり、改めて坑井対比を確認した。図 5.3-4 に示すように、対比に使用した坑井は IW-2、使用した弾性波探査記録は 2022 年に再処理されたベースライン記録である。合成弾性波記録は 2020 年スタディおよび 2021 年スタディにて音波検層 (DT) のみを使って作成 (密度は Gardner の式 (Gardner et al., 1974) で推定) した合成弾性波記録を採用し、深度—時間関係は CCS-1 のチェックショットを採用した。

対比する坑井マーカとホライズンは、浅部から萌別層泥岩基底、SB-3、萌別層基底および SB-2 である。合成弾性波記録と弾性波探査記録ともに、青 (ピーク) が正の値 (音響インピーダンスが増加する境界面からの反射波)、赤 (トラフ) が負の値 (音響インピーダンスが減少する境界面からの反射波) を示す。SB-3 から SB-2 までの区間では合成弾性波記録と 2022 年ベースライン記録の波形が良好に対比できた。貯留層は萌別層泥岩基底と SB-3 の間において音響インピーダンスが複数回にわたって大きく振れる礫層卓越部分に相当する。萌別層泥岩基底の対比は少しずれているものの、少なくとも貯留層内の 2 枚のピークは良好に対比できた。

以下、各ホライズンの対比をまとめる。

- 1) 萌別層泥岩基底 (983 mTVDSS (海水面からの垂直深度) / 997 ms) :
ピークそのものではなく、トラフ (赤) からピーク (青) のゼロクロス付近
- 2) SB-3 (1,018 mTVDSS / 1,028 ms) :
トラフ
- 3) 萌別層基底 (1,086 mTVDSS / 1,086 ms) :
トラフからピークのゼロクロス付近
- 4) SB-2 (1,144 mTVDSS / 1,134 ms) :
ピーク

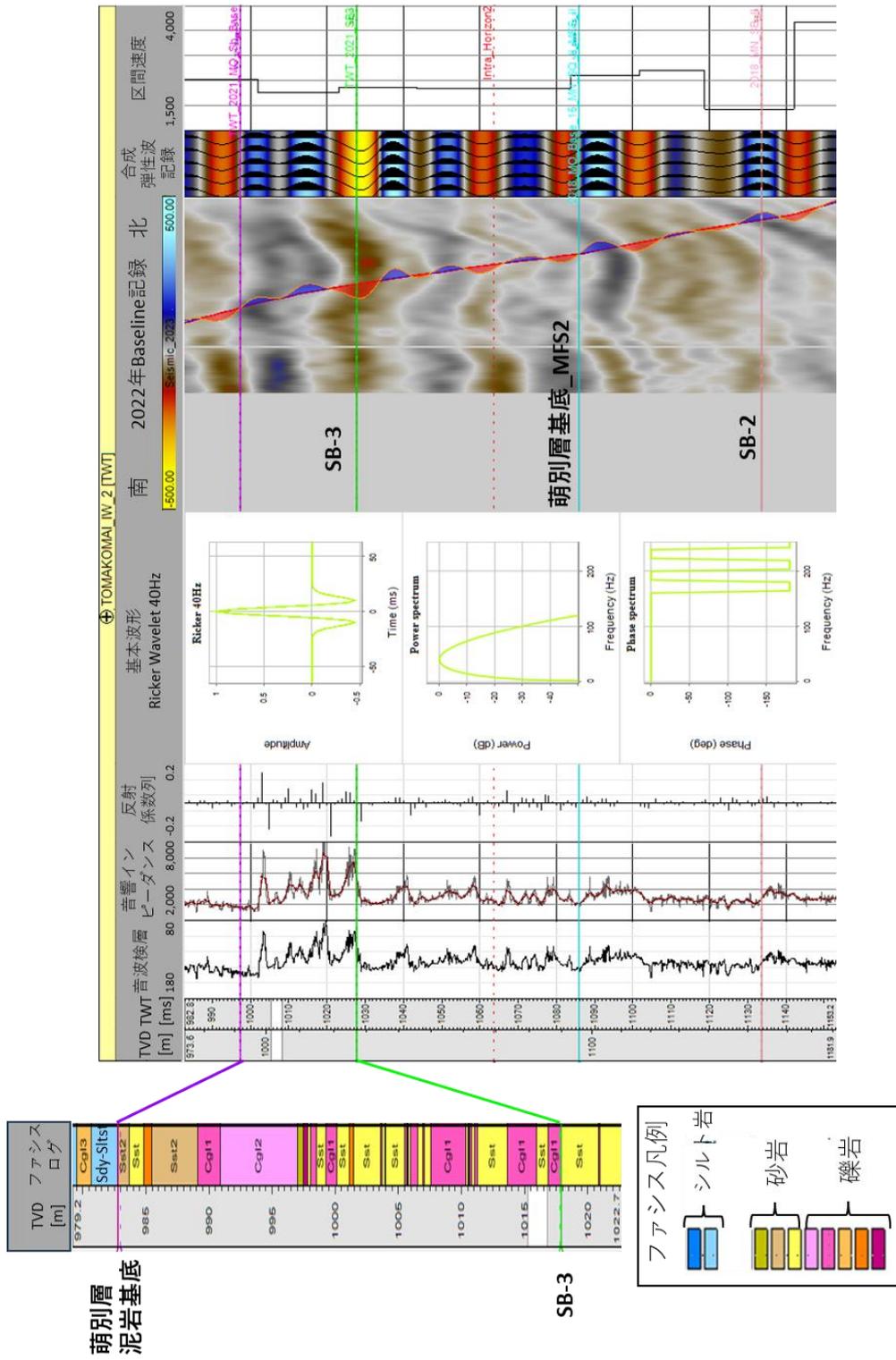


図 5.3-4 坑井一弾性波探査記録対比 (Baseline 記録)

次に、坑井対比結果をもとに、合成弾性波記録とモニター記録を対比した。図 5.3-5 に IW-2 の坑跡に沿ったベースライン記録およびモニター記録の断面を示す。各断面の IW-2 の坑跡上には坑井対比で作成した合成弾性波記録を表示した。

マゼンタ色のホライズンは萌別層泥岩基底に相当し、ここから緑色の SB-3 ホライズンまでの複数の礫層を挟む区間が萌別層貯留層に相当する。図 5.3-4 の坑井対比で示したとおり、ベースライン記録の断面では合成弾性波記録と良好に対比された。一方で、モニター記録の断面では萌別層貯留層内の青色のピークとして現れる礫層に挟まれた区間に、強いトラフ（赤色）の反射波の出現が確認でき、このトラフの反射波は CO₂ の圧入に伴うインピーダンス低下により出現した反射波と考えられる。モニター記録の萌別層泥岩基底以深では CO₂ 圧入に伴う速度低下により新たに出現した反射波による波形干渉の影響や分散・吸収による時間遅れによる合成弾性波記録との若干のずれが確認できたが、大局的にはベースライン記録と同様に合成弾性波記録と良好に対比された。

図 5.3-6 に、IW-2 の坑跡に沿ったベースライン記録および各年のモニター記録とベースライン記録との差分記録の断面を示す。差分記録では萌別層貯留層内に負（赤色のトラフ）の振幅異常と正（青色のピーク）の振幅異常がペアで観測された。これらの現象は、CO₂ 圧入により礫層に狭狭する砂層のインピーダンスが低下し、CO₂ 圧入区間の上限と下限で 4D 応答として出現したものと解釈した。同様に、萌別層泥岩層基底上位においても負の振幅異常が観測された。この萌別層泥岩中の 4D 応答は CO₂ 圧入仕上げ区間の上部で、かつ、萌別層泥岩基底直下から上位の泥岩またはシルト岩と解釈される深度（977.6 ~ 986.1 m TVDSS）に相当し、圧入レートは低いものの CO₂ が圧入されたと解釈され、この区間においても CO₂ 圧入に伴う速度低下が生じたものと考えられる。

一方で、差分記録に見られる SB-3 ホライズン以深の繰り返しの強振幅異常は、CO₂ 圧入に伴う圧入層の速度低下に起因する現象と考えられる。CO₂ 圧入後は貯留層内の弾性波速度が低下することにより、圧入層以深においても CO₂ が圧入されていないにも関わらず、上位に圧入された CO₂ の影響によりベースライン記録に比べて時間遅延が生じてしまうことがある。そのため、差分記録に観測される SB3 ホライズン以深の振幅異常については CO₂ 圧入に伴う物性変化とは無関係の見かけ上の振幅異常と解釈した。

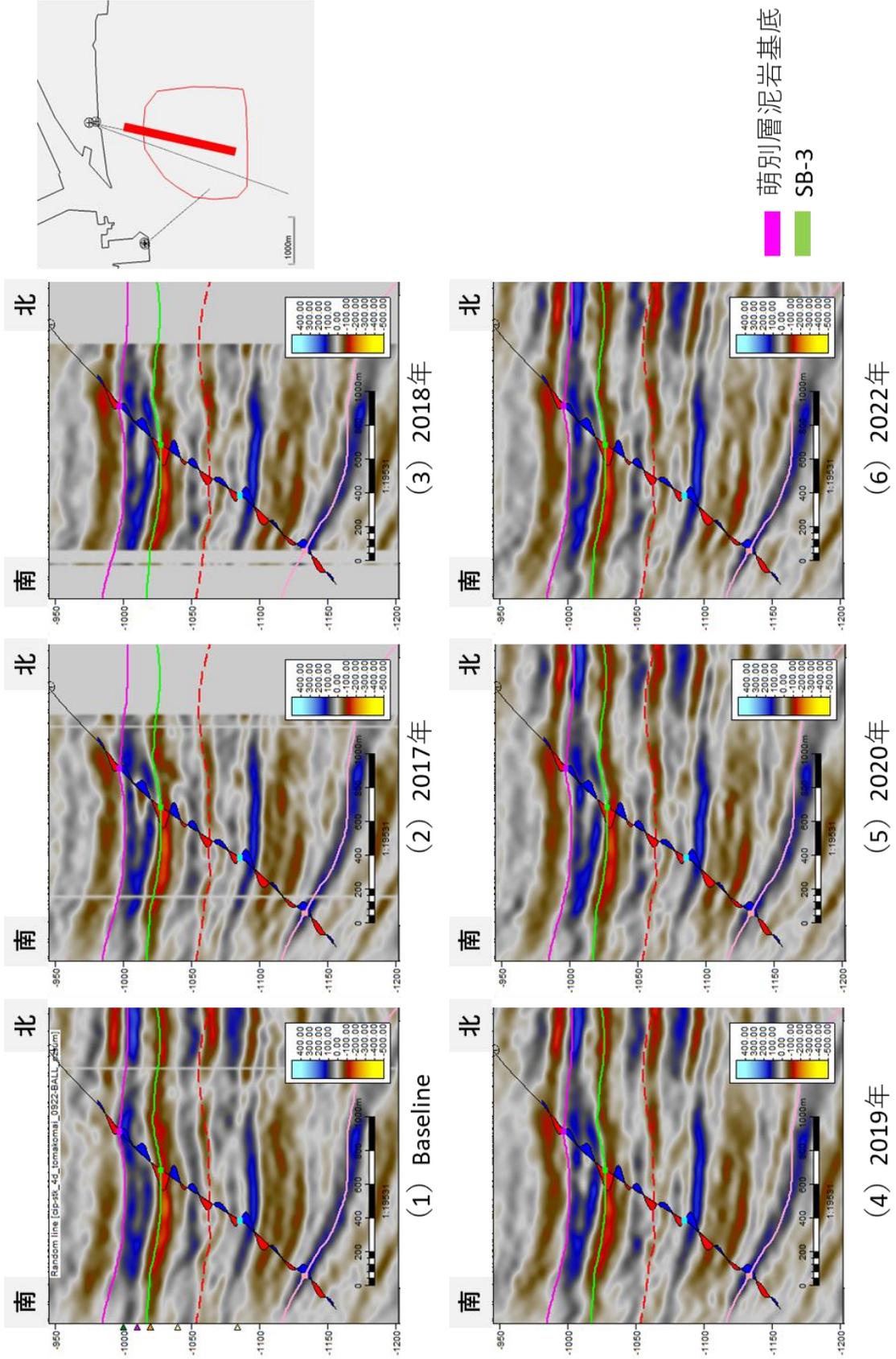


図 5.3-5 坑井一弾性波探査記録対比 (繰り返し記録)

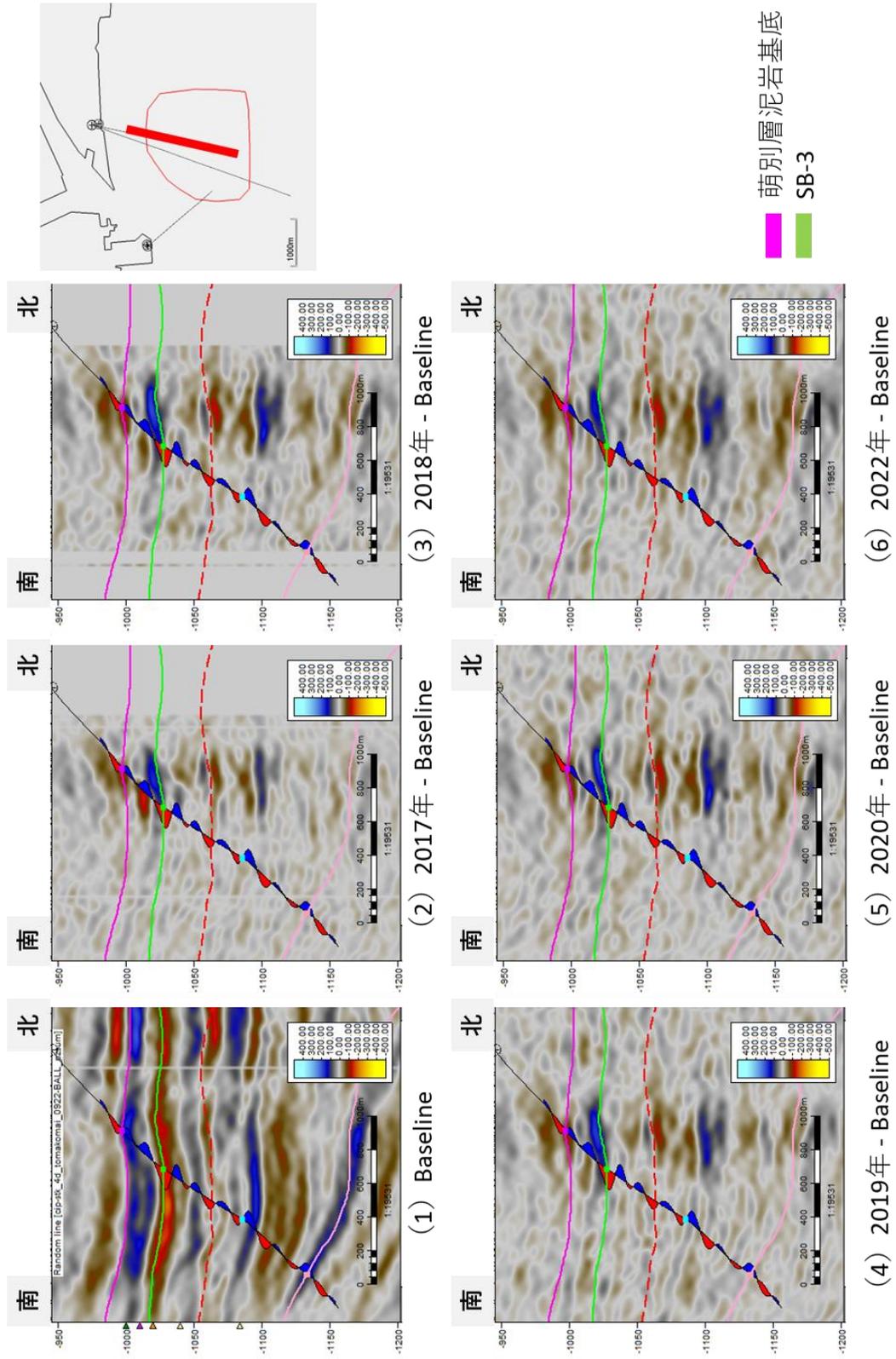


図 5.3-6 坑井一弾性波探査記録対比 (差分記録)

5.3.4 構造解釈および地質モデルの更新

2022年度タイムラプス処理データを用いて構造解釈の更新について検討した。図 5.3-7 に 2021年度スタディで使用した 2020年度タイムラプス処理のベースライン記録と本スタディで使用した 2022年度タイムラプス処理のベースライン記録の比較を示す。両処理記録を比較すると、2022年度タイムラプス処理は 2020年度タイムラプス処理に比べて処理範囲が CO₂ 圧入域に限定される。また、データ品質については品質の向上は認められるものの、構造解釈を見直すほどの大きな差異は確認できなかった。したがって、本スタディでは構造解釈を見直す必要性はないと判断し、2021年度スタディの地質モデルを踏襲することとした。構造解釈および深度変換の詳細については 2022年度以前の報告書を参照されたい。

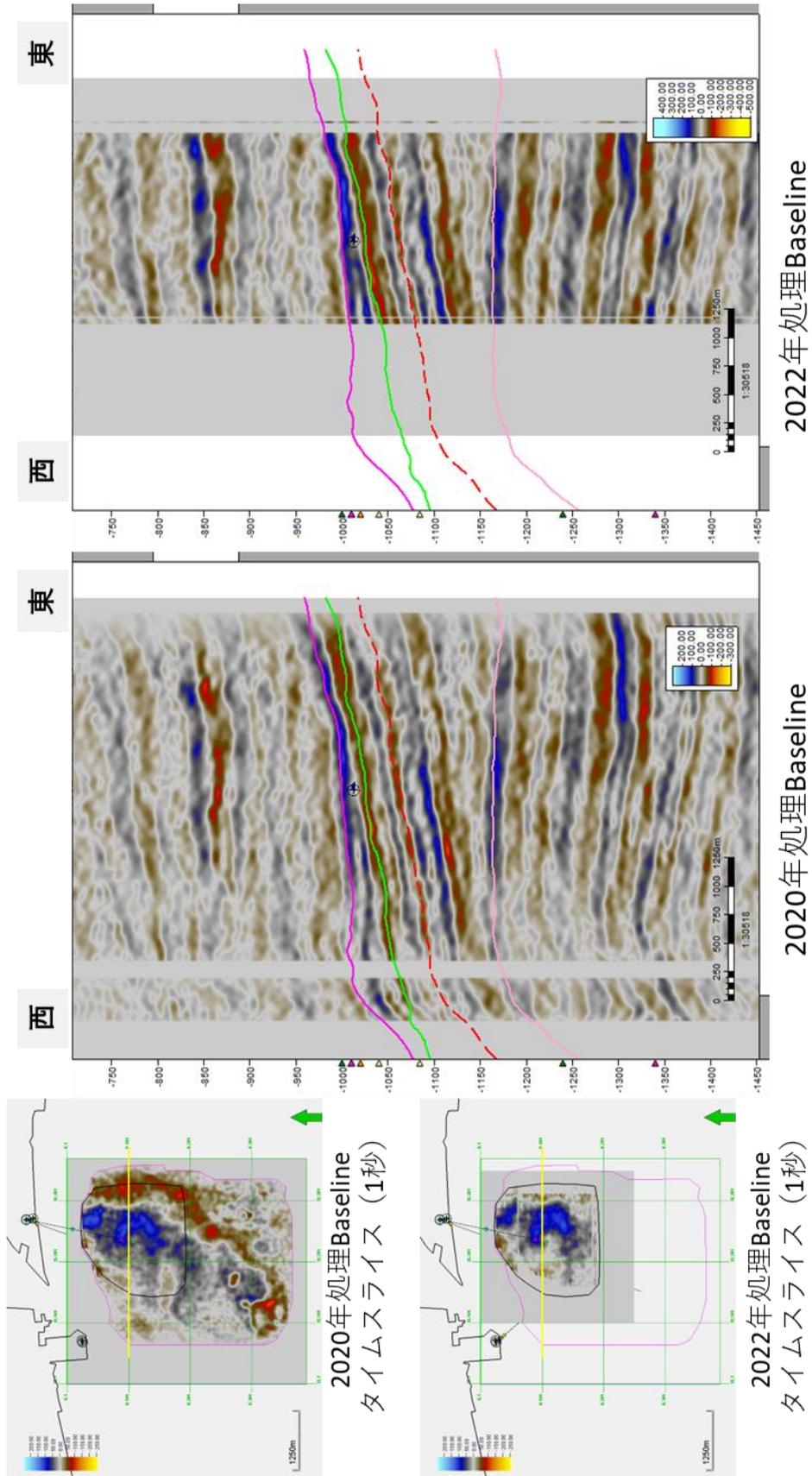


図 5.3-7 2020年ベースライン記録と2022年ベースライン記録の比較

5.3.5 4D 差分解析

(1) 萌別層貯留岩

ベースライン記録からの各年の差分記録で見られる振幅異常の比較を図 5.3-8 に示す。図 5.3-8 a) に IW-2 の坑跡に沿うベースライン記録と 2022 年モニター記録の差分記録断面（坑跡沿いに示すカーブは CO₂ 圧入量を示す）、5.3-8 b) から 5.3-8 f) に萌別層貯留層を含む区間（萌別層泥岩基底の上位 12 ms～下位 36 ms の区間）より計算した RMS 振幅マップを示す。差分記録にみられる RMS 振幅の振幅異常は CO₂ 圧入に伴う萌別層貯留層内の反射波の時間遅れや振幅変化に起因する振幅差と考えられる。2017 年（累計圧入量 6.5 万 t・CO₂）は IW-2 周辺に同心円に近い形状で振幅異常（赤色ほど強い）が広がっているが、2018 年（累計圧入量 21 万 t・CO₂）、2019 年（累計圧入量 30 万 t・CO₂）および 2020 年（累計圧入量 30 万 t・CO₂）記録では振幅異常の広がりがさらに坑井の東方に拡大している様子が確認できる。一方、圧入量が増加しても、北方や西方にはほとんど振幅異常域は広がっていない。また、2018 年以降の記録を比べると、2019 年および 2020 年は 2018 年と比べて圧入量が増加しているにも関わらず、三者の差分記録の振幅異常域はほとんど変化していない。同様の傾向が 2022 年差分記録の RMS 振幅マップにおいても確認でき、CO₂ 圧入が停止されている 2020 から 2022 年の期間においても引き続き顕著な振幅変化は確認できなかった。

各モニター記録間の差分記録でみられる振幅異常の比較を図 5.3-9 に示す。CO₂ 圧入開始から 2017 年までは最も振幅が増大していることが確認でき、2017 年から 2018 年の期間に東方に振幅異常が拡大している様子が確認できる。一方、2018 年以降はモニター記録間での振幅変化は顕著ではなく、振幅異常が周辺に拡大している様子は確認できない。2020 から 2022 年期間の振幅マップにおいても 2020 年からの顕著な振幅変化は確認できず、2020 から 2022 年期間において弾性波応答には変化がなかったと解釈した。

また、IW-2 の坑跡沿いの Quadrature trace の各年の差分記録断面を図 5.3-10 に、萌別層貯留層下部の最小振幅マップを図 5.3-11 に示す。Quadrature trace は、差分記録を 90 度位相回転させたものに相当し、各層の疑似的な相対インピーダンスを示す。図 5.3-3 の差分記録断面が貯留層区間で青のピークと赤のトラフのインピーダンス境界を表現するのに対し、Quadrature trace の差分記録はインピーダンス変化を示唆し、萌別層貯留層区間ではほぼ赤のトラフ（インピーダンスの負の変化）で表現されるインピーダンス低下を示唆する。各年の貯留層区間のインピーダンス変化に着目すると、2017 年は CO₂ 圧入量（坑跡沿いの右振れのカーブ）が多い区間でインピーダンス減少が大きく、2018 年はさらにインピーダンス低下が東西南北に広がっているよう様子が確認できる。特に東側へのイン

ピーダンス低下域の広がりは顕著である。2019年以降の **Quadrature trace** の差分記録では差分記録に応じてインピーダンス低下域は縮小・拡大しているように見えるが、大局的にはインピーダンス低下域は 2018年に観察されたインピーダンス低下域と同様の範囲と解釈できる。2022年記録についても、2020年記録との差異は極めて小さく、インピーダンス低下域が拡大・縮小した傾向は確認できなかった。

以上、萌別層貯留層区間の観察結果を以下のようにまとめる。

- 1) 萌別層貯留層は高インピーダンスの礫岩卓越層を複数枚挟むため、ベースライン記録では高インピーダンスを示す。
- 2) 2017年時点の差分記録には高インピーダンスに挟まれた区間にCO₂圧入に伴うインピーダンス低下が観察され、そのインピーダンス低下域はIW-2坑井の圧入区間に同心円状に広がる様子が観察された。
- 3) 2018年時点の差分記録では、2017年時点で観察された低インピーダンス域が拡大する様子が観察された。
- 4) 断面からは、モニター期間を通じて構造下位から上位への振幅異常域の遷移が観察された。
- 5) 一方で、CO₂圧入部より離れた区域では、モニター年度によって振幅が増大していたり減少していたりと安定しない傾向も観察された。

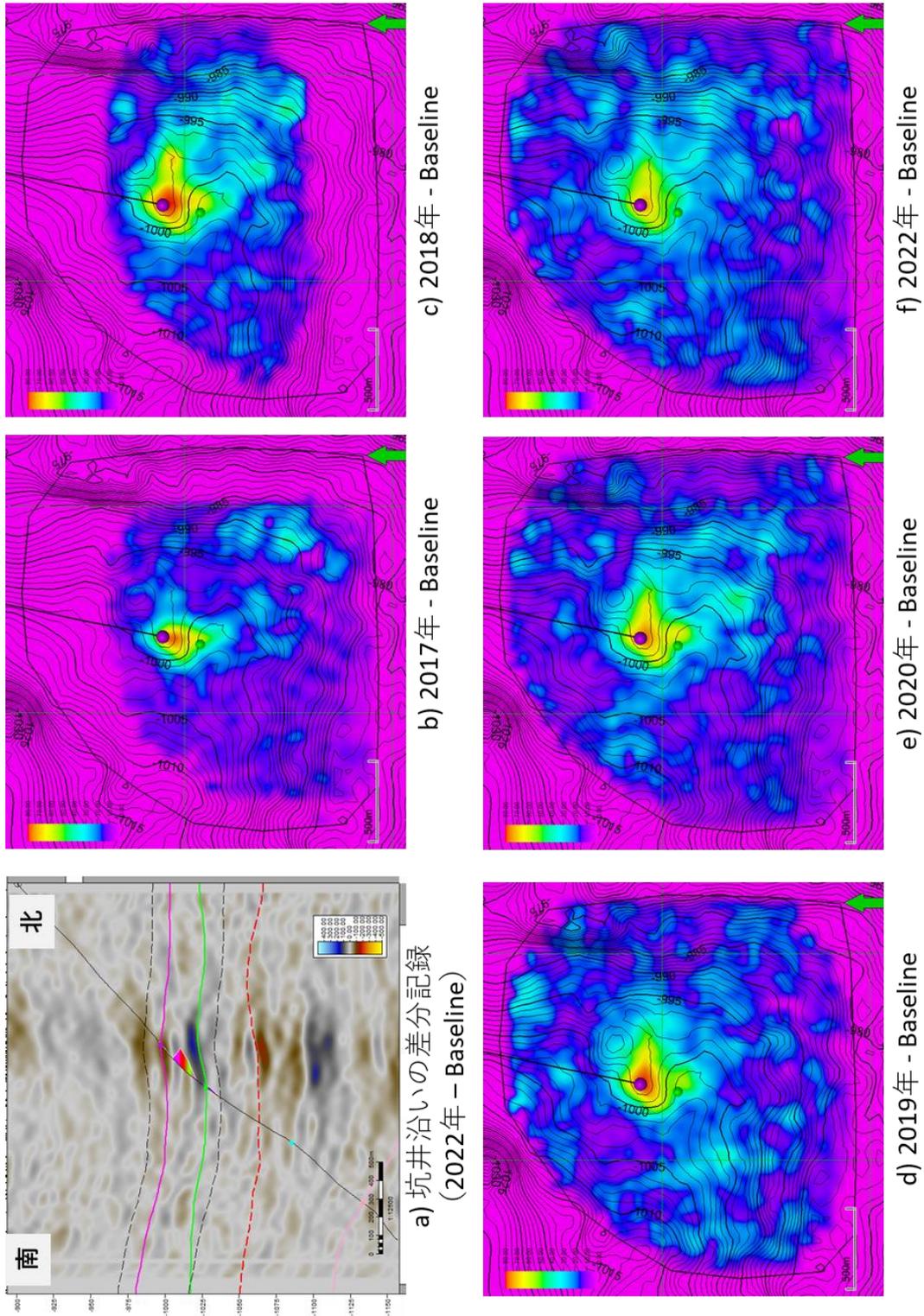


図 5.3-8 各年の差分記録 (萌別層貯留層の RMS 振幅)

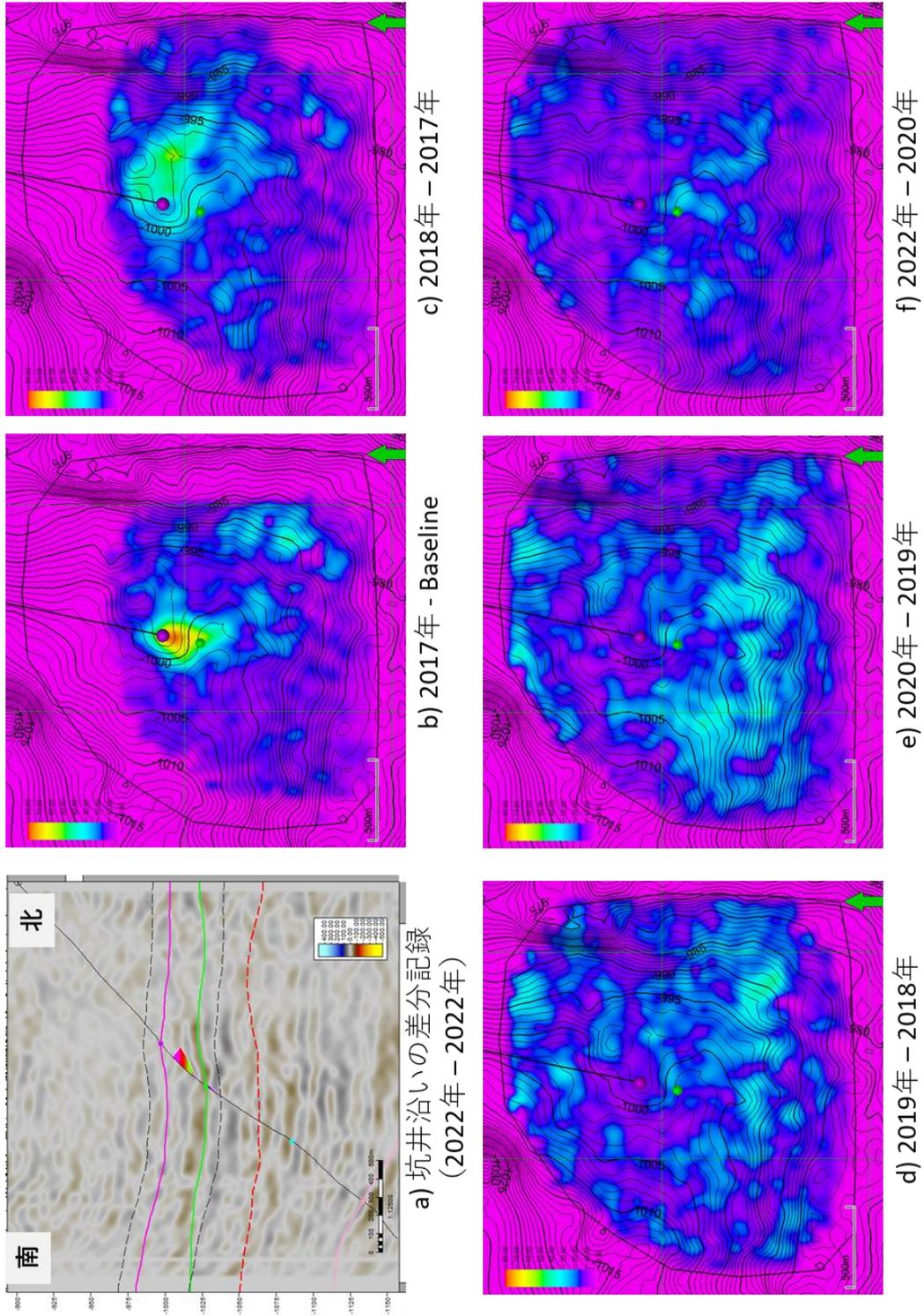


図 5.3-9 各年の差分記録間の差分 (萌別層貯留層の RMS 振幅)

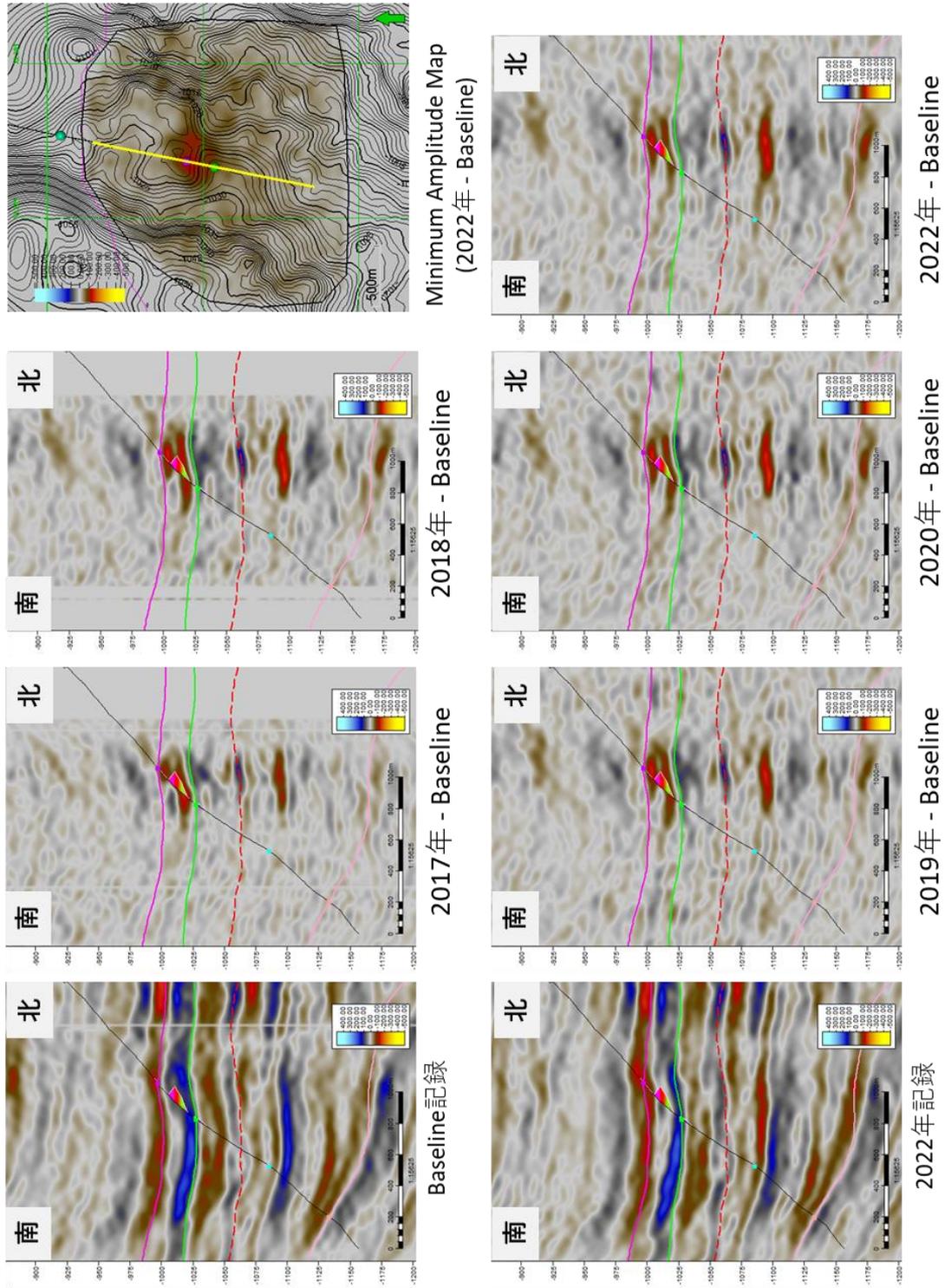


図 5.3-10 差分記録の Quadrature trace (坑井沿い)

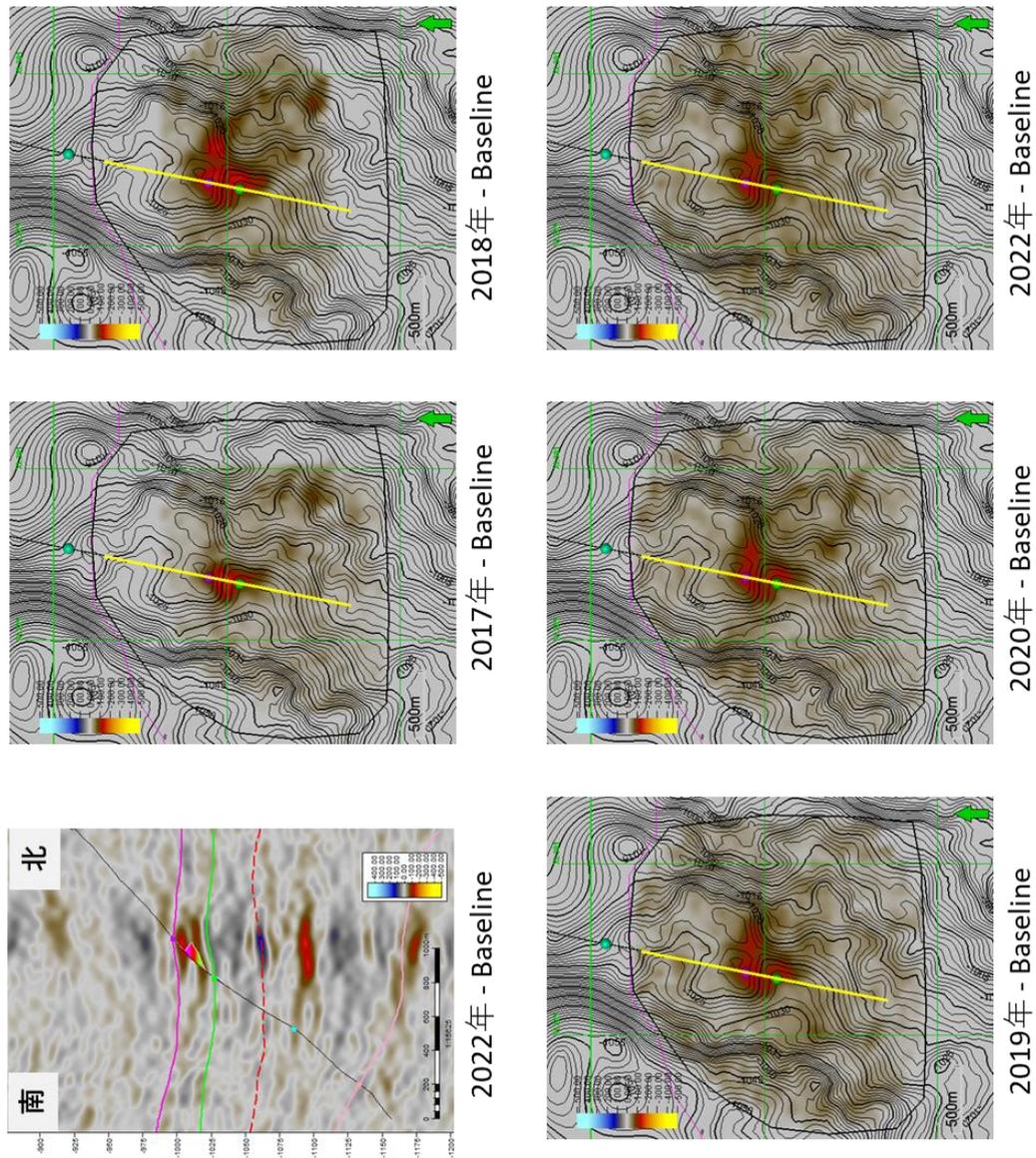


図 5.3-11 差分記録の Quadrature trace (最小振幅マップ)

(2) 萌別層泥岩

4D 記録では萌別層貯留層直上の泥岩層内にも振幅変化が観察された(図 5.3-10)。図 5.3-12 に差分記録による萌別層泥岩基底直上の最小振幅マップを示す。2017 年差分記録の最小振幅マップでは、負の振幅異常が圧入域から同心円状に広がっている様子が確認できた。また、差分記録の経時変化を追跡すると、2017 年から 2018 年にかけて負の振幅異常が強くなり拡大している様子が確認できた。2019 年以降の振幅変化は萌別層貯留層の 2019 年以降の 4D 応答同様に大きな変化は観察されていない。

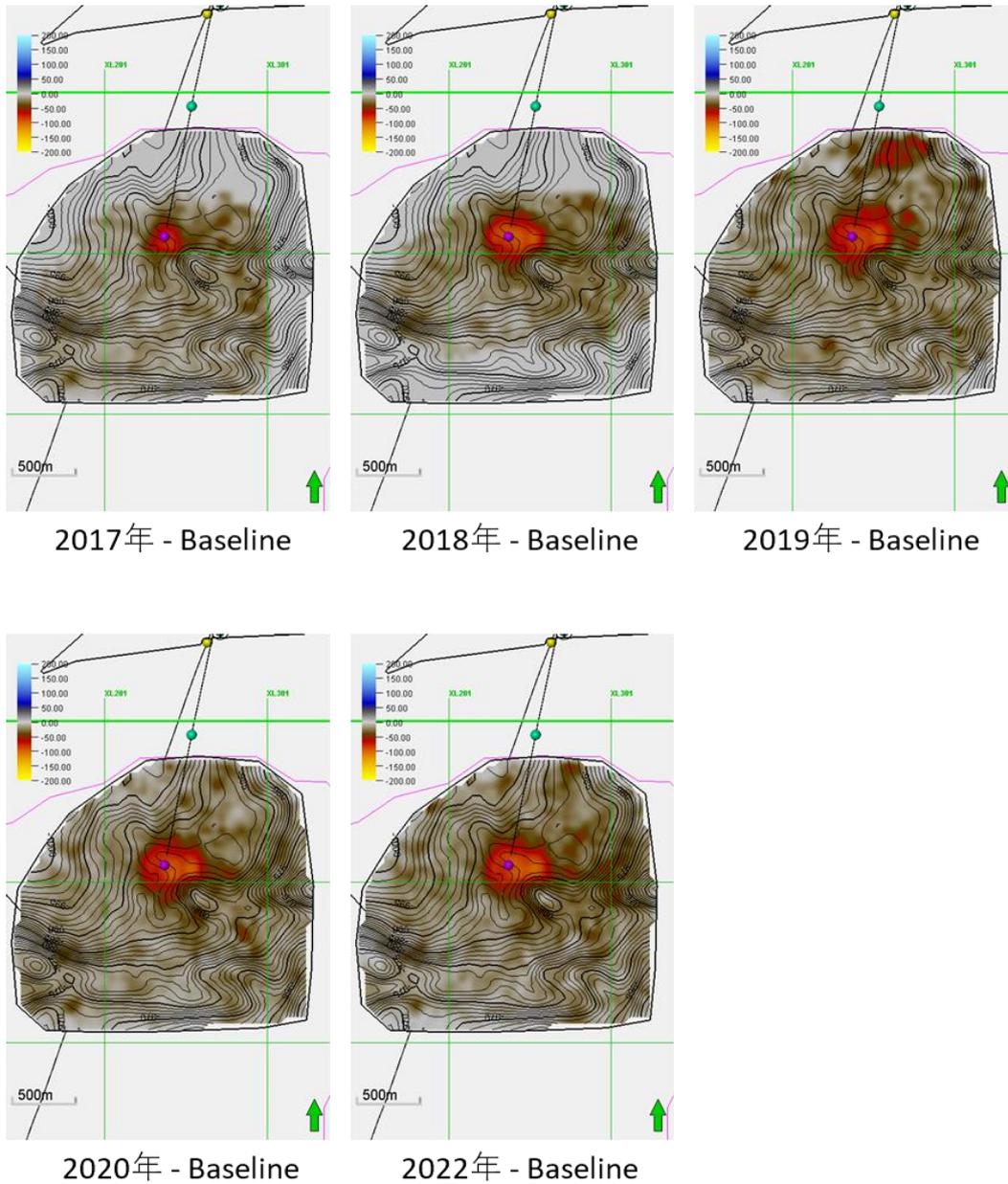


図 5.3-12 萌別層泥岩層内ホライズンの振幅変化 (最小振幅マップ)

5.3.6 考察

5.3.5 節における萌別層貯留層および萌別層泥岩層の 4D 差分解析の観察結果をもとに、以下、考察する。

(1) CO₂ 圧入量に対する差分記録の変化

5.3.5 節で示したとおり、CO₂ の圧入開始以降、繰り返し弾性波探査記録には CO₂ の圧入に伴う 4D 応答が確認できた。第 1 回目のモニター記録である 2017 年 (累計圧入量 6.5

万 t・CO₂) 記録では圧入井である IW-2 近傍に 4D 応答 (振幅変化や時間遅れ) が確認でき、2018 年 (累計圧入量 21 万 t・CO₂) 記録では CO₂ 圧入に伴う 4D 応答の範囲が拡大した様子が確認できた。2018 年時点の差分記録が振幅異常分布域、振幅値の大きさともに最大を示す。2017 年 (累計圧入量 6.5 万 t・CO₂) から 2018 年 (累計圧入量 21 万 t・CO₂) の圧入量変化に比べて、2018 年から 2019 年 (累計圧入量 30 万 t・CO₂) の累計圧入量の変化は小さく、2019 年記録では振幅異常域が拡大しなかった (2020 年スタディ)。また、圧入を停止後に取得された 2020 年記録では 2019 年記録同様に振幅異常の拡大は確認されず、むしろ、振幅が減少するような現象も確認されている (2021 年スタディ)。本年度はさらに、圧入停止後の 2022 年記録が追加された。2022 年記録は 2020 年記録と類似した記録となっており、振幅異常が 2020 年時点に比べて拡大している様子は確認できない。2022 年時点において、CO₂ が移動せず 2020 年時点の状態が維持されていることが示唆された。

また、2018 年以降の差分記録では坑井から南東方向への二条の振幅異常の伸びが見られる。そのうち、北西側の振幅異常帯については、圧入地点から構造の上位方向へ伸びているようにも見え、CO₂ の浮力による構造上位への移動を示している可能性もある。

一方で、各年の処理記録に傾向の違いが見られる。差分記録の振幅異常図では 2018 年と 2020 年、2022 年は類似した分布を示すのに対し、その間の 2019 年は振幅異常の分布域が特に南東側で狭まっている。これはデータ処理の違いによる記録品質への影響とも考えられる。

(2) CO₂ 圧入量に対する差分記録の変化

5.3.5 (2)にて記載した通り、モニター記録において、萌別層貯留層直上の萌別層泥岩層内にもベースライン記録では記録されていない負の振幅異常が IW-2 近傍に観察された (図 5.3-12)。負の振幅変化であることから、ベースライン記録に比べてインピーダンスが低下したものと解釈でき、萌別層泥岩層内にわずかに圧入された CO₂ の影響および砂岩貯留岩に圧入された CO₂ が直上の泥岩層内へ移動した影響と解釈できる。図 5.3-12 の最小振幅マップを観察すると、2017 年に観察された負の振幅異常域は 2019 年にかけて徐々に拡大する様子が確認され、萌別層泥岩層内においても萌別層貯留層内と同様に、CO₂ が IW-2 を中心に同心円状に広がっていったと解釈できる。一方、圧入が停止された 2019 年以降については萌別層泥岩層内においても負の振幅異常域が顕著に変化している様子は確認できず、IW-2 周辺に CO₂ が留まっていると推察される。また、顕著な振幅異常域は萌別層貯留層直上の泥岩またはシルト岩と解釈される深度に観察されるのみで、その深度よ

りも上方に広がっていく様子は確認できない。垂直方向のCO₂の移動に関しては、萌別層貯留層直上の泥岩またはシルト岩と解釈される深度が上限であると解釈できる。

(3) 課題

本スタディでは、苫小牧沖4D弾性波探査データを用いて4D解析を実施し、CO₂の圧入に伴う弾性波応答についての検討を実施した。今後の課題として以下の3点を挙げる。

① 弾性波フォーワードモデリングによる4D応答の検討

本スタディではCO₂の圧入に伴う4D弾性波応答を抽出することができた。今後は4D応答を引き起こす要因について弾性波フォーワードモデリングを用いて検討することが重要である。岩石物理学的手法により、CO₂飽和率の変化や圧力の変化等に伴う4D応答について検討することで、観察される4D応答の妥当性の検討や4D応答の現象の把握に寄与するはずである。また、萌別層貯留層内には複数の礫岩卓越部からの反射波のチューニングや薄層がせん滅する様子が観察できる。反射波の干渉に伴う複雑な弾性波応答が示唆されるため、フォーワードモデリングによるチューニング現象の検討は4D応答を理解する上で重要である。

② 4Dノイズの軽減および速度変化や時間シフトに関する検討

ベースライン記録とモニター記録の差分記録にはCO₂の圧入に伴う顕著な4D応答が観察される一方で、貯留層の上下には4Dノイズやウェーブレットのサイドローブの影響が観察され、4D応答がマスクされている可能性がある。速度変化や時間シフトに関する検討やサイドローブの軽減に関する検討を実施し、4D解析の精度向上に努めることが重要である。

③ インバージョン解析による物性解析

本スタディではQuadrature Traceによる相対インピーダンス変化を抽出したが、絶対インピーダンスを扱うことができるインバージョン解析を実施し、定量的な物性評価に繋げることを期待する。特に、重合前データを活用したAVO解析やAVOインバージョンの適用は地層内流体の変化に関する弾性波応答についての検討を可能にするため、より詳細な4D応答の検討が実現できるはずである。

5.3.7 まとめ

本スタディでは、苫小牧沖4D弾性波探査記録(2022年度処理記録)を使用して、地質モデル更新に関する検討と、CO₂圧入に伴う4D解析を実施した。地質モデル更新につい

では、2022年度処理記録を用いて解釈の見直し作業を実施し、既存の地質モデルが十分に適していることを確認した。4D解析については、CO₂圧入による萌別層貯留層および直上の泥岩層の振幅異常の経年変化を確認し、圧入されたCO₂の広がりについて検討した。

5.4 ケーススタディ

5.4.1 ケーススタディの実施

2023年度は、2021年度の圧入可能量評価の結果から抽出したP90相当、P50相当、P10相当の具現像を用いて、圧入レートを変化させた場合のシミュレーションを行い、圧入レートと貯留層内の圧入区間の関係について調査・検討した。

(1) 代表具現像

本年度使用した3つの具現像は、30個の具現像に対して下記の制約条件下での圧入可能量を評価した結果、P90相当、P50相当、P10相当の圧入可能量に対応する具現像であり、具現像13、具現像3、具現像2が該当する。

具現像数30個での圧入可能量の平均は417万t-CO₂、標準偏差は210万t-CO₂であった。30具現像のシミュレーション結果について圧入可能量を統計処理した結果、P90は148万t-CO₂、P50は417万t-CO₂、P10は686万t-CO₂である。作成された各具現像の詳細について2021年度貯留層等総合評価を参照されたい。

下記の条件2から条件5を平面図上にプロットしたものを図5.4-1に示す。また、図5.4-2から図5.4-10に各具現像における浸透率分布の平面図と断面図(図5.4-1で示した坑跡断面および東西断面)を示す。

条件1：萌別層圧入井における仕上げ区間上端の圧力が12.93MPaGに達する

条件2：溶存CO₂量の分布が海岸線に到達する

条件3：溶存CO₂量の分布が遮蔽層層準の層厚が20m以下となるエリアに到達する

条件4：溶存CO₂量の分布がモデルエリア西部の断層周辺に到達する

条件5：溶存CO₂量の分布が深度750m(TVDSS)に到達する

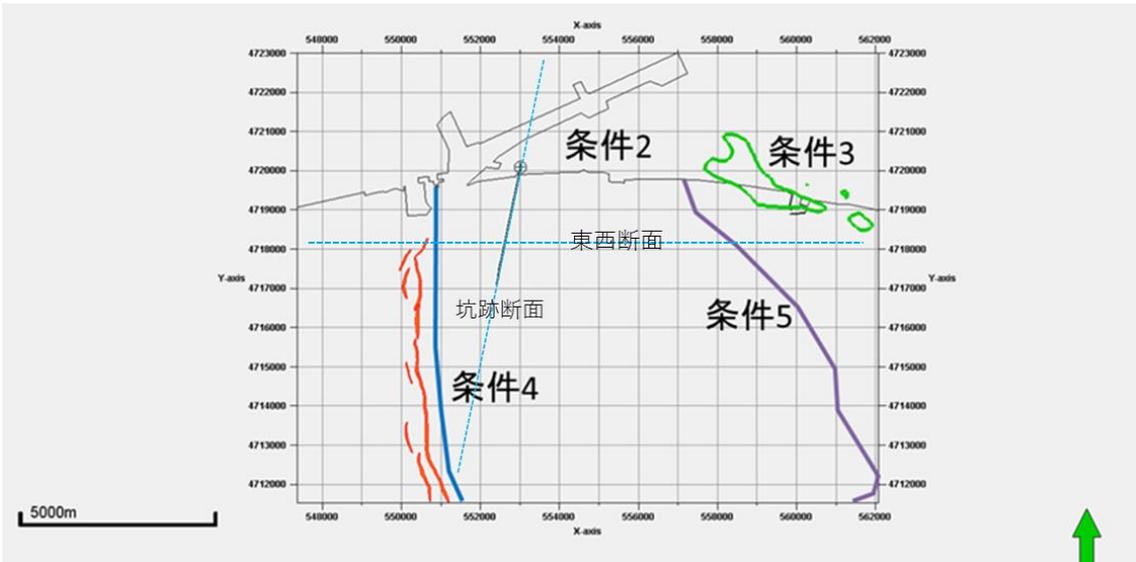


図 5.4-1 圧入可能量評価に使用する条件の範囲

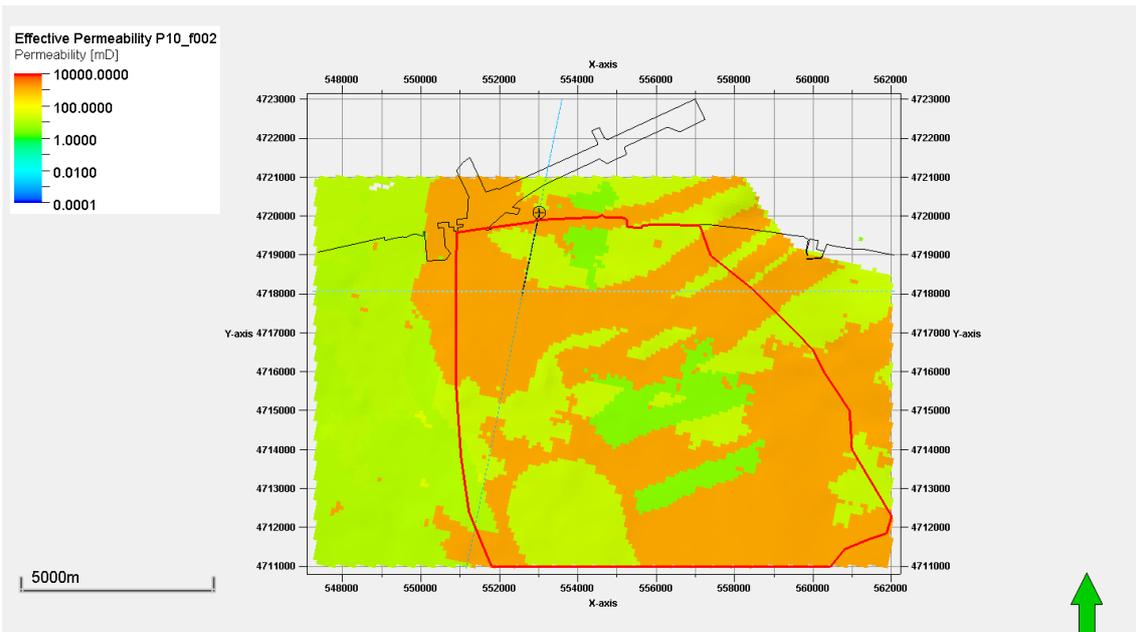


図 5.4-2 P10 モデルにおける浸透率分布 平面図 k=11

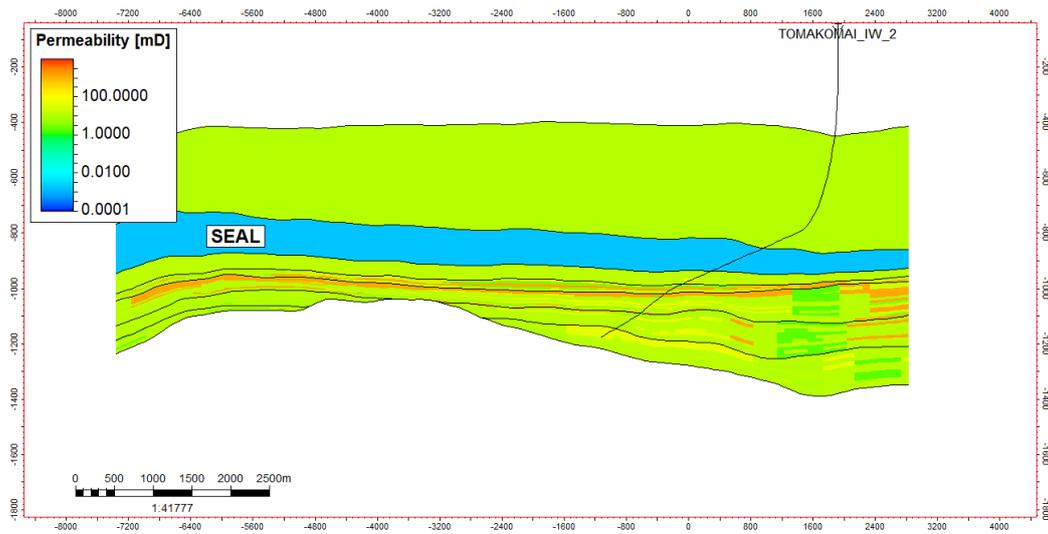


図 5.4-3 P10 モデルにおける浸透率分布 断面図 (坑跡断面)

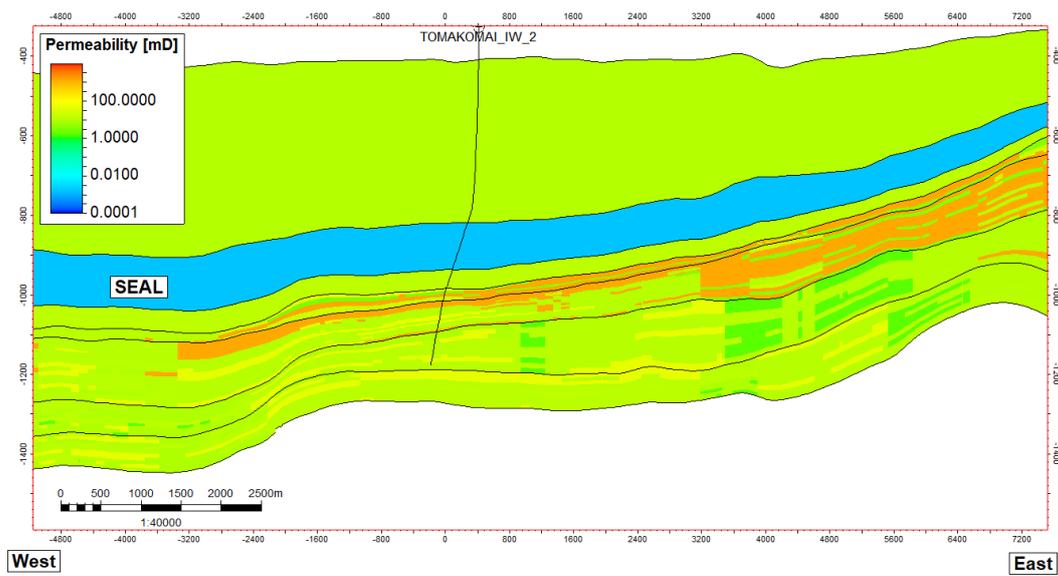


図 5.4-4 P10 モデルにおける浸透率分布 断面図 (東西断面)

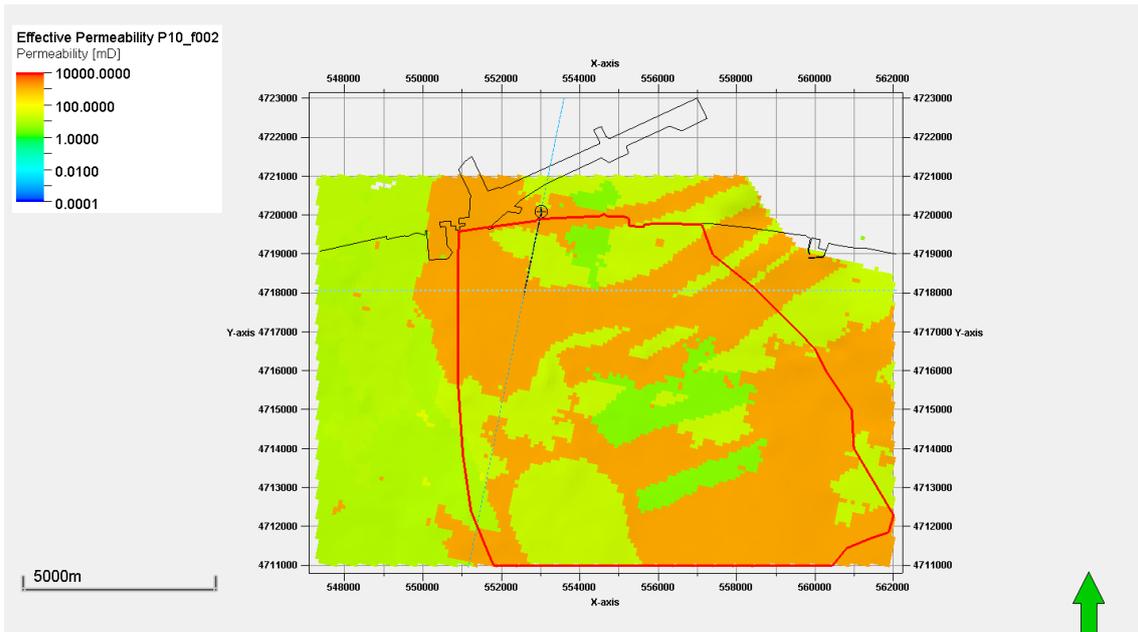


図 5.4-5 P50 モデルにおける浸透率分布 平面図 k=11

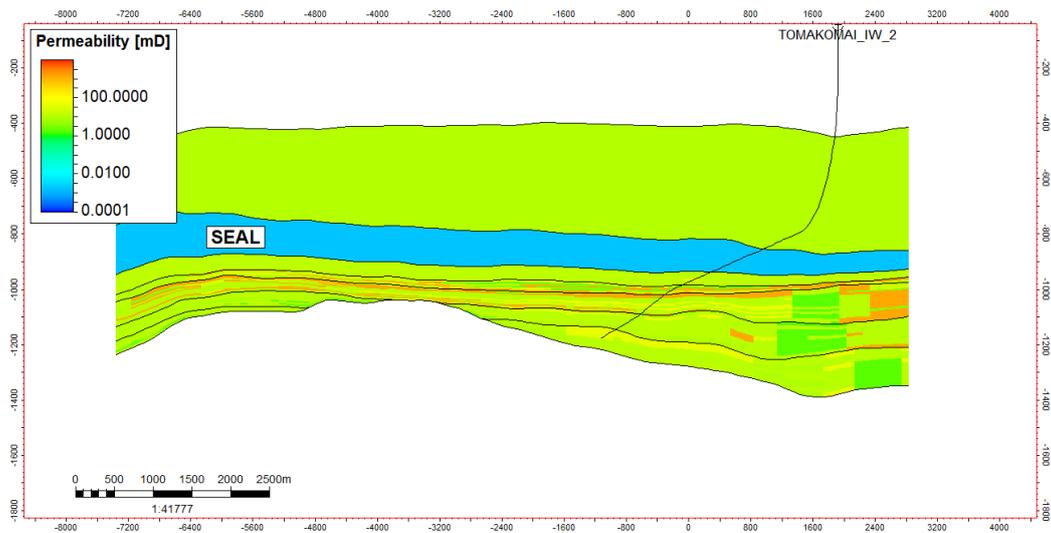


図 5.4-6 P50 モデルにおける浸透率分布 断面図 (坑跡断面)

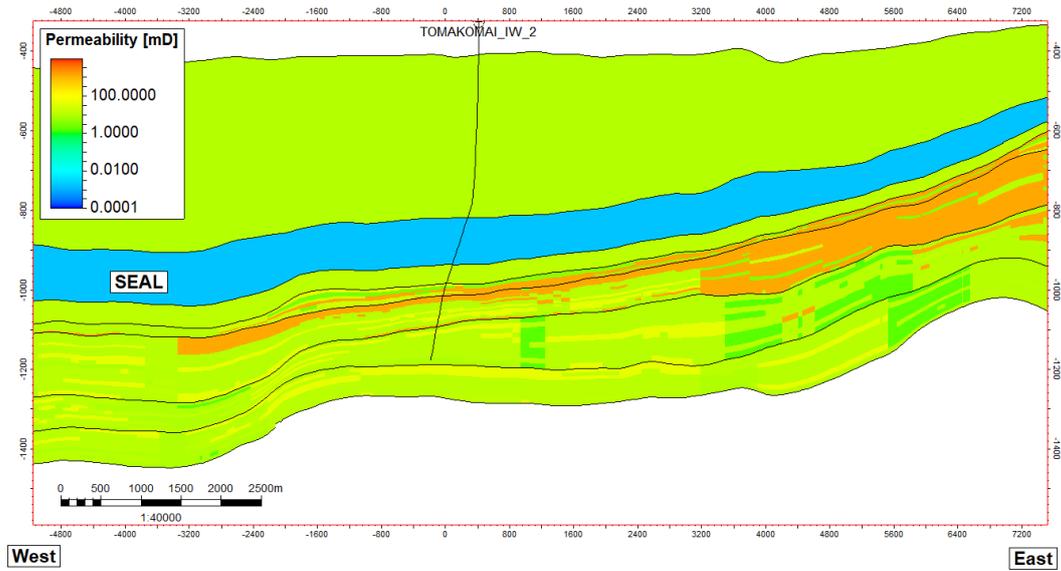


図 5.4-7 P50 モデルにおける浸透率分布 断面図 (東西断面)

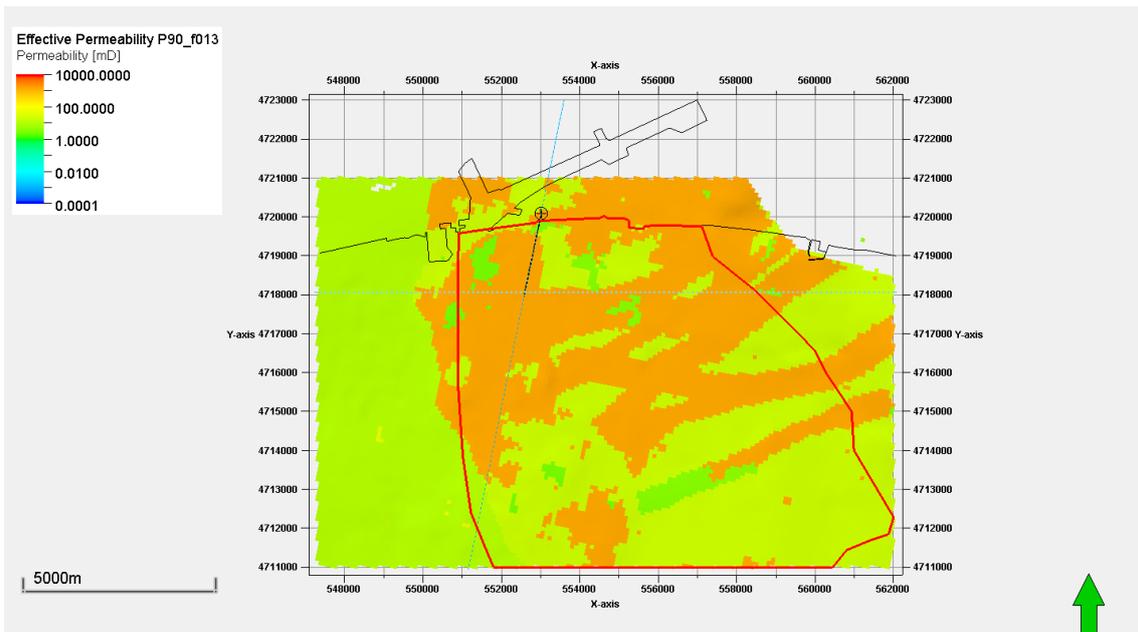


図 5.4-8 P90 モデルにおける浸透率分布 平面図 k=11

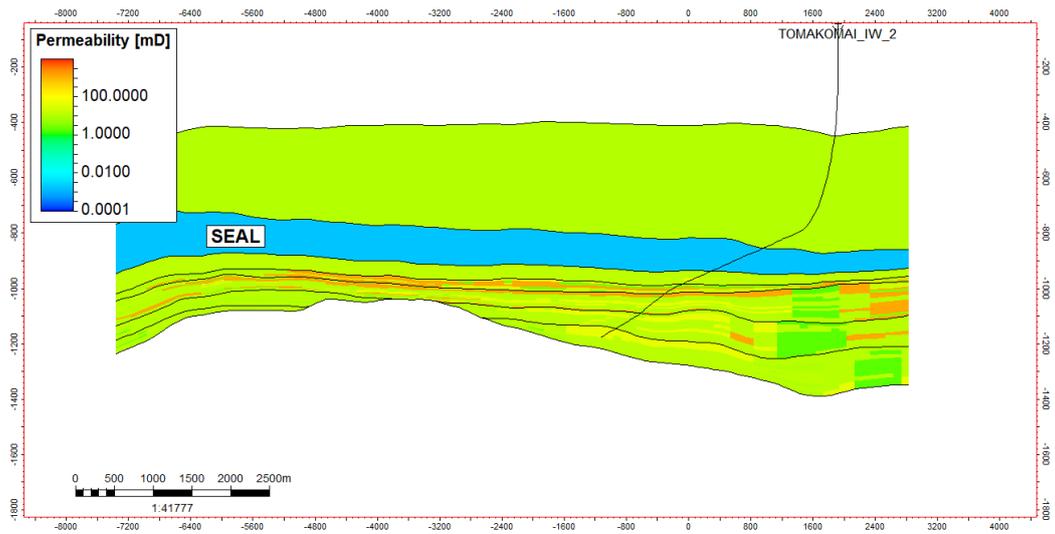


図 5.4-9 P90 モデルにおける浸透率分布 断面図 (坑跡断面)

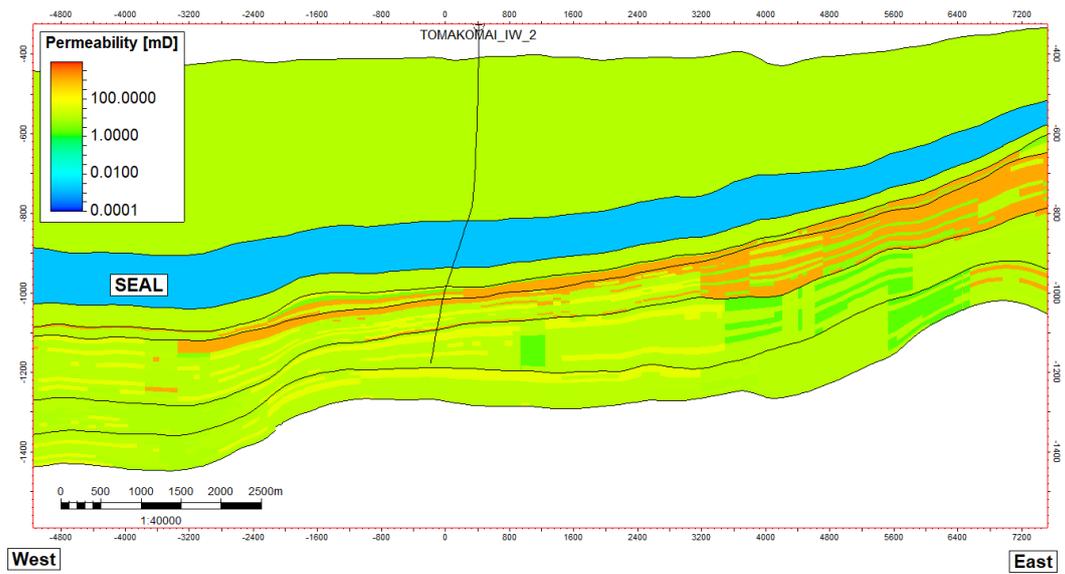


図 5.4-10 P90 モデルにおける浸透率分布 断面図 (東西断面)

(2) 圧入条件

表 5.4-1 に圧入条件を示す。3つの具現像について、総圧入量を 400 万 t-CO₂として、圧入レートを 10 万・20 万・35 万・50 万・75 万・100 万 (t-CO₂/年) の 6 通りにてシミュレーションを実施し、合計 18 ケースを比較検討した。また、圧入開始日は 2030 年 1 月からとし、モニタリング期間は圧入終了から 1000 年間とした。

表 5.4-1 圧入条件

総圧入量	400 万 t-CO ₂
圧入レート	10 万、20 万、35 万、50 万、75 万、100 万 (t-CO ₂ /年)
圧入開始年	2030 年 1 月～
モニタリング期間	圧入終了から 1000 年間

(3) 設定条件

流動シミュレーションのパラメータ設定 (貯留層圧力・温度、塩分濃度、岩石物性値) については、2021 年度貯留層等総合評価と同様の設定とした。

5.4.2 シミュレーション結果

(1) 総括

全 18 ケースにおける、各層へと圧入された CO₂ 量を表 5.4-2 から表 5.4-4 に示す。いずれの具現像についても、高レートであるほど萌別層砂岩下部以深での圧入量の増加を確認できた。100 万 t-CO₂/年レートのケースにおいては萌別層砂岩上部と下部の圧入割合はおおよそ 50 対 50 である。また、萌別層互層以深の圧入量について、僅少ではあるが増加を確認できたことから、仕上げ区間全体に CO₂ が圧入されていることが示された。

表 5.4-2 から表 5.4-4 をより詳細にしたモデルレイヤー毎の圧入 CO₂ 量を表 5.4-5、表 5.4-6、表 5.4-7 に示す。主要な圧入レイヤーは萌別層砂岩上部の k=11, 12 および萌別層砂岩下部の k=15, 16 である。具現像毎の各レイヤーで圧入量の違いは、水平方向の不均質性によるものとする。

図 5.4-11 から図 5.4-14 は主要圧入レイヤーに関して、圧入レートと圧入量の関係を示したものであり、具現像毎の傾向に大きな差はないことが見てとれる。また、50 万 t-CO₂/年以上において圧入量変化の鈍化を確認でき、75 万 t-CO₂/年以上ではほとんど変化がないことから、圧入レートと圧入量の関係性は 100 万 t-CO₂/年までの確認で十分であると考えられる。くわえて特徴的なこととして、k=15, 16 は圧入量が増加するレートに明確な違いが見られる。これは、圧入レートの増加に伴う坑底圧力の増加によって、圧入区間が深部へ

と進み、浸透率の良いレイヤーに浅部から順に圧入が進むためと考える。

表 5.4-2 P10 具現像における圧入レート別の各層へのCO₂圧入量

		圧入レート(万t-CO ₂ /年)					
		10	20	35	50	75	100
各層の圧入量(万t-CO ₂)	遮蔽層 (k2-k4)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	遮蔽層と萌別層砂岩層上部の間 (k5-k8)	1.6	1.1	0.8	0.7	0.6	0.6
	萌別層砂岩上部 (k9-k14)	390.4	320.2	257.1	236.2	221.8	215.0
	萌別層砂岩下部 (k15-k29)	8.2	79.0	141.7	162.9	176.1	181.9
	互層 (k30-k39)	0.0	0.0	0.1	0.2	0.7	1.6
	砂岩層 (k40-k65)	0.0	0.0	0.1	0.2	0.5	1.2

※各層の括弧内はモデルレイヤー番号を示す

表 5.4-3 P50 具現像における圧入レート別の各層へのCO₂圧入量

		圧入レート(万t-CO ₂ /年)					
		10	20	35	50	75	100
各層の圧入量(万t-CO ₂)	遮蔽層 (k2-k4)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	遮蔽層と萌別層砂岩層上部の間 (k5-k8)	1.7	1.1	0.8	0.7	0.7	0.6
	萌別層砂岩上部 (k9-k14)	381.8	299.0	241.0	222.8	210.4	204.7
	萌別層砂岩下部 (k15-k29)	16.7	100.1	157.7	176.3	187.4	191.8
	互層 (k30-k39)	0.0	0.0	0.1	0.2	0.8	1.8
	砂岩層 (k40-k65)	0.0	0.0	0.1	0.2	0.5	1.3

表 5.4-4 P90 具現像における圧入レート別の各層への CO₂ 圧入量

		圧入レート(万t-CO ₂ /年)					
		10	20	35	50	75	100
各層の圧入量(万t-CO ₂)	遮蔽層 (k2-k4)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	遮蔽層と萌別層砂岩層 上部の間 (k5-k8)	1.8	1.1	0.8	0.7	0.6	0.6
	萌別層砂岩上部 (k9-k14)	385.1	307.3	249.0	230.8	218.6	212.7
	萌別層砂岩下部 (k15-k29)	13.4	91.8	149.7	168.3	179.3	184.0
	互層 (k30-k39)	0.0	0.0	0.1	0.2	0.8	1.7
	砂岩層 (k40-k65)	0.0	0.0	0.1	0.2	0.5	1.3

表 5.4-5 P10 具現像における圧入レート別の各モデルレイヤーへの CO₂ 圧入量

		圧入レート(万t-CO ₂ /年)					
		10	20	35	50	75	100
各レイヤーの圧入量(万t-CO ₂)	萌別層上部_k9	17	12	9	8	8	8
	萌別層上部_k10	0	0	0	0	0	0
	萌別層上部_k11	196	158	126	115	108	104
	萌別層上部_k12	177	150	121	112	106	102
	萌別層上部_k13	0	0	0	0	0	0
	萌別層上部_k14	0	0	0	0	0	0
	萌別層下部_k15	8	71	86	92	95	96
	萌別層下部_k16	0	7	55	69	77	80
	萌別層下部_k17	0	0	0	0	0	0
	萌別層下部_k18	0	0	0	0	0	0
	萌別層下部_k19~k29	0	0	1	2	4	6
	萌別層互層	0	0	0	0	1	2
	萌別層砂岩	0	0	0	0	0	1

表 5.4-6 P50 具現像における圧入レート別の各モデルレイヤーへの CO2 圧入量

		圧入レート(万t-CO ₂ /年)					
		10	20	35	50	75	100
各レイヤーの圧入量(万t-CO ₂)	萌別層上部_k9	16	11	9	8	8	8
	萌別層上部_k10	0	0	0	0	0	0
	萌別層上部_k11	192	148	118	109	102	99
	萌別層上部_k12	173	139	114	105	100	97
	萌別層上部_k13	0	0	0	0	0	0
	萌別層上部_k14	0	0	0	0	0	0
	萌別層下部_k15	16	84	95	100	101	101
	萌別層下部_k16	1	15	61	74	81	84
	萌別層下部_k17	0	0	0	0	0	0
	萌別層下部_k18	0	0	0	0	0	0
	萌別層下部_k19~k29	0	0	1	2	5	7
	萌別層互層	0	0	0	0	1	2
	萌別層砂岩	0	0	0	0	1	1

表 5.4-7 P90 具現像における圧入レート別の各モデルレイヤーへの CO2 圧入量

		圧入レート(万t-CO ₂ /年)					
		10	20	35	50	75	100
各レイヤーの圧入量(万t-CO ₂)	萌別層上部_k9	18	12	9	8	8	8
	萌別層上部_k10	0	0	0	0	0	0
	萌別層上部_k11	190	150	122	112	106	103
	萌別層上部_k12	176	144	118	110	104	101
	萌別層上部_k13	0	0	0	0	0	0
	萌別層上部_k14	0	0	0	0	0	0
	萌別層下部_k15	13	77	90	95	97	97
	萌別層下部_k16	1	14	59	71	78	81
	萌別層下部_k17	0	0	0	0	0	0
	萌別層下部_k18	0	0	0	0	0	0
	萌別層下部_k19~k29	0	0	1	2	4	6
	萌別層互層	0	0	0	0	1	2
	萌別層砂岩	0	0	0	0	1	1

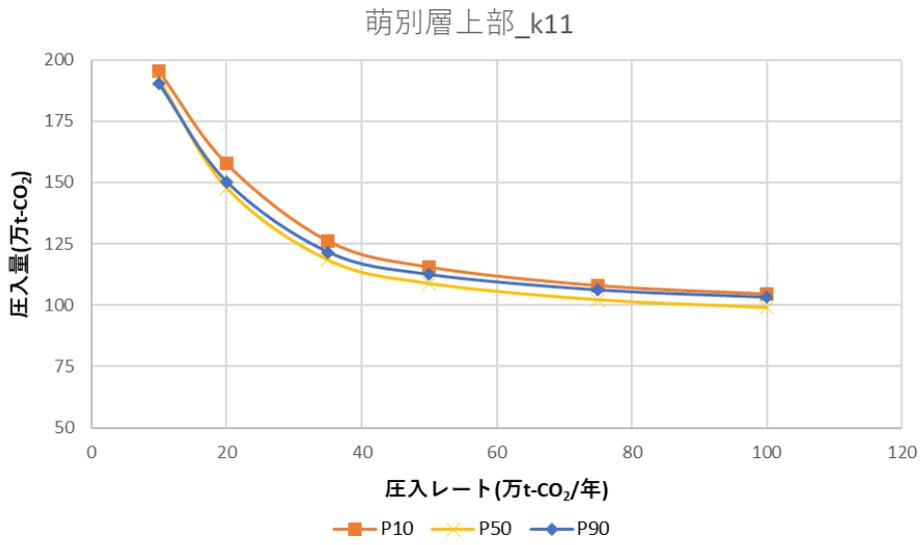


図 5.4-11 萌別層上部 レイヤー k11 における圧入レートと圧入量の関係

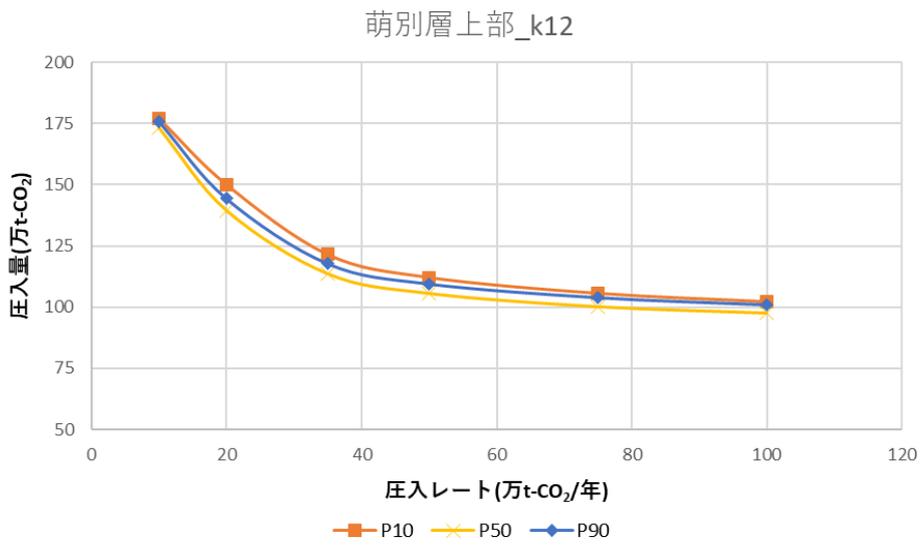


図 5.4-12 萌別層上部 レイヤー k12 における圧入レートと圧入量の関係

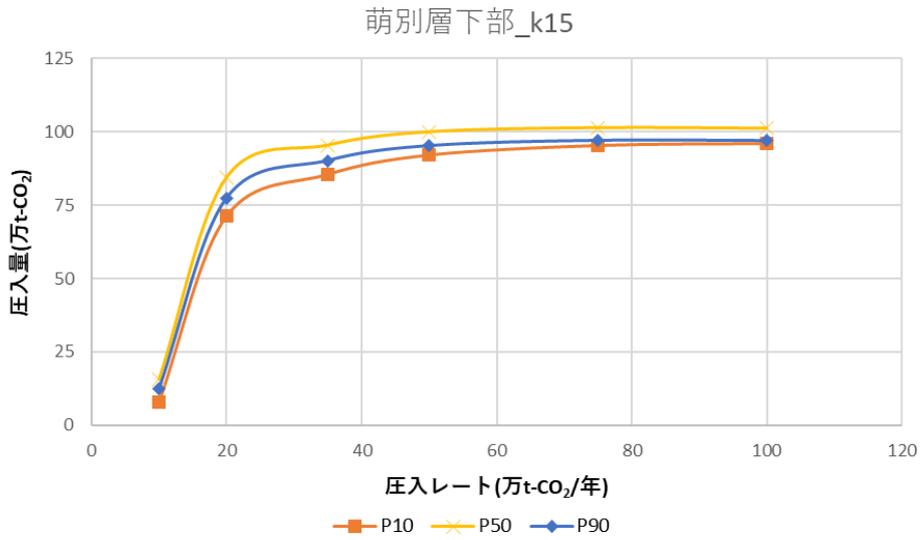


図 5.4-13 萌別層下部 レイヤー k15 における圧入レートと圧入量の関係

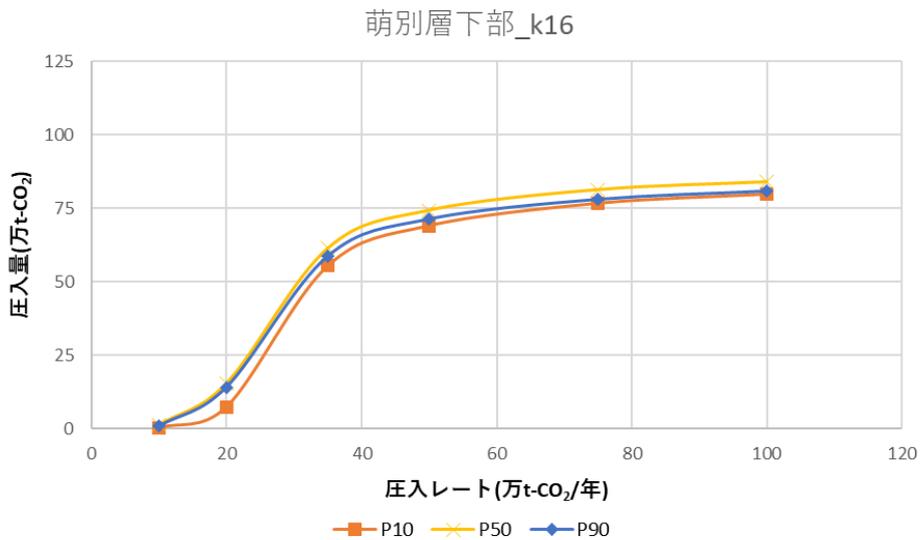


図 5.4-14 萌別層下部 レイヤー k16 における圧入レートと圧入量の関係

(2) 坑底圧力推移

P90 具現像、P50 具現像、P10 具現像における IW-2 の仕上げ区間上端深度の坑底圧力推移を図 5.4-15 から図 5.4-17 に示す。CO₂ 圧入再開直後（2030 年 1 月）の圧力の急上昇は坑井密閉後の坑井周辺の CO₂ 飽和率が連続圧入時より低下しているため、坑井周辺の相対浸透率が低下したことに起因しているが、ある程度圧入を継続するとすぐに安定した圧力値に落ち着く。CO₂ 圧入中は圧入再開直後を含め、いずれも圧力上限値 12.93 MPaG に

は到達せず、レートが高いほど圧入中の坑底圧力は高くなり最大で11.7MPaG程度であった。圧入停止後は5年程度で圧力低下はほぼ安定し、圧入停止1,000年後の仕上げ区間上端における圧力は、9.86MPaGであった。

P90 具現像、P50 具現像、P10 具現像における OB-2 の仕上げ区間上端深度の坑底圧力推移は図 5.4-18 から図 5.4-20 に示す通りであり、最大でも 60kPa 程度の上昇にとどまった。

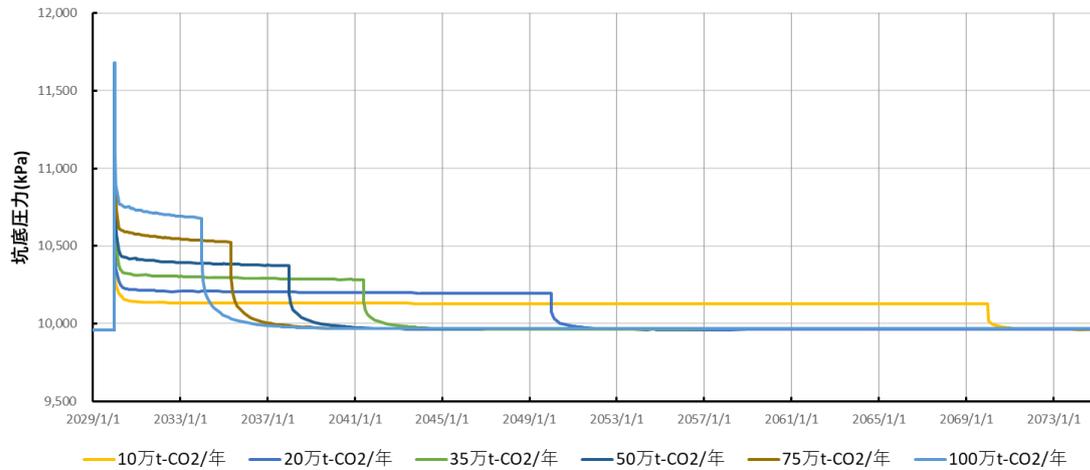


図 5.4-15 P90 具現像における IW-2 仕上げ区間上端圧力推移

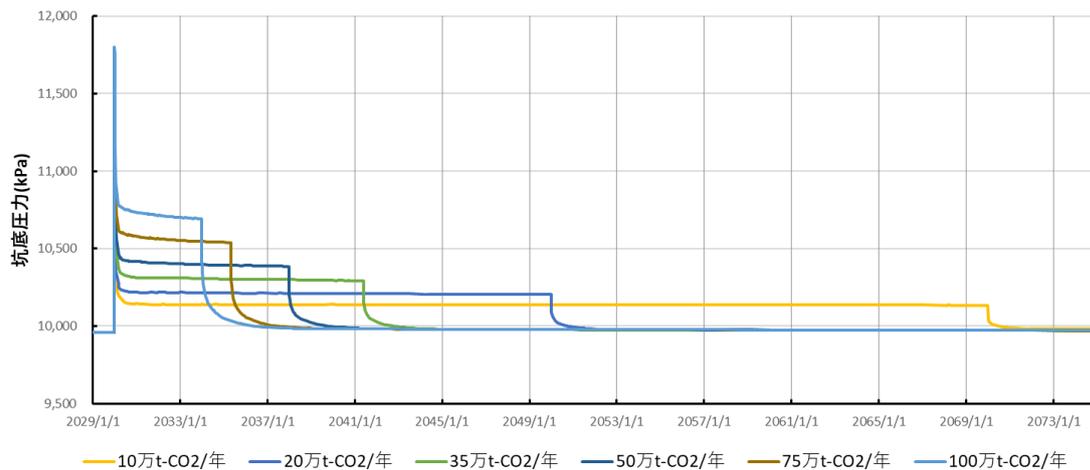


図 5.4-16 P50 具現像における IW-2 仕上げ区間上端圧力推移

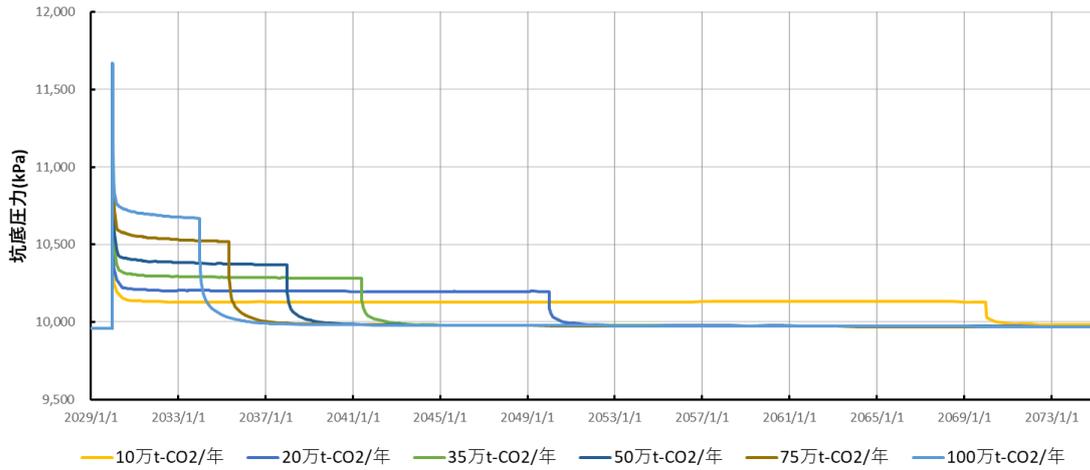


図 5.4-17 P10 具現像における IW-2 仕上げ区間上端圧力推移

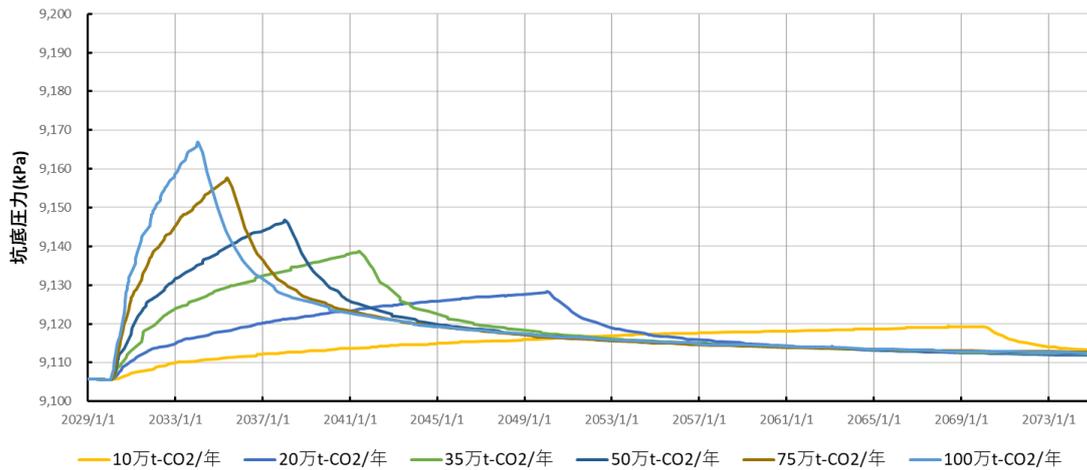


図 5.4-18 P90 具現像における OB-2 仕上げ区間上端圧力推移

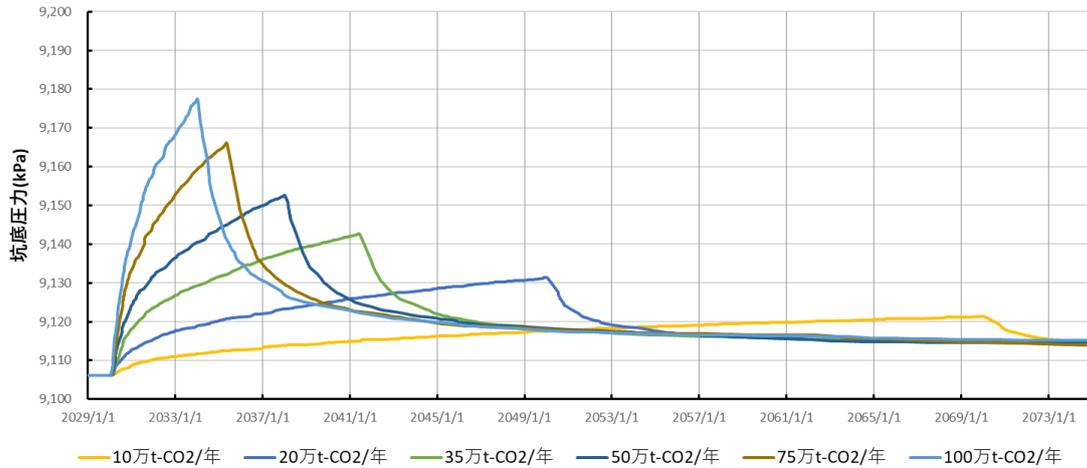


図 5.4-19 P50 具現像における OB-2 仕上げ区間上端圧力推移

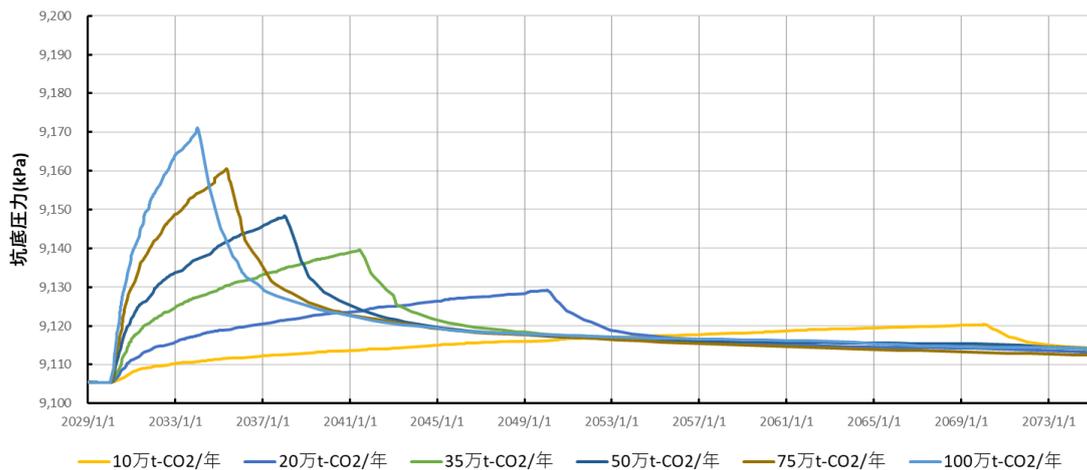
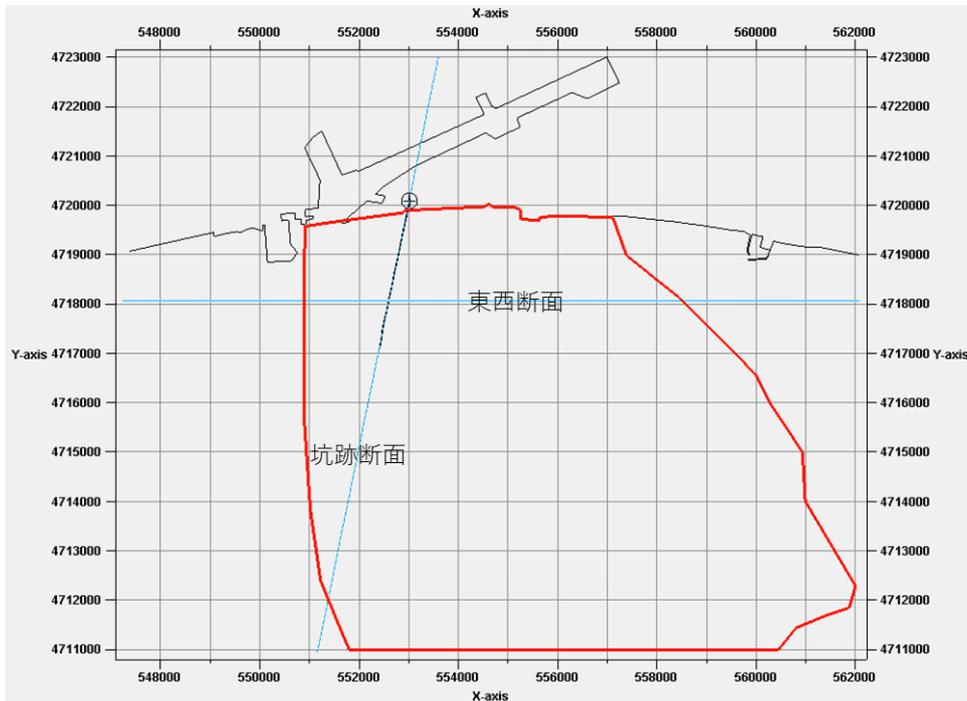


図 5.4-20 P10 具現像における OB-2 仕上げ区間上端圧力推移

(3) 圧力分布

P50 相当の具現像について、圧入レート 100 万 $\text{ton-CO}_2/\text{年}$ 、50 万 $\text{ton-CO}_2/\text{年}$ 、10 万 $\text{ton-CO}_2/\text{年}$ における圧入停止直後、圧入停止 1000 年後について、初期圧力からの圧力変化の分布について平面図と断面図（坑跡断面および東西断面、断面の位置は図 5.4-21 を参照）を図 5.4-22 から図 5.4-39 に示す。なお、実施したシミュレーションのうち、P10 具現像、P90 具現像は P50 具現像と圧入レートの変化による分布の変化傾向は同様であったことから詳細報告は割愛する。また、P50 具現像の 75 万 $\text{t-CO}_2/\text{年}$ 、35 万 $\text{t-CO}_2/\text{年}$ 、20 万 $\text{t-CO}_2/\text{年}$ の結果も他のレートの結果から類推が可能な結果であったため割愛する。

圧入停止直後の平面図(図 5.4-22、図 5.4-28、図 5.4-34)で比較すると、レートが高いほど圧力上昇値が大きく、100万t-CO₂/年では最大630kPaの上昇があり、350kPa以上の上昇が深部、遠方まで伝搬する。また、全てのレートにおいて、遮蔽層内にわたって圧力変化が確認されているが、圧入停止後、徐々に圧力が低下し、圧入停止1,000年後にはCO₂が存在する坑井周辺以外の範囲に圧力変化は見られない。



※赤線は2021年度評価における制約条件の範囲を示す。

図 5.4-21 断面図の位置(青線)

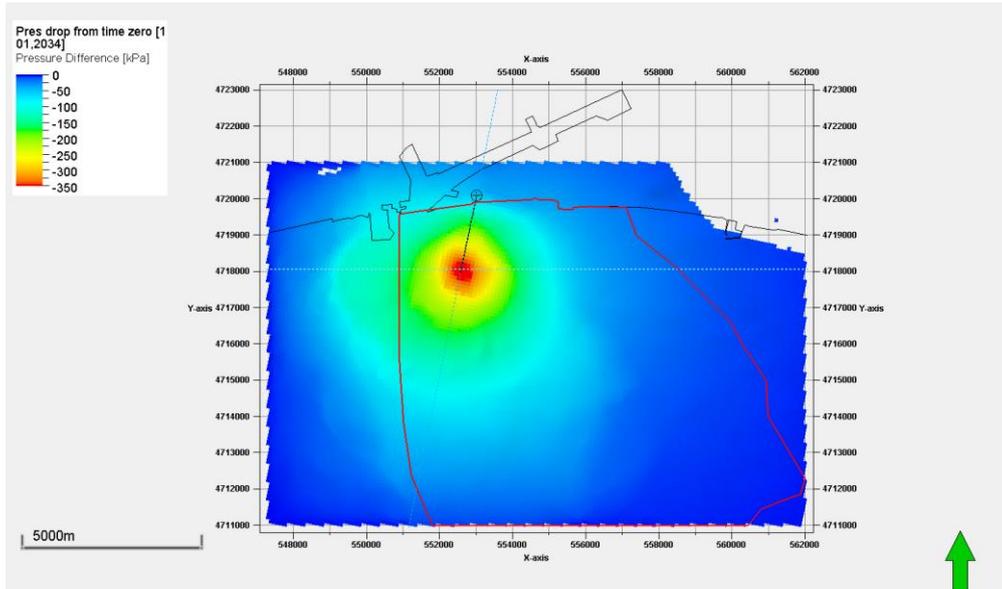


図 5.4-22 P50 モデルにおける圧力変化分布 平面図 k=11
(圧入レート 100 万 t-CO₂/年、圧入停止直後)

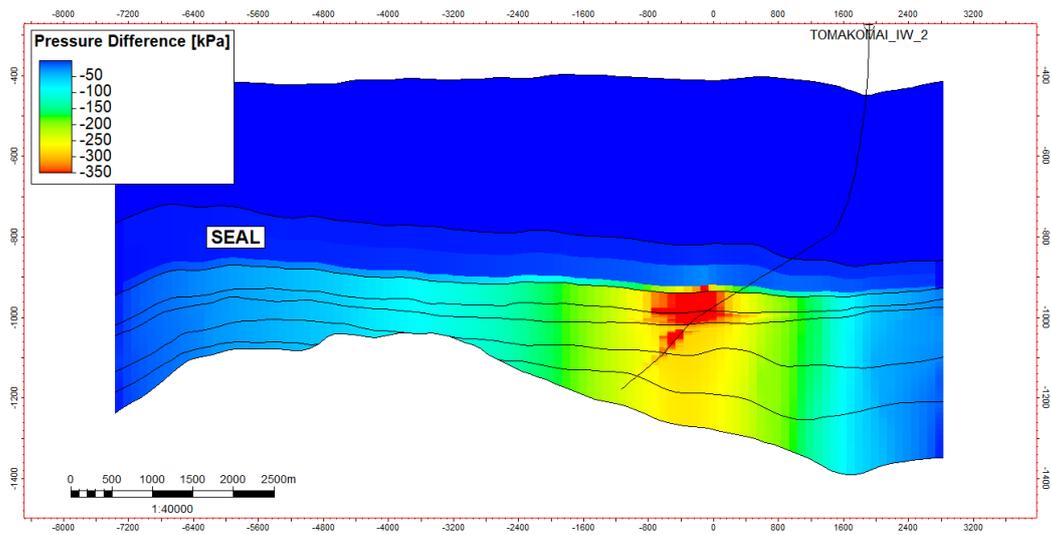


図 5.4-23 P50 モデルにおける圧力変化分布 断面図 (坑跡断面)
(圧入レート 100 万 t-CO₂/年、圧入停止直後)

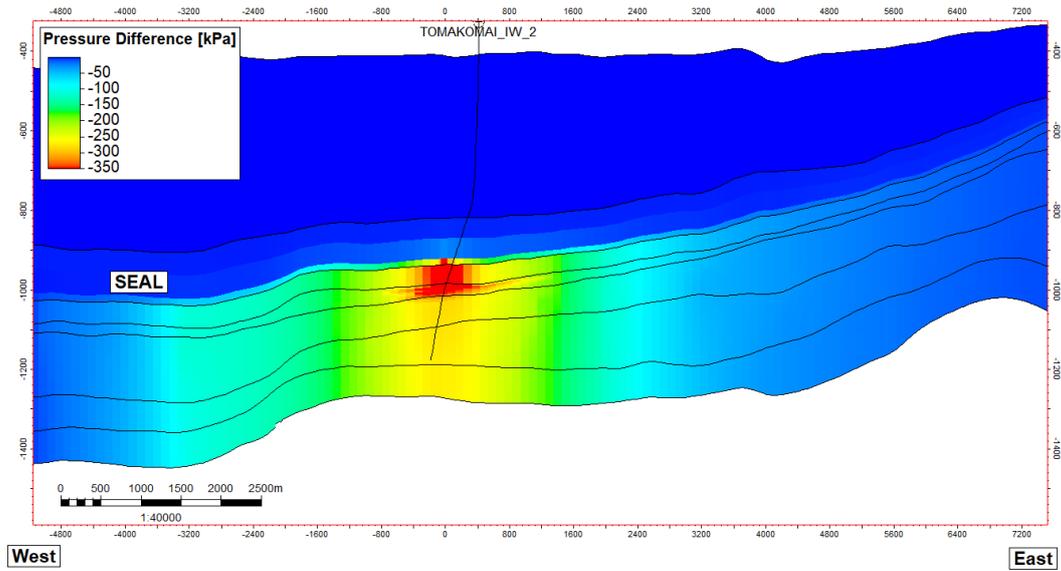


図 5.4-24 P50 モデルにおける圧力変化分布 断面図 (東西断面)
(圧入レート 100 万 t-CO₂/年、圧入停止直後)

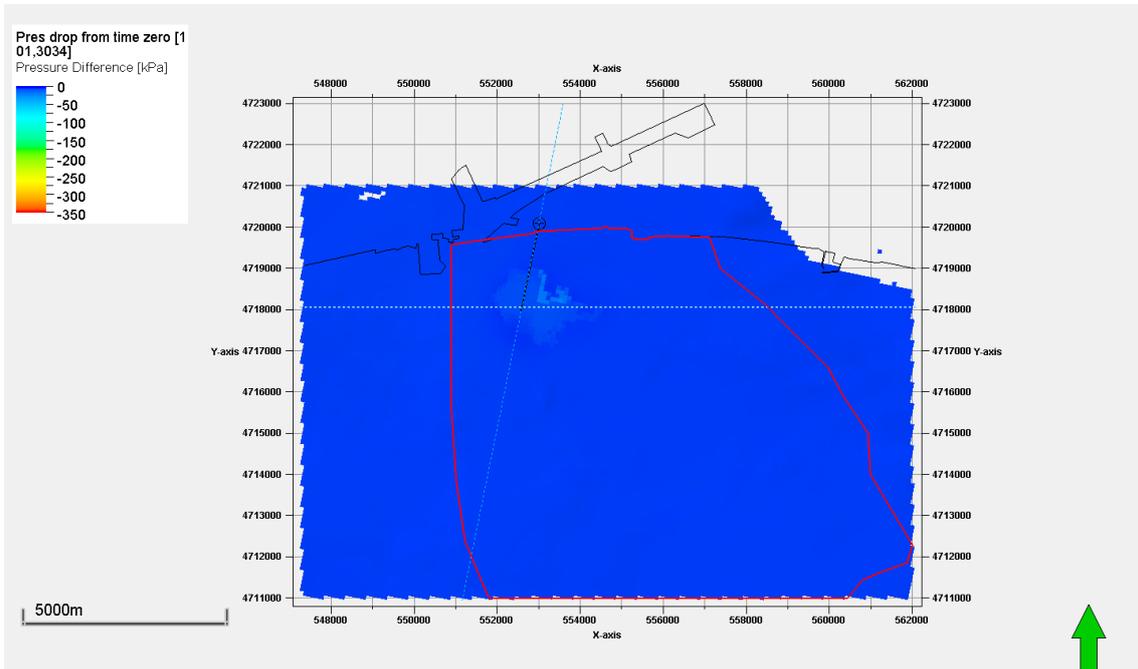


図 5.4-25 P50 モデルにおける圧力変化分布 平面図 k=11
(圧入レート 100 万 t-CO₂/年、圧入停止 1000 年後)

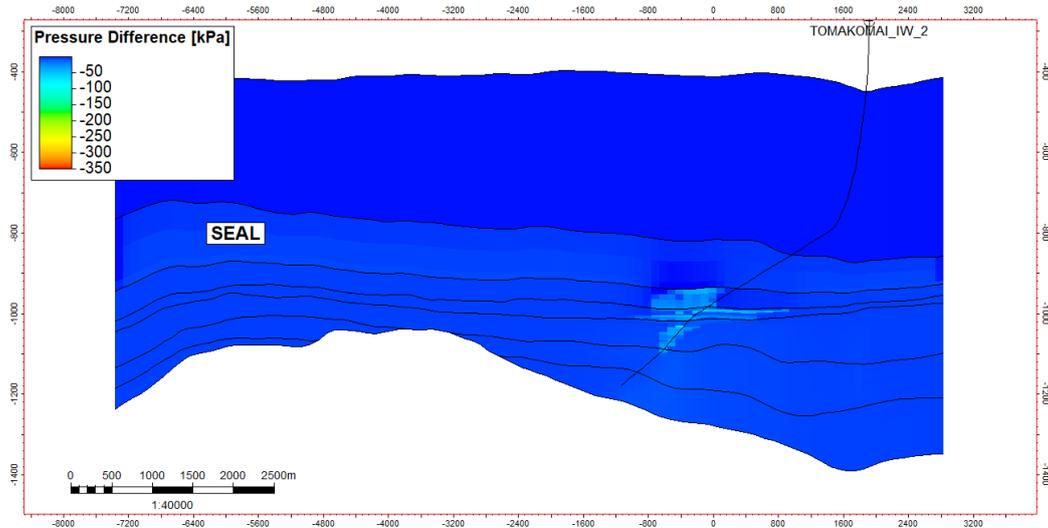


図 5.4-26 P50 モデルにおける圧力変化分布 断面図 (坑跡断面)
(圧入レート 100 万 t-CO₂/年、圧入停止 1000 年後)

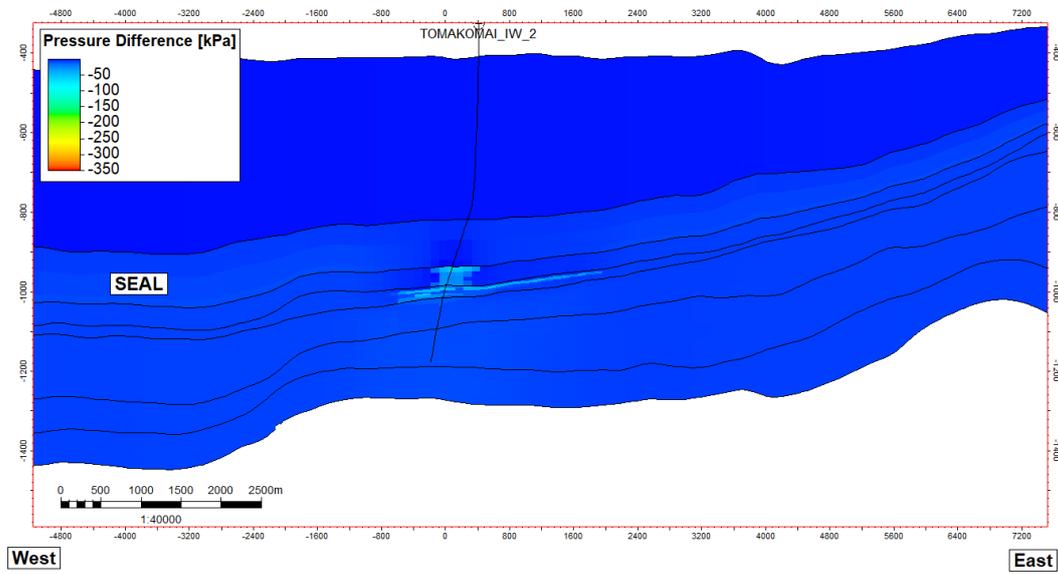


図 5.4-27 P50 モデルにおける圧力変化分布 断面図 (東西断面)
(圧入レート 100 万 t-CO₂/年、圧入停止 1000 年後)

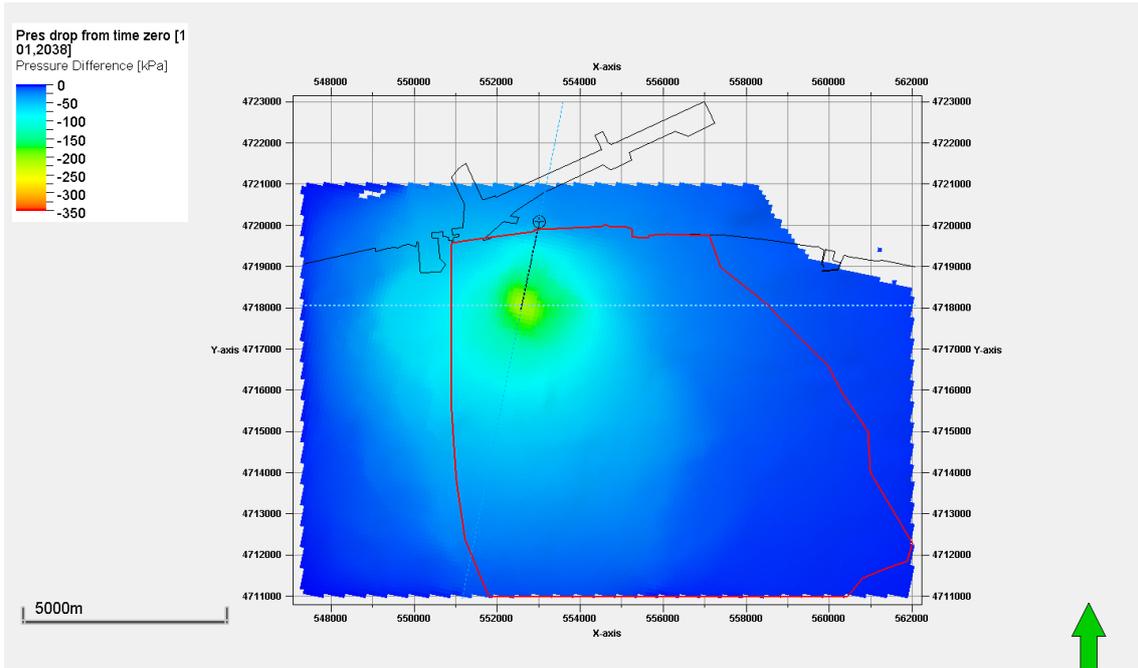


図 5.4-28 P50 モデルにおける圧力変化分布 平面図 k=11
(圧入レート 50 万 t-CO₂/年、圧入停止直後)

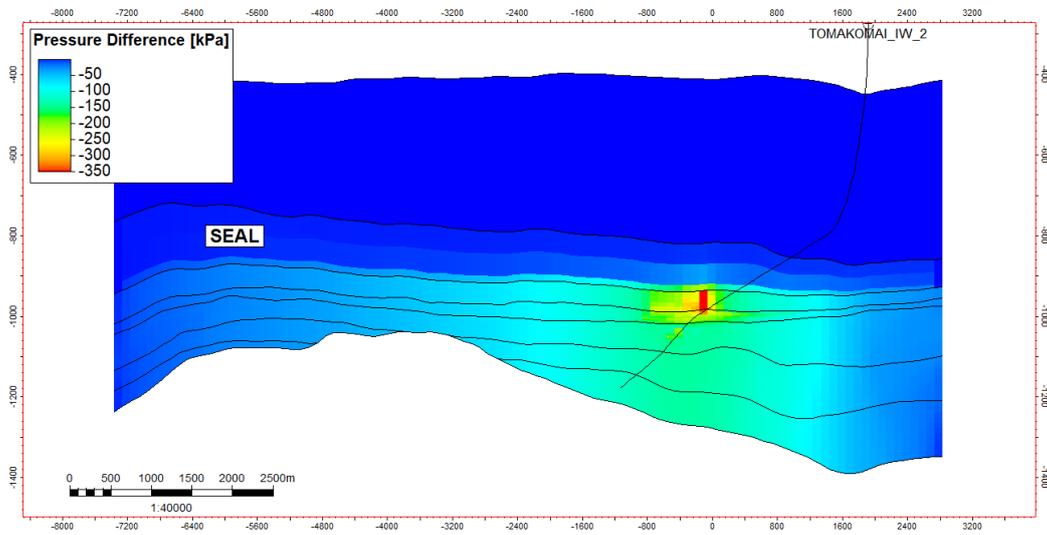


図 5.4-29 P50 モデルにおける圧力変化分布 断面図 (坑跡断面)
(圧入レート 50 万 t-CO₂/年、圧入停止直後)

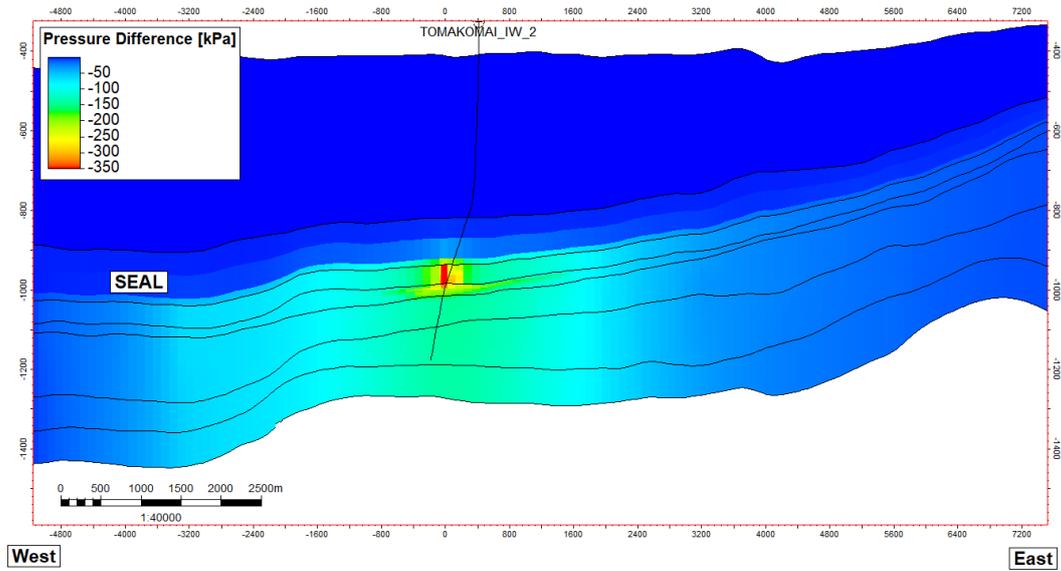


図 5.4-30 P50 モデルにおける圧力変化分布 断面図(東西断面)
(圧入レート 50 万 t-CO₂/年、圧入停止直後)

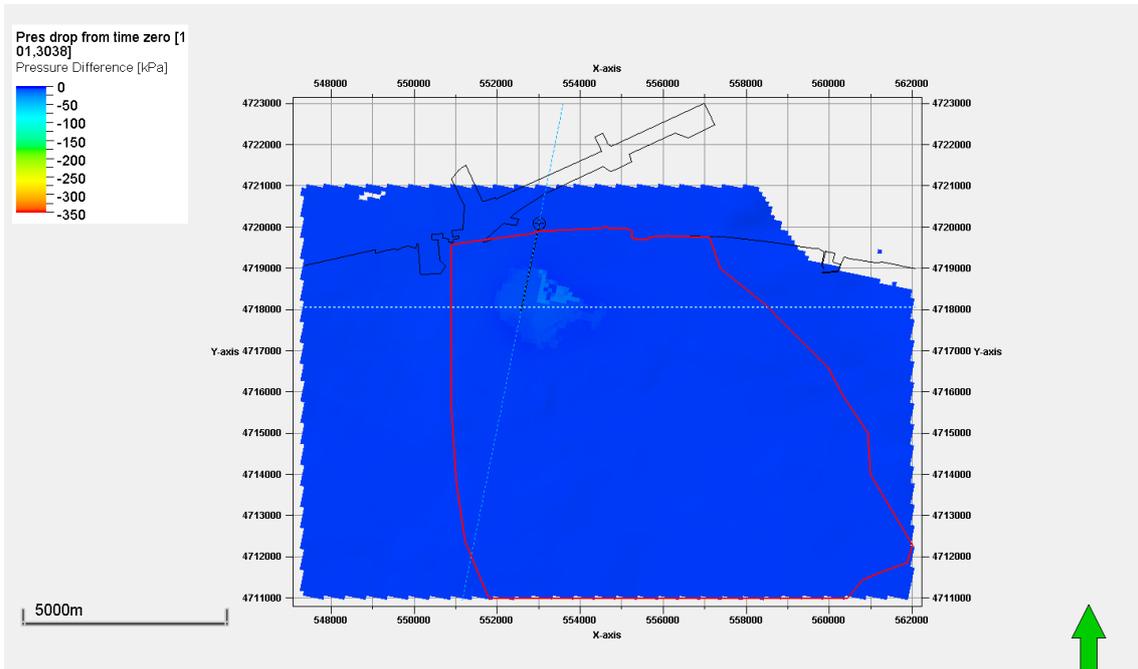


図 5.4-31 P50 モデルにおける圧力変化分布 平面図 k=11
(圧入レート 50 万 t-CO₂/年、圧入停止 1000 年後)

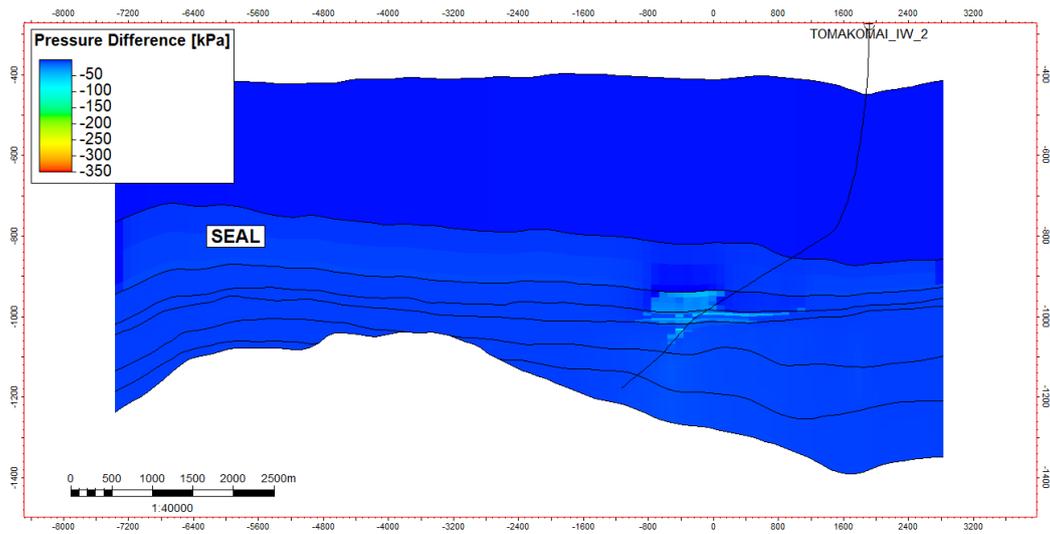


図 5.4-32 P50 モデルにおける圧力変化分布 断面図 (坑跡断面)
(圧入レート 50 万 t-CO₂/年、圧入停止 1000 年後)

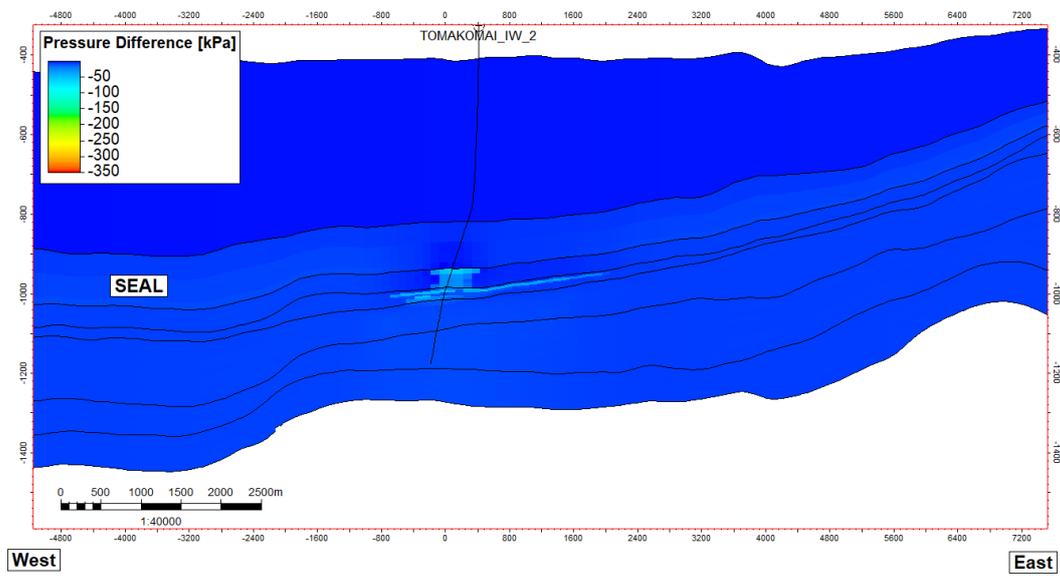


図 5.4-33 P50 モデルにおける圧力変化分布 断面図 (東西断面)
(圧入レート 50 万 t-CO₂/年、圧入停止 1000 年後)

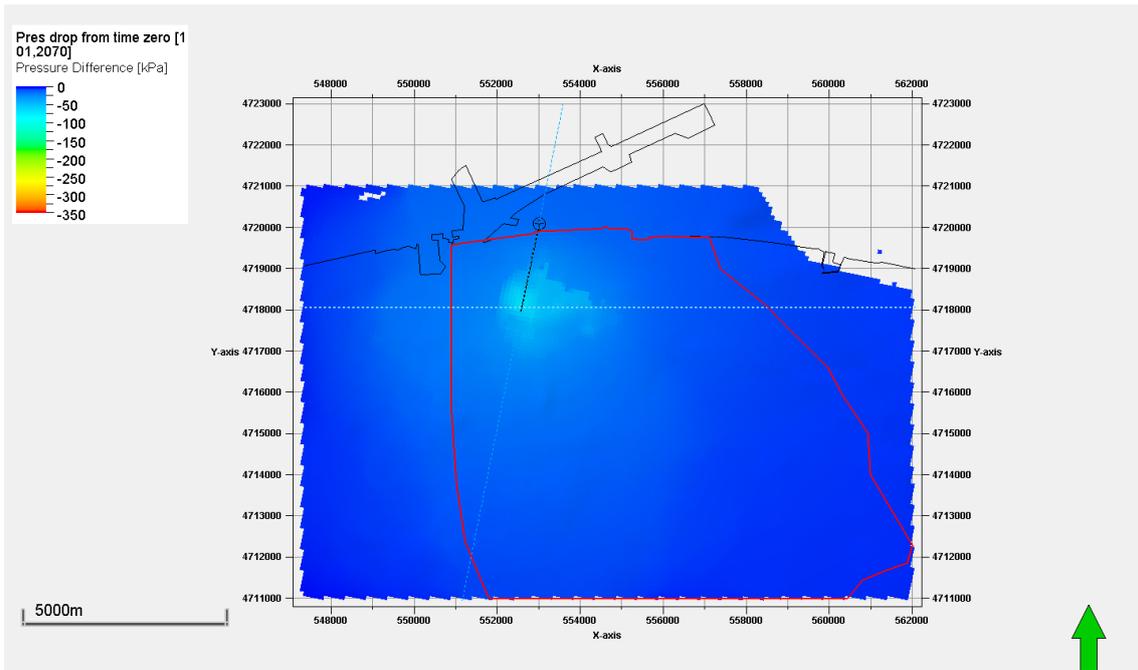


図 5.4-34 P50 モデルにおける圧力変化分布 平面図 k=11
(圧入レート 10 万 t-CO₂/年、圧入停止直後)

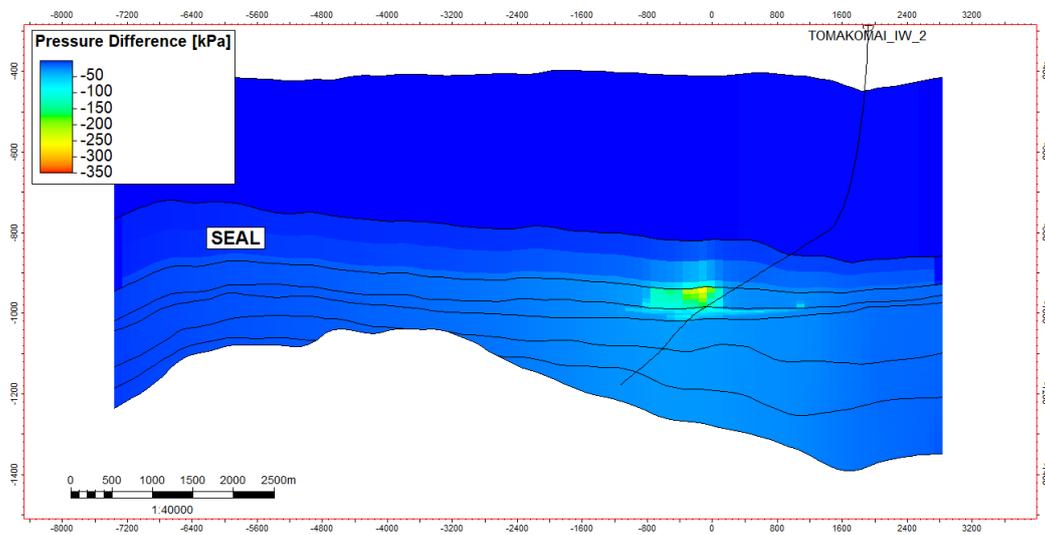


図 5.4-35 P50 モデルにおける圧力変化分布 断面図 (坑跡断面)
(圧入レート 10 万 t-CO₂/年、圧入停止直後)

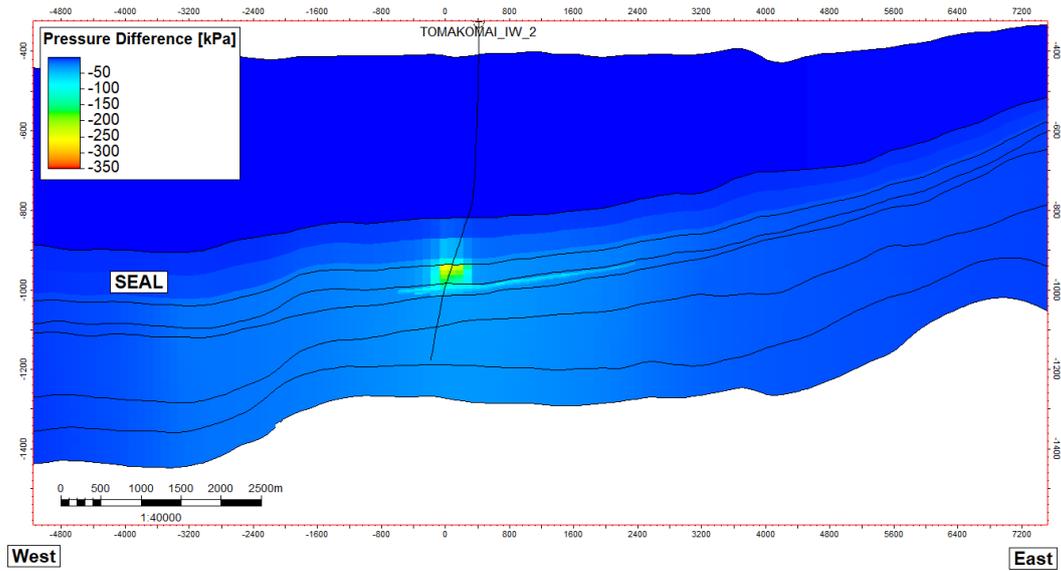


図 5.4-36 P50 モデルにおける圧力変化分布 断面図(東西断面)
(圧入レート 10 万 t-CO₂/年、圧入停止直後)

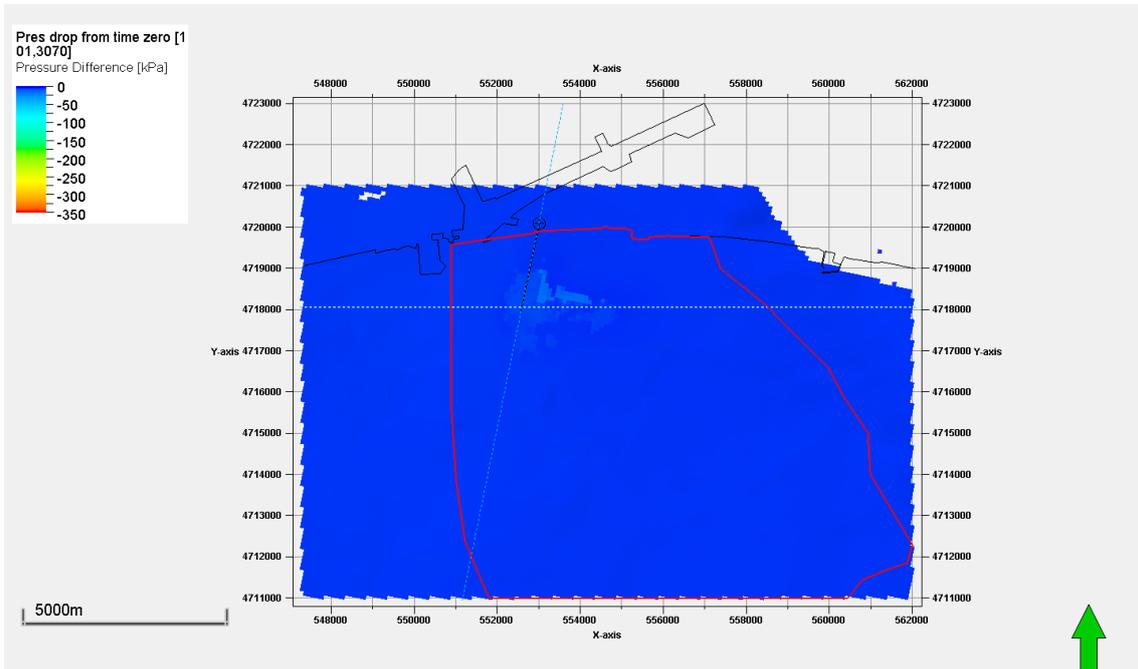


図 5.4-37 P50 モデルにおける圧力変化分布 平面図 k=11
(圧入レート 10 万 t-CO₂/年、圧入停止 1000 年後)

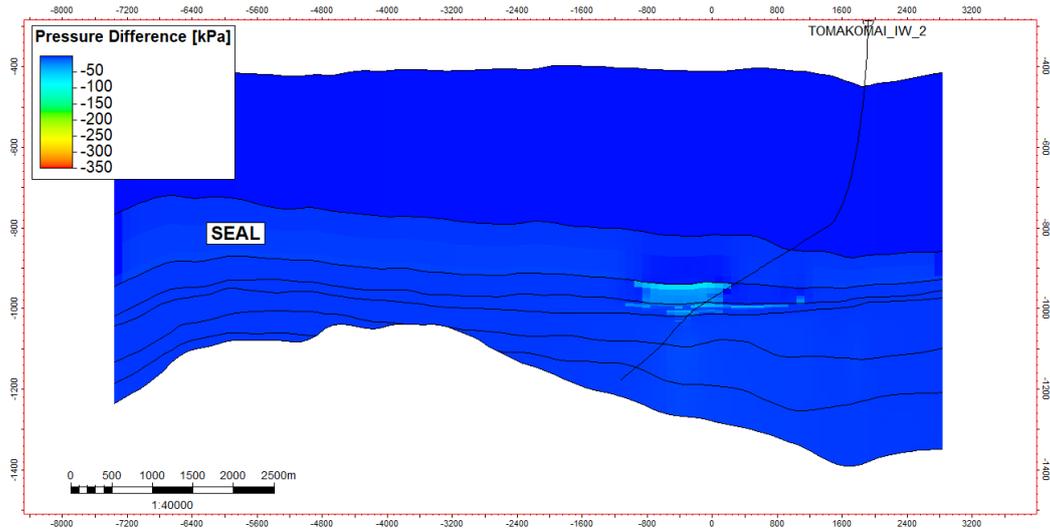


図 5.4-38 P50 モデルにおける圧力変化分布 断面図（坑跡断面）
（圧入レート 10 万 t-CO₂/年、圧入停止 1000 年後）

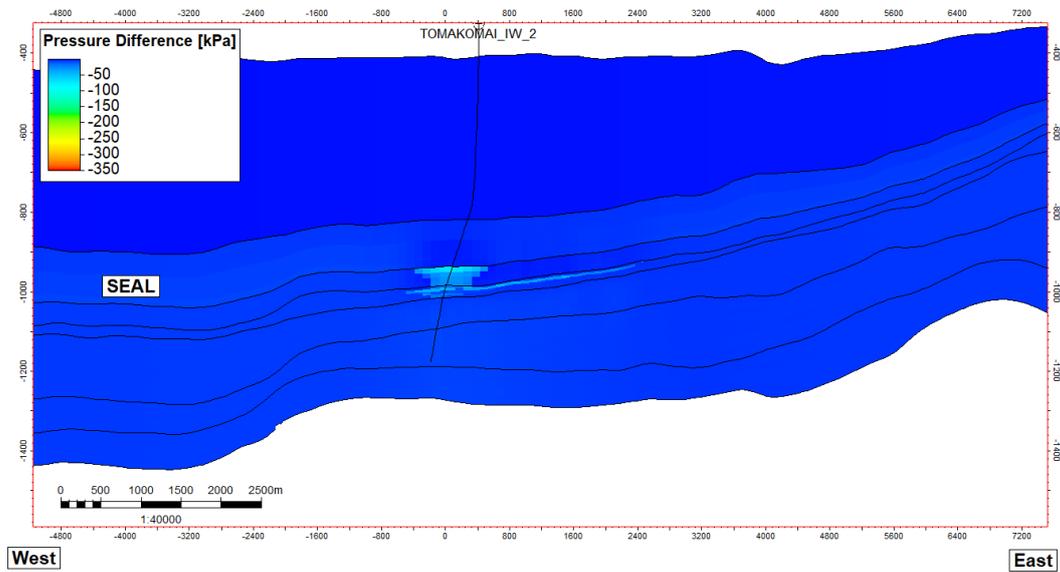


図 5.4-39 P50 モデルにおける圧力変化分布 断面図（東西断面）
（圧入レート 10 万 t-CO₂/年、圧入停止 1000 年後）

(4) CO₂ 飽和率分布

P50 相当の具現像について、圧入レート 100 万 t-CO₂/年、50 万 t-CO₂/年、10 万 t-CO₂/年における圧入停止直後、圧入停止 100 年後、圧入停止 1000 年後の CO₂ 飽和率分布の平

面図と断面図を図 5.4-40 から 5.4-66 に示す。平面図は CO₂ 飽和率 0.001 以上を表示している。なお、実施したシミュレーションのうち、P10 具現像、P90 具現像は P50 具現像と圧入レートの変化による分布の変化傾向は同様であったことから詳細報告は割愛する。また、P50 具現像の 75 万 t-CO₂/年、35 万 t-CO₂/年、20 万 t-CO₂/年の結果も他のレートの結果から類推が可能な結果であったため割愛する。

圧入停止直後の平面図(図 5.4-40、図 5.4-49、図 5.4-58)で比較すると、レートが高いほど CO₂ が東側へ拡大するのが抑制されている。これは、高レートであるほど萌別層下部に多く圧入され、萌別層上部とシルト層(萌別層上部と遮蔽層の間)境界の傾斜に沿って東方に移動する CO₂ 量が抑制されているからと考えられる。それらは断面図(図 5.4-41、図 5.4-42、図 5.4-50、図 5.4-51、図 5.4-59、図 5.4-60)にて確認できる。圧入停止後 100 年経過すると、CO₂ 飽和率分布はレートに依らず概ね同程度である一方で、レートが高いほどやや西側へ広がっているのも特徴的である(図 5.4-43、図 5.4-52、図 5.4-61)。圧入停止後 1000 年後は塩水への溶解が進んでいるが、レートが低いほど浮力による上昇によって遮蔽層との境界に貯留され、CO₂ プルームが地層傾斜に沿って全体的に東側にシフトしているのに対し、高レートでは萌別層上部と下部に一定程度留まっている様子が見られる(図 5.4-47、図 5.4-48、図 5.4-56、図 5.4-57、図 5.4-65、図 5.4-66)。

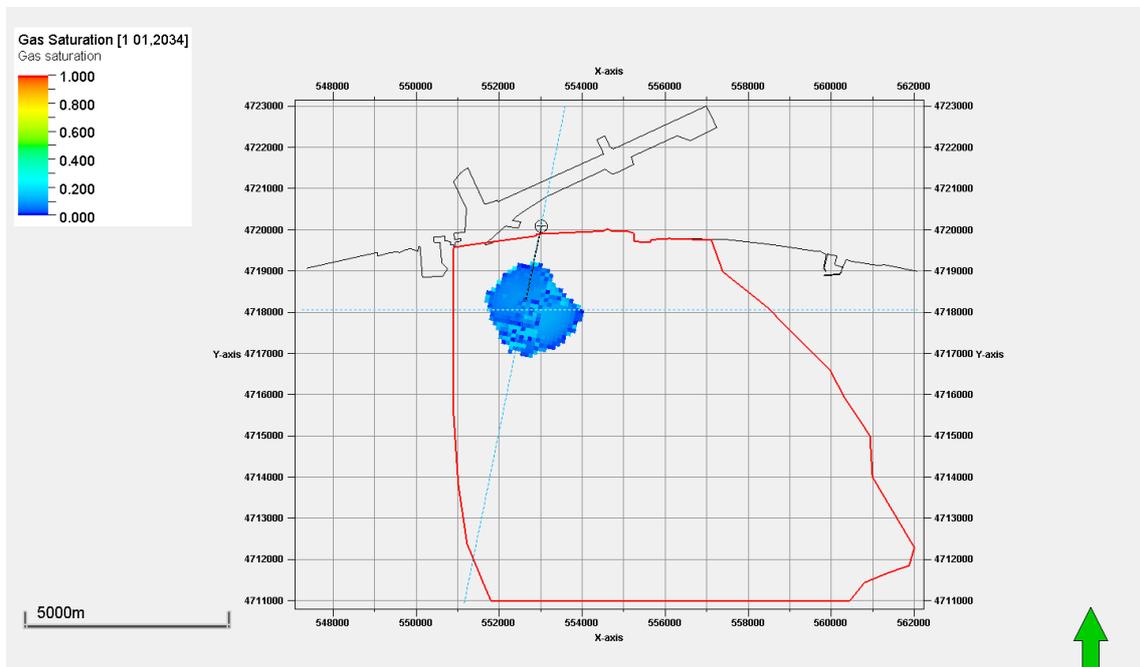


図 5.4-40 P50 モデルにおける CO₂ 飽和率分布 平面図
(圧入レート 100 万 t-CO₂/年、圧入停止直後)

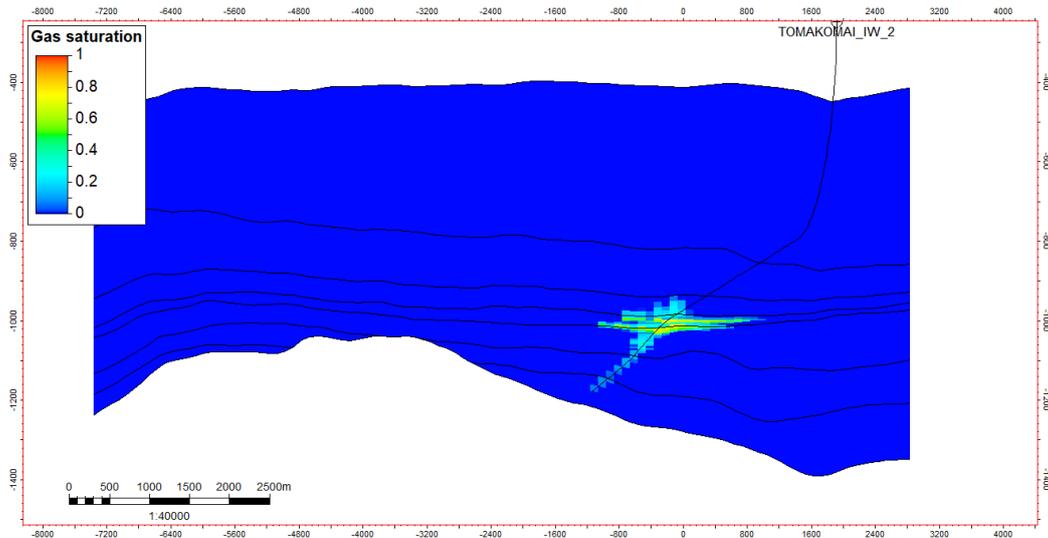


図 5.4-41 P50 モデルにおける CO₂飽和率分布 断面図 (坑跡断面)
(圧入レート 100 万 t-CO₂/年、圧入停止直後)

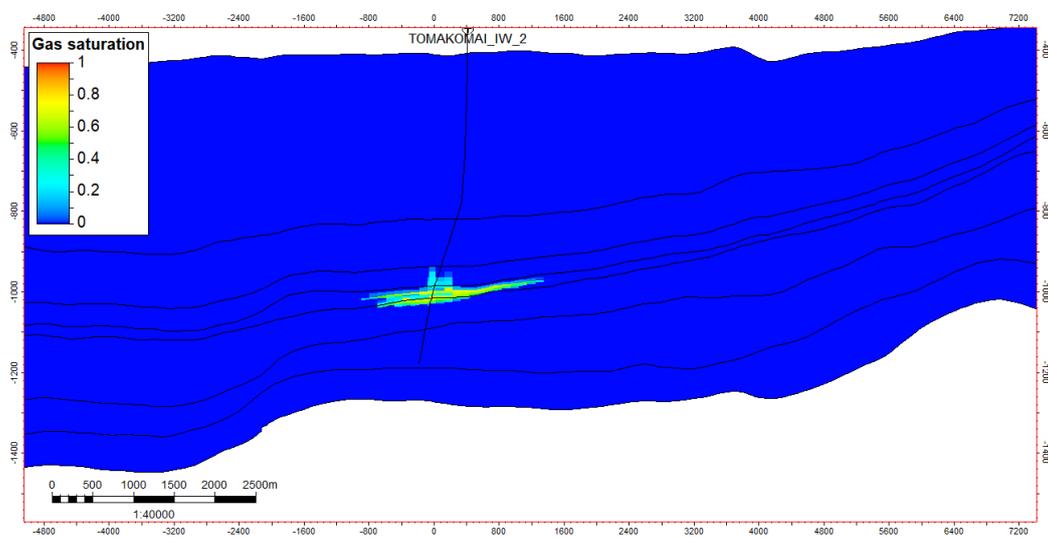


図 5.4-42 P50 モデルにおける CO₂飽和率分布 断面図 (東西断面)
(圧入レート 100 万 t-CO₂/年、圧入停止直後)

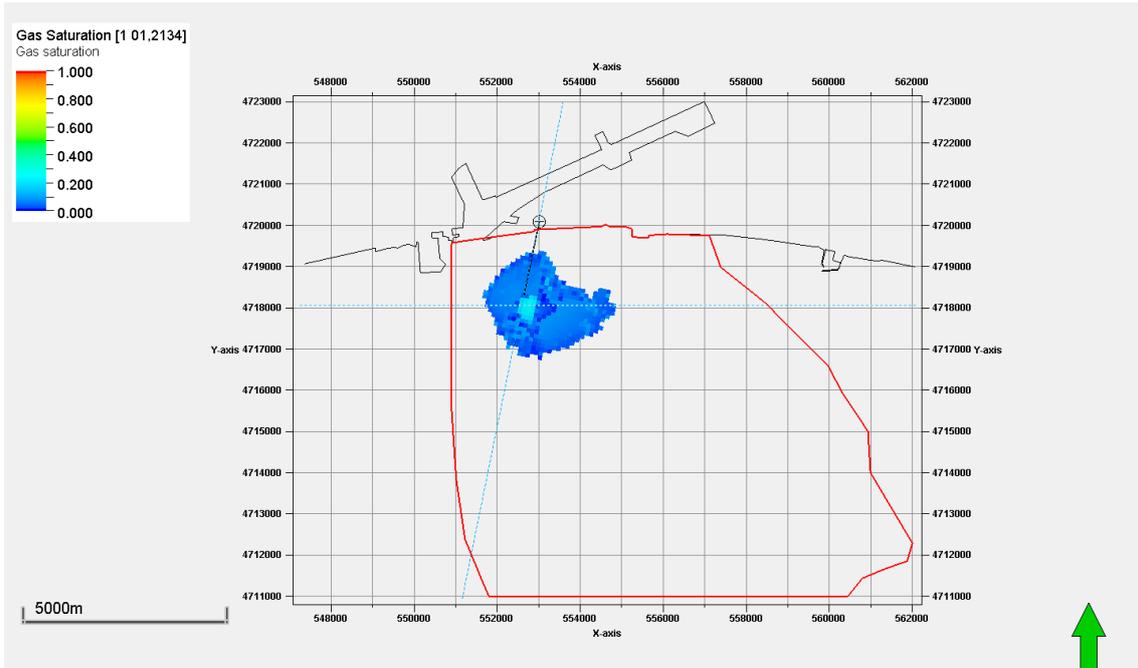


図 5.4-43 P50 モデルにおける CO₂ 飽和率分布 平面図
(圧入レート 100 万 t-CO₂/年、圧入停止 100 年後)

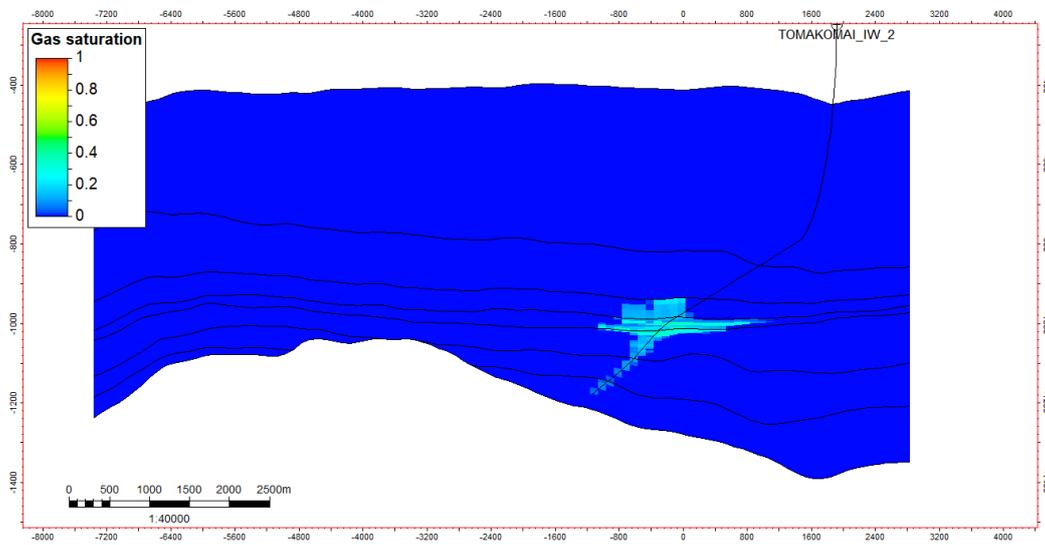


図 5.4-44 P50 モデルにおける CO₂ 飽和率分布 断面図 (坑跡断面)
(圧入レート 100 万 t-CO₂/年、圧入停止 100 年後)

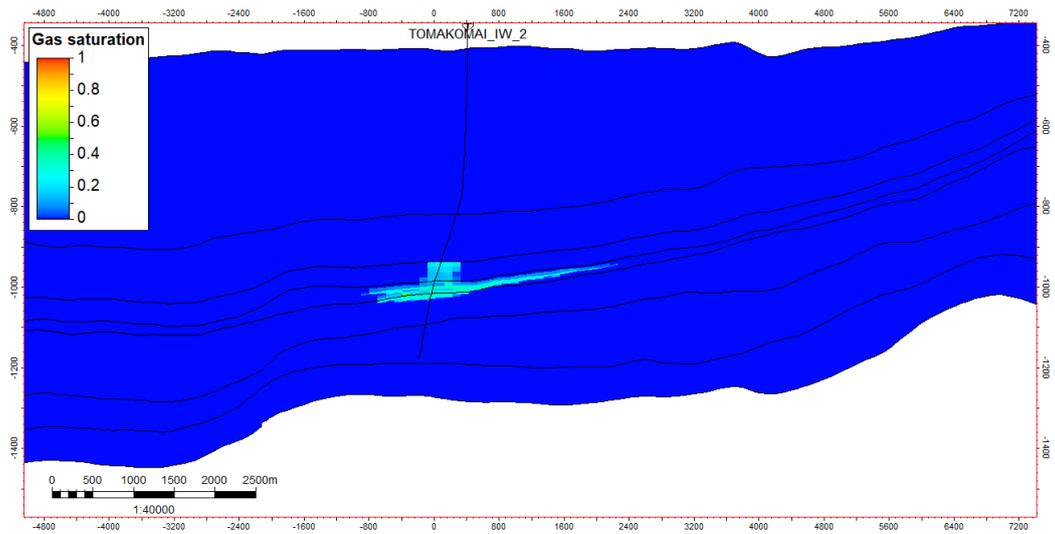


図 5.4-45 P50 モデルにおける CO₂ 飽和率分布 断面図 (東西断面)
(圧入レート 100 万 t-CO₂/年、圧入停止 100 年後)

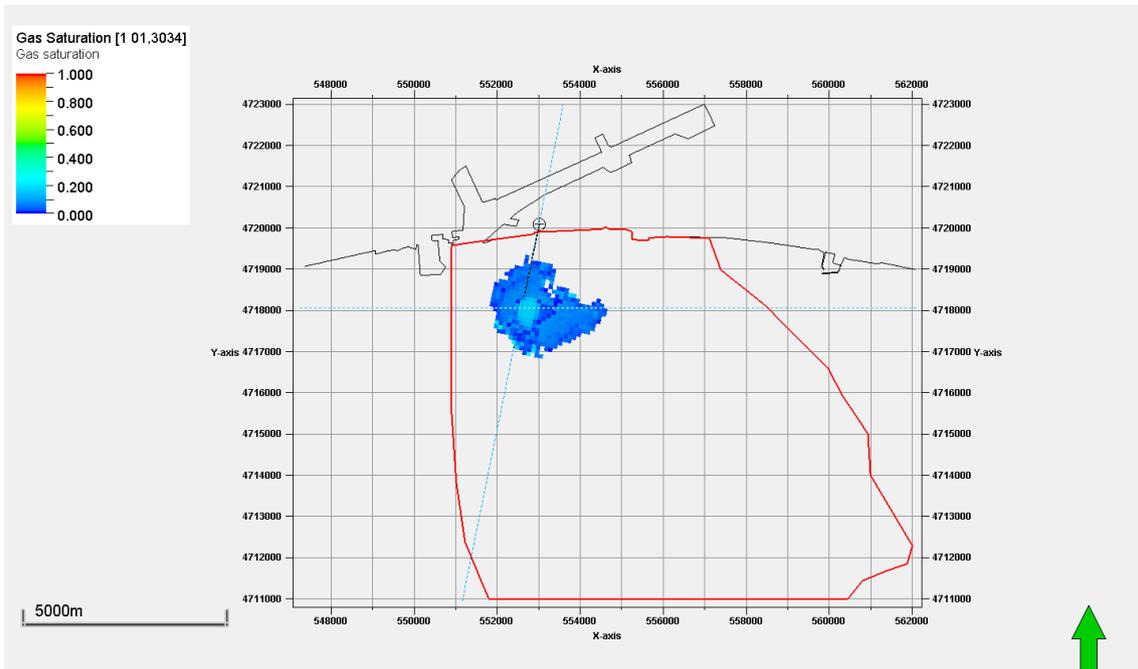


図 5.4-46 P50 モデルにおける CO₂ 飽和率分布 平面図
(圧入レート 100 万 t-CO₂/年、圧入停止 1000 年後)

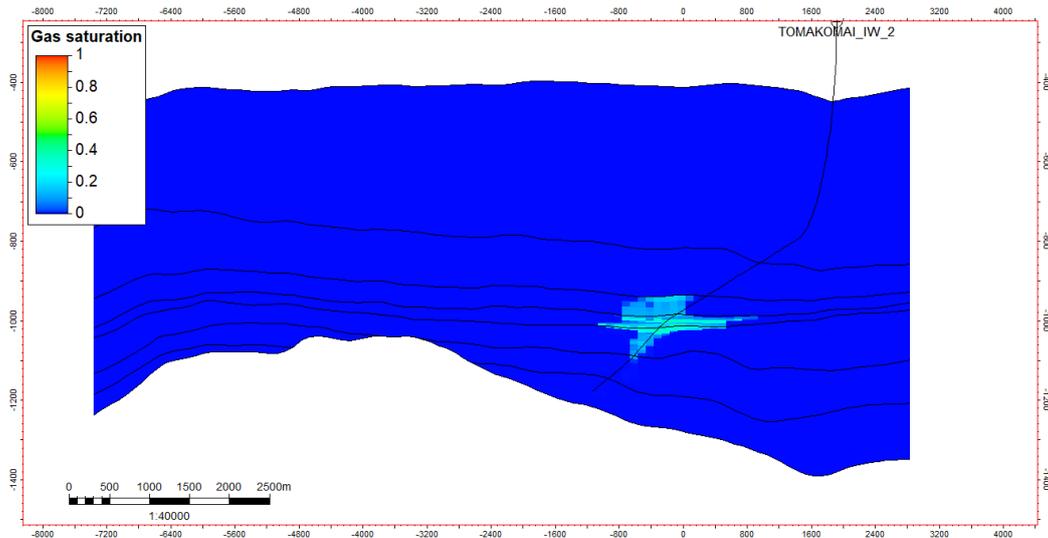


図 5.4-47 P50 モデルにおける CO₂飽和率分布 断面図 (坑跡断面)
(圧入レート 100 万 t-CO₂/年、圧入停止 1000 年後)

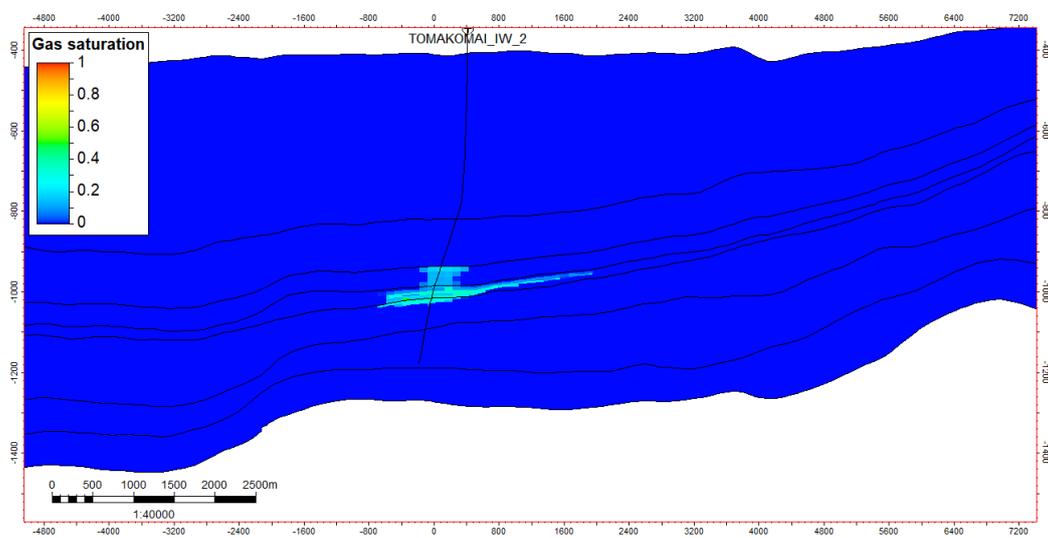


図 5.4-48 P50 モデルにおける CO₂飽和率分布 断面図 (東西断面)
(圧入レート 100 万 t-CO₂/年、圧入停止 1000 年後)

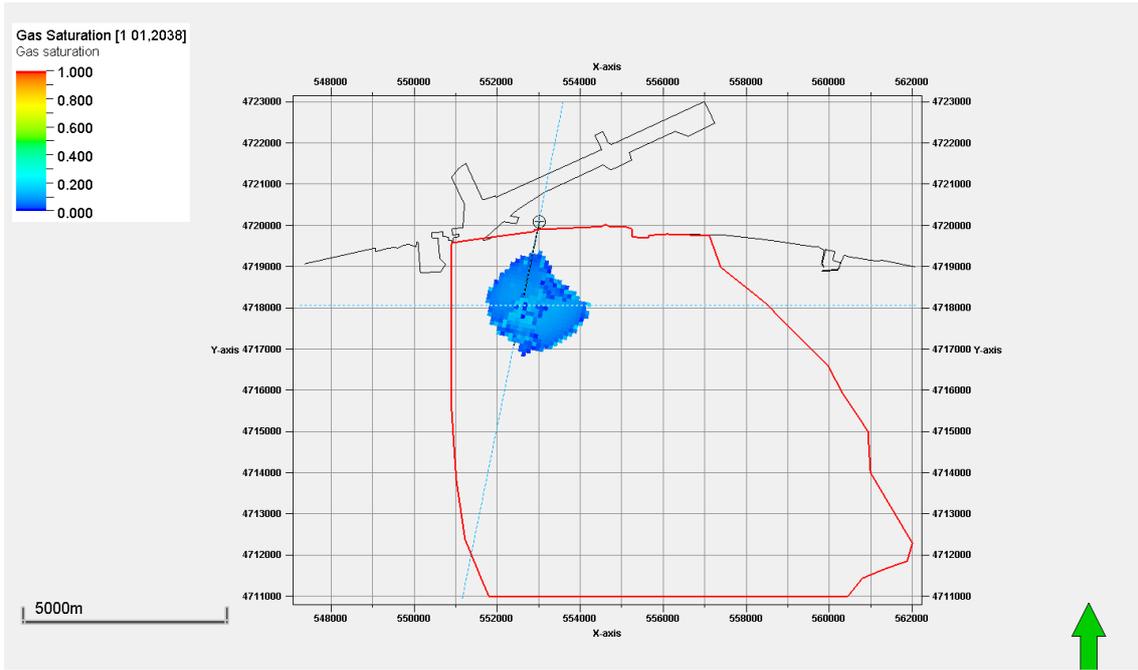


図 5.4-49 P50 モデルにおける CO₂ 飽和率分布 平面図
(圧入レート 50 万 t-CO₂/年、圧入停止直後)

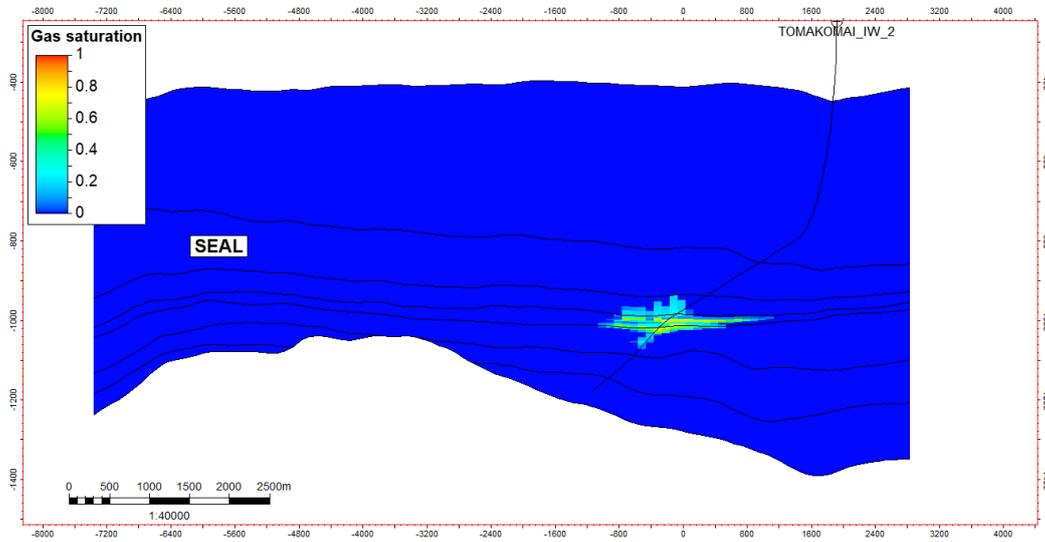


図 5.4-50 P50 モデルにおける CO₂ 飽和率分布 断面図 (坑跡断面)
(圧入レート 50 万 t-CO₂/年、圧入停止直後)

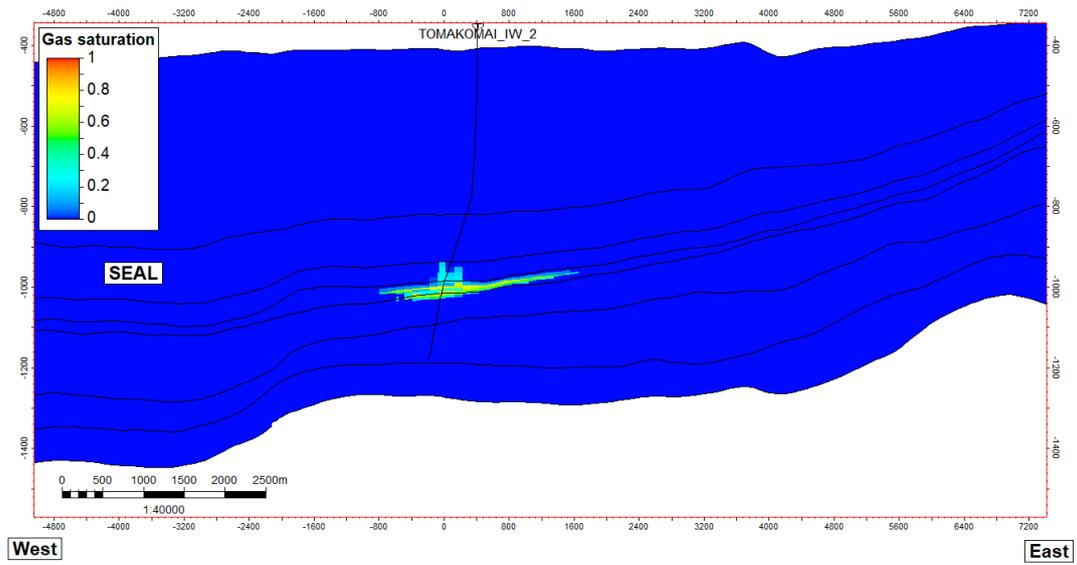


図 5.4-51 P50 モデルにおける CO₂ 飽和率分布 断面図 (東西断面)
(圧入レート 50 万 t-CO₂/年、圧入停止直後)

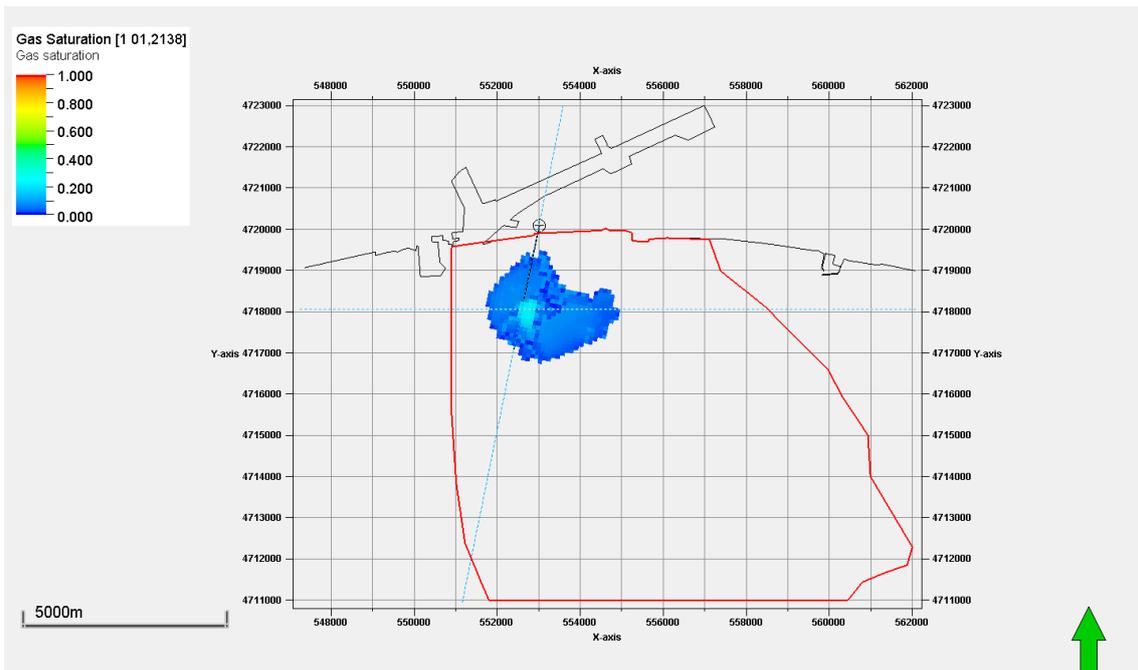


図 5.4-52 P50 モデルにおける CO₂ 飽和率分布 平面図
(圧入レート 50 万 t-CO₂/年、圧入停止 100 年後)

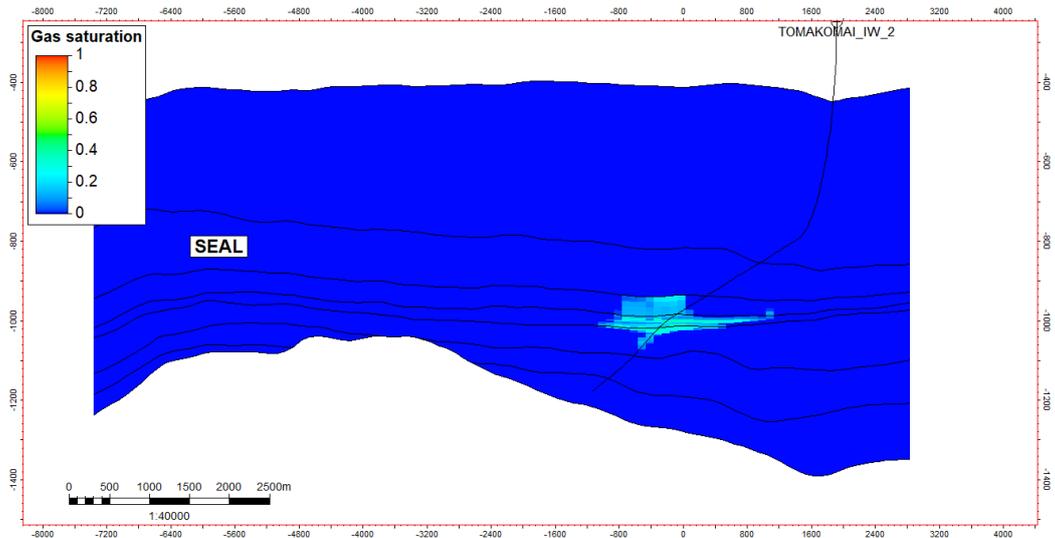


図 5.4-53 P50 モデルにおける CO₂飽和率分布 断面図 (坑跡断面)
(圧入レート 50 万 t-CO₂/年、圧入停止 100 年後)

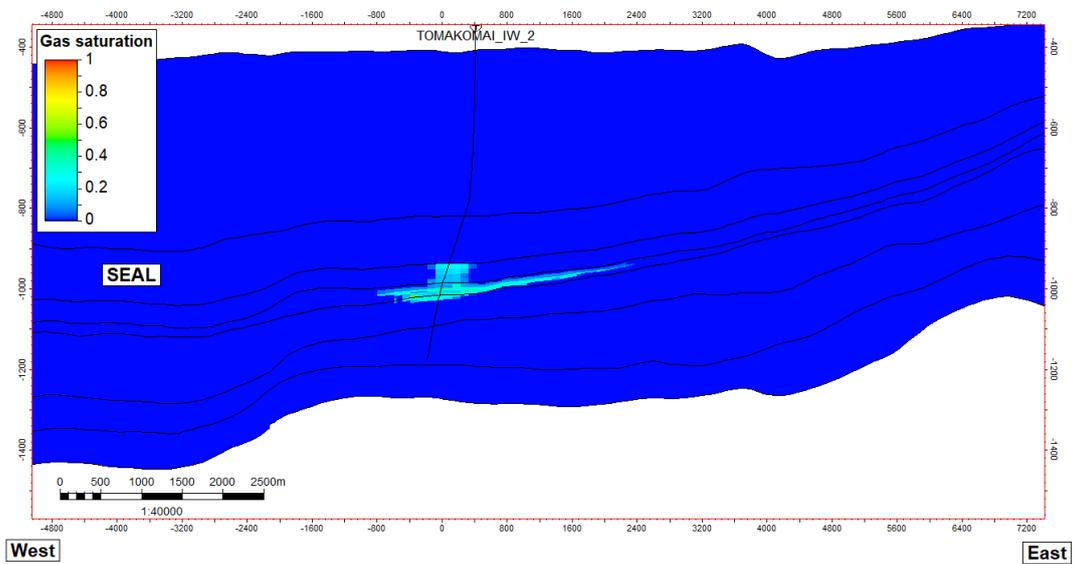


図 5.4-54 P50 モデルにおける CO₂飽和率分布 断面図 (東西断面)
(圧入レート 50 万 t-CO₂/年、圧入停止 100 年後)

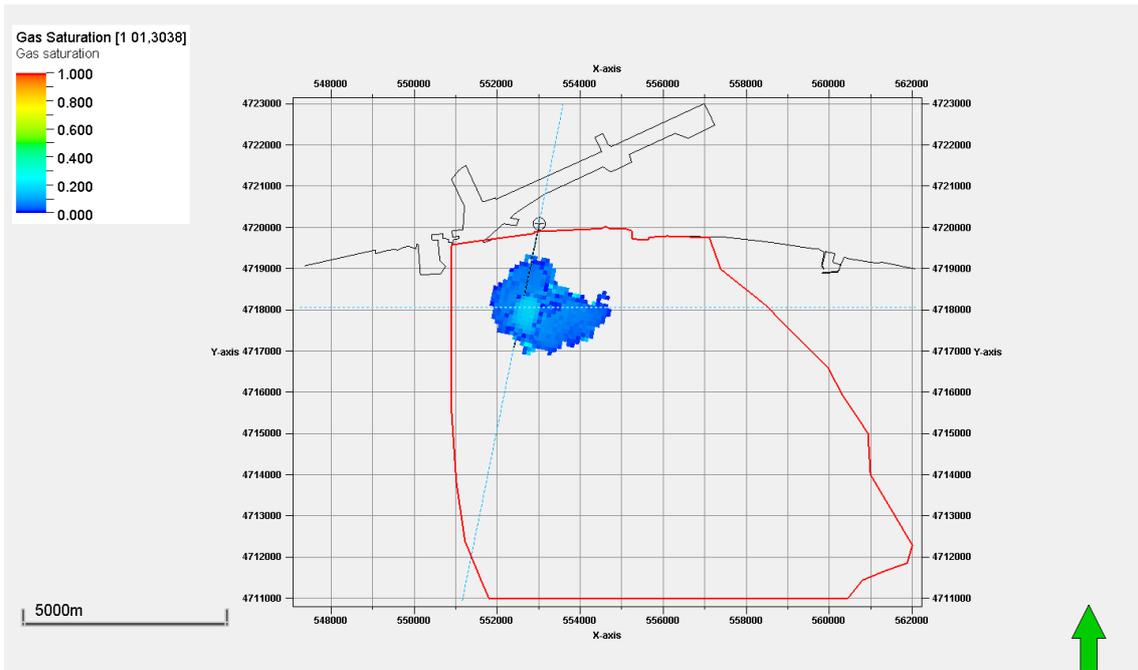


図 5.4-55 P50 モデルにおける CO₂ 飽和率分布 平面図
(圧入レート 50 万 t-CO₂/年、圧入停止 1000 年後)

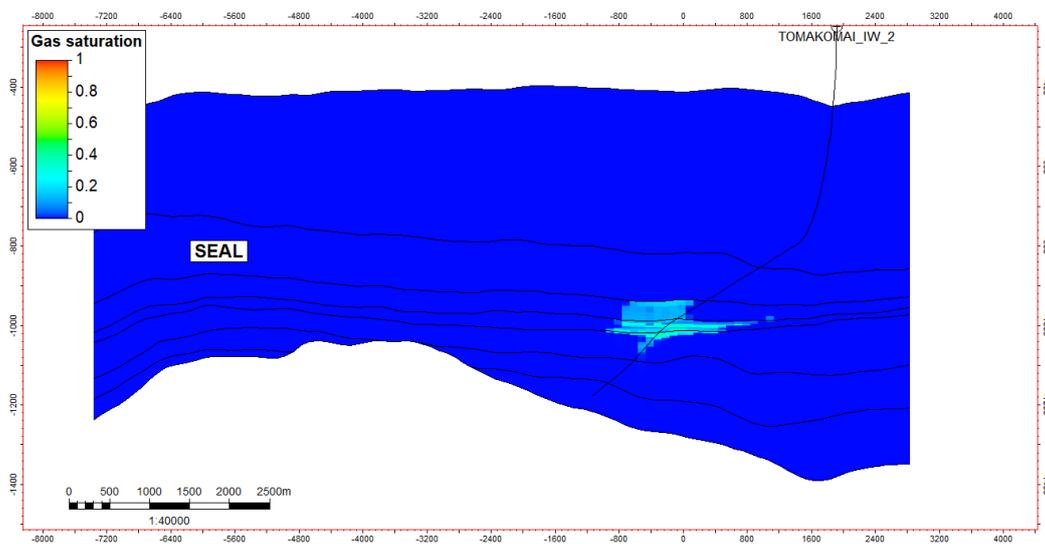


図 5.4-56 P50 モデルにおける CO₂ 飽和率分布 断面図 (坑跡断面)
(圧入レート 50 万 t-CO₂/年、圧入停止 1000 年後)

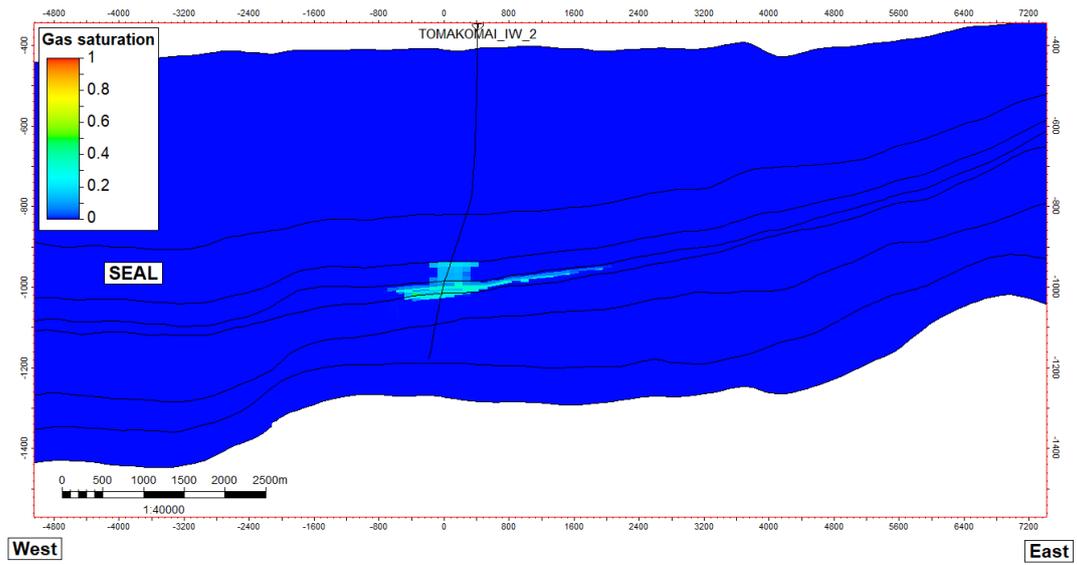


図 5.4-57 P50 モデルにおける CO₂ 飽和率分布 断面図 (東西断面)
(圧入レート 50 万 t-CO₂/年、圧入停止 1000 年後)

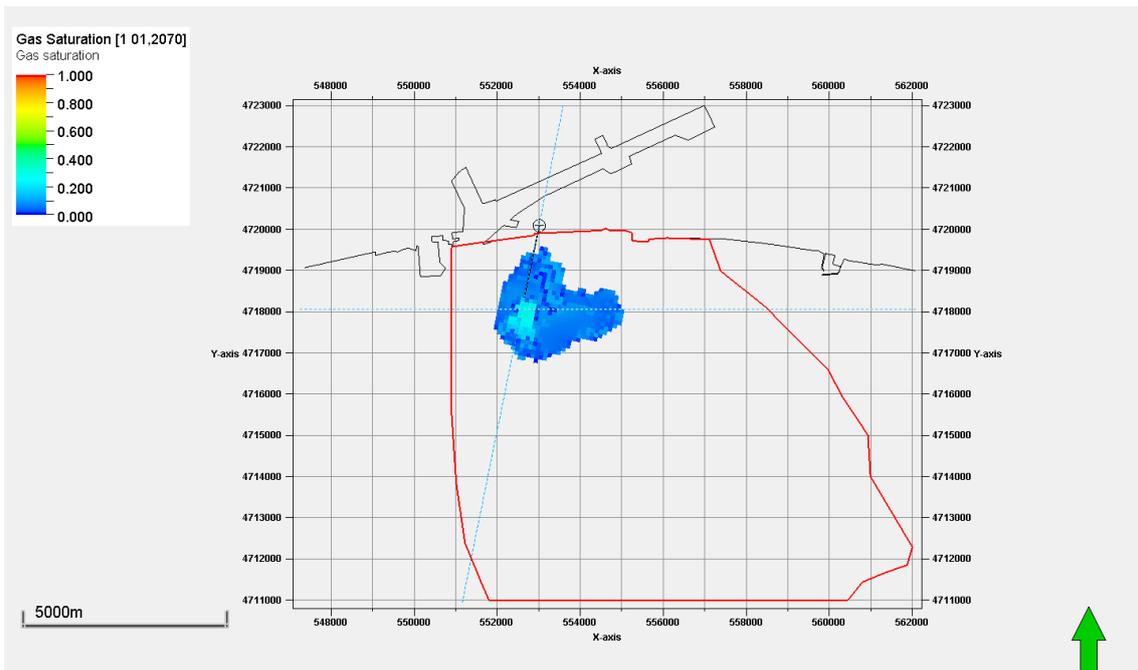


図 5.4-58 P50 モデルにおける CO₂ 飽和率分布 平面図
(圧入レート 10 万 t-CO₂/年、圧入停止直後)

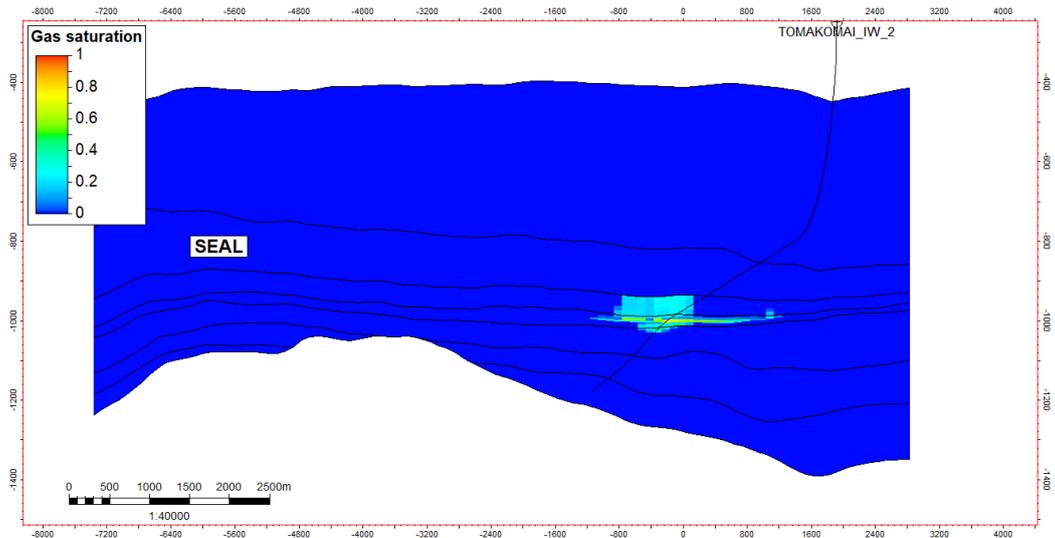


図 5.59 P50 モデルにおける CO₂ 飽和率分布 断面図 (坑跡断面)
(圧入レート 10 万 t-CO₂/年、圧入停止直後)

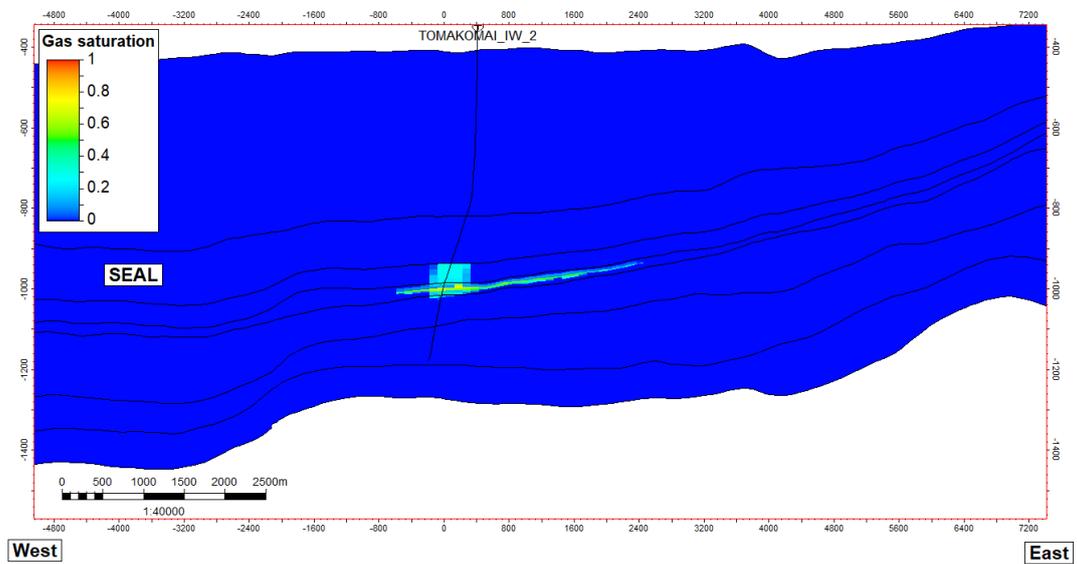


図 5.4-60 P50 モデルにおける CO₂ 飽和率分布 断面図 (東西断面)
(圧入レート 10 万 t-CO₂/年、圧入停止直後)

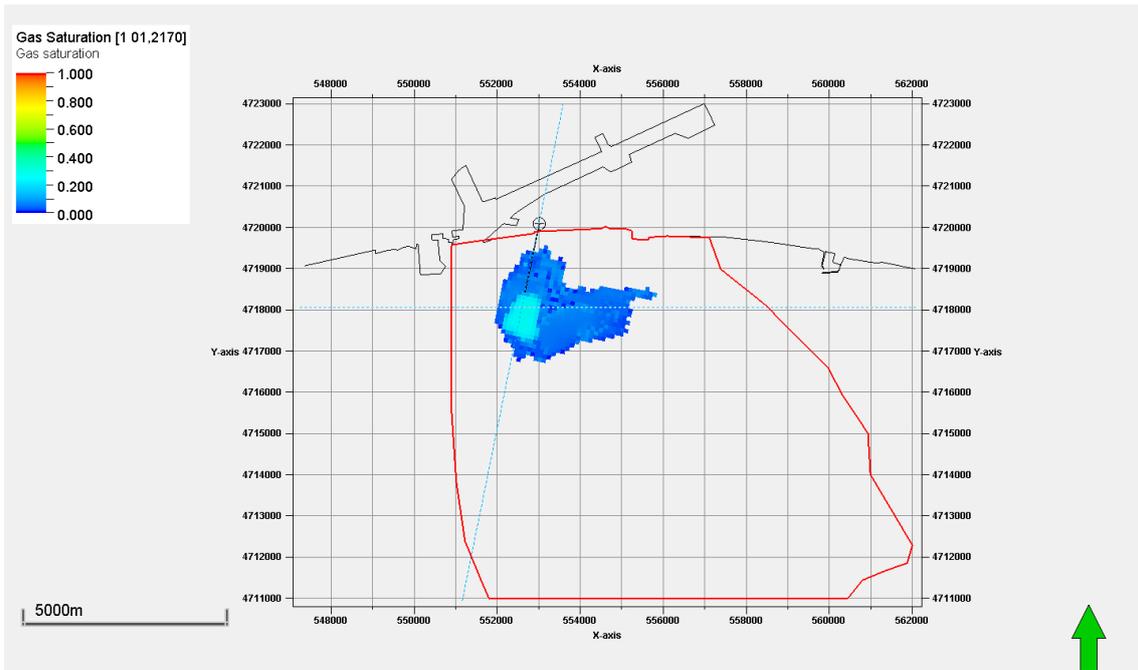


図 5.4-61 P50 モデルにおける CO₂ 飽和率分布 平面図
(圧入レート 10 万 t-CO₂/年、圧入停止 100 年後)

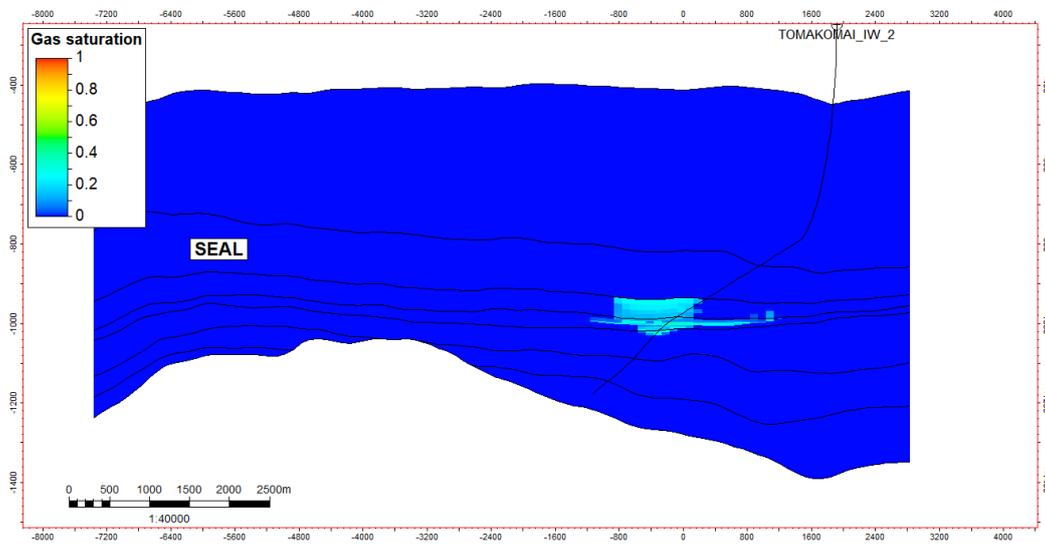


図 5.4-62 P50 モデルにおける CO₂ 飽和率分布 断面図 (坑跡断面)
(圧入レート 10 万 t-CO₂/年、圧入停止 100 年後)

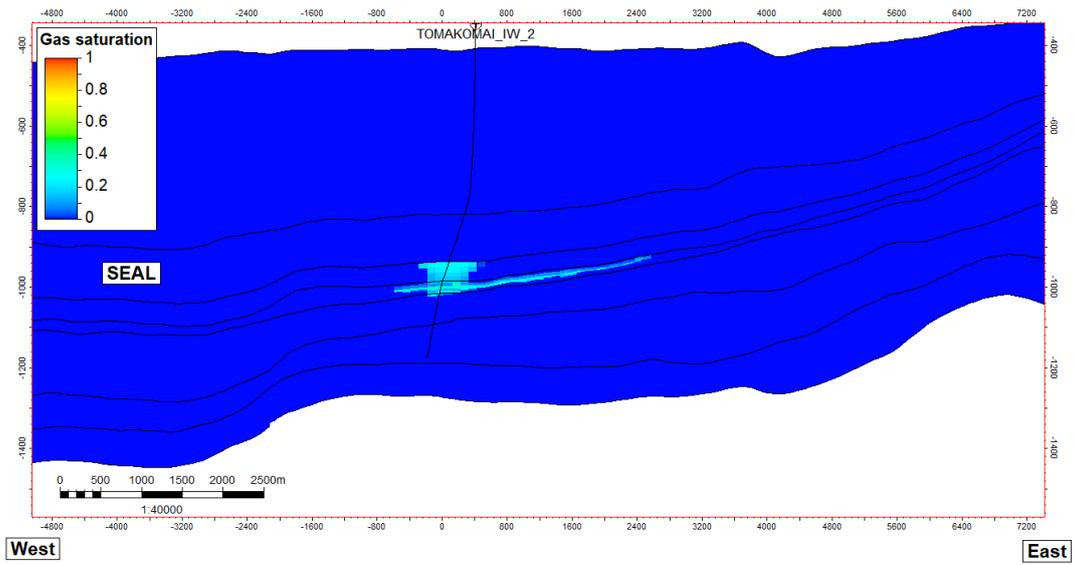


図 5.4-63 P50 モデルにおける CO₂ 飽和率分布 断面図 (東西断面)
(圧入レート 10 万 t-CO₂/年、圧入停止 100 年後)

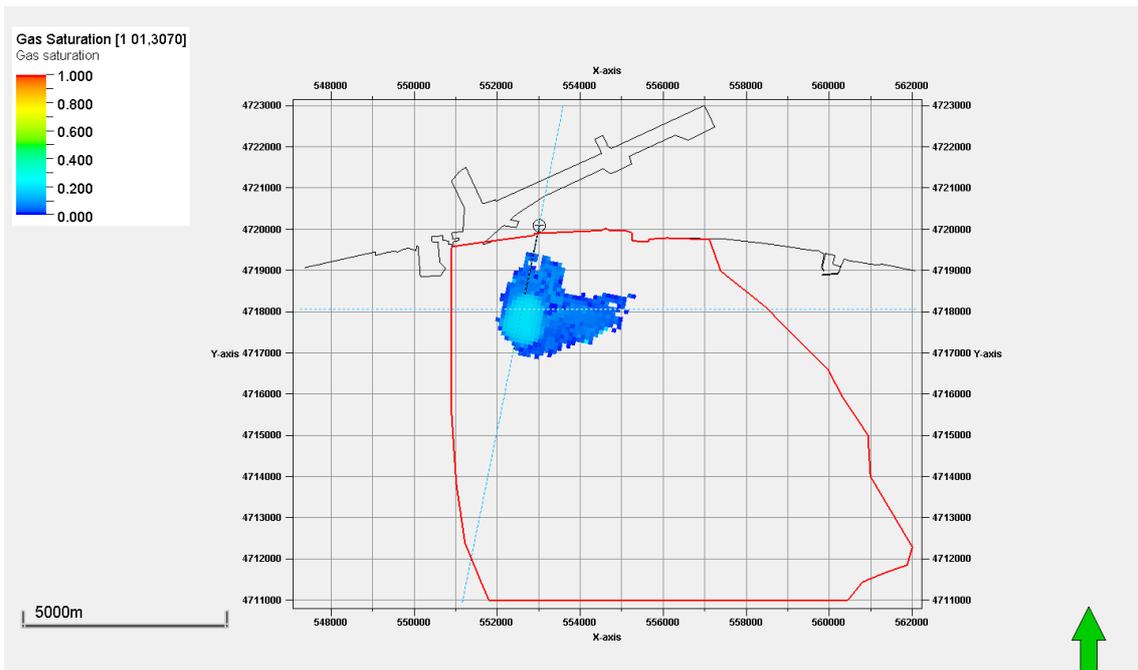


図 5.4-64 P50 モデルにおける CO₂ 飽和率分布 平面図
(圧入レート 10 万 t-CO₂/年、圧入停止 1000 年後)

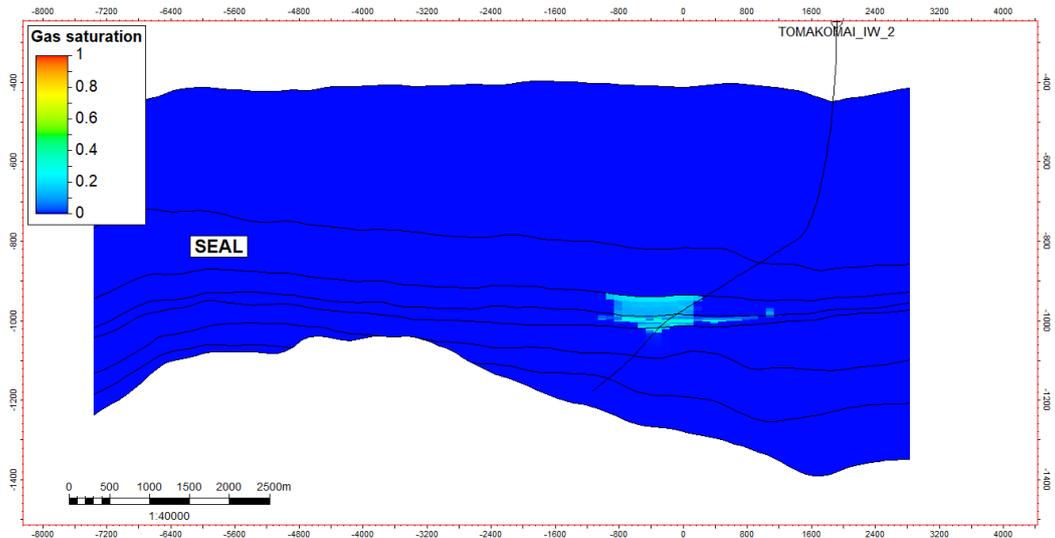


図 5.4-65 P50 モデルにおける CO₂ 飽和率分布 断面図 (坑跡断面)
(圧入レート 10 万 t-CO₂/年、圧入停止 1000 年後)

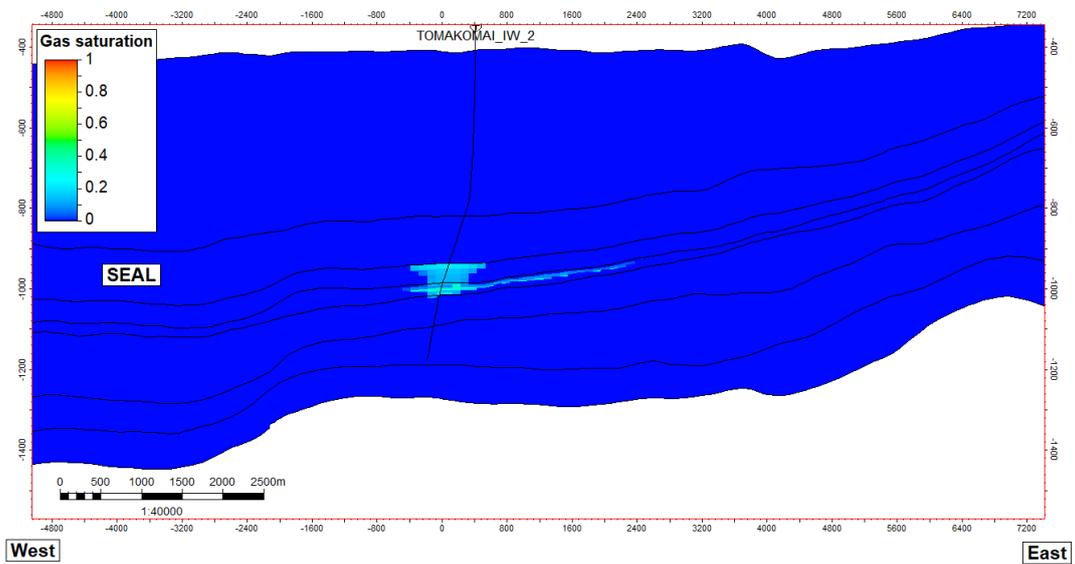


図 5.4-66 P50 モデルにおける CO₂ 飽和率分布 断面図 (東西断面)
(圧入レート 10 万 t-CO₂/年、圧入停止 1000 年後)

(5) 溶存 CO₂ 量分布

P50 相当の具現像について、圧入レート 100 万 t-CO₂/年、50 万 t-CO₂/年、10 万 t-CO₂/年における圧入停止直後、圧入停止 100 年後、圧入停止 1000 年後の溶存 CO₂ 量分布の平

面図と断面図（坑跡断面および東西断面）を図 5.4-67 から図 5.4-93 に示す。平面図は溶存 CO₂ 量 3×10^{-5} (mol/kg) 以上を表示している。なお、実施したシミュレーションのうち、P10 具現像、P90 具現像は P50 具現像と圧入レートの変化による分布の変化傾向は同様であったことから詳細報告は割愛する。また、P50 具現像の 75 万 t-CO₂/年、35 万 t-CO₂/年、20 万 t-CO₂/年の結果も他のレートの結果から類推が可能な結果であったため割愛する。

圧入停止 1,000 年後には東側および西側へ溶存 CO₂ が拡大しているが、高圧入レートであるほど、萌別層上部や下部に留まった CO₂ が溶解することにより、東側への拡大が抑えられて西側に拡大している（図 5.4-73、図 5.4-82、図 5.4-91）。また、時間が経過するにつれて、溶存 CO₂ と塩水の比重差により、溶存 CO₂ が貯留層下部に進んでいることがわかり、高レートであるほどより深部に進んでいる（図 5.4-74、図 5.4-75、図 5.4-83、図 5.4-84、図 5.4-92、図 5.4-93）。なお、遮蔽層には溶存 CO₂ が存在しているが、CO₂ 飽和度分布では CO₂ が確認されておらず、浸入した CO₂ は全て溶解することがわかり、結果、安全に貯留されていると考える。

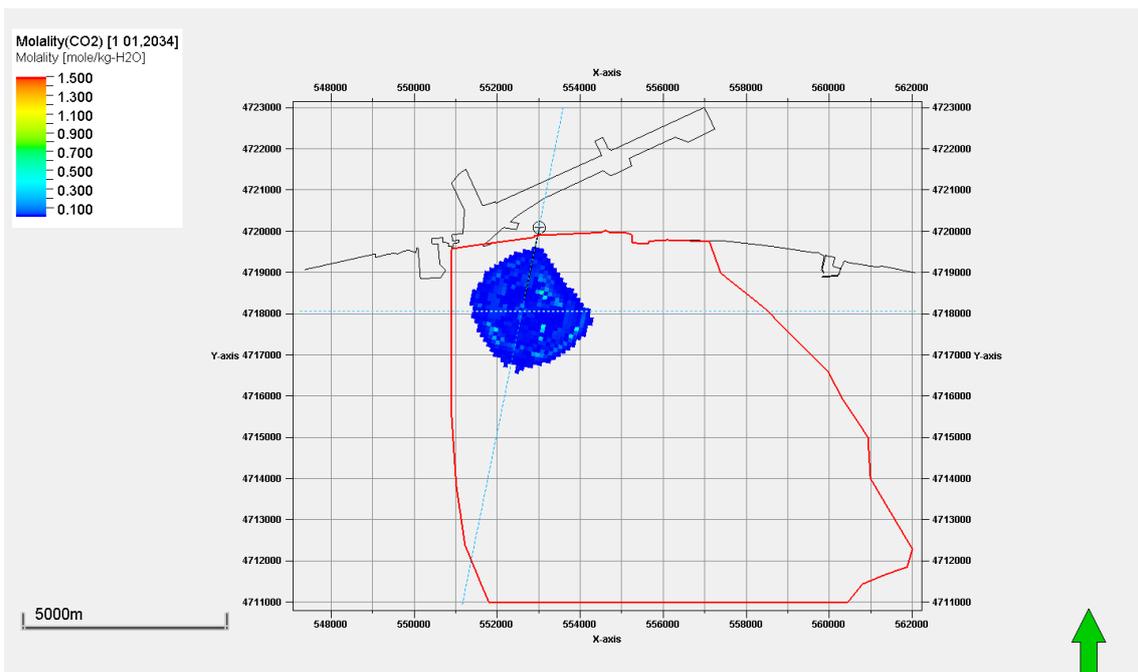


図 5.4-67 P50 モデルにおける溶存 CO₂ 量分布 平面図
(圧入レート 100 万 t-CO₂/年、圧入停止直後)

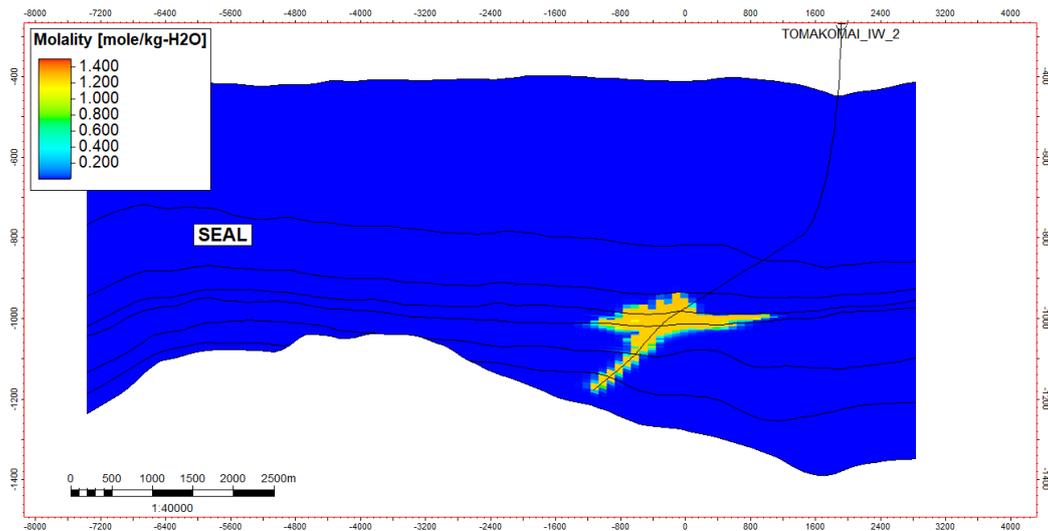


図 5.4-68 P50 モデルにおける溶存 CO₂ 量分布 断面図 (坑跡断面)
(圧入レート 100 万 t-CO₂/年、圧入停止直後)

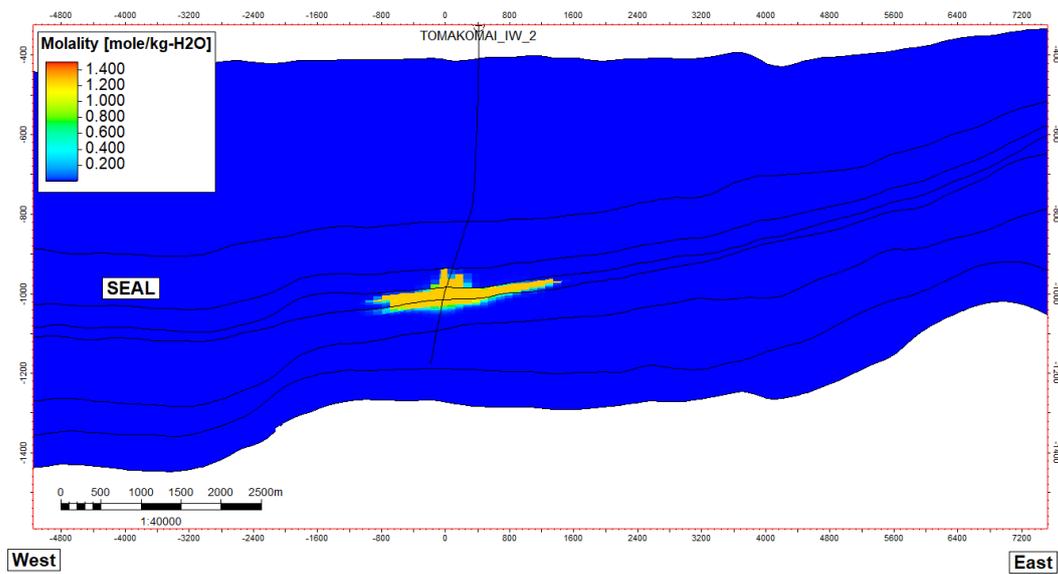


図 5.4-69 P50 モデルにおける溶存 CO₂ 量分布 断面図 (東西断面)
(圧入レート 100 万 t-CO₂/年、圧入停止直後)

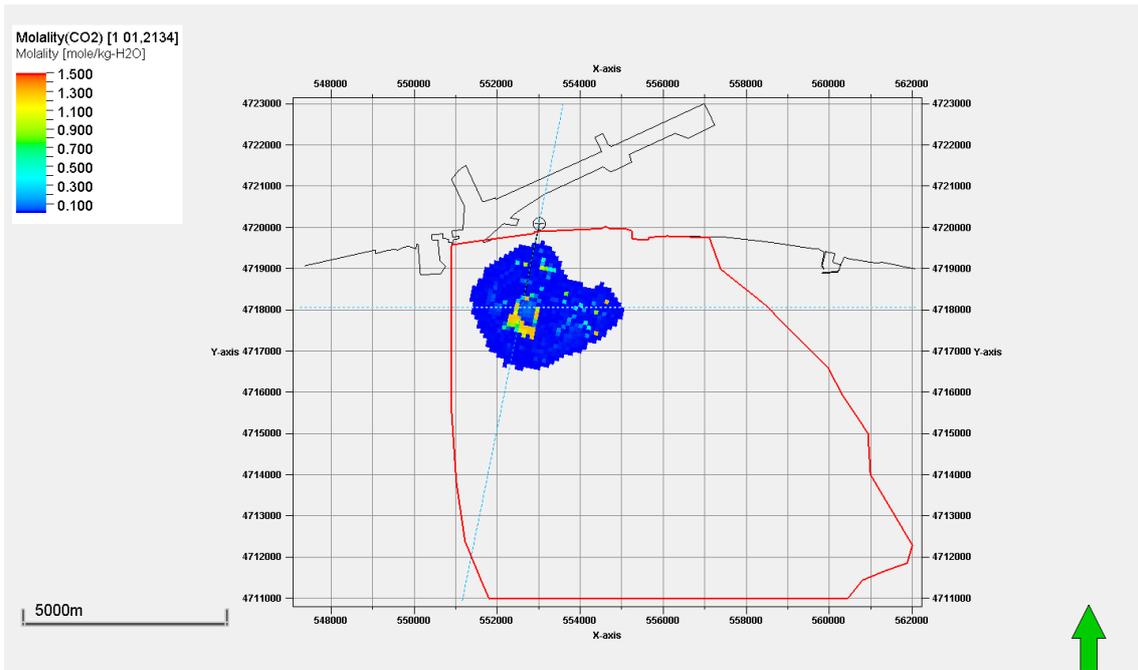


図 5.4-70 P50 モデルにおける溶存 CO₂ 量分布 平面図
(圧入レート 100 万 t-CO₂/年、圧入停止 100 年後)

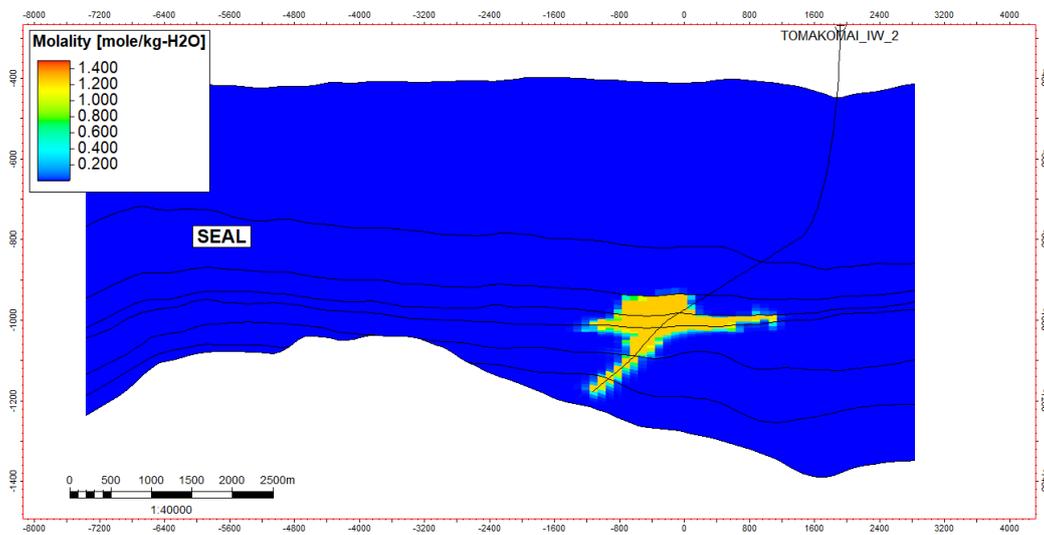


図 5.4-71 P50 モデルにおける溶存 CO₂ 量分布 断面図 (坑跡断面)
(圧入レート 100 万 t-CO₂/年、圧入停止 100 年後)

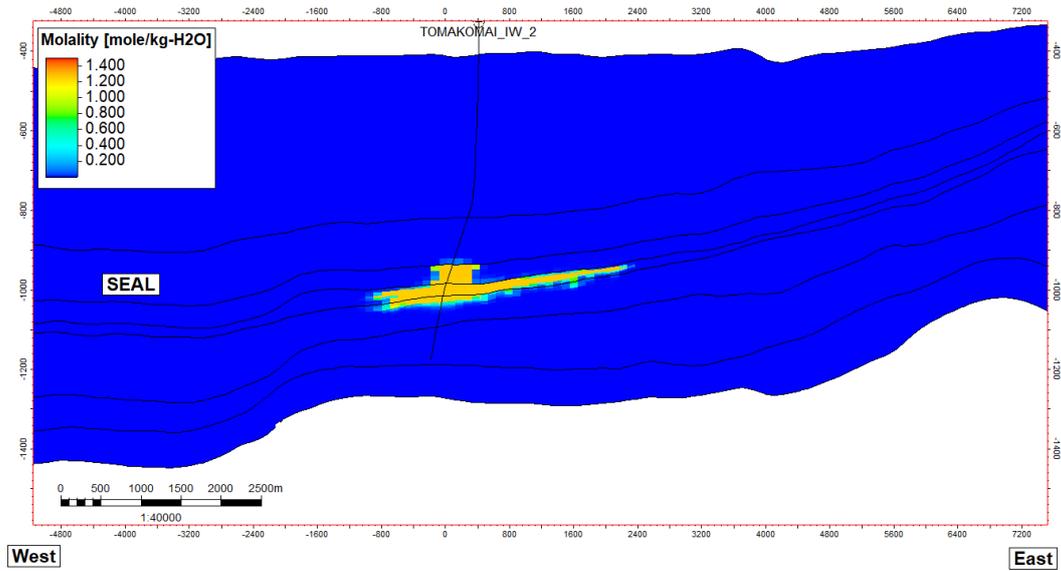


図 5.4-72 P50 モデルにおける溶存 CO₂ 量分布 断面図 (東西断面)
(圧入レート 100 万 t-CO₂/年、圧入停止 100 年後)

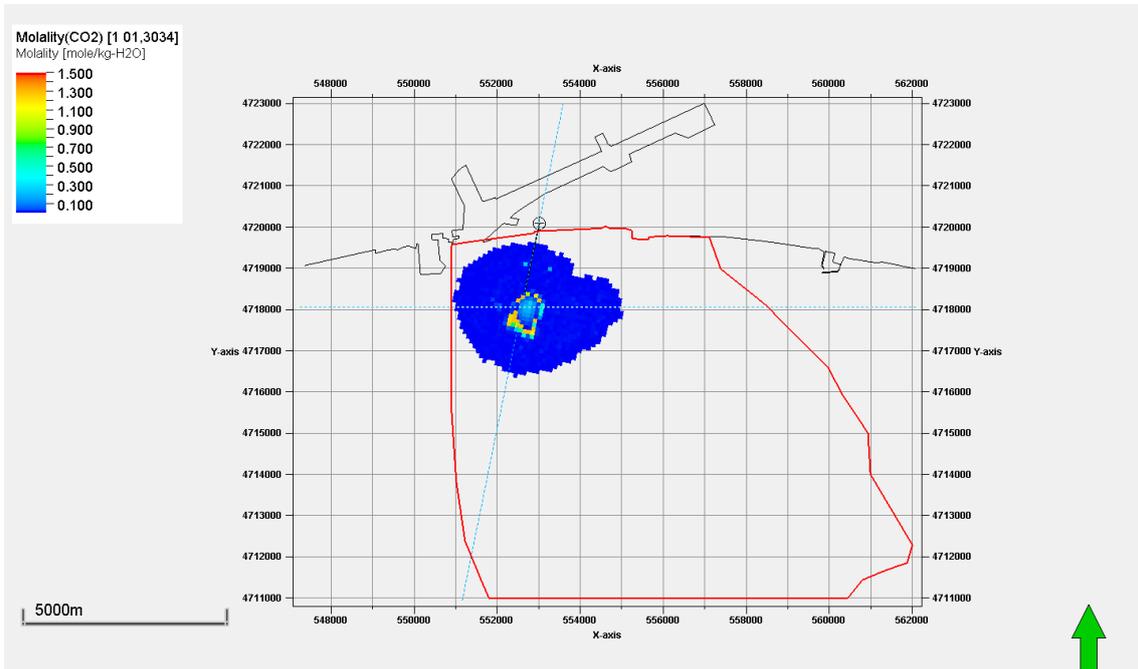


図 5.4-73 P50 モデルにおける溶存 CO₂ 量分布 平面図
(圧入レート 100 万 t-CO₂/年、圧入停止 1000 年後)

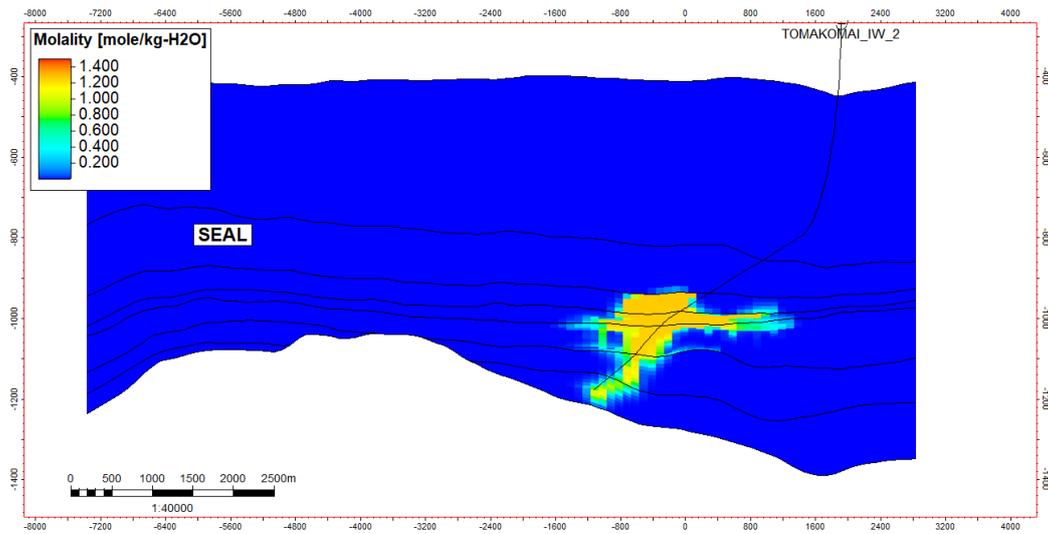


図 5.4-74 P50 モデルにおける溶存 CO₂ 量分布 断面図 (坑跡断面)
(圧入レート 100 万 t-CO₂/年、圧入停止 1000 年後)

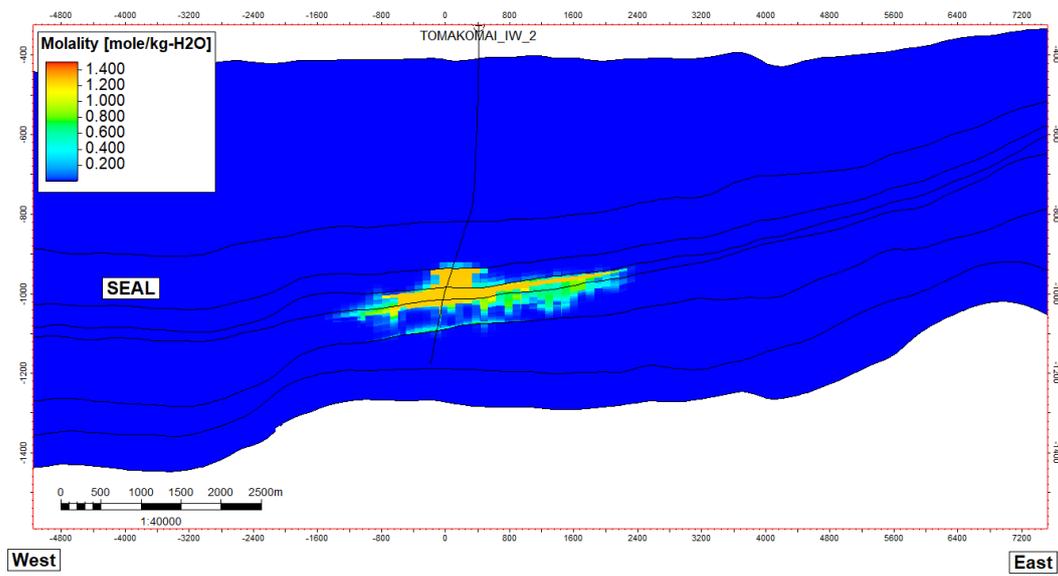


図 5.4-75 P50 モデルにおける溶存 CO₂ 量分布 断面図 (東西断面)
(圧入レート 100 万 t-CO₂/年、圧入停止 1000 年後)

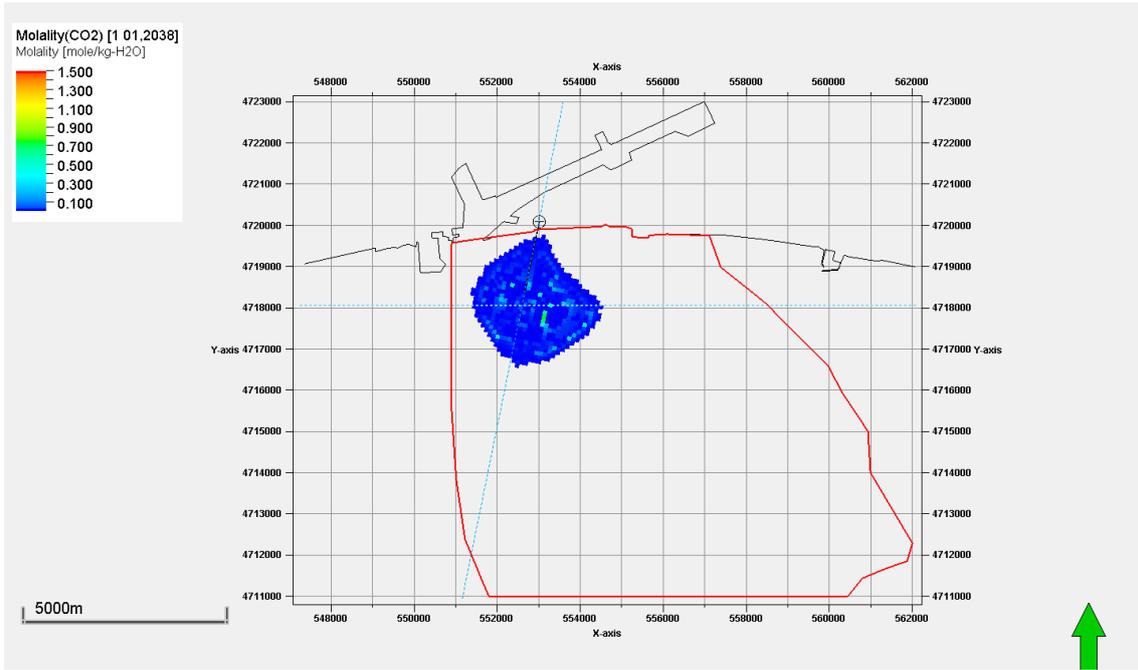


図 5.4-76 P50 モデルにおける溶存 CO₂ 量分布 平面図
(圧入レート 50 万 t-CO₂/年、圧入停止直後)

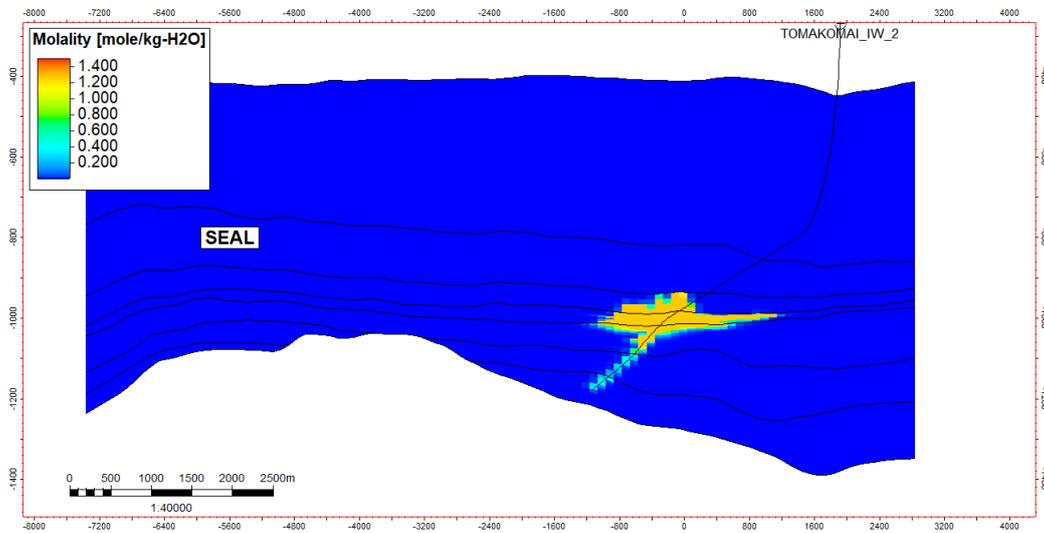


図 5.4-77 P50 モデルにおける溶存 CO₂ 量分布 断面図 (坑跡断面)
(圧入レート 50 万 t-CO₂/年、圧入停止直後)

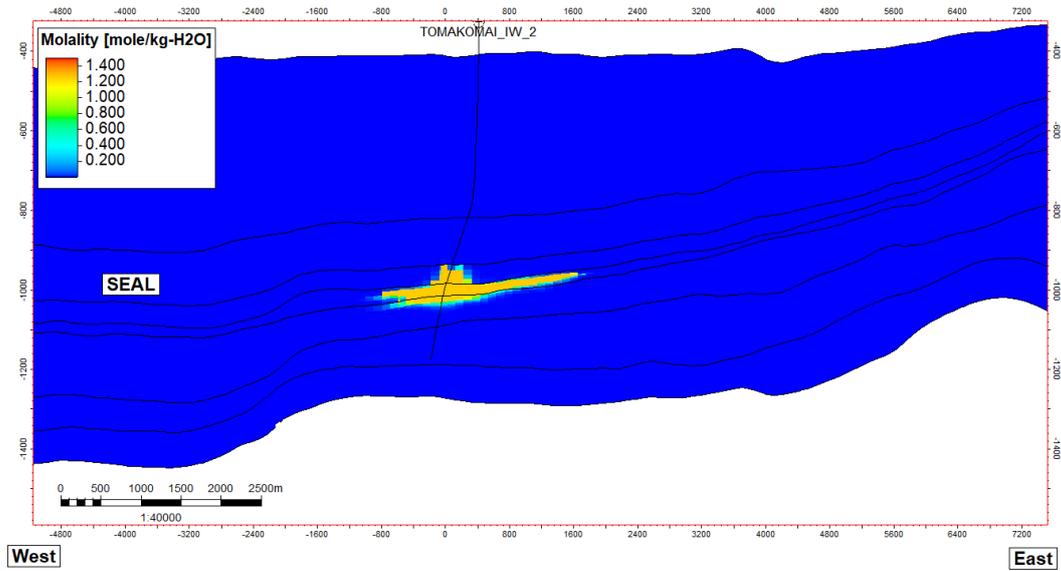


図 5.4-78 P50 モデルにおける溶存 CO₂ 量分布 断面図 (東西断面)
(圧入レート 50 万 t-CO₂/年、圧入停止直後)

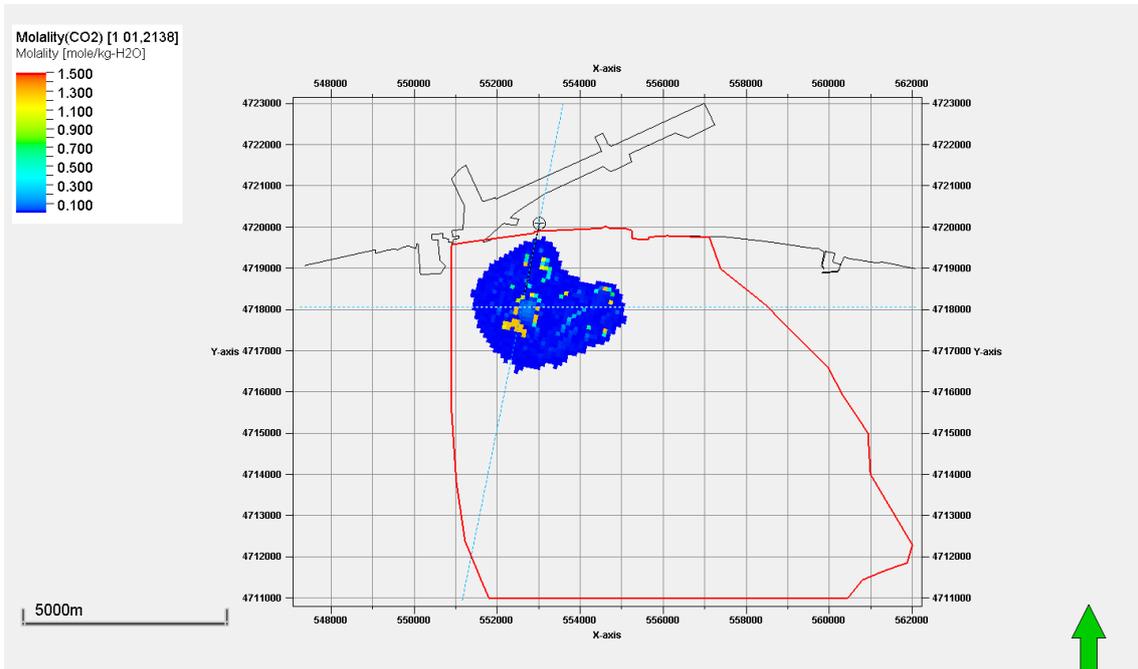


図 5.4-79 P50 モデルにおける溶存 CO₂ 量分布 平面図
(圧入レート 50 万 t-CO₂/年、圧入停止 100 年後)

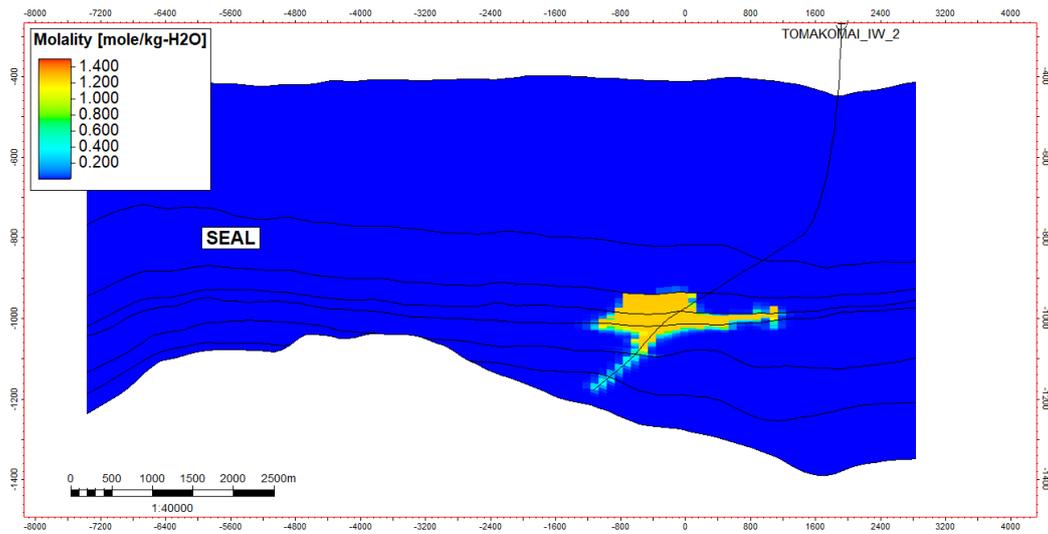


図 5.4-80 P50 モデルにおける溶存 CO₂ 量分布 断面図 (坑跡断面)
(圧入レート 50 万 t-CO₂/年、圧入停止 100 年後)

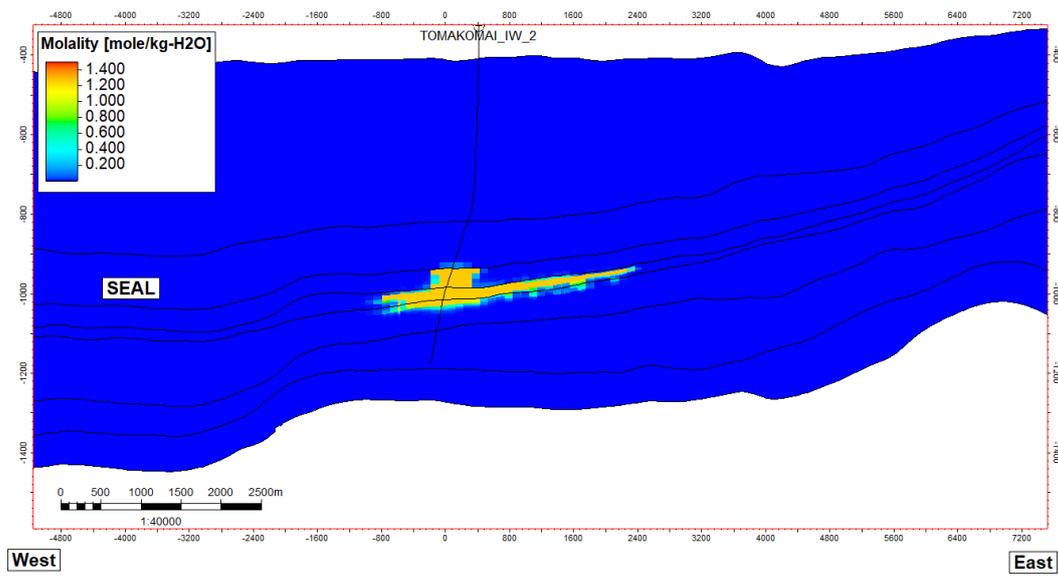


図 5.4-81 P50 モデルにおける溶存 CO₂ 量分布 断面図 (東西断面)
(圧入レート 50 万 t-CO₂/年、圧入停止 100 年後)

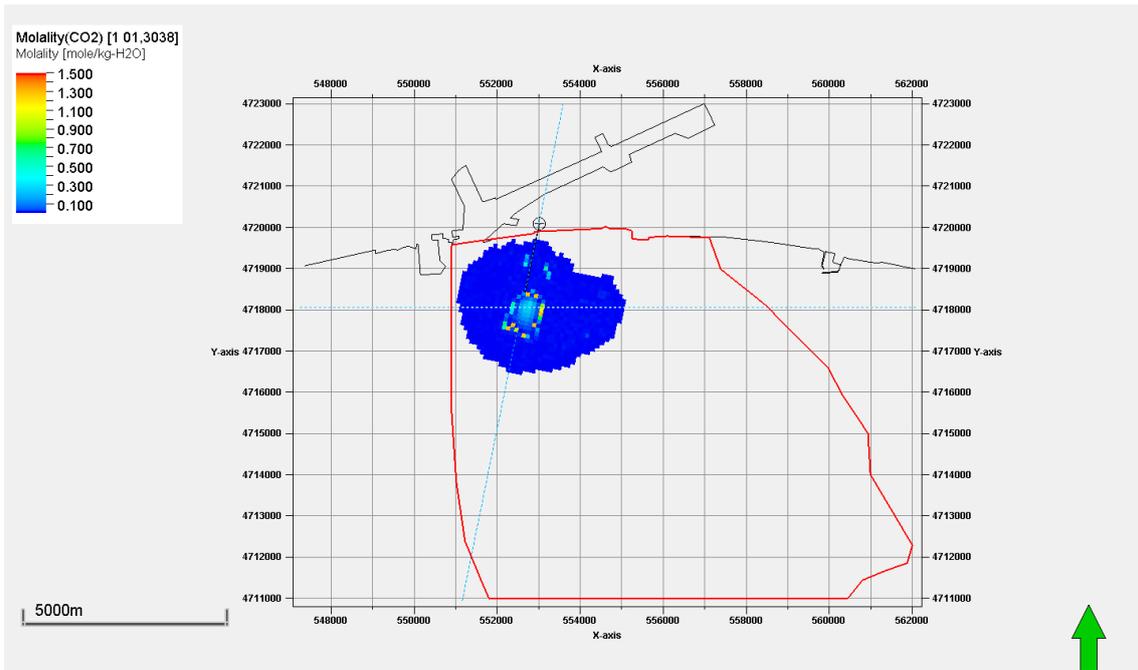


図 5.4-82 P50 モデルにおける溶存 CO₂ 量分布 平面図
(圧入レート 50 万 t-CO₂/年、圧入停止 1000 年後)

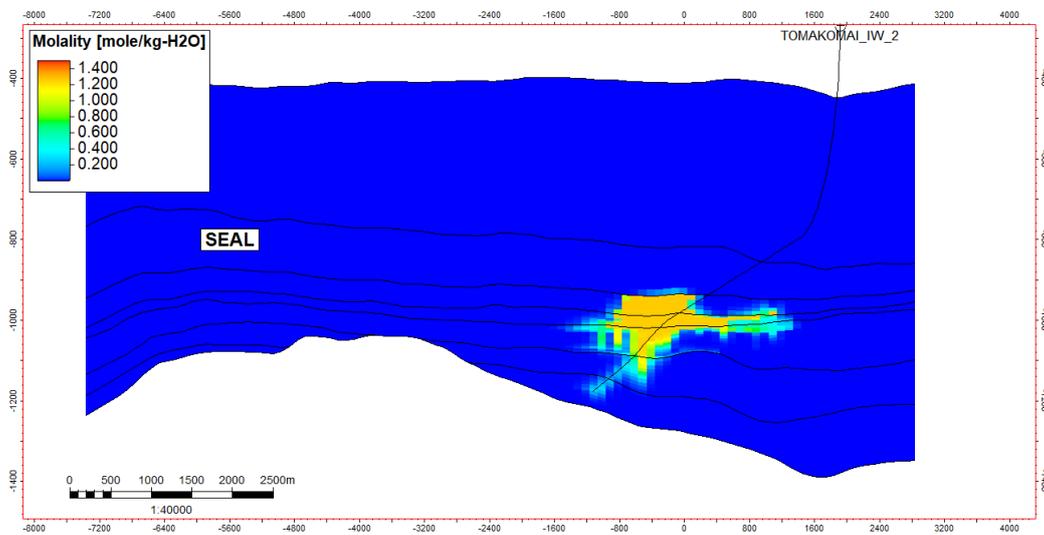


図 5.4-83 P50 モデルにおける溶存 CO₂ 量分布 断面図 (坑跡断面)
(圧入レート 50 万 t-CO₂/年、圧入停止 1000 年後)

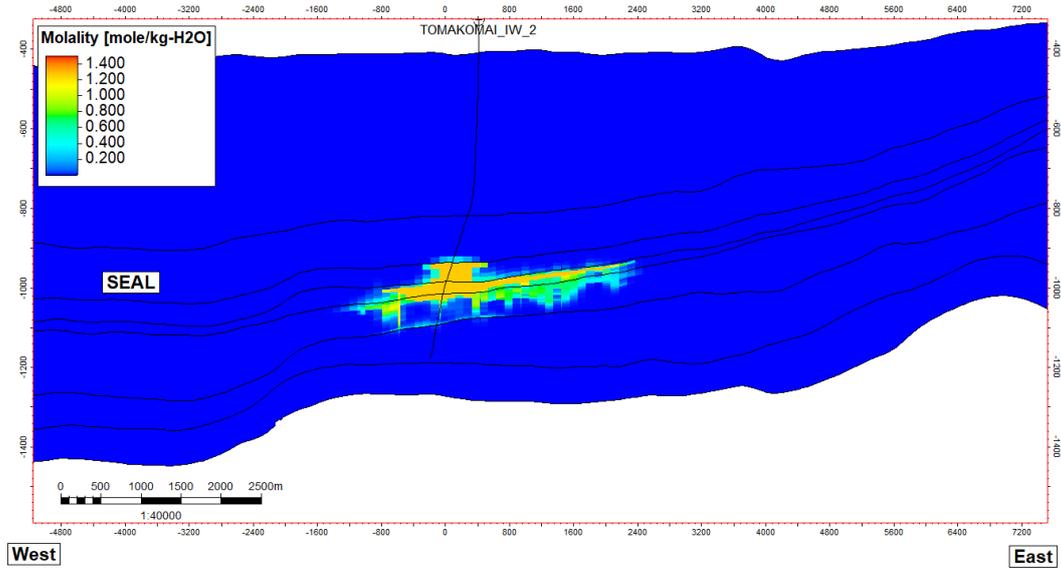


図 5.4-84 P50 モデルにおける溶存 CO₂ 分布 断面図 (東西断面)
(圧入レート 50 万 t-CO₂/年、圧入停止 1000 年後)

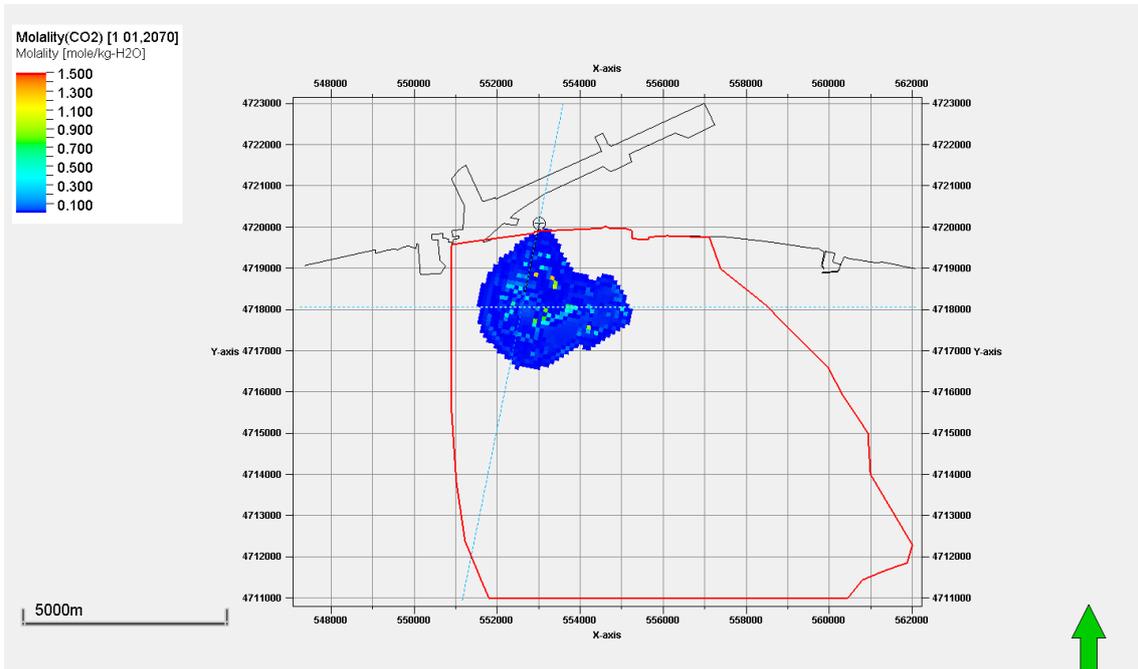


図 5.4-85 P50 モデルにおける溶存 CO₂ 量分布 平面図
(圧入レート 10 万 t-CO₂/年、圧入停止直後)

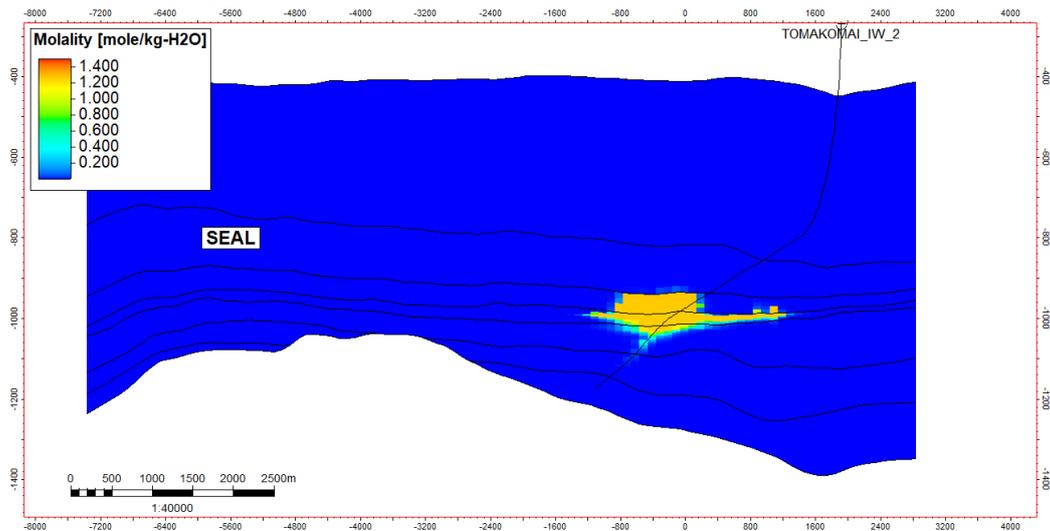


図 5.4-86 P50 モデルにおける溶存 CO₂ 量分布 断面図 (坑跡断面)
(圧入レート 10 万 t-CO₂/年、圧入停止直後)

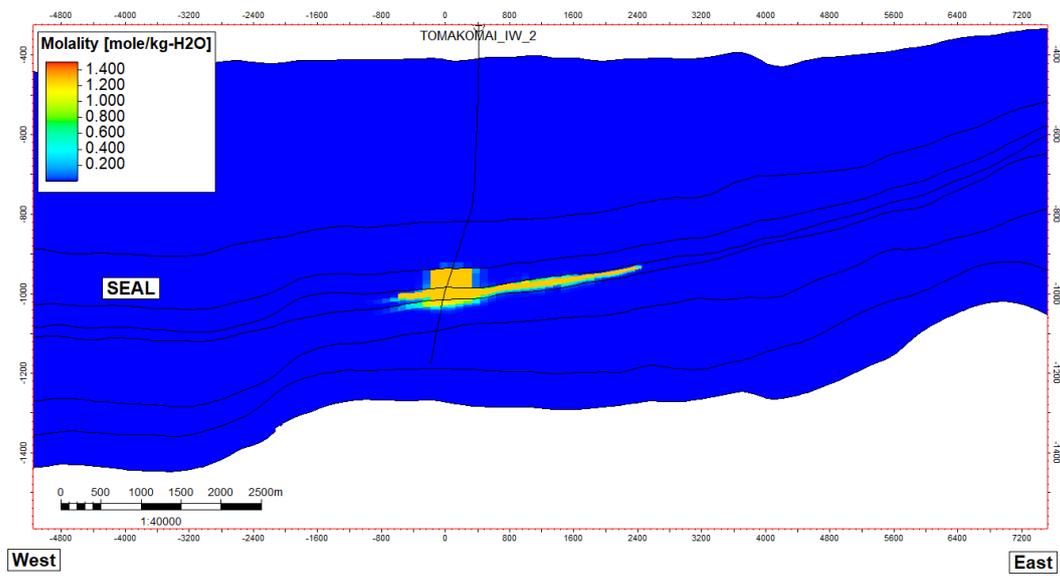


図 5.4-87 P50 モデルにおける溶存 CO₂ 量分布 断面図 (東西断面)
(圧入レート 10 万 t-CO₂/年、圧入停止直後)

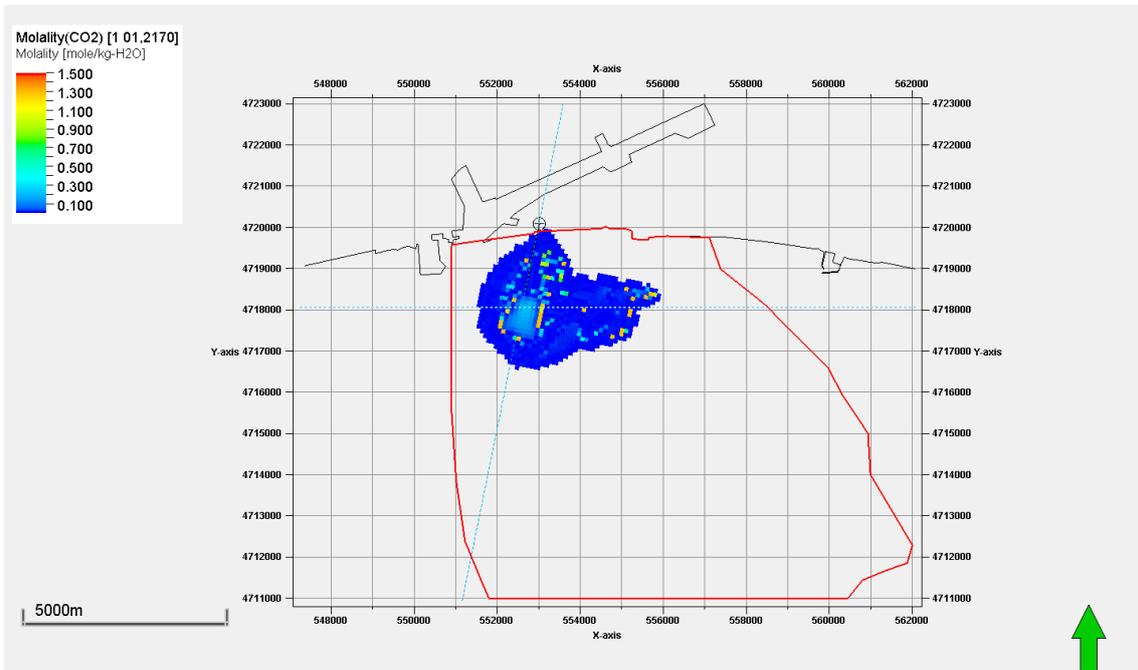


図 5.4-88 P50 モデルにおける溶存 CO₂ 量分布 平面図
(圧入レート 10 万 t-CO₂/年、圧入停止 100 年後)

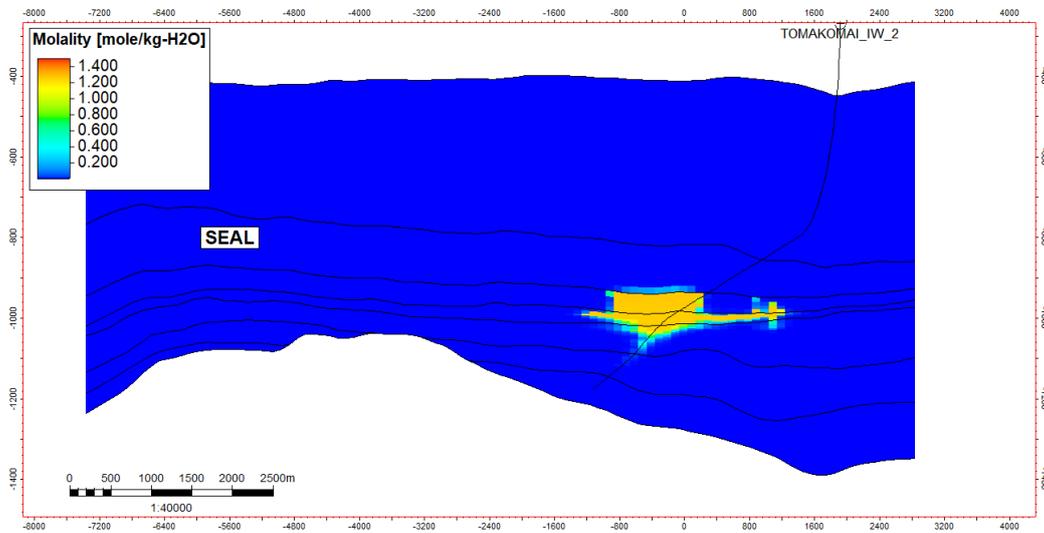


図 5.4-89 P50 モデルにおける溶存 CO₂ 量分布 断面図 (坑跡断面)
(圧入レート 10 万 t-CO₂/年、圧入停止 100 年後)

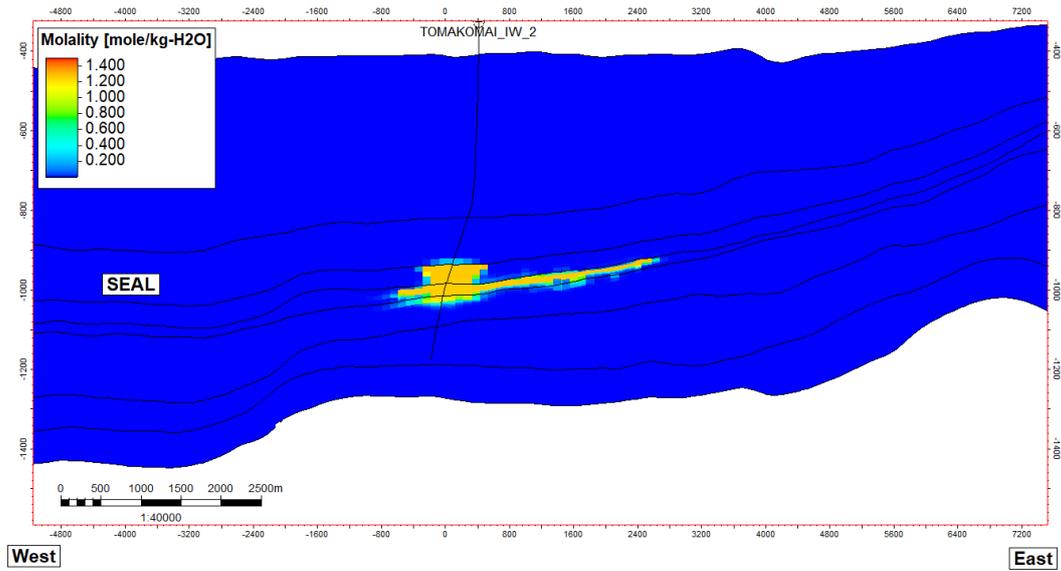


図 5.4-90 P50 モデルにおける溶存 CO₂ 量分布 断面図 (東西断面)
(圧入レート 10 万 t-CO₂/年、圧入停止 100 年後)

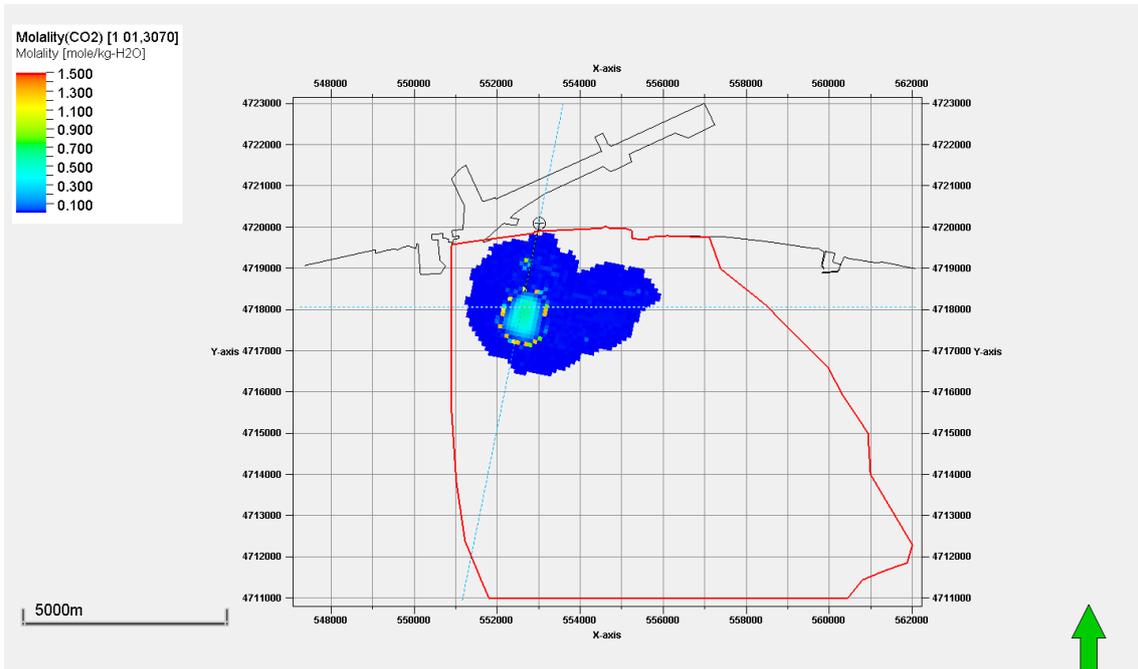


図 5.4-91 P50 モデルにおける溶存 CO₂ 量分布 平面図
(圧入レート 10 万 t-CO₂/年、圧入停止 1000 年後)

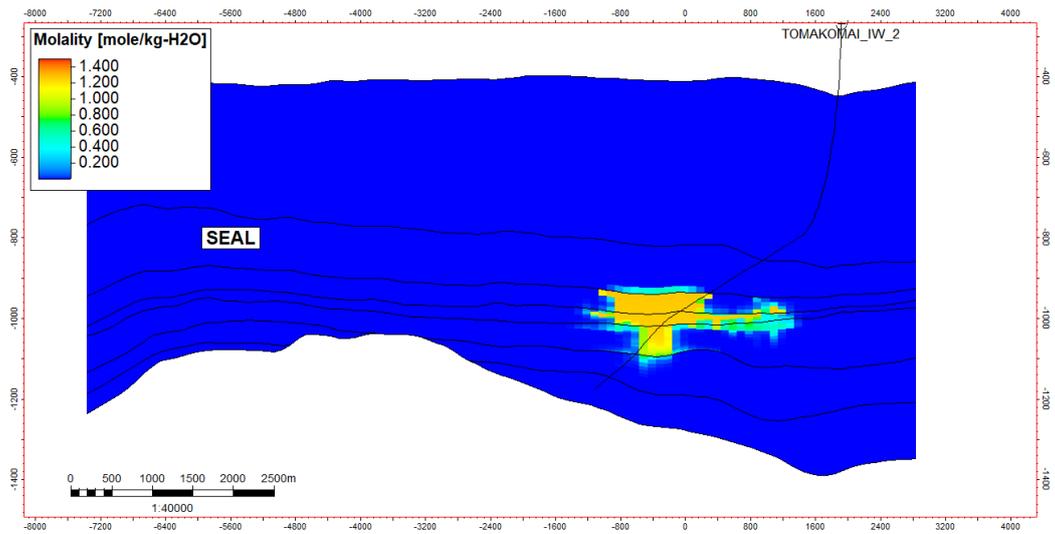


図 5.4-92 P50 モデルにおける溶存 CO₂ 量分布 断面図 (坑跡断面)
(圧入レート 10 万 t-CO₂/年、圧入停止 1000 年後)

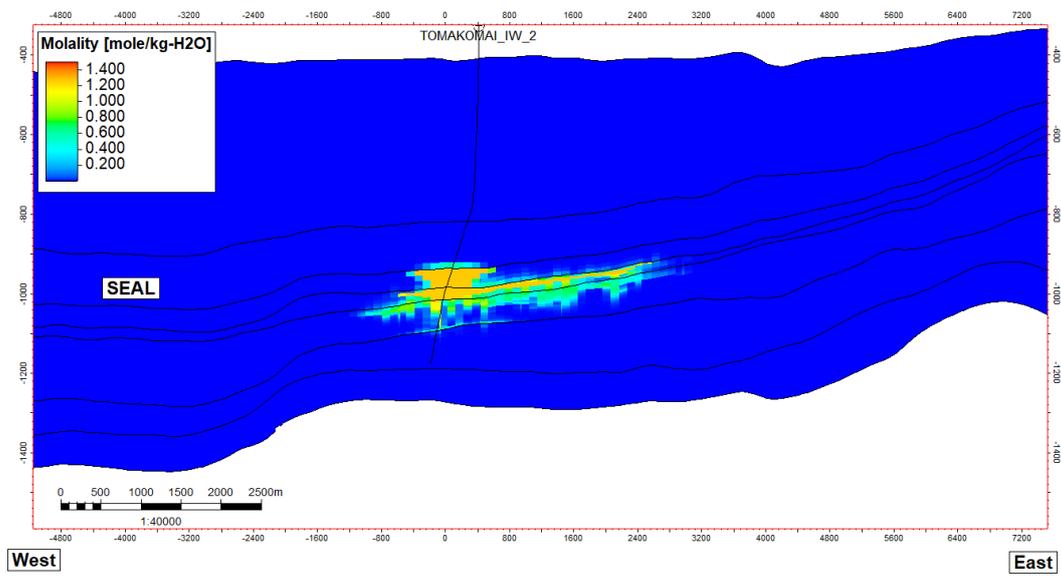


図 5.4-93 P50 モデルにおける溶存 CO₂ 量分布 断面図 (東西断面)
(圧入レート 10 万 t-CO₂/年、圧入停止 1000 年後)

5.5 まとめと今後の課題

2023年度業務では、2021年度の圧入可能量評価の結果から抽出したP90相当、P50相当、P10相当の具現像において、総圧入量は400万t-CO₂一定の条件下で圧入レートを変化させたケースの溶存CO₂やCO₂飽和率の分布状況の違いを検討した。

いずれの具現像においても、高レートであるほど坑底圧力と貯留層圧力の差圧は大きくなるため、貯留層の下部まで圧入される傾向があった。具体的には、主要圧入ゾーンである萌別層砂岩上部と萌別層砂岩下部の圧入量について、10万t-CO₂/年では5%程度のみが萌別層砂岩下部に圧入されるのに対し、100万t-CO₂/年ではその割合は50%程度と大きく変化した。これは、萌別層砂岩上部と萌別層砂岩下部の主な圧入ゾーンは共に高浸透領域であり、レートが上昇するに伴って萌別層砂岩下部にも十分な圧力差が生じることで上部下部とも同程度の圧入量に落ち着いていくためと考えられる。

また、東西断面上では萌別層砂岩上部と萌別層砂岩下部に広がるCO₂の挙動を確認した。高レートであるほど主要な圧入区間以外に貯留されるCO₂の量も増え、貯留層の中でも低レートでは活用されない空間に貯留されて長期的にも移動しにくくなるため、萌別層上部や下部において東側へ広がる溶存CO₂の拡大も抑制され、遮蔽層境界へのCO₂の移動も抑えられることを確認した。

くわえて、IW-2の仕上げ区間上端深度の坑底圧力はCO₂圧入中いずれも圧力上限値12.93MPaGには到達せず、遮蔽層には溶存CO₂は存在するものの僅かで、CO₂飽和度分布では確認されない程度で、坑井周辺以外に圧力変化は見られないことから安全に貯留されていることを確認した。

本スタディにおいてはシミュレーションモデルの精度向上と貯留層の特性把握を目的としてシミュレーションにより圧入レートと圧入区間の関係を検討したが、今後の課題としてはテスト等によりこれらの関係を検証することが挙げられる。この場合、本圧入井は非常に高傾斜井であり、主に自重で降下する坑内ツールズを用いた検証は非常に困難であると考えため、高レート圧入と圧入前後での弾性波測定を組み合わせるなどの手法による検証方法を工夫する必要がある。

【参考文献】

- 1) R. Span and W. Wagner, “A New Equation of State for Carbon Dioxide covering the Fluid Region from the Triple Point Temperature to 1100 K at Pressures up to 800 MPa” J. Phys. Chem. Ref. Data 25, p.1509-1596 (1996)
- 2) ChinaPeixue Jiang, Xiaolu Lia, Ruina Xua, Yongsheng Wang, Maoshan Chen, Heming Wang, Binglu Ruan, “Thermal modeling of CO₂ in the injection well and reservoir at the Ordos CCS demonstration project, China” International Journal of Greenhouse Gas Control (2014)