

目次

第5章 貯留層等総合評価	1
5.1 圧入井、観測井における坑底圧力予実績比較.....	1
5.1.1 貯留層モデルの概要.....	1
5.1.2 グリッドモデル.....	3
5.1.3 IW-2 坑底圧力の予実績比較.....	4
5.1.4 OB-2 坑底圧力上昇値の予実績比較.....	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.....	7
5.2 苫小牧 IW-2 フォールオフ解析 (FOA)	8
5.2.1 FOA 一覧.....	8
5.2.2 FOA に用いた密閉坑底圧力データ	10
5.2.3 圧力デリバティブに関する考察.....	11
5.2.4 苫小牧 IW-2 フォールオフ解析のまとめ	14
5.3 地質構造解釈の更新.....	15
5.3.1 調査対象範囲と使用データ	15
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	16
5.3.3 坑井対比 (IW-2)	23
5.3.4 構造解釈および地質モデルの更新.....	29
5.3.5 4D 差分解析	31
5.3.6 考察	38
5.3.7 まとめ.....	40
5.4 2021 年度モデルを用いた CO ₂ 貯留状況の安定性の検討	40
5.4.1 シミュレーションモデルおよび設定条件.....	40
5.4.2 シミュレーション結果.....	46
5.4.3 シミュレーションのまとめと今後の検討事項.....	102

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4月から萌別層に、2018年2月から滝ノ上層への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。

2024年度の総合評価は、2023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、2023年度に実施した3D弾性波探査データの再処理結果を基に地質モデル更新の必要性を検討し、弾性波探査によるモニタリングを終了する際のCO₂の貯留状況や、CO₂の地中貯留における安定性の評価について、既存のモデルを用いたシミュレーションにより検討した。

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。

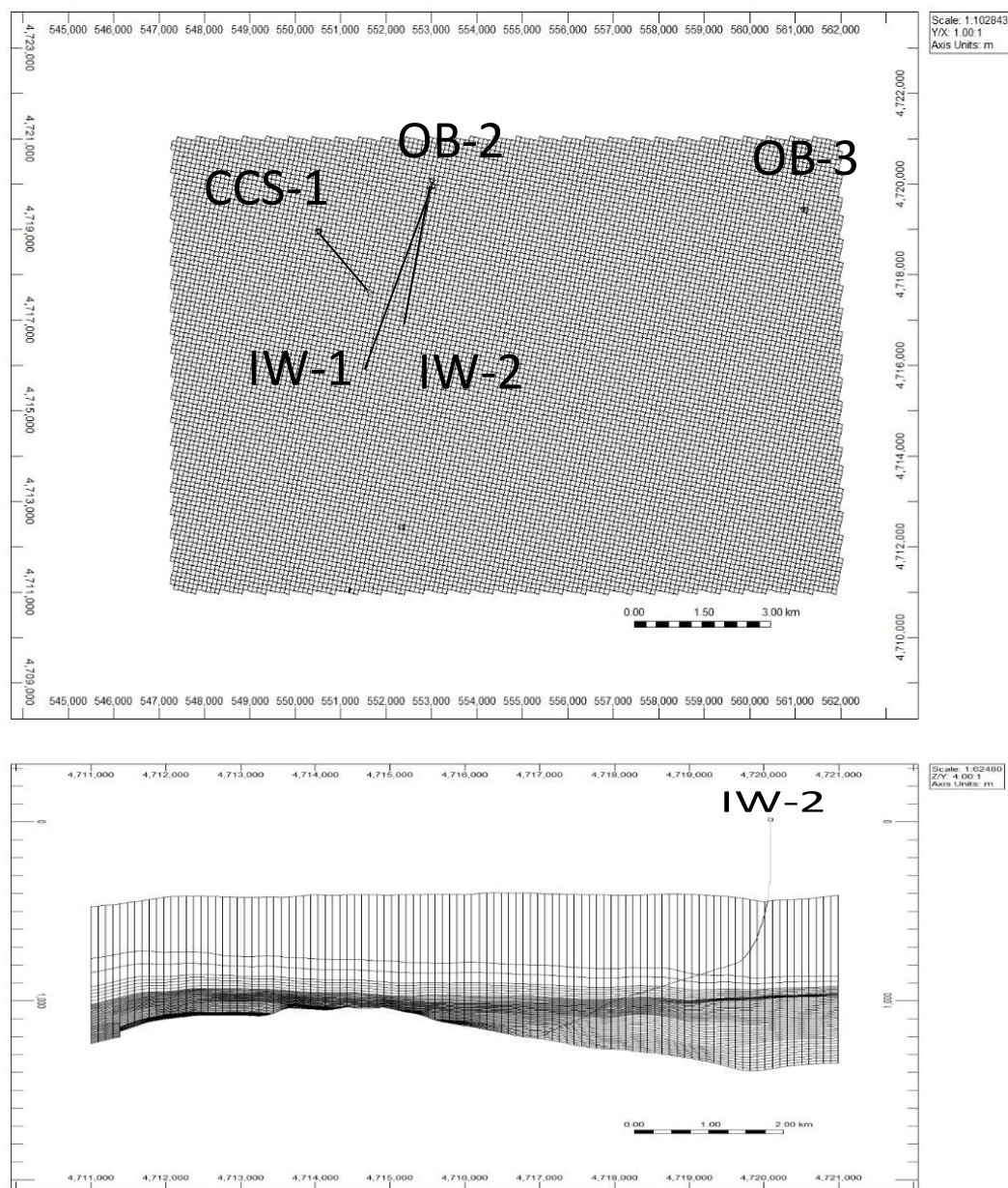
表 5.1-1 貯留層モデルの設定および入力値

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 k_{rg}	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 k_{rw}	1.00
臨界ガス飽和率 S_{gc}	0.05
不動水飽和率 S_{wir}	浸透率と孔隙率より算出
ヒステリシス (S_{grmax})	$S_{gc}+0.5 \times (1-S_{wir}-S_{gc})$ 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	k_{rg} 曲線 : Corey ¹⁾ k_{rw} 曲線 : van Genuchten ²⁾
ガス相対浸透率 k_{rg}	1.00
水相対浸透率 k_{rw}	1.00
臨界ガス飽和率 S_{gc}	0.05
不動水飽和率 S_{wir}	0.638
ヒステリシス (S_{grmax})	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、グリッドモデルの詳細については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）の三つを採用した。

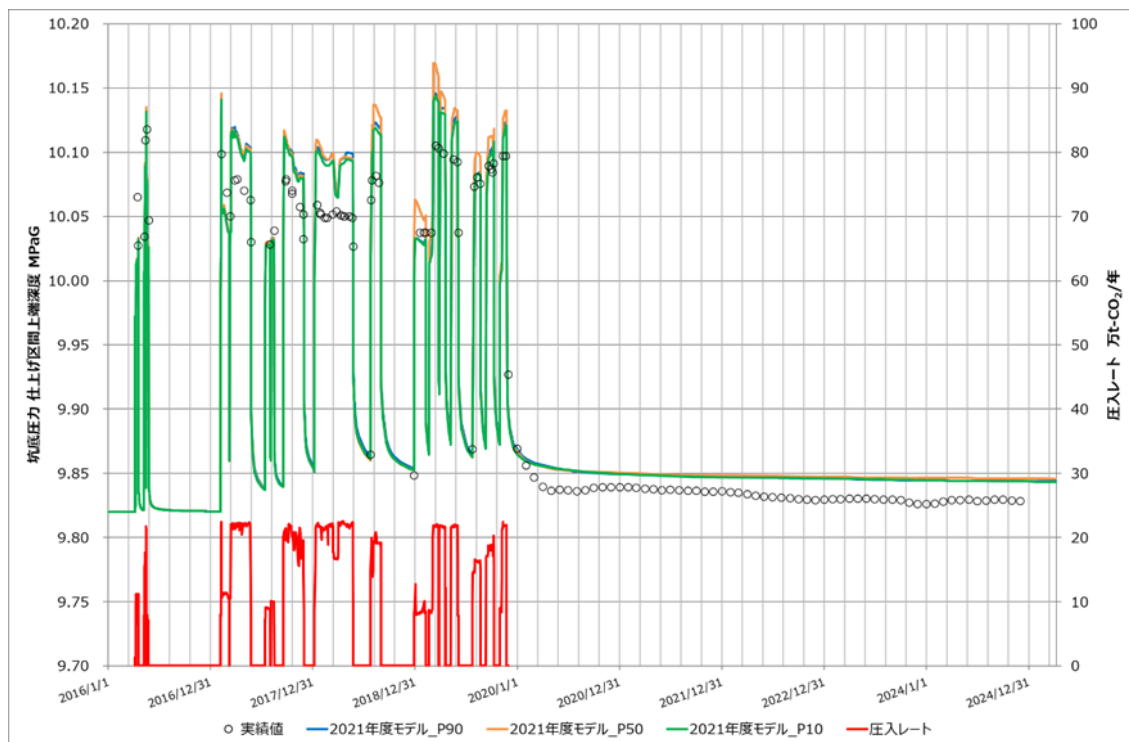


図 5.1-2 (a) IW-2 坑底圧力（仕上げ区間上端深度での圧力）の予実績比較

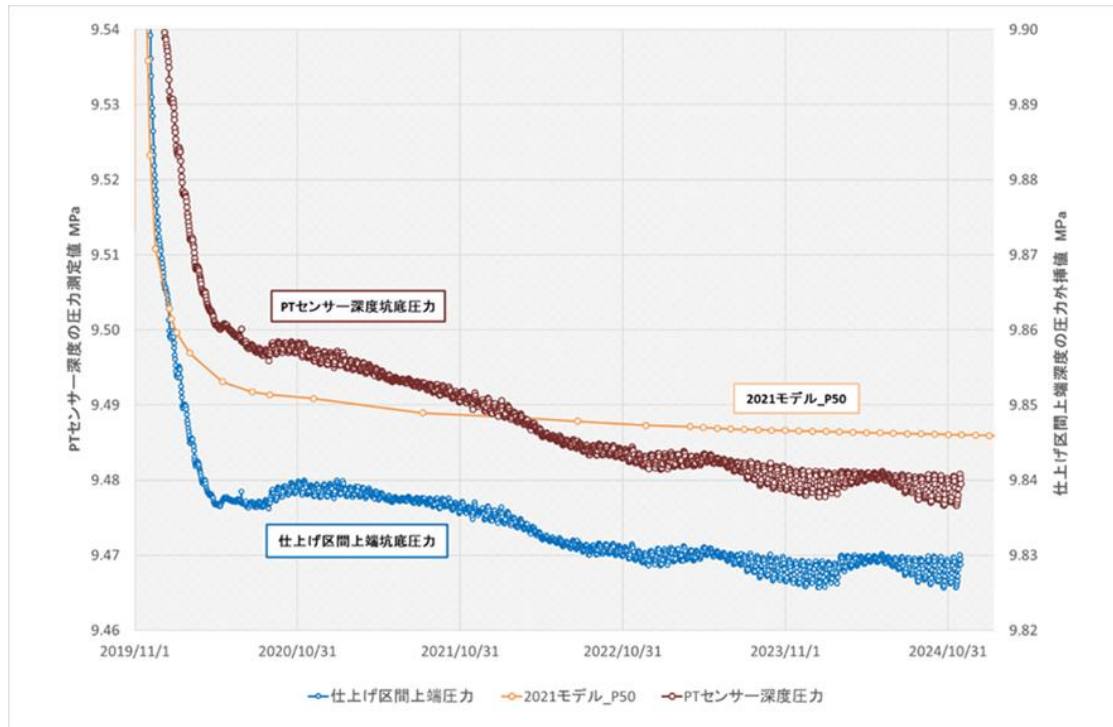


図 5.1-2 (b) IW-2 坑底圧力の予実績比較（圧入を停止した 2019 年 11 月 22 日以降）

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 箇月おきに月末 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月頃から再び低下傾向を示し続けている。2025年3月31日時点では、PTセンサー深度の圧力は9.47 MPaGであり、圧入開始前の初期圧力9.47 MPaG^{*1)}と同値になっている。

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2024年11月30日まで25 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箇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。

*1) 圧入開始前の仕上げ区間上端における圧力を、坑内がCO₂で満たされていると仮定してPTセンサー深度へ変換した圧力。



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25 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 回のフォールオフ解析（以下、「FOA」と称する。）を実施しており、本節では圧入終了後の FOA 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 FOA 一覧

表 5.2-1 に FOA 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 FOA には FOA1、2・・・のように通し番号を付けた。また、2017 年 3 月 9 日の圧入停止時には、坑口装置点検に伴う短期密閉であったことから FOA そのものから除外した。

FOA17 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 FOA 一覧 (概要)

FOA	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
FOA1	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
FOA2	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
FOA3	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
FOA4	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
FOA5	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
FOA6	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
FOA7	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
FOA8	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
FOA9	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
FOA10	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
FOA11	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
FOA12	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
FOA13	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
FOA14	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

FOA	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
FOA15	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
FOA16	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
FOA17	2019年 11月22日 11時30分	測定中	計画 密閉		216,498	300,012

注) FOA17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 FOA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。

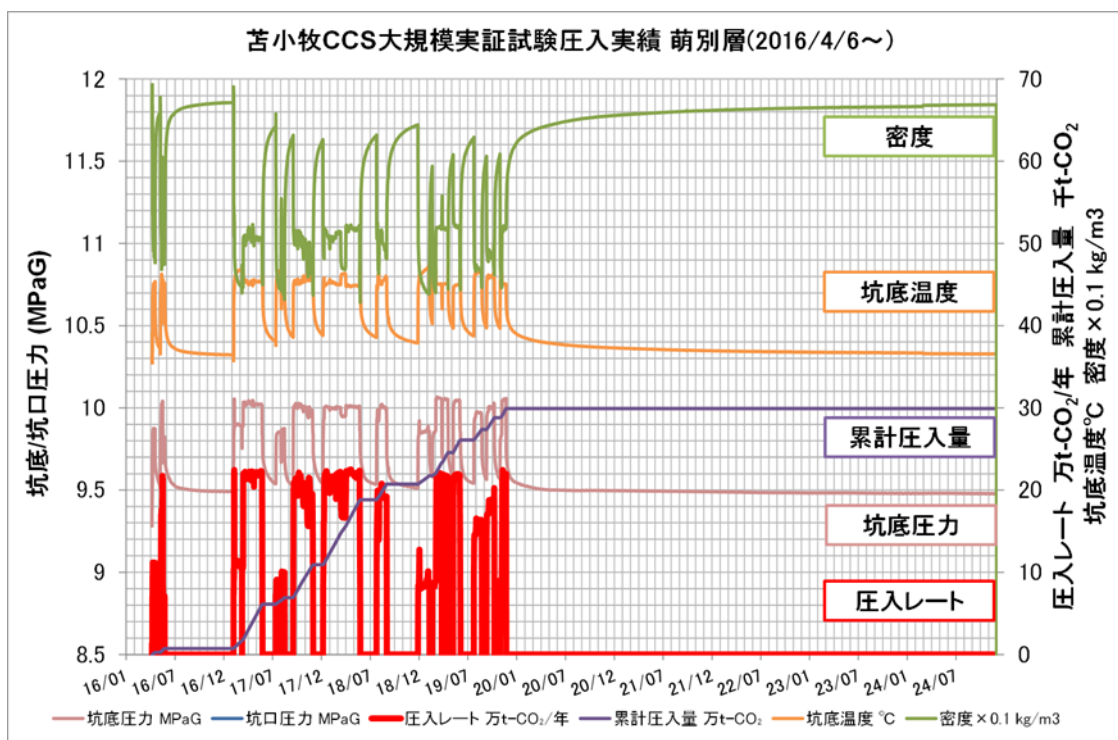


図 5.2-1 PT センサー深度における坑底圧力と坑底温度の推移

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。

FOA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 圧力デリバティブに関する考察

FOA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力デリバティブをプロットし利用する（以下、「ログーログプロット」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、FOA17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グ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

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。

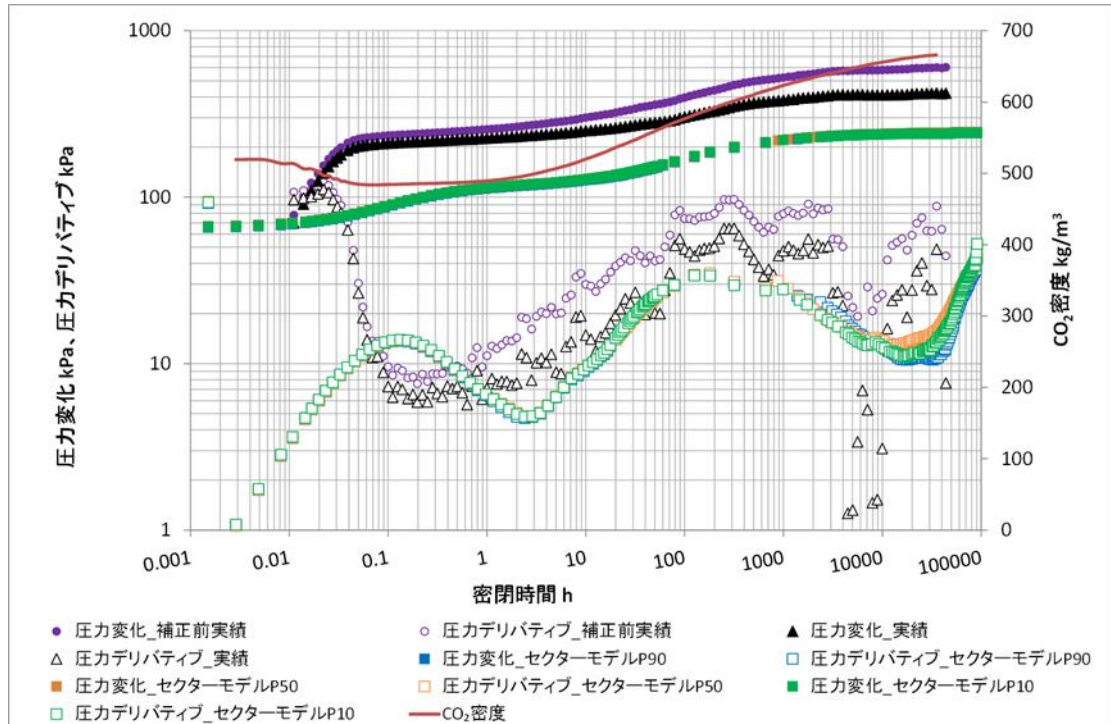


図 5.2-2 FOA17 におけるローグログプロット

圧力デリバティブの実績値は密閉後 100 時間から 2,000 時間の間はほぼ一定となっており、放射状流やショックフロントの特徴を示している。その後は低下傾向を示し、定圧境界の存在を示唆している。8,000 時間付近からは傾き 1 を超える上昇傾向に転じている。

シミュレーションにより予測されている圧力デリバティブは、密閉後 1,000 時間あたりから低下傾向を示し、P90 具現像では密閉後 30,000 時間、P50 具現像では密閉後 10,000 時間、P10 具現像では密閉後 20,000 時間付近で上昇傾向に転じており、外部境界の設定（セクターモデルでは外部境界に流量 0 の条件を与えている）が圧力デリバティブに影響するタイミングは、具現像ごとに異なっている。

FOA17 における密閉坑底圧は、図 5.2-3 に示すように 2020 年 5 月頃（密閉後 4,000 時間程度）までに急激に低下し、以降は初期圧 9.47 MPaG*2) に向かって緩やかな低下傾向を示している。

*2) 圧入開始前の仕上げ区間上端における圧力を、坑内が CO₂ で満たされていると仮定して PT センサー深度へ変換した圧力。

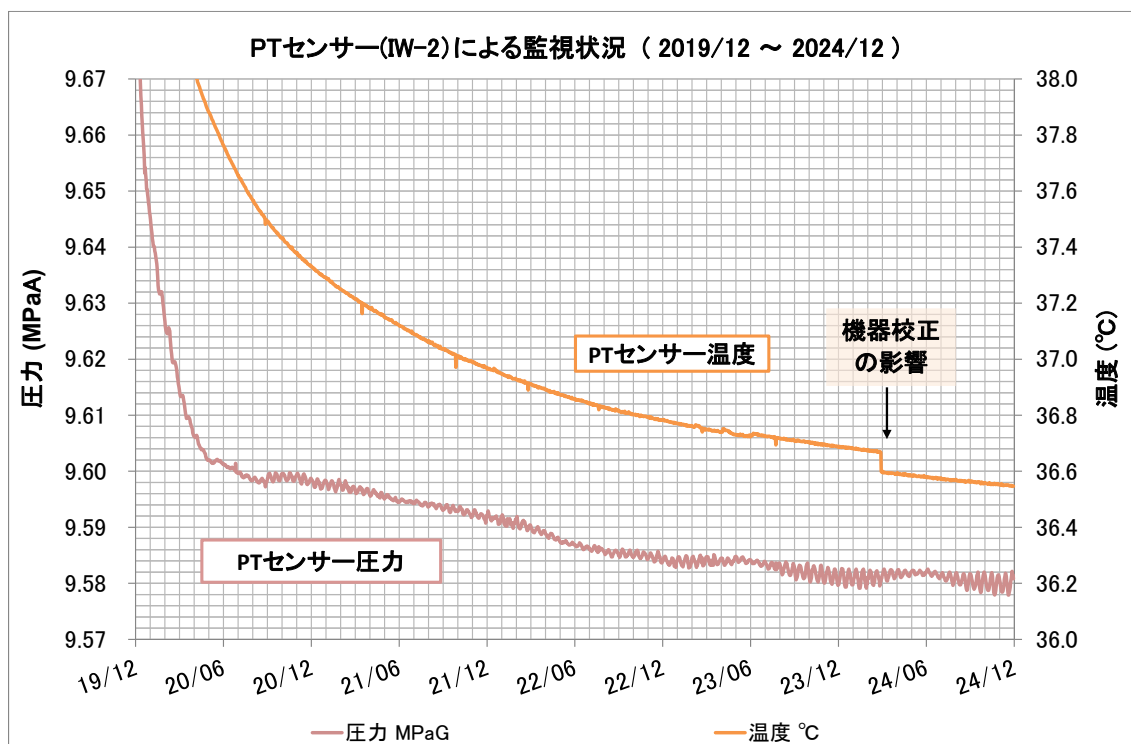


図 5.2-3 PT センサー深度における坑内圧力温度 (FOA17)

図 5.2-3 は毎日 0 時の PT センサー深度における坑内圧力温度をプロットしたものである。圧力は周期的な変動を繰り返しつつ長期的に低下する傾向を示しており、2023 年 6 月から 2024 年 6 月の圧力推移は圧力変化の山と谷の数を数えると 25 から 26 サイクルあり、詳細は適切な解析手法で分析する必要があるものの潮汐現象の影響を受けている様子がうかがえる。気象庁の HP で苫小牧東港の 1 時間ごとの潮位記録が公開されているため、参考情報としてまとめたものを図 5.2-4 に示す。

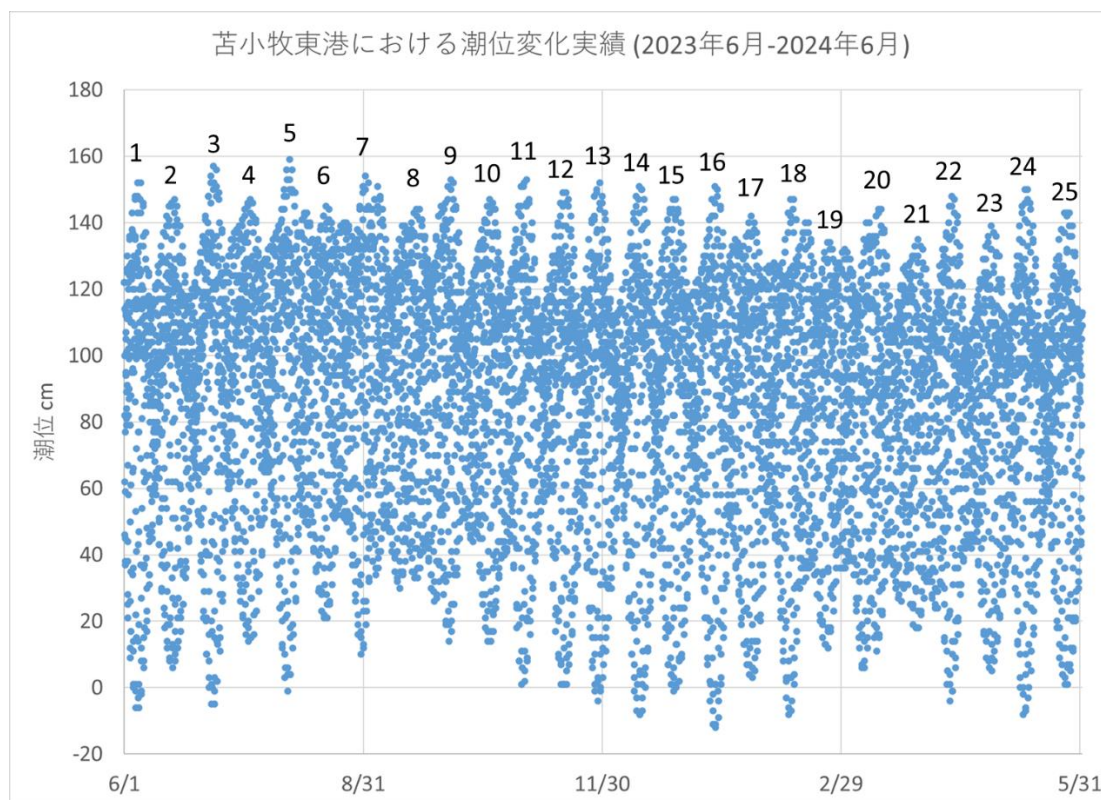


図 5.2-4 苫小牧東港における潮位変化実績

地下深部で潮汐現象の影響が地表と同じようにあるかは個別のスタディが必要であるが、2 m 程度の潮位は水頭として考えると 20 kPa 程度に相当するため、数 kPa から 10 kPa 程度の水準で坑底圧力に影響を与えている可能性は十分にあると考えられる。

同じように、一般的な圧力解析では織り込まれていない現象としては、地表の気象状況等に左右される坑内の微妙な温度変化や、CO₂ が地層水に溶解することによる圧力分布の変化、CO₂ 飽和率分布の変化に伴う毛管圧力を加味した圧力分布の変化等が挙げられる。2020 年度評価や 2022 年度評価においてはこれらの現象の影響の規模感等が概念的に検討されているが、可能性の議論の範疇に留まっており結論は出ておらず、2024 年度評価においても同様の状況であると考えられる。

これらの事象の影響を追究するには、同様の規模の坑底圧力の変化を引き起こす可能性がある物理現象についてモデル化しつつ実績値と比較していくことが必要であり、測定面においては端液面や仕上げ区間周辺の圧力温度の測定データが重要となるため、今後の圧入井においてはそれらを測定可能な仕上げとすることを推奨する。

5.2.4 苫小牧 IW-2 フォールオフ解析のまとめ

FOA17 についてロガーログプロットを作成し、圧力変化と圧力デリバティブの実測値と

予測値の比較を行った。新たに取得されたデータはおよそ 35,000 時間から 44,000 時間にかけてのデータであり、更新されたログログプロットからも密閉後 8,000 時間辺りまでは高傾斜井特有の圧力デリバティブの変化やショックフロント、定圧境界の影響、といった貯留層挙動を示唆するデータと考えられる特徴が確認された。一方、それ以降については圧力デリバティブの傾きは 1 を超えて増加しているが、過年度の報告書図でも述べられているように必ずしも貯留層内の流れの形態変化や貯留層性状に起因するものではなく、管内のわずかな温度変化や坑井周辺の飽和率の変化、潮汐の影響を受けている可能性がある。また、2023 年 6 月から 2024 年 6 月の PT センサー圧力は苫小牧東港の潮位変化と似た様な周期性を示していることを確認した。

坑底圧は年間数 kPa から 10 kPa 程度と初期圧に向かって非常に緩やかな低下傾向を示しつつ、短期的には潮汐によるものと考えられる数 kPa 程度の周期的な変動を伴っている。潮汐現象のモデル化や PT センサー以深から仕上げ区間にかけての圧力温度の測定等により、潮汐の影響を除外して貯留層性状を解析できる可能性について今後検討を行う。

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(2023)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

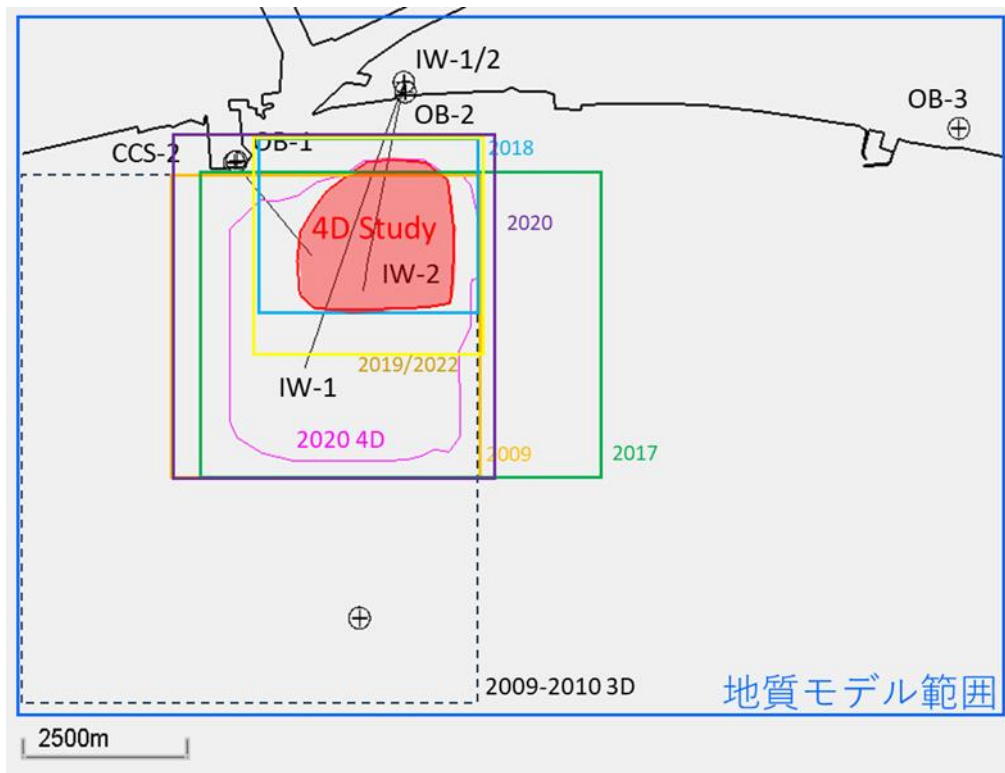


図 5.3-1 調査対象範囲

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、23年度に実施された「2023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C

CCUS大規模実証試験「繰り返し弾性波探査を用いた貯留層モニタリング手法の高精度化のための基礎資料作成業務」データ処理作業」(以下、「2023年度処理」と称する。)により作成された弾性波探査データを使用した。

2023年度処理のデータ処理範囲を図5.3-1に示し、使用したデータの一覧を表5.3-1に示す。2023年度データ処理では、取得年度ごとにデータ取得範囲全域でデータ処理を実施した通常処理と、4D応答の抽出を目的としたタイムラプス処理が実施された。図5.3-2に通常処理記録の例を示す。通常処理記録は取得年度に応じてデータ範囲が異なり、取得年度によっては広域な地質構造解釈が可能である。図5.3-3にタイムラプス処理記録の例を示す。タイムラプス処理記録は、4D応答抽出の最適化を目的としているため、データ範囲がCO₂圧入に伴う4D応答の出現が予想されるIW-2周辺に限定される(図5.3-1に示す赤枠)。図5.3-4にタイムラプス処理における各年のベースライン記録とモニター記録の差分記録の例を示す。マゼンタ色および緑色の坑井マーカースはそれぞれ萌別層泥岩基底、SB3に相当し、両坑井マーカースに挟まれた区間が萌別層貯留層に相当する。図5.3-4に示す各年の差分記録には萌別層貯留層に相当する区間にCO₂の圧入に伴う弾性波4D応答が観察される等、4D応答の抽出に最適化された処理が適用されたことが確認できる。

2023年度処理では統合ベースライン記録の更新やトレース内挿処理に関する検討等、タイムラプス処理の品質向上に資する検討が実施された。本スタディでは、その検討の中で特に効果が高かったとされる5D内挿を適用したデータセットを用いて、地質モデル更新および4D応答に関する検討を実施した。

5D内挿とは、インライン・クロスライン・オフセット・アジマス・時間の5次元空間において弾性波探査データを再構築することでデータ取得に起因するCMPの不規則性を軽減する手法である。トレース内挿・重複トレースの除去・ビンセンタリングを実現することで、ノイズの軽減、データ処理精度の向上、イメージングの向上等が期待される。特に、4D解析に関しては、ビンテージ間のデータ取得に起因するデータのばらつきを軽減することが期待され、4D応答抽出の精度向上に寄与する。図5.3-5の上段に2022年度処理記録の例を、下段に2023年度処理記録の例を示す。2022年度処理記録(A, B)と2023年度処理記録(E, F)を比較すると、2023年度処理記録は2022年度処理記録よりもノイズが軽減され反射波の連続性が向上している様子が観察できる。特に差分記録では(C, G)、バックグラウンドノイズが軽減され、CO₂圧入に伴う振幅異常がより鮮明に観察できる。差分記録より作成したRMS振幅図(D, H)を比較すると、CO₂圧入に関連した振幅異常がIW-2周辺に確認できるが、2023年度処理記録より作成したRMS振幅図では振幅異常域の外側の振幅変化がないと考えられるエリアのノイズが軽減され、4D応答とバックグラ

ウンドがより区別しやすくなった。5D内挿を適用することで、ビンテージ間の差が軽減され、より4D応答を解釈しやすいデータとなったと考える。

表 5.3-1 データ一覧 (2023 年)

	データ名	ビンテージ	処理
1	5Dint_cip-stk_tomakomai_2009_pzsum.sgy	2009/2010	通常
2	5Dint_cip-stk_tomakomai_2017_pzsum.sgy	2017	通常
3	5Dint_cip-stk_tomakomai_2018_pzsum.sgy	2018	通常
4	5Dint_cip-stk_tomakomai_2019_pzsum.sgy	2019	通常
5	5Dint_cip-stk_tomakomai_2020_pzsum.sgy	2020	通常
6	5Dint_cip-stk_tomakomai_2022_pzsum.sgy	2022	通常
7	5Dint_cip-stk_4d_tomakomai_0923-BALL_pzsum.sgy	Base	タイムラプス
8	5Dint_cip-stk_4d_tomakomai_0923-2017_pzsum.sgy	2017	タイムラプス
9	5Dint_cip-stk_4d_tomakomai_0923-2018_pzsum.sgy	2018	タイムラプス
10	5Dint_cip-stk_4d_tomakomai_0923-2019_pzsum.sgy	2019	タイムラプス
11	5Dint_cip-stk_4d_tomakomai_0923-2020_pzsum.sgy	2020	タイムラプス
12	5Dint_cip-stk_4d_tomakomai_0923-2022_pzsum.sgy	2022	タイムラプス
13	5Dint_dif-stk_4d_tomakomai_BALLx2017_pzsum.sgy	2017 - Base	差分
14	5Dint_dif-stk_4d_tomakomai_BALLx2018_pzsum.sgy	2018 - Base	差分
15	5Dint_dif-stk_4d_tomakomai_BALLx2019_pzsum.sgy	2019 - Base	差分
16	5Dint_dif-stk_4d_tomakomai_BALLx2020_pzsum.sgy	2020 - Base	差分
17	5Dint_dif-stk_4d_tomakomai_BALLx2022_pzsum.sgy	2022 - Base	差分
18	5Dint_dif-stk_4d_tomakomai_2018x2019_pzsum.sgy	2019 - 2018	差分
19	5Dint_dif-stk_4d_tomakomai_2018x2020_pzsum.sgy	2020 - 2018	差分
20	5Dint_dif-stk_4d_tomakomai_2018x2022_pzsum.sgy	2022 - 2018	差分
21	5Dint_dif-stk_4d_tomakomai_2019x2020_pzsum.sgy	2020 - 2019	差分
22	5Dint_dif-stk_4d_tomakomai_2019x2022_pzsum.sgy	2022 - 2019	差分
23	5Dint_dif-stk_4d_tomakomai_2020x2022_pzsum.sgy	2022 - 2020	差分

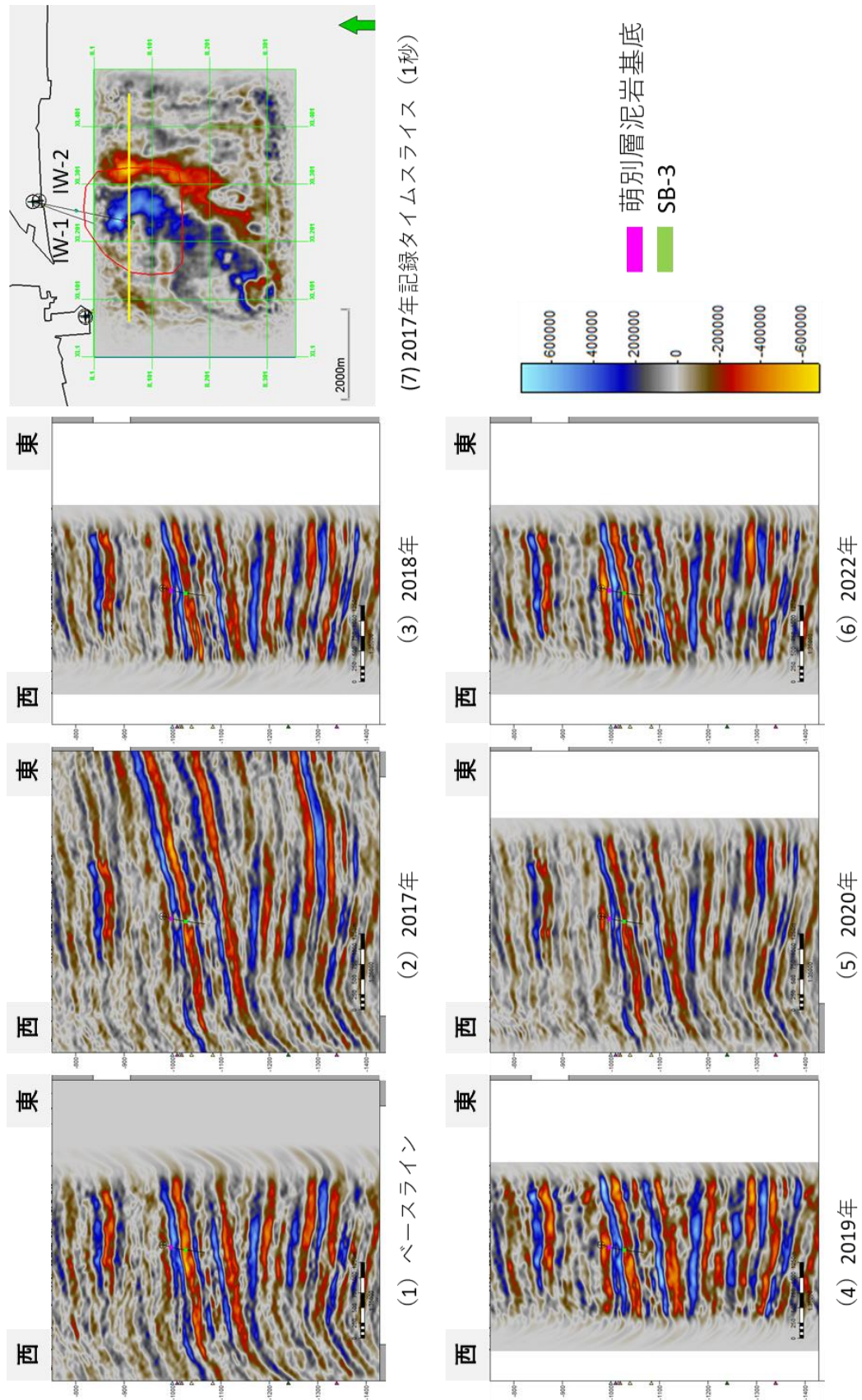


図 5.3-2 通常処理記録

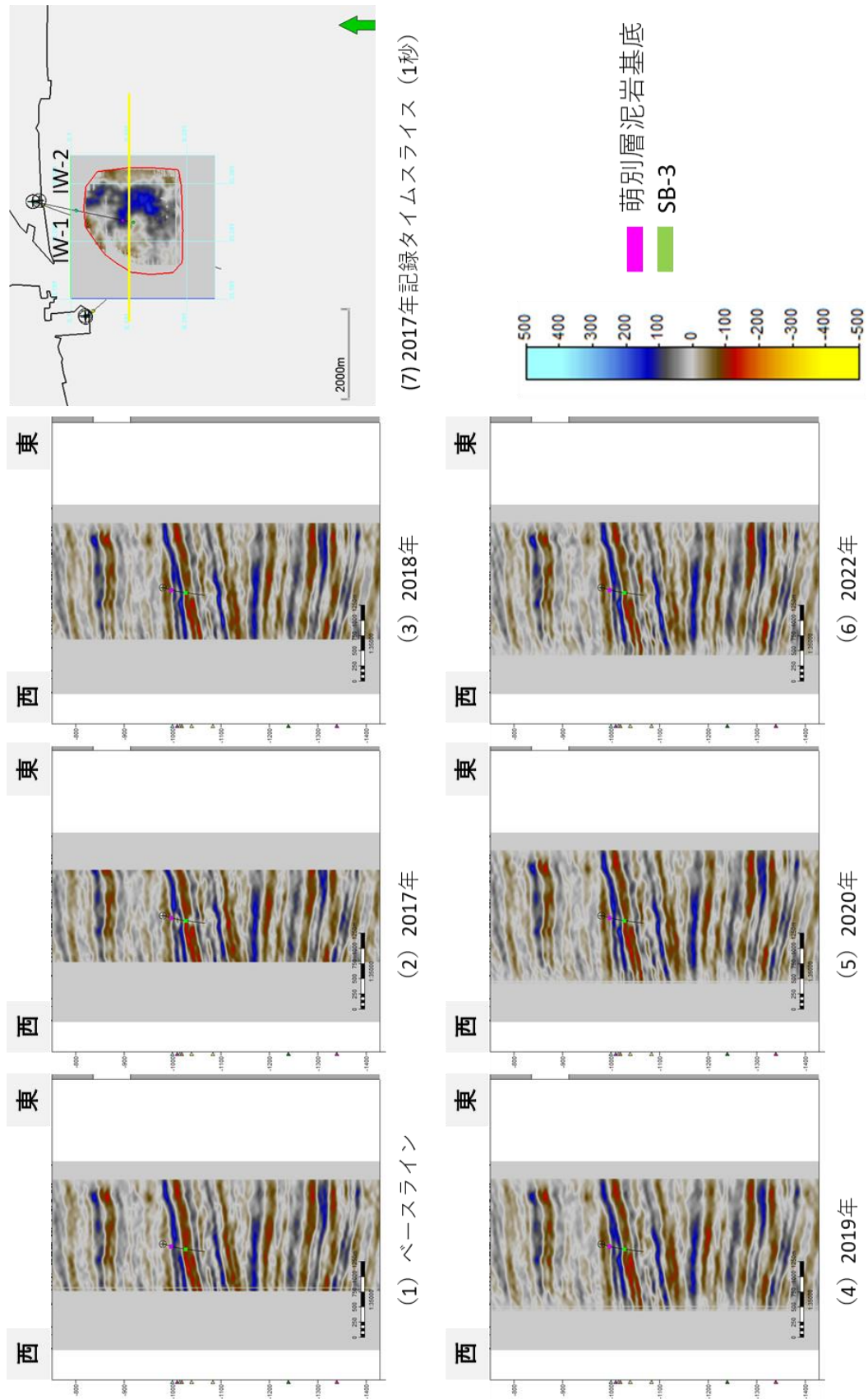


図 5.3-3 タイムラプス処理記録

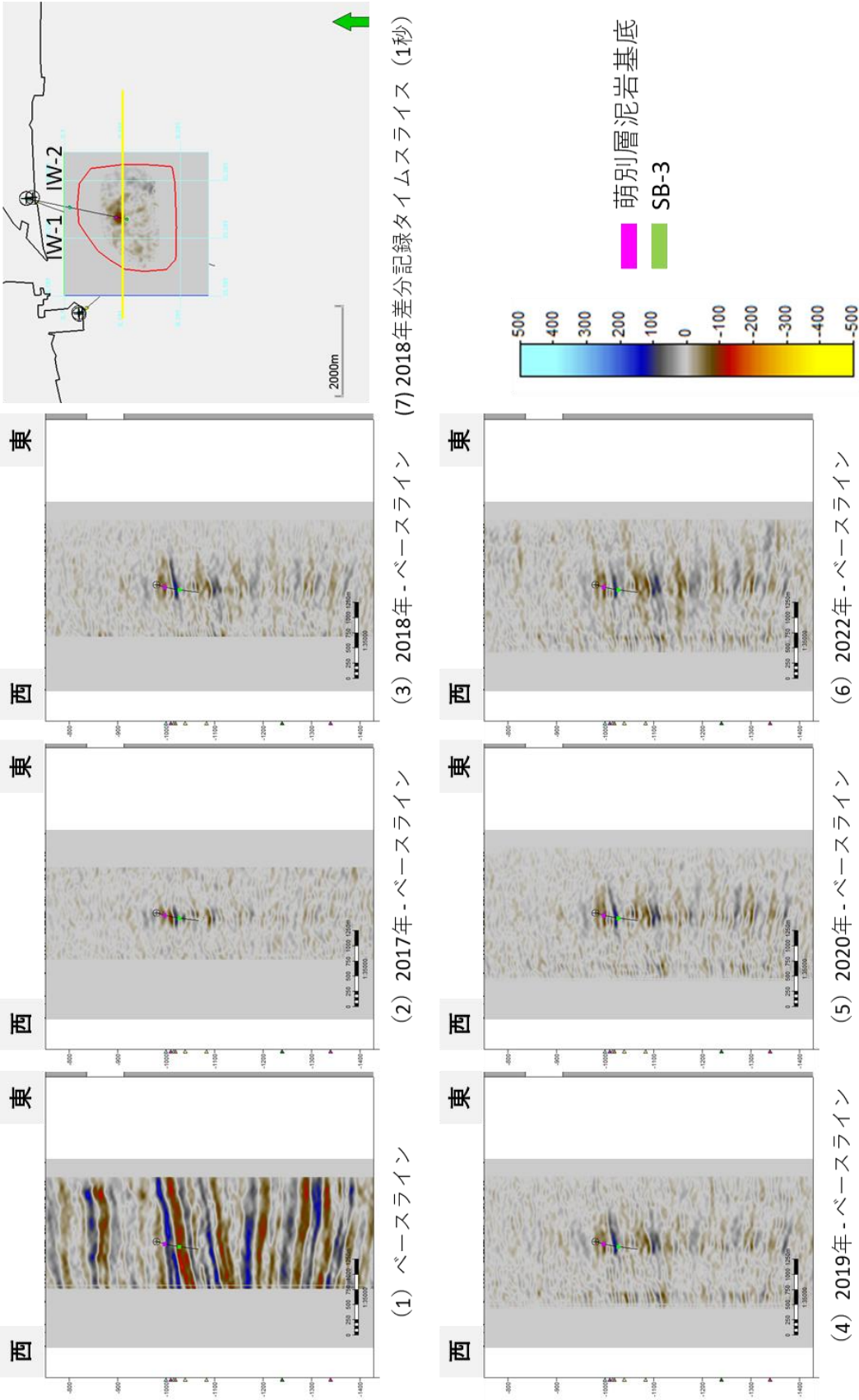


図 5.3-4 タイムラプス処理における各年の差分記録

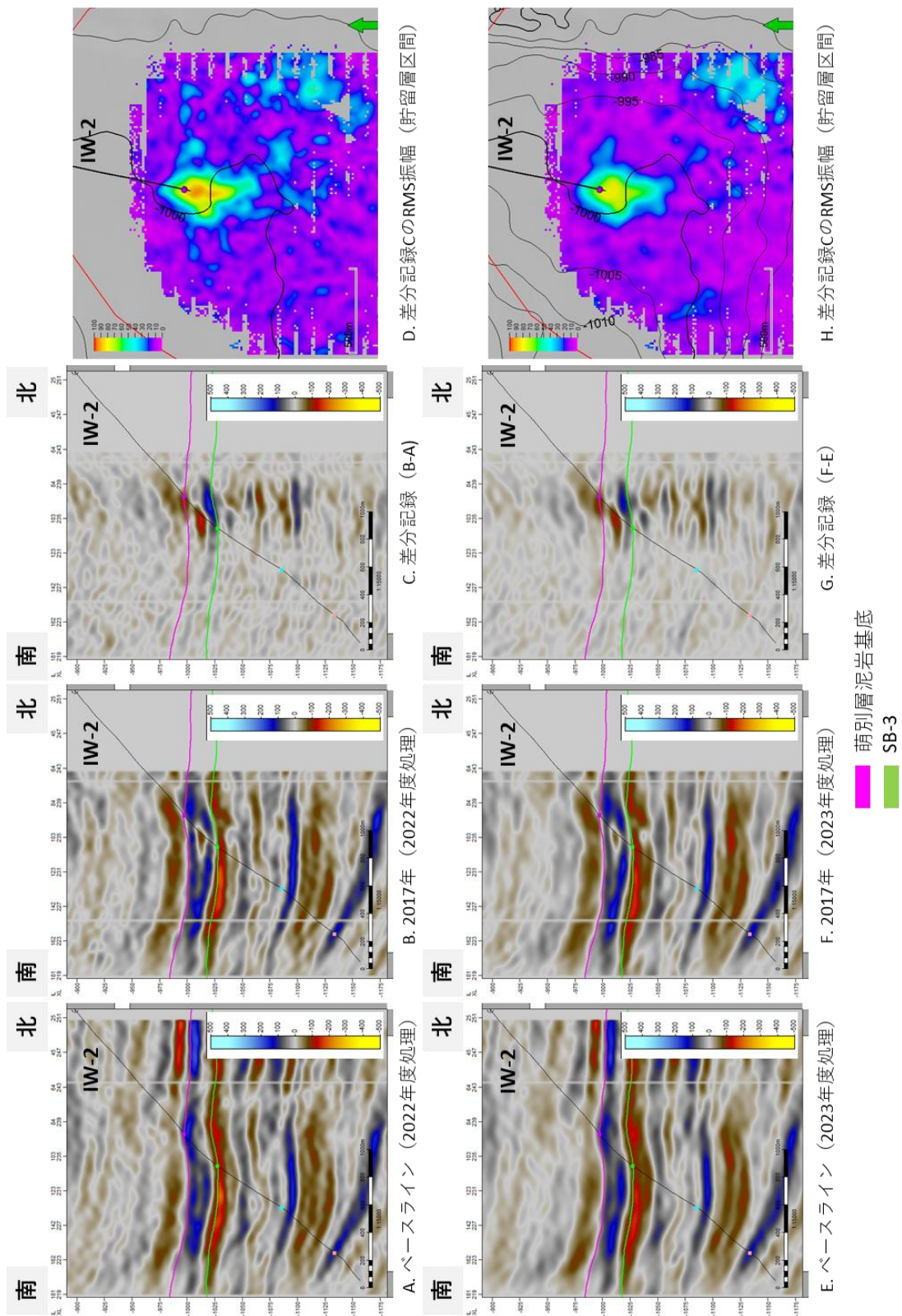


図 5.3-5 2022 年度処理記録と 2023 年度処理記録の比較

5.3.3 坑井対比 (IW-2)

新たに処理された弾性波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。対比に使用した坑井はIW-2である。合成弾性波記録は2020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)³⁾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。図5.3-6に通常処理記録のベースライン記録の坑井対比の例を、図5.3-7にタイムラプス処理記録のベースライン記録の坑井対比の例を示す。対比する坑井マーカーとホライズンは、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。通常処理記録のベースライン記録、タイムラプス処理記録のベースライン記録ともに、貯留層区間で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し、貯留層内の2枚のピークは良好に対比できた。SB-3以深についても、合成弾性波記録とベースライン記録の波形が良好に対比できた。以下に、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

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5.3-8に通常処理記録の対比断面を、図5.3-9にタイムラプス処理記録の対比断面を、図5.3-10にタイムラプス処理記録より作成した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対比断面を示す。IW-2の坑跡に沿った断面に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ピークイベントを挟む区間が萌別層貯留層に相当する。図5.3-6および図5.3-7の坑井対比図面で示したとおり、ベースライン記録の断面では合成弾性波記録と弾性波記録が良好に対比された。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に挟まれた区間に、トラフ(赤色)の反射波の出現が確認できる等、CO₂圧入に伴い合成弾性波記録とは異なる傾向を一部で示す。本スタディでは、モニター記録に対し、CO₂圧入に伴う物性変化を考慮した坑井対比は実施せず、CO₂圧入に伴う物性変化や時間遅れに関しては許容し、後述する構造解釈および4D差分解析を実施した。

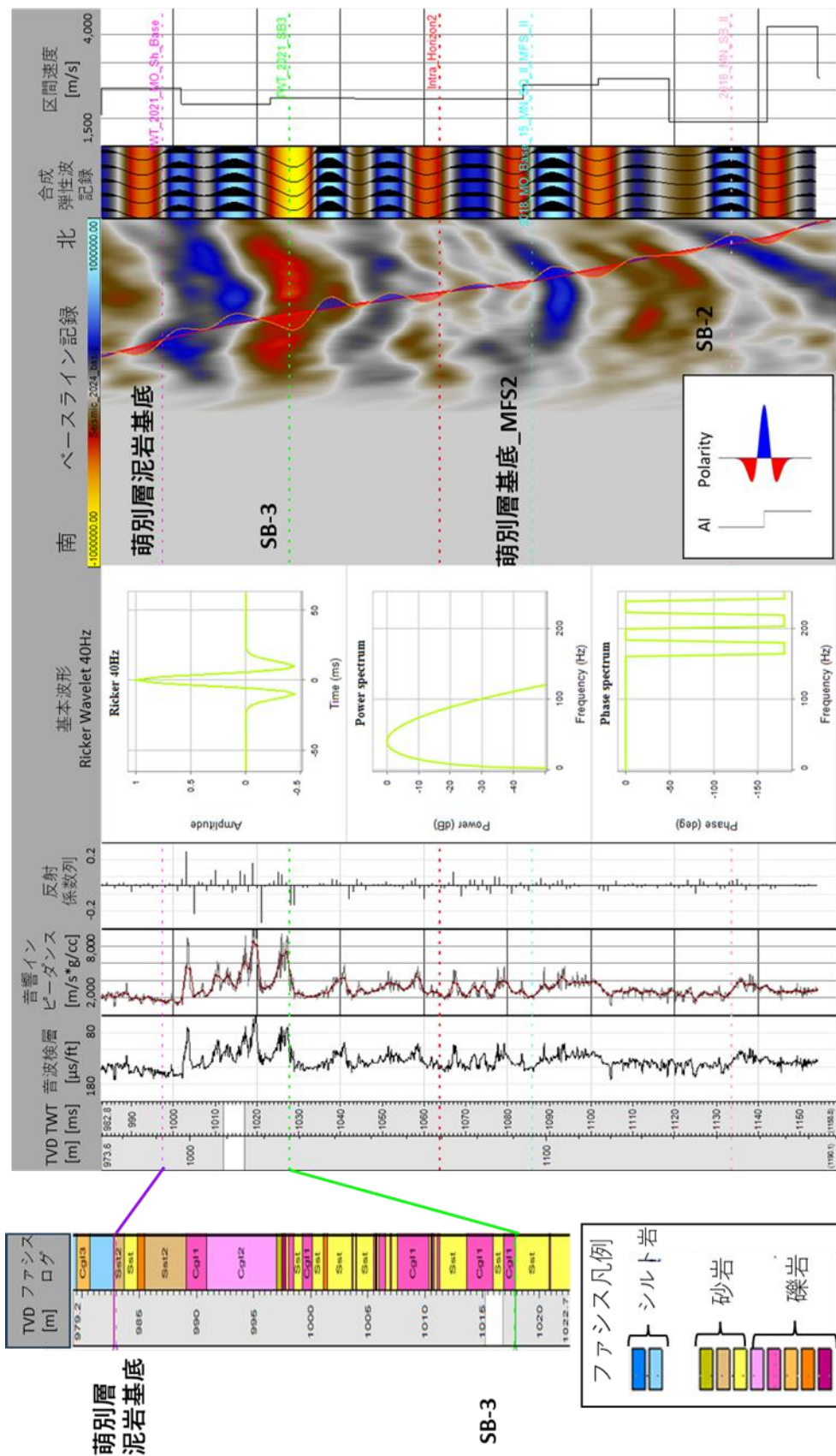


図 5.3-6 坑井一弾性波探査記録対比（通常処理記録：ベースライン）

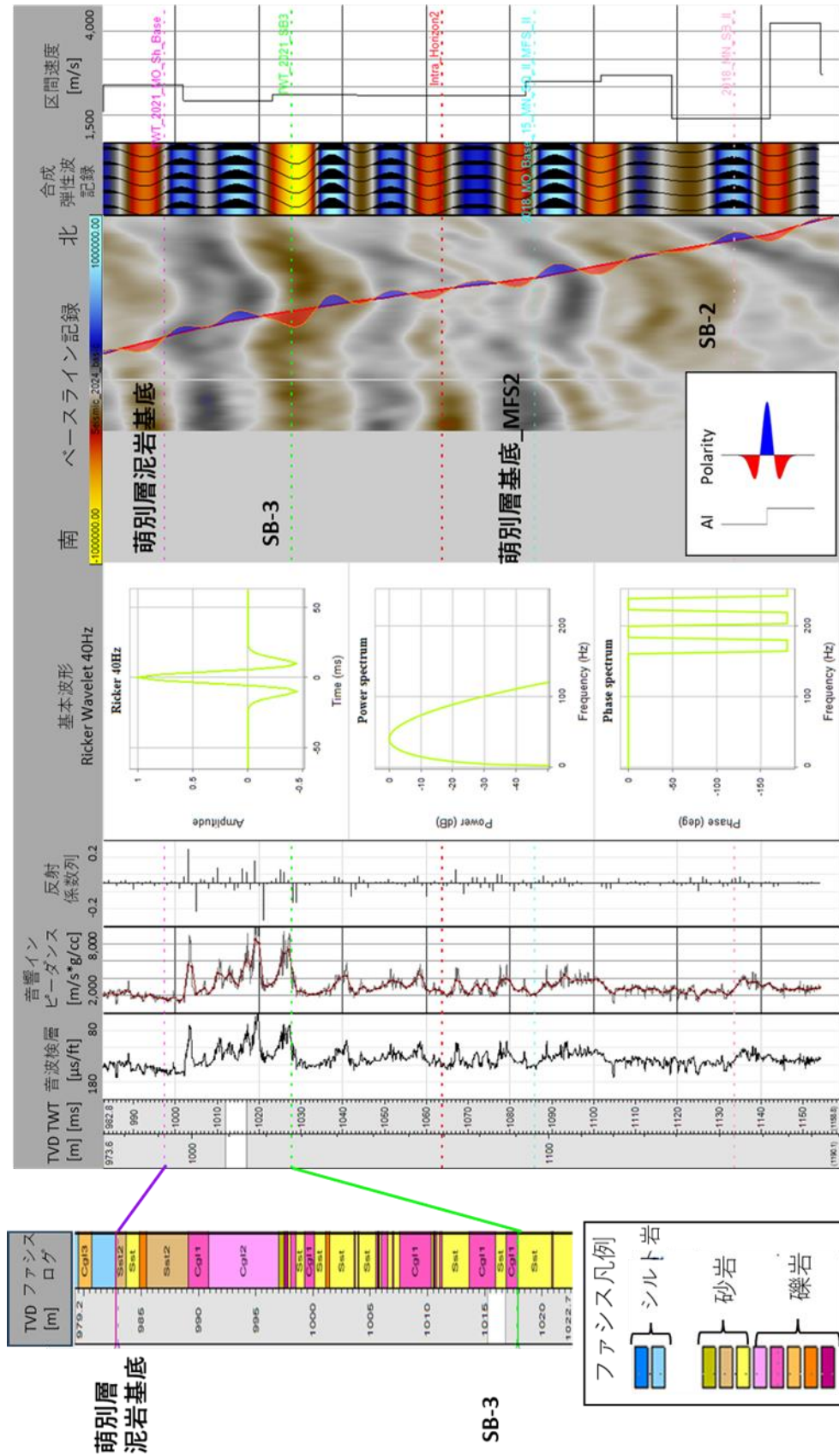


図 5.3-7 坑井一弾性波探査記録対比 (タイムラプス処理記録：ベースライン)

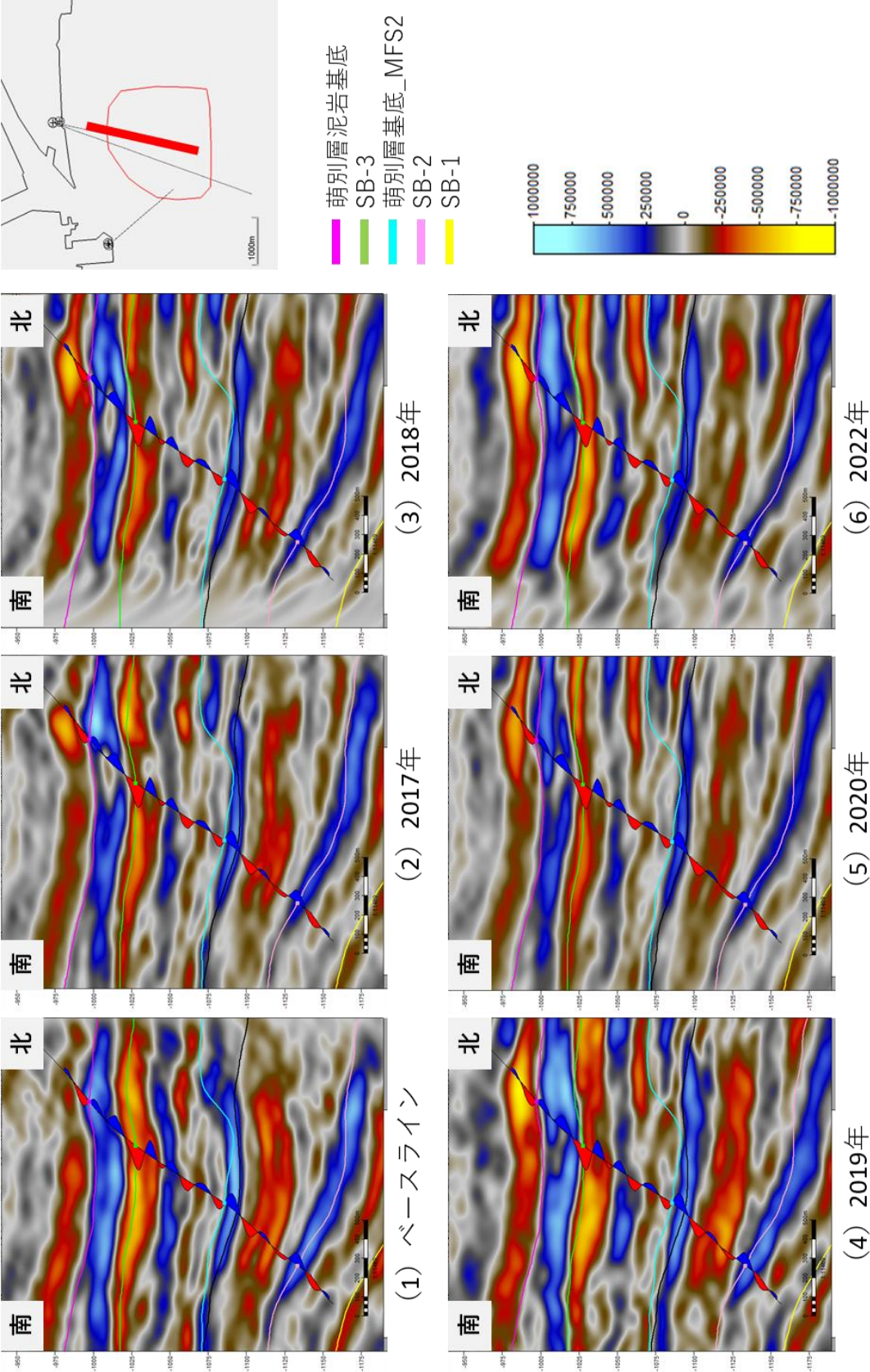


図 5.3-8 坑井一弾性波探査記録対比 (通常処理記録：モニター記録)

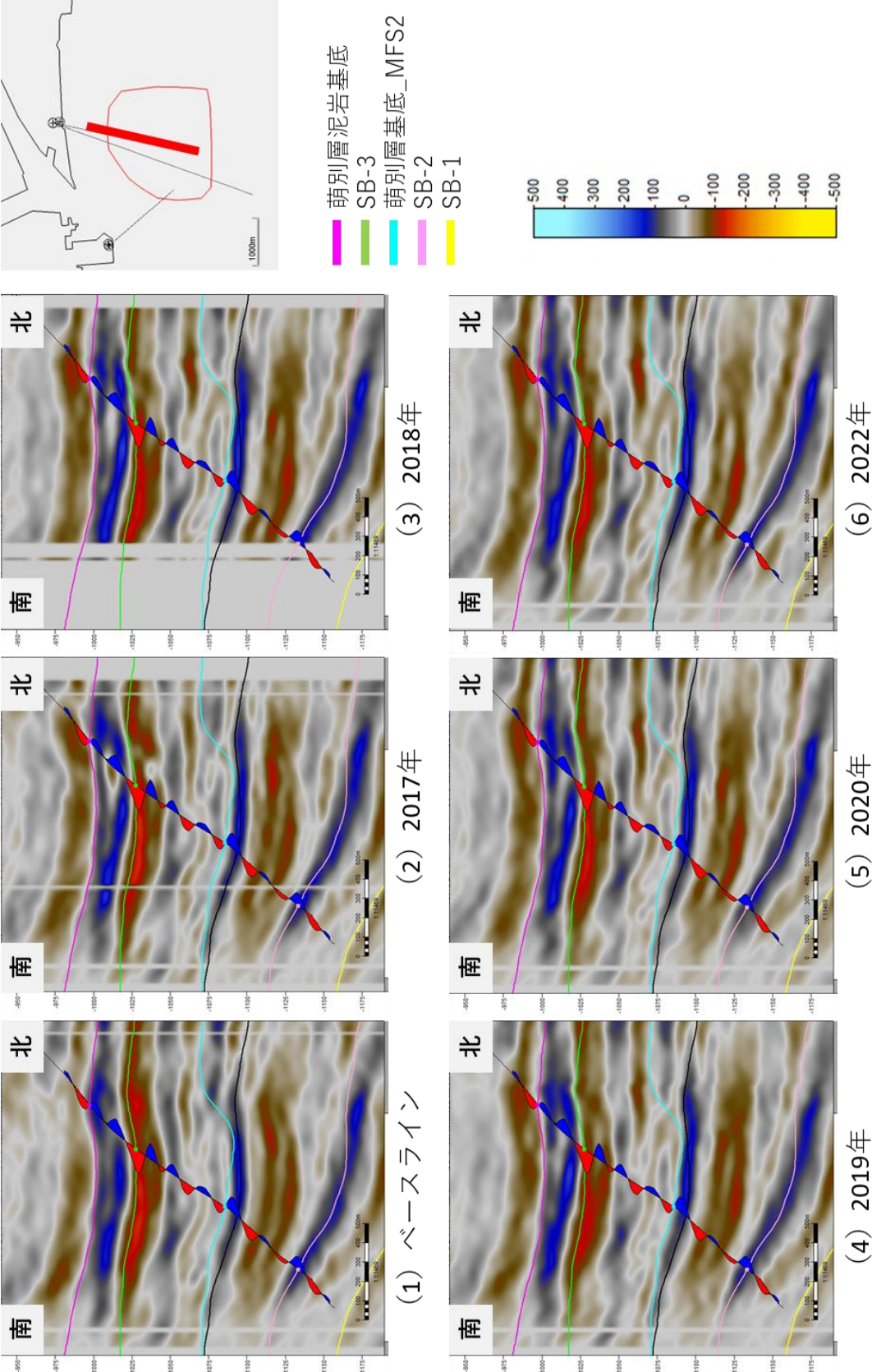


図 5.3-9 坑井一弾性波探査記録対比 (タイムラプス処理記録: モニター記録)

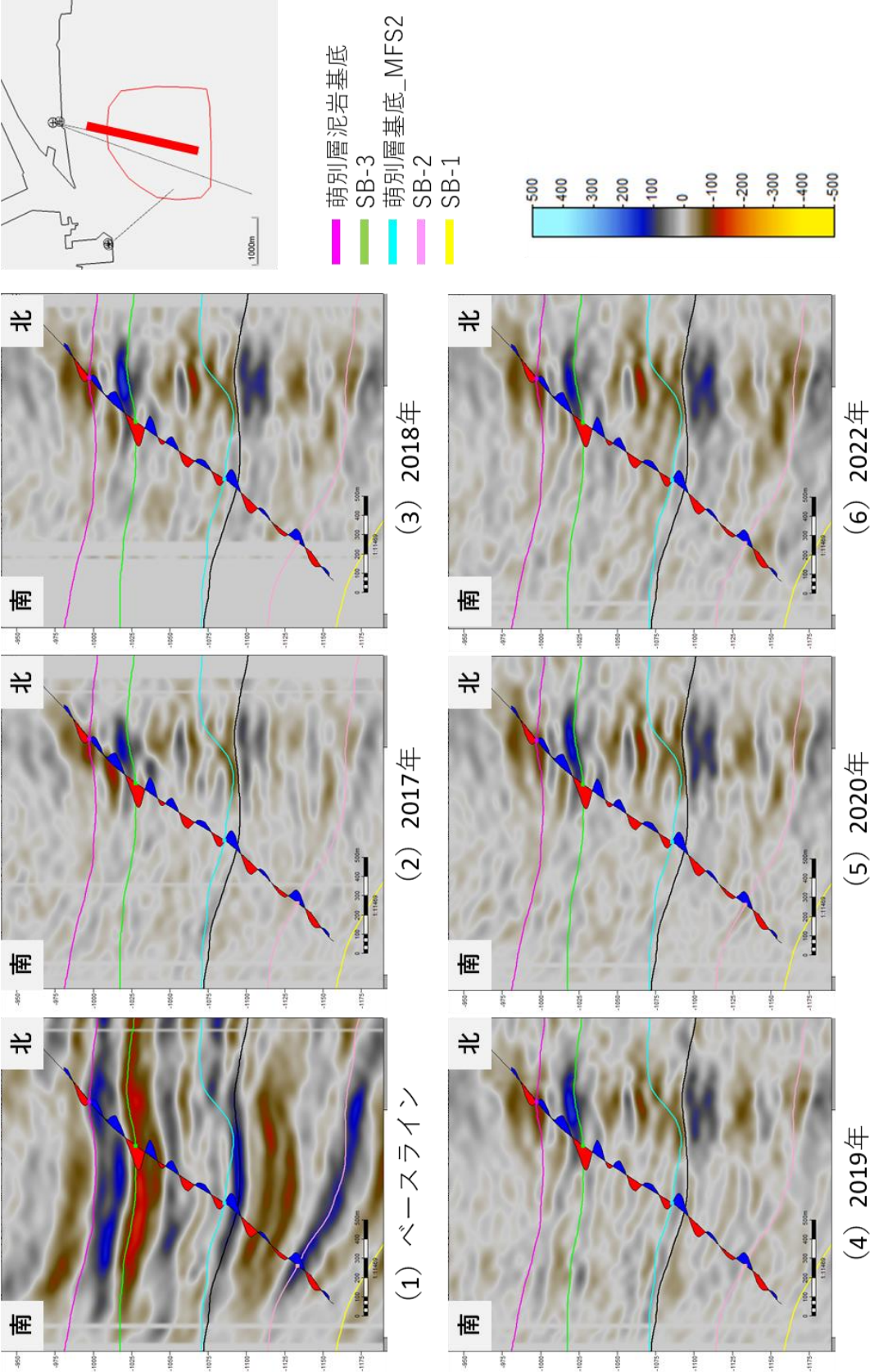


図 5.3-10 坑井一弾性波探査記録対比 (タイムラプス処理記録：差分記録)

5.3.4 構造解釈および地質モデルの更新

広域解釈が可能な通常処理記録のベースライン記録を用いて構造解釈および地質モデル更新の必要性に関して検討した。図 5.3-11 に既存の地質モデルの作成時に使用した 2020 年度処理記録と、本スタディの地質モデル更新作業に使用した 2023 年度処理記録を示す。両弾性波探査処理記録を比較すると、データ品質の向上は認められるものの、構造解釈や堆積層解析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および地質モデルを見直す必要性はないと判断し、現状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、地質モデル構築の詳細については 2022 年度以前の報告書を参照されたい。

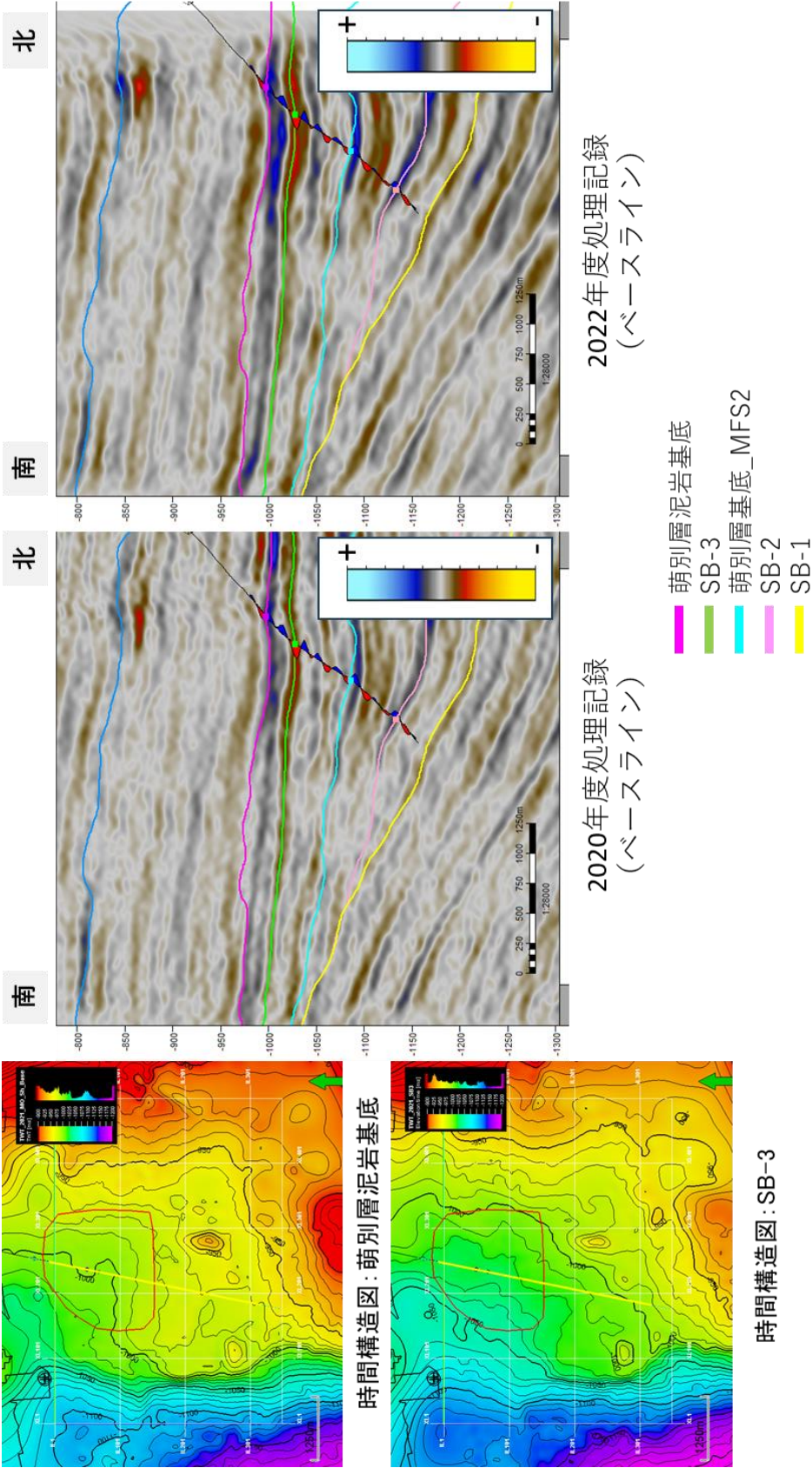


図 5.3-11 2020 年度処理記録と 2023 年度処理記録の比較

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 5.3-12 に示す。図 5.3-12 a)に IW-2 の坑跡に沿うベースライン記録と 2017 年モニター記録の差分記録断面、b)~f)に萌別層貯留層区間より計算した RMS 振幅マップを示す。2023 年度までのスタディと同様に、2017 年差分記録（累計圧入量 6.5 万 t-CO₂）では IW-2 周辺に振幅異常（暖色系ほど強い）が確認でき、2018 年差分記録（累計圧入量 21 万 t-CO₂）、2019 年差分記録（累計圧入量 30 万 t-CO₂）および 2020 年差分記録（累計圧入量 30 万 t-CO₂）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た。また、CO₂ 圧入停止後に取得された 2022 年差分記録においても、同様の振幅異常が確認できた。

各モニター記録間の差分記録の振幅異常の比較を図 5.3-13 に示す。CO₂ 圧入開始から 2017 年までの期間が最も振幅が増大している様子が確認でき、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た。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。CO₂ 圧入停止後の 2022 年差分記録では CO₂ 圧入停止前の 2020 年記録との差は小さく、圧入された CO₂ が圧入停止後も坑井周辺にとどまっていると解釈できる。

また、IW-2 の坑跡沿いの Quadrature trace の各年の差分記録断面を図 5.3-14 に、萌別層貯留層内の Quadrature trace の最小振幅マップを図 5.3-15 に示す。Quadrature trace は、弾性波探査記録を 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。各年の差分記録の Quadrature trace を観察すると、負のインピーダンス変化が萌別層貯留層内に確認でき、CO₂ 圧入に伴いインピーダンスが低下したことが示唆された。貯留層区間のインピーダンス低下域は、差分記録より作成した RMS 振幅図で観察された振幅異常域とおおむね一致し、CO₂ 圧入に伴うインピーダンス低下が振幅異常の大きな要因であると解釈できる。

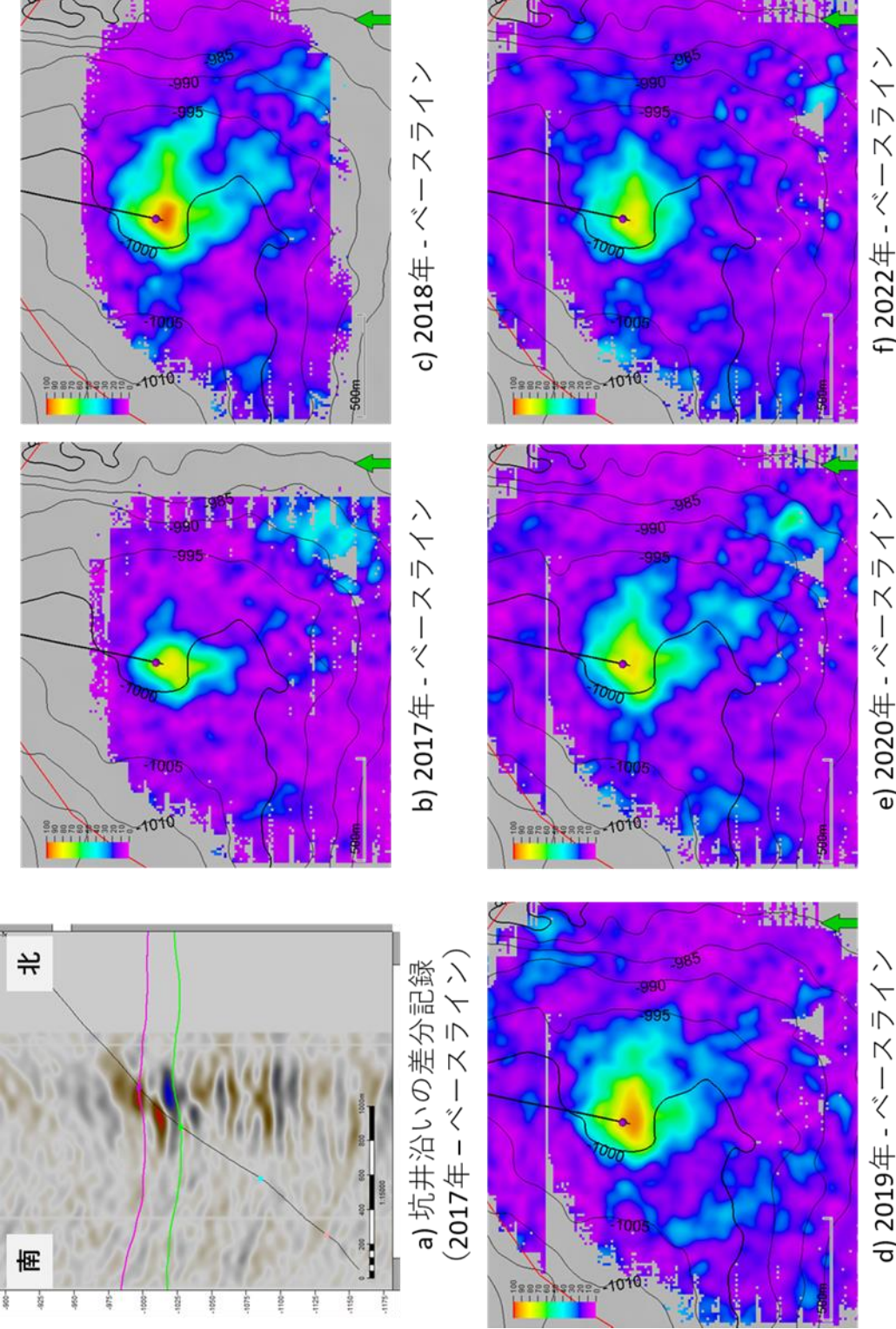


図 5.3-12 各年の差分記録（萌別層貯留層の RMS 振幅）

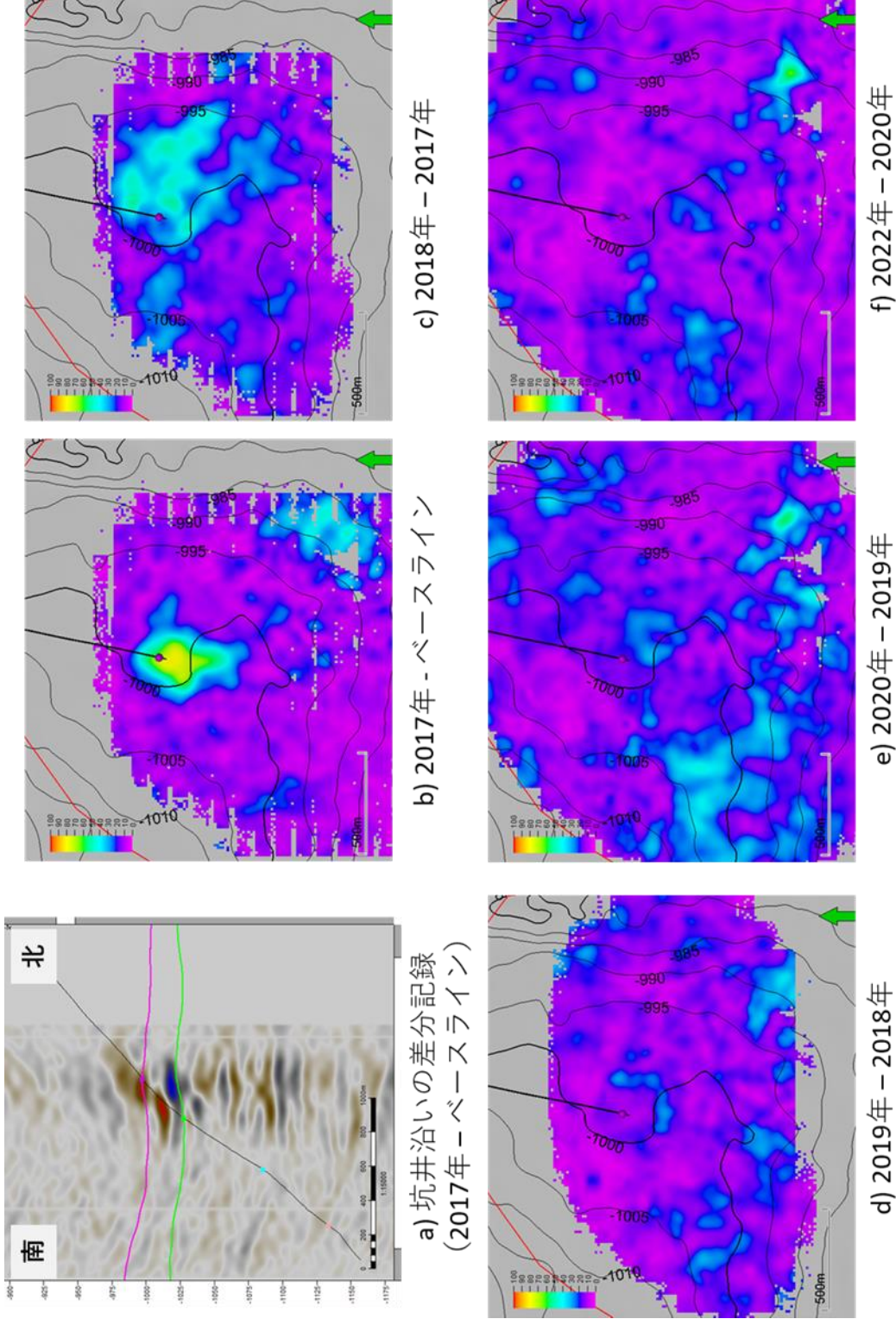


図 5.3-13 各年の差分記録間の差分（萌別層貯留層の RMS 振幅）

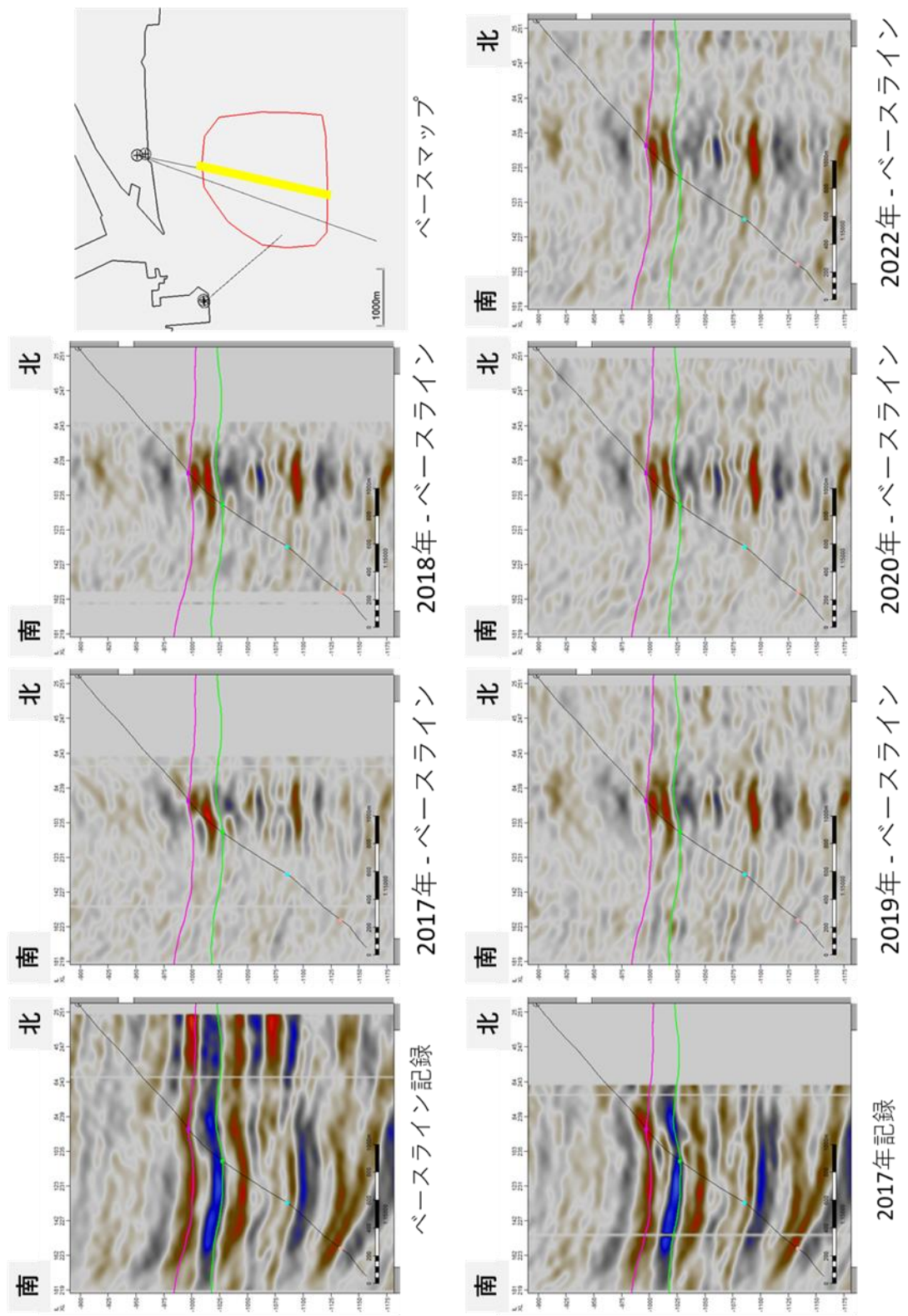


図 5.3-14 差分記録の Quadrature trace (坑井沿い)

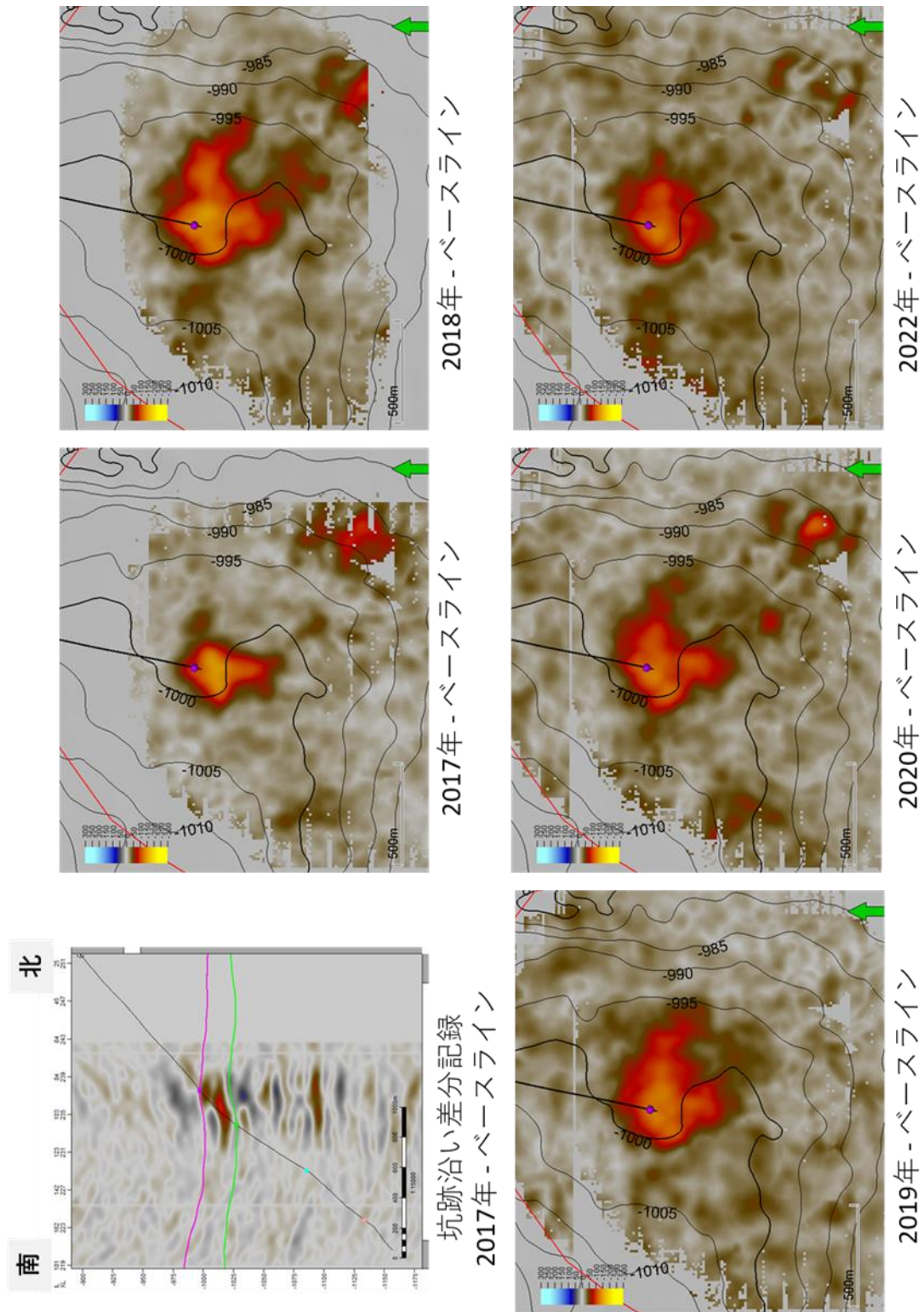


図 5.3-15 差分記録の Quadrature trace (最小振幅マップ)

(2) 萌別層泥岩

図 5.3-16 に萌別層貯留層直上の泥岩層内の振幅変化を抽出した最小振幅マップを示す。2022 年度スタディと同様に、萌別層貯留層直上の泥岩層内においても CO₂ 圧入に伴う振幅変化が観察できた。観察された振幅異常は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、もしくは、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によるインピーダンス変化と解釈できる。また、2023 年度処理記録においても泥岩層内の振幅異常は、2022 年度スタディと同様に、萌別層貯留層直上の一定深度にとどまっており、上方に拡散する様子は観察できない。

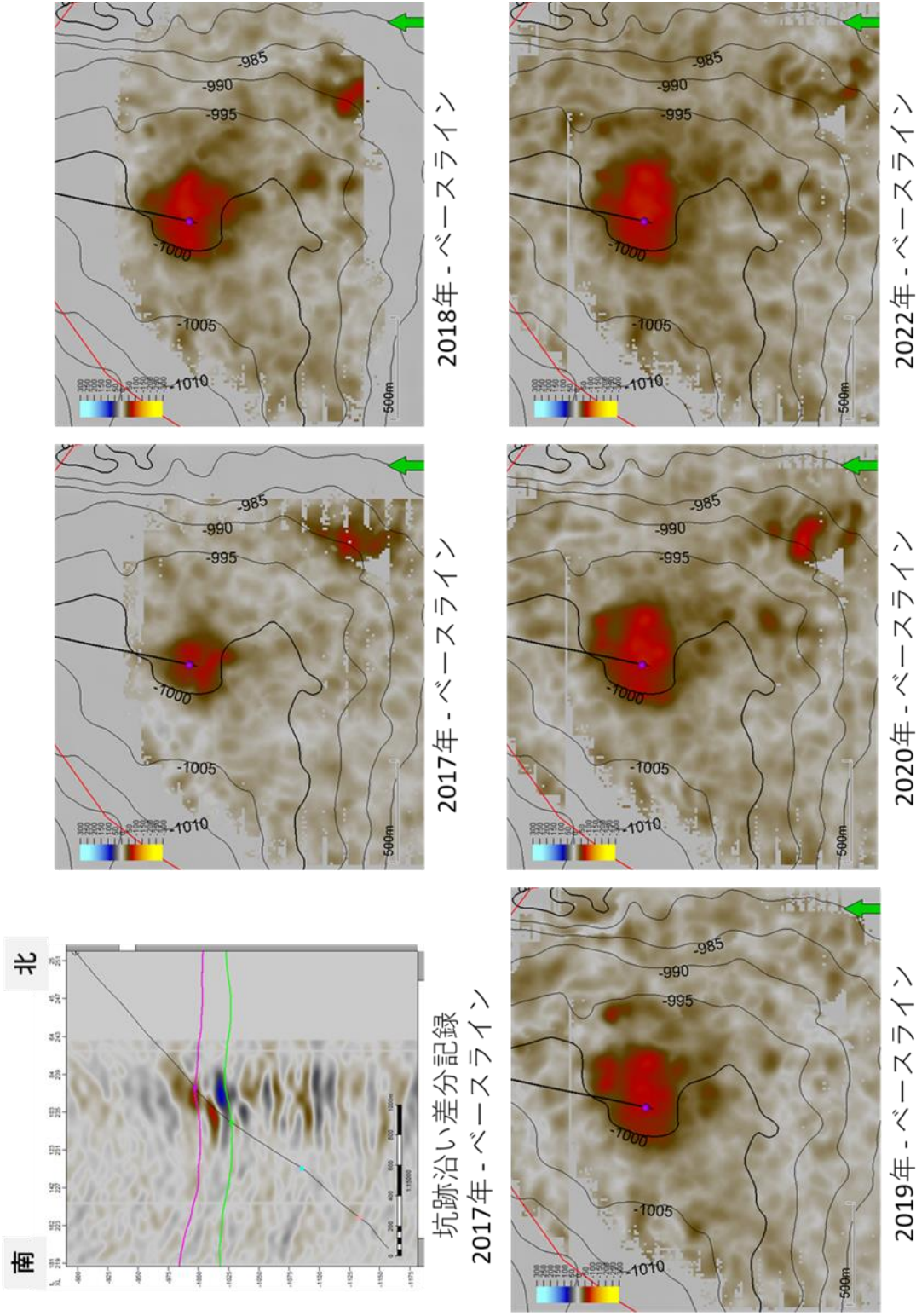


図 5.3-16 萌別層泥岩層内ホライズンの振幅変化（最小振幅マップ）

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) 弾性波探査データの品質向上による4D差分解析の精度向上

5.3.2で言及したとおり、5D内挿処理を適用した2023年度処理を利用することで、4D差分解析の精度が大きく向上した。図5.3-17に、萌別層貯留層内の4D解析に利用したQuadrature traceの最小振幅マップを示す。a)図は2022年度処理記録より作成した振幅マップ、b)図は2023年度処理記録より作成した振幅マップである。両記録ともCO₂圧入に伴う振幅異常を明瞭に捉えているが、2022年度処理記録に比べ、2023年度処理記録では振幅異常域周辺のバックグラウンドのノイズが軽減され、より明瞭に振幅異常域を解釈することができた。図5.3-18に、萌別層貯留層直上に観察された振幅異常域のマップを示す。同様に、a)図は2022年度処理記録より作成した振幅マップ、b)図は2023年度処理記録より作成した振幅マップである。泥岩層内の振幅異常マップに関しても、萌別層貯留層内の4D差分解析同様に、2023年度処理記録ではバックグラウンドノイズが大きく軽減され、より明瞭に振幅異常域を解釈することができた。

本スタディでは、従来の解釈を変更するほどの大きな更新はなかったが、弾性波探査記録の品質が向上したため、CO₂圧入域と解釈できる範囲の不確実性が大きく軽減された。今回の結果から、弾性波探査記録の精度向上が4D差分解析においては大きく寄与することが改めて示されたと思われる。

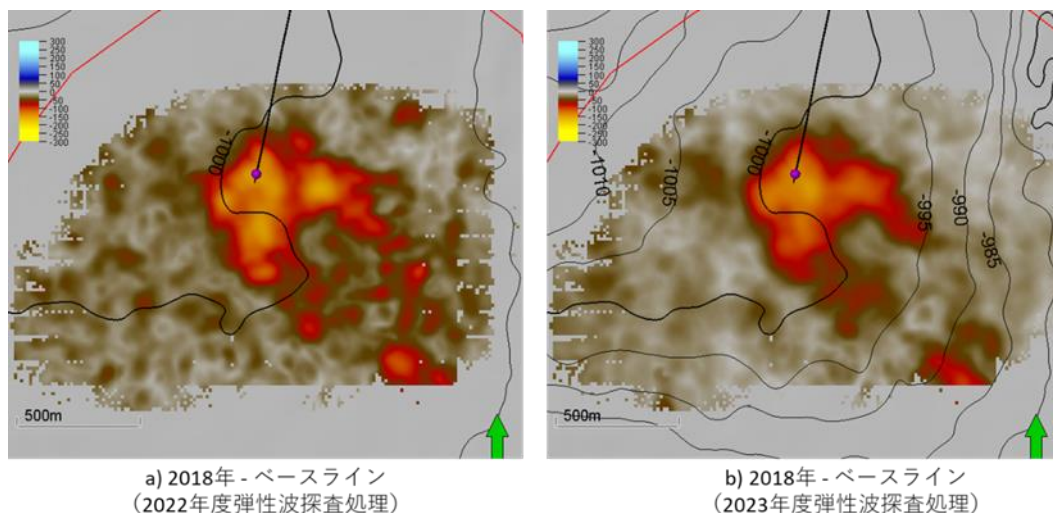


図 5.3-17 萌別層貯留層内の Quadrature trace 最小振幅マップの弾性波探査処理の比較

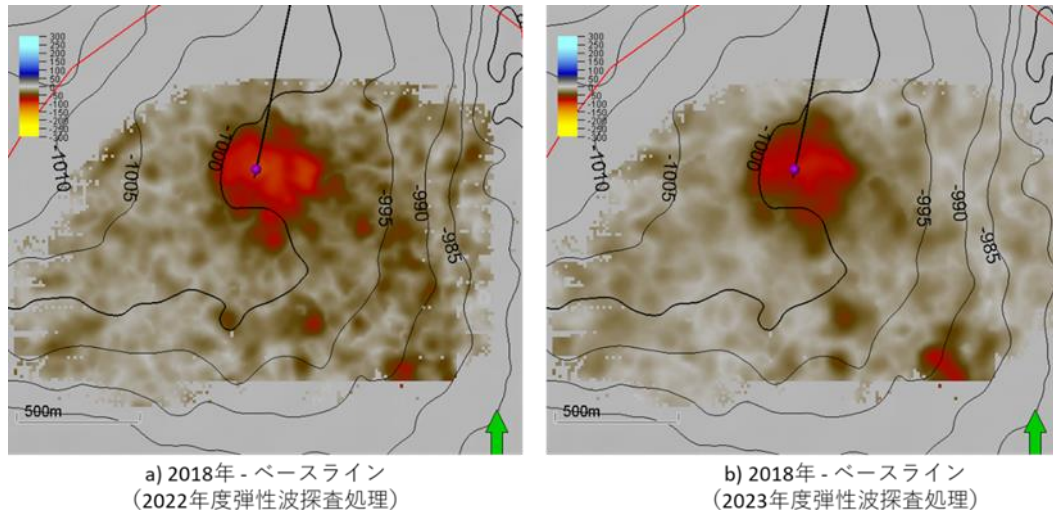


図 5.3-18 萌別層貯留層直上泥岩層内の最小振幅マップ弾性波探査処理の比較

(2) 課題

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、層厚の変化やCO₂飽和率の変化、圧力の変化等に伴う4D応答の検討が期待される。

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

本スタディでは、弾性波探査記録の品質向上が4D差分解析に対し大きく寄与することが確認されたが、貯留層の上下には物性変化に伴う時間遅れの影響やウェーブレットのサイドローブの影響が引き続き観察される。今後は、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が期待される。

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応答の検討が期待される。

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(2023 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ては、2023 年度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。検討結果については既存の解釈を大きく更新する結果ではなかったが、弾性波探査記録の品質向上に伴い、精度の高い 4D 差分解析および CO₂ 圧入域の不確実性が大きく軽減された結果が得られた。

5.4 2021 年度モデルを用いた CO₂ 貯留状況の安定性の検討

2024 年度は、2019 年 11 月の圧入停止以降における適切なモニタリング(弾性波探査)継続期間について考察を行うべく、2021 年度モデル(2021 年度の圧入可能量評価結果から抽出した P90 相当、P50 相当、P10 相当の具現像)を水平方向に 3 分割したモデルを用いて、CO₂ 飽和率分布、溶存 CO₂ 量分布および圧力変化分布の推移をより高い解像度で確認するとともに、シミュレーション結果(CO₂ 飽和率分布)と 4D 差分解析結果との比較を試行した。

5.4.1 シミュレーションモデルおよび設定条件

(1) 代表具現像

本年度使用したシミュレーションモデルのベースとなる 3 つの具現像は、2021 年度報告書に記述があるように、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、P10 相当、P50 相当、P90 相当の圧入可能量に対応する具現像であり、具現像 2、具現像 3、具現像 13 が該当する。以下では、P10 相当の具現像をモデル A、P50 相当の具現像をモデル B、P90 相当の具現像をモデル C と称す。下記条件 2~5 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~図 5.4-10 は各具現像における浸透率分布について、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)を示したものである。

条件 1 : 萌別層圧入井における仕上げ区間上端の圧力が 12.93 MPaG 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 20 m 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750 m（TVDSS）に到達する

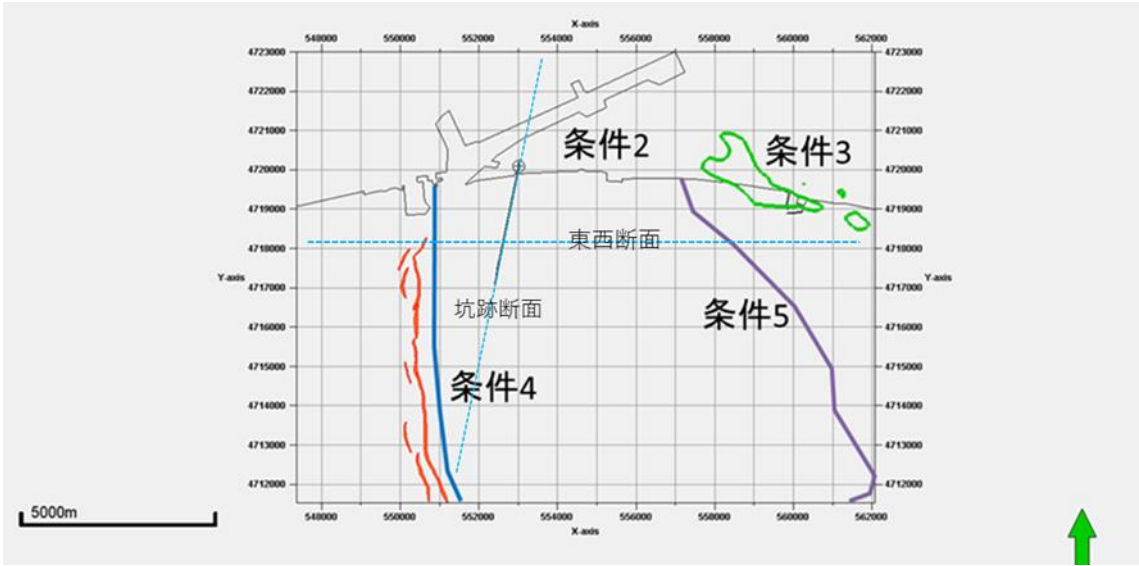


図 5.4-1 圧入可能量評価に使用する条件の範囲

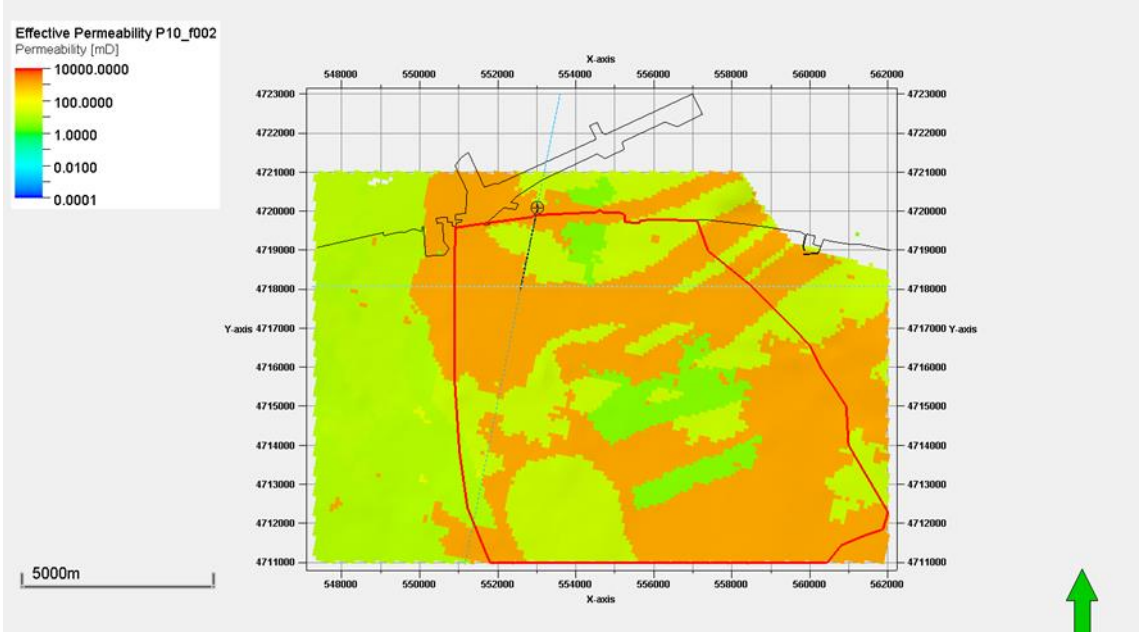


図 5.4-2 モデル A における浸透率分布（貯留層上部平面）

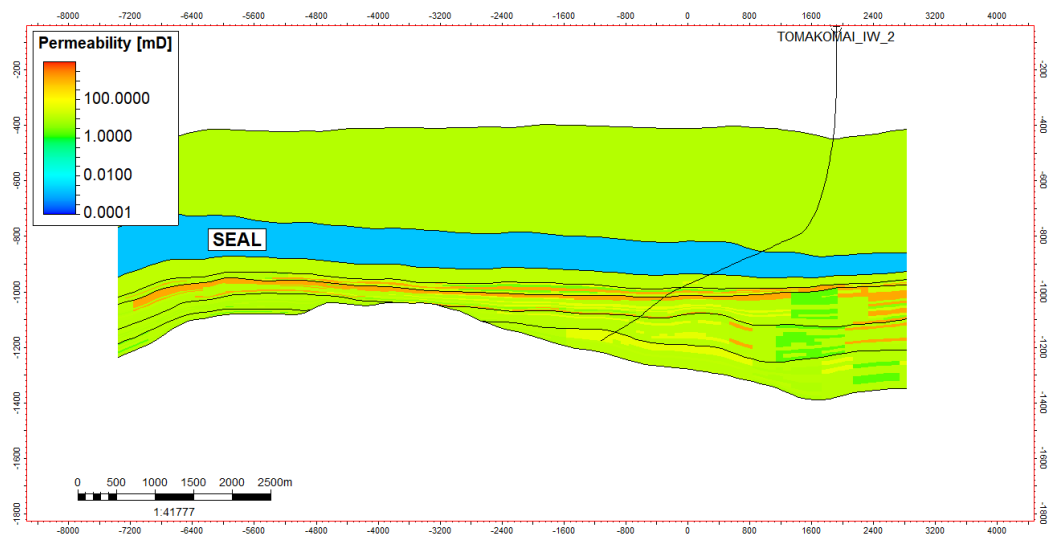


図 5.4-3 モデル A における浸透率分布 断面図（坑跡断面）

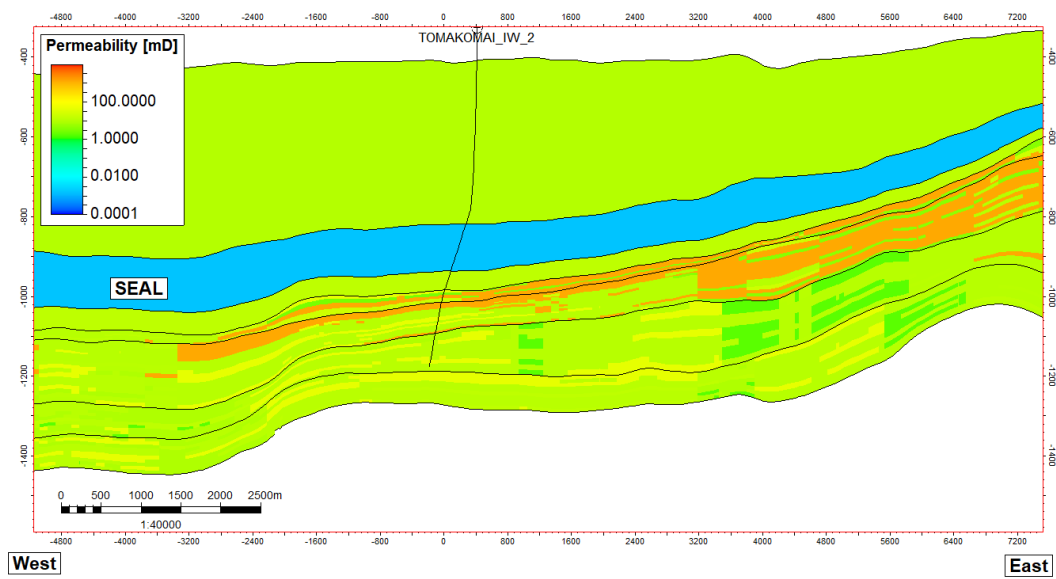


図 5.4-4 モデル A における浸透率分布 断面図（東西断面）

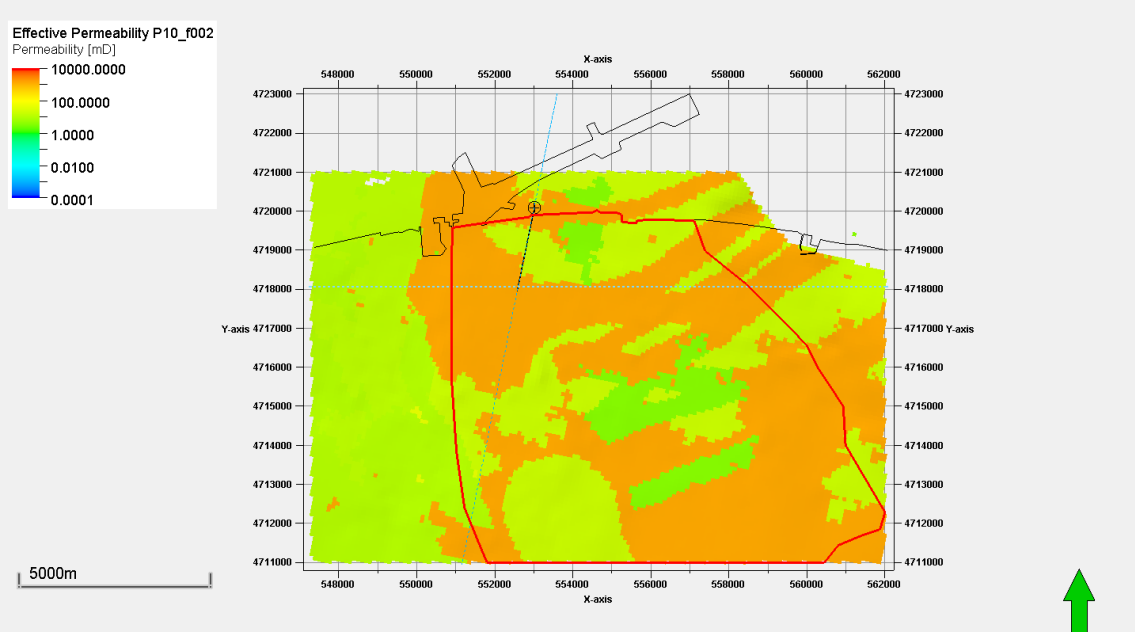


図 5.4-5 モデル B における浸透率分布 (貯留層上部平面)

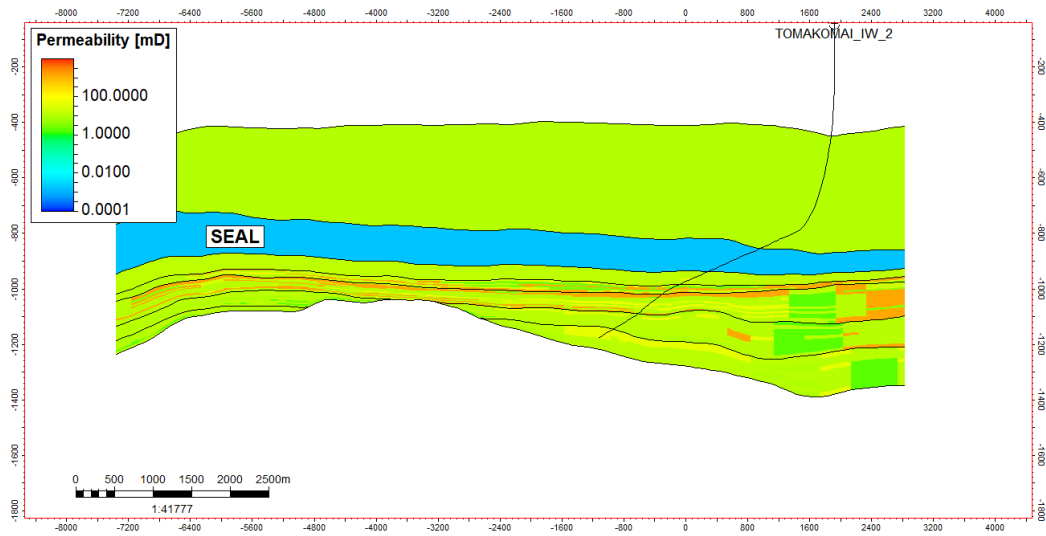


図 5.4-6 モデル B における浸透率分布 断面図 (坑跡断面)

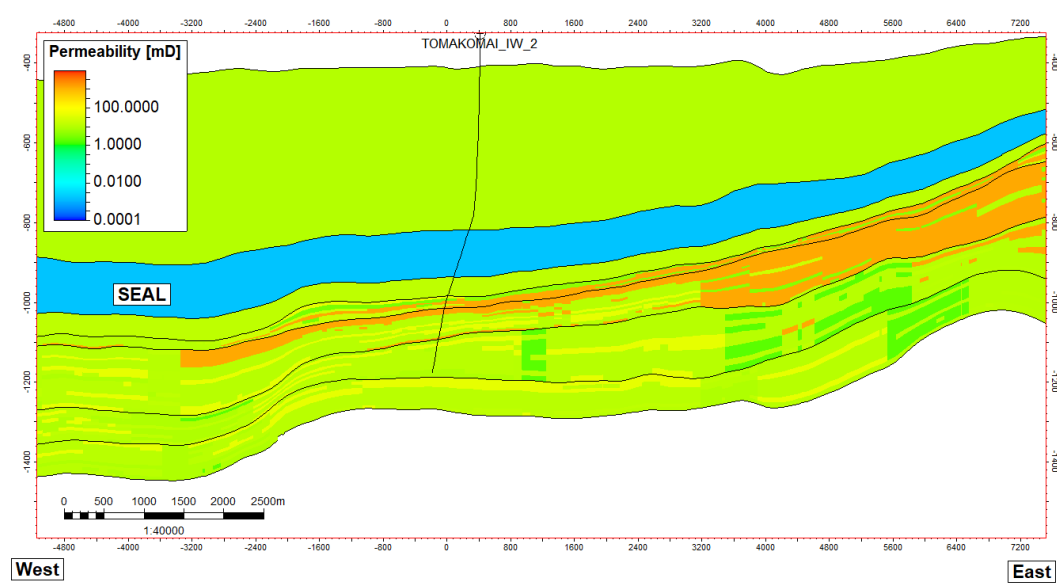


図 5.4-7 モデル B における浸透率分布 断面図（東西断面）

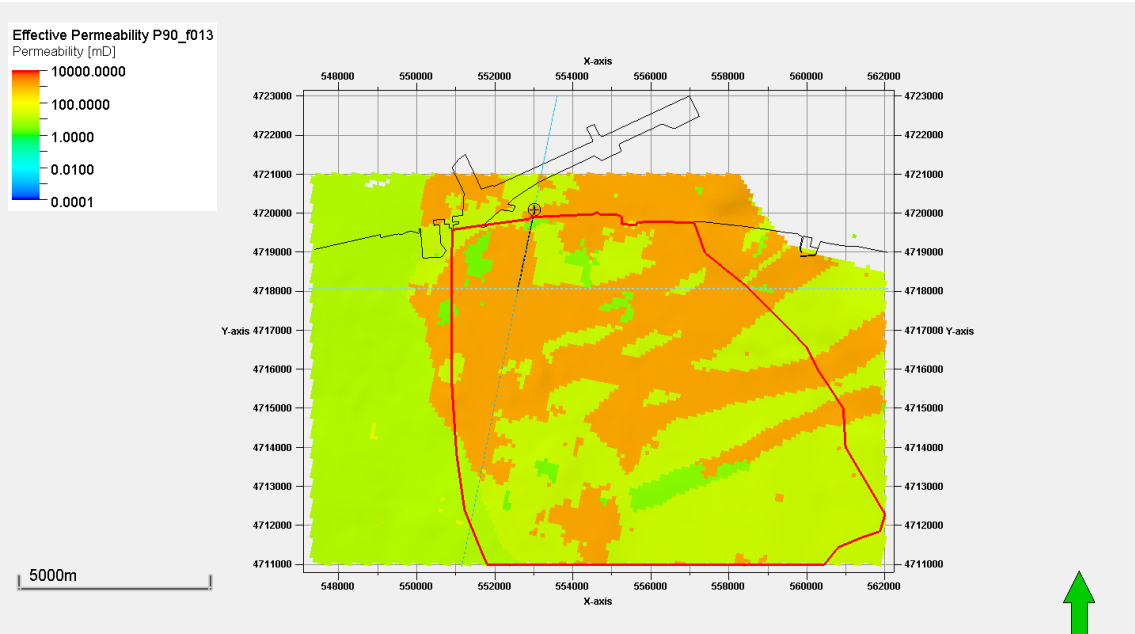


図 5.4-8 モデル C における浸透率分布 （貯留層上部平面）

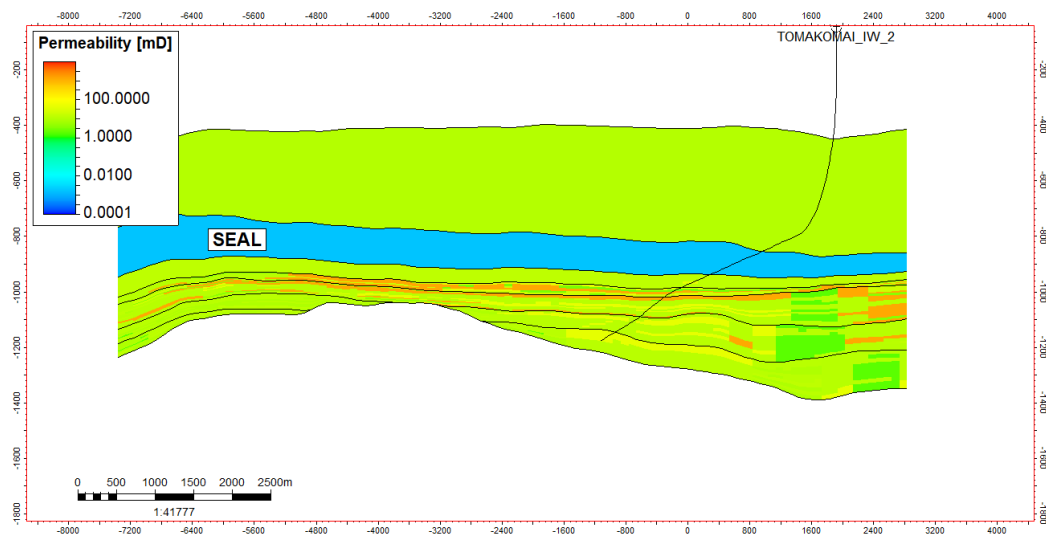


図 5.4-9 モデル C における浸透率分布 断面図（坑跡断面）

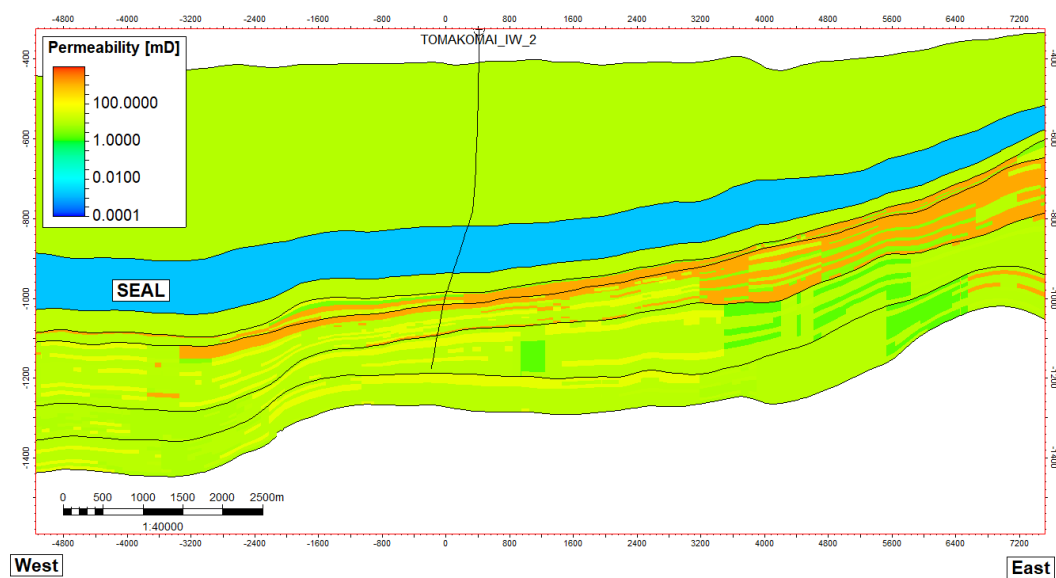


図 5.4-10 モデル C における浸透率分布 断面図（東西断面）

(2) シミュレーションモデルのグリッドサイズの変更

CO₂ 飽和率分布等の変化から CO₂ 貯留状況の安定性をより高い解像度で評価するために、2021 年度に構築されたフィールドモデル（以下、「2021 年度モデル」と称する。）を水平方向に更に 3 分割した上で、2021 年度の評価時と同じようにフィールドモデルからセクターモデルを切り出し（以下、「2024 年度モデル」と称する。）本検討でのグリッドサイズとした。

(3) 設定条件

圧入レートおよび圧入期間は全て実績どおりとし、CO₂ 飽和率、溶存 CO₂ 量および圧力変化の分布推移を確認するためにシミュレーション期間は 2100 年までとした。またパラメータ設定（貯留層圧力・温度、塩分濃度、岩石物性値）については、2021 年度報告書第 7 章 2 節と同様の設定とした。

5.4.2 シミュレーション結果

(1) 坑底圧力推移

モデル A、モデル B、モデル C について、IW-2 の仕上げ区間上端深度における坑底圧力推移を 2021 年度モデルおよび 2024 年度モデルで比較したものを図 5.4-11 から図 5.4-13 に示す。グリッドサイズの変更に伴い各具現像で坑底圧力の差が生じているものの、過年度のヒストリーマッチングにおける水準を満たしていること、また本年度は特に CO₂ 飽和率分布の推移が焦点であることを踏まえ、坑底圧力の差は許容可能と判断した。

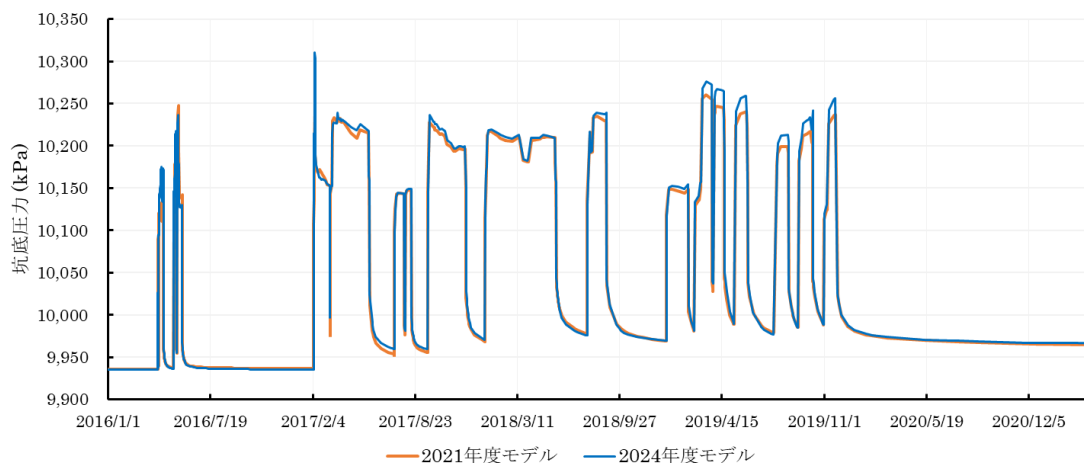


図 5.4-11 モデル A における IW-2 仕上げ区間上端圧力推移

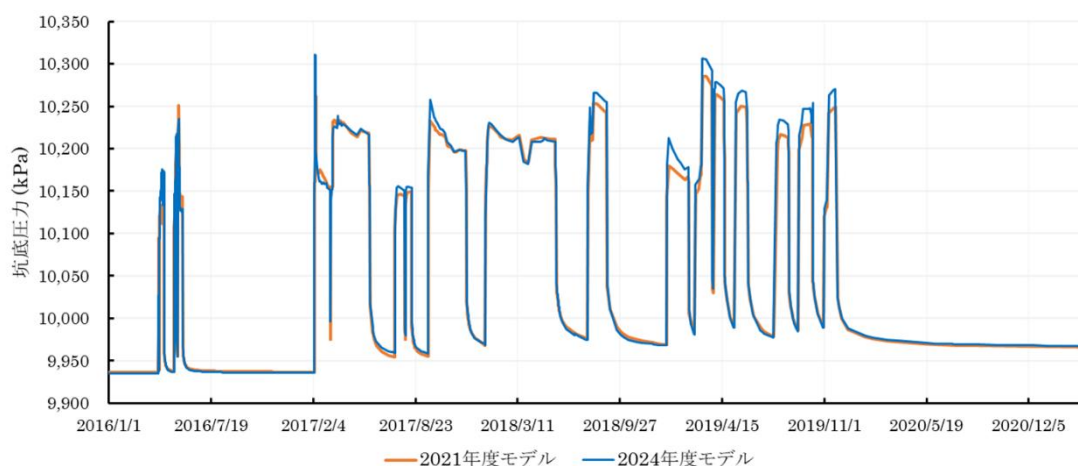


図 5.4-12 モデル B における IW-2 仕上げ区間上端圧力推移

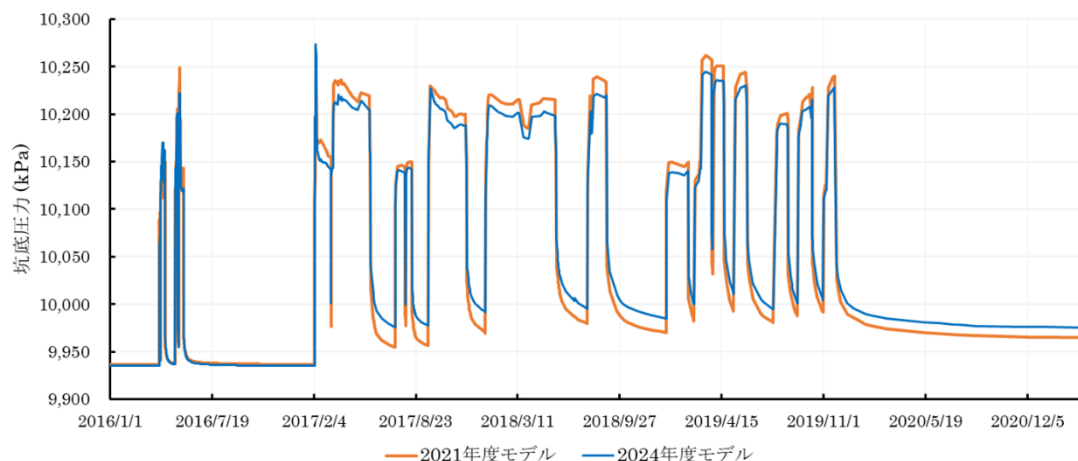


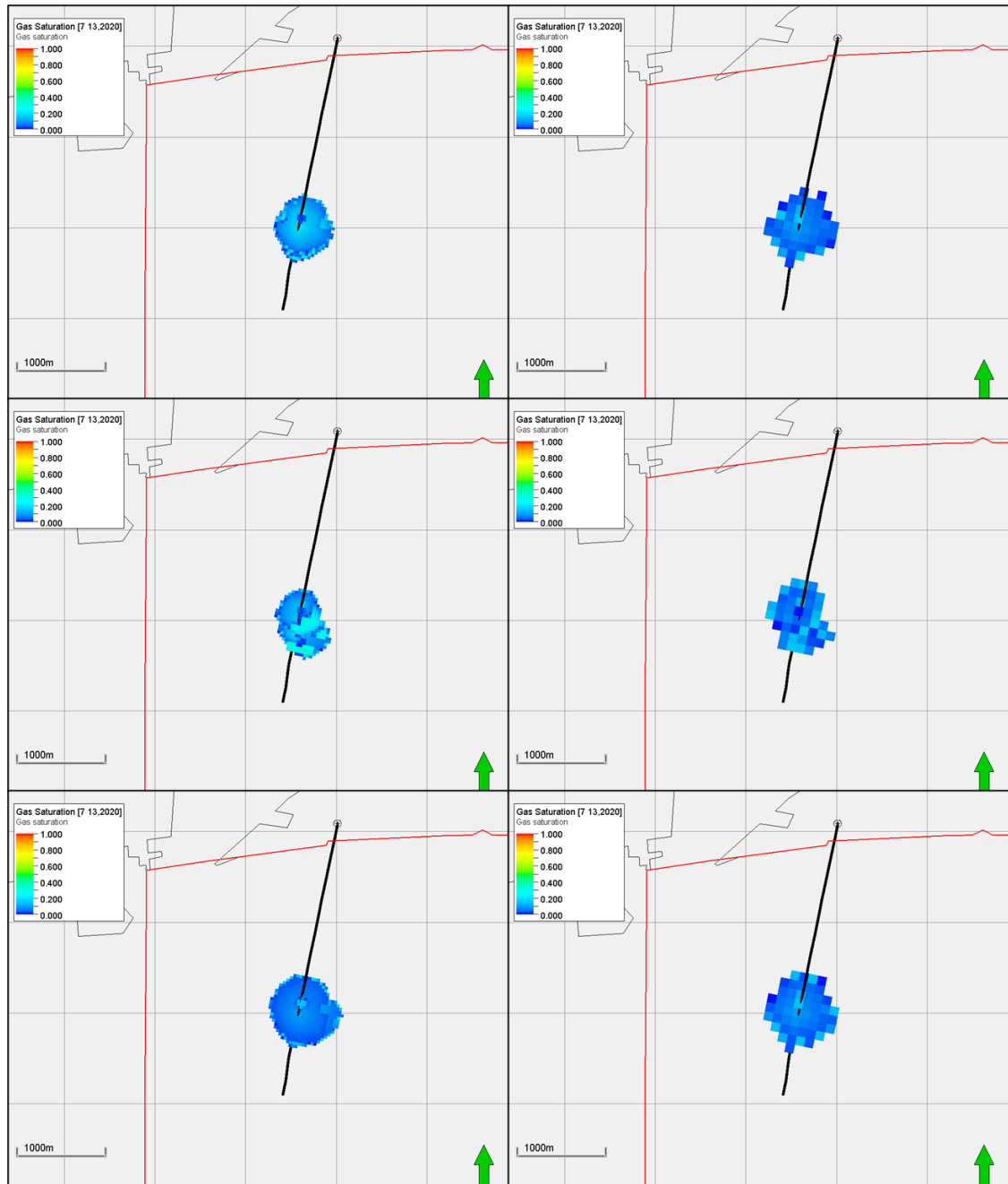
図 5.4-13 モデル C における IW-2 仕上げ区間上端圧力推移

(2) CO₂ 飽和率分布

2021 年度モデルおよび 2024 年度モデルにおけるモデル A、モデル B、モデル C について、2020 年（圧入停止後、弾性波探査実施時期）、2025 年、2030 年、2050 年、2100 年断面での CO₂ 飽和率分布の平面図および断面図（図 5.4-1 で示した坑跡断面および東西断面）を図 5.4-14 から図 5.4-28 に示す。各図において上段、中段、下段がそれぞれモデル A、モデル B、モデル C に対応し、左列が 2024 年度モデル、右列が 2021 年度モデルに対応している。また平面図においては、CO₂ 飽和率 0.001 以上のグリッドのみを表示している。

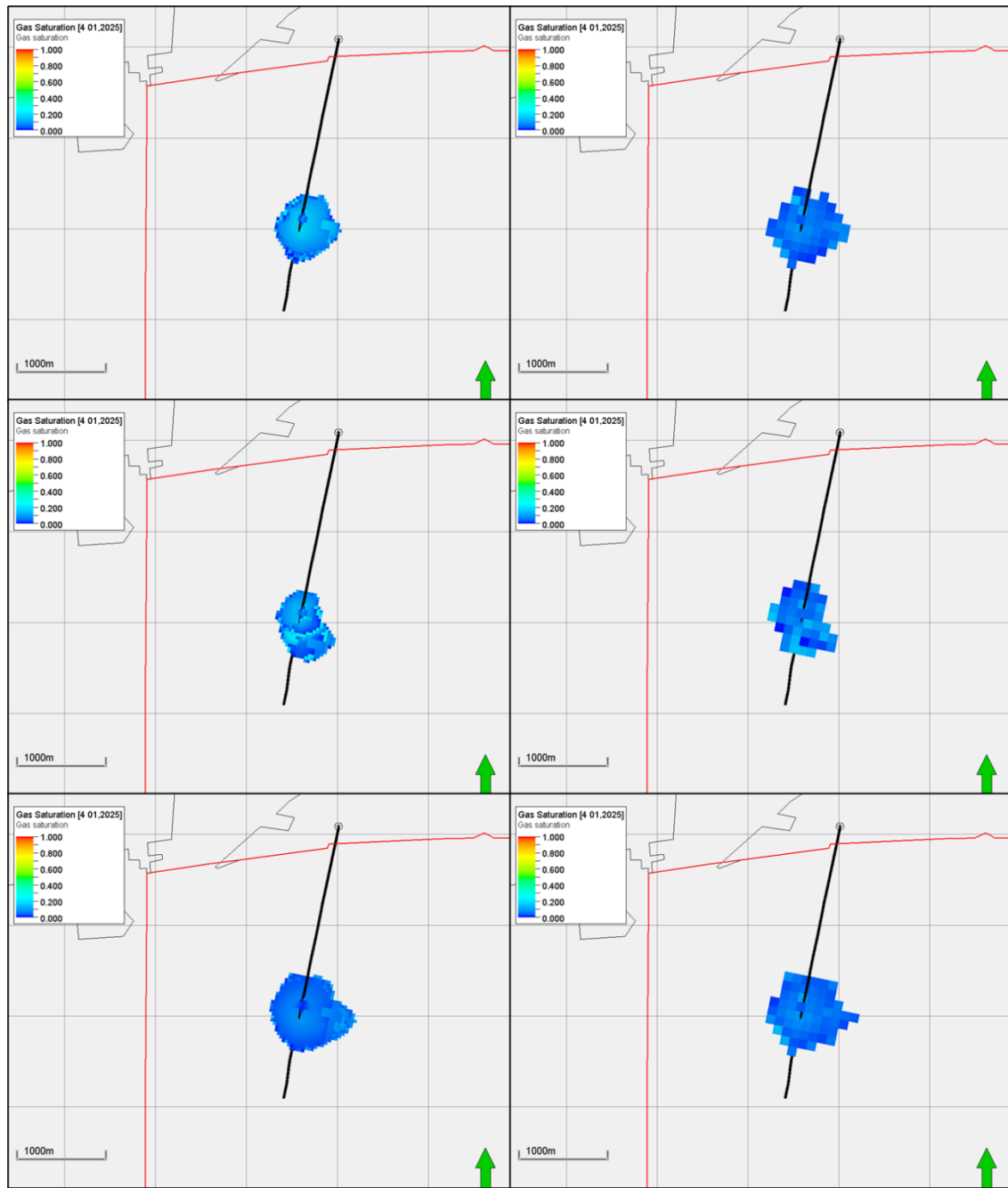
具現像ごとに CO₂ 飽和率分布の推移は異なるものの、いずれの具現像においても 2030 年頃までにはおおむね CO₂ 飽和率分布の広がりが止まっており、2100 年断面でもおおむ

ね同様の分布を示している。これらの結果はグリッドサイズ変更前後でもおおむね同様となっているが、坑跡断面図において2024年度モデル(2021年度よりグリッドサイズが細かい)の方が坑跡沿いにより深い箇所までCO₂飽和率上昇が見られる。



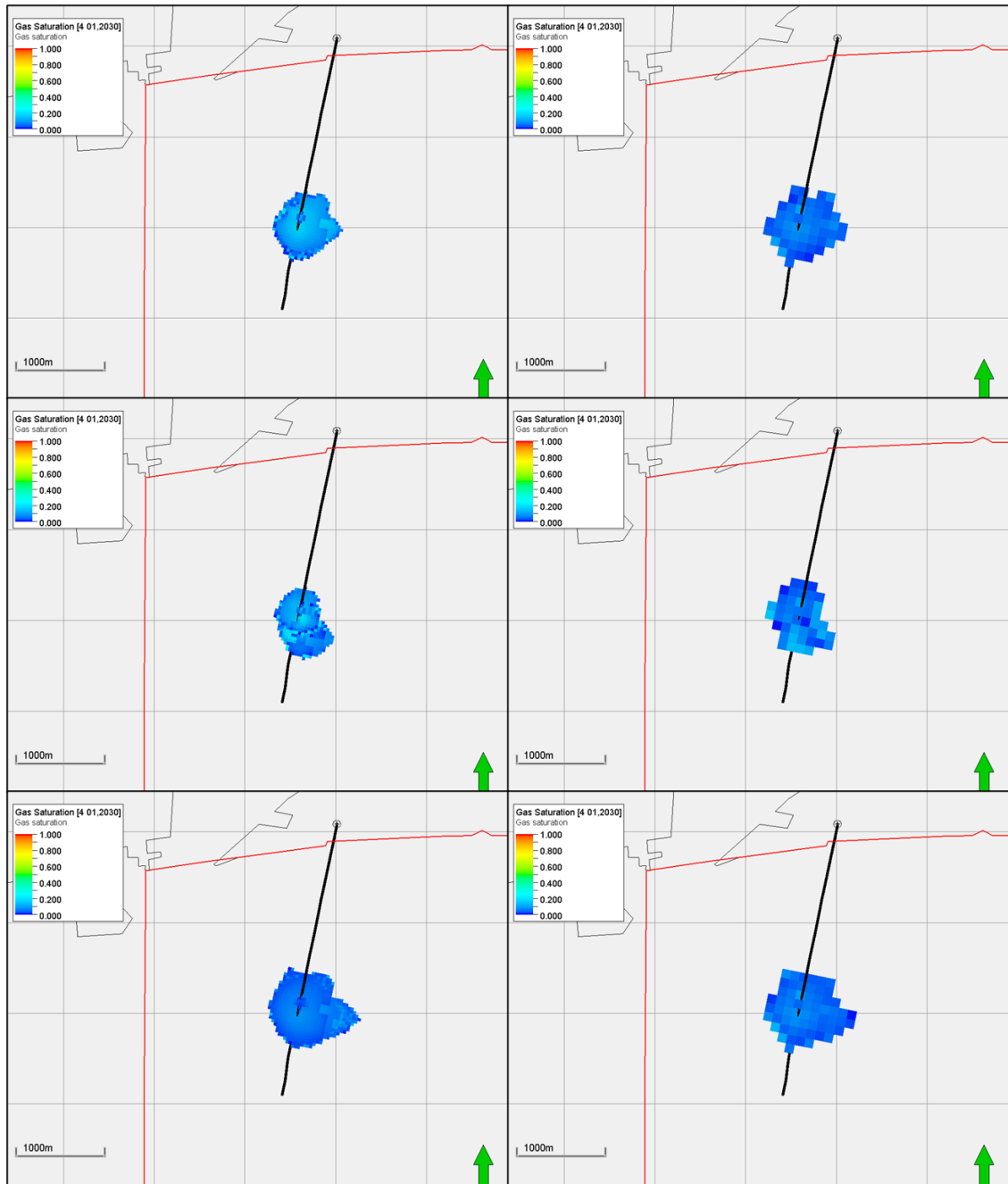
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-14 CO₂飽和率分布 平面図 2020 年(圧入停止後 弾性波探査時期)



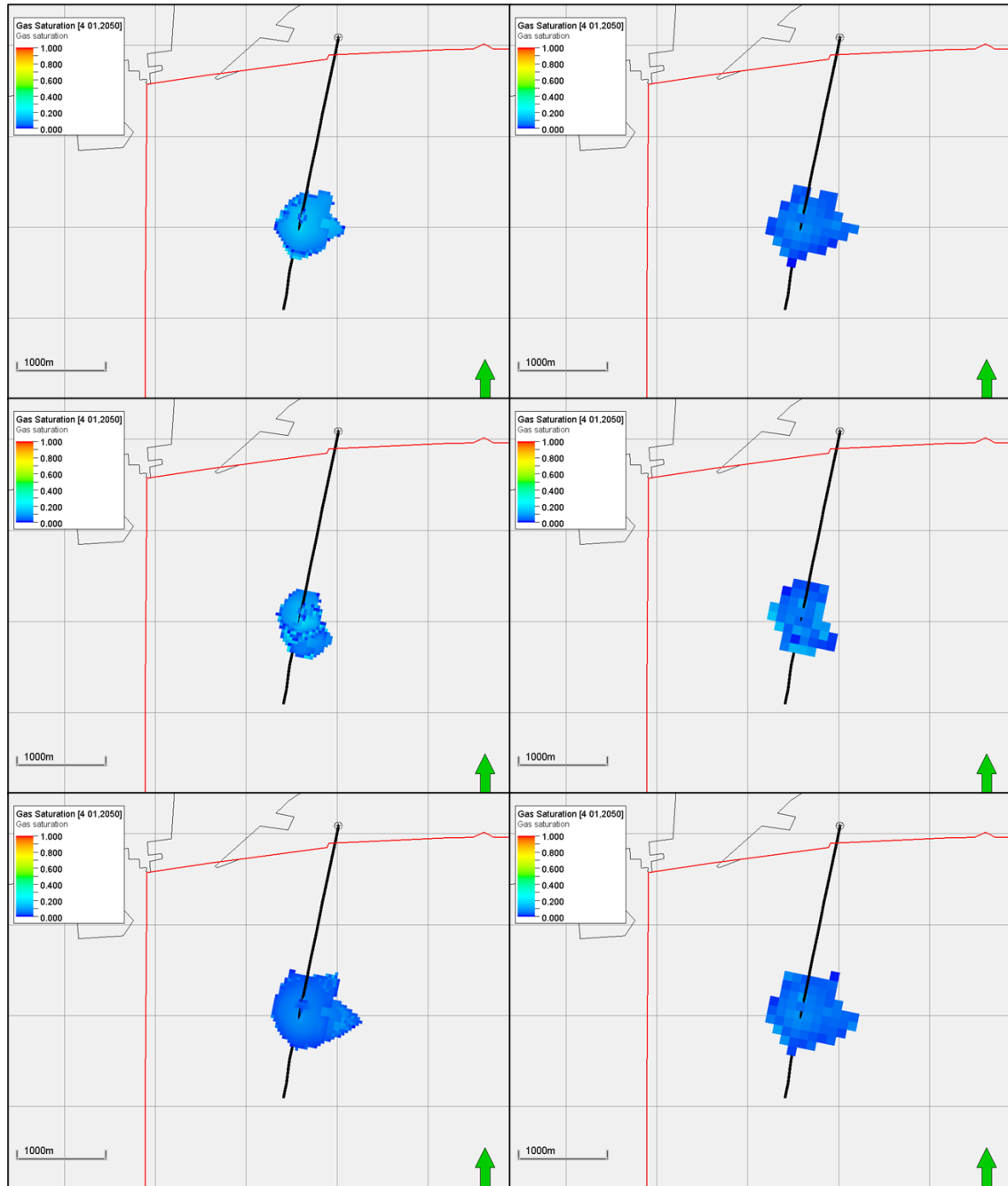
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-15 CO₂ 飽和率分布 平面図 2025 年



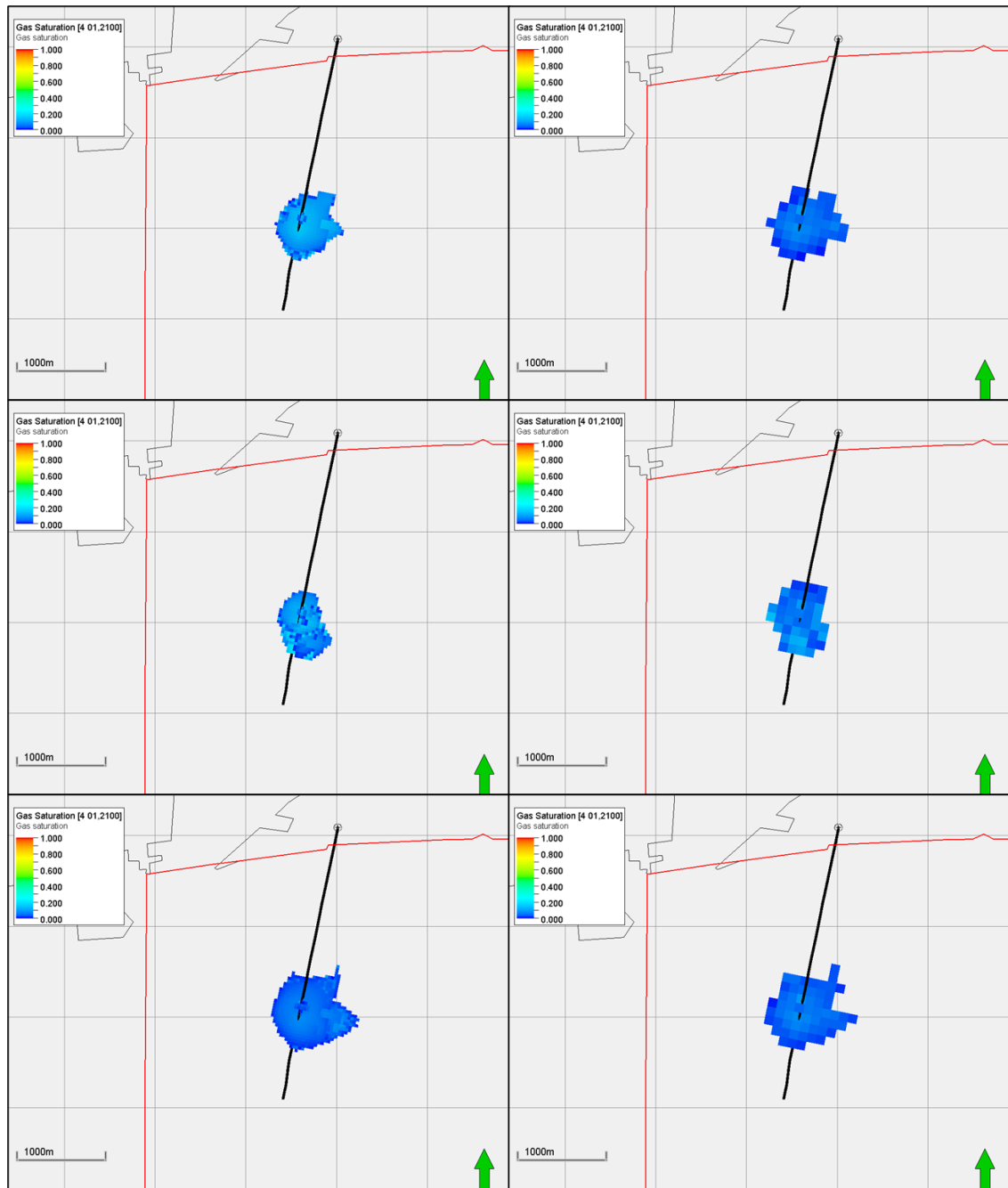
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-16 CO₂ 飽和率分布 平面図 2030 年



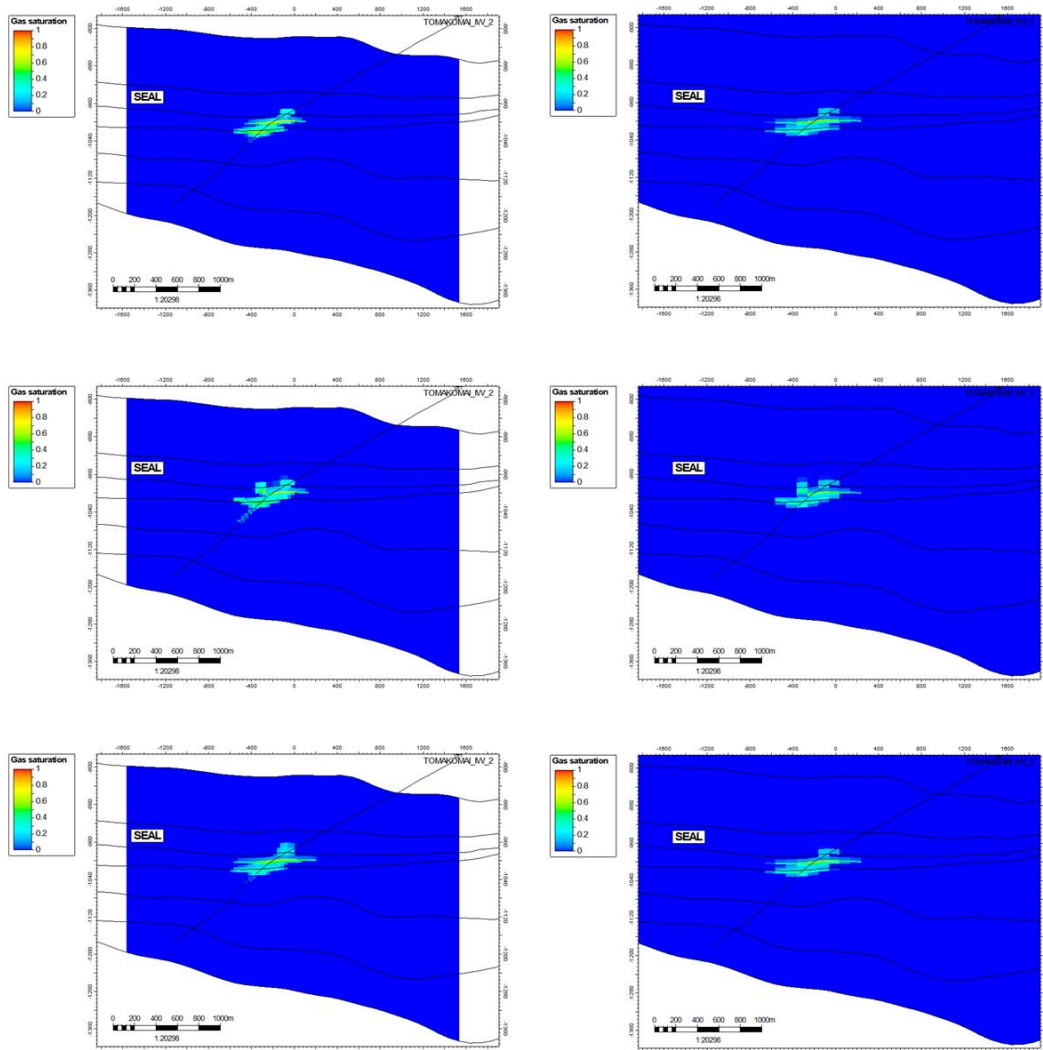
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-17 CO₂ 飽和率分布 平面図 2050 年



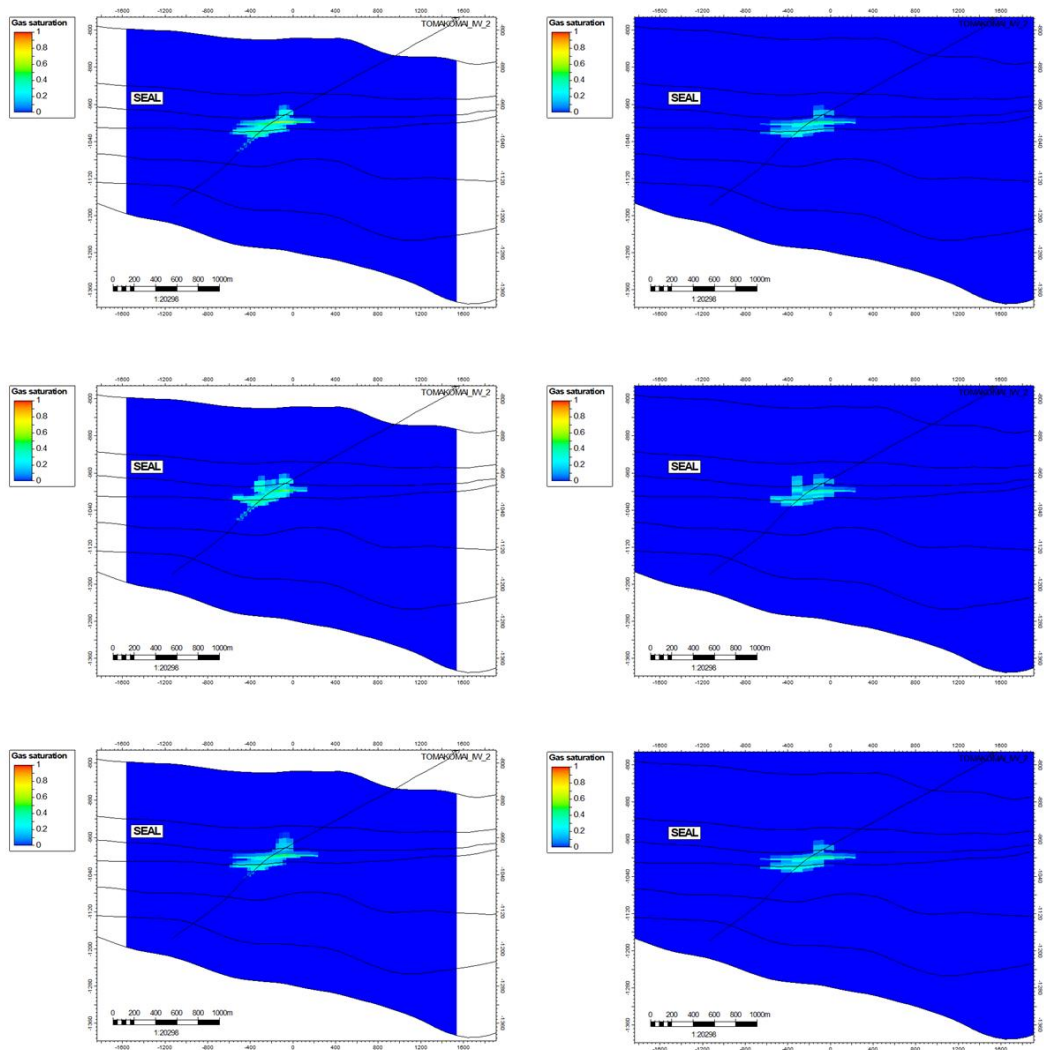
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-18 CO₂ 飽和率分布 平面図 2100 年



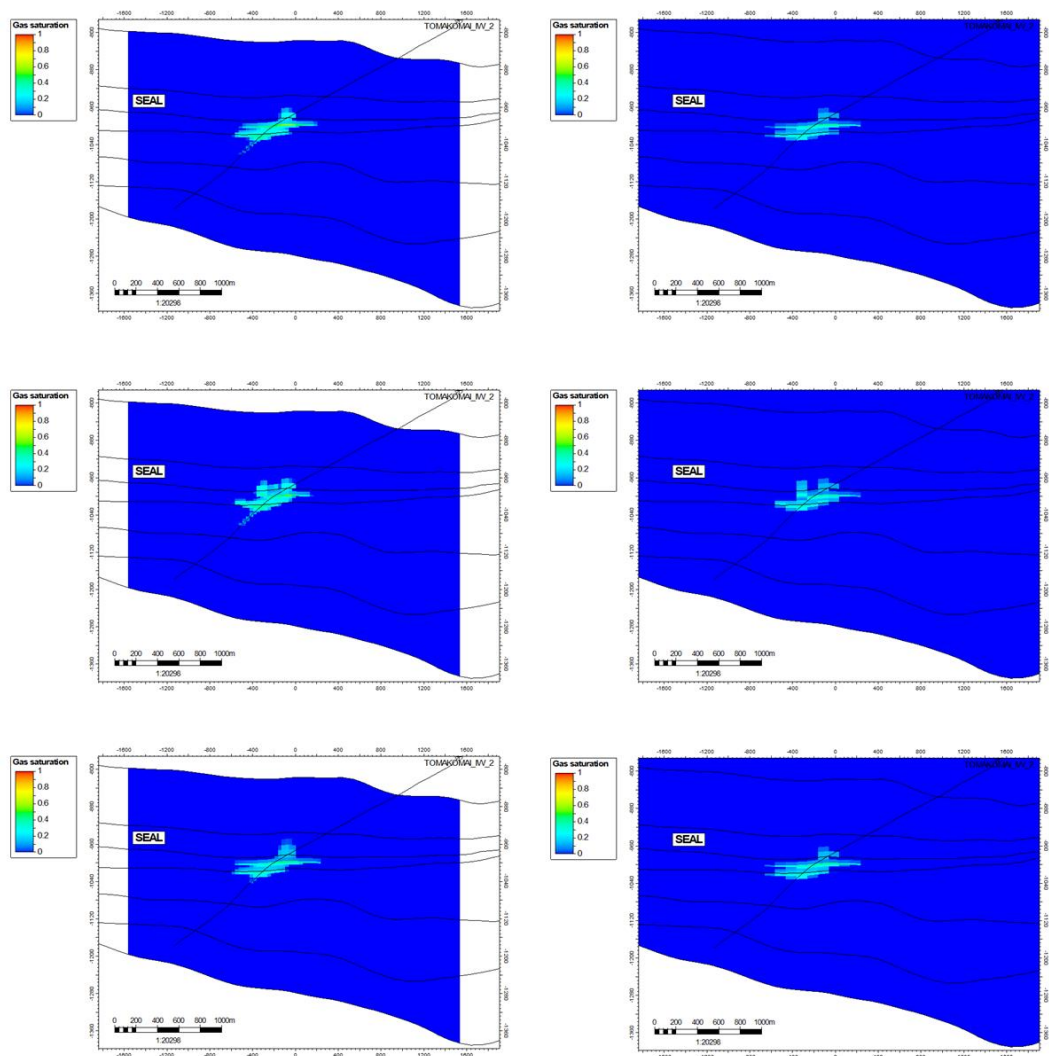
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-19 CO₂飽和率分布 坑跡断面図 2020 年(圧入停止後 弾性波探査実施時期)



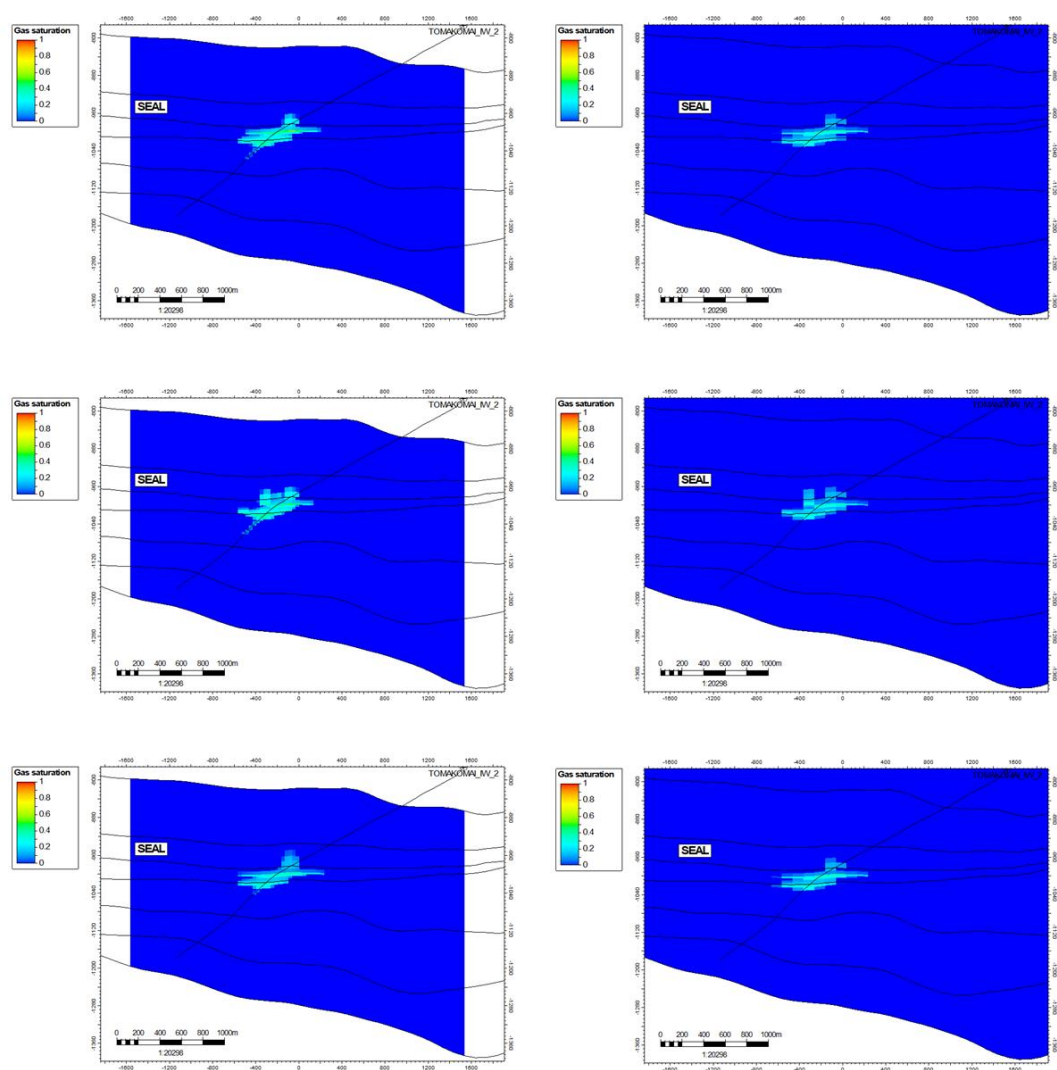
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-20 CO₂ 飽和率分布 坑跡断面図 2025 年



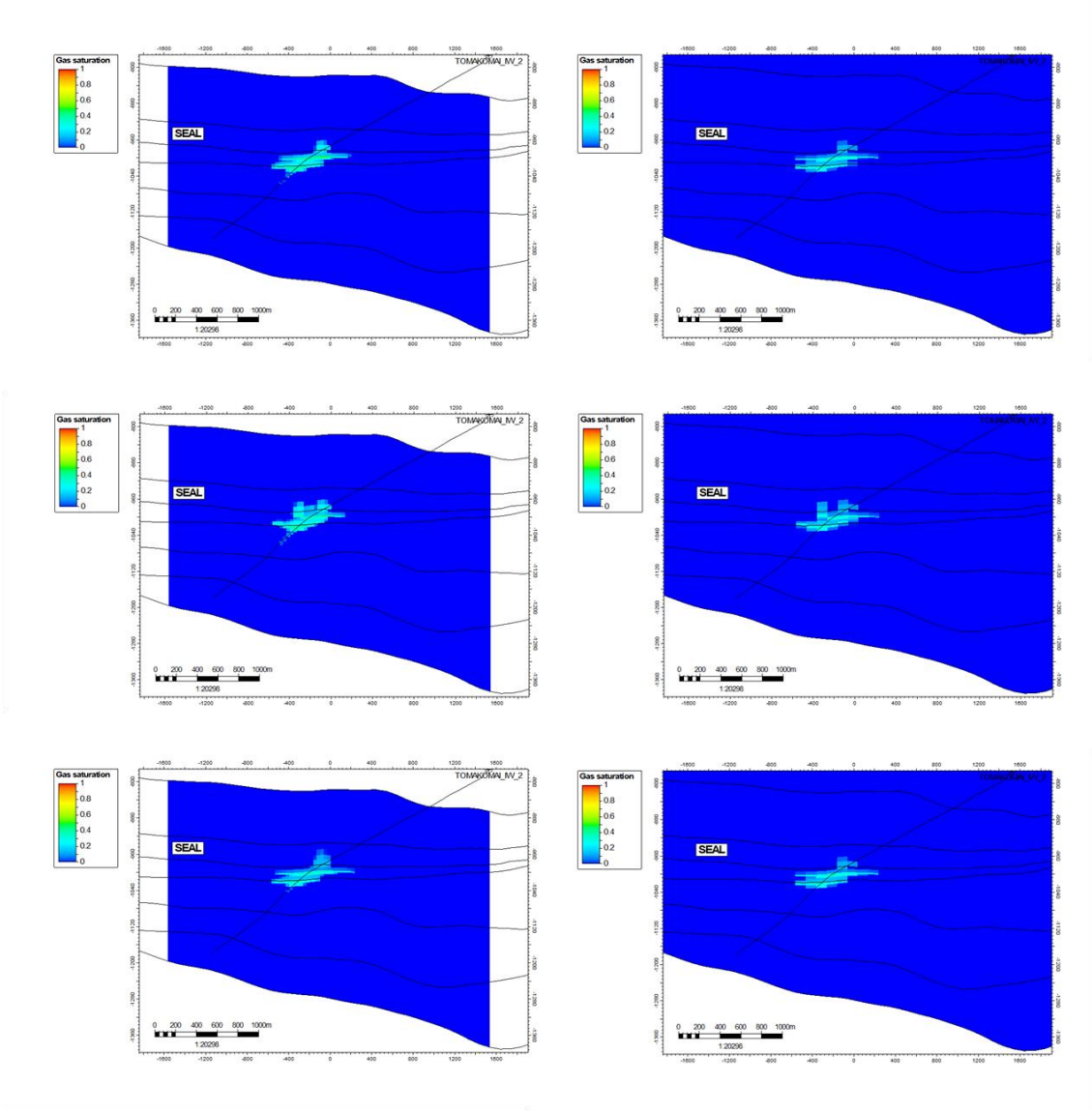
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-21 CO₂飽和率分布 坑跡断面図 2030 年



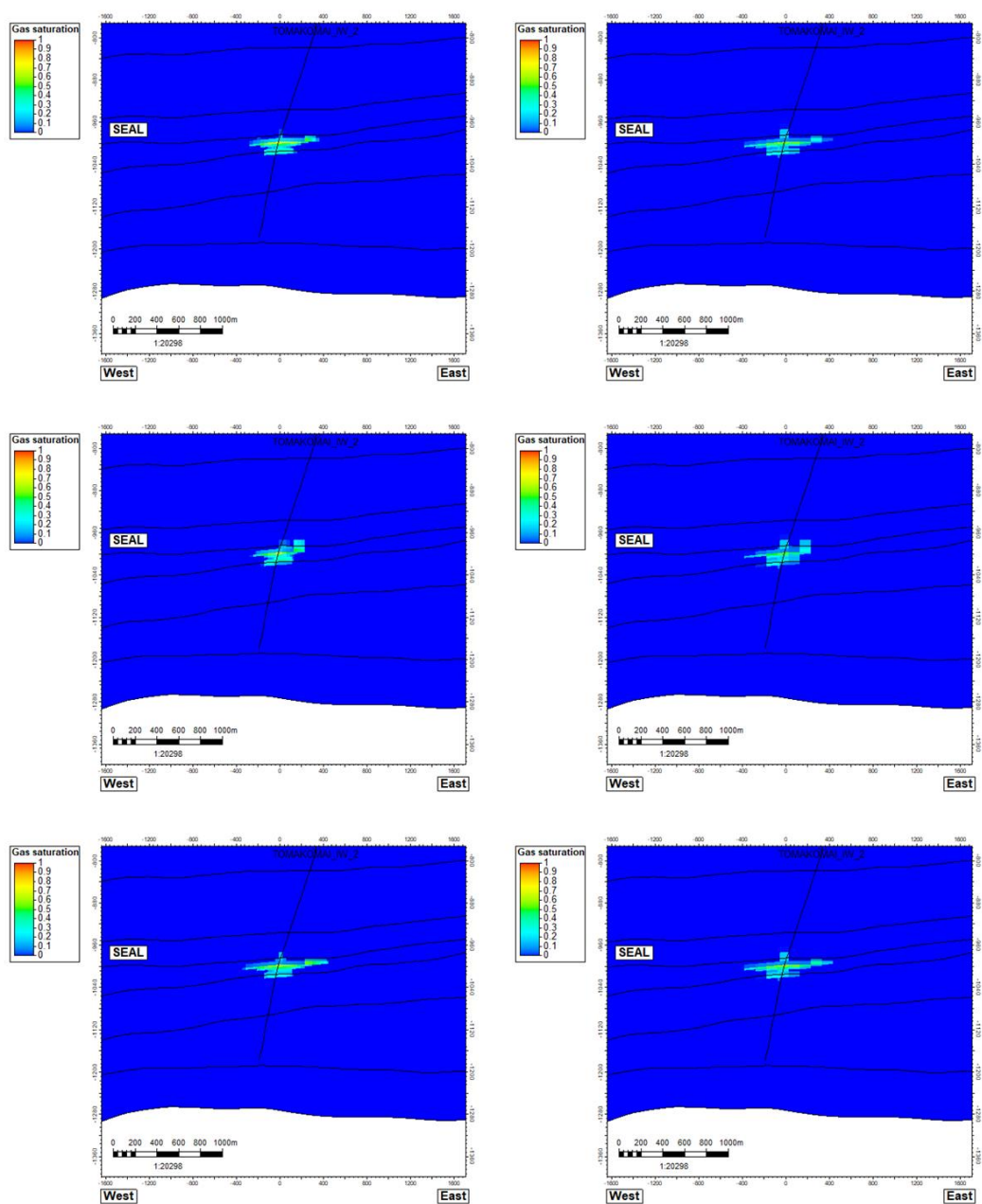
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-22 CO₂ 飽和率分布 坑跡断面図 2050 年



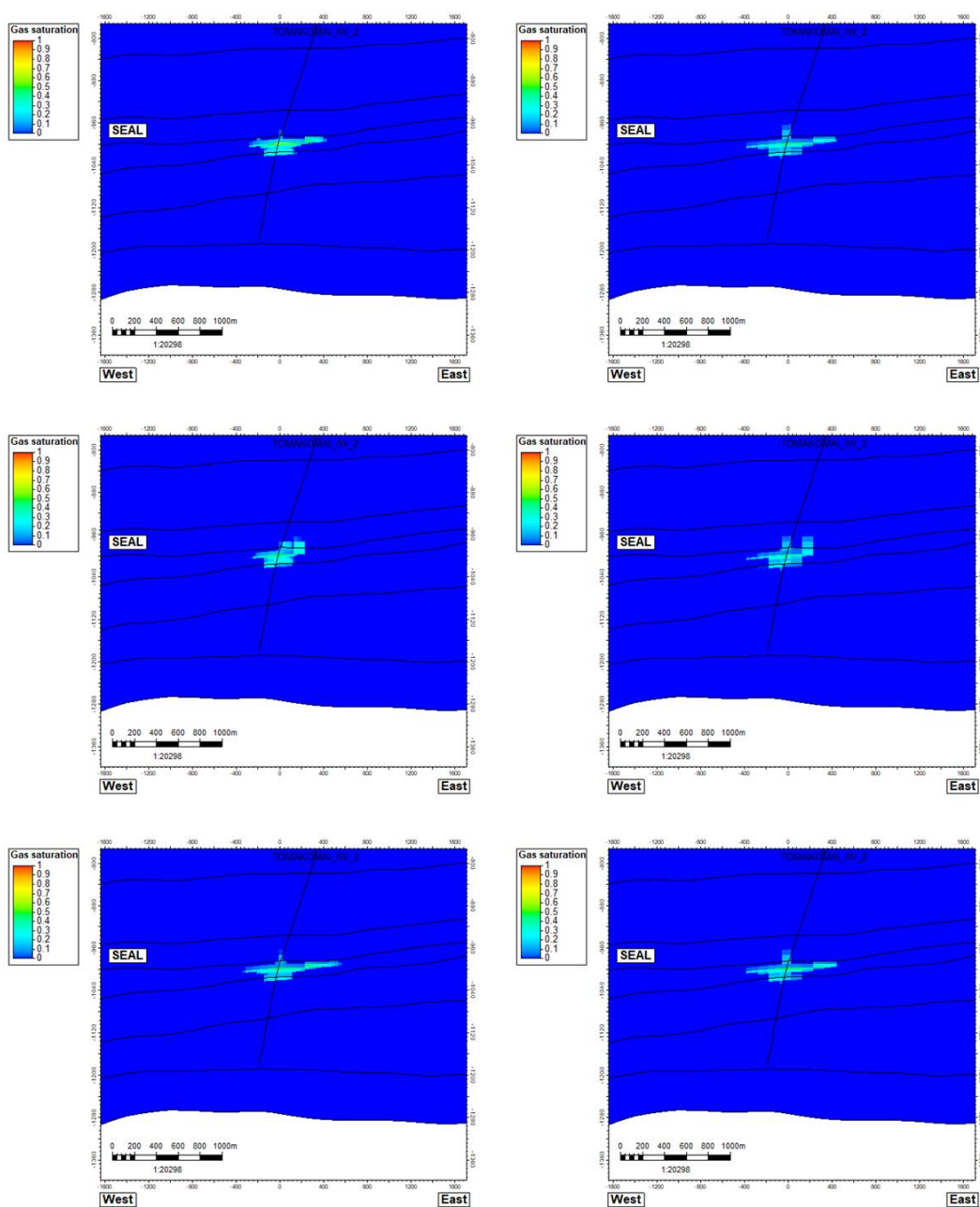
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-23 CO₂飽和率分布 坑跡断面図 2100 年



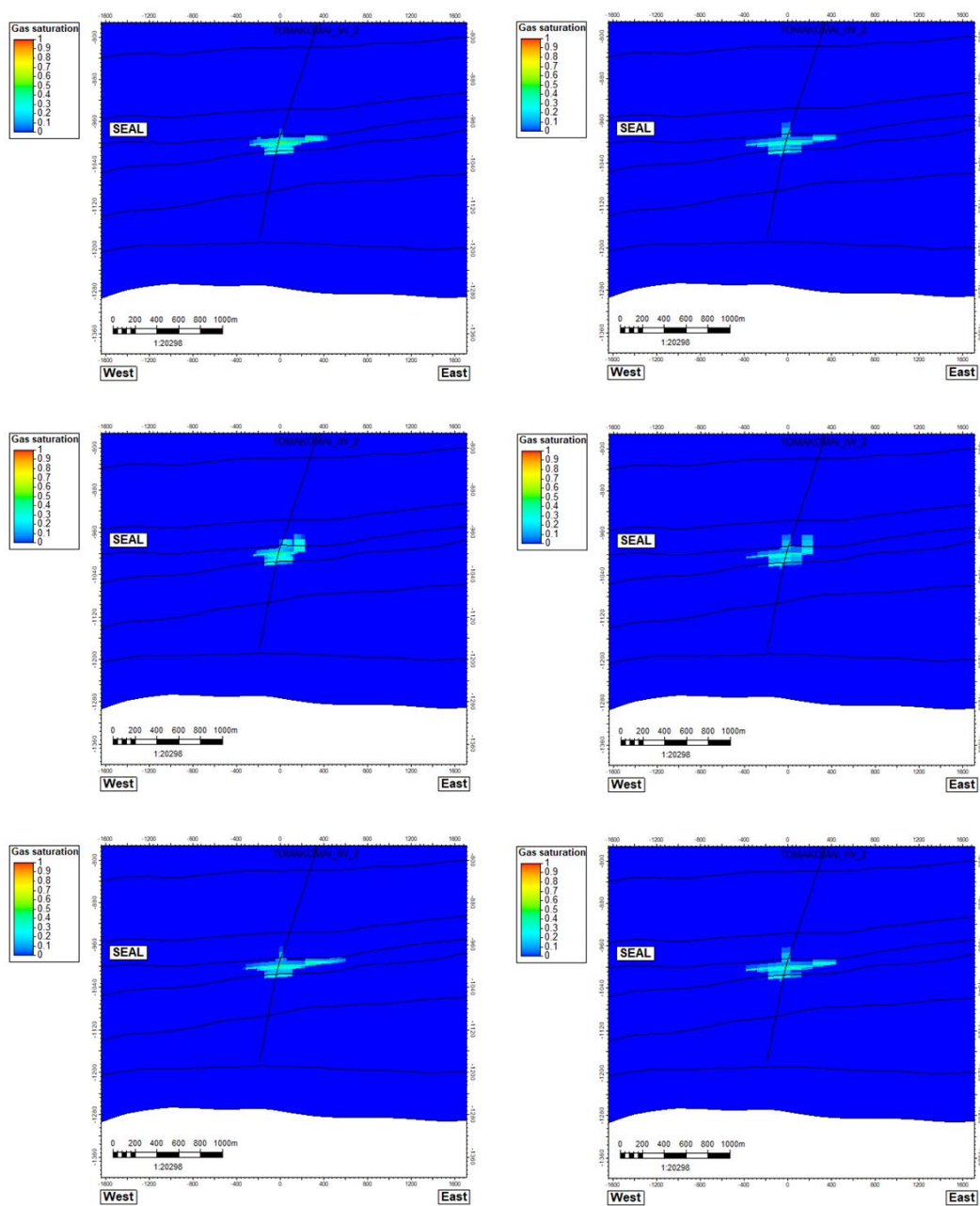
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-24 CO₂飽和率分布 東西断面図 2020 年(圧入停止後 弾性波探査実施時期)



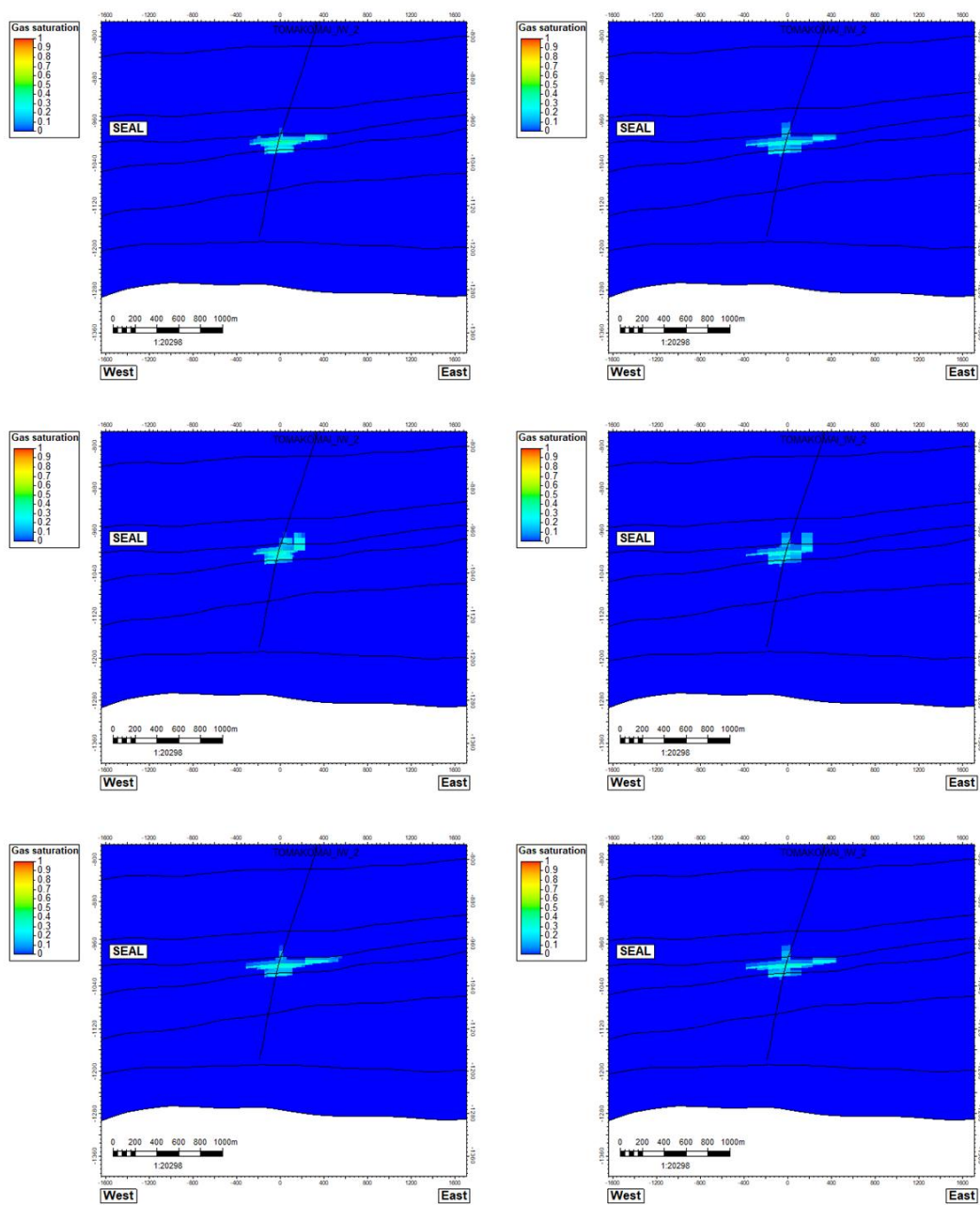
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-25 CO₂ 飽和率分布 東西断面図 2025 年



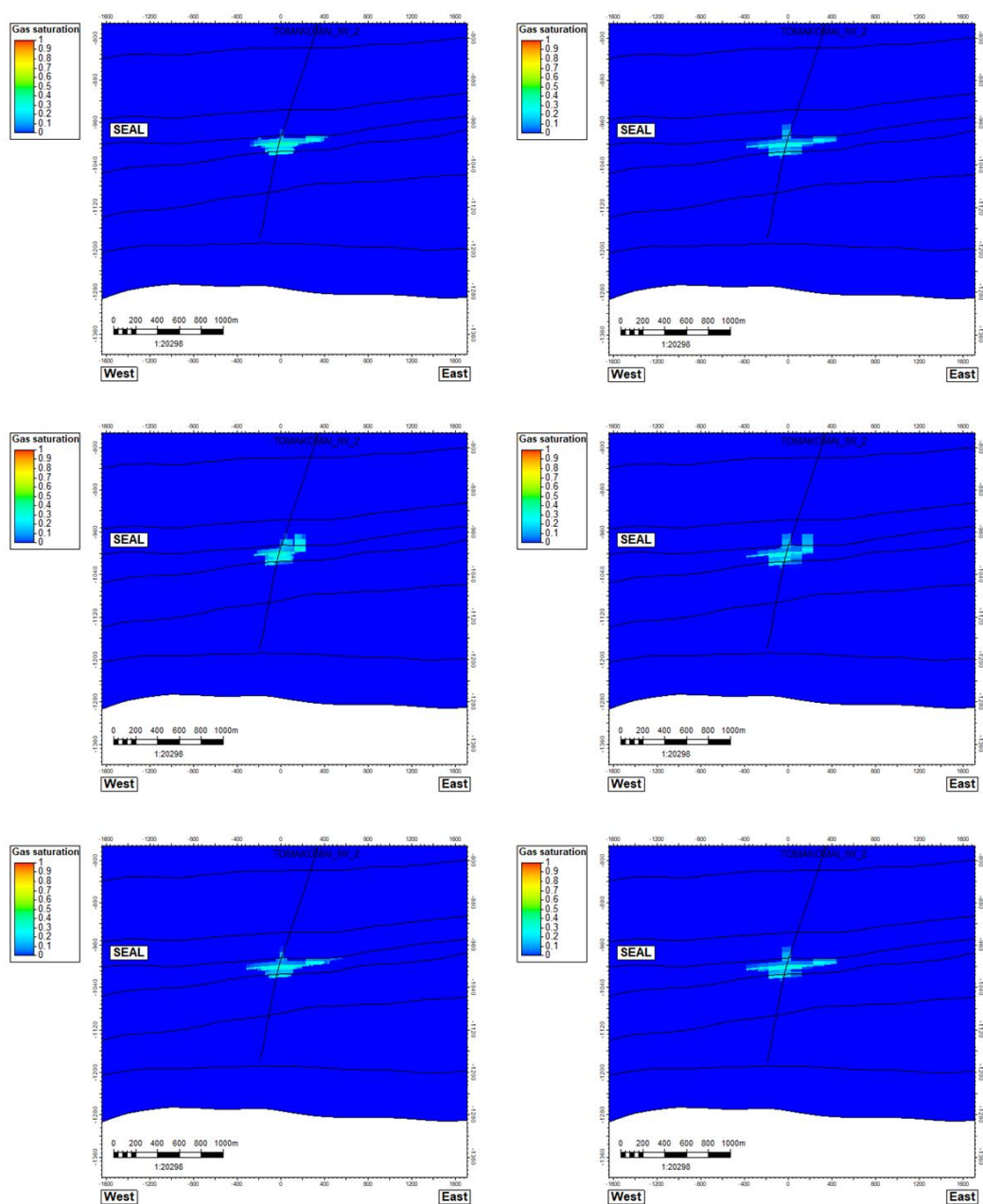
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-26 CO₂ 飽和率分布 東西断面図 2030 年



注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-27 CO₂ 飽和率分布 東西断面図 2050 年



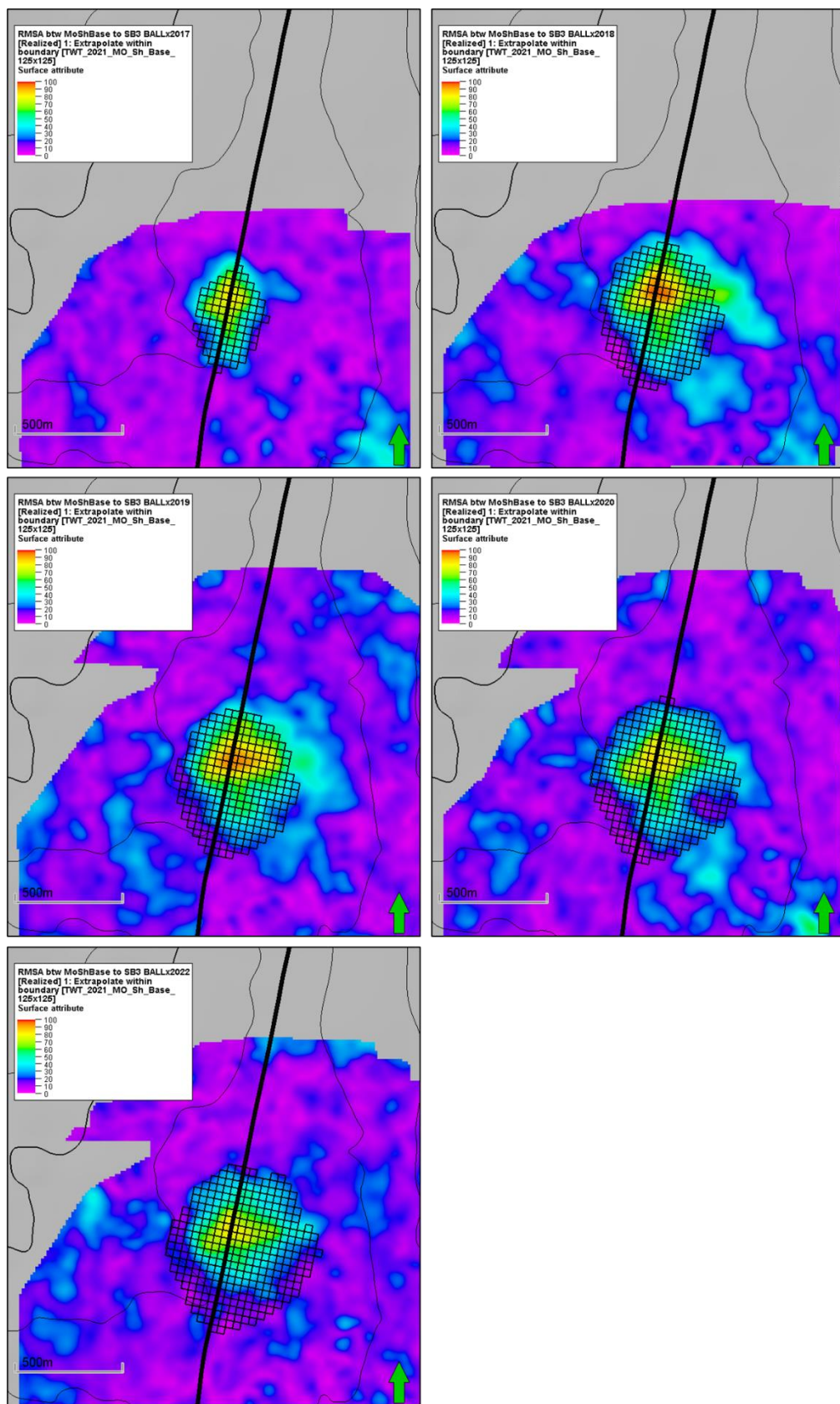
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-28 CO₂ 飽和率分布 東西断面図 2100 年

(3) CO₂飽和率分布と4D差分解析結果の比較

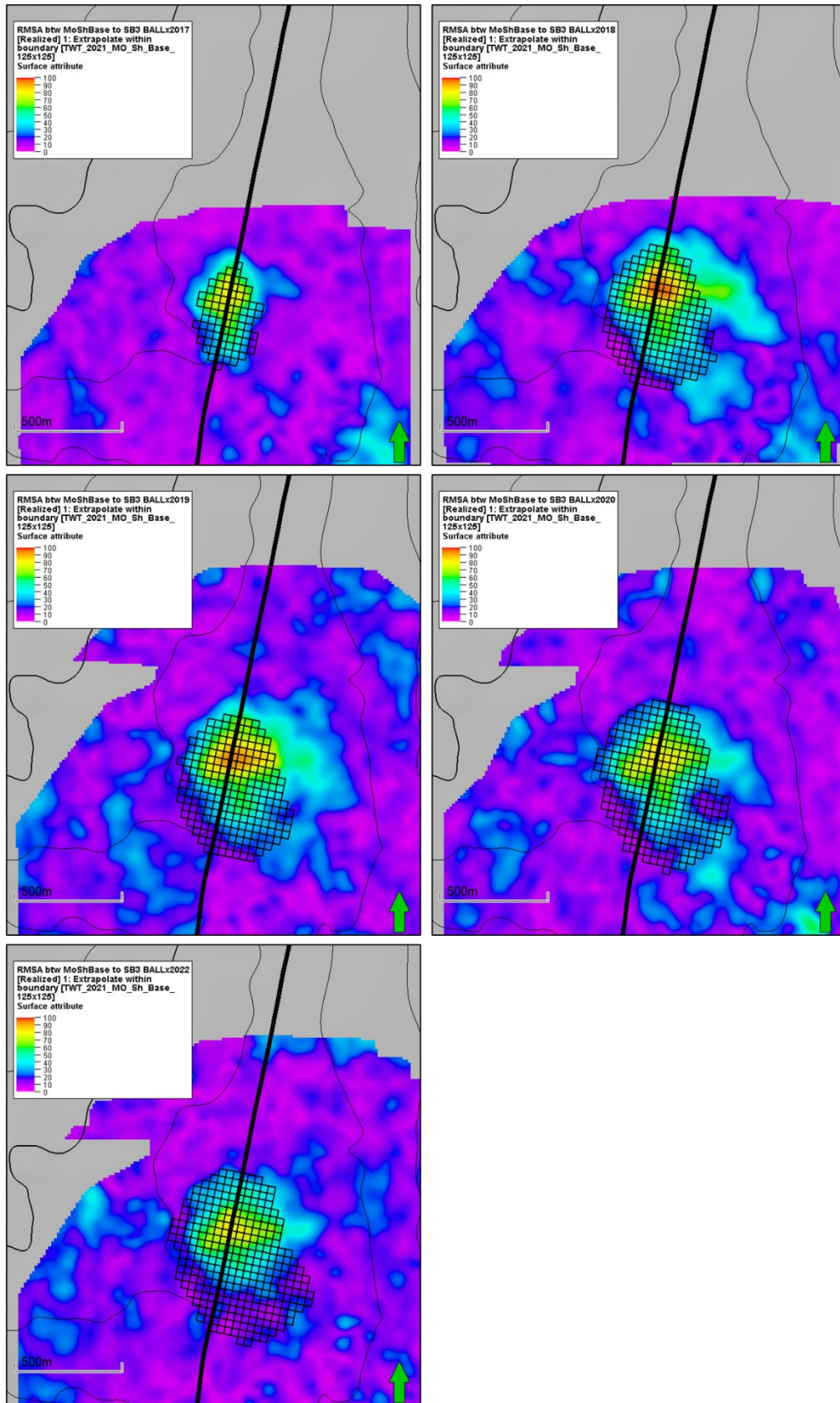
従来実施されている弾性波探査の適切な継続期間について考察を行うために、5.4.2(2)で示したCO₂飽和率分布(2024年度モデルによるシミュレーション結果)を4D差分解析結果と平面図上で比較した。図5.4-29から図5.4-31はそれぞれモデルA、モデルB、モデルCによるシミュレーション結果に対応しており、弾性波探査が実施された2017年、2018年、2019年、2020年、および2022年の4D差分解析結果(RMS Amplitude)を重ねて示している。シミュレーション結果については、CO₂飽和率が0.001以上のグリッドを表示している。

4D差分解析結果から示唆されるCO₂が貯留されている範囲、およびシミュレーションから示唆されるCO₂飽和率が変化する可能性のある範囲について、縁辺部の厳密な対応関係までは把握できていないものの、一定程度の整合性があることを確認した。



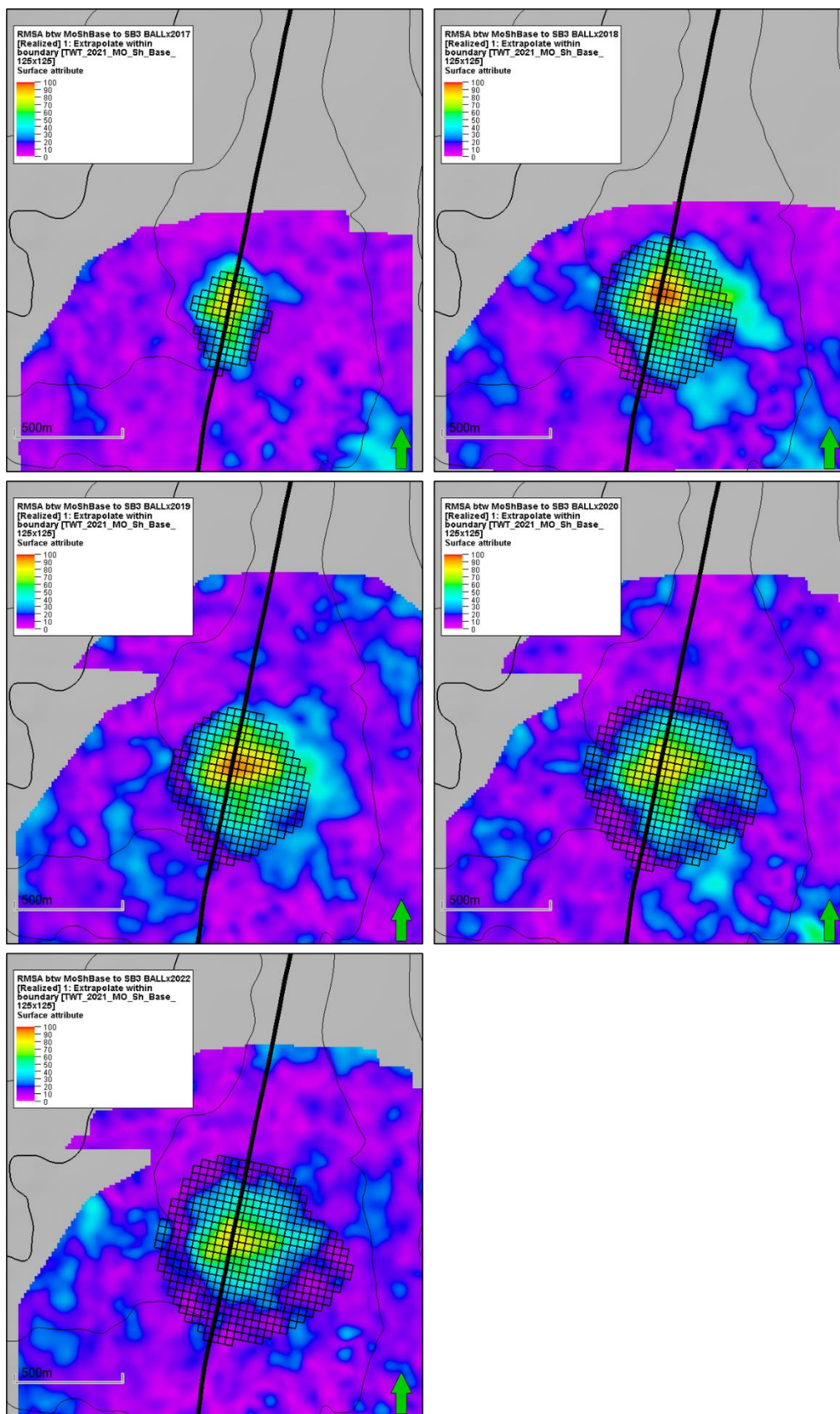
注) 上段左:2017年, 上段右:2018年, 中段左:2019年, 中段右:2020年, 下段:2022年度

図 5.4-29 CO₂飽和率分布と 4D 差分解析結果の比較 モデル A



注) 上段左:2017年, 上段右:2018年, 中段左:2019年, 中段右:2020年, 下段:2022年度

図 5.4-30 CO₂飽和率分布と 4D 差分解析結果の比較 モデル B



注) 上段左:2017年, 上段右:2018年, 中段左:2019年, 中段右:2020年, 下段:2022年度

図 5.4-31 CO₂飽和率分布と4D差分解析結果の比較 モデルC

(4) CO₂飽和率分布の変化率

CO₂飽和率分布範囲がどの程度の期間で安定するのかをシミュレーションで検討する際の一案として、CO₂飽和率が閾値（今回は 0.001 と設定）を超えるセル数（以下、「セル数」と称する。）、および、その変化率がどのように時間推移していくのかを確認した。モデル A、モデル B、モデル C それぞれについて、2017～2100 年の期間におけるセル数およびその一日当たりの変化率を纏めたものを表 5.4-1、セル数を時間推移としてプロットしたものを図 5.4-32 に示す。

表 5.4-1 のとおり、セル数の変化率が 0 以下となる（CO₂の溶解等により CO₂プルームがおおむね広がり止まる）タイミングは具現像ごとに一定程度異なっているものの、いずれの具現像においても 2030 年頃までにセル数の一日当たりの変化率が 0 以下となっており、CO₂貯留状況の安定性検討における一つの定量的なアプローチになり得ると考える。

表 5.4-1 CO₂飽和率 0.001 以上のセル数およびその一日当たりの変化率

	モデルA		モデルB		モデルC	
	セル数	変化率	セル数	変化率	セル数	変化率
2017/7/9	250	-	242	-	284	-
2018/9/26	797	1.2320	739	1.1194	957	1.5158
2019/1/19	856	0.5130	792	0.4609	1,009	0.4522
2020/7/13	1,228	0.6876	1,122	0.6100	1,442	0.8004
2022/7/11	1,315	0.1195	1,200	0.1071	1,571	0.1772
2023/4/1	1,330	0.0568	1,213	0.0492	1,598	0.1023
2024/4/1	1,346	0.0437	1,233	0.0546	1,630	0.0874
2025/4/1	1,359	0.0356	1,247	0.0384	1,644	0.0384
2026/4/1	1,366	0.0192	1,252	0.0137	1,653	0.0247
2027/4/1	1,375	0.0247	1,255	0.0082	1,669	0.0438
2028/4/1	1,379	0.0109	1,257	0.0055	1,675	0.0164
2029/4/1	1,379	0.0000	1,257	0.0000	1,674	-0.0027
2030/4/1	1,377	-0.0055	1,263	0.0164	1,681	0.0192
2035/4/1	1,368	-0.0049	1,250	-0.0071	1,676	-0.0027
2040/4/1	1,367	-0.0005	1,238	-0.0066	1,665	-0.0060
2045/4/1	1,359	-0.0044	1,225	-0.0071	1,654	-0.0060
2050/4/1	1,350	-0.0049	1,217	-0.0044	1,640	-0.0077
2060/4/1	1,338	-0.0033	1,200	-0.0047	1,620	-0.0055
2070/4/1	1,332	-0.0016	1,188	-0.0033	1,597	-0.0063
2080/4/1	1,315	-0.0047	1,174	-0.0038	1,570	-0.0074
2090/4/1	1,300	-0.0041	1,161	-0.0036	1,553	-0.0047
2100/4/1	1,288	-0.0033	1,145	-0.0044	1,529	-0.0066

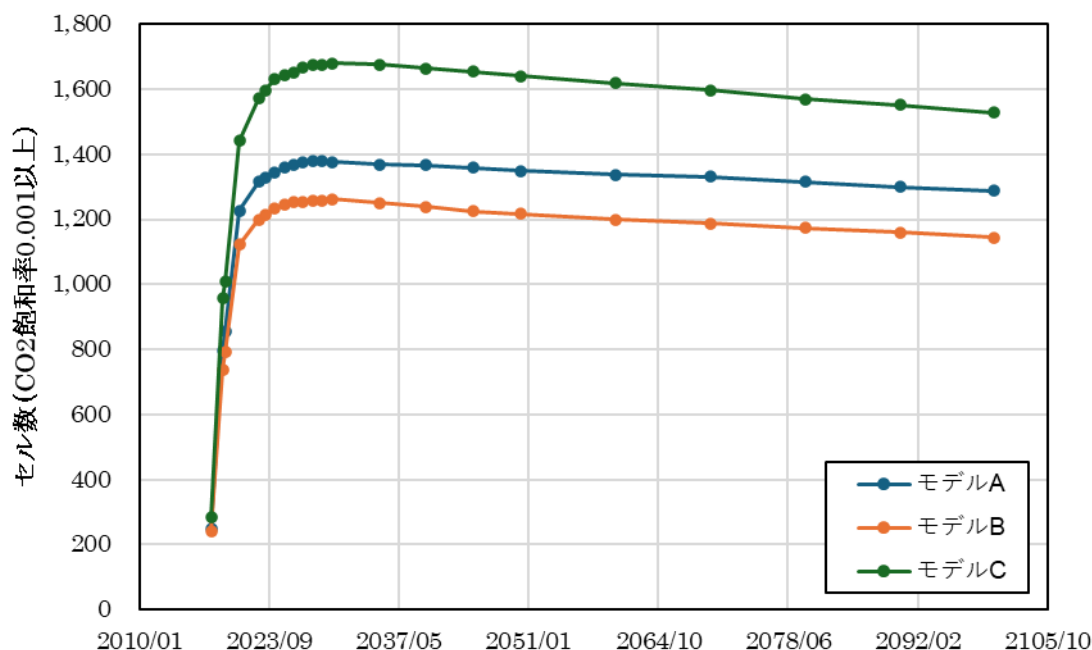
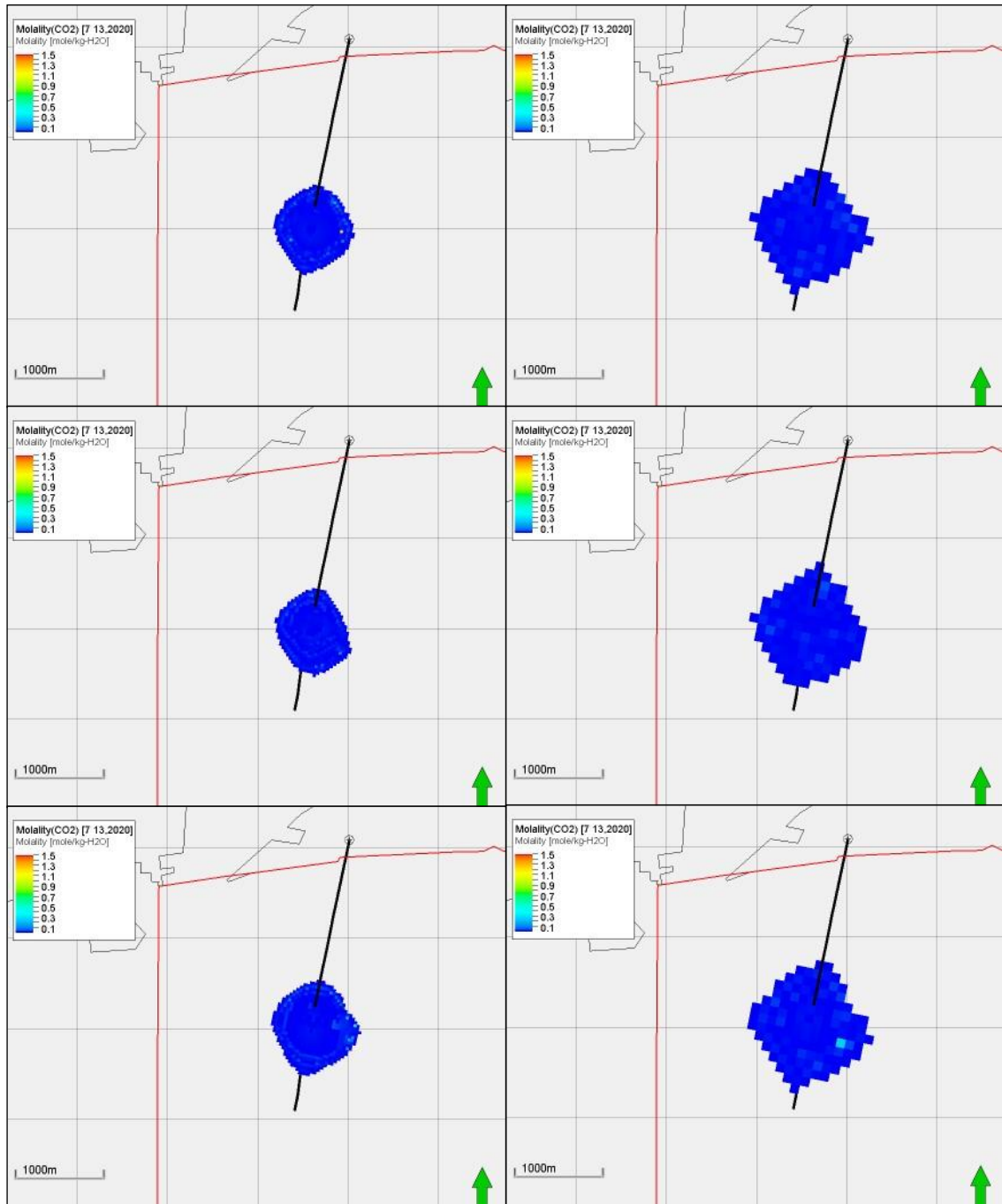


図 5.4-32 CO₂ 飽和率 0.001 以上のセル数

(5) 溶存 CO₂ 量分布

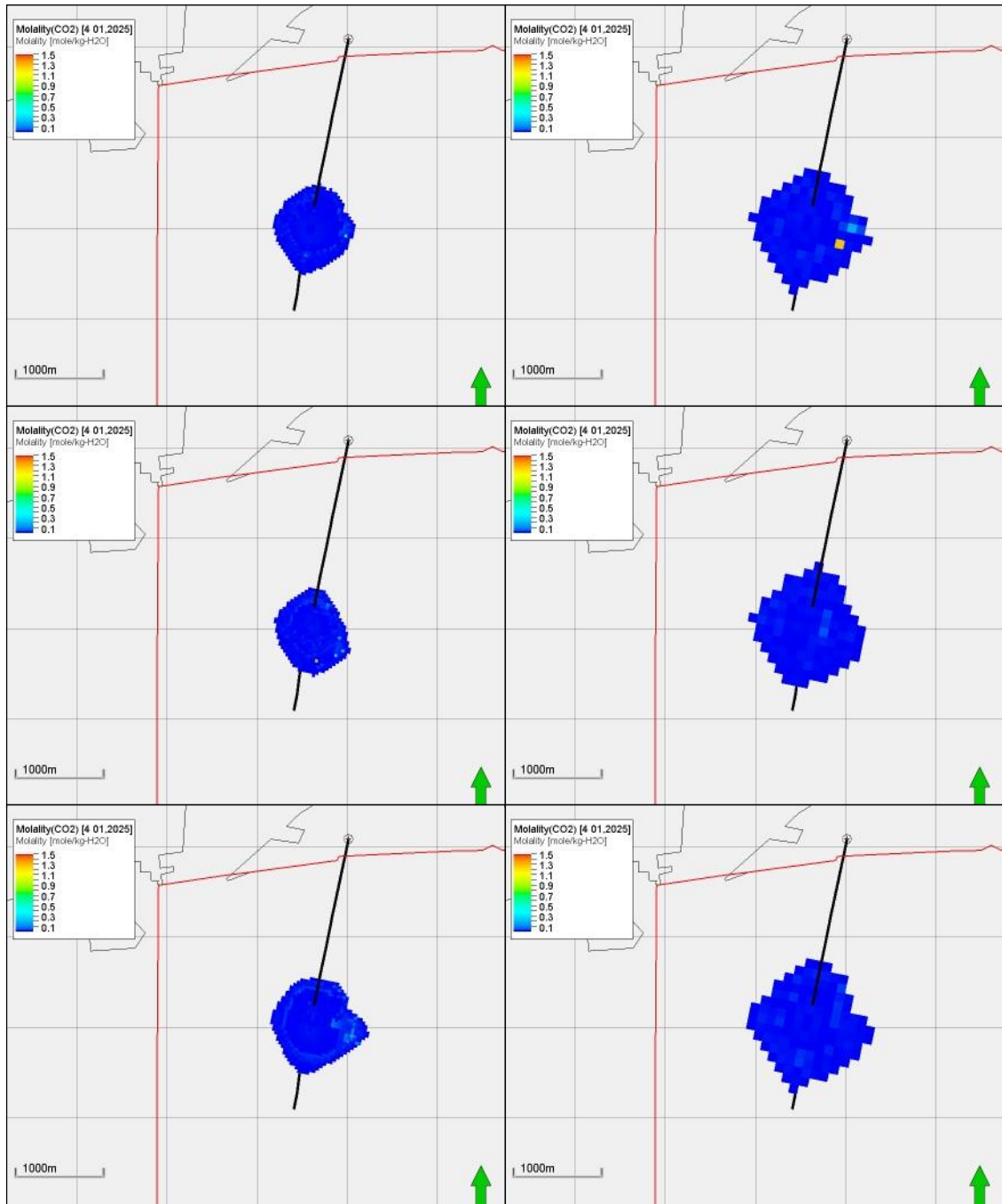
2021 年度モデルおよび 2024 年度モデルにおけるモデル A、モデル B、モデル C について、2020 年（圧入停止後、弾性波探査実施時期）、2025 年、2030 年、2050 年、2100 年断面での CO₂ 飽和率分布を、平面図および断面図（図 5.4-1 で示した坑跡断面および東西断面）で図 5.4-33 から図 5.4-47 に示す。各図において上段、中段、下段がそれぞれモデル A、モデル B、モデル C に対応し、左列が 2024 年度モデル、右列が 2021 年度モデルに対応している。また平面図においては、溶存 CO₂ 量 3×10^{-5} (mol/kg) 以上のグリッドのみを表示している。

平面図を見ると、2021 年度モデルおよび 2024 年度モデル共に、2030 年以降も溶存 CO₂ 量分布が水平方向に広がっている。また、断面図を見ると CO₂ が溶存している地層水が比重差により貯留層下部へ沈降している。2024 年度モデルは 2021 年度モデルよりも高解像度であることにより、比重差による貯留層下部への CO₂ 溶解水の沈降がより顕著に表れている。



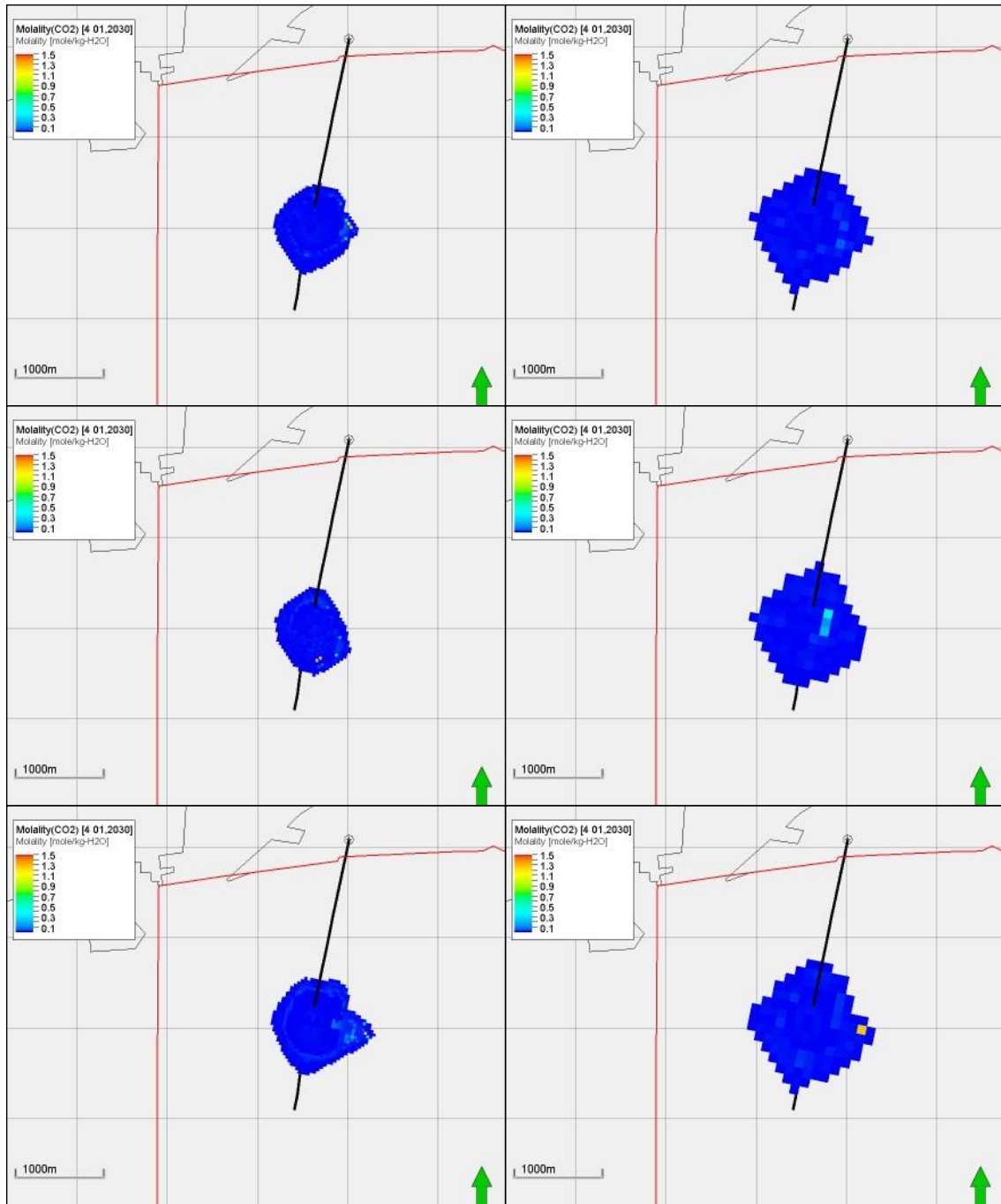
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-33 溶存 CO₂ 量分布 平面図 2020 年 (圧入停止後 弾性波探査時期)



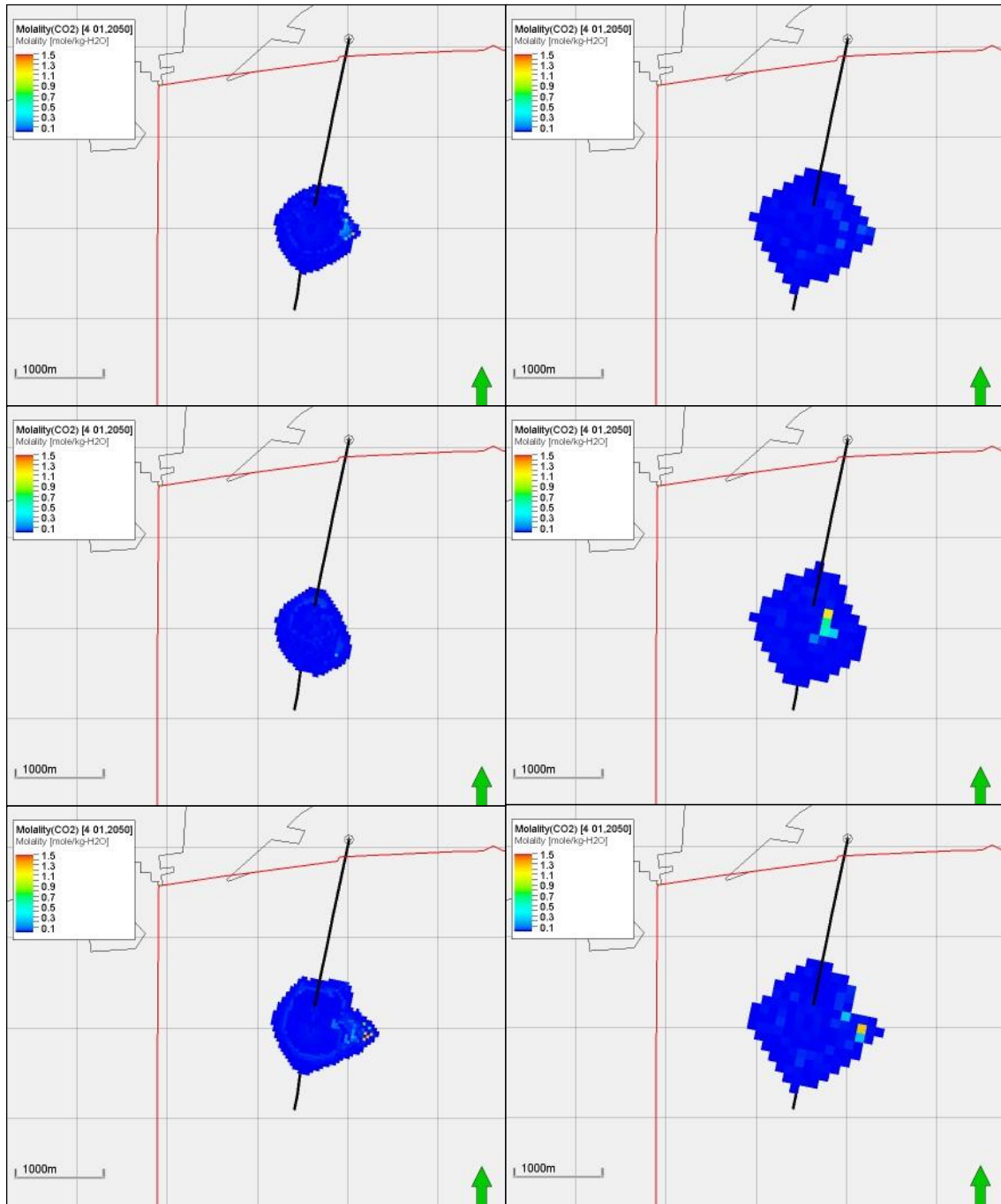
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-34 溶存 CO₂ 量分布 平面図 2025 年



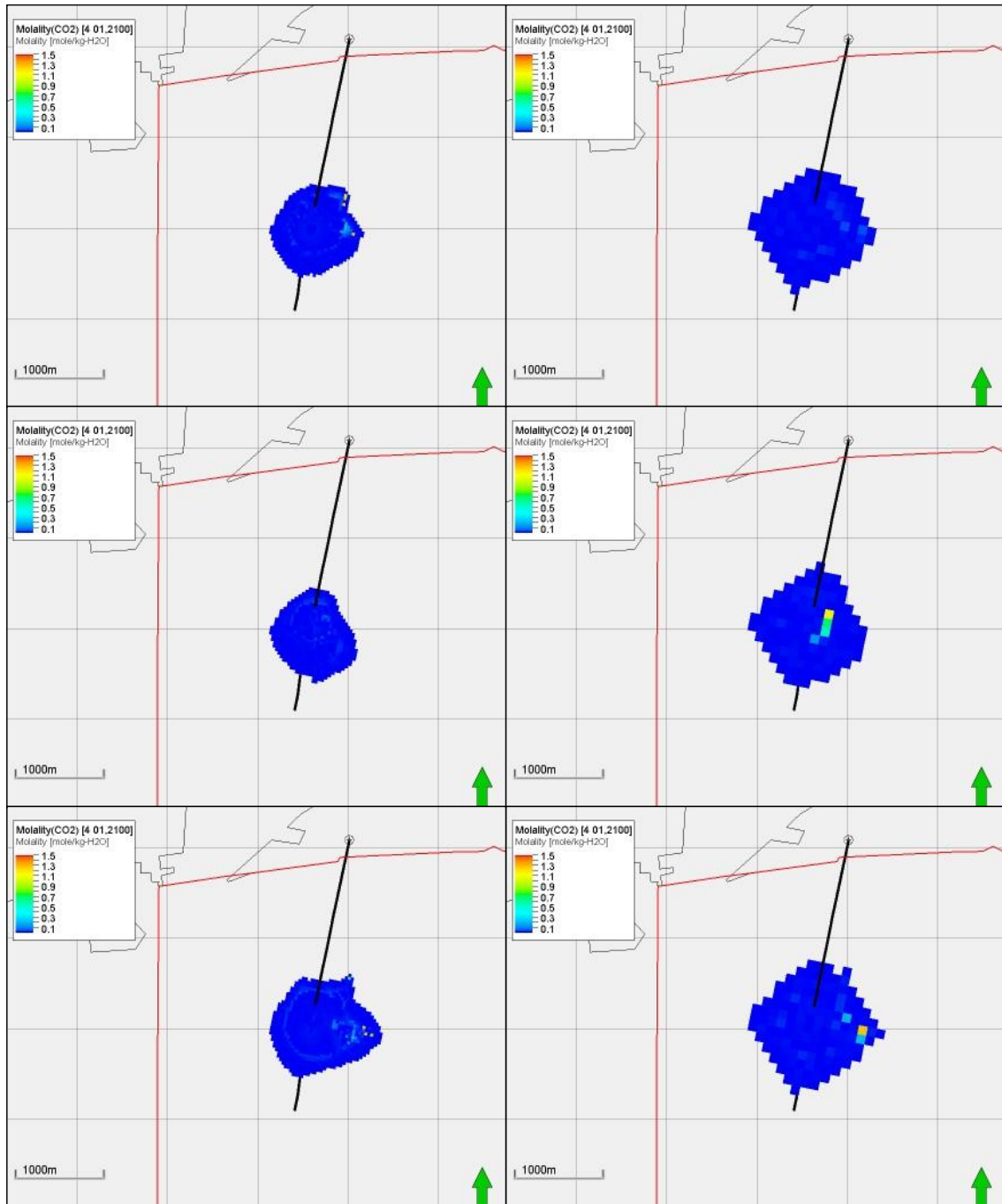
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-35 溶存 CO₂ 量分布 平面図 2030 年



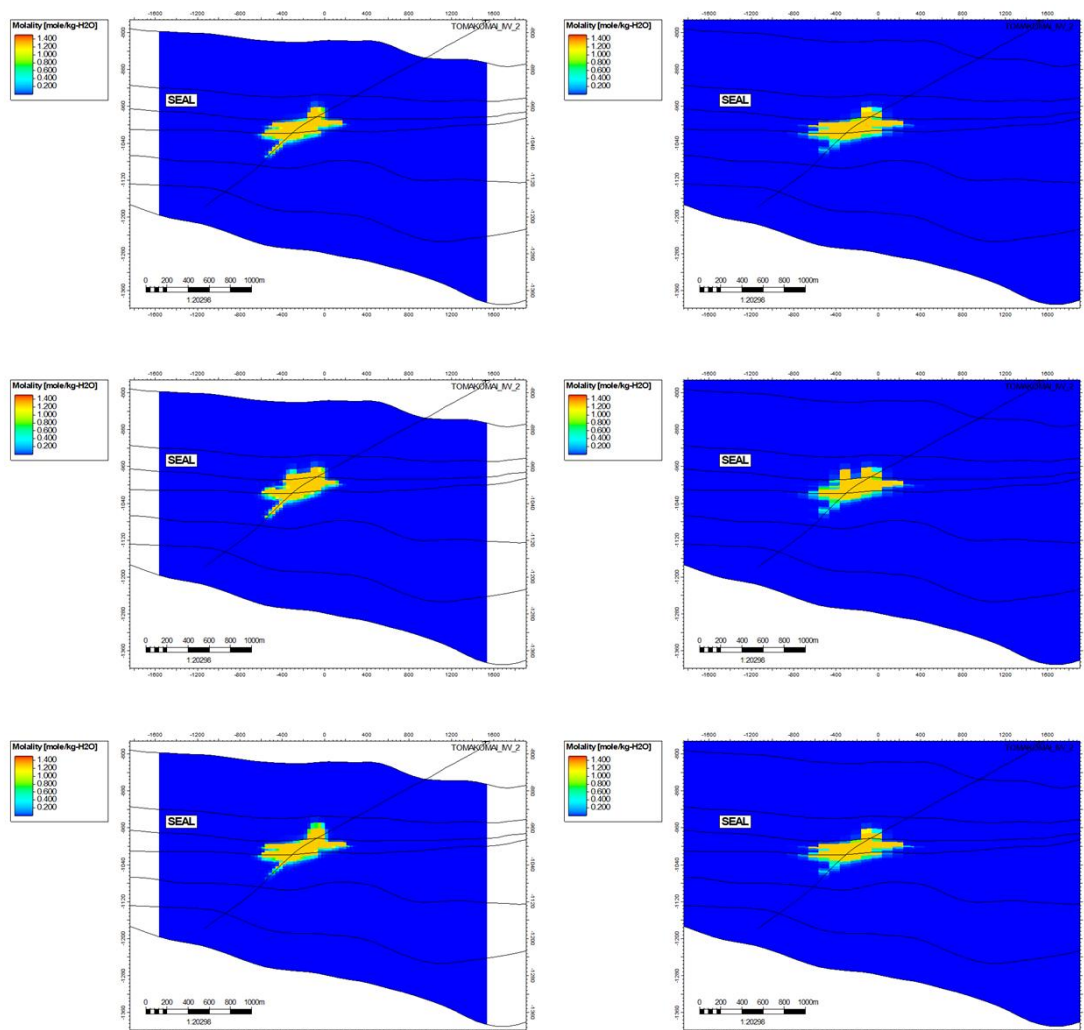
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-36 溶存 CO₂ 量分布 平面図 2050 年



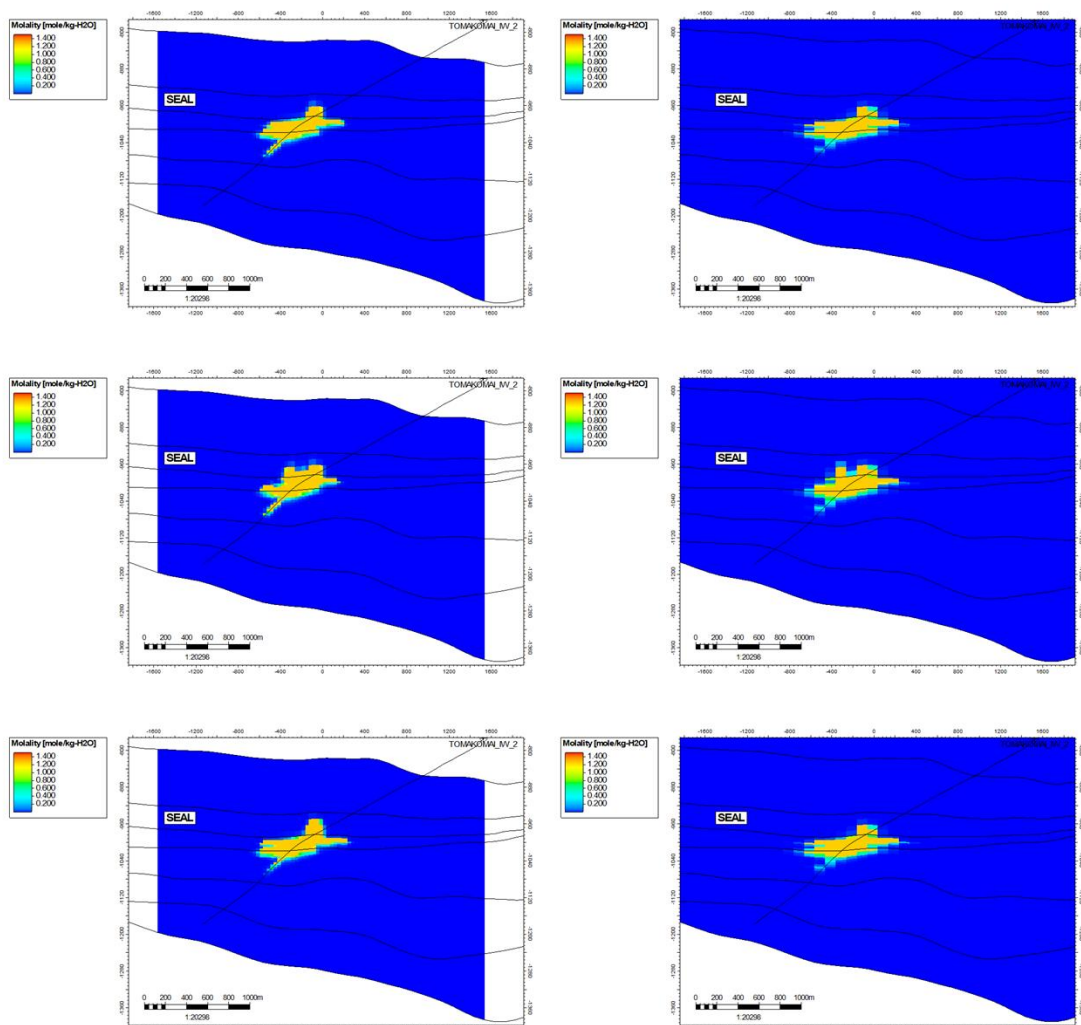
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-37 溶存 CO₂ 量分布 平面図 2100 年



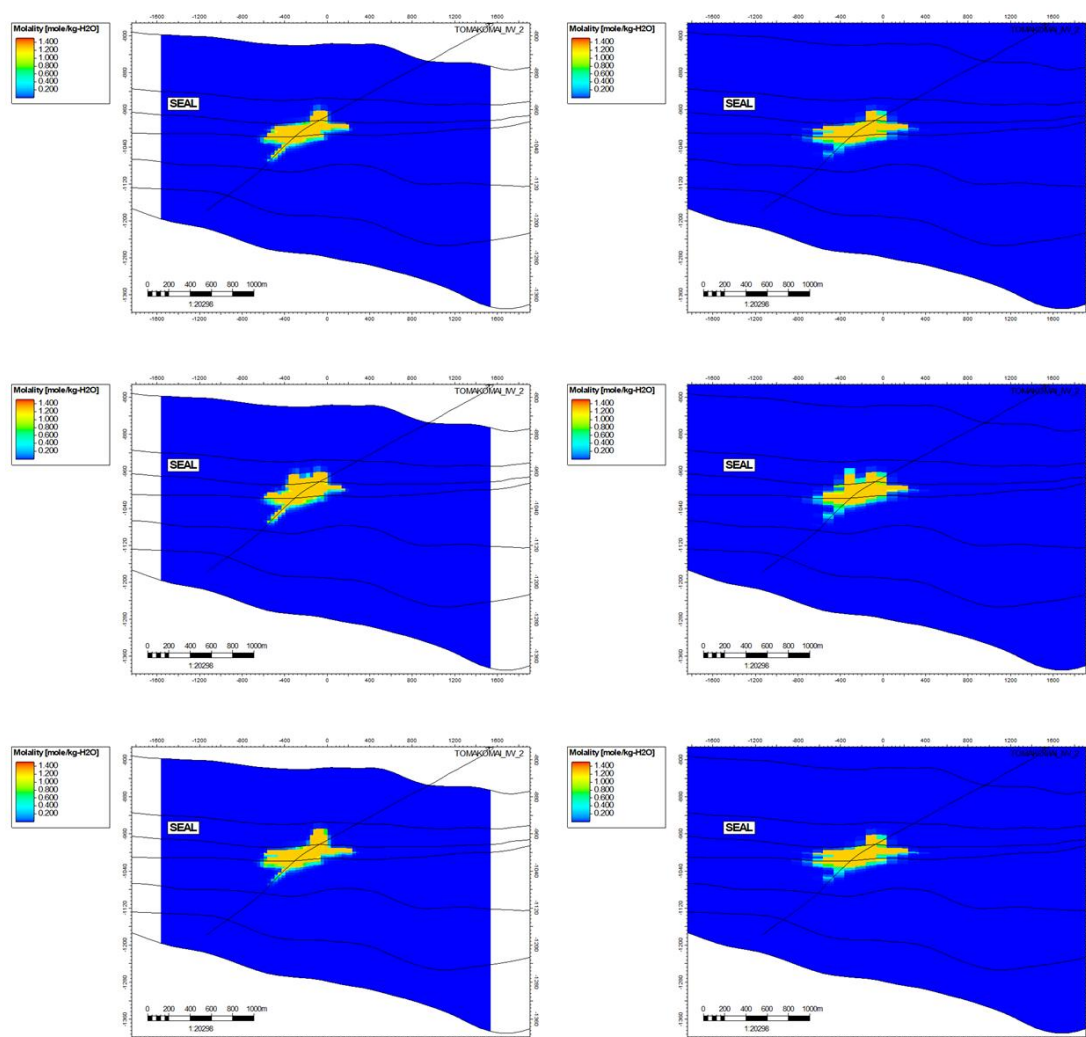
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-38 溶存 CO₂ 量分布 坑跡断面図 2020 年 (圧入停止後 弾性波探査実施時期)



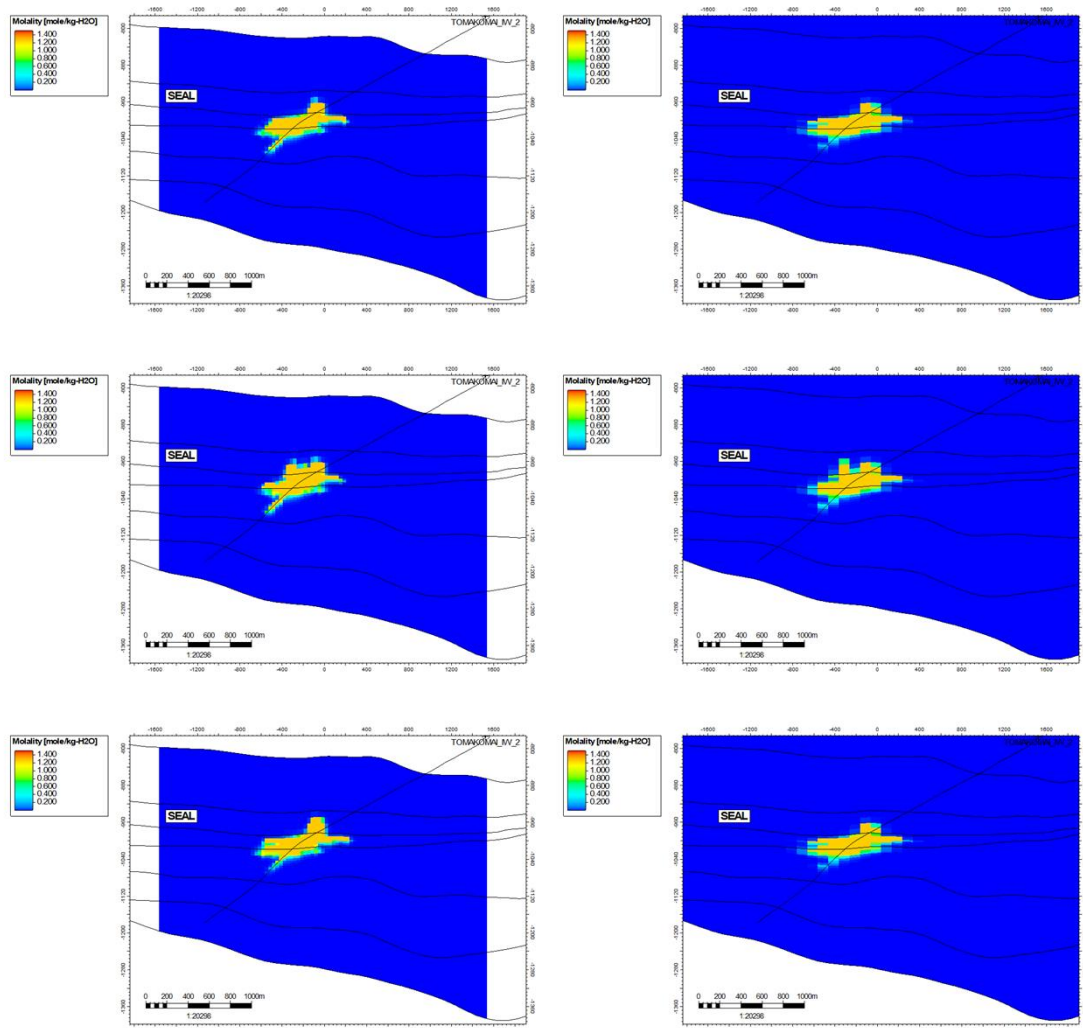
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024年度モデル, 右:2021年度モデル

図 5.4-39 溶存 CO₂ 量分布 坑跡断面図 2025 年



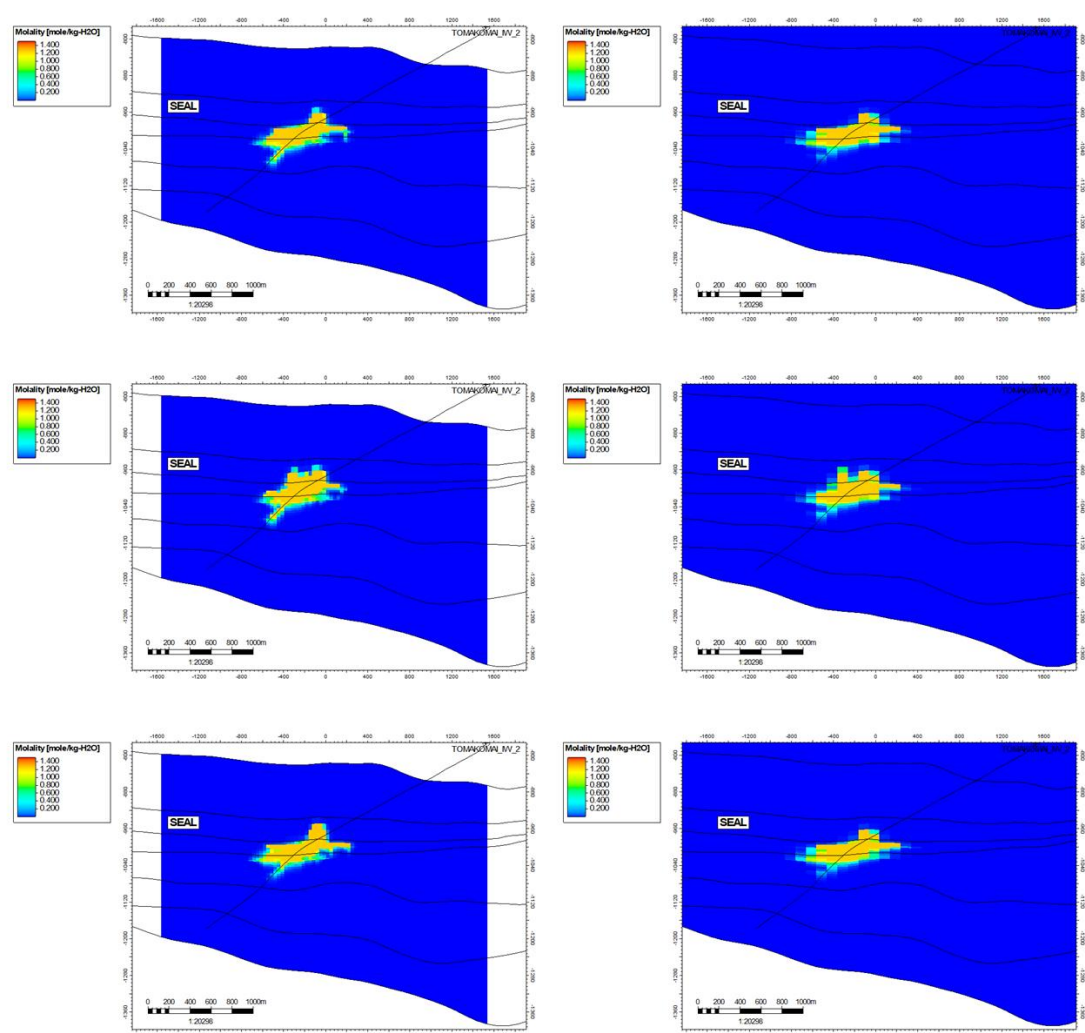
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-40 溶存 CO₂ 量分布 坑跡断面図 2030 年



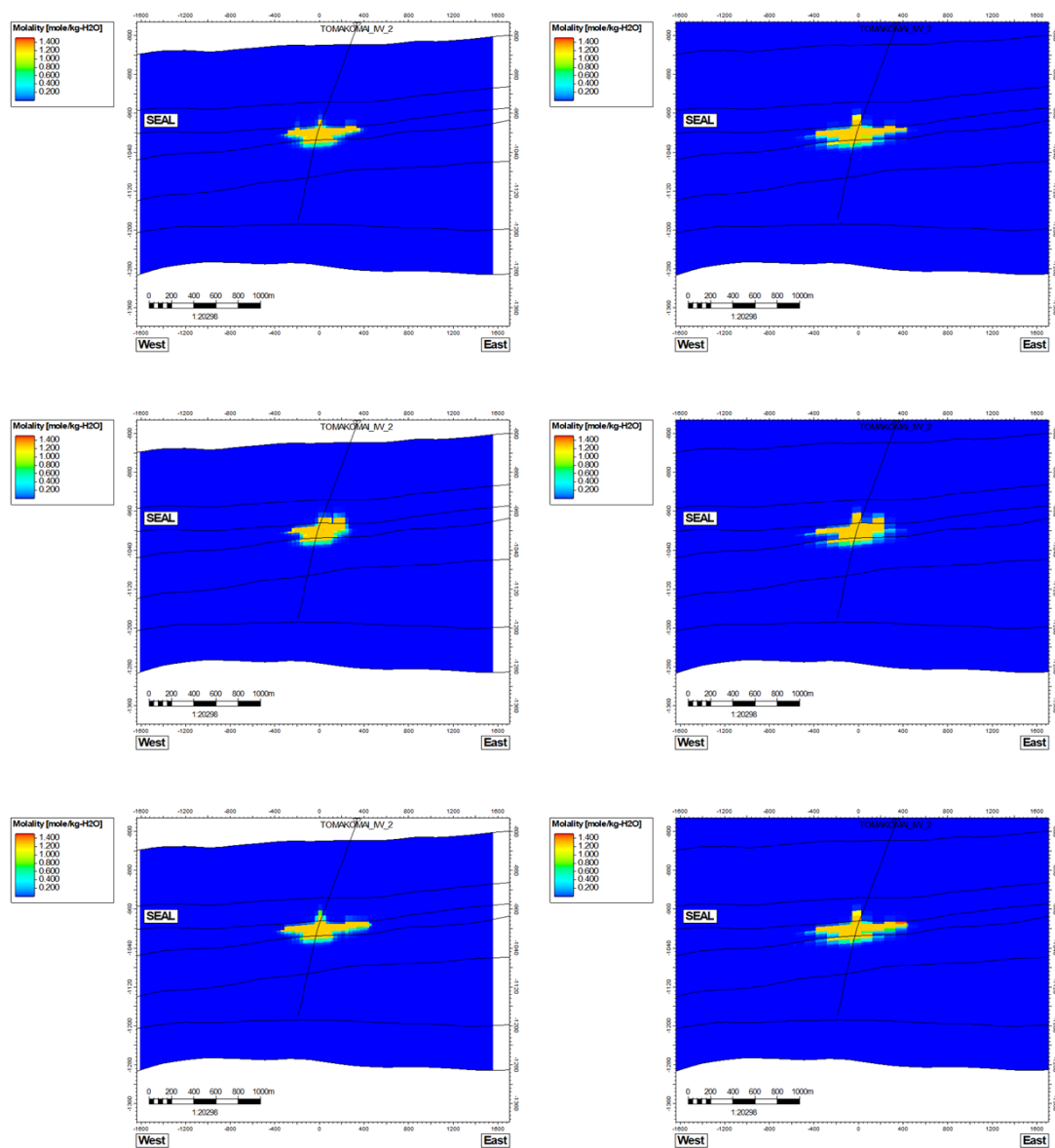
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-41 溶存 CO₂ 量分布 坑跡断面図 2050 年



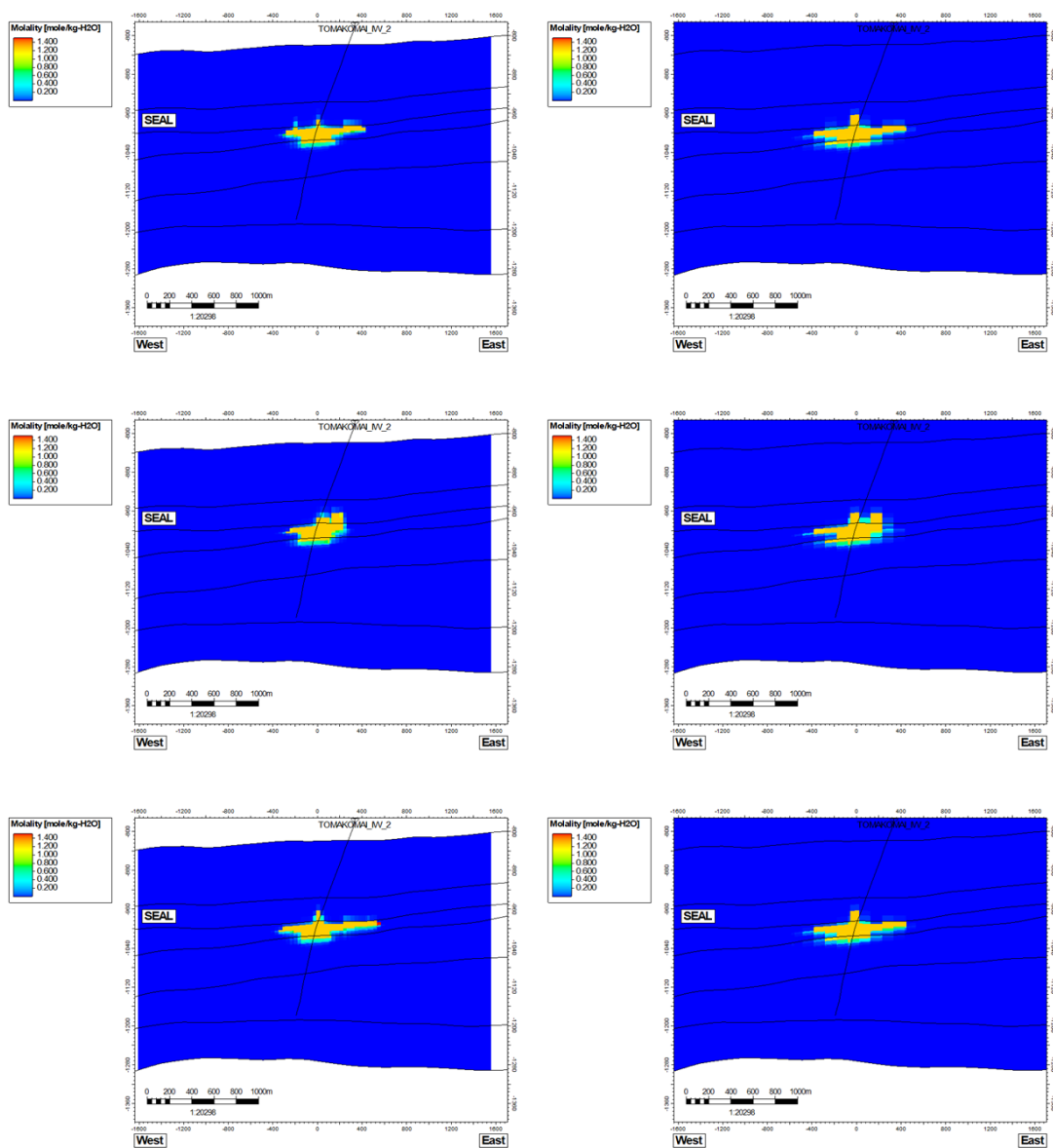
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-42 溶存 CO₂ 量分布 坑跡断面図 2100 年



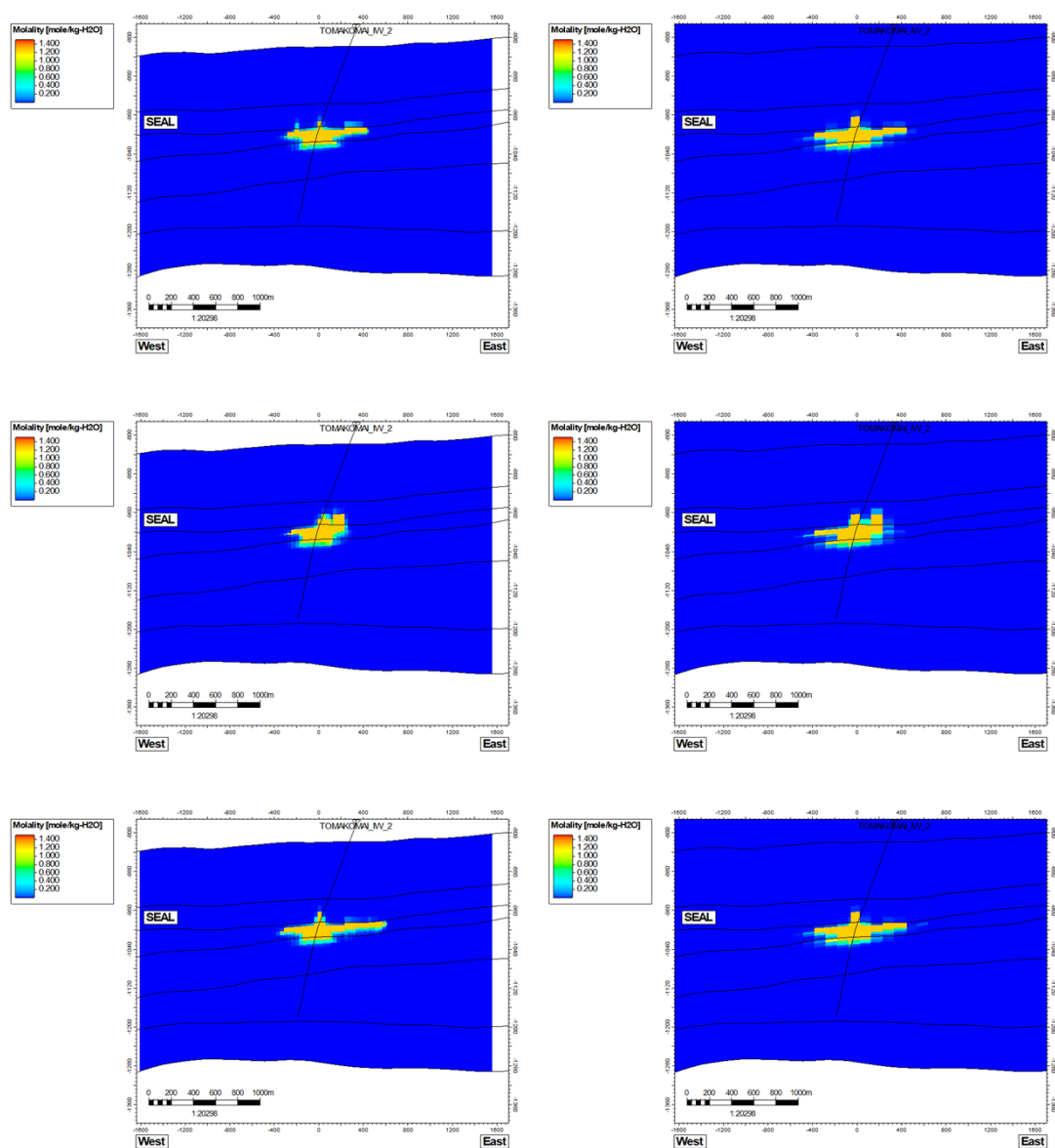
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-43 溶存 CO₂ 量分布 東西断面図 2020 年 (圧入停止後 弾性波探査実施時期)



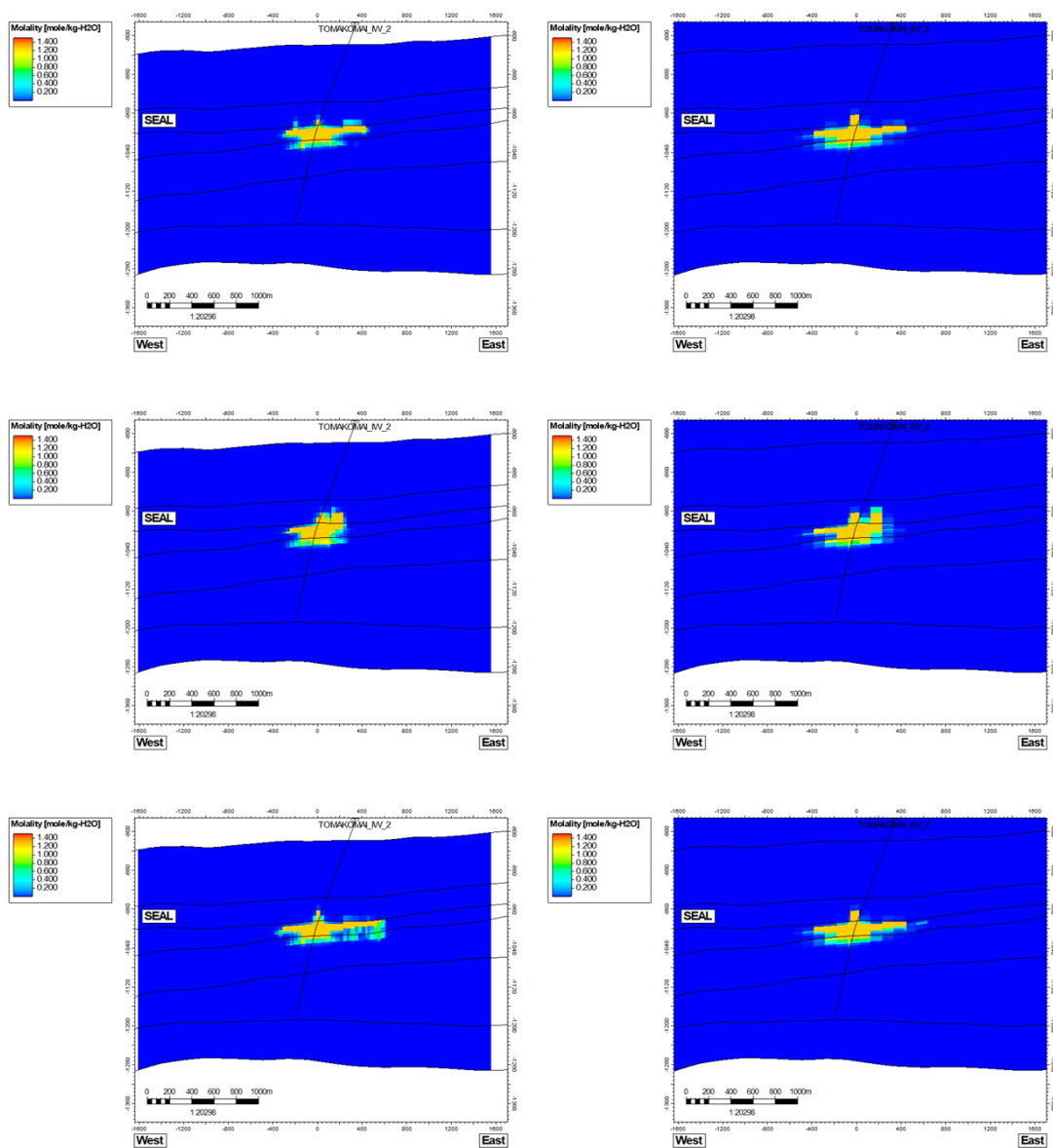
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-44 溶存 CO₂ 量分布 東西断面図 2025 年



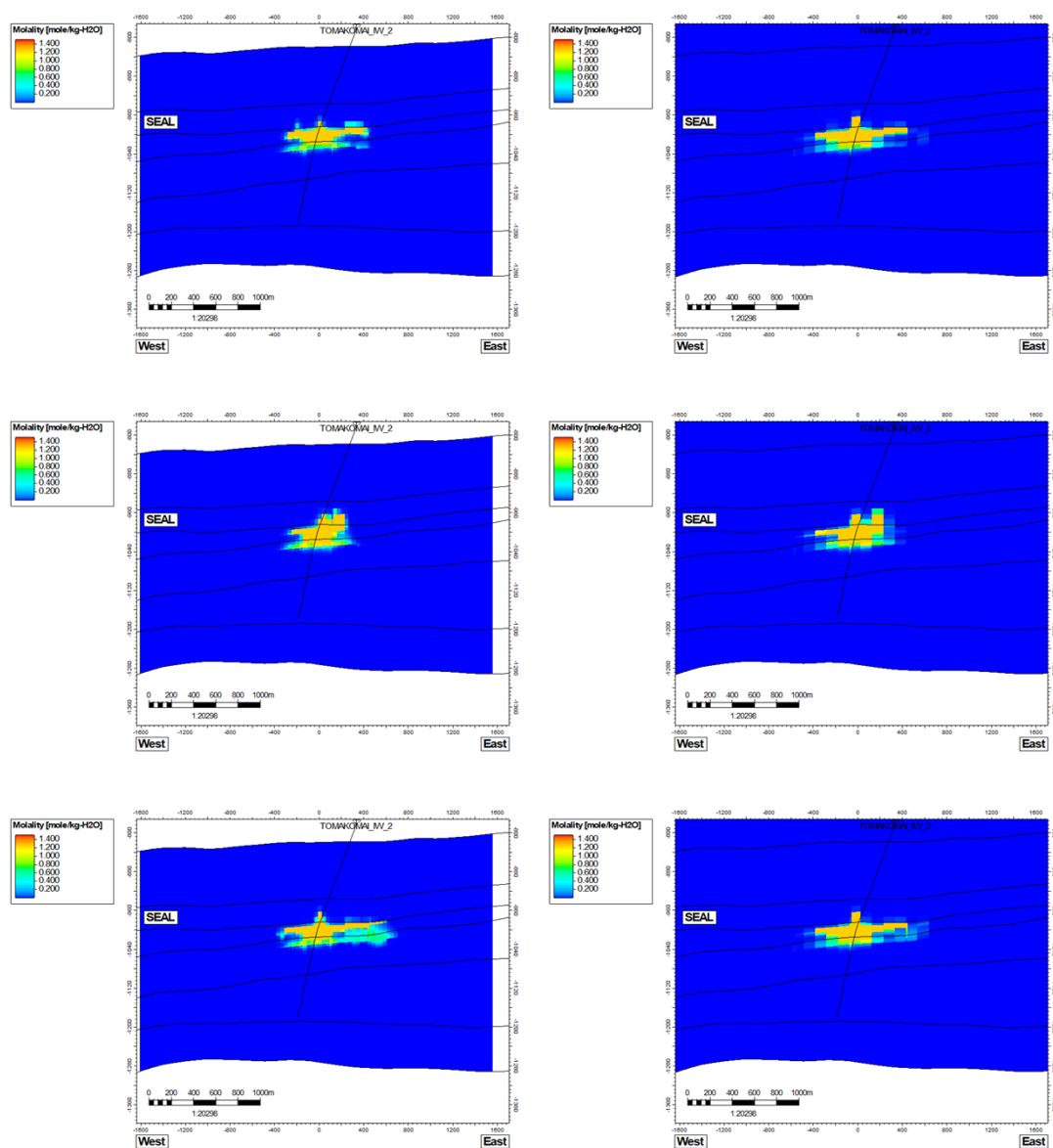
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-45 溶存 CO₂ 量分布 東西断面図 2030 年



注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-46 溶存 CO₂ 量分布 東西断面図 2050 年



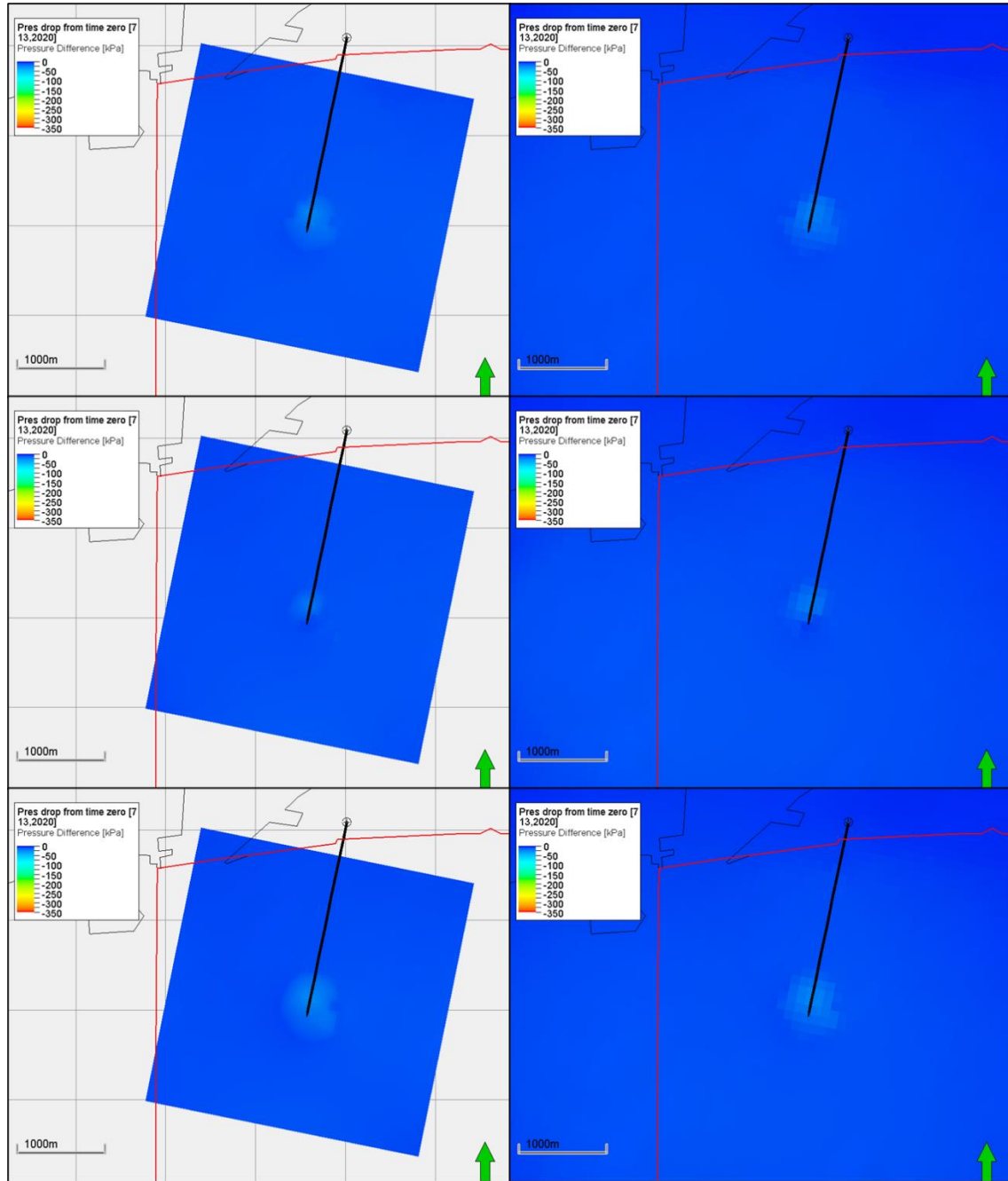
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-47 溶存 CO₂ 量分布 東西断面図 2100 年

(6) 圧力変化分布

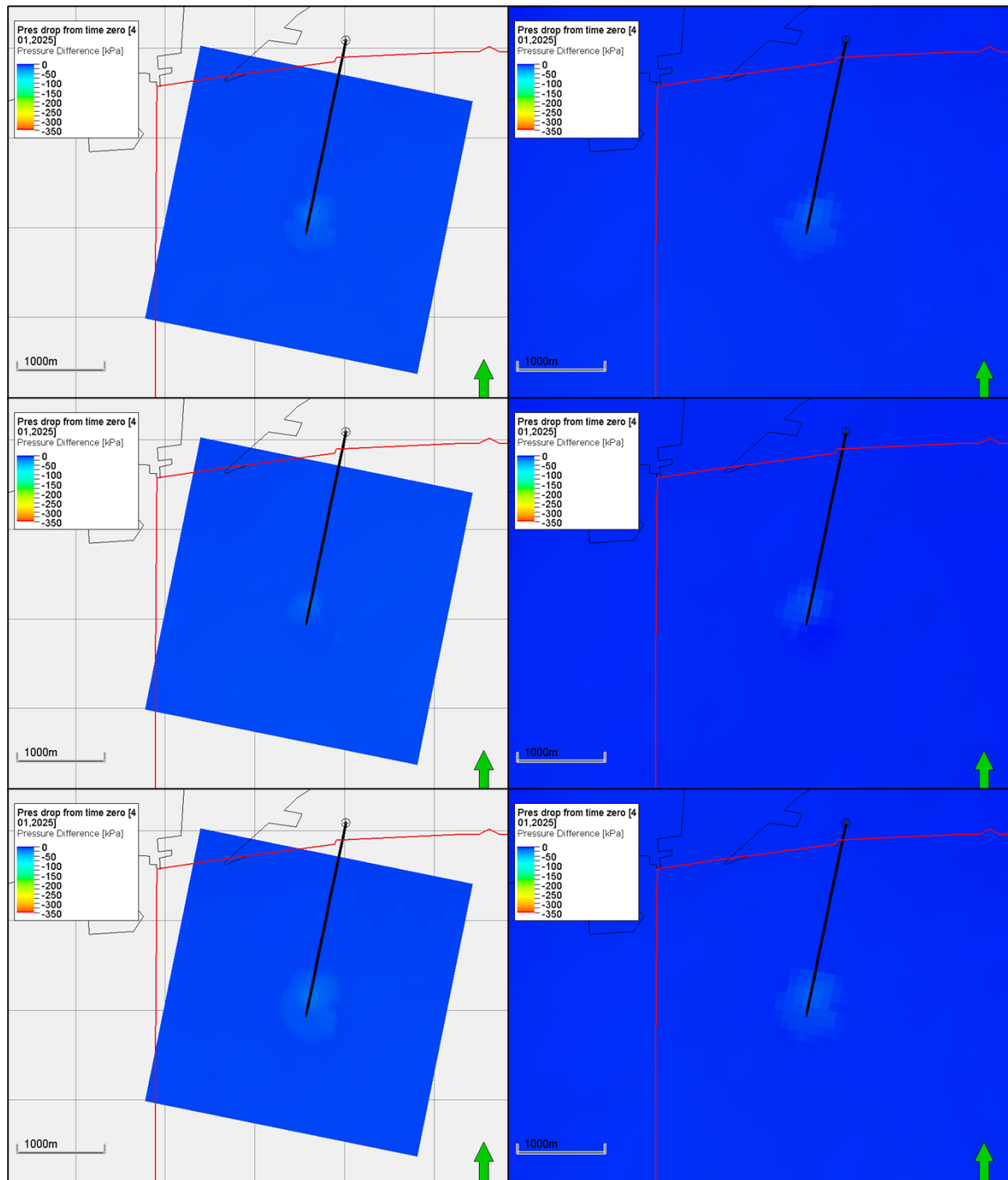
2021年度モデルおよび2024年度モデルにおけるモデルA、モデルB、モデルCについて、2020年（圧入停止後、弾性波探査実施時期）、2025年、2030年、2050年、2100年断面での圧力変化分布の平面図および断面図（図5.4-1で示した坑跡断面および東西断面）を図5.4-48から図5.4-62に示す。なお、平面図については2021年度モデル（フィールドモデル）の貯留層上部に対応するレイヤー（高浸透領域の上面）で比較している。

いずれの具現像においても、圧入停止後に初期圧力に向かって低下していくことを確認した。CO₂が存在する坑井周辺の圧力は2020年には初期圧力から数十kPa高い圧力まで低下し、坑井周辺以外の範囲では圧力変化はほとんど見られない。これらの結果はグリッドサイズ変更前後でもおおむね同様となっている。



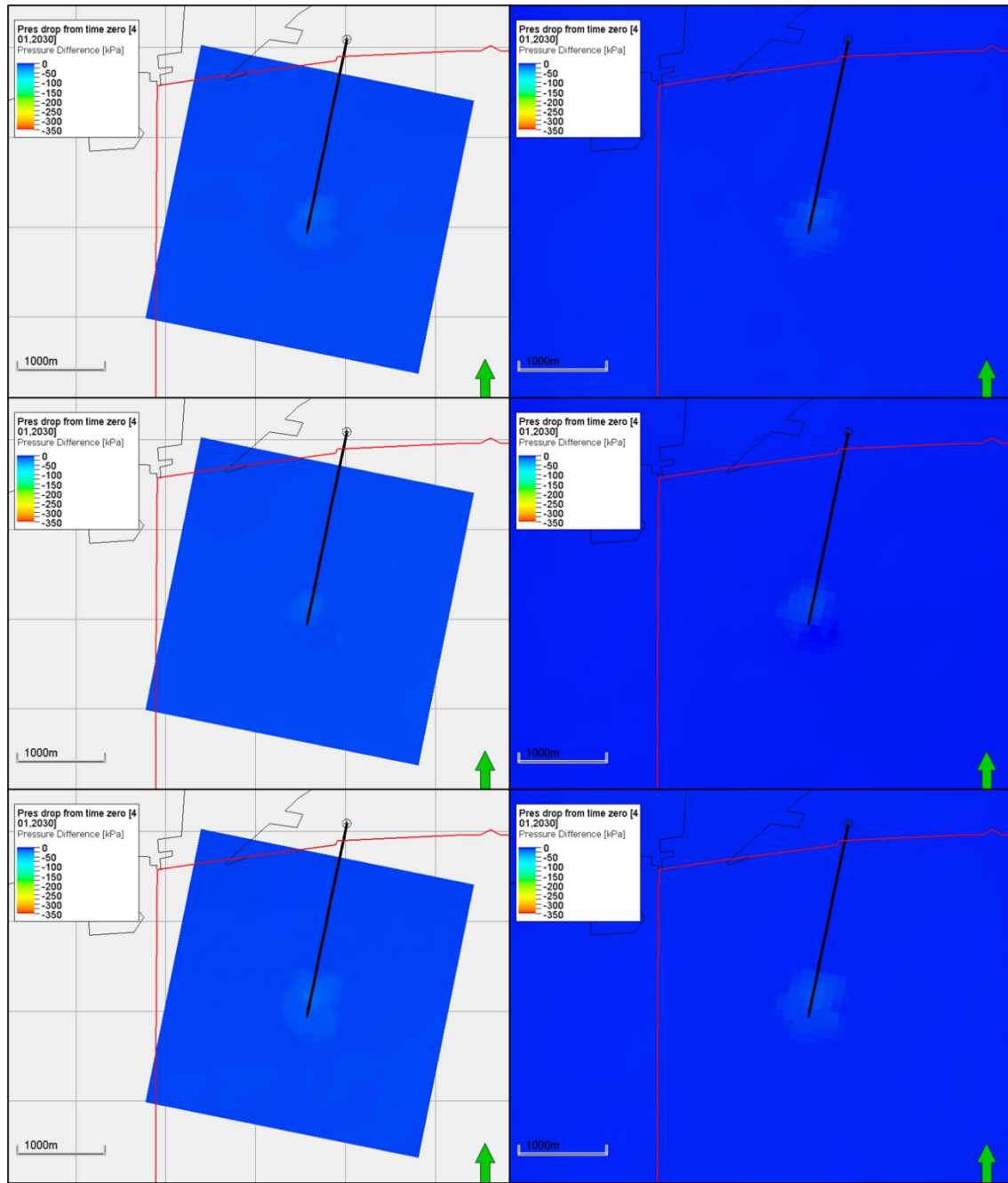
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-48 圧力変化分布 平面図 2020 年 (圧入停止後 弾性波探査実施時期)



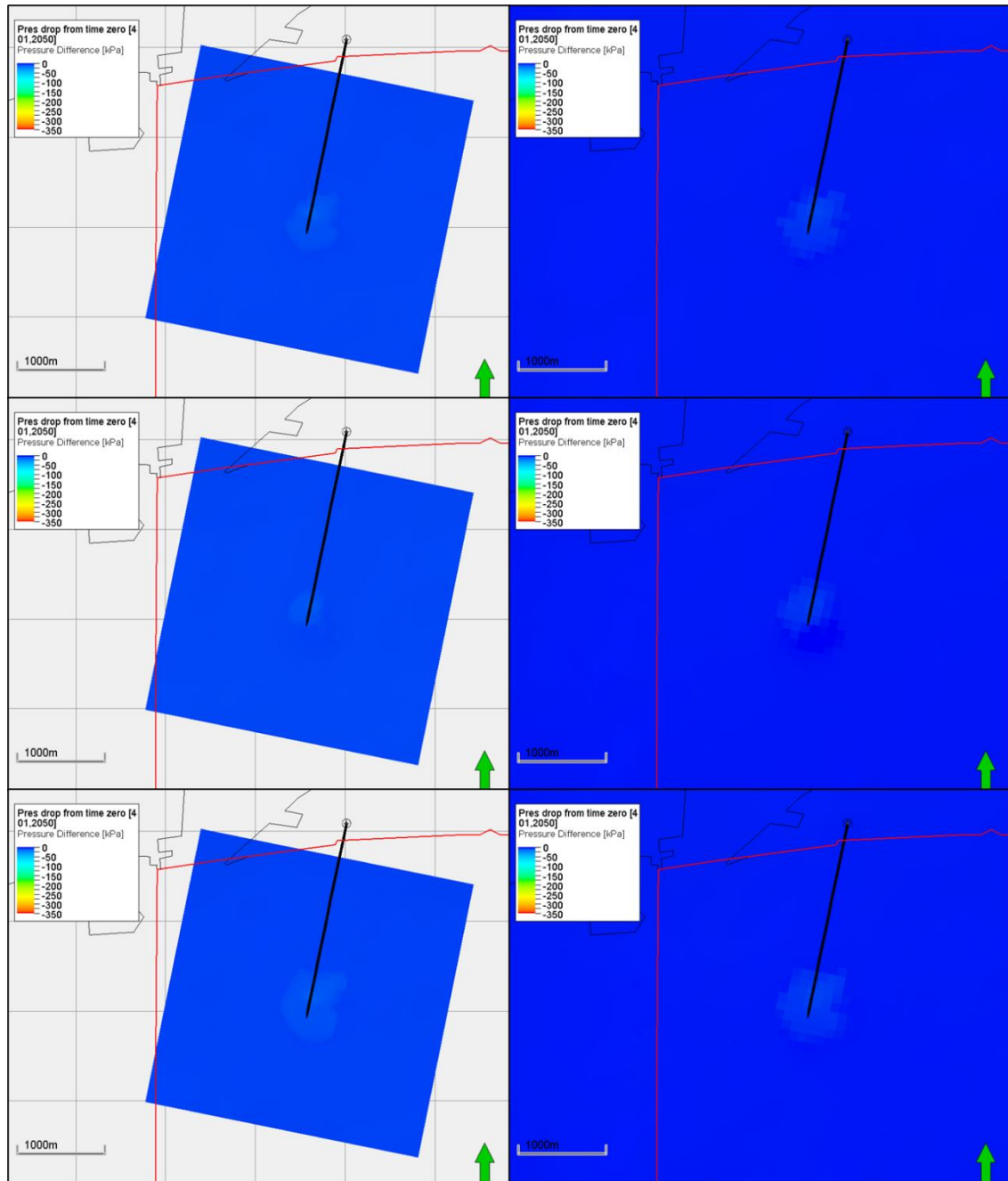
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-49 圧力変化分布 平面図 2025 年



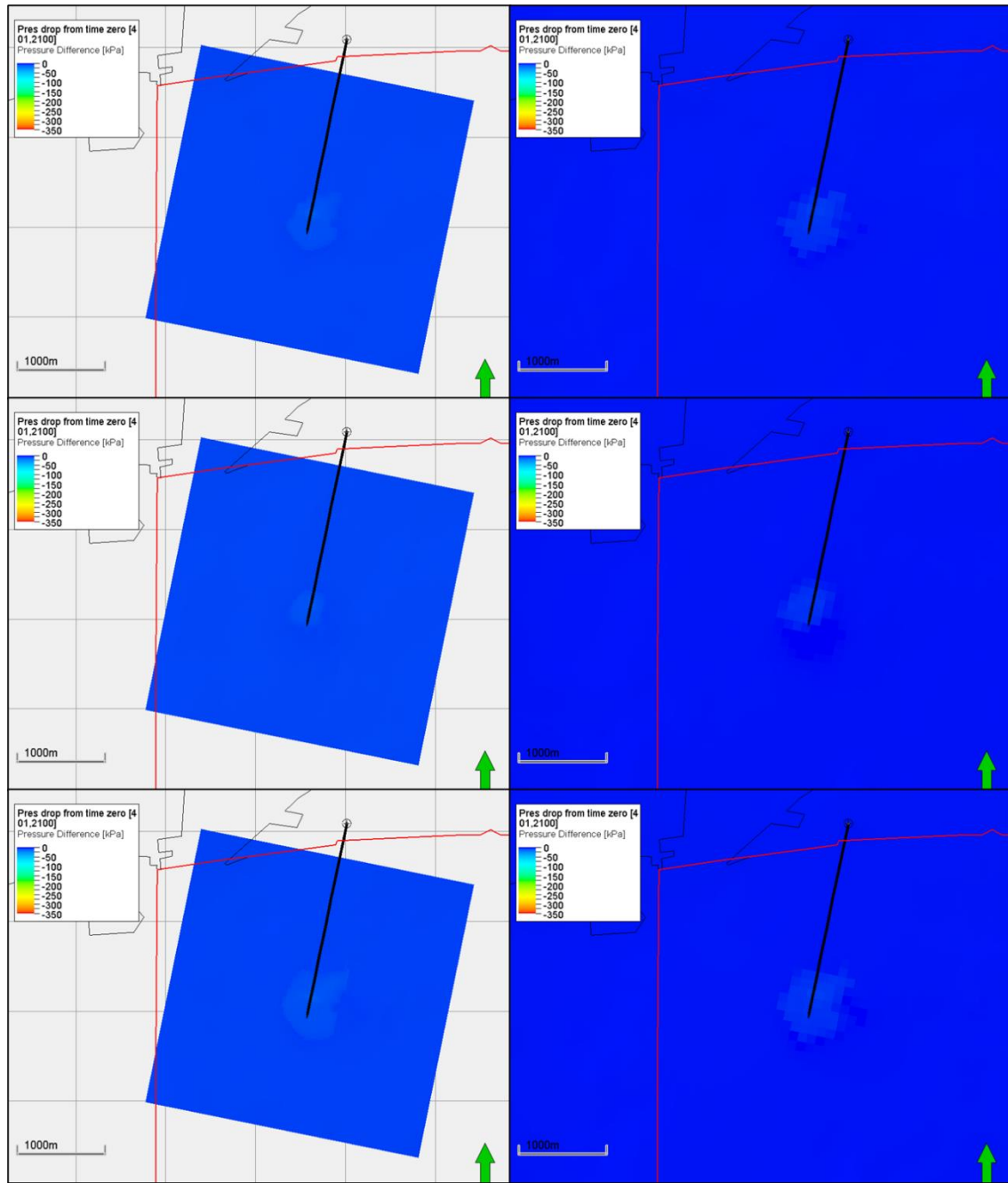
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-50 圧力変化分布 平面図 2030 年



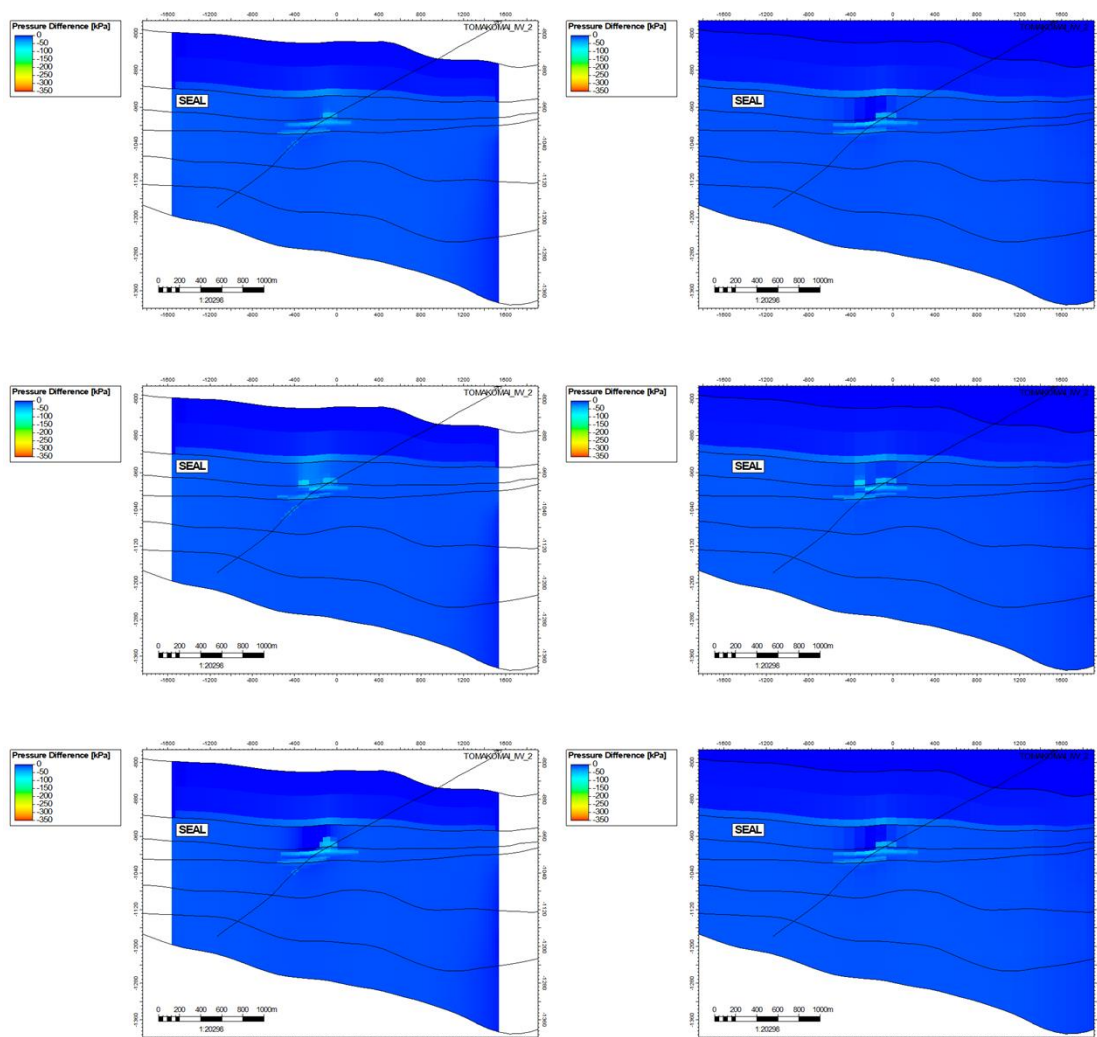
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-51 圧力変化分布 平面図 2050 年



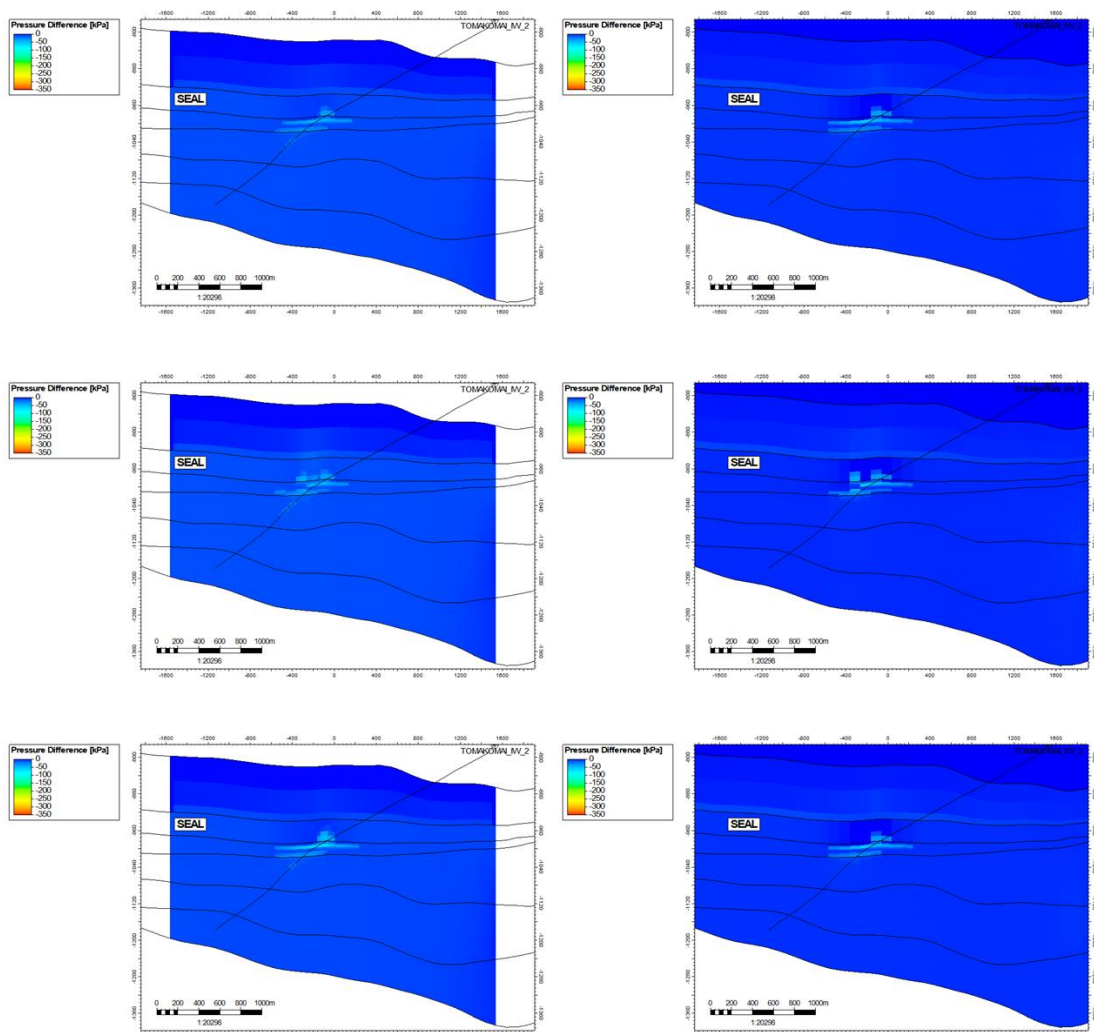
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-52 圧力変化分布 平面図 2100 年



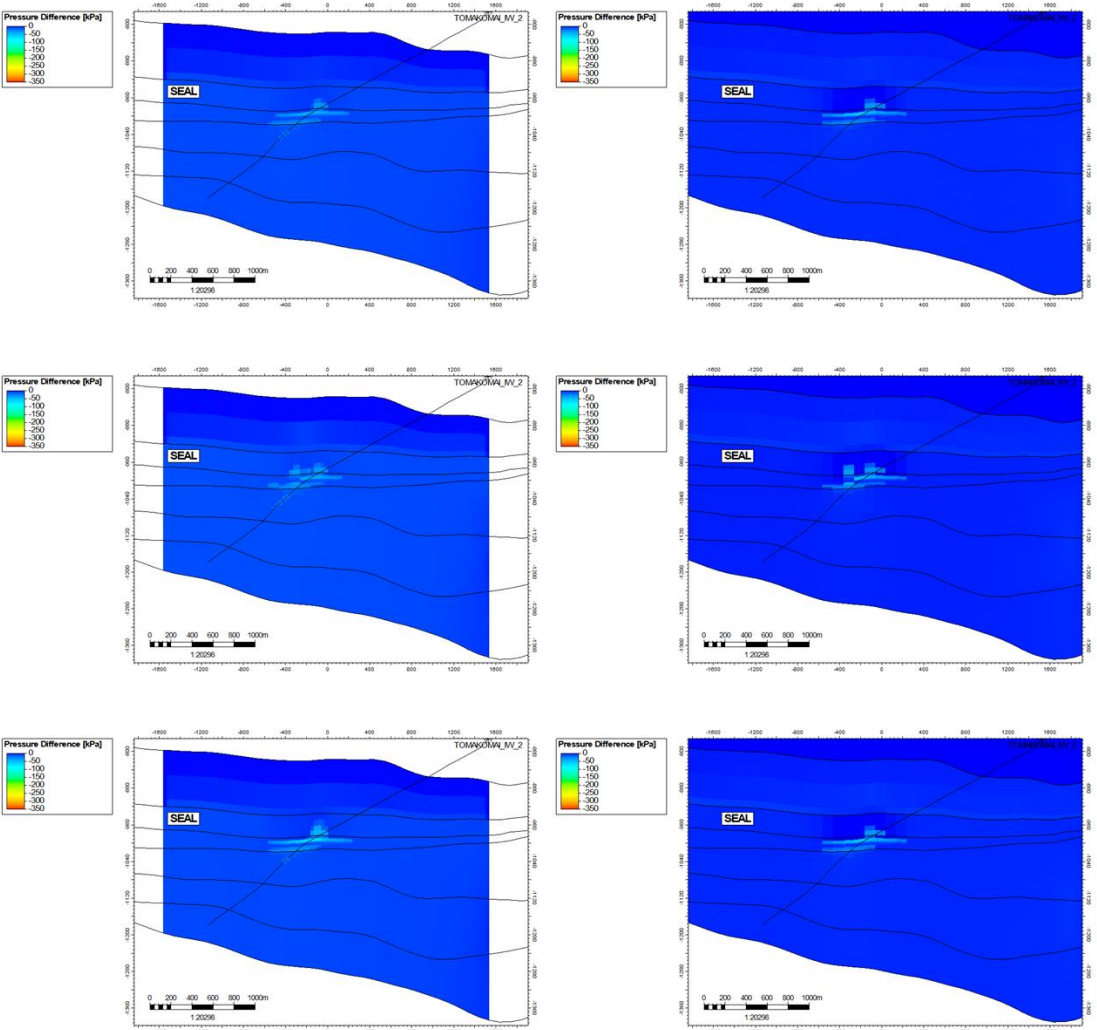
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-53 圧力変化分布 坑跡断面図 2020 年(圧入停止後 弾性波探査実施時期)



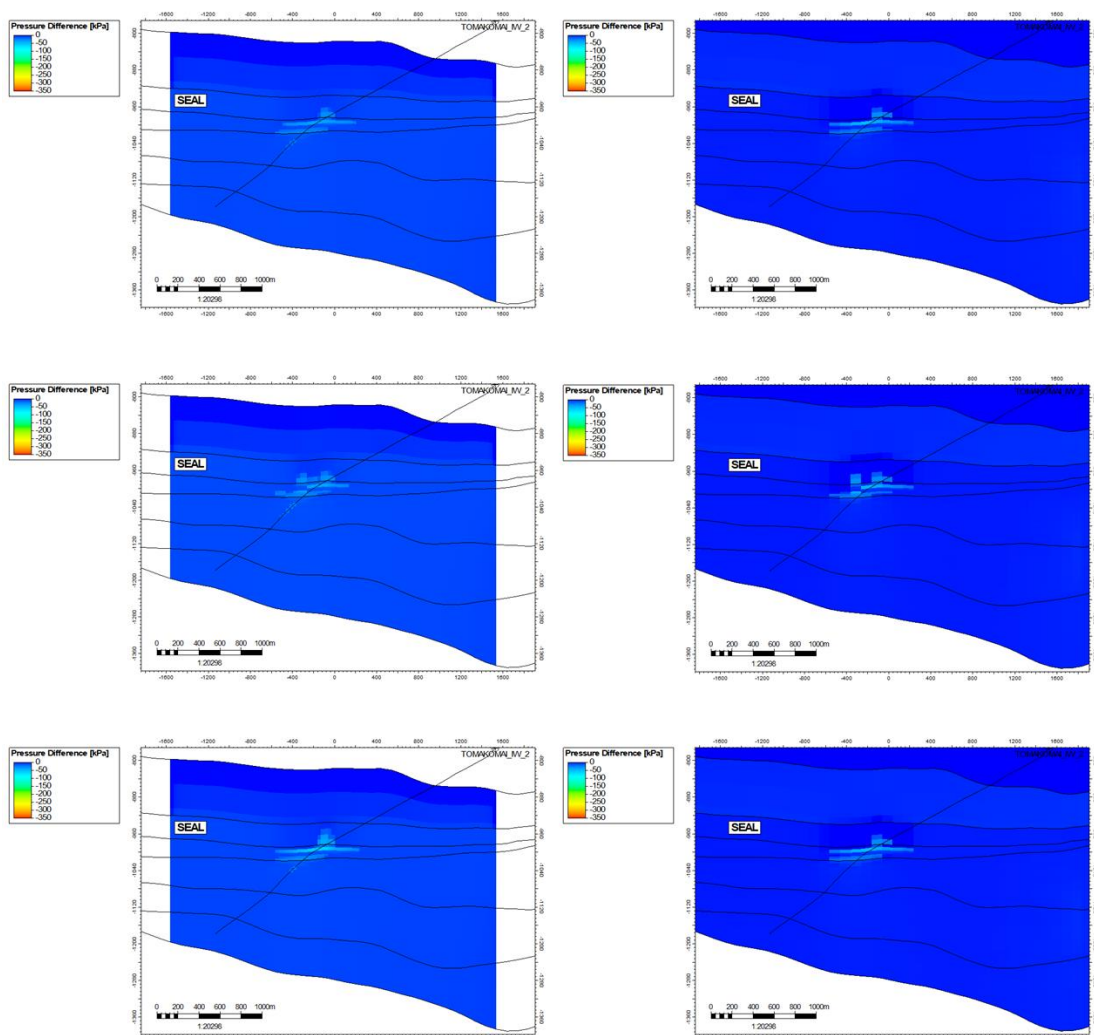
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-54 圧力変化分布 坑跡断面図 2025 年



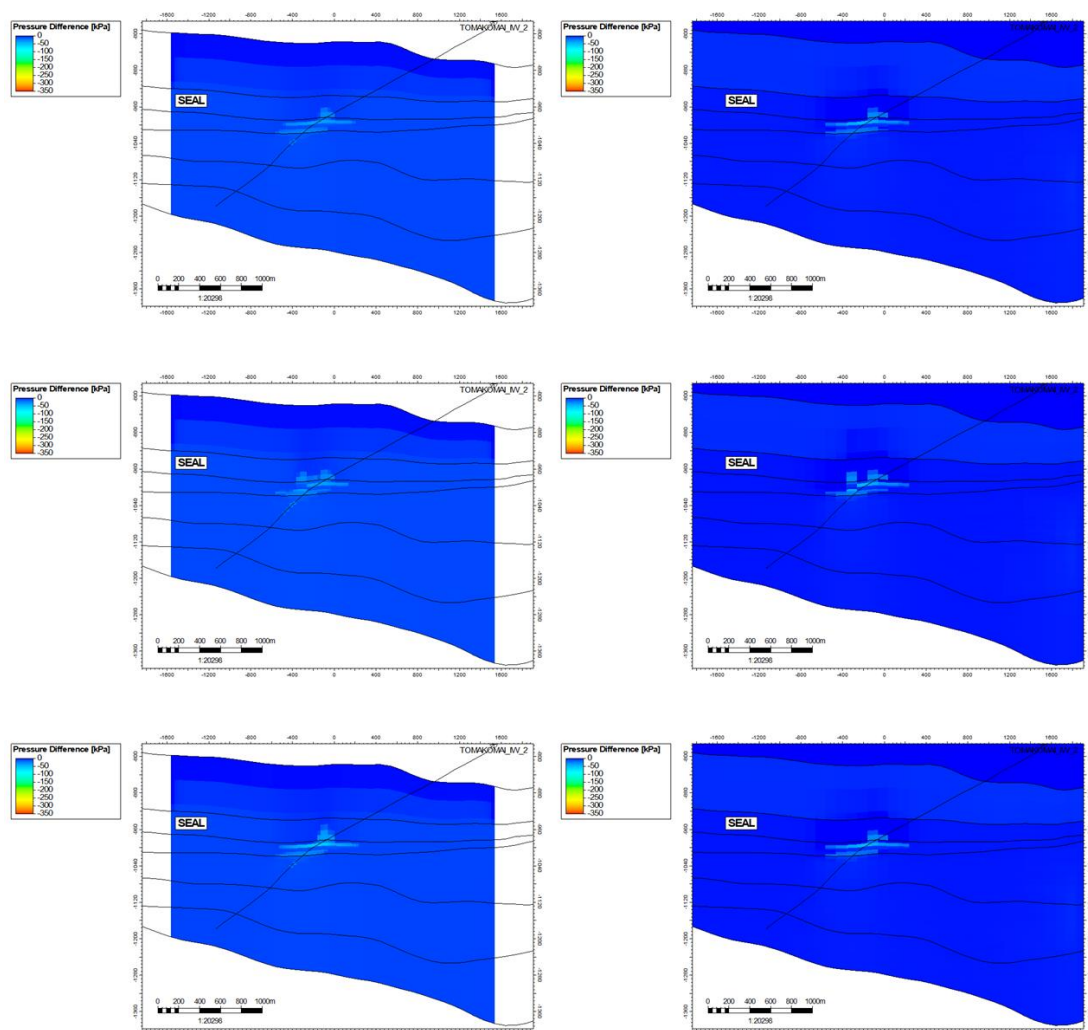
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-55 圧力変化分布 坑跡断面図 2030 年



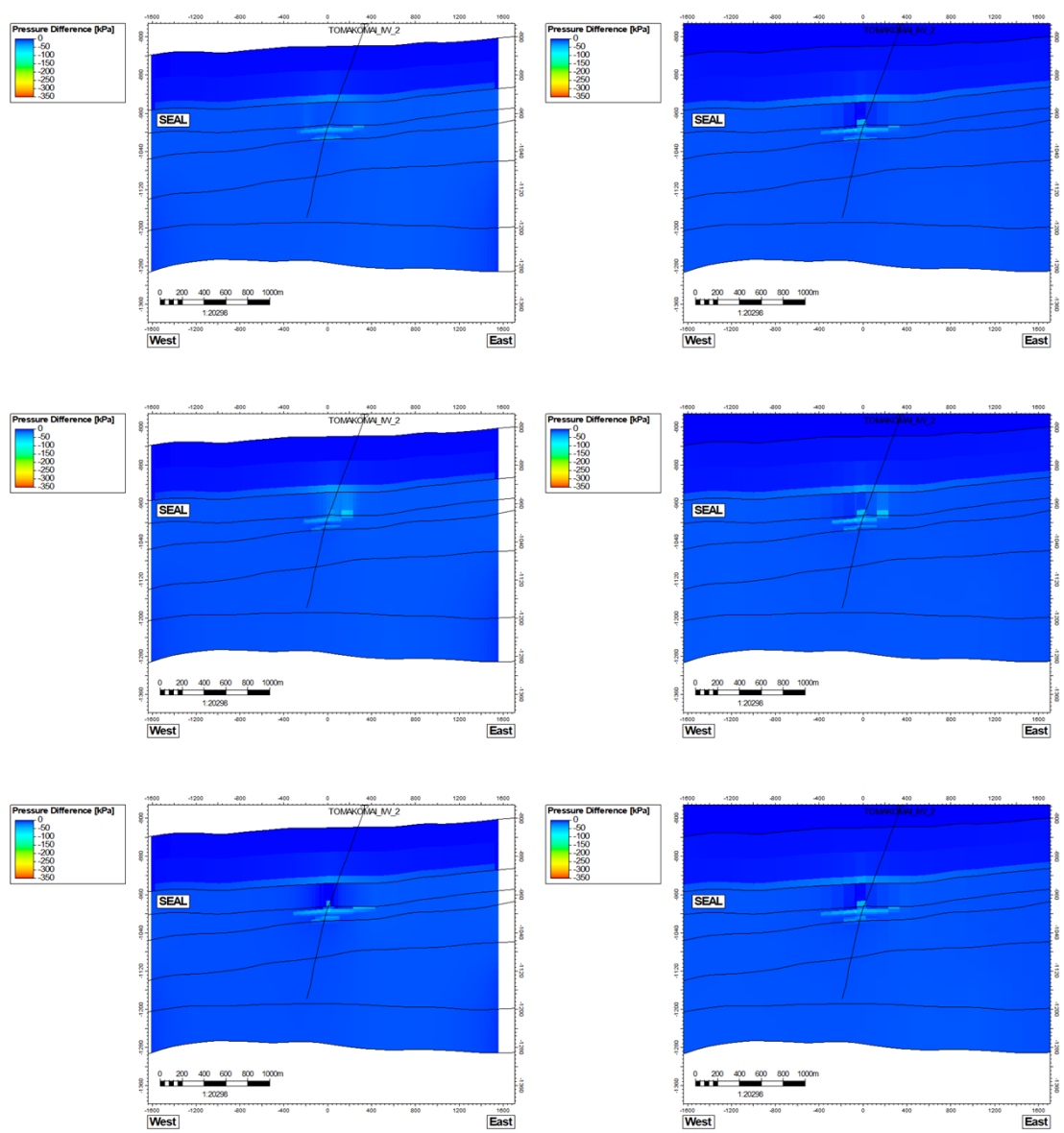
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-56 圧力変化分布 坑跡断面図 2050 年



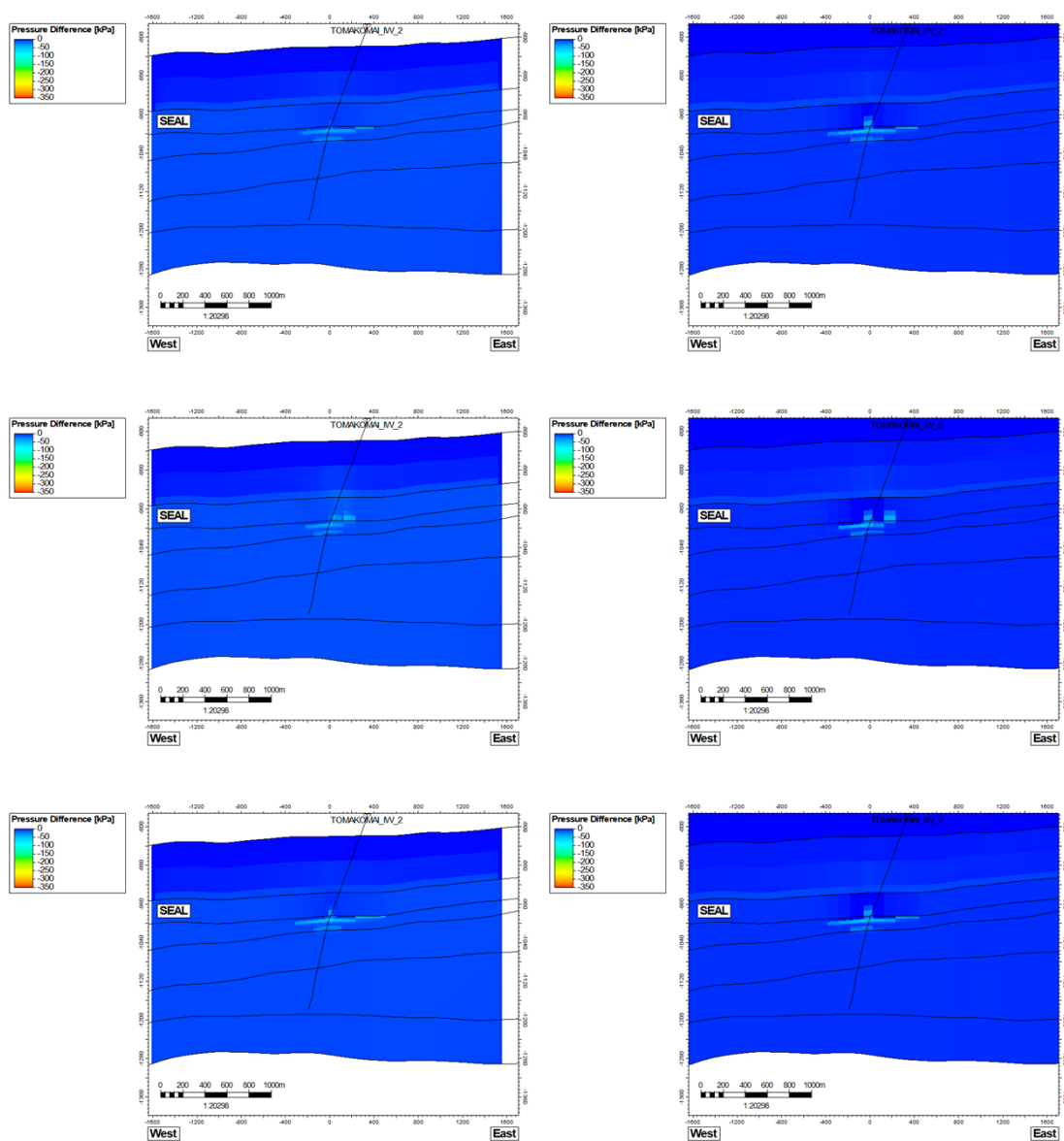
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-57 圧力変化分布 坑跡断面図 2100 年



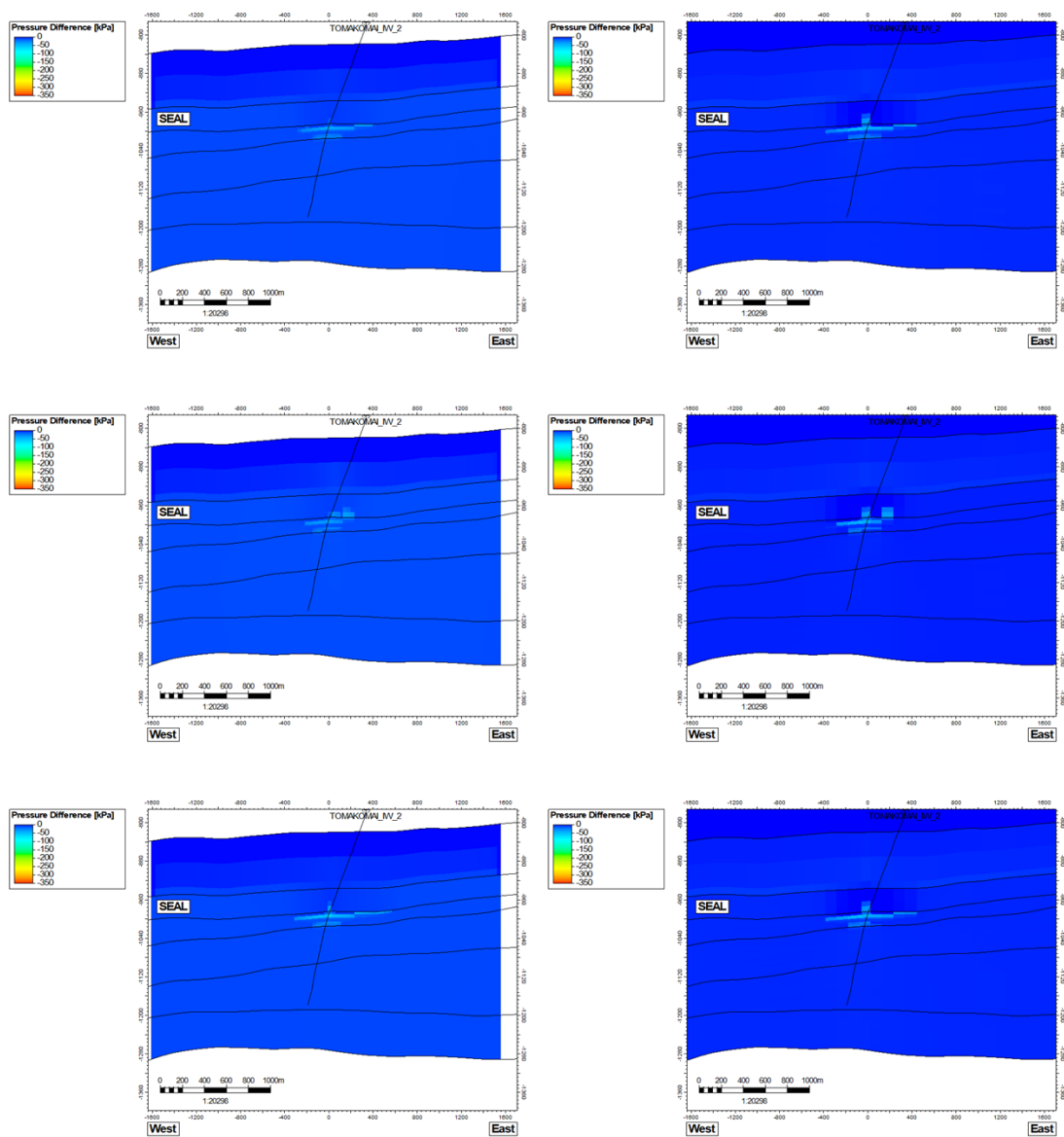
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-58 圧力変化分布 東西断面図 2020 年 (圧入停止後 弾性波探査実施時期)



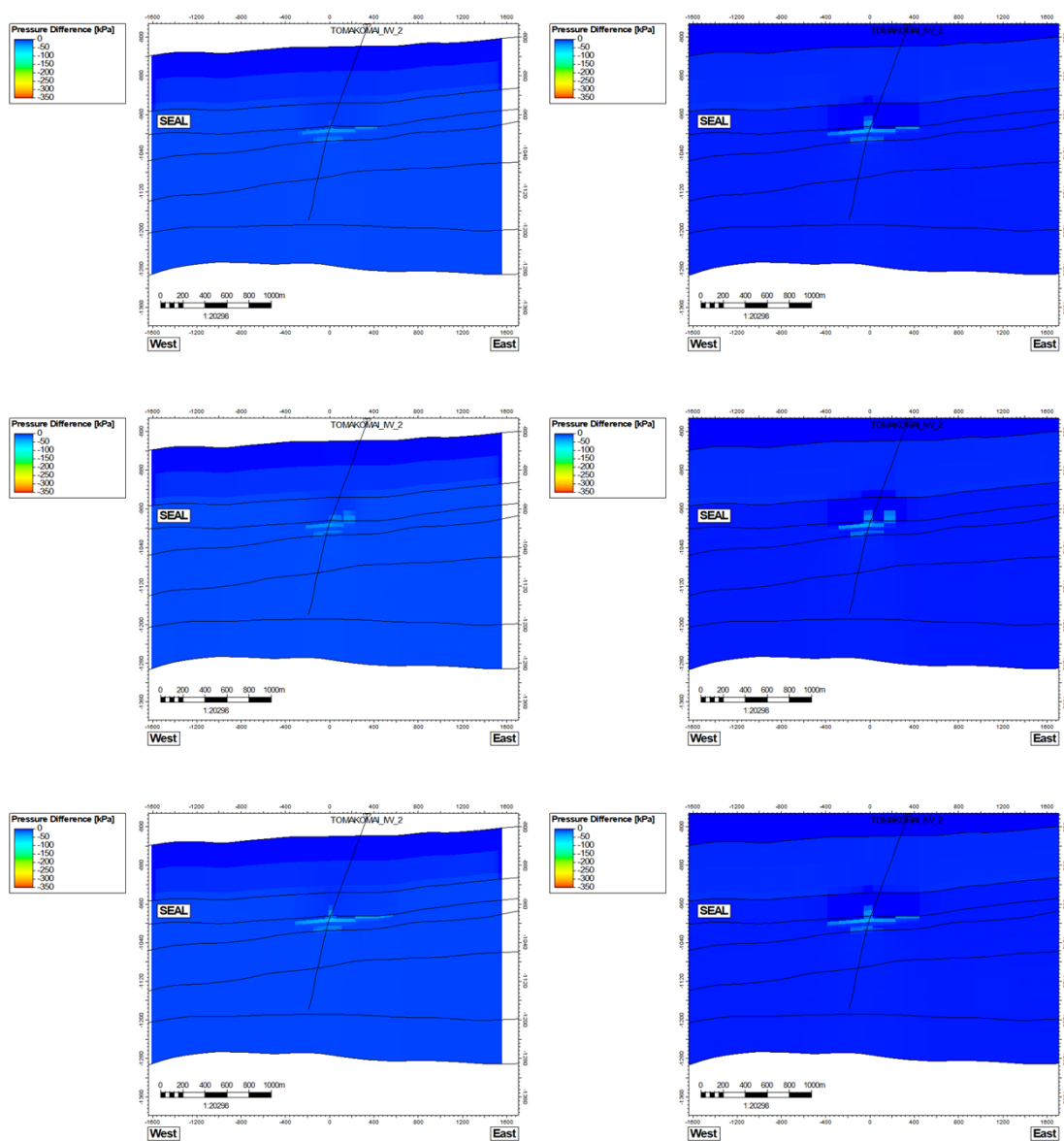
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-59 圧力変化分布 東西断面図 2025 年



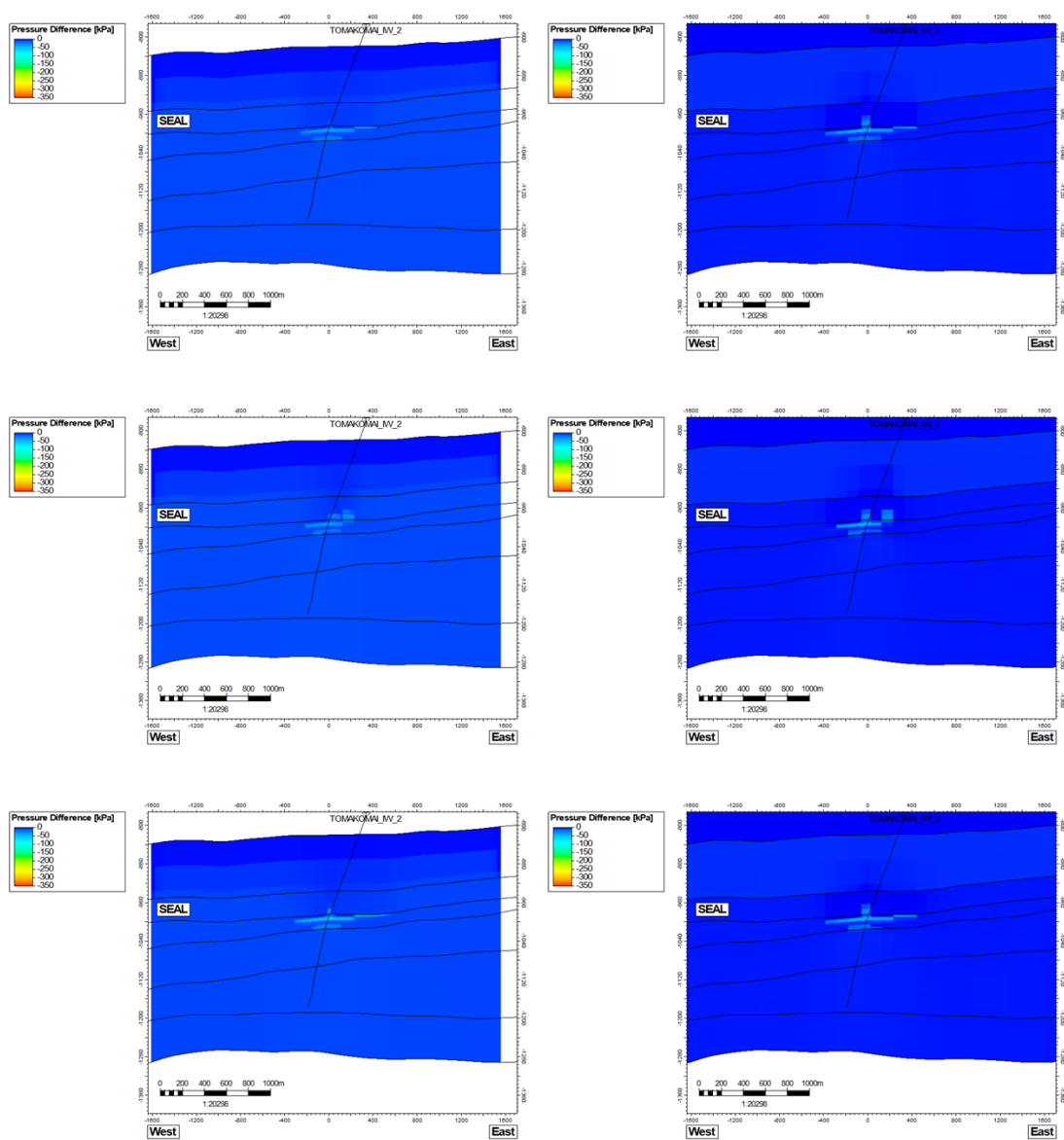
注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-60 圧力変化分布 東西断面図 2030 年



注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024 年度モデル, 右:2021 年度モデル

図 5.4-61 圧力変化分布 東西断面図 2050 年



注) 上段:モデル A, 中段:モデル B, 下段:モデル C, 左:2024年度モデル, 右:2021年度モデル

図 5.4-62 圧力変化分布 東西断面図 2100 年

5.4.3 シミュレーションのまとめと今後の検討事項

本節では、2021年度モデル（2021年度の圧入可能量評価結果から抽出したP90相当、P50相当、P10相当の具現像）を用いて、異なるグリッドサイズでCO₂飽和率分布、溶存CO₂量分布、圧力変化分布の推移を比較し、またシミュレーション結果（CO₂飽和率分布）と4D差分解析結果との比較、およびCO₂飽和率分布の広がり方に対する定量評価も試行した。

圧力分布については、いずれの具現像およびグリッドサイズにおいても、圧入停止後に初期圧力まで低下していくことが確認された。

CO₂飽和率分布については、いずれの具現像およびグリッドサイズにおいても2030年頃までにはおおむね広がりが止まっていることを確認できた。また4D差分解析結果から示唆されるCO₂が貯留されている範囲、およびシミュレーションから示唆されるCO₂飽和率が変化する可能性のある範囲を重ねたところ、一定の整合性があることを確認した。CO₂飽和率分布範囲が安定するまでの期間の定量評価として、シミュレーションのCO₂飽和率が一定の値を超えるセル数の変化率を計算したところ、CO₂飽和率分布範囲の長期的安定性の評価として適用可能となり得ることを確認した。

今回の評価手法に影響を与える要因に関して、今後の検討事項は以下を考えている。

1) CO₂飽和率のカットオフ値

弾性波の差分解析では飽和率の変化のうち約5%以上が表現されと考えられるので、3%、5%、10%等のカットオフ値を適用し、影響度を確認する。

2) モデル数

本スタディでは3モデルで検討を行ったが、さらにモデル数を増やして不確実性を検討する。

【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)
- 3) Gardner, G.H.F., L.W. Gardner, and L.W. Gregory, 1974, Formation velocity and

density -- the diagnostic basics for stratigraphic traps, Geophysics, 39, 770-780.