

目次

第5章 貯留層等総合評価	1
5.1 萌別層地質構造解釈の更新.....	1
5.1.1 調査対象範囲	1
5.1.2 坑井対比（IW-2）	5
5.1.3 構造解釈の更新.....	7
5.1.4 深度変換.....	9
5.1.5 差分記録に関する考察	12
5.2 地質モデリング	16
5.2.1 地質モデリングの概要	16
5.2.2 地質モデルの更新	18
5.2.3 地質モデル更新結果.....	23
5.3 苫小牧 IW-2 圧入圧力の予実績比較	25
5.3.1 予実績比較	25
5.3.2 セクターモデルの作成	26
5.3.3 IW-2 坑底圧力の予実績比較.....	28
5.3.4 OB-2 坑底圧力上昇値の予実績比較	30
5.4 IW-2 ヒストリーマッチング	31
5.4.1 使用モデル	33
5.4.2 岩相分布の作成.....	33
5.4.3 パラメータの設定	34
5.4.4 浸透率の検討	39
5.4.5 ヒストリーマッチ状況の判断	39
5.4.6 浸透率の組合せとスキんファクターの組合せ選定	40
5.4.7 ヒストリーマッチ状況	42
5.4.8 CO ₂ の垂直方向への浸透についての考察.....	47
5.4.9 苫小牧 IW-2 ヒストリーマッチングまとめ.....	48
5.5 IW-2 流動シミュレーション	48
5.5.1 具現像の抽出	48
5.5.2 グリッドモデル.....	50
5.5.3 境界条件の設定.....	53
5.5.4 流動シミュレーションパラメータ設定方法	53
5.5.5 圧入可能量評価.....	61

5.5.6 ケーススタディ	84
5.6 今後の課題.....	100

第5章 貯留層等総合評価

5.1 萌別層地質構造解釈の更新

5.1.1 調査対象範囲

(1) 調査対象範囲概要

2021年度貯留層等総合評価では、苫小牧沖3D弾性波探査データ（2020）を使って地質構造解釈を更新した。主に苫小牧IW-2（以下、「IW-2」と称する。）近傍の萌別層貯留層を更新対象とし、図5.1-1の赤枠で示す既存の地質モデル範囲全域の構造図を更新した。

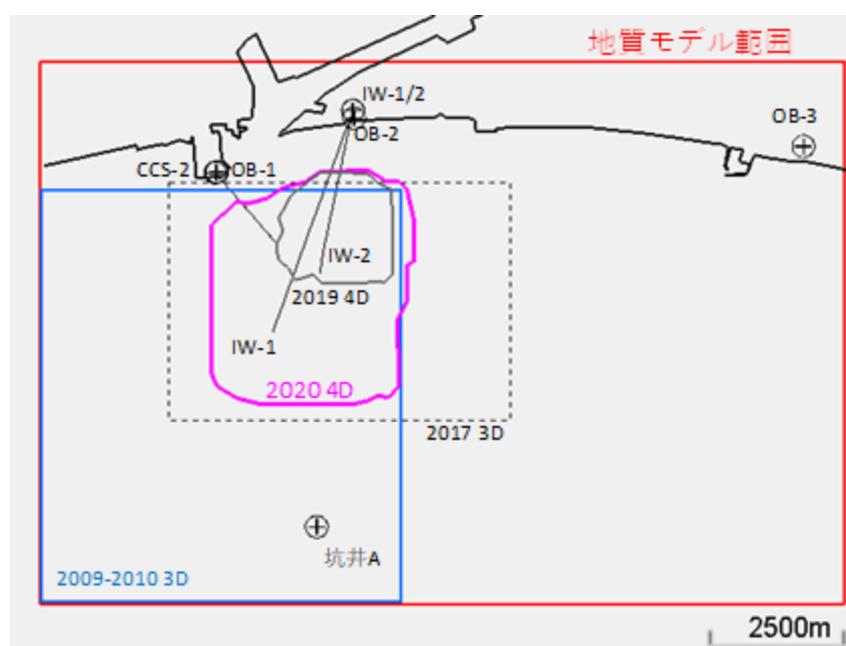


図 5.1-1 調査対象範囲

(2) 苫小牧沖3D弾性波探査データ（2020）概要

調査対象範囲では、2009～2010年度の3D探査弾性波探査データ取得以降に4回の3D弾性波探査を実施している。本構造解釈更新作業では主に苫小牧沖3D弾性波探査データ（2020）の差分解析検討結果をもとに検討した。この差分解析検討で使用したベースライン記録（以下、「2020年ベースライン記録」と称する。）は、2009年度3D弾性波探査に2017年度および2018年度3D探査弾性波探査記録の中から圧入したCO₂の影響が及んでいない範囲（2017年度はその調査領域東側、2018年度はその調査領域北側）を加えて拡張したものである。

また、ベースライン記録と各年度の繰り返し探査記録（以下、「4D記録」と称する。）の比較を図 5.1-2 に、各年度の差分記録の比較を図 5.1-3 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 5.1-2 に示すように、各年度によって有効なデータ範囲が異なるが、これはデータ取得範囲が異なるためである。

図 5.1-2 では、ベースライン記録と比べて各 4D 記録の貯留層内の反射波振幅が年によって変化している。図 5.1-3 の差分記録は、各年度の 4D 記録とベースライン記録の差分を取ったものである。

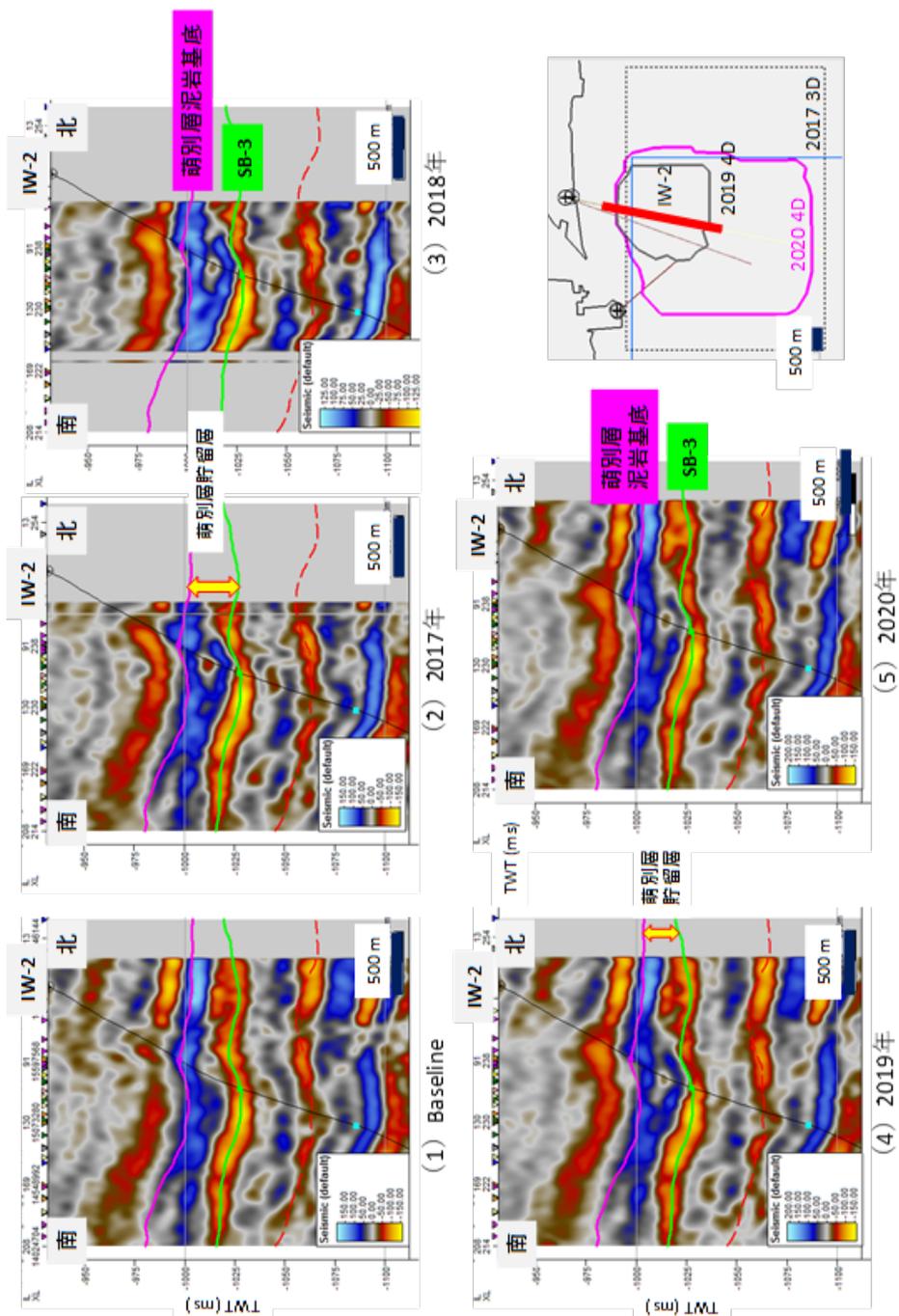


図 5.1-2 ベースライン記録と各年度の繰り返し探査記録

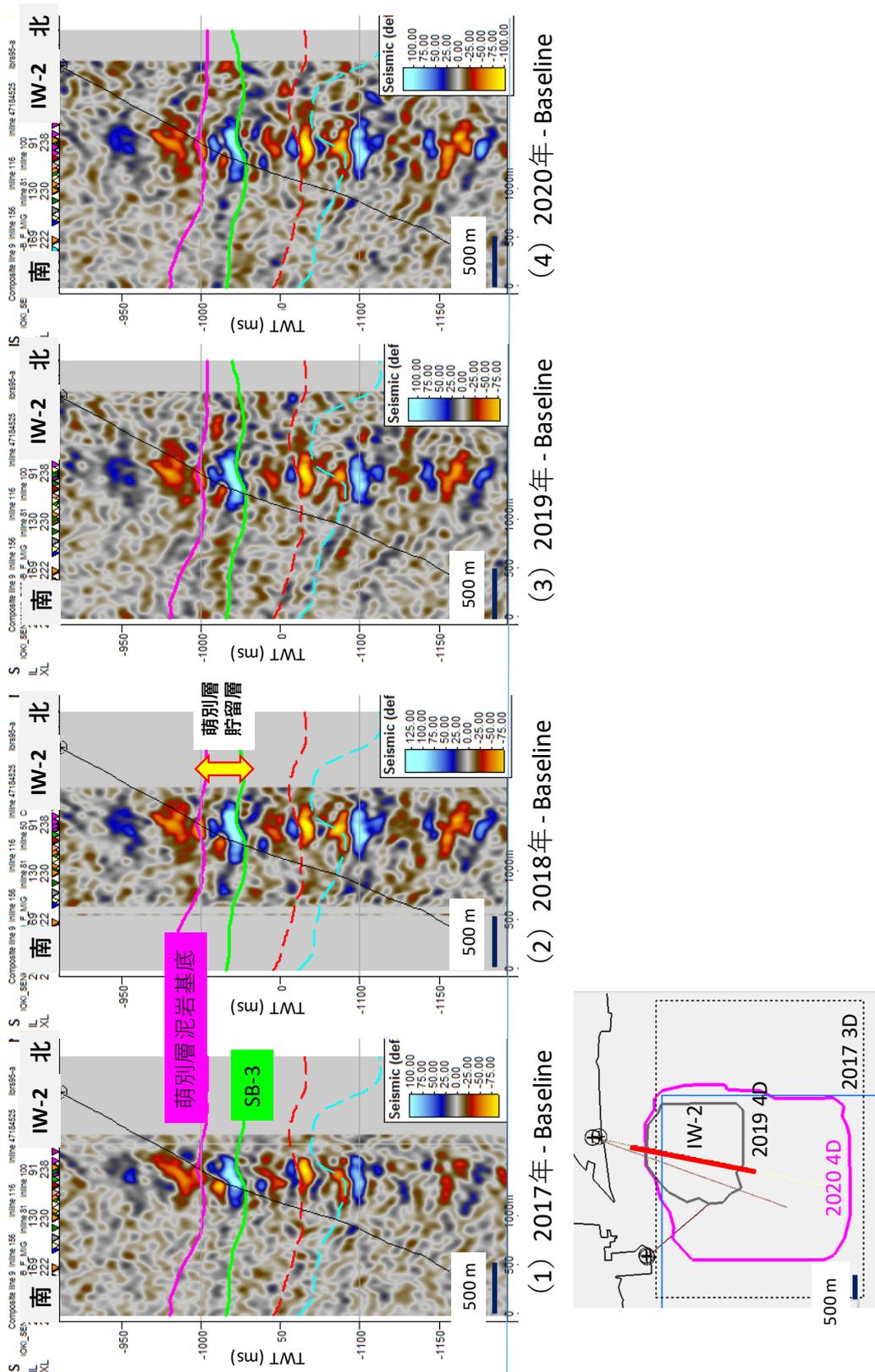


図 5.1-3 各年度の差分記録（比較）

5.1.2 坑井対比（IW-2）

図 5.1-3 の(4)に示した差分記録（2020年度）を用いて再解釈をするにあたり、あらためて坑井対比を実施した。図 5.1-4 に示すように、対比したのはIW-2と2020年ベースライン記録である。IW-2の合成弾性波記録は2020年度の評価において音波検層（DT）のみを使って作成（密度はGardnerの式（Gardner et al., 1974）³⁾で推定）したものを使用した。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を示す）、赤（トラフ）が負の値を示す。SB-3からSB-2までの区間では合成弾性波記録と2020年ベースライン記録の波形は良く対比できる。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である。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可能であった。

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

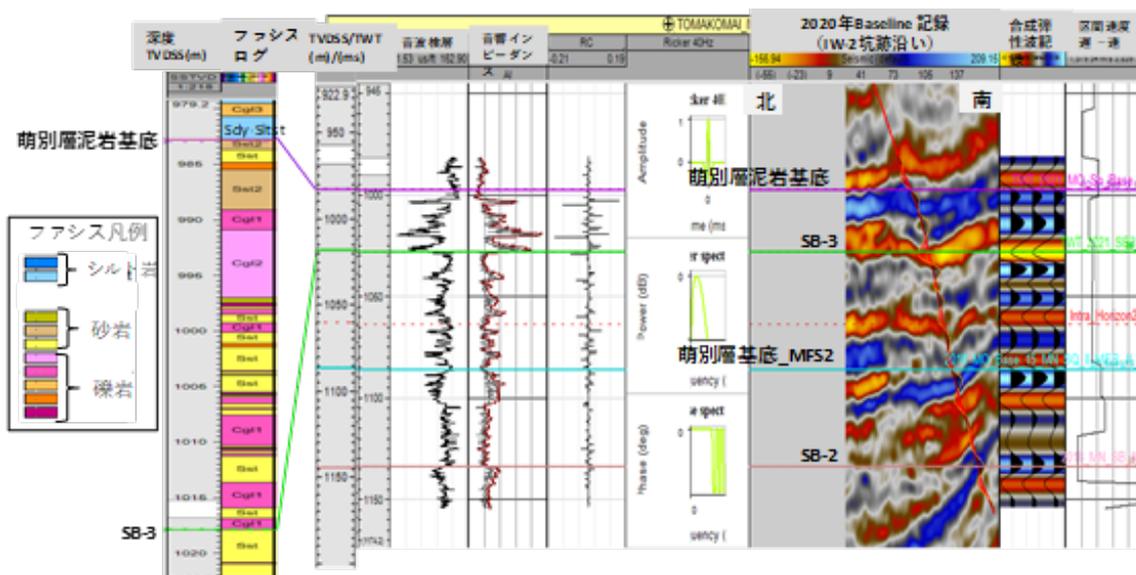


図 5.1-4 坑井—弾性波探査記録対比

次に、坑井対比結果をもとに、CO₂の圧入位置を弾性波探査断面上で対比した。図5.1-5には、左からインデックス図、2020年ベースライン記録、2020年繰り返し記録およびその差分記録の断面を示す。各断面は、インデックス図に示すように圧入位置近くを通る東西断面であり、中央部にIW-2の坑跡を投影している。

マゼンタ色のホライズンが萌別層泥岩基底であり、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である。各断面において貯留層内の坑跡上に赤く右に振れるカーブが表示されているが、これが深度方向のCO₂圧入量を示す。これを見ると、CO₂圧入区間の中でも圧入レートが高かった区間（998.4～1,004.3 m TVDSS）は、萌別層泥岩基底直下ではなく貯留層の中部に対比される。注目されるのは、2020繰り返し記録の黄色破線で囲んだ場所で、ベースライン記録にはなかった青いピークの反射波が現れている。ここは、差分記録では青（正）の強い振幅異常として表れている。

これらの現象は、CO₂圧入により礫層に挟在する砂層の速度が低下し、下位の礫層とのインピーダンス差が増大したことにより、ベースライン記録にはなかった青いピークの反射波が出現したと解釈した。差分記録の正の振幅異常（1,010～1,025 ms）は、この反射波の出現によるものと考えられる。

また、差分記録では萌別層泥岩基底付近およびその上位で負（赤トラフ）の振幅異常が観測されている。これはCO₂圧入仕上げ区間の上部が萌別層泥岩中にもあり、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）にも、浸透量は少ないものの浮力によりCO₂が移動し、この区間の速度が低下したことに関連した振幅異常が発生したと考えられる。

一方で、差分記録に見られるSB-3ホライズンよりも下位の繰り返しの強振幅異常は見かけ上の振幅異常であり、これはCO₂圧入後に貯留層内の弾性波速度が低下することによって貯留層よりも下位に時間遅延が生じた結果によるものと判断している。

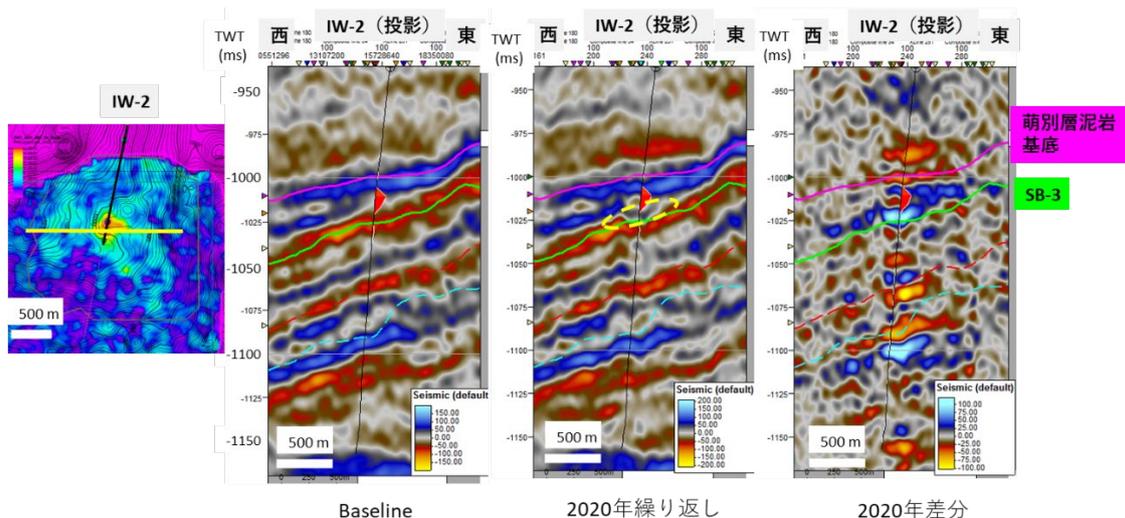


図 5.1-5 弾性波探査記録と圧入位置

5.1.3 構造解釈の更新

萌別層泥岩基底ホライズンおよび SB-3 ホライズンの時間構造図は地質モデル作成範囲全域で必要となるため、基本的には 2020 年度の構造解釈による時間構造図に対して、2020 年ベースライン記録部分を 2021 年度の再解釈で置き換える操作により、構造解釈の更新を行った。

2020 年ベースライン記録を確認したところ、両ホライズンは 2020 年度の構造解釈（2019 年ベースライン記録を使用）結果と一致しない箇所が複数あることが判明した。図 5.1-6 は、萌別層泥岩基底ホライズンの時間構造図における 2020 年度の構造解釈と 2021 年度との違いを示した図である。同図に示すように主に 4 箇所（図中赤色文字の①～④）で解釈の変更を行った。

次に図 5.1-7 に SB-3 ホライズンの 2020 年度および 2021 年度の時間構造図とその差分を示す。萌別層泥岩基底ホライズンほどの大きな違いはないが、2020 年ベースライン記録の縁辺部を中心に解釈の更新を実施した。

また、図 5.1-8 と図 5.1-9 には、それぞれ萌別層泥岩基底ホライズンと SB-3 ホライズンの時間構造図について、IW-2 の CO₂ 圧入位置近傍を拡大した新旧構造図を示す。参考のため 2018 年度の構造図も示す。2018 年度と 2020 年度のの違いに比べると、2020 年度と 2021 年度は大きな違いはなく、2020 年度と 2021 年度はほぼ同等の構造形態となっている。萌別層泥岩基底ホライズンでは、圧入区間の東方で僅かに構造の違いがみられるが、今回の 4D 解析は 2021 年差分解析検討結果を使用するため、2020 年ベースライン記録を使った 2021 年度の解釈結果を採用することにした。

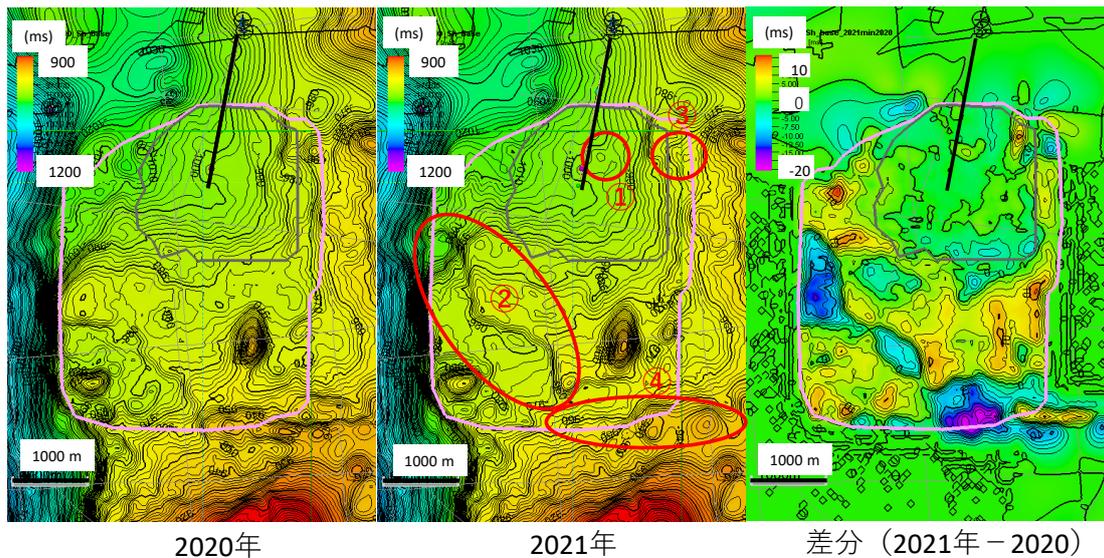


図 5.1-6 2020 年度と 2021 年度の解釈の違い（萌別層泥岩基底ホライズン時間構造図）

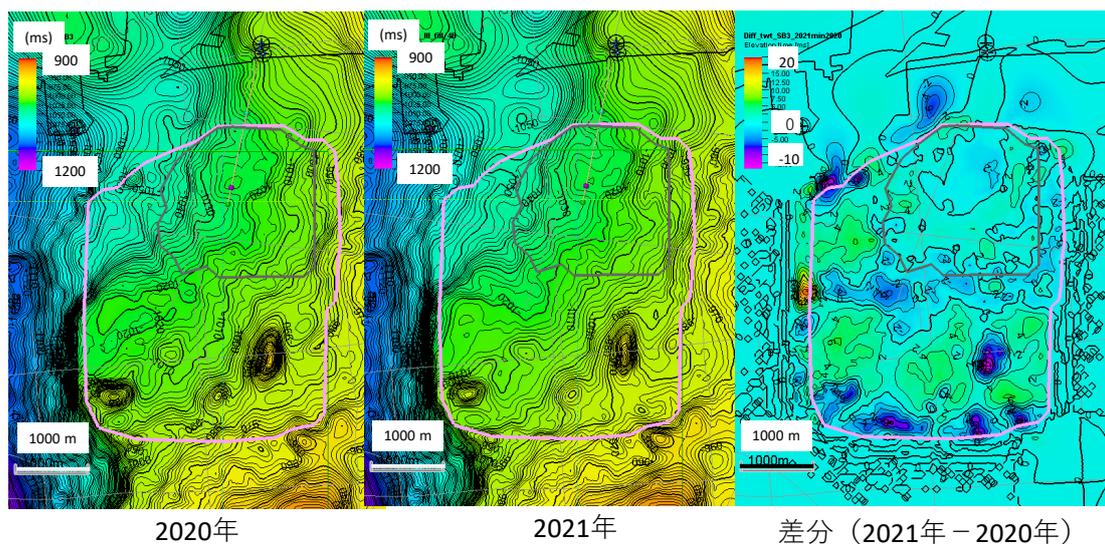


図 5.1-7 2020 年度と 2021 年度の解釈の違い（SB-3 ホライズン時間構造図）

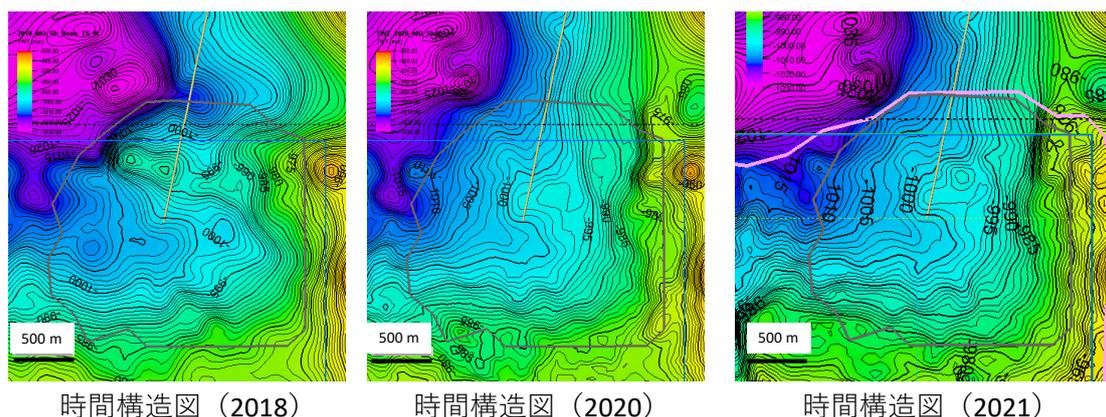


図 5.1-8 萌別層泥岩基底時間構造図（IW-2 周辺）2018 年度、2020 年度および 2021 年度の比較

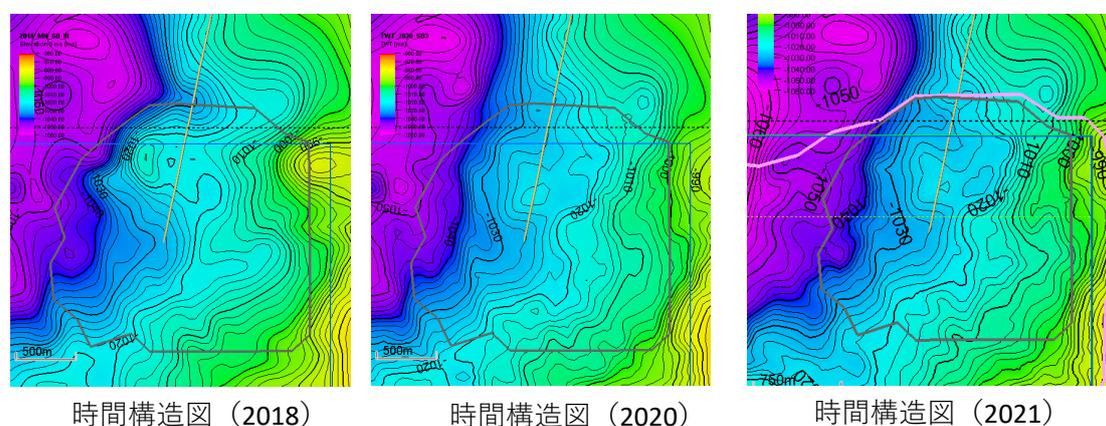


図 5.1-9 SB-3 ホライズン時間構造図（IW-2 周辺）2018 年度、2020 年度および 2021 年度の比較

5.1.4 深度変換

深度変換は、2020 年度の構造解釈時と同様の手法により実施した。これは、この後の深度構造図をもとに更新される地質モデルへの影響を最低限に抑えるためである。

深度変換の方法を図 5.1-10 に示す。複数の坑井の速度情報から各ホライズンまでの平均速度図を作成し、時間構造図にかけ合わせて深度構造図に変換するフローである。各坑井の速度情報およびマーカー深度（表 5.1-1）はともに既存データを変更していないため、平均速度図に変更はなかった。時間構造図で変更された部分のみが、深度構造図で更新された。図 5.1-11 に萌別層泥岩基底、図 5.1-12 に SB-3 ホライズンのそれぞれの平均速度図を示す。図 5.1-13 に萌別層泥岩基底、図 5.1-14 に SB-3 ホライズンのそれぞれの新旧深度構造図を示す。

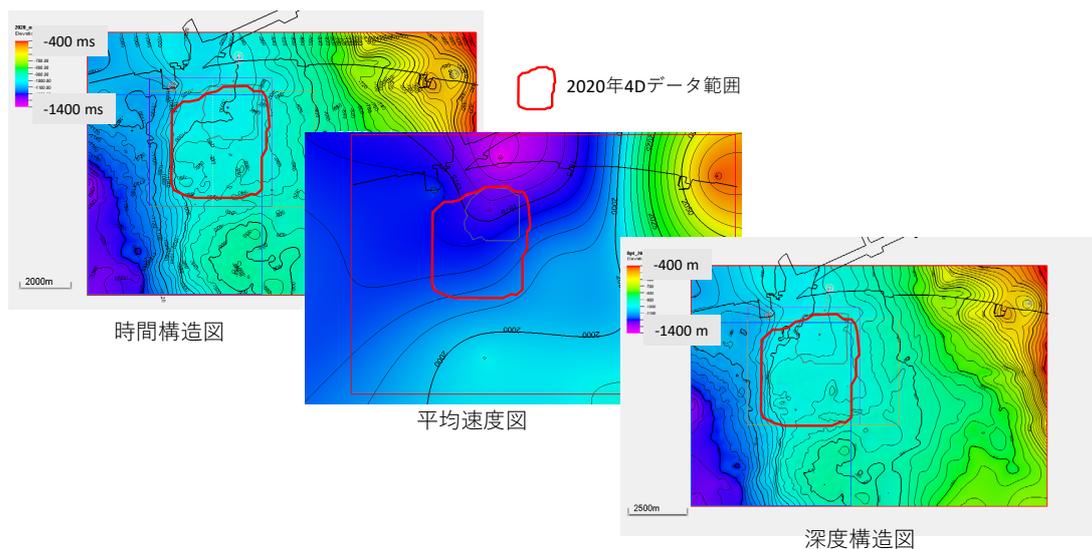


図 5.1-10 深度変換の方法

表 5.1-1 速度モデルに使用した坑井とマーカー深度（TVDSS）

マーカー名	CCS-2	CCS-1	IW-2	IW-1	OB-2	OB-3
萌別層泥岩層基底	1,064 m	1,061 m	983 m	972 m	972 m	598 m (欠如)
SB-3	1,087 m	1,086 m	1,018 m	985 m	990 m	598 m (欠如)

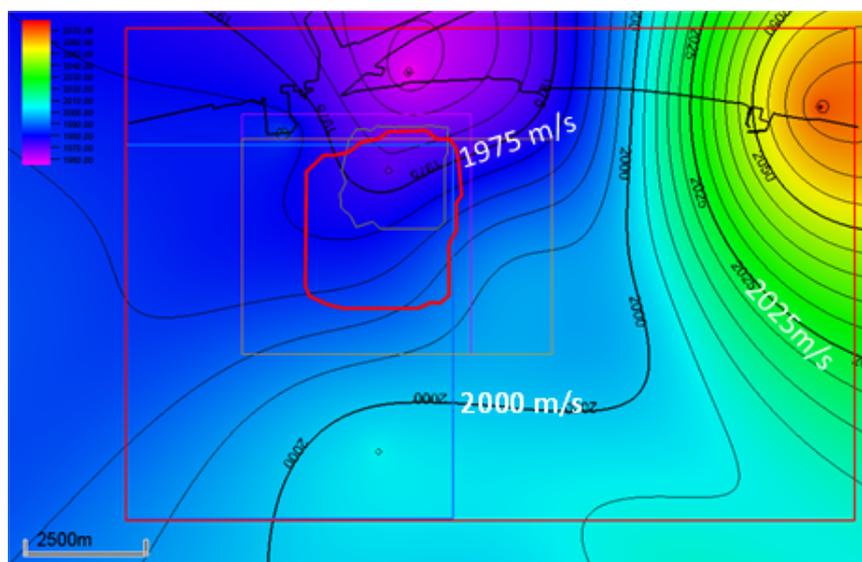


図 5.1-11 萌別層泥岩基底の平均速度図

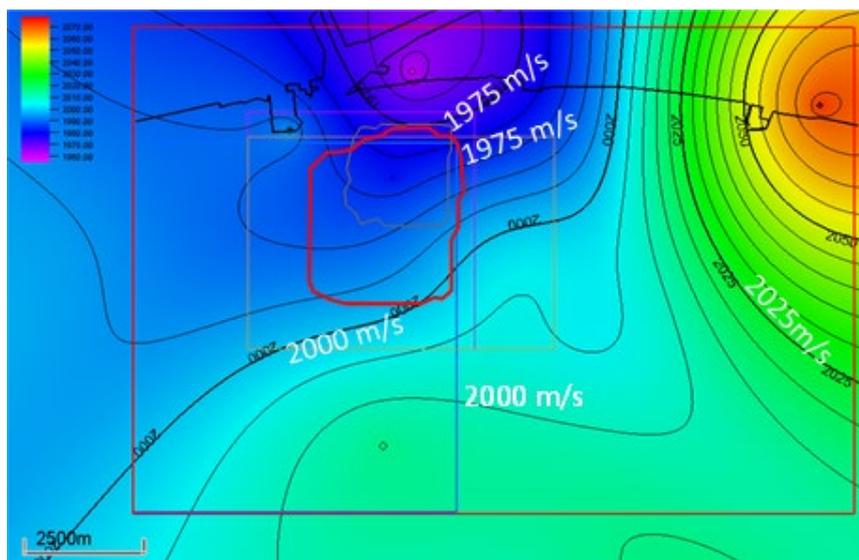


図 5.1-12 SB-3 の平均速度図

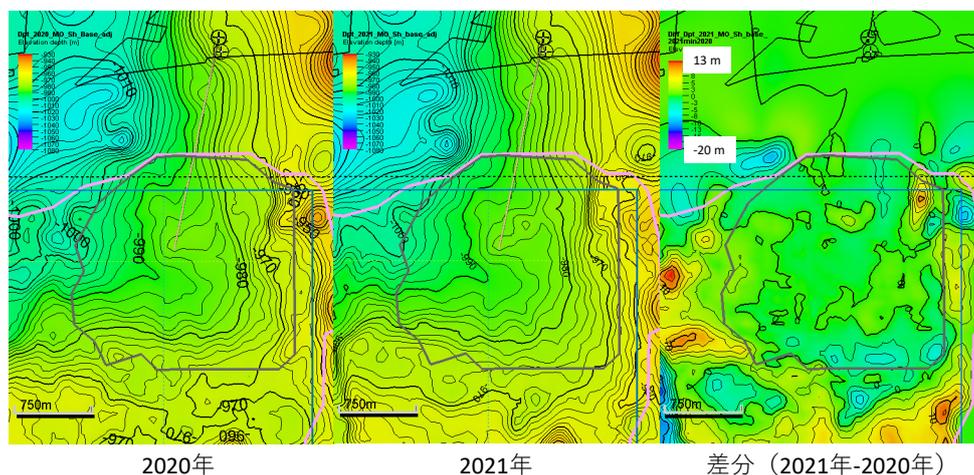


図 5.1-13 萌別層泥岩基底：2020年度と2021年度の深度構造図の比較

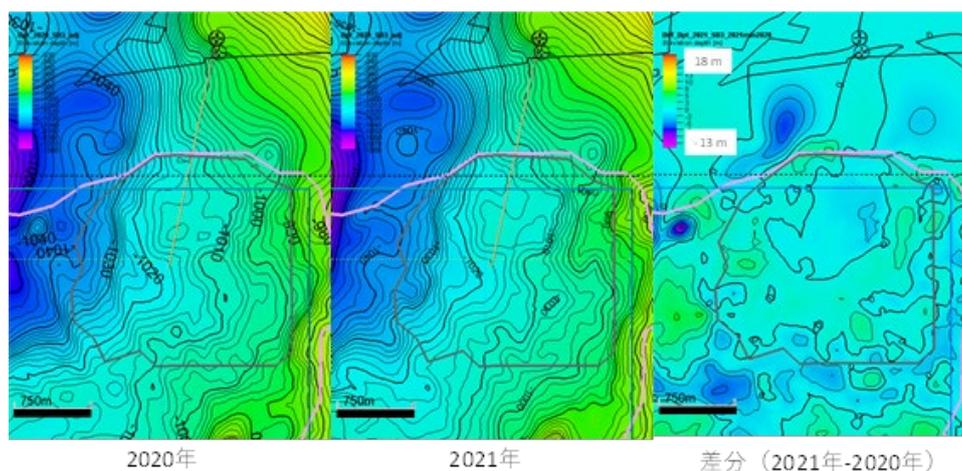


図 5.1-14 SB-3 : 2020 年度と 2021 年度の深度構造図の比較

5.1.5 差分記録に関する考察

各年度の差分記録で見られる振幅異常の比較を図 5.1-15 に示す。振幅異常は、各年度の差分記録（図 5.1-2）から萌別層貯留層付近の RMS 振幅（萌別層泥岩基底の上位 12 ms～下位 36 ms の区間）を取ったものである。2017 年度（累計圧入量 6.5 万 t-CO₂）は IW-2 井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 年度（累計圧入量 21 万 t-CO₂）、2019 年度（累計 30 万 t-CO₂ 圧入停止後 2 箇月）および 2020 年度（累計 30 万 t-CO₂ 圧入停止後 8 箇月）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のがわかる。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 年度以降の記録を比べると、2019 年度および 2020 年度は 2018 年度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。一方、2020 年度は、全体的に振幅異常が弱くなっているのが観察される。

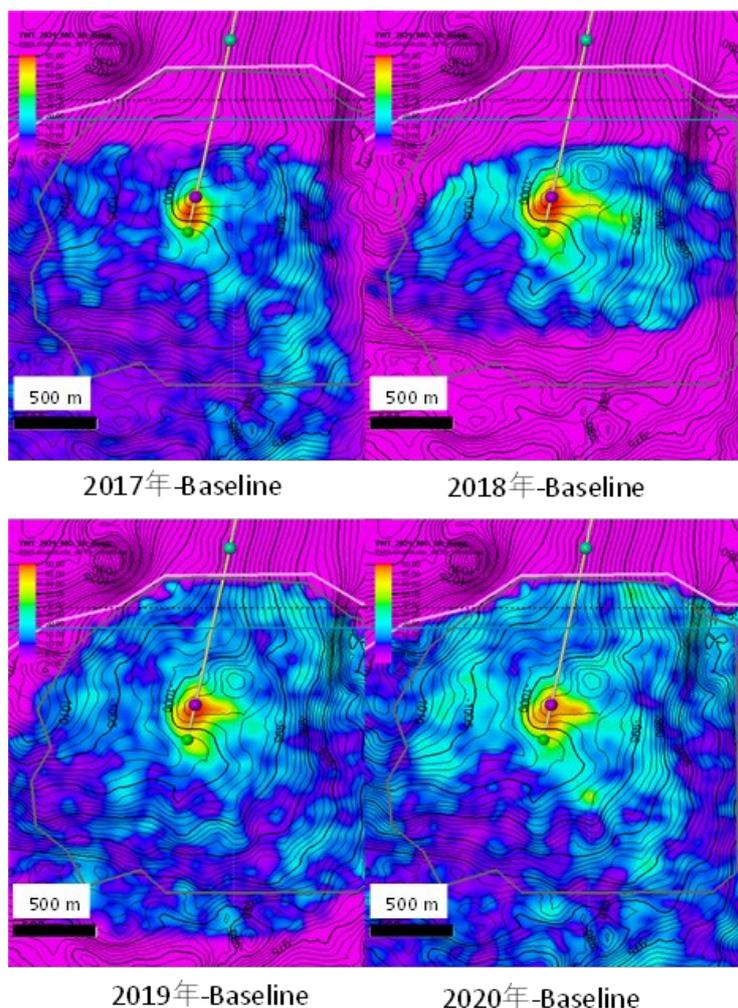


図 5.1-15 各年度の差分記録（萌別層貯留層の RMS 振幅）

また、各年度の差分記録の IW-2 近傍を東西に切る断面図を図 5.1-16 に示す。差分記録断面が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）で表現されており、同区間内の速度低下を示唆する。貯留層区間を見ると、2017 年度は CO₂ 圧入量（坑跡沿いの右振れ赤塗りのカーブ）が多い区間で振幅が大きく、2018 年度はさらに正の振幅異常域が構造上位の東側および直上に拡大している。2019 年度は 2018 年度と同様の傾向であるが、振幅異常域はやや縮小しているように見える。2020 年度は貯留層内上部の振幅が強まり、下位の振幅は相対的に小さくなっている。

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) 2018 年度時点の差分記録の振幅異常が最も大きい。
- 2) 2019 年度以降は、圧入部周辺で振幅異常の減少と振幅異常域のわずかな縮小が見られる。
- 3) 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見ら

れる。

- 4) 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見られる。

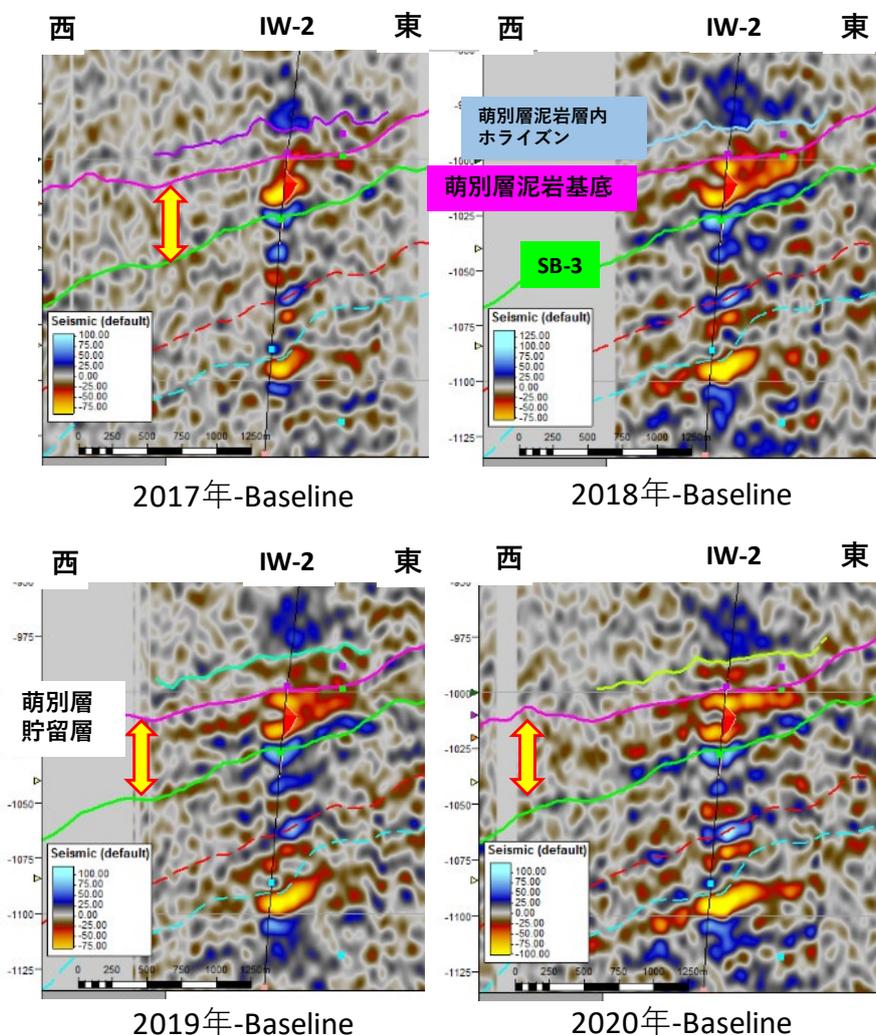


図 5.1-16 各年度の差分記録断面図（IW-2 近傍を東西に切る断面）

次に、萌別層貯留層直上の泥岩層の差分記録の断面を図 5.1-17 に示す。萌別層貯留層直上の萌別層泥岩層内にも振幅異常が見られ、負の変化（赤）であることから速度低下によるものを示すと考えられる。萌別層貯留層の直上に位置することや、萌別層泥岩という岩相区分であっても岩相内は均質ではなく、実際にはシルト岩も含まれることから、砂岩貯留層に圧入した CO₂の一部が直上の泥岩層内へ移動したことも否定できず、その影響による速度低下・振幅変化を示している可能性がある。一方では萌別層泥岩層内ホライズンよりもさらに上位に正の振幅変化（青）が表れている。これはインピーダンス増加すなわち

速度増大を示すもので、その原因は明らかではない。ただし、CO₂の移動が伴う場合は、ここでの観察事象とは反対に速度低下による負の振幅変化を示すため、CO₂のさらなる上方への移動を示すものではないと判断している。

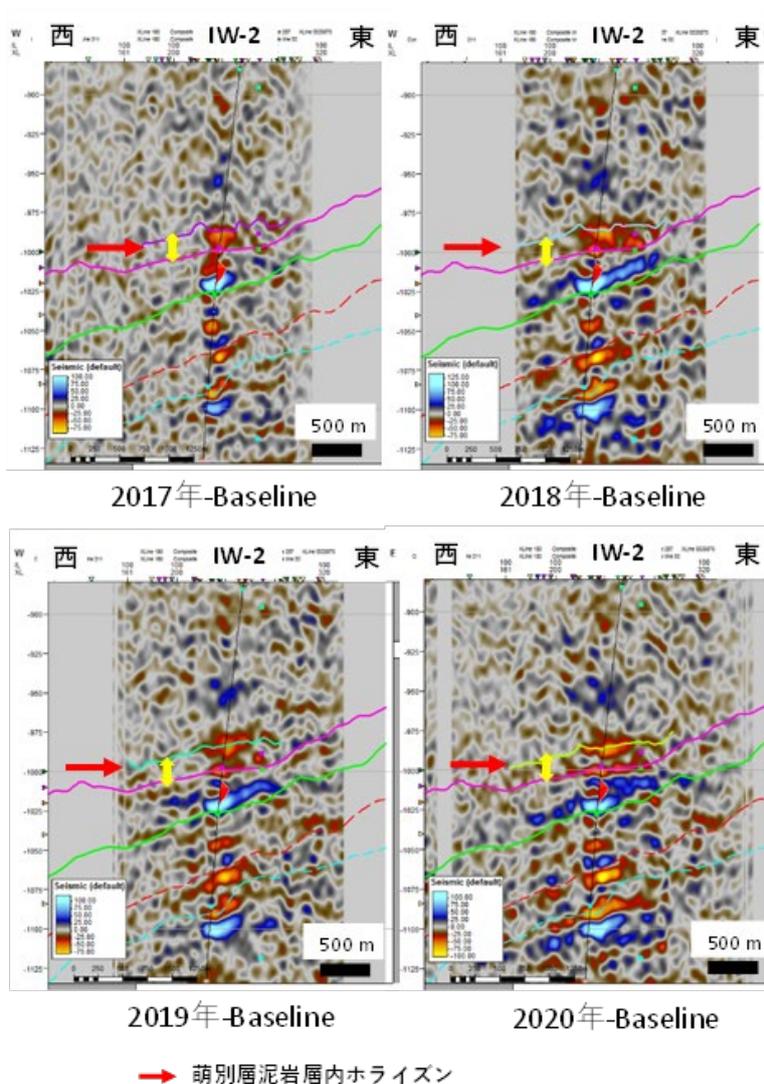
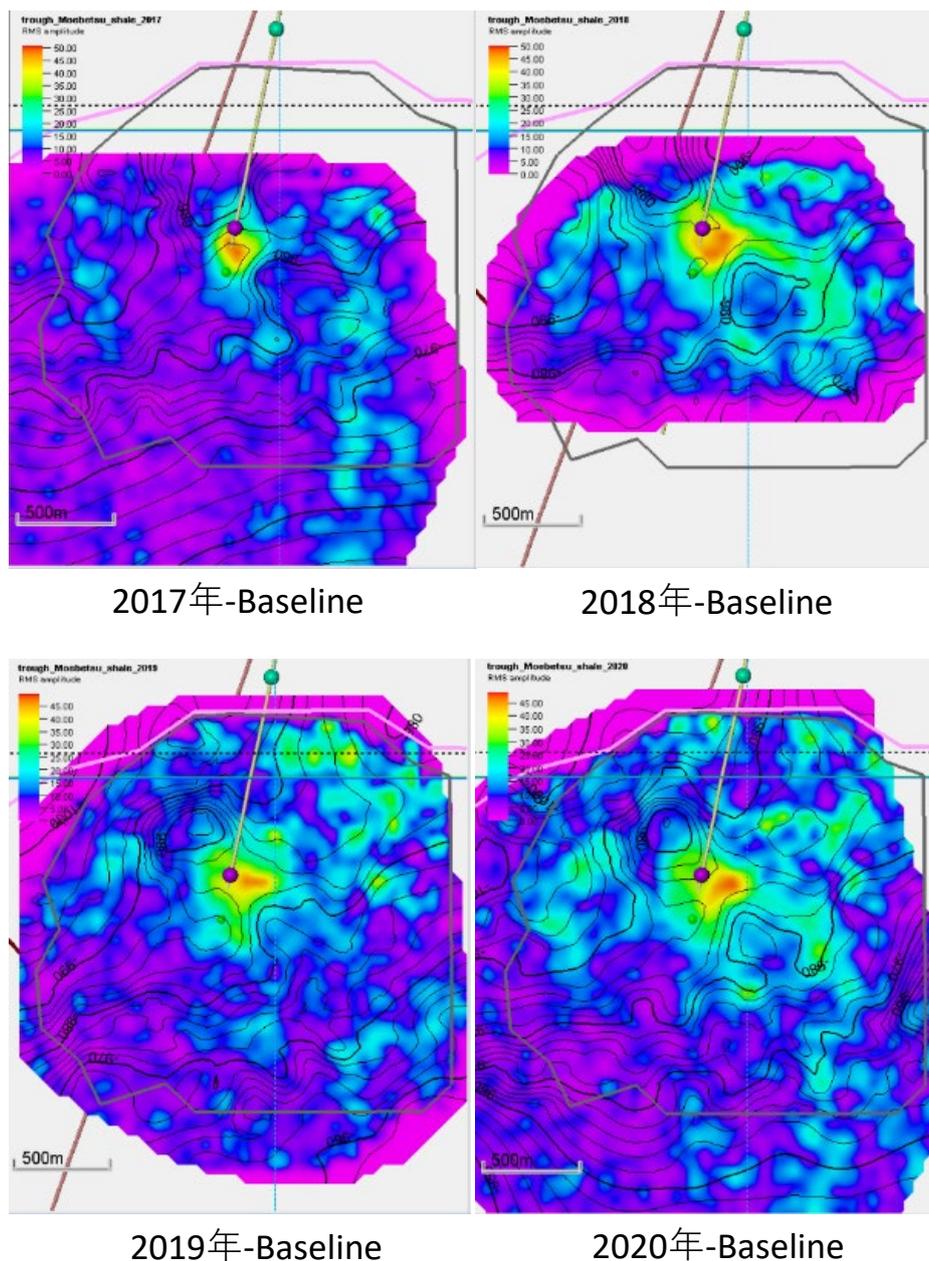


図 5.1-17 各年度のベースライン差分記録の断面図

次に、萌別層泥岩層内ホライズンから萌別層泥岩層基底ホライズン間の RMS 振幅を抽出した振幅分布図を図 5.1-18 に示す。振幅異常の変化は、萌別層貯留層の RMS 振幅分布図と似たような傾向を示す。2017 年度に比べて 2018 年度以降で振幅異常域が拡大しており、2018 年度の振幅が最も大きい。また、2019 年度の振幅分布傾向は、特に圧入地点から南東側の振幅異常域の広がりにおいて、2018 年度および 2020 年度とは異なる傾向にある。



注1) 萌別層泥岩層内～萌別層泥岩基底ホライズン間（図 5.1-17 断面中の黄色両矢印）の RMS 振幅

図 5.1-18 萌別層泥岩層の差分記録 RMS 振幅

5.2 地質モデリング

5.2.1 地質モデリングの概要

萌別層貯留層の地質モデルは、2020年度に苫小牧沖 CCS 大規模実証試験「繰り返し弾性波探査タイムラプス処理」の結果を用いて、2018年度地質モデルの更新を実施した。この2020年度の更新では、2018年度モデルのグリiddingを維持しつつ、圧入地点を中心とする約2×2 kmの範囲の深度構造図を更新した。2021年度の検討では、2020年度に

新規に取得した弾性波探査データを用いて、図 5.2-1 で示すフローチャートに従い、2020年度地質モデルの更新作業を実施した。ワークフローは2018年度および2020年度に構築したものを踏襲し、2020年度に新規に取得した弾性波探査データを用いて更新した深度構造図を取り込み、地質モデルに反映させた。地質モデルの範囲は、2018年度および2020年度と同様の図 5.2-2 に示す約 10 km × 15 km の範囲であり、そのうち更新の対象範囲は、繰り返し弾性波探査が実施されている約 5 km × 5 km の範囲である。

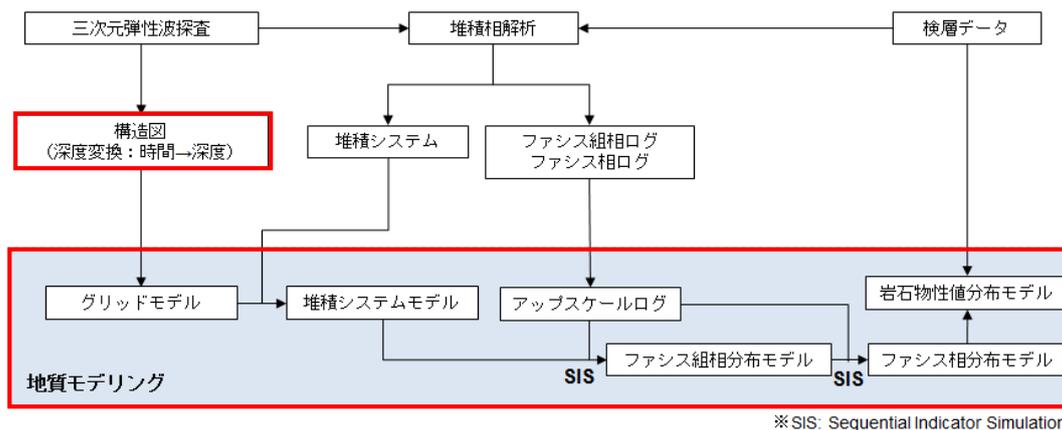


図 5.2-1 地質モデリングフローチャート（赤枠が本検討の更新部分）

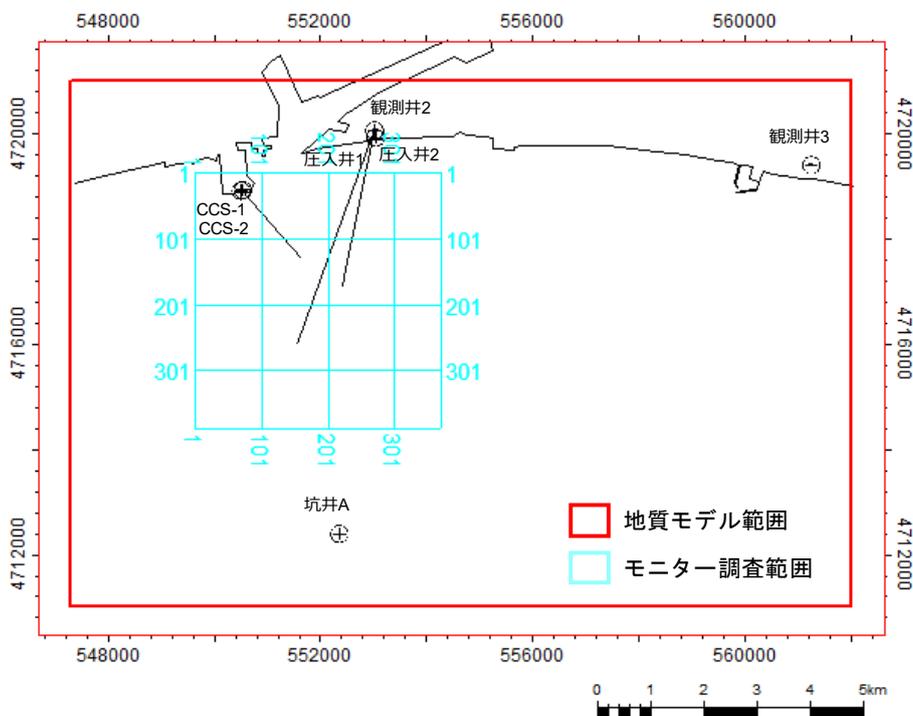


図 5.2-2 地質モデル範囲と坑井位置

5.2.2 地質モデルの更新

2020年度に新規に取得した弾性波探査の結果により、萌別層砂岩上部ホライズンおよびSB-IIIホライズンの深度構造図の更新を実施した。地質モデルの更新に使用する深度構造図を図5.2-3に示す。あわせて、2018年度に実施した堆積相解析ならびに断層解釈の結果の更新の必要性の有無について確認した。さらに深度構造図の更新にあわせて、地質モデルのグリッドモデルの更新・最適化についても検討した。

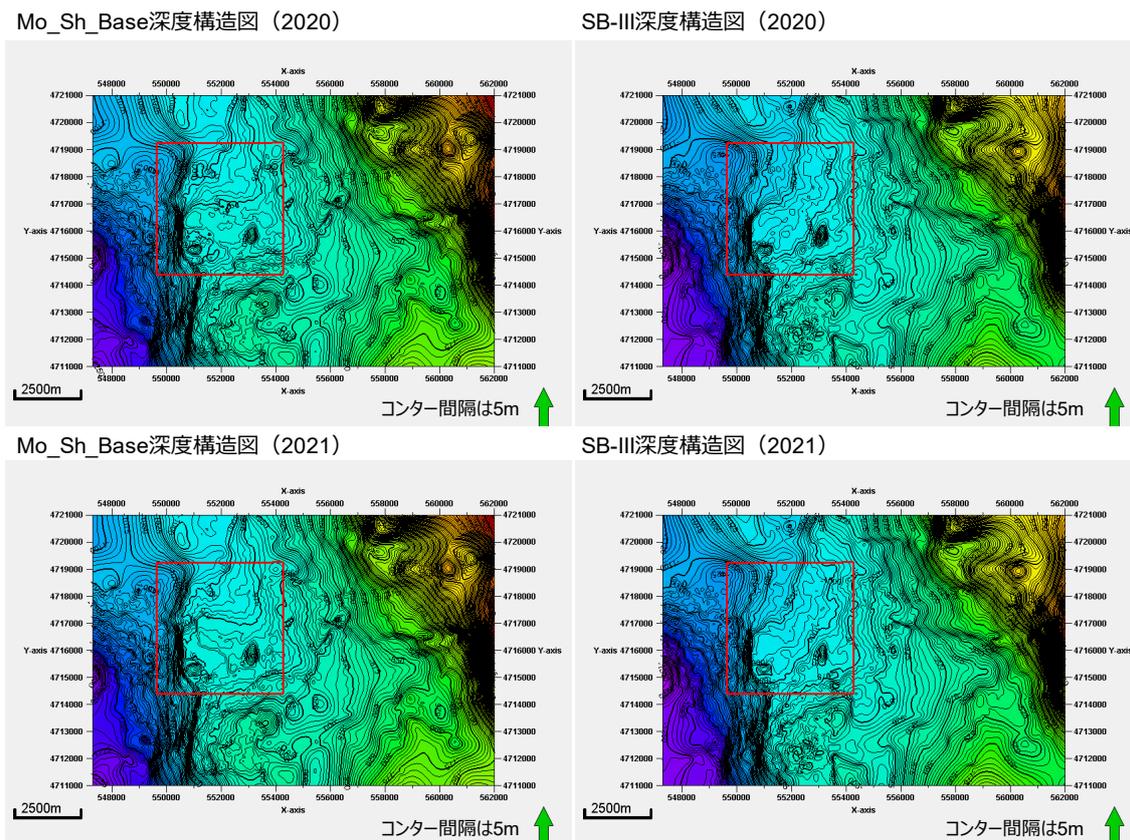
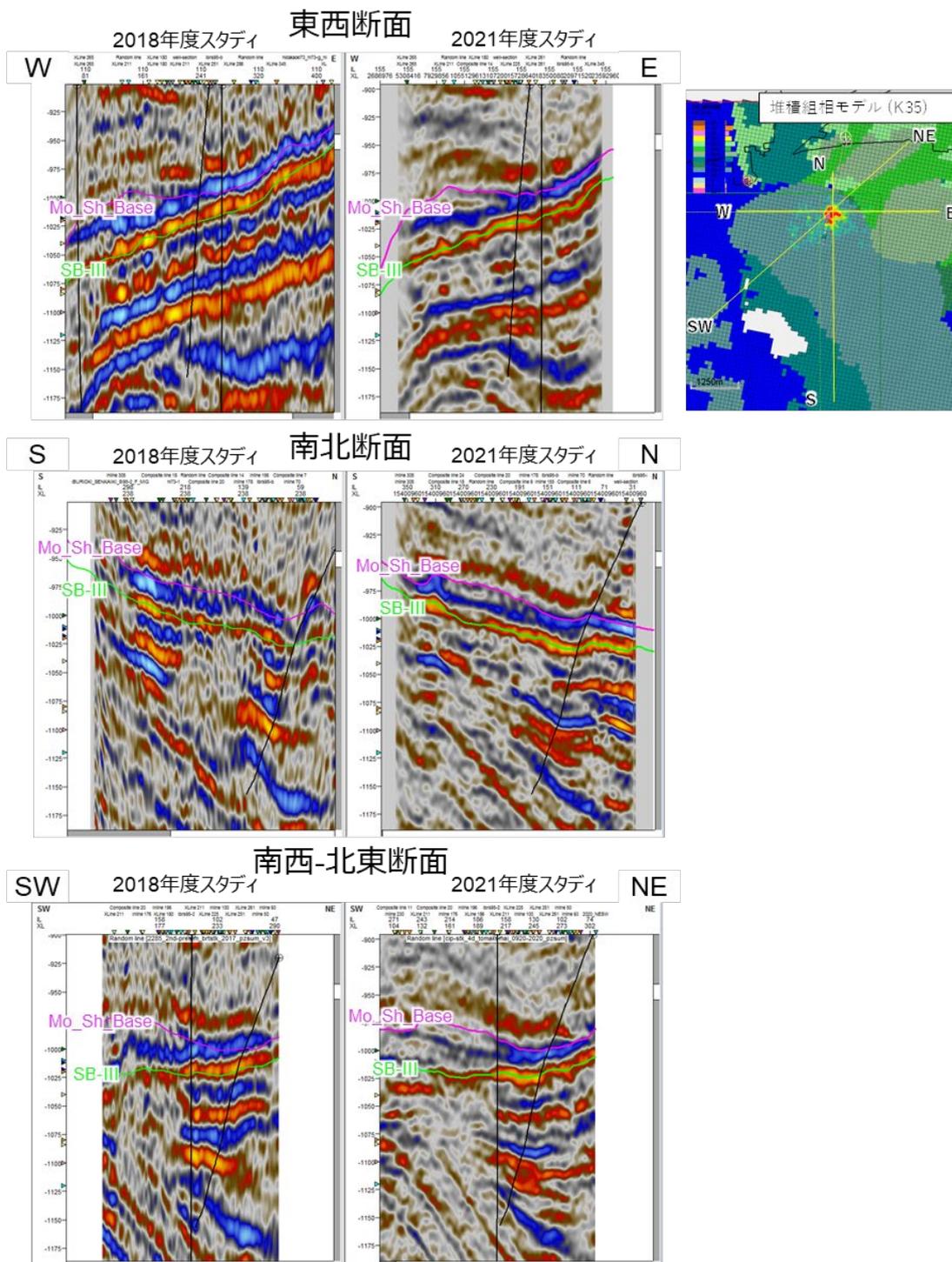


図 5.2-3 2020年度と2021年度の地質モデルに使用した深度構造図の比較

(1) 堆積相解析・断層解釈の確認

図5.2-4にラッピングパターンの比較を示す。ここでは、2018年度の堆積相解析結果に使用した弾性波探査断面（図5.2-4「2018年度スタディ」）と、本検討に使用する2020年度に新規に取得した弾性波探査断面（図5.2-4「2021年度スタディ」）の断面を比較し、弾性波探査記録のラッピングパターンを確認した。ここでは、東西、南北、南西—北東断面の三つの断面を確認した。2021年度の評価で用いた弾性波探査記録はより高品質な記録になっているが、貯留層層準である萌別層泥岩基底ホライズン（Mo_Sh_Base）～SB-3ホライズンの間において、振幅がSB-3ホライズンにオンラップするパターンはいず

れの断面でも共通しており、弾性波探査記録の取得年度による違いによるラッピングパターンとの差は認められない。またその上下の層準においても、形状に明確な差は認められない。したがって、2021年度の評価で用いた弾性波探査記録を使用する限りでは、2018年度の地質モデルの堆積相解析結果を適用できると判断し、堆積相解析の更新は行わなかった。



注）図中左列 2021 年度スタディは本検討で使用した弾性波探査記録、中列 2018 年度スタディは 2018 年度地質モデルの堆積相解析に使用した弾性波探査記録を示す。右上図は堆積組相モデルの平面図を示し、図中黄色線は断面線を示す。

図 5.2-4 弾性波探査記録のラッピングパターンの比較

(2) グリッドモデルの更新・最適化

深度構造図の更新にあわせてグリッドモデルの更新・最適化を行った。グリッドモデルの更新には、萌別層砂岩層上部に対して更新した深度構造図を用い、それ以外の層準については 2020 年度モデルに使用したのと同じ深度構造図を使用した。グリッドモデルの設定を、表 5.2-1 に示す。セルサイズならびにレイヤー数は 2020 年度モデルと同様である。

本検討におけるグリッドモデル作成では、検層結果で確認される高浸透領域をより正確にモデルに反映することを目的としてグリiddingの最適化を実施した。

図 5.2-5 にアップスケリング前後の検層結果とグリッドモデルを 2020 年度および 2021 年度地質モデルについて比較を、図 5.2-6 に 2021 年度地質モデルの概要を示す。最右翼トラックの検層で測定した NMR 浸透率が示すように、萌別層砂岩層上部およびその直下には、高浸透率領域が 3 か所に存在する。2020 年度のグリッドモデルでは、高浸透率領域①（Layer 9）は検層結果が示す高浸透率領域と適合するが、高浸透率領域②の上限と高浸透率領域③の下限が、数 m ずれている。そのため、2021 年度モデルでは高浸透率領域②および③が、検層結果が示す高浸透率領域とできる限り整合するように Layer 11 上限および Layer 15、Layer 16 のグリッドサイズを最適化した。

グリiddingの最適化は、対象層準のレイヤーの等分方法を、任意の比率（Fractional）で行うこととした。検討の結果、萌別層砂岩層上部ゾーン、萌別層砂岩層下部ゾーンにおいて適切な比率を設定してグリiddingを実施した。また、萌別層泥岩層においては、遮蔽層層準のアップスケールファシスをファシスログと整合させるために適切な比率を設定してグリiddingを実施し、Layer 7 および Layer 8 の上限を変更した。

これにより、図 5.2-6 に示すように 2021 年度のグリッドモデルとアップスケールファシスは検層結果が示す高浸透率領域とファシスログと比較してより整合するものとなり、これを 5.4 節で述べる貯留層シミュレーションのヒストリーマッチングに使用することとした。

表 5.2-1 2021年度地質モデルのグリッドセル設定

		セルサイズ	セル番号
I方向(東西方向)		100m	1~163
J方向(南北方向)		100m	1~126

K方向 (深度方向)	Zone名	Zone区画	レイヤー数	セル番号	レイヤリング方法
	鷓川層(Mukawa)	QTN_Base~MU_Base	1	1	Proportional
	萌別層泥岩層(Mo_SH_TS_T)	MU_Base~ MO_SH_Base_TS_III	7	2~8	Farctions (40,40,12,11,10,8,9)
	萌別層砂岩層上部(Mo_Sst_up_LST)	MO_SH_Base_TS_III~SB-III	6	9~14	Farctions (11,14,7,9,9,10)
	萌別層砂岩層下部(Mo_Sst_low_HST)	SB-III~MO_Base_MFS_II	15	15~29	Farctions (12,13,5,10,10,10,10,10,10,10,10,10,10,10,10)
	萌別層(+荷菜層)互層(Ni_Alt_TS)	MO_Base_MFS_II~SB-II	10	30~39	Proportional
	萌別層(+荷菜層)砂岩層(Ni_Sst_HST)	SB-II~SB-I	10	40~49	Proportional

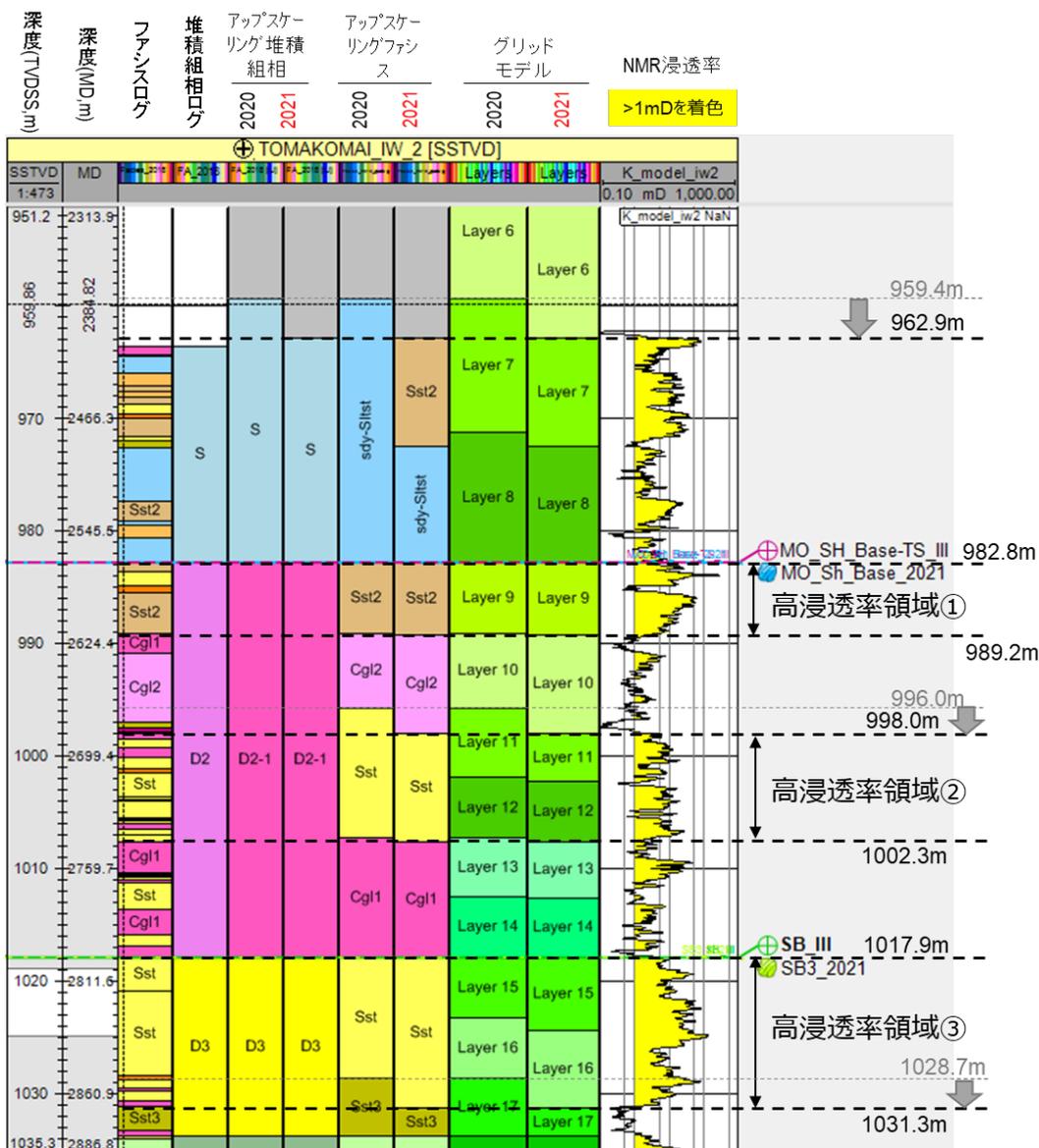


図 5.2-5 IW-2 におけるアップスケール前のファシスデータおよび堆積組相データと、2020 年度モデルと 2021 年度モデルのそれぞれのアップスケールリング堆積組相とアップスケールリングファシスおよびグリッドモデルの比較

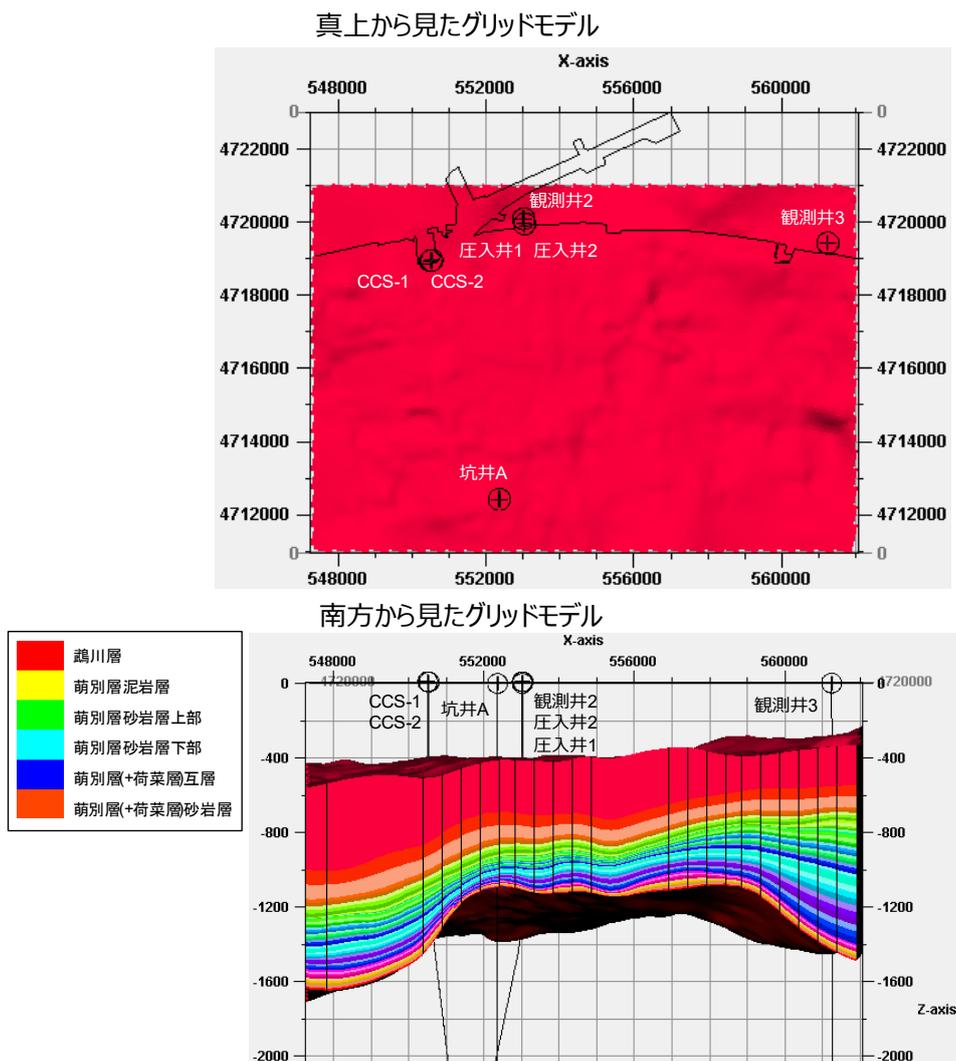
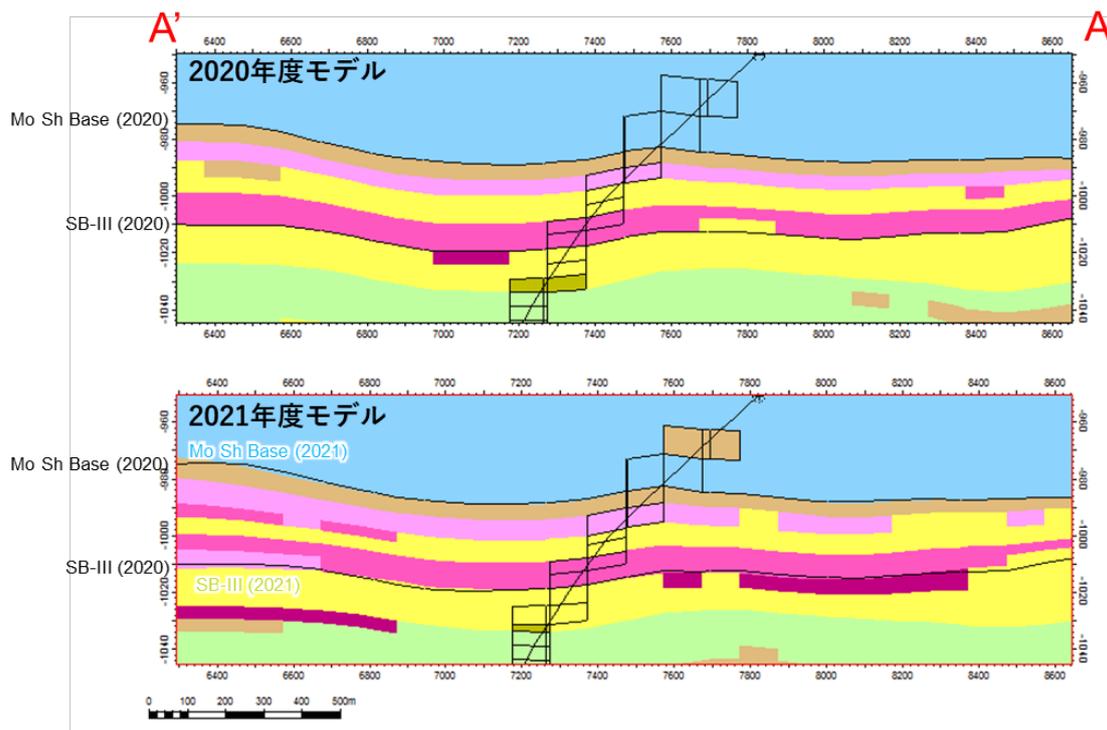


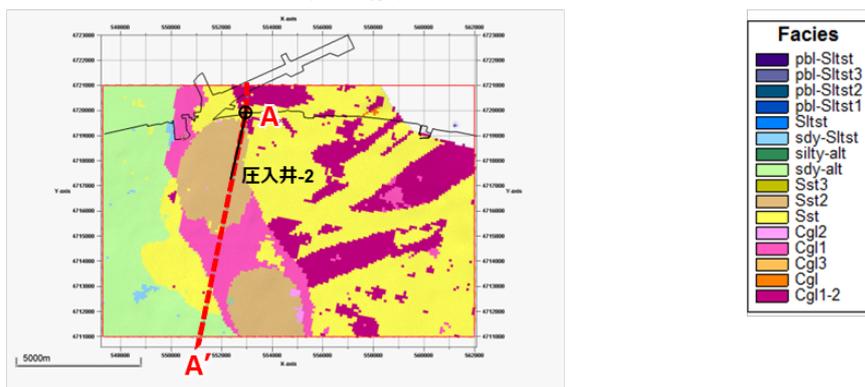
図 5.2-6 （上）真上から見たグリッドモデル （下）南方から見たグリッドモデル

5.2.3 地質モデル更新結果

図 5.2-7 に圧入井 IW-2 の坑跡に沿った 2020 年度地質モデルの断面図と 2021 年度地質モデルの断面図を示す。両者を比較すると、萌別層砂岩層上部の構造の変更は軽微であり、IW-2 の南側および北側においてわずかに変化する程度にとどまる。また、グリッディングの最適化にともない、2021 年度モデルでは 2020 年度モデルに比べて、高浸透率領域②の層厚が薄く、高浸透率領域③の層厚が厚くなるモデルとなった。



MO SH Base TS-III～SB-IIIのファシス分布モデル



注) 下図は岩相分布モデルの平面図であり図中 A-A' は断面線の位置を示す。

図 5.2-7 2020 年度地質モデルと 2021 年度地質モデルの比較

グリッドモデルを更新したうえで、岩相分布モデルを確率論的に作成した。確率論的手法として SIS (Sequential Indicator Simulation) を使用している。作成した岩相分布の一例を図 5.2-8 に示す。5.4 節では、岩相分布モデルの各ファシスについて決定論的にプロパティを与え、シミュレーションモデルを更新し、ヒストリーマッチングを実施した。

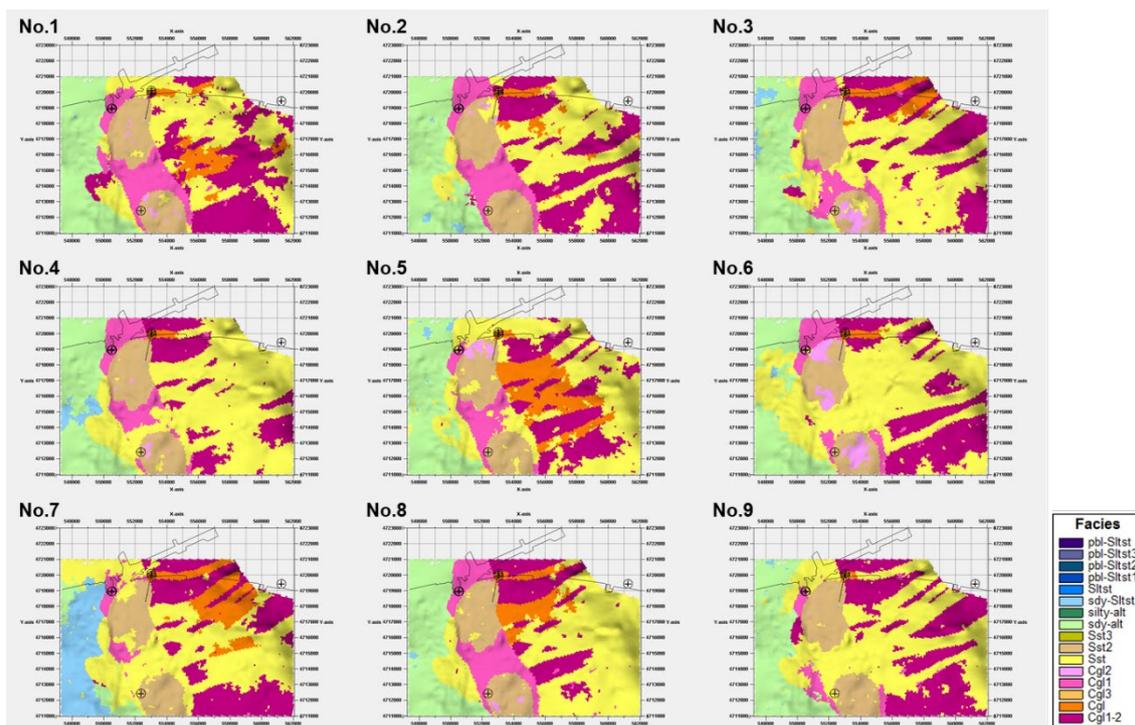


図 5.2-8 萌別層貯留層上部の岩相分布モデル (No.1~9 を表示)

5.3 苫小牧 IW-2 圧入圧力の予実績比較

圧入井に設置した PT センサーより取得した坑底圧力データに基づき、2021 年度に更新した貯留層モデルを用いて、坑底圧力の予実績比較を実施した。

5.3.1 予実績比較

ここでは、2020 年度に作成した貯留層モデルを用いて、IW-2 と OB-2 の坑底圧力の予実績比較、弾性波探査の差分解析結果とシミュレーションによる CO₂ 飽和度の比較を実施した。

なお、主にグラフで示す結果では、2020 年度成果報告書 5.5.4 項にて実施した予備検討において目的関数の小さかった三つのモデル（岩相分布 1、3、6）の結果で比較した。

モデルへの入力値は表 5.3-1 のとおりである。各パラメータの設定は、5.5.4 項に記載した。

表 5.3-1 モデル入力値

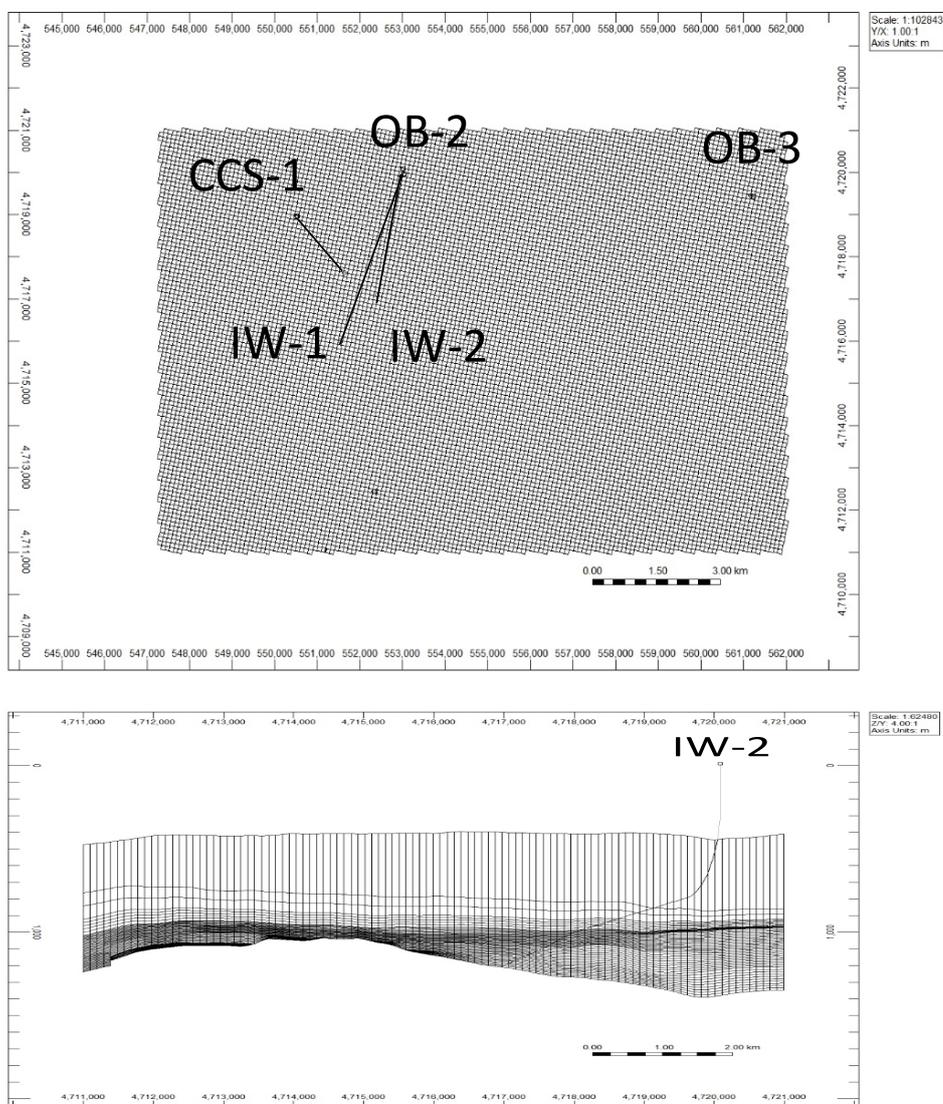
モデル	2020年度モデル
サイズ	フィールドモデル：15km×10km×1,700m
	セクターモデル：3km×3km×1,500m
グリッド	フィールドモデル：163×126×173
	セクターモデル：31×31×48
アクティブ・グリッド数	フィールドモデル：714,082
	セクターモデル：861,822(細分化後)
基準温度	36.2°C@920.41m(TVDSS)
基準圧力	9,290kPa@920.41m(TVDSS)
塩分濃度(ppm NaCl)	3,150
境界条件	フィールドモデル：開境界
	セクターモデル：閉境界
貯留層	
孔隙率	岩相毎に設定
浸透率(mD)	岩相毎に設定
ネットグロス比	岩相毎に設定
岩石圧縮率(1/kPa)	4.54×10^{-6}
相対浸透率曲線	岩相 10、11：n=2.0
	その他：n=3.5
kr _g	岩相 10、11=0.60 その他=0.143
kr _w	1.00
S _{gc}	0.05
Sw _{ir}	浸透率と孔隙率より算出
ヒステリシス(S _g max)	S _{gc} +0.5×(1-Sw _{ir} -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	kr _g 曲線:Corey ¹⁾
	kr _w 曲線:van Genuchten ²⁾
kr _g	1.00
kr _w	1.00
S _{gc}	0.05
Sw _{ir}	0.638
ヒステリシス(S _g max)	なし

5.3.2 セクターモデルの作成

IW-2 圧入圧力の予実績比較のため(1)フィールドモデル、(2)セクターモデルの二つのグリッドモデルを用いた。

(1) フィールドモデル

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は図5.3.1に示すフィールドモデルを用いた。フィールドモデルとはOB-2までを含めた広域のモデルであり、水平方向のグリッドサイズは100 m×100 m、垂直方向が5 m程度、セル数は163×126×173である。以降、東西方向の平面番号をi、南北方向の平面番号をj、垂直方向の平面番号をkとする。境界条件はモデル境界のグリッドのボリュームに等倍の値を乗じることで設定した。乗じる数値は、OB-2の坑底圧力上昇値に違いがみられなくなる数値を設定するが、2020年度の評価においては、2019年度の評価結果を踏襲し、500倍とした。



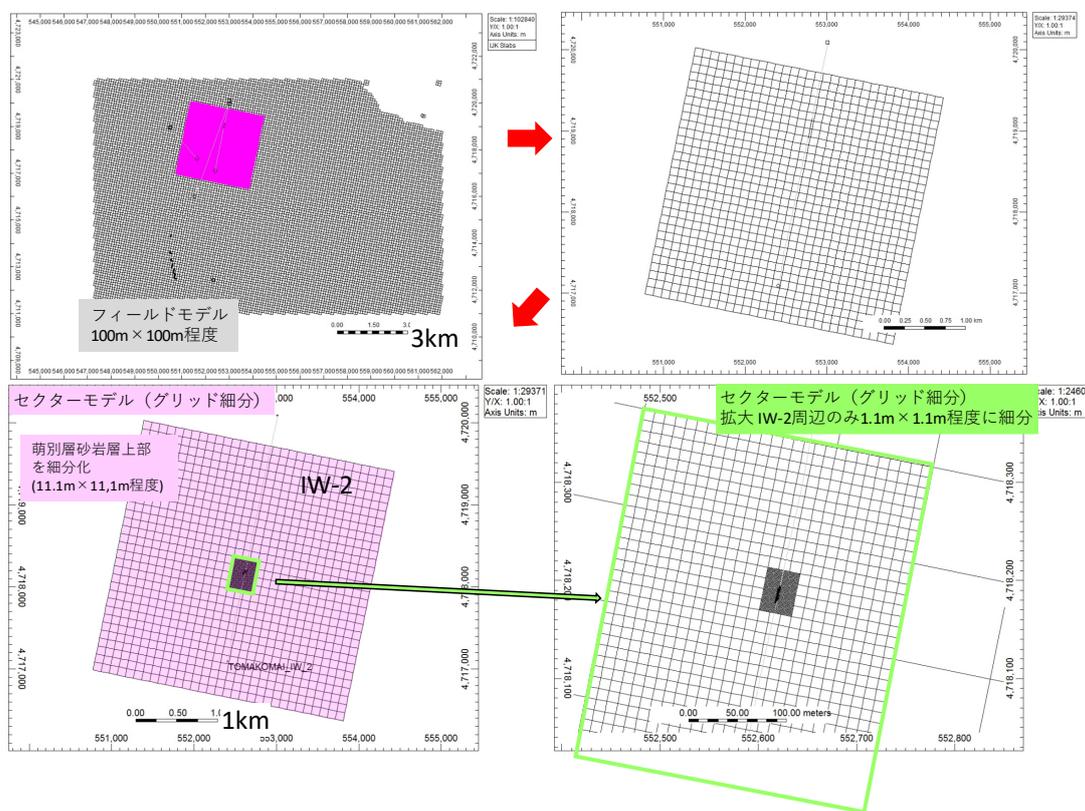
注) 上図：フィールドモデルの平面図 (k=1) 下図：フィールドモデルの坑井断面図 (j=58)

図 5.3-1 フィールドモデル

一方、IW-2のログ-ログプロットの予実績比較には、より正確な坑底圧力を計算するため、Local Grid Refinement（以下、「LGR」と称する。）と呼ばれる該当するグリッドのみを細分化する手法を適用したセクターモデルを用いた。

(2) セクターモデル

セクターモデルとは、フィールドモデルから坑井周辺を切り出し、グリッドサイズを細分化したモデルである。対象範囲は限定されるが予測精度が向上する。図5.3-2のように31×31×48のモデルを切り出し、坑井周辺を水平方向に11.1m×11.1m（9×9分割）、更に坑井通過グリッドとその隣接グリッドの坑井周辺のみをLGRを適用することで細分化した。最小グリッドサイズを1.23m×1.23m×1.25mに細分化した。



注)ピンク色で示した部分がフィールドモデルから切り出した部分である。

図 5.3-2 予実績比較モデルのグリッドシステム

5.3.3 IW-2 坑底圧力の予実績比較

フィールドモデルを用い、圧入を開始した2016年4月6日から圧入を停止した2019年11月30日までのCO₂圧入実績を入力し、IW-2の坑底圧力を予測した。予実績比較は図5.3-3のとおりである。

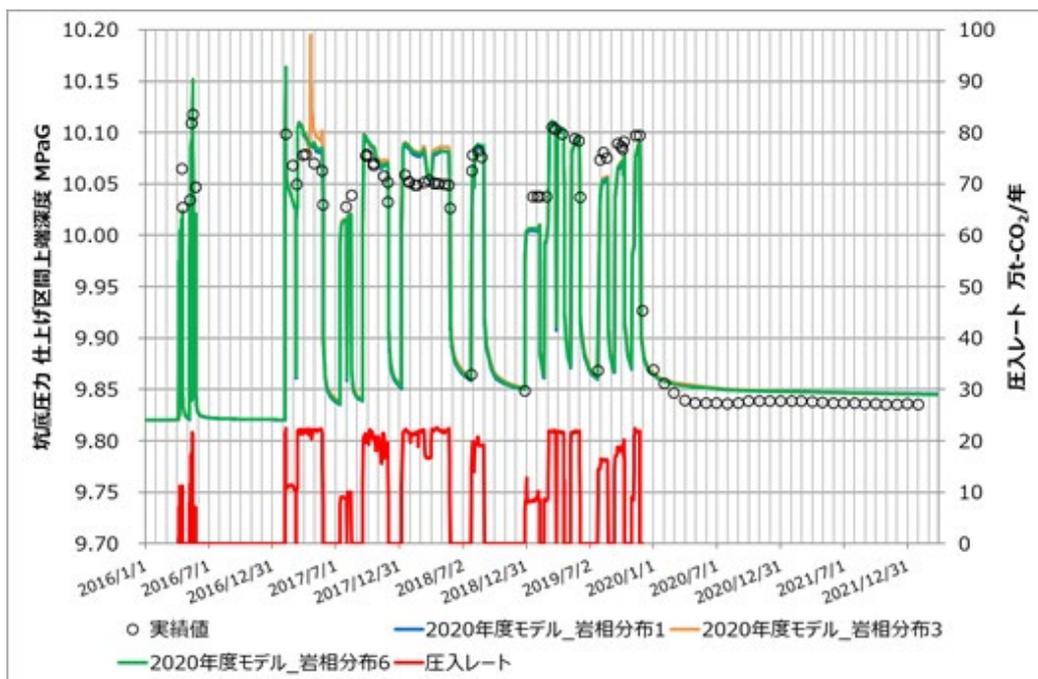
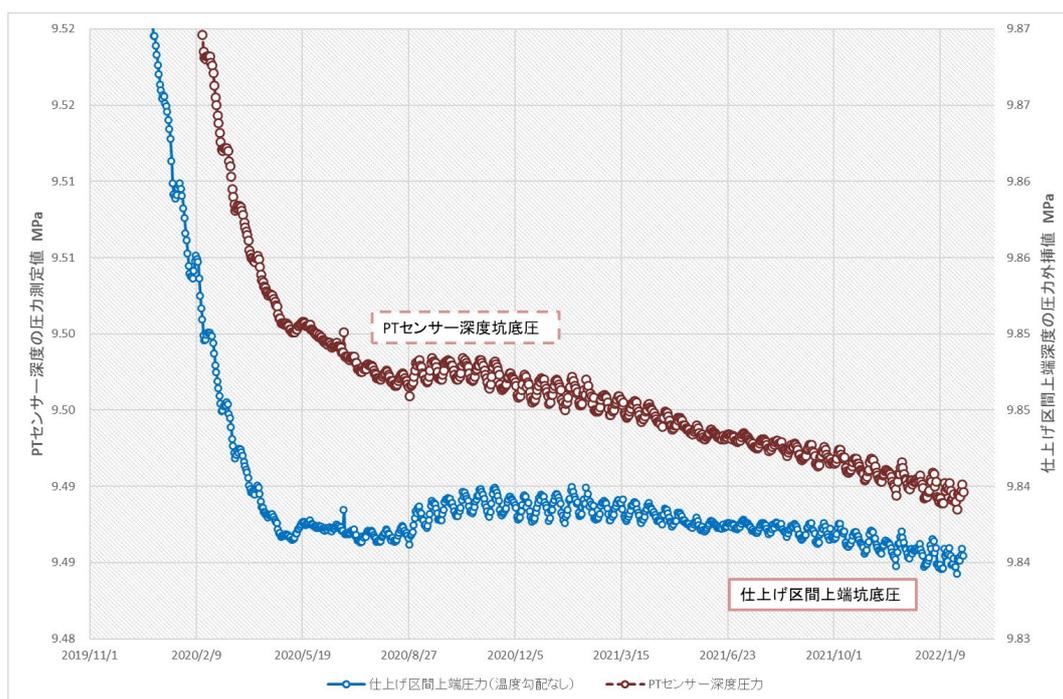


図 5.3-3(a) IW-2 坑底圧力の予実績比較



注) 青線の仕上げ深度上端坑底圧は茶線の PT センサー深度坑底圧（実測値）をもとに PT センサーから仕上げ区間までの CO₂ の密度を温度圧力より補正し深度換算した計算値である。

図 5.3-3(b) IW-2 坑底圧力の予実績比較（2019/11/22~）

予実績比較にて使用した圧入中の坑底圧力実績値は、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を用いている。

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した場合の外挿値である。

フィールドモデルによる予測値では、圧入停止以降、坑底圧力が低下傾向を継続している。一方で、PTセンサーの測定圧力は、2020年8月頃より約2週間周期で上下する様子が顕著に見られるものの低下傾向は続いている。このPTセンサーでの測定圧力を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、2021年10月頃より再び低下傾向を示している。これは4.9節でも述べたとおり、PTセンサー深度における温度が圧入停止以降低下し続けており、図5.3-4に示すように換算に使用したCO₂密度が上昇しているためである。2021年10月頃より、仕上げ区間上端深度に深度換算した圧力値が再び低下傾向に転じているのは、温度低下の度合いが緩やかになりCO₂密度の上昇も緩やかになったためである。

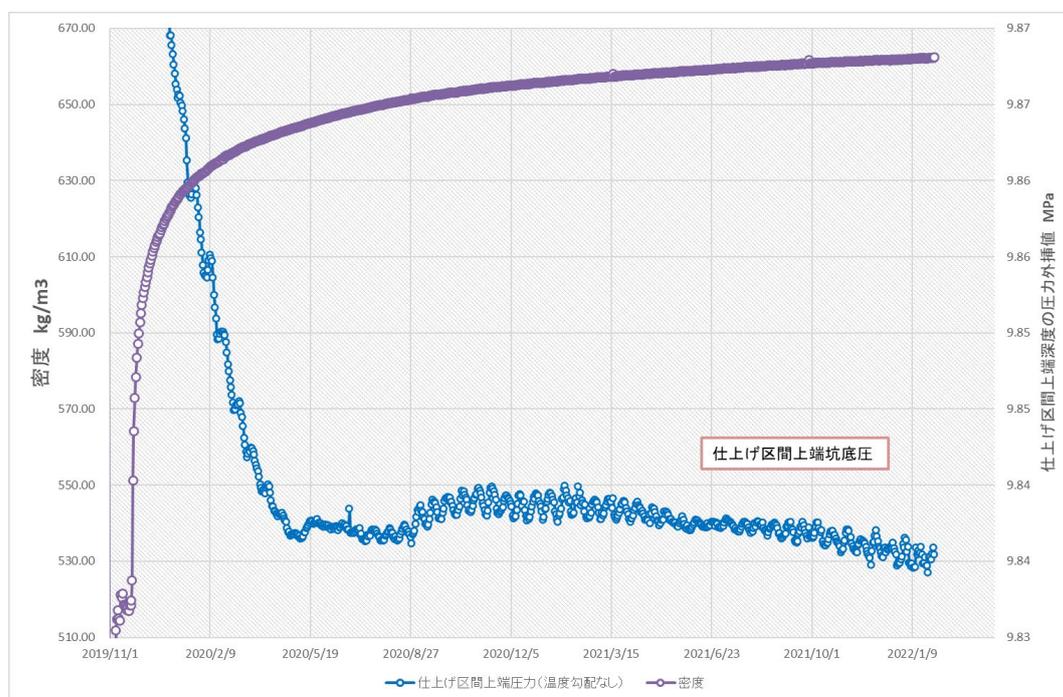


図 5.3-4 IW-2 仕上げ区間上端深度換算圧力値と密度変化（2019/11/22～）

5.3.4 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の坑底圧力を予測した。予実績比較は図5.3-5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の坑底圧力を初期圧力として圧入後に上昇する坑底圧力の推移を予測している。

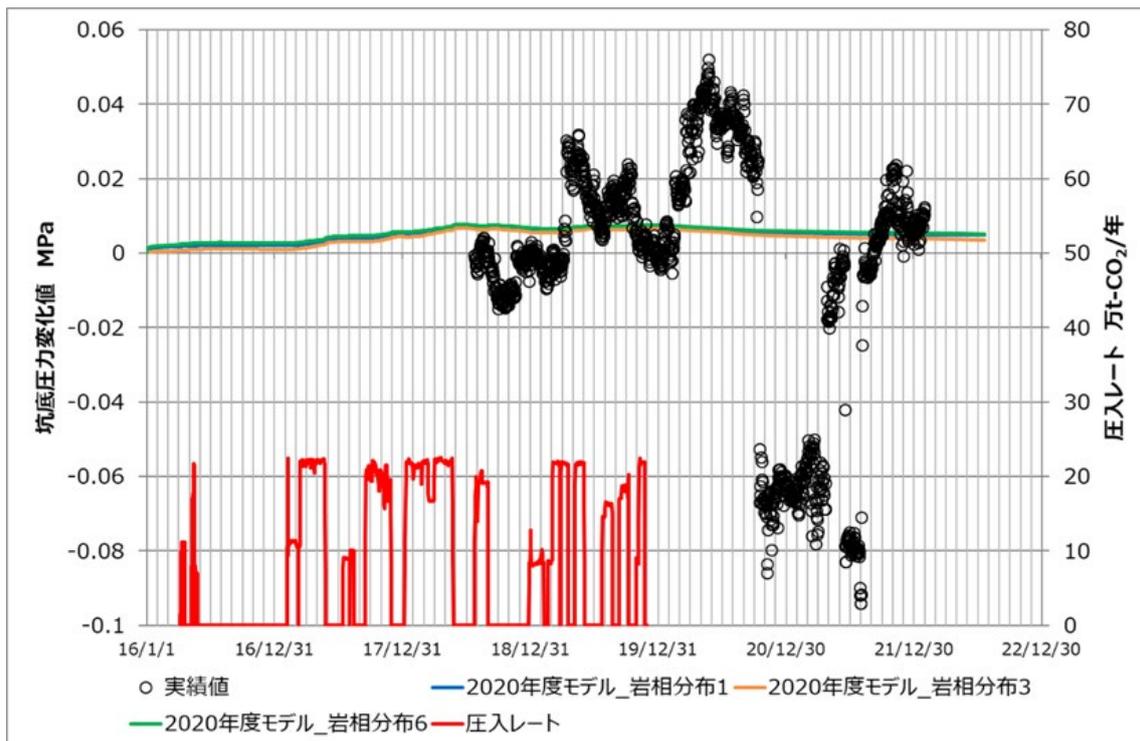


図 5.3-5 IW-2 による圧入レートと OB-2 の坑底圧力上昇値の予実績比較

ここで実績値は貯留層内の基準深度より上部にあるゲージでの測定値であるため、坑内流体に起因した圧力変動を含み、絶対値自体の精度が落ちる。また、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が影響し、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ように、絶対値の傾向を考察することも困難である。

ただし、実績値の圧力変化の傾向において、IW-2からの圧入による圧力伝搬がOB-2の圧力変化上昇に寄与している傾向が一部認められ、OB-2とIW-2が同じ貯留層内にあると言えなくもない。なお、現状のモデルではOB-2とIW-2の間に境界は存在しない設定としている。

5.4 IW-2 ヒストリーマッチング

2019年度の評価におけるヒストリーマッチでは、2018年度の評価における2箇所の高浸透率領域（以下、「浅部・深部高浸透率領域」と称する。）それぞれにスキンファクターを設定することにより、各高浸透率領域の圧入割合を変更することで、2018年7月以降の圧入指数の低下（以下、「圧入性悪化」と称する。）を再現した。コア分析や検層解析、弾性波探査の差分解析からは、岩相11の細分化を追究することは困難と判断されて

おり、現行の貯留層モデルでは岩相毎に一つのプロパティを設定している。2019年度の評価ではスキnfアクターの調整のみでヒストリーマッチを実施したが、浅部・深部高浸透率領域それぞれの絶対浸透率が異なる可能性もあり、検討の余地が残った。そこで、今回の2021年度のヒストリーマッチでは、浅部・深部高浸透率領域の絶対浸透率の組合せとスキnfアクターとの組合せをマッチングパラメータとし、浅部・深部高浸透率領域の絶対浸透率が異なる可能性を試行錯誤的に検証した。

ヒストリーマッチ作業では試行錯誤的に検証するため、計算時間も考慮した上で、計算数の削減を施行した。以下に作業手順を示す。

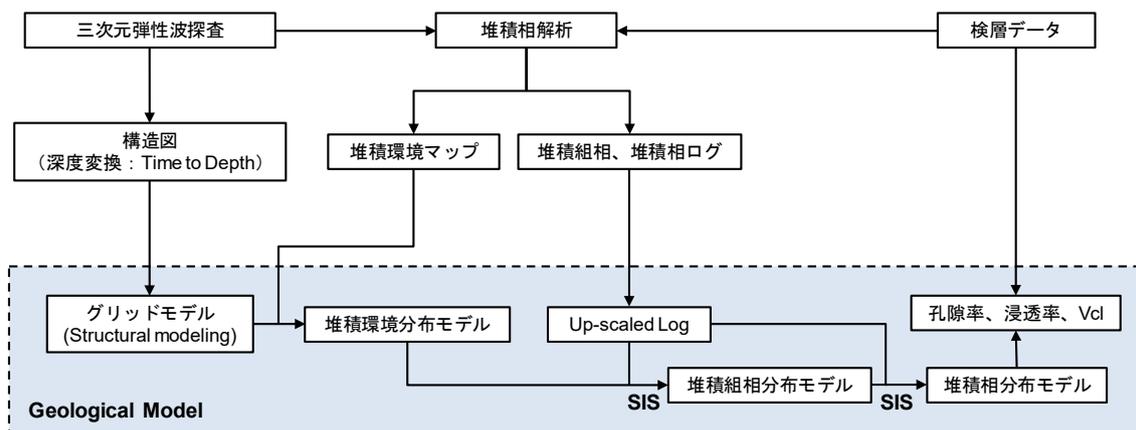
- a. スキnfアクターと絶対浸透率の組合せについて、一つの岩相分布を用いてスクリーニングを行った。ここでは圧入性悪化前において、以下の3点を達成する絶対浸透率とスキnfアクターの組合せを抽出した。なお、浅部・深部高浸透率領域における圧入レート割合に関するスクリーニングの基準は、2019年度評価で構築した30個の具現像について、圧入性悪化前の深部高浸透率領域への平均圧入レート割合が19.61%であることを参考に設定した。2019年度の評価から、深部高浸透率領域への圧入量割合が大きいほうが圧入挙動を再現できることが確認されている。
 - 1) IW-2の坑底圧力の目的関数が25kPa以下
 - 2) 低レート圧入（10万t-CO₂/年以下）時に深部高浸透率領域へCO₂圧入レート割合が0%（圧入されない）
 - 3) 高レート圧入（10万t-CO₂/年以上）時に深部高浸透率領域へのCO₂圧入レート割合が20%以上
- b. 抽出した絶対浸透率とスキnfアクターの組合せにおいて引き続き同じ一つの岩相分布を用いて圧入性悪化後の計算結果から以下3点を達成する組合せを抽出した。
 - 1) IW-2の坑底圧力の目的関数が25kPa以下
 - 2) 低レート圧入時に深部高浸透率領域の圧入レート割合が0%（圧入されない）
 - 3) 深部高浸透率領域のスキnfアクターを圧入性悪化前の設定から10ずつ増やし、IW-2の坑底圧力の目的関数が極小値
- c. 抽出した組合せについて、岩相分布の数を増やし、圧入性悪化前後の全期間におけるIW-2坑底圧力の目的関数の平均が最少である組合せを抽出した
- d. c.で抽出した組合せにおける各岩相分布について5.4.5項で述べるヒストリーマッチ基準を満たす岩相分布を具現像として抽出した。

5.4.1 使用モデル

ヒストリーマッチに用いたモデルは、5.3.2項で用いたセクターモデルとした。

5.4.2 岩相分布の作成

岩相分布は、図 5.4-1 に示す地質モデリングのワークフローに基づき設定した。



注) SIS：Sequential Indicator Simulation

図 5.4-1 地質モデリングのワークフロー

以下のワークフローに沿って、岩相分布を設定した。

岩相分布は、

1. 堆積相解析で解釈された、16個のファシス（岩相）について、坑井におけるファシスログをグリッドモデルのサイズにアップスケールする。
2. 堆積相解析で解釈された堆積システムについて決定論的に分布を作成する。
3. 2.で分布させた堆積システム毎に坑井におけるファシス組相の解釈結果をハードデータとして SIS により地質統計学的にファシス組相分布を作成する。
4. 3.で分布させたファシス組相毎に坑井における岩相の解釈結果をハードデータとして SIS により地質統計学的に岩相分布を作成する。

3.および4.を繰り返すことで、複数の岩相分布を作成した。図 5.4-2 に岩相分布の一例を示す。

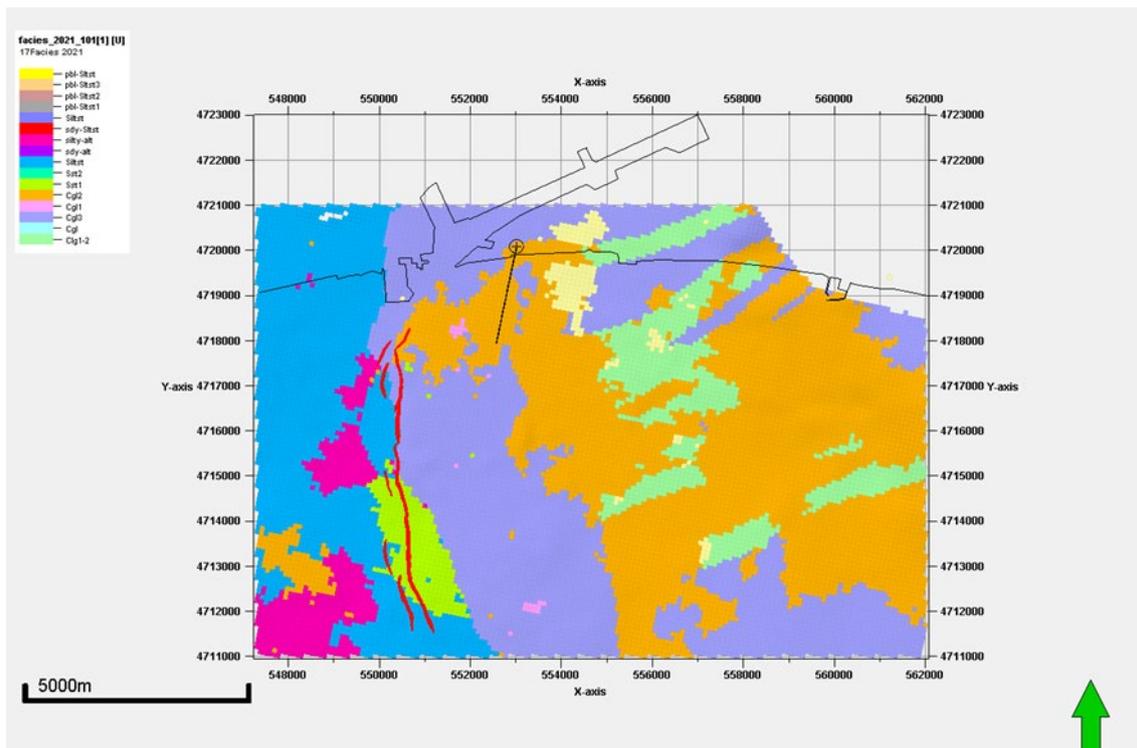


図 5.4-2 岩相分布の一例

5.4.3 パラメータの設定

5.4.2 で示した岩相分布に対して表 5.4-1 のとおりパラメータを設定した。

表 5.4-1 岩相毎のパラメータ

岩相	孔隙率	水平浸透率 mD	kv/kh	ネットグロス比
1	0.35	2	0.72	0.76
2	0.35	2	0.72	0.76
3	0.35	2	0.72	0.76
4	0.35	2	0.72	0.76
5	0.35	9	0.72	0.76
6	0.28	13	0.72	0.77
7	0.29	11	0.59	0.69
8	0.28	11	0.62	0.80
9	0.27	2	0.77	0.56
10	0.29	43	0.67	0.85
11	0.26	1,308	0.68	0.82
12	0.24	3	0.75	0.78
13	0.22	19	0.75	0.83
14	0.28	8	0.52	0.75
15	0.23	4	0.82	0.79
16	0.23	4	0.39	0.76

なお、手法の詳細は後述するが、kv/khを導出する際にグリiddingに合わせてアップスケーリングを行う。2021年度モデルは2019年度のパラメータ設定方法を踏襲しているが、地質モデル更新に伴いIW-2を通過するグリッドも更新されているため岩相11のkv/khの値は0.65から0.68に、水平浸透率の値は1,281 mDから1,308 mDに設定した。各パラメータの設定方法について以下に説明する。

(1) 孔隙率

IW-2とOB-2、CCS-1それぞれの全孔隙率の検層解析結果を岩相毎に平均した値を用いた。なお、岩相1~4はデータ数そのものが少ない（100個以下、measured depthで10 m以下）ため、岩質が近い岩相5も含めて平均化した値を用いた。

(2) 浸透率

水平浸透率は、岩相毎に各坑井の検層データの全孔隙率とNMR浸透率のクロスプロットから近似式を作成し、(1)における全孔隙率を代入して求めることとした。

浸透率は、検層解析上、式(5.4-1)により計算している。

$$\text{浸透率} = a \times \text{全孔隙率}^b \times (\text{T2LM})^c \quad \text{式(5.4-1)}$$

T2LM: T2幾何平均、a, b, c: 定数

T2LMはT2分布を反映した値であるため、岩相に依存するパラメータであると考えることができる。したがって、 $a \times (\text{T2LM})^c$ は岩相毎に定数を取ることとなり、浸透率=定数

×全孔隙率^bと近似することができる。なお、bには一般的な値である4を使用した。定数a×(T2LM)^cは近似式から求めた数値と実データを用い、最小二乗法を用いて決定した。

表 5.4-2 に各岩相の定数 a と水平浸透率の結果を、図 5.4-3 および図 5.4-4 に各岩相についての近似式を示す。なお、岩相 5～13 については、2019 年度のヒストリーマッチ結果を参照し 2020 年度に見直した定数 a の値を採用している。

表 5.4-2 調整前後の定数 a と水平浸透率

岩相	定数			水平浸透率 mD		
	調整前	調整後		調整前	調整前	
		2019年度	2021年度		2019年度	2021年度
1	123	123	123	2	2	2
2	123	123	123	2	2	2
3	123	123	123	2	2	2
4	123	123	123	2	2	2
5	123	613	613	2	9	9
6	198	1,979	1,979	1	13	13
7	816	1,632	1,632	6	11	11
8	858	1,717	1,717	5	11	11
9	96	287	287	1	2	2
10	3,007	6,014	6,014	21	43	43
11	2,094	273,276	278,936	10	1,281	1,308
12	459	918	918	1	3	3
13	1,724	8,622	8,622	4	19	19
14	1,324	1,324	1,324	8	8	8
15	1,392	1,392	1,392	4	4	4
16	1,419	1,419	1,419	4	4	4

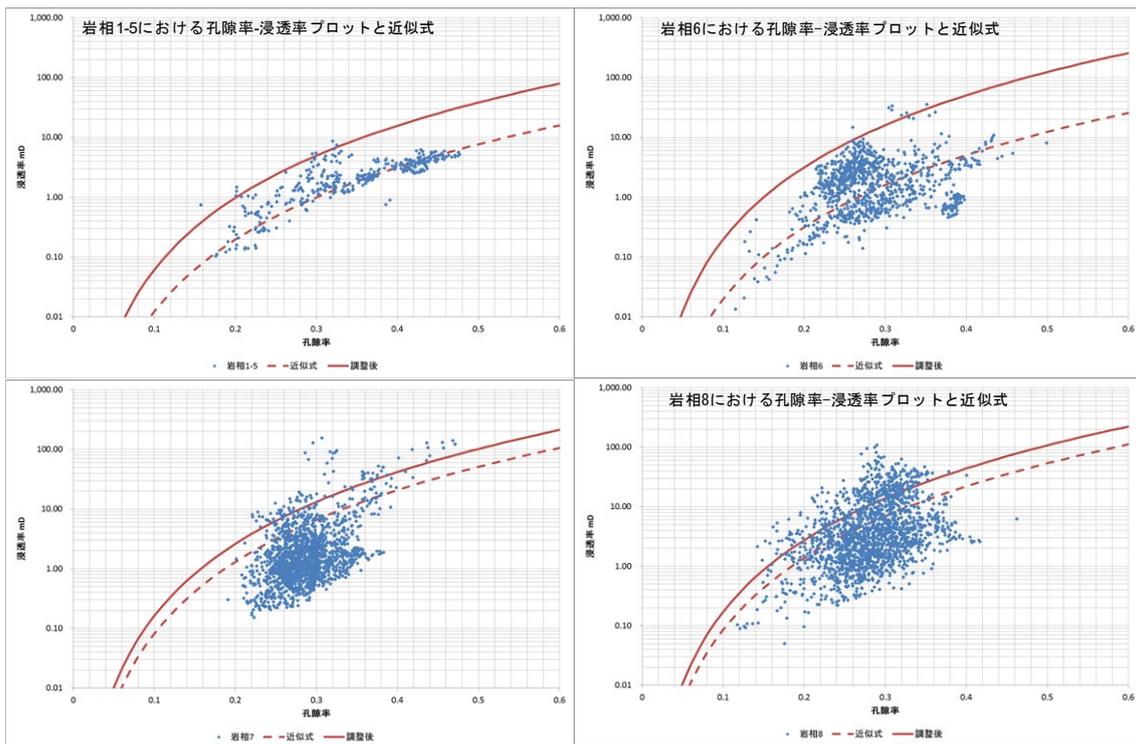


図 5.4-3 岩相 1-8 における孔隙率-浸透率プロットと近似式

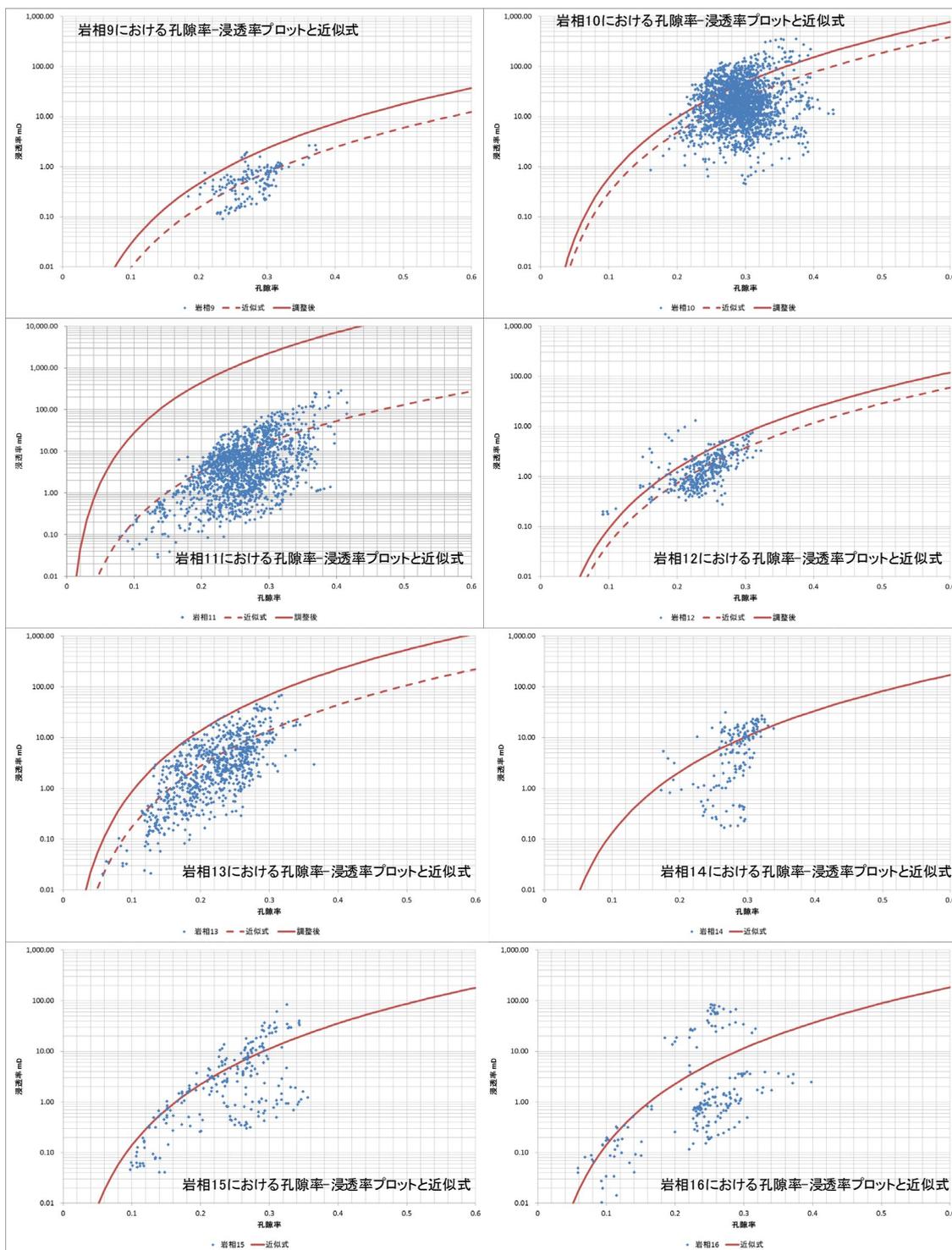


図 5.4-4 岩相 9-16 における孔隙率-浸透率プロットと近似式

(3) ネットグロス比

IW-2、OB-2 および CCS-1 において、頁岩含有率 V_{clay} 、有効孔隙率 $PHIE$ 、全孔隙率 $PHIT$ 、の間で以下の関係を前提として検層解析を実施している。

$$PHIE = (1 - V_{clay}) \times PHIT$$

一方 PHIE/PHIT はネットを反映すると考えられるため、ネットグロス比 $= (1 - V_{clay})$ として、岩相毎に平均した値を用いた。なお、岩相 1~4 はデータ数そのものが少ない（100 個以下、measured depth で 10 m 以下）ため、岩質が近い岩相 5 も含めて平均化した値を用いた。

(4) 垂直浸透率と水平浸透率の比 (kv/kh)

垂直浸透率を求めるため、アップスケーリングする際の垂直方向のグリッドサイズは 2017 年度の評価における最小のグリッドサイズに倣い、1.25 m とした。

まず、水平浸透率と垂直浸透率をそれぞれ加重平均と調和平均を用いて、1.25 m にアップスケーリングし、kv/kh を算出した。次にアップスケーリングした際に占める割合が、最も大きい岩相をアップスケーリングした範囲の代表とし、再度岩相毎に浸透率を平均して kv/kh を算出した。

5.4.4 浸透率の検討

浅部および深部高浸透率領域である岩相 11 の絶対浸透率が、深度によって異なる可能性を検討した。浸透率は、深部であるほど岩石圧縮の影響により低下する傾向にあり、また深度差が 30 m 程の同一岩相であるにも関わらず、浸透率が著しく異なる可能性は考えにくいという想定の下、浅部高浸透率領域の絶対浸透率が 1,308 mD、1,400 mD、1,500 mD、1,600 mD、1,700 mD、1,800 mD であるケースを検討した。浅部高浸透率領域の絶対浸透率の各値に対する深部高浸透率領域の絶対浸透率は、2015 年度のブライン圧入テストの結果から得られた IW-2 全体の浸透率 \times 層厚 $(= 135,000 \text{ mD}\cdot\text{m})$ となるように 5.4.3 項の定数 a を調整して求めた。

なお、5.4.2 で作成した岩相分布において岩相 11 が割り当てられたセルの内、坑井通過セルだけでなく、各高浸透率領域のレイヤーに出現したすべてのセルの絶対浸透率をそれぞれ調整した。例えば、浅部高浸透率領域：1,400 mD、深部高浸透率領域：1,223 mD という絶対浸透率組合せとする場合は、岩相分布上で岩相 11 と割り当てられたセルの内、浅部高浸透率領域に出現する岩相 11 の絶対浸透率を 1,400 mD とし、深部高浸透率領域に出現する岩相 11 の絶対浸透率を 1,223 mD と設定し直した。

5.4.5 ヒストリーマッチ状況の判断

ヒストリーマッチ状況の判断は、最終的には以下を確認し、総合的に判断した。

- 1) IW-2 の坑底圧力：式(5.4-2)に示す目的関数の式を用い、ヒストリーマッチ状況の判断の一つにした。この数値が小さいほど坑底圧力のヒストリーマッチが良好である

と判断した。なお、ヒストリーマッチの対象となる坑底圧力データは、圧入性悪化前期間を2016年4月14日～2018年7月25日、圧入性悪化後期間を2018年7月28日～2022年1月31日までとした。

$$\text{目的関数} = \frac{1}{n_{obs}} \sum_{i=1}^{n_{obs}} \sqrt{(d_{sim}^i - d_{obs}^i)^2} \quad \text{式(5.4-2)}$$

n_{obs} : 実績データ数、 d_{sim} : シミュレーション計算値、 d_{obs} : 実績データ

- 2) 圧入レート割合：2019年度の評価では、圧入性悪化前後に関わらず圧入レートと圧入指数に相関性が示されており、20万t-CO₂/年を超える高レート圧入時には、浅部高浸透率だけでなく深部高浸透率領域へ圧入領域が拡大していると推察されている。10万t-CO₂/年より低い低レート圧入時（圧入性悪化前：2018年5月25日、圧入性悪化後：2019年6月4日）は、浅部高浸透率領域にのみCO₂が圧入されており、20万t-CO₂/年を超える高レート圧入時（圧入性悪化前：2018年5月23日、圧入性悪化後：2019年6月1日）は、各高浸透率領域ともにCO₂が圧入されていることをマッチングの条件とした。
- 3) フォールオフテスト（以下、「FOT」と称する。）のログ-ログプロット：FOT6～12、14、17について、実データとシミュレーションから得られたログ-ログプロットを比較し、挙動の再現性を確認した。
- 4) CO₂飽和度の広がりを確認し、2017年度（斉藤ら（2018）1）と2018年度、2020年度に実施された弾性波探査の結果と比較した。

5.4.6 浸透率の組合せとスキンファクターの組合せ選定

岩相分布1通りに対し、5.4.3および5.4.4で設定したパラメータを用いて、スキンファクターを0、5、10、15、20まで調整した場合の目的関数と圧入レート割合の傾向を調査した。

圧入性悪化前の期間では、浅部高浸透率領域や深部高浸透率領域に関係なく、スキンファクターを増やすと目的関数の値が増える傾向にあり、浅部スキンファクターが15以上かつ深部スキンファクターが5以上の組合せと浅部スキンファクターが20、深部スキンファクターが0の組合せは、すべての絶対浸透率組合せにおいて目的関数が25kPaを超えた。圧入性悪化前の低レート圧入時において、浅部高浸透率領域だけでなく深部高浸透率領域へもCO₂が圧入される組合せにおいても、すべて目的関数が25kPaを超えた。圧入性悪化前の高レート圧入時において、深部高浸透率領域への圧入割合が2割を上回る組合せにおいては、浅部高浸透率領域のスキンファクターが大きいほど、また深部高浸透率領

域のスキンファクターが小さいほど、また浅部高浸透率領域の絶対浸透率が小さいほど、深部高浸透率領域への圧入割合が増加する傾向を示した。

圧入性悪化後の期間では、すべての組合せで目的関数の値が25kPa以下を満たした。これらの内、深部領域のスキンファクターを増やし目的関数が極小値をもつ組合せは、表5.4-3に示す三つの組み合わせであった。

表 5.4-3 深部領域のスキンファクターが増えても目的関数が極小値をもつ組合せ

	浸透率 [mD]		スキン			
	浅部	深部	圧入性悪化前		圧入性悪化後	
			浅部	深部	浅部	深部
1	1,308	1,308	15	0	15	20
2	1,400	1,223	15	0	15	30
3	1,500	1,130	15	0	15	30

これら三つの組合せについて、岩相分布 10 通りの目的関数を計算し平均を求めた。結果を表 5.4-4 に示す。

表 5.4-4 各高浸透率領域の絶対浸透率の組合せとスキンファクターの組合せにおける目的関数の結果（岩相分布 10 通りの平均）

組合せ	目的関数平均 (kPa)		
	悪化前	悪化後	全期間
1	24.66	16.13	21.14
2	24.96	16.44	21.45
3	24.55	16.68	21.30

ここで必要な岩相分布数を検討するため、組合せ 1 において、複数の岩相分布を用いて圧入性悪化前における目的関数の標準偏差の推移を計算した。結果を図 5.4-5 に示す。

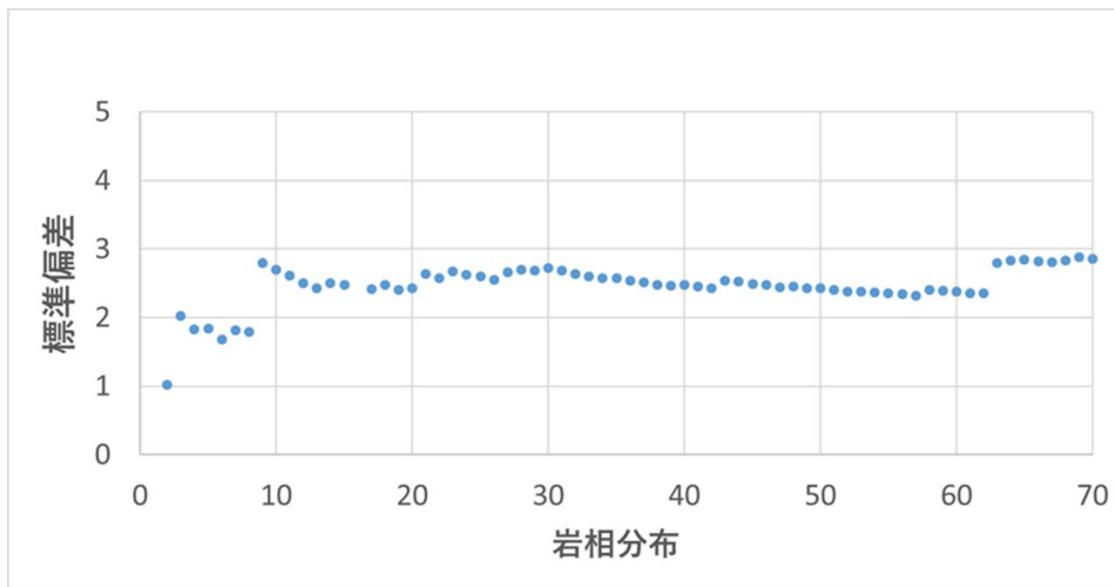


図 5.4-5 組合せ 1 における目的関数の標準偏差

図 5.4-5 より、およそ 10 通りの岩相分布があれば目的関数の値の振れ幅が収束することを確認した。よって、岩相分布 10 通りの目的関数の平均値が最も小さい 1 の組合せが最適と判断し、以降は 1 の組合せにてヒストリーマッチングを行った。

5.4.7 ヒストリーマッチ状況

(1) 坑底圧力の目的関数

圧入性悪化前後のいずれの期間においても、目的関数が 25kPa を下回る岩相分布を選定した。それぞれ圧入性悪化前期間とヒストリーマッチ対象期間全体の目的関数を図 5.4-6 に示す。また、目的関数の数値を表 5.4-5 に示す

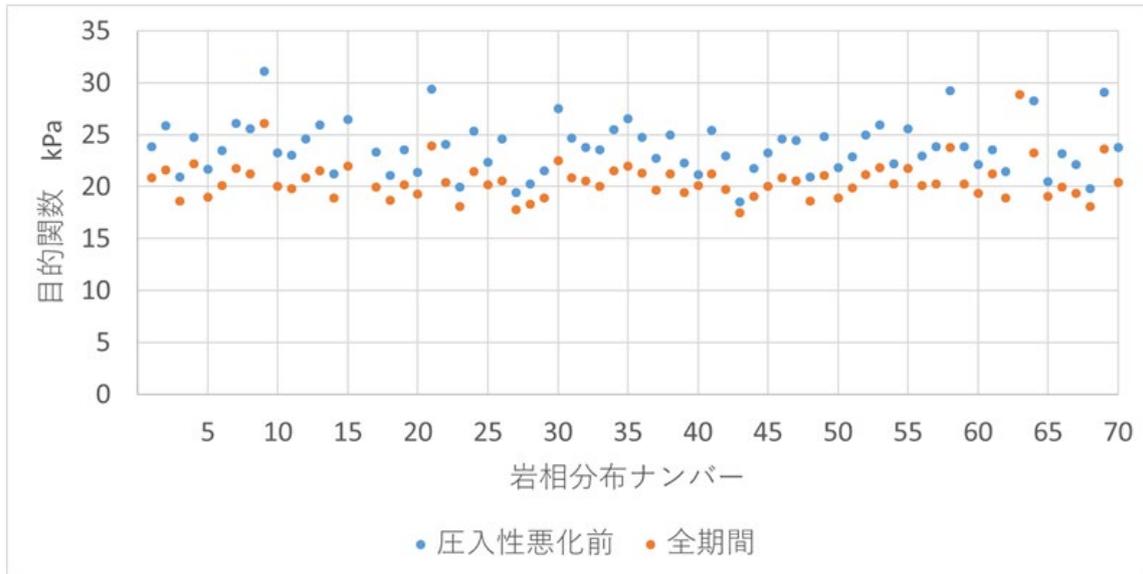
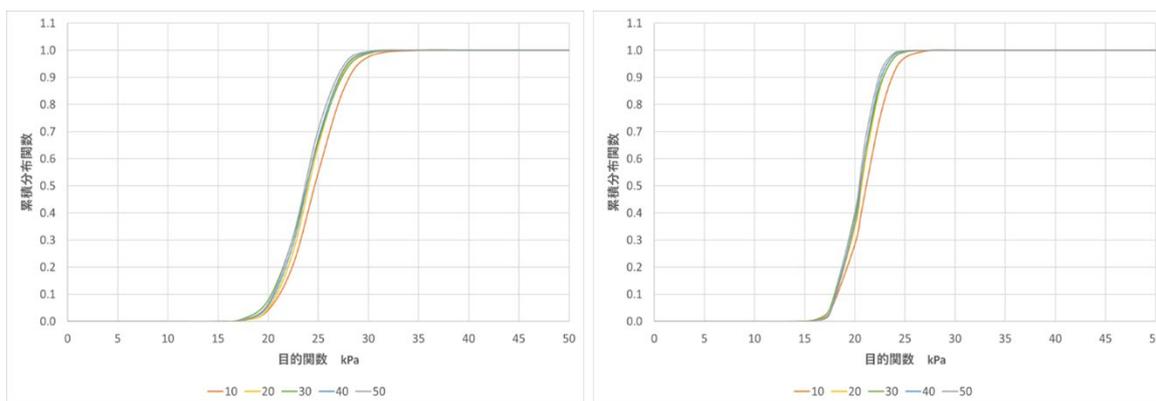


図.5.4-6 岩相分布毎の目的関数

表 5.4-5 各岩相分布における目的関数値

岩相分布	目的関数平均(kPa)			岩相分布	目的関数平均(kPa)		
	悪化前	悪化後	全期間		悪化前	悪化後	全期間
1	23.85	16.5	20.82	36	24.76	16.37	21.3
2	25.88	15.49	21.59	37	22.76	15.23	19.65
3	20.96	15.36	18.65	38	24.96	15.96	21.25
4	24.75	18.52	22.18	39	22.31	15.32	19.42
5	21.7	15.11	18.98	41	25.42	15.24	21.22
6	23.47	15.23	20.07	42	22.98	15.08	19.72
7	26.08	15.56	21.74	43	18.55	15.95	17.48
8	25.54	15.11	21.24	44	21.73	15.24	19.05
9	31.12	19.01	26.13	45	23.23	15.42	20.01
10	23.24	15.39	20	46	24.61	15.43	20.82
11	22.99	15.32	19.82	47	24.42	15.11	20.58
12	24.58	15.62	20.88	48	20.95	15.27	18.61
13	25.94	15.25	21.52	49	24.8	15.81	21.09
14	21.24	15.64	18.93	50	21.86	14.76	18.93
15	26.49	15.47	21.94	51	22.85	15.6	19.86
17	23.32	15.24	19.99	52	24.97	15.63	21.12
18	21.05	15.37	18.71	53	25.95	15.99	21.84
19	23.56	15.33	20.16	54	22.22	17.39	20.23
20	21.35	16.34	19.28	55	25.55	16.27	21.72
21	29.4	16.2	23.95	56	22.98	16.08	20.13
22	24.05	15.2	20.4	57	23.82	15.25	20.28
23	19.99	15.3	18.06	58	29.22	16.04	23.78
24	25.34	15.84	21.42	59	23.87	15.17	20.28
25	22.32	17.07	20.15	60	22.12	15.38	19.34
26	24.58	14.9	20.58	61	23.54	17.87	21.2
27	19.4	15.51	17.8	62	21.47	15.32	18.93
28	20.28	15.58	18.34	63	35.97	18.81	28.89
29	21.51	15.13	18.88	64	28.27	16.09	23.25
30	27.5	15.46	22.53	65	20.48	17.1	19.09
31	24.64	15.52	20.88	66	23.17	15.36	19.94
32	23.77	15.99	20.56	67	22.11	15.46	19.37
33	23.55	15.03	20.03	68	19.81	15.6	18.07
34	25.46	15.89	21.51	69	29.06	15.93	23.64
35	26.51	15.59	22	70	23.81	15.57	20.41

また、各岩相分布で得られるそれぞれの期間の目的関数の値を、通し番号順に抽出し、通し番号の数毎に目的関数の平均と標準偏差を求め、10通りずつ、50通りまでの累積分布関数を作成すると、圧入性悪化前および全期間では、それぞれ図 5.4-7 に示すような分布となる。



注) 左図：圧入性悪化前 右図：全期間

図 5.4-7 岩相分布数毎の目的関数における累積分布関数表

表 5.4-6 岩相分布数毎の目的関数の平均値と標準偏差

岩相分布数	圧入性悪化前		全期間	
	平均 kPa	標準偏差 kPa	平均 kPa	標準偏差 kPa
10 通り	25	3	21	2
20 通り	24	2	21	2
30 通り	24	3	21	2
40 通り	24	2	21	2
50 通り	24	2	20	2

表 5.4-6 に示すようにおおよそ 20 通り以上の岩相分布があれば、それ以上の数の岩相分布があったとしても平均値や標準偏差、累積分布関数の形状にはほとんど変化がないことがわかる。また、標準偏差は圧入性悪化前で 3kPa、全体で 2kPa であり、岩相分布の違いによって、IW-2 の坑底圧力の推定値に与える影響は小さいことがわかる。

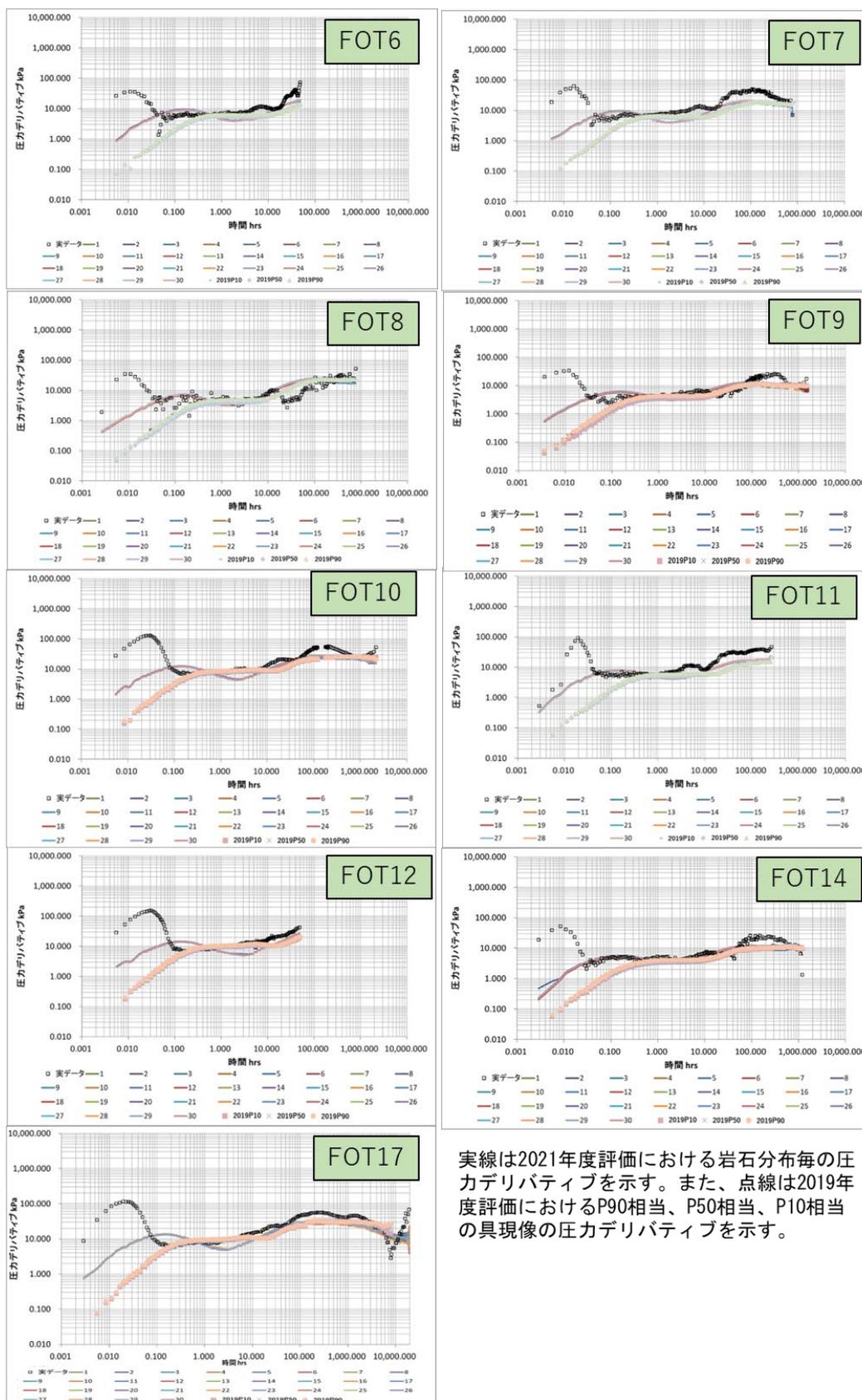
(2) 圧入レート割合

岩相分布のうち、圧入性悪化前および圧入性悪化後、ヒストリーマッチ対象全期間の目的関数平均値が 25kPa 以下となるものについて、通し番号順に抽出し、各高浸透率領域における圧入レート割合を確認した。低レート圧入時は浅部高浸透率領域のみに CO₂ が圧入されており、高レート圧入時は浅部だけでなく深部高浸透率領域へも CO₂ が圧入される岩相分布を選定した。

(3) FOT のログ-ログプロット

岩相分布のうち、圧入レート割合のマッチング基準を満たした岩相分布について、通し番号の若い順に 30 通り抽出し、FOT のログ-ログプロットを図 5.4-8 のように確認した。ここでは、2019 年度評価の P90 相当、P50 相当、P10 相当の三つのデリバティブも併記

した。



実線は2021年度評価における岩石分布毎の圧力デリバティブを示す。また、点線は2019年度評価におけるP90相当、P50相当、P10相当の具現像の圧力デリバティブを示す。

図 5.4-8 ログ-ログプロットの確認

5.4.8 CO₂の垂直方向への浸透についての考察

5.1.5 項の 2019 年度および 2020 年度に取得された弾性波探査差分解析では、萌別層泥岩層ホライズン直上の萌別層泥岩層内にも振幅異常が見られ、CO₂が泥岩層内へ移動した可能性について言及した。岩相分布 1 の 2020 年 1 月 22 日時点（30 万 t-CO₂ 圧入時点）における溶存 CO₂ 量分布のシミュレーション結果を図 5.4-9 に示す。なお、溶存 CO₂ 量の下限値は 3×10^{-5} mole/kg-H₂O としている。

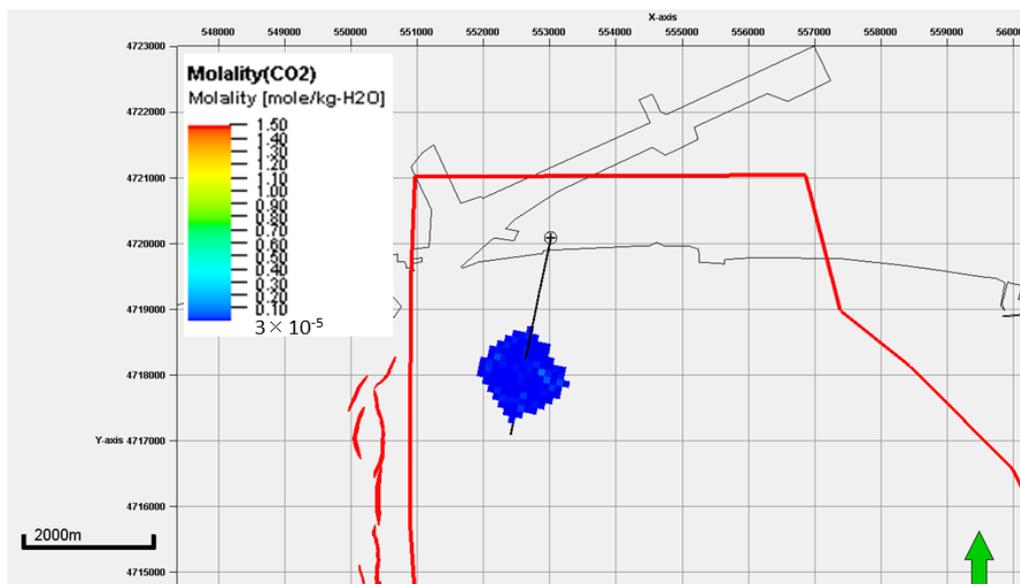


図 5.4-9(a) 岩相分布 1 における溶存 CO₂ 量分布のシミュレーション結果 平面図

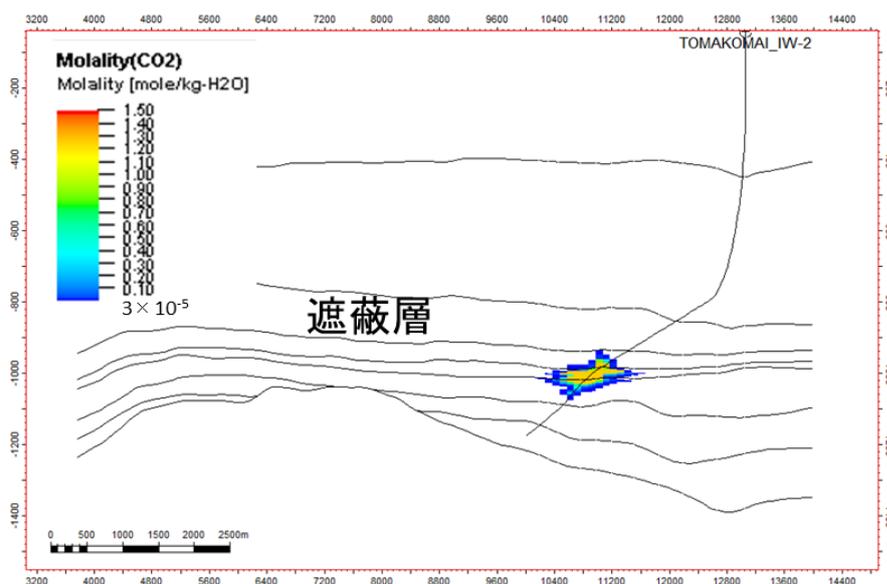


図 5.4-9(b) 岩相分布 1 における溶存 CO₂ 量分布のシミュレーション結果 坑井断面図

シミュレーション結果からも、萌別層貯留層直上の萌別泥岩層内へ溶存CO₂が浸透している可能性が示された。差分解析では萌別層泥岩層内のシルト岩相と泥質部の詳細な比較ができなかったが、シミュレーション結果では溶存CO₂の浸透は萌別層泥岩層内のシルト岩相に留まり、シミュレーション上の遮蔽層である萌別層泥岩層内の泥質部分までは到達しなかった。図5.4-10は、仕上げ区間上端のセルの直上に位置する遮蔽層下端における初期圧力からの圧力推移を示したものである。CO₂ガスはシミュレーション上の遮蔽層に到達せず、また圧入による圧力上昇は最大でも35kPa程度であり、遮蔽層のスレッシュホールド圧力である370kPaを大きく下回ることから、圧入したCO₂は安全に貯留されていると考えられる。

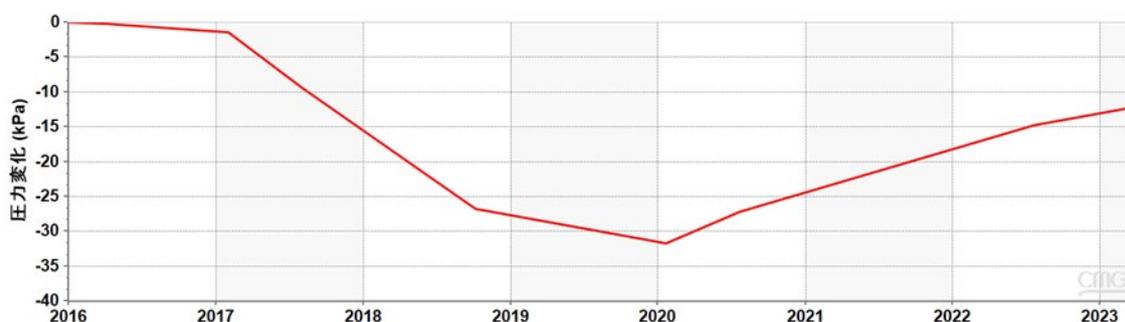


図 5.4-10 岩相分布 1 における遮蔽層下端セル{58,81,4}の圧力変位

5.4.9 苫小牧 IW-2 ヒストリーマッチングまとめ

スキンファクターだけでなく、スキンファクターおよび各高浸透率領域の絶対浸透率の組合せを設定し、各高浸透率領域への圧入レート割合を変更することで、マッチングを得る具現像を選定することができた。結果として、各高浸透率領域の絶対浸透率が同一である組合せの可能性を追求しヒストリーマッチングを実施したが、マッチングの基準を満たす組合せは他にも二通り存在している。各高浸透率領域の絶対浸透率をより精度良く設定するためには、CO₂圧入再開し追加のダイナミックデータを取得するか、あるいは掘削時のカッティングス分析などを行い、新たに情報を追加する必要があると考える。

5.5 IW-2 流動シミュレーション

本章では5.4節のヒストリーマッチの実施で得られたパラメータをフィールドモデルに適用し、圧入可能量評価を実施した。

5.5.1 具現像の抽出

5.4節で実施したヒストリーマッチと同様の方法で、圧入性悪化前および悪化後におい

て目的関数が 25kPa 以下となる岩相分布を選択した。この内、圧入性悪化前および悪化後において、低レート圧入時にも深部高浸透率領域へ CO₂ が圧入されているものは具現像から除外した。最終的に具現像を 30 個抽出するまでに試行した岩相分布の数は 66 通りであった。

以降では、表 5.5-1 に示すように岩相分布ナンバーの数字の若い順に、具現像 1、具現像 2 のようにあらためてナンバリングした上で説明する。

表 5.5-1 各岩相分布における圧入レート割合と抽出した具現像

具現像	岩相分布	圧入レート割合							
		悪化前				悪化後			
		低レート		高レート		低レート		高レート	
		浅部	深部	浅部	深部	浅部	深部	浅部	深部
1	1	95.06	0.00	61.15	35.49	96.56	0.00	73.58	22.50
2	3	95.16	0.00	62.01	34.62	96.79	0.00	75.47	20.62
	4	93.40	1.89	59.10	37.50	95.87	0.64	71.75	24.09
3	5	95.81	0.00	62.95	33.81	97.16	0.00	76.13	20.12
4	6	95.29	0.00	61.93	34.70	96.17	0.00	75.52	20.54
	10	92.94	2.53	60.20	36.46	95.14	0.89	74.99	21.09
5	11	95.02	0.00	62.60	33.97	96.13	0.00	75.93	20.11
	12	89.45	6.38	58.49	38.63	94.06	3.18	75.41	21.18
	14	92.72	3.01	60.63	36.09	96.74	0.15	76.21	19.95
	17	91.07	4.64	59.87	36.79	95.21	1.93	75.04	21.05
	18	91.07	4.64	60.92	35.76	96.39	0.42	75.52	20.57
	19	92.58	2.38	58.95	37.69	94.92	2.20	72.33	23.77
6	20	95.61	0.00	63.42	33.21	96.68	0.00	75.72	20.23
7	22	95.11	0.00	62.00	34.62	96.72	0.00	75.49	20.57
8	23	94.93	0.00	62.07	34.55	96.72	0.00	75.64	20.43
	25	92.92	2.07	59.00	37.42	95.27	0.72	71.66	23.91
9	26	94.94	0.00	61.21	35.45	96.70	0.00	75.44	20.63
10	27	95.37	0.00	62.69	33.94	96.83	0.00	74.86	21.22
11	28	94.96	0.00	62.68	33.81	96.60	0.00	75.92	20.03
	29	94.98	0.33	61.38	35.37	96.75	0.00	74.77	21.37
	31	91.98	4.87	61.65	35.35	96.68	0.85	75.88	20.65
12	32	97.07	0.00	66.41	30.54	97.05	0.00	78.93	17.48

具現像	岩相分布	圧入レート割合							
		悪化前				悪化後			
		低レート		高レート		低レート		高レート	
		浅部	深部	浅部	深部	浅部	深部	浅部	深部
13	33	95.19	0.00	62.34	34.29	96.68	0.00	74.57	21.56
14	36	95.71	0.00	64.70	31.89	96.99	0.00	76.45	19.67
15	37	94.89	0.00	61.71	34.90	96.57	0.00	74.92	21.13
	38	92.66	2.29	58.76	37.81	94.35	2.82	71.87	24.10
16	39	95.10	0.00	62.18	34.44	96.77	0.00	75.56	20.53
17	40	94.52	0.00	62.47	33.76	95.98	0.00	75.24	20.31
18	42	94.97	0.00	62.01	34.63	96.73	0.00	75.70	20.38
	43	93.31	0.21	61.02	34.89	95.76	0.00	76.02	19.29
19	44	95.00	0.00	61.67	35.00	96.75	0.00	75.18	20.92
20	45	95.09	0.00	61.57	35.09	96.65	0.00	74.91	21.20
	46	89.12	5.55	57.88	38.54	91.95	3.56	72.23	23.58
21	47	95.11	0.00	61.79	34.85	96.73	0.00	75.47	20.63
22	48	95.11	0.00	62.09	34.54	96.75	0.00	75.69	20.39
	49	92.72	2.77	59.47	37.23	95.43	1.74	73.40	22.75
	50	89.09	6.06	57.41	39.28	91.87	4.04	72.10	24.01
23	51	93.40	0.00	61.59	34.18	95.57	0.00	74.77	20.51
	52	88.71	6.78	56.19	40.68	92.58	3.64	71.56	24.58
24	54	95.46	0.00	62.52	34.18	96.78	0.00	75.68	20.32
	56	91.37	3.04	58.55	37.64	94.66	1.75	73.29	22.31
25	57	95.08	0.00	61.93	34.74	96.95	0.00	75.93	20.20
26	59	94.94	0.00	62.05	34.56	96.75	0.00	75.63	20.44
	60	95.18	0.00	60.64	36.03	96.07	0.00	74.28	21.87
27	61	95.24	0.00	61.30	35.37	96.82	0.00	74.81	21.31
28	62	95.24	0.00	61.20	35.48	96.73	0.00	74.54	21.56
29	65	95.03	0.00	62.64	33.95	95.99	0.00	77.08	19.05
30	66	96.16	0.00	61.60	35.47	97.37	0.00	74.95	21.60

5.5.2 グリッドモデル

5.2節で適用したグリッドサイズをフィールドモデルに適用してシミュレーションを行った場合、グリッド数が多すぎるため、多大な計算時間が懸念された。

そこで、まずLGRを適用しない最小100 m×100 m×5 mのグリッドシステムで、ヒストリーマッチ同様の2022年1月31日までCO₂圧入実績を入力して坑底圧力を計算した。

このグリッドモデルとLGRを適用したセクターモデルとでIW-2の坑底圧力を比較したものが図5.5-1である。

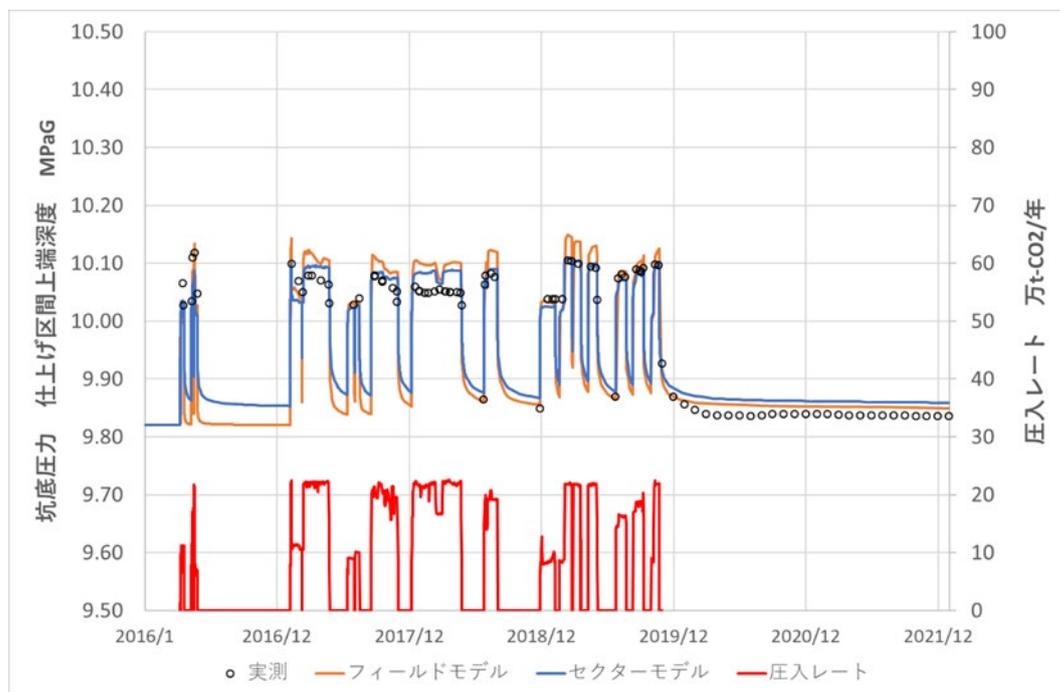


図 5.5-1 フィールドモデルとセクターモデル（LGR）におけるIW-2 坑底圧力の比較（具現像 1）

フィールドモデルでは、坑井周辺のグリッドサイズが大きいため、坑井周辺でのCO₂飽和率が低く、圧入期間中の坑底圧力は0.03 MPa程度セクターモデルの予測より高くなる。

GEMでは、グリッドサイズによるこのような坑底圧力の違いに対する影響を抑えるために坑井通過グリッドの圧入性を変更する設定を用いることが推奨されているが、本検討ではグリッドサイズによる坑底圧力の違いが小さいことからこの設定を使わずに計算を実施することとした。また、図5.5-2に示すように溶存CO₂量の分布が一致することからも、以降の圧入可能量評価には影響しないと判断した。

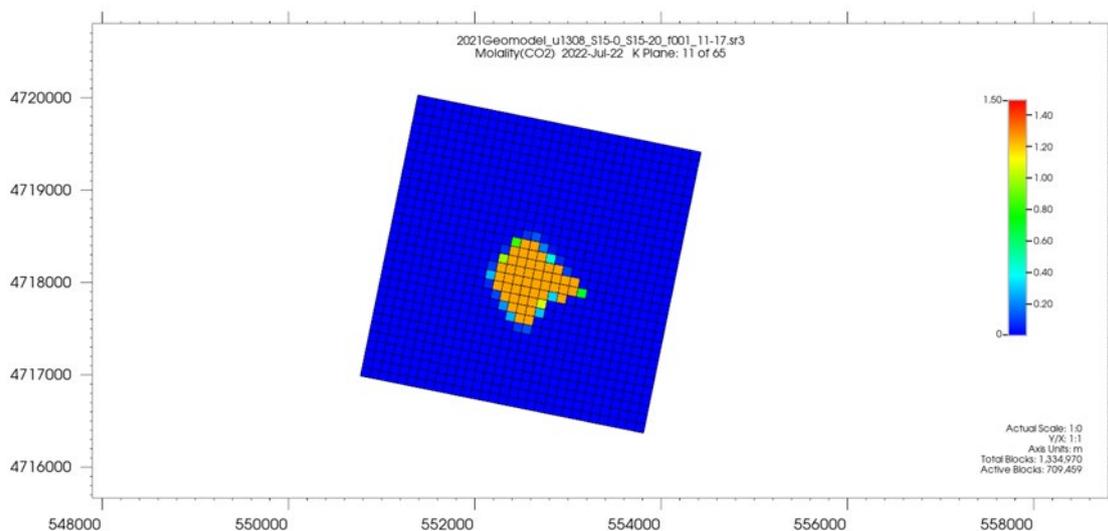


図 5.5-2(a) フィールドモデルとセクターモデル（LGR）での溶存 CO₂ 量分布の比較
 (2020年1月22日時点) フィールドモデル k=11

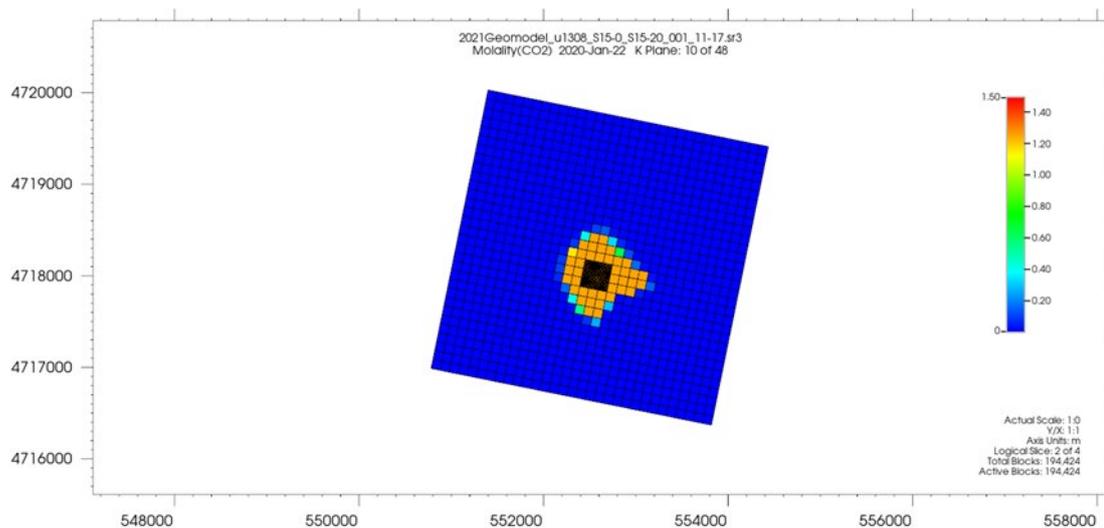


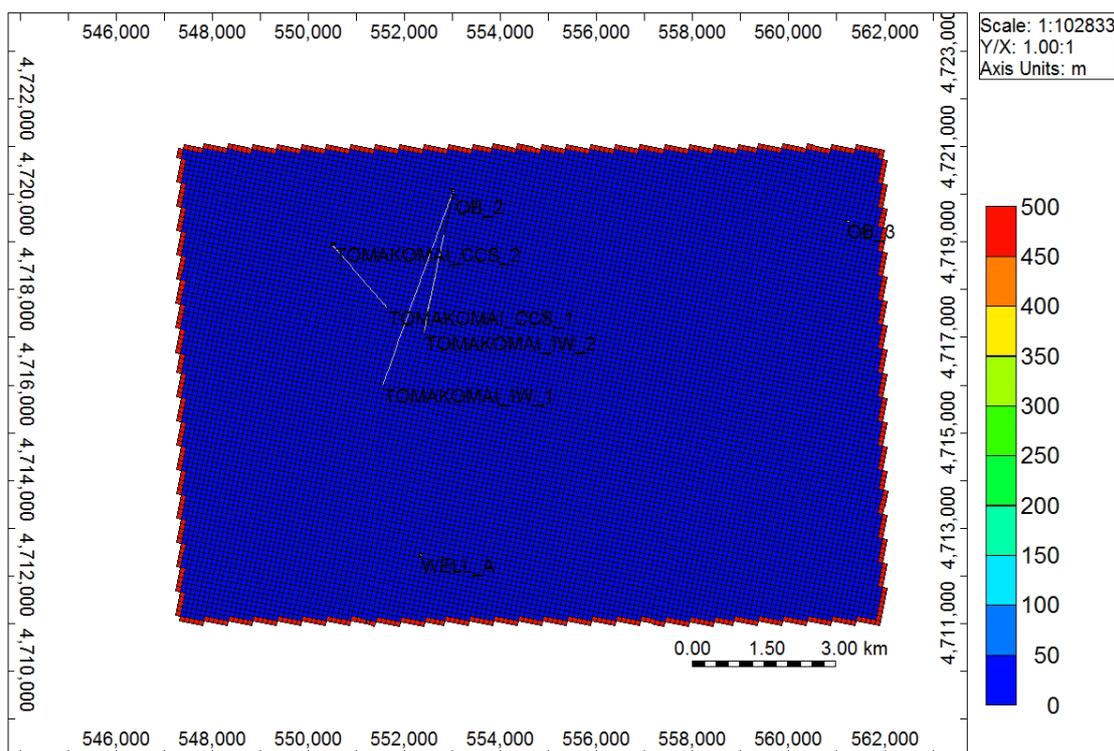
図 5.5-2(b) フィールドモデルとセクターモデル（LGR）での溶存 CO₂ 量分布の比較
 (2020年1月22日時点) セクターモデル k=10

以上の結果から、計算時間等も考慮し、将来予測では、100 m×100 m×5 m のグリッドシステムを用いて検討することとした。なお、このグリッドシステムでの総グリッド数は $163 \times 126 \times 65 = 1,334,970$ 個であり、アクティブ・グリッド数は 714,013 個（LGRを設定した場合 147,740 個増加し、861,753 個）となる。

5.5.3 境界条件の設定

2019年度の評価での圧入可能量評価では図5.5-3に示すように、モデル境界のグリッドにそのグリッドの有効孔隙の500倍となるよう設定する開境界モデルによって検討した。

2019年度の評価時点以降CO₂圧入は停止しており、圧入中の坑底圧力変化を示す追加情報はないため、2019年度の評価の結果を踏襲し、有効孔隙の倍率は500倍とした。



注1) 数値は有効孔隙倍率を示す。この場合モデル境界グリッドは500、その他は1である。

図 5.5-3 開境界設定例（開境界×500 ケース、k=1）

5.5.4 流動シミュレーションパラメータ設定方法

表 5.5-2 は入力パラメータの一覧である。次項よりそれぞれの入力値について説明する。

表 5.5-2 モデル入力値

	入力値
サイズ	15 km × 10 km × 1,700 m
グリッド	163 × 126 × 173
アクティブ・ブロック数	714,013
基準温度	36.2°C at 920.41 m(TVDSS)
基準圧力	9,290 kPa at 920.41 m(TVDSS)
塩分濃度(ppm NaCl)	3,150
境界条件	開境界 ※モデル境界に 500 倍の有効孔隙を設定
貯留層	
孔隙率	岩相毎に設定
浸透率(mD)	岩相毎に設定
ネットグロス比	岩相毎に設定
岩石圧縮率(1/kPa)	4.54×10^{-6}
相対浸透率曲線	岩相 10、11 : n=2.0 その他 : n=3.5
kr _g	岩相 10、11 : kr _g =0.60 その他 : kr _g =0.143
kr _w	1.00
S _{gc}	0.05
Sw _{ir}	浸透率と孔隙率より算出
ヒステリシス(S _g max)	GEM デフォルト式を使用
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}
遮蔽層	
孔隙率	0.299
浸透率(md)	0.0015
相対浸透率曲線	kr _g 曲線 : Corey kr _w 曲線 : van Genuchten
kr _g	1.00
kr _w	1.00
S _{gc}	0.05
Sw _{ir}	0.638
ヒステリシス(S _g max)	なし

(1) 貯留層圧力・温度

貯留層圧力については圧入開始前のPTセンサー深度での測定圧力である9.29 MPaG(920.41 m(TVDSS))と塩水の圧力勾配である1.0 MPa/100mを用いて、仕上げ区間上端の973.63 m(TVDSS)深度に変換した9.82 MPaGを入力した。貯留層温度は実測値に基づき、以下の式を適用した。

$$T = 0.02904 \times m(\text{TVDSS}) + 9.4973 \quad \text{式(5.5-1)}$$

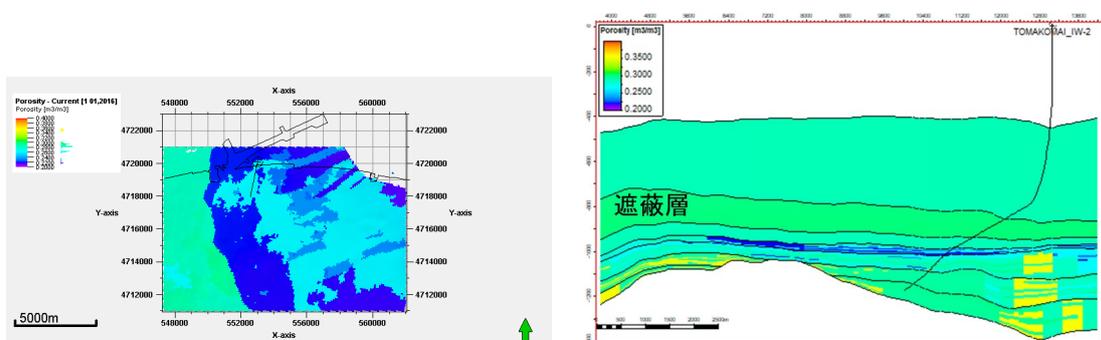
(2) 塩分濃度

OB-2の地層水塩分濃度測定結果に基づき、0.0537 mole/kg-H₂O (= 3,150 ppm NaCl)とした。

(3) 貯留層岩石物性値

① 孔隙率・浸透率・ネットグロス比

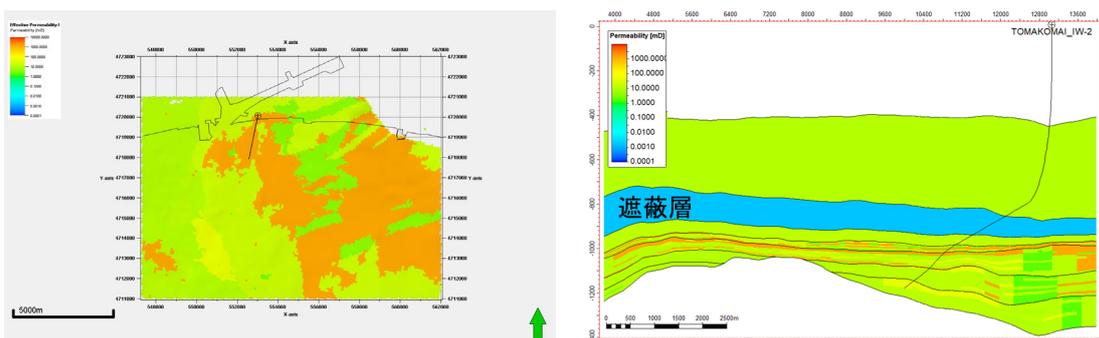
5.4節で示した方法にて岩相を分布させ、それぞれに5.4.3項で示した数値を入力した。ここでは一例として、具現像1における各パラメータの平面図と坑井断面図を図5.5-4～-6にそれぞれ示す。



注1) 左図：平面図 k=11 右図：坑井断面図

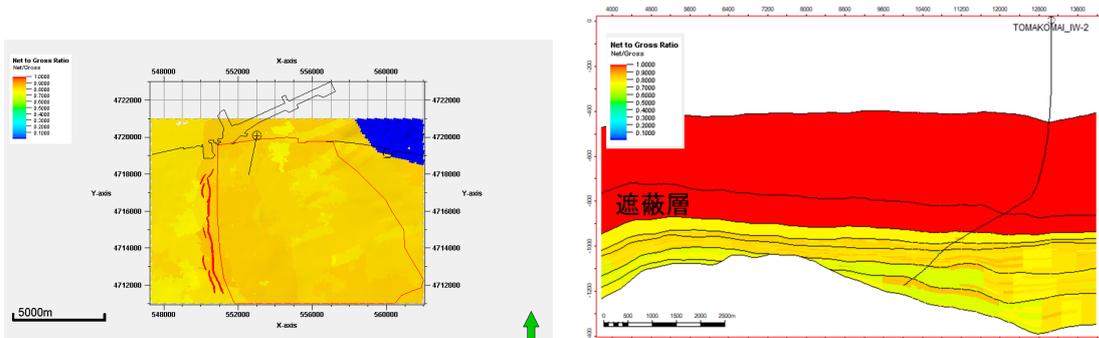
注2) モデル中の黒い横線は、層序区分である。遮蔽層（萌別層泥岩層）より浅部が鶴川層、遮蔽層より深部へ順に遮蔽層と萌別層砂岩層上部の間、萌別層砂岩層上部、萌別層砂岩層下部、萌別層（+荷菜層）互層、萌別層（+荷菜層）砂岩層を表す。

図 5.5-4 孔隙率分布（具現像1）



注) 左図：平面図 k=11 右図：坑井断面図

図 5.5-5 浸透率分布（具現像 1）



注) 左図：平面図 k=11 右図：坑井断面図

図 5.5-6 ネットグロス比分布（具現像 1）

② 岩石圧縮率

CCS-2 と OB-2 および IW-2 のコアデータに基づき $4.54 \times 10^{-6} \text{ 1/kPa}$ とした。

③ 相対浸透率・エンドポイント

相対浸透率曲線は CCS-2 と OB-2 のコアデータによって測定された数値を標準化することによって求めている。標準相対浸透率 k_{rg}^* と標準塩水相対浸透率 k_{rw}^* はそれぞれ式(5.5-2)(Corey (1954) ¹⁾)と式(5.5-3)(van Genuchten (1980) ²⁾)の近似式を用いて作成した。

$$k_{rg}^* = (1 - S_w^*)^n \quad \text{式(5.5-2)}$$

$$k_{rw}^* = \sqrt{S_w^*} \left(1 - \left(1 - S_w^{*1/\lambda} \right)^\lambda \right)^2 \quad \lambda = 0.8 \quad \text{式(5.5-3)}$$

$$k_{rg}^* = k_{rg}/k_{rg}@S_{wir}$$

$$S_w^* = \frac{S_w - S_{wir}}{1 - S_{wir}}$$

$$k_{rw}^* = k_{rw}/k_{rw}@S_{wmax}$$

式(5.5-2)のn値は良好な砂岩である岩相10、11では、n=2、その他の岩相ではn=3.5とした。また、式(5.5-3)のλ値はコアデータ結果と合うようにいずれもλ=0.8を用いた。

不動水飽和率 (S_{wir}) は CCS-2 のコアデータから得られた式(5.5-4)により設定した。

$$S_{wir} = 0.78 - 0.0542 \log(k)/\phi \quad \text{式(5.5-4)}$$

k : 水平浸透率、φ : 全孔隙

不動水飽和率 (S_{wir}) での CO₂ 相対浸透率は良好な砂岩である岩相10、11では0.60、その他の岩相では0.144を用いることとした。また、臨界飽和率は0.05と仮定した。

相対浸透率のヒステリシス（圧入が停止すると浮力による上昇や溶解により不動ガス飽和率が大きくなる現象）は式(5.5-5)に基づき設定した。

$$S_{grmax} = S_{gc} + 0.5 \times (1 - S_{wir} - S_{gc}) \quad \text{式(5.5-5)}$$

図 5.5-7 に一例として岩相 5（シルト岩）、岩相 10 と 11（いずれも砂岩）、岩相 13（礫岩）における相対浸透率曲線を示す。

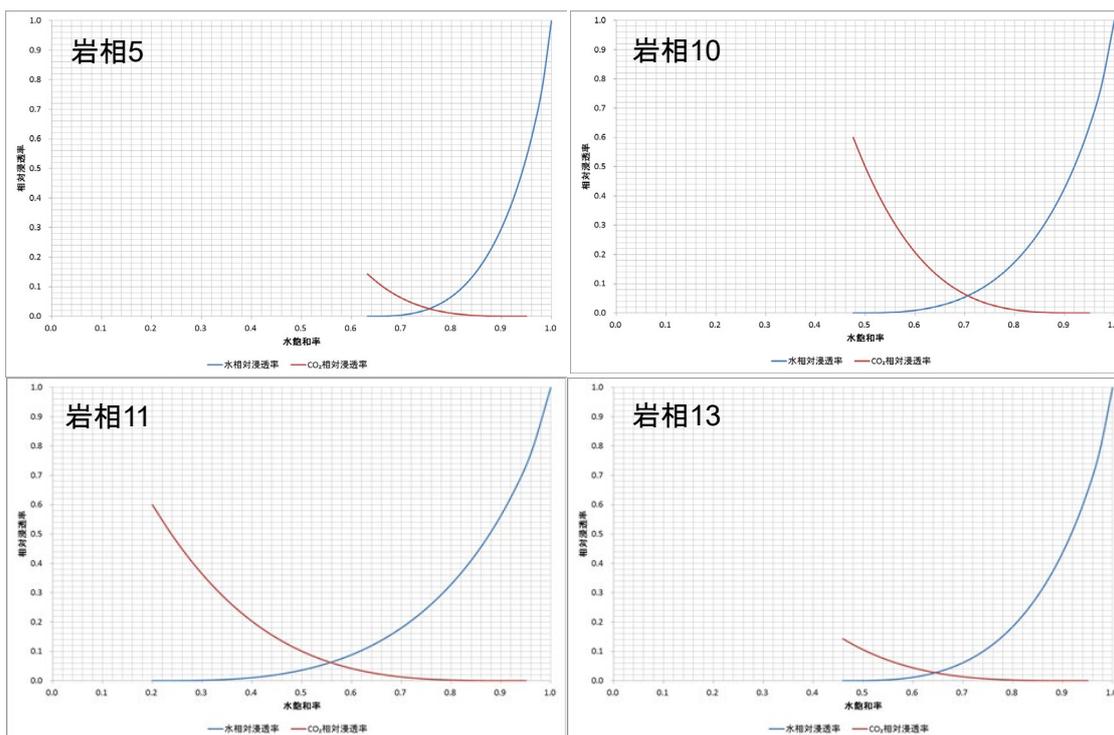


図 5.5-7 相対浸透率曲線

④ 毛細管圧力

毛細管圧力曲線は CCS-2, OB-2 および IW-2 のコアデータにより取得された N₂-水系の毛細管圧力データを CO₂-水系に変換し、式(5.5-6)に示す標準化曲線を使用した。また、GEM 内では式(5.5-7)に基づく J-Function を用い、浸透率と孔隙率による相関を設定した。

$$P_c = J(S_w) * T \cos\theta * \sqrt{\frac{\phi}{k}} * CF \quad \text{式(5.5-6)}$$

P_c : 毛細管圧力

$J(S_w)$: J-function

$T \cos\theta$: 界面張力 × cos(接触角)

CF : Conversion Factor (kPa の場合、31.8316)

$$J(S_w^*) = 6.28 * \exp(-5 * S_w^*) \quad \text{式(5.5-7)}$$

図 5.5-8 に一例として岩相 5（シルト岩）、岩相 10 と 11（いずれも砂岩）、岩相 13（礫岩）における毛細管圧力曲線を示す。

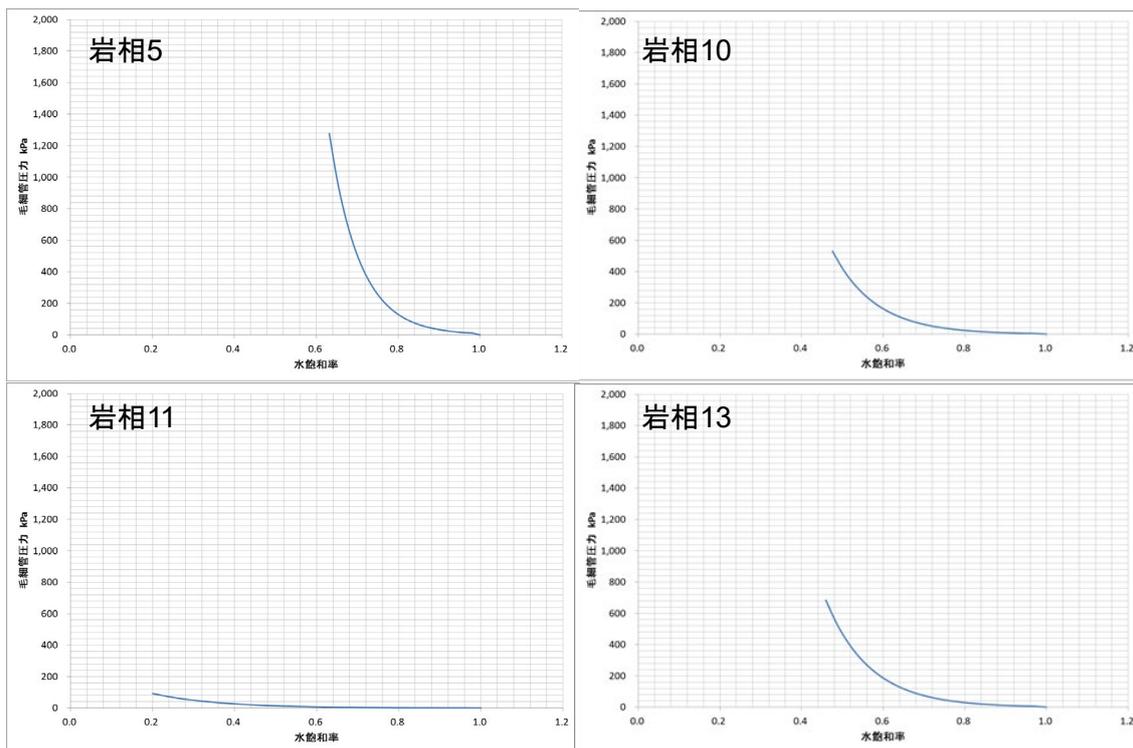


図 5.5-8 毛細管圧力曲線

(4) 遮蔽層岩石物性値

遮蔽層の設定について以下に説明する。

① 孔隙率・浸透率・ネットグロス比

CCS-2 と OB-2 で測定された結果の平均値を用いて、孔隙率は 0.299、水平・垂直浸透率は 0.0015 mD を一律設定した。ネットグロス比は、遮蔽層を構成する泥岩という岩相が一樣に分布するとして、1 に設定した。

② 相対浸透率・エンドポイント

不動水飽和率は Bennion et al.(2007)⁴⁾ の低浸透性岩石に対する CO₂-水系のフラッド実験結果より 0.638 と仮定した。また、臨界ガス飽和率は 0.05 と仮定した。相対浸透率曲線における相対浸透率 k_{rg} は Corey(1954)¹⁾ の式、水相対浸透率 k_{rw} は van Genuchten(1980)²⁾ の近似式において係数を仮定し、図 5.5-9 に示すように設定した。なお、ヒステリシスは考慮しなかった。

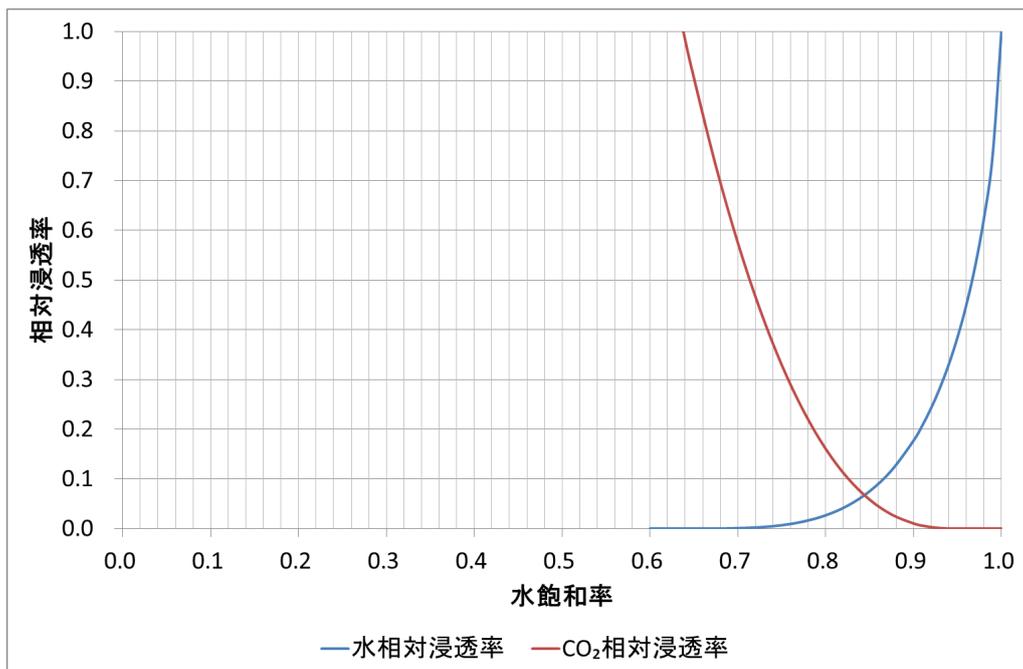


図 5.5-9 遮蔽層における相対浸透率曲線

③ スレッシュホールド圧力・毛細管圧力

CCS-2 と OB-2 でのスレッシュホールド圧力測定結果で最も低い値を用い、スレッシュホールド圧力は 370kPa を使用した。毛細管圧力は van Genuchten(1980)²⁾ の関数にて定義し、臨界飽和率 (Sgc) における毛細管圧力がスレッシュホールド圧力となるように定数を決定し、図 5.5-10 のとおり設定した。

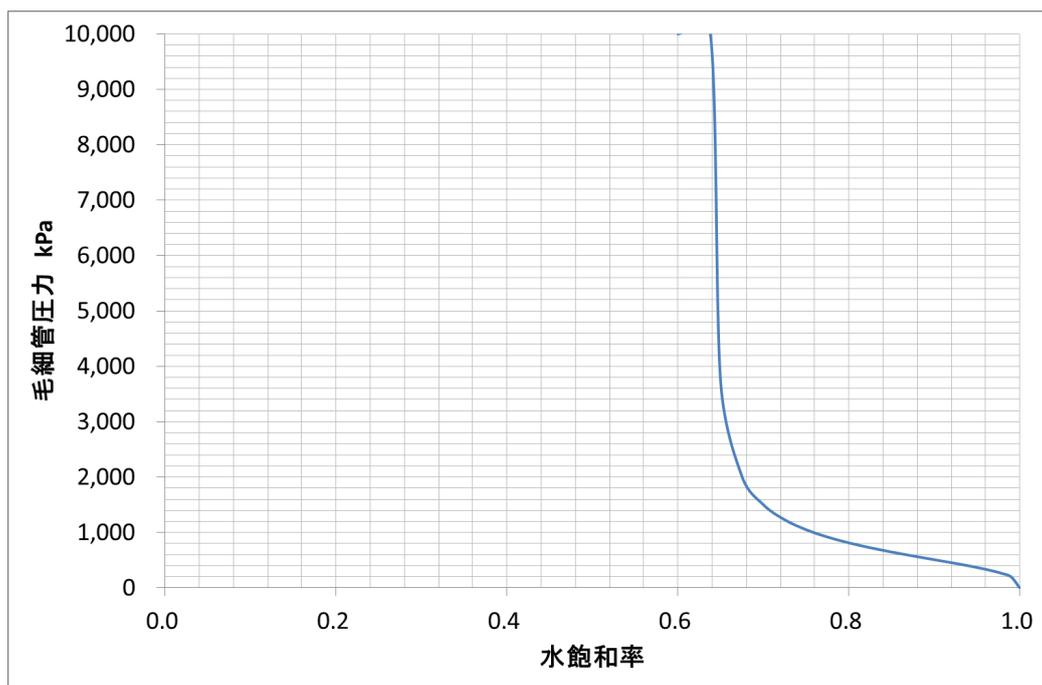


図 5.5-10 遮蔽層における毛細管圧力曲線

5.5.5 圧入可能量評価

各具現像の圧入可能量は、圧入開始からの累計圧入量を 100 万 t-CO₂単位で増加させてそれぞれシミュレーションを行い、仕上げ区間上端の圧力および圧入停止 1,000 年後の溶存 CO₂分布が下記の条件 1～条件 5 に到達するかどうかを確認することで評価した。条件のいずれにも達しない最大の累計圧入量を、その具現像の圧入可能量とした。

- 1) 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
- 2) 条件 2：溶存 CO₂ 量の分布が海岸線に到達する
- 3) 条件 3：溶存 CO₂ 量の分布が遮蔽層層準の層厚 20 m 以下となるエリアに到達する
- 4) 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（断層から約 50 m 坑井側へ境界線を設定）
- 5) 条件 5：溶存 CO₂ 量の分布が深度 750 m(TVDSS)に到達する

なお、条件 1 は圧入時に制御するため IW-2 の坑底圧力が上限圧力に到達することはない。よって、溶存 CO₂ 量の分布が条件 2～5 に対応する境界を超えないことを確認すればよいことになる。

また、図 5.5-11 に示すとおり条件 5 の境界は赤線であり、条件 3 の境界（青線）よりも坑井に近い範囲となる。結果、条件 2、4、5 を満たさない範囲が圧入可能量評価のための

範囲となる。

なお、溶存CO₂が条件を満たす場合や満たす可能性があると判断した場合には累計圧入量を100万t-CO₂ずつ減らして圧入可能量の評価を行うこととした。

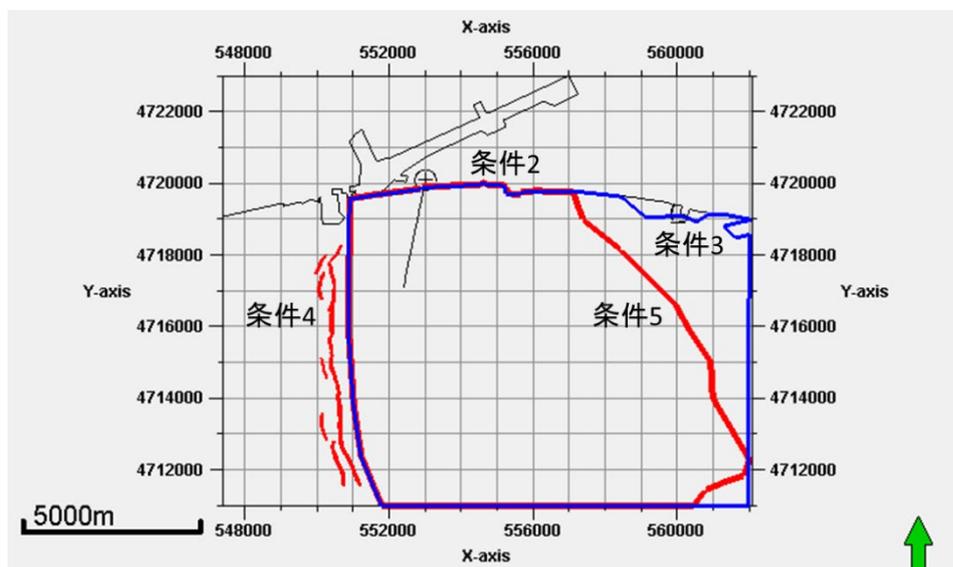
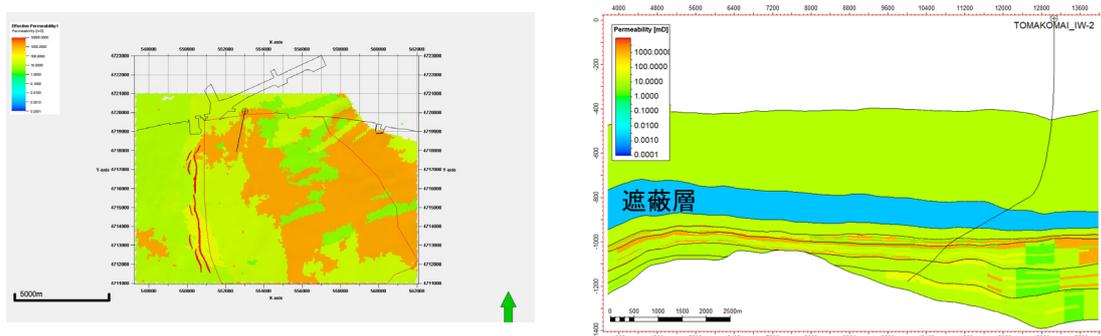


図 5.5-11 圧入可能量評価における条件 2、3、4、5 の範囲

(1) 圧入可能量算定方法例

ここでは、圧入可能量算定方法例として、具現像 1 を用いて説明する。具現像 1 の浸透率分布は図 5.5-12 のとおりである。



注) 左図：平面図 k=11 右図：坑井断面図

図 5.5-12 具現像 1 における浸透率分布 平面図 k=11

k=11 での浸透率分布では、坑跡の南側は浸透性の低い岩相が広がるが、北側および東

側には高浸透率の岩相が連続的に広がっている。

図 5.5-13 に累計圧入量が 500 万 t-CO₂ から 100 万 t-CO₂ ずつ増加していったときの溶存 CO₂ 量分布の平面図を示す。なお、圧入可能量の評価においては、溶存 CO₂ 量の濃度が 1ppm 以上となるよう、 3×10^{-5} mole/kg-H₂O を下限値として表示した。

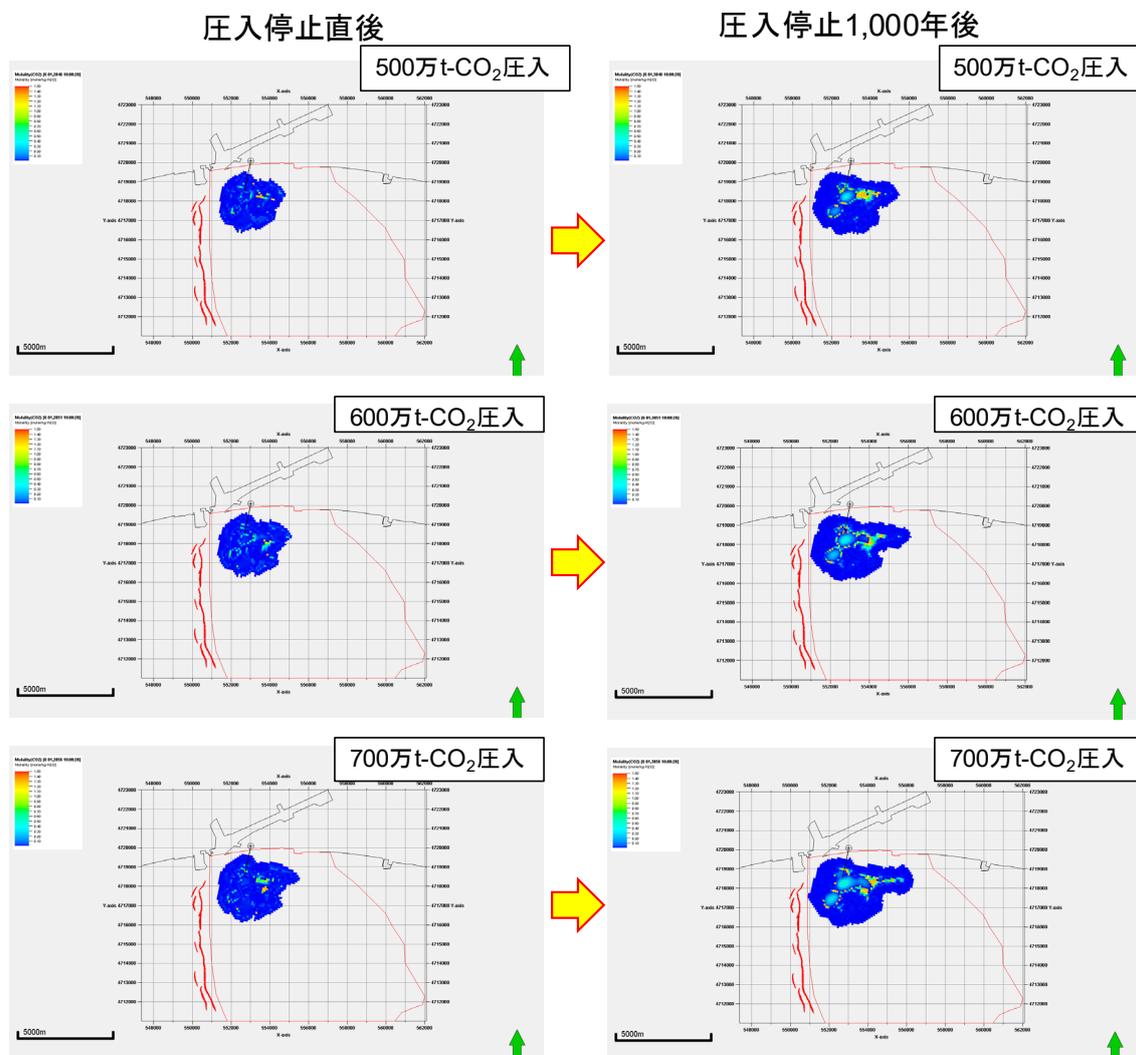


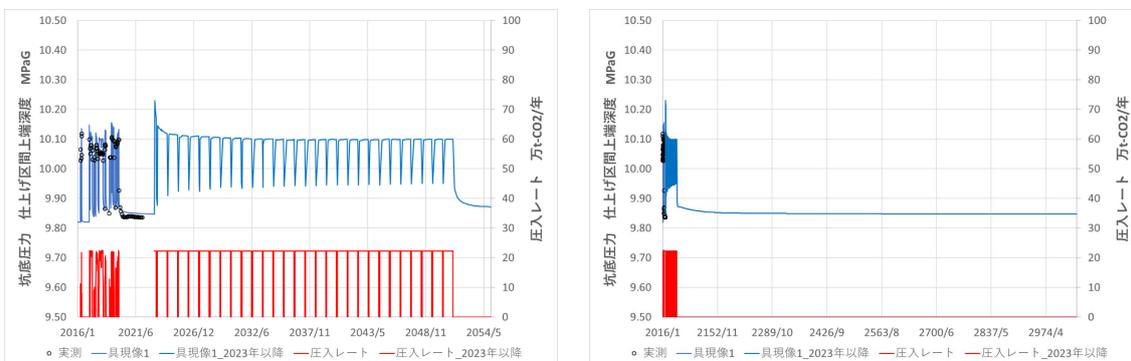
図 5.5-13 具現像 1 における累計圧入量毎の溶存 CO₂ 量分布

累計圧入量が増加するにつれて溶存 CO₂ 量の分布は広がっていく。坑井を中心におおむね同心円状に広がっていく様子が見られた。

累計圧入量が 700 万 t-CO₂ 到達後に圧入を停止し 1,000 年後には、西部の断層エリアの境界にまで溶存 CO₂ 量分布が到達しており、600 万 t-CO₂ 圧入後に圧入を停止し 1,000 年後の溶存 CO₂ 量分布は条件を満たさなかった。具現像 1 の IW-2 仕上げ区間上端の圧力推移を示す図 5.5-14 のように、仕上げ区間上端圧力は上限圧力の 12.93 MPaG 以下であっ

た。

以上のことから、具現像1での圧入可能量は600万t-CO₂とした。



注) 左図：圧入期間中 右図：圧入1000年後

図 5.5-14 具現像1でのIW-2仕上げ区間上端圧力推移

(2) 圧入可能量算定

(1)の方法を用いて、各具現像の圧入可能量を算定した。

まず、具現像の数を徐々に増やしたときの累積分布関数の推移と各具現像数でのP90、P50、P10（それぞれ累積分布関数の値が0.1、0.5、0.9）の圧入可能量の推移を図5.5-15および図5.5-16にそれぞれ示す。また、表5.5-3には評価結果を示す。具現像数が15個以上のとき、累積分布関数の形状やP90、P50、P10の数値は収束することから、具現像数が30個あれば十分と判断した。

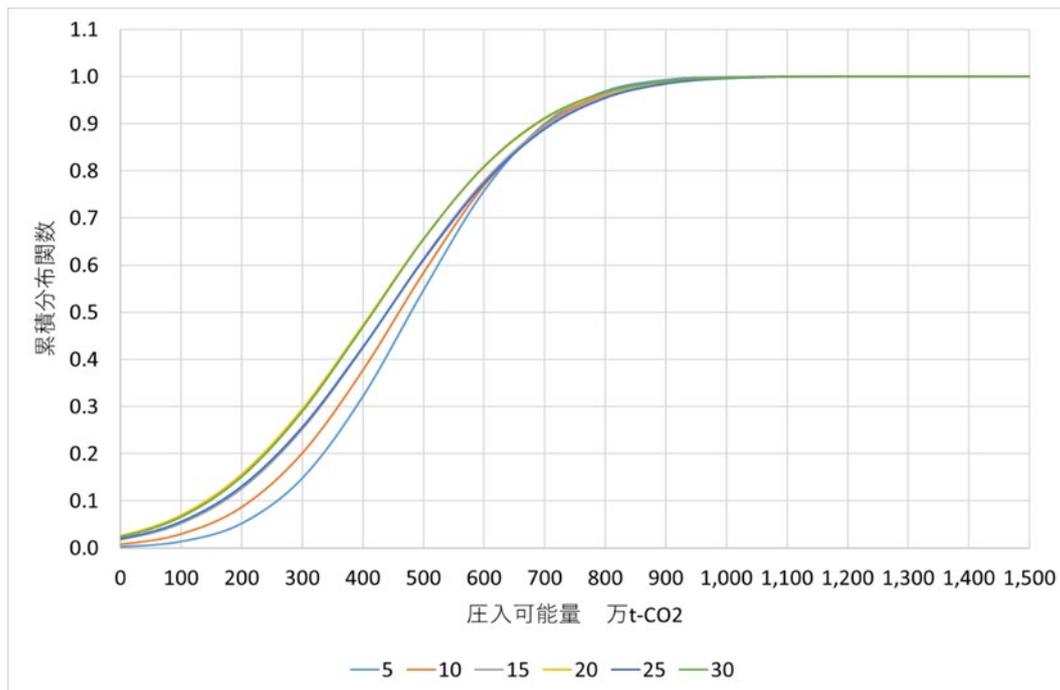


図 5.5-15 具現像数毎の圧入可能量の累積分布関数



図 5.5-16 具現像数毎の P90、P50、P10 の圧入可能量評価値

表 5.5-3 圧入可能量評価結果一覧

具現像ナンバー	岩相分布ナンバー	圧入可能量	具現像ナンバー	岩相分布ナンバー	圧入可能量
1	1	600	16	39	300
2	3	700	17	40	700
3	5	400	18	42	400
4	6	200	19	44	200
5	11	500	20	45	100
6	20	400	21	47	400
7	22	200	22	48	500
8	23	300	23	51	500
9	26	500	24	54	900
10	27	800	25	57	400
11	28	300	26	59	200
12	32	500	27	61	300
13	33	100	28	62	400
14	36	800	29	65	100
15	37	300	30	66	500

具現像数 30 個での平均は 417 万 t-CO₂、標準偏差は 210 万 t-CO₂であった。これらの結果を用いたときの P90 は 148 万 t-CO₂、P50 は 417 万 t-CO₂、P10 は 686 万 t-CO₂となった。2019 年度、2021 年度の圧入可能量評価について表 5.5-4 に示す。

表 5.5-4 圧入可能量評価の比較

	2021 年度評価	2019 年度評価
平均	417	470
標準偏差	210	252
P90	148	147
P50	417	470
P10	686	793

標準偏差は、2021 年度の評価は 2019 年度の評価とほぼ同じであることから、圧入可能量の振れ幅に最も影響があると考えられる岩相分布の違いの影響は同程度といえる。

平均値、P50 相当、P10 相当の値は、2021 年度の評価は 2019 年度の評価よりもすべて小さい値となった。CO₂ は浅部高浸透率領域を中心に広がっていくことから、表 5.5-5 に 2019 年度、2021 年度の評価における具現像毎の最大圧入レート時（2019 年 6 月 1 日）における深部と浅部の高浸透率領域における圧入割合を示す。

表 5.5-5 具現像毎の圧入量割合の比較

		2021年度評価	2019年度評価
浅部	平均	76%	87%
	標準偏差	1%	2%
深部	平均	21%	10%
	標準偏差	1%	2%

圧入可能量評価においては、北側の条件1に到達することで圧入可能量が制限される場合が多く、浅部高浸透率領域に圧入されたCO₂によるものである。2021年度の評価は2019年度の評価よりも最もCO₂が圧入される浅部高浸透率領域への圧入量割合は11ポイント程度（同じ圧入可能量であれば浅部への圧入量は13%）減っており、一見すると圧入可能量の平均値は大きくなると考えられた。しかし、浅部高浸透率領域（k=11,12）の層厚は11.57 mから9.65 mと17%程度小さくなっており、浅部への圧入量の低下割合である13%に比べると大きく、2019年度モデルよりもより薄く広く広がることで北側の条件1に到達しやすくなり、圧入可能量は平均的に小さくなったと推察する。また、層厚減少がCO₂の平面的な拡がりに与える影響は、圧入量が大きいほどより顕著になると考える。これは、2019年度の評価と比較してP90の値はほぼ同じでありP50よりもP10の方が圧入可能量の低下幅が大きく、標準偏差がやや低下したことから総合的に判断される。

圧入可能量評価の全体像としては、ヒストリーマッチングの精度が向上していることから、圧入可能量評価の精度も向上しているといえるものの、地質の不均質性や不確実性の影響のみで数百万t-CO₂の振れ幅があることから、引き続き、精度向上が課題であるといえる。

次項で代表具現像を抽出し、それぞれの結果について考察を行う。

(3) 代表具現像を用いた圧入可能量の幅に関する考察

(2)の結果から、圧入可能量のP90、P50、P10相当の具現像を抽出した。その結果、P90相当が具現像13（圧入可能量100万t-CO₂、P93）、P50相当が具現像3（圧入可能量400万t-CO₂、P53）、P10相当が具現像2（圧入可能量700万t-CO₂、P9）となった。

① 浸透率分布

P90、P50、P10相当の具現像13、3、2の浸透率分布の平面図と坑井断面図を図5.5-17に示す。最もCO₂が圧入されるのは浅部高浸透率領域（k=11とk=12）であるが、坑井を

中心として平面図には次のような特徴が見られた。

1) P90 相当の平面図

k=11 においては坑井仕上げ上部の北東側と北西側に低浸透率領域（10 mD 程度）が北部の海岸線近くまで分布し、高浸透率領域（1,000 mD 程度）が坑井仕上げ上部から北部の海岸線近くまで帯状に伸びている。従って、CO₂ が北東側、および北西側に流れにくくなり、直線的に北部の海岸線側に流れやすくなっていると考えられる。また、k=12 では k=11 と同様に北東側に低浸透率領域（10 mD 程度）が分布し、CO₂ の流れについては似たような傾向を示すと考えられる。

2) P50 相当の平面図

k=11 においては坑井仕上げ上部の東側に低浸透率領域（10 mD 程度）が存在するものの、北部の海岸線近くまでは分布しておらず、坑口近くの海岸線東側にはやや広く高浸透率領域（1,000 mD 程度）が分布しており、CO₂ は直線的には北部に流れないと考えられる。また、k=12 では坑井仕上げ上部の南側に部分的に低浸透率領域（10 mD 程度）が存在するものの、その他の領域では高浸透率領域（1,000 mD 程度）が分布しており、全体的に P90 相当に比べて CO₂ が比較的東側や南側に流れやすくなっていると考えられる。

3) P10 相当の平面図

k=11 においては坑井仕上げ上部の北側と北東側に低浸透率領域（10 mD 程度）が分布し、その他の領域では高浸透率領域（1,000 mD 程度）が分布しているため、北部の海岸線側へ CO₂ が流れにくくなっていると考えられる。また、k=12 では坑井仕上げ上部の東側に低浸透率領域（10 mD 程度）が分布しているものの、その他の領域では広く高浸透率領域（1,000 mD 程度）が分布しており、全体的に P90 相当や P50 相当の具現像に比べて CO₂ が南東側、南側や南西部に流れやすくなっていると考えられる。

なお、坑井断面図ではこれら三つの具現像に大きな違いは見られなかった。

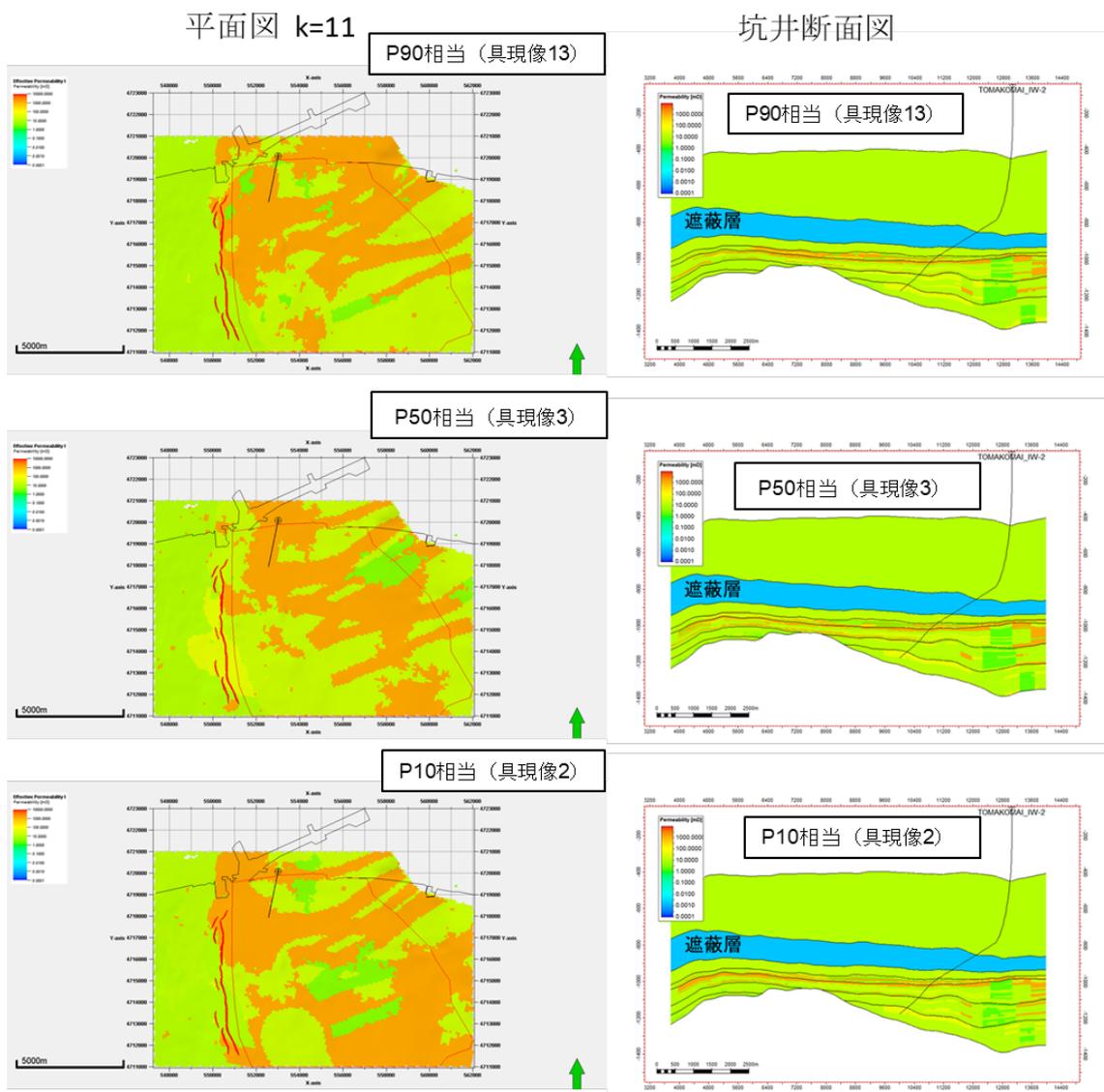


図 5.5-17 具現像 13、3、2 の浸透率分布の平面図と坑井断面図

② 地層傾斜

図 5.5-18 に萌別層砂岩層上部の深度コンターマップを示す。IW-2 を中心に見ると、地層傾斜は東西方向であり、超臨界状態の CO₂ は浮力の影響により砂岩層上部まで移動するとその後は地層傾斜に沿って広がっていく。一方、溶存 CO₂ を含む水相は地層水よりも若干重いため沈んでいくが、超臨界状態の CO₂ の移動と CO₂ の溶解は同時に起きるため、溶存 CO₂ 分布も地層傾斜の影響を受ける。このような理由により、圧入可能量の幅を考察する上では浸透率分布の影響だけではなく地層傾斜の影響も考慮した。

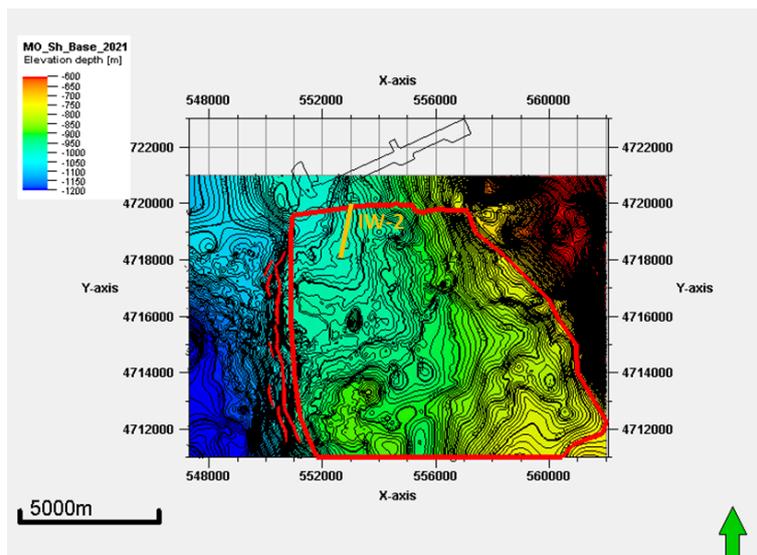


図 5.5-18 萌別層砂岩層上部でのコンターマップ

③ P90 相当（具現像 13）の圧入可能量

具現像 13 では、図 5.5-19 のように、累計圧入量 200 万 t-CO₂ では、圧入停止 1,000 年後には溶存 CO₂ 量分布が海岸線（条件 2）を超えた。このため、さらに累計圧入量を減らした 100 万 t-CO₂ にて溶存 CO₂ 量分布を確認し、この具現像の圧入可能量を 100 万 t-CO₂ とした。溶存 CO₂ 量分布は、(3)①浸透率分布 1)で示したように、坑井仕上げ上部から北部の海岸線に向けて直線上に分布する高浸透率領域により、海岸線への到達が早まり、結果圧入可能量が小さくなったと考えられる。

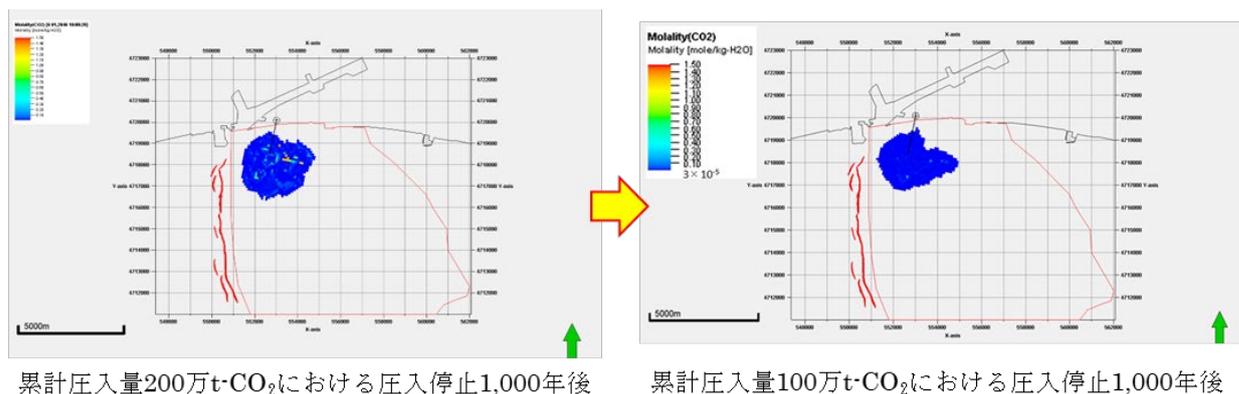
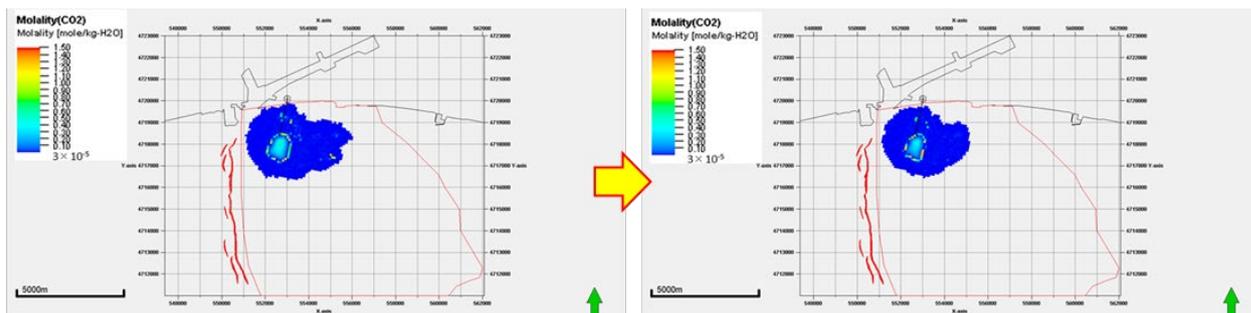


図 5.5-19 P90 相当（具現像 13）における溶存 CO₂ 量分布 平面図

④ P50 相当（具現像 3）の圧入可能量

具現像 3 では、図 5.5-20 のように、累計圧入量 500 万 t-CO₂ では、圧入停止 1,000 年後

には溶存CO₂量分布が海岸線（条件2）を超えた。このため、さらに累計圧入量を減らした400万t-CO₂にて溶存CO₂量分布を確認し、この具現像の圧入可能量を400万t-CO₂とした。溶存CO₂量分布は(3)①浸透率分布2)で示したように、坑口近くの海岸線東側にもやや広く高浸透率領域が分布するため海岸線への到達が遅くなり、また、P90相当の具現像より東側や南側にCO₂が流れやすくなっているため、圧入可能量がP90相当の具現像よりも大きくなったと考えられる。



累計圧入量500万t-CO₂における圧入停止1,000年後

累計圧入量400万t-CO₂における圧入停止1,000年後

図 5.5-20 P50 相当（具現像 3）における溶存 CO₂ 量分布平面図

⑤ P10 相当（具現像 2）の圧入可能量

具現像 2 では、図 5.5-21 のように、累計圧入量 800 万 t-CO₂ では、圧入停止 500 年後には溶存 CO₂ 量分布が海岸線（条件 2）を超えた。このため、さらに累計圧入量を減らした 700 万 t-CO₂ にて溶存 CO₂ 量分布を確認し、この具現像の圧入可能量を 700 万 t-CO₂ とした。溶存 CO₂ 量分布は、(3)①浸透率分布 3) で示したように、坑井仕上げ上部の北側と北東側に低浸透率領域が分布し、北部の海岸線側には直線的に CO₂ が流れにくくなっていると考えられる。また、k=12 にも坑井仕上げ上部の東側に低浸透率領域が分布しているものの、その他の領域では広く高浸透率領域が分布しており、直線的に北部海岸線側に CO₂ が直線的に流れにくくなっている。このため、海岸線への到達がより遅くなり、結果 P90 や P50 相当の具現像よりも圧入可能量が大きくなったと考えられる。

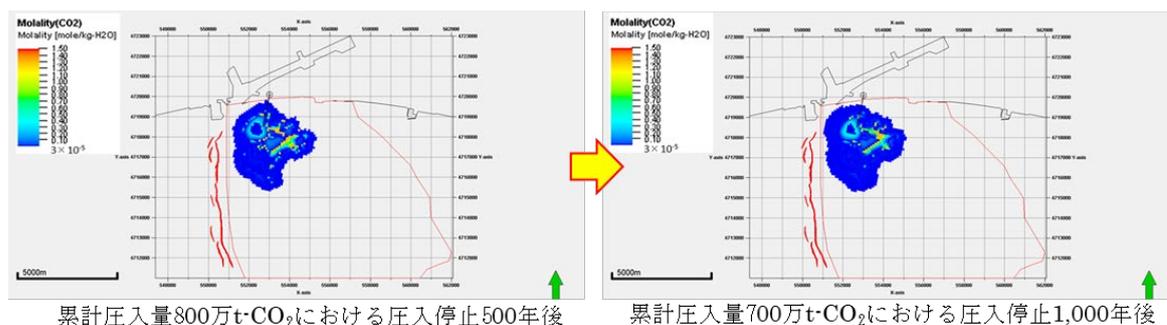


図 5.5-21 P10 相当（具現像 2）における溶存 CO₂ 量分布平面図

⑥ 圧入可能量評価の幅に関する考察のまとめ

CO₂の広がり方は具現像によって特徴が異なり、CO₂が最も圧入される萌別層砂岩層上部の高浸透率領域の分布や地層傾斜の違いの影響が確認された。特に地層傾斜については超臨界 CO₂が浮力の影響で上方（主に東側）に移動する様子に加えて、その周辺で溶存 CO₂を含む地層水が元の地層水との比重差で下方へ移動する様子が影響として確認された。

P90 相当の具現像では、坑井仕上げ上部から海岸線へ直線的な高浸透率領域が分布しており、少量の圧入量で溶存 CO₂が海岸線に到達して、圧入可能量が小さくなったと考えられる。

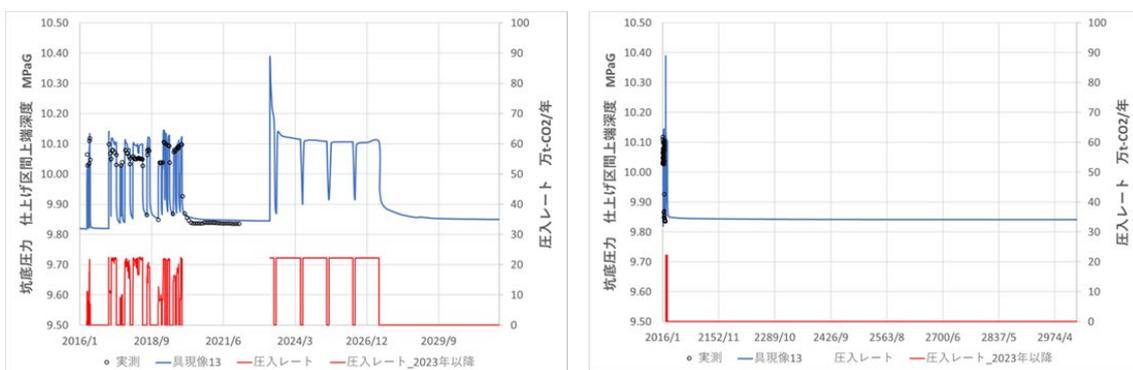
P50 相当の具現像では、P90 のような坑井仕上げ上部から海岸線への直線的な高浸透率領域の分布はなく、やや面的に広がりやすい高浸透率分布となっているため、海岸線への早期の溶存 CO₂量の到達は見られず、圧入可能量が P90 よりも大きくなったと考えられる。

P10 相当の具現像では、坑井仕上げ上部の北東から北側に低浸透率領域が分布しており、P90 や P50 よりも海岸線方向への直線的な CO₂の流れが妨げられ、圧入可能量が大きくなったと考えられる。

現状、各具現像とも IW-2 の坑底圧力挙動はほぼ同等に再現されており確率論的にはいずれの岩相分布もありうるが、表 5.5-4 にまとめたとおり圧入可能量の振れ幅は大きい。地質の不均質性や不確実性に伴うリスクは、データの新規取得や既存データに対する新たな分析・検討の適用により絞り込んでいくことができる。圧入区間をコントロールすることや坑井を追加で掘削することが具体的な施策として挙げられるが、リスク低減のための施策の実施については今後も検討課題と考えられる。

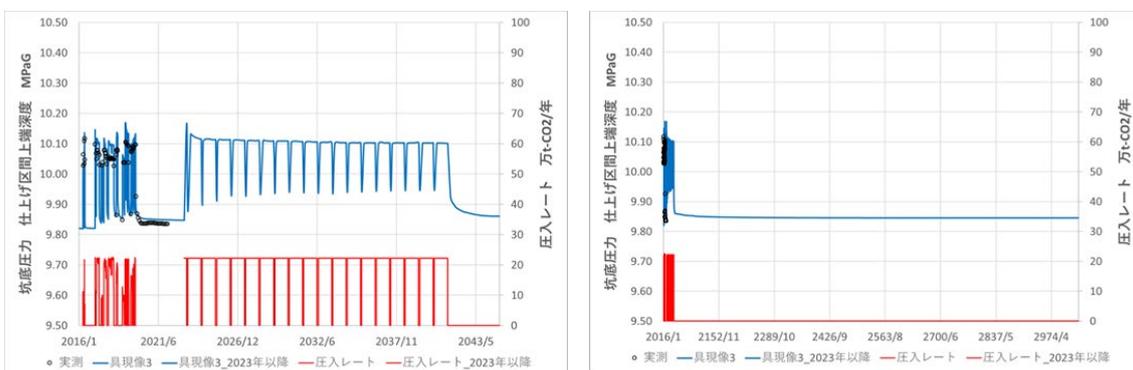
(4) 圧入井の仕上げ区間上端における圧力推移

P90、P50、P10 相当具現像における IW-2 の仕上げ区間上端深度の坑底圧力推移を図 5.5-22~24 にそれぞれ示す。CO₂ 圧入中にはいずれも圧力上限値 12.93 MPaG には到達せず、最大で 10.39 MPaG 程度であり、圧入停止後は 5 年程度で圧力低下はほぼ安定した。圧入停止 1,000 年後の仕上げ区間上端における圧力は、P90、P50 で 9.84 MPaG、P10 で 9.85 MPaG であった。開境界ではあるが、圧入量の大きい P10 の坑底圧力は P10 や P50 よりも大きい結果となった。



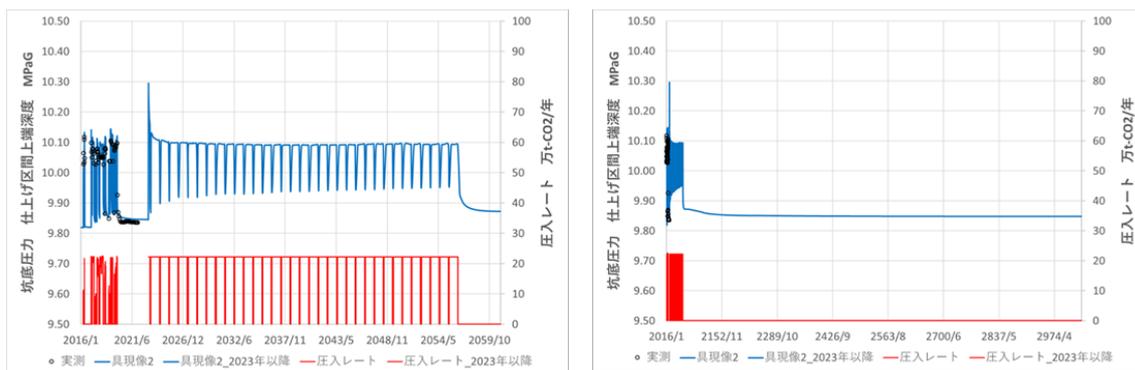
注) 左図：圧入期間中 右図：圧入 1000 年後

図 5.5-22 P90 相当具現像 13 における IW-2 仕上げ区間上端圧力推移



注) 左図：圧入期間中 右図：圧入 1000 年後

図 5.5-23 P50 相当具現像 3 における IW-2 仕上げ区間上端圧力推移



注) 左図：圧入期間中 右図：圧入 1000 年後

図 5.5-24 P10 相当具現像 2 における IW-2 仕上げ区間上端圧力推移

(5) 圧力変化分布

P90、P50、P10 相当の具現像における圧入停止前、圧入停止 200 年後および圧入停止 1,000 年後での圧力変化分布の平面図と断面図を図 5.5-25～27 に示す。

① P90 相当（具現像 13）

坑井周辺は 100kPa～250kPa の圧力変化（上昇）が見られる。また、モデルの西側にある断層（ $k=10$ を含む萌別層砂岩層上部下部には到達していない）付近の圧力上昇値は、50kPa 以下であった。圧入停止後、貯留層圧力の変化は小さくなり、徐々に圧力が回復している。圧入停止 1,000 年後には CO_2 が存在する坑井周辺以外の圧力変化は見られない。

圧入停止前の坑井断面図では、貯留層と接する遮蔽層部分では圧力伝搬が確認できるが、この時点では遮蔽層全体まで圧力変化は確認されない。

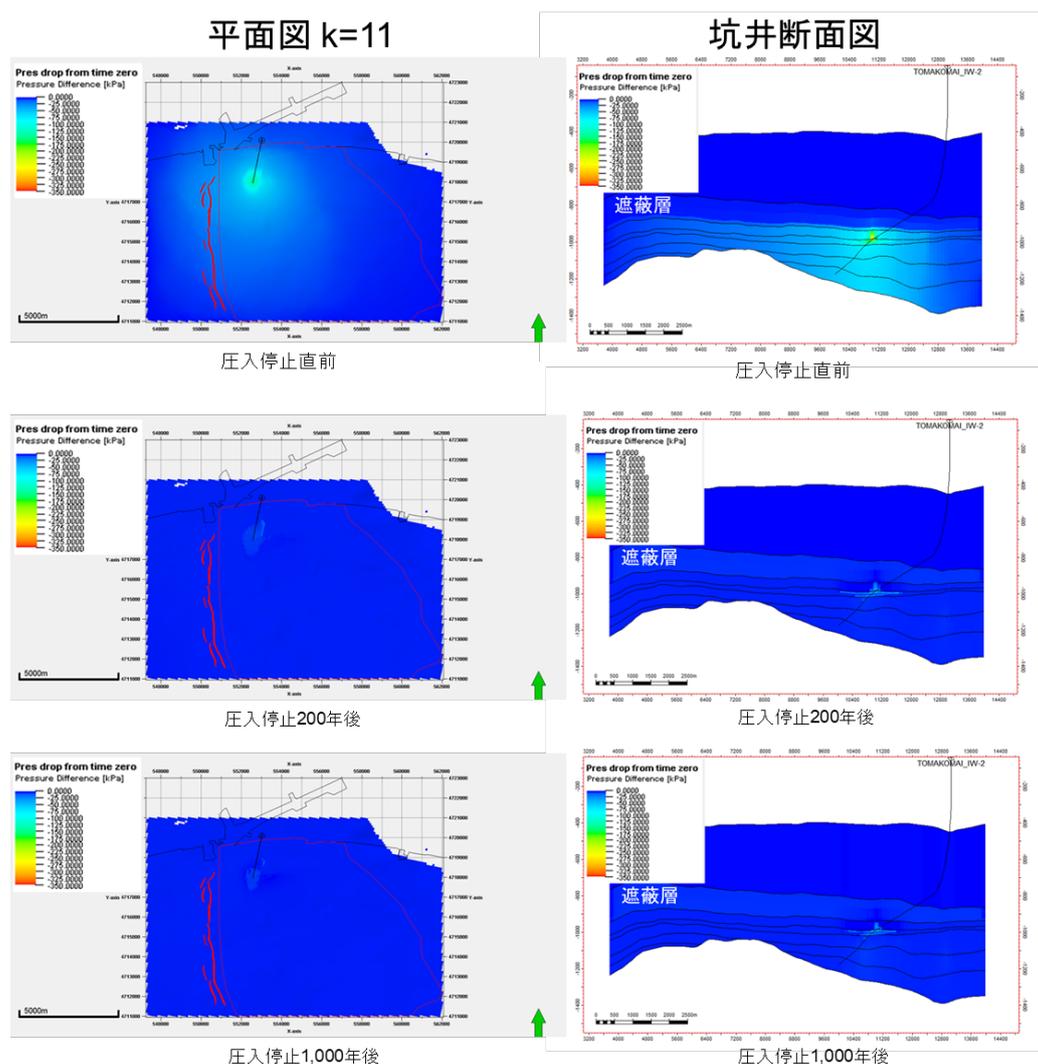


図 5.5-25 P90 相当具現像（具現像 13）の圧力変化分布

② P50 相当（具現像 3）

坑井周辺は 100kPa～300kPa の圧力変化（上昇）が見られる。また、モデルの西側にある断層（k=10 を含む萌別層砂岩層上部下部には到達していない）付近の圧力上昇値は、50kPa 以下であった。圧入停止後、貯留層圧力の変化は小さくなり、徐々に圧力が回復している。圧入停止 1,000 年後には CO₂ が存在する坑井周辺以外は圧力変化が見られない。

圧入停止前の坑井断面図では、貯留層と接する遮蔽層部分では圧力伝搬が確認できるが、この時点では遮蔽層全体まで圧力変化は確認されない。

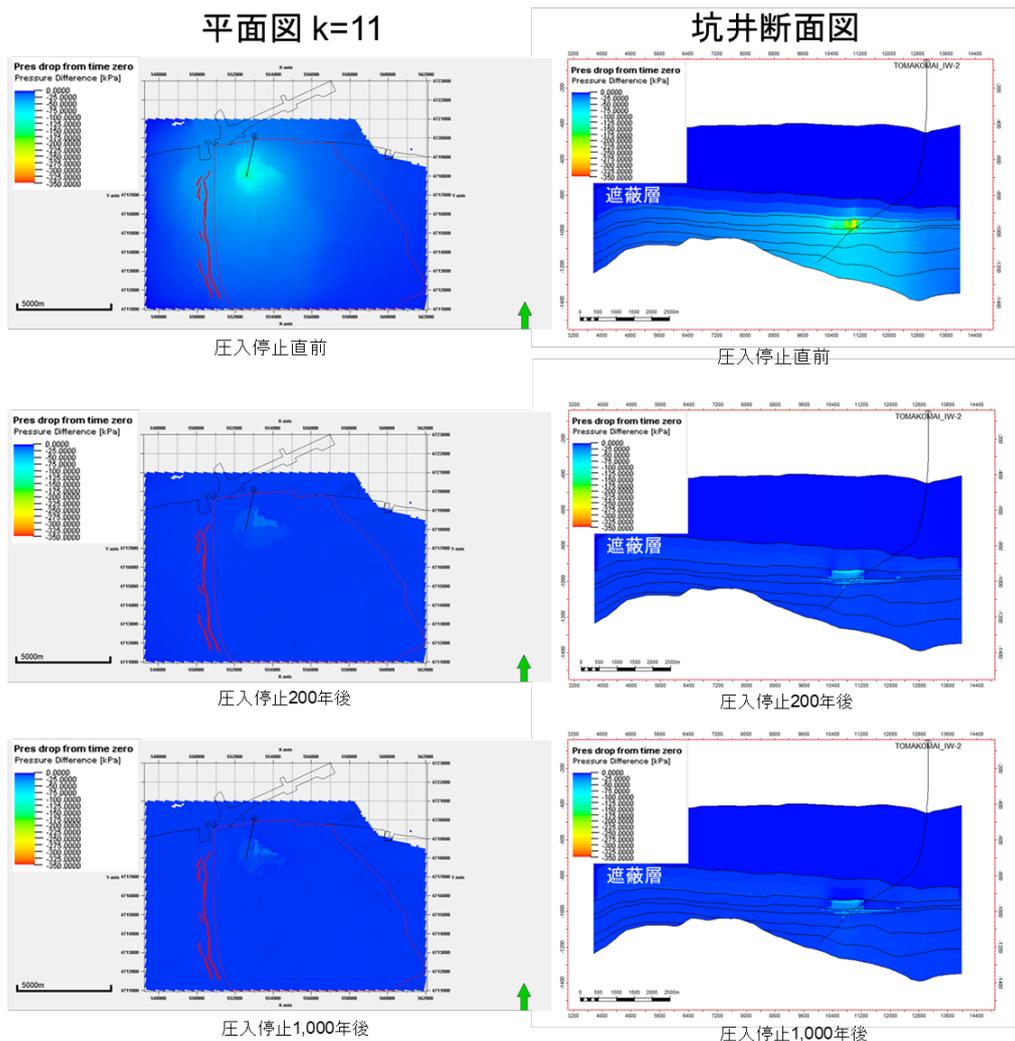


図 5.5-26 P50 相当具現像（具現像 3）の圧力変化分布

③ P10 相当（具現像 2）

坑井周辺は 100kPa～300kPa の圧力変化（上昇）が見られる。また、モデルの西側にある断層（k=11 を含む萌別層砂岩層上部下部には到達していない）付近の圧力上昇値は、50kPa 以下であった。圧入停止後、貯留層圧力の変化は小さくなり、徐々に圧力が回復している。圧入停止 1,000 年後には CO₂ が存在する坑井周辺以外は圧力変化が見られない。

圧入停止前の坑井断面図では、貯留層と接する遮蔽層部分では圧力伝搬が確認でき、坑井直上付近は遮蔽層全体にわたって圧力変化が確認された。

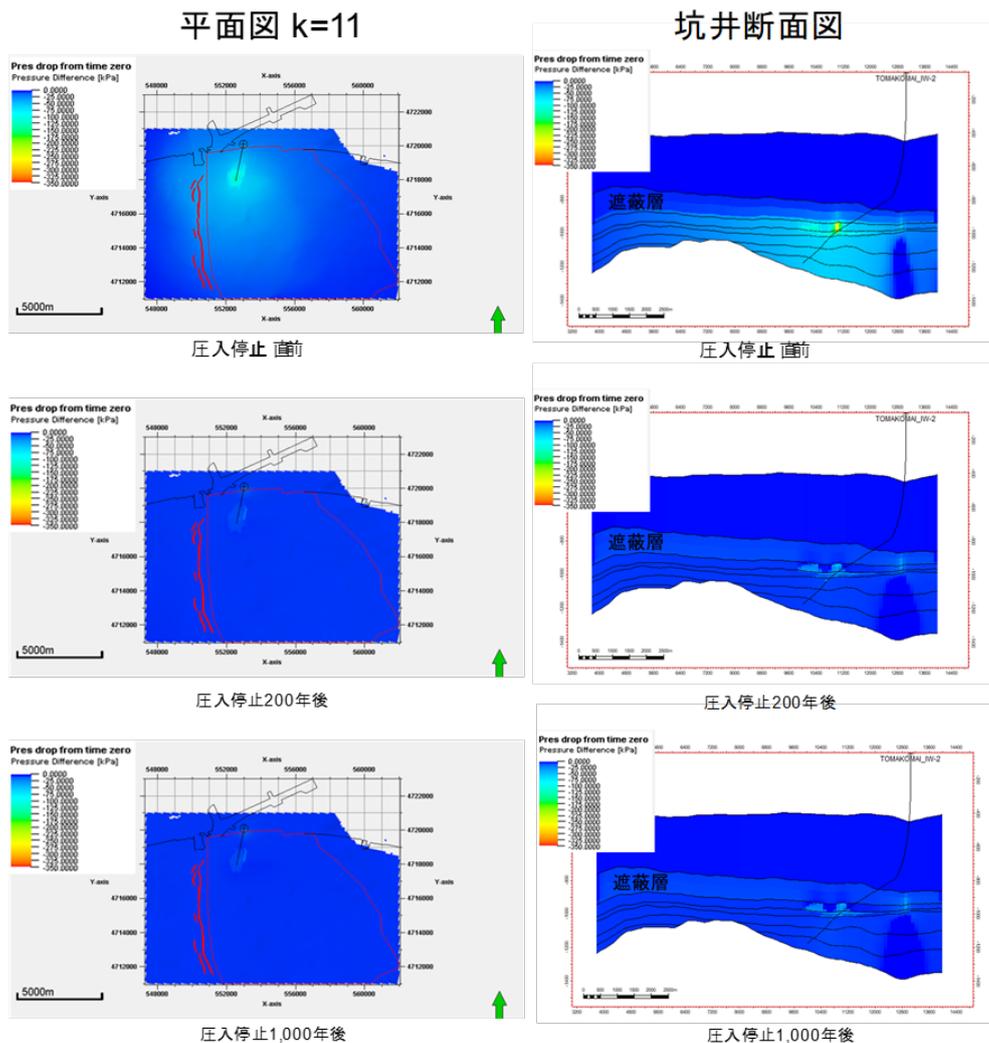


図 5.5-27 P10 相当具現像（具現像 2）の圧力変化分布

(6) CO₂ 飽和率分布

P90、P50、P10 相当の具現像における圧入停止前、圧入停止 200 年後および圧入停止 1,000 年後での CO₂ 飽和度分布の平面図と断面図を図 5.5-28～30 に示す。

① P90 相当（具現像 13）

平面図では、圧入停止 200 年後にて CO₂ が東側および北側へ移動していく様子が見られた。その後、CO₂ の塩水への溶解が進み、CO₂ の東側への移動は抑制されている様子が確認された。坑井断面図では、浮力によって CO₂ が上昇する様子が見られるが、遮蔽層より上部には確認できず、CO₂ が安全に貯留されている様子が確認された。

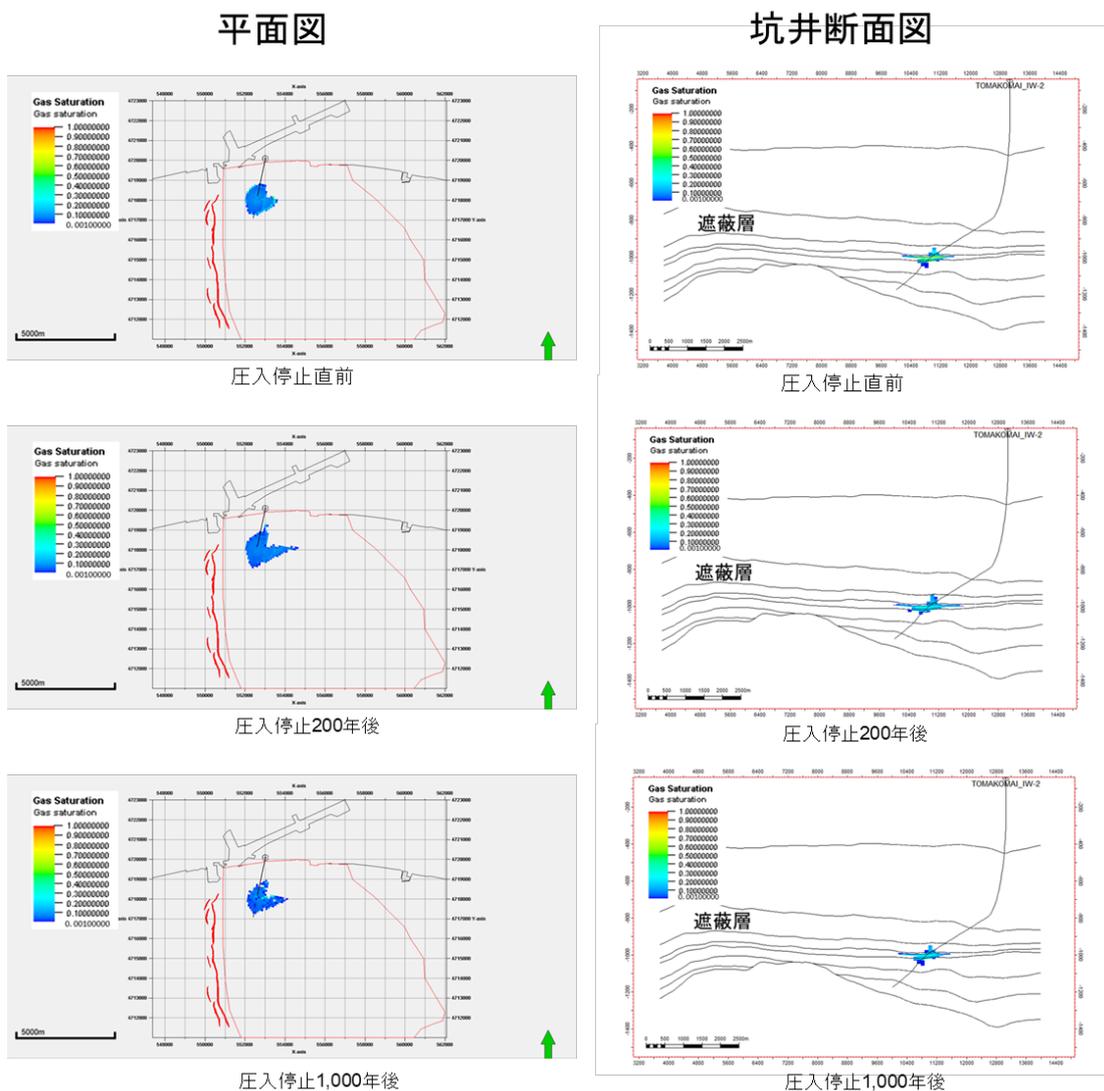


図 5.28 P90 相当具現像（具現像 13）の CO₂ 飽和度分布 平面図

② P50 相当（具現像 3）

平面図では、圧入停止直前でも CO₂ が東側へ移動している様子が見られた。ただ、CO₂ の塩水への溶解が進み、CO₂ の移動が抑制されている様子が確認された。

坑井断面図では、浮力によって CO₂ が上昇する様子が見られるが、遮蔽層より上部には確認できず、CO₂ が安全に貯留されている様子が確認された。

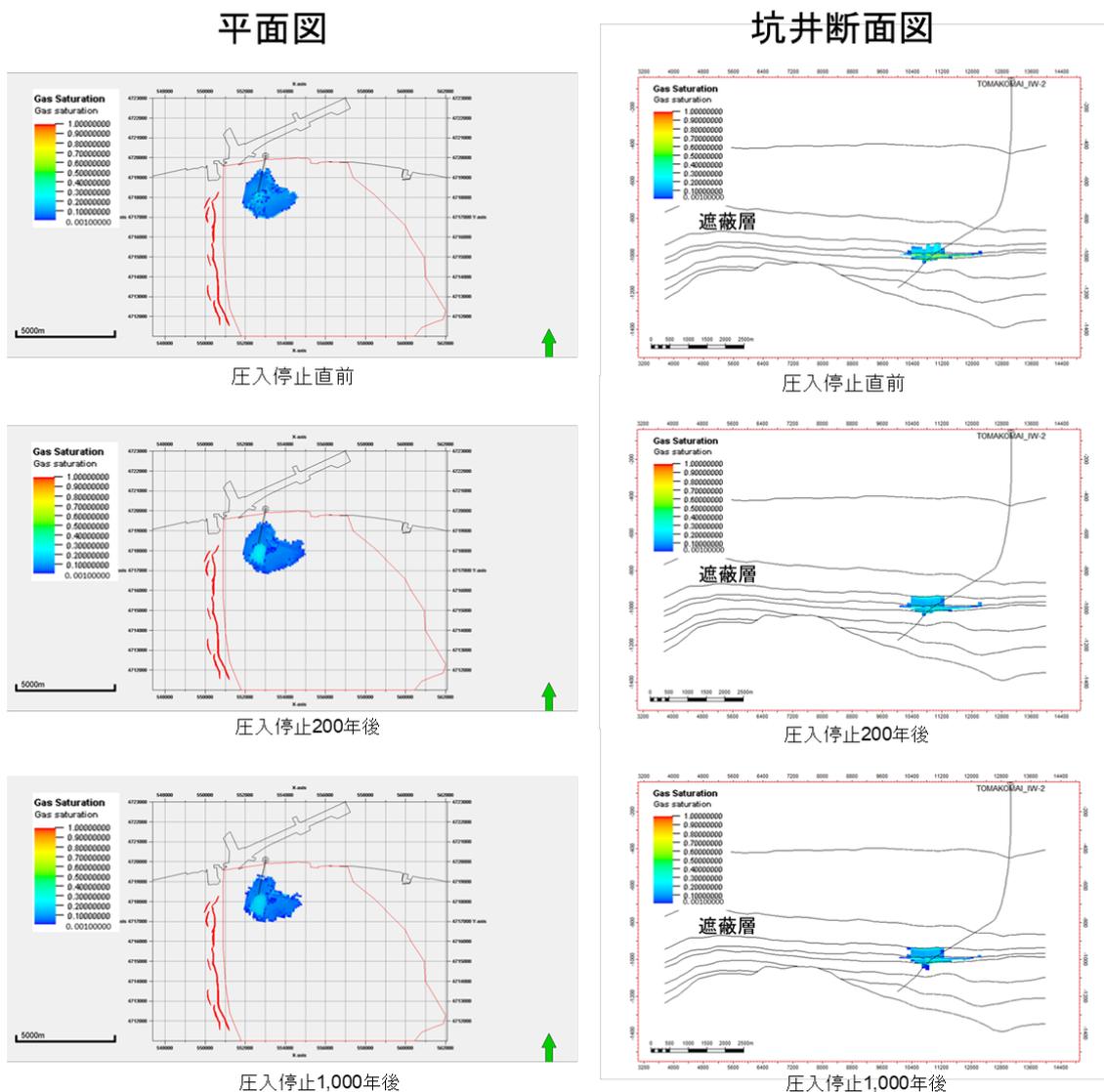


図 5.5-29 P50 相当具現像（具現像 3）の CO₂ 飽和度分布

③ P10 相当（具現像 2）

平面図では、圧入停止直前でも CO₂ が東側へ移動している様子が見られた。ただ、CO₂ の塩水への溶解が進み、CO₂ の移動が抑制されている様子が確認された。坑井断面図では、浮力によって CO₂ が上昇する様子が見られるが、遮蔽層より上部には確認できず、CO₂ が安全に貯留されている様子が確認された。

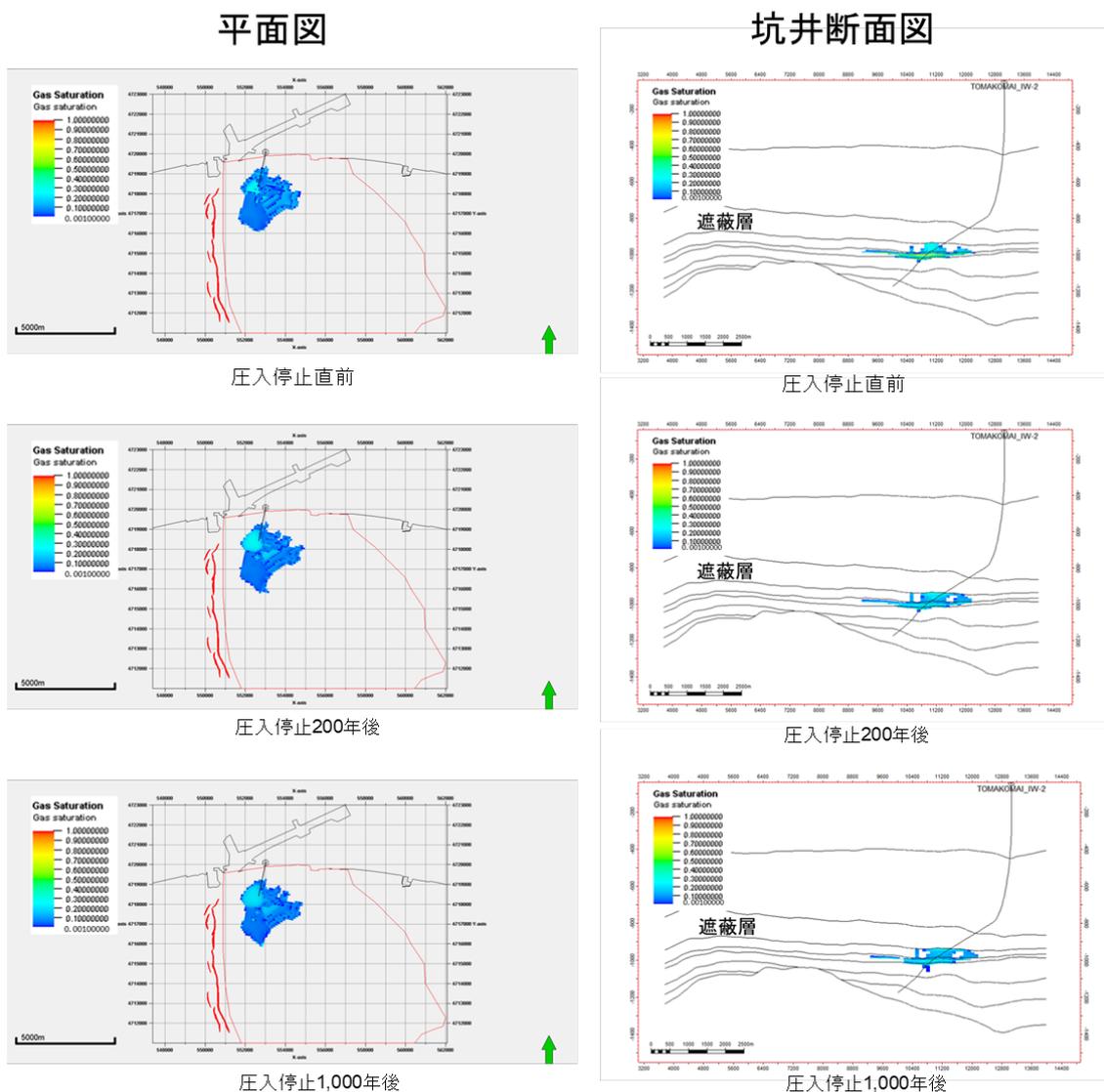


図 5.5-30 P10 相当具現像（具現像 2）の CO₂ 飽和度分布

(7) 溶存 CO₂ 量分布

P90、P50、P10 相当の具現像における圧入停止前、圧入停止 200 年後および圧入停止 1,000 年後での溶存 CO₂ 量分布の平面図と断面図を図 5.5-31～33 に示す。

① P90 相当（具現像 13）

平面図では、CO₂ 飽和度分布で見られた圧入停止 200 年後での CO₂ の東側へ移動により、溶存 CO₂ 量分布も東側に広がっている様子が見られた。坑井断面図では、溶存 CO₂ は CO₂ が圧入されている高浸透率領域を中心に数値が大きくなっている。遮蔽層には CO₂ が明確に存在しておらず、安全に貯留されていることがわかる。なお、時間が経過するに

つれて、溶存CO₂を含む地層水が元の地層水との比重差により貯留層下部に進んでいることがわかる。

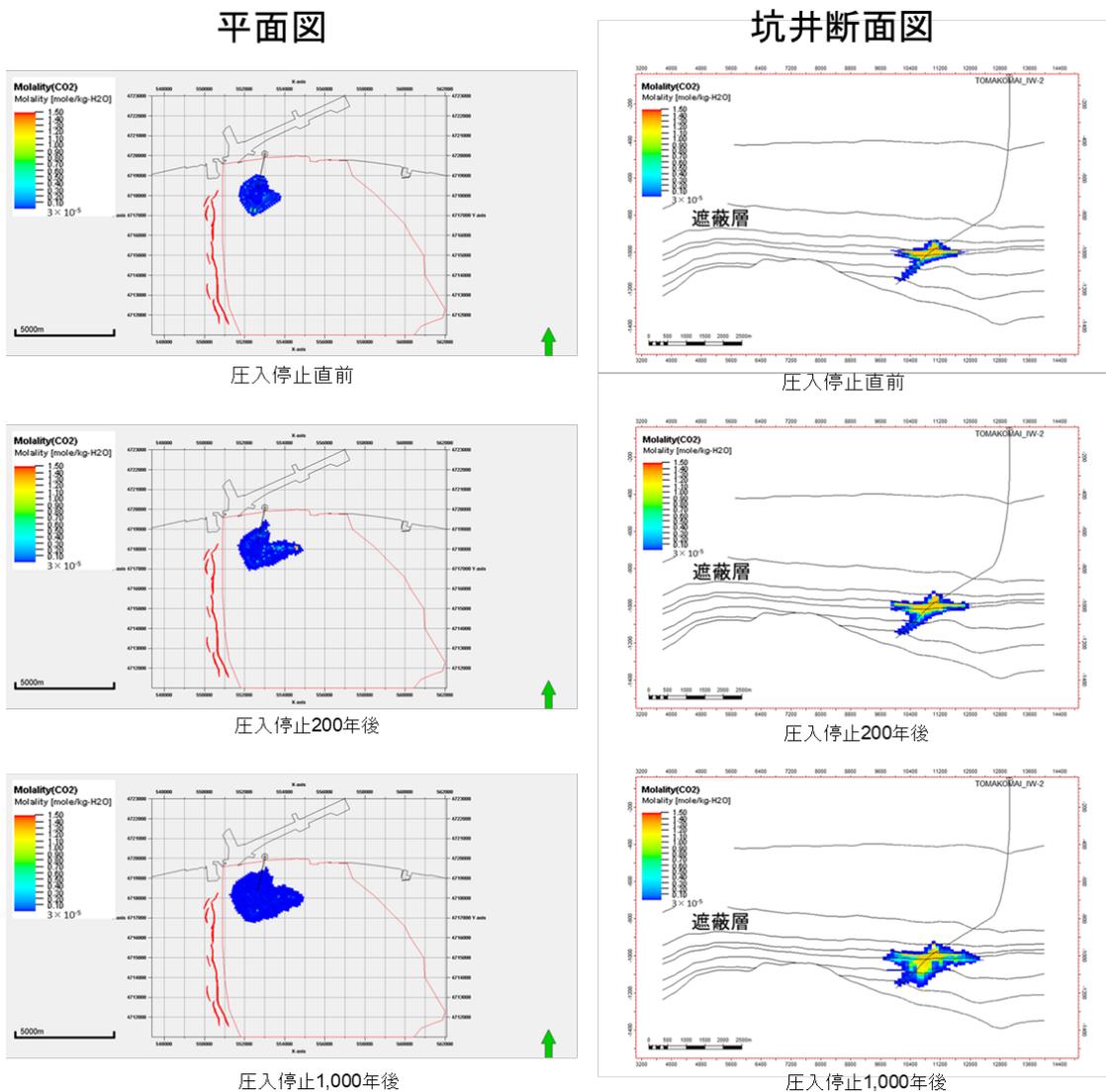


図 5.5-31 P90 相当具現像（具現像 13）の溶存 CO₂ 量分布

② P50 相当（具現像 3）

平面図では、CO₂飽和度分布で見られたCO₂の東側へ移動により、溶存CO₂量分布も東側に広がっている様子が見られた。坑井断面図では、溶存CO₂はCO₂が圧入されている高浸透率領域を中心に数値が大きくなっている。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、CO₂はすべて溶解することがわかり、結果、安全に貯留されていることがわかる。なお、時間が経過するにつれて、溶存CO₂を含む地層水が元の地層水との比重差により貯留層下部に進んでいることがわかる。

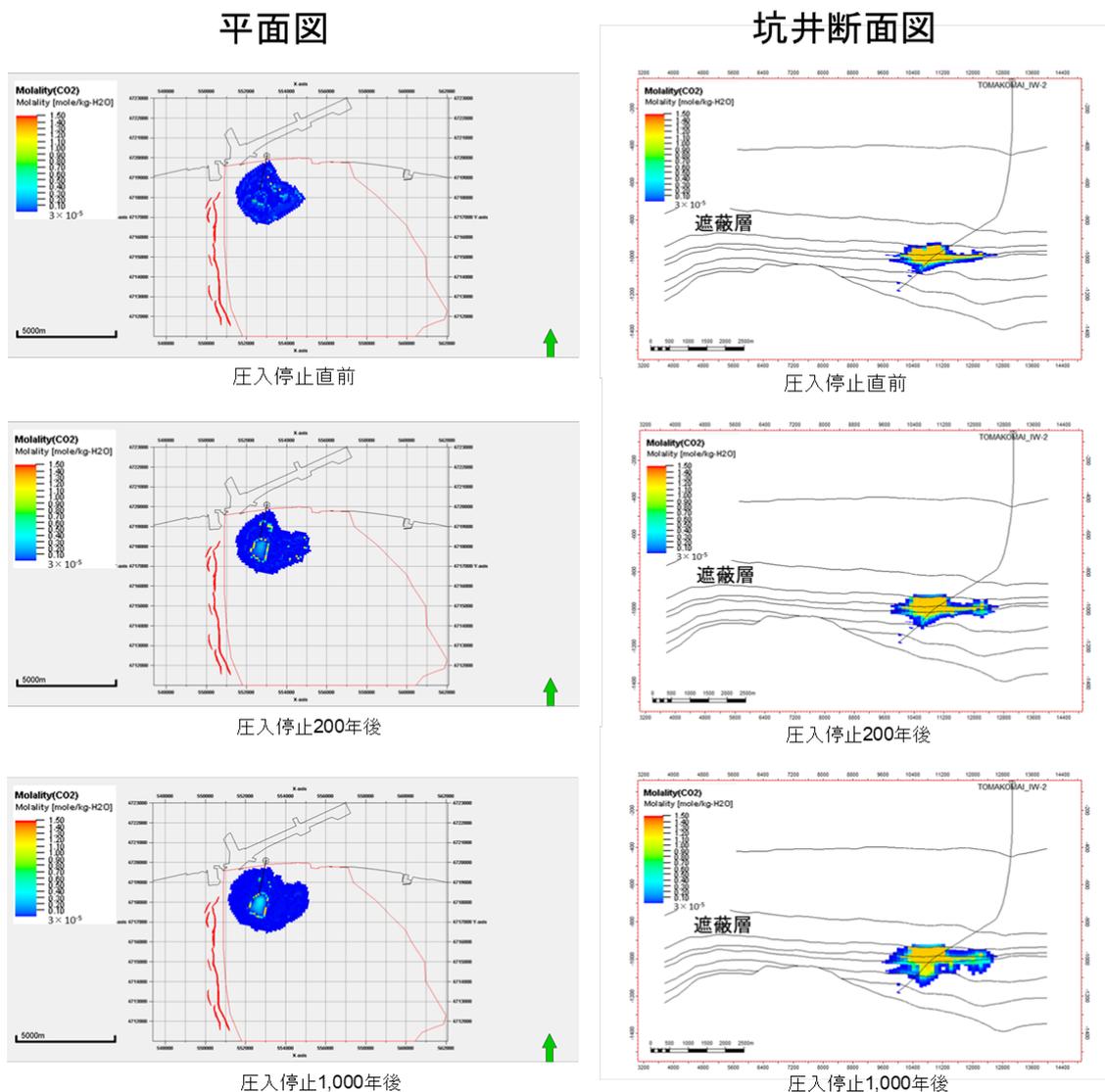


図 5.5-32 P50 相当具現像（具現像 3）の溶存 CO₂ 量分布

③ P10 相当（具現像 2）

平面図では、CO₂飽和度分布で見られたCO₂の東側へ移動により、溶存CO₂量分布も東側に広がっている様子が見られた。坑井断面図では、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はすべて溶解することがわかり、結果、安全に貯留されていることがわかる。なお、時間が経過するにつれて、溶存CO₂を含む地層水が元の地層水との比重差により貯留層下部に進んでいることがわかる。

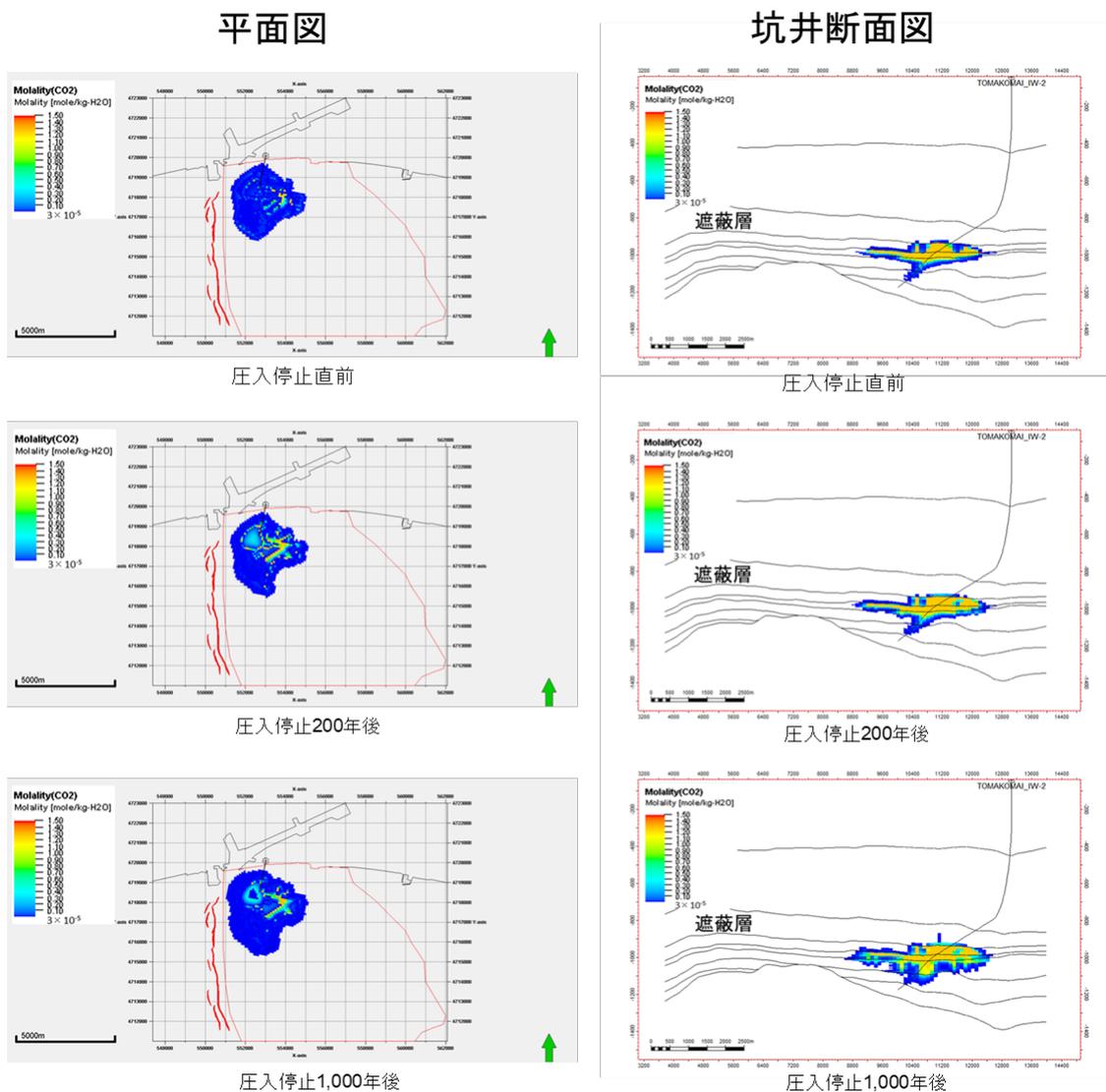


図 5.5-33 P10 相当具現像（具現像 2）の溶存 CO₂ 量分布

(8) 圧入可能量評価まとめ

圧入可能量評価を実施し、P90 相当、P50 相当、P10 相当の各具現像における IW-2 仕上げ区間上端圧力推移と圧力変化、CO₂飽和度、溶存 CO₂量の各分布から長期的な CO₂流動挙動を数値シミュレーションにより推定した。

圧入可能量評価時の確認事項である溶存 CO₂の分布は、超臨界 CO₂の分布の影響を受ける。その超臨界 CO₂の分布は地層傾斜だけでなく浸透率分布の影響を受ける。特に CO₂の圧入割合が大きい浅部高浸透率領域において、高浸透率の岩相が連続して分布している方向へ CO₂が拡散する様子が確認できており、各具現像の浸透率分布の違いにより圧入量評価値に大きな振れ幅が生じている。

P50 相当、P10 相当では、遮蔽層に溶存 CO₂が分布するものの、CO₂飽和度分布では下

限值以下であり、CO₂は安全に貯留されている様子が確認された。一方で、圧入可能量評価では、具現像毎の振れ幅が大きく、地質の不均質性と不確実性によるリスクを低減する場合には、追加坑井を掘削する等、更なる追加データの取得が必要であると考えられる。

5.5.6 ケーススタディ

P10、P50、P90 相当の具現像において圧入可能領域を北側のモデル境界まで拡張した場合の圧入可能量評価についてケーススタディを行い、IW-2 仕上げ区間上端圧力推移や圧力変化、CO₂飽和率、溶存 CO₂量の分布の長期的な挙動について考察を行った。

(1) 制限条件

5.5.5 項の圧入可能量評価で抽出した P10、P50、P90 相当の具現像について、5つの制限条件のうち条件 2 を変更した場合の CO₂飽和度分布と圧入可能量を評価した。圧入可能量評価においては、累計圧入量が 100 万 t-CO₂増加するごとに圧入停止後 1,000 年まで下記制限条件のいずれにも達しないことを確認し、最大の累計圧入量をその具現像の圧入可能量とした。なお、5.5.5 項の圧入可能量評価での条件 2 と区別するために、条件 2' と記載する。

- 1) 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
- 2) 条件 2'：溶存 CO₂量の分布がシミュレーションの北部境界に到達する
- 3) 条件 3：溶存 CO₂量の分布が遮蔽層層準の層厚 20 m 以下となるエリアに到達する
- 4) 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
- 5) 条件 5：溶存 CO₂量の分布が深度 750 m (TVDSS) に到達する

開境界モデルを想定した浸透性の良い塩水帯水層で、初期圧が 9.82 MPaG であることを踏まえると条件 1 には達しないと見込まれた。実際に確認した仕上げ区間上端の圧力推移や CO₂飽和率分布等については後述するが、圧入可能量を評価する上で具現像ごとの特徴を踏まえつつ確認が必要なのは溶存 CO₂量の分布に関する条件 2'~5 であった。

図 5.5-34 に条件 2'~5 の範囲を示す。条件 2'は青線で示しており、5.5.5 項の制限条件であった海岸線から 1,000~1,500 m 北方へ拡張している。条件 3~4 は 5.5.5 項の制限条件と同様である。条件 5 は赤線であり、条件 3 よりもさらに沖合になる。これらをまとめると「溶存 CO₂量の分布が条件 2'、4、5 に囲まれた範囲内に納まること」が圧入可能量評価のための条件であり、赤枠の内側を圧入可能域として圧入可能量評価を行った。

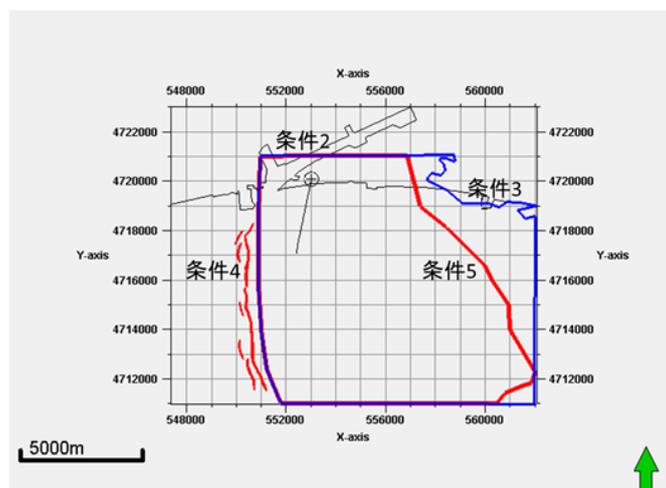


図 5.5-34 ケーススタディ圧入可能量評価における条件 2'、3、4、5 の範囲

(2) 圧入可能量評価結果

5.5.5(1)の方法を用いて、P90、P50、P10 相当の具現像 13、3、2 の圧入可能量を算定した。表 5.5-6 に評価結果を示す。P90、P50、P10 相当具現像はいずれも、5.5.5 項の条件では累計圧入量を増やしていくと溶存 CO₂ が海岸線に到達して圧入可能量が決まるのに対して、ケーススタディの条件では圧入可能域が北側のモデル境界まで拡張されたため、すべての具現像において圧入可能量は大きくなった。

表 5.5-6 圧入可能量評価結果一覧

具現像 (カッコ内は 具現像ナンバー)	ケーススタディ 圧入可能量 万 t-CO ₂	圧入可能量評価 (5.5.3 項) 万 t-CO ₂
P90 相当(13)	600	100
P50 相当(3)	800	400
P10 相当(2)	1,100	700

以下ではまず各具現像の圧入可能量評価について述べ、次いで IW-2 の仕上げ区間上端の圧力推移や貯留層内の圧力分布、CO₂ 飽和率分布、溶存 CO₂ 量分布について特徴を記載する。

① P90 相当（具現像 13）のケーススタディ圧入可能量

具現像 13 では、図 5.5-35 のように、累計圧入量 700 万 t-CO₂ では、圧入停止 1,000 年後には溶存 CO₂ は超臨界から外れる深度の境界（条件 5）を超えた。累計圧入量 600 万 t-CO₂ では、溶存 CO₂ が超臨界から外れる深度の境界（条件 5）を超えなかったことか

ら、圧入可能量を 600 万 t-CO₂ とした。

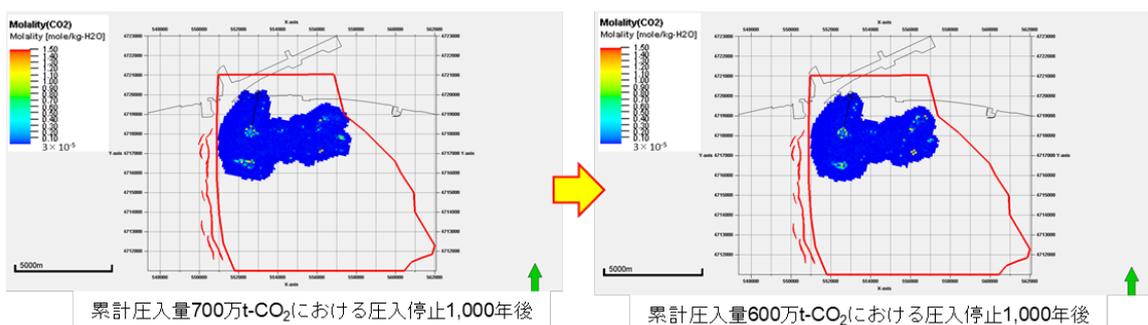


図 5.5-35 P90 相当（具現像 13）における溶存 CO₂ 量分布

② P50 相当（具現像 3）のケーススタディ圧入可能量

具現像 3 では、図 5.5-36 のように、累計圧入量 900 万 t-CO₂ では、圧入停止 1,000 年後には溶存 CO₂ は超臨界から外れる深度の境界（条件 5）を超えた。累計圧入量 800 万 t-CO₂ では、溶存 CO₂ が超臨界から外れる深度の境界（条件 5）を超えなかったことから、圧入可能量を 800 万 t-CO₂ とした。

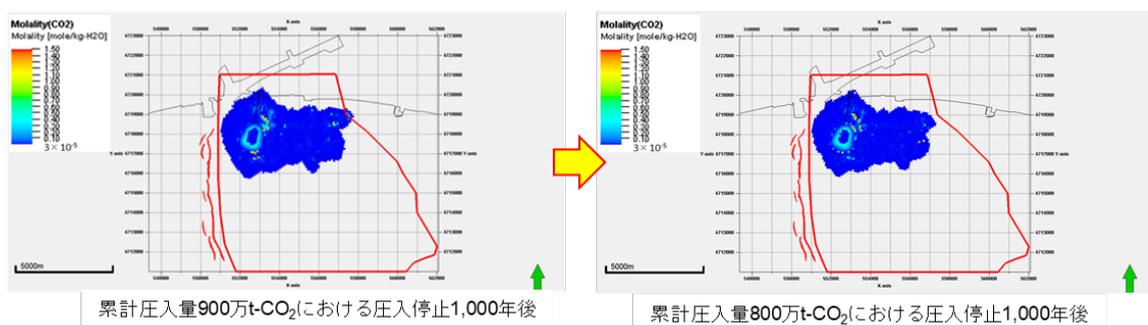


図 5.5-36 P50 相当（具現像 3）における溶存 CO₂ 量分布 平面図

③ P10 相当（具現像 2）のケーススタディ圧入可能量

具現像 2 では、図 5.5-37 のように、累計圧入量 1,200 万 t-CO₂ では、圧入停止 1,000 年後には溶存 CO₂ は西部の断層側の境界（条件 4）を超えた。累計圧入量 1,100 万 t-CO₂ では、溶存 CO₂ は西部の断層側の境界（条件 4）を超えていないことから、圧入可能量を 1,100 万 t-CO₂ とした。

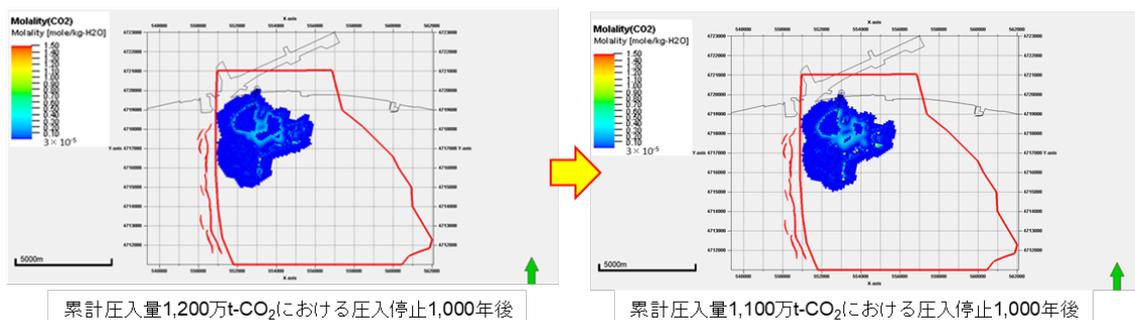


図 5.5-37 P10 相当（具現像 2）における溶存 CO₂ 量分布 平面図

④ 具現像毎の圧入可能量評価の違いに関する考察

P90 相当の具現像の圧入可能量が 600 万 t-CO₂、P50 相当の具現像の圧入可能量が 800 万 t-CO₂、P10 相当具現像の圧入可能量が 1,100 万 t-CO₂ と、具現像毎に数 100 万 t-CO₂ 単位の振れ幅がある。各具現像では浅部高浸透率領域（k=11 と k=12）に最も CO₂ が圧入されており、CO₂ の分布は浸透率分布の影響を大きく受けることから図 5.5-38 の平面図で、オレンジ色で示される高浸透率領域や黄緑色で示される低浸透率領域の分布の特徴を比較した。

P90 相当の具現像は、k=11 および k=12 において、東側へ高浸透率領域が伸びている。P50 相当具現像は、k=11 においては、P90 で見られたのと同様に東側へ延びる高浸透率領域は存在するものの、直線的な CO₂ の東側への流れを遮るように低浸透率領域が存在しており、東側の境界への CO₂ の到達が遅くなるため、P90 よりも圧入可能量が大きくなったと考えられる。P10 相当の具現像は、k=11 においては P90 や P50 よりも坑井仕上げ上部付近の西側に広範囲に高浸透率領域が分布している特徴が見られる。k=12 においても似たように西側に広範囲に高浸透率領域が分布する一方で、P90 や P50 のように東側へ延びる高浸透率領域がない。結果として、より西側や南側へ CO₂ が流れやすくなり、P90 や P50 よりも圧入可能量が大きくなったと考えられる。

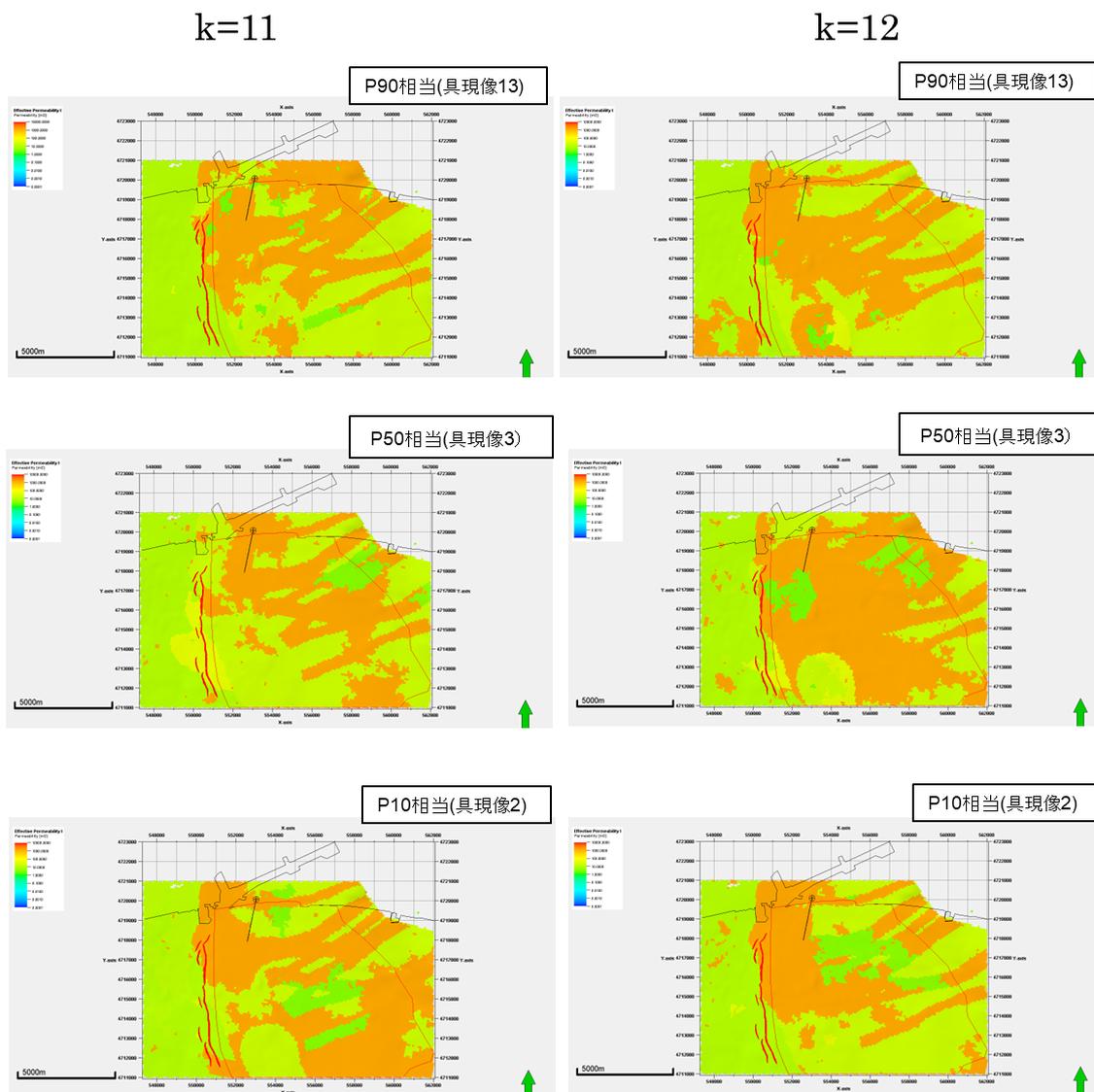
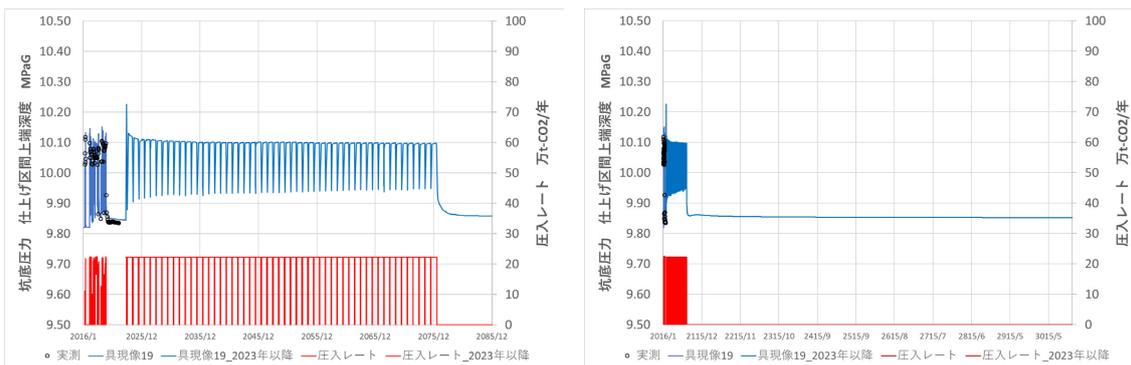


図 5.5-38 浸透率分布（平面図）

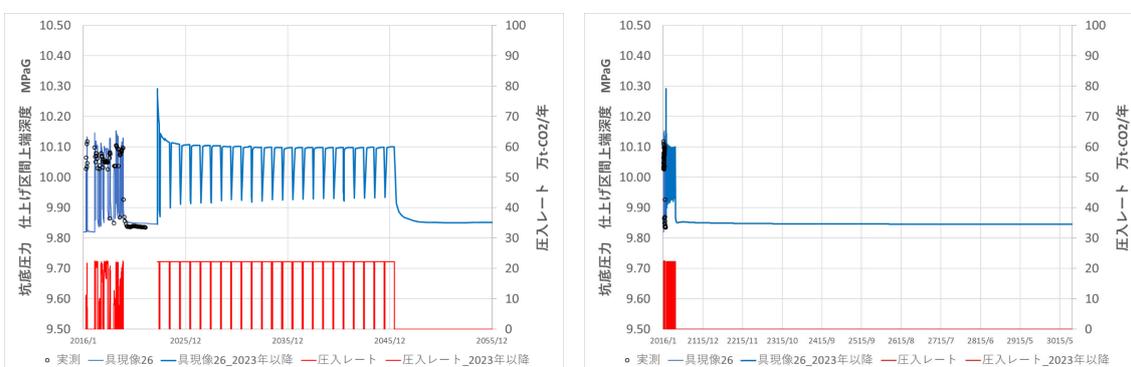
(3) 圧入井の仕上げ区間上端における圧力推移

P90、P50、P10 相当の具現像における IW-2 の仕上げ区間上端の圧力推移を図 5.5-39～41 にそれぞれ示す。いずれの期間においても上限値の 12.93 MPaG には到達せず、CO₂ 圧入中でも最大で 10.39 MPaG 程度であり、圧入停止後は 2 年程度で圧力は低下し、安定した。圧入停止 1,000 年後の仕上げ区間上端における圧力は、P90、P50、P10 すべてが 9.85 MPaG であった。



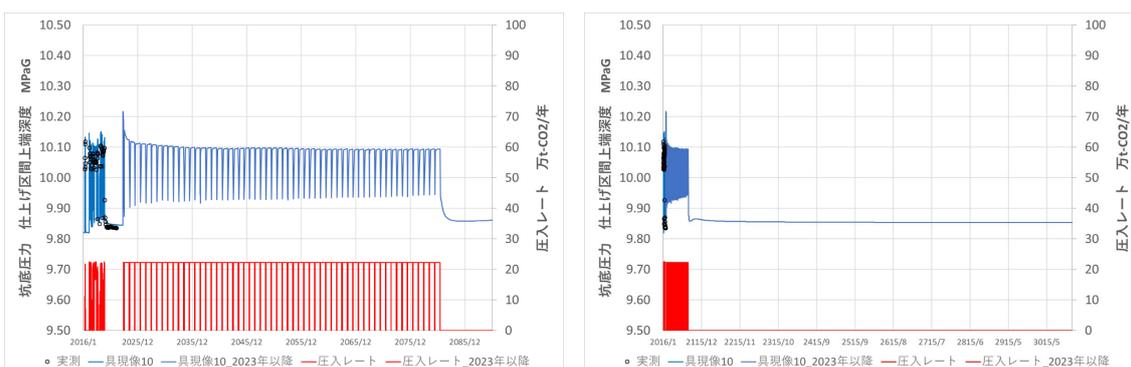
注) 左図：圧入期間中 右図：圧入 1000 年後

図 5.5-39 P90 相当の具現像 13 における IW-2 仕上げ区間上端圧力推移



注) 左図：圧入期間中 右図：圧入 1000 年後

図 5.5-40 P50 相当の具現像 3 における IW-2 仕上げ区間上端圧力推移



注) 左図：圧入期間中 右図：圧入 1000 年後

図 5.5-41 P10 相当の具現像 2 における IW-2 仕上げ区間上端圧力推移

(4) 圧力変化分布

P90、P50、P10 相当の具現像における圧入停止前、圧入停止 200 年後および圧入停止 1,000 年後での圧力変化分布の平面図と断面図を図 5.5-42～44 に示す。

① P90 相当の具現像（具現像 13）

坑井周辺は 100kPa～300kPa の圧力変化（上昇）が見られる。また、モデルの西側にある断層（ $k=10$ を含む萌別層砂岩層上部下部には到達していない）付近の圧力上昇値は、50kPa 以下であった。圧入停止後、貯留層圧力の変化は小さくなり、徐々に圧力が回復している。圧入停止 1,000 年後には CO_2 が存在する坑井周辺以外の圧力変化は見られない。ただし、圧入量が 500 万 t- CO_2 増大している影響で、5.5 節の条件で見られたよりも、圧力変化が及ぶ範囲が拡大している様子が確認された。

圧入停止前の坑井断面図では、5.5 節の条件では貯留層と接する遮蔽層部分にのみ圧力伝搬が確認できていたが、坑井直上付近は遮蔽層全体にわたって圧力変化が確認された。なお、遮蔽層の圧力上昇幅は最大 150kPa 程度に収まっており、遮蔽層のスレッシュホールド圧力 370kPa 未満である。

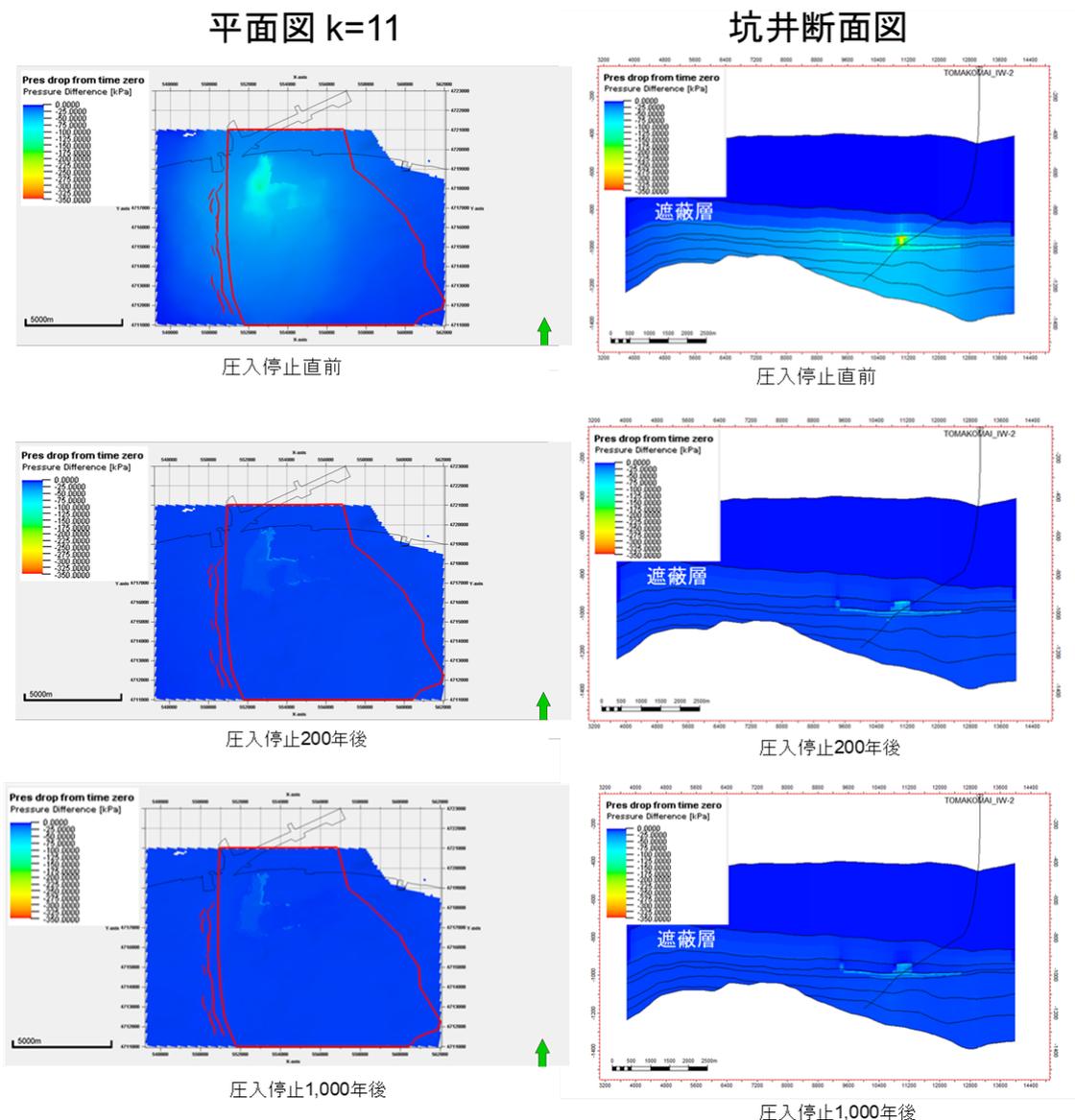


図 5.5-42 P90 相当の具現像（具現像 13）の圧力変化分布

② P50 相当の具現像（具現像 3）

5.5 節の条件で見られた結果と同様に、坑井周辺は 100kPa～350kPa の圧力変化（上昇）が見られる。また、モデルの西側にある断層（k=10 を含む萌別層砂岩層上部下部には到達していない）付近の圧力上昇値は、50kPa 以下であった。圧入停止後、貯留層圧力の変化は小さくなり、徐々に圧力が回復している。圧入停止 1,000 年後には CO₂ が存在する坑井周辺以外は圧力変化が見られない。

圧入停止前の坑井断面図では、5.5 節の条件では貯留層と接する遮蔽層部分にのみ圧力伝搬が確認できたが、坑井直上付近は遮蔽層全体にわたって圧力変化が確認された。なお、遮蔽層の圧力上昇幅は最大 150kPa 程度に収まっており、遮蔽層のスレッシュホールド圧

力 370kPa 未満である。

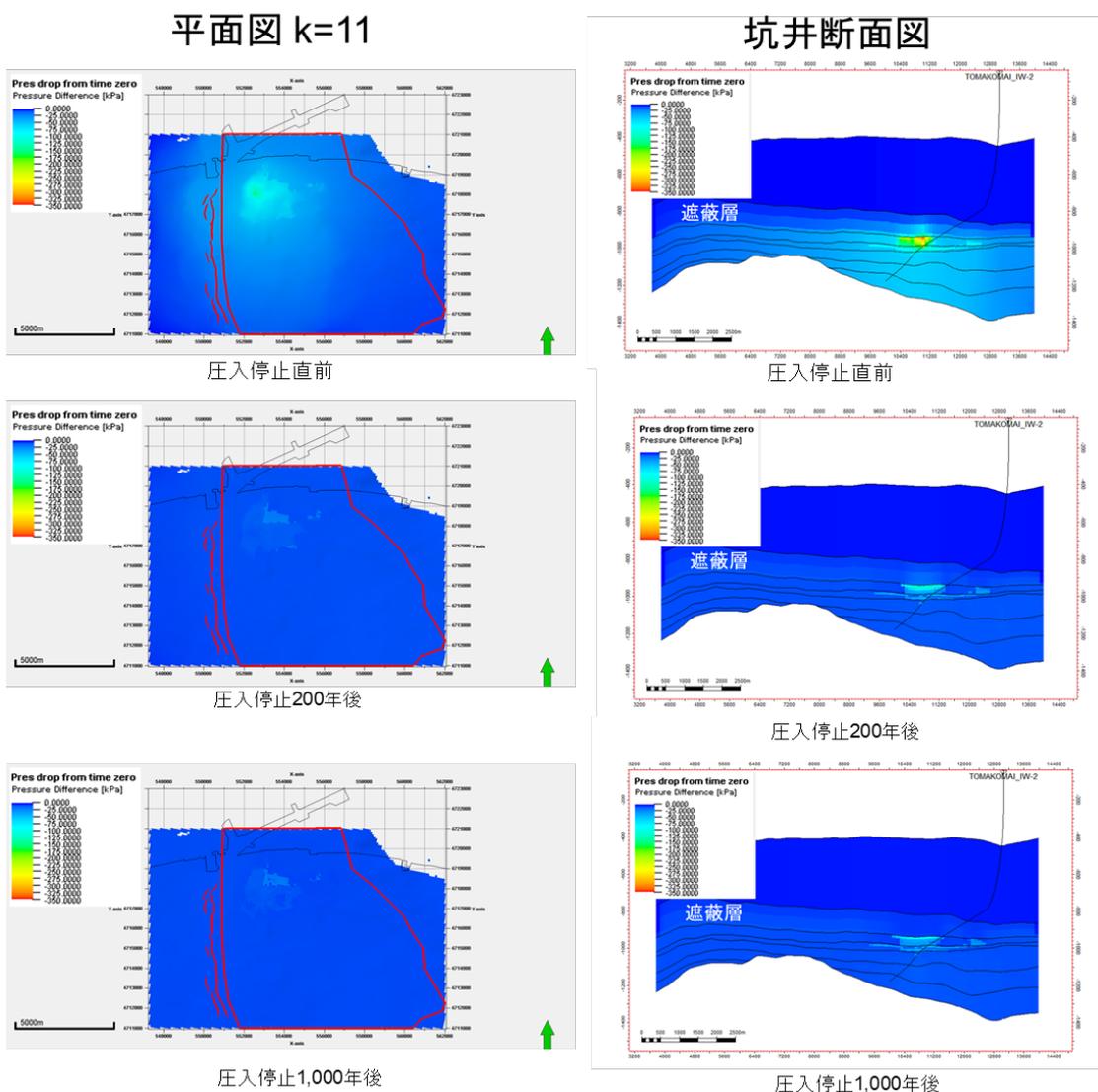


図 5.5-43 P50 相当の具現像（具現像 3）の圧力変化分布

③ P10 相当の具現像（具現像 2）

5.5 節の条件で見られた結果と同様に、坑井周辺は 100kPa～350kPa の圧力変化（上昇）が見られる。また、モデルの西側にある断層（k=11 を含む萌別層砂岩層上部下部には到達していない）付近の圧力上昇値は、50kPa 以下であった。圧入停止後、貯留層圧力の変化は小さくなり、徐々に圧力が回復している。圧入停止 1,000 年後には CO₂ が存在する坑井周辺以外は圧力変化が見られない。

圧入停止前の坑井断面図では、貯留層と接する遮蔽層部分では圧力伝搬が確認でき、坑井直上付近は遮蔽層全体にわたって圧力変化が確認された。なお、遮蔽層の圧力上昇幅は最大 150kPa 程度に収まっており、遮蔽層のスレッシュホールド圧力 370kPa 未満である。

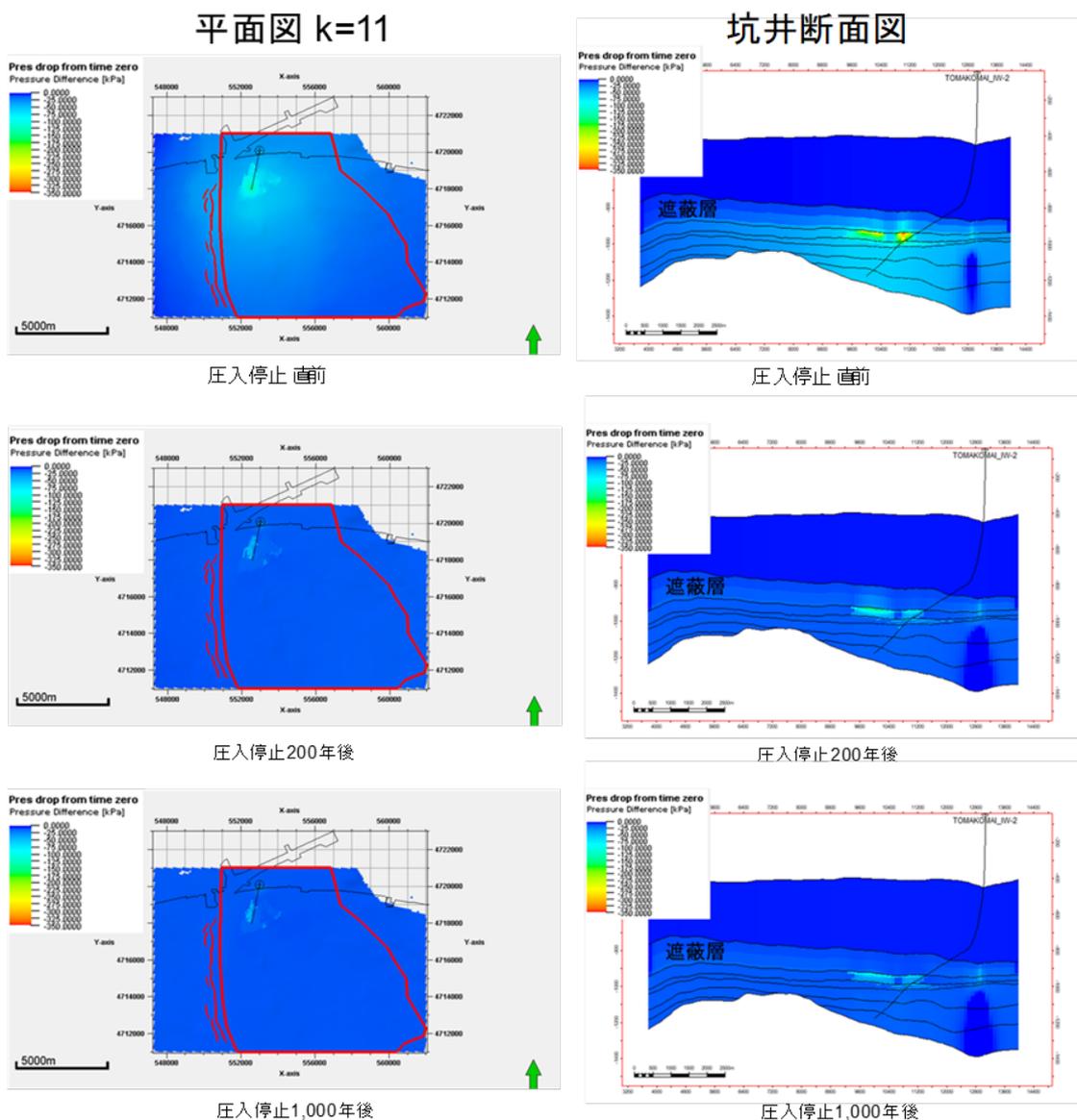


図 5.5-44 P10 相当の具現像（具現像 2）の圧力変化分布

(5) CO₂ 飽和率分布

P90、P50、P10 相当の具現像における圧入停止前、圧入停止 200 年後および圧入停止 1,000 年後での CO₂ 飽和度分布の平面図と断面図を図 5.5-45～47 に示す。

① P90 相当の具現像（具現像 13）

平面図では、圧入停止直前および圧入停止 200 年後において CO₂ が東側へ移動していく様子が見られた。その後、CO₂ の塩水への溶解が進み、CO₂ の東側への移動は抑制されていることが確認された。圧入量が 500 万 t-CO₂ 増大している影響で、5.5 節の条件で見られたよりも CO₂ 分布域が拡大し、特に東方向へ CO₂ が広がった。坑井断面図では、5.5 節

の条件の場合と同様に、浮力によってCO₂が上昇する様子が見られるが、遮蔽層より上部には確認できず、CO₂が安全に貯留されている様子が確認された。

平面図

坑井断面図

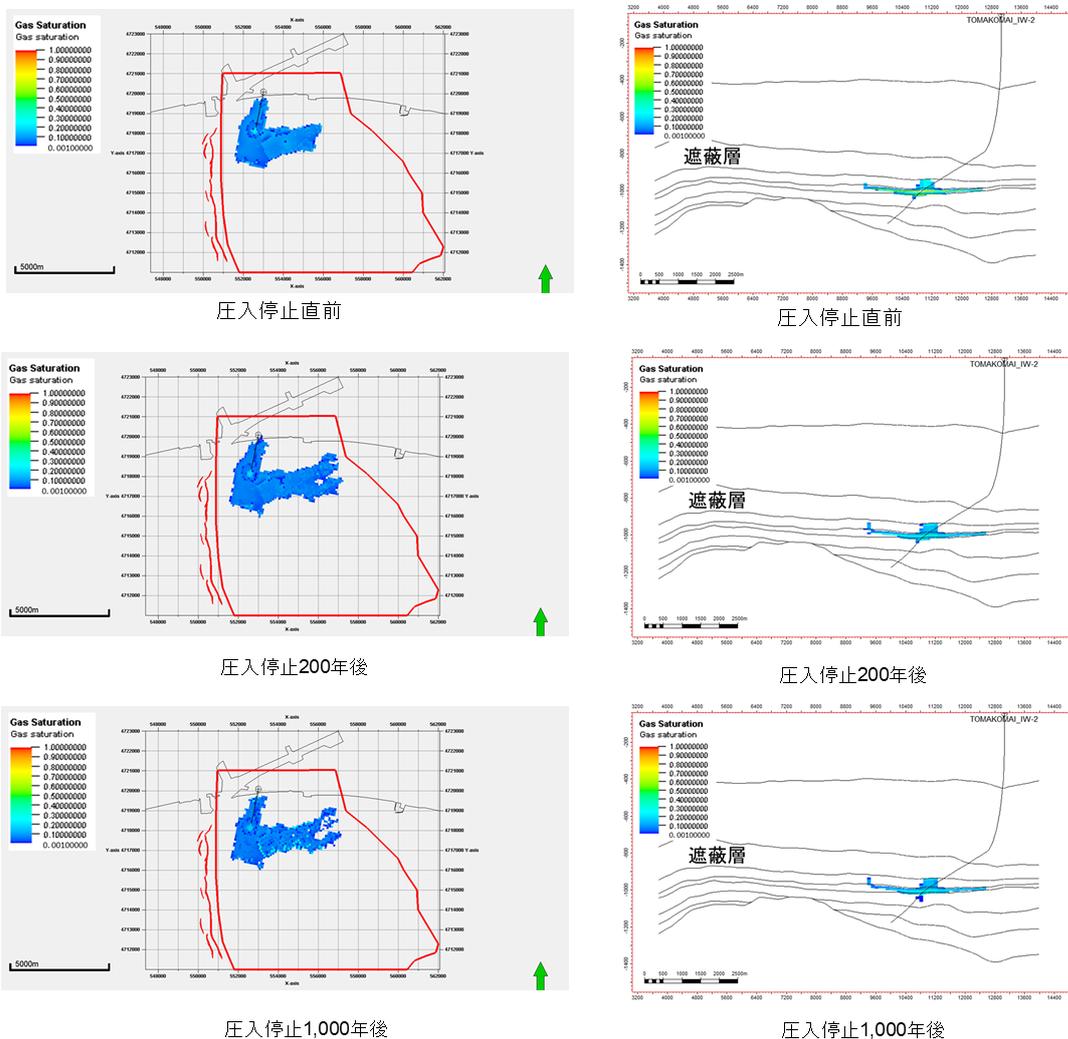


図 5.5-45 P90 相当の具現像（具現像 13）の CO₂ 飽和度分布

② P50 相当の具現像（具現像 3）

平面図では、圧入停止直前および圧入停止 200 年後において CO₂ が東側へ移動していく様子が見られた。その後、CO₂ の塩水への溶解が進み、CO₂ の移動は抑制されている様子が確認された。坑井断面図では、浮力によって CO₂ が上昇する様子が見られるが、遮蔽層より上部には確認できず、CO₂ が安全に貯留されている様子が確認された。

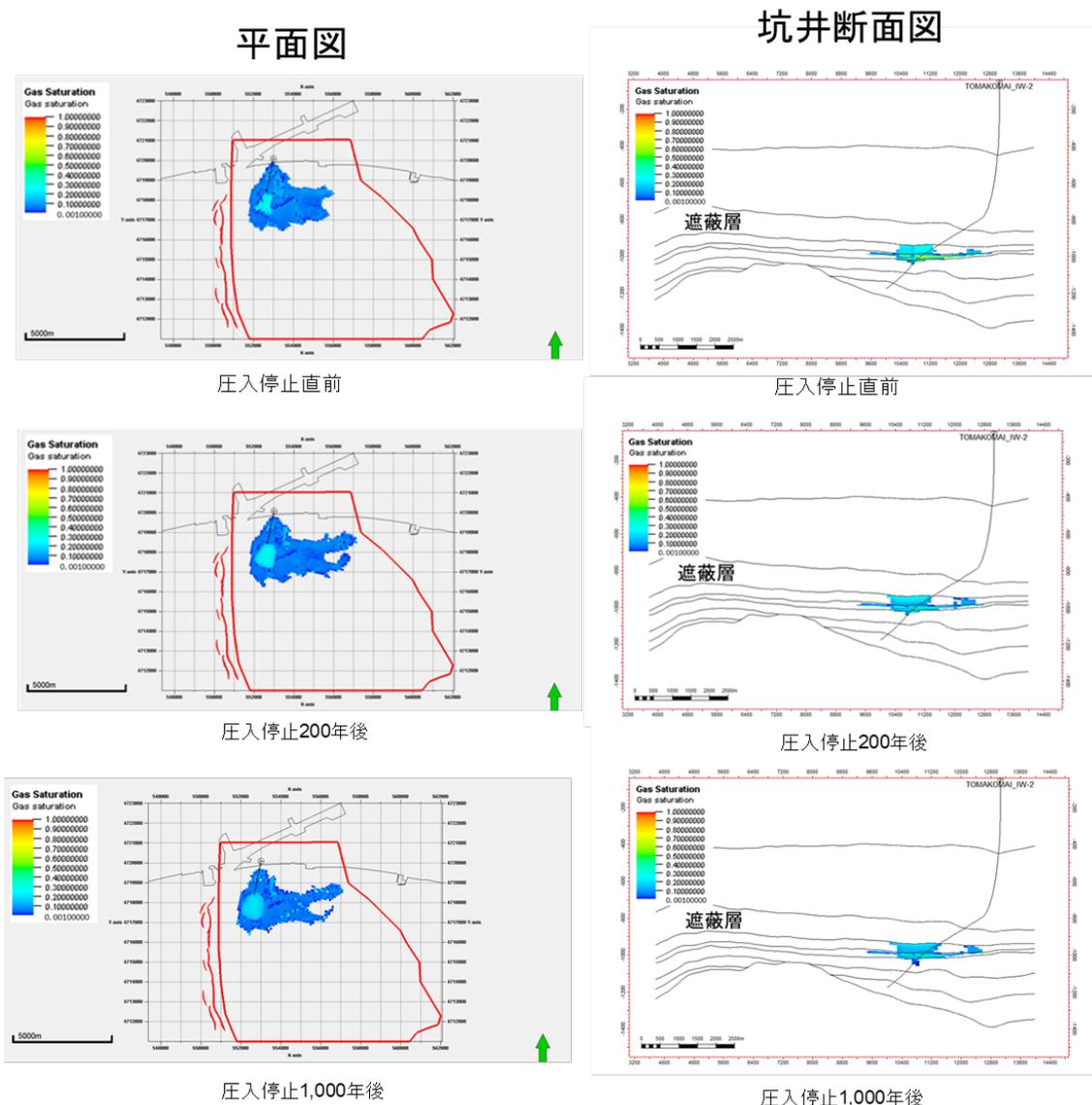


図 5.5-46 P50 相当の具現像（具現像 3）の CO₂ 飽和度分布

③ P10 相当の具現像（具現像 2）

平面図では、圧入停止 200 年後においても CO₂ が東側へ移動していく様子が見られた。その後、CO₂ の塩水への溶解が進み、CO₂ の東側への移動は抑制されている様子が確認された。5.5 節の条件よりも、北側および東側へわずかに CO₂ 分布域が拡大した。圧入停止直前において東側へ移動している CO₂ 分布領域や、圧入停止から 200 年後にかけて CO₂ が東側へ拡大する領域は、P90 や P50 よりも抑えられている。坑井断面図では、浮力によって CO₂ が上昇する様子が見られるが、遮蔽層より上部には確認できず、CO₂ が安全に貯留されている様子が確認された。

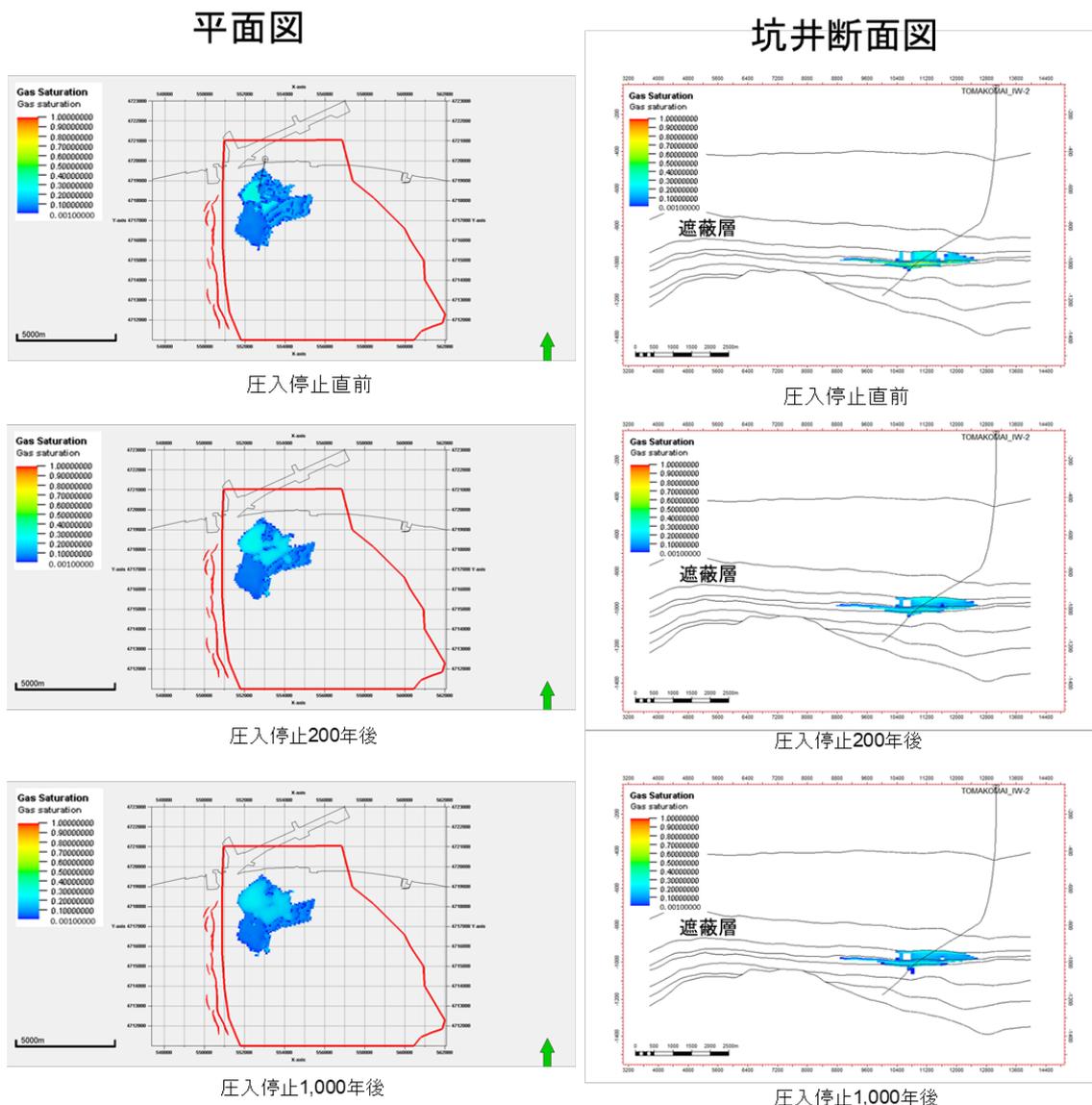


図 5.5-47 P10 相当の具現像（具現像 2）の CO₂ 飽和度分布 平面図

(6) 溶存 CO₂ 量分布

P90、P50、P10 相当の具現像における圧入停止前、圧入停止 200 年後および圧入停止 1,000 年後での溶存 CO₂ 量分布の平面図と断面図を図 5.5-48～50 に示す。

① 90 相当の具現像（具現像 13）

平面図では、CO₂ 飽和度分布で見られたのと同様に、圧入停止直前でも溶存 CO₂ 量分布は東側に広がっており、圧入停止 200 年後には特に東側へ更に溶存 CO₂ が広がっている様子が見られた。坑井断面図では、溶存 CO₂ は CO₂ が圧入されている高浸透率領域を中心に数値が大きくなっている。5.5 節の条件の場合とは異なり、遮蔽層にも溶存 CO₂ が存在

している。しかし、CO₂飽和度分布ではCO₂が確認されておらず、浸入したCO₂はすべて溶存CO₂の状態が存在しており、結果、安全に貯留されていることがわかる。なお、時間が経過するにつれて、溶存CO₂を含む地層水が元の地層水との比重差により貯留層下部に進んでいることがわかる。

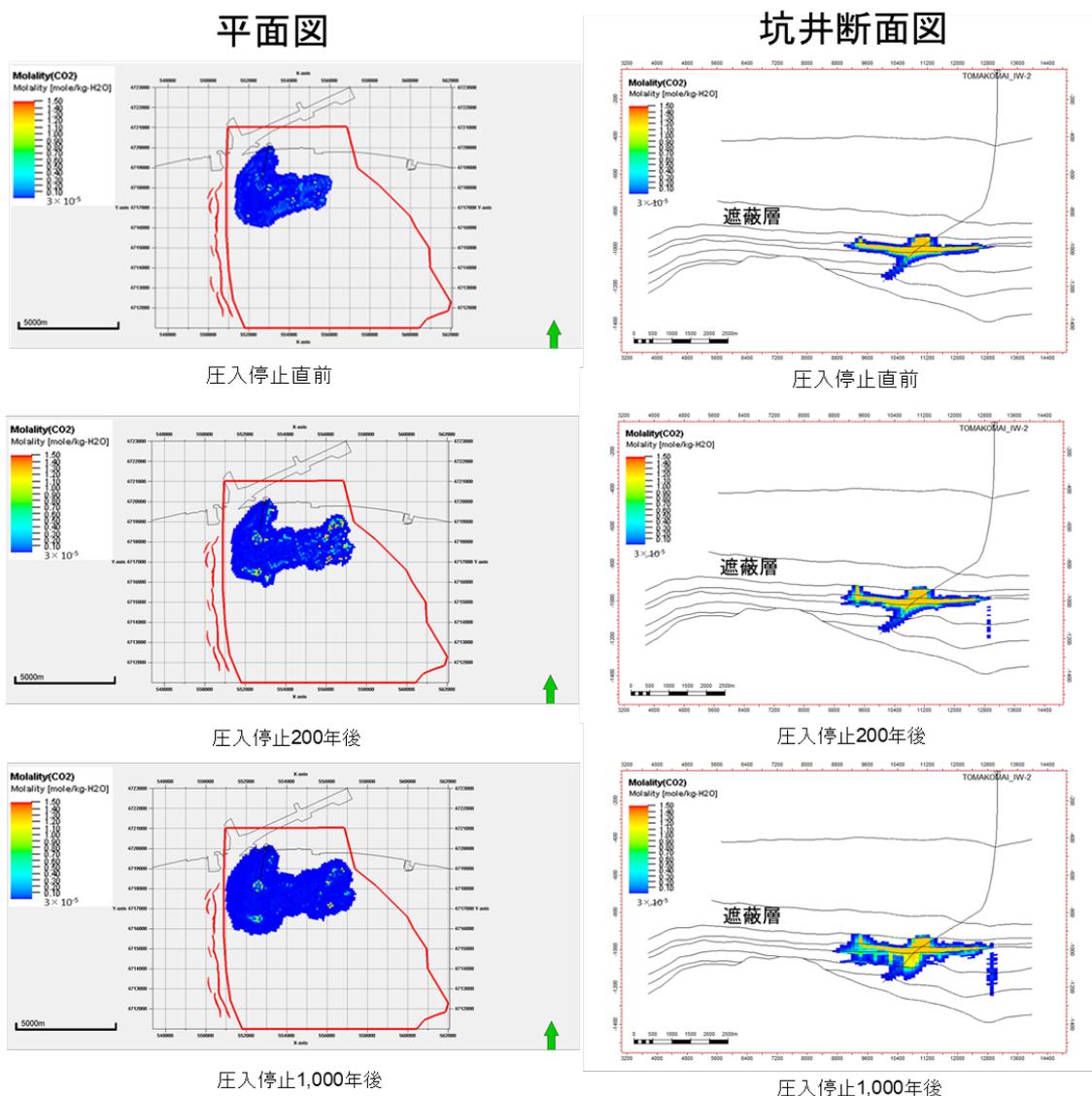


図 5.5-48 P90 相当の具現像（具現像 13）の溶存 CO₂ 量分布

② P50 相当の具現像（具現像 3）

5.5 節の条件で見られたのと同様に、平面図では、CO₂飽和度分布で見られたCO₂の東側への移動と同様に、溶存CO₂量分布も東側に広がっている様子が見られた。坑井断面図では、溶存CO₂はCO₂が圧入されている高浸透率領域を中心に数値が大きくなっている。遮蔽層には溶存CO₂が存在しており、CO₂の遮蔽層への浸入はあることがわかる。し

しかし、CO₂飽和度分布ではCO₂が確認されておらず、浸入したCO₂はすべて溶解することがわかり、結果、安全に貯留されていることがわかる。なお、時間が経過するにつれて、溶存CO₂を含む地層水が元の地層水との比重差により貯留層下部に進んでいることがわかる。

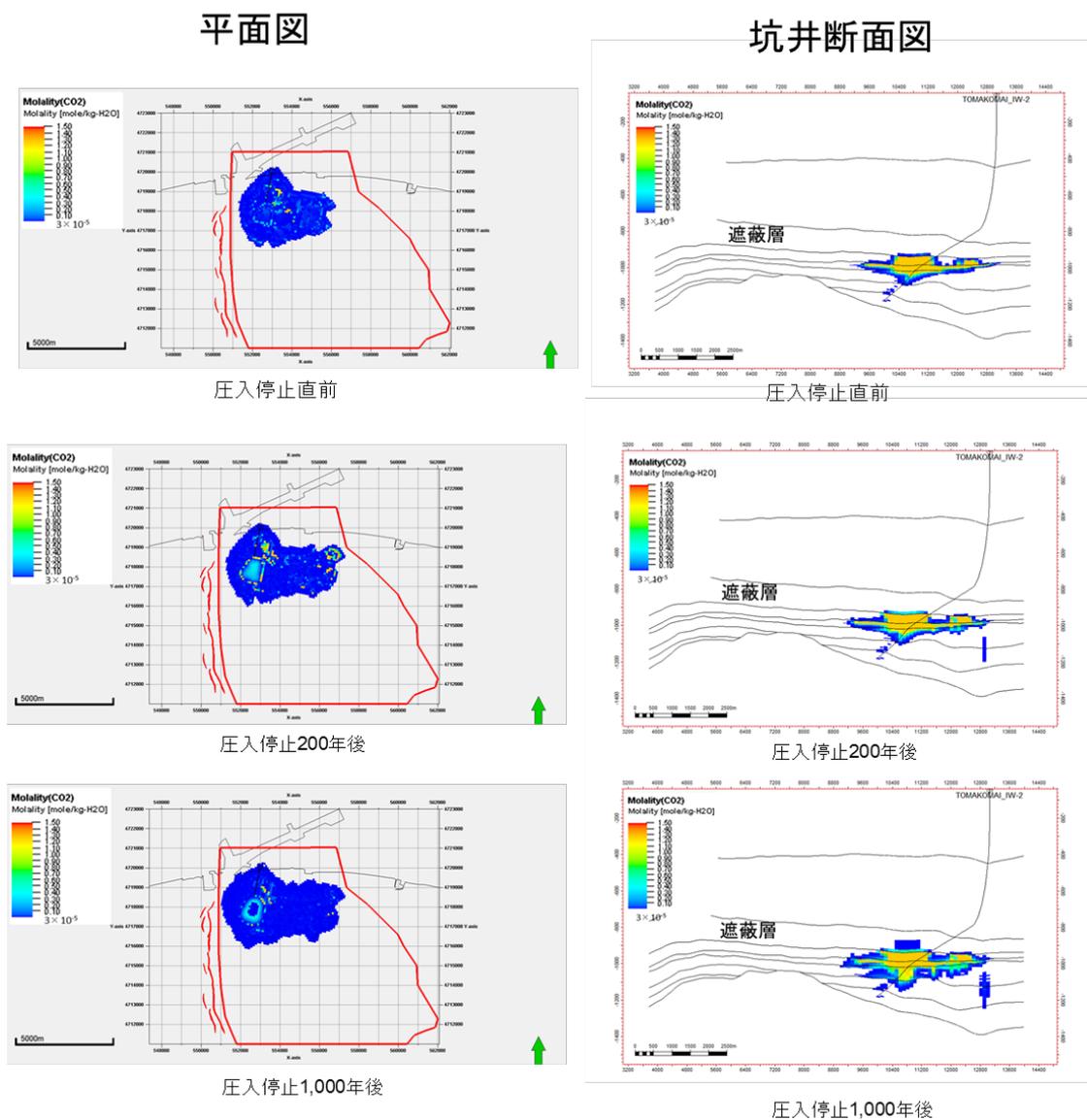


図 5.5-49 P50 相当の具現像（具現像 3）の溶存 CO₂ 量分布

③ P10 相当の具現像（具現像 2）

5.5 節の条件で見られたのと同様に、平面図では、CO₂ 飽和度分布で見られた CO₂ の東側への移動と同様に、溶存 CO₂ 量分布も東側に広がっている様子が見られた。坑井断面図では、遮蔽層には溶存 CO₂ が存在しており、CO₂ の遮蔽層への浸入はあることがわかる。しかし、CO₂ 飽和度分布では CO₂ が確認されておらず、浸入した CO₂ はすべて溶解して

いるものと評価され、安全に貯留されていると判断される。なお、時間が経過するにつれて、溶存CO₂を含む地層水が元の地層水との比重差により貯留層下部に進んでいることがわかる。

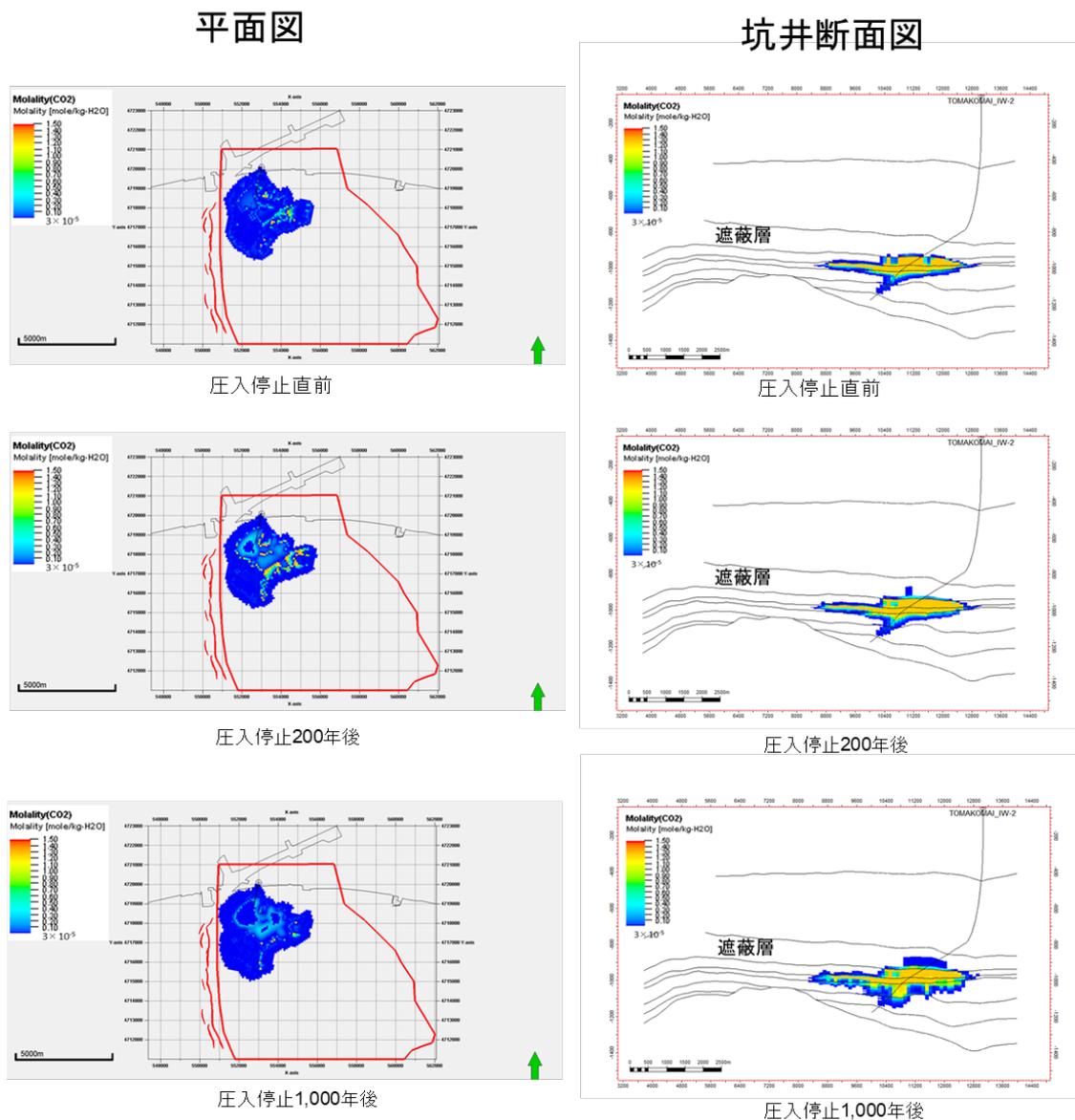


図 5.5-50 P10 相当の具現像（具現像 2）の溶存 CO₂ 量分布

(7) ケーススタディまとめ

いずれのケースにおいても圧入井の仕上げ区間上端における圧力は上限値の 12.93 MPaG には到達せず、CO₂ 圧入中でも最大で 10.39 MPaG 程度であった。またケーススタディの圧入可能量まで累計圧入量を増やしても、遮蔽層下端における圧力変化は最大 150kPa 程度であり、スレッシュホールド圧力未満であることを確認した。

CO₂ 飽和率分布の形状は、特に浅部高浸透率領域の岩相分布が影響しており、高浸透率

領域が広がる方向へCO₂が広がり、浮力によるCO₂の東側への移動も特に高浸透率領域で顕著に確認された。5.5節の条件において西側の断層周辺に溶存CO₂が到達し圧入可能量が決定する具現像以外は、北方へ圧入可能領域を拡大したため圧入可能量が增大した。しかし、東側に位置する超臨界から外れる深度または西側の断層周辺に溶存CO₂が到達することが原因で、ケーススタディ条件における圧入可能量は最大でも1,000~1,500万程度に留まると想定される。

遮蔽層においては、CO₂飽和度分布からは遮蔽層に超臨界CO₂は確認されなかったが、溶存CO₂の測定下限から導いた下限値 3×10^{-5} mole/kg-H₂Oを超える量の溶存CO₂が遮蔽層内に確認された。溶存CO₂の形態であれば基本的には重力により構造下位へ移動していくため、安全に貯留されると考えられる。

5.6 今後の課題

(1) 萌別層地質構造解釈更新

地質構造解釈については特に挙げる課題はないが、4D差分解析については萌別層泥岩層内部における振幅異常の信頼性に不確実性が残る。今後、4D記録の振幅異常のうち、CO₂圧入区間よりも上位については、その信頼性を確かめることが必要である。データ処理における速度変化・時間シフトの抽出、AIインバージョンを適用したさらに正確なP波インピーダンス変化の把握およびAVOインバージョンなどの手法による地層内流体の変化の推定等が手法として考えられる。

(2) 地質モデル

IW-2の遮蔽層区間において全域の検層データが取得されておらず、その性状がはっきりしないため、地質モデルでは一様なプロパティが与えられている。そのため遮蔽層へのCO₂の浸透などを考慮するには当該区間のデータの新規取得が必要となる。

(3) IW-2 ヒストリーマッチング

FOTのログ・ログプロットにおいて、圧力デリバティブの形状を確認したところ、密閉後10時間程度までに見られるCO₂領域のラディアルフローを示唆するSlope0の挙動が、シミュレーションモデル結果では再現できなかった。短期的な挙動のマッチングの向上を目的として、PTセンサー深度での坑底圧力の貯留層深度への深度換算や坑井近傍のプロパティ分布と坑底圧力の対応関係、LGRの設定等の詳細化のためには、貯留層区間のデータの新規取得が必要となる。

ヒストリーマッチングのスクリーニングにおいては、同じ岩相であっても浅部高浸透率

領域と深部高浸透率領域の浸透率やスキンの違いがあれば、IW-2の坑底圧力の挙動は再現される可能性があることが示された。各高浸透率領域の絶対浸透率およびスキンファクターの組合せを絞り込み、貯留層イメージの精度向上を図るためには、コアや検層、震探データ等、実データを高解像度で追加取得することが必要になると考える。

(4) IW-2 流動シミュレーション

特に高浸透率領域における岩相分布の形状がCO₂の広がり方に影響し、岩相分布の違いによって圧入可能量は数100万t-CO₂の違いがあることが確認された。圧入可能量評価の振れ幅を絞り込んでいくには、追加坑井を掘削するなど巨視的な観点からもデータを追加取得し、貯留層イメージに反映していくことが課題と考えられる。

(5) ケーススタディ

シミュレーションの北側の境界位置の制限条件を海岸線から北方へ拡張すると圧入可能量は増加する傾向にあるが、一方で西側の断層周辺の制限条件にも配慮が必要になることが示された。

今後、圧入可能量の増大化を検討する場合には、西側断層でのリスク評価が検討項目の一つとなる。また、圧入井をより東側に新規に掘削することで、西側の制限条件への到達状況および貯留可能量の増加についての検討も必要と考えられる。

【参考文献】

- 1) Corey, A.T., “The Interrelation between Gas and Oil Relative Permeabilities” Producers Monthly November, p.38-41 (1954)
- 2) van Genuchten, M.T.H., “A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of undersaturated soils” Soil Science Society of America. Journal Vol 44 p.892-898 (1980)
- 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.
- 4) Bennion, B. Bachu, S., “Permeability and Relative Permeability Measurements at Reservoir Conditions for -Water System in Ultralow-Permeability Confining Caprocks” SPE 106995 (2007)