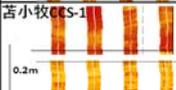
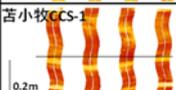
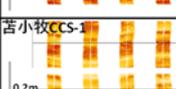
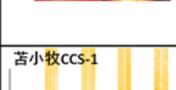
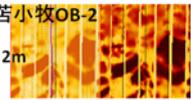
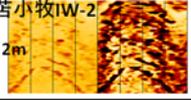
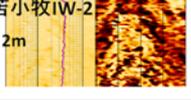
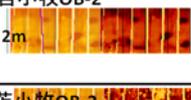


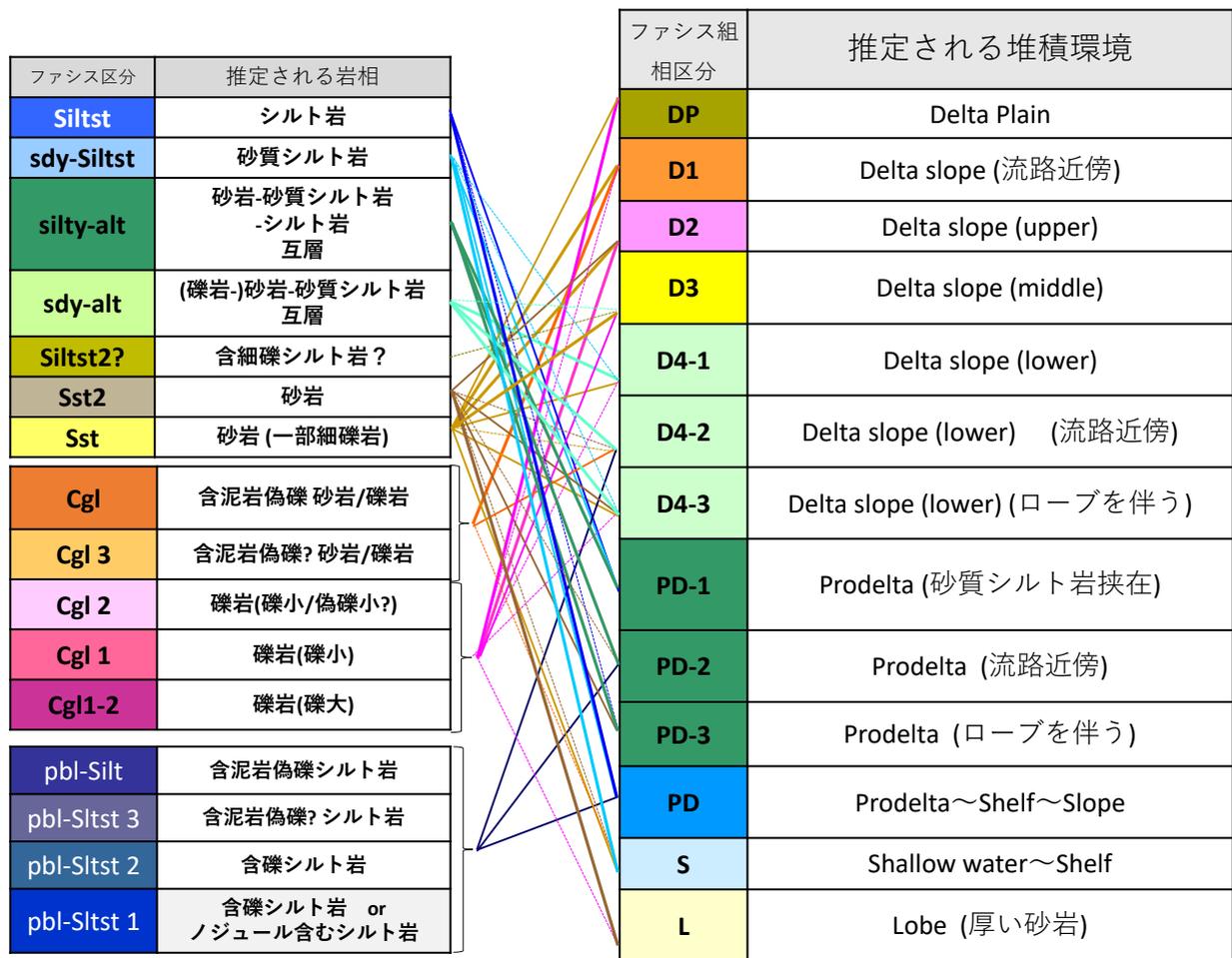
比抵抗イメージにおける特徴	比抵抗イメージの例	検層データにおける特徴	ファシス区分	推定される岩相
暗色。 (生痕や炭質物が明暗の点で見えることもある。)	苦小牧CCS-1 	- GR値, Vclay値が高い。 - 比抵抗値が低い(イメージで暗色)。  比抵抗値<2, Vclay値>0.25, GR値 55~70	Siltst	シルト岩
やや暗色。 (コントラストの弱い互層状か混沌とした様相を示す。)	苦小牧CCS-1 	- GR値, Vclay値が高い傾向。 - 比抵抗値がやや低い(イメージでやや暗色)。  比抵抗値 1~2, Vclay値 0.2~0.25, GR値 35~50	sdY-Siltst	砂質シルト岩
暗色とやや暗色(ときに明色)の互層を示す。	苦小牧CCS-1 	- GR, Vclay値高い傾向で振幅小さく変動。 - 比抵抗値が低い(イメージで暗色), 部分的に高い(イメージで明色)。  比抵抗値 1~3, Vclay値 0.2~0.4, GR値 30~60	silty-alt	砂岩-砂質シルト岩 -シルト岩 互層
やや暗色と明色の互層を示す。	苦小牧CCS-1 	- GR, Vclay値低い傾向で振幅小さく変動。 - 比抵抗がやや高い(イメージでやや明色)。  比抵抗値 2~4, Vclay値 < 0.3, GR値 45~60	sdY-alt	(礫岩-) 砂岩-砂質シルト岩 互層
比抵抗イメージではSstと同じくらい明色に見える。	苦小牧IW-2 	- GR値, Vclay値が高い。 - 比抵抗値は高い(イメージで明色)。  比抵抗値>3, Vclay値 > 0.25	Siltst?	含細礫シルト岩?
比抵抗イメージではSiltstやsdY-Siltstと同じく暗色に見える。 Siltstにはほとんど見られない葉理が見られることがある。	苦小牧IW-2 	- GR値, Vclay値が低い。 - 比抵抗値はやや低い(イメージでやや暗色)。  比抵抗値 < 2, Vclay値 < 0.2	Sst2	砂岩
明色。	苦小牧CCS-1 	- GR値, Vclay値が低い。 - 比抵抗値が高い(明色)。  比抵抗値 2~4, Vclay値 < 0.2, GR値 < 45	Sst	砂岩 (一部細礫岩)

第 2.2-29 図 ファシス区分の例 (シルト岩~砂岩)

比抵抗イメージにおける特徴	比抵抗イメージの例	ファシス区分	推定される岩相
含暗色角礫 背景は明色	苦小牧OB-2 2m 	Cgl	含泥岩偽礫 砂岩/礫岩
含暗色円礫 背景は明色	苦小牧IW-2 2m 	Cgl 3	含泥岩偽礫? 砂岩/礫岩 (礫は泥岩偽礫か 炭質物の可能性も有?)
含明・暗色円礫(小) 背景は明色	苦小牧IW-2 2m 	Cgl 2	礫岩(礫小/偽礫? 径数cm~数10cm) (暗色の礫は泥岩偽礫か 炭質物の可能性も有?)
含明色円礫 背景は明色	苦小牧OB-2 2m 	Cgl 1	礫岩(礫小 径数cm~数10cm)
含明色円礫(大) 背景は明色	苦小牧IW-2 2m 	Cgl1-2	礫岩(礫大 径数10cm~1m)
含暗色角礫 背景は暗色	苦小牧OB-2 2m 	pbl-Silt	含泥岩偽礫シルト岩 (礫は泥岩偽礫か 一部は炭質物の可能性も有?)
含暗色円礫 背景は暗色	苦小牧OB-2 2m 	pbl-Sltst 3	含泥岩偽礫? シルト岩 (礫は泥岩偽礫か 炭質物の可能性も有?)
含明・暗色円礫(小) 背景は暗色	苦小牧OB-2 2m 	pbl-Sltst 2	含礫シルト岩 (暗色の礫は泥岩偽礫か 炭質物の可能性も有?)
含明色円礫 背景は暗色	苦小牧OB-2 2m 	pbl-Sltst 1	含礫シルト岩 or ノジュール含むシルト岩

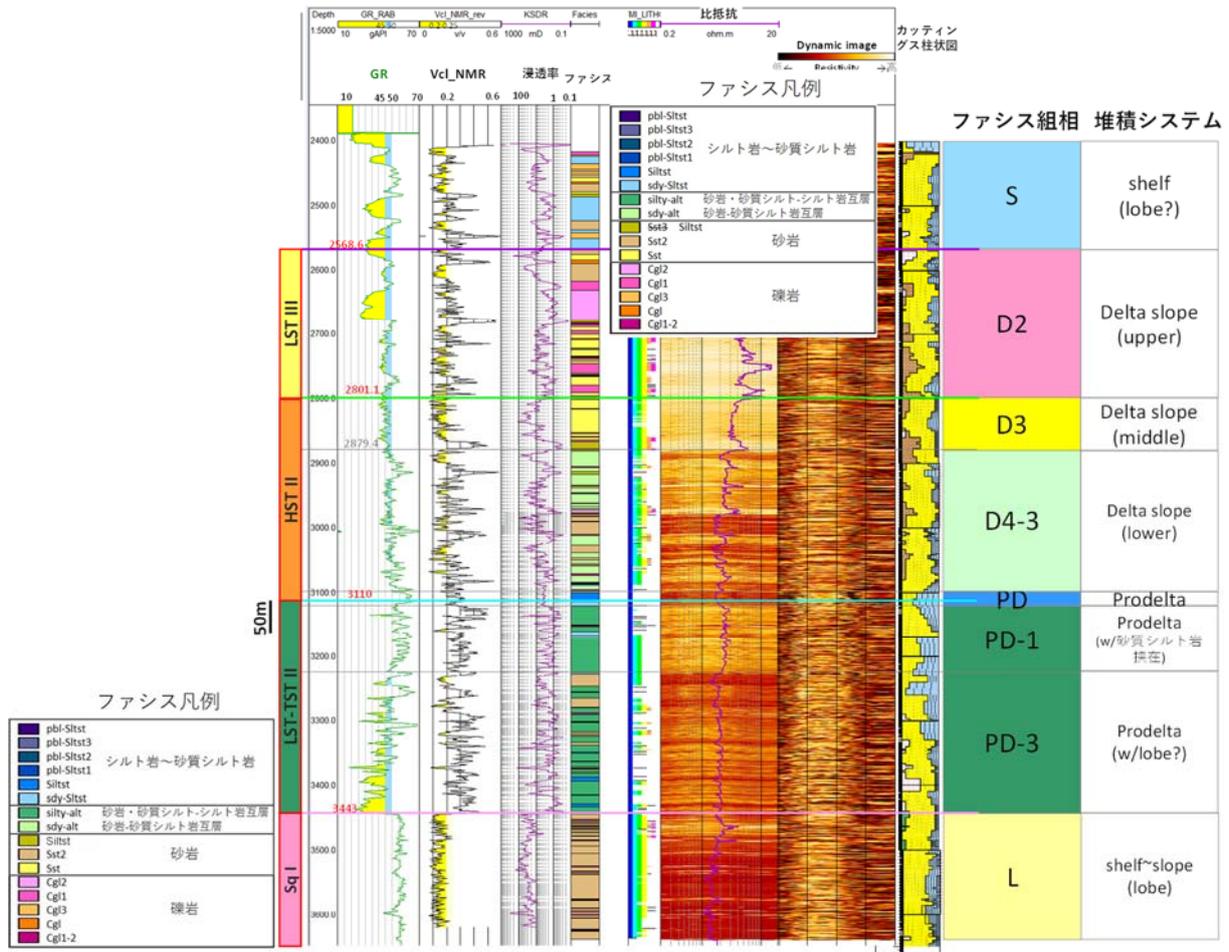
第 2.2-30 図 ファシス区分の例 (礫岩など粗粒な岩相)

区分したファシスの組み合わせから、ファシス組相を認定し、堆積環境を推定した。ファシス区分とファシス組相、推定した堆積環境の関係を第 2.2-31 図に示す。

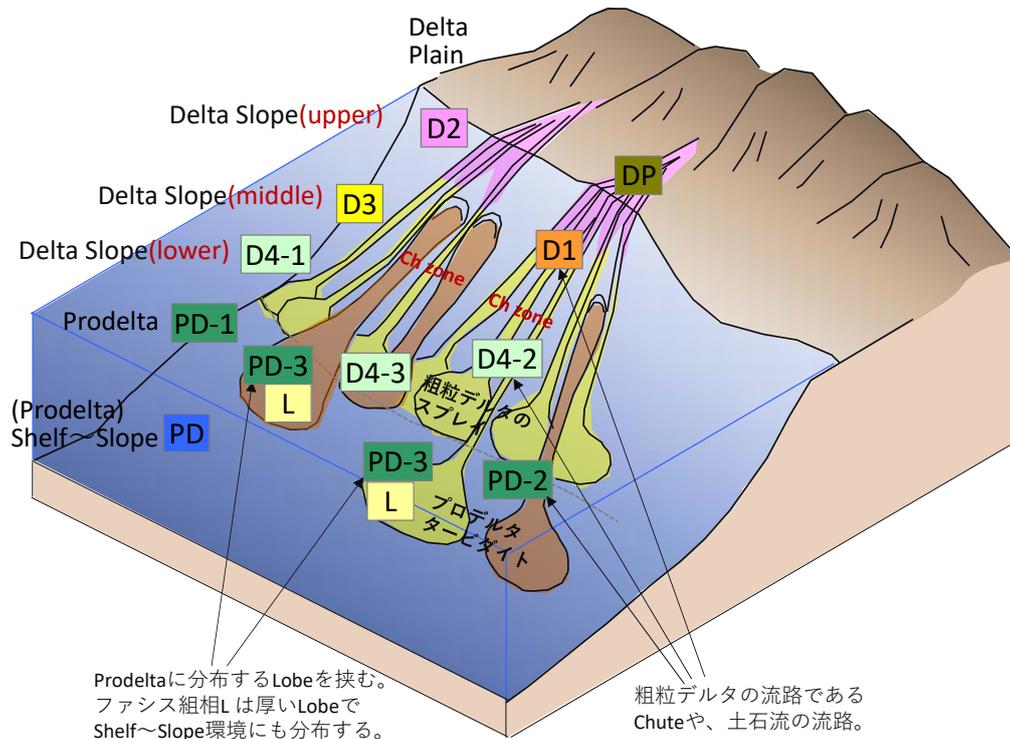


第 2.2-31 図 ファシス区分とファシス組相，推定した堆積環境の関係

また，例として，萌別層圧入井(IW-2)におけるファシス，ファシス組相，堆積環境（システム）の推定結果を第 2.2-32 図に示す。ここで示されるファシス組相，堆積環境（システム）が該当する堆積環境の概念図を第 2.2-33 図に示す。本地域の萌別層で認識されたファシス組相，堆積環境（システム）は，河川～陸棚斜面(Slope)域での堆積を示唆するものであると判断された。



第 2. 2-32 図 坑井におけるファシス区分とファシス組相，推定した堆積環境の関係

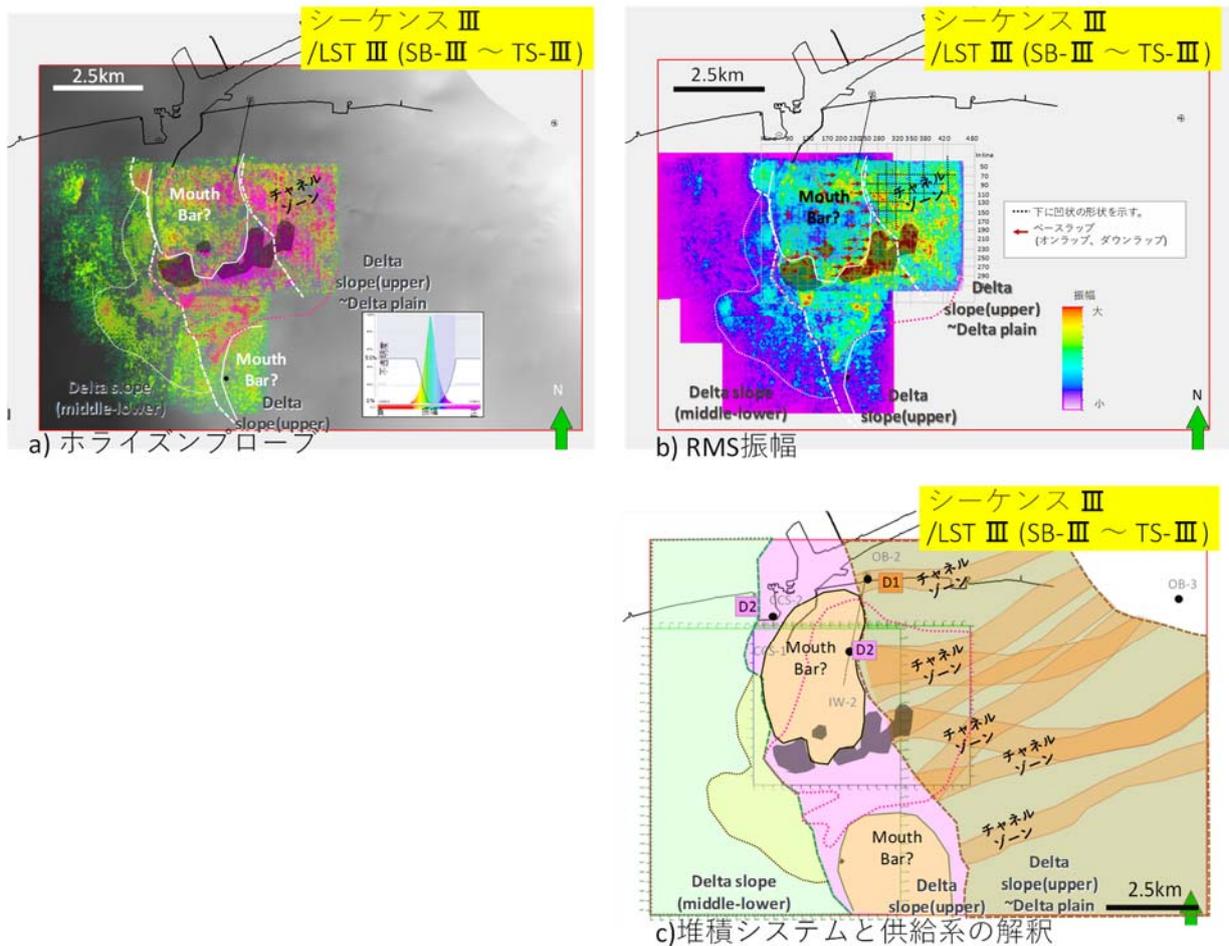


第 2. 2-33 図 推定したファシス組相および堆積環境の概念図

## ii) 弾性波探査データの振幅値を用いた堆積環境の推定

シーケンス層序区分をもとにした層序区間に対し、3D 弾性波探査データを使用し、ホライズンプローブおよび RMS 振幅を用いたマッピングを実施し、堆積体の分布やその形態を把握し、坑井データを元にしたファシス組相や堆積環境の解釈を考慮し、堆積システムと堆積物の供給系を解釈した。後述するように萌別層圧入井からの圧入に際し、最も圧入に寄与する層準は萌別層砂岩層上部のシーケンスⅢである。例として、シーケンスⅢにおけるホライズンプローブと RMS 振幅および解釈により推定した堆積システムと供給系の解釈図を第 2.2-34 図に示す。

ホライズンプローブとは、3D 弾性波探査データにおける二つのホライズン区間の振幅値の大きさによりカラーリングし三次元表示する手法で、堆積体の分布・形態の把握に用いた。既存坑井の音波検層データから、正の振幅値がより高い方が礫岩の存在を、インピーダンスが低い面を示す負の振幅値が低い方が砂岩の存在を示すと推定した。色調・不透明度を調整し、正の振幅値が大きいエリア（礫岩が発達）を紫色系、負の振幅値が大きいエリア（砂岩が発達）を赤色系で示し、正と負の低い振幅値（シルト岩が発達）を透明となるように表示して使用した。RMS 振幅とは、3D 弾性波探査データにおける二つのホライズン区間の振幅値を二乗平均平方根（Root Mean Square : RMS）で表示したもので、正負を問わずに振幅の強弱を表示することができる。ホライズンプローブの表示と同様、振幅値の分布の形態から、堆積体の分布を推定することに使用した。本解析では振幅値の大きさにより暖色系→寒色系で表示した。



第 2.2-34 図 シーケンス III におけるホライズンプローブと RMS 振幅および解釈により推定した堆積システムと供給系の解釈図

### iii) ファシス分布モデルの作成

坑井における堆積環境の推定結果と弾性波探査データの振幅値を用いた解析結果から推定した堆積システムと供給系の解釈図を基準とし、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ファシス組相を地球統計学的手法 (Sequential Indicator Simulation) により分布させた。さらにファシス組相の分布を基準とし、坑井毎に設定したファシス (岩相) をハードデータとして、ファシス (岩相) を地球統計学的手法 (Sequential Indicator Simulation) により分布させ、不均質なファシス分布モデルを作成した。物性値はファシスごとに決定した値を入力した (第 2.2-10 表)。作成した複数のファシス分布モデルを用いてそれぞれについて後述する CO<sub>2</sub> 挙動予測シミュレーションを実施し、推定結果を確率論的に取り扱った。

第 2.2-10 表 それぞれのファシス（岩相）に入力した物性値の例

ファシス名	PHIT	PHIE	Vcl
muddy	0.34	0.25	0.27
sdv-silt	0.28	0.21	0.23
silty-alt	0.29	0.20	0.31
sdv-alt	0.28	0.22	0.20
silt2?	0.27	0.15	0.44
sst2	0.29	0.25	0.15
sst	0.26	0.21	0.18
cgl	0.24	0.19	0.21
cgl3	0.28	0.21	0.25
cgl2	0.24	0.18	0.22
cgl1	0.22	0.18	0.17
cgl1-2	0.23	0.17	0.24

#### ④ CO<sub>2</sub>挙動予測シミュレーション

作成した地質モデルを用いて、圧入実績に即した CO<sub>2</sub>挙動予測シミュレーションを実施し、CO<sub>2</sub>圧入時の圧力挙動のほか、貯留層内での移動・到達範囲を推定した。

#### 7) 滝ノ上層 T1 部層における CO<sub>2</sub>挙動予測（圧入実績を踏まえた予測）

##### a. 概要

既存の地質モデルを修正し、圧入実績を踏まえ、2018年2月および、2018年7月～9月にかけて、累計98トンのCO<sub>2</sub>を滝ノ上層 T1 部層に圧入する CO<sub>2</sub>挙動予測シミュレーションを実施した。

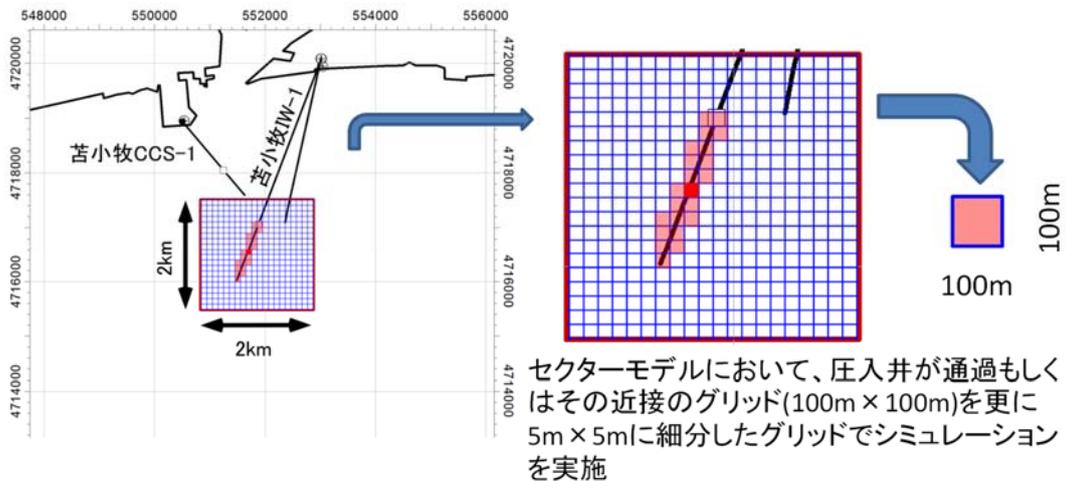
##### b. パラメータ

シミュレーションパラメータは、滝ノ上層圧入井のデータ（圧入テスト、コア分析値、物理検層測定値等）および文献値により、第2.2-11表に示す値を用いた。

滝ノ上層の貯留岩性状が予想以上に低かったため、地質モデルの一部分を切出した2km×2kmのセクターモデルを作成した。さらにより正確なシミュレーションを実施するために、100m×100mのセクターモデルとし、滝ノ上層圧入井が通過するグリッドを5m×5mのグリッドに細分の上、シミュレーションを実施した（第2.2-35図）。

第 2.2-11 表 シミュレーションパラメーター一覧

モデル	滝ノ上層 T1 部層 2018 モデル	
サイズ	8km×12km×4km ⇒ 2km×2km×1km (セクターモデル)	
グリッド	80×120×106 グリッド ⇒ 20×20×62 (セクターモデル)	
アクティブ・ブロック数	24,800 (セクターモデル)	
基準温度	89.2°C (2,386mVD/仕上げ区間上端深度)	
基準圧力	33,600kPa (2,386mVD/仕上げ区間上端深度)	
CO <sub>2</sub> 圧入レート, 圧入期間	実績に基づく	
圧入圧力上限	38,000kPa (PT センサー深度)	
岩石性状	凝灰岩 (貯留層)	泥岩 (遮蔽層)
平均孔隙率	滝ノ上層圧入井 AI 分布から推定	0.19
平均浸透率 : mD	フォールオフ解析の結果等から推定	0.000043
圧縮率 : kPa <sup>-1</sup>	6.79×10 <sup>-7</sup> (測定値)	
塩分濃度 : ppm (NaCl)	35,100 (Cl <sup>-</sup> = 21,300ppm)	
相対浸透率	凝灰岩 (貯留層)	泥岩 (遮蔽層)
気相 相対浸透率 Krg	Bennion (2005) <sup>[1]</sup>	Corey (1954) <sup>[2]</sup>
液相 相対浸透率 Krw		van Genuchten (1980) <sup>[3]</sup>
臨界ガス飽和率 Sgc	0.04 Bennion (2005) <sup>[1]</sup>	0.05
不動水飽和率 Swir	0.558 Bennion (2005) <sup>[1]</sup>	0.8
最大残留ガス飽和率 Sgrmax	0.241 from default value of GEM	—
毛細管圧力曲線	凝灰岩 (貯留層)	泥岩 (遮蔽層)
	Bennion (2006) <sup>[4]</sup> , van Genuchten (1980) <sup>[3]</sup>	測定値



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

第 2.2-35 図 シミュレーションに用いたセクターモデルとグリッド

<sup>[1]</sup> Bennion, B. 2005. Relative permeability characteristics for supercritical CO<sub>2</sub> displacing water in a variety of potential sequestration zones in the Western Canada Sedimentary Basin. paper SPE 95547, pp.7-9, p.12

<sup>[2]</sup> Corey, A.T. 1954. The Interrelation between gas and oil relative permeabilities. Producers Monthly, November, pp.38-41

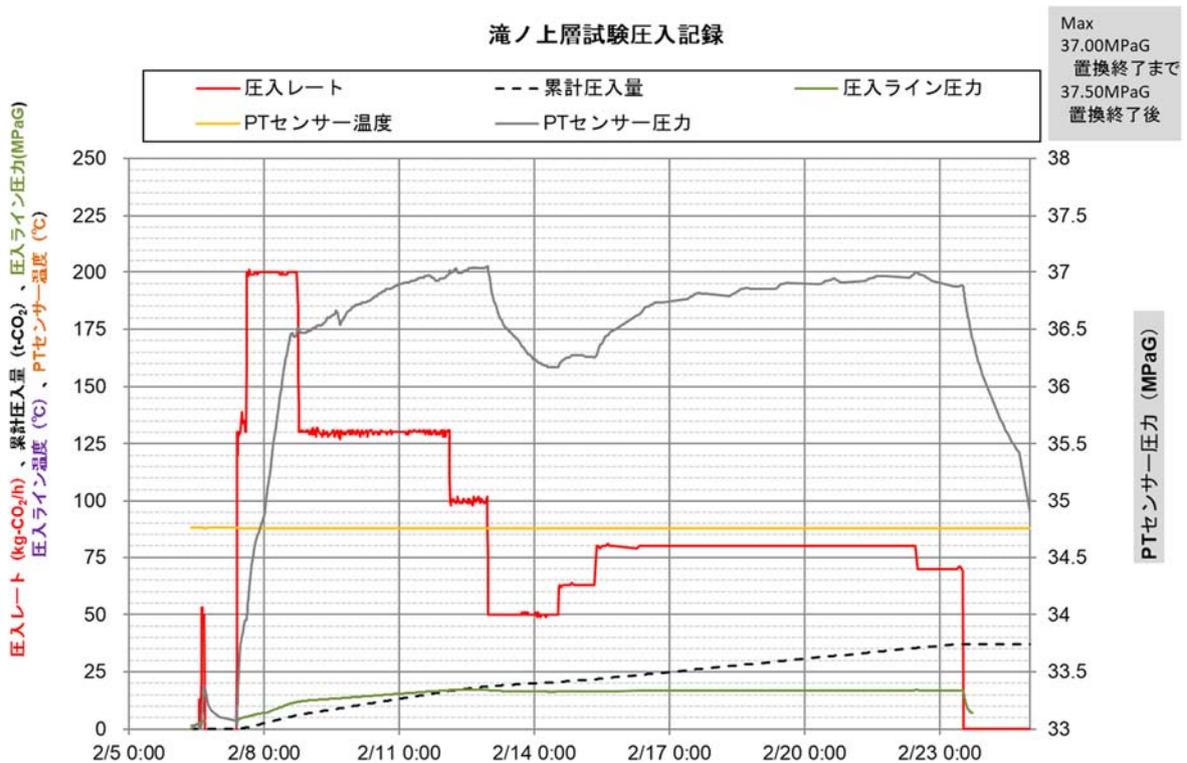
<sup>[3]</sup> van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of undersaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44, pp.892-898

<sup>[4]</sup> Bennion, B. 2006. The impact of interfacial tension and pore-size distribution / capillary pressure character on CO<sub>2</sub> relative permeability at reservoir condition in CO<sub>2</sub>-Brine systems. paper SPE 99325, p.9

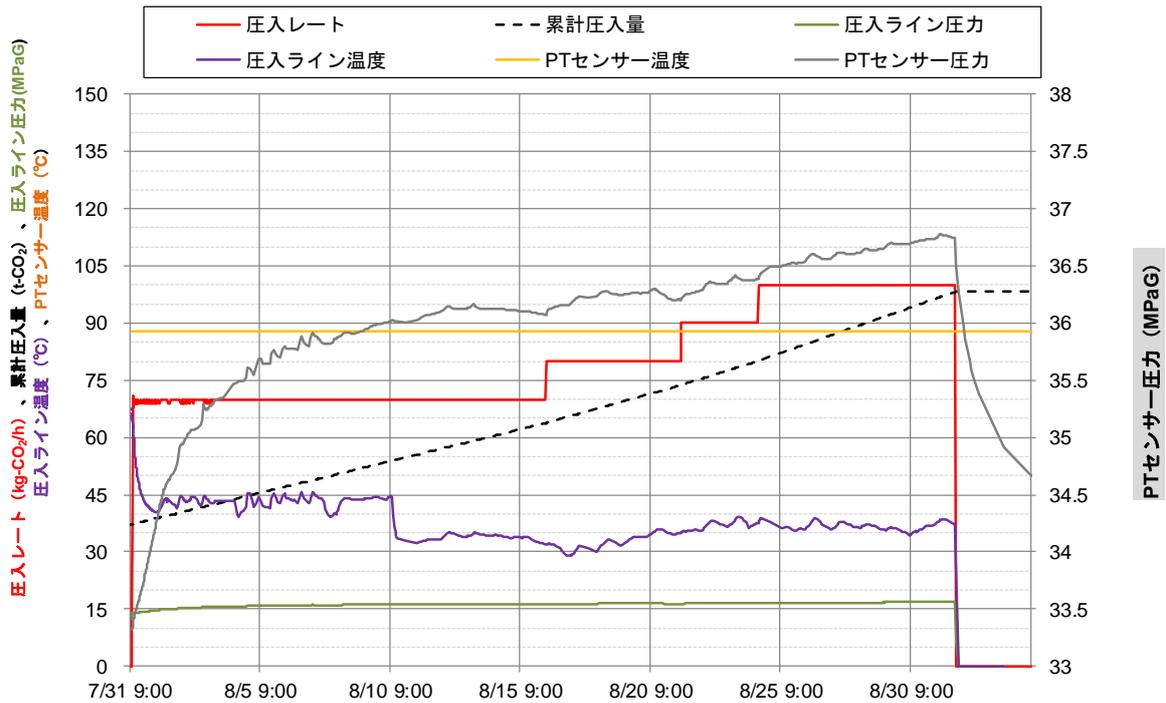
c. 圧入実績

滝ノ上層へのCO<sub>2</sub>圧入は2018年2月6日に開始したが、2月26日に地上設備の不具合により圧入を停止した(第2.2-36図)。問題対応等の後7月31日に圧入を再開したが、PSA オフガス供給元の都合により PSA オフガスの供給が途絶えたため、9月1日に圧入を停止した。9月1日時点での累計圧入量は98t-CO<sub>2</sub>となる(第2.2-37図)。

なお、圧入レートに対する圧入圧力および圧入温度は当初の想定内にあり、生産実績や圧入停止後のデータをもとに更新を行った最新のモデルを適用することにより今後の挙動予測は可能である。



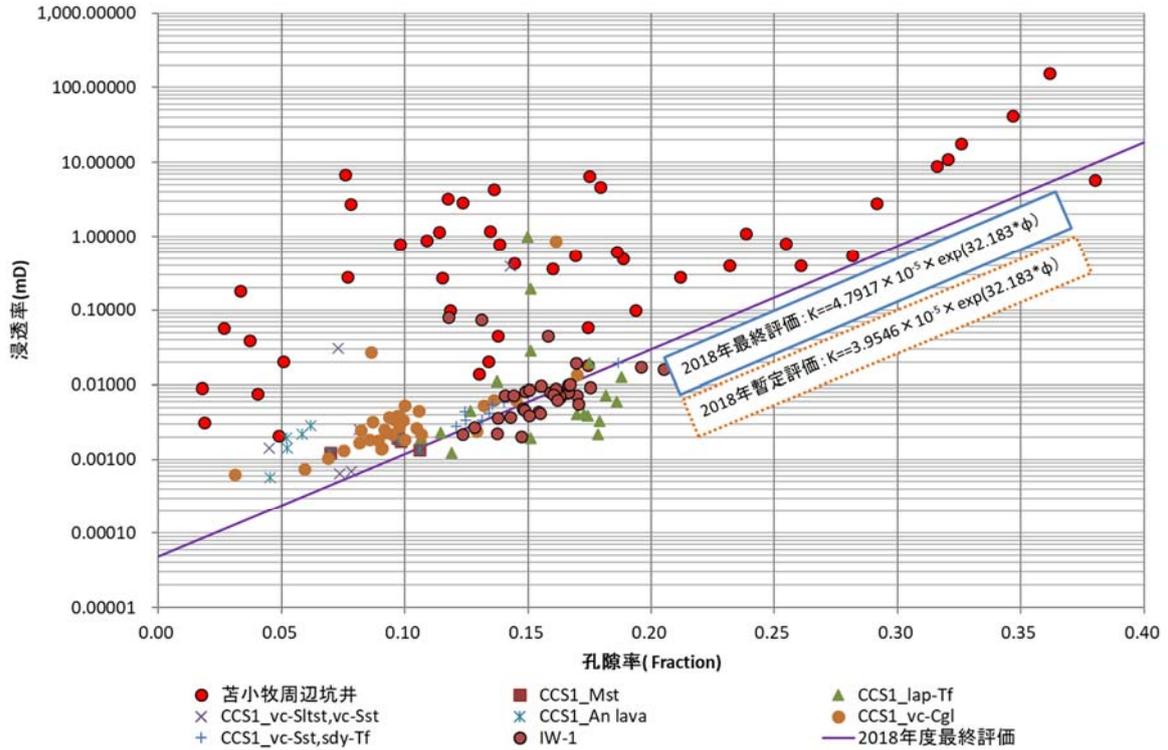
第 2.2-36 図 滝ノ上層試験圧入記録 (2018 年 2 月)



第 2.2-37 図 滝ノ上層試験圧入記録(2018年7月～9月)

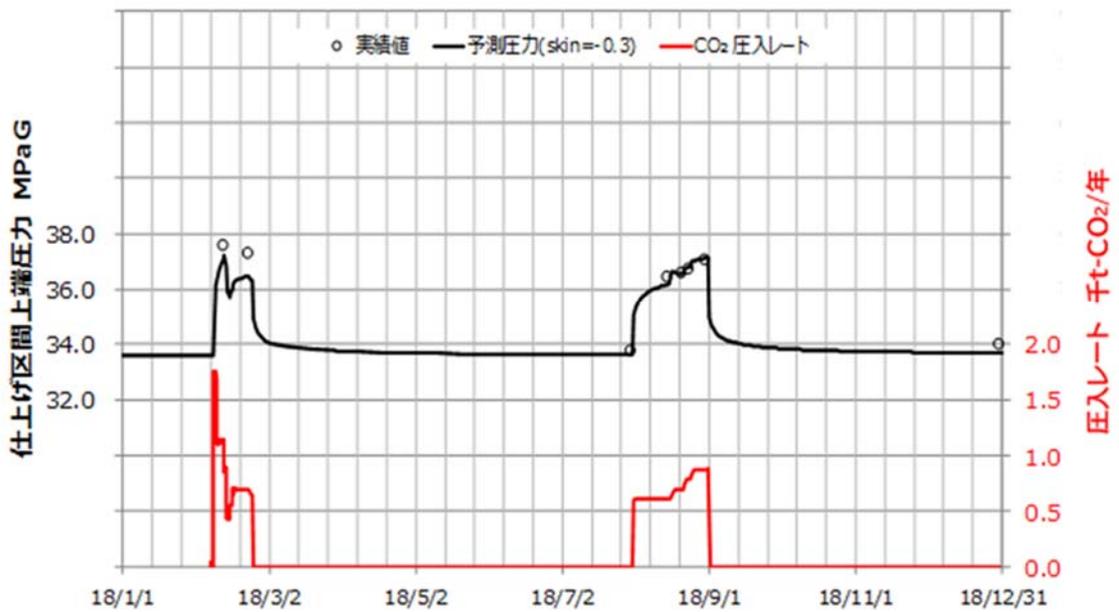
d. CO<sub>2</sub> 圧入時の挙動とパラメータの調整

CO<sub>2</sub> 挙動予測シミュレーションは圧入実績に即した、2018年2月および2018年7月～9月に累計98トンのCO<sub>2</sub>を圧入ものとして実施した。圧入中の仕上げ区間上端の圧力(坑底圧)を反映するように、フォールオフの解析結果をもとに地質モデルの孔隙率と浸透率の相関式を修正し、最終的に浸透率を暫定値の1.2倍程度とした(第2.2-38図)。その結果、モデルで想定される坑底圧力は2018年7月以降の圧入実績とほぼ一致するまで改善した(第2.2-39図)。



注：1. 地質モデルにおける孔隙率と浸透率の関係は、「 $浸透率 = 0.000047917 \times e^{32.182 \times 孔隙率}$ 」を用いた。  
 2. CCS1: 苦小牧 CCS-1 (現苦小牧 OB-1), Mst: 泥岩, lap-Tf: 火山礫凝灰岩, vc-Sltst: 火山岩質シルト岩, vc-Sst: 火山岩質砂岩, An lava: 安山岩質溶岩, vc-Cgl, 火山岩質礫岩, sdy-Tf: 砂質凝灰岩, IW-1: 苦小牧 IW-1

第 2.2-38 図 滝ノ上層 浸透率調整 (2018 年度シミュレーション)



注) シミュレーションによる推定される圧力値と実績値の乖離について目的関数 (Objective function) を用いて検討し, SkinFactor=-0.3 とした。

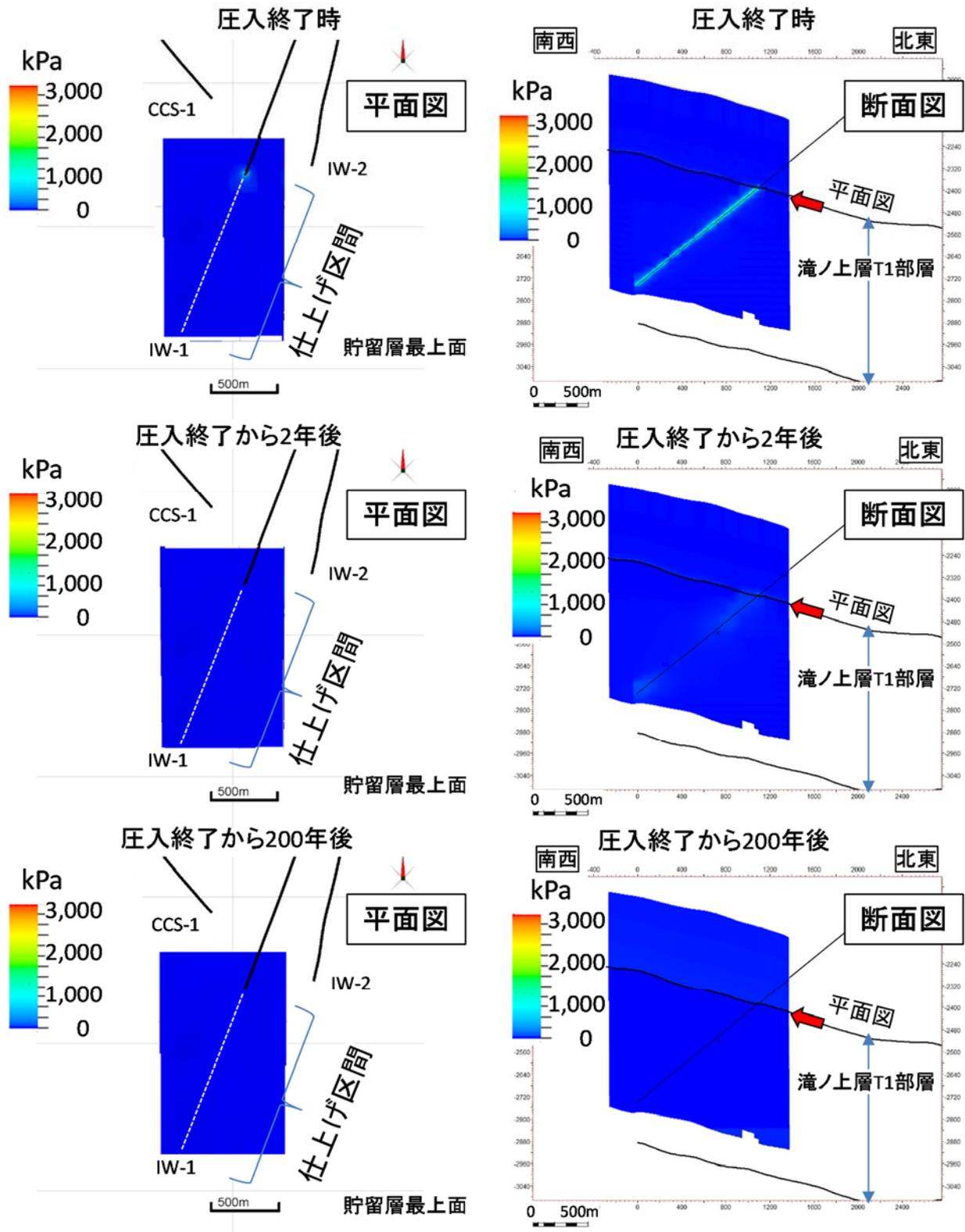
第 2.2-39 図 滝ノ上層 CO<sub>2</sub>挙動予測 (2018 年度シミュレーション)

#### e. 貯留層圧力分布

圧力変化に関するシミュレーション結果を第 2.2-40 図に示す。第 2.2-39 図に示すように、シミュレーションでは圧入圧力が上限圧力付近に達している。そのため、圧入時および圧入終了直後の圧入井の近傍では、初期圧から最大 5MPa 程度の貯留層圧力の上昇が生じている。圧入終了後、速やかに圧力上昇は解消され、圧入終了から 2 年後には、圧力上昇範囲は広がるが、圧力上昇が 1,000kPa (1MPa) を超える箇所は消滅する。圧入終了から 200 年後には圧力上昇範囲がさらに拡大するが、坑井のごく近傍以外は 100kPa に満たない低い圧力上昇となる。

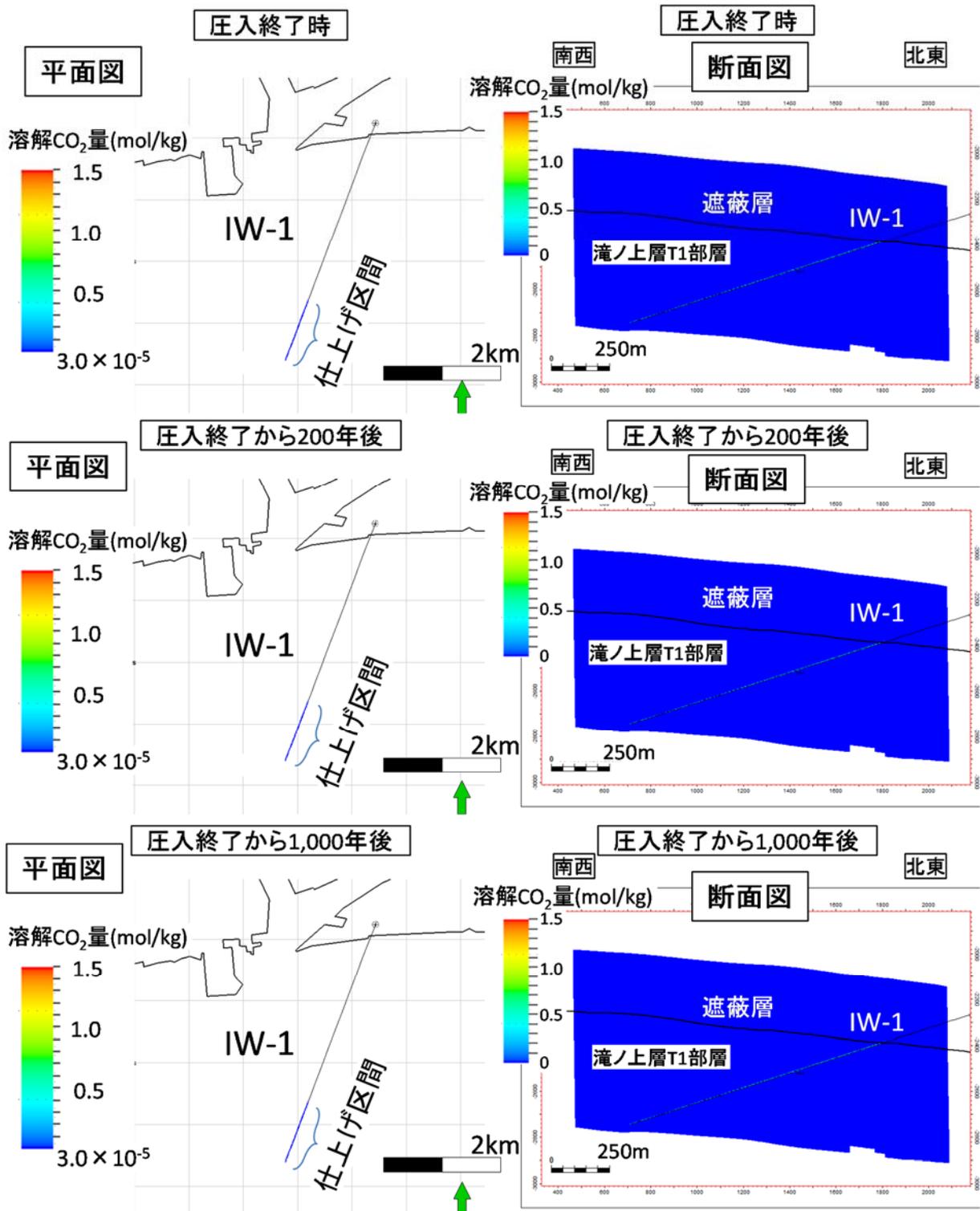
#### f. 圧入に伴う貯留層内の CO<sub>2</sub> 分布予測（貯留 CO<sub>2</sub> の長期挙動予測）

圧入した実績 CO<sub>2</sub> 量が少ないため、CO<sub>2</sub> 飽和度の分布域を示すことができない。溶解 CO<sub>2</sub> 量の分布に対するシミュレーション結果を第 2.2-41 図に示す。



注：1. 左：貯留層上面の平面図，右：坑跡に沿った断面図。  
 2. 上段：圧入終了時，中段：圧入終了から2年後，下段：圧入終了から200年後。  
 3. シミュレーションに使用する地質モデルを，圧入井掘削時に実施した圧力試験の結果と整合させるために，地質モデルのグリッドサイズを細分化した。平面図のグリッドは100m×100mのグリッドであるが，圧入井が通過するグリッドは5m×5m(1/20)としてシミュレーションを実施した（平面図では5m×5mのグリッド表示は省略）。圧入井が通過するグリッドは，垂直方向は約2mに分割した。

第 2.2-40 図 圧力変化の推移

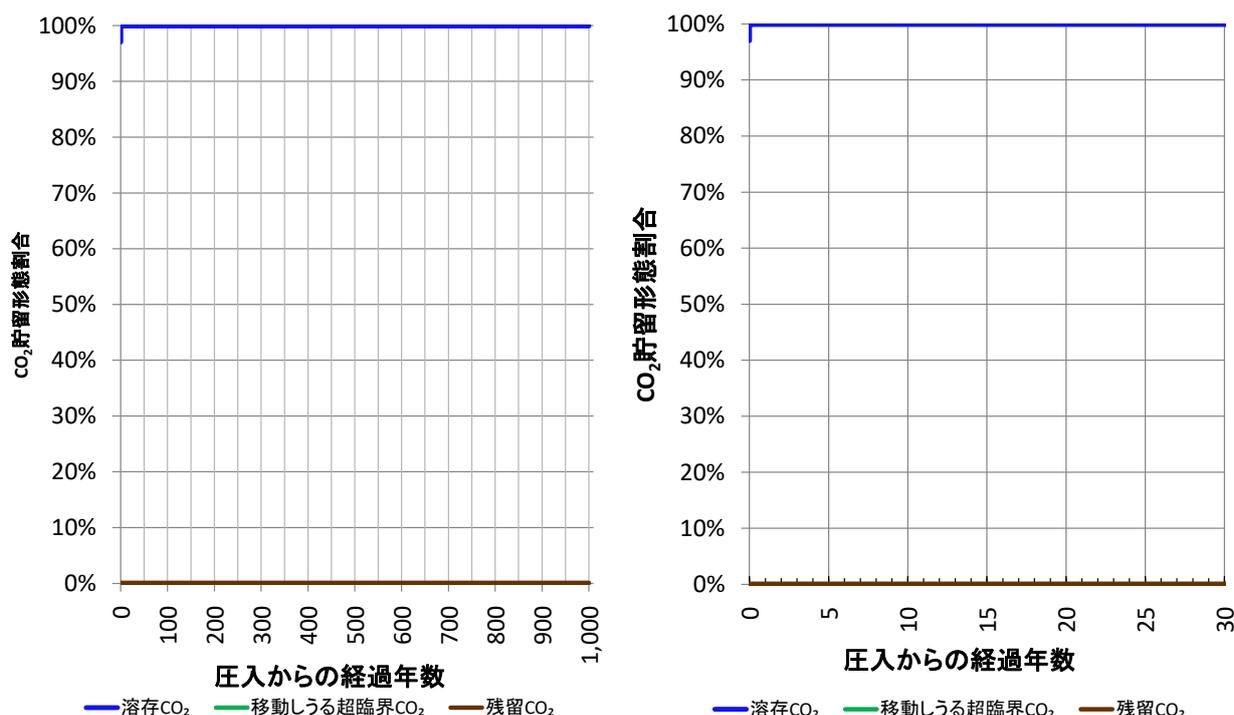


注：1. 左：上方から俯瞰した平面図，右：坑跡に沿った断面図。  
 2. 上段：圧入終了時，中段：圧入終了から200年後，下段：圧入終了から1,000年後。  
 3. シミュレーションに使用する地質モデルを，圧入井掘削時に実施した圧力試験の結果と整合させるために，地質モデルのグリッドサイズを細分化した。平面図のグリッドは100m×100mのグリッド，圧入井が通過するグリッドは5m×5m(1/20)としてシミュレーションを実施した（平面図では5m×5mのグリッド表示は省略）。圧入井が通過するグリッドは，垂直方向は約2mに分割した。

第 2.2-41 図 溶解 CO<sub>2</sub> 量の推移

### g. CO<sub>2</sub>の貯留形態ごとの割合

貯留 CO<sub>2</sub> の 3 つの貯留形態を、Movable（移動する可能性がある気相 CO<sub>2</sub>）、Dissolved（溶解 CO<sub>2</sub>）および Trapped（孔隙等にトラップされ動かない気相 CO<sub>2</sub>）の 3 つに表現し、CO<sub>2</sub> 圧入量に対する割合の経時変化を、第 2.2-42 図に示す。実績圧入量が少なく、圧入した CO<sub>2</sub> の全量が、圧入後即座に地層水に溶解するため、圧入したすべての CO<sub>2</sub> は溶存 CO<sub>2</sub> として貯留層中にトラップされる。



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

第 2.2-42 図 CO<sub>2</sub>の貯留フォーム（割合）の変化

### イ) 萌別層砂岩層における CO<sub>2</sub>挙動予測（2019 年度シミュレーション）

#### a. 概要

シミュレータは GEM を使用した。貯留層の孔隙率や浸透率などの属性値はファシス（岩相）ごとに同一の値を入力した。

また、萌別層砂岩層における坑井の最終坑径を 8.5 インチ（半径 0.10795m）、チュービング径を 3.5 インチ（内半径 0.038m）とした。圧入時に許容される仕上げ区間上端における最大坑底圧力は、苫小牧 IW-2 の掘削時に取得した萌別層泥岩層下部のリークオフ圧力を地層破壊圧と仮定し、その 90%（12.93MPa）とした<sup>[1]</sup>。圧入レートおよび圧入期間については、2016 年 4 月 6 日～2019 年 11 月 22 日までに実績値に基づき、累計圧入量が 300,012 トンとした。シミュレーションは地球統計学的に作成した、複数のファシス（岩相）分布

[1] 圧入上限圧力の詳細は、「特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄に関する実施計画に係る事項」の 5.2(3)①を参照のこと。

モデル(具現像)を用いて複数回実施し、圧入終了時の坑内圧力値を統計的に考慮し、P10、P50、P90 モデルによる結果を考慮した。

## b. パラメータ

シミュレーションパラメータは、苫小牧 CCS-2 および苫小牧 OB-2 および苫小牧 IW-2 で得られたデータ(圧入テスト、コア分析値、物理検層測定値など)および文献値から設定した(第 2.2-12 表)。これらを入力した属性モデルを基本とし、圧入実績と整合するように圧入区間のパラメータを妥当な値に修正(詳細については、e. 圧入実績を考慮したパラメータの調整、に記載)して流動シミュレーションを実施した。

第 2.2-12 表 シミュレーションパラメータ一覧 (2019 年度地質モデル)

モデル	2019 年度地質モデル	
サイズ	15km×10km×1,700m	
グリッド	163×126×173	
アクティブ・ブロック数	708,711	
基準温度	36.2°C@920.41m(TVDSS)	
基準圧力	9,290kPa@920.41m(TVDSS)	
CO <sub>2</sub> 圧入レート, 圧入期間	実績レート	
圧入圧力上限	12,930kPa (仕上げ区間上端深度) 12,600kPa (P/T Sensor 深度)	
深部塩水層容積 (面積×層厚×孔隙率)	2.4×10 <sup>11</sup> m <sup>3</sup>	
岩石性状	砂岩	泥岩
平均孔隙率	ファシス毎	0.299
平均浸透率: mD	ファシス毎	0.0015
圧縮率: kPa <sup>-1</sup>	4.56×10 <sup>-6</sup>	
塩分濃度: ppm (NaCl)	3,150mg/L	
相対浸透率	砂岩	泥岩
気相 相対浸透率 Krg	0.144	Corey (1954) <sup>[1]</sup>
液相 相対浸透率 Krw	1.00	van Genuchten (1980) <sup>[2]</sup>
臨界ガス飽和率 Sgc	0.05	0.05
不動水飽和率 Swir	0.49	0.638
	測定値	Bennion (2007) <sup>[3]</sup>
最大残留ガス飽和率 Sgrmax	0.275	-
	Holtz (2002) <sup>[4]</sup>	
毛細管圧力	砂岩	泥岩
	測定値	van Genuchten (1980) <sup>[2]</sup>
Pc: kPa	4.04	370

## c. 圧入実績

萌別層への圧入は、2016年4月6日に開始し、2019年11月22日に累計圧入量が300,012t-CO<sub>2</sub>に到達し圧入を停止した。萌別層への圧入実績を第 2.2-43 図に示す。この間の最大圧

[1] Corey, A.T. 1954. The Interrelation between gas and oil relative permeabilities. Producers Monthly, November, pp.38-41

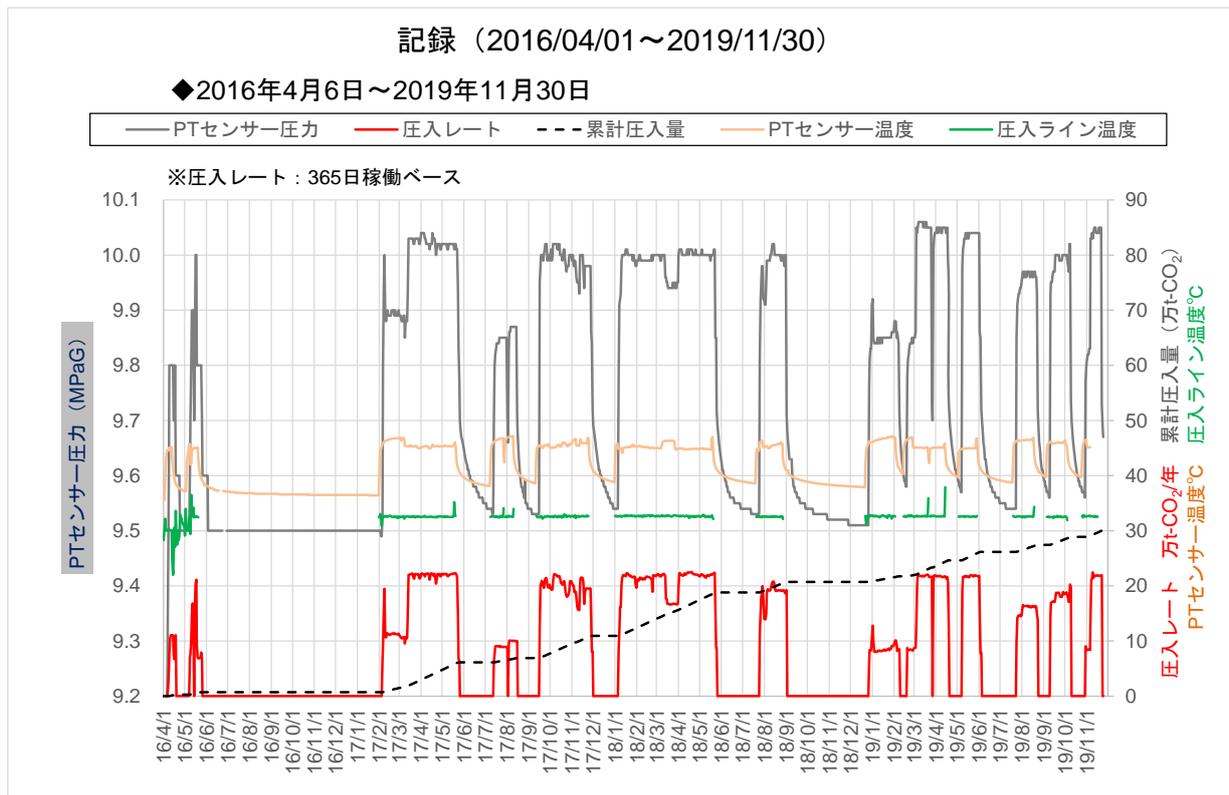
[2] van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of undersaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44, pp.892-898

[3] Bennion, D.B. 2007. Permeability and Relative Permeability Measurements at Reservoir Conditions for CO<sub>2</sub>-Water Systems in Ultra Low Permeability Confining Caprocks. paper SPE 106995-MS, p.5

[4] Holtz, M.H. 2002. Residual Gas Saturation to Aquifer Influx: A Calculation Method for 3-D Computer Reservoir Model Construction. paper SPE 75502, p.7

入レートは約22万トン/年であり、最大坑底圧(圧力・温度センサーP/T Sensor)は10.1MPaGに満たない。P/T Sensor における圧入上限圧力(遮蔽層のリークオフ圧力の90%)の12.63MPaGに対し、十分余裕を持った安全な圧入がなされた。

なお、圧入レートに対する圧入圧力および圧入温度は当初の想定内にあり、生産実績や圧入停止後のデータをもとに更新を行った最新のモデルを適用することにより今後の挙動予測は可能である。



注) 坑底温度・坑底圧力はP/T Sensor の値

第 2.2-43 図 苦小牧 IW-2 による萌別層への圧入実績

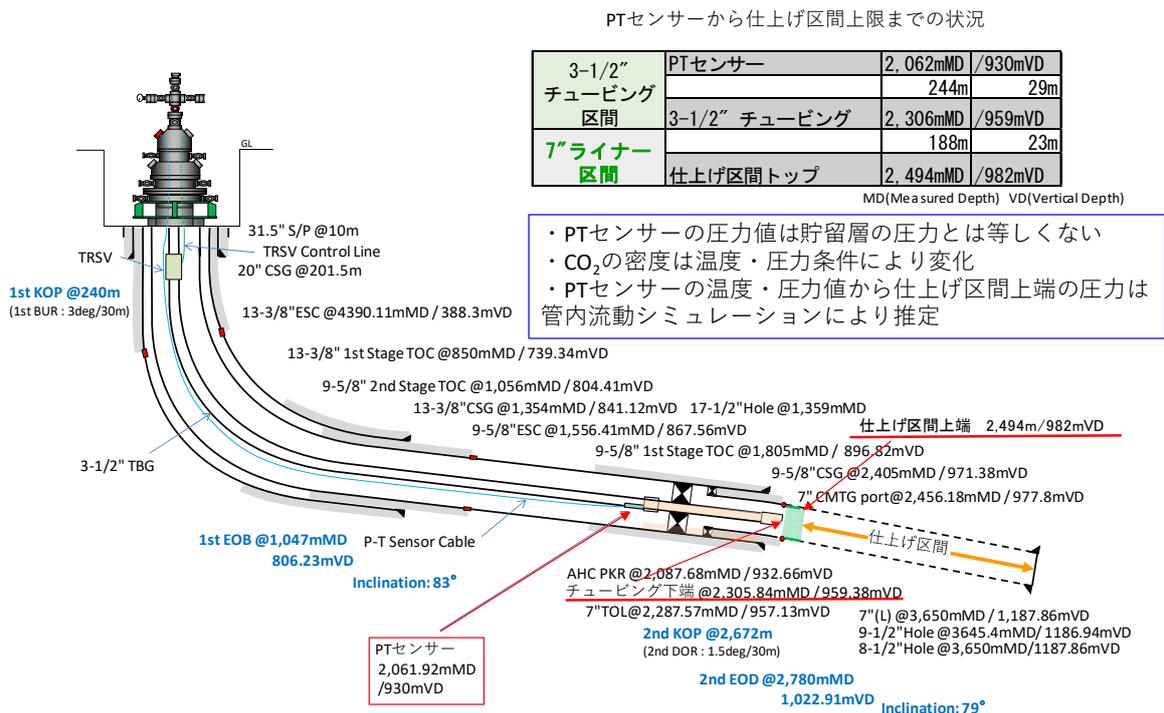
d. 圧入実績から推定される圧入区間

貯留層内の温度圧力を推定するために、圧入井の坑内には圧力・温度センサー (P/T Sensor) を設置している。P/T Sensor から貯留層の仕上げ区間上端までは、チュービングとライナーを介し計432mほど離れている(第2.2-44図)ため、P/T Sensor で計測した温度・圧力値を用いて、管内流動シミュレーションにより貯留層(仕上げ区間上端)に加わる圧力を推定した。なお、シミュレーションによる仕上げ区間上端の圧力推定は、圧入レートを変化させた後、坑内の温度・圧力が安定した時点において実施している。

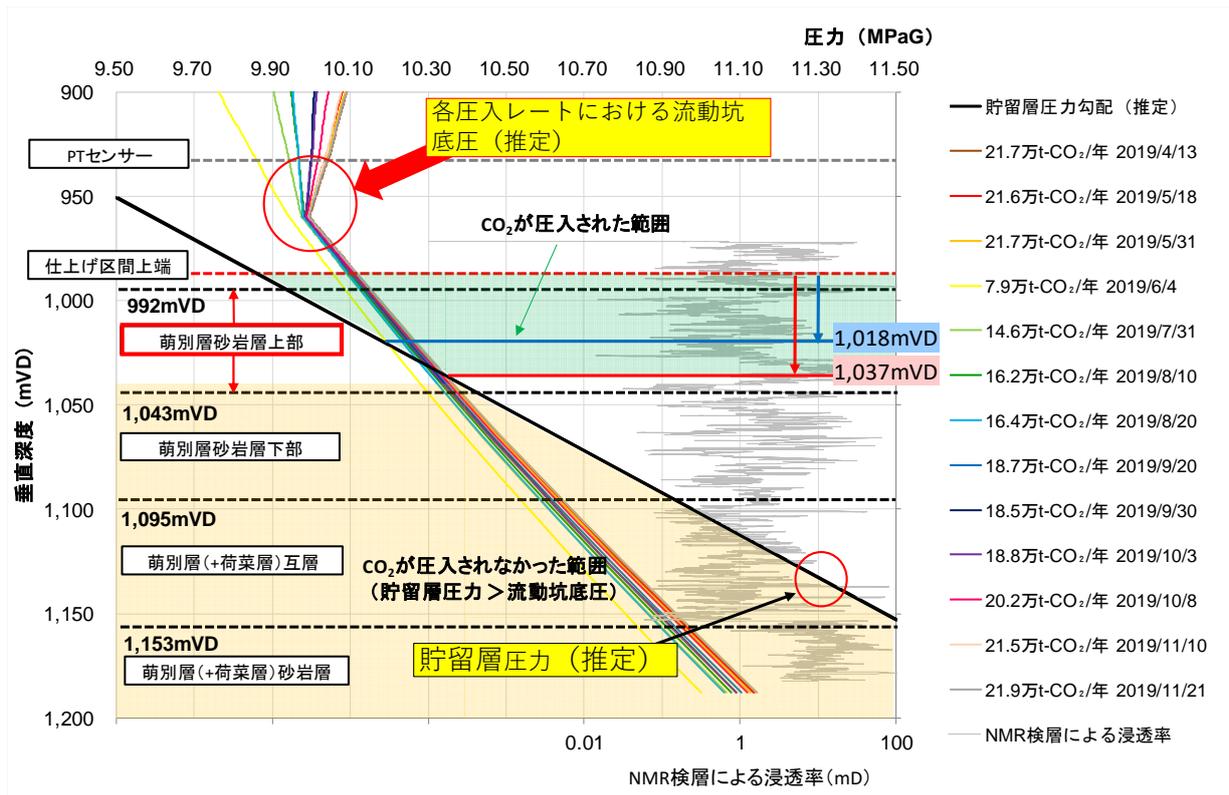
苦小牧 IW-2 は掘削した貯留層区間の全てを孔明管により仕上げているため、仕上げ区間の全てからCO<sub>2</sub>を圧入可能な構造(第2.2-44図)である。

第2.2-45図および第2.2-13表は、貯留層圧力と各圧入レートで推定した圧入中に貯留層に加わる圧力(流動坑底圧)との関係を示している。流動坑底圧が貯留層圧力(第2.2-45図の黒線)を上回る深度区間がCO<sub>2</sub>の圧入される深度区間である。CO<sub>2</sub>が圧入された貯

留層における深度区間は、圧入されていない区間と比較して CO<sub>2</sub> 飽和度が高くなることで流体粘性が低下して圧入性が高まるため、圧入時の流動坑底圧の上昇が抑制され、圧入区間は変化しない。検討した範囲において、圧入に寄与した深度の下端は 2019 年 3 月 15 日 (21.7 万 t-CO<sub>2</sub>/年) が最も深度が深く 1,037mVD までであり、2018 年 5 月 25 日 (8.9 万 t-CO<sub>2</sub>/年) が最も浅く 1,018mVD 付近までであったと推定される。圧入レートを大きく変化させても流動坑底圧の上昇が少ないことから、1,018mVD~1,037mVD 付近が圧入に大きく寄与する層準であると考えられる。この深度区間には NMR 浸透率で高浸透率を示す 2 層準が認められており、この 2 層準が圧入性に大きく寄与しているものと推定される。



第 2.2-44 図 苦小牧 IW-2 仕上げ坑内図



注：1. 貯留層の孔隙は全て密度が 1.02g/cc の地層水で満たされ、圧入中に貯留層圧力は変化しないと仮定。  
 2. 貯留層の浸透性が高いため、貯留層の毛管スレシールド圧力は無視。

第 2. 2-45 図 苫小牧 IW-2 による萌別層への圧入実績から推定される圧入区間

第 2. 2-13 表 CO<sub>2</sub> が圧入された貯留層区間の下端深度

日時	圧入レート (万t-CO <sub>2</sub> /年)	CO <sub>2</sub> の圧入区間下端深度		日時	圧入レート (万t-CO <sub>2</sub> /年)	CO <sub>2</sub> の圧入区間下端深度	
		垂直深度 (mVD)	坑井長 (mMD)			垂直深度 (mVD)	坑井長 (mMD)
17/9/26	21.3	1,033	2,775	19/1/18	8.4	1,019	2,701
10/18	20.2	1,030	2,760	1/31	9.1	1,020	2,701
11/16	21.3	1,028	2,750	2/7	8.5	1,018	2,692
11/27	19.5	1,026	2,740	2/27	8.3	1,017	2,686
11/28	8.2	1,020	2,704	3/15	21.7	1,037	2,798
18/1/16	21.8	1,029	2,756	3/25	21.6	1,036	2,794
1/28	21.8	1,027	2,745	4/13	21.7	1,035	2,789
2/12	21.2	1,027	2,741	5/18	21.6	1,034	2,785
2/21	21.3	1,027	2,743	5/31	21.7	1,034	2,780
3/12	22.1	1,028	2,749	6/4	7.9	1,019	2,699
3/25	16.8	1,025	2,734	7/31	14.6	1,027	2,744
4/11	22.0	1,027	2,745	8/10	16.2	1,029	2,755
4/23	22.1	1,027	2,745	8/20	16.4	1,028	2,747
5/11	21.9	1,027	2,743	9/20	18.7	1,032	2,770
5/22	22.4	1,027	2,742	9/30	18.5	1,031	2,765
5/25	8.9	1,018	2,693	10/3	18.8	1,030	2,762
7/28	17.8	1,031	2,767	10/8	20.2	1,033	2,777
7/30	20.0	1,035	2,788	11/10	21.5	1,035	2,790
8/14	20.7	1,033	2,779	11/21	21.9	1,035	2,789
8/25	19.1	1,032	2,774				

## e. 圧入実績を考慮したパラメータの調整

### i) フォールオフデータの解析

圧入中に上昇した貯留層圧力は圧入を停止すると低下する。低下状況を解析することにより貯留層や坑井の健全性をある程度把握することが可能であり、この解析はフォールオフ解析（以下、「FOT 解析」と称する。）と呼ばれている。圧入井では、坑内に設置した PT センサーにより、常時圧力・温度データを取得しており、この圧力・温度データを用いて貯留層での圧力の変化状況を推定し、FOT 解析を実施した。

なお、得られている坑底圧を使った FOT 解析については CO<sub>2</sub> の圧入停止が「フォールオフテスト」を実施する目的で行われておらず、解析は条件をある程度満たすものを選択して行っていることに加え、流体物性は超臨界 CO<sub>2</sub> で均一と仮定した解析であり、ある程度の誤差を前提としている。

第 2.2-14 表、第 2.2-46 図は 2016 年 4 月 6 日の圧入開始以降の主な圧入停止のタイミングと、FOT 解析を実施したタイミングを示している。圧入停止は計画外の停止ケースが多く、第 2.2-15 表に示すように、圧入停止時に PT センサーにおける温度圧力条件が安定しなかったため、取得したデータが解析に不向きケースも多い。本検討では、解析条件を満たすと判断した、FOT6~12, 14, 17 について解析を実施した。解析に使用した圧力は、Meunier et al. (1987)<sup>[1]</sup>の手法により、以下に示す Normalized Pseudo Pressure を用いた。

$$m(p) = \left(\frac{\mu z}{2p}\right) \int_{p_0}^p \frac{2p dp}{\mu z} \quad \text{式 (2.2-1)}$$

$m(p)$ : Normalized Pseudo Pressure,  $\bar{P}$ : 貯留層平均圧力

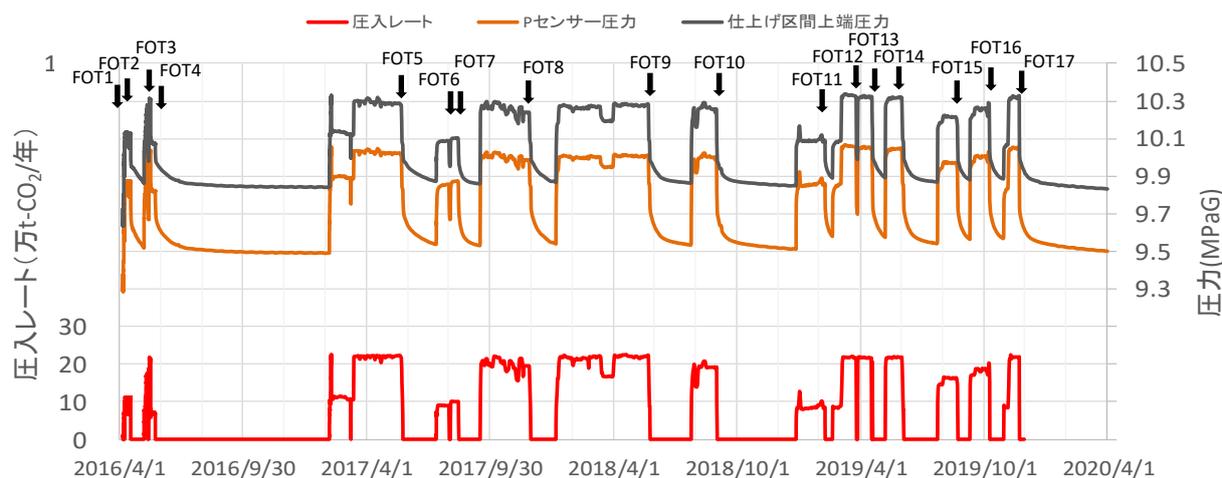
FOT 解析では横軸に時間、縦軸に圧力変化と圧力デリバティブ（圧力変化を微分、以下、「デリバティブカーブ」と称する）を共に対数スケールでプロットし、解析モデルにより貯留層性状を解析解により推定した。各ロガーログプロットには、PT センサーが記録した圧力データを直接解析したカーブ（PT）と、PT センサーの圧力・温度データからセンサー位置での CO<sub>2</sub> 密度を推定し、その密度をもとに PT センサーから離れた位置にあたる仕上げ区間上端における圧力挙動を推定したカーブ（補正）も示した。また、PT センサーの圧力・温度条件から推定される CO<sub>2</sub> の密度の変化も示した。解析には Pradigm 社製の圧力解析ソフト「Interpret」を使用した。第 2.2-47 図にそれぞれのロガーログプロットを示す。

---

<sup>[1]</sup> Meunier, D.F., Kabir, C.S., Wittmann, M.J., “Gas Well Test Analysis: Use of Normalized Pseudovariabes” SPE13082 (1987)

第 2. 2-14 表 FOT 実績

FOT	開始時刻	終了時刻	停止種類	測定時間	密閉前平均圧入レート	累計圧入量
				時間	t-CO <sub>2</sub> /年	t-CO <sub>2</sub>
	2016 年					
FOT1	4 月 8 日 6 時 14 分	4 月 8 日 17 時 1 分	予定外停止	11	58,800	81
FOT2	4 月 17 日 22 時 16 分	5 月 7 日 15 時 15 分	予定外停止	473	109,351	2,558
FOT3	5 月 13 日 1 時 0 分	5 月 14 日 14 時 19 分	予定外停止	37	139,056	4,330
		2017 年				
FOT4	5 月 24 日 9 時 0 分	2 月 5 日 17 時 35 分	計画停止	6,177	71,079	7,163
FOT5	5 月 25 日 9 時 47 分	7 月 13 日 16 時 15 分	計画停止	1,183	64,861	61,239
FOT6	8 月 1 日 10 時 0 分	8 月 3 日 9 時 57 分	計画停止	48	88,474	65,793
FOT7	8 月 15 日 9 時 0 分	9 月 16 日 12 時 0 分	予定外停止	771	100,124	69,070
FOT8	11 月 30 日 9 時 27 分	1 月 6 日 11 時 50 分	計画停止	890	85,159	109,250
	2018 年					
FOT9	5 月 25 日 9 時 20 分	7 月 25 日 11 時 36 分	計画停止	1,466	87,709	188,136
FOT10	9 月 1 日 2 時 25 分	12 月 27 日 13 時 28 分	予定外停止	2,819	189,602	207,209
	2019 年					
FOT11	2 月 8 日 8 時 33 分	2 月 19 日 11 時 18 分	予定外停止	267	83,620	217,425
FOT12	3 月 26 日 10 時 37 分	3 月 28 日 11 時 3 分	予定外停止	48	218,008	233,438
FOT13	4 月 19 日 13 時 31 分	5 月 8 日 11 時 28 分	予定外停止	454	108,463	246,354
FOT14	6 月 4 日 8 時 49 分	7 月 24 日 17 時 10 分	予定外停止	1,208	78,536	261,632
FOT15	8 月 23 日 5 時 19 分	9 月 10 日 11 時 48 分	予定外停止	438	137,885	274,342
FOT16	10 月 9 日 18 時 20 分	10 月 30 日 11 時 8 分	予定外停止	497	80,592	288,874
FOT17	11 月 22 日 11 時 30 分	停止中	計画停止		216,498	300,012

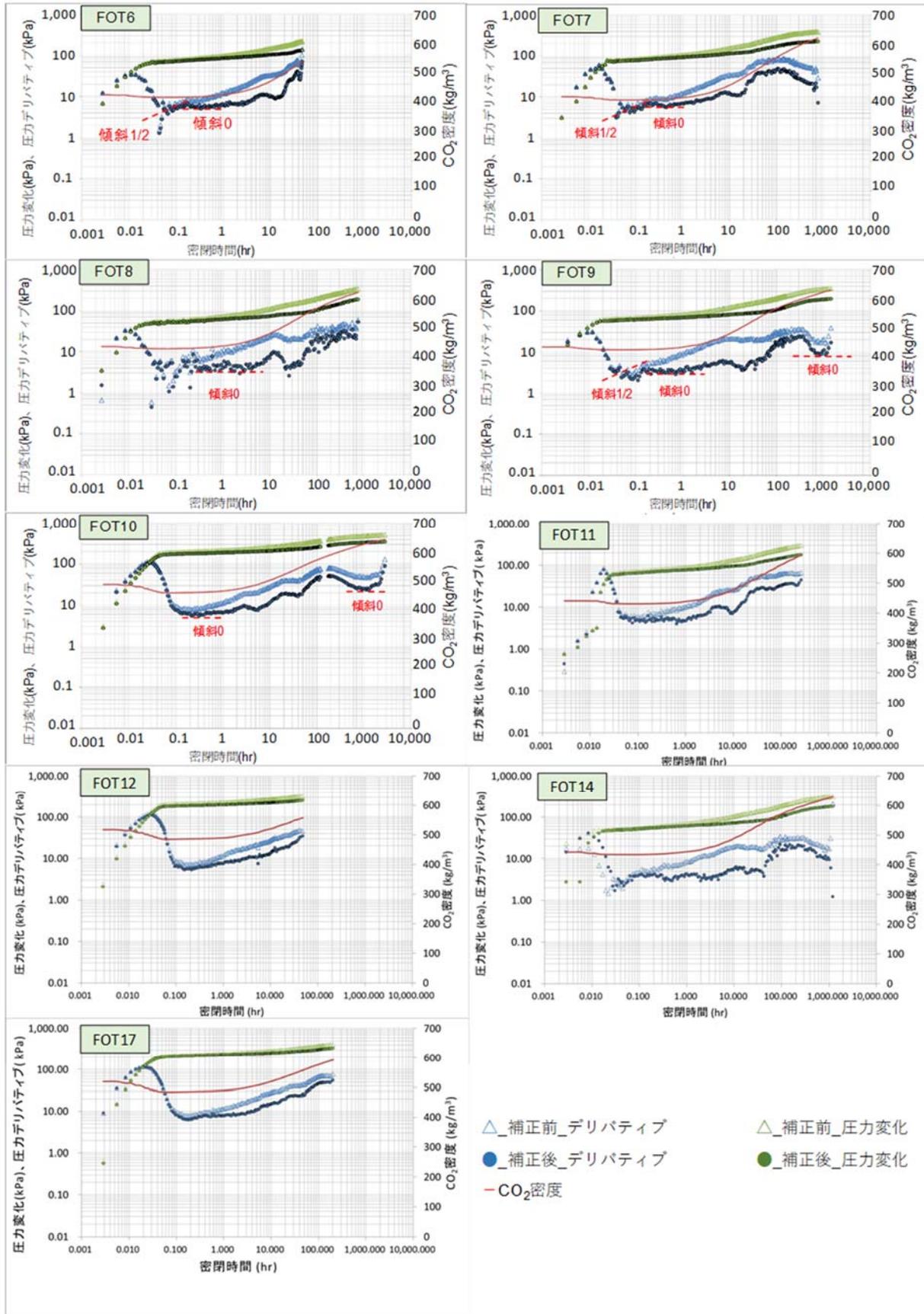


第 2.2-46 図 FOT 解析を実施したタイミング

第 2.2-15 表 FOT 一覧(解析の有無)

FOT	圧入停止方法	CO <sub>2</sub> 領域のラジアルフロー (ERF)	地層水領域のラジアルフロー (LRF)	備考欄
FOT1	×	—	—	徐々にレートを下げて圧入停止
FOT2	○	×	×	ERF 確認不可
FOT3	×	—	—	徐々にレートを下げて圧入停止
FOT4	○	×	×	ERF 確認不可
FOT5	×	—	—	徐々にレートを下げて圧入停止
<b>FOT6</b>	○	○	×	FOT 時間が短く LRF 確認不可
<b>FOT7</b>	○	○	×	FOT 時間が短く LRF 確認不可
<b>FOT8</b>	○	○	×	FOT 時間が短く LRF 確認不可
<b>FOT9</b>	○	○	○	
<b>FOT10</b>	○	○	○	
<b>FOT11</b>	○	○	×	FOT 時間が短く LRF 確認不可
<b>FOT12</b>	○	○	×	FOT 時間が短く LRF 確認不可
FOT13	×	—	—	直前でレートダウンした後に圧入停止
<b>FOT14</b>	○	○	○	FOT 時間が短く LRF 確認不可
FOT15	×	—	—	圧入停止前に何度かレート変更した後に圧入停止
FOT16	×	—	—	徐々にレートを下げて圧入停止
<b>FOT17</b>	○	○	確認中	

注) 圧入停止方法: 圧入停止直前に 2 日程度以上の定レートで圧入後に停止したケースは○, 圧入レートが安定しないまま停止した場合は×。CO<sub>2</sub>領域のラジアルフロー, 地層水領域のラジアルフロー: ログ-ログプロットの圧力デリバティブカーブから認識されたケースは○, 認識できなかったケースは×。青色は解析を実施。



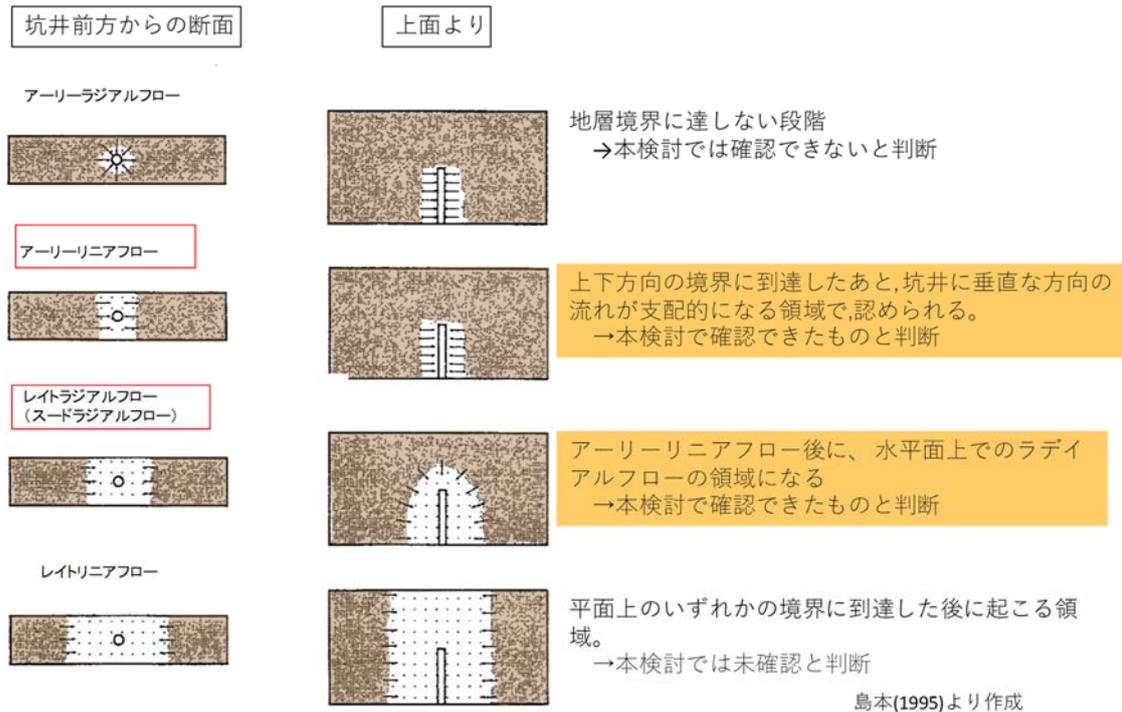
第 2.2-47 図 FOT のログ-ログプロット (FOT6~10, 11, 12, 14, 17)

参考のため、第 2.2-48 図はガスの生産井（水平井）において生産を中断した直後に想定される圧力挙動を示す。IW-2 は最大傾斜  $83^{\circ}$  の高傾斜井であるため、水平井における圧力挙動と類似した挙動が認識されるものと仮定した。

アーリーリニアフロー（以下、「ELF」と称する。）は圧入井からの流れが上下の地層境界などに到達し、坑井に垂直な方向に線形で広がる流れであり、デリバティブカーブの傾斜が  $1/2$  となる。本年度以前の検討では、アーリータイムの領域において認められたデリバティブカーブの  $1/2$  傾斜を ELF とみなして、ELF 解析を実施し、坑井近傍の浸透率および  $\text{CO}_2$  飽和率を推定していたが、圧入停止条件などが適切であっても ELF が認識できないケースがあることから、本検討では、昨年度以前の検討での ELF の認識が誤りで有る可能性を考慮し、ELF 解析は実施していない。

アーリーラジアルフローは地層境界に達しない段階で認識される挙動で、本検討では認識できていないと考えている。

レイトラジアルフロー（スードラジアルフロー）は坑井と水平な面に放射状に広がる流れであり、デリバティブカーブの傾斜は  $0$  となる。本検討では、圧入停止後  $0.3$  時間程度以降に認識されたデリバティブカーブの傾斜が  $0$  となる挙動をレイトラジアルフローの挙動と考え、ショックフロントの挙動（デリバティブカーブで上方向に凸の形状）が認められる以前のラジアルフローの挙動を  $\text{CO}_2$  領域のラジアルフロー、それ以降のラジアルフローを地層水領域のラジアルフローと見なして解析した。



注) 島本(1995) [1]より作成. ログ-ログプロットにおいて, アーリーリニアフローは 1/2 傾斜のデリバティブカーブとして認識され, レイトラジアルフロー (スードラジアルフロー) は 0 傾斜のデリバティブカーブとして認識される。

## 第 2. 2-48 図 水平井で予想される圧力挙動

### 1) CO<sub>2</sub> 領域のラジアルフロー解析

解析対象とした各 FOT におけるデリバティブの傾斜 0 を, CO<sub>2</sub> 領域のラジアルフローと仮定して解析した。圧力解析ソフト「Interpret」にて, 貯留層性状が均質で, 半無限円(ある境界での圧力が初期から変わらない)を想定した物理モデル (Homogenous, Infinite Lateral) を使用した。解析に際しては, 貯留層性状が均質かつ無限に広がるものと仮定した。解析に用いた入力値と解析結果を第 2. 2-16 表に, マッチング状況を第 2. 2-49 図に示す。

[1] 島本辰夫:水平坑井の圧力解析と生産予測,石油技術協会誌 60(6), 462-473(1995)