

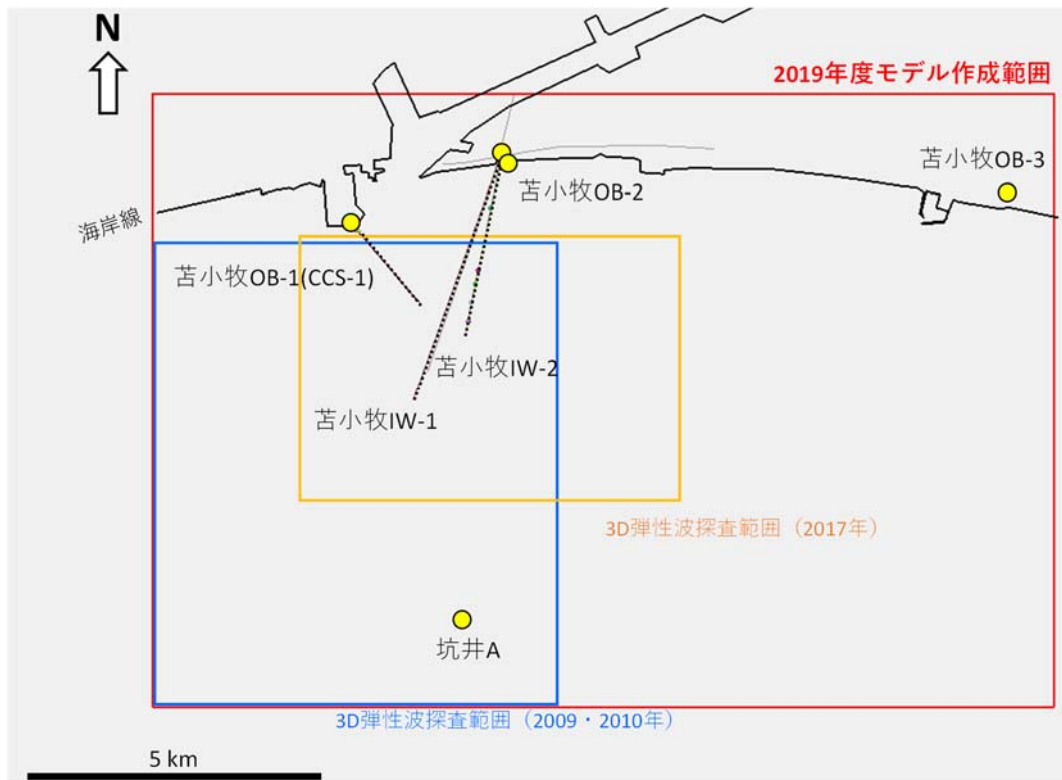
(2) 萌別層砂岩層における特定二酸化炭素ガスが広がる範囲

① 検討に使用したモデル

7) 2019年度地質モデルの作成

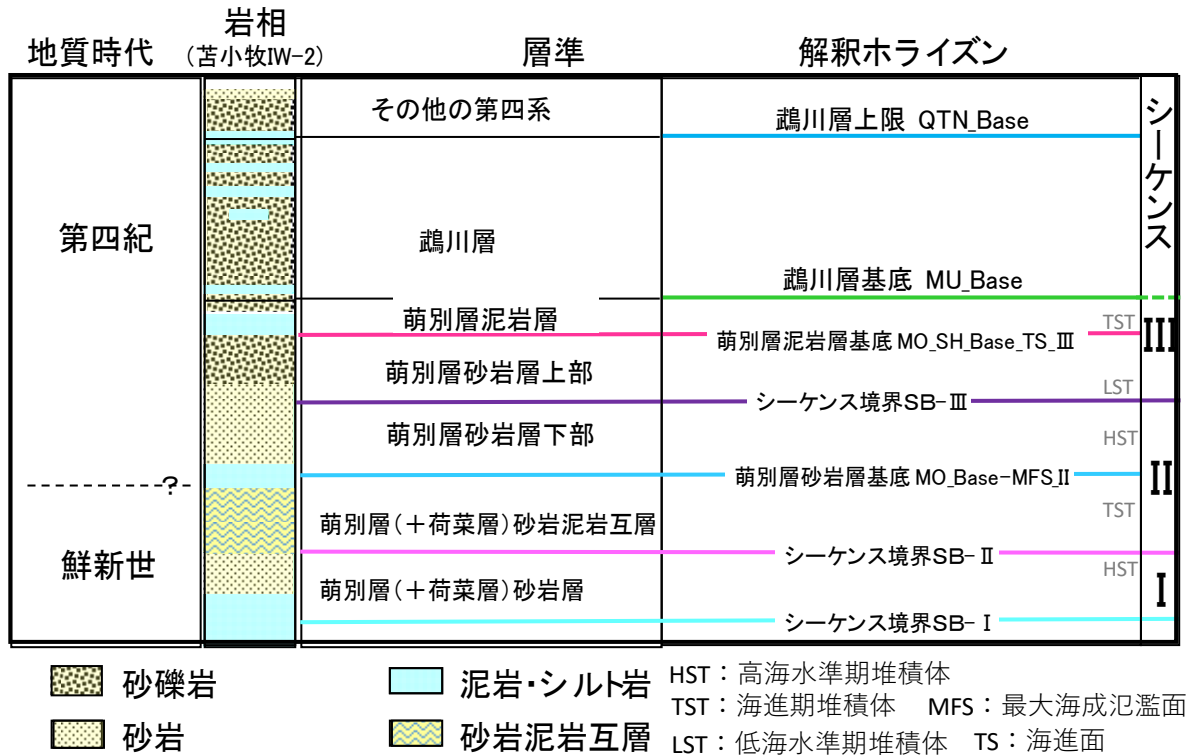
a. 岩相分布・性状分布の推定

第 4.5-16 図に示す，坑井のデータ（圧入井，観測井，民間井）と 3D 弾性波探査データおよび，民間会社所有の 2D 弾性波探査データを用いて 2019 年度地質モデルを作成した。



第 4.5-16 図 2019 年度 地質モデル作成範囲

三次元弾性波探査データを加味し，坑井データを用いたシーケンス層序学的検討により，萌別層砂岩層（貯留層）～萌別層泥岩層（遮蔽層）をシーケンスⅠ～Ⅲの3つのシーケンスに区分した（第 4.5-17 図）。シーケンスⅠは苦小牧 IW-2 の掘り止め深度付近で確認したシーケンスで，砂岩層を含み苦小牧 IW-2 では下限を確認していない。この砂岩層を萌別層（+荷菜層）砂岩層と称する。シーケンスⅡの海進期堆積体を萌別層（+荷菜層）砂岩泥岩互層と，高海水準期堆積体を萌別層砂岩層下部と称するシーケンスⅢの低海水準期堆積体を萌別層砂岩層上部と，海進期堆積体を萌別層泥岩層と称している。

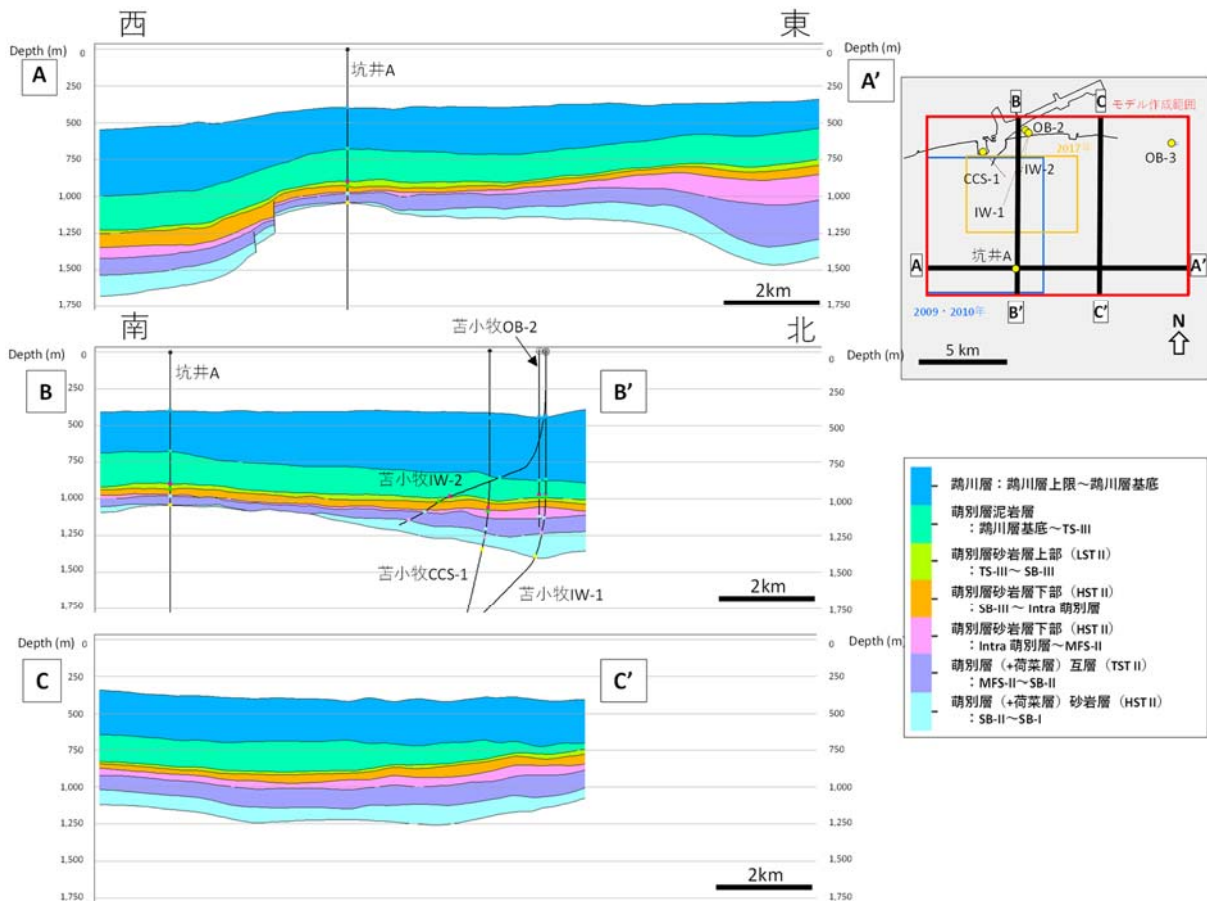


第 4.5-17 図 萌別層の層序区分と解釈ホライズン

b. 構造モデルの作成

地質モデルを作成するため、三次元弾性波探査データおよび二次元弾性波探査データの解釈により作成した各層準の時間構造図を深度構造図へ変換した。

構造モデル構築には、第 4.5-17 図に示す地質構造解釈で作成した解釈ホライズンを用いた。深度変換された萌別層(+荷葉層)砂岩層～鵜川層のモデル断面を第 4.5-18 図に示す。

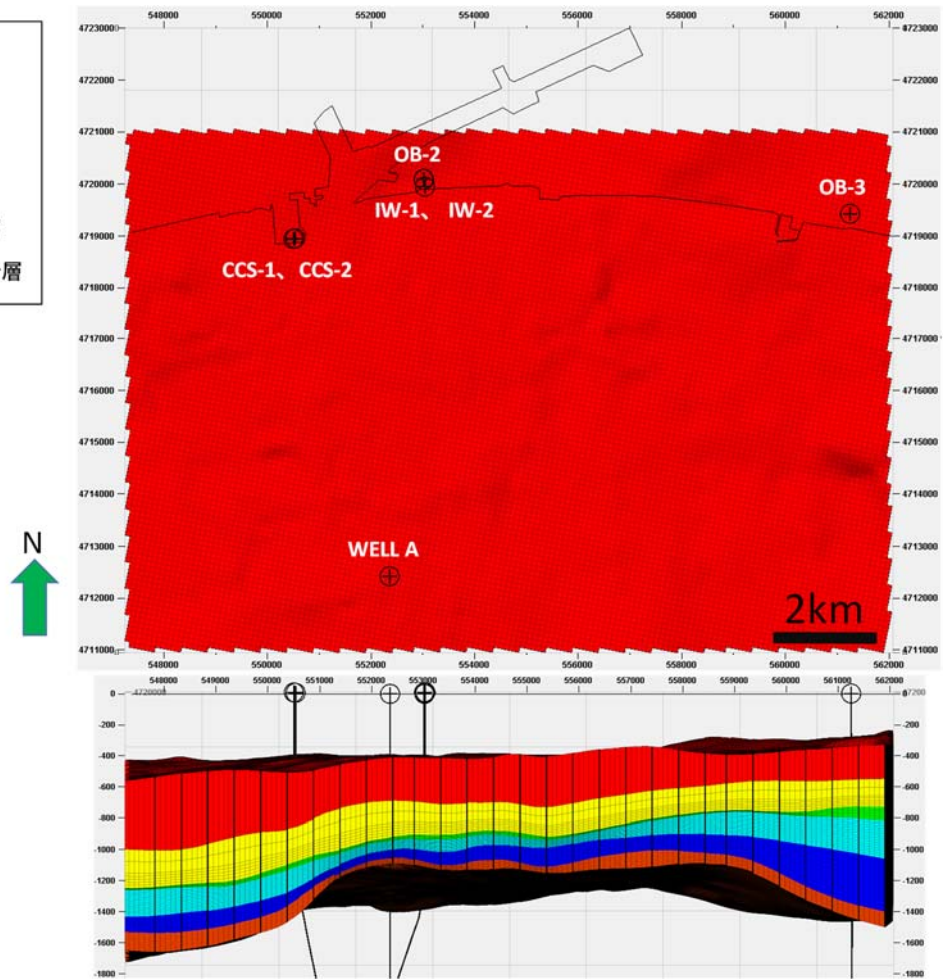
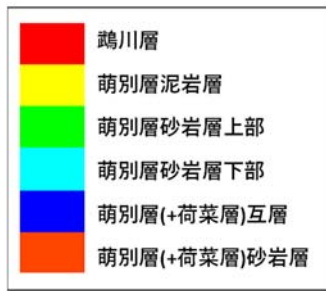


第 4.5-18 図 モデル断面

各層準内に第 4.5-5 表のようにグリッドセルを作成した。第 4.5-19 図に、グリッドセルの外観図を示す。

第 4.5-5 表 萌別層構造モデルのグリidding

層序区分 (Zone)	Zone 区間 Zone 区間 (解析ホライズン名)	垂直方向 レイヤー数	水平方向	垂直方向 セル番号
鶺川層 (Mukawa)	QTN_Base ~MU Base	1	100m × 100m	1
萌別層泥岩層 (Mo_SH_TST)	MU Base ~MO_SH_Base_TS_III	7		2~8
萌別層砂岩層上部 (Mo_Sst_up_LST)	MO_SH_Base_TS_III ~SB-III	6		9~14
萌別層砂岩層下部 (Mo_Sst_low_HST)	SB-III ~MO_Base-MFS-II	15		15~29
萌別層(+荷葉層)互層 (Ni_Alt_TS)	MO_Base-MFS-II ~SB-II	10		30~39
萌別層(+荷葉層)砂岩層 (Ni_Sst_HST)	SB-II ~SB-I	10		40~49



第 4.5-19 図 グリッドセルの外観図

c. 属性モデルの作成

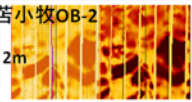
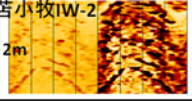
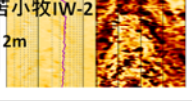
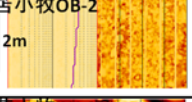


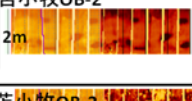


萌別層（+荷葉層）砂岩層～萌別層砂岩層の分布を推定するために、CCS-1、IW-2、OB-2、OB-3 の 4 坑井のデータおよび 3D 弾性波探査データ、2D 弾性波探査データを用いて堆積相解析を実施し、堆積環境について推定した。

i) 坑井データを用いた堆積環境の推定

シーケンス層序区分（第 4.5-17 図）基準として、坑井毎にカッティングス・コアのデータや検層データから岩相を区分した（第 4.5-20 図，第 4.5-21 図）。なお、岩相の区分には主に検層ログを使用したため、ここではファシス区分と称している。

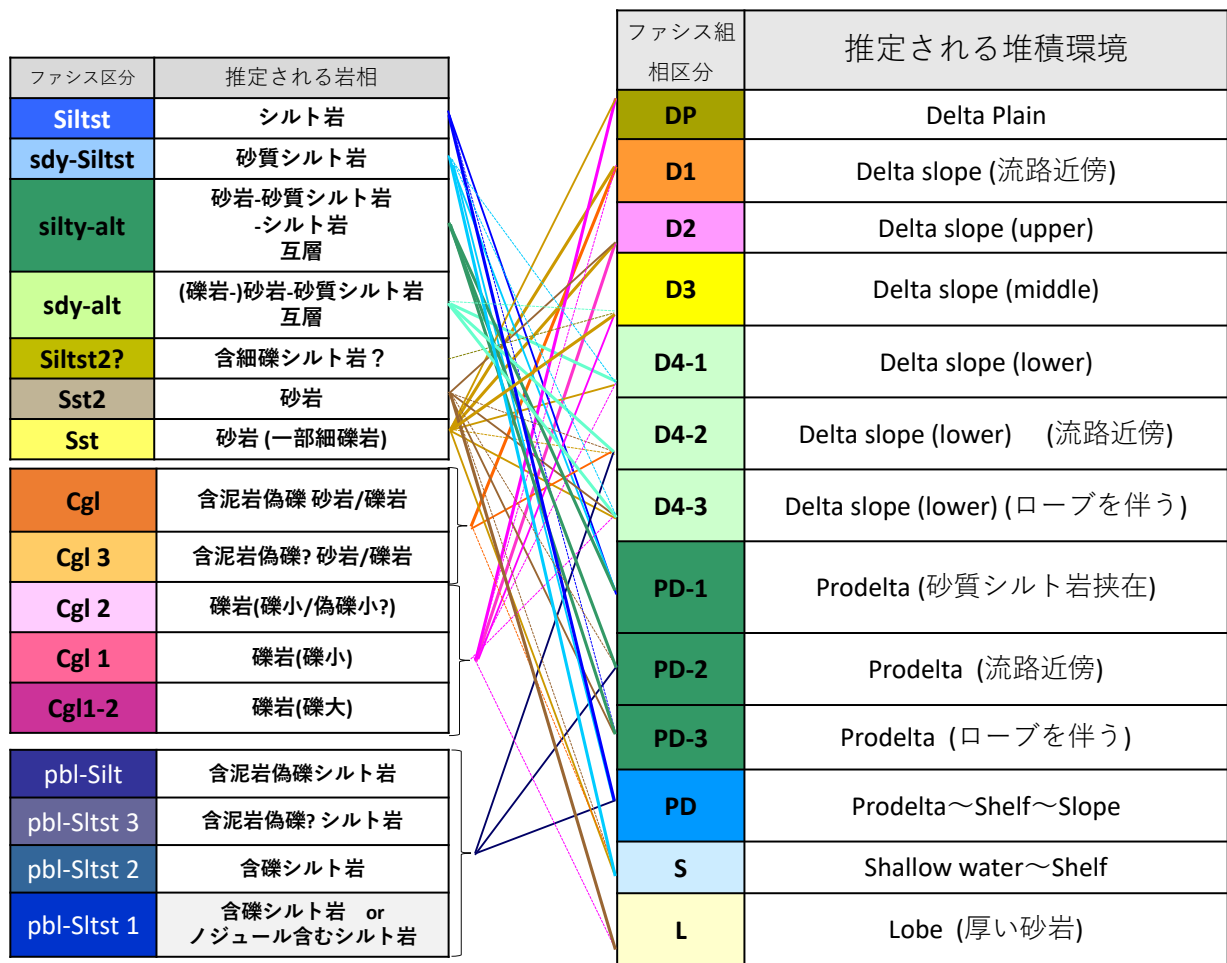
比抵抗イメージにおける特徴	比抵抗イメージの例	検層データにおける特徴	ファシス区分	推定される岩相
暗色。 (生痕や炭質物が明暗の点で見えることもある。)	苦小牧CCS-1 	- GR値, Vclay値が高い。 - 比抵抗値が低い(イメージで暗色)。 比抵抗値<2, Vclay値>0.25, GR値 55~70	Siltst	シルト岩
やや暗色。 (コントラストの弱い互層状か混沌とした様相を示す。)	苦小牧CCS-1 	- GR値, Vclay値が高い傾向。 - 比抵抗値がやや低い(イメージでやや暗色)。 比抵抗値 1~2, Vclay値 0.2~0.25, GR値 35~50	sdY-Siltst	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 4.5-20 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 	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 	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 	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 	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 	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 	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 	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 	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 	pbl-Sltst 1	含礫シルト岩 or ノジュール含むシルト岩

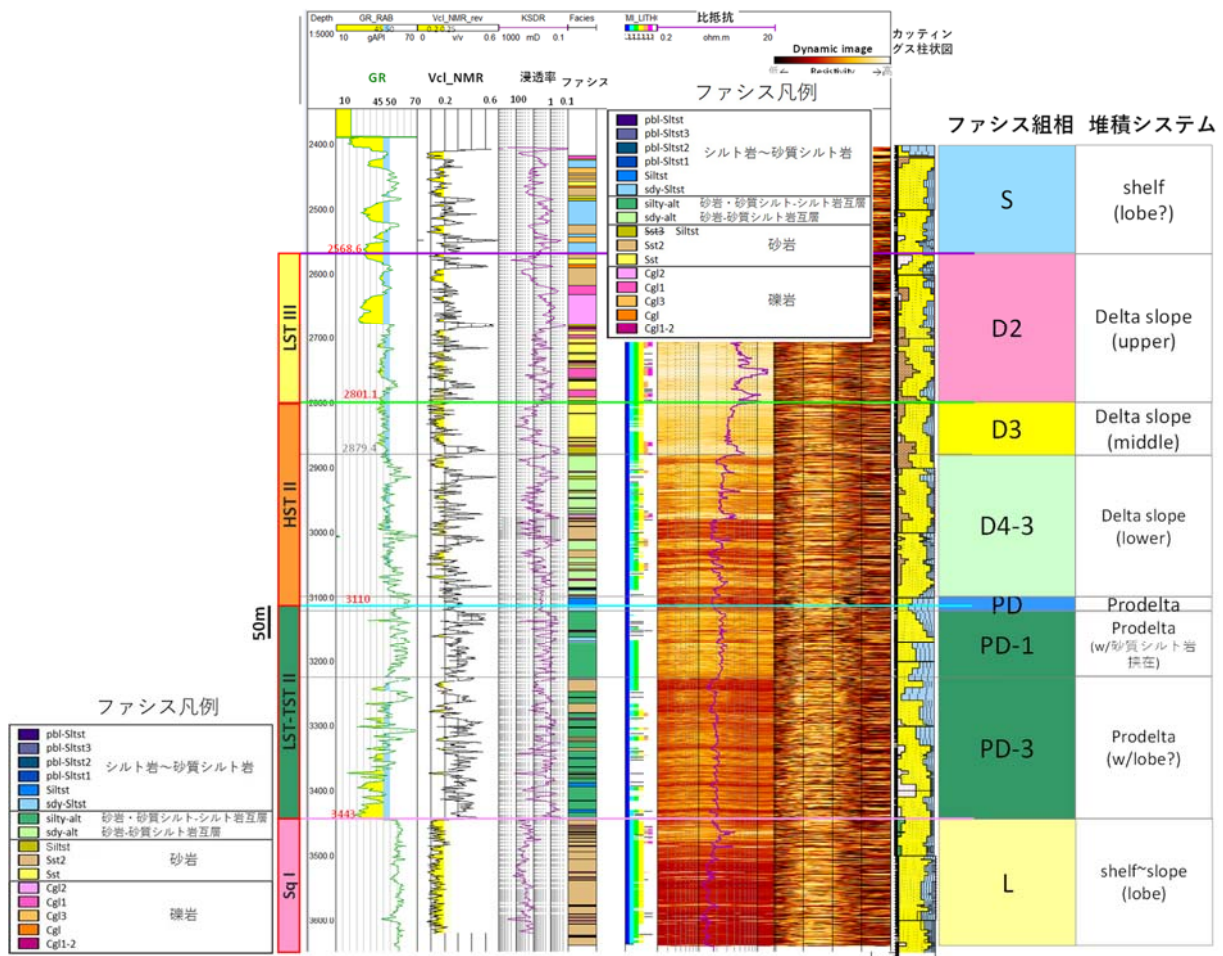
第 4.5-21 図 ファシス区分の例 (礫岩など粗粒な岩相)

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 4.5-22 図に示す。

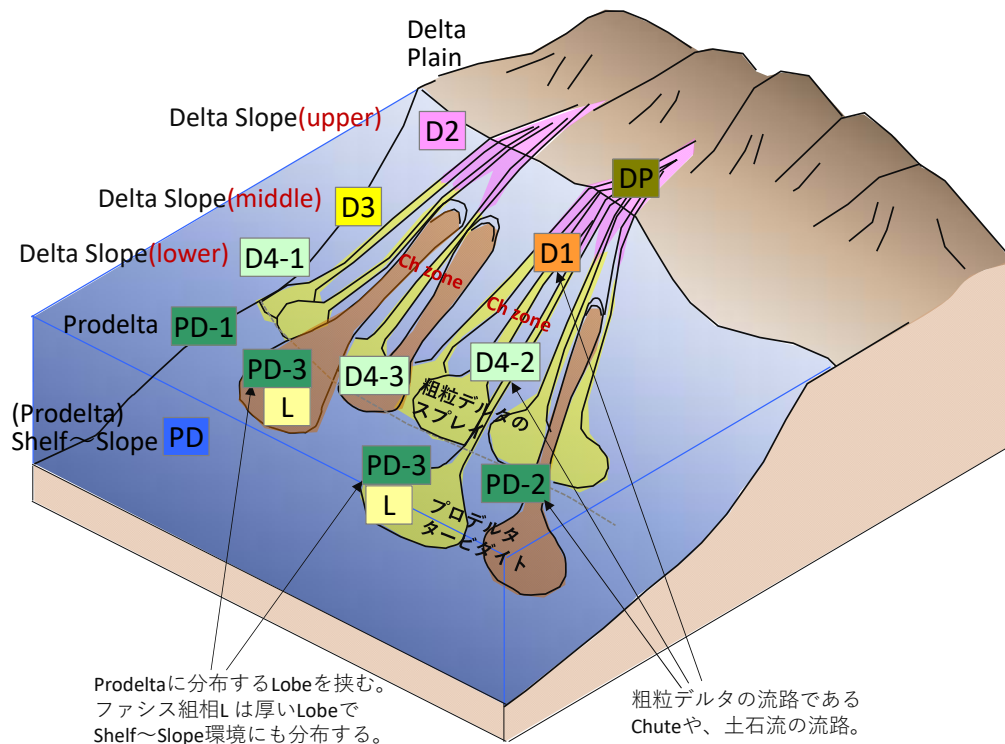


第 4.5-22 図 ファシス区分とファシス組相，推定した堆積環境の関係

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 4.5-23 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 4.5-24 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 4.5-23 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

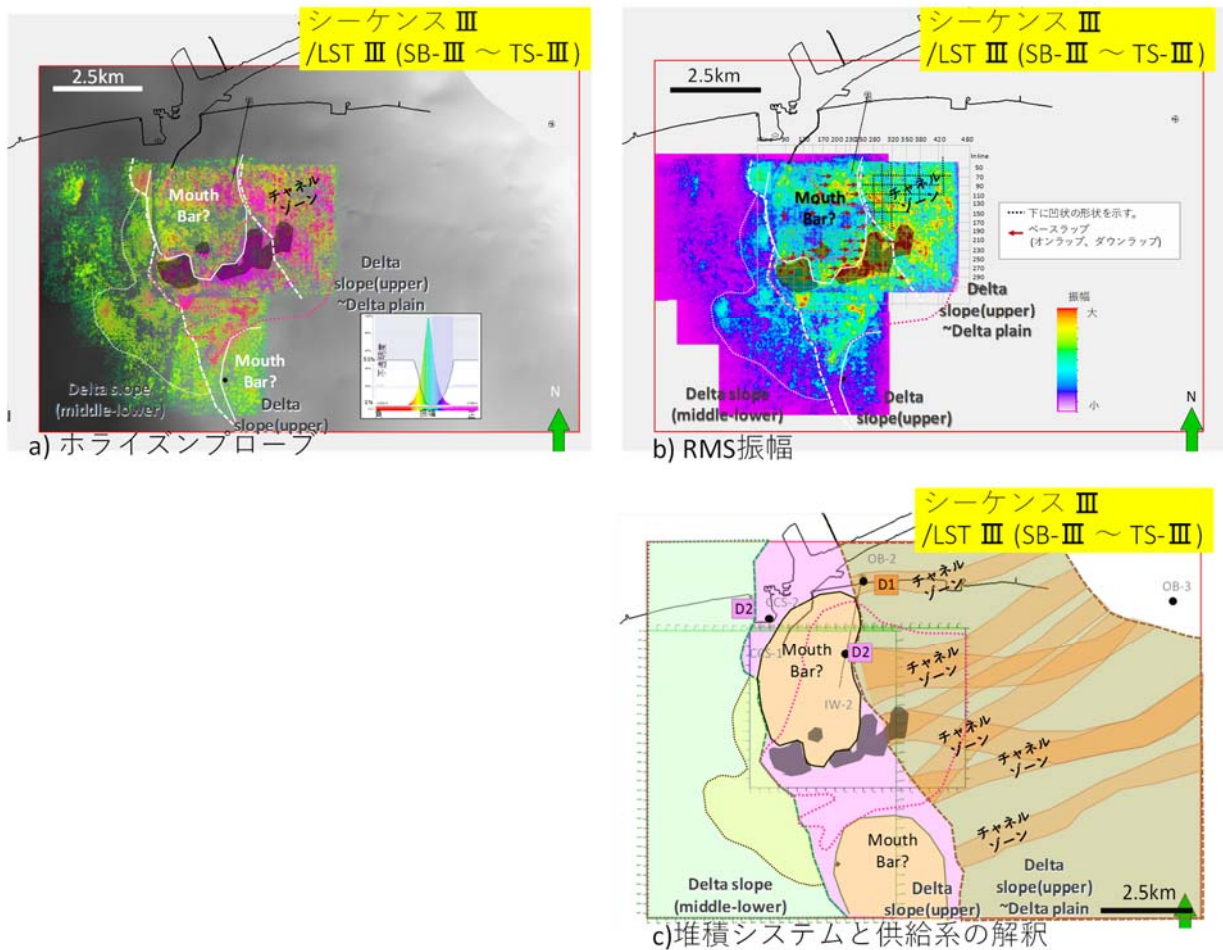


第 4.5-24 図 推定したファシス組相および堆積環境の概念図

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 4.5-25 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に、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 4.5-25 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 4.5-6 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 CO₂ 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 4.5-6 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

② 萌別層砂岩層における CO₂ 挙動予測シミュレーション

7) 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^[1]。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 トンとなした。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 4.5-7 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。

^[1] 圧入上限圧力の詳細は、5.2(3)①を参照のこと。

第 4.5-7 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 ₂ 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 (温度圧力センサー深度)	
孔隙容積(m ³)	2.4×10 ¹¹ m ³	
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 ⁻¹	4.56×10 ⁻⁶	
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) ^[1]
液相 相対浸透率 Krw	1.00	van Genuchten (1980) ^[2]
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) ^[3]
最大残留ガス飽和率 Sgrmax	0.275	-
	Holtz (2002) ^[4]	
毛細管圧力	砂岩	泥岩
	測定値	van Genuchten (1980) ^[2]
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-CO₂ に到達し圧入を停止した。萌別層への圧入実績を第 4.5-26 図に示す。この間の最大圧入レートは約 22 万トン/年であり、最大坑底圧(圧力・温度センサー P/T Sensor) が 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。

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

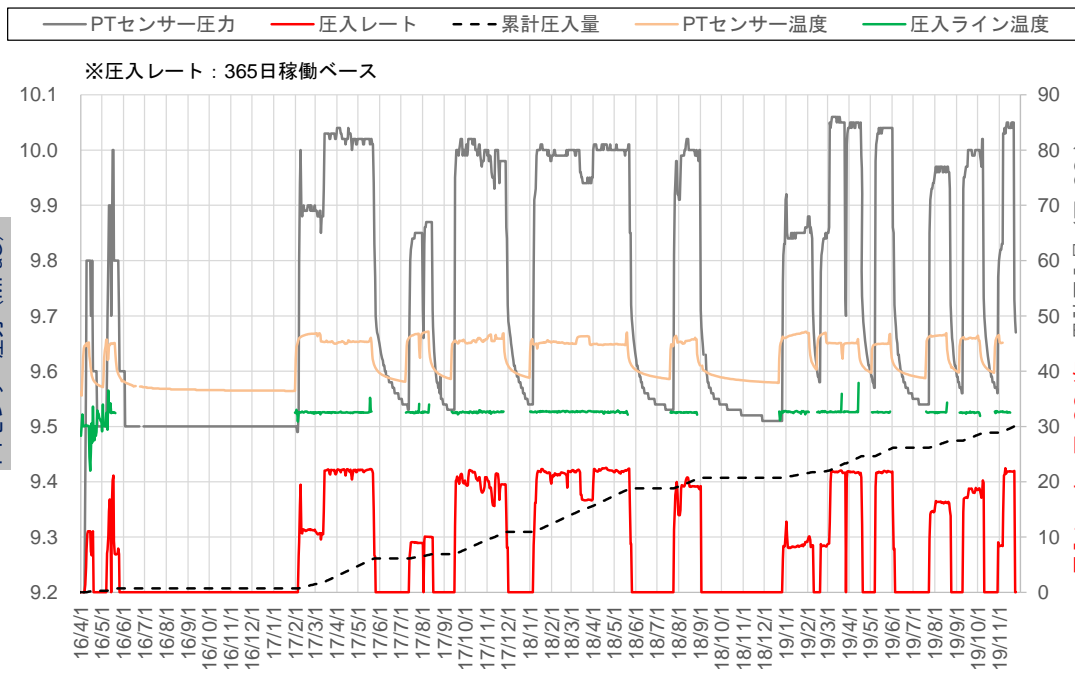
^[2] van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of undersaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44, pp.892-898

^[3] Bennion, D.B. 2007. Permeability and Relative Permeability Measurements at Reservoir Conditions for CO₂-Water Systems in Ultra Low Permeability Confining Caprocks. paper SPE 106995-MS, p.5

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

記録 (2016/04/01~2019/11/30)

◆2016年4月6日~2019年11月30日



注) 坑底温度・坑底圧力はP/T Sensor の値

第 4.5-26 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 4.5-27 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 CO₂ を圧入可能な構造 (第 4.5-27 図) である。

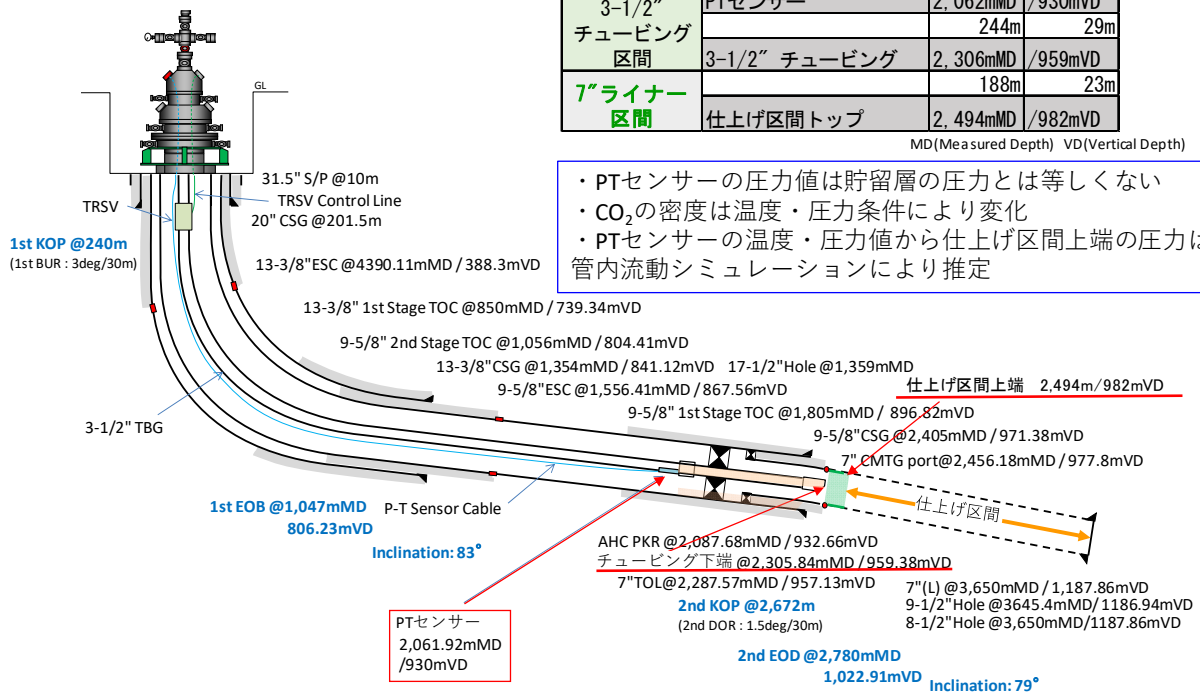
第 4.5-28 図および第 4.5-8 表は、貯留層圧力と各圧入レートで推定した圧入中に貯留層に加わる圧力 (流動坑底圧) との関係を示している。流動坑底圧が貯留層圧力 (第 4.5-28 図の黒線) を上回る深度区間が CO₂ の圧入される深度区間である。CO₂ が圧入された貯留層における深度区間は、圧入されていない区間と比較して CO₂ 飽和度が高くなることで流体粘性が低下して圧入性が高まるため、圧入時の流動坑底圧の上昇が抑制され、圧入区間は変化しない。検討した範囲において、圧入に寄与した深度の下端は 2019 年 3 月 15 日 (21.7 万 t-CO₂/年) が最も深度が深く 1,037mVD までであり、2018 年 5 月 25 日 (8.9 万 t-CO₂/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。

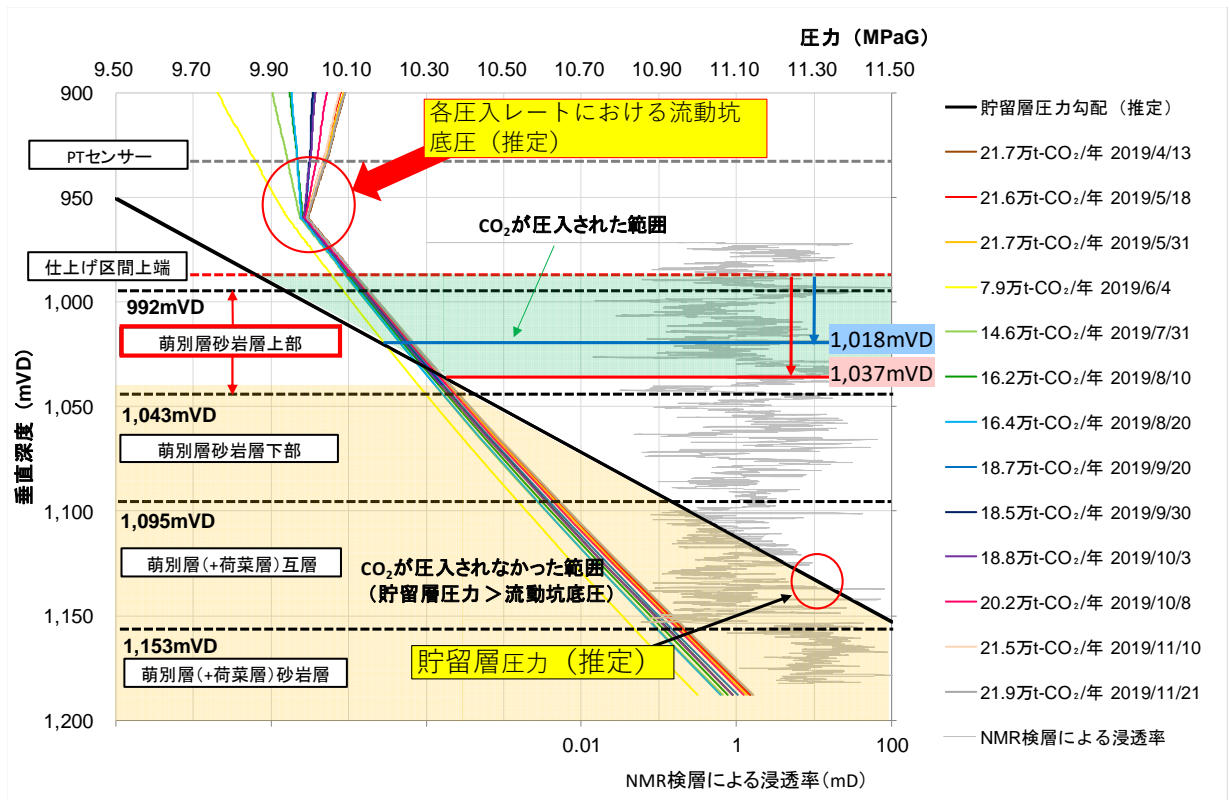
PTセンサーから仕上げ区間上限までの状況

3-1/2" チュービング区間	PTセンサー	2,062mMD / 930mVD
		244m 29m
7"ライナー区間	3-1/2" チュービング	2,306mMD / 959mVD
		188m 23m
	仕上げ区間トップ	2,494mMD / 982mVD

MD(Measured Depth) VD(Vertical Depth)



第 4.5-27 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ヨールド圧力は無視。

第 4.5-28 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 4.5-8 表 CO₂ 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 ₂ /年)	CO ₂ の圧入区間下端深度		日時	圧入レート (万t-CO ₂ /年)	CO ₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 4.5-9 表、第 4.5-29 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 4.5-10 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)^[1]の手法により、以下に示す Normalized Pseudo

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

Pressure を用いた。

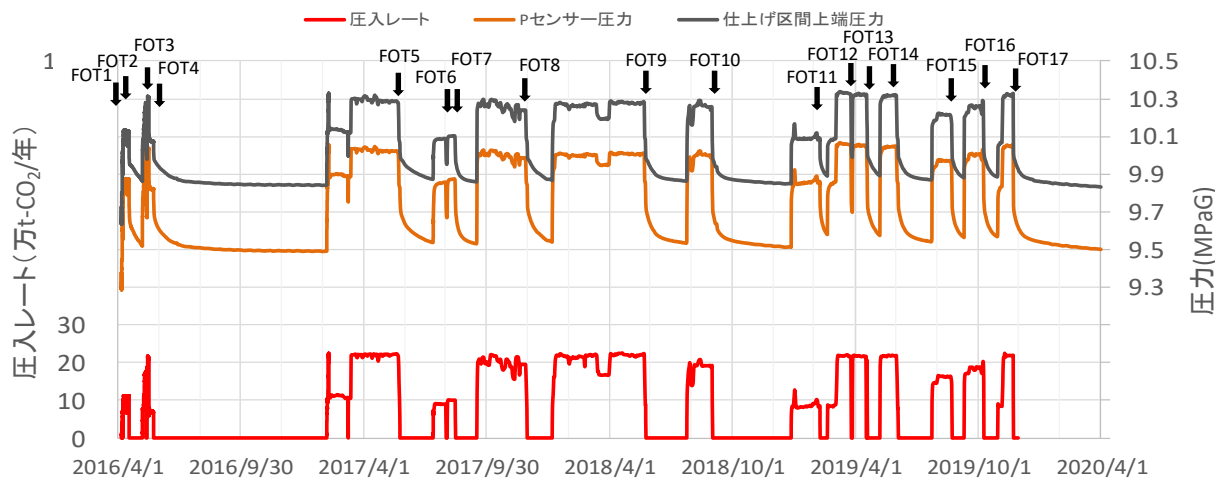
$$m(p) = \left(\frac{\mu z}{2p}\right)_{\bar{p}} \int_{p_0}^p \frac{2p dp}{\mu z} \quad \text{式 (4.5-1)}$$

$m(p)$: 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。各ログ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 CO₂ 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 CO₂ 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 4.5-30 図にそれぞれのログーログプロットを示す。

第 4.5-9 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 ₂ /年	t-CO ₂
	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

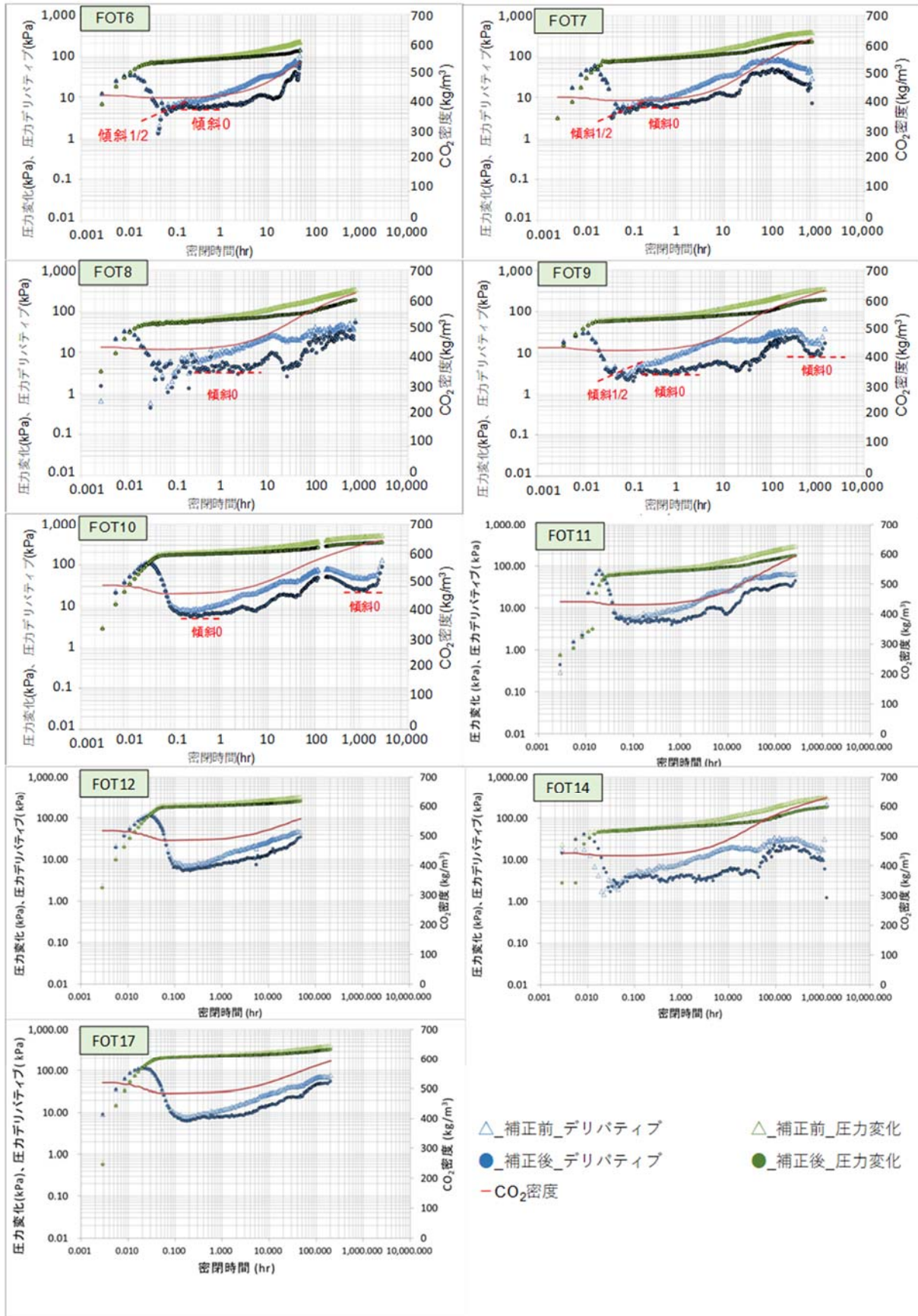


第 4.5-29 図 FOT 解析を実施したタイミング

第 4.5-10 表 FOT 一覧(解析の有無)

FOT	圧入停止方法	CO ₂ 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
FOT6	○	○	×	FOT 時間が短く LRF 確認不可
FOT7	○	○	×	FOT 時間が短く LRF 確認不可
FOT8	○	○	×	FOT 時間が短く LRF 確認不可
FOT9	○	○	○	
FOT10	○	○	○	
FOT11	○	○	×	FOT 時間が短く LRF 確認不可
FOT12	○	○	×	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
FOT14	○	○	○	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
FOT17	○	○	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×。CO₂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。



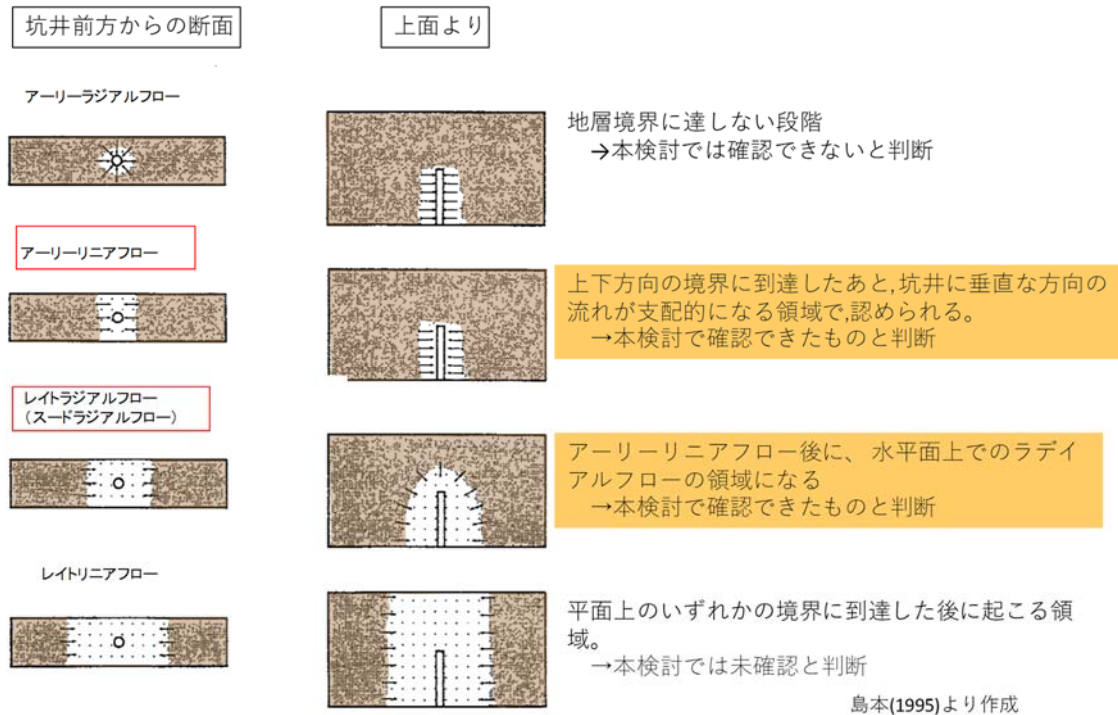
第 4.5-30 図 FOT のログ-ログプロット (FOT6~10, 11, 12, 14, 17)

参考のため、第 4.5-31 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° 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 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 の認識が誤りである可能性を考慮し、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 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 4.5-31 図 水平井で予想される圧力挙動

1) CO₂ 領域のラジアルフロー解析

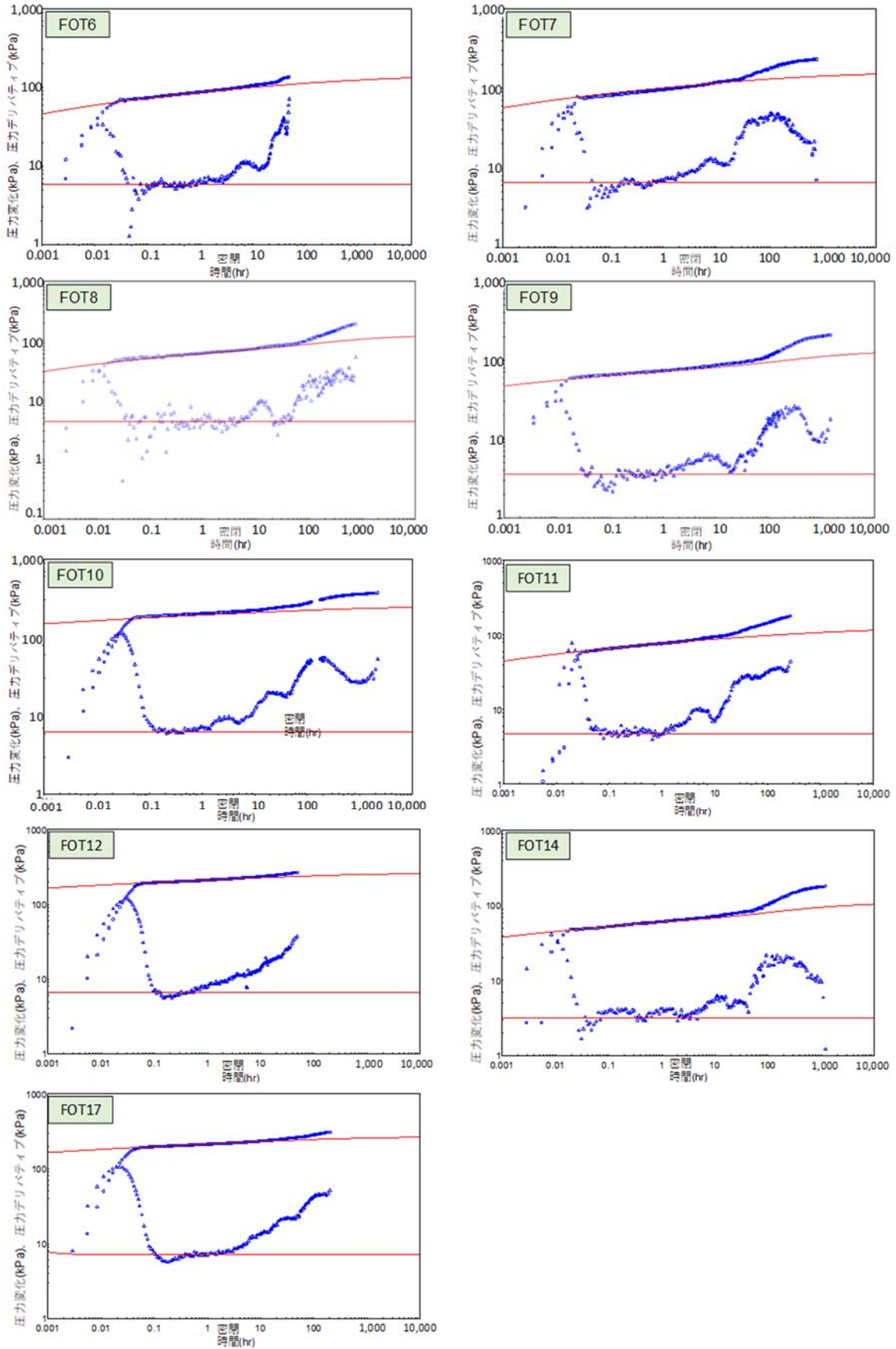
解析対象とした各 FOT におけるデリバティブの傾斜 0 を, CO₂ 領域のラジアルフローと仮定して解析した。圧力解析ソフト「Interpret」にて, 貯留層性状が均質で, 半無限円(ある境界での圧力が初期から変わらない)を想定した物理モデル(Homogenous, Infinite Lateral)を使用した。解析に際しては, 貯留層性状が均質かつ無限に広がるものと仮定した。解析に用いた入力値と解析結果を第 4.5-11 表に, マッチング状況を第 4.5-32 図に示す。

[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)

第 4.5-11 表 CO₂ 領域ラジアルフロー解析の入力値と結果 (FOT6~12, 14, 17)

	単位	FOT6	FOT7	FOT8	FOT9	FOT10	備考欄
圧入	m ³ /日	129,623	146,691	124,766	128,502	277,785	圧入停止
レート	t-CO ₂ /年	88,474	100,124	85,159	87,709	189,602	直前のレート
累計圧入量	t-CO ₂	65,793	69,070	109,250	188,136	207,209	
有効層厚	m	19					CO ₂ が主に圧入されていると考える層厚
CO ₂ 容積係数	rm ³ /m ³	0.0028					9.82MPaG/37.8°C
CO ₂ 粘性	cP	0.0521					
孔隙率		0.28					検層解析結果
CO ₂ 飽和率		0.8					高浸透率領域の不動水飽和率(Swir=0.2)より
総合圧縮率	1/kPa	7.28 × 10 ⁻⁵					9.82MPaG/37.8°C
水圧縮率	1/kPa	4.29 × 10 ⁻⁷					
CO ₂ 圧縮率	1/kPa	8.52 × 10 ⁻⁵					
岩石圧縮率	1/kPa	4.54 × 10 ⁻⁶					コア試験データより
浸透率 × 有効層厚	mD*m	3,000	3,078	3,900	4,950	6,000	解析結果
浸透率	mD	158	162	205	261	316	

	単位	FOT11	FOT12	FOT14	FOT17	備考欄
圧入	m ³ /日	122,509	319,403	115,063	317,189	圧入停止
レート	t-CO ₂ /年	83,618	218,008	78,536	216,498	直前のレート
累計圧入量	t-CO ₂	217,425	233,438	261,632	300,012	
有効層厚	m	19				CO ₂ が主に圧入されていると考える層厚
CO ₂ 容積係数	rm ³ /m ³	0.0028				9.82MPaG/37.8°C
CO ₂ 粘性	cP	0.0521				9.82MPaG/37.8°C
孔隙率		0.28				検層解析結果
CO ₂ 飽和率		0.8				高浸透率領域の不動水飽和率(Swir=0.2)より
総合圧縮率	1/kPa	7.28 × 10 ⁻⁵				9.82MPaG/37.8°C
水圧縮率	1/kPa	4.29 × 10 ⁻⁷				
CO ₂ 圧縮率	1/kPa	8.52 × 10 ⁻⁵				
岩石圧縮率	1/kPa	4.54 × 10 ⁻⁶				コア試験データより
浸透率 × 有効層厚	mD*m	3,600	6,650	4,940	6,080	解析結果
浸透率	mD	190	350	260	320	



第 4.5-32 図 ラジアルフロー解析マッチング状況 (FOT6~12, 14, 17)

FOT10 までは、圧入レートが高いほどかつ累計圧入量が多いほど浸透率×有効層厚の値を増加する傾向認められた。前者の原因は圧入レートが上がるほど流動坑底圧が上昇するため圧入区間が増大するため、後者の原因は累計圧入量の増加と圧入井周辺の貯留層の平均 CO₂飽和度が上昇により、CO₂の相対浸透率が向上するためであると考えられる。FOT11以降は、それ以前の傾向とは若干異なり、異なり累計圧入量の増加が浸透率×有効層厚の向上につながる相関が不明瞭となっている。

2) ホーナープロット解析

密閉後 10 時間以降のレイトタイムで見られたデリバティブの傾斜 0 を対象にホーナープロット解析を実施した。ホーナープロット解析ではラジアルフローと考えられる領域で直線を引き、その傾きから式(4.5-2)を用いて浸透率を推定し、その切片(ホーナータイム=1)から貯留層平均圧力を算出した。

$$k \times h = \frac{162.6 \cdot q \cdot B \cdot \mu}{m} \quad \text{式(4.5-2)}$$

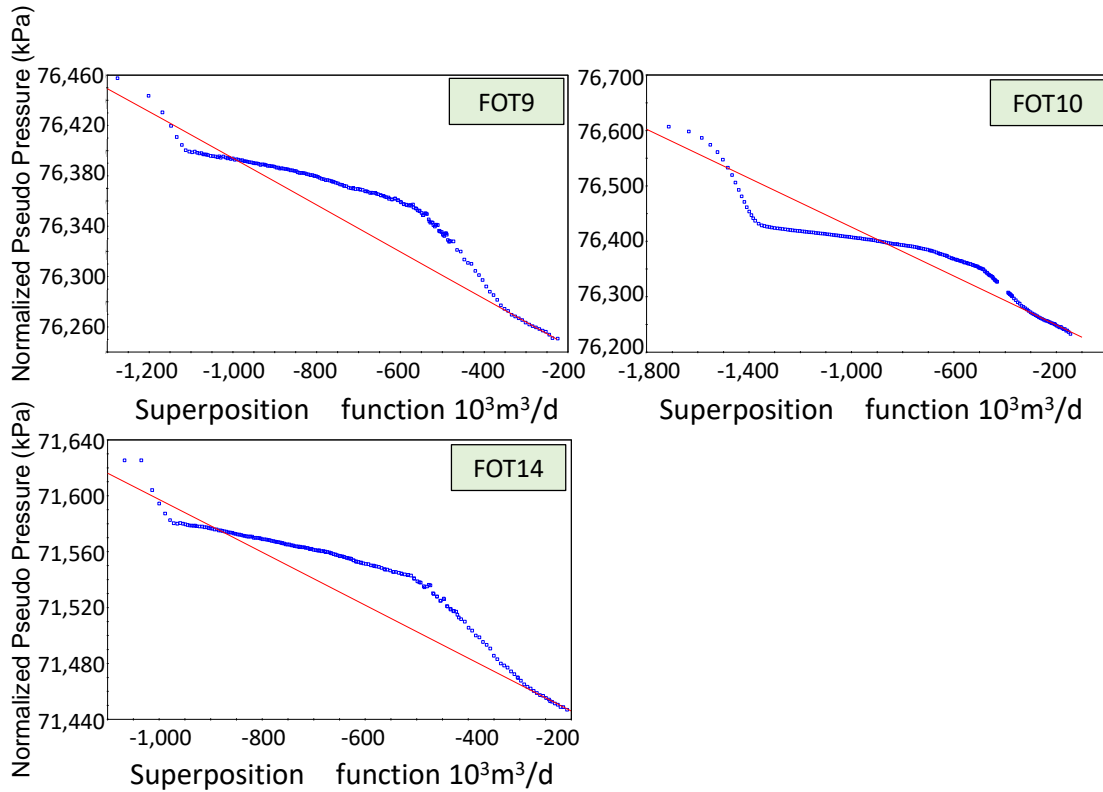
注) k:浸透率, h:有効層厚, q:流量, B:容積係数, μ :粘性, m:ホーナープロットにおける傾きを示す。

圧力解析ソフト「Interpret」によるホーナープロット法では、Superposition function 式(4.5-3)を横軸に、Normalized Pseudo Pressure 式(4.5-1)を縦軸にとり、式(4.5-2)の傾き m を求め、 $k \times h$ (浸透率×有効層厚)を算出する。

$$f(t_{sp}) = \sum_{i=1}^n \frac{(q_i - q_{i-1})f(t_n - t_{i-1})}{q_n} \quad \text{式(4.5-3)}$$

注) f: Superposition function, t_{sp} : Superposition time, q:レート, n:n 番目を示す。

ホーナープロット解析でのマッチング状況を第 4.5-33 図に、解析結果を第 4.5-12 表に示す。浸透率×有効層厚は、ラジアルフロー解析でよりも小さい。これはラジアルフローの解析で対象とした CO₂が到達した領域の浸透率よりも、ホーナープロットで対象とした貯留層全体の浸透率の方が低いことを示している。CO₂が圧入された領域が局所的であることや、水平方向に不均質に圧入されていることなどが理由として挙げられる。



第 4.5-33 図 ホーナープロット解析状況 (FOT9, FOT10, FOT14)

第 4.5-12 表 ホーナープロット解析結果

		FOT9	FOT10	FOT14
圧入レート	m ³ /D	128,502	277,785	115,063
浸透率×有効層厚	mD*m	1,691	1,425	1,662
浸透率	mD	9	8	9
貯留層平均圧力	MPaG	9.82	9.82	9.83

3) 探査半径の推定結果

レイトラジアルフローは探査半径（圧力伝搬が及んだ範囲）が坑井長（圧入区間長）を上回った時に検知される。IW-2 の仕上げ区間長は、水平方向距離 1,140m 程度となるため、レイトラジアルフローは探査半径が 1,140m を超えているはずである。また、CO₂ を深部塩水層に圧入する場合、貯留層内での流体の動きやすさの指標となるモビリティ（浸透率/粘性）は CO₂ 領域と地層水領域およびその中間であるショックフロントの 3 領域で異なるものと考えられる。この考えに基づき、探査半径を式 (4.5-4) ~ 式 (4.5-6) (Rahman et al. (2014) ^[1]) を用いて算出した。ここで、FOT9, FOT10, FOT14 のそれぞれにおいて、デリバティブカーブが上側に凸となる挙動（ショックフロント）が、密閉後 600 時間で修了していると仮定した。第 4.5-13 表に CO₂ 領域およびショックフロン

^[1] Rahman, N. M. A., Al-Thawad, F. M., BinAkresh S. A., “SYSTEM FOR COMPUTING THE RADIUS OF INVESTIGATION IN A RADIAL, COMPOSITE RESERVOIR SYSTEM” U.S Patent Application Publication (2013)

ト領域の探査半径の推定結果を示す。

$$\text{探査半径} = R_1 \sqrt{\frac{M_3}{F_3} \left(\sqrt{\frac{F_2}{M_2}} - \sqrt{\frac{F_1}{M_1}} \right)} + R_2 \left(1 - \sqrt{\frac{M_3 F_2}{F_3 M_2}} \right) + 0.0328 \sqrt{\frac{M_3 \Delta t}{F_3}} \quad \text{式 (4.5-4)}$$

$$R_2 = R_1 \left(1 - \sqrt{\frac{M_2 F_1}{F_2 M_1}} \right) + 0.0328 \sqrt{\frac{M_2 \Delta t}{F_2}} \quad \text{式 (4.5-5)}$$

$$R_1 = 0.0328 \sqrt{\frac{k}{\phi \mu c_t} \Delta t} \quad \text{式 (4.5-6)}$$

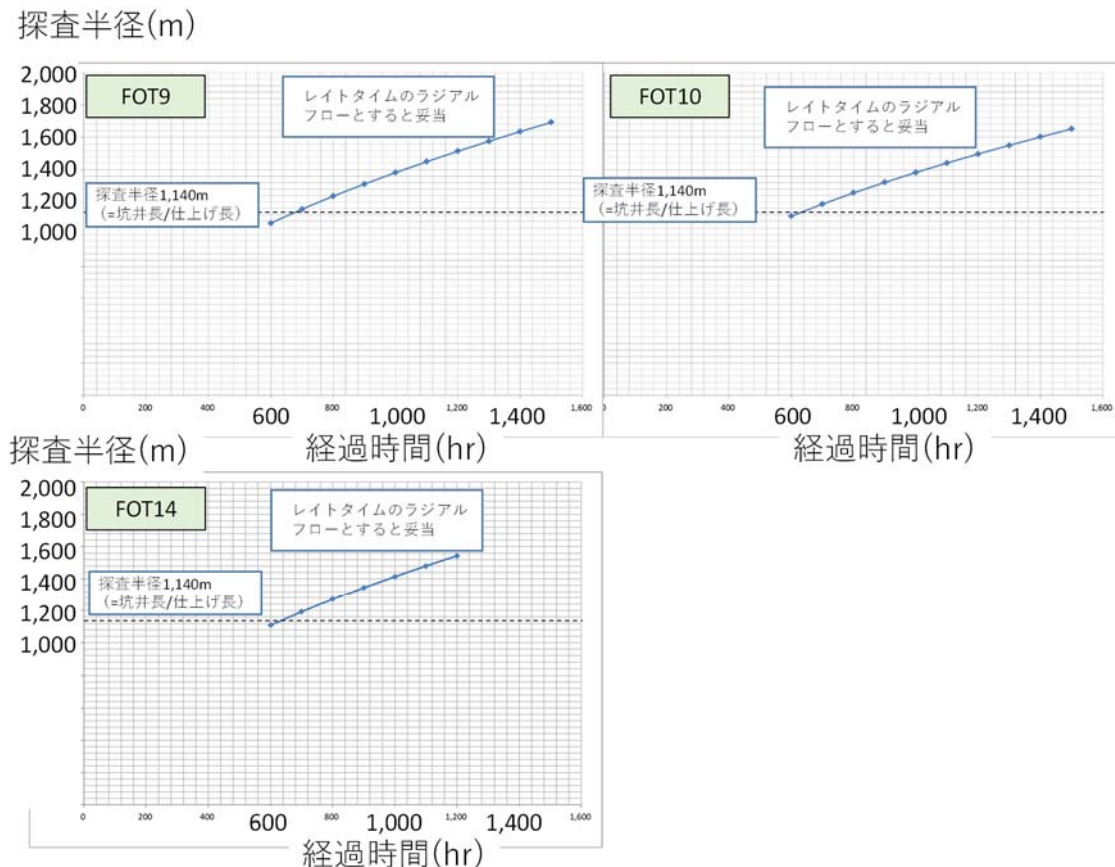
注) R:半径, M:モビリティ (浸透率/粘性), F:ストラティビティ (孔隙率×総合圧縮率), k:浸透率, φ:孔隙率, μ:粘性, ct:総合圧縮率, Δt:密閉時間, 下付き番号 1: CO₂領域, 下付き番号 2: ショックフロント領域, 下付き番号 3: 塩水領域を示す。

第 4.5-13 表 探査半径の算出に用いた入力値と計算結果

	入力値		FOT9	FOT10	FOT14	適用
CO ₂ 領域	半径	m	422	464	421	式 (4.5-6) より計算
	有効層厚	m	19	19	19	仮定
	浸透率 × 有効層厚	mD*m	4,950	6,000	4,940	ラジアルフロー解析結果
	浸透率	mD	261	316	260	上記 2 つの値より計算
	終了時間	hrs	50	50	50	ショックフロント出現よりも手前
	粘性	cP	0.052	0.052	0.052	9.82MPaG, 37.8°C
	孔隙率		0.28	0.28	0.28	貯留層平均値
	総合圧縮率	1/kPa	0.00346	0.00346	0.00346	圧力解析の入力値
ショックフロント領域	半径	m	1,070	1,113	1,109	式 (4.5-5) より計算
	有効層厚	m	19	19	19	CO ₂ 領域と同じと仮定
	浸透率 × 有効層厚	mD*m	760	760	855	ホーナープロット解析値
	浸透率	mD	40	40	45	上記 2 つの値より計算
	終了時間	hrs	600	600	600	ショックフロント終了時
	粘性	cP	0.052	0.052	0.052	CO ₂ 領域と同じと仮定
	孔隙率		0.28	0.28	0.28	CO ₂ 領域と同じと仮定
	総合圧縮率	1/kPa	0.00136	0.00136	0.00136	相対浸透率曲線から導いたフラクショナルフロー曲線からショックフロントでの Sg=0.28 を算出して計算
塩水領域	有効層厚	m	181	181	181	層厚 220m に平均的なネットグロス比 0.78 を考慮
	浸透率 × 有効層厚	mD*m	25,533	19,150	24,465	ホーナープロット解析値に塩水 (0.77cP) と CO ₂ (0.05cP) の粘性比を乗じたもの
	浸透率	mD	141	106	135	上記 2 つの値より計算
	粘性	cP	0.77	0.77	0.77	9.82MPaG, 37.8°C
	孔隙率		0.28	0.28	0.28	検層解析結果
	総合圧縮率	1/kPa	0.00024	0.00024	0.00024	9.82MPaG, 37.8°C

FOT9, 10, 14 のデリバティブカーブにおいて圧入停止時間 600 時間以降で認められたレイトラジアルフローに対し, 式 (4.5-4) を用いて圧入停止時間と探査半径を推定した

(第 4.5-34 図)。FOT9, 10, 14 とともに圧入停止時間 600 時間付近から探査半径が坑井の仕上げ長である 1,140m を超えることが予想された。FOT9, 10, 14 において密閉後 600 時間以降に認められるデリバティブカーブの傾斜 0 を、地層水領域におけるレイトラジアルフローと見なすことの妥当性が示された。



第 4.5-34 図 ホーナープロット解析状況 (FOT9, FOT10, FOT14)

4) フォールオフ解析のまとめ

FOT6~12, 14, 17 の 9 回の FOT のデリバティブカーブの傾斜 0 の挙動に対し、ラジアルフロー解析を実施した。その結果、FOT11 以降で、圧入レートと CO₂ の累計圧入量および解析される $k \times h$ 値の関係が異なる傾向があり、FOT11 以降に圧入性が低下した可能性が示唆された。

FOT9, 10, 14 の密閉時間 10 時間以降に認められるデリバティブカーブの傾斜 0 の挙動に対し、ホーナープロット法を適用した。その結果それぞれの FOT で推定された貯留層平均圧力は初期圧力の 9.82MPaG に近い値となり、圧力上昇の影響が及ばない領域の挙動を示している可能性が示唆された。

FOT9, 10, 14 の密閉時間 600 時間頃までに認められるショックフロント挙動以降に認められるので、デリバティブカーブの傾斜 0 の挙動は探査半径の解析からレイトラジアルフローの挙動を示していることが示唆された。

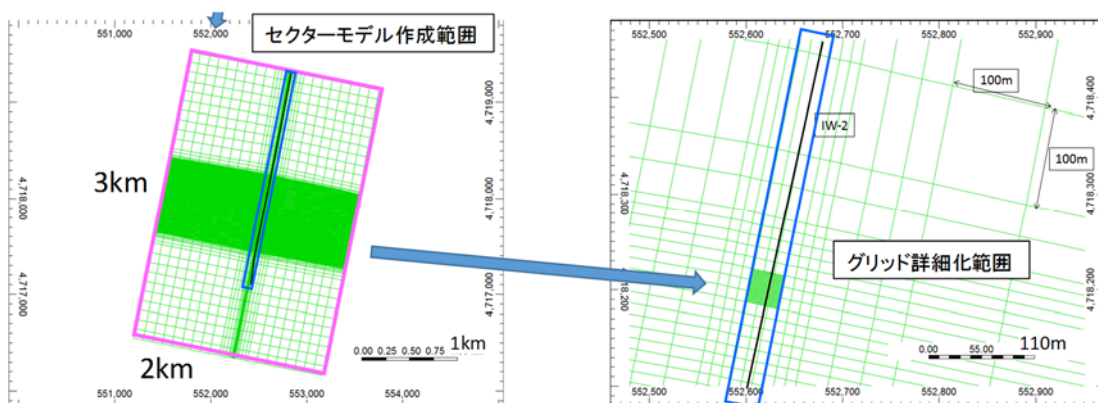
ii) ヒストリーマッチ

圧入中に記録した坑内圧力や、FOT 解析に際して作成したログ-ログプロットの挙動とシミュレーションにより再現される挙動が近づくように貯留層モデルのパラメータを調整することによりヒストリーマッチングを実施した。

ヒストリーマッチは、地質統計学的に作成した複数の異なる岩相分布を持った地質モデルを下記の手順により作成し、それぞれを用いて実施した。

- ・堆積相解析で設定した、16 個のファシス(岩相)を、坑井におけるファシスログをグリッドモデルに入力。
- ・堆積相解析で解釈した堆積システムを決定論的にグリッドモデルに入力。
- ・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、地球統計学的にファシス組相を分布させる。
- ・分布させたファシス組相毎に坑井におけるファシス(岩相)分布をハードデータとして岩相を地球統計学的手法により 3 次元的に分布させる。

ヒストリーマッチングでは、貯留層モデルから部分的にセクターモデルを切り出し、坑井が通過するグリッドの周辺を 1 m×1 m 程度の詳細なグリッドに細分化したモデルを用いた(第 4.5-35 図)。また、グリッドに入力した物性値パラメータは第 4.5-14 表と同様とした。



第 4.5-35 図 ヒストリーマッチングに用いたモデルのグリッドシステム

地質モデルが適切であることを判断するために、仕上げ区間上端深度における圧入中の実績圧力と、複数の地質モデル(具現像)による予測値との乖離を評価する式(4.5-7)による目的関数を用いた。乖離が小さいほど適切な地質モデルであると考えられる。

$$\text{目的関数} = \frac{1}{n_{obs}} \sum_{i=1}^{n_{obs}} \sqrt{(d_{sim}^i - d_{obs}^i)^2} \quad \text{式 (4.5-7)}$$

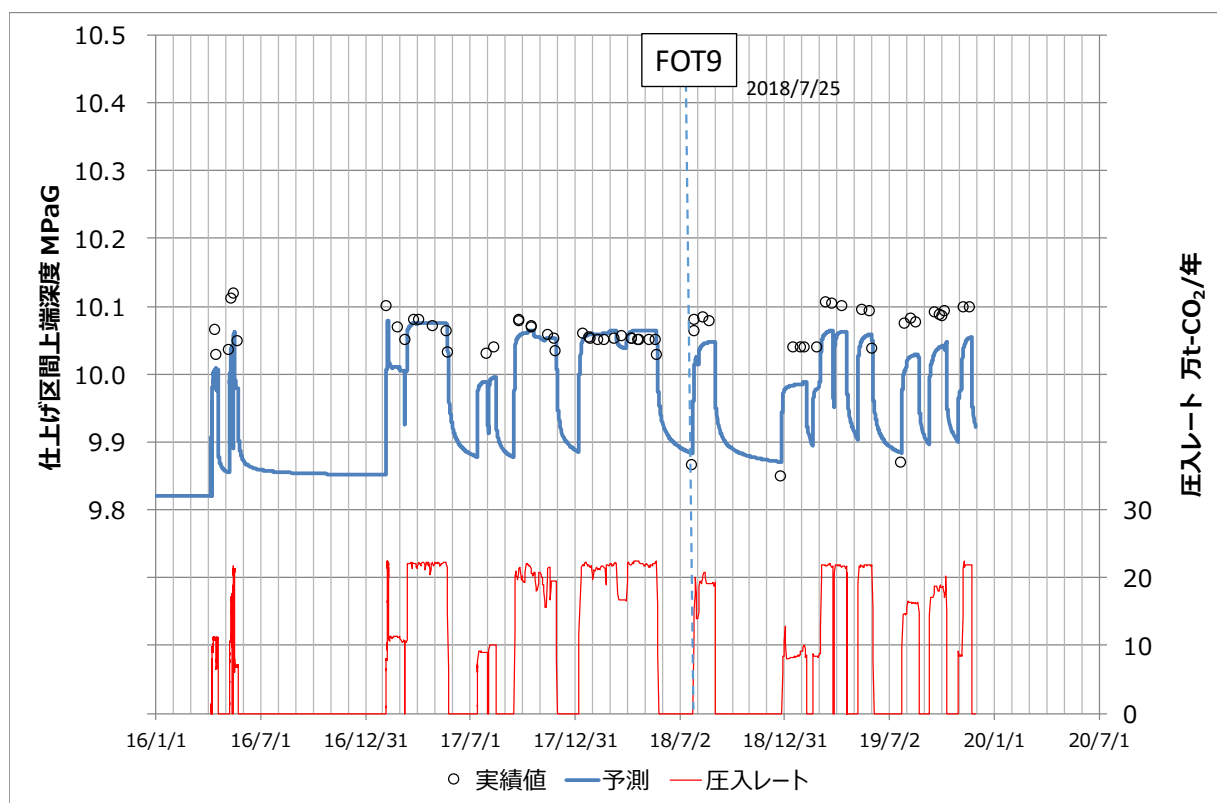
注) nobs:実績データ数, dsim:シミュレーション計算値, dobs:実績データ

2018年7月25日以前の圧入状況を目的関数 25kPa 以下で再現する地質モデル(具現像)を 30 個抽出し、そのパラメータのままで 2018年7月25日以降の状況を再現すると、予測値と実績値の乖離が広がり目的関数が大きくなる(第 4.5-14 表)。具現像 24

による例を第 4.5-36 図に示す。FOT9 (2018/7/25) の前後で仕上げ区間上端深度による圧力実績が、シミュレーションによる予測値よりも高くなる傾向が認められた。

第 4.5-14 表 具現像ごとの目的関数一覧

具現像の番号	目的関数 kPa			具現像の番号	目的関数 kPa		
	全期間	2018年7月25日以前	2018年7月25日以後		全期間	2018年7月25日以前	2018年7月25日以後
1	30.2	21.6	43.1	16	31.3	22.1	45.2
2	31.1	21.8	45.1	17	30.4	23.9	40.3
3	29.8	21.9	41.9	18	27.5	21.5	36.6
4	29.9	23.1	40.3	19	26.2	20.4	35.1
5	30.8	21.6	45	20	30.5	22.2	43.2
6	31.6	22	46.2	21	29.4	21.6	41.2
7	28.9	22.2	39.1	22	29.5	24.4	37.3
8	27.5	24.6	32	23	29	22.8	38.5
9	31.6	21.8	46.6	24	31.1	22.5	44.2
10	30	21.8	42.4	25	31.7	22.4	45.9
11	30.6	23.1	41.9	26	31.4	22.2	45.4
12	30.8	20.9	45.7	27	30	22.9	40.8
13	30.7	22.5	43	28	28.2	20.4	40.2
14	32.5	21.3	49.4	29	30.6	22.2	43.4
15	31	21.3	45.9	30	29.5	23.2	39.1



注) 具現像 24 による例。

第 4.5-36 図 IW-2 における圧入レートと仕上げ区間上端圧力の予実績比較