

参考資料 1

苫小牧地点における
貯留層総合評価

平成 23 年 10 月 26 日
平成 23 年 12 月一部改訂

本資料は、「CCS 実証試験実施に向けた専門検討会（第1回）」（10月26日）に提出したものを、同検討会における議論を踏まえて、一部表記をわかりやすくしたものです。

内容

第1章 目的・評価手法	1
1.1 目的	1
1.2 貯留層総合評価の評価手法	1
第2章 貯留層総合評価のための調査	1
2.1 調査概要	1
2.2 広域地質	3
2.2.1 地質概要	3
2.2.2 地層水塩分濃度解析による水理地質評価	6
2.3 使用した地質データ	9
2.4 三次元弾性波探査結果の概要	10
2.4.1 実地調査	10
2.4.2 3Dデータの解釈	11
2.5 苫小牧CCS-1掘削結果の概要	17
2.5.1 掘削作業概要	17
2.5.2 地質調査結果	17
2.5.3 リークオフテスト結果	20
2.5.4 VSP結果	20
2.5.5 圧入テスト結果	22
2.6 苫小牧CCS-2調査結果の概要	23
2.6.1 掘削結果	23
2.6.2 地質調査結果	23
2.6.3 リークオフテスト結果	24
2.7 滝ノ上層解析結果	24
2.7.1 貯留層	24
2.7.2 遮蔽層	25
2.7.3 地質モデル構築	26
(1) 岩相分布・性状分布の推定	26
(2) 地質構造モデル構築	28
(3) 属性モデル構築	32
2.7.4 CO ₂ 挙動予測シミュレーション	36
2.7.5 弾性波探査シミュレーション	36

2.8 萌別層解析結果.....	38
2.8.1 貯留層.....	38
2.8.2 遮蔽層.....	39
2.8.3 地質モデル構築.....	41
(1) 構造モデル構築.....	41
(2) 属性モデル構築.....	45
2.8.4 CO ₂ 挙動予測シミュレーション.....	46
2.8.5 弾性波探査シミュレーション.....	46
第3章 貯留層総合評価	1
3.1 貯留層の総合評価.....	1
3.1.1 滝ノ上層評価結果.....	1
(1) 貯留層評価.....	1
(2) 遮蔽層評価.....	1
(3) シミュレーション概要.....	2
① 概要.....	2
② パラメータ.....	2
(4) シミュレーションによるCO ₂ の圧入挙動.....	4
① CO ₂ 圧入時の挙動.....	4
② 貯留層圧力分布.....	5
(5) シミュレーションによる貯留CO ₂ の長期挙動予測.....	10
① 圧入に伴う貯留層内のCO ₂ 分布予測.....	10
② CO ₂ の貯留形態ごとの割合.....	17
(6) 総合評価.....	19
① 滝ノ上層評価のまとめ.....	19
② 総合評価.....	19
3.1.2 萌別層評価結果.....	21
(1) 貯留層評価.....	21
(2) 遮蔽層評価.....	21
(3) シミュレーション概要.....	21
① 概要.....	21
② パラメータ.....	22
③ ケーススタディ.....	24

(4) シミュレーションによるCO ₂ の圧入挙動.....	27
① CO ₂ 圧入時の挙動.....	27
② 貯留層の圧力分布.....	29
(5) シミュレーションによる貯留CO ₂ の長期挙動予測.....	33
① 圧入に伴う貯留層内のCO ₂ 分布予測.....	33
② 遮蔽性能検討.....	40
③ CO ₂ の貯留形態ごとの割合.....	45
(6) 総合評価.....	47
① 萌別層評価のまとめ.....	47
② 総合評価.....	47
3.2 貯留対象層周辺を取巻く環境等の評価.....	49
3.2.1 活断層分布および地震活動.....	49
(1) テクトニクス概要.....	49
(2) 北海道周辺の地殻応力分布.....	50
(3) 北海道周辺および苫小牧周辺の地震活動.....	53
(4) 苫小牧周辺の活断層.....	56
(5) 三次元弾性波探査断面図に見られる断層.....	56
(6) 苫小牧地点で予想される地震.....	57
3.2.2 CO ₂ 漏出の可能性検討.....	59
(1) CO ₂ 漏出要因の洗出し.....	59
(2) CO ₂ 漏出要因に関する検討のまとめ.....	59
3.3 「CCS実証事業の安全な実施にあたって」への対応.....	61

第1章 目的・評価手法

1.1 目的

CCS大規模実証試験を安全に実施するためには、弾性波探査や調査井の掘削等により地層の状態を詳細に把握し、CO₂を貯留する貯留層としての適正性およびCO₂を長期間にわたり貯留層から漏洩させない遮蔽層としての適正性を確認する必要がある。

苫小牧地点については、平成23年度上半期に必要な調査・分析が終了したことから、貯留層総合評価として取りまとめを行った。

本貯留層総合評価は、CCS大規模実証試験を安全に実施することが可能であるかを判断するために、苫小牧地点の貯留層と遮蔽層の適正性について評価を行ったものである。

1.2 貯留層総合評価の評価手法

経済産業省は、平成21年8月に我が国がCCSの大規模実証試験を実施する場合に、安全面・環境面から遵守することが望ましい事項について基準を示すものとして「CCS実証事業の安全な実施にあたって」を策定している。

この報告書は、大規模実証試験を行うに際して、地質面から検討すべき事項から設備の安全確保、CO₂輸送面からの安全確保、運用時の安全確保、モニタリング、坑井の廃坑に至るまで、CCSの実施に係る全般について検討したものとなっている。

本貯留層総合評価では、本報告書の項目1、「CO₂貯留に際し地質面から検討すべき事項」に沿って評価を実施した。

具体的には、必要な地質データを取得するために苫小牧地点において以下の調査を行った。

- ・「三次元弾性波探査(2009)」の実施
- ・「三次元弾性波探査(2010)」の実施
- ・調査井「苫小牧CCS-1」の掘削
- ・調査井「苫小牧CCS-2」の掘削

その上で、既存の地質データおよびこれらの調査から得られた地質データを使用し、「CO₂貯留に際し地質面から検討すべき事項」について、より具体的な内容の検討・評価を行った。

第2章 貯留層総合評価のための調査

2.1 調査概要

調査対象区域の苫小牧港西港区沿岸海域は、これまで石油・天然ガスの探査を目的とした弾性波探査による調査が多くなされており、周辺には深度3,000mを越える天然ガス開発用の坑井が複数あることから、CO₂貯留対象となり得る帯水層として、海底面下約1,000m～約3,000mに萌別層砂岩層および滝ノ上層T1部層が存在することが知られていた。

萌別層砂岩層および滝ノ上層T1部層を貯留対象層としてCCS大規模実証試験を実施するために、既存の地質データに加えて貯留対象地域における詳細な地質データを取得して地下の構造形態を詳細に把握した。これらのデータから地質モデルを構築し、そのモデルを用いたシミュレーションにてCO₂の貯留可能性や長期的な移動について評価することを目的として、平成21年度から平成23年度において、以下の調査を実施した(図2.1-1に調査範囲位置図を示す)。

1) 三次元弾性波探査

苫小牧港西港区沖合において、平成21年度には東西約3.8km、南北約4.1kmの範囲で、平成22年度には東西約5.9km、南北約7.6kmの範囲で三次元弾性波探査のデータ取得した。

2) 調査井

平成22年度には苫小牧CCS-1を掘削し、物理検層、リークオフテスト(遮蔽層の強度測定)、コア試料・カッティングス試料の採取、貯留層の圧入テスト、垂直弾性波プロファイリング(VSP)調査等を実施した。採取したコア試料およびカッティングス試料の分析(孔隙率、浸透率、スレシヨルド圧力試験等)は、平成22年度および平成23年度に実施した。

平成23年度には苫小牧CCS-2を掘削し、リークオフテストおよびコア試料の採取・分析(孔隙率、浸透率、スレシヨルド圧力試験等)を実施した。

3) 地質モデル構築およびCO₂挙動予測シミュレーション

平成22年度には、周辺の既存坑井データと二次元弾性波データ、および平成21年度実施の三次元弾性波探査の結果に基づいて滝ノ上層T1部層を圧入対象層とした地質モデル構築とCO₂挙動予測シミュレーションを実施した。

平成23年度には平成22年度の弾性波探査の結果と、平成22年度から平成23年度に得られた苫小牧CCS-1および苫小牧CCS-2での試験結果と試料分析の結果を加えて、滝ノ上層T1部層と萌別層砂岩層を圧入対象とした地質モデ

ルを構築し、CO₂挙動予測シミュレーションを実施した。



図 2. 1-1 調査範囲位置図

2.2 広域地質

2.2.1 地質概要

調査区域および周辺地域では、これまで国による基礎物理探査、民間企業による石油・天然ガスを対象とした探鉱活動により、地下の地質層序および地質構造が明らかになっている。

調査区域は、苫小牧リッジと呼ばれる中生代火山岩類の基盤岩の隆起帯に位置しており、基盤の上位の古第三紀以降の様々な構造場のもとで形成された堆積盆に、古第三系、新第三系および第四系が認められる(図2.2-1)。調査区域では、古第三系の上位に、下位より滝ノ上層、振老層、平取+軽舞層、荷菜層、萌別層、鶴川層などの地層が堆積しており、滝ノ上層から荷菜層にかけては新第三系、萌別層と鶴川層は第四系に区分されている(図2.2-2)。

調査区域から東方に向けては、波長が10km程度の褶曲構造が南北ないし北北西-南南東方向に並列して複数認められ、一般に東側の背斜構造群は逆断層を伴った変形を受けているが、調査区域を含めて西側の背斜構造群はいずれも比較的弱い変形と考えられている。

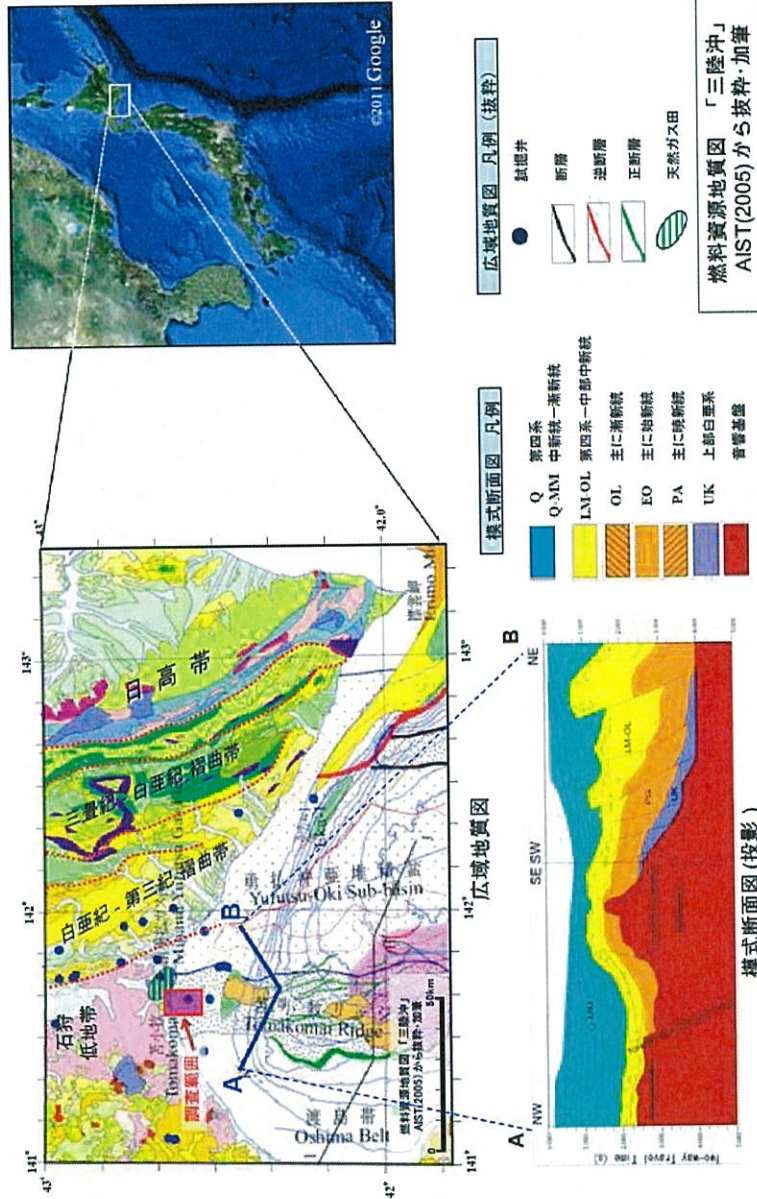


図 2-2-1 若小牧周辺の広域地質図と模式断面図

2-4

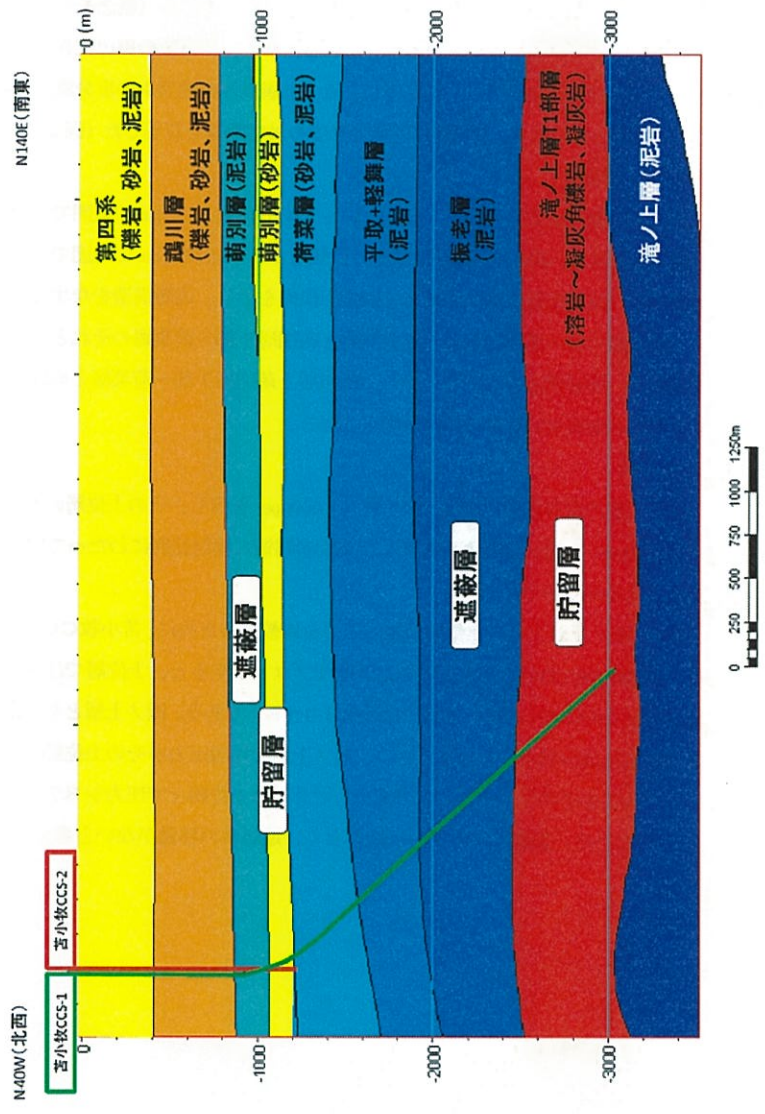


図 2. 2-2 苫小牧地点の層序

2.2.2 地層水塩分濃度解析による水理地質評価

「CCS実証事業の安全な実施にあたって」においては、「CO₂貯留層、キャップロックおよびその上部の領域を含む水理地質および地質構造を広域モデル（概念モデル）として既存資料等を利用して構築する」と記載されている。そこで、複数の周辺坑井における物理検層データおよび地層温度データを使用し、滝ノ上層以浅の地層水の塩分濃度を算出し、坑井ごとに深度分布を求め、地質層序と塩分濃度の対応関係を評価した（図2.2-3）。

1) 萌別層～荷菜層

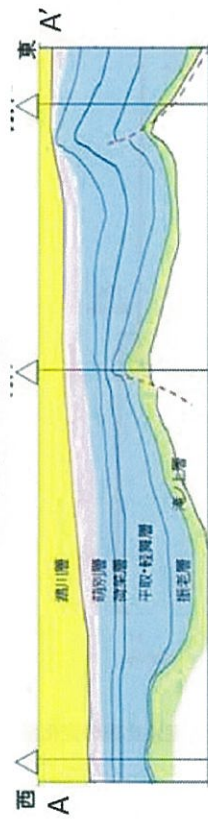
表層から萌別層上部へは、下位に向かって数100～1,000ppmの範囲で次第に塩分濃度が上昇し、萌別層下部～荷菜層では数1,000～10,000ppmの範囲で安定した値となり、検討範囲全体にわたって同様の傾向を示し、成層構造をなすことがわかった。鶴川層～萌別層上部の塩分濃度と萌別層下部～荷菜層のそれとは明らかに異なり、成層構造をなすことから、鶴川層と萌別層下部～荷菜層との間には垂直方向への地層水の移動はないと考えられる。

2) 滝ノ上層

滝ノ上層の塩分濃度は数1,000～数10,000ppmを示し、その上位層の数1,000～10,000ppmの塩分濃度よりも高く、上位層同様に検討範囲にわたって成層構造をなすことがわかった。

また、滝ノ上層とその上位層の地層圧力を比較するために、苫小牧CCS-1（後述）の掘削時における泥水比重を対深度でプロットすると、上位層では比重1.1前後であるのに対し、滝ノ上層では比重1.4～1.5である。滝ノ上層とその上位層との泥水比重が異なるということは、滝ノ上層の地層圧力がその上位層とは異なっていることを示す。すなわち、滝ノ上層とその上位層とで圧力システムが異なり（図2.2-4）、垂直方向の圧力伝播がなく、地層水の移動がないと考えられる。

広域東西断面図



広域南北断面図

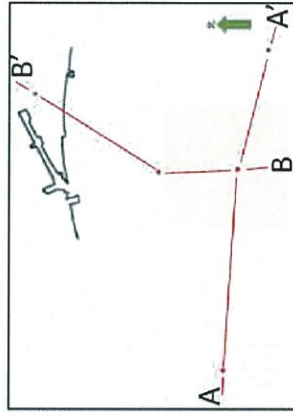
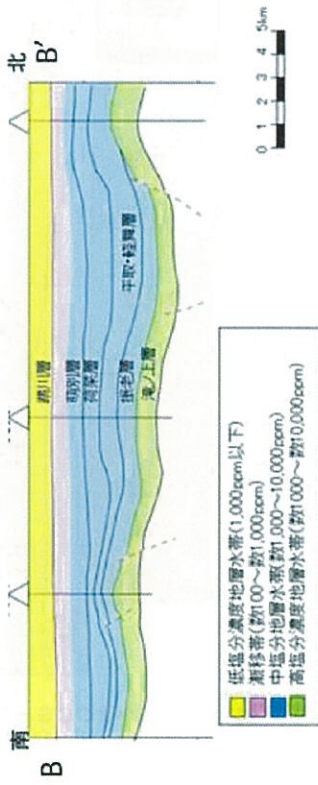


図 2.2-3 地層水の塩分濃度分布断面図

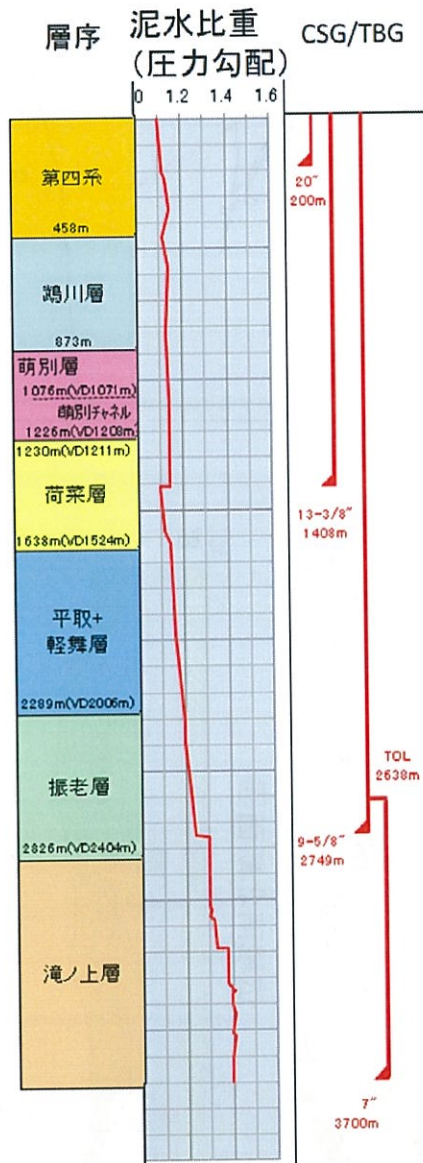


図 2.2-4 苫小牧 CCS-1 における泥水比重の変化図

2.3 使用した地質データ

苫小牧地点周辺を含む道央南部の陸域および海域では、数十年にわたって石油・天然ガスのための調査が国および民間企業によって行われてきた。苫小牧地点における貯留層評価に使用した地質データには、国による基礎物理探査データ、民間企業が取得した既存の二次元弾性波探査データ（以下、「2Dデータ」という）や周辺坑井データなどが含まれる。

貯留層の評価には、既存地質データおよび今回新規に取得した地質データを使用した（表 2.3-1）。今回取得した三次元弾性波探査データ（以下、「3Dデータ」という）の解析においては、その範囲内にある既存の坑井A（1970年代に民間企業によって海域に掘削された試掘井で、深度3,000m以上の滝ノ上層以深まで調査されている）および苫小牧C CS-1のデータをリファレンスとして使用した。また、滝ノ上層T1部層の地質モデルを構築する際に使用した浸透率・孔隙率相関には既存の坑井Aおよび周辺坑井のデータを使用した。

表 2.3-1 貯留層評価の使用データ一覧

使用データ	使用方法	データソース
三次元弾性波探査データ (3D)	地質構造解釈、堆積学的検討、音響インピーダンス等の物性値推定	3Dデータ (リファレンスデータ: 坑井A・苫小牧CCS-1)
コア分析データ	岩石学的評価の他、孔隙率、浸透率、相対浸透率、毛細管圧、スレシヨルド圧等の基礎物性値の提供 浸透率-孔隙率相関	周辺坑井 坑井A 苫小牧CCS-1 苫小牧CCS-2
坑井速度測定データ	弾性波データの時間-深度変換	坑井A 苫小牧CCS-1
物理検層データ	岩相区分の判定 インピーダンス推定 岩相分布・孔隙率分布の作成	坑井A 苫小牧CCS-1
温度・圧力データ	地温勾配 坑底圧力(貯留層圧力&地層破壊圧力)決定	坑井A 苫小牧CCS-1 苫小牧CCS-2
二次元弾性波探査データ (2D)	地質構造解釈、堆積学的検討、音響インピーダンス等の物性値推定	陸海域の既存2Dデータ

2.4 三次元弾性波探査結果の概要

2.4.1 実地調査

苫小牧港西港区沖合の海域において、2009年10月8日から11月27日に東西約3.8km、南北約4.1kmの区域で、さらに2010年7月15日から9月10日に東西約5.9km、南北約7.6kmの区域で、3Dデータを取得し、データ解析を行うために両3Dデータを統合した処理を行った(図2.4-1)。



図 2.4-1 調査範囲位置図

2.4.2 3Dデータの解釈

平成22年度および23年度の3Dデータに加え、民間企業が所有する周辺海域の弾性波探査断面と坑井資料を補助的に利用し、層序のコントロールポイントとして坑井Aおよび苦小牧CCS-1を使用して解析作業を実施した。

坑井Aおよび苦小牧CCS-1の層序に従って、下位より「滝ノ上層泥岩層」「滝ノ上層T1部層下部」「滝ノ上層T1部層上部」「振老層」「平取+軽舞層」「荷葉層」「萌別層」「鶴川層」の計8層準に区分し、3Dデータにより各層準について岩相と反射波の特徴、各地層境界や地層内における不整合、オンラップ、ダウンラップなどの堆積様式を確認した。

1) 滝ノ上層

滝ノ上層は火山岩/凝灰岩からなる上部の滝ノ上層T1部層と下部の泥岩層からなり、さらに滝ノ上層T1部層は上部の凝灰岩卓越層と下部の溶岩～凝灰角礫岩卓越層とに分けられる。滝ノ上層T1部層は周辺の既存坑井において、浸透率の高い溶岩～凝灰角礫岩・凝灰岩として認められ、その上位には平取+軽舞層、振老層からなる厚い遮蔽層が確認されている。

3Dデータでは滝ノ上層T1部層下部の溶岩～凝灰角礫岩卓越層は全体的に強反射で水平方向の連続性が良く、溶岩～凝灰角礫岩の粗粒堆積物が比較的安定して分布していると推定される(図2.4-2および図2.4-3)。滝ノ上層T1部層上限(振老層基底)は、北北西～南南東の構造の高まり(背斜構造)を示し、その北端部(沖合約3km)付近でドーム状の構造を形成している。この構造は火山の噴出口近傍を示している可能性があり、周辺には孔隙率および浸透率が高い粗粒堆積物が堆積していることが期待される。滝ノ上層T1部層上限は、構造東翼部では約15°で北東に傾斜している(図2.4-4)。

2) 萌別層

萌別層は3Dデータでは上部と下部とで反射波の特徴が異なっている。上部は連続性の悪い弱反射となっていることから、シルト岩～泥岩が発達していると予想され、下部は連続性の良い強反射であることから、坑井Aで認められた礫岩、砂岩のような粗粒堆積物(粗粒相)の発達が予想される。この強反射は南西方向へ薄化して不明瞭になることから、粗粒相は検討海域の北東部を中心に発達していると考えられる。海底面から萌別層までの間では反射波はほぼ平行で、一連の堆積層として識別される(図2.4-2および図2.4-3)。粗粒相発達域(萌別層下部)の上面は、北西から西に約1～3°で緩く傾斜している(図2.4-5)。

3) 地質構造

調査対象区域の地質構造は、滝ノ上層T1部層上限（振老層基底）構造図では北北西方向に延びた背斜構造となっている（図2.4-4）。3Dデータから、滝ノ上層上限の背斜構造に沿って北北東-南南西に延び、荷葉層にまで達する断層が存在すると解釈した。断層の落差は一樣ではなく、検討海域の中央付近では若干の落差が認められるが、北部や南部では落差は認められない。背斜頂部付近での削剥様式は振老層基底、平取+軽舞層基底および荷葉層中の傾斜不整合で認められ、振老層堆積前から荷葉層堆積時にかけて断層の活動と背斜構造の形成が断続的に繰り返されたと解釈した。また、萌別層基底にも背斜頂部から東部にかけて傾斜不整合が認められることから、断層の活動は萌別層堆積前まで続いていた可能性がある。

一方、萌別層から第四系にかけては一連の堆積層として認識されること、鵝川層上限の時間構造図では苦小牧沖構造の背斜構造が認められないことおよび鵝川層基底の時間構造図では東の高まりからの構造の張り出しとなっていることから、萌別層堆積時以降は背斜構造を形成するような構造運動はなかったと考えられる（図2.4-5）。

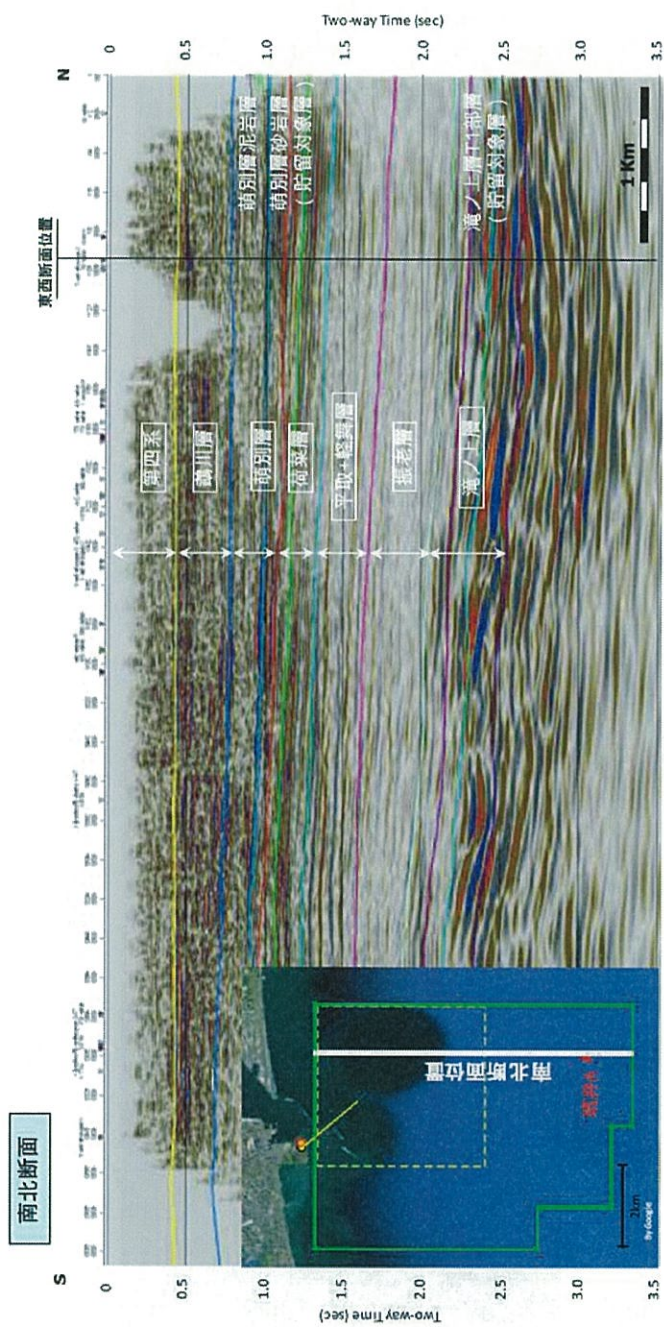


圖 2.4-2 三次元彈性波探查結果解釈断面圖 (南北断面)

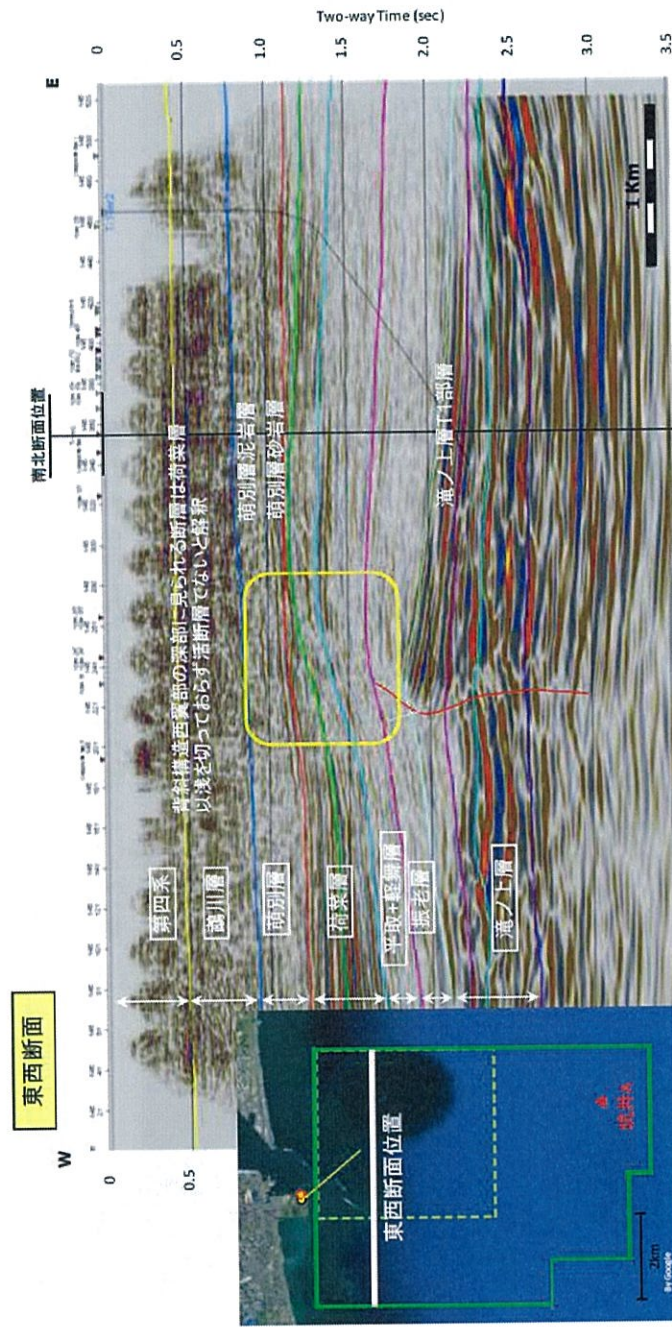


図 2.4-3 三次元弾性波探査結果解釈断面図 (東西断面)

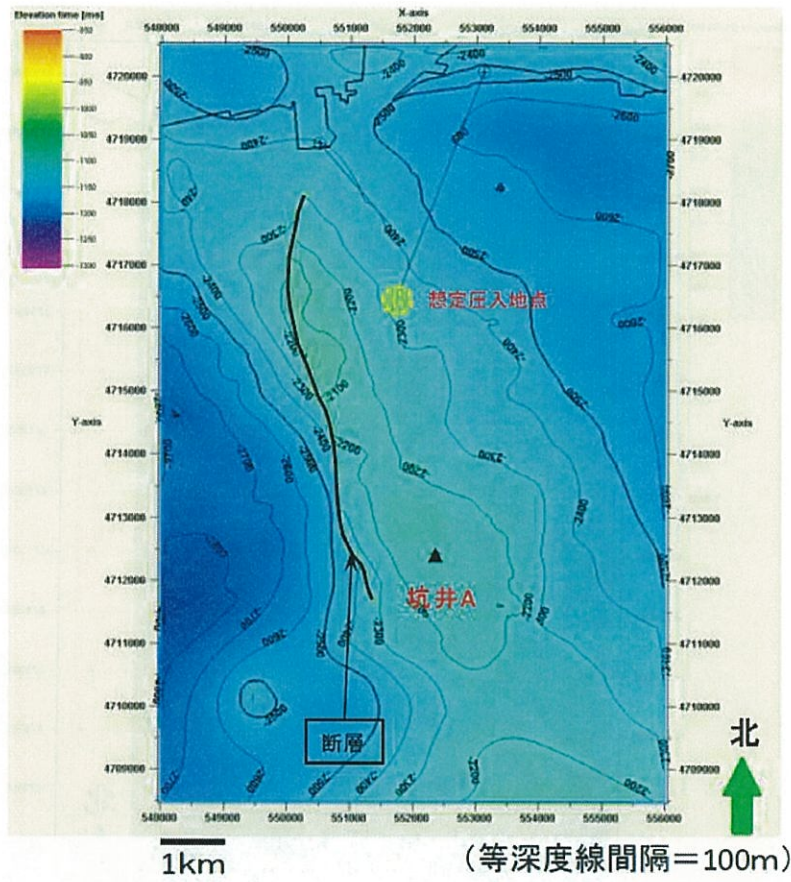


図 2.4-4 滝ノ上層 T1 部層上限構造図
(図中の X 軸および Y 軸は世界測地系 WGS84 の UTM54 系の座標)

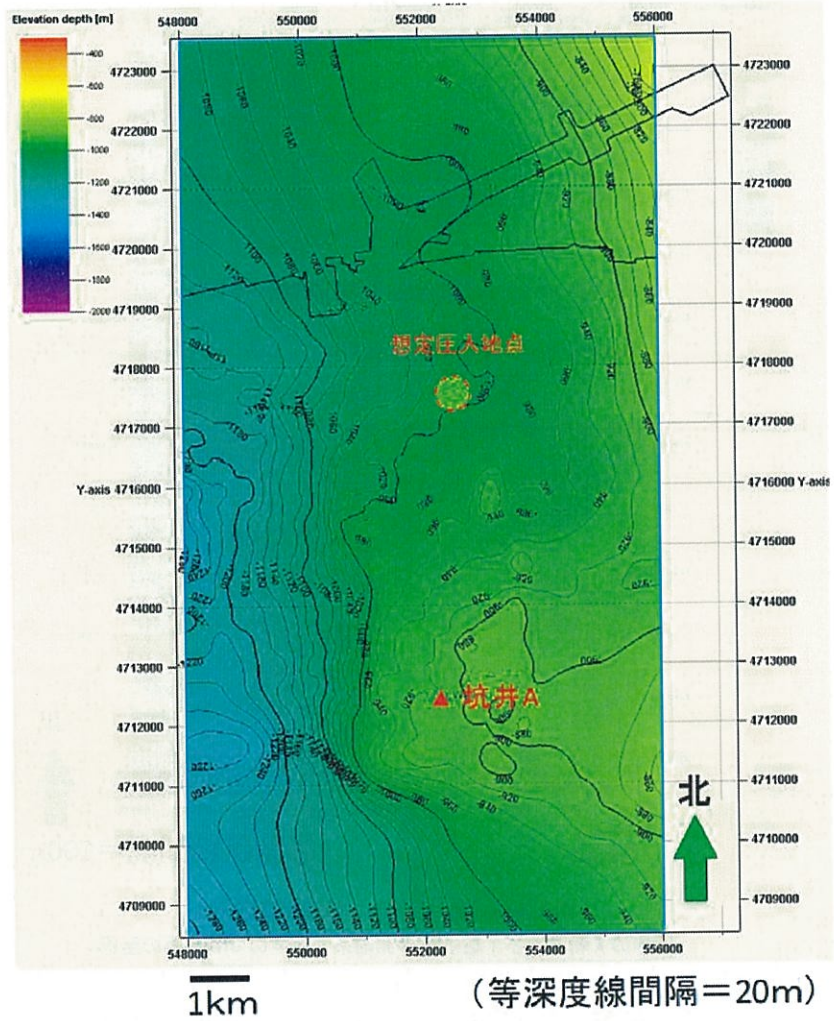


図 2.4-5 萌別層砂岩層上限構造図
(図中の X 軸および Y 軸は世界測地系 WGS84 の UTM54 系の座標)

2.5 苫小牧CCS-1掘削結果の概要

2.5.1 掘削作業概要

2010年11月5日から2011年2月21日までの109日間において、深度3,700m（垂直深度3,046m）の傾斜井を掘削した（図2.4-1）。

2.5.2 地質調査結果

掘削中は、カッティングス調査および物理検層により、層序および岩相を確認した。その結果を表2.5-1に記す。なお、萌別層砂岩層の上限は1,076m（垂直深度1,071m）である。

表 2.5-1 地質層序と岩相

地層名	掘削深度 mMD (垂直深度 mVD)	岩 相
第四系	0 - 458	未固結砂礫等
鶴川層	458 - 873	砂礫岩を主体とし、シルト岩を伴う
萌別層	873 - 1,230 (1,211)	上部はシルト岩～泥岩主体とし、下部は砂岩からなる。
荷菜層	1,230 - 1,638 (1,211) (1,524)	シルト岩～砂岩を主体とし泥岩を伴う。稀に凝灰質シルト岩～砂岩・マールの薄層を挟在する。
平取+軽舞層	1,638 - 2,289 (1,524) (2,006)	シルト岩～砂岩主体とし泥岩を伴う。稀に凝灰質シルト岩～砂岩・マールの薄層を挟在する。
振老層	2,289 - 2,826 (2,006) (2,404)	シルト岩～砂岩を主体とし泥岩を伴う。稀に凝灰質シルト岩～砂岩・マールの薄層を挟在する。
滝ノ上層 T1部層	2,826 - 3,700 (2,404) (3,046)	火山角礫岩・凝灰岩等の火山岩再堆積相を主体とし、一部に枕状溶岩を確認した。

各坑径掘り止め時に以下の種目の物理検層を実施し、岩相や物性を評価するための基礎データを取得した。主な種目は、坑径、比抵抗、自然電位、ガンマ線、見かけ密度、中性子孔隙率、音波速度、比抵抗画像、ディップメータ、核磁気共鳴である。図2.5-1に物理検層結果の事例を記す。

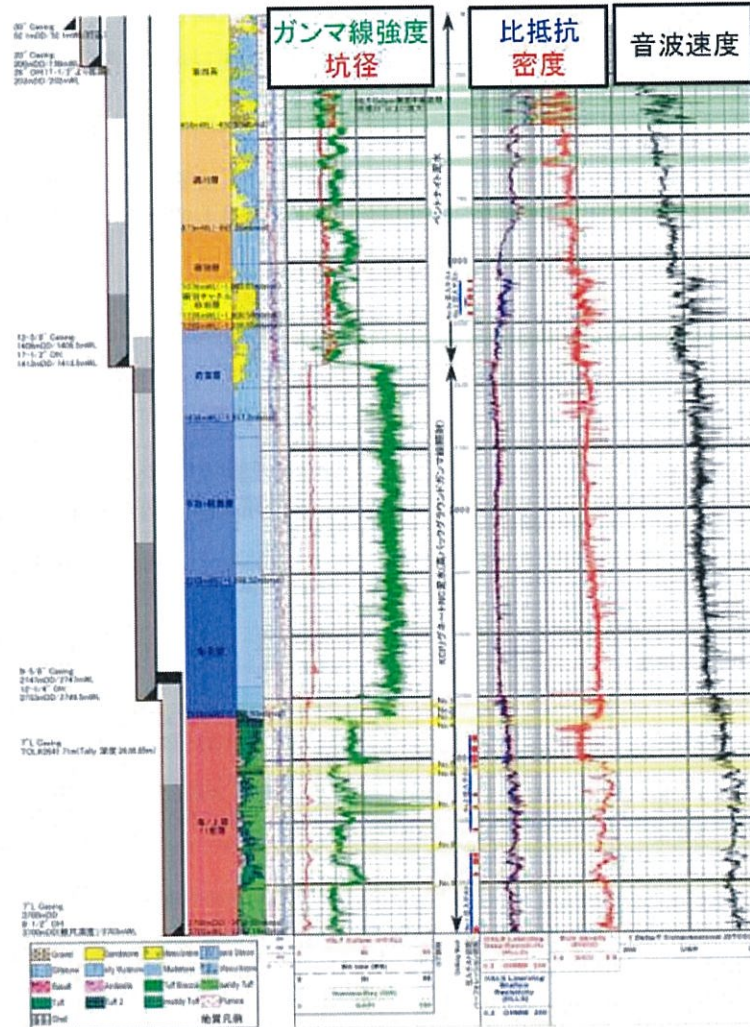


図 2.5-1 苫小牧 CCS-1 物理検層結果事例

物理検層作業で測定された温度のビルドアップ解析結果と取水井の揚水試験時に測定した温度から地温勾配を求めた (図 2.5-2)。第 1 次および第 2 次物理検層作業区間のビルドアップ温度が地温勾配より高く出ているのは、どちらも 17-1/2" (インチ) の

大坑径環境下で高粘度のベントナイト泥水を使用したため、検層作業中に掘削泥水の除熱が間に合わなかったためである。図中には、温度勾配の傾向を示すため、FMI・XPT・CMR・RCBLの測定温度もプロットした。

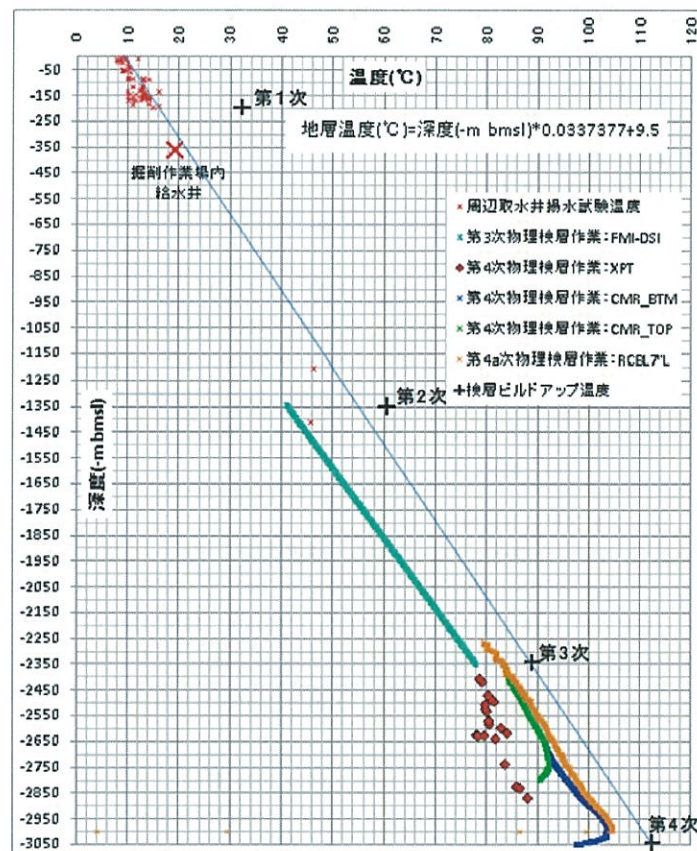


図 2.5-2 苫小牧 CCS-1 地温勾配解析結果

カッティングス試料を地表～深度 3,700m の間、分析項目により 20m～50m ごとに採取し、コア試料（直径約 10cm）を振老層泥岩で 2 回（合計 16m）、滝ノ上層 T 1 部層で 7 回（合計 115.9m）採取した。

これらの試料に関し、微化石分析（有孔虫および珪藻化石分析）、岩石鉱物分析（X線分析および薄片鑑定）および岩石物性分析（孔隙率、浸透率、スレショルド圧力分析など）を実施した。

有孔虫および珪藻化石分析により各地層の堆積時代を推定するとともに、周辺にある

既存坑井と対比することで地層名を確認した。有孔虫化石分析により堆積環境を推定し、振老層は中部半深海（500～1000m）、萌別層は中部半深海上部から上部半深海（200～500m）であることがわかった。

コア試料を用いた岩石物性分析により以下を確認した。

1) 滝ノ上層T1部層

- ・孔隙率：5～18%（封圧下）
- ・空気浸透率：0.001～0.01mD（封圧下）

2) 振老層泥岩層

- ・孔隙率：12.4～18.0%（封圧下）
- ・水浸透率： $8.2 \times 10^{-6} \sim 36.7 \times 10^{-6}$ mD
- ・スレシヨルド圧力
孔径分布からの推定（N₂-水系）：5.73～15.02MPa
段階昇圧法（N₂-水系）：水浸透率が低く長期間を要するため実施せず。
残差圧力法（N₂-水系）：1.29～12.3MPa以上^{注)}（4試料）
段階昇圧法（CO₂-水系）：11.72MPa以上^{注)}（2試料）

注) ブレークスルーしなかったことからこの値以上のスレシヨルド圧力を有すると判断した。

2.5.3 リークオフテスト結果

苫小牧CCS-1の深度2,753～2,758m（垂直深度2,350.1～2,354.8m）の振老層下部において、遮蔽層強度を測定することを目的として、リークオフテストおよびエクステンディッド・リークオフテストを実施した。その結果、加圧対象の中央深度2,755.5m（垂直深度2,352.0m）におけるリークオフ圧力は45.3MPaであり、等価泥水比重で1.96であること、また閉合圧力が44.55MPa、等価泥水比重で1.93であることがわかった。

2.5.4 VSP結果

苫小牧CCS-1において、300～800mの間は100m間隔で、深度850～3,265mは25m間隔でVSP調査を実施することにより、深度-走時間関係を取得するとともに、坑井近傍における弾性波データを取得したことから、苫小牧CCS-1と3Dデータとの高精度な対比が可能となった（図2.5-3）。

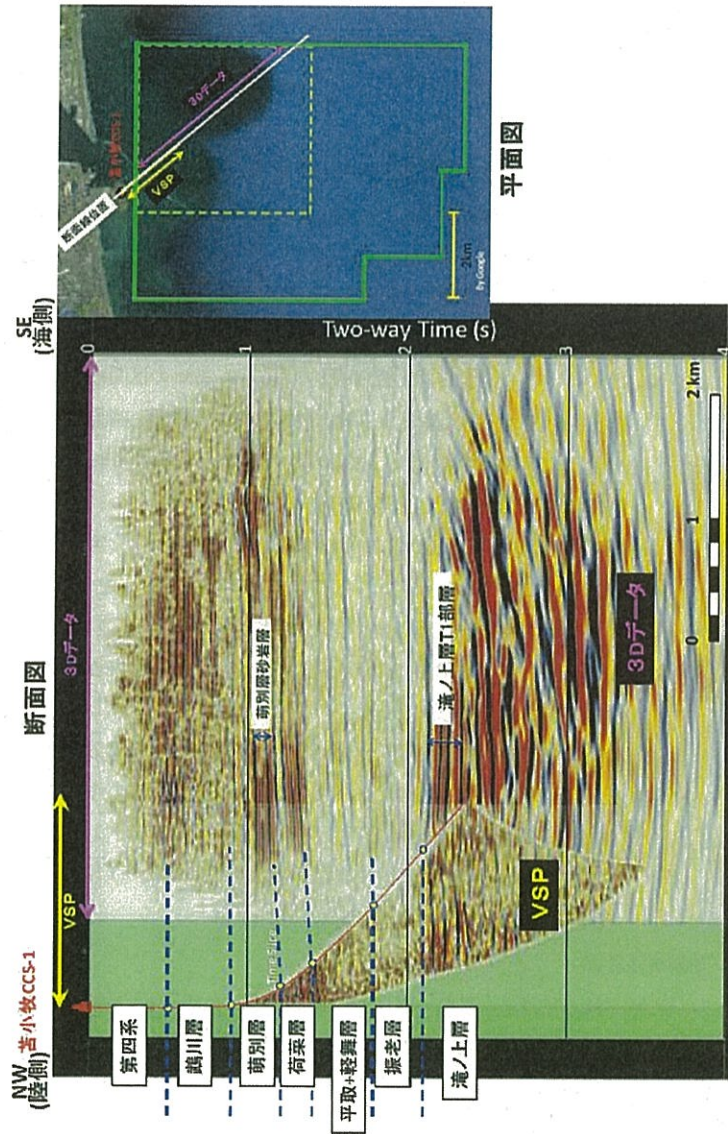


図 2.5-3 坑跡に沿う三次元断面図およびVSPイメージング断面図の対比 (縦軸は往復走時)

