

## 2. 海底下廃棄をされた特定二酸化炭素ガスが海洋に漏出したと仮定した場合に予測される当該特定二酸化炭素ガスの海洋への漏出の位置及び範囲並びに漏出量並びにその予測の方法

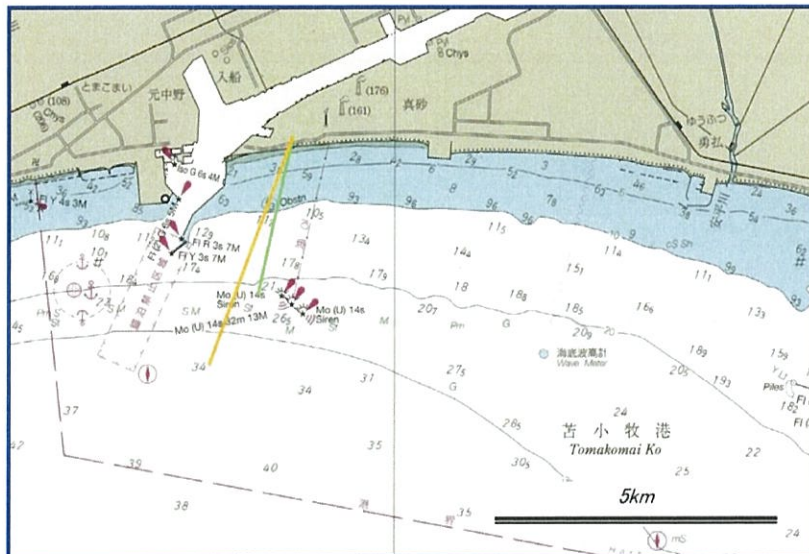
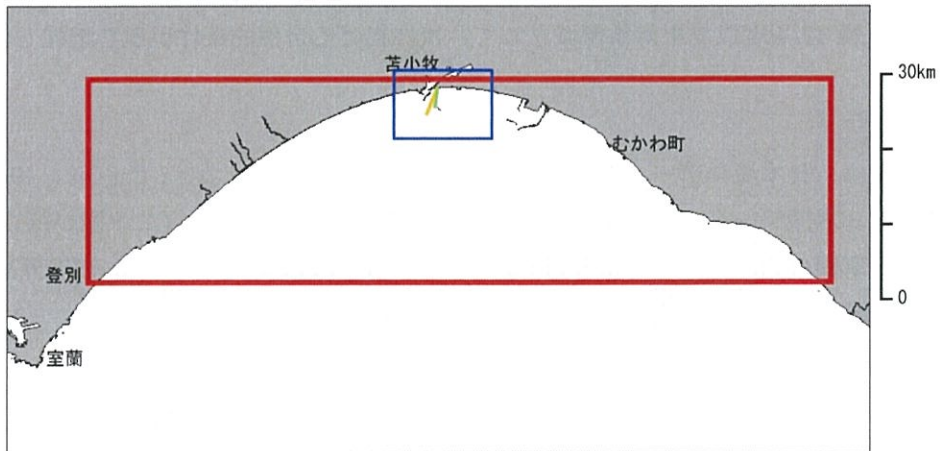
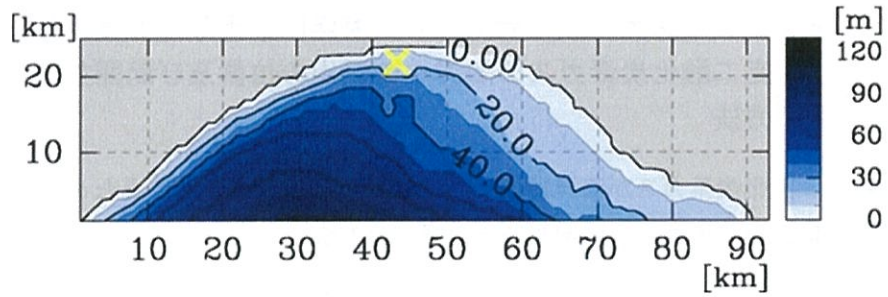
### 2.1 当該特定二酸化炭素ガスが海洋環境に及ぼす影響の程度を予測するために把握した海域の流況その他の自然的条件の現況及びその把握の方法

#### (1) 自然的条件の現況

特定二酸化炭素ガスが海洋に漏出した場合に影響の及ぶ範囲を特定するために、日高湾のおよそ北緯 42.4 度以北を対象領域として、次に掲げる自然的条件現況を把握した。

#### ① 水深

水深は、日本海洋データセンター (Japan Oceanographic Data Center; JODC) の 500m メッシュ水深データを用いて把握した。全体として海岸線に平行に水深が深くなり、苫小牧港の東側では西側に比べて水深の増大が緩やかであった (第 2.1-1 図参照)。なお、CO<sub>2</sub> 圧入点直上の水深は、萌別層で約 20m、滝ノ上層で約 30m である。



- 注: 1. 上図はモデル地形。色と等値線は水深。黄色の×が CO<sub>2</sub>漏出位置。  
 2. 中図は苫小牧沖の地図(日本水路協会 海洋情報研究センター 海底地形デジタルデータ)。赤の矩形が静水圧モデル領域。青の矩形が下図の領域。  
 3. 下図は黄の線が滝ノ上層の圧入坑跡。緑の線が萌別層の圧入坑跡。

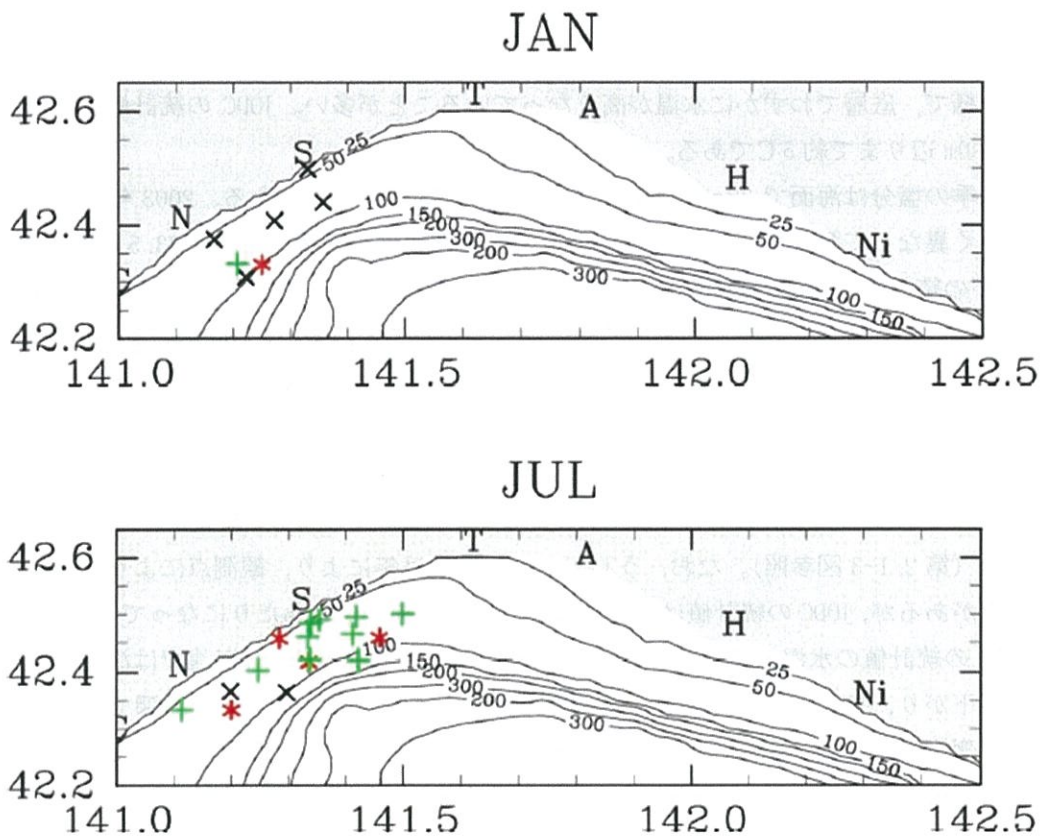
第 2. 1-1 図 静水圧モデル領域

② 水温, 塩分, 温度躍層および密度躍層の存在の有無, 並びにそれらの季節的变化

水温, 塩分は, 北海道大学水産学部附属練習船うしお丸による白老沖での CTD 観測データ(データ取得位置は, 第 2. 1-2 図および第 2. 1-1 表参照) および JODC の水温統計, 塩分統計の北緯 42~43 度, 東経 141~142 度の値を用いて把握した。

夏季の水温は表層付近が 15°C前後, 40m 以深では 5~12°C程度になっている。JODC の統計値は, 海面が約 16°C, 100m 深で約 7°Cである。冬季の水温は 3~8°C程度であり鉛直にほぼ一様で, 底層でわずかに水温が高くなっていることが多い。JODC の統計値は海面から水深 100m 辺りまで約 5°Cである。

夏季の塩分は海面で 32~33 程度, 40m 以深で 33~34 程度である。2003 年は, 他の年と大きく異なっており, 60m 以浅では 32.5~33 程度, 60m 以深では 33~33.5 になっている。JODC の統計値は海面で約 32.8, 水深 100m で約 33.8 である。冬季の塩分は 33 前後であり鉛直にほぼ一様で, 底層でわずかに高くなっていることが多い。2006 年は, 他の年に比べて塩分が高く, 33.9 程度で鉛直に一様となっている。JODC の統計値は, 海面で約 33.3, 水深 100m で約 33.5 である。躍層については, 2003 年の夏季は 30m 深付近に水温躍層が見られるが, その他には明瞭な水温躍層, 塩分躍層が見られない。夏季は海面から水深 30~40m 辺りまで水温は低下, 塩分は上昇し, それ以深では鉛直方向への変化が小さい傾向が見られる(第 2.1-3 図参照)。なお, うしお丸の観測値は年により, 観測点によりある程度ばらつきがあるが, JODC の統計値はおおよそそのばらつきの中心あたりになっている。そこで, JODC の統計値の水温, 塩分から密度を計算した。夏季は水深 30m 以浅では深さとともに水温が下がり, 塩分が上がっているため密度も大きくなっている。それ以深では水温, 塩分とも変化が小さく, 密度の増加も小さくなっている。冬季は, 夏季に比べて, 水温, 塩分とも海面から水深 100m まで変化が小さく, したがって密度の変化も小さい(第 2.1-4 図参照)。

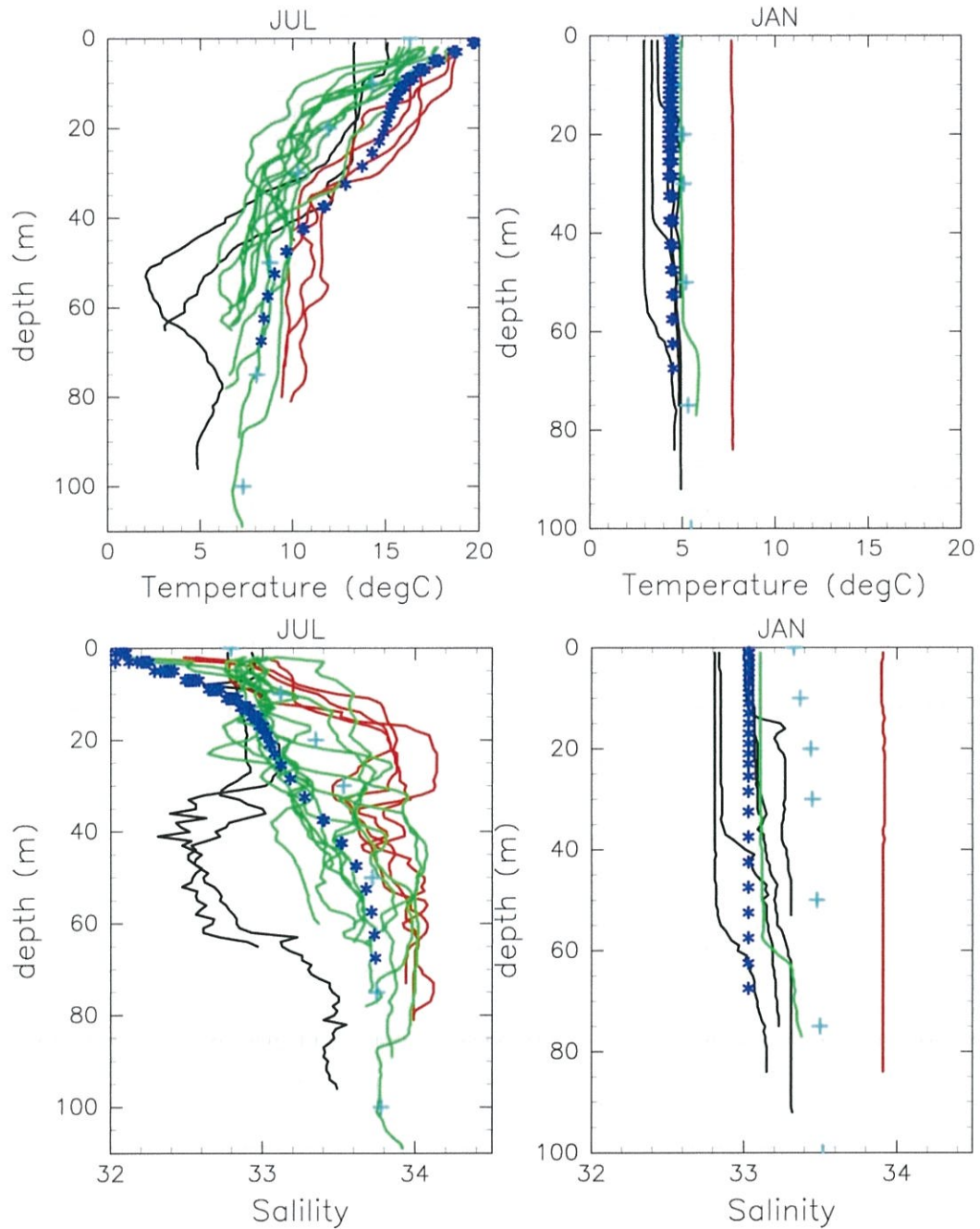


注：観測位置（上：1月，下：7月）  
 黒×，赤＊，緑＋は，1月がそれぞれ順に2003年，2008年，2012年，7月がそれぞれ順に2003年，2006年，2008年。N，S，T，A，H，Niは，順に登別，白老，苫小牧，厚真，日高，新冠。

第 2.1-2 図 北海道大学水産学部附属練習船うしお丸による白老沖での観測位置と観測日

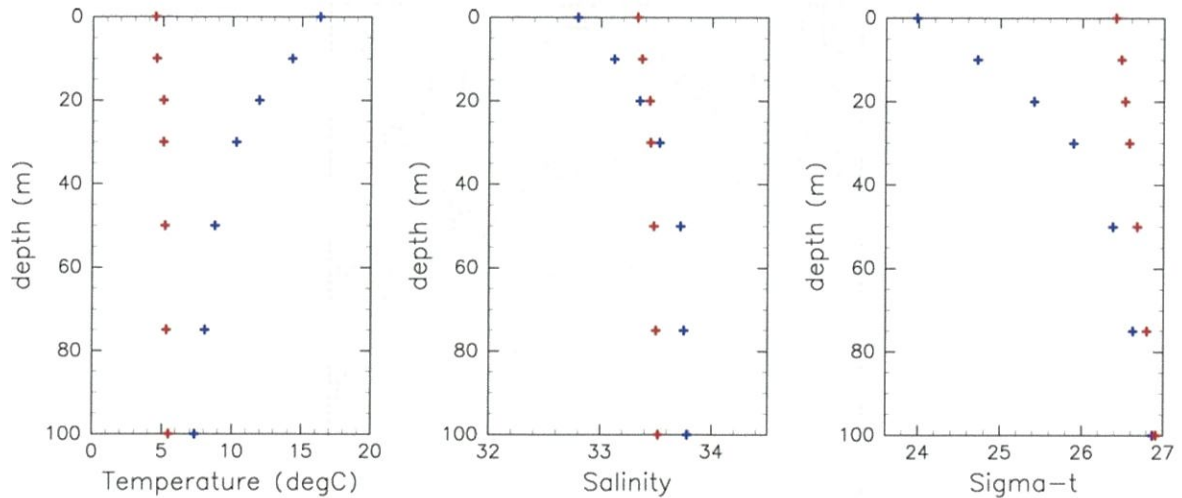
第 2. 1-1 表 北海道大学水産学部附属練習船うしお丸による白老沖での観測の位置，年月日および水深

月	緯度	経度	観測日	水深
1 月	42. 308	141. 22167	15-Jan-03	97
1 月	42. 375	141. 16667	15-Jan-03	59
1 月	42. 498	141. 33	15-Jan-03	39
1 月	42. 44	141. 35667	15-Jan-03	89
1 月	42. 408	141. 27167	15-Jan-03	80
1 月	42. 33	141. 25	21-Jan-08	97
1 月	42. 332	141. 20667	9-Jan-12	85
7 月	42. 367	141. 19833	13-Jul-03	71
7 月	42. 365	141. 29667	13-Jul-03	98
7 月	42. 333	141. 2	29-Jul-06	83
7 月	42. 417	141. 335	29-Jul-06	91
7 月	42. 457	141. 28333	29-Jul-06	54
7 月	42. 458	141. 45833	29-Jul-06	92
7 月	42. 49	141. 35333	9-Jul-08	63
7 月	42. 5	141. 49833	14-Jul-08	75
7 月	42. 42	141. 42167	14-Jul-08	103
7 月	42. 495	141. 41833	14-Jul-08	77
7 月	42. 465	141. 41167	14-Jul-08	86
7 月	42. 483	141. 33833	14-Jul-08	61
7 月	42. 422	141. 33667	14-Jul-08	91
7 月	42. 46	141. 33333	14-Jul-08	75
7 月	42. 333	141. 11333	15-Jul-08	58
7 月	42. 403	141. 24667	15-Jul-08	74



注：上が水温，下が塩分。左が7月，右が1月。青の\*が計算結果で，7月は2008年の条件で，1月は2003年の条件でそれぞれ計算したもの。実線は北海道大学うしお丸による白老沖のCTD観測結果。黒，赤，緑の順に7月は2003年，2006年，2008年の観測値，1月は2003年，2008年，2012年の観測値。水色の+はJODCの統計値。

第2.1-3図 水温・塩分の7月と1月の鉛直プロファイル



注：左が水温，中が塩分，右が計算による密度。各図の赤が冬季，青が夏季の値を示す。

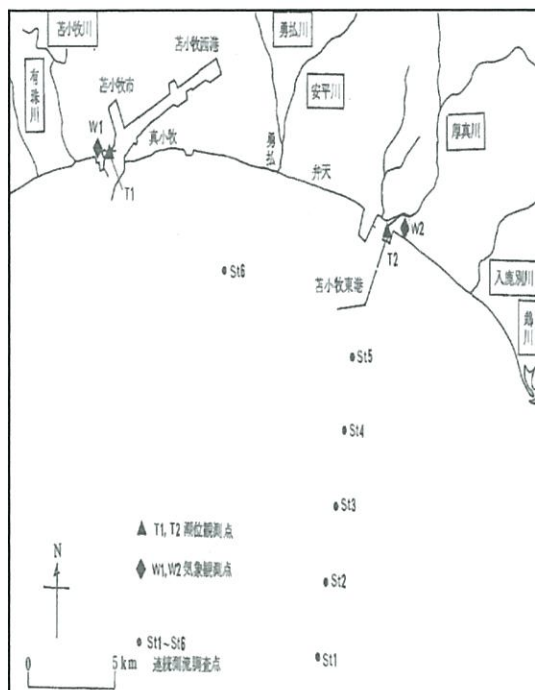
第 2.1-4 図 JODC 統計値の水温，塩分による密度

### ③ 海域の流況およびその季節的变化

流況は、『昭和 58 年度 - 苫小牧東部地区地先海域産業公害総合事前調査 現地調査報告書』（通商産業省 札幌通商産業局，1983 年）および『苫小牧港潮流観測調査業務報告書』（日本データサービス株式会社，2005 年）により把握した。

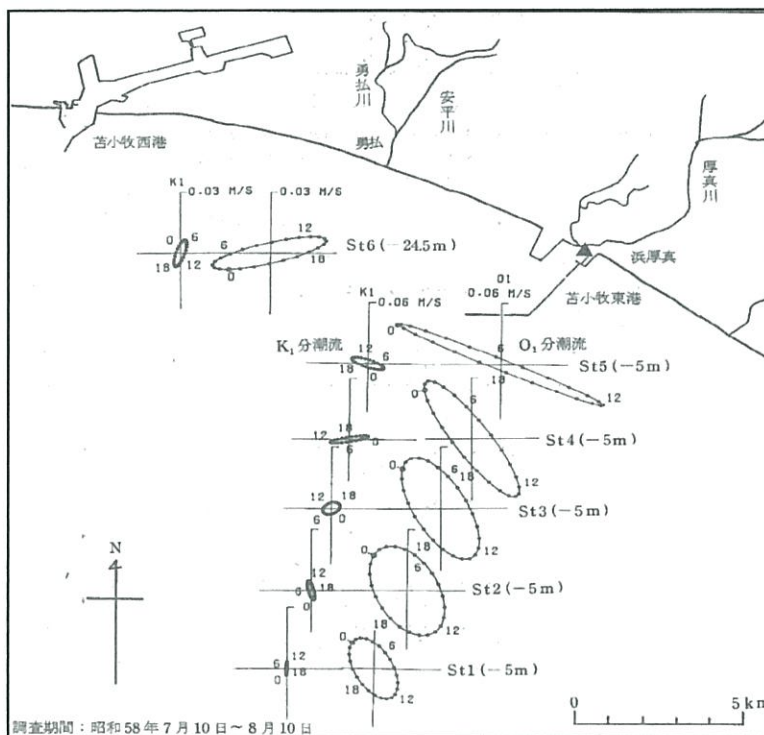
『昭和 58 年度 - 苫小牧東部地区地先海域産業公害総合事前調査 現地調査報告書』には，本調査海域の東へ約 10km 離れた 5 か所の調査点（第 2.1-5 図）で，1983 年 7 月 10 日から 8 月 10 日にかけての 32 日間，流速・流向を測定し解析した結果が記載されている。潮流は，海岸線に平行な流向の日周潮流（O1 分潮）が卓越し（第 2.1-6 図），海岸線に直角な流向の半日周潮流（M2 分潮）は微弱である（第 2.1-7 図）。恒流（32 日間平均流）は，2.1～3.9cm/sec の範囲に見られる。

『苫小牧港潮流観測調査業務報告書』（日本データサービス株式会社，2005 年）には，本調査海域内に 2 か所の調査点（No. 1, 2）が設けられ，約 2～3 週間の潮流観測を行った結果が示されている（第 2.1-8 図～第 2.1-11 図）。流向頻度を見ると，春から夏は海岸線に平行な東西方向の頻度が多く，南北の頻度が少ない。東西方向では，東流よりも西流の頻度が高い傾向がある。秋から冬は，春から夏と同様に，海岸線に平行な東西方向の頻度が多くて南北の頻度が少ないが，西流よりも東流の頻度が高い傾向を示している。潮流については，日周潮と半日周潮の比である F 値（K1 分潮+O1 分潮） / （M2 分潮+S2 分潮）を用いて潮流の型が示されている。圧入点近くの観測点 No. 2 においては，全観測期間において  $F \geq 1.5$  の日周潮型となっている。



資料：『 - 昭和 58 年度 - 苫小牧東部地区地先海域産業公害総合事前調査 現地調査報告書』  
 (通商産業省 札幌通商産業局, 1983 年)

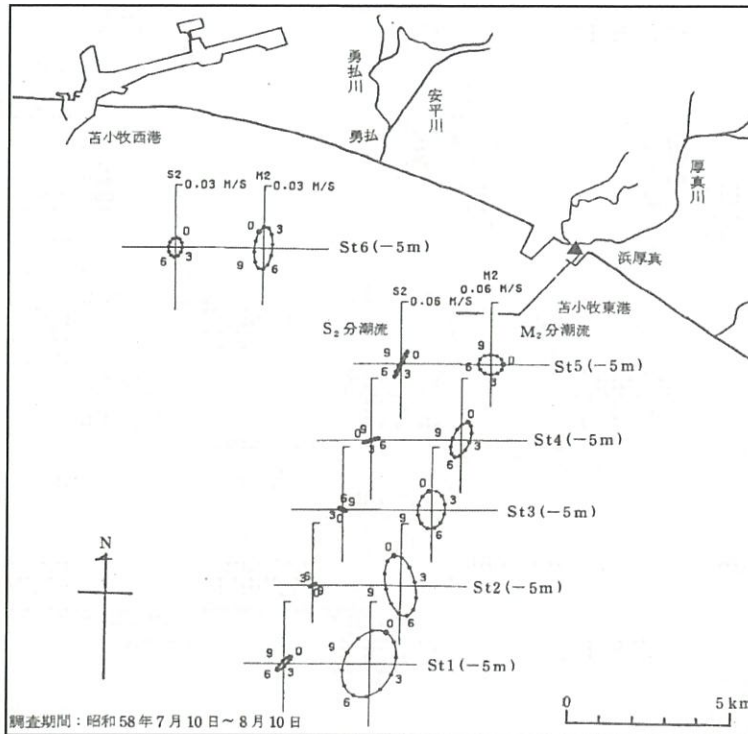
第 2.1-5 図 流速・流向調査測点位置



調査期間：昭和 58 年 7 月 10 日～8 月 10 日  
 資料：『 - 昭和 58 年度 - 苫小牧東部地区地先海域産業公害総合事前調査 現地調査報告書』  
 (通商産業省 札幌通商産業局, 1983 年)

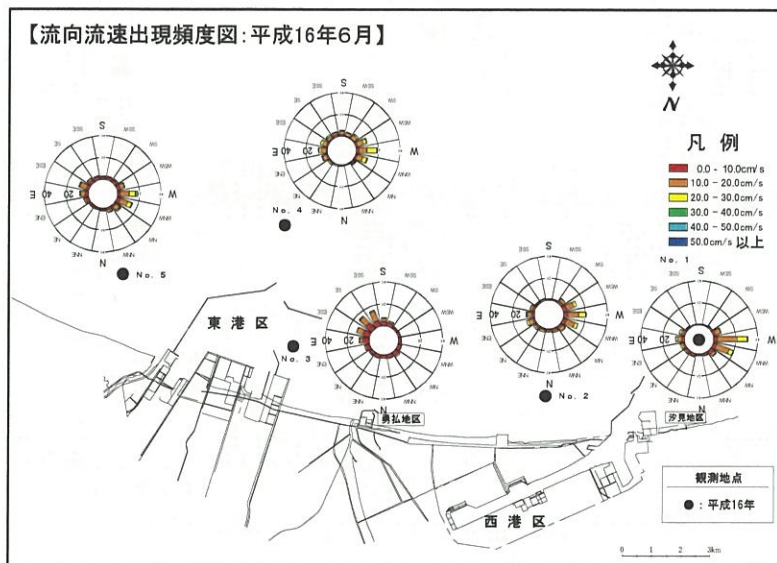
第 2.1-6 図 O1 と K1 分潮流の潮流楕円の水平分布





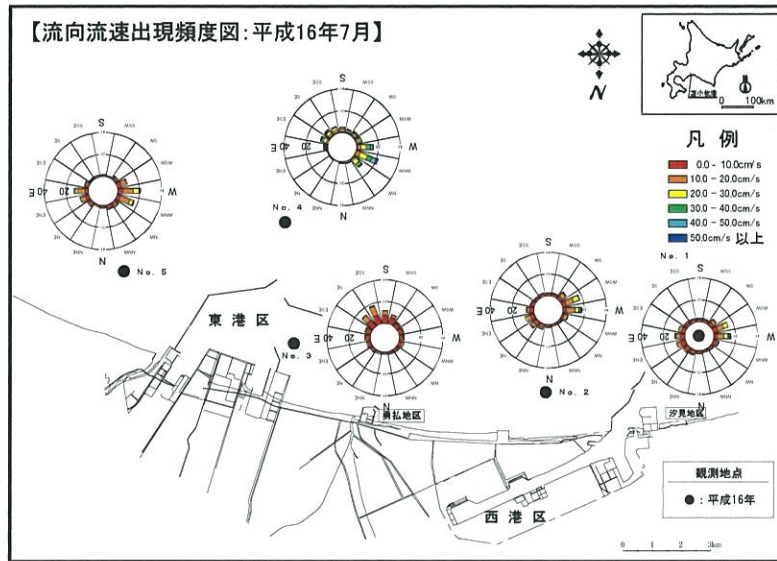
資料：『昭和58年度 - 苫小牧東部地区地先海域産業公害総合事前調査 現地調査報告書』  
(通商産業省 札幌通商産業局, 1983年)

第 2.1-7 図 M2 と S2 分潮流の潮流楕円の水平分布



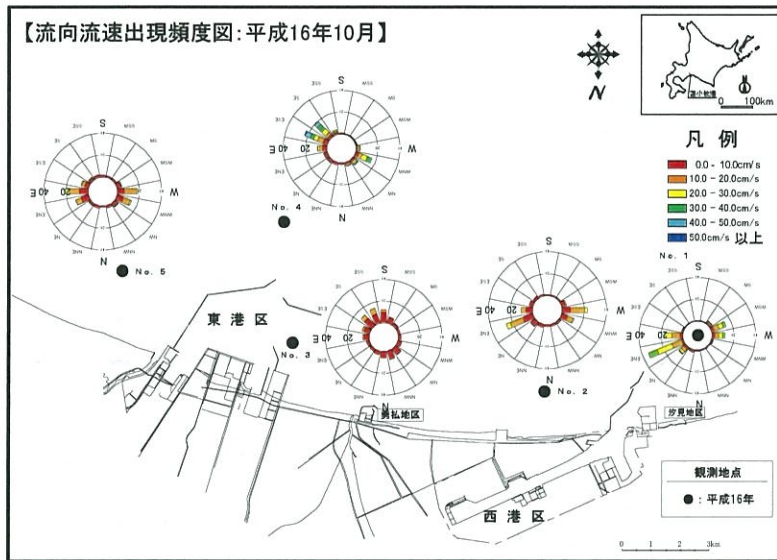
資料：『苫小牧港潮流観測調査業務報告書』  
(日本データサービス株式会社, 2005年)

第 2.1-8 図 流向出現頻度 (平成 16 年 6 月)



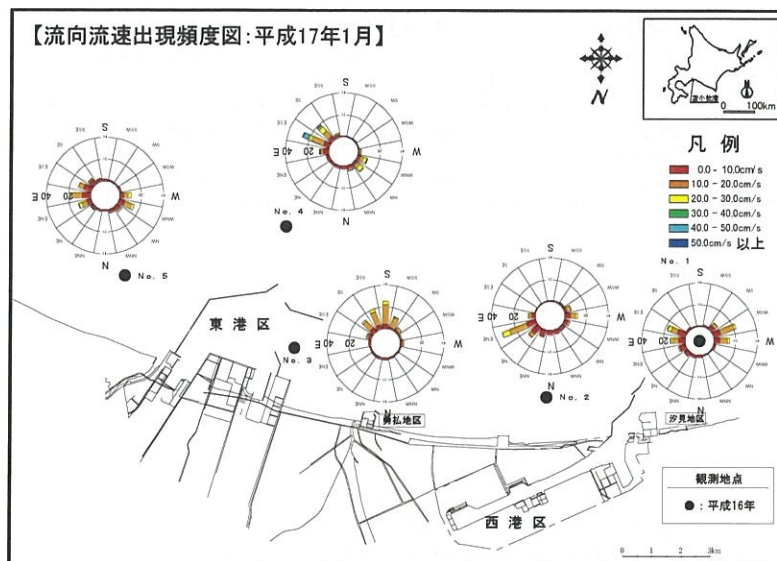
資料：『苫小牧港潮流観測調査業務報告書』  
(日本データサービス株式会社, 2005年)

第 2.1-9 図 流向出現頻度 (平成 16 年 7 月)



資料：『苫小牧港潮流観測調査業務報告書』  
(日本データサービス株式会社, 2005年)

第 2.1-10 図 流向出現頻度 (平成 16 年 10 月)



資料：『苫小牧港潮流観測調査業務報告書』  
 (日本データサービス株式会社, 2005年)

第 2.1-11 図 流向出現頻度 (平成 17 年 1 月)

流況の季節変化は, Rosa et al. (2009)<sup>[1]</sup>の示した日高湾における季節ごとの流況 (第 2.1-12 図参照) および苫小牧港湾事務所による苫小牧港潮流観測調査データ (第 2.1-2 表) を用いて把握した。苫小牧港沖合の恒流は, 夏季および冬季ともに流速数 cm 程度であり, 夏季には西向き, 冬季には東~北東向きの流向であった (第 2.1-8 図~第 2.1-11 図参照)。

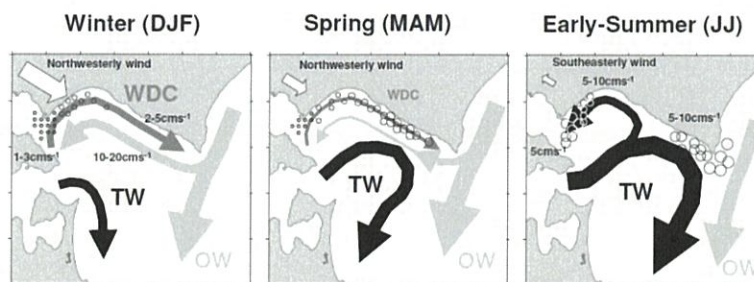


Fig. 10. Schematic diagrams of transient flow patterns from winter to early-summer, based on our previous study (Rosa *et al.*, 2007) combined with the present analysis of the coastal current measurements. Black arrows represent the Tsugaru Warm Current (TW), light gray arrows represent the shelf slope current (OW), and dark gray arrows show the wind-driven current (WDC). The white arrow in the upper left corner of each figure represents the typical wind. The locations of egg/larvae/juvenile Pollock for each season are expressed approximately as the group of circle-symbols, based on the juvenile's migration calendar proposed by Honda *et al.* (2004). DJF, MAM and JJ represent December–January–February, March–April–May and June–July, respectively.

第 2.1-12 図 Rosa et al. (2009)<sup>[1]</sup>の示した日高湾における季節ごとの流況

[1] Rosa A.L., Isoda, Y., Kobayashi, N. 2009. Seasonal variations of shelf circulation in Hidaka Bay, Hokkaido, Japan, with an interpretation of the migration route of juvenile walleye Pollock. *Journal of Oceanography*, 65, pp.615–626.

第 2.1-2 表 苫小牧港湾事務所による苫小牧港潮流観測調査の位置，期間および水深

調査季	緯度	経度	観測期間	水深 (m)
夏季	42° 36' 59.022	141° 39' 26.722	22-Jul-04~7-Aug-04	5
冬季	42° 36' 59.022	141° 39' 26.722	19-Jan-05~7-Feb-05	5

## 2.2 漏出事例仮説の設定

漏出経路として CO<sub>2</sub> 貯留層近傍の断層/フラクチャを想定することが現実的であるため (Benson et al., 2005) <sup>[1]</sup>, 次に掲げる調査検討を行った。

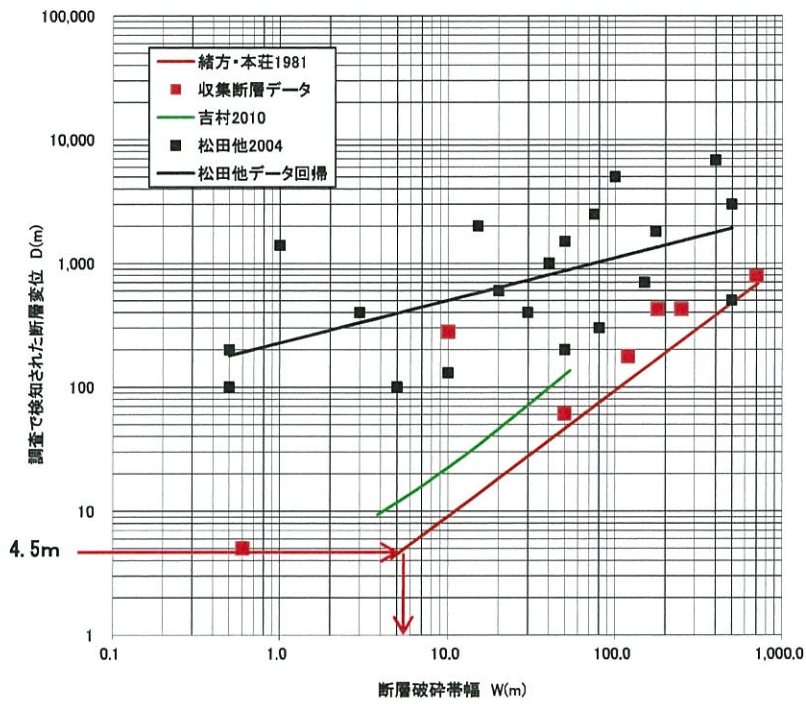
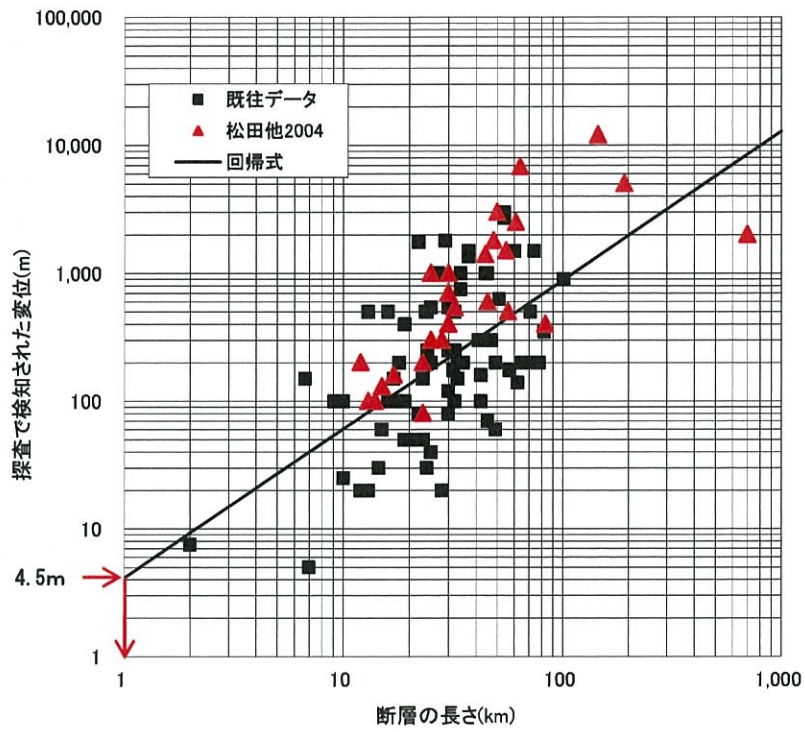
### (1) 断層の性状に関する文献調査

CO<sub>2</sub> の漏出経路となりうる断層/フラクチャの性状や浸透性について、既往知見を基にまとめた。

断層/フラクチャの性状調査では、弾性波探査によって検知限界となる断層の長さや幅を求めるために、まず断層変位と長さの関係を求めた。次に、断層の長さや幅の関係についてまとめ、さらに断層の幅と断層変位の関係を求めた。以上の関係を用いて、苫小牧沖での三次元弾性波探査の波長 (36m) と三次元弾性波探査で期待される垂直分解能 (波長の 1/8) との関係から苫小牧地点での垂直分解能を推定し、検知限界変位 (4.5m) とし、その検知限界変位に対応する断層の長さや幅を求めた。ただし、幅は安全側をみて下限の関係により求めた。以上の検討結果から、検知限界の断層変位は 4.5m であり、この場合の断層の長さは 1km、幅は 5m 程度と推定された (第 2.2-1 図)。

---

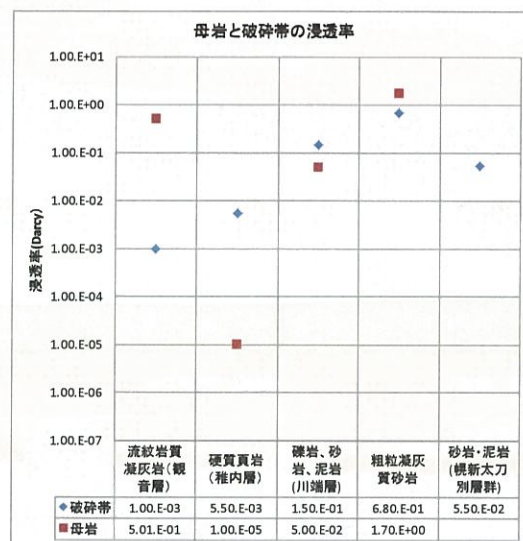
<sup>[1]</sup> Benson, S., Cook, P., Anderson, J., Bachu, S., Nimir, H.B., Basu, B., Bradshaw, J., Deguchi, G., Gale, J., von Goerne, G., Heidug, W., Holloway, S., Kamal, R., Keith, D., Lloyd, P., Rocha, P., Senior, B., Thomson, J., Torp, T., Wildenborg, T., Wilson, M., Zarlenga, F., Zhou, D., 2005. Underground geological storage. In: IPCC Special Report on carbon dioxide capture and storage. Cambridge University Press, Cambridge, UK. pp.195-276.



第 2. 2-1 図 変位検知限界から断層の長さ と 破砕帯幅の限界値を決める方法

浸透性の調査ではいくつかの文献データベースからキーワード検索を行い、断層破碎帯の浸透率が得られている文献を取集した。得られた国内 54 地点、海外 18 地点の結果から、岩種、地層年代などごとにヒストグラムを作成し、また、母岩と破碎帯の浸透率の関係、破碎帯の幅と浸透率の関係などの解析を行った。最終的には、苫小牧沖における貯留層岩種と類似の岩種として新第三紀以降の堆積岩、火山碎屑岩の断層破碎帯に関して詳細分析を行った。その結果、浸透率は 1mDarcy から 1Darcy の間に分布していることがわかった(第 2.2-2 図)。

この結果に基づき、後述(2)の漏出シナリオ 1 では周囲の岩相に合わせて 1mDarcy から 1Darcy の浸透率を与え、シナリオ 2 では全体に 1Darcy という最大の浸透率を与えた。



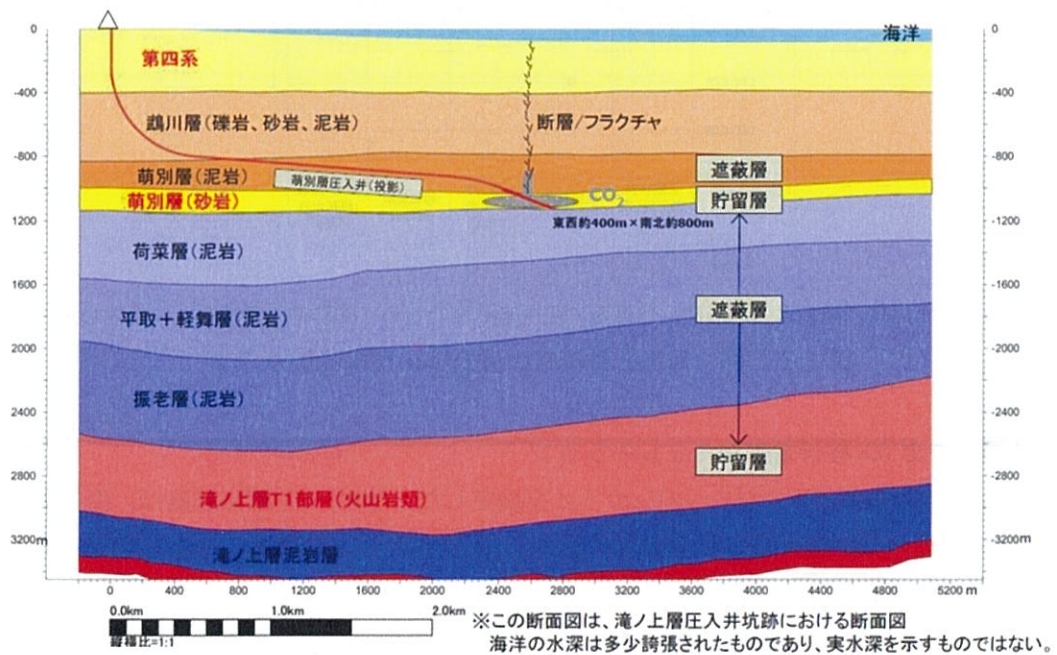
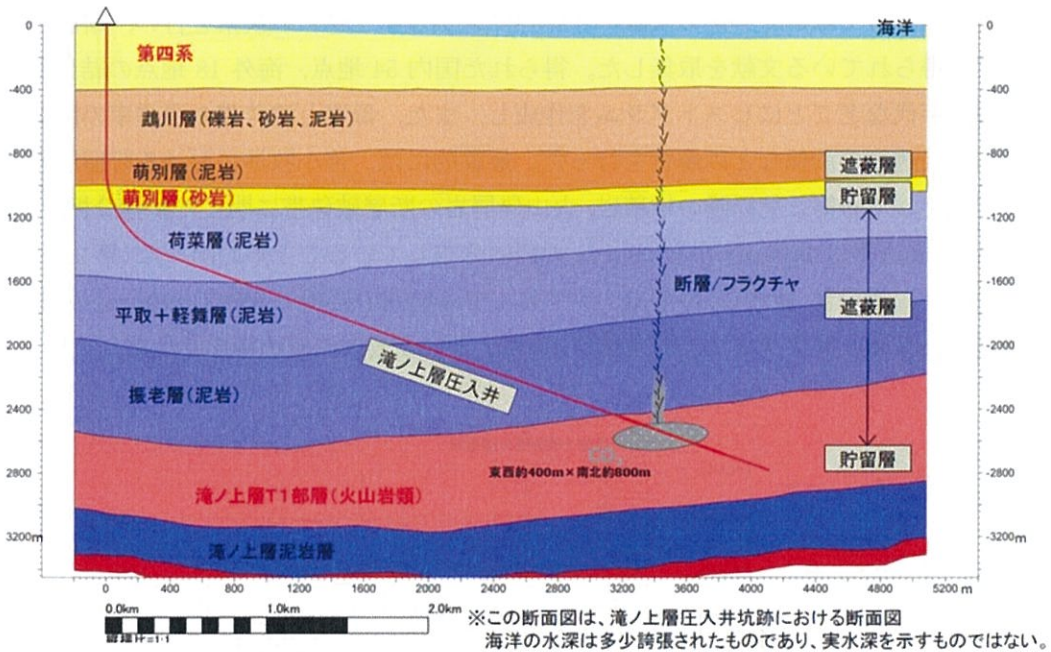
注：砂岩・泥岩（幌新太刀別層群）は母岩の浸透率がないため、破碎帯の浸透率のみ記載した。

第 2.2-2 図 母岩と破碎帯の浸透率の関係比較グラフ

## (2) 地層中での CO<sub>2</sub> 移行挙動シミュレーション

漏出シナリオは、以下の 2 つのシナリオを設定した。なお、CO<sub>2</sub> 漏出経路は、両シナリオともに前述(1)の文献調査結果から幅 5m、長さ 1km（当該サイトの地殻応力場を考慮して南北方向）の断層を設定した。

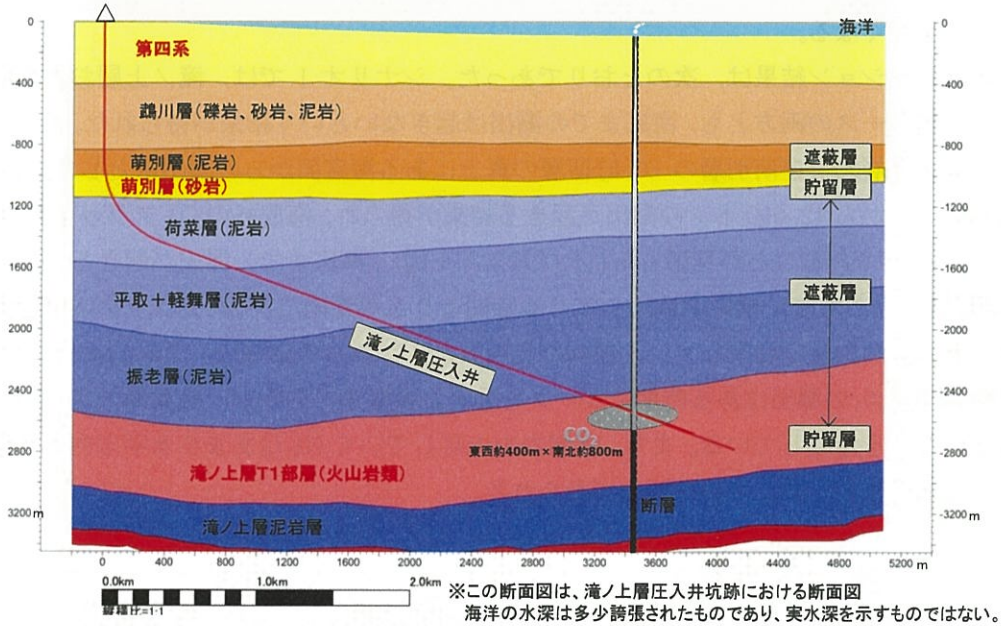
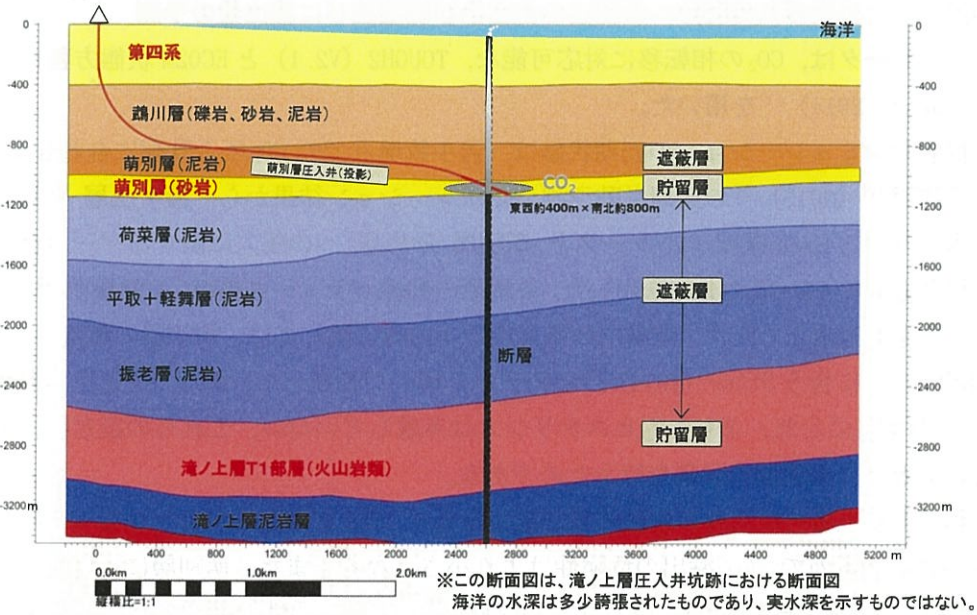
シナリオ 1…弾性波探査の検出限界以下の小規模な断層/フラクチャ（幅 5m、長さ 1km）が存在している場合を仮定し、CO<sub>2</sub> 圧入による貯留層圧力の上昇と、CO<sub>2</sub> プルームの浮力により、CO<sub>2</sub> が徐々に浸透（小規模な断層/フラクチャ周囲の浸透率は、周囲の岩相に合わせて 1mDarcy から 1Darcy）するシナリオ（第 2.2-3 図）。



第 2.2-3 図 漏出シナリオ 1 のイメージ (上：滝ノ上層，下：萌別層)

シナリオ 2…想定外の事象で、CO<sub>2</sub> 圧入期間中に貯留層から海底面付近まで達する断層（幅 5m，長さ 1km）が新たに発生し、この断層（断層全体の浸透率が 1Darcy という極端値）を通じて CO<sub>2</sub> が漏出する極端なシナリオ（第 2.2-4 図）。





第 2.2-4 図 漏出シナリオ 2 のイメージ (上：滝ノ上層, 下：萌別層)

## 2.3 特定二酸化炭素ガスの海洋への漏出の位置及び範囲並びに漏出量の予測

シミュレータは、CO<sub>2</sub>の相転移に対応可能な、TOUGH2 (V2.1) と ECO2M 状態方程式モジュール (Pruess, 2011) <sup>[1]</sup>を用いた。

移行挙動シミュレーションの初期状態は、苫小牧地点での CO<sub>2</sub> 圧入計画に合わせるために、石油資源開発 (2013) <sup>[2]</sup>の長期挙動予測シミュレーション結果から、滝ノ上層 (T1 部層) への圧入に関する Base 深度/P10 ケースと、萌別層 (砂岩層) への圧入に関するベースケースの、圧入終了直後の CO<sub>2</sub>・圧力分布を用いた。各地層の物性パラメータ等は、石油資源開発 (2013) <sup>[3]</sup>の報告書を基本としたが、断層内の相対浸透率曲線に関しては、萌別層の超臨界 CO<sub>2</sub>-水系の相対浸透率に合う Stone (1974) <sup>[4]</sup>のモデルを用いて設定した。また、毛管圧力曲線に関しては 0 のままにした。どちらもヒステリシスは考慮していない。これらの設定は、より漏出が起こるといふ危険側で評価を行うためである。

なお、滝ノ上層の圧入井の掘削結果を勘案すると、CO<sub>2</sub>ブルームがより小さく、その浮力もより小さくなるので、CO<sub>2</sub>漏出の危険性はより小さくなる。また、萌別層についても、圧力が最大となる初期状態を設定したが、圧入井掘削の結果、浸透性が当初の想定よりも高いことが期待されるデータが得られたことから圧力は設定より低くなると考えられ、CO<sub>2</sub>漏出の危険性はより小さくなる。

シミュレーション結果は、次のとおりであった。シナリオ 1 では、滝ノ上層および萌別層からの漏出ケースの両方とも、海底までの漏出は起きないという結果が得られた。シナリオ 2 では、滝ノ上層および萌別層の CO<sub>2</sub>貯留層の真上にある海底面からの漏出量として、40 年間で 7,000 トンから 12,000 トンの漏出が起きる結果が得られ、海底への CO<sub>2</sub>フラックスは、600 ~700 トン/年であることが見積もられた (第 2.3-1 図)。海底までの漏出が起きる場合には、CO<sub>2</sub>が海底に達した後、地中を移行してくる時間よりも短期間で、CO<sub>2</sub>フラックスは極大値をとり、その後漏出量は収束していく傾向が見られた。これらの結果は、Class et al. (2009) <sup>[5]</sup>と同等で、CO<sub>2</sub>の漏出はある時期にピークを迎えた後収束に向かい、長期間一定量の漏出は起きないことを示唆している。また、断層内を上昇していく CO<sub>2</sub>はあまり水平方向へは移動せず、ほぼ鉛直に上昇していく傾向が見られた。

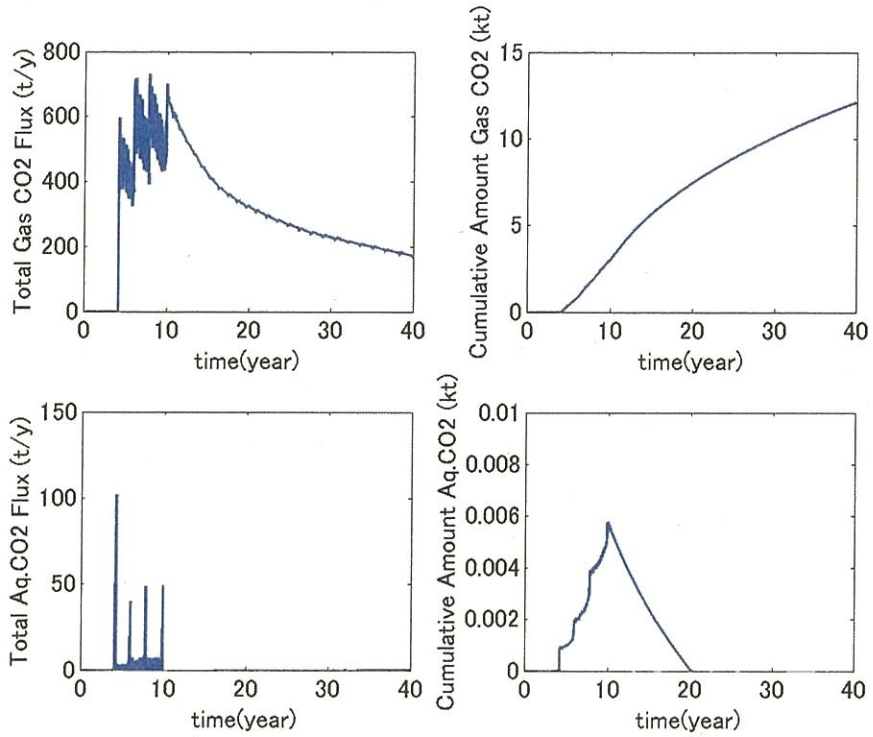
[1] Pruess, K., 2011. ECO2M: A TOUGH2 Fluid property module for mixtures of water, NaCl, and CO<sub>2</sub>, including super- and sub-critical conditions, and phase change between liquid and gaseous CO<sub>2</sub>. LBNL Report, LBNL-4590E, pp.1-83.

[2] 石油資源開発 (株), 2013. “圧入井最適圧入区間の選定, 圧入区間の仕上げ方法および坑壁安定性の検討 作業実施報告書”. 日本 CCS 調査 (株) 社内資料, p.8, 41, 43, 46, 253, 255, 258.

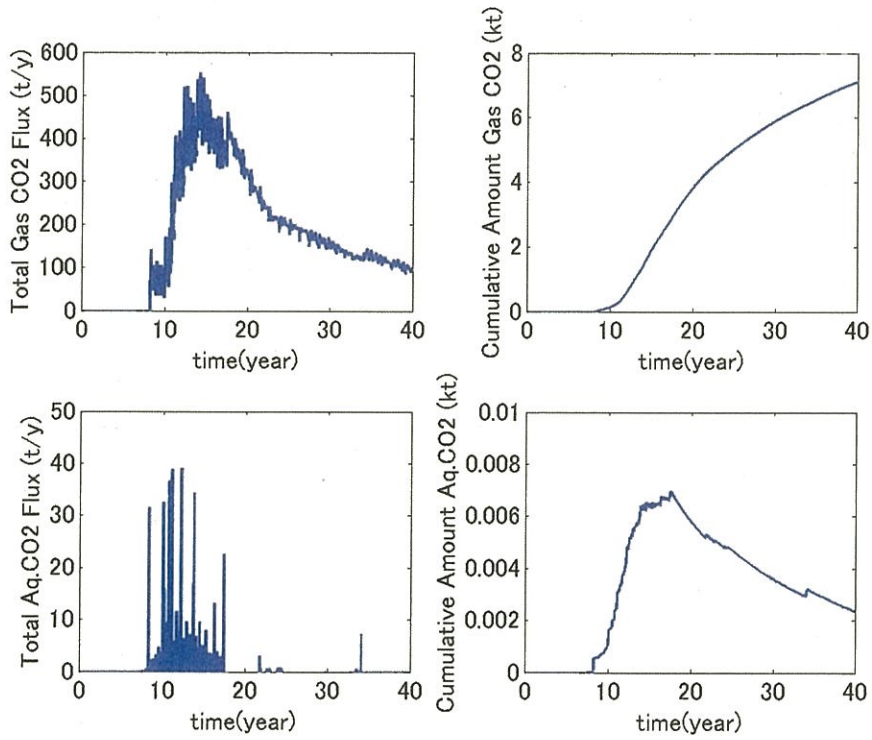
[3] 石油資源開発 (株), 2013. “圧入井最適圧入区間の選定, 圧入区間の仕上げ方法および坑壁安定性の検討 作業実施報告書”. 日本 CCS 調査 (株) 社内資料, p.8, 175, pp.403-409.

[4] Stone, H.L., 1970. Probability model for estimating three-phase relative permeability. Trans. SPE of AIME, 249, pp.214-218.

[5] Class, H., Ebigbo, A., Helmig, R., Dahle, H. K., Nordbotten, J. M., Celia, M. A., Audigane, P., Darcis, M., Ennis-King, J., Fan, Y., Flemisch, B., Gasda, S. E., Jin, M., Krug, S., Labregere, D., Beni, A. N., Pawar, R. J., Sbai, A., Thomas, S. G., Trenty, L., Wei, L., 2009. A benchmark study on problems related to CO<sub>2</sub> storage in geologic formations. Computers & Geosciences, 13, pp.409-434.



注：左；CO<sub>2</sub>フラックス，右；全漏出量，上；気相，下；溶解相。



注：左；CO<sub>2</sub>フラックス，右；全漏出量，上；気相，下；溶解相。

第 2.3-1 図 滝ノ上層（上）および萌別層（下）からの漏出（シナリオ 2）における海底面への CO<sub>2</sub> 漏出量