

添付書類-3

特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄をすることが海洋環境に及ぼす影響についての調査の結果に基づく事前評価に関する事項を記載した書類

目次

1. 海底下廃棄をしようとする特定二酸化炭素ガスの特性.....	- 1 -
1.1 特定二酸化炭素ガスの物理的及び化学的特性に関する情報.....	- 1 -
1.2 特定二酸化炭素ガスが廃棄される地層内での反応性.....	- 2 -
(1) 滝ノ上層 T1 部層.....	- 2 -
(2) 萌別層砂岩層.....	- 6 -
1.3 政令で定める基準への適合状況.....	- 9 -
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.....	- 10 -
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.....	- 10 -
(1) 自然的条件の現況.....	- 10 -
① 水深.....	- 10 -
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..	- 11 -
③ 海域の流況およびその季節的变化.....	- 16 -
2.2 漏出事例仮説の設定 (圧入開始以前の想定)	- 22 -
(1) 断層の性状に関する文献調査.....	- 22 -
(2) 地層中での CO ₂ 移行挙動シミュレーション	- 24 -
2.3 漏出事例仮説の設定 (圧入開始以降の想定)	- 27 -
(1) 地層中での CO ₂ 移行挙動シミュレーション	- 27 -
2.4 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 (圧入開始以前の想定)	- 29 -
2.5 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 (圧入開始以降の想定)	- 31 -
(1) シナリオ 3 結果.....	- 31 -
(2) シナリオ 4 結果.....	- 31 -
3. 潜在的海洋環境影響調査項目の現況の把握.....	- 33 -
3.1 水環境及び海底環境.....	- 34 -
(1) 水環境.....	- 34 -
① 項目.....	- 34 -
② 調査方法.....	- 34 -
ア) 調査測点.....	- 34 -
イ) 調査実施日.....	- 35 -
ウ) 調査方法.....	- 35 -
a. 水温.....	- 35 -
b. 塩分.....	- 36 -
c. 溶存酸素 (DO)	- 36 -
d. 水素イオン濃度指数 (pH)	- 36 -

e.	全炭酸.....	- 36 -
f.	アルカリ度.....	- 37 -
g.	硫化物イオン濃度.....	- 37 -
h.	pCO ₂	- 37 -
i.	流速・流向.....	- 37 -
j.	クロロフィル a および栄養塩類.....	- 37 -
③	結果.....	- 38 -
ア)	水温.....	- 38 -
a.	採水調査結果.....	- 38 -
b.	多項目センサー調査結果.....	- 39 -
イ)	塩分.....	- 42 -
a.	採水調査結果.....	- 42 -
b.	多項目センサー調査結果.....	- 42 -
ウ)	溶存酸素 (DO)	- 45 -
a.	採水調査結果.....	- 45 -
b.	多項目センサー調査結果.....	- 45 -
エ)	水素イオン濃度指数 (pH)	- 48 -
a.	採水調査結果.....	- 48 -
b.	多項目センサー調査結果.....	- 48 -
オ)	全炭酸.....	- 51 -
a.	採水調査結果.....	- 51 -
カ)	アルカリ度.....	- 53 -
a.	採水調査結果.....	- 53 -
キ)	硫化物イオン濃度.....	- 55 -
a.	採水調査結果.....	- 55 -
ク)	pCO ₂	- 55 -
a.	採水調査結果.....	- 55 -
ケ)	流速・流向.....	- 57 -
コ)	クロロフィル a および栄養塩類.....	- 60 -
(2)	海底環境.....	- 61 -
①	項目.....	- 61 -
②	調査方法.....	- 61 -
ア)	調査測点.....	- 61 -
イ)	調査実施日.....	- 61 -
ウ)	調査方法.....	- 61 -
a.	水素イオン濃度指数 (pH)	- 61 -
b.	酸化還元電位 (ORP)	- 62 -
c.	全有機炭素.....	- 62 -
d.	無機炭素.....	- 62 -

e.	硫化物.....	- 62 -
f.	粒度組成.....	- 62 -
③	結果.....	- 63 -
ア)	水素イオン濃度指数 (pH)	- 63 -
イ)	酸化還元電位 (ORP)	- 63 -
ウ)	全有機炭素.....	- 63 -
エ)	無機炭素.....	- 63 -
オ)	硫化物.....	- 63 -
カ)	粒度組成.....	- 63 -
3.2	海洋生物.....	- 68 -
(1)	項目.....	- 68 -
(2)	調査方法.....	- 68 -
①	調査測点.....	- 68 -
②	調査実施日.....	- 68 -
ア)	植物プランクトン, 動物プランクトン.....	- 68 -
イ)	メイオベントス, マクロベントス.....	- 68 -
ウ)	メガロベントス.....	- 69 -
③	調査方法.....	- 70 -
ア)	浮遊生物の生息状況.....	- 70 -
a.	植物プランクトン調査.....	- 70 -
b.	動物プランクトン調査.....	- 70 -
イ)	魚類等遊泳動物の生息状況.....	- 70 -
ウ)	海草及び藻類の生育状況並びにさんご類の生息状況.....	- 71 -
エ)	底生生物の生息状況.....	- 71 -
a.	メイオベントス調査.....	- 71 -
b.	マクロベントス調査.....	- 71 -
c.	メガロベントス調査.....	- 71 -
(3)	結果.....	- 72 -
①	浮遊生物の生息状況.....	- 72 -
ア)	植物プランクトン調査.....	- 72 -
イ)	動物プランクトン調査.....	- 75 -
②	魚類等遊泳動物の生息状況.....	- 78 -
ア)	苫小牧市および厚真町地先海域に生息する魚類等.....	- 78 -
イ)	苫小牧市および厚真町地先海域における魚種別の漁獲量.....	- 94 -
③	海草及び藻類の生育状況並びにさんご類の生息状況.....	- 103 -
ア)	海草及び藻類の生育状況.....	- 103 -
イ)	さんご類の生息状況.....	- 106 -
④	底生生物の生息状況.....	- 106 -
ア)	メイオベントス調査.....	- 106 -

イ)	マクロベントス調査.....	- 125 -
ウ)	メガロベントス調査.....	- 129 -
a.	水中カメラによるメガロベントス観察調査（生息状況）.....	- 129 -
b.	貝けた網によるホッキガイ（ウバガイ）調査.....	- 131 -
3.3	生態系.....	- 132 -
(1)	項目.....	- 132 -
(2)	調査方法.....	- 132 -
①	藻場，干潟，さんご群集その他の脆弱な生態系.....	- 132 -
②	産卵場又は生息場その他の海洋生物の生息状況.....	- 132 -
③	熱水生態系その他の特殊な生態系.....	- 132 -
(3)	結果.....	- 133 -
①	藻場，干潟，さんご群集その他の脆弱な生態系.....	- 133 -
ア)	藻場.....	- 133 -
イ)	干潟.....	- 133 -
ウ)	さんご群集.....	- 133 -
②	産卵場又は生息場その他の海洋生物の生息状況.....	- 134 -
ア)	苫小牧市および厚真町地先海域を産卵場として利用している魚類など.....	- 134 -
イ)	苫小牧市および厚真町地先海域に生息する底生性の魚類など.....	- 135 -
ウ)	苫小牧市および厚真町周辺の河川と地先海域を回遊する遡河回遊魚など.....	- 136 -
エ)	苫小牧市および厚真町地先海域に生息する希少な魚類など.....	- 137 -
③	熱水生態系その他の特殊な生態系.....	- 139 -
3.4	海洋の利用.....	- 140 -
(1)	項目.....	- 140 -
(2)	調査方法.....	- 140 -
①	海洋レクリエーションの場としての利用状況.....	- 140 -
②	海中公園その他の自然環境の保全を目的として設定された区域としての利用状況.....	- 140 -
③	漁場としての利用状況.....	- 141 -
④	主要な航路としての利用状況.....	- 141 -
⑤	港湾区域および港域に関する情報.....	- 141 -
⑥	海底ケーブルの敷設，海底資源の探査または掘削その他の海底の利用状況.....	- 141 -
(3)	結果.....	- 142 -
①	海洋レクリエーションの場としての利用状況.....	- 142 -
②	海中公園その他の自然環境の保全を目的として設定された区域としての利用状況.....	- 144 -
③	漁場としての利用状況.....	- 147 -
ア)	漁業の実態.....	- 147 -
a.	漁業活動の社会基盤.....	- 147 -
b.	漁業種類別漁獲量.....	- 153 -
c.	漁期・漁場.....	- 154 -
イ)	北海道海面漁業調整規則等による規制状況.....	- 161 -

④	主要な航路としての利用状況.....	- 163 -
⑤	港湾区域および港域に関する情報.....	- 164 -
⑥	海底ケーブルの敷設, 海底資源の探査または掘削その他の海底の利用状況.....	- 169 -
ア)	海底ケーブル等.....	- 169 -
イ)	海底資源.....	- 170 -
4.	当該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潜在的海洋環境影響項目に係る変化の程度及び当該変化の及ぶ範囲並びにその予測の方法.....	- 174 -
4.1	海洋環境の化学的な変化の予測の方法.....	- 174 -
(1)	シミュレーションモデル.....	- 174 -
①	MEC モデル.....	- 174 -
②	CO ₂ 二相流モデル.....	- 175 -
(2)	苫小牧沖海中拡散シミュレーションモデル.....	- 176 -
①	モデル領域.....	- 176 -
②	境界条件データ.....	- 176 -
③	シミュレーションに用いたコンピュータ.....	- 177 -
(3)	静水圧モデル単体での計算.....	- 177 -
(4)	モデル計算結果と観測データの比較.....	- 179 -
4.2	海洋環境の化学的な変化の予測-CO ₂ 漏出シミュレーション.....	- 184 -
(1)	シミュレーション条件.....	- 184 -
①	CO ₂ 漏出量.....	- 184 -
ア)	シナリオ 2 萌別層ケース (シナリオ 2 ケース)	- 184 -
イ)	貯留量の 1%が漏出するケース (1%漏出ケース)	- 185 -
②	漏出域.....	- 188 -
③	季節.....	- 189 -
④	シミュレーションケース.....	- 189 -
4.3	シミュレーション結果.....	- 191 -
(1)	潜在的環境影響評価項目.....	- 191 -
(2)	溶存 CO ₂	- 191 -
4.4	海洋生物への影響の予測方法.....	- 200 -
(1)	生物影響閾値の設定.....	- 200 -
(2)	CO ₂ 漏出シミュレーションによる pCO ₂ の増分 (ΔpCO ₂)	- 204 -
①	ΔpCO ₂	- 204 -
②	ΔpCO ₂ の最大値.....	- 209 -
③	ΔpCO ₂ の 24 時間移動平均値.....	- 217 -
(3)	生物影響の予測結果.....	- 224 -
5.	当該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海洋環境に及ぼす影響の程度分析及びこれに基づく事前評価の結果.....	- 226 -
6.	その他当該特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄をすることが海洋環境に及ぼす影響についての調査の結果に基づく事前評価に関して参考となる事項.....	- 227 -

1. 海底下廃棄をしようとする特定二酸化炭素ガスの特性

1.1 特定二酸化炭素ガスの物理的及び化学的特性に関する情報

本計画において海底下廃棄をしようとする特定二酸化炭素ガスの圧入井坑口での特性を、第 1.1-1 表に示す。

第 1.1-1 表 廃棄する特定二酸化炭素ガスの圧入井坑口での特性（設計値）

廃棄する井戸の名称		滝ノ上層圧入井	萌別層圧入井
圧入する特定二酸化炭素ガスの状態	温度(運転範囲) : °C	31~40	31~40
	圧力(運転範囲) : MPa	14.4~22.8	4.0~9.3
	粘度(最大温度・圧力時) : cP	0.082	0.043
	密度(最大温度・圧力時) : kg/m ³	858.324	584.773
廃棄する特定二酸化炭素ガスに含まれる CO ₂ の濃度 (乾きガス, 体積 %)		99.70	99.70
主要な不純物と濃度 (乾きガス, 体積 %)		H ₂ : 0.22 CH ₄ : 0.06 CO : 0.02	H ₂ : 0.22 CH ₄ : 0.06 CO : 0.02

CO₂ 分離・回収・圧入設備は新規に建設するもので、現時点で当該特定二酸化炭素ガスは入手不可能であり、第 1.1-1 表の数値は設計値である。そのため、圧入開始前に行う CO₂ 分離・回収・圧入設備の試運転において当該特定二酸化炭素ガスのサンプリングおよび組成分析を行い、CO₂ および主要な不純物の濃度を確認する。また、温度と圧力については、圧入開始後、坑口および圧入井の遮蔽層最下部付近に設置した圧力・温度センサーにより計測する。粘度・密度については、実測する温度・圧力値を参照し、流送シミュレーションにより推定する。

廃棄された特定二酸化炭素ガスの海底下地層内での圧力状態予測については、「当該海底下廃棄をする海域が、海底下廃棄許可省令第 2 条において定める基準に適合し、かつ、当該海底下廃棄をする海域の海洋環境の保全に障害を及ぼすおそれがないものであることを説明する書類」2.2(3)④で詳述する。

なお、特定二酸化炭素ガスに含まれる二酸化炭素および含有される物質ごとの濃度の把握は、ガスクロマトグラフ分析法にて行う。

ガスクロマトグラフ分析法では、サンプリングしたガス中の不純物（水素、窒素、酸素、炭化水素及び一酸化炭素）の濃度を測定し、当該ガス中の二酸化炭素の濃度は次の式により算定する。

$$C = 100 - (A_h + A_n + A_o + A_c + A_m)$$

C : 二酸化炭素の濃度 (単位 体積百分率)

A_h : 測定された水素の濃度 (単位 体積百分率)

A_n : 測定された窒素の濃度 (単位 体積百分率)

A_o : 測定された酸素の濃度 (単位 体積百分率)

A_c : 測定された炭化水素の濃度 (単位 体積百分率)

A_m : 測定された一酸化炭素の濃度 (単位 体積百分率)

1.2 特定二酸化炭素ガスが廃棄される地層内での反応性

滝ノ上層 T1 部層および萌別層砂岩層に CO₂ を圧入し、それぞれの地層と CO₂ との地化学反応状況を推察するために、一次元地化学シミュレーションを実施し、貯留層の鉱物および圧入した CO₂ と地層水との反応にかかる析出・溶解する鉱物について考察した。ここで示す一次元とは空間的な一次元を意味するものである。

一次元での反応量(鉱物化量)の予測は、以下のように検討した。

- ・調査井で採取した地層水を元に地層水の組成を推定
- ・調査井で採取した岩石サンプルの分析等に基づき、貯留層中の鉱物組成を推定。熱力学パラメータは公開データベースから引用した。
- ・溶液化学種を推定
- ・反応速度パラメータを文献等から推定
- ・1D シミュレータによりシミュレーションを実施

一次元地化学シミュレーションにより、貯留層の鉱物および圧入した CO₂ と地層水との反応にかかり析出・溶解する鉱物について考察することで、CCS に係る地層との化学的特性の把握は可能であると考えている。なお、この数値シミュレーションでは、入力値に最も妥当と考えられる値を使用したが、推定困難な値もあり、以下に記載した結果は、一部は仮定に基づく解析である。以下に示す検討結果は 1 つのシナリオであり、その確度を保証するものではない。これまでの圧入期間中および圧入終了後に複数回実施した弾性波探査の結果および圧入終了後の許可期間中に実施する複数回の適切な探査の結果を踏まえて、地質モデルの修正を行う。その機会ごとに、地化学反応にかかる部分についても可能な修正を行う。また、必要に応じ地化学シミュレーションの多次元化も検討する予定である。

(1) 滝ノ上層 T1 部層

滝ノ上層 T1 部層の地層水は、苫小牧 CCS-1 (滝ノ上層調査井) で採取した地層水を基に、第 1.2-1 表に示す地層水組成を使用した。滝ノ上層 T1 部層の鉱物組成は、苫小牧 CCS-1 の試料を参照し、第 1.2-2 表に示す組成を採用した。

また、鉱物の熱力学データは、公開データベースである Thermoddem^[1]を参照した。

[1] Thermoddem (BRGM, the French Geological Survey : <http://thermoddem.brgm.fr/>, 2020/7/25 アクセス)

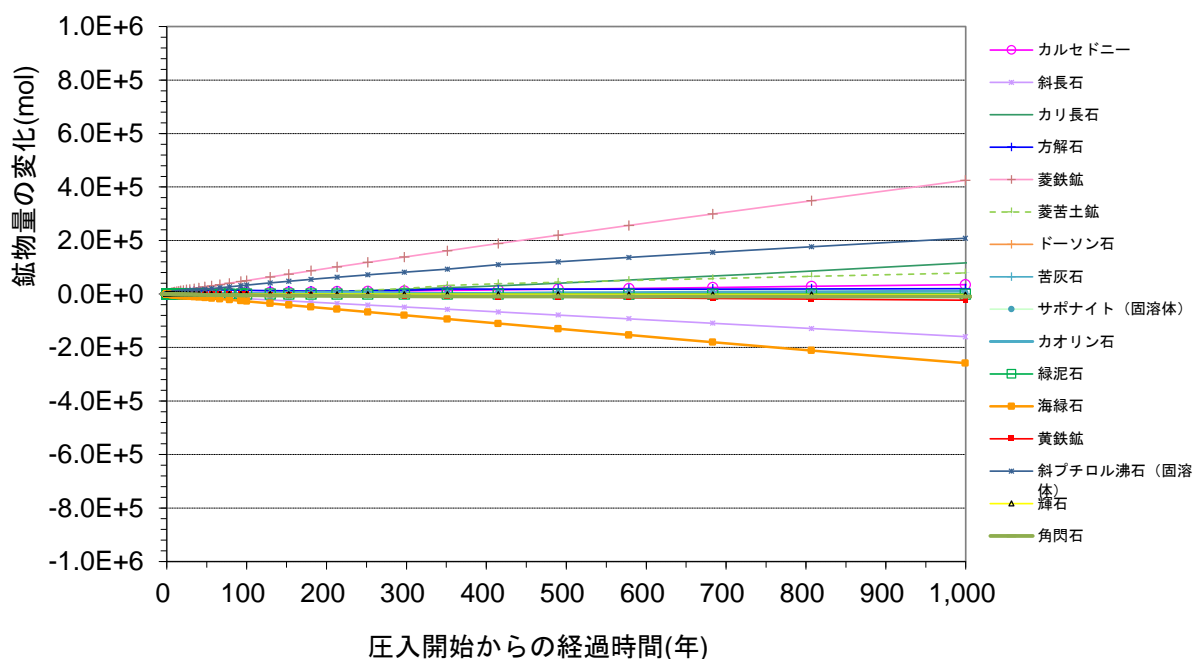
第 1.2-1 表 地化学反応シミュレーションで使した滝ノ上層 T1 部層の地層水組成

滝ノ上層 T1 部層 地層水組成	
貯留層温度 (°C)	90
pH	6.72
組成	濃度 (mg/kg)
Cl ⁻	20,775.00
SO ₄ ²⁻	63.40
HCO ₃ ⁻	7.50
HS ⁻	4.79×10 ⁻⁴
SiO ₂ (aq)	83.00
Al ³⁺	1.43×10 ⁻³
Ca ²⁺	8,321.00
Mg ²⁺	1.56
Fe ²⁺	9.25
K ⁺	68.00
Na ⁺	3,899.00
NH ₄ ⁺	16.60
備考	黄鉄鉱, カルセドニー, 束沸石, カオリナイト, 方解石, サポナイト (Fe, Ca), イライト (Al) と化学平衡になるように地層水組成を熱力学的に再構成 (Thermodem を使用)。

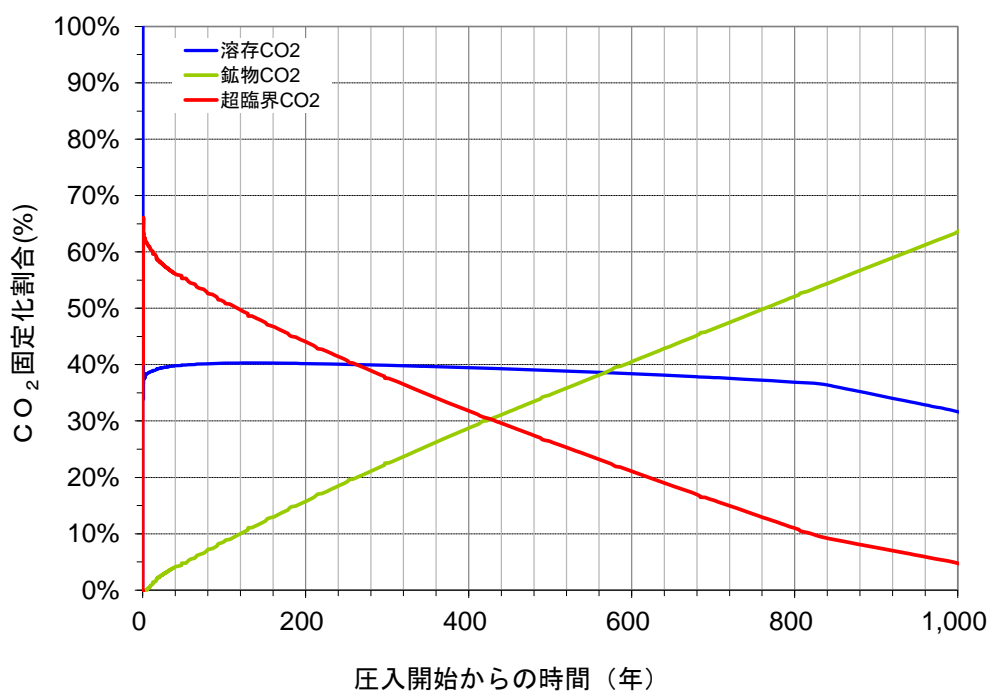
第 1.2-2 表 地化学反応シミュレーションで使した滝ノ上層 T1 部層の鉱物組成

group	和名	Name	鉱物組成 vol%
シリカ鉱物	カルセドニー	chalcedony	11.16
長石	斜長石	albite/anorthite	35.29
	カリ長石	K-feldspar	2.24
炭酸塩鉱物	方解石	calcite	1.55
	菱鉄鉱	siderite	0.00
	菱苦土鉱	magnesite	0.00
	ドーソン石	dawsonite	0.00
	苦灰石	dolomite	0.00
粘土鉱物	サポナイト(固溶体)	SS-saponite	17.67
	カオリン石	kaolinite	0.00
	緑泥石	clinoclore/daphnite	0.09
	海緑石	glauconite	16.39
硫化鉱物	黄鉄鉱	pyrite	0.17
沸石	斜プチロル沸石(固溶体)	SS-clinoptilolite	14.26
輝石	輝石	diopside/hedenbergite	1.09
角閃石	角閃石	tremolite/actinolite	0.09

シミュレーションの結果を、第 1.2-1 図および第 1.2-2 図に示す。滝ノ上層圧入井(IW-1)からは、98.2 トンの CO₂ を地表から地下に圧入したが、圧入井の管内容量を考慮すると実際は 35 トン程度の CO₂ が貯留層に圧入されたものと考えられることから、シミュレーションでは、35 トンの CO₂ を貯留層に圧入する想定とした。なお、シミュレーションは 1D で実施した。



第 1.2-1 図 滝ノ上層 T1 部層に CO₂ を圧入した際の鉱物変化量の推定



第 1.2-2 図 滝ノ上層 T1 部層に CO₂ を圧入した際の鉱物固定化量の推定

CO₂ 圧入開始直後から、カルセドニー、斜プチロル沸石、カリ長石、苦灰石などが徐々に析出し、海緑石、斜長石、黄鉄鉱などが溶解するものと推定される。溶解した鉱物も含め化学反応が進行し、1,000 年後には圧入した CO₂ の 60%以上が鉱物として固定される結果となった。

第 1.2-3 表に、苫小牧 CCS-1 で採取したカッティング試料の X 線回折分析結果を示す。

第 1.2-3 表 苫小牧 CCS-1 で採取したカッティング試料の X 線回折分析結果

深 度 (m)	地 層 名		岩 相 (肉眼記載)	同 定 さ れ た 鉱 物														
	果層	部層		スチクタイト	イソト	緑泥石	斜プチロル沸石	シリカ沸石	シリカ沸石	バクテ	石英	斜長石	カリ長石	方解石	ドロマイト	黄鉄鉱	赤鉄鉱	角閃石
900	萌別層泥岩		砂質珪岩	×	△	△					◎	○		×		△		△
950			砂質珪岩	×	○	○					○	○	△	×		△		△
1000			砂質珪岩	×	○	○					◎	○		×		△		△
1050			砂質珪岩	×	○	○					◎	○				△		△
1100			砂質珪岩	×	○	○					◎	○	△			×		△
1150			砂質珪岩	×	△	△	△				○	○	○			×		△
1200	萌別層砂岩		砂質珪岩	×	○	○	△			◎	○	△			△		△	
1250			砂質珪岩	×	○	○				◎	○				△		△	
1300	荷葉層		砂質珪岩	×	○	○				◎	○				△		△	
1350	荷葉層		砂質珪岩	×	○	○				◎	○	△			△		△	
1400	荷葉層		砂質珪岩	×	△	△				◎	◎		×		△			
1450	荷葉層		砂質珪岩	×	○	○				○	○	△	×		×		○	
1500	荷葉層		砂質珪岩	×	○	○	△			◎	○		×		×		△	
1550	荷葉層		砂質珪岩	×	○	△	△			◎	○		×		△		△	
1580	荷葉層		砂質珪岩	×	○	△	○			○	○	△	×		△		△	
1650	平取+軽舞層		泥岩	×	○	○				○	○				△		△	
1700	平取+軽舞層		泥岩	×	○	○	○			×	○	○			△		△	
1750	平取+軽舞層		泥岩	×	○	○	○			×	○	○	×		△		△	
1800	平取+軽舞層		泥岩	×	○	○	○			△	◎	×	△		△		△	
1850	平取+軽舞層		泥岩	×	○	○	△			△	○	○	△		△		△	
1900	平取+軽舞層		泥岩	×	○	△	○			△	○	○			△		△	
1950	平取+軽舞層		泥岩	×	○	○	△			△	○	○			△		△	
2000	平取+軽舞層		泥岩		○	○	△			△	◎	○			△			
2050	平取+軽舞層		泥岩	×	○	○	△			△	○	○			△		×	
2100	平取+軽舞層		泥岩	×	○	○	○			△	△	○	×		△		×	
2150	平取+軽舞層		泥岩	×	○	○	△			△	○	○			△		×	
2200	平取+軽舞層		泥岩	×	○	○	△			△	◎	○			△		×	
2250	平取+軽舞層		泥岩	×	○	○	△			×	◎	○			△		×	
2300	振老層		泥岩	×	○	○	△			◎	○				△			
2350			泥岩		○	○	△			◎	○				△			
2400			泥岩	×	○	○				◎	○		×		△			
2450			凝灰質泥岩	×	○	○				◎	○		×		△			
2500			泥岩	×	○	○				◎	○		×		△			
2550			凝灰質泥岩	×	○	○				◎	○		×	×	△			
2600			泥岩	×	○	○				◎	○		×		△			
2650			凝灰質泥岩	×	○	○				◎	○		×	×	△			
2700			泥岩	×	○	○				◎	○		×		△			
2750			泥岩	×	○	○				◎	○		×		△			
2800			泥岩	×	△	○	△			◎	○		×		○			
2900		滝ノ上層	T1	火山礫凝灰岩	×	△			◎		△	○				×		
2950	滝ノ上層	T1	火山礫凝灰岩	×	△			◎		△	○							
3000	滝ノ上層	T1	砂質凝灰岩	×	△		○	◎		△	○							
3100	滝ノ上層	T1	砂質凝灰岩	△	△		○			○	◎		×					
3150	滝ノ上層	T1	砂質凝灰岩	△	×			△		○	◎		×			△		
3250	滝ノ上層	T1	砂質凝灰岩	△	△		◎			△	◎		×					
3300	滝ノ上層	T1	砂質凝灰岩	△	△		○		○	△	◎		×		△		×	
3400	滝ノ上層	T1	砂質凝灰岩	△				○		○	◎		×			△		
3450	滝ノ上層	T1	凝灰岩	×	×		◎			○	△	○	×					
3500	滝ノ上層	T1	砂質凝灰岩	△				◎		○	◎		×					
3550	滝ノ上層	T1	砂質凝灰岩	△				△		○	◎		×			△		
3600	滝ノ上層	T1	砂質凝灰岩	○						○	◎		×			○		
3650	滝ノ上層	T1	砂質凝灰岩	○						○	◎		×					
3700	滝ノ上層	T1	砂質凝灰岩	△		○		○		○	◎		×					

◎：多い ○：中 △：少ない ×：極めて少ない

第 1.2-3 表に示すように、砕屑岩である振老層（遮蔽層）で同定された鉱物は、滝ノ上層 T1 部層の火山岩類とは異なり、萌別層泥岩などに近い組成を示す。したがって、遮蔽層と CO₂ の化学的な反応は萌別層に近い反応が生じることになる。流動シミュレーションの結果、遮蔽層には CO₂ がほとんど浸透できないと考えられ、化学的反応は遮蔽層と CO₂ の接触部分でのみ生じることとなる。

なお、流動シミュレーションのモデルは、滝ノ上層で採取したコアの孔隙率-浸透率の関係を

ベースとし、実際のCO₂圧入実績を考慮しており、遮蔽層の浸透率とは異なった値を使用している。貯留層の孔隙率の平均は13.4%、その孔隙率に対応する浸透率は $2.97 \times 10^{-3} \text{mD}$ を与え、遮蔽層には孔隙率は19%、浸透率は $4.3 \times 10^{-5} \text{mD}$ を与えた。シミュレーションでは、圧入したCO₂は、溶解CO₂を含め遮蔽層への浸透は認められていない。貯留層内でさえ垂直方向へのCO₂の移動は数m規模であり、遮蔽層の浸透率を勘案すればシミュレーション結果は妥当であると判断している（「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」第4.5-14図参照）。

(2) 萌別層砂岩層

萌別層砂岩層の地層水は、苫小牧OB-2（萌別層観測井）で採取した地層水を基に、第1.2-4表に示す地層水組成を使用した。萌別層砂岩層の鉱物組成は、苫小牧OB-2試料を参照し、第1.2-5表に示す組成を採用した。

また、鉱物の熱力学データは、公開データベースであるThermoddem^[1]を参照した。

第1.2-4表 地化学反応シミュレーションで使用した萌別層砂岩層の地層水組成

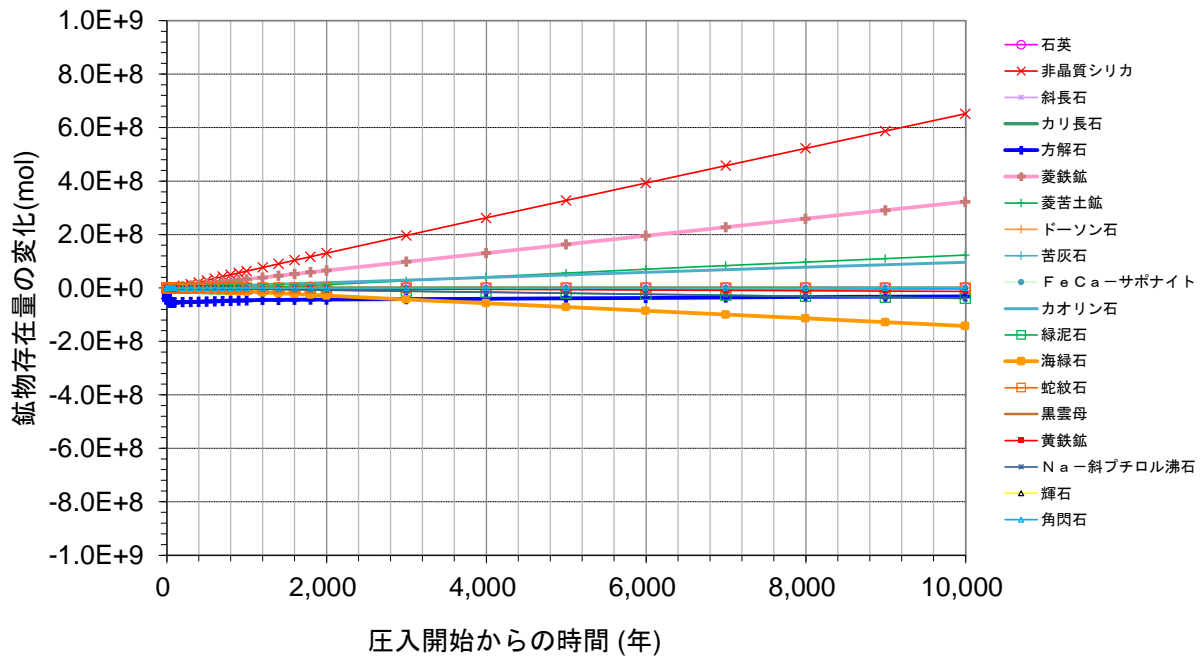
萌別層砂岩層 地層水組成	
貯留層温度 (°C)	40
pH	7.11
組成	濃度 (mg/kg)
Cl ⁻	1,780.00
SO ₄ ²⁻	9.20
HCO ₃ ⁻	809.00
HS ⁻	1.29×10^{-4}
SiO ₂ (aq)	168.00
Al ³⁺	4.01×10^{-5}
Ca ²⁺	30.10
Mg ²⁺	4.94
Fe ²⁺	0.44
K ⁺	26.70
Na ⁺	1,370.00
NH ₄ ⁺	2.70
備考	黄鉄鉱，非晶質シリカ，クリノプチロライト (Na)，カオリナイト，菱鉄鉱，方解石，サポナイト (Fe, Ca)，菱苦土石，イライト (Al) と化学平衡になるように地層水組成を熱力学的に再構成 (Thermoddemを使用)。

[1] Thermoddem (BRGM, the French Geological Survey : <http://thermoddem.brgm.fr/>, 2020/7/25 アクセス)

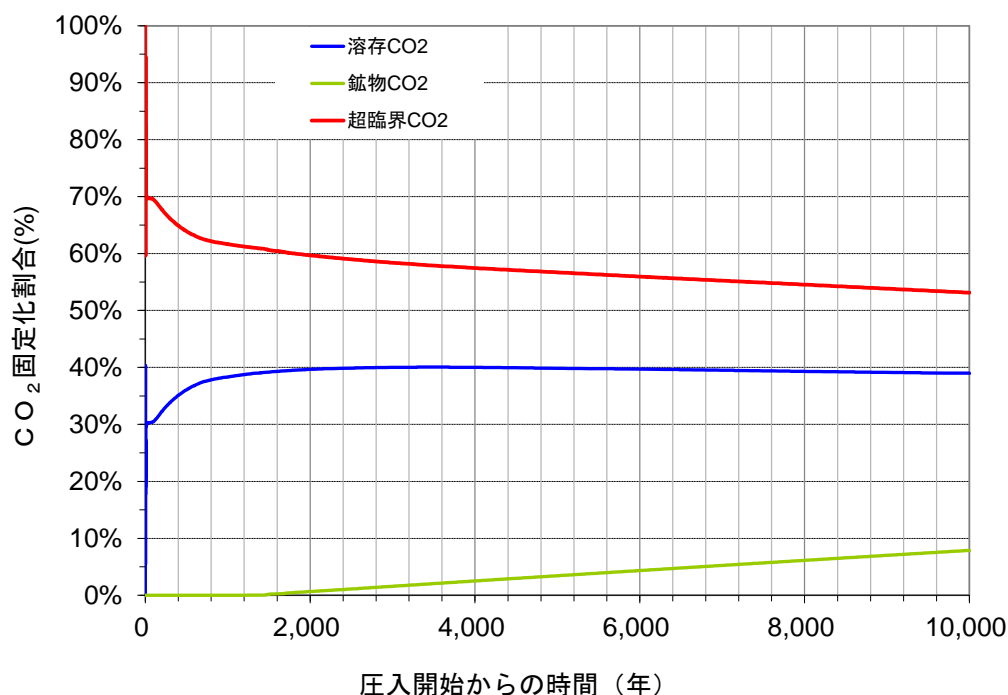
第 1.2-5 表 地化学反応シミュレーションで使用した萌別層砂岩層の鉱物組成

group	和名	Name	鉱物組成 vol%
シリカ鉱物	石英	quartz	36.11
	非晶質シリカ	amorphous silica	0.00
長石	斜長石	albite/anorthite	25.84
	カリ長石	K-feldspar	2.36
炭酸塩鉱物	方解石	calcite	0.10
	菱鉄鉱	siderite	0.00
	菱苦土鉱	magnesite	0.00
	ドーソン石	dawsonite	0.00
	苦灰石	dolomite	0.00
粘土鉱物	FeNa-サポナイト	FeNa-saponite	0.09
	カオリン石	kaolinite	6.34
	緑泥石	clinochlore/daphnite	0.95
	海緑石	glauconite	12.42
	黒雲母	Siderophyllite/Eastonite	9.51
硫化鉱物	黄鉄鉱	pyrite	0.27
沸石	Na-斜プチロル沸石	Na-clinoptilolite	2.74
輝石	輝石	diopside/hedenbergite	0.33
角閃石	角閃石	tremolite/actinolite	0.69

シミュレーションの結果を、第 1.2-3 図及び第 1.2-4 図に示す。



第 1.2-3 図 萌別層砂岩層に CO₂ を圧入した際の鉱物量変化量の推定



第 1.2-4 図 萌別層砂岩層に CO₂ を圧入した際の鉱物固定化量の推定

CO₂ 圧入開始直後から、非晶質シリカ、菱鉄鉱、菱苦土鉱、カオリナイトが析出し、海緑石や方解石が溶解すると推定された。溶解した鉱物も含め化学反応が進行し、2,000 年後には圧入した CO₂ の数%が鉱物として固定化される。その後徐々に鉱物固定化は増加し、10,000 年後には圧入した CO₂ の 8%程度が鉱物として固定化されるものと推定された。なお、シミュレーションは 1D にて、圧入実績に即した 30 万トンの CO₂ を圧入する想定とした。

萌別層砂岩および萌別層泥岩の堆積物の主な供給源は共通していると考えられ、鉱物組成も類似している（第 1.2-3 表）。主に溶解する鉱物と考えている海緑石や方解石の存在量も同程度であることから、遮蔽層と貯留層の CO₂ への化学的な反応は類似したものになるが、流動シミュレーションの結果、遮蔽層には CO₂ がほとんど浸透できないと考えられるため、化学的反応は遮蔽層と CO₂ の接触部分でのみ生じることとなる。

1.3 政令で定める基準への適合状況

「海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律施行令」（昭和46年政令第201号）第11条の5への適合状況は、以下のとおりである。

- ・本計画において海底下廃棄をしようとする特定二酸化炭素ガスは、アミン類と二酸化炭素との化学反応を利用して二酸化炭素を他の物質から分離する方法により集められたものである。
- ・本計画において海底下廃棄をしようとする特定二酸化炭素ガスに含まれる二酸化炭素の濃度は、第1.1-1表に示すとおり体積百分率99パーセント以上である。
- ・本計画において海底下廃棄をしようとする特定二酸化炭素ガスには、二酸化炭素以外の油等を加えていない。また、特定二酸化炭素ガスを海底下地層に圧入するために使用する設備はドライガスシールタイプの遠心式圧縮機のため、圧入の際に油分が混入するおそれはない。

なお、本計画において海底下廃棄をしようとする特定二酸化炭素ガスは、石油の精製に使用する水素の製造工程から分離したガスよりアミン類とCO₂との化学反応を利用してCO₂を分離したものであることから、本計画において適用する基準は、体積百分率98パーセント以上とする。

よって、海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律施行令第十一条の五第一項第二号に規定する基準（当該ガスに含まれる二酸化炭素の濃度が体積百分率九十九パーセント以上（当該ガスが石油の精製に使用する水素の製造のために前号に規定する方法が用いられたことにより集められたものである場合には、体積百分率九十八パーセント以上）であること。）を満たしている。

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

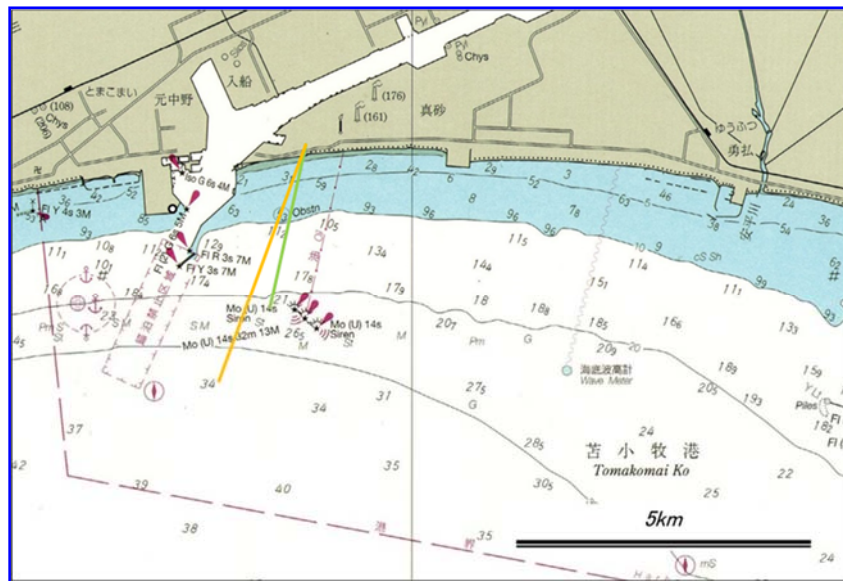
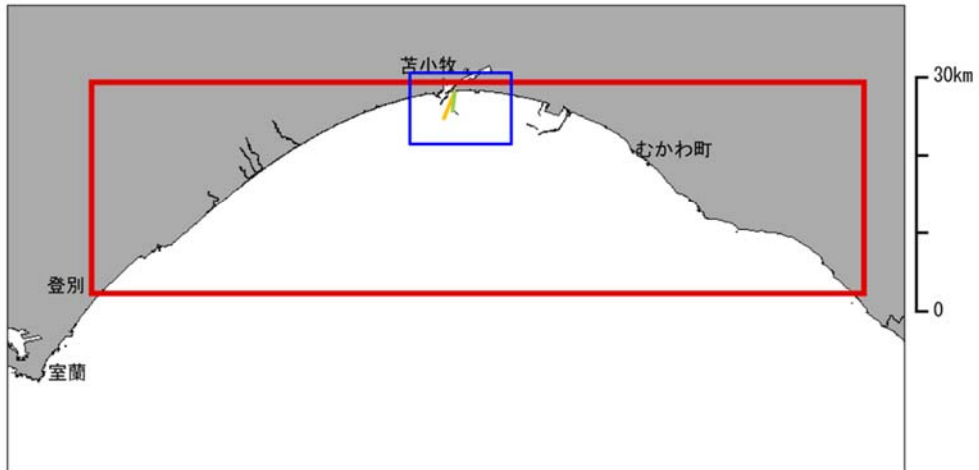
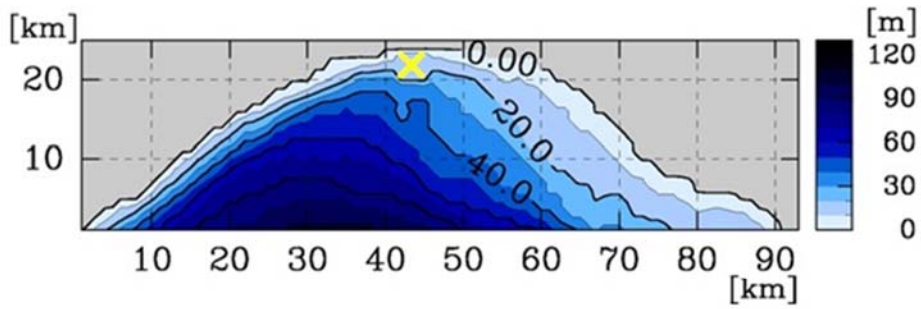
2.1 当該特定二酸化炭素ガスが海洋環境に及ぼす影響の程度を予測するために把握した海域の流況その他の自然的条件の現況及びその把握の方法

(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、CO₂ 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CO₂漏出位置。
 2. 中図は苦小牧沖の地図 (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。

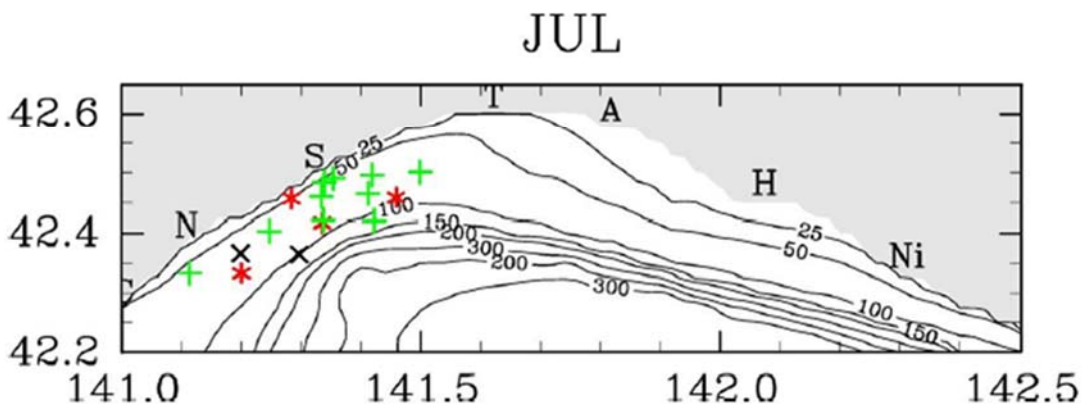
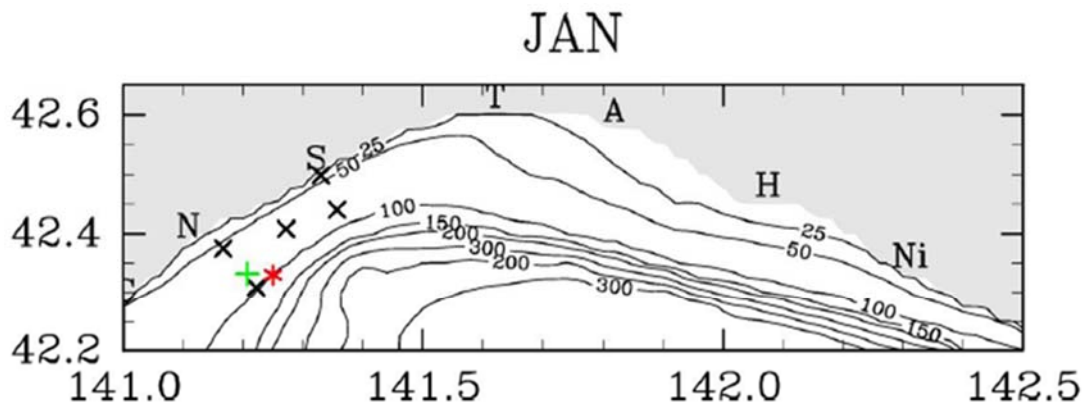
第 2.1-1 図 静水圧モデル領域

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℃前後、40m 以深では 5～12℃程度になっている。JODC の統計値は、海面が約 16℃、100m 深で約 7℃である。冬季の水温は 3～8℃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℃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）。

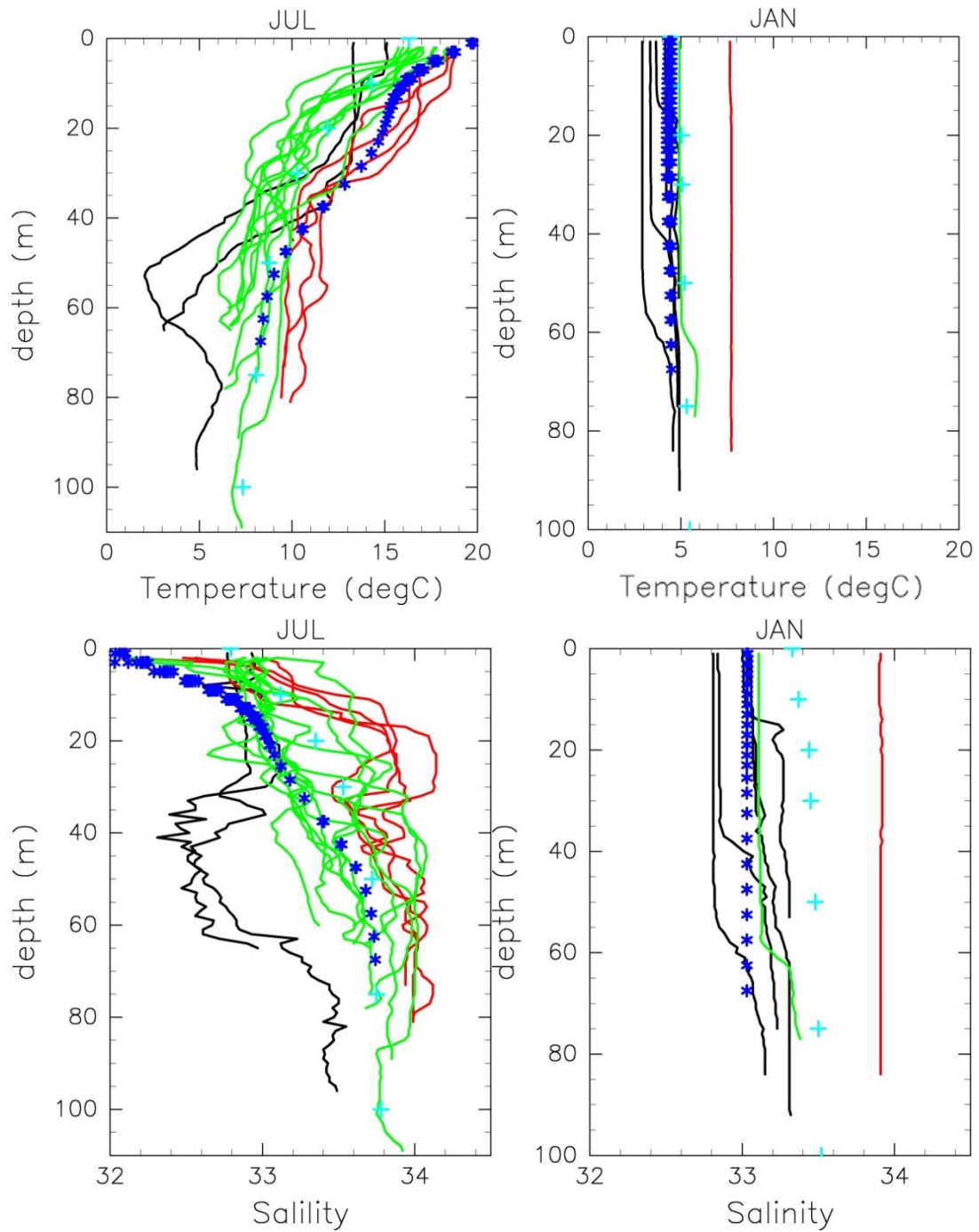


注：観測位置（上：1月，下：7月）
 黒×，赤＊，緑＋は，1月がそれぞれ順に2003年，2008年，2012年，7月がそれぞれ順に2003年，2006年，2008年。N，S，T，A，H，Niは，順に登別，白老，苫小牧，厚真，日高，新冠。

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

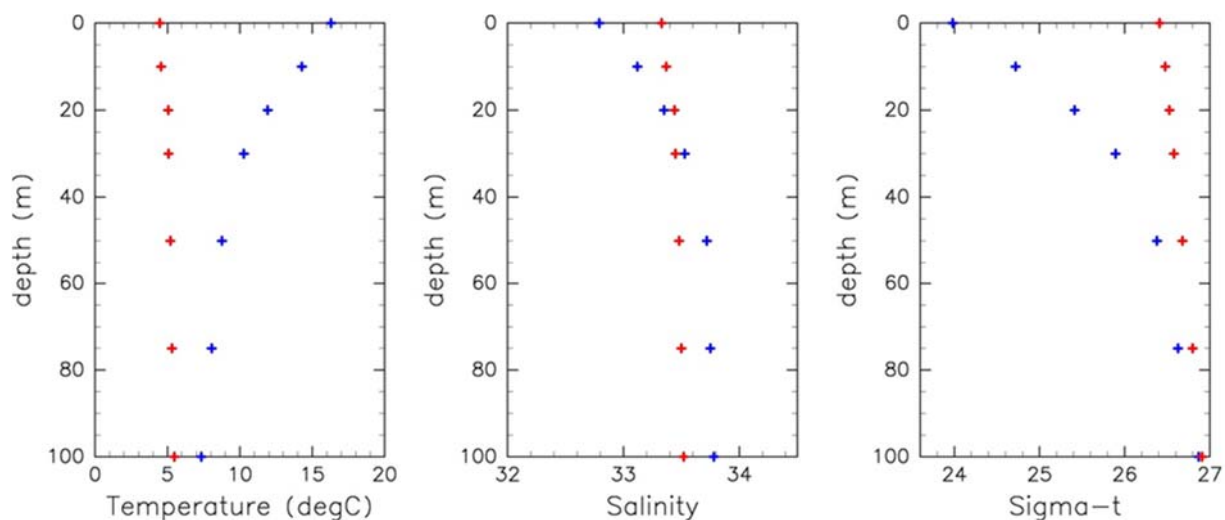
第 2.1-1 表 北海道大学水産学部附属練習船うしお丸による白老沖での観測の位置, 年月日および水深

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。

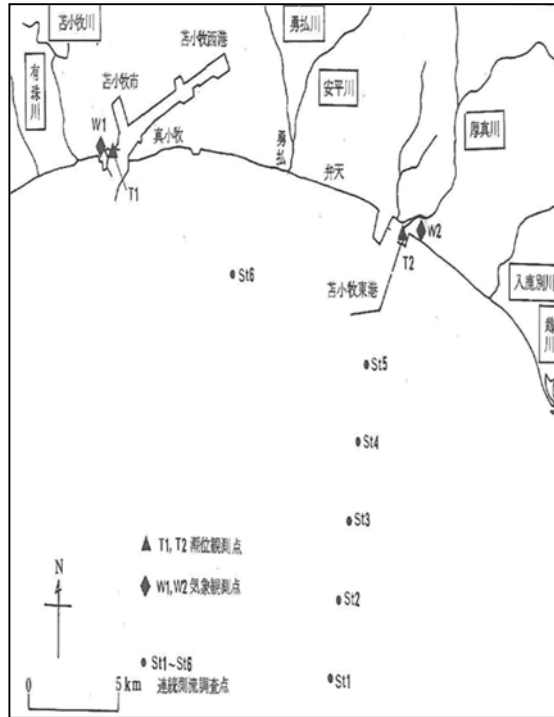
第 2.1-4 図 JODC 統計値の水温，塩分による密度

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。

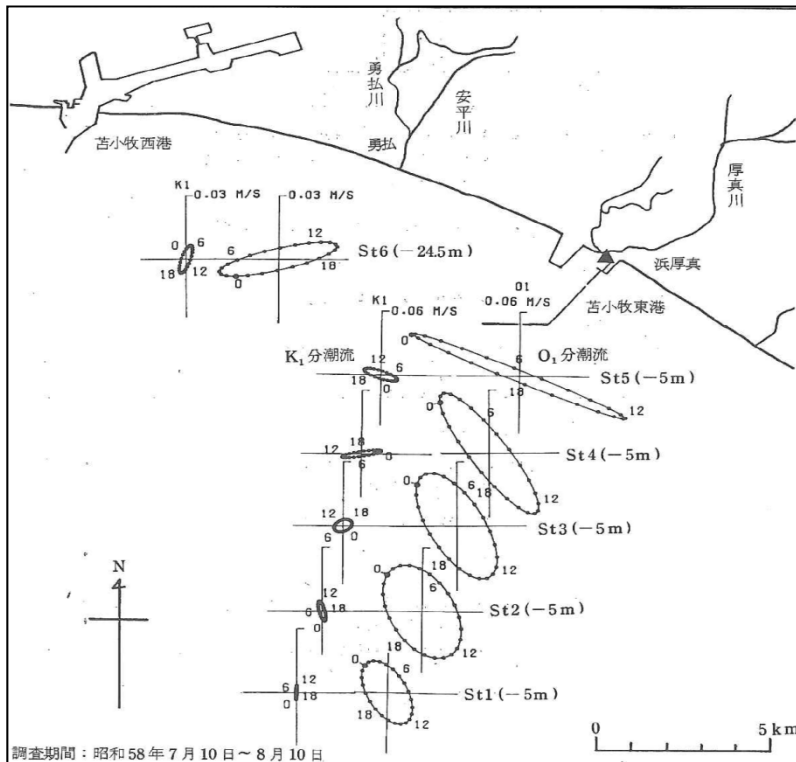
『昭和 58 年度 - 苫小牧東部地区地先海域産業公害総合事前調査 現地調査報告書』には，本調査海域の東へ約 10km 離れた 5 か所の調査点（第 2.1-5 図）で，1983 年 7 月 10 日から 8 月 10 日にかけての 32 日間，流速・流向を測定し解析した結果が記載されている。潮流は，海岸線に平行な流向の日周潮流（O1 分潮）が卓越し（第 2.1-6 図），海岸線に直角な流向の半日周潮流（M2 分潮）は微弱である（第 2.1-7 図）。恒流（32 日間平均流）は，2.1～3.9cm/sec の範囲に見られる。

『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。



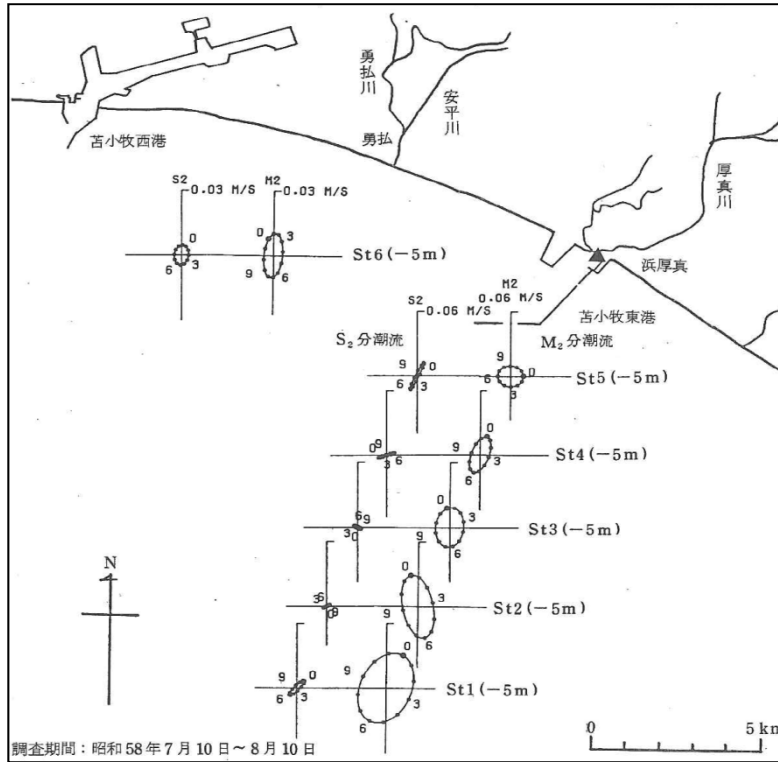
資料：『 - 昭和 58 年度 - 苫小牧東部地区地先海域産業公害総合事前調査 現地調査報告書』
 (通商産業省 札幌通商産業局, 1983 年)

第 2.1-5 図 流速・流向調査測点位置



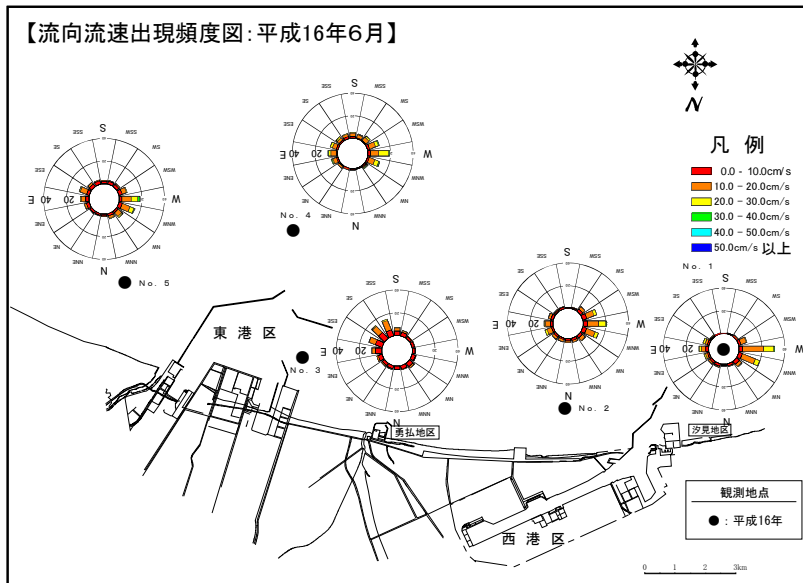
資料：『 - 昭和 58 年度 - 苫小牧東部地区地先海域産業公害総合事前調査 現地調査報告書』
 (通商産業省 札幌通商産業局, 1983 年)

第 2.1-6 図 O1 と K1 分潮流の潮流楕円の水平分布



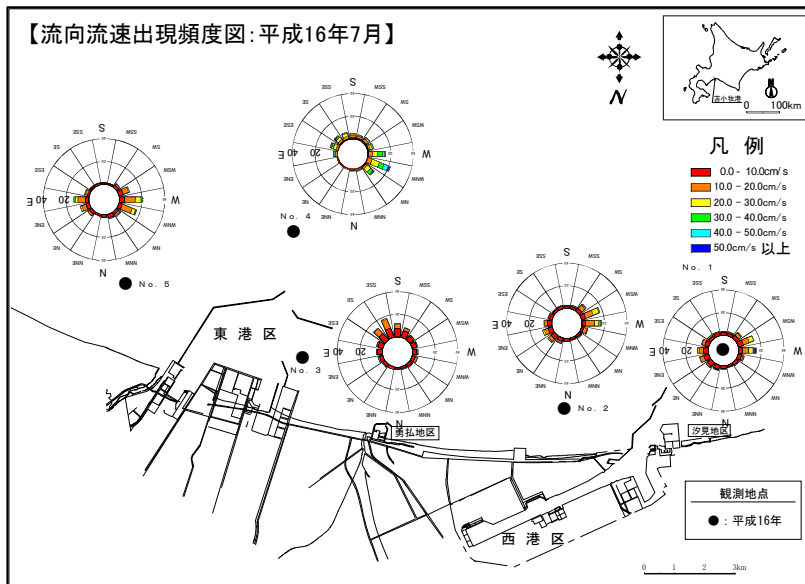
資料：『昭和58年度 - 苫小牧東部地区地先海域産業公害総合事前調査 現地調査報告書』
 (通商産業省 札幌通商産業局, 1983年)

第 2.1-7 図 M2 と S2 分潮流の潮流楕円の水平分布



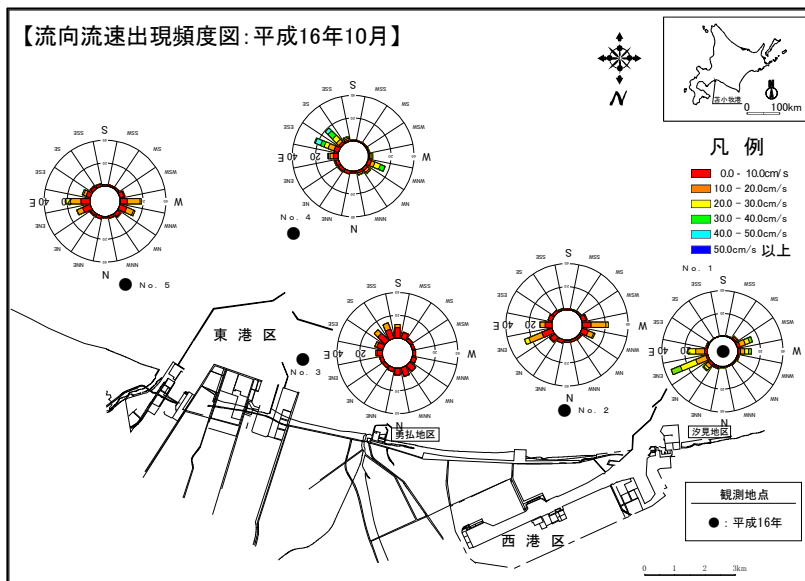
資料：『苫小牧港潮流観測調査業務報告書』
 (日本データサービス株式会社, 2005年)

第 2.1-8 図 流向出現頻度 (平成 16 年 6 月)



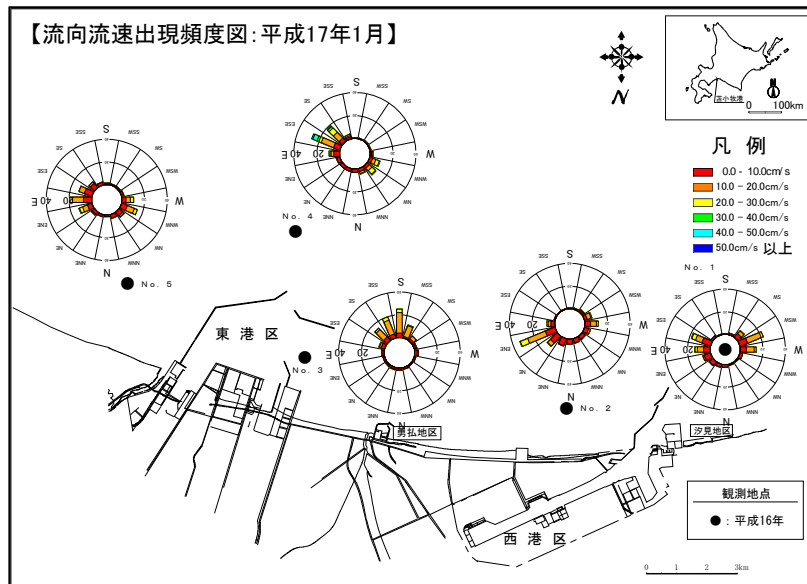
資料：『苫小牧港潮流観測調査業務報告書』
(日本データサービス株式会社, 2005年)

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)^[1]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)。

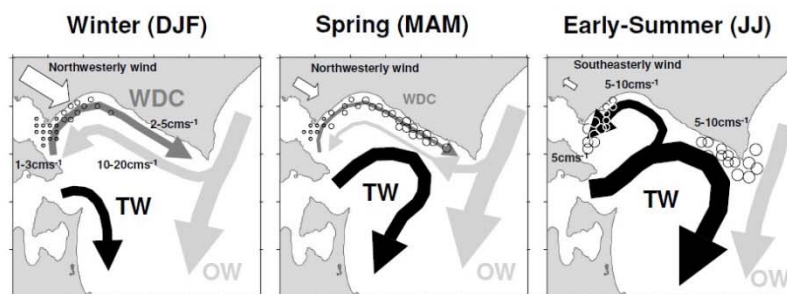


Fig. 10. Schematic diagrams of transient flow patterns from winter to early-summer, based on our previous study (Rosa et al., 2007) combined with the present analysis of the coastal current measurements. Black arrows represent the Tsugaru Warm Current (TW), light gray arrows represent the shelf slope 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)^[1]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（圧入開始以前の想定）

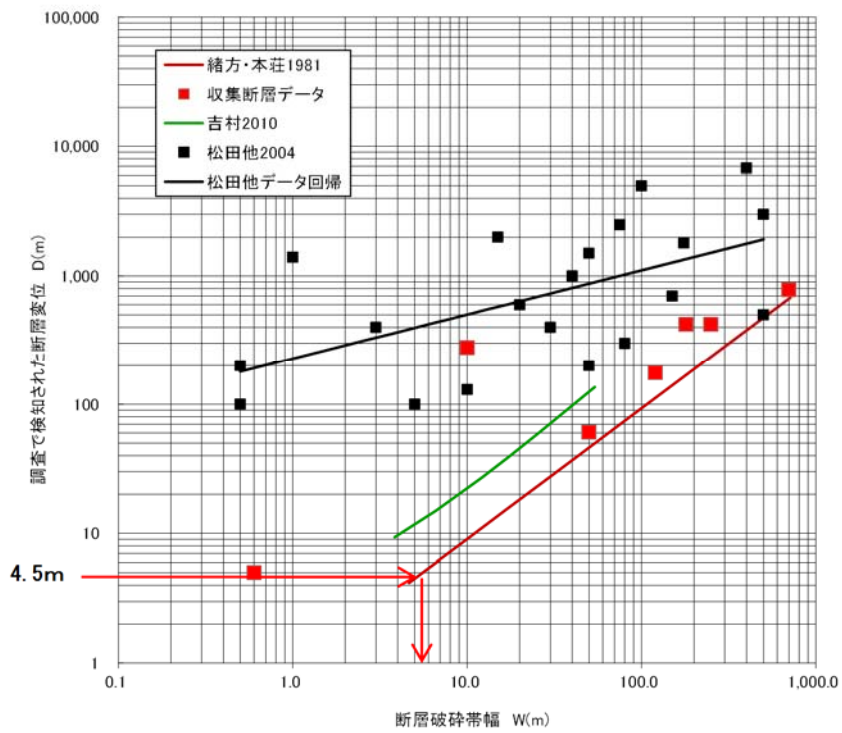
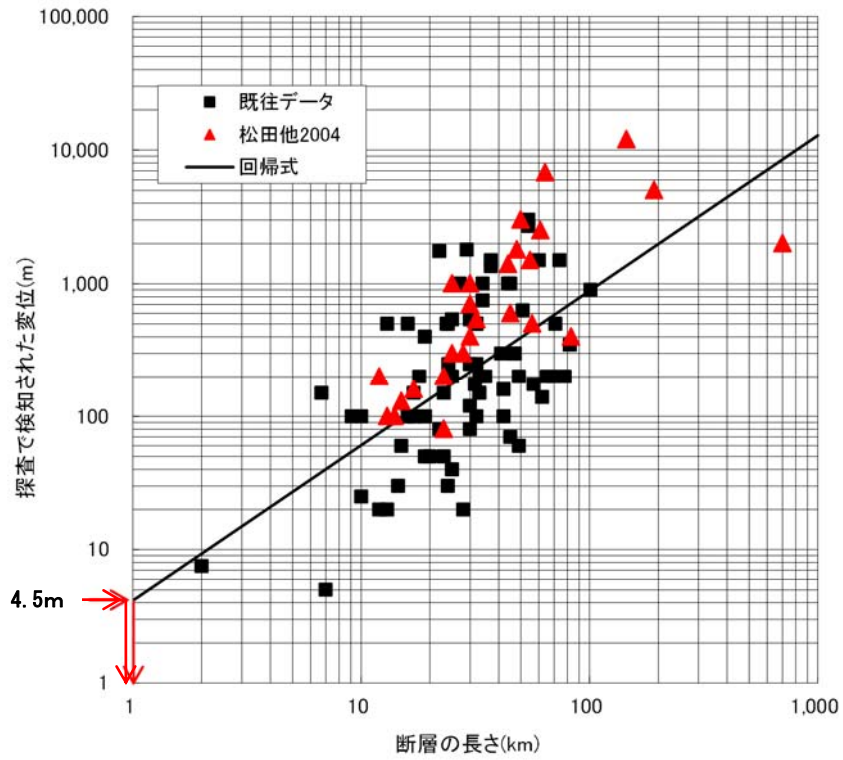
漏出経路として CO₂ 貯留層近傍の断層/フラクチャを想定することが現実的であるため (Benson et al., 2005) ^[1], 次に掲げる調査検討を行った。

(1) 断層の性状に関する文献調査

CO₂ 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)。

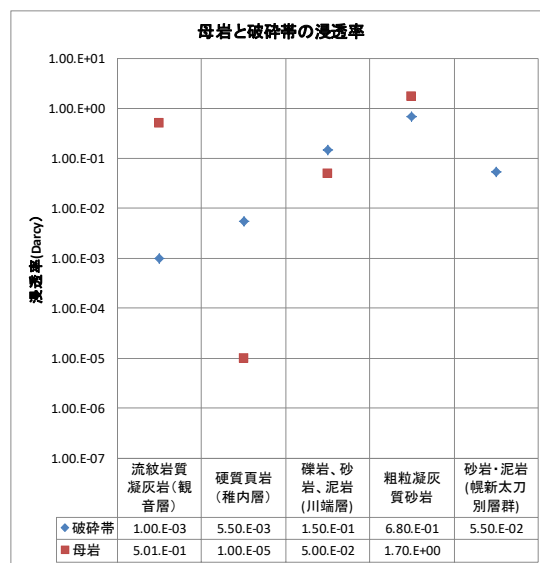
^[1] Benson, S., Cook, P., Anderson, J., Bachu, S., Nimir, H.B., Basu, B., Bradshaw, J., Deguchi, G., Gale, J., von Goerne, G., Heidug, W., Holloway, S., Kamal, R., Keith, D., Lloyd, P., Rocha, P., Senior, B., Thomson, J., Torp, T., Wildenborg, T., Wilson, M., Zarlenga, F., Zhou, D., 2005. Underground 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や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、火山砕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。



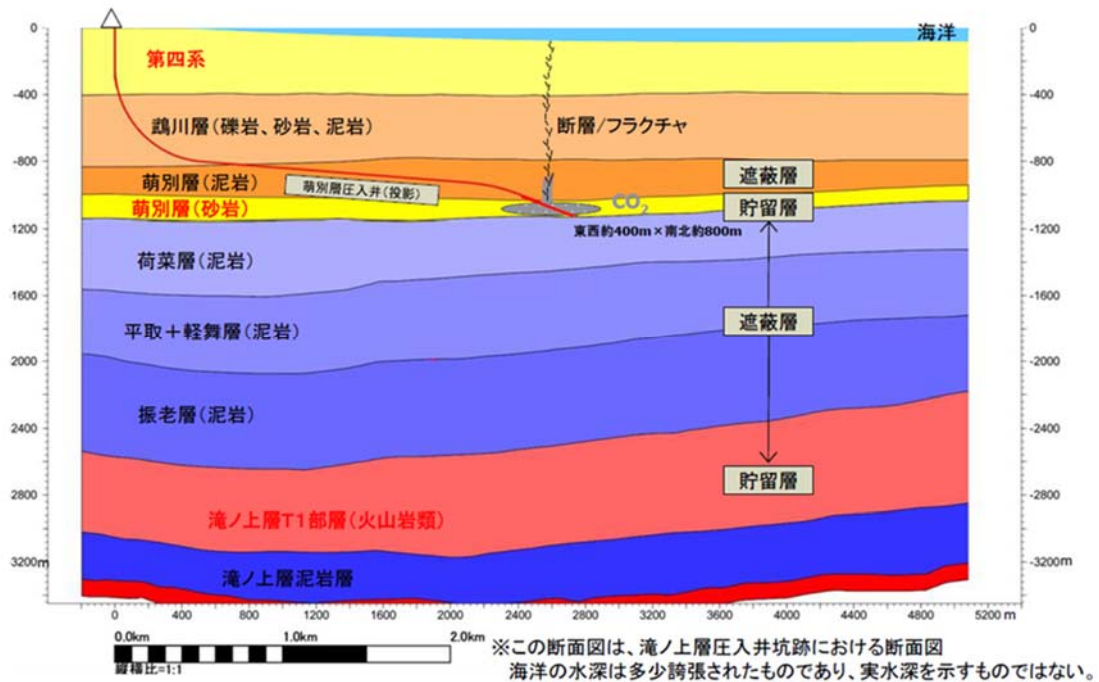
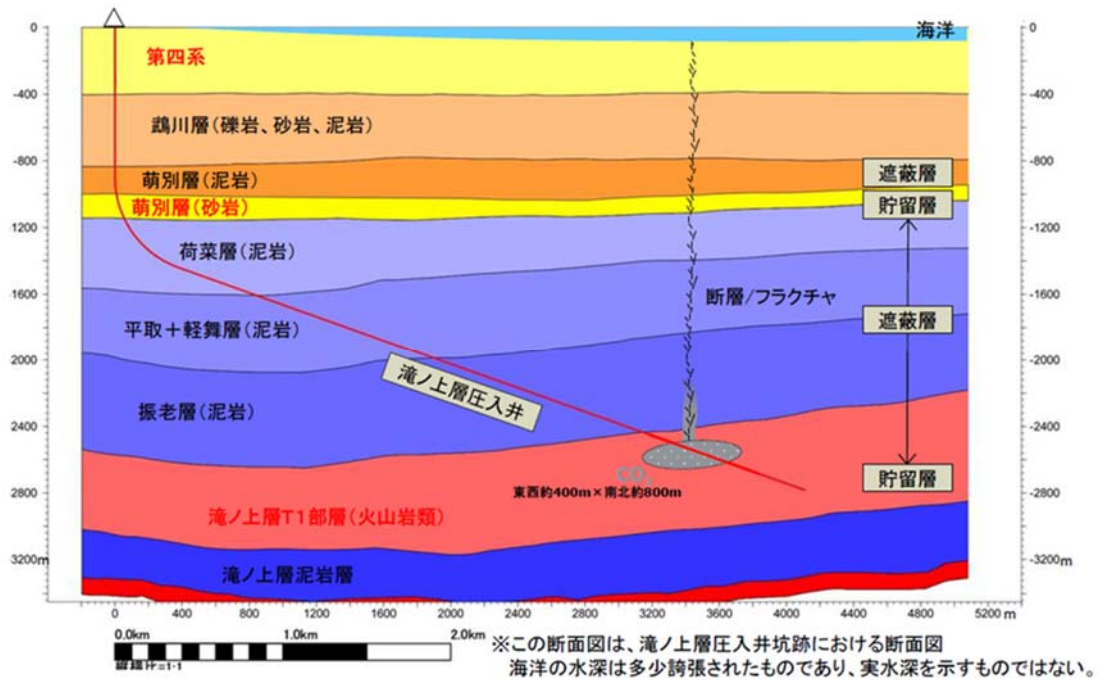
注：砂岩・泥岩（幌新太刀別層群）は母岩の浸透率がないため、破碎帯の浸透率のみ記載した。

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 CO₂ 移行挙動シミュレーション

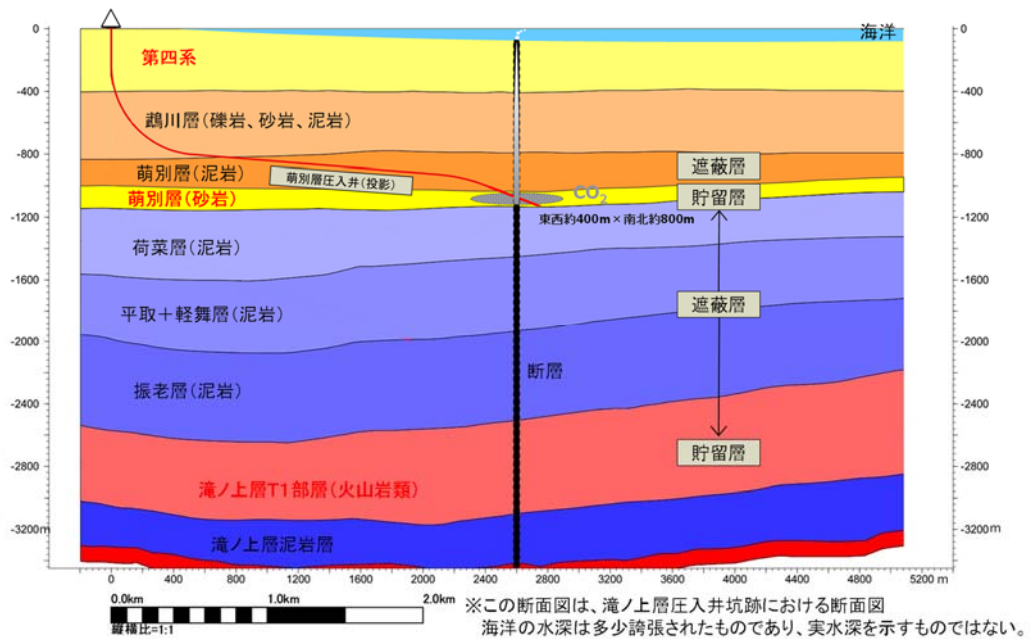
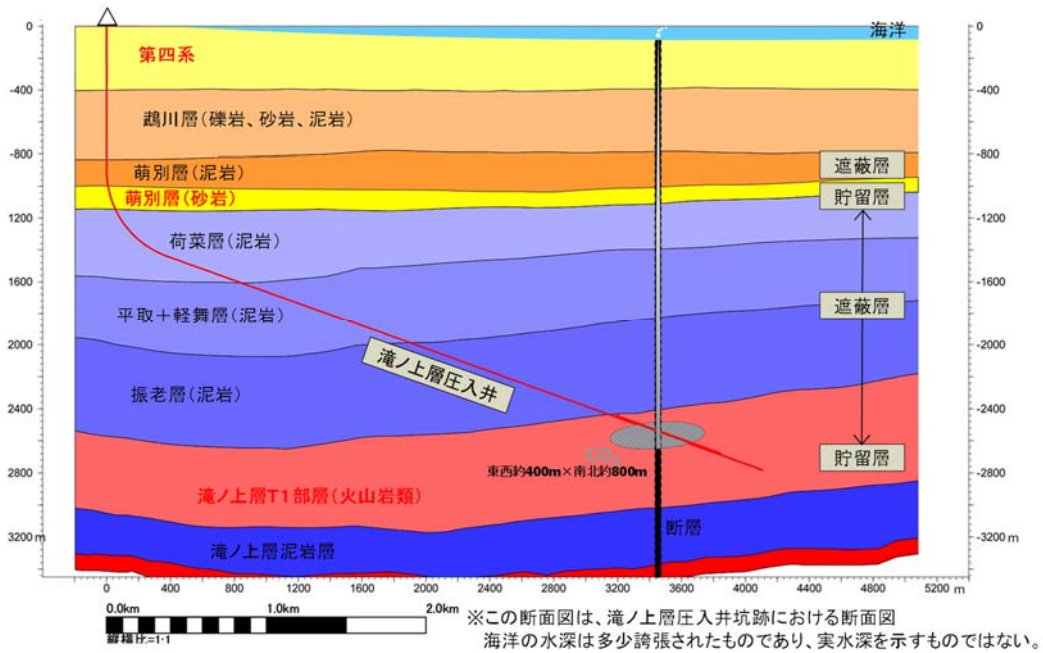
漏出シナリオは、以下の 2 つのシナリオを設定した。なお、CO₂ 漏出経路は、両シナリオともに前述(1)の文献調査結果から幅 5m、長さ 1km（当該サイトの地殻応力場を考慮して南北方向）の断層を設定した。

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、CO₂ 圧入による貯留層圧力の上昇と、CO₂ プルームの浮力により、CO₂ 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，CO₂ 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 CO₂ が漏出する極端なシナリオ（第 2.2-4 図）。



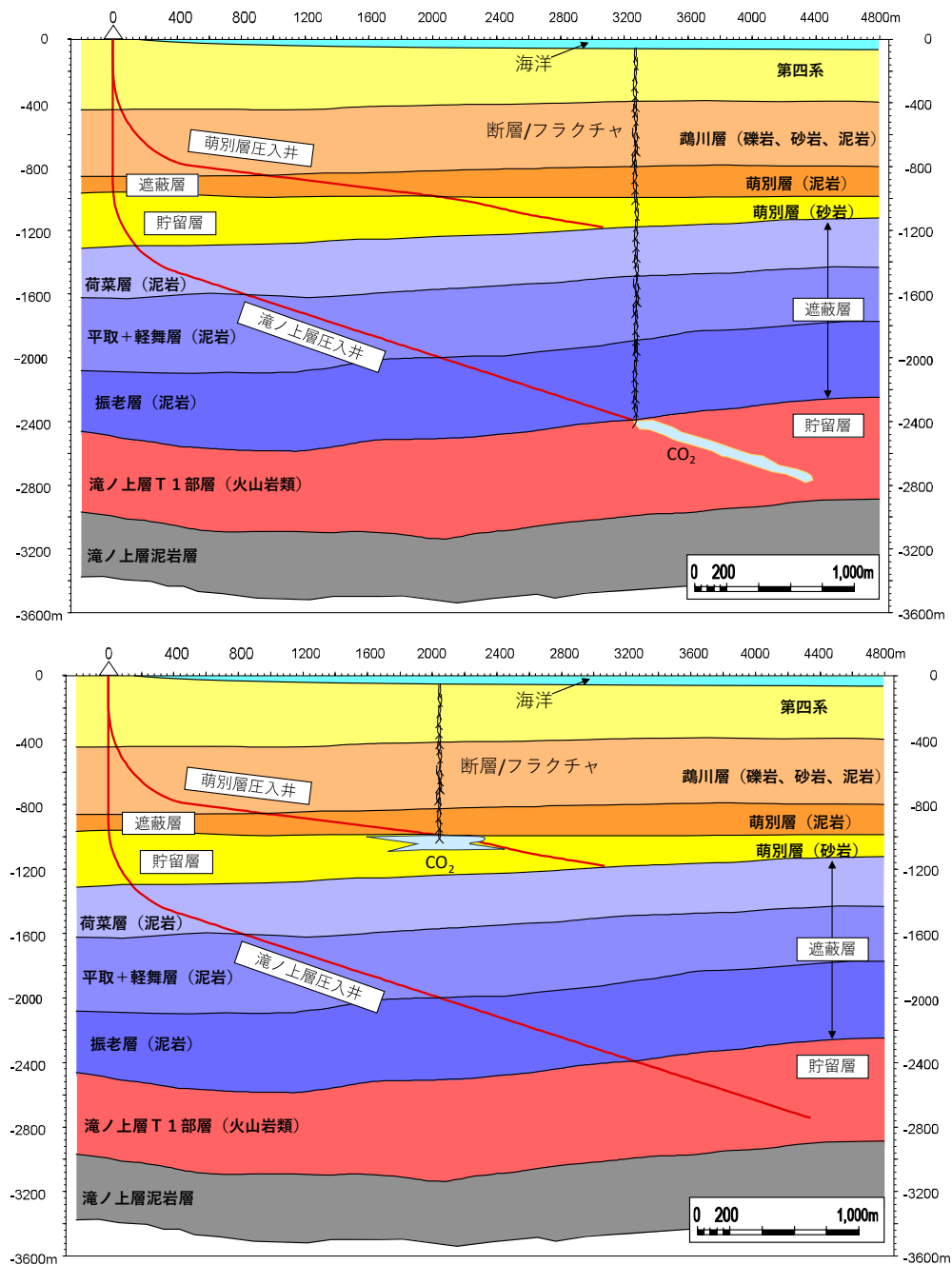
第 2.2-4 図 漏出シナリオ 2 のイメージ (上：滝ノ上層，下：萌別層)

2.3 漏出事例仮説の設定（圧入開始以降の想定）

(1) 地層中での CO₂ 移行挙動シミュレーション

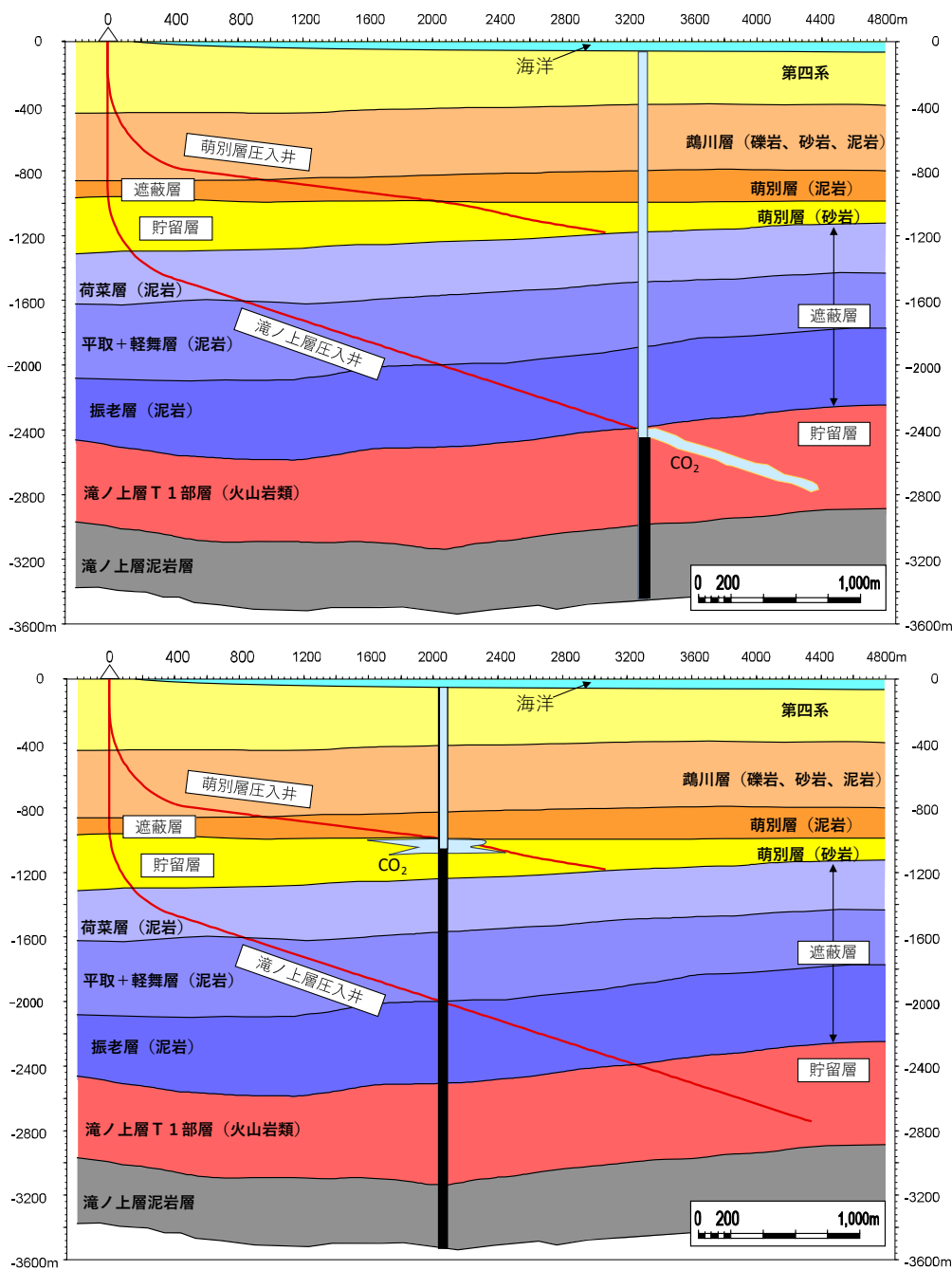
漏出シナリオは、以下の 2 つのシナリオを設定した。なお、CO₂ 漏出経路は、両シナリオとも前述 2.2(1)の文献調査結果から幅 5m、圧入井から海底面に達する長さ（当該サイトの地殻応力場を考慮して南北方向）の断層を設定した。

シナリオ 3…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、圧入井から海底面に達する長さ）が存在している場合を仮定し、CO₂ 圧入による貯留層圧力の上昇と、CO₂ プルームの浮力により、CO₂ 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 2.3-1 図）。



第 2.3-1 図 漏出シナリオ 3 のイメージ（上：滝ノ上層，下：萌別層）

シナリオ 4…想定外の事象で、CO₂ 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, 圧入井から海底面に達する長さ）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 CO₂ が漏出する極端なシナリオ（第 2.3-2 図）。



第 2.3-2 図 漏出シナリオ 4 のイメージ (上：滝ノ上層, 下：萌別層)

2.4 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（圧入開始以前の想定）

シミュレータは、CO₂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) ^[1]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 CO₂ 圧入計画に合わせるために、石油資源開発 (2013) ^[2]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 CO₂・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) ^[3]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 CO₂-水系の相対浸透率に合う Stone (1974) ^[4]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、CO₂ プルームがより小さく、周辺の地層水に溶解し比重の大きい溶存 CO₂ に変化しやすいと考えられ、CO₂ 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、CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ フラックスは、600～700トン/年であることが見積もられた (第2.3-4図)。海底までの漏出が起きる場合には、CO₂ 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、CO₂ 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) ^[5]と同等で、CO₂ 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 CO₂ 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。

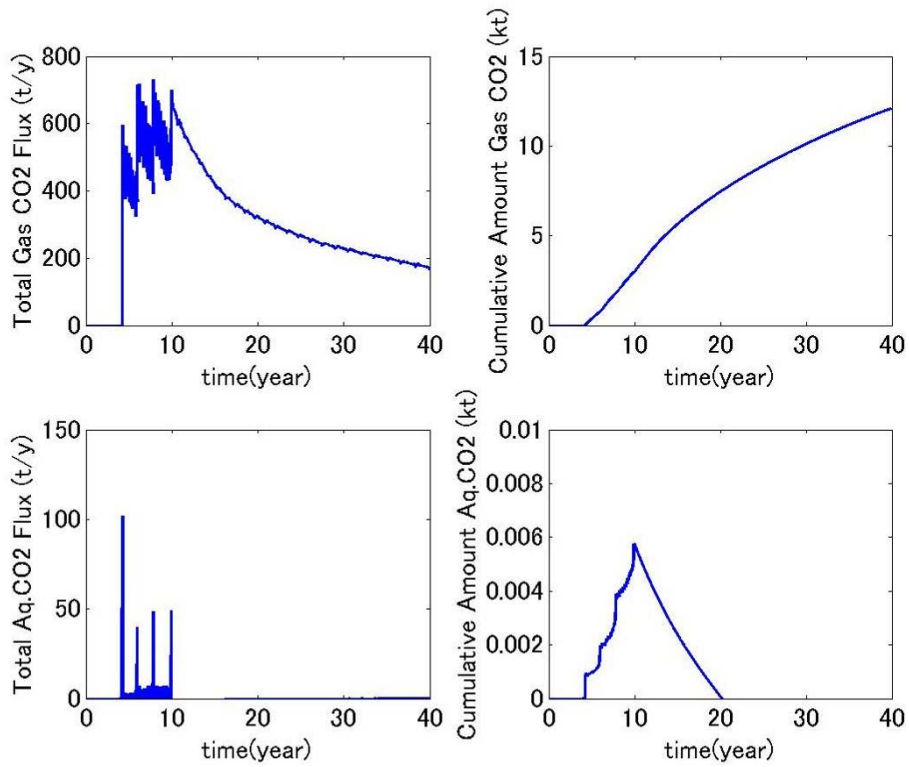
[1] Pruess, K., 2011. ECO2M: A TOUGH2 Fluid property module for mixtures of water, NaCl, and CO₂, including super- and sub-critical conditions, and phase change between liquid and gaseous CO₂. LBNL Report, LBNL-4590E, pp.1-83.

[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.

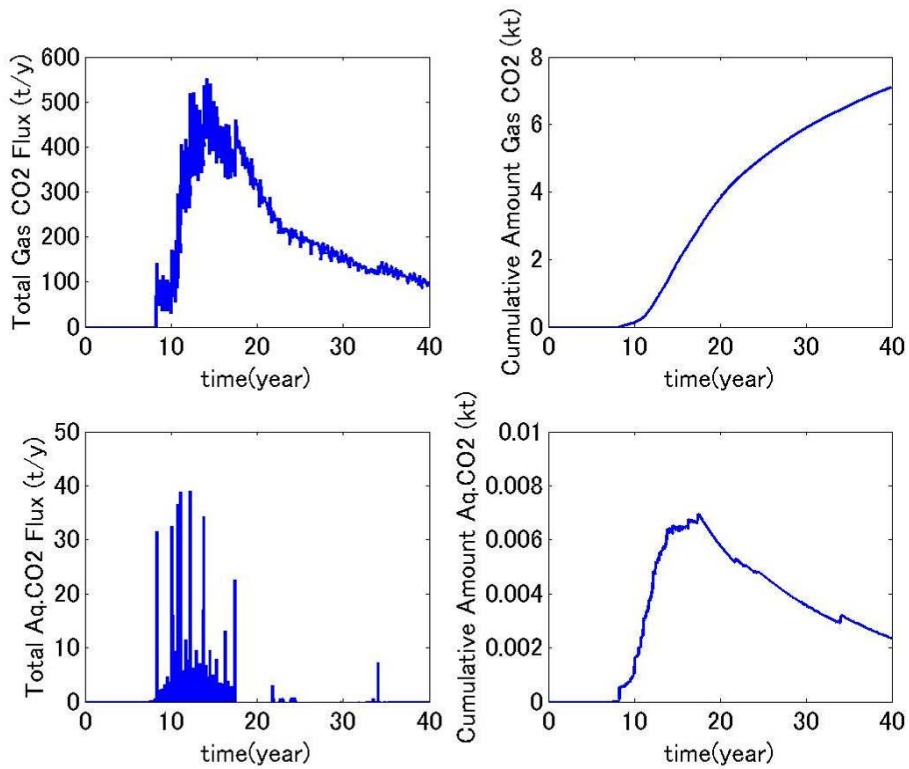
[3] 石油資源開発 (株), 2013. “圧入井最適圧入区間の選定, 圧入区間の仕上げ方法および坑壁安定性の検討 作業実施報告書”. 日本CCS調査 (株) 社内資料, p.8, 175, pp.403-409.

[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 CO₂ storage in geologic formations. Computers & Geosciences, 13, pp.409-434.



注：左；CO₂フラックス，右；全漏出量，上；気相，下；溶解相。



注：左；CO₂フラックス，右；全漏出量，上；気相，下；溶解相。

第 2.3-4 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 CO₂ 漏出量

2.5 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（圧入開始以降の想定）

シミュレータは、CO₂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) ^[1]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CO₂圧入計画に合わせるために、平成30年度（暫定）CO₂挙動予測シミュレーション結果から、滝ノ上層（T1部層）への圧入に関するケースと、萌別層砂岩層への圧入に関するケースの、圧入終了直後のCO₂・圧力分布予測を用いた。各地層の物性パラメータ等は、平成30年度（暫定）CO₂挙動予測シミュレーションで使用したパラメータに準じたが、断層内の相対浸透率曲線に関しては、萌別層の超臨界CO₂-水系の相対浸透率に合うStone (1974) ^[2]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う危険側で評価を行うためである。

(1) シナリオ3結果

滝ノ上層および萌別層からの漏出ケースについて、両者とも貯留層から漏出したCO₂は海底まで到達しないとする結果を得た。

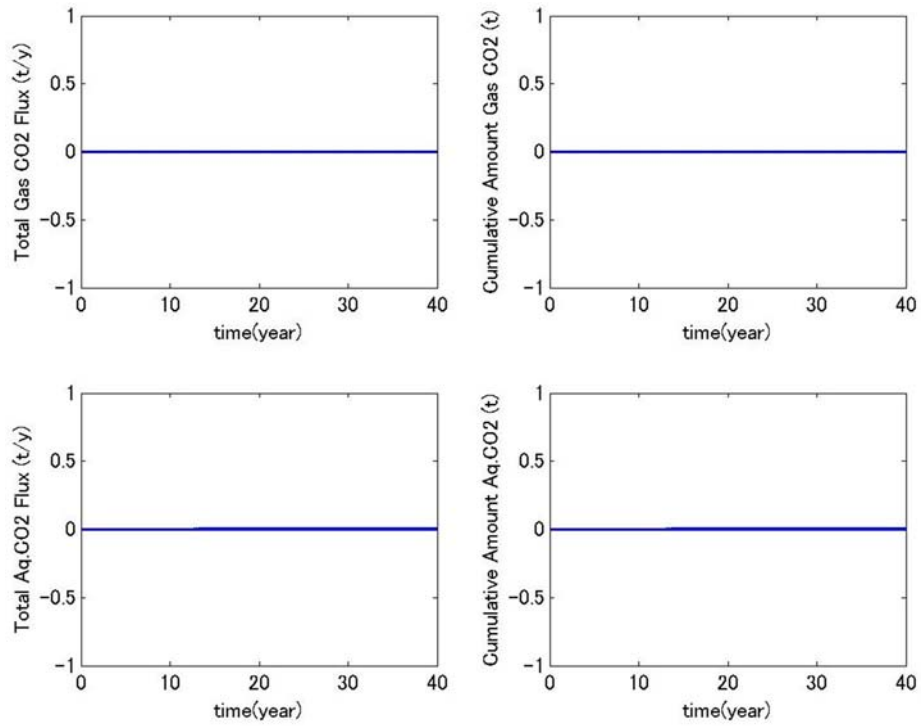
(2) シナリオ4結果

滝ノ上層および萌別層からの漏出ケースについて、両者とも貯留層から漏出したCO₂は海底まで到達しないとする結果を得た。

参考のため、第2.3-5図に萌別層からの漏出（シナリオ4）における海底面へのCO₂漏出量のグラフを示す。

^[1] Pruess, K., 2011. ECO2M: A TOUGH2 Fluid property module for mixtures of water, NaCl, and CO₂, including super- and sub-critical conditions, and phase change between liquid and gaseous CO₂. LBNL Report, LBNL-4590E, pp.1-83.

^[2] Stone, H.L., 1970. Probability model for estimating three-phase relative permeability. Trans. SPE of AIME, 249, pp.214-218.



注：左；CO₂フラックス，右；全漏出量，上；気相，下；溶解相。

第 2.3-5 図 萌別層からの漏出（シナリオ 4）における海底面への CO₂ 漏出量

3. 潜在的海洋環境影響調査項目の現況の把握

第3-1表に示す項目を、潜在的環境影響調査項目として選定し、同表に示す方法により現況を把握した。

第3-1表 潜在的海洋環境影響調査項目と把握の方法

環境要素等の区分		調査項目	把握の方法
水環境	水質	水温	現地調査により把握した。
		塩分	
		溶存酸素 (DO)	
		水素イオン濃度指数 (pH)	
		全炭酸	
		アルカリ度	
		硫化水素	
	pCO ₂		
	流況	流速・流向	既存資料の整理，現地調査により把握した。
海底環境	底質	水素イオン濃度指数 (pH)	現地調査により把握した。
		酸化還元電位 (ORP)	
		全有機炭素	
		無機炭素	
		硫化物	
		粒度組成	
海洋生物		浮遊生物の生息状況	現地調査により把握した。
		魚類等遊泳動物の生息状況	既存資料の整理により把握した。
		海草及び藻類の生育状況並びにさんご類の生息状況	既存資料の整理により把握した。
		底生生物の生息状況	現地調査により把握した。
生態系		藻場，干潟，さんご群集その他の脆弱な生態系の状態	既存資料の整理により把握した。
		重要な生物種の産卵場又は生育場その他の海洋生物の生育又は生息にとって重要な海域の状態	既存資料の整理により把握した。
		熱水生態系その他の特殊な生態系の状態	既存資料の整理により把握した。
海洋の利用等		海洋レクリエーションの場としての利用状況	既存資料の整理により把握した。
		海中公園その他の自然環境の保全を目的として設定された区域としての利用状況	既存資料の整理により把握した。
		漁場としての利用状況	既存資料の整理により把握した。
		主要な航路としての利用状況	既存資料の整理により把握した。
		港湾区域および港域に関する情報	既存資料の整理により把握した。
		海底ケーブルの敷設，海底資源の探査または掘削その他の海底の利用状況	既存資料の整理により把握した。

3.1 水環境及び海底環境

(1) 水環境

① 項目

水環境として、第 3.1-1 表の項目を把握した。

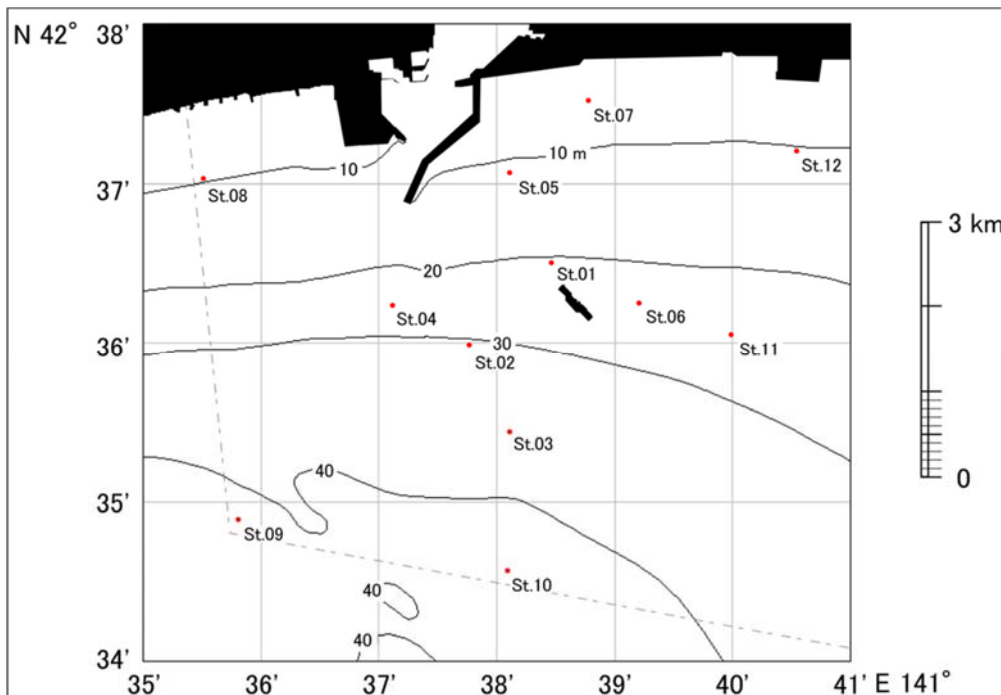
第 3.1-1 表 潜在的海洋環境影響調査項目と把握の方法（水環境）

環境要素等の区分	調査項目	把握の方法	
水環境	水質	水温	現地調査により把握した。
		塩分	
		溶存酸素 (DO)	
		水素イオン濃度指数 (pH)	
		全炭酸	
		アルカリ度	
		硫化水素	
		pCO ₂	
流況	流速・流向	既存資料の整理，現地調査により把握した。	

② 調査方法

7) 調査測点

水環境に係る現地調査は、第 3.1-1 図に示した St.01～St.12 の全 12 測点で実施した。また、各測点の緯度経度を第 3.1-2 表に示す。



第 3.1-1 図 調査海域および測点位置図

第 3.1-2 表 水質調査測点の緯度経度表

調査測点	緯度	経度
St. 01	北緯 42° 36' 30"	東経 141° 38' 28"
St. 02	北緯 42° 35' 59"	東経 141° 37' 46"
St. 03	北緯 42° 35' 26"	東経 141° 38' 07"
St. 04	北緯 42° 36' 14"	東経 141° 37' 07"
St. 05	北緯 42° 37' 04"	東経 141° 38' 07"
St. 06	北緯 42° 36' 15"	東経 141° 39' 13"
St. 07	北緯 42° 37' 31"	東経 141° 38' 47"
St. 08	北緯 42° 37' 02"	東経 141° 35' 31"
St. 09	北緯 42° 34' 53"	東経 141° 35' 49"
St. 10	北緯 42° 34' 34"	東経 141° 38' 06"
St. 11	北緯 42° 36' 03"	東経 141° 40' 00"
St. 12	北緯 42° 37' 12"	東経 141° 40' 33"

注：緯度経度は世界測地系（WGS84）

イ) 調査実施日

水質調査の調査実施日を、第 3.1-3 表に示した。

第 3.1-3 表 水質調査の調査実施日

年度	春季	夏季
ベースライン	2014 年 5 月 19 日	2013 年 8 月 26 日
2016	2016 年 6 月 3 日	2016 年 8 月 24 日 25 日, 9 月 11 日
2017	2017 年 5 月 18 日	2017 年 8 月 24 日 25 日
2018	2018 年 5 月 30 日	2018 年 8 月 31 日
2019	2019 年 5 月 29 日 30 日	2019 年 8 月 27 日

年度	秋季	冬季
ベースライン	2013 年 11 月 6 日	2014 年 2 月 20 日
2016	実施していない	2017 年 2 月 15 日
2017	2017 年 11 月 16 日	2018 年 2 月 18 日
2018	2018 年 11 月 12 日	2019 年 2 月 13 日
2019	2019 年 12 月 6 日	2020 年 2 月 11 日

ウ) 調査方法

a. 水温

水温は、採水調査および多項目センサー調査により把握した。

採水調査においては、ニスキン採水器およびバンドーン採水器を用いて、温度躍層の上下各 2 層、計 4 層にて採水し、温度計を用いて現地にて測定した。

多項目センサー調査においては、JFE アドバンテック社製の多項目センサー AAQ-RINKO を用いて測定した。毎秒 0.1m の速度で多項目水質センサーを垂下させることにより水温を 0.5m ピッチで同時計測し鉛直分布を把握した。

b. 塩分

塩分は、採水調査および多項目センサー調査により把握した。

採水調査においては、ニスキン採水器およびバンドーン採水器を用いて、温度躍層の上下各 2 層、計 4 層にて採水し、塩検瓶に分取し、ゴム栓で密栓して分析試料とした。分析試料を分析室に持ち帰り、第 3.1-4(1)表に示す方法で測定した。

多項目センサー調査においては、JFE アドバンテック社製の多項目センサー AAQ-RINKO を用いて測定した。毎秒 0.1m の速度で多項目水質センサーを垂下させることにより塩分を 0.5m ピッチで同時計測し鉛直分布を把握した。

c. 溶存酸素 (DO)

DO は、採水調査および多項目センサー調査により把握した。

採水調査においては、ニスキン採水器およびバンドーン採水器を用いて、温度躍層の上下各 2 層、計 4 層にて採水し、100mL の DO ガラス瓶に気泡の混入が無いように十分注意して分取した。分取に際しては共洗いを行わず、オーバーフローにより置換を行った。分取した試料に硫酸マンガン (II) 溶液、アルカリ性ヨウ化カリウム-アジ化ナトリウム溶液の順に各 1mL を添加し、気泡が入らないように栓をして、転倒混和し、瓶の口を水封し、分析試料とした。分析試料を分析室に持ち帰り、第 3.1-4(1)表に示す方法で測定した。

多項目センサー調査においては、JFE アドバンテック社製の多項目センサー AAQ-RINKO を用いて測定した。毎秒 0.1m の速度で多項目水質センサーを垂下させることにより DO を 0.5m ピッチで同時計測し鉛直分布を把握した。

d. 水素イオン濃度指数 (pH)

pH は、採水調査および多項目センサー調査により把握した。

採水調査においては、ニスキン採水器およびバンドーン採水器を用いて、温度躍層の上下各 2 層、計 4 層にて採水し、250mL 中栓付き広口ポリ瓶に分取して分析試料とした。また、pH 分析は、ベースライン調査は帰港後、2016~2019 年度は船上で、第 3.1-4(1)表に示す方法で測定した。

多項目センサー調査においては、JFE アドバンテック社製の多項目センサー AAQ-RINKO を用いて測定した。毎秒 0.1m の速度で多項目水質センサーを垂下させることにより pH を 0.5m ピッチで同時計測し鉛直分布を把握した。

e. 全炭酸

全炭酸濃度は、採水調査により把握した。

ニスキン採水器およびバンドーン採水器を用いて、温度躍層の上下各 2 層、計 4 層にて採水し、120mL ガラスバイアルに気泡の混入が無いように十分注意して分取した。共洗いはせず、オーバーフローにより置換を行った。分取した試料に飽和塩化第二水銀溶液を 50 μ L 添加し、ブチルゴム栓により密栓した。その後、アルミキャップで封じ、冷蔵保

存して分析試料とした。分析試料を分析室に持ち帰り、第 3.1-4(1)表に示す方法で測定した。

f. アルカリ度

アルカリ度は、採水調査により把握した。

ニスキン採水器およびバンドーン採水器を用いて、温度躍層の上下各 2 層、計 4 層にて採水し、250mL 中栓付き広口ポリ瓶に気泡の混入が無いように十分注意して分取した。共洗いはせず、オーバーフローにより置換を行った。分取した試料に飽和塩化第二水銀溶液を 100 μ L (50 μ L \times 2 回) 添加し、冷蔵保存して分析試料とした。分析試料を分析室に持ち帰り、第 3.1-4(1)表に示す方法で測定した。

g. 硫化物イオン濃度

硫化物イオン濃度は、採水調査により把握した。

ニスキン採水器およびバンドーン採水器を用いて、温度躍層の上下各 2 層、計 4 層にて採水し、120mL ガラスバイアルに気泡の混入が無いように十分注意して分取した。共洗いはせず、オーバーフローにより置換を行った。分取した試料に飽和塩化第二水銀溶液を 50 μ L 添加し、ブチルゴム栓により密栓した。その後、アルミキャップで封じ、冷蔵保存して分析試料とした。分析試料を分析室に持ち帰り、第 3.1-4(1)表に示す方法で測定した。なお、硫化物イオン濃度の測定は、ベースライン調査は St. 01, 02 および St. 03 の 3 測点のみ、2016~2019 年度は St. 01~St. 12 の 12 測点で実施した。

h. pCO₂

pCO₂ は、水温、塩分、全炭酸濃度およびアルカリ度の値を用い計算して求めた。

i. 流速・流向

文献により把握した流況が妥当であることを確認するために、現地調査を行った。

現地調査は水質多項目センサー等調査時に、各測点からベースライン調査は 50m 程度離れた位置、2016~2019 年度は 100m 程度離れた位置において流況(流速・流向)観測を実施した。海表面下 2m 層と海底直上 2m 層の 2 層に電磁流向流速計を取り付けた係留系を用いて行った。各測点での係留系設置時間は、多項目センサー観測および採水作業などの調査作業を実施している間の約 1~2 時間とし、30 秒ごとに記録した値の平均流速を求めた。

j. クロロフィル a および栄養塩類

クロロフィル a および栄養塩類は、採水調査により把握した。

ニスキン採水器を用いて、温度躍層の上下各 1 層、計 2 層にて採水した試料から分取して分析試料とし、第 3.1-4(2)表に示す方法で測定した。

第 3.1-4(1)表 分析方法（水質）

項目	分析法	参考文献
水温	温度計による計測（現地測定）	—
塩分	海洋観測指針 5.3.4.2	海洋観測指針(気象庁：1999)
水素イオン濃度 (pH)	ガラス電極センサーによる計測（現地測定）	海洋観測指針(気象庁：1999)
溶存酸素 (DO)	ウインクラー法 海洋観測指針 5.4	海洋観測指針(気象庁：1999)
全炭酸	リン酸添加，電量滴定法 ・参照物質(Reference material for oceanic CO ₂ measurements)による分析精度管理	Dickson AG, Sabine CL and Christian JR (eds.) (2007). Guide to best practices for ocean CO ₂ measurements. PICES Special Publication 3, 191 pp.
アルカリ度	改良グランプロット法 ・参照物質(Reference material for oceanic CO ₂ measurements)による分析精度管理	Dickson AG and Goyet C (1994). DOE Handbook of methods for the analysis of the various parameters of the carbon dioxide system in sea water; version 2, ORNL/CDIAC-74, Dep. Of Energy, Washington, D.C.
硫化物イオン濃度	ガスクロマトグラフによる GC-FPD 法	環境省告示第 9 号別表第 2 第 3(昭和 47 年)
pCO ₂	全炭酸とアルカリ度から CO ₂ SYS による炭酸平衡の関係式により算出	Lewis E, Wallace DWR (1998). Program developed for CO ₂ system calculations, ORNL/ CDIAC-105. Oak Ridge: Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy.

第 3.1-4(2)表 分析方法（水質）

項目	分析法	参考文献
クロロフィル a	吸光光度法	日本海洋学会（2008）. 沿岸環境調査マニュアル II [水質・微生物篇]. 恒星社厚生閣，東京，400pp.
全リン	オートアナライザーによる流れ分析	日本規格協会（2013）. 工業排水試験方法，JIS K 0102.
全窒素	オートアナライザーによる流れ分析	日本規格協会（2013）. 工業排水試験方法，JIS K 0102.
ケイ酸態ケイ素	吸光光度法	日本海洋学会（2008）. 沿岸環境調査マニュアル II [水質・微生物篇]，恒星社厚生閣，東京，400pp.

③ 結果

7) 水温

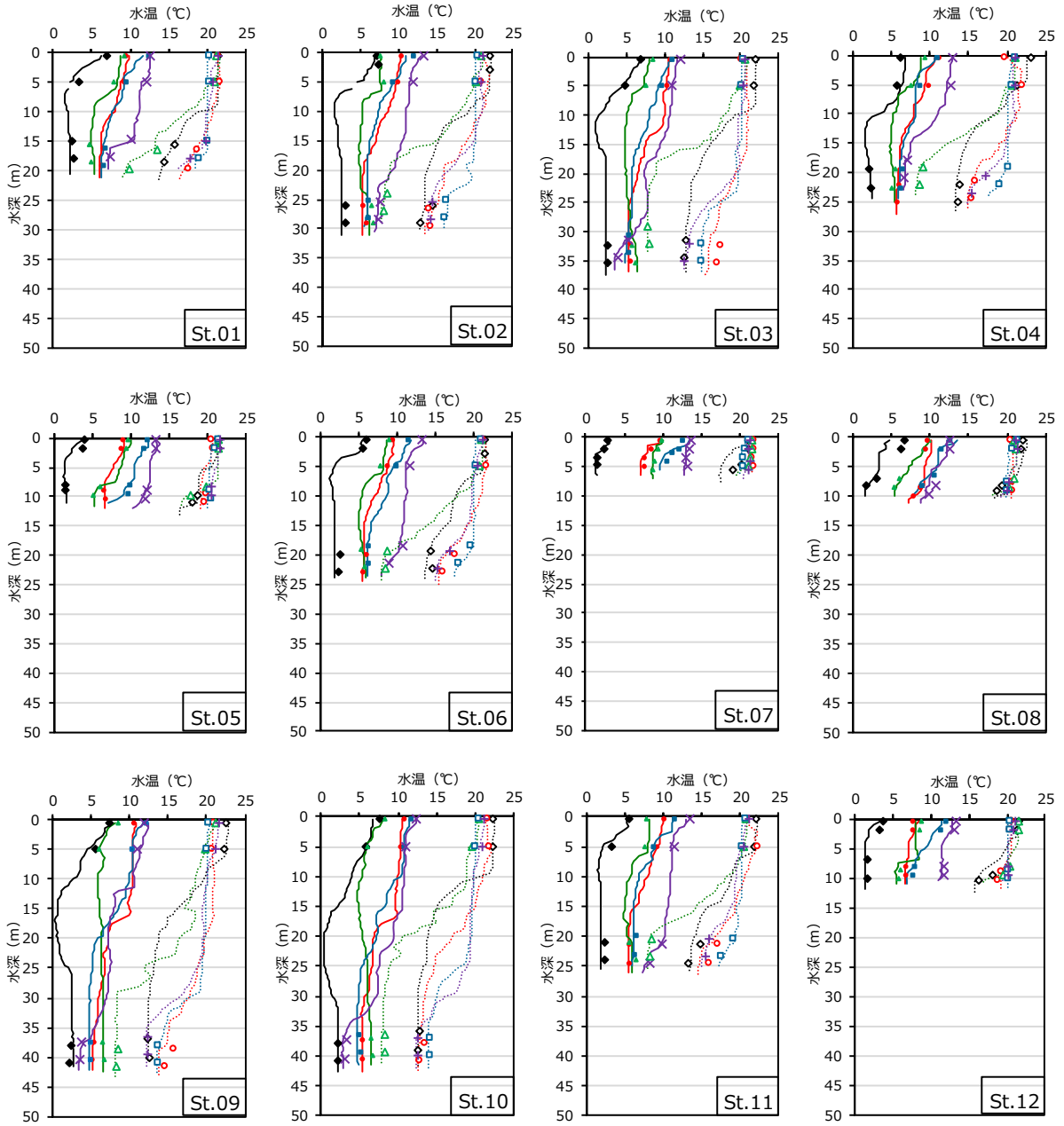
水温の調査結果を，第 3.1-2(1)(2)図に示す。

a. 採水調査結果

夏季は 7.9～23.0℃，秋季は 6.7～16.0℃，冬季は 1.0～7.2℃，春季は 1.4～13.6℃の範囲にあった。

b. 多項目センサー調査結果

夏季は7.7～22.9℃，秋季は6.8～16.2℃，冬季は1.1～7.3℃，春季は0.3～13.6℃の範囲にあった。春・夏季は浅部から深部にかけて水温の差がみられるが，秋・冬季では水深による温度変化が少ない。年毎の変化は，いずれの季節においても，深部の水温はある範囲で増減している。秋季については，ほかの年度と比較して，2019年度が最も低くなっているのは，12月の水温が低下した時期に調査したことによるものである（ほかには11月に実施している）。



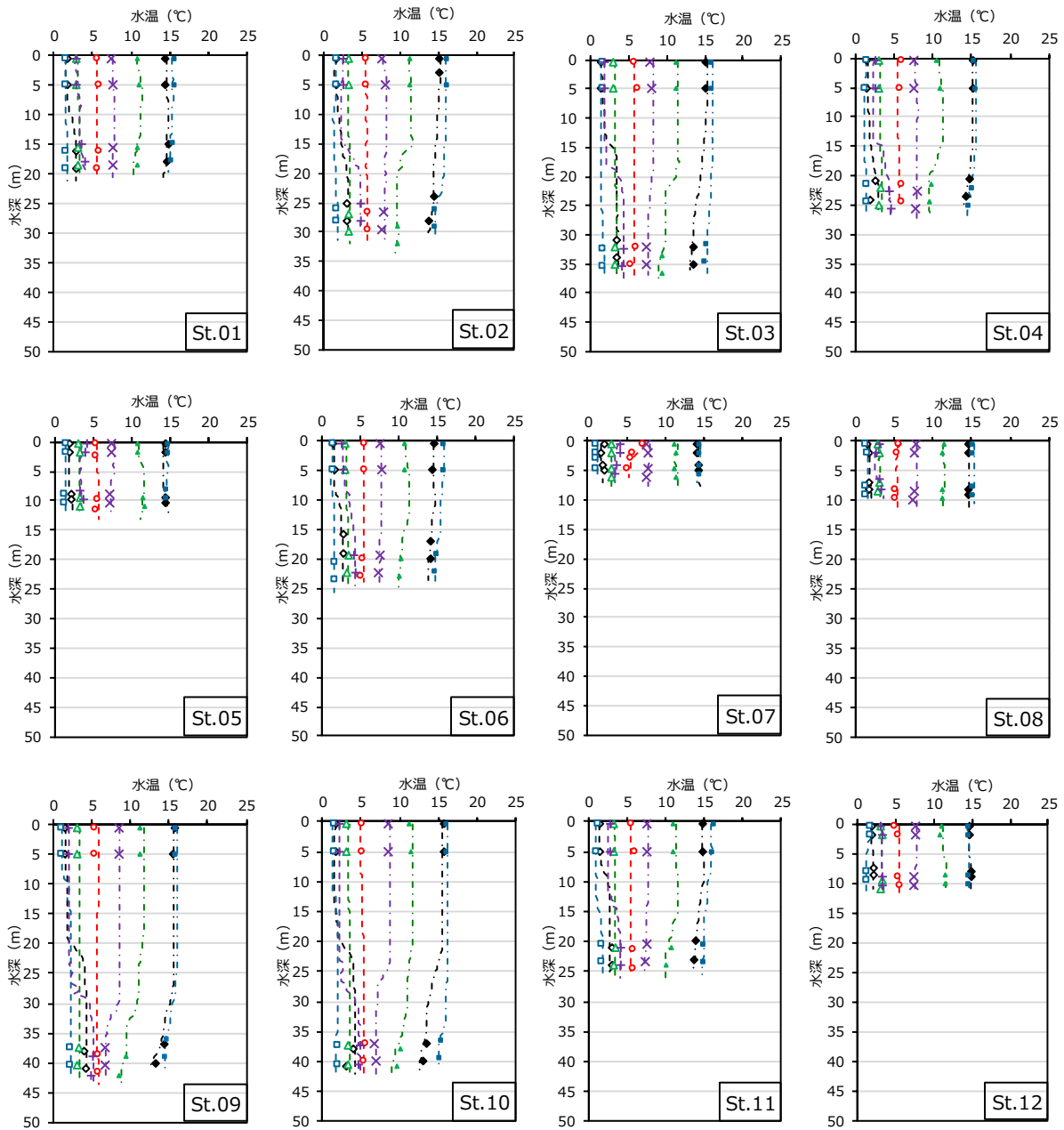
採水調査

◆ 水温 (ベース春)	◇ 水温 (ベース夏)
● 水温 (2016 春)	○ 水温 (2016 夏)
▲ 水温 (2017 春)	△ 水温 (2017 夏)
■ 水温 (2018 春)	□ 水温 (2018 夏)
✕ 水温 (2019 春)	+ 水温 (2019 夏)

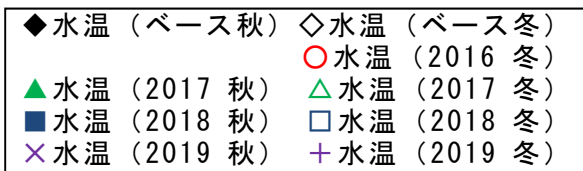
多項目水質センサー調査

— 水温 (ベース春) 水温 (ベース夏)
— 水温 (2016 春) 水温 (2016 夏)
— 水温 (2017 春) 水温 (2017 夏)
— 水温 (2018 春) 水温 (2018 夏)
— 水温 (2019 春) 水温 (2019 夏)

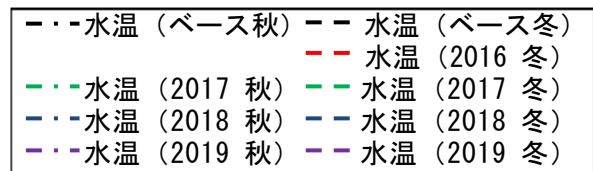
第 3.1-2(1) 図 水質調査結果鉛直分布 (水温)



採水調査



多項目水質センサー調査



第 3.1-2(2) 図 水質調査結果鉛直分布 (水温)

イ) 塩分

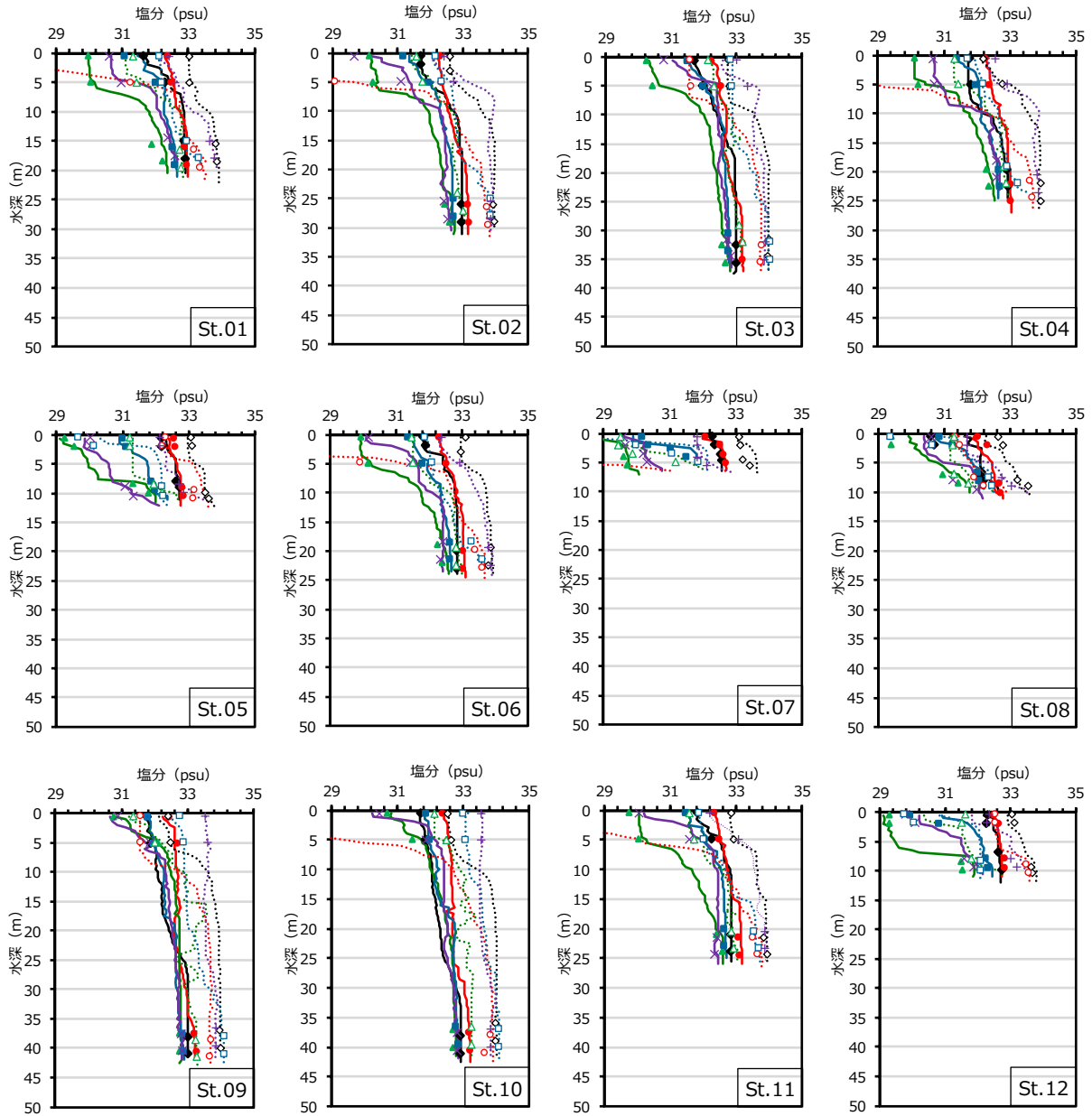
塩分の調査結果を、第 3.1-3(1)(2)図に示す。

a. 採水調査結果

夏季は 14.46～34.12，秋季は 31.77～33.98，冬季は 31.97～33.47，春季は 28.55～33.26 の範囲にあった。春・夏季は浅部から深部にかけて塩分にかなり変化がみられるが，秋・冬季では水深による塩分の変化は小さい。年毎の変化は，いずれの季節においても，深部の塩分はある範囲で分布していた。

b. 多項目センサー調査結果

夏季は 13.01～34.12，秋季は 32.44～34.00，冬季は 31.68～33.56，春季は 28.66～33.24 の範囲にあった。春季では 2017 年が最も低く，2016 年が最も高くなっている。春・夏季は浅部から深部にかけて塩分にかなり変化がみられる。2017 年度夏季は春季の塩分の範囲であるが，それを除いて深部では沖側ほど，いずれの季節もある範囲で分布していた。一方，秋・冬季は春・夏季に比べると浅部と深部，あるいは年毎の変化は小さい。



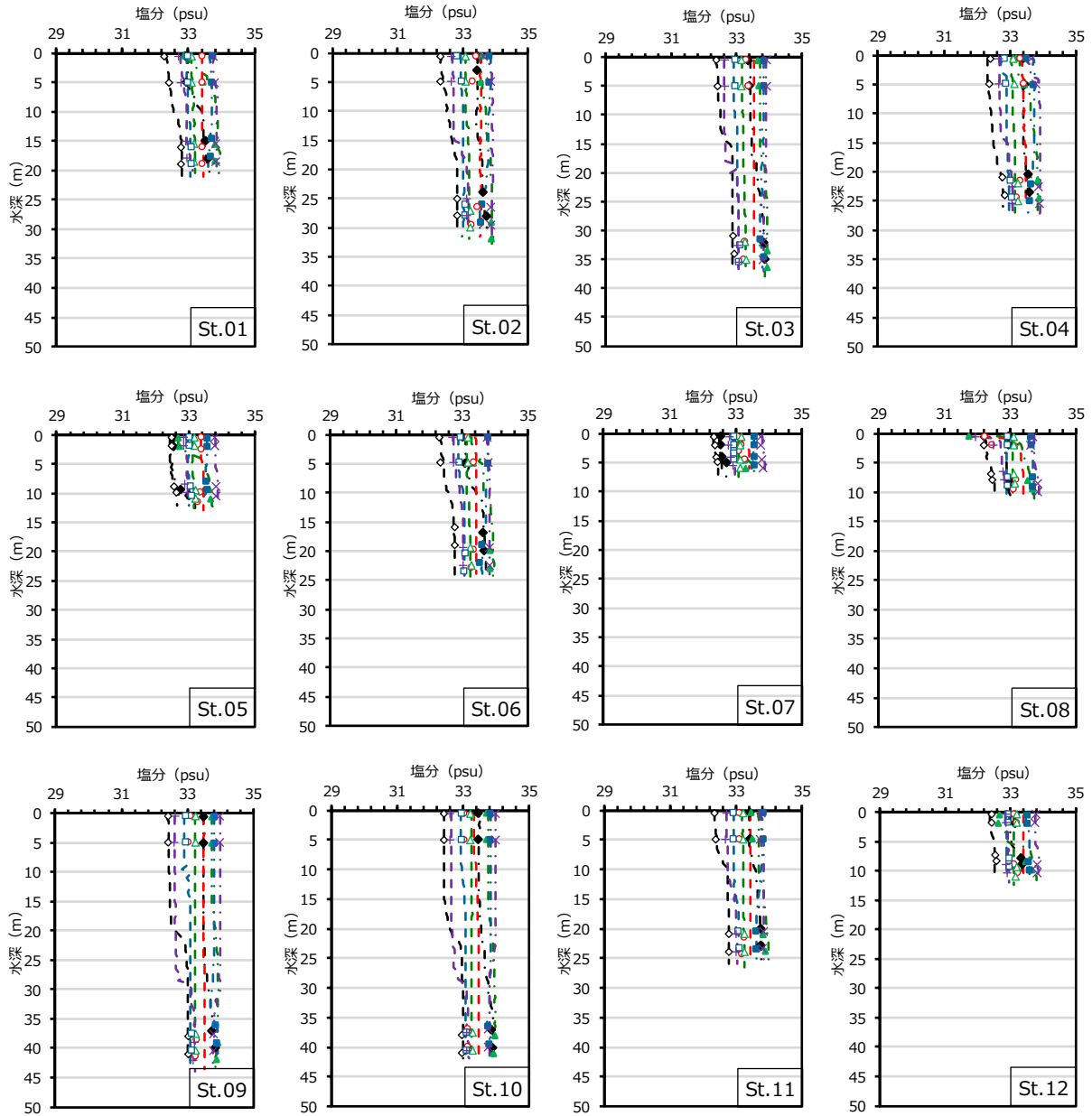
採水調査



多項目水質センサー調査



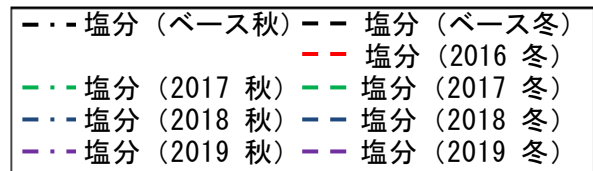
第 3.1-3(1) 図 水質調査結果鉛直分布 (塩分)



採水調査



多項目水質センサー調査



第 3.1-3(2) 図 水質調査結果鉛直分布 (塩分)

ウ) 溶存酸素 (DO)

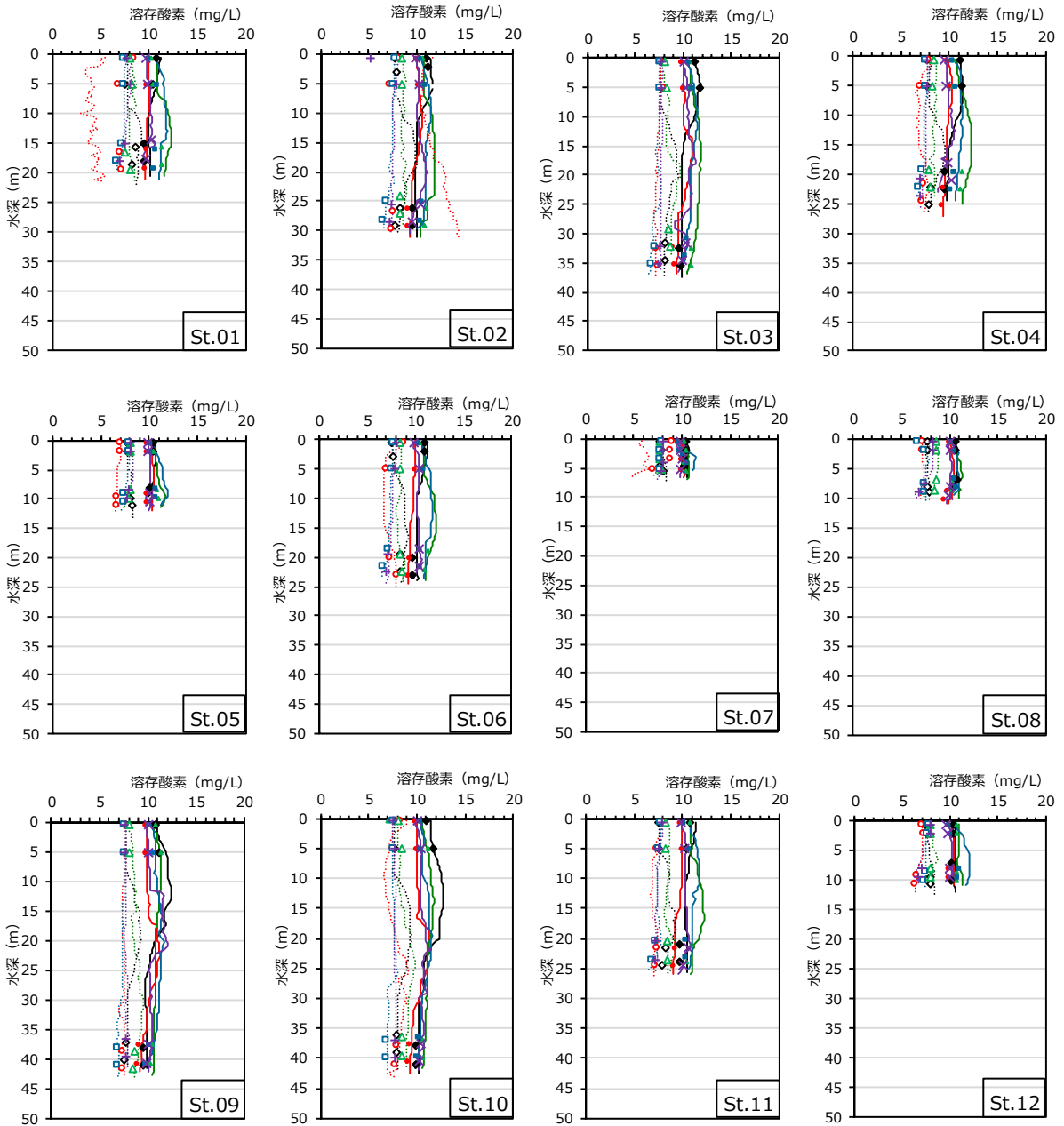
DO の調査結果を、第 3.1-4(1)(2) 図に示す。

a. 採水調査結果

夏季は 5.10～8.95mg/L, 秋季は 6.59～8.91mg/L, 冬季は 8.89～12.81mg/L, 春季は 6.99～11.71mg/L の範囲にあった。季節ごとの違いでは、夏季や秋季に比べて、冬季や春季のほうが、DO が高い傾向にある。

b. 多項目センサー調査結果

夏季は 3.03～14.41mg/L, 秋季は 6.36～9.19mg/L, 冬季は 9.84～13.92mg/L, 春季は 8.80～12.78mg/L の範囲にあった。春・夏季は秋・冬季に比べ水深による変化が多少見られる。また、夏季や秋季に比べて、冬季や春季の方が高い傾向にあり、2018 年度冬季に最も高かった。2016 年度夏季の St.02 では、夏季の他の年度の測定値より大きくなっているが、これはセンサーモジュールの不具合によるものである。



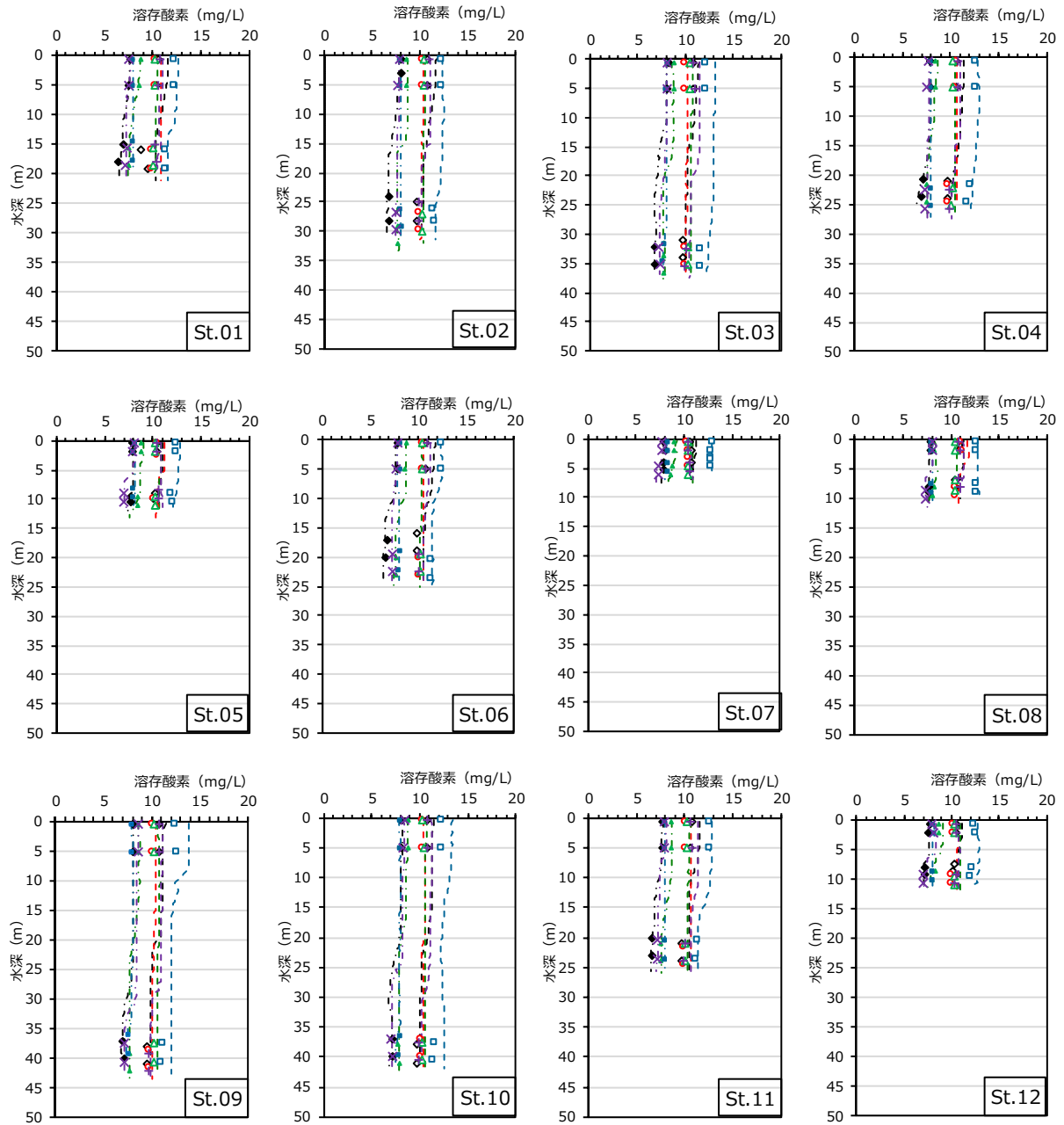
採水調査



多項目水質センサー調査



第 3.1-4(1) 図 水質調査結果鉛直分布 (溶存酸素)



採水調査



多項目水質センサー調査



第 3.1-4(2) 図 水質調査結果鉛直分布 (溶存酸素)

イ) 水素イオン濃度指数 (pH)

pHの調査結果を、第3.1-5(1)(2)図に示す。なおpH(NBSスケール)は、採水調査ではベースライン調査は室温下で測定した値、2016~2019年度は船上で測定した値を示し、多項目センサー調査では現場水温で測定した値を記載している。

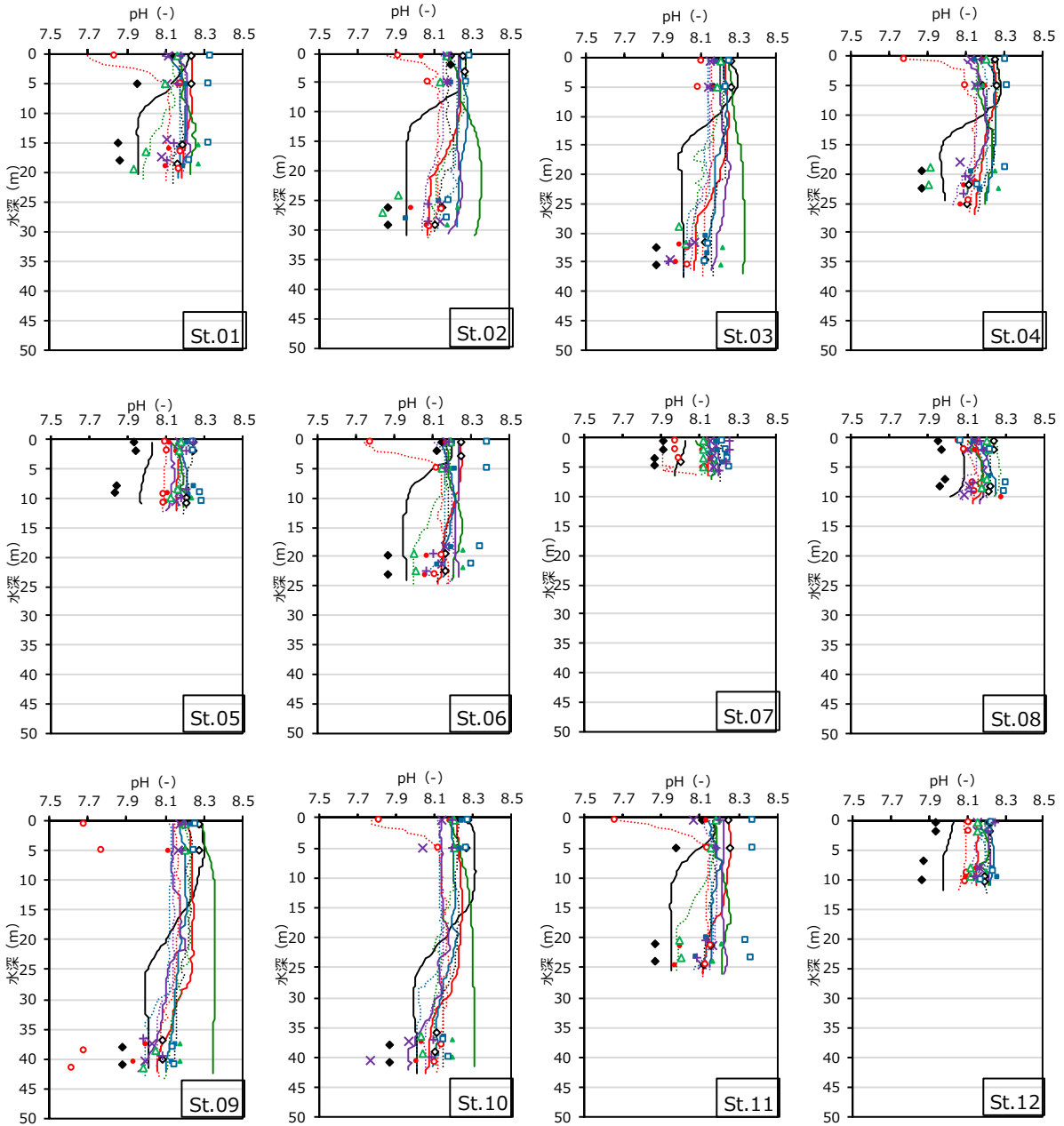
a. 採水調査結果

夏季は7.62~8.38、秋季は7.83~8.26、冬季は7.84~8.38、春季は7.77~8.28の範囲にあった。また、春季のベースライン調査では沖合の調査測点のpHは浅部と深部の差が大きく、浅部で高い値を示す傾向がみられた。

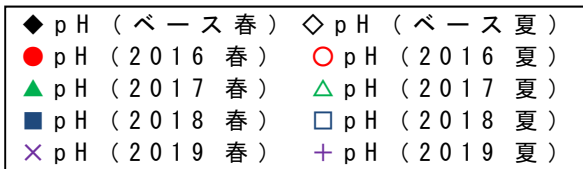
b. 多項目センサー調査結果

夏季は7.69~8.28、秋季は7.94~8.23、冬季は7.95~8.37、春季は7.91~8.36の範囲にあった。採水調査結果と同様、春季ベースライン調査では表層と下層の差が大きくなっている。2017年春季のデータではSt.02, St.03, St.09, St.10の観測点で比較的高いpHとなっているが、これらはいずれも沖合の観測点である。

秋・冬季のデータでは全体的に水深によるpHの変化が少ない。2018年冬季のSt.01, St.06, St.11のデータが他の年に比べ大きくなっているが、これはセンサーモジュールの不具合によるものである。



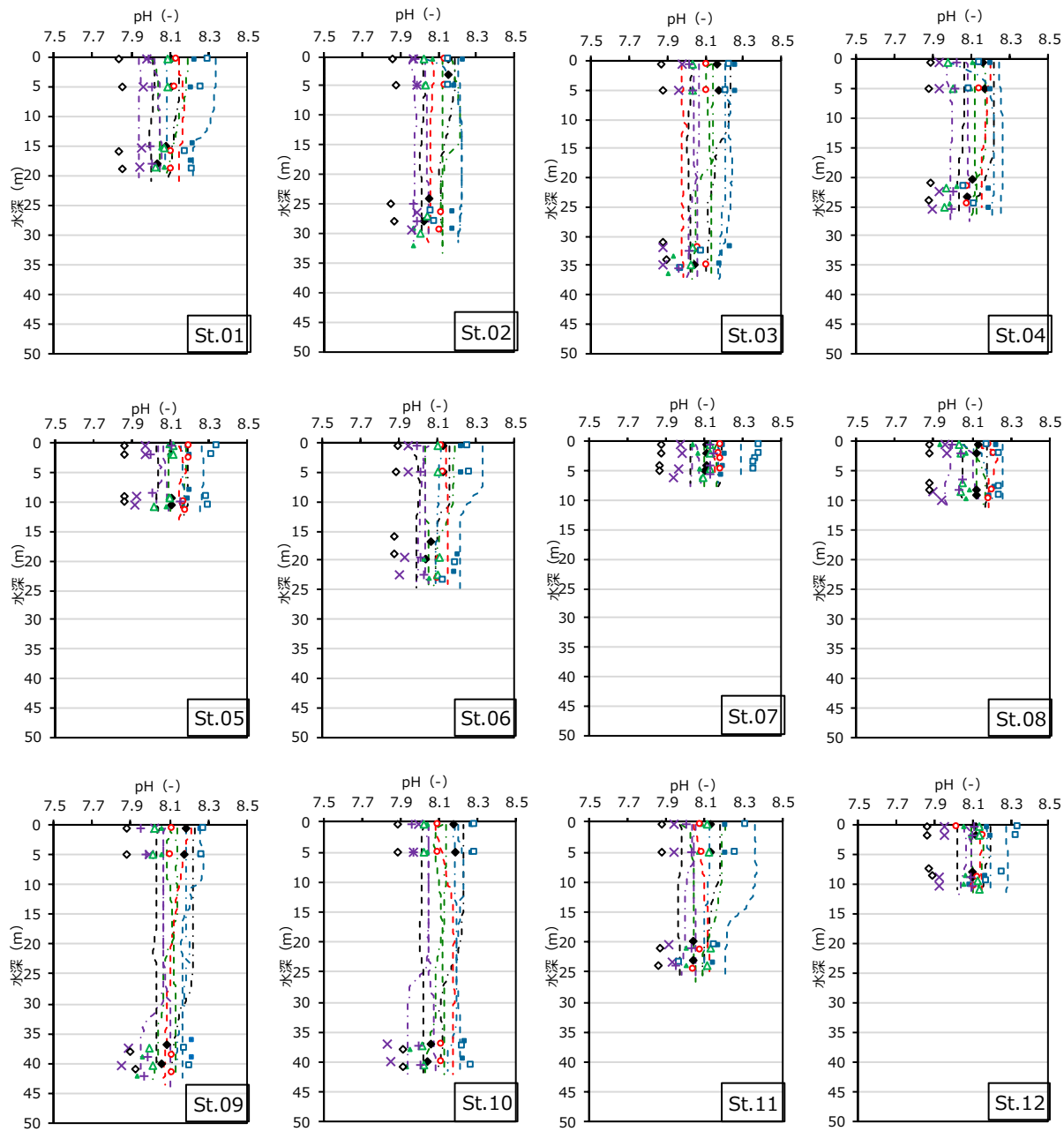
採水調査



多項目水質センサー調査

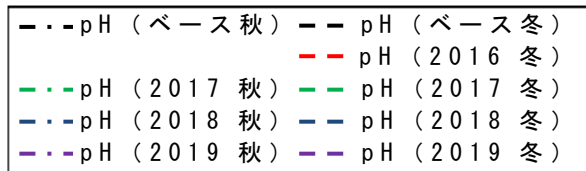
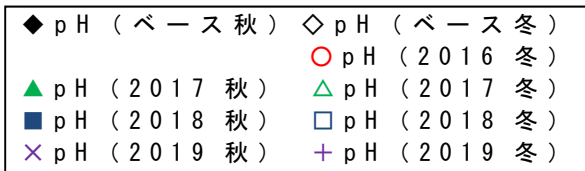


第 3.1-5(1) 図 水質調査結果鉛直分布 (pH)



採水調査

多項目水質センサー調査



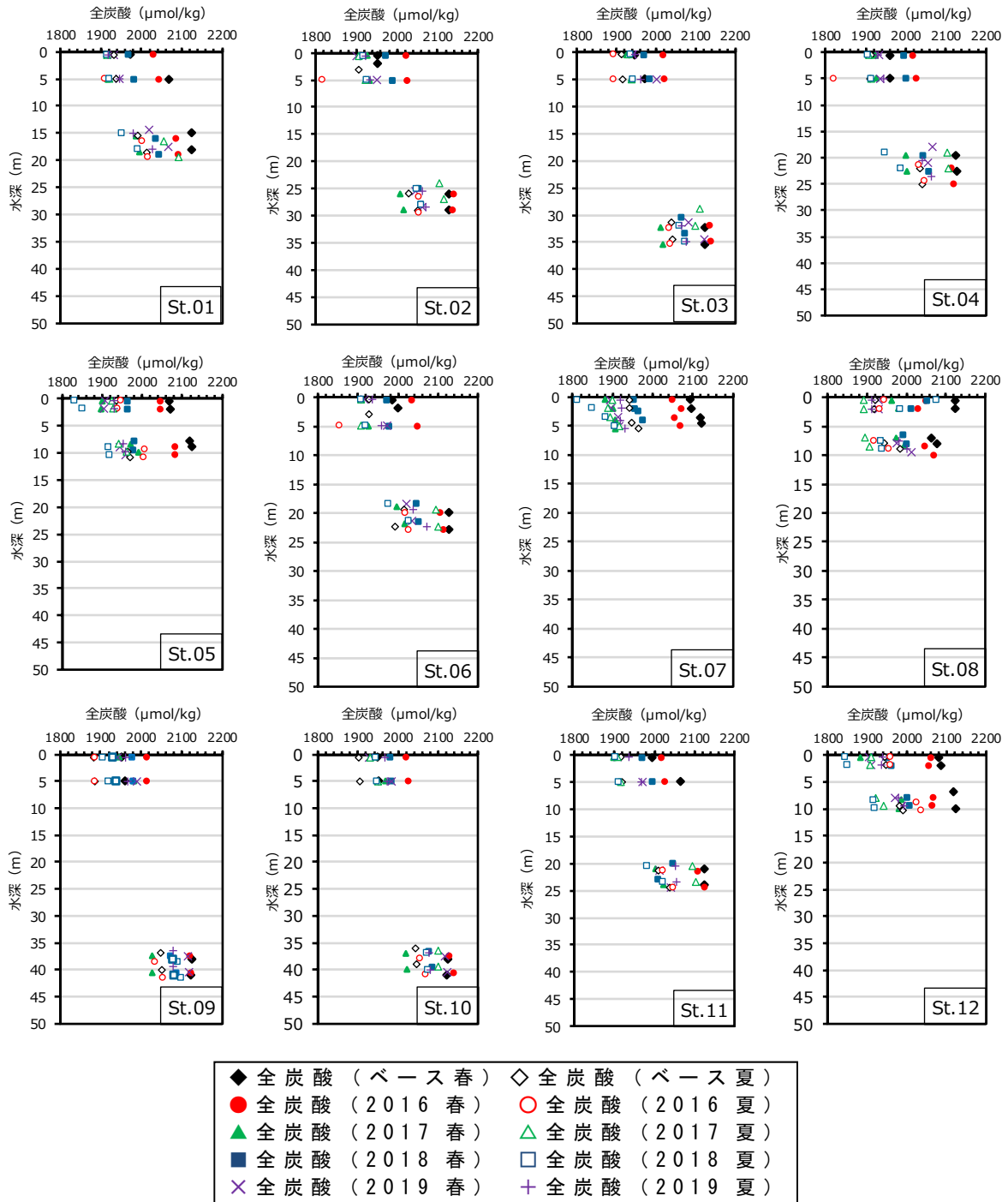
第 3.1-5(2) 図 水質調査結果鉛直分布 (pH)

カ) 全炭酸

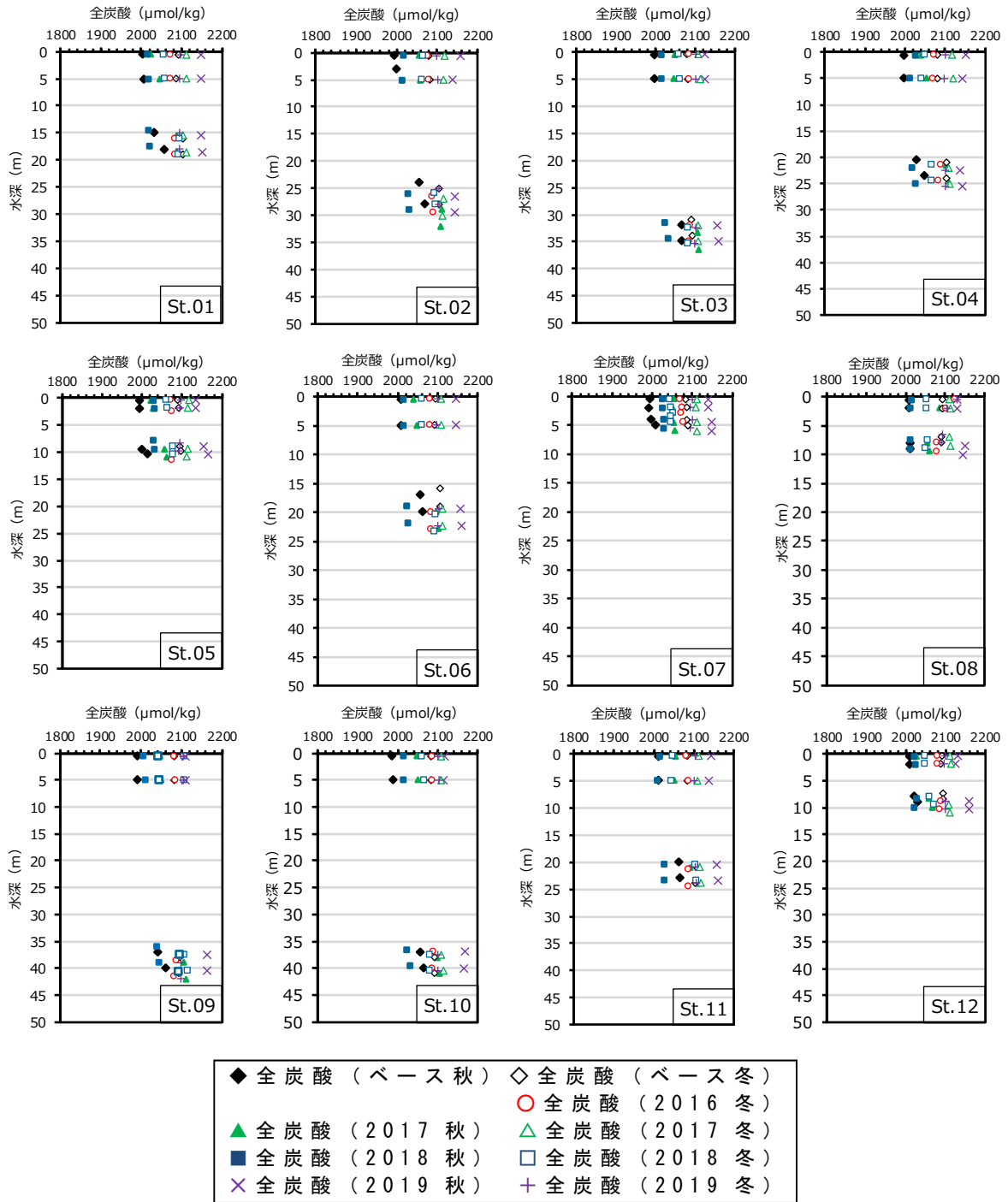
全炭酸の調査結果を、第 3.1-6(1)(2) 図に示す。

a. 採水調査結果

夏季は 1,126~2,114 $\mu\text{mol}/\text{kg}$ 、秋季は 1,985~2,201 $\mu\text{mol}/\text{kg}$ 、冬季は 2,040~2,129 $\mu\text{mol}/\text{kg}$ 、春季は 1,786~2,138 $\mu\text{mol}/\text{kg}$ の範囲にあった。全炭酸濃度は浅部で低く、深部で高い傾向を示した。季節的にみると、浅部の全炭酸濃度は冬季に高く、夏季に低い傾向を示した。特に、春季、夏季は、浅部と深部の鉛直差が大きい傾向がみられた。



第 3.1-6(1) 図 採水調査結果鉛直分布 (全炭酸)



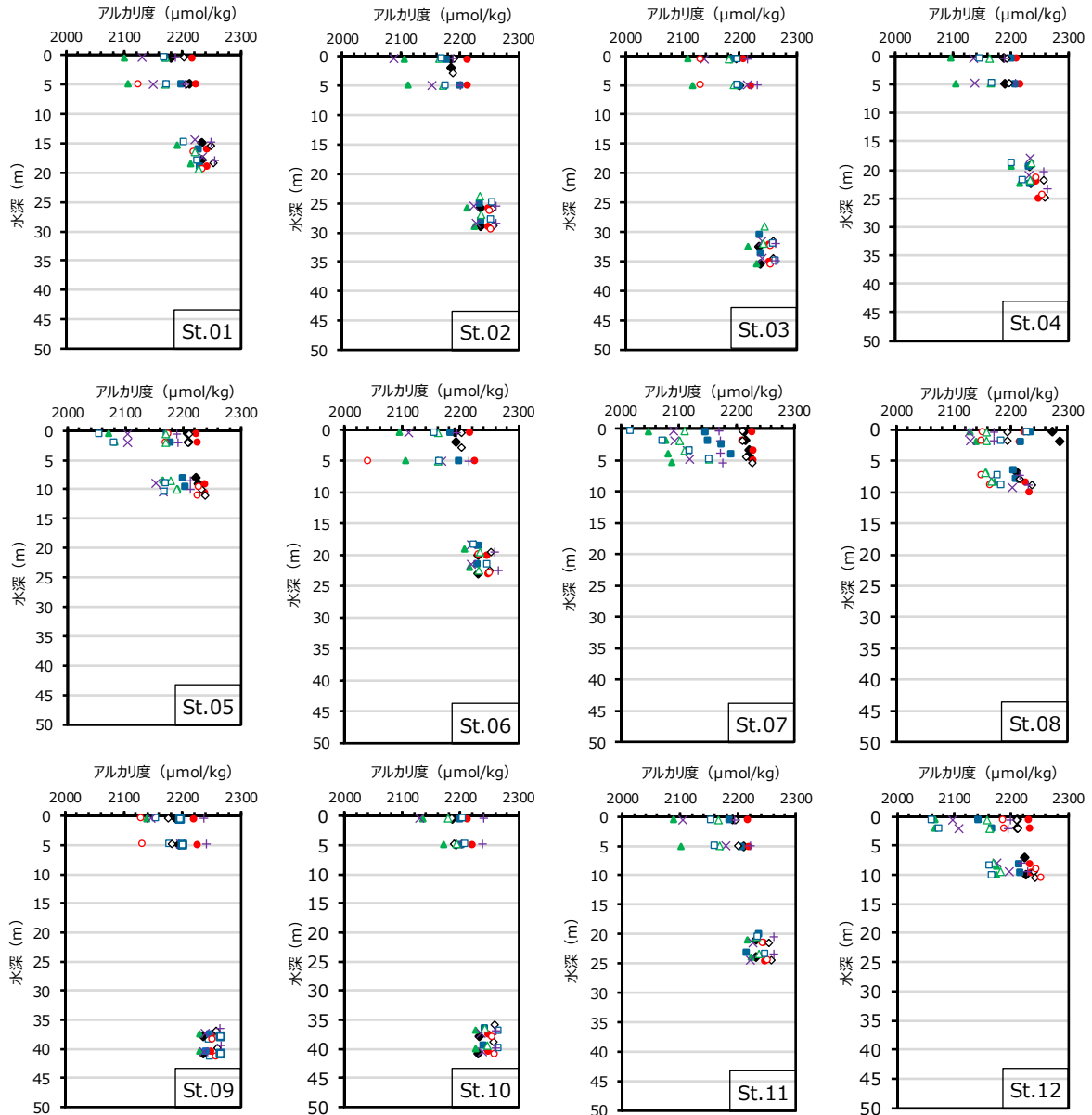
第 3.1-6(2) 図 採水調査結果鉛直分布 (全炭酸)

か) アルカリ度

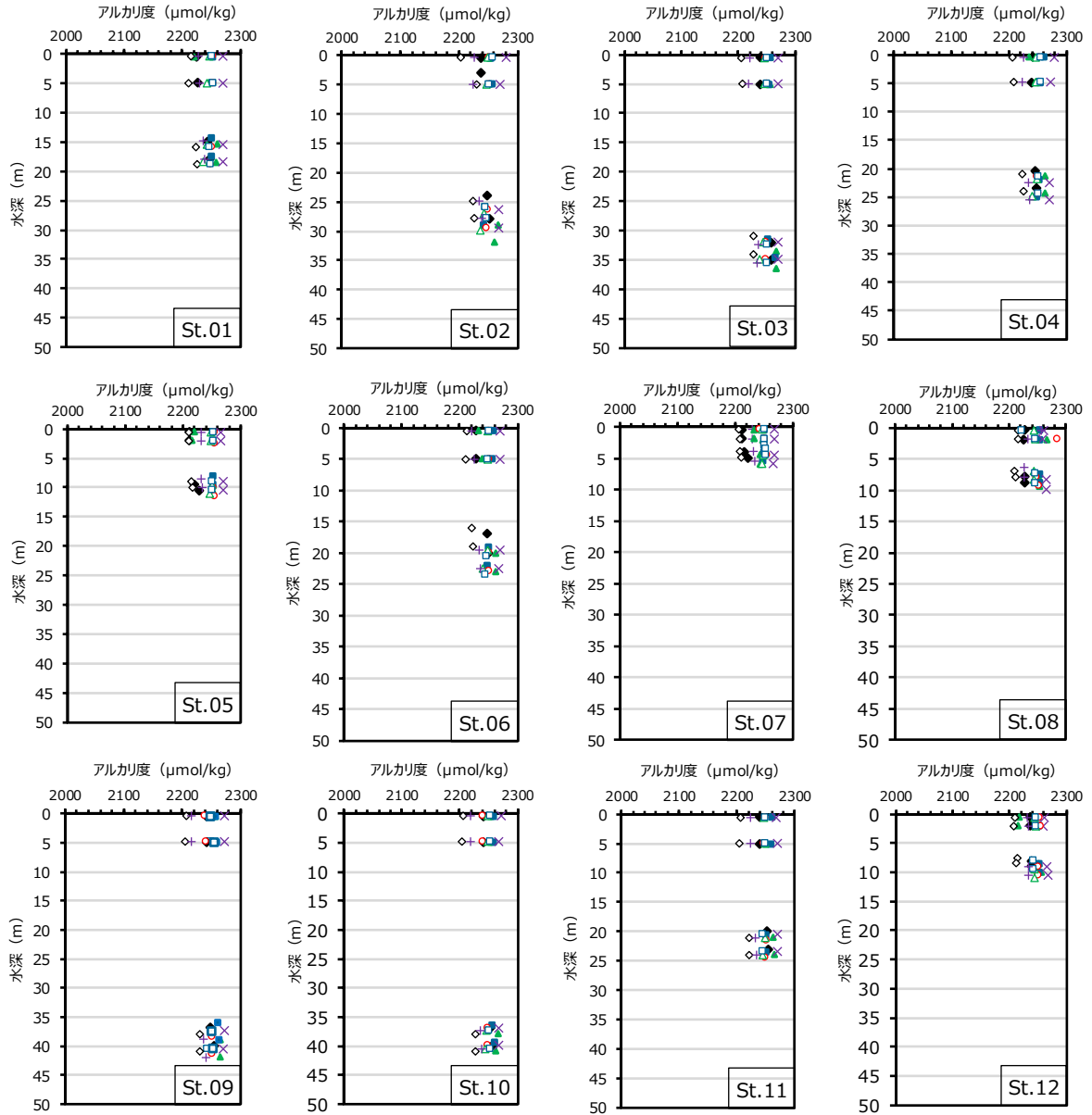
アルカリ度の調査結果を、第3.1-7(1)(2)図に示す。

a. 採水調査結果

夏季は1,151~2,266 $\mu\text{mol}/\text{kg}$ 、秋季は2,210~2,352 $\mu\text{mol}/\text{kg}$ 、冬季は2,205~2,306 $\mu\text{mol}/\text{kg}$ 、春季は2,048~2,287 $\mu\text{mol}/\text{kg}$ の範囲にあった。アルカリ度は、浅部で低く深部で高い傾向を示し、春・夏季に顕著であり、季節的にも、春季、夏季に浅部のアルカリ度が低い傾向がみられた。



第3.1-7(1)図 採水調査結果鉛直分布 (アルカリ度)



第 3.1-7(2) 図 採水調査結果鉛直分布 (アルカリ度)

キ) 硫化物イオン濃度

a. 採水調査結果

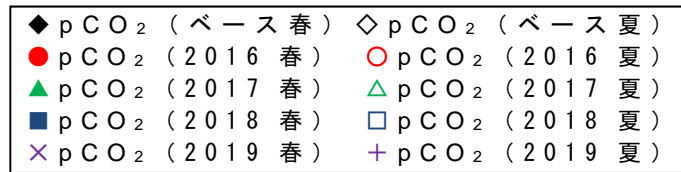
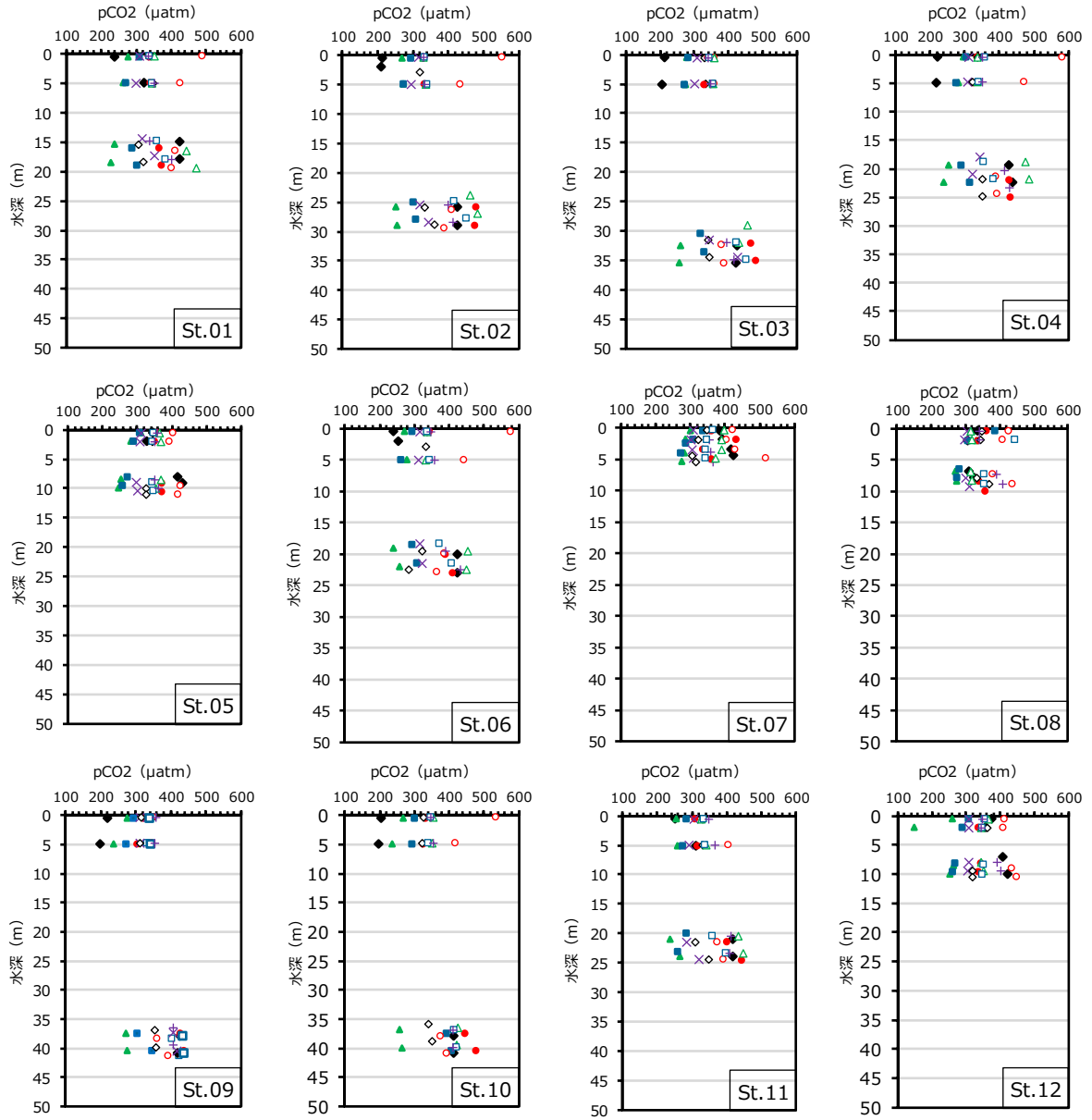
分析対象とした全測点（ベースライン調査は，St. 01，St. 02，St. 03，2016～2019年度調査は全12調査測点），全季節で検出下限値（0.0005mg/L）未満であった。

ク) pCO₂

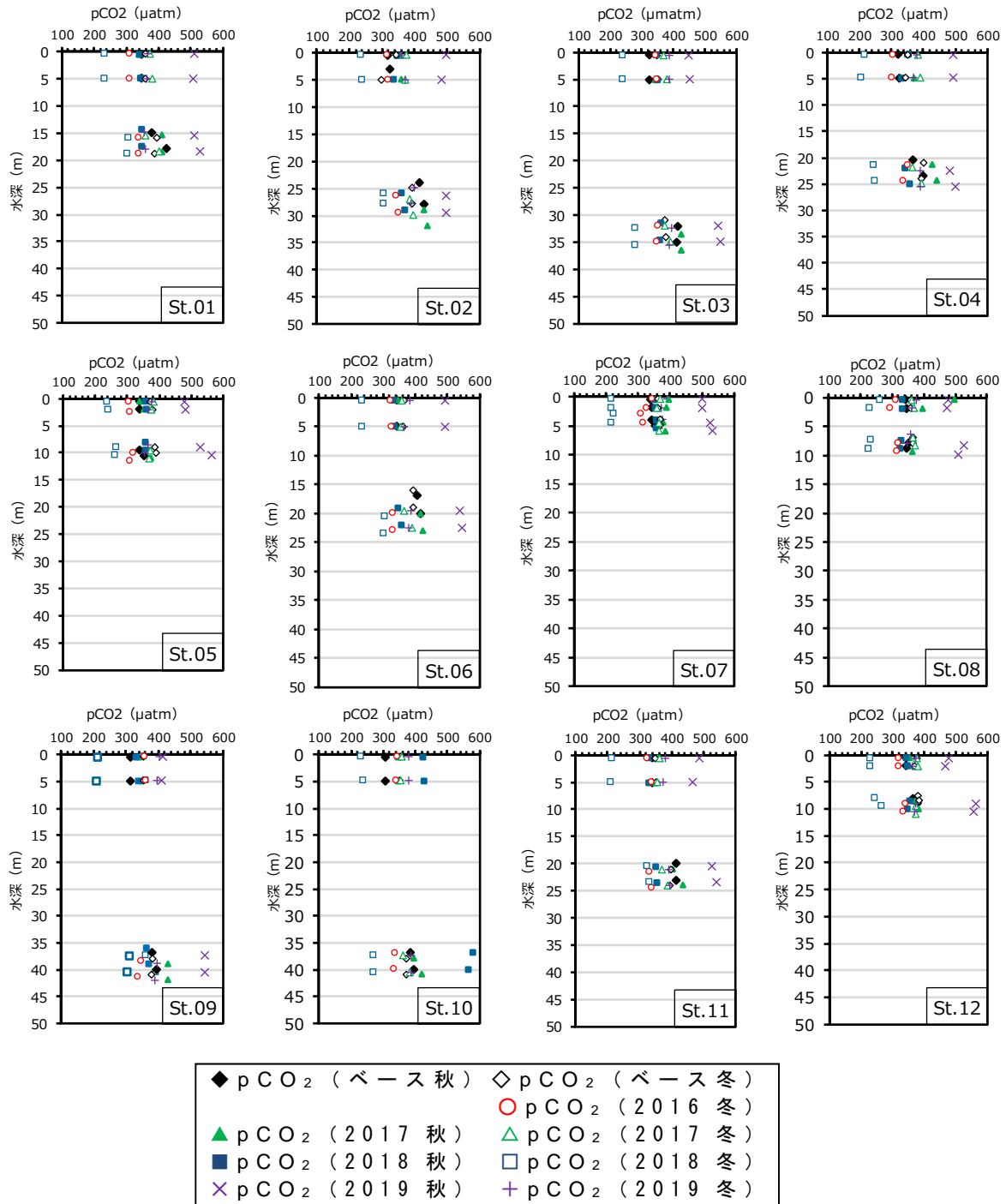
pCO₂の調査結果を，第3.1-8(1)(2)図に示す。

a. 採水調査結果

夏季は283～760 μ atm，秋季は307～579 μ atm，冬季は206～403 μ atm，春季は147～480 μ atmの範囲にあった。2019年秋季は高い傾向にあったが，その後に観測した冬季は過去の冬季とほぼ同等であり，高い傾向が続くものではなかった。



第 3.1-8(1) 図 採水調査結果鉛直分布 (pCO₂)



第 3.1-8(2) 図 採水調査結果鉛直分布 (pCO₂)

ケ) 流速・流向

調査海域における流況をみると、流速は、表層（海面下 2.0m）で 0.8～53.9cm/s、底層（海底上 2.0m）で 0.0～33.6cm/s が観測され、底層に比べ表層の流速が速い傾向がみられた。また、表層流速は、岸に近い調査測点で遅く、沖合で速い傾向がみられた。

流向は、調査年によるばらつきが大きかったが、夏季と冬季では海岸線に平行な東向きの流れが多い傾向にあった。また春・秋季は、上層が東向き、底層が西向きの流れが多くみられた。

第 3.1-5(1)表 流況観測結果

調査 測点	年度	春季				夏季			
		上部		底部		上部		底部	
		流向 (°)	流速 (cm/s)	流向 (°)	流速 (cm/s)	流向 (°)	流速 (cm/s)	流向 (°)	流速 (cm/s)
St. 01	ベースライン	95	20.5	82	4.9	47	8.9	296	0.2
	2016	112	16.1	254	9.4	85	29.3	108	1.5
	2017	309	8.7	108	10.9	65	14.3	76	8.8
	2018	196	6.9	267	10.5	284	19.6	82	12.5
	2019	341	17.6	237	5.6	79	22.7	83	2.7
St. 02	ベースライン	102	39.9	81	2.8	116	14.9	50	3.0
	2016	123	32.9	260	6.4	239	6.8	42	6.9
	2017	292	9.2	108	5.3	94	22.8	318	4.3
	2018	326	5.9	348	19.2	275	34.4	51	4.9
	2019	320	28.1	233	4.5	89	24.1	337	1.5
St. 03	ベースライン	106	38.9	80	5.0	114	15.7	36	5.4
	2016	122	25.7	234	6.6	111	53.9	60	7.2
	2017	256	12.6	93	5.0	90	16.2	149	33.3
	2018	144	7.4	224	3.1	310	22.7	73	9.9
	2019	332	29.8	240	4.3	90	38.1	111	3.2
St. 04	ベースライン	100	40.8	84	3.8	110	24.4	27	0.4
	2016	114	29.1	315	3.9	343	3.8	67	9.2
	2017	301	9.2	109	11.0	129	9.0	90	4.4
	2018	74	7.5	248	6.8	267	10.2	181	3.3
	2019	346	20.8	233	8.4	95	24.8	194	5.8
St. 05	ベースライン	78	1.9	211	3.5	73	2.0	106	0.8
	2016	156	4.4	222	12.2	228	14.7	93	1.8
	2017	277	8.9	28	2.9	248	16.2	247	5.3
	2018	263	3.8	243	6.4	245	4.5	186	2.2
	2019	305	3.5	欠測	欠測	102	9.3	85	2.1
St. 06	ベースライン	101	17.3	92	2.1	41	2.9	28	5.0
	2016	110	24.2	261	9.1	117	17.1	150	6.6
	2017	246	4.2	123	5.3	33	14.2	84	8.2
	2018	196	7.9	292	5.5	333	14.3	140	5.6
	2019	335	32.7	268	8.5	91	19.1	118	2.3
St. 07	ベースライン	278	3.7	242	2.6	149	2.5	80	7.9
	2016	268	8.0	271	12.4	50	4.1	95	17.2
	2017	154	3.6	261	1.9	286	22.2	318	4.9
	2018	283	9.4	251	3.3	53	0.8	90	2.5
	2019	278	6.0	欠測	欠測	276	5.3	80	6.1
St. 08	ベースライン	260	4.9	270	8.1	99	10.0	58	11.5
	2016	131	17.9	31	6.7	120	2.6	115	15.4
	2017	304	21.2	145	4.3	43	27.0	46	33.6
	2018	258	7.5	214	5.8	305	6.5	125	8.5
	2019	322	34.9	206	10.8	56	3.1	152	3.3
St. 09	ベースライン	91	43.9	53	2.0	150	14.2	36	6.6
	2016	88	8.5	247	8.0	105	47.3	31	11.9
	2017	293	39.7	301	1.8	201	11.3	30	8.0
	2018	127	10.8	292	3.9	196	18.6	126	1.4
	2019	323	23.7	248	11.2	73	49.4	14	4.8
St. 10	ベースライン	95	28.0	117	6.5	140	5.0	60	6.3
	2016	114	8.9	219	6.5	153	19.8	64	5.0
	2017	287	24.2	113	1.9	103	24.4	207	8.7
	2018	116	10.7	209	3.1	192	41.5	147	11.6
	2019	277	34.8	249	4.0	86	53.1	116	4.9
St. 11	ベースライン	126	14.9	70	5.7	130	3.7	76	1.4
	2016	108	24.7	255	6.9	200	5.3	91	13.6
	2017	271	6.4	123	5.7	84	6.5	124	4.0
	2018	22	4.3	244	4.6	307	41.1	159	0.4
	2019	334	34.4	277	11.2	110	29.8	342	2.7
St. 12	ベースライン	203	2.3	36	1.2	101	15.2	60	6.7
	2016	279	11.8	272	9.5	122	15.9	28	12.7
	2017	351	9.4	100	4.9	310	10.4	159	7.7
	2018	310	11.2	290	7.1	88	2.0	107	9.4
	2019	320	6.1	欠測	欠測	256	18.1	95	5.8

第 3.1-5 (2) 表 流況観測結果

調査 測点	年度	秋季				冬季			
		上部		底部		上部		底部	
		流向 (°)	流速 (cm/s)	流向 (°)	流速 (cm/s)	流向 (°)	流速 (cm/s)	流向 (°)	流速 (cm/s)
St. 01	ベースライン	271	13.9	159	2.3	90	8.0	48	6.1
	2016	—	—	—	—	262	7.4	276	4.5
	2017	260	22.6	261	9.5	100	20.0	61	13.6
	2018	88	26.2	85	10.8	107	4.1	14	6.4
	2019	231	4.0	285	9.2	81	19.3	52	2.4
St. 02	ベースライン	332	14.7	331	1.1	125	17.3	81	7.7
	2016	—	—	—	—	281	10.1	268	6.2
	2017	188	13.4	326	3.3	129	20.0	48	15.7
	2018	96	28.7	74	14.5	141	18.1	321	11.9
	2019	120	17.7	74	6.6	105	13.2	92	15.2
St. 03	ベースライン	346	20.4	125	4.1	114	22.8	58	8.6
	2016	—	—	—	—	173	7.8	170	8.8
	2017	162	3.0	280	1.4	123	13.1	71	13.6
	2018	107	30.9	65	14.6	204	7.1	350	2.0
	2019	110	26.1	78	11.5	121	27.6	78	9.7
St. 04	ベースライン	337	9.7	27	7.2	144	7.9	85	4.9
	2016	—	—	—	—	272	8.5	280	4.8
	2017	250	17.8	306	7.1	125	19.2	53	15.6
	2018	104	32.8	90	16.3	167	10.1	352	4.6
	2019	130	12.0	107	5.0	118	8.8	95	13.3
St. 05	ベースライン	79	3.2	11	5.1	243	10.5	237	11.3
	2016	—	—	—	—	277	6.4	249	2.6
	2017	264	30.7	270	6.1	74	15.9	54	17.1
	2018	103	5.5	251	4.4	108	5.7	311	5.2
	2019	250	9.5	266	11.7	266	8.2	225	7.9
St. 06	ベースライン	340	11.0	214	5.4	81	9.3	70	6.1
	2016	—	—	—	—	145	9.6	140	8.4
	2017	249	12.3	280	3.6	116	16.5	60	18.9
	2018	95	13.4	69	15.6	153	8.7	319	2.3
	2019	133	2.7	281	9.7	77	8.9	74	9.5
St. 07	ベースライン	114	3.1	225	2.4	246	5.7	254	6.6
	2016	—	—	—	—	304	5.1	216	2.8
	2017	272	16.8	259	10.4	98	14.6	87	13.4
	2018	279	5.4	297	5.3	147	4.9	121	4.4
	2019	281	5.5	266	4.5	283	7.6	267	5.6
St. 08	ベースライン	165	10.4	331	7.2	278	5.4	243	5.0
	2016	—	—	—	—	31	1.6	2	0.9
	2017	317	16.1	39	5.1	106	13.2	68	13.6
	2018	93	14.6	123	5.7	103	9.0	149	3.9
	2019	238	4.8	274	3.4	136	3.9	99	6.0
St. 09	ベースライン	357	30.8	279	6.2	104	24.2	29	8.0
	2016	—	—	—	—	280	14.5	255	6.6
	2017	282	5.2	241	11.1	203	2.2	38	10.8
	2018	97	27.5	27	12.7	232	7.7	282	3.4
	2019	98	25.1	46	8.8	109	18.5	62	10.7
St. 10	ベースライン	347	34.7	163	3.0	111	28.7	56	9.6
	2016	—	—	—	—	354	3.7	278	9.4
	2017	221	6.0	309	2.5	212	12.4	49	14.9
	2018	98	38.7	72	10.4	212	6.1	248	2.8
	2019	121	25.0	68	10.8	129	23.3	65	13.1
St. 11	ベースライン	149	1.2	245	5.5	104	18.9	81	8.9
	2016	—	—	—	—	272	7.3	273	6.9
	2017	178	7.5	286	4.6	118	22.3	67	18.6
	2018	104	32.0	72	12.3	191	11.8	251	2.9
	2019	114	15.7	217	4.7	103	9.8	80	7.6
St. 12	ベースライン	170	16.6	235	8.8	102	1.7	80	4.8
	2016	—	—	—	—	273	9.1	227	5.1
	2017	284	29.8	295	11.0	114	26.6	80	15.7
	2018	97	10.3	104	12.3	159	8.6	64	0.7
	2019	270	5.1	295	2.4	105	6.1	81	4.4

コ) クロロフィル a および栄養塩類

クロロフィル a は、2017 年度が $0.3\sim 4.3\ \mu\text{g/L}$ 、2018 年度が $0.4\sim 14.0\ \mu\text{g/L}$ (植物プランクトンの大増殖と考えられる冬季を除いた場合は $0.4\sim 4.8\ \mu\text{g/L}$)、2019 年度が $0.2\sim 6.6\ \mu\text{g/L}$ の範囲にあった。

全リンは、2017 年度が (0.01mg/L) 未満 \sim 0.04mg/L、2018 年度が (0.01mg/L) 未満 \sim 0.04mg/L、2019 年度が (0.01mg/L) 未満 \sim 0.05mg/L の範囲にあった。

全窒素は、2017 年度が (0.1mg/L) 未満 \sim 0.3mg/L、2018 年度が (0.1mg/L) 未満 \sim 0.3mg/L、2019 年度が (0.1mg/L) 未満 \sim 0.4mg/L の範囲にあった。

ケイ酸態ケイ素は、2017 年度が (0.05mg/L) 未満 \sim 1.20mg/L、2018 年度が (0.05mg/L) 未満 \sim 2.00mg/L、2019 年度が (0.05mg/L) 未満 \sim 1.00mg/L の範囲にあった。

四季の区分では、クロロフィル a は、春季が $0.4\sim 4.6\ \mu\text{g/L}$ 、夏季が $0.2\sim 6.6\ \mu\text{g/L}$ 、秋季が $0.3\sim 3.7\ \mu\text{g/L}$ 、冬季が $0.3\sim 14.0\ \mu\text{g/L}$ (植物プランクトンの大増殖と考えられる2018 年度を除いた場合は $0.3\sim 1.9\ \mu\text{g/L}$) の範囲にあった。

全リンは、春季が (0.01mg/L) 未満 \sim 0.04mg/L、夏季が (0.01mg/L) 未満 \sim 0.04mg/L、秋季が (0.01mg/L) 未満 \sim 0.05mg/L、冬季が 0.01 \sim 0.04mg/L の範囲にあった。

全窒素は、春季が (0.1mg/L) 未満 \sim 0.3mg/L、夏季が (0.1mg/L) 未満 \sim 0.3mg/L、秋季が 0.1 \sim 0.4mg/L、冬季が (0.1mg/L) 未満 \sim 0.2mg/L の範囲にあった。

ケイ酸態ケイ素は、春季が (0.05mg/L) 未満 \sim 1.00mg/L、夏季が (0.05mg/L) 未満 \sim 2.00mg/L、秋季が 0.12 \sim 1.20mg/L、冬季が (0.05mg/L) 未満 \sim 1.00mg/L の範囲にあった。