

# CCS モニタリング技術に関する技術資料

令和 7 年（2025 年）3 月

環境省 水・大気環境局 海洋環境課

## 目次

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. この技術資料の目的と活用方法                                                        | 1  |
| 2. 略語一覧                                                                  | 3  |
| 3. はじめに                                                                  | 4  |
| 4. 海底下 CCS モニタリング技術（第 1 部）                                               | 5  |
| 4. 1 領域① 海水中及び海底面～海底直上                                                   | 7  |
| 4. 2 領域② 海底下浅部（海底面から海底下数 100 m）                                          | 20 |
| 4. 3 領域③ 海底下深部（海底面から海底下数 km）                                             | 22 |
| 5. 海底下 CCS モニタリング技術（第 2 部）                                               | 28 |
| 5. 1 センサ調査                                                               | 30 |
| 5. 2 気泡確認詳細調査                                                            | 34 |
| 5. 3 $^{14}\text{C}$ 炭素同位体比（ $\delta^{14}\text{C}$ ）分析                   | 37 |
| 5. 4 「特定二酸化炭素のガスの位置および範囲」に係る海底下モニタリング<br>への電磁探査技術の適用について                 | 39 |
| 5. 5 「潜在的海洋環境影響調査項目」における環境 DNA 技術による海洋生態系<br>把握調査の検討                     | 48 |
| 5. 6 内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「海洋安全保障プラット<br>フォーム」で開発された環境モニタリング技術の適用検討 | 56 |

## 1. この技術資料の目的と活用方法

2050 年カーボンニュートラルを実現するためには、エネルギー消費量を抜本的に削減する大胆な省エネを進め、再生可能エネルギーを最大限導入することに加えて、電力のゼロカーボン化等の抜本的な排出削減技術を普及させることが不可欠である。とりわけ、石炭火力発電所等の大規模排出源には、二酸化炭素回収・貯留（CCS：Carbon dioxide Capture and Storage）の導入が求められている。

二酸化炭素（以下、「CO<sub>2</sub>」という。）の回収と海底下地層への貯留は、海洋環境保全の観点からは、地球温暖化に伴う海洋環境の悪化や海洋酸性化を防止する意義を有するが、一方で、万が一の漏出が生じた場合には、局所的な海洋環境の悪化を引き起こす可能性があることにも留意しなければならない。

廃棄物の海洋投棄を規制する国際的枠組である「1972 年の廃棄物その他の物の投棄による海洋汚染の防止に関する条約」及びその改正議定書（以下、「96 年議定書」という。）の国際発効（2006 年 3 月 24 日）においては、同議定書に基づいて海洋投棄を検討できる品目（同議定書附属書Ⅰに定められたもの）を処分する場合には、同議定書附属書Ⅱに沿った影響評価の一連の手続を経た上で有期限の許可を受け、環境監視を実施することが義務付けられている。96 年議定書第 1 回締約国会議において、附属書Ⅰに「二酸化炭素を隔離するための二酸化炭素の回収工程から生ずる二酸化炭素を含んだガス」を追加する改正を採択し、同改正は 2007 年 2 月 10 日に発効した。

我が国においては、同議定書附属書Ⅰの改正を踏まえ、二酸化炭素の海底下廃棄に係る許可制度を新たに設けることとし、2007 年に「海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律」（昭和 45 年法律第 136 号。以下、「海防法」という。）の改正を行った。これにより、二酸化炭素の海底下廃棄をしようとする者は、環境大臣の許可を受けなければならないこととされた。

環境大臣の許可を受けようとする者は、二酸化炭素の海底下廃棄の許可申請書を提出しなければならない。この申請書には、二酸化炭素の海底下廃棄が海洋環境に及ぼす影響についての事前評価結果に関する書類、その他「特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄の許可等に関する省令」（平成 19 年環境省令第 23 号。以下、「省令」という。）で定める書類を添付しなければならない。許可申請書等の記載要領は、「特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄の許可の申請に関し必要な事項を定める件」（平成 19 年環境省告示第 83 号。以下、「告

示」という。)に示されている。また、海底下廃棄許可申請者がより円滑に許可申請書やそれに添付する書類を作成するための手引きとして活用できるよう、申請に当たり実施すべき事項等を解説するものとして、「特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄の許可の申請に係る指針」(2020年3月。以下、「指針」という。)が示されている。なお、2030年までに民間事業者がCCS事業を開始するための事業環境を整備するための法制度として、「二酸化炭素の貯留事業に関する法律」(令和6年法律第38号。以下、「CCS事業法」という。)が第213回通常国会にて成立し、令和6(2024)年5月24日に公布された。海防法における海底下CCSに係る許可制度は、CCS事業法に一元化した上で、海洋環境保全の観点から必要な対応については環境大臣が共管することとなっている。

本技術資料は指針を補足するものであり、日本国内において海底下CCS事業を実施する事業者が、監視計画を立案する際の参考資料として活用できる資料として、海底下CCSモニタリングを適正に実施するために、推奨する仕様や適用可能な技術を示しており、併せて、モニタリング技術として適用する際の留意事項や運用時の注意点などを示している。

なお、本技術資料は、二酸化炭素の海底下廃棄の海洋環境への影響に係る今後の科学的知見の充実、並びに海洋環境の保全に関する国際的な動向等を踏まえ、定期的に見直しを行うものとする。

## 2. 略語一覧

- CO<sub>2</sub> : 二酸化炭素 (Carbon Dioxide)
- CCS : 二酸化炭素回収・貯留 (Carbon dioxide Capture and Storage)
- BAT : 利用可能な最良技術 (Best Available Technique)
- pCO<sub>2</sub> : 二酸化炭素分圧 (partial pressure of CO<sub>2</sub>)
- AUV : 自立型無人潜水機 (Autonomous Underwater Vehicle)
- ROV : 隔操作無人探査機 (Remotely Operated Vehicle)
- ASV : 自律型海上無人探査機 (Autonomous Surface Vehicle)
- MBARI : モンテレー湾水族館研究所 (Monterey Bay Aquarium Research Institute)
- SIP : 内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム (Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program)
- CTD : Conductivity Temperature Depth profiler
- ADCP : Acoustic Doppler Current Profiler
- SSS : サイドスキャンソナー (Side Scan Sonar)
- MBES : マルチビーム音響測深 (Multibeam Echo Sounding)
- QUCS : Quantifying and Monitoring Potential Ecosystem Impacts of Geological Carbon Storage
- VSP : Vertical Seismic Profiling
- MT 法 : 地磁気地電流 (Magnetic-Telluric) 法
- OBEM : 海底電位差磁力計 (Ocean Bottom ElectroMagnetometer)
- IBDP : Illinois Basin Decatur Project
- MCSEM 法 : 海洋人工信号源電磁探査 (Marine Controlled Source ElectroMagnetic) 法
- MMR 法 : Marine Magnetometric Resistivity sounding 法
- CSEM 法 : 人工信号源電磁探査 (Controlled Source ElectroMagnetic) 法
- MDCR : Marine DC resistivity sounding 法
- TEM : 過渡応答電磁探査 (Transient Electro-Magnetic) 法、または時間領域電磁探査法
- SQUID : 超電導量子干渉素子 (Superconducting QUantum Interference Device)
- EOR : 石油増進回収 (Enhanced Oil Recovery)
- DAS : 分布型音響計測 (Distributed Acoustic Sensing)
- DTS : 分布型温度計測 (Distributed Temperature Sensing)
- DSS : 分布型ひずみ計測 (Distributed Strain Sensing)

### 3. はじめに

海底下 CCS 事業において圧入した CO<sub>2</sub> の漏洩・漏出<sup>1</sup>を監視する技術は、国際的にも研究途上であり、様々な技術の実用化が検証されている。

物理探査や坑底圧力のモニタリングといった貯留層を対象とした監視技術は、漏洩を定量的に把握することは困難であるが、貯留層外に CO<sub>2</sub> が漏洩していることを検知できる技術と考えられる。

音波探査による監視技術（サイドスキャンソナー、サブボトムプロファイラー等）は、海底面から気泡として漏出した CO<sub>2</sub> の漏出場所を特定することが可能である。さらに、最新の音波探査技術を活用することで、海底下における漏洩経路を推定し、漏出場所を特定できる可能性がある。

CO<sub>2</sub> 漏出に伴う海水の化学的性状の変化を把握するためのモニタリング技術の BAT として採水分析があるが時間的・空間的に制約がある。将来的にはモニタリングの時空間スケールを拡大するために、pH センサや pCO<sub>2</sub> センサ等のセンサ技術を、効率的な広域観測を可能とする AUV や海底撮影技術として有効な ROV 等のプラットフォーム技術と組み合わせた監視手法の確立が期待される。

CO<sub>2</sub> 漏出により影響を受けることが想定される底生生物については、海底下 CCS 事業の事前評価のための潜在的海洋環境影響調査項目とされており、地域共生の観点からも重要な項目である。ベンティックチャンバーによる現場試験では、CO<sub>2</sub> 漏出による底泥生態系への影響を評価することが可能である。また、通常時監視においては、技術革新が著しい高精度カメラや AI による画像解析技術、環境 DNA 解析技術などを活用することで、効率的なモニタリングが期待される。

---

<sup>1</sup> 海防法関連法令では、「漏洩」は CO<sub>2</sub> が貯留層外に出ること、「漏出」は CO<sub>2</sub> が海底面から海水中に出ること、としている。

#### 4. 海底下 CCS モニタリング技術（第 1 部）

本章では海底下 CCS 事業に係るモニタリング技術として適用可能な技術について整理することとし、現段階における BAT に加えて CCS モニタリングとしての適用実績は少ないが、近い将来に実用化される可能性がある技術を対象とした。

海底下 CCS 事業におけるモニタリング技術の適用範囲は海底下深部から海水中まで幅広く、漏洩及び漏出の形態も様々である。ここでは技術の適用範囲を 3 領域（表 4-1 及び図 4-1 で示す 3 領域；領域①：海水中及び海底直上～海底面、領域②：海底下浅部、領域③：海底下深部）に区分し、海底下 CCS モニタリング技術としての実用性の観点から、それぞれの技術が適用される時空間スケールについて整理をした。

表 4-1 海底下 CCS 事業に係るモニタリング技術の領域区分の概念

| 領域  | 区分                   |
|-----|----------------------|
| 領域① | 海水中及び海底直上～海底面        |
| 領域② | 海底下浅部（海底面～海底下数 100m） |
| 領域③ | 海底下深部（海底面～海底下数 km）   |

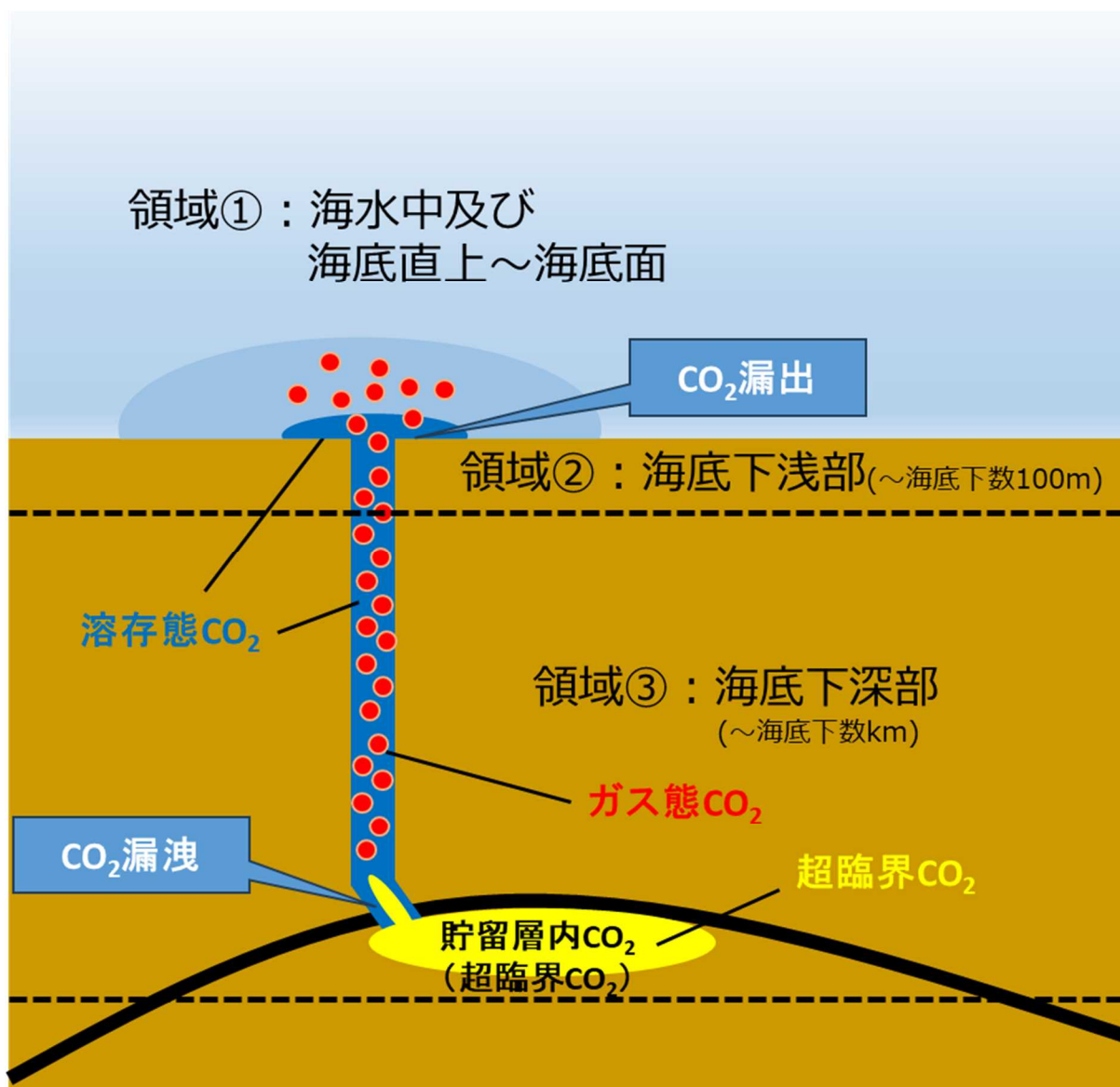


図 4-1 海底下 CCS 事業に係るモニタリング技術の領域区分の概念図



#### 4. 1 領域① 海水中及び海底面～海底直上（表 4. 1-1 及び表 4. 1-2）

領域①では、海水中と海底面～海底直上で適用可能なモニタリング技術が異なる。そこで、本領域におけるモニタリング技術については、「4. 1. 1 海水中」と「4. 1. 2 海底面～海底直上」に区分して記載する。

##### 4. 1. 1 海水中

CO<sub>2</sub> 漏出に伴う海水の化学的性状の変化を検知し、CO<sub>2</sub> 漏出の有無を把握できるモニタリング技術が必要である。当該領域におけるモニタリングでは、採水化学分析が高精度かつ確実な技術ではあるが、把握できる時空間スケールが限定的であるため、化学センサ等とプラットフォーム技術を組み合わせて効率的かつ効果的に CO<sub>2</sub> 漏出の有無を把握することが必要である。

##### （1）採水化学分析

採水化学分析は、高精度かつ確実に海水中の CO<sub>2</sub> 濃度を把握できる BAT である。しかし、CO<sub>2</sub> の漏出箇所を検知するためには時空間スケールを上げた観測が必要であり、広範囲を効果的にできるセンサ技術やプラットフォーム技術を併用することが望ましい。

##### （2）化学センサ

CO<sub>2</sub> が海水中に漏出した場合に pH が低下し pCO<sub>2</sub> が増加するので、pH センサや pCO<sub>2</sub> センサはこれらの化学的性状の変化を検知できる技術である。採水分析と比較して時空間的に連続したデータを取得可能とする技術で、AUV や ROV 等の移動式プラットフォームとの組み合わせにより広範囲のマッピング調査等も可能となる。また、係留系等の固定式プラットフォームとの組み合わせにより定点でのモニタリングが可能となる。環境省事業では pH センサによる係留系調査が実施されており、1 ヶ月間にわたる連続データを取得している。

環境省事業では国内で実績のあるセンサを用いた試験を行い、モニタリング技術として実用化する上での留意点等について確認した。センサ値は採水分析結果と比べて絶対値の正確さがいいことから、漏出の有無を判断するための基準設定のデータとして利用する場合はまだ課題がある。しかし、相対値としては信頼性があり、漏出場所を絞り込むための技術としては適用可能である。コストの観点からも、採水化学分析よりも短期間で広範囲を効率的に調査できる技術であり、AUV 等によるマッピング調査を実施することで漏出が懸念される地点を早期に絞り込み、詳細調査に迅速に移行することが可能になる。

##### （3）プラットフォーム

プラットフォームは、センサ技術と組み合わせることにより効率的なモニタリングを可能とする技術である。海洋観測に用いられるプラットフォームには大きく分けて移動

式及び固定式がある<sup>2</sup>。

CO<sub>2</sub> 漏出モニタリングの移動式プラットフォームとして、オーソドックスな船舶による観測や曳航観測（曳航体）、AUV の他、海底撮影技術として有効な ROV 等がある。

AUV は、センサ技術やサイドスキャンソナー技術等と組み合わせることが可能で、効率的な広範囲のモニタリングを可能とする技術である。環境省事業では、これまでに AUV によるモニタリング技術の検討を行ってきた。環境省事業で使用された AUV を図 4.1.1-1 に示す。この AUV は 2 人で運搬できる小型 AUV で、専用装備がない小型船でも運用可能である。また、海洋研究開発機構では北極海の海水下の観測を目的とした小型 AUV（図 4.1.1-2）が開発されており、北極海にて実際に潜航し、搭載されたカメラによる海水の裏側の写真撮影に成功した事例が報告されている。浅海域（～水深 100 m）では小型 AUV が適しているが、大水深（～水深 1,000 m）では大型 AUV が適している。国内では海洋研究開発機構などの研究機関や民間船舶会社等が既に AUV を運用して実績を積んでおり、コストはかかるが確立された海洋観測技術である。なお、環境省事業と内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）の共同実施で、AUV「ほぼりん」による環境モニタリング調査（水温、塩分、濁度、CO<sub>2</sub> 濃度、pH、画像等）を苫小牧沖において実施した（図 4.1.1-3）。

自律型海上無人探査機（ASV : Autonomous Surface Vehicle）は、AUV と同様に効率的に広範囲のモニタリングを可能とする技術である。近年、米国の研究機関（MBARI）とメーカーにより、Saildrone と呼ばれる太陽光発電と風力発電によって自動航行できるように設計されたドローンが開発され、海洋調査に運用されている。本技術により、指定範囲におけるマッピング調査や採水作業が可能になる。

ROV は、カメラ技術やセンサ技術と組み合わせ、海底撮影やマッピング調査を可能とする技術である。また、マニピュレータを装備すれば、海底面でのサンプリング作業も可能となる。環境省事業における苫小牧沖調査で海底観察調査に使われている ROV を図 4.1.1-4 に示す。この ROV は 2～3 人で運搬することが可能な小型 ROV で、投入揚収用装備が実装されていない小型船でも運用可能である。また、撮影された映像は光ファイバーケーブルを介して船上で確認できる。2017 年度には、ROV によるマッピング調査を試行し、浅海域で運用できることを確認した。大水深（～水深 1,000 m）では、海洋研究開発機構等の大型 ROV が運用され、海底資源調査等で活躍している。

近年、新しいプラットフォームとして、海洋観測用グライダー（シーグライダー）が活用されている。グライダーは、あらかじめ設定した範囲において潜航、浮上を繰り返し、鉛直観測を自動で行うことが可能である。AUV 等に比べて省電力化されており、長期間観測が可能な技術である。CTD センサが標準装備されており、その他の化学センサをオプションで搭載することも可能である。最近では、国内民間船舶会社より「グライダー型自律航行水中ロボットを使用したリアルタイム海洋データ収集サービス」が提供されて

<sup>2</sup> 海洋研究開発機構海洋工学センター「海と地球の 5 ヶ年指針」より  
（出典： [http://www.jamstec.go.jp/maritec/j/public\\_offering/sisin/](http://www.jamstec.go.jp/maritec/j/public_offering/sisin/)）

おり、熟練の海洋観測技術者でなくてもデータ取得が可能である。

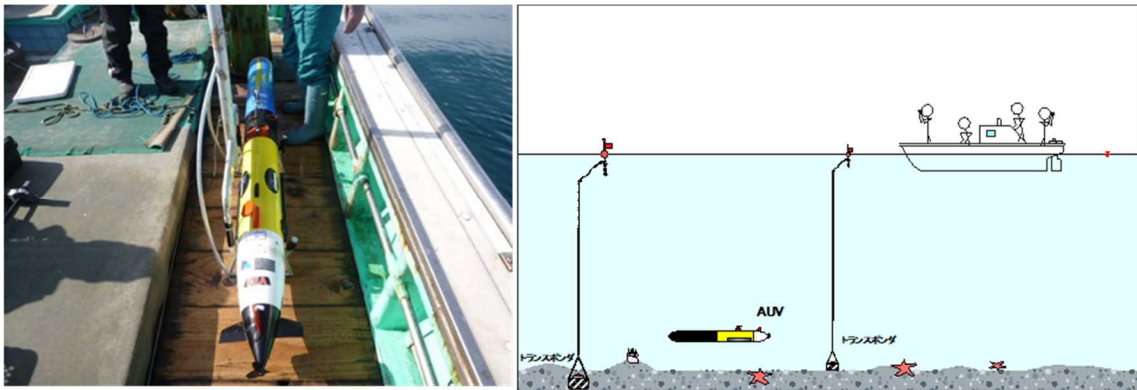


図 4.1.1-1 環境省事業で使用された AUV  
(左：外観図 (HYDROID 社製 REMUS100 を改良した AUV)、右：調査概念図)



図 4.1.1-2 海洋研究開発機構で開発された小型 AUV 外観図<sup>3</sup>

<sup>3</sup> [http://www.jamstec.go.jp/j/about/press\\_release/20161124/](http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20161124/)

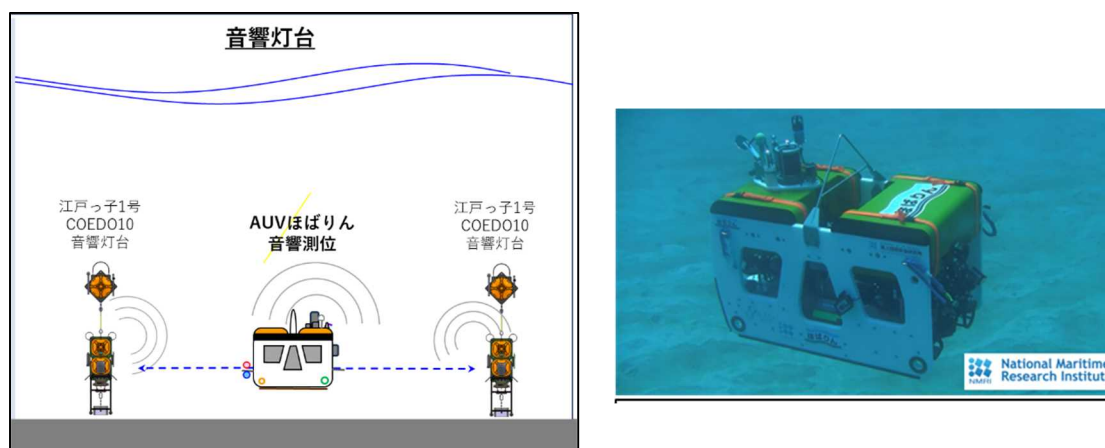


図 4.1.1-3 環境省事業と SIP の共同実施で使用された AUV「はぼりん」

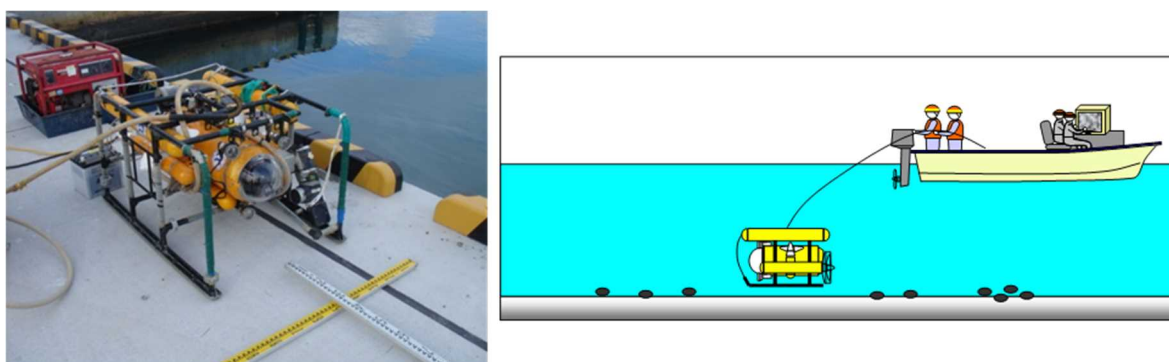


図 4.1.1-4 環境省事業（苫小牧沖海底観察調査）で使用された ROV  
（左：外観図、右：調査概念図）

CO<sub>2</sub>漏出モニタリングに適用できる固定式プラットフォームとして、係留系や海底設置型プラットフォーム等がある。

環境省事業における苫小牧沖調査では、図 4.1.1-5 に示す係留系を 1 ヶ月間設置し、pH 等の連続観測データを取得している。また、環境省事業と SIP が共同実施した苫小牧沖調査では、図 4.1.1-6 に示す海底観測プラットフォーム「江戸っ子 1 号 COEDO」を AUV「はぼりん」(図 4.1.1-3) の音響灯台とした観測に成功した。また、海底設置型プラットフォームの例として、海底資源開発モニタリングで活用されている低頭型プラットフォームを図 4.1.1-7 に示す。低頭型プラットフォームは自動昇降ウインチが組み込まれており、間欠的な鉛直観測が可能である。これら以外に、深海底における海底設置型長期観測システム(ランダー)なども国内研究者の使用実績がある。これらプラットフォームに、各種センサや流況観測用 ADCP、カメラ等を搭載することで、多項目の時系列データを効率的に取得することが可能となる。



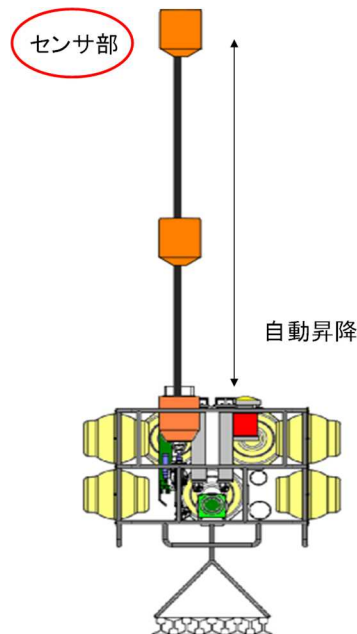


図 4.1.1-7 海底資源開発モニタリング用低頭型プラットフォーム

広範囲を効率的にモニタリングするためには、プラットフォームとモニタリング技術の組み合わせが不可欠であり、それぞれの特徴を活かした時空間スケールを理解する必要がある。

プラットフォームとモニタリング技術の組み合わせによるモニタリング手法を想定し、時空間スケールの概要を含めて表 4.1.1-1 に整理した。また、各プラットフォームにより把握できる時空間スケールについて、図 4.1.1-8 に整理した。

表 4.1.1-1 モニタリング手法（例）一覧及び時空間スケールの概要

| プラットフォーム     | モニタリング技術（例）  | 時空間スケール |         |                   |
|--------------|--------------|---------|---------|-------------------|
|              |              | 時間      | 空間      | 位置精度 <sup>4</sup> |
| 船（採水）        | 採水           | 一時      | 狭域      | ○                 |
| 船（曳航）        | センサ、SSS      | 一時      | やや広域    | ○                 |
| ROV          | センサ、カメラ、採水   | 一時      | やや広域    | ○                 |
| AUV          | センサ、SSS、カメラ  | 一時      | 広域（大水深） | ◎                 |
| 小型 AUV       | センサ、SSS、カメラ  | 一時      | やや広域    | ◎                 |
| 係留系、海底設置型 PF | センサ、ADCP、カメラ | 常時      | 点（鉛直）   | ◎                 |
| グライダー、ASV    | センサ、採水       | 常時      | やや広域    | △                 |

<sup>4</sup> 観測時に対象とした空間をどの程度正確に捉えることが可能であるか、具体的には、観測中のプラットフォームの位置をほぼ確実に特定できる場合を「◎」で、ある程度特定できる場合を「○」で、特定が困難である（プラットフォーム自体が自由に動くことが前提となる）場合を「△」で示す。

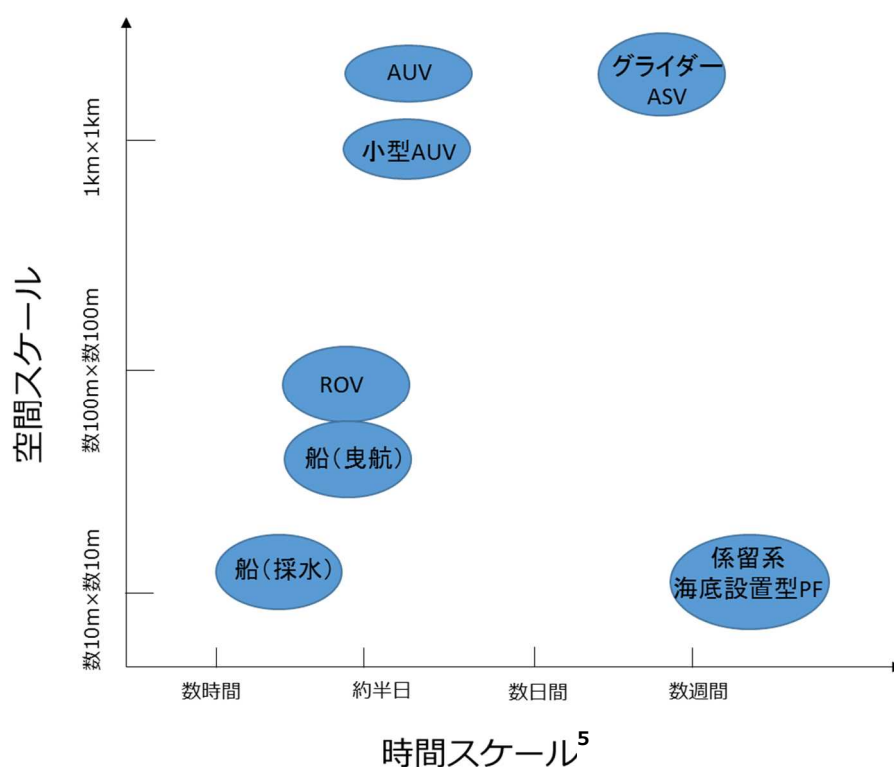


図 4. 1. 1-8 プラットフォームの運用に係る時空間スケール

#### (4) 炭素同位体比 ( $\delta^{14}\text{C}$ ) 分析

炭素同位体比 ( $\delta^{14}\text{C}$ ) 分析は、漏出  $\text{CO}_2$  が圧入した  $\text{CO}_2$  起源かどうかを判定することが可能な技術である。圧入された  $\text{CO}_2$  は化石燃料起源であり  $^{14}\text{C}$  がほとんど含まれていないと考えられる<sup>6</sup>ため、圧入  $\text{CO}_2$  の漏出に伴い海水中の  $^{14}\text{C}$  同位体比が自然状態に比べて低くなる<sup>7</sup>可能性がある。  $\text{CO}_2$  漏出の有無を適正に判断するためには、自然状態のデータ（バックグラウンドデータ）や対照点データと比較する必要がある。分析に一定期間を要するが、苫小牧における CCS 大規模実証試験事業（以下、「CCS 大規模実証試験事業」という。）の監視計画では、漏出を最終判断するための手法として採用されている。

#### 4. 1. 2 海底面～海底直上

$\text{CO}_2$  漏出に伴う気泡を検知し漏出場所を特定するためのモニタリング技術が必要となる領域である。本領域においては、気泡の起源を検証する技術や底生生物等の分布状況を把握する技術が重要であり、主たる技術として、音波探査、トレーサー分析法、カメラ撮影技術がある。

<sup>5</sup> 観測を密に行う（観測メッシュを小さくする）場合、係留系及び海底設置型 PF 以外は時間スケールが長くなる。

<sup>6</sup> 化石燃料の基となる動植物が生前に蓄積していた  $^{14}\text{C}$  は、放射壊変（ $\beta$ 壊変）により、化石燃料に変化するまでの期間ではほぼ全て消失する。

<sup>7</sup> 化石燃料起源の  $\text{CO}_2$  には  $^{14}\text{C}$  が殆ど存在しないことから、圧入した  $\text{CO}_2$  が漏出により海水に溶解した場合、海水中の  $^{14}\text{C}$  同位体比は低くなる。



### (1) 音波探査

音波探査は、海底地形調査で実用化されている技術である。CO<sub>2</sub> 漏出モニタリングの気泡検知技術としてマルチビーム (MBES) やサイドスキャンソナー (SSS) などを活用することができる。

SSS は、CCS 大規模実証試験事業の現地概況調査のうち気泡確認調査で活用されている技術である。また、2008～2009 年度環境省事業等において、自然漏出している気泡を検知した実績がある。

合成開口ソナーは、高解像度に海底地形や対象物の形状を把握できる技術であり、気泡漏出場所の特定等に活用できる可能性がある。SSS 等は広範囲における海底面からの気泡湧出を検知する効率的な技術として活用されているが、魚類の浮袋等を気泡と誤認する可能性もあり、気泡の識別手法を確立させることで、検出精度をより向上させられると期待される。

スマートハイドロフォンは、気泡発生時の音を収録し、気泡湧出量を定量的に把握する技術である。QICS プロジェクト<sup>8</sup>において、気泡発生音から気泡湧出量を定量化した実績がある。定量的に把握するためには、バックグラウンドの水中音を事前に確認しておく必要がある。

### (2) トレーサー分析法

トレーサー分析法は、海底面から発生した気泡が CO<sub>2</sub> 漏出起源かを判別する技術である。圧入する CO<sub>2</sub> ガスにトレーサー物質を添加し、圧入中もしくは圧入後に海底面から気泡発生が確認された際に、気泡を採取してトレーサー物質の有無を確認することで CO<sub>2</sub> 漏出起源かどうかを判別するため、漏出検知をより確実にする技術として期待される。トレーサー物質として He、Xe 等の希ガス、人為起源の SF<sub>6</sub> (六フッ化硫黄) や PFC (パーフルオロカーボン) が挙げられる。

ただし、日本国内では、海洋汚染等防止法施行令第 11 条の 5 で海底下廃棄することのできるガスの基準について「三 二酸化炭素以外の油等が加えられていないこと。」と定められていることから、圧入する CO<sub>2</sub> ガスにトレーサー物質を添加することは禁止されており、当該手法による CO<sub>2</sub> 漏出モニタリングの実施は原則不可能である。

### (3) カメラによる海底面撮影技術

カメラによる海底面撮影技術は、底生生物や気泡漏出を確認できる技術である。近年、4K 解像度カメラ等の高精度、高画質のカメラが開発され、より鮮明な映像や画像を取得できるようになり、海底面の状況をより詳細に把握することが可能となっている。CO<sub>2</sub> 圧入前の海底面の状況を撮影して保存することで、CO<sub>2</sub> 圧入中または圧入後に CO<sub>2</sub> 漏出が

---

<sup>8</sup> Quantifying and Monitoring Potential Ecosystem Impacts of Geological Carbon Storage プロジェクト。CO<sub>2</sub> が海洋環境に及ぼす影響について理解を深めるために英国の研究機関とともに行われた、CO<sub>2</sub> を海底から人為的に漏出させるフィールド実験。2013 年に CO<sub>2</sub> ガス放出による試験が実施された。



疑われる場合に、海洋環境の変化の有無を評価することが可能となる。また、海底ブイや係留系等の固定式プラットフォームと組み合わせることで、定点における長期観察も可能となる。環境省事業においては、カメラを搭載した ROV による海底観察調査が苫小牧沖で実施されたことがある。

表 4.1-1 領域①（海水中）におけるモニタリング技術一覧 (1/2)

| 観測手法・システム | CCSモニタリング<br>把握可能な情報                 | 特徴                                                                              | 技術適用時の注意点                                                           | 海底下CCS事業<br>への適用例    | 適用<br>海域 |
|-----------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------|----------|
| 採水化学分析    | 海水のDIC、 $p\text{CO}_2$ 他             | 海水の化学的性質を高精度かつ確実に把握することが可能である。                                                  | センサと比べて、時空間スケールが限定される。<br>$\text{CO}_2$ 圧入前の事前調査が必要である。             | 苫小牧、Sleipner、Shohvit |          |
|           | pH センサ                               | 連続したpHデータの取得が可能である。また、プラットフォーム技術（下記は一例）との組み合わせにより、効率的な広域観測が可能となる。               | 採水化学分析と比べて正確ではないが、漏出場所を絞り込むための相対値としては有用性がある。                        | 苫小牧、Sleipner         |          |
|           | $p\text{CO}_2$ センサ                   | 連続した $p\text{CO}_2$ データの取得が可能である。また、プラットフォーム技術（下記は一例）との組み合わせにより、効率的な広域観測が可能となる。 | 適正な校正手法の確立が課題である。                                                   | 苫小牧                  |          |
|           | DO センサ                               | 連続したDOデータの取得が可能である。DOは漏出判断のための補足データとして重要である。                                    | 採水化学分析と比べて正確ではないが、漏出場所を絞り込むための相対値としては有用性がある。ただし、他のデータとの組み合わせが前提となる。 | 苫小牧                  |          |
|           | センサ（ $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2$ 等） | $\text{CO}_2$ 関連項目ではないが、pHセンサ等の観測結果について判断する際の補足データとなる。                          | 適正な校正手法の確立が課題である。また、他のデータとの組み合わせが前提となる。                             |                      |          |
| プラットフォーム  | 調査船<br>（移動式；<br>広域モニタリング）            | センサ等やカメラ技術等との組み合わせにより、効率的な広域観測が可能となる。                                           | センサを曳航する場合、水深の保持にやや難がある。                                            |                      |          |
|           | AUV<br>（移動式；<br>広域モニタリング）            | センサ等の他、サイドスキャンソナー等との組み合わせにより、効率的な広域観測が可能となる。                                    | センサ性能（反応速度、分解能等）を考慮した適正な観測条件（速度等）で運用する必要がある。                        | 苫小牧、Sleipner         |          |
|           | ROV<br>（移動式；<br>現場モニタリング）            | 漏出海域を絞り込んだ場合、漏出点近傍における詳細観測に適している。<br>漏出場所の撮影が可能であり、海底画像等を船上で確認することが可能である。       | AUVと比べて機動力にやや難がある。また、ROV自身による海底面の巻き上げの影響がある。                        | Sleipner             |          |

表 4.1-1 領域①（海水中）におけるモニタリング技術一覧（2/2）

| 観測手法・システム                                                     | CCSモニタリング<br>把握可能な情報                  | 特徴                                          | 技術適用時の注意点                                                                                            | 海底下CCS事業<br>への適用例                                                                          | 適用<br>海域     |
|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| プラットフォーム                                                      | 海上ブイ<br>（固定式；<br>マルチセンサ観測<br>システム）    | 漏出に伴うpH変化等<br>（センサとの組み合わせが必要）               | 定点における常時モニタリングが可能である。                                                                                | 苫小牧、Sleipner                                                                               |              |
|                                                               | 海底ブイ<br>（固定式；<br>海底設置型自動昇降ブイ）         | 漏出に伴うpH変化等<br>（センサとの組み合わせが必要）               | 定点における常時モニタリングが可能である。<br>取り付けたセンサが自動昇降すること、軌直<br>分布を把握することが可能となる。                                    | 他分野で実績がある<br>ため、CCSに適用で<br>きる可能性がある。                                                       |              |
|                                                               | pCO <sub>2</sub> ブイ<br>（固定式）          | 漏出に伴うpCO <sub>2</sub> 上昇<br>（センサとの組み合わせが必要） | 海表面のpCO <sub>2</sub> を常時モニタリングすることが可<br>能である。また、大気 - 海洋間のCO <sub>2</sub> フラックス<br>を連続的に把握することが可能である。 | 苫小牧                                                                                        | 沿岸           |
|                                                               | ASV（Autonomous Surface<br>Vehicle）    | 漏出に伴うpH等の不均一分布<br>（センサとの組み合わせが必要）           | 船舶のように海表面を自動航行し、センサ観測<br>や採水等を自動で行うことが可能である。ま<br>た、洋上中継局として機能することも可能であ<br>る。                         | 他分野で実績がある<br>ため、CCSに適用で<br>きる可能性がある。                                                       | 外洋           |
| 炭素同位体比分析<br>( $\delta^{13}\text{C}$ , $\Delta^{14}\text{C}$ ) | 海洋観測用グライダー<br>（シーグライダー、<br>ウエーブグライダー） | 漏出に伴うpH等の不均一分布<br>（センサとの組み合わせが必要）           | 波を推進力としたものや潜航浮上をあらかじめ<br>設定した海域において自動で行う。                                                            | モニタリングに適用可能な海域が限定され<br>る。<br>定点保持が困難な場合がある。                                                | 外洋           |
|                                                               |                                       | 漏出に伴う海水又は気泡の $\Delta^{14}\text{C}$ 低下       | 漏出懸念が発生した場合、海水や気泡を採取し<br>て炭素同位体比を測定することで、漏出が圧入<br>CO <sub>2</sub> 起源かどうか判断することが可能である。                | 分析に時間がかかる（約1ヶ月）。<br>既存知見が少なく、漏出判断をする際は参照<br>点が必要である。<br>また、CO <sub>2</sub> 圧入前の事前調査が必要である。 | 苫小牧、Sleipner |

表 4. 1-2 領域①（海底面～海底直上）におけるモニタリング技術一覧 （1/2）

| 観測手法・システム |                                   | CCSモニタリング<br>把握可能な情報 | 特徴                                                                                     | 技術適用時の注意点                                                                         | 海底下CCS事業<br>への適用例                  | 適用<br>海域 |
|-----------|-----------------------------------|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|----------|
| 音波探査      | マルチビーム測深機<br>(MBES)               | 気泡漏出                 | 広域観測を効率的に実施でき、気泡漏出場所の<br>絞りこみに活用することが可能である。                                            | 気泡湧出量の定量化が困難である。<br>MBESは水中のデータ処理方法が確立してい<br>ない。                                  | 苫小牧、Sleipner<br><br>苫小牧、Sleipner   |          |
|           | サイドスキャンソナー<br>(SSS)               | 気泡漏出                 |                                                                                        |                                                                                   |                                    |          |
|           | 合成開口ソナー                           | 気泡漏出                 | 広域を効率的かつ高精度に観測でき、対象に対<br>するソナーの複数信号を合成することで高解像<br>に対象を把握することが可能となる。<br>AUV等への搭載が可能である。 | 気泡検知技術としての実績が少ない。                                                                 | 他分野で実績がある<br>ため、CCSにも適用<br>可能性がある。 |          |
|           | 計量魚探                              | 気泡漏出                 | 水底分野等で確立された技術であり、気泡湧出<br>量を定量化できる可能性がある。                                               | 気泡と魚類の浮き袋の区別が課題である。                                                               | 気泡検知技術として<br>適用可能性はある。             |          |
|           | 3Dソナー                             | 気泡漏出                 |                                                                                        |                                                                                   |                                    |          |
|           | 超音波ドップラー流向<br>流速計 (ADCP)          | 気泡漏出                 | ADCP反射強度データから気泡を検知する。<br>流速情報を合わせて得ることが可能である。                                          | 懸濁物質との区別が課題である。                                                                   |                                    |          |
|           | 海底設置型ガス測定<br>システム (GasQuant)      | 気泡漏出                 | 音波の反射データから、対象範囲で湧出する気<br>泡の検出が可能である。<br>海底設置型を運用することで、常時モニタリン<br>グが可能となる。              | 長期観測する場合は、電源供給が必要であ<br>る。<br>データ処理方法の確立が課題である。                                    | Sleipner                           |          |
|           | 音響トモグラフィ                          | 気泡漏出                 |                                                                                        |                                                                                   |                                    |          |
|           | スマートハイドロフォン<br>センサ<br>(気泡発生時の水中音) | 気泡漏出                 | 気泡発生時の音を検知する。<br>常時モニタリングが可能である。                                                       | バックグラウンド水中音と気泡による音を区<br>別することが必要である。                                              |                                    |          |
|           | 気泡中のトレースー分析                       | 気泡漏出                 | 湧出している気泡のトレースー成分 (SF <sub>6</sub> 等) を<br>確認することで、圧入CO <sub>2</sub> 起源かどうかを判断す<br>る。   | 海防下では圧入CO <sub>2</sub> にトレースー物質を混<br>入することはできない。<br>海洋環境への影響評価、極微量の測定等、<br>課題は多い。 |                                    |          |

表 4.1-2 領域①（海底面～海底直上）におけるモニタリング技術一覧 （2/2）

| 観測手法・システム                 |                                                        | CCSモニタリング<br>把握可能な情報               | 特徴                                                                                                                                  | 技術適用時の注意点                                                                                   | 海底下CCS事業<br>への適用例                  | 適用<br>海域 |
|---------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|----------|
| カメラによる<br>海底面<br>撮影技術     | ダイバーによる漏出箇所<br>撮影                                      | 気泡漏出                               | 気泡漏出を撮影し、状況を把握する。                                                                                                                   | 自然条件により（深度、時間、濁り、流れ<br>等）作業が制限される。                                                          | Sleipner                           | 沿岸       |
|                           | AUVによる海底面撮影                                            | 気泡漏出                               | センサやサイドスキャンソナー等との組み合わせによ<br>り、効率的な広域観測が可能となる。                                                                                       | 濁りや光量不足で画像が不鮮明になる場合があ<br>る。                                                                 | 苦小牧、Sleipner                       |          |
|                           | ROVによる海底面撮影                                            | 気泡漏出                               | 気泡漏出範囲を絞り込んだ後の詳細観測に適し<br>ている。<br>船上での映像確認が可能である。                                                                                    | 濁り等の影響で画像が不鮮明になる。<br>位置情報の高精度化(SSBL等)が必要である。<br>AUVに比べると機動性が悪い。                             | 苦小牧、Sleipner                       |          |
|                           | AUV搭載カメラによる底生生<br>物分布状況の撮影                             | メガベントス生息状況                         | センサやサイドスキャンソナー等との組み合わせによ<br>り効率的な広域観測が可能となる。                                                                                        | ROVより撮影画像が不鮮明であり、詳細な生物<br>同定には適していない。                                                       | 苦小牧、Sleipner                       |          |
|                           | ROV搭載カメラによる底生生<br>物分布状況の撮影                             | メガベントス生息状況                         | 船上で映像確認ができ、大型底生生物の状況を<br>把握することが可能である。                                                                                              | 濁り等の影響で画像が不鮮明になる。<br>位置情報を高精度化するための対策が必要であ<br>る(SSBL等)。<br>AUVに比べて機動性が悪く、広範囲観測には適<br>していない。 | 苦小牧、Sleipner                       |          |
|                           | 気泡採取<br>(CO <sub>2</sub> 分析、 $\Delta^{14}\text{C}$ 分析) | 気泡の主成分<br>(CO <sub>2</sub> 起源かどうか) | 採取した気泡について、CO <sub>2</sub> 分析により主成分が<br>CO <sub>2</sub> であること、 $\Delta^{14}\text{C}$ 分析により圧入CO <sub>2</sub> 起源<br>かどうか確認することが可能である。 | 分析に時間がかかる（1ヶ月）。                                                                             | 苦小牧、Sleipner                       |          |
| 観測ブイによるガスの捕集<br>(MAMBOブイ) |                                                        | 気泡採取                               | 気泡を現場採取する装置である。                                                                                                                     | モニタリングに適用可能な海域が限定され<br>る。                                                                   | 試験段階である。<br>気泡採取技術として<br>適用可能性はある。 |          |

#### 4. 2 領域② 海底下浅部（海底面から海底下数 100m）（表 4. 2-1）

貯留層から漏洩した CO<sub>2</sub> が海底面に到達するまでの挙動を監視するためのモニタリングが必要となる領域である。当該領域においては、海底面から海底下数 100 m 程度を対象とした物理探査技術が主であり、重力探査、弾性波探査、音波探査、電気探査、傾斜計、地震観測等がある。これらの探査技術は資源探査等の分野で既に実用化され商業ベースで普及している技術が多いが、海底下 CCS 事業のモニタリングについては適用の試験段階の技術もある。

##### （1）重力探査

重力探査は、測定される重力値の変化から貯留 CO<sub>2</sub> をモニタリングする技術である。CO<sub>2</sub> は水より密度が小さいことから、CO<sub>2</sub> 貯留域は低重力域として検知される。海底設置型重力計による探査が Sleipner<sup>9</sup>や Snøhvit<sup>10</sup>で活用されている。

##### （2）弾性波探査

弾性波探査（サブボトムプロファイラー、ブーマー、スパーカー等）は、領域③に示す弾性波探査と比較して、高周波の音波を利用することで海底下数メートルの浅い地質構造を高解像度で推定することが可能な技術である。これら海底下浅部のモニタリング技術は、海水中へ CO<sub>2</sub> が漏出する直前の気泡溜まりや漏出箇所の推定に有効な技術である。ブーマー、スパーカーについては、QICS プロジェクト等で採用され、海底下数メートルの気泡溜まりを高精度に推定した実績がある。サブボトムプロファイラーについては、CCS 大規模実証試験事業の事前調査において実施されている。

##### （3）電気探査

電気探査は、海底下の電気抵抗率（以下、「比抵抗」という。）構造から地質構造等を推定する技術である。気泡は電気を流しにくい物質であるため、比抵抗が増大した領域として気泡溜まり等を検出することが可能である。探査深度は電極間の距離で決まるため（電極間距離の 1/2～1/3 が探査深度の目安とされる）、モニタリングの目的深度に応じて、他技術と組み合わせて使う必要がある。近年、海底資源探査等で注目されている技術である。

<sup>9</sup> ノルウェー沖合い 250 km に位置するガス田。天然ガス中の CO<sub>2</sub> ガスをアミン法により分離・回収し、1996 年から、海底下 1,000 m の Utsira 層（砂岩層）に貯留している。

<sup>10</sup> ノルウェー北部のバレンツ海にあるガス田。天然ガス中の CO<sub>2</sub> ガスをアミン法により分離・回収し、2008 年から、海底下 2,500 m の Tubåen 層に貯留している。

表 4.2-1 領域②（海底下浅部（海底面から海底下数 100m））におけるモニタリング技術一覧

| 観測手法・システム |                     | CCSモニタリング<br>把握可能な情報                    | 特徴                                                                           | 技術適用時の注意点                                                                                                          | 海底下CCS事業<br>への適用例                                      | 適用<br>海域 |
|-----------|---------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|----------|
| 重力探査      | 海上重力計               |                                         | 重力計測を実施することで海底下の地質の密度を把握することが可能となる。                                          | 弾性波探査に比べると分解能がやや劣る。<br>CO <sub>2</sub> 圧入前の事前調査が必要である。                                                             | 海底設置型重力計は Sleipner、Snøhvit（海底下）や In Salah（陸域）で使用されている。 |          |
|           | 海底設置型重力計            | 地下の密度分布<br>地層中の CO <sub>2</sub> 分布      | 重力変化から海底下に存在する物質の違いを識別し、地質構造や地層中の CO <sub>2</sub> 分布を把握する。                   |                                                                                                                    |                                                        |          |
|           | AUV 搭載型重力計          |                                         |                                                                              |                                                                                                                    |                                                        |          |
| 弾性波探査     | サブボトムプロファイルャー (SBP) |                                         | 比較的低い周波数（4～500kHz）の音波を海底に発信し、海底下からの反射音から海底下の気泡溜まりを検知することが可能となる。              | 音波の波長を短くすることで分解能を上げることが可能であるが、到達距離（探査深度）が短く（浅く）なる。<br>対象深度に応じた条件設定や組み合わせが必要である。<br>CO <sub>2</sub> 圧入前の事前調査が必要である。 | 苫小牧                                                    |          |
|           | ブーマー、スパーカ<br>弾性波探査  | 地質構造<br>地層中の気泡溜まり                       | 高周波パルス音波を使用することで、地質構造を高精度に把握することが可能となる。                                      |                                                                                                                    |                                                        |          |
|           | チャープ弾性波探査           |                                         | 海底下の気泡溜まりを検知することが可能である。                                                      |                                                                                                                    |                                                        |          |
| 電気探査      | 海上電気探査              |                                         | 地層を構成する物質の比抵抗、誘電率あるいは電気化学的性質に着目し、電流及び電位電極を配置したケーブルを曳航または海底面に設置し、応答（電位）を測定する。 | 探査深度は電極間の距離に依存し、電極間距離の 1/2～1/3 が探査深度の目安となる。<br>CO <sub>2</sub> 圧入前の事前調査が必要である。                                     | 海底資源探査の実績がある。                                          |          |
|           | 海底電気探査              | 地質構造<br>地層中の気泡溜まり<br>CO <sub>2</sub> 分布 | 測定値から比抵抗構造を解析することで、気泡溜まりや CO <sub>2</sub> 分布等を検知することが可能となる。                  |                                                                                                                    |                                                        |          |
| 傾斜計       | 海底傾斜計               |                                         | 海底に機器を設置することで、簡易に観測することが可能となる。                                               | 既存知見が少ない。<br>事前データがないと観測結果の評価が難しい。<br>CO <sub>2</sub> 圧入前の事前調査が必要である。                                              | 他分野で実績があり、CCS にも適用可能性はある。                              |          |
| 水圧計       | 水圧計                 | 海底表面の変動                                 |                                                                              |                                                                                                                    |                                                        |          |
| 地震観測      | 海底地震計               | 微動地震                                    |                                                                              |                                                                                                                    |                                                        |          |

#### 4. 3 領域③ 海底下深部（海底面から海底下数 km）（表 4.3-1）

貯留層内の CO<sub>2</sub> の貯留状況を監視するモニタリングが必要となる領域である。当該領域においては、海底面から海底下数 km を対象とした物理探査技術が主であり、弾性波探査（地震探査）や電磁探査等の他、坑井モニタリング技術がある。海底油田開発等の分野で実用化されている技術が多く、それぞれの特徴や適応深度などを把握することで、貯留された CO<sub>2</sub> の貯留状況を確認することができると考えられる。

##### （1）弾性波探査

弾性波探査（地震探査）は、人工的に弾性波（地震波）を発生させ、その伝播状況を測定・解析することにより地質構造を推定する技術である。CO<sub>2</sub> が貯留された領域では反射波が強く生じたり、弾性波の速度や振幅の減衰が大きくなることから、CO<sub>2</sub> の分布域が推定される。伝播させる（起震させる）弾性波の種類や解析方法により、いくつかの探査法がある。海底探査の場合は反射波を用いた探査方法が一般的であり、起震方法には高出力が可能なエアガン、ウォーターガン等が用いられる場合が多い。

経済産業省は苫小牧において、三次元弾性波探査及び二次元弾性波探査による調査を実施している。当調査においては、設置回収型の海底受振ケーブルを受振機として使用し、エアガン発振によりデータを取得している。

本領域のモニタリング技術は、海水の化学的性状に係るモニタリングに比べてコストがかかるが、海底下探査技術として、石油資源開発等において商業ベースで普及している技術が活用されている。CCS 大規模実証試験事業では、坑底の圧力温度測定とともに、海底下に貯留した CO<sub>2</sub> モニタリングの BAT としては、弾性波探査が行われている。

##### （2）VSP（Vertical Seismic Profiling）探査

VSP 探査は、地表に設置された震源から発生した地震波を、坑井内に設置されたセンサ（ジオフォンや水中マイク等）で受振することで地層の詳細な情報を得る手法であり、地震波が地層を通過する際の速度や反射特性を分析することで、地下の地質構造を高精度で把握する。地表でデータを取得する弾性波探査と比べて探査範囲は限られるが、坑井内でデータ取得を行う（受信機がより密である）ため、高解像度な画像取得が可能である。また、坑井直上の地震波だけでなく、坑井間、坑井近傍の 2・3 次元的な画像作成にも活用できる。近年では、光ファイバーを利用した事例も増加している。また、海外の CCS プロジェクト（IBDP ; Illinois Basin Decatur Project など）でも実績がある。

坑井が既に存在するサイトで特定の地層の詳細な情報が必要になるといった、対象が限定される場合であれば、広範囲を対象とする弾性波探査よりも VSP 探査の方がコスト面で優位になる場合がある。プロジェクトの規模、目的、既存のインフラ、必要なデータの詳細度などに基づいて、どの技術がコスト面で優位になるかを検討する必要がある。



### (3) 電磁探査

電磁探査は、地層の電磁誘導現象を利用して得られる地下の比抵抗情報から地質構造等を推定する技術である。大別すると、地球を取り巻く自然電磁場を用いる技術と送信機による人工電磁場を用いる技術がある。

前者の代表例は MT (Magnet-Telluric) 法であり、複数の海底電位差磁力計 (OBEM: Ocean Bottom ElectroMagnetometer) を海底に設置し、自然電磁波が海底下に浸透したときに地層から生じる誘導電流 (もしくは誘導電流から生じた誘導磁場) を地表で測定することで地下の比抵抗を推定する。

後者については、測定される信号の成分により周波数領域探査法と時間領域探査法に分類される。

周波数領域探査法は、測定する信号を色々な周波数に分け、その各々の周波数における信号の強度や位相の変化などを測定する探査手法である。主な手法として、①送信装置と受信装置が切り離されている手法と②送受信装置が一体化され、共に海底付近を曳航する手法があり、一般的に①は探査深度が深く、②は浅いという特徴がある。①の代表例として、MCSEM (Marine Controlled-source Electromagnetic) 法や MMR (Marine Magnetometric Resistivity sounding) 法が挙げられる。また、②の代表例として、曳航式 CSEM 法や MDCCR (Marine DC resistivity sounding) 法が挙げられる。

時間領域探査法は、ある時刻 (例えば送信開始時刻) 以降における受信信号の強度変化などを、時間経過に沿って測定する探査手法である。主な手法として、TEM (Transient Electro-Magnetic; 過渡応答電磁探査、時間領域電磁探査) 法がある。これは、地表に設置したループ状、あるいは直線状の送信源 (ケーブル等) に直流電流を流して人工的に電磁場を生成させた後、その電流を急激に遮断することで地下に渦電流を発生させ、その渦電流の拡散する様子 (あるいは渦電流により生じる誘導磁場の減衰の時間変化) を地表に設置した磁力計により測定し、地下の比抵抗探査を行う手法である。

TEM 法による探査手法の一例として、近年開発されている、超電導量子干渉素子 (SQUID: Superconducting QUantum Interference Device) を TEM 法に適用したシステム (SQUITEM) がある。電磁探査の欠点として、電磁波の原理上、深部に行くほど高周波成分が減衰するために、空間分解能が粗くなる点が挙げられるが、SQUID は地磁気の 100 億分の 1 の磁場まで測定可能であり、低周波から高周波まで連続した高感度を有することから、SQUID を適用した SQUITEM は、低周波まで高感度に検知することで探査深度を向上させている。また、液体窒素を用いた簡易な冷却が必要だが、野外・現場での使用実績がある。これまでに海底 CCS 事業への適用例はないが、CO<sub>2</sub>-EOR (Enhanced Oil Recovery) モニタリング用の広域検層や金属鉱物資源探査に係る技術として開発が進められている。

この他に、TEM 法の大深度適用手法として、LOTEM (Long Offset TEM) がある。これは、送信源として電線を地表に敷設し、その両端を大地に設置して電流源として地下に直接電流を流す手法である。SQUITEM と同様に SQUID を適用することが可能であ

り、EORにおいて深度約3,000 m、層圧100 mの石油貯留層内の比抵抗変化を検知可能であることが実証されていることから、海底下CCS事業への適用が期待できる。

海底下CCS事業への適用に当たっては、貯留されたCO<sub>2</sub>は地層水より比抵抗が高いことから、高比抵抗域がCO<sub>2</sub>分布域として推定される。現在、CO<sub>2</sub>貯留サイトでは、MT法やMCSEM法等が適用されている。測定原理の違いや電磁気信号の周波数によって推定可能な深度等が異なる（地下浅部では30 Hz、地下深部探査では0.25 Hz～1 Hz程度が一般的である<sup>11)</sup>）ため、貯留層の深度等に応じてどの技術を採用するか、場合によっては複数の技術を組み合わせる必要がある。

#### （４）坑井モニタリング

貯留層からCO<sub>2</sub>が漏出する際に想定される漏出経路として、CO<sub>2</sub>のガス圧が遮蔽層の毛細管圧を超えることによる移動や断層を通じての移動、圧入井等の構造物に沿った移動などが考えられる<sup>12)</sup>。地層内の状況の監視にあたっては、貯留層内（坑底部）の温度や圧力の変動や微小な振動（微小地震）をモニタリングすることが必要であり、圧入井や観測井等の坑井にセンサ等を設置してモニタリングを行う。以下に具体的な坑井モニタリング技術を示す。

##### １）貯留層飽和度計測（RST : Reservoir Saturation Tool）

貯留層内の流体飽和度を測定・評価する検層ツールである。特にCO<sub>2</sub>飽和度の経時変化の把握を可能とし、貯留層モデリングやシミュレーションの精度向上に寄与できる。このツールでは中性子を地層に放出させ、これにより地層から発生するガンマ線を測定する。中性子と地層及び流体との相互作用により、地層内に存在する流体の種類と量を特定できる。また、非破壊での測定を可能としており、坑井の仕上げの状況（ケーシングやオープンホールなど）によらず、使用が可能である。米国のIllinois州のDecaturプロジェクト等での運用実績がある。ただし、海底下に設置する場合には、特殊船舶（Well Intervention vessel）が必要となり、高コストとなる。

##### ２）坑井健全性モニタリング

既存の古井戸や試掘井、観測井、圧入井等からの漏洩を防ぐにあたり、ケーシングの腐食やケーシング背後<sup>13)</sup>のセメントなどの坑井の健全性に係る評価が重要になる。坑井健全性モニタリングの例として、音波測定によるセメントボンドの評価や超音波測定によるセメントボンド及びケーシング腐食の評価、電磁測定によるケーシング腐食の評価などが挙げられる。各サービス会社から音波・超音波・電磁波などを用いた測定ツールが提供

<sup>11)</sup> <https://www.mindeco.co.jp/squitem/>より。

<sup>12)</sup> IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. IPCC, 2005, pp.34-35

<sup>13)</sup> 油井やガス井等のケーシング（鋼管）と井戸壁の間の空間を指す。この空間は通常、セメントが充填された状態となっている。

されており、これらを用いることで、非破壊で坑井健全性の監視が可能となる。

### 3) 微小地震 (Microseismic) モニタリング

微小地震は圧入に伴う応力変化により誘発される地層内の極小規模の破壊であり、貯留層の安定性評価（貯留層や遮蔽層破壊の有無）や漏洩検出（漏洩発生位置の特定）、圧力変動の監視（圧力プルームの広がり解釈）や有感地震リスク管理（断層付近での漏洩検知）の観点から、そのモニタリングは極めて重要である。モニタリングにあたっては、海底や地表への適切な受信機（OBN; Ocean Bottom Node、OBC; Ocean Bottom Cable）の設置が必要となる。また、坑内 DAS（Distributed Acoustic Sensing; 後述参照）やジオフォンを用いることで、より小規模の微小地震イベントを検知できる。

### 4) 光ファイバー計測

光ファイバー計測は、光ファイバーを通じて光を伝送し、その光の特性変化を利用して測定を行う手法である。光ファイバー自体がセンサであるため電気回路がなく、故障しにくいという特徴がある。また、光ファイバーは電磁干渉を受けず、化学的に安定しているため、過酷な環境下でも使用可能であり、海底下 CCS においては地下の連続監視に適している。一般的に安価かつ長寿命性が期待されており、海外でも QUEST、Goldeneye、Endurance、Porthos 等多数のプロジェクトにおいてモニタリング計画に含まれている。光ファイバー計測の運用例として、DAS、DTS、DSS がある。

DAS（Distributed Acoustic Sensing; 音響計測）は微小な振動を高感度で検出できるため、反射法地震探査や VSP（Vertical Seismic Profiling; 前述参照）調査の受信機として活用することが可能で、貯留層内の CO<sub>2</sub> プルームの広がり把握に適している。また、光ファイバーをケーシング背後に設置できれば、微小地震計測も可能となる。また、ノイズを計測することで、坑井内の個体析出（ハイドレート、ドライアイス、塩分等）を検知できる可能性もある。

DTS（Distributed Temperature Sensing; 温度計測）は長距離にわたる温度測定を高精度（±1℃以内）で行うことが可能であり、坑井内の温度分布をモニタリングすることで、CO<sub>2</sub> 漏洩を検知できる可能性がある。DTS は特に石油業界で多くの運用事例がある。

DSS（Distributed Strain Sensing; ひずみ計測）は数十 km にわたる広範囲の歪みを連続的にモニタリングすることが可能であり、微小な歪みを高精度で検出できるため、坑井の健全性や貯留層/遮蔽層の安全性の監視に適している。また、岩石力学モデルのキャリブレーションにも利用可能である。

表 4. 3-1 領域③（海底下深部（海底面から海底下数 10km））におけるモニタリング技術一覧（1/2）

| 観測手法・システム |                                     | CO <sub>2</sub> モニタリング<br>把握可能な情報 | 特徴                                                                                                                    | 技術適用時の注意点                                                                                              | 海底下CCS事業<br>への適用例           | 適用<br>海域 |
|-----------|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------|
| 弾性波探査     | 反射法探査システム<br>（シングルチャネル・<br>マルチチャネル） |                                   | エアガン等を使って人工的に起震し、首響インピーダンスの違いにより地質境界から発生する反射波を測定・解析することで、地層構造や地層中のCO <sub>2</sub> 分布を把握することが可能となる。                    | エアガンは水中騒音となるため海洋生物への影響が懸念される。地層中のCO <sub>2</sub> 分布を把握できるBATだが、高コストである。CO <sub>2</sub> 圧入前の事前調査が必要である。 | 苫小牧、Sleipner、Shahvit        |          |
|           | 海底地震計屈折法システム                        | 地質構造<br>地層中のCO <sub>2</sub> 分布    | 地震波が地中で屈折して伝播した波形を解析することにより、地層構造を把握する。深部探査が可能である。                                                                     | 採水化学分析と比べて正確ではないが、漏出場所を絞り込むための相対値としては有用性がある。CO <sub>2</sub> 圧入前の事前調査が必要である。                            | 苫小牧には海底受振機（OBC、OBS）を設置している。 |          |
|           | VSP<br>(Vertical Seismic Profiling) |                                   | 坑井内に設置されたセンサ（ジオフォンや水中マイク等）で地震波を受振することで、地層の高解像度な画像取得が可能である。                                                            | 広範囲を対象とする弾性波探査（反射法等）と比べて探査範囲は限られる。CO <sub>2</sub> 圧入前の事前調査が必要である。                                      | IBDP等                       |          |
|           | 自然電磁場（MT法）                          |                                   | 地層を構成する物質の比抵抗の違いを把握するために海底電磁場を測定し、海底下の比抵抗構造を解析することで地層中のCO <sub>2</sub> の分布とともに地層構造を把握する。                              | 自然の電磁気信号を利用し電磁場を測定するMT法は、大深度まで把握が可能な技術だが自然ノイズによる影響を受けやすい。対象深度に応じた手法の組み合わせや条件設定が必要である。                  | 他分野で実績があり、CCSにも適用可能性がある。    |          |
| 電磁探査      | MCSEM法                              |                                   | 自然の電磁気信号を用いる方法（MT法）、人工的に発生させた電磁気信号を併用する方法（MCSEM法等）がある。                                                                | CO <sub>2</sub> 圧入前の事前調査が必要である。                                                                        | Sleipner                    |          |
|           | MDCR法                               |                                   | 人工的な電磁気信号を発生させるMCSEM法等は、到達深度はMT法に劣るが解像度が高い。                                                                           |                                                                                                        |                             |          |
|           | 曳航式CSEM法                            |                                   |                                                                                                                       |                                                                                                        | Sleipner                    |          |
|           | SQUITEM                             | 地層の比抵抗<br>CO <sub>2</sub> 分布、飽和度  | 低周波から高周波まで連続して高感度に検知できる超電導量子干渉素子（SQUID）を時間領域探査法（TEM法）に応用し、磁場時間変化測定により得られる地下深部の比抵抗分布情報からCO <sub>2</sub> の分布と地層構造を把握する。 |                                                                                                        |                             |          |
|           | LOTEm                               |                                   | 時間領域探査法であるTEM法を大深度に適用させるために開発された手法であり、送信源として電線を設置して地下に直接電流を流す手法である。                                                   | 陸上における金属資源探査や地熱探査、EOR事業等において実績があるが海洋での実績が少なくないため、運用手法を確立する必要がある。CO <sub>2</sub> 圧入前の事前調査が必要である。        | 他分野で実績があり、CCSにも適用可能性がある。    |          |
|           |                                     |                                   | SQUITEMと同様にSQUIDを適用することが可能であり、陸上EORにおいて石油貯留層内の比抵抗変化を検知した実績がある。                                                        |                                                                                                        |                             |          |

表 4.3-2 領域③（海底下深部（海底面から海底下数 10km））におけるモニタリング技術一覧（2/2）

| 観測手法・システム    | CCSモニタリング<br>把握可能な情報 | 特徴                                                                                                                                                     | 技術適用時の注意点                                                                                                                                     | 海底下CCS事業<br>への適用例                    | 適用<br>海域 |
|--------------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|----------|
| 坑井<br>モニタリング | 貯留層飽和度計測             | 貯留層内の流体飽和度<br>ツールであり、特にCO <sub>2</sub> 飽和度の経時変化の把握を可能とし、貯留層モデリングやシミュレーションの精度向上に寄与できる。中性子を地層に放出させ、地層及び流体との相互作用により発生するガンマ線を測定することで、地層内に存在する流体の種類と量を特定する。 | 海底下に設置する場合には、特殊船舶（Well Intervention vessel）が必要となり、高コストとなる。                                                                                    | IBDP等                                |          |
|              | 坑井健全性モニタリング          | ケーシング管内・ケーシング・セメント等の状況                                                                                                                                 | 海底下に設置する場合には、特殊船舶（Well Intervention vessel）が必要となり、高コストとなる。                                                                                    | QUEST、Goldeneye、Porthos等のプロジェクトで計画あり |          |
|              | 微小地震モニタリング           | CO <sub>2</sub> 圧入に伴う地層内の微小地震の検知                                                                                                                       | 海底や地表への適切な受信機（OBN、OBC）の設置が必要となる。                                                                                                              | IBDP等多数のプロジェクトで実績、計画あり               |          |
|              | 光ファイバー計測（DAS）        | CO <sub>2</sub> ブルームの広がり                                                                                                                               | 地層内の岩石や土壌による摩擦や圧力からケーブルを守るための保護措置が必要であり、ケーブルの劣化や損傷を早期に発見できるための監視体制を整えることが必要である。また、長距離にわたる信号の伝送では、信号の減衰が問題になる場合があるため、信号増幅器やリピーターの設置を検討する必要がある。 | QUEST、Goldeneye、Porthos等のプロジェクトで計画あり |          |
|              | 光ファイバー計測（DTS）        | 坑井内の温度分布によるCO <sub>2</sub> 漏洩検知                                                                                                                        |                                                                                                                                               |                                      |          |
|              | 光ファイバー計測（DSS）        | 坑井の健全性や貯留層/遮蔽層の安全性の監視                                                                                                                                  |                                                                                                                                               |                                      |          |
|              |                      | 数10kmにわたる広範囲の歪みを連続的にモニタリングすることが可能であり、微小な歪みを高精度で検出できるため、坑井の健全性や貯留層/遮蔽層の安全性の監視に適している。                                                                    |                                                                                                                                               |                                      |          |

## 5. 海底下 CCS モニタリング技術（第2部）

事業者が監視計画を検討する際に参照する資料として環境省から公表されている「海底下 CCS 事業に係る監視計画のあり方について（2016 年 10 月 13 日）」（以下、「監視計画のあり方」）では、経済産業省が実施している苫小牧沖海底下 CCS 事業に係る通常時監視、通常時監視確認調査、懸念時監視、異常時監視の各段階における実施すべき調査項目や留意事項が示されている。

「監視計画のあり方」では、通常時監視における海水の化学的性状に関する調査で移行基準を超過した場合、次の監視段階に移行すべきかを確認するための調査（確認調査）において、採水調査とは別に、より直接的に CO<sub>2</sub> の漏出の有無やそのおそれを具体的に確認するための詳細な調査を迅速にいくつか実施して、CO<sub>2</sub> 漏出の有無を総合的に判断することとしている。

確認調査の主な内容を以下に示す。また、監視計画のフローを図 5-1 に示す。

- 確認調査においては、現地概況調査及び現地詳細調査を実施する。
- 現地概況調査において、採水再調査、センサ調査及び気泡確認調査を実施する。
- 現地詳細調査において、採水再々調査、気泡確認詳細調査を実施する。
- センサ調査により pH の不均一な分布が観測されるかどうかを確認し、また、海水や採取した気泡の炭素同位体比分析を行うことにより、圧入した CO<sub>2</sub> の漏出の有無を確認する。

確認調査のうち、センサ調査、気泡確認詳細調査及び炭素同位体比分析については、現場海域での適用事例が少なく、調査手法及び評価のあり方について科学的妥当性はあるものの広く一般に用いられている海洋調査技術のような手法が確立されていない。

本章では CCS 大規模実証試験が実施されている苫小牧沖海域等で得た知見から、苫小牧事業において事業者が実用可能なモニタリング技術を監視計画に盛り込むことを念頭に、推奨される手法や留意点について記述した。

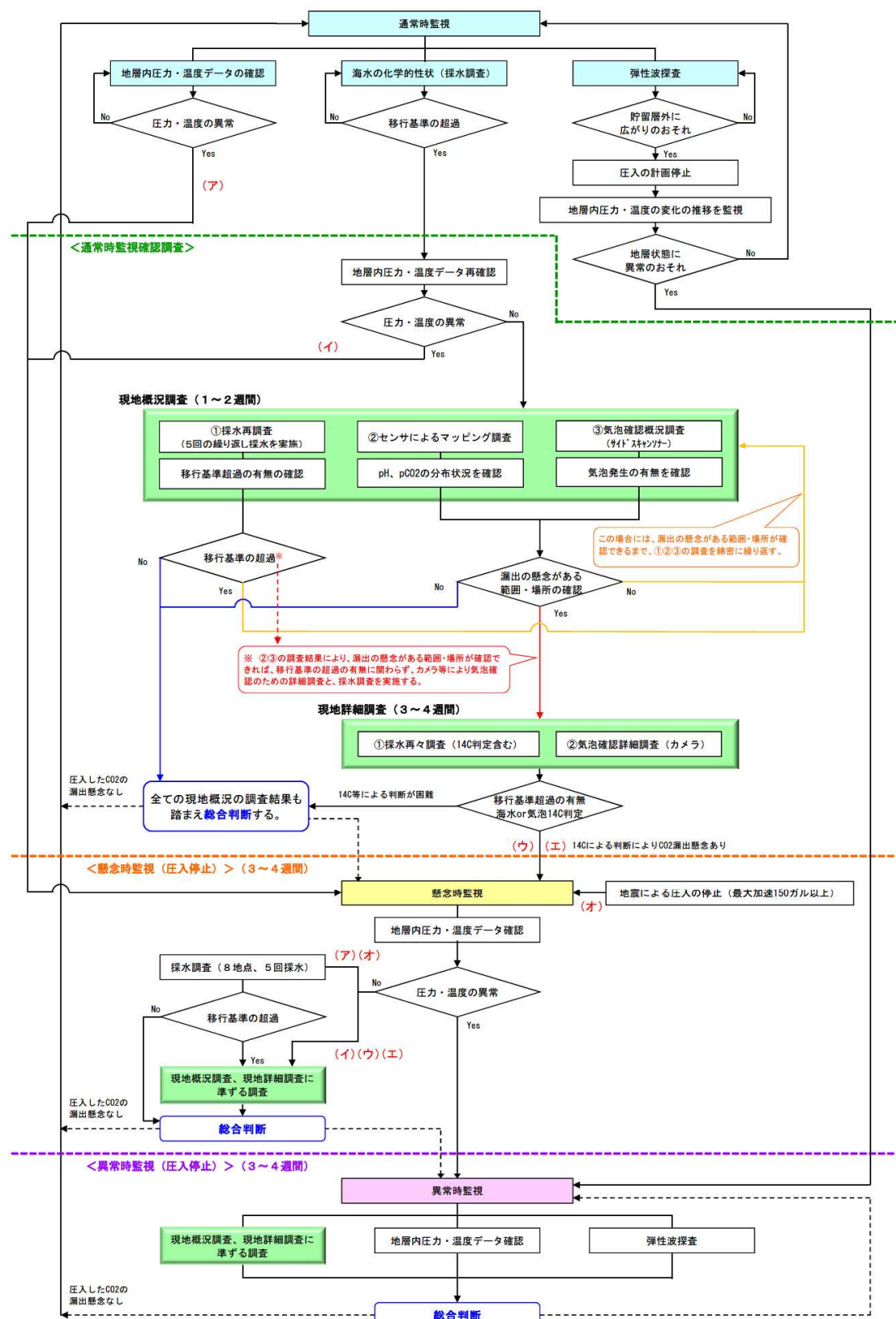


図 5-1 監視計画のフロー<sup>14</sup>

<sup>14</sup> 環境省「海底下 CCS 事業に係る監視計画のあり方について」(2016 年 10 月 13 日)  
(<https://www.env.go.jp/water/kaiyo/ccs2/kanshinoarikata.html>)

## 5. 1 センサ調査

### (1)「監視計画のあり方」における記載内容

4. 通常時監視確認調査、4-2. 現地概況調査、②センサ調査として以下のとおり記載されている。

#### 4-2. 現地概況調査

##### ②センサ調査

通常時監視において移行基準を超過した地点の周辺（漏出点が存在している可能性がある海域）において、漏出懸念点の存在範囲を絞り込むことを目的として、pH または pCO<sub>2</sub> を測定する化学センサを用いた面的な調査を行う。

事前評価におけるシミュレーション結果によると、最も影響範囲が広いケース（1%漏出－100m）においても、 $\Delta pCO_2 > 100 \mu atm$ （ $\Delta pH > 0.1$ ）となる範囲は漏出点から半径 100m 以内である。このため、調査範囲は、海流による高 CO<sub>2</sub> 水塊の移動の可能性も考慮して、通常時監視において移行基準を超過した地点を中心に 1km×1km 程度の範囲とするのが望ましい。

観測は、センサを直線状に曳航して行う。観測線の間隔は 100m以内とし、センサは海底近傍（海底上 2m）を曳航する。

センサを曳航するプラットフォームとしては、船舶をはじめとして、AUV、ROV、シーグライダーなどが考えられる。化学センサは、pH センサまたは pCO<sub>2</sub> センサを用いる。観測しようとする水深で適切に曳航できたかどうかを確認するために、CTD（水温、塩分、圧力）を同時に用いる。なお、pH は、CO<sub>2</sub> 以外の要因によって変動する可能性もあるため、直接的に CO<sub>2</sub> のデータを観測できる pCO<sub>2</sub> センサを用いることが望ましい。また、化学センサを使って長期間にわたり正確な値を得るためには、ドリフト補正や校正等が必要であるが、本調査のように pH または pCO<sub>2</sub> の不均一な分布を検出することが目的であれば、これらのセンサは十分実用可能なことがこれまでの知見から確認されている。ただし、pH センサとして一般的なガラス電極の pH センサを用いる場合には、水温及び圧力（水深）の影響により出力値が変化しやすいため、留意する必要がある。

得られた観測データをマッピングし、漏出が懸念される pH または pCO<sub>2</sub> の不均一な分布（pH の低下または pCO<sub>2</sub> の増加）の有無を確認する。

「監視計画のあり方」では、現地概況調査及び現地詳細調査において移行基準を超過した測点を中心に 1 km×1 km の範囲を対象にセンサ調査を実施することとされている。

海水中の CO<sub>2</sub> 濃度を把握するには採水分析が最も確実かつ高精度な手法だが、1 km×1 km の範囲を対象とした場合、時空間分解能が高い化学センサを使うことが望まし



い。化学センサは、採水分析に比べて信頼性がやや劣るが、CO<sub>2</sub> 漏出による pH または pCO<sub>2</sub> の不均一な分布を効率的に確認することができる技術である。

## (2) 推奨手法

センサ調査を効率的かつ適正に実施するためには、広範囲を効率的に観測できる移動式プラットフォームを活用することが望ましい。最も効率的に実施できる移動式プラットフォームは AUV であり、化学センサとの組み合わせにより効率的かつ正確にセンサ調査を遂行できる。センサ調査では海の状況が変動することを考慮すると対象範囲を短期間で調査することが望ましく、AUV によるセンサ調査では 1 km×1 km (測線間隔は 100 m) を 1 日で遂行することが可能である。また、AUV にはサイドスキャンソナーが搭載されたものもあり、気泡確認調査を同時に実施できる可能性もある。

外洋調査に使われる AUV は大型であるが、水深が比較的浅い沿岸域で運用するには漁船で投入・回収ができる小型 AUV (図 5.1-1) が適している。

AUV によるセンサ調査の観測条件例を以下に示す。観測条件を検討するうえで重要なことはセンサの反応速度に適した観測条件にすることである。また、「監視計画のあり方」に記載されているように測線間隔が 100 m 以内に設定されるので、AUV には数メートル以内の位置精度が求められる。位置精度を確保するためには、音響機器 (トランスポンダ) 等を適正に活用することが望ましい。また、AUV は 1 km×1 km 程度の範囲を 1 回の潜航で観測できるので、センサ値に影響する圧力や温度の変動が最小限に抑えられるというメリットもある。

### <AUV によるセンサ調査の観測条件例>

- 潜航深度 : 海底面上 2 m
- 潜航速度 : 1~2 ノット程度
- データ取得間隔 : 1 秒

AUV に比べると機動性で劣るが、ROV もセンサ調査に活用できる移動式プラットフォームである。ROV は船上で海底状況を随時確認できるという利点があるものの、ケーブルで船と繋がっているため機動性がやや劣る。また、水深が比較的浅い沿岸域では潮流の影響をケーブルが受けるため、測線上を正確に航走することや一定高度を維持することにやや難がある。測線上を正確に航走させるためには、船をアンカリングして ROV を航走させることになるが、ROV の投入・揚収とアンカリングに時間を要し、1 km×1 km 程度の範囲を調査するのに数日間かかる。また ROV を投入・揚収することで pH センサが大気に晒されることになり、センサ値が不安定となる一因となる<sup>15</sup>。

移動式プラットフォームではなく船舶を使ったセンサ調査では、海底上 2 m の水深

<sup>15</sup> pH センサのセンサ部 (電極部) は乾かさないように運用する。観測時は、海水と同程度のイオン強度をもつ溶液 (例えばバッファ溶液等) に観測直前まで漬けておくことが望ましい。

を維持して曳航することは極めて難しい。船からセンサを懸架する方法では、懸架のたびに水温・圧力が変動するため、センサが不安定となる可能性が高い。

センサ調査では化学センサを適正に運用する必要がある。化学センサはドリフト等の誤差が発生するが、誤差を小さくするためには、校正等を適正な頻度で実施し、必要に応じてセンサ値を補正することが望ましい。校正には人工海水ベースのバッファ溶液を使い、調査前後に校正することが望ましい。また、センサ調査時に対象海域で採水し、分析値と比較することが望ましい。

センサ調査の調査結果例を図 5.1-2 に示す。海底上 2 m の pH 等の水平分布図を作成し、pH の不均一な分布の有無を確認する。



図 5.1-1 小型 AUV 及び海水専用 pH センサ（例）

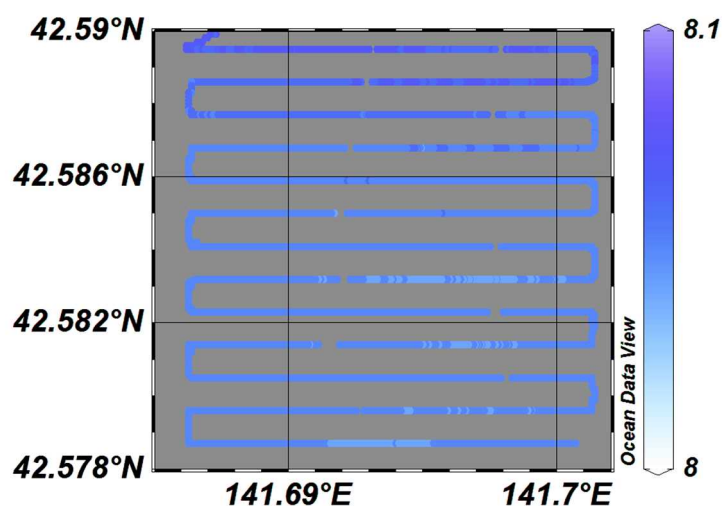


図 5.1-2 センサ調査の調査結果（例）

### (3) 留意点

- AUV の潜航水深は海水の化学的性状の最下層と同じ海底上 2 m だが、潜航時は海底からの距離をできる限り保持することが望ましい。また、海底からの距離は AUV に高度計や CTD を取付け、データを確認することが望ましい。
- 位置情報の誤差は数メートル以内にすることが望ましく、高精度な音響測位機器（トランスポンダ等）を複数台配置することで誤差を小さくすることができる。
- AUV や ROV にセンサ取り付ける場合、進行方向にセンサ部を向けて海水が直接当たるように取り付けることが望ましい。
- ガラス電極の pH センサは圧力や温度の影響を受ける。AUV 潜航時など海底に向かってセンサが沈下する際は圧力や温度の変動による影響を受けるので、沈下直後の海底付近のデータは留意が必要である。また、測線を設定する場合は、圧力や温度の変動が小さくなるように等深線と並行に設定することが望ましい。
- センサの校正は調査の直近に実施することが望ましく、測定環境が安定した室内で校正することが望ましい。

## 5. 2 気泡確認詳細調査

### (1)「監視計画のあり方」における記載内容

4. 通常時監視確認調査、4-2. 現地概況調査②気泡確認調査、4-3. 現地詳細調査②気泡確認詳細調査として以下のとおり記載されている。

#### 4-2. 現地概況調査

##### ③気泡確認調査

サイドスキャンソナー (SSS) を用いて海底面からの気泡の発生状況を調査する。また、必要に応じて、サブボトムプロファイラーを用いて、海底直下に存在すると予想される気泡溜まりを探索する。

②センサ調査と同様の考え方にに基づき、調査範囲は、1km×1km 程度の範囲とするのが望ましく、観測線の間隔は 100m 以内とする。観測データは、簡単な処理 (ノイズ除去等) を行い、データ全体を統合した上で気泡の発生の有無を確認する。②センサ調査で漏出懸念点の存在範囲を絞り込めた場合は、当該範囲においてサイドスキャンソナーを用いて調査を行うことや、計量魚探やマルチビーム等の音響探査装置を用いて調査を行うことも検討すべきである。

#### 4-3. 現地詳細調査

##### ②気泡確認詳細調査

4-2. 現地概況調査の②センサ調査において pH または  $p\text{CO}_2$  の不均一な分布が観測された場合は、観測された分布異常範囲において、また、③気泡確認調査において気泡の発生が確認された場合は、気泡確認地点の周辺において、ROV またはダイバーによるカメラ撮影を行い、撮影映像から気泡の発生状況を詳細に調査する。

気泡の発生が観測された場合は、可能な限り、気泡を採取し成分分析を行う。成分分析の結果、 $\text{CO}_2$  濃度が著しく高い場合は、さらに  $^{14}\text{C}$  同位体比分析を行う。

発生した気泡が圧入された化石燃料起源の  $\text{CO}_2$  を含む場合は、 $^{14}\text{C}$  同位体比が低くなるため、 $^{14}\text{C}$  同位体比を分析した結果、当該気泡に含まれる  $^{14}\text{C}$  同位体比が、海水に溶存する二酸化炭素あるいは海底で自然に生じる気泡の  $^{14}\text{C}$  同位体比に比べて有意に低い場合、圧入した  $\text{CO}_2$  の漏出によって気泡が発生していることを強く示唆する。

「監視計画のあり方」では、気泡確認調査で気泡の発生が観測された場合は、気泡確認詳細調査において可能な限り、気泡を採取し成分分析を行い、その結果  $\text{CO}_2$  濃度が著しく高い場合は、さらに  $^{14}\text{C}$  同位体比分析を行うこととされている。

## (2) 推奨手法

現地概況調査ではサイドスキャンソナーを使って  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$  程度の範囲から気泡発生個所を絞り込むことになっている。現地概況調査で気泡発生が確認された場合、海底から噴出している気泡をできるだけ採取し、採取できた場合は分析することになっている。

気泡採取作業のイメージを図 5.2-1 に示す。海底から発生している気泡を試料容器に直接採取することは潮流等の影響で難しいので、気泡発生場所に気泡採集器具を覆い被せ気泡を一定量溜めたのち、試料容器に採取する。また、海底付近では水圧がかかった状態なので採取した気泡試料の体積が膨張する（水深  $10\text{ m}$  以上では 2 気圧以上の水圧となるため、大気圧下では気泡の体積が約 2 倍に膨張）。そのため、試料容器は気泡の体積膨張に対応可能なアルミバックやシリンジ等（図 5.2-2）を使うことが望ましい。

試料容器の密閉性が確保されていても少量の海水が試料に混入している可能性が高いため、できるだけ早く成分分析を行うことが望ましい。成分分析は  $\text{CO}_2$  が主成分であるかどうかを確認するので、分析精度は数%程度で問題ない。現地で簡易に成分分析を行うのであれば、持ち運び可能なポータブルガスクロを使うことが望ましい。TCD 検出器付ポータブルガスクロ（例えば、ポータブル TCD ガスクロ INORGA<sup>16</sup>）などが市販されているので、事前に標準ガス等を使って分析条件を確認した上で現地分析することが望ましい。

主成分が  $\text{CO}_2$  であることが確認された場合は、 $\delta^{14}\text{C}$  分析を実施することになる。 $\delta^{14}\text{C}$  分析には時間と費用を要するが、噴出している気泡が圧入した  $\text{CO}_2$  起源かどうかの判断材料となる。 $\delta^{14}\text{C}$  分析用試料は保管期間が長いので、真空状態を維持できる容器（図 5.2-3）が望ましい。 $\delta^{14}\text{C}$  分析結果が  $-1,000\text{‰}$  に近い値を示した場合、懸念時に移行する可能性が高くなる。

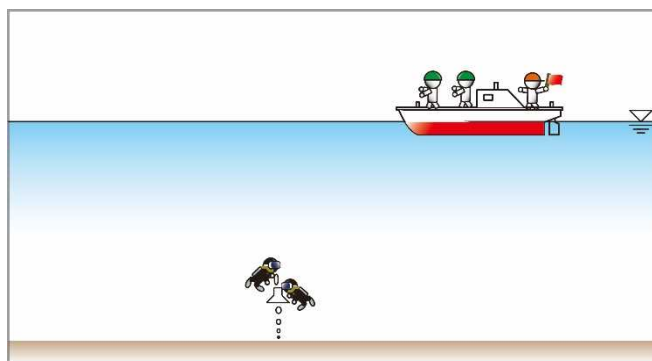


図 5.2-1 気泡採取作業（イメージ）

<sup>16</sup> <http://www.lc-s.co.jp/INORGA.htm>



図 5.2-2 気泡採集容器例（左；アルミバッグ、右；ガラスシリンジ）

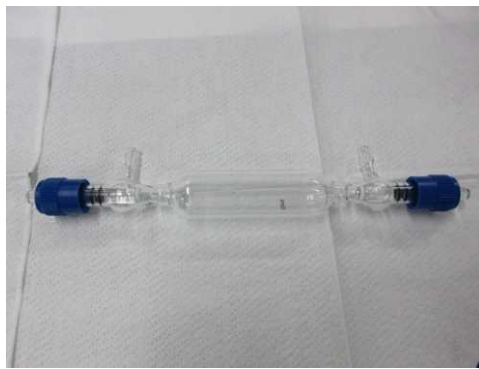


図 5.2-3  $\Delta^{14}\text{C}$  分析用試料容器例（真空バルブ付ガラス容器）

### （3）留意点

- 水深が 20 m 以上と深い場合は潜水士（作業員）による作業が困難となる。その場合、ROV を使って気泡採取することが可能である。重量のある耐圧容器を気泡発生場所に直接覆い被せて気泡を採取することが可能である。
- 気泡は確認されているものの採取が困難な場合、気泡が発生している海底近傍の海水を採水して $\Delta^{14}\text{C}$  分析することで、圧入した  $\text{CO}_2$  の漏出かどうかを判断できる可能性がある。
- 成分分析の分析精度は%オーダーで問題ないが、ガスクロに水分が混入すると故障の原因となる。試料導入時の水分混入を防ぐためには、気泡採取容器からシリンジ等を使ってガスクロに導入するなどの工夫が必要である。

### 5. 3 $^{14}\text{C}$ 炭素同位体比 ( $\delta^{14}\text{C}$ ) 分析

#### (1) 「監視計画のあり方」における記載内容

4. 通常時監視確認調査、4-3. 現地詳細調査、①採水再々調査および②気泡確認詳細調査として以下のとおり記載されている。

##### 4-3. 現地詳細調査

###### ①採水再々調査

また、採水再々調査では、 $^{14}\text{C}$  同位体比分析のための採水も行う。採水にあたっては、仮に漏出があったとしても漏出の影響を受けていないと考えられる海水の  $^{14}\text{C}$  同位体比との比較を行うため、分布異常範囲外、気泡確認地点以外の沖側の対照地点においても採水を行う。

分布異常範囲内または気泡確認地点の海水の  $^{14}\text{C}$  同位体比が対照地点と比べて有意に低い値を示した場合、圧入した  $\text{CO}_2$  の漏出が発生していることを示唆する。

##### 4-3. 現地詳細調査

###### ②気泡確認詳細調査

気泡の発生が観測された場合は、可能な限り、気泡を採取し成分分析を行う。成分分析の結果、 $\text{CO}_2$  濃度が著しく高い場合は、さらに  $^{14}\text{C}$  同位体比分析を行う。

発生した気泡が圧入された化石燃料起源の  $\text{CO}_2$  を含む場合は、 $^{14}\text{C}$  同位体比が低くなるため、 $^{14}\text{C}$  同位体比を分析した結果、当該気泡に含まれる  $^{14}\text{C}$  同位体比が、海水に溶存する二酸化炭素あるいは海底で自然に生じる気泡の  $^{14}\text{C}$  同位体比に比べて有意に低い場合、圧入した  $\text{CO}_2$  の漏出によって気泡が発生していることを強く示唆する。

「監視計画のあり方」では、確認調査により  $\text{CO}_2$  の漏出懸念が確認された場合、採水再々調査において海水中の  $\delta^{14}\text{C}$  値をもとに漏出有無を判断することとされている。具体的には、現地概況調査及び現地詳細調査（採水再々調査及び気泡確認詳細調査）により絞り込んだ  $\text{CO}_2$  漏出箇所の海底近傍で採水した海水試料の  $\delta^{14}\text{C}$  を測定する。

#### (2) 推奨方法

「監視計画のあり方」では、 $\text{CO}_2$  漏出懸念が確認された地点と漏出の影響を受けていない地点（分布異常範囲外、気泡確認地点以外の対照地点など）において  $\delta^{14}\text{C}$  の採水分析を行い、比較することで漏出有無を判断することになっている。 $\text{CO}_2$  漏出懸念が確認された地点の  $\delta^{14}\text{C}$  値が対照地点と比べて有意に低い値を示した場合、圧入した  $\text{CO}_2$  が漏出している可能性を示唆している。

苫小牧沖における  $\delta^{14}\text{C}$  の時空間変動を表 5.3-1 に示す。苫小牧沖では黒潮系や親潮

の影響を受けた水塊が季節によって入れ替わっており、その影響で $\delta^{14}\text{C}$  が変動している（- 50‰～30‰）。 $\text{CO}_2$  漏出の有無については確認調査で多角的に調査した結果をもとに絞り込むことになるが、最終的には $\delta^{14}\text{C}$  分析結果が漏出判断の決め手となる。上述のように対照地点との比較により判断することになっているが、沿岸域における $\delta^{14}\text{C}$  の知見は少なく、まずは採水分析結果の妥当性について評価する必要がある。圧入  $\text{CO}_2$ （ $\delta^{14}\text{C} = -1,000\text{‰}$ ）が海水に溶解すると、海水中の $\delta^{14}\text{C}$  が自然変動幅より有意に低くなると考えられ、漏出有無を適正に判断できると考えられる。

表 5.3-1 苫小牧沖における海水中の $\delta^{14}\text{C}$  変動幅

| 調査測点          | 全体<br>(‰)  | 親潮<br>(‰)   | 黒潮系<br>(‰) |
|---------------|------------|-------------|------------|
| 調査測点1<br>(底層) | -44.7～24.9 | -44.7～-20.5 | 5.6～24.9   |
| 調査測点7<br>(底層) | -33.4～24.9 | -33.4～-10.5 | 11.3～24.9  |

### （３）留意点

- 海水中の $\delta^{14}\text{C}$  分析については、海洋観測ガイドライン（日本海洋学会発行 <http://kaiyo-gakkai.jp/jos/guide>）第9章に準じた手法で実施することが望ましい。
- $\delta^{14}\text{C}$  分析に必要な海水試料は 200 mL 以上。採水は全炭酸（DIC）と同様に大気との接触が最小限となるように採取し、塩化第二水銀を添加することが望ましい。
- 参照点は、漏出地点と同水深で漏出の影響が全くない地点に設定することが望ましい。



#### 5. 4 「特定二酸化炭素ガスの位置および範囲」に係る海底下モニタリングへの電磁探査技術の適用について

環境省では、海底下に貯留された二酸化炭素をモニタリングする際の環境負荷及びコストをより軽減できる技術として、弾性波探査を補完する「電磁探査」(図 5.4-1)を検討している。

本章では、将来的には弾性波探査の実施回数を抑える技術として期待される電磁探査技術について、環境省事業で得られた知見等を記述する。

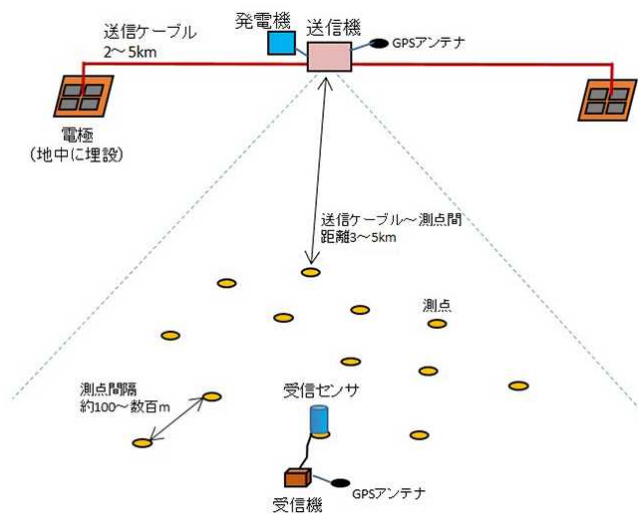


図 5.4-1 電磁探査法の概要（上図は探査手法の一つである TEM 法の概要）<sup>17</sup>

#### (1) 「監視計画のありかた」における記載内容

3. 通常時監視、3-2. 弾性波探査として、以下のとおり記載されている。

##### 3-2. 弾性波探査

廃棄された CO<sub>2</sub> の位置及び範囲に係る調査として、弾性波探査を年 1 回実施する。CO<sub>2</sub> の貯留層外（遮蔽層）への広がりのおそれが疑われた場合、圧入を計画的に停止し、圧入停止直後（数日程度）の坑内の圧力と温度（特に圧力の低下挙動）を注視した観測を行う。観測結果により地層の状態の異常のおそれが類推される場合は、異常時監視に移行する。

ただし、現行の許可期間（2021 年度～2025 年度）における特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄許可申請書（20210118 産第 4 号令和 3 年 2 月 2 日）の監視計画では、2. 通常時監視に係る事項、2. 1 監視の方法、(2)海域の状況に関する事項、①特定二酸化炭素ガスの圧入等による地層内圧力及び温度の変化等の地層及び地質の状況並びに特定二酸化炭素ガスの位置及び範囲等で、「海底下地層に廃棄した特定二酸化炭素ガスの分布状況や挙動を把握するための手段として、定期的に適切な探査を実施する。」としている。

<sup>17</sup> <https://www.mindeco.co.jp/squitem/>より引用

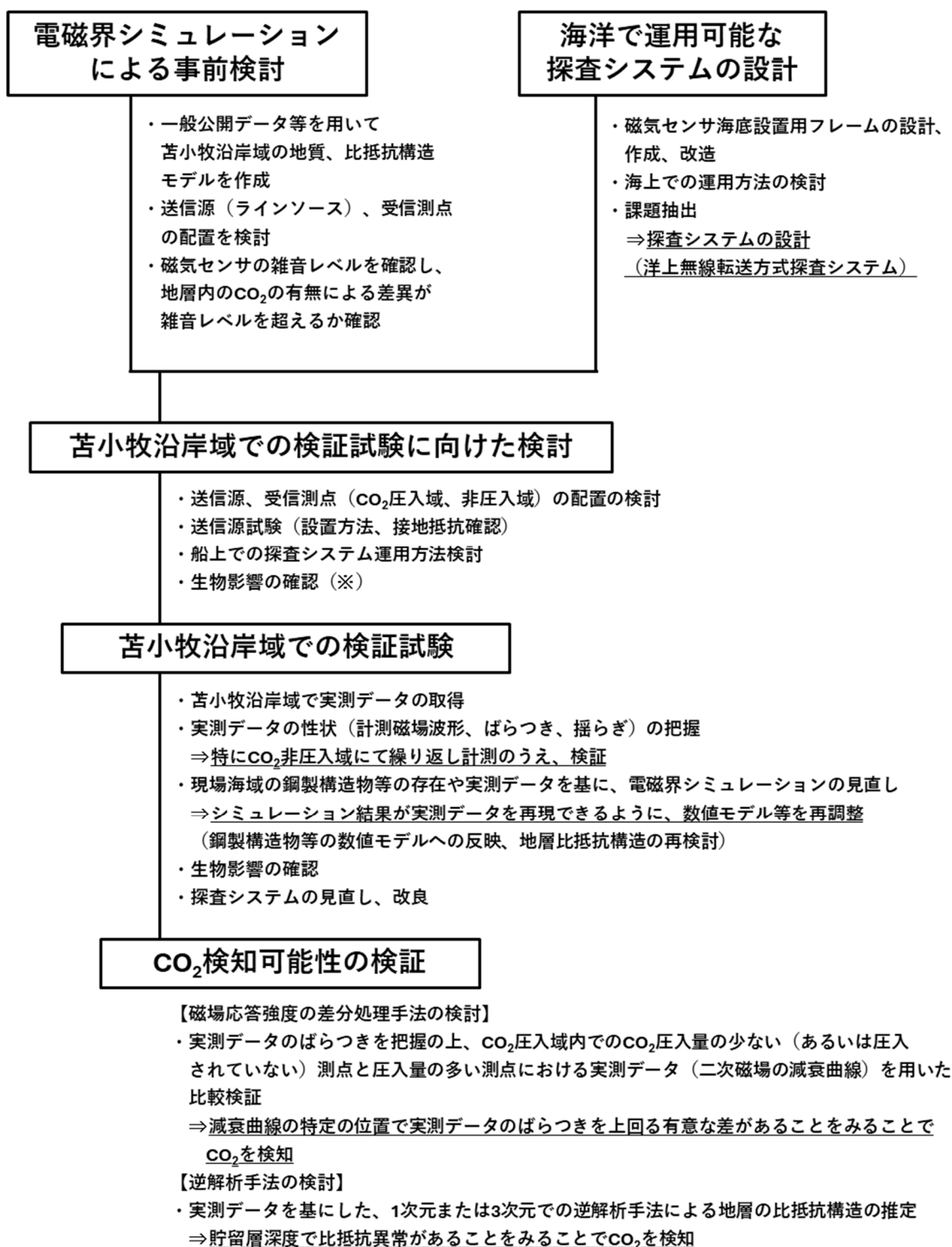
## （２）技術の概要

電磁探査は、地層の電磁誘導現象を利用して得られる地下の比抵抗情報から地質構造等を推定する技術である。電磁探査技術を海洋で運用するにあたり、低比抵抗である海水によって、電磁波が伝搬する際に磁気信号が減衰しやすくなり（特に高周波数の信号が影響を受けやすくなり）、深部の構造を把握するための感度が低下することから、環境省事業では、地磁気の 100 億分の 1 の磁場まで測定可能であり、低周波から高周波まで連続した高感度を有する超電導量子干渉素子（Superconducting Quantum Interference Device; SQUID）を磁気センサとして適用する電磁探査技術（時間領域電磁探査法; TEM 法）について、苫小牧沿岸域の海底下約 1,000 m に圧入された CO<sub>2</sub> の検知可能性の検討を行ってきた。

以下に、環境省事業における検討の流れと電磁探査を海底下モニタリング技術に適用する上での留意事項を示す。

## （３）海底下モニタリング技術への適用に係る検討の流れ

環境省事業における電磁探査技術の海底下モニタリング技術への適用に係る検討の流れについて、図 5.4-2 に示す。なお、環境省事業では検証試験段階にあったため、陸上の地熱探査等で活用されている既存の磁気センサを運用することを前提に、探査システムの構築を検討した。また、従来であれば、CO<sub>2</sub> 圧入前後で CCS サイトの磁場計測データ（以下、「実測データ」という。）を取得し、その差異（変化）をみることで CO<sub>2</sub> の圧入状況を推察するが、苫小牧沿岸域では CO<sub>2</sub> 圧入前の実測データが得られていないため、CO<sub>2</sub> 非圧入域の実測データを用いた電磁界シミュレーションにより、圧入前の地層の比抵抗構造を推定することが重要である。環境省事業では、電磁界シミュレーションの実測データとのヒストリーマッチングを重視し、電磁界シミュレーションの見直しを適宜進めている。



※：環境省「電磁探査による海洋生物への影響について」（2024年3月28日）  
<https://www.env.go.jp/content/000214067.pdf>

図 5. 4-2 電磁探査技術の海底下モニタリング技術への適用に係る検討の流れの例  
 （環境省事業における検討の流れ）

#### （４）推奨手法

苫小牧沿岸域では陸から 2～3 km 程と陸から近く、漁場が傍にある海域の海底下深部に CO<sub>2</sub> が圧入されており、また、圧入域が水深 20 m 程の浅海域であったことから、環境省事業では、以下の要領で検討を行った。CO<sub>2</sub> 圧入における条件が苫小牧沿岸域と同様であれば、苫小牧沿岸域と同じような要領で電磁探査（TEM 法）を適用できるとみられる。

- 海洋に直接電流を流す形にならないように、送信源（ラインソース）を陸上（海岸沿い）に設置して、陸上から電磁場を発信する設計とした。
- 海底に受信測点を配置し、各測点で磁気センサを船上から垂下させて海底面に設置する形での探査システムを設計した。
- 陸上からの送信源由来の電磁場が海洋環境、特に地元の水産物等に与える影響を事前に評価するため、電磁場が海洋生物に与える影響に関する文献を調査した。その上で、地元のステークホルダーである漁協の理解醸成のため、苫小牧の重要水産物であるウバガイを対象に電磁場暴露試験（室内試験）を実施し、ウバガイの成長や歩留まりに影響が出ないことを確認した。

#### （５）留意点

##### １）電磁界シミュレーションに係る解析モデル等の構築及び改良（更新）

苫小牧沿岸域では CO<sub>2</sub> 圧入前の実測データがないため、圧入前の状況を推定するには、電磁界シミュレーションによる実測データの再現が重要になる。精度の高い電磁界シミュレーション結果を得るにあたり、以下に留意する必要がある。

- 解析モデル（地層モデル、比抵抗構造モデル、数値モデル等）の構築にあたっては、一般公開されている国土地理院や日本水路協会等の地形データや、貯留サイト周辺の坑井について公開されている検層データ（地層区分、電気検層）などを利用する。また、弾性波探査等の物理探査による地下構造に係る知見があれば、同様に活用する。
- 貯留サイトには、圧入井や観測井等の坑井のケーシングの他、パイプライン等の鋼製構造物や電源ケーブル等が存在する場合があることから、解析モデルの構築の際は、これらの位置情報・素材・形状等を考慮する必要がある。
- 電磁界シミュレーション結果と実測データを比較検証し、当該シミュレーションで実測データを再現できるように解析モデルのパラメータを適宜更新、最適化する（ヒストリーマッチングを行う）。環境省事業では、実測データを基に電磁界シミュレーションの見直しを適宜行っており、地層の比抵抗構造設定や数値計算のための幾何モデルを更新している（表 5.4-1、図 5.4-3）。また、電磁界シミュレーションの見直しにより、実測データ（二次磁場の減衰曲線）とのフィッティングが向上している（図 5.4-4）。

表 5. 4-1 電磁界シミュレーションで設定する層区分例  
(電磁界シミュレーションの見直しで再設定した苦小牧沿岸域の層区分<sup>18)</sup>)

| モデル層 | 平均下面深度<br>(m) | 平均層厚<br>(m) | 地層区分          | 設定比抵抗値<br>( $\Omega \cdot m$ ) |
|------|---------------|-------------|---------------|--------------------------------|
| 海    | -60           | 30          |               | 0. 25                          |
| SB   | -180          | -120        | 第四系           | 13. 0                          |
| B1   | -490          | -310        | 第四系           | 70. 0                          |
| B2   | -940          | -450        | 鷗川層, 萌別層 (泥岩) | 9. 0                           |
| B3   | -1, 440       | -500        | 萌別層 (砂岩), 荷葉層 | 5. 0                           |
| B4   | -2, 330       | -890        | 平取+軽舞層+振老層    | 5. 0                           |
| B5   | -3, 240       | -910        | 滝ノ上層          | 1. 2                           |
| 基盤   | -6, 000       | -2, 760     | 基盤            | 1, 000. 0                      |

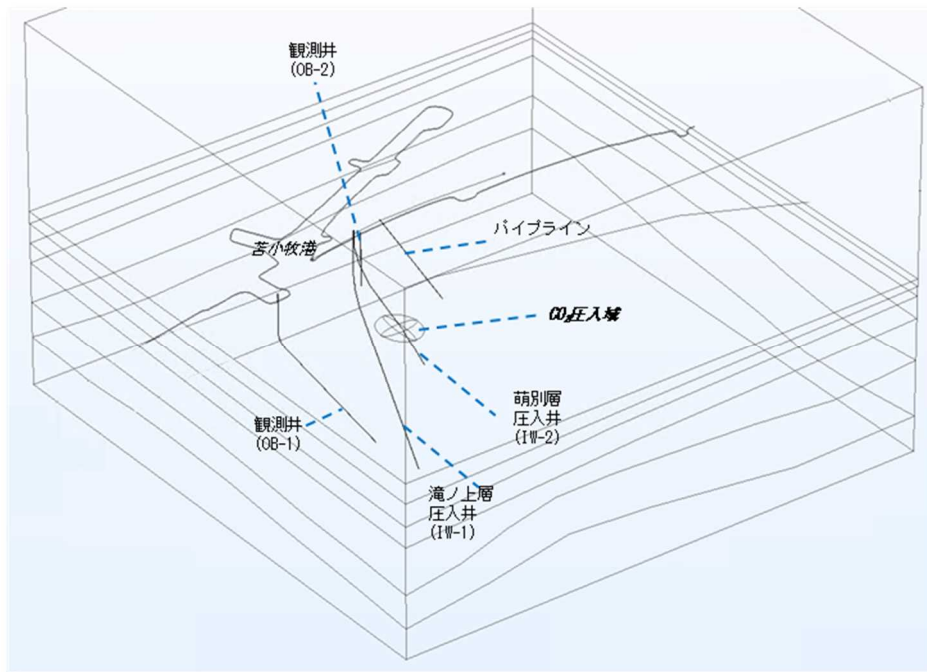


図 5. 4-3 電磁界シミュレーションで設定する数値計算のための幾何モデルの例  
(電磁界シミュレーションの見直しで更新した苦小牧沿岸域における幾何モデルの鳥瞰図<sup>19)</sup>)

<sup>18</sup> 2024 年度時点の更新による設定であり、今後も実測データを収集してばらつきを把握し、適宜ヒストリーマッチングを行う。

<sup>19</sup> 2024 年度時点の更新による設定であり、今後も実測データを収集してばらつきを把握し、適宜ヒストリーマッチングを行う。

C01 6/21

C01 10/3

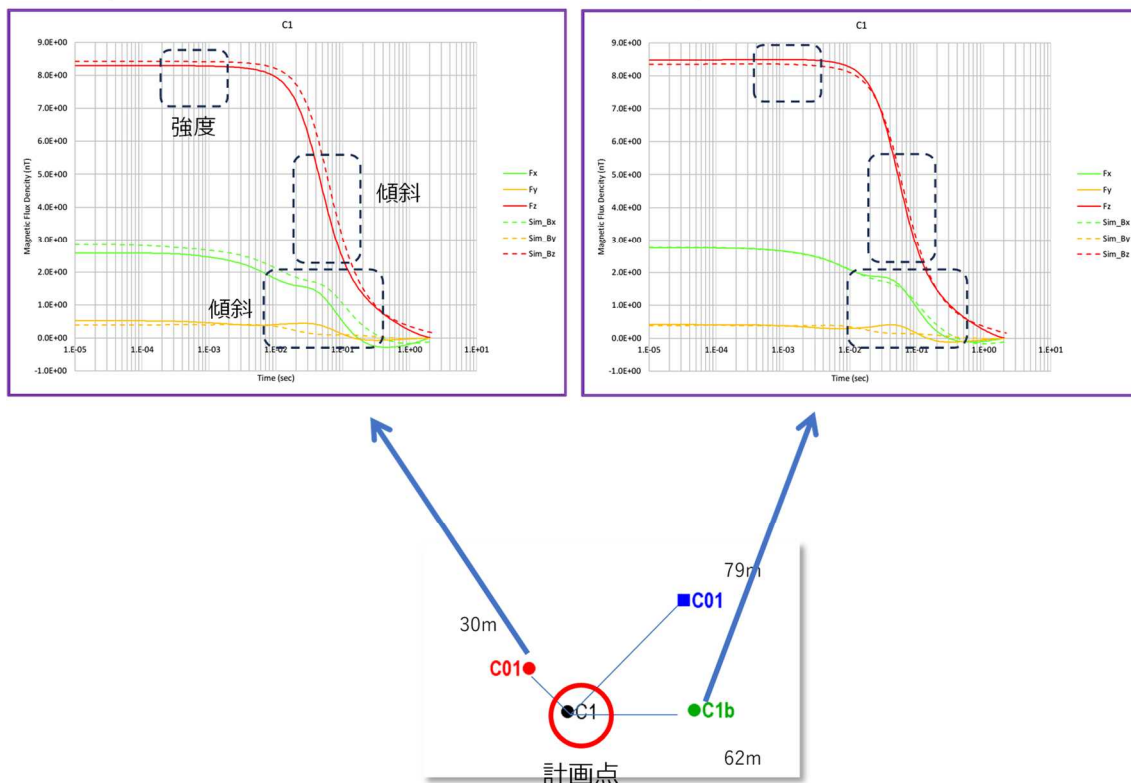


図 5.4-4 電磁界シミュレーションと実測データ（二次磁場の減衰曲線）の比較例  
 （環境省事業で計測した CO<sub>2</sub> 非圧入域の 1 測点（C01 測点）における実測データ（二次磁場）の減衰曲線と更新した電磁界シミュレーションの計算結果との比較（実線：実測データ、点線：電磁界シミュレーション結果））<sup>20</sup>

## 2) 受信システム（探査システム）の設計

環境省事業では水深 20 m 程の苫小牧沿岸域で、陸上の地熱探査や金属資源探査等で実績のある受信機を海底に設置するための探査システム（洋上無線転送方式探査システム；図 5.4-5）を設計した。水深 20 m 程の浅海域で磁気センサを海底に設置する場合には、以下に留意する必要がある。

- 海底に設置中（磁場計測中）に潮流による磁気センサの動揺を抑制するため、ある程度の重量を確保しながら、システム全体の重心を低く据えるような材質や形状を検討する必要がある。環境省事業では、SUS や FRP グレーチング等を用い、四角錐台の形状とした。
- 磁気センサを固定するシステム（SUS フレーム等）から誘導電流を発生させない設計を検討する必要がある。環境省事業では、SUS フレームの複数個所に切断面を設け、切断箇所に絶縁体（ゴム）を挟むことで、誘導電流の発生を抑制した。
- 船舶の動揺で海底に設置する磁気センサ（SUS フレーム）が転倒することや、船

<sup>20</sup> 6 月 21 日の計測結果（左図）に比べ、10 月 3 日の計測結果（右図）の方が、実測データと電磁界シミュレーション結果が良く合うようになった。

舶由来の磁場による磁気センサへのノイズを避ける設計を検討する必要がある。環境省事業では、受信機と船舶を切り離すこととして、受信部と通信ケーブルで繋がる磁気センサ制御用 PC を洋上ブイ内に格納し、船上の別 PC で磁気センサ制御用 PC を無線 LAN (Wi-Fi) で遠隔操作する設計とした (図 4.3-3)。

- 運用コストを抑えることを想定した設計を検討する必要がある。環境省事業では、漁船等の小型船での運用を想定した大きさの設計とした。

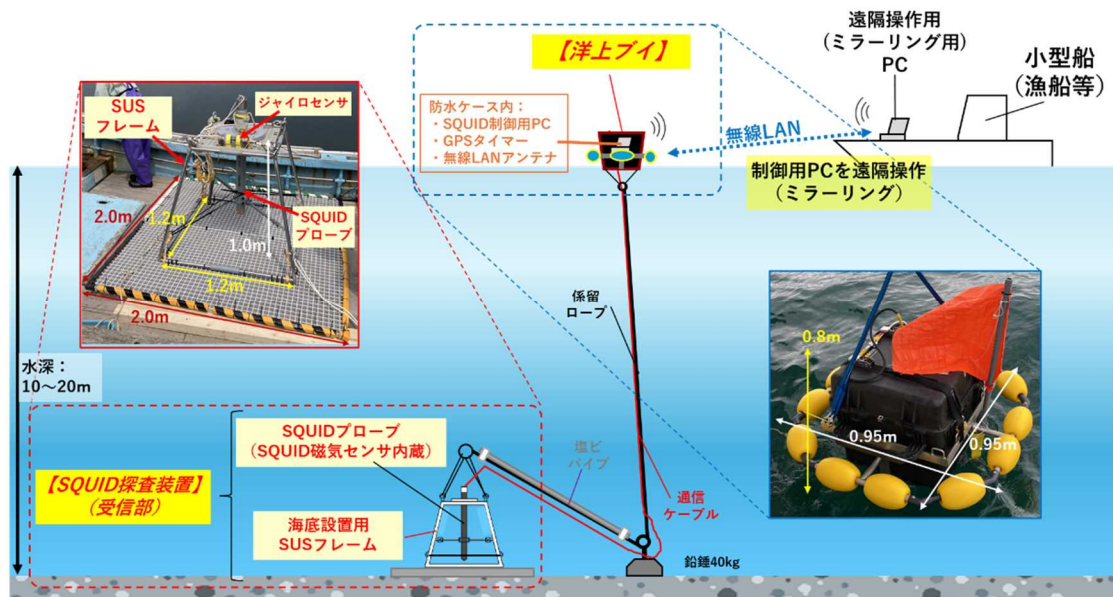


図 5.4-5 浅海域で使用する探査システムの例  
(環境省事業で設計した洋上無線転送方式探査システムの概要)

### 3) 現場海域における磁場計測

磁気センサを海底に設置する形で磁場計測を行うにあたり、以下に留意する必要がある。

- 磁気センサが船舶由来の磁場による干渉を受けないように、磁気センサと船舶との距離をある程度開ける必要がある。環境省事業では、上記探査システムを運用するにあたり、磁気センサ制御用 PC と船上の遠隔操作用 PC の間で無線 LAN (Wi-Fi) が通じる程度の距離 (100~200 m) を保ちながら、磁気センサとの距離を確保した。
- 磁気センサを海底に設置する探査システムを船上で運用するにあたり、受信部を持ち上げられる設備 (ユニック等) を搭載した船舶を利用する必要がある。また、船上での不慮の事故を回避するために、機材の取り回し方を事前に整理する必要がある。環境省事業では船上の各作業員の作業要領を整理して作業マニュアルを作成し、作業員に周知した。
- 実測データのばらつきや揺らぎの程度を把握するため、同一測点で複数回実測データを取得する必要がある。ただし、海上で船舶を同一測点 (同一座標上) に置くことはほぼ不可能であるため、磁気センサの設置位置の違いについて、どの程度許容するかを検討する必要がある。



- 1 日の計測回数は、送信電流の 1 周期あたりの通電時間や積算回数などの計測条件に依存する。より高品質な実測データを取得するためには、積算回数を増やすことが必要になるため、磁場計測の計画立案時は、必要な実測データ数を取得するための計測条件を念入りに検討する必要がある。

#### 4) CO<sub>2</sub> 検知に向けた解析手法

従来であれば、CO<sub>2</sub> 圧入前後で CCS サイトの実測データを取得し、その差異（変化）をみることで CO<sub>2</sub> の圧入状況（貯留層内の CO<sub>2</sub> の広がり）を推察する。ただし、苫小牧沿岸域では CO<sub>2</sub> 圧入前の実測データが存在しないため、環境省事業では、実測データのばらつきを把握し、現在の CO<sub>2</sub> 圧入域で CO<sub>2</sub> の圧入量が少ないとみられる測点と多いとみられる測点における実測データ（二次磁場の減衰曲線）の差分を取るることによる、磁場応答強度の差分処理手法による CO<sub>2</sub> 検知可能性を検証している（図 5.4-6）。この手法は、両者の差分が実測データのばらつきを上回るものであれば、CO<sub>2</sub> 圧入により差分が生じたと推定するものである。2024 年度時点では、CO<sub>2</sub> が圧入されている萌別層の比抵抗値は  $5 \Omega \cdot m$  と推定されている（表 5.4-1）。一方、CO<sub>2</sub> 飽和率と比抵抗値の関係を算出したところ、飽和率が 20% のときは、比抵抗値は  $10 \Omega \cdot m$  程度とみられるが、飽和率が上昇するに伴い比抵抗値も増加するため（図 5.4-7）、CO<sub>2</sub> の貯留範囲は周辺砂岩よりも高比抵抗であることが想定され、CO<sub>2</sub> を検出できる可能性があるとみられている。また、CO<sub>2</sub> 検知に適用できると考えられる解析手法として、X、Y、Z 方向の全ての磁場を統合して立体的な評価を可能とする 3D 解析手法が挙げられる。それぞれの解析手法に係る留意点を以下に示す。

- 電磁界シミュレーションの精度向上にあたり、実測データとのヒストリーマッチングが重要になるが、そのためには実測データの品質（安定性と再現性の担保）が重要となる。また、実測データのばらつきや揺らぎを把握することで、電磁界シミュレーション結果のばらつきを推定することが可能となり、磁場応答強度の差分処理による貯留層内の CO<sub>2</sub> の検知可能性が高まる。実測データのばらつきを把握するためには、CO<sub>2</sub> 非圧入域で繰り返し測定を実施して実測データを収集して整理することが必須となる。
- 現場海域で取得する実測データのばらつきや揺らぎを評価するにあたり、そのばらつき等が磁気センサの特性によるものか、環境ノイズによるものか、適切に評価することが重要である。
- 3D 解析手法を検討する上で、実測データを用いて逆解析による比抵抗構造を推定する場合、どのような測点配置で、どのような実測データを取得できれば、想定した比抵抗構造（CO<sub>2</sub> に相当する比抵抗異常）を得られるのか、事前に電磁界シミュレーション（フォワードシミュレーション）で検討することが重要である。さらに、電磁界シミュレーションで得られた電磁応答を人工データとした逆解析シミュレーションを実施し、必要な精度や情報量での逆解析が可能かを入念な数値実験で検証することも必要である。また、逆解析結果の妥当性の検証にあたっては、参照できる既存のデータ（苫小牧沿岸域であれば、大規模 CCS 実証試験における検層結果や弾性波探査結果等）との比較検証が重要である。加えて、電磁探査（物理探査）の



逆解析は、典型的な悪条件問題であり、推定された地下構造が真の構造とは異なっているとしても、実測データとの誤差（一般的には **RMS** 誤差など）が極小となることもある。また、3D 逆解析では計算における初期設定パラメータが複数存在し、解析者の判断により結果に相違も生じるため、フォワードシミュレーションを含め、解析過程全ての開示と慎重な解析の実行、そして評価が必要不可欠である。

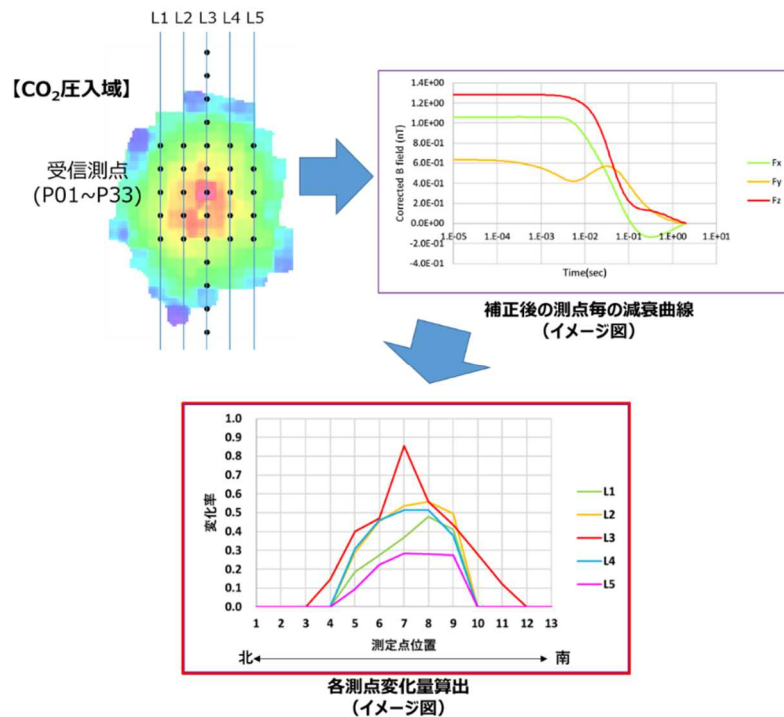


図 5.4-6 CO<sub>2</sub> 分布域検出の解析手法案のイメージ例（磁場応答強度の差分処理手法）

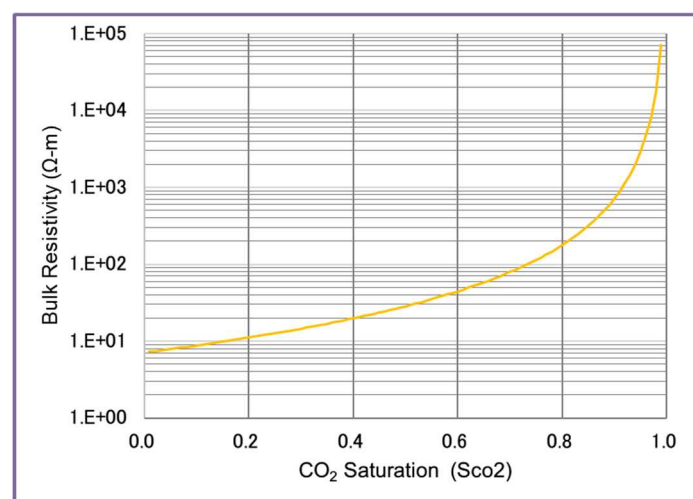


図 5.4-7 想定される CO<sub>2</sub> 飽和率と比抵抗の関係<sup>21</sup>

<sup>21</sup> 尾西他（2007）及び Y.Nakatsuka *et al.*(2009)に記載された、アーチーの式を用いた CO<sub>2</sub> 飽和率と比抵抗の関係より算出した。

## 5. 5 「潜在的海洋環境影響調査項目」における環境 DNA 技術による海洋生態系把握調査の検討

### (1) 「潜在的海洋環境影響調査項目」に係る記載内容

「特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄の許可の申請に関し必要な事項を定める件（環境省告示第 83 号（平成 19 年 9 月 19 日））」（以下、「告示」という。）では、以下のように記載されている。

### (3) 潜在的海洋環境影響調査項目

(1) の海底下廃棄をしようとする特定二酸化炭素ガスの特性並びに法第 18 条の 9 第 1 号及び海底下廃棄許可省令第 2 条に規定する海底下廃棄をする海域及び海底下廃棄の方法に関する基準にかんがみ、次に掲げるものその他必要な項目を潜在的海洋環境影響調査項目として選定し、海底下廃棄事前評価書に記載するものとする。

#### 1) 水環境及び海底環境

- ・ 全炭酸濃度等の二酸化炭素濃度の指標及び水素イオン濃度
- ・ 硫化水素その他の有害物質の濃度（海底下廃棄をしようとする特定二酸化炭素ガスの特性及び海底下廃棄をする海域の状況を勘案し必要と認められるものに限る。）

#### 2) 海洋生物

- ・ 浮遊生物の生息状況
- ・ 魚類等遊泳動物の生息状況
- ・ 海藻及び藻類の生育状況並びにさんご類の生息状況
- ・ 底生生物の生息状況

#### 3) 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
- ・ 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
- ・ 熱水生態系その他の特殊な生態系の状態

#### 4) 海洋の利用

- ・ 海洋レクリエーションの場としての利用状況
- ・ 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
- ・ 漁場としての利用状況
- ・ 主要な航路としての利用状況
- ・ 海底ケーブルの敷設、海底資源の探査又は掘削その他の海底の利用状況

告示では、海底下 CCS 事業の事前評価における潜在的海洋環境影響調査項目として、魚類等遊泳動物の生息状況や底生生物の生息状況が挙げられており、それらの評価項目として、魚類等遊泳動物の生息状況については魚類群集構造（特に底生魚類）が、底生生物の生息状況については底生生物の群集構造（メイオベントス、マクロベントス等）が推

奨されている<sup>22</sup>。

## （２）技術の概要

環境 DNA は、生物が体表の粘液や排泄物などを通して環境中（水、土壌、空気中など）に放出する DNA を指す。また、環境 DNA 技術とは、調査対象の環境（河川、湖、海など）から水や底質を採取し、その試料から DNA を抽出して PCR（ポリメラーゼ連鎖反応）を用いて特定の生物の DNA を増幅することによって、その生物がその環境に存在するかを確認する技術である。なお、その環境に当該生物がいるかを調査する手法として、生物を直接捕獲し、計数、分類する採捕調査があるが、この手法では、個体の詳細な情報や生態学的なデータが得られる代わりに、生物に負荷がかかることや専門性の高い分類・同定技術が必要で調査費用が高いことが課題となっている。一方、環境 DNA 技術には、以下の利点があげられる<sup>23</sup>。

- 捕獲の必要がないため、生物を傷つけない。
- 捕獲や観察では見つけにくい生物が確認できる。
- 調査員は分類同定に関する専門知識が不要である。
- 調査員の経験や技術により、結果が大きくばらつく可能性が小さい。  
（現場の環境によっては、一般市民や学生でも調査が可能である）
- 現場での作業量が少ないため、広域・多測点・高頻度な調査に展開しやすい。

特に、広域・多測点・高頻度な調査に展開しやすい、という利点から、環境 DNA 技術は CCS 事業の事前評価に係る海洋環境影響調査や、CCS 事業の実施（CO<sub>2</sub> 圧入中や圧入後）による海洋生物への影響を評価するための手法として適しているとみられる。

環境 DNA 技術を用いるにあたっては、「網羅的解析」と「種特異的検出」の 2 つのアプローチがある。

網羅的解析は、環境中に存在する多様な生物種を一度に把握するための手法である。サンプルから抽出した DNA を次世代シーケンシング技術で解析し、広範な生物種の存在を確認する。この方法は、生態系全体の健康状態や生物多様性を評価するのに適している。網羅的解析では、得られたシーケンスデータを既存のリファレンスデータベースと比較することで、生物種を特定し、生物相を把握する。データ量が膨大であるため、効果的なバイオインフォマティクスツールを活用し、海域全体の生物多様性を把握し、長期的な変化を追跡することが可能である。

種特異的検出は、特定の生物種やグループに焦点を当てる手法である。例えば、苫小牧沿岸域の水産資源として重要なウバガイのような特定種の存在や分布を詳細にモニタリングする場合に適している。この方法では、ターゲットとする生物種の DNA 配列に特異的なプライマーを使用し、PCR を利用して DNA を増幅する。この技術は、特定種の存在を高感度で検出できるため、特定種の生息状況や個体数の変動をモニタリングするの

<sup>22</sup> 特定二酸化炭素ガスの海底下廃棄の許可の申請に係る指針（改訂版）（令和 3 年 9 月）より。

<sup>23</sup> 農業水路系における生物多様性保全のための技法と留意事項（令和 4 年 7 月 農林水産省 農村振興局 鳥獣対策・農村環境課）p.114 より抜粋。

に効果的である。ただし、種特異的検出を行う際には、ターゲットとする DNA の検出精度を高めるために、プライマー設計が重要である。

各解析のフローを図 5.5-1 に示す。

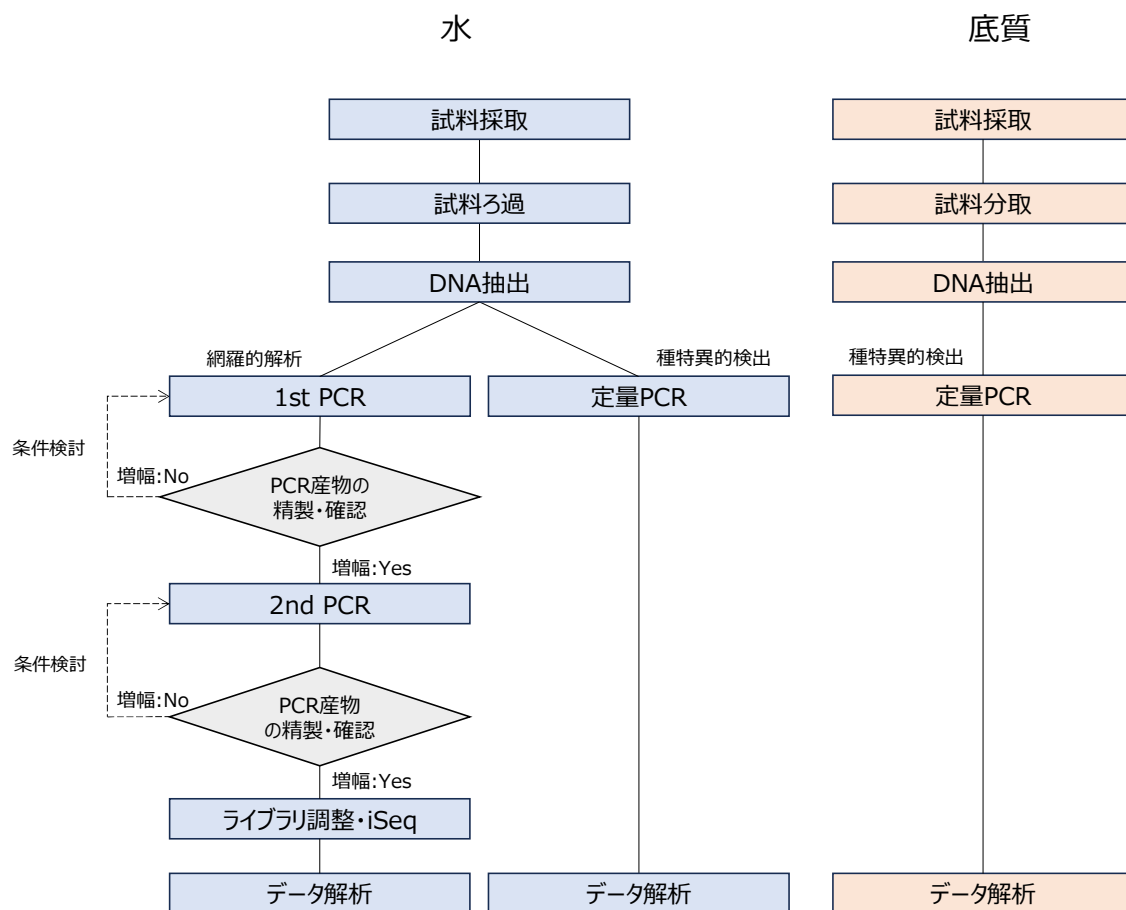


図 5.5-1 解析フロー図

### (3) 推奨方法

2024 年度に本環境省事業で実施した環境 DNA 技術に係る苫小牧沖での検証試験（以下、「環境 DNA 技術検証試験」という。）を踏まえて、以下に、環境 DNA 技術を海底下 CCS 事業の事前評価における海洋環境影響調査等に適用する上での推奨方法を記述する。

環境 DNA 学会の発行する環境 DNA 調査・実験マニュアルに準拠することが望ましいが、本マニュアルは河川調査を想定して作成されている。そのため、海域での適用例として使用機材や使用試薬についても詳細に記載する。

#### 1) 試料採取方法

##### ① 採水

採水は、ニスキン採水器を用い、表層（海底面下 0.5 m）、底層（海底直上 2.0 m）の 2 層で採取する。表層、底層の順に採水を行うことにより、海水の乱れ、層間でのコンタミネーションを予防する。試料は各層で 5L を 2 本ずつ採取する。採水作業における

コンタミネーションがないことを担保するため、調査測点の作業終了時に精製水を試料瓶に移すことによって、フィールドネガティブコントロール（以下、「FNC」とする）を採取する。

採水試料及びFNCには、塩化ベンザルコニウム（benzalkonium chloride; BAC）を終濃度 0.01 v/v%となるように添加し、DNA を分解する微生物を不活性化する。

採水時の水中環境の基礎情報は Rinko-Profiler (JFE アドバンテック社) 等を用いて水温、塩分等の鉛直プロファイルを得る。

## ② 採泥

スミス・マッキンタイヤ型採泥器で底泥を各調査測点で 3 本の試料を採取する。各試料について分析を行い、各調査測点の結果とする。分析までは-80℃で冷凍保存とする。

## ③ DNA 抽出

### ●採水試料

試料はカートリッジ式フィルターあるいはグラスファイバーフィルターを使用し、ろ過を行う。ろ過フィルターは次の段階まで-20℃以下で冷凍保存する。

ろ過フィルターについては、DNeasy Blood & Tissue (Qiagen 社) を用いて、Fukazawa *et al.* (2023)<sup>24</sup>の ATL Method に従い、DNA 抽出を行う。抽出 DNA は、次の段階まで-20℃以下で保管する。

### ●採泥試料

試料は Extrap soil DNA kit Plus Ver.2 を用いて、製品付属マニュアルに従って DNA 抽出を行う。抽出 DNA は、次の段階まで-20℃以下で保管する。

## 2) 解析手法

### ① 網羅的解析

試料からの抽出 DNA に対し、MiFish プライマーを用いて 1st PCR を行う。1st PCR 後、SPRIselect, BECKMAN COULTER を用いて、製品付属マニュアルに従って目的長の 1st PCR 産物を精製し、精製後の 1st PCR 産物を鋳型として、2nd PCR によって各試料にそれぞれ異なる組み合わせのインデックス配列を付加している。

インデックス配列の付加（2nd PCR）後、SPRIselect を用いて、製品付属マニュアルに従って 2nd PCR 産物の精製を実施する。2nd PCR 産物の濃度を揃え、E-Gel システム (ThermoFisher Scientific 社) に供することで、目的の遺伝子を回収する。E-Gel システムによって回収した 2nd PCR 産物をライブラリとする。

E-Gel の電気泳動の結果、最も不純物（目的産物長以外の産物）が少なく、高濃度であったライブラリを使用し、濃度調製の後次世代シーケンサー iSeq100 (Illumina 社) に供し、遺伝子配列を決定する。

---

<sup>24</sup> Fukazawa, T., Shirakura, H., Nishizawa, N., Nagata, H., Kameda, Y., & Doi, H. (2023). Environmental DNA extraction method from water for a high and consistent DNA yield. *Environmental DNA*, 5(4), 627-633.

得られた塩基配列 (Fastq 形式) を Miya *et al.* (2020)<sup>25</sup>にて公開されている MiFish パイプラインに供し、ASV (Amplicon sequence variant) を作成し取得した各遺伝子配列の生物種を決定する。生物種を決定する際には NCBI (National Center for Biotechnology Information : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>) の登録情報を使用して精査する。既存の塩基配列との一致率が 98.5%未満の配列については、属止めとして精査を行う。また、Fish Base (<https://fishbase.se/>) による生息域 (海水・汽水・淡水)・生活環 (遡河／降海) の分類も合わせて行う。なお、生物種のうち、ヒトや家畜等の標的外の哺乳類等は以降の解析から除外する。データベースを参照した際には、データベースの参照日時を記録しておく。

得られる解析結果については、可能であれば、同一の調査対象海域における環境 DNA 技術以外の従来法による調査結果との比較を行い、解析結果の妥当性を評価することが望ましい。

なお、これまでの環境省事業における苫小牧沖でのモニタリング調査では、海洋生態系把握調査として、ROV に搭載した水中カメラによるメガベントス調査 (以下、「ROV 調査」という。) を実施している。2024 年度の環境省事業では、ROV 調査で観察された魚類と、環境 DNA 技術検証試験において底層で観測された魚類の科レベルにおける比較を行っており、その結果を本検証試験結果の妥当性検証に係る一例として、表 5.5-1 に示す。ROV 調査で観察された魚類の多くが環境 DNA 技術でも検出され、環境 DNA 調査のみで検出された魚類も多く存在した。調査期間が異なることや ROV 調査がメガベントスを対象とした調査であること (遊泳性の魚類等は対象としていなかったこと) を考慮する必要があるが、環境 DNA 技術における検証試験結果は概ね妥当であると考えられた。

---

<sup>25</sup> Miya, M., Gotoh, R. O., & Sado, T. (2020). MiFish metabarcoding: a high-throughput approach for simultaneous detection of multiple fish species from environmental DNA and other samples. *Fisheries Science*, 86(6), 939-970.

表 5.5-1 網羅的解析によって検出された魚類（科レベル）と ROV 調査結果との比較例  
 （苫小牧沖での網羅的解析結果と過年度苫小牧沖モニタリング調査の ROV 調査結果との比較）

| 科        | 季節 | 観測手法 | St. 1 | St. 2 | St. 3 | St. 4 | St. 5 | St. 6 | St. 7 | St. 8 | St. 9 |
|----------|----|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| アイナメ科    | 夏  | eDNA | ○     |       | ○     | ○     |       |       | ○     |       |       |
|          | 秋  | ROV  | ○     |       |       |       |       |       |       |       |       |
|          | 秋  | eDNA | ○     | ○     |       | ○     |       |       | ○     |       |       |
| アジ科      | 夏  | eDNA | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     |
|          | 秋  | eDNA |       |       | ○     |       | ○     |       | ○     |       |       |
| イカナゴ科    | 夏  | eDNA | ○     |       |       |       |       |       |       |       |       |
|          | 秋  | eDNA |       |       | ○     |       |       |       |       |       |       |
| カジカ科     | 春  | ROV  | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     |
|          | 春  | eDNA |       |       |       | ○     |       | ○     | ○     | ○     | ○     |
|          | 夏  | ROV  |       | ○     |       | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     |
|          | 夏  | eDNA |       |       |       | ○     |       |       | ○     |       |       |
|          | 秋  | ROV  | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     |
|          | 秋  | eDNA | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     |       | ○     | ○     | ○     |
|          | 秋  | eDNA |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| カタクチイワシ科 | 春  | eDNA | ○     | ○     |       |       |       | ○     |       |       |       |
|          | 夏  | eDNA | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     |
|          | 秋  | eDNA | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     |
| カラスザメ科   | 秋  | eDNA |       |       | ○     |       |       |       |       |       |       |
| カレイ科     | 春  | ROV  | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     |
|          | 春  | eDNA |       | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     |
|          | 夏  | ROV  | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     |
|          | 夏  | eDNA | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     |
|          | 秋  | ROV  | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     |
|          | 秋  | eDNA | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     |
|          | 秋  | eDNA |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| カワハギ科    | 夏  | ROV  | ○     |       |       |       |       |       |       |       |       |
|          | 夏  | eDNA | ○     |       |       |       |       |       |       |       |       |
| ガンギエイ科   | 春  | eDNA |       |       |       | ○     |       |       |       |       |       |
|          | 夏  | eDNA |       |       |       |       | ○     |       |       |       | ○     |
|          | 秋  | ROV  |       |       |       |       | ○     |       |       |       |       |
|          | 秋  | eDNA |       |       | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     |
| キュウリウオ科  | 秋  | eDNA |       |       |       |       |       | ○     |       |       |       |
| クサウオ科    | 春  | ROV  |       | ○     |       |       |       |       |       |       |       |
|          | 夏  | eDNA |       |       |       |       |       | ○     |       |       |       |
|          | 秋  | eDNA |       |       |       | ○     |       |       |       |       |       |
| ケムシカジカ科  | 春  | ROV  |       | ○     |       | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     | ○     |
|          | 春  | eDNA |       |       |       |       |       | ○     |       |       |       |
|          | 夏  | eDNA |       |       |       |       | ○     |       |       |       |       |
|          | 秋  | eDNA |       | ○     | ○     |       | ○     | ○     | ○     |       |       |
| ゲンゲ科     | 春  | ROV  |       |       |       |       |       |       | ○     | ○     |       |
|          | 春  | eDNA |       |       |       |       |       |       | ○     |       |       |
|          | 夏  | eDNA |       |       |       | ○     |       |       | ○     |       |       |
|          | 秋  | ROV  |       |       |       |       | ○     |       |       |       | ○     |
|          | 秋  | eDNA |       |       |       | ○     |       |       |       |       |       |
| コイ科      | 夏  | eDNA |       | ○     | ○     |       |       |       |       |       |       |

## ② 種特異的検出

試料からの抽出 DNA に対し、目的とする生物種の特異のプライマーを用い、リアルタイム PCR 装置を使用して定量 PCR を実施する。蛍光プローブを用いて、段階希釈した既知濃度の DNA と試料 DNA を同一条件下で反応させることで検量線を作成し、試料中の目的 DNA 量の定量を行う。ある調査測点で目的 DNA が検出されれば目的生物が存在したことが示唆され、複数の調査測点で目的 DNA が検出された場合は、濃度の違いから相対的な分布情報を得ることができる可能性がある。

論文等の知見で目的生物のプライマー情報がない場合は、プライマーの設計を行う必要がある。設計されるプライマーは、目的とする生物種の DNA のみに特異的に反応し、その増幅を行う必要がある。また、近縁種が存在すると遺伝的に類似しているためプライマーが増幅反応を示し、結果が過大評価となる可能性がある。過大評価を防ぐた

めには、近縁種の DNA 情報を取得することが必要である。DNA データベースに登録されていない近縁種に関しては、該当する近縁種を収集し、その DNA 抽出を行い、設計されたプライマーが近縁種の DNA を増幅しないことを確認することによって、目的とする生物種のプライマーの種特異性を検証する。

2024 年度の環境省事業では、苫小牧の重要水産種であるウバガイについて種特異的検出を検証している。その解析結果を種特異的検出の一例として図 5.5-2 に示す。

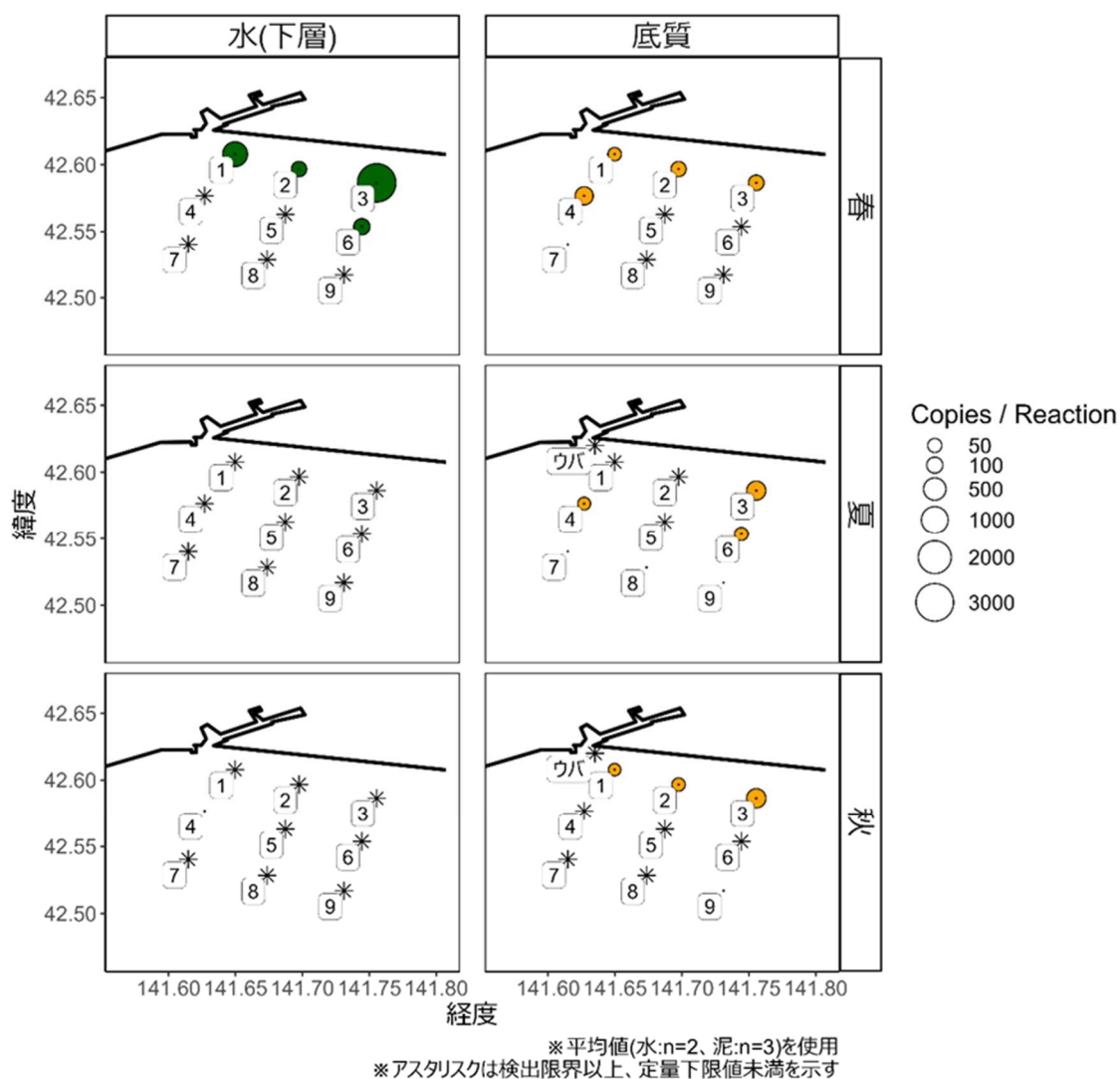


図 5.5-2 特異的検出による調査結果例（苫小牧沖のウバガイに係る調査結果）



#### (4) 留意点

環境 DNA 技術を扱うにあたり、以下を留意する必要がある。

- 環境 DNA 学会が発行する環境 DNA 調査・実験マニュアルに準拠することが望ましい。
- 対象とする調査海域 (CCS サイト等) の自然変動を正しく把握するためには、継続的なデータの蓄積が重要である。
- 沿岸域で網羅的解析を行う際は、河川水の影響による偽陽性の可能性について考慮する必要がある。
- 特異的検出を行う際は、採泥測点の底質性状の違いによる DNA 吸着性能の差や、貝殻片や死骸などの生体に由来しない遺伝子の影響による偽陽性の可能性を考慮する必要がある。
- 環境 DNA 調査結果が反映できる空間範囲の検討には、測点配置や試料採取頻度を留意する必要がある。
- マクロベントスやメイオベントスなど底層や底質に存在する炭酸カルシウムの殻を持つ生物は、CO<sub>2</sub>漏出による底質の間隙水の pH 低下の影響を受けやすいとされている。そのため、海底下 CCS 事業の事前評価に係る海洋環境影響調査等では、これらの生物をいかに環境 DNA で検出、または定量するかについて技術的な検討が必要である。
- 環境 DNA 調査は、生物種の「在・不在」の検出を基本としており、従来の生物を直接捕獲し、計数、分類する採捕調査方法とは異なっていることから、CCS サイトにおいて最適な評価方法や適用方法について、検討する必要がある。

## 5. 6 内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)「海洋安全保障プラットフォーム構築」で開発された環境モニタリング技術の適用検討

### (1)「監視計画のあり方」における記載内容

4. 通常時監視確認調査、4-2. 現地概況調査、②センサ調査として以下のとおり記載されている。

#### 4-2. 現地概況調査

##### ②センサ調査

通常時監視において移行基準を超過した地点の周辺（漏出点が存在している可能性がある海域）において、漏出懸念点の存在範囲を絞り込むことを目的として、pH または  $p\text{CO}_2$  を測定する化学センサを用いた面的な調査を行う。

事前評価におけるシミュレーション結果によると、最も影響範囲が広いケース（1%漏出-100m）においても、 $\Delta p\text{CO}_2 > 100 \mu\text{atm}$ （ $\Delta \text{pH} > 0.1$ ）となる範囲は漏出点から半径 100m 以内である。このため、調査範囲は、海流による高  $\text{CO}_2$  水塊の移動の可能性も考慮して、通常時監視において移行基準を超過した地点を中心に  $1\text{km} \times 1\text{km}$  程度の範囲とするのが望ましい。

観測は、センサを直線状に曳航して行う。観測線の間隔は 100m 以内とし、センサは海底近傍（海底上 2m）を曳航する。

センサを曳航するプラットフォームとしては、船舶をはじめとして、AUV、ROV、シーグライダーなどが考えられる。化学センサは、pH センサまたは  $p\text{CO}_2$  センサを用いる。観測しようとする水深で適切に曳航できたかどうかを確認するために、CTD（水温、塩分、圧力）を同時に用いる。なお、pH は、 $\text{CO}_2$  以外の要因によって変動する可能性もあるため、直接的に  $\text{CO}_2$  のデータを観測できる  $p\text{CO}_2$  センサを用いることが望ましい。また、化学センサを使って長期間にわたり正確な値を得るためには、ドリフト補正や校正等が必要であるが、本調査のように pH または  $p\text{CO}_2$  の不均一な分布を検出することが目的であれば、これらのセンサは十分実用可能なことがこれまでの知見から確認されている。ただし、pH センサとして一般的なガラス電極の pH センサを用いる場合には、水温及び圧力（水深）の影響により出力値が変化しやすいため、留意する必要がある。

得られた観測データをマッピングし、漏出が懸念される pH または  $p\text{CO}_2$  の不均一な分布（pH の低下または  $p\text{CO}_2$  の増加）の有無を確認する。

「監視計画のあり方」では、現地概況調査及び現地詳細調査において移行基準を超過した測点を中心に  $1\text{km} \times 1\text{km}$  の範囲を対象にセンサ調査を実施することとされている。

(2) 技術の概要

SIP 海洋プログラムでは、海洋資源開発での環境モニタリングの手法開発及び自律型無人探査機（AUV）と海底観測プラットフォームによる広域モニタリングのシステム開発を進めている。開発している海洋ロボティクス技術による広域モニタリングシステムの技術展開として、地球温暖化により変動する海洋環境を高精度に観測する「海の見える化」にも取り組んでいる。技術の社会実装として、沿岸環境でのモニタリングへの適用を検討しており、2024 年度に環境省と共同で苫小牧沖での CCS 事業の海域において環境モニタリングの試験調査を実施している。

(3) 推奨方法

試験調査では、ホバリング型 AUV「ほばりん」と海底観測装置「江戸っ子 1 号 COEDO」を組み合わせたシステムを使用した（図 5.6-1 及び図 5.6-2）。観測では、音響測位装置を装着した「江戸っ子 1 号」を海底に配置し、AUV は音響信号により規定した空間を航行できるようにした（図 5.6-3）。

AUV は、音響測位により観測範囲を高精度で特定し、計測センサにより即時的に環境モニタリングができる（図 5.6-4）。「ほばりん」の調査結果の例（濁度）は図 5.6-5 に示した。

海底に配置した「江戸っ子 1 号 COEDO」は定点観測において、ビデオ映像、水温、塩分、pH などの環境パラメータを継続的に記録する。この時系列のデータと AUV 収集した環境データを利用することで海洋環境の変動を空間と時間の単位で解析できる。

環境 DNA の自動採取装置は、遺伝子データによる海洋生物の多様性の動態調査に利用することができる。海底に設置して潮汐の時間帯に合わせたスケジュールで採取した結果では、潮流条件に伴う生物相の変化を捉えることができた。従来法ではデータ収集が難しい生物群集の動態調査に有用な手法である。

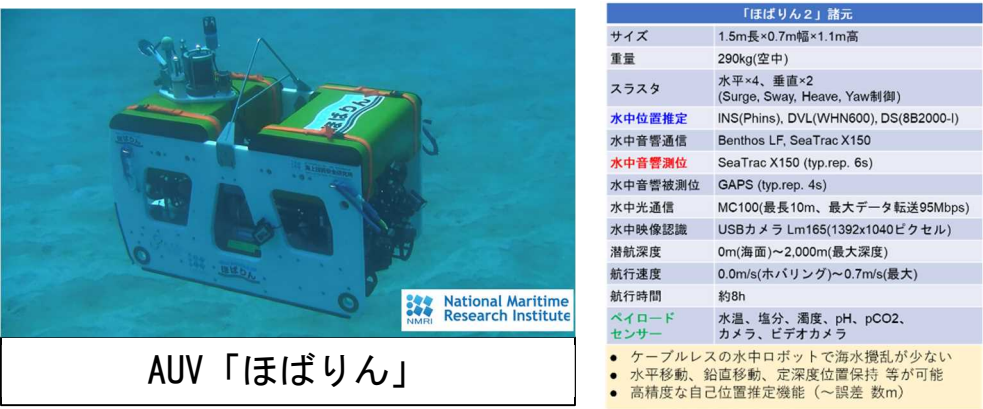


図 5.6-1 AUV「ほばりん」と海底観測装置「江戸っ子 1 号 COEDO」

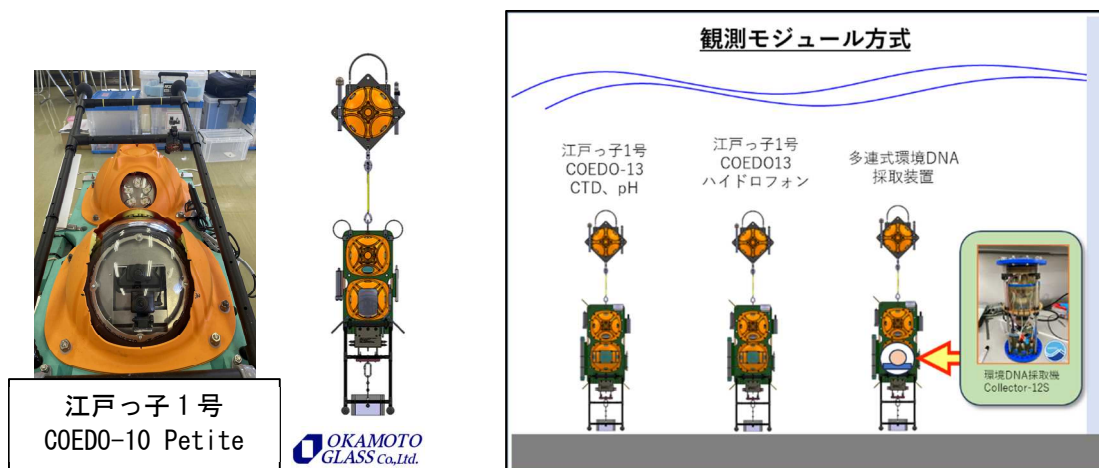


図 5.6-2 海底観測装置「江戸っ子 1 号 COEDO」

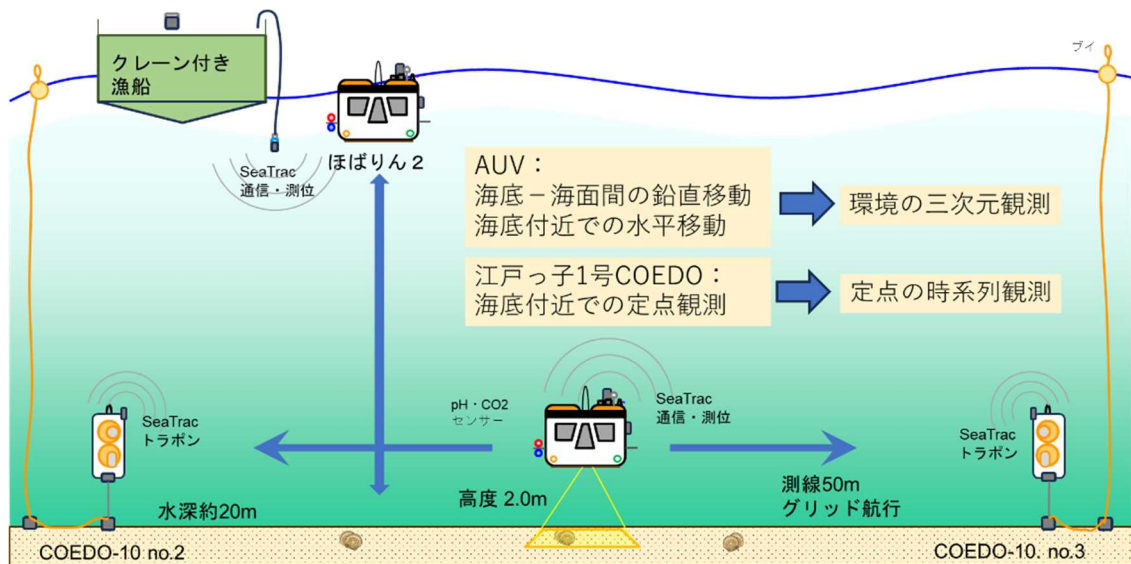
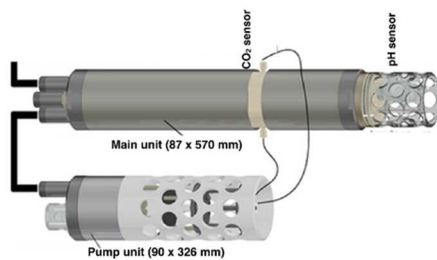


図 5.6-3 AUV「ほばりん」と海底観測装置「江戸っ子 1 号 COEDO」設置例

### pH/CO<sub>2</sub> ハイブリッドセンサ



| 項目      | pH                                         | CO <sub>2</sub>          |
|---------|--------------------------------------------|--------------------------|
| 測定範囲    | 6.0～8.3                                    | 300～2000 $\mu$ atm       |
| 精度（分解能） | 0.01（0.001）                                | 3 $\mu$ atm（1 $\mu$ atm） |
| 分析方法    | ガラス電極                                      | 比色法                      |
| 応答速度    | 20秒以内<br>（90%応答，<br>25℃）                   | 3分以内<br>（90%応答）          |
| 測定頻度    | 1秒                                         |                          |
| 補助測定項目  | 温度0～40℃（分解能0.01℃）                          |                          |
| 大きさ     | 制御センサ部（直径87mm×570mm）<br>ポンプ部（直径90mm×326mm） |                          |
| 重さ      | 5.8kg（空中），2.0kg（水中）                        |                          |
| 耐圧水深    | 3,000m                                     |                          |

\* AUV「ほばりん」後部に装着

### 自動環境DNA採取装置



### 6連式自動採取装置

設定した日時に採水しフィルタ上に環境DNA試料を捕集して保存試薬を添加する。1年間の海中設置における作動実績がある。

図 5. 6-4 モニタリングに使用した装置例

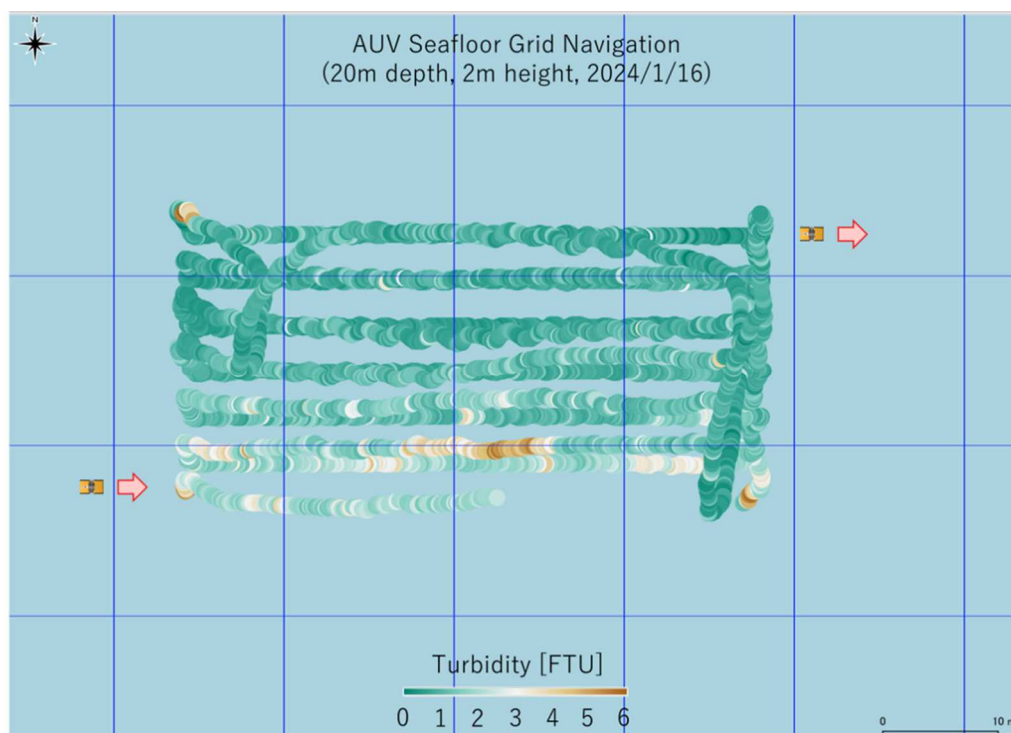


図 5. 6-5 「ほばりん」による観測結果の例（苫小牧沖における濁度）

#### (4) 留意点

- AUV、海底観測装置、環境 DNA 採取装置は自動化されているが、正確なデータを取得するためには、調査目的に応じた設定と準備が不可欠である。
- 搭載するセンサ類による CO<sub>2</sub> 濃度や pH 等の測定にはセンサの特性や感度に応じた校正とデータ処理が必要である。また漏出した CO<sub>2</sub> ガスを検知するためには海底面に接近する必要がある、AUV の航行高度やスラスターによる底泥の巻き上げなどの影響も考慮しなければならない。定点観測に搭載するセンサでは長期間にわたり安定した測定感度が得られる機器を使用する。
- 調査海域での潮流や海底地形などは、AUV の航行に影響するため、事前確認が必要である。また、AUV が航行ルートから外れた場合の対処法を事前に決めておく必要がある。
- 環境 DNA の自動採取では、調査目的と対象の生物群集の特性に応じた採取プログラムを設定する。また遺伝子解析の結果は、カメラ観察の結果や海域での漁獲状況のデータと比較して精度の検証をするべきである。

海洋環境保全上適正な海底下CCS 実施確保のための総合検討会検討員

| 検討会委員（五十音順、敬称略） |                                                 |  |
|-----------------|-------------------------------------------------|--|
| 窪田　ひろみ          | （一財）電力中央研究所　サステナブルシステム研究本部　気象・流体科学研究部門<br>上席研究員 |  |
| 佐藤　徹            | 東京大学　大学院新領域創成科学研究科　教授                           |  |
| 白山　義久           | 京都大学名誉教授                                        |  |
| 鈴村　昌弘           | （国研）産業技術総合研究所　エネルギー環境領域　環境創生研究部門　研究部門付          |  |
| 野尻　幸宏           | （国研）国立環境研究所　客員研究員                               |  |
| 分科会委員（五十音順、敬称略） |                                                 |  |
| 【海中】            |                                                 |  |
| 笠井　亮秀           | 北海道大学大学院　水産科学研究院　海洋生物資源科学部門　教授                  |  |
| 木村　里子           | 京都大学　東南アジア地域研究研究所　環境共生研究部門　准教授                  |  |
| 下島　公紀           | 東京海洋大学　学術研究院　教授                                 |  |
| 中野　善之           | （国研）海洋研究開発機構　技術開発部　観測技術研究開発グループ　副主任研究員          |  |
| 山中　裕樹           | 龍谷大学　先端理工学部　環境生態工学課程　教授                         |  |
| 【地中】            |                                                 |  |
| 上田　匠            | 早稲田大学　理工学術院　創造理工学部　教授                           |  |
| 海江田　秀志          | （一財）電力中央研究所名誉研究アドバイザー                           |  |
| 笠谷　貴史           | （国研）海洋研究開発機構スマートセンシング技術開発プロジェクト長                |  |
| 古井　健二           | 早稲田大学　理工学術院　創造理工学部　教授                           |  |

担当者等連絡先

部 署 名：環境省 水・大気環境局海洋環境課

T E L：03-5521-9023（直 通）

担当者名：課長補佐 堀野上 貴 章（内線：25523）