

講演11

科学的根拠に基づいた海洋モニタリング実証に向けて

～CO2の海洋環境モニタリング手法に関する検討～

佐藤 徹（東京大学）

鈴木勇也、三木周、市川好貴（日本NUS）

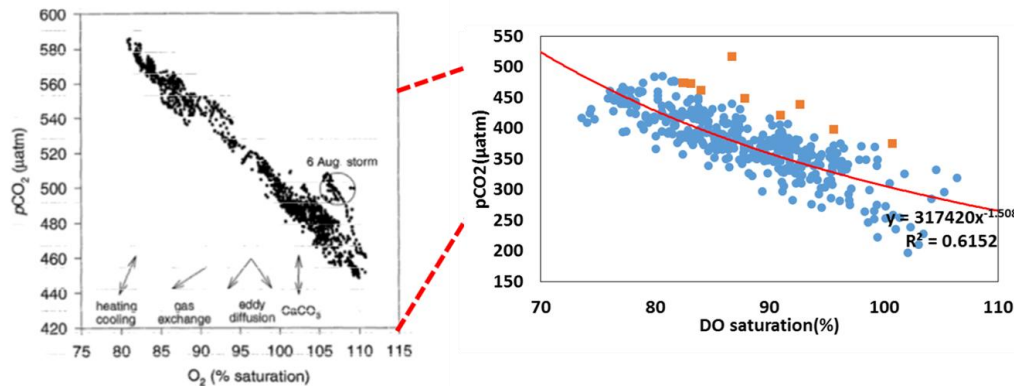
鶴島修夫（産総研）

CCSの法規制

- **ロンドン条約**96年議定書発効（2004年発効、日本の批准は2005年）
 - 監視および環境影響評価のためのモニタリング計画が明確に定められていること
- **海洋汚染防止法**（2005年）
 - 事業者は環境大臣の許可
 - 海域のモニタリングを義務化
 - 通常時、懸念時、異常時の段階的対応
- **CCS事業法**（2024年5月公布、2026年5月施行）
 - 貯留層の温度・圧力等のモニタリング義務
 - 貯留したCO₂の挙動が安定していることを条件に、モニタリング業務をJOGMECに移管可
 - **海洋汚染防止法**におけるCO₂の海底下廃棄に係る許可制度は、**本法律に一元化**した上で、海洋環境の保全の観点から必要な対応について**環境大臣が共管**

苫小牧で何が起こったか

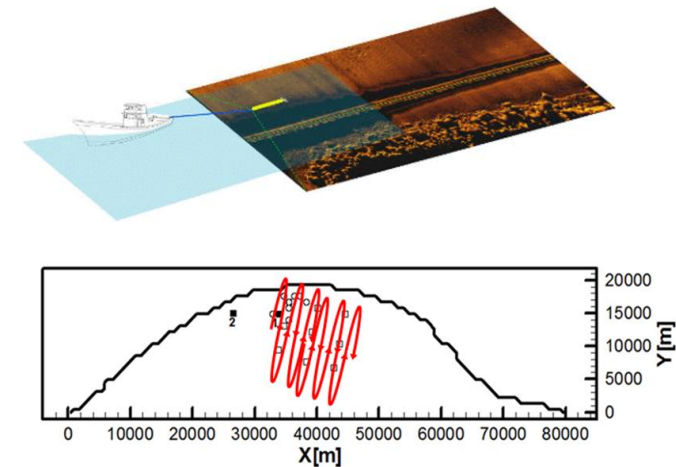
- 2016年4月からの圧入開始直後の5月に高濃度CO₂を検出
 - 2016年5月～2017年1月までの9か月間圧入停止
 - 同時期の環境省海洋環境室（当時）の調査では高濃度は検出されなかった
 - 2016年8月～10月再調査実施（「懸念時」には移行せず）
 - ・ 追加の採水検査
 - ・ サイドスキャンソナーによる気泡調査
 - ・ 炭素同位体



海洋汚染防止法では、pCO₂とDO飽和度の相関に対して近似曲線をひき、95%予測区間上限以上ズレた値を検出したら再調査としている

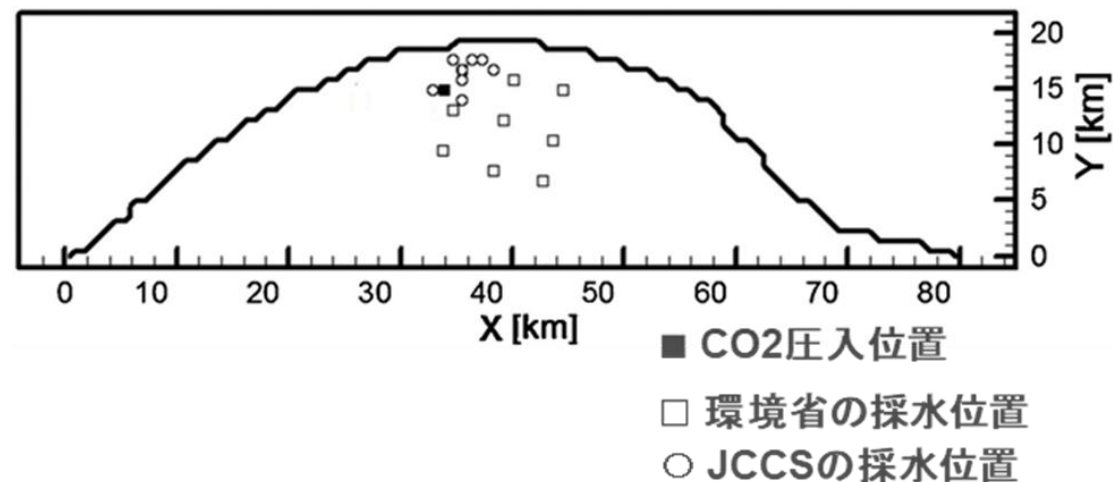


再調査



海洋モニタリングの意義

- あらかじめ設定した数点の観測点で、年数回の採水観測で何がわかるか？
 - 苫小牧沖の観測位置の設定には科学的根拠はない
- そもそも、どの程度の規模の漏出を検知しようとしているか？
 - どんな小さな漏出でも必ず発見するということは不可能



観測点の最適(最小コスト)配置とはどうあるべきか？

今海域モニタリングに求められていること

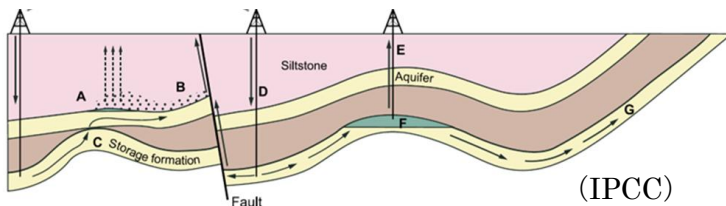
■ 科学的根拠に基づいた、より高精度の観測方法

➤ 現実的な海洋漏出経路を考慮した観測方法

■ 高効率で低コストの観測方法

➤ 最小コストで採水分析以外の方法

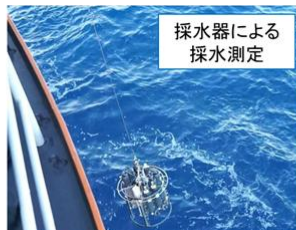
CO₂の潜在的漏洩経路



(IPCC)

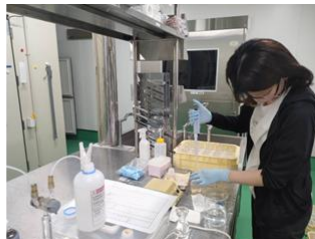
A	CO ₂ のガス圧が遮蔽層の毛管圧を超えて漏洩/漏出	
B	気体CO ₂ が断層を通して漏洩/漏出	→空間定期監視
C	遮蔽層の局所的な不連続部分を通じた漏洩/漏出	
D	CO ₂ 貯留層圧の増加により断層の浸透率が増加した結果生じる漏洩/漏出	
E	プラグの状態が不完全な封鎖坑井を通じた漏出	→定点連続監視
F	地層水に溶解したCO ₂ がクロージャー外に移動	
G	地層水に溶解したCO ₂ が構造上位に移動し、海中や大気中に漏出	

(IPCC : RITEによる翻訳)



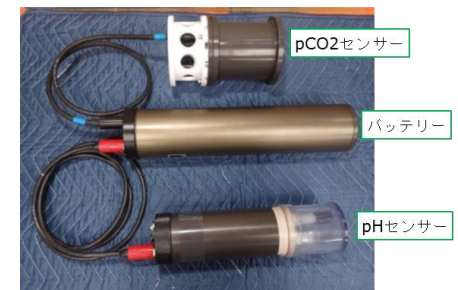
採水器による
採水測定

(<https://nipr-blog.nipr.ac.jp/jare/20191205post-17.html>より)



採水・分析

- ・DIC、TA、DOを同定
- ・高精度だが、分析費用高、分析時間長



センサー: pH、pCO₂、DOセンサー

- ・定点設置(海底設置、係留系)可
- ・精度に課題、ゼロ点ドリフト

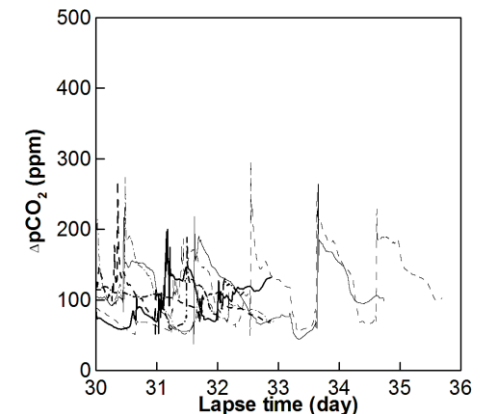
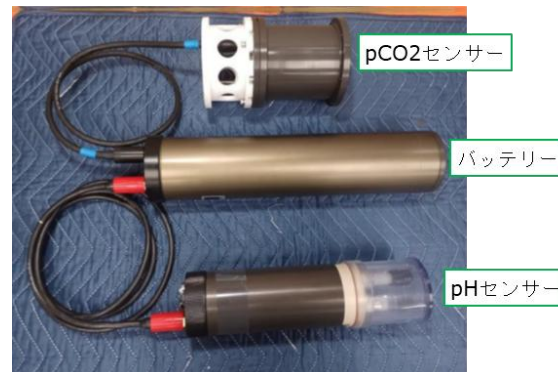
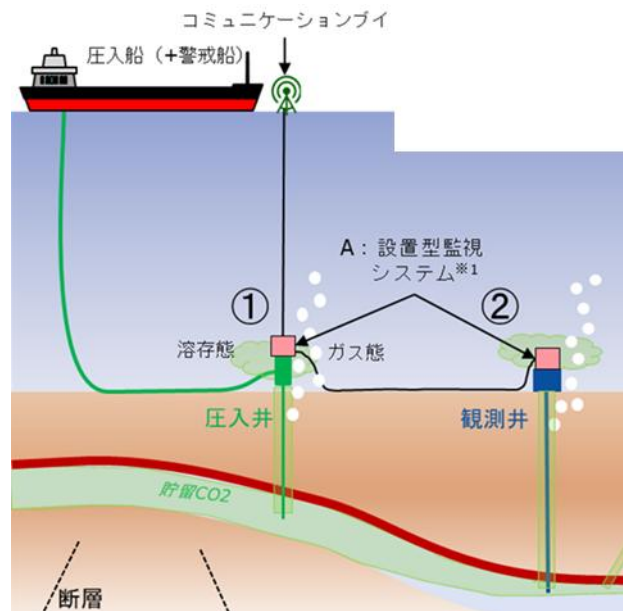
想定シナリオ（定点連続観測）

■ 最終目的

- 科学的根拠に基づいた最小コストでの漏出位置の特定

■ 漏洩経路毎の最適モニタリング

- 圧入井、観測井など関連施設に沿った漏洩
 - ・ センサーによる**定点連続観測**
- 未検出・新たに生じた断層などからの漏洩
 - ・ 最適観測位置での空間定期観測



(kano et al., 2010)

長期連続観測に堪えるセンサーの開発

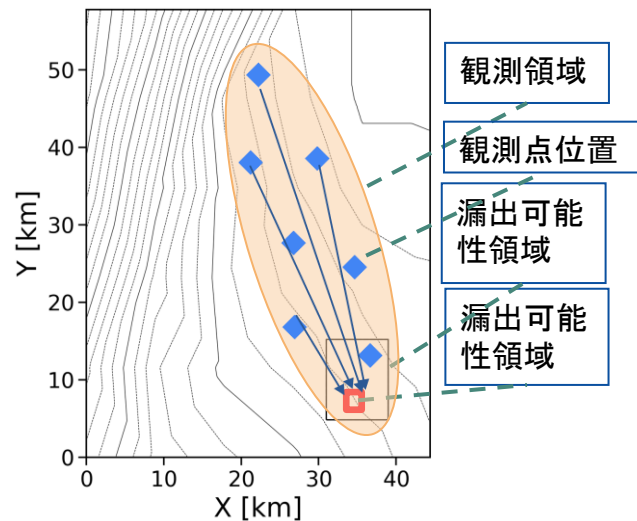
想定シナリオ（空間定期観測）

■ 最終目的

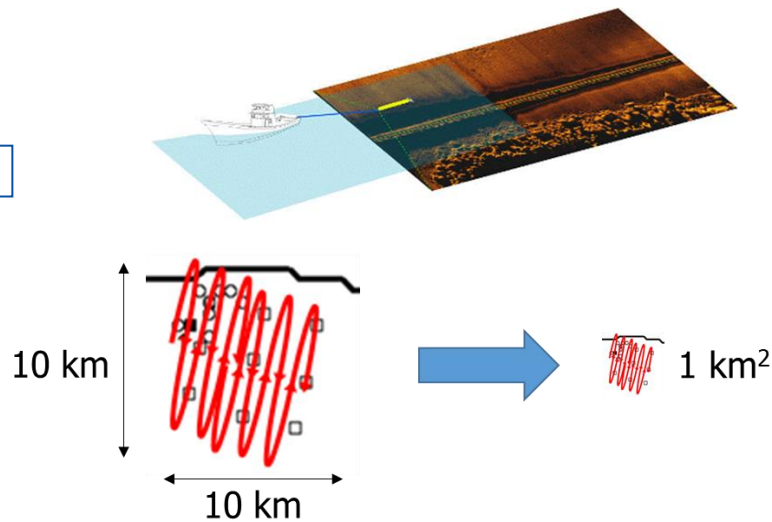
- 科学的根拠に基づいた最小コストでの漏出位置の特定

■ 漏洩経路毎の最適モニタリング

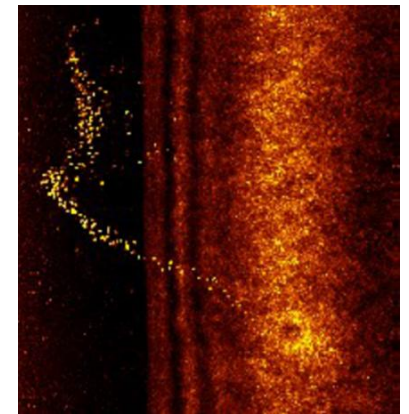
- 圧入井、観測井など関連施設に沿った漏洩
 - ・ センサーによる定点連続観測
- 未検出・新たに生じた断層などからの漏洩
 - ・ 最適観測位置での**空間定期観測**



最適観測点位置の決定



漏出点位置の数値的絞込み



最適ソナー方式による
漏出点位置の特定

CO₂の海洋環境モニタリング手法に関する検討

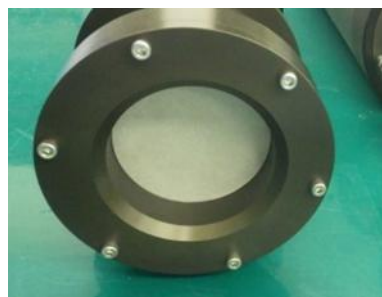
- 圧入井、観測井など関連施設に沿った漏洩（定点連続観測）
 - 海洋pCO₂センサーの開発

- 未検出・新たに生じた断層などからの漏洩（空間定期観測）
 - 観測点最適配置法の開発
 - 漏出点位置の数値的絞り込み法の開発
 - 最適ソナー方式の選定と運用方法の確認

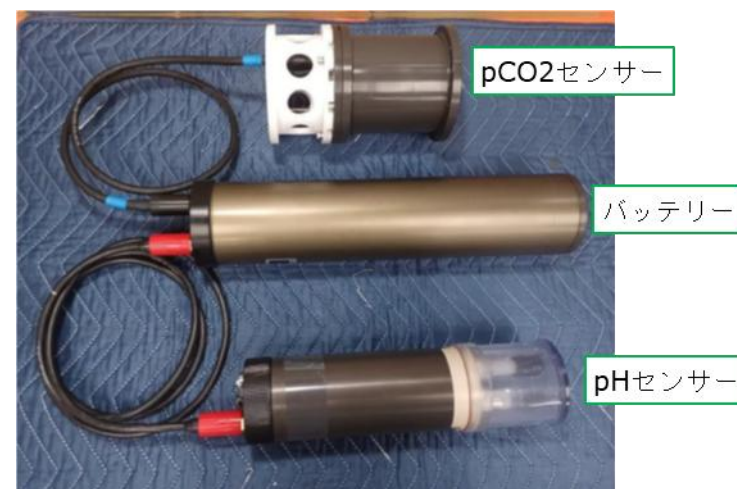
- 上記検証のための実海域におけるCO₂ガス送気試験

海洋pCO₂センサー試作機の開発

- CCS海洋モニタリングに活用可能なpCO₂センサーを開発した。運用に係るコストを低減するため、**安価なCO₂検出モジュールを採用し**、その性能を評価した。
- 既存のpHセンサーとともに外部バッテリー1台で駆動でき、**比較的コンパクトで、かつ長期の観測が可能**なシステムを構築した。



pCO₂センサー開口部
(気体交換膜)

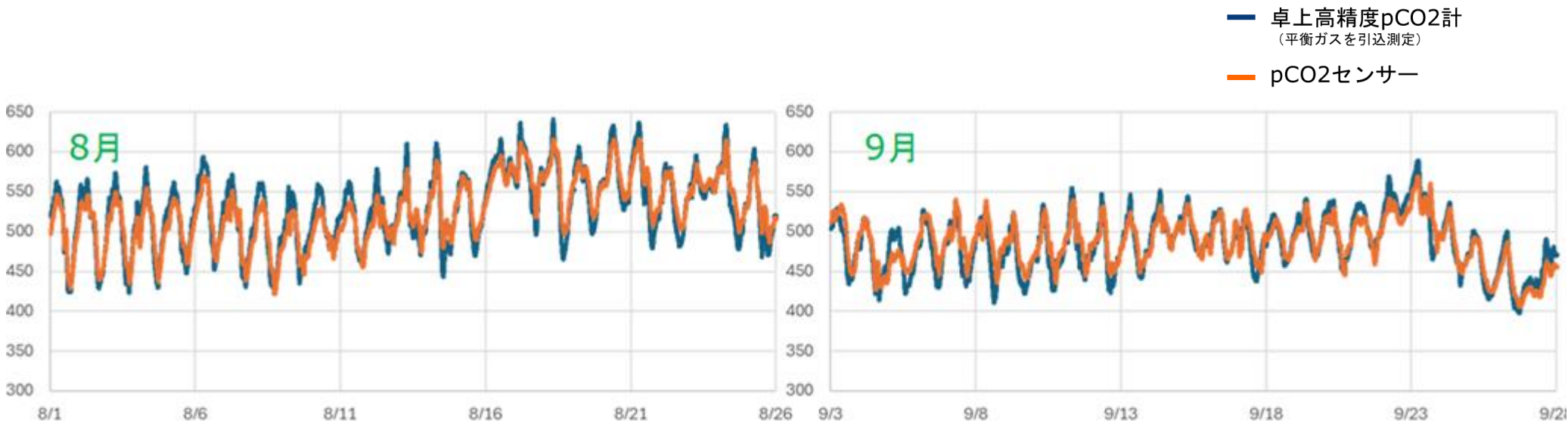


- ・ 重量 約2.4 kg (空中)
- ・ 電源 DC 6V
- ・ 消費電力 約180 mA
- ・ 筐体耐圧 1000 m
- ・ 応答速度 約8分 (90%)

バッテリー1台でpH, pCO₂センサーの駆動が可能。
バッテリーの増設により、数カ月～1年の長期係留に対応可能。

長期運用試験結果

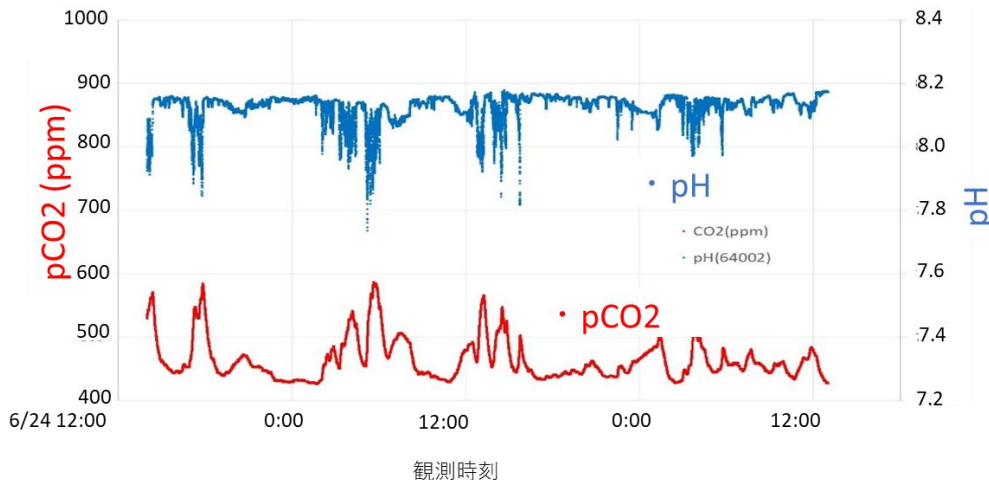
- 静岡県下田市の筑波大学下田臨海実験センターにて、沿岸水（鍋田湾）引き込み海水の連続測定を行った。**約半年間の長期運用**によっても大きなドリフトはなく、沿岸水炭酸系の日変動、季節変動を、高精度卓上測定器と同様に観測することができた。



臨海実験施設における長期観測結果

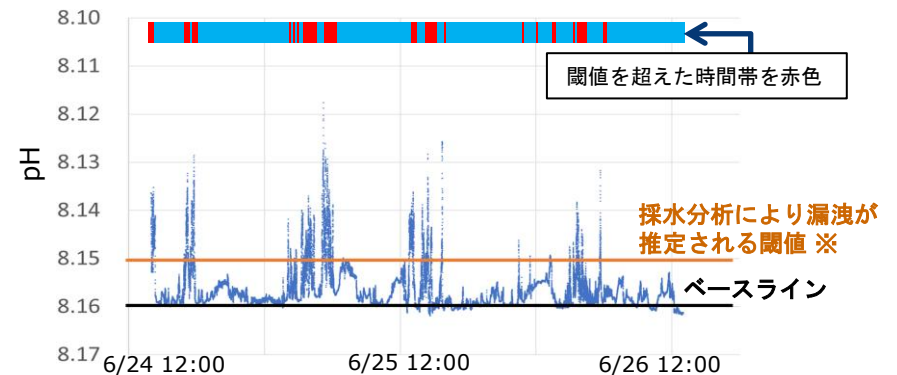
式根島観測結果を用いたセンサー検知性能評価

- 式根島御釜湾のCO₂湧出域において、約2日間、センサーによる連続測定を実施、pCO₂, pHセンサーによりCO₂湧出の影響を検出することに成功した。
- 式根島CO₂湧出観測を利用して、同海域におけるセンサーおよび採水分析の検知可能性について検討した。



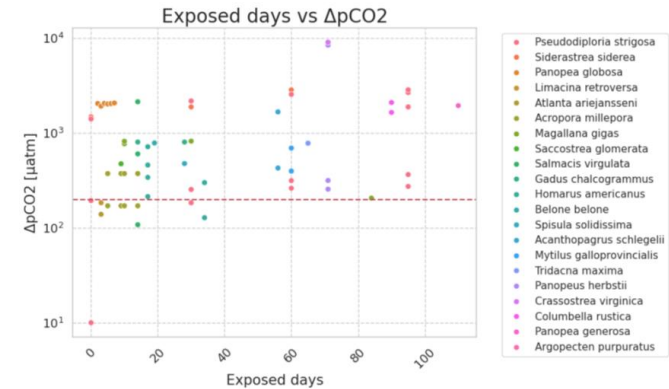
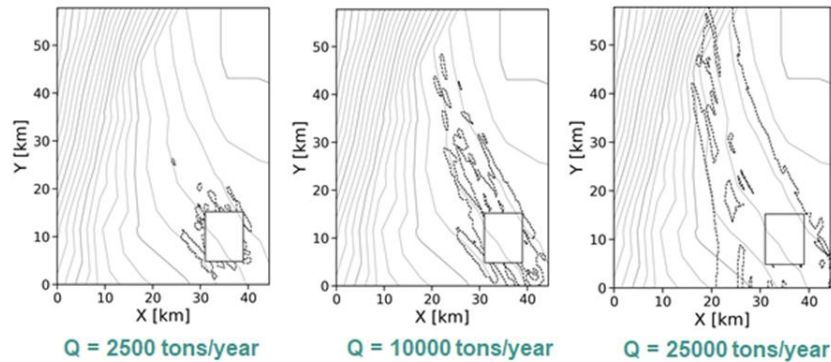
現場観測結果：湧出CO₂の検知に成功

仮想CO₂フラックス (10kg/day) 検討結果

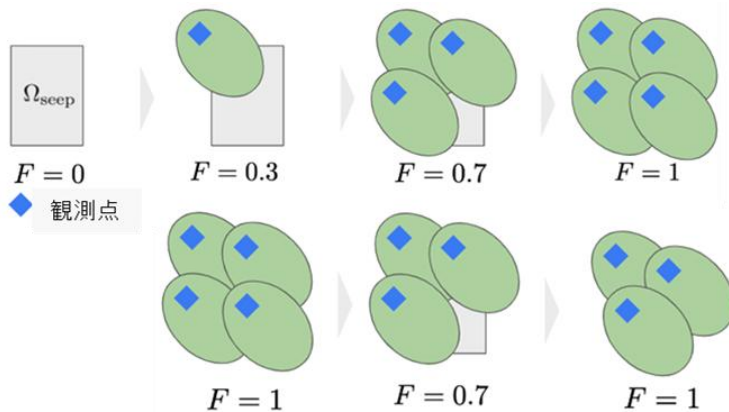


採水・センサーともに検知可能であるが、採水はタイミングが重要。一方、設置式センサーでは連続測定値を得られることから、どの時間帯に異常値ピークが現れたとしても捉えることが可能であることを実証。

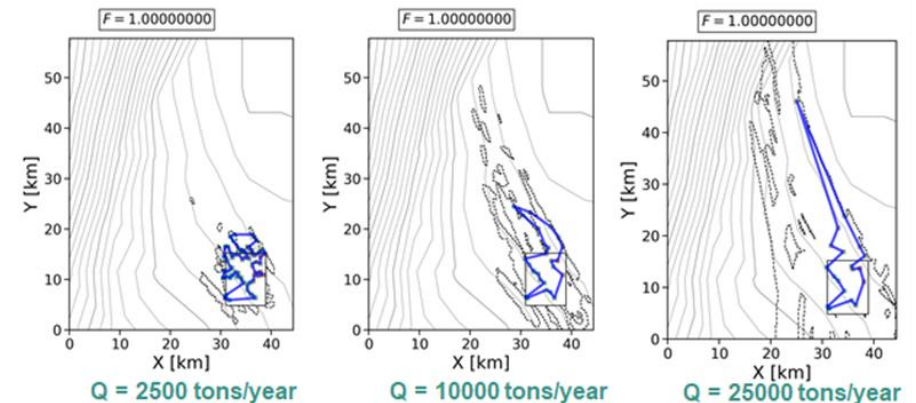
観測点最適配置法の開発



- ・漏出想定海域の様々な点から漏出レートを様々に変えて、 ΔDIC の移流拡散シミュレーションを多数実施
- ・計算結果の実線は CO_2 の移流拡散領域: $\Delta p\text{CO}_2 = 200 \mu\text{atm}$ の等値線 ($\pm 100 \mu\text{atm}$ は自然変動範囲)
- ・この実線内に最小観測コスト(採水の場合、最小点数)となるように観測点を配置する

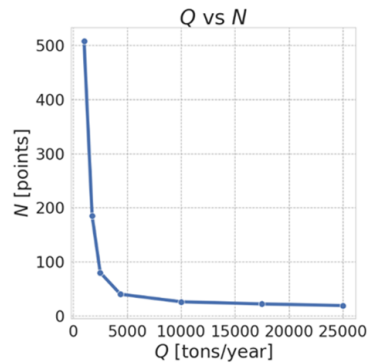


貪欲法を用いて漏出想定海域を100%カバーする、
最小点数となるような観測点位置を決定

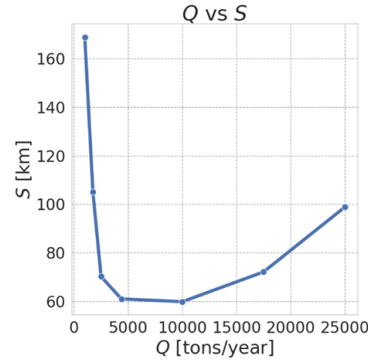


巡回セールスマン問題を解いて、選択された
最適観測点を最も効率よく回る航路を決定

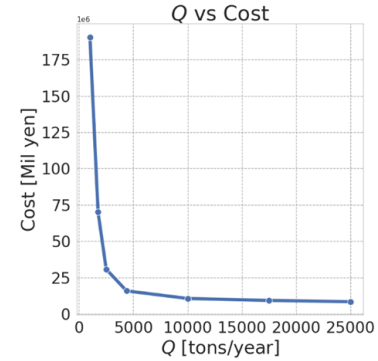
観測点最適配置法の開発



漏出レートに対する観測点数

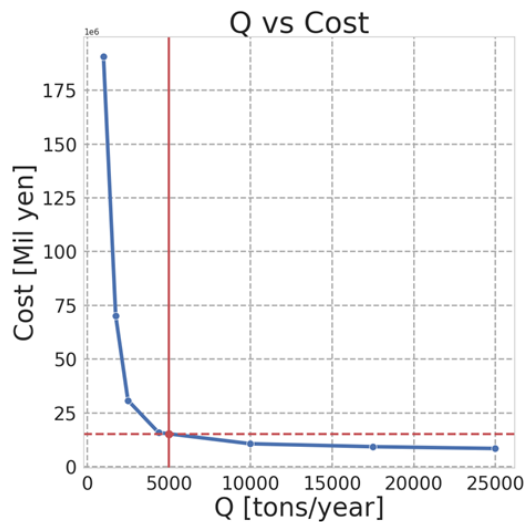


漏出レートに対する観測船の航行距離

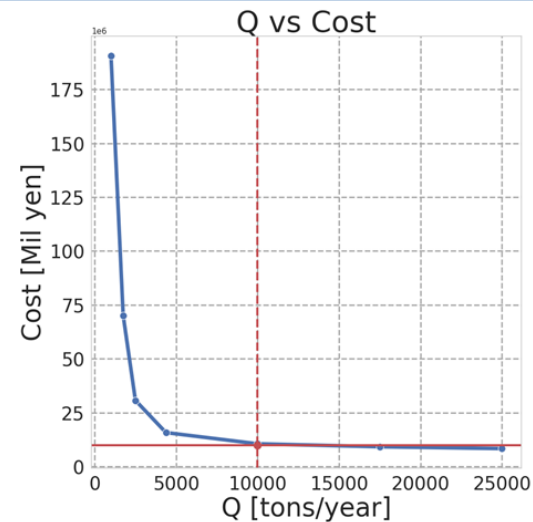


漏出レートに対する層観測コスト

Okamoto et al. (2025)

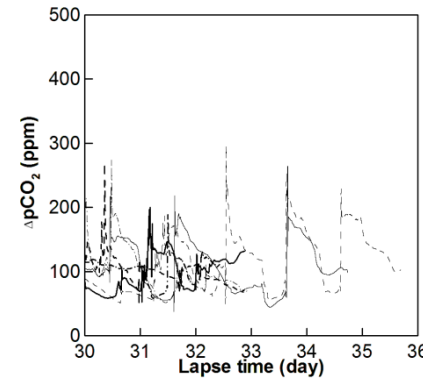
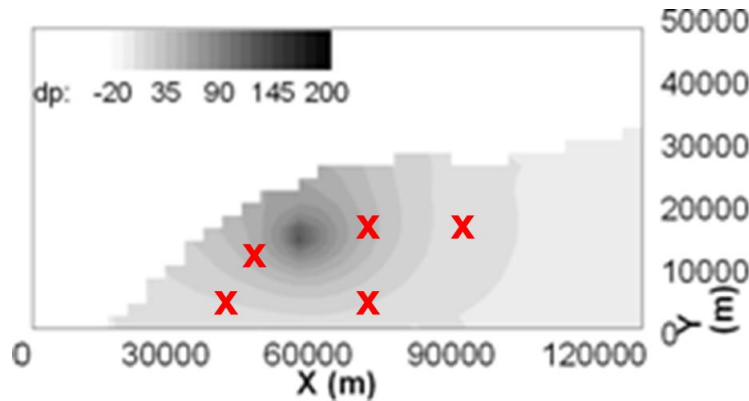


5000 ton/yr の漏出を必ず発見したいなら、1500万円かかる



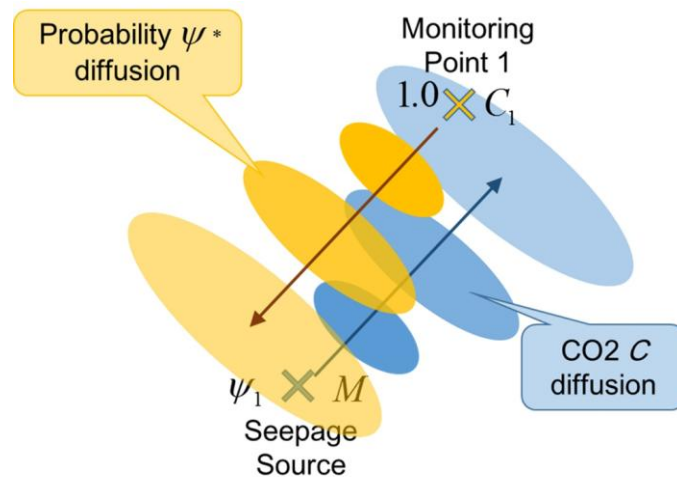
1000 万円をかければ、10000 ton/yr の漏出を必ず発見できる

漏出位置推定のための逆解析法の開発



(kano et al., 2010)

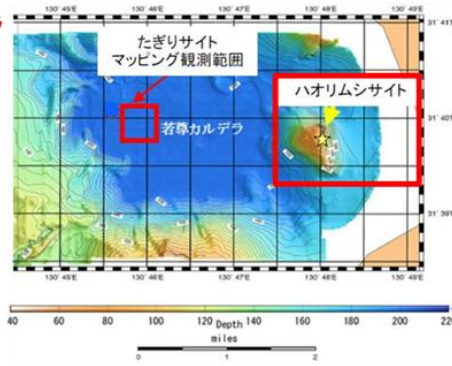
センサーが異常に高いCO2濃度を検知した場合、海洋におけるCO2の漏出の位置と量を特定する必要がある
でもどうやって？



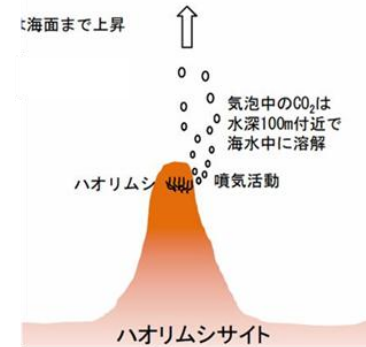
$$\frac{C}{f} = \frac{\psi}{1}, \quad f = \frac{C}{\psi}$$

アジョイント法: CO2濃度Cの順時間方向移流拡散とアジョイント確率 ψ^* の逆時間方向移流拡散の模式図

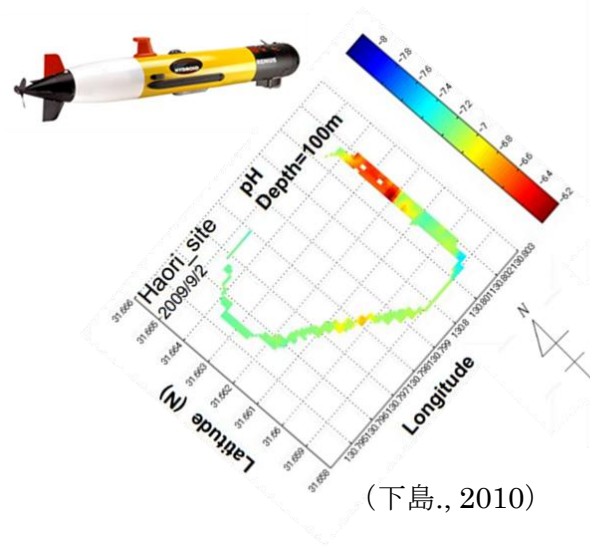
漏出位置推定のための逆解析法の開発



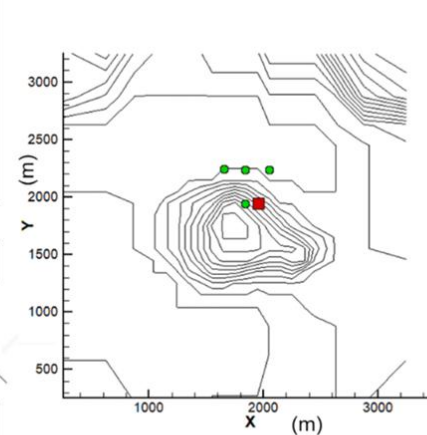
ハオリムシサイトの位置
(下島(2010))



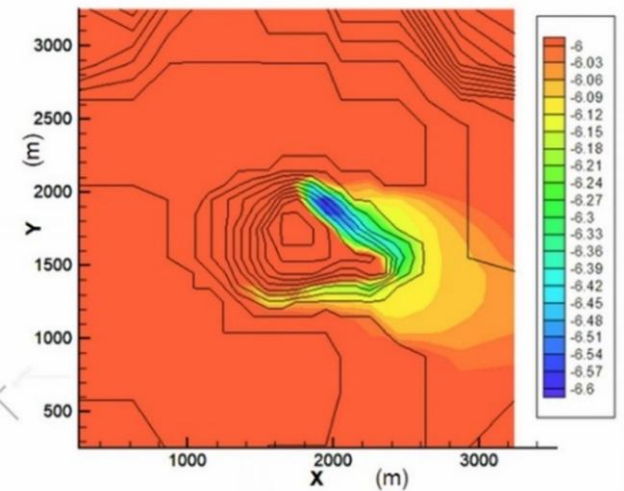
ハオリムシサイトにおける噴気活動の模式図
(下島(2010))



(下島., 2010)



緑: 選択した観測点
赤: 実際の漏出位置



(竹岡ら, 2019)

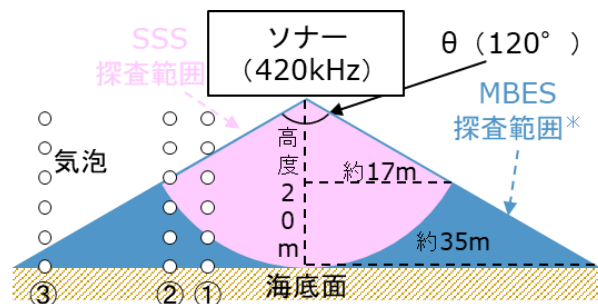
最適なソナー方式の選定と運用方法の確立

■ 調査したソナー

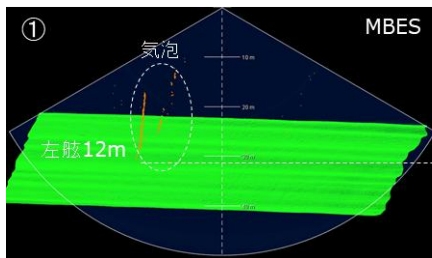
- サイドスキャンソナー (SSS)
- マルチビームソナー (MBES)

■ MBESを最適なソナー方式として選定し、最適な運用方法を確認した

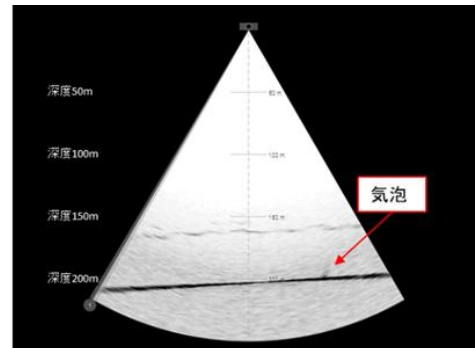
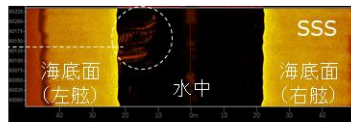
- 水平探査幅：MBESより狭い（スワス角（ θ ）が 120° の場合MBESの約1/2
- 水深200mにて300t/yの漏出CO₂を、**水平距離100m**で安定的に検知



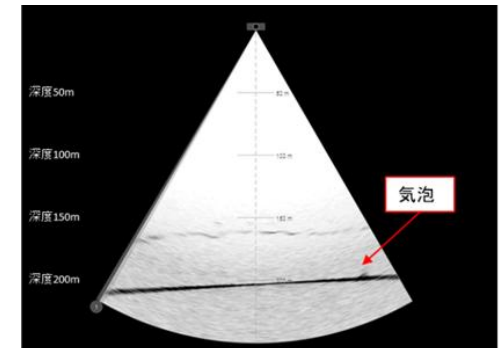
* 海底面ではなく気泡等、水中の反射体を対象とした場合



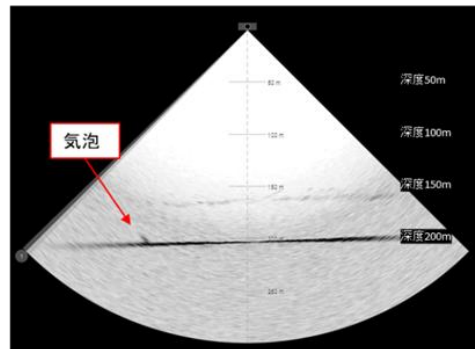
船速3knot程度
周波数190kHz
スワス角 110°



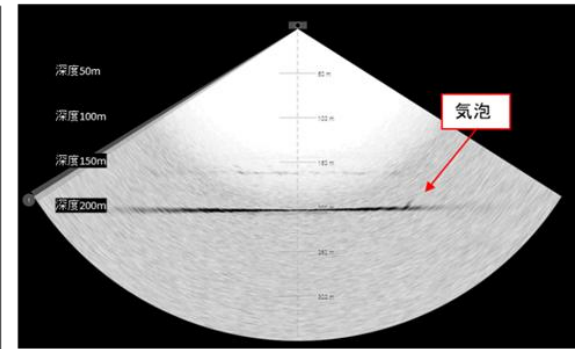
漏出量60t/y・水平距離60m



漏出量60t/y・水平距離83m



漏出量200t/y・水平距離98m



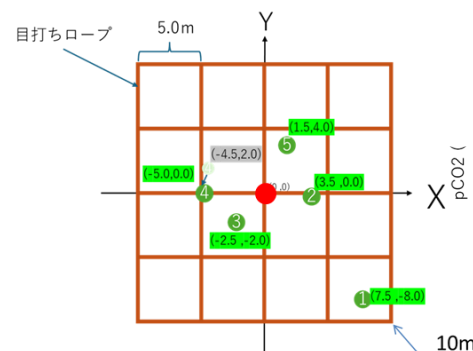
漏出量200t/y・水平距離125m

実海域におけるCO2ガス送気試験



試験海域：式根島 カンビキ浦（東京都新島村）

漏出位置および採水位置の決定



- : 漏出地点
①～⑤ : 設置型センサー・採水位置
④ : リファレンス地点(採水位置)

センサーの検知性能の把握

