

ENAA2013-ODF1

(25-60①) 平成 25 年度

地球温暖化対策等に貢献するエンジニアリング調査研究補助事業
沿岸域海水中温暖化ガス連続モニタリング技術に関する調査研究

報告書

平成 26 年 3 月

一般財団法人エンジニアリング協会



RING!RING!
プロジェクト

この報告書は、競輪の補助金により作成しました。

<http://ringring-keirin.jp>



序

「平成 25 年度 地球温暖化対策等に貢献するエンジニアリング調査研究補助事業 沿岸域海中温暖化ガス連続モニタリング技術に関する調査研究」は、JKA 補助事業として一般財団法人エンジニアリング協会に「沿岸域海中温暖化ガス連続モニタリング技術調査研究委員会」（渡邊豊委員長：北海道大学 大学院地球環境科学研究院 准教授）を設置して調査研究を実施したものである。

沿岸域においては、底質や淡水の流入、生物活動によって CO₂ の鉛直分布が大きく変化する。そのため、沿岸域における温暖化ガスの挙動を正確に捉えるためには、鉛直方向の濃度変化を連続的に観測し、時空間的な評価を行う必要であった。しかしながら、国内では一部表層の観測例はあるものの、鉛直・連続観測の事例はなく、新たな観測システムの開発が望まれていた。本調査研究では、沿岸域におけるこのような観測を可能とするためのモニタリングシステムの開発を目的とした。

調査研究方法としては、文献やインターネット、メーカーのカタログ等で情報を収集するとともに、有識者へのヒアリングを行い、沿岸域を対象とした海水中の二酸化炭素分圧の連続モニタリングシステムについて整理を行った。事業の実施期間中には委員会を 3 度開き、整理された項目についての信憑性や妥当性を諮った。また、各委員からの助言や提案を報告書に反映させ、その有用性の向上に努めた。

本調査研究は、実用化までに 5 年間を要する計画であり、今年度はその 1 年目として、連続モニタリングシステムの概念設計を行った。最終的な成果を得た後は、これまでの水温、塩分や溶存酸素等の環境測定項目とあわせて、温室効果ガスの観測ができるようになる。これによって、沿岸域における物質循環や水質変化の解析がより詳細に行えるようになり、沿岸域を利用した地球温暖化の抑制や、水質改善のための施策立案等に有用な情報を提供できる。

平成 26 年 3 月

一般財団法人 エンジニアリング協会

委員名簿

沿岸域海水中温暖化ガス連続モニタリング技術調査研究委員会

区分	氏名	機関名	所属役職
委員長	渡邊 豊	北海道大学	大学院地球環境科学研究院 准教授
委員	鶴島 修夫	(独)産業技術総合研究所	環境管理技術研究部門 主任研究員
委員	桑江 朝比呂	(独)港湾空港技術研究所	沿岸環境研究領域 チームリーダー
委員	所 立樹	(独)港湾空港技術研究所	沿岸環境研究領域 研究官
委員	江頭 毅	紀本電子工業(株)	技術部技術課
委員	中村 哲也	日油技研工業(株)	開発営業部海洋機器 グループリーダー
委員	吉田 基	(株)ゼニライトブイ	特販部特販課 課長
委員	乾 悦郎	芙蓉海洋開発(株)	技術部 部長

平成 25 年度

地球温暖化対策等に貢献するエンジニアリング調査研究補助事業
沿岸域海水中温暖化ガス連続モニタリング技術に関する調査研究

目 次

序	i
委員名簿	ii
図表リスト	vi
1 章 はじめに	1
1.1 海水中に溶解込む CO ₂ と海洋酸性化について	1
1.2 ブルーカーボンのメカニズムと考え方	3
1.3 沿岸域において CO ₂ をモニタリングする意義と技術開発の必要性	4
1.4 調査概要	5
2 章 海水中の温室効果ガス測定技術に関する調査	6
2.1 海水中の温室効果ガス測定技術の概要	6
2.1.1 CO ₂ センサー	7
2.1.1.1 pH-CO ₂ ハイブリッドセンサー	7
2.1.1.2 SAMI-CO ₂	9
2.1.1.3 HydroC/CO ₂	10
2.1.1.4 PSI CO ₂ -pro	11
2.1.1.5 MAPCO ₂	12
2.1.1.6 CO ₂ Optode	13
2.1.1.7 ISFET pCO ₂ センサー	14
2.1.2 N ₂ O センサー	15
2.1.2.1 Unisens マイクロ N ₂ O センサー	15
2.1.3 CH ₄ センサー	16
2.1.3.1 METS メタンセンサー	16
2.1.3.2 HydroC/CH ₄	17
2.1.4 水中質量分析センサー (UWMS : Under Water Mass Spectrometer)	18
2.1.4.1 NEREUS	18
2.1.4.2 Inspectr200-200	19
2.1.5 その他のセンサー	20
2.1.5.1 栄養塩センサー	20

2.1.5.2	pH センサー	21
2.1.5.3	DO センサー	23
2.2	自動モニタリングが可能な測定技術の調査	26
2.2.1	オイラー型測定技術	26
2.2.1.1	定置ブイシステム	26
2.2.1.2	モニタリングポスト	29
2.2.1.3	自動昇降装置	31
2.2.2	ラグランジュ型測定技術	35
2.2.2.1	漂流ブイ	35
2.2.2.2	アルゴシステム	37
2.2.2.3	AUV	39
2.2.2.4	水中グライダー	41
3章	沿岸海水中の温室効果ガス収支把握に必要な機能に関する調査	43
3.1	沿岸域における物質循環	43
3.2	沿岸域の CO ₂ に関する年間収支把握に必要な機能	46
3.2.1	連続観測機能	46
3.2.2	鉛直観測機能	46
3.2.3	搭載センサー	47
3.2.4	他観測との連携	47
4章	モニタリングシステム概念設計	48
4.1	自動モニタリングシステムの仕様	48
4.1.1	昇降型の利点と課題	54
4.1.1.1	昇降型の利点	54
4.1.1.2	昇降型の課題	55
4.1.2	ブイ型の利点と課題	55
4.1.2.1	ブイ型の利点	56
4.1.2.2	ブイ型の課題	57
4.2	自動モニタリングシステム概念設計	58
4.2.1	自動モニタリングシステム概念設計	59
4.2.2	机上試験対象海域に関する情報の収集	63
5章	モニタリングシステムの適用	70

6章 今後の展開	76
6.1 次年度の実施項目	76
6.1.1 対象海域の設定	76
6.1.2 プロファイラの検討	76
6.1.3 標識ブイの検討	77
6.1.4 搭載センサーの選定と開発要素の確認	77
6.1.5 データ通信に関する検討	77
6.1.6 メンテナンスの検討	77
6.1.7 開発要素の検討	78
6.2 3年目以降の実施内容	78
6.2.1 3年目の実施内容（試設計）	78
6.2.2 4年目の実施内容（試作機の製作）	78
6.2.3 5年目の実施内容（実証実験）	78
6.3 予算獲得への働きかけ	79
参考文献リスト	80

別添資料

< 図表リスト >

- 図 1 沿岸域 CO₂鉛直自動モニタリングシステム開発のロードマップ
- 図 2.1.1.1 pH-CO₂ハイブリッドセンサーの外観
- 図 2.1.1.2 SAMI-CO₂の外観
- 図 2.1.1.3 HydroC/CO₂の外観
- 図 2.1.1.4 PSI CO₂-pro の外観
- 図 2.1.1.5 MAPCO₂の外観
- 図 2.1.1.6 CO₂ Optode の外観
- 図 2.1.1.7 ISFET センサーの外観
- 図 2.1.2.1-1 Unisense マイクロ N₂O センサーの外観
- 図 2.1.2.1-2 Unisense MiniProfiler MP4 System の外観
- 図 2.1.3.1 METS メタンセンサーの外観
- 図 2.1.3.2 HydroC/CH₄の外観
- 図 2.1.4.1 左図：NEREUS の外観、右図：AUV 搭載時外観
- 図 2.1.4.2 Inspectr200-200 の外観
- 図 2.1.5.1-1 左図：YSI 9600 センサー外観、右図：Cycle-PO₄ センサー外観
- 図 2.1.5.1-2 ISUS V3 センサー外観
- 図 2.1.5.2-1 SBE 18 センサー外観
- 図 2.1.5.2-2 SAMI-pH センサー外観
- 図 2.1.5.2-3 SeaFET センサー外観
- 図 2.1.5.3-1 Sea-Bird SBE43 外観
- 図 2.1.5.3-2 左図：Oxygen Optode センサー外観、右図：RINKO I/ID センサー外観
- 図 2.2.1.1-1 左図：係留ブイシステムと海底ネットワーク図、右図：表層ブイ部外観
- 図 2.2.1.1-2 GPS 海洋ブイ外観
- 図 2.2.1.2 伊勢湾湾奥部モニタリングポスト外観
- 図 2.2.1.3-1 左図：自動昇降ブイシステム概念図、右図：自動昇降ブイシステム外観
- 図 2.2.1.3-2 Vertical Profiler System (VPS) イメージ図
- 図 2.2.1.3-3 JFE アドバンテック(株)製自動昇降水質システムセンサー部外観
- 図 2.2.1.3-4 左図：YSI 自動昇降装置外観、右図：YSI 浮体設置タイプ昇降装置外観
- 図 2.2.1.3-5 波力式自動昇降プロファイラー：SeaHorse 外観
- 図 2.2.2.1-1 ブイロボット外観
- 図 2.2.2.1-2 CO₂ 観測用小型漂流ブイ外観
- 図 2.2.2.2-1 (株)鶴見精機製 Deep NINJA 外観
- 図 2.2.2.2-2 Sea-Bird electronics 社製 NAVIS フロート外観
- 図 2.2.2.3-1 Bluefin-21 外観

図 2.2.2.3-2	ECO-MAPPER 外観
図 2.2.2.4-1	Bluefin Robotics 社製 SprayGlider 外観
図 2.2.2.4-2	大阪府立大学水中グライダー：SOARER 外観
図 2.2.2.4-3	左図：Liquid Robotics 社 Wave Glider SV3 の外観、右図：構造模式図
図 3.1	海洋における炭素循環模式図
図 4.1-1	水中 CO ₂ センサーの応答速度と測定精度
図 4.1-2	海水中 CO ₂ 観測手法イメージ図
図 4.2.1-1	昇降ブイ警戒エリア水平イメージ図
図 4.2.1-2	沿岸 CO ₂ 鉛直連続モニタリングシステム概念図
図 4.2.2	各地の水質自動観測地点
図 5.1	沿岸域における炭素循環フロー
図 5.2	港湾域における CO ₂ 挙動イメージ図
表 2.1-1	センサー一覧表
表 2.2.1.2	モニタリングポスト一覧表
表 3.1	東京湾底層における貧酸素水塊層厚の変化
表 4.1-1	CO ₂ センサースペック一覧表
表 4.1-2	海洋観測プラットフォーム一覧表
表 4.1.3	ブイの形状比較
表 4.2	沿岸 CO ₂ 鉛直自動モニタリングシステム研究開発の進め方
表 4.2.2-1	定地水温観測地点一覧表
表 4.2.2-2	自動観測ブイ（水温）一覧表
表 4.2.2-3	係留ブイ、海上構造物を利用した沿岸水質観測事例一覧表
表 4.2.2-4	自動昇降式鉛直観測実施モニタリングポスト一覧表
表 5	沿岸域 CO ₂ 鉛直自動モニタリングシステム仕様一覧表

1章 はじめに

これまで海洋が持つ二酸化炭素 (CO₂) シンクとしての機能を述べる場合、もっぱら CO₂ が海水中に溶け込み、それが化学的な過程を経て安定的に保持される現象をいうことが多かった。しかし近年では、藻類や植物プランクトンなど、海洋中の生物が光合成活動によって固定する炭素、すなわちブルーカーボンについても、言及される機会が増えている

(Nellemann et al., 2009 ; 所ら, 2013 ; 渡辺ら, 2013)。

海洋における上記 2 つの機能は、CO₂を海洋中に固定し蓄積する仕組みにおいて大きく異なる。物理・化学的な過程のみからなる前者では、大気中の CO₂の増加に伴い、次第に海水中に溶け込む CO₂の量が増え、海洋の酸性化を招くため、海洋生態系に甚大な影響が与えられる可能性が危惧されている (NSF, NOAA, and USGS, 2006)。一方、生物学的な過程を主とする後者においては、光合成によって海水から炭素を除去し海洋中の CO₂分圧を下げるようになるため、酸性化を防ぐことが期待される。

ブルーカーボンは生物の生産性に大きく影響されることから、生産力が旺盛な沿岸域で、大きな蓄積量を生み出すものと考えられる。沿岸域がブルーカーボンを利用した CO₂固定の対象として選ばれるのも、そのためである。また、沿岸域は人の生活圏に近く水深も浅いため、生活排水や農業用水の清浄化、浚渫工事の他、藻場造成などの環境改善に取り組みやすく、そのため、成果が現れやすい場所と考えられる。国土交通省では、港湾における温室効果ガス排出削減として、藻場造成等を盛り込んだゼロエミッションポート施策を打ち出している (国土交通省, 2012)。

将来、ブルーカーボンが国際的にカーボンオフセットとして認められた際には、国家予算を投入して、様々な取り組みが展開されるものと予想される。さらに沿岸域は領海内にあるため、生産力を高めるための施策も、自国の判断で行うことが可能である。

一方、ブルーカーボンの定量的評価とその増大に貢献するためには、その炭素固定についての能力など不明な点が多くあり、複雑なブルーカーボンのメカニズムを正しく調査する必要がある。これには、変動の大きい沿岸域において CO₂の時空間分布や鉛直的な日周期変動を把握することが要求される。

本調査研究では、これを可能とするため、文献調査と専門家へのヒアリングを中心に現存の技術を取りまとめ、沿岸域における CO₂モニタリングシステムの概念設計を行うものである。

1.1 海水中に溶け込む CO₂ と海洋酸性化について

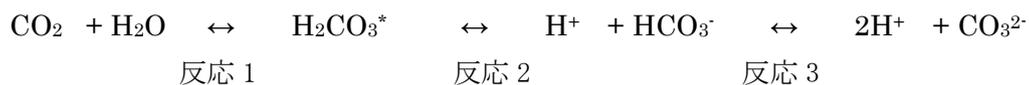
海洋が人為起源 CO₂を吸収することによって、大気中の CO₂濃度の上昇が抑えられる一方で、海洋中に CO₂が蓄積されることにより、海洋酸性化が進行し、CO₂吸収能力が徐々に減衰するとともに、海洋生態系への影響が危惧されている。ここでは先ず、ブルーカーボンについて記述する前に、生物が関与せずに海洋が CO₂のシンクとなる仕組みについて触れてお

く。

1) 海洋酸性化

表面海水は一般に弱アルカリ性 (pH = 約 8.1) であるが、CO₂が多く溶け込むと pH が下がり、海水のアルカリ性が弱まる。海面の pH は、産業革命前に比べて 0.1 程度低下していると推定されている (IPCC, 2007)。海洋酸性化のメカニズムを簡単に記すと以下のようなになる (DOE, 1994)。海洋中に CO₂が溶けると「溶存 CO₂」となる (反応 1)。溶存 CO₂は、海洋中では水素イオン (H⁺) が解離した炭酸水素イオン (HCO₃⁻) や炭酸イオン (CO₃²⁻) との間で、反応 2 と反応 3 で表わされる化学平衡の状態を保っている。

大気中の CO₂が増えると、海水に溶け込む CO₂が増え、反応 1 と反応 2 が右側に進んで、水素イオン (H⁺) が発生する。発生した H⁺ の大部分は反応 3 が左側に進むことにより消費される。大気中の CO₂が増加することで、この反応過程が進み、H⁺が増加していくことになる。これが人間活動に由来する海洋の酸性化である。結果として H⁺が増加するため pH が下がる。



注：H₂CO₃^{*} は溶存 CO₂ を示す

2) 海洋酸性化の影響

海洋が酸性化すると、植物プランクトンや動物プランクトン、サンゴ、貝類、甲殻類など、さまざまな海洋生物の成長や繁殖に影響が現れる怖れがあり、これらを底辺とする食物連鎖網を通して、さらに、多くの海洋生態系において深刻な影響を及ぼし、海洋全体の物質循環を劇変させる。植物プランクトンの円石藻、原生動物の有孔虫、貝類、ウニなどの棘皮 (きょくひ) 動物、熱帯や亜熱帯に分布するサンゴなど、さまざまな海の生物は、海水中に含まれるカルシウムイオン (Ca²⁺) と炭酸イオン (CO₃²⁻) から、水に溶けにくい炭酸カルシウム (CaCO₃) の骨格や殻を作っている。

現在の海面付近の環境下では、水素イオンの濃度が十分に低いため、炭酸カルシウムの飽和度が高く、これらの生物はその骨格などを作ることができる。しかし、海洋酸性化が進んで海水中の水素イオンが増えると、炭酸カルシウムの殻が形成されにくい環境となる。

炭酸カルシウムには、アラゴナイト (アラレ石) やカルサイト (方解石) といった結晶形があり、同じ炭酸カルシウムでもアラゴナイトは結晶形としての安定性が低いため、pH の低下によって溶解しやすいといった化学的性質を持つ。このため、アラゴナイトの殻や骨格を持つ生物の方が、海洋酸性化による影響をより受けやすいと考えられている。

1.2 ブルーカーボンのメカニズムと考え方

ブルーカーボンという言葉は、2009年に国連機関である国連環境計画（UNEP）が「ブルーカーボンレポート」（Nellemann et al., 2009）を発行したことにより急速に広まった。「ブルーカーボン」とは、森林に吸収される「グリーンカーボン」に対し、海洋の生物によって吸収されるCO₂を指している。

UNEPが発表したこの報告書によると、地球上の生物によって吸収されるCO₂のうち、約55%がアマモやヨシなどの藻場や、塩性湿地、マングローブ等の海洋性生物が吸収するブルーカーボンによるものだとしている。もし、この量が海洋内に永続的に固定されるならば、カーボンオフセットとしてのその効果は計り知れない。

今後、ブルーカーボンによる大気中のCO₂削減効果が認められれば、四方を海に囲まれている日本にとって、大きな経済効果をもたらす可能性が考えられる。

1) 生物が死んでもCO₂は固定される

これまでブルーカーボンによる炭素蓄積効果が認知されなかった大きな理由は、アマモやヨシなどの藻類や湿性植物が成長してCO₂を吸収しても、枯死した際に再度分解してCO₂を排出し、蓄積されないと考えられていたためである。UNEPはこれについて、一部は海底に泥のような形で有機物として残るため、ゼロにはならないとしている。

この固定量がどの程度の時間規模保持されるかは未だ不明であるが、十分に長ければそのブルーカーボン効果は膨大なものとなる。

ブルーカーボンによるCO₂蓄積のメカニズムには、こうした現象が沿岸域生態系の内部でおこる場合と、アマモなどの藻類が流れ藻となり、外洋や深海などに沈降して蓄積する場合とがある。前者を「系内埋没」といい、後者を「系外埋没」という。さらに、藻場や干潟を新たに造成することで生物量が増え、CO₂が固定されるという考え方もある。

藻場や干潟造成による固定とは、藻類のほか甲殻類や貝類など、新たに棲みついた生物種によって炭素が固定されることを指す。これは、生物体の構成に炭素が多く利用されていることから、海洋の生物が増えることも、広い意味でブルーカーボンに含まれるという考え方である。この考えに従えば、独立栄養生物以外に従属栄養生物によって生産された有機物も含まれることになる。

日本の海岸線の総延長は先進国でもトップレベルの約35,000kmである。将来、ブルーカーボンによる大気中CO₂の削減効果が認められれば、日本はブルーカーボンの主要な貯蔵国になる可能性が高い。さらに、干潟や藻場の再生技術も保有しており、こうした技術で海外支援ができれば、ビジネスチャンスにも繋がる。

2) 本報で対象とするブルーカーボンについて

これまでの解説で、藻類や植物プランクトンなどの独立栄養生物以外に、貝類や甲殻類など、従属栄養生物によって取り込まれた炭素についても、広い意味でのブルーカーボン

であることを述べた。一方、本報では海水中の CO₂分圧等を計測する装置の概念設計が目的であり、この装置を用いて沿岸域におけるブルーカーボンの仕組みや CO₂蓄積量を評価することが狙いであることから、ここでは、海洋中の独立栄養生物によって固定される炭素をブルーカーボンとする。

1.3 沿岸域において CO₂をモニタリングする意義と技術開発の必要性

ブルーカーボンが国際的にカーボンオフセットとして認められるためには、より詳細に、そのメカニズムを解明するとともに、対象海域における年間の生産量や蓄積量を正しく推定するための、「透明かつ再現性のある方法」を確立しておかなくてはならない。そのためにはまず、沿岸域においてブルーカーボンの入口となる海水中の CO₂分圧を正しく測定できる必要がある。

外洋域における CO₂観測は 1990 年代から実施され、地球温暖化研究の推進に寄与してきたが、沿岸域での観測例はまだ少ない。沿岸域においては、淡水の流入や水質・底質の違い、生物活動などに加え、潮流や水塊の鉛直混合によっても影響を受けるため、日変動や季節変動が大きいことが予想される。

生物活動による鉛直的な炭素濃度の勾配ができる現象としては、生物ポンプが知られており、これがまさにブルーカーボン生成のメカニズムの一つである。これは、植物プランクトン等が CO₂を吸収し、その固定した炭素を海洋表層から深層部へと送り込む現象である。植物プランクトン等が光合成によって、表層に溶け込んだ CO₂から有機物を生産し、糞粒や遺骸としてその粒子が海底に向かって沈む。粒子中の有機炭素は、中・深層でバクテリア等の働きによって分解・再生されて無機炭素に戻るが、一部は海底に堆積物となって蓄積する。これによって、全炭素量は海洋表層で減り、深度が増すにつれ増加する。

一方、沿岸域において物理的な要因によって起こる鉛直勾配としては、夏季の成層構造がある。これは日射量の増加により海洋表面が暖められることで、表層から底層に向けて水温の勾配ができることで、海水に比重の差が生じ、水温や塩化物イオン濃度、DO 等の、様々な指標において鉛直的な濃度勾配がみられるみられ、日周期変動や年変動が発生する。

以上のことから沿岸域のブルーカーボンによる CO₂収支を正しく評価するためには、平面的なデータだけでなく 3 次元的なデータが要求され、さらに、それらの日周期変動や年間を通じた観測による年変動を捉える必要がある。

1.4 調査概要

1) 調査目的

本調査研究では、沿岸域における CO₂の時空間分布と鉛直的な日周期変動を把握できる CO₂モニタリングシステムを開発することで、対象海域の CO₂収支を明らかにし、沿岸域のブルーカーボンの増大に貢献することを目的とする。本調査研究は 5 年間をかけて、装置の設計から製作、実証実験までを行う計画であり、今年度はその初年度にあたる（図 1）。

2) 調査項目と方法

文献やインターネット情報等での情報収集ならびに有識者へのヒアリングを行い、沿岸域を対象とした CO₂を中心とした温室効果ガスの連続モニタリングシステムの概念設計を行った。調査では CO₂の他にも海洋起源の温室効果ガスとしてメタン (CH₄)、亜酸化窒素 (N₂O) が挙げられるため、これらも調査対象とした。

① 海水中の温室効果ガス測定技術に関する調査

市販されている機器ならびに開発中の機器について、構造や測定方式・測定精度・価格等について調査を行い、温室効果ガスの自動モニタリングが可能な測定技術について整理し、本調査研究への適用の妥当性を評価した。

② 沿岸域海水中の温室効果ガス収支把握に必要な機能に関する調査

測定器の仕様を明確にするため、沿岸域における海水中の物質循環について、既存の研究成果ならびに有識者へのヒアリング等を行い整理し、本調査研究の開発の基盤とした。これを基に沿岸域の CO₂に関する年間の収支把握に必要な機能を取りまとめた。

③ モニタリングシステムの概念設計

上記①、②の調査結果から、機器に要求される技術仕様を取りまとめ、沿岸海域に適用可能な CO₂の実現可能な鉛直・連続モニタリングシステムの概念設計を行った。

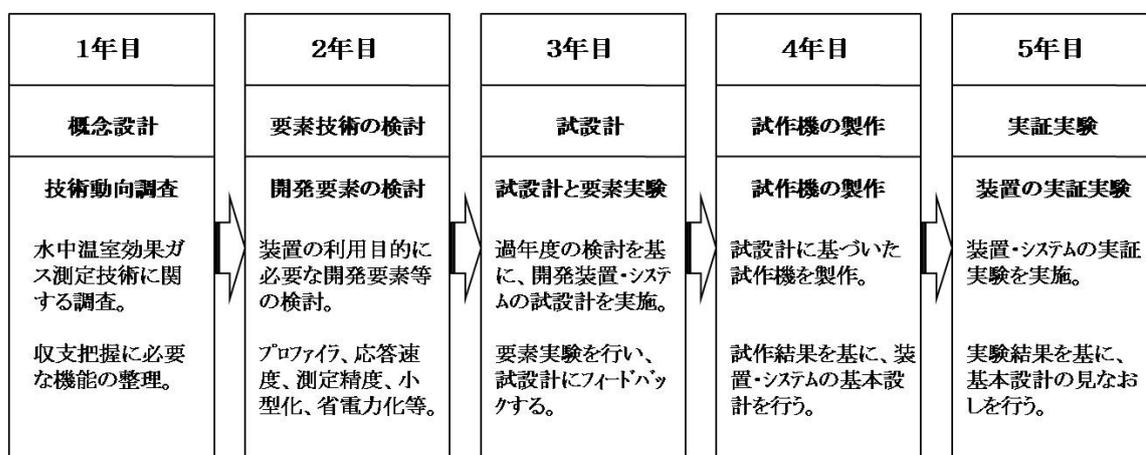


図 1 沿岸域 CO₂鉛直自動モニタリングシステム開発のロードマップ

2章 海水中の温室効果ガス測定技術に関する調査

海水中の CO₂等の温室効果ガス濃度の測定には、海水を採取し船上や室内にて分析する方法と、船舶やブイに自動観測装置を搭載し測定する方法がある。現状の技術では、前者は高精度で鉛直測定が可能であるが、密な水深層での評価や、長期間にわたるデータ等を得るには莫大な時間・費用・労力を要し、時空間的に詳細なデータを得るのは困難である。後者は海表面層の水平的な、あるいは定点における連続観測が可能であるが、鉛直方向の観測には適さず 3次元像を描き出すには不向きである。それら問題点を解決しようと期待される観測技術が化学センサーを用いた時空間観測（鉛直的・水平的・連続的観測）である。

本章では、2.1節で海水中の温室効果ガスを計測する技術として、特に水中に投入して計測できるセンサー技術について、開発機関、測定原理、仕様や観測実績等を中心に取りまとめた。2.2節ではこれらセンサーを現場観測で使用するために必要な測定技術としてブイや昇降装置を使った連続観測技術について、文献調査や有識者ヒアリング調査をもとに取りまとめた。

2.1 海水中の温室効果ガス測定技術の概要

海水中の温室効果ガスを測定する技術として各種センサーが市販されている。これらに加えて、研究段階でも現場調査における実績のあるセンサー技術について調査した結果を以下に記す。

本調査研究では、鉛直観測に利用するという目的から、水中で使用できるセンサーで耐圧水深が 50m 以上のものを主に選定し調査を行った。また、海水中における CO₂挙動に係る指標としての pH（水素イオン指数：水素イオン濃度の逆数を常用対数にしたものが pH）や、生物活動の指標となる栄養塩や溶存酸素（DO）についても主要なセンサーについて調査を行った。各センサースペック値は、文献、メーカーカタログ値のほか、メーカーや輸入代理店への聞き取りによるものである（表 2.1）。

- CO₂センサー（7機種）
- N₂O センサー（1機種）
- CH₄センサー（2機種）
- 水中質量分析センサー（2機種）
- NO₂-NO₃（硝酸-亜硝酸）センサー（2機種）
- PO₄（リン酸）センサー（1機種）
- pH センサー（5機種）
- DO センサー（3機種）

2.1.1 CO₂センサー

2.1.1.1 pH-CO₂ハイブリッドセンサー

pH-CO₂ハイブリッドセンサーは、独立行政法人海洋研究開発機構（以降、JAMSTEC と表記）と紀本電子工業㈱が開発した（図 2.1.1.1）。本センサーは pCO₂測定に比色法、pH 測定にガラス電極法を採用し、異なるセンサーを一体化することにより pCO₂と pH の同時測定を可能にしている。

本センサーではまず、CO₂濃度の指標として pH 指示薬溶液を用い、これをセンサー内部のポンプ構造によりチューブ状のガス透過膜に移送する。疎水性のガス透過膜は外側が海水と接触しており、海水中の CO₂が膜内に透過する。この透過した CO₂による pH の変化に応じてチューブ内の指示薬の色が変わるため、この色調変化に相当する CO₂濃度を計測するという仕組みになっている。

ここで用いられる指示薬はセンサー内部で循環させることにより、繰り返し使用が可能である。本センサーは振動や水圧変化を考慮し、色の変化を計測する光学系に、耐圧レンズを使用している。これにより従来機器に頻繁に用いられていた光ファイバーと比べて、ノイズやドリフトが低減されている。pH 測定には、応答性に優れ、小型・省電力かつ温度影響が少ないガラス電極法が採用されている。

本センサーの計測範囲は pCO₂で 300~2000 μ atm、測定精度 \pm 3 μ atm、分解能は 1 μ atm である。一方の pH については pH 6.0~8.3 の範囲で測定が可能で、測定精度 pH 0.01、分解能は pH 0.001 である。90%応答速度は CO₂測定が 3 分以内、pH 測定は 20 秒以内、測定頻度は 1 秒である。形状は制御センサー部が直径 87mm×長さ 570mm で、ポンプ部は直径 90mm×長さ 326mm である。水中重量は 2.0kg、耐圧は深度 3000m である。本機器は AUV や ROV への搭載を念頭に置いた開発が行われているが、データロガー内蔵型であるため外部電源や電池ユニットとの接続によりプロファイラや係留観測用としても運用可能である。

2012 年 9 月には、水深 1600m の沖縄トラフ海域において本センサーを ROV に搭載した調査が実施され、熱水噴出孔接近時に pH の低下とともに pCO₂が上昇する変化を捉えることに成功している。実際の測定データからは、pH と pCO₂の応答速度の違いにより、pCO₂に比べて、pH がより詳細な環境変化を捉えることが確認された。同じく、2012 年 8 月に日本海 上越沖メタンハイドレード賦存海域において、メタン溶存による相対的な CO₂低下というメタンブルームに特徴的な変化を捉えることに成功している（中野ら、2013; Nakano et al., 2013 ; JAMSTEC プレスリリース、2013）。

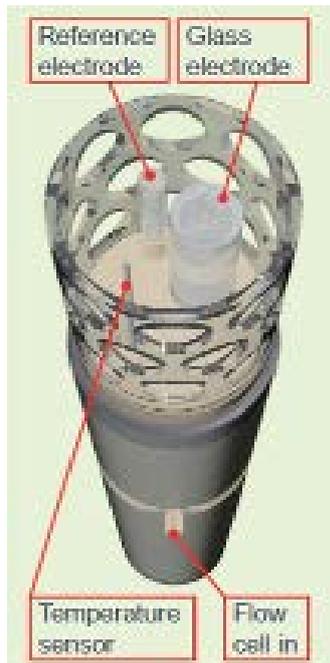


図 2.1.1.1 pH-CO₂ハイブリッドセンサーの外観 (Nakano et al., 2013)

2.1.1.2 SAMI-CO₂

SAMI-CO₂ (Submersible Autonomous Moored Instrument) はアメリカ Sunburst Sensors (以降、Sunburst) 社によって、1990 年に開発された海水・淡水域で使用できる pCO₂ センサーである (図 2.1.1.2)。

本センサーは、ガス透過膜に包まれた pH 指示薬 (BTB 溶液) を内部の吸光度分析計で測定することで、計機周囲の海水と平衡状態になった pCO₂ を計測する。本センサーの計測範囲は pCO₂ で 150~700ppm (測定レンジは変更可能) であり、分解能は 1 μ atm、データ精度は $\pm 3\mu$ atm、応答速度は 5 分である。アルカリ電池 8 個と試薬 1L を搭載し、1 時間毎の計測を行った場合、1 年以上のデータ取得が可能である。

安定性と応答性を向上させるために、SAMI-CO₂ の半透膜内 pH 指示薬が計測毎に交換される構造となっていることが特徴である。その結果として 6 ヶ月間の長期観測でもドリフトは 1ppm 以下である (Sunburst 社 HP 情報より、D.Schar et al., 2010)。形状は直径 150mm、長さ 580mm の円筒型で、重さは水中重量 1.1kg である。耐水圧については標準仕様で 100m であるが、ハウジングを変更することにより最大 1200m まで対応可能である (日本環境計測 HP 情報より)。

開発者である Dr. M. D. DeGrandpre により 1995 年にウッズホール湾において、32 日間の係留計測が行われ、Flow Analyzer 方式の pCO₂ 計測と比較しドリフトがほとんど見られず高い長期安定性を示すことが確認されている (DeGrandpre, 1995)。その他、米国国立海洋大気庁 (NOAA) のサンゴ礁早期警戒システムの一部として SAMI-CO₂ センサーが展開されており、サンゴ礁生態系の CO₂ モニタリングが行われている。またバハマにある North Norman's Reef にも複数台設置されモニタリングに利用されている (Sunburst 社 HP 情報より)。日本国内においては、防災研究所災害実験センターが大湊波浪観測所において、10 分毎サンプリングで長期観測を行った事例が報告されている (岩田ら、2004)。



図 2.1.1.2 SAMI-CO₂の外観 (Schar et al., 2010)

2.1.1.3 HydroC/CO₂

HydroC/CO₂は 1999 年にドイツの CONTROS Systems & Solutions GmbH (以降、CONTROS) 社によって開発された pCO₂センサーである (図 2.1.1.3)。本センサーは、海水に接触している 10 μ m 半透膜を介して平衡となった CO₂ガスを、内部回路内でポンプにより循環させ、センサーヘッドスペースにおいて非分散型赤外線吸収法 (NDIR) により計測する。また内部ガス回路はヒーターを経由しガス温度を適切な値に保って計測する。そのため計測に際しては 2~27 分のウォームアップが必要となる。ウォームアップに要する時間は海水温に依存して増減する。

本センサーの計測範囲は pCO₂で 200~1000ppm (校正によって計測レンジ変更可能 : 200~3000ppm、200~5000ppm)、精度は読取り値の \pm 1%、分解能は 1ppm 以下である。消費電力については、12V 電圧を使用した場合、計測時は平均 3~4W、ウォームアップ時は 10W 以下である。本センサーは、デュアルチャンネル NDIR を採用し、内部ガス回路をソーダライムで充填したカラムに接続して、定期的に自動でゼロ点補正を行っている。これによって、長期観測時のドリフト対策としている。(Schar et al., 2010 ; CONTROS 社 HP 情報より)。

応答速度は半透膜周りにおける海水流速、水温、圧力 (水深) に依存し、初期信号の受信まで 5 秒、63%応答時間 6 分、90%応答時間 15 分である。ただし CONTROS 社が追加備品として販売している外付けポンプを装着すると、63%応答時間 90 秒 90%応答時間 210 秒に短縮することが可能である。形状は直径 90mm \times 長さ 376mm の円筒型で、重さは水中重量 3 kg、耐水圧は標準仕様で 2000m である (Schar et al., 2010 ; CONTROS 社 HP 情報より)。

アルゴフロートに搭載され 2010 年 11 月から 2011 年 6 月にかけて 4 度の漂流観測が実施された。計 156 日間の観測を行い、水深 200m から表層 0.5m までの pCO₂の鉛直プロファイルを合計 123 回取得した (Fiedler et al., 2013)。その際、鉛直方向への上昇速度 0.06 m/s、観測インターバルを 5 秒間に設定され、鉛直観測が行われた。



図 2.1.1.3 HydroC/CO₂の外観
(CONTROS 社ホームページより引用)

2.1.1.4 PSI CO₂-pro

PSI CO₂-pro はカナダ Pro-Oceanus Systems Inc によって 1999 年に開発された pCO₂ センサーである (図 2.1.1.5)。本センサーは、Pro-Oceanus Systems Inc が特許を取得している管状半透膜を介して平衡となった CO₂ガスを、内蔵ポンプにより検出部に送気し NDIR により計測する。

本センサーの計測範囲は pCO₂で 0~600ppm (製品注文時に計測範囲は変更可能)、測定精度±2ppm、分解能 0.01ppm である。2V 電圧電源接続時の場合、必要電流は通常時 0.4A、ウォームアップ時 0.8A となる。長期観測時のドリフト対策としては、電源が入っていない時は自動でゼロ点補正を行う。ゼロ点補正時はガスがセンサーに内蔵されている CO₂吸収剤を経由する構造になっている。

応答速度に関しては管状半透膜周りにおける海水流速、水温、圧力 (水深) に依存し、通常 2.5 分とされている。形状は直径 173mm、長さ 330mm の円筒型で、これに 100mm のコネクタがついている。重さは水中 0.4 kg、耐水圧は 200m とされている。

EuroSITES プロジェクトでは、South Adriatic に設置された係留ブイの水深 12m の位置に本センサーが設置され、長期モニタリングが行われた (Schar et al., 2010 ; Cardin, 2009 ; Pro-Oceanus Systems 社 HP 情報より)。



図 2.1.1.4 PSI CO₂-pro の外観
(Pro-Oceanus Systems ホームページより引用)

2.1.1.5 MAPCO₂

MAPCO₂ はモントレイ湾水族館研究所 (Monterey Bay Aquarium Research Institute、以降 MBARI と表記) と NOAA's Pacific Marine Environmental Laboratory (PMEL) によって開発された pCO₂ センサーである (図 2.1.1.5)。その後、2008 年にこの技術は Battelle Memorial Institute に渡り、Battelle Seaology 社より CO₂ Monitoring System として販売されている。

本センサーは、センサー内の CO₂ 検出器を海水で充たし、搭載したガスボンベから標準ガスを送り込むことで、平衡状態となったガスを NDIR で計測する。

地球規模での炭素循環の長期観測が、NOAA/PMEL が主体となって、世界各国の研究機関と協力して行われている。本取り組みにおいて、MAPCO₂ を搭載した係留ブイ観測が実施されており、2009 年時点で世界 13 箇所に展開されている。このシステムは 3 時間毎計測で、400 日以上稼働が可能であり、中には 1.5 年以上の連続稼働実績も報告されている (Sabine, 2009)。

MAPCO₂ 搭載の係留ブイシステムにはイリジウム衛星データ通信に対応しており、リモートコントロールにより計測データを陸上基地へ送信することができる (Schar et al., 2010)。ただし、外洋における表層係留ブイでの運用を目的として作られているため、水中での使用例は報告されていない。



図 2.1.1.5 MAPCO₂の外観 (Schar et al., 2010)

2.1.1.6 CO₂ Optode

CO₂ Optode は Aanderaa Data Instruments AS (以降、Aanderaa)社によって研究開発中の pCO₂ センサーである (図 2.1.1.6)。ポリエステルやガラス基盤に薄いポリマー膜を塗布したセンサー基部に、海水中 CO₂ が接触すると、ガス態のみが透過することで膜内部に pH 変化が生じる。この変化によって、ポリマー膜内物質が青色 LED により励起される。同じく内部に備えられた赤色 LED による赤色蛍光と励起光との位相変化を計測し CO₂ 濃度を測定する。

CO₂ Optode の大きな特徴のひとつとして、類似のセンサーと比較して省電力であることが挙げられる。5 秒間隔での計測では 80mW、1 分間隔での計測においては 7mW の消費電力量となる。また測定に際しては蛍光の持続時間を測定することにより pCO₂ 濃度を計測する手法を採用しており、単純に蛍光強度を測定する手法とは大きく異なる。このため、他のセンサーと比べてもドリフトが大幅に少なくなる。

本センサーの計測範囲は pCO₂ 濃度 0~50000µatm、応答時間は 5 分である。反応性が水圧により影響を受けることが報告されており (Atamanchuk, 2013)、100 気圧環境下において 700µatm で 3.5%、3000-3200µatm で 4.4%、10000µatm で 6%の応答性低下が確認されている。またセンサー基部が H₂S に対しても感度が高く、高 H₂S 環境下での測定には不適である。

形状は直径 36mm×長さ 86mm の円筒型で、耐水圧は 600m (オプションにより 1200m) である。本機器は未だ市販されていないが、2012 年にスコットランド Ardmucknish 湾において実施された CO₂ 人為漏出実験 (Quantifying and Monitoring Potential Ecosystem Impacts of Geological Carbon Storage、以降 QICS プロジェクトと表記) において現場海水のモニタリングに使用されている。試験期間中 CO₂ Optode は、後述の ISFET pCO₂ センサー等とあわせて水深 12m 地点の CO₂ 漏出地点近傍に設置され、水中の pCO₂ を連続的に観測した (Aanderaa 社 HP 情報より)。



図 2.1.1.6 CO₂ Optode の外観
(Aanderaa 社ホームページより引用)

2.1.1.7 ISFET pCO₂ センサー

ISFET (Ion Sensitive Field Effect Transistor : イオン感応性電界効果型トランジスタ) を用いた現場型 pCO₂ センサーの研究開発が行われている(下島ら、2006)。ISFET は本来、医療用として水溶液中の pH を計測することを目的として開発されたデバイスであり、高精度であることに加えて応答時間や初期安定時間が短く、さらにセンサーの小型化が容易という特徴を持っている。

ISFET pCO₂ センサーは、海水中の CO₂ をガス透過膜により透過させ、透過膜内部の内部液 pH の変化を ISFET pH センサーにより測定する。またガス透過性が高いアモルファステフロン膜をガス透過膜として採用し、海水中で迅速なガス透過と気液平衡を図っている。90%応答速度は水温 2~4℃環境において 60 秒である。耐水圧 3000m の実績を有する。

ISFET のもうひとつの特徴としては、pH センサーを内蔵していることである(図 2.1.1.7)。本センサーは ISFET pH 電極と圧力補償型参照電極を使用し、現場計測において高い応答性と安定性を有している。

ISFET pCO₂ センサーは、下島らにより沖縄海域鳩間海丘内水深 1500m 地点や、南部マリアナトラフ海底熱水活動域 3000m 地点等の深海底での観測をはじめ、QICS プロジェクトにおいて浅海部での定点観測にも用いられている (Atamanchuk, 2013)。

また鹿児島県たぎり (若尊カルデラ) では本センサーを含めた多数の計測機器 (温度、濁度、pH、pCO₂、DO、クロロフィル a、ORP) を AUV に搭載しマッピング観測を行っている (RITE 報告書、2008)。

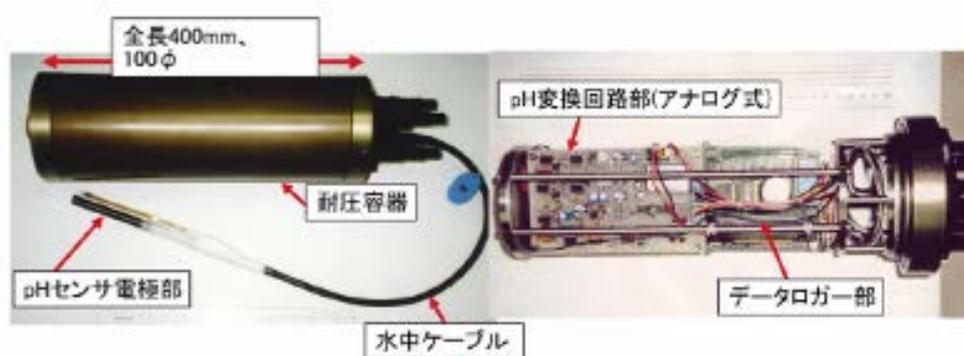


図 2.1.1.7 ISFET センサーの外観 (下島ら、2006)

2.1.2 N₂O センサー

2.1.2.1 Unisense マイクロ N₂O センサー

Unisens マイクロ N₂O センサーはデンマーク UNISENS 社によって開発された (図 2.1.2.1-1)。本センサーは、主としてラボ内における液中あるいは大気中の成分分析を想定した設計となっているが、同社開発のフィールド測定用の MiniProfiler MP4 System (図 2.1.2.1-2) や水中メーターと同時に使用することで、水中での計測が可能となる。

本センサーの計測原理は二重ガラス管の構造により O₂ と分離後、計測を行う。計測範囲は N₂O 濃度で 500μM、分解能は読み取り値の 2%、検出下限は 0.1~0.5μM となっている。センサー部分のメーカー保障寿命は 2 ヶ月と設定されている。応答速度に関しては Unisense 社の発表によれば 90% 応答速度が 10 秒以下とされている。センサー形状は、長さ 150~200mm で、センサーチップ外径は 4 種から選択可能 (20~30μm、40~60μm、75~120μm、400~600μm) である。

野外での使用実績として、同種のセンサー (O₂ センサー) が、2008 年にフランス Canche 湾干潟で 6 日間の定点観測に用いられた事例が報告されている (Unisense 社 HP 情報より; Denis et al., 2012)。その際、15~20 分毎で 3~5mm (空間分解 100μm) の鉛直微細構造を計測している。



図 2.1.2.1-1 Unisense マイクロ N₂O センサーの外観
(Unisense 社ホームページより引用)



図 2.1.2.1-2 Unisens MiniProfiler MP4 System の外観
(Unisense 社ホームページより引用)

2.1.3 CH₄センサー

2.1.3.1 METS メタンセンサー

METS メタンセンサーは 1999 年に CAPSUM Technologie GmbH 社 (現 Franatech GmbH 社) により開発された。(図 2.1.3.1)。本センサーは、水中下でのメタンの検出・モニタリングが可能であり、冷水湧出帯環境に重なって広がる水域内のメタンリッチプルーム信号の検出や、メタンの長期モニタリングなど幅広く使用されてきた。

METS センサーは、用途別に 3 種の測定手法を採用している。この中で本調査において対象としている水環境モニタリング用途としては、Classic METS センサーが該当する。本センサーは、酸化第一スズ (SnO₂) 半導体検知器を備えたガス透過膜を用いて CH₄を測定する。SnO₂半導体は、酸化できる全てのガスと反応してしまうため、メタンを計測するためにはメタンのみが酸化される温度である 400°C に設定する必要がある。

測定範囲は、標準仕様で 50nM~10μM、外付けポンプを必要とする高感度仕様で 1nM~500nM、Low range 仕様で 20nM~1μM、High range 仕様で 1μM~40μM となっている。METS センサーは検出部に長い拡散経路を持つため、±10nM の変化を検出することができる。必要電流は 12V 電圧電源接続時の場合、40~120mA である (Franatech 社 HP 情報より)。

応答速度については、90%応答速度は 1~30 分かかる (膜の厚さによって決まる)。形状は直径 49mm、長さ 200mm の円筒型で、重さは水中重量 0.5kg、耐水圧は 2000~4000m となっている。2005 年から 2006 年にかけてドイツの Eckenford 湾、熊野灘の泥火山近傍、高濃度メタンが溶存する初島沖において、改良した METS センサーを用いて実海域観測を行った例が報告されている (澤田ら、2008)。また Naval Research Laboratory が METS センサーを Submersible operator に搭載し、メキシコ湾においてメタンの計測を行った例が報告されている (Lamontagne, 2001)。



図 2.1.3.1 METS メタンセンサーの外観
(Franatech 社ホームページより引用)

2.1.3.2 HydroC/CH₄

HydroC/CH₄は 3.4 μ m 波長の直接非分散赤外光吸光度分析に基づく溶存メタン (CH₄) センサーである (図 2.1.3.2)。この計測方法では、内部ガス回路をヒーターを経由してガス温度を適切な値に保って計測する。そのため計測に際しては 2~27 分のウォームアップが必要となる。ウォームアップに要する時間は海水温に依存して増減する。

計測範囲は 30nM~500 μ M、精度は読み取り値の 3%、分解能 3~30nM であるとされている。消費電力は 12VDC 接続時に 300mA である。ドリフト対策としては、デュアルチャンネル NDIR 装置を用いることで長期の計測にも対応している。検出機の 90%応答速度は 30 秒未満とされているが、膜厚や水圧によって変化する。CONTROS 社のパンフレット資料には外付けポンプ使用で 90%応答速度は 100 秒以下と記されている。

形状は直径 90mm、長さ 376mm の円筒型で、重さは水中重量 3 kg、耐水圧は標準仕様で 2000m である (CONTROS 社 HP 情報より)。2010 年の時点において HydroC/CH₄を用いたデータ計測事例やユーザーからのフィードバックによる投稿論文が少ない (Boulart et al.,2010)。



図 2.1.3.2 HydroC/CH₄の外観 (CONTROS 社ホームページより引用)

2.1.4 水中質量分析センサー (UWMS : Under Water Mass Spectrometer)

2.1.4.1 NEREUS

NEREUS (Novel, Efficient, Rapid Evaluation of Underwater Spectra) は、WHOI (Woods Hole Oceanographic Institution) によって 2002 年に開発された水中に溶存するガス態を測るセンサーである (図 2.1.4.1)。

測定原理としては、水中に露出した半透膜を介して外部溶存ガスと平衡になった内部ガスを、真空まで減圧し、高温下で荷電することでイオン分子とし、そのイオンを電磁氣的に分離して検出するという、質量分析法を用いる。

本センサーは 2~150amu のイオン分子について計測が可能であるとされており、CO₂、CH₄等の定性的な検出が可能となっている。検出限界はガス濃度 1ppm 以下である。消費電力は減圧、加熱、荷電、イオン加速で電気を使用するため、20W 程度とされている。

NEREUS は 12V、7Ah のバッテリーを二つ内蔵している。応答速度は、CO₂、CH₄の検出については理論上 15 秒以下とされているが、半透膜の物理的、化学的な性質に大きく左右される。通常の計測間隔としては、5~15 分程度に設定されている。形状は直径 400mm 程度の球型で、重さは重量 22 kg、耐水圧は 200m である。

米国ボストンの北に位置する Upper Mystic Lake において、NEREUS を AUV (KEMONAUT) に搭載して 3 時間の潜行調査が実施された。本調査では表層から深度 25m までにおける CH₄の計測が行われている (Hemond et al., 2002 ; Boulart et al., 2010 ; Camilli et al., 2004)。



図 2.1.4.1 左図 : NEREUS の外観 (Camilli et al., 2004)、
右図 : AUV 搭載時外観 (Hemond et al., 2002)

2.1.4.2 Inspectr200-200

Inspectr200-200 はフロリダ大学によって 2002 年に発表された、質量分析法により水中の溶存ガスを測定するセンサーである (図 2.1.4.2)。

測定原理としては、PDMS (ジメチルポリシロキサン) 毛細管にポンプで計器周囲の水を送り込むことで内部ガスを外部溶存ガスと平衡状態にした後、質量分析法を用いて計測を行っている。本センサーは 1~600amu のイオン分子について計測が可能であり、CO₂、CH₄、N₂O 等の溶存気体が検出される。検出限界としてはガス濃度 1~5ppb 以下である。

消費電力は PDMS 毛細管への送水ポンプ、内部気体の減圧、加熱、荷電、イオン加速で電気を使用するため、20W 程度とされている。応答速度は、18 種の分子量を選択して 5 秒で 1 データを作成するが、通常の計測間隔としては、5~15 分程度に設定されている。

形状は直径 190mm、長さ 1400mm、重量は 39kg である。耐水圧は最大 200m である (Short et al., 2006)。Alfred Wegener Institut が、北海とバルト海、Lake Constance で計測を行った例が報告されている (Alfred Wegener Institut 社 HP 情報より)。



図 2.1.4.2 Inspectr200-200 の外観
(Alfred Wegener Institut ホームホームページより引用)

2.1.5 その他のセンサー

2.1.5.1 栄養塩センサー

現在市販されている水中栄養塩センサー（硝酸塩、リン酸塩）には、発色試薬法と、紫外吸光スペクトル法が用いられている。

1) 発色試薬法センサー

この手法は海水と発色試薬をマイクロチューブ内で混合し、吸光度法を利用して測定するといった従来の実験室実験と同様の原理であるため、信頼性が高い。しかしながら、応答時間が遅く、測定による廃液の処理、試薬消費量による計測期間の限界等といった問題もある。ここでは市販されているセンサーとして、YSI 社の硝酸塩センサー：YSI 9600、Wet Lab 社のリン酸塩センサー：Cycle-PO₄を紹介する（図 2.1.5.1-1）。



図 2.1.5.1-1 左図：YSI 9600 センサー外観、右図：Cycle-PO₄ センサー外観
(それぞれ YSI 社、WetLab 社のホームページより引用)

2) 紫外吸光スペクトル法

この手法は上記の原理とは異なり、紫外線スペクトルの吸収特性から濃度を推定する原理を用いている。本手法は硝酸塩のみについて開発されている。CDOM（有色溶存有機物）や懸濁粒子等による吸収の補正が必要な場合があるが、発色試薬法に比べれば小型で利用が簡便であり、応答速度も速い。ここでは、市販されているセンサー例として Satlantic 社の ISUS V3 を紹介する（図 2.1.5.1-2）。



図 2.1.5.1-2 ISUS V3 センサー外観
(Satlantic 社ホームページより引用)

2.1.5.2 pH センサー

現在、pH を水中で計測するセンサーとしては、ガラス電極法、指示薬法、半導体センサー法によるものがある。

1) ガラス電極法

ガラス電極法とは、ガラス電極と比較電極の 2 本の電極を用いて、この二つの電極間に生じた電圧（電位差）を計測し、ある溶液の pH を測定する方法である。電位の平衡時間が早くて再現性がよいこと、また酸化剤や還元剤の影響を受けることが少なく、様々な溶液について測定することができることから、pH 測定では最も多く用いられている。本手法を用いる pH センサーとしては Sea-Bird Electronics 社の SBE 18（図 2.1.5.2-1）や、紀本電子工業(株)と高大学が共同開発した SP-11 が代表的である。



図 2.1.5.2-1 SBE 18 センサー外観
(Sea-Bird Electronics 社ホームページより引用)

2) 指示薬法

指示薬法とは、緩衝液等を用いて種々の pH に対応する標準色を作っておき、サンプル中の指示薬の色とを比べる方法をいう。水中で使用するにあたり半透膜内に pH 指示薬と吸光度計を内包し、吸光度分析することで pH を計測する原理が用いられている。本手法を用いる pH センサーとしては、Sunburst 社の SAMI-pH（図 2.1.5.2-2）が代表として挙げられる。



図 2.1.5.2-2 SAMI-pH センサー外観
(SunBurst 社ホームページより引用)

3) 半導体センサー法

半導体センサー法はガラス電極の機能を半導体チップで実現しようとするものである。ISFET（イオン応答電界効果トランジスタ）とよばれ、ガラスを用いないため破損しにくい特長のほか、小型化・微小化が可能という利点もある。本手法を用いる pH センサーとしては、市販されている Satlantic 社の SeaFET（図 2.1.5.2-3）や、研究開発段階ではあるが、前述の電力中央研究所・下島らによる深海用 pH/pCO₂ センサーが挙げられる。



図 2.1.5.2-3 SeaFET センサー外観
(Satlantic 社のホームページより引用)

2.1.5.3 DO センサー

現在、DO を水中で計測するセンサーとしては、隔膜ポーラログラフ法、蛍光法によるものが主流となっている。

1) 隔膜ポーラログラフ法

隔膜ポーラログラフ法は、電極（作用極、対極）、内部電解質溶液をガス透過膜で遮断し、電極両極間に一定電圧をかけて酸化還元反応を行わせ、酸素濃度に比例して流れる電流を測定する手法である。内部電解質溶液には KCl または KOH が用いられ（取り扱いが容易な中性の KCl が用いられるケースが多い）、作用極には貴金属（プラチナ、または金）が、対極には銀・塩化銀（Ag/AgCl；KCl 内部液の濃度に対応して一定の電位となる）が用いられる。本手法を用いる市販 DO センサーとして、Sea-Bird Electronics 社 Sea-Bird SBE43（図 2.1.5.3-1）が代表的である。



図 2.1.5.3-1 Sea-Bird SBE43 外観（Sea-Bird Electronics 社ホームページより引用）

2) 蛍光法

蛍光法は、青色 LED（発光ダイオード）の光で励起された蛍光物質より発せられる蛍光が、酸素により消光（クエンチング）される現象を利用して DO を算出する方法である。蛍光法による DO 測定は比較的新しい方法であり、内部液の交換が不要であるため現場測定用に普及し始めている。本手法を用いる市販 DO センサーとしては、Aanderaa 社 Oxygen Optode、JFE アドバンテック(株) RINKO が代表として挙げられる(図 2.1.5.3-2)。



図 2.1.5.3-2 左図：Oxygen Optode センサー外観、右図：RINKO I/ID センサー外観（ともに Aanderaa 社ホームページ、JFE アドバンテック(株)ホームページより引用）

表 2.1-1 センサー一覧表 (測定項目: 溶存態温室効果ガス)

測定項目	No.	センサー	メーカー、研究機関	測定原理	測定範囲	測定精度	分解能	反応速度	対応水深	形状	重量	消費電力	電源	データ記録	参考価格	
pCO ₂	1	pH-CO ₂ ハイブリッドセンサー	紀本電子工業(株)、JAMSTEC	ガス透過膜+ pH試薬の吸光光度分析	300~2000µatm	±3µatm	1µatm	90%応答時間 3min	3,000m	ポンプユニットD:90mm L:326mm メインユニットD:87mm L:570mm	空中: 5.8kg 水中: 2.0kg	0.2A	外付け DC24V	内蔵記録式 microSD 4GB	800万円	
	2	SAMI-CO ₂	Sunburst Sensors	ガス透過膜+ pH試薬の吸光光度分析	150~700ppm	±3µatm	1µatm	90%応答時間 5min	600m	D:150mm L:580mm	空中: 7.6kg 水中: 1.1kg	1hごとの計測で 6ヶ月間使用可能	18 D cell アルカリ, 13.5V	内蔵記録式	200万円 (+半年毎 に要メンテ 20万)	
	3	HydroC/CO ₂	CONTROS Systems & Solutions GmbH	ガス透過膜+ 高精度光学解析式NDIR	200~1000ppm 200~3000ppm 200~5000ppm	±1%	<1ppm	63%応答時間 6min 90%応答時間15min 外付けポンプ追加 63%応答時間90sec 90%応答時間210sec	2,000m 4,000m 6,000m	D:90mm L:376mm	空中: 4.7kg 水中: 2.2kg	計測時: 平均3~4W 初期待機時: 10W以下 (12V電源使用時)	11~24VDC	内蔵記録式	500万円	
	4	PSI CO ₂ -pro	Pro-Oceanus System Inc.	管状ガス透過膜+ 高精度光学解析式NDIR	0~600ppm	±2ppm	0.01ppm	2.5min	110m	D:173mm L:330mm	空中: 5.5kg 水中: 0.4kg	12V/0.4A (ウォームアップ:0.8A)	12±0.5VDC	内蔵記録式	550万円	
	5	MAPCO2 (Battele Seaology)	Battelle Seaology (PMEL/NOAA)	標準ガス曝気+ 直接NDIR	200~600ppm	±3ppm	0.01ppm						2.43kWh (およそ243A-hr)	10V(7~14.5V)		
	6	CO ₂ Optode	Aanderaa Data Instruments AS	ガス透過膜+青色LEDによるポリマー膜内物質の励起と赤色蛍光との位相変化を計測	0~50000µatm			90%応答時間 5min	600m (1200m)	D:36mm L:86mm		80mW (5秒 間隔計測) 7mW (60秒 間隔計測)	AADI RCM9 等に搭載可	AADI RCM9等に 依存		
	7	ISFETpH/pCO ₂ センサー	電力中央研究所	ガス透過膜+イオン感受性電解効果型トランジスタ (内部液のpH相関)				90%応答時間60sec (水温2~4°C)	1500m (実績:3000m)						内蔵記録式	
N ₂ O	1	溶存成分マイクロセンサー 亜酸化窒素(N ₂ O)センサー	Unisense	二重構造のガラス管構造によりO ₂ と分離後、電極にて還元させたN ₂ Oを計測	下限: 0.1~0.5µM 上限: 500µM	検出下限: 0.1~0.5µM (チップ径による)	2%	90%応答時間 10sec	センサー部: 50m	MiniProfler MP4 L:約1000mm H:約1000mm	MiniProflerMP4、ロガー部込みで重量約100kg	充電式内部バッテリー: 18H 外部バッテリー: 100H	12V	内蔵記録式 8~32GB	160万円	
CH ₄	1	HydroC/CH ₄	CONTROS Systems & Solutions GmbH	高精度光学解析式NDIR	<100nM/L~5µM/L	読み取り値の3%	<10nM/L	外付けポンプ付きで >7sec	2,000m 4,000m 6,000m	D:90mm L:376mm	空中: 4.7kg 水中: 2.2kg	12VDC, 400mA	11~24VDC	内蔵記録式	280万円 (2000m) +オプション 約300万円	
	2	METSセンサー	Franatech GmbH	熱触媒反応方式	標準)50nM~10µM 高感度)1nM~500nM 低レンジ)20nM~1µM 高レンジ)1µM~40µM	読み取り値の5%	4~5nM/L	反応速度 数秒 90%応答時間: 1~30min	2,000m Option: 3,500m	D:49mm L:200mm	(ステンレス): 空中 1.5kg 水中1.0kg (チタン): 空中1.0kg 水中0.5kg	12VDC, 40mA	9~36VDC	アナログ 出力、RS-485	161万円+ オプション: 52万円	
UWMS	1	NEREUS	Woods Hole Oceanographic Institution	半透膜+質量分析法	分子量: 2~150mnu 検出限界: 1ppm			5~15min (理論上は10sec)	理論上 200m	D:17 inch (416mm)の球型	重量22kg	20W	12V, 7Ah バッテリー x2			
	2	Inspectr200-200	フロリダ大学	PDMS毛細管+質量分析法	分子量: 1~600mnu 検出限界: 1~5ppb			5~15min (分子量18種を選択して5secで1データ)	最大 200m	D:190mm L:1400mm	重量39kg		20W			

網掛け部分は研究開発センサーであるため、データが開示されていないことを示す。

表 2.1-1 センサー一覧表 (測定項目: 栄養塩、pH、DO)

測定項目	No.	センサー	メーカー、研究機関	測定原理	測定範囲	測定精度	分解能	反応速度	対応水深	形状	重量	消費電力	電源	データ記録	参考価格
NO ₂ , NO ₃	1	YSI 9600	YSI	発色試薬+吸光度分析	高濃度用(海水用) 0.025~10.0 mg/L	読値の±5%、または0.2mg/Lの大きい方(0~10mg/L)、読値の±10%(6~10mg/L)	0.01mg/l	サンプリングレート 30min	61m	D:330mm L:710mm	空中18.2kg	バッテリー寿命:150日 (20°C、1時間毎測定)	バッテリーパック1個 (単1アルカリ電池14個)	3MB	300万円
	2	ISUS V3	Satlantic	紫外域スペクトル吸収測定法+ 数学的アルゴリズム	0.5~2000µM (0.007~28mg/l-N)	±2µM (0.028mg/l-N) または読値10%	±0.2µM (0.0028mg/l)	サンプリングレート 1Hz	200m (1000m)	D:114mm L:608mm	空中5.0kg 水中0.7kg	7.5W (0.625A・12V)	6~18VDC	256MB	550万円 (+電池40万)
PO ₄	1	Cycle-PO ₄	WET-Lab	発色試薬+吸光度分析	0.075~10µM (0.0023~0.3mg/L)	0.15µM (0.0046mg/L)		サンプリングレート 30min	200m	D:180mm L:560mm	空中6.8kg 水中0.37kg	125mA	10-18VDC	1GB	340万円
pH	1	SBE18 (pHオプションセンサー)	Sea-Bird Electronics, Inc	ガラス電極法	0~14	0.1pH	0.01	1sec	1,200	D:48mm L:337mm	空中:0.7kg	10mA	6-24VDC	SBE CTD シリーズに 依存	45万円
	2	SP-11海水pHセンサー	紀本電子工業㈱、高知大学	ガラス電極法	3.5~9	0.01pH	0.001pH	2sec	200m	D:76mm L:415mm	空中:1.5kg 水中:0.4kg	20mA スリープ時:0.3mA	リチウム CR123A 4本	内部記録 microSD 4GB	100万円
	3	SAMI-pH	Sunburst Sensors,LLC	発色試薬+吸光度分析	7~9	±0.003pH	0.001pH	3min	600m	D:150mm L:580mm	空中:7.6kg 水中:1.1kg	1hごとの計測で 6ヶ月間使用可能	18 D cell アルカリ,13.5 V	内臓記録 式	150万円
	4	SeaFET	Stalantic	ISFET半導体	6.5~9	0.05pH	0.01	20sec	50m	D:114mm L:406mm	空中:4.5 kg 水中:0.0 kg	計測中20mA スタンバイ3.5mA	内部バッテ リ 10.5 V 19.8 Ah	内部記録 容量2 GB	100万円 + メンテ費用 12万円
	5	ISFETセンサー	電力中央研究所	ISFET半導体		0.005pH		1sec	<3,000						
DO	1	SBE 43	Sea-Bird Electronics, Inc	隔膜ポーラログラフ法	0~15ml/L	0.1ml/L	0.01ml/L	0.5mil膜:2~5sec 1.0mil膜:8~20sec (ハウジング 交換で 7000m)	600	D:67mm L:299mm	空中:0.5kg 水中:0.1kg	6.5-24VDC 50mW	SBE CTDシ リーズに備付 可能	SBE CTD シリーズに 依存	130万円
	2	Oxygen Optode 3830	Aanderaa Data Instruments AS	蛍光法	0~11ml/L	0.18ml/L	0.03ml/L	1sec	6,000	D:36mm L:86mm	0.21kg	6-14VDC(SR10) 5-14VDC(RS-232)	AADI RCM9 等に搭載可	AADI RCM9等に 依存	127万円
	3	RINKO 1	JFEアドバンテック㈱	蛍光法	0~18ml/L	0.15ml/L	0.003~ 0.0012ml/L	1sec	7,000	D:54mm L:245mm	空中:0.9kg 水中:0.6kg	平均 125mA	CR-V3型リチ ウム電池 /3.3Ah	miniSD	105万円(ソ フト:6万 円)

網掛け部分は研究開発センサーであるため、データが開示されていないことを示す。

2.2 自動モニタリングが可能な測定技術の調査

従来、海洋観測における現場観測手法は、専ら海洋調査船を用いて、予め設定した調査海域および水深を対象に、センサー観測や採水分析を中心に行われてきた。現在でも多くの調査船により各種分析機器を用いた高精度な海洋観測が行われている。しかしながら、それら船舶を用いた海洋観測では時空間的な制限を受けるため、スポット的な観測が主であった。

それに対して、対象とする海域、地点において連続した観測データを一定期間取り続ける長期連続観測については、定点固定式係留系観測や海上構造物等に各種センサーを固定したモニタリング観測が行われてきた。

本章では、これら連続観測手法について、本事業で検討する自動モニタリングが可能な測定技術として整理する。今回整理する測定技術は、ある定点、固定水深においてデータを連続的に取得する手法をオイラー型測定技術として、漂流ブイ等あるスタート点から潮流や動力等により 2 次元的、または 3 次元的に移動しながら観測する手法をラグランジュ型測定技術として分類し、整理を行った。

2.2.1 オイラー型測定技術

2.2.1.1 定置ブイシステム

外洋沿岸問わず、定置ブイシステムによる連続観測はこれまで多くの海域で実施されてきた。外洋域で広く展開されている代表的な事例として JAMSTEC の海洋観測ブイ、TRITON ブイ (TRIangle Trans-Ocean buoy Network) による観測や、米国 MBARI の係留ブイ観測プログラムがある。

TRITON ブイは 1998 年より米国海洋大気庁 (NOAA) の TAO ブイ観測網と連携して太平洋赤道域の暖水が世界中の気候に及ぼす影響を調査することを目的としており、約 20 基の TRITON ブイが運用され、世界中の気象機関にデータを供給してきた。

近年はインド洋の熱帯域の大気・海洋変動メカニズム把握を目的とした観測が開始されており、それに伴い従来型のブイに比べ小型軽量化を図った小型ブイも開発されている (黒田ら、2006)。TRITON ブイは約 1 年間、錘を用いた 1 点係留で固定され、海表面での気象観測 (風向風速、温湿度、雨量等) と、水深 750m までの鉛直方向十数層における水温、塩分、流向流速等を各種センサーにより計測している (黒田ら、2001)。

2008 年からはブイ本体部に pCO_2 センサーも取り付け研究開発も進められている (海洋研究開発機構むつ研究所報告書、2010)。得られたデータは ARGOS 衛星通信 (1998 年の観測開始当初は ARGOS III、現在は ARGOS II) を用いて準リアルタイムに陸上へ伝送される。通信や機器類への電源供給は、ブイ本体に内蔵したリチウム電池を利用している。2006 年には機器の老朽化対策やハンドリング性の向上を目的とし、試験機 m-TRITON の研究開発

を経て、直径で 3/4、全体重量で 1/3 以下に小型軽量化されたインド洋小型トライトンブイが開発された。こうした小型ブイの開発にあわせて係留方式も見直され、従来の緊張係留方式から、係留ラインに余裕を持たせたスラック係留方式に見直され、ブイ本体の軽量化や設置回収作業労力の軽減化・時短化に寄与している（松本ら、2007）。

一方、MBARI の OASIS（Ocean Acquisition System for Interdisciplinary Science）や MOOS（MBARI Ocean Observation System）は、カリフォルニア半島のモンレー湾を観測フィールドとした海洋観測プロジェクトであり、OASIS は沿岸から沖合へのラインに沿った 3 定点でのブイ観測を中心とした観測、MOOS は水深の深い沖合（海底渓谷部）を対象域とし大学と連携して発電・通信ブイの開発等幅広い観測を実施している（Hamilton et al., 2003）

特に MOOS で開発された観測ブイシステム（図 2.2.1.1-1）は、係留索にライザーケーブルを用いたシステムであり、海底部に設置した観測機器に電力供給する。また荒れた海峡でも観測が継続できるようにカテナリー係留を用い、係留索上部に Snubber hose というコイル状になったケーブル部を装着しており、波浪によるブイ本体の上下動を緩和し係留索全体にテンションがかかりにくい機構を採用している（Chaffey et al., 2005）。海表面に浮かぶブイ本体には 4 枚の太陽光パネル（150W/パネル）と小型の風力発電機（300W）を搭載しており、内蔵バッテリーと併せてブイ部並びに海底観測機器に電力を供給できる（Hamilton et al., 2003）。

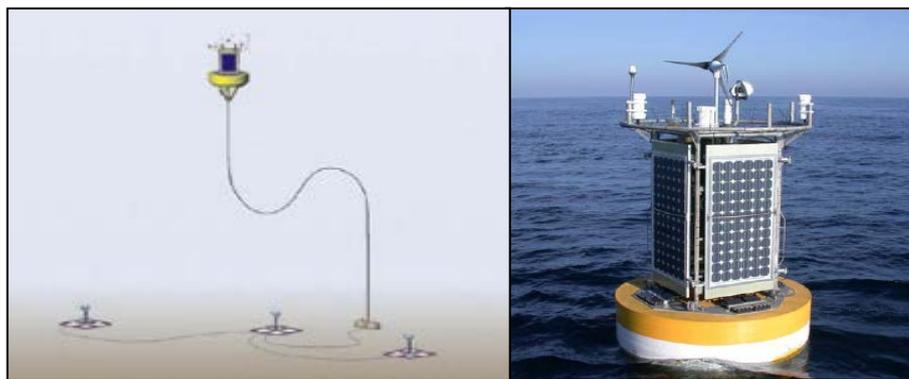


図 2.2.1.1-1 左図：係留ブイシステムと海底ネットワーク図、
右図：表層ブイ部外観（ともに Chaffey et al., 2005）

国内の沿岸域における係留ブイを用いた観測は水産・航路交通・環境等多くの分野で活用されており、観測項目も水温・塩分をはじめとする水質項目の他にも、波浪、流況、気象海象、油膜監視他であり、用いられるブイの大きさも様々である。代表的なものとして GPS 波浪ブイがある（図 2.2.1.1-2）。

GPS 波浪ブイは、1996年に東京大学地震研究所・加藤照之教授らによって洋上における津波を観測する津波計として開発され、2006年より国土交通省港湾局のナウファスシステムにGPS 波浪計として採用された（室戸沖 GPS 津波計沖合実証実験観測データ公開ページより）。ブイを製造した日立造船㈱のホームページ情報によると、GPS 波浪ブイは波浪、潮位、津波、水温、流向流速、気温、気圧、風向風速を観測でき、現在では国内沿岸域に16箇所に展開され、沿岸約20kmの沖合にて波浪や津波等を観測している。



図 2.2.1.1-2 GPS 海洋ブイ外観（日立造船㈱のホームページより引用）

2.2.1.2 モニタリングポスト

沿岸において水産養殖生簀の水温変動をモニタリングするために生簀本体に流速計や水温センサーを設置する、あるいは、発電所取水口近傍に水質センサーを設置する等、観測対象物（域）周辺の水質監視に固定センサーを利用する方法は古くから多方面で利用されてきた。それに対し、例えば湾全体を対象とした広域観測を行うために設置された構造物、あるいは既存構造物を活用したモニタリング観測が、近年大型港湾を中心に行われている。

国土交通省港湾局は、各湾における水環境の変化を捉えるため連続的な水質観測を実施し、環境メカニズムを把握することを目的とし、平成 22 年度より大阪湾、伊勢湾、東京湾において定点での連続観測を行っている（図 2.2.1.2）。国土交通省の資料（国土交通省報道発表資料、2010）によると、東京湾 5 箇所、伊勢湾 3 箇所、大阪湾では 13 箇所において既存の海上構造物を活用したモニタリングポスト（自動連続観測装置）が整備され、当該の湾を管轄する地方整備局がその観測データの収集、保守点検を実施している（千葉灯標のみ海上保安庁が管理）。

主な観測項目は、水温、塩分、DO、濁度、クロロフィル a、流向流速、風向風速であり、毎正時に観測を行い、観測データをインターネットや携帯電話を通じてリアルタイムに公表している。この計 21 箇所のモニタリングポストのうち、12 箇所においては自動昇降装置による鉛直観測が実施されている（表 2.2.1.2）。なお、自動昇降装置については、次節で述べる。



図 2.2.1.2 伊勢湾湾奥部モニタリングポスト外観
(伊勢湾環境データベースより引用)

表 2.2.1.2 モニタリングポスト一覧表

#	湾名	観測地点名	利用施設形態	海面鉛直方向の観測方法
1	東京湾	浦安沖	海上櫓(新設)	自動昇降式
2	東京湾	千葉港波浪観測塔	波浪観測塔	自動昇降式
3	東京湾	千葉灯標	灯標	自動昇降式
4	東京湾	千葉港口第一号灯標	灯標	固定式(3層)
5	東京湾	川崎人口島	東京アクアライン換気塔	自動昇降式
6	伊勢湾	湾奥部	伊勢湾シーバース	自動昇降式
7	伊勢湾	湾中部	灯標(ブイ)	自動昇降式
8	伊勢湾	湾口部	灯標(ブイ)	固定式(3層)
9	大阪湾	明石海峡航路東方灯浮標	既設灯浮標	固定式(1層)
10	大阪湾	洲本沖灯浮標	既設灯浮標	固定式(1層)
11	大阪湾	関空MT局	既設波浪観測塔	自動昇降式
12	大阪湾	神戸港波浪観測塔	既設波浪観測塔	自動昇降式
13	大阪湾	淀川河口	灯浮標(新規設置)	固定式(3層)
14	大阪湾	阪南沖窪地	灯浮標(新規設置)	自動昇降式
15	大阪湾	堺浜	灯浮標(新規設置)	自動昇降式
16	大阪湾	六甲アイランド東水路中央第三灯標	既設灯浮標	固定式(18層)
17	大阪湾	浜寺航路第十号灯標	既設灯浮標	固定式(18層)
18	大阪湾	淡路交流の翼港	既設防波堤	固定式(2層)
19	大阪湾	須磨海釣り公園	既存施設	固定式(2層)
20	大阪湾	大阪港波浪観測塔	既設波浪観測塔	自動昇降式
21	大阪湾	岸和田沖	既設波浪観測塔	自動昇降式

(国土交通省資料、2010 をもとに作成)

2.2.1.3 自動昇降装置

2.2.1.1 で紹介した定置ブイシステムは、化学センサー等を予め決められた水深に固定し時系列的に連続観測を行えるが、空間的な拡充を図るには、固定センサーや係留ブイを多数設置することが必要となり、結果として初期コストを増大させることになる。そこでウインチ等の動力を利用してセンサーをある水深層内で昇降させるシステムが開発された。

名古屋大学の才野ら（当時）は日油技研工業㈱と共同で自動昇降式ブイシステムの開発を行い、相模湾や太平洋域における海洋基礎生産量の観測を行った（才野、2007；Fujiki et al.,2008）。この自動昇降ブイシステムは、昇降する Profiling Buoy 部とウインチを備えた中層中立ブイの Underwater Winch 部で構成される。観測データの転送は、海表面浮上時に衛星回線を介して行われる（日油技研工業㈱ニュースレター、2010）。

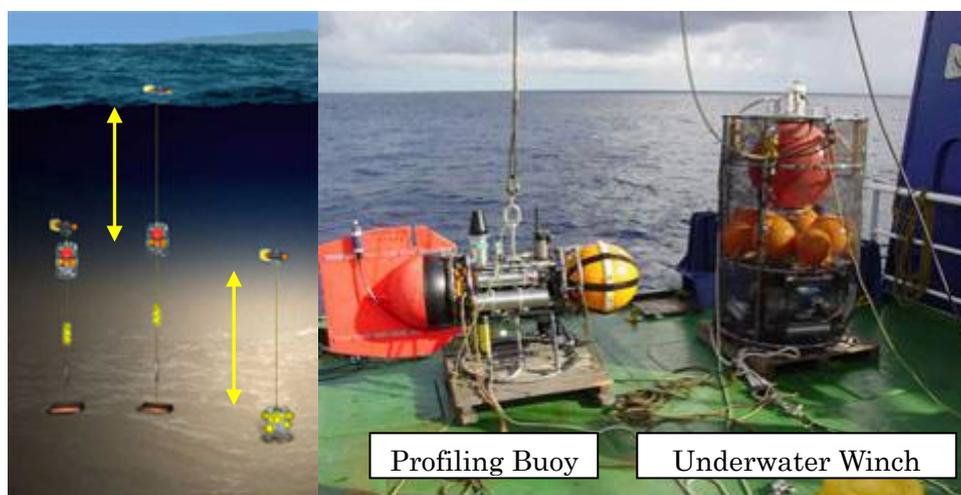


図 2.2.1.3-1 左図：自動昇降ブイシステム概念図、右図：自動昇降ブイシステム外観
（日油技研工業㈱のホームページより引用、作図）

自動昇降ブイシステムの Profiling Buoy 部は、水深 150m 以深の無光層水深で待機するよう設定されているため、機器への生物付着の影響を軽減できるとともに海表面の波浪影響を受けにくいことが確認されている（JAMSTEC・藤木主任研究員へのヒアリングによる、別添資料「有識者ヒアリング調査結果シート」ヒアリング結果報告（1）参照）。この自動昇降ブイシステムを用いた大水深域（数千 m 深度）における海洋観測は JAMSTEC に引き継がれ、現在も太平洋上の観測定点において有光層内の海洋基礎生産量の連続観測を継続中である（Fujiki et al., 2011）。

また日油技研工業㈱では中層中立ブイタイプのほかに、海底設置型の自動昇降ブイシステムを開発販売しており、海底熱水鉱床等の海底資源開発系のモニタリングに活用されている（図 2.2.1.3-1 左の概念図の右端のイメージ図が海底設置型）。これら自動昇降ブイシステムは、基本的に電源供給を内蔵バッテリーのみで賄っており、JAMSTEC の海洋基礎生

産観測では3日に1回の昇降（観測）で約1年間の連続観測を行った実績を持つ（藤木主任研究員ヒアリングによる）。このほかにもカナダ Victoria 大学が実施した海底ケーブルを用いた観測網システム（NEPTUNE 計画）に VPS（Vertical Profiler System）として採用され、海底ケーブルを介して海底近傍鉛直観測データを送信し、かつケーブルを通じて装置に給電する研究が進められている（中村ら、2009）。

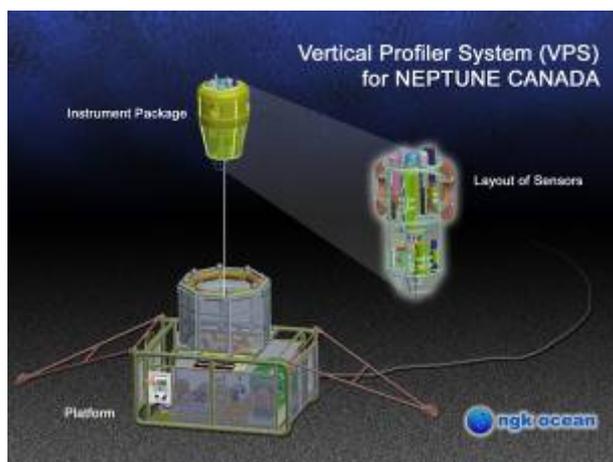


図 2.2.1.3-2 Vertical Profiler System (VPS) イメージ図
（日油技研工業㈱ 提供資料）

一方、沿岸域においても自動で昇降する装置を用いた鉛直観測が実施されている。沿岸では海上構造物にセンサーを昇降させるウインチを設置する「設置型昇降装置」が代表的であり、メーカーとしては国内での実績が多い JFE アドバンテック㈱と YSI ナノテック㈱の製品が代表的である。前述した東京湾等に設置されたモニタリングポストに設置されている自動昇降装置や、佐賀大学の有明海観測タワーに搭載した沿岸観測の例が報告されている（伊藤ら、2012）。

細部の仕様はそれぞれ異なるが、基本的な構造としてはプラットフォーム上にウインチや気象観測装置、太陽光パネル等を設置し、定期的（ほとんどが1時間に1回の観測）にセンサーを水中に降下させていく機能を持つ。観測項目は水温、塩分、DO、クロロフィル a、濁度、pH 等である。電源はプラットフォーム上の太陽光パネルによるものが多く、予備的に充電池を併用しているものもある。

センサーへの生物付着対策は、上記2社のセンサーでそれぞれ異なる。JFE アドバンテック㈱の装置は、センサーを空気中で待機させることで付着の影響を軽減する方法を採用しており（図 2.2.1.3-3）、観測待機中はセンサー電極部等が劣化しないように観測塔プラットフォーム上で淡水に浸しておく工夫がされているものもある（伊藤ら、2012）。

一方の YSI ナノテック㈱の装置は、銅合金のハウジングを装着させ、センサー部を生物付着の影響が少ない底層に待機させる方法を採用している。また、YSI ナノテック㈱の装置

は構造物に設置する固定設置タイプのほか、浮体を装着し係留できる（あるいは筏上に設置できる）浮体設置タイプが市販されている（図 2.2.1.3-4）。水質センサー以外の機器についてみると、YSI ナノテックタイプはウインチ部を含め総重量 100kg 未満の小型軽量化されたものを開発しているのに対し、JFE アドバンテック㈱は耐久性や操作性を重視したやや大型な装置開発（総重量 200kg を超えるものもある）や、大型ブイ搭載型等の開発を行っている。



図 2.2.1.3-3 JFE アドバンテック㈱製自動昇降水質システムセンサー部外観
(JFE アドバンテック㈱のホームページより引用)



図 2.2.1.3-4 左図：YSI 自動昇降装置外観、右図：YSI 浮体設置タイプ昇降装置外観
(ともに YSI ナノテック㈱資料「YSI 水質プロファイリングシステム」より引用)

その他、昇降する動力源に現場の波力を利用するタイプがカナダの **Brooke Ocean Technology** 社より波力式自動昇降プロファイラー: **SeaHorse** として商品化されている（図 2.2.1.3-5）。この波力式自動昇降装置は、係留索を挟む本体ワイヤークランプ部、充電池、制御部、フロート部、センサー部で構成されており、クランプ部のラチェット機構を用いて降下する仕組みである。波高 15cm 以上（周期 2 秒以上）の波があると動力として活用

でき、ラチェットをマイクロプロセッサで制御し、降下スピードを調整したり、停止したりできる機構を備えている。上昇する場合はラチェットのグリップを解除し、内包するフロートの浮力で上昇する。

センサーは Sea-Bird Electronics 社の CTD : SBE19 を標準搭載しており、オプションセンサーにも対応できる。データ転送は海表面ブイと音響や電磁誘導を用いてやり取りする仕様となっている。実海域での観測事例としては 1997 年カナダの BIO (Bedford Institute of Oceanography) が、ノバスコシア州 Country Harbour にて 3 週間の係留観測が行った報告 (Hamilton, 1999) や、同じくノバスコシア州の Halifax 湾沖の観測点 (水深 150m) に係留した報告がある (BIO HP 情報より)。

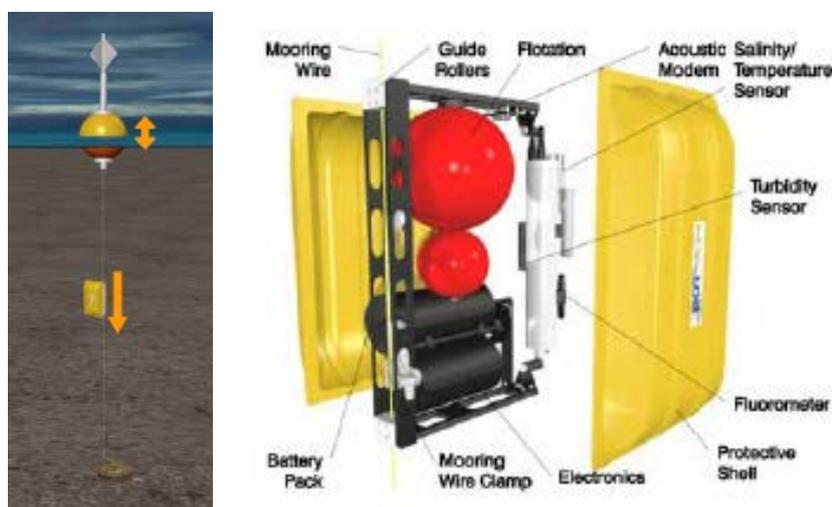


図 2.2.1.3-5 波力式自動昇降プロファイラー : SeaHorse 外観
(日本海洋㈱のホームページより引用)

2.2.2 ラグランジュ型測定技術

前節で紹介したオイラー型測定技術は、観測する地点や深度層が固定された、いわゆる定点における連続観測であるのに対し、本節では、観測開始ポイントから海面や水中を装置自身が 2 次元的、または 3 次元的に移動しながら連続観測するラグランジュ型測定技術を紹介する。

2.2.2.1 漂流ブイ

海表面に投入したブイに内蔵した観測装置により海表面等の観測データを連続的に観測する漂流ブイは、国内機関でも研究、観測事例が豊富である。

気象庁では、海上を航行する船舶運行、漁業や海洋開発に伴う洋上作業の安全確保のため、2000 年より日本近海における波浪観測を効率的に実施することを目的とし漂流型海洋気象ブイロボットを実運用している。このブイロボットは、洋上を海流等流れに乗って漂流しながら気圧・水温・有義波高・有義波周期および位置情報を 3 時間毎にリアルタイムで伝送する。現在も日本海、太平洋（日本の東域および南域）、東シナ海にてブイの放流を展開しており、観測データは気象庁ホームページ上で公開されている。

ブイロボットは、運用当初は直径高さ共に 60cm 程度の円筒状のフレームで約 60kg であったが（気象庁、2000）、現在は直径 46cm の球形フレームとなり重量も約半分の 30kg と小型軽量化が図られている（気象庁ホームページ情報より）。ブイロボットは、約 3 ヶ月間継続的な観測が可能であり、台風接近時等には観測タイミングを変える等の操作を陸上から指示することができる。



図 2.2.2.1-1 ブイロボット外観
(現行タイプ、気象庁のホームページより引用)

JAMSTEC でも 2008 年頃より、 $p\text{CO}_2$ センサーを搭載した小型漂流ブイ係留および放流観測を太平洋や日本東方海域で行っている（中野ら、2010）。漂流ブイ本体は、柵ゼニライトブイのオーブコムブイをベースに開発された（図 2.2.2.1-2）。海表面の $p\text{CO}_2$ を測定する

ため、漂流ブイには分析部（分光光度計）の他、ポンプ、光源、温度・塩分計、通信機器、制御基板等多くの部品が搭載された。

漂流ブイに内蔵するリチウムバッテリー容量とのバランスにより週に1度、4回/日程度の観測頻度であったが、その後の各パーツの省電力化や二次電池の開発により2日に1度、4回/日レベルまで観測頻度を向上することに成功している。また、外洋域での衛星通信を確実にするため ARGOSⅢ衛星によるデータ送信と GPS 情報を併用しデータ通信の精度向上を図っている（海洋研究開発機構陸奥研究所報告書、2010）。



図 2.2.2.1-2 CO₂ 観測用小型漂流ブイ外観
(株ゼニライトブイのホームページより引用)

一般財団法人電力中央研究所では、ある一定の水深層を中立浮遊させながら観測する追跡型中立ブイを開発している。任意の水深層で中立になるよう錘を調整した中立ブイの位置情報を、調査船から垂らした音響測位システムによって確認しながら追跡する方法である。

電力中央研究所では紀伊半島沖合にて水深 1000m での 3 日間の中立ブイ追跡試験を行っており、水深 1000m 層に 5cm~25cm/sec の海流観測に成功している。また、中立ブイと同時に放出した蛍光染料についても、2 日間見失うことなく追跡検出することに成功している。今後は複数台の中立ブイを放出・追跡することで、海洋中に拡散・溶解する CO₂ の挙動についてリアルタイムで計測することを目標としている（下島ら、2006）。

2.2.2.2 アルゴシステム

地球上の気候変動に大きな役割を果たす海洋内部の熱輸送過程を解明するため、2000年より国際的な全球海洋観測プロジェクト「Argo 計画」が開始され、わが国でも外務省、文部科学省、国土交通省、水産庁、海上保安庁、気象庁、JAMSTEC 等が参加している (JAPAN Argo HP 情報より)。

アルゴ観測の主軸となるのが海表面から水深 2000m までの層を浮き沈みしながら漂流するアルゴフロートと呼ばれるペンシル型の観測機器である。このアルゴフロートの観測は、海中投入後に水深 1000m まで沈降し、その深度において漂流を開始する。そして漂流 10 日後に 2000m まで再沈降した後、海表面までを上昇しながらセンサー観測を実施する。観測項目は基本タイプで水温、塩分であり、海面浮上時に衛星回線経由で陸上へデータを伝送する。データ送信後は再び、水深 1000m まで沈降し漂流を再開する。

既に 2014 年 1 月末時点で 3613 台のアルゴフロートが世界中で展開されており、得られたデータも 100 万プロファイルを達成している (JAPAN Argo HP 情報より)。近年は観測項目の拡充が図られ、DO センサーや pCO₂ センサーを搭載した観測例も報告されている (Bjorn et al., 2012)。

また、フロート開発も各国機器メーカーや研究機関間で盛んに行われており、国内製品としては JAMSTEC と榊鶴見精機が開発した 4000m 級のフロート「Deep NINJA」が今春より販売を開始している (図 2.2.2.2-1)。一方、米国 Sea-Bird Electronics 社の「NAVIS」は、水深 2000m までの層を 300 プロファイル観測できる能力を有し、機器重量も 18.5kg と軽量化を実現している (図 2.2.2.2-2)。



図 2.2.2.2-1 榊鶴見精機製 Deep NINJA 外観
(榊鶴見精機ホームページより引用)



図 2.2.2.2-2 Sea-Bird Electronics 社製 NAVIS フロート外観
(Sea-Bird Electronics 社ホームページより引用)

2.2.2.3 AUV

水中で活動する観測ロボットのうち、船上からの操作や電力ケーブルを必要とせず自由に航行できる自立型無人潜水機（AUV：Autonomous Underwater Vehicle）は、1970年代より米国を中心に産学連携の下、海底資源開発や軍事関連分野での開発が進められてきた。

その技術が近年海洋観測の分野にも活用されており、海外メーカーから種々の機種が販売されている。代表的なものとして米国の Bluefin Robotics 社の BluefinAUV は小型の Bluefin-9（空中重量 60kg）から Bluefin-21（空中重量 750kg）まで用途に応じたシリーズがある（Bluefin Robotics 社 HP 情報より）。

ノルウェー Kongsberg 社の AUV シリーズは、アルミニウム燃焼電池搭載の大型 AUV（Hugin、60 時間航走を実現）から小型 AUV（REMUS）まで様々な機種を販売している（Kongsberg 社 HP 情報より）。

国内では、JAMSTEC が「うらしま」「ゆめいるか」「じんべい」の 3 機種を三菱重工業（株）等と共同開発しており、これまで海底資源探査や地球科学分野での研究で実績を挙げている。これら 3 タイプの AUV の稼働時間は約 10～20 時間である。



図 2.2.2.3-1 Bluefin-21 外観
(Bluefin Robotics 社ホームページより引用)

東京大学浦研究室は、三井造船（株）と共同開発した AUV（r2D4）を用いて熱水鉱床海域における海底面探査や各種センサーを搭載してのモニタリング航行を行ってきた。海上保安庁は、今年度よりカナダの International Submarine Engineering 社の AUV を購入し、測量船「拓洋」を母船に奄美大島北西海域における海底火山調査を行っている。これら大型および中型 AUV はその航続距離（航行時間）や大深度（数千 m 深度）、多項目観測を目的

としているため機器自体が大型のものが多く、支援母船等運用面でのサポートも必要とする。

一方、沿岸域（浅海域）において数人単位で運用できる小型の AUV 観測事例として、電力中央研究所の下島らが行った竹富島海底温泉湧出域で行った観測事例がある（下島、2010）。この観測では AUV に米国ウッズホール海洋研究所が開発し Kongsberg 社から販売されている小型 AUV の REMUS100 を用いて行われた。REMUS100 は直径 19cm 長さ 170cm の魚雷型 AUV で、空中重量は 37kg、リチウムバッテリー駆動で 8~22 時間航走が可能である。下島らの研究では、REMUS100 に水温、塩分、水深、DO、クロロフィル a、濁度、pH/pCO₂/ORP、サイドスキャンソナー、音響ドップラー流速計の各種センサーを搭載し、海底湧出域における CO₂由来の低 pH・高 pCO₂海水の拡散挙動を捉えることに成功している。

また、海外製品でも YSI Integrated Systems and Services 社から ECO MAPPER という小型 AUV が販売されている（図 2.2.2.3-2）。ECO MAPPER は重量 21kg であり一人で設置できるサイズであり、船が進入できないような浅瀬からの測器投入も可能である。ECO MAPPER には 8 項目の水質・測深センサーを搭載でき、2.5 ノット航走で 8 時間連続航走が可能であるが、耐圧を 60m までとしている。また、九州工業大学のグループも沿岸利用を前提に水深 200m 仕様の小型 AUV : AquaBox II を研究開発している（大畑ら、2006）。



図 2.2.2.3-2 ECO-MAPPER 外観

(YSI Integrated Systems and Services 社ホームページより引用)

2.2.2.4 水中グライダー

海洋環境を長期間に亘ってモニタリングするためのグライダー型海中観測ロボット（水中グライダー）が各地で研究開発されている。海外では既に製品化され、販売されているものも存在する。水中グライダーの特徴としては、先述の AUV とは違い、推進力を得るのに複雑な駆動系・動力系を有しておらず、AUV に比べて小型なものが多く安価である。水中グライダーは、潮流によって流されるアルゴフロートや漂流ブイとは違い、推進方向制御（例えば、翼角の制御）によって、自身の下降方向を制御することができ、定点保持観測や定線に沿った観測が可能となっている。

水中グライダーは、推進駆動力を得る方法によって「浮力式」「波力式」に分類できる。浮力式水中グライダーは、膨張やバラスト水排出による内部重量変化から生じる浮力（機体下降時は重力）を、船体側面に備えられた翼によって揚力に変換し、推進力を得る方法が主流である。機体重心や翼角を制御することによって、推進力、推進方向を調整して、三次元方向に目的とした航行経路を走行することが可能となる。既に市販品も出回っており、代表的な商品として米国の Bluefin Robotics 社が最長 6 ヶ月間の航行を可能にした SprayGlider（図 2.2.2.4-1）、同じく米国 iRobot 社の Seaglider（国内代理店は榊東陽テクニカ）が挙げられる。

一方、国内では大学による研究開発が進められており、大阪府立大学有馬研が開発した RINKO Glider SOARER（図 2.2.2.4-2）、九州大学開発の BOOMRANGE が挙げられる。国内での観測実施例としては、水産総合センター東北区水産研究所が、米国 TeledyneWebb 社の水中グライダー：Slocum を用いた現場観測を 2007 年より実施しており、水質センサーの増設や、バッテリー改良等により 3 ヶ月の連続運用ができるようにした実績が報告されている（伊藤ら、2010）。



図 2.2.2.4-1 Bluefin Robotics 社製 SprayGlider 外観
(Bluefin Robotics 社ホームページより引用)



図 2.2.2.4-2 大阪府立大学水中グライダー：SOARER 外観
(大阪府立大学ホームページより引用)

一方、波力式水中グライダーは、波力による海面フロート部の上下振動を、海中の推進翼が揚力に変換することで推進力を得る方法を用いている。浮力式推進グライダーと同様に機体重心や翼角を制御することによって、推進力、推進方向を調整して、目的とした航行経路を走行することが可能となる。波力式推進は三次元に自由に航行する浮力式推進とは違い、表層からの一定水深を常時観測する目的で設計されている。

販売例としては米国 Liquid Robotics 社の Wave Glider SV3 が挙げられる(図 2.2.2.4-3)。この Wave Glider に前述の MAPCO₂や SeaFET pH sensor、Sea-Bird CTD を搭載した Carbon Wave Glider を NOAA /PMEL と Liquid Robotics 社が共同で開発しており、長期係留ブイとの計測地比較や、それら観測点までの航行中に大気-海表面の CO₂観測を行う計画が PMEL で進められている (Willcox et al., 2009)。また 2013 年に南ミシシッピ大学がメキシコ湾の海洋酸性化を観測するため、Carbon Wave Glider を用いた大気-海洋間の CO₂フラックスの計測を計画している (GCOOS HP)。



図 2.2.2.4-3 左図：Liquid Robotics 社 Wave Glider SV3 の外観、右図：構造模式図
(Liquid Robotics 社ホームページより引用)

3 章 沿岸海水中の温室効果ガス収支把握に必要な機能に関する調査

3.1 沿岸域における物質循環

IPCC の第 5 次レポート（気象庁暫定訳、2013）によると、大気中の二酸化炭素（CO₂）、メタン（CH₄）、亜酸化窒素（N₂O）濃度は人間活動により増加を続けており、工業化以前の水準に比べ CO₂ で約 40% 増加の 391ppm となっている。1750 年から 2011 年までに排出された人為起源の累積二酸化炭素排出量 555GtC（炭素換算で 5550 億トン）のうち、約 240GtC が大気中に蓄積しており、そのうち約 160GtC が海洋に取り込まれていると試算されている。

このように海洋は大気中 CO₂ の主要な吸収源となっているが、その吸収能力は全海洋域で一様ではなく海域により大きな違いがある。一般的に外洋域では、大気との溶解平衡により海水中に溶け込んでいる CO₂ が、無機炭酸となり水深 100m 程度までの海洋表層（有光層）に生息する植物プラントンによる光合成に利用される。光合成によって植物プランクトン生体内に取り込まれた無機炭酸は有機物化され、その一部は、より上位の生物による捕食活動や沈降により徐々に下層に運ばれていく。無光層に運ばれた沈降粒子や溶存態となった有機物は、再びバクテリア等による分解を受け無機炭酸へと循環する。

一方、沿岸域（水深 200m 以浅を沿岸とすると）は面積では全海洋の 10% 弱と小さいが、CO₂ 循環については全海洋における一次生産のうち数 10% を占め、底層への有機物堆積の 80% 程度を占めると見積もられており（杉山、2010；所ら、2013）、海洋全体に占める役割の大きさが注目されている。

近年、第 1 章で紹介したブルーカーボンによる CO₂ 循環（固定）プロセスも注目されており、陸域の森林同様重要な CO₂ 吸収ポテンシャルを有すると見積もられている。実観測でもそれらを証明するデータが取られ始めており、港湾空港技術研究所の調査によると、北海道風蓮湖河口域沿岸のアマモ場での現場観測において、年間を通じて大気海水間の CO₂ のやり取りは吸収量が放出量を上回る測定結果を得ている（所ら、2013；Tokoro et al., 2014 (in press)）。このように CO₂ 吸収源としてのポテンシャルが期待される沿岸域ではあるが、一方で、こうした海洋生態系による吸収源は、海浜開発や水質汚染により年 7% ずつ失われているとも報告されており（UNEP Press Releases, 2009）、その進行を如何に食い止め再生させるかが課題とされている。

これら沿岸域における CO₂ 吸収量を含む収支を評価することは外洋に比べ難しいとされている。それは沿岸域がそれぞれに異なった水深、海底地形、河川（陸水）流入等による局地性をもち、さらには接する外洋との水平移動（流入、流出）作用も働くため、海水中の物質濃度の変動も大きく年変動スケールはもとより、日変動のスケールも大きいいため時空間的にも一様ではないことによる。

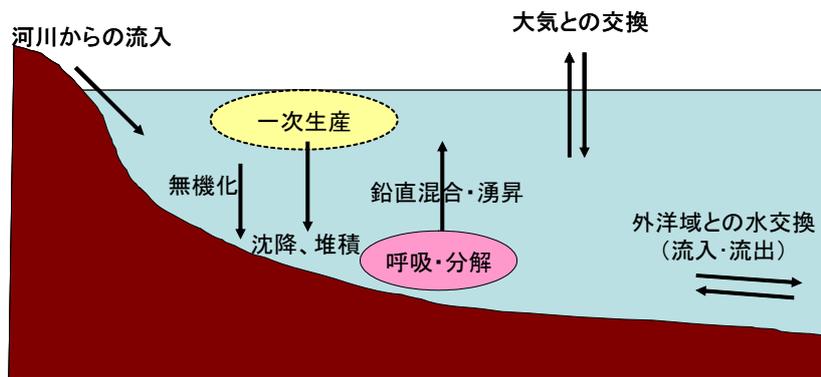


図 3.1 海洋における炭素循環模式図

このような沿岸域における炭素循環は、外洋に比べて更に複雑なメカニズムをもち、時空間的な変動が大きいことから、これまで沿岸域での炭素循環を正確に観測した例はほとんどない状態であった。

近年、東京湾と大阪湾において海水の CO_2 観測を実施した観測事例が報告されている。東京海洋大学の神田らは、2008 年から 3 年間にわたり東京湾の海表面 pCO_2 の連続観測を行った（神田、2011）。その報告によると東京湾では内湾部や湾口部については年間を通して大気 pCO_2 値より海水 pCO_2 値が低いこと（約 $400\mu\text{atm}$ 以下）が多く観測されたのに対し、湾奥部では数 $100\mu\text{atm}\sim 2000\mu\text{atm}$ の幅で変動することが観測された。また同じく神田らによる東京湾最奥部における詳細観測において、京浜運河付近の海水 pCO_2 値が $7000\mu\text{atm}$ を超える高い値を示したことも報告されている。これは京浜運河を介して流入した高栄養塩・高溶存有機物濃度・高水温・低塩分の陸水が、現場の有機物分解を促し海水 pCO_2 値が上昇したためと報告されている。

岡山理科大学の山下ら（2001）は、1994 年から 3 年間にわたり大阪湾から紀伊水道、播磨灘に至る広範囲海域において 4 日間の表層 pCO_2 航走観測を実施しており、海表面 pCO_2 の水平分布は外洋のように一様ではなく、2~4 海里の海域内で $20\sim 300\mu\text{atm}$ 程度変化していることを確認している。一方、奈良教育大学の藤井ら（2011）は、大阪湾沿岸部における強閉鎖性海域を含む 3 地点で、多項目センサーによる水温、塩分、DO、pH の観測結果と、大阪湾で取得された第五管区海上保安本部の約 1 年分の水温、塩分、pH の定期観測値を用いて、同海域の季節変動を試算した。

結果として、大阪湾沿岸部の夏季成層期の底層では、有機物分解によって酸素が消費され高 CO_2 水塊が形成されるが、秋季から冬季にかけての成層消滅期に、季節風等の影響を受け底層水の沿岸湧昇が生じることで、高 CO_2 水が表層にまで達し海水 pCO_2 値が大気 pCO_2 よりも高くなる（ CO_2 放出域になる）と推察している（藤井ら、2011）。

神田らによると、大気より沿岸域海水に吸収された CO_2 の行方について、①一次生産を経て有機物となり沈降し海底に堆積するのか、②一旦沈降した後に巻き上がり等により再

び懸濁し外洋へと運ばれるのか、③鉛直混合等により再び大気中に放出されるのか、④底層の高 CO₂水塊として湾外に移送されるのか、それらメカニズムあるいは収支について、未だ解明されていないとのことである（別添資料「有識者ヒアリング調査 結果シート」ヒアリング結果報告（2）より）。

このように沿岸域における炭素循環を把握し、評価するためには時間的にも空間的（水平、鉛直）にも密な観測が必要となる。また沿岸域における CO₂イベントが季節変動のような大きな動きではなく、波浪や河川流入等短いスパンでの事象に影響を受ける可能性が大きいことから、日レベルや時間レベルでの変動を捉える必要がある。

直接的な海水中 CO₂観測ではないが、CO₂変動の時間スケールを推察する上で参考となるデータとして、DO のデータが有効である。神田教授によると東京湾ではしばしば青潮の原因となる貧酸素水塊（低 DO）と高 CO₂の挙動との間により相関関係があるとされている（別添資料「有識者ヒアリング調査 結果シート」ヒアリング結果報告（2）より）。

清水ら（2007）によると、東京湾千葉灯標に設置した自動昇降水質センサーの定点鉛直観測における 4 年分の連続観測結果より、底層の貧酸素水塊は 4 月上旬から 5 月下旬にかけて発生し、11 月中旬に解消されるという大きな時間スケールでの季節変動を確認したが、一方で、日変動のデータ解析から数日スケール（約半日～5 日間）で発生する冬季の貧酸素状態という珍しい事象を発見し、冬季に発生した短期間貧酸素水塊が外洋水の底層進入によるものと推察している（清水ら、2007）。

工藤ら（2008）は、同じく東京湾千葉灯標と対岸の東京湾西側にある東京灯標（自動昇降水質センサーを仮設置）で測定した連続鉛直観測から貧酸素水塊の層厚の日周変動を報告している（表 3.1）。これら結果から日単位（時間単位）の短時間で底層の貧酸素水塊が変動していることが判明し、それと連動して高 CO₂水塊も短周期変動をしている可能性があることが推察された（工藤ら、2008）。

表 3.1 東京湾底層における貧酸素水塊層厚の変化

観測日（H19年）	東京灯標の貧酸素水塊層厚	千葉灯標の貧酸素水塊層厚
8月27日	3～4m	1m
8月28日	3～4m	0m（解消）
8月29日	0m（解消）	徐々に発達（約2m）
8月30日	8m（表層に達する）	徐々に発達（約5m）
8月31日	0m（解消）	6m
9月1日	2m	1～2m
9月2日	0m	9m
9月3日	徐々に発達（約2m）	9m
9月4日	4m	5～6m

((工藤ら、2008)より作成)

しかし現状として、沿岸域における海水中 CO₂に関する観測事例は一般水質項目に比べると少なく、その水質項目についても物理学的観測データに比べて化学的データは少ないことが日本海洋学会将来構想委員会化学サブグループによる報告書にも報じられている(神田ら、2013)。同報告書では物理学的パラメータの観測密度と比較して化学的パラメータの観測密度は未だ粗いものであり、先行する物理学的パラメータと見合った時空間情報の取得の必要性が唱えられている。

3.2 沿岸域の CO₂に関する年間収支把握に必要な機能

前述のとおり、沿岸域において海水中の CO₂の挙動を把握し、その年間収支を見積もるためには、時空間的に密度の高い観測を行う必要がある。しかし一方で、従来のような観測船による採水分析やセンサー観測だけでは、時空間的に数多くの観測を行うことは費用的にも時間的にも不可能に近い。そこで第 2 章で紹介したような化学的センサーを用いた定点連続観測を広く展開していくことに期待が寄せられている。化学的センサーを用いた現場化学分析手法は、測定精度や感度こそ従来の採水分析手法に比べ低く、観測できる項目も限られたもののみではあるが、次のような 3 点において重要な利点を有するとされている(蒲生、2006)。

- 1) リアルタイム(あるいは準リアルタイム)データを取得できること。
- 2) 空間分解能の高い連続的な濃度分布を知ることができること。
- 3) 時系列データを取得できること。

上記、1)、2)については、船舶観測でも実施できるが、3)については、化学的センサーを用いた定点観測においてのみ得られるデータといえる。特に、鉛直方向の CO₂循環メカニズムが複雑であり、数日単位でのイベントが起こりうる沿岸域では、鉛直連続観測は非常に有用であると考えられる。本節では、CO₂の鉛直観測に必要な観測密度と観測技術スペックを整理し検討する。

3.2.1 連続観測機能

季節変動だけではなく、日収変動等時間スケールの短い事象が生じやすい沿岸域においては、定点連続観測等による時系列データ(少なくとも1時間に1キャスト程度の観測で通年観測)の取得が望ましい。

3.2.2 鉛直観測機能

季節レベルの鉛直水塊変動(成層期-混合期)のほかに、気象状況、波浪、陸水影響等により起こる日周レベルの鉛直変動(移入、擾乱、巻き上がり等)が起こる沿岸での鉛直変動を把握するためには、観測密度の高い鉛直観測(0.5m~1mピッチ)を実施するのが望ましい。

3.2.3 搭載センサー

日本海洋学会将来構想委員会化学サブグループによる報告書（神田ら、2013）では、今後の海洋化学センサー観測について、高解像度で有益な測定データを取得するためにも、観測に使用する化学センサーについて、①高精度、②高確度、③高応答性、④耐久性、⑤小型化、⑥安価、⑦品質管理が必須項目であるとしている。本調査研究における CO₂センサー等ではこれらの考えに⑧省電力化を加え、使用センサーの選定を進めることとした。

本調査研究で調査した CO₂センサーは、分析精度的には陸上分析等で使用される大型な分析装置に劣るものの、沿岸での CO₂変動幅から考慮するに十分な精度を持つ。しかし、一方で、応答速度が数分かかるセンサーが多く、自動昇降装置等に取り付けて鉛直観測を行うためには、昇降スピードとのバランスをとることが検討課題となる。また、対象となる沿岸域は水塊挙動が複雑なメカニズムを有するため、海水中における CO₂挙動に係る指標としての pH や生物活動の指標となる栄養塩や DO、水塊挙動の指標として水温、塩分等を同時に観測する必要がある（後述）。

3.2.4 他観測との連携

沿岸域の CO₂観測では、定点における観測だけでは空間的・経費的な限界がある。そのため対象となる内湾全体の動態を把握するためには、当該海域で同時期に行われている定点観測や研究調査船による定期観測データによる補完が必要となる。さらには、定期航路フェリーや一般貨物船に測器を搭載し水質観測等を行うを篤志船舶観測データも水平方向のデータ補完に有用である。

一般船舶による海洋観測の例としては、外洋域では国立環境研究所が 90 年代半ばから太平洋を横断する貨物船に大気海洋二酸化炭素濃度測定装置を搭載した観測を行っており、現在でも北米航路・オセアニア航路の貨物船で観測が継続されている（Nakaoka et al., 2013）。沿岸域では、東京湾や伊勢湾を航行する定期航路フェリーや各地の地方整備局が所有する清掃船を用いた水質観測が行われている（鈴木ら、2006；名古屋港湾空港技術調査事務所ヒアリング結果より、別添資料「有識者ヒアリング調査 結果シート」ヒアリング結果報告（3））。

その他、本モニタリングシステムで使用する各種センサーの測定値の正確さや長期ドリフト値の確認をするためにも、当該測点での採水分析値との比較検証が必要である。

水平観測の手段のひとつとして、海表面水温や表層クロロフィル濃度等の観測機能を持つ人工衛星画像を用いた観測も有効な手段となる。近年では温室効果ガス観測を目的とした技術衛星「いぶき」も運用されている。まだ沿岸域に活用するには観測メッシュが粗いが、今後の沿岸海域調査にも適応されることが期待される。

また、将来的に本調査研究の鉛直モニタリングシステムを運用する際に、経済的に多点展開することが難しい場合には、安価な水質センサー等を用いた固定層観測を組み合わせ、水平的な観測網を展開することも有効であると考えられる。

4章 モニタリングシステムの概念設計

4.1 自動モニタリングシステムの仕様

海水中の CO₂等の温室効果ガス濃度の測定には、海水を採取し分析する方法と船やブイに自動分析装置を設置し測定する方法がある。現状の技術では、前者は鉛直測定が可能であるが、採水できる水深層の数と時間が限られるため、水深数 m レベルで変動する現象や数時間ごとに生じる現象を見出すことはできない。たとえ、同一測点で停船観測をしたとしても時系列データを取得するには莫大な費用と労力が掛かる。

一方、後者は同一測点における連続観測は可能であるが、設置測点の水深が深い場合センサー設置層の数に限りがあるため、採水観測同様、細かい水深層での挙動の把握ができない可能性がある。

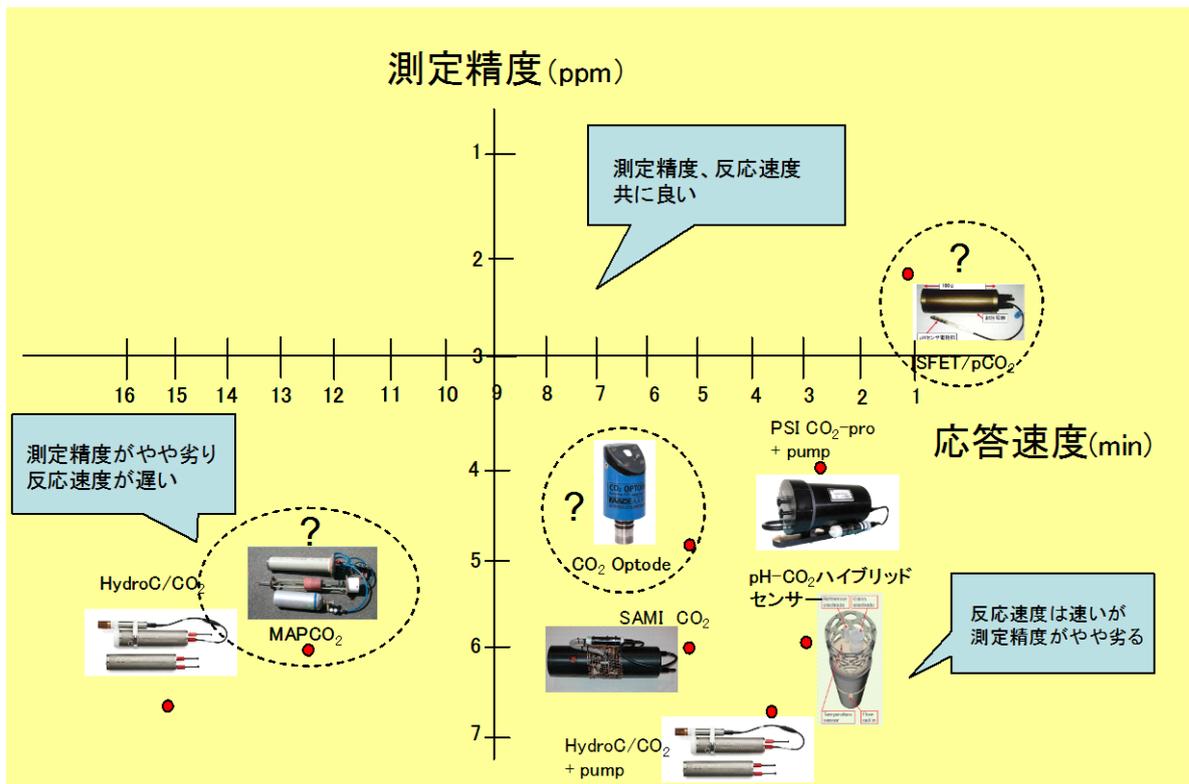
そこで、本調査研究では、化学センサー技術と沿岸域海水中の表層から底層までの CO₂値を連続的に観測するモニタリングシステムの開発に向けた概念設計を行うことを目的としている。本章では、要素技術となるセンサー技術、プラットフォーム技術を整理し、CO₂モニタリングシステムの仕様概要を検討し、概念設計を行った。

1) CO₂センサー

通常、陸上や船上での CO₂分析に用いられる卓上型の非分散型赤外吸収法 (NDIR) 分析器 (例 : LICOR LI-7000 等) は、検出手法としては最も精度が高く、かつ安定であり、最高機種で±1ppm レベルの分析精度を持つ。海表面水の分析であれば、プラットフォーム上に NDIR 分析計ごと搭載し、ポンプで汲み上げた海水を介して観測することもできるが、数 m を超える鉛直方向の観測には不向きである。

本調査研究で目標としている鉛直連続観測を行うために、水中でも使用できる CO₂センサーを用いることとした。第 2 章で調査した水中 CO₂センサー 7 種について、応答速度と測定精度によるグラフ図を作成した (図 4.1-1)。なお、MAPCO₂、CO₂ Optode と ISFET/pCO₂については市販品ではなく、研究機関によって開発されたセンサーであるため、文献検索等による調査でもいくつかの情報を得ることができなかった。そのため、図 4.1-1 のグラフ上ではこれら研究開発品については破線枠線囲みとしてある。

CO₂センサーを鉛直に移動させ観測する場合、センサーを取り付けるデッキ部が昇降する速度と、センサーの応答速度との時定数が合うことが望ましい。公開されている仕様を基にした図 4.1-1 によると、CO₂センサーの応答速度はイオン感応性電界効果型トランジスタ (ISFET) 電極が 1 分程度で最も速い。次いで、PSI CO₂-pro (ポンプ装着型) が 2.5 分、pH-CO₂ハイブリッドセンサーが 3 分、Hydro/CO₂ (ポンプ装着仕様) が 3.5 分、CO₂ Optode と SAMI-CO₂が 5 分と続く。



これは、後述する他項目センサーの時定数（数秒レベル）と比べると、昇降速度の律速となることが判明した。ただし、いずれの CO₂センサーも固定層に係留して使用する場合には問題にはならない。

次に、CO₂センサーの測定精度について整理すると、PSI CO₂-pro が±2ppm、pH-CO₂ハイブリッドセンサーと SAMI-CO₂が±3ppm、HydroC/CO₂の±4ppm となっている（ただし、ここで示した測定精度値は使用する環境や装置設置条件等により変動する可能性を含んでいる）。

船舶搭載型等の大型な分析装置と同じく NDIR 方式で計測を行う PSI CO₂-pro や HydroC/CO₂は、センサー自体を小型化するために、NDIR 自体も小型のものを使用している。そのため船舶搭載型装置に比べて精度が劣る（中野、2010）。MAPCO₂は太平洋観測用として長期観測に耐えうる安定性と精度を担保するために標準ガスを必要とする大型センサーであるため、大型のプラットフォームを必要とし、主に海表面での観測に用いられている（S.Willcox et al., 2009）。

海水中の CO₂を測定する場合、外洋域では CO₂値の変動が微小であるため±1ppm レベルの測定精度を要求されるが、沿岸域では日周変動が数 100ppm にも達するため、センサーの精度は±10ppm レベルあれば十分であると考えられる（神田ら、2013）。

次に、CO₂センサーの測定レンジを一覧表にまとめた（表 4.1-1）。なお、表中において市販品ではないセンサー（MAPCO₂、CO₂ Optode、ISFET）については値等不明な箇所は網掛け表記とした。前章で記述したとおり、沿岸域での水中 CO₂値は特に陸水の

影響を受ける海域で高い値が観測されており（東京湾の $p\text{CO}_2$ 事例で、青潮の影響下で約 $7500\mu\text{atm}$ （神田、2011））、モニタリングシステムに搭載する CO_2 センサーの測定レンジ幅はそれらも視野に入れた仕様にするのが望ましい。

今回の既存センサー調査では、公表されているメーカーカタログ値や文献から読み取ったスペック値を基としており、必ずしも同条件で比較検証したものではない。また、これまで外洋域での CO_2 観測用として研究開発が成されてきた経緯をもつため、沿岸対応の測定レンジ幅ではないものが多く、本調査研究では測定レンジについては参考値として取り扱った。今後、沿岸での CO_2 センサー使用を検討する際には、メーカー等とセンサー測定精度と測定レンジのバランスについて検討を重ねる必要がある。

また、長期間の現場観測に使用するため、観測値のドリフトについても検討する必要がある。2章でも述べたが、SAMI- CO_2 は6ヶ月間で 1ppm 以下の長期安定性をもち、PSI CO_2 -pro は自動で0点補正を行う機能を持っている。また MAP CO_2 は標準ガスボンベによる校正を行うことで長期観測に備えている。

各センサーの重量は、水中重量 $0.4\sim 2.2\text{kg}$ 程度であり大きな差はなかった。また、センサー1台あたりの参考価格は250万円～800万円であり、SAMI- CO_2 が最も安価であった。

表 4.1-1 CO_2 センサースペック一覧表

センサー名	測定レンジ	重量（水中）	参考価格
pH- CO_2 ハイブリッドセンサー	$300\sim 2000\mu\text{atm}$	2.0kg	800万円
SAMI- CO_2	$150\sim 700\text{ppm}$	1.1kg	250万円
HydroC/ CO_2	$200\sim 5000\text{ppm}$	2.2kg	500万円
PSI CO_2 -pro	$0\sim 600\text{ppm}$	0.4kg	550万円
MAP CO_2	$200\sim 600\text{ppm}$		
CO_2 Optode	$0\sim 50000\mu\text{atm}$		
ISFET pH/ $p\text{CO}_2$ センサー			

（表中の網掛け部分は調査結果データなし。価格については市販品のみ記載）

2) その他の温室効果ガスパラメータセンサー

CO_2 と同じく、温室効果ガスである亜酸化窒素 (N_2O) やメタン (CH_4) についても市販の水中センサーを中心に調査した。その結果、 N_2O については、Unisense 社のマイクロセンサーのみであり、メタンについても CONTROS 社の HydroC/ CN_4 と Franatech GmbH 社の METS センサーの2機種のみであった。メタンセンサー2種はCTDセンサー等との組み合わせやROV搭載が可能な形状をしているため、当該調査研究で検討する鉛直モニタリングシステムへの搭載が可能と判断した。一方、Unisense 社の N_2O センサーについては、別途大型バッテリーや制御部ハウジング、マイクロセン

サーを保護するハウジング等が必要となり、総重量が100kg程度になることがわかった。また、N₂O マイクロセンサーは耐圧が50m程度であるため、浅海域以外での使用の際は別途センサー用耐圧ハウジングも必要となる。

CH₄やN₂Oについては、現場での濃度が微量であるため感度が問題となると推察される。今回のCH₄センサー2機種についての測定範囲、分解能から判断すると、外洋域の自然変動を把握することは難しいが、沿岸域での異常値を検出することは可能であると考えられる。

その他、研究機関による研究段階ではあるが、現場調査実績のある質量分析法の原理を利用した水中センサー2機種（ウッズホールのNEREUS、フロリダ大学のINSPECTOR200-200）も調査対象とした。ただし、いずれも測定時間が15分程度と時間を要することから今回の鉛直連続観測に使用する際には、観測層を固定して使用することはできるが、鉛直的な連続観測用センサーとしての候補からは除外した。

3) 自動モニタリングが可能な測定技術

2章でオイラー型、ラグランジュ型に整理した自動モニタリング測定技術（以降、プラットフォームと称す）について、運用対象となるエリアを浅海・沿岸・外洋に分け、それぞれのエリアにおける適正を表4.1-2に取りまとめた。

（オイラー型）

定置ブイを用いた係留系プラットフォームは、あらゆる水深にも適用でき内湾エリアにおいても多用されている。またブイ浮体の形状にも様々な種類があり（後述）、観測海域に応じた設計が可能である。しかし、従来のブイを使用した係留系観測においては、観測データの空間密度を高くするためには、設置するセンサーの台数が増えることとなり、初期コストが増大する問題点も抱える（後述）。

海上構造物を利用したモニタリングポスト観測は、船舶調査と異なり荒天時にも観測が実施できることが利点である。また、陸上からの電力供給を受けている構造物を利用している場合、センサーや観測機器への外部電力供給が可能で電源使用総量を気にすることがなく、外付けバッテリー等を使用する係留系観測に比べて長期間安定した観測が行える。

自動昇降機能をもつプラットフォームは、ブイ一体型と、自動昇降装置を海上構造物や生簀等、別のプラットフォームに組み合わせる型がある。前者は外洋域での実績が多い日油技研工業(株)製の中層中立ブイタイプと海底設置タイプがある。後者はモニタリングポスト等で使用されているJFEアドバンテック(株)製やYSI ナノテック(株)製の装置がある。いずれの装置も観測層を任意に調節でき、密な鉛直観測を実現している。しかし、ウインチ等のシステムに必要な機器も多くなる自動昇降装置はそれら機器も含めた耐久性に課題があるとの意見もある（後述）。

(ラグランジュ型)

このプラットフォーム（漂流ブイ、AUV、アルゴフロート、水中グライダー）については、沿岸域、特に内湾域等船舶の往来が多い場所での運用には細心の注意が必要となる。特に、海表面での漂流物は航行船舶の通行の妨げになる可能性があり、今回の沿岸域モニタリングシステムの検討では、このラグランジュ型プラットフォームについて検討から外した。

表 4.1-2 海洋観測プラットフォーム一覧表

	プラットフォーム名	観測海域			メンテナンス性				コスト(円)	
		外洋域 200m<	沿岸域 20~200m	浅海域 <20m	センサー交換等 保守の容易さ	電源供給	データ転送	ヴァンダリズム の想定	インフラコスト	運用コスト
オイル 型	定置ブイ	○	○	○	△(深度による)	太陽電池 内蔵バッテリー	○ 衛星	あり	数百万~数千 万	安
	モニタリングポスト	×	○	○	○	太陽電池	○ 衛星、有線	構造物の大き さにより、あり	既設物への設 置なら数千万	2千万
	自動昇降装置(日油式)	○	○	×	×	内蔵バッテリー	○ 衛星	なし	1.5千万~	数百万~
	自動昇降装置(JFE/YSI式)	×	○ >100m	○ 10m<	○	太陽電池	○ 衛星	あり	1千万~	数百万~
	自動昇降装置(波力駆動式)	△ >500m	○	△	○	内蔵バッテリー	○ 衛星	あり	4千万~	
ラゲ ラン ジュ 型	漂流ブイ	○	○ 但し湾内×	×	×	内蔵バッテリー	○ 衛星	あり	1基170万~	
	アルゴフロート	○	×	×	△	内蔵バッテリー	○ 衛星	なし	1基150万~ (1USD=100円)	1基数百万~
	AUV(大~中型)	○	△	×	○	内蔵バッテリー	×	なし	数億~	
	AUV(小型)	△	○	○	○	内蔵バッテリー	×	なし	4千万~	
	水中グライダー(浮力式)	○	△	×	△	内蔵バッテリー	○ 衛星	なし	1.5千万~	
	水中グライダー(波力式)	○ 表層のみ	○ 表層のみ	△	○	太陽電池	○ 衛星	あり	3千万~	

4.1.1 昇降型の利点と課題

ここでは、海水中 CO₂観測手法として、外洋域で用いられた実績を持つ自動昇降装置を備えた中層中立ブイ「昇降型」プラットフォームと、海表面 CO₂観測を想定した「ブイ型」プラットフォーム（図 4.1-2）について、それぞれの利点と課題を整理する。

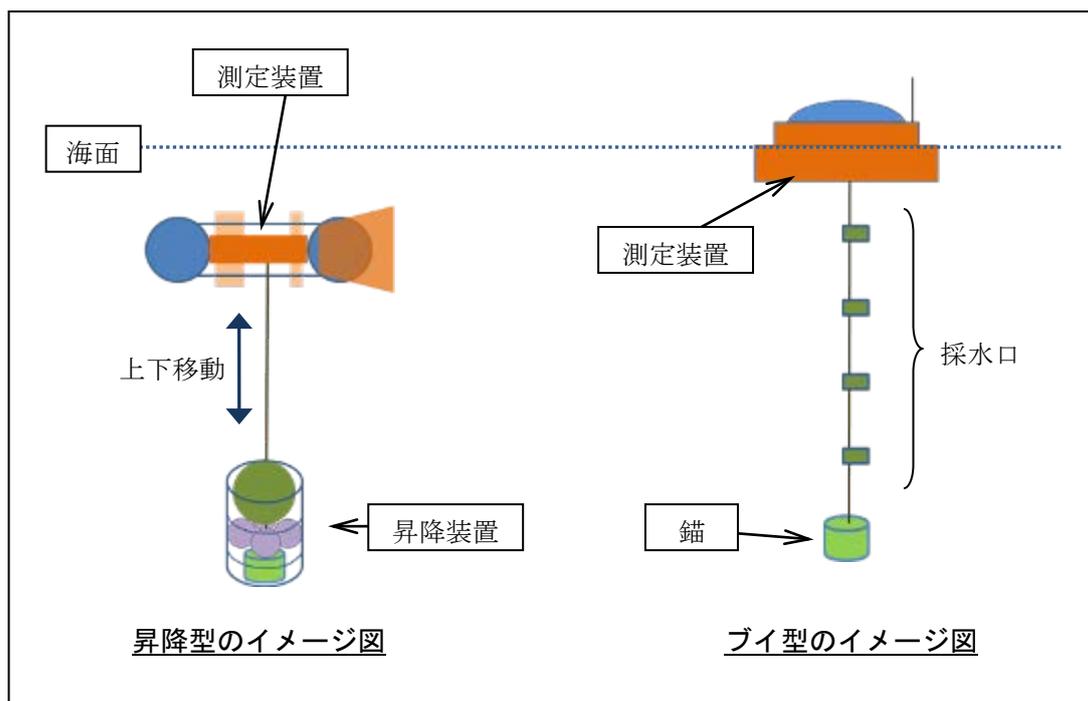


図 4.1-2 海水中 CO₂観測手法イメージ図

4.1.1.1 昇降型の利点

(1) 鉛直プロファイル観測

表層から海底直上までの鉛直的な連続観測により、鉛直的に密なデータの取得が可能である。また同一センサーで各水深の連続観測値が得られるため、複数機器を固定して用いる場合と違い、器差補正の必要がない。

(2) インフラコスト

昇降装置にセンサーを 1 台取り付けて運用するため、ブイ等を利用した複数の固定層観測インフラコストよりも安く抑えられる。さらにセンサー交換時等にはスペアセンサーを複数準備しておく必要もない。

(3) メンテナンス性

(ア) 荒天対策

通常、表層観測時以外は水中で待機しているため、荒天による波浪の影響を受けにくく、第三者によるヴァンダリズム(破壊行為)被害にも遭いにくい。

(イ) 生物付着対策

日油技研工業(株)の中層中立ブイタイプや海底設置タイプの場合、外洋域での運用ではセンサー部を有光層下に待機させることで生物付着の軽減を図っている。沿岸での使用が多い JFE アドバンテック(株)製の昇降装置は空気中でセンサーを待機させることで生物付着の影響を軽減している。同じく YSI ナノテック(株)の昇降装置は、センサーハウジングに銅合金を装着し、センサー部を水中待機させて生物付着対策を講じている。

(ウ) 機器交換

日油技研工業(株)の中層中立ブイタイプは、センサー部を海面浮上させ駆動部のみ海面上で取り外しメンテナンスすることができる。

4.1.1.2 昇降型の課題

(1) 海面浮上時の事故

船舶の往来が多い内湾や港湾域では、中層中立ブイのように水面下から海表面に浮上してくる動作は、単体で利用の場合、船舶との接触事故を起こす危険性があるため、設置許可が認められない可能性がある。

(2) ハード面での耐久性

海面より上にウインチ部等の機器類を設置するタイプの自動昇降装置については、巻き上げ機器故障による観測中断の危険性が高まる。またガイドワイヤーや海底に設置したストッパー板等の耐久性もシステム全体の寿命を左右する。ウインチ部等機器類の材質に SUS 素材等を使用している場合は、腐食・劣化を生じる可能性がある。

4.1.2 ブイ型の利点と課題

海洋観測係留ブイとして使用されるブイ本体の構造と形状を分類し、その諸特性、材質および製造法、設計時に検討すべき項目を示し、本調査研究で概念設計する沿岸域 CO₂モニタリングシステムにおける利点や課題をまとめる。ブイの構造および浮力体の形状、材質は、水深・波高・潮流等の海域条件、搭載機器の種類、運用する年数、設置方法や使用機材等によって決定される。ブイの形状と性能をまとめた表を示す(表 4.1.3)。

表 4.1.3 ブイの形状比較

	円筒型	円盤型(ディスク型)	円環型(トロイド型)	船型	円柱型(スパー型)	球型
形状						
形状特徴	円筒型浮体上にヤグラ構造物、下方に重錘最も実績のある型	浮体の安定性向上 ブイ上に機器を多く収納	浮力を周辺に配置 係留策張力の軽減	波浪潮流抵抗が少ない 機器を多く搭載	波浪抵抗を低減 緊張係留 浮体の振れ回りが少ない 浅海域用	波浪の外力が最小 漂流ブイとして活用
主な用途	航路標識ブイ 工事用標識ブイ 海洋観測ブイ 水産ブイ	海洋観測ブイ(気象庁ブイ) 航路標識ブイ 水産ブイ	海洋観測ブイ (アトラスブイ)	航路標識ブイ 海洋観測ブイ	工事用標識ブイ 海洋観測ブイ	海洋観測ブイ(海流)
浮体外径	0.5 ~ 3.2m	2.0 ~ 1.6m	2.4m	3 ~ 21m	0.1 ~ 1.5m	0.3 ~ 1.2m
重量	0.02 ~ 12tf	1 ~ tf		0.2 ~ tf	0.01 ~ 24tf	0.009 ~ 0.4tf
全浮力	0.05 ~ 25tf	2 ~ 700tf	3tf	0.5 ~ 140tf	0.02 ~ 60tf	0.015 ~ 0.9tf
搭載物重量	~ 0.5tf	0.1 ~ 2tf		0.05 ~ 3tf	0.005 ~ 0.5tf	0.002 ~ 0.1tf
主要材質	鋼材 アルミ FRP ポリエチレン	鋼材 アルミ PCコンクリート	FRP 鋼材 アルミ	鋼材 FRP	鋼材 アルミ材	アルミ材
特徴	重量あたりの体積効率良 ブイ上の保守性難 小~中型ブイに適 ヒープ運動大 ヒープ内機器、電源を収納	安定性大 搭載物多い 耐潮流性能良 ブイ上での保守性可 大型ブイに適 波面追従によりピッチ、ヒープ、ロール運動大 ブイ内に機器、電源を収納 高波浪時転覆する	安定性大 搭載物多く積めない ブイ上での保守性難 ブイ内に機器室がなく各機器が独立した機器を持つ 小型軽量で船上での取扱いは比較的良い	耐潮流性能良 搭載物多い 重く取扱いが難 小型の場合作業性難 ピッチ共振有	耐波浪性能良 長大になる傾向がある 搭載物多く収納は不可 作業スペース少 ヒープ共振有 設置/回収の取扱いは難	耐波浪性能良 視認効果が良くない 小型軽量ブイに適す ブイ上での作業不可 ヒープ運動大 設置回収は容易 重い係留索が使えない

4.1.2.1 ブイ型の利点

(1) 高精度分析

ブイ浮体の中に CO₂分析装置や標準ガスボンベを搭載することにより、センサー利用に比べて現場海水値を高精度に分析することが可能となる。また大気 CO₂値も観測することが可能となる。

(2) 可搬性（観測地点の選択性）

観測タワー等の海上構造物や自動昇降付き中層中立ブイ等は、設置してしまうと容易に観測地点を変更できない。これと比較して、ブイを用いたプラットフォームの利点は可搬性にある。当該地点での観測や水平観測等の結果から、より良いデータが得られる地点への移設が可能である。また同じく設置地点での水深変化にもセンサー固定位置を変更する等柔軟に対応ができる。

(3) コストパフォーマンス

ブイをベースとしたプラットフォームは、これまで沿岸から外洋域まで幅広い海

域において自動観測等に多く利用されており、前述のとおり構造や形状等は海域や用途に応じて最適化することができる。さらに、海上構造物と比較して大掛かりな海上工事を必要としないため、設置、移設や回収作業にかかる日数と費用を軽減できる。

4.1.2.2 ブイ型の課題

(1) 観測水深

海水中 CO₂観測手法イメージ図（図 4.1-2）のように、採水口を各層に配置し海表面ブイ浮体内分析部で測定する場合、採水口を設ける水深によっては浮体部に搭載したポンプ容量や採水チューブ径等を検討しなければならず、概ね浅海域での利用になると予想される。また、各深度の観測値にタイムラグができ、吸引や掃気の圧によっては海水中のガス成分に影響が生じる可能性も考えられる。

(2) 荒天避難

大型低気圧通過等、設置海域の海象悪化が予想された場合、ブイ型プラットホームはその規模によっては避難する必要が出てくる。それに掛かる備船費や回収・再設置費用が発生する可能性がある。一方、荒天待機を必要としない強固な設置を行った場合、前述の「可搬性」の利点効果はやや薄れるものとなる。

(3) メンテナンス性

ブイ係留系の鉛直観測は、各設定深度にセンサーを固定してあるため、それらセンサーの交換等の保守作業効率・作業量は設置深度に依存することとなる。深度 20m 程度までであれば、潜水士による機器取替えが一般的であるが、それ以深になると係留系ごと回収する必要が出てくる。係留系の大きさにもよるが作業船が必要な作業の場合は、コストが増大する。

また、各層にセンサーを固定した場合には駆動する昇降型よりもセンサー部への生物付着影響を受けやすい可能性があるため、生物付着対策や洗浄方法、そのメンテナンス頻度も考慮すべきである。

(4) 機器の破損、盗難

海表面に浮かんでいるブイは、その大きさによらず他船による衝突や接触、またヴァンダリズム被害に遭うことがあり（角田ら、2004）、その場合、観測中断になる可能性もある

以上のように、「昇降型」「ブイ型」それぞれの利点・課題を整理した。本事業における沿岸 CO₂鉛直自動モニタリングシステムの概念設計に際しては、これらの利点を生かし、課題については優先順位をつけて対策を講じ、現時点で可能な限り最適なシステムとなるよう検討を進める。

4.2 自動モニタリングシステムの概念設計

ここまで、沿岸 CO₂鉛直自動モニタリングシステムに必要な要素技術（センサー、プラットフォーム）について、既存技術を整理検討した。第1章で述べたとおり、本調査研究は5ヵ年にわたる沿岸 CO₂鉛直自動モニタリングシステム開発計画の初年度にあたり、当該システムの概念設計をとりまとめることとしている。今後、沿岸 CO₂鉛直自動モニタリングシステム研究開発を進めるにあたり、第1章で示した図1 沿岸域 CO₂鉛直自動モニタリングシステム開発のロードマップの流れに従って、表4.2のような進め方を検討する。

表 4.2 沿岸 CO₂鉛直自動モニタリングシステム研究開発の進め方

年次	概要	実施内容（案）
平成 25 年度	概念設計	（技術動向調査） 沿岸 CO ₂ 鉛直自動モニタリングシステムの概念設計 机上試験を実施するための候補地リストの作成
平成 26 年度	要素技術の検討	（開発要素の検討） 机上試験に基づいた、要素技術の整理と開発要素の洗い出し （試行試験準備） 候補地の絞込み、候補地（既存モニタリングポスト）過去観測データの解析、観測データ解析結果による搭載予定センサーの選定
平成 27 年度	試設計	（試設計と要素実験） 既存モニタリングポストでの CO ₂ センサー鉛直観測の実証試験（試行試験） 試行試験結果の取りまとめ、試設計へのフィードバック
平成 28 年度	試作機の製作	（試作機の製作） 試設計に基づく試作機の製作、搭載センサー実証試験 システムの基本設計
平成 29 年度	実証試験	（装置の実証実験） 試作システムの実証試験 基本設計の見直し

本節では、それら要素技術の検討結果から、沿岸 CO₂鉛直自動モニタリングシステムの概念設計および CO₂鉛直観測の試行試験実施に向けた候補地リストの作成を行った。

4.2.1 自動モニタリングシステムの概念設計

本調査研究結果として、沿岸域における CO₂鉛直連続モニタリングシステム（以降、本モニタリングシステム）の概念設計をまとめた。

- 設置海域
 - ・ 沿岸域（水深 50m 程度を想定）
- 観測プラットフォーム
 - ・ 海底設置タイプの昇降ブイ装置とマーカーブイの組み合わせによる鉛直観測プラットフォームを想定した。
 - ・ 沿岸域（特に港湾）において水面下から海面浮上してくる昇降ブイの単体利用は、周辺を航行する船舶に支障が出る可能性があるため、船舶からも視認性の良い標識ブイを近傍に設置し、昇降ブイが浮上してくる警戒エリアの目印とした。警戒エリアは、標識ブイ 1 基と灯標ブイ 2 基で構成した（図 4.2.1-1）。

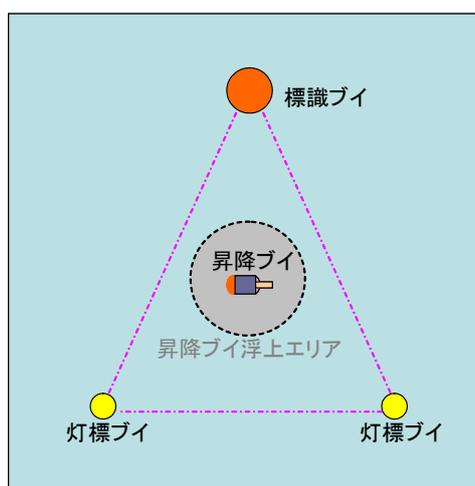


図 4.2.1-1 昇降ブイ警戒エリア水平イメージ図

- ・ 標識ブイの形状は、沿岸での実績が多く浮体内に装置類を収納できる円筒型浮体を採用した。その浮体内にバッテリー、大気 CO₂分析計を搭載し、櫓部分には太陽光パネル、GPS アンテナ、気象観測装置、大気取り込み口を設置する。その他船舶からの視認性を保つために必要なレーダーリフレクターや灯火類を装備する。
- ・ 標識ブイから水中ケーブルを介して海底に設置する昇降ブイシステムのウインチ部へ電力を供給する。
- ・ 標識ブイ下層部（海面下）には、多層流向流速を観測できる ADCP を設置し調査海域における流況を観測する。
- 自動昇降装置（昇降ブイ方式）
 - ・ 海底設置型の昇降ブイシステムをベースとした。昇降ブイシステムはフロート、

観測センサー等を搭載した昇降ブイ部と、フロート部を昇降するウインチを搭載したウインチ部で構成され、センサーのメンテナンス時には昇降ブイ部ごと交換することとする。

- ・ 昇降ブイ部には、 $p\text{CO}_2$ センサー、水質センサー（水深、水温、塩分、DO、クロロフィル a、pH、 NO_3 、 NO_2 ）、センサー用予備バッテリーを搭載する。

➤ CO_2 センサー

- ・ 沿岸域での CO_2 変動を把握するために必要な分析精度は $\pm 10\text{ppm}$ レベルであるとした場合、本調査研究で調査した CO_2 センサーでは測定精度にほぼ大差ないと判断し、応答速度に注目しセンサーを選択した。

- ◇ 第1候補:PSI CO_2 -pro、第2候補:pH- CO_2 ハイブリッドセンサーとした。
- ◇ 固定層設置の場合は、第1候補:SAMI- CO_2 、第2候補:pH- CO_2 ハイブリッドセンサーとした。

- ・ ただし、次に示す2点については、今後の改良が必要と考える。
 - ◇ 応答速度:現状、半導体式を除き最低2~3分要する。今後、半導体式センサーの市販化や、他方式の CO_2 センサーの高速化に向けた開発が望まれる。
 - ◇ 測定レンジ:対象沿岸域における CO_2 値変動レンジをカバーする測定精度と測定レンジ幅のバランスを検討する必要がある。

➤ 水質観測項目

- ・ 水中:水温、塩分、DO、クロロフィル a、pH、 $p\text{CO}_2$ (海水)、栄養塩類 (NO_3 、 NO_2 、 NH_4 、 PO_4 、 $\text{Si}(\text{OH})_4$)、流向、流速

➤ 洋上観測項目

- ・ 気温、風向、風速、 $p\text{CO}_2$ (大気)

➤ 観測タイミング、観測間隔

- ・ 毎正時に観測を実施。
- ・ 海底面より浮上時に0.5mピッチで測定(10秒停止)。
- ・ 現状の CO_2 センサー測定速度の場合、まずは海底直上層(スタート層)それ以降10m毎の層で3分間停止し CO_2 観測を行う(試行試験の結果によっては、さらに観測密度が増える可能性が高い)。
- ・ 将来的には、 CO_2 センサー応答速度向上に伴い高い観測密度を目指す。

➤ データ転送方法

- ・ 初期段階では、昇降ブイに搭載した衛星通信装置を利用してデータ転送を行う。昇降ブイが海表面に浮上したと同時に、イリジウム衛星回線や携帯電話回線により陸上基地局へのデータ転送を実施する。所要時間は約10分間とする。
- ・ 将来的には、標識ブイとウインチ部をつなぐケーブルを介して、データ通信を行えるようにする。

- 電力供給
 - ・ 標識ブイ櫓部分に太陽光パネルを装着する。標識ブイ内部にはリチウムバッテリーを搭載する。
 - ・ 標識ブイから海底にあるウインチ部には電力ケーブルを介して電力を供給する。将来的には、電力供給だけでなくデータ通信を行えるようにする。
- 生物付着対策
 - ・ 各センサーには生物付着対策として、銅合金ケースおよびワイパーを適用。ウインチ部や昇降ブイの各パーツには、生物付着対策として実績のあるシリコン系防汚塗料（藤木ら、2009）を塗布し生物付着を抑制する。
- メンテナンス
 - ・ 運用当初は、毎月1回の頻度で点検、バッテリー部品交換、センサー洗浄・交換等を実施する。
 - ・ メンテナンス作業時に現場採水を実施し、センサー観測値と採水分析値との比較検証を実施する。またセンサーを交換し、陸上にて機器校正を行う。
 - ・ 将来的には、センサーの長期安定性や校正方法を検討しセンサー運用期間の向上を図る。
 - ・ 同様にメンテナンス点検時に得られる情報（生物付着状況やバッテリー消耗具合等）により、メンテナンス頻度を少なくする検討を行う。
- 初期コスト（概算値で表記。この価格帯で抑えることで市場競争力の向上を図る）
 - ・ 昇降システム : 1500 万円/基～4500 万円/基
 - ・ pCO₂センサー : 250 万円/台～800 万円/台
 - ・ 水質センサー : 500 万円/台～1500 万円/台
 - ・ 流向流速観測装置 : 500 万円/台～1000 万円/台
 - ・ 標識ブイ（工事費含む） : 3000 万円/基～4000 万円/基
 - ・ 灯標ブイ（工事費含む） : 2000 万円/基～3000 万円/基
- 運用コスト（概算）
 - ・ 概算 : 400 万円/年～2000 万円/年

本モニタリングシステムは、海洋観測で実績のある係留ブイ観測手法に、昇降ブイシステムという要素技術を取り入れ、それぞれの利点を生かすことで、これまで実現できなかった沿岸域での海水中 CO₂鉛直観測を可能にする技術である。また、海水中の CO₂に関連する水質項目の化学的観測だけではなく、急潮など当該海域の物理的イベントの観測も同時に把握することが可能なハイブリッド観測手法である。本モニタリングシステムの概念図を図 4.2.1-2 に示す。

さらには、近年国内外で研究開発が進む海底ケーブルを利用した沿岸観測網システム（第 2 章で紹介した米国の MOOS プロジェクトや、カナダの NEPTUNE 計画等）に比べ

て、本システムは標識ブイ・自動昇降装置・灯標ブイで 1 ユニットを形成しており、かつ陸上と有線接続されていないため、沿岸から外洋まで設置ロケーションを選ばず、これまでになかったシステムであるといえる。またコスト面でも海底ケーブル観測網に比べて優位性を持つものといえる。

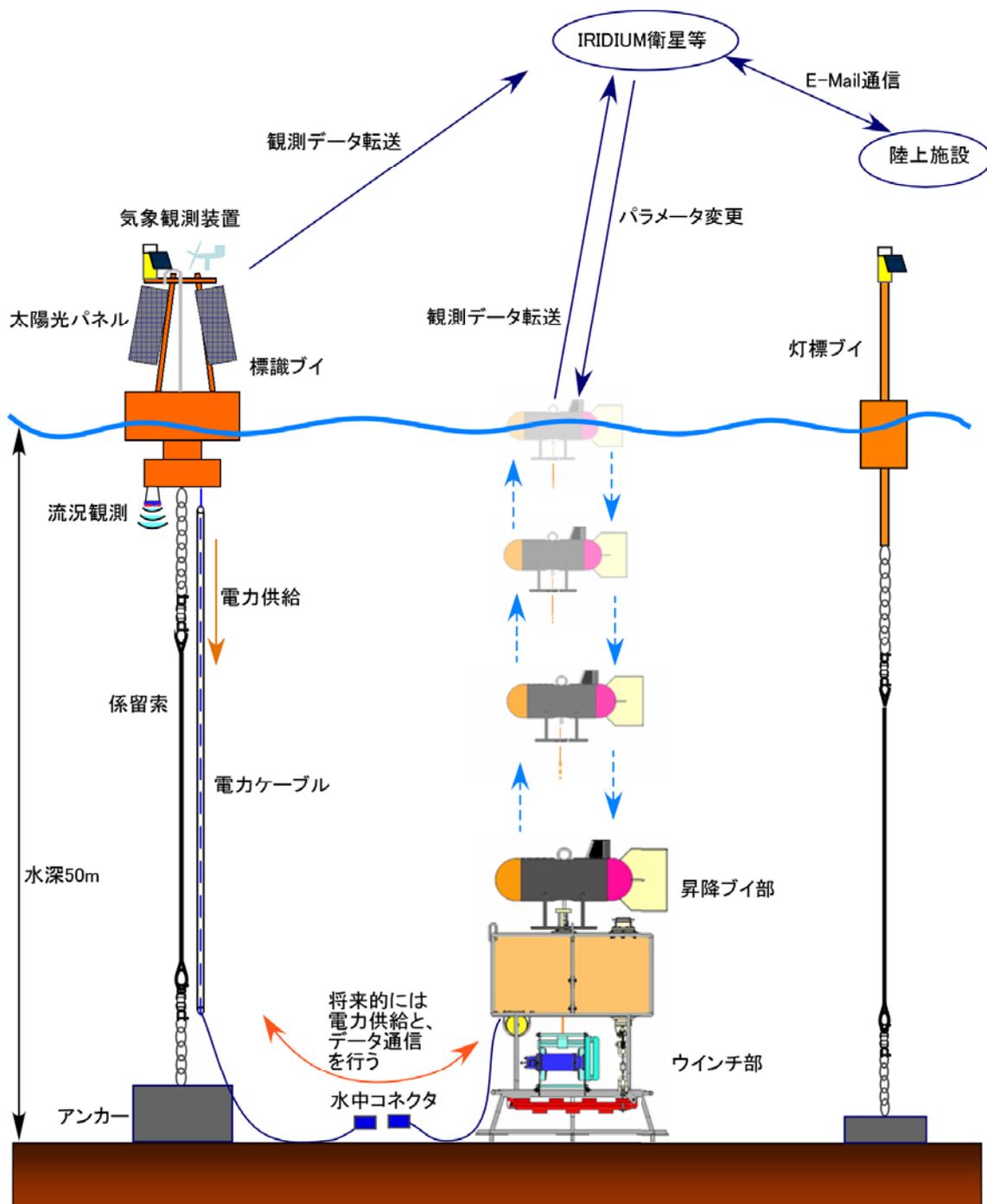


図 4.2.1-2 沿岸 CO₂鉛直連続モニタリングシステム概念図

4.2.2 机上試験対象海域に関する情報の収集

本調査研究で CO₂鉛直自動モニタリングシステムの開発を行うに当たり、次の開発段階として、要素技術の検討が必要となる。また、その検討には机上試験が要求され、結果の精度を確保するためには、できるだけ具体的な海域を設定し、既に取得されたデータ等を参照しながら検討することが望まれる。

この節では、現在国内において実際に水質の連続観測を実施している地点を整理するとともに、それぞれの地点で得られた水質データや、当該海域を対象とした文献等に基づく情報をあわせて整理した。

1) 定地水温データ (120 地点)

日本海洋データセンター (JODC) では、日本各地沿岸域で毎日観測される表面海水温のデータをホームページ上で毎日更新している。観測地点数は 120 地点 (現在既に観測を終了した 16 地点を含む) であり、インターネット上で過去のデータも閲覧することができる。これらの観測地点をまとめたものを表 4.2.2-1 に、地図上に描画したものを図 4.2.2 (図中の赤色丸) に示す。

これら 120 地点のうち、岸壁等での採水测温は 42 地点、同じくデジタル水温計等による直接測定が 9 地点であり、残り 69 地点は設置センサーやポンプアップ海水の測定、定置ブイによるセンサー観測による测温であった。

表 4.2.2-1 定地水温観測地点一覧表

観測地点名		観測地点名		観測地点名	
北海道地方	北海道1(稚内)	北陸地方	新潟(佐渡島)	中国地方	岡山(牛窓)
	北海道2(紋別港内)		新潟1(上越)		鳥取1(泊村)
	北海道2'(紋別港外)		新潟2(寺泊)		鳥取2(隠岐海峡)
	北海道3(厚岸)		新潟3(新潟)		島根(浜田)
	北海道4(余市)		新潟4(岩船沖)		島根1(浜田)
	北海道5(室蘭)		富山(滑川)		広島(音戸)
	北海道6(奥尻島)		石川1(宇出津新港)		広島1(広島港)
	北海道7(知内)		石川2(石崎港)		山口1(大泊港)
	北海道8(小樽港)		石川3(志賀)		山口2(山口漁港)
北海道9(江差)	石川4(橋立港)	山口3(秋穂港)			
東北地方	青森1(鱒ヶ沢)	中部地方	石川5(能登島)	四国地方	香川1(屋島湾)
	青森2(茂浦)		福井1(米ノ)		香川2(引田)
	岩手1(野田湾)		静岡1(伊東)		香川3(大浜丸山沖)
	岩手2(山田湾)		静岡2(稲取)		愛媛(宇和島)
	岩手3(船越湾)		静岡3(下田)		徳島1(粟田漁港)
	岩手4(釜石湾)		静岡4(雲見)		徳島2(鳴門分場)
	岩手5(大船渡湾)		静岡5(沼津)		徳島3(今切港)
	岩手6(広田湾)		静岡6(焼津)		徳島4(橘漁港)
	岩手7(宮古)		静岡7(地頭方)		徳島5(椿漁港)
	秋田(船川港)		静岡8(御前崎)		徳島6(日和佐浦)
	宮城1(気仙沼)		愛知(南知多)		高知1(柏島漁港)
	宮城2(牡鹿)		三重(浜島港)		高知2(伊佐)
	山形(加茂港)		三重1(白子)		高知3(清水)
	福島1(相馬)		三重2(英虞湾口)		高知4(田野浦)
福島2(大熊)	三重3(英虞湾央)	高知5(浦ノ内)			
福島3(小名浜)	三重4(英虞湾奥)	高知6(室戸岬)			
福島4(小名浜)	三重5(船越)	高知7(甲浦)			
関東地方	茨城(磯崎)	近畿地方	三重6(神明)	九州地方	高知8(野見湾口)
	東京1(大島)		三重7(鳥羽浦村)		高知9(野見湾央)
	東京2(新島)		和歌山1(串本港東堤防)		高知10(野見湾奥)
	東京3(式根島)		和歌山2(串本港西堤防)		大分(津井浦)
	東京4(神津島)		和歌山3(田辺湾)		福岡(大牟田)
	東京5(三宅島)		京都(粟田湾)		福岡1(関門港)
	東京6(八丈三根)		大阪(岬町)		佐賀(唐津)
	東京7(父島)		兵庫(明石)		長崎(新長崎漁港)
	東京8(八丈島)		兵庫1(須磨)		熊本(有明海)
	神奈川(三崎)		兵庫2(神戸港)		宮崎(熊野江港)
	千葉(千倉)				鹿児島(垂水)
	千葉1(富津)				鹿児島1(鹿児島港本港区)
	千葉2(千葉灯標)				沖縄(本部町)
					沖縄1(石垣島)
		沖縄2(水族館)			

2) リアルタイム海洋情報収集解析システム

独立行政法人水産総合研究センターがデータベースの管理をしている「リアルタイム海洋情報収集解析システム」のホームページ(<http://buoy.nrifs.affrc.go.jp/top.php>)では、日本各地で観測されている自動観測ブイのデータをリアルタイムに得ることができる。東北から鹿児島まで24箇所の自動観測ブイ（全て水温観測のみ、一部のブイでは流況も観測）の測点を表4.2.2-2に整理し、図4.2.2（図中の緑色丸印）に示す。

表 4.2.2-2 自動観測ブイ（水温）一覧表

設置場所		観測項目	観測層	測定層の水深
青森県	塩屋崎	水温	3層	1、5m、10m
岩手県	重茂	水温、流向流速	4層	1、5、10、20m
岩手県	越喜来	水温、流向流速	4層	1、5、10、15m
宮城県	歌津	水温、流向流速	4層	1、5、10、15m
宮城県	石巻	水温、流向流速	4層	1、3、5、8m
茨城県	会瀬	水温、流向流速	3層	1、10、20m
神奈川県	長井	水温	2層	1、5m
静岡県	妻良	水温	4層	1、5、10、20m
静岡県	内浦	水温	7層	1、5、10、15、20、30、35m
静岡県	地頭方	水温	4層	1、5、10、12m
三重県	片田	水温	3層	1、5、10m
京都府	蒲入	水温	2層	10、30m
京都府	舞鶴湾	水温	3層	1、6、10m
和歌山県	串本東側	水温	4層	1、5、10、13m
和歌山県	串本西側	水温	2層	1、5m
愛媛県	岩松湾	水温	25層	0.5、1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、12、13、14、15、16、17、18、19、20、21、22、23、24m
愛媛県	遊子	水温	2層	5、20m
高知県	宿毛湾	水温	7層	1、5、10、15、20、30、40m
高知県	室戸岬	水温	5層	1、5、10、20、30m
佐賀県	唐津湾	水温	3層	0.5、6、11m
佐賀県	名護屋浦	水温	3層	0.5、9、17m
佐賀県	伊万里湾	水温	3層	0.5、6、11m
宮崎県	串間	水温	3層	1、5、10m
鹿児島県	種子島	水温	2層	1、10m

（水産総合研究センター資料より作成）

3) 係留ブイ、海上構造物を利用した沿岸水質自動観測

インターネットで公開されている各機関データベースを調査し、係留ブイや海上構造物を利用した水質観測のうち、鉛直連続観測を行っている観測システムの情報をまとめた表を作成した（表4.2.2-3）、またその表中の観測システム番号を図4.2.2（図中の青枠囲み）に示した。

表 4.2.2-3 係留ブイ、海上構造物を利用した沿岸水質観測事例一覧表

観測システム名	観測実施機関	観測海域	観測項目	固定式/昇降式	観測層水深(m)	観測インターバル		
陸奥湾 海況自動観測システム	青森県産業技術センター水産総合研究所	陸奥湾平館ブイ	水温、塩分、流向・流速	固定式	水質は、1、15、30、底層の4層 流向流速は、4、6、8、15、20、25、30、35、40の10層	60分		
		陸奥湾青森ブイ	水温	固定式	水温は、1、15、30、底層の4層	60分		
		陸奥湾東湾ブイ	水温、塩分、DO、クロロフィルa、流向・流速、気温、風向・風速	固定式	水質は、1、15、30、底層の4層(DOは下層2層、蛍光強度は表層のみ)	60分		
海洋環境リアルタイムモニタリング	東北大学	志津川湾ブイ	水温、塩分	固定式	5.3、16	10分		
		女川湾塚浜沖ブイ	水温、塩分	自動昇降	5、10、15、20	60分		
		女川湾寺間沖ブイ	水温、塩分	固定式	5、30	10分		
		女川湾竹浦沖ブイ	水温、塩分	固定式	2.4、8	10分		
		長面浦(筏タイプ)	水温、塩分、DO	固定式	1、7	30分		
東京湾水質連続観測	東京湾環境情報センター (国土交通省関東地方整備局港湾空港部)	浦安沖観測塔	水深、水温、電位伝導度、塩分、DO、クロロフィルa、濁度、気温、流向・流速、風向・風速	自動昇降	1mピッチ	60分		
		千葉港波浪観測塔	水深、水温、電位伝導度、塩分、DO、クロロフィルa、濁度、気温、流向・流速、風向・風速	自動昇降	1mピッチ	60分		
		千葉港口第一号灯標	水深、水温、電位伝導度、塩分、DO、クロロフィルa、濁度、気温、流向・流速、風向・風速	固定式	1、10、18.5	60分		
		川崎人口島	水深、水温、電位伝導度、塩分、DO、クロロフィルa、濁度、気温、流向・流速、風向・風速	自動昇降	1mピッチ	60分		
	海上保安庁	千葉灯標	水温、塩分、DO、クロロフィルa、濁度、流向・流速、風向・風速	自動昇降	1mピッチ	60分		
伊勢湾環境モニタリングシステム	中部地方整備局 名古屋港湾空港技術調査事務所	伊勢湾湾奥	水温、塩分、DO、クロロフィルa、濁度、気温、風向・風速	自動昇降	1mピッチ	60分(正時)		
		伊勢湾湾央	水温、塩分、DO、クロロフィルa、濁度、波高、流向・流速、気温、風向・風速	自動昇降	1mピッチ	60分(正時)		
		伊勢湾湾口	水温、塩分、DO、クロロフィルa、濁度、波高、流向・流速、気温、風向・風速	自動昇降	1mピッチ	60分(正時)		
水試三河湾ブイ	愛知県水産試験場	1号ブイ	水温、塩分、DO	固定式	表層、底層	60分		
		2号ブイ	水温、塩分、DO	固定式	表層、底層	60分		
		3号ブイ	水温、塩分、DO	固定式	表層、底層	60分		
英虞湾・的矢湾・五ヶ所湾環境モニタリングシステム	三重県真珠養殖連絡協議会	英虞湾 湾央	水温、塩分、DO、クロロフィルa、濁度	自動昇降	1mピッチ	60分(正時)		
		英虞湾 湾奥	水温、塩分、DO、クロロフィルa、濁度	自動昇降	1mピッチ	60分(正時)		
		的矢湾 三ヶ所	水温、塩分、DO、クロロフィルa、濁度	自動昇降	1mピッチ	60分(正時)		
		五ヶ所湾 床なぎ	水温、塩分、DO、クロロフィルa、濁度	自動昇降	1mピッチ	60分(正時)		
		明石海峡航路東方灯浮標	水温、塩分	固定式	表層	60分		
大阪湾水質定点自動観測	近畿地方整備局 神戸港湾空港技術調査事務所	洲本沖灯浮標	水温、塩分	固定式	表層	60分		
		関空MT局	水温、塩分、DO、クロロフィルa、濁度、流向・流速、水中光量、風向・風速	自動昇降	0.5、1(それ以降1mピッチ)	60分		
		神戸港波浪観測塔	水温、塩分、DO、クロロフィルa、濁度、流向・流速、水中光量	自動昇降	0.5、1(それ以降1mピッチ)	60分		
		淀川河口	水温、塩分、DO、クロロフィルa、濁度、流向・流速、水中光量、風向・風速	固定式	0.7、5、7.5m	60分		
		阪南沖窪地	水温、塩分、DO、クロロフィルa、濁度、流向・流速、水中光量、風向・風速	自動昇降	0.5、1(それ以降1mピッチ)	60分		
		堺浜	水温、塩分、DO、クロロフィルa、濁度、流向・流速、水中光量	自動昇降	0.5、1(それ以降1mピッチ)	60分		
		六甲アイランド	水温	固定式	3.5(それ以降0.5mピッチに17層)	60分		
		東水路中央第三灯標	水温	固定式	3.5(それ以降0.5mピッチに17層)	60分		
		浜寺航路第十号灯標	水温	固定式	海面1m下、海底1m上	60分		
		淡路交流の翼港	水温、塩分	固定式	海面1m下、海底1m上	60分		
		須磨海釣り公園	水温、塩分	固定式	海面1m下、海底1m上	60分		
		大阪港波浪観測塔	水温、塩分、DO、クロロフィルa、濁度、流向・流速、水中光量、風向・風速	自動昇降	0.5、1(それ以降1mピッチ)	60分		
		岸和田沖	水温、塩分、DO、クロロフィルa、濁度、水中光量、流向・流速	自動昇降	0.5、1(それ以降1mピッチ)	60分		
		佐賀県 水温塩分自動観測	玄海水産振興センター	唐津湾	水温、塩分	固定式	表層、6m、底上1m	20分
				名護屋浦	水温、塩分	固定式	表層、9m、底上1m	20分
伊万里湾 阿漕地先	水温、塩分、DO、クロロフィルa			固定式	表層、5m	20分		
伊万里湾 波多津地先	水温、塩分、DO			固定式	底上1m	20分		
有明湾・諫早湾・八代湾自動観測ブイネットワーク	福岡県水産海洋技術センター 福岡県有明海漁連 佐賀県有明振興センター 熊本県水産研究センター 熊本市	有明海湾奥部	水温、塩分	固定式	表層(0.2~0.4m)	60分(正時)		
	九州農政局北部九州土地改良調査管理事務所 熊本天草市 鹿児島県東町漁業協同組合	熊本市地先、長州	水温、塩分	固定式	0.5m	60分(正時)		
		諫早湾	水温、塩分、DO	固定式	底上1m	60分(正時)		
		八代海	水温、塩分	固定式	3m	60分(正時)		
有明海観測タワー	佐賀大学	有明海	水温、塩分、DO、クロロフィルa、濁度、pH、光量子量、流向・流速、 気温、相対湿度、風向・風速、気圧、降水量、日射量	自動昇降	0.5mピッチ	60分		
有明海水質連続観測	水産総合研究センター西海区水産試験所 有明海・八代海漁場環境研究センター	有明海 六角川観測塔	表層)水温、塩分、クロロフィルa 底層)水温、塩分、DO	固定式	表層、底層(海底上0.2m)	10分		
		有明海 国富干湯沖	表層)水温、塩分、クロロフィルa、濁度、流向・流速 底層)水温、塩分、DO	固定式	表層、底層	10分		
		有明海 新明沖	底層)水温、塩分、DO、水深	固定式	表層、底層(懸架のため水深変動)	10分		
		有明海 浜川沖	底層)水温、塩分、DO、水深	固定式	表層、底層(懸架のため水深変動)	10分		
		有明海 沖神瀬西	表層)水温、塩分、クロロフィルa、濁度 底層)不明	固定式	表層、底層	10分		
八代海水質連続観測		八代海 大多尾沖観測ブイ	水温、塩分、DO、クロロフィルa、濁度、水中光量、流向・流速	自動昇降	0.1mピッチ	60分		
		八代海 姫戸沖観測ブイ	水温、塩分、DO、クロロフィルa、濁度、水中光量、流向・流速	自動昇降	0.1mピッチ	60分		
		八代海 湯の口観測ブイ	水温、塩分、DO、クロロフィルa、濁度、水中光量、流向・流速	自動昇降	0.1mピッチ	30分		

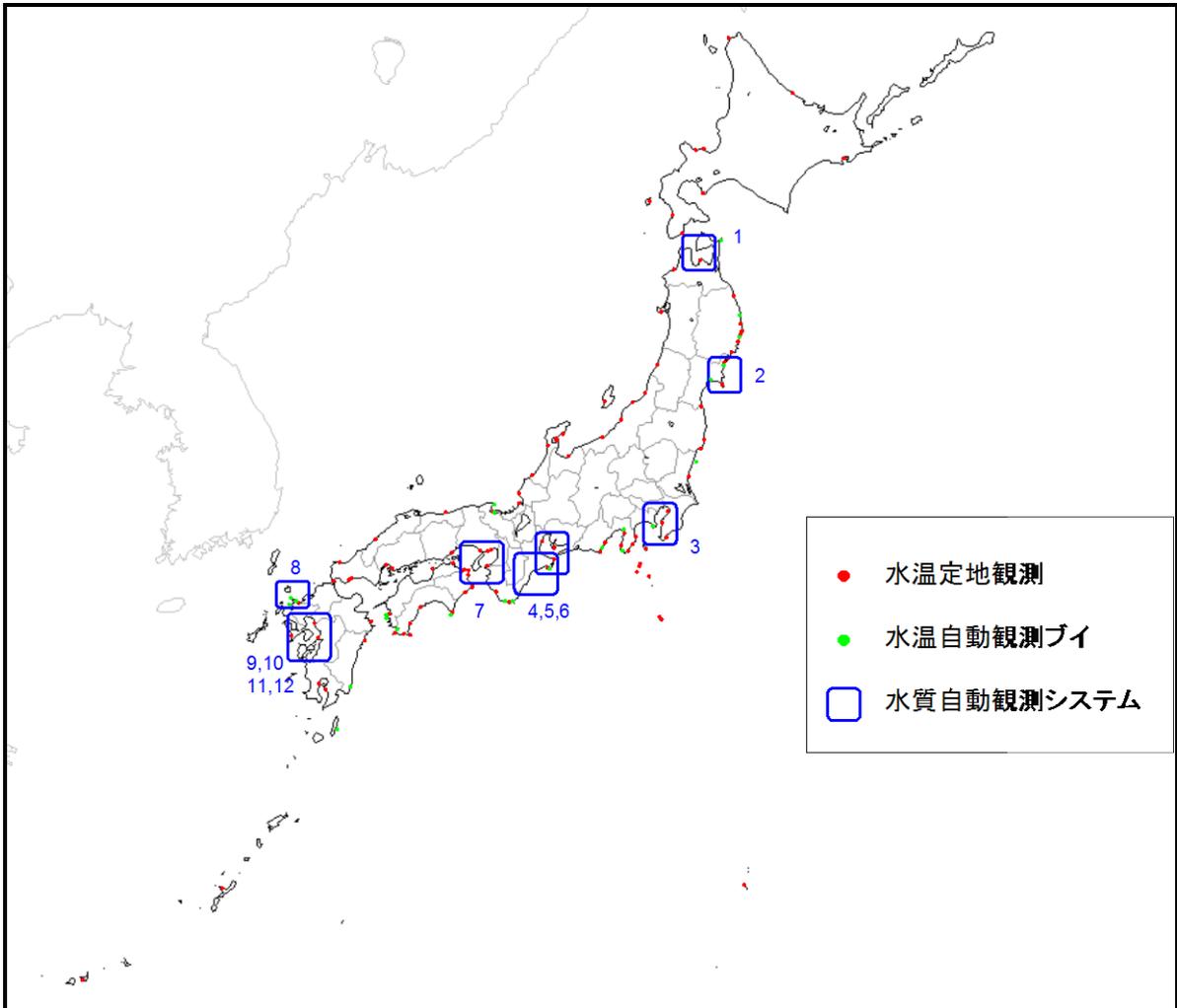


図 4.2.2 各地の水質自動観測地点
 (定地観測、水温自動観測ブイ、水質自動観測ブイ、モニタリングポスト)

国内で行われている自動観測地点を整理した結果（表 4.2.2-3）、22 基の昇降式鉛直観測が行われていた。このことから本調査研究において検討をしている適用技術が広く沿岸域観測において有効であること、さらには海水中の CO₂観測を行っている地点は未だ存在しないということが確認できた。さらにそれらの自動昇降鉛直観測地点のうち、多項目観測（水温、塩分、DO、クロロフィル a）を実施している観測地点に絞り、その観測地点における観測データの入手状況を整理した（表 4.2.2-4）。

表 4.2.2-4 自動昇降式鉛直観測実施モニタリングポスト一覧表

観測地点	データ提供機関	観測項目	入手可能データ
東京湾（浦安沖、千葉港波浪観測塔、千葉港口第一灯標、川崎人口島）	東京湾環境情報センター	水深、水温、電位伝導度、塩分、DO、クロロフィル a、濁度、気温、風向・風速、流向・流速	全 4 地点） 2010/04/01～現在
東京湾（千葉灯標）	海上保安庁情報部	水温、塩分、DO、クロロフィル a、濁度、風向・風速、流向・流速	直近 1 週間のデータそれ以前のデータは、海上保安庁海洋情報部「海の相談室」まで問い合わせ
伊勢湾（湾奥、湾央、湾口）	名古屋港湾空港技術調査事務所	水温、塩分、DO、クロロフィル a、濁度、気温、風向・風速、波高、流向・流速 （湾奥は、波高、流向・流速観測なし）	湾奥） 2010/03/16～現在 湾央） 2010/03/16～現在 湾口） 2010/03/25～現在
英虞湾（湾奥、湾央）、的矢湾、五ヶ所湾	三重県真珠養殖連絡協議会	水温、塩分、DO、クロロフィル a、濁度	英虞湾） 2003/09/12～現在 的矢湾） 2007/03/20～現在 五ヶ所湾） 2007/03/20～現在
大阪湾（関空MT局、神戸港波浪観測塔、淀川河口、阪南沖窪地、堺浜、大阪港波浪観測塔、岸和田沖）	神戸港湾空港技術調査事務所	水温、塩分、DO、クロロフィル a、濁度、流向・流速、水中光量、風向・風速（神戸港・岸和田・堺港は、風向風速なし）	全 7 地点） 2011/01/01～現在
有明観測タワー	佐賀大学	水温、塩分、DO、クロロフィル a、濁度、pH、光量子量、流向・流速、気温、相対湿度、風向・風速、気圧、降水量、日射量	2011/09 以降のデータを 1 年後より提供している。佐賀大学のデータ管理者への申請が必要。
八代海（大多尾沖、姫戸沖、湯の口）	西海区水産試験所有明海・八代海漁場環境研究センター	水温、塩分、DO、クロロフィル a、濁度、水中光量、流向・流速	リアルタイムデータによるグラフ図のみ。

全国 6 海域において、自動昇降装置を用いた鉛直観測モニタリングポストが整備、運営されている。観測されている水質項目も充実しており、本調査研究の机上試験の際の参考となる。さらに今後、本事業による実海域試験を計画・実施するにあたって、既に類似実績をもつこれらの地点が有力な候補地点となる。

このうち、東京湾は他の海域と比較して水質データの研究報告が多く、前述のとおり、東京海洋大学神田教授らによる海表面 CO₂観測事例も多い海域である。同じく大阪湾でも CO₂観測の事例がある。また、伊勢湾では干潟における CO₂固定に関する研究事例も報告されている。

また、各観測地点で得られた観測データは、表 4.2.2-4 にまとめたとおり、データ管理を行っている機関から得ることができる。例えば、東京湾で 4 つのモニタリングポストを管理している東京湾環境情報センターのインターネットサイトによると、2010 年 4 月からの観測データをインターネット経由で入手することができる。ダウンロードできる数値データは、次の 3 通り。

- 1) 連続観測データの CSV 形式 (毎時データごとにフォルダ分けされている)
- 2) 観測データから上・中・下層データを抽出したもの、CSV 形式
- 3) 観測データから上・中・下層データを抽出し、標準化したデータ、XML 形式 *
(*XML ファイルを処理するデータコンバータソフトも同ホームページでダウンロードできる)

今後は上記に示した各種情報について、沿岸域における水質データの変動幅を確認する等の精査を行い、対象海域の絞り込みを行う。

5章 モニタリングシステムの適用

前章において概念設計した沿岸 CO₂鉛直自動モニタリングシステムの適用について、次の2項目に関する検討を行った。

- 1) 沿岸域における CO₂吸収量評価に係るモニタリング
- 2) 海底下 CCS（二酸化炭素貯留）監視

沿岸域における CO₂吸収に関して、近年、ブルーカーボンとして注目されており、海洋基本計画にも取り上げられている。このため沿岸域 CO₂吸収量把握においては藻場や干潟等、ブルーカーボンの賦存量の多い海域を対象とした CO₂リザーバーとしての有効性評価が重要となる。

一方で、沿岸域において水質悪化に伴う貧酸素水塊の形成が問題視されている。貧酸素水塊では有機物の分解に伴い酸素が消費され、CO₂が発生する。また底質が還元状態となることによるヘドロの堆積や H₂S、CH₄、N₂O の発生が誘引され、底質および水質環境の悪化と生物の大量斃死や生息域の喪失を招く。このように貧酸素水塊の形成は、沿岸域環境に大きなダメージを与え、CO₂リザーバーとしての機能を大きく損なう可能性がある。

このため、沿岸域 CO₂吸収量評価に際しては、ブルーカーボンの賦存量が大きい海域と、CO₂放出量の多い可能性のある海域（有機物負荷が高く、汚濁が進行している）において、CO₂挙動のモニタリングが必要である。

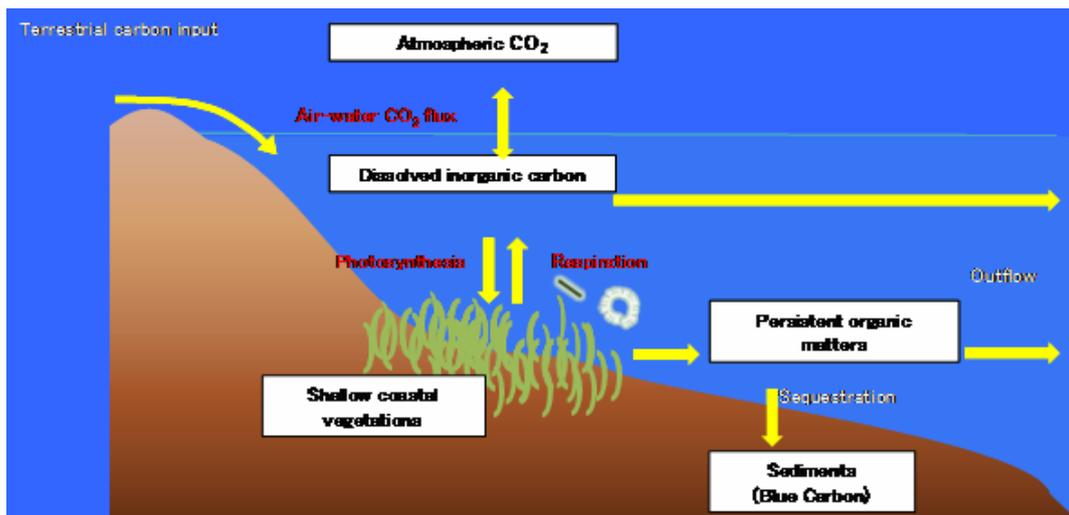
海底下 CCS については、海洋分野における地球温暖化対策の中でも重要な取り組み項目とされており、ブルーカーボンと同様に海洋基本計画においても言及されている。海底下 CCS に関しては、リスク管理の観点から貯留された CO₂の漏出監視の徹底が不可欠であり、現在さまざまな手法についての検討が進められている。

- 1) 沿岸域における CO₂吸収量評価に係るモニタリング

・ブルーカーボン評価技術としての活用

堆積物中の有機炭素の堆積速度は、ブルーカーボンの蓄積速度とされている（所ら、2013）。この中で、藻場、干潟等の沿岸域におけるブルーカーボンの蓄積速度は外洋の 30 倍以上とされている。その一方で、閉鎖性の強い沿岸域では陸域等から負荷される有機物の分解活動が活発であり、大きな CO₂放出源の一つともなりえる。このため、沿岸域でのブルーカーボンの評価に際しては、大気・海洋間での CO₂挙動を把握し、どの程度の CO₂が海域に蓄積されるかを継続的にモニタリングすることが重要となる。

海域での CO₂挙動に係る指標としては pCO₂、pH が挙げられ、ブルーカーボン評価に際しては、もっとも重要な観測項目となる。



また、大気-海洋間の交換を観測する観点から、観測点の海面直上における大気 CO₂の観測も必要である。これに加えて炭酸系水質分析を補完するために水温、塩分の観測が望まれる。本観測により前記観測項目のほかに、Lewis and Wallace (1988) の方法に従い、全炭酸および全アルカリ度の算出が可能である。これらの項目については、海面直上と海底直上をもっとも重要な観測点として、鉛直的なプロファイルを観測する。

ブルーカーボンの賦存量は、マングローブや藻場、海草場、塩性湿地等の植生のある沿岸域において特に豊富であることが知られている (所ら, 2013)。このため、観測において重要となる地点の多くは、水深 10m 以浅に絞られるものと予想される。しかし、現状の自動昇降装置では、水深 10m 以浅での稼働を想定したものはないため、このような浅海域ブルーカーボンに関する CO₂連続観測においては、鉛直方向に複数の観測機器を固定した定置ブイを用いることが有効と考えられる。

また、沿岸域では、有機物あるいは水塊の外洋への水平移動があり、沿岸域で蓄積されたブルーカーボンの一部が外洋に運ばれる。このため、必ずしも大気-海洋間の CO₂交換において 1 対 1 の関係が成り立たない。海域での水塊挙動について鉛直および水平面での把握が重要となる。水塊挙動観測の指標としては、水温、塩分、流向、流速が挙げられる。本項目については観測対象とする沿岸域における広域での水塊挙動の観測を目的としており、既存知見を踏まえて効率的な観測点の設定が求められる。また、知見の蓄積に伴い人工衛星観測・パラメタリゼーション技術・シミュレーション等を活用し、データの高精度化を図る必要がある。

以上を踏まえて、ブルーカーボン評価に際して本技術を活用する場合、海水の pCO₂、pH、水温、塩分、流向、流速に関する計測機器と、大気 CO₂計測機器を備えた観測装置が求められる。また、このほかにブルーカーボンにおいては、CO₂吸収源としての藻類等も評価指標として重要となる。このため、生物活動の活発な観測点においては付帯的なモニタリング項目としてクロロフィル a、DO、栄養塩類を加えることにより、より高精度なデータセットを得ることができる。

・貧酸素水塊等が形成される沿岸域のモニタリング

前述のとおり、貧酸素水塊の形成に伴う沿岸環境の悪化は、沿岸域の CO₂リザーバーとしての機能を大きく損なう可能性がある。

東京湾、大阪湾、あるいは瀬戸内海等、人為活動の活発な海域では浚渫により発生する海底窪地が大きな問題となっている。局所的な海底窪地では鉛直混合が起こりにくくなるため貧酸素化しやすいと考えられており、生物の生息・生産の場を喪失することのみならず、周辺海域への環境影響が懸念されている（図 5.2）。

特に有機物負荷が高い場合、窪地等において蓄積された大量の有機物が分解され、酸素が急激に消費される。そして密度成層と海水の停滞により貧酸素水塊が形成され、CO₂、H₂S、CH₄、N₂O 等が発生する。この水塊が、成層構造の崩壊や急激な水塊の移流等の大きな環境イベントにより海表面に供給されると、表層の貧酸素化、H₂S の発生や高 CO₂による低 pH 化を引き起こす。東京海洋大学神田教授によると、東京湾ではこれら貧酸素水塊と高濃度に CO₂を溶存する水塊は良い相関関係にあるとのことである（ヒアリング結果より）。また、藤井らは沿岸に吹く季節風的作用により底層の貧酸素水塊が表層へと巻き上げられるメカニズムを示唆している（藤井ら、2011）。

上記を踏まえて、沿岸域での CO₂モニタリングに際しては、CO₂の挙動把握に加えて、もっとも懸念すべき貧酸素水塊の把握に備え、DO および貧酸素化により大きな影響を受ける pH についても併せて観測する必要がある。発生した CO₂は海底から表層に向けて鉛直的に移動するため、挙動把握には昇降式機器の活用が有効である。また、水塊の鉛直挙動の正確な把握も重要であり、水温、塩分、流向、流速についても観測項目として加えることが望ましい。

貧酸素水塊を形成する海域では、富栄養化が進行しており、栄養塩類も重要な指標の一つとなる。これら観測項目に加えて、窪地貧酸素水塊において特徴的に観測される H₂S、あるいは CH₄、N₂O 等についても観測項目として加えることにより、観測の高精度化と詳細な事象把握が可能となる。

貧酸素水塊については、埋め戻し等の環境改善への取り組みが活発に行われており、周辺環境への影響を把握し、適切な対策を講じていくためのモニタリングが重要である。このため、ここで示した観測により CO₂収支量把握のみならず、これらの対策による貧酸素水塊の解消等の沿岸域環境改善効果の把握にも貢献することが期待される。また、貧酸素水塊は沿岸環境に大きな被害を与え、有用資源の斃死や漁場環境の悪化等、水産業に大きな影響を及ぼす。近年であれば青潮の発生による三番瀬におけるアサリの大量斃死等が挙げられ、これら事象のモニタリングに対する社会的要求度は高いものと考えられる。本件を踏まえた場合、改善に伴い回復が見込まれる生物活動の変化も貴重な評価指標のひとつであり、クロロフィル a 等を観測項目として追加することが望ましい。

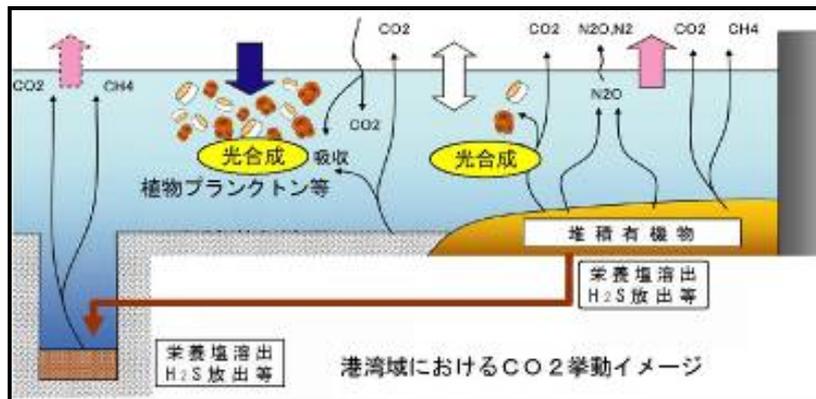


図 5.2 港湾域における CO₂挙動イメージ図

2) 海底下 CCS（二酸化炭素貯留）監視

海底下 CCS（二酸化炭素貯留）の実施に際して懸念されるリスクとして、「断層等を通しての海底面からの CO₂漏出」がある。漏出が生じると近傍の海水の CO₂が上昇し、それに伴い pH が低下する。海水の pH 低下、あるいは CO₂濃度増加は、周辺環境に大きな影響を与えることが懸念される。このため、海底下 CCS の適用においては、

- ・安全に貯留されていること
- ・周辺環境に影響を与えていないこと

をモニタリングによって確認する必要がある。この漏出モニタリングのためには海水の CO₂濃度または pH の変化を観測する必要がある。

また、圧入された CO₂のモニタリングについては、「いつ」、「どこで」漏出するかの予想が困難なため、広域の海底面を網羅的に連続観測することが重要である。このため、観測に際しては、CO₂圧入地点の断層構造等から予測される漏出リスク評価をもとに、効率的な観測ポイントを決める必要がある。観測項目としては、pCO₂、pH に加えて水温、塩分の 4 項目が必須である。本観測により、前述の観測項目のほかに、Lewis and Wallace（1988）の方法に従い、全炭酸および全アルカリ度の算出が可能である。

沿岸域においては、窪地等の特異環境や陸域等からの高 CO₂水塊の発生・流入等の特異的な環境イベントが発生する。海底下 CCS 監視においてはこれらの値がノイズとなり、CO₂漏出を正確に評価できない可能性も考えられる。このため、海底面で観測された炭酸系データセットの数値を正確に評価するためには、鉛直的、あるいは水平的な水塊構造の動きと CO₂の分布の把握が必要となる。

また、本調査研究で検討を行う観測手法の特性上、面的には 1 点のみでの観測となるため、前述の通り CO₂漏出検知に際しては、観測機器の効率的な多点展開が求められる。し

かし、観測機器設置地点が CO₂漏出点から大きく外れた場合、海底面固定センサーだけでは CO₂漏出を検知できない可能性が高い。その際に鉛直モニタリングによる移流水塊の連続観測により、観測点から離れた場所で漏出した CO₂を含む高 CO₂水塊を検出できる可能性が高まる。

以上を踏まえて、CCS モニタリングに際して本技術を活用する場合、海水の海底面における pCO₂、pH、水温、塩分の定点観測に加えて、pCO₂、pH、水温、塩分、流向、流速の鉛直観測機能を備えた観測装置が求められる。

本調査研究で概念設計した「沿岸域 CO₂鉛直自動モニタリングシステム」により、鉛直的な海水中の CO₂連続観測が可能となる。これにより、複雑な沿岸域における CO₂挙動の把握に資するデータを得ることができ、沿岸域でのブルーカーボン評価や海底下 CCS の漏洩監視技術として有効な手法となると考えられる。さらに、沿岸窪地の水質改善に関する評価技術としても有用であると考えられ、窪地埋め戻しや藻場造成等による環境改善施策に対する評価ツールとして本技術の活用が期待できる。

また、CO₂収支評価は沿岸環境の価値向上に繋がる評価ツールになりうる。すなわち、環境改善に伴い、CO₂収支の改善、あるいは対象海域の CO₂リザーバー化による地球温暖化問題への貢献、さらにこれらを CO₂クレジットとして換算することによる環境改善の経済的価値の創出が可能となる。

これら用途・目的に応じた沿岸域 CO₂鉛直自動モニタリングシステムの各仕様について、表 5 に取りまとめた。

表 5 沿岸域 CO₂鉛直自動モニタリングシステム仕様一覧表

		CO ₂ 吸収量把握		CCS 監視 モニタリング型
		浅海域ブルーカーボ ン観測型	沿岸域 モニタリング型	
調査海域		浅海域 (水深 5m程度)	沿岸閉鎖水域 (水深 50m 程度)	CCS 実証海域
プラットフォーム		定置ブイ	海表面観測ブイ +自動昇降装置	海底設置型 自動昇降ブイ
観測項目 (取り付けセンサー) ◎必須項目、 ○推奨項目	pCO ₂ (大気)	◎	○	
	pCO ₂ (海域)	◎	◎	◎
	pH	◎	◎	◎
	水温	◎	◎	◎
	塩分	◎	◎	◎
	流向・流速	◎	◎	*◎
	DO	○	◎	
	栄養塩類	○	○	
	CH ₄		○：底層固定	
	H ₂ S		○：底層固定	
	N ₂ O		○：底層固定	
	クロロフィル a	○	○	
	気象	○		
	風向・風速	○		
観測層	鉛直観測 (表層～中層) 固定層観測 (底層)			
データ回収方法	有線通信 衛星通信	衛星通信	有線通信	
電力供給	バッテリー供給 太陽光発電	バッテリー供給 太陽光発電	有線による陸上からの供給	
観測間隔	1 観測/1 時間			
データ補完・校正	定期的な採水分析値との比較			
測定精度および応答速度	各観測項目に関するセンサーの測定精度および応答速度については表 2.1-1、図 4.1-1 および 4 章 2.1 を参照。 鉛直観測項目のうち pCO ₂ センサーの反応速度がもっとも遅く、pCO ₂ 測定が昇降観測における律速となる。			

※流れ場シミュレーション等を想定した広域観測の実施が望ましい。

6章 今後の展開

平成 25 年度の調査研究の結果、沿岸域における CO₂鉛直連続モニタリングシステムの概念設計を取りまとめた。本テーマは実用化までに、5 年間に要する計画で開始され、現在、初年度の課題を終えた段階である（図 1）。今後は、この成果に基づいて試作機を作って実証試験を行い、実用化に至るまでのステップを丹念に実施することで、技術的知見を集積しながら、実用化を目指す予定である。

次年度は、試設計を行うのに必要な要素技術の検討を行うために、概念設計で得られた情報を活用するとともに、対象海域を定めた机上試験を実施して、装置の利用目的に必要な開発要素の洗い出しと、新たな開発要素の必要性等を検討する。

本章では先ず、実用化に至るまでのステップのうち、次年度実施する「要素技術の検討」についてその項目を記し、続いて 3 年目以降の実施内容について述べる。

6.1 次年度の実施項目

6.1.1 対象海域の設定

対象海域の設定は、机上試験を実施する上で基礎となる条件であり、以後の「要素技術の検討」については、全てこの対象海域での実施が前提となる。そのため、将来、装置が利用される目的・状況を踏まえつつ、様々な観点を考慮した総合的な判断が望まれる。これには、ブルーカーボンの蓄積や港湾の環境改善が期待されているエリアなど、本システムの利用価値が高いと考えられる地域がよい。

これとあわせて、モニタリングポストの運用状況（稼働中、運用停止）や、過去のデータ集積実績、海象条件や水深、藻場の生育状況、流入河川の規模やその影響範囲、船舶の航行状況等も判断材料とし、対象海域の設定を行う。

一方、対象海域の選定には特殊なところは避けた一般的な場が望まれ、その地点での観測が満足にできれば、他地点への適用も可能であるような海域を探ることが理想である。

6.1.2 プロファイラ^(注1)の検討

観測装置を搭載し、鉛直方向の観測を実現するためのプロファイラについて要素技術を検討する。搭載するセンサーの種類数やサイズ、総重量等によって、プロファイラの形状や排水量、ウインチの能力等を定める必要がある。

また、昇降をコントロールするための制御装置や電力供給方式も検討するほか、標識ブイや灯標ブイの並設に伴う課題（ワイヤーの干渉等）についても検討が必要である。さらに、台風等波浪条件が厳しい時など、海底でプロファイラを待機させることが可能なよう、自動制御もしくは遠隔制御の機能について検討する。

(注1) 本節では観測装置を搭載した昇降ブイをプロファイラと呼び、昇降装置や標識ブイ等はこれに含めないものとする。

6.1.3 標識ブイの検討

標識ブイは警戒エリアの目印としてだけではなく、内部にバッテリーや大気 CO₂観測装置、GPS、通信装置等を搭載するほか、ブイの上部には気象観測装置、下部には流向流速を観測する ADCP を搭載する。さらに、外部壁面には太陽電池パネルを有しており、プロファイラウインチへの電力供給も行う。従って、本報の概念設計における標識ブイは、プロファイラと一体となった観測装置として扱われるものである。

また、標識ブイ本来の目的である船舶の安全航行に関する配慮も不可欠であり、ブイの形状やサイズ、色彩に留意するほか、アンカーの種類や係留方式についても、過去の事例を参考に整理を行う。なお、プロファイラや標識ブイについては、生物付着や電食等の対策についても整理する。

6.1.4 搭載センサーの選定と開発要素の確認

対象海域での観測に際し、必要な能力を有するセンサーについて候補を選定する。選定条件としては、観測精度や応答時間、測定レンジ、長期安定性、サイズ、重量、消費電力、同様海域での使用実績、価格などが考えられる。

温室効果ガスセンサーとしては、当面 pCO₂センサーのみとし、水質センサー（水深、水温、塩分、DO、pH、クロロフィル a、硝酸、亜硝酸）についても、搭載可能な機種について検討を行う。

6.1.5 データ通信に関する検討

収集したデータは、定期的に地上本部に送信しなくてはならない。海上からのデータ通信には IRIDIUM や ARGOS 等の衛星を介した通信が一般的であるが、対象海域が陸域に近いことから、携帯電話網を利用するといった選択肢もある。

データの転送量や通信速度、通信の信頼性、費用などを考慮して選定することになる。また、データの転送は極めて重要な機能であるため、複数の回線を利用し、一つの回線がなんらかの原因で不通になっても、通信ができるよう対策をとる必要がある。さらに、可能であればプロファイラもしくはブイの内部に、取得したデータをすべて蓄積するようにし、メンテナンスの際に回収するような措置についても検討を行う。

6.1.6 メンテナンスの検討

センサー類の清浄や校正のほか、機器類に損傷がないかを定期的にチェックする必要があり、そのための手順等を検討する。メンテナンス時にはバッテリーの交換も必要と考えられ、機器類の消費電力や観測の頻度、バッテリーの容量、太陽電池パネルの発電量などを考慮し、メンテナンスの方法やタイミングを検討する。

一方、データ通信が正常に行われていれば、センサーが故障した際に、本部で直ぐに異常を検出できるよう、システム化しておくのがよい。また、各バッテリーの電圧も本部で

常時把握できるよう、観測データと一緒に送信することを検討する。

6.1.7 開発要素の検討

pCO₂センサーにおける応答速度の高速化や、測定レンジの拡大のほか、昇降装置の機械的な安定性なども開発要素として挙げられる。その他、机上試験を行いながら、課題を見出し、装置の実用化のために必要な開発要素を検討する。

6.2 3年目以降の実施内容

6.2.1 3年目の実施内容（試設計）

要素技術の検討結果を踏まえ、装置・システムの試設計を実施する。特に重要な機能を有する部分については、個別に要素実験を行い、その結果を試設計にフィードバックさせる。なお、要素実験については、シミュレーションのほか、モデルを用いた試験水槽での実験を主とする。

6.2.2 4年目の実施内容（試作機の製作）

試設計に基づいて、試作機の製作を行う。その後、実海域で一定期間試験運用を行い、機器類の動作確認の他、課題の抽出ならびに設計変更の必要性の有無などを、装置の部分毎に詳細に調べる。その後、上記の結果を基に、実証機製作のための基本設計を行う。

実海域での試験においては、試作機の設置や撤去、メンテナンスに関する作業手順の確認のほか、作業の容易性や必要時間等についても検討を行う。その他、海上交通や漁業への影響など、室内試験では得難い情報についても整理する。

6.2.3 5年目の実施内容（実証実験）

基本設計に基づいて、実証機の製作を行う。ここでいう実証機とは、ほぼ実用段階にある装置をいう。これを実海域で長期間運用することにより、装置の長期的な安定性や耐久性、通信機能、バッテリー能力等の確認を行うとともに、メンテナンスの方法や頻度についての妥当性を検証する。その結果を基に、最終的な課題の抽出を行ない、基本設計にフィードバックさせる。

5年目を終えた段階での成果は、実海域での使用に耐える、観測装置の基本設計資料と運用マニュアルとなる。なお、最終版の基本設計に適合するよう改良された実証機が残されていれば、それも成果の一つとなる。

ところで、技術開発は日進月歩である。現時点では困難と考えられても、本研究開発と並行して様々な要素技術が進歩している。この数年で、マイクロコンピュータの性能や、記憶素子の容量は飛躍的な進歩を遂げ、バッテリーの性能についても数年前とは隔世の感がある。

本研究開発は、観測装置の性能を核とするものの、様々な技術分野の集大成でもある。自らの

研究開発と併せ、こうした技術の進展を素早く察知し、上手く取り入れてゆく事が、成功の秘訣であると考えている。

6.3 予算獲得への働きかけ

61 頁に示した初期コストや運用コストでも明らかなように、試設計以降（3年目以降）の研究開発では、多額の費用が発生する。従って、研究開発を継続させ、当該システムを完成させるためには、相当額の予算の獲得が不可欠となる。

一般財団法人エンジニアリング協会では、本報告書の成果を活用して、各省庁に対し本システムの沿岸域における重要性や必要性を説くとともに、システム自体の事業性についても説明を行い、予算獲得へ向けた働きかけを実施する。

参考文献リスト

- Aanderaa Data Instruments AS : New CO₂ optodes submitted to intensive tests, Sensors and Systems issue #27, 2012
- Alfred-Wegener-Institut : Underwater Mass Spectrometry (UWMS), ALFRED-WEGENER-INSTITUT HP (<http://www.awi.de/en/home/>)
- Andersen, Knud, Thomas Kjar, Niels Peter Revsbech : An oxygen insensitive microsensor for nitrous oxide, Sensors and Actuators B 81, p42-48, 2001
- アルゴ計画・日本公式サイト (http://www.jamstec.go.jp/J-ARGO/index_j.html)
- Atamanchuk, Dariia : Development and use of an optical pCO₂ sensor in marine studies, University of Gothenburg HP (<http://www.ub.gu.se/>)
- Bedford Institute of Oceanography HP: Seahorse - Station 2 Deployment HP(<http://www.bio.gc.ca/science/newtech-technouvelles/seahorse/station-eng.php>)
- Bluefin Robotics Corporation : Spray Glider, Bluefin Robotics Corporation HP(<http://www.bluefinrobotics.com/products/spray-glider/>)
- Boulart, C., D. P. Connelly and M. C. Mowlem : Sensore and technologies for in situ dissolved methane measurements and their evaluation using Technology Readiness Levels, Trends in Analytical Chemistry, Vol.29, No.2, 2010
- Byrne, Robert H., Michael D. DeGrandpre, R. Timothy Short, Todd R. Martz, Liliane Merlivat, Craig McNeil, Fred L. Sayles, Ryan Bell, Peer Fietzek : Sensors and Systems for In Situ Observations of Marine Carbon Dioxide System Variables, Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society, 2009
- Camilli, R., H.F. Hemond : NEREUS/Kemonaut, a mobile autonomous underwater mass spectrometer, TrAC Trends in Analytical Chemistry, Vol. 23, Issue 4, p307-313, 2004
- Cardin, V., M. Bensi, M. Gačić: DEEP OCEAN OBSERVING SYSTEM OVER MIDDLE AND LONG TIME SCALE: THE E2M3A SITE IN THE SOUTHERN ADRIATIC :Proceedings of OceanObs'09, 2009
- Chaffey, Mark, Larry Bird, Jon Erickson, John Graybeal, Andy Hamilton, Kent Headley, Mike Kelley, Lance McBride, Ed Mellinger, Tim Meese, Tom O'Reilly, Walter Paul, Mike Risi, and Wayne Radochonski: MBARI's Buoy Based Seafloor Obserbatory Design, OCEANS '04. MTTs/IEEE TECHNO-OCEAN '04, Vol.4, p1975 - 1984, 2004
- CONTROS Systems & Solutions GmbH : HP(URL: <http://www.contros.eu/>)
- Denis, Lionel, François Gevaert, Nicolas Spilmont : Microphytobenthic production estimated by in situ oxygen microprofiling : short-term dynamics and carbon budget

- implications, *Journal of soils and sediments*, Vol.12, No.10, p. 1517-1529, 2012
- 独立行政法人海洋研究開発機構 pH-CO₂ハイブリッドセンサの開発：プレスリリース (2013,03 29)(http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20130329/)
 - 独立行政法人海洋研究開発機構：次世代型巡航探査機 (AUV)、独立行政法人海洋研究開発機構 HP (<https://www.jamstec.go.jp/maritec/j/development/auv/>)
 - 独立行政法人海洋研究開発機構むつ研究所：地球観測システム構築推進プラン 地球温暖化・炭素循環観測プロジェクト 海洋二酸化炭素センサー開発と観測基盤構築 平成21年度研究成果報告書 (文部科学省研究開発室), 2010
 - 独立行政法人水産総合研究センター「リアルタイム海洋情報収集解析システム」HP (<http://buoy.nrifs.affrc.go.jp/top.php>)
 - EIC ネット：UNEP 海洋生態系の CO₂吸収力に関する報告書を公表 (<http://www.eic.or.jp/news/?act=view&oversea=1&serial=21932>)
 - Fiedler, B., P.Fietzek, N.Vieira, P.Silva, H. C. Bittig and A. K. Rtzinger : In Situ CO₂ and O₂ Measurements on a Profiling Float, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol.30, p.112-126, 2013
 - Fiedler,B., Peer Fietzek, Nuno Vieira, Péricles Silva, Henry C. Bittig, Arne Körtzinger : In Situ CO₂ and O₂ Measurements on a Profiling Float, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol.31, No.1, p181-196, 2013
 - Franatech GmbH : HP(<http://www.franatech.com/>)
 - 藤井智康、駒井幸雄、藤原建紀：大阪湾沿岸域の二酸化炭素の挙動、土木学会論文集 B2(海岸工学)、Vol.67、No.2、I -911-915、2011
 - Fujiki, Tetsuichi, Kazuhiko Matsumoto, Shuichi Watanabe, Takuji Hosaka, Toshiro Saino : Phytoplankton productivity in the western subarctic gyre of the North Pacific in early summer 2006, *Journal of Oceanography*, Volume 67, Issue 3, p 295-303, 2011
 - Fujiki, Tetsuichi, Takuji Hosaka, Hideshi Kimoto, Takashi Ishimaru, Toshiro Saino : In situ observation of phytoplankton productivity by an underwater profiling buoy system: use of fast repetition rate fluorometry, *Marine Ecology Progress Series*, Vol.353, p81-88, 2008
 - 藤木徹一、中野義之、渡邊修一：海洋観測機器への生物付着防止法の検討～シリコーン系防汚塗料の防汚効果試験～、JAMSTEC Report of Research and Deveropment、Vo.9, p1-p8, 2009
 - 蒲浦俊敬：現場化学分析総論－海洋地球化学分野における有用性－、月刊海洋、Vol.38、No.12、2006
 - GCOOS: University of Southern Mississippi and Liquid Robotics Re-Launch the Wave Glider in the Gulf of Mexico, GCOOS HP(<http://gcoos.tamu.edu/?p=3638>)

- Hamilton, Andrew, Mark Chaffey, Ed Mellinger, Jon Erickson, Lance McBride : Dynamic Modeling and Actual Performance of the MOOS Test Mooring, OCEANS 2003. Proceedings, Vol.5, p2574-2581, 2003
- Hamilton, Andrew, Mark Chaffey: Use of an electro-optical-mechanical mooring cable for oceanographic buoys: modeling and validation, Proceeding of OMAE, 2005
- Hamilton, Jim, George Fowler, Brian Beanlands : Long-term monitoring with a moored wave-powered profiler, Sea Technology, Vol.40, No.9, p68-69, 1999
- Hemond, Harry, Richard Camilli : NREUS : engineering concept for an underwater mass spectrometer, TrAC Trends in Analytical Chemistry, Vol. 21, Issue 8, p 526-533, 2002
- 日立造船株式会社 : GPS 海洋観測システム、日立造船株式会社 HP
(<http://www.hitachizosen.co.jp/products/products029.html>)
- 稲田 勝 : 円盤型水中グライダーによる海洋観測, 九州地区総合技術研究会 in 熊本大学 第 21 回 情報処理センター等担当者技術研究会, ポスター発表要旨 No.P16、
- IPCC 第 5 次評価報告書 第 1 次作業部会報告書 気候変動 2013 : 自然科学根拠 政策決定者向け要約、気象庁、2013
- 伊勢湾環境データベース (<http://www.isewan-db.go.jp/about/index.asp>)
- 板倉 茂: 赤潮・貝毒モニタリングの重要性、問題点および提案、月刊海洋、Vol.42、No.2、p103-106、2010
- 伊藤進一、清水勇吾、笥 茂穂、和川 拓、佐藤政俊 : 水中グライダー観測の実施状況、月刊海洋、Vol.42、No.11、p658-659、2010
- 伊藤祐二、片野俊也、速水祐一、藤井直紀 : 有明海観測タワーの自動モニタリング技術とその活用事例、EICA、16 号、4 号、p16-20、2012
- 岩田徹、出晴寛基、片山博之、内山清、山下隆男 : 大瀬海岸における pCO₂ の長期連続測定、平成 16 年度京都大学防災研究所研究発表講演会、E10
- JAPAN Argo アルゴ計画・日本公式サイト
(http://www.jamstec.go.jp/J-ARGO/index_j.html)
- JFE アドバンテック株式会社: 自動昇降水質システム
(<http://www.jfe-advantech.co.jp/ocean/shoukou/index.html>)
- 株式会社東陽テクニカ海洋計測部 : 最近よく聞くグライダーって何?、株式会社東陽テクニカ HP (<http://www.toyo.co.jp/file/glider.pdf>)
- 株式会社鶴見精機 : プロファイリングフロート NINJA, 株式会社鶴見精機 HP
(<http://www.tsk-jp.com/index.php?page=/product/detail/10>)
- 株式会社鶴見精機 : 深海用プロファイリングフロート Deep NINJA, 株式会社鶴見精機 HP(<http://www.tsk-jp.com/index.php?page=/product/detail/42>)
- 株式会社ゼニライトブイ : CO₂ 観測用小型漂流ブイ、株式会社ゼニライトブイ HP

- (<http://www.zenilite.co.jp/prod/co2.html>)
- ・ 海上保安庁：海上保安庁がAUVによる海洋調査を開始～奄美大島北西沖の海底火山で熱水・ガスの湧出を発見～、海上保安庁広報資料、2013
(<http://www.kaiho.mlit.go.jp/info/kouhou/h25/k20131008/k131008-1.pdf>)
 - ・ 神田穰太：東京湾における二酸化炭素収支の時空間変動、科学研究費補助金研究成果報告書、2011
 - ・ 川上高志、堀克博、安野正芳、安野正芳、川原寿能、太田純吾、調 睦：NEPTUNE Project 対応の昇降装置開発とその経緯、海洋調査技術学会 第 21 回研究成果発表会資料、2009
 - ・ 気象庁 気候・海洋気象部 海洋課 海洋気象ブイロボット班：漂流型海洋気象ブイによる観測、気象庁 HP(<http://www.data.kishou.go.jp/db/buoy/buoy-obs.pdf>)、2000
 - ・ 気象庁：漂流型海洋気象ブイロボット、気象庁 HP
(<http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/db/buoy/buoy-info.html>)
 - ・ 国土交通省 港湾局 国際・環境課：東京湾・伊勢湾・大阪湾におけるモニタリングポスト設置について、国土交通省ホームページ 報道・広報 東京湾・伊勢湾・大阪湾における海域環境の観測システムの強化について添付資料
(http://www.mlit.go.jp/report/press/port06_hh_000032.html)
 - ・ 工藤圭太、吉川恵太、岡田智也：内湾域環境における連続モニタリング手法の効率化に関する基礎的研究、国土技術政策総合研究所研究報告、No.35、2008
 - ・ 黒田芳史、山口誠之、石原靖久、松本健寛：m - TRITON ブイの開発、みらいシンポジウム予稿集、9 巻、p56-57
 - ・ 黒田芳史、曾野和彦、安藤健太郎：西太平洋熱帯域に設置されたトライトンおよび TAO ブイのデータ相互比較、海洋科学技術センター試験研究報告、第 43 号、p93-105、2001
 - ・ Lamontagne, R. A., S. L. Rose-Pehrsson, K. E. Grabowski, D. L. Knies : Response of METS Sensor to Methane Concentrations Found on the Texas-Louisiana Shelf in the Gulf of Mexico, Naval Research Laboratory 20375-5320. NRL/MR/6110--01-8584., 2001
 - ・ Lewis E, Wallace DWR : Program developed for CO₂ system calculations, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy HP(<http://cdiac.esd.ornl.gov/oceans/co2rprtnbk>), 1998
 - ・ 松本健寛、黒田芳史、石原靖久、山口誠之：m-TRITON ブイの開発とインド洋への展開～海洋観測ブイの新たな挑戦～、みらいシンポジウム予稿集、10 巻、p51-52
 - ・ 室戸沖 GPS 津波計沖合実証実験観測データ公開ページ 研究の経緯（既往の成果）
(<http://www.tsunamigps.com/research/tsunamiGPS2.html>)
 - ・ 中野善之、吉田弘、三輪哲也、紀本英志：無人探査機用 CO₂-pH 一体型センサー(HCS)の開発、日本海洋学会要旨集、2013
 - ・ 中野善之、藤木徹一、渡邊修一：現場型センサーによる海水中炭酸成分の観測、月刊海

- 洋、Vol.42、No.12、p684-688、2010
- Nakano, Yoshiyuki, Hideshi Kimoto, Tetsuya Miwa, Hiroshi Yoshida : Development of in situ CO₂ and pH sensor for AUVs and ROVs, EGU2013
 - Nakaoka, S., M. Telszewski, Y. Nojiri, S. Yasunaka, C. Miyazaki, H. Mukai, and N. Usui : Estimating temporal and spatial variation of ocean surface pCO₂ in the North Pacific using a Self Organizing Map neural network technique, Biogeosciences, 10, p6093-6106, 2013
 - 日本環境計測株式会社 HP (<http://www.environment.co.jp/ImpPro/SAMI/index.html>)
 - 日本海洋株式会社 : BOT 社 波力式自動昇降モニタリングシステム SeaHorse, 日本海洋 HP(<http://www.nipponkaiyo.co.jp/>)
 - 日油技研工業株式会社 : ngk ocean News Letter No.1, NGK ocean HP, 2010 (<http://www.nichigi.co.jp/products/ocean/>)
 - 日油技研工業株式会社 : 水中自動昇降装置、日油技研工業株式会社 HP (http://www.nichigi.co.jp/products/ocean/products/products_002.html)
 - NOAA/PMEL : Carbon Wave Glider Developing new platforms for carbon measurements, PMEL Carbon ploglam HP (<http://www.pmel.noaa.gov/co2/story/Carbon+Wave+Glider>)
 - 大畑智海, 北野まどか, 江里口勇, 石井和男 : 沿岸域観測水中ロボット” AquaBox II ”の開発-運動特性の解析と制御系設計-, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 1P1-E30, 2006
 - 大阪府立大学工学部大学院工学研究科海洋システム工学分野有馬研究室 HP (<http://www.marine.osakafu-u.ac.jp/~lab06/>)
 - Paul, Walter, Mark Chaffey, Andrew Hamilton, Stanley Boduch : The Use of Snubbers as Strain Limiters in Ocean Moorings, OCEANS, 2005. Proceedings of MTS/IEEE, Vol. 3, p2722 - 2729
 - Pro-Oceanus Systems Inc. HP(<http://www.pro-oceanus.com/>)
 - 才野 敏郎 : 衛星利用のための実時間海洋基礎生産計測システム, 戦略的創造 (基礎) 研究推進事業「地球変動メカニズム」平成 11 年度採択テーマ 平成 15 年度研究実施報告
 - 才野 敏郎 : 自動昇降式ブイシステムによる海洋基礎生産モニタリング、沿岸海洋研究、第 45 巻、第 1 号、p17-28、2007
 - Satlantic LP HP (URL: <http://satlantic.com/>)
 - 澤田信一, 深澤強, 桶谷能史 : 海底から海水中へのメタン漏洩を検知するためのセンシング技術の開発、海洋と生物, Vol.30, No.4, pp.498-504,
 - Schar, D., M. Atkinson, T. Johengen, A. Pnchuk, H. Purcell, C. Robertson, G. J. Smith, M. Tamburri : Performance Demonstration statement Contros HydroC/CO₂,

Alliance for Coastal Technologies : UMCES Technical Report

Series:Ref.No.[UMCES]CBL 10-091, 2010

- Schar, D., M. Atkinson, T. Johengen, A. Pnchuk, H. Purcell, C. Robertson, G. J. Smith, M. Tamburri : Performance Demonstration Statement for PMEL MAPCO₂ / Battelle Seaology pCO₂ Monitoring System, Alliance for Coastal Technologies: Ref. No. [UMCES]CBL 10-092, 2010
- Schar, D., M. Atkinson, T. Johengen, A. Pnchuk, H. Purcell, C. Robertson, G. J. Smith, M. Tamburri : Performance Demonstration Statement for Pro-Oceanus Systems Inc. PSI CO₂-Pro, Alliance for Coastal Technologies : Ref. No. [UMCES]CBL 10-093, 2010
- Schar, D., M. Atkinson, T. Johengen, A. Pnchuk, H. Purcell, C. Robertson, G. J. Smith, M. Tamburri: Performance demonstration statement sunburst Sensors SAMI-CO₂, Alliance for Coastal Technologies : Ref. No. [UMCES]CBL 10-094, 2010
- Sea-Bird Electronics, Inc. : Navis Autonomous Profiling Float, Sea-Bird Electronics Inc. HP(http://www.seabird.com/products/spec_sheets/Navisdata.htm)
- 清水潤子、山尾理 : 東京湾奥部における連続観測より得られた賓酸素水塊の現状について、月刊海洋、Vol.39、No.1、2007
- 下島 公紀, 大隈多加志: CO₂海洋隔離の環境影響評価のための観測手法開発 (その 2) - 海洋での CO₂拡散挙動観測技術の開発- 研究報告: V05037、電力中央研究所報告、2006
- 下島公紀 : CO₂海洋隔離の環境影響評価のための観測手法開発 (その 1) -高精度な現場型 pH/pCO₂センサの開発、電力中央研究所報告、研究報告 : V05036、2006
- 下島公紀 : 海底下地層貯留における貯留 CO₂漏洩の検知・モニタリング技術の提案 研究報告 : V09034、電力中央研究所報告、2011
- Short, R. T., D. P. Fries, M. L. Kerr and C. E. Lembke, S. K. Toler, P. G. Wenner and R. H. Byrne : Application of a fiber-optic NIR-EFA sensor system for in situ monitoring of aromatic hydrocarbons in contaminated groundwater, Journal of the American Society for Mass Spectrometry, 12, 676-682, 2001
- 杉山大志 : 体系的介入による海の魚類資源の増大について、(財) 電力中央研究所社会経済研究所ディスカッションペーパー, 2010
- SUNBURST SENSORS : Reef sutady SUNBURST SENSORS HP (<http://www.sunburstsensors.com/>)
- SUNBURST SENSORS HP (<http://www.sunburstsensors.com/products/sami-co2.html>)
- 鈴木高二郎、竹田晃 : 東京湾口フェリーによる海洋環境の 2003~2005 年の観測結果とその特性、港湾空港技術研究所資料、No.1134、2006
- 所立樹、細川真也、三好英一、門谷茂、茅根創、桑江朝比呂 : 沿岸域のブルーカーボン

- と大気中 CO₂の吸収との関連性に関する現地調査と解析、港湾空港技術研究所報告、Vol.52、No.1、2013
- 角田晋也、山口誠之、伊藤淳雄、石原靖久、米沢明美、田代省三：TRITON 海洋観測ブイシステムにおける Vandalism、海洋科学技術センター試験研究報告、第 49 号、p131-134
 - WET Labs inc. : Cycle-PO4 Spec sheet, WET Labs inc. HP (<http://www.wetlabs.com/>)
 - Willcox, Scott, Christian Meinig, Christopher L. Sabine, Noah Lawrence-Slavas, Tim Richardson, Roger Hine, Justin Manley : An autonomous mobile platform for underway surface carbon measurements in open-ocean and coastal waters, OCEANS 2009, MTS/IEEE Biloxi - Marine Technology for Our Future: Global and Local Challenges, p1-8, 2009
 - 山下栄次、河野雄彦、林昌世、石田廣史：大阪湾及びその周辺海域における海水中二酸化炭素の測定、海と空、77 巻、2 号、p65-72、2001
 - YSI : YSI 9600 Nitrate Monitor Spec Sheet, YSI Inc. HP(<http://www.ysi.com/>)
 - YSI ナノテック株式会社: EcoMapper™ Autonomous Underwater Vehicle (<http://www.nanotech.co.jp/products/auv/ecomapper.html>)
 - 財団法人地球環境産業技術研究機構：平成 20 年度 二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業 二酸化炭素の海洋隔離に伴う環境影響予測技術開発 成果報告書, 2008

別添資料

有識者ヒアリング調査 結果シート

ヒアリング結果報告（1）

日 時：平成25年11月19日 14:00～16:00

対象者：独立行政法人海洋開発研究機構 藤木主任研究員

参加者：(KANSO) 播本

ヒアリングの目的：外洋物質循環研究において、国内で初めて自動昇降装置付きの中層ブイを開発した才野敏郎教授（当時は名古屋大学教授、現在は JAMSTEC プログラムディレクター）の下で、現在も同システムを用いた海洋観測を行っている藤木主任研究員に対し、中～表層を昇降するブイシステムの研究実績や運用課題、各コスト等についてヒアリングを実施した。

ヒアリング冒頭、藤木主任研究員より JAMSTEC で実施しているプロファイリングブイ観測の成果について説明を受けた。

- ▶ 本機器は、日油技研工業(株)製の自動昇降装置がベース。センサーと共に上下する Profiling buoy 部分と、Underwater winch 部により構成される。
- ▶ 水深 0～200m までの基礎生産量観測を行っている。
- ▶ 昇降スピードは、上昇 15m/分、下降 9m/分。
- ▶ 名古屋大学才野教授が約 10 年実施した研究（クレスト予算）を、才野教授の JAMSTEC 異動に伴い現研究へと引き継がれた。

主なヒアリング質問事項：

<p>Q1) 現在の観測項目と観測期間（四季調査なのか、連続観測なのか）、自動昇降装置の運用実績（自動運用期間）と保守点検頻度について教えてください。</p>	<p>A1) 現在 JAMSTEC では、物質循環メカニズム解明のための研究として太平洋上の定点で生物生産を中心とした連続観測を実施している。現在は小笠原沖の測点 S1 にて 1 年間の連続観測中。実機 2 基で運用しており、1 年ごとに観測とメンテナンスを繰り返している。</p> <p>昇降のタイミングはタイマー式で 3 日に 1 回の観測を実施している。ブイが海表面に出た際にイリジウム衛星通信にて陸上へデータ伝送を行う。双方向通信が可能であるが、現在は陸上からの通信はほとんどしていない。</p>
<p>Q2) 今後の観測項目について、追加観測項目等ありますか？</p>	<p>A2) バッテリー駆動であるため、電気容量の大きいセンサーは搭載しないようにしている。現在の仕様でバッテリーのみの駆動で 130 キヤストを達成している。</p>

<p>Q3) 自動昇降装置を利用した自動モニタリング観測について、これまでに抽出できた課題について教えてください。</p>	<p>A3) 外洋において最も怖いのは波の動揺等によるブイラインの切断である。万が一切れた場合も、GPSデータや深度データから異状を判断できるが、外洋での回収は不可能に近い。そのため、海表面通信時が最も危険であるため、通信が終わればすぐに潜らせるように設定している。</p> <p>同じく、現場海域の流れについても注意している（現場表層の流れが強いと浮上ブイが流されたりする危険性があるため）。</p>
<p>Q4) 自動昇降装置を利用する意義について教えてください。</p>	<p>A4) 鉛直プロファイルを描けることに尽きる。物質循環を検討する上で重要である。</p>
<p>Q5) 自動昇降装置を利用した自動モニタリング観測の沿岸域観測への転用の可能性について教えてください（本システムのニーズについて）。また、沿岸域での温室効果ガス鉛直分布の把握について、アドバイスをお願いします。</p>	<p>A5) 沿岸におけるCO₂鉛直観測はニーズがあると考える。現に外洋においてもAUVやアルゴブイにCO₂センサーを搭載した研究が開始されている。地球温暖化のほかに、海洋酸性化監視にも貢献できるのではないかと。</p> <p>本装置の沿岸に転用の際、以下のポイントを注意すべき。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 地元漁師対策：底引きにより切断される危険がある。→周知と協力が必要 ・ 生物付着対策：電氣的に余裕があれば塩素発生装置や紫外線処理装置を付加できる。銅製のシャッターも有効。 ・ 盗難、破損対策：レジャー船等に切断されたり、部品盗難の危険性がある。 ・ その他：アンカリングの際に海底状況確認が必要（通信ケーブル等の存在）

<p>Q6) 現装置の生物付着対策を教えてください。また、装置への生物付着問題について、特に沿岸域での運用に際して技術的な提言等ございますか。</p>	<p>A6) JAMSTEC ブイは、無光層深度に機器を待機させ生物付着を低減させている。また、ブイが動いているときは生物の付着はほとんどないが、電池が切れて停止するとすぐに生物付着が進行するようである。</p> <p>生物付着防止には、船具等に使用される金属系塗料、銅プレート、シリコン塗料等があり、銅プレートは有効であると考え(JAMSTEC では過去にこれら塗料の比較試験を実施した)。</p>
<p>Q7) 初期コスト、メンテナンスコストについて教えてください。</p>	<p>A7) コストについては以下の通り (初期コスト)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 昇降ブイシステム・・・約 1500 万円 ・ 搭載センサー・・・約 2000 万円 ・ メンテナンスコスト・・・約 400 万円
<p>Q8) 現在、我々が検討している自動モニタリング装置(測定法)について、期待されることはございますか？また逆に何かネックになる可能性はあると思いますか？</p>	<p>A8) 定深度固定ではなく鉛直昇降できるのがメリット。JAMSTEC の中野研究員が水中 CO₂センサーを開発している。pH 比色原理を用いているが、まだ応答時間が長くかかってしまう。自動昇降システムへの搭載を考えると、昇降スピードとセンサー応答速度のバランスが必要。WetLab 社のリン酸センサーも、応答速度が長い。</p> <p>その他、人工衛星による海表面 CO₂濃度のアルゴリズム検証用としても期待できるようになるのではないかと。</p>

ヒアリング結果報告（２）

日 時：平成25年11月22日 10:00～

対象者：東京海洋大学 神田穰太教授

参加者：(ENAA) 末国、(KANSO) 播本

ヒアリングの目的:沿岸域における物質循環を専門にされ、今春日本海洋学会において「海洋学の10年展望(Ⅱ)-化学サブグループ-」の取りまとめをされた神田穰太教授に対して、本調査研究で検討している沿岸自動モニタリングシステムについてのコメントやご意見を頂戴した。

主なヒアリング質問事項：

<p>Q1) 2008年から3年間実施された東京湾のpCO₂連続観測について</p> <p>(ア) 代表測点等における鉛直的な観測も実施されましたでしょうか？</p> <p>(イ) 上記、鉛直観測されていた場合、その深度ピッチ、観測期間、地点数等について教えてください。</p> <p>(ウ) 現在も船舶による連続観測は継続されておりますでしょうか？</p> <p>(エ) 河川流入によるインパクトについて何か特徴的な事象が観測されましたでしょうか？またそれらを捉えるような観測事例をご存知でしょうか？</p>	<p>A1) 東京湾の観測は旧・東京水産大学時代より約20年定点観測を行っており、その調査船にCO₂計を搭載し航走連続観測を実施した。装置として平衡に達する時間は2～3分程度を実現。東京湾観測には定点が3箇所あるがCO₂鉛直観測はしていない。湾口の測点では採水分析値からpCO₂を計算したことがある。既に当該観測は終了したが、ドクターの久保氏が論文をまとめている。</p> <p>鉛直的な観測としては、千葉港沖にて青潮発生域の観測を行ったことがある。水中ポンプを鉛直降下させ汲み上げた海水を連続計に導入した。取水口は数mごとに停止し平衡状態を待ち分析を行った。</p> <p>東京湾は全体的には吸収域だが、湾奥、特に河川流入の多い東京港側は千葉側に比べてpCO₂が高かった。一般的に沿岸域で陸水の影響の高いところはpCO₂が高い(陸起源の有機物分解による)とされており、よく合っている。これらエリアごとの現象は海表面の連続観測で知ることができる。</p> <p>有機物の沈降速度と二酸化炭素の観測を絡めたものはあまりない。直接的な陸水混合観測はされていないため、吸収されたCO₂が、①有機物となり沈降し海底に堆積するのか、②沈降はするが再び巻き上がり(ふわふわした泥のイメージ)、外洋に輸送されるのか、③鉛直混合され再び大気放出するの</p>
--	---

	か、④あるいは底層の高 CO ₂ 水塊が湾の外に移送されていくのか、そのメカニズムも収支もまだ判っていない。徹底的に時空間分解能を高めて CO ₂ の収支をきちんと出せれば、有機物の収支を考える上で有効かもしれない。
Q2) 本調査では自動昇降装置のようなプロファイラーによる観測と、係留ブイによる水深固定の観測の二通りを検討材料としておりますが、沿岸で自動昇降装置を用いた鉛直観測をいかがお考えでしょうか(例えば係留ブイ観測で十分等) ?	A2) 沿岸において鉛直連続観測は重要であると考ええる。例えば青潮のメカニズム(貧 O ₂ 水=高 CO ₂ 水が底層から巻上がる)は良く知られているが、そのタイミングを観測した事例はない。その多くが青潮発生後のスポット的観測であり大気と接触した脱ガス状態の pCO ₂ を計測している可能性が高い。時間分解能、計時変化的なものが測れることが大事であり、鉛直連続観測が有効である。
Q3) 新たなポイントにおいて定点観測をすることについていかがでしょうか。既存モニタリングポストに pCO ₂ 計をつけることについてどうお考えか	A3) 東京湾で新たな設置場所を選定する場合、許認可申請関係、航行船舶との調整が難しいのではないかと。沈下タイプのシステムにしても浮上時に船舶と衝突する可能性はある。港湾管理者等と調整の上、危険のないような場所選定が必要ではないかと。場所が選べるのであれば興味がある。
Q4) プロファイラー観測に搭載できるセンサーという観点で考えた場合、CONTROS 社 HydroC センサーの観測事例がありますが、他に応答速度の早いセンサーをご存じないでしょうか。あるいは期待できるセンサーをご存知でしょうか?	A4) 応答性の速いセンサーについては、あまり詳しくない。CO ₂ センサー以外の他センサーの組み合わせ結果から計算するよりも、CO ₂ センサーを改良し直接観測する方法を開発する方が早いのではないかと。それに pH 計等を組み合わせるのが良いと考える。
Q5) 数 m 毎に数分停止して観測するプロファイラーを開発した場合、沿岸鉛直観測で活用できますでしょうか?	A5) 沿岸域では変動にかかる時間が短いイベントもあるので、昇降スピードはあまり犠牲にできない。

<p>Q6) 対象としている沿岸域（特に港湾域）での温室効果ガス濃度鉛直観測について、これまでの海洋におけるCO₂観測では海表面での大気海洋間収支がその多くを占め、鉛直観測、特に鉛直の連続観測の例が少ない傾向にあると考えますが、港湾海域での鉛直観測に期待すること等ありますでしょうか？</p>	<p>A6) 沿岸域において鉛直連続観測の重要性は、方向性は間違っていない。スナップショット的な観測だけでは説明がつかないものもある。単に収支を抑えたい場合でも鉛直連続データは必要となる。</p>
<p>Q7) 本調査で検討している鉛直プロファイラー観測の開発目的のひとつに、港湾域における藻場造成や深堀跡の埋め戻し等の環境改善施策についての環境評価ツールとしての活用があります。下記のような効果を考えているのですが、先生のご意見を申し上げます。</p> <p>(ア) 港湾域のCO₂収支の実態把握により、汚濁域と清浄域のCO₂収支比較により水質改善を評価する。</p> <p>(イ) 藻場造成によるCO₂吸収効果を推定するためのバックグラウンド情報を得ることができる。</p> <p>(ウ) 海水中CO₂濃度の上昇による海洋酸性化の監視、警鐘が可能となる。</p>	<p>A7) 沿岸の水質改善には、無酸素水が一番のキーであり、無酸素水により底層から硫化水素やリン酸の溶出が起こる。リン酸の供給を絞っていき、仮に有機物生産がコントロールできて無酸素水塊を減らすことができれば底層からのリン酸の溶出は減らすことができ、水質は加速度的に改善する。リン酸の供給をコントロールするのは比較的簡単で、下水処理の段階で確実にリン酸除去の処理をすれば無酸素水の生成を制限でき、水質は確実に改善できると考える。</p> <p>これからの沿岸観測の焦点は貧酸素水塊の挙動であり、貧酸素水塊いわゆる高CO₂水塊がどこで形成され、どう動いているかは捉えられる観測は重要と考える。</p>
<p>Q8) 今後、本調査で検討している鉛直プロファイラー観測が実用化された場合、活用してみたいと思いますでしょうか？また今後沿岸、港湾観測においてどのような観測ツールがあれば有効だとお考えでしょうか。</p>	<p>A8) 沿岸環境で重要な因子として底層からの供給がある。例えば、無酸素水が底層に接することで底層からリン酸やアンモニア濃度が溶出し上昇する。そのリン酸が海域の栄養塩収支に効いてくる。無酸素水塊の挙動が重要で、底上直上の物質の挙動が沿岸環境に対する大きなインパクトをもっている可能性がある。</p>

	<p>センサーとしては、リン酸センサー（ウェットラボ社製 応答速度 15 分程度）。DO センサー、メタンセンサー、硫化水素センサー、N₂、DO/アルゴン比等が挙げられる。</p>
<p>Q9) 同じく、この機器の外洋域への活用案として、メタンハイドレード開発等海底資源開発における環境監視ツール、CCS 技術における CO₂漏洩監視ツールとしての活用も視野に入りたいと考えております。先生のご意見をお願いいたします。</p>	<p>A9) 地質系研究者らは、過去にメタンの大量放出を危惧する声が聞かれる。海底からメタンを掘り起こすのであれば周辺環境の監視を目的とした環境モニタリングや環境アセスメントが重要となる。特に沿岸漁業の強い日本では諸外国に比べてより厳しくなるのではないか。</p>
<p>Q10) 循環モデルのパラメタリゼーションについて</p>	<p>A10) 本当は CO₂計の動きと有機物系の動きが合わさると炭素そのものが導き出される。有機物をマスとしてどう計るかが問題。</p>

ヒアリング結果報告（3）

日 時：平成25年12月3日 13：30～

対象者：国土交通省中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所

福田技術開発課長、高野技術開発第二係長

参加者：（KANSO）廣辻、播本

ヒアリングの目的：伊勢湾において平成22年度から約3年間3箇所のモニタリングポストにおいて自動昇降装置を用いた沿岸環境モニタリングを実施している名古屋港湾空港技術調査事務所に対して、機器運用（メンテナンス）や本事業で検討しているモニタリングシステムへのニーズ調査を実施した。伊勢湾湾央部のモニタリングポストは国内初の観測機能付き航路標識である。

主なヒアリング質問事項：

<p>Q1) 伊勢湾にて稼動している自動モニタリングシステムについて、灯標を活用した湾央および湾口の観測データはどのように回収されており、システム運用の制御はどのようにされていますか？</p>	<p>A1) 現観測システムでは全て携帯電話通信を用いて観測データを伝送している。モニタリングポスト（3箇所）から当事務所内にある中央局に毎時伝送され、環境データベースに集約している。通信は双方向だが、陸上からのコマンドは台風時等にセンサー部を停止させる ON/OFF のコマンド制御のみである。</p>
<p>Q2) 現在どのようなセンサーを搭載しているのか。またその各観測項目の観測インターバルは何時間間隔で測定されていますか？</p>	<p>A2) 湾奥部（伊勢湾シーバース）</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 気温、風向風速、水温、塩分、DO、クロロフィル a、濁度 ・ 自動昇降装置にて 1m ピッチで観測 <p>湾央部（伊勢湾 4 号灯標）</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 気温、風向風速、波高、流向流速、水温、塩分、DO、クロロフィル a、濁度 ・ 自動昇降装置にて 1m ピッチで観測 <p>湾口部（瀬木寄瀬東方灯標：海上保安部保有）</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 気温、風向風速、波高、流向流速、水温、塩分、DO、クロロフィル a、濁度 ・ 湾口部は固定層（水深 1m・12m・23m） <p>観測インターバルは全機器 60 分、自動昇降装置では 1m 毎にデータを取得している。</p>

<p>Q3) 伊勢湾では、自動昇降装置を用いたシステムと固定型システムの観測を併用されておりますが、それぞれの利点と課題点、設置地点によるシステムの選択等の経緯について教えてください。</p>	<p>A3) 既設のブイ・施設等を活用しており、観測用として新たに設置してはいない。湾内における観測点が限られることによる観測データ欠測エリア対策については、湾内に観測点や観測ラインを持つ他の研究機関（三重県水産研究所、愛知県水産試験場）等の観測データにより補完していくことになる。当事務所では観測データを収集する「伊勢湾環境クリアリングハウス」を運営している。水試関係以外にも、湾内を航行する清掃兼油回収船による定期観測データ（水質・底質）や、伊勢湾フェリーに搭載した観測装置による水質観測データ（水温・塩分・流向流速）を集約している。</p>
<p>Q4) 実質 3 年間沿岸自動観測を実施している研究機関として、沿岸自動モニタリングの課題について何かあれば教えてください。</p>	<p>A4) 連続観測の課題としては、ハード面での不具合が生じデータ欠測期間が発生することである。不具合事象としては、水中では電気防食、気中では海上の高湿条件で基板系が故障するケースが多い。今後新たに装置を設置するのであれば、メンテナンス性を高めた装置の開発を検討すべきではないか。</p>
<p>Q5) 各モニタリング装置の点検の頻度とその内容について教えてください。</p>	<p>A5) センサーの点検は基本的に 3 ヶ月に 1 回。湾口部は水中固定式であるため、メンテナンス頻度を上げて対応している。不具合が生じた場合は緊急点検も実施している。</p>
<p>Q6) 生物付着問題について、どう対応されていますか？</p>	<p>A6) 基本的に自動昇降装置付きの観測システムは気中でセンサーを待機させるため、生物付着はないものとして特別な対策はしていない。</p>
<p>Q7) 予備的調査の実施有無について、校正方法はどのようにされていますか？</p>	<p>A7) 予備的な調査は実施していない。校正については、保守点検業務内で実施している。自動昇降装置付きの湾奥部、湾央部では各 2 機のセンサーを交互に運用している。</p>
<p>Q8) 港湾モニタリングの今後の展望について、観測項目の追加等は検討されていますか？</p>	<p>A8) これまでに取得したデータの解析を行い、伊勢湾における事象を説明できるか、今後のモニタリング項目として何が必要かを含めた検討業務を実施中である。その結果として、CO₂モニタリン</p>

	グの必要性が出てくるかも知れない。
Q9) 同じく今後の展望として、我々のFSで概念設計を検討している二酸化炭素分圧やメタン濃度等の鉛直観測が実現できれば、設置したいと思いますか？	A9) 上記に同じ。
Q10) その他、港湾観測において今後何に期待されますか？	A10) 自動昇降装置は鉛直分布を把握する上で必要なものと考えられるが、故障が多いと信頼を損なうため、データ取得率の高い装置の開発を期待する。
Q11) 初期コスト、運用コストについて教えてください。	A11) 灯標ブイ製作設置を含めた総経費が約2億円。個別には、湾中央湾奥のセンサー1基270万円×4基。湾口固定センサーは総額で1800万円。昇降装置は予備品含めて1千万/基程度。 メンテナンスコストは年間2千万円、通信費は年間200万円程度。
Q12) 普段は海底にセンサーごと沈んでおり、観測時にのみ揚降するタイプの自動昇降装置もあるが、港湾において使用することについて何かアドバイスはありますか。港湾区域内外、それぞれのケースで教えてください。	A12) 基本的に沿岸では、「対象物が視認できる」ことが前提になるのではないかと。

書名 平成 25 年度 地球温暖化対策等に貢献するエンジニアリング調査研究補助事業
沿岸域海水中温暖化ガス連続モニタリング技術に関する調査研究 報告書

発行 平成 26 年 3 月
一般財団法人 エンジニアリング協会
〒105-0001
東京都港区虎ノ門三丁目 18 番 19 号
TEL 03-5405-7204
FAX 03-5405-8201

印刷 株式会社 リョーサン