

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE

OF

THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1309 September 2015

港湾におけるブルーカーボン（CO₂吸収と炭素隔離）の計測手法のガイドライン

所 立樹
渡辺 謙太
田多 一史
桑江朝比呂

国立研究開発法人 港湾空港技術研究所

National Research and Development Agency,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

| | |
|--------------------------------------|----|
| 要 旨 | 3 |
| 1. 序論 | 4 |
| 1.1 ブルーカーボン研究の背景 | 4 |
| 1.2 本資料の目的 | 5 |
| 2. 参照レベル | 6 |
| 3. 対象面積の時系列変化の計測手法 | 8 |
| 3.1 現地測量調査 | 8 |
| 3.2 リモートセンシング | 8 |
| 3.3 計測に係る比較項目ごとの関係性 | 9 |
| 4. 大気中CO ₂ 交換量の計測手法 | 11 |
| 4.1 バルク法 | 11 |
| 4.2 チャンバー法 | 12 |
| 4.3 渦相関法 | 13 |
| 4.4 計測に係る比較項目ごとの関係性 | 14 |
| 5. 生物内炭素量の計測手法 | 16 |
| 5.1 現地調査 | 16 |
| 5.2 リモートセンシングとの複合的手法 | 17 |
| 5.3 計測に係る比較項目ごとの関係性 | 18 |
| 6. 堆積物中炭素量の計測手法 | 18 |
| 6.1 炭素貯留量の計測手法 | 19 |
| 6.2 炭素貯留速度の計測手法（経年比較法） | 22 |
| 6.3 炭素貯留速度の計測手法（年代測定法） | 23 |
| 6.4 計測に係る比較項目ごとの関係性 | 24 |
| 7. 結論 | 24 |
| 謝辞 | 27 |
| 参考文献 | 27 |
| 記号表 | 28 |

Guideline of Blue Carbon (CO₂ absorption and Carbon Sequestration) Measurement Methodology in Port Areas

Tatsuki TOKORO*

Kenta WATANABE*

Kazufumi TADA**

Tomohiro KUWAE***

Synopsis

Carbon sequestration by blue carbon (carbon captured by marine living organisms) in port areas would generate benefits and social values. Furthermore, CO₂ emissions due to port (coastal shallow water) use changes are potentially obligated to be quantitatively reported if such projects are included in the national inventory in the next framework of the international climate change initiatives after 2020. Therefore, development of the measurement methodology for CO₂ emission/absorption and preparation of the guideline in terms of blue carbon are critical.

In this article, a blue carbon guideline is proposed. We focus on the measurement methods for (1) reference level, (2) project area, and (3) CO₂ emission/absorption and carbon sequestration per unit area (air-water CO₂ exchanges and the carbon stocked in organisms and sediments) in port areas. Data reliability, technical ease, and cost are chosen as the evaluation criteria in light of the implementation and prevalence of the blue carbon initiatives as an option for the future climate change mitigation.

Key Words: climate change, atmospheric CO₂ exchange, carbon stocked in organisms, carbon stocked in sediments

* Researcher, Coastal and Estuarine Environment Field, Coastal and Estuarine Environment Research Group
** Guest researcher, Coastal and Estuarine Environment Field, Coastal and Estuarine Environment Research Group
*** Head, Coastal and Estuarine Environment Field, Coastal and Estuarine Environment Research Group

港湾におけるブルーカーボン（CO₂吸収と炭素隔離） の計測手法のガイドライン

所 立樹*・渡辺 謙太*・田多 一史**・桑江 朝比呂***

要 旨

港湾環境事業において、CO₂や炭素を海洋中に隔離貯留する（ブルーカーボン）効果を新たな機能として導入することにより、便益の付与や社会的意義の向上が期待される。また、2020年以降の新たな国際的な法的枠組みのなかで、港湾や海岸事業に起因する当該生態系の炭素増減量も国別報告書に含めることが規定される場合には、炭素隔離量やCO₂吸収・排出量の変化を計測し報告する義務が生じることになる。よって、各港湾環境事業によるブルーカーボンによるCO₂吸収量や炭素隔離量の計測手法の確立と、そのガイドラインの作成は喫緊の課題である。

本資料では、下記の計測対象ごとに複数の計測手法を比較検討することで、港湾環境事業（海域）ごとに最適な手法を決定できるガイドラインを作成した。計測対象は、①参照レベル、②対象面積の時系列変化、③単位面積当たりの炭素フローとストック（大気中CO₂交換量、生物内炭素量、堆積物中炭素量）とした。評価項目としては、技術的な観点ではデータの信頼性が重要であるのに対し、ブルーカーボン事業の普及やCO₂排出量緩和への対応を考慮した場合、計測手法の簡易さやコストが重要な要素となる。そのため、本資料ではデータの信頼性、簡易さ、そしてコストを主な評価項目とした。

キーワード：気候変動、大気中CO₂交換量、生物内炭素量、堆積物中炭素量

* 沿岸環境研究領域沿岸環境研究チーム研究官

** 沿岸環境研究領域沿岸環境研究チーム客員研究員

*** 沿岸環境研究領域沿岸環境研究チームリーダー

1. 序論

1.1 ブルーカーボン研究の背景

将来の気候変動による農業や漁業への悪影響、または今後の気候災害の増加を抑制するため、CO₂をはじめとする大気中の温室効果ガスの濃度上昇の抑制が喫緊の課題となっている。陸域の植生や海洋は人為起源の炭素の主要なプールとみなされており、例えば海洋には人為起源で放出された CO₂ の 3 分の 1 が毎年大気中から除かれていると見積もられている¹⁾。

近年、炭素プールの一つとして、海洋生態系の光合成などによって固定される炭素（ブルーカーボン）が注目されている。特に、海草場や塩生湿地、マングローブといった沿岸域では難分解性有機物として長期間堆積物中に固定されるため、有効な気候変動対策として期待されている。既存の見積もりでは、堆積物中への有機態炭素の堆積速度がブルーカーボンの蓄積速度と捉えられており、沿岸域で年間 1 億トン程度蓄積されていると見積もられている²⁾。

これまでの国内の複数の海草場の調査から、年間を通じて大気中 CO₂ の吸収源となりうることを示されている³⁻¹⁰⁾。しかしながら、これらの既往研究のように沿岸域系内における炭素フローを総合的に取り扱った例はほとんどない。これは、沿岸域の炭素フローが陸域や生態系、大気との間で極めて複雑な相互関係の上に成り立っている上に、正確な測定を行うための機器やノウハウが整備されていないことが原因である。

ブルーカーボンに関する国際的な状況としては、2013 年に IPCC 湿地ガイドライン¹¹⁾が改定され、湿地の CO₂ 吸排出量のインベントリ作成に関する方法論が示された。湿地にはマングローブや干潟、ヨシ原を含むが藻場は含まれていない。また 2013 年 10 月には SBSTA37（科学および技術の助言に関する補助機関）において提案された「高炭素貯蔵の生態系に関するワークショップ」が開催された。本ワークショップにおいて、沿岸域生態系による CO₂ 吸収および気候変動緩和機能を SBSTA の議題に挙げるよう提案がなされた。

このような背景のもと、2013 年 11 月にポーランド・ワルシャワで気候変動枠組条約締約国会議（UNFCCC）の COP19 が開催された。これに付随して開催された SBSTA39 において、「土地利用、土地利用変化及び林業部門（Land Use, Land Use Change and Forestry : LULUCF）」の条項について IPCC の湿地ガイドラインの導入に関する議論がなされた。湿地ガイドラインに基づいた湿地（沿岸域生態系を含む）における吸排出量のインベントリ作

成は 2017 年まで自主的適用とすることで関心国の意見が一致した。2014 年 12 月にペルー・リマで開催された UNFCCC の COP20 では沿岸域生態系に関する議論は主に SBSTA41 で行われた。本会議では COP21 での争点となる新枠組の議論に時間が割かれた。SBSTA41 でのブルーカーボンに関する議論は、条項「研究と組織的観測」において海洋および海洋酸性化に関する観測の計画的実行に積極的に取り組むよう求めたこと、条項「LULUCF」において、湿地の保全・再生を追加吸収源 CDM 活動の候補とする議論があがったが、「植生回復」のみが候補となったことである。

UNFCCC の本会議においてブルーカーボンに関する大きな進展は見られていないが、サイドイベントではさかんに議論がなされている。特に COP20 の際に注目されていたのは「沿岸生態系（湿地・マングローブ）の保全・再生による適応策・緩和策の融合」であった。アメリカやインドネシア、イギリスの科学学会がオーガナイザーを務めたサイドイベントが開催され、実際に行われているプロジェクトの紹介がなされた。

2014 年には UNESCO から沿岸域のブルーカーボン（マングローブ、塩性湿地、海草藻場）の計測ガイドライン¹²⁾が提案されるなど、クレジット化へ向けた動きは始まっている。現状では、SBSTA での議論を通じて各国（島嶼国や熱帯諸国の関心が高い）がブルーカーボンの重要性を認識している状態である。各国の排出量インベントリに含めるかどうかの議論はまだ本格化していないが、SBSTA によって繰り返し求められている。来年の COP21 で合意を目指している新枠組に明言されるかどうかは今後の議論次第である。インベントリとして計測する際の技術的な面については IPCC 湿地ガイドラインなどで最低限のレベルはまとめられている。しかし、サンゴ礁や海草・海藻藻場など沿岸域生態系へ一般化するには今後も検証・技術開発が必要である。計測のガイドラインやクレジット化の方法論など国際的な認証には至っていないが、実証プロジェクトベースでは REDD+（Reduction of Emission from Deforestation and forest Degradation plus: 途上国における森林減少と森林劣化からの排出量削減並びに森林保全、持続可能な森林管理、森林炭素蓄積の増強）なども取り入れた先進的なものが進められている。今後は、2017 年以降に改正が予定される湿地ガイドラインについても、将来義務適用化されることを見据えた対応が必要となる。

ブルーカーボン調査研究の最終的なゴールは、港湾環境事業（浚渫土砂を用いた干潟・浅場・アマモ場再生や、老朽化護岸の更新における生物共生型護岸化など）にお

いて、CO₂や炭素を海洋中に隔離貯留する（ブルーカーボン）効果を新たな機能として導入することにより、便益（ベネフィット）を付与させ、社会的意義を向上させ、もって港湾環境事業を促進させることにある。ここでいう便益とは、経済的インセンティブ全般のことを指し、具体的な経済的インセンティブとしてはクレジット（市場取引）や基金といった収入がある。

大気中の CO₂ を港湾環境事業によって海中に隔離貯留し、気候変動緩和に寄与させるためには、以下の3つのアプローチを取ることができる。

- ・ 対象面積の新規創出（炭素プールや CO₂ 吸収源の創出）
- ・ 対象生態系の保全や修復による、対象面積の減少抑制
- ・ 対象環境や対象生態系の管理の改善（単位面積当たり炭素蓄積速度や CO₂ 吸収排出速度の向上）

便益や社会的意義について国内外から信認を得るためには、ブルーカーボンを科学的に、客観的に、そして定量的に計測すること（国際条約で導入されている原則である MRV, Measurement 計測, Reporting 報告, Verification 検証の3つのうち、計測に相当）が必須となる。また、ダーバン合意による2020年以降の新たな法的枠組みのなかで、港湾や海岸における炭素増減量も国別報告書（National Communication）のインベントリに含むことが規定されるのであれば、大気中 CO₂ の除去や排出抑制に寄与する上記の港湾環境事業に加え、開発事業等による炭素蓄積量減少や CO₂ 排出も MRV の原則に沿って計測する義務が生じることになる。

1.2 本資料の目的

以上を踏まえ、本資料では、各港湾環境事業による CO₂ 吸収・排出量の計測手法を確立し、そのガイドラインを提示することを目的とする。ガイドラインの構成は下記の項目に沿って整理する。

（1）計測の要件

本資料では、近い将来国内外で設定されるであろうブルーカーボンの計測に求められる要件として、現在の森林保全や再生における経済的インセンティブ付与で要件となっている以下の項目と同様になることを予想し議論をすすめる。すなわち、必須となると予想される計測項目として

1. 参照レベル
2. 対象面積の時系列変化
3. 面積当たりの CO₂ 吸排出量の時系列変化を前提とする。

参照レベルとは、対象エリアの保全や再生によって、どれだけ「追加的に」CO₂を吸収し炭素を蓄積したかを推定するために必要となる、保全や再生がされない場合（ベース）の吸収・排出量のことである。実際には、保全や再生事業前の当該地における吸収排出量の時系列トレンドや、近隣の対照区との差分で求められる。

本資料では、対象面積の時系列変化および面積当たりの炭素蓄積量・CO₂吸収排出量の時系列変化の計測手法開発に重点を置いている。その理由は、対象面積や面積当たり蓄積量・吸収排出量の計測が技術的に確立すれば、その手法を援用して参照レベルが計測可能となるからである。時系列トレンドや対照区をどのように設定するかという課題は依然として残るものの、この残される課題は科学技術的というよりは社会政策的な課題となり、技術的な調査研究課題からは距離があるとの判断である。

対象面積や面積当たり蓄積量・吸収排出量の計測については、科学技術的な要件であることから IPCC のガイドラインに準拠した手法となる。既に提案されているブルーカーボンの計測マニュアルでは、国内の沿岸域のスケールや対象水域に合っていない内容を含むものがあるため、国内の港湾環境事業に則したマニュアルの作成の意義は大きいと考えられる。

（2）対象となる測定手法と評価項目

炭素蓄積量の計測手法案について、以下に示す。まず、測定すべき炭素プールを整理する。浅水域には、次の5つの炭素蓄積形態（炭素プール）が存在する（図-1.1）；溶存無機炭素、生物内炭素（有機物が主体、サンゴの場合は無機物）、難分解性有機物、無機炭酸塩（貝殻など）、堆積物中炭素（有機物が主体）。この5つのプールは、すべて大気中の CO₂ の隔離貯留と関連するが、隔離貯留の安定性（大気 CO₂ への回帰のしにくさ）はまちまちである。また、各炭素プールの増加が、大気中 CO₂ の低下に寄与するわけではないことに留意する必要がある。例えば、無機炭酸塩が生成（石灰化、貝類やサンゴの増殖など）されると、化学量論的に CO₂ も生成される（主に水中の無機炭素が基質となり、およそ半分が無機炭酸塩、残りの半分が CO₂ となる）ため、無機炭酸塩の炭素プールの増加は、大気への CO₂ 排出を促進する作用を持つ。

隔離貯留の安定性が高いと考えられるのは、堆積物中への有機物の蓄積（有機物の分解が遅く、埋没過程との相乗効果で水中や大気への CO₂ の回帰が相対的に少ない）、海水中への難分解性有機物の蓄積（分解速度がきわめて遅い）の2つである。海水中無機炭素は、プール量そのものはもっとも多いが、pHの変化により容易に CO₂ を生成するため、隔離貯留の安定性は低い。生物体内炭

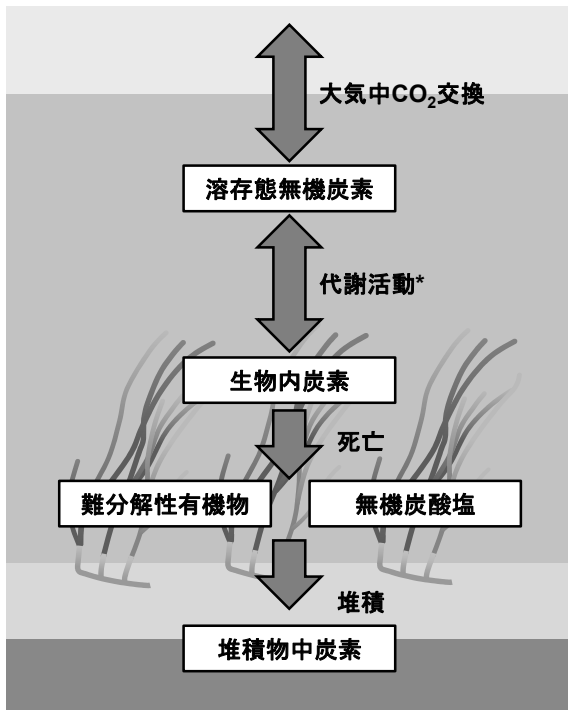


図-1.1 沿岸生態系のブルーカーボンフロー．*光合成，呼吸・分解，石灰化反応など

素は、プール量が増殖や死亡・枯死によって時空間的に激しく変動するため、やはり隔離貯留の安定性は低い。

隔離貯留の安定性の視点と同様に重要なのが、隔離貯留の速度の視点である。速度と安定性とは、基本的に二律背反の関係がある、生物体内のプールや水中無機炭素は、安定性は低いが変化速度は速い。

本報告では、上記特徴と国内の港湾周辺の環境を考慮して、上記の炭素プールのうち堆積物中炭素と生物内炭素が最も効率的な隔離貯留が期待できると判断し、これらを測定対象とした。また、上記炭素プールには含まれないが、大気中のCO₂交換量は気候変動緩和の観点からもっとも直接的な評価指標となりうるため、これも測定対象とした。

これらの測定手法については、それぞれに複数の手法を提案することができる。これらは、下記で示す対象環境事業（海域）ごとに運用が困難であったり不可能であったりするため、それぞれのケースで最適な手法を選択する必要がある。潜在的な対象事業（海域）としては空間スケールが狭い順に、下記が挙げられる。

- ① 生物共生型護岸
- ② 海草藻場ならびに干潟の保全・再生
- ③ サンゴ礁など遠隔離島の保全
- ④ 内湾の環境保全*

*ここでは、水深が深く植物プランクトンが主な生物内炭

素量となる海域を示す。

これらは、それぞれ対象水域の空間スケールや生態系が異なる。評価項目としては、研究の観点では精度や対応可能な空間・時間スケールが挙げられる。一方、ブルーカーボン事業の普及やCO₂排出量緩和への対応を考慮した場合、計測手法の簡易さや低コストであることも重要な要素となる。これらを考慮し、下記を評価項目として、上記対象事業（海域）ごとに整理をした。

- A. データの信頼性
- B. 測定範囲
- C. 測定継続時間
- D. 計測の簡易さ
- E. データ数/コスト

データの信頼性は、その測定結果が対象項目の解析においてどれだけ信頼性があるかという指標である。具体的には測定対象ごとに異なり、時間・空間分解能や測定精度（データのばらつきの小ささ）が該当する。測定範囲・測定継続時間は、その計測手法においてどれだけの範囲や期間をカバーできるのかという項目である。基本的に測定範囲が広い手法は空間分解能が悪くなる傾向にあるが、それらの点については対象事業（海域）ごとに個別に説明する。計測の簡易さは、その計測手法の取り扱いに要求される知識や経験の程度の指標である。具体的には、専門知識がなくても、適切なマニュアルがあれば、計測に必要な基礎データの取得（サンプリング、測量など）が可能な方法を簡易とする。また、測定測器の価格（イニシャルコスト）も評価に含める。データ数/コストは、同じコストでどれだけのデータ数を得られるのか評価した指標であり、ランニングコストに該当する。なお、計測手法の時間的コスト（1つのデータを得るのに、どれだけ時間が必要か）については、本資料では考察しない。

2. 参照レベル

参照レベルとは、ある環境保全・再生事業によって、対象エリアが追加的に吸収・蓄積したCO₂の量を推定するために必要となる、保全や再生がされない場合（ベース）の吸収・排出量である。国際的な環境事業の経済的インセンティブなどの定量的な評価（例：REDD+）のために、環境事業が行われている状態でのCO₂吸収・蓄積量（実測値）と参照レベルとの差分が用いられている。したがって、本報告における計測手法評価をIPCCガイドラインに準じた形式にするためには、参照レベルの概念を導入する必要がある。

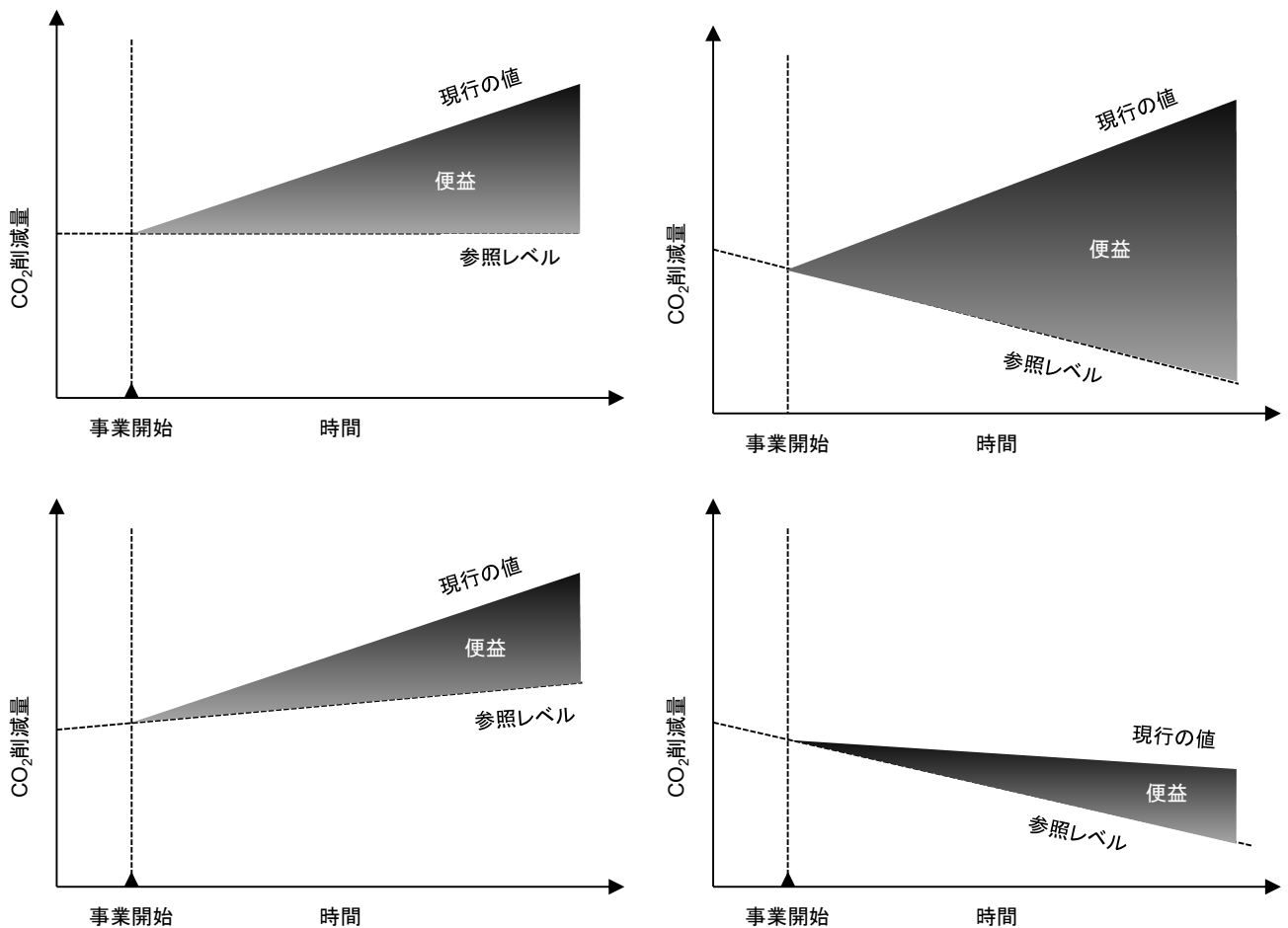


図-2.1 参照レベルと便益の関係性（文献 13 を改変）．事業開始後の参照レベルと現行の値との差分（図中の黒の箇所）が便益として計上できる．

図-2.1 は、参照レベルの時系列変化別に想定される 4 つのシナリオの例示である．左上の図は参照レベルが一定の区域で CO₂ 吸収・蓄積量を増加させたケースを示す．海草場の場合、CO₂ に対して中立的な植生（面積が一定、大気との CO₂ 吸収・放出が釣り合っている、炭素の堆積がほぼ確認されない、など）において、面積や光合成速度、炭素堆積速度などを増加させた場合が例として挙げられる．左下は参照レベルの増加している区域で CO₂ 吸収・蓄積量をさらに増加させたケースである．事業前から CO₂ の吸収が確認されている海草場の面積や単位面積当たりの CO₂ 吸収量をさらに増加させた場合に該当する．右上は参照レベルが減少傾向の区域を環境事業によって吸収・蓄積量が増加傾向になるまで回復させたケースで、減少や劣化が進行している海草場の面積を拡大したり、CO₂ 吸収量を増加させたりした場合が例として挙げられる．右下は参照レベルの低減を緩和させたケースである．海草場の減少・劣化の程度を軽減した場合に該当する．このケースでは、CO₂ 吸収・蓄積量を事業開始時点のレベ

ルまで回復してはいないが、参照レベルとの比較により便益を計上できる．

参照レベルを算出するための技術的な要件は、次章以降で解説する対象面積や面積当たりの炭素蓄積量や CO₂ 吸収排出量の時系列変化の計測手法に準ずる．しかしながら、環境事業が開始した後の時系列変動を予測するためには、環境事業開始前の海域か対照区となる海域で計測する必要がある．

事業開始前の対象海域の計測結果を使う場合、開始後の参照レベルを決定するためにその水域の時系列トレンドを推定する必要がある．もっとも単純な推定方法は、事業前の測定結果の値を不変と仮定して（図-2.1 の左上のケース）、事業開始後の測定結果との差分を便益として計上する方法である．この方法が有効なのは、対象水域が極めて安定している場所か、計測手法の結果が長い時間スケールを持つ場合（堆積物中炭素の計測手法）である．より高い精度で参照レベルを決定するためには、事業開始前の数年以上の継続調査から時系列トレンドを推

測するための環境モデルを構築する必要がある。なお、既に事業が開始した時点で事業開始前のデータを得るためには、過去の計測データなどを検索する必要がある。この場合、参照レベルの推定に必要なデータが得られるとは限らないという問題点がある。事業開始前の対象海域の代わりに対照区となる海域の計測結果を参照レベルとすることもできる。例えば、ある海域の海草藻場造成事業の評価をする場合、近隣の造成していない水域の測定結果を参照レベルとして、便益を計上することができる。この方法の利点として、モデルやトレンドなどの予測値ではなく、実際の計測値を参照レベルとして用いることができる点が挙げられる。したがって、比較サイトを適切に選択されていれば、最も高い精度で参照レベルを決定できる。ただし、調査後の継続的な調査が必要であるため、コスト面では時系列トレンドを使う方法と比較した場合との優劣は対照区の空間スケールや環境モデルの質に依る。

時系列トレンドと対照区を使う方法の選択基準は、対象海域よりは、環境事業の空間スケールに依るところが大きい。環境事業の空間スケールが大きくなるほど、対照区の選定が困難となるため、結果的に時系列トレンドを使うことになる。対照区を選定できる状況であれば、そちらを使うほうが精度・コスト面で有利であるが、対照区が対象海域の正確な代替海域となっている環境かどうか精査が必要である。検討項目としては、地形条件（水深、潮汐、外洋に対して閉鎖的か開放的か）や水質（水温、塩分、クロロフィル a 濃度など）、植生の分類や総バイオマス量などが挙げられる。

3. 対象面積の時系列変化の計測手法

対象海域の面積計測は対象海域全体の炭素貯留量やCO₂吸収排出速度を見積もる際に必須の項目である。対象海域の植生や規模に応じて適用する手法は異なる。必要とされる精度は10%程度と推測される。本章では、対象面積の計測手法として、現地測量調査とリモートセンシングの2つを検討する。

3.1 現地測量調査

現地測量調査は比較的規模の小さな「生物共生型護岸」、小規模な「海草藻場・干潟」等に適用される。護岸では生物が固着している護岸の延長距離を地上から測量する。海草藻場・海藻藻場など水中に没している植生の面積を測量する際は、複数のダイバー（通常はプロダイバーを雇用する）の潜水作業を伴う（写真-1）。GPSの測位シ



写真-1 潜水作業による海草藻場の面積測量の様子

ステムを用いた目視観察で植生の分布図を作成し、対象植生の分布面積（ha）を推定する。現地測量調査は多大な人的コストを要するため、広域での適用には限界がある。しかしながら、ある程度狭い範囲であれば、植生面積に関する情報を最も詳細に得ることができる。

3.2 リモートセンシング

リモートセンシングは、空中から撮影した画像をもとに植生の面積を解析する手法である。画像には大きく分けて衛星写真と空中写真に分けられる。衛星写真は、Passive data と Active data の2種類がある。前者は、太陽光か熱の反射を測定したもので、比較的安価で解析が容易である反面、日射角度や雲の影響を受けるデメリットがある。後者は、特定のパルス放射し、その反射の減衰過程などを測定する手法である。パルスの設定次第でPassive data では捉えられないデータを得られる反面、高価で解析が困難になる問題がある。

また、データ解像度もデータソース別に様々で、解像度が高いほど詳細な解析ができるが、コストやデータ解釈に要するリソースも大きくなる。衛星画像による分解能は数m～数十m程度であるため、比較的規模の小さな「直立護岸」、「生物共生型護岸」、「小規模な藻場・干潟」等には適さない。画像データから対象海域の面積を解析する手法としては、単純に目視で植生範囲を推定するものから、画像の色調を統計的に解析してより正確に面積を推定する方法までである（図-3.1）。得ることができるデータの量と精度は、解析元となる写真データの質と解析者の技術に依存する。

現在入手可能な衛星写真の代表的なものとして、Landsat や WorldView-2 などが挙げられる。ただし、対象水域のデータを得るためにはこれらの衛星が水域の上空にあるタイミングでなくてはならないため、利用者の希望する時期