

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

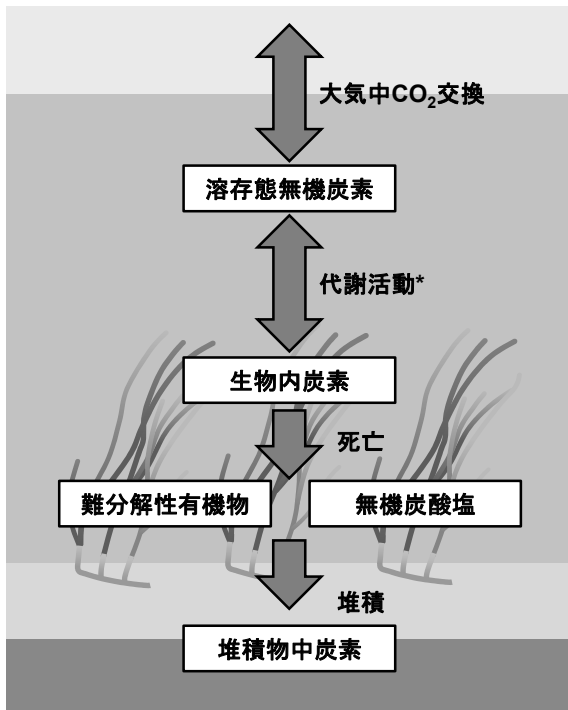


図-1.1 沿岸生態系のブルーカーボンフロー．*光合成，呼吸・分解，石灰化反応など

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。

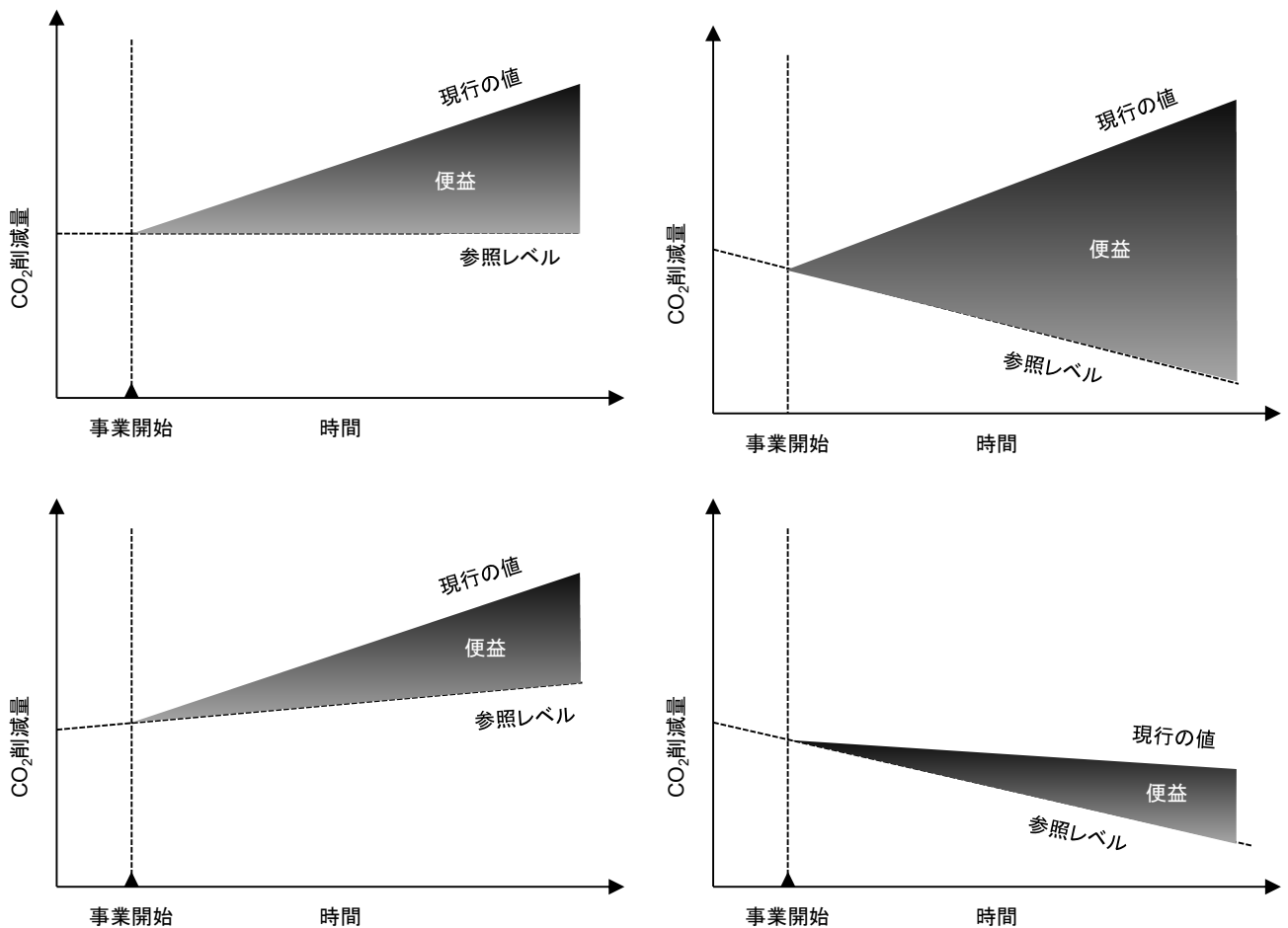


図-2.1 参照レベルと便益の関係性（文献 13 を改変）．事業開始後の参照レベルと現行の値との差分（図中の黒の箇所）が便益として計上できる．

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

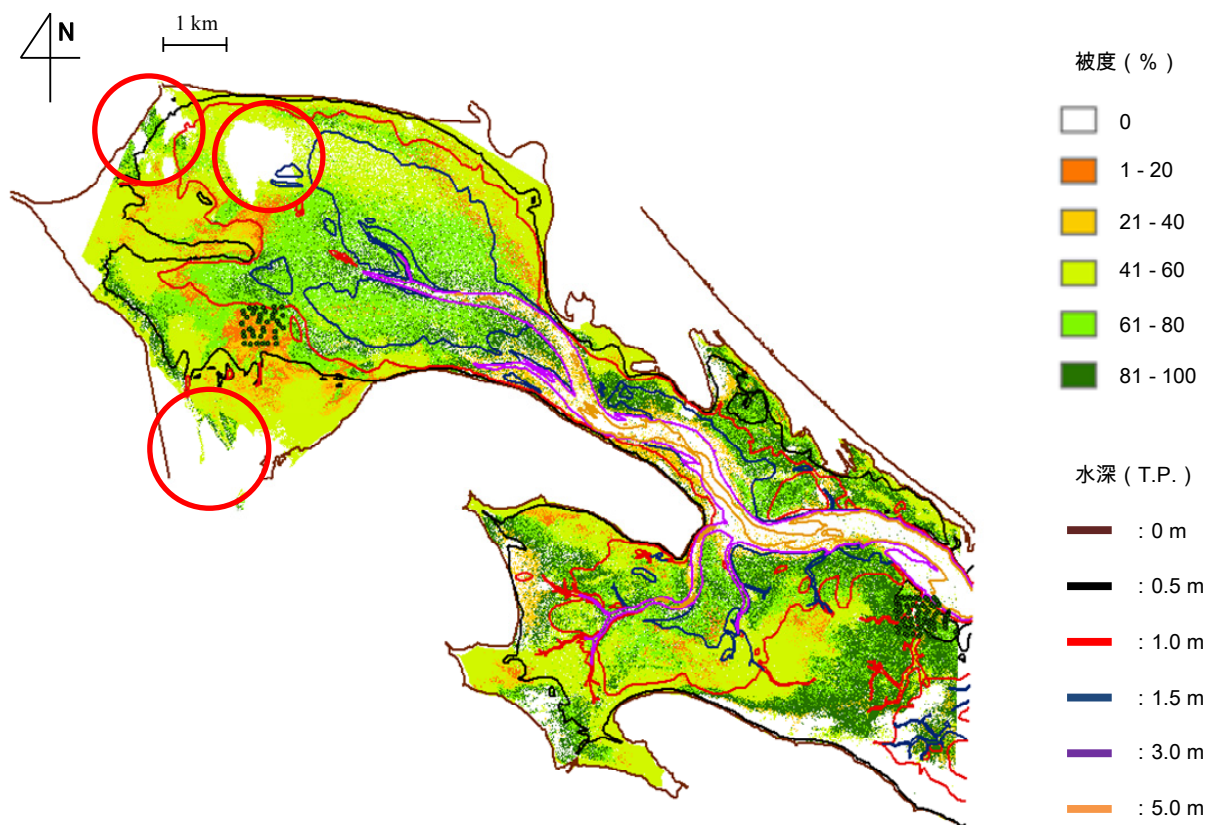


図-3.1 リモートセンシングによる海草藻場（北海報道風蓮湖）の面積の計測例（文献14を改変）．丸印の箇所は雲または雲の陰のため、「被度0%」と判定されているが実際には藻場がある．なお、水深のデータは測深図から読み取ったもの．

に得ることは難しい．衛星写真の金額はまちまちであり、web上から無料で手に入れられるものもあれば、1枚50万円程度のものもある．基本的に高額であるほど空間分解能が高く、赤外線などを含むスペクトルデータを持つため植生の分類が可能になるなど、得られるデータの質と量は向上する．

空中写真は、空中から対象水域を撮影して得られる画像である．気球や航空機を使って、使用者の任意のタイミングで写真データを得ることができる．しかしながら、写真の周辺にゆがみが生じるなど、衛星写真と比べると解析に使用できるデータに限度があり、現状では植生面積を大雑把に把握できる程度である．なお空中写真の1枚当たりの価格は、実質無料（自前で気球などを使った場合）から、数十万円以上（航空機のチャーターなど）と様々である．

「内湾」は水深が深く（干潟や海草海藻藻場を含まない）、大阪湾や東京湾などの海域を想定しているため、国土地理院の地図等から算定するのが望ましい．

3.3 計測に係る比較項目ごとの関係性

図-3.2に比較項目ごとの関係性を示した概念図、表-3.1に対象事業（海域）ごとの各計測手法の適用性についてまとめる．

現地測量調査は、信頼性（空間分解能）は最も高く、比較的簡易な手法であるが、データ取得数／コストが悪く、広域ではコスト面で不利になるという評価となった．一方、リモートセンシングは、空間分解能が低い、広域ではコスト面で有利で広域向けという評価である．衛星写真と空中写真との比較では、信頼性では衛星写真、簡易さでは空中写真の方が優れている．なお、空間分解能の問題から、生物共生型護岸のような狭いスケールには適用できないとした．リモートセンシングは信頼性・簡易さ共に、将来の技術開発で向上する見込みがある．

なお、内湾では地図で面積を算出する方法が最も簡易で信頼性の高い方法であるため、地図測量を最良の手法とした．

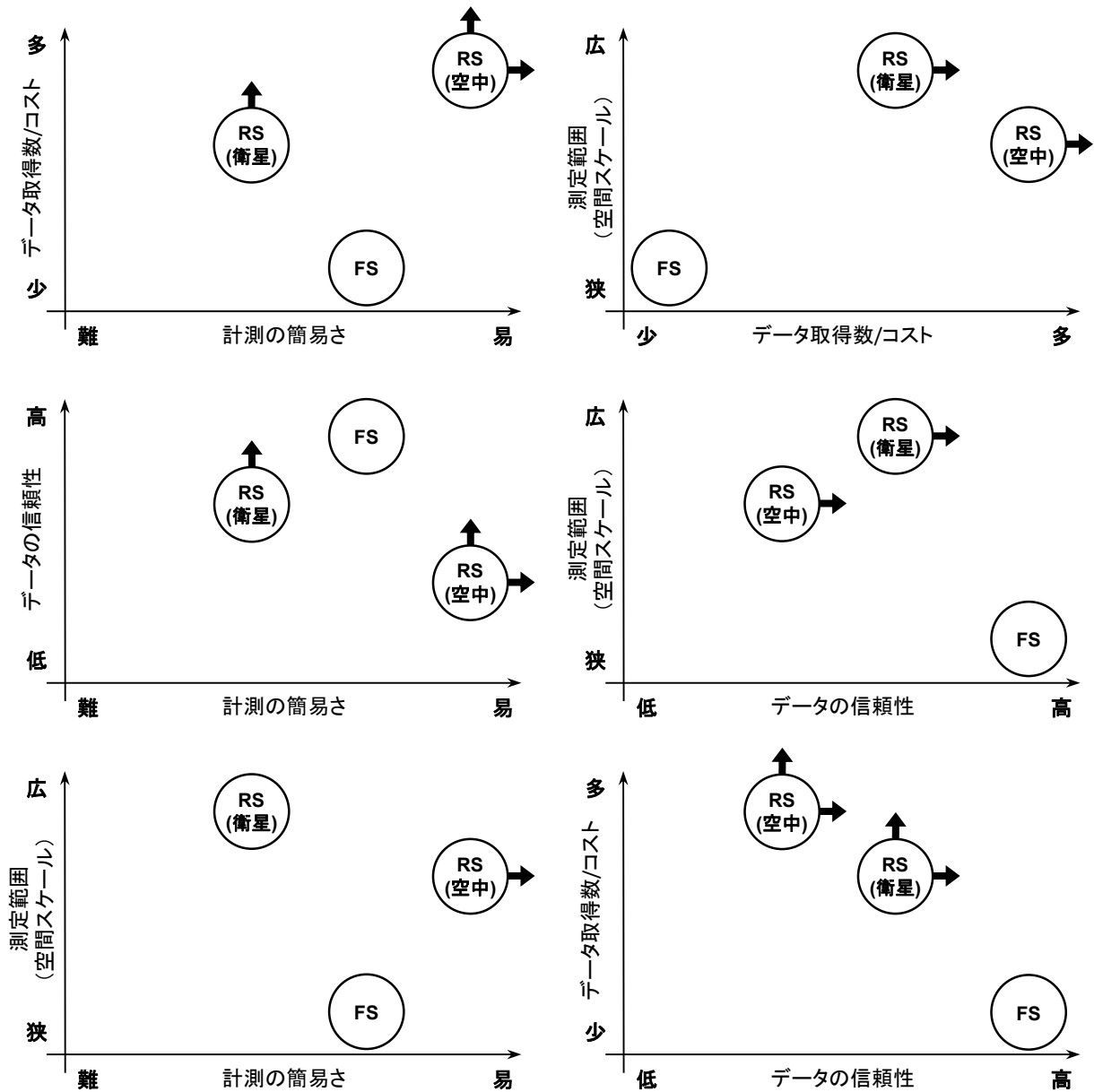


図-3.2 対象面積の計測手法の比較項目ごとの関係性. 図中の「データの信頼性」は、空間分解能（どれだけ細密なデータが得られるか）を示す. その他の項目については、1.2節を参照. 図中の矢印は将来の技術開発によって見込まれる改良の方向性. 図中の「FS」・「RS」は、それぞれ現地測量調査・リモートセンシングの略語である. なお、図中のプロットは相対的なものであり、コストなどを定量的に評価しているものではない.

表-3.1 対象面積の計測手法の対象事業（海域）ごとの適用性

対象事業（海域）		生物共生型護岸	海藻藻場・干潟	遠隔離島	内湾
空間スケール		狭			広
計測手法の適用性	現地測量調査	適	やや適 (コスト高)	不適 (コスト高)	地図等から計測
	リモートセンシング (衛星写真)	不適 (解像度不足)	適 (小規模： やや不適)	適	地図等から計測
	リモートセンシング (空中写真)	不適 (解像度不足)	適 (小規模： やや不適)	適	地図等から計測

4. 大気中CO₂交換量の計測手法

大気中CO₂交換量に係る計測手法について、各計測手法の種類と特性を考慮し、想定される対象海域に適した手法を提示する。要求される精度は0.1 μmol/m²/s以下で、計測手法は下記バルク法、フローティングチャンバー法、そして渦相関法が挙げられる。

4.1 バルク法

バルク法は、大気と海水間のCO₂分圧差と交換速度と呼ばれる海面上の風速などによって経験的に決定される係数を用いてCO₂フラックスを算出する方法である。大気-海水間のCO₂フラックスの測定手法としては最も良く使われている手法であり、現在、外洋によるCO₂吸収速度もこの手法で算出されている。ただし、交換速度の経験式は、主に外洋や十分に広い湖などの測定結果に基づいたものであり、水深や地理条件が多様な浅海域で適用可能かについては、議論の余地がある¹⁵⁻¹⁷⁾。

バルク法の計算式は、式(4.1)に示すとおりである。

$$F = kS(fCO_{2water} - fCO_{2air}) \quad (4.1)$$

fCO_{2water} と fCO_{2air} は、それぞれ海水中と大気中のCO₂分圧(μatm)である。海水に対するCO₂の溶解度 S (mol/m³/atm) は、水温と塩分の既存の経験式から算出される。交換速度 k (cm/hour) は、一般的に風速をパラメータとした経験式から決定される。

式(4.2)は、交換速度の経験式の一例である¹⁷⁾。

$$k = 0.39 \cdot U_{10}^2 \times \left(\frac{Sc}{660} \right)^{-0.5} \quad (4.2)$$

U_{10} は、水面から10 mの高さの風速で、現場の風速計やアメダスの観測データを高度補正¹⁹⁾して計算する。高度補正のためには、地表面粗度を決定する必要があり、アメダスのデータに関しては文献値²⁰⁻²²⁾を使用できる。 Sc はシュミット数と呼ばれる無次元数で、水温と塩分の経験式から算出される²³⁾。

式(4.1)における海水中と大気中のCO₂分圧は次のとおりを求める。

(1) 海水中CO₂分圧 (fCO_{2water})

海水中CO₂分圧は、専用の測器による自動計測、又は3つの炭酸系成分(DIC: 溶存無機炭酸濃度, TA: 全アルカリ度, pH)のうちの2つの値から平衡計算によって算

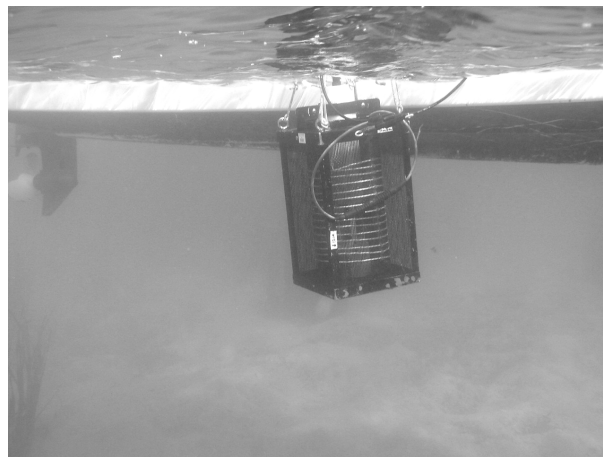


写真-2 ガス透過膜式平衡器 (写真の機器のサイズは30 cm×30 cm×50 cm程度)



写真-3 水中CO₂分圧用サンプルの採取の様子

出する²⁴⁾。専用の測器については、沿岸域のような浅い水域では非分散赤外線吸収法(NDIR)を使う手法が一般的である。NDIRは海水を直接扱うことができないため、ガス透過膜などの平衡器を併用する必要がある(写真-2)。これらの測器の精度は、0.01 μatm程度で、価格帯は数十～数百万円程度である。

平衡計算から算出する手法は大きく分けて下記の2種類が挙げられる。①採水サンプルから、滴定法で全アルカリ度(TA)と溶存無機炭素(DIC)を測定し、それらから算出する方法。250 mlの採水ビン(例:Duran® Schott社製)でサンプルを採取した後、200 μlの塩化第二水銀を添加して保存する方法が推奨される(写真-3)。滴定では、酸化還元電位と塩酸の添加量をGlanPlotと呼ばれる非線形式に近似させることでTAとDICを得ることができる²⁴⁾。市販の測器の測定精度は1 μmol/kg以下である。また、TAもしくはDICのみを測定する手法(オープンセル法

23) と pH の組み合わせから算出することも可能である。この手法では、市販の pH 計（例：HACH 社：HQ40d）で連続データを探ることができるため、分析手法を部分的に簡略化することができる。ただし、pH の精度については 0.001 以下という高い水準が要求される。採水作業の委託費の目安は、1 回の測定（10 サンプル程度を想定）当たり数十万程度である。採水試料の分析には、測器（例：ATT-05、紀本電子製、100 万円程度）を購入する必要がある。②塩分と pH から算出する方法。TA を増減させる石灰化・溶解反応が顕著な海域（サンゴ礁など）を例外として、塩分と TA の間には高い相関関係がある。したがって、塩分と比較的直接的な pH の組み合わせから、CO₂ 分圧を算出することが可能である。これらの 2 つの方法のうち、前者は高い精度で算出が可能な反面、現場での採水と特殊な機器を要するというデメリットを持つ。後者は塩分計と pH 計を設置すれば自動的に長期間のデータを得ることができる反面、塩分と TA の関係式を個別に算出する必要性や計算上の精度が悪いといった問題点がある。必要な精度や耐久性を持つ水温塩分計（精度：0.01 以下、数十万程度）や pH 計（精度：0.001 以下、百万円程度）を購入する必要がある。

(2) 大気中 CO₂ 分圧 (fCO_{2air})

前述の CO₂ 濃度計は、大気中の CO₂ 濃度を直接測定が可能である。または、国立環境研究所の観測データ (<http://db.cger.nies.go.jp/gem/ja/ground/> より、落石・波照間の観測データを入手可能)、もしくは妥当と考えられる推定値 (400 μatm) を用いることができる。

4.2 チャンバー法

チャンバー法は大別して、水面で使用するフローティングチャンバー法と堆積物上で使用する底生系チャンバー法の 2 種類がある。

フローティングチャンバー法は、水面に浮かべた中空の箱状の装置内部の CO₂ 濃度変動を連続的に測定することで、CO₂ フラックスを決定する手法である。大気-海水間 CO₂ フラックスを簡易な手法で直接測定できる利点がある。なお、この手法は、水面に物理的な影響を与えるため妥当性に関して様々な議論がなされているが、既存の研究²⁵⁾において静穏な環境では測定結果が妥当なものであるとされている。欠点としては、大気中の CO₂ 分圧を連続計測可能な機器を必要とする点（前述のバルク法における NDIR）、無人計測が困難であり、長期・広域測定に向かない点、そして構造上装置が転倒するような条件（荒天時・外洋域）では使用できない点が挙げられる。

本測定装置の市販品は確認されておらず、研究機関ご

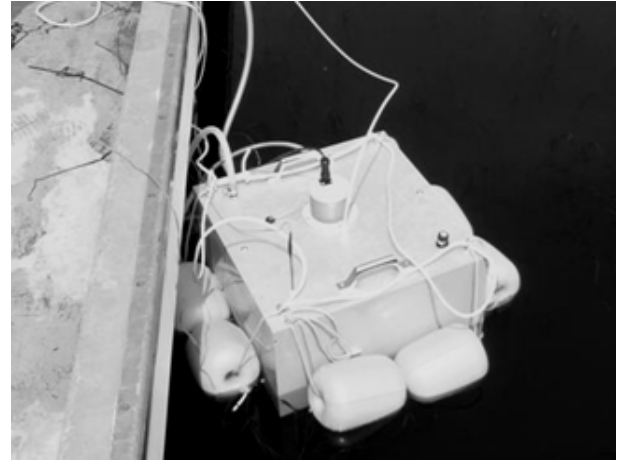


写真-4 別体式フローティングチャンバー装置（写真の機器のサイズは 50 cm×50 cm×20 cm 程度）



写真-5 一体式フローティングチャンバー装置。リージュ大学の HP より



写真-6 底生系チャンバー装置 (LI-COR8100A)。LI-COR 社の HP より（写真の右側の機器のサイズは 30 cm×40 cm×20 cm 程度）

とに設計したものが使われている。それらの例として、CO₂濃度計と別体式のタイプ(写真-4)と小型ブイと一体式のタイプ(写真-5)を挙げる。なお、この手法では測定中の装置内部の圧力変動により、内部のCO₂濃度の測定に誤差が生じることが指摘されており、内部圧力バッファや装置内部に補正用の圧力センサーの設置が推奨される。CO₂濃度計はバルク法の直接測定で使う機器と同じものが使える(数十~数百万円程度)。チャンバー装置自体は別体式では数十万程度(写真-4)で制作可能である。一体式の価格は数百万程度と予想される。

底生系チャンバー法は、原理自体はフローティングチャンバー法と同様であるが、水面に浮かべるのではなく、堆積物上に設置して使用する^{26, 27)}。測定の対象となるのは、前述の方法と異なり、大気と堆積物間のCO₂交換量である。計測手法としてはこちらが先行しており、市販品が存在する(例:LI-8100A, LI-COR社製, 写真-6)。価格は350万程度である。

4.3 渦相関法

渦相関法とは、乱流によって輸送される物質やエネルギー量(ガス・熱など)を直接測定する手法である²⁸⁾。無人で長期間に広範囲の測定が可能であるため、これまでに主に陸域のCO₂や水中O₂フラックスの測定に広く使われている。ただし、乱流成分や各データを高速で測定するため、高価な機材や精密な設置が要求される。渦相関法によるCO₂フラックスは、式(4.3)で示される。

$$F = \overline{\rho_c w'} \cdot F_1 + \mu \frac{\rho_c}{\rho_d} \overline{\rho_v w'} \cdot F_1 + \rho_c \left(1 + \mu \frac{\rho_v}{\rho_d} \right) \frac{\overline{T_a w'}}{T_a} \cdot F_2 \quad (4.3)$$

F は大気と海水間のCO₂フラックス(μmol/m²/s)、 F_1 と F_2 はCO₂濃度計や3次元超音波風速計の設置距離やそれぞれの測定空間分解能による誤差を補正するための係数である²⁹⁾。式中の第一項はCO₂濃度 ρ_c (mol/m³)と鉛直風速 w (m/s)の共分散を示しており、見かけ上のCO₂の鉛直フラックスを示している。式中の上バーとプライムは、それぞれ測定時間中(通常30分間)の平均値と、測定値の平均からの差分を示す。大気中のCO₂濃度の場合、湿度や気温の変化による空気塊の体積の変化により、実際はCO₂の移動が無い場合でも見かけ上のCO₂濃度変動が観測される。式中第2項と第3項は、それぞれ湿度と気温による空気塊の体積変化の影響を理論的に補正(WPL補正²⁸⁾)するものである。式中の μ は乾燥空気と

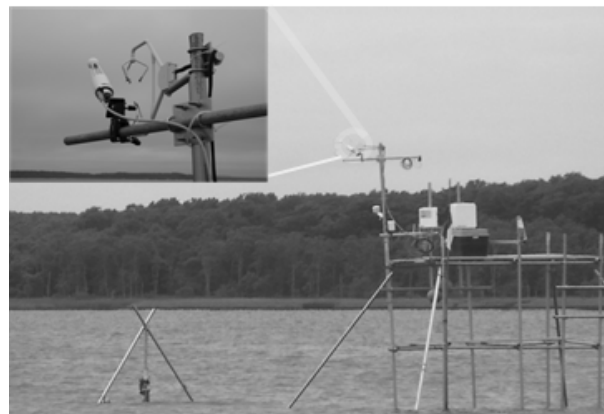


写真-7 海草藻場における渦相関装置設置の様子。上の写真は測定装置の外観(LI-7500A CO₂濃度計, CSAT-3 3次元風速計)。測器は水面から3-4mの高さに設置。

水蒸気モル比率、 ρ_d , ρ_v はそれぞれ乾燥空気密度と水蒸気密度(μmol/m³)である。 T_a は大気中の温度(K)である。

渦相関法で使用する主な機器は、専用設計となる高速測定が可能なCO₂濃度計(例:LI-7500A, LI-COR社製)と3次元超音波風速計(例:CSAT-3, Campbell社製)である。CO₂濃度計は、測定セル部分が解放されているタイプ(オープンパス型)と密閉されているタイプ(クローズドパス型)がある。前者は霧や降雨等による欠測のデメリットがあるものの、直接大気中のCO₂濃度を測定するため計算式を単純化できるメリットがあり、近年の主流となっている。

沿岸域で使用する場合、設置高さは運用上数m程度となるが(写真-7)、この場合の測定範囲は風上方向に数百mのオーダーになる。測定値はこの範囲の平均として計測されるため、これより狭い範囲では適用できない。

渦相関法の測器は非常に高額(一千万円程度)であり、また運用のためにはプラットフォームや電源の確保が必須となる(数十~数百万円)。また、1か月に最低1~2回程度のメンテナンスが推奨される。メンテナンスの内容は、電源の確認やセンサー動作の確認が主となる。

なお、渦相関法は大量のデータを扱うために、そのデータ品質管理が最大の課題となる。また、沿岸域の適用例が少ないため、独自の新たな品質管理手法の開発が必要となる²⁸⁾。下記は、品質管理手法の開発例³⁰⁾である。品質管理の内容は主にCO₂濃度と風速の鉛直成分の測定値の異常の除去と、CO₂フラックスには関係しない長期成分除去のためのハイパスフィルター処理である。図-4.1は、測定値の生データと今回開発した品質管理を行ったデータの時系列変化を示す。生データ(図上段)では平

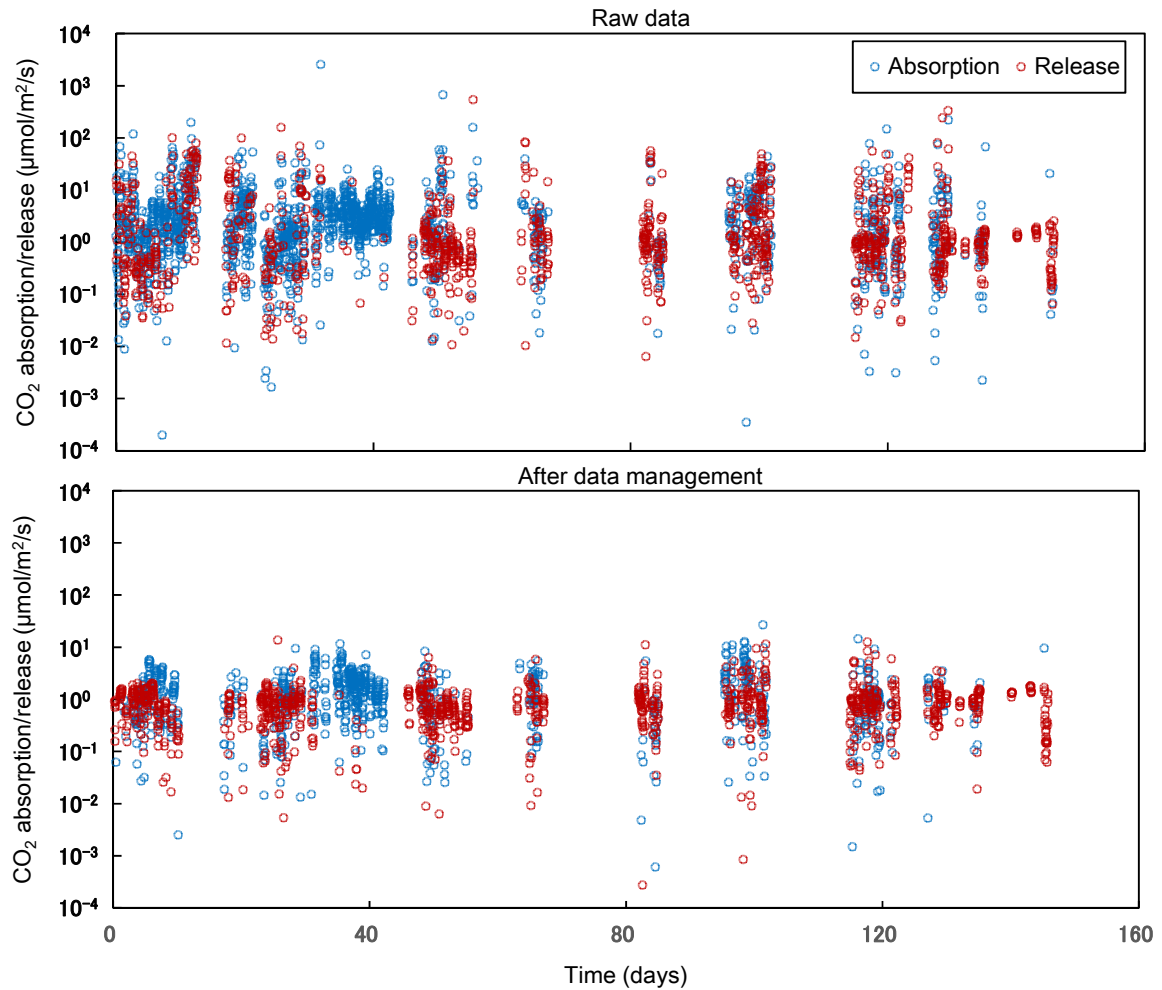


図-4.1 渦相関法の品質管理例横軸は測定開始からの日数。縦軸はCO₂吸収量（青）・放出量（赤）の対数値。生データ（上段）に対し、品質管理を行うことで、ばらつきが小さくなっている（下段）。

均 2.0 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ の吸収で非常に大きなばらつきを持っていたのに対し、品質管理後（図下段）の吸収量は平均 0.2 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ へ修正され、絶対値が不自然に大きなデータを除外することができた。今後の品質管理の課題としては、ハイパスフィルターの設定と CO₂ 濃度などが急激に変化するような条件の測定データの妥当性の検証、バルク法との比較検討が挙げられる。

4.4 計測に係る比較項目ごとの関係性

図-4.2 に比較項目ごとの関係性を示した概念図、表-4.1 に対象事業（海域）ごとの各計測手法の適用性についてまとめる。ただし、図は大気—海水間CO₂交換量の計測手法を比較したものであるため、底生系チャンバー法は表記していない。

バルク法は、最も簡易・低コストで、中程度の信頼性を持つ手法である。反面、1回の測定で得られる空間・時

間情報は限られるため、測定範囲・継続時間の評価は低い。広域では高コストになる傾向があるが、基本的にどの海域でも使用できる手法である。測器による自動計測は採水試料を用いる方法と比べて、より簡易で長い継続時間がある。ただし、採水試料からは、DICなどの関連する副次的なデータを得ることができる利点がある。フローティングチャンバー法は、測定範囲・継続時間はバルク法と同程度である。また、バルク法ほど簡易ではないが、信頼性は最も高いと評価した。ただし、内湾のような波の影響の強い海域では設置困難であることから適用外とした。渦相関法は、信頼性と簡易さが最も低い評価となったが、測定範囲と継続時間の評価が高く、データ取得数/コストも最も優れているとした。ただし、測定範囲の問題から生物共生型護岸のような狭いスケールには適用できないとした。また、データ品質管理手法の開発により、信頼性を向上できる可能性が高いとした。

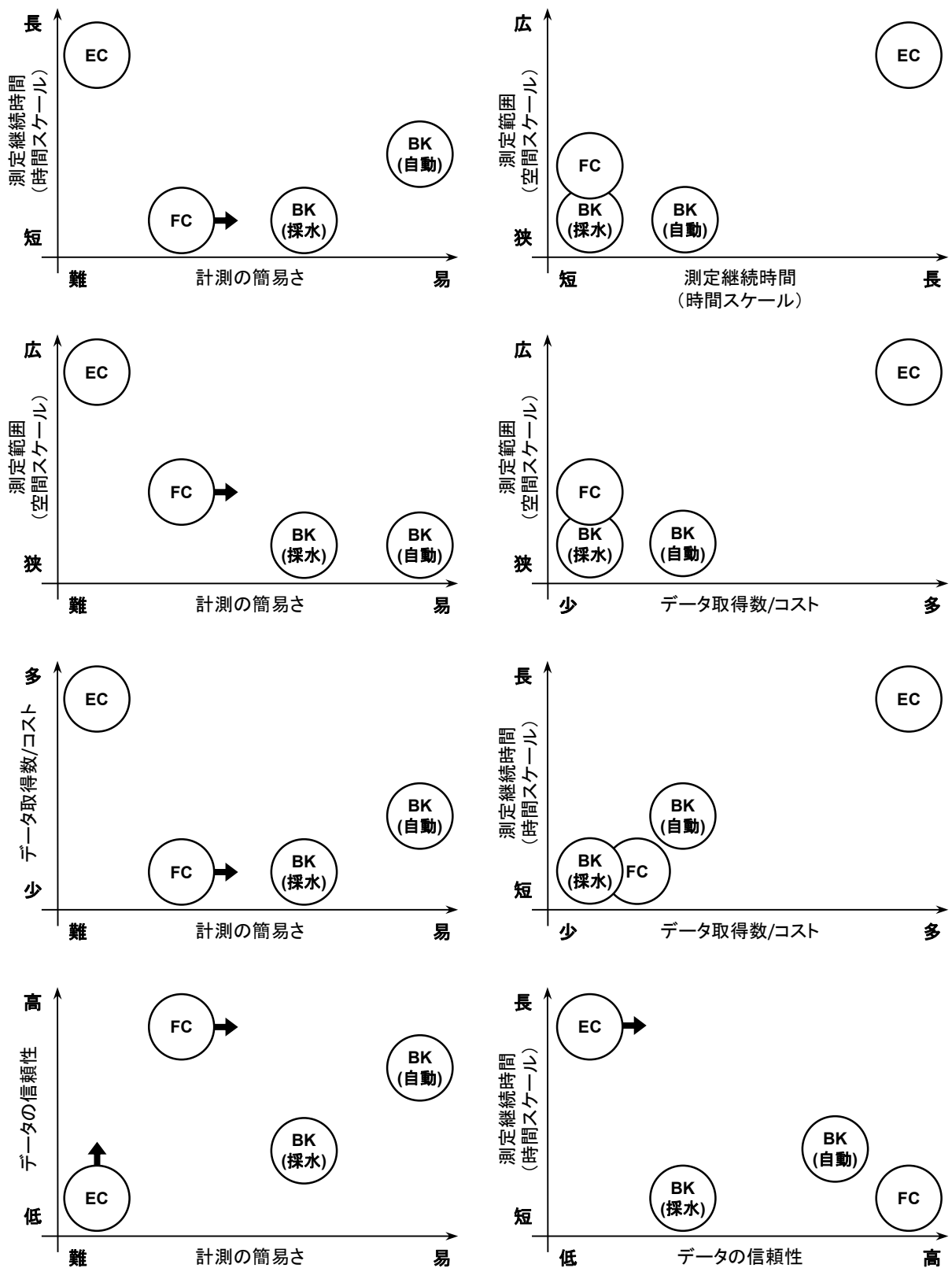


図-4.2 大気中CO₂交換量の計測手法の比較項目ごとの関係性 (次ページに続く)

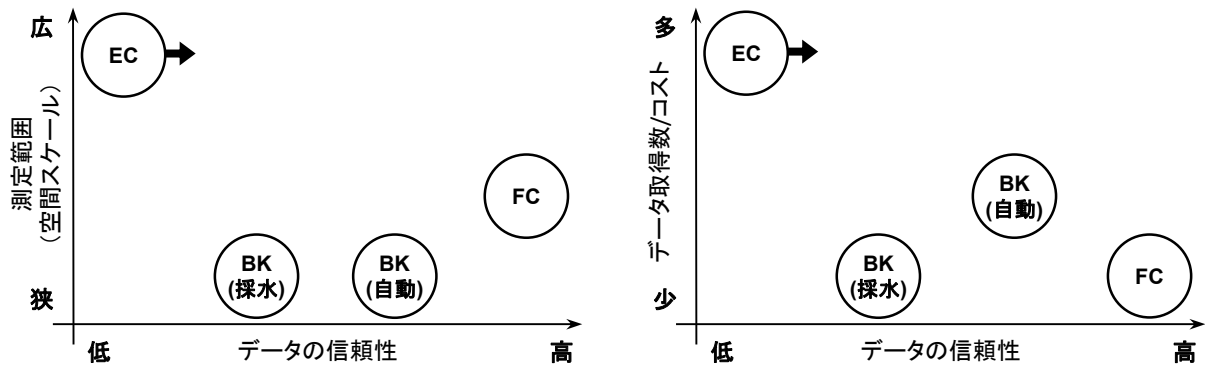


図-4.2 大気中CO₂交換量の計測手法の比較項目ごとの関係性(続き). 図中の「データの信頼性」は、精度(データのばらつき)の小ささと理論的に推測される確度(真の値にどれだけ近い)を示す. その他の項目については、1.2節を参照. 図中の矢印は、将来の技術開発によって見込まれる改良の方向性. 図中の「BK」・「FC」・「EC」は、それぞれバルク法・フローティングチャンバー法・渦相関法の略語である. なお、図中のプロットは相対的なものであり、コストなどを定量的に評価しているものではない.

表-4.1 大気中CO₂交換量の計測手法の対象事業(海域)ごとの適用性. *大気-堆積物間交換量

対象事業(海域)	生物共生型護岸	海草藻場・干潟	遠隔離島	内湾	
空間スケール	狭 → 広				
計測手法の適用性	バルク法	適	やや適 (測定範囲不足)	やや適 (測定範囲不足)	やや適 (測定範囲不足)
	フローティングチャンバー法	適	やや適 (測定範囲不足)	やや適 (測定範囲不足)	不適 (機器設置困難)
	底生系チャンバー法*	適	適	やや適 (測定範囲不足)	適用外
	渦相関法	不適 (空間スケール狭小)	適 不適 (数 km ² 以下の場合)	適	適

大気-堆積物間CO₂交換量の計測に適用できる手法は底生系チャンバー法と渦相関法である. 上記の図表内での評価は、それぞれフローティングチャンバー法と海域における渦相関法の評価に準じる. ただし、底生系チャンバー法は市販品が存在するため、簡易さはフローティングチャンバー法よりやや高い評価になる.

5. 生物内炭素量の計測手法

生物内炭素量は堆積物炭素ストックに比べると小さいが、沿岸域の重要な炭素ストックであり、海水中の無機・有機体炭素のフローを知る上でも重要な構成要素である. 沿岸域において生物内炭素量の大部分を占めるのは基礎生産者である植物であるため、本報告でも主に植物の総量(バイオマス)の計測手法に着目して検討する. 内湾を除いて対象となる生物は海底や基盤に繁茂する海草や海藻で、対象海域全体のバイオマスを算出するためには、

それらの植生面積と植生密度を計測する必要がある. 内湾での主な生産者は植物プランクトンで、単位面積当たりのバイオマス量はクロロフィルa濃度(葉緑体に含まれる色素)などの計測結果から推定する. それぞれに要求される精度は、植生の面積と同様に10%以下とする. 本章では、これらの値の計測手法として、現地調査とリモートセンシングによる画像解析およびそれらの複合的手法について検討する.

5.1 現地調査

現地調査による海草藻類のバイオマス計測は、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. 植生密度の測定では、コドラートと呼ばれる数十cm×数十cm(サイズは対象生物のサイズによる)の正方形の枠を水底に設置し、その枠内の生物全てを採取し、重量測定(湿重量・乾燥重量)と分類を行う(写真-8).

また、採集する生物に応じて中空のパイプ型コアやボツ

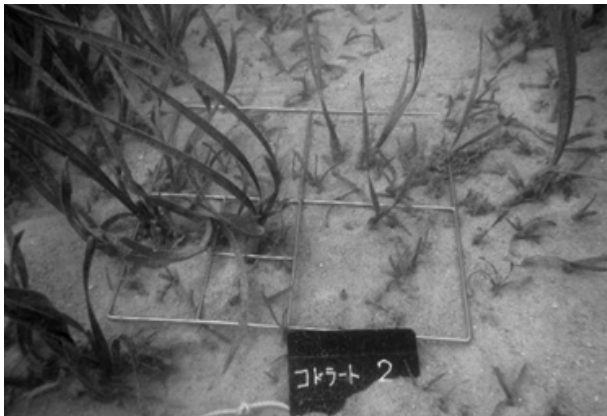


写真-8 コドラートの使用例



写真-11 植物プランクトン採取の様子

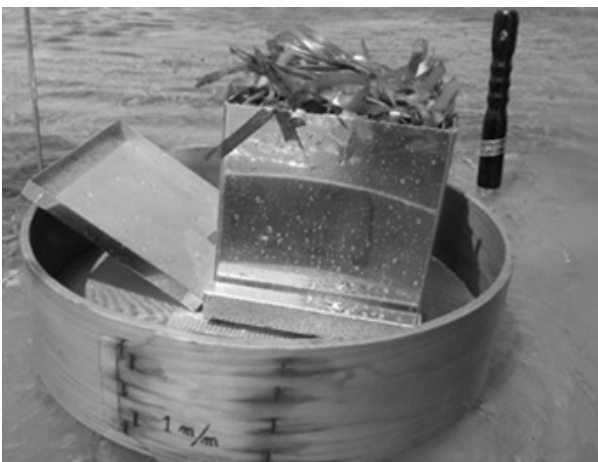


写真-9 ボックス型コアの使用例

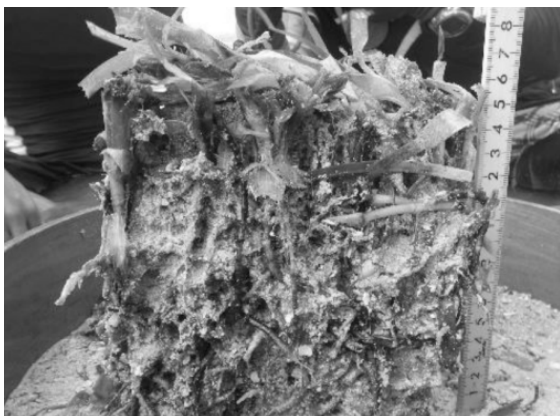


写真-10 写真-9のボックス型コアによって採取された海草の様子

クス型コア、ふるいなどを用いる(写真-9)。海草の場合は地上部に加えて地下部(根、根茎)のバイオマスも非常に重要で、地上部と地下部のバイオマスを別々に採取・計測する(写真-10)。こうして採取された生物の重量から炭

素量への換算係数により、面積あたりの生物炭素量(トン/ha)が計算される。植生の被度に応じて複数地点で面積あたりの生物炭素量を算出し、面積あたりの平均生物炭素量を計算する。これらの作業は、サンプル数や水域(特に深海域)次第では、多大な人的コストを要する。ここで得られた面積あたりの生物炭素量の空間的情報が詳細であるほど、後述するリモートセンシングによるバイオマス推定の精度は向上する。

遠隔離島におけるサンゴ礁については、無機炭素(炭酸カルシウム)も生物内炭素量に含まれる。しかしながら、生きているサンゴの採取は砂利採取法などによる法的規制があるため、海草のようなサンプリングは困難である。よって、潜水作業によりサンゴの被度種類、サイズなどから炭素量を計測する形になる。

内湾などの植物プランクトンがバイオマスとなる海域では採水作業が主になるため、潜水作業と比べて人的エフォートは低減される。よって、船舶などを使った移動採水調査は内湾における最適なバイオマス調査の一つである

(写真-11)。採水した試料中の植物プランクトン量から面積あたりの生物炭素量(トン/ha)を算出する。環境勾配(塩分など)を考慮して、複数地点で面積あたりの生物炭素量を算出し、面積あたりの平均生物炭素量を計算する。

このように計測した対象海域の面積(ha)と平均生物炭素量(トン/ha)を乗ずることで、対象海域の生物内炭素量を算出することができる。また、対象海域の生物内炭素を経年的に採取し、その差をモニタリングすることで、バイオマスへの炭素吸収量(フロー)を推定できる。

5.2 リモートセンシングとの複合的手法

リモートセンシングについて、3章で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を検討した。本

章では画像解析を利用した対象海域全体のバイオマス推定の手法について述べる。

画像については、植生の分類のための赤外線データを含むマルチバンド・スペクトル撮影が必要である。また、入手した衛星画像は平面情報のみであることから、水深や濁りなどの水面下の特性による影響や雲などの大気特性を排除することはできない。そこで GIS (地理情報システム) を用いて、現地調査で得られたバイオマスの分布データを統合することにより、海域全体の詳細なバイオマス分布を推定することが可能である (図-5.1)。

こうして解析されたバイオマス分布から対象海域全体の総バイオマス炭素ストックを推定する。ただし、現地観測とリモートセンシングの統合によるバイオマス計測手法は世界的にも開発段階にあり¹⁴⁾、得ることができるデータの量と精度は元のデータの質と解析者の技術に依存する。また、衛星写真の場合は、衛星が水域の上空にあるタイミングで、かつ晴天時でなくては十分な情報量の写真を取得できないため、利用者の希望する時期に得ることは難しい。

空中写真については、撮影者の望む時期にデータが入手できるため、衛星写真では困難な、植生の総バイオマスの季節変動解析への利用が期待される。ただし、マルチスペクトルカメラを搭載した空中写真の撮影の例がほとんどないため、今後の撮影技術の開発が必要である。

上記の画像を経年的に取得・解析することで、対象海域の総バイオマス炭素ストックを経年比較し、バイオマスへの炭素吸収量(フロー)を推定することができる。なお、衛星写真・空中写真のコストは、対象面積計測のためのリモートセンシング(3.2節参照)に準ずる。

5.3 計測に係る比較項目ごとの関係性

図-5.2に比較項目ごとの関係性を示した概念図、表-5.1に対象事業(海域)ごとの各計測手法の適用性についてまとめる。

現地調査は最も簡易・低コストである。しかし、測定範囲が狭く、広域になるほど信頼性(ここでは確度)が低下する。リモートセンシングとの複合的手法、特に広域における信頼性は向上するが、簡易さとコストは低い評価となる。なお、分解能の問題から、空間スケールが小さい生物共生型護岸にはリモートセンシングは適用外とした。

6. 堆積物中炭素の計測手法

ブルーカーボンとして吸収・固定された炭素の一部は、生物の枯死・沈降を経て堆積物中に埋没する。埋没した有

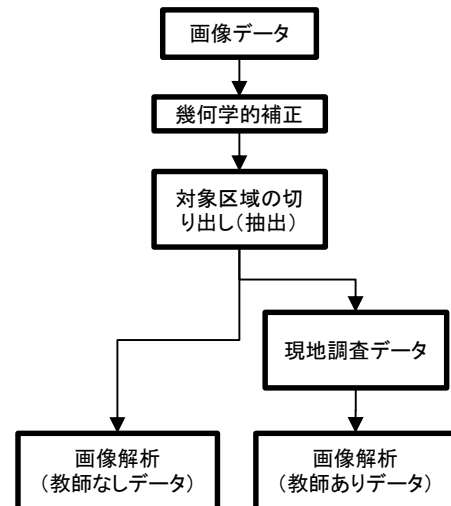


図-5.1 現地調査とリモートセンシングとの複合手法に関するフローチャート(文献14を改変)。「教師ありデータ」は現地調査データを含む解析結果で、生物内炭素量データを含む。

機態炭素の一部は生物・化学・物理的な分解を免れて大気中 CO₂ から長期間隔離される。そのため大気中 CO₂ の貯留プロセスとして極めて重要なものと認識されている。堆積物中炭素への大気中 CO₂ 吸収量は基本的に、堆積物中の有機炭素量(貯留量)を測定して、計算される。

堆積物中炭素への炭素貯留量の計測に際して、その難易度・精度・範囲などに応じていくつかの手法が考えられる。現在、国際的な炭素吸排出量評価の基準として提案されているものを表-6.1に示す。いずれの計測手法においても対象海域の炭素貯留量は単位面積当たりの貯留量と対象海域の面積の積として算出される。したがって、対象海域で吸収量が増えるということは1)面積あたりの炭素貯留量が増加するか、2)対象植生の面積が拡大することによって生じる。

国際基準(IPCCガイドライン)で用いられている階層である Tier 1 における沿岸生態系ごとの炭素貯留量デフォルト値は表-6.2に示すとおりである。Tier 1 において、例えば「1000 ha の海草場がある藻場造成事業において1200 ha に増加した」という事例を想定する。事業前の炭素ストック量は386000トン、事業後の炭素ストック量は463200トンなので、事業による炭素吸収量は77200トン(二酸化炭素吸収量は3.67を乗じて283324トン)と算出される。このように Tier 1 による算出は対象海域の植生面積さえ推定できれば算出できるため比較的容易である。しかしながら、表-6.2で示したようにデフォルト値には大きな誤差が含まれており、計算された吸収量の不確実性は非常に大きい。

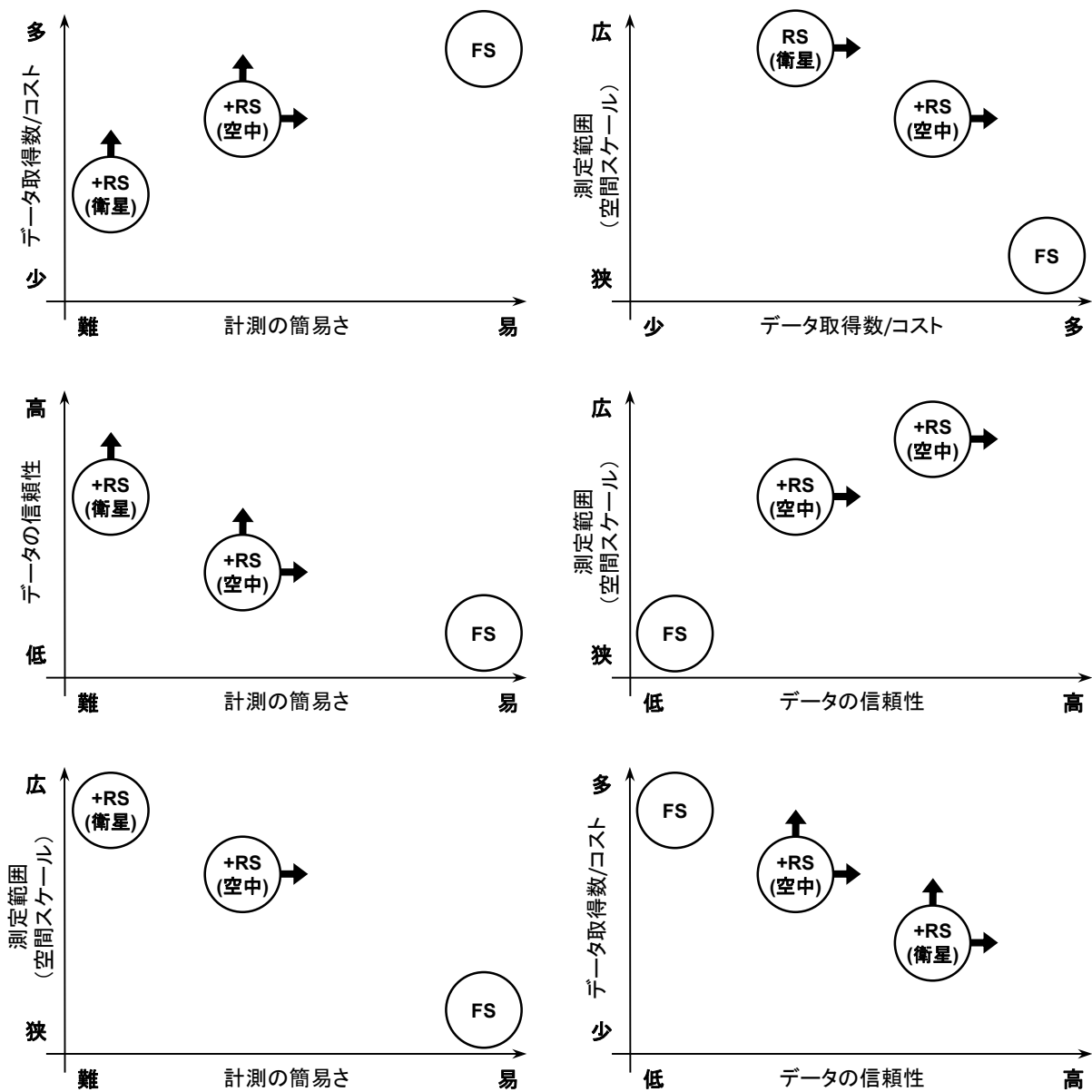


図-5.2 生物内炭素量の計測手法の比較項目ごとの関係性 (続き)。図中の「データの信頼性」は、理論的に推測される確度 (真の値にどれだけ近い)。その他の項目については1.2節を参照。図中の矢印は、将来の技術開発によって見込まれる改良の方向性。図中の「FS」・「+RS」は、それぞれ現地調査・現地調査とリモートセンシングとの複合手法の略語である。なお、図中のプロットは相対的なものであり、コストなどを定量的に評価しているものではない。

Tier 2 では国別にデフォルト値を設定して運用することになるが、より正確な吸収量を計算するためには多くの観測データが必要となる。しかし、日本のように海岸線延長が長く、緯度方向に多様な環境を有している国では必然的にデフォルト値の内包する誤差は大きくなる。

Tier 3は、下記に示す計測手法による実測値に該当する。対象海域ごとに炭素の貯留量を詳細に測定するため精度は最も高くなる。Tier 1,2のデフォルト値の基になるため、Tier 3データを充実させることで、こちらの計算精度も向上

していく。本資料では、Tier 3に該当する、各対象海域の炭素貯留量を時系列的に計測する手法についてまとめる堆積物中炭素は対象海域ごとの貯留量 (ストック) の測定と、その水域に貯留される速度 (フロー) を測定する手法がある。最終的なフローに要求される精度は0.001トン/ha以下である。

6.1 炭素貯留量の計測手法

ここでは測定が比較的容易な炭素貯留量 (ストック)

表-5.1 生物内炭素量の計測手法の対象事業（海域）ごとの適用性

対象事業（海域）		生物共生型護岸	海草藻場・干潟	遠隔離島	内湾	
空間スケール		狭				広
計測手法の適用性	現地調査	適	やや不適 (精度低)	やや不適 (精度低)	やや不適 (精度低)	
	現地調査+ リモート センシング (衛星写真)	不適 (解像度不足)	やや適 (精度高, コスト高)	やや適 (精度高, コスト高)	やや適 (精度高, コスト高)	
	現地調査+ リモート センシング (空中写真)	不適 (解像度不足)	やや不適 (精度中, コスト高)	やや不適 (精度中, コスト高)	やや不適 (精度中, コスト高)	

表-6.1 堆積物中への炭素吸排出量. 計測手法の国際基準^{11), 12)}. 炭素貯留量は面積当たり（泥深 1 m）に堆積している炭素量を示す.

計測手法の階層	必要なデータ	備考
Tier 1 (易)	対象海域の面積 (ha) 炭素貯留量のデフォルト値 (トン/ha)	大きな計測誤差 (±90%) 面積, 植生情報だけで計算可
Tier 2 (中)	対象海域の面積 (ha) 炭素貯留量の国別デフォルト値 (トン/ha)	Tier 1 より高精度 国としてデータを収集する必要
Tier 3 (難)	対象海域の面積 (ha) 炭素貯留量の計測値 (トン/ha)	Tier 1, 2 より高精度 対象海域の詳細なデータを収集する必要. 継続的現場観測や数値計算が必要.

表-6.2 国際基準の Tier 1 における沿岸生態系ごとの炭素貯留量デフォルト値¹²⁾

植生タイプ	炭素貯留量 (トン/ha)	値の範囲 (トン/ha)	CO ₂ 換算 (トン/ha)
海草場	386	55 ~ 1376	1415
塩性湿地	255	16 ~ 623	935
マングローブ	108	10 ~ 829	396



写真-12 長尺コアによるサンプル採取の様子



写真-13 長尺コアの分割・分析試料採取



写真-14 短尺コアの採取・分析試料採取

の計測手法について述べる. 計測は対象海域の堆積物を採取して「有機炭素含有量」を計測し, 面積あたりの炭素貯留量を計算する. 炭素貯留量を正確に定量するためには, 堆積物コア（理想は表層から 1 m 深まで）を対象海域において複数採取し, 以下の 3 項目を計測する.

- 1) 泥深
- 2) 乾燥泥密度
- 3) 有機炭素量 (OC)

乾燥泥密度, 有機炭素量 (OC) は一般に地点間および泥深でばらつきが大きいので, 対象海域のスケールが大きいほど複数試料を採取する必要がある (表-6.4 を参照).

(1) 堆積物コアの採取・分割

堆積物の採取は柱状のコアにより実施する. 対象海域のスケールが大きく, 環境勾配 (淡水の流入や底質の変化) がある場所では, その環境勾配に沿って複数地点で

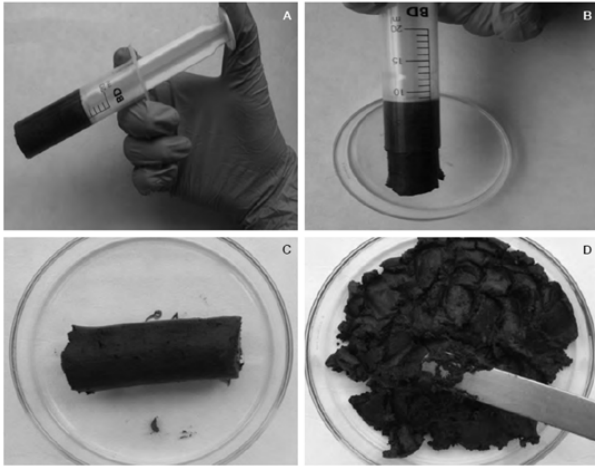


写真-15 泥試料の体積を定量する方法¹²⁾。シリンジで一定体積の泥試料を採取し、(B,C)それを押し出す。(D)均等にならして乾燥機にかける。



写真-16 元素分析計 (Thermo Finnigan 社製 Elemental Analyzer)

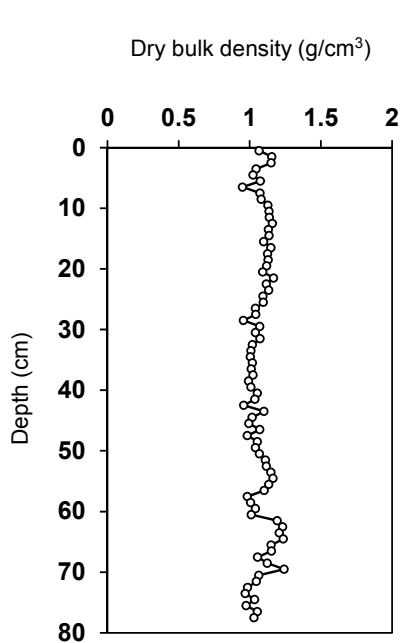


図-6.1 乾燥泥密度の測定例。横軸は乾燥泥密度、縦軸は深度

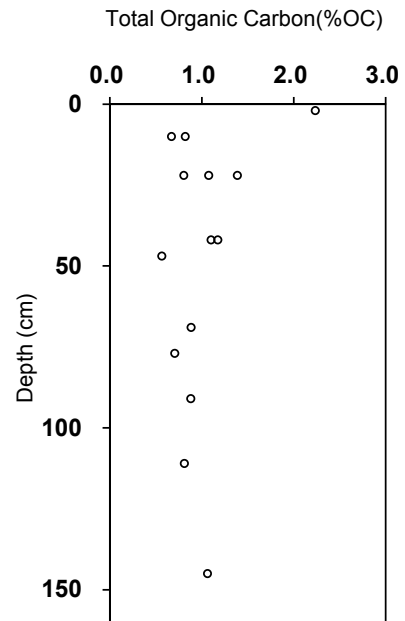


図-6.2 有機炭素量の測定例。横軸は全有機炭素量、縦軸は深度

の採取が必要である。泥深 1 m 以上の長尺コアを採取するのが理想的である²⁹⁾。長尺コア採取は塩ビパイプやスチールパイプを打撃し、土中に陥入させることで実施する (打撃式サンプリング; 写真-12)。採取してきた長尺コアは半分に分割し、泥深ごとに分析試料の採取を行う (写真-13)。

資材やコストの問題で長尺コアの採取が難しい場合は、～50 cm 程度の短尺コアを採取する。短尺コア採取も塩ビパイプやアクリルパイプを土中に陥入させることで実施する (写真-14)。採取した短尺コアから泥深ごとに分析

試料の採取を行う (写真-14)。採取した分析試料は凍結保存し、乾燥泥密度・有機炭素量の計測に用いる。

(2) 乾燥泥密度の計測

乾燥泥密度は以下の式 (6.1) で算出される。

$$\text{乾燥泥密度 (g/cm}^3\text{)} = \frac{\text{乾燥泥重量 (g)}}{\text{泥試料の体積 (cm}^3\text{)}} \quad (6.1)$$

泥試料の体積は各泥深から採取した分析試料を体積既知のシリンジ等で採取する方法がある (写真-15)。この

表-6.3 強熱減量 (LOI) から有機炭素量 (OC) への換算式¹²⁾

植生タイプ	換算式	データソース
海草場 (LOI<0.2)	$OC = 0.40 \times LOI - 0.21$	世界中の海草場 ³²⁾
海草場 (LOI>0.2)	$OC = 0.43 \times LOI - 0.33$	世界中の海草場 ³²⁾
塩性湿地	$OC = 0.40 \times LOI + 0.0025 \times (LOI)^2$	アメリカの塩性湿地 ³³⁾
マングローブ	$OC = 0.415 \times LOI + 2.89$	パラオのマングローブ ³⁴⁾

泥試料を 60℃ のオーブンで乾燥させ、秤量することで乾燥泥重量を得る。乾燥泥重量と体積から、泥深ごとの乾燥泥重量と体積から、泥深ごとの乾燥泥密度が算出される (図-6.1)。

(3) 有機炭素量の計測

有機炭素量の計測は、元素分析計による直接測定と強熱減量からの換算の 2 つの計測法に大別できる。

1) 元素分析計による直接測定

上記で泥深ごとに採取して乾燥させた分析試料を均質にすりつぶす。すりつぶした分析試料に含まれる炭酸カルシウム (無機炭酸) を除外するために、塩酸を滴下して再度乾燥させる。前処理した試料を元素分析計 (写真-16) により分析して、有機炭素量を計測する (図-6.2)。この方法は、有機炭素量を直接測定するため、高い精度で計測できるが、元素分析計という特殊な化学分析装置を必要とするため、コスト高になる傾向がある (委託費: 1 検体二万円程度)。

2) 強熱減量からの換算

強熱減量とは堆積物中の有機物量の指標であり、高温処理によって燃焼する物質重量のことである。上記で泥深ごとに採取して乾燥させた分析試料を均質にすりつぶし、前処理した試料をマッフル炉で 450℃ で 4 時間以上加熱する。強熱減量 (LOI) は以下の式で算出される。

$$LOI (\%) = [\text{燃焼前の乾燥泥重量 (mg)} - \text{燃焼後の乾燥泥重量 (mg)}] / \text{燃焼前の乾燥泥重量 (mg)} \times 100 \quad (6.2)$$

強熱減量は様々な元素を含む有機物全量を反映するため、有機炭素量 (OC) は表-6.3 の換算式で計算される。植生によって有機物の質が異なるので換算式も複数用意する。この方法では、特殊な機器を必要とせず、コストを抑えられるが、換算式に不確実性を含んでいる。

(4) 炭素貯留量の計算

炭素貯留量は以下の手順 1) ~ 5) で算出する。

1) 泥深ごとに炭素密度を以下の式 (6.3) で算出する。

$$\begin{aligned} & \text{炭素密度 (gC/cm}^3\text{)} \\ & = \text{乾燥泥密度 (g/cm}^3\text{)} \times \text{有機炭素量 (OC [mg/g])} \quad (6.3) \end{aligned}$$

2) 分割したコアの画分ごとに炭素量を算出する。

$$\begin{aligned} & \text{コア画分の炭素量 (g/cm}^2\text{)} \\ & = \text{炭素密度 (gC/cm}^3\text{)} \times \text{コア画分の厚さ (cm)} \quad (6.4) \end{aligned}$$

3) 各コア画分の炭素量を積分し、泥深 1 m 分のコア炭素貯留量を算出する。

$$\begin{aligned} & \text{コア炭素貯留量 (g/cm}^2\text{)} \\ & = \text{コア画分 1} \sim \text{X の炭素量 (g/cm}^2\text{) の合計} \quad (6.5) \end{aligned}$$

*1 m 未満の短尺コアを採取した場合、最も深いコア画分の炭素量からその下の炭素量を推定する。そのため長尺コアに比べると誤差が大きくなる。

4) 対象海域の平均炭素貯留量を算出する。

$$\begin{aligned} & \text{平均炭素貯留量 (g/cm}^2\text{)} \\ & = \text{コア 1} \sim \text{X の炭素貯留量 (g/cm}^2\text{) の平均} \quad (6.6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{平均炭素貯留量 (トン/ha)} \\ & = \text{平均炭素貯留量 (g/cm}^2\text{)} \times 100 \quad (6.7) \end{aligned}$$

5) 対象海域の総炭素貯留量を算出する。

$$\text{総炭素貯留量 (トン)} = \text{平均炭素貯留量 (トン/ha)} \times \text{対象海域の面積 (ha)} \quad (6.8)$$

6.2 炭素貯留速度の計測手法 (経年比較法)

前節の計測手法に従って得られた対象海域の総炭素貯留量は現在蓄えられているストックであり、大気中 CO₂ の吸排出量 (フロー) を表すものではない。大気中 CO₂ の吸排出量を計測するためには、総炭素貯留量の経年変化 (最低 2 点) をおさえる必要がある (図-6.3)。

炭素貯留量の経年変化による大気中 CO₂ の吸排出量の評価は陸上での評価手法を踏襲した一般的な方法で、高い技術力がなくても実施することが可能である。しかし、経年的に複数回大規模な調査を実施する必要がある。また、通常大気中 CO₂ の吸排出量はストックに比べて小さい値になることが多いため、炭素貯留量に大きな変化がない場合はその違いを検知することが難しいという精度

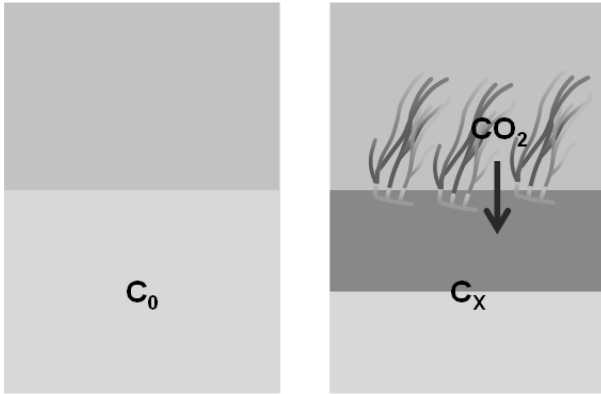


図-6.3 経年比較法の原則

0年目の総炭素貯留量を C_0 、X年目の総炭素貯留量を C_x とすると1年あたりに貯留された炭素量は $(C_x - C_0) / X$ (トン/年)となる。

の問題がある。

6.3 炭素貯留速度の計測手法（年代測定法）

ここでは堆積物の堆積年代を測定することで、直接的に炭素貯留速度（大気中 CO_2 の吸排出量）を計測する手法を述べる。経年比較法と比べると特殊な機器による高度な分析を必要とするために、資材・コストの面で比較的難しい手法である。しかし、経年的な測定は必要なく、また精度も良いため利点も多い。計測は対象海域の堆積物を採取して上述の手法により「コア炭素貯留量」を計測し、そこに「土砂堆積速度」をあてはめることで計算される。「コア炭素貯留量」と「土砂堆積速度」は一般に地点間でばらつきがあるために、対象海域のスケールが大きいほど複数試料を採取する必要がある（表-6.4を参照）。また砂質堆積物中に存在する放射性元素は泥質堆積物に比べて微量であるため、砂質海域における推定精度は悪くなる。

埋没速度の推定は一般的に放射性同位元素の堆積物中における放射壊変による減衰を利用して推定される。時間スケールにより様々な手法が用いられるが、本稿では1000年スケールの土砂堆積速度については放射性炭素 (^{14}C)、数10~100年スケールの土砂堆積速度については放射性鉛 (^{210}Pb) および放射性セシウム (^{137}Cs) を用いた方法を適用する。

1) 放射性炭素 (^{14}C) による測定手法

^{14}C は5730年の半減期を持つ炭素の放射性同位体で、約45000年前までの年代測定に用いられる。一般に、 ^{14}C 法による炭素年代は、Libby Age (yrBP) と呼ばれる1950年を基準年 (0 yrBP) として遡る年代で表される。堆積物中に埋没する有機態炭素そのものの年代を測定するため、

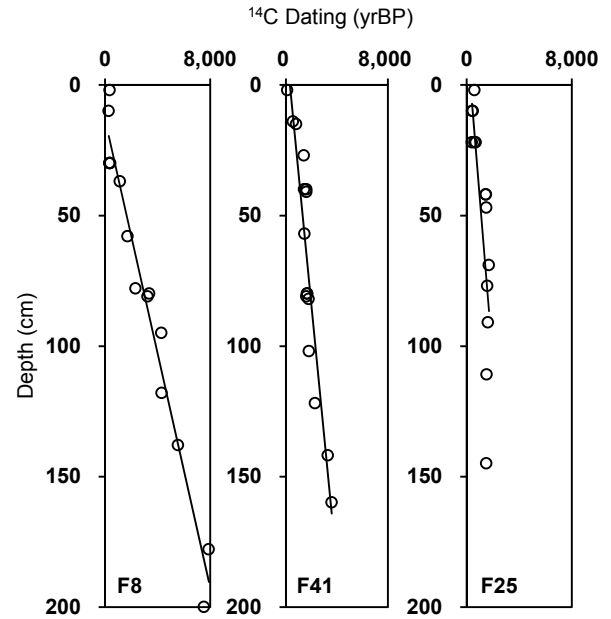


図-6.4 炭素年代の測定例（北海道風蓮湖の海草場の堆積物）傾きから算出された土砂堆積速度は0.2 mm/年 (F8)、0.5 mm/年 (F41)、0.6 mm/年 (F25)。

土砂堆積速度の算出に適していると考えられる。測定の前処理として堆積物サンプルの分析試料を乾燥後、全試料をすりつぶし、酸処理により炭酸カルシウム（無機炭素）を取り除く。加速器質量分析計をベースとした ^{14}C -AMS専用装置（NEC社製）を使用し、前処理を施した試料を上記の測定に用いる。得られた各泥深の炭素年代から土砂堆積速度を算出する（図-6.4）。委託費は1検体六万円程度である。

2) 放射性鉛 (^{210}Pb) および放射性セシウム (^{137}Cs) による測定手法

^{14}C 法では1950年以降の年代測定が困難であることから、数10~100年スケールの土砂堆積速度については ^{210}Pb および ^{137}Cs を用いた方法を用いる。 ^{210}Pb は微小粒子の形で空气中を循環しており、毎年概ね一定の量が堆積物に移行する。 ^{210}Pb は半減期22.2年で壊変するため、堆積深度が深くなるにつれて少なくなる。 ^{210}Pb 法は一般に約100年前に堆積した堆積物まで適応可能である。 ^{137}Cs は主に大気圏原水爆実験や原子力発電所の事故により放出された放射性物質である。従って、 ^{137}Cs が放出され始めた1950年代前半や、大きな原子力発電所の事故があった1986年、2011年などの推定が可能である。堆積物試料を乾燥後、低バックグラウンド仕様の井戸型ゲルマニウム半導体検出器（写真-17）を用いて分析し、数値解析により土砂堆積速度を算出する（図-6.5）。委託費は1検体



写真-17 低バックグラウンド仕様の井戸型ゲルマニウム半導体検出器

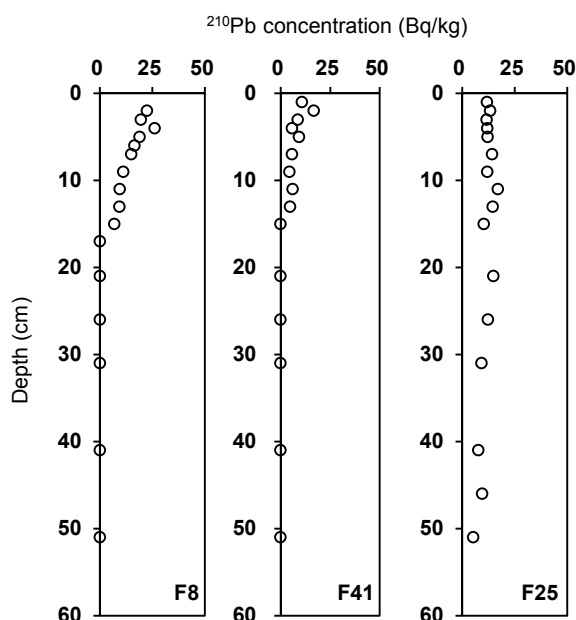


図-6.5 ^{210}Pb の測定例（北海道風蓮湖の海草場の堆積物）。数値解析から推定された土砂堆積速度は3.2 mm/年（F8）、0.9 mm/年（F41）、5.4 mm/年（F25）。

十万円程度である。

放射性炭素 (^{14}C) による測定手法、もしくは放射性鉛 (^{210}Pb) および放射性セシウム (^{137}Cs) による測定手法で得られた「土砂堆積速度」と「コア炭素貯留量」から、炭素貯留速度を計算する。ここで計算される炭素貯留速度はその場における数千年スケールおよび数十～百年スケールの平均的な貯留速度を表す。炭素量を CO_2 に換算すれば一度の計測で大気中 CO_2 吸収量を推定することができる。例えば北海道風蓮湖での観測例では、 ^{14}C 法により炭素貯留速度は年間0.04～0.09 トン/haであり、対象海域の面積が5740 haであることから、対象海域における炭

素貯留速度は年間225～518 トン、堆積物への CO_2 隔離速度は825～1900 トンと算出される。

6.4 計測に係る比較項目ごとの関係性

図-6.6に比較項目ごとの関係性を示した概念図、表-6.4に対象事業（海域）ごとの各計測手法の適用性についてまとめる。

経年比較法は、簡易であるが、信頼性（ここでは時間分解能）、データ取得数/コストともに低い評価とした。特に広域で空間変化が大きい場所では多量のサンプルが必要となり、精度も悪化することから、内湾のような公スケールでは適用できないとした。元素分析計を使う場合と強熱減量を使う手法を比較した場合、前者は信頼性、後者はコスト面で有利である。年代測定法は、特殊な機器による高度な分析を必要とするため、簡易さの評価は低い。ただし、信頼性や測定範囲、データ取得数/コストといったそのほかの項目は高い評価となった。なお、本資料では堆積物中の有機炭素を計測対象としているため、それらが少ない生物共生型護岸と遠隔離島（サンゴ礁を想定）は適用外とした。なお、炭素同位体 (^{14}C) を使う方法は鉛 (^{210}Pb) を使う方法と比べて若干簡易・低コストであるが、両者は対象とする貯留速度の時間スケールによって使い分けるべきである。

7. 結論

港湾環境事業における CO_2 吸排出量算定のための計測手法の開発と体系化は喫緊の課題である。本資料では、 CO_2 吸排出にかかる計測の要件を整理し、それらに関する複数の計測手法を環境事業（海域）ごとに比較・検証した。その結果として、環境事業（海域）ごとに最適と評価した手法について表-7.1にまとめる。表では、各測定項目における比較検討をもとに、「総合的な精度」と「簡易さ・コスト」を重点項目として、それぞれの項目で最適と評価した計測手法を記載している。なお、「総合的な精度」とは、「信頼性」や「測定範囲」、「測定継続時間」などを総合し多評価である。特に空間分解能に関しては、対象となる海域で1～数点以上のデータの取得が可能であることを選択基準とした。時間分解能においては、季節変化や経年変化の把握が可能な手法を想定している。ただし、堆積物中炭素の項目に関しては、技術的な限界から、対象となる時間分解能は数年～数千年のオーダーである。「簡易さ・コスト」は、「計測の簡易さ」と「データ取得数/コスト」を総合したもので、イニシャルコスト・ランニングコストとも低コストで計測手法が簡易

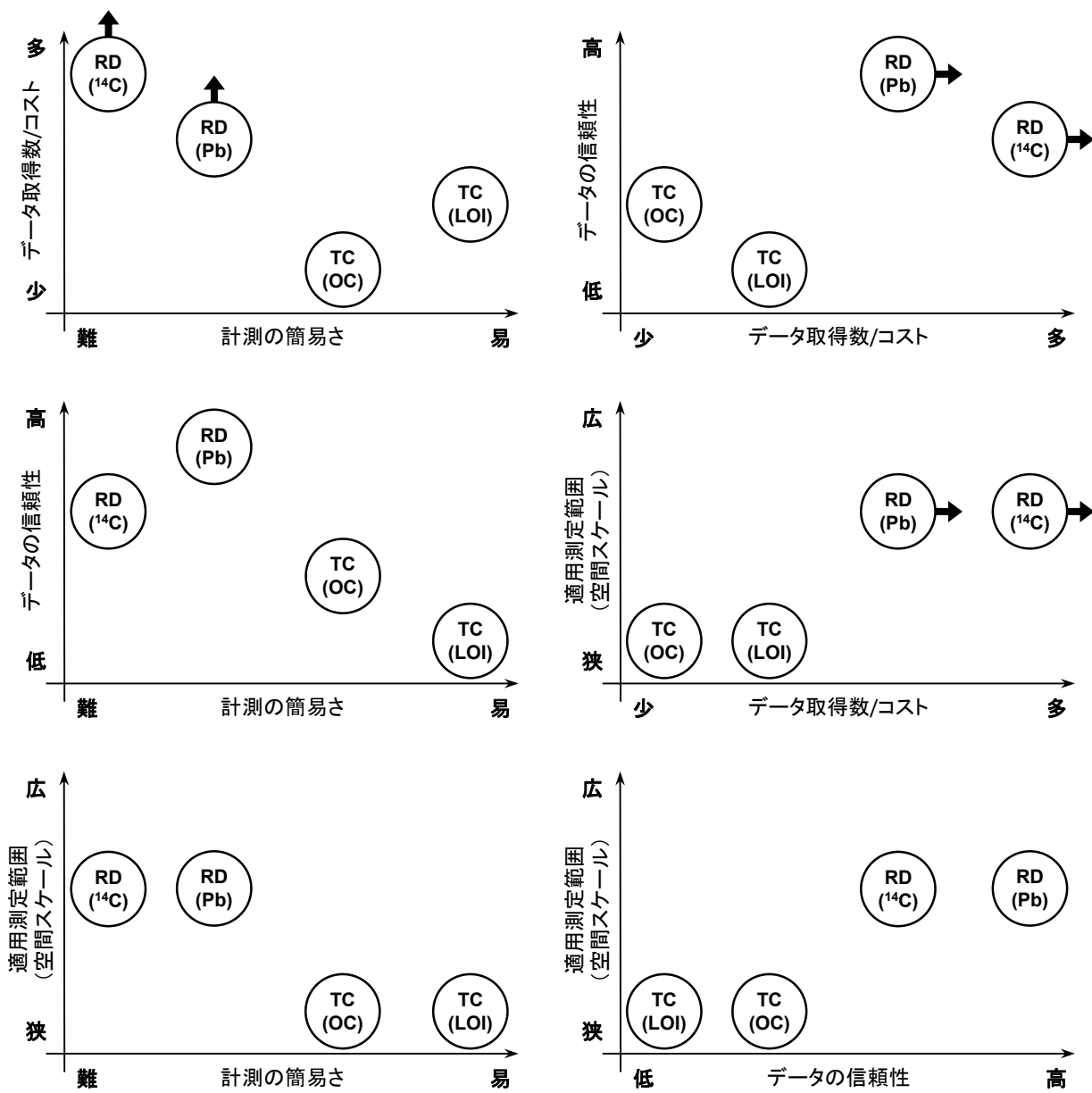


図-6.6 堆積物中炭素量の計測手法の比較項目ごとの関係性。図中の「データの信頼性」は、時間分解能を示す。その他の項目については1.2節を参照。図中の矢印は、将来の技術開発によって見込まれる改良の方向性。図中の「TC」・「RD」は、それぞれ経年比較法と年代測定法。「LOI」・「OC」・「¹⁴C」・「Pb」は、それぞれ経年比較法において強熱減量・元素分析計を使う方法、年代測定法において¹⁴C・²¹⁰Pbを使う方法の略語。なお、図中のプロットは相対的なものであり、コストなどを定量的に評価しているものではない。

であることを示す。なお、「計測の簡易さ」と「データ取得数/コスト」が相反する場合は、前者を優先している。基本的にコンサルタントなどに外注可能であることを選択基準とした。

参照レベルにおいては、「総合的な精度」と「簡易さ・コスト」ともに対照区の方が時系列トレンドよりも優れていると評価した。しかしながら、対象事業の空間スケールが大きい場合は対照区の設定が困難であるため、狭

いスケールでは対照区、広いスケールでは時系列トレンドを最適な計測手法とした。

対象面積の時系列変化については、「総合的な精度」は空間分解能と測定範囲を考慮して、現地測量調査とリモートセンシングの両方を候補に挙げた。「簡易さ・コスト」の評価では、データ取得数/コストを考慮してリモートセンシングを候補に挙げた。ただし、リモートセンシングの空間分解能が不足する生物共生型護岸は現地測

表-6.4 堆積物中炭素量の計測手法の対象事業（海域）ごとの適用性

対象海域		生物共生型護岸	海草藻場・干潟	遠隔離島	内湾
空間スケール		狭			広
計測手法の適用性	経年比較法	適用外	適 (精度低)	適用外	不適 (精度低)
	年代測定法	適用外	適 (コスト高)	適用外	やや適 (コスト高)

表-7.1 環境事業（海域）ごとに推奨される最適な計測手法。*選択基準は対象事業（海域）ではなく、空間スケールによる。
表中のFチャンパー法・Bチャンパー法は、それぞれフローティングチャンパー法・底生系チャンパー法の略。

対象事業（海域）		重点項目	生物共生型護岸	海草藻場・干潟	遠隔離島	内湾
空間スケール			狭			広
最適な計測手法	参照レベル*		対照区			時系列トレンド
	対象面積の時系列変化	総合的な精度	現地測量調査	現地測量調査・リモセン	現地測量調査・リモセン	地図測量
		簡易さ・コスト	現地測量調査	リモセン	リモセン	地図測量
	大気中CO ₂ 交換量（大気-海水）	総合的な精度	バルク法＋Fチャンパー法	バルク法＋Fチャンパー法＋渦相関法	バルク法＋Fチャンパー法＋渦相関法	バルク法＋渦相関法
		簡易さ・コスト	バルク法	バルク法	バルク法	バルク法
	大気中CO ₂ 交換量（大気-堆積物）	総合的な精度	Bチャンパー法	Bチャンパー法＋渦相関法	Bチャンパー法＋渦相関法	適用外
		簡易さ・コスト	Bチャンパー法	Bチャンパー法	Bチャンパー法	適用外
	生物内炭素量	総合的な精度	現地調査	現地調査＋リモセン	現地調査＋リモセン	現地調査＋リモセン
		簡易さ・コスト	現地調査	現地調査	現地調査	現地調査
	堆積物中炭素量	総合的な精度	適用外	年代測定法	適用外	年代測定法
		簡易さ・コスト	適用外	経年比較法	適用外	年代測定法

量調査のみとし、内湾においては、どちらの評価でも地図測量が適していると判断した。

大気中CO₂交換量のうち、大気-海水間CO₂交換量においては、「総合的な精度」の向上のためには3つの計測手法を併用することが望ましいと判断した。ただし、生物共生型護岸のような狭いスケールでは渦相関法、内湾のような波の影響が強い海域ではフローティングチャンパー法が適用不可であるため、それぞれの海域から除外している。「簡易さ・コスト」の評価では、フローティングチャンパー法は測器が市販されていない、渦相関法は機器・設置が高コストでデータ管理の難度が高い、という理由でバルク法のみを挙げた。大気-堆積物間CO₂交換量においては、底生系チャンパー法と渦相関法が候補となる。前者は簡易（市販品が存在）で信頼性が高いが、測定範囲・継続時間に限界があり、

後者は海域と土曜に長時間・広域で測定可能であるが、簡易でないという特徴がある。よって、「総合的な精度」のためには、2つの複合的手法、「簡易さ・コスト」のためには底生系チャンパー法の使用が適していると判断した。

生物内炭素量については、「総合的な精度」は、リモートセンシングが適用できない（空間分解能不足）生物共生型護岸を除き、現地調査とリモートセンシングの複合的手法が最も高い評価とした。「簡易さ・コスト」の評価に関しては、現地調査とリモートセンシングの複合的手法が開発段階にあることから、現地調査のみとした。

堆積物中炭素量では、比較的狭いスケールの海草藻場・干潟では、「総合的な精度」は年代測定法、「簡易さ・コスト」は経年比較法が優れていると評価した。広いスケールの内湾では、経年比較法では最低限の精度が保障

できないと判断し、両方の評価で年代測定法を挙げた。なお、今回の資料では有機物の貯留速度を評価対象としたため、堆積物中有機物がほとんどない生物共生型護岸と遠隔離島（サンゴ礁を想定）は適用外とした。

上記の評価は、現在の技術的基準をもとに決定したものであるため、今後の技術開発次第では最適な計測手法の候補も変化する可能性がある。例えば、リモートセンシングは衛星写真・空中写真ともに技術開発が進展しており、今後は「簡易さ・コスト」を重点に評価した場合でも候補となる可能性が高い。また、大気中 CO₂ 交換の計測において、渦相関法のデータ品質管理手法が確立すれば、「総合的な精度」の評価においてバルク法などとの併用の必要性がなくなったり、「簡易さ・コスト」の評価の候補になったりする可能性も想定される（データ取得数/コストは渦相関法が最も評価が高い）。

今回評価した計測手法はリモートセンシングを除き、現場で実測するものである。しかしながら、多様な沿岸域の環境を考慮すると、実測で広域の沿岸域のデータを取得することは困難であり、実測値をもとにした様々な海域のデフォルト値を確立する必要がある。よって、計測手法の開発と体系化と共に、統計モデルや数値モデルの開発が今後の課題として挙げられる。

(2015年5月1日受付)

謝辞

本研究の基となる野外調査では、北海道大学の門谷茂氏・柴沼成一郎氏、港湾空港技術研究所の三好英一氏・京田潤一氏からの多大なご助力を頂いた。また、野外調査の機器開発・援助において、(有)紀本電子工業の紀本英志氏・木下勝元氏と(株)メイワフォーシスの井上祐太氏から貴重な手助けやアドバイスを頂いた。本論文の作成にあたっては、港湾空港技術研究所の菅野高弘氏らからの貴重なコメントを頂いた。

本研究の一部は、キヤノン財団研究助成プログラム「理想の追求」と(独)日本学術振興会科学研究費助成事業「挑戦的萌芽的研究 (No. 24656316)」(共に研究代表者: 桑江朝比呂)の助成によるものである。

参考文献

- 1) IPCC: Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 2013, pp. 273-278.
- 2) Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C. M., Valdes, L., DeYoung, C., Fonseca, L., and Grimsditch, G. (eds.): Blue carbon. A rapid response assesment., United Nations Environmental Programme, GRID-Arendal, Norway, 2009, pp. 80.
- 3) 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の吸収との関連に関する現地調査と解析, 港湾空港技術研究所報告, No. 52 (1), 2013, pp. 3-49.
- 4) Tokoro, T., Hosokawa, S., Miyoshi, E., Tada, K., Watanabe, K., Montani, S., Kayanne, H., and Kuwae, T.: Net uptake of atmospheric CO₂ by coastal submerged aquatic vegetation, *Global Change Biology*, 2014, doi: 10.1111/gcb.12543.
- 5) 渡辺謙太・桑江朝比呂: 浅海域における炭素隔離機能の評価へ向けた元素比・安定同位体による有機物動態の解析, 港湾空港技術研究所報告, 2013, Vol. 52
- 6) Watanabe, K., and Kuwae, T.: How organic carbon derived from multiple sources contributes to carbon sequestration processes in a shallow coastal system?, *Global Change Biology*, 2015, doi: 10.1111/gcb.12924.
- 7) 田多一史・所立樹・渡辺謙太・桑江朝比呂: 北海道風蓮湖における大気中CO₂フラックスに影響を及ぼす要因, 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol. 69 (2), 2013, pp. 1252-1257.
- 8) 田多一史・所立樹・渡辺謙太・桑江朝比呂: 浅海域における大気中CO₂フラックスの予測手法の検討, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 69(2), 2013, pp. 1416-1420.
- 9) 田多一史・所立樹・渡辺謙太・茂木博匡・桑江朝比呂: 北海道コムケ湖における大気中CO₂フラックスの空間分布特性と要因分析, 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol. 70 (2), 2014, pp. 1188-1193.
- 10) 田多一史・所立樹・渡辺謙太・茂木博匡・桑江朝比呂: アマモ場における大気中CO₂フラックスの連続観測, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 70 (2), 2014, p. 1191-1195.
- 11) Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M., and Troxler, T. G. (eds.): 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands, IPCC, Switzerland, 2014.
- 12) Howard, J., Hoyt, S., Isensee, K., Pidgeon, E., and Telszewski, M. (eds.): Coastal Blue Carbon: Methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrass meadows,

- Conservation International, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature. Arlington, Virginia, USA, 2014.
- 13) Olander, J., and Ebeling, J.: Building forest carbon project: step-by step overview and guide, Forest Trends, Washington DC, 2011, pp. 35.
 - 14) 京田潤一・桑江朝比呂：現地観測データと衛星画像の統合による海草藻場の分布域と密度の測定, 港湾空港技術研究所資料, No. 1273, 2013, pp. 15pp.
 - 15) Raymond, P. A., and Cole, J. J.: Gas exchange in rivers and estuaries: choosing a gas transfer velocity, Estuaries, Vol. 24, 2003, pp. 312-317.
 - 16) Borges, A. V., Delille, B., Schiettecatte, L.-S., Gazeau, F., Abril, G., and Frankignoulle, M.: Gas transfer velocities of CO₂ in three European estuaries (Randers Fjord, Scheldt and Thames), Limnology and Oceanography, Vol. 49 (5), 2004, pp. 1630-1641.
 - 17) Tokoro, T., Kayanne, H., Watanabe, A., Nadaoka, K., Tamura, H., Nozaki, K., Kato, K., and Negishi, A.: High gas-transfer velocity in coastal regions with high energy-dissipation rates, Journal of Geophysical Research, Vol. 113, 2008, doi:10.1029/2007JC004528.
 - 18) Wanninkhof, R.: Relationship between wind-speed and gas-exchange over the ocean, Journal of Geophysical Research. C. Oceans, Vol. 97, 1992, pp. 7373-7382.
 - 19) 近藤純正：風 地表面に近い大気の科学, 東京大学出版会, 東京, 2000, pp. 82-108.
 - 20) 桑形恒男・近藤純正：西日本アメダス地点における地表面粗度の推定, 天気, Vol. 109, 1991, pp. 15-18.
 - 21) 桑形恒男・近藤純正：東北南部から中部地方までのアメダス地点における地表面粗度の推定, 天気, Vol. 109, 1990, pp. 55-59.
 - 22) 近藤純正・桑形恒男・中園信：地域代表風の推定法, 自然災害科学, Vol. 10-3, 1991, pp. 171-185.
 - 23) Jähne, B., Heinz, G., and Dietrich, W.: Measurement of the diffusion-coefficients of sparingly soluble gases in water, Journal of Geophysical Research. C. Oceans, Vol. 92, 1987, pp. 10767-10776.
 - 24) Dickson, A. G., Sabine, C. L., and Christian, J. R. (eds.): Guide to best practice for ocean CO₂ measurement, PICES Special Publication, Vol. 3, 2007.
 - 25) Tokoro, T., Watanabe, A., Kayanne, H., Nadaoka, K., Tamura, H., Nozaki, K., Kato, K., and Negishi, A.: Measurement of air-water CO₂ transfer at four coastal sites using a chamber method, Journal of Marine Systems, Vol. 66, 2007, pp. 140-149.
 - 26) 大谷優里・藤田哲朗・矢持進：都市近郊の人工干潟における有機物の分解特性に関する一考察—チャンパー法によるCO₂フラックスの測定—, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 67 (2), 2011, pp. 976-980.
 - 27) 藤田哲朗・遠藤徹・田中俊行・矢持進：潮汐に伴う干潟堆積物からのCO₂フラックスの変動に関する研究, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 69 (2), 2013, pp. 1181-1185.
 - 28) Lee, X., Finnigan, J., and Kyaw Tha Paw, U.: Coordinate system and flux bias error, Handbook of micrometeorology, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 2004, pp. 33-64.
 - 29) Massman, W. J.: A simple method for estimating frequency response corrections for eddy covariance systems, Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 104, 2000, pp. 185-198.
 - 30) 所立樹・桑江朝比呂：渦相関法による沿岸域の大気中CO₂吸収・放出量のデータ品質管理, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 71 (2), 2015, (投稿中).
 - 31) Miyajima, T., Hori, M., Hamaguchi, M., Shimabukuro, H., Adachi, H., Yamano, H., and Nakaoka, M.: Geographic variability in organic carbon stock and accumulation rate in sediments of East and Southeast Asian seagrass meadows, Global Biogeochemical Cycles, (early view), 2015, 10.1002/2014GB004979.
 - 32) Fourqurean, J. W., Duarte, C. M., Kennedy, H., Marbà, N., Holmer, M., Mateo, M. A., Apostolaki, E. T., Kendrick, G. A., Krause-Jensen, D., McGlathery, K. J., and Serrano, O.: Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock, Nature Geoscience, Vol. 5, 2012, pp. 505-509.
 - 33) Craft, C., Seneca, E., and Broome, S.: Loss on ignition and Kjeldahl digestion for estimating organic carbon and total nitrogen in estuarine marsh soils: calibration with dry combustion, Estuaries, Vol. 14, 1991, pp. 175-179.
 - 34) Kauffman, J.B., Heider, C., Cole, T.G., Dwire, K.A., and Donato, D.C.: Ecosystem carbon stocks of Micronesian mangrove forests, Wetlands, Vol. 31, 2011, pp. 343-352.
- 記号表
- F : 大気中CO₂交換量 (μmol/m²/s)
- F_1, F_2 : センサーの反応速度や空間分解能に起因する測定バイアスの補正項

fCO_{2air} : 大気中CO₂分圧 (μatm)
 fCO_{2water} : 水中CO₂分圧 (μatm)
 k : 大気中CO₂交換速度 (cm/hour)
 S : CO₂溶解度 (mol/m³/atm)
 Sc : シュミット数
 T_a : 大気中温度 (K)
 U_{10} : 高度10 mに補正された風速 (m/s)
 w : 風速鉛直成分 (m/s)
 μ : 乾燥空気と水蒸気の実モル比率
 ρ_c : 大気中CO₂濃度 (mol/m³)
 ρ_d : 乾燥空気濃度 (mol/m³)
 ρ_v : 水蒸気濃度 (mol/m³)

港湾空港技術研究所資料 No.1309

2015.9

編集兼発行人 国立研究開発法人 港湾空港技術研究所

発行所 国立研究開発法人 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社 シーケン

Copyright © (2015) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。



古紙配合率70%再生紙を使用しています