水産研究・教育機構 機関リポジトリ
FRA Japan Fisheries Research and Education Agency Institutional Repository

藻場のブルーカーボンを対象とした吸収源評価手法およびその現場活用について

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2022-09-28 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 堀, 正和 メールアドレス: 所属: 水産研究・教育機構
URL	https://fra.repo.nii.ac.jp/records/87

藻場のブルーカーボンを対象とした吸収源評価手法およびその現場活用について

堀　正和

1. はじめに

脱炭素社会への取り組みが加速する中、国際社会では海洋での気候変動対策への機運が高まっている。特に、極浅い沿岸域を対象としたブルーカーボンの活用への期待が大きくなってきた。海藻を食料利用する文化が無かった欧米諸国でも、ブルーカーボンへの期待から海藻養殖を実施し、さまざまな方面への活用について研究開発が実施されるようになった。

国内でもブルーカーボンを森林、農地、都市緑地に続く、新たな CO_2 吸収源とする動きが始まった。脱炭素社会へ向けた各種政策にブルーカーボンの探求が含まれるようになり、国土交通省港湾局を事務局に、関連省庁が参画したブルーカーボンに関する検討会も設置されている。ブルーカーボンの吸収源評価に必須となる算定手法の構築に向け、ブルーカーボンの沿岸浅海域への貯留メカニズムに関する研究成果がまとめられてきている[1)]。

このような動きのうち、本稿では農林水産省・農林水産技術会議委託プロジェクト研究で進められている、藻場（海草類と海藻類）のブルーカーボンの CO_2 吸収源評価手法の概要と、水産現場におけるカーボンニュートラル達成へ向けた活用例について紹介したい。

2. 気候変動対策における藻場の役割

気候変動に関連した分野では、植物の光合成によって取り込まれた大気中 CO_2 由来の炭素を「グリーンカーボン」と呼ぶ。そのうち、海洋生物によって大気中の CO_2 が取り込まれ、海洋生態系内に貯留された炭素のことを、国連環境計画（UNEP）は「ブルーカーボン」と名付けた[2)]。陸域や海洋は地球における炭素の主要な貯蔵庫となっているが、海洋が炭素貯蔵庫として特に重要となるのは、海底の堆積物中に貯留された有機炭素（ブルーカーボン）は長期間（数千年程度）分解無機化されず、その保存性が極めて高いこと、また一度深海へ落ちてしまえば、数千年のスケールで海表面へ再浮上することが無い（つまり海洋内へ保存される）ためである。このうち、海底堆積物への貯留機能が高い海草藻場、塩性湿地、マングローブといった砂泥性の浅海生態系は「ブルーカーボン生態系」と呼ばれ、植物体そのものではなく、海底堆積物がブルーカーボンの主要な貯蔵場所となっている。

藻場が食料生産にとって重要な場となっていることは、我々水産分野に関わるものにとって周知の事実である。ただ、その生物生産の高さゆえ、藻場を含めた沿岸浅海域は CO_2 の排出源として認識されてきた。ところが、「ブルーカーボン」報告書で沿岸浅海域が重要な CO_2 吸収源であると報告された後、気候変動対策においてブルーカーボン生態系への期待が一気に高まることになった。最近では、国連の報告書では扱われなかった海藻類に関する知見も集まり、藻場全般のブルーカーボンを緩和策や適応策に利用する試みが多くの国々で

進みつつある。これまで海藻を食用としてこなかった欧米ですら、海藻養殖を大々的に始めるようになった。その背景には、海洋国家の首脳で構成される「持続可能な海洋経済の構築に向けたハイレベル・パネル（High Level Panel for a Sustainable Ocean Economy：オーシャン・パネル）」が 2019 年 9 月に公開した報告書「気候変動の解決策としての海洋（The Ocean as a Solution to Climate Change）」の存在がある。

地球温暖化を 1.5℃以下に抑えるために 2050 年までに削減すべき温室効果ガスのうち、21％を海洋での気候変動対策で達成できると報告したこの報告書では、その具体策として 5 つのアクションを挙げていた[3)]。そのアクションとは、①海洋の再生可能エネルギー（海上風力発電や波浪・潮汐の利用など）の導入拡大、②海上輸送での脱炭素化の推進、③ブルーカーボン生態系を中心とした沿岸海洋生態系の保全と再生、④漁業・養殖の振興と陸上のタンパク源から海洋のタンパク源への食糧シフト、⑤技術革新による海底への人工的な炭素貯留、であり、それぞれの潜在的な緩和効果が試算された（表 1）。2030 年時点での試算結果では、③ブルーカーボン生態系と④水産業振興の潜在的効果が高く、技術開発や整備に時間を要する他のアクションよりも即効性があると期待されている。

海洋での気候変動対策の領域	2030年での緩和試算値（$GtCO_2E$/年）	2050年での緩和試算値 $GtCO_2E$/年）
1. 再生可能エネルギー	0.18-0.25	0.76-5.40
2. 海上輸送	0.24-0.47	0.9-1.80
3. 沿岸海洋生態系	0.32-0.89	0.50-1.38
4. 漁業・養殖・食料源の転換	0.34-0.94	0.48-1.24
5. 炭素の海底埋没	0.25-1.00	0.50-2.00
総計	1.32-3.54	3.14-11.82
1.5℃上昇シナリオへの寄与率	4-12%	6-21%
2℃上昇シナリオへの寄与率	7-19%	7-25%

表 1. 海洋における気候変動の緩和と持続可能な海洋経済の発展に向けた５つのアクションとその緩和効果の試算値. Hoegh-Guldberg et al. (2019)を改変.

まず、④水産業振興に関するアクションでは、漁船の動力・燃料による CO_2 排出の削減、養殖業における餌料改良（魚肉・大豆由来タンパク源に代わる新しい餌料）や、海藻養殖の振興などによる CO2 排出の削減が示されている。そして最も効果が高い CO_2 排出削減として、CO_2 負荷の高い陸上のタンパク源（特に牛や羊）から、負荷の低い海洋のタンパク源（魚介類）への食料シフトの効果について試算されている。また、③ブルーカーボンに関連するアクションでは、ブルーカーボン生態系の保護や面積減少を食い止める効果、ブルーカーボン生態系を再生・拡大する効果が試算されている（表 2）。さらに特筆すべき内容では、IPCC 湿地ガイドラインに記載のある海草藻場・塩生湿地・マングローブ林だけでなく、将来的には海藻藻場（現状では試算不可）や、海藻養殖を増やしていく効果を試算している点である。

気候変動対策の領域	対策の種類	対象	2030年での緩和試算値（$GtCO_2E$/年）	2050年での緩和試算値（$GtCO_2E$/年）
沿岸海洋生態系	生態系と生物の維持（消失や劣化を防ぐ）	マングローブ林	0.02-0.04	0.02-0.04
		塩生湿地・干潟	0.04-0.07	0.04-0.07
		海草藻場	0.19-0.65	0.19-0.65
		海藻藻場	知見不足で現状では試算不可	知見不足で現状では試算不可
	生態系と生物の再生（消失・劣化から回復させる）	マングローブ林	0.05-0.08	0.16-0.25
		塩生湿地・干潟	0.004-0.01	0.01-0.03
		海草藻場	0.01-0.02	0.03-0.05
		海藻藻場	知見不足で現状では試算不可	知見不足で現状では試算不可
	海藻養殖の拡大		0.01-0.02	0.05-0.29
	乱獲の廃止による生物多様性とバイオマスの再生助長		知見不足で現状では試算不可	知見不足で現状では試算不可
総計			0.32-0.89	0.50-1.38

表 2. ブルーカーボン生態系でのアクションとその吸収源としての潜在的効果の試算値の内訳. Hoegh-Guldberg et al. (2019)を改変.

沖合等への海藻養殖の拡大や大規模化を目指した研究は、海藻利用の先進国であるわが国ではなく、欧米諸国を中心に開始されている（図１）[4]。これらの国々では海藻養殖の歴史が無いため、養殖資材の開発から研究を始め、その後は養殖システム・技術の構築、養殖海藻の機能性物質（化粧品や医薬品など）の探索、バイオマス活用の探索（海藻ポリマー、バイオ燃料など）などが計画的に進行している。海藻養殖は吸収源としてまだ認可されていないため、現時点では吸収源としての活用ではなく、食品や化石燃料に代わる（排出源対策として）物質・原材料としての価値創出を試みている点が特徴である。

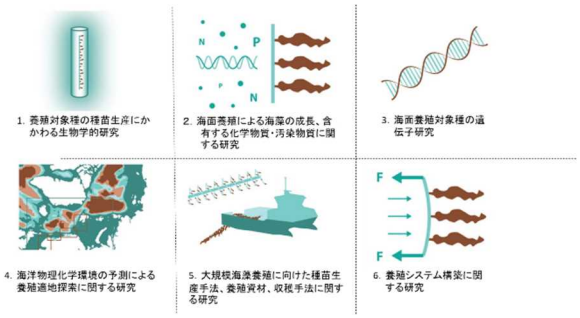

図１. 欧米での海藻養殖研究の一例：ノルウェーでの海藻養殖産業化プロジェクト（MACROSEA）における 6 つの取り組み。図は MACROSEA プロジェクト HP より引用. (https://www.sintef.no/prpjectweb/macrosea/)

3. 農林水産技術会議プロジェクトの概要：藻場を新たな CO_2 吸収源に

国際社会の動きにあわせて、国内でもブルーカーボンの可能性を追求する動きが各省庁で始まった。農林水産分野では、2020 年 1 月に政府が策定した「革新的環境イノベーション戦略」において、温室効果ガス吸収源拡大の動きにブルーカーボンが加わった。また、2021 年 5 月に策定された「みどりの食料システム戦略」においても、海藻類による CO_2 固定化（ブルーカーボン）の推進が明記された（図２）。これにより、ブルーカーボンを新たな CO_2 吸

収源として活用し、農業、林業、水産業のすべてで吸収源対策を行うことが目標となった。

農林水産省・農林水産技術会議では、有効な CO_2 吸収源となる藻場を我が国の温室効果ガスインベントリ報告書へ登録するため、その算定手法を開発する「ブルーカーボンの評価手法及び効率的藻場形成・拡大技術の開発（JPJ008722）」を、令和２年４月から５年間のプロジェクトとしてスタートさせた。プロジェクトは、プロジェクト前半で藻場のブルーカーボンによる CO_2 吸収量の算定手法を開発し、後半では磯焼け等により減少する藻場を効率的に形成・拡大する技術を開発することを目的としている。

図２. みどりの食料システム戦略におけるブルーカーボンの位置づけ。

１）藻場による CO_2 吸収量の評価手法

ブルーカーボンを日本政府の温室効果ガスインベントリ報告書に登録するためには、森林などと同じく、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）が公開しているガイドラインに沿って算定する必要がある。ガイドラインには湿地（ブルーカーボンが含まれる）に関する追補版が公表されており、原則としてこの湿地ガイドラインの算定方法に沿った算定となる。ただし、湿地ガイドラインには上述したアマモ場、塩生湿地、マングローブを対象とした手法のみ記載されている。古来よりさまざまな海藻を利用する文化を有するわが国は海藻類に関する知見が豊富であり、最近では海藻類の CO_2 吸収源機能に関する科学的根拠も集まってきている。世界に先駆けて、海藻の吸収源評価を実施する基盤を有している。

すでに公表済みのブルーカーボンによる CO_2 吸収量算定では[5)]、海藻類のうち一部のガラモ類、コンブ類、アラメ・カジメ類について算定値を提示した。しかしながら、他の大多数の海藻類は未評価のままである。そこで、農林水産技術会議プロジェクトの評価手法では、海草類の評価の高度化とともに、海藻養殖まで含めた多くの海藻類を対象とし、その評価手法を構築することにした。しかしながら、海藻類は世界で約２万種、国内だけでも少なくとも 1000 種以上が分布していると言われている。すべての海藻種別に、それぞれの算定手法を作ることは不可能である。そのため、海藻種の分布・生活史や CO_2 吸収プロセスの類似性から種をいくつかのタイプに集約し、そのタイプ別に評価できるようにした。これにより、どのような海藻種でも CO_2 吸収量の算定が

可能になることを目指している。また、算定モデルは国のインベントリ報告への算定だけでなく、藻場の再生活動、漁業(海藻養殖)活動、産業活動など、地先での取り組みによる CO_2 吸収量の算定も可能な構造にしている。

2）吸収係数と活動量

大気–海洋間における CO_2 ガス交換過程では、大気中の CO_2 分圧と海中に溶けている CO_2 分圧に差が生じたとき、分圧の高いほうから低い方へ CO_2 が取り込まれる(図 3)。したがって、大気中 CO_2 の吸収源となるためには、大気中の CO_2 分圧よりも海中の CO_2 分圧が低くなることが必須である．藻場が光合成により海中の CO_2 分圧を下げることで、大気から CO_2 が海中へ吸収される仕組みが吸収源となる所以である。

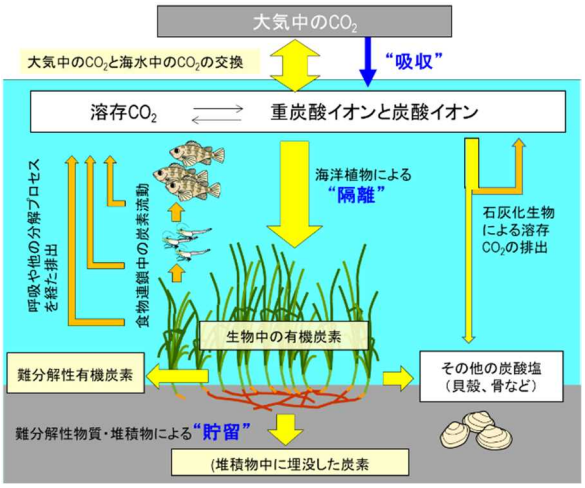

図 3. 沿岸浅海域での主要な炭素循環と炭素隔離・貯留の概念図

海洋植物の光合成による大気中 CO_2 の吸収に加えて、水中の無機炭素（炭酸、重炭酸、CO_2）からは、貝類の貝殻やサンゴの骨格といった炭酸塩も形成される（石灰化)。この炭酸塩の貯留過程も大気中 CO_2 の吸収に寄与すると思われがちであるが、実は、石灰化の化学反応では炭酸塩の形成と同時に CO2 を排出する。つまり、石灰化は海水中の CO_2 分圧を逆に上昇させてしまうため、大気中 CO_2 の吸収に寄与しない。

ここで、評価手法の概要について説明しよう。藻場が吸収する CO_2 量を算定するためには、「海草・海藻類が光合成によって有機炭素化する CO_2 量」、「海草・海藻類が CO_2 から作り出した有機炭素のうち、分解されずに（CO_2 に戻らずに）長期間海中に貯留される割合」、「算定対象とする藻場タイプの活動量（面積)」、の３つのパラメータが必要となる。このうち、最初の 2 つのパラメータをかけ合わせたものを“吸収係数”と呼び、藻場のタイプ（種類）別の算定値を特徴づける。この“吸収係数” と「対象とする藻場の面積」から、対象とする場所の CO_2 吸収量(CO_2 トン/年)を算出する。吸収係数のうち、第 2 項のパラメータは“残存率”と呼ばれ、4 つのプロセスを定義している（図 4)。藻場を形成する海洋植物は、森林のように 100～数千年スケールで植物体（自身の

体を構成する有機炭素）として CO_2 を貯留することができないため、これらのプロセスを介して CO_2 を海中に長期貯留すると算定される。

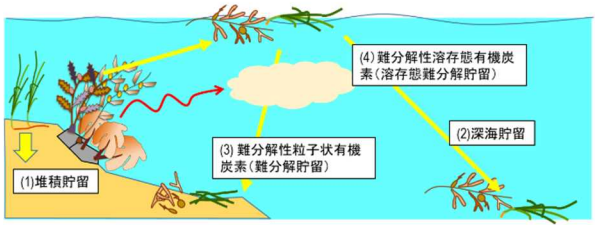

図 4. 残存率を決める４つのプロセス

第１の残存プロセスは、アマモ場など砂泥底（堆積物）にできる藻場のプロセスで、藻場の立体構造によって水流が弱められ、海草・海藻の枯れた葉、水塊を漂う有機物などが藻場内へ堆積物と一緒にどんどん堆積し、海底に閉じ込められていく作用である（堆積貯留）。瀬戸内海のアマモ場では、5 千年以上の長期スケールで堆積貯留されている例もある[6)]。

第２のプロセスは、海草・海藻類の葉が藻場から流出して流れ藻になり、またその破砕された粒状物が沖合に流れていき、大陸棚を過ぎて深海まで輸送される作用となる（深海貯留）[7)]。深海に到達した有機炭素は、分解されたとしても、その CO_2 がまた海表面に達するまでには数千年かかるため、長期間炭素を貯留していることになる。

第 3 のプロセスは、藻場から流れ出た有機炭素が分解されながら流れていき、深海に落ちず、最終的にどこか藻場以外の浅い海底に堆積する難分解性有機炭素である（難分解貯留）。浅海域では易分解性の有機炭素は分解が迅速に進むため、最終的に長期間分解されない難分解性の有機炭素のみ残ることになる。

第４のプロセスは、海草・海藻類が成長過程で体表面から分泌する溶存態の有機炭素である[8)]。その溶存態有機炭素には難分解成分が含まれるため、難分解貯留と同様に、溶存態の難分解性成分による貯留作用と言える（溶存態難分解貯留: RDOC）。このプロセスによって、最終的に食料として消費する（大気中 CO_2 に戻る）海藻養殖ですら、成育期間中に放出する溶存態の難分解性炭素によって、吸収源としての算定が可能になる。

以上の４つのプロセスが算定する海草・海藻のタイプによって発生する/発生しない場合があり、またその値もタイプや地域によって異なる。それによって対象とする海域の吸収量の変化が生じることになる。

4. 水産現場でのカーボンニュートラル対策の可能性

1）海草藻場による緩和・適応策の事例

ブルーカーボン生態系は防災、水質浄化など、さまざまな生態系サービスを有する、いわばコベネフィット性の高い生態系として重要視されてきた。特に海草（アマモ）藻場は、食料生産や水質浄化、酸素供給など、水産業に密接するさまざまな観点から重要視されてきた。

そのため、気候変動の緩和策としての CO2 吸収源とともに、水産現場での気候変動への適応策を同時に講じやすい生態系でもある。

その試みの 1 つとして、海草藻場を利用したカキ養殖手法の構築が世界各地で進められている。カキ養殖が行われる内湾・内海域は、海域の環境要因だけでなく陸域（集水域）の環境要因の影響を同時に受けるため、気候変動の影響が顕著に表れやすい海域と言われている。近年では、夏期高水温による稚貝・成貝の大量斃死、貧栄養化（餌不足）・海洋酸性化による着底稚貝の減少、稚貝の成長不良・生残率低下など、気候変動と陸域の変化に関連した阻害要因がカキ養殖の持続可能性・安定供給を低下させるようになった。そこで、内湾域に多く分布するアマモ場内や隣接海域で養殖を行うことで様々なアマモ場の機能を利用し、これらの阻害要因の効果を緩和させる試み（適応策）が始まっている。同時に、カキが貝殻形成する際に排出する CO_2 をアマモに吸収させ、さらにカキの排泄物（有機炭素）をアマモの堆積作用によって堆積物中に長期貯留させれば、有効な緩和策となり得る。

海草の仲間の生活史には CO_2 吸収源として機能するための重要な特徴を多く含んでいる。わが国沿岸の海草類はどの種も陸上のタケ亜科の植物（竹林）のように地下茎を持つ。地下茎は大きく網目状に伸張することで海中の堆積物の流出を防ぐと同時に，地上部の葉は流れを弱めることで堆積作用を増加させる。この組み合わせが有機炭素の堆積貯留を促進する[9)]。また，地下茎から切れた地上部は浮力によって海面を漂い、沖合まで輸送されれば深海貯留に寄与する。日本の海草類の優占種であるアマモ（*Zostera marina*）は地球上でもっとも分布が広い海洋植物と言われており，北半球の亜寒帯から温帯域すべてに分布する。あまり知られていないが寿命も長く，地下茎でつながる株単位の寿命は 1000 年を超える。これらの生物的特性が，陸上の木本類と同様に CO2 吸収源として機能できる根拠となっている。このような特徴を漁業の現場で利用し、例えばアマモ場の地下茎伸長は二枚貝の着底稚貝の逸散や捕食を防ぐ、などといった有効活用する方向性を探索していけば、水産業の発展とカーボンニュートラルへの貢献を同時に増やしていくことになる。

2）海藻養殖の活用

上述の事例のように，カーボンニュートラルへの貢献を増やすには藻場が有する様々な機能，すなわちコベネフィットとの両立を考慮することが重要である。食料生産への寄与（幼稚魚育成や餌料供給の機能、あるいは直接的な食料として）など，本来の機能を発揮させるために藻場の保全・整備を実施すれば，同時に気候変動の緩和策としても機能させる素地ができる。このことは岩礁域に生息する海藻類にも同様のことが言える。

最近の研究で明らかになりつつある溶存態難分解貯留は、堆積物底を有さない（堆積貯留のない）海藻藻場であっても、CO_2 吸収源としての機能を保障する[8)]。また、コンブ類やワカメを対象とした海藻養殖は、藻体そのものを水産物として水揚げ・消費するため，養殖中に藻体として貯留した CO_2 は吸収源とみなせない。しかしながら，成長に伴い藻体から溶出する RDOC を定量すれば、その RDOC を CO_2 吸収源として評価できる。

海藻養殖は食料生産分野における気候変動適応策として有望視されており、緩和策との融合によって、更なる気候変動対策への貢献を構築できる。もちろん、水産業として養殖を実施するだけでは吸収源対策の活動とは認められないため、養殖収穫＋α（吸収源としての機能を向上させる活動）が必要となるが、海藻養殖を有効なカーボンニュートラル対策として活用できるポテンシャルは極めて大きい。このような藻場や海藻養殖を活用した気候変動緩和・適応策のシナジーは今後の SDGs の達成や脱炭素社会の構築へ向けて有効な原動力の一つになるはずである。

5. おわりに:今後の研究動向について

前述した「革新的環境イノベーション戦略」では、「脱炭素社会」の実現に向けて、ブルーカーボンに対して 4 つの技術開発目標：１．バイオ技術の活用等により、効率よく海中の CO_2 を吸収する海藻類等の探索と高度な増養殖技術の開発をすすめる、２．海藻類等を新素材・資材として活用するための技術開発を民間主導でナショナルプロジェクトの下に行う、３．藻場・干潟等における CO_2 吸収量推計手法の開発を行う、４．藻場・干潟造成・再生・保全技術の開発・実証を進める、が上げられている。農林水産技術会議プロジェクトは、この目標 3 および 4 に該当している。

今後は目標３＆４に加えて、目標１および目標２に該当する研究についても、具体的に深化させていく必要がある。天然藻場が磯焼けからの回復に苦戦する現在、吸収源の増加には海藻養殖を同時並行で拡大していくことが必須となる。しかしながら、養殖拡大のためには養殖した海藻が販売できることが必要であり、その一方で食用としての利用では中国・韓国等の外国産に押され、伸び悩み気味である。そこで、目標 2 にあるような食用以外の新しい利用方法を作り出し、新産業を構築していくことが重要となる。また、磯焼けが深刻化している現在、目標２のために天然の藻場を刈り取って活用していくことは、吸収源の向上という観点からも好ましくない。新産業では養殖海藻の活用がもっとも適していると考えている。このようなブルーカーボンの可能性を追求が、水産業の活性化・成長化への道筋としても機能することを期待している。

参考文献

1) 桑江朝比呂・堀正和：海洋生態系を介した炭素フロー、化学工学、No.85、印刷中、2021.
2) Nellemann, C., et al.：Blue Carbon. A Rapid Response Assessment. United Nations Environmental Programme, GRID-Arendal, Birkeland Trykkeri AS, Birkeland, 2009.
3) Hoegh-Guldberg. O., et al.：“The Ocean as a Solution to Climate Change: Five Opportunities for Action.’Report. Washington, DC: World Resources Institute (2019). Available online at http://www.oceanpanel.org/climate
4) MACROSEA：A Knowledge Platform for Industrial Macroalgae Cultivation in Norway.

Research report to the Research Council of Norway, nr. 254883, 2020.
5)桑江朝比呂・吉田吾郎・堀　正和・渡辺謙太・棚谷灯子・岡田知也・梅澤　有・佐々木淳：浅海生態系における年間二酸化炭素吸収量の全国推計、土木学会論文集 B2（海岸工学)、No.75、10-20、2019.
6) Miyajima, T, et al.: Geographic variability in organic carbon stock and accumulation rate in sediments of East and Southeast Asian seagrass meadows. Global Biogeochemical Cycles, 29, 397-415, 2015.
7) Abo, K, et al. : Quantifying the fate of captured carbon from segrass meadows to the deep sea. Blue carbon in shallow coastal ecosystems (T. Kuwae and M. Hori eds), Springer, 251-272, 2019.
8) Watanabe, K, et al.: Macroalgal metabolism and lateral carbon flows can create significant carbon sinks. Global Change Biology, 25, 1063-1077, 2019.
9) 堀　正和・桑江朝比呂：ブルーカーボン－浅海における CO_2 隔離・貯留とその活用、地人書館、pp. 276、2017.