

沿岸域生態系を利用した炭素固定技術の開発

研究代表者 宇部工業高等専門学校 教授 杉本 憲司

共同研究者 宇部工業高等専門学校 教授 高田 陽一

共同研究者 宇部工業高等専門学校 助教 小林 和香子

1. 研究背景

瀬戸内海を中心に産業活動等のために沿岸域の開発が行われており、それによって浅場生態系が生育可能な生育基盤は減少している。そのため、全国各地で浅場の再生や創出の取り組みが行われており、山口県岩国市神代では岩礁性藻場生育基盤材料として転炉系製鋼スラグが利用されている¹⁾⁴⁾。一方、二酸化炭素濃度は産業革命後、上昇しており、二酸化炭素の固定化は地球上において重要な課題であることから、二酸化炭素の排出の緩和策については様々行われてきた。近年、海域における炭素固定である「ブルーカーボン」については国連によって定義され、沿岸域生態系におけるブルーカーボンの機能について研究が行われつつある^{5),6)}。沿岸生態系のうち、砂泥域における海草を含む生態系については、砂泥内に直接炭素貯留されるが、岩礁域における海藻を含む生態系については、岩礁内に直接炭素貯留されず、周辺の砂泥域に生物が漂流し、そこで炭素貯留されていると考えられている。岩礁域の生態系のうち、岩礁性藻場については生育する海藻種が多く、その生活史が異なることから年間を通じて藻場生態系が形成及び海藻種が更新されやすい。

本研究では、広島湾において砂泥域及び岩礁域における沿岸域生態系による炭素吸収能や炭素固定寄与度について明らかにするとともに、スラグ製品によって創出された岩礁性藻場生育基盤によって形成される生態系による炭素固定能について検証を行い、岩礁性藻場生育基盤の創出による炭素固定効果を明らかにし、スラグ製品利用による炭素固定の開発を目的とした。

2. 研究方法

2-1 海域調査

2-1-1 研究対象地

研究対象地として、砂泥域の沿岸生態系は、広島湾奥部にある広島県廿日市地御前干潟、湾中央部にある山口県岩国市尾津地先、岩国市湾口部にある山口県岩国市神東地先(神代地先)及び周防大島周防西方の砂泥性藻場とした。岩礁域の沿岸生態系は、スラグ製品によって2013年～2018年に約3.4ヘクタール創出された人工岩礁性藻場とした。また、藻場ではない研究対象地として、岩礁性藻場周辺砂泥域とした(図2-1-1)。

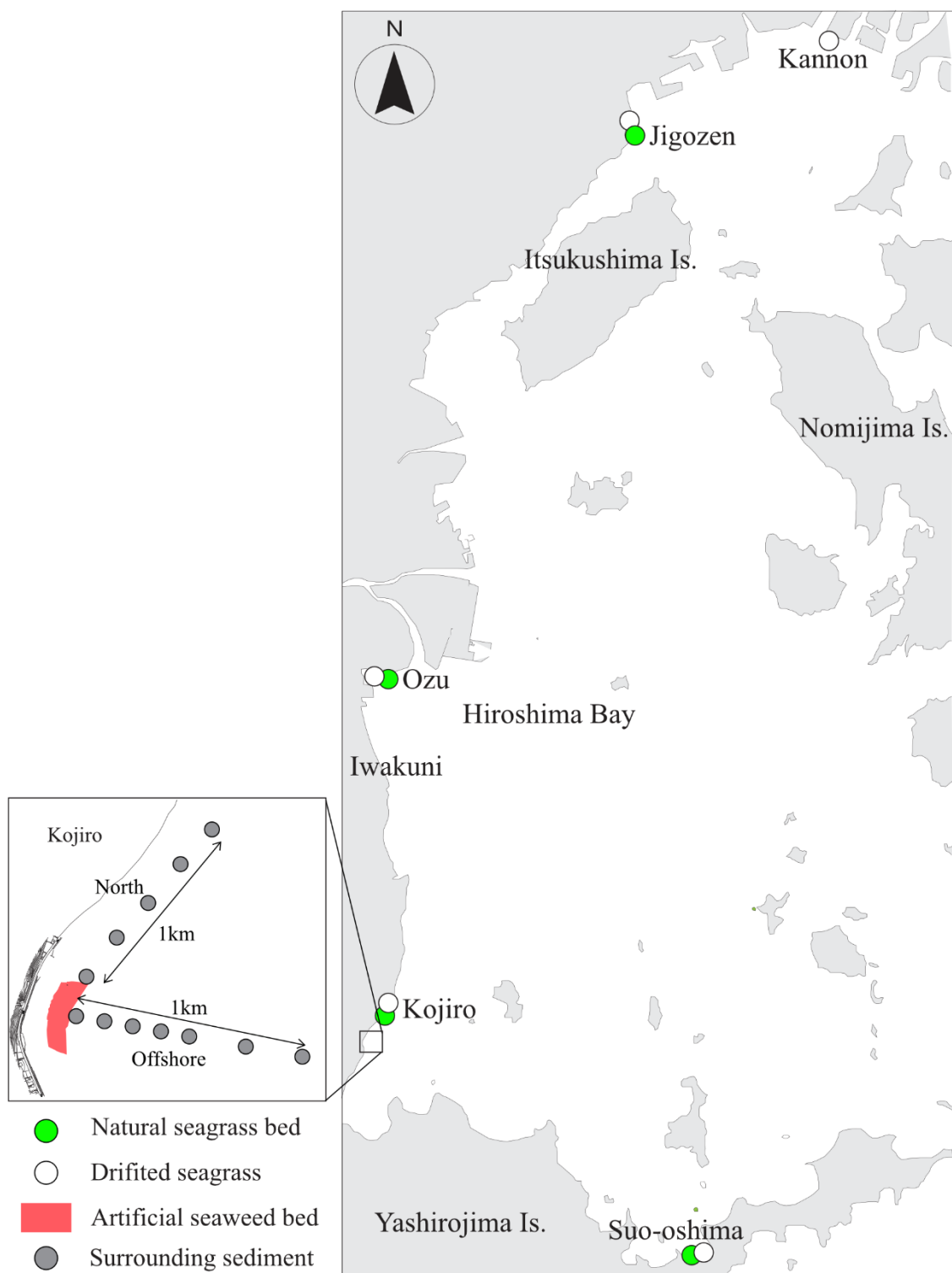


図 2-1-1 研究対象地

2-1-2 海藻草の分布

砂泥性藻場の分布を調べるために、2020 年 5 月にマルチコプター(Phantom4:DJI 社)を使って、空撮を行った。空撮の際には写真が 60%以上オーバーラップするようにし、解像度が 6cm 以上となる高度(150 メートル)で撮影を行った。撮影した写真はモザイク作成をした後、画像解析ソフト(ERDAS IMAGINE2015: Hexagon Geospatial 社)を用いて、教師付き分類によって砂泥性藻場分布の推定を行った。

2-1-3 海藻草の分析

海藻草の炭素含有量及び炭素安定同位体比を調べるために、2020 年 5 月及び 8 月に砂泥性藻場内に生育及び周辺海岸に漂着していたアマモ *Zostera marina*、コアマモ *Zostera japonica*、岩礁性藻場内に生育していたホンダワラ属 *Sargassum* sp.、クロメ *Ecklonia kurome*、ウミウチワ *Padina arborescens* Holmes を採取した。採取した海藻草は海藻草表面を超純水で洗浄した後、2 日間凍結乾燥(FDU-1200 : EYELA 社)後に粉碎をした。粉碎した海藻草は、安定同位体比質量分析装置(DELTA V Advantage : Thermo Scientific 社)によって、炭素及び窒素の含有率及び安定同位体比の分析を行った。

2-1-4 砂泥の分析

砂泥の炭素含有量及び炭素安定同位体比を調べるために、2020 年 5 月及び 8 月に砂泥性藻場内及び岩礁性藻場周辺砂泥域において砂泥を採取した。採取した砂泥は 1 N の塩酸を入れて 24 時間静止させた。塩酸を除去、超純水で洗浄後、60℃で乾燥させた。乾燥させた砂泥は、安定同位体比質量分析装置(DELTA V Advantage : Thermo Scientific 社)によって、炭素及び窒素の含有率及び安定同位体比の分析を行った。

砂泥性藻場及び周辺海域砂泥中の環境 DNA を調べるために、2020 年 5 月及び 8 月に砂泥性藻場内及び周辺海域砂泥において砂泥を採取した。採取した砂泥は、DNA 抽出キット(DNeasy PowerMax Soil Kit : QIAGEN 社)で DNA の抽出を行った後、アマモ、コアマモ、アカモク、クロメの DNA プライマー(表 2-1-4)を用いて、リアルタイム PCR(QuantStudio 3 : Thermo Fisher SCIENCE 社)によって相対定量を行った。なお、PCR 産物を検出するためのケミストリは SYBR、増幅条件は 50℃で 2 分、98℃で 2 分の加温後に、98℃で 15 秒、60℃で 10 秒、68℃で 30 秒を 60 サイクルとした。

表 2-1-4 対象とした海藻草の DNA プライマー配列

アマモのプライマー配列	F: GCTTTCTTTTCCCTTACACGAG R: AACCTTCCCAACCCCGTT
コアマモのプライマー配列	F: TATTCATGATTGGTCGTGAGAATA R: TGCACACACGACTTTCCTATG
アカモクのプライマー配列	F: CAAGCAGGATAGGCAACCATAC R: CAGAATAGCCCCAACGTATTCTAG
クロメのプライマー配列	F: CCTTAACTGTCTTCTGCTGAC R: GTTCTTCGTGGTTTGATCTGGTG

2-2 漂流海藻シミュレーション

藻場からの海藻草の漂流先をさらには広島湾内の潮流シミュレーションによって海藻草の漂流経路について検証をするとともに底泥内で固定されている炭素起源の特定を行った。潮流及び漂流経路のシミュレーションは、非圧縮性粘性流体に関する Navier-Stokes の運動方程式と流体の連続の式を基礎式とした多層の差分法を用いている Delft 3D を用いた。また、シミュレーション範囲は広島湾とし、水深は 500 m メッシュ水深データを用いた(図 2-2-1)。シミュレーションの条件は表 2-2-1 のとおりである。

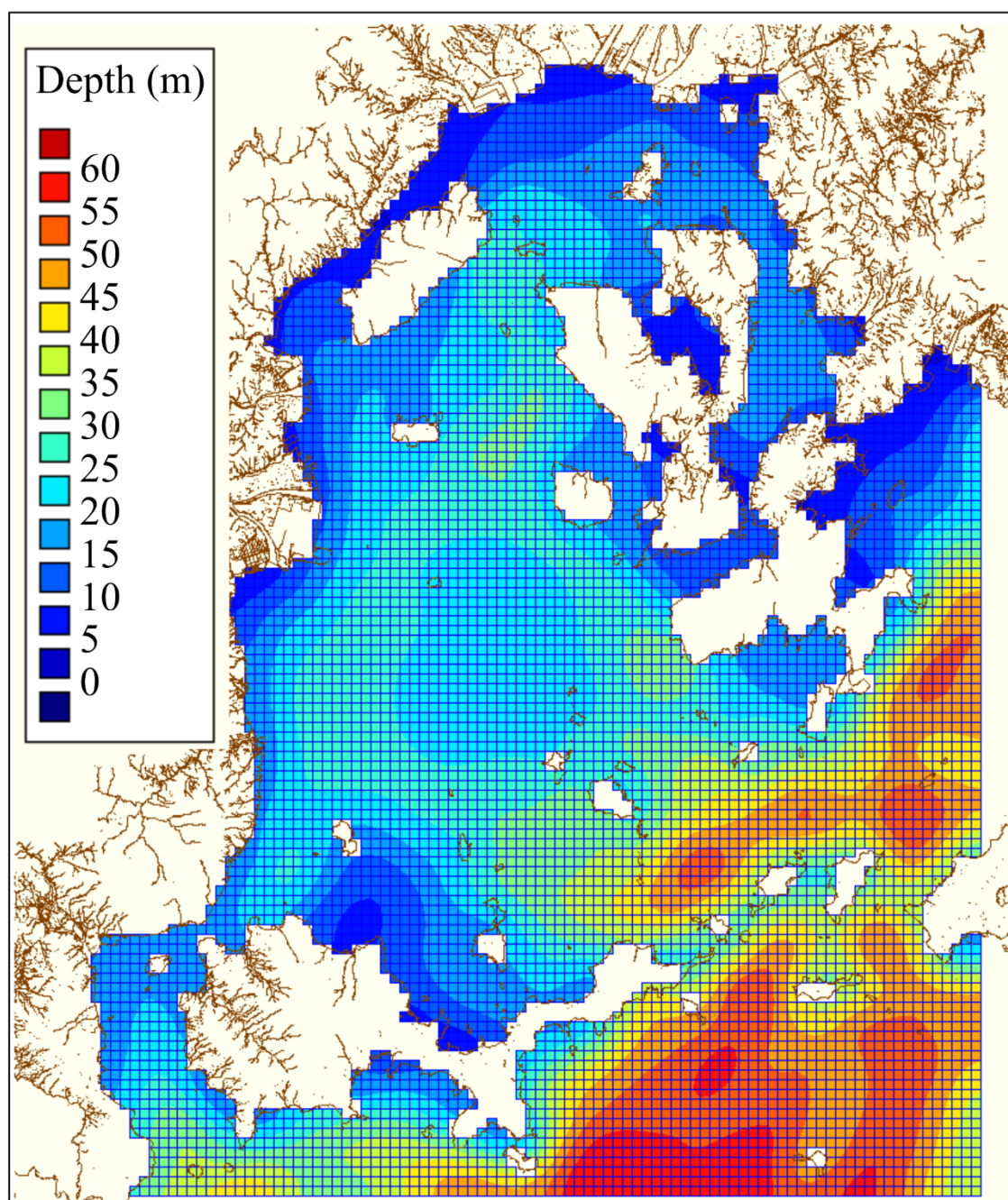


図 2-2-1 シミュレーションの範囲及び水深

表 2-2-1 シミュレーション条件

項目	内容
計算領域	東西 47 km×南北 60 km
平面座標系	500 m×500 m
鉛直座標系	10 層
タイムステップ	1 分
潮流計算期間	2018 年 1 月～2018 年 12 月
水深	500 m メッシュ水深データ(日本海洋データセンター)
境界条件	日本沿岸潮汐調査定数表(海上保安庁) 大島、沖家室島、長浜、宇和間、松山
河川流入量	瀬野川：平均 5.3 m ³ /s 太田川：平均 77.0 m ³ /s 八幡川：平均 3.5 m ³ /s 小瀬川：平均 14.8 m ³ /s 今津川：平均 36.7 m ³ /s 門前川：平均 3.0 m ³ /s 由宇川：平均 2.4 m ³ /s
海藻草漂流期間	2018 年 6 月～2018 年 10 月
漂流させた海藻草	砂泥性藻場 広島県廿日市地御前干潟：704 kg 山口県岩国市神東地先：1605 kg 周防大島周防西方：2901 kg 岩礁性藻場 山口県岩国市神東地先：7629 kg

3. 研究結果

3-1 海域調査

3-1-1 砂泥性藻場の分布状況

図 3-1-1 に地御前、神代及び周防大島におけるドローンによる空撮で得られた画像データから解析を行った砂泥性藻場推定分布位置を示す。いずれの場所においても D.L. +0.5 ～-2.5mの範囲で海草(アマモもしくはコアマモ)が分布していた。地御前、神代及び周防大島における推定分布面積はそれぞれ 5093 m²、8521 m²及び 12398 m²であった。地御前における株密度は 215 dry-g・m⁻²、神代における株密度は 468 dry-g・m⁻²であることから、地御前と神代における海草量はそれぞれ 1095 kg、3988 kg と推定された。

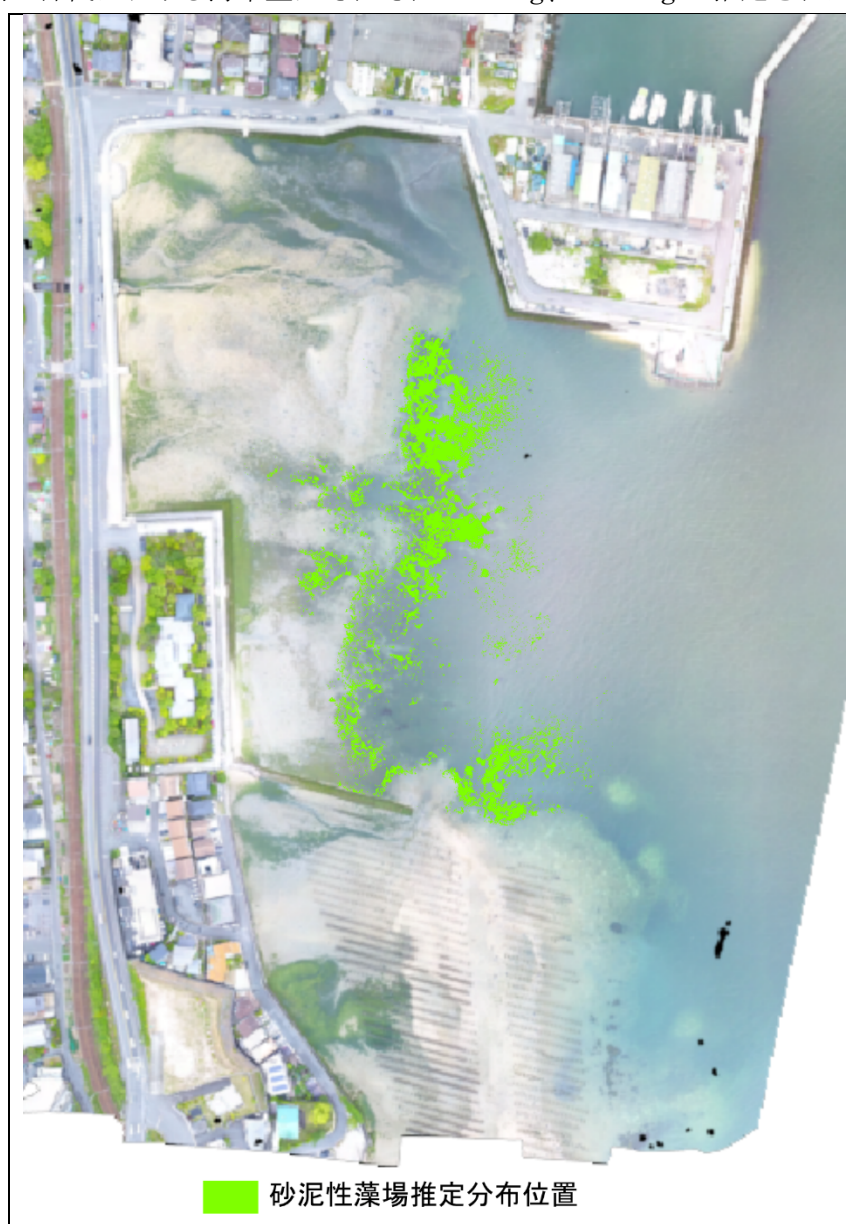


図 3-1-1(1) 地御前における砂泥性藻場推定分布位置



図 3-1-1(2) 岩国市神東地先における砂泥性藻場推定分布位置

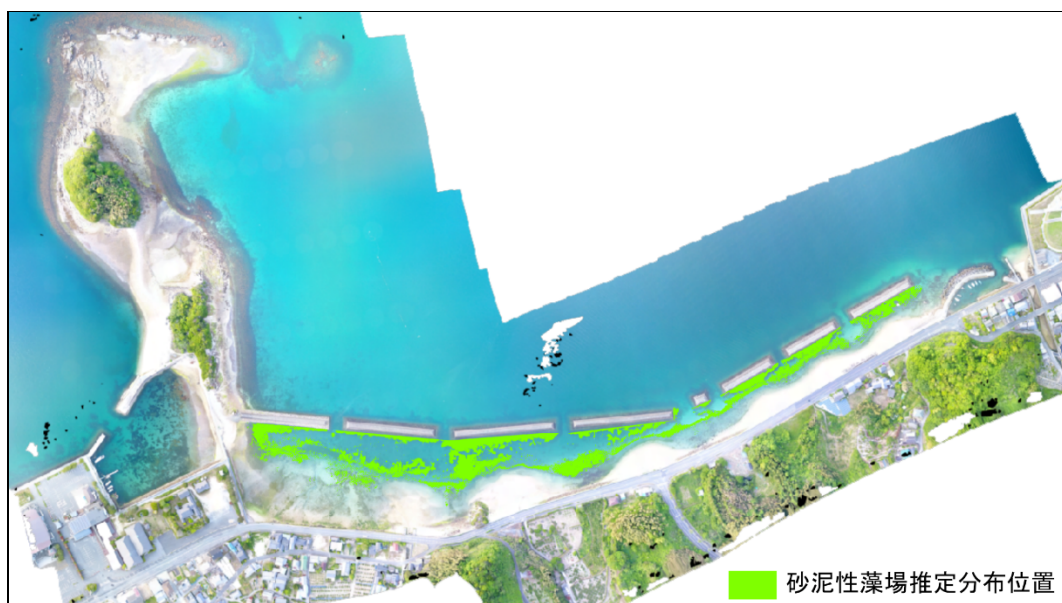


図 3-1-1(3) 周防大島における砂泥性藻場推定分布位置

3-1-2 海藻草の炭素含有率及び炭素吸収量

図 3-1-2 に海藻草の炭素含有率を示す。

2020 年 5 月における砂泥性藻場に生育していたアマモの葉及び地下部の炭素含有率は、それぞれ 31～37%及び 14～28%であり、葉が地下部よりも炭素含有率が高く、統計的な有意差があった($p<0.01$)。また、漂着していた葉の炭素含有率は 24～33%であり、砂泥性藻場に生育していた葉よりも低かった($p<0.05$)。アマモは 35%が難分解性の有機炭素であるが⁸⁾、漂流している間に易分解性の有機炭素が分解して炭素含有率が低くなったと考えられた。

2020 年 8 月における砂泥性藻場に生育していたアマモの葉及び地下部の炭素含有率は、それぞれ 32～39%及び 32～35%であり、葉と地下部の炭素含有率に差はなかった。また、漂着していた葉の炭素含有率は 31～39%であり、砂泥性藻場に生育していた葉と統計的な有意差はなかった($p>0.95$)。

2020 年 5 月におけるコアマモの葉及び地下茎の炭素含有率はそれぞれ 26～32%及び 17～33%であり、地御前及び尾津で両者に差があった。2020 年 8 月におけるコアマモの葉及び地下茎の炭素含有率はそれぞれ 26～32%及び 17～33%であり、やや葉の炭素含有率が高かった。

2020 年 5 月における、アカモク、クロメ及びウミウチワの炭素含有率は、それぞれ、33%、37%及び 33%、2020 年 8 月ではそれぞれ 31%、33%及び 30%であり、やや 2020 年 5 月で高かった。

2020 年 5 月における地御前、神代地先、周防大島におけるアマモのバイオマスはそれぞれ 1095 kg、3988 kg 及び 5802 kg であったことから、炭素量はそれぞれ 395 kgC、2067 kgC 及び 2139 kgC と見積もられた。また、2020 年 5 月における神代地先の人工岩礁性藻場における海藻着生量は 138 dry-g・m⁻²であり、炭素量は 1712 kgC と見積もられた。

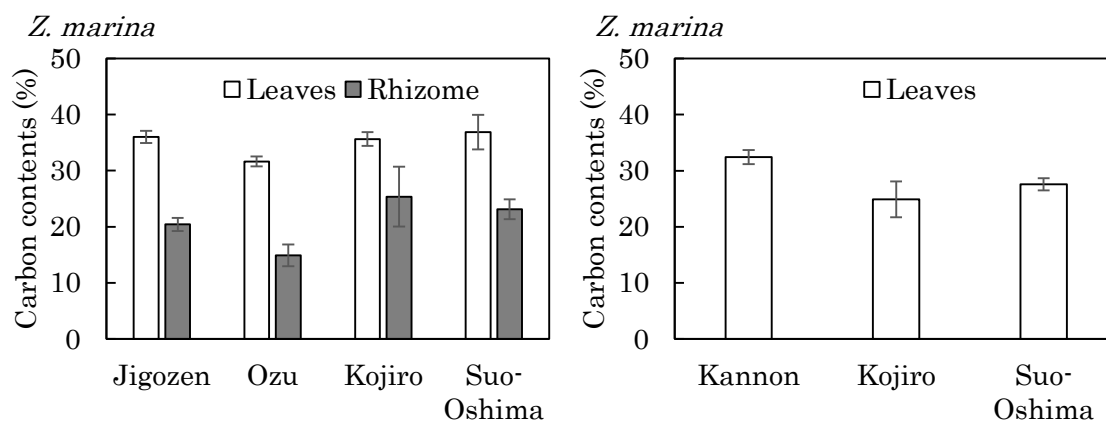


図 3-1-2(1) 2020 年 5 月のアマモの炭素含有率(左：生育、右：漂着)

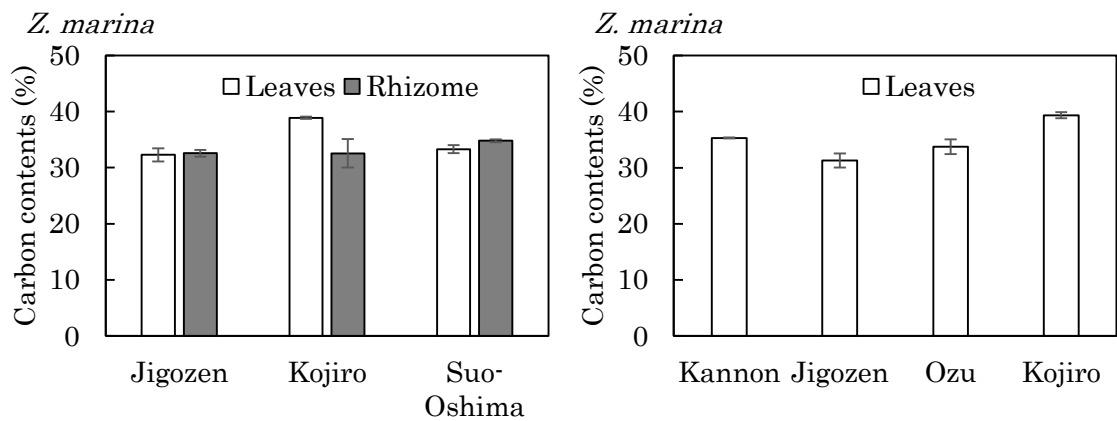


図 3-1-2(2) 2020 年 8 月のアマモの炭素含有率(左：生育、右：漂着)

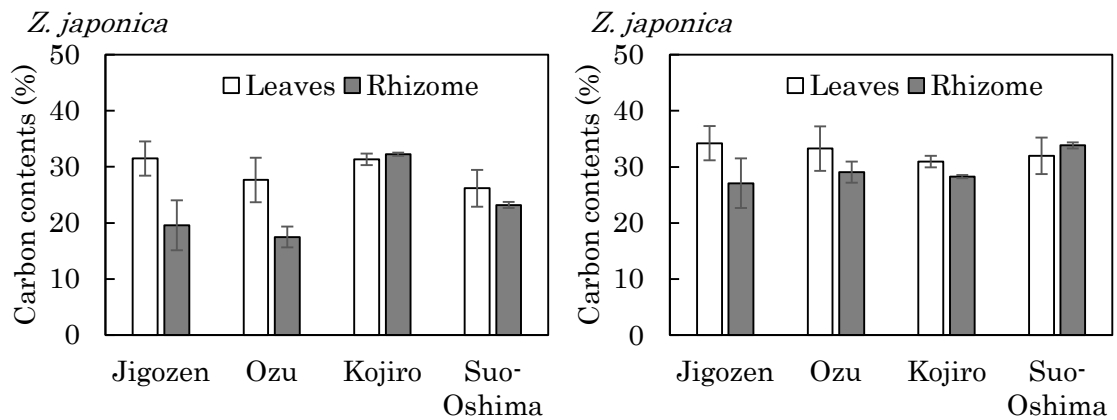


図 3-1-2(3) コアマモの炭素含有率(左：2020 年 5 月、右：2020 年 8 月)

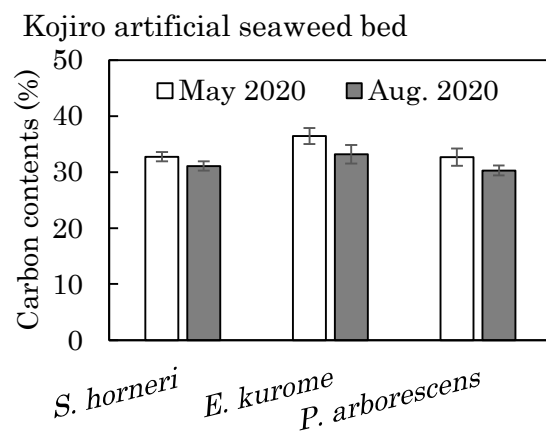


図 3-1-2(4) 人工岩礁性藻場に着生した海藻の炭素含有率

3-1-3 砂泥の炭素含有率

図 3-1-3 に砂泥中の炭素含有率を示す。砂泥性藻場の砂泥における炭素含有率は、2020 年 5 月では 0.12~0.18%、2020 年 8 月では 0.10~0.21%であり、月によって差はほとんどなかった。岩礁性藻場から沖側の砂泥域の炭素含有率は 0.19~0.90%であり、砂泥性藻場の砂泥よりも高く、統計的に有意差があった ($p<0.05$)。また岩礁性藻場から潮流方向の砂泥域の炭素含有率は 0.11~0.39%であり、砂泥性藻場の砂泥よりもやや高かった。砂泥性藻場は岩礁性藻場周辺砂泥域よりも水深が浅く、波や潮流によって有機炭素が溜まりにくいと考えられた。

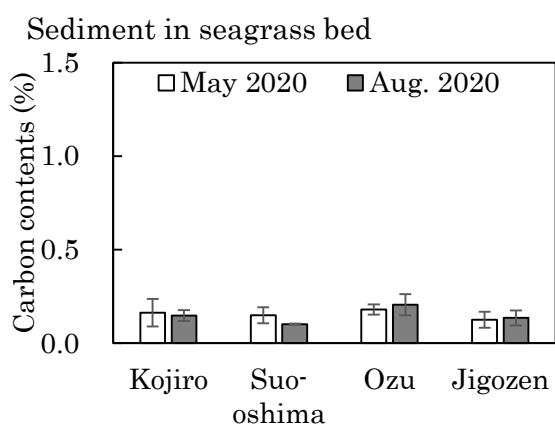


図 3-1-3(1) 砂泥性藻場の砂泥中の炭素含有率

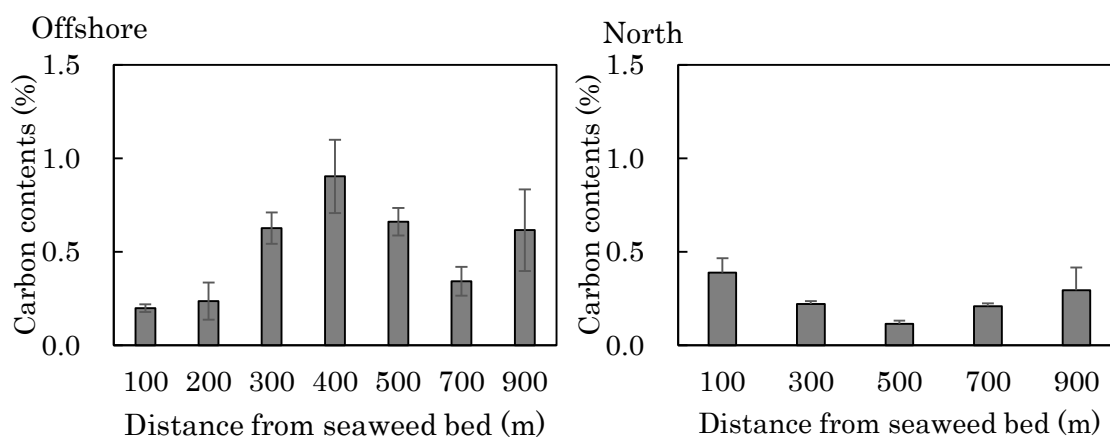


図 3-1-3(2) 岩礁性藻場周辺砂泥域の砂泥中の炭素含有率
(左：沖側、右：潮流方向)

3-1-4 海藻草及び砂泥の安定同位体比

図 3-1-4(1)に砂泥中における炭素窒素比と安定同位体比の関係を示す。砂泥性藻場内において C/N は、2020 年 5 月及び 2020 年 8 月でそれぞれ 7.8~11.0 及び 5.7~8.5 であり、2020 年 5 月で高かった ($p < 0.10$)。2020 年 8 月において、岩礁性藻場の沖側砂泥域の C/N は 9.7~36.3 であり陸起源の有機物であったと考えられるが、炭素安定同位体比の値が -20.5~-5.0 と陸起源の有機物としては高く、原因は不明である。岩礁性藻場の北側砂泥域においては、C/N と炭素安定同位体比の間に負の相関があり ($R = -0.632$)、海起源と陸起源の両方が考えられた。

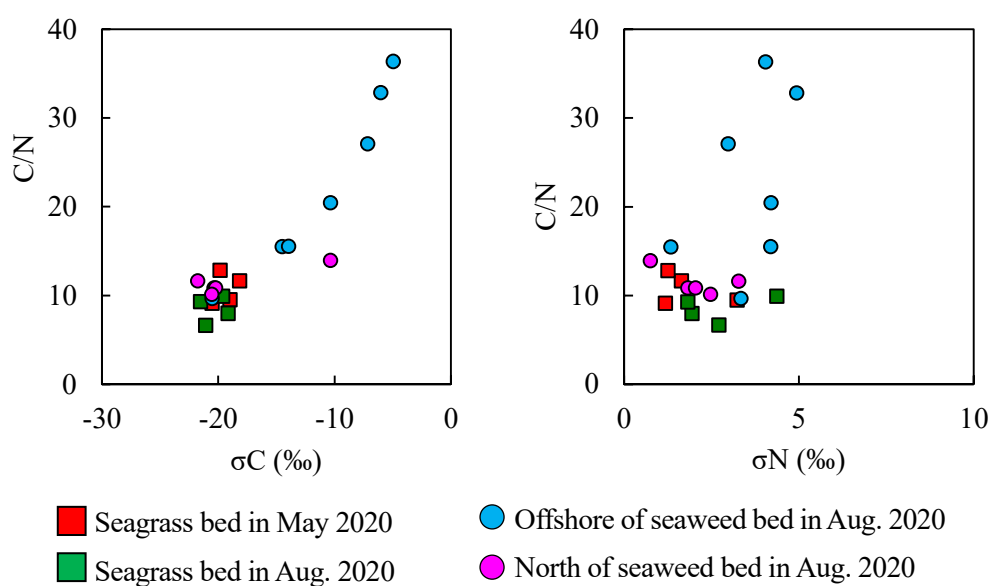


図 3-1-4(1) 砂泥中における炭素窒素比と安定同位体比の関係

図 3-1-4(2)に 2020 年 5 月における砂泥性藻場の砂泥中と神代岩礁性藻場もしくは漂着した海藻中の安定同位体比を示す。砂泥性藻場の砂泥中の窒素安定同位体比は、地御前が他地点と比べて大きかった。海藻中の窒素安定同位体比に大きな違いはなかったが、炭素同位体比は、海藻の種類によって差があった。砂泥性藻場の砂泥中の炭素同位体比は海藻と似ており、海藻が砂泥中の炭素起源になっていた可能性がある。

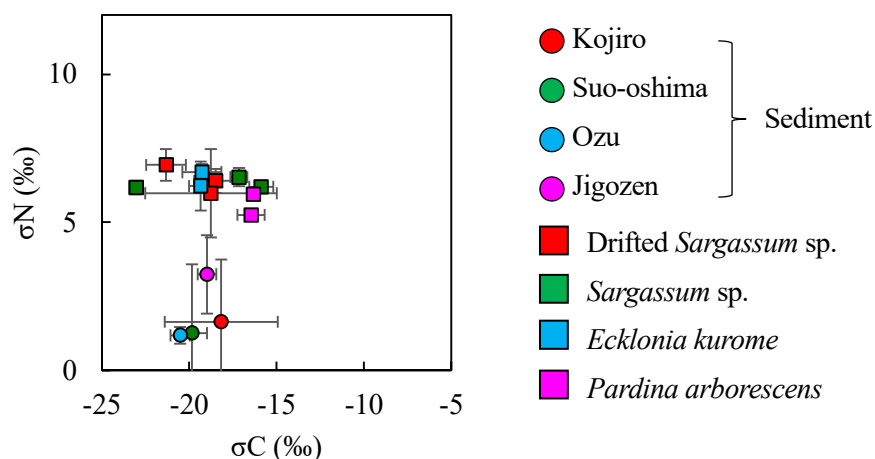


図 3-1-4(2) 砂泥中と神代岩礁性藻場もしくは漂着した海藻中の安定同位体比
(2020 年 5 月)

図 3-1-4(3)に 2020 年 5 月における砂泥性藻場の砂泥中とアマモ、図 3-1-4(4)にコアマモの安定同位体比を示す。砂泥性藻場の砂泥中の安定同位体比は、漂流していたアマモ、アマモの葉、アマモの地下茎、コアマモの葉及びコアマモの地下茎と比べて炭素、窒素安定同位体比ともに値が低かった。

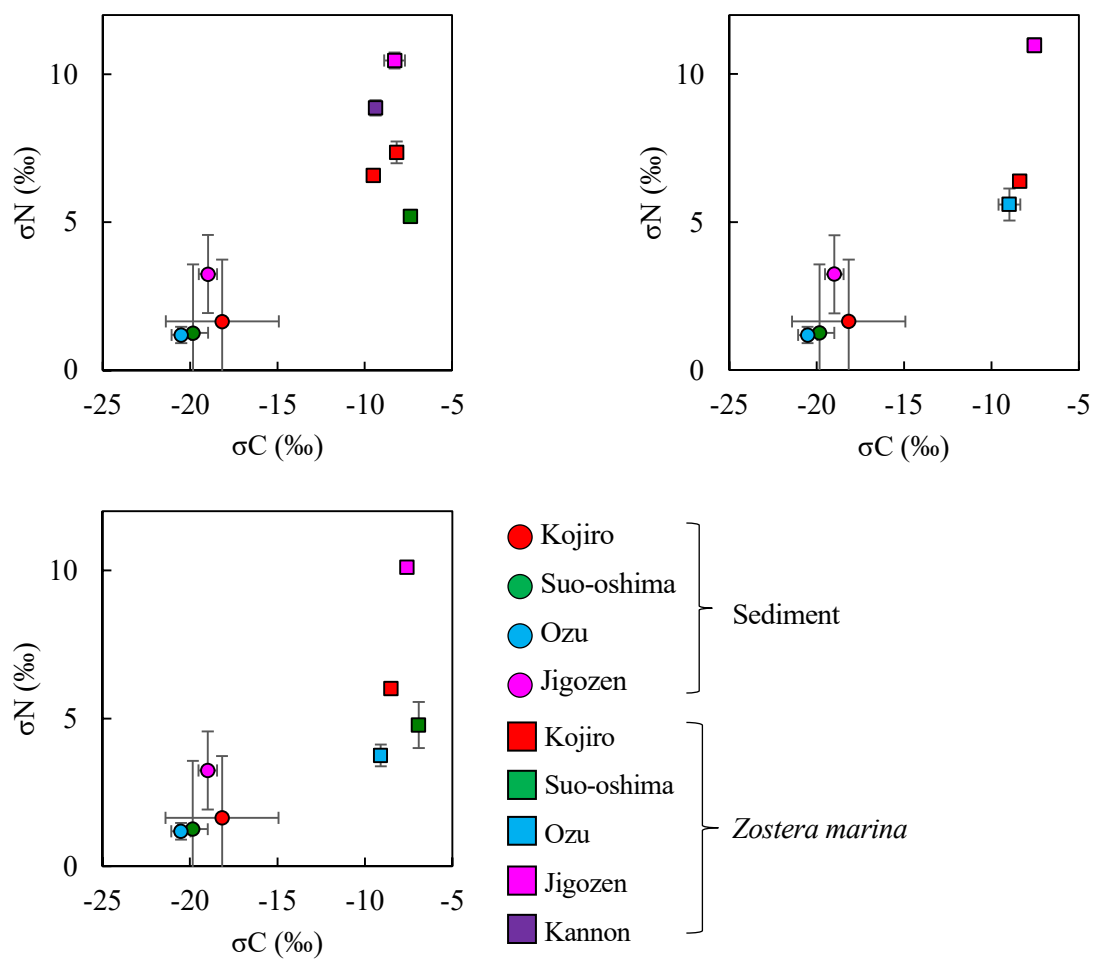


図 3-1-4(3) 砂泥性藻場の砂泥中と海草(アマモ)の安定同位体比(2020 年 5 月)
(左上:漂着していた葉、右上:葉、左下:地下茎)

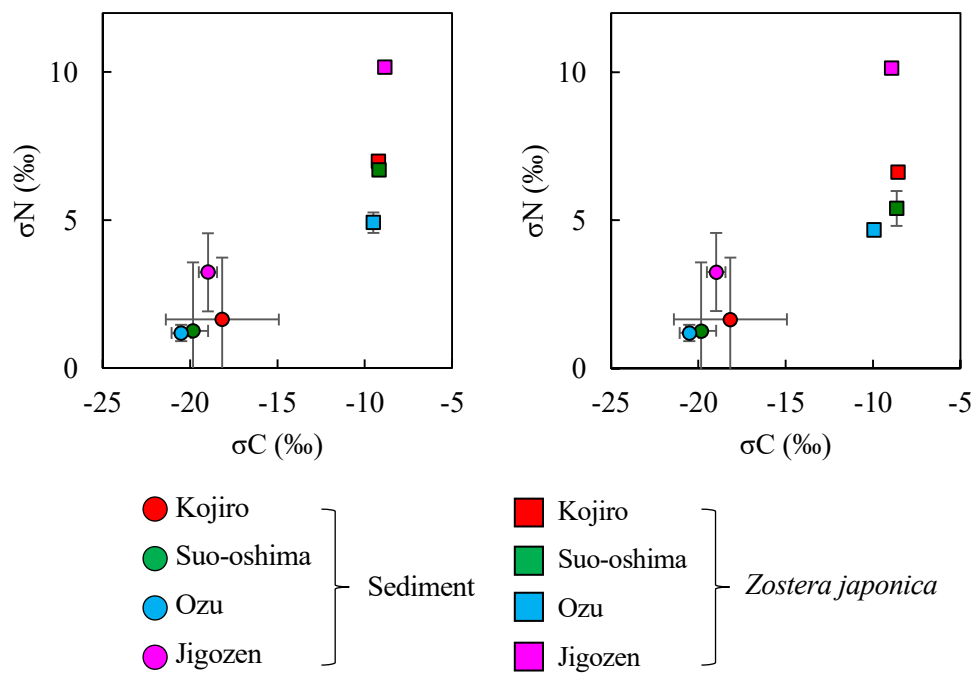


図 3-1-4(4) 砂泥性藻場の砂泥中と海草(コアマモ)の安定同位体比(2020 年 5 月)
(左: 葉、右: 地下茎)

図 3-1-4(5)に 2020 年 8 月における砂泥性藻場の砂泥中、神代岩礁性藻場周辺砂泥域及び神代岩礁性藻場に着生した海藻中の安定同位体比を示す。海藻中の炭素安定同位体比は海草の種類によって大きな違いはなかった。岩礁性藻場周辺砂泥域の潮流方向の砂泥の炭素同位体比は、1 地点を除いて砂泥性藻場の砂泥と似た値であった。

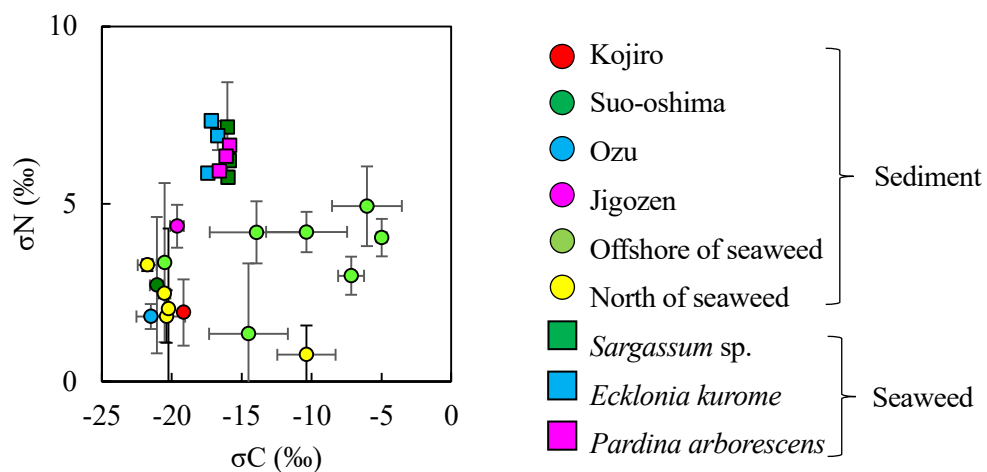


図 3-1-4(5) 砂泥中と海藻中の安定同位体比(2020 年 8 月)

図 3-1-4(6)に 2020 年 8 月における砂泥性藻場の砂泥中とアマモ、図 3-1-4(7)にコアマモの安定同位体比を示す。砂泥性藻場の砂泥中の安定同位体比は、アマモの葉、アマモの地下茎、コアマモの葉及びコアマモの地下茎と比べて炭素、窒素安定同位体比ともに値が低かった。また、岩礁性藻場周辺砂泥域の沖方向の砂泥の炭素同位体比は、海藻よりもアマモの漂流していたアマモやコアマモに近く、海草が炭素起源になっていた可能性がある。

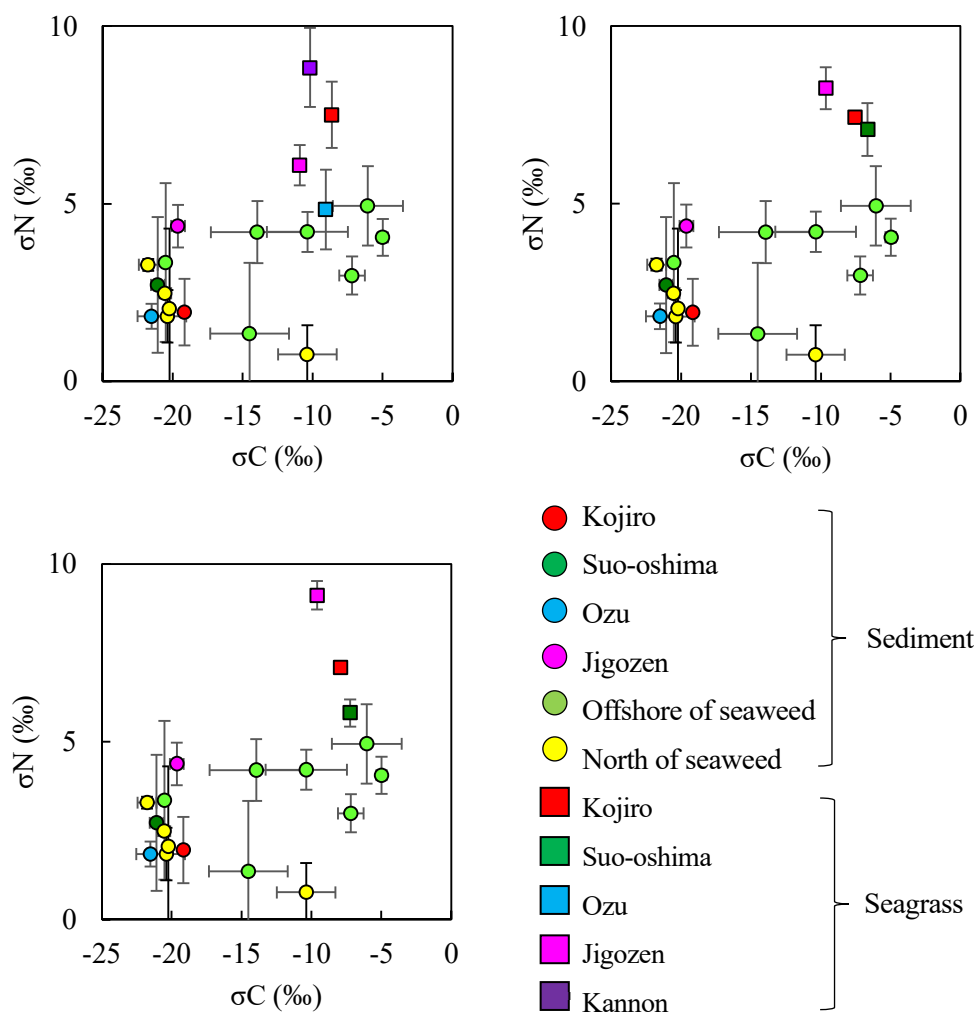


図 3-1-4(6) 砂泥中と海草(アマモ)の安定同位体比(2020 年 5 月)
(左上:漂着していた葉、右上:葉、左下:地下茎)

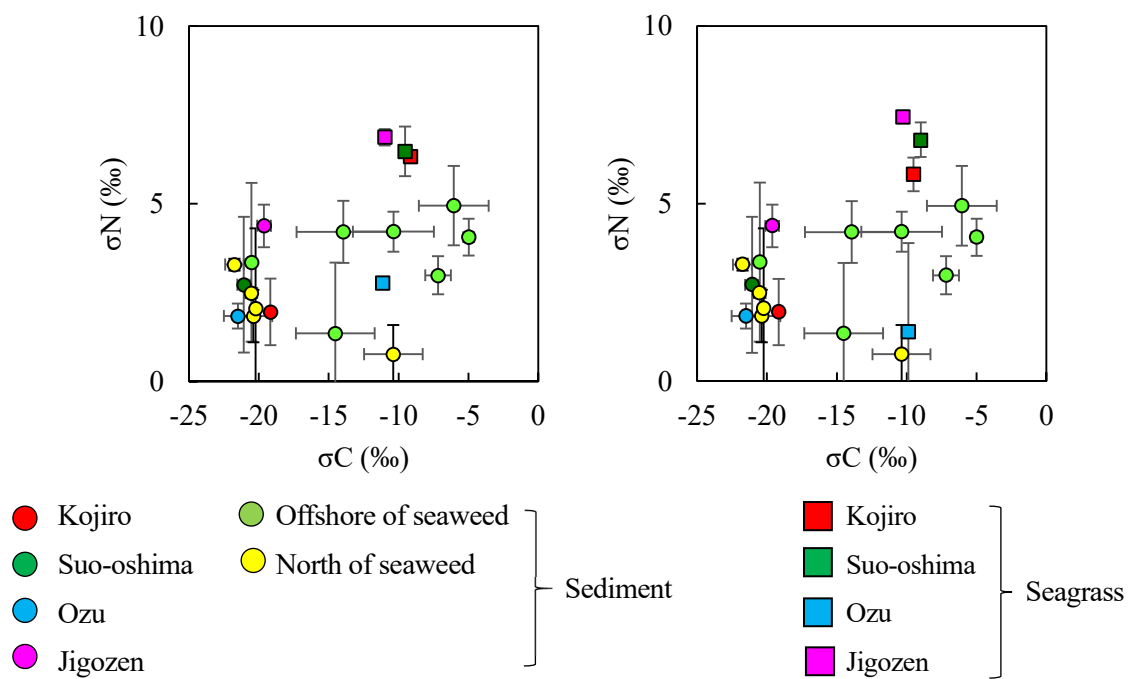


図 3-1-4(7) 砂泥中と海草(コアマモ)の安定同位体比(2020 年 8 月)

(左 : 葉、右 : 地下茎)

このことから、砂泥性藻場や岩礁性藻場周辺砂泥域の潮流方向における砂泥中の炭素源は海藻や陸起源有機物、岩礁性藻場周辺砂泥域の沖方向における砂泥域の炭素源は海草の寄与が高いと考えられた。

3-1-5 砂泥の環境 DNA

図 3-1-5(1)に砂泥性藻場内及び岩礁性藻場周辺砂泥域の砂泥中におけるアカモク DNA 濃度を示す。砂泥性藻場内において、2020 年 5 月が 2020 年 8 月よりもアカモク DNA 濃度は高く、統計的な有意差があった($p < 0.05$)。これは、アカモクが単年生海藻であり、5 月以降は枯れてしまい、8 月にはほとんど生育していないためと考えられた。

2020 年 8 月における岩礁性藻場周辺砂泥域においては、神代藻場内に比べて沖側方向のほうがアカモク DNA 濃度は高かった。また、岩礁性藻場の直近の砂泥域では沖側方向に比べて潮流方向のほうがアカモク DNA 濃度は高かった。

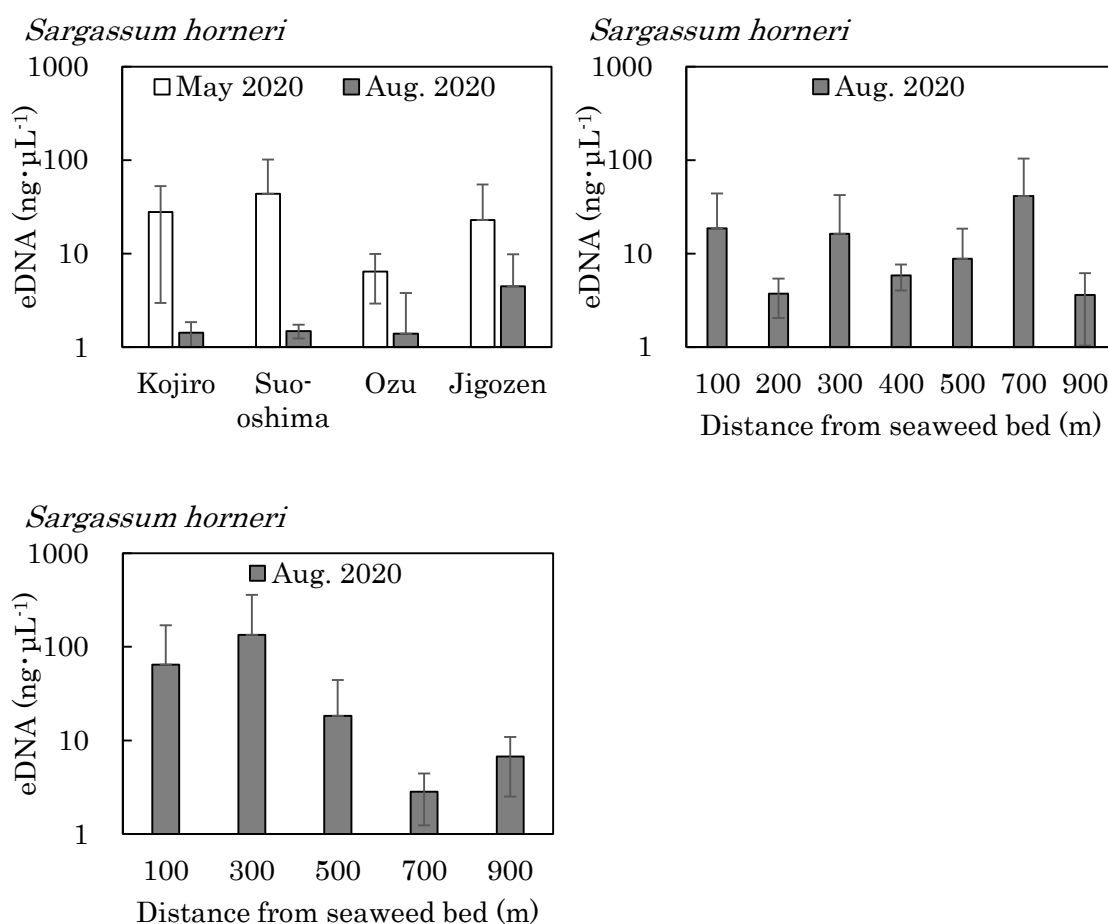


図 3-1-5(1) 砂泥中のアカモク DNA 濃度

(左上：砂泥性藻場内、右上：岩礁性藻場から沖側、左下：岩礁性藻場から潮流方向)

図 3-1-5(2)に砂泥性藻場内及び岩礁性藻場周辺砂泥域の砂泥中におけるクロメ DNA 濃度を示す。砂泥性藻場内において、周辺に岩礁域が少ない尾津及び地御前については、クロメ DNA は検出されなかった。

2020 年 8 月における岩礁性藻場周辺砂泥域においては、ほとんどの地点でクロメ DNA は検出されなかった。これは、岩礁性藻場において 2020 年 5 月以降クロメが衰退しており、クロメの漂流量が少なかったためと考えられた。また、岩礁性藻場から流出した後は、アカモクに比べてクロメの移動能力が小さいことも岩礁性藻場周辺砂泥域のほとんどの地点でクロメ DNA 濃度が検出されなかったことも原因として推察された。

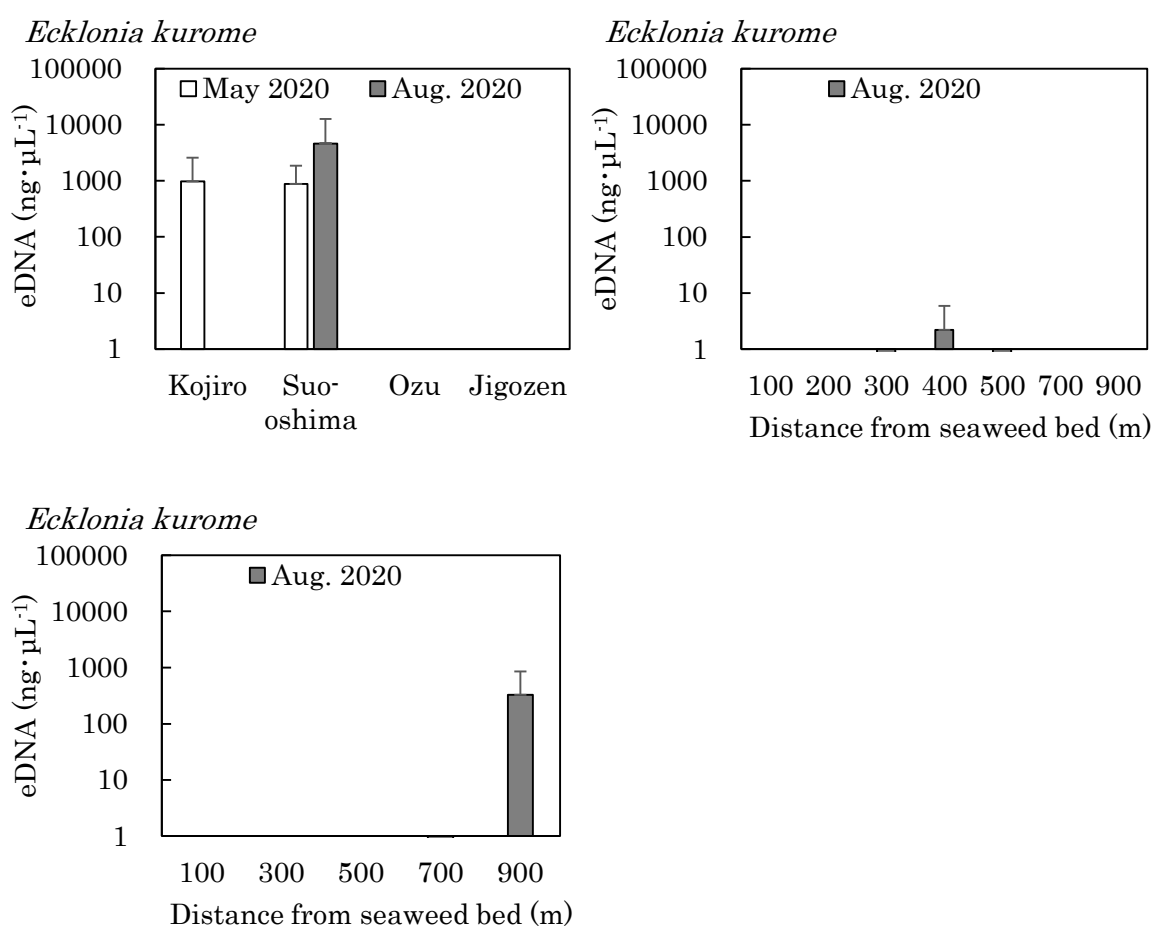


図 3-1-5(2) 砂泥中のクロメ DNA 濃度

(左上：砂泥性藻場内、右上：岩礁性藻場から沖側、左下：岩礁性藻場から潮流方向)

図 3-1-5(3)に砂泥性藻場内及び岩礁性藻場周辺砂泥域の砂泥中におけるアマモ DNA 濃度を示す。砂泥性藻場内において、2020 年 5 月と 2020 年 8 月でアマモ DNA 濃度に大きな差はなかった。今回調査を行った砂泥性藻場におけるアマモは、7 月以降に衰退はするものの多年生であることから、季節による違いがほとんどなかったと考えられた。

2020 年 8 月における岩礁性藻場周辺砂泥域においては、沖側方向と潮流方向でアマモ DNA 濃度に差はほとんどなかった。

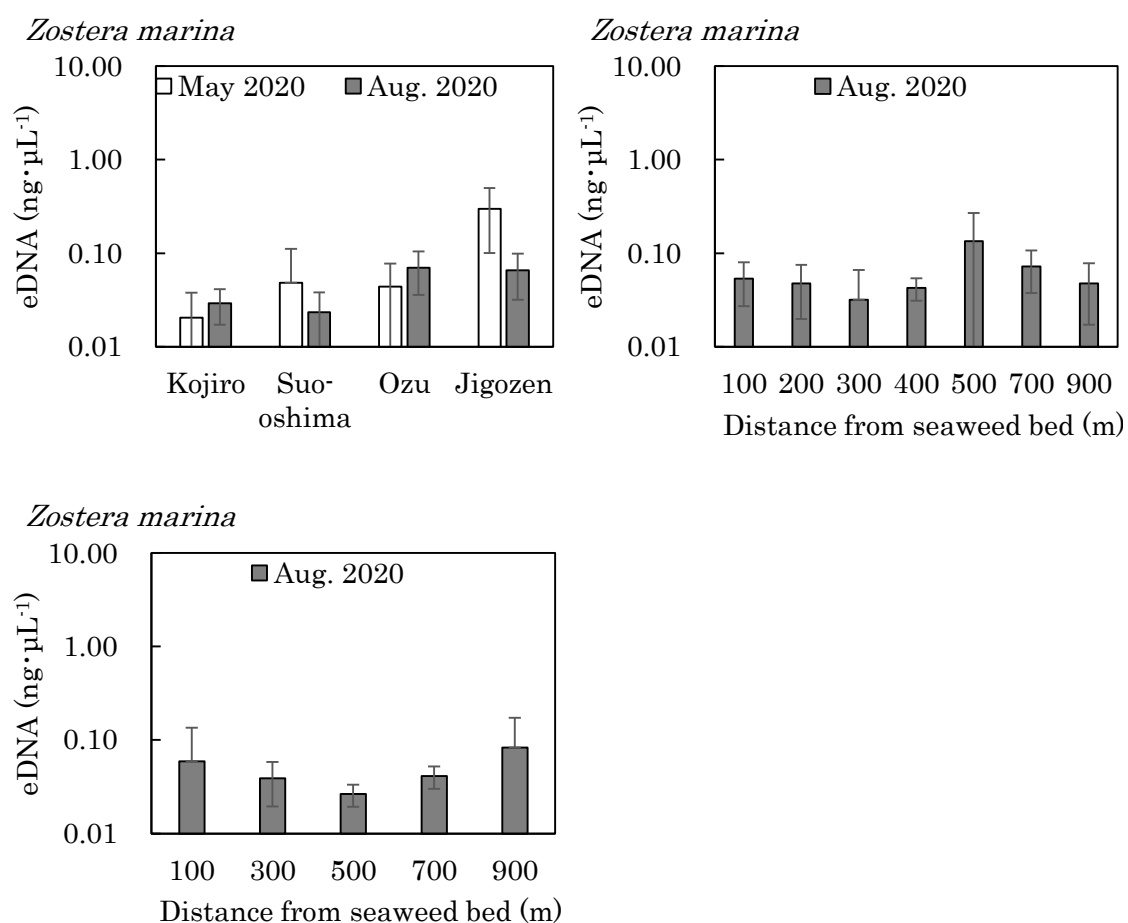


図 3-1-5(3) 砂泥中のアマモ DNA 濃度

(左上：藻場内、右上：岩礁性藻場から沖側、左下：岩礁性藻場から潮流方向)

図 3-1-5(4)に砂泥性藻場内及び岩礁性藻場周辺砂泥域の砂泥中におけるコアマモ DNA 濃度を示す。砂泥性藻場内において、2020 年 5 月が 2020 年 8 月よりもややコアマモ DNA 濃度は高かった。

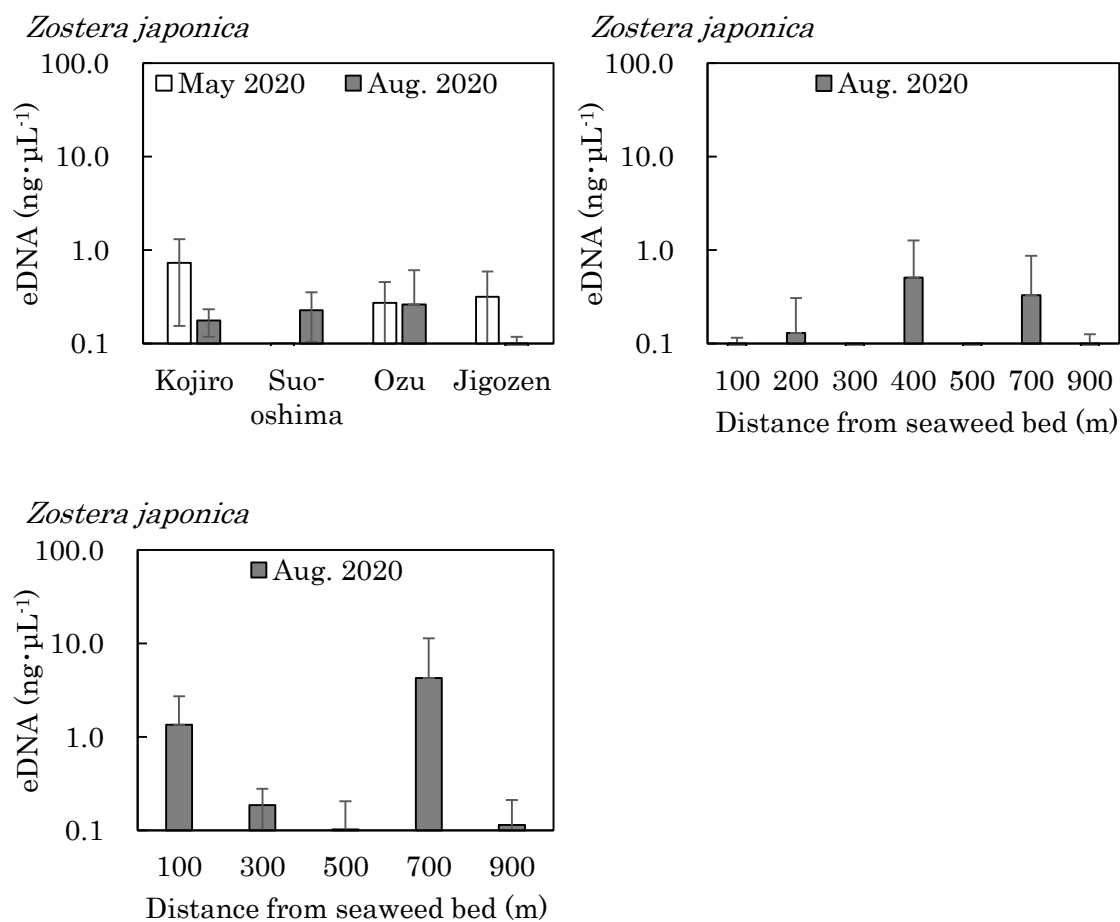


図 3-1-5(4) 砂泥中のコアマモ DNA 濃度
(左上：藻場内、右上：岩礁性藻場から沖側、左下：岩礁性藻場から潮流方向)

3-2 漂流海藻シミュレーション

図 3-2-1(1)は、底層における神代地先の岩礁性藻場から海藻の漂流状況を示している。岩礁性藻場の海藻は西側の大島瀬戸及び周防大島の海岸に沿って漂流しており、広島湾の北側エリアにはほとんど漂流していなかった。このことから、造成をした岩礁性藻場で吸収した炭素は、周防大島周辺の浅海域で固定されている可能性が高い。

図 3-2-1(2)は、底層における神代砂泥性藻場から海草の漂流状況を示している。神代砂泥性藻場の海草は岩礁性藻場からの海藻と同様に西側の大島瀬戸及び周防大島の海岸に沿って漂流しており、広島湾の北側エリアにはほとんど漂流していなかった。このことから、神代周辺の砂泥性藻場で吸収した炭素は、周防大島周辺の浅海域で固定されている可能性が高い。

図 3-2-1(3)は、底層における地御前砂泥性藻場から海草の漂流状況を示している。地御前砂泥性藻場の海草は南西へ移動し、主に大野瀬戸に漂流していた。また、神代や周防大島などの南側にはほとんど漂流していなかった。このことから、地御前周辺の砂泥性藻場で吸収した炭素は、大野瀬戸周辺の浅海域で固定されている可能性が高い。

図 3-2-1(4)は、底層における周防大島砂泥性藻場から海草の漂流状況を示している。周防大島砂泥性藻場の海草は海岸に沿って北東へ移動し、徐々に北西にも漂流していた。

このように沿岸域に近い岩礁性藻場の海藻や砂泥性藻場の海草は海岸に沿って漂流し、主には浅海域の砂泥域で海藻草は炭素固定されていることが推察された。

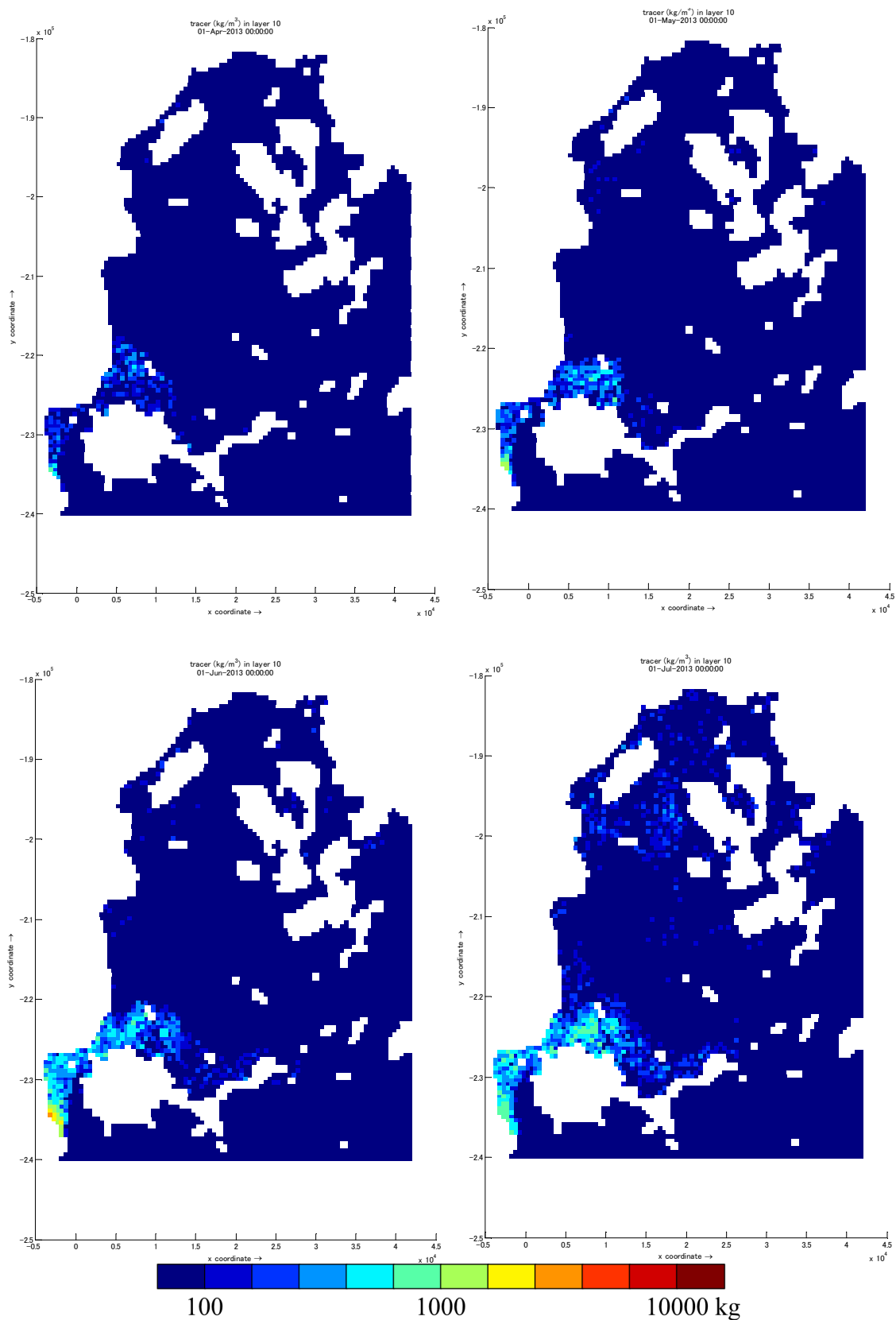


図 3-2-1(1) 岩礁性藻場(神代人工岩礁性藻場)からの海藻漂流結果
(左上: 1 ヶ月後、右上: 2 ヶ月後、左下: 3 ヶ月後、右下: 4 ヶ月後)

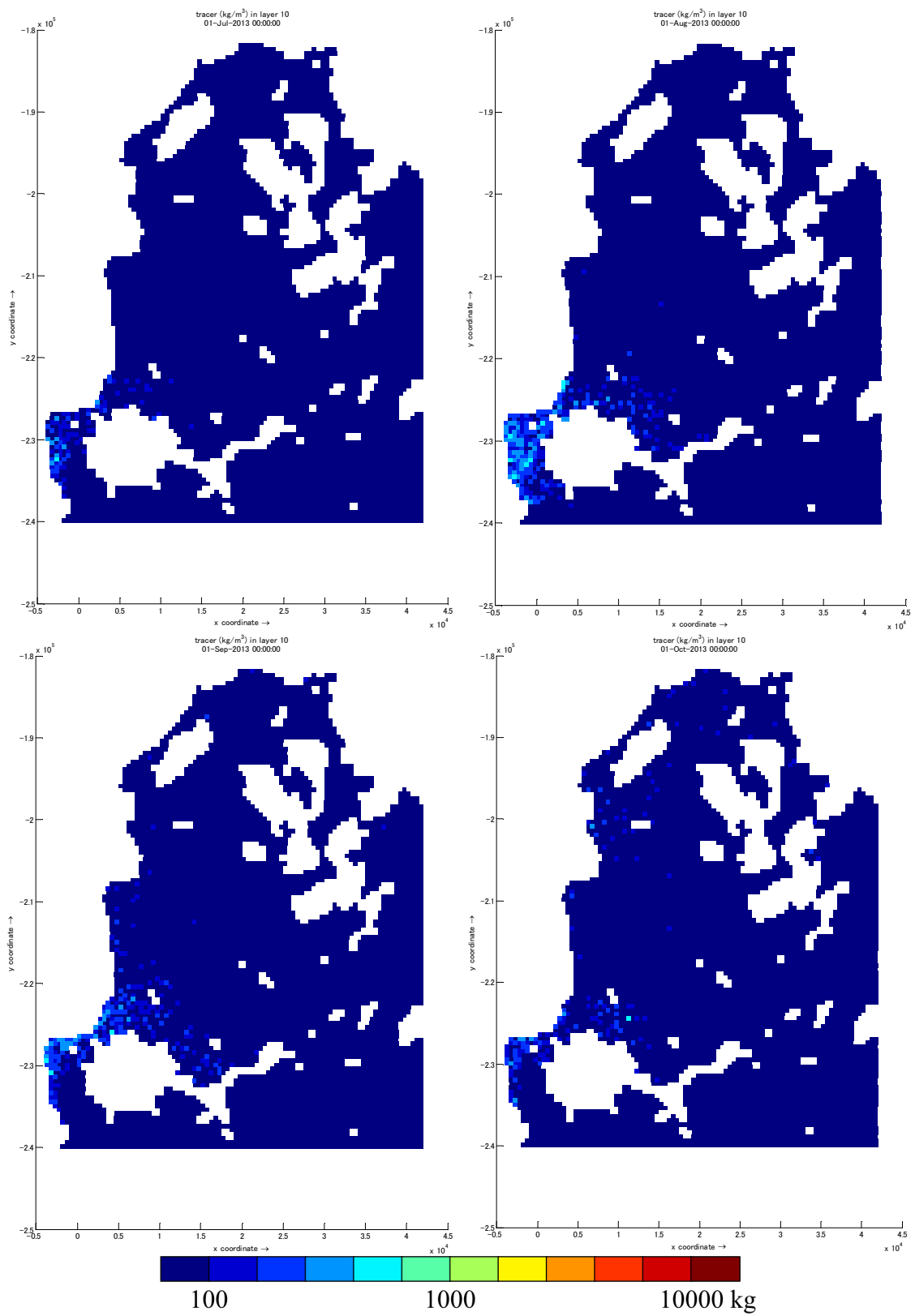


図 3-2-1(2) 砂泥性藻場(神代)からの海草漂流結果
(左上: 1 ヶ月後、右上: 2 ヶ月後、左下: 3 ヶ月後、右下: 4 ヶ月後)

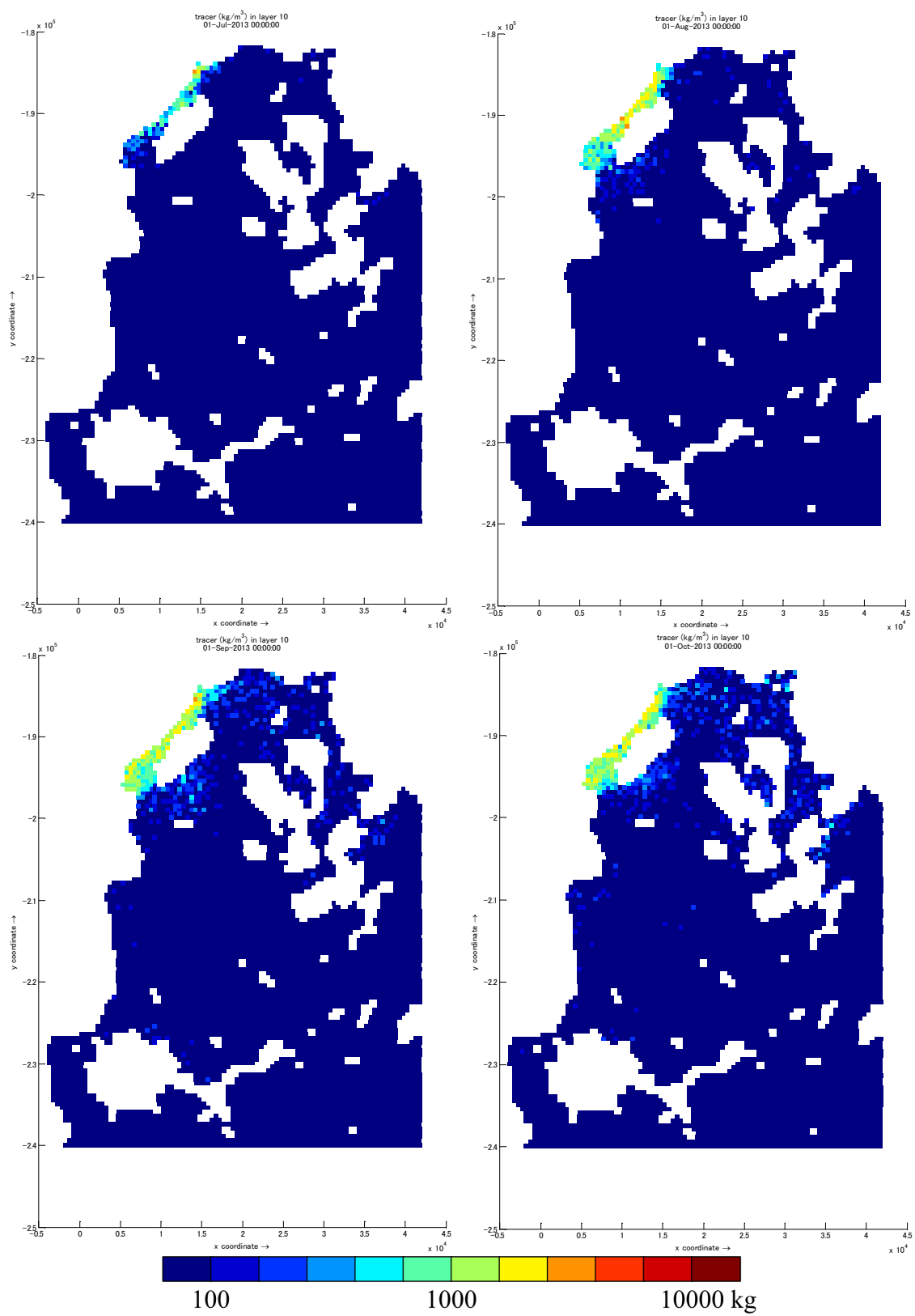


図 3-2-1(3) 砂泥性藻場(地御前)からの海草漂流結果
(左上: 1 ヶ月後、右上: 2 ヶ月後、左下: 3 ヶ月後、右下: 4 ヶ月後)

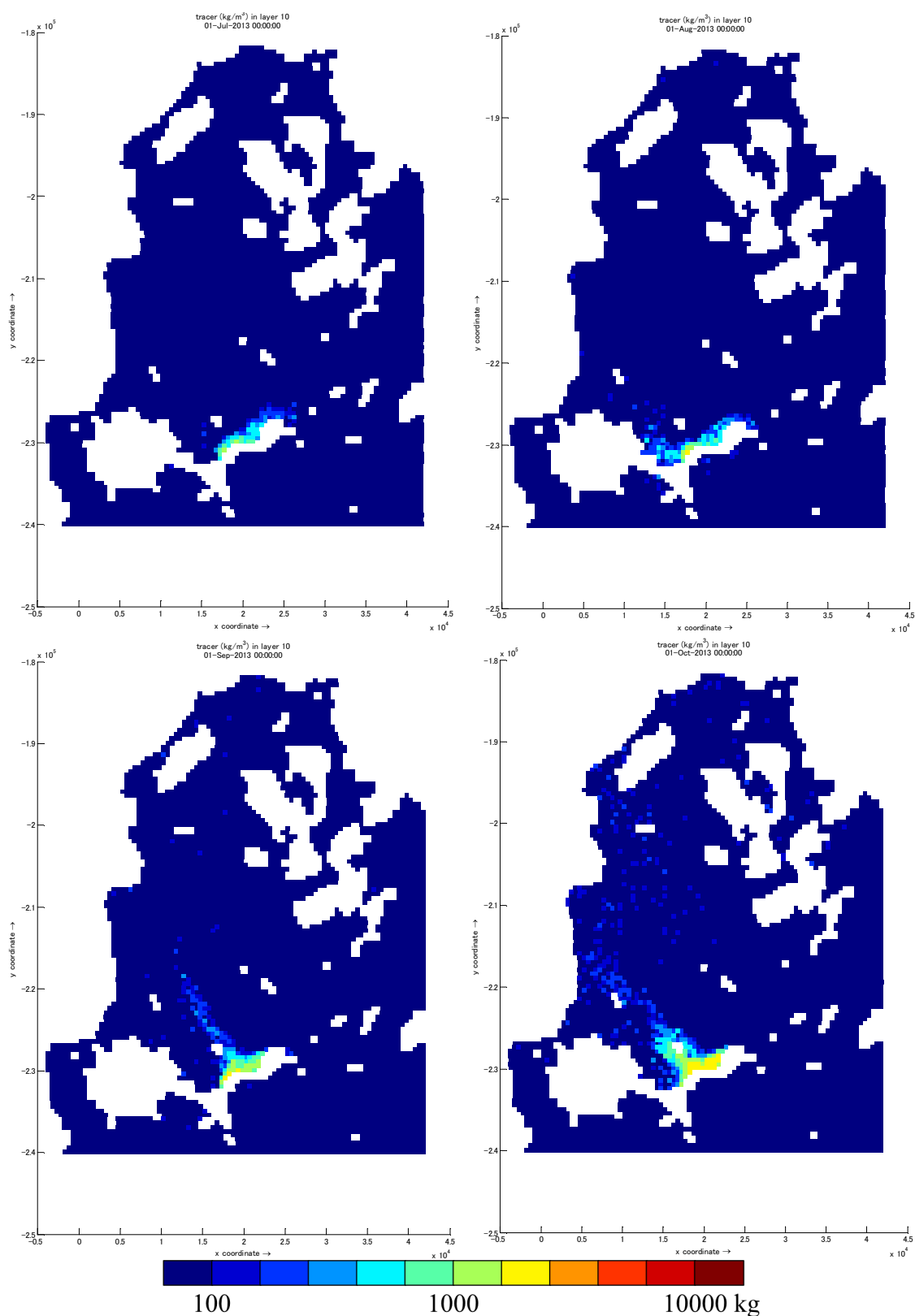


図 3-2-1(4) 砂泥性藻場(周防大島)からの海草漂流結果
(左上: 1 ヶ月後、右上: 2 ヶ月後、左下: 3 ヶ月後、右下: 4 ヶ月後)

4. 研究のまとめ

本研究では、広島湾において砂泥域及び岩礁域における沿岸域生態系による炭素吸収能や炭素固定寄与度について明らかにするとともに、スラグ製品によって創出された岩礁性藻場生育基盤によって形成される生態系による炭素固定能について検証を行った。得られた結果は以下のとおりである。

- 1) 2020 年 5 月における地御前、神代地先、周防大島における海草中の炭素量はそれぞれ 395 kgC、2067 kgC 及び 2139 kgC と見積もられた。また、2020 年 5 月における神代地先の人工岩礁性藻場における海藻中の炭素量は 1712 kgC と見積もられた。
- 2) 岩礁性藻場から沖側の砂泥域の炭素含有率は砂泥性藻場の砂泥よりも高く、統計的に有意差があった。砂泥性藻場は岩礁性藻場周辺砂泥域よりも水深が浅く、波や潮流によって有機炭素が溜まりにくいと考えられた。
- 3) 砂泥性藻場や岩礁性藻場周辺砂泥域の潮流方向における砂泥中の炭素源は海藻や陸起源有機物、岩礁性藻場周辺砂泥域の沖方向における砂泥域の炭素源は海草の寄与が高いと考えられた。
- 4) シミュレーション結果から沿岸域に近い岩礁性藻場の海藻や砂泥性藻場の海草は海岸に沿って漂流し、主には浅海域の砂泥域で海藻草は炭素固定されていることが推察された。
- 5) スラグ製品によって創出された岩礁性藻場生育基盤に着生した海藻によって炭素は吸収され、海藻が漂流し、砂泥域の炭素固定に寄与していることが示唆された。

謝辞

本研究は、公益財団法人 JFE21 世紀財団の支援により実施されました。ここに謝意を表します。

引用文献

- 1) 杉本憲司, 中野陽一, 高濱繁盛, 山本民次, 土田孝, 関根雅彦, 岡田光正, 製鋼スラグを用いた岩礁性藻場生育基盤の造成, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 70(2), I_1231-I_1235, 2014.
- 2) 杉本憲司, 中野陽一, 高濱繁盛, 山本民次, 土田孝, 関根雅彦, 岡田光正, 岩礁性藻場生育基盤材料の種類及び造成形状の違いによる海藻着生と魚類溜集の効果, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 72(2), I_10283-I_1028, 2016.
- 3) 杉本憲司, 菅野孝則, 高濱繁盛, 高嶋ひかる, 高田陽一, 岡田光正, フェロマンガンスラグによる岩礁性藻場造成生育基盤材料への適用, 水環境学会誌, 42(3), 123-132, 2019.
- 4) 杉本憲司, 高嶋ひかる, 高田陽一, 菅野孝則, 高濱繁盛, 岡田光正, 長期的なモニタリングによる造成時期が異なる人工岩礁性藻場の生物遷移, 土木学会論文集 B2(海岸工学),

76(2), I_967-I_972, 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), 75(1), 10-20, 2019.
- 6) 国分秀樹, 山田浩且, 伊勢湾内のアマモ場における炭素固定量の検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 71(2), I_1381-I_1386, 2015.
- 7) Sosuke Otani, Akira Umehara, Satoshi Asaoka, Naoki Fujii, Tetsuji Okuda, Daichi Tsuji, Haruka Miyagawa, Satoshi Nakai, Wataru Nishijima, Annual dynamics of benthic primary production by macrophytes on a sand flat in the eutrophic Hiroshima Bay, Japan, Regional Studies in Marine Science, 34, 2020.
- 8) 国分秀樹, 石井裕一, 宮崎一, 矢部徹, 伊勢湾内のアマモ場における炭素固定量の検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 73(2), I_1261-I_1266, 2017.