

広島県廿日市市地先における 石積み護岸ブロック上の海藻植生と環境の変遷

島袋 寛盛^{1*}・三浦 俊一²・真鍋 康司²・吉田 吾郎³

¹ 国立研究開発法人水産研究・教育機構水産技術研究所廿日市庁舎
(〒739-0452 広島県廿日市市丸石 2-17-5)

² 水圏リサーチ株式会社 (〒730-0055 広島県広島市中区南千田西町 5-12-701)

³ 国立研究開発法人水産研究・教育機構水産技術研究所長崎庁舎
(〒851-2213 長崎県長崎市多以良町 1551-8)

Hiromori Shimabukuro^{1*}, Syunichi Miura², Yasushi Manabe² and Goro Yoshida³: Transition of seaweed vegetation and coastal environment along the stone-built seawall mound in Hatsukaichi City, Hiroshima Prefecture, Japan. Jpn. J. Phycol. (Sôru) 71: 81–91, July 10, 2023

In 2021, seaweed vegetation and environment were surveyed along the stone-built seawall mound surrounding a reclaimed land on the coast of Maruishi, Hatsukaichi City, Hiroshima Pref., Japan, and compared with the vegetation surveyed at the past survey. A total of 61 species of seaweed were confirmed to grow, of which the large seaweeds that make up the beds were 2 species of temperate kelp, 5 species of *Sargassum*, and 1 species of seagrass. Numbers of seaweed species have not changed since the 2009 survey, but coverage has decreased. Precipitation in the neighborhood has increased compared to the past, and it is thought that the decrease in seaweed is due to the accumulation of increased fluid mud on the seaweed and on the substrate. In recent years, in order to realize a carbon-free society, it has been required to conserve seaweed beds on artificial coasts and create new beds. The growth of seaweed is caused by various environmental factors, and we would like to continue monitoring to obtain basic knowledge.

Key Index Words: Flora, Hiroshima Bay, Sargassum, seaweed, stone-built mound, succession, *Zostera marina*

¹Hatsukaichi Field Station, Fisheries Technology Institute, Japan Fisheries Research and Education Agency, 2-17-5 Maruishi, Hatsukaichi, Hiroshima 739-0452, Japan

²Aquatic Research Inc, 5-12-701 Minamisendanishi, Nakaku, Hiroshima 730-0055, Japan

³Nagasaki Field Station, Fisheries Technology Institute, Japan Fisheries Research and Education Agency, 1511-8 Taira-machi, Nagasaki, Nagasaki 851-2213, Japan

* Author for correspondence: shimabukuro_hiromori84@fra.go.jp

緒言

気候変動は地球上の生物や生態系の変化、生物多様性の損失だけではなく、我々人類の活動とも相互的に作用しており、食料生産や経済、社会活動にも大きな影響を与えている。またそれらの変化は陸上だけで生じるのではなく、海域へも大きな影響を及ぼしている (IPCC 2022)。日本においても水温上昇による沿岸域の環境変化は、藻場の衰退や消失を招き海産植物やそれに伴う海産魚介類の減少などを引き起こしている (水産庁 2015)。これらの変化を及ぼしている気候変動を緩和させるためには温室効果ガスである CO₂ の世界的な排出を減少させることが必要であるが、すでにそれだけでは間に合わず、今ある大気中の CO₂ を取り省くための技術や吸収源の創出も必要であることが指摘されている (Tong *et al.* 2019)。そのための海洋で行える対策として、洋上風力発電などの再生可能エネルギーの活用や海上輸送の脱炭素化などに加え、ブルーカーボンの活用が強く求められている (Hoegh-

Guldborg *et al.* 2019)。

ブルーカーボンとは地球温暖化に関わる温室効果ガスのうち、海洋生物の作用によって大気中から海中に吸収された CO₂ 由来の炭素のことを指している (Nellemann *et al.* 2009)。このブルーカーボンの吸収源は沖合の植物プランクトンや、海草・海藻、マングローブなど海域の植物であり、これらがつくるブルーカーボン生態系の保護や創出が重要な課題となっている (堀・桑江 2017)。従って総延長およそ 35,000 km に及ぶ海岸線や広大な海域を有する日本にとってブルーカーボンの活用はとても重要である。

日本列島は 800 余りの島で構成され、砂浜や磯、干潟など変化に富んだ自然海岸から日本人は古来より多くの恵みを受けてきた。しかし 1960～1970 年代には多くの沿岸域で開発がおこなわれ、1993 年には自然海岸の割合が 55% にまで減少した。特に東京などの都市部では人工海岸率は 100% に近く、自然海岸はほとんど残っていない (敷田・小荒井 1997)。

瀬戸内海も例外ではなく、高度経済成長期からさらにさかのぼる400年以上前から塩田や田畑の開発、宅地や工業用地の造成など、その時代ごとの目的のために多くの海岸改変が行われてきた(松田・堀 2010)。

埋め立てや護岸工事などにより出現した人工の海岸構造物には、港湾などでみられる垂直のコンクリート壁や、離岸堤や防波堤でみられる消波ブロック、天然石を積み上げて形成されたものなどがある。人工海岸はその建設時において浅海域の環境に大きな影響を与え、従来あった生態系を変え、時に消失させてしまう場合もある。しかしその逆に、構造物が生物に新たな着生面を供給し、周辺の環境も変え生物量の多い人工岩礁域となる場合もある(大野 1988, 濱野ら 1989)。特に近年これらの構造物においては自然調和型の施行を行うことが求められるようになり、天然石の使用や自然海岸を模した傾斜構造物が多くなりつつある(安藤ら 2002, 酒向ら 2011)。これらの構造物は海藻類の生育に好適な場合が多く、大型海藻類が繁茂することも少なくない。数十年スケールの陸域の植生遷移と比べて海藻類は加入や遷移の過程が速く、大型の海藻類が定着すれば極めて速く生態的な極相に達すると考えられている(片田 1963, 大野 1988)。上述したブルーカーボンは天然の海岸に生育する海藻だけではなく、人工海岸に成立する藻場や養殖された海藻も対象であり、それらもブルーカーボン生態系のひとつとなる。よって自然海岸だけではなく人工的に創出された護岸などに成立する藻場においても、継続的なモニタリングが今後さらに重要となってくる。

本研究の調査海域にある石積み護岸マウンドは1994～1995年に詳細な植生調査が初めて行われた(寺脇ら 1998)。またその15年後の2009年にも同様の調査が行われ(島袋ら 2015)、その後およそ10年が経過した。そこで本研究では、石積み護岸マウンド周辺の海藻・海草植生と、それを取り巻く底質、動物、温度、降水量などの環境を明らかにするとともに、長期的な温度や降水量の変化が植生にどの様に影響しているかを考察した。

材料と方法

調査地に設定した広島県廿日市市丸石の埋め立て地護岸の石積みマウンドは瀬戸内海西部の広島湾奥部にあり、対岸には厳島神社のある厳島が位置する(Fig. 1)。調査地から対岸の厳島まではおよそ1.5 kmであり、最大でおよそ350 cmに達する潮汐による流動以外は一年を通して比較的穏やかな海域である。石積みマウンドは、水産技術研究所廿日市庁舎等が立地する1968年に竣工した埋め立て地周囲の人工護岸の基盤であり、直径50～100 cm程度の天然石を積み上げて作られている(Figs 2, 3)。その天頂部はD.L.(基準水面)+2.0 mに設定され、最下部はおよそD.L. 0 mからそれ以深で、側面は傾斜度が30～40度になっている(Fig. 3)。2021年2月16日と17日に石積みマウンドとその周辺において(Fig. 1)、寺脇ら(1998)や島袋ら(2015)と同じ手法を用いて海藻・海草類の植生調査を行った。

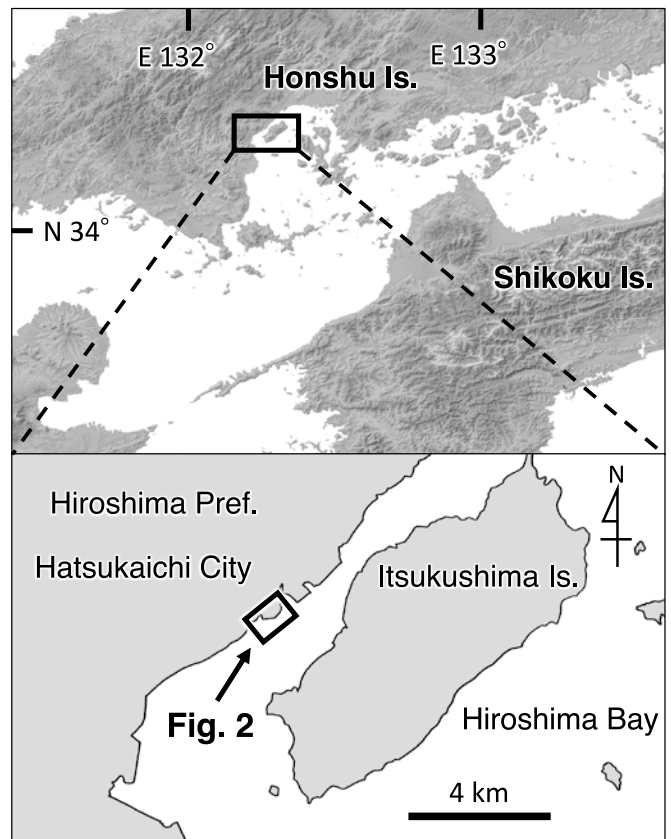


Fig. 1. Location of this study site on the Coast of Hiroshima Bay in the western Seto Inland Sea.

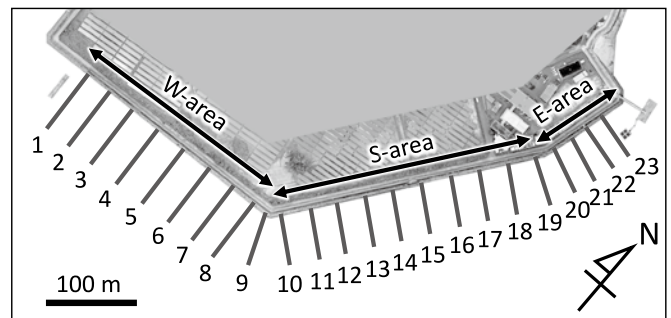


Fig. 2. Arrangement of survey lines with the bottom topography along the stone-built seawall mound at the study site.

石積みマウンドは、南西方向・南方向・南南東方向に向いた三面に分かれている。本論文ではこれらを簡略化して、それぞれW-area(汀線距離約250 m)、S-area(同約300 m)、E-area(同約80 m)とした(Fig. 2)。調査測線は、それぞれの面においておよそ30 mの等間隔でマウンド上の汀線に対し垂直に配置し、Line 1～9(W-area)、Line 10～19(S-area)、Line 20～23(E-area)の計23本を設置した(Fig. 2)。各調査測線では、マウンド上の天頂部の陵角部を起点とし、マウンド傾斜面とその下の自然海岸を含む形で沖方向に測線を設置した(Fig. 3)。測線上の起点からの距離0 m, 1 m, 2 m, 3 m,

4 m, 以後 2 m の間隔で 20 m までを調査点とした。スキューバダイビングにより、測線上の調査点ごとに 50 cm 方形枠を設置し、枠内の底質及び海産植物種とその被度を記録した。また、動物相を把握するため各ライン上に出現する動物類を目視により記録し、マガキ *Crassostrea gigas* とフジツボ類については被度を、ウニ類、ナマコ類については個体数を記録した。底質は、巨礫 (boulder; 径 256 mm 以上)・大礫 (cobble; 径 256 ~ 60 mm)・小礫 (gravel; 径 60 ~ 2 mm)・砂 (sand; 径 2 ~ 0.06 mm)・泥 (clay; 径 0.06 mm 以下) の 5 段階に分け記録した (文部省 1984)。また調査地における詳細な出現海藻相を把握するため、上記の調査に加え、2021 年 5 月 13 日の干潮時に徒歩による調査を行い、石積みマウンド上に生育する海藻類を記録し種リストに加えた。

環境要因として、2020 年 5 月 1 日から 2021 年 5 月 31 日までの 13 ヶ月間、水中用温度計測ロガー (Onset 社 Tidvit v2) を海面下 1 m に設置して 30 分の間隔で水温を記録するとともに、調査地近傍の陸上に設置した小型百葉箱 (Onset 社製 RS1) に温度ロガー (Onset 社製 Hobo Pro V2) を取り付けて 30 分間隔で記録し、水温と気温の日平均値を求めた。また、調査地においては、水産研究教育機構廿日市庁舎実験筏の水深 1 m ほどに 2011 年より水中用温度計測ロガー (Onset 社 Tidvit v2) を設置して継続的に水温を 30 分間隔で記録している (Fig. 2, Line 23 近傍)、そのデータを用いて 2011 年から 2020 年まで各年で年間 (1 月から 12 月)、夏季 (7 月から 9 月)、冬季 (12 月から 2 月) の平均水温を求めた。また、調査地のある広島湾における年間の降水量及び降水日の傾向を把握するため、気象庁のホームページ (<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/>) より、1970 年から 2020 年までの広島市における降水量、1 mm 以上の降水日数、50 mm 以上の降水日数を求めた。

結果

水温・気温 調査地の水温は、2020 年 8 月 30 日 13:30 に最高値の 30.1°C を、2021 年 1 月 11 日 6:00 に最低値の 9.6°C を記録し、年平均水温は 17.3°C であった (Fig. 4)。気温は、水温と同日の 2020 年 8 月 30 日 13:00 に最高値の 36.2°C を、2021 年 1 月 8 日 5:00 に最低値の -3.4°C を記録し、年平均気温は 17.2°C であった。また、2011 年から 2020 年の年平均水温は 2014 年の 17.8°C から 2020 年の 18.8°C の間を推移し、10 年間を通してやや上昇傾向にあった (Fig. 5)。7 ~ 9 月の夏季の平均水温は 2015 年の 24.6°C から 2012 年の 26.5°C の間を推移し、10 年間を通してやや低下の傾向にあった。また、12 ~ 2 月にかけての冬季平均水温は 2011 年の 11.1°C と 2020 年の 13.3°C の間を推移し、10 年間を通して上昇傾向にあった (Fig. 5)。

降水量 広島市における 2020 年の月降水量は、7 月に 768.5 mm と最も多く、翌 8 月は 2.0 mm と最も少なかった。また、1970 年から 2020 年にかけて年降水量は長期的に増加傾向にあったが (Fig. 6A)、1 mm 以上の降水日数は長期的に

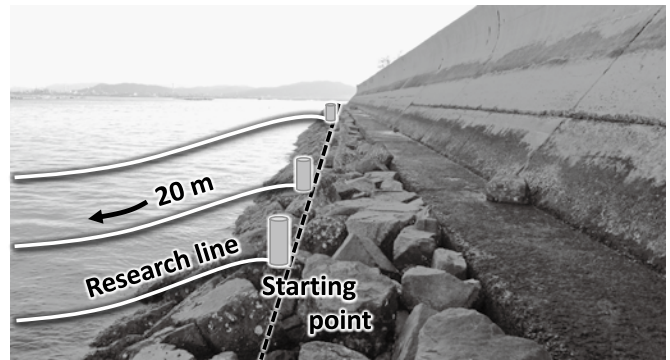


Fig. 3. Positions of starting point of research lines on the stone-built seawall mound.

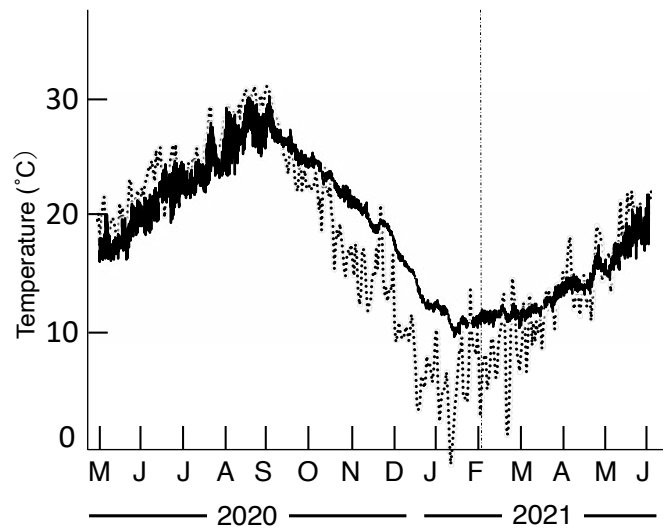


Fig. 4. Surface seawater temperature (solid line) and air temperature (dotted line) from May 1, 2020 to May 31, 2021 at study site Hatsukaichi City, Hiroshima, Japan. A vertical dash-dotted line indicates survey date.

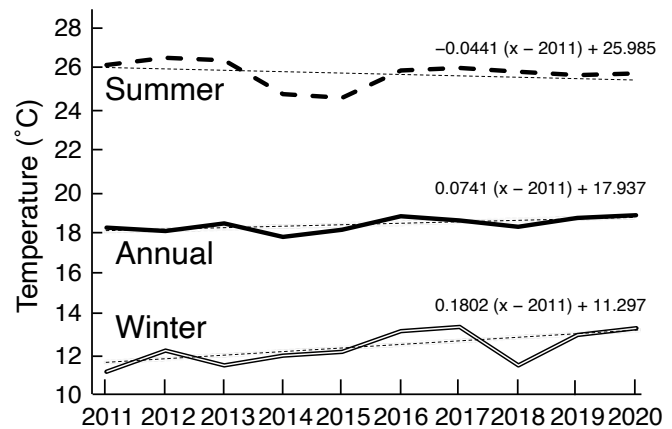


Fig. 5. Succession of seawater temperature from 2011 to 2020 at study site, Hiroshima, Japan. Solid line, annual average; dashed line, average of summer (from July to September); double line, average of winter (from December to February).

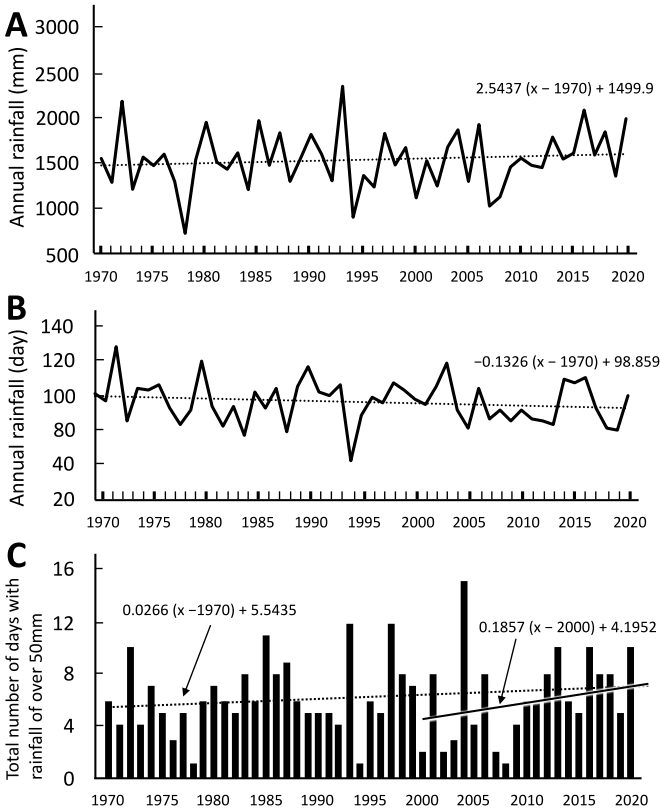


Fig. 6. Annual rainfall (A), annual rainfall day (B) and total number of days with rainfall of over 50 mm (C) from 1970 to 2020 at Hiroshima City, Hiroshima, Japan.

減少傾向にあり (Fig. 6B), 50 mm 以上の降水日数は年によりばらつきが大きかったものの長期的に増加傾向にあり, その傾向は 2000 年以降で顕著であった (Fig. 6C)。

底質 調査地の底質は, W-area では D.L. -0.5 ~ -2 m 近くまではマウンドを構成する巨礫となっており, マウンドより下は砂泥質, D.L. -2 m 以深は泥を主体とした砂泥質であった (Fig. 7)。S-area では, D.L. 0 m までがマウンドで, 0 m より下は一部で小礫の基質が見られるものの, ほとんどが砂と泥で覆われていた。E-area は, D.L. 0 m までがマウンドで, それより深部は砂と泥で覆われていた。W-area と S-area, S-area と E-area の境界は D.L. 0 m までがマウンドでさらに下は小礫を主体とする底質であった。調査エリア全体では水深が D.L. -2 m 以深になると泥の堆積が見られ, 特に S-area で泥の範囲が広がった。泥以外の基質では, E-area では砂が多く W-area では小礫が多かった (Fig. 7)。

動物類 マガキはすべての測線上で確認され, 離岸距離 0 ~ 4 m で基質がマウンドである潮間帯に集中し, 特に S-area と E-area に多かった。フジツボ類もマガキと同様に離岸距離 4 m までの潮間帯に多かった。側線の L1 ではフジツボ類が被度 8 ~ 90% で出現する場所もあったが, 多くはマガキと同様に S-area と E-area に出現した。調査測線上にはウニ類は確認されなかった。マナマコは調査測線及び近傍で合計 15 個体が確認され, 出現個体の 7 割以上にあたる 11 個体は W-area で確認された。

海産植物相 調査地の護岸マウンドには, 緑藻 (アオサ藻綱) 12 種, 褐藻 22 種, 紅藻 27 種, 海草類 1 種の計 62 種の大型海産植物が生育していた (Table 1)。主な藻場構成種で

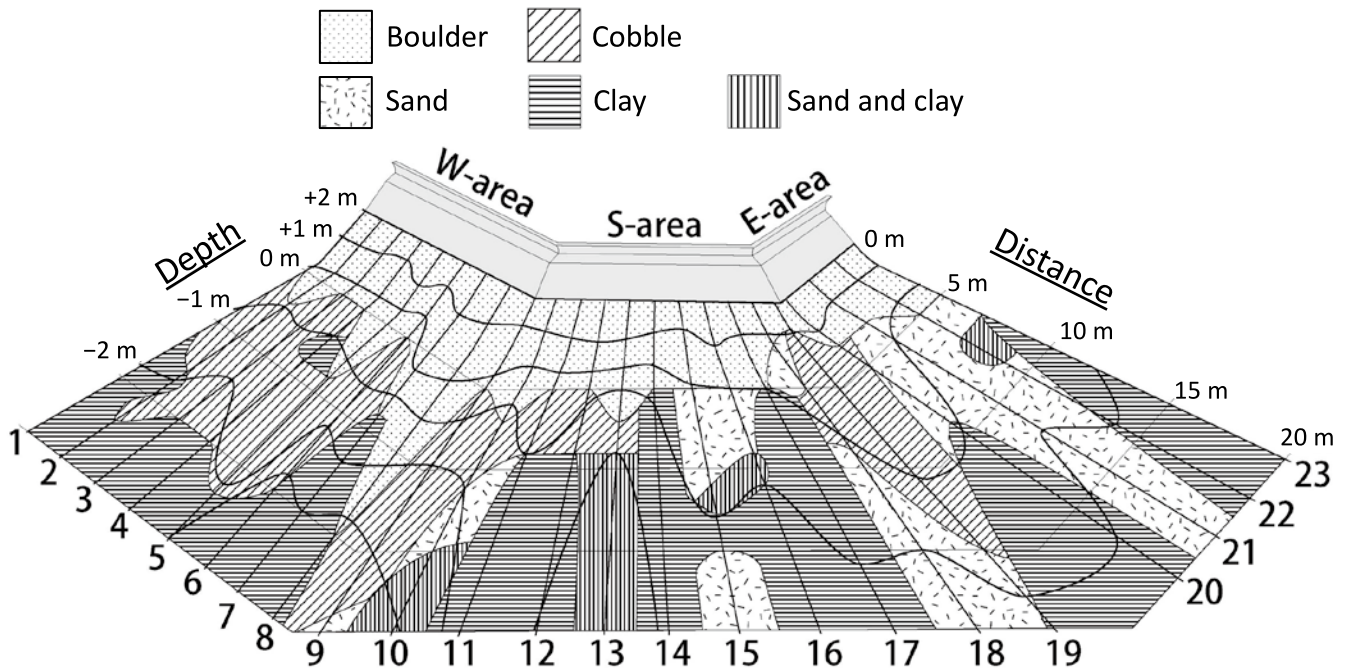


Fig. 7. Topographic feature observed along the stone-built seawall mound in this study site.

Table 1. Macrophyte list from the study site, Hatsukaichi City, Hiroshima Pref., Japan.

Class	Scientific name	Japanese name	Frequency*1	Coverage*2
Ulvophyceae	<i>Monostroma nitidum</i>	ヒトエグサ	35	895
	<i>Ulva australis</i> (sheet type)	アナアオサ	29	235
	<i>Ulva</i> sp. (sheet type)	アオサ属の一種	121	1100
	<i>Ulva compressa</i> (tube type)	ヒラアオノリ	10	205
	<i>Ulva prolifera</i> (tube type)	スジアオノリ	22	485
	<i>Ulva</i> sp. (tube type)	アオサ属の一種	8	15
	<i>Cladophora albida</i>	ワタシオグサ	4	35
	<i>Cladophora</i> sp.	シオグサ属の一種	11	245
	<i>Codium fragile</i>	ミル	3	5
	<i>Codium subtubulosum</i>	クロミル	1	+
	<i>Codium</i> sp.	ミル属の一種	7	+
	<i>Bryopsis plumosa</i>	ハネモ	2	+
Phaeophyceae	<i>Ectocarpus siliculosus</i>	シオミドロ	2	10
	<i>Cutleria multifida</i>	ヒラムチモ	1	+
	<i>Dictyopteris latiuscula</i>	ヤハズグサ	50	380
	<i>Dictyota dichotoma</i>	アミジグサ	3	5
	<i>Padina arborescens</i>	ウミウチワ	3	+
	<i>Rugulopteryx okamurae</i>	フクリンアミジ	2	10
	<i>Leathesia marina</i>	ネバリモ	1	+
	<i>Dactylosiphon wynnei</i>	ホソクビワタモ	1	+
	<i>Colpomenia peregrina</i>	ウスカワフクロノリ	4	5
	<i>Colpomenia sinuosa</i>	フクロノリ	6	15
	<i>Myelophycus simplex</i>	イワヒゲ	2	15
	<i>Petalonia fascia</i>	セイヨウハバノリ	1	+
	<i>Planosiphon gracilis</i>	ウスカヤモ	1	+
	<i>Scytosiphon lomentaria</i>	カヤモノリ	18	80
	<i>Undaria pinnatifida</i>	ワカメ	45	950
	<i>Chorda asiatica</i>	ツルモ	1	+
	<i>Ecklonia cava</i> subsp. <i>kurome</i>	クロメ	1	60
	<i>Sargassum fusiforme</i>	ヒジキ	54	1740
	<i>Sargassum horneri</i>	アカモク	1	10
	<i>Sargassum muticum</i>	タマハハキモク	13	95
	<i>Sargassum piluliferum</i>	マメタワラ	1	5
	<i>Sargassum thunbergii</i>	ウミトラノオ	3	15
Rhodophyceae	<i>Phycocalidia suborbiculata</i>	マルバアマノリ	1	+
	<i>Neopyropia yezoensis</i>	スサビノリ	3	10
	<i>Asparagopsis taxiformis</i>	カギケノリ	1	+
	<i>Caulacanthus okamurae</i>	イソダンツウ	14	405
	<i>Gloiopeltis furcata</i>	フクロフノリ	6	100
	<i>Halarachnion latissimum</i>	ススカケベニ	16	60
	<i>Chondracanthus chamissoi</i>	シキンノリ	130	2245
	<i>Chondracanthus intermedius</i>	カイノリ	29	870
	<i>Chondrus giganteus</i>	オオバツノマタ	10	85
	<i>Chondrus ocellatus</i>	ツノマタ	6	35
	<i>Grateloupia asiatica</i>	ムカデノリ	1	+
	<i>Grateloupia turuturu</i>	ツルツル	2	+
	<i>Pachymeniopsis lanceolata</i>	フダラク	5	10
	<i>Polyopes affinis</i>	マツノリ	3	+
	<i>Hypnea cervicornis</i>	カヅノイバラ	1	+
	<i>Gymnogongrus flabelliformis</i>	オキツノリ	12	55
	<i>Gracilaria vermiculophylla</i>	オゴノリ	1	+
	<i>Gracilaria incurvata</i>	ミゾオゴノリ	97	1470
	<i>Gracilaria textorii</i>	カバノリ	10	50
	<i>Fushitsunagia catenata</i>	フシツナギ	10	40
	<i>Botryocladia wrightii</i>	タオヤギソウ	5	10
	<i>Antithamnion nipponicum</i>	フタツガサネ	1	+
	<i>Ceramium</i> sp.	イギス属の一種	13	10
	<i>Pterothamnion yezoense</i>	ヨツガサネ	2	10
	<i>Dasya</i> sp.	ダジア属の一種	2	+
	<i>Martensia jejuensis</i>	アヤニシキ	1	+
	<i>Polysiphonia senticulosa</i>	ショウジョウケノリ	1	+
	Zosteraceae	<i>Zostera marina</i>	アマモ	52

*1: Frequency of occurrence in all quadrates

*2: Sum of coverages (%) that appeared in all quadrates. +: This symbol indicates less than 5% coverage.

ある大型の褐藻類として、ホンダワラ類はヒジキ *Sargassum fusiforme* (Harvey) Setchell, アカモク *S. horneri* (Turner) C. Agardh, タマハハキモク *S. muticum* (Yendo) Fensholt, マメタワラ *S. piluliferum* (Turner) C. Agardh, ウミトラノオ *S. thunbergii* (Mertens ex Roth) Kuntze の 5 種, 温帯性のコンブ目藻類はワカメ *Undaria pinnatifida* (Harvey) Suringar, クロメ *Ecklonia cava* subsp. *kurome* (Okamura) S. Akita *et al.* の 2 種, 海草類はアマモ *Zostera marina* Linnaeus の 1 種のみであった (Table 1)。ライン上の方形枠内に出現した頻度を解析したところ, 最も多く出現したのは紅藻のシキンノリ *Chondracanthus chamissoi* (C. Agardh) Kützinger で, 次いで膜状のアオサ属の一種 *Ulva* sp., ミゾオゴノリ *Gracilaria incurvata* Okamura, ヒジキ, アマモ, ヤハズグサ *Dictyopteris latiuscula* (Okamura) Okamura と出現頻度が多かった。被度はシキンノリ, ヒジキ, ミゾオゴノリ, アマモ, 膜状のアオサ属の一種の順に大きかった (Table 1)。

海産植物の分布と変遷 上述した出現頻度と被度の大きかった種を中心に, 主要な海藻種の分布について結果を述べる。

主な緑藻と海草について Fig. 8A に示した。膜状のアオサ属は, W・S・E のすべてのエリアにおいて D.L. +2 ~ 0 m の広い範囲に分布し, E-area では D.L. -2 m 近くまで確認された。また管状のアオサ属やヒトエグサは D.L. +2 ~ +1 m までのマウンド傾斜上の狭い範囲に帯状に分布していた。海草類のアマモは, E-area と S-area の東側の D.L. 0 ~ -3 m ほどの砂泥域に分布していた (Fig. 8A)。

大型褐藻について Fig. 8B に示した。ヒジキは, W・S・E のすべてのエリアにおいて, D.L. +1.5 ~ 0 m の範囲において帯状に広く分布していた。ワカメは S・E-area では点在し, W-area では D.L. 0 ~ -2 m の範囲に分布していた。その他のアカモク, タマハハキモク, ウミトラノオのホンダワラ属藻類は, 各エリアの D.L. 0 ~ -2 m の範囲に数個体で構成される小さなパッチが点在して分布していた (Fig. 8B)。瀬戸内海沿岸域で一般的にみられるコンブ目藻類のクロメは, W-area と S-area の境界である Line-9 の護岸マウンド上の巨礫にわずかに生育するのみで極めて稀であった。生育するクロメ藻体には浮泥の堆積が確認された (Fig. 9)。

出現頻度の多かった褐藻のヤハズグサと主な紅藻について Fig. 8C に示した。ヤハズグサは W-area の D.L. 0 ~ -2 m の範囲に広く分布し, S-area についても分布が確認された。紅藻の中でも被覆面積が大きかったイソダンツウ *Caulacanthus okamurae* Yamada とカイノリ *Chondracanthus intermedius* (Suringar) Hommersand は分布範囲が重なっており, すべてのエリアの D.L. +2 m 前後の潮間帯に分布していた。シキンノリとミゾオゴノリは調査地において出現頻度が高く, すべてのエリアにおいて D.L. +0.5 ~ -2 m の範囲に広く分布していた。特に W・E-area に多かった (Fig. 8C)。

本調査と同様の位置に測線と方形枠を設置し調査を行った 2009 年の植生調査の結果 (島袋ら 2015) (Fig. 10A) と, 本

研究時 (Fig. 10B) における各方形枠に出現した植生調査の結果のうち 10% 以上の被度で出現した海産植物種を, 緑藻, 紅藻, 小型褐藻, 小型褐藻と紅藻の混生, ホンダワラ属とワカメの林冠種, ヒジキ, アマモ, 植生なし, に大別し模式化した (Fig. 10)。アマモは特に S-area での増加が顕著で, 調査地全体としてはアマモが優占した方形枠の数は 2009 年の 2.94 倍に増加していた。また紅藻類は 2009 年時の 1.06 倍と大きな差はなかったが, 小型褐藻は 2009 年の 0.7 倍, 紅藻と小型褐藻が混生する場所はおおよそ 0.05 倍と, 景観的な多様性が著しく減少していた。調査地全体としては, 2009 年にはすべての方形枠のおおよそ 82% に何らかの植生があったが, 本研究時には 67% となり, 調査測線上の海産植物は減少していた (Fig. 10)。

考察

瀬戸内海及び広島湾における海藻植生について, 古くは 1930 年代に種リストについての報告があり (八木 1939), 1970 ~ 1990 年代にはホンダワラ科藻類を中心とした海藻植生に関する報告がある (佐々田ら 1975, 斉藤 1980, 村瀬ら 1993)。また西日本沿岸域における藻場の多くは 1990 年代から急激に衰退したことから (吉田ら 2011), 瀬戸内海においても 2000 年代に入って多くの藻場植生調査等が行われるようになった (寺脇ら 2001, 山岸・三輪 2008, 吉田ら 2010, 北野ら 2011, 吉田ら 2014, 加藤・城内 2016)。本研究の調査地である, 広島県廿日市市丸石沿岸域では 1997 年に海底底質の分布と海藻植生の模式図が示された (寺脇 1997)。翌年には 1994 年 12 月から翌 1 月に行われた植生調査の結果が詳細に報告され (寺脇ら 1998), その 15 年後の 2009 年 12 月末にも同様の調査が行われ植生の変遷が報告された (島袋ら 2015)。

本研究では 62 種の海産植物が記録され (Table 1), これはおよそ 10 年前の調査の 62 種 (島袋ら 2015) と同数であった。また種構成は異なるものの, 環境変化の影響を受けたような大きな構成種の変化はなかった。第 7 回自然環境保全基礎調査浅海域生態系調査 (藻場調査) 報告書に付属のデジタルデータによると (環境省自然環境局 2008), 本調査地の対岸に当たる廿日市市宮島町 (厳島) では 45 種が記録されており, 瀬戸内海 7 箇所で行われた藻場調査 (環境省自然環境局 2008) の平均出現種数は 50.5 種 (S.E. ±4.8 種), 環境省モニタリングサイト 1000 事業による兵庫県淡路島南部の洲本市由良においても 2021 年の調査で 61 種の海藻類が報告されている (環境省自然環境局 2022)。これら瀬戸内海の他の天然海岸と比較し, 人工護岸である本調査地も同様の海産植物種の多様性を有していると考えられた。しかし, 前回調査からの約 10 年で海産植物が出現した方形枠数は全方形枠数の 82% から 67% と減少している。なお, 前回調査では S-area の深場の緑藻や紅藻の多くはアナアオサ *Ulva australis* Areschoug やミゾオゴノリなどが寄り藻の状態で記録されたものであり (Fig. 10A), 実際に基質に固着して生育している海藻種の被度や生

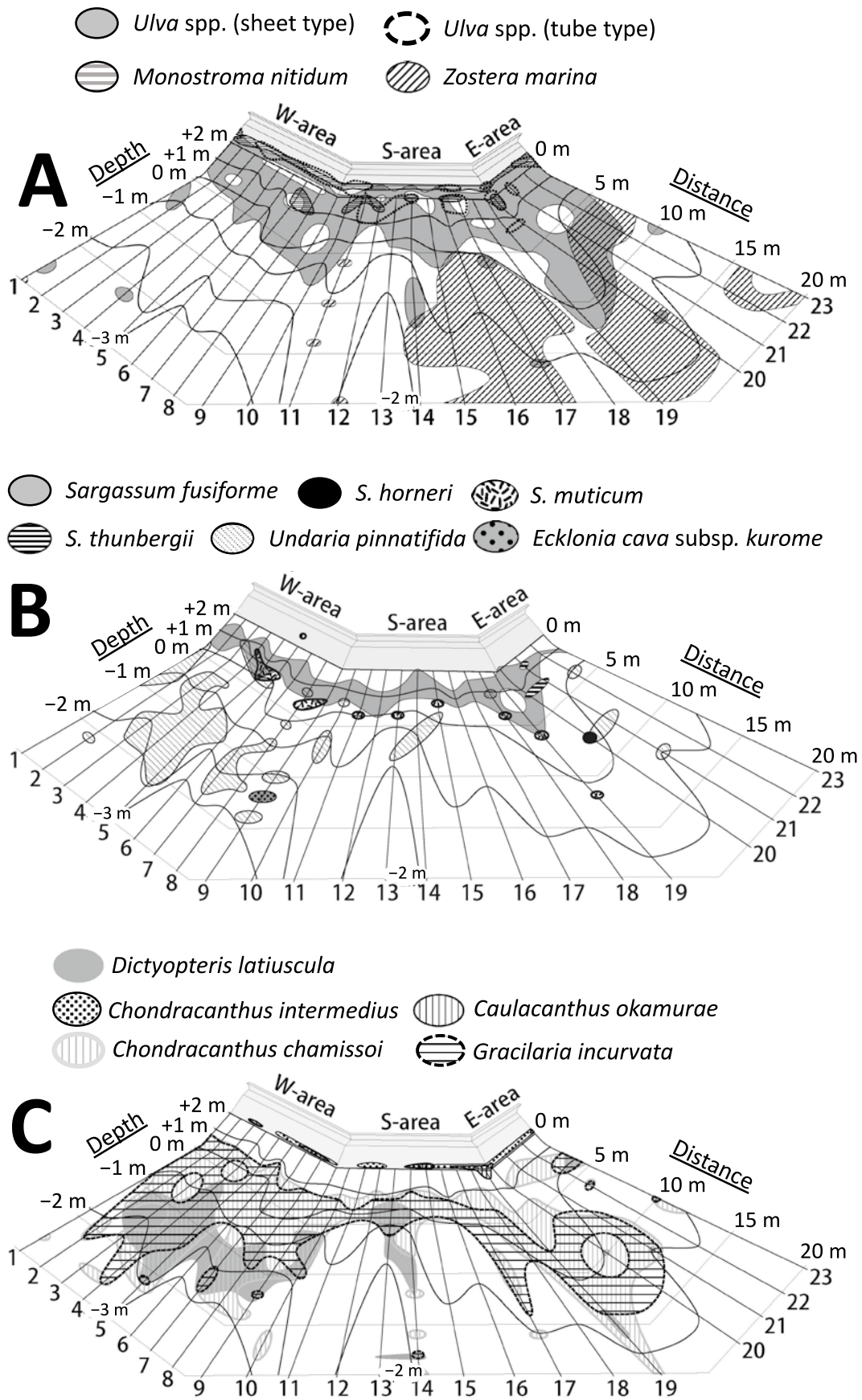


Fig. 8. Occurrence of marine plants along the stone-built seawall mound in this study site. A: Green algae and *Zostera marina*, B: Large brown algae, C: Small brown and red algae.



Fig. 9. Brown algae covered by drifted mud.

物量の変遷については今後、注意深く観察していく必要がある。

大型褐藻類の分布 今回、最大水深で D.L. -3 m ほどまである護岸マウンド上（離岸距離最大 20 m）の潮間帯及び潮下帯に生育する大型褐藻類は、ヒジキ、アカモク、タマハハキモク、マメタワラ、ウミトラノオのホンダワラ類が 5 種と、ワカメ、クロメを加えた 7 種であり、海草類はアマモの 1 種のみであった。27 年前の 1994 年に本研究と同じ場所で行われた調査では、アマモに加え、今も瀬戸内海に広く分布しているノコギリモク *Sargassum macrocarpum* C. Agardh を含む 4 種のホンダワラ類が確認され（寺脇ら 1998）、その後ノコギリモクは 1996 年にも生育が確認されていた（吉田ら 1997）。しかし、およそ 10 年前の 2009 年の調査（島袋ら 2015）および本調査ではノコギリモクは確認できなかった。寺脇ら（1998）の調査では本調査地の W-area と S-area の境界に最も密に分布していたが、該当域の石積みが 1999 年 9 月の台風で大きく崩落し、その後 2000 年 8 月に補修が行われているものの、急激な成体の消失とそれに伴う新規加入の減少がノコギリモクの衰退を引き起こし、今に至っていると考えられた。

10 年前の調査時と比べて大型褐藻類の出現種に変化はなく、ヒジキはすべてのエリアの D.L. +1 ~ 0 m の範囲に分布が広がっており、他のホンダワラ類も出現方形枠数が増加していた（Fig. 10）。しかし、これらの種は個体が点在するのみで群落は形成しておらず、目視では現存量が年々減少している様に感じられた。特にワカメは、以前は S・E-area を中心に広く分布していたが（島袋ら 2015）、本調査時には W-area の D.L. 0 ~ -2 m の範囲に分布するのみで、他のエリアではあまり確認できず、大幅に減少していることがわかった。

気候変動による水温上昇が藻類の分布や藻場の構造に与える影響は大きく、日本においても西日本を中心に各所で藻場の減少や種構成の変化が報告されている（原口ら 2005, Tanaka *et al.* 2012, 村瀬・野田 2018, 島袋ら 2018, 清本ら

2021, 寺田ら 2021）。本調査地における水温も、夏季に多くの海藻類の生育限界である 30°C を越える日があり、また気温も夏季に最高で 36°C を越える日もあった。特に潮間帯に生育する海藻は気温の影響も強く受けていると考えられる（Fig. 4）。2011 年からの 10 年間において、高水温期である夏季の平均水温は低下傾向が見られたが、低水温期である冬季の平均水温は上昇傾向にあり、年平均水温も上昇傾向にあったことから（Fig. 5）、本調査地の海藻類は冬季に水温が下がらないことによる生理的な悪影響（馬場 2009, 土屋ら 2012）を受けていると考えられる。

本調査地は対岸に厳島が近接して位置することで、大きな干満差による流動はあるものの波浪は比較的穏やかであり、藻類の分布はその流動環境の影響も強く受けていると思われる。各地の湾や瀬戸内海などの半閉鎖的な海域では一般的に波浪が穏やかであり、発生する浮泥の堆積は海藻だけではなく様々な生物に影響を与えている（荒川・松生 1990, 玉置ら 1999, 田中・児玉 2004, 吉田ら 2014）。本調査地においても全体的に基質には薄く浮泥が堆積している状態であり、D.L. -1 m 以深になると藻体上にも堆積しているのが観察された（Fig. 9）。浮泥とは環境学や地質学上の用語であり、海底面近くに浮遊懸濁している有機物を含む粒子とされる（日比野・松本 2006）。浮泥はどのような海域においても発生し、それが沿岸域に堆積すると、海藻類の生育や新規加入を妨げることが報告されている（荒川・森永 1994, Watanabe *et al.* 2016, Matsumoto *et al.* 2020）。通常は波浪による揺れ等で海藻上や基質に堆積した浮泥が流失するが、流動が緩やかな海域や通常よりも多くの浮泥が流入すると、海藻類の生育や新規加入に影響が生じる場合がある。浮泥はその地域の雨量により大きく変化する。本調査地のある広島湾の奥に位置する広島市の降水量は年々増加しているが、1 mm 以上の降水日数は減少の傾向にある（Fig. 6A, B）。これは降水日当たりの降水量が増加していることを示唆している。また実際に 50 mm 以上の降水日数は増加傾向にあり、2000 年以降で顕著であった（Fig. 6C）。これは一度に海域に流入する河川水及び海域の浮泥の量が増加していることを示しており、浮泥が堆積する影響でワカメなど大型褐藻類の減少が引き起こされている可能性がある。

瀬戸内海でこれまでに確認されているホンダワラ類はおよそ 30 種であり（吉田 1998）、広島湾口に近い山口県の屋代島、平郡島で 2010 ~ 2013 年に実施した調査では 13 種が確認された（吉田ら 2014）。本調査地で確認されたホンダワラ類 5 種はこれらと比較すると少ない。瀬戸内海は大小さまざまな離島や多くの入り江によって複雑な海岸線が形成され、波浪などの物理環境が海域によって多様である。離島などの潮通しが良い海域と比べると本調査地は流動が穏やかであり、海域による物理環境の違いが、分布するホンダワラ類の種や種数に影響しているのかもしれない。

アマモの分布 1994 年の調査では、S-area と E-area の境界域にアマモの生育が確認され、2009 年の調査時にはさらに

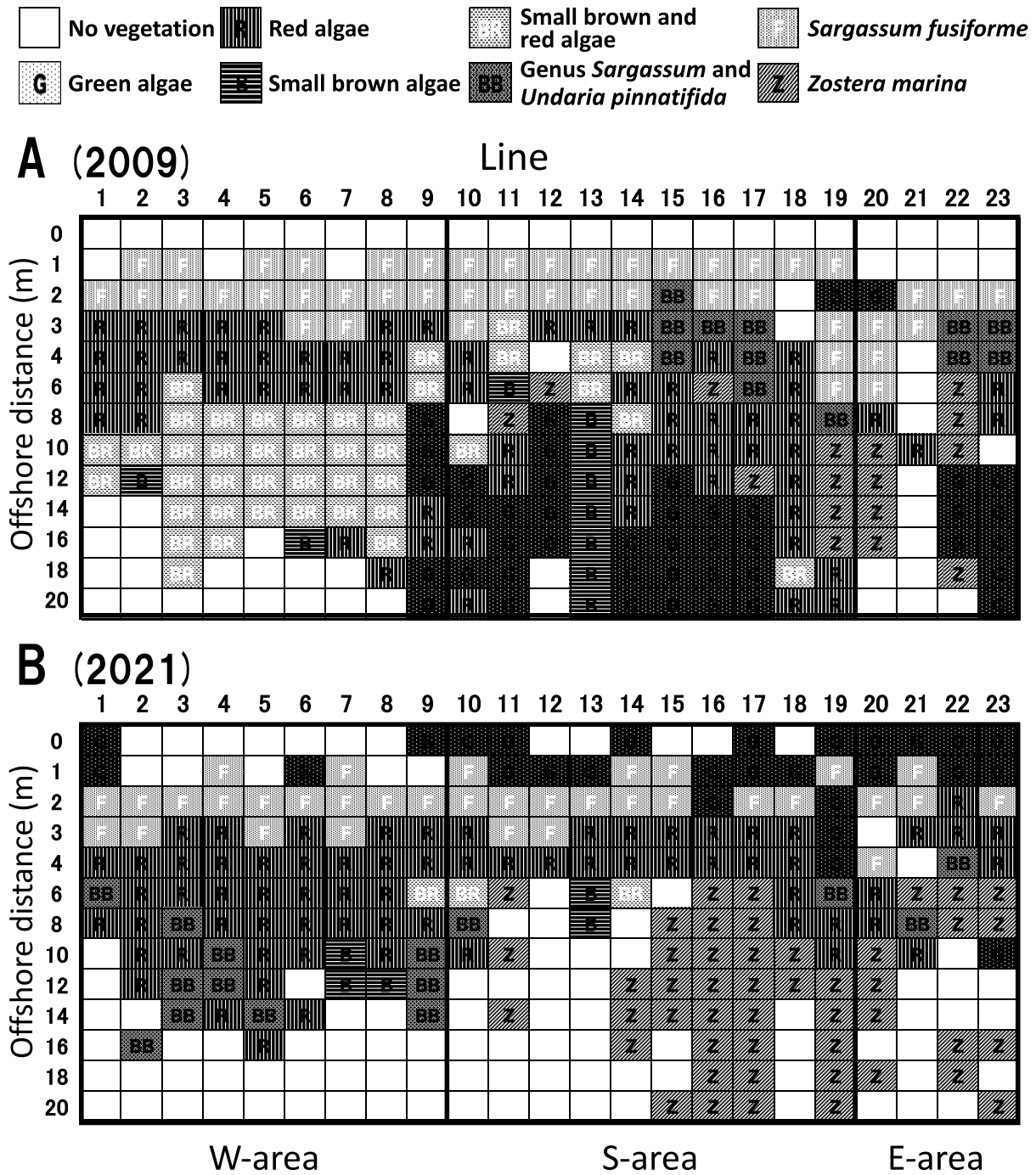


Fig. 10. Changes in seaweed vegetation in the study site between 2009 (A) and 2021 (B).

東側にアマモの分布域が広がっていた (島袋ら 2015)。本調査時には、S-area の東側と E-area に同様のアマモの分布が確認され、方形枠上の出現頻度は 2009 年時の 2.94 倍と大幅に増加していた (Fig. 10)。調査地の対岸には巖島があり強い波浪が少ないこと、さらに東側には隣接する埋め立て地があり、E-area 及び S-area の東側は W-area や S-area の西側に比べてより静穏である。特に前回の調査時と比較すると S-area のマウンド下部は砂泥の堆積が進行し、海藻の着生面は狭くなる

一方で、アマモの生育適地が増えていた (Fig. 7)。また前回の調査時に S-area 下部で見られた緑藻の多くはアナオサの寄り藻であり、アオサ類の堆積はアマモの生育を阻害することが知られている (杉本ら 2006)。本調査時にはアオサ類の寄り藻は減少しており、アマモ生育域への堆積も見られなかった (Fig. 10)。これらの要因がアマモの分布域の拡大に寄与しているものと推察された。

その他の生物 1994 年の調査時には、広域的に出現する

種として海藻では緑藻のアナアオサと紅藻のマクサ *Gelidium elegans* Kützinger がマウンド上のすべてのエリアで確認された。また広島湾は二枚貝のマガキの養殖が盛んであり、マウンド上縁から D.L. +1.0 m までにマガキが全エリアに分布していたことが報告されている (寺脇ら 1998)。しかし、2009 年の調査時には護岸マウンド上にはマガキの付着が全く観察されなかった (島袋ら 2015)。島袋ら (2015) は他の付着生物との新規着生基質をめぐる競争や、クロダイ *Acanthopagrus schlegelii* などの魚類の捕食により、マガキが着生できなくなったと指摘している。ところが、本調査時には 1994 年時と同様にすべてのエリアでマガキの付着が確認された。付着のなかった 2009 年以降、いつ頃からマガキが付着し始めたかはデータがないが、競合する他生物との相互作用や環境変化、マガキ群落の更新など様々な要因によりマガキの付着量も大きく変動するのかもしれない。また海藻の植生に影響を与える要因として魚類やウニ類の食害があり (桐山ら 2001, 桑原 2001, 野田ら 2014)、瀬戸内海の冬季にはクロダイが養殖海藻を食べてしまう被害が問題となっている (野田・村瀬 2021)。本調査地においてもクロダイの姿は通年観察されるものの、食害による藻場の減少は確認されていない。ウニ類は本研究でも確認を行ったが、方形枠内には出現しなかった。海藻類をはじめとする岩上の固着生物群集は、わずかな岩の傾斜度や基面の高さ、水温や光量など多くの環境要因によって分布が決定される (奥田ら 2010)。瀬戸内海は水温や透明度、栄養塩など年々環境が変化していることが指摘されており (多田ら 2014, 阿保ら 2018)、本調査結果からも、水温や浮泥・堆積物など環境の変化が海藻類や動物類の生物相に影響を与えていると言える。また、本調査地の E-area から東側は天然の海岸であったが、2011 年 3 月 11 日の東日本大震災以降の 2013 年に護岸及び防波堤として整備され、近隣海岸線の人為的な改変による環境変化も本調査地の海藻植生に影響を与えている可能性が高い。

防波堤や護岸を設置する事業は、防災上の緊急性から行われることも多く、その海岸改変の生態系への影響が十分考慮されないまま進められる事例も多い (鳥居ら 2000)。しかし逆に、強い波浪が生物の侵入を拒んでいる環境下に消波ブロックや離岸堤が設置されることにより基質の出現と物理的な攪乱が緩和され、新たな生態系が創出される場合もある (大野 1988, 米田ら 2014)。本調査地の護岸マウンドも緩やかな傾斜の石積みのため、海藻類や固着性の動物に新たな基質を与えるだけではなく、石によって作られた多数の空隙により、多くの魚類や甲殻類などの姿も確認されている。

このような護岸による人工の海岸線は都市部に多く、都市生活者にとっては人工護岸が身近な自然となる場合も多い。そのため同じ護岸の造成でも、コンクリートによる垂直護岸ではなく、石積みにより新たな生態系を創出するような自然調和型の施設整備が求められている (諸住・小池 2021)。また最近では脱炭素社会の実現に向け、陸域だけではなく海域での炭素吸収源の需要が高まり、日本各地において海産植物

を中心とした藻場生態系の保全や創出が求められている (堀・桑江 2017)。しかし、各生物種の好適な環境条件はさまざまで、またそれぞれの生物が他の生物の分布に与える影響も不明な点が多い。高度経済成長期において海岸線は効率的な物流のために整備されてきたが、現代における海岸線はエネルギーや物質循環の場としての重要性が高まっている。すでに整備された人工護岸や消波堤も固着生物の基質となり、生物多様性を維持し、物質循環の場としても重要となっている。調査海域の護岸マウンドにおいても引き続き生物相のモニタリングと環境把握を行い、基礎的な知見の積み上げを継続して行きたい。

謝辞

本調査を遂行するに当たり、広島県廿日市市の大野町漁業協同組合の皆さんには多大なご協力をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。また図表の作成に際し、分布図を作成いただきました水圏リサーチ株式会社の末吉伸二郎氏に、また空撮写真を提供していただきました、水産研究・教育機構水産技術研究所の須藤健二博士に感謝いたします。

引用文献

- 阿保勝之・秋山諭・原田和弘ら 2018. 瀬戸内海における栄養塩濃度等の水質変化とその要因. 沿岸海洋研究 55: 101-111.
- 安藤亘・村岡芳郎・石田和敬・小島洋一 2002. 自然調和型防波堤の藻場分布と水理環境との関係について. 海岸工学論文集 49: 1331-1335.
- 荒川久幸・松生治 1990. 褐藻類カジメ・ワカメの遊走子の沈降速度及び基質着生に及ぼす海中懸濁粒子の影響. 日水誌 56: 1741-1748.
- 荒川久幸・森永勤 1994. 褐藻類ワカメ・カジメ遊走子群の分散に及ぼす海中懸濁粒子の影響. 日水誌 60: 61-64.
- 馬場将輔 2009. クロメ配偶体と幼孢子体の生育に及ぼす温度、光量、塩分の影響. Algal Resources 2: 11-19.
- 濱野龍夫・網尾勝・林健一 1989. 潮間帯および人工藻礁域におけるマナコ個体群の動態. 水産増殖 37: 179-186.
- 原口展子・村瀬昇・水上讓・野田幹雄・吉田吾郎・寺脇利信 2005. 山口県沿岸のホンダワラ類の生育適温と上限温度. 藻類 53: 7-13.
- 日比野忠史・松本英雄 2006. 広島湾に分布する浮泥の特性と季節的な性状変化. 土木学会論文集 B 62: 348-359.
- Hoegh-Guldberg, O., Caldeira, K., Chopin, T. et al. 2019. The ocean as a solution to climate change: five opportunities for action. World Resources Institute, Washington (DC). https://oceanpanel.org/wp-content/uploads/2022/06/HLP_Report_Ocean_Solution_Climate_Change_final.pdf
- 堀正和・桑江朝比呂 (編) 2017. ブルーカーボン 浅海における CO₂ 隔離・貯留とその活用. 地人書館, 東京.
- IPCC 2022. Summary for policymakers. In: Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Tignor, M. et al. (eds.) Climate Change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. pp. 3-33. Cambridge University Press, Cambridge. doi.10.1017/9781009325844.001
- 環境省自然環境局 2008. 第 7 回自然環境保全基礎調査浅海域生態系調査 (藻場調査) 報告書. 環境省自然環境局生物多様性センター, 山梨.
- 環境省自然環境局 2022. 2021 年度モニタリングサイト 1000 アマモ場・藻場調査報告書. 環境省自然環境局生物多様性センター, 山梨.

- 片田実 1963. 海藻の生活形と遷移. 日水誌 29: 798-808.
- 加藤亜記・城内辰享 2016. 瀬戸内海中西部の広島県竹原市周辺における海藻相と季節消長. 藻類 64: 1-9.
- 桐山隆哉・野田幹雄・藤井明彦 2001. 藻食性魚類数種によるクロメの摂餌と摂食痕. 水産増殖 49: 431-438.
- 北野慎容・安宅政志・吉永一男・三木宗和・安信秀樹・中嶋泰 2011. 兵庫県瀬戸内海沿岸域における現在の藻場分布域と1950年代の推定藻場分布域との比較事例. 水産工学 47: 189-196.
- 清本節夫・山仲洋紀・吉村拓ら 2021. 九州北西部壱岐島和歌地先におけるカジメ科海藻藻場の消失までの長期変動. 日水誌 87: 642-651.
- 桑原久実 2001. ウニの食害による磯焼けの現状と対応策. 日本水産工学会 学術講演会 学術講演論文集 2001: 223-226.
- 松田裕之・堀正和 2010. 海洋・沿岸域の生物多様性. 日本の科学者 45: 546-551.
- Matsumoto, A., Sato, M. & Arakawa, H. 2020. Impacts of sub-micrometer sediment particles on early-stage growth and survival of the kelp *Ecklonia bicyclis*. Sci. Rep. 10: 20689.
- 文部省(編) 1984. 学術用語集: 地学編. 日本学術振興会, 東京.
- 諸住健・小池文人 2021. 都市近郊の海岸生態系に対する市民による需要. 保全生態学研究 26: 61-70.
- 村瀬昇・松井敏夫・大貝政治 1993. 山口県瀬戸内海沿岸域東部海域の海藻相. 水大校研報 41: 237-249.
- 村瀬昇・野田幹雄 2018. 水温の変動が藻場構成種および植食性魚類に与える影響. 海洋と生物 40: 226-232.
- Nellemann, C., Corcoran, E., Duarte, C. M. *et al.* 2009. Blue carbon: the role of healthy oceans in binding carbon. Center for Coastal and Ocean Mapping, Durham. <https://scholars.unh.edu/ccom/132/>
- 野田幹雄・村瀬昇 2021. クロダイ成魚による養殖ワカメの食痕の特徴と採餌行動. 水大校研報 69: 93-101.
- 野田幹雄・大原啓史・村瀬昇・池田至・山元憲一 2014. アイゴによるアラメ及び数種のホンダワラ類の被食過程と群落構造の関係. 日水誌 80: 201-213.
- 大野正夫 1988. 概論: 海岸構造物と水産資源増殖. 海洋科学 20: 350-354.
- 奥田武弘・野田隆史・山本智子・堀正和・仲岡雅裕 2010. 群集構造決定機構に対する環境と空間の相対的重要性: 岩礁潮間帯における生物群間比較. 日本生態学会誌 60: 227-239.
- 斉藤雄之助 1980. 瀬戸内海およびその周辺海域におけるホンダワラ科藻類の分布について. 南西水研研報 12: 51-68.
- 酒向章哲・青井晃樹・藤井良昭・秋田雄大・鳴海日出人 2011. 二重堤および破碎岩を再利用したマウンドによる藻場創出に関する研究—北海道元稲府漁港の自然調和型漁港構造物の事例—. 土木学会論文集 B2 68: 1181-1185.
- 佐々田憲・藤山虎也・犬丸惣 1975. 瀬戸内海産ホンダワラ科藻類の分布について. 広島大学水産学部紀要 14: 89-100.
- 敷田麻実・小荒井衛 1997. 1960年以降の日本の自然海岸の改変の統計学的分析. 日本沿岸域学会論文集 9: 17-25.
- 島袋寛盛・吉田吾郎・加藤亜記・郭新宇 2018. 今後100年間に生じる水温と藻場生態系の変遷を予測する. 海洋と生物 40: 233-242.
- 島袋寛盛・吉田吾郎・三浦俊一・寺脇利信 2015. 広島湾廿日市市丸石地先における石積み護岸上の海藻植生とその変遷. 藻類 63: 1-9.
- 杉本憲司・平岡喜代典・太田誠二・新村陽子・寺脇利信・岡田光正 2006. アオサ類の堆積によるアマモ場への影響. 水環境学会誌 29: 269-271.
- 水産庁 2015. 改訂磯焼け対策ガイドライン. 水産庁漁港漁場整備部, 東京.
- 多田邦尚・西川哲也・樽谷賢治ら 2014. 瀬戸内海東部海域の栄養塩低下とその低次生物生産過程への影響. 沿岸海洋研究 52: 39-47.
- 玉置仁・西嶋渉・新井章吾・寺脇俊信・岡田光正 1999. アマモ生育に及ぼす葉上堆積浮泥の影響. 水環境学会誌 22: 663-667.
- 田中勝久・児玉真史 2004. 有明海湾奥部の環境変動に及ぼす浮泥の影響. 水環境学会誌 27: 307-311.
- Tanaka, K., Taino, S., Haraguchi, H., Prendergast, G. & Hiraoka, M. 2012. Warming off southwestern Japan linked to distributional shifts of subtidal canopy-forming seaweeds. Ecol. Evol. 2: 2854-2865.
- 寺田竜太・進藤蒼・田中美和・江崎聡 2021. 鹿児島県長島における藻場の長期変化, 特に東シナ海に面した沿岸からの藻場の消失. 日水誌 87: 631-641.
- 寺脇利信 1997. 広島湾の大野瀬戸・宮島周辺. 藻類 45: 185-188.
- 寺脇利信・吉田吾郎・玉置仁・薄浩則 1998. 広島湾の石積み護岸マウンド沿いに成立した海草・海藻植生. 南西水研研報 31: 13-18.
- 寺脇利信・吉川浩二・吉田吾郎・内村真之・新井章吾 2001. 広島湾における大型海藻の水平・垂直分布様式. 瀬戸内水研研報 3: 73-81.
- Tong, D., Zhang, Q., Zheng, Y. *et al.* 2019. Committed emissions from existing energy infrastructure jeopardize 1.5 °C climate target. Nature 572: 373-377.
- 鳥居謙一・加藤史訓・宇多高明 2000. 生態系保全の観点から見た海岸事業の現状と今後の展開. 応用生態工学 3: 29-36.
- 土屋勇太郎・Gregory N. Nishihara・寺田竜太 2012. 酸素電極法と変動クロロフィル蛍光法を用いた鹿児島産ホンダワラ属(ヒバマタ目)藻類5種, マメタワラ, ヤツマタモク, ヒジキ, コブクロモク, キレバモクの光合成・温度特性. 日水誌 78: 189-197.
- Watanabe, H., Ito, M., Matsumoto, A. & Arakawa, H. 2016. Effects of sediment influx on the settlement and survival of canopy-forming macrophytes. Sci. Rep. 6: 18677.
- 八木繁一 1936. 瀬戸内海及び豊後海峡の海藻. 植物分類地理 8: 241-254.
- 山岸幸正・三輪康彦 2008. 瀬戸内海中央部因島・福山の海藻相. 福山大学生命工学部年報 7: 21-33.
- 米田佳弘・吉田司・芝修一ら 2014. 大阪湾の傾斜護岸帯における藻場の現存量とその変動要因 関西国際空港護岸における事例. 水産工学 50: 151-162.
- 吉田吾郎・新井章吾・寺脇利信 1997. 広島湾大野瀬戸産ノコギリモク幼体の成長に及ぼす光量・水温の影響. 南西水研研報 30: 137-145.
- 吉田吾郎・堀正和・崎山一孝ら 2010. 瀬戸内海の各灘における藻場・干潟分布特性と主要魚種漁獲量との関係. 水産工学 47: 19-29.
- 吉田吾郎・島袋寛盛・森口朗彦ら 2014. 瀬戸内海西部の屋代島, 平郡島における海藻藻場の特性—特にホンダワラ類とクロメの垂直分布について—. 生物圏科学 53: 1-22.
- 吉田吾郎・寺脇利信・山下亜純・新井章吾・樽谷賢治 2011. 瀬戸内海から豊後水道にみるガラモ場の変化と水温勾配の関係. 海洋と生物 33: 337-343.
- 吉田忠生 1998. 新日本海藻誌. 内田老鶴圃, 東京.

(2022年12月27日受付, 2023年5月26日受理)
通信担当編集委員: 芹澤(松山)和世