

フライアッシュ高含有ポーラスコンクリートパネルを用いた 能登半島での藻場造成の検討—輪島市名舟漁港におけるフィールド実験—

三 木 理^{1),*}
参 納 千夏男²⁾

奥 村 真 子¹⁾
田 中 義 人³⁾

中 島 隆 甫²⁾
石 川 竜 子⁴⁾

Field Monitoring of Seaweed Bed Construction Using Coal-fly-ash Porous Concrete Panels on Coast of Noto Peninsula, Japan

Osamu MIKI^{1),*}, Chikako OKUMURA¹⁾, Takatoshi NAKAZIMA²⁾,
Chikao SANNOH²⁾, Yoshito TANAKA³⁾ and Ryoko ISHIKAWA⁴⁾

¹⁾ Institute of Science & Engineering, Kanazawa University, Kakuma, Kanazawa, Ishikawa 920-1192, Japan

²⁾ Hokuriku Electric Power Company, 15-1, Ushijima, Toyama 930-8686, Japan

³⁾ Hokukon Corporation, 66-20-2, Imaichi, Fukui 918-8152, Japan

⁴⁾ Oceanic Planning Corporation, 2-28-15, Oyamadai, Setagaya, Tokyo 158-0086, Japan

Abstract

We conducted a pilot-scale experiment for seaweed bed construction using concrete substrata with newly developed fly-ash (FA) porous concrete panels or conventional concrete panels from November 23, 2013 to October 14, 2017 in a coastal area of Noto Peninsula, Japan. The FA porous concrete panel was manufactured by replacing 20-40% of the cement with coal fly ash produced in a coal power plant. The total number of *Ecklonia kurome* sporophytes grown on two substrata after four years was 14. The erosion of central lamina began in the third year and the maturing of over 50% of *E. kurome* sporophytes was observed in the fourth year. A greater number of *E. kurome* sporophytes tended to grow on FA porous concrete panels than on normal concrete panels; the maximum density of *E. kurome* sporophytes attached to FA porous concrete panels was 24 individuals per square meter. The final number of *E. kurome* sporophytes largely differed among the sides of each substratum, which seemed to be strongly affected by waves. No grazing marks of herbivorous fishes and benthic animals were observed during the four years of growth monitoring. These results suggest that *E. kurome* bed construction using FA porous concrete panels in the coastal area of Noto Peninsula would be possible.

Keywords: Seaweed bed; Fly ash; Porous concrete; *Ecklonia kurome*; Noto Peninsula

1. はじめに

日本の海洋沿岸域は豊かで多様な生態系が育まれており、特に藻場ではホンダワラ類、コンブ類等の大型藻類の生産性が高く、魚介類の種類も豊富に保たれてきた¹⁾。1994年の環境庁の調査によると、日本で最も広い藻場が分布する海域は石川県能登半島周辺の海域であり、約14,761 haと全国の藻場面積の7.3%を占めている²⁾。しかし、近年、能登半島においてアワビやサザエの漁獲量が激減しており、その一因としてアワビやサザエの好餌となる大型褐藻の「かじめ」が減少していることが推定され、藻場の保全活動が活発に実施されている^{3, 4)}。能登半島周辺地域で「かじめ」と呼称されている褐藻は、コンブ目コンブ科カジメ属に属するクロメ (*Ecklonia kurome*

Okamura) とツルアラメ (*Ecklonia stolonifera* Okamura) の2種であり、カジメ (*Ecklonia cava* Kjellman) とは異なる。クロメやツルアラメは多年生で、アワビやサザエの周年的な好餌となるばかりでなく、能登地域の食材としても重要であり、乾燥品に加えて春先には「生かじめ」が貴重な食材として珍重されている^{5, 6)}。ツルアラメは日本海沿岸に生息が限定される北方性固有種であり、九州北岸から北海道南部を中心に水深2~35 m付近まで広く分布する^{7, 8)}。一方、クロメは比較的温暖な海域や浅所を好む南方性の種で、本州南西部・四国・九州の潮間帯直下から水深14 m程度まで分布し、新潟県南部が生育の北限とされている^{7, 9)}。能登半島周辺においてクロメとツルアラメが混生している場合、葉部のみの観察では区別が困難であるが、ツルアラメは匍匐枝が岩上に這い、

1) 金沢大学理工研究域 〒920-1192 石川県金沢市角間町

2) 北陸電力株式会社 〒930-8686 富山県富山市牛島町 15-1

3) 株式会社ホクコン 〒918-8152 福井県福井市今市町 66 号 20 番地の 2

4) 海洋プランニング株式会社 〒158-0086 東京都世田谷区尾山台 2-28-15-2F

* 連絡先: mikiosamu@se.kanazawa-u.ac.jp

匍匐枝上に直立枝を出すことからクロメと区別される¹⁰⁾。この特徴を持つことからツルアラメは波浪に強い特性があり、石川県輪島市 50 km 沖の舳倉島（へぐらじま）にはツルアラメ群落が発達し、アワビやサザエの優良漁場となっている¹¹⁾。また、クロメについては海域での温暖化傾向が確認されていることから、今後温暖化がさらに進行した場合、北陸近辺の藻場造成に適した対象種として位置づけられる可能性も考えられる。

藻場造成では、古くから投石やコンクリートブロックが藻礁として適用されてきたが、近年では海藻の付着性やリサイクル資材の活用を考慮した藻礁用の様々なコンクリートブロックが開発されている¹²⁾。中でもポーラスコンクリートは、空隙が大きい多孔質のコンクリートであり、藻場造成材としての有効性が数多く報告されている¹³⁻¹⁵⁾。本研究で使用したポーラスコンクリートは、北陸地域の石炭火力発電所の副産物であるフライアッシュ（以下、FA）をセメントに対して 20~40 重量%置換し、また、粗骨材には能登半島から産出する安山岩を使用するなど、北陸地域で産出される資源を有効活用した地域特産の FA 高含有ポーラスコンクリートである^{16, 17)}。FA をコンクリートに用いる際には、JISA6201「コンクリート用フライアッシュ」が適用されるため、FA は SiO_2 を 45% 以上含有する必要がある¹⁸⁾。この他、FA は Al_2O_3 を 20~30% 程度、また Fe_2O_3 を 5% 程度含有している^{12, 19)}。北陸地域では FA のこのような含有成分を活用したコンクリートの高耐久化の取り組みが広く実施されており、以下のような特長がある^{20, 21)}。FA の主成分である SiO_2 や Al_2O_3 がセメント中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と反応（ポズラン反応）して、ケイ酸カルシウム水和物やアルミン酸カルシウム水和物が生成するため、組織がより緻密となり、コンクリートの耐久性が向上する。また、セメントの使用量が減りコンクリートのアルカリ分が低下することから、海水中においてもアルカリシリカ反応（ASR 反応、骨材中のシリカ成分とコンクリート中のアルカリ分の反応）の進行を抑制できるため、コンクリートの膨張、ひび割れを抑制できる。特に能登半島で産出する安山岩などの火山岩を骨材として用いると ASR 反応が生じやすいため、北陸地域においては FA のコンクリートへの活用が効果的であることが報告されている²⁰⁾。

著者らは、これまでに室内培養実験において、十分に養生した後の FA 高含有ポーラスコンクリートは、アルカリ溶出による海水の pH 上昇はほとんど見られず、平板の普通コンクリートと比較してホンダワラ類幼胚の付着性や初期生長が優れていることを確認し報告した¹⁶⁾。本報においては、FA 高含有ポーラスコンクリートパネルを取り付けた藻場造成材を用い、能登半島の輪島市名舟（なふね）漁港において 2013 年 11 月 29 日から 2017 年 10 月 14 日まで約 4 年間のフィールド実験を行い、褐藻カジメ属植物を主体とした藻場造成の可能性や課題について検討した結果を報告する。

2. 調査方法

2.1 調査場所および藻場造成材

フィールド実験は石川県輪島市南志見（なじみ）地区の名舟漁港で実施した（Fig. 1）。Fig. 2 に用いた藻場造成材を示す。コンクリートブロック（1 m×1 m×1 m）

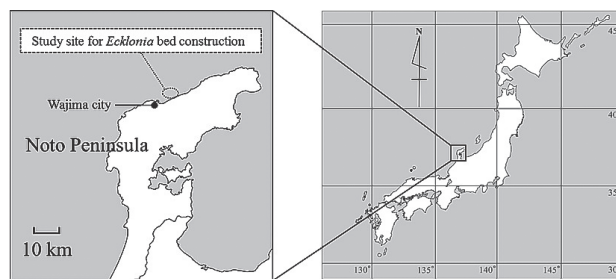


Fig. 1 Study site of seaweed bed construction at the coast of Nafune, Wajima City, Ishikawa, Japan.

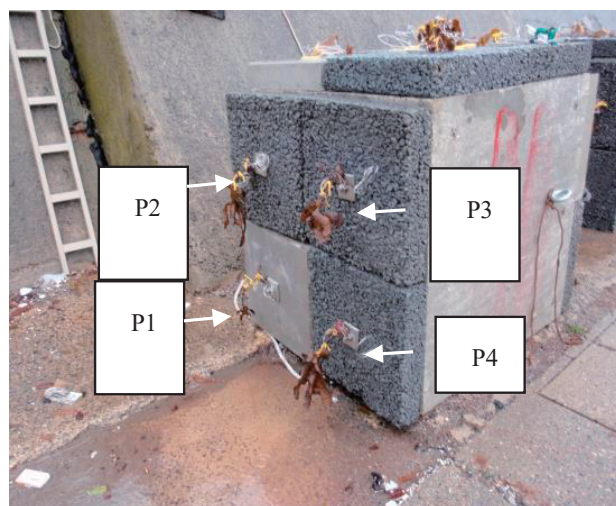


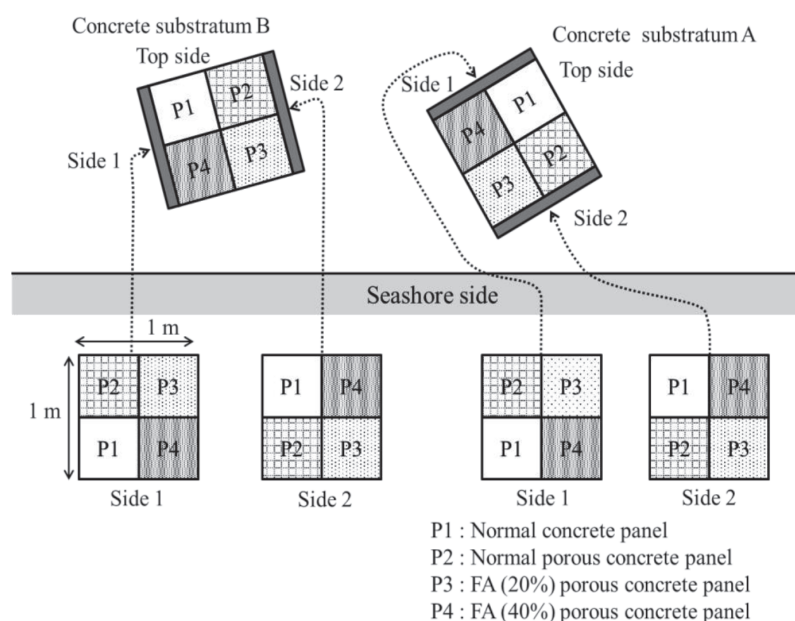
Fig. 2 Concrete substrata having four kinds of concrete panels on the three sides (top, side1, side2) with a mature *E. kurome* sporophyte. P1: Normal concrete panel, P2: Normal porous concrete panel, P3: FA porous concrete panels substituted 20% of cement with fly ash, P4: FA porous concrete panels substituted 40% of cement with fly ash.

の 3 面（天端 + 側面 2 か所）に 4 種類の性状の異なるコンクリートパネル（50 cm×50 cm×10 cm）をアンカーで固定した藻場造成材である。Table 1 に 4 種のコンクリートパネル（P1, P2, P3, P4）の性状を示す。P1 は平板の普通コンクリートパネル、P2 は普通ポーラスコンクリートパネル、P3, P4 が各々 FA をセメントに対して 20, 40 重量%置換した FA 高含有ポーラスコンクリートパネルである。なお、いずれのポーラスコンクリートパネルも、空隙率が 25% で圧縮強度が 10 N mm^{-2} 以上となるように製造した^{16, 17)}。

能登半島周辺のクロメやツルアラメは 11 月頃に成熟し、葉状部に子嚢斑を形成し、遊走子を放出する。遊走子は岩などに付着して発芽し、雌雄異株の配偶体を形成し受精後、胞子体に生長する。今回の実験では名舟漁港の海岸に打ち上げられた子嚢斑を有するカジメ属植物を採集し、その仮根を各コンクリートパネルの中央部に針金で固定し、遊走子の播種を促した。なお、採集したカジメ属植物はツルアラメとクロメの分類形質である匍匐枝を持たない藻体であったため、クロメであると判定した。2013 年 11 月 29 日に藻場造成材 2 基（以下、礁 A、礁 B）を名舟漁港の岸壁付近の海域に設置し、実験を開始した。藻場造成材はほぼ同じ地盤高に設置されたが、

Table 1 Properties of each concrete panel with and without coal-fly-ash.

Concrete panel	Water (kgm ⁻³)	Cement (kgm ⁻³)	Fly ash (kgm ⁻³)	Coarse aggregate (kgm ⁻³)
Normal concrete (P1)	48	298	0	1556
Normal porous concrete (P2)	48	298	0	1556
FA porous concrete with 20% cement substitution (P3)	49	217	55	1556
FA porous concrete with 40% cement substitution (P4)	47	157	105	1556


Fig. 3 Two concrete substrata location submerged in the coastal area and four kinds of concrete panels attached on the three sides (top, side1, side2).

大潮等の影響を受け、水深は1.2~1.8 m、また、天端水深は0.2~0.8 m 程度に変動した。

2.2 調査方法

Fig. 3に礁A、礁Bの配置図を示す。2013年11月の設置以降、2014年10月23日、2015年5月25日、2015年11月8日、2016年6月3日、2016年10月20日、2017年5月31日、2017年10月14日まで4年間にわたり、潜水調査を総計7回実施した。

クロメの着生と生長については、礁A、礁Bの3面に取り付けられた4種のパネル計24枚について調査した。パネル毎に、着生しているクロメの個体数および中央葉長を測定、記録した。さらに、2017年10月14日に、礁Aおよび礁Bを引き上げ、着生していたクロメを全て刈り取り、形態（全長、中央葉長等）および湿重を測定、記録した。

また、海藻全般の遷移状況や植食動物の生息状況については、礁Aの3面に取り付けられた4種類のパネル12枚について調査した。礁Aの各パネルに着生している海藻の種類、被度、および植食動物などの種類と個体数を記録した。海藻の被度とは、パネル上における海藻の占める面積の割合であり、方型枠（コードラート）を海中に沈めてその枠内の海藻面積を計数するコードラート法に

準じて測定した²²⁾。

3. 調査結果および考察

3.1 藻場造成材の設置状況および経年変化

礁A、礁Bともに洗掘、埋没、転倒は見られなかったが、礁Bは全体的に傾いており、天端が10°程度傾斜していた。底質は岩盤に玉石や小礫が乗っているやや不安定な状態であったが、4年間の実験期間中に冬季の風浪等によって礁の設置状況が変化することはなかった。また、礁に取り付けたコンクリートパネルに亀裂や脱落などの破損は見られなかった。

3.2 クロメの着生と生長状況

3.2.1 各礁のクロメ着生数の年次推移

設置から1年後の2014年10月の調査時に礁A、礁Bのパネル上に着生したクロメは総計7個体とやや少なかった。このため、2014年11月に成熟期のクロメをスポアバッグ方式（袋詰め型）^{22, 23)}で周辺に設置し、追加の遊走子の播種を試みた。海岸に打ち上げられたクロメを収集し、母藻から茎状部および仮根部を切除した後、スポアバッグの各網袋に母藻片180 g（10個体）程度と発砲スチロール片（浮き用）を入れた。網袋には目合の異なる2種を用い、3 mm 目合網を5袋、8 mm 目合網を

7袋として計12セットのスポアバッグを作成した。各スポアバッグの下部におもり用の建材ブロックを結びつけ、漁港の防波堤から礁の周辺に投入した後、各礁からの距離が1~1.5 m程度の周囲に6個体ずつ再配置した。設置2年後の2015年11月の調査では、新たな6個体を加えた総計13個体のクロメの着生が確認された。スポアバッグ方式の播種によってある程度の効果があったと考えられる。さらに設置3年後の2016年10月の調査では、総計16個体のクロメが観測されたが、設置4年後の2017年10月の最終調査時には2個体の脱落がみられ、総計14個体（Table 2）の着生数となった。設置から3年以降にはクロメの新規の着生は無かった。また、クロメの着生数は礁A、礁B、およびその面によって大きく異なった。以下、2017年の最終調査時のクロメの着生数で比較する（Table 2）。礁A、礁Bの天端のクロメは、礁Bで1個体のみであった。天端はマクサ等の小型の海藻の個体が多く（詳細は後述）、浅い水深が影響したと思われる。側面間で比較すると側面1では礁Aの1個体と少ないが、側面2では計12個体（礁A：2個体；礁B：10個体）と多く、特に、礁B側面2の着生数が突出して多かった。礁A、礁Bの側面1は外海から設置海域に流入する海流や波浪の影響を直接受けやすく、また、礁Bの側面2は防波堤に面しており、防波堤との距離も1~2 m程度と小さいため防波堤から打ち返される波浪の影響が大きく、クロメの遊走子の着生率が低下したと考えられる。一方、礁B側面2は2つの礁の内側に位置（礁間の間隔：1~2 m程度）し、防波堤にも面していないため、クロメの遊走子が滞留、着生しやすい環境であった可能性が推定される。

このように礁の設置場所や面によって着生数に大きな差が見られたことから、水深や波浪などの環境条件がクロメの着生に大きく影響していることが推察された。輪島市沿岸で広域的に藻場を観察したところ、防波堤の内側など波浪のやや弱い場所にクロメが、外海に露出した波浪の強い場所にはツルアラメが生育する傾向があることが分かった。しかし、それぞれ逆の場所で両種が見られることもあり、一概には結論づけられなかった。クロメに関しては太平洋岸や九州のフィールド調査の知見は多い^{24, 25)}が、能登地域はクロメ分布の北限に近く、冬季の波浪も極めて強いことから限界に近い過酷な条件で生育していると考えられる。このため、他の地域の知見を用いて、能登半島のクロメの分布に対する波浪の影響を論じることが難しく、今後、能登半島の輪島市周辺海域でクロメを主体とした藻場造成を図る際には、当該海域での冬季の波浪状況を含めたクロメとツルアラメの詳細な分布調査が必要と思われる。

3.2.2 礁B側面2のパネル別のクロメ着生数の比較 礁B側面2の各パネル別のクロメの着生数の経年変化

Table 2 Final number of *E. kurome* sporophyte grown on two concrete substrata on October 14, 2017.

	Top	Side 1	Side 2	Total
Substratum A	0	1	2	3
Substratum B	1	0	10	11
Total	1	1	12	14

をFig. 4に示す。また、2017年の最終調査時での各パネルのクロメ着生数をTable 3に示す。パネルの種類によってクロメの着生数に大きな差が見られた。クロメの着生が早く確認され、最も多い6個体の着生数が得られたのは、水深が1~1.5 mの地点にあるFA含有率20%のポーラスコンクリートパネルP3であった。これは、24個体 m^{-2} の着生密度に相当する。また、刈り取り調査後の湿重量測定から湿重基準では2500 $g m^{-2}$ 程度と求められた。一方、同じ水深にある普通ポーラスコンクリートパネルP2には着生が確認されなかった。また、水深が0.5~1 mのやや浅い地点にあるFA含有率40%のポーラスパネルP4の個体数は3個体であった（着生密度：12個体 m^{-2} ）。FA含有の有無で比較すると、10個体中、FAを含有するパネルには9個体、FAを含まないパネルには1個体の着生となった。カジメ属の藻場造成時の目標値は、2才以上の大型藻体で10個体 m^{-2} との報告がある²⁴⁾。また、輪島市近海のクロメの生息状況は、輪島の里海を守る会の調査（石川ら、未公開資料）によると、着生密度は0~1個体 m^{-2} （1才以上）、被度0~5%、最大湿重量300 $g m^{-2}$ 程度であり、南西の温暖な海域に比べると少ない。周辺の調査結果と比較しても、礁B側面2におけるFA高含有ポーラスコンクリートパネルへのクロメの着生数はかなり多いと考えられる。

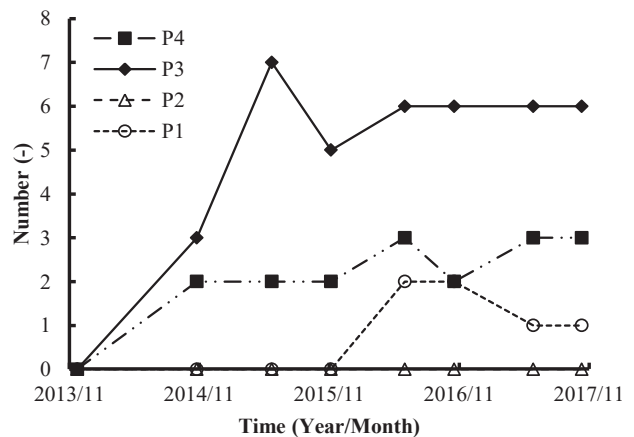


Fig. 4 Seasonal changes of number of *E. kurome* sporophyte grown on each concrete panel of substratum B's side 2 from November 23, 2013 to October 14, 2017. P1: normal concrete, P2: normal porous concrete, P3: FA (20%) porous concrete, P4: FA (40%) porous concrete.

Table 3 Final number of *E. kurome* sporophyte grown on each panel of concrete substratum B on October 14, 2017.

	Top	Side 1	Side 2	Total
Normal concrete (P1)	0	0	1	1
Normal porous concrete (P2)	1	0	0	1
FA porous concrete with 20% cement substitution (P3)	0	0	6	6
FA porous concrete with 40% cement substitution (P4)	0	0	3	3
Total	1	0	10	11

また、普通ポーラスコンクリートパネル P2 には着生がなく、普通コンクリートパネル P1 には 1 個体の着生結果となり、空隙の有無による明確な差異が認められなかった。この理由は明確ではないが、クロメの遊走子の着生に対して、海域投入直後の普通コンクリートパネルの表面近傍でのアルカリ成分が影響し、いずれの場合も着床率が低かった可能性も考えられる。

個体数も少ないため、今回の調査結果から素材に含まれる FA の化学成分による影響について断ずることは難しいが、物理的な空隙の影響ばかりでなく、セメントを FA に置換することによるクロメ着生への影響がある可能性がある。前述したように、セメントに対する FA の置換量を増やすことによって、FA の主成分である SiO_2 や Al_2O_3 とセメント中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ とのポズラン反応が促進され、ケイ酸カルシウム水和物やアルミン酸カルシウム水和物が形成されるため、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ に起因する pH の上昇や Ca^{2+} の溶出を抑制できる^{16, 17)}。このため、海域投入直後の普通コンクリートパネルと FA 高含有コンクリートパネルの表面近傍におけるクロメ遊走子の着床に差異が生じたことが推定される。しかし、FA 含有成分によるクロメ遊走子の着生への影響についての基礎的な知見は少なく²⁷⁾、また、フィールドの実証実験では着生機構の検証が難しいため、今後、室内実験により FA の主成分である SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 によるクロメ遊走子の着生への影響をさらに精査する必要がある。

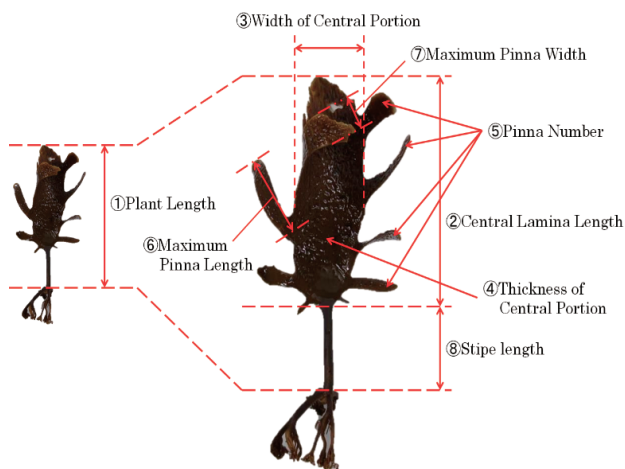


Fig. 5 Morphology of *E. kurome* sporophyte collected at the coast of Nafune, Wajima City and each part name.

3.2.3 FA 高含有ポーラスコンクリートパネル P3 上でのクロメ生長の年次推移

Fig. 5 にクロメの形態および部位の名称、**Fig. 6** に礁 B 側面 2 のパネル P3 上でのクロメの中央葉長の経年変化を示す。また、**Fig. 7** に水中で撮影した礁 B 側面 2 のパネル P3 上クロメ藻体の経年変化を示す。クロメの中央葉長は、1 年目の秋に 7.2 ± 3.3 cm、2 年目の春、秋に各々 21.9 ± 6.5 cm、 27.4 ± 8.1 cm、3 年目の春、秋に各々 38.3 ± 6.0 cm、 28.8 ± 1.9 cm、4 年目の春、秋に各々 42.2 ± 6.0 cm、 34.8 ± 6.0 cm となった。中央葉長は、伸長期である秋～冬期により大きく生長しており、着生した個体は順調に生長したと考えられる。また、3 年目の 2016 年の夏期になると、中央葉長は先枯れによって減少する季節消長が確認されたことから中央葉長の増大はほぼ頭打ちになったと考えられる。なお、礁 B 側面 2 の普通コンクリートパネル P1 上のクロメ藻体は 1 個体のみであるが、中央葉長は 4 年目の秋で 31.0 cm となっており、FA 高含有コンクリートパネル上のクロメ藻体と同程度であった。

日本海沿岸のクロメ藻体の大きさについての知見は比較的少ない。例えば、京都府では 5 月に全長 45.2 ± 4.5 cm、中央葉長 33.2 ± 5.4 cm と最大となり²⁸⁾、島根県では

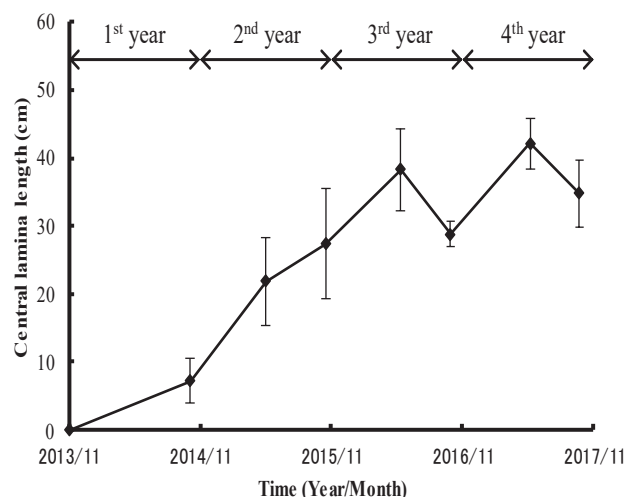


Fig. 6 Seasonal changes of mean central lamina lengths of *E. kurome* sporophyte cultured on P3 of concrete substratum B's side 2. Values represent the mean of samples \pm standard deviation (SD).



Fig. 7 Morphological changes of an *E. kurome* sporophyte on the FA porous concrete panel (P3) on concrete substratum B's side 2 on October 23, 2014 (a), November 8, 2015 (b) and October 20, 2016 (c).

5月の最大の中央葉長は35.0 cm 程度である²⁹⁾。また、新潟県の南西部のクロメでは最大の全長が30~40 cm と報告されている³⁰⁾。これらの日本海沿岸の調査結果の数値と今回の実験結果を比較すると、FA 高含有ポーラスコンクリートパネル上で育成したクロメの大きさの差異は小さく順調に生長したと思われる。また、クロメは4年目の個体でも脱落はほとんど観察されなかった。島根県沿岸におけるクロメの寿命は6年前後と推定されており²⁹⁾、能登地域のクロメの寿命もこの数値に近いことが推定される。

3.2.4 最終年度のクロメの性状

Fig. 8 に引き上げ後の礁 B の外観とクロメを示す。引き上げ後の礁 A、礁 B の調査でも FA 高含有フライアッシュポーラスコンクリートパネルに亀裂や脱落などの破損は見られなかった。礁 A、礁 B に着生したすべてのクロメを刈取り、その形態と湿重量を測定した。Table 4 に採集したクロメの形態を示す。礁 A、礁 B の引き上げ時にクロメが2個体脱落し、測定数は12個体となった。採集したクロメは、夏の先枯れ衰退期から秋の伸長期に差し掛かり、突出しによる生長が始まっていた。また、50%の個体が子嚢斑を形成し、成熟していた。全長は28.0~67.5 cm (平均42.8 cm)、中央葉長は16.5~33.3 cm (平均26.3 cm)、側葉数は3~9枚 (平均6.1枚)、湿重量は39.0~183.0 g (平均99.0 g) と幅広い大きさの個体が

生育していた。これらの数値は島根県沿岸におけるクロメの部位の数値²⁹⁾ に近似していた。

また、各部位の相関を検討した。1例として Fig. 9b に全長と中央葉長の関係を示す。(中央葉長/全長)比は0.66、相関係数は0.6102とおおよそ正の相関を呈したが、強い相関関係ではなかった。これは、採取した季節(10月)が夏の衰退期から秋の伸長期へ移行する季節であったため、個体によって形態変異のばらつきが大きく、形態が統一的でなかったためと考えられる。一方、Fig. 9a は個体の形が一樣となり易い春の伸長最盛期(2017年5月)に水中で測定したデータを基に検討した例である。(中央葉長/全長)比は、約0.66 とほぼ一致しているが、この場合には強い相関関係が得られた($R^2=0.8269$)。これらの結果から、地域に生育する成熟したクロメの形状の特徴を論ずる際には、その季節の変動が大きいため、測定時期の明示が必要であるとともに個体の形が一樣となり易い春の伸長最盛期に複数の個体を用いて評価することが適切であると考えられる。

3.3 海藻の遷移と植食動物の生息状況

3.3.1 海藻の遷移状況

Table 5, Table 6 に調査最終年度である設置4年目の2017年5月および10月の礁 A に出現した海藻種と底生植食動物を示す。2017年5月の春季の礁 A には25種の海藻が着生していた。全体的に著しく優占する種は見ら

(a)



(b)



Fig. 8 Concrete substratum B on October 14, 2017 (a) and mature *E. kurome* sporophytes on the FA porous concrete panel P3 (b).

Table 4 Morphologies of twelve *E. kurome* sporophytes grown on concrete substrata A & B on October 14, 2017.

	Mean \pm SD	Max.	Min.
Plant length (cm)	42.8 \pm 13.7	67.5	28.0
Central lamina length (cm)	26.3 \pm 5.9	33.3	16.5
Width of central portion (cm)	6.8 \pm 1.0	8.5	5.5
Thickness of central portion (mm)	1.8 \pm 0.2	2.2	1.2
Pinna number	6.1 \pm 2.0	9.0	3.0
Maximum pinna length (cm)	17.2 \pm 7.4	26.3	7.0
Maximum pinna width (cm)	4.1 \pm 0.8	5.5	3.0
Wet weight (g)	99.0 \pm 40.3	183.0	39.0

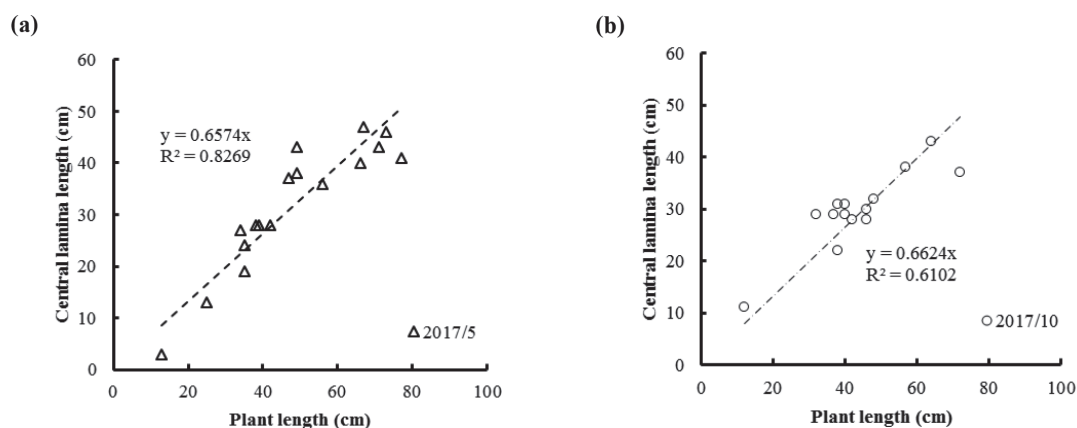


Fig. 9 Relationship between *E. kurome*'s central lamina length and plant length from May 31, 2017 (a) to October 14, 2017 (b).

Table 5 Measurements of seaweed and animals grown on concrete substratum A on May 31, 2017.

Substratum A		Top		Side 1				Side 2			
		FA + porous		non-FA		FA + porous		non-FA		FA + porous	
		P3	P4	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4
Coverage of Seaweed (%)											
Chlorophyceae	<i>Ulva</i> sp.	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	<i>Chaetomorpha</i> sp.		+			+		+	+	+	+
	<i>Cladophora</i> sp.				+	+	+			+	+
	<i>Caulerpa okamurae</i> Weber-van Bosse									+	+
Phaeophyceae	<i>Dictyopteris prolifera</i> (Okamura) Okamura	5	5	+	+	5	5	+	5	5	5
	<i>Dictyota</i> sp.					+	5	+	+	5	+
	<i>Colpomenia sinuosa</i> (Mertens ex Roth) Derbes et Solier	20	40	25	25	+	+			+	
	<i>Undaria pinnatifida</i> (Harvey) Suringar	30	20	30	25	20	5	5	25	5	5
	<i>Ecklonia kurome</i> Okamura							15		5	20
	<i>Sargassum siliquastrum</i> (Mertens ex Turner) C. Agardh	15	5	20	15						
	<i>Sargassum coreanum</i> J. Agardh		+					5			
	<i>Sargassum</i> sp.						+				
Rhodophyceae	non-articulated coralline algae			+	+	5		5	+	5	5
	articulated coralline algae									+	+
	<i>Gelidium elegans</i> Kutzing	15	10	10	10	60	70	20	50	5	20
	Gelidiaceae	+		+	+	+	+	+	+	+	5
	<i>Chondrus</i> sp.	+	+	5	+	+	+	+	+		+
	<i>Hypnea</i> sp.					+					
	Peyssonellaceae			+		+	+	5	+	5	15
	<i>Grateloupia</i> sp.	+	5	+							
	<i>Plocamium telfairiae</i> (Hooker et Harvey) Harvey									+	+
	<i>Gracilaria</i> sp.										+
	Ceramaceae			+						5	+
	<i>Acrosorium</i> sp.					5	5			10	10
	<i>Laurencia</i> sp.	+	+	+	+	+			+	+	
Amount of Coverage		85	85	90	75	95	90	55	80	35	65
Number of Species		10	11	13	11	15	12	12	11	14	15
Number of herbivorous animals											
<i>Omphalius nigerrimus</i>		(3)		(1)						(1)	
<i>Aphysia kurodai</i> Baba		(1)									
Number of other animals											
Porifera			+			+	+	+		5	5
Actiniaria							(1)				
<i>Serpulorbis imbricatus</i>											
Serpulidae		+	+			+	+			+	+
Ectoprocta			+							+	+
Ascidacea						+		+		+	+

Table 6 Measurements of seaweed and animals grown on concrete substratum A on October 14, 2017.

Substratum A		Top				Side 1				Side 2			
		FA + porous		non-FA		FA + porous		non-FA		FA + porous		non-FA	
		P3	P4	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4	P1	P2
Coverage of Seaweed (%)													
Chlorophyceae	<i>Ulva</i> sp.	5	5	+	5		+					+	+
	<i>Chaetomorpha</i> sp.	+	+									+	
Phaeophyceae	<i>Dictyopteris prolifera</i> (Okamura) Okamura	5	+		10			+			+		+
	<i>Ecklonia kurome</i> Okamura							10		10		10	
	<i>Sargassum siliquastrum</i> (Mertens ex Turner) C. Agardh	20	15	40	5			+					
	<i>Sargassum coreanum</i> J. Agardh			5	+			5	5				
Rhodophyceae	non-articulated coralline algae		+	+		5	5	10	+		5	10	10
	articulated coralline algae											+	
	<i>Gelidium elegans</i> Kutzing	10	10	30	10	40	70	50	50		20	20	5
	Gelidiaceae	+		+		+	+				+	5	+
	<i>Chondrus</i> sp.		5	5	+	+		5	+	+	+	+	+
	<i>Hypnea</i> sp.		25	+	20	+							
	Peyssonneliaceae			+		+	+	+	+	+	+	5	+
	<i>Grateloupia</i> sp.		+	+						+		+	
	<i>Plocamium telfairiae</i> (Hooker et Harvey) Harvey		+							5	+	+	5
	<i>Gracilaria</i> sp.	+	+		+	+						+	
	Ceramiales											+	+
	<i>Acrosorium</i> sp.		+	+	+	+	+	+	+	+	+		
	<i>Laurencia</i> sp.		+										
Amount of Coverage		40	60	80	50	45	75	80	55	15	25	50	20
Number of Species		7	13	11	9	8	6	9	6	6	9	12	9
Number of herbivorous animals													
	<i>Omphalius nigerrimus</i>		(2)	(8)							(1)		
Number of other animals													
	Porifera											+	
	<i>Serpulorbis imbricatus</i>					+							
	Serpulidae		+		+	+		+	+				
	Ectoprocta					+	+		+	+	+	+	

れなかったが、紅藻のマクサ (*Gelidium elegans*)、無節サンゴモ類 (non-articulated coralline algae)、褐藻のワカメ (*Undaria pinnatifida*)、フクロノリ (*Colpomenia sinuosa*)、ヨレモク (*Sargassum siliquastrum*)、クロメが比較的多く、被度 5% 未満～70% で生育していた。マクサは、全てのパネルで被度 5～70% で見られた。藻場を構成する大型褐藻としてクロメ、ワカメ、およびホンダワラ類であるヨレモク、ヤナギモク (*Sargassum ringgoldianum*) が被度 5% 未満～30% で確認された。最終調査の 2017 年 10 月の秋季では、1 年生のワカメやフクロノリなどが減少するため、礁 A 全体の海藻の出現種数は、5 月の調査から 6 種減少して 19 種となった。また、海藻全体の被度は、各パネルで 15～80% と差が大きいものの、いずれも下草となるマクサ等の小型海藻から、林冠を形成するクロメ、ホンダワラ類等の大型褐藻まで多岐に及んでいたことから、4 年間で多様な海藻相が形成されたと考えられる。さらに、最終年度の礁 A に出現した海藻の多くは、周辺の天然石に出現した海藻と同種であったことから、周辺の海藻が礁に加入し、礁 A の海藻種の遷移を促してきたものと考えられる。

礁 A における海藻の 4 年間の遷移の特徴としては、下草の植性の顕著な経年的変化が挙げられる (補足資料: Table S1～S5 参照)。礁の設置 1 年後の 2014 年には緑藻のアオサ属 (*Ulva* sp.) がまず優占し、次いで 2 年後の 2015 年には紅藻のツノマタ属 (*Chondrus* sp.) が優占した。3 年目の 2016 年以降はこれに代わるように紅藻のマクサが徐々に増加し、海藻種も増加したが、4 年目で概ね横ばい状態となった。マクサは叢生する多年生の紅藻³¹⁾ であり、密生した藻体の仮根部分が重なり合い盤状となった座が形成されると着生力が強くなるため、海藻相の更新が起こりにくくなる。このような場合、他のクロメなどの大型海藻の新たな入植が困難な状況となることから、4 年の経過で大型海藻、下草の海藻相ともほぼ安定化した状態となったと思われる。実際、3 年目以降になると礁 A、礁 B ともにクロメの新たな着生数の増加は観測されなかった。今後、クロメを選択的に増加させたい場合には、下草を壁面から物理的に除去するなど、クロメ遊走子の付着を促す清掃作業が必要となると考えられる。

3.3.2 植食動物の状況

調査最終年度の2017年5月および2017年10月の礁Aの底生植食動物としては、アメフラシ (*Aplysia kurodai* Baba) が総計で0~1個体、小型巻貝であるヒメクボガイ (*Omphalius nigerrimus*) が総計で5~11個体見られたのみであった (Table 5, Table 6)。ヒメクボガイがクロメ上に付着している様子も確認されたが、摂食痕もほとんど見られなかったことから、食害を懸念する程の生物量ではないと考えられる。

設置から1年後の2014年の調査では、ヒメクボガイが総計で46個体、また生息量が1パネルで12個体を超えるパネルもあったが、その後の経年調査では次第に減少した (補足資料: Table S1~S5参照)。礁上でのマクサ等の海藻の着生密度が増えると、底生動物が基質上に付着しにくくなり、その生息量が減少し、小型巻貝の食圧が低い状態が維持されているものと考えられる。また、4年間の調査中、周囲にアイゴ等の植食性魚類の出現は確認されず、海藻に魚類の摂食痕も見られなかった。これらの結果から、本海域における藻場造成時には植食性動物に対する特段の対策は必要なく、FA高含有ポーラスコンクリートパネルを用いた藻場の造成は可能であると考えられる。

4. まとめ

FA高含有ポーラスコンクリートパネルや普通コンクリートパネルをコンクリートブロックに固定した地域特産の藻場造成材を用い、能登半島輪島市名舟漁港において4年間の藻場造成フィールド実験を行った。以下に得られた知見をまとめる。

- 1) 4年間の実験期間中、2基の藻場造成材のいずれのFAポーラスコンクリートパネルも普通コンクリートパネルと同様に亀裂や脱落などの破損は見られなかった。
- 2) 名舟漁港周辺海域に生息するカジメ属はクロメが主体であり、また、藻場造成材に生長したカジメ属も匍匐枝を持たなかったため、クロメであると判定した。
- 3) クロメの着生数は礁B側面2の着生数が突出して多かった。礁B側面2は2つの礁の内側に位置するため、クロメの遊走子が滞留、着生しやすい環境であった可能性があり、波浪などの環境条件がクロメの着生に大きく影響していることが推察された。本地域においては冬季の波浪の影響がパネルの素材や物理的形状の影響以上に大きいと考えられるため、クロメを主体とする藻場造成にあたっては留意しておく必要がある。
- 4) ほぼ同じ流況環境と考えられる礁B側面2において、クロメの着生数はパネルの種類によって大きく異なり普通コンクリートパネルよりもFA高含有ポーラスコンクリートパネル上に多い傾向があった。水深が1~1.5mの地点にあるFA20%含有パネルに最も多くの6個体が確認され、24個体 m^{-2} の着生密度に相当した。また、4年後のFA高含有ポーラスコンクリートパネル上のクロメの形状は、普通コンクリートパネル上のクロメや島根県沿岸におけるクロメの報告値に近似していたことから、クロメの生長に問題は無いと考えられた。
- 5) 4年後の藻場造成材の海藻全体の被度は、各パネルで15~80%と差が大きいものの、いずれもマクサ等下草となる小型海藻から、クロメ、ホンダワラ類等大型褐藻ま

で多岐に及んでおり、多様な海藻相が形成された。

6) 底生植食動物は、小型巻貝であるヒメクボガイがわずかに見られたのみであり、摂食痕もほとんど見られなかった。また、周囲にアイゴ等の植食性魚類は確認されず、海藻に魚類の摂食痕も見られなかった。

謝 辞

フィールド実験および現地調査にあたりご協力いただいた石川県漁業協同組合輪島支所の江尻浩幸氏 (南志見地区漁業会会長) ほか関係者に深謝する。本研究は、一般財団法人北陸産業活性化センターによる平成26年度R&D推進研究助成の援助を受けて行われたことを記して謝意を表する。

付録：補足資料

補足資料は下記より閲覧可能である。

<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jswe/-char/ja/>

(原稿受付 2019年8月26日)

(原稿受理 2019年12月10日)

参 考 文 献

- 1) Okuda, K., 2008. Coastal environment and seaweed-bed Ecology in Japan. *Kuroshio Science* 2(1), 15-20.
- 2) 横浜康継, 相生啓子, 1994. II 藻場調査結果の解析. 海域生物環境調査報告書 (干潟, 藻場, サンゴ礁調査): 第4回自然環境保全基礎調査 第2巻 藻場. 環境庁自然保護局, 財団法人海中公園センター, 東京.
- 3) 輪島の里海を守る会, 2015. 輪島の里海における藻場保全活動. 平成26年度水産多面的機能発揮対策支援事業 水産多面的機能開発事例集. 全国漁業協同組合連合会, 全国内水面漁業協同組合連合会, 東京, pp. 33-35.
- 4) 石川竜子, 2016. 輪島の里海を守る会の取組について. 平成27年度水産多面的機能発揮対策支援事業 水産多面的機能開発事例集. 全国漁業協同組合連合会, 全国内水面漁業協同組合連合会, 東京, pp. 61-63.
- 5) のと海洋ふれあいセンター, 2007. 能登地域で珍重されている食材〈海藻編〉. 能登の海中林 27, 2-3.
- 6) 池森貴彦, 2012. 能登の美味しい海藻. 珠洲商工会議所, 珠洲, pp. 9-10.
- 7) 寺脇利信, 新井章吾, 2004. アラメ・カジメ類. 大野正夫編著, 有用海藻誌 海藻の資源開発と利用に向けて. 内田老鶴園, 東京, pp. 133-158.
- 8) 能登谷正浩, 1995. 青森県沿岸のツルアラメ. 日本水産学会誌 61(1), 105-106.
- 9) 吉田吾郎, 島袋寛盛, 森口朗彦, 堀正和, 濱岡秀樹, 高田茂弘, 田井中剛, 加藤亜紀, 2014. 瀬戸内西部の屋代島, 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.
- 10) 新井章吾, 寺脇利信, 筒井功, 吉田忠生, 1997. ツルアラメのタイプ標本およびツルアラメとクロメの根の形態形成の比較. *藻類* 45, 15-19.
- 11) 藤田大介, 新井章吾, 村瀬昇, 東出幸真, 2006. 舳倉島の露出海岸と遮蔽海岸における海藻の垂直分布と帯状構造. *藻類* 54, 165-171.
- 12) 土木学会コンクリート委員会豊かな沿岸を造る生態系コンクリート研究調査小委員会, 2006. コンクリート技術シリーズ72 豊かな沿岸を造る生態系コンクリート—磯やけを防ぎ藻場を造る—. 土木学会, 東京.
- 13) 谷口和也, 山根英人, 佐々木國隆, 吾妻行雄, 荒川久幸, 2001. 磯焼け域におけるポーラスコンクリート製海藻礁によるアラメ海中林の造成. *日本水産学会誌* 67(5), 858-865.
- 14) 綿貫啓, 青田徹, 2010. 進化するコンクリート藻礁. 藤田大介, 村瀬昇, 桑原久美編著, 藻場を見守り育てる知恵と技術. 成山堂書店, 東京, pp. 219-222.

- 15) Oyamada, K., Tsukidate, M., Watanabe, K., Takahashi, T., Isoo, T., Terawaki, T., 2008. A field test of porous carbonated blocks used as artificial reef in seaweed beds of *Ecklonia cava*. *Journal of Applied Phycology* 20, 863-868.
- 16) 吉田匠吾, 吉田晴信, 参納千夏男, 三木理, 2014. 藻場再生を目的としたフライアッシュ高含有ポーラスコンクリートの研究開発. *コンクリート工学年次論文集* 36(1), 1678-1683.
- 17) 久保哲司, 参納千夏男, 蟹谷真生, 2015. 北陸地方における地域貢献を目的としたフライアッシュの有効利用促進. *電力土木* 376, 83-87.
- 18) 一般財団法人日本規格協会, 2015. JIS A6201 コンクリート用フライアッシュ.
- 19) 福留和人, 石川嘉崇, 大即信明, 西田孝弘, 2013. フライアッシュを高置換したコンクリートの強度発現に及ぼす NaCl の効果. *コンクリート工学年次論文集* 35(1), 187-192.
- 20) 鳥居和之, 2012. フライアッシュの活用によるコンクリートの高耐久化-北陸地方の ASR 問題への取り組みと情報発信-. *電力土木* 357, 11-15.
- 21) 澤崎晴彦, 藤田康一, 山戸博晃, 鳥居和之, 1999. フライアッシュ高含有ポーラスコンクリートの強度と暴露性状. *Cement Science and Concrete Technology* 53, 483-488.
- 22) 全国漁港漁場協会, 2015. 改訂磯やけ対策ガイドライン. 全国漁港漁場協会, 東京.
- 23) Choi, C.G., Serisawa, Y., Ohno, M., Sohn, C.H., 2000. Construction of artificial seaweed beds; Using the spore bag method. *Algae* 15, 179-182.
- 24) 木村創, 2003. II 生態的特性とその応用 2.3 クロメ. 能登谷正浩編著, 藻場の海藻と造成技術. 成山堂書店, 東京, pp.113-122.
- 25) 能登谷正浩, 2009. カジメ属の生態学と藻場造成. 恒星社厚生閣, 東京.
- 26) 川嶋之雄, 松本正喜, 2003. III 造成技術と管理手法, その理論生態的特性とその応用 3.1 アラメ・カジメ類の造成技術. 能登谷正浩編著, 藻場の海藻と造成技術. 成山堂書店, 東京, pp.217-230.
- 27) Sornalakshmi, V., Venkataraman, K., 2014. Effect of fly ash on the growth and biochemicals of some seaweed. *Bioscience Discovery* 5, 1-5.
- 28) 西垣友和, 道家章生, 2015. 若狭湾西部海域における褐藻クロメの分布特性および季節的消長. 京都府農林水産技術センター研究報告 37, 1-6.
- 29) 石田健次, 由木雄一, 1996. 島根県鹿島沿岸におけるクロメの季節変化. *水産増殖* 44(3), 241-247.
- 30) 寺脇利信, 新井章吾, 2000. 藻場の景観模式図 5. 新潟県能生町百川地先. *藻類* 48, 237-239.
- 31) 藤田大介, 2003. II 生態的特性とその応用 3.1 テングサ. 能登谷正浩編著, 藻場の海藻と造成技術. 成山堂書店, 東京, pp.145-160.

[論文要旨]

普通コンクリートパネルやフライアッシュ (FA) を活用した FA 高含有ポーラスコンクリートパネルを取り付けた藻場造成材を用い, 能登半島において約 4 年間のフィールド実験を実施し, 褐藻カジメ属植物を主体とした藻場造成の可能性や課題について検討した。この結果, 4 年後には藻場造成材上に 14 個体のカジメ属植物であるクロメが着生, 生長し, その半数が成熟した。クロメは普通コンクリートパネルよりも FA 高含有ポーラスコンクリートパネルに多く着生する傾向があり, 最大 24 個体 m^{-2} の着生密度であった。クロメの着生数は, 藻場造成材の設置環境によって大きく異なり, 波浪等の環境条件が着生に強く影響すると推定された。さらに, 4 年を経て藻場造成材にはマクサ等の小型海藻からクロメ等の大型褐藻まで多岐に及ぶ多様な海藻相が形成され, 植食動物による海藻の摂食も見られなかったことから, 能登半島における藻場造成の可能性が示唆された。

キーワード: 藻場; フライアッシュ; ポーラスコンクリート; クロメ; 能登半島