

コンクリート海岸構造物から流出する成分が藻場に及ぼす影響

鍵谷 司(環境計画センター)

はじめに

北海道日本海の南西沿岸部の漁村で育った。大工の父は海が好きで磯舟を作り、漁師も兼ねていた。漁の時期になると昆布やワカメの浜干し、ウニの身(卵巣)の採取、イカ付けや日干し等の手伝いが当たり前であった。遠浅の磯辺はホンダワラに覆われ、凧の時は潜らなくてもウニもアワビも歩きながら拾うように採ることができた。

ところが、1993(平成5)年7月にM7.8の北海道南西沖地震(奥尻地震)が発生した。震源から80km離れた漁村にも津波が押し寄せ、あの浅瀬の海藻群は流出し、砂に覆われた。その後、防災対策として沿岸部には高さ5mの防潮堤が延々と築かれ、浜辺や浅瀬には、波消しコンクリートブロックが大量に積み上げられた。あの素晴らしい自然景観は見るかげなくなってしまった。

その後も25年以上にわたって浅瀬の波消しブロック周辺を観察を続けたが、繁茂していた海藻群はほとんど回復せず、むしろ海底が磯焼けしていることに気づいた。しかも、波消しブロックには海藻がほとんど付着・繁茂していない。コンクリート製構造物は、微量ながら主成分のカルシウムが溶出すると1980年代初頭に新聞報道が出たが、国立水産研究や大学の研究者が、この問題に取組み、海水には緩衝作用なり海藻の繁茂に影響はないといされた。波消しブロックで多く使われているテトラポッドについても、神奈川県下で隣接していた天然岩礁地帯の藻場の比較調査を8年にわたり行った結果、差異がないことが実証された⁷⁾。現在は藻場造成コンクリートが投入されている。

藻場消失は、沿岸漁業の衰退を意味し、漁村はますます過疎化することになる。このような背景をもとに環境専門誌「環境施設」に話題提供として寄稿した。その結果、多くの専門家や現場の方々が、波消しブロックの影響を懸念していることを知った。

1.磯焼けの原因を究明するに至った背景

筆者が、テトラポッドなど波消しブロックの設置後の磯辺の繁茂状態を長年観察した結果、浅瀬のコンクリートブロックにはほとんど海藻が付着・繁茂せず、その周辺の岩場の海藻類も貧弱であった。その後、ウニやアワビあるいは波打ち際にまで押し寄せていたイワシの大群も消えてしまった。特に奥尻地震以後、膨大なコンクリート防潮堤や波消しブロックが沿岸に設置・投入された。コンクリートはカルシウムを微量ながら溶出する。このような従来の自然材と比べて異質な人工材が、海の生態系へ影響しないとは思えない。

以下、流出する成分が水界に及ぼす影響を紹介する。

1.1 琵琶湖における赤潮発生とその原因～合成洗剤から石鹼へ～

1980年代に京都市の上水源である琵琶湖で赤潮発生が大きな問題になっていた(図1、写真1)。赤潮が発生すると、水道水がカビ臭くなり、とてもそのままでは飲めない。赤潮発生の原因是、閉鎖性水域である琵琶湖に窒素とリンを高濃度に含む排水が流入して富栄養化し、植物プランクトンが異常に増殖したためとされた。対策として窒素とリンの流入抑制を図るため、生活排水については、リンを含む合成洗剤から石鹼への切り替えや琵琶湖流域下水道の整備で対応し、工場排水については、窒素除去が難しいので、凝集沈殿方法で簡単に対応できるリン除去が推進された。

赤潮発生メカニズムは、冬から春にかけて気温低下や雪溶け水が湖に流入すると重いので沈降し、逆に底層水が上昇し、循環が起こる。底層水には、有機物が沈降しているので栄養に富んでいるが、溶存酸素濃度が低く、嫌気性が強い。この富栄養状態の底層水が表層に運ばれると空気中の酸素が溶存し、好気性状態になる。春先の強い太陽光に暴露され植物プランクトンが爆発的に増殖するとの考え方である。

しかしながら、窒素やリン濃度の高い富栄養化水域において必ずしも赤潮が発生しない事例もあり、矛盾があった。その後、京都大学農学部の故門田元先生が、溶存鉄が赤潮発生の引き金になると研究結果を発表された。嫌気状態の底層水には、固体の鉄分が還元されて溶解性鉄に変化し、表層に供給されたことが要因とされた。

1.2 豊穣な海の条件：海洋及び大洋における事例

閉鎖性水域の琵琶湖で発生する赤潮は、生活に悪影響を及ぼす環境問題であるが、開放系の自然界で起こった場合、植物プランクトンの大発生は、動物性プランクトンあるいは小魚の餌となり、豊富な漁場を形成する。以下に、琵琶湖の赤潮発生のメカニズムをモデルにして、餌である植物プランクトンの大発生の条件、つまり、栄養塩と溶解性鉄供給に注目して調べてみた。

(1) 好漁場の富山湾における栄養塩と鉄供給のメカニズム

富山湾の大きな特徴は、日本海に突き出た能登半島、背後に3,000m級の立山連峰がそびえ、湾内は、大陸棚が狭く、急激に1,000mもの深さに達する深海が存在することである。南から北上する暖かい黒潮は、深さ1,000mにも達する深海流を伴い、能登半島で遮られて湾内に流れ込む。深層海流は表層部へと湧昇し、栄養に富んだ深層水が表層へ運ばれる(図2)。また、富山湾内には、河川等から流入する有機物や不溶性鉄分が底層部に沈殿し、嫌気性分解が起こる。つまり、外海からの深層水及び湾内の底層水は、栄養分が豊富であると共に、溶存酸素が低いので不溶性鉄分は還元されて溶解性鉄として存在すると考えられる。



図2. 日本近海の海流(ネットより)



図3. 富山湾の地形

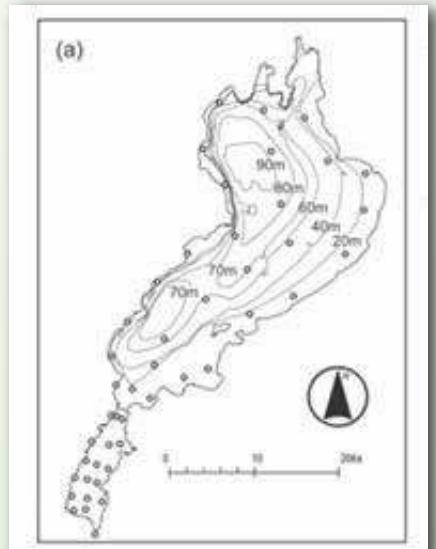


図1. 琵琶湖の等深度図



写真1. 赤潮の発生事例(ネットより)

春先の強い太陽光により雪が解け、冷たい水が流入すると循環が起こる。栄養豊富で溶解性鉄を含む底層水が表層に運ばれ、植物プランクトンが大量発生し、これが餌となり、動物性プランクトンや小魚が増殖し、良好な漁場を形成すると考えられる。原理的に、琵琶湖の循環と富栄養、溶存鉄の供給メカニズムは同じである(図3)。

(2)好漁場ベーリング海の不思議;アリューシャン・マジック

ベーリング海の周辺陸地は、森林・土壌も雨もなく、人も住んでいないので、海への栄養分供給がないので、好漁場になるとは思えない。しかしながら、最近、ある時期になるとオキアミが爆発的に発生し、世界中から凄まじい数の魚類、海鳥や海洋大型動物が集合し、数時間で餌を食べつくし、その後には静かな海に戻る不思議な現象が起こる。毎年繰り返されるこの現象は「アリューシャン・マジック」と呼ばれる。

アリューシャン列島は、アラスカ半島からカムチャッカ半島にかけて東西に約2000kmにわたって弧を描くように伸びる列島で、ベーリング海を封じ込めるように配列している(図4)。ベーリング海では寒流と暖流が流れしており、列島の間から太平洋へと流れ出る。海底は大陸棚と海盆(最深4,085m)から成り、約150箇所の火山からミネラル分が流れ込む。寒流が沈みこむと渦を巻いて海底の栄養分を海面に巻き上げられ、太陽光と豊富な酸素が供給されると膨大な植物プランクトンが爆発的に増殖し、動物性プランクトンやオキアミが大発生し、魚類や海洋動物の餌となる(写真2)。その結果、溶解性鉄は、ほとんど消費され、かつ太平洋への流出が列島で遮られるので、北太平洋亜寒帯域に栄養豊富であるが、植物プランクトンが異常に少ない海域HNLC(High Nutrient Low Chlorophyll)地帯が現れる。

海洋におけるHNLC地帯の存在は1930年代には知られていたが、その原因は謎であった。海洋学者マーチン博士は、HNLC海域である南極海は、栄養分は海流に乗って運ばれるので豊富であるが、森林も河川もなく大陸から遠く離れているので鉄分は途中で沈殿・消費されるので不足すると考え、「鉄仮説」を提唱した。南極の海水をビーカに採取し、溶解鉄を添加して太陽光を当てクロロフィルの発生を確認した。その後、100km²もの広範囲の海域において飛行機から溶解鉄を散布し、植物プランクトンの発生、海中のCO₂減少を確認した。当時は、海水中の微量鉄分の分析ができなかったので「仮説」とされたが、後に分析技術が向上し、実証された。¹⁾



図4. アリューシャン海域の位置図



写真2. 4万頭?の鯨の餌場となる(NHK)

2.沿岸部の磯焼けと溶解性鉄の働き

植物性プランクトンあるいは藻場はいずれも海水中のCO₂、窒素やリンの栄養塩、太陽光による光合成により増殖する。が、微量ではあるが、細胞分裂など増殖には特殊な機能を有する微量のミネラル、とくに溶解性鉄が必要である。光合成に必要な栄養塩などの条件が揃っていても、溶解性鉄が不足すると光合成は抑制される。

2.1 沿岸部の磯焼け原因について

日本各地の沿岸で「磯焼け」が急速に進んでおり、水産業に深刻な影響を及ぼしている。磯焼けとは、沿岸部のコンブやワカメ等多くの海藻類が減少する、いわば藻場喪失する現象である。代わってサンゴ藻が岩礁を覆いつくす状態になり、ウニの幼生の着底、変態を誘起する化学物質を出すのでウニが大発生する。その結果、海藻類は消滅し、餌がなくなるとウニはサンゴ藻を齧る。数は増えるが栄養の乏しいサンゴ藻を食べる所以

身(卵巣)が少なく食用にならない。サンゴ藻がなくなると死滅し、海底には白くなった炭酸カルシウムの殻が残る。

その原因には次のような様々な説はある。

- ①水温上昇説;コンブ等大型海藻の発芽休眠期の冬季に水温が上昇すると発生が抑制
- ②食害説;ウニや植食性魚類の藻食動物による過度な摂食による海藻群落の衰退
- ③養分不足説;排水の規制強化により窒素やリン等の栄養分の不足
- ④鉄イオン不足説;コンブなどの海藻の光合成等に不可欠な溶解鉄イオンが不足
- ⑤その他;大時化(しけ)による海藻群落の流出説、濁りによる太陽光不足説、無節サンゴモ類が他の海藻の付着・固着を阻害する剥離説等

平成27年3月水産庁「磯焼け対策ガイドライン」においても④鉄イオン(溶解鉄)不足が、植物プランクトンの発生及び豊かな藻場育成に欠かせない重要成分であることが指摘されている。

しかし、磯焼けと波消しコンクリート構造物の影響について、注目した研究・調査した事例は見当たらない。



写真3. 磯焼け地帯のウニ大発生

2.2 海の生態系を支える栄養分・溶解性鉄の働き;

植物プランクトンや海藻類の育成は、水中の炭素(CO_2)、窒素、リンを主成分として太陽光による光合成によって行われる。さらに、光合成を行うためには、微量の溶解性鉄が必要であることを述べた。以下に栄養分や溶解性鉄の働きと沿岸部や海洋においてこれらの栄養分や鉄分がどのように供給されているかについて調べた。

(1) 海藻等が生育・増殖する条件とは!

海の生態系を支える植物プランクトンや海藻類は植物である。陸域における植物と同様に CO_2 と水と太陽光により生育する(図5)。海中の CO_2 が消費され、濃度が低下すると大気から供給されるので太陽光があれば基本的に生育の条件が満たされる。植物プランクトンの生産量は、栄養塩に大きく依存し、重要成分としては窒素、リン及び溶解性鉄がある。海水中には、溶解性鉄は陸域や海底の堆積物から供給され、窒素は安定した硝酸塩、リンはリン酸塩として溶存している。これらは、植物プランクトンや海藻類を構成するたんぱく質を合成するために不可欠である(図6)。

タンパク質はアミノ酸から作られるが、アミノ酸は炭素、酸素、窒素、水素から構成されている。空気中には窒素が豊富に存在するが、不活性であるの機能しない。植物プランクトンや海藻等が利用できる化学形態は硝酸塩であり、主に海中に堆積した有機物の分解あるいは陸域から供給される。取り込まれた硝酸塩(イオンとして溶解)は、溶解鉄が関与して硝酸還元酵素によりアミノ酸になり、たんぱく質が合成される。また、鉄は、クロロフィルなどの光合成色素の合成にも関与しており、鉄なしでは

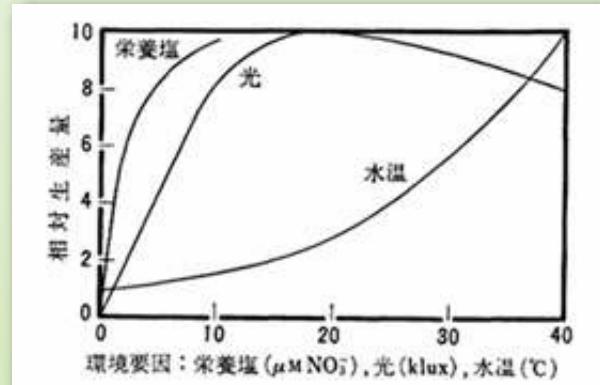


図5光合成を促す要因と相対生産量²⁾

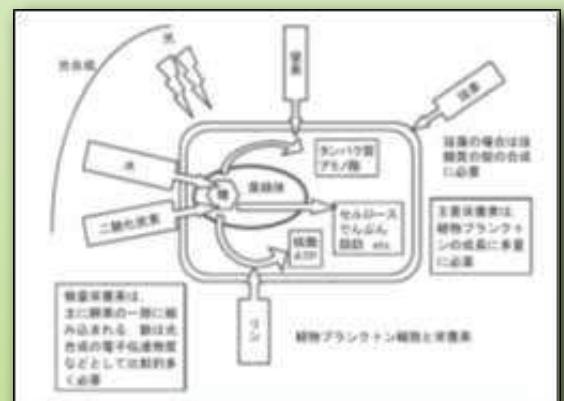


図6 プランクトン細胞と栄養素³⁾

光合成できない。なお、リンは、アデノシン三リン酸の原料であり、エネルギーを蓄え、増殖に重要な役割を果たす。

植物の生長は、最も不足する栄養源の供給量によって制限を受ける。とくに、植物プランクトンの増殖に必要な栄養塩の比率をレッドフィールド比と呼ぶ。成分を重量で表すと、C(炭素)；N(窒素)；P(リン)；Fe(鉄)の比率は、100；18；2；0.02になり、溶解性鉄分は、重量でリンの1/100程度である。必要量は非常にわずかであるが、溶解性鉄として供給する必要がある。なお、植物プランクトンや海藻類もヒトと同様に栄養は豊富であってもバランスが悪いと健康に生育・増殖できないのである。

(2)自然界における鉄の挙動：

コンクリート製波消しブロックの主原料はセメントであり、その成分はCaであり、海水と触れると強いアルカリ性を呈する。鉄類は、アルカリ性が強くなると溶解度が低下し、析出して沈殿する。つまり、海中における鉄イオン(溶解)が不溶性になり、沈殿して海水中から除去される。光合成に必須である溶解鉄(イオンで存在)が不足すると光合成が阻害され、藻場回復は難しくなると推測される。

地球の地表には、鉄は4.7%程度分布するが、空気中の酸素と反応して酸化鉄として存在する。酸化鉄は不溶性で固体として存在するので細胞内に取り込めない。しかし、この不溶性の鉄は、酸に溶けるし、酸素の少ない条件下では還元されて溶解性鉄に変化する。たとえば、森林には、落葉や落枝などの有機物が豊富に存在する。これらが微生物で分解されると有機酸が生成し、土壌中の鉄と反応して溶解性の「フルボ酸鉄」を生成する。また、空気の少ない地層深部や溶存酸素の少ない湖底や海底では、不溶性の酸化鉄は三価から二価に還元されて溶解性鉄に変化する(図7)。

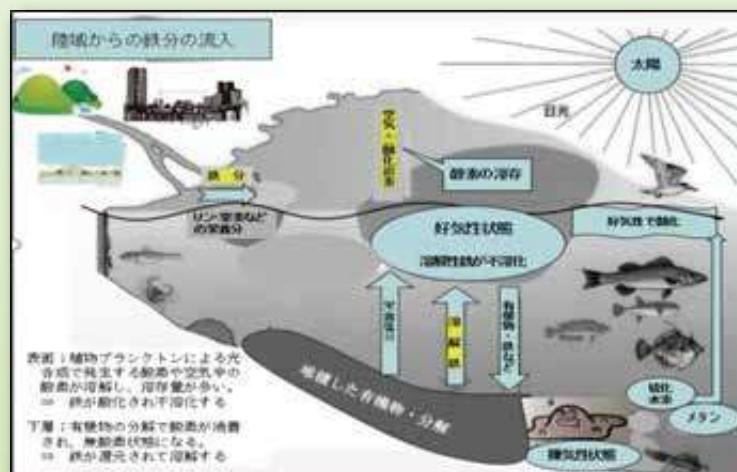


図7. 陸域及び海域における鉄の挙動(引用参考資料⁴⁾を編集)

このように森からは溶解性鉄や不溶解性鉄をはじめ様々な栄養分が河川から海に供給される。さらに、湖底や海底に堆積した成分は、溶存酸素が低いので、不溶性鉄は還元されて溶解性鉄になる。これが対流や昇流により底層から表層へ移動すると、溶解性鉄や栄養分を豊富に供給されるので植物プランクトンの大発生や赤潮発生を引き起こすのである。まとめると次のようになる。

- ① 地表の分布量は4.7%であるが、ほとんど不溶性の酸化鉄で存在(FeO 、 Fe_2O_3)
- ② 酸素の少ない地中では水に溶ける二価鉄で存在するが、地表に現れるあるいは海への流出過程でほとんど酸化されて不溶性鉄に変化する。
- ③ 海水中では水酸化鉄になるが、溶存酸素の多い海面では不溶性の三価鉄になる。
- ④ 海底は溶存酸素が少ないので、三価鉄は還元されて二価鉄になり、溶解性鉄となる。対流や昇流により表層へ移流すると植物プランクトンが爆発的に発生する。

⑤ 陸域では腐食物質のフルボ酸とフルボ酸鉄(二価鉄)を生成し、溶解する。フルボ酸鉄は、安定なので河川から海へ流出し、溶解鉄の供給源となる。同時に窒素やリンなどの栄養分も供給される。

(3) 海中におけるカルシウム(Ca)の挙動

地表におけるCa分布量は3.4%と多く、地球のあらゆる場所に存在する。化学的反応性が高いので、色々な化合物に変化しながら陸上から海洋の多様な生物に利用される。とくにCO₂と反応して生成した炭酸カルシウムは、溶けにくく、硬くて丈夫なので、陸上生物の骨格を作るとともに、海水中では魚介類やサンゴの骨生成に欠かせない重要な部位を構成する。波消しブロックとして、コンクリート製ブロックが、投入により海中にCaが増えた場合にどのような影響を及ぼすのであろうか

今後も大気中のCO₂濃度が上昇すると想定すると、海水中への溶解量が増えるので、酸性化が進みコンクリートがより溶けやすくなると推測する。一方、温暖化が進行するので、海水温が高くなる。海水温が高いほどCaの溶解度が小さくなるので、溶存していたCaは不溶性になり、浮遊あるいは沈殿する。条件次第では海底の白灰化が進む可能性がある。

2.3 波消しブロックと自然岩礁の違いについて！

海藻には、根(付着器)はあるが、岩場に固定して流されないようにするのみで、根から栄養を摂取せず、必要な栄養分は体全体で海中から取り込み、光合成により成長する。つまり、海藻の胞子が固着しなければ流出し、繁茂することができない

(1) 表面状態から見た胞子付着・成育について

波消しブロックは人工的にセメントを主原料に砂等を混合して固化して製造したコンクリートであり、表面は滑らかである。海中には微量のCaの溶出で、表面や近傍付近の海水はアルカリ性が強いと思われるが、海水中での変化は確認できていない。

一方、海藻の胞子等の大きさは、数μm(0.005mm程度)であり、表面が粗く、微細な孔が多いほど付着・固着しやすい。岩礁は、長年にわたって激しくぶつかる波で岩が削られ、割れ目、溝や窪みの多い粗々しい表面が形成されており、胞子が固定されやすい。さらに、成長した根が岩盤の窪みや割れ目に進入し、地下茎を塊状に発達させて安定して固着されやすい。

テトラポッドや多くのブロックは施工で表面は平滑である。窪みや割れ目などが殆ど無いので、胞子が付着・固着し難く、付着しても容易に剥離しと流出しやすいと思われる。また、付着・固着しても周りの海水はアルカリ性が高いので、溶解鉄が除去され、鉄不足状態に陥っており、生育や繁茂は難しいと考えられるが、胞子の付着や増殖に及ぼすアルカリの影響について研究・調査報告は見当たらない。

(2) コンクリートブロックの藻場回復と課題

コンクリート漁礁に対する実証試験では、いくつに報告が目を引く。なお、鉄鋼スラグを活用した沿岸部の藻場回復実証試験など事例も多いが、最新の取組みが発表されるので割愛した。

① コンクリート礁の表面を削って胞子の付着性を確認した実験では、海藻は繁茂するが、3年後から減少するとの報告がある⁵⁾。しかし綿貫らは8年間⁷⁾、簗口ら⁸⁾は11年間の調査で、コンクリート礁と周囲の岩礁の海藻遷移は同様であった。

② コンクリートブロックと天然石とのコンブの付着性能についての調査では、両者に優劣はない報告されている。設置一年目に多くのコンブが繁茂するが、3~4年後には1/10くらいに減少する。その原因は、様々な藻類等が付着するためとし、設置5年目頃からブロックの機掃除が必要であると報告されている。⁶⁾

このような結果を積み重ね、波消しブロックの表面を改良、溶出防止などの工夫が試行されている。しかし、コンクリートは、経年劣化して亀裂やひび割れが起こり、そこへ海水が浸透し、内部は高アルカリ状態になる。たとえ胞子が付着・固着しても周辺海水の溶解性鉄分が不足し、生育や繁茂は阻害される可能性がある。なお、フィールド実験では、海流、栄養分・鉄分、pH、水温、河川など立地、環境条件を明らかにしなければ、本質に迫ることは難しい。

おわりに

磯焼けを長年にわたって観測し、特に浅瀬に設置された波消しコンクリートブロック周辺の海藻群が貧弱であり容易に回復できず、むしろ衰退の傾向が確認した。テトラポッドなどコンクリート構造物であり、その表面は滑らかでアルカリ性であることが影響していると推測された。しかしながら、設置された波消しブロックには藻場が回復している事例も数多く報告されている。海流が常に波消しブロック周辺を洗い流すような状況、河川が流入、海水が滞留し難い場所ではアルカリ性の影響は軽減される推察すると観察した地点は、浅瀬であり、海水が滞留し易い立地条件である。

波消しグロックに付着・固着した海藻の生育、繁茂状況だけを確認するのではなく海域、河川、森林の栄養塩や溶解性鉄などの測定データを積み重ねが重要である。このような「化学反応」による影響は、海全体ではなく、海藻胞子の付着や成育、あるいは海水温の影響や溶解度の変化などを局所的な視点から検討する必要がある。

最後に植物プランクトンの増殖及び藻場回復・繁茂は、海水中のCO₂を消費し、その分を大気中から吸収して大気濃度の低減に寄与する。地球温暖化対策として注目されていることを紹介しておく。

引用参考資料

- 1) 西岡 純; 海洋の植物プランクトンと鉄が語る地球環境、細水、52.p.56-61(2006).
- 2) 谷口 旭; 植物プランクトンの生産特性—厳しい環境下での生産ー; 化学と生物、21-9, pp.606-606(1983).
- 3) 植物プランクトンと栄養素; 東京水産大学練習船海鷹丸ホームページ
- 4) 東京湾岸水質一斉調査結果(速報)、東京湾岸自治体環境保全会議等(平成12.9)
- 5) 中村義輝; コンクリート・ブロックの投石調査報告、昭和34年度、浅海増殖事業(効果調査)報告書、北海道、pp.17-25, 1960(11).
- 6) 沿岸の環境保全コンクリート研究 — 磯焼けを防ぎ藻場を造る — 北海道士木技術会 コンクリート研究委員会(平成19年9月).
- 7) Watanuki A. Yamamoto H. Settlement of seaweeds on the coastal structure. Hydrobiologia. 204/205:69-75, (1990).
- 8) 箕口百代・小川浩・内山幸之介・大野正夫. 大分県別府に設置された貝殻混合多孔質の海藻基質面付きコンクリート岩礁における海藻遷移. Algal Rerouce, 13.171-180. (2020)