

名古屋港における 浚渫土人工石の利活用検討

生駒 涼太¹

¹中部地方整備局 名古屋港湾事務所 企画調整課
(〒455-0045 愛知県名古屋市港区築地町2番地)

港湾インフラの整備、維持で発生する浚渫土砂の処分は重要な課題である。浚渫土砂を製鉄過程の副産物である製鋼スラグや高炉スラグ微粉末で固化して製作した人工石を港湾資材として活用することは、土砂処分量を低減できるだけでなく、天然石の枯渇や資材価格高騰の対策として有効である。本研究では人工石を礁として活用した際の、ごく初期の珪藻の付着、その後の海藻および動物の加入からより高次の魚介類に至るモニタリング調査結果のうち設定した注目種について、2ケ年に渡って天然石と比較した結果を報告する。

キーワード 名古屋港、浚渫土人工石、製鋼スラグ、高炉スラグ微粉末
浚渫土砂、モニタリング調査、ブルーカーボン、建設リサイクル

1. 事業の背景

名古屋港においては、物流コストの低減を目的として船舶の大型化が急速に進展しており、航路や泊地の拡幅・増深が必要であることと、庄内川等の河川からの土砂が流入しており、航路や泊地が埋没しやすいことから、浚渫工事が継続的に行われている。浚渫工事で発生する土砂（以下、浚渫土砂と表記）の処分が大きな課題となっている。

浚渫土砂の処分先は、港湾計画上の発生土量と処分土量のバランスを考慮して策定されているため、本来であれば十分な埋め立て容量が確保されていなければならない。しかし、名古屋港の土砂処分場であるポートアイランドは、1975年から土砂の受入を行っており、浚渫土砂の処分量は既に計画上の処分容量を超えている。そのため中部国際空港沖に新たな土砂処分場の整備が進められているが、海域環境を維持するためには、埋め立てを回避する方策につ

いても検討を進める必要がある。

浚渫土砂を有効活用して、その処分量を減らす取り組みとして、製鋼スラグや高炉スラグ微粉末を浚渫土砂と混合固化し製作する浚渫土人工石（以下、人工石と表記）を、浚渫土砂を港湾資材として活用することを目指す。本研究では、名古屋港内に人工石で作成した礁を設置し、藻類の生育効果と生物の増集効果を調査するモニタリングを実施している

（図-1、図-2）。さらに、海域環境や水産生物等への影響評価に関する検討を行うことを目的として、名古屋港浚渫土人工石検討委員会（以下、委員会と表記）を設置し、学識経験者や有識者等の専門家の意見を踏まえ検討している。

人工石については、愛知県師崎地先においても、天然石との比較による生物増集効果が検討されており、天然石の枯渇や資材価格高騰が懸念されている中、その注目度も高まっている。



図-1 検討の進め方



図-2 名古屋港ポートアイランド及び人工石設置位置

2. 名古屋港での試験施工の概要

(1) 製作・施工の概要

(a) 人工石の概要

人工石は、浚渫土砂に製鋼スラグや高炉スラグ微粉末と水を練り混ぜ、水和固化させて製造される

(図-3)．製造工程がほぼコンクリートと同様であることから、天然石や無筋コンクリート等の代替に用いられてきた．コンクリートと同様に混練・成型して製造されるため自由な形状・サイズにすることが可能で、藻類や生物の付着基盤材として、また、潜堤や人工海底山脈等のマウンド材としての活用が期待されている．以下に人工石の特徴を示す．

- ・準硬石とほぼ同様な品質（強度）である．
- ・使用目的に合わせて形状・大きさを任意に変えることが可能である．
- ・非液状化材料である．
- ・海藻等の生物付着性に優れる．
- ・拘束圧100～400kPaにおいて、せん断抵抗角 35° 以上を得られる．
- ・海域で使用する場合、周辺海域へのpHの影響がない．
- ・「土壌環境基準」または「海洋汚染防止法水底土砂基準」に適合する．



図-3 浚渫土人工石の概要

(b) ポートアイランドでの製作試験

2020年2月から5月にかけて、名古屋港第2ポートアイランドの浚渫土を用いて人工石を製作した．人工石の製作工程は図-4に示すとおりである．

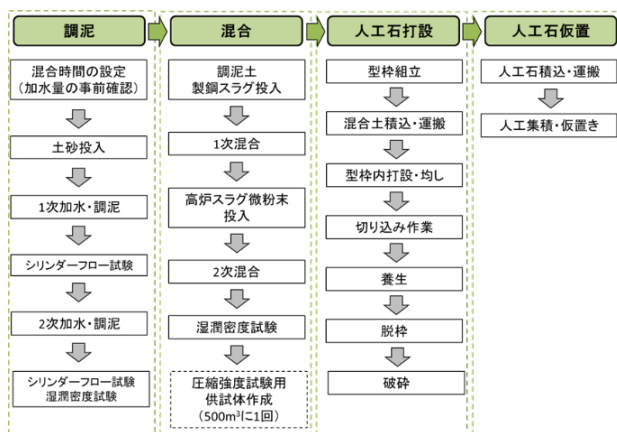


図-4 人工石製作工程

(2) 3試験区の状況

製作された人工石について、実海域でのモニタリング試験を行うため、2020年6月に第3ポートアイランドの沖防波堤前面海域に人工石（1t/個，0.5t/個），対照区としての天然石1t/個による礁を設置した．大きさの異なる人工石を2種類設置することで、隙間の大きさが異なる礁として比較する．名古屋港高潮防波堤の外側に面しており、港内へ流入する河川からの影響を受けにくいことや将来的なポートアイランドの開発への影響、港湾計画を踏まえ、図-5、図-6、図-7に示す位置に設置した．礁は沖側と岸側にそれぞれマウンド形式で設置しており、南側からA礁（人工石1t/個），中央がB礁（天然石1t/個），北側がC礁（人工石0.5t/個）である．沖側は天端水深が5mとなるように、岸側は天端水深が3mとなるように設置位置を調整している．



図-5 名古屋港広域図及び人工石設置位置

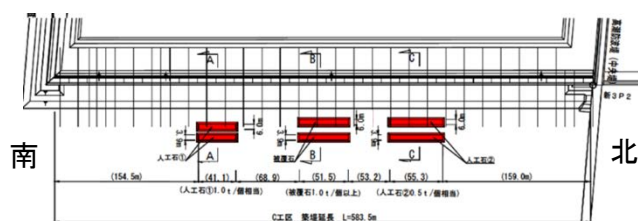
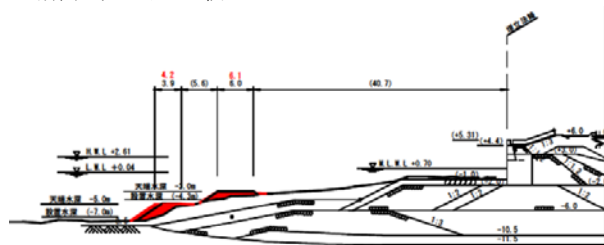
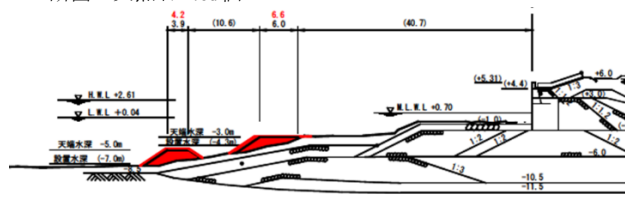


図-6 設置位置図（平面拡大図）

A-A断面：人工石1.0t/個



B-B断面：天然石1.0t/個



C-C断面：人工石0.5t/個

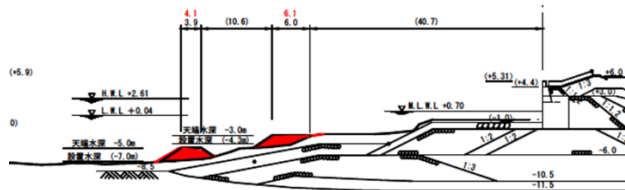


図-7 設置位置図（横断面図）

(3) モニタリング計画

委員会では人工石のモニタリング計画を策定しており、海藻の生育効果や生物の増集効果を評価することとしている。モニタリング調査においては、港湾資材としての有効活用に要求される性能を満たしていることを確認するための礁の形状観察、水域環境への影響を確認するための水質・流況・波浪などの物理環境調査、付着生物等の生育生息基盤としての機能や魚介類の増集効果等を確認するための生物調査を実施している。なお、潜水目視観察により、人工石の表面形状の変化や浮泥の堆積状況についても観察している。ビデオ撮影でも礁の様子を確認している。以下にモニタリング調査の概要を示す（表-1）。

表-1 名古屋港におけるモニタリング内容

区分	調査種類	調査項目	調査方法
環境調査	水質調査	水温、塩分、pH、クロロフィル a、光量子、DO、濁度	海面下 0.1m から海底付近まで 0.1m 間隔で多項目水質計による鉛直測定
	波浪・波高・流速	波高、流向、流速	海底設置型の波高計、流向流速計による 15 昼夜連続観測

付着生物	礁の安定性確認	天然石・人工石の転倒、崩れ、砂による埋没状況	ダイバーによる目視観測、写真・動画撮影
	付着珪藻	5cm×5cm 内の付着珪藻	テストピースにおけるクロロフィル a 量、種の同定、種ごとの細胞数の計測
	海藻調査	目視観察、試料採取、分析試験、出現生物・代表種の記録、種の同定	海藻類の被度を目視観測、写真動画撮影にて記録、海藻類の生育状況を目視観測、目視観測にて採取した海藻の種の同定と種別湿重量の測定
増集生物調査	付着動物調査	種の同定、種別個体数、種別湿重量	コドラード法による採取
	葉上動物調査	種の同定、種別個体数、種別湿重量	コドラード法による採取、枠内の海藻の葉上等に生息する小型甲殻類・小型巻貝を海藻ごと採取
	魚類調査①	種の同定（刺網式）、種別個体数、種別湿重量	夕方から翌朝までの刺網式による採取、回収直前の水中での漁獲状況等をビデオ収録
魚類調査②	種の同定（かご式）、種別個体数、種別湿重量	夕方から翌朝までのかご式による採取	

3. 検討方法

魚類、藻類について、人工石の特徴を確認するため、それぞれ注目種を選定した（表-2、表-3）。

魚類の注目種として、下位の生態系を含む増集効果を把握するため、生態系の上位種であるスズキを選定した。礁の設置効果を継続的に判断するため、岩礁を好むマアナゴやカサゴ、メバルを選定した。夏場の環境が悪化する名古屋海域での増集効果や貧酸素水塊からの避難場所としての効果を確認するため、春先から夏場に回遊する特徴を持つクロダイ、サッパ、メバルを選定した。

藻類の注目種は、事前調査で確認されたマクサ、アオサ、ワカメを、それぞれテングサ場、アオサ場、ワカメ場の構成種であることから選定した。また、既設護岸付近にはガラモ場の構成種であるアカモクも確認されていることから、注目種として選定した。

表-2 設定した注目種（魚類）

想定する内容	注目する魚種	備考
魚類（上位種）	スズキ	生態系の上位種。下位の魚種の増集効果を含め礁の設置効果を確認できる。
魚類（岩礁性典型種）	マアナゴ、カサゴ、メバル	岩礁や礫等の隙間に回遊したり生息場所として利用したりする。魚類の棲家としての効果を把握できる。
魚類（藻場を好む回遊魚）	クロダイ、サッパ、メバル	藻場に増集したり付近を回遊したりする。春先から夏に回遊するのも特徴である。

表-3 設定した注目種（藻類）

想定する藻場	注目する藻類	備考
テングサ場	マクサ	多年生の紅藻
アオサ場	アオサ	1 年生の緑藻
ワカメ場	ワカメ	1 年生の褐藻
ガラモ場	アカモク	1 年生の褐藻

初めに、3つの礁（A礁、B礁、C礁）毎に注目種の出現状況を確認し、異なる結果が得られた断面では、設置場所による影響の有無を把握する。

次に、材質や水深等の違いによる空間的な生物定着効果を整理するために、人工石と天然石の設置位置（A礁、B礁、C礁の3パターン）、岸側と沖側の設置位置（2パターン）、個別の礁の層別（6パターン）に出現する生物相を整理し、空間的な配置による出現個体数や注目種、優占種、貴重種などの出現特性の違いを解析し、材質や水深の違いによる多様性や優位性について評価する（図-8）。評価方法は、委員会で決定された評価方法（量的評価：生物量の経時変化及び多様度指数、質的評価：注目種による考察）を適用する。本研究では、令和2年11月秋季調査から令和4年11月秋季調査までの9季の魚類と藻類に関する調査結果を整理した（図-9）。

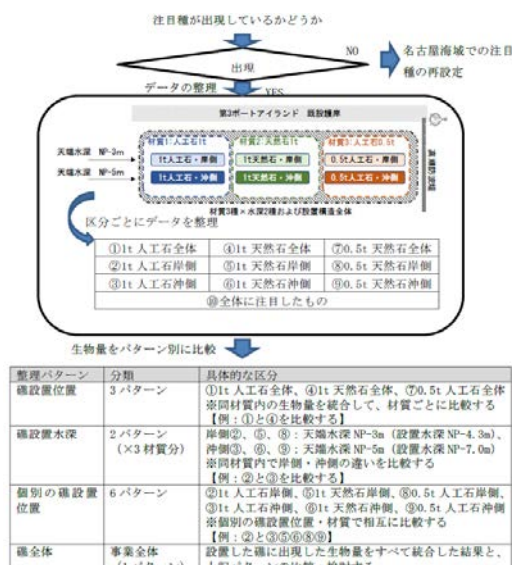


図-8 検討フロー

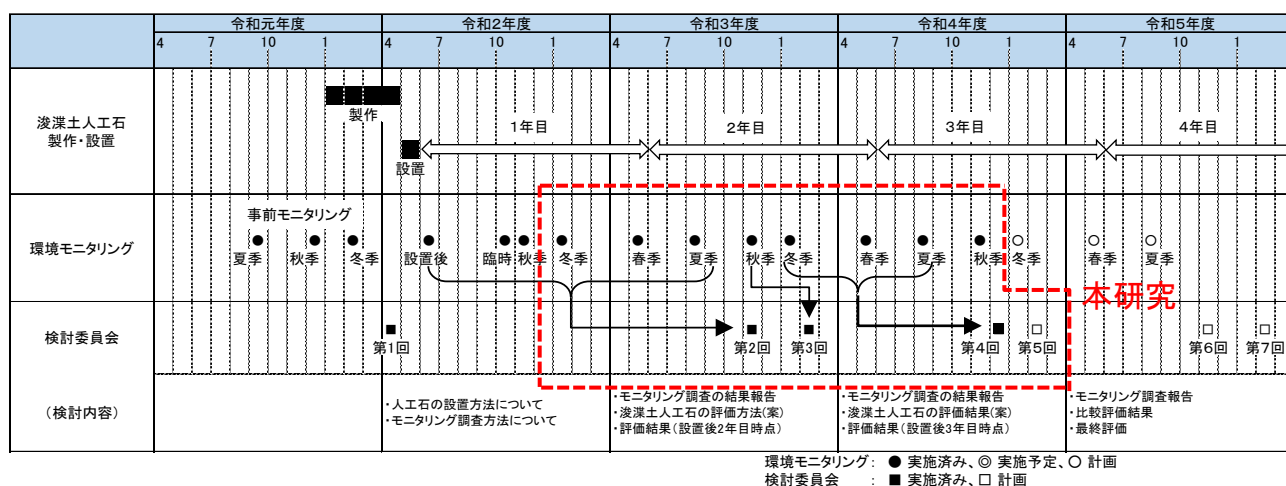


図-9 モニタリング調査時期

4. モニタリング結果と出現種の概要

礁の設置から2ヶ年が経過している。生物が季節的な増加・消長を繰り返しており、生態系の成熟期に移行し、生態系創出機能等の適切な評価が可能な段階であると考えられる。

(1) 魚類について

モニタリング時に確認された魚種はカゴ・刺網の調査（図-10）で36種類、目視のみで20種類確認されている。このうち注目種として設定した魚類は、マアナゴ、カサゴは9季、メバルは8季、スズキは4季、クロダイは3季出現している。魚類注目種であるクロダイが設置後11カ月の春季出現後、設置後26カ月夏季と設置後29カ月秋季に出現している。上位種であるスズキは設置後17カ月の秋季に目視・刺網で出現後、設置後23カ月春季、設置後26カ月夏季、設置後29カ月秋季に出現している。全体的にはカサゴ、マアナゴ、イシガニの個体数が特に多かった。

各礁で出現した注目種個体数の総数は図-11、注

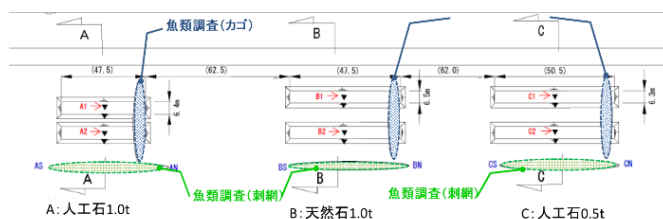


図-10 カゴ・刺網の設置箇所図（平面図）

目種湿重量の総重量は図-12、定着性魚種個体数の推移は図-13に示すとおりである。

A礁（人工石1t/個）とB礁（天然石1t/個）、C礁（人工石0.5t/個）の変化の傾向はほとんど同じであり、冬季に増加して、春季、夏季で減少傾向に転じ、秋季で回復傾向となる季節変化であった。設置後7カ月と設置後19カ月の冬季に個体数も湿重量も増加する傾向にあり、これらの時期には大型のマアナゴやカサゴが出現していた。B礁では、設置後23カ月春季にカサゴの個体数が多かったこととスズキが出現したため個体数や湿重量に変化が出ている。一方で設置後26カ月の夏季にはカサゴの数が減少した影響が出ている。

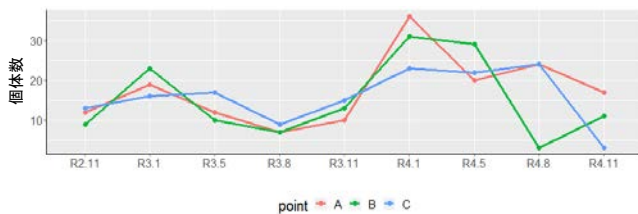


図-11 注目種個体数の経時変化（カゴ・刺網合計）

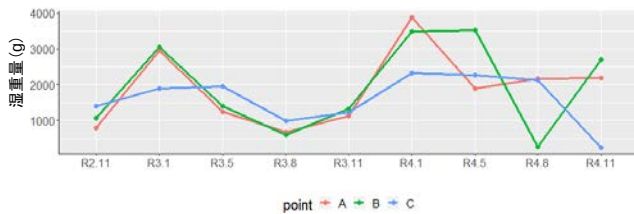
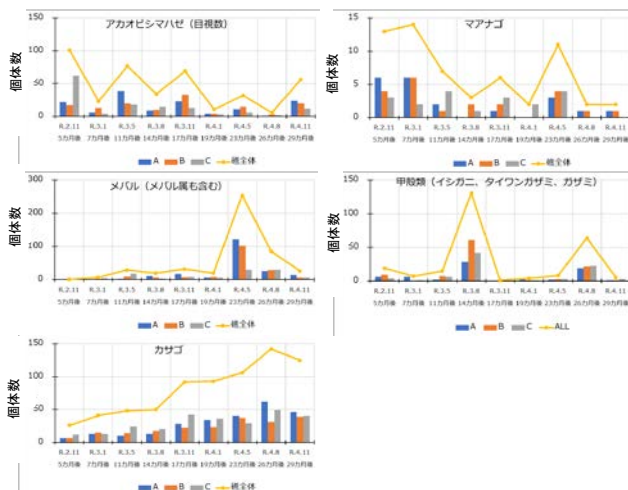


図-12 注目種湿重量の経時変化（カゴ・刺網合計）



*注目種 6種 スズキ, カサゴ, マアナゴ, クロダイ, メバル, サッパ

図-13 定着性魚種個体数の推移

1t人工石のA礁ではマアナゴとカサゴの出現する割合が多く、0.5t人工石のC礁はカサゴの割合が多い傾向にある。カサゴは小さな隙間を形成している0.5t人工石に好んで集まっている可能性がある。

(2) 藻類について

注目種として設定した褐藻（アカモク・ワカメ）の出現状況を図-14に、マクサ・アオサの出現状況を図-15に示す。注目種として設定した藻類は設置後29カ月秋季までにすべて出現している。褐藻植物であるワカメは、設置後7カ月の冬季から出現し始め、春季には湿重量が大幅に増加した。2年目でも同様の傾向が確認できた。同じく注目種として設定したマクサ・アオサの湿重量と比較すると、ワカメの湿重量が圧倒的に多く、ワカメ場としての効果が期待できる。ワカメについてはA礁とB礁、C

礁の出現状況の傾向はほとんど同じである。秋季にはワカメは消失し、マクサ・アオサが確認できるようになる。

A礁のマクサ・アオサの出現状況（図-15）から、B礁、C礁と比較して少ないことが読み取れる。A礁は伊勢湾中央に最も近く、回遊する魚類の餌場となり食害の影響が出たこと、春季のワカメの割合がB礁、C礁に比べて高く、他の海藻が付着しにくい状況であったことが考えられる。

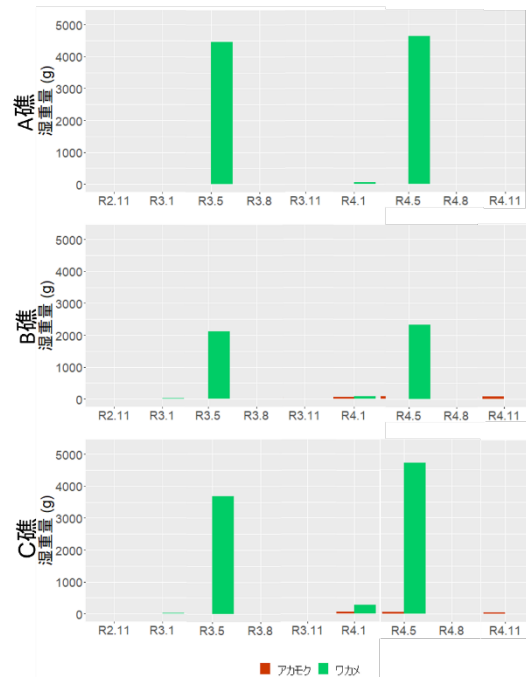


図-14 褐藻（アカモク・ワカメ）の出現状況

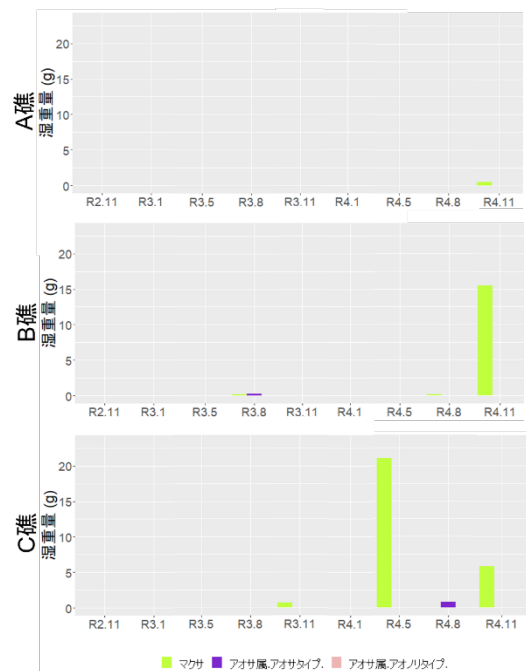


図-15 マクサ・アオサの出現状況

5. 設置後29ヶ月時点の人工石と天然石の比較と評価

設置後29ヶ月時点での評価は表-4に示すとおりである。量的解析では海藻類、魚類、付着動物、葉上動物について生物量や多様度の経年変化を確認した。生物量については2年分のデータが蓄積されたことから、季節ごとの周年変化を確認することができた。生物量及び多様度指数の経年変化から、生態系が極相に近づいていく様子を十分にモニタリングできたと考えている。

付着する生物、蛸集する魚類について、現時点では人工石と天然石との間に有意な差は見られない。人工石は天然石と同等の性質を有しており、水深による差の方が大きい結果が分かってきている。天然石にはない環境面のメリットは、今後脱炭素化やブルーカーボン等の取り組みを行う上では重要な要素となる。

表-4 設置後29ヶ月時点での評価

評価分類	評価項目	評価方法	評価
量的評価	経時変化	①1周期後の変化 ②t検定で、人工石と天然石の間に平均的に有意な差が出ているかどうかを判断する	①遷移している状態。 ②人工石と天然石に有意な差はみられなかった。
	多様度	①多様度が安定しているかどうか ②経時変化に有意差が出ているかを判断する	①遷移している状態。 ②人工石と天然石に有意な差はみられなかった。
質的評価	MDS解析*	①類似性の季節変化 ②人工石と天然石の類似性	①春季や夏季は類似性が高い。 ②性能による特徴的な差はみられないが、設置位置などの細かな条件では違いが出る可能性が示唆された。
	注目種	①設定した魚種や藻類の出現状況 ②餌環境の状況	①岩礁性魚種の定着が確認された。回遊性の魚種も集まり、上位種であるスズキも確認された。 ②底生生物は安定して出現している。特に、ワカメのような大型海藻が繁茂すれば生物量も比例して増加する傾向が確認された。
環境面			藻場が形成されれば、CO ₂ 吸収源となり、ブルーカーボンとして評価できる。 人工石には鉄分が含まれており、海藻類の栄養分となり、鉄鉱石を用いた水和固化体製の人工石ではコンクリートに比べるとpHの溶出が無い等の環境面に対して良いという報告もなされている。 天然石産出のための土地造成等による環境破壊リスクが無く、切り出しや運送に伴うCO ₂ の排出抑制にもなる。
施工性			硬化後の人工石は9.8N/mm ² 程度の強度は有しており、施工性に変わりはない。ただし、人工石は比重が軽く、角が崩れやすい。事前に散水などの対策が必要。

※MDS解析: 群集データの類似性を2次元座標に可視化する手法。
底生生物の種別の個体数と地点（季節ごとのA礁、B礁、C礁）を統合し、群集データを作成。設置海域全体、A礁、B礁、C礁の類似度を比較した。

6. 今後の課題

これまでの委員会において、人工石と天然石の違いを優劣させることよりも人工石の特長を評価する方向性が重要であるとの意見があった。また、今後の実海域への活用を検討するにあたり、より大規模な実験礁の設置を望む意見も出された。

以上を踏まえ、以下に課題点を示す。

(1) 表面粗度と藻場との関連性について

表面粗度と藻場の関係についての文献や試験結果が少ないのが実情であるが、福島県小名浜港で行われた実験礁では無処理、筋型、溝形、空隙型、天然石の5つの異なる表面形状に対して試験をした例²⁾がある。結果として着床初期は表面粗度の違いで効果に差がみられるが、表面を海藻が覆うと効果は変わらないという結果が出ている。

今後、名古屋港でも海中暴露時の強度の変化や表面形状（粗度）の経年劣化状況といった物理的な試験を実施し、港湾資材として使うための基礎情報を取得する必要がある。

(2) 評価方法確立に向けて

現状は9季のデータであり、最終年度までに取得できるデータ数は12個となる。データ数が増えるほど解析結果や考察の信頼性は向上するため、長期の連続データを入手することが望ましい。

このようなデータを得て統計的モデルを構築できれば、目標とする海洋環境を効果的に創出するために必要な環境条件を推定できる可能性がある。

(3) 人工石の特長に配慮した検討

2(1)(a)でも述べたように、人工石は天然石と比べて形状や表面状態を自由に設定できるという点を含め³⁾、様々な利点がある。人工石の活用可能な場は、形状や表面状態を適切に造作することにより大きく広げることが期待できる。

7. 参考文献

- 宮向智興, 今尾和正, 田崎智晶, 赤司有三, 鈴木輝明, 田中義人: 浚渫土と鉄鋼スラグを用いた人工石への生物蛸集効果に関する天然石との比較, 水産工学, Vol.57 No.1, pp.11-25, 2020
- 小笹博昭, 村上和男, 夏戸園子, 中瀬浩太, 綿貫啓: 港湾構造物と付着生物との関わり, 水産工学, Vol.34 No.1, pp.45-54, 1997
- 辻匠, 田中雄一, 中川雅夫, 野中宗一郎, 長尾喬平, 赤司有三, 木曾英滋, 田中智晶: 浚渫土人工石の材料特性と製造技術, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.71 No.2, 2015