

(一財) 港湾空港総合技術センター
令和7年度 研究開発助成 成果報告書

助成番号 : 令和 7 年 2 月 25 日付 第 15 - 2 号

研究開発項目 : (番号) ④港湾、海岸及び空港における技術の伝承・
人材育成に関する研究に関するもの

生成 AI 時代を見据えた海象学習モデルの構築

令和8年4月30日

広島大学
日比野 忠史

目 次

1. はじめに-----	1
1.1 研究開発の目的・意義-----	1
1.2 研究開発の概要-----	1
2. 干潟ゲームの構築 -強化学習によって生態系の生成過程を評価する-----	2
2.1 方法-----	2
(1) 強化学習-----	3
(2) 砂場と泥場（状態価値）の設定-----	3
(3) 流れ（エージェント）の役割と環境の設定-----	3
(4) 細粒分輸送（方策 π ）が作る環境-----	3
(5) 有機物（C, N, P）と生物の元素組成-----	3
(6) 調査データ-----	4
2.2 結果-----	4
(1) 対象沿岸域での優占生物種-----	4
(2) 生物の湿重量（増殖，死亡）の有機物量-----	5
(3) 環境パラメータの抽出（学習）のための観測値-----	5
a) 細粒分への吸着有機物と生体関係有機	
b) C, N, P による有機物のパラメータ化	
(4) 生物生息と底質関係のパラメータ化-----	6
a) 生息に必要な有機物量	
b) 生物の成長と有機物消費	
2.3 干潟ゲームの概念の構築-----	7
(1) 生物の湿重量の有機物量による表現-----	7
(2) 生物と有機物関係（知識）の数値化-----	8
a) 細粒分含有率，細粒分 1 個の輸送する有機物	
b) 細粒分の移動と有機物輸送	
c) 生物の生長と増殖	
(3) 生物の増減をパラメータ化-----	9
3. 底生動物と底質環境間・相互作用のモデル化	
-知識 DB 化と RAG による環境データ解析支援-有機物の分解性-----	10
3.1 生物生息と底質の変動-----	10
(1) 分析に用いる動物，底質データ-----	10
a) 調査の概要	
b) 生物による有機物生産（生体関係有機物の組成比）	

(2) 動物門の季節変動特性-----	11
a) 優先動物種の競合	
b) TOC に対する動物量	
c) 節足動物の減量（動物の死亡）と有機物組成	
(3) 動物活動と底質変動-----	13
a) BOM の生成が形成する有機物組成	
b) 動物の死骸と土粒子密度	
c) TOC の残留形態（選択的分解と TOC の残留）	
d) 足場への細粒土粒子の集積（底泥有機物場の形成）	
3.2 データベース（DB）と RAG の構築-----	15
(1) 調査結果・考察知識の MD 化と DB への格納-----	15
(2) RAG ベースの解析処理の設計（図-3.6）-----	16
(3) システムの性能評価-----	16
4. おわりに-----	18
参考文献-----	18

1. はじめに

1.1 研究開発の目的・意義

生成 AI は港湾事業において今後向かえる「省人化の必要性」、「DX の遅れ問題」を解決していくための新しい技術である。生成 AI の活用環境を整備することは、港湾行政を革新的に成長させるためのチャンスになる。生成 AI である ChatGPT は日々進化を続ける技術であり、港湾分野においても先導的に活用することが望まれる。本研究では構造物の設計、施工への生成 AI の適用法を検討する。設計基準、設計プログラムを活用する施工支援モデルを構築すること、初級技術者を対象とした機械学習システム開発することを目的とする。機械学習に用いるアルゴリズムは人間の知能をコンピューター上に再現するものであり、構造物の設計、施工法を提案する SDB（検索用データベース）の考え方は、全ての港湾事業（港湾領域 RAG（検索拡張生成）を構成する多数の内装 SDB）への拡張を可能にする（図-1.1）。

1.2 研究開発の概要

人口減少が進む社会において失われつつある技術者の知恵を継承することを目的としている。沿岸構造物の設計、施工における技術者の知恵を学習させた港湾領域で活用される RAG を開発する。開発する RAG は習熟した技術者の知恵を機械学習により取り入れた（AI が読める）SDB と種々の構造物の設計用プログラムから構成される。技術者の知恵である SDB を実装した RAG は汎用 LLM（Large Language Model）に専門的な知能を与える拡張情報源である。AI 化された SDB を搭載した RAG を提供することにより、汎用 LLM を専門性の高い頭脳として利用できる環境が構築される。また、本研究で開発する「人の DX」は設計プログラム作成等を支援する技術的な支援機構であり、ChatGPT が得意とするプログラミング技術の提供システムである。

本研究では地形、海象、生態系等の自然現象下での構造物の設計に関する技術者のノウハウを AI 化する機械学習法を開発して、港湾構造物に対する設計外力を対象とした技術者の知識、経験を反映できる SDB を構築する。設計、施工等の構造物設計プログラムを連携させた内装 SDB に連動させる港湾領域 RAG を開発する。汎用 LLM に文章を学習されることを拒む利用者のために秘匿性を向上させる SLM（Small Language Model）を連携させた RAG を構築する（図-1.1）。

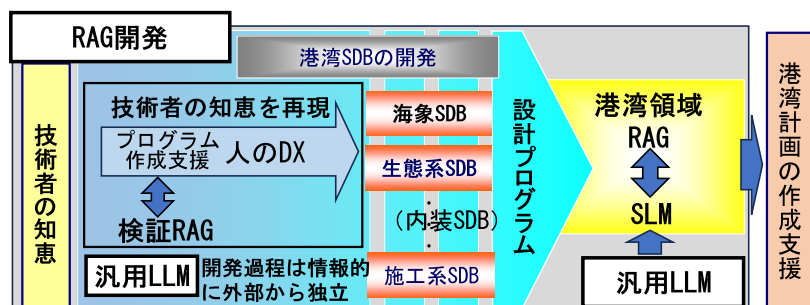


図-1.1 港湾領域 RAG の概念図

（専門技術に対する汎用 LLM の正解率は低く、専門技術を提供する RAG は汎用 LLM よりも性能の低い SLM の正解率の向上に必須、SDB の構築と AI 化の主軸とする）

2. 干潟ゲームの構築 – 強化学習によって生態系の生成過程を評価する –

干潟の造成において適地選定は重要課題である。社会的な条件等を考慮して候補地を選定し、生物、水質および流況等の事前調査を実施し、造成後の生物量を予測し、造成場所を決定することとなる。干潟の生態系は、生物、化学、物理過程が相互に複雑に関連しているため、これらの過程をつぶさにモデル化し、造成後の生物量を精度良く予測することは現時点の科学ではまだ困難である。

このような複雑な過程に対し、取得可能な情報から最善の方策（ある状態での最適な行動）を決定する手法として、強化学習がある。強化学習はロボット制御等に用いられており、例えば、エージェントであるロボットが現在ある状態から移行した全ての状態での各々の報酬を学習させ、ゴール到着時の報酬の和（収益）が最大になる方策を学習させていく手法である¹⁾。このように強化学習は、ある状態から得られる収益を求めるのではなく、目標とする結果を得るためにある状態と目標とする収益を達成するための最適な行動を求めることである。

著者らは、この強化学習を造成干潟の場所の選定に応用した干潟ゲームを考えた。本研究で提案する干潟ゲームでは、ロボット（エージェント）は泥場と砂場を結ぶ流れ、状態は底質等、行動は細粒分の輸送、報酬は生物量、方策は干潟の栄養場（状態）での細粒分の輸送、収益は将来の干潟生物量とした。干潟ゲームでは将来の生物量が最大になるような細粒分の輸送が求められ、この細粒分の輸送を実現する候補地が干潟造成の適地となる。干潟生態系の強化学習においては、様々な行動に対する報酬を設定する必要がある。そのためには、様々な状態（底質等）と報酬（生物量）の関係を定量化することが求められる。干潟に関して膨大なデータはないので、深層学習は適用が困難であり、データが比較的少ない沿岸生態系の機械学習では、人が観測値を解釈して与える必要がある。この人（技術者や研究者等）の知見をモデルに与える過程が、沿岸生態系の機械学習を発展させる上で重要であると考えている。そこで、本研究では、強化学習を造成干潟の適地選定に応用した干潟ゲームに対して、現地の調査データからパラメータを設定する過程を示すこと、および適地選定モデルの概念を構築することを目的とする。

2-1 方法

(1) 強化学習

ベルマン方程式（(2.1)式）は「状態 s の価値関数 $v_\pi(s')$ 」と「その次に取り得る状態 s' の価値関数」との関連性を表しており、時刻 t 現在での状態において得られる将来の収益 (G_t) と $t+1$ での状態に遷移した時に得られる報酬 (R_{t+1}) との関係を表す方程式である。ベルマン方程式では将来の v_π は割引率 γ に従って低下していく。

$$\begin{aligned} v_\pi(s) &= \mathbb{E}_\pi[R_t = r | S_t = s] + \gamma \mathbb{E}_\pi[G_{t+1} | S_t = s] \\ &= \sum_{a,s'} \pi(a|s) p(s'|s,a) \{r(s,a,s') + \gamma v_\pi(s')\} \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$G_t = R_t + \gamma G_{t+1} \quad (2.2)$$

状態価値関数 v_π はロボットが状態 s にある時に将来得られる収益の期待値を表す方程式である。

価値を計算するための行動 $\pi(a|s)$ は $S_t = s$ において a の行動をとる確率であり、 $t+1$ に移行する新しい状態 s' は状態遷移確率 $p(s'|s,a)$ に従って決定される。 t 現在での最適な行動は一連のステップを繰り返して収益 G_t を最大にする行動によって決定されていく。この一連の強化学習の流れは干潟ゲームでは図-2.1となる。ここで、状態 s は泥場、または砂場、方策 $\pi(a|s)$ は泥場では有機物獲得量、砂場では生物増加量、報酬は底質と生物量との関係（生

態系モデル) により得られる生物量となる。

(2) 砂場と泥場（状態価値）の設定

干潟生態系における餌と生物との関係として、数理生物学で用いられる餌量 x と捕食生物量 y に生じる振動モデル(2.3)式の間接作用を用いて²⁾、干潟での生物量を最大とする細粒分の輸送を求めるモデルを設計した。

$$\begin{aligned} dx/dt &= rx - axy \\ dy/dt &= bxy - cy \end{aligned} \quad (2.3)$$

ここで、 r はマルサス係数、 a 、 b は捕食速度係数、 c は死亡率である。

(3) 流れ（エージェント）の役割と環境の設定

生物活性の高い砂場と有機物（栄養、餌）が集積する泥場を設定し、砂場と泥場をつなぐ流れをエージェントとして強化学習モデルを構築した。流れは「細粒分を効率的に輸送する」ための方策($\pi = a = \text{輸送} | s = \text{泥場, 砂場}$)を実行する。

干潟生態モデル（図-2.1 破線枠内）は泥場から輸送される有機物に加えて、生物が生成する死骸、排泄物等の生体関係有機物によって形成される。本ゲームで設定される環境は、泥

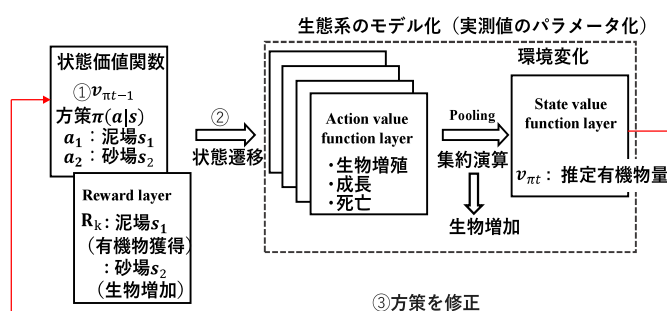


図-2.1 強化学習の流れ

場から輸送、または生物が生成した有機物（栄養塩）を餌（一次生産過程は考慮せず）として、餌の集積により生物が生息（成長、増殖、減少）するステージである。環境の変化に用いるパラメータは実測された有機物と生物の個体数、湿重量との関係を表す生物の活性状態から決定された。

(4) 細粒分輸送（方策 π ）が作る環境

流れが泥場（状態 s_1 ）から砂場（状態 s_2 ）に有機物（栄養塩）を輸送（行動 a ）する方策 $\pi(a|s)$ により形成される環境から得られる収益 G_t を評価する。収益は報酬 R_t (生物の増加) の将来和であり生物生産の高い環境が形成されることにより最大化するとした。本環境では餌（有機物）の供給により生物の活性が高まると生物の成長、増殖のみならず、排泄、死亡（生物循環）量が多くなるため、有機物を介して有機物の循環（生体関係有機物の生成と利用）による R_t が学習されていく。

(5) 有機物（C, N, P）と生物の元素組成

生成初期の生体関係有機物は生物体と同程度の元素比で構成されているため、レッドフ

ィールド比（RF 比）を基準とした元素比で構成される（C/N 比 6.6, N/P 比 16）とした³⁾。TOC は乾燥生物の 1/4（湿重量では 1/10）程度の重量比であるが、生物湿重量との関係を設定できない（底質と生物量は異なる検体）ため、調査単位（g/0.15 m²）を基準として TOC を有機物量に代表させた。

有機物は生物の摂餌により体内に取り込まれるが、排泄物、餌は生体に不都合な元素を含むため、餌と排泄物の差を生物の吸収量とした。すなわち、排泄物、餌と生物吸収量（生体）区分せず、RF 比に基づく元素組成比で有機物が生体に取り込まれるとした。

(6) 調査データ

燧灘北沿岸域において 2023 年 7 月と 8 月に A～F エリアの 31 地点での調査結果を用いた。エリア等の情報は文献⁴⁾を参照されたい。底質および生物調査から優占生物の増減に対する底泥の粒度分布、有機物の関係を融合するパラメータを設定した。

既往研究⁴⁾によって、対象海域は次の様な特徴があることが示されている。全てのエリアは 3 m 以浅に砂場、2 m 以深に泥場（75 μm 以下の細粒分が 60 %以上）が発達した 5 m 以浅の浅場であった。大潮干潮面（TP-2.5 m）付近に泥場が形成されており、有機物の集積していた。大潮干潮帯付近では、生物活動により生成された有機物（生体関係有機物）の掃流、堆積が繰り返えされていた。細粒分含泥率の高い底泥には有機物が土粒子に吸着して堆積しており、細粒泥への C, N, P の含有量が多く、砂場への栄養（餌）の供給源となっていた。

2.2 結果

(1) 対象沿岸域での優占生物種

対象沿岸域ではメナシピンノ（カクレガニ科）とホトトギスガイが優占して生息していた。メナシピンノ、ホトトギスガイの各々の湿重量が 15 g 以上出現する地点を優占地点（6 地点）とした。図-2.2 には細粒分に対する(a) TOC, (b) TOC（砂分）, (c) 生物湿重量、および(d) 優占種～全生物個体重量（湿重量/個体数関係）、図-2.3 には優占種の(a) 個体重量, (b) 湿重量の 7 月から 8 月への変化が示されている。図-2.3(a)中の凡例 p はメナシピンノ、ホトトギスガイが優占する地点を表している。例えば、メナシピンノ-p7●は 7 月調査○の内、メナシピンノが優占した地点を示している。TOC（砂分）は細粒分に吸着しない POM（粒状態有機物）を示している（2.2.(3) a)節参照）。TOC は細粒分に多く含まれるが、細粒分との相関は低い（図(a)）ことから細粒分に吸着しない TOC が多いと考えられる。メナシピンノが優占して生息する 4 地点では 7 月の個体重量が全生物の平均個体重量の数倍あるが、8 月に他の動物と同等の個体重量に低下していた（図-2.2(d)）。メナシピンノは幅広い細粒分含有率の場で生息しているが、40 %以下の含泥率で生息量が多くなっていた（図-2.2(c)）。また、細粒分が 90 %以上の泥場においても生息しており、対象沿岸域では泥場に DO の供

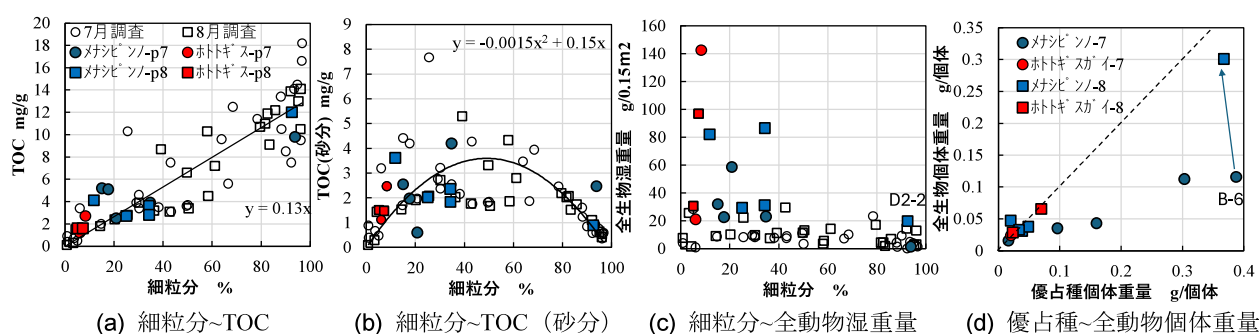


図-2.2 細粒分への TOC の含有と生物個体数、湿重量の関係（メナシピンノ湿重量 > 15 mg 出現地を優占地点）

給が継続的にあったと考えられる。メナシピンノは7月から8月の間に増加していた。個体数の増加に対して湿重量の増加率が低く（個体重量の減少）になっており、7月～8月にメナシピンノに繁殖があったことが推定される（図-2.4(a)）。

(2) 生物の湿重量（増殖，死亡）の有機物量

有機物（餌）が不足し易い砂場では，細粒分に付着しない有機物量により生物量を表現できていた（図-2.2(b), (c)）。生物活性の高い砂場では，生体関係有機物が主体として堆積するため，有機物量は生物活性（増減）の指標として利用できると考えられる。また，成長過程での湿重量の増加は有機物の減少，生物の死亡（湿重量の低下）は有機物の増加として現れると考えられる。

メナシピンノの増殖時には湿重量が増加する傾向はあるが，D1-1 では個体重量の約 1/6 の減少に対して，湿重量が約 1/2 に減少していた（図-2.3）。個体重量の減少は増殖があったことを示すが，増殖過程では生物の生成と死亡（増加と減少）が同時に起こることがある。そのため，干潟ゲームでは増殖（個体重量の低下）と死亡（湿重量の低下）を表現せず，生物の湿重量の変動分と同等の有機物量が増減するとした。増殖と死亡等に伴う湿重量の変化を有機物量の変化として表すことで，複雑な生態過程をモデルから省略した。

(3) 環境パラメータの抽出（学習）のための観測値

優占種であるメナシピンノに生物を代表させた。図-2.4 に干潟パラメータの抽出に用いる底質，生物データ（7月，8月観測値）を示す。湿重量は全動物の総和であり，図(c)にはメナシピンノの成体（個体重量 0.15 g 以上），図(d), (h), (l)には細粒分が 70 %以上の地点に×が付記してある。有機物の含有元素（C, N, P）/細粒分比は底質 1 g に対する C, N, P 含有量（mg）と細粒分含有量（mg）の比を表している。

a) 細粒分への吸着有機物と生体関係有機物

細粒分に吸着している有機物の元素/細粒分比は元素に対して一定の勾配を持つ（図(d), (h), (l)中の直線）が，細粒分に吸着しない生体関係有機物が多い砂場では，元素/細粒分比

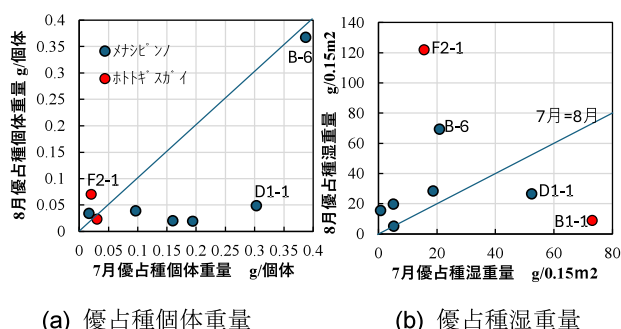


図-2.3 メナシピンノとホトトギスガイ（7月～8月への変化）

が上昇していた。湿重量が 20 g/0.15 m² 以上の細粒分が 20～40 %の砂場においては TOC が 2～4 mg/g 含まれており（図(a)），生物湿重量の多い（生物活性の高い）砂場では，TOC/細粒分は 10 程度であった（図(c)）。

有機物は砂分に吸着し難いため，砂分には有機物含有量が少ないが，生物活性の高い砂場では POM（粒状有機物）として存在する生体関係有機物有量の含有率が高くなる。図(d), (h), (l)では細粒分が 70 %以上の底泥では有機物元素/細粒分が有機物元素を表す直線上近傍にあり，70 %未満の

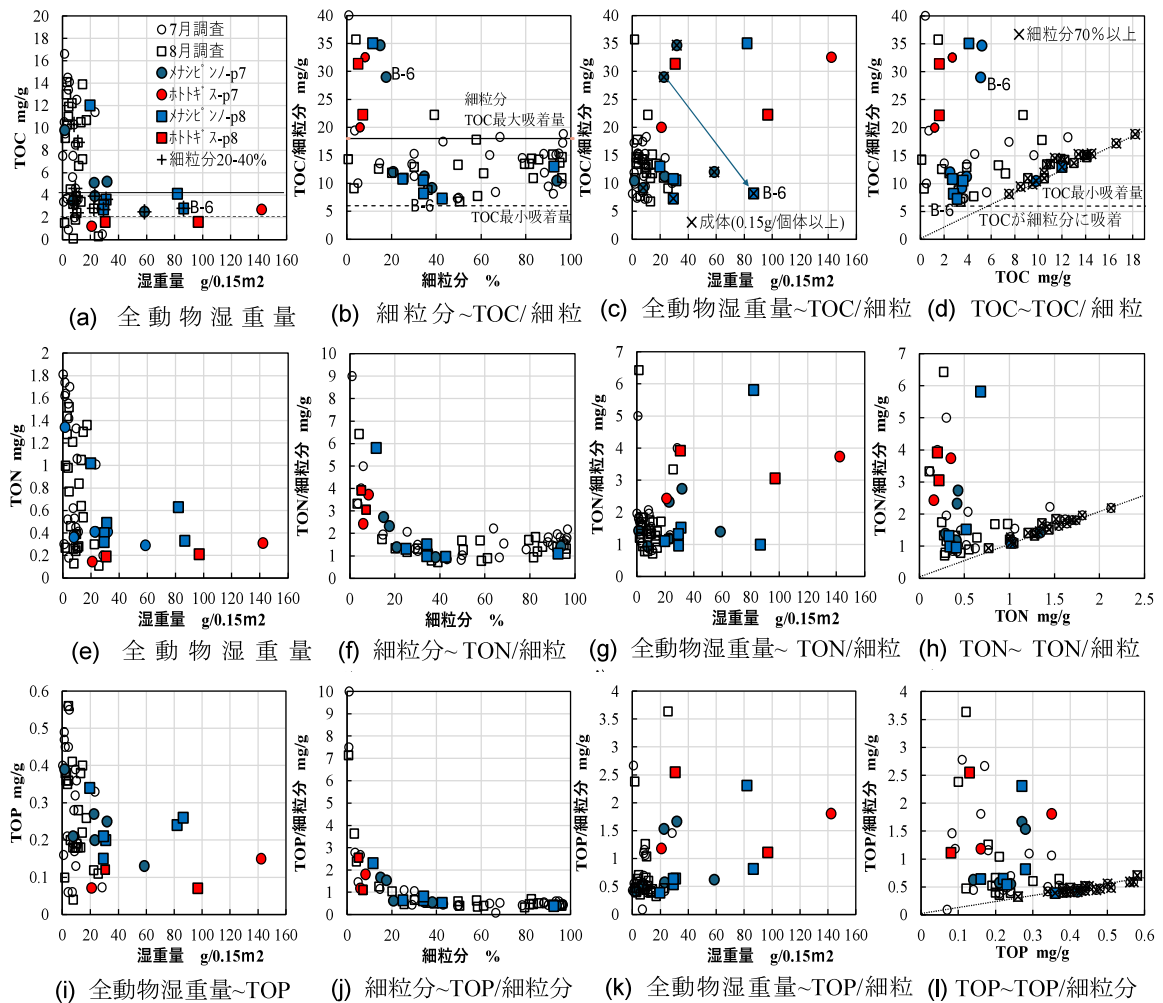


図-2.4 干潟パラメータの抽出に用いる底質、生物データ（凡例は図-2.3 と同様）

底泥ではプロットが直線上の上側に離れていた。生物（湿重量）が少ない泥場ではPOMの含有量が少なく、C、N、Pとも直線上にプロットされた。対象沿岸域では生物活性の高い砂場ではC、N、Pが餌源となるPOMとして存在できていたと考えられる。

b) C、N、Pによる有機物のパラメータ化

図-2.5は有機物元素の構成比（C/N比、N/P比）を示す。図(a-1)、(b-1)はTOC、TON、図(a-2)、(b-2)は砂分に含有される栄養塩を対象にするTOC（砂分）、TON（砂分）を示す。図中のTOC（砂分）、TON

（砂分）は図-2.3(d)、(h)の破線を基準（x軸）とした（細粒分に吸着したTOC、TONを除いた）時のTOC、TONを示している。破線は7月、実線は8月のメナシピンノ優占地点に対する線形近似線を表している。砂分に吸着しないPOMに対してC、N、Pを整理すると、C/N比、N/P比関係は逆転しており、砂場POMではN減少量が多くなかった（N生産されている）。メナシピンノの生息地点ではC/N=13（mol/mol）から8月に向ってC/N比は6.6、N/P比は16に近づく変化があり、生物により生産されたC/N比、N/P比を持った生体関係有機物の堆積があったことが示唆された。

(4) 生物生息と底質関係のパラメータ化

a) 生息に必要な有機物量

7月から8月での生物の生息特性として、図-2.6に優占種であるメナシピンノとホトト

ギスガイの個体特性、および優占種湿重量と TOC との関係を示す。図(b)の成体、未成年線はメナシピンノに対しての。

ホトトギスガイ生息地点（砂場）の TOC（赤破線）は正の勾配を持つのに対し、メナシピンノでは泥場での生息があるため負の勾配（青破線）を持っていた（図(c)）。しかし TOC（砂分）で整理すると（図(d)），メナシピンノ湿重量に対しても TOC の正の勾配が現れた。底泥内で細粒分に吸着する有機物は還元化、難分解性化が進むため、泥場では生物の有機物利用率が低下するのに対し、POM 化した生体関係有機物の存在率の高い TOC（砂分）では湿重量の増加は有機炭素 OC の減少（有機物利用）として現れるものと考えられる。図(d)ではメナシピンノの湿重量（g/0.15 m²）に対し平均的に 0.06 mg/g の TOC が存在しており、湿重量の増加とともに TOC の減少があった（A3-1, B-6）。

b) 生物の成長と有機物消費

B-6 ではメナシピンノが平均個体重量を変化させず（図-2.2(d)）に 54 個体（21 mg, 0.39 g/個体）から 189 個体（69 mg, 0.37 g/個体）に増加していた。一方で TOC が 5.1 から 2.8 mg/g に減少しており、湿重量の増加（成長）は TOC の減少を伴っていた（図(d)）。なお、B-6 では細粒分が 17.6 %から 34.3 %に上昇しており、約 17 %（TOC（砂）1.5 mg/g, 図-2.4(b), (d)）の細粒分の増加分もあった。この現象は A3-1 でも観測されており（図(a), 全生物湿重量が 3→8 g/0.15 m²），十分な TOC が動物を成長、増殖させることを示唆している。

2.3 干潟ゲームの概念の構築

(1) 生物の湿重量の有機物量による表現

生物の増減では有機物（TOC（砂場））が成長、増殖、死亡の条件となることが示された。そこで干潟ゲーム（図-2.7）では生物量を湿重量で表し、生物の生存に必要な有機物量を

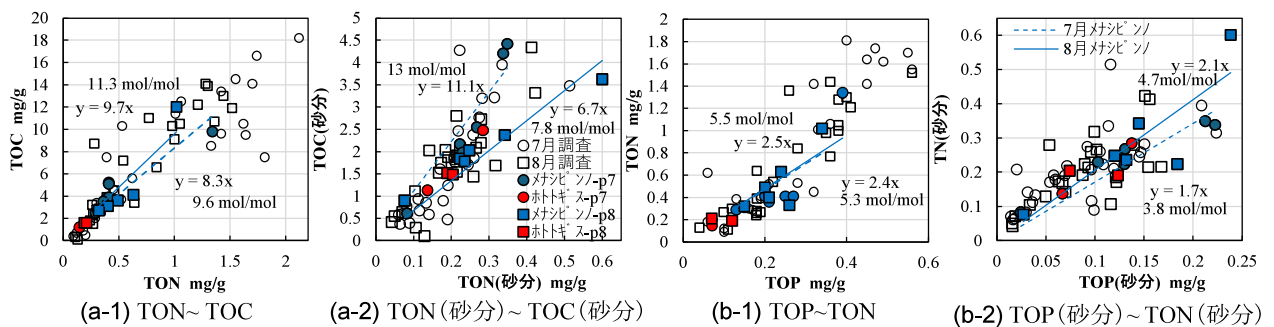


図-2.5 有機物元素の構成比（C/N 比，N/P 比，凡例は図-2.3 と同じ）

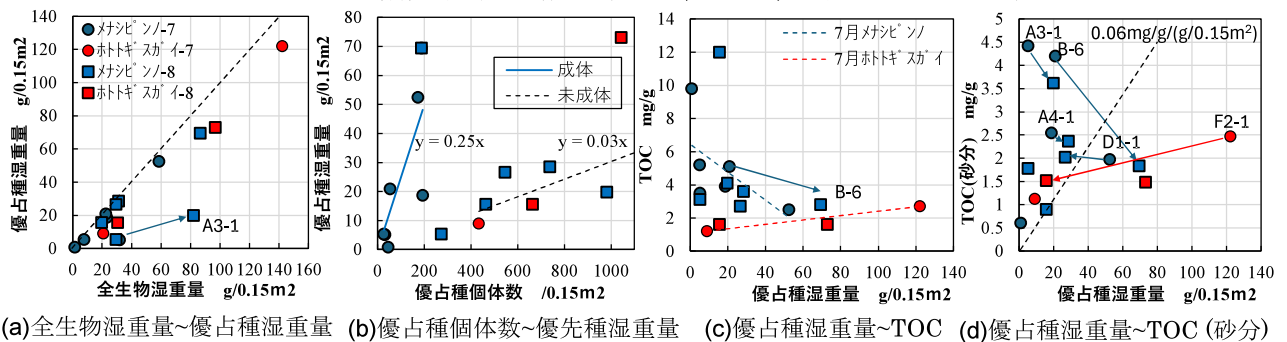
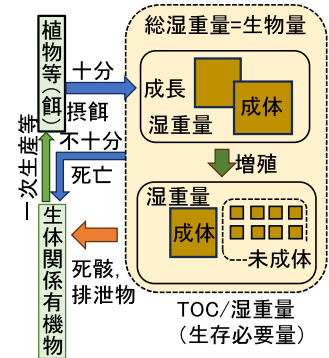
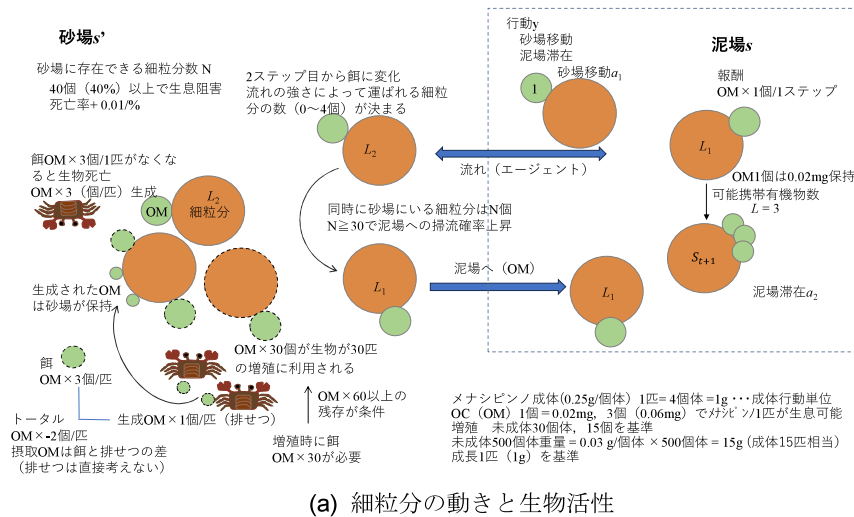


図-2.6 優占種の個体特性、および優占種湿重量と場の TOC，細粒分との関係



(b) 生物の生息と有機物循環
(生物湿重量の有機物 TOC による表現法)

図-2.7 干潟ゲームの概要 (有機物 OM = TOC としたケース)

TOC/湿重量によって表現した。

湿重量に比例した TOC が無い環境では餌の不足分に相当する生物は死亡させ、死骸湿重量を砂場での生体関係有機物 (餌) の生成量とした。成長度によって増殖の有無 (生態) が変化するが、本モデルでは成体と未成体を区分せず、湿重量をパラメータとして増殖させた。

(2) 生物と有機物関係 (知識) の数値化

a) 細粒分含有率、細粒分 1 個の輸送する有機物

重量比 1 % の細粒分を基準 (100 個/g) とし、TOC は砂場に輸送される細粒分 1 個に吸着する量を TOC/細粒分 (mg/個) として表現した (表-2.1)。初期に有機泥 1 個が保持する TOC は 3 個 (0.06 mg/g) とし、細粒分 1 g (100 個) は泥場から TOC2~6 (6/3~18/3) mg を砂場に運べるとした (泥場に存在する細粒分の吸着 TOC から判断、図-2.4(b), (d))。泥場で付着する TOC はステップ毎に 1 個 (0.02 mg/g)，最大付着 TOC は 9 個 (0.18 mg) とした。TN, TP は RF 比により TOC から換算する。N, P を考慮しない場合 (表-2.1) は OM (有機物) = TOC とする。

b) 細粒分の移動と有機物輸送

エージェントである流れは、細粒分を泥場にいる状態 s_1 から 30 % の確率で砂場 (状態 s_2) に移動させ ($\pi(s_2|s_1) = 0.3$)，70 % の確率で泥場に停滞させる。流れが運ぶ細粒分の個数は 1~3 個を同確率で決定した。細粒分の移動確率は砂場と泥場の位置，地形等を代表する流れ場を考えて決定とした。細粒分が 30 % (個) を越えると細粒分 (全個数-30 個) に比例 (係数 0.5) させて 40 % の確率で泥場に掃流 (行動 a) させた。 a は π とは関係なく実行される (泥化させないための行動価値関数)。掃流時の細粒分に応じた TOC (砂分) (図-2(b)) を細粒分個数に乗じて泥場に輸送させた。また、細粒分 1 個が砂場生息区域に移動すると砂分 1 個が生息区域から外れる (細粒分含有率は細粒分の個数によって決まる) として細粒分の含有率を単純化した。

c) 生物の生長と増殖

成長（生存）に必要な TOC（餌と排泄物の差）は調査面積 0.15 m^2 内の生息湿重量に対して 0.06 mg/g とし（図-2.6(d)），摂取分は湿重量に加算した．生体 4 個体（ 0.25 g/個体 ，図-2.6(b)）を 1 匹（ 1 g ）に換算して，1 匹を基準に成長（有機物の消費と生物量の増加）させた．細粒分が 40 % を越えると生息が阻害されるとし（図-2.2(b)），細粒分 1% の増加に対して死亡率を 0.01 加算した．

増殖では成体，未成体を区別せず，未成体（個体重量 0.03 mg/個体 ，図-2.6(b)）500 個体を 1 増殖として 1 増殖に必要な TOC（ $0.06 \text{ mg/g} \times 0.03 \text{ g/個体} \times 500 \text{ 個体} = 0.9 \text{ mg}$ ）を増殖単

表-2.1 生物生息環境パラメータ

細粒分含有率，細粒分の輸送する有機物の表し方		
細粒分含有率 100% → 細粒分 100個（細粒分 1 g ）	100	個/g
泥場有機物の餌転換率 100%（泥場から運ばれた有機物は 100% 餌化）	1	100%
有機物量 = $\text{TOC mg/底泥 } 1 \text{ g} \rightarrow \text{TOC mg/細粒分 } 1 \text{ 個}$ に変換		
細粒分 1 g につき TOC $6 \sim 18 \text{ mg}$ 輸送（図-2.4(b)）→ 細粒分 1 個の TOC 最大輸送量	0.2	mg/個
初期状態（7月のB-6地点の再現）		
細粒分含有率 18%（図-2.4(b)）	18	個/g
砂場集積 TOC（/砂分 1 g ） 4.2 mg/g （図-2.6(d)）	4.2	mg/g
生物量 $20.9 \text{ mg}/0.15 \text{ m}^2 \rightarrow \text{TOC} = 0.06 \times 20.9 = 1.25 \text{ mg/g}$ （図-2.6(d)）	1.25	mg/g
移動（行動の選択）確率・・・泥場～砂場間の流れ場により変化		
砂場への移動確率はベルヌーイ分布（砂場移動の選択は確率）	0.3	
砂場から泥場への細粒分掃流確率（細粒分量に依存）	0.4	
30個以上の砂場細粒分に比例して個数を決定（全個数-30）	30	0.5
砂場から泥場への有機物掃流量 $\text{TOC (砂分)} = f(\text{細粒分 (個/g)})$ （図-2.2(b)）	1	係数
成長（有機物消費と湿重量の増加）		
成体 4 個体（ 0.25 g/個体 ，図-2.6(b)）を 1 匹（ 1 g ）に換算		
OM（TOC）1 個は 0.02 mg		
生物成長に必要な有機物（ $\text{TOC/湿重量} = 0.06 \text{ mg/g}$ ，図-2.6(d)）	0.06	mg/g
TOC の生成（死亡）量（ 0.25 mg/g ）積算量	0.2	mg/g
生息を阻害する細粒分数 N（含泥率 40%）	40	個/g
細粒分 1% の増加に対して死亡率を 0.01 加算	0.01	
生物増殖		
生物量の有機物量換算 $\text{TOC (砂分)} \text{ mg/g} = 0.06 \times \text{湿重量 mg}/0.15 \text{ m}^2$		
生成生物量と同等の増殖による TOC を変換（1 増殖当り未成体 500 個を生成）	0.9	mg/g
生物増殖条件（最低残存 TOC）	0.9	mg/g
生物増殖に必要な TOC	1.8	mg/g
有機物をキャッチする行動（泥場）		
初期保持 TOC（初期持物，図-2.4(b)）	0.06	mg/個
泥場での獲得有機物/ステップ	0.02	mg/個

位とした．増殖分と同量以上の TOC を生成生物に変換させるため，生成生物と同量の TOC が存在すること，および増殖により生成された生物の湿重量以上の有機物が存在する（生存に必要）ことを条件（増殖と生存条件， $\text{TOC (砂)} : 0.9 \times 2 = 1.8 \text{ mg/g}$ 以上）とした．

死亡量（TOC 生成），成長量（TOC 消費）は湿重量にステップ毎の死亡率，成長率を乗じて求めた．死亡率，成長率等のパラメータは調査データからの抽出が困難であるため，深層学習により決定する．表-2.1 に示されるパラメータは初期パラメータとなる．

(3) 生物の増減をパラメータ化

強化学習では状態価値を正確に表現することが最も重要である．本研究では 2 つの状態

(砂場、泥場)の価値を生物生息環境パラメータとして表現して、流れをエージェントとした干潟ゲームを構築した。生物生息環境パラメータは、干潟における底泥～生物調査結果から砂場、泥場の価値関数として各々生物量（餌）、有機物輸送量を設定した。生物活性の向上は、生体関係有機物の生成、利用されることから、生物量と餌となる有機物（TOC）の関係を見い出すことで生物の増減のパラメータ化した。

3. 底生動物と底質環境間・相互作用のモデル化

～知識 DB 化と RAG による環境データ解析支援～

沿岸域での生物調査では、底生動物の種数、個体数、湿重量などが整理される一方、得られた生物情報を構造物設計や造成計画へ定量的に接続する枠組みは十分にできていない。例えば干潟造成では、水産有用種の個体数を増やせる場を選定する必要があるが、有用種と生息場環境の関係を直接同定することは容易でない。

AIは多変量の統合や高次元データ処理を得意とするため、生物情報の解釈に活用する価値は大きい。しかし、生態系のように複数の解釈が併存する現象では、単純な教師あり学習によって真値を与えることは難しい。また、生物調査データの分析は、分析方法や考察が分析者に依存し、初学者・若手技術者にとっては困難であるが、適正な調査発注と結果の有効活用のために、その支援が求められる。そこで、自然言語を理解・生成することができる大規模言語モデル（LLM）が有効であると考えられるが、応答の一貫性が不十分であることが課題である。LLMを使った一貫性を持つ分析を実現するために、現象解釈に必要な前提・手続き・根拠を検索可能な知識として外部化し、観測データの計算結果に対して知識を検索・適用して考察を生成する検索拡張生成（Retrieval-Augmented Generation: RAG）とPythonプログラムを併用する枠組みを提案する。

本研究では、岡山県西部沿岸域において2024年度の4季に実施された底質・生物調査データを対象に、動物門間の湿重量関係と底泥性状を解析した。その解析方針とそこから得られた考察を知識としてMarkdown（MD）で整備し、知識データベースを構築した。なお、2023年に同海域で実施した既往調査結果と比較して、本検討で得られた生態系特性に大きな相違は認められなかった⁵⁾。

調査結果のデータが含まれる Excel シートには、列名（変数名）や表構造の揺らぎが含まれること前提に、変数名の読み替え等の正規化を LLM が行う設計とした。本システムから分析可能項目が提示され、分析者は選択肢中から分析項目を選択することができる。必要に応じて Python による計算が実施され、LLM が知識 DB を参照した考察を生成することで、初学者でも分析可能な、一貫した RAG 型の環境データ解析支援システムを構築した。

3.1 生物生息と底質の変動

(1) 分析に用いる動物、底質データ

a) 調査の概要

生物、底泥調査は図-3.1 に示される岡山県西部沿岸域の A～C の 3 エリア、13 地点で 2024 年度 5 月、8 月、11 月、1 月の 4 季に底泥をハンドマッキン型採泥器により表層泥を採取し、底質および生物分析を行なった。調査点水深は 3.5 m 以浅であり、全調査とも同水深で調査が行われた。TP+0.17 m が平均海面、TP-1.28 m が大潮干潮面である。A1-1、B2-2、B1-

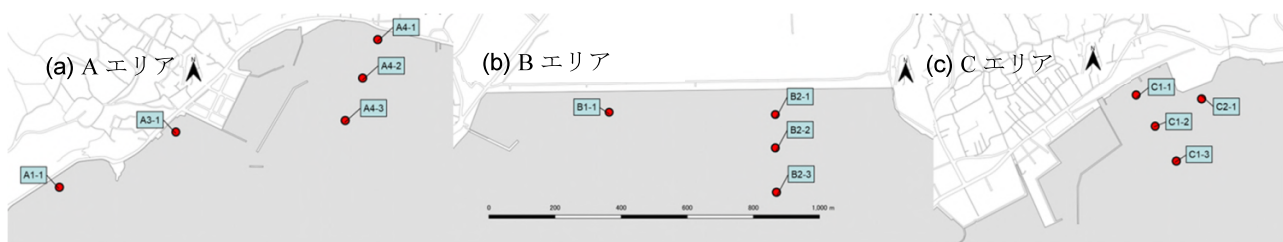


図-3.1 採泥された岡山県西部沿岸域の13地点（A～Cエリア，ドットが調査地点）

1 が干潟地点である。採泥試料の分析では粒度組成，IL，TOC，硫化物，COD が底質調査法に基づいて測定された。生物分析では採泥された底質試料を船上で1 mm で振った残差の固定と，室内での種の同定，種別の個体数，湿重量が測定された。生物，底泥調査は図-1 に示される燧灘北沿岸域のA～Cの3エリア，13地点で2024年5月，8月，11月，1月の4季に底泥をハンドマッキン型採泥器により表層泥を採取し，底質および生物分析を行なった。調査点水深は3.5 m 以浅であり，全調査とも同水深で調査が行われた。TP + 0.17 m が平均海面，TP-1.28 m が大潮干潮面である。A1-1，B2-2，B1-1 が干潟地点である。

採泥試料の分析では粒度組成，IL，TOC，硫化物，COD が底質調査法に基づいて測定された。生物分析では採泥された底質試料を船上で1 mm で振った残差の固定と，室内での種の同定，種別の個体数，湿重量が測定された。

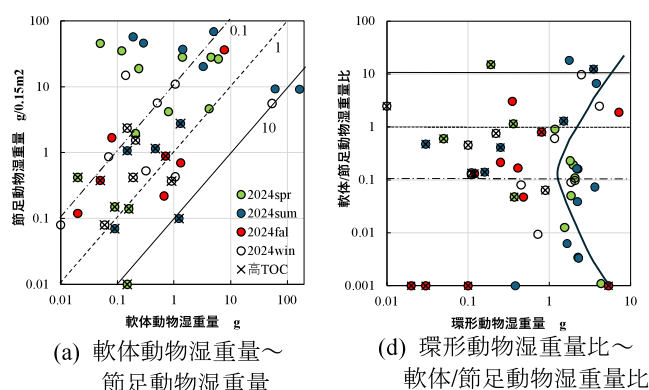


図-3.2 優先する動物門湿重量の季節変化（M/A 比
=0.001 地点は軟体動物生息なし，図(a), (d)の×は TOC

b) 生物による有機物生産（生体関係有機物の組成比）

沿岸に堆積する有機物の多くは，生物が生成した有機物（生体関係有機物 BOM）であり，生物の死亡時の BOM は生体と同程度の元素組成比が保たれる。レッドフィールド比（RF 比， $(\text{CH}_2\text{O})_{106}(\text{NH}_3)_{16}(\text{H}_3\text{PO}_4)$ ）を仮定⁶⁾すれば，生物により生成された BOM（乾燥状態）の C/IL 比（IL = C + H + N + O + S）は約 0.4（mol/g）である。

(2) 動物門の季節変動特性

a) 優先動物種の競合

図-3.2 には動物門湿重量の季節変化が示されている。図(d)において 0.001 の軟体/節足動物湿重量比(M/A 比)は軟体動物が出現しなかった場を表わしている。図(a)中の直線は M/A = 0.1, 1, 10 を示しており，M/A 比の 3 つの黒直線は図(d)での黒線に対応している。図(a), (d)中の×は TOC > 10 mg/g（高 TOC）の地点である。節足動物 A は軟体動物 M に対して

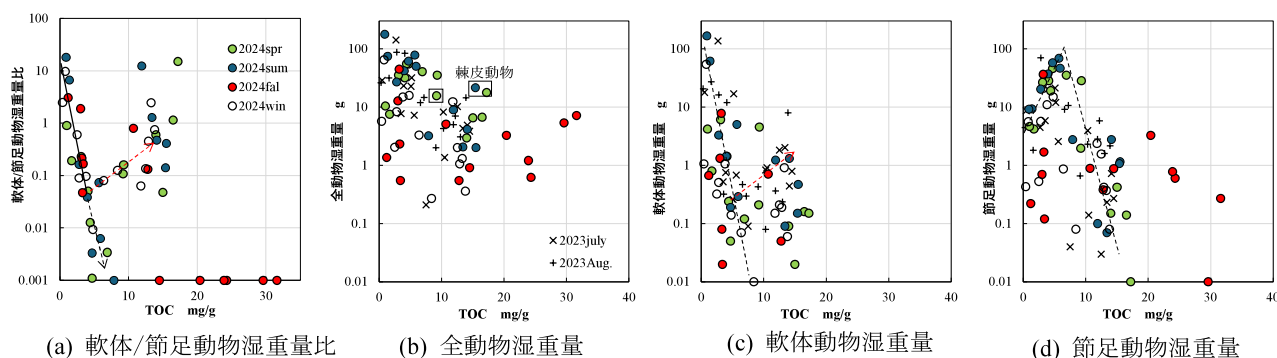


図-3.3 TOC に対する動物量 (×, +は 2023 年 7, 8 月)

TOC 耐性は強い傾向にある。

夏季の干潟地点 (A1-1, B1-1) では M のホトトギスガイが主体 ($M/A > 1$) であるが、それ以外では巻貝等の腹足綱 (M) が数 g 出現している。環形動物は A の 1/10 のオーダの生息量であるが、A が多い場では環形動物が増加する傾向がある。環形動物が増殖できる底質環境は A と類似しているが、 M/A 比が小さい A の優占場では、動物活動を活性化させるように環形動物も増加することが可能になっている。一方、 M/A 比が大きい場でも環形動物が増加する傾向があり、A が多い場では環形動物の生息は制限される (図(d)青線)。

b) TOC に対する動物量

図-3.3 には TOC に対する動物湿重量が示されている。×, +は 2023 年 7 月と 8 月の調査データである (図-3.3, 3.5 共通)。TOC が 10 mg/g 以下では TOC と $\log(M/A)$ が直線上にプロットされている (図(a), 実線)。A では TOC ~ $\log(M/A)$ 関係が逆勾配になっており、TOC が低い場では M が優先し、TOC が高くなるにつれ A が優先することがわかる。後に

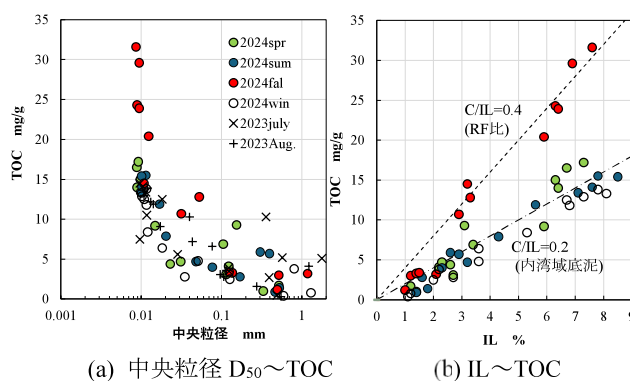


図-3.4 底泥有機物の組成, 性状 (×, +は 2023 年 7, 8 月)

示す図-3.5(f)では餌となる TOC (砂分) の増加により動物量が増える傾向がある。TOC が 7 mg/g 以上になると A は減少傾向になる (図(d)) が、M (腹足綱) は TOC の増加に耐性がある種 (二枚貝綱以外) がいるため、 M/A 比の上昇と下降成分に分かれる (図(a), 図(c), 矢印)。TOC が 5 mg/g 以上の場において $\log(M/A)$ が 0.1~1 の間で高くなる成分は、M の減量勾配が A よりも小さい (図-3.3(c), (d)中破線) ために生じる。TOC 含有量の多い細粒分の増加に対して二枚貝綱は敏感であり、TOC が 15 mg/g (細粒分が 70 %) 以上では生息はできていない (図(a))。

c) 節足動物の減量（動物の死亡）と有機物組成

図-3.4 には底泥有機物の TOC、性状 (D_{50} , IL) の季節変化が示されている。対象海域においては秋季の C/IL 比は BOM (0.4) と同程度であるが、他の季節での C/IL 比は 0.2 (g/g) 以下の値をとっている。秋季の TOC の増加は $D_{50} = 0.05$ mm 以下の場で顕著に起こっており (図-3.4(a)), D_{50} が低下した B1-1, C1-2, C1-1, C2-1, B2-1 では TOC の増加とともに動物量が減少している (図-3.3)。TOC の増加には A の急激な減少が伴っている (図-3.3(d))。図-3.5 には有機物性状の性状変化が土粒子密度に及ぼす影響が示されている。図(b), (c) には 2023 年の結果、図(d)中の直線は $\rho_m = 2.68$ g/cm³ の鉱物に $\rho_o = 2.0$ (実線①), 1.2 (点線②) g/cm³ の有機物が付着した時の、実測値である土粒子密度 ρ_s の変化 (式(1)) を示している。

$$\frac{1}{\rho_s} = \frac{1}{\rho_m} + \left(\frac{1}{\rho_o} - \frac{1}{\rho_m} \right) \frac{IL}{100} \quad (1)$$

破線で囲まれた点は D_{50} が大きいにもかかわらず密度が小さいことから、IL が高い傾向にある底泥であることがわかる。泥場にある有機物は密度が重く (図(d)①付近, $IL < 5$, 図(b) $D_{50} \div 0.01$), 砂場にある有機物 (②付近) の密度は軽くなる傾向にある。砂場では実線①と点線②により挟まれた軽い密度の範囲の有機物が混入しているが、泥場に堆積する有機物は難分解性化が進んでおり³⁾、難分解性化 (腐植、錯体形成) の進んだ有機物の密度が重くなることをわかる。

(3) 動物活動と底質変動

a) BOM の生成が形成する有機物組成

C/IL 比の高い状態 (図-3.4(b)) は、動物の死亡 (図-3.2(a), 秋に節足動物量が減少→BOM 増加) に起因すると考えられる。BOM の堆積状態が長くなると、有機物の分解や選択的残存による O 含有率が高くなり³⁾、C/IL 比は 0.2 以下の値をとる。死亡、枯死が間もない節足動物、草藻類は未分解の新生 BOM の堆積であり、新生 BOM が堆積する底泥の C/IL 比は RE 基準の C/IL = 0.4 に近いと考えられる。動植物の死骸、残差 (BOM) の堆積が夏～秋季の C 含有率の高い海底泥として現れており、動物の活動と海底泥の性状が相互に関連していることがわかる。

b) 動物の死骸と土粒子密度

節足動物が減少、TOC が増加した秋季泥では土粒子密度が大きくなっており (図-3.5(a)), 死骸 (新生 BOM) 中の安定な炭素化合物の増加は底泥の土粒子密度を極端に大きくさせている。新生 BOM に対する①易分解成分 (例えばアミノ基) の溶出、②海水中の金属イオンとの結合、③CaCO₃ 形成等の無機成分は密度を増大させる。図-3.5(d)中の実線①よりも高い値は土粒子と密度に近い有機化合物の混入を示しており、②、③の現象は泥場で多いことがわかる。還元的な底泥中では BOM に含まれるシュウ酸 (H₂C₂O₄) のような O 含有率の高い易分解性の有機物の錯体形成や腐植化過程において金属取り込み量の大小が有機物密度を変動させる。最も高い TOC 含有泥では鉱物密度に近い BOM が形成されていることになる。

c) TOC の残留形態 (選択的分解と TOC の残留)

図-3.5(g)中の実線 (C/IL = 0.25 IL) は堆積有機物の難分解性化状態、破線は内湾域底泥の平均的な C/IL 比 (= 0.17 mol/g = 20mg/100g) を示している。海底泥では C/IL 比は 0.2 程度

以下をとることを図-3.4(b)に示したが、IL<4 の地点（砂場）では有機物の分解が進み C/IL 比が 0.08（図では 10 mg/100 g）以下になりやすい。C/IL 比の低下に伴って土粒子密度が高

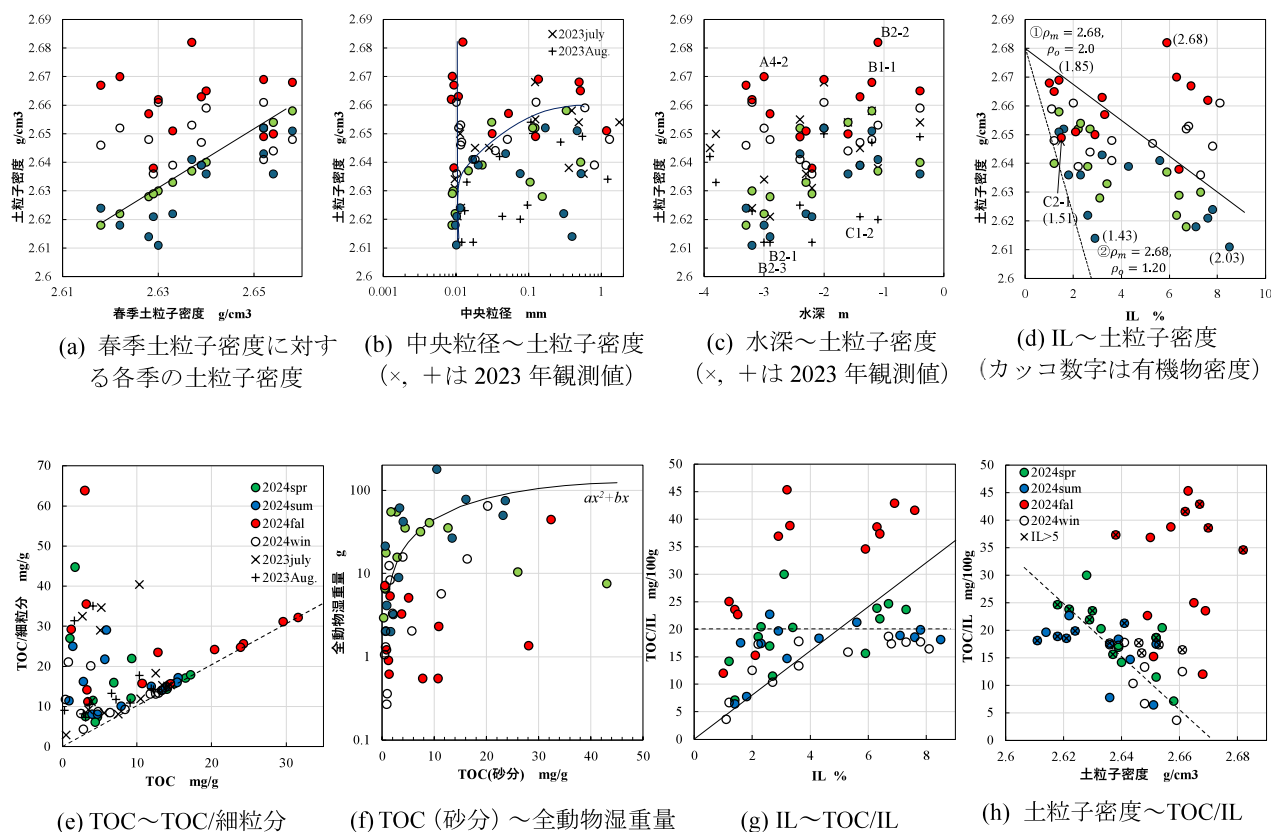


図-3.5 有機物性状変化が土粒子密度に及ぼす影響

くなり（図-3.5(h)），難分解性化した有機物が残留することを示唆している。

図-(e)の関係は，OSS（有機懸濁物質）は砂分には吸着しない特性を利用して，OSS に含有される TOC(砂分)量の関係（点線）を示している¹⁾。対象砂場では TOC(砂分)の含有率は高く，OSS が多く存在している（生物活性のある浅場の特徴）。動物量は TOC(砂分)に依存して増加する傾向にあり（図(f)），TOC(砂分)が動物の増加に依存する傾向がある。ただし TOC > 10 mg/g の増加は動物の生息を阻害する（図-3.3(b)）。

d) 泥場への細粒土粒子の集積（底泥有機物場の形成）

泥場での動物量は多くないため（図-3.2(b)），泥場での BOM 生産は少なくないことから，BOM 起源の高 TOC 粒子の多くは動物生息場から泥場へ集積された BOM と考えられる。泥場では無機物の結合により集積した BOM の粒子密度が高くなることを 2.(3) c) 節で示した（図-3.5(d)）。一方で，大潮干潮面付近には軽い有機物を含んだ細粒径の有機泥が集積する傾向にある（図-3.5(c)，春～夏季）。しかし，秋季の高密度の細粒分の集積は水深に関わっておらず，動物の死亡初期の新生 BOM は広く拡散され易いことが考えられる。夏～秋季での水底質を含む流れ場の環境変化によって死亡した動物の生成された死骸は沿岸域全体に拡散され易い形状であると推定される。

3.2 データベース（DB）と RAG の構築

(1) 調査結果・考察知識の MD 化と DB への格納

調査結果を評価できる技術者の判断過程を、AI（LLM, OpenAI API o4-mini モデルを利用）が検索・判断し、利用可能な知識を Markdown（MD）形式でまとめた。本論文では、MD は人が調査結果の評価軸を決定する過程を示す分析方針 MD と、AI が知見に基づいて結果を生成するための考察知識 MD（表-3.1）に分けて作成された。

各 MD には、栄養塩堆積～生物生息、死亡に関わる有機物循環の機構に基づく調査結果の解釈、適用上の注意点、可視化時に保持すべき軸・区分・注釈が含まれている。また、2 次的な変数生成のための計算にはプログラム言語 python のプログラムが自動的に実行される設計とした。MD は多言語埋め込みモデル *intfloat/multilingual-e5-base* でベクトル化・正規化したうえで、`file_path`, `page`, `chunk`（文章を分割した単位）, `vector` とともに SQLite（軽量データベース管理システム）を用いた知識 DB に格納された。

以上のシステムにより、環境調査結果を AI とプログラムにより解析し、知識 DB を基にした解析結果の考察文の生成と、それを反映させた考察反映グラフの生成を試みる。実用段階では複数の観測値を DB 化し、汎用性の高いシステムの作成を目指しているが、本論文では今回の調査結果のみを用いた知識 DB を作成した。

表-3.1 作成した考察知識の MD 形式の DB 一覧

id	MD名	内容
1	C/IL比による有機物分解状態	C/IL比を使って、未分解BOM（約0.4）・一般底泥（約0.2）・難分解化（0.2未満）を判定する基準。
2	M/A比（軟体/節足）による優占構造	M/A比で軟体動物優占か節足動物優占かを読む。低値域（0.001など）の扱いも定義。
3	TOCとlog(M/A)に基づく競合勾配	TOC増加に対する群集変化をlog(M/A)で解釈。低TOC域の直線関係や高TOC域の制限傾向を扱う。
4	TOC(砂)によるOSS量評価	TOC(砂)を、細粒分に吸着しない砂場由来有機物（OSS）の量指標として解釈する。
5	細粒分・D50と有機物蓄積	細粒化（高細粒分・低D50）とTOC増加、生息制限との関係を読むための知識。
6	土粒子密度から読む有機物混入・難分解化の解釈指針	土粒子密度の変化を、有機物混入状態や分解進行（鉱物結合・高密度化）と結びつけて解釈。
7	D50・IL・土粒子密度の統合解釈	D50・IL・土粒子密度を統合し、砂場/泥場やOSS混入などを4分類で判定する総合ルール。

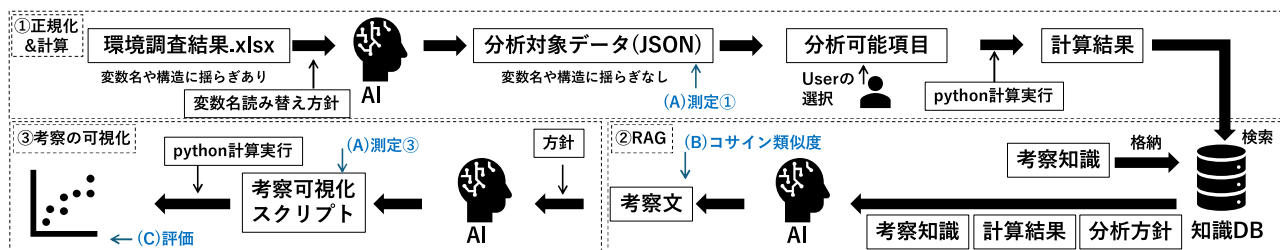


図-3.6 処理フローの概要（青字は性能検証）

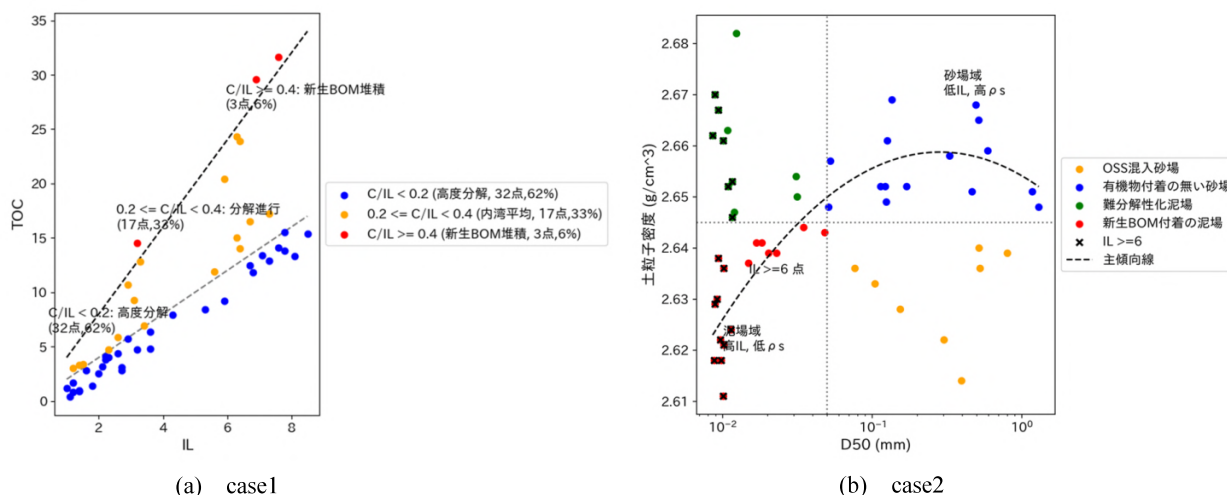


図-3.7 AI生成の考察反映グラフの例

(2) RAG ベースの解析処理の設計 (図-3.6)

図-3.2~3.6 の元データ (Excel ファイル) を入力とし, AI によりそのファイル構造が解析され, 分析対象データが JSON 形式で生成され, 知識 DB で分析できる (変数が存在する場合) 項目が User に表示される (図-3.6①). 選択された分析項目に計算が必要な場合は Python で実行される (図-3.6①). RAG フェーズでは, 知識 DB からデータ分析に適した DB が検索・取得され, その考察知識, 分析対象データ (または計算結果), 分析方針が AI に入力され, AI がデータを分析し, 考察文が生成される (図-3.6②). 考察反映グラフの生成では, 分析対象データ, 考察文, ②RAG で取得された知識 DB, グラフの可視化方針が AI へ入力され, グラフを描く Python スクリプトが生成される (図-3.6③). 例として図-3.7 に, 表-3.1 の id=1 (case1), 7 (case2) の知識を使った分析により生成された考察反映グラフがそれぞれ示されている. 図-3.7 では AI が適切な変数を適当な縦軸・横軸にとり, 考察文で指摘された分類がわかりやすくなるよう色分けや補助線が引かれている. なお, 使用可能ライブラリを限定したうえで, 制約を満たしたスクリプトのみが実行されるため, セキュリティ上のリスクが考慮されている.

AI は表構造の揺らぎ吸収や必要列抽出, 考察生成, グラフ作成のスクリプト生成を担当し, それらを使った計算や分析可能項目の判断, AI 起動のきっかけなどはコード側 (Python) で処理する. この役割分担により, 自然言語的な柔軟性と計算の再現性を両立させた.

(3) システムの性能評価

本システムの性能は, (A)中間生成物の要求フォーマット適合性, (B)同一入力に対する考察文の再現性, (C)考察を反映したグラフの妥当性の 3 観点から評価した. (A)では, 図-3.6 に示す測定①と測定③において, AI の生成物の要求フォーマット適合率が測定される. 適合しない場合, システムはエラーとなり再実行が必要となる. (B)では, 考察文がコサイン類似度により一貫性が評価される. (C)では, 考察反映グラフの体裁, 閾値補助線, 注釈正確性の 3 指標 (表-3.2) で評価した. 評価対象は case1, 2 とし, 各 case につき 10 回ずつ試行した.

要求フォーマット適合率の評価結果が図-3.8 に, 考察文の再現性が図-3.9 に, 生成に成功した考察反映グラフについて表-3.2 の基準に基づいて評価した結果が図-3.10 示されている.

case1 では前段処理が 10/10 回, 考察可視化グラフ生成が 9/10 回成功し, case2 では前段

処理が 10/10 回、考察可視化グラフ生成が 7/10 回成功した（図-3.8）。すなわち、Excel からの列名正規化、分析可能項目推定、分析用 JSON 抽出までは両 case とも安定して実行できた一方、失敗は主として考察可視化グラフの Python スクリプト生成段階で生じた。特に case2 では可視化条件が複雑になるため成功率が低下しており、可視化段階ではプロンプトの自由度を下げることや、処理の一部をよりプログラムベースに置き換えることを検討する必要がある。

また、case1 のコサイン類似度はおおむね 0.95～0.98 の範囲に分布し、0.96～0.97 付近に集中し、case2 ではおおむね 0.96～1.00 の範囲に分布、0.97 付近に最も集中した（図-3.9）。いずれも高い類似度を示しており、同一の入力条件に対し、表現上の揺らぎは残るが、知識 DB に基づく解釈の骨格は安定して再現されていることがわかる。

さらに、case1 では、体裁が平均 1.78 点、閾値補助線が平均 1.89 点、注釈正確性が平均 1.56 点であった（図-3.10）。特に閾値補助線については、成功した 9 例中 8 例が 2 点であり、知識 DB に記載した閾値や補助線が高い確率で図中へ正しく反映された。一方、case2 では、体裁が平均 1.71 点、閾値補助線が平均 1.14 点、注釈正確性が平均 1.57 点であった。体裁および注釈正確性は case1 と同程度であったが、閾値補助線は 7 例中 2 例で 0 点となり、知識 DB の図中反映にばらつきが残った。

データ入力から考察文生成までについては高い安定性と再現性を有し、考察反映グラフについても一定水準の可視化が可能であるが、複雑な条件を含む case では、閾値や補助線の不安定な反映の改善が今後の課題である。

表-3.2 考察可視化グラフの評価指標

	0	1	2
体裁	体裁が崩壊している	軽微な体裁の崩れがあるが、判読可能	文字やプロット、線の破りや崩壊が全くなく、読みやすい
閾値補助線	明らかな間違いが含まれる	軽微な乱れがあるが、解釈を損ねない	考察に基づく閾値によって色分け・閾値線や補助線が正確に描かれている
注釈正確性	明らかな間違いが含まれる	軽微な乱れがあるが、解釈を損ねない	考察に基づく注釈が正確に掲載されている

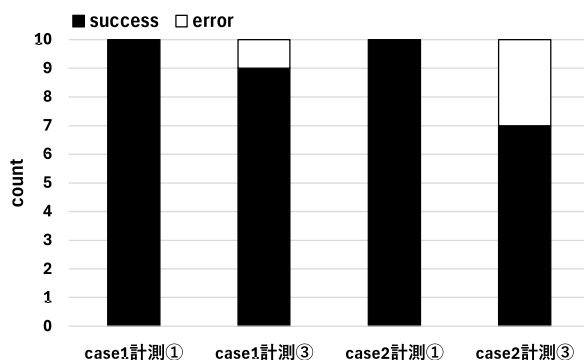


図-3.8 要求フォーマット適合率の評価結果

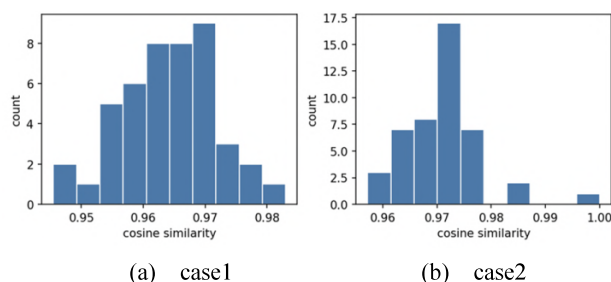


図-3.9 考察文の再現性（コサイン類似度）

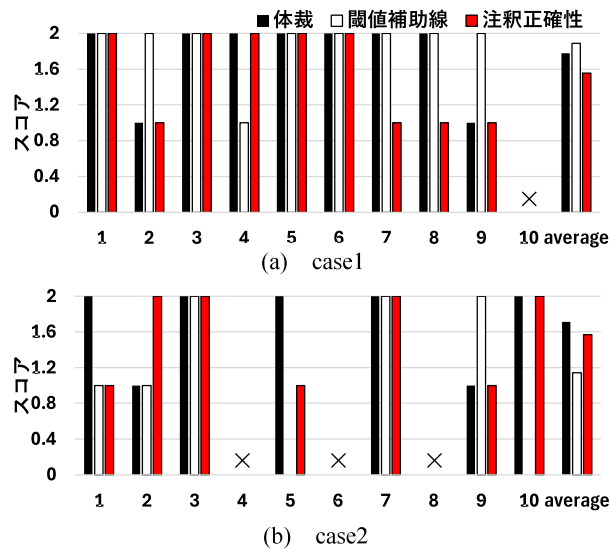


図-3.10 考察反映グラフの評価結果

4 おわりに

沿岸域での調査結果を技術者の知識としてDB化し、RAGによる検索と考察生成により、熟練していない技術者のデータ分析をAIで支援する枠組みが検討された。

- (1) 底生動物の生息と底質環境の関係は一義的ではなく、分析には観測データだけでなく、技術者の判断過程や解釈知識の明示化が必要である。
- (2) 調査知見をMD形式で整理して知識DB化し、RAGによる知識検索とPythonによる確定的計算を組み合わせることで、揺らぎを含む環境調査データに対して一貫した解析・考察を行える枠組みを構築した。
- (3) 沿岸環境のデータ解析におけるAI活用・支援、また熟練技術者の知見の継承方法の一つとして、有効性が示唆された。

REFERENCES

- 1) 八谷大岳：機械学習スタートアップシリーズ，ゼロからつくるPython 機械学習プログラミング入門，2022.
- 2) 巖佐 庸：数理細物学入門-生物社会のダイナミクスを探る，2005.
- 3) 田口 哲：レッドフィールド比：研究の歴史と現状，今後の展望，海の研究, Vol. 25, No. 4, pp. 123-132, 2016.
- 4) 土居田祐希，井川広之，岡田知也，日比野忠史：堆積泥のC，N組成による生物生息環境の推定-ポアソン分布の学習による環境場の評価-，土木学会論文集（海岸工学）80巻，17号，論文ID: 24-17240，2024.
- 5) 鈴木脩大，笹岡実也，首藤 啓，岡田知也，日比野忠史：生物生息活性場で形成される底質環境-環形動物の生息状況から底質環境を考える-，土木学会論文集/特集号（海洋開発）81巻(2025)18号，論文ID: 25-18141（202506）.
- 6) 田口 哲：レッドフィールド比：研究の歴史と現状，今後の展望，海の研究, Vol. 25, No. 4, pp. 123-132, 2016.
- 7) 佐藤駿介，Jeong Ilwon，岡田知也，日比野忠史：有機物の難分解性化がつくる生物生息場，土木学会論文集/特集号（海洋開発）81巻(2025)18号，論文ID：25-18121（202506）.