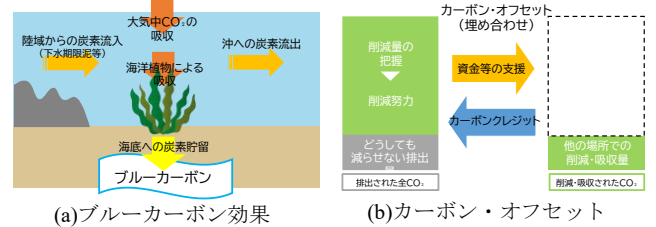


生物生息場での易分解性有機物の難分解性化過程

広島大学 ○野原 舜太
 広島大学 土居田 祐希
 広島大学 正会員 日比野 忠史

1. はじめに

我が国では高度経済成長期以降、経済の発展に伴い多くの有機物や栄養塩類、重金属を排出し生物の生息環境を悪化させてきた¹⁾。同時に沿岸域の埋立事業の進行によって、全国の干潟は50年余りで4割減少した。Nellemann et al.²⁾によると、海洋生態系によるブルーカーボン効果(炭素吸収・固定)(図-1(a))について地球上の生物が固定する炭素の55%に当たり、特に浅海域では全海底面積の0.2%にしか満たないにも関わらず、海洋堆積物に堆積されている炭素の50%~71%を占めると推計した。これらのことから浅海域(干潟)でのCO₂吸収・固定が、カーボン・オフセット(図-1(b))の観点において重要である。干潟でのブルーカーボン効果として干潟内部で生物の死骸、排泄物や外部から流入する有機懸濁態(油脂等)が堆積することによる難分解性化(腐植化、錯化)が考えられている。本報告では干潟・GCA体における有機物(堆積泥)の分解性の把握と、組成を分析し有機物の難分解性化メカニズムを検討した。さらに、生物の増殖と有機物の難分解性化との関係から生物生息と難分解性化との関係を明らかにした。本報告での分解性の評価方法として、燃焼減量法(IL₃₀₀法³⁾)に基づき、堆積泥内の有機物、含有炭素が減量する温度によって分類した(図-2)。IL₃₀₀法では300℃までの燃焼減量IL₃₀₀を不安定な有機物の易分解性有機物(生物関係有機物等)、300℃から600℃までの燃焼減量IL_hを難分解性有機物量の指標としている。各燃焼温度での減量IL_{燃焼温度}は有機化合物の他に水や硫黄等の無機化合物を含むため、燃焼減量のみでは組成の把握は困難である。炭素量は燃焼泥のCHNS分析により測定され、元素_{燃焼温度}が各々のILに対応する炭素含有量、全有機炭素(C₅₀)、易分解性有機炭素(C₅₀-C₃₀₀)、難分解性の有機炭素、無機炭素(C₃₀₀)と分類した。



(a)ブルーカーボン効果 (b)カーボン・オフセット
 図-1 ブルーカーボン

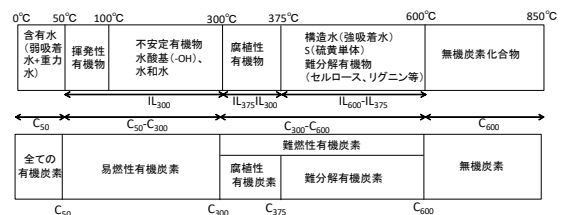
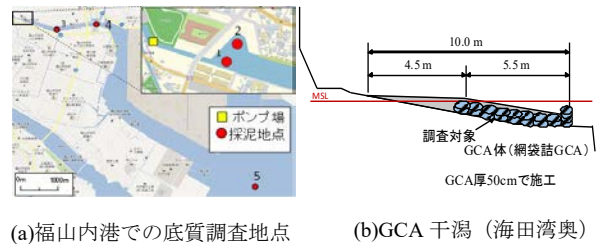
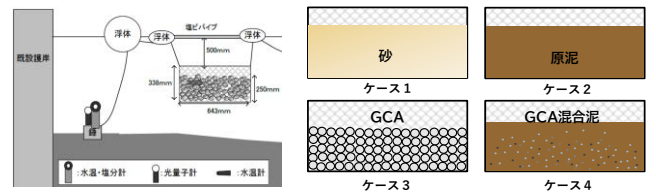


図-2 燃焼温度と燃焼物質での IL_{燃焼温度} と C_{燃焼温度} との関係



(a)福山内港での底質調査地点 (b)GCA干潟(海田湾奥)



(c)浮体式GCA籠 (d)浮体籠ケース
 (a)地点2に設置

図-3 底泥採取地点とGCA体、浮体籠

2. 調査概要

2.1 下水放流のある沿岸に堆積する有機泥調査

福山内港では図-3(a)に示される下水放流口から流下方向(海側)に向かって異なる距離に堆積している福山泥(下水起源泥)が2013年に採取、分析された⁴⁾ 採取地点として下水処理ポンプ場(下水泥)、未処理下水が

堆積する流下路沿いの地点1~5を選定した。比較のため、広島湾奥の呉泥(海底泥)と海田泥(海底泥)が採取された。

2.2 干潟および浮体籠での生物、堆積泥調査

2.2.1 GCA 干潟設置 GCA 層

2019年9月に石炭灰造粒物(GCA)を材料としたCCA干潟が造成された(図-3(b))。主にシリカイオン、 Ca^{2+} を溶出するガラス、セメント水和物からなるGCAには生物に対する底泥性状の改善効果として細粒分の砂礫径化、有機物の難分解性化効果がある⁵⁾。堆積泥調査、底生生物(藻類、動物)調査が2022年1月に実施された。GCA干潟側面底部にはGCA体(GCAを詰めた5mmの網袋)が設置された。図-3(b)に示す側面最下部に設置した干潟GCA体、および護岸上の同高さに設置された2種類のGCA層(護岸GCA体と護岸GCA籠(64cm×44cm×高さ34cm))を対象として生物、堆積泥調査を行った。護岸GCA体は2021年度11月から2.5ヶ月間護岸に単独で設置された。護岸GCA籠は図-3(a)の地点5の浚渫泥とGCAを同量投入して作成され、約2年間護岸に設置された。

2.2.2 浮体籠

浮体型実験装置を福山内港に設置した。実験に用いた試料(原泥)は未処理下水が堆積した内港海底(図-3(a)地点2)から採取された有機泥である。実験では砂(ケース1)、原泥(ケース2)とGCA(ケース3)、GCAの体積比が40%になるように原泥を混合して作成されたGCA混合泥(ケース4)を試験層とした4つの浮体籠(64cm×44cm×高さ34cm)表層が水深約50cmになるように浮遊させて設置している。

2.3 有機泥の分析と底生動物の生息量調査

有機泥の分析試料は下水処理ポンプ場、福山内港~海域、広島湾奥(海田、呉)からの採取泥(底泥)、およびGCA干潟(GCA体、GCA籠)に堆積した有機泥と浮体籠設置時に籠内に投入した原泥、GCA層間隙内(GCA体、GCA籠、浮体籠)に新しく沈降堆積した有機泥(GCA層内泥)である。さらに浮体籠では、新しく試験層上に堆積した層上泥(ケース1とケース4)を採取した。層上泥は現地海水を含んで採取した後、1日静置させて回収した沈殿物を試料とした。採取した有機泥分析、および干潟表層、干潟GCA体、護岸GCA体、浮体籠内に出現した底生動物調査が行われた。海底

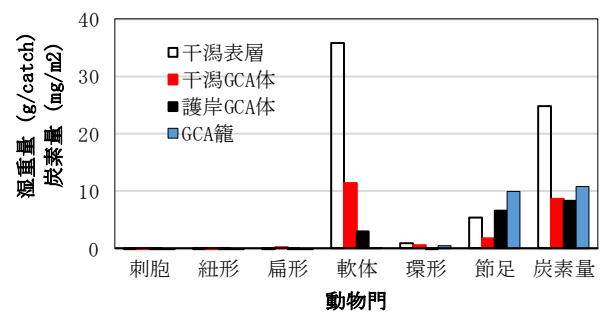


図-4 干潟表層と底層GCA体、浮体GCA籠に出現した動物門の湿重量、炭素量(湿重量換算)

採取した底泥の乾燥(含水比)は100°C(fast-labile fractionが少ないため)、その他の有機泥の乾燥は50°Cで行った。強熱減量試験では300~600°Cで有機泥を燃焼させた。これらに加えて、海底採取泥ではn-ヘキサン抽出物質、腐植性有機炭素(THOC)の抽出⁶⁾。脂肪酸(n=14~20)、TOC(全有機炭素量)分析が行われた。抽出された脂肪酸には腐植性有機物、錯体、油脂類の素材として結合する脂肪酸が含まれている⁷⁾。さらに、干潟泥、浮体籠泥では燃焼試験と同温度で燃焼した後の試料に含まれる元素量を測定した。干潟底生動物(GCA表層)は25cm²コードラート×10cm深を基準(1catch)として試料を採取した。GCA層、GCA体、浮体籠では網袋、または、籠から25cm²コードラート相当量を取り出し1catchとした。全ての試料泥内に生存する動物の種と湿重量を計測した(図-4)。

3. 下水底泥への炭素の含有率(図-5)

燃焼減量試験の結果、流下・堆積に伴い進行する脂肪酸のけん化や腐植化(脂肪酸が素材)が、TOCに対するTHOC(腐食性有機炭素量)含有量を増加させている。下水起源泥には脂肪酸が多く含まれるため、 IL_{300} 含有率が高いが流下した先の沖側では含有比が60%から20%まで低下している(図-5(a))。THOC/TOCの増加は IL_{300}/IL_{600} の減少を根拠とすると易分解性有機物(IL_{300})の腐植化によるものだと考えられる。TOCが沖側に流下するにつれ1/10程度に減少している(図-5(c))の、下水起源泥の沈降量が下水放流口から沖側にむけ減少していることに起因しており、同時に下水泥のTHOC/ IL_h は50%から10%程度に減少、THOC/TOCの増加から難分解性化過程で炭素組成率を減少させていることが推察される。

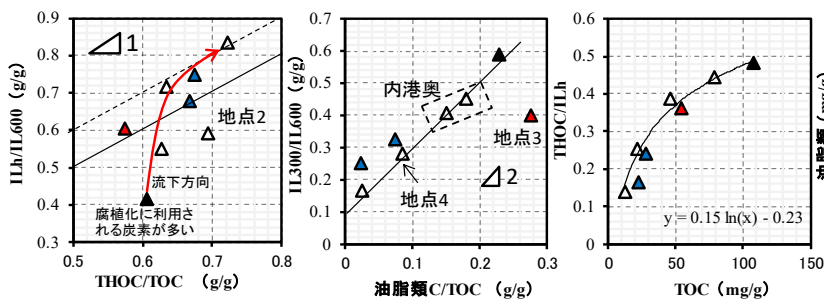
(a) 燃焼減量と炭素量分析(図-6.7)

干潟泥、浮体籠泥ともに IL_{600} に含まれる全炭素量(C_{50})は海底泥と同様に60%程度で(図-6(a)), 下水起源泥がGCA層に沈降すると C_{50} が減少, C_{300}/C_{50} , IL_h/IL_{600} がともに上昇することから,GCA層内では易分解性有機物は分解され減量し、生物が生息した後では易分解性有機物が難分解性化していることがわかる(図-7)。生物生息のあるGCA層内泥の易分解性有機炭素($C_{50}-C_{300}$)は干潟泥に近い値まで減少しており(図-6(b))、生物生息可能なGCA層内は生物の良好な環境であると言える。GCA層内における有機物の難分解性化時はO, H, N, S, (水分, アミノ酸等)が分解, 脱

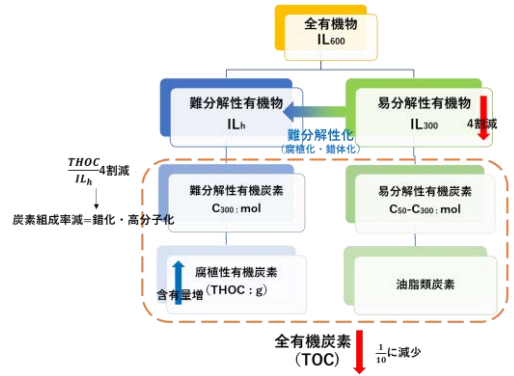
離することで高い炭素組成率の有機物が形成される。

(b)GCA層での炭素組成変化(図-6)

GCA層上に堆積する有機泥には層内の有機泥に比べ、重量当たりの有機物量が2倍、有機炭素量が3~6倍多く含まれており、これは生物にとって良好な環境ではない。層上から層内への堆積過程で易分解性有機炭素が減量し、難分解性有機炭素が増量していること(図-6中の→変化)から有機物の難分解性化過程における易分解性、難分解性の有機炭素の増減が脂肪酸の腐植化、錯体化、けん化及び、生物利用等における易分解性有機物も化学反応に起因している(図-9)。GCA層での IL_{600} ,

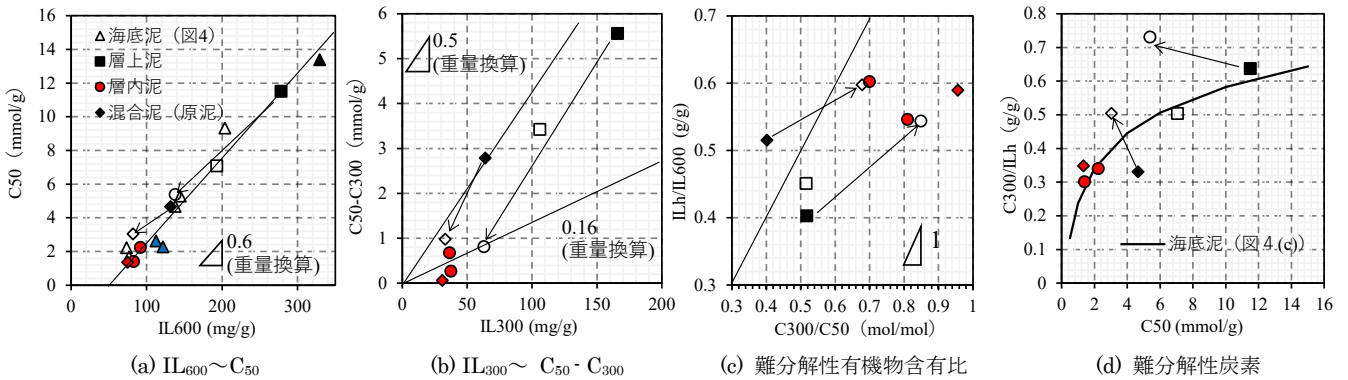


(a) 難分解性有機物含有比 (b) 易分解性有機物含有比 (c) 難分解性有機炭素



(d) 難分解性化(下水起源泥)

図-5 有機泥の燃焼減量と腐植物質(難分解性有機物)と易分解性有機物(油脂類=n-ヘキサン抽出物質)の関係 (▲ポンプ場沈殿泥, △地点1, 2, 4, 5, 内港奥は地点1, 2, ▲地点3, ▲海田湾, 呉湾)



(a) $IL_{600} \sim C_{50}$

(b) $IL_{300} \sim C_{50} - C_{300}$

(c) 難分解性有機物含有比

(d) 難分解性炭素

図-6 燃焼減量によって表わされる有機物量と炭素元素関係 (赤は干潟 GCA, 白は浮体籠 GCA 有, 黒塗りは浮体籠原泥(GCA 無), 凡例は図-8 と共通, △は海底泥(図-2 凡例), 矢印は生物生息の無→有)

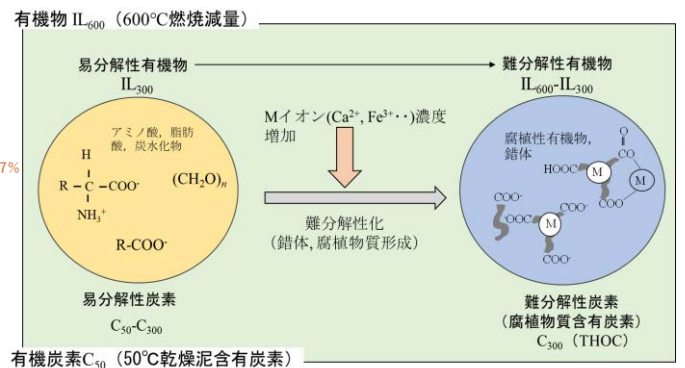
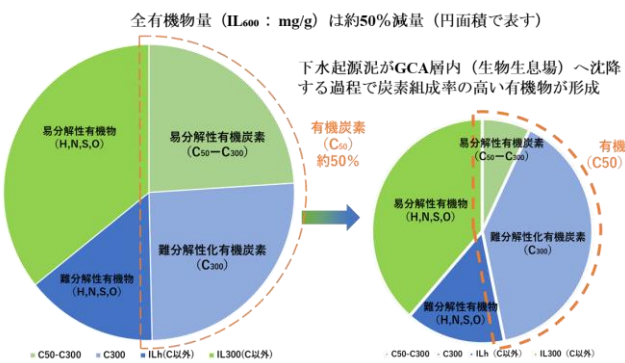


図-7 生物生息場における難分解性有機物含有状態と金属 M イオンの増加に伴う易分解性有機物の難分解性化

C_{50} の減少は層内での土粒子の混合, 無機物 (CSH, CaCO_3) 生成や有機物の脱離, 捕食等によって起こる.

(c) 難分解性化過程での炭素組成 (図-7)

生物生息層では難分解性有機物の炭素組成率 (C_{300}/C_{50}) が高く, 生息環境に応じた炭素組成を構成することが生物生息と難分解性化の関係性を評価できる要因となる.

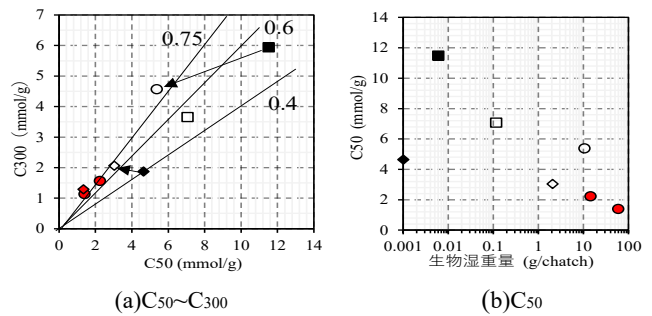


図-8 生物生息場に適した C_{50}

4. おわりに

- (1) 海水に放流された脂肪酸 (下水成分) は, 急激に高分子化, または分解が進み減量する. 有機物の難分解化過程における C_{50} – C_{300} の低下と C_{300} の増加の傾向は, 脂肪酸の腐植化, 錯体化, けん化, 生物利用等における易分解性有機物の化学反応の結果である.
- (2) 海底泥と同様に干潟泥, 浮体籠泥とも IL_{600} に含まれる全炭素量は60% (重量比) であるが, 生物の生息にともない, 易分解性炭素は難分解性有機物に移行していく. GCA層での IL_{600} , C_{50} の減少はGCA層内での土粒子の混合, 無機物 (例えばCSH, CaCO_3) の生成や有機物の脱離 (分割), 捕食等によって起こる.
- (3) 生物生息のあるGCA層内では IL_h に対する C_{300} の含有率が高くなっている. 生物が生息できるGCA層内泥の C_{50} – C_{300}/IL_h 関係 (図-6(d)) から上側にはずれるのは, 生物生息場の特徴として考えられる.
- (4) 生物が生息する適切な場は C_{50} が 2~3 mmol/g ($IL_{600}=10\%$) 未満であり (図-8), ミネラル等の混入により生物が生息できる環境が形成されれば, C_{50} – C_{300} が利用されるとともに, C_{300} が形成されて難分解性有機物が卓越する場に変化する.

5. 参考文献

- 1) 環境省, 平成 28 年度公共水域水質測定結果
- 2) Nellemann et al. (2009) “Blue Carbon “ 「ブルーカーボン」
- 3) 日比野忠史, 太刀内紘平, TOUCH NARONG, 中下慎也: 沿岸域に堆積する有機泥に含まれる有機物の分類法, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, pp. I_1101-I_1105, 2014.
- 4) 中下慎也, 加納一成, TOUCH NARONG, 日比野忠史: 沿岸域に拡散・堆積する油脂類の変動特性の解明, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.70, No.2, pp. I_1086-I_1090, 2014.
- 5) 弓岡亮太, 田多一史, 河内友一, KIM Kyeongmin, 日比野忠史: 礫材を用いた人工干潟における生物活動が固定する炭素量の定量, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.78, No.2, 2022.
- 6) 筒木潔 (1995): フミン物質とその水環境へのかかわり水環境学

会誌, Vol. 18, No. 4, pp. 2-6.

- 7) 岡村宏信, 小枝豪志, 中下慎也, 日比野忠史: 有機泥の沈降特性とフロック構造による有機泥密度の推定法の確立, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.68, No2, pp.1031-1035, 2012.
- 8) 西尾直人, 遠藤徹, 矢持進: 人工塩性湿地堆積中における難分解性有機物の動態, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.72, NO.2, 2016
- 9) 森本優希: 石炭灰造粒物の化学特性が底質改善に及ぼす効果についての研究, 広島大学大学院工学研究科平成 30 年度博士論文, 2019
- 10) 玉井 和久, 小畑 健二, 芳倉 勝治, 日比野忠史, 首藤 啓, 山本裕規, 三戸 勇吾, 石炭灰造粒物の海 底被覆による中・長期的な海域環境改善効果, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 2013, 69 巻, 2 号, p. I_892-I_897