河川感潮域におけるヤマトシジミ生息基盤への 石炭灰造粒物の適用性評価

EVALUATION OF GRANULATED COAL ASH COVERING METHOD UTILIZED
TO HABITAT BASIS OF CORBICULA JAPONICA IN ESTUARY

中本 健二¹・井上 智子²・松尾 暢²・樋野 和俊³・日比野 忠史⁴
Kenji NAKAMOTO, Tomoko INOUE, Toru MATSUO, Kazutoshi HINO and Tadashi HIBINO

¹ 正会員 工修 広島大学大学院 工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)
E-mail:d134328@hiroshima-u.ac.jp

² 正会員 中国電力株式会社 エネルギー総合研究所 (〒739-0046 東広島市鏡山 3-9-1)

³ 正会員 工博 中国電力株式会社 電源事業本部 (〒730-8701 広島市中区小町 4-33)

⁴ 正会員 工博 広島大学大学院准教授 工学研究院 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)
E-mail:hibinot@hiroshima-u.ac.jp

Recently, sludge purification of organic matter enriched river bottom using granulated coal ash (GCA) have been used in Hiroshima Otagawa delta areas. It has been proved that GCA can absorb the compounds of phosphorus, nitrogen and sulfur. By previous study, the material properties of GCA for biological affinity have been clarified. On the other hands, a characteristic as the inhabiting basis of bivalves is not sufficiently clarified. The purpose of this study is to evaluate GCA covering method utilized to habitat basis of *Corbicula japonica*. Laboratory experiments and field investigation were carried out to compare GCA (covering material) for habitat basis with control materials (e.g. natural sand, natural stone and organic mud) about a sneaking act by *Corbicula japonica*. From our findings, it can be concluded that GCA can be used as a covering material to improve biological environment and utilized to habitat basis of *Corbicula japonica* in organic matter enriched river bottom.

Key Words : *Corbicula japonica*, granulated coal ash, covering material, sludge purification

1. はじめに

広島デルタ太田川派川感潮域では、還元有機泥が底質に堆積し河川環境の悪化を招いている箇所がある。この底質改善に石炭灰 (FA) を造粒・固化した海砂代替材 (石炭灰造粒物) が覆砂材 (写真-1) として活用され、改善効果が報告されている¹⁾。石炭灰造粒物覆砂による底質の改善に併せて、有用二枚貝であるヤマトシジミの生息基盤の回復が求められている。石炭灰造粒物は、還元有機泥が堆積する底質の覆砂材として生物生息環境の改善が確認され²⁾、その生物親和性等が報告³⁾されている。その一方、ヤマトシジミの生息基盤としての適用性は明らかにされていない。

ヤマトシジミは高い水質浄化能力を有することから河川環境の水質改善および保全への効果が期待されている^{4,5)}。悪化した底質を良質な覆砂材で改善し、その底質がヤマトシジミの生息場として機能すれば、漁業資源の増大のみならず採取による系外搬出効果による河川底質

環境の改善にも寄与できる。ヤマトシジミは砂泥質の底質を好む事が知られている。一方で、覆砂材である石炭灰造粒物は砂礫質材料であるが、湿潤密度は $1.0 \sim 1.4 \text{ g/cm}^3$ と自然砂礫 ($1.6 \sim 2.0 \text{ g/cm}^3$) と比較し軽量である。このため、粒径が大きくてもシジミの底質への潜入は自然砂礫と比較し有利と想定されるが、その潜入性性能は不明であり潜入能力解明は生息基盤としての適用性を検討するうえで極めて重要である。

本研究の目的は、還元有機泥が堆積した感潮河川底質へ石炭灰造粒物を覆砂した場合のシジミ生息基盤への適用性を評価することである。現地調査、現地実験および

写真-1 (a) 石炭灰造粒物覆砂, (b) 還元有機泥

室内実験により、石炭灰造粒物と対照材料（在来底質、自然砂礫）を生息基盤として比較し、適用性を検討した。

対象箇所は、広島デルタ 1 級河川太田川派川京橋川の感潮域（図-1）である。当該地区は還元有機泥が堆積する干潟に石炭灰造粒物の覆砂（覆砂厚10～50 cm）による底質改善事業が実施され生物生息環境改善が期待されている。本研究において最も重要な課題は、まず砂礫質材料である石炭灰造粒物に、砂泥と同様にシジミが潜入可能であるか確認することであった。次に、還元状態が改善された底質DOと感潮域の塩分が重要な項目と既往の研究⁹⁾⁷⁾から考察されたが、短期的、長期的に評価する場合、生息基盤としてどちらの影響が支配的か検討した。また、潜入可否と併せて、継続した有機泥沈降がある還元有機泥底質改善箇所のシジミ生息環境を調査した。

既往の研究で得られている環境条件⁴⁾⁵⁾を踏まえて、現地調査によりシジミの生息条件を把握し、現地在来底質でのヤマトシジミ生息実験により検討項目を明確にした。その結果を室内実験条件に反映し、実験水槽へ現地模擬地盤を構築し、各条件におけるヤマトシジミの底質への潜行行動を実験的に明らかにした。これら一連の現地調査と実験（現地、室内）により、従来把握されていなかった石炭灰造粒物覆砂のシジミ生息基盤への適用性に関する新たな知見が得られた。

2. 河川感潮域底質でのシジミ生息環境調査

(1) 現地調査による対象箇所環境の把握

対象箇所の環境性状把握を目的に現地調査（2012.11.～2014.10）が実施された。石炭灰造粒物覆砂箇所（30cm厚）および、在来還元有機泥堆積箇所（2013年8月に、□25cm コドラートを用いて表層10cmの底生生物を調査（表-1）し、微量であるがシジミの生息が確認された。太田川市内派川でのヤマトシジミ生息環境の調査事例は少なく、太田川市内派川を対象とした既往の研究⁹⁾では、水温、塩分、DO、粘土含有率、ORP、地盤高を重要な環境要因として検討している。対象地区の上流域ではシジミ漁が実施されている環境のため、本研究では、塩分、DO、底質（粘土含有率、ORP）を重要な環境要因として調査した。漁業関係者から、対象箇所は高度成長期以前にシジミ漁が盛んにおこなわれていた箇所で、底質に還元有機泥が堆積しシジミの生息が激減したと聞き取りしており還元的な環境の影響についても評価が必要であった。

(2) 対象箇所の水質調査結果とその概要

感潮河川のため、塩分変化の把握を目的に河川水位の上昇（大潮上げ潮）時に京橋川河央（図-1）において、クロロフィル a、濁度を含めて水質連続測定を実施した。

図-1 京橋川調査位置図

表-1 対象河岸底質での底生生物生息調査結果

項目	種名	太田川派川京橋川	
		覆砂区(個体数)	在来区(個体数)
軟体動物	クミコマツボ	1	0
	ヤマトシジミ	2	2
	ソトオリガイ	2	1
環形動物	Goniada属	5	2
	ヤマトスピオ	12	2
	Pseudopolydora属	1	0
	Heteromastus属	65	2
	Laonome属	83	5
節足動物	ドロソコエビ属	5	2
	クーマ科	0	1
	ムロミナウミナナフシ	27	8
	アサシヤコ	1	0
	ケフサイソガニ	2	0
	ヤマトオサガニ	2	1
	チゴガニ	3	0
	ハエ目	1	0
確認個体数		212個体	26個体
確認種類数		15種類	10種類
湿重量		5.056g	1.454g

図-2 水質連続測定結果（上げ潮時に観測）

測定時期（2013年12月）は河川流量が少なく塩分が高い渇水期とした。干潮から満潮となる4時間の鉛直方向

プロファイルを観測（図-2）した。塩分躍層は明確でなく 3.5 m の水深で同様の塩分が観測された。干潮時の塩分 10 PSU は満潮時に 32 PSU に上昇している。シジミの餌と関連付けられるクロロフィル a と濁度は、満潮前に急激に上昇する傾向にあった。濁度は干潮時には底層の巻き上がり等の影響により 10~12 FTU を示し、上げ潮とともに低下傾向となり満潮時は 3FTU 程度であった。

(3) 対象箇所の底質調査による底質 DO・塩分の評価

対象箇所の底質 DO と塩分を調査するため京橋川干潟（図-1）において、大潮時の還元有機泥層内と石炭灰造粒物層内の底質 DO・塩分の経時変化を観測した。観測期間は 2013 年 11 月 23 日から 1 ヶ月間とし、DO 計、塩分濃度計を底質内（河床から 10cm 下層を測定）へ設置し、併せて河川水位を連続して測定した。堆積している還元有機泥層内の底質 DO（図-3）は 2mg/L 未満の貧酸素状態、還元有機泥層内の塩分（図-4）は、恒常的に 15~20 PSU であった。感潮河川水の塩分は最大 32PSU が観測されており、泥層内の透水性は低いと考察される。一方、石炭灰造粒物層は河川水位の変動に伴い、底質 DO（図-5）は好気環境を保つと共に、塩分（図-6）は 0~27 PSU と変動しており、透水性が高く層内の水循環が確認された。なお、図-5,6 で、河川水位が水質計設置高より低い時間帯のデータは取得されていない。石炭灰造粒物層内の DO 調査は、夏季（2014 年 8 月から 1 ヶ月間）においても実施したが DO 経時変化は図-5 と同様の傾向であった。また、クロロフィル a、濁度を短時間の観測値で評価するのは適切でないため、干潟の 3 箇所（図-1）にセジメントトラップを設置し有機泥の沈降堆積速度を調査（図-7）した。3 回の調査期間中に出水はなく、トラップ内の泥は強熱減量が 10 % 以上であることが確認された。測定データから 5~50 g/m²/hr 程度の沈降速度があり恒常的な有機泥堆積環境であることが把握された。なお、夏季（2014 年 8 月）にクロロフィル a を測定したところ 60 μg/L あり季節変動が大きいことが確認された。

(4) 現地調査によるシジミ生息に係る考察

現地調査により、石炭灰造粒物と還元有機泥層の底質 DO、塩分変動、間隙水循環および有機泥の沈降堆積速度が把握された。既往の研究^{6,7)}では DO は 1.5mg/L 以上、塩分は、宍道湖産のヤマトシジミでは、22PSU 以下が好適とされている。還元有機泥層の底質 DO は条件を満足しておらず、長期的な生息は困難な環境と想定された。直上水の DO は上げ潮時に観測したところ 5.6 mg/L であり、底泥の巻き上がりの影響を考慮しても生息条件を十分に満たすものであった。一方で石炭灰造粒物は透水性が良いため潮位変動に伴い 22 PSU 以上の塩分となる時間は大潮時に約 5 時間、小潮時の塩分は 10PSU 程度が最

大値である。短時間であれば殻を閉じていると想定されるが、その時間的な耐性については不明な点が多い。現地で個体数は少ないがシジミの生息は確認されており生息基盤として適用性を検討するには複合した影響要因を個別に検討することが適切である。現地生息実験を行い、底質と塩分条件を考慮した条件での室内実験を実施した。

図-3 還元有機泥層内の DO 経時変化

図-4 還元有機泥層内の塩分経時変化

図-5 石炭灰造粒物層内の DO 経時変化

図-6 石炭灰造粒物層内の塩分経時変化

図-7 セジメントトラップによる沈降泥沈降速度評価

3. 河川感潮域での現地シジミ生息実験

室内実験に先立ち、還元有機泥の堆積環境においてヤマトシジミがどの程度生息可能か検証するため、還元有機泥内で現地生息実験（実験期間:2015.5.19～2015.6.18）を実施した。底質に試験区（1.6 m×1.6 m）を設置しシジミ散布範囲を金網で区画しシジミの流出を抑制した。試験区にシジミ（200 個以上/m²）を散布し、生息状況を経過期間毎に観察しコドラートで生息数を確認した。試験区の地盤高は T.P.+1.4m で干潮時に干出するが干出後も十分な保水性を有している。粒度組成は太田川市内派川において河口でシルト・粘土分は 10 %以下、下流域で 20～50 %，上流域で 50～80 %という特徴があり、当該地区も京橋川の中・上流域に位置しており、シルト・粘土分が 80 %を占めた。

対象地区の底質および間隙水は、表-2 のとおりである。強熱減量は 8.4 %とやや大きい値であった。硫化物は 0.2 mg/g 以下であり、シジミの生息に問題がないレベルである。シジミ散布 2 日後（写真-2）に、現地の観察とシジミ生息状況を 25cm コドラートにより表層 10cm 厚の範囲で調査した。散布した半数のシジミは底質に潜入せず底質上で固く殻を閉ざしていた。上げ潮時の現地測定で、直上水は 27PSU が確認され高塩分によりシジミは潜入活動に移れなかったと考察される。15 日後の調査では、半数が底質に潜入、半数は殻を開き死滅していた。散布 30 日後の調査では、コドラート内外全てのシジミは殻を開けて死滅し、生存は確認されなかった。原因については、底質の貧酸素状態と塩分濃度の影響が想定され、実験箇所の底質環境ではシジミの生息は困難と考察された。

4. 室内実験によるシジミ生息基盤の適用性評価

(1) 石炭灰造粒物および自然砂礫への潜入実験

現地での調査と実験結果を踏まえ、京橋川干潟および石炭灰造粒物覆砂箇所を模擬した実験基盤を用いて、室内実験により石炭灰造粒物のシジミ生息基盤への適用性を検討した。当該対象箇所上流で採取されたシジミを用いて、シジミ成貝による模擬地盤への潜入性能および生息性能について実験した。実験条件を表-3 に、模擬基盤の性状を表-4 に示す。本実験では、既往の研究⁷⁾と実験結果を比較できるように、気温、水温を 20℃とした。透明な矩形実験水槽（長さ 300 mm × 幅 180 mm）内に、高さ 100 mm の石炭灰造粒物、感潮域の還元有機泥、および比較材料により模擬地盤を作成した。実験開始時の初期 DO は、現地実験の底質直上水と同じ 5.6 mg/L に調整し、DO を経時的に測定した。京橋川の底質改善箇所約 2000 m 上流のシジミ漁場区で採取されたヤマトシジミ（写真-3）を採取後速やかに実験室へ運搬し、模擬地

盤上に静置した。本実験により対象干潟でのシジミ生息基盤構築に必要な環境条件を考察した。配置後 1hr 以内の短期的な潜入状況を確認すると共に実験環境への馴致時間を考慮して、24hr 毎に底質への潜入個体数を計測した。観察後はシジミを掘り起し、模擬基盤上に再配置した。潜入できず時間の経過に伴い貝殻を開いて死亡が確認されたものは取り除き生息数を計測した。

石炭灰造粒物の湿潤密度は、自然砂礫と比較し軽量であり、粒径が大きくてもシジミの底質への潜入は有利と想定される。しかし、底質の粒径変化と潜入特性に関する知見はない。そこで石炭灰造粒物の模擬基盤により、粒径とシジミ成貝の底質潜入性能（写真-4）について粒径分布を変化させて実験（図-8）した。併せて比較基盤として京橋川シジミ漁場箇所の自然砂および自然礫質材による潜入特性を実験（図-9）した。8 日間の室内実験において、石炭灰造粒物は粒度分布 φ2～10 mm では、自然砂と同様な潜入が観察された。石炭灰造粒物は、自然

表-2 現地底質条件一覧

項目	対象箇所底質	試験区状況
強熱減量 (%)	4～10
含水比 (%)	67.4～81.3	
ORP (mV)	-328～-40	
DO (mg/L)	0.5～1.0	
硫化物	0.09～0.17	
n-ヘキサン抽出物質 (mg/kg)	500～1000	
PO ₄ -P (mg/L)	0.1～1.3	
NH ₄ -N (mg/L)	1.5～6.0

写真-2 (a) シジミ散布 2 日後、(b) 散布 15 日後

表-3 ヤマトシジミ潜入実験条件一覧

項目	実験条件
シジミ殻長	20～32 mm程度（成貝）
シジミ殻幅	13～18 mm
湿重量	7.0g/個体（平均）：大16g～小4g
散布数量	10個体/水槽
実験水深	100 mm
模擬地盤厚	100 mm
水槽底質面積	540 cm ² （300 mm×180 mm）
シジミ散布密度	185個体/m ²
実験用水	感潮河川水 塩分濃度毎に採水

表-4 実験模擬基盤の性状

実験基盤	基盤性状
河川域還元有機泥	性状は表-2のとおり
河川域自然砂	上流シジミ漁場区で採取
石炭灰造粒物	実験条件により粒度分布を調整
自然礫質材	実験条件により粒度分布を調整
複合基盤	石炭灰造粒物+河川域還元有機泥

砂と比較して、湿潤密度が小さく軽量なため、2~10 mmの粒径であれば、砂と同様な潜入が可能と考察できる。自然礫質材 $\phi 19$ mm が混入する地盤では5日程度で、半数が潜入を諦め底質上で殻を閉ざしていた。石炭灰造粒物では $\phi 26.5$ mm が混入すると同様な傾向であった。礫質材と同粒径であれば石炭灰造粒物への潜入が容易であることが確認された。しかし、自然砂と比較すると潜入の容易さは劣っている。一方で、現地は底質上に沈降有機泥が堆積するため、これを考慮した条件としたところ（有機泥を容積比 10 %混入）、自然砂と同様な潜入特性（図-10）となった。自然砂より湿潤密度が小さい礫状の石炭灰造粒物層へ含水比が高く細粒分が多い有機泥が混合されることで、粒度調整効果が働き底質の潜入抵抗が低減しシジミの潜入が容易になったと考察される。

(2) 塩分と沈降泥を考慮した模擬地盤への潜入実験

潜入行動への塩分の影響を検討するため、複数の塩分条件により潜入実験を実施した。既往の研究⁷⁾では 22 PSU 以下は好適とされており、還元有機泥層内の 20PSU（図-4）を考慮して、4~20 PSU の6 ケースで、自然砂地盤への潜入性能を確認（図-11）した。6~18 PSU では、静置直後から潜砂行動を開始し、実験期間中安定して潜砂していた。一方で 20PSU では、殻を閉じ潜入を開始しなかった。馴致時間が必要なこともあるが、20 PSU では5日以降、死貝が確認されはじめ、8日後は、潜砂した1個体以外を除いて殻を開き死亡していた。18 PSU と 20 PSU では、シジミの潜入性能の違いが実験的に確認された。太田川派川に生息するヤマトシジミは従来からの知見⁷⁾22 PSU でなく、20 PSU で活動が制限される結果となった。本研究で用いたシジミは上流域で採取しており潮位変動に伴う塩分変動が小さい環境で成長している。成長環境による塩分耐性の違いによりシジミの活動が制限されたと考察される。

次に、高塩分（20 PSU）での底質の違いによる潜入行動特性を評価（図-12）した。複合基盤は、石炭灰造粒物に現地の有機泥を混合したものである。石炭灰造粒物に有機泥を 10 %混合した模擬基盤の潜入性能（図-10）が良好であったことを踏まえ、容積比で有機泥を 20%、および 30%混合している。2日後以降は、シジミが徐々に環境に馴致し、潜入数が増加していったが、基盤へ潜入できたシジミは限られていた。塩分 20 PSU の環境（図-13）では、4日後まではすべてのシジミは生存していたが、5日後から死亡が確認され始めた。基盤内へ潜入したシジミは生存できていた一方で、潜入していないシジミは死亡が確認され始めた。また8日後に生存していたシジミは全て、模擬基盤内へ潜入したものであった。砂および石炭灰造粒物で死亡数が多いのは、透水性が良く高い塩分が直接浸潤し間隙水中の塩分が高くなるためと

写真-3 (a) 実験用シジミ外観 (b) シジミ配置状況

写真-4 石炭灰造粒物へのシジミ潜入開始・完了状況

図-8 石炭灰造粒物の粒径を変化した場合の潜入状況

図-9 砂礫の粒径を変化した場合の潜入状況

図-10 石炭灰造粒物に有機泥を混合した場合の潜入状況

図-11 塩分を変化した場合の潜入状況

考察できる。一方で、還元有機泥の透水性は悪く貧酸素状態であるが、底泥採取時は干潮時で、5.6 mg/L の直上水が表層を流れ、模擬地盤の塩分濃度は 18 PSU となっていた。既往の研究⁹⁾では、ヤマトシジミは高い貧酸素耐性を有することが報告されている。底質による直上水 DO (図-14) は、還元有機泥で低くなり好適値 (1.5mg/L 以上) 未満となった。長期的には底質 DO の影響を大きく受けるが、短期的には高い塩分濃度で活動が制限され、潜入できず死亡したと想定される。石炭灰造粒物と有機泥が混合されることで、塩分濃度が高い環境において、保水性による塩分の影響と還元状態が緩和されシジミ生息基盤となる環境が形成されると考察する。

現地シジミ生息実験結果を今回得られた知見で整理すると、短期的に潜入しなかったシジミは塩分の影響を回避するために殻を閉ざしていたと想定する。2 週間後は半数が底質へ潜入していたが、2 週間で塩分環境に馴致できたものも、底質 DO の還元状態により 1 ヶ月後には死滅したと考察できる。石炭灰造粒物を還元有機泥が堆積する感潮域においてシジミの生息基盤として適用するには 20 PSU 以上でのシジミの塩分耐性時間を検討することが、今後の課題である。

5. おわりに

本研究により明らかとなった主な結論を以下に示す。

- (1) 石炭灰造粒物は密度が小さく、同じ粒径の自然礫質材料と比較して、シジミ成貝の潜入は容易であることが定量的に確認された。
- (2) 石炭灰造粒物は、礫状材料のため自然砂と比較するとシジミの潜入行動は劣るが、現地は沈降泥堆積環境である。この沈降泥の堆積を踏まえて評価すると自然砂と同様の底質潜入行動をとることが定量的に確認された。
- (3) 現地実験により長期的 (1 ヶ月以上) なシジミ生息には底質 DO が重要な指標となることが確認された。還元有機泥が堆積する底質への石炭灰造粒物覆砂により、底質 DO をシジミの好適値 (1.5 mg/L 以上) に改善できることが確認された。沈降有機泥の堆積状況を想定した室内実験においても底質 DO 低下の抑制効果が確認された。
- (4) 室内実験により短期的 (1 週間程度) なシジミの生息には塩分が重要な指標となることが確認された。高塩分域でのシジミ生息基盤は底質地盤の透水性に影響される。底質改善を行う干潟は、沈降有機泥が定常的に供給される環境であり、石炭灰造粒物と有機泥が混合されると生息基盤として底質 DO の消費抑制と保水性の両方が向上する場が形成されることが確認された。
- (5) 今後の課題として、石炭灰造粒物をシジミ生息基盤へ適用するには、適用箇所の塩分変化とシジミの塩分耐性を評価する必要がある。

図-12 ヤマトシジミ潜入実験 (20 PSU) 結果

図-13 生息基盤ごとのヤマトシジミの生存数の変化

図-14 生息基盤ごとの DO の変化

参考文献

- 1) 井上省吾, 西野博史, 木村道夫, 日比野忠史, 首藤啓; 石炭灰造粒物の海底被覆による海域環境の改善効果, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.67, pp.511-516, 2011.
- 2) 中本健二, 廣中伸孝, 樋野和俊, 日比野忠史; ヘドロ堆積干潟での底質浄化能力を持つ作業場構築技術の開発, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.70, pp.1104-1109, 2014.
- 3) 中本健二, 及川隆仁, 樋野和俊, 日比野忠史; 還元有機泥が堆積した海域の底質改善に用いられる石炭灰造粒物の生物親和性評価, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, pp.1459-1464, 2015.
- 4) 大沼克弘, 藤田光一, 望月貴文, 天野邦彦; 太田川放水路を事例とした河口干潟の設計・管理方法の枠組みに関する研究, 河川技術論文集, 第 17 巻, 2011.
- 5) 富田智, 岩井克己, 市村康, 土屋正隆, 阿部徹, 太田川市内派川における HSI 手法を用いた場の評価, 土木学会中国支部, Vol.60, 07, 2008.
- 6) 中村幹雄, 品川明, 戸田顕史, 中尾繁; ヤマトシジミの貧酸素耐性, 水産増殖, 45 巻 1 号, pp.9-15, 1997.
- 7) 中村幹雄, 安木茂, 高橋文子, 品川明, 中尾繁; ヤマトシジミの塩分耐性, 水産増殖, 44 巻 1 号, pp.31-35, 1996.