

竹炭化材を活用した有明海干潟土の 底質改善効果

MUD IMPROVEMENT EFFECT OF TIDAL FLAT MUD OF THE ARIAKE SEA BY USING BAMBOO CHARCOAL MATERIAL

荒牧憲隆¹

Noritaka ARAMAKI

¹正会員 博(工) 崇城大学准教授 工学部エコデザイン学科 (〒860-0082 熊本市池田4-22-1)

The mud improvement tests were performed on tidal flat mud sampled from the Ariake Sea where environmentally polluted, recently. The effect of bamboo charcoal material on sediment remediation has been considered. The improvement effect of mixed-mud between mud and granulated bamboo charcoal material were investigated from a point of view of sulfate reduction. In addition, the various model tests were carried out in order to develop mud improvement method in the field.

The mud improvement effects were observed depending on carbonized temperatures and mixing rate of bamboo charcoal material. In the various model tests, it was shown that contaminated tidal mud was improved by mixing bamboo charcoal material with mud and driving a few cylindrical bamboo charcoal materials into the mud.

Key Words : *Mud improvement, bamboo charcoal material, tidal flat mud, oxidation-reduction potential, acid volatile sulfides, model tests*

1. はじめに

有明海では、我国の干潟の40%にも達する約8,600haの広大な干潟域を有し、多種にわたる底棲生物が数多く生息する豊かな海域であった。しかし、近年では海苔の不作や魚介類の不漁が続いており、また、干潟の底質悪化が大きな社会問題となっている。その原因の一つとして、有明海干潟土内の硫酸還元菌の活発化による硫化物の増加が、底棲生物にとって生存困難な底質環境になったと報告されている^{1),2),3)}。さらに、硫化物の増加に伴って、有明粘土から異臭を放っている。

一方、竹は植物の中でも成長が早く、古来より人々にとって有用な資源として活用されてきた。しかし、工業化が進み時代が変わる中で、竹の利用量が減り、竹林は放置され、他の生態を侵食しているのが現状である。また、この放置地域は拡大し、豪雨時の土砂災害の原因となることもしばしば認められる。そのため、竹の適切な間伐は、他の生態系への侵食を防ぐことや土砂災害の減災へと繋がり、その間伐した竹材の有効利用に関する研究・開発が、種々の分野で進められている。その中には、竹材を炭化することにより、その炭化材は、多孔質で吸着性能などの材料特性を有し、水質浄化、農業での土壌改良材など種々の分野での利用が図られている

4),5)。また、土木分野においても、道路、港湾などでの土構造物建設では、コスト縮減を念頭に置いた合理的な工法、環境に配慮した技術への展開が求められている。その中で、木質系炭化物を地盤材料へと有効利用した地盤改良の検討⁶⁾もされているが、現場への適用事例は少ないものとなっている。その原因として、一意的ではない炭化物の性能を十分に踏まえていない結果と考えられる。これに加え、天然材料に比べ、木質系炭化物の利用は、他のリサイクル品材料と同様、材料コスト的には高く、そのためリサイクルが進まないと考えられる。しかし、これは、短期的な視野から見たコスト概念であり、長期的に考えると、前述したような災害の抑制、浸食の防止、炭化によるCO₂の固定、森林保全などの環境コスト⁷⁾への投資とも繋がる。

本研究は、以上のことを踏まえ、間伐竹材を異なる温度によって竹炭化材を作製し、粒状化した竹炭化材を活用した有明海干潟土との混合において、硫酸還元抑制の点から底質改善効果について調べている。さらに、それらの結果に基づき、干潟土再生にむけた対策工法の開発を念頭に置き、種々の模型による底質改善効果について実験的に検討を行うものである。

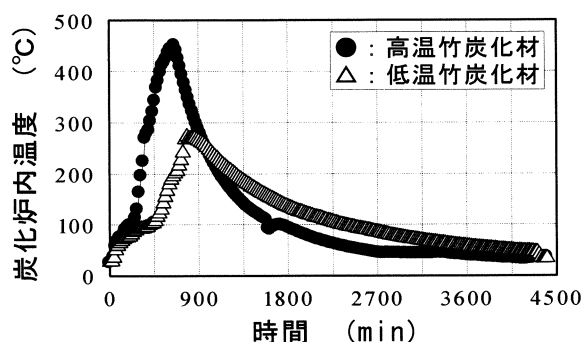


図-1 竹炭化材作製時の炉内温度の経時変化

表-1 竹炭化材の物理的性質

	高温		低温
	電導	非電導	
pH	10.45	10.45	8.00
EC (mS/m)	244	139.4	60

2. 竹炭材の作成方法および物理的性質

(1) 竹炭化材の作成方法

竹炭化材の作製には、学内で間伐した竹材を利用している。間伐した竹材は、3ヶ月程度、陰干しし、竹材の含水比が15%以下であることを確認した上で、竹炭化材へと利用している。これを、円筒形炭焼炉（直径1.5m×奥行き1.5m）内に敷き詰め、竹材に着火後、炉内温度、煙の状態を確認しながら、炭化を行う。着火後の燃焼は、自然方式である。燃焼中は、炉内への空気流入量を調整しながら竹材を燃焼させ、炉内温度がピークを迎えた後、完全に空気を遮断し、竹材を炭化させる。その後、約1日程度放置し、炉内温度が外気温と差がないことを確認した後、竹炭材を取り出す。

図-1には、本研究で用いる竹炭材作製行程における炉内温度と時間の関係を示した。本研究では、炉内ピーク温度が、450℃（以後、便宜上、高温竹炭材と称す）と260℃（以後、低温竹炭材と称す）での2種類を作製している。

(2) 竹炭化材の物理的性質

表-1には、これらの物理的性質を示した。高温で作製された竹炭化材は、電気抵抗を測定し、2種類に分類した。すなわち、 $5.7 \times 10^5 \Omega/\text{cm}$ で、電導/非電導竹炭として分類した。これは、木炭の品質である精煉度5を基準とし、分類している⁸⁾。低温竹炭材は非電導であった。pHは、土と同様に、懸濁液（1：5法）で測定し、何れもアルカリ性を呈していることが分かる。また、温度の依存性は認められない。これは、カリウムに富む竹炭のpH挙動が、炭酸カリウムが水溶して生成された苛性カリウム＋炭酸水素カリウムなどのアルカリ成分に左右されたと考えられる。電気伝導率ECは、低温竹炭材に比

表-2 実験条件

Case	竹炭化材混合率	炭化温度
1	無対策	—
2	10%	260
3	30%	
4	50%	
5	10%	450
6	30%	
7	50%	

表-3 有明海干潟土の物理的性質

土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.642
自然含水比 w_n (%)	176.8
液性限界 w_L (%)	99.5
塑性限界 w_p (%)	43.7
塑性指数 IP	55.8
pH	7.57
EC (mS/m)	337

べ、高温竹炭材が高い値を示しており、懸濁液に電解質が多量に含まれていることを示している。

3. 異なる炭化温度で作製された竹炭化材を混合した干潟土の底質改善効果

(1) 試料および実験方法

本研究では、有明海干潟土に2mm以下に粉砕した竹炭化材を混合し、その混合土の底質改善効果を検討した。竹炭化材の添加率を、有明海干潟土の乾燥質量に対し、10,30,50%とした。これを水槽（30cm×30cm×30cm）内に、高さ15cmとなるように地盤を作製した。無対策を含め、計7種類の模型を作製し、実験を行っている。その実験条件を表-2に示す。有明海干潟土は、熊本県内の有明海において、表層から20cm程度の深度で採取した。有明干潟土の物理的性質を表-3に示す。この有明海干潟土を嫌気状態となるように放置し、AVS(酸揮発性硫化物)量が1.5mg/g-drymudとなるのを確認し使用している。竹炭化材は、電導性のある高温と低温竹炭材を用いた。

底質改善効果の確認には、混合土のpH、ORP(酸化還元電位)、AVS(酸揮発性硫化物)の3項目を測定している。混合土のpH、ORPは、混合土に、直接センサーを挿入し計測を行った。AVS(酸揮発性硫化物)については、深さ10cmで試料を採取し、これをガラス容器内にて、18N硫酸と混合後、試料の硫化物を全て硫化水素に置換し、それをガス検知管法によって測定している。測定は、約3ヶ月間において週2回の測定を行っている。また、何れの模型地

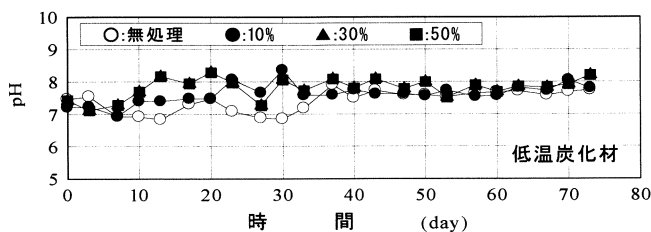


図-2 pHの経時変化（低温竹炭材）

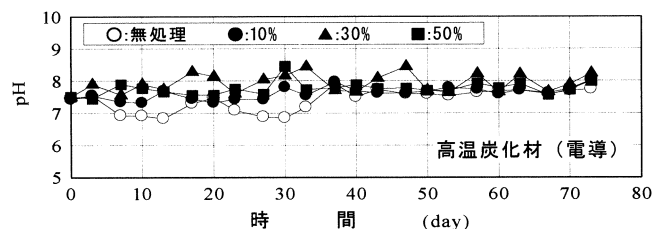


図-5 pHの経時変化（高温竹炭材）

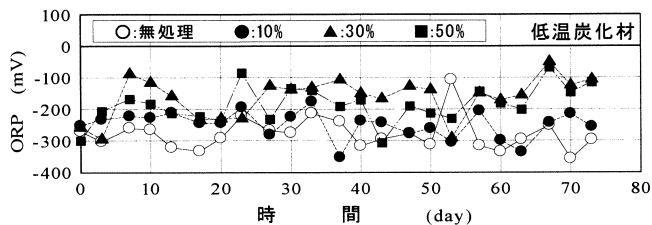


図-3 ORPの経時変化（低温竹炭材）

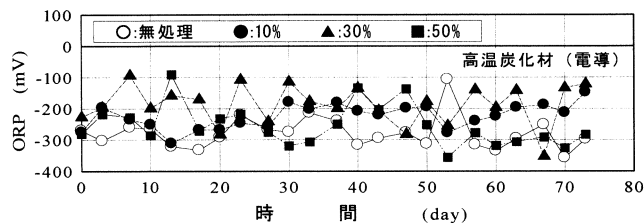


図-6 ORPの経時変化（高温竹炭材）

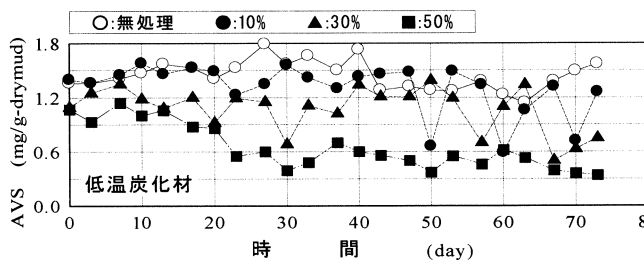


図-4 AVSの経時変化（低温竹炭材）

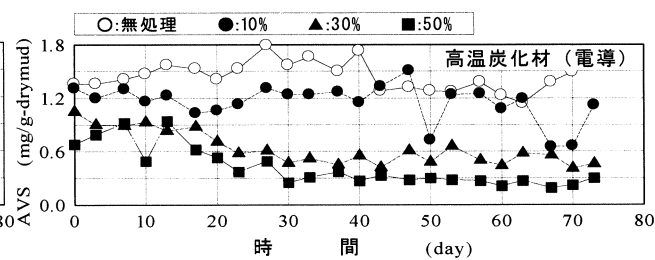


図-7 AVSの経時変化（高温竹炭材）

盤も、水による化学的影響を小さくするために、実験中は、エアレーションを行っている。

(2) 計測結果

図-2～4には、低温竹炭材を混合した有明海干潟土のpH、ORP、AVSの経時変化を示した。図-2のpHでは、ほとんど変化がなく、概ねpH=7～8の間で推移し、中性を保っている。図-3のORPでは、無処理の場合、ORP=-300mVで還元状態となっている様子が窺える。炭化材を混合することで、ORPの値は、増加するが、酸化状態へは至っていない。ORPの増加率は、竹炭混合率の増加に伴い、顕著であった。また、硫酸還元はORP=-200mV以下の条件で開始されることを踏まえると、竹炭混合率30%以上で、有明海干潟土のORPは、-200mV以上へと改善され、その状態を維持している。ただし、改善効果は、測定初期には認められず、7日以降となっている。図-4のAVSにおいて、無処理では、AVS量は、1.2mg/g-drymud以下になることはなく、干潟土の状態が悪化している環境下にあることがわかる。これは、ORPが常に-200mV以下であったことから、硫酸還元が発生しやすい状態であったと考えられる。竹炭混合率10%においても、同様で、改善効果は認められなかった。改善材の覆設・耕耘・混合による、酸化反応が促進された効果は小さかったと考えられる。また、時間的なばらつきが他の混合率に比べ大きくなっているが、これは、採取時の竹炭含有量の

差であると考えられる。竹炭混合率30%では、時間の経過とともに、AVS量は減少するが、良質な底質環境とはなっていない。竹炭混合率50%では、時間の経過とともに、減少傾向を示しており、干潟土の底質改善効果が認められる。しかし、70日を経過した時点においても、水産用水基準⁹⁾により、底棲生物にとって良好な環境とされるAVSの値が0.2mg/g-drymud以下の値にはなることは認められなかった。また、ORP、AVSともに、計測値の時間変動が大きいが、外気温の影響や、ORP、AVS計測地点での土中炭化物含有量に影響されたと考えられる。

図-5～7には、高温炭化材混合による干潟土のpH、ORP、AVSの経時変化を示した。図-5のpHでは、低温炭化材と同様、中性から弱アルカリ性を示していることが分かる。図-6のORPでは、何れの竹炭混合率においても、低温炭化材同様、酸化状態になることは認められなかった。ばらつきはおおきいものの、竹炭材混合率10および30%では、計測60日以降、硫酸還元の指標となるORP=-200mV以上の値を示している。一方で、竹炭材混合率50%では、無対策と変わらず、ORP=-300mV付近の値を示し、嫌気的な状態であったと考えられる。図-12のAVSについて、竹炭混合率10%では、無対策と比較すると、若干良好な底質の改善効果が認められるが、水産用水基準である底棲生物が生存可能なAVS=0.5mg/g-drymud以下になることはなかった。竹炭混合率30%および50%では、計測初期より、漸次AVSの値が減少しており、AVS=0.5mg/g-

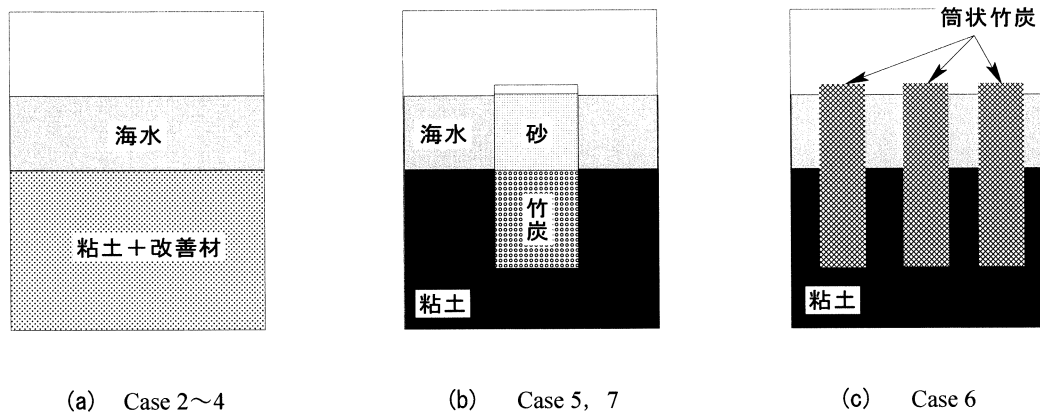


図-8 模型実験の概念図

表-4 実験条件

Case 1	無対策
Case 2	砂混合
Case 3	非電導性竹炭混合
Case 4	電導性竹炭混合
Case 5	竹炭中詰め杭
Case 6	筒状竹炭
Case 7	しらす中詰め杭

drymud以下に抑制されていることが分かる。特に、竹炭混合率50%では、計測開始から65日以降、0.2mg/g-drymud以下を示し、底棲生物にとって良好な底質環境へ改善された様子が窺える。

これらの結果から、有明海干潟土の底質改善には、竹炭化材を混合することの有用性が示された。また、その効果は、高温で炭化された竹炭材が顕著であった。この要因とし、高温で炭化された竹炭⁴⁾は、一般的に細孔容積が大きいことが分かっており、吸着能も高かったと考えられる。また、竹炭の機能の一つである有機物の分解過程で発生する不安定な水素イオンの硫化水素生成前での吸着、または、悪臭の元である有害物質の硫化水素を吸着したためと考えられる。

4. 種々の方法による底質改善効果

(1) 試料および実験方法

ここでは、AVSが0.5mg/g-drymud程度の熊本県内の有明海干潟土を用いて、干潟土再生にむけた対策工法の開発を念頭に置き、底質改善方法の異なる7種類の模型を作製し、底質改善効果の検討を行った。実験条件を表-4に示し、実験模型の概念図を図-8に描いた。模型地盤は、円筒容器(直径50cm×高さ60cm)内に、高さ30cmとなるように作製した。ここで、Case 1は無対策とし、Case 2では、アサリ漁場などで、底質改善を行う一般的な手法として、砂を混合し、改善効果の確認を行った。砂の混合割合は、干潟土の乾燥質量に対し30%としている。Case 3および4では、高温竹炭材を、砂と同

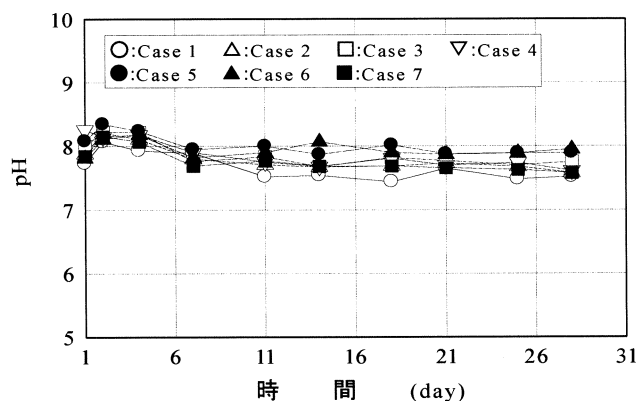


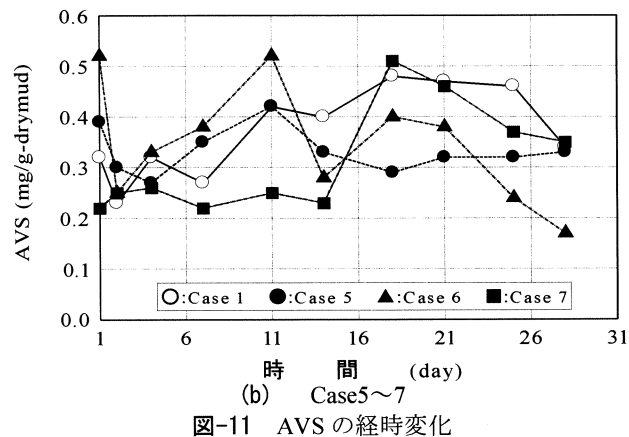
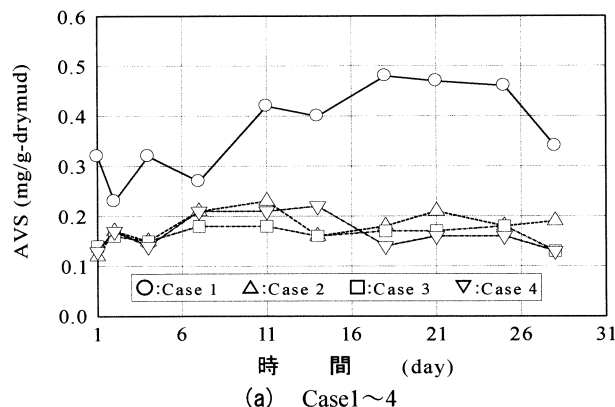
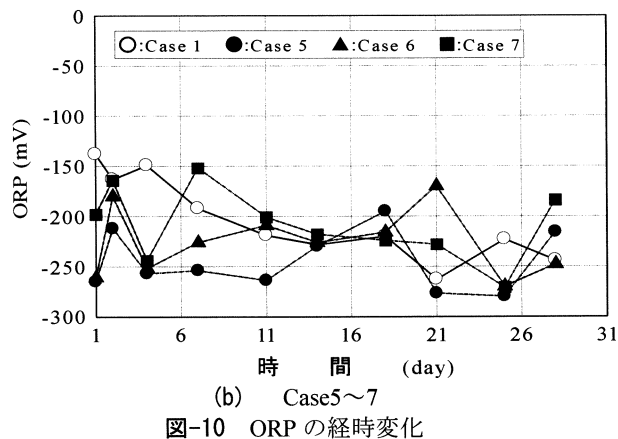
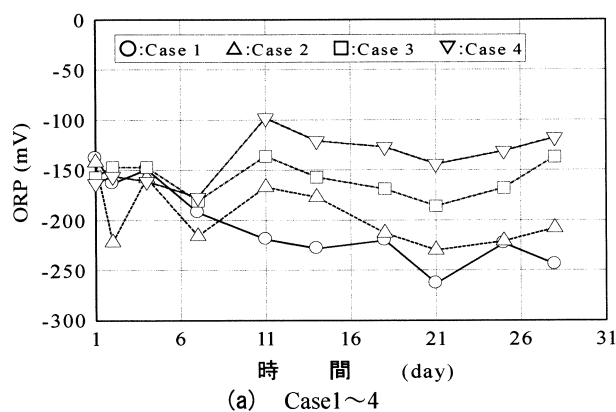
図-9 pHの経時変化

様に、30%混合している。また、竹炭材の電導性に着目し、非電導および電導竹炭材(2.参照)を用いた。Case 5では、パイプ(直径10cm)を模型地盤内に15cmとなるよう打設し、電導竹炭材を中詰め材として用い、パイプ底面および側面より水の流入が可能な状態としている。Case 6では、海苔養殖の支柱の代替材を想定し、筒状に炭化した竹炭材を用いて、直接干潟土へと深さ15cmまで打設した。Case 7では、Case 5の竹炭同様、多孔質な材料であり、吸着効果が期待できる火山灰質粗粒土のしらすを用いている。底質改善効果の確認には、3.と同様に干潟土のpH、ORP(酸化還元電位)、AVS(酸揮発性硫化物)の3項目を測定している。AVS計測時において、表層より10cm程度の深さで試料を採取している。測定は、約1ヶ月間において週2回の測定を行っている。また、何れの模型地盤も、水による化学的影響を小さくするために、実験中は、エアレーションを行っている。

(2) 計測結果

図-9には、全ての実験CaseにおけるpHの経時変化を示した。何れのケースにおいても、中性から弱アルカリ性を示していることが分かる。種々の形状で竹炭材を混合するが、地盤は弱アルカリ性を示し、pHは一定の値を示す。

図-10(a)、(b)には、ORPの経時変化を示した。



なお、比較のため、Case1（無対策）の結果は両図ともに示した。同図(a)の Case1~4 において、Case1（無対策）は、ORP の値が、時間の経過とともに、減少傾向を示し、還元状態を示している様子が窺える。Case2（砂混合）においては、計測 7 日までは、硫酸還元が発生条件となる -200mV 前後の値を示すが、11 日以降、Case1 と同様な傾向を示し、ORP=-200V 以下となっていることが認められる。一方、Case3（非電導竹炭混合）では、計測期間中、初期値 ORP-150mV 以上を維持していることが分かる。また、Case4（電導竹炭混合）でも、ORP は改善され、初期値以上を示し、-200mV 以下の値を示すことは認められなかった。3. で示した混合土の結果と同様な傾向を示している。同図(b)の Case5~7 において、何れの実験条件においても、Case1（無対策）同様、ORP は、-200mV 以下の値を示し、硫酸還元が行われやすい結果となっている。

図-11(a), (b)には、AVS の経時変化を示した。なお、比較のため、Case1（無対策）の結果は両図ともに描いている。同図(a)の Case1（無対策）は、時間の経過とともに、AVS の値が上昇していることが分かる。Case2（砂混合）においては、初期には混合により干潟土は酸化され、底棲生物にとって良好な AVS=0.2mg/g-drymud 前後の値を示し底質改善効果が窺える。Case3（非電導竹炭混合）、Case4（電導竹炭混合）では、AVS=0.2mg/g-drymud 以下の値を維持し、砂混合と比較しても、良好な底質改善効果があることが認められた。ORP の計測結果も踏まえると、硫酸還元を抑制していると考えられ

る。一方、同図(b)の Case5~7 においては、いずれも顕著な底質改善効果は認められなかったが、Case6（筒状竹炭）においてのみ、計測 18 日目を以降、AVS の値は減少し、AVS=0.2mg/g-drymud 以下の値を示し、底質改善効果に時間的な遅れが生じている。Case5~7 においては、干潟土と接触面積が小さいため、顕著な硫酸還元活動の抑制には至らなかったと推察される。

以上のことから、底質の改善には、竹炭の混合が最も顕著であった。また、Case6 の筒状竹炭でも改善効果は認められたが、打設間隔や貫入深度によって、結果は異なってくると考えられる。

5. まとめ

本研究は、間伐竹材を異なる燃焼温度によって炭化し、その竹炭化材を粒状化し有明海干潟土との混合による硫酸還元抑制の点から底質土改善効果について検討した。さらに、それらの結果に基づき、干潟土再生にむけた対策工法の開発を念頭に置き、種々の模型による底質改善効果について実験的に検討を行った。本研究で得られた結果を要約すると以下の通りである。

- (1) 異なる炭化温度で生成された竹炭化材と干潟土の混合土における底質改善について、無処理では、ORP=-300mV 以下の値を示し、硫酸還元が発生しやすい環境であった。竹炭を混合することにより、ORP=-200mV 以

上となった。また、竹炭化材の増加に伴い、その傾向は顕著であった。

- (2) 混合土の底質改善において、AVS は、竹炭化材の増加に伴い、減少傾向が認められ、硫酸還元発生抑制が確認された。また、その傾向は、高温竹炭化材が顕著であった。
- (3) 種々の対策工模型実験において、竹炭化材混合で $ORP=-200mV$ 以上を維持していることが確認された。
- (4) 種々の対策工模型実験において、AVS は、竹炭化材と干潟土の混合でのみ、 $0.2mg/g\text{-drymud}$ 以下の値を維持し、良好な底質環境であることが認められ、底質改善に最も効果的であった。

参考文献

- 1) 環境省 有明海・八代海総合調査評価委員会：委員会報告，2006.
- 2) 林重徳，杜延軍，末次大輔：有明海湾奥部における干潟環境再生のための地盤工学的視点からの

取組み，第7回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，pp.1-10，2007.

- 3) 牛原裕司，林重徳，原裕，松尾保成，杜延軍，末次大輔：有明海の干潟底質改善における発泡ガラス材の有効性，環境工学研究論文集，Vol.44，pp.17-22，2007.
- 4) 日本竹炭竹酢液生産者協議会編：竹炭・竹酢液作り方生かし方，創林社，2004.
- 5) 柳沼力夫：炭のかがく，誠文堂新光社，2003.
- 6) K. Omine, H. Ochiai and N. Yasufuku., T. Kobayashi, K. Kuroki & M. Shiozaki : Improvement in the mechanical properties of cohesive soils by mixing carbide possessing water absorption property, Proc. of Recent Developments of Geotechnical Engineering in Soft Soil Ground, pp.311-316, 2005.
- 7) (社)地盤工学会九州支部編：環境と経済を考慮した建設発生土と廃棄物の有効利用，2003.
- 8) (社)全国燃料協会：新用途木炭の用途別基準，2004.
- 9) (社)日本水産資源保護協会編：水産用運用基準，2005.