下水汚泥炭化物を用いたCO_2固定に関する基礎的研究

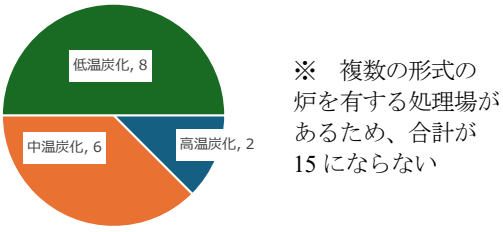
研究予算：運営費交付金
研究期間：令 5～令 7
担当チーム：材料資源研究グループ
研究担当者：阿部千雅、岡安祐司、宮本豊尚

【要旨】
下水道施設では多数のポンプやブロアの運転等による電力の使用が不可避であり、カーボンニュートラルを達成するには、カーボンネガティブな取り組みが必須となる。CO_2 固定手法の一つとして下水汚泥炭化物を土木材料として利用することを想定し、溶出試験や土質試験等を実施した。中温炭化物は水中で易分解有機物の溶出がわずかであり、地下水に与える影響は相対的に軽微と示唆された。炭化物を非常に柔らかい粘土に混合した結果、コーン指数は改善した。盛土工を想定した温室効果ガスの概算を行った結果、二酸化炭素排出量の大幅な削減が期待される試算結果となった。
キーワード：炭化汚泥、熱重量測定、溶出試験、コーン指数、温室効果ガス排出量

1. はじめに

2050 年のカーボンニュートラル達成を目指し、種々の取組がなされている。地方公共団体から発生する温室効果ガスのうち、下水道事業由来のものは大きな割合を占め（例えば横浜市では約 20%程度[1)]）、対策が求められているが、既存の省エネ対策では限界があり各団体で苦慮しているところである。さらに、下水道施設では汚水・雨水問わず多数のポンプを有しているだけでなく、生物処理に必要なブロアの運転等で電力の使用が不可避であり、カーボンニュートラルを達成するには、カーボンネガティブな取り組みが必須となる。

これまで国交省では、下水汚泥のエネルギー利用を推進してきた。その結果、下水汚泥の炭化は令和 3 年度末時点で 15 箇所の下水処理場において実施されており[2)]、その後も全国で新しい施設の供用が始まっている。その主たる目的は、下水汚泥のエネルギー利用であり、炭化物は石炭火力発電所などでの補助燃料として利用されている。そのため、多少の臭気等の問題を有していても炭化の温度を低く設定し、熱量を多く確保できるものが多く製造されている状況にある（**図-1**）。しかし、現在有力な手法である石炭代替利用については、電力政策の方向性から将来における石炭火力発電所の運転停止が見込まれ、炭化物の安定利用は厳しいと予想される。一方、J クレジット制度[3)]において、令和 2 年 9 月より、農地への炭化物施用が CO_2 固定手法の一つとして認定され、排出削減量として計上されるようになった。今後、J クレジット制度を活用し、農地以外でも炭化物を貯留する可能性も考えられる。



※ 複数の形式の炉を有する処理場があるため、合計が 15 にならない

図-1 炭化施設の温度区分（R3 年度末）

以上を踏まえ、本研究は、下水汚泥炭化物を CO_2 固定資材としての利用可能性について検討するため、①汚泥の炭化特性と汚泥炭化物の安定性の把握、②想定貯留環境における汚泥炭化物の安定性と溶出特性の把握、③汚泥炭化物貯留事業の $LCCO_2$ の試算を実施した。

2. 汚泥の炭化特性と汚泥炭化物の炭素安定性

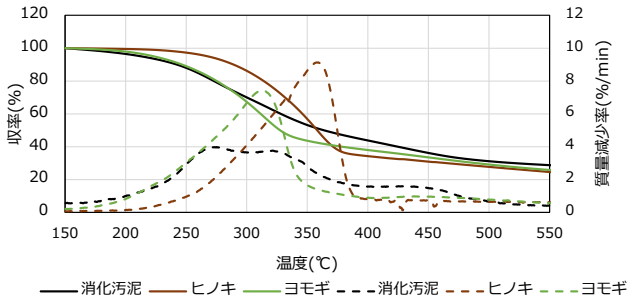
2.1 目的

酸素が少ない条件で有機物が熱作用を受けると、有機物中に含まれる酸素が炭素や水素と反応し、二酸化炭素や一酸化炭素、水蒸気等の気体、液体のタール及び固体の炭化物が生成する。易分解な有機物は低温で分解・揮発するため、得られる炭化物は温度による影響を受けることになる。また炭化物が安定すると、無酸素環境では熱分解せず、質量の変化はわずかとなる。

そこでまず、下水汚泥（消化汚泥）と代表的なバイオ炭である草木類のほか純物質を対象に、窒素環境条件で熱重量(TG)分析を行い、熱分解特性を把握した。

2.2 実験方法

実験に用いた試料は、分流式下水道の消化汚泥の凍結乾燥物のほか、ヒノキとヨモギの粉砕凍結乾燥物およびデンプン、及びセルロース（濾紙）である。分析は



※　実線：収率　破線：質量減少率

図-2　温度と収率及び質量減少率の関係

TG-DTA(セイコーインスツルメンツ製 6300)で実施した。キャリアガスには窒素を使用した。熱分析は室温（約 20℃）から 550℃までの区間で実施した。N_2 雰囲気下(50 mL/min)、昇温速度 10℃/min とした。

2.3　結果と考察

TG の結果を**図-2** に示す。バイオ炭は 350℃以上でバイオマスを加熱して得られる固形物として定義されている [3]。350℃での質量は初期値の約 53%であり、これはヒノキ(約 55%)と類似した値で、ヨモギ(約 45%)よりも多い値であった。一方で、灰分を除いた有機物ベースでの質量減少率は、消化汚泥は約 65%減少し、ヒノキの約 45%、ヨモギの約 60%と比べて小さな値となった。このことから、350℃で消化汚泥を炭化すると、植物よりも有機物が失われる結果となった。

また、消化汚泥の TG がなだらかに 500℃付近まで下がる傾向が見られた。質量の減少速度は 5%/min 未満となった。これは文献 [4]（ただし汚泥の種類は不明）と同様の傾向を示していた。なお、ヨモギはでんぷんと類似した 310℃付近で、ヒノキについてはセルロースと類似した 360℃付近で急激な TG の減少が見られる特徴が見られた。汚泥はそれらと比べて様々な物質から構成されているため明瞭なピークは見られないと考えられた。すなわち特定の成分が多いと想定される草木類では、想定される成分の熱変性特性を超えた温度帯で炭化することにより安定した炭化物が得られると考えられるが、汚泥では草木類と比べて安定した炭化物が得られにくいと考えられた。以上より、今回使用した消化汚泥を炭化すると、バイオ炭としての炭素固定能力は草木よりも低い可能性が示唆された。

3.　水中環境における下水汚泥炭化物の挙動

3.1　目的

土木材料として炭化物を使用する場合、地下水位以下に長時間置かれる可能性が考えられる。**図-1** に示したとおり、下水汚泥の炭化温度は大きく低温（250～350℃程度）と中温（400℃程度）以上に大別される。下水汚泥の炭化物は現状燃料利用を主に想定しており、特に低温炭化物はなるべく多くの熱量を保有した状態を維持したまま炭化処理が行われている。これらの炭化物は、易分解の有機物が含まれていると想定され、微生物の作用により分解が進行することが予想される。仮に農地での施用であれば作物の成長に有用と考えらえる一方で、土木材料として使用される場合は、公共用水域の水質汚濁につながる可能性も想定される。

そこで、実験的に低温炭化物と中温炭化物を水中に浸漬し、密閉した環境での経時的な変化について、特に地下水汚染の観点から調査した。

なお、本研究については当初重金属についても対象と想定していたが、下水汚泥の重金属はその流域に強く依存すること、下水汚泥炭化物の燃料としての規格に JIS Z 7312: 2014 下水汚泥固形燃料において重金属含有量等も選択的項目として示されており、懸念があるものについては事前に排除されると想定された。そのため重金属に関する検討は省略した。

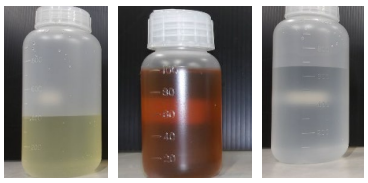
表-1　炭化物の特性

	炭化物 A	炭化物 B	炭化物 C
炭化温度	低温	低温	中温
形状	ペレット	ペレット	粉体
大きさ	長さ 約 1cm	長さ 約 1cm	数μm～ 数十μm

3.2　実験方法

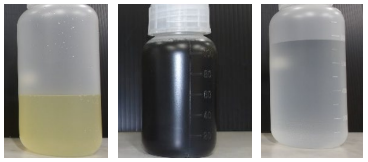
実験に用いた炭化物は、低温炭化を実施している下水処理場（A,B の 2 か所）及び中温炭化を実施している下水処理場（C の 1 か所）から提供を受けた。以下、それぞれの炭化物を炭化物 A,B,C と呼ぶ。各炭化物の特性を**表-1** に示す。

溶出試験は、1L のポリ瓶に、炭化物 100g-dry、炭化物中の水分と超純水を合わせて 1000g 分取して密封した。その後、20℃に設定したインキュベーターに静置し、溶出試験を行った。試験開始から 1,2,3 週間後の試料について、それぞれの上澄みを 1μm の濾紙でろ過し、得られたろ液を下水試験方法 [5]に準じて生物化学的酸素要求量（BOD）の測定を行った。BOD は溶存酸素の存在の下で水中の分解可能な物質が生物化学的に安定化するために要求する酸素の量 [5]であり、その値が高ければ水中に微生物が分解できる有機物が多く含まれていることを示している。



炭化物 A　炭化物 B　炭化物 C

写真-1　1 週間水浸後ろ液の変化



炭化物 A　炭化物 B　炭化物 C

写真-2　3 週間水浸後ろ液の変化

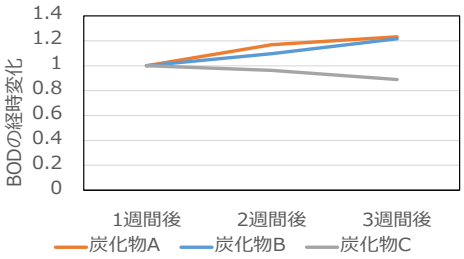


図-2　水浸による BOD の経時変化
（各 1 週間後を 1 とした）

3.3　結果と考察

実験後の試験体の色のろ液の変化を**写真-1、2** に示す。特に炭化物 B のろ液は茶褐色が徐々に濃くなる傾向が確認された。炭化物 A のろ液は 1 週間後から淡黄色を示し、炭化物 C のろ液は無色透明であった。

浸漬 1 週間後のろ液の BOD は A が約 350mg/L、B が約 2500mg/L、C が約 3 mg/L とその値は大きく異なった。それぞれの浸漬 1 週間後の BOD を 1 とした場合の経時変化を**図-2** に示すが、低温炭化の A と B については、時間が経過とともに濃度が大きくなり、一定程度有機物が増加することが確認された。一方で、C については減少傾向が見られた。初期値が小さく、ばらつきの可能性もあるが、C からの浸出する有機物量はこれ以上大きくならないことが想定された。

特に、B の炭化物については、ポリ瓶を開封した際に腐卵臭を感知した。これは炭化汚泥中の有機物に含まれる硫黄成分が微生物によって分解し、硫化水素が生成した可能性が示唆された。

以上から、有機物の多い低温炭化物については、地下水を含めた周辺の水環境に影響する可能性があるため、土木材料としての適用が難しいことが明らかとなった。

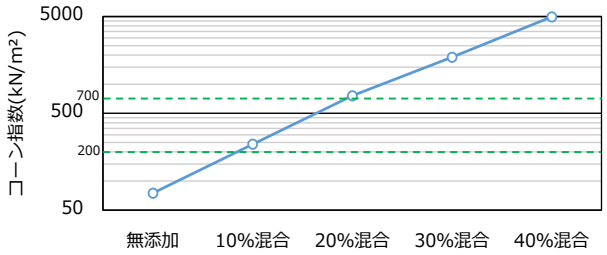


図-3　炭化物の混合割合とコーン指数の関係

4.　地盤改良材としての中温炭化物の活用可能性検討

4.1　目的

3. で相対的に地下水汚染の可能性が低いことが確認できた中温炭化物を対象に、土木材料としての可能性を検討した。ここでは建設発生土の含水率調整資材としての利用を想定し、コーン指数による評価を行った。なお、炭化物自体は化学的な反応が期待できず、発生土の含水比を低下させる効果のみが期待される。

4.2　実験方法

土木研究所構内で採取した粘性土に加水し、非常に柔らかい粘性土を作製した。この柔らかい粘性土に対して炭化物 C を粘性土の乾燥重量に対して 10～40%混合し、JIS A 1228 : 2020 締固めた土のコーン指数試験方法に準じた供試体作成及びコーン指数の測定を実施した。コーン指数は供試体作製の翌日に測定した。

4.3　結果と考察

コーン指数試験の結果を**図-3** に示す。無添加の粘性土のコーン指数は 75kN/m^2 であり、建設発生土の区分としては泥土に該当する試料であった [6]。この粘性土に炭化物の混合割合を増加させるとコーン指数は上昇し、10%混合条件では超湿地ブルドーザーが走行可能な 200kN/m^2 を超える 240 kN/m^2、20%混合条件では普通ブルドーザーが走行可能な 700kN/m^2 を超える 760 kN/m^2 となった [7]。以上から、例えば良好な基礎地盤上で、水の侵入が生じない条件で構築する盛土等への利用の可能性が考えられた。ただし、盛土等への適用には、材料の圧縮特性やせん断力に対する安定性について別途詳細な検証が必要である。また、**表-1** で示したように炭化物 C の粒径は概ね数 μm～数十 μm であったが、これはシルトと同等であった。そのため、粘性土と混合しても透水性の改善などの効果は軽微であると考えられる。実際に適用可能な条件を明確化するには、中温炭化物を混合した土の力学特性について引き続き検討が必要である。

5. 温室効果ガスに関する試算

5.1 目的

炭化物を作成して土木材料として使用しても、炭化物の製造や施工等の貯留事業を実施に伴って発生する温室効果ガスが、炭化物によって貯留しうる能力以上排出されると事業実施の意義が失われる。そこできわめてラフな温室効果ガスの試算を行った。

5.2 手法（試算条件）

4. での検討で、炭化物を 20%以上添加することによりコーン指数が 400 kN/m^2 を超え、第 3 種建設発生土相当とみなすことができる結果となった。そこで残土処理を目的とした、良好な基礎地盤上で、周辺からの水の供給がない条件での盛土工に適用する場合を仮定し試算を行った。

試算は、4. で対象とした非常に柔らかい粘性土に対して炭化物 C を 20%添加した混合土を、1m^3 盛土する場合を考えた。この時の混合土の最大乾燥密度$\rho_{d\max}$は、突固めによる土の締固め試験（JIS A 1210：2020）から、0.99Mg/m^3 であった。盛土の締固め度は$\rho_{d\max}$の 90%を仮定した。盛土工で発生する二酸化炭素排出原単位は、参考文献 [8]から道路土工の路体（築堤）盛土 1.2kg-CO_2/m$_3$ を採用した。下水汚泥炭化物の製造にあたっては、参考文献 [9]から中温炭化の原単位 216kg-CO_2/t と焼却の原単位 390kg-CO_2/t を採用した。また炭化物 C に含まれる炭素は約 46%であり、すべて炭素固定化に寄与するものと仮定した。炭化物 C の乾燥重量は、元の脱水汚泥の 1/10 と仮定した。

5.3 結果

90%の締固め度を仮定しているため、土の密度は 0.89Mg/m^3 となった。そのため 1m^3 の盛土を構築するためには 890kg-dry の混合土が必要となった。このとき炭化物の添加率は 20%なので約 150kg の炭化物が必要となった。すなわち、二酸化炭素換算では、約 250kg-CO_2 が固定化される計算となった。

一方炭化物 150kg を作成するのに約 320kg-CO_2 が、盛土工で路体（築堤）盛土の整備で 1.2kg-CO_2 が発生する計算となった。現状ではカーボンネガティブは達成できない試算となったが、同量の脱水汚泥を焼却すると約 590kg-CO_2 発生することから、二酸化炭素排出量の大幅な削減が期待される試算結果となった。ただし、本試算では、運搬や混合に関する項目が含まれておらず、さらなる検討が必要である。

6. まとめ

本研究では、CO_2 固定手法の一つとして土木材料として下水汚泥炭化物を利用することを想定して実施した種々の実験の結果、以下のことが明らかとなった。

1) 消化汚泥を炭化した場合、有機物の分解特性からバイオ炭としての炭素固定能力は植物よりも低い可能性が示唆された。
2) 中温炭化物は水中で易分解有機物の溶出がわずかであり、地下水に与える影響は相対的に軽微と示唆された。
3) 炭化物を非常に柔らかい粘性土に混合した結果、コーン指数は改善した。
4) 残土処理を目的とした盛土工を想定し、温室効果ガスの概算を行った結果、二酸化炭素排出量の大幅な削減が期待される試算結果となった。

謝辞

本研究の実施にあたっては公共団体の皆様から試料提供をいただいた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

1) 横浜市 HP:横浜市下水道中期経営計画 2022-2025 https://www.city.yokohama.lg.jp/kurashi/machizukuri-kankyo/kasen-gesuido/gesuido/keiei/chukikeiei/gesuityuuki2022.files/keikaku_print_r1.pdf
2) 国土交通省 HP：下水汚泥固形燃料化施設（令和３年度末） https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewerage/content/001626427.pdf
3) Ｊ－クレジット制度事務局 HP:農業系プロジェクトの概要について ～バイオ炭方法論～ 2023 年 11 月 https://japancredit.go.jp/data/pdf/mv_nogyo_tougouban.pdf
4) Lee et al. : Fuel characteristics of sewage sludge using thermal treatment, Journal of Material Cycles and Waste Management, Vol.21, pp.766–773, 2019
5) (社)日本下水道協会：下水試験方法　上巻、p.270、2012
6) 国土交通省：発生土の利用基準について、平成 18 年 8 月 10 日(国官技第 112 号国官総第 309 号国営計第 59 号)
7) (社)日本道路協会:道路土工要綱　平成 21 年度版 p.287
8) 国土技術政策総合研究所：社会資本のライフサイクルを通した二酸化炭素排出量の算出の手引き（案）、p.2-14、H31.4
9) 国土技術政策総合研究所 HP：炭化による CO_2 固定量の概算 https://www.nilim.go.jp/lab/eag/pdf/20211126_i_yamamura.pdf

BASIC RESEARCH ON CO_2 SEQUESTRATION USING CARBONIZED SEWAGE SLUDGE

Research Period: FY2024-2026
Research Team: Materials and Resources Research Group
Author: ABE Chika
OKAYASU Yuji
MIYAMOTO Toyohisa

Abstract: Wastewater treatment plants inevitably consume large amounts of electricity to operate pumps and blowers. Carbon-negative initiatives are therefore critical for achieving carbon neutrality. In the agricultural sector, ongoing efforts seek to apply biochar to farmland for carbon sequestration. Drawing on this approach, we used carbonized sewage sludge as a civil engineering material for carbon sequestration and performed thermogravimetric analysis, leachate tests, and soil tests. The results indicated that when digested sludge is carbonized, its carbon fixation capacity as biochar may be lower than that of plant-derived biochar. Dry carbonization at approximately 400°C produced minimal leachate of easily decomposable organic matter into water, and its impact on groundwater was relatively small. Mixing carbonized sludge with very soft clay improved the cone index. Preliminary calculations of greenhouse gas emissions during embankment construction indicated that a considerable reduction in carbon dioxide emissions can be expected compared with conventional methods.

Keywords: Carbonized sewage sludge, Thermogravimetric analysis, Leaching test, Cone Index, Greenhouse gas emissions

論文リスト

- **学術誌等による成果普及**

土研刊行物（計１本）

f-1）土木研究所資料：令和 5 年度下水道関係調査研究年次報告書集、pp.25-28、2025