建設廃棄物の有効利用方法の検討

研究予算：運営費交付金
研究期間：令 4～令 5
担当チーム：材料資源研究グループ
研究担当者：岡安祐司、宮本豊尚

【要旨】
現在、建設廃棄物の約 95%は再生資材として利用されており、高い再資源化率を維持しているが、今後はリサイクルの質にも着目することが必要となっている。建設系副産物のより一層の有効利用に向け、①建設廃棄物の質に着目した再資源化可能性調査、②建設廃棄物中の資源物質の利用可能性調査を目的に研究を実施した。令和 4 年度は建設廃棄物の質として有機性の副産物について調査を行い、泥炭及び浄水発生土に着目した。特に浄水発生土については、ろ過方法だけでなく原水水質の影響を強く受けており、浄水場ごとに性状が大きく異なることが予想された。令和 5 年度は、消化汚泥を用いた泥炭及び浄水発生土の嫌気性消化試験を行い、特に藻類を主体とする浄水発生土については、メタンとしてエネルギーを回収できる可能性が示唆された。

キーワード：建設廃棄物、有機物、泥炭、浄水発生土

1. はじめに

「建設副産物」とは、建設工事に伴い副次的に得られたすべての物品である [1]。建設廃棄物は、建設副産物のうち「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」（以下廃掃法）第 2 条 1 項に規定する廃棄物に該当するものであり [1]、建設発生土等を除いたものが該当する [2]。建設廃棄物は、ごく少量の工事事務所から排出される図面や生ごみ等の一般廃棄物と工事現場から排出されるコンクリート殻等の産業廃棄物に分かれる [2]。

廃掃法が 1970 年に公布されて 50 年が経過した。廃棄物全体をみると、家庭等から排出される一般廃棄物は、2000 年度以降減少傾向が続き、2008 年度には、5,000 万トンを下回った。以降、微減あるいは横ばいの傾向が続き、2017 年度時点で約 4,300 万トンとなっている [3]。一方で、企業の事業活動に伴い発生する産業廃棄物をみると、1990 年度以降はほぼ横ばいとなっているが、その総量は 4 億トン前後と、一般廃棄物の 10 倍程度となっている [4]。

産業廃棄物の発生量に占める各カテゴリの割合は図-1 に示すとおりであった。令和元年度は、汚泥が約 1.7 億 t/年と全体の約半分（約 45%）を占め、特に下水汚泥が約 8 千万 t/年と全体の約 20%を占めていた [5]。そのほか国土交通省の所管する事業に関連する廃棄物としては、令和元年度の統計によると、建設業に由来するがれき類（約 6 千万 t/年：全体の約 15%）や汚泥（約 1 千万 t/年：全体の約 3%）があった [5]。また、廃棄物

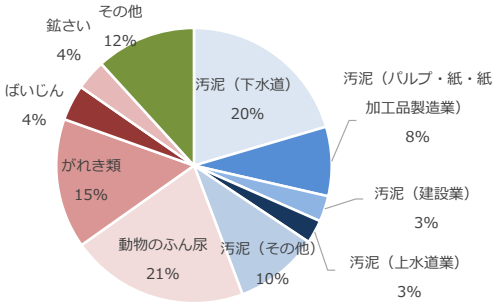


図-1　産業廃棄物発生量に占める割合（令和元年度）[5]

とされていないが建設発生土についても平成 30 年度の調査から約 3 億 m^3 発生していた [6]。

これまでに建設副産物のリサイクルは着実に取り組みが実施され、例えば建設廃棄物のリサイクル率は令和 2 年度には 97%に達しており、今後はリサイクルの質の向上が重要な視点とされている [7]。建設副産物の多くは無機物であることから、建設分野での再利用が多くなっている。

そこで本研究では、建設廃棄物のより一層の有効利用に向け、①建設廃棄物の質に着目した再資源化可能性調査、②建設廃棄物中の資源物質の利用可能性調査を目標に研究を実施した。令和 4 年度は建設副産物を含む国土交通省の所管する事業から発生する副産物のより一層の有効利用に向けて、これまであまり着目されていない有機物を含む資材について検討を行うこととした。本検討では有機性資材のうち、特に下水処理場の消化槽で混合嫌気性消化が可能かという観点で整

理を行うこととした。下水処理場からの観点では、混合嫌気性消化の対象基質について、新たな資材の適用性評価を行うことになる。

また、本研究に関連した社会情勢として、令和 5 年 5 月に「生活衛生等関係行政の機能強化のための関係法律の整備に関する法律」が国会で成立・公布され、上水道事業に関する事務の一部が国土交通省に移管されることとなった [8]。上水道事業由来の汚泥（以下浄水発生土）も約 1 千万 t/年（全体の約 3%）発生しており [5]、上下水道一体化に合わせ、下水道汚泥と浄水発生土の一体的な活用についても検討が求められている。

2. 建設廃棄物等からの有機性廃棄物等の抽出

有機性の建設廃棄物としては、アスファルト・コンクリート塊、建設発生汚泥の一部、建設混合廃棄物の一部、建設発生木材、廃プラスチックが存在する。このうち、下水処理場での混合メタン発酵の資材として供するためには、微生物の作用により分解すること、あらかじめ細かく破砕されており配管閉塞等の問題を生じないことが求められる。

以上を踏まえて、建設発生土の一部である泥炭と、浄水発生土について、基礎的な情報について文献収集を行った。

2.1 泥炭

2.1.1 発生メカニズム

泥炭は、植物遺体が分解不十分な状態で堆積した有機質土壌である [9]。その多くは分解が進みにくい冷涼な地域に分布するが、熱帯でも水のたまりやすいところに分布している [9]。植物の成長と分解の過程で、分解よりも成長が上回った場合に植物遺体が堆積し泥炭となる [9]。泥炭は長い年月により生成するが、年平均 1-2mm 程度ずつ蓄積するといわれている [10]。特に北海道においては、平野部面積のうち約 6%が泥炭で覆われている [11]。

2.1.2 発生メカニズム

泥炭は、多量の水を含み、大きな間隙に含まれた水は小さな力を加えるだけで排水される。そのためそのままでは盛土材料として使用できない材料である [12]。泥炭を処分する場合、泥炭は汚泥に分類されることから管理型最終処分場で処分しなければならず、その費用は安くないとされる [13]。

泥炭を土木材料として有効利用できれば、処分費の低減等の工事に要するコストを縮減でき、かつ、資源の有効活用や環境への負担の軽減となる。泥炭の地盤改良技術の方法として、圧密を促進させる方法や固化材により改良する方法等がある [14),15)]。また、微生物による泥炭固化に関する研究も実施されている [16]。堤防の盛土材以外にも、法面保護材や防雪林の基盤材への適応について検討がなされている [17]。

また、大深度地下圏でのバイオメタン鉱床造成/生産法の開発に向けた検討が行われている [18]。これは泥炭や褐炭の現地盤において、難分解物質を過酸化水素により分解して有機酸を生成させ、微生物の力によりメタンを生成・回収することを目指している。荒牧らの研究では、泥炭間隙水の分析の結果、酢酸やギ酸等の揮発性脂肪酸が 10mg/L オーダーで確認されていた [19]。

2.1.3 利用に当たっての課題

一般的にヒ素は腐植土・泥炭などの有機物層に濃縮されることも知られており、例えば札幌市においても泥炭中のヒ素含有量は高いことが報告されている [20]。利用に当たっては含有量の確認が必要となる。

2.2 浄水発生土

2.2.1 発生メカニズムとろ過手法別の特性

浄水場において、取水した原水から水道水をつくる過程で取り除かれた河川中の濁り（土砂）や浄水処理に用いられた薬品類などの沈殿物を集めて脱水処理したものが浄水発生土である [21]。浄水発生土は、当然取水した原水の水質に影響されるほか、浄水場のろ過プロセス（急速ろ過と緩速ろ過、膜ろ過の 3 種類）に影響され、その性状は異なる。このうち緩速ろ過については比較的水質が良好な原水に適する方法であり [22]、膜ろ過については懸濁物質以外の溶存性物質があまり含まれていないような原水に適する方法 [23]である。そのため、図-2 に示すように原水の蒸発残留物（TS）が

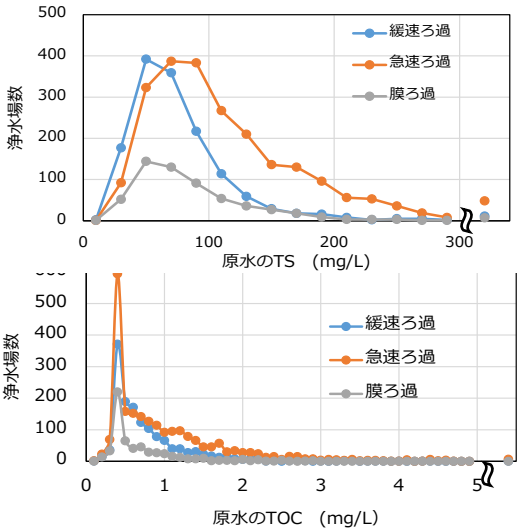


図-2 ろ過方法別原水の水質と浄水場数 [24]

（上：TS 下：TOC）

※同一浄水場で複数のろ過方法が採用されている場合はそれぞれ計上
※同一処理場で複数の原水を使用している場合もすべて計上

高ければ急速ろ過が採用される傾向がみられる。浄水処理では TS を除去するため、必然的に浄水発生土は急速ろ過の浄水場で多く発生していると想定される。原水の有機性炭素（TOC）は、いずれのろ過方式も 0.4mg/L が最頻値となっているが、1.0mg/L を超える原水を用いている浄水場は急速ろ過の採用率が高くなっている。以上から急速ろ過を採用している浄水場の一部では有機物が多い浄水発生土が存在している可能性が示唆された。

2.2.2 発生量・現状の有効利用方法

（公社）日本水道協会によると、令和 2 年度に全国で発生した上水道・水道用水供給事業由来の浄水発生土は、乾燥重量で 360 千 t-DS/年であった[25]。そのうち約 3 割となる 116 千 t-DS/年が埋め立てに、約 6 割の 223 千 t-DS/年が有効利用されていた[25]。特に近畿臨海地区（大阪・兵庫・和歌山）では発生量の約 95%が埋め立て処理されている一方で、東海地区（岐阜、静岡、愛知、三重）、山陽地区（岡山、広島、山口）、沖縄では 90%以上が有効利用されていた[25]。

有効利用用途の例としては、園芸用土やグラウンド材、粒状改良土などがある[21]が、園芸用土を除くとその多くは無機物の利用を想定したものであった。

2.2.3 浄水発生土の分析例

一般に公開されている浄水発生土の分析結果や、文献での調査結果を整理した。調査した範囲では、含水率は約 10%[26]～約 60%[27]と大きく差が生じていた。強熱減量については情報が少なかったが、全炭素については表-1 に示す結果となった。浄水発生土の化学的特性は原水に依存することが想定されるが、調査した範囲では発生土固形物中の約 1～20%程度と大きな差がみられた。重金属類については、金属等を含む産業廃棄物に係る浄水発生土判定基準を定める省令の別表第一の基準や農用地の環境基準との比較を行い、基準を満足している結果を示すことで安全性を示す事例が確認された[26),28),30),31)]。

表-1 浄水発生土中の全炭素測定例[27),28),29)]

区分	団体名	浄水場	全炭素
浄水	埼玉県	柿木	48 g/kg
浄水	兵庫県	神出	169 g/kg
工業用水	愛媛県	松山	42 g/kg
工業用水	愛媛県	西条	16 g/kg
工業用水	愛媛県	今治	53 g/kg

3. 下水汚泥との混合嫌気性消化に関する基礎的検討

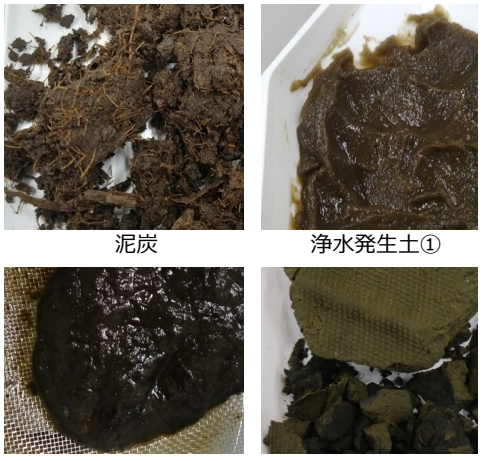
2. の結果を踏まえ、1 種類の泥炭と 3 種類の浄水発生土をサンプリングし、下水汚泥との混合嫌気性消化が実施可能か、基礎的な検討を試みた。

3.1 採取試料とその組成

実験に用いた試料は、寒冷地の A 市の下水道工事で発生した泥炭、B 市の緩速ろ過処理方式の緩速ろ過池に発生していた藻類（珪藻）、急速ろ過方式の浄水場で発生した浄水発生土①及び有機物負荷の高い湖沼を原水とする急速ろ過方式の C 市の浄水発生土②の 4 種類を用いた。採取した試料の写真を図-3 に示す。

表-2 に TS と VS の分析結果を示す。測定は下水試験法により実施した。浄水発生土①については、部位によって TS が大きく異なる傾向がみられた。これは浄水発生土の製造にあたり、天日乾燥を採用しているため、太陽光に照射される外側と発生土の塊の内部では乾燥速度が大きく異なることが影響していると考えられる。

VS/TS の値を見ると、泥炭が最も有機物の割合が高く約半分を占めていた。珪藻や浄水発生土は約 2～4 割程度であった。



泥炭　浄水発生土①

緩速ろ過池の珪藻　浄水発生土②

図-3 実験で使用した試料
（なお浄水発生土①は加水後の試料）

表-2 各試料の TS と VS の測定結果

	TS		VS		VS/TS	
	%		%		%	
泥炭	27.2		14.8		54.3	
緩速ろ過池珪藻	10.6		3.3		31.3	
浄水発生土①	8.4	62.6	2.1	21.1	24.8	33.8
浄水発生土②	29.1		12.4		42.5	

※ 浄水発生土①のTS、VS、VS/TSについては、乾燥が不十分な箇所とよく乾燥した箇所の、2か所の測定結果を示している。

表-3　珪藻及び浄水発生土の元素分析結果

	C	N	P	Si
	w/w%-dry	w/w%-dry	w/w%-dry	w/w%-dry
緩速ろ過池珪藻	15.48	2.73	0.197	25.2
浄水発生土①	3.91	0.78	0.183	11.8
浄水発生土②	17.77	2.85	0.332	14.4

また、珪藻及び浄水発生土の組成を表-3 に示す。CHN については CHN 計で、P については硝酸分解後に ICP 発光分光分析装置により、Si については重量法により実施した。

珪藻の組成は、C、N、P、Si の mol 比率が C:N:P:Si=106:16:0.52:74 となった。珪藻の元素比（レッドフィールド比）は C:N:P:Si＝106:16:1:15 とされる[32]が、本藻類は、P が欠乏気味かつ Si が多く含まれている試料であると考えられた。急速ろ過の処理場で採取した浄水発生土①は、有機物の低い表流水を原水としている。TS は、天日乾燥床で脱水しているため、サンプリングの場所でばらつきが大きくなった。C の含有量は約 4%-DS と他の発生土と比べて少なく、メタンとしての回収はあまり期待できないと考えられた。同じく急速ろ過の処理場で採取した浄水発生土②は、有機物負荷の高い湖沼を水源としており、原水の影響を受け緑色をしていた。フィルタープレスで脱水を行っており、TS は、約 30%であった。C の含有量は約 18%-DS と緩速ろ過の藻類とほぼ同程度の含有であった。C、N、P の mol 比率は N＝16 で固定すると C:N:P＝116:16:0.84 となり、レッドフィールド比とよく類似した比率となった。このことからも、浄水発生土②は藻類の影響を強く受けていることが確認された。

また、炭素の測定結果は、表-1 の文献値と比較して、概ね同等の結果であった。

3.2　消化汚泥を用いた採取試料の分解特性の把握

採取試料の消化汚泥による分解特性を把握するため簡易な回分試験を実施した。試験は、分取した採取試料を VS 比で消化汚泥の 1/10 となるように消化汚泥と混合し、密閉瓶（500mL）に封入した（使用した消化汚泥の VS は 0.87%）。その後、35℃加温条件で 28 日間、液相については攪拌しつつ反応を進めた。実験前後に混合汚泥の CODCr（HACH：東亜ディーケーケー社）を測定し、その変化を確認した。

各試料と消化汚泥の混合液について、28 日後の CODCr の分解状況を表-4 に示す。各基質の単独での分解率は、$1-\frac{\text{混合液の COD(消化後)}-\text{消化汚泥単独 COD(消化後)}}{\text{混合液中の各基質の COD(消化前)}}$で求めた（消化汚泥単独の実験系も比較のため計算を実施）。

表-4　混合液と基質の CODcr 分解率

	混合液の分解率	基質単独での分解率
消化汚泥	0.16	0.16
泥炭	0.08	-0.73
緩速ろ過藻類	0.15	0.13
浄水発生土①	0.11	-0.60
浄水発生土②	0.17	0.22

消化汚泥単独では COD が約 16%分解した。泥炭と浄水発生土①では、混合液の分解率が消化汚泥単独の系よりも低く、消化汚泥内の有機物の分解が阻害された可能性が考えられた。分解が最も進んだのは、藻類が主成分と推定される有機物負荷の高い原水を用いた浄水発生土②であった。このような発生土については、下水処理場における混合嫌気性消化の実現可能性が示唆された。

3.3　浄水発生土②と下水汚泥との混合嫌気性消化

3.2 の結果、最も CODCr 分解率が高かった有機物負荷の高い湖沼を水源とする浄水発生土②を対象に、混合嫌気性消化試験を行った。試験に用いた消化汚泥は 3.2 で使用した消化汚泥と同じ処理場で採取したが、採取時期が異なり、消化温度は約 30℃で運転されていた。発生した消化ガスは、水酸化ナトリウム溶液を通過させて、二酸化炭素や硫化水素などを除去したガスを収集した。このガスは主にメタンと想定され、回収されたガス量を発生メタンガス量とした。

消化汚泥に添加した基質は浄水発生土及び分流式下水道の濃縮汚泥（初沈汚泥のみを重力濃縮したもの）であり、表-5 に示す配合で混合し、3L の三角フラスコに 2.5L ずつ混合液を封入した。これを 35℃に維持しつつ、回分式でメタンガスの発生が概ね停止したと考えられた約 1 カ月（34 日間）にわたり試験を行った。

表-5　混合嫌気性消化試験液の配合（2.5L あたり）

	消化汚泥	濃縮濃縮	浄水発生土②	水
Case1	2.25L(17g-VS)	–	–	250g
Case2	2.25L(17g-VS)	89g(1.7g-VS)	–	161g
Case3	2.25L(17g-VS)	89g(1.7g-VS)	40g(0.85g-VS)	122g
Case4	2.25L(17g-VS)	89g(1.7g-VS)	79g(1.7g-VS)	82g

実験前後で TS、VS（いずれも下水試験法による）、TP(ペルオキソ二硫酸カリウムによる分解後、モリブデン青法による)、PO_4-P(1.0 μ m のろ紙でろ過後、モリブデン青法による)を測定したほか、実験期間内の総発生メタンガス量を測定した。実験系は N=3 で実施し、解析にはその平均値を用いた。ただし、Case3 の一つの実験系ではメタンガスの捕集が適切に実施できていなかったため、メタンガス量については当該系を除いた

2 つの実験系の平均値を採用した。

基質ごとの VS 分解率を表-6 に、メタン転換率を表-7 に示す。浄水発生土②についてはいずれも VS が減少しており、嫌気環境で浄水発生土②が分解している

表-6　VS 分解率

基質	各基質のVS量の計算方法 (液量は2.5L)	VS分解率
消化汚泥単独	VS濃度(Case1)×液量	19%
濃縮汚泥	VS濃度の差分(Case2-Case1)×液量	62%
浄水発生土②（5%）	VS濃度の差分(Case3-Case2)×液量	68%
浄水発生土②(10%)	VS濃度の差分(Case4-Case2)×液量	51%

※　VS分解率は、各基質について　1-(実験後のVS量)÷(実験前のVS量)で求めた。

表-7　VS あたりのメタン転換率

(単位:NmL/VS-g)

基質	各基質のメタン発生量の計算方法	メタン転換率
消化汚泥単独	Case1のメタン発生量	669
濃縮汚泥	Case2とCase1のメタン発生量の差分	149
浄水発生土②（5%）	Case3とCase2のメタン発生量の差分	-37
浄水発生土②(10%)	Case4とCase2のメタン発生量の差分	758

※　メタン転換率は、各基質についてメタン発生量÷(VS量(実験前)-VS量(実験後))で求めた。

表-8　実験前後の P の挙動

(単位:mg/L)

	実験前		実験後	PO_4-Pの
	T-P	PO_4-P	PO_4-P	増分
Case1	263	104	122	17
Case2	271	109	140	32
Case3	280	94	121	27
Case4	292	80	102	22

ことが確認された。また、VS 分解率では濃縮汚泥と同程度の値となった。また、消化汚泥単独での VS 分解率及びメタン転換率の値が過去の実験結果 [33]（約 500NmL/VS-g）よりも大きくなったが、これは今回の試験に用いた消化汚泥には未消化の成分が多く含まれていたことが影響していたと予想された。このことも影響し、浄水発生土②のメタン転換率は、10%混合条件では約 760Nml/VS-g となったが、5%混合条件ではマイナスとなったと考えられる。ただし、Case3（メタンガス捕集が適切でなかった系を除く）のメタンガス発生量は Case2 を下回っており、浄水発生土の混合条件によっては、消化が阻害される可能性も否定できない。

続いて P の挙動を表-8 に示す。TP については、濃縮汚泥だけでなく浄水発生土を加えることで増加する傾向が確認された。試験前の PO_4-P については、濃縮汚泥のみを加えた Case2 に対し、浄水発生土を添加した Case3、4 では濃度が減少していた。これは浄水発生土内に含まれる未反応の PAC 等が消化汚泥や濃縮汚泥由来の PO_4-P と速やかに結合し、リン酸アルミニウムなどの形態に移行していると推察された。また、試験後の PO_4-P の増加量は、浄水発生土の添加量が多いほど少なくなる傾向がみられた。

4. おわりに

建設系副産物のより一層の有効利用に向け、有機性の副産物として泥炭及び浄水発生土に着目し、基本的な情報を整理した。特に浄水発生土については、ろ過方法だけでなく原水水質の影響を強く受け、浄水場ごとに性状が大きく異なることが予想された。また、消化汚泥を用いた泥炭及び浄水発生土の嫌気性消化試験を行った結果、特に藻類を主体とする浄水発生土については、メタンとしてエネルギーを回収できる可能性が示唆された。

本技術は、消化汚泥の脱水ろ液中の P 濃度が低下はすることが見込まれるため、P に関する放流水質の規制が厳しい下水処理場における嫌気性消化の導入促進の一助となる可能性を有する技術と考える。実装にあたっては、浄水発生土の季節変動や地域特性を把握するほか、消化阻害の発生メカニズム解明が求められる。

参考文献

1) 国土交通省 HP：建設副産物の定義 https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/region/recycle/d01about/d0101/page_010201byproduct.htm (2024.5.7 閲覧)
2) 国土交通省：建設リサイクル推進計画 2020～「質」を重視するリサイクルへ～、p.1、2020 https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001365044.pdf (2024.5.7 閲覧)
3) 環境省：令和元年版　環境白書・循環型白書・生物多様性白書、p.176、2019、https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/r01/pdf/full.pdf (2024.5.7 閲覧)
4) 国土交通省：建設リサイクル推進計画 2020～「質」を重視するリサイクルへ～、p.1、2020 https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001365044.pdf (2024.5.7 閲覧)
5) 環境省環境再生・資源循環局廃棄物規制課：令和３年度事業 産業廃棄物排出・処理状況調査報告書 令和２年度実績,p.29,2021
6) 国土交通省：建設リサイクル推進計画 2020～「質」を重視するリサイクルへ～、p.12、2020 https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001365044.pdf (2024.5.7 閲覧)

7) 国土交通省：建設リサイクル推進計画 2020～「質」を重視するリサイクルへ～、p.2、2020 https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001365044.pdf (2024.5.7 閲覧)
8) 厚生労働省：生活衛生等関係行政の機能強化のための関係法律の整備に関する法律案の概要 https://www.mhlw.go.jp/content/001067044.pdf (2024.5.7 閲覧)
9) 資源保全チーム：泥炭農地の整備と課題について、寒地土木研究所月報、No.777、p.32-34、2018
10) 粕渕辰昭、宮地直道、神山和則：美唄湿原の保全と周辺農用地の管理、農業土木学会誌、第 63 巻、第 3 号、pp.19-24、1995
11) 能登繁幸：泥炭地盤工学、pp. 4-7、 技報堂出版、1991..
12) 土木研究所：建設発生土利用技術マニュアル第 4 版、2013
13) 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所、公立大学法人富山県立大学大学院：微生物による泥炭固化に関する研究共同研究報告書、p.3、2021、https://www.icharm.pwri.go.jp/jpn/results/db/doken_kankoubutu/kyoudoukenkyu_houkokusyo/files/doken_kyoudoukenkyu_0539_00.pdf (2024.5.7 閲覧)
14) 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所：泥炭性軟弱地盤対策工マニュアル、pp.81-93、2017
15) 土木研究所寒地土木研究所寒地地盤チーム：北海道における不良土対策マニュアル、 pp.38-49、2013
16) 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所、公立大学法人富山県立大学大学院：微生物による泥炭固化に関する研究共同研究報告書、p.1、2021、https://www.icharm.pwri.go.jp/jpn/results/db/doken_kankoubutu/kyoudoukenkyu_houkokusyo/files/doken_kyoudoukenkyu_0539_00.pdf (2024.5.7 閲覧)
17) 梅木択弥、千葉隆広、佐藤厚子：道路工事において発生する泥炭の有効活用について－法面保護材や防雪林の基盤材、盛土材への利用－、第 61 回（平成 29 年度）北海道開発技術研究発表会、2018 https://thesis.ceri.go.jp/db/files/2666194615b3b00556ed09.pdf (2024.5.7 閲覧)
18) 荒牧憲隆、金子勝比古：バイオメタン生成に資する泥炭の有効利用に関する基礎的検討、地盤工学会 北海道支部技術報告集、第 56 号、p.187-194、2016
19) 荒牧憲隆、金子勝比古：建設発生土リサイクルにおける泥炭の有効利用に関する検討、土木学会第 71 回年次学術講演会 p.407-408、2016
20) 札幌市自然由来重金属検討委員会：札幌市における自然由来重金属を含む建設発生土の取扱いについて（答申）、p.3、2011
21) 東京都水道局 HP：浄水場発生土の有効利用 https://www.waterworks.metro.tokyo.lg.jp/suidojigyo/torikumi/kankyo/recycle.html (2024.5.7 閲覧)
22) 公益社団法人日本水道協会：水道施設設計指針 2012、p.240、2012
23) 公益社団法人日本水道協会：水道施設設計指針 2012、p.249、2012
24) 公益社団法人日本水道協会：水道統計「令和 2 年度」(第 103 号)、2022
25) 日本下水道協会水道統計編纂専門委員会：水道統計の経年分析（令和 2 年度）、水道協会雑誌、第 91 巻、第 8 号（第 1055 号）、pp.39-82、2022
26) 北見市 HP：浄水発生土の性状 https://www.city.kitami.lg.jp/common/img/content/content_20220502_161843.pdf (2024.5.7 閲覧)
27) 埼玉県 HP：浄水発生土の農業に関する成分分析について https://www.pref.saitama.lg.jp/documents/18213/r3hp-kakinoki.pdf (2024.5.7 閲覧)
28) 望月証、青山喜典、津高寿和、藤中邦則、桑名健夫：浄水発生土の理化学性並び多量施用が水稲の生育・収量に及ぼす影響、兵庫県立農林水産技術総合センター研究報告. 農業編、59 号、pp. 28-33、2011 https://agriknowledge.affrc.go.jp/RN/2010811467.pdf (2024.5.7 閲覧)
29) 横田仁子、大森誉紀：愛媛県内の浄水施設で排出される浄水ケーキの化学性と果菜類育苗培土への適用、愛媛県農林水産研究報告、第 4 号、p.1-7、2012 https://www.pref.ehime.jp/uploaded/attachment/26576.pdf (2024.5.7 閲覧)
30) 大阪市 HP: 浄水発生土の有効利用について https://www.city.osaka.lg.jp/suido/page/0000029184.html (2024.5.7 閲覧)
31) 岐阜県 HP：園芸用土に浄水発生土はいかがですか？ https://www.pref.gifu.lg.jp/uploaded/attachment/15902.pdf (2024.5.7 閲覧)
32) 原島省：海洋生態系におけるケイ藻とシリカの役割、環境バイオテクノロジー学会誌、Vol. 8、No. 1、pp.9-16、2008

33) 宮本豊尚、重村浩之、鈴木石根、浦野涼太：流入下水で培養した緑藻 *Monoraphidium* のメタン発酵特性、第 57 回下水道研究発表会講演集、pp. 211-213、2020