

汚泥肥料を農地に活用するための基礎的検討

ポット栽培試験による肥効効果の検討

マハズン ヤヒヤ^{*1}・屋祢下 亮^{*1}・高畑 陽^{*1}

Keywords: Sludge fertilizer, Soil analysis, Total nitrogen, ATP, Cultivation test

汚泥肥料, 土壌分析, 全窒素, ATP, 栽培試験

1. はじめに

国内の農地で利用する化成肥料は、ほぼ全量を輸入に頼っている。一方、世界的な穀物需要の増加や国際情勢の不安定な状況から、化成肥料の国際価格が上昇傾向にある^{1,2)}。そのため、我が国の肥料自給率の底上げは急務であり、その方策の 1 つとして、有機性廃棄物由来の肥料の活用が着目されている。このうち、下水汚泥やし尿などから作られる汚泥肥料は、原料をコンスタントに確保できる一方で、品質や安全性に不安があり、そのイメージの悪さから受け入れ先が少なく、活用が十分に進められていなかった。

当社は 2050 年に向けて、グループ長期環境目標「TAISEI Green Target 2050」を定めており、持続可能な「循環社会」の実現に向けて地域資源の活用と循環に取り組んでいる。この取り組みの 1 つとして、耕作放棄された水田を畑地として再生し、周辺地域で発生する有機性廃棄物を肥料として活用する技術の検討を開始している³⁾。

本報では、国内の下水汚泥やし尿の処理・リサイクル状況について概説するとともに、国内各所から収集した汚泥肥料の性状を調べ、製造方法の異なる汚泥肥料の施肥効果を栽培試験により確認した結果について述べる。

2. 国内の汚泥肥料の利用状況

令和 5 年度末時点で、下水道の普及率は 81.4%に達しており、下水の処理過程で発生する下水汚泥は乾燥重量で年間約 225 万トン（令和 3 年度）となっている⁴⁾。下水汚泥の項目別の発生汚泥量に対する各リサイク

ル方法の割合（有効利用率）の推移を図-1に示す⁵⁾。下水汚泥のリサイクル率は年々増加し、2010 年度には約 80%に到達した。2011 年度は東日本大震災の影響により 55%まで激減したが、現在は 78%まで回復している。下水汚泥の有効利用率は、建設素材への利用が約 50%と高く、緑農地利用（約 14%）、燃料化など（約 10%）となっている。緑農地利用は 2004 年度以降、約 14%と横ばいで推移している。下水汚泥には、窒素、リン、カリウムなど肥料成分が含まれており、2021 年度に化成肥料の価格が高騰したことから、下水汚泥を肥料として最大限の利用を進めることが国土交通省から通達されている⁶⁾。

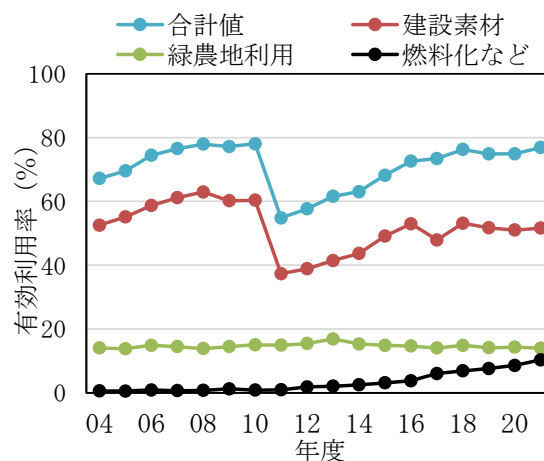


図-1 下水汚泥のリサイクル率と項目別の有効利用率の推移
Fig.1 Transition in recycle rate of sewage sludge and its effective utilization rate by category

国内に存在する約 2,000 箇所の下水処理関連施設のうち、約 1,000 箇所で下水汚泥の肥料化が実施されている。このうち、74 箇所（約 7%）が下水道管理者による肥料化、35 箇所（約 3%）が自治体による肥料化であり、

* 1 技術センター社会基盤技術研究部 環境研究室

これらは主に処理場内で実施されている。それ以外の 896 箇所（約 90%）は下水処理関連施設から処理施設に汚泥を搬出して行われており、その運営は民間企業が担っている⁷⁾。民間企業による肥料化が多い理由として、肥料化に限らず、汚泥処理全体の民間委託が増えていることや、汚泥肥料が普通肥料として使うための方策が進められたため、需要を見込んだ民間事業者の参入が進んだことが考えられる⁸⁾。

汚泥肥料の生産量を都道府県別でみると、静岡県、北海道、愛知県の順で多い（図-2）⁸⁾。これらの地域の特徴として、下水汚泥の発生量が多いだけでなく、肥料を作成する施設や肥料を使用する農地が多く存在することが挙げられる。一方、下水汚泥の発生量が多い東京都や神奈川県で汚泥肥料の生産量が少ない要因として、都市部では臭気等の影響で汚泥肥料が活用しにくいことや、下水汚泥の大部分が焼却処理されているためと考えられる。

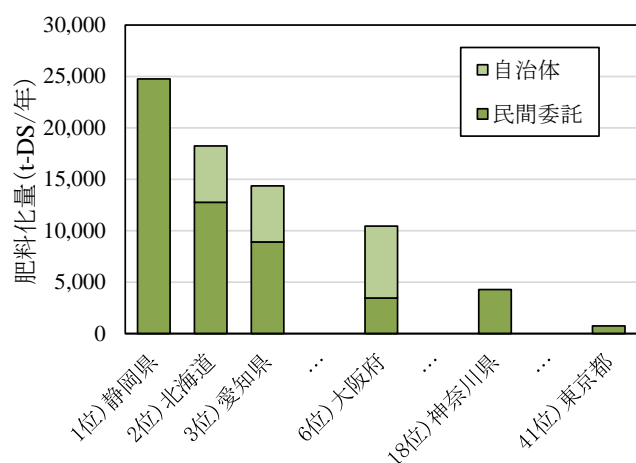


図-2 都道府県別の下水汚泥の肥料化量

Fig.2 Fertilized sewage sludge amount by prefecture

下水汚泥から工業的な手法でリン酸を化学肥料として抽出する方法として、濃縮汚泥の分離液を原料とするハイドロキシアパタイト法（HAP 法）⁹⁾、消化汚泥または脱水ろ液を原料とするストルバイト法（MAP 法）¹⁰⁾、焼却灰を原料とする灰アルカリ抽出法¹¹⁾などがある。近年では、微生物（菌体）由来のリン酸成分を含む汚泥資源を原料とする新たな公定規格の肥料（肥料成分を保証する普通肥料）である菌体リン酸肥料を 2023 年 10 月に農林水産省が創設している¹²⁾。

一方、令和 4 年における下水汚泥の緑農地利用の実績を表-1 に示す。この実績の多くは緑地に利用されていると考えられるが、大部分が汚泥をコンポスト化

（堆肥化）や乾燥されたものが用いられており、熔融スラグから製造されるリン酸や菌体リン酸肥料の割合はわずか 0.5%である⁷⁾。この要因として、これらの肥料は品質が保証されている一方で、価格が高いためと考えら、下水汚泥を肥料として安価に活用するには堆肥化が適していると考えられる。

表-1 下水汚泥の緑農地利用の実績（令和 4 年度）

Table 1 Utilization of sewage sludge in green farms (Fiscal Year 2022)

利用する汚泥の形状	利用乾燥量 (t-DS/年)	割合 (%)
コンポスト	256,697	80.2
乾燥汚泥	21,930	6.8
焼却灰	5,262	1.6
炭化汚泥	4,205	1.3
熔融スラグ※ ¹	1,536	0.5
その他※ ²	30,538	9.5
計	320,168	100.0

※¹ ほとんどがリン酸原料として利用されている

※² 主に脱水汚泥

下水汚泥の堆肥化には、密閉型強制発酵方式、開放型強制発酵方式と堆積型発酵方式の主に 3 つの方法がある。密閉型強制発酵方式は、断熱性を備えた密閉された発酵槽を使用し、強制通気や攪拌作業を行い、堆肥化させる方法であり、主に小規模な事業所で採用されている¹³⁾。開放型強制発酵方式は、堆肥化原料を開放系で定期的にスクープ式、ロータリー式、スクレーパー式¹⁴⁾などの方法で機械攪拌する方法であり、主に中規模な事業所で採用されている。堆積型発酵方式は、原料を地盤に盛り上げ、ショベルローターなどを用いて切り返しを行う方法であり、主に大規模な事業所で採用されている¹³⁾。

下水汚泥の堆肥化を行う場合には、病原菌や雑草種子の死滅、有機物の分解促進、臭気の低減、害虫の発生抑制のため、高温好気発酵により堆肥の温度を 60～80℃で少なくとも数日間保つ必要がある¹⁵⁾。好気性細菌による高温好気発酵を促すため、牛糞や生ごみなどの微生物に利用されやすい有機物を混合する場合や、竹チップやコーヒーかすなどを混合して通気性を高める場合がある¹⁶⁾。また、近年では、好熱性細菌を堆肥作成時に添加し、80℃を超える超高温好気発酵を可能とする技術が開発され実用化されている¹⁵⁾¹⁷⁾。

3. 汚泥肥料を用いる栽培試験

3.1 目的

前章でも述べたとおり、汚泥肥料は国内各地で生産され、その一部は農地でも使われているが、その製造方法や性状は様々ではない。一般的に農地等に流通して使用されている汚泥肥料については全リンや窒素全量などの情報が提供されており、農地で用いる場合には、農作物の三大栄養素である窒素、リン酸、カリウム（カリウム）の含有率や C/N 比等の情報が重要となる。しかしながら、汚泥肥料には無機栄養素以外の有機物あんの固形残渣などが含まれており、農作物の栽培に影響を与える可能性がある。

本章では、農地で肥料として使われている製造方法や副資材が異なる複数の汚泥肥料を収集してその性状を調べると共に、施肥条件を揃えて栽培試験を実施し、施肥効果を比較検討した結果について報告する。

3.2 試験方法

3.2.1 収集した汚泥肥料の性状確認

国内で製造され、農地に施用されている 7 種類の汚泥肥料を入手した（表-2）。収集した汚泥肥料は、汚泥原料（下水、し尿）、副資材の有無、乾燥もしくは発酵工程（高温好気発酵、超高温好気発酵）が異なるものを選定した。

汚泥肥料の入手後、表-2 の「分析値」に列挙した項目について測定を実施した。測定項目は、炭素全量（C）、窒素全量（N）、アンモニア態窒素、硝酸性窒素、リン酸全量、加里全量とした。C は肥料等有機物分析法¹⁸⁾の乾式燃焼法に基づいて分析した。その他の項目は肥料等試験法¹⁹⁾（N は燃焼法、アンモニア態窒素と

硝酸態窒素は蒸留法、リン酸全量はバナドモリブデン酸アンモニウム吸光光度法、加里全量はフレイム原子吸光法）に基づいて分析した。

3.2.2 汚泥肥料を用いる栽培試験

栽培試験に使用する土壌は、埼玉県北部の休耕田から採取し、風乾燥して均一にした。土壌約 200 g に対して、表-2 で示した汚泥肥料を土壌全窒素が 250mg-N/ポットになるようにそれぞれ添加して混合した。その後、ポット内の土壌に深さ約 2cm の穴を 4 か所空けてコマツナの種類を播種し、土を被せた。栽培期間中、土壌の表面が乾いたタイミングで適宜の水やりを実施し、最終的に 1 株残るように間引き、播種から 44 日後にコマツナを収穫した。

コマツナの栽培による土壌中の肥料成分量や微生物活性の変化を把握するため、試験前後のポット内の土壌を採取して分析した。土壌中のアンモニア態窒素、硝酸態窒素、可給態窒素量の分析は、農林水産省が提供する土壌分析法²⁰⁾に基づいて実施した。また、先行研究²¹⁾に基づき市販の ATP 測定キットを用いて土壌中の微生物活性を評価した。土壌 1g を蒸留水 100mL に加え、市販のミキサーを用いて 1 分間混合した後、懸濁液をルシパック Pen-AQUA（キッコーマンバイオケミファ株式会社）に添加し、一定時間反応後にルミテスター PD-30（キッコーマンバイオケミファ株式会社）で ATP 値（RLU 値）を測定した。

3.3 試験結果

3.3.1 汚泥肥料の性状

収集した汚泥肥料を測定した結果、窒素全量は公開情報と筆者らが調べた測定値が概ね同じ値を示したが、超高温好気発酵で作成された肥料は公開情報の値が低

表-2 汚泥肥料の成分分析値（乾燥物あたり）
Table 2 Analyzed chemical composition values of sludge fertilizers (Dried value)

番号	主成分	工程	副資材	公開情報				分析値						
				C/N比	窒素全量	リン酸全量	加里全量	C/N比	炭素全量	窒素全量	アンモニア態窒素	硝酸態窒素	リン酸全量	加里全量
				(-)	(%)	(%)	(%)	(-)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%) as P2O5	(%) as K2O
A	下水	乾燥	無	5~9	5~6	3~5	0.2	6	42.9	6.9	0.5	<0.1	6.7	0.2
B	し尿	発酵	無	—※2	5.8	9.5	0.3	6	34.0	5.6	1.7	<0.1	7.8	0.3
C	下水	発酵	無	—※2	—※2	—※2	—※2	8	42.2	5.3	1.7	<0.1	5.4	0.4
D	し尿	乾燥	生ごみ	6	6.7	6.4	<0.5	7	45.0	6.5	0.6	<0.1	4.0	0.2
E	下水	発酵※1	有機性廃棄物	7	2.7	3.6	0.2	6	22.4	4.0	0.9	<0.1	8.2	1.1
F	下水	発酵※1	牛糞等	4	3.8	6.5	<0.5	6	29.2	4.9	1.4	<0.1	7.6	0.8
G	下水	乾燥	生ごみ、コーヒークス	10	6.0	4.3	0.2	8	45.6	6.0	0.8	<0.1	5.0	0.2

※1：超高温好気発酵，※2：情報なし

かった(図-3)。C/N 比, リン酸全量, 可里全量についても, 汚泥肥料によっては両者の値に差が生じる場合があった。この要因として, 汚泥肥料の原料となる下水汚泥の品質や製造過程における堆肥化条件などは常に変化するため, 最終的な汚泥肥料の品質は常に一定ではなく, 公開情報と異なる場合があることが示された。一方, すべての汚泥肥料で C/N 比は 10 以下と低く, 今回選定した全ての肥料は有機物分解が十分に進んだ完熟堆肥であると考えられ, 肥料効果が期待できる²²⁾。リン酸全量はすべての汚泥肥料で 1% 以上存在し, 農林水産省が家畜糞入り堆肥として推奨する値より高かったが, カリウムはほぼ全ての肥料において 1% 以下と推奨値より低かった²³⁾。また, 汚泥肥料に硝酸態窒素はほとんど含まれておらず, 窒素全量に対するアンモニア態窒素の比率は 7~35% であった。したがって, 汚泥肥料に含まれる窒素の多くは作物に直接利用されない形態であり, 有機態窒素の形態で存在している場合には, 土壌中の微生物分解が必要と考えられた。

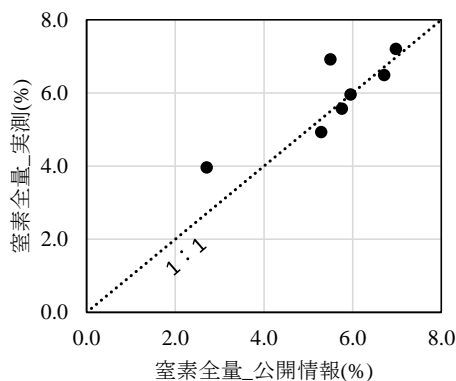


図-3 窒素全量の公開情報と分析値の比較

Fig.3 Comparison between released and analyzed data on nitrogen

3.3.2 栽培試験結果

汚泥肥料を用いた栽培試験終了時のコマツナの乾燥重量から, 各肥料間でコマツナの生長量に差があることが示された(図-5)。図-6 に各試料の栽培試験開始時および終了時の土壌中の可給態窒素, アンモニア態窒素, 硝酸態窒素の各濃度を示す。施肥条件として全窒素量が 125mg/100g 乾土になるように設定したが, 可給態窒素, アンモニア態窒素, および硝酸性窒素の合計値は約 20~50mg/100g 乾土であり, 肥料として土壌に存在する窒素の多くはコマツナに利用されにくい形態であった。

栽培開始時と栽培試験終了時の土壌における ATP 値を図-7 に示す。初期の ATP 値は約 800~1,400 で, 肥料 G を除いて栽培試験終了後に ATP 値が増加した。この

結果から, 汚泥肥料の添加は土壌の微生物活性を高めると考えられた。また, アンモニア態窒素の減少量とコマツナの生長量には明確な相関はみられなかったが, 微生物活性の増加量 (Δ ATP) とコマツナ乾燥重量の間には相関が確認され, 汚泥肥料を土壌に添加して微生物活性が高くなることで作物の生長が促される可能性が示唆された(図-8)。

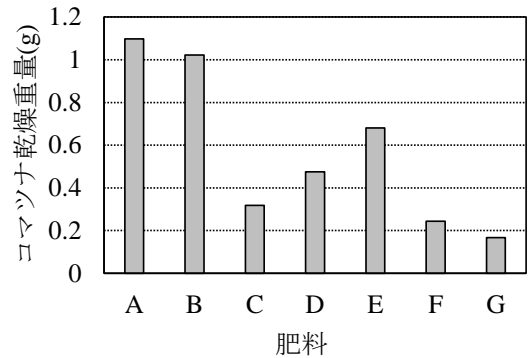


図-4 各試料のコマツナ乾燥重量

Fig.4 Dry weight of Komatsuna for each fertilizer

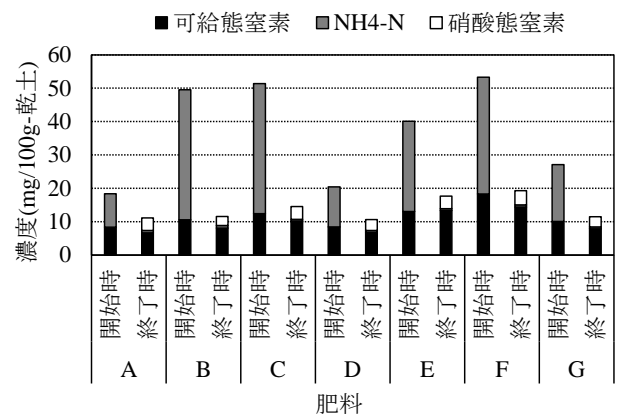


図-5 栽培試験開始・終了時の土壌中の窒素

Fig.5 Nitrogen concentration of soil before/after cultivation test

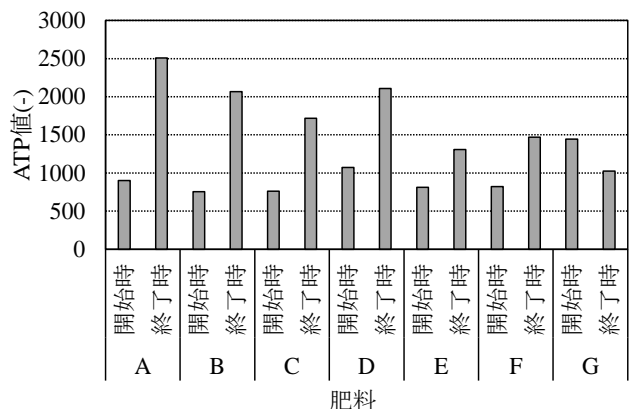


図-6 栽培試験開始・終了時の土壌中の ATP

Fig.6 ATP of soil before/after cultivation test

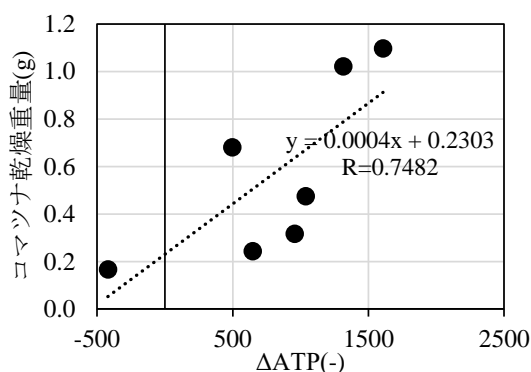


図-7 ΔATP とコマツナ乾燥重量の相関

Fig.7 Correlation between ΔATP and Dry weight of Komatsuna

4. おわりに

本報では国内で製造されている様々な種類の汚泥肥料を収集してその性状を調べ、それらを用いた栽培試験を実施した。その結果、以下の知見が得られた。

- ・汚泥肥料を農作物の栽培に活用する際に重要となる三大栄養素などの存在量は、公開情報を用いて確認できる。一方、製造時期によってはその濃度が公開値と異なる場合もある。したがって、作物を確実に栽培するためには、施肥後に土壤中の肥料成分等の測定を行うことが重要と考えられた。
- ・窒素全量を基準にして汚泥肥料を施してコマツナを栽培した結果、各肥料間でのコマツナの生長量には差が生じた。この要因として、コマツナが直接利用できるアンモニア態窒素の初期濃度が異なっていただけでなく、可給態窒素からのアンモニア態窒素への供給状態に差が生じている可能性が土壤中の微生物活性の違いより示唆された。

これらの結果から、汚泥肥料を農作物の肥料として活用する場合には、農作物による土壤中の窒素成分などの利用状況や土壤の微生物活性に着目する必要であると考えており、汚泥肥料の農地への最適な使用方法を今後検討していく予定である。

参考文献

- 1) 農林水産省：
https://www.maff.go.jp/j/zyukyu/jki/j_rep/monthly/attach/pdf/r4index-98.pdf.
- 2) 農林水産省：
https://www.maff.go.jp/j/seisan/sien/sizai/s_hiryo/220729.html.
- 3) 高畑陽，屋祢下亮：大成建設の農地利活用に向けた取り組み，大成建設技術センター報，第 57 号，3，2024.
- 4) 日本下水道協会：<https://www.jswwa.jp/sewage/qa/rate/>.
- 5) 国土交通省：下水汚泥エネルギー化技術ガイドラインー平成 29 年度版ー，2017.
- 6) 国土交通省：
<https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sewage/content/001595583.pdf>.
- 7) 国土交通省：下水汚泥資源の肥料利用に関する検討手順書（案），2024.
- 8) 国土交通省：下水道資源の農業利用促進にむけた BISTRO 下水道 事例集，2018.
- 9) 伊達知見：辺流水からの HAP 造粒法によるリン除去・回収の技術開発，下水道協会誌，Vol.47，No.573，pp.33-37，2010.
- 10) 白毛宏和：MAP 法によるリン回収資源化システム，環境バイオテクノロジー学会誌，Vol.4，No.2，pp.109-115，2005.
- 11) 今井敏夫，三浦啓一：焼成法による下水汚泥焼却灰のりん酸肥料化技術，太平洋セメント研究報告，No.169，pp.51-61，2015.
- 12) 農林水産省：菌体リン酸肥料の解説（申請者用），2023.
- 13) 肥料ペディアホームページ：
<https://www.taihi-pedia.com/recycling/secondarymaterial.html>.
- 14) 鈴木郁男：堆肥化施設の構成等について，におい・かおり環境学会誌，Vol.46，No.1，pp.21-24，2015.
- 15) 皆川知華：汚泥発酵肥料で育てた米や野菜をレストランで提供する資源循環の構築，月刊下水道，Vol.44，No.13，pp.44-45，2021.
- 16) 農林水産省：国内資源由来肥料の活用事例集（2.下水汚泥資源）.
- 17) 金澤晋二郎，山村友王，柳田裕紹，蔵本寛基：超高温・好気発酵法によるバイオハザー ド・フ リーコンポストの製造新技術，土と微生物，Vol.58，No.2，pp.105-114，2003.
- 18) (財) 日本土壤協会：堆肥等有機物分析法，2000.
- 19) (独) 農林水産消費安全技術センター：肥料等試験法，2023.
- 20) 農林水産省：土壌分析法
https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/h_schi_kizyun/attach/pdf/ibaraki01-4.pdf.
- 21) 浦嶋泰文，唐澤敏彦，中塚博子，林正紀，徳田進一：ATP 測定キットを用いた簡易迅速な土壤微生物バイオマス評価法，日本土壤肥料学雑誌，Vol.88，No.4，pp.336～338，2017.
- 22) 食環境衛生研究所ホームページ：
<https://www.shokukanken.com/colum/colum-23414/>.
- 23) 農林水産省：
https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/h_schi_kizyun/attach/pdf/tottori01-2.pdf.