汚泥肥料

国産バイオマス肥料で「勇気農業」にチャレンジ

肥料は原料の多くを輸入に頼っている。
つまり肥料自給率が低い。
自給率向上の決め手となるのがバイオ資源の活用だ。
ここでは、そのひとつである下水汚泥肥料を取り上げる。
実証研究に基づいた有機物活用型農業＝勇気農業の提言。
勇気を出して安価な国産バイオマス肥料である
汚泥肥料を活用しよう。

後藤 逸男
東京農業大学
名誉教授
全国土の会
会長

1 農業生産に不可欠な肥料

世の中には、農薬不使用はいうにおよばず堆肥や肥料を一切施さないで、農産物を生産する「自然農法」なるものがある。山の中で自然の物質循環を巧みに利用し、ごく少量の農産物のみを生産する自給自足的自然農法であれば、成立するようにも思われる。しかし、一般の農耕地で肥料を施用せずに農産物を生産し、それを販売して生業とする営利的自然農法が本当に成り立つのだろうか、そのような疑問を抱いた筆者は自然農法実践地域の土壌診断調査を行ったことがある。紙面の都合で詳細は省くが、自然農法を始めるまで行っていた慣行農法当時の残存肥料を活用した「お余り農法」、あるいは周辺の農地から流入する養分を利用した「お流れ農法」であった。

植物が生育するには、17種類の養分が不可欠で、酸素・炭素・水素を除く14種類の養分は土の中から吸収される。すなわち、農産物を収穫するということは、土の中から養分を奪い取ることに他ならない。農家は土壌養分の「略奪者」とならないために、奪い取った養分を土にお返しする。それが「肥料（こやし）」だ。多雨気候でおまけに黒ぼく土が広く分布するわが国の土壌は、酸性が強く、石灰・苦土・カリなど交換性塩基を欠く。また、黒ぼく土はリン酸固定力が強く、施肥したリン酸を作物が吸収できない形態に変えてしまう性質が強いため、欧米などの農業先進国に比べて、日本の土は極端に痩せている。日本農業にとって、肥料は絶対に必要不可欠な資材だ。

肥料の分け方にはさまざまあるが、最もわかりやすい分類が化学肥料と有機質肥料である。

化学肥料といえば、化学的に合成した肥料と思っている人が多いようだが、窒素肥料の主原料は空気中に約80％含まれる窒素ガス、リン酸肥料はリン鉱石という天然鉱物だ。窒素ガスはそのままでは肥料として効かないので、天然ガス中の水素ガスと反応させてアンモニアに変えると尿素や硫安などの窒素肥料となる。リン鉱石には30％程度のリン酸が含まれるが、植物には吸収されにくい形態となっている。そこで、硫酸や加熱処理で効きやすいリン酸に変えたものが過リン酸石灰や熔成リン肥などのリン酸肥料である。

有機農業にこだわりリン鉱石の粉末を施用する農家もいるが、リン酸

肥料と同等の効果を得るには、大量のリン鉱石が必要で貴重な資源の浪費となる。化学肥料であるリン酸肥料を使った方が断然環境にやさしい。そのリン鉱石だが、日本には産業利用できるような資源がないため、ほとんどを輸入に依存し、主な輸入先は中国と中近東だ。

カリ肥料の原料は岩塩で、リン鉱石と同じように日本には資源がないため、カナダやベラルーシなどから大量に輸入している。なお、塩化カリは岩塩を砕いただけの肥料で天然物そのもの、硫酸カリは塩化カリを硫酸で化学処理した肥料である。

一方、有機質肥料とは油かすや魚かすなど、ほとんどがさまざまな食品産業などから出る副産物を原料とする肥料である。本来、有機質肥料は国産肥料であるが、最近ではどういうわけか化学肥料が嫌われて有機嗜好が高まる中で有機質肥料の需要が高まり、現状では輸入量が増加している。

このように、日本では農業生産に欠かせない肥料の多くを輸入している。日本の食料自給率は37％、飼料自給率は27％にすぎず、それらを高めるべきことは当然だが、それと同時に肥料自給率も高めなければいけない。

２００８年には中国からのリン鉱石の輸出が一時的にストップした。その影響で肥料価格が高騰した「リン酸ショック」は記憶に新しい。また、今後地球規模で人口が増加すれば、自国での肥料消費が高まるため、肥料の国際価格上昇や輸入量確保が難しくなることも予想される。

もう一点、肥料自給率を高めるべき理由が環境問題である。肥料の三要素といわれる窒素・リン酸・カリのうち、窒素とリン酸は農耕地土壌の中では貴重な肥料資源であるが、これらが環境に放出されると河川・湖沼・海域での富栄養化をもたらす環境負荷物質に一変してしまう。すなわち、肥料を輸入するということは環境負荷物質を輸入することに他ならない。

それでは、肥料資源に乏しい日本で、どのように肥料自給率を高めるのか。その決め手が、かつては有機性廃棄物、現在ではバイオマス資源と呼ばれる国産有機質資源を原料とする肥料の活用だ。バイオマス資源の三本柱といえば家畜排せつ物・汚泥類・食品廃棄物だが、ここでは下水汚泥を原料とする肥料を取り上げる。

2 「勇気農業」で土を健康に

上記のとおり、日本の土は痩せている。ただし、それは未耕地のことで、野菜や花卉を栽培する露地園芸畑やハウスの土は、痩せているどころか太りすぎて健康を損ねていることが多い。人の健康にたとえれば「メタボ」である。堆肥や肥料の過剰施用がその原因で、可給態リン酸過剰や窒素過剰に伴う電気伝導率（塩類濃度）の上昇とpHの低下がその典型だ。これらを人の健康にたとえると、リン酸過剰はコレステロールの蓄積、電気伝導率の上昇は高血圧症に該当する。どちらも深刻な心臓や脳疾患につながるように、土のメタボもアブラナ科野菜根こぶ病やフザリウム病害など土壌病害の発病を助長することが筆者らの研究により明らかになっている。また、土のメタボ化は貴重な肥料資源の浪費にもつながる。

このような園芸土壌の養分過剰化対策として、半世紀近くも以前より土壌診断に基づいた土壌改良や施肥設計の実践が国や都道府県、農業団体などにより啓発され続けてきた。本来、土壌診断は農作物栽培のための必須作業のひとつであるべきだが、十分普及しているとはいえない。その背景には、肥料や資材を売らんがための土壌診断分析もあったこと、農家が勘と経験に頼りすぎてきたこと、「堆肥は肥料ではなく、土づくり資材」「黒ぼく土の畑やハウス土壌にはリン酸の多施用」などの土づくり迷信が農家に蔓延してきたことなどがある。また、土壌診断分析を健康な土づくりに活かす原則は、「少なければ施し、多ければ施さない」であるが、特に後者を実行する「勇気のない農家」が多い。

「勇気」といえば、最近の有機ブームで気がかりなことがある。２００６年に「有機農業の推進に関する法律」が制定されたことも追い風となり、「有機農産物」は安全・安心、高品質で栄養価も高い、化学肥料は使わない方がよいなどと考える消費者が多い。筆者らは以前から有機農業を実践する野菜畑やハウスの土壌診断調査も行ってきたが、慣行栽培以上にメタボが進む農地が少なくなかった。決して、有機農業を否定するわけではないが、有機栽培に拘りすぎると養分の偏在化を招き土の健康を損ねやすい。また、物質循環や環境保全の観点から有機農業では国産肥料を使うべきである。そこで、国産の有機物やバイオマス資源を原料とする肥料の活用を基本とし、土壌診断分析結果に応じて、必要最少量の化学肥料を併用する、それが筆者ら

の提唱する「有機物活用型農業」だ。その中の4文字をとって省略すると「有機農業」となるが、誤解を避けるために「勇気農業」と称している。それには、土の健康を保つには「勇気」を奮って化学肥料を使うべきという意味も込められている。

園芸の土とは対照的に、水田では地力の低下が著しい。土づくりの基本であったはずの堆肥や石灰・ケイ酸資材施用量の減少がその原因である。その影響で、高温障害などによる米の品質低下やごま葉枯れ病などの病害多発、これまでは考えられなかったイオウ欠乏症などの異常現象が発生している。筆者らによる土壌診断分析でも、pH5以下の異常ともいえる酸性化した水田も散見されるようになった。また、可給態ケイ酸や遊離酸化鉄の不足や園芸土壌とは対照的に可給態リン酸欠乏土壌も少なくない。これまで、土壌診断を行う水田農家は少なかったが、今後はしっかりと土壌診断を行い、土の健康状態を把握すべきである。その結果、不足する成分を補給するに際しては、汚泥肥料の活用を勧めたい。

従来はコンポストと呼ばれていた汚泥肥料だが、「汚泥」という名前や有害元素の含有に二の足を踏む農家が多い。しかし、肥料登録を受けた汚泥肥料であれば、安心して使える。勇気を出して安価な国産バイオマス肥料である汚泥肥料を活用しよう。

3 汚泥肥料とは

(1) コンポストと呼ばれていた汚泥肥料

各家庭の台所、洗濯、風呂、トイレなどの排水は下水管を通って下水処理場へと送られる。下水処理場では、活性汚泥法という方法で下水を浄化し、消毒した処理水を川や海に放流している。その活性汚泥法では、曝気層内で下水に空気が送り込まれると、微生物が下水中の有機物を「えさ」として分解し、その際に下水中に含まれる窒素やリンなどを取り込んで増殖する。曝気槽に続く沈殿槽でその菌体を濃縮・脱水した物質が下水汚泥である。わが国における年間発生量は約7500万tで、家畜排せつ物の年間約8000万tに次いで多いバイオマス資源となっている。

下水汚泥の主成分は窒素を含むタンパク質であるため、放置すれば短時間で分解し、下水汚泥独特の悪臭を放つことになる。そこで、さまざまな方法で下水汚泥を加工して、再利用しやすくした資材が汚泥肥料である。従来、下水汚泥の緑化資材としての利用方法は、主に堆肥化であった。家畜ふん堆肥と区別化するためか、堆肥ではなくコンポストと呼ばれていた。コンポスト（compost）は堆肥の英語名であるので、本来であれば同意語であるはずだが、家畜排せつ物やバークなどを原料とする堆肥は「堆肥」で、下水汚泥を原料とする堆肥は「下水汚泥コンポスト」あるいは単に「コンポスト」と、農業生産現場では全く異なる資材として取り扱われてきた。

ただし、両資材の用途はどちらも土づくりのための有機物補給源で、肥料というより土壌改良資材であった。そのため、施用量は10a当たり数tにもおよんだ。家畜ふん堆肥より安価であったため、主に集約的な露地野菜産地で腐植を増やすための有機物資材として多く使われてきた。

(2) 汚泥肥料の種類とその製法

1999年には、肥料取締法の改正によりそれまで特殊肥料の「堆肥」として扱われてきたコンポストが「汚泥肥料」という普通肥料に分類されることになった。ただし、汚泥肥料にはそれ以外の普通肥料のような肥料成分の最少量を保証する保証値がなく、含有を許される有害成分の最大量が定められている。その種類と最大量は、ひ素0・005%、カドミウム0・0005%、水銀0・0002%、ニッケル0・03%、クロム0・05%、鉛0・01%である。

かつて、下水汚泥コンポストといえば「臭い」と「有害元素」が大きな課題であった。しかし、最近では、排水規制などの関係で下水中に含まれるカドミウムなど有害元素濃度は著しく低下している。また、肥料登録を受けた汚泥肥料を適正に活用すれば、有害金属は問題とならない。臭気問題についても下水汚泥の堆肥化や乾燥方法の改善により著しく緩和されている。

肥料取締法では、下水汚泥を原料とする汚泥肥料として5種類の公定規格が設けられているが、全国で入手できる汚泥肥料は主に汚泥発酵肥料で、その他に下水汚泥肥料・し尿汚泥肥料・工業汚泥肥料・混合汚泥肥料・焼成汚泥肥料などがある。

①汚泥発酵肥料

汚泥発酵肥料とは、従来からコ

ンポストと呼ばれてきた資材で、下水汚泥に木質チップやおがくず、米ぬかなどの水分調節材を混ぜて堆肥化した汚泥肥料である。堆肥化過程では、微生物による呼吸熱で70～100℃にまで品温が上昇するため、雑草の種子や病原菌も死滅し、悪臭源となる成分も分解されるので、完熟すれば悪臭が大幅に緩和される。全国各地の多くの下水処理場で作られているので最も入手しやすく、2016年の調査によると、汚泥肥料の年間利用量約32万tの75%を汚泥発酵肥料が占めている。

写真1：汚泥発酵肥料

②下水汚泥肥料

下水汚泥肥料とは、主に下水汚泥を乾燥した肥料で、乾燥するまでの時間が長くなると特有の悪臭を発する、乾燥に化石エネルギーを使うなどの欠点があるため、肥料としての利用量は10%弱と少ない。しかし、最近では一部の下水処理場で脱水汚泥を急速乾燥する技術が導入され、下水汚泥中の微生物菌体が分解する前に乾燥してしまうので、ほとんど異臭を感じない下水汚泥肥料が作られている。メタン発酵槽が設けられている下水処理場ではメタンガスを燃料として下水汚泥を乾燥すれば合理的である。最近の乾燥機は熱効率もよいようなので、今後各地の下水処理場での導入拡大を期待したい。

なお、原料として下水汚泥の他にし尿汚泥が混ざっていると混合汚泥肥料という公定規格となる。

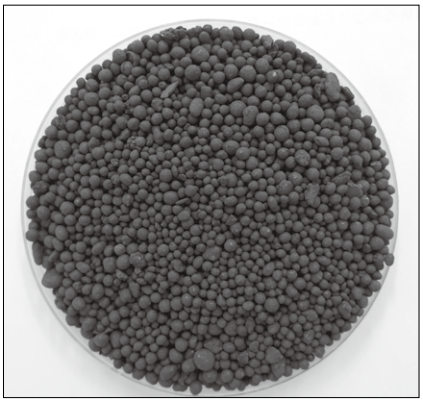


写真2：下水汚泥肥料

③その他の汚泥肥料

下水汚泥を250～600℃で炭化した資材が火力発電所で石炭代替資源として使われて、その一部が焼成汚泥肥料として主に緑化資材として利用されている。炭化処理で窒素は全量消失するが、リン酸などの無機成分は濃縮されて含有量が多くなる。そのリン酸の肥効は低温で炭化するほど高まるが、同時に濃縮されるカドミウムの植物への吸収も促進される。逆に、高温で炭化した資材はカドミウムとリン酸の吸収が抑制される。そのような炭化資材の施用効果は主に保水性の改善などの土壌物理性改良効果である。

(3) 下水汚泥焼却灰などを原料とする他の肥料

下水汚泥の発生量が多い都会や都市部の下水処理場でもかつてはコンポストが製造され農業利用されていたが、農地の減少に伴い現在では発生する大半の下水汚泥が焼却され、その際発生する下水汚泥燃焼灰にはリン鉱石に匹敵するほどのリン酸が含まれている。また、下水処理場内で発生する濃縮あるいは脱水分離液中には高濃度のアンモニウムイオンやリン酸イオンが含まれている。

2008年の「リン酸ショック」を機に、下水からのリン酸肥料製造技術が一躍注目を浴びた。これまでに実用化されているリン酸肥料としては、リン酸マグネシウムアンモニウム（MAP：化成肥料登録）、リン酸カルシウム（登録：副産リン酸肥料）などがある。

筆者らも2006年頃から熔成汚泥灰複合肥料の開発に携わった。下水汚泥焼却灰に酸化カルシウムと酸化マグネシウムを混合して1400℃の電気炉で還元熔融した後に水砕した資材である。製法と組成が熔成リン肥（熔リン）と類似することからエコ熔リンとも呼ばれ、2004年に熔成汚泥灰複合肥料という公定規格が設けられた。

これらリン酸肥料は下水汚泥焼却灰から化学的あるいは物理的にリン酸を分離した肥料であるため重金属問題は完璧に解消される。その一方で、MAPやリン酸カルシウムのように、リン酸塩を化学的に分離した肥料では、下水汚泥に含まれるリン酸以外の肥料成分まで除去されてしまう。

その点、熔成汚泥灰複合肥料では、ケイ酸やマグネシウムなども残留するので、ケイ酸を必要とする水田用肥料としては他の下水系リン酸肥料より優れていた。ただし、製造に多額の費用を要するため現状でも実用化には至っていない。

汚泥肥料には分類されないこれらの国産リサイクル肥料は、下水中のリン酸資源を有効活用できるすばらしい肥料ではあるが、有機物をまったく含まない無機質肥料で、製造に

経費を要する。その点、汚泥肥料には、大量の有機物が含まれ、おまけに窒素とリン酸も含まれている。これを肥料として使わない手はなかろう。

繰り返すが、最近の堆肥化や乾燥技術の進歩により、かつてのコンポストとは一線を画した新しい肥料が各地の下水処理場で作られている。土壌改良資材として大量施用していたコンポストから脱却して、有機物と窒素・リン酸を補給できる「肥料」として汚泥肥料を活用しよう。

下水汚泥を主原料とする肥料の安全・安心性を確認し、下水汚泥の農業利用を促進する目的で、2009年3月に（公財）日本下水道新技術機構から「下水道由来肥料の利活用マニュアル・施用量をどのように決めるか・」が発表された。

筆者は、そのマニュアル作成時の評価委員の一人として参画したので、その概要を以下の**4**と、**5**の(**1**)(**2**)で紹介する。

4 窒素とリン酸肥料として有望な汚泥肥料

(1) 栽培試験に用いた汚泥肥料の性質

1930年に名古屋でわが国初の活性汚泥法による下水処理場が建設された。その当時から下水汚泥が肥料として有効であることが報告されていた。その後、今日まで下水汚泥中の窒素とリン酸の肥効や、有害成分の挙動などに関する実に多くの研究が行われてきた。この間、下水処理方法や使用する凝集剤の種類の違いなどで下水汚泥の性質が変化してきた。

また、農業利用方法も従来の土壌改良資材的な多量施用から肥料としての利用へと変わりつつある。そこで、2017年に「下水道由来肥料の利活用マニュアル」作成の一環として、汚泥発酵肥料3点、乾燥処理による下水汚泥肥料1点を入手して、それらの窒素およびリン酸肥料としての施用効果について検討した。いずれの汚泥肥料も最新の堆肥化あるいは乾燥化設備で製造されたもので、全量が農業利用されている。

汚泥肥料4種類の肥料成分含有量を表1に示す。汚泥肥料A、M、Sは100℃に達する発酵温度を経て作られた水分30％程度の完熟堆肥で、きつい臭気はない。AとSの炭素率が5弱に対して、Mでは堆肥化原料に木質チップを混合しているために6となっている。汚泥肥料Tは乾燥処理品であるが、現状では牛ふん堆肥と混ぜて堆肥化しているため、水分30％程度の乾燥に留めている。そのため、下水汚泥特有の臭気が伴うが、菌体の分解によるアンモニアガスの揮散が少ないため、窒素含有量は堆肥化した汚泥肥料よりやや高い。リン酸含有量は5～8％、カリ含有量は0・2～1・1％で、汚泥肥料Aが他の3点より高い。その原因は、堆肥化原料に米ぬかを加えているためと思われる。なお、窒素とリン酸に比べて汚泥肥料のカリ含有量が低い原因だが、カリはカリウムイオンとして存在するので、活性汚泥処理の段階で菌体中のカリウムイオンが処理水中に流出してしまうためである。

表1：供試汚泥肥料の肥料成分含有量（現物当たり）

試料	水分	窒素	炭素	炭素率	リン酸	カリ	亜鉛	銅
	%	%			%	%	mg / kg	
汚泥肥料T	28.2	5.1	31.6	6.2	4.6	0.2	650	260
汚泥肥料A	30.7	4.8	22.1	4.6	7.7	1.1	574	239
汚泥肥料M	33.8	3.5	21.7	6.2	4.8	0.7	567	150
汚泥肥料S	28.3	3.2	13.1	4.1	5.1	0.3	556	100

表2：供試汚泥肥料の有害元素含有量（乾物当たり mg / kg）

試料	ヒ素	カドミウム	水銀	ニッケル	クロム	鉛
汚泥肥料T	6	1	0.2	26	49	19
汚泥肥料A	6	2	0.1	16	29	11
汚泥肥料M	6	1	0.3	25	32	17
汚泥肥料S	3	1	0.4	25	33	26
最大量＊	50	5	2	300	500	100

＊含有を許される有害成分の最大量

次に、有害成分含有量については、表2のとおりいずれも含有を許される最大量を大きく下回っている。従来、亜鉛と銅も有害成分扱いされ、特に亜鉛については施用土壌中での挙動について数多くの研究がなされてきたが、最近では人の亜鉛摂取量の不足が指摘され、亜鉛の微量要素としての重要性が認識されるようになった。そもそも、亜鉛も銅も植物生育に不可欠な微量要素であるため、肥料取締法では有害元素に含まれていない。

(2) 汚泥肥料を土壌施用すると窒素がどのように効くか

農作物を作付けする際の施肥設計では、肥料に記載されている窒素・リン酸・カリ含有量から施肥量を決

定する。硫安や尿素のように水に溶ける化学肥料では含有される窒素成分の全量が有効成分と考えてもよいが、有機質肥料では含有成分の全てが有効化するわけではなく、例えばなたね油かすでは施用後1ヶ月で窒素量の半分程度がアンモニア態窒素となり、その後は有機物がゆっくり分解して緩効的に窒素が効いてくる。そのため通常では全窒素含有量から施肥量を計算することが多い。

一方、汚泥肥料に含まれる窒素の形態は有機質肥料とは異なり、乾燥汚泥は微生物菌体、汚泥堆肥は100℃にも達する高温で有機物が分解された「かす」のような物質であるため、肥料として使う際には、有機物の分解速度を調べる必要がある。そこで、4種類の汚泥肥料について、土壌中での窒素無機化試験を行った。

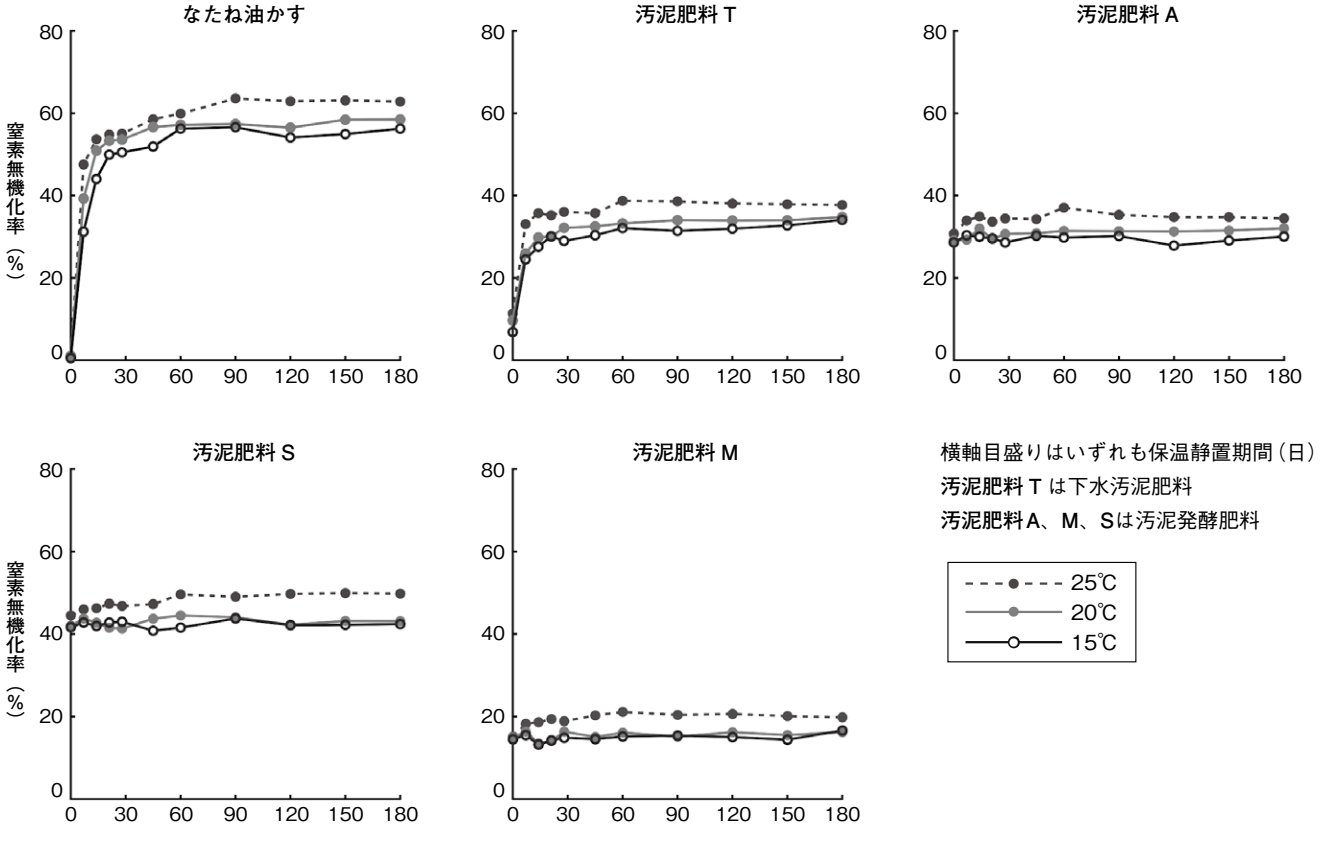
窒素の無機化とは土壌中に施用された有機物中の有機態窒素が微生物分解を受けてアンモニア態窒素に変化することをいう。窒素肥沃度の低い黒ぼく土の畑から採取した土壌に4種類の汚泥肥料と対照有機質肥料としてなたね油かすを一定量（全窒素量として50㎎／100g）施用して土壌水分を畑条件（最大容水量の約50％）とし、6ヶ月間15、20、25℃で保温静置した。一定期間ごとに土壌中の無機態窒素量（アンモニア態窒素と硝酸態窒素）を測定した。その結果を図1に示す。縦軸は窒素無機化率で、施用した全窒素量に対するアンモニア態窒素と硝酸態窒素生成量の割合を示す。

無機態窒素を含まないなたね油かすでは、施用後3週間程度をかけて緩慢に無機化した。3ヶ月後の窒素無機化率は約60％であった。汚泥肥料Tには全窒素に対して5％程度のアンモニア態窒素が含まれていた。土壌混和後、急激な有機態窒素の分解に伴う無機化が認められたが、1週間程度でほぼ終了し、3ヶ月後の窒素無機化率はなたね油かすより低い30％程度であった。

一方、汚泥肥料A、M、Sには、全窒素量の20～40％に相当する無機態窒素が含まれ、そのほぼ全てがアンモニア態窒素であった。土壌混和後の無機態窒素の生成はほとんど認められなかった。供試した汚泥発酵肥料は製造過程で100℃にも達する高温条件下で長期間の堆肥化を受けているため、分解できる有機物は堆肥化中に分解しきったことを示している。なお、各汚泥堆肥に含まれるアンモニア態窒素量が異なる原因は堆肥化時に添加する副材料の種類と量によると思われる。

これらの窒素無機化試験により、

図1：4種の汚泥肥料となたね油かすの経時的窒素無機化率



下水汚泥肥料は土壌混和後に無機化するが1週間程度で終了し、なたね油かすより速効的な窒素肥効を示すことが確認された。一方、汚泥発酵肥料には多量のアンモニア態窒素が含まれ、土壌混和後にそれ以上の有機態窒素が無機化することはなく、アンモニア態窒素は土壌中での硝酸化成作用により2～3週間で硝酸態窒素に変化した。その際の硝酸化成速度もなたね油かすより速かった。汚泥発酵肥料は尿素や硫酸アンモニウム（硫安）のような窒素肥料に匹敵する肥料であることが明らかになった。

(3) 栽培試験で汚泥肥料の化学肥料代替率を調べた

窒素無機化試験で用いた3種類の汚泥発酵肥料のク溶性（クエン酸に溶ける）および可溶性リン酸を分析したところ、全リン酸に対するク溶率は80％程度、可溶率は90％程度であった。従来の下水汚泥では処理過程で鉄やアルミニウム系の凝集剤を添加することが多く、汚泥中のリン酸が植物に吸収利用されにくい形態になっていたが、最近では高分子凝集剤への変換が進み、リン酸の有効化が高まったと考えられる。

そこで、汚泥発酵肥料中の窒素とリン酸がどの程度化学肥料の代替資源となるかを1／5000aワグネルポットを用いたチンゲンサイの栽培試験により検討した。下水汚泥肥料1点（T）と汚泥発酵肥料3点（A、M、S）の他に化学肥料区を設け、4種類の汚泥肥料区では現物で1t／10a相当量を施用した。化学肥料区では窒素（尿素）とリン酸（過リン酸石灰）の施用量を0～50kg／10aの4段階に変え、カリは全区一律で25kg／10a（塩化カリ）施用した。なお、汚泥肥料区ではカリ施用量が不足するので、合計で25kg／10aとなるように塩化カリを補給した。

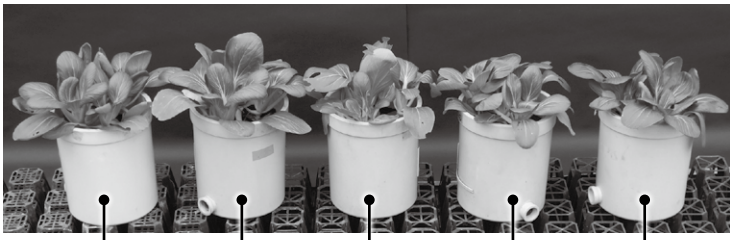


写真3：化学肥料標準区と4種類の汚泥肥料区におけるチンゲンサイの生育と窒素・リン酸吸収量の比較

項目	化学肥料	汚泥肥料T	汚泥肥料A	汚泥肥料M	汚泥肥料S
生育量 g	68.1（100）	77.6（114）	75.9（111）	59.6（87.5）	67.5（99.1）
窒素吸収量 mg	315（100）	353（112）	326（103）	155（49.2）	282（89.5）
リン酸吸収量 mg	41.6（100）	61.3（147）	66.0（159）	59.6（143）	67.5（162）

ガラス温室内で52日間栽培した後の4種汚泥肥料区と化学肥料区の三要素25kg／10a区（標準区）の生育と窒素・リン酸吸収量は写真3のとおりである。汚泥肥料T、A、S区は化学肥料標準区と同等あるいはそれ以上の生育を示し、汚泥肥料1t／10aで窒素とリン酸を十分賄えることが判明した。ただし、汚泥肥料Mは木質チップを混合した堆肥で、前ページ図1のように窒素無機化率が低いため、化学肥料区にはおよばなかった。汚泥肥料区のリン酸吸収量は化学肥料区を50％程度上回り、汚泥肥料中のリン酸の肥効が高いことが明らかになった。

この栽培試験結果から汚泥肥料の化学肥料代替率を算定したが、ここでは結論のみとするので、詳細については（公社）日本下水道協会発行の「再生と利用2019 Vol.43 No.160」を参照頂きたい。

その結論は次のとおりである。汚泥肥料は化学肥料の代替肥料として極めて有望で、窒素の化学肥料代替率は汚泥肥料4点中3点でほぼ50％であった。化学肥料代替率がその2分の1程度と低かった汚泥堆肥Mは、堆肥化原料として大量の木質チップを混ぜているためと思われる。また、汚泥肥料中のリン酸の化学肥料代替率はほぼ100％と見なしてよい。

5 汚泥肥料の活用事例

(1) 水田での汚泥肥料活用（秋田県大仙市）

汚泥肥料Aを秋田県大仙市の水田で活用した事例を紹介する。隣接する2枚の水田（面積：各30a）を汚泥肥料A区と慣行区とし、両区の施肥設計を表3とした。試験水田の土壌診断分析の結果、図2のように酸性が強く、遊離酸化鉄含有量が少なめであったので、両区に転炉スラグを200kg／10a施用した。汚泥肥料Aの窒素代替率を50％と見なして、慣行区の窒素施肥量の倍量となるよう汚泥肥料Aを500kg／10a施用した。慣行区の基肥・追肥は化学肥料を原料とする配合肥料である。この施用量で、カリ量は両区でほぼ一致するが、リン酸は慣行区の約5倍（43kg／10a）となる。しか

表4：水田での汚泥肥料施用の実証試験における結果

測定項目	単位	慣行区	汚泥肥料区
穂数	本／株	28	29
稈長	cm	890	945
穂長	cm	208	205
枝梗数	本／穂	10	11
粒数	粒／穂	115	119
玄米千粒重	g	22.3	22.2
根の乾燥重量	g	60.6	62.7
収量（1.7㎜篩目換算）	kg/10a	531	539
玄米食味値	点	77	75
玄米タンパク質含有量	%	7.8	8.0

表3：水田での汚泥肥料施用の実証試験における施肥設計

	成分	基肥			追肥	合計
		配合肥料	転炉スラグ	合計	配合肥料	
慣行区	施用量	33.7 kg /10a	200 kg /10a	kg /10a	20 kg	kg /10a
	窒素	9.1	0	8.1	3.0	12.1
	リン酸	3.4	4.2	7.6	0.8	8.4
	カリ	2.7	0	2.7	3.0	5.7
	成分	基肥			追肥	合計
		汚泥肥料 A	転炉スラグ	合計	微生物資材	
汚泥肥料区	施用量	500 kg /10a	200 kg /10a	kg /10a	10 kg /10a	kg /10a
	窒素	24.1	0	24.1	0.2	24.3
	リン酸	38.3	4.2	42.5	0.5	43.0
	カリ	5.3	0	5.3	0.2	5.5

し、土壌中の可給態リン酸が5㎎／100gと欠乏気味のため妥当な施肥である。なお、本試験実施者の意向で汚泥肥料区には追肥として微生物資材を施用した。

各試験区内3ヶ所で坪刈りによる生育・収量調査を行った結果の平均値は表4のとおりで、両区間に顕著な相違は認められずほぼ同等と判断される。すなわち、水田での汚泥肥料による化学肥料代替効果が確認された。

また、玄米食味値とタンパク質含有量についても慣行区77、7・8%、汚泥肥料区75、8・0%とほぼ同等であった。秋田県の「高品質・良食味米安定生産マニュアル（2015）」によると、あきたこまちの玄米タンパク質含有率は6・2%を中心に5・4～7・2%の範囲に分布するとのことである。さらに、あきたこまちの窒素施肥基準が基肥5～7kg／10aとなっているので、今後は窒素施肥量をやや削減し、汚泥肥料Aであれば、400kg／10a程度が最適施用量と判断される。

図2：水稲栽培前後の汚泥肥料施用区における土壌化学性の変化
（出典：全国土の会 Web みどりくん）

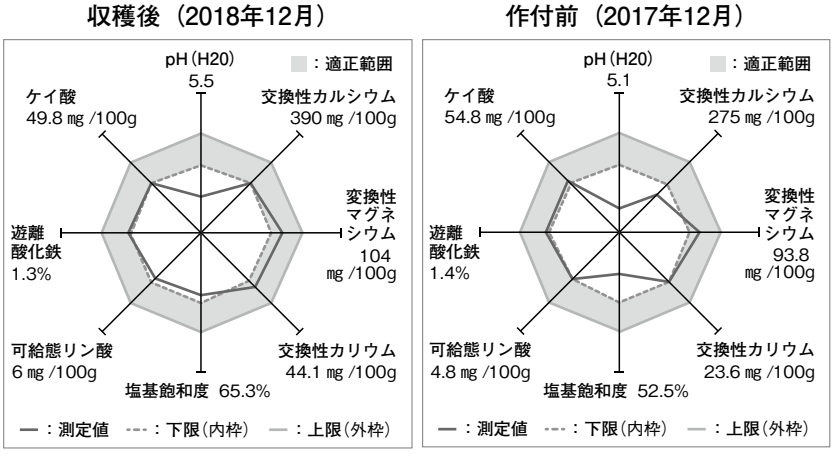


表5：露地畑での汚泥肥料施用の実証試験における施肥設計

■慣行区（kg /10a）

成分	春レタス				夏レタス				2作合計
	配合肥料	過石	塩加	合計	配合肥料	過石	塩加	合計	
施用量	125	50	24		125	50	24		
窒素	20	0	0	20	20	0	0	20	40
リン酸	8	7	0	15	8	7	0	15	30
カリ	8	0	12	20	8	0	12	20	40

■汚泥肥料区（kg /10a）

成分	春レタス	夏レタス	2作合計
	汚泥肥料 S	汚泥肥料 S	
施用量	620	970	1590
窒素	20	31	51
リン酸	32	50	82
カリ	2	3	5

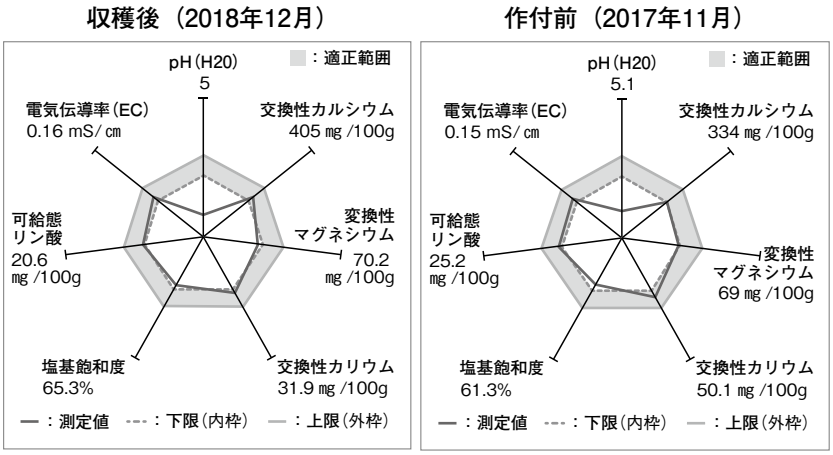
(2) 露地野菜栽培での汚泥肥料活用（佐賀市）

汚泥肥料Sを佐賀市内の露地畑（灰色低地土）でのレタス2毛作栽培に活用した事例を紹介する。しばらく休耕していた畑の中の2m×30

表6：露地畑での汚泥肥料施用の実証試験における
レタスの収量および地上部の窒素・リン含有量

項　目	春レタス			夏レタス		
	慣行区(A)	試験区(B)	B/A	慣行区(A)	試験区(B)	B/A
地上部重 g/株	1180	1193	101	866	1220	141
球高　cm	22.4	23.9	107	19.9	23	116
茎球径　cm	3.9	3.6	92	3.2	3.5	109
調整重　g/株	843	919	109	561	817	146
外葉数　枚	8.7	7.4	85	9.1	9.1	100
根長　cm	15.6	16.2	104	24	24.5	102
根重　g/株	33.0	26.5	80	25.1	30.1	120
窒素含有量　%	3.30	2.32	70	2.62	3.01	115
リン含有量　%	0.39	0.43	110	0.34	0.44	129

図3：レタス2作栽培前後の汚泥肥料施用区における土壌化学性の変化
（出典：全国土の会 Web みどりくん）



mを4分割し、交互に汚泥肥料S区と慣行区を設けた。試験圃場の土壌は、酸性が強く交換性カルシウムとマグネシウムが少なめで、可給態リン酸は適量であった。電気伝導率0・15mS／cmで無機態窒素が10mg／100g弱残存していたが、レタス定植約3ヶ月前に採取した土壌であったため、窒素施肥量には反映させなかった。1作目春レタスの施肥設計は表5のとおりである。慣行区では佐賀県の春レタス施肥基準通りの20－15－20kg／10aとした。本試験開始時には下水汚泥Sの無機化率や化学肥料代替率が未定であったので、汚泥肥料S区では全窒素量として20kg／10aに相当する620kg／10aの汚泥肥料Sを施用した。その中には、リン酸32kg／10a、カリ2kg／10aが含まれる。リン酸施用量は慣行区の約2倍となるが、可給態リン酸が25mg／100gで過剰状態ではなかったので支障はない。カリは慣行量を大きく下回るが、土壌中には50mg／100gの交換性カリウムが含まれていたので、他肥料による補給は行わなかった。土壌pHが5・1と低く、本来であれば酸性改良すべきであったが、汚泥肥料の施用が土壌化学性におよぼす影響を検討したいとする試験実施者の意向で石灰資材の施用も行わなかった。

レタス地上部の生育は表6のように、両区間でほぼ同等であったが、汚泥肥料区の窒素含有量が慣行区の80%と低く、汚泥肥料の窒素施肥量を全窒素含有量から決定すると慣行区と同等の窒素量が賄えないことが判明した。そこで、次作の夏レタス栽培では、汚泥肥料区の施肥量を窒素無機化率を考慮して970kg／10aとした。その結果、汚泥肥料区の生育が優り、地上部の窒素含有量も慣行区を上回った。

レタスを2作連続栽培した前後の汚泥肥料施用区における土壌化学性は図3のとおりで、栽培後の汚泥肥料区では慣行区に比べてpHが若干高く、交換性カルシウムとマグネシウムはやや多かったが、栽培前より土壌酸性化が進んでいた。特に、露地畑では肥料の施用に伴い土壌が酸性化するので、栽培前の土壌診断結果に基づいて必要な酸性改良を行うことが望ましい。なお、本試験地では可給態ホウ素が0・3～0・4mg／kgと欠乏気味であった。このような場合にはホウ素などの微量要素を含む転炉スラグによる酸性改良が合理的である。交換性カリウムはレタス栽培に伴う経時的が減少が認められた。汚泥肥料を施用する際には、必要に応じたカリ肥料の併用が必要である。

(3) 地力増進のための汚泥肥料活用（福島県富岡町）

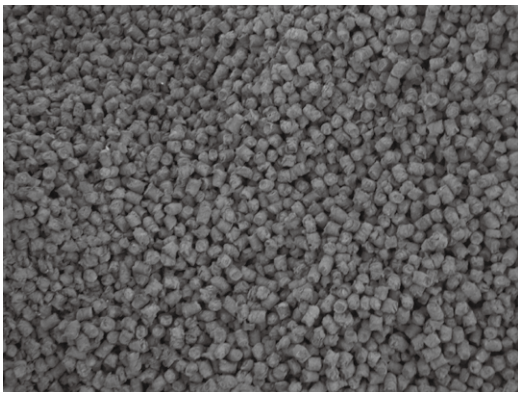
東日本大震災に伴う福島第一原発事故からすでに9年経過した。原発の南約10kmに位置する福島県富岡町では、2017年4月に北東部の帰還困難区域を除いて避難指示が解除され、住民の帰還が認められた。その区域の農地では、放射性セシウムで汚染された表土を剥ぎ取り、そこに山土を客土する除染作業が行われた。そのような除染による農地保全管理は2020年3月末をもって終了し、4月以降は所有者自身が管理することになった。しかし、山土を

客土した農地の土壌肥沃度は極めて低く、町内では写真4のように播種したソルゴーがほとんど生育していないような農地が多く見られた。そこで、㈱CTIフロンティアでは、除染終了農地での生産性向上を図る目的で、適切な土壌改良と地域で入手可能な汚泥肥料を活用した飼料用トウモロコシの栽培試験を2019年に実施したので、その概要を紹介する。

1haの圃場をプラウによる深耕と転炉スラグによる酸性改良（目標pH6・5）を全面的に行った後、汚泥肥料区と化学肥料区に2分して、飼料用トウモロコシを播種した。なお、汚泥肥料区には、写真5のような福島県相馬市下水処理場の乾燥汚泥をペレット化した下水汚泥肥料（窒素－リン酸－カリ：5－3－0・2）を施用した。汚泥肥料施用量は窒素の化学肥料代替率を50％と見なして300kg／10aとし、不足するカリを塩化カリとして16kg／10a補った。その結果、写真6のように両区共によく生育し、子実収量は汚泥肥料区：889kg／10a、化学肥料区862kg／10aであった。

汚泥肥料は、地力増進のための有機物と窒素・リン酸補給資材としてきわめて有望な国産肥料資源である。

⬆写真4：除染後、土壌改良せずにソルゴーを作付けした農地（福島県富岡町）



⬆写真5：
下水汚泥肥料
（福島県相馬市）

➡写真6：
除染後、転炉スラグと汚泥肥料を施用して飼料用トウモロコシを栽培した農地

6 汚泥肥料の使い方とその注意点

(1) 水田で使いたい汚泥肥料

わが国の耕地面積442万ha（2019年度）の約半分を水田が占める。その水田土壌が疲弊し、リン酸過剰などによる「メタボ化」が進む園芸土壌とは対照的である。まさに瀕死状態にある水田土壌を国産リサイクル肥料で救うことができる。その筆頭資材が汚泥肥料である。窒素とリン酸の肥効と共に適正土壌管理に不可欠な有機物を補給することができる。

ただし、汚泥堆肥では窒素の肥効が速効性であるので、水稲生育後半に肥切れをきたす恐れもある。そのような場合には、窒素が緩効的に無機化する生ごみ堆肥の併用が有効と思われる。汚泥肥料中には、4～20％のケイ酸が含まれているが、その主な起源が下水に流入した土砂であるので、水稲への吸収はほとんど期待できない。水稲が最も多量吸収するケイ酸とアルカリ分による土壌酸性改良、それに水田老朽化対策に不可欠な鉄を同時に補給できる資材が転炉スラグである。

(2) 下水汚泥肥料（乾燥）は播種・定植の2週間前施用

入手できる汚泥肥料の多くは堆肥化した発酵汚泥肥料だが、福島県富岡町で使ったような乾燥処理した下水汚泥肥料もある。前者は、土壌施用しても分解する有機物がほとんどないため、播種あるいは定植直前に施用しても支障ないが、下水汚泥肥

料は油かすと同じような新鮮有機物である。そのため、施用に際しては畑では播種・定植、水田では入水の2週間程前に施用する必要がある。特に、水田で施用後すぐに入水すると、有機物の分解が抑制されて異常還元を引き起こし、「わき」の原因となるので十分注意する。

(3) 土の免疫力を弱める土のリン酸過剰に注意

汚泥肥料にはリン酸が多く含まれているので、リン酸が足りない土壌には最適の肥料だ。ただし、汚泥肥料を活用する農地では事前に土壌診断分析を行い、可給態（有効態）リン酸量を確認する。その値が50㎎／100g程度以下であれば、窒素施用量を基に施用量を決定する。例えば、窒素施用量20kg／10aを全窒素5％の汚泥堆肥でまかなう場合には、化学肥料代替率を50％と見なせば、20kg／10a／0・05×100／50＝800kg／10aとなる。大まかではあるが、畑では汚泥肥料の最大施用量を1t／10a、水田では500kg／10aとして、不足するカリを塩化カリなどで補う。

可給態リン酸が50㎎／100g程度以上の農地であれば、リン酸として10kg／10a程度の汚泥肥料を施用することが最適である。その理由は、作物1作当たりのリン酸吸収量が10kg／10a程度以下であるためだ。例えば、リン酸5％の汚泥肥料であれば、化学肥料代替率を100％と見なして、10kg／10a／0・05＝200kg／10aとなる。不足する窒素とカリについては尿素と塩化カリ、あるいはNK化成肥料などで補給する。ハウス土壌のような可給態リン酸が数百㎎／100gに達するようなリン酸過剰土壌であっても、リン酸10kg／10a程度の施用であれば、それ以上にリン酸過剰を助長することはない。

いずれにせよ、汚泥肥料の施用がリン酸過剰を招かないように注意すべきだ。前記のように土壌のリン酸過剰は、アブラナ科野菜根こぶ病やフザリウム病害などの発病を助長する。わかりやすくいえば、リン酸過剰は土の免疫力を弱め、さらには貴重なリン酸資源の浪費につながる。

おわりに

下水汚泥を原料とする肥料がわが国で使われるようになって90年となるにもかかわらず、農業資材として広く農家に普及しない原因には、一般的な肥料の販売ルートから外れているため利用に関する技術的なサポートが得られにくいこと、カドミウムなどの有害元素を含む資材との固定概念がつきまとうこと、それにもうひとつが肥料取締法で肥料名としてあまりにもイメージが悪い「汚泥」が使われていることである。下水道事業を管轄する国土交通省あるいはその関連団体では汚泥肥料を「下水汚泥由来肥料」あるいは、「汚泥」を使わずに「下水道由来肥料」と呼ぶことが多い。

本記事を執筆するに当たり筆者も迷ったが、肥料取締法で「汚泥肥料」と定められているので「汚泥」を使うことにした。いまや、国を挙げてバイオマス資源の利活用を進めている中にあって、先ずは農林水産省と国土交通省が一致団結して肥料名称の変更を検討すべきである。

一方、国土交通省では、再生水・汚泥・熱・二酸化炭素などの下水道資源を農作物の栽培等に有効利用し、農業等の生産性向上に貢献する取り組みを「BISTRO（ビストロ）下水道」（http://www.mlit.go.jp/common/001135944.pdf）、その取り組みから生産された農作物に「じゅんかん育ち」の愛称をつけて、汚泥肥料など下水道資源の利用拡大を推進している。

この「じゅんかん育ち」は2017年4月に開催されたBISTRO下水道ブランドネームコンテストで、全国から寄せられた833点の中から選ばれた。「じゅんかん」は記すまでもなく「循環」を表していて、実によいネーミングだ。これを下水道資源だけに限定するのではなく、家畜排せつ物や食品廃棄物（生ごみ）など国産バイオマス資源を原料とする堆肥や肥料などにまで拡げ、「勇気農業」の旗頭にするべきである。「有機JAS」のような手間や経費のかかる認証ではないこともすばらしい。

汚泥肥料を入手するには

肥料の入手先といえば、農協か肥料商が一般的であるが、汚泥肥料に関してはそのような通常ルートでの販売はわずかで、自治体あるいは下水処理事業の委託を受けた民間業者が全国約900ヶ所の下水処理場で肥料製造と販売を担っている。

そのため、汚泥肥料を入手するには、各自治体の下水道担当部署に問い合わせる。あるいは、国交省のホームページ（http://www.mlit.go.jp/common/001233621.pdf）や（公社）日本下水道協会が発行する雑誌「再生と利用」（https://www.jswa.jp/publication/journal-recycle/）には各地の汚泥肥料の紹介やそれを活用した事例が掲載されているので、参考にするとよい。