

■「ビストロ下水道」の時代がやってきた

山形大学 渡部 徹

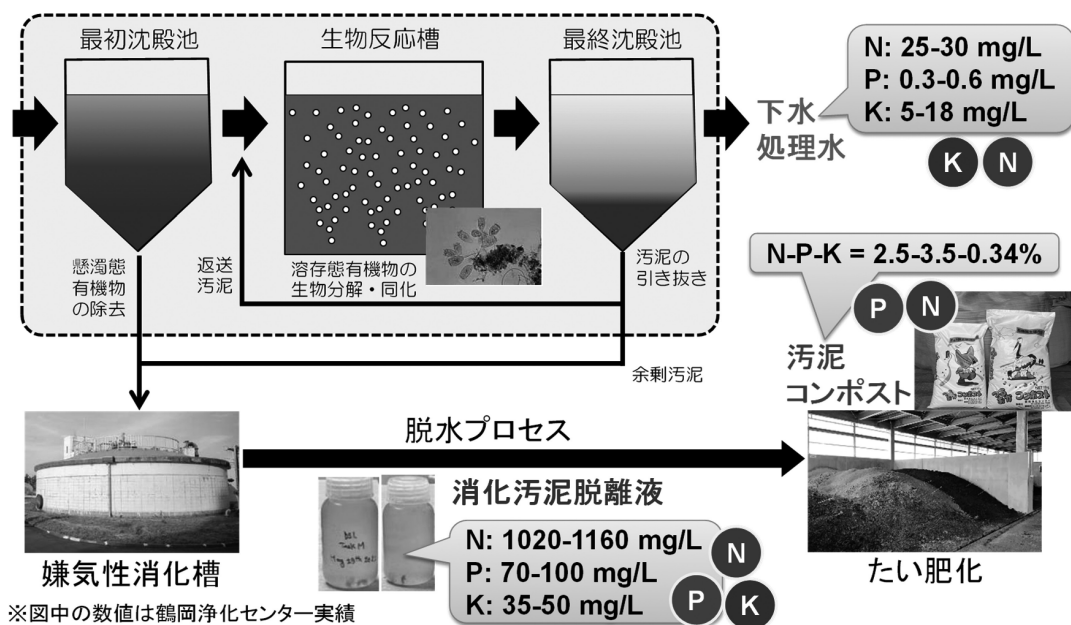


図1 一般的な下水処理のプロセスとそこで生まれる肥料資源

1. はじめに

下水道と聞いて、読者の皆さんはどのようなイメージを持たれるだろうか？汚い、臭い、暗いの「3K」かもしれない。確かに、家庭から捨てられる下水は様々な汚染物質を含み、不快な臭いがする。しかし、それが下水処理場に集まり、適切な処理を受けることで、透明で無臭の下水処理水に生まれ変わる。この下水処理場が広く普及したおかげで、身近な河川や湖沼、海の良好な環境が守られている。私は昭和50年に生まれたが、自宅のトイレは大学を卒業するまで汲み取り式で、同世代またはそれより先輩にあたる方々は、下水道がなかった時代の風

景を覚えていらっしゃるかもしれない。

その下水道が今、食の分野で、かつてない注目を集めている。やや専門的な話になるが、下水処理プロセス（図1）は下水に含まれる大量の有機物の除去を目的に設計されている。下水道の暗いイメージは、地面の下にある管を流れることに起因すると思われるが、汚いと臭いのイメージにはこの有機物が関係している。下水の中には多くの微生物が生息しており、その微生物は、彼らが生きていくために、水中の酸素を使って有機物を分解する。酸素がある環境では、有機物は二酸化炭素と水に分解されるので無臭である。しかし、有機物が多量に存在していると、その分解のために水中の酸素が使われてしまい、酸欠の状態になる。酸素がない環境で有機物が分解されると、不快な臭いのする物質が発生する。これは人間の体内でも起こっており、おならが臭い理由も同じである。ぬか漬けの「ぬか床」をかきまぜることを忘れると、腐って悪臭が発生してしまう理由も同じである。下水処理プロセスでは、下水中の酸素が枯渇しないよう

Toru WATANABE

山形大学農学部食料生命環境学科 教授

〔著者紹介〕(略歴) 1998年3月に東北大学工学部土木工学科卒業。同年4月から東北大学大学院工学研究科助手(のちに助教)。その後、米国ドレクセル大学工学部客員助教、東京大学環境安全研究センター特任准教授を経て、2010年10月に山形大学農学部准教授に着任。2015年6月から同学部教授。2018年4月より同学部の副学部長を務め、2024年4月に学部長就任。

〔専門分野〕水環境工学、環境リスク評価

にポンプで空気を常に送りこみながら、有機物を微生物に分解させている。単純なプロセスだが、とても効果的に下水から有機物を取り除くことができる。そして、処理後の下水（これを下水処理水と呼ぶ）は、有機物が劇的に減少しているので、汚くも臭くもない。

ここまでは、小学生の社会科見学などで勉強したことがある人も多いだろう。下水には、有機物の他にも肥料の三大要素である窒素、リン、カリウムも豊富に含まれているが、この処理プロセスではあまり除去できず、下水処理水には窒素とカリウムが残留する。また、下水中の有機物を分解することで増殖した微生物のからだを主成分とする下水汚泥（図1）には、下水に由来する窒素とリンが含まれている。この肥料成分に着目し、下水処理水や汚泥に代表される下水道資源を農業に利用する取組は「ビストロ下水道」と呼ばれ、10年ほど前から国土交通省によって推進されてきた。図2のようにビストロ下水道の取組は全国各地で行われているが、その中でも山形県鶴岡市は、山形大学農学部を含む産学官が連携した共同研究によって東の横綱（西の横綱は佐賀市）と呼ばれるに至っている。次章では、そのユニークで挑戦的な取組の一端を紹介する。

2. 鶴岡市におけるビストロ下水道の取組

山形県鶴岡市は日本有数の穀倉地帯・庄内平野に位置し、農業生産額では全国24位、米に限っては全国4位の生産量を誇る。その鶴岡市は近年、食をテーマとした地域振興を掲げており、日本で最初の「ユネスコ食文化創造都市」（国内では他に大分県臼杵市のみ）であるとともに、農林水産省による「SAVOR JAPAN（農泊食文化海外発信地域）」にも認定されている。本年に入ってから、美食（食の豊かなあり方）の観点から都市を表彰する「美食都市アワード」の初回受賞都市（全5都市）に選ばれるなど、活発な取組を続けている。

その鶴岡市にある山形大学農学部には、私は2010年に着任した。もともと上下水道システムを含む環境工学を専門としてきた私が、農学部で研究するのに適したテーマとしてビストロ下水道を選び、下水処理水を灌漑する（農業用水として流す）水田での食用米の栽培に関する研究を始めた。すぐに米のタンパク含有率が高くなり味が悪くなる課題が判明し、稲作の専門家である先輩教授の助言を受けて飼料用米（家畜が食べる米）の栽培に切り替えた。この顛末については後述するが、学内での研究成果を積み重ね、2016年からは鶴岡市、JA 鶴岡との共同研究を開始した。翌年には民間企業3社（地元企業1社、



図2 各地で実施されているビストロ下水道
（出典：BISTRO 下水道推進戦略チーム）



図3 下水処理水で灌漑する試験水田での飼料用米栽培
(対照水田は慣行栽培で、化学肥料と水路の水を使用)

大手水コンサルティング1社、大手水処理メーカー1社)が加わり、産学官が連携した体制で現在、以下のようなビストロ下水道研究を展開している。

(1) 下水処理水灌漑による高タンパク飼料用米の栽培

下水処理水で水田を連続灌漑することで、肥料を一切与えず、処理水に含まれる養分だけで飼料用米を栽培する研究である。2018年からは、実水田での実証試験を継続しており(図3)、肥料コストを節約しながら、慣行栽培の水田と同等またはそれ以上の量の米を収穫できることを確認している。ここで収穫される米は、処理水中の豊富な窒素を吸収し、タンパク質の含有率が高くなる傾向がある。私たちが食べる米(食用米)は、タンパク質が増えるとパサパサした食感となり、味が悪くなる。そのため、美味しい米を作る農家は、収穫量が減ることを覚悟で窒素肥料を減らし、タンパク質の少ない米を育てようとしている。一方で、タンパク質は家畜にとっては重要な栄養であり、高タンパク米は家畜に与える飼料としては品質が高いと言える。

この技術を用いて栽培された米を給与する養豚の試験も実施している。豚だけでなく牛も鶏も、一般的には、トウモロコシ(エネルギー源)と大豆油粕(タンパク源)を主原料とする配合飼料を与えて育てる。このうちトウモロコシは、成分が似ている米で置き換えることができる。ここで、処理水で栽培された高タンパク米を用いると、エネルギー源としてのトウモロコシを代替できる上に、タンパク源である大豆油粕も減らすことができ、飼料コストの削減(大豆油粕がトウモロコシよりも高価なため)につながる。処理水栽培米を混合した飼料を与える試験では、一般的な配合飼料で育てた場合よりも枝肉の品質が向上し、養豚業者の収益が約1割増える結果が得られた。

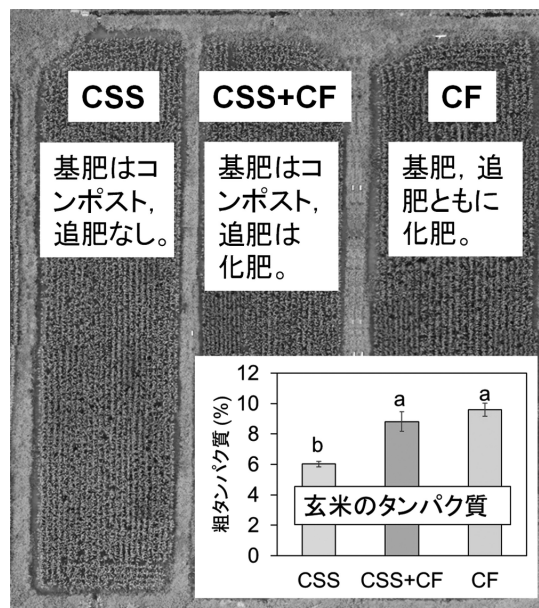


図4 化学肥料(化肥)の代わりに汚泥コンポストを用いた飼料用米栽培

(2) 汚泥コンポストを用いた飼料作物の栽培

上述した処理水灌漑による高タンパク飼料用米の栽培は、下水処理場から離れた水田への適用が難しいため、処理水の代わりに汚泥コンポストを用いて、高タンパク飼料用米を栽培する研究も行っている。汚泥コンポストとは、下水処理で発生する汚泥を発酵させた肥料である(図1)。汚泥のコンポスト化は、家畜のふん尿を堆肥にするプロセスとまったく同じで、汚泥をときどき切り返して(かきまぜて)まんべんなく空気に触れさせることで、汚泥にもともと生息する微生物が汚泥中の有機物を分解する働きを促す。単純なプロセスだが、有機物の分解にともなって発生する熱によって汚泥中の病原菌は死滅し、汚泥コンポストの安全性が高まる。この汚泥コンポストは、汚泥に由来するリンと窒素が残留しており、良質な有機質肥料として知られている。

飼料用米栽培の実験(図4)では、基肥および追肥に化学肥料を用いる慣行栽培(CF)に対して、基肥の化学肥料に代えて汚泥コンポストを使用(CSS+CF)しても、米の収穫量および粗タンパク質含有率は変化しなかった。ただし、汚泥コンポストを基肥に用いて追肥を行わないケース(CSS)では、粗タンパク質含有率が低下し、追肥の必要性が確認された。さらに、追肥のための化学肥料の代わりに、下水道資源の一つである消化汚泥脱離液(図1)を用いる研究も実施している。この消化汚泥脱離液は、下水処理プロセスで発生した汚泥を嫌気性消化(詳細は後述)した後、含水率を下げるために機械的に絞ったときに得られる液体部分であり、窒素、リン、カリウムをそれぞれ高い濃度で含んでいる。液肥のように使えるので、必要なタイミングで必要な場所にだけ散布

庄内スマート・テロワールが 目指す美しい未来

スマート・テロワールとは、農と食を地域の中で循環させ、持続可能な食料自給を目指す取り組みです。農業の持つ可能性を引き出すことで21世紀の農村を、活力あふれる場へと変えていきます。



日本の食料事情



図5 山形大学農学部が推進するスマートテロワール構想

(出典：庄内スマート・テロワール構築協議会)

することができる。

同じ発想から、汚泥コンポストや消化汚泥脱離液を用いて、化学肥料に頼らない飼料用トウモロコシの栽培にも挑戦している。山形大学農学部ではかねてより、地域の中で肥料や飼料を確保するための「耕畜連携」(田畑で飼料作物を栽培し、その作物で育てた家畜のふん尿をたい肥にして田畑に戻す連携)をベースに、生産された食肉を地域内で加工、販売、消費する循環型食料自給圏「スマートテロワール」(図5)を研究の目玉としている。しかし、畜産業が盛んでない鶴岡市では家畜堆肥が不足しがちで、それを補う下水道資源に期待が寄せられている。飼料作物、特にデントコーンは価格が安いので、小麦や大豆などの商品作物と輪作体系を構築する研究も行いながら、スマートテロワール構想に賛同してくれる生産者を増やす活動も進めている。同じ目的から、休耕地、とくにだだちゃ豆の連作で痩せてしまった畑地に着目し、汚泥コンポストを大量投入して再生する研究も進めている。このスマートテロワール研究で生まれた山形大学ブランドのハム、ソーセージ、ベーコン、味噌、麺類などはすでに地元のスーパーで販売されている。

(3) 下水処理水を用いた付加価値の高いアユの養殖

なんと、下水処理水はアユの養殖にも利用されている。天然のアユは、野趣あふれる風味(スイカやキュウリの

臭いと呼ばれる)で人気がある。その独特の風味は、アユが食べる川底の石に付着した藻類が起源と言われており、人工飼料で育てられた養殖アユの風味は天然物と明らかに異なる。そこで、下水処理水のプールで(そこに含まれる栄養と)日光だけで藻類を増やし、その藻類を与えることで天然物に近い風味のアユを育てている。これまでの研究で、養殖期間終盤の2週間だけ、人工飼料に藻類を混合して与えることで、アユが発するスイカ臭やキュウリ臭が確かに強まる分析データが得られている。この方法で養殖されたアユは、安全性の評価も終わっており、「つるおか BISTRO 鮎」のブランドで地元漁協からの販売が間もなく始まる。

(4) その他の取組

他にも、下水汚泥からはエネルギーを取り出すことができる。汚泥を密閉されたタンクの中に放置するだけで、微生物による有機物の分解が進み、酸素が使い果たされると、酸素を使わない分解が始まる。これを嫌気性消化と呼び、味噌や醤油で良く知られている発酵の一種だが、このプロセスではメタンを主成分とするバイオガスが発生する。メタンは良く燃えるので、鶴岡市の下水処理場では、汚泥からこのバイオガスを回収し、場内でそのガスを燃やして発電を行い、電力会社に売っている。さらに、発電の際に発生する熱も無駄にせず、冬季には場内



図6 鶴岡市におけるビストロ下水道の取組

に設置した農業用ハウス2棟の暖房に使っている。鶴岡市の冬は大変厳しいが、屋外が氷点下になる日でも、この発電熱のおかげでハウス内を終日15℃以上に保つことができる。ハウスでは、ほうれん草などの葉物野菜を中心に栽培を行っており、その生産物の一部は冬季の貴重な地元産野菜として学校給食に提供され、地産地消に関する食育に役立てられている。

以上の通り、ビストロ下水道の東の横綱・鶴岡市では、下水道資源のポテンシャルを余すことなく食料生産に活用するために多様な取組を実施している(図6)。本稿を通じて取組に関心を持たれた方は、ぜひ一度見学にお越し頂きたい。見学が難しい方には、政府広報オンラインが配信するインターネット番組「下水道資源を活用! BISTRO 下水道」や、鶴岡市が発信するYouTubeチャンネルでも我々の取組を深く知ることができる。

3. いま注目を集めるビストロ下水道

(1) 食料安全保障の切り札としてのビストロ下水道

現在の日本では、農業生産に必要な化学肥料の原料のほぼ全量を輸入に依存している。これは畜産で用いる飼料についても同様であり、トウモロコシや大豆のような濃厚飼料の自給率はわずか13%に過ぎない。わが国の食料自給率は30~40%と言われているが、そこには肥料や飼料の調達先は考慮されておらず、もし海外との貿易が止まると、国内での食料生産が困難となる。そのような

中で、新型コロナウイルス感染症の世界的流行やウクライナ情勢による国際物流の混乱、主要な穀物生産国における異常気象、我が国の円安などを背景に、数年前から輸入肥料や飼料の価格が高騰している。これらのコスト増を生産物の価格に反映できない生産者は、厳しい経営状況に置かれている。これを機に離農(廃業)する生産者が増えると、わが国の食料自給率はさらに低下してしまう。

このような国難を迎え、2022年9月の食料安定供給・農林水産業基盤強化本部において、岸田総理大臣は、次の課題について緊急パッケージを策定するよう、農林水産大臣に指示した。

○国土交通省等と連携して、下水汚泥・堆肥等の未利用資源の利用拡大により、グリーン化を推進しつつ、肥料の国産化・安定供給を図ること。

○小麦・大豆・飼料作物について、作付け転換支援により、国産化を強力に推進すること。

これに応じて、関連する政策の見直しも行われている。例えば、第3次バイオマス活用推進基本計画にある汚泥中有機物のエネルギー・緑農地利用の2030年度目標値が35%から50%に引き上げられた。2022年12月に出された食料安全保障強化政策大綱では、2030年までに下水汚泥資源・堆肥の肥料利用を倍増し、肥料使用量に占める国内資源の利用割合を40%にすることも定められた。さらに昨年3月には、国土交通省下水道部長から、発生汚泥

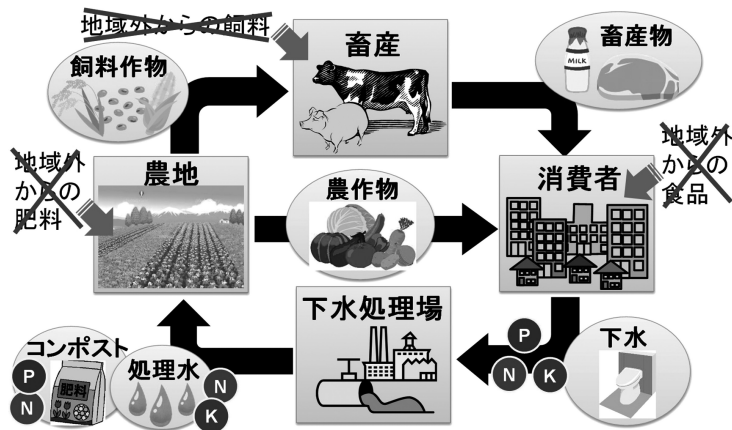


図7 ビストロ下水道による食・資源・経済の地域循環

等の処理では肥料利用を最優先し、かつ最大限に利用することが通知されるに至っている。従来、農林水産省でも、肥料法が定める一つのカテゴリーとして、汚泥肥料の登録を認めてきたが、他の原料と混合した肥料の登録も認めるよう規則を緩和した上に、国産肥料資源としてその利用拡大のためのマッチング事業を積極的に進めている。

このように今、わが国の食料安全保障を支える切り札として、汚泥の肥料利用を中心としたビストロ下水道に注目が集まっている。ビストロ下水道の時代がやってきた、とも言えるだろう。山形大学農学部が進めているビストロ下水道研究は、汚泥に加えて処理水や消化汚泥脱離液も使いながら良質な飼料作物の生産を目指しており、「下水汚泥等の未利用資源の利用拡大」だけでなく、「飼料作物の国産化の強力な推進」にも貢献できる点で、この分野では間違いなく日本をリードしている。

輸入肥料や飼料の価格高騰の背景にある個別の要因は一時的かもしれない。実際にこれらの価格はすでにピークを超え、現在は低下しつつある。しかしながら、長期的な視点で見ると、世界人口とともに食料需要が今後も増え続けることは確実である。これを機に、飼料や肥料の国内での安定確保に貢献するビストロ下水道の取組が我が国の食料安全保障に不可欠であることが、広く認識されることを願ってやまない。

余談となるが、汚泥コンポストは良質な有機質肥料であるにも関わらず、JASが認める有機肥料ではなく、これを利用しても（取引価格が高い）有機農産物として出荷することができない。その昔、農学分野のある学会の会長が、汚泥由来肥料を指して「農地にごみを捨てるな」と書かれた原稿を見たこともある。様々な事情があるとは思いますが、このような保守的な考え方が、循環型農業や肥料・飼料の国内自給の障壁となり、我が国の食料生産の持続可能性をここまで低下させてきたのではないだろうか？

(2) ビストロ下水道がもたらす多面的な効果

さて、ビストロ下水道のメリットは、肥料や飼料に係る生産コストの削減や、鶴岡市の事例での豚肉やアユのような生産物の品質向上だけではない。ビストロ下水道での生産物を地元で流通させれば、飼料や肥料に加えて食料も地域内で確保でき、それらを購入するための資金も地域で循環するようになる（図7）。この「循環経済」は、資金が外に出ていき地域経済が縮小することを防ぐために有効と言われている。それだけでなく、先に紹介したスマートテロワール構想のもとで、ビストロ下水道による飼料や肥料の確保から、生産物が消費者の口に入るまでのフードチェーンが地域内に確立できれば、そこに関わる生産者、食品加工業者、流通業者、小売業者などの経営の安定化と雇用の維持が図られ、地域の人口減少を食い止める効果も期待できるだろう。

肥料、飼料、食料を地域内で確保することができれば、それらの輸送にともなう温室効果ガス（GHG）排出削減にも貢献できる。繰り返しになるが、日本の農業で使われる肥料のほぼ全部、畜産業で使われる飼料の約9割が、海外から運ばれてきている。下水汚泥コンポストで化学肥料を代替すれば、その分だけ肥料製造時に発生するGHGを削減することができ、また、コンポストの施用には、他の有機質肥料で知られているように、炭素を地中に貯留する効果が期待できる。さらに、先に紹介した汚泥消化ガス発電はまさに再生可能エネルギーの生産であり、その廃熱で農業用ハウスを温めることで暖房用重油を減らすことができる。このように、ビストロ下水道は農業生産のためであるとともに、地域の経済振興や脱炭素社会に向けた取組でもある。地方の大半の自治体が消滅可能性都市と言われ、「2050年カーボンニュートラル宣言」が出された今こそ、鶴岡市に限らず、日本全国の地方都市でビストロ下水道を推進すべきと私は考えている。

4. ビストロ下水道の普及に向けた課題

ビストロ下水道の普及に向けた最大の課題は、生産物の安全性に対する懸念だろう。実際には、灌漑用水や肥料に関する基準に適合した下水処理水や汚泥コンポストを使用しているとしても、そして、食品安全に関する基準をクリアする生産物であっても、下水道から連想される負のイメージは根強い。読者の皆さんも、下水道には重金属などの毒性物質が流れ込み、健康を害するレベルで汚泥や下水処理水に残留すると考えてはいただろうか？過去にはそういう時代もあったかもしれないが、現在、工場等から下水道への排水には、厳しい水質基準が適用されている。我々の日常生活と縁のない毒物が、家庭から下水道に出てくることも考えにくい。悪意をもった個人が毒物を下水道に流す可能性もあるが、莫大な量の下水で希釈されるし、人間に対して毒性の強い物質は、下水処理プロセスで活躍する微生物に対しても毒性を示すため、異物の混入は下水処理のトラブルとして発見できることもあるだろう。

このように解説してもなお、未知なる健康リスクに対する懸念は消えないかもしれない。この点は、遺伝子組み換え作物と似ている。現在、食用油の他、しょうゆの原料や家畜飼料として、多くの遺伝子組み換え作物が輸入されている。その安全性に関しては、現時点で利用可能な科学的手法をもって立証されているが、不安が尽きることはないだろう。食品工学の最先端では培養肉の開発も進んでいるが、その安全性に対する信頼が通常の食肉を上回ることはないだろう。これらと比べて、ビストロ下水道での生産物の健康リスクが特別に高いとは思わないが、読者の皆さんはどのようにお考えになるだろうか？

5. おわりに

本稿では、下水道資源を農業利用する取組である「ビ

ストロ下水道」について、その先進地である鶴岡市の事例を中心に紹介した。ビストロ下水道の取組がなければ、下水処理水は河川や湖沼、海域に放流され、その栄養成分は拡散される。湖や内湾など地形的に拡散されにくい水環境では、栄養成分が蓄積して富栄養化と呼ばれる環境問題が発生する。処理水中の栄養成分を食料生産に利用することは、この富栄養化の対策にもなる。下水汚泥は通常、水分を絞った後で焼却され、その灰は産業廃棄物として処分場に運ばれる。汚泥を嫌気性消化した後、コンポスト化して肥料利用することは、汚泥の焼却に必要なエネルギーを節約し、焼却時に発生する二酸化炭素の削減、そして、廃棄物処分場のスペース確保にもつながる。

現在の日本では、人口の約8割が下水道を利用できる。下水道と同様に生活排水処理を目的とした小規模施設も含めると、その割合は9割を超える。このように「あって当たり前」のインフラとなったことで、逆に、日々の生活で下水道を意識する機会が失われているように思える。下水道の建設や維持には、莫大な費用とエネルギーが必要であり、毎月請求される下水道使用料金の他に、我々が納めている税金が投入されている。そのようなインフラを3Kで忌み嫌うのではなく、ビストロ下水道で積極的に利用することで、多くのメリットを得るべきではないだろうか？ビストロ下水道のために下水道資源の提供を始めるかどうかを判断するのは行政であり、下水道資源を食料生産に使うかどうかを決めるのは生産者だが、消費者も、ビストロ下水道で生産された農産物やその加工品（これを「じゅんかん育ち」と呼んでいる）を購入することで取組に参加できる（図7）。下水道の負のイメージから、最初は抵抗があるかもしれないが、買い物の際に「じゅんかん育ち」ブランドの食品を選ぶだけで、皆さんが暮らす地域の衰退を食い止め、温室効果ガスの削減にも貢献できることを、素敵で幸せなことと考える人が少しずつでも増えてくれるよう心から願っている。