

エタノール廃液の農地還元が農地土壌環境におよぼす影響

宮本輝仁¹・亀山幸司¹・小林政広²・陳 嬌¹・塩野隆弘¹

Effects of vinasse applications on the soil environmental issues: a review

Teruhito MIYAMOTO¹, Koji KAMEYAMA¹, Masahiro KOBAYASHI², Yan CHEN¹ and Takahiro SHIONO¹

1. はじめに

1970年代以降、化石燃料代替と地球温暖化防止を目的として、サトウキビやテンサイ、トウモロコシ等のバイオマスを原料とした燃料用エタノール（バイオエタノール）が注目され、その製造・利用に関する研究・実用化技術の開発が盛んに行われている。わが国においても2007年に国産バイオ燃料の大幅な生産拡大に向けた工程表を関係7府省において取りまとめ、バイオ燃料の開発および商業化に向けた取り組みを加速化している。

バイオエタノールはエタノール発酵により製造される。エタノール発酵はグルコースやフルクトースなどの糖質に酵母を加えて嫌気条件を維持することにより、糖質をエタノールと二酸化炭素に変化させるものである。このエタノール発酵は酒類、醸造食品の発酵に関連して古くから知られ利用されてきた。エタノール発酵によりアルコール分6～8%のもろみを得ることができる。もろみは濃縮装置によりアルコールと残液に分離される。この残液は、蒸留過程で排出される廃液と併せて「エタノール廃液」、「蒸留廃液」、「エタノール発酵母液」等と様々な名称で呼ばれている。また、英語でも“Distillery wastewater”, “Stillage”, “Vinasse”等の用語が使われている。本稿では、以後、「エタノール廃液」で統一する。

エタノール廃液は1Lのバイオエタノールを製造するに当たり10～20L前後排出される(Wilkie et al., 2000)。バイオエタノールに限らず、蒸留酒をエタノール発酵・蒸留を通じて製造する際には多くのエタノール廃液が排出される。そのため、エタノール廃液の処理は、バイオエタノールを含め、バイオマス資源を有効活用して循環型社会を構築していくための重要な課題である。

エタノール廃液に含まれる化学成分は原材料によって異なるが、窒素、リン酸、カリウムなどの肥料成分も含まれる。例えば、サトウキビやテンサイ由来のエタノール

廃液はカリウムが他の成分に比べて高く、木材などのセルロース系のエタノール廃液は窒素を多く含む(Wilkie et al., 2000)。このようにエタノール廃液には肥料成分も含まれるため、農地還元して作物栽培で有効利用することが検討されている。しかし、エタノール廃液は肥料成分を含むこと、pHが低いことや電気伝導度が高いこと、溶存有機物を多く含むことなど(Table 1)、多量に農地還元された場合、農地土壌環境へ大きなインパクトを与えることが懸念される。そのため、エタノール廃液を農地還元する際には、作物栽培と農地土壌環境の保全を両立させることが今後益々必要となる。

農地還元以外のエタノール廃液の処理方法については、飼料化して使用(例えば, Vaccarino et al., 1993)、メタン発酵の原料として使用(例えば, Wilkie et al., 2000)、機能性成分の抽出材料として使用(例えば, 須見, 2001)、高度な排水処理技術による方法等がある。特に排水処理技術に関しては優れた総説が既にいくつか発表されている(Sheehan and Greenfield, 1980; Wilkie et al., 2000; Satyawali and Balakrishnan, 2008)。

これまで、エタノール廃液の農地還元を主題とした総説はほとんどない。そこで、本稿ではエタノール廃液を作物栽培に利用するための農地還元に関する研究成果を概観するとともに、エタノール廃液の農地還元が農地土壌環境に与える影響について既存の研究成果を土壌の物理性、化学性、微生物特性の変化と不飽和土層内での窒素・炭素の動態の観点から概観する。

2. エタノール廃液を作物栽培に利用するための研究

灌漑用水や肥料の一部代替のためのエタノール廃液の農地還元について、1930年代から1970年代にかけて検討が行われ、年間の施用許容量について35～1280 m³ ha⁻¹の幅広い値が提案された(Sheehan and Greenfield, 1980)。エタノール廃液を作物栽培に利用するための研究は、1980年代以降も室内試験、ポット試験、圃場試験の各レベルで行われている。エタノール廃液を投与したときの植物の反応を観察するとともに、特に圃場試験では土壌分析を併せて行い、エタノール廃液の施用効果を検討している。

¹National Institute for Rural Engineering, National Agriculture and Food Research Organization, 2-1-6, Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8609, Japan. Corresponding author: 宮本輝仁, 農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究所

²Forestry and Forest Products Research Institute, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan
2010年8月11日受稿 2010年11月8日受理
土壌の物理性 116号, 19-25 (2010)

Table 1 原材料の異なるエタノール廃液の化学分析値 .

原材料	サトウキビ糖蜜	テンサイ糖蜜	ブドウ(ワイン)	サツマイモ(焼酎)
pH	4.28	4.9	4.2	4.2
EC (dS m ⁻¹)		—	5.2	3.92
COD (mg L ⁻¹)	81900–172000	—	50207	—
BOD (mg L ⁻¹)	50900	—	14542	—
有機物含量 (mg L ⁻¹)	—	497500	—	—
SS (mg L ⁻¹)	108000	—	12285	—
TOC (mg L ⁻¹)	55400	—	—	29400
TN (mg L ⁻¹)	1976	40625	104.9	2590
P (mg L ⁻¹)	335	375	118.4	750
Na (mg L ⁻¹)	508	26250	88	—
K (mg L ⁻¹)	17000	67500	354	3100
引用文献	陳・凌 (2010)	Tejada and Gonzalez (2006a)	Bustamante et al. (2005)	柯ら (1988)

室内試験では, コマツナ(柯ら, 1988), クレス(Murillo et al., 1995), ライグラス(Murillo et al., 1995; Murillo et al., 1998), ヒマワリ(Murillo et al., 1995; Murillo et al., 1998)の種子の発芽試験や初期生育試験が行われている。柯ら(1988)は培養日数の異なるサツマイモ焼酎蒸留廃液添加土壌でコマツナの発芽試験を行い, 廃液施用直後(0–3日)の播種で生育障害が起こったと報告した。Murillo et al.(1998)はテンサイ由来のエタノール廃液がヒマワリやライグラスの発芽や初期生育に与える影響を調べ, インピトロではエタノール廃液を濃度 0.15, 0.5% の水溶液で投与した場合, 発芽指数(発芽率と根長を掛けた値から求められる指標であり, 対照区を 100% としたときの割合)が小さくなる傾向を示したと報告した。

ポット試験では, エンドウ豆(Kadioğlu and Algur, 1990; Algur and Kadioğlu, 1992)やヒマワリ(Kadioğlu and Algur, 1990; Algur and Kadioğlu, 1992; Murillo et al., 1998), ライグラス(Murillo et al., 1998), シロツメクサ(Vassilev et al., 1996)にエタノール廃液を施用した栽培試験が行われている。Kadioğlu and Algur(1990)はエタノール廃液を濃度 1~50% の水溶液でエンドウ豆やヒマワリに施用したときの植物生長に関連する酵素や葉緑素, タンパク質含有量の違いを調べた。Algur and Kadioğlu(1992)はエタノール廃液を濃度 2.5% の水溶液で投与したとき, 生育が最もよく, バイオマス量も最大となったと報告した。Vassilev et al.(1996)はテンサイ由来のエタノール廃液投与により黒色アスペルギルス発酵が進み, リン鉱石が溶け出し, 植物生育が向上したことを報告した。Murillo et al.(1998)はテンサイ由来のエタノール廃液がヒマワリやライグラスの発芽や初期生育に与える影響についてポット試験を行い, 原液を 2~3 t ha⁻¹ 与えても悪影響は無かったことを報告した。

圃場試験では, サトウキビ(Booth and Lightfoot, 1990; 古江・永田, 1994)やキャベツ(上村ら, 1993), 綿(Gemtos and Lellis, 1997), テンサイ(Gemtos and Lellis, 1997), 小麦(Gemtos et al., 1999; Tejada et al., 2006), トマト(陳・凌, 2010), ダイコン(陳・凌, 2010)にエタノール廃液を施用した栽培試験が行われている。また, 試験

圃場から採取した土壌や土壌溶液を分析し, エタノール廃液の施用に伴う土壌の理化学性の変化が観察されている。栽培試験では概してエタノール廃液の施用により化学肥料の一部代替が可能であること(陳・凌, 2010)や増収にも繋がること(Booth and Lightfoot, 1990)が報告されている。しかし, 多量施用した場合, 生長障害や茎長の伸長阻害が起こることがあり(上村ら, 1993; 古江・永田, 1994; Tejada et al., 2006; Tejada et al., 2007), より詳細な施用技術の開発が必要である。

また, エタノール廃液の農地施用方法について, Booth and Lightfoot(1990)は 300 m³ ha⁻¹ のエタノール廃液を灌漑用の送水組織を用いることにより, サトウキビ畑により経済的に散布できたことを報告した。

エタノール廃液を植物生長や植物病原菌のコントロールのための資材や窒素の無機化を促進させるための資材として利用するための研究も行われている。奥野・吉元(2002)はカンショ焼酎廃液からの抽出物に植物生長を制御する成分が含まれることを報告した。Santos et al.(2008)は3種類の原料の異なるエタノール廃液による植物病原菌コントロールの可能性を試験し, 病原菌の種別の効果を報告した。また, Chaves et al.(2007)は有機性廃棄物を施用した土壌に, 154 日後, 窒素の無機化を促進させるための資材としてエタノール廃液を施用する試験を行い, 麦わらとの組み合わせで効果があったことを報告した。

エタノール廃液を他の有機性廃棄物と混合してコンポスト化し, 農地還元する試みも行われている。Vaccari et al.(1999)は都市部から排出される有機性廃棄物にエタノール廃液を混合して発酵を促進し, 農地還元ができるコンポストを製造した。製造されたコンポストを土壌有機物が少なく, 保肥力も小さい粗間隙の発達した砂地でのイチゴ栽培試験で用いたところ, イチゴの生育の向上が確認された。また, コンポスト化する方法は直接エタノール廃液を農地施用するのに比べて 5 倍の量を還元できることを示した。Madejón et al.(2001)はテンサイからのエタノール廃液と 2 種類の異なる有機物(ブドウの搾りかすと綿織り機のごみ)を混合したものについて, 温度, pH, 無機態窒素の違いによる堆肥化過程への

影響とできた堆肥の理化学性や熟度について検討した。Tejada et al. (2006) はエタノール廃液、綿織り機のごみのコンポスト、およびこれらを混合したコンポストを4年間農地施用し、その間の土壌の物理性、化学性、バイオマス量、酵素活性および小麦の収量について調べた。Bustamante et al. (2008) はワイン製造時に排出される廃棄物を他の有機物と混合することにより7種類のコンポストを作り、微生物的指標や病原菌含有量について調べた。

3. 農地土壌環境に与える影響

3.1 土壌の物理性

土壌の物理性のうち主に土壌構造の安定度、乾燥密度、耐侵食性に関する研究が行われている。

エタノール廃液を土壌に施用すると、土壌の団粒構造を壊す恐れがある。Tejada et al. (2006), Tejada and Gonzalez (2006a, 2006b) は有機物量で 7.5 t ha^{-1} , 10 t ha^{-1} のエタノール廃液を施用した試験区では、1年後から土壌構造の安定度が低下し、試験を行った5年間、低下し続けたことを報告した。そして、彼らはエタノール廃液には高濃度のナトリウムイオンとフルボ酸が含まれることが原因と考察している。エタノール廃液の施用により交換性ナトリウム率 (ESP) が増加し、土壌分散や団粒崩壊を引き起こしたと考えられた。

土壌構造の崩壊は、乾燥密度の増加を引き起こす。Tejada and Gonzalez (2006b), Tejada et al. (2007) は毎年エタノール廃液を有機物量で 7.5 t ha^{-1} , 10 t ha^{-1} 施用した試験区では、施用後3年目から乾燥密度の増加が観察されたことを報告した。一方、Gemtos et al. (1999) は、エタノール廃液の施用量が 7 t ha^{-1} 以下のときは、エタノール廃液の施用量、施用時期の違いによる乾燥密度への影響は観察されなかったと報告した。

エタノール廃液には有機物が含まれるため、土壌構造が発達し、耐侵食性も高まると期待されたが、エタノール廃液を土壌に直接施用すると、耐侵食性が低下するようである。これもエタノール廃液に高濃度のナトリウムイオンとフルボ酸が含まれることにより、ESPが増加し、土壌分散や団粒崩壊を引き起こしたためと考えられた (Tejada and Gonzalez, 2006a)。

エタノール廃液の施用による土壌の物理性の変化は、主にエタノール廃液の化学性により土壌構造が変化することに起因している。土壌構造の変化は、ガスを含め、土壌中の物質移動特性に大きな影響を与える。そのため、エタノール廃液の施用が土壌中の物理現象の場をどのように変化させるのかを明らかにすることにより、土壌環境に配慮したエタノール廃液の施用技術の開発につながられるものと考えられる。

3.2 土壌の化学性

エタノール廃液の農地還元が土壌の化学性に与える影響について、pHの変化、炭素・窒素の無機化特性、陽イオン交換容量 (CEC) や土壌中の金属の移動性などが検討されている。

エタノール廃液は低い pH 値を示すため、農地施用された直後は土壌 pH が低下するが、その後、土壌 pH は上昇することが知られている。この土壌 pH の上昇は微生物活動に起因した有機物の酸化により起こる (Mattiazzo and de Glória, 1987)。しかし、土壌条件により土壌 pH の著しい上昇は確認されない場合も報告されている (Casarini et al., 1987; Bueno et al., 2009)。

エタノール廃液には多量の有機物が含まれるため、無機化特性に関する研究が行われている。特に、窒素の無機化特性はエタノール廃液を肥料代替として利用する場合に重要な情報である。Parnaudeau et al. (2008) は原材料 (テンサイ糖蜜、サトウキビ糖蜜) の違いや発酵過程、濃縮過程がエタノール廃液の有機物の質や無機化特性に与える影響について調べた。原材料の性質はエタノール廃液中の難分解性有機物の組成や量に大きく影響を与えること、テンサイ由来のエタノール廃液はサトウキビ由来のものに比べて窒素含量が高く、窒素の無機化速度も大きいこと、易分解性有機物の割合はテンサイ由来のエタノール廃液のほうが高いこと、また、濃縮されたエタノール廃液の組成にも原材料の性質が大きく影響するが、サトウキビ由来のエタノール廃液を濃縮した場合、易分解性有機物の割合が少なくなり、土壌施用直後に無機態窒素の減少 (窒素飢餓) が起こったこと等を報告した。エタノール廃液の窒素の無機化について、培養初期に無機態窒素の減少がしばしば観察されている (柯ら, 1988; 上村ら, 1993; Parnaudeau et al., 2006; 陳・凌, 2010)。これは C/N 比の高いエタノール廃液を土壌に施用した場合、エタノール廃液中の易分解性炭素化合物の分解に必要な窒素が不足し、土壌中に存在していた無機態窒素を利用することにより、無機態窒素の有機化が起こるためと考えられている。また、Tejada and Gonzalez (2005) は、エタノール廃液の多量施用 (20 t ha^{-1} 以上) の場合では、土壌構造の崩壊により土壌が嫌氣的になり、窒素無機化の抑制や脱窒が生じる可能性を示唆した。有機物の無機化特性は、原材料の性質、土壌や環境条件 (温度、水分等) により異なるため、利用条件に合わせた評価が必要である。エタノール廃液を含む有機性廃液の無機化特性を C/N 比を指標として分類することも試みられている (Parnaudeau et al., 2006)。

エタノール廃液には多量の溶存有機物が含まれる。Benke et al. (1998) によれば、サトウキビ糖蜜由来のエタノール廃液に含まれる炭素分の 79 ~ 92 % は溶存態である。このため、エタノール廃液に含まれる溶存有機炭素の土層内挙動に関する研究が行われている。Benke et al. (1999) はエタノール廃液中の溶存有機炭素の熱帯土壌、カオリナイト、Fe-oxides への吸着・脱着特性について調べた。 $688 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ 相当のエタノール廃液を施用したときの吸着率が Ultisol の A 層では 7.1 % に対して Bt4 層では 27.4 % となり、深度に伴い吸着率が増加する結果を得た。また、主要粘土鉱物の Goethite と Hematite は吸着された溶存有機炭素のうち 28 ~ 35 % しか脱着されなかったと報告した。土壌への吸着・脱着過程を考慮

した溶存有機炭素の移動過程についてモデル化が試みられている (Kameyama and Miyamoto, 2010)。

エタノール廃液中の溶存有機物は殺菌剤の吸着・移動現象にも影響を与える。Andrades et al. (2004) は殺菌剤の土壌への吸着量を水中とエタノール廃液中で比較し、エタノール廃液中では殺菌剤の吸着量が増加したことを報告している。エタノール廃液中の溶存有機物が固相表面に吸着され殺菌剤の吸着体となるためと説明されている。また、殺菌剤が投与された土壌にエタノール廃液を与えると、疎水性の殺菌剤は土壌中に更に吸着され、親水性の殺菌剤は溶脱される量が増加したことも報告している。溶存有機物の量と性質、殺菌剤の性質、土壌等が複雑に関連して起きている現象であり、多くの実証的なデータを蓄積していく必要がある。

エタノール廃液の施用により土壌水分量の増加、酸素消費量の増加、土壌構造の崩壊などが起こり、土壌が還元状態になりやすくなる。そして、嫌気性菌の活動が活発になるとともにオキシ水酸化物の形態変化や粘土鉱物中に含まれる Fe や Mn の減少が起こる。そのため、エタノール廃液の施用による無機物の置換や金属の移動 (Lahlah et al., 2009), CEC の増加 (Renault et al., 2009) に関する研究が行われている。更に, Lahlah et al. (2009) は土壌にエタノール廃液を施用し 28 日間還元状態にした後、酸化状態にしても Fe や Mn は初期状態に戻らないことも明らかにした。エタノール廃液の投与は土壌の化学性の不可逆的变化を生じさせることが示唆された。

エタノール廃液を施用した土壌の化学特性に関する新たな検出方法も提案されている。Simabuco and Nascimento Filho (1994) はエタノール廃液を投与した土壌 (Podzolic soil と Latosol soil) における土層内での各種元素の動態解明にエネルギー分散型蛍光 X 線が有効であることを示した。また、Demattê et al. (2004) はエタノール廃液の投与量の異なる農地土壌のスペクトル特性について検討し、農地土壌中のエタノール廃液の残存をリモートセンシングにより把握するための周波数帯を見つけた。

長期間、エタノール廃液を農地還元した場合の土壌の化学性への影響を評価する研究も行われている。Cruz et al. (1991) はエタノール廃液を 5, 10, 15 年間施用した圃場を対象に 25, 75, 150 cm 深さから採取した土壌溶液中の有機物含量、肥料成分、pH 等の測定を行った。有機物含量は表層で増加したが、下層では変化がほとんど無かった。pH は各深さとも増加傾向を示した。カルシウム、硫黄、リンはエタノール廃液の施用により増加した。硝酸態窒素は溶脱により地下水中の濃度も増加したことを報告している。また、Rosabal et al. (2007) はエタノール廃液を灌漑用水として 40 年間灌水した圃場を対象に、土壌の理化学性や鉱物学的性質の変化について調べた。地表面下 1 m までの pH は低下していた。他方、エタノール廃液中には多量のカリウムが含まれているために EC 値は増加していた。また、有機物含量も増加していた。エタノール廃液の低 pH は土壌中の Fe や

Mn の含有量を減少させ、エタノール廃液中の有機物により重金属の可溶化が促進されたことを示した。

3.3 土壌中の微生物活動

土壌中の微生物活動に与える影響について、エタノール廃液施用に伴う土壌バイオマス量の変化や土壌微生物フロラの変化が調べられている。

土壌バイオマス量の変化について, Tejada et al. (2006) はエタノール廃液を原液またはコンポスト化して施用した小麦栽培試験区における土壌バイオマス量の年変化を調べた。原液の場合、対照区に比べて土壌バイオマス量は増加するが、経年的には土壌バイオマス量が減少した。これに対してコンポスト化した場合、施用量の増加とともに経年的にも土壌バイオマス量が増加した。原液には不安定な有機性の有毒成分が含まれていることや原液の添加により土壌の電気伝導度が高くなったことが要因として考えられた。試験期間を変えた栽培試験でも同様の結果が得られた (Tejada and Gonzalez, 2006a; Tejada and Gonzalez, 2006b; Tejada et al., 2007)。Crittter et al. (1994) はエタノール廃液を投与した土壌を含む 4 種類の土壌で、微生物活動によるグルコースの分解過程を微小熱量測定法で測定した。その結果、土壌バイオマス量の違いはエタノール廃液の投与の有無より土壌間の違いのほうが大きく関与することを報告した。

土壌微生物フロラの変化について, Casarini et al. (1987) はエタノール廃液投与により細菌や菌類の一時的な増加が確認されたこと、廃液投与初期において放線菌の繁殖が抑制されたことなどを報告した。

3.4 不飽和土層内での炭素・窒素の動態

圃場に施用されたエタノール廃液の環境への影響について, Cunha et al. (1987) は灌漑用水とともに $800 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ のエタノール廃液を農地還元したときの養水分動態を把握する圃場試験を行い、農地施用後 6 ヶ月では、カリウムは 0.04 %、硝酸態窒素は 0.13 % しか 1.2 m 以深に溶脱しなかったと報告した。Gloeden et al. (1991) は $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ または $300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ のエタノール廃液を農地還元したときの廃液成分の不飽和帯および飽和帯における動態を調査している。また, Parnaudeau et al. (2009) はエタノール廃液を含む有機性廃棄物を圃場に施用したときの窒素フラックス (無機化, 揮散, 脱窒, 溶脱) を観測結果とモデルによる推定結果から評価を行っている。

エタノール廃液に含まれる有機物が土壌の炭素貯留に及ぼす影響についても研究が行われている。de Resende et al. (2006) は 16 年以上、収穫前の焼畑と窒素施用、エタノール廃液の施用を行ったサトウキビ畑の窒素収支と炭素貯留について調べた。Silva et al. (2007) は林地と栽培期間が 2, 18, 25 年のサトウキビ畑の調査を行い長期間のサトウキビ栽培が有機炭素量や土壌構造の安定性に与える影響について検討した。対象としたサトウキビ畑ではエタノール廃液も 1 作ごとに $400 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ 施用された。栽培後 2 年では有機物含量が減少し、土壌構造も不安定化するが、その後有機物量は回復する。しか

し、土壌は圧密されやすい状態となることを観察した。更に、Galdos et al. (2009) はサトウキビの収穫時には従来から枯葉や先端部分を事前に焼き払うことが行われてきたが、サトウキビの葉が枯れる前に機械収穫する場合の炭素循環について CENTURY モデル (Parton et al., 1987; Parton and Rasmussen, 1994) を使って評価した。エタノール廃液の施用については相当量の炭素・窒素濃度の灌漑水が投与されるとして計算した。60 年間のシミュレーション結果は焼き払いが行われなければ土壌により多くの炭素貯留が可能であることを測定データとともに示した。

4. 土壌物理学から見た今後の課題

化石燃料の代替や地球温暖化に対する対策の一つとして、バイオマスの有効利活用が有望視されるが、農村地域における各種循環系を構成する要素である農地土壌内のバイオマス資材の動態に関する知見は今後益々重要な情報となる。上で概観したように、これまでの関連研究は、表土層内での微生物活動やエタノール廃液自体の化学性に起因する理化学性の変化を中心課題として行われてきている。しかし、不飽和帯や帯水層における環境影響を評価していくためには、相互に比較できる観測事例も少なく、既存モデルを用いたシミュレーションによる検討も始まったばかりである。今後、エタノール廃液による農地土壌環境への影響をより詳細に検討し、適切な農地還元を行うためには、エタノール廃液に含まれる肥料成分や溶存有機物の土壌中での保持・移動現象の解明が必要であろう。この点は、これまで土壌物理学が蓄積してきた知見の活用が大いに期待される。しかし、エタノール廃液は理化学性の面から単純な溶液と異なるため、以下のような視点も必要になってくるかもしれない。例えば、エタノール廃液はコロイド分を含むため、溶存態の物質とは異なる移動様式を示す可能性がある（例えば、未継ら, 2003）。また、エタノール廃液には土壌微生物の栄養分も含まれるため、土壌微生物活動が土壌水分保持特性・土の濡れ性・土壌中の物質移動現象に大きく関与することも考えられる（例えば、Or et al., 2007）。このように複雑な混合物を土壌に投与した際の土壌環境変化を予測することは非常に困難であるが、個別の現象解明に加え、土壌物理学と土壌化学的・生物的反応を結び付けた土壌を総体として捉える研究アプローチの両方を融合させることが、今後の研究の発展の鍵を握るものと思われる。

謝辞

本研究は科学研究費補助金（21380149）の助成を受けたものである。

引用文献

- Algur, Ö.F. and Kadioğlu, A. (1992): The effects of vinasse on the growth, biomass and primary productivity in pea (*Pisum sativum*) and sunflower (*Helianthus annuus*). *Agric. Ecosyst. Environ.*, 39: 139–144.
- Andrades, M.S., Rodriguez-Cruz, M.S., Sanchez-Martin, M.J. and Sanchez-Camazano, M. (2004): Effect of the addition of wine distillery wastes to vineyard soils on the adsorption and mobility of fungicides. *J. Agric. Food Chem.*, 52: 3022–3029.
- Benke, M.B., Mermut, A.R. and Chatson, B. (1998): Carbon-13 CP/MAS NMR and DR-FTIR spectroscopic studies of sugarcane distillery waste. *Can. J. Soil Sci.*, 78: 227–236.
- Benke, M.B., Mermut, A.R. and Shariatmadari, H. (1999): Retention of dissolved organic carbon from vinasse by a tropical soil, kaolinite, and Fe-oxides. *Geoderma*, 91: 47–63.
- Booth, R.J., and Lightfoot, C.J. (1990): The reticulation of ethanol stillage through irrigation systems and its use for fertilization of sugarcane in Zimbabwe. *Agric. Water Manage.*, 17: 49–58.
- Bueno, P.C., Martín Rubi, J.A., García Giménez, R. and Jiménez Ballesta, R. (2009): Impacts caused by the addition of wine vinasse on some chemical and mineralogical properties of a Luvisol and a Vertisol in La Mancha (Central Spain). *J. Soils Sediments*, 9: 121–128.
- Bustamante, M.A., Paredes, C., Moral, R., Moreno-Caselles, J., Pérez-Espinosa, A. and Pérez-Murcia, M.D. (2005): Uses of winery and distillery effluents in agriculture: Characterization of nutrient and hazardous components. *Water Sci. Technol.*, 51: 145–151.
- Bustamante, M.A., Moral, R., Paredes, C., Vargas-García, M.C., Suárez-Estrella, F. and Moreno, J. (2008): Evolution of the pathogen content during co-composting of winery and distillery wastes. *Bioresour. Technol.*, 99: 7299–7306.
- Casarini, D.C.P., Cunha, R.C. de A. and Maset Filho, B. (1987): Effects of irrigation with vinasse and the dynamics of its constituents in the soil: II — microbiological aspects. *Water Sci. Technol.*, 19: 167–176.
- Chaves, B., De Neve, S., Boeckx, P., van Cleemput, O. and Hofman, G. (2007): Manipulating nitrogen release from nitrogen-rich crop residues using organic wastes under field conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 71: 1240–1250.
- 陳嬌, 凌祥之 (2010): バイオエタノール蒸留残渣液の農業利用について — 土壌環境およびトマト・ダイコンの生育・品質に与える影響. *農工論集*, 265: 1–7.
- Critter, S.A.M., Simoni, J.A. and Airoidi, C. (1994): Microcalorimetric study of glucose degradation in some brazilian soils. *Thermochimica Acta*, 232: 145–154.
- Cruz, R.L., Righetto, A.M. and Nogueira, M.A. (1991): Experimental investigation of soil and groundwater impacts caused by vinasse disposal. *Water Sci. Technol.*, 24: 77–85.
- Cunha, R.C. de A., de Costa, A.C.S., Maset Filho, B. and Casarini, D.C.P. (1987): Effects of irrigation with vinasse and the dynamics of its constituents in the soil: I — physical and chemical aspects. *Water Sci. Technol.*, 19: 155–165.
- de Resende, A.S., Xavier, R.P., de Oliveira, O.C., Urquiaga, S., Alves, B.J.R. and Boddey, R.M. (2006): Long-term effects of pre-harvest burning and nitrogen and vinasse applications on yield of sugar cane and soil carbon and nitrogen stocks on a

- plantation in Pernambuco, N.E. Brazil. *Plant Soil*, 281: 339–351.
- Demattê, J.A.M., Gama, M.A.P., Cooper, M., Araújo, J.C., Nanni, M.R. and Fiorio, P.R. (2004): Effect of fermentation residue on the spectral reflectance properties of soils. *Geoderma*, 120: 187–200.
- 古江広治, 永田茂穂 (1994): サトウキビに対する黒糖焼酎廃液の施用効果. 鹿児島県農試報告, 23: 33–40.
- Galdos, M.V., Cerri, C.C., Cerri, C.E.P., Paustian, K. and van Antwerpen, R. (2009): Simulation of soil carbon dynamics under sugarcane with the CENTURY model. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 73: 802–811.
- Gemtos, T.A. and Lellis, Th. (1997): Effects of soil compaction, water and organic matter contents on emergence and initial plant growth of cotton and sugar beet. *J. Agric. Engng. Res.*, 66: 121–134.
- Gemtos, T.A., Chouliaras, N. and Marakis, St. (1999): Vinasse rate, time of application and compaction effect on soil properties and durum wheat crop. *J. Agric. Engng. Res.*, 73: 283–296.
- Gloeden, E., Cunha, R.C.A., Fraccaroli, M.J.B. and Cleary, R.W. (1991): The behavior of vinasse constituents in the unsaturated and saturated zones in the Botucatu aquifer recharge area. *Water Sci. Technol.*, 24: 147–157.
- Kadioğlu, A. and Algur, Ö.F. (1990): The effect of vinasse on the growth of *Helianthus annuus* and *Pisum sativum*: Part I — The effects on some enzymes and chlorophyll and protein content. *Environ. Pollut.*, 67: 223–232.
- Kameyama, K. and Miyamoto, T. (2010): Retention and transport of dissolved organic carbon from sugarcane-molasses ethanol vinasse in soils. In Japan Geoscience Union Meeting 2010 abstracts [CD-ROM], Chiba, Japan, 23–28 May 2010. Japan Geoscience Union.
- 上村幸廣, 鳩野哲也, 西園直生子 (1993): 甘しょ焼酎廃液の農耕地還元技術. 鹿児島県農試報告, 22: 105–111.
- 柯貴城, 平井光代, 正田誠, 久保田宏 (1988): サツマイモ焼酎蒸留廃液の農地還元利用. 土肥誌, 59: 156–163.
- Lahlah, J., Renault, P., Cazevielle, P., Buzet, A., Hazemann, J.L., Womes, M. and Cambier, P. (2009): Geochemical resilience of a ferralsol subjected to anoxia and organic matter amendment. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 73: 1958–1971.
- Madejón, E., Díaz, M.J., López, R. and Cabrera, F. (2001): Co-composting of sugarbeet vinasse influence of the organic matter nature of the bulking agents used. *Bioresour. Technol.*, 76: 275–278.
- Mattiazzo, M.E., and de Glória, N.A. (1987): Effect of vinasse on soil acidity. *Water Sci. Technol.*, 19: 1293–1296.
- Murillo, J.M., Cabrera, F., López, R. and Martín-Olmedo, P. (1995): Testing low-quality urban composts for agriculture: Germination and seedling performance of plants. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 54: 127–135.
- Murillo, J.M., Cabrera, F., López, R. and Martín-Olmedo, P. (1998): Sunflower response to the application of a concentrated beet vinasse. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 29: 643–655.
- 奥野成倫, 吉元誠 (2002): レタス種子発芽に及ぼすカンショ焼酎廃液抽出物の影響. 九州農業研究, 64: 43.
- Or, D., Smets, B.F., Wraith, J.M., Dechesne, A. and Friedman, S.P. (2007): Physical constraints affecting bacterial habitats and activity in unsaturated porous media — a review. *Adv. Water Resour.*, 30: 1505–1527.
- Parnaudeau, V., Nicolardot, B., Robert, P., Alavoine, G., Pagès, J. and Duchiron, F. (2006): Organic matter characteristics of food processing industry wastewater affecting their C and N mineralization in soil incubation. *Bioresour. Technol.*, 97: 1284–1295.
- Parnaudeau, V., Condom, N., Oliver, R., Cazevielle, P. and Recous, S. (2008): Vinasse organic matter quality and mineralization potential, as influenced by raw material, fermentation and concentration processes. *Bioresour. Technol.*, 99: 1553–1562.
- Parnaudeau, V., Générmont, S., Hénault, C., Farrugia, A., Robert, P. and Nicolardot, B. (2009): Measured and simulated nitrogen fluxes after field application of food-processing and municipal organic wastes. *J. Environ. Qual.*, 38: 268–280.
- Parton, W.J. and Rasmussen, P.E. (1994): Long-term effects of crop management in wheat-fallow: II. CENTURY model simulations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58: 530–536.
- Parton, W.J., Schimel, D.S., Cole, C.V. and Ojima, D.S. (1987): Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51: 1173–1179.
- Renault, P., Cazevielle, P., Verdier, J., Lahlah, J., Clara, C. and Favre, F. (2009): Variation in the cation exchange capacity of a ferralsol supplied with vinasse, under changing aeration conditions. — Comparison between CEC measuring methods. *Geoderma*, 154: 101–110.
- Rosabal, A., Morillo, E., Undabeytia, T., Maqueda, C., Justo, A. and Herencia, Juan F. (2007): Long-term impacts of wastewater irrigation on Cuban soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 71: 1292–1298.
- Santos, M., Diáñez, F., de Cara, M. and Tello, J.C. (2008): Possibilities of the use of vinasses in the control of fungi phytopathogens. *Bioresour. Technol.*, 99: 9040–9043.
- Satyawali, Y. and Balakrishnan, M. (2008): Wastewater treatment in molasses-based alcohol distilleries for COD and color removal: A review. *J. Environ. Manage.*, 86: 481–497.
- Sheehan, G.J. and Greenfield, P.F. (1980): Utilisation, treatment and disposal of distillery wastewater. *Water Res.*, 14: 257–277.
- Silva, A.J.N., Ribeiro, M.R., Carvalho, F.G., Silva, V.N. and Silva, L.E.S.F. (2007): Impact of sugarcane cultivation on soil carbon fractions, consistence limits and aggregate stability of a Yellow Latosol in Northeast Brazil. *Soil Till. Res.*, 94: 420–424.
- Simabuco, S.M. and Nascimento Filho, V.F. (1994): Study on vinasse dynamics in soil using energy dispersive X-ray fluorescence with radioisotopic excitation. *Sci. Agric. Piracicaba*, 51: 207–215.

- 末継淳, 佐藤孝, 金田吉弘, 佐藤敦 (2003): 土壌 - 水系におけるコロイド担体輸送. 農土論集, 228: 135-142.
- 須見洋行 (2001): 本格焼酎 - 泡盛の機能性. 日本醸造協会誌, 96(8): 513-519.
- Tejada, M. and Gonzalez, J.L. (2005): Beet vinasse applied to wheat under dryland conditions affects soil properties and yield. *Eur. J. Agron.*, 23: 336-347.
- Tejada, M., and Gonzalez, J.L. (2006a): Effects of two beet vinasse forms on soil physical properties and soil loss. *Catena*, 68: 41-50.
- Tejada, M., and Gonzalez, J.L. (2006b): The relationships between erodibility and erosion in a soil treated with two organic amendments. *Soil Till. Res.*, 91: 186-198.
- Tejada, M., García, C., Gonzalez, J.L. and Hernández, M.T. (2006): Organic amendment based on fresh and composted beet vinasse: Influence on soil properties and wheat yield. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 70: 900-908.
- Tejada, M., Moreno, J.L., Hernández, M.T. and García, C. (2007): Application of two beet vinasse forms in soil restoration: Effects on soil properties in an arid environment in southern Spain. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 119: 289-298.
- Vaccarino, C., Tripodo, M.M., Lo Curto, R.B. and Cimino, G. (1993) The effects of NaOH treatments of grape-marc, vinasse, and wheat-straw mixtures on their degradability *in vitro*. *Bioresour. Technol.*, 44: 197-202.
- Vaccari, G., Dosi, E., Mantovani, G. and Greselin, M. (1999): Use of vinasses for compost production. *Int. Sugar J.*, 101: 192-196.
- Vassilev, N., Franco, I., Vassileva, M. and Azcon, R. (1996): Improved plant growth with rock phosphate solubilized by *Aspergillus niger* grown on sugar-beet waste. *Bioresour. Technol.*, 55: 237-241.
- Wilkie, A.C., Riedesel, K.J. and Owens, J.M. (2000): Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks. *Biomass Bioenergy*, 19: 63-102.

要 旨

エタノール発酵・蒸留を通じてエタノールを製造する過程では、多量の廃液（エタノール廃液）が排出される。そのため、エタノール廃液の処理問題は循環型社会の構築のための重要な課題である。エタノール廃液の処理方法の一つとして農地還元が挙げられる。これはエタノール廃液に肥料成分が含まれるためである。しかし、pH が低いことや電気伝導度が高いこと、溶存有機物を多く含むことなど、多量に農地還元された場合、農地土壌環境へ大きなインパクトを与えることが懸念される。本総説では、作物栽培への利用のための試験研究に加え、エタノール廃液の農地還元による土壌の物理性、化学性、微生物特性の変化と不飽和土層内での窒素・炭素の動態に関する研究を概観した。そして、土壌物理学的視点からの今後の展開方向について提言を行った。

キーワード：土壌環境，物質循環，バイオエタノール，農地還元，廃液処理