

第Ⅵ章 総合考察

第1節 メタン発酵消化液由来資材の肥料的効果について

1. メタン発酵消化液の固液分離が肥料的効果に及ぼす影響

中村ら (2007a) によれば、乳牛ふん尿と野菜汁を原料とするメタン発酵消化液を固液分離することにより、メタン発酵消化液に含まれる全窒素の1/3が液体分に、2/3が固体分に移行する。また、アンモニウム態を主体とする無機態窒素の大部分は液体分に移行する。リン酸は、大部分が固体分に移行する。加里は2/3が液体分に、1/3が固体分に移行する (第5-1表)。したがって、メタン発酵消化液を固液分離することにより、アンモニウム態窒素と加里を含む速効性の液肥である脱水ろ液と、有機態窒素とリン酸および加里を含む脱水ケーキが生成する。

脱水ろ液については、エダマメおよびキャベツにおいて、脱水ろ液に含まれる窒素分が基肥窒素のすべてを代替しても良好な生育が得られることが明らかにされている (草川ら, 2007)。脱水ろ液に含まれる窒素の大部分がアンモニウム態窒素であることから、慣行の液体肥料と同様に活用することが可能であると考えられる。ただし、宮田・池田 (2006) が報じているとおり、硝酸化成能の低い土壌においては、その利用を避ける必要がある。

一方、脱水ケーキそのものを農地に施用して肥料的効果を評価した事例は認められず、その他の材料と混合して堆肥化されている事例が多い (白石ら, 2007; 中村, 2012)。中村ら (2007a) によれば、脱水ケーキのC/N比は8程度で、メタン発酵の原料となっている乳牛ふん尿のC/N比16と比べて低い。しかし、脱水ケーキに含まれる窒素の大部分は有機態であると考えられる。そのため、短期的な窒素肥料的効果は期待できず、リン酸および加里資材としての活用が現実的であると考えられる。

2. 脱水ろ液の濃縮処理が肥料的効果に及ぼす影響

脱水ろ液を濃縮処理することにより、本研究に供試した濃縮液肥が得られる。濃縮処理の方法としては逆浸透膜を用いたろ過 (迫田ら, 2007) と減圧蒸留 (山岡ら, 2006) がある。どちらの濃縮処理を行った場合でも、脱水ろ液から除去した水にアンモニウム態窒素が移行する。そのアンモニウム態窒素濃度は、逆浸透膜ろ過で数百 mg L^{-1} 、減圧蒸留では蒸留初期で10,000 mg L^{-1} 程度、最終的には10 mg L^{-1} 程度となる (迫田ら, 2007; 山岡ら, 2006)。しかし、脱水ろ液そのものが減容化されるため、脱水ろ液のアンモニウム態窒素濃度は増加し、逆浸透膜ろ過では1,000~3,500 mg L^{-1} 、減圧蒸留では10,000 mg L^{-1} 程度となる。したがって、脱水

ろ液を濃縮処理することにより、より高濃度のアンモニウム態窒素を含む液肥が得られ、その特性は脱水ろ液と同様と考えられる。

3. 消化液脱水ケーキの炭化処理が肥料的効果に及ぼす影響

炭化処理においては、炭化条件の違いが、炭化物の性質に大きな影響を及ぼす。炭化温度が高いほど、炭化処理による窒素の消失量は大きい (Chan and Xu, 2009; Shinogi, 2004)。また、畜ふん炭化物における無機態窒素含量は極めて低く、450 °Cで炭化された畜ふんの無機態窒素含量は2 mg kg^{-1} (Chan et al., 2007)、500 °Cで炭化された牛ふんの無機態窒素含量は1 mg kg^{-1} (真行寺・松丸, 2007) との報告がある。牧ら (2009) は、おがくず入り牛ふん堆肥を300 °Cで炭化すると無機態窒素含量がゼロになり、500 °Cで炭化するとすべての窒素が不可給態になると報告している。また、横山ら (2009) は、300 °C、350 °Cおよび400 °Cで炭化した鶏ふん炭化物を恒温培養し、炭化温度が高いほど、無機化する窒素量が減少することを認めている。生ゴミの炭化物についても、炭化により窒素の可給性が低下するとの報告が得られており、炭化の過程において、600 °Cを超える高温により表面の塩基度が上昇し、アミン官能基として存在する有機態窒素がピリジン様化合物に変化するためである (Bagreev et al., 2001)。この有機態窒素の形態変化は400 °Cから600 °Cの間に起こると考えられ、脱水酸基反応のために炭化物のpHは7.7から11.5に一気に上昇する。小林 (2009) は、500 °Cで炭化したタマネギ残さ炭化物には窒素肥効が全く認められないと報告している。

これらの報告から600 °Cを超える温度で、脱水ケーキを炭化した場合には、その窒素肥効はほとんど期待できないと考えられる。一方、比較的低温域で炭化された場合には、その窒素肥効を考慮しなければいけない可能性がある。歌野ら (2007) は、コマツナ栽培において、牛ふん炭化物の窒素肥効率を化学肥料の10%と想定して栽培試験を行った。その結果、400 °Cで炭化された牛ふん炭化物は、窒素肥料的効果をほとんど持たないが、250 °Cで炭化された牛ふん炭化物を施用した区のコマツナ新鮮重は化学肥料区と同等になり、一定の窒素肥料的効果を認めている。本試験においても4週間の恒温培養の結果、濃縮液肥のみのDL区と比べて濃縮液肥を脱水ケーキ炭に添加したDL+BC区のアンモニウム態窒素量は明らかに多くなっている (第4-3図)。これは、脱水ケーキ炭に含まれる有機態窒素の無機化を示すと考えられる。本試験に供した炭化物は330 °Cという比較的低温で炭化されていることから、歌野ら (2007) が供した250 °Cで炭化された牛ふん炭化物と同様に、肥料的効果を示す可能

性がある。

以上のように、消化液脱水ケーキ炭化物の窒素肥料的効果については、その炭化温度により大きく変化し、炭化温度が600℃を超える場合には、窒素肥料的効果は期待できないが、炭化温度が400℃以下の場合には、ある程度の窒素肥料的効果を期待することができる。

炭化処理による全リンの減少はほとんど認められない。450℃で生ゴミを炭化した場合における全窒素の減少は55%であったが、全リンの減少はほとんど認められなかったとの報告がある(Bridle and Pritchard, 2004)。しかし、炭化処理の前後におけるリンの可給性は大きく異なり、炭化処理前の原料の全リンに占める有効態リンの割合が40%あったのに対し、炭化物の全リンに占める有効態リンは13%に減少した(Pritchard, 2003)。Shinogi (2004)は、生ゴミを250℃で炭化処理した時のク溶性リン含有率が0.98%であったのに対し、800℃で炭化処理した時には0.06%に低下したと報じている。

このように、炭化処理を行うことにより、炭化物中の全リンはほとんど減少しないものの、その可給性は低下する。

炭化処理により、全カリウムの含有率はわずかに上昇するが、その可給性は低下する。Shinogi (2004)は、生ゴミの炭化処理により、250℃においては全カリウム含量が0.51%、600℃においては1.12%と倍増したが、有効態カリウムは14分の1以下に減少したと報告している。また、Yu et al. (2005)は、炭化温度を変化させた稲わら炭化物において、炭化温度を上昇させるほど、全カリウムおよび水溶性カリウムが減少するが、ク溶性カリウムはほとんど変化しないと報告している。

第2節 メタン発酵消化液由来資材の施用が温室効果ガスの発生に及ぼす影響

1. 濃縮液肥の施用が温室効果ガスの発生に及ぼす影響

濃縮液肥の原料となる消化液の施用は、化学肥料を施用した場合と比較してN₂Oの放出量を増大させることが明らかとなっており、その原因は消化液の施用による土壌水分の増加が硝酸化成を活発にしたためとされている(中村ら, 2009)。本研究においても濃縮液肥の施用により、試験初期においてはN₂Oの放出量が増大した(第5-1図)。この原因としては、土壌水分の増加(第5-2図)と併せて、濃縮液肥に含まれる有機態炭素が硝酸化成に関与する微生物の活動を活発にしたためと推測される。ただし、濃縮液肥のC/N比は0.52と低いため、短期間のうちに有機態炭素は分解されてしまい、硝酸化成を促進する効果は一時的なものとなる。C/N比の低い蒸留廃液を施用し、土壌からのN₂O放出量を測定したAlotaibi and Schoenau (2013)は、炭素および

窒素の枯渇により、土壌からのN₂O放出量が、実験が進むにつれ減少したと報告している。実験後期において、濃縮液肥を施用した土壌からのN₂O放出量が化学肥料区と同等以下になったことから(第5-1図)、有機態炭素を含む濃縮液肥の施用は、一時的に土壌からのN₂O放出量を増大させるものの、長期的には化学肥料を施用した場合と同等の放出量になると結論づけられる。

また、CO₂の放出量は化学肥料を施用した場合とほとんど変わらなかった(第5-3図b)。これは、Alotaibi and Schoenau (2013)の蒸留廃液を用いた試験事例と同様に、濃縮液肥のC/N比が低く、分解されてCO₂として放出される炭素量がわずかであるためと推察される。

以上より、濃縮液肥の施用は、化学肥料を施用した場合と比較して、N₂OおよびCO₂の放出量を増大させないと判断される。

2. 脱水ケーキ炭の施用が温室効果ガスの発生に及ぼす影響

バイオマスを炭化したバイオ炭の施用が温室効果ガスの発生に及ぼす影響は、炭化原料と炭化条件によって異なるとされている(Lehmann, 2007)。炭化温度が低く、易分解性炭素を多く含むバイオ炭は、その施用により従属微生物の活動を活発にし、硝化や脱窒を促進する可能性が高い(Kamewada, 2007; Velthof et al., 2002)。これにより、脱水ケーキ炭を施用した土壌からのN₂O放出量が増加したと考えられる(第5-3図a)。同様に、易分解性炭素を含む脱水ケーキ炭の施用により、微生物分解を受けて放出されるCO₂の発生量も増加したと推測される(第5-3図b)。

以上より、易分解性炭素を含む脱水ケーキ炭の施用は、化学肥料を施用した場合と比較して、N₂OおよびCO₂の放出量を増大させると判断される。

3. メタン発酵消化液由来資材と化学肥料の製造時における温室効果ガス排出量の比較

メタン発酵消化液に由来する濃縮液肥は、①メタン発酵②消化液の固液分離③脱水ろ液(消化液の液体分)の濃縮という過程を経て製造される。

乳牛ふん尿および野菜残さのメタン発酵過程におけるCO₂発生量は、メタン発酵槽を加熱するための電力消費量から求められる。山田バイオマスプラントで得られたメタン発酵槽の消費電力量は約40 kWhである(中村ら, 2007b)。これは、メタン発酵槽の加熱に電気ヒーターを用いているためである。菱沼ら(2008)の事例にならって、系統電力1 kWh当たりのCO₂排出係数を0.41 kg とすると、1時間当たり16.4 kgのCO₂が排出される。

メタン発酵消化液の容量は135 m³、メタン発酵槽での滞留日数は27日を想定しているため(市原・矢野, 2007)、消化液1 m³あたりの滞留時間数は(27日×24h)÷135=4.8

h となる。消化液の水分率は96.3%と高いため(中村, 2010), 比重を1と仮定すると, 消化液1 kg あたりの滞留時間数は0.0048hとなる。したがって, メタン発酵過程における消化液1kg あたりのCO₂ 発生量は, $0.0048 \text{ h} \times 16.4 \text{ kg/h} = 0.079 \text{ kg}$ となる。

消化液の固液分離過程においては, 固液分離装置の電力消費に伴うCO₂ 発生のみを考慮する。山田バイオマスプラントで得られた消化液脱水機(消化液を固液分離する装置)の消費電力量は約0.8 kWhである(中村ら, 2007b)。系統電力1 kWh当たりのCO₂ 排出係数を0.41 kg とすると, 1時間当たり0.328 kg のCO₂ が排出される。消化液脱水機の処理能力は1時間当たり16 kg であるため(市原・矢野, 2007), 消化液1 kg 当たりのCO₂ 排出量は $0.328 \div 16 = 0.021 \text{ kg}$ である。1 kg の消化液から870 g の脱水ろ液が得られるため, 脱水ろ液1 kg 当たりの固液分離過程でのCO₂ 排出量は $0.021 \text{ kg} \div 870 \text{ g} \times 1,000 \text{ g} = 0.024 \text{ kg}$ である。また, 脱水ろ液1 kg 当たりのメタン発酵過程でのCO₂ 排出量は $0.079 \text{ kg} \div 870 \text{ g} \times 1,000 \text{ g} = 0.091 \text{ kg}$ となる。

脱水ろ液の濃縮過程においては, 濃縮装置の電力消費に伴うCO₂ 発生のみを考慮する。山田バイオマスプラントで得られたRO(脱水ろ液を濃縮する装置)の消費電力量は約4 kWhである(中村ら, 2007b)。系統電力1 kWh当たりのCO₂ 排出係数を0.41 kg とすると, 1時間当たり1.64 kg のCO₂ が排出される。1分間あたりの処理量は1.5~2.5 L とされているため(市原・矢野, 2007), 仮に2.5 L/min の速度で濃縮処理がなされるとすると, 1時間で150 L の脱水ろ液を処理できる。脱水ろ液の比重を1とすると, 脱水ろ液1 kg あ

たりのCO₂ 排出量は, $1.64 \text{ kg} \div 150 = 0.011 \text{ kg}$ となる。RO膜ろ過を行った場合, 脱水ろ液の68.5%が濃縮液肥となる(市原・矢野, 2007)。したがって濃縮過程における濃縮液肥1kg 当たりのCO₂ 排出量は, $0.011 \text{ kg} \div 0.685 = 0.016 \text{ kg}$ となる。同様にメタン発酵過程におけるCO₂排出量は $0.091 \text{ kg} \div 0.685 = 0.133 \text{ kg}$, 固液分離過程におけるCO₂ 排出量は $0.024 \text{ kg} \div 0.685 = 0.035 \text{ kg}$ となる(第6-1表)。

このように計算すると, 濃縮液肥1 kg を製造する過程におけるCO₂ 排出量は, $0.133 \text{ kg} + 0.035 \text{ kg} + 0.016 \text{ kg} = 0.184 \text{ kg}$ となる。濃縮液肥1 kg には無機態窒素が1.3 g 含まれることから(第2-2表), 無機態窒素1 kg を製造するために排出されるCO₂ の量は, $0.184 \text{ kg} \div 1.3 \text{ g} \times 1,000 \text{ g} = 142 \text{ kg}$ となる。

一方, 窒素1 kgに相当する硫酸を合成するために必要なエネルギーは, 60.6 MJ である(越野, 1992)。1 MJ をCO₂ 排出量に換算すると約70 g に相当することから, 約 4.2 kg となる。したがって, 窒素1 kg に相当する濃縮液肥を製造するために排出されるCO₂ の量は, 化学肥料の約 30倍となる。

メタン発酵消化液に由来する脱水ケーキ炭は, ①メタン発酵②消化液の固液分離③脱水ケーキの乾燥④脱水ケーキの炭化という過程を経て製造される。

前記のとおり, メタン発酵過程における消化液1 kg 当たりのCO₂発生量は, 0.079 kg である。同じく, 消化液の固液分離過程における消化液1 kg 当たりのCO₂ 排出量は0.021 kg である。1 kg の消化液からは130 g の脱水ケーキが得られるため, 脱水ケーキ1 kg 当たりの固液分離過程で

第 6-1 表 濃縮液肥および脱水ケーキ炭の製造過程における二酸化炭素発生量

Experimented material	Manufacturing process	Electric power consumption ¹⁾ (kWh)	CO ₂ emission ²⁾ (kg/kg)
Digested liquid	Methane fermentation	40.0	0.133
	Solid-liquid separation	0.8	0.035
	Concentration	4.0	0.016
	total	-	0.184
Biochar	Methane fermentation	40.0	5.714
	Solid-liquid separation	0.8	1.521
	Drying	0	0.000
	Carbonization	10.3	0.324
	total	-	7.559

1) quoted from "Ichihara and Yano(2007)"and "Nakamura et al.(2007b)"

2) per 1kg of experimented material

のCO₂ 排出量は $0.021 \text{ kg} \div 130 \text{ g} \times 1,000 \text{ g} = 0.162 \text{ kg}$ である。また、脱水ケーキ1 kg 当たりのメタン発酵過程でのCO₂ 排出量は $0.079 \text{ kg} \div 130 \text{ g} \times 1,000 \text{ g} = 0.608 \text{ kg}$ となる。

脱水ケーキの乾燥は天日で行われるため、CO₂ の排出を伴うエネルギー投入は行われない。したがって、脱水ケーキの乾燥過程でのCO₂ 排出はゼロと仮定する。なお、乾燥前の脱水ケーキの含水率は78 %、乾燥後の含水率は40 %である(中村ら, 2007b)。したがって、乾燥前の脱水ケーキ1 kg から乾燥後の脱水ケーキ367 g が得られる。乾燥後の脱水ケーキ1 kg 当たりの固液分離過程でのCO₂ 排出量は、 $0.162 \text{ kg} \div 367 \text{ g} \times 1,000 \text{ g} = 0.441 \text{ kg}$ 、メタン発酵過程でのCO₂ 排出量は、 $0.608 \text{ kg} \div 367 \text{ g} \times 1,000 \text{ g} = 1.657 \text{ kg}$ となる。

脱水ケーキの炭化過程においては、資材に含まれる炭素の73 %が排ガスとして大気へ放出されることが明らかになっている(中村ら, 2007b)。乾燥後の脱水ケーキ1 kg は 380 g の炭素を含むので、その73 % に相当する277 g の炭素が炭化時にCO₂ として放出される。277 g の炭素は 1,017 g のCO₂ に相当する。乾燥後の脱水ケーキ1 kg を原料として、脱水ケーキ炭290 g が作成される(中村ら, 2007b)。したがって、脱水ケーキ1 kg を炭化する過程におけるCO₂ 排出量は $1,017 \text{ g} \div 290 \text{ g} \times 1,000 \text{ g} = 3,507 \text{ g}$ となる。ただし、炭化過程で排ガスとして放出されるCO₂は、乳牛ふん尿および野菜残さ由来のものであるため、ここでは菱沼ら(2008)の試算と同様に、カーボンニュートラルの考えからカウントしない。また、炭化装置の消費電力量は10.3 kWhである(市原・矢野, 2007)。系統電力1 kWh当たりのCO₂ 排出係数を0.41 kg とすると、1時間当たり4.22 kg のCO₂ が排出される。炭化装置の処理能力は1時間当たり45 kg であるため(市原・矢野, 2007)、乾燥後の脱水ケーキ1 kg 当たりのCO₂ 排出量は $4.22 \text{ kg} \div 45 = 0.094 \text{ kg}$ である。乾燥後の脱水ケーキ1 kg を原料として、脱水ケーキ炭290 g が作成されることから、脱水ケーキ炭1 kg 当たりの固液分離過程でのCO₂ 排出量は $0.441 \text{ kg} \div 290 \text{ g} \times 1,000 \text{ g} = 1.521 \text{ kg}$ 、メタン発酵過程でのCO₂排出量は $1.657 \text{ kg} \div 290 \text{ g} \times 1,000 \text{ g} = 5.714 \text{ kg}$ 、炭化過程でのCO₂ 排出量は $0.094 \text{ kg} \div 290 \text{ g} \times 1,000 \text{ g} = 0.324 \text{ kg}$ である(第6-1表)。

このように計算すると、脱水ケーキ炭1kgを製造する過程におけるCO₂ 排出量は、 $5.714 \text{ kg} + 1.521 \text{ kg} + 0.324 \text{ kg} = 7.559 \text{ kg}$ となる。脱水ケーキ炭1 kg にはク溶性リン酸が40.9 g 含まれることから(第3-3表)、ク溶性リン酸1 kgを製造するために排出されるCO₂ の量は、 $7.559 \text{ kg} \div 40.9 \text{ g} \times 1,000 \text{ g} = 185 \text{ kg}$ となる。

一方、リン1 kg に相当する過リン酸石灰を製造するために必要なエネルギーは、18.9 MJである(越野, 1992)。リ

ン1 kg はリン酸2.29 kg に相当するため、リン酸1 kg に相当する過リン酸石灰を製造するためのエネルギーは、 $18.9 \div 2.29 = 8.3 \text{ MJ}$ となる。1 MJをCO₂ 排出量に換算すると約70 g に相当することから、約0.58 kg となる。

このように計算すると、ク溶性リン酸1kg を製造するうえでのCO₂ 排出量は、脱水ケーキ炭が、過リン酸石灰の約300倍となる。

以上より、窒素1 kg、リン酸1 kg に相当するメタン発酵消化液由来資材を製造するために排出されるCO₂ の量は、それぞれ、化学肥料を用いる場合の約30倍、300倍となる。この原因は、メタン発酵消化液由来資材の養分含有率が、化学肥料と比べて低いことと、メタン発酵過程における電力消費が大きいことが原因と考えられる。ただし、この試算ではメタン発酵施設で製造されるバイオガスにより発電した電気の供給および発電時の余熱によるメタン発酵槽の加温を前提としていない。仮に、バイオガス発電や熱利用により、メタン発酵槽の加温装置等に必要なエネルギーを補うことができれば、メタン発酵消化液由来資材の製造過程における化石燃料由来のCO₂ 排出量をゼロに近づけることができる。その結果、メタン発酵消化液由来資材の製造過程における温室効果ガス発生量は、化学肥料と比べて小さくなる可能性がある。

山田バイオマスプラントで得られたバイオガスを発電に利用した場合、メタン発酵槽の加温等に必要な系統電力量を削減できる。仮に発生するバイオガスをすべて発電利用した場合の系統電力削減量は、以下のとおり計算できる。

山田バイオマスプラントで発生するバイオガスの量は、120 Nm³/dayと設定されている(関・若松, 2007)。バイオガスのメタン含有率は約60%で、メタンの高位発熱量は39.7 MJ/Nm³である(中村, 2007)。したがって、バイオガスの高位発熱量は約24 MJ/Nm³となる。ガス発電機の発電効率を30 %と仮定すると、 $120 \times 24 \times 0.3 = 864 \text{ MJ/day}$ の発電が可能である。864 MJ/day は240 kWh/day に相当する。メタン発酵槽の消費電力量は40 kWh/すなわち960 kWh/day となるので、その25 %をバイオガス発電により補うことができる。

4. メタン発酵消化液由来資材の製造過程と圃場施用後の温室効果ガス発生量の比較

前項で示したとおり、濃縮液肥および脱水ケーキ炭の製造過程においては、資材1 kg に対して、それぞれ0.184 kg、7.559 kg のCO₂ が発生する(第6-1表)。ここでは、これらの数値を圃場施用後の温室効果ガス発生量と比較する。なお、温室効果ガスが地球温暖化に及ぼす影響の強さは、その種類により異なる。IPCC (2013)によれば、CH₄ はCO₂ の28倍、N₂OはCO₂ の265倍の温室効果を持つ。これらの数値は地球温暖化係数と呼ばれる。ここでは、圃場施用後に

発生するN₂Oに地球温暖化係数を乗じ、CO₂ 相当量に変換して試算する。

試算における濃縮液肥および脱水ケーキ炭の圃場への施用量は、第V章に示した脱水ケーキ炭中量区（BM区）と同量とする。すなわち、窒素で12 g m²、炭素で36 g m²とする（第5-3表）。窒素 1 g に相当する濃縮液肥の製造過程で排出されるCO₂ の量は、前項で示したとおり、142 g である。したがって、1 m² に施用する濃縮液肥の製造過程で排出されるCO₂ の量は142×12=1,704 g となる（第6-2表）。また、脱水ケーキ炭の全炭素含量は、337 mg kg⁻¹ である（第3-1表）。したがって、炭素1 g に相当する脱水ケーキ炭の量は、1÷337×1,000=2.97 g となる。脱水ケーキ炭 1 kg の製造過程で排出されるCO₂ の量は、前項で示したとおり、7.559 kg である。したがって、1 m² に施用する脱水ケーキ炭の製造過程で排出されるCO₂ の量は2.97×36×7.559=808 g となる（第6-2表）。一方、脱水ケーキ炭中量区からの温室効果ガス放出量は、N₂O が63.6 mg m²、CO₂ が215.5 g m² であった（第5-4表）。N₂Oの数値に地球温暖化係数を乗ずると、63.6×265÷1,000=16.8 g m² となり、合計量は16.8+215.5=232.3 g m² となる。

これらの試算結果から、メタン発酵消化液由来の製造過程と圃場施用後の温室効果ガス発生量を比較すると、製造過程における発生量がより大きいことが明らかとなった。ただし、前項でも記したとおり、バイオガス発電や発電時の余熱利用によりメタン発酵消化液由来製造過程の消費電力を補うことができれば、製造過程における温室効果ガス発生量を削減でき、圃場施用後の発生量がより大きな比率を占めることとなる。

Nakamura et al. (2014) は、山田バイオマスプラント

から発生するメタン発酵消化液を直接農地に散布した場合、メタン発酵消化液の輸送過程、散布過程および施用後の圃場から発生するCO₂ の合計量を消化液1 t あたり8.1 kg とし、その67 %がメタン発酵消化液の輸送過程で発生すると試算している。その量は8.1×0.67=5.43 kg となる。一方、固液分離およびRO膜ろ過を経て、濃縮液肥を製造した場合、1 t のメタン発酵消化液は約600 kg の濃縮液肥に変換される。前項で示したとおり、エネルギーをすべて外部電力に依存した場合の消化液の固液分離と脱水ろ液の濃縮過程における濃縮液肥1 kg あたりのCO₂ 排出量は0.051 kg である。したがって、濃縮液肥600 kg 当たりに換算すると 0.051×600=30.6 kg となる。この値は、Nakamura et al. (2014) が試算した消化液の輸送過程において発生する CO₂ 量 5.43kg と比べて大きい。このように、メタン発酵消化液の減容化を目的とした処理過程におけるCO₂ 発生量は、消化液の輸送過程におけるCO₂ 発生量と比べて大きくなるため、温室効果ガス削減の観点からは、メタン発酵消化液を直接農地に散布することが望ましいと判断される。

第3節 メタン発酵消化液由来資材の農業利用における課題

1. 圃場への重金属および塩素の蓄積

本研究で取り上げたメタン発酵消化液由来資材の原料は、乳牛ふん尿と野菜残さをメタン発酵した消化液である。乳牛ふん尿をはじめとする家畜ふん尿には重金属が含まれることが知られており、その含有率は畜種によって異なる（森、2010）。本研究に供した脱水ケーキ炭の炭化原料である山田バイオマスプラントで生産された消化液の乾物1 kg 当た

第6-2表 メタン発酵消化液由来資材の製造過程と圃場施用後の温室効果ガス発生量

Manufacturing process				
Experimented materials	CO ₂ emission per 1g of material(g/g)	CO ₂ emission per 1g of nitrogen(g/gN)	CO ₂ emission per 1g of carbon(g/gC)	CO ₂ emission from the amount of material per unit area ¹⁾ (g/m ²)
Digested liquid	0.184	142	—	1,704
Biochar	7.559	—	2.97	808
total	—	—	—	2,512
After application				
Experimented materials	N ₂ O flux per area(g/m ²)	N ₂ O flux per area(CO ₂ conversion) ²⁾ (g/m ²)	CO ₂ flux per area(g/m ²)	Total (g/m ²)
Digested liquid and Biochar	0.064	16.8	215.5	232.3

1)Application rate is assumed that digested liquid:12gN/m², biochar:36gC/m²

2)Multiplied by 265 as global warming potential

りに含まれる重金属の量は、カドミウムが0.4 mg、ヒ素が0.5 mg、鉛が3.5 mg、銅が81 mg、亜鉛が330 mg である(中村, 2010)。炭化処理により、炭化温度より沸点の低い重金属含量は減少する可能性がある。なお、主要な重金属の沸点は、カドミウムが766.8 °C、ヒ素が613 °C、鉛が1,750 °C、銅が2,562 °C、亜鉛が907 °Cである。本研究に供した脱水ケーキ炭の炭化温度は230~330 °Cであり、重金属の沸点と比べて低い。したがって、炭化処理による重金属含量の減少は期待できず、脱水ケーキ炭に含まれる重金属含量は、消化液と同等以上であると判断される。

国内においては、「農用地における土壤中の重金属等の蓄積防止に係る管理基準について」により、表層土壌における亜鉛の管理基準値が乾土1 kg 当たり120 mg 以下と定められている(環境省, 1984)。千葉県の農耕地土壌における全亜鉛含量の平均値は、黒ボク土では乾土1 kg 当たり103 mg と報告されている(在原ら, 1992)。作土深を15 cm、土壌の仮比重を0.67と仮定すると、10a当たり1.7 kg が平均的な千葉県の黒ボク土圃場における亜鉛の施用限界量となる。仮に脱水ケーキ炭に含まれる亜鉛の量が 330 mg kg⁻¹ とすると、10a当たり5.2 t が脱水ケーキ炭の施用限界量となる。このように、脱水ケーキ炭に含まれる亜鉛が、施用におけるボトルネックとなる可能性が高い。

しかし、バイオ炭に含まれる重金属は安定性が高く、重金属を含む都市ゴミ炭化物を施用してコマツナをポット栽培したところ、収穫物の重金属含量には影響を及ぼさなかったとの報告が認められる(山下ら, 2007)。また、バイオ炭の施用により土壌のpHが変化し、作物の重金属吸収量が減少したとの報告も見られる(Kameyama et al., 2014; Cui et al., 2014)。バイオ炭の施用と重金属の関係については、バイオ炭そのものに含まれる重金属の影響と、バイオ炭の施用が作物の重金属吸収に及ぼす影響を併せて考慮する必要があるといえる。

本研究に供したメタン発酵消化液の原料である乳牛ふん尿は、塩素を多く含むことが知られている(野口・久保, 1998)。乳牛ふん尿をメタン発酵原料とした消化液の液体分を濃縮した濃縮液肥には、1,520 mg L⁻¹ の塩素が含まれている。トマトの半促成栽培1作を通した塩素の施用量は21 g m⁻² となった。また、トマトの1作あたりの塩素吸収量は15.9 g m⁻² であった。これによりトマトの半促成栽培1作あたり、5.1 g m⁻² の塩素が圃場に残留すると計算される。作土深を15 cm、土壌の仮比重を0.67と仮定すると、濃縮液肥を用いた半促成栽培を1作実施するごとに、乾土1 kg あたり51 mg の塩素が投入される。土壌中の塩素はトマトの収量

に影響を及ぼし、乾土1 kg あたりの塩素含量が1,050 mg を超えると、収量が10 %減少するとの報告が見られる(古川ら, 1994)。したがって、仮に栽培前の作土における塩素含量がゼロであったとしても、20作程度の栽培を行うことで、トマトの収量に影響を及ぼすことが予想される。このように、濃縮液肥の施用にあたっては、含まれる塩素に留意する必要がある。

2. メタン発酵消化液の処理コスト

メタン発酵消化液の処理方法としては、浄化後に水系に放流するか、肥料的資材として農用地に施用するかのいずれかがある。柚山ら(2006)は、乳牛ふん尿を原材料としたメタン発酵を行うと仮定して、牛ふん尿の受け入れ費を500円/t、メタン発酵消化液を液肥として販売した場合の価格を1,000円/t とした場合、処理規模25 t/日の施設では、年間1,000万円の赤字になると試算している。本研究の対象となった山田バイオマスプラントから産出されるメタン発酵消化液は、1 L あたり1,690 mg のアンモニウム態窒素を含んでいる(第2-2表)。したがって1 t の消化液には約1.7 kg のアンモニア態窒素が含まれることとなる。アンモニウム態窒素1 kg あたりの価格は588円となる。一方、アンモニウム態窒素を21 %含む硫安の農家販売価格は約1,200円/20kg である(一財)肥料経済研究所, 2014)。アンモニウム態窒素1 kg あたりの価格は286円となる。このように試算に用いられたメタン発酵消化液の液肥としての価格は、化学肥料の単肥と比較しても割高である。

また、柚山ら(2006)は、乳牛ふんを直接炭化処理すると仮定して、牛ふんの受け入れ費を500円/t、炭化物を販売した場合の価格を10,000円/t とした場合、処理規模25 t/日の施設では、年間7,600万円の赤字になると試算している。本研究の対象とした脱水ケーキ炭のク溶性リン酸含量は4.09%である(第3-3表)。したがって、脱水ケーキ炭1 tには40.9 kg のク溶性リン酸が含まれる。脱水ケーキ炭の販売価格を10,000円/t と仮定すると、リン酸1kg あたりの価格は244円となる。一方、可溶性リン酸を17 %含む過リン酸石灰の農家販売価格は約1,500円/20kg である(一財)肥料経済研究所, 2014)。リン酸1 kg あたりの価格は442円となる。今後、リンの枯渇が進み、炭化物のリン資材としての価値が高まる可能性はある。仮に脱水ケーキ炭の販売価格を20,000円/t(リン酸1 kg あたりの価格は488円)とした場合、柚山ら(2006)の計算式に当てはめると、処理規模 25t/日の施設での年間赤字試算額は7,100万円となる。

このように、メタン発酵消化液および消化液由来資材の利用にあたっては、処理コストの高さが問題となる。

第4節 結論

本研究において取り上げた乳牛ふん尿および野菜残さを原料としたメタン発酵消化液由来資材のうち、消化液の液体分を濃縮した「濃縮液肥」は、アンモニウム態窒素と加里を含む速効性肥料であり、その窒素肥料的効果は、無機態窒素をベースとした場合、化学肥料と同等であった(第6-3表)。また、施設栽培における灌水同時施肥が可能であった(第II章)。消化液の固体分を炭化した「脱水ケーキ炭」はク溶性リン酸を含み、そのリン酸肥料的効果は、慣行のリン酸肥料と同等であった。また、リン酸固定力の異なる黒ボク土および褐色低地土のいずれにおいてもリン酸肥料的効果を示した(第III章)。窒素・リン酸・加里を同等含む資材とすることを目的として試作した「濃縮液肥添加脱水ケーキ炭」は、窒素・リン酸・加里を1:9:12の比率で含む資材となった。また、作成時に濃縮液肥に含まれるアンモニアの一部がMAP態に変化した(第IV章)。なお、濃縮液肥添加脱水ケーキ炭の窒素肥料的効果は濃縮液肥と同等、リン酸肥料的効果は脱水ケーキ炭と同等と判断された。

このように、メタン発酵消化液由来資材の肥料的効果は化学肥料と同等であり、その活用により、化学肥料の代替が可能であるとともに、バイオマス由来資材として、循環型社会の構築に資するものであると考えられる。

また、濃縮液肥の畑地への施用による一酸化二窒素および二酸化炭素の発生量は化学肥料を施用した場合と同等であった(第6-4表)。一方、脱水ケーキ炭の施用は、一酸化二窒素および二酸化炭素の発生量を化学肥料と比べて増加させた。脱水ケーキ炭の施用により土壌に貯留される炭素は、施用量の7割程度であると推定された(第V章)。ただし、一酸化二窒素および二酸化炭素の発生を増加させた原因は、

炭化温度が低いことによる易分解性炭素の存在であると推定されるため、炭化条件を変化させることにより、温室効果ガスの発生量を低減できる可能性がある。このように、メタン発酵消化液由来資材の畑地への施用による温室効果ガスの発生量は、化学肥料と同等かそれ以上であった。したがって、化学肥料の代替物としてメタン発酵消化液由来資材の施用を推進することによる温室効果ガス削減効果は低いと考えられる。

第6-3表 メタン発酵消化液由来資材の肥料的効果

Experimented material	Nitrogen	Phosphate
Digested liquid	As much as chemical fertilizer ¹⁾	Almost not contained
Biochar	Inorganic nitrogen is not contained but some NH ₄ mineralized ³⁾	Equal or more than chemical fertilizer ²⁾
Digested liquid attached biochar	As much as digested liquid ³⁾	Possibly as much as biochar

1)obtained by field cultivation test in Andosol

2)obtained by pot cultivation test in Andosol and Lowland soil

3)obtained by incubation test in Andosol

第6-4表 メタン発酵消化液由来資材の畑地への施用が温室効果ガスの発生に及ぼす影響

Experimented material	CO ₂ flux	N ₂ O flux
Digested liquid	As much as chemical fertilizer	As much as chemical fertilizer
Biochar	More than chemical fertilizer	More than chemical fertilizer

1)results were obtained by container cultivation test in sand dune Regosol

要 旨

メタン発酵は、有望なバイオマス利活用技術だが、残さである消化液が大量に発生する。窒素、リン酸、加里を含む消化液の利用性を高めるため、濃縮・炭化処理が行われているが、処理後の資材の肥料的効果は明らかでない。そこで、消化液を固液分離し、液体分を濃縮した「濃縮液肥」、固体分を炭化した「脱水ケーキ炭」、 「濃縮液肥」を「脱水ケーキ炭」に添加した「濃縮液肥添加脱水ケーキ炭」の肥料的効果と、これらの資材の施用が、圃場からの温室効果ガス発生に及ぼす影響を評価した。

濃縮液肥は、アンモニウム態窒素と加里を多く含み、慣行の液体肥料と無機態窒素施用量を揃えてトマトの灌水同時施肥栽培を実施したところ、生育収量および窒素吸収量は化学肥料区と同等であり、無機態窒素ベースの窒素肥効率は100%であった。脱水ケーキ炭はク溶性のリンを多く含み、コマツナのポット栽培試験でリン酸肥効を評価したところ、慣行のリン酸肥料と同等以上の効果を示した。濃縮液肥添加脱水ケーキ炭は、作成時に、濃縮液肥に含まれるアンモニウム態窒素の3割程度が揮散もしくは 100 g L^{-1} 塩化カリウム溶液で抽出されない形態に変化し、窒素と比べてリン酸および加里含量の高い資材となった。

また、畑条件において、濃縮液肥と脱水ケーキ炭を施用してコマツナを栽培し、土壌からの N_2O および CO_2 放出量を測定したところ、濃縮液肥の施用が N_2O および CO_2 の放出に及ぼす影響は、化学肥料と同程度であった。脱水ケーキ炭は施用量が多いほど、土壌からの N_2O および CO_2 放出量が増加した。

謝 辞

本論文は、農林水産省農林水産技術会議事務局の委託プロジェクト研究「地域活性化のためのバイオマス利活用技術の開発（バイオマス利用モデルの構築・実証・評価）」の成果の一部を取りまとめたものである。

本研究のとりまとめにあたり、千葉大学大学院園芸学研究科教授犬伏和之先生には、終始暖かいご指導とご助言を賜った。また、同研究科教授坂本一憲先生、同研究科教授松岡延浩先生、同研究科教授丸尾達先生には、本論文のご校閲と貴重なご助言を賜った。また、同研究科博士後期課程に同時期に在籍されたAnkit Singla博士(現：Deemed 大学助教授)には、暖かい励ましをいただくとともに、本論文の骨子となるデータを快く提供していただいた。また、八島未和講師をはじめとする土壌学研究室の皆様には様々ご指導、ご協力を賜った。

千葉県農林総合研究センター土壌環境研究室の斉藤研二前室長(現：千葉県農林水産部担い手支援課技術振興室長)、八槇教室長をはじめとする研究室の皆様には、研究の遂行ととりまとめにあたり、多大なご協力を賜った。元千葉県農林総合研究センター長金子文宜博士(現：全農関東肥料農薬事業所主席技術主管)、前同センター生産環境部長真行寺孝博士(現：千葉県海匠農業事務所次長)には数々の暖かいご指導と励ましを賜った。前同センター次長片瀬雅彦博士(現：千葉県立農業大学校副校長)には統計処理に関する貴重なご助言を賜った。また同センターのOBである安西徹郎博士、松丸恒夫博士、山本二美博士には折に触れ、暖かい励ましを賜った。独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所の中村真人博士、山岡賢博士には、研究の推進にあたり様々ご助言を賜った。また、農事組合法人和郷園の相原秀基博士には、貴重なご助言と研究サンプルを快く提供していただいた。ここに記して深く感謝の意を表す。

引用文献

- 相原秀基・阿部邦夫 (2011) 農家圃場におけるメタン発酵消化液を用いた栽培実証試験, 平成23年度農業農村工学会大会講演要旨集, 16-17.
- Akhtar S.S., M.N.Andersen, F.Liu (2014) Biochar mitigates negative effect of salinity on growth, physiology and yield of wheat. 20th WCSS, P2-96, Jeju, Korea.
- Akiyama H., I.P. McTaggart, B.C. Ball, A.Scott (2004) N₂O, NO, and NH₃ emissions from soil after the application of organic fertilizers, urea and water. Water, air, and soil pollution, 156, 113-129.
- Alburquerque J.A., C. de la Fuente, M.P. Bernal (2011) Chemical properties of anaerobic digestates affecting C and N dynamics in amended soils. Agriculture, Ecosystems and Environment, 160, 15-22.
- Alotaibi K.D., J.J.Schoenau (2011) Enzymatic activity and microbial biomass in soil amended with biofuel production byproducts. Applied Soil Ecology, 48, 227-235.
- Alotaibi K.D., J.J.Schoenau (2013) Greenhouse gas emissions and nutrient supply rates in soil amended with biofuel production by-products. Biology and Fertility of Soils, 49, 129-141.
- Amkha S., K. Inubushi, M. Takagaki (2007) Effects of controlled-release nitrogen fertilizer application on nitrogen uptake by a leafy vegetable (*Brassica campestris* L.), nitrate leaching and N₂O emission. Jpn J. Trop Agr., 51, 152-159.
- Amkha S., A. Sakamoto, M. Tachibana, K. Inubushi (2009) Controlled mineralizing acetaldehyde condensation urea (CM-CDU) fertilizer can reduce nitrate leaching and N₂O emission from an Andisol with continuous cropped komatsuna (*Brassica napa* L.). Soil Science and Plant Nutrition, 55, 772-777.
- Anderson J.M., J.S.I. Ingram (1989) Colorimetric determination of ammonium. In: ISSS (ed) A handbook of methods, tropical soil biology and fertility. CAB International, Wallingford, pp 42-43.
- Antil R.S., A. Bar-Tal, P. Fine, A. Hadas (2011) Predicting nitrogen and carbon mineralization of composted manure and sewage sludge in soil. Compost science and utilization, 19, 33-43.
- Antil R.S., B.H. Janssen, E.A. Lantinga (2009) Laboratory and greenhouse assessment of plant availability of organic N in animal manure. Nutrient cycling in agroecosystems, 85, 95-106.
- Antil R.S., M. Singh (2007) Effects of organic manures and fertilizers on organic matter and nutrients status of the soil. Arch Agron Soil Sci., 53, 519-528.
- 在原克之・八槇敦・渡辺春朗 (1992) 千葉県 of 耕地土壌における全亜鉛含量の実態. 千葉県農業試験場研究報告, 33, 123-132.
- Arthurson V. (2009) Closing the global energy and nutrient cycles through application of biogas residue to agricultural land-potential-benefits and drawback. Energies, 2, 226-242.
- Asai H., K.B. Samson, M.H. Stephan, K. Songyikhangsuthor, K. Homma, Y. Kiyono, Y. Inoue, T. Shiraiwa, T. Horie (2009) Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. Field crops research, 111, 81-84.
- Aulakh M.S., J.W. Doran, A.R. Mosier (1992) Soil denitrification: significance, measurement, and effects of management. Advances in Soil Science, 18, 1-58.
- Bagreev A., T.J. Bandosz, D.C. Locke (2001) Pore structure and surface chemistry of adsorbents obtained by pyrolysis of sewage-derived fertilizer, Carbon, 39, 1971-1979.
- Bailey V.L., S.J. Fansler, J.L. Smith, H. Bolton Jr. (2010) Reconciling apparent variability in effects of biochar amendment on soil enzyme activities by assay optimization. Soil biology and biochemistry, 43, 296-301.
- Bera T., A. Patra, T.J. Purakayashta, S.C. Datta (2014) Pyrolysis temperature affects alkalinity and inorganic minerals formation in biochar prepared from different crop residues. 20th WCSS, P2-120, Jeju, Korea.

- Bridle T.R., D. Pritchard (2004) Energy and nutrient recovery from sewage sludge via pyrolysis, *Water science and Technology*, **50**, 169-175.
- Bruun E.W., P. Ambus, H. Egsgaard, H. Hauggaard-Nielsen (2012) Effects of slow and fast pyrolysis biochar on soil C and N turnover dynamics. *Soil biology and biochemistry*, **46**, 73-79.
- Bruun E.W., D. Muller-Stover, P. Ambus, H. Hauggaard-Nielsen (2011) Application of biochar to soil and N₂O emissions: potential effects of blending fast-pyrolysis biochar with anaerobically digested slurry. *European Journal of Soil Science*, **62**, 581-589.
- Bruun S., E. Jensen, L. Jensen (2008) Microbial mineralization and assimilation of black carbon: dependency on degree of thermal alteration. *Organic geochemistry*, **39**, 839-845.
- Cabrera M.L., S.C. Chiang, W.C. Merka, O.C. Pancorbo, S.A. Thompson (1994) Nitrous oxide and carbon dioxide emissions from pelletized and nonpelletized poultry litter incorporated into soil. *Plant and Soil*, **163**, 189-195.
- Cannavo P., A. Richaume, F. Lafolie (2004) Fate of nitrogen and carbon in the vadose zone: in situ and laboratory measurements of seasonal variations in aerobic respiratory and denitrifying activities. *Soil biology and biochemistry*, **36**, 463-478.
- Carole R.S., F.P. Scarigelli (1971) Colorimetric determination of nitrate after hydrazine reduction to nitrite. *Microchemical journal*, **16**, 657-672.
- Chan K.Y., Z. Xu (2009) Biochar: Nutrient Properties and Their Enhancement. *Biochar for environmental management*. p70. Earthscan, London.
- Chan K.Y., V.L. Zwieten, I. Meszaros, A. Downie, S. Joseph (2007) Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. *Australian Journal of Soil Research*, **45**, 629-634.
- 千葉県 (2009) 主要農作物等施肥基準. p.93, p.181.
- 千葉県 (2006) 千葉県園芸作物出荷規格(青果物編). p.19.
- 千葉県・千葉県農林水産技術会議 (2009) 野菜ハンドブック. p.6-7.
- 千葉県・千葉県農林水産技術会議 (2011) 土壌モニタリング調査2巡目(2004~2007)による千葉県耕地土壌の現状. <https://www.pref.chiba.lg.jp/ninaite/seikafukyu/documents/kouchidojo.pdf>(2014年10月16日最終確認)
- Cui L., G. Pan, L. Li, J. Yan, A. Chang (2014) Reduction of rice and wheat Cd uptake via biochar amendment in contaminated paddy soil. 20th WCSS, P2-55, Jeju, Korea.
- Dainy M., P.B. Usha (2014) Soil fertility status, nutrient uptake and yield of cowpea by tender coconut husk biochar application in ferrallitic soils. 20th WCSS, P2-160, Jeju, Korea.
- 土壌環境分析法編集委員会編 1997. 土壌環境分析法. p.176-185, p.231-233, p.243-245, p.251-253. 博友社. 東京.
- (独) 農研機構農村工学研究所 (2012) メタン発酵消化液の畑地における液肥利用—肥料効果と環境への影響—. pp22.
- Dugan E., A. Verhoef, J.S. Robinson, S.P. Sohi (2014) Effect of biochar and maize stover mulch on the physical properties of a sandy loam soil and maize yield. 20th WCSS, P2-137, Jeju, Korea.
- Ebid A., H. Ueno, A. Ghoneim, N. Asagi (2008) Uptake of carbon and nitrogen derived from carbon-13 and nitrogen-15 dual-labeled maize residue compost applied to radish, komatsuna, and chingensai for three consecutive croppings. *Plant and Soil*, **304**, 241-248.
- FAO (2014) Mitigation of Climate Change in Agriculture (MICCA) Programme, <http://www.fao.org/climatechange/micca/en/>(2014年10月16日最終確認)
- Frossard E., P. Tekely, J.Y. Grimal (1994) Characterization of phosphate species in urban sewage sludges by high-resolution solid-state ³¹P NMR. *European Journal of Soil Science*, **45**, 403-408.
- 藤川智紀・中村真人 (2010) 乳牛ふん由来のメタン発酵消化液の施用方法がコマツナの収量と亜酸化窒素発生量に与える影響. *日本土壌肥科学雑誌*, **81**, 240-247.
- 古川雅文・鈴木秀章・松丸恒夫(1994) 塩化ナトリウムを含むかんがい水の長期連用が施設栽培のキュウリおよびトマトの生育、収量に及ぼす影響. *千葉県農業試験場研究報告*, **35**, 9-19.
- Goyal S., K. Chander, M.C. Mundra, K.K. Kapoor (1999) Influence of inorganic properties under tropical conditions. *Biology and Fertility of Soils*, **29**, 196-200.

- Goyal S., K. Sakamoto, K. Inubushi (2000) Microbial biomass and activities along an Andosol profile in relation to soil organic matter level. *Microbes and environments*, 15, 143-150.
- Gupta A.P., R.P. Narwal, R.S. Antil, S. Dev (1992) Sustaining soil fertility with organic-C, N, P and K by using farmyard manure and fertilizer-N in a semi-arid zone: a long-term study. *Arid soil research and rehabilitation*, 6,243-251.
- 服部勉・宮下清貴 (1996) 土の微生物学. p68, 養賢堂, 東京.
- Hayakawa A., H. Akiyama, S. Sudo, K. Yagi (2009) N₂O and NO emissions from an Andisol field as influenced by pelleted poultry manure. *Soil biology and biochemistry*, 41,521-529.
- 早川修・渡辺紀元 (1990) 下水汚泥の理化学的性状に対する焼却処理の影響. *日本土壌肥科学雑誌*, 61, 127-133.
- Hayes M.H.B, R.S. Swift (2014) Characterizations of biochars and their influence on plant growth when added to soil. 20th WCSS, P2-126, Jeju, Korea.
- Herath I., M. Vithanage (2014) Role of biochar on metal ion release kinetics and phytotoxicity reduction in serpentine soils in Sri Lanka. 20th WCSS, P2-59, Jeju, Korea.
- 菱沼竜男・栗島英明・楊翠禁・玄地裕 (2008) LCA手法を用いたメタン発酵施設によるふん尿処理・利用方式の環境影響の評価—堆肥化・液肥化処理との比較—. *Animal behaviour and management*, 44, 7-20.
- 帆秋利洋・天石文・小嶋令一・羽川富夫・大原孝彦 (2005) メタン発酵の研究開発の現状と課題, 大成建設技術センター報, 38, 24-1-4.
- 本間千晶 (2013) 木質チップ熱処理物によるアンモニア揮散抑制と土壌改良効果. *林産試だより*, 2013年1月号, 2-3.
- 本間千晶・佐野弥栄子・窪田実・梅原勝雄・駒澤克己 (2001) 窒素および空気雰囲気下で製造したトドマツ材炭化物の化学構造とアンモニア吸着能. *北海道立林産試験場報*, 15, 1-7.
- 堀間久己・濱戸もえぎ (2009) バイオガスプラント由来消化液の飼料作物における利用効果. *東北農業研究*, 62, 93-94.
- (一財)肥料経済研究所 (2014) 肥料の農家購入価格情報(平成26年). http://www.hi-kei-ken.jp/hiryou/price/hiryou_1.html(2014年10月8日最終確認)
- 池田英男 (1988) そ菜の無機態窒素利用に関する研究—特に施用窒素形態と関連して—. *大阪府立大学紀要*, 40, 89-94, 105-110.
- 稲村達也・陳福剛・間藤徹・井上博茂・山末祐二 (2006) 玄米中に低濃度レベルで含まれるカドミウムのメタン発酵消化液による抑制. *日本作物学会紀事*, 75, 273-280.
- Inubushi K., M.A. Barahona, K. Yamakawa (1999) Effects of salts and moisture content on N₂O emission and nitrogen dynamics in Yellow soil and Andosol in model experiments. *Biology and Fertility of Soils*, 29, 401-407.
- Inubushi K., H. Naganuma, S.Kitahara (1996) Contribution of denitrification and autotrophic and heterotrophic nitrification to nitrous oxide production in andosols. *Biology and Fertility of Soils*, 23, 292-298.
- Inubushi K., S. Goyal, K. Sakamoto, Y. Wada, K. Yamakawa, T. Arai (2000) Influences of application of sewage sludge compost on N₂O production in soils. *Chemosphere. Global change science*, 2, 329-334.
- IPCC. (2007) Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. In: Solomon S.D. et al. (eds) *Climate change 2007: the physical science basis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- IPCC. (2013) Anthropogenic and natural radiative forcing. In: Cambridge University Press (Ed) *Climate change 2013. The physical science basis, contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- 市原昭・矢野聡 (2007) 個別変換技術. *農林業バイオリサイクル研究「システム実用化千葉ユニット」編 アグリ・バイオマスタウン構築へのプロローグ*,18-53.
- 伊藤豊彰・小宮山鉄兵・三枝正彦 (2005) 黒ボク畑におけるリン酸ベースでの家畜ふん堆肥連用がデントコーンの収量および土壌無機態リン酸蓄積に与える影響—施用1年目での評価. *東北大学複合生態フィールド教育研究センター報告*, 21, 27-31.
- 伊藤豊彰・小宮山鉄兵・三枝正彦・森岡幹夫 (2010) 豚ふんおよび鶏ふん堆肥のリン酸組成. *日本土壌肥科学雑誌*, 81, 215-223.

- 岩佐博邦・斉藤研二・犬伏和之 (2014) メタン発酵消化液脱水ケーキ炭化物のリン酸肥効. 日本土壌肥科学雑誌, 85, 439-445.
- 岩佐博邦・山本二美・斉藤研二 (2010) メタン発酵消化液由来の液肥を利用したトマトの灌水同時施肥栽培. 日本土壌肥科学雑誌, 81, 248-251.
- Jeong C., J. Wang, D. Harrell (2014) Effect of biochar amendment on greenhouse emissions from rice paddy and sugarcane soils in the subtropical region of USA. 20th WCSS, O43-7, Jeju, Korea.
- Johnson J.M.F., A.J. Franzluebbers, S.L. Weyers, D. C. Reicosky (2007) Agricultural opportunities to mitigate greenhouse gas emissions. *Environmental Pollution*, 150, 107-124.
- Jones D.L., D.V. Murphy, M. Khalid, W. Ahmad, G. Edwards-Jones, T.H. DeLuca (2011) Short-term biochar-induced increase in soil CO₂ release is both biotically and abiotically mediated. *Soil biology and biochemistry*, 43, 1723-1731.
- Jones D.L., J. Rousk, G. Edwards-Jones, T.H. DeLuca, D.V. Murphy (2012) Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three year field trial. *Soil biology and biochemistry*, 45, 113-124.
- Jones S.K., R.M. Rees, U.M. Skiba, B.C. Ball (2007) Influence of organic and mineral N fertiliser on N₂O fluxes from a temperate grassland. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 121, 74-83.
- 甲斐秀昭 (1978) 水田土壌中における窒素の形態変化と有効性. 川口桂三郎編 水田土壌学, p233. 講談社, 東京.
- Kamewada K. (2007) Vertical distribution of denitrification activity in an Andisol upland field and its relationship with dissolved organic carbon: effect of long-term organic matter application. *Soil Science and Plant Nutrition*, 53, 401-412.
- Kameyama K., T. Miyamoto, Y. Iwata, T. Shiono (2014) Effects of biochar incorporation on Cd bioavailability in a Cd-contaminated agricultural soil. 20th WCSS, P2-49, Jeju, Korea.
- 上岡啓之・亀和田國彦 (2011) 水稻コシヒカリに対するメタン発酵消化液の基肥利用. 日本土壌肥科学雑誌, 82, 31-40.
- Kammann C., S. Ratering, C. Eckhard, C. Müller (2012) Biochar and hydrochar effects on greenhouse gas (carbon dioxide, nitrous oxide, and methane) fluxes from soils. *Journal of Environmental Quality*, 41, 1052-1066.
- Kang S.W., D.C. Seo, J.W. Park, J.D. Yang, Y.J. Seo, S.G. Lee, J.S. Heo, J. Sik (2014) Effect of soybean stover biochar on growth of chinese cabbage under different pyrolysis temperatures. 20th WCSS, P2-192, Jeju, Korea.
- 環境省 (1984) 農用地における土壌中の重金属等の蓄積防止に係る管理基準について. <http://www.env.go.jp/hourei/syousai.php?id=06000049>(2014年10月3日最終確認)
- 加藤哲郎 (2008) リン酸質肥料. 塩崎尚郎編 肥料便覧 第6版, p13-25. 農山漁村文化協会, 東京.
- 城戸薫・西川知宏・井上博茂・廣岡博之・山末祐二・稲村達也 (2008) メタン発酵消化液の連用水田土壌からの窒素の無機化と水稻による利用. 日本作物学会紀事, 77(別1), 170-171.
- Kim Y.S., J. Kim, W. Hwang, S. Hyun (2014) Assessment of potential risk of biochar from different biomass sources with seed germination test. 20th WCSS, P2-178, Jeju, Korea.
- 小林尚司 (2009) タマネギ残さ炭化物の露地野菜への効果的施用法. 農業および園芸, 84, 1199-1203.
- Kolb S.E., K.J. Fermanich, M.E. Dornbush (2009) Effect of charcoal quantity on microbial biomass and activity in temperate soils. *Soil Science Society of America journal*, 73, 1173-1181.
- 今野一男 (1994) 木炭の品質と活用. 農業技術大系土壌施肥編7, 資材の特性と活用, p156. 農山漁村文化協会, 東京.
- 越野正義 (1992) 農業生産における肥料に関するエネルギー投入について 1 肥料製造に必要なエネルギー投入量. 日本土壌肥科学雑誌, 63, 479-486.
- 久保山周子・吉田綾子・後藤逸男 (2007) 下水処理場からの回収したリン酸資材の農業利用 (その3) 下水汚泥炭化処理物の肥効. 日本土壌肥科学会講演要旨集, 53, 251.
- 黒田章夫・滝口昇・加藤純一・大竹久夫 (2005) リン資源枯渇の危機予測とそれに対応したリン有効利用技術開発. 環境テクノロジー学会誌, 4, 87-94.
- 草川知行・松丸恒夫・山本二美・中村耕土 (2007) 消化液・脱水ろ液・濃縮液肥の利用. 農林業バイオリサイクル研究「システム実用化千葉ユニット」編 アグリ・バイオマスタウン構築へのプロローグ, 70-73.
- 楠部孝誠・稲田義久・下田充 (2010) 中国農村地域におけるメタン発酵装置の導入効果と持続可能な発展. 環境科

- 学会誌, 23, 351-362.
- Kuzyakov Y. (2010) Priming effects: interactions between living and dead organic matter. *Soil biology and biochemistry*, 42, 1363-1371.
- Kuzyakov Y. (2014) Biochar stability in soils: Mechanisms of C sequestration and fertility improvements. 20th WCSS, O67-1, Jeju, Korea.
- Lashari M.S., G. Pan, H. Lu, H. Ji, G.W. Kibue, Y. Ye, L. Li, X. Yu (2014) Effect of biochar amendment on major soil properties, crop yield under saline cropland from central china great plain. 20th WCSS, P2-156, Jeju, Korea.
- Lee S.J., J.H. Park, M.E. Lee, J.W. Chung (2014) Comparative sorption of Cd, Cu and Pb by peat moss and peat moss derived biochar. 20th WCSS, P2-177, Jeju, Korea.
- Lehmann J. (2007) A handful of carbon. *Nature*, 447, 143-144.
- Lehmann J., M.C. Rillig, J. Thies, C.A. Masiello, W.C. Hockaday, D. Crowley (2011) Biochar effects on soil biota - a review. *Soil biology and biochemistry*, 43, 1812-1836.
- 李玉友 (2005) メタン発酵技術, 講座「バイオマス利活用」(その3). *農業土木学会誌*, 73, 77-82.
- Liang F., G. Li, X. Zhao (2014) Biochar effects on crop yields in a calcareous soil. 20th WCSS, P2-128, Jeju, Korea.
- Liu J., J. Shen, Y. Li, H. Tang, C. Wang, J. Wu (2014) Effects of biochar amendment on CO₂ and CH₄ emissions from two paddy soils in subtropical China. 20th WCSS, P2-158, Jeju, Korea.
- Lu K., X. Yang, J. Shen, B. Robinson, D. Liu, H. Wang (2014) Effect of bamboo and rice straw biochars on the bioavailability of Cd, Cu, Pb and Zn in soils. 20th WCSS, O43-8, Jeju, Korea.
- 牧浩之・河野哲・永井耕介 (2009) 熱および炭化処理による牛ふん堆肥の無機元素収支と溶解性の変化. *日本土壤肥科学雑誌*, 80, 257-262.
- 益田光信 (2009) 固形有機物高温メタン発酵を用いたバイオマス利用システムに関する研究. *京都大学学位論文*, pp8-9.
- 松丸恒夫・真行寺孝 (2005) 牛ふん炭化物中リン酸, カリの肥料効果—特にコマツナに対する多量施用の影響—. *日本土壤肥科学雑誌*, 76, 53-57.
- 松中照夫・熊井美鈴・千徳あす香 (2003) バイオガスプラント消化液由来窒素のオーチャードグラスに対する肥料的効果. *日本土壤肥科学雑誌*, 74, 31-38.
- Mishra M., R.K. Sahu, S.K. Sahu, R.N. Padhy (2009) Growth, yield and elements content of wheat (*Triticum aestivum*) grown in composted municipal solid wastes amended soil. *Environment, Development and Sustainability*, 11, 115-126.
- 宮田尚稔・池田英男 (2006) メタン発酵消化液が養液土耕におけるトマトの生育と果実収量に及ぼす影響. *日本土壤肥科学雑誌*, 77, 619-626.
- 水谷潤太郎 (1997) 総窒素・総リンの物質循環図. *土木学会論文集*, 566, 103-108.
- 望月和博・迫田章義 (2004) 「バイオマスタウン」シミュレータの構築. *生産研究*, 56, 148-151.
- Moller K., W. Stinner (2009) Effects of different manuring systems with and without biogas digestion on soil mineral nitrogen content and on gaseous nitrogen losses (ammonia, nitrous oxides). *European journal of agronomy*, 30, 1-16.
- 森昭恵 (2010) 家畜ふん尿の新処理・利用技術と課題 2. 家畜ふん尿に含まれる重金属元素. *日本土壤肥科学雑誌*, 81, 413-418.
- Muller C., R.J. Stevens, R.J. Laughlin, H.J. Jäger (2004) Microbial processes and the site of N₂O production in a temperate grassland soil. *Soil biology and biochemistry*, 36, 453-461.
- 中村真人 (2007) バイオマスの含有エネルギー. *農林業バイオリサイクル研究「システム実用化千葉ユニット」編 アグリ・バイオマスタウン構築へのプロローグ*, 31.
- 中村真人 (2010) メタン発酵消化液の液肥利用とその環境影響に関する研究. *神戸大学学位論文*, pp36.
- 中村真人・藤川智紀・柚山義人・前田守弘・山岡賢 (2009) メタン発酵消化液の施用が畑地土壌からの温室効果ガス発生と窒素溶脱に及ぼす影響. *農業農村工学会論文集*, 77, 17-26.
- 中村真人・藤川智紀・柚山義人・山岡賢・折立文子 (2012) メタン発酵消化液の施用方法がアンモニア揮散および亜酸化窒素の発生に及ぼす影響. *日本土壤肥科学雑誌*, 83, 139-146.
- 中村真人・柚山義人・山岡賢・藤川智紀 (2007a) メタン発酵プラントにおける物質収支と消化液及び消化液脱ろ液の肥料特性. *農業土木学会論文集*, 75, 107-113.
- 中村真人・山岡賢・柚山義人・藤川智紀 (2007b) 多段階利用システムの評価. *農林業バイオリサイクル研究「システム実用化千葉ユニット」編 アグリ・バイオマスタウ*

- ン構築へのプロローグ, 57-67.
- Nakamura M., Y. Yuyama, M. Yamaoka, N. Shimizu (2014) Global warming impacts of the process to utilize digested slurry from methane fermentation as a fertilizer: Case Study of the Yamada Biomass Plant. Paddy and water environment, 12 (Supp.2), S295-299.
- 中村稔 (2012) 酪農バイオガスシステムにおけるメタン発酵由来消化液の活用効果. 酪農学園大学研究報告, 36, 77-122.
- 中野明正・上原洋一 (2003) かん水同時施肥栽培におけるコーンステイプリカーおよびメタン消化液の利用がメロンの生育および収量に及ぼす影響. 園学研, 2, 175-178.
- Nguyen H.P., T.T. Tran, T.D. Hoang, T.L. Phan, H.MPham (2014) Study on the effects of temperature and residence time in slow pyrolysis on physico-chemical properties of biochar derived from dairy farming waste. 20th WCSS, P2-142, Jeju, Korea.
- 西尾隆・荒尾知人 (2002) 土壌中の施肥アンモニア窒素有機化量の推移に関する土壌間差異. 日本土壌肥科学雑誌, 73, 493-499.
- 野口毅・久保研一 (1998) 家畜糞尿処理水の時期別養分濃度変化と利用上の問題点. 九州農業研究, 58, 55.
- 農林水産バイオリサイクル研究「システム実用化千葉ユニット」 (2007) アグリ・バイオマスタウン構築へのプロローグ, pp14-67.
- 農林水産省 (2007) バイオマス・ニッポン, <http://www.maff.go.jp/j/biomass/index.html>(2014年10月16日最終確認)
- 農林水産省 (2009) 肥料および肥料原料をめぐる事情, http://www.maff.go.jp/j/seisan/sien/sizai/s_hiryosensiryaku_kaigi/pdf/01_siryos3.pdf (2014年10月16日最終確認)
- 農林水産省農業環境技術研究所 (1992) 肥料分析法(1992年版), http://www.famic.go.jp/ffis/fert/sub6_data/sub6_analyze.html(2013年5月27日最終確認)
- 農林水産省農林水産技術会議事務局・独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 (2012) 地域活性化のためのバイオマス利用技術の開発(バイオマス利用モデルの構築・実証・評価) 研究成果ダイジェスト, <http://www.naro.affrc.go.jp/org/nkk/soshiki/soshiki07-shigen/01shigen/pdf/digest/siryos.pdf> (2014年11月26日最終確認)
- 大津善雄・永田浩久・里脇岩男・大井義弘・大井由紀子・藤山正史 (2011) 廃棄バレイショ炭化物の特性とバレイショ, レタスおよびダイコンへの施用効果. 長崎県農林技術開発センター研究報告, 2, 63-78.
- 小柳渉・和田富弘・安藤義昭 (2005) 家畜ふん堆肥中リン酸の性質と肥効. 新潟県農業総合研究所畜産研究センター研究報告, 15, 5-9.
- Park J.W., D.C. Seo, S.W. Kang, J.D. Yang, Y.J. Seo, S.G. Lee, J.S. Heo, J.S. Cho (2014) Adsorption characteristics of heavy metals by pepper stalk biochar. 20th WCSS, P2-193, Jeju, Korea.
- Prabha S., R. Renuka, N.P. Sreekanth, P. Babu, A. P. Thomas (2013) A study of the fertility and carbon sequestration potential of rice soil with respect to the application of biochar and selected amendments. Annals of environmental science, 7, 17-30.
- Pritchard D. (2003) Nutrient Properties of Char. Report prepared for ESI by Curtin University of Technology, Perth, Western Australia.
- Rajkovich S., A. Enders, K. Hanley, C. Hyland, A.R. Zimmerman, J. Lehmann (2012) Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. Biology and Fertility of Soils, 48, 271-284.
- Saarnio S., K. Heimonen, R. Kettunen (2013) Biochar addition indirectly affects N₂O emissions via soil moisture and plant N uptake. Soil biology and biochemistry, 58, 99-106.
- 三枝俊哉・渡辺敢 (2006) バイオガスプラント消化液のチモシー採草地に対する肥効と効果的分施肥法. 北海道立農試集報, 90, 29-39.
- 迫田章義・望月和博・佐藤伸明 (2007) バイオマス多段階利用の変換技術. 農林業バイオリサイクル研究「システム実用化千葉ユニット」編 アグリ・バイオマスタウン構築へのプロローグ, 32-38.
- Sasada Y., K.T. Win, R. Nonaka, A.T. Win, K. Toyota, T. Motobayashi, M. Hosomi, C. Dingjiang, J. Lu (2011) Methane and N₂O emissions, nitrate concentrations of drainage water, and zinc and copper uptake by rice fertilized with anaerobically digested cattle or pig slurry. Biology and Fertility of Soils, 47, 949-956.
- Sato S., H. Kawamata (2014) Phosphorus bioavailability of sewage sludge biochar applied to temperate and tropical soils in Japan. 20th WCSS, P2-98, Jeju, Korea.

- 関孝司・若松孝彦 (2007) バイオマス多段階利用の変換技術。農林業バイオリサイクル研究「システム実用化千葉ユニット」編 アグリ・バイオマスタウン構築へのプロローグ, 25-32.
- Sellamuthu K.M., V.P. Duraisami, P. Venkatachalam (2014) Characterization of biochar and its effect on crops and soil properties. 20th WCSS, P2-100, Jeju, Korea.
- Singh A., A.P. Singh, S.K. Singh, C.M. Singh (2014) Effect of rice husk biochar and pgpr on rice yield, nutrient uptake and nutrient availability in alluvial soil. 20th WCSS, P2-44, Jeju, Korea.
- Singh B.P., B.J. Hatton, B. Singh, A.L. Cowie, A. Kathuria (2010) Influence of biochars on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils. *Journal of Environmental Quality*, 39, 1224-1235.
- Singla A., S.K. Dubey, H. Iwasa, K. Inubushi (2013) Nitrous oxide flux from komatsuna (*Brassica rapa*.) vegetated soil: a comparison between biogas digested liquid and chemical fertilizer. *Biology and Fertility of Soils*, 49, 971-976.
- Singla A., K. Inubushi (2013) CO₂, CH₄ and N₂O production potential of paddy soil after biogas byproducts application under waterlogged condition. *International Journal of Agriculture, Environment & Biotechnology*, 6, 233-239.
- Singla A., K. Inubushi (2014a) Effect of biochar on CH₄ and N₂O emission from soils vegetated with paddy. *Paddy and water environment*, 12, 239-243.
- Singla A., K. Inubushi (2014b) Effect of biogas digested liquid on CH₄ and N₂O flux in paddy ecosystem. *Journal of Integrative Agriculture*, 13, 635-640.
- Singla A., S. Paroda, S.S. Dhamija, S. Goyal, K. Shekhawat, S. Amachi, K. Inubushi (2012) Bioethanol production from xylose: Problems and possibilities. *J. Biofuels*, 3, 39-49.
- 真行寺孝・松丸恒夫 (2007) 牛ふん炭化物の施用量および多量施用土壌の除塩がコマツナの生育と養分吸収および溶脱塩類に及ぼす影響。日本土壌肥科学雑誌, 78, 355-362.
- 真行寺孝・松丸恒夫・犬伏和之 (2009) 牛ふんの炭化物および除塩炭化物のコマツナに対するリン酸肥効の持続性と除塩炭化物による塩類障害軽減効果。日本土壌肥科学雑誌, 80, 355-364.
- Shinogi Y. (2004) Nutrient leaching from carbon products of sludge. ASAE/CSAE Annual International Meeting, Paper number 044063, Ottawa, Canada.
- 白石誠・滝本英二・高取健治・小林宙・疇地勲和 (2007) メタン発酵施設実証試験。岡山県総合畜産センター研究報告, 17, 103-106.
- Solaiman Z., P. Blackwell, L. Abbott, D. Murphy (2014) Biochars influence nitrogen leaching and availability to wheat plants. 20th WCSS, P2-146, Jeju, Korea.
- Song Y., X. Zhang, B. Ma, S.X. Chang, J. Gong (2014) Biochar addition affected the dynamics of ammonia oxidizers and nitrification in microcosms of a coastal alkaline soil. *Biology and Fertility of Soils*, 50, 321-332.
- Steiner C., B. Glaser, W.G. Teixeira, J. Lehmann, W.E.H. Blum, W. Zech (2008) Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal. *Journal of plant nutrition and soil science*, 171, 893-899.
- 鈴木一好 (2002) 結晶化法による豚舎汚水中リンの除去及び回収。日本養豚学会誌, 39, 101-111.
- 棚橋寿彦・矢野秀治・伊藤元・小柳涉 (2010) 牛ふん堆肥・豚ふん堆肥中のリン酸マグネシウムアンモニウムの存在とその評価のための抽出法。日本土壌肥科学雑誌, 81, 329-335.
- 徳田進一・田中康男・東尾久雄・村上健二・相澤証子・浦上敦子・國久美由紀 (2010) キャベツの露地栽培におけるメタン発酵消化液の効果的な施用方法。日本土壌肥科学雑誌, 81, 105-111.
- Uchimiya M. (2014) Influence of dissolved organic and inorganic compounds on the function of biochar in amended soils. 20th WCSS, O43-4, Jeju, Korea.
- Uchimiya M., S. Hiradate (2014) Pyrolysis temperature-dependent changes in dissolved phosphorus speciation of plant and manure biochars. *Journal of agricultural and food chemistry*, 62, 1802-1809.
- 梅津一孝・山縣真人・岸本正・谷昌幸・林峰之・三崎卓也 (2003) 乳牛ふん尿と有機性廃棄物による混合メタン発酵消化液の秋蒔き小麦(ホクシン)への施用。農作業研究, 38, 199-205.
- U.S.Geolical survey (2004) Mineral commodity

- summaries, January 2004.
- 歌野裕子・三牧奈美・郡司掛則昭・凌祥之 (2007) 牛ふん炭化物の肥効特性と露地野菜に対する効果的な施用法. 熊本県農業研究センター研究報告, 14, 104-110.
- Vance E.D., P.C. Brookes, D.S. Jenkinson (1987) An extraction method for measuring soil microbial biomass-C. *Soil biology and biochemistry*, 19, 703-707.
- Velthof G.L., P.J. Kuikman, O. Oenema (2002) Nitrous oxide emission from soils amended with crop residues. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 62, 249-261.
- Walsh J.J., J. Rousk, G. Edwards-Jones, D.L. Jones, A.P. Williams (2012) Fungal and bacterial growth following the application of slurry and anaerobic digestate of livestock manure to temperate pasture soils. *Biology and Fertility of Soils*, 48, 889-897.
- Wang J., Z. Chen, Y. Kuzyakov, Z. Xiong (2014) Biochar amendment effects on nitrous oxide and net greenhouse gas balance from an acidic vegetable field in southeast China. 20th WCSS, P2-80, Jeju, Korea.
- Wang J., X. Pan, Y. Liu, X. Zhang, Z. Xiong (2012) Effects of biochar amendment in two soils on greenhouse gas emissions and crop production. *Plant and Soil*, 360, 287-298.
- Wardle D.A., M. Nilsson, O. Zackrisson (2008) Fire-derived charcoal causes loss of forest humus. *Science*, 320, 629.
- Watanabe S., K. Nakamura, C.S. Ryu, M. Lida, S. Kawashima (2012) Effects of different timings of methane fermentation digested liquid to paddy plots on soil nitrogen and rice yield. *Soil Science and Plant Nutrition*, 58, 224-237.
- Win K.T., K. Toyota, T. Motobayashi, M. Hosomi (2009) Suppression of ammonia volatilization from a paddy soil fertilized with anaerobically digested cattle slurry by wood vinegar application and floodwater management. *Soil Science and Plant Nutrition*, 55, 190-202.
- Winning N., J. Cloy, R. Rees, S. Sohi (2014) Evaluation of the effect of biochar on greenhouse gas emissions from slurry storage and slurry amended arable soil. 20th WCSS, P2-45, Jeju, Korea.
- Xie Z., Y. Xu, G. Liu, Q. Liu, J. Zhu, C. Tu, J.E. Amonette, G. Cadisch, J.W.H. Yong, S. Hu (2013) Impact of biochar application on nitrogen nutrition of rice, greenhouse-gas emissions and soil organic carbon dynamics in two paddy soils of China. *Plant and Soil*, 370, 527-540.
- Xing B., Z. Wang, H. Zheng, X. Su (2014) Pyrolytic temperature affects sulfamethoxazole adsorption by plant-derived biochars. 20th WCSS, O43-5, Jeju, Korea.
- Xu C.Y., S. Hosseini-Bai, Y. Hao, R.C.N. Rachaputi, Z. Xu, H. Wallace (2014) 20th WCSS, P2-67, Jeju, Korea.
- 山田良三・加藤俊博・井戸豊・関稔・早川岩夫 (1995) リアルタイム土壌・栄養診断に基づくトマトの効率的肥培管理 (第1報) 葉柄汁液の硝酸濃度に基づく診断基準の作成. 愛知農総試研報, 27, 205-211.
- 八槇敦 (2009) 煮沸浸出法による畑土壌の可給態窒素量の推定. 日本土壌肥科学雑誌, 80, 173-176.
- 山本二美・松丸恒夫 (2005) 施設トマトにおける施肥前の土壌中硝酸態窒素量が栄養診断に基づく施肥量に及ぼす影響. 日本土壌肥科学雑誌, 76, 825-831.
- 山岡賢・柚山義人・中村真人 (2006) メタン発酵消化液の脱水ろ液の減圧蒸留による減量. 農業土木学会論文集, 245, 807-808.
- 山岡賢・柚山義人・中村真人・上田達己 (2008) メタン発酵消化液ろ液の蒸留処理技術の開発展望. 農業農村工学会誌, 76, 25-28.
- 山下浩一・平浩一郎・竹中勲・藤田奈都 (2007) 都市ゴミ炭化物の施用による土壌および作物体への影響. 奈良県農業総合センター研究報告, 38, 1-4.
- Yanagi Y., H. Shindo, S. Nishimura (2014) Production of charred plants and subsequent the ir distribution, behavior and function in soils. 20th WCSS, O67-8, Jeju, Korea.
- Yanai Y., K. Toyota, M. Okazaki (2007) Effects of charcoal addition on N₂O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiments. *Soil Science and Plant Nutrition*, 53, 181-188.
- 横田剛・伊藤豊彰・小野剛志・高橋正樹・三枝正彦 (2003) 製造条件の異なる牛ふん堆肥の無機態リン酸組成. 日本土壌肥科学雑誌, 74, 133-140.
- 横山明敏・川崎佳栄・西原基樹・上田重英・黒木正晶・宮本裕子 (2009) 家畜ふん堆肥等有機質資材の窒素無機化特性. 宮崎県総合農業試験場研究報告, 44, 1-13.

- 米田太一・杉田秀雄・岡庭良安（2012）日本におけるメタン発酵消化液の液肥利用の現状. 平成23年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 8-9.
- Yoon J., KH. Kim (2014) Effect of wood waste biochar from roadside trees on adsorption of $\text{NH}_4\text{-N}$ and Cd. 20th WCSS, P2-194, Jeju, Korea.
- Yu C., Y. Tang, M. Fang, Z. Luo, K. Cen (2005) Experimental study on alkali emission during rice straw pyrolysis. *Journal of Zhejiang University (engineering Science)*, **39**, 1435-1444.
- 柚山義人・生村隆司・小原章彦・小林久・中村真人（2006）バイオマス再資源化技術の性能・コスト評価. 農工研技報, **204**, 61-103.
- 柚山義人・中村真人・山岡賢（2007）メタン発酵消化液の利活用技術. 農業土木学会論文集, **75**, 119-129.
- 柚山義人・山岡賢・中村真人・清水夏樹（2011）メタン発酵プラントの経済性評価. 平成23年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 638-639.
- 善明嵩英・山川武夫・菊池政道（2009）メタン発酵消化液の施用方法の違いが水稻の生育に及ぼす影響. 九州大学大学院農学院学芸雑誌, **64**, 1-5.
- Zhang D., G. Wu, G. Pan, L. Li, J. Zheng, J. Zheng, X. Zhang (2014) Effect of combined use of biochar and fertilizer on maize yield and greenhouse gas emission in calcareous soil: 2 consecutive maize growing cycling. 20th WCSS, P2-68, Jeju, Korea.
- Zhu T., J. Zhang, W. Yang, Z. Cai (2013) Effects of organic material amendment and water content on NO , N_2O , and N_2 emissions in a nitrate-rich vegetable soil. *Biology and Fertility of Soils*, **49**, 153-163.
- Zimmerman A.R., B. Gao, M.Y. Ahn (2011) Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils. *Soil biology and biochemistry*, **43**, 1169-1179.
- Zwieten L.V., M. Farrell, M. Rose, F. Fornasier, W. Dougherty, T. Rose, S. Kimber, J. Rust, S. Morris, A. Cowie (2014) Assessing long-term impacts of contrasting biochars on soil functionality and P availability. 20th WCSS, O67-3, Jeju, Korea.
- Zwieten L.V., S. Kimber, S. Morris, K.Y. Chan, A. Downie, J. Rust, S. Joseph, A. Cowie (2010) Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil*, **327**, 235-246.

SUMMARY

Fertilizer efficacy of concentrated and carbonized materials derived from methane fermentation digested slurry and their effect on greenhouse gas emission

Hirokuni Iwasa

Methane fermentation is a promising biomass utilization technology, but disposing of the digested slurry is a serious problem. Since digested slurry contains nitrogen, phosphate and potassium, it may be used as agricultural amendments. To improve the value of digested slurry as agricultural amendments, concentration and carbonization were conducted. But fertilizer efficacy of concentrated or carbonized slurry is not clear. This dissertation aims to evaluate the fertilizer efficacy of : (1)“digested liquid” (concentrated liquid part of digested slurry) , (2) “biochar” (carbonized solid part of digested slurry) and (3) “digested liquid attached biochar”. Because application of biochar is said to reduce greenhouse gas emission, the N₂O and CO₂ emission from applying “digested liquid” and “biochar” were measured.

“Digested liquid”, which contains a lot of ammonium nitrogen and potassium, was applied as fertilizer to tomato plants. The growth, yield and amounts of nitrogen uptake of tomatoes applied with digested liquid were equal to those of chemically- fertilized tomatoes. While nitrogen present in inorganic fertilizers assumed to be potentially 100% available to the plant, this was similar for digested liquid which seemed to have 100% efficacy.

“Biochar” contains a lot of citric acid -soluble phosphate which was evaluated for its phosphorus fertilizer efficacy in Japanese mustard spinach. The results showed that biochar’s phosphorous fertilizer efficacy was equal or even more than that of the chemical phosphorus fertilizer.

“Digested liquid attached biochar” contains nitrogen, and higher amounts of phosphate and potassium. Nitrogen is low because 30% of ammonium nitrogen contained in digested liquid was volatilized or changed state that is not extracted by 100 g L⁻¹ potassium chloride solution, when digested liquid was attached to biochar.

After applying digested liquid and biochar, to field-grown Japanese mustard spinach, N₂O and CO₂ flux from the soil was monitored. Digested liquid had similar effects on N₂O and CO₂ flux with that of chemical fertilizer. On the other hand, application of biochar increased N₂O and CO₂ flux from the soil.