

## 話題 56 窒素循環の観点から考えるメタン発酵消化液の液肥利用

中村真人

### 要旨

人類は大気中の窒素ガスからアンモニアを合成する技術により、窒素肥料を作り、食料生産を飛躍的に増やすことに成功し、20世紀以降の人口増加を支えた。しかし、その反面、肥料として使われた窒素のうち、作物に利用される以外は、最終的に環境へ放出され、大気、土壌、森林、淡水、海水に蓄積され、その一部は健康や生態系に悪影響を及ぼす。そのため、食料やエネルギーの生産において窒素の管理を最適化し、人間や環境への悪影響を最小化することが重要となる。本報では、環境中の反応性窒素の増加を防ぎ、よりよい窒素循環を実現する方法としてメタン発酵消化液の液肥利用に着目し、肥料効果を発揮し、かつ環境負荷を最小化するための適正な消化液の液肥利用技術について検討した。

消化液は速効性の肥料成分を含むため、化学肥料の代わりに利用できるものの、化学肥料施用の場合とは施用後のアンモニア揮散特性が大きく異なる。そのため、適正な施肥設計のためには、アンモニア揮散量を考慮に入れる必要がある。適切な施用量であれば、消化液で化学肥料を代替しても、地下水質への影響は小さい。

このように、消化液は環境負荷を増加させることなく、速効性の肥料として利用することが可能である。メタン発酵と消化液の液肥利用を組み合わせることにより、エネルギーの生産、地球温暖化緩和、肥料資源の有効利用、及び資源循環等を通じ地域のより健全な窒素循環を実現できる可能性を持っている。

### プロフィール

- 氏名（ふりがな） 中村真人（なかむら まさと）
- 生年(昭和) 昭和 52 年 5 月 21 日
- 本サイトの趣旨や提供する話題に関連する学歴・職歴等  
1977 年 大阪府に生まれる  
2002 年 神戸大学大学院自然科学研究科博士前期課程修了  
2002 年 （独）農業工学研究所資源循環研究室  
2006 年 （独）農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所資源循環システム研究チーム  
2011 年 同 資源循環工学研究領域 資源循環システム担当  
現在に至る

### キーワード

アンモニア揮散、施肥設計、地下水汚染、温室効果ガス、窒素循環

## 目次

- 1 窒素循環を健全化する手段としてのメタン発酵消化液の液肥利用
- 2 メタン発酵・メタン発酵消化液とは
- 3 消化液の液肥利用の利点
- 4 消化液の成分の特徴
- 5 消化液の農地における動態と環境負荷
- 6 消化液の肥料効果と環境負荷
- 7 よりよい消化液の液肥利用のために

## 1. 窒素循環を健全化する手段としてのメタン発酵消化液の液肥利用

窒素は、生物にとって重要なタンパク質を構成する重要な元素である。しかし、窒素は大気中に大量に存在しているにも関わらず、窒素ガス ( $N_2$ ) の形態では非常に安定しているため、動物や植物はこれを直接利用できない。窒素ガスを固定する、特別な能力を持った、根粒菌などの微生物や一部のらん藻類だけが窒素ガスを反応性窒素（窒素ガス以外の窒素で、動植物が利用可能な無機態窒素や有機態窒素）に変換し、利用することができる。そのため、20世紀初頭までは窒素固定による反応性窒素の供給量が十分ではなく、食料生産などの制限要因となってきた。

その状況を大きく変えたのが、ハーバーおよびボッシュにより開発された、工業的なアンモニア合成法（ハーバー・ボッシュ法）である。ハーバー・ボッシュ法とは、鉄を主体とした触媒上で水素と窒素を高温高压条件下で反応させ、アンモニアを生産する方法である。ハーバー・ボッシュ法により、大気中の窒素ガスが窒素肥料などに利用されるようになった。Galloway and Cowlingによると、地球上の反応性窒素の量は1890年からの100年間に、1.3億tから2.8億tに増加したと試算されている<sup>1)</sup>。

こうして作られた窒素肥料を利用することにより、食料生産を飛躍的に増やすことができ、20世紀以降の人口増加を支えた。しかし、その反面、アンモニアの合成には莫大なエネルギーが必要である。また、肥料として使われた窒素のうち、作物に利用される以外は最終的に環境へ放出され、大気、土壌、森林、淡水、海水に蓄積され、その一部は健康や生態系に悪影響を及ぼす。図-1に1890年および1990年の世界の窒素循環の状況を示す。100年の間に工業的窒素により、多量の大気中の窒素ガスが反応性窒素となり、窒素の循環量が飛躍的に増加していることがわかる。例えば、産業活動により排出された窒素化合物 ( $NO_x$ ) は、酸性雨の原因物質となる。また、家畜排せつ物や施肥された農耕地土壌から揮散（液相中（土壌溶液、地表水など）の  $NH_4^+$  の一部が  $H^+$  と  $NH_3$  に解離し、その  $NH_3$  が海面を通じて液相から気相に拡散する現象）した大気に放出されたアンモニア性窒素は、大気中を移動した後、陸地や水域に降下（沈着）する。大気から地表に沈着したアンモニア性窒素は、その硝化に伴う酸性化、硝化後の硝酸性窒素の溶脱による水質汚染、可給態窒素の増加による富栄養化などの環境負荷をもたらす<sup>2)</sup>。図-1における1990年の窒素循環を見ると、1890年に比べて陸域および水域に入る窒素量が多いことが読み取れる。このように、大気から固定された大量の反応性窒素をコントロールするためには、食料やエネルギーの生産において窒素の管理を最適化し、人間や環境への悪影響を最小化することが重要となる。

Galloway and Cowling<sup>3)</sup>によると、それらの悪影響は窒素ガスから反応性窒素への変換を減らすことによって達成可能であるとし、以下に示す4つの機会があると述べている。

1. 食料生産における窒素の利用効率の向上。
2. 農業生態系における反応性窒素のリサイクル。
3. 燃料の燃焼にともなう  $NO_x$  の除去または生成抑制。
4. 以上が難しい場合は、環境に戻る前に  $N_2$  に戻す。

もちろん、これらの対策を行うにしても、経済性、環境影響、持続可能性等の観点から受け入れられるものでなければならない。

メタン発酵と消化液の液肥利用は、反応性窒素の増加を抑制し、適切な窒素循環を実現する一つの方法である。

- 1) Galloway, J.N. and Cowling, E.B.: Reactive nitrogen and the world: 200 years of change., *Ambio*, 31(2), 64-71, (2002)
- 2) 林健太郎:アンモニアの環境科学と農業とのかかわり, 農業由来のアンモニア負荷, 13-8, (2011)
- 3) Galloway, J.N. , Cowling, E.B. and Kessler, E.: Reactive nitrogen. *Ambio*, 31(2), 59, (2002)
- 4) 波多野隆介:土地利用解析と窒素収支法による河川水質評価, 土壌の物理性, 33, 21-28, (2005)

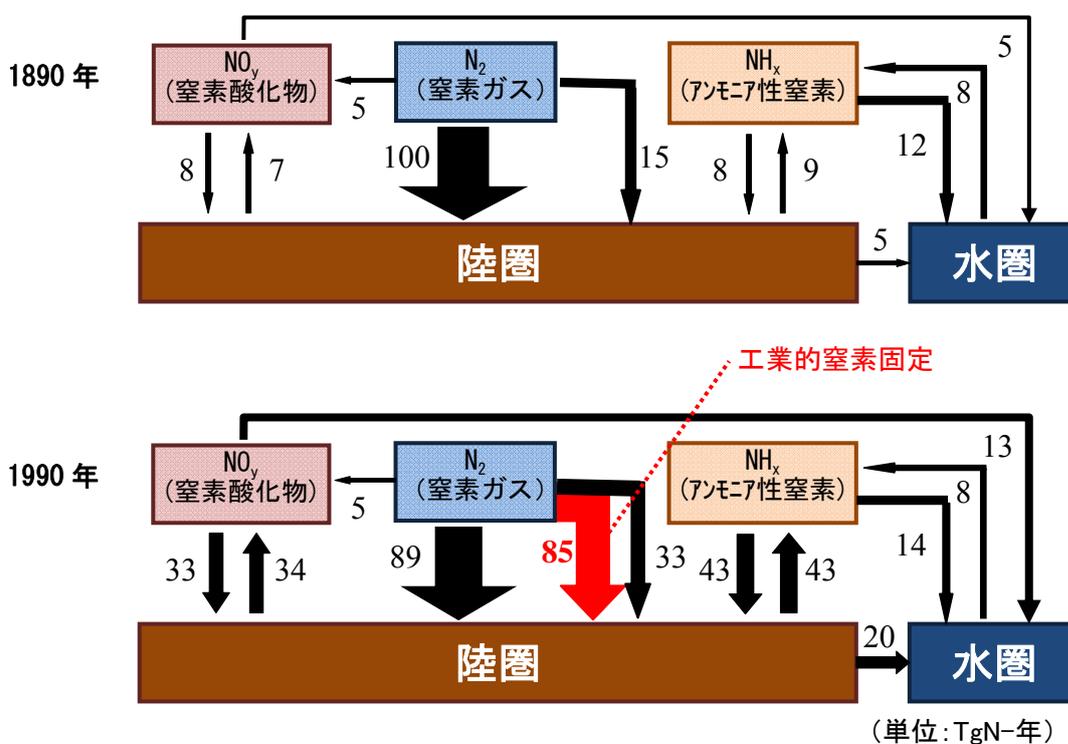


図-1 世界の窒素循環(波多野(2005)<sup>4)</sup>を一部改変)

## 2. メタン発酵・メタン発酵消化液とは

近年、風力、太陽光、バイオマス等の再生可能エネルギーの導入が世界的に進められており、日本においても、2012年7月から導入された電力の固定価格買取制度の導入等により、その動きが加速することが予想される。こうした再生可能エネルギーのうち、バイオマスを活用してエネルギーを取り出す技術は種々あるものの、実用化レベルの技術としては、メタン発酵や木質バイオマスのガス化などに限られる。メタン発酵は家畜排せつ物や食品廃棄物などの水分の多いバイオマスも原料として利用できるなど、適用範囲が広い。そのため、農林水産省がとりまとめたバイオマス事業化戦略<sup>1)</sup>では、重点的に活用する実用化技術の一つとして位置づけられている。

メタン発酵とは、嫌気条件下においてメタン発酵微生物の代謝作用により、家畜排せつ物や食品廃棄物等の有機物から再生可能エネルギーであるメタン(CH<sub>4</sub>)を回収する技術であり、バイオガス技術とも呼ばれている。メタン発酵の流れを図-2に示す。現在、原料投入量が1t/日以下の小規模なものから、100t/日以上の大規模なものまで、多様なメタン発酵施設が稼働している。こうした施設では、原料である家畜排せつ物や食品廃棄物等からメタンを回収した後に、原料とほぼ同量のメタン発酵消化液(以下、「消化液」という)が生成される。生成された消化液は、排水処理を行った上で放流する場合と、肥料成分が多く含まれる特長を活かして液肥として利用する場合がある。このうち、後者の液肥利用を採用した場合、前者の排水処理の場合と比べ施設の運転コスト削減、温室効果ガス排出量の削減、肥料代替による化学肥料使用量の削減などの面で効果がある。また、窒素を肥料としてリサイクルするので、反応性窒素の増加の抑制につながる。メタン発酵と消化液の液肥利用の組み合わせは、再生可能エネルギーの生産、地球温暖化対策、地域の健全な窒素循環等を同時に実現できる可能性を持っている。

しかしながら、液肥利用の方法により生じる効果が異なり、あらゆる条件下で十分な効果が発揮されるわけではないため、消化液の特徴を把握した上で、より効率的で環境負荷の少ない利用方法を追求することが重要である。

消化液は、無機態の肥料成分を含むなど化学肥料と似ている部分がある反面、消化液の施用後における動態など化学肥料とは異なる部分もある。肥料効果を発揮し、かつ環境負荷を最小化するためには、その点を考慮した使用方法を考える必要がある。

1) 農林水産省：バイオマス事業化戦略，(2012)

<http://www.maff.go.jp/j/press/shokusan/bioi/120906.html>



図ー2 メタン発酵の流れ

### 3. 消化液の液肥利用の利点

#### (1) 消化液の液肥利用を採用するための前提条件

前述のとおり，消化液の液肥利用は排水処理を行う場合と比較して利点が多いが，当然のことながら，消化液を散布するための農地面積が確保できない地域にメタン発酵施設が立地している場合には液肥利用を採用できない。また，消化液の成分が液肥利用に適するものである必要がある。消化液の肥料成分が一定濃度以上であること，消化液に含まれる重金属や塩分等の成分含有量が作物の生育やそれを食べる人間の健康に有害な影響を与えない程度に少ないことなどが，液肥利用採用のための必須要素となる。

#### (2) 消化液の液肥利用プロセス

メタン発酵施設で生成された消化液は，一時的に貯留槽で貯留された後，バキューム車等で圃場まで運ばれ，液肥散布車で散布される場合が多い（図－3）。なお，クローラタイプの液肥散布車は走行スピードが遅く，公道を自走できない場合も多いため，回送車やトラックに積載され圃場まで運ばれる。



図－3 消化液の液肥利用プロセス

#### (3) 液肥利用の利点

##### ①メタン発酵施設運転管理者にとっての利点

消化液を排水処理した場合，薬品に要するコストや消費電力が大きいいため，メタン発酵施設の運転管理者にとっては，液肥利用の導入により施設の運転コストを削減できるという利点がある。

##### ②耕種農家にとっての利点

現在，液肥利用が採用されている地区では，消化液は化学肥料より安価で提供され，消化液の輸送・散布作業もメタン発酵施設側が担う事例が多い。そのため，耕種農家にとっては，肥料に要する経費の節約や肥料散布労力の節減ができるといえる。また，消化液は，速効性の窒素成分を多く含むため，減化学肥料栽培に利用できる。

##### ③地域環境にとっての利点

家畜排せつ物を処理する過程で生じるアンモニアは，悪臭物質であるとともに，呼吸器疾患の原因物質や水域の富栄養化・酸性化を引き起こす環境負荷物質でもある。家畜排せつ物は，どのような処理を行ったとしても，含有するアンモニア性窒素の一部がアンモニアとして揮散する。メタン発酵の場合，消化液の貯留時や散布時にアンモニア揮散が生じ

るが、堆肥化や好気性排水処理に比べて同等かそれ以下であり、メタン発酵は、アンモニア揮散量を抑制するという観点で、環境負荷の少ない処理方法であるといえる。さらに、窒素循環の観点からは、反応性窒素の再利用により、環境に放出される窒素量を減らす効果がある。

また、前述のとおり、消化液を排水処理した場合には消費電力が多く、薬品使用量も多いため、それに伴って温室効果ガス排出量も多くなる。液肥利用の場合においても輸送・散布車両に伴う温室効果ガス排出はあるものの、排水処理を行った場合に比べると少ない。さらに、消化液は速効性の肥料成分を多く含むため、地域内の化学肥料使用量を削減でき、地域への窒素流入量を削減できる。なお、消化液を化学肥料の代替として使用した時の窒素の地下への溶脱による地下水質への影響については後述する通りとなっている。

#### (4) 液肥利用の課題

液肥利用の課題として、消化液の輸送・散布作業量が多いこと、農家は消化液使用の経験がなく慣れていないことが挙げられる。ここ数年間で、福岡、熊本、京都、千葉の先進事例において、効率的な作業手順、耕種農家への普及のためのノウハウの蓄積が進み、消化液の輸送・散布計画を支援するモデルの開発も進んでいる。また、消化液の液肥研究については、従来、牧草地への散布を中心として取り組まれている例が多く、水田や畑地を対象とした研究は十分行われているとはいえない。

#### 4. 消化液の成分の特徴

様々な原料由来のメタン発酵消化液の成分を表-1に示す。これは、著者らが全国9施設のメタン発酵施設において消化液を採取し、分析を行ったものであるが、すべての施設で液肥利用が行われているわけではなく、排水処理されているものも含んでいる。また、消化液の固液分離装置を有している施設もあるが、表-1に示す結果はすべて、固液分離する前の消化液についてのものである。

消化液成分の特徴としては、含有窒素のうち、約半分が速効性の肥料成分であるアンモニア性窒素であることがあげられる。このため、硫酸などの速効性の化学肥料と同様の利用が可能である。これに対し、堆肥は、同じ家畜排せつ物を原料とした場合であっても、アンモニア性窒素の割合が低く、窒素肥料の効きが遅いことから、使用方法が化学肥料とは異なる。

なお、メタン発酵において、原料に含まれる肥料成分の窒素、リン、カリウムは、ほぼ全量が消化液に移行するため、その成分はメタン発酵原料の成分組成を反映する。例えば、乳牛ふん尿が主原料の場合、消化液成分は乳牛ふん尿の成分を反映して、窒素やカリウムに対してリンの含有量が少なくなる、し尿が主原料の場合にはカリウムが相対的に少なくなる、などである。3要素のいずれかが相対的に高濃度となる場合には、過剰施用を防ぐために、その要素が施用量の上限値を定める制限要因となる。

また、原料の含水率は、消化液の肥料成分濃度に影響する。原料が含水率の高い野菜残渣や汚泥の場合（表-1の施設E、施設F、施設H、施設I）や、畜舎の洗浄水などを家畜排せつ物と一緒にメタン発酵槽に投入している場合（表-1の施設C）には、消化液の肥料成分濃度は低くなる。したがって、液肥利用を行うのであれば、高含水率原料を避けることや洗浄水の混入を避けることが望ましい。家畜排せつ物や生ごみを主原料とする場合（表-1の施設A、施設B、施設D）は全窒素が3,000mg/L程度と比較的高濃度の消化液が得られ、液肥利用に有利である。

生ごみを原料とする堆肥では、塩分や油分の含有率が議論となる場合がある。竹本は、作物の生育に影響を及ぼさない塩分（NaCl）施用量の上限値は、1m<sup>2</sup>あたり約50gと算定している<sup>1)</sup>。この上限値をそのまま適用すると、消化液施用量3t/10aの場合ではナトリウム濃度が6,600mg/L以下、5t/10aの場合では同3,900mg/L以下であれば、作物に影響を及ぼさないことになる。表-1に示したように、塩分濃度の高さが懸念される生ごみを原料とした消化液でも、上限値を大きく下回っており、液肥利用に支障がないといえる。油分（粗脂肪）についてのデータ数が少ないが、いずれも低濃度であり、液肥利用に支障がないといえる。

1) 竹本 稔：食品廃棄物の堆肥化とその農業利用に関する研究，農業技術センター研究報告，148，1-121，(2005)

表-1 様々な原料のメタン発酵消化液の成分

	単位	施設 A	施設 B	施設 C	施設 D	施設 E	施設 F	施設 G	施設 H	施設 I
主な原料		乳牛ふん尿	乳牛ふん尿	豚ふん尿 (洗浄水含む)	生ごみ	食品加工残渣・生ごみ	野菜加工残渣・乳牛ふん尿	浄化槽汚泥, し尿, 生ごみ	し尿, 浄化槽汚泥	し尿・浄化槽汚泥
含水率	%	93.9	95.9	98.3	98.2	97.4	97.5	98.4	99.5	96.9
pH		8.03	7.66	7.79	8.04	8.08	7.48	8.55	9.60	8.38
EC	S/m	1.97	1.96	0.82	2.05	1.49	1.43	1.68	1.00	0.78
SS	mg/L	33,900	26,700	9,630	10,500	15,900	14,900	830	1,250	27,600
VSS	mg/L	22,300	17,900	7,510	6,340	10,600	11,000	460	860	13,800
TS	mg/L	61,200	41,300	17,200	17,800	26,200	24,600	6,650	5,070	31,000
VS	mg/L	40,500	24,200	11,600	8,730	14,800	14,300	2,820	1,800	15,200
COD <sub>Mn</sub>	mg/L	17,800	14,100	3,290	4,200	8,010	7,880	1,350	1,040	7,930
COD <sub>Cr</sub>	mg/L	-	-	-	12,900	18,000	-	1,300	3,570	-
BOD	mg/L	2,710	2,320	1,150	1,890	2,430	1,640	716	254	810
TOC	mg/L	6,250	6,220	738	406	1,860	3,840	-	768	1,060
全炭素	mg/L	17,000	9,790	3,620	4,930	3,900	8,180	3,410	1,640	5,020
塩化物イオン	mg/L	1,100	1,390	307	1,520	1,030	786	1,330	1,110	667
アンモニア態窒素	mg/L	1,480	1,740	731	1,550	961	798	1,570	1,060	671
亜硝酸態窒素	mg/L	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3
硝酸態窒素	mg/L	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3
全窒素	mg/L	3,270	3,390	1,290	2,710	1,640	1,820	1,900	1,330	1,770
全リン	mg/L	949	536	267	320	238	404	82.6	143	505
リン酸態リン	mg/L	7.08	169	8.71	35.2	6.90	55.7	36.0	53.5	0.54
カリウム	mg/L	2,940	3,210	490	1,190	1,900	2,570	924	397	383
ナトリウム	mg/L	-	850	-	1,480	1,120	-	-	802	-
カルシウム	mg/L	-	1,600	-	40.4	24.6	-	-	10.4	-
マグネシウム	mg/L	-	661	-	7.7	42.8	-	-	1.15	-
粗脂肪 (油分)	mg/L	-	-	-	17.8	26.2	24.6	-	<5	-

## 5. 消化液の農地における動態と環境負荷

畑地に施用された窒素の動態を図-4に示す。施用された窒素は、そのすべてが作物へ吸収されるわけではなく、作物に吸収されなかった窒素には、アンモニア揮散や脱窒（脱窒菌の働きで主として硝酸態窒素  $\text{NO}_3^-$  が窒素ガス  $\text{N}_2$  もしくは酸化窒素  $\text{N}_2\text{O}$  の形に還元されて大気中にガス状で揮散する現象）により大気への放出するもの（ガス揮散）、地下へ溶脱するもの（溶脱）、移動せずに土壌に蓄積するもの（土壌蓄積）等がある。これらの割合は、土壌の種類、温度や降水量等の環境条件、肥料の施用方法やその後の土壌管理、作物の窒素吸収特性により異なるが、施用された窒素の形態によっても大きく異なる。堆肥や消化液等の有機質資材はそれぞれ窒素の組成が異なるため、施用後の動態を把握した上で、作物の収量を維持しつつ、環境負荷を最小化する利用方法を採用することが重要である。

消化液の場合、含まれる窒素の約半分がアンモニア性窒素、残りが有機態窒素である。消化液中のアンモニア性窒素は、圃場施用後、その一部がアンモニアとして揮散する。アンモニア揮散とは、液相（土壌溶液、地表水、あるいは固形物に含まれる水分）中のアンモニア性窒素の一部が水素イオンとアンモニアに解離し、そのアンモニアが界面を通じて液相から気相に拡散する現象である。消化液のようなアンモニア性窒素を含む液体を土壌に施用する場合にはアンモニア揮散が起こりやすい。アンモニア揮散速度は、液相のアンモニア性窒素濃度、液相の pH、温度、風速等多くの因子の影響を受ける。消化液のように、アンモニア性窒素を多く含み、pH がやや高い液体は、アンモニアとして揮散しやすくなる。多量揮散すると、環境に負荷を与えるとともに、肥料成分である窒素分のロスにつながる。

一方、有機態窒素の中には農地への施用後速やかに無機化する易分解性のものと、長期的に分解しない難分解性のものがある。有機態窒素のうち、速やかに無機化する成分は作物が利用しやすい速効性成分であり、施肥設計をする上で重要である。消化液の場合、含有するアンモニア性窒素と短期間に無機化する有機態窒素の量が、短期間に効く窒素肥料成分量の目安となる。畑地では、アンモニア性窒素や有機態窒素由来の無機態窒素は、最終的に硝酸態窒素（畑地において作物が主に吸収利用する形態）になり作物に利用される。

畑地において、作物要求量以上に窒素を過剰に施用した場合には、地下水の硝酸態窒素汚染を引き起こす。土壌中の粘土鉱物や腐植物質はマイナスの電荷をもっているため、同じマイナスの電荷を持つ硝酸態窒素は土壌にほとんど吸着されない。そのため、作物に吸収されなかった硝酸態窒素は浸透水に溶けて溶脱し、地下水の硝酸態窒素汚染につながる。水田においても、過剰に施用された場合には、地表流出や地下浸透により、水域への負荷が増加する。

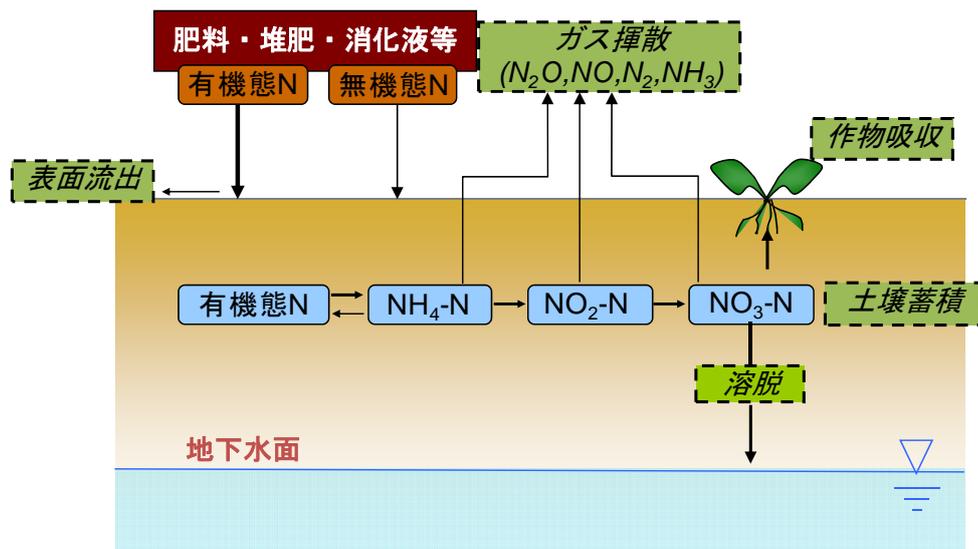


図-4 畑地における窒素の動態

## 6. 消化液の肥料効果と環境負荷

### (1) 検討項目

消化液の肥料効果や環境負荷に関して、表-2に示す項目についてとりまとめる。以下に示す結果は、大部分が山田バイオマスプラント（表-1の施設B）の消化液を用いて、黒ボク土の畑土壌を対象に行った試験結果である。

表-2 消化液の肥料効果や環境負荷に関する検討項目

検討項目	評価のポイント
有機態窒素の無機化量	消化液に含まれる有機態窒素のうち、どの程度が無機化するか。
アンモニア揮散量	消化液に含まれる有機態窒素のうち、施用後にどの程度がアンモニアとして揮散するか。
消化液の施用可能量	施用直後に表面流出が生じない施用量はどの程度か。
地下への窒素溶脱量	作物に吸収されずに下方へ移動する割合はどの程度、地下水質に及ぼす影響はどの程度か。
連用による土壌への影響	消化液の連用により、消化液に含有する炭素や窒素はどの程度蓄積するか。土壌の物理性は変化するか。

### (2) 消化液に含まれる有機態窒素の無機化量

前述のとおり、消化液に含まれる窒素の約半分が有機態窒素（ここでは、無機態窒素以外の窒素と定義する）である。著者らは、消化液に含まれる有機態窒素の無機化特性やアンモニア性窒素の硝化特性を把握するため、畑地条件での培養試験（30℃）を行った。試験は、アンモニア揮散を抑制するため、施用後土壌と混和した条件で行った。消化液に含まれる有機態窒素の一部が無機化とアンモニア性窒素の硝化により、消化液に含まれる窒素の6割から7割程度が施用後約1ヶ月間に硝酸態窒素となり、速効性の窒素肥料として利用できると判断された（図-5）。また、石岡・木村は消化液中の窒素成分組成について報告している<sup>1)</sup>。それによると、アンモニア性窒素以外の窒素の中でも、0.5M 塩酸で溶解しアンモニア性窒素となる成分については速効性の窒素成分としてカウントでき、その分量は消化液中に元々含まれているアンモニア性窒素量の1.2倍程度であると報告している。

これらを踏まえると、消化液に含まれる有機態窒素の2~3割程度は、速やかに無機化し、アンモニア揮散等により損失がなければ、含有する窒素の6~7割程度が速効性の窒素成分として利用できるといえる。

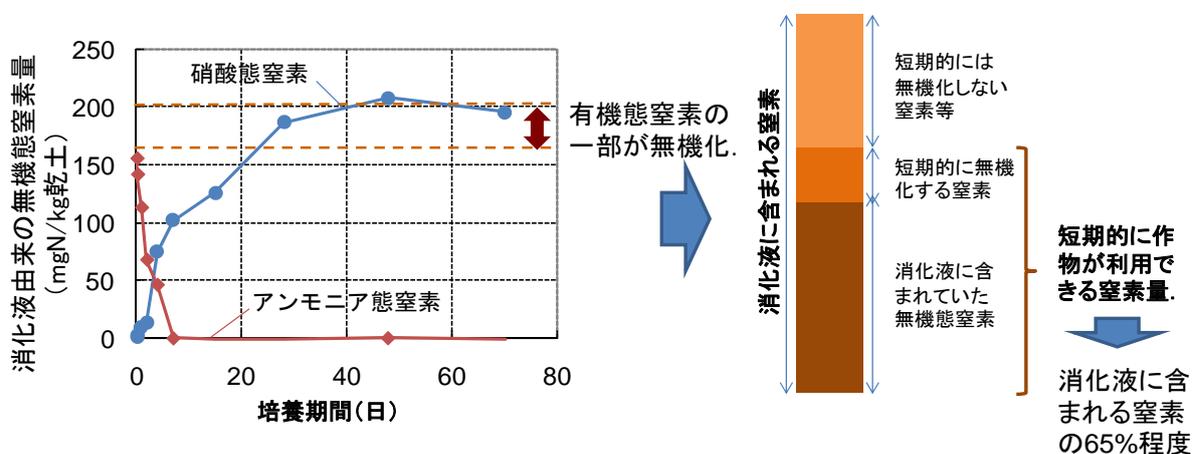


図-5 消化液由来の有機態窒素の無機化特性(30℃, 畑地条件)

### (3) 消化液を施用した土壌におけるアンモニア揮散量

著者らは、消化液を表面施用（消化液を土壌表面に施用し、そのまま放置）した場合と、混和施用（消化液を表面施用後 30 分後に土壌と混ぜる）した場合、化学肥料（硫酸アンモニウム（以下、「硫安」という）を施用）を施用した場合のアンモニア揮散量の違いを室内試験により調査した<sup>2)</sup>。

その結果、硫安を施用した場合にはアンモニア揮散がほとんどなかったのに対し、消化液を施用した場合、施用後にアンモニア揮散が生じた。特に、消化液を表面施用し、そのまま放置した場合、施用後 3 時間以内におけるアンモニア揮散量が多く、土壌との混和を行わなければ、施用後 1 日間で施用したアンモニア性窒素の多くが揮散した。一方、土壌と混和すれば、その時点でアンモニア揮散量が抑制され、揮散量はほぼ 0 まで低減した。つまり、消化液に含まれるアンモニア性窒素を最大限利用し、アンモニアによる大気環境への負荷を削減するためには、施用後速やかに土壌を混和することが望ましいことが示唆された（図-6）。

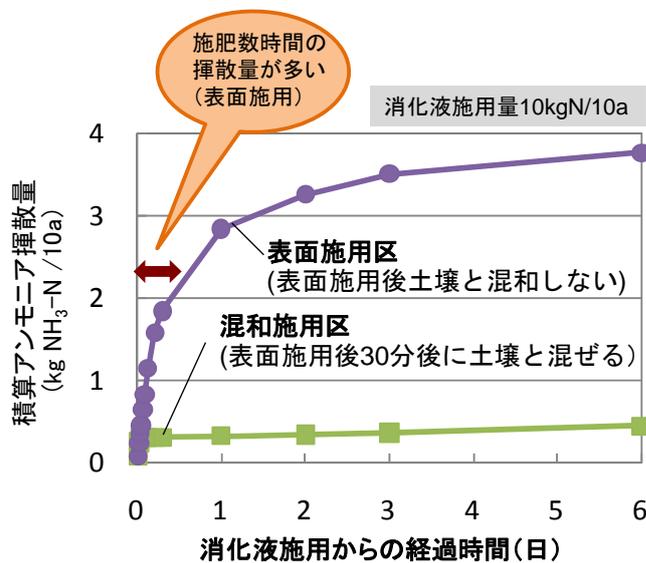


図-6 積算アンモニア揮散量

アンモニア揮散を抑制する方法として、混和施用の他に、溝切り散布法、スラリーインジェクタによる土中施用、消化液に酸を添加して pH を下げる方法等がある。

一方、消化液施用直後の混和や酸添加を行わない場合には、揮散による窒素の損失が多いことを考慮した施肥設計が必要である。ただし、アンモニア揮散量は、液相の pH、温度、風速等多くの因子の影響を受けるため、揮散量の予測が難しい。Matsunaka et al.は、乳牛スラリーを対象として、圃場の土壌水分、気温、施用量、スラリーの pH 等の条件を変化させた時の施用土壌からのアンモニア揮散量を測定し、条件によりアンモニア揮散率（施用されたアンモニア性窒素に対するアンモニアとして揮散した窒素量の割合）が大きく変動（22～61%）することを報告している<sup>3)</sup>。このことは、消化液施用後しばらく放置した場合のアンモニア揮散量を予測することは困難であり、揮散量を考慮に入れて適正に施肥設計を行うことの難しさを示している。

以上より、消化液施用後すぐの土壌との混和や消化液への酸添加によりアンモニア揮散

を抑制する施用方法は、消化液に含有するアンモニア性窒素の有効利用という観点と揮散量を正確に予測し、無駄のない施肥設計が行えるという観点から望ましいと言える。一方、それらの方法を採用することが難しい場合には、環境条件によりアンモニア揮散量が変わるため、肥料効果も一定しないことが予想される。作物の生育状況から肥料の効き具合を判断して、追肥で過不足を補う対応が求められる。

#### (4) 消化液の施用可能量

消化液は水分が多いため、施用量が多いと一部が土壤に浸透せず、土壤表面を流れ、施肥ムラを引き起こすおそれがある。そのため、施用直後に表面流出が生じない施用量を把握した。黒ボク土の畑地に消化液をそれぞれ 4t/10a, 8t/10a 施用して、表面流出を観察した。

その結果、4t/10a の場合、施用した消化液はほぼ土壤に浸透し、表面流出は起こらなかった。一方、8t/10a では消化液の一部が土壤に浸透せず、土壤に消化液の液面ができ、表面流出が生じ、施肥ムラが生じた。

以上より、消化液を均一に施用するためには、5t/10a 程度が1回の施用量の限界であると考えられる。また、施用量の決定にあたっては、施用畑の土壤診断結果や地域の施肥基準に基づき、カリなどの養分過剰に留意することも重要である。

#### (5) 地下への窒素溶脱量と連用による土壤への影響

消化液を施用した時の窒素の溶脱特性を化学肥料の場合と比較するため、ライシメータという試験装置（図-7）を用いて調査を行った<sup>4)</sup>。ライシメータとは、土壤から浸透する水を採取できるように設計された土壤槽のことである。ライシメータで施肥・作物栽培を行い、その間の浸透水の水量と成分濃度を測定することにより、消化液等の施用が地下水の水質に及ぼす影響をモニタリングできる。このライシメータを6基使い、消化液区、硫安区、無施肥区を設定し、年3作（春作、夏作：コマツナ、秋作：ハウレンソウ）の作付けで、4年間試験を行った。

消化液・硫安を施用した畑地における4年間の窒素収支を図-8に示す。消化液区の作物の窒素吸収量は4年間を通じて硫安区よりやや少ない程度であり、消化液は硫安に近い窒素肥料として、化学肥料の代替利用ができることが示唆された。浸透水の窒素濃度の時期的な変動は、消化液区と化学肥料区でほぼ同様であったが、窒素溶脱量（浸透水量と浸透水の窒素濃度の積）は、作物への吸収量と同様に消化液区でやや少なかった。作物への窒素吸収量に対する窒素溶脱量は、消化液と硫安ではほぼ等しいことを示唆している。このことから、消化液で化学肥料を代替しても、適切な施用量であれば、地下水質への影響は小さいといえる。また、消化液には難分解性の有機態窒素が1割程度含まれており、作物に吸収されたり、溶脱したりせず、土壤の表層に蓄積されることが示された。

以上より、農地に施用され、土壤との混和などによって土壤に保持された消化液由来のアンモニア性窒素の動きは、硫安等の化学肥料由来成分と大きな差異はなく、化学肥料を消化液に代替しても地下水への負荷は増加しないことが示唆された。

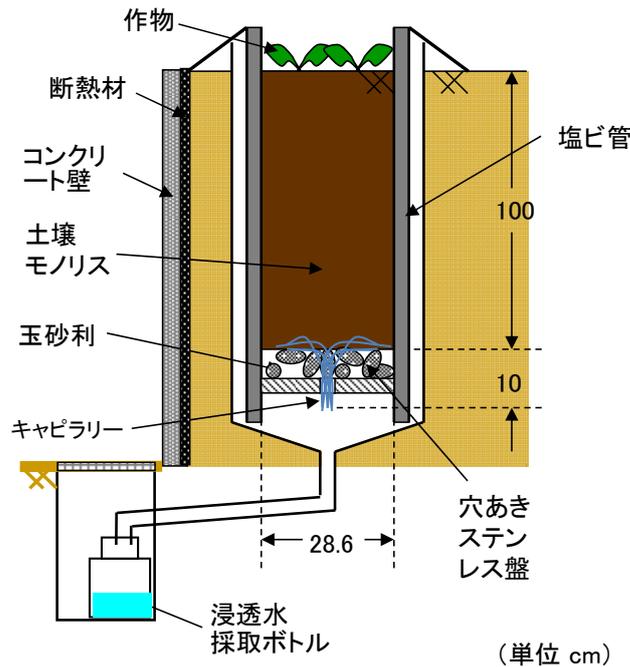


図-7 モノスライシメータ

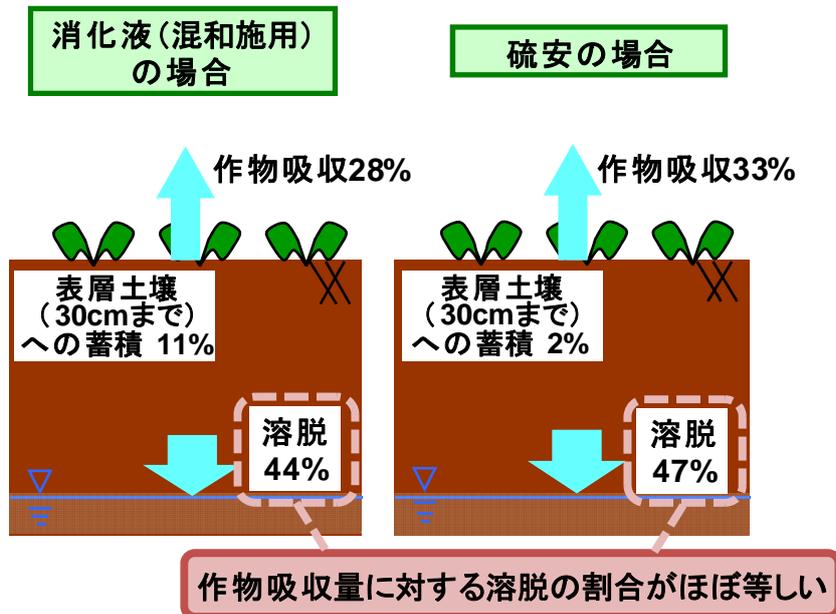


図-8 施肥された窒素の動態  
(4年間の窒素収支)

- 1) 石岡 巖, 木村 武: メタン消化液中の速効性窒素成分は 0.5M 塩酸抽出で測定できる, 平成 17 年度「関東東海北陸農業」研究成果情報, (2006)  
[http://www.naro.affrc.go.jp/org/narc/seika/kanto17/12/17\\_12\\_20.html](http://www.naro.affrc.go.jp/org/narc/seika/kanto17/12/17_12_20.html)
- 2) 中村真人, 藤川智紀, 柚山義人, 山岡 賢, 折立文子: 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, 日本土壤肥料学雑誌, 83(2), 139-146, (2012)

- 3) MATSUNAKA, T., SENTOKU, A., MORI, K., and SATOH, S.: Ammonia volatilization factors following the surface application of dairy cattle slurry to grassland in Japan: Results from pot and field experiments, *Soil Science and Plant Nutrition*, 54, 627-637, (2008)
- 4) 中村真人, 藤川智紀, 柚山義人, 前田守弘, 山岡 賢: 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(6), 17-26, (2009)

## 7. よりよい消化液の液肥利用のために

前章までに述べたことを踏まえ、消化液を施用した土壌における窒素の動態を以下にまとめます。

消化液を土壌表面に施用すると、消化液に含まれる速効性の肥料成分であるアンモニア性窒素の一部が揮散し、速効性の肥料成分が損失する。アンモニア揮散の抑制のためには、①施用後速やかに土壌と混和する、②スラリーインジェクタにより土中施用する、③消化液に酸を添加してpH調整する、などの対策が有効である。これらの対策を行うことにより、アンモニア揮散量を少量にすることができ、消化液中のアンモニア性窒素の多くを肥料として利用することができる。それらの対策により、有機態窒素の無機化分（アンモニア性窒素の2割程度）を含めて、消化液に含まれる窒素の約6割程度は速効性成分として利用できる。しかし、それらの対策を行うことが困難な場合には消化液に含まれるアンモニア性窒素の多く（30%～60%）が揮散により失われることになる。しかも、その量は環境条件に左右され、予測が難しい（図-9）。

農地に施用した後、土壌との混和などによって土壌に吸着された消化液由来のアンモニア性窒素は、硫酸等の化学肥料由来成分と比べ土壌での動態に関して大きな差異はない。したがって、消化液を施用する場合は、アンモニア揮散を考慮に入れて施肥設計を行うことで、化学肥料同等の肥料効果を発揮でき、かつ化学肥料を施用した場合と同等に抑えられることが分かる。

施用量を決定するにあたり、アンモニア揮散量は施用方法による変動が相対的に大きくその影響も大きいいため、適正な施肥設計のためのポイントはアンモニア揮散であるといえる。

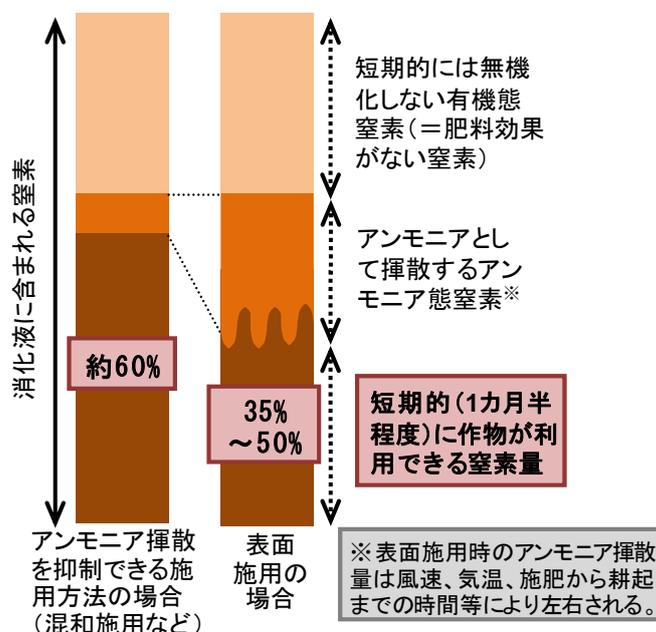


図-9 施用方法による消化液由来窒素の利用可能割合

本報では、環境中の反応性窒素の増加を防ぎ、よりよい窒素循環を実現する方法としてメタン発酵消化液の液肥利用に着目し、肥料効果を発揮し、かつ環境負荷を最小化するための適正な消化液の液肥利用技術について検討した。

消化液は速効性の肥料成分を含むため、化学肥料の代わりに利用できるものの、化学肥料施用の場合とは施用後のアンモニア揮散特性が大きく異なる。そのため、適正な施肥設計のためには、アンモニア揮散量を考慮に入れる必要がある。適切な施用量であれば、消化液で化学肥料を代替しても、地下水質への影響は小さいことが示された。

このように、消化液は環境負荷を増加させることなく、速効性の肥料として利用することが可能である。メタン発酵と消化液の液肥利用を組み合わせることにより、エネルギーの生産、地球温暖化緩和、肥料資源の有効利用を実現できる。窒素循環の観点からは、化学肥料使用量を減少させ、反応性窒素の増加を緩和する効果が期待できる。もちろん、消化液の液肥利用だけでは、地球規模の窒素循環を大きく改善することはできない。しかし、消化液の利用と同様に、地域に存在する未利用の資源を効率よく肥料として利用するシステムを導入することができれば、より健全な窒素循環に貢献できる。