

第Ⅱ章 メタン発酵消化液由来の濃縮液肥の窒素肥料的効果

第1節 はじめに

本章では、メタン発酵実験プラント「山田バイオマスプラント」で製造される各種のメタン発酵消化液由来資材のうち、メタン発酵消化液を固液分離し、液体分を濃縮した液肥（第1-2図）の窒素肥料的効果について論じる。

バイオマスの資源化においては、その効率的利用の観点から、地域内で得られるバイオマスから、その地域で必要とされるエネルギーを得る仕組みを構築する必要がある（望月・迫田，2004）。

その実験的施設として、2005年に千葉県香取市に乳牛ふん尿のメタン発酵プラントが建設された。このプラントは地域の酪農施設で発生する乳牛ふん尿を原料にしてメタン発酵を行い、燃料用のメタンガスを製造している。メタンガスを回収した後の残さは、畜ふん尿由来のメタン発酵消化液となる。このメタン発酵消化液は窒素、リン酸、加里を含むため、肥料としての利用が期待されており、これまでに、果菜類では、ドレンベッドに細粒黄色土を充填し、メタン発酵消化液を施用してメロンを栽培した事例（中野・上原，2003）、発泡スチロール製ベッドに褐色低地土を充填し、0.40 μmの精密ろ過膜を透過したメタン発酵消化液を施用してトマトを栽培した事例（宮田・池田，2006）が報告されている。

一般的に、果菜類の栽培において、効率的な養分および水分管理を行うには、灌水同時施肥という手法が有効である。灌水同時施肥を行う場合には、チューブを通して液体肥料を施用するのが一般的である。液体肥料に固形分が混和していると、チューブの目詰まりを起こすリスクがあり、メタン発酵消化液をそのまま灌水同時施肥に利用することは困難であると考えられる。しかし、本試験に供したメタン発酵消化液由来の液肥は、メタン発酵消化液を固液分離した液体分を濃縮したものであり、灌水同時施肥が可能であると判断された。

そこで、市販の灌水同時施肥システムを用い、トマト半促成栽培におけるメタン発酵消化液由来の液肥の実用性を表層腐植質黒ボク土のハウス圃場において検証したので報告する。

第2節 材料および方法

1. 栽培方法

2006年11月から2008年6月にかけてトマト（*Lycopersicon esculentum* Mill.）の半促成栽培を千葉県農林総合研究センター内の小型ガラスハウス（96 m²）で、2作実施した。土壌は表層腐植質黒ボク土（米神統）である。土壌の化学性は第2-1表に示した。pHが高い理由は、試験開始の前年まで5作続けてトマトの栽培試験が実施されており、毎作100 g m⁻²の苦土石灰が施用されていたためであると考えられる。施肥法は市販のシステム（養液土耕栽培用液肥混入機、大塚化学社製）を用いた灌水同時施肥とした。品種は「ハウス桃太郎」（タキイ種苗）、台木は「影武者」（タキイ種苗）を供試し、栽植様式は畦幅1.3 m、株間0.35 m（2.2株m⁻²）の1条植えとした。主枝1本仕立ての斜め誘引整枝を行い、9段果房の上の葉2枚を残して摘心した。

第1作では、2006年11月8日に播種、12月27日に定植した。第2作では、2007年10月2日に播種、11月29日に定植した。

2. メタン発酵消化液由来の液肥

本試験では、千葉県香取市のメタン発酵施設で発生した乳牛ふん尿由来のメタン発酵消化液を固液分離し、この液体分をポリプロピレン製不織布フィルター（100micron-double-length, Hayward社製）によりろ過して濃縮した液肥（以下、「濃縮液肥」とする）を供した。その主成分はアンモニウム態窒素と加里であり、リン酸含有量は19 mg L⁻¹であった（第2-2表）。同一の施設で発生したメタン発酵消化液の成分（中村ら，2007a）と比較すると、全窒素に占める無機態窒素の割合が高く、リン酸含有量が低い傾向になった。

3. 試験区の構成

試験区として濃縮液肥区と標準液肥区を設置した。濃縮液肥区には生育全期間を通じて、濃縮液肥を硫酸でpH 7に調整して施用した。また、濃縮液肥はリン酸を含まないため、基肥として30 g m⁻²のリン酸を熔リン（N-P₂O₅-K₂O=0-20-0）で施用した。標準液肥区には、定植直後から収穫開始まで大塚養液土耕5号（N-P₂O₅-K₂O=12-20-20）、収穫開始から栽培終了まで大

第2-1表 供試土壌の化学性

pH (H ₂ O)	EC (S m ⁻¹)	T-C (g kg ⁻¹)	T-N (g kg ⁻¹)	C/N	NO ₃ -N (g kg ⁻¹)	NH ₄ -N (g kg ⁻¹)
7.6	0.017	44.3	3.6	12.2	0.06	0.01
Phosphate absorption coefficient	Truog P ₂ O ₅ (g kg ⁻¹)	CEC (cmol _c kg ⁻¹)	Exchangeable cation (g kg ⁻¹)			
			CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
1,869	0.50	41.0	6.09	1.24	0.19	0.25

第2-2表 濃縮液肥の成分含有量

	pH	EC (S m ⁻¹)	T-N (mg L ⁻¹)	NH ₄ -N (mg L ⁻¹)	NO ₃ -N (mg L ⁻¹)	P ₂ O ₅ (mg L ⁻¹)	K ₂ O (mg L ⁻¹)
Digested liquid	8.0 ± 0.3	2.1 ± 0.6	1,780 ± 640	1,330 ± 250	90 ± 120	19 ± 10	3,310 ± 1,100
Digested slurry ^a	7.7 ± 0.1	2.0 ± 0.2	3,340 ± 976	1,690 ± 329	< 0.6	1,643 ± 593	3,650 ± 934

Mean value ± standard deviation(n=6)

^a Content of digested slurry was quoted from "Nakamura et al.(2007)"

塚養液土耕2号 (N-P₂O₅-K₂O = 14-8-25) を施用した。株当たりの施用量と無機態窒素濃度は千葉県施肥基準 (千葉県, 2009) に準じた。濃縮液肥の希釈倍率は、濃縮液肥のアンモニウム態窒素濃度から、標準液肥区の液肥と同等の無機態窒素濃度になるように設定した。第2作における窒素施用量と灌水量は第2-1図に示した。

第2作の濃縮液肥区の窒素、リン酸、加里の施用量はそれぞれ17.0 g m⁻², 30.2 g m⁻², 48.1 g m⁻²であった。トマトの半促成栽培における千葉県施肥基準 (千葉県, 2009) は窒素31 g m⁻², リン酸34 g m⁻², 加里31 g m⁻²であるため、本試験では、灌水同時施肥法により、全面施肥を前提とした千葉県施肥基準と比べて窒素の施用量は削減されたが、加里は過剰施用となった。

試験規模は1区8株 (3.6 m²) の3反復とした。なお、第1作および第2作は、濃縮液肥区、標準液肥区とも同一ハウス内で行った。

4. 調査項目および調査方法

(1) 葉柄汁液中の硝酸イオン濃度調査

山田ら (1995) の方法に準じ、第2作の生育中期にあたる2008年1月22日から4月9日まで、週1回の割合で汁液栄養診

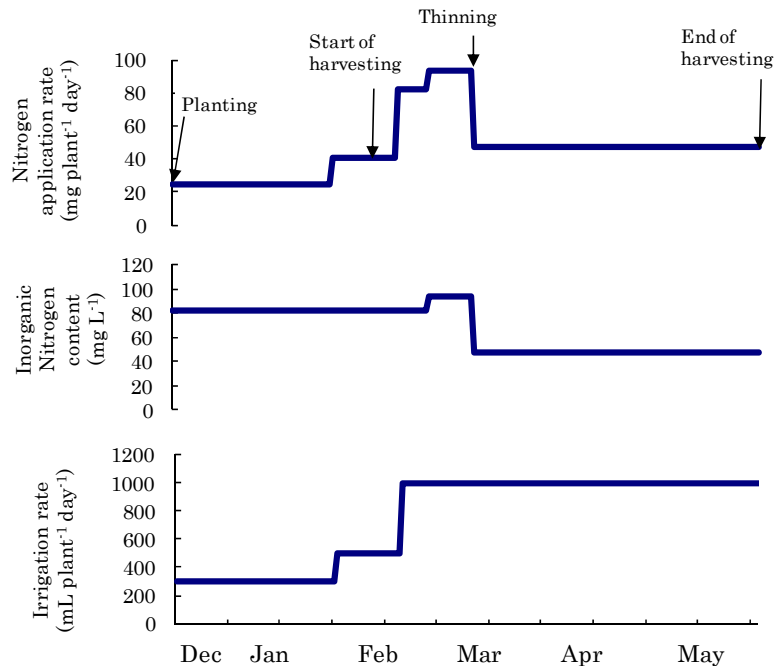
断を行い、各区のピンポン玉程度に肥大した果房直下の葉の葉柄汁液に含まれる硝酸イオン濃度を小型反射式光度計 (RQフレックスシステム,メルク社製) で測定した。

(2) 生育調査

株ごとにトマトの草丈、葉身長、葉身幅、莖径および葉色を第2作の摘心直前である2008年3月13日に測定した。草丈は地際から生長点までの長さとし、葉身長と葉身幅は第5果房直下の本葉、莖径は第5果房直下で測定した。葉色は、第5果房直下の本葉で葉緑素計 (SPAD-502, コニカミノルタ社製) を用いて測定した。

(3) 窒素吸収量調査

第2作の栽培終了時に、各区の2株を葉、莖、根に分けて採取し、70°Cの通風乾燥器内で3日間以上乾燥させた後、乾物重を測定した。果実と側枝は各区の2株を対象に生育中に採取し、葉、莖および根と同様に乾燥させた後、乾物重を測定した。葉、莖、根、果実および側枝の全窒素含有率は、これらの乾燥試料を粉碎し、乾式燃焼法で測定した。測定にはNCアナライザー (SUMIGRAPH NC900, 住化分析センター製) を用いた。乾物重に全窒素含有率を乗じて窒素吸収量を算出した。



第2-1図 窒素施用量と無機態窒素濃度および灌水量の推移(第2作)

(4) 果実の収量および品質調査

収穫開始（第1作：2007年3月26日，第2作：2008年2月14日）から収穫終了（第1作：2007年6月18日，第2作：2008年6月2日）まで果実の等級別収量を毎週2回調査した。等級区分は千葉県園芸作物出荷規格（千葉県，2006）に準じてA・B級品およびC・D級品に分類し，個数と重量を調査した。

収穫後期（第1作：2007年5月22日，第2作：2008年5月14日）に果実の糖度および硬度を調査した。糖度はデジタル糖度計（PR-101，ATAGO社製）で測定した。硬度は直径8 mmの円錐型先端を装着したデジタルフォースゲージ（DPS II-R，IMADA社製）で測定した貫入抵抗値とした。調査個数は各区8個とした。

(5) 栽培圃場の無機態窒素含有量および交換性加里含有量調査

第2作において，栽培前後における圃場のアンモニウム態窒素含有量および硝酸態窒素含有量を深さ0～15 cm および 15～30 cm で調査した。フローインジェクション分析装置（FA-100，アクア・ラボ社製）を用い，アンモニウム態窒素はインドフェノール青吸光度法（土壤環境分析法編集委員会，1997），硝酸態窒素は銅・カドミウム還元一ナフチルエチレンジアミン吸光度法（土壤環境分析法編集委員会，1997）で測定した。

また，栽培後の圃場の深さ0～15 cm の交換性加里含有量（以下，加里含有量と記す）を原子吸光光度計（Z-5010，日立ハイテクノロジーズ社製）を用い，原子吸光法（土壤環境分析法編集委員会，1997）で測定した。

第3節 結果および考察

1. 濃縮液肥を施用してかん水同時施肥栽培したトマトの生育収量および窒素吸収量

(1) 葉柄汁液中の硝酸イオン濃度および植物体の生育

第2作において，濃縮液肥区の葉柄汁液中の硝酸イオン濃度は，収穫開始前日の2月13日において3,900 mg L⁻¹ であり，

摘心前日の3月12日までは2,500 mg L⁻¹ 前後であった（第2-2図）。山本・松丸（2005）は，トマト葉柄汁液の硝酸イオン濃度を収穫始期から摘心期において1,000～2,000 mg L⁻¹ に維持することで，目標収量を確保できるとしており，本試験においても十分な収量を確保できる葉柄汁液中の硝酸イオン濃度を維持できた。

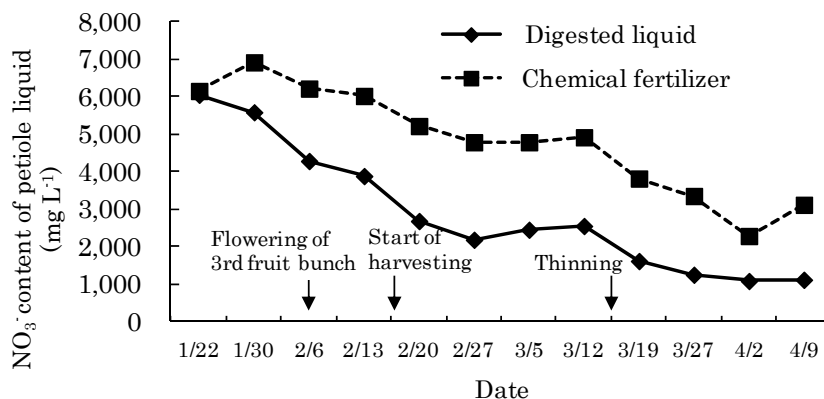
また，第1作および第2作のいずれにおいても，収穫中期の草丈，葉身長×葉身幅，茎径および葉色について試験区間に有意差はみられなかった（第2-3表）。

第2作の栽培終了後の面積当たり窒素吸収量は，濃縮液肥区が23.1 g m⁻²，標準液肥区が21.9 g m⁻² であり，試験区間に有意差はみられなかった（第2-4表）。これらの結果から，濃縮液肥の窒素肥料としての効果は標準液肥と同等と判断された。なお，窒素吸収量が窒素施肥量の17.0 g m⁻² を上回ったが，栽培圃場の深さ0～15 cm における可給態窒素含有量が0.09 g kg⁻¹ であったことから，地力窒素の無機化による窒素供給が原因と考えられた。

(2) 果実の収量および品質

果実のA・B級品収量は，第1作では濃縮液肥区が9.0 kg m⁻²，標準液肥区が8.7 kg m⁻² となり，第2作では濃縮液肥区が9.2 kg m⁻²，標準液肥区が9.9 kg m⁻² であった（第2-5表）。果実のA・B級品収量とC・D級品収量を合計した総収量は，第1作では濃縮液肥区が12.1 kg m⁻²，標準液肥区が12.0 kg m⁻²，第2作では濃縮液肥区が10.4 kg m⁻²，標準液肥区が11.0 kg m⁻² であった。A・B級品収量，総収量ともに，いずれの作においても試験区間に有意差はみられなかった。なお，千葉県の半促成トマトの目標収量は12段収穫で12.0 kg m⁻² であるため（千葉県・千葉県農林水産技術会議，2009），1段当たり1 kg m⁻² となる。したがって，9段で収穫を終えた本試験における総収量が9 kg m⁻² を超えていることから，一般的な栽培と同等以上の収量が得られたといえる。

また，果実の糖度および硬度は，収穫中期および収穫後期のいずれの時期においても，試験区間に有意差はみられず，標準液肥を施用した場合と同等の品質が得られた。



第2-2図 濃縮液肥の施用がトマトの葉柄汁液硝酸イオン濃度の推移に及ぼす影響(第2作)

第2-3表 濃縮液肥の施用が摘心直前のトマトの生育に及ぼす影響(第2作)

Experimental plot	Plant length	Leaf length × Leaf width	Stem diameter	Leaf color
	(cm)	(cm ²)	(mm)	(SPAD value)
Digested liquid	230 ± 15	2,403 ± 79	12.2 ± 0.9	40.6 ± 1.1
Chemical fertilizer	228 ± 3	2,487 ± 148	12.5 ± 1.2	40.9 ± 1.1
t-test	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

Mean value ± standard deviation(n=3)

第2-4表 濃縮液肥の施用が栽培終了時のトマトの窒素吸収量に及ぼす影響(第2作)

Experimental plot	Nitrogen uptake rate (g m ⁻²)					
	Leaf	Stem	Root	Fruit	Lateral shoot	Total
Digested liquid	8.2 ± 0.9	2.6 ± 0.3	0.4 ± 0.0	8.3 ± 0.8	3.6 ± 0.3	23.0 ± 2.2
Chemical fertilizer	7.1 ± 0.6	2.4 ± 0.5	0.3 ± 0.1	8.5 ± 0.1	3.7 ± 0.1	21.9 ± 1.1
t-test	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

Mean value ± standard deviation(n=3)

第2-5表 濃縮液肥の施用がトマトの収量および品質に及ぼす影響

1st cultivation

Experimental plot	Yield (kg m ⁻²)			Sugar content of fruit (brix)	Hardness of fruit (g cm ⁻²)	Blossom-end rot rate ^a (%)
	A·B class	C·D class	Total			
Digested liquid	9.0 ± 0.4	3.1 ± 0.5	12.1 ± 0.2	5.6 ± 0.2	694 ± 32	0.2
Chemical fertilizer	8.7 ± 0.3	3.3 ± 0.3	12.0 ± 0.4	5.6 ± 0.1	650 ± 14	0.1
t-test	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

2nd cultivation

Experimental plot	Yield (kg m ⁻²)			Sugar content of fruit (brix)	Hardness of fruit (g cm ⁻²)	Blossom-end rot rate ^a (%)
	A·B class	C·D class	Total			
Digested liquid	9.2 ± 0.4	1.3 ± 0.4	10.4 ± 0.1	5.3 ± 0.1	762 ± 15	0.0
Chemical fertilizer	9.9 ± 0.3	1.1 ± 0.5	11.0 ± 0.5	5.2 ± 0.0	743 ± 39	0.0
t-test	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-

Mean value ± standard deviation(n=3)

^a Blossom-end rot rate(%)= number of blossom-end rot fruits / number of total harvested fruits×100

2. 濃縮液肥を施用してトマトをかん水同時施肥栽培した土壌へのアンモニウム態窒素および加里の蓄積

栽培前後の土壌の無機態窒素含有量を第2-6表に示した。栽培前および栽培後の土壌におけるアンモニウム態窒素含有量について試験区間に有意差がみられないことから、濃縮液肥により施用されたアンモニウム態窒素は栽培期間中にほとんど硝化され、圃場への蓄積は少ないと判断された。その結果、第2-5表に示したとおりアンモニウム態窒素の施用によるカルシウムの吸収抑制が原因とされる(池田, 1988) 尻腐れ果の発生はほとんど認められなかった。

マサ土に定植したトマトに、本試験と同様に硫酸でpH調整したメタン発酵消化液を施用した宮田・池田(2006)は、

アンモニウム態窒素の蓄積が認められ、尻腐れ果が発生したと報告している。本試験との結果が異なった原因は、主に供試土壌の違いにあると考えられる。西尾・荒尾(2002)は、黒ボク土と灰色低地土および台地黄色土の硝酸化成速度を測定し、黒ボク土の硝酸化成速度がもっとも速いことを認めている。したがって、本試験においてアンモニウム態窒素の蓄積が少なかった原因は、表層腐植質黒ボク土における硝酸化成速度が、マサ土と比較して高かったためと考えられる。

また、加里含有量については標準液肥区が0.19 g-K₂O kg⁻¹であったのに対し、濃縮液肥区は0.36 g-K₂O kg⁻¹と2倍近い値になり、圃場への蓄積が認められた。したがって、濃縮液肥の施用にあたっては土壌診断を行い、圃場の加里含有量が

第 2-6 表 濃縮液肥の施用が栽培前後の土壌中無機態窒素含有量に及ぼす影響

Experimental plot	NH ₄ -N content (×10 ⁻³ g kg ⁻¹)				NO ₃ -N content (×10 ⁻³ g kg ⁻¹)			
	0-15cm		15-30cm		0-15cm		15-30cm	
	Before cultivation ^a	After cultivation ^b	Before cultivation	After cultivation	Before cultivation	After cultivation	Before cultivation	After cultivation
Digested liquid	1.0±0.4	5.6±0.3	0.8±0.5	6.1±0.9	0.8±0.4	0.5±0.4	0.6±0.5	0.7±0.3
Chemical fertilizer	1.2±0.2	7.7±4.6	0.8±0.1	4.2±1.9	1.1±0.3	1.7±0.8	0.5±0.1	1.2±0.4
t-test	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

Mean value ± standard deviation(n=3)

^a sampled Nov. 2007

^b sampled Jun. 2008

適正値を超えないように留意する必要がある。

第 4 節 まとめ

メタン発酵消化液由来の濃縮液肥を黒ボク土に定植されたハウス半促成栽培のトマトに灌水同時施肥し、その実用性を検討したところ、下記の結果を得た。

1作当たりの施肥量は、窒素17.0 g m⁻²、リン酸30.2 g m⁻²、加里48.1 g m⁻² となり、慣行栽培の施肥基準と比較して窒素の施用量は削減されたが、加里は過剰施用となった。

汁液栄養診断法に準じて、葉柄汁液中の硝酸イオン濃度を測定したところ、収穫開始期から摘心期において2,500～3,900 mg L⁻¹ となり、十分な収量を確保できる濃度を維持できた。

収穫中期の生育状況および栽培終了時の全窒素吸収量は、同量の窒素を灌水同時施肥用の標準液肥で施用した場合と

差が無かった。

果実のA・B級品収量は9.0～9.2 kg m⁻²、総収量は10.4～12.1 kg m⁻²、収穫中期および収穫後期の果実糖度はBrix値で 5.0～5.6となり、灌水同時施肥用の標準液肥を施用した場合と差が無かった。

濃縮液肥により施用されたアンモニウム態窒素は表層腐植質黒ボク土において栽培期間中に硝化され、栽培終了後の土壌における蓄積は少なかった。加里は土壌への蓄積が認められた。

以上のことから、表層腐植質黒ボク土でのハウス半促成トマト栽培において、加里の蓄積に留意する必要があるものの、メタン発酵消化液由来の濃縮液肥を灌水同時施肥できることが明らかとなった。また、濃縮液肥の窒素肥料的効果は、無機態窒素施用量を慣行の液肥と揃えた場合、化学肥料と同等であることが明らかとなった。