

# メタン発酵消化液が養液土耕, やしがら耕, ロックウール耕および水耕におけるトマトの生育に及ぼす影響

誌名	日本土壌肥料学雑誌 = Journal of the science of soil and manure, Japan
ISSN	00290610
著者名	宮田, 尚稔 池田, 英男 小島, 敬良
発行元	日本土壌肥料学会
巻/号	76巻5号
掲載ページ	p. 619-627
発行年月	2005年10月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター  
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council  
Secretariat



# メタン発酵消化液が養液土耕，やしがら耕，ロックウール耕 および水耕におけるトマトの生育に及ぼす影響\*

宮田尚稔\*\*、\*\*\*・池田英男\*\*・小島敬良\*\*\*

キーワード メタン発酵，消化液，アンモニア態窒素，塩化ナトリウム，トマト

## 1. 緒 言

近年，畜産ふん尿や生ごみ等の有機性廃棄物の増加が著しい<sup>1)</sup>ために，その適正処理だけでなく，資源としての有効利用が期待されている<sup>2)</sup>。こうした中，エネルギーを生産するメタン発酵技術は，資源循環型社会の中核を担う技術として脚光を浴びている<sup>3)</sup>。しかし一方で，メタン発酵では，同時に生ずる消化液の処理の問題が顕在化している。一般に，消化液の処理には，BOD除去や脱窒等を行うための水処理施設を要することから，その初期投資額や運転経費は多大なものとなる<sup>4)</sup>。そのため，この問題を解決しないと，メタン発酵技術の普及は進まない。そこで，消化液を液肥として利用できれば有効な資源となり，廃棄する際の水処理コストも不要となる。

これまでの予備調査から，消化液には，作物の栄養となる多くの成分が含まれていることがわかっている(表1)。市販培養液と比べると，窒素(N)，カリウム(K)，ナトリウム(Na)，塩素(Cl)濃度が高い。N源として，アンモニア態窒素(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)を多く含むが，硝酸態窒素(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)は含まない。カルシウム(Ca)，マグネシウム(Mg)濃度は，全濃度は比較的高いものの，水溶性成分としての濃度はかなり低い。こうした消化液の成分組成を見ると，NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Nが主要なN源であること，あるいはNaやCl濃度が高いことは，作物にとっては好ましくない。一般にNH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Nは，体内である濃度を超えると極めて有毒である<sup>5,6)</sup>。NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Nが体内に蓄積すると，葉緑体の炭素同化の阻害や光リン酸化反応の阻害，多糖類合成の阻害などとなって，NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N過剰害が現れる<sup>7)</sup>。またNaやClは作物によって耐性は異なるものの，高濃度で与えた場合には，過剰障害の発生が危惧される。消化液を液肥として利用する場合には，このような点に留意する必要がある。

そこで本実験では，養液土耕や養液栽培に対する消化液の液肥としての適性を判定するために，養液土耕，やしが

ら耕，ロックウール耕，水耕の4種の異なる栽培法でトマトを栽培し，NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-NやNa，Clが生育に及ぼす影響を評価した。

## 2. 材料および方法

### 1) 処理

供試消化液には，乳牛ふん尿，豚ふん，鶏ふん，および生ごみを混合したものを原料として，55°Cの高温メタン発酵(滞留時間:15日)後，0.40 μmの精密濾過膜(MF膜)を透過したもの<sup>8,9)</sup>を用いた。なお，原料の蒸発残留物(TS)濃度，強熱減量(VTS)濃度および生物化学的酸素要求量(BOD)はそれぞれ，62,400，49,982，47,000 mg L<sup>-1</sup>であった。

実験に先立って供試消化液中の無機要素濃度を測定したところ，窒素(N) 2,520，リン(P) 18，カリウム(K) 1,910，カルシウム(Ca) 139，マグネシウム(Mg) 95 mg L<sup>-1</sup>であった(表2)。養液栽培で一般的に用いられる大塚ハウス肥料A処方<sup>10)</sup>の無機要素濃度，N 260，P 52，K 336，Ca 164，Mg 36 mg L<sup>-1</sup>に比べると，供試消化液はNやK濃度が極めて高かった。今回対照区として用いた大塚ハウス肥料A処方1/2単位のN，P，K，Ca，Mg濃度の分析値は，それぞれ132，26，177，81，23 mg L<sup>-1</sup>である。消化液をNレベルでこれに合わせるためには20倍程度に希釈しなければならないが，20倍に希釈すると，表2に示すように，N，P，K，Ca，Mgはそれぞれ126，1，96，7，5 mg L<sup>-1</sup>となる。これは，大塚ハウス肥料A処方1/2単位に比べると，N以外の濃度はどれも低いので，補正する必要がある。また，消化液の微量要素濃度も非常に低いので，これも補正する必要がある。そこで，本実験では大塚ハウス肥料A処方培養液を2倍に希釈したもの(大塚1/2)を対照として，消化液を20倍に希釈したもの(補正なし)と，20倍希釈液にN以外の無機要素を対照区と同等になるよう補正したもの(補正あり)の二つの処理区を設けた。各処理液のpHは，1規定の硫酸を用いて6.5程度になるように調整した。これら3種を液肥として，トマト品種‘ハウス桃太郎’を，各種栽培法で栽培した。なお補正する際，多量要素には，リン酸二水素カリウム，硫酸カリウム，塩化カルシウム(二水和物)，硫酸マグネシウム(七水和物)を，微量要素には大塚ハウス肥料5号(保証成分: NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N，K，マンガン，配合成分: 鉄，ホウ素，亜鉛，銅，モリブデン)をそれぞれ用い

\* 本報告の一部は，2004年度日本土壌肥料学会福岡大会シンポジウムにおいて発表した。

\*\* 大阪府立大学大学院農学生命科学研究科(599-8531 堺市学園町1-1)

\*\*\* 株式会社クボタ(661-8567 尼崎市浜1-1-1)

2004年12月21日受付・2005年5月16日受理

日本土壌肥料学雑誌 第76巻 第5号 p.619~627 (2005)

表1 原料別にみたメタン発酵消化液の成分組成 (mg L<sup>-1</sup>)

発酵原料*	T-N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	P	K	Ca	Mg	S	Na	Cl
牛糞	3,040	1,420	560 (27)	1,276	1,136 (201)	436 (132)	291 (0)	339	1,206
鶏糞	6,810	4,760	4,870 (390)	1,690	5,207 (74)	922 (6)	1,848 (23)	371	1,426
豚糞	4,330	1,980	3,070 (59)	1,013	3,591 (140)	1,302 (21)	2,581 (47)	291	776
厨芥**	2,460	1,850	290 (120)	195	226 (101)	56 (6)	221 (0)	818	1,612

\* 湿式メタン発酵を行うために、各発酵原料は水で希釈して蒸発残留物濃度を10%に調整した。

\*\* 厨芥原料として弁当を用いた。

( ) 内は水溶性濃度。

表2 供試消化液のpH, ECおよび成分組成

	pH	EC	T-N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	P	K	Ca	Mg	S	Na	Cl
消化液原液	8.49	—	2,520	2	2,194	18	1,910	139	95	<0.01	961	1,909
大塚 1/2	7.22	1.39	132	125	11	26	177	81	23	33	21	29
消化液 1/20	6.50	1.13	126	0	110	1	96	7	5	30	48	95
消化液 1/20 補正	6.50	1.77	126	0	110	26	168	82	18	63	48	233

大塚ハウス 1/2：大塚ハウス肥料 A 処方 1/2 単位。消化液 1/20：消化液原液を 20 倍に希釈し、pH を調整した液。消化液 1/20 補正：消化液 1/20 に N 以外の無機要素を補正し、pH を調整した液。

単位は、EC は dS m<sup>-1</sup>、それ以外の成分は mg L<sup>-1</sup>。

表3 供試土壌 (マサ土：パーク堆肥=3:1, v/v) の化学的特性

pH(H <sub>2</sub> O) (1:2.5)	EC(1:5) (dS m <sup>-1</sup> )	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N (mg kg <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (mg kg <sup>-1</sup> )	交換性塩基			可給態 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )
				K	Ca (mg kg <sup>-1</sup> )	Mg	
6.48	0.27	1.0	1.2	53	1,442	259	270

た。

## 2) 栽培管理

栽培は、大阪府立大学農学部構内の実験用プラスチックハウスで行った。本実験で採用した栽培法は、養液土耕、やしがら (有機培地) 耕、ロックウール (無機培地) 耕、水耕 (たん液型) の 4 種である。養液土耕では、マサ土とパーク堆肥を容積比で 3:1 に混合した培地 (以下、土壌) を用いた。土壌の化学的特性は、表 3 に示すとおりである。また、やしがらの主含有成分は、乾物当たり N 1.9, P 1.0, K 16.9 mg g<sup>-1</sup> であった。

トマト品種 'ハウス桃太郎' は 7 月 15 日に播種した。育苗用培地として、養液土耕とやしがら耕用の苗にはメトロミックスを、ロックウール耕と水耕用の苗にはロックウールキューブ (たて 36 mm×横 36 mm×高さ 40 mm) をそれぞれ用いた。育苗後、8 月 13 日に各培地に定植した。水耕は、定植と同時に処理を開始した。その他の栽培は、定植時の活着不良を防ぐため、定植後 3 日間は大塚ハウス肥料 A 処方 1/2 を与え、8 月 16 日に処理を開始した。トマトは 1 本仕立てとして、摘心は行わなかった。第 1 花房収穫期前 (第 4 花房開花期) に、処理間の生育差が明瞭になったため、10 月 7 日に処理を終了した。栽培中はハウスの側窓を開放し、ハウス内の気温を調整した。

水耕では、たて、横、深さそれぞれ 1,290, 828, 192

mm のプラスチック容器を用い、これに 150 L の培養液を入れて、8 本の苗を植えた。2 容器をもって 1 処理とした。処理期間中はブローアを使って連続通気を行い、処理 37 日後に培養液を更新した。養液土耕、やしがら耕およびロックウール耕には、たて、横、深さそれぞれ 900, 215, 130 mm の発泡スチロール製の栽培ベッドを用い、各々の培地を充填して、1 ベッド当たり 4 本の苗を植えた。4 ベッドをもって 1 処理とした。給液には、圧力補正付ドリッパー (ウッドベッカー WPC, ネットファーム社) を差し込んだ点滴チューブを用い、かけ流し方式を採用した。また、給液量は、生育段階や天候によって、ベッド底面より排液が出る程度に調整した。処理期間中の給液量は 270~440 mL 株<sup>-1</sup> 日<sup>-1</sup> であった。

## 3) 植物体の調査および分析方法

処理開始後、定期的に生育調査を行い、処理終了時には地上部の生体重、乾物重を測定した。

水耕は、培養液の更新前 (処理 37 日後) と処理終了時 (処理 53 日後) の 2 回、その他の栽培は処理終了時 (処理 53 日後) に、葉を無機要素分析用に採取した。トマトの場合、吸収した NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N あるいは NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N の体内分布率は、葉身では上位のものほど高い<sup>10)</sup> ため、採取部位は最上位展開葉とした。分析試料は、採取後すぐに熱風乾燥器に入れて、最初の約 1 時間は 90~100°C に保ち、その後は

約 70°C で速やかに乾燥して乾物重を求め、粉碎した。

各要素の分析方法は次のとおりである。全窒素 (T-N) は Gunning 変法にて分解後、インドフェノール法で比色定量した<sup>11)</sup>。また  $\text{NO}_3^-$ -N および  $\text{NH}_4^+$ -N は、乾燥粉末試料 1 g に約 85°C の温水 50 mL を加えて密栓し、1 時間振とう後、0.20  $\mu\text{m}$  のメンブランフィルターでろ過して分析用液とし、イオンクロマトグラフ (10 A シリーズ (カチオンカラム: IC-C 3, アニオンカラム: IC-A 1), 島津製作所) を用いて定量した。その他の無機要素は、乾燥粉末試料 0.5 g に硝酸 3.0 mL, 過酸化水素水 2.0 mL を添加し、マイクロウェーブ分解装置 (MULTIWAVE, Anton Paar 社, GER) にて分解後、純水で 50 mL に定容して分析用液とし、ICP 発光分光分析装置 (IRIS Advantage RP, JARRELL ASH 社, USA) で定量した。

#### 4) 培地の調査および分析方法

固形培地耕では、培地内の溶液を分析用試料として採取し、pH, EC および無機要素濃度を測定した。なお、溶液は減圧ポーラスカップ法にて採取した。また、タンク内の培養液についても、定期的な同じ項目を測定した。pH と EC はそれぞれ、pH メータと電気伝導率計で測定し、

無機要素はイオンクロマトグラフを用いて定量した。

### 3. 結 果

#### 1) 外観・生育

消化液を与えると、栽培法によっては外観に特異的な症状が見られた。水耕では、補正なし消化液で処理開始後まもなく下葉が黄化し、葉緑部にはネクロシスが発症した。処理末期になると、これら症状が更に進み、一部の株が枯死した。補正なしの根は、大塚 1/2 に比べて発達が遅れ、褐色の短根がそう生ずる形となった。補正ありでも、同様の症状が見られたが、症状の程度は補正なしよりも軽減された。また、これらの症状はロックウール耕でも同様に生じたが、その程度は比較的軽かった。しかし、やしがら耕や養液土耕では、外観上の異常は認められなかった。

図 1 に、処理期間中の最大葉長の経日変化を示した。これによると、養液土耕では、処理 21 日後までは、消化液でも補正の有無にかかわらず、大塚 1/2 とほぼ同等の生育を示したことがわかる。一方、それ以外の栽培法では、処理 10 日後の測定時に、既に大塚 1/2 との間に差が認められた。他の項目の調査結果については表示を省略したが、

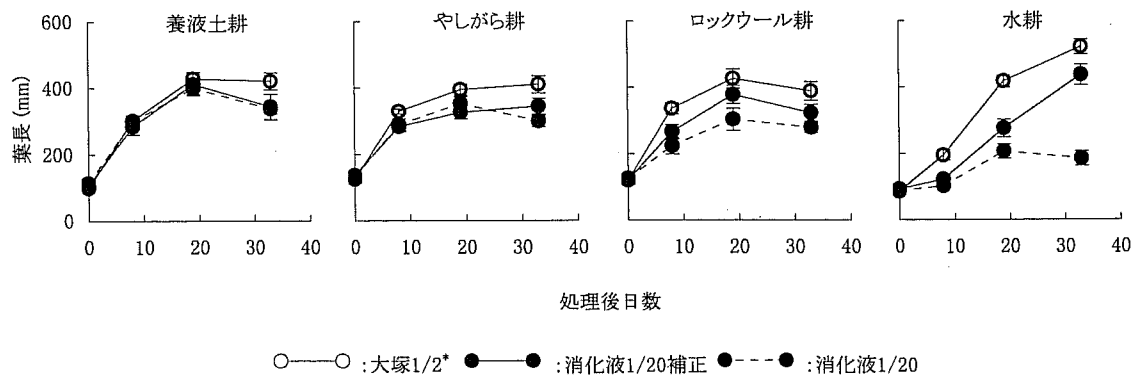


図 1 養液土耕, やしがら耕, ロックウール耕および水耕におけるトマトの最大葉長の推移  
\* 表 2 の脚注参照。バーは標準偏差を示す。

表 4 消化液がトマトの地上部乾物重に及ぼす影響

栽培法	液肥*	乾物重 (g plant <sup>-1</sup> )		
		葉	茎	地上部全体
養液土耕	大塚 1/2	43.2 b	26.2 b	69.5 b
	消化液 1/20 補正	31.4 a	23.9 ab	55.3 ab
	消化液 1/20	30.8 a	22.7 a	53.5 a
やしがら耕	大塚 1/2	39.6 c	22.7 c	62.3 c
	消化液 1/20 補正	26.4 b	19.1 b	45.5 b
	消化液 1/20	15.4 a	13.5 a	28.9 a
ロックウール耕	大塚 1/2	46.4 c	31.6 c	78.0 c
	消化液 1/20 補正	30.2 b	25.4 b	55.6 b
	消化液 1/20	10.9 a	8.7 a	19.6 a
水耕	大塚 1/2	69.6 c	39.8 c	109.4 c
	消化液 1/20 補正	35.8 b	24.0 b	59.8 b
	消化液 1/20	2.9 a	1.4 a	4.3 a

\* 表 2 の脚注参照。

同列の異なるアルファベット間には Tukey の多重検定により 5% の危険率で有意差あり ( $n=16$ )。

葉幅も同様の傾向を示した。草丈、葉数については、処理間における差は小さかった。

表 4 に示すように、処理終了時のトマトの生育は、いずれの栽培法においても、大塚 1/2 で良好であったが、消化液では抑制された。しかし、抑制の程度は栽培法によってかなり異なった。養液土耕では比較的良く生育し、消化液の補正の有無にかかわらず、地上部乾物重が大塚 1/2 の 80% 程度の 54~55 g となった。それに対して、水耕では、消化液は補正ありでも 60 g (大塚 1/2 の 55%) 程度であり、補正なしでは 4.3 g (同 4%) と極端に抑制された。やしらが耕、ロックウール耕ではそれぞれ、補正ありでは 45.5 g (同 73%)、55.6 g (同 71%) と、大塚 1/2 の 70% 強の地上部乾物重となったものの、補正なしでは 28.9 g (同 46%)、19.6 g (同 25%) と生育抑制が顕著であった。乾物重の低下は茎よりも葉で著しかった。

## 2) 植物体の分析結果

表 5 は、処理終了時の乾物当たり葉中 T-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N および NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 濃度を示したものである。

葉中 T-N 濃度は、水耕では、大塚 1/2 と比べ、補正あ

りでは有意に低かったが、補正なしでは逆に有意に高かった。同様の傾向がロックウール耕でも見られた。また養液土耕では、補正なしでのみ、他の培養液を与えた場合よりも有意に低い値を示した。やしらが耕では、培養液の間で有意差は認められなかったものの、養液土耕に近い傾向を示した。

葉中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 濃度は、いずれの栽培法も大塚 1/2 で高い値であった。これに比べると、補正ありでは、養液土耕でのみ 1.34 mg g<sup>-1</sup> を示したものの、他の栽培法では 0.06~0.14 mg g<sup>-1</sup> と極めて低い値であった。また、補正なしでは、養液土耕で 0.45 mg g<sup>-1</sup> と最も低い値であったが、他の栽培法では 1.20~2.10 mg g<sup>-1</sup> と比較的高い値を示した。

葉中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 濃度は、大塚 1/2 を与えた場合には、いずれの栽培法も 0.60~0.90 mg g<sup>-1</sup> とほとんど変化しなかったが、消化液では、大塚 1/2 と同じかこれを上回った。特に水耕の補正なしでは、大塚 1/2 の 3 倍の 1.80 mg g<sup>-1</sup> と非常に高かった。

補正ありを与えたトマトの葉中 P, K, Ca, Mg の濃度

表 5 消化液がトマトの葉中全窒素、硝酸態窒素およびアンモニア態窒素濃度に及ぼす影響 (mg g<sup>-1</sup> DW)

栽培法	液肥*	T-N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N
養液土耕	大塚 1/2	36.1 b	6.10 c	0.66 a
	消化液 1/20 補正	36.0 b	1.34 b	0.72 ab
	消化液 1/20	32.3 a	0.45 a	0.87 b
やしらが耕	大塚 1/2	31.4 a	4.74 c	0.90 a
	消化液 1/20 補正	31.5 a	0.06 a	1.10 b
	消化液 1/20	29.8 a	1.20 b	1.10 b
ロックウール耕	大塚 1/2	29.9 a	2.89 c	0.82 a
	消化液 1/20 補正	27.7 a	0.13 a	1.14 b
	消化液 1/20	35.8 b	2.10 b	1.10 b
水耕	大塚 1/2	31.1 b	5.41 c	0.60 a
	消化液 1/20 補正	21.0 a	0.14 a	0.80 b
	消化液 1/20	39.4 c	1.78 b	1.80 c

\* 表 2 の脚注参照。

同列の異なるアルファベット間には Tukey の多重検定により 5% の危険率で有意差あり (n=16)。

表 6 消化液がトマトの葉中無機要素濃度に及ぼす影響 (mg g<sup>-1</sup> DW)

栽培法	液肥*	P	K	Ca	Mg	S	Na	Cl
養液土耕	大塚 1/2	6.0 c	44.1 b	20.6 c	6.5 b	0.58 a	0.57 a	8.2 a
	消化液 1/20 補正	5.6 b	45.3 b	16.9 b	5.7 a	0.81 b	0.87 b	27.5 c
	消化液 1/20	3.9 a	33.3 a	12.5 a	5.7 a	0.61 a	1.20 c	25.4 b
やしらが耕	大塚 1/2	6.3 c	43.9 b	25.5 c	7.8 b	0.60 b	0.50 a	6.6 a
	消化液 1/20 補正	5.7 b	42.8 b	11.5 b	6.1 a	0.84 c	0.78 c	27.7 c
	消化液 1/20	2.0 a	39.1 a	4.6 a	8.7 b	0.38 a	0.60 b	12.0 b
ロックウール耕	大塚 1/2	6.3 c	38.2 a	15.8 c	6.4 b	0.49 b	0.44 a	6.2 a
	消化液 1/20 補正	6.1 b	36.2 a	6.5 a	5.0 a	0.55 c	0.59 b	14.3 c
	消化液 1/20	1.7 a	42.7 b	8.9 b	12.9 c	0.41 a	0.93 c	8.4 b
水耕	大塚 1/2	6.7 c	44.3 c	16.2 b	6.0 b	0.46 b	0.51 a	6.6 a
	消化液 1/20 補正	6.0 b	38.3 b	11.1 a	3.9 a	0.72 c	0.65 b	27.7 c
	消化液 1/20	1.2 a	30.2 a	15.3 b	23.1 c	0.40 a	1.08 c	24.4 b

\* 表 2 の脚注参照。

同列の異なるアルファベット間には Tukey の多重検定により 5% の危険率で有意差あり (n=16)。

は、いずれの栽培法においても、大塚1/2を与えたものより概ね低かった(表6)。中でもCa濃度は、養液土耕以外の栽培法では6.5~11.5 mg g<sup>-1</sup>で大塚1/2の41~69%と極端に低かったが、養液土耕では16.9 mg g<sup>-1</sup>(大塚1/2の82%)と低下の程度は軽かった。また補正なしでも、これら要素は大塚1/2に比べて低くなる場合が多かった。特に、養液土耕以外の栽培法では、P濃度が1.2~2.0 mg g<sup>-1</sup>(同18~32%)と極めて低かった。

葉中NaとCl濃度はいずれも、消化液を与えるで大塚1/2より顕著に高い値を示した(表6)。葉中Na濃度は、補正ありでは0.59~0.87 mg g<sup>-1</sup>で、補正なしでは0.60~1.20 mg g<sup>-1</sup>と、補正なしのほうが比較的高くなる傾向を示した。これに対し、葉中Cl濃度は、補正ありでは14.3~27.7 mg g<sup>-1</sup>で、補正なしでは8.4~25.4 mg g<sup>-1</sup>と、補正ありのほうが高かった。

3) 培地の分析結果

処理10日後には処理間に生育差が見られ始めたが、この時点で各培地から採取した溶液中のNH<sub>4</sub><sup>+</sup>-NとNO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N濃度を図2に示した。NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N濃度は、補正ありでは、養液土耕、やしがら耕、ロックウール耕、水耕でそれぞれ、0.0, 14.0, 19.6, 27.1 mg L<sup>-1</sup>で、補正なしではそ

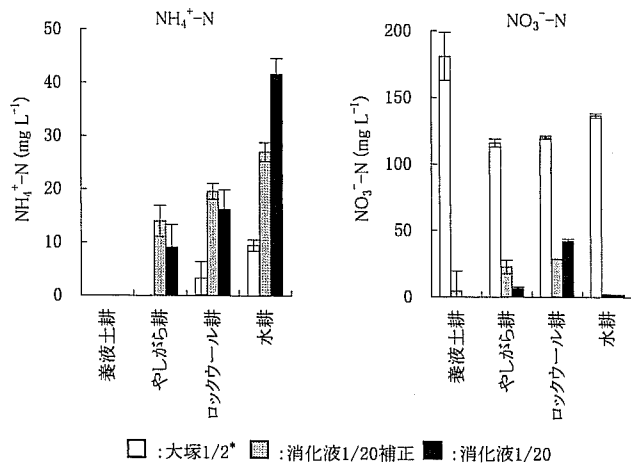


図2 処理10日後に各培地から採取した溶液中アンモニア態窒素および硝酸態窒素濃度

\* 表2の脚注参照。バーは標準偏差を示す。

れぞれ、0.0, 9.1, 16.2, 41.6 mg L<sup>-1</sup>と、いずれも水耕で著しく高く、養液土耕では定量下限値以下であった。表示することは省略したが、養液土耕では排水にもNH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Nはほとんど含まれなかった。一方、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N濃度は、水耕では1.7~1.8 mg L<sup>-1</sup>と、極めて低かった。また、固形培地耕でも、定植時の活着不良を防ぐ目的で、培地内の溶液をNO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Nを主要なN源とする大塚ハウス肥料A処方1/2で置換したにもかかわらず、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N濃度は非常に低い値を示した。

図3に示すように、補正ありの場合には、いずれの栽培法においても、溶液中のNa濃度が著しく上昇した。養液土耕では、Na濃度は処理開始時すでに469 mg L<sup>-1</sup>と、他の栽培法に比べてかなり高かったが、その理由は、供試土壤に含まれていたNaが溶出したためである。処理開始後は、Na濃度はいったん低下したものの、10日後には上昇傾向を示し、処理終了時には448 mg L<sup>-1</sup>となった。やしがら耕やロックウール耕では、処理開始後すぐに上昇傾向を示し、処理終了時にはそれぞれ、521, 360 mg L<sup>-1</sup>となった。水耕でもNa濃度は上昇したが、その値は110~150 mg L<sup>-1</sup>と、他の栽培法に比べて低かった。補正なしの場合には、いずれの栽培法においても、Na濃度はあまり上昇しなかった。表示することは省略したが、Na濃度と同様、Cl濃度も補正ありで著しく上昇した。

溶液のECは、NaやCl濃度と同様、補正ありで上昇傾向を示した(図4)。固形培地耕では、処理終了時には4.6~6.2 dS m<sup>-1</sup>と極めて高い値を示したのに対し、水耕では、1.7~2.2 dS m<sup>-1</sup>と、あまり上昇しなかった。

図5は、消化液を希釈、あるいは希釈調整してタンク内に貯蔵した時の培養液中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N濃度、pHおよびECの推移を示したものである。培養液は7~10日ごとに新しく作成してタンクに貯蔵したが、貯蔵中にタンク内のNH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N濃度は著しく低下した。低下の程度が最も著しい時には、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N濃度は71.3 mg L<sup>-1</sup>から21.5 mg L<sup>-1</sup>まで低下した。こうしたNH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N濃度の低下は、水耕でも、培養液の更新直後に顕著に認められた。またpHは、培養液作成時に6.5に調整したにもかかわらず、数時間後には7.0~8.4まで上昇した。その後pHは低下した。一

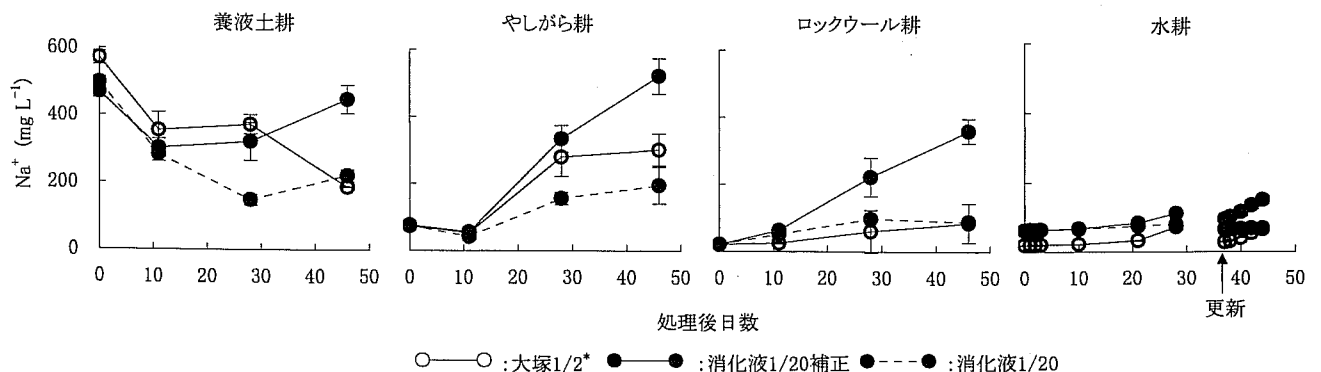


図3 各培地から採取した溶液中ナトリウムイオン濃度の推移

\* 表2の脚注参照。バーは標準偏差を示す。

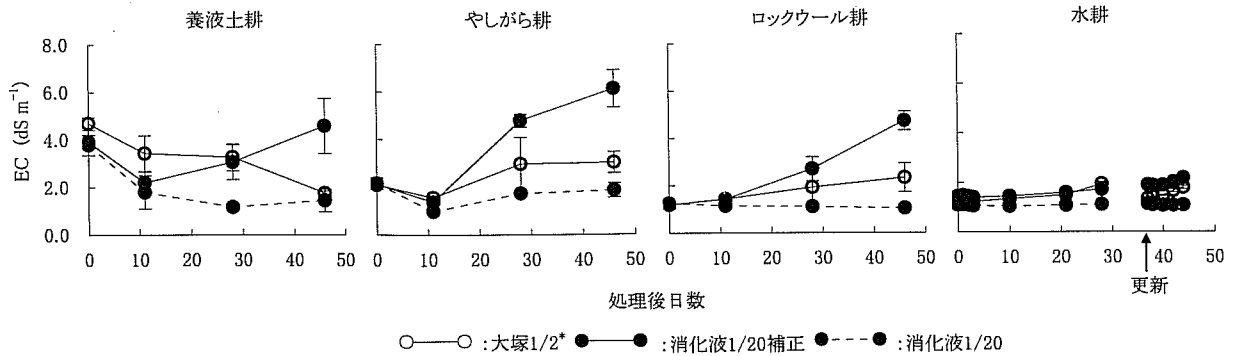


図 4 各培地から採取した溶液 EC の推移  
\* 表 2 の脚注参照。バーは標準偏差を示す。

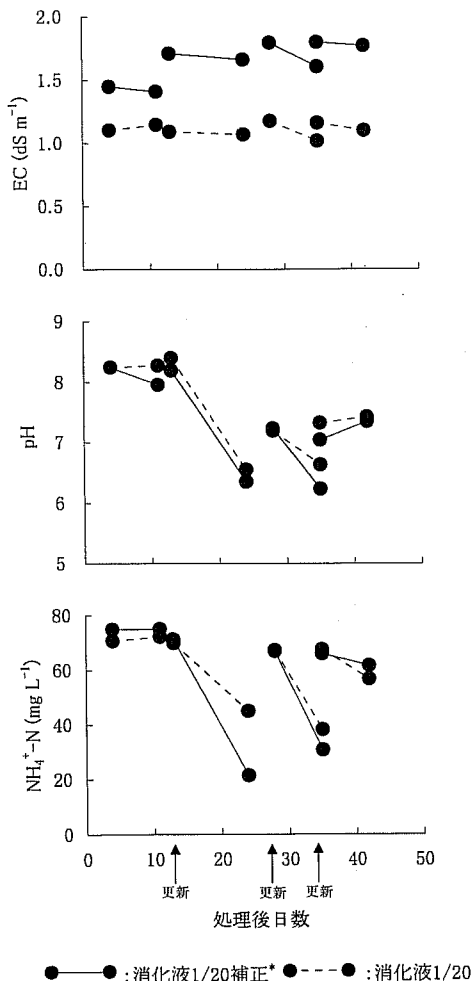


図 5 貯蔵中の消化液におけるアンモニア態窒素濃度、pH および EC の推移

\* 表 2 の脚注参照。

消化液原液は同時期に入手し、ポリ容器に入れて冷蔵庫で保存した。この消化液原液を用いて、タンク内の消化液を 4 回に分けて更新した。

般に  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  濃度の低下が著しい時に pH の低下も著しく、pH が 6.2 まで低下する場合もあった。EC は変動が小さかった。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$  については表示を省略したが、ほとんど検出されなかった。

#### 4. 考 察

本実験は、メタン発酵後に発生する消化液の、養液土耕や養液栽培に対する適正を判定するために、消化液に多く含まれる  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  や Na, Cl がトマトの生育に及ぼす効果を評価したものである。

消化液を使用した栽培法では、養液土耕 > やしがら耕 > ロックウール耕 > 水耕の順に、また補正ありのほうが補正なしより、生育は良好となった。以下、栽培法別に検討する。

水耕では、消化液を使用すると、生育が著しく抑制され、葉の黄化や葉緑部のネクロシス、あるいは地上部のしおれや短根がそう生ずる形の根などが観察された。これらは Ajayi ら<sup>12)</sup> や Maynard ら<sup>13)</sup> が  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  過剰害として報告している症状と同じものである。池田・大沢<sup>14)</sup> は、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  過剰害を受けたトマトの葉中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  濃度は、乾物中  $0.63\sim 2.95 \text{ mg g}^{-1}$  であった、と報告している。本実験でも、消化液を使用したトマトの葉中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  濃度は  $0.80\sim 1.80 \text{ mg g}^{-1}$  で、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  過剰害と判断された。また、培養液の測定結果より、消化液中の  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  は処理期間を通して、ほとんど硝酸化成されないことがわかった。このように、水耕で消化液を使用すると、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  はそのままの形態で植物に吸収されるため、結果として  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  過剰害が生じることになる。

また、補正の有無を比較すると、補正ありのほうが補正なしに比べて、生育阻害が軽減された。補正ありでは、葉中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  濃度は比較的低かったが、その理由は培養液に添加した K, Ca, Mg 等の陽イオンと  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  の吸収における拮抗作用<sup>10)</sup> によるものと推察される。

養液土耕では、外観上に異常はなく、生育も大塚 1/2 にほぼ匹敵する良好なものであった。葉中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  濃度は、大塚 1/2 と比べて同等もしくは若干上回る程度で、他の栽培法と比較すると低かった。このように、養液土耕では  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  過剰害が軽減されたが、このことには以下に示すような土壤特性が関連するものと考えられる。

一つは土壤の硝酸化能力である。補正消化液を与えた場合には、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  より高い濃度の  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  が葉中で検出

された。しかし、培地から採取した溶液中には  $\text{NO}_3^-$ -N はほとんど検出されなかった。このことは、補正消化液に含まれる  $\text{NH}_4^+$ -N は培地中で硝酸化成され、生成した  $\text{NO}_3^-$ -N は速やかに植物に吸収されたことを示している。

もう一つは、 $\text{NH}_4^+$ -N が土壌に吸着あるいは固定<sup>15,16)</sup>される現象である。養液土耕では、溶液中に  $\text{NH}_4^+$ -N はほとんど検出されなかったが、水耕やロックウール耕では、 $\text{NH}_4^+$ -N 濃度は比較的高かった。 $\text{NH}_4^+$ -N は植物に吸収されたか、または排液として流亡したかのいずれかが考えられるが、それだけでは N 収支が合わない。つまり、土壌のような培地では、消化液を与えても過剰な  $\text{NH}_4^+$ -N が吸着あるいは固定される。そのため、結果として養液土耕では  $\text{NH}_4^+$ -N の吸収が抑えられることになる。

$\text{NH}_4^+$ -N 過剰害による生育抑制は、ロックウール耕は水耕に、やしがら耕は養液土耕に近い傾向を示した。

以上のように、消化液を与えても、栽培法によって  $\text{NH}_4^+$ -N 過剰害の程度は異なり、培地が N 形態変化に関与するものと考えられた。特に、土壌を培地にした場合には、硝酸化成の進行や  $\text{NH}_4^+$ -N の土壌への吸着あるいは固定によって、 $\text{NH}_4^+$ -N 過剰害は軽減するものと判断された。

これまで述べてきたように、 $\text{NH}_4^+$ -N は生体内である濃度を超えた場合に極めて有毒となるが、それ以外にも K, Ca, Mg などの陽イオンの吸収を阻害することが知られている<sup>12,13)</sup>。本実験でも、消化液を与えると葉中 K, Ca, Mg 濃度は、大塚 1/2 に比べて低下した。しかし、その程度は栽培法によって異なり、養液土耕では比較的軽度であった。前述したとおり、養液土耕では  $\text{NH}_4^+$ -N の吸収が抑制されたために、結果として陽イオンの吸収阻害も軽減されたものと考えられる。

更に、養液土耕では、消化液を補正しない場合にも、K, Ca, Mg 等の陽イオンや P, S 等の陰イオンの葉中濃度は、補正した場合と同等あるいは若干低くなる程度であった。通常、土壌には多くの無機要素が含まれている可能性がある。供試土壌の化学的特性を考慮すると、植物にとって必要な養分がある程度土壌から供給されたのであろう。このような結果は、養液土耕では、消化液を補正しなくても、希釈するだけで液肥として利用できる可能性を示唆するものである。

次に、消化液に含まれる Na と Cl がトマトの生育や培地に及ぼす影響について検討する。消化液を与えると、いずれの栽培法においても、葉中の Na と Cl 濃度は、大塚 1/2 に比べて増加したが、その程度は補正の有無によって異なった。補正ありでは、葉中 Na 濃度の増加は比較的抑えられたが、培地から採取した溶液中 Na 濃度は著しく上昇した。このように、補正すると Na は、植物による吸収が低下し、溶液中への集積が増加した。補正ありでは K 等の不足要素を補正したため、植物による Na の吸収が抑制されたのである<sup>17)</sup>。一方、葉中 Cl 濃度は、補正ありのほうが高かった。その理由は、補正ありでは、不足陽イオ

ンの補正に塩化物を利用したために、培養液中の Cl 濃度が補正なしの 2.5 倍程度まで増加したことによるものと考えられる。

本実験での葉中 Na や Cl 濃度は、Nukaya ら<sup>18)</sup>の報告による生育阻害発生時の値より低かったものの、一方で、培地から採取した溶液中 Na や Cl 濃度はかなり高かった。養液栽培における Na や Cl の根域内許容最大濃度は、トマトでは両者共に  $12 \text{ mmol L}^{-1}$  (Na:  $276 \text{ mg L}^{-1}$ , Cl:  $425 \text{ mg L}^{-1}$ ) とする報告がある<sup>19~21)</sup>。本実験では、水耕以外のいずれの栽培法もこの値を上回った。また、溶液中 Na と Cl 濃度の上昇に伴って、EC も著しく上昇した。以上より、消化液を用いて長期間栽培を続ければ、Na や Cl の培地中への集積やそれに伴う EC の上昇により、塩類障害が発生するかもしれない。

ところで本実験において、消化液をタンクに貯蔵中、 $\text{NH}_4^+$ -N 濃度の低下が顕著に認められた。松中ら<sup>22,23)</sup>は、メタン発酵消化液をオーチャードグラス栽培で与えた場合、培地から  $\text{NH}_4^+$ -N がアンモニア ( $\text{NH}_3$ ) ガスとして揮散した、と報告している。通常  $\text{NH}_3$  揮散は、溶液の pH が 7 を上回ると進行する<sup>24,25)</sup>。 $\text{NH}_3$  が揮散すると、溶液中の水素イオンは増加し、pH は低下する。本実験でも、貯蔵中に消化液の pH はいったん 7~8 程度まで上昇し、その後著しく低下したことから、 $\text{NH}_3$  揮散が生じた可能性が高い。それ以外にも、硝酸化成後の脱窒、リン酸アンモニウムマグネシウムの生成<sup>26,27)</sup>による沈殿等が考えられる。いずれにせよ、本実験では消化液を使用した処理区において、当初の計画通りに  $\text{NH}_4^+$ -N が与えられなかったことは否めない。しかし、水耕、ロックウール耕、やしがら耕では、消化液中の  $\text{NH}_4^+$ -N 濃度が低かったにもかかわらず、 $\text{NH}_4^+$ -N 過剰害が顕著に認められたのに対し、養液土耕では外観的な異常もほとんど認められず、生育も大塚 1/2 に匹敵したことから、トマト栽培における消化液の液肥としての適性は、養液土耕が最も高いと結論づけることができる。

## 5. 要 約

メタン発酵後に発生する消化液を液肥として、養液土耕、やしがら耕、ロックウール耕および水耕でトマト栽培に用いた場合に、消化液に多く含まれる  $\text{NH}_4^+$ -N や Na, Cl が生育に及ぼす効果を評価した。

消化液を希釈しただけのもの（補正なし）、希釈して不足成分を補正したもの（補正あり）、大塚ハウス肥料 A 処方培養液を 1/2 倍に希釈したもの（大塚 1/2）の 3 種を液肥として使用し、トマト品種「ハウス桃太郎」を温室内で 53 日間栽培した。

養液土耕では、外観的な異常はほとんど認められず、生育も大塚 1/2 に匹敵した。しかし、養液土耕以外の栽培法では、消化液を与えると、 $\text{NH}_4^+$ -N 過剰害が顕著に認められ、生育は大塚 1/2 に比べて抑制された。その程度は、補正ありは補正なしより軽かった。



養液土耕では、葉中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  濃度や培地から採取した溶液中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  濃度が、他の栽培法に比べて低かったことから、硝酸化成の進行や土壌への  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  の吸着あるいは固定により、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  過剰害が軽減したものと判断された。

補正ありでは、いずれの栽培法でも、葉中 Na, Cl 濃度は生育障害レベルより低かった。しかし、栽培期間中に溶液中 Na, Cl 濃度が著しく上昇し、それに伴って EC も上昇した。

以上より、トマト栽培における消化液の液肥としての適性は、養液土耕が最も高いと判断された。その一方で、消化液を用いて長期間栽培を続けられれば、Na と Cl の集積による塩類障害が発生する可能性が示唆された。

### 文 献

- 1) 環境省編：循環型社会白書，p. 39～45，ぎょうせい，東京（2002）
- 2) 生物系廃棄物リサイクル研究会編：生物系廃棄物のリサイクルの現状と課題，p. 1～27，有機質資源化推進会議，東京（1999）
- 3) 木田建次：生産的変換技術（第2章），バイオマスエネルギー利用の最新技術，湯川英明監修，p. 88～110，シーエムシー，東京（2001）
- 4) 中村作二郎：家畜排せつ物の浄化技術（第13講），家畜排せつ物の処理・リサイクルとエネルギー利用，ブッカーズ編，p. 275～291，エヌ・ティー・エス，東京（2004）
- 5) Puritch, G. S. and Barker, A. V.: Structure and function of tomato leaf chloroplasts during ammonium toxicity. *Plant Physiol.*, **42**, 1229～1238 (1967)
- 6) Trebst, A. V., Losada, M. and Arnon, D. I.: Photosynthesis by isolated chloroplasts. *J. Biol. Chem.*, **235**, 840～844 (1960)
- 7) 王子善清：窒素の過剰と欠乏ストレス，植物栄養・肥料の辞典，植物栄養・肥料の辞典編集委員会編，p. 308～312，朝倉書店，東京（2002）
- 8) 間處威俊・上野 将・師 正史・添田祐二・山本哲也・柴田敏行：膜分離型メタン発酵処理システムの開発，環境工学研究フォーラム講演集，**35**，27～29（1998）
- 9) 山本哲也：生ごみに秘められたエネルギーを活用（北海道北空知衛生センター組合ークボタ膜型メタン発酵システム），都市と廃棄物，**34**，23～27（2004）
- 10) 池田英男：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**，73～82，84～88（1988）
- 11) 植物栄養実験法編集委員会編：植物栄養実験法，p. 174～179，188～191，博友社，東京（1990）
- 12) Ajayi, O., Maynard, D. N. and Barker, A. V.: The effects of potassium on ammonium nutrition of tomato. *Agron. J.*, **62**, 818～821 (1970)
- 13) Maynard, D. N., Barker, A. V. and Lachman, W. H.: Influence of potassium on the utilization of ammonium by tomato plants. *Proc. Am. Soc. Hort.*, **92**, 537～542 (1968)
- 14) 池田英男・大沢孝也：施用窒素形態とそ菜の適応性（第1報）—水耕栽培において硝酸，アンモニア，亜硝酸を窒素源とした果菜の生育並びに窒素同化—，園学雑，**47**，454～462（1979）
- 15) Drury, C. J. and Beauchamp, E. G.: Ammonium fixation, release, nitrification and immobilization in high- and low-fixing soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **55**, 125～129 (1991)
- 16) Green, C. J., Blackmer, A. M. and Yang, N. C.: Release of fixed ammonium during nitrification in soils. *ibid.*, **58**, 1411～1415 (1994)
- 17) 山崎耕宇・杉山達夫・高橋英一・茅野充男・但野利秋・麻生昇平：植物栄養・肥料学，p. 99～101，朝倉書店，東京（1993）
- 18) Nukaya, A., Masui, M. and Ishida, A.: Salt tolerance of tomatoes. *J. Jpn. Soc. Hort. Sci.*, **48**, 73～81 (1979)
- 19) Baas, R., Nijssen, H. M. C., Van den Burg, T. J. M. and Warmenhoven, M. G.: Yield and quality of carnation and gerbera in a closed nutrient system as affected by sodium chloride. *Sci. Hort.*, **61**, 273～284 (1995)
- 20) Voogt, W. and Sonneveld, C.: Nutrient management in closed growing systems for greenhouse production; in Plant Production in Closed Ecosystems, ed. E. Goto, K. Kurata, M. Hayashi and S. Sase, p. 86～88, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands (1997)
- 21) Sonneveld, C. and Van Der Burg, A. M. M.: Sodium chloride salinity in fruit vegetable crops in soilless culture. *Neth. J. Agric. Sci.*, **39**, 115～122 (1991)
- 22) 松中照夫・成瀬往代・熊井実鈴：乳牛ふん尿のメタン発酵処理に伴う性状変化，土肥誌，**73**，297～300（2002）
- 23) 松中照夫・熊井実鈴・千徳あす香：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，同上，**74**，31～38（2003）
- 24) Culp, R. L. and Culp, G. L.: アンモニア・ストリップング，廃水の高度浄化法，綾日出教監訳，p. 49～64，公害対策技術同友会，東京（1975）
- 25) 渡部 勇：アンモニアストリップング，環境技術会誌，**112**，132～133（2003）
- 26) Mamail, D., Pitt, A. P., Cheng, W. Y., Loiacono, J. and Jenkins, D.: Determination of ferric chloride dose to control struvite precipitation in anaerobic sludge digesters. *Water Environ. Res.*, **66**, 912～918 (1994)
- 27) 斎藤 豊・高山真紀・原田浩幸・川上正宏：下水消化汚泥の曝気によるリン酸イオン除去に関する研究，下水道協会誌，**33**，39～49（1996）

## Effects of the Aqueous Phase of Methane Fermentation on the Growth of Tomato Plants in Soil, Coconut Fiber, Rockwool and Hydroponic Culture

Hisatoshi Miyata, Hideo Ikeda and Takayoshi Obatake\*  
(*Grad. Sch. Agric. Biol. Sci., Osaka Pref. Univ., \*Kubota Corp.*)

Effects of the aqueous phase containing much  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and NaCl, produced by methane fermentation on the growth of tomato plants were evaluated in soil, coconut fiber, rockwool and hydroponic culture. Tomato plants were supplied with diluted aqueous phase (DAP), diluted and modified aqueous phase (DMAP), and commercial fertilizer (Otsuka Chemicals) and grown for 53 days in the greenhouse.

In all cultural systems except the soil system, tomato plants supplied with the aqueous phase showed ammonium toxicity symptoms and the growth was reduced. In the soil system, tomato plants showed no toxicity symptoms and the growth was comparable to that in commercial fertilizer. As compared with DAP, plant growth was better in DMAP.

Analytical data on leaves and the nutrient solution sampled from each medium indicated that  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  concentration was low in the soil system. In the soil system, it was estimated that  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  was nitrified and/or fixed and its toxic effects reduced.

NaCl concentration in leaves was less than a toxic level in DMAP. However NaCl concentration in the nutrient solution sampled from each medium was increased in the latter growing period. And EC also increased with it.

From the above results, we have a possibility to use the aqueous phase of methane fermentation as liquid fertilizer in soil system. On the other hand, the possibility that salt injury by accumulation of Na and Cl occurred was suggested when the aqueous phase was supplied for cultivation of a long term.

*Key words* ammonium, aqueous phase, methane fermentation, NaCl, tomato

(*Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr.*, **76**, 619-627, 2005)