

研究論文

## イネの生育および収量に対するメタン発酵消化液の施用効果

古賀巧樹・松尾光弘・寺尾寛行・小川紹文・日吉健二<sup>1)</sup>・蔭東清一<sup>2)</sup>・  
黒木義一<sup>2)</sup>・西脇亜也<sup>2)</sup>

宮崎大学農学部食料生産科学科植物生産科学講座

<sup>1)</sup> 宮崎大学農学部地域農業システム学科

<sup>2)</sup> 宮崎大学農学部附属自然共生フィールド科学教育研究センター

(2009年11月26日 受理)

## Effects of anaerobically digested slurry to the growth and yield of rice (*Oryza sativa* L.).

Yoshiki KOGA, Mitsuhiro MATSUO, Hiroyuki TERAO, Tsugufumi OGAWA,  
Kenji HIYOSHI<sup>1)</sup>, Seiichi KAGEHIGASHI<sup>2)</sup>, Yoshikazu KUROGI<sup>2)</sup> and Aya NISHIWAKI<sup>2)</sup>

Division of Plant Production Science, Faculty of Agriculture, University of Miyazaki,

<sup>1)</sup> Department of Regional Agricultural Systems, Faculty of Agriculture, University of Miyazaki,

<sup>2)</sup> Field Science Center, Faculty of Agriculture, University of Miyazaki

**Summary :** To show ability of anaerobically digested slurry from bio-gas plant as manure on the rice cultivation, the nutritive effects on the growth and yield of rice plants were investigated.

On paddy field experiments, treatment of the slurry as top-dressing was increased panicle weight, grain weight, panicle length and grain number per head of rice plants, which was also increased grain yield. Grain yield of rice plants after treating the slurry as basal-dressing became lower by decreasing of panicle number and grain number per head in pot experiment. On both pot and paddy field experiments, there were no significant difference of plant height, tiller number and SPAD value of rice plants between top-dressing treatment and untreated control. Similarly, panicle number and 1000-grain weight were also the same. Grain number per head in top-dressing treatment increased significantly compared with that in untreated control, therefore, grain yield in top-dressing treatment became higher.

From the results of these experiments, it was demonstrated that anaerobically digested slurry was effective to the growth and yield of rice plants by using as a top-dressing treatment. Furthermore, it was suggested that the slurry had high nutritive effects as a substitute for chemical fertilizer.

**Key words :** Anaerobically digested slurry, Bio-gas plant, Fertilizer application, Grain yield, Rice.

### はじめに

現在の日本の農業における化学肥料あるいは農薬の使用は、農作物の多収あるいは収量の安定に

大きな役割を果たしてきた。しかし、近年肥料や農薬の過剰投入あるいは家畜排泄物の不適切な管理による環境への影響の懸念が高まっている（農

林水産省 2006)。そこで、化学肥料あるいは農薬の使用を少しでも低減させ、且つ環境負荷の軽減に配慮した環境保全型農業が求められており、新たな技術を確立するための様々な取り組みがなされている。

一方、1年間に農林畜産業から排出される畜産廃棄物は約8,720万トンであり（環境省 2008）、現在それらの大部分が堆肥として処理されている。しかし、堆肥の過剰生産と施用は河川あるいは地下水の汚染、更には海域の富栄養化をもたらし、また悪臭の原因にもなっていることから、堆肥以外での畜産廃棄物の利用あるいは処理法が望まれている。その処理法の一つとして、近年バイオガスプラントにおけるメタン発酵処理が注目されている。バイオガスプラントは、メタン発酵によって炭素の多くをメタンガスとして回収し、エネルギー源としての活用が可能となる。また、密封系の処理方式により、通常家畜糞尿を処理する際に発生するメタンガスとアンモニアによる大気汚染を有効に防止することができる。バイオガスプラントより排出されるメタン発酵消化液（以下 消化液）は、水分含量の高い有機性廃棄物からエネルギー資源としてバイオガスを取り出す際に必然的に発生する廃棄物である。消化液の処分には、BOD（生物化学的酸素要求量）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になる。そのため、消化液の利用について様々な検討がなされてきた。消化液には家畜糞尿に含まれる栄養分が含有しているため、液肥として利用することにより化学肥料の軽減または資源循環を図ることができる。

現在、消化液を液肥として有効に利用するために、トマト (*Solanum lycopersicum*) (宮田ら 2005)、デントコーン (*Zea mays* L. var. *indentata* bailey) (若木 2005)、メロン (*Cucumis melo* L.) (中野・上原 2003) あるいはブロッコリー (*Brassica oleracea* var. *Italica*) (村中ら 2009) への利用に関する研究が行われており、その中で慣行とされる化学肥料施用区と比較して消化液を施用した場合にいずれも生育・品質に差がないことが認められたことから、消化液は化学肥料に代わるものとして利用可能であることが明らかとなりつつある。

また、消化液に含まれる窒素の大部分はアンモニア態窒素の状態が存在する。イネ (*Oryza sativa* L.) は、アンモニア態窒素を効率的に吸収できる作物であり、湛水中の水田土壌面は還元状態にあるため、消化液を水田内に導入するとアンモニア態窒素は硝酸態窒素に酸化されず土壌粒子に保持され、イネ植物体に吸収されやすくなるものと考えられる。そのため、消化液を水稻栽培に利用できる可能性がある。西川ら (2007) は、消化液の施用が水稻の玄米品質に及ぼす影響について調査した結果、精玄米窒素含有率あるいは外觀品質について消化液施用区と化学肥料施用区の間には顕著な有意差は認められなかったことから、消化液を化学肥料の代替として使用した場合でも、化学肥料と同等の収量あるいは玄米品質を得ることが可能であるとした。しかし、水稻への利用事例に関する報告はほとんど見られず、また水稻栽培における消化液の施用量あるいは施用時期については検討がなされていない。これらを明確にする事は、消化液の有効な処理あるいは利用と併せて、有機的な水稻栽培技術を確立できる可能性がある。

そこで、本研究は消化液を水稻栽培に導入するための可能性を見出すために、まずイネに対する消化液の肥料としての適性について明らかにするとともに、消化液の施用時期の違いによるイネの生育および収量への影響について調査した。

## 材料および方法

### 消化液

宮崎県都城市山田町の養豚農家より譲受した糞尿を、宮崎大学農学部附属自然共生フィールド科学教育研究センター内に2007年3月に建設されたバイオガスプラント内で発酵させて、得られた消化液を供試した。

### 1. 追肥としての消化液施用がイネの生育および収量に及ぼす影響

本実験は、宮崎大学農学部附属自然共生フィールド科学教育研究センター・木花フィールド内東水田（宮崎郡清武町）において2007年度および2008年度の2ヶ年に渡って実施した。なお、イネの作期は早期とし、水稻品種は「コシヒカリ」を供試した。

## 1) 2007年度

3月7日に苗箱に播種し、ビニルハウス内で育苗した後、4月5日に田植機で移植した(株間16 cm, 条間30 cm)。水田は、消化液施用区として20.1 aを、対照区として18.2 aをそれぞれ用いたが、いずれも4月3日に基肥として10 aあたりに鶏糞(だるま有機, 窒素3%, 燐酸7%, 加里3%, 石灰15%, 苦土1.6%, 児湯養鶏農業協同組合, 以下同)を100 kg, 高度複合肥料552(窒素15%, 燐酸15%, 加里13%, 株式会社アグロメイト, 以下同)を60 kg施用した後に耕起・代かきを行った。中干し終了後の6月8日に、湛水深を7~10 cmとした水田内にバキュームカーにより消化液1,000 Lを追肥として流入・施用した。消化液の流速は、2,700 L/時間とした。なお、消化液の成分組成は表1のとおりである。

消化液施用後は、施用区および対照区ともに2週間毎にイネの草丈、茎数および最上位葉のSPAD(葉緑素濃度)値をそれぞれ10株ずつ計測した。また、7月20日に各区水田内からランダムに株を刈り取り、イネの各形質および収量構成要素をそれぞれ調査して玄米収量を算出した。

## 2) 2008年度

3月7日に苗箱に播種し、ビニルハウス内で育苗した後、4月15日に田植機で移植した(株間16 cm, 条間30 cm)。水田は、2007年度試験と同様の場所で行い、消化液施用区として20.1 aを、対照区として18.2 aをそれぞれ用いた。いずれの水田も、4月10日に基肥として10 aあたりに鶏糞を140 kg, 高度複合肥料552を60 kg施用した後に、耕起・代かきを行った。中干し終了後の6月10日

に、湛水深を0 cmとした水田内にバキュームカーにより消化液1,800 Lを追肥として流入・施用した。消化液の流速は2,700 L/時間とし、同時に灌漑水(流量:300 L/min)も入水した。なお、消化液の成分組成は表1のとおりである。

消化液施用後は、施用区および対照区ともに2週間毎にイネの草丈、茎数および最上位葉のSPAD値をそれぞれ10株ずつ計測した。また、8月5日に各区水田内からランダムに株を刈り取り、イネの各形質および収量構成要素をそれぞれ調査して玄米収量を算出した。

## 2. 消化液の施用時期がイネの生育および収量に及ぼす影響

## 1) ポット実験(2007年度)

栽培には1/2000 aワグネルポットを用い、焼土(宮崎焼土1号, 山宗商会株式会社, 宮崎市)を充填した。5月23日に水稻品種「ヒノヒカリ」を苗箱に播種し、ビニルハウス内で育苗した。7月3日にポット内土壌に基肥を施用し、湛水・代かきした後に、ポット内中央に苗を1株3本植えて移植した。栽培は、宮崎大学農学部附属自然共生フィールド科学教育研究センター・木花フィールド内畑圃場において実施した。試験区は、基肥および追肥に化成肥料をそれぞれ施す対照区に対して、基肥に消化液を施用して追肥に化成肥料を施す基肥区、基肥に化成肥料を施して追肥に消化液を施用する追肥区および基肥と追肥にそれぞれ消化液を施用する基肥+追肥区を設置した。基肥の場合、基肥区および基肥+追肥区には10 aあたり窒素(N)が10 kgとなるように消化液を、また対照区および追肥区には10 aあたり窒素(N)が10 kgとなるように硫酸アンモニウム(アンモニア態窒素含有率21%, 宇部興産株式会社, 以下同)を、リン酸( $P_2O_5$ )が15 kgとなるように熔成リン酸(リン酸含有率20%, 貴州清和化学有機公司)を、またカリウム( $K_2O$ )が12 kgとなるように塩化カリウム(カリウム含有率60%, 三菱商事株式会社, 以下同)をそれぞれ施用した。追肥においては、追肥区および基肥+追肥区には窒素が2 kg/10 aとなるように消化液を、また対照区および基肥区には窒素が2 kg/10 aとなるように硫酸アンモニウムを、カリウムが2 kg/10 aとなるように塩化カリウムをそれぞれ8月27日に施用した。なお、

表1. メタン発酵消化液の成分組成

項目	分析値 (mg/消化液 1 L)					
	2007年		2007年		2008年	
	(早期 水稻)	(早期 水稻)	(ポット実験) 基肥	追肥	(圃場実験) 基肥	追肥
pH		8.2	8.2	8.2	8.2	8.7
EC(S/m)		2.2	2.1	2.1	2.2	1.5
N	2902	3448	4090	4090	3448	2195
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	2112	3026	3096	3096	3026	2195
P	216	212	1015	1015	212	75
K	1524	1576	1627	1627	1576	891
Total Solid	5663	7206	9767	9767	7206	3519

消化液の成分組成は表1のとおりである。

イネ移植後1週間毎に、イネの草丈、茎数および最上位葉のSPAD値をそれぞれ計測した。また、10月23日に株を刈り取り、イネの各形質および収量構成要素をそれぞれ調査して玄米収量を算出した。実験は4回反復で行った。

## 2) 圃場実験 (2008年度)

本実験は、宮崎大学農学部附属自然共生フィールド科学教育研究センター・木花フィールド内東水田(宮崎郡清武町)において実施した。なお、イネの作期は普通期とし、水稻品種は「まいひかり」を供試した。5月21日に苗箱に播種し、ビニルハウス内で育苗した後、7月1日に田植機で移植した(株間16 cm, 条間30 cm)。試験区は、基肥および追肥に化成肥料をそれぞれ施す対照区(2.9 a)に対して、基肥に消化液を施用する基肥区(1.8 a)、基肥に化成肥料を施し追肥に消化液を施用する追肥区(2.4 a)および基肥と追肥にそれぞれ消化液を施用する基肥+追肥区(1.9 a)を設置した。6月27日に、湛水深を7~10 cmとした基肥区および基肥+追肥区内に、バキュームカーにより消化液1,000 Lを基肥として流入・施用した。なお、流入時の消化液の成分組成は表1のとおりである。一方、対照区および追肥区においては、基肥として10 aあたりに鶏糞を140 kg、高度複合肥料552を60 kg施用した後に、耕起・代かきを行った。追肥については、9月19日に湛水深を0 cmとした追肥区および基肥+追肥区内に、10 aあたり1,000 L(窒素成分で10 aあたり2 kg相当)の消化液をバキュームカーにより水田内に流入・施用し、同時に灌漑水も入水した。なお、流入した消化液の成分組成は表1のとおりである。一方、対照区および基肥区においては10 aあたり窒素が2 kgとなるようにNK7号(窒素14%, 加里17%, 株式会社アグロメイト)を施用した。

イネ移植後1週間毎に、イネの草丈、茎数および最上位葉のSPAD値をそれぞれ計測した。また、11月4日に各区水田内からランダムに株を刈り取り、イネの各形質および収量構成要素をそれぞれ調査して玄米収量を算出した。

## 3. イネの形質調査および収量構成要素

株を刈り取り、約1ヶ月間自然乾燥させた後、

地上部全重、穂重、わら重、稈長、籾重および穂長を測定した。また、収量構成要素についても調査した。各特性の調査方法は以下の通りである。  
地上部全重：各区より選抜した個体の株ごとの地上部全重を測定し、1株あたりの平均地上部全重を算出した。

穂重およびわら重：各区より選抜した個体の株ごとの穂重を測定し、1株あたりの平均穂重を算出した。なお、地上部全重から穂重を差し引いた値をわら重とした。

稈長：各区より選抜した個体の株ごとの最長稈の地上から穂首までの長さ(cm)を測定し、1株あたりの平均稈長を算出した。

籾重：各区より選抜した個体の株ごとの籾重を測定し、1株あたりの平均籾重を算出した。

穂長：各区より選抜した個体の株ごとの穂の長さ(cm)を測定し、1株あたりの平均穂長を算出した。

1穂籾数：各区より選抜した個体の株ごとの穂の籾数を数え、1株あたりの平均1穂籾数を算出した。

登熟歩合：塩水選により精籾を選別し、精籾数/総籾数×100から登熟歩合を算出した。

千粒重：各区について登熟した500粒の重さを測定し、千粒重に換算した。

## 結果

### 1. 追肥としての消化液の施用がイネの生育および収量に及ぼす影響

#### 1) 2007年度

2007年度は、施用区と対照区をそれぞれ設けて実験を行ったが、施用区において消化液が全面に拡散しなかったことから、同一の水田圃場内において消化液が拡散していた範囲を施用区、拡散していなかった範囲を対照区としてそれぞれ調査を行った。

消化液施用直後におけるイネの草丈は、施用区が49.4 cm、対照区が51.3 cmであり、施用区よりも対照区で有意に高かった。その後、両区ともに日数の経過に伴って草丈は徐々に伸長したが、施用後14日目および28日目における草丈はいずれも施用区が対照区と比較して有意に高かった。施用後42日目におけるイネの草丈は、施用区で92.4 cm、対照区で80.0 cmとなり、対照区よりも施用

区において有意に高かった (図 1-a). 次に、茎数について見ると、消化液施用直後は施用区が約 16 本、対照区が約 14 本であり、有意差は見られなかった。その後、いずれの区も茎数はやや増加し、施用後 28 日目には約 21 本となったが、有意な差は見られなかった。施用後 42 日目の調査では、両区ともに茎数は約 18 本となり、差異は見られなかった (図 1-b)。消化液施用直後の最上位葉における SPAD 値は、施用区が 32.6、対照区が 27.4 であり、対照区と比較して施用区で有意に大きかった。その後の SPAD 値は、両区ともに施用後 28 日目まで若干増加したが、施用後 42 日目になると減少した。しかし、対照区よりも施用区の SPAD 値が調査期間中を通して有意に大きかった (図 1-c)。

追肥として消化液を施用した場合のイネ各形質への影響について調査した結果、株当たりの地上部全重は施用区が 37.9 g、対照区が 30.9 g となり、対照区よりも施用区において有意に重かった。株当たりの穂重は、施用区が 23.0 g、対照区が 18.4 g であり、対照区よりも施用区において有意に重かった。株当たりのわら重は、施用区が 15.8 g、対照区が 12.5 g であり、対照区よりも施用区において有意に重かった。最長稈の稈長は、施用区が 61.2 cm、対照区が 57.6 cm であり、区間に差異は見られなかった。株当たりの籾重は、施用区が 21.4 g、対照区が 17.6 g であり、対照区よりも施用区において有意に大きかった。株当たりの穂長は、施用区が 16.4 cm、対照区が 13.9 cm であり、対照区よりも施用区において有意に長かった。収量および収量構成要素への影響について見ると、1 m<sup>2</sup> 当たりの穂数は施用区が 393 本、対照区が 352 本であり、区間に差異は見られなかった。一穂粒数は、施用区が 65.8 粒、対照区が 51.3 粒であり、対照区よりも施用区において有意に多かった。登熟歩合は、施用区で 90.6%、対照区で 95.1% となり、施用区よりも対照区において高かった。千粒重は施用区が 18.8 g、対照区が 18.7 g であり、区間に差異は見

られなかった。以上の収量構成要素を基に玄米収量を算出した結果、施用区では 10 a 当たり 445 kg、対照区では 10 a 当たり 310 kg となり、対照区よりも施用区において有意に大きかった (表 2)。

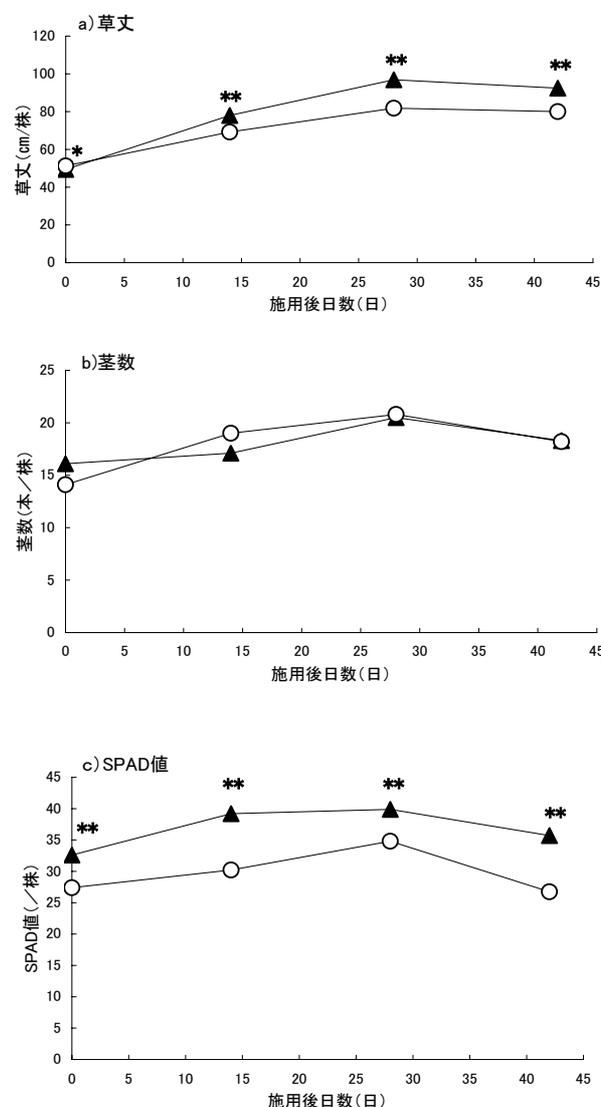


図 1. 追肥としての消化液施用によるイネへの影響 (2007年度)

注) \*\*は 1%, \*は 5% レベルで対照区と比較して有意差あり.

— 施用区 - - 対照区

表 2. 追肥としての消化液施用によるイネの各形質、収量および収量構成要素への影響 (2007年度)

試験区	地上部全重 (g/株)	穂重 (g/株)	わら重 (g/株)	稈長 (cm)	籾重 (g/株)	穂長 (cm/株)	穂数 (本/m <sup>2</sup> )	一穂粒数 (粒/穂)	登熟歩合 (%)	千粒重 (g)	玄米収量 (kg/10a)
施用区	37.9*	23.0*	15.8*	61.2	21.4*	16.4**	393	65.8**	90.6	18.8	445**
対照区	30.9	18.4	12.5	57.6	17.6	13.9	352	51.3	95.1	18.7	310

注) \*\*は 1%, \*は 5% レベルで対照区と比較して有意差あり.

## 2) 2008年度

2008年度の場合、消化液施用直後のイネの草丈は、施用区が55.1 cm、対照区が56.7 cmであり、2007年度の場合と同様に施用区よりも対照区で有意に高かった。その後、日数の変化に伴って草丈は徐々に伸長したが、施用後14日目および28日目における草丈はいずれも施用区が対照区と比較して有意に高かった。施用後42日目の草丈は、施用区で90.1 cm、対照区で83.5 cmとなり、対照区よりも施用区において有意に高かった(図2-a)。次に、茎数について見ると、消化液施用直後については施用区が約17本、対照区が約18本であり、有意差は見られなかった。その後は、いずれの区も茎数に大きな変化は見られず、施用後42日目の調査では、両区ともに約18本となって差異は見られなかった(図2-b)。消化液施用直後の最上位葉におけるSPAD値は、施用区が37.3、対照区が37.2であり、区間に有意差は見られなかった。施用後14日目におけるSPAD値は、施用区ではやや増加して39.1であったが、それ以後は減少した。一方、対照区におけるSPAD値は、施用後42日目まで減少傾向を示した。施用後14日目および28日目において、施用区のSPAD値は対照区よりも有意に大きかった。しかし、施用後42日目におけるSPAD値は施用区で31.0、対照区で31.6となり、有意差は見られなかった(図2-c)。

追肥として消化液を施用した場合のイネ各形質への影響について調査した結果、株当たりの地上部全重は施用区が58.0 g、対照区が55.3 gとなり、区間に差異は見られなかった。株当たりの穂重は、施用区が33.1 g、対照区が30.4 gであり、対照区よりも施用区において有意に重かった。株当たりのわら重は、施用区が25.0 g、対照区が23.8 gであり、区間に差異は見られなかった。最長稈の稈長は、施用区が66.7 cm、対照区が64.4 cmであり、区間に差異は見られなかった。株当たりの籾重は、施用区が30.6 g、対照区が27.4 gであり、対照区より

も施用区において有意に重かった。株当たりの穂長は、施用区が16.1 cm、対照区が15.1 cmであり、対照区よりも施用区において有意に長かった。収量および収量構成要素への影響についてみると、1 m<sup>2</sup>当たりの穂数は施用区が417本、対照区が453本であり、区間で差異は見られなかった。一穂粒数は、施用区が63.8粒、対照区が57.6粒であり、対

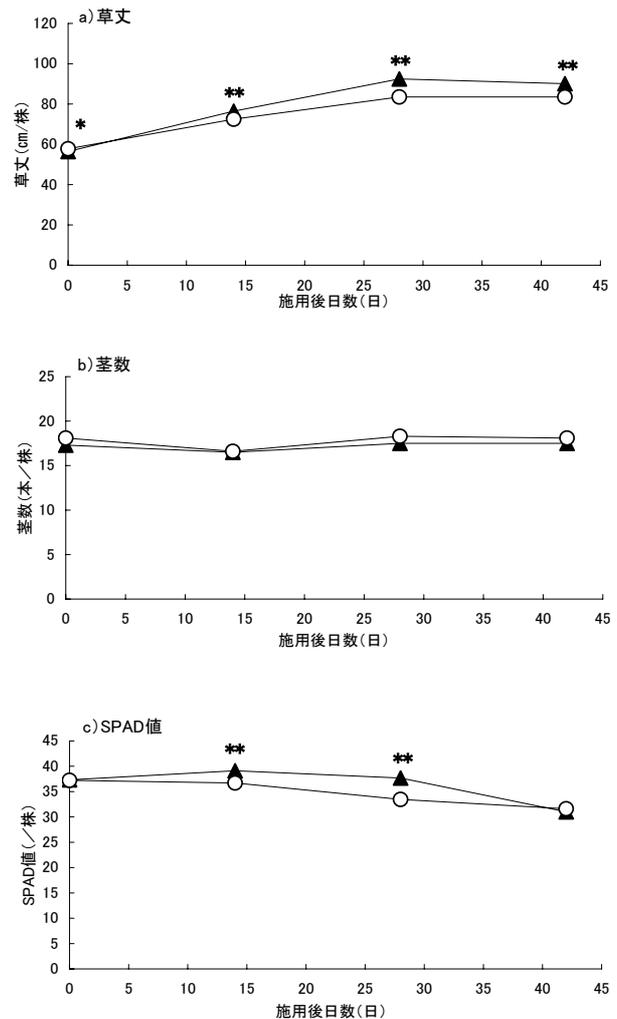


図2. 追肥としての消化液施用によるイネへの影響 (2008年度)

注) \*\*は1%, \*は5%レベルで対照区と比較して有意差あり.

— 施用区 - - 対照区

表3. 追肥としての消化液施用によるイネの各形質、収量および収量構成要素への影響 (2008年度)

試験区	地上部全重 (g/株)	穂重 (g/株)	わら重 (g/株)	稈長 (cm)	籾重 (g/株)	穂長 (cm/株)	穂数 (本/m <sup>2</sup> )	一穂籾数 (粒/穂)	登熟歩合 (%)	千粒重 (g)	玄米収量 (kg/10a)
施用区	58.0	33.1*	25.0	66.7	30.6*	16.1**	417	63.8*	88.4	22.1**	514**
対照区	55.3	30.4	23.8	64.4	27.4	15.1	453	57.6	88.8	21.1	436

注) \*\*は1%, \*は5%レベルで対照区と比較して有意差あり.

照区よりも施用区において有意に多かった。登熟歩合は、施用区で88.4%、対照区で88.8%となり、施用区よりも対照区において若干高かった。千粒重は、施用区が22.1 g、対照区が21.1 gであり、対照区よりも施用区において有意に重かった。以上の収量構成要素を基に玄米収量を算出した結果、施用区では10 a当たり514 kg、対照区では10 a当たり436 kgとなり、対照区よりも施用区において有意に大きかった（表3）。

## 2. 消化液の施用時期がイネの生育および収量に及ぼす影響

### 1) ポット実験

ポット実験の場合、移植後7日目におけるイネの草丈は、基肥区で28.9 cm、対照区が32.1 cmであり、対照区よりも基肥区において有意に低かった。その後は、いずれの区においても草丈は徐々に高くなり、追肥を行った移植後56日目には、基肥 + 追肥区で63.4 cm、対照区で71.4 cmとなって、対照区よりも基肥 + 追肥区におけるイネの草丈の方が有意に低かった。移植後63日目（追肥後7日目）における草丈は、基肥区が69.5 cm、基肥 + 追肥区が69.7 cm、対照区が76.4 cmであり、対照区よりも基肥区および基肥 + 追肥区において有意に低かった。その後は、移植後84日目（追肥後28日目）までいずれの区においても草丈は変化しな

かった（図3-a, 表4）。次に、茎数について見ると、移植後14日目における茎数は、基肥区が3.8本、対照区が6.5本であり、対照区よりも基肥区において有意に少なかった。移植後21日目まで茎数はいずれの区も同様の傾向に推移したが、移植後28日目以降は対照区および追肥区で本数が増加し、移植後56日目には両区ともに約25本となった。一方、基肥区および基肥 + 追肥区では茎数に変化は見られず、追肥を行った移植後56日目には基肥区で11本、基肥 + 追肥区で約17本となった。追肥以後、いずれの区においても茎数に大きな変化は見られず、移植後84日目（追肥後28日目）の茎数は対照区で最も多く30本、次いで追肥区の約28本、基肥区の17本となり、基肥区 + 追肥区では14本となって最も少なかった（図3-b, 表5）。追肥を行った移植後56日目のイネの最上位葉におけるSPAD値は、いずれの区においてもおよそ25であり、有意な差は見られなかった。移植後63日目（追肥後7日目）におけるSPAD値は、いずれの区においても増加したが、その後は減少傾向を示し、移植後77日目（追肥後21日目）には追肥区で15.8、対照区で20.7となって対照区よりも追肥区が有意に小さかった。移植後84日目（追肥後28日目）のSPAD値は、基肥区で27.5と最も大きく、次いで対照区の26.5、基肥 + 追肥区の23.0となり、追肥区では21.2となって最も小さかった（図3-c, 表6）。

表4. 消化液の施用時期がイネ草丈に及ぼす影響（ポット実験）

試験区	移植後日数								
	7日目	14日目	21日目	28日目	56日目	63日目	70日目	77日目	84日目
基肥区	28.9*	41.6	51.8	50.3	65.6	69.5*	69.7	69.4	71.7
追肥区	33.8	44.9	55.0	57.5	77.5	82.0	82.1	81.9	81.9
基肥 + 追肥区	30.8	43.0	55.6	55.6	63.4*	69.7*	69.2*	69.2	69.0
対照区	32.1	42.8	52.1	54.0	71.4	76.4	75.8	75.7	75.6

1) 単位：cm/株

2) \*\*は1%、\*は5%レベルで対照区と比較して有意差あり。

表5. 消化液の施用時期がイネ茎数に及ぼす影響（ポット実験）

試験区	移植後日数								
	7日目	14日目	21日目	28日目	56日目	63日目	70日目	77日目	84日目
基肥区	3.8	3.8*	9.0	12.3**	11.0**	15.5**	18.8**	16.8**	17.0**
追肥区	4.0	5.5	13.5	19.3	23.5	32.3	30.0	27.3	28.3
基肥 + 追肥区	3.8	5.0	11.0	14.3**	16.8*	16.5**	16.5**	14.5**	14.0**
対照区	4.3	6.5	12.3	24.5	25.3	33.3	30.8	29.0	30.0

1) 単位：本/株

2) \*\*は1%、\*は5%レベルで対照区と比較して有意差あり。

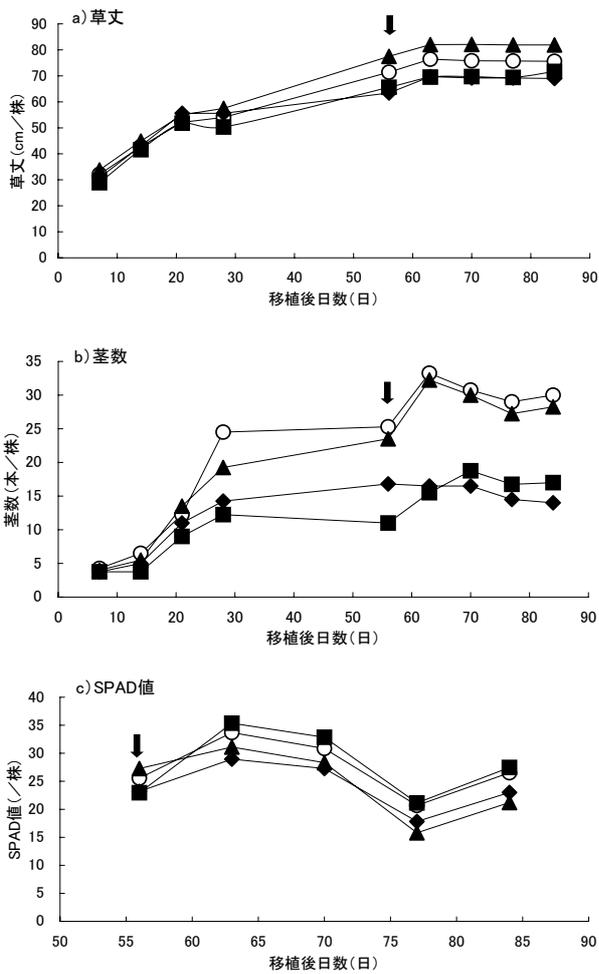


図3. 消化液の施用時期がイネの生育に及ぼす影響 (ポット実験)

注) 図中の矢印は追肥日を表す (移植後56日目).

--- 対照区    —■— 基肥区    —▲— 追肥区    —●— 基肥+追肥区

表6. 消化液の施用時期がイネ最上葉葉のSPAD値に及ぼす影響 (ポット実験)

試験区	移植後日数				
	56日目	63日目	70日目	77日目	84日目
基肥区	23.0	35.4	32.9	21.1	27.5
追肥区	27.3	31.1	28.3	15.8**	21.2*
基肥+追肥区	23.2	29.0	27.3	17.8	23.0
対照区	25.6	33.7	30.9	20.7	26.5

1) 単位: /株

2) \*\*は1%, \*は5%レベルで対照区と比較して有意差あり.

消化液の施用時期に対するイネの各形質への影響について調査した結果, 株当たりの地上部全重は基肥区が32.0 g, 追肥区が87.9 g, 基肥+追肥区が32.4 g, 対照区が77.5 gとなり, 対照区よりも基

肥区および基肥+追肥区は有意に軽かったが, 追肥区では対照区と差異が見られなかった. 株当たりの穂重, わら重および籾数についても, 地上部全重の場合と同様に, 対照区よりも基肥区および基肥+追肥区において有意に軽く, 追肥区では対照区と差異が見られなかった. 株当たりの穂長は, 追肥区において15.1 cmと最も長くなり, 逆に最も短かったのは基肥区の場合であり, 11.0 cmであった. 収量および収量構成要素への影響について見ると, 1 m<sup>2</sup>当たりの穂数は追肥区において380本と最も多くなり, 逆に最も少なかったのは基肥+追肥区の場合で215本であった. 一穂粒数についても, 穂数の場合と同様に追肥区で最も多く61.0粒となり, 基肥+追肥区では26.9粒となって最も少なかった. 登熟歩合は, 基肥区および基肥+追肥区で91.6%と最も高くなり, 対照区では84.2%となって最も低かった. 千粒重は各区ともに約18 gとなり, 差異は見られなかった. 以上の収量構成要素から10 a当たりの玄米収量を算出した結果, 追肥区では342 kgと最も多く, 次いで対照区の232 kg, 基肥+追肥区の131 kgとなり, 基肥区では107 kgとなって最も少なかった (表7).

## 2) 圃場実験

移植直後におけるイネ苗の草丈は約21 cmであったが, その後は試験区によって伸長傾向が異なり, 移植後35日目におけるイネの草丈は, 基肥区が57.5 cm, 対照区が62.5 cmとなって, 対照区よりも基肥区において有意に低かった. その後は, いずれの区においても草丈は徐々に高くなり, 移植後77日目には追肥区で93.9 cm, 対照区で85.8 cmとなって, 対照区よりも追肥区におけるイネの草丈の方が有意に高かった. 追肥後の移植後91日目 (追肥後4日目) における草丈は, 追肥区が94.2 cm, 対照区が88.6 cmであり, 対照区よりも追肥区において有意に高かった. その後は, 移植後126日目 (追肥後46日目) までいずれの区においても草丈に変化は見られなかった (図4-a, 表8). 次に, 茎数について見ると, 移植後21日目における茎数は, 基肥区で約19本, 追肥区で21本, 基肥+追肥区で約22本, 対照区で24本となり, 区間に有意な差は見られなかった. その後は, いずれの区においても茎数に変化は見られず, 移植後126日目 (追肥後46日目) における茎数は, 基肥区で

表7. 消化液の施用時期がイネの各形質、収量および収量構成要素に及ぼす影響（ポット実験）

試験区	地上部全重 (g/株)	穂重 (g/株)	わら重 (g/株)	籾重 (g/株)	穂長 (cm/穂)	穂数 (本/m <sup>2</sup> )	一穂籾数 (粒/穂)	登熟歩合 (%)	千粒重 (g)	玄米収量 (kg/10a)
基肥区	32.0 <sup>b</sup>	8.8 <sup>b</sup>	23.3 <sup>b</sup>	8.2 <sup>b</sup>	11.0 <sup>c</sup>	302 <sup>ab</sup>	26.9 <sup>c</sup>	91.6	17.7 <sup>a</sup>	107 <sup>d</sup>
追肥区	87.9 <sup>a</sup>	26.3 <sup>a</sup>	61.6 <sup>a</sup>	24.5 <sup>a</sup>	15.1 <sup>a</sup>	380 <sup>a</sup>	61.0 <sup>a</sup>	89.9	18.0 <sup>a</sup>	342 <sup>a</sup>
基肥+追肥区	32.4 <sup>b</sup>	8.8 <sup>b</sup>	23.7 <sup>b</sup>	9.5 <sup>b</sup>	12.6 <sup>bc</sup>	215 <sup>b</sup>	42.4 <sup>bc</sup>	91.6	17.9 <sup>a</sup>	131 <sup>c</sup>
対照区	77.5 <sup>a</sup>	19.4 <sup>a</sup>	58.1 <sup>a</sup>	18.1 <sup>a</sup>	14.3 <sup>ab</sup>	374 <sup>a</sup>	49.5 <sup>ab</sup>	84.2	17.4 <sup>a</sup>	232 <sup>b</sup>

注) 異なる英文字を付した値はTukeyの多重検定において1%レベルで有意差あり。

表8. 消化液の施用時期がイネ草丈に及ぼす影響（圃場実験）

試験区	移植後日数								
	14日目	21日目	28日目	35日目	42日目	49日目	56日目	63日目	70日目
基肥区	29.3 <sup>1)</sup>	42.5	50.0	57.5 <sup>**2)</sup>	66.3	74.7	79.9	80.1	79.8
追肥区	29.9	42.0	50.8	60.3	64.8	75.4	77.9	79.9	84.9
基肥+追肥区	30.0	43.6	53.9	59.7	68.9	73.8	77.6	80.4	80.1
対照区	28.9	41.1	52.4	62.5	67.7	74.9	77.8	78.7	81.2

試験区	移植後日数							
	77日目	84日目	91日目	98日目	105日目	112日目	119日目	126日目
基肥区	87.7	94.6	91.3	90.8	89.7	89.3	91.7	88.6
追肥区	93.9 <sup>**</sup>	91.3	94.2 <sup>**</sup>	94.1 <sup>**</sup>	92.1	93.5 <sup>*</sup>	95.0	89.7
基肥+追肥区	85.6	90.3	86.2	89.7	87.2	88.0	92.2	86.4
対照区	85.8	89.1	88.6	88.4	88.1	88.5	88.8	88.8

1) 単位：cm/株

2) \*\*は1%、\*は5%レベルで対照区と比較して有意差あり。

約21本、追肥区および基肥+追肥区で約20本、対照区で19本であり、区間に有意な差は見られなかった（図4-b）。イネ最上位葉におけるSPAD値は、イネ苗の移植以降56日目まで区間に差異は見られなかったが、移植後63日目には基肥区で37.0、対照区で32.7となり、対照区よりも基肥区において有意に大きかった。追肥後の移植後84日目（追肥後4日目）におけるSPAD値は、追肥区が36.8、対照区が31.7となり、対照区よりも追肥区において有意に大きかった。その後、移植後105日目（追肥後25日目）まで対照区よりも追肥区のSPAD値は有意に高かった。移植後112日目（追肥後32日目）のSPAD値は、基肥+追肥区で24.1、対照区で30.0となり、対照区よりも基肥+追肥区において有意に小さかった（図4-c、表9）。

消化液の施用時期に対するイネの各形質への影響について調査した結果、株当たりの地上部全重は追肥区において71.6gと最も重くなり、逆に最も軽かったのは基肥+追肥区の場合であり、56.3gであった。穂重、わら重および籾重について

地上部全重の場合と同様に追肥区で最も重くなり、基肥+追肥区では最も軽くなった。株当たりの稈長は、区間に差異は見られなかった。株当たりの穂長は追肥区において16.8cmと最も長くなり、逆に最も短かったのは基肥+追肥区の場合であり、14.7cmであったが、両区間において有意な差は見られなかった。収量および収量構成要素への影響について見ると、1m<sup>2</sup>当たりの穂数は株当たりおおよそ410本前後となり、区間に差異は見られなかった。一穂当たりの籾数は、追肥区において82.3粒となり最も多く、逆に基肥+追肥区では60.6gとなって最も少なかった。登熟歩合は、基肥+追肥区において96.0%と最も高くなり、基肥区では92.3%となって最も低かった。千粒重は、各区間に差異は見られなかった。以上の収量構成要素から10a当たりの玄米収量を算出した結果、追肥区が578kgと最も多く、次いで基肥区の523kg、対照区の510kgとなり、基肥+追肥区では464kgとなって最も少なかった（表10）。

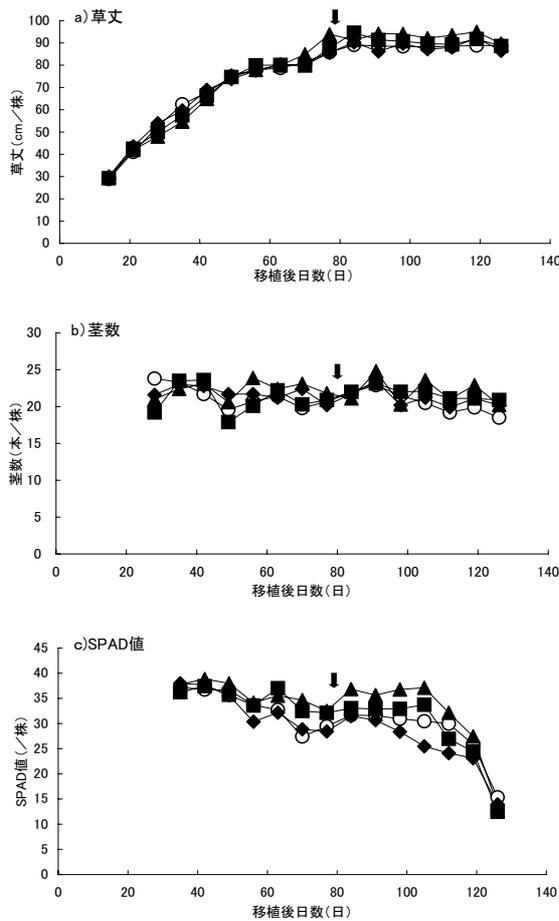


図4. 消化液の施用時期がイネの生育に及ぼす影響 (圃場実験)

注) 図中の矢印は追肥日を表す (移植後80日目)。

--- 対照区 — 基肥区 — 追肥区 — 基肥 + 追肥区

考察

本研究では、バイオガスプラントから排出される消化液について、イネに対する生育あるいは収量への影響を調査し、水稻栽培に対する肥料としての適性と導入について検討した。

まず、実験1では消化液による肥料としての効果を見るために、早期栽培の水稻に対して追肥として施用した。消化液はアンモニア態窒素を豊富に含み、且つイネは幼穂分化期において窒素が必要であることから、追肥として施用した場合に肥料としての効果が発現しやすいものと考え、2年に渡って実施した。その結果、消化液施用後におけるイネの草丈および最上位葉のSPAD値は両年とも対照区の場合と比較して有意に高かった。したがって、追肥として消化液を施用するとイネが大きく伸長し、また葉緑素濃度が増加して光合成能力が高まる効果が見られる事が分かった。収量構成要素について見ると、両年ともに施用区における一穂粒数が対照区に比べ有意に多くなった。さらに、10a当たりの玄米収量は対照区と比較して2007年度では44%、2008年度では18%増加しており、両年ともに有意に高かった。穂ばらみ期および花粉母細胞の減数分裂期において、穂あるいは2次枝梗の下部に分化・形成した穎花原基は、栄養不足下では穂先における強勢穎花が発達するために発育が停止し退化してしまう。そこで、幼穂分化期に追肥を行うと、栄養分が次第にイネに

表9. 消化液の施用時期がイネ最上位葉のSPAD値に及ぼす影響 (圃場実験)

試験区	移植後日数													
	35日目	42日目	49日目	56日目	63日目	70日目	77日目	84日目	91日目	98日目	105日目	112日目	119日目	126日目
基肥区	36.2 <sup>1)</sup>	37.4	35.7	33.6	37.0 <sup>**2)</sup>	32.5 <sup>**</sup>	32.1	33.0	32.9	32.9	33.7	27.0	24.4	12.5
追肥区	37.8	38.8	38.0	34.1	35.5	31.1	32.5	36.8 <sup>**</sup>	35.6 <sup>*</sup>	36.8 <sup>*</sup>	37.1 <sup>*</sup>	32.1	27.5	13.8
基肥 + 追肥区	38.0	37.7	35.6	30.4	32.2	28.9	28.4	31.5	30.7	28.4	25.5	24.1 <sup>*</sup>	23.1	13.9
対照区	37.2	36.7	36.7	33.6	32.7	27.4	29.4	31.7	31.6	31.0	30.5	30.0	25.9	15.4

1) 単位: cm/株

2) \*\*は1%, \*は5%レベルで対照区と比較して有意差あり。

表10. 消化液の施用時期がイネの各形質、収量および収量構成要素に及ぼす影響 (圃場実験)

試験区	地上部全重 (g/株)	穂重 (g/株)	わら重 (g/株)	稈長 (cm/株)	初重 (g/株)	穂長 (cm/株)	穂数 (本/m <sup>2</sup> )	一穂粒数 (粒/穂)	登熟歩合 (%)	千粒重 (g)	玄米収量 (kg/10a)
基肥区	66.6 <sup>ab</sup>	31.5 <sup>ab</sup>	30.2 <sup>b</sup>	59.3 <sup>a</sup>	33.5 <sup>ab</sup>	15.8 <sup>a</sup>	412 <sup>a</sup>	68.1 <sup>b</sup>	92.3	20.9 <sup>a</sup>	523 <sup>ab</sup>
追肥区	71.6 <sup>a</sup>	33.3 <sup>a</sup>	38.3 <sup>a</sup>	64.1 <sup>a</sup>	35.5 <sup>a</sup>	16.8 <sup>a</sup>	408 <sup>a</sup>	82.3 <sup>a</sup>	94.4	21.3 <sup>a</sup>	578 <sup>a</sup>
基肥 + 追肥区	56.3 <sup>b</sup>	26.8 <sup>b</sup>	29.5 <sup>b</sup>	59.9 <sup>a</sup>	27.8 <sup>b</sup>	14.7 <sup>a</sup>	437 <sup>a</sup>	60.6 <sup>b</sup>	96.0	20.5 <sup>a</sup>	464 <sup>b</sup>
対照区	63.0 <sup>ab</sup>	33.0 <sup>ab</sup>	30.0 <sup>b</sup>	61.3 <sup>a</sup>	31.6 <sup>ab</sup>	15.7 <sup>a</sup>	410 <sup>a</sup>	77.0 <sup>ab</sup>	94.2	20.1 <sup>a</sup>	510 <sup>b</sup>

注) 異なる英文字を付した値はTukeyの多重検定において1%水準で有意差あり。

吸収され、弱勢穎花の発育期に栄養が補給されるために、穎花の分化は促進するとともに退化が抑制され、一穂粒数が増加する（星川 1975）。このようなことから、幼穂分化期における消化液の施用によって、イネは穂ばらみ期および減数分裂期に必要な栄養分、特に窒素を吸収できたために、一穂粒数が増加し、その結果玄米収量が増加したものと考えられた。以上のことから、消化液は水稻に対して肥料としての効果を持つ事が明らかとなった。

次に、実験 2 では消化液の施用時期がイネの生育および収量に及ぼす影響について検討したが、その結果、ポット実験では基肥として消化液を施用するとイネの草丈は低くなり、また茎数が減少する傾向が見られた。すなわち、基肥時に消化液を施用するとイネの初期生育は劣ることが分かった。この結果は、西川らの報告（2007）と一致したが、水田土壌を使用した善明らのポット実験（2009）では、消化液を全層施用した場合にイネの生育あるいは収量に対して化成肥料と同等の効果が得られたとしている。これらの結果の相違として、消化液に由来する有害物質による根の活性の低下が考えられた。本実験では、消化液中に含まれる個々の物質と根の発達との関係について調査していないが、硫化水素のような根の発達を抑制する物質が含まれている可能性も考えられ、今後は消化液中の成分構成についてさらに調査する必要がある。また、本実験において施用した全窒素量は消化液および硫酸アンモニウムともに同等であったが、硫酸アンモニウム中における窒素形態は全てアンモニア態窒素であったのに対し、消化液では約76%がアンモニア態窒素であり、残りの24%は有機態窒素であった。本実験に使用した焼土中には微生物がほとんど存在しないため、消化液中の有機態窒素は無機化されず、その結果イネの窒素吸収量が少なくなって生育が小さくなった可能性がある。さらに、消化液中のアンモニアが田面水中から大気中に揮散したために窒素が消失した（Hou *et al.* 2007）ことを考慮すると、イネは必要な窒素量を得られなかったために生育が劣った、あるいは揮発したアンモニアが気孔からイネの体内に吸収されて地上部の生育が抑制された可能性も考えられる。ポットによる実験は閉鎖的環境であるために、実際の水田での結果とは

結びつきにくい。消化液をイネの基肥として施用することはイネに対して負の影響をもたらすことが明らかであり、したがって消化液は水稻栽培において基肥以外で利用することが望ましいと思われた。

圃場実験において、追肥区の一穂粒数および玄米収量は対照区と比較して多かった。したがって、消化液は追肥として施用した場合に化学肥料以上の肥効があると考えられた。実験 1 でも述べたように、幼穂分化期における消化液施用によってイネは必要な栄養分を吸収し、穎花の分化が促進されたために一穂粒数が増加し、その結果玄米収量が増加したと考えられた。また、消化液には窒素・リン酸・カリウムの三要素の他に、マグネシウムや鉄などの微量元素も含まれており、これらが影響して一穂粒数が増加した可能性も考えられるが、消化液中の微量元素とイネの関係についてさらに詳しく調査する必要がある。

基肥 + 追肥区の草丈および茎数は対照区とほぼ同等となり、同じ傾向で推移していた。しかし、収量および収量構成要素について見ると、基肥 + 追肥区の一穂粒数および玄米収量は対照区と比較して有意に少なかった。このことから、基肥 + 追肥区のイネは、穂ばらみ期および減数分裂期において窒素量が少なかったと考えられる。これは、基肥としての消化液施用により、根の発達が抑制されたことにより養分吸収力が低下したためであると考えられるとともに、圃場実験とポット実験の結果が一致したことを示すものである。小畑ら（2007）は、水田に消化液を施用する際の問題点として、消化液中の有機物が土壌中で分解される際に発生する有害物質に注意を払う必要があるとしている。有機物の分解に伴う有害物質の発生は、畑作物に対する評価研究においては指摘されていないことから、好氣的条件下では有害物質は発生しにくいものと考えられている（宮田ら 2005, 宮川 2006）。本研究あるいは西川らの報告（2007）から考慮すると、嫌氣的条件下、すなわち水田への基肥としての消化液施用は有機物の分解産物である有害物質の発生によってイネの初期生育における根の発達を低下させたものと考えられた。

以上のことから、消化液を水稻栽培に導入するには追肥が有効であることが明らかとなった。し

かし、様々な水田において消化液を導入するためには天候や地形による影響を考慮して消化液を水田全面にうまく拡散させる技術が必要となる。したがって、今後は消化液を固形化する等の技術開発が求められる。また、本実験では消化液の施用時期と水稻の移植を同時に行ったために水稻の生育が劣ったと考えられるが、消化液の大量消費の観点から、消化液の基肥への導入利用について、特に水稻移植前の消化液施用について今後検討を進める必要があると考えている。それにより、バイオガスプラントより排出される消化液を利用した循環型農業システムが構築できるものと期待している。

## 要約

バイオマスプラントから排出されるメタン発酵消化液が水稻栽培に利用できる可能性を明らかにするために、イネに対する消化液の肥料としての効果および施用時期の違いによるイネの生育および収量を調査した。

1. 消化液を追肥として施用した施用区のイネは、対照区よりも草丈が高くなり、最上位葉のSPAD値が大きくなったが、茎数に差異は見られなかった。穂重、籾重、穂長および1穂籾数は対照区よりも施用区で有意に大きくなり、そのため玄米収量が多くなった。
2. ポット実験では、消化液を基肥として施用した場合にイネの草丈および茎数は小さくなり、また穂数および1穂粒数が少なくなって、その結果玄米収量も低下した。
3. ポット実験および圃場実験ともに追肥区のイネにおける草丈、茎数およびSPAD値は対照区の場合とほぼ同程度となり、また穂数および千粒重についても試験区間に有意差は認められなかった。しかし、1穂籾数は対照区と比較して追肥区が有意に多くなったことから、玄米収量も多くなった。
4. 以上のことから、消化液は水稻栽培において化学肥料の代替として追肥時に施用した場合に有効であることが認められ、さらに化学肥料よりも増収することが示唆された。

キーワード：イネ、玄米収量、施肥、バイオガスプラント、メタン発酵消化液。

## 謝辞

本研究は、「平成19・20年度文部科学省特別研究経費・連携融合事業・農林畜産廃棄物利用による地域資源循環システムの構築」による運営費交付金を用いて実施された。研究にあたり、「農林畜産廃棄物利用による地域資源循環システムの構築」に関係する宮崎大学の教職員各位、農学部附属自然共生フィールド科学教育研究センターの教職員各位、そして宮崎大学農学部作物学研究室の学生諸氏には様々な支援を頂いた。深く感謝の意を表す。

## 引用文献

- 星川清親 (1975) イネの生長. 農林漁村文化協会, 東京, 241.
- Hou, H., S. Zhou, M. Hosomi, K. Toyota, K. Yosimura, Y. Mutou, T. Nisimura, M. Takayanagi and T. Motobayashi (2007) Ammonia emissions from anaerobically digested slurry and chemical fertilizer applied to flooded forage rice. *Water Air Soil Pollut.* **183**, 37-48.
- 環境省 (2008) 廃棄物処理に関する統計・状況・記者発表資料.
- 宮川大輔 (2006) メタン発酵消化液のチャへの利用について. *農及園* **81**, 785-789.
- 宮田尚稔・池田英男・小島敬良 (2005) 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. *日本土壌肥料科学雑誌* **76**, 619-627.
- 村中智恵子・西脇亜也・宇田津康弘・杉本安寛 (2009) メタン発酵消化液のプロックリー栽培における施用効果について. *宮崎大学農学部研究報告* **55**, 57-64.
- 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発酵の利用がメロンの発育および収量に及ぼす影響. *園学研* **2**, 175-178.
- 西川知宏・井上博茂・山末祐二・稲村達也 (2007) メタン発酵消化液の施用が水稻の玄米品質に及ぼす影響. *日本作物学会紀事* **76** (別2) 48-49.
- 農林水産省 (2006) 第2章, 地域農業の構造改革と国産の強みを生かした生産の展開. *食料・農業・農村白書*. 農林水産省, 財団法人農林統計協会, 東京, 166.

小畑仁・水谷裕典・水野隆文・脇田正彰・松葉捷也 (2007) メタン発酵消化液施用が水稻の生育並びに水稻体内及び水田土壌中元素濃度に及ぼす影響. 三重フィールド研究・技術年報 6号, 25-31.

若木修・鈴木啓太・新海秀史・高橋太郎・平克郎・八巻憲和・荒木肇・松田従三 (2005) 土壌化学性の変化とデントコーンの生育・収量に及ぼす消化液, 堆肥および化学肥料の影響. 北海道大学農場研究報告 34, 13-20.

善明崇英・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. 九大農学芸誌 64, 1-5.