

水稻生産における好気発酵液肥の稲わら腐熟促進剤および窒素肥料としての施用効果の評価

平井康丸¹⁾・猿田恵輔²⁾・河合憲三³⁾・首藤大比古⁴⁾・山川武夫¹⁾・望月俊宏¹⁾・井上英二¹⁾・岡安崇史¹⁾・光岡宗司¹⁾

(¹⁾九州大学大学院農学研究院, ²⁾ヤンマー農機株式会社, ³⁾味の素株式会社, ⁴⁾黄桜株式会社)

要旨：近年、水稻生産におけるコスト・環境負荷・エネルギー消費低減の観点から、し尿や汚泥を原料として製造される好気発酵液肥（液肥）の利用促進の気運が高まっている。そこで本研究では、稲わらの腐熟促進剤および窒素肥料としての液肥の施用効果を2009年と2010年の2年間の連用試験により評価した。腐熟促進剤の施用効果は、稲体の地上部乾物重、全窒素含量（T-N）、窒素保有量の面からは確認されなかった。窒素肥料としての効果は、基肥として全層施用する場合は、アンモニア態窒素（ $\text{NH}_4\text{-N}$ ）の割合が7割程度あれば、化学肥料と同等であり、穂数は同程度確保された。一方、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の割合が低い場合は、乾物重、T-N、窒素保有量が低下し、穂数が減少する傾向であった。追肥として表面施用する場合は、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の揮散損失を伴うため窒素保有量が小さくなり、粒数の減少を招くことが示唆された。また、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の割合が低い場合は、窒素吸収が緩やかになり登熟期の窒素栄養状態が低下した。これにより、2010年の出穂後20日間の平均気温が26.7℃の高温条件において、千粒重が低下したと推察された。以上の収量構成要素の低下により、精玄米重は小さくなる傾向であった。液肥の窒素肥料としての効果は、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の割合に依存するため、その成分変動は利用上の問題と考えられる。

キーワード：稲わら、好気発酵液肥、水稻生産、窒素肥料、バイオマス、腐熟促進剤。

し尿や汚泥等の有機性廃棄物を原料として製造される発酵液肥は、植物の栄養源である窒素、リン、カリを含み、化学肥料の代替として有効利用し得るバイオマス資源である。この発酵液肥の肥料利用は、肥料の製造に伴うエネルギー消費や温室効果ガス排出の削減につながるほか、肥料代の節減に寄与することから、近年、地域資源として利用促進の気運が高まっている。水稻生産における発酵液肥の肥料特性に関する研究としては、善明ら（2009）がメタン発酵消化液（嫌気発酵液肥）（以下、消化液）を基肥および追肥として施用した際の生育、乾物重および全窒素集積量をポット栽培により比較しており、消化液を全層施用した場合は化学肥料と同等であったと報告している。一方、古賀ら（2010）は、ポット栽培において消化液を基肥として全層施用した場合に、化学肥料施用区に比べて草丈や茎数の初期生育が劣り、乾物重および玄米収量が低下したと報告している。上岡・亀和田（2011）は、善明ら（2009）および古賀ら（2010）が消化液の施用窒素量を全窒素換算で化学肥料施用区と同一としたのに対し、アンモニア態窒素（以下、 $\text{NH}_4\text{-N}$ ）換算で施用窒素量を同一として圃場試験を実施している。その結果、消化液を基肥として全層施用した場合の水稻の窒素吸収量、倒伏程度、収量構成要素および精玄米重、玄米窒素含有率は、化学肥料施用区と同等であったと報告している。このように、消化液の肥料特性や施用時の窒素換算の方法は各報告で異なり、その理由として消化液に3割前後含まれる有機態窒素の影響が考えられる。一方、本研究で用いる好気発酵液肥（以下、液肥）

については、河合ら（2009）がポット栽培により、基肥時の初期生育が化学肥料に比べて劣り、追肥後に稲体の窒素吸収量が低く推移することを、推定値に基づき報告しているのみである。したがって、液肥の肥料特性については、さらなる試験研究により明らかにする必要がある。また、消化液に関する報告から、液肥に含まれる有機態窒素が乾物生産や窒素吸収に及ぼす影響を評価することが特に重要と考える。

さらに液肥は、し尿、下水汚泥等を原料として一年中製造されるため、休耕期における用途を確立することが、水稻生育期間中の肥料利用と同様に重要な課題である。休耕期に水田に施用される窒素資材として、稲わらの腐熟促進を目的とする石灰窒素が挙げられる（橋元・松崎 1976）。川村・中田（1974）は、稲わらに添加された石灰窒素は、稲わらの分解を2～6%促進すること、湛水後に再無機化が容易な形態で有機化されると報告している。したがって、液肥を石灰窒素と同様に施用することにより、稲わらの分解促進および無機態窒素の有機化による地力窒素増進が期待できる。

そこで本研究では、水稻生産において液肥を有効利用するための基礎データを得ることを目的に、液肥の腐熟促進剤および窒素肥料としての施用効果を、生育期間を通じた稲体地上部の乾物重、全窒素含量（以下、T-N）、窒素保有量の推移、さらには、収量構成要素、精玄米重、玄米のタンパク質含有率の面から評価した。

第1表 各試験区の稲わら、腐熟促進剤、肥料の施用量 (全窒素換算)。

| 試験区の処理 (鋤き込み→施肥) | 試験区 略表記 | 稲わら (g m^{-2}) | | 腐熟促進剤 (g m^{-2}) | | 基肥 (g m^{-2}) | 追肥 (g m^{-2}) |
|---------------------|------------|---------------------------|------|-----------------------------|------|-----------------------------|-----------------------------|
| | | 2009 | 2010 | 2009 | 2010 | | |
| 稲わら・石灰窒素→無肥 | 藁石無 | 2.4 | 3.2 | 5.5 | 6.2 | — | — |
| 稲わら・液肥 →無肥 | 藁液無 | 2.4 | 3.2 | 5.5 | 6.2 | — | — |
| 稲わら・液肥 →液肥 | 藁液液 | 2.4 | 3.2 | 5.5 | 6.2 | 5.0 | 2.5 |
| 稲わら →化肥 | 藁無化 | 2.4 | 3.2 | — | — | 5.0 | 2.5 |
| 稲わら →液肥 | 藁無液 | 2.4 | 3.2 | — | — | 5.0 | 2.5 |
| 無施用 →化肥 | 無無化 | — | — | — | — | 5.0 | 2.5 |
| 無施用 →液肥 | 無無液 | — | — | — | — | 5.0 | 2.5 |

試験区の処理は、→の左が鋤き込みの処理を、→の右が施肥の処理を示す。試験区略表記は、左からわらの施用、腐熟促進剤の種類、肥料の種類をそれぞれ示す。例えば、「藁石無」であれば、稲わらを施用し、腐熟促進剤として石灰窒素を施用し、無肥料の試験区を示す。稲わら、腐熟促進剤、基肥および追肥の施用量はすべて全窒素換算の値である。稲わらの現物施用量は、2009 年が 0.4 kg m^{-2} 、2010 年が 0.5 kg m^{-2} であった。

材料と方法

1. 水稻栽培試験の概要

栽培試験は福岡県糟屋郡粕屋町の九州大学農学部附属農場の水田圃場において、2009 年および 2010 年に実施した。本研究では、液肥の腐熟促進剤および窒素肥料としての施用効果を評価することを目的として、第1表に示す試験区を設定した。稲わら・石灰窒素→無肥区（以下、藁石無区）、稲わら・液肥→無肥区（以下、藁液無区）は、液肥の腐熟促進剤としての効果を石灰窒素と比較することを目的に設けた。また、藁液無区で無肥としたのは、稲わらと腐熟促進剤からの窒素供給のみで水稻生産が可能であるかを評価するためである。なお、この評価については、慣行の栽培体系である稲わら→化肥区（以下、藁無化区）との比較により行った。稲わら・液肥→液肥区（以下、藁液液区）は、液肥を腐熟促進剤および窒素肥料として利用することを想定した試験区であり、慣行の栽培体系である藁無化区との比較を行った。また、藁無化区に対比して液肥の肥料効果を評価するために、稲わら→液肥区（以下、藁無液区）を設けた。さらに、無施用→化肥（以下、無無化区）、無施用→液肥区（以下、無無液区）は、肥料のみにより窒素供給を行った試験区であり、液肥の肥料特性を化学肥料と対比して評価した。また、藁液液区、藁無液区、無無液区間の比較から、稲わらと腐熟促進剤の施用効果を評価した。各試験区は、一筆の水田において3反復の乱塊法で配置した。各試験区の面積は $2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ の 10 m^2 であり、試験水田の土性は Clay Loam、CEC は $13.9 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ であった。なお、肥料成分の流出を防ぐために、2009 年の基肥施用前から 2010 年の栽培試験終了まで各試験区を畦畔波板により分割した。

2009 年の試験では、1月5日に稲わらおよび腐熟促進剤を施用し、翌日にロータリー耕うんにより鋤き込んだ。ロータリー耕うんは全試験区について行った。腐熟促進剤の施用時期は、液肥の製造施設がある福岡県八女市星野村が稲

単作地域であり、液肥は8月上旬の追肥に利用された後、翌年の6月上旬の基肥まで利用されないことを考慮して決定した。すなわち、8月上旬から翌年の6月上旬の液肥未利用期間の半ばの時期であり、液肥の製造が過剰になる1月上旬（2010 年は12月下旬）に決定した。稲わらは、稲わらカッターにより長さ 10 cm 程度に切断後、作土層の深さ 15 cm 付近まで鋤き込んだ。ここで、稲わらを切断した理由は、本研究の腐熟促進剤が、コンバイン収穫時に田面に放出される排わらへの施用を想定しているためである。一方、本実験では、稲わらの施用量の調整、液肥の施用および稲わらの鋤き込み時期を1月上旬に設定した都合上、一旦圃場外で保管した稲わらを施用した。稲わらの現物施用量は 0.4 kg m^{-2} であった。また、腐熟促進剤を施用した試験区においては、稲わらに対して C/N 比が 20 となる全窒素添加量を算定し、液肥もしくは石灰窒素の施用量を決定した。この C/N 比 20 の根拠は、広瀬（1973）が種々の植物遺体を添加して 30°C 70 日間の条件で行った土壌の湛水培養実験において、C/N 比が約 20 より小さくなると有機態窒素の無機化率が正の値に転じるとした報告である。また、広瀬（1973）の結果に基づき、西尾（2007）は C/N 比 20 を堆肥化終了の炭素率の目安としている。石灰窒素は 20.0 石灰窒素（窒素 20%，アルカリ分 55%）を使用した。水稻の栽培は品種ヒノヒカリを用いて実施し、6月23日に基肥を全層施用後、6月25日に機械移植用の稚苗を1株3本、栽植密度 17.5 株 m^{-2} にて移植した。追肥は、8月13日に表面施用した。出穂日は9月2日、収穫日は10月13日であった。なお、液肥については、基肥、追肥ともにバケツやじょうろ等を用いて試験区全体に均一に施用した。化成肥料は、基肥にくみあい水稻基肥用 480 号（窒素 14%，リン酸 8%，カリ 10%）、追肥にくみあい追肥化成 523（窒素 15%，リン酸 2%，カリ 13%）を使用した。2010 年の試験では、2009 年の 12 月 25 日に稲わらおよび腐熟促進剤を施用し、平鋤を用いて鋤き込んだ。稲わらの現物施用量は 0.5 kg m^{-2} であり、2009 年に比べて 0.1 kg

第2表 稲株の採取日.

| 年次 | 採取日 (月 / 日) | | | | |
|------|-------------|-------|------|------|-------|
| | 分けつ盛期 | 幼穂形成期 | 出穂期 | 登熟中期 | 収穫期 |
| 2009 | 7/24 | 8/12 | 9/2 | 9/24 | — |
| 2010 | 7/28 | 8/11 | 8/31 | 9/22 | 10/13 |

2009 年の収穫期は試料の採取を行っていない.

m² 増量した. 腐熟促進剤は, 2009 年と同様に C/N 比 20 の基準で全窒素添加量を算定し, 施用量を決定した. 7 月 1 日に基肥を全層施用し, 7 月 2 日に 3 粒播きの 21 日齢ポット苗を移植した. 2009 年と異なりポット苗を移植したのは, ジャンボタニシによる食害対策である. 栽培品種および栽植密度は 2009 年と同じである. 追肥は, 8 月 12 日に表面施用した. 出穂日は 9 月 1 日, 収穫日は 10 月 13 日であった.

2. 調査項目および方法

(1) 気象環境

水稻生育期間中の気温および日射量を気象観測装置 (HOBO Weather Stations, ONSET COMPUTER) により計測した. 10 分間隔の記録データから, 気温の日平均値, 日射量の日積算値を計算後, 分けつ期, 幼穂形成期, 登熟前期の平均値を求めた. 本研究では, 前述の各生育期を, それぞれ, 移植後 10 日～出穂前 30 日, 出穂前 30 日～出穂日, 出穂日～出穂後 20 日の期間とした.

(2) 液肥および稲わらの成分

液肥は福岡県八女市星野村の自給肥料供給施設にて, し尿および浄化槽汚泥を原料として製造されたものを用いた. 製造工程の概略を示すと, 回収された原料は調整槽 (40 t) において固液分離後, 微生物酵素製剤 (浄化作用促進脱臭剤 浄化クリーン, 旭化成クリーン株式会社) が 0.3 g L⁻¹ 添加され, 成熟槽 (200 t) に送られる. 続いて, 成熟槽において平均 1 か月ほど曝気処理が行われた後, 貯留槽 (300 t) に送られる. 今回の試験に用いた液肥は, 貯留槽から採取したものである. 液肥中の T-N は, サリチル酸・硫酸一過酸化水素分解 (大山ら 1991) 後, インドフェノール法 (Cataldo ら 1974) により比色定量した. NH₄-N はコンウェイの微量拡散分析法 (土壤養分測定法委員会 1994) により抽出し, インドフェノール法により比色定量した. 施用した稲わらについては, 乾燥・粉碎後, 九州大学中央元素分析センターに分析を依頼して, T-N, 全炭素含量 (以下, T-C) の値を得た. なお, 液肥は, 無作為に抜き取った 5 サンプル, 稲わらは 3 サンプルについて分析を行い, 平均値を求めた.

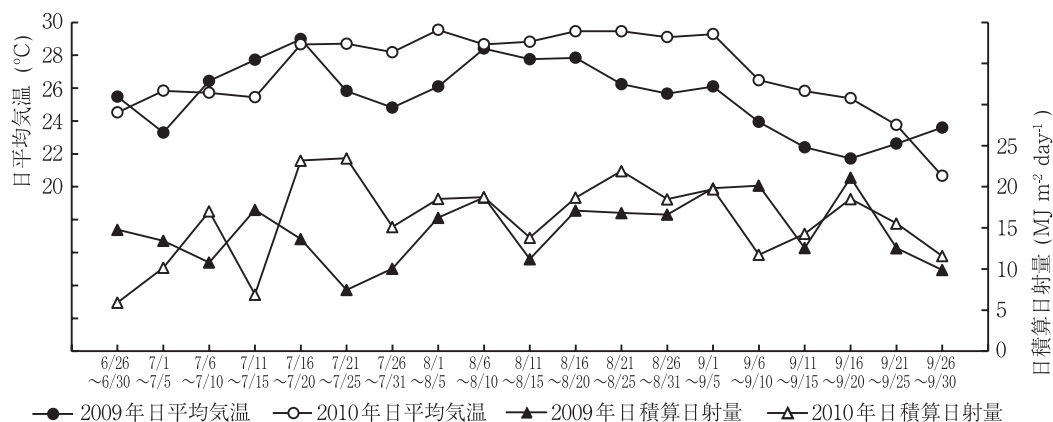
(3) 稲体地上部の乾物重, T-N, 窒素保有量

分けつ盛期, 幼穂形成期, 出穂期, 登熟中期, 収穫期 (2010 年のみ) において, 各試験区の 10 株に対して行った草丈, 茎数 (出穂期以降は穂数) の生育調査に基づき, 平均的な生育量の 3 株を採取して分析用試料とした. 生育調査は生育期間を通して同一の 10 株に対して行い, 2009 年は試験

区中央部の条方向に連続した 5 株×2 条を, 2010 年は試験区中央部の条方向に連続した 3 株×2 条とその左右外側の条方向に連続した 2 株を計測した. また, 分析用試料は, 生育調査株の外周株より外側の株を対象に, 過去の採取により周辺効果を受けていない株を掘り取った. なお, 2010 年の生育調査株の配置を変更した理由は, 採取可能な試料を増やすためである. 採取した稲株は, 48 時間 70~80℃ で通風乾燥後, 乾物重を測定した. さらに, 同試料をサイクロンサンプルミル (CSM-FI, UDY CORPORATION) で粉碎後, (2) の液肥と同様の方法で T-N を定量した. 1 株につき 1 連制で分解を行い, 比色定量後, 3 株の平均値を算定した. 得られた乾物重と T-N の値を乗じて, 各生育期の窒素保有量を算定した. ここで, 登熟中期, 収穫期については, 茎葉と穂を分けて乾物重の測定ならびに T-N の分析を行い, 窒素保有量を算定した. 第 2 表に稲株の採取日を示す. 幼穂形成期の採取日は, 追肥の前日である. また, 生育調査では, 葉身の SPAD 値も参考データとして計測した. SPAD 値の計測は, 中鉢ら (1986) の報告を参考にして, 株中の草丈が最長となる茎の第 2 展開葉 (登熟中期, 収穫期は止葉) の中央部において, 中肋を挟む左右各 2 箇所 (合計 4 箇所) を葉緑素計 (SPAD-502, コニカミノルタ) により計測し, 平均値を求めた.

(4) 収量構成要素および精玄米重, 玄米タンパク質含有率

各試験区から生育調査株 10 株を手刈りし, 収量構成要素および玄米タンパク質含有率の計測試料とした. 試料を通風乾燥後, 各株の穂数, 10 株の合計初数を計測した. さらに, インペラ初すり機 (FC2K, 大竹製作所) により初すりした玄米を, 1.85 mm の縦目篩にて選別し, 篩上の精玄米数を計測した. 初数, 精玄米数の計測には, 粒数検知器 (WAVER IC-0, アイデックス) を用いた. 続いて, 精玄米を秤量し, 含水率を 135℃ 24 時間法 (農業機械学会 1996) により測定した. 以上の測定結果から, 各試験区の穂数, 初数, 登熟歩合, 千粒重の収量構成要素および精玄米重を求めた. 玄米の T-N は, 精玄米を 48 時間 70~80℃ で通風乾燥後, サイクロンサンプルミルにより粉碎した試料を, (2) の液肥と同様の分析方法により定量した. 1 試料につき 3 連制で分解を行い, 比色定量後, 平均値を算定した. タンパク質含有率は T-N にタンパク質換算係数 5.95 を乗じることにより求めた. なお, 千粒重, 精玄米重, タンパク質含有率は, 湿量基準含水率 (wet basis) で 15% (以下, 15% wb.) の値に換算した.



第1図 半旬別の日平均気温および日積算日射量の推移。

第3表 各生育期の気温および日積算日射量の平均値。

| 年次 | 分けつ期 | | 幼穂形成期 | | 登熟前期 | |
|------|------------|---|------------|---|------------|---|
| | 気温 (°C) | 日積算日射量 (MJ m ⁻² day ⁻¹) | 気温 (°C) | 日積算日射量 (MJ m ⁻² day ⁻¹) | 気温 (°C) | 日積算日射量 (MJ m ⁻² day ⁻¹) |
| 2009 | 26.5 | 12.1 | 27.0 | 16.5 | 23.4 | 17.7 |
| 2010 | 27.8 | 17.4 | 29.2 | 18.3 | 26.7 | 16.1 |

分けつ期, 幼穂形成期, 登熟前期は, それぞれ, 移植後10日～出穂前30日, 出穂前30日～出穂日, 出穂日～出穂後20日の期間である。

第4表 液肥の成分組成。

| 項目 | 腐熟促進剤 | | 基肥 | | 追肥 | |
|---|-------|------|------|------|------|------|
| | 2009 | 2010 | 2009 | 2010 | 2009 | 2010 |
| NH ₄ -N (g L ⁻¹) | 1.32 | 0.82 | 1.00 | 0.23 | 1.04 | 0.16 |
| T-N (g L ⁻¹) | 2.09 | 1.09 | 1.37 | 0.69 | 1.71 | 0.62 |
| NH ₄ -Nの割合 (%) | 63 | 75 | 73 | 33 | 61 | 26 |

3. 平均値の差の検定

稲体地上部の乾物重, T-N, 窒素保有量, 収量構成要素, 精玄米重, 玄米タンパク質含有率の各試験区の平均値の差をテューキー法 (山内 2008) により有意水準5%で検定した。また, 臨界差を求める際の誤差分散は, 乱塊法のデータの構造模型 (奥野 1978) に基づき求めた。解析は全てVBA言語で作成したオリジナルプログラムにより行った。

結 果

1. 気象環境

第1図に半旬別の日平均気温と日積算日射量の推移を示す。2010年の気温が生育期間全体を通して高いのが特徴で, 7月21日～8月5日, 8月21日～9月20日の期間は2009年に比べ3℃程度高かった。その結果, 第3表に示すように, 2010年の幼穂形成期の気温は29.2℃, 登熟前期の気温は26.7℃と, 2009年の27.0℃および23.4℃と比較して, それぞれ2.2℃, 3.3℃高かった。また, 2009年の7月16日～7月31の期間の日射量が低い値で推移しており, 分けつ期 (7月5日～8月2日) の日射量は12.1 MJ m⁻²

第5表 稲わらの成分組成。

| 項目 | 2009 | 2010 |
|---------------------------|-------|-------|
| T-N (g kg ⁻¹) | 6.0 | 6.4 |
| T-C (g kg ⁻¹) | 397.0 | 373.1 |
| C/N比 | 66.2 | 58.3 |

day⁻¹と2010年の分けつ期 (7月12日～8月1日) の17.4 MJ m⁻² day⁻¹に比べて著しく小さかった。

2. 液肥および稲わらの成分組成

第4表に液肥の成分組成を示す。T-Nは, 0.62 g L⁻¹～2.09 g L⁻¹と変動が大きく, 特に, 2010年のT-Nが2009年の同時期の36%～52%と大幅に低下した。また, 2009年にはT-N中に6～7割含まれていたNH₄-Nが, 2010年の基肥および追肥においては, 3割前後しか含まれていなかった。第5表に稲わらの成分組成を示す。C/N比は60前後であったことから, 鋤き込み時の液肥の施用量 (C/N比が20になるように決定) は2009年が2.7 L m⁻², 2010年が5.6 L

m^2 となった。また、基肥および追肥時の液肥の施用量は、2009 年がそれぞれ、 3.6 L m^{-2} 、 1.5 L m^{-2} 、2010 年がそれぞれ、 7.2 L m^{-2} 、 4.0 L m^{-2} となった。

3. 稲体地上部の乾物重、T-N、窒素保有量

(1) 乾物重

第2図(a)に2009年の稲体の地上部乾物重の推移を示す。稲わらおよび腐熟促進剤のみで窒素供給を行った藁石無区と藁液無区の比較では、分けつ盛期を除き、藁液無区の値が大きい傾向であった(有意差なし)。また、藁液無区の値は、慣行の栽培体系である藁無化区に比べて常に小さい傾向であり、出穂期および登熟中期の穂の値が有意に小さかった。藁液液区の値は、藁無化区に比べて同等か大きい傾向であった(有意差なし)。藁無液区の値は、藁無化区と同等であった。無無液区については、追肥後の出穂期および登熟中期において、無無化区に比べて小さい傾向を示した(有意差なし)。また、藁液液区、藁無液区、無無液区間の比較においては、明瞭な傾向は見られなかった。

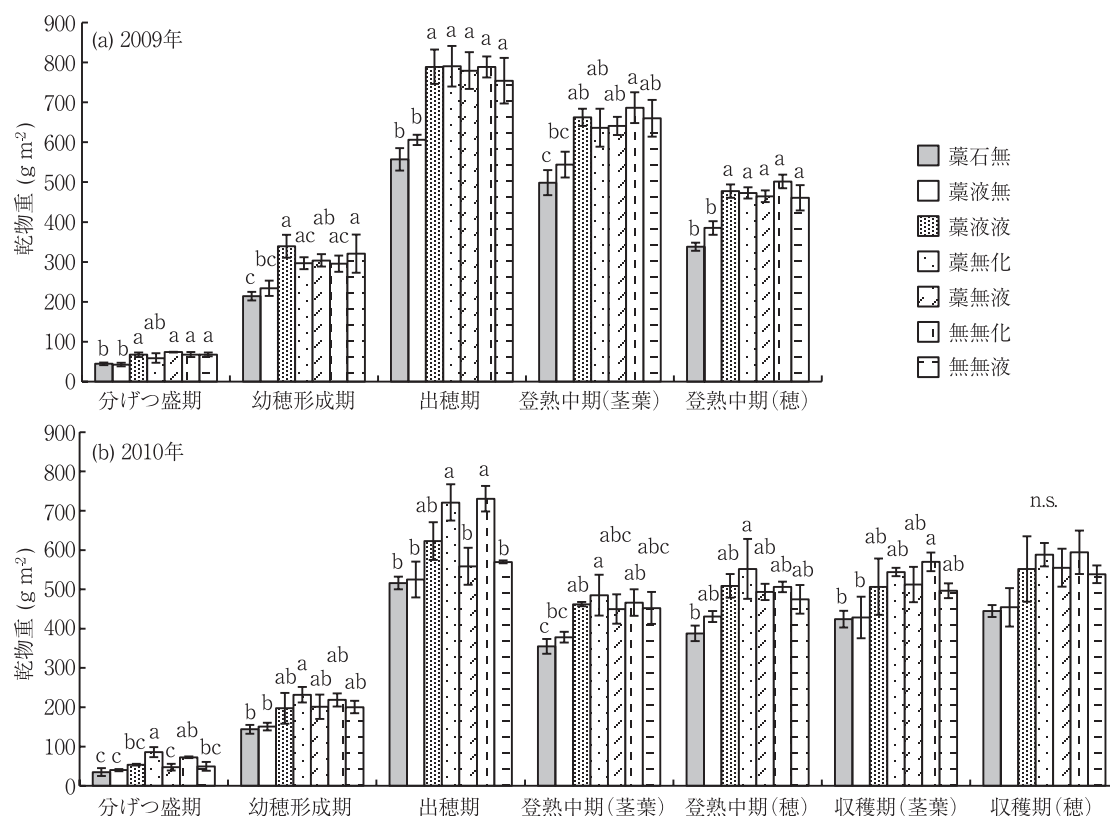
第2図(b)に2010年の結果を示す。藁石無区と藁液無区間の比較では、僅かではあるが2009年と同様に藁液無区の値が大きい傾向であった(有意差なし)。また、藁液無区の値は、藁無化区に比べて常に小さい傾向であり、分けつ盛期、幼穂形成期、出穂期および登熟中期の茎葉の値

が有意に小さかった。藁液液区および藁無液区については、藁無化区に比べて常に値が小さい傾向であり、それぞれ、分けつ盛期、分けつ盛期および出穂期において有意差が認められた。無無液区についても、無無化区に比べて常に小さい傾向であり、出穂期において有意差が認められた。藁液液区、藁無液区、無無液区間の比較においては、出穂期の藁液液区の値が大きい傾向であった(有意差なし)。

(2) T-N

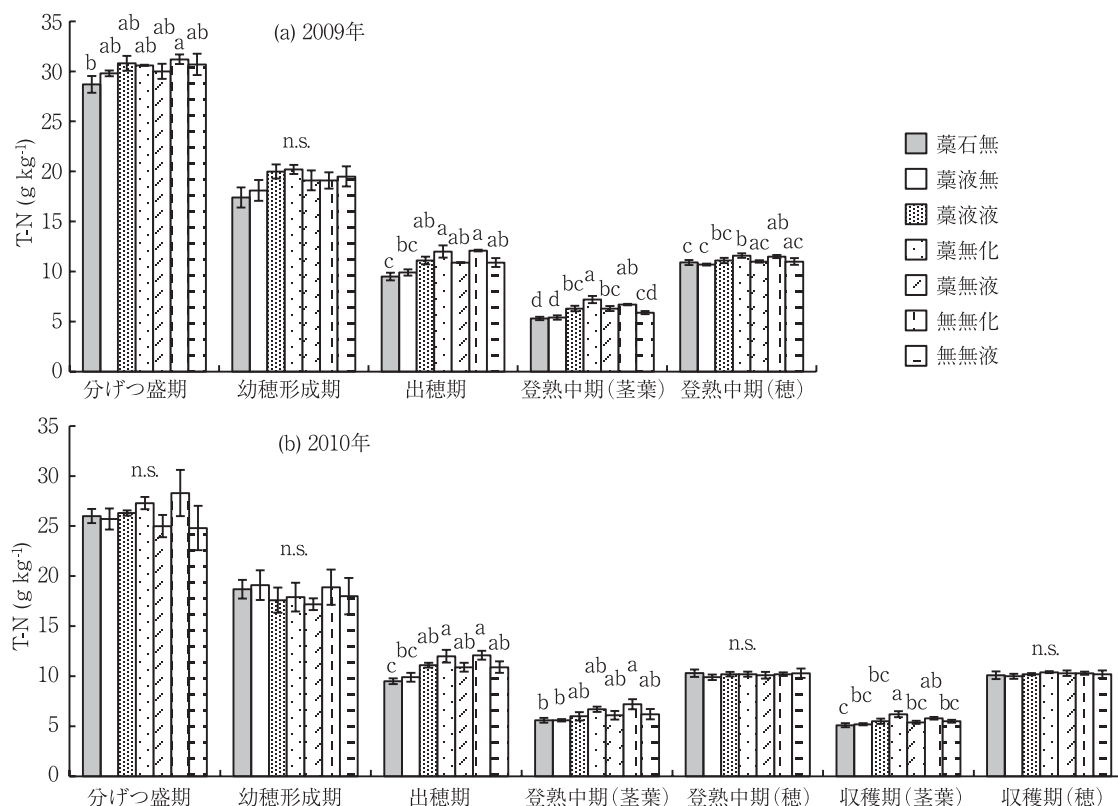
第3図(a)に2009年の稲体の地上部 T-N の推移を示す。藁石無区と藁液無区の比較では、追肥前の分けつ盛期、幼穂形成期は藁液無区の値が大きい傾向であったが(有意差なし)、その他は同等であった。また、藁液無区の値は、藁無化区に比べて常に小さい傾向であり、出穂期および登熟中期の値が有意に小さかった。藁液液区および藁無液区については、追肥後の出穂期および登熟中期において藁無化区に比べて値が常に小さく、それぞれ、登熟中期の茎葉、登熟中期の茎葉および穂において有意差が認められた。無無液区と無無化区の比較においても同様の傾向であり、登熟中期の茎葉において有意差が認められた。また、藁液液区、藁無液区、無無液区間の比較においては、有意な差は認められなかった。

第3図(b)に2010年の結果を示す。藁石無区と藁液無区の値は同等であった。また、藁液無区の値は、藁無化区



第2図 稲体の地上部乾物重の推移。

図中のバーは標準偏差を、同一生育時期の異なるアルファベット間の試験区はテューキー法により5%水準で有意差があることを示す。



第3図 稲体の地上部 T-N の推移。

図中のバーは標準偏差を、同一生育時期の異なるアルファベット間の試験区はテューキー法により 5%水準で有意差があることを示す。

との比較において、出穂期および収穫期の茎葉の値が有意に小さく、登熟中期の茎葉の値が小さい傾向であった（有意差なし）。藁液液区および藁無液区については、穂を除いて藁無化区に比べて値が常に小さく、収穫期の茎葉の値が有意に小さかった。無無液区と無無化区の比較においても同様の傾向が示された。また、藁液液区、藁無液区、無無液区間の比較においては、分げつ盛期において藁液液区の値が大きい傾向であったが（有意差なし）、その他は同等の値であった。

(3) 窒素保有量

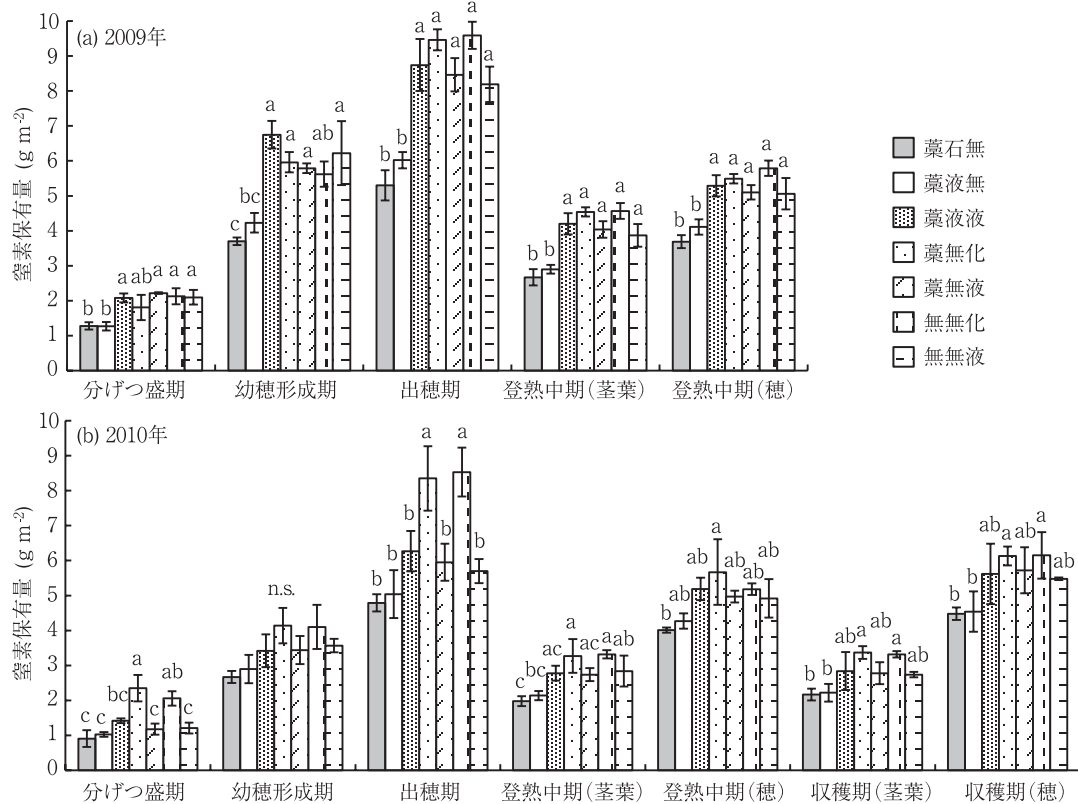
第4図(a)に2009年の稲体の地上部窒素保有量の推移を示す。藁石無区と藁液無区の比較では、分げつ盛期を除いて藁液無区の値が大きく（有意差なし）、これは乾物重の傾向（第2図(a)）と一致した。また、藁液無区の値は、藁無化区に比べて常に小さい傾向であり、分げつ盛期を除く各生育期において値が有意に小さかった。これは、乾物重と T-N（第3図(a)）両方の影響を受けた結果である。藁液液区の値は、藁無化区と比べて、追肥前の分げつ盛期と幼穂形成期において大きく、追肥後の出穂期および登熟中期においては小さい傾向であった（有意差なし）。この差は、追肥前は乾物重が大きかったこと、追肥後は T-N の低下に起因するものであった。藁無液区についても、藁液液区の場合と同様に追肥後の T-N の低下により、窒素保有

量が藁無化区に比べて小さい傾向であった（有意差なし）。無無液区については、乾物重と T-N の両方の影響を受けて、追肥後の出穂期、登熟中期の値が無無化区に比べて小さい傾向を示した（有意差なし）。藁液液区、藁無液区、無無液区間の比較においては、明瞭な傾向は見られなかった。

第4図(b)に2010年の結果を示す。藁石無区と藁液無区の比較では、僅かであるが2009年と同様に藁液無区の値が大きい傾向であった（有意差なし）。これは乾物重の傾向（第2図(b)）と一致した。また、藁液無区の値は、藁無化区に比べて常に小さい傾向であり、幼穂形成期および登熟中期の穂を除いて値が有意に小さかった。これは、出穂期以降の茎葉については、乾物重と T-N（第3図(b)）両方の影響を受けた結果であり、その他については主に乾物重の影響が大きかった。藁液液区および藁無液区については、藁無化区に比べて常に値が小さい傾向であり、分げつ盛期および出穂期において有意差が認められた。無無液区と無無化区の比較においても同様の傾向が示された。これは、乾物重と茎葉の T-N 両方の影響を受けた結果であった。藁液液区、藁無液区、無無液区間の比較においては、明瞭な傾向は見られなかった。

4. 収量構成要素および精玄米重、玄米タンパク質含有率

第6表の上段に2009年の収量構成要素、精玄米重、玄



第4図 稲体の地上部窒素保有量の推移。

図中のバーは標準偏差を、同一生育時期の異なるアルファベット間の試験区はテューキー法により5%水準で有意差があることを示す。

第6表 収量構成要素、精玄米重、玄米タンパク質含有率。

| 試験区 | 穂数 (m ⁻²) | 初数 (m ⁻²) | 登熟歩合 (%) | 千粒重 (g) | 精玄米重 (g m ⁻²) | タンパク質含有率 (%) |
|--------|--------------------------|--------------------------|-------------|------------|------------------------------|-----------------|
| 2009 年 | | | | | | |
| 藁石無 | 246 b | 19465 b | 83 a | 22.1 a | 360 c | 6.2 b |
| 藁液無 | 246 b | 21091 b | 81 a | 22.2 a | 382 bc | 6.3 b |
| 藁液液 | 320 a | 27026 a | 78 a | 22.2 a | 468 ab | 6.5 ab |
| 藁無化 | 317 a | 27927 a | 80 a | 22.3 a | 499 a | 6.6 a |
| 藁無液 | 305 ab | 26099 a | 78 a | 22.2 a | 453 abc | 6.4 ab |
| 無無化 | 301 ab | 26108 a | 78 a | 22.3 a | 456 ab | 6.5 ab |
| 無無液 | 311 a | 26087 a | 78 a | 22.2 a | 453 abc | 6.5 ab |
| 2010 年 | | | | | | |
| 藁石無 | 262 b | 17601 b | 84 a | 21.3 c | 315 a | 5.9 b |
| 藁液無 | 265 b | 18832 ab | 84 a | 21.4 bc | 339 a | 6.0 ab |
| 藁液液 | 300 ab | 21475 ab | 80 a | 21.7 ac | 375 a | 6.2 ab |
| 藁無化 | 327 ab | 24235 a | 77 a | 22.2 a | 414 a | 6.2 ab |
| 藁無液 | 273 b | 21732 ab | 81 a | 21.8 ac | 382 a | 6.1 ab |
| 無無化 | 344 a | 24362 a | 78 a | 22.1 ab | 418 a | 6.3 a |
| 無無液 | 301 ab | 21289 ab | 81 a | 21.8 ac | 377 a | 6.3 ab |

同一列の異なるアルファベット間の数値はテューキー法により5%水準で有意差があることを示す。精玄米重は、1.85 mmの縦目篩にて選別した玄米の重量である。千粒重、精玄米重、タンパク質含有率は、15% w. b. の換算値である。

米タンパク質含有率の計測結果を示す。藁石無区と藁液無区の比較においては、穂数が 246 m^2 で同じであったが、籾数がそれぞれ 19465 m^2 、 21091 m^2 であり、藁液無区において多い傾向であった。その結果、藁液無区の精玄米重は、 382 g m^2 と藁石無区の 360 g m^2 に比べて若干大きかった（有意差なし）。一方、藁液無区の穂数、籾数は、藁無化区の 317 m^2 、 27927 m^2 に比べて有意に少なく、精玄米重は藁無化区の 499 g m^2 に比べて有意に小さかった。登熟歩合および千粒重については同等であった。玄米タンパク質含有率については、藁液無区の値は 6.3% であり、藁無化区の 6.6% に比べて有意に低かった。藁液液区および藁無液区は、藁無化区に比べて籾数が若干少なく、精玄米重がそれぞれ 468 g m^2 、 453 g m^2 と小さい傾向であった。しかし、収量構成要素、精玄米重、玄米タンパク質含有率の各値に有意な差は認められなかった。また、無無液区の各値は無無化区と同等であり、有意差は認められなかった。藁液液区、藁無液区、無無液区間の比較においては、藁液液区の穂数および籾数が多く、精玄米重が大きい傾向であった（有意差なし）。

第6表の下段に、2010年の結果を示す。全試験区において2009年より籾数が少なかった。藁石無区と藁液無区の比較においては、穂数がそれぞれ 262 m^2 、 265 m^2 と同等であったが、籾数が 17601 m^2 、 18832 m^2 であり、藁液無区において多い傾向であった。その結果、藁液無区の精玄米重は、 339 g m^2 と藁石無区の 315 g m^2 に比べて若干大きく（有意差なし）、これは2009年と同様の傾向であった。また、藁液無区の穂数、籾数は、藁無化区の 327 m^2 、 24235 m^2 に比べて少なかった（有意差なし）。さらに、藁液無区の千粒重は 21.4 g であり、藁無化区の 22.2 g に比べて有意に小さかった。その結果、藁液無区の精玄米重は、藁無化区の 414 g m^2 に比べて小さい傾向であった（有意差なし）。登熟歩合およびタンパク質含有率については、有意な差は認められなかった。藁液液区および藁無液区については、穂数がそれぞれ、 300 m^2 、 273 m^2 、籾数が 21475 m^2 、 21732 m^2 、千粒重が 21.7 g 、 21.8 g と藁無化区に比べて値が小さかった（有意差なし）。その結果、藁液液区および藁無液区の精玄米重は、それぞれ 375 g m^2 、 382 g m^2 と藁無化区に比べて小さい傾向であった（有意差なし）。登熟歩合およびタンパク質含有率については同等であった。また、無無液区の穂数、籾数、千粒重は、それぞれ 301 m^2 、 21289 m^2 、 21.8 g であり、無無化区の 344 m^2 、 24362 m^2 、 22.1 g に比べて小さかった（有意差なし）。その結果、精玄米重は、 377 g m^2 と無無化区の 418 g m^2 に比べて小さくなった（有意差なし）。登熟歩合およびタンパク質含有率については有意差は認められなかった。藁液液区、藁無液区、無無液区間の比較においては、藁無液区の穂数が少なかったが、その他の収量構成要素、精玄米重、タンパク質含有率の値は同等であった。

考 察

1. 腐熟促進剤としての施用効果

2009年および2010年ともに、稲わらおよび腐熟促進剤のみで窒素供給を行った藁石無区並びに藁液無区は、生育期間中の乾物重、T-Nおよび窒素保有量が低下し（第2図、第3図、第4図）、慣行の藁無化区と比べて、穂数、籾数の収量構成要素および精玄米重の値が小さかった（第6表）。したがって、2年間の連用においては、稲わらと腐熟促進剤からの窒素供給のみで慣行の栽培体系と同等の収量を得るのは困難と判断された。また、液肥の石灰窒素の代替としての利用については、乾物重、T-N、窒素保有量、収量構成要素、精玄米重において同等以上の数値が確認されたことから、施用効果については差がないと判断される。しかし、今回の施用による液肥および石灰窒素の腐熟促進効果は明らかでなく、この点については、土壌の可給態窒素による評価が必要である。藁液液区、藁無液区、無無液区間の比較において乾物重、T-N、窒素保有量は、ほぼ同等の値であり（第2図、第3図、第4図）、2年間の連用試験では腐熟促進効果は確認されなかった。川村・中田(1974)は、12月に石灰窒素を腐熟促進剤として施用した場合に比べ4月に施用した方が、稲わらの分解および無機態窒素の有機化が促進されると報告している。一方、本研究の液肥の施用時期は、2009年が12月下旬、2010年が1月上旬であったため、溶脱や脱窒による窒素成分の損失が大きかった可能性がある。したがって、液肥の腐熟促進剤としての施用については、時期に関する検討が更に必要と考える。

2. 基肥としての施用効果

2009年においては、藁液液区、藁無液区、無無液区の幼穂形成期までの乾物重、T-N、窒素保有量は、それぞれの対照区である藁無化区、無無化区と同程度か大きい傾向であった（第2図(a)、第3図(a)、第4図(a)）。これは、液肥の $\text{NH}_4\text{-N}$ の割合が 73% （第4表）と高く、全層施用したことから、利用率が高かったことを示す結果であり、穂数も対照区と同程度確保された（第6表）。一方、河合ら(2009)は、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の割合が 79% の液肥をT-N換算で基肥として全層施用した場合の推定窒素吸収量が、分けつ盛期においては化学肥料に比べて劣り、幼穂形成期に同等になったと報告しており、稲体の窒素吸収過程に関して本研究とは異なる結果を示した。河合ら(2009)は、この窒素吸収過程について、液肥に2割程度含まれる有機態窒素が幼穂形成期までに緩やかに無機化したことが原因と考察している。本研究の液肥に含まれる有機態窒素についても同様の無機化特性であったと考えられるが、圃場試験で行った本研究は土壌由来の無機態窒素が多く、稲体の窒素吸収を補ったため、窒素保有量が化学肥料と同等であったと推察される。なお、河合ら(2009)の試験に用いた土壌は、ポット栽培に繰り返し使用された水田土壌であったため

に、無機態窒素の供給が少なかったと考えられる。また、善明ら（2009）は $\text{NH}_4\text{-N}$ の割合が 63% の消化液を T-N 換算で基肥として全層施用した際に、草丈、茎数、SPAD 値の生育指標が化学肥料と同等であったことから、消化液に含まれる有機態窒素は、容易に無機化して稲体に吸収される形態であると推察している。上岡・亀和田（2011）は $\text{NH}_4\text{-N}$ の割合が約 7 割の消化液を $\text{NH}_4\text{-N}$ 換算で基肥として全層施用した場合、生育が化学肥料と同等であったと報告している。さらに、この結果から消化液中の有機態窒素は水稻の生育に影響を及ぼさないと結論づけている。しかしながら、上岡・亀和田（2011）の追肥前（出穂 15 日前）の稲体の窒素吸収量の結果は、統計的に有意ではないが消化液施用区の値が大きい傾向であり、有機態窒素が栄養生長期に無機化し、稲体に吸収された可能性を示唆している。一方、古賀ら（2010）は、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の割合が 76% の消化液を T-N 換算で基肥として全層施用した場合に、茎数が化学肥料の半分に抑制され、穂数の減少を招いたと報告している。しかし古賀ら（2010）は、消化液を基肥として流入施用した圃場試験において、茎数が化学肥料と同等であったと報告している。このことから、ポット栽培の結果は、実験方法に起因する $\text{NH}_4\text{-N}$ の揮散や流亡等の窒素成分の損失が影響した可能性が高いと考えた。したがって、消化液に含まれる有機態窒素は、液肥と同様に栄養生長期に無機化する形態であると推察されるが、両者の無機化特性については、培養試験による検証が必要である。

2010 年においては、藁液液区、藁無液区、無無液区の分けつ盛期および幼穂形成期の乾物重（第 2 図（b））、T-N（第 3 図（b））は、化学肥料を施用した対照区に比べて小さい傾向にあり、窒素保有量は分けつ盛期に有意に小さく、幼穂形成期は小さい傾向であった（第 4 図（b））。そのため、穂数は、化学肥料を施用した対照区に比べて少ない傾向であった（有意差なし）（第 6 表）。これらの結果は、液肥の $\text{NH}_4\text{-N}$ の割合が 33%（第 4 表）と非常に低かったことが影響したものである。藁液液区、藁無液区、無無液区の窒素保有量は、分けつ盛期においては基肥を施用していない藁石無区および藁液無区と同等であったが、幼穂形成期には化学肥料を施用した対照区に近づいた（第 4 図（b））。これは、液肥に含まれる有機態窒素が、幼穂形成期までに緩やかに無機化して稲体に吸収されたことを示す結果である。しかし、液肥の $\text{NH}_4\text{-N}$ の割合が低い場合は、以下のように生育初期の分けつが抑制されたために、幼穂形成期の窒素保有量が低下したと推察される。分けつ盛期の株当たりの茎数は、藁無化区の 18.4 本、無無化区の 18.0 本に対し、藁液液区が 12.6 本、藁無液区が 12.1 本、無無液区が 11.3 本であり、基肥を施用していない藁石無区の 12.2 本および藁液無区の 12.1 本と同程度に分けつが抑制された。千葉ら（1979）は、平均気温 20°C において、根圏土壌の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が $6\text{ mg}/100\text{ g}$ 乾土以下の条件では、移植後 20 日頃までは茎数が $\text{NH}_4\text{-N}$ の濃度低下とともに減少

すると報告している。本研究の分けつ期の気温は 27.8°C （第 3 表）であり、千葉ら（1979）の実験条件とは異なるが、液肥の $\text{NH}_4\text{-N}$ の割合が低く、根圏土壌の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が低かったために分けつが抑制された可能性は高いと考えた。また、生育初期の分けつの抑制は、幼穂形成期の茎数減少につながり、乾物重の減少を通して窒素保有量の低下を招いたと考えられる。なお、幼穂形成期の藁液液区、藁無液区、無無液区の茎数は、対照区に比べて約 2.5 本株⁻¹ 少なかった。さらに、窒素保有量が低下した理由として、2010 年の移植日が 2009 年に比べて約一週間遅く、栄養生長期が短かったことから、液肥中の有機態窒素が幼穂形成期までに完全に無機化せず、稲体の窒素吸収に影響した可能性も考えられる。

以上から、液肥を基肥として全層施用する場合は、液肥中の $\text{NH}_4\text{-N}$ の割合が 7 割程度あれば、乾物重、T-N、窒素保有量は化学肥料と同等になり、穂数も同程度確保できると考えられる。ただし、液肥中の有機態窒素は、幼穂形成期までの期間に緩やかに無機化する性質であることから、土壌からの無機態窒素の供給が少ない場合は、分けつ盛期等の生育初期に窒素保有量が低下する可能性がある。一方、液肥の $\text{NH}_4\text{-N}$ の割合が著しく低い場合は、全窒素換算で施用すると、生育初期の分けつが抑制され、乾物重、T-N、窒素保有量が化学肥料に比べて低下し、穂数の減少を招くことが示唆された。したがって、この場合は $\text{NH}_4\text{-N}$ 換算で施用量を決定すべきであるが、栄養生長期に液肥中の有機態窒素が多量に無機化することが予想されるので、生育への影響については更に検討が必要である。

3. 追肥としての施用効果

2009 年においては、液肥を窒素肥料として施用した藁液液区、藁無液区、無無液区の出穂期および登熟中期の地上部 T-N および窒素保有量は、それぞれの対照区である藁無化区、無無化区に比べて小さい傾向を示した（第 3 図（a）、第 4 図（a））。追肥に施用した液肥は、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の割合が 61% と基肥に比べ低く（第 4 表）、表面施用されたことから、利用率が低下したと考えた。善明ら（2009）は、消化液の表面施用により見かけの施肥窒素利用率が低下することを報告しており、その理由として $\text{NH}_4\text{-N}$ の揮散損失を挙げている。須永ら（2009）は、ライシメータ試験により、飼料イネに消化液を施用した際のアンモニアの揮散量を測定している。基肥と追肥の合計全窒素施用量が 30 g m^{-2} の条件で、施用窒素の 58% がアンモニアとして大気に放出され、これは化学肥料を同条件で施用した試験区の 8.5% に比べて著しく大きかった。須永ら（2009）の実験においては、全層施用された基肥と表面施用された追肥各々の揮散損失の割合については明らかにされていないが、善明ら（2009）および本研究の基肥および追肥の窒素保有量の結果（第 4 図（a））を踏まえると、追肥時に揮散損失が卓越していたと推察される。一方、安西（1987）は、生豚尿を追肥とし

て施用した場合、収穫時の稲体の窒素吸収量が化学肥料を施用した場合と同等であったと報告している。しかし、本研究および善明ら（2009）が全窒素換算で施肥窒素量の条件を化学肥料施用区と一致させたのに対し、安西（1987）は $\text{NH}_4\text{-N}$ 換算で条件を一致させており、この違いが結果の差として現れたと考える。ただし、安西（1987）は、葉色の変化から、生豚尿施用区の窒素吸収が化学肥料施用区に比べて緩やかであったことを確認している。このことから、安西（1987）の結果は、一部の $\text{NH}_4\text{-N}$ が揮散損失し、20%程度含まれる有機態窒素が緩やかに無機化した後に吸収され、収穫時の窒素保有量が化肥施用区と同等になったと推察される。なお、生豚尿は成分の80%程度が $\text{NH}_4\text{-N}$ である（安西ら1985）。登熟歩合、千粒重、精玄米重、玄米タンパク質含有率に関しては、藁液液区および藁無液区と藁無化区の比較において、精玄米重が若干小さい傾向を示したが、その他の指標については同等であった。無無液区については、無無化区と同等の値を示した。

2010年の追肥に施用した液肥は、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の割合が26%（第4表）と非常に低かった。そのため、藁液液区、藁無液区、無無液区の出穂期（追肥19日後）における乾物重およびT-Nは、化学肥料を施用した対照区に比べて小さい傾向であった（藁無液区、無無液区の乾物重のみ有意に小さい）。その結果、窒素保有量は、対照区に比べて有意に小さく、肥料を施用していない藁石無区および藁液無区に近い水準であった（第2図（b）、第3図（b）、第4図（b））。一方、登熟中期、収穫期における乾物重、茎葉のT-N、窒素保有量の各値は、対照区に比べて小さい傾向であったが、有意差が認められたのは、藁液液区、藁無液区の収穫期の茎葉のT-Nについてのみであった。これは、施肥後の時間経過とともに、液肥の効果が現れたことを示す結果であり、2010年の液肥中の有機態窒素は、緩やかに無機化したと推察される。また、藁液液区、藁無液区、無無液区の緩やかな窒素吸収過程は、葉身のSPAD値に反映された。出穂期のSPAD値は、35.7（藁石無区）、34.5（藁液無区）、36.8（藁液液区）、38.1（藁無液区）、36.5（無無液区）、40.7（藁無化区）、40.9（無無化区）であり、追肥に化学肥料を施用した試験区、液肥を施用した試験区、肥料を施用しなかった試験区の順番で窒素栄養状態が低下していた。さらに、2010年は籾数が2009年にくらべて少ないにもかかわらず、化学肥料を追肥に施用した試験区を除く、藁石無区、藁液無区、藁液液区、藁無液区、無無液区において千粒重が低下した（第6表）。これは、窒素栄養状態が低下した試験区において登熟期の高温が影響したと考えた。2010年の出穂後20日間および30日間の平均気温はそれぞれ、26.7℃（第3表）、25.2℃（データ略）と2009年に比べて3℃程度高く、若松ら（2007）が、品種ヒノヒカリにおいて出穂後30日間の平均気温が26℃以上の条件で、千粒重が急激に低下するとした報告に近い条件であった。なお、2010年の全試験区を通して、籾数が2009年に

比べて少なかったのは、移植日が約一週間遅く、栄養生長期間が短かったことが、幼穂形成期あるいは出穂期までの窒素保有量低下を招いたためと考えた（第4図）。和田（1969）は穎花分化後期の稲体の窒素吸収量と分化穎花数が高い正の相関（ $r=0.970$ ）を示すことを報告している。角重ら（1993）は、品種ヒノヒカリについて、穂揃い期の窒素吸収量と籾数が高い正の相関（ $r=0.927$ ）を示すことを報告している。また、これらの報告から、藁液液区、藁無液区、無無液区の籾数が化学肥料を施用した対照区に比べて少なかったのは、追肥後の窒素保有量が低下したことも原因と考えられる。2009年の藁液液区および藁無液区の籾数が藁無化区に比べて少なかったこと、無無液区において穂数が無無化区に比べて若干多かったにもかかわらず、籾数が僅かに少なかったことについても、追肥後の窒素保有量が低下したためと考えられる。さらに、藁液液区、藁無液区、無無液区は、化学肥料を施用した対照区に比べて、精玄米重が小さい傾向であった。

以上から、液肥を追肥として表面施用する場合は、揮散損失を考慮に入れる必要があるという、メタン発酵消化液に関する報告と同様の結果が示された。この揮散損失の問題については、安西（1987）の結果から、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の含有割合が8割程度と高ければ、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 換算で追肥量を決定することにより、化学肥料と同等の肥料効果が期待できると考えられる。すなわち、液肥中に含まれる2割程度の有機態窒素成分が揮散損失分を補うと考えられる。一方、2010年のように液肥中の $\text{NH}_4\text{-N}$ の割合が低い場合は、水稻の窒素吸収が緩やかになり登熟期の窒素栄養状態が低下するため、高温条件において千粒重の低下を招くことが示唆された。また、追肥後の稲体の窒素保有量の低下は、籾数減少の原因となることが推察された。さらに、これらの収量構成要素の低下は、基肥による穂数の減少も含め、精玄米重の減少要因になると考えられた。したがって、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の割合が低い場合についても、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 換算で追肥量を決定するのが妥当と考えられるが、生殖生長期間に液肥中の有機態窒素が多量に無機化することが予想されるので、籾数、登熟歩合、千粒重の収量構成要素、玄米タンパク質含有率への影響については更に検討が必要である。

4. 液肥の成分変動について

2010年の基肥および追肥に用いた液肥のT-Nは、それぞれ2009年の50%、36%と顕著に低下した。また、T-Nに占める $\text{NH}_4\text{-N}$ の割合は、2009年が6~7割であったのに対し、2010年は3割前後と大きく低下した（第4表）。この液肥の成分の変動が、2009年と2010年の試験結果に大きな影響を与えた。ここでは、液肥の成分が変動した理由について考察する。

液肥製造施設がある星野村では、2008年度~2009年度の期間において、星野村浄化槽整備補助事業により急速に浄化槽および水洗式便所の設置が進んだ。浄化槽は、し尿

および生活排水の浄化処理を行う設備で、星野村においては、処理水は通常河川に放流される。したがって、浄化槽から液肥製造施設に持ち込まれる原料は、年1回の洗浄時に洗浄水とともに回収される希釈された浄化槽汚泥となる。この浄化槽汚泥の回収量が多くなると、原料の希釈により液肥のT-Nが低下することになる。浄化槽汚泥の回収量は毎月の変動が大きく、星野村役場提供のし尿・浄化槽汚泥回収量の資料によると、2010年の2月と3月の回収量が特に多かった（2009年の同月の20%増）。液肥の製造は、原料の回収から2か月程度要することから、この時期の浄化槽汚泥の回収量増加が基肥時のT-N低下の原因と推察された。NH₄-Nの割合が低かった理由については、原料回収量の増加により、成熟槽における原料の発酵期間が短くなり、有機態窒素が十分無機化されなかったためと考えた。また、T-NおよびNH₄-Nの割合が低かった原因として、曝気過程で硝化・脱窒が起こった可能性も考えられたため、2012年6月18日に星野村の施設で採取した液肥を再度分析した。その結果、T-Nが0.251 g L⁻¹、NH₄-Nが0.176 g L⁻¹、硝酸が0.021 g L⁻¹であり、硝酸が8%程度含まれた。成分組成が違ふことから、この結果から2010年の液肥の硝酸態窒素の割合について推察することは難しいが、この時の曝気期間は、原料回収量から考えて通常より短かったと思われる。他の期間に比べて極端に硝化や脱窒が起こったとは考えにくい。また、2010年の稲体の地上部窒素保有量の推移（第4図）から、液肥の硝酸成分が脱窒して窒素吸収量が低下したのではなく、有機態窒素成分が緩やかに無機化し、稲体に吸収されたと考えるのが妥当と思われる。追肥に使用した液肥についても同様の理由でT-NおよびNH₄-Nの割合が低下したと推察されるが、し尿・浄化槽汚泥回収量の資料からは十分な裏付けを得ることができなかった。

以上から、液肥の成分変動には、浄化槽汚泥の回収量の変動が影響していると推察された。T-NおよびNH₄-Nの成分低下は、液肥の散布量を増加させ、施用効果の見積もりを困難にすることから、液肥の利用を促進する上で大きな問題である。この問題については、液肥の利用時期を考慮に入れて、浄化槽汚泥の回収時期と量を調整することにより原料の希釈と発酵期間の短期化を防ぎ、成分の安定化を図るなどの対策が必要と考える。

謝辞：本研究の遂行に当たり、八女市社会福祉協議会星野支所の樋口唯文氏には、実験材料の液肥および原料回収に関する資料を提供頂きました。八女市市民生活福祉課市民生活福祉係星野支所の田中政弘氏には、合併浄化槽の設置状況について情報提供頂きました。九州大学大学院農学研究家畜生産生態学分野の中野豊助教には、作物試料の粉碎作業においてご協力頂きました。九州大学農学部附属農場技術職員梶原良徳氏、山崎敦子氏、梶原さゆり氏、四宮直子氏には、試験水田の管理、収量調査においてお世話になりました。ここに記して感謝の意を表します。

引用文献

- 安西徹郎・戸村雅彦・松本直治 1985. 水田に対する豚尿の実用的施用について. 土肥誌 56: 64-67.
- 安西徹郎 1987. 水稲に対する豚尿の追肥としての施用効果. 土肥誌 58: 369-373.
- Cataldo, D.A., L.E. Schrader and V.L. Youngs 1974. Analysis by digestion and colorimetric assay of total nitrogen in plant tissues high in nitrate. *Crop Science* 14: 854-856.
- 千葉隆久・丹野耕一・高橋正道 1979. 水稲初期生育に及ぼす根圏窒素濃度の影響について. 日作東北支部報 22: 21-22.
- 中鉢富夫・浅野岩夫・及川勉 1986. 葉緑素計による水稲（ササニシキ）の窒素栄養診断. 土肥誌 57: 190-193.
- 土壤養分測定法委員会 1994. 肥沃度測定のための土壤養分分析法. 養賢堂, 東京. 186-195.
- 橋元秀教・松崎敏英 1976. 土づくり講座5 有機物の利用. 農山漁村文化協会, 東京. 106.
- 広瀬春朗 1973. 各種植物遺体の有機態窒素の畑状態土壌における無機化について. 土肥誌 44: 157-163.
- 角重和浩・山本富三・井上恵子・田中浩平 1993. ヒノヒカリの窒素栄養診断—第1報 ヒノヒカリの窒素吸収量と生育・収量との関係—. 福岡県農総試研報 A-12: 15-18.
- 上岡啓之・亀和田國彦 2011. 水稲コシヒカリに対するメタン発酵消化液の基肥利用. 土肥誌 82: 31-40.
- 河合憲三・平井康丸・首藤大比古・望月俊宏・山川武夫・濱上邦彦 2009. 水稲のポット栽培による液状堆肥の窒素成分の肥料特性評価. 九大農芸誌 64: 103-107.
- 川村戈十二・中田均 1974. 水田における有機物施用に関する研究—（第2報）稲わら添加石灰窒素の有機化と無機化過程—. 滋賀農試研報 16: 26-33.
- 古賀巧樹・松尾光弘・寺尾寛行・小川紹文・日吉健二・藤東清一・黒木義一・西脇亜也 2010. 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. 宮崎大学農学部研究報告 56: 15-27.
- 西尾道徳 2007. 堆肥・有機質肥料の基礎知識. 農文協, 東京. 20-21, 27-28, 86-90.
- 農業機械学会 1996. 生物生産機械ハンドブック. コロナ社, 東京. 790-791.
- 奥野忠一 1978. 実験計画法. 養賢堂, 東京. 65-81.
- 大山卓爾・伊藤道秋・小林京子・荒木創・安吉佐和子・佐々木修・山崎拓也・曾根久美子・種村竜太・水野義孝・五十嵐太郎 1991. 硫酸-過酸化水素分解法による植物、堆肥中に含まれるN, P, Kの分析. 新大農研報 43: 111-120.
- 須永薫子・吉村季織・侯紅・Khin Thawda WIN・田中治夫・吉川美穂・渡邊裕純・本林隆・加藤誠・西村拓・豊田剛己・細見正明 2009. 飼料イネ栽培へのメタン発酵消化液の多量投入が土壌、水質、大気汚染に及ぼす影響. 土肥誌 80: 596-605.
- 和田源七 1969. 水稲収量成立におよぼす窒素栄養の影響—とくに出穂期以降の窒素の重要性について—. 農業技術研究所報告 A16: 27-167.
- 若松謙一・佐々木修・上蘭一郎・田中明男 2007. 暖地水稲の登熟期間の高温が玄米品質に及ぼす影響. 日作紀 76: 71-78.
- 山内光哉 2008. 心理・教育のための分散分析と多重比較. サイエンス社, 東京. 85-87.
- 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稲の生育に及ぼす影響. 九大農芸誌 64: 1-5.

Evaluation of the Effects of Maturity Acceleration of Rice Straw and Nitrogen Fertilizer on Application of Aerobically Fermented Liquid Fertilizer in Rice Production: Yasumaru HIRAI¹⁾, Keisuke SARUTA²⁾, Kenzo KAWAI³⁾, Hirohiko SHUTO⁴⁾, Takeo YAMAKAWA¹⁾, Toshihiro MOCHIZUKI¹⁾, Eiji INOUE¹⁾, Takashi OKAYASU¹⁾ and Muneshi MITSUOKA¹⁾ (¹⁾*Fac. of Agr., Kyushu Univ., Hakozaki 6-10-1, Fukuoka 812-8581, Japan;* ²⁾*Yanmar Agricultural Machinery Manufacturing Co., Ltd.;* ³⁾*Ajinomoto Co., Inc.;* ⁴⁾*Kizakura Co., Ltd.*)

Abstract : There is growing concern to promote the use of aerobically fermented liquid fertilizer produced from human waste and sludge to reduce the cost, environmental load, and energy consumption in rice production. We tested the maturity accelerating effects on rice straw and effects as a nitrogen fertilizer by applying liquid fertilizer in 2009 and 2010. The maturity accelerating effects were not significant in terms of dry weight, total nitrogen content (T-N), and nitrogen uptake. When liquid fertilizer, which had an ammonium nitrogen ($\text{NH}_4\text{-N}$) ratio of approximately 70%, was incorporated into the plow layer of the soil as a basal fertilizer, the nitrogen fertilizer effect and panicle number were equivalent to those for chemical fertilizers. However, when liquid fertilizer with a low $\text{NH}_4\text{-N}$ ratio was applied, the dry weight, T-N, and nitrogen uptake were lowered resulting in reduced panicle number. When applied as a top-dressing on the soil surface, nitrogen uptake decreased because of $\text{NH}_4\text{-N}$ loss through volatilization. This decrease in nitrogen uptake may have reduced spikelet number. Nitrogen uptake slowed under the low $\text{NH}_4\text{-N}$ ratio, and nitrogen nutrition conditions deteriorated during the ripening period. This may have lowered 1000-grain weight under the high average temperature conditions in 2010 (26.7°C during the 20-d period after heading). The yield tended to be low because of these reductions in yield components. Nitrogen fertilizer effects were affected by $\text{NH}_4\text{-N}$ ratio, whose fluctuation is considered problematic.

Key words : Aerobically fermented liquid fertilizer, Biomass, Maturity accelerator, Nitrogen fertilizer, Rice production, Rice straw.
