

湛水条件下における有機質肥料からの窒素無機化量の推定

大橋祥範¹⁾・大竹敏也¹⁾

摘要: 有機質肥料の効果的な利用を目的として、大豆油かす、なたね油かす、あまに油かす、ひまし油かす、脱脂米ぬか、グルテンフィードの湛水条件下における窒素無機化特性値を算出し、窒素無機化量の推定モデルを作成した。これにより、これまで明確でなかった湛水条件下での有機質肥料からの窒素無機化量の推定が可能となった。湛水条件では畑条件と比べて窒素無機化が遅くなる傾向を示したことから、同じ有機質肥料でも、水稲栽培では、畑栽培と窒素肥効が異なると考えられた。

キーワード: 有機質肥料、湛水条件下、窒素無機化量、窒素無機化特性値、反応速度論的解析

Estimation of Amount of Nitrogen Mineralization from Organic Fertilizers under Flooded Soil Conditions

OHASHI Yoshinori and OTAKE Toshiya

Abstract: For the effective use of organic fertilizer, nitrogen mineralization values under flooding conditions of soybean, canola, flaxseed, and castor oil residues, as well as of rice bran solvent and gluten feed were calculated, and an estimation formula for the nitrogen mineralization amount was created. The amount of nitrogen mineralization from organic fertilizers under flooded soil conditions could then be estimated, which was not possible previously. Under flood conditions, nitrogen mineralization tended to be slower than that in the upland condition. Therefore, even if the same organic fertilizer was used, the effect of nitrogen fertilizer in paddy rice cultivation would be different from that in upland cultivation.

Key Words: Organic fertilizer, Under flooded soil conditions, Amount of nitrogen mineralization, Nitrogen mineralization parameters, Kinetic analysis

緒言

みどりの食料システム戦略では、2050年までに輸入原料や化石燃料を原料とした化学肥料の使用量の30%低減を目指すと考えられた。また、次世代有機農業に関する技術を確立することで、耕地面積に占める有機農業の取組面積の割合を25%に拡大することを目指すと考えられた。

有機農業や減化学肥料栽培など環境保全型農業に取り組む生産者を中心に、以前から有機質肥料への関心は高い¹⁻³⁾。科学的な知見により、有機質肥料の積極的な利用を推進できれば、これら目標の達成に貢献できる。

有機質肥料は土壌中での分解にともなって肥効が発現するため、その使い方は勘と経験に頼ることが多く、施肥設計が困難である。そのため、保温静置培養で得られる窒素無機化量を反応速度論的に解析して推定する手法によって有機質肥料からの窒素無機化量を明らかにする試験が、古くから行われてきた⁴⁻⁸⁾。しかし、有機質肥料は種類が多く、未だその肥効特性が明らかでないものが多い。特に、湛水条件下での肥効特性に関する知見は、畑条件下のそれと比べて少ない^{9,10)}。

そこで、本試験では有機質肥料の効果的な利用を目的として、現在、愛知県内で流通している主要な植物質由来の有機質肥料6種の湛水条件下における窒素無機化特性値を算出し、窒素無機化量の推定式を作成した。

材料及び方法

1 有機質肥料

本試験では有機質肥料として、大豆油かす、なたね油かす、あまに油かす、ひまし油かす、脱脂米ぬか、グルテンフィードの6種を供試した(表1)。肥料の品質の確保等に関する法律に基づく普通肥料の公定規格では、それぞれ大豆油かす及びその粉末、なたね油かす及びその粉末、あまに油かす及びその粉末、ひまし油かす及びその粉末、米ぬか油かす及びその粉末、副産動植物質肥料に分類された。本試験の有機質肥料には、いずれも愛知県内で流通している製品を用いた。

供試した有機質肥料は、水分、全炭素含量、全窒素含量を測定した。全炭素と全窒素含量は全炭素・全窒素/水素同時定量装置(MACRO CORDER JM1000CN、ジェイ・サイエンス・ラボ株式会社、京都)を用い、乾式燃焼法¹¹⁾で測定し

た。

2 培養試験

培養試験の培土には、愛知県豊橋市飯村町(東三河農業研究所)の露地畑土壌(細粒質台地黄色土、土性LiC)を用いた。

風乾土20 g に有機質肥料を乾土1 kgあたり窒素250 mg相当量混合し、培養びん(内径22 mm、高さ90 mm)に充填した。蒸留水を20 mL入れた後、軽くかきまぜて土壌内の空気を抜き、ゴム栓で密閉して恒温器内で静置培養した。培養温度は10℃、20℃、30℃の3水準とし、培養期間は0、7、14、28、56、84、112、140日とした。この期間、培養びん内に発生したガスは適宜除去した。

培養期間終了後、120 mLの振とうびんに、培養びんの内容物すべてを200 g L⁻¹塩化カリウム溶液と蒸留水で洗いこんだ。このとき、振とうびんの塩化カリウム溶液の最終濃度は100 g L⁻¹とした。その後、振とうびんを30分間水平振とうし、No.5Bのろ紙でろ過した。得られたろ液中のアンモニア態窒素を連続流れ分析装置(AA3型、ビーエルテック株式会社、大阪)を用い、インドフェノール青吸光度法¹²⁾で測定した。

有機質肥料由来の窒素無機化量は、有機質肥料を混和した土壌の値から同じ培養期間を経た有機質肥料を混和しない土壌の値を差し引いて求めた。その値を投入した全窒素量で除して、みかけの窒素無機化率を算出した。

3 反応速度論的解析

培養試験で温度別に得られた窒素無機化率については、培養日数を温度変換日数法¹³⁾により25℃に変換し、それらを無機化曲線に残差平方和が最小となるように最小二乗法であてはめた。この曲線として、有機態窒素の無機化の基本的なモデルである単純型モデル、単純並行型モデル、有機化・無機化並行型モデル^{4,14)}の3つを設定した(表2)。

最適モデルは、統計モデルの良さを評価するための指標である赤池情報量規準(AIC)が、3つのうち最小となるモデルとした。なお、これらの解析にあたっては、表計算ソフト「EXCEL」のソルバー機能(反復計算を行い解を求める機能)を利用した⁷⁾。

4 土壌分析

培養試験に供試した土壌の化学性を分析した¹²⁾。分析項目はpH、EC、全炭素、全窒素、培養発現窒素、可給態リン酸、CEC、交換性陽イオン(石灰、苦土、加里)とした(表3)。

pHはガラス電極法で、ECは1:5水浸出法で電気伝導度率

表1 供試有機質肥料の成分組成

肥料名	肥料の種類	水分(%)	全炭素含量(%)	全窒素含量(%)	C/N 比
大豆油かす	大豆油かす及びその粉末	9.8	45.8	8.7	5.3
なたね油かす	なたね油かす及びその粉末	11.2	46.1	6.5	7.0
あまに油かす	あまに油かす及びその粉末	8.9	46.3	5.8	7.9
ひまし油かす	ひまし油かす及びその粉末	9.0	46.4	5.1	9.1
脱脂米ぬか	米ぬか油かす及びその粉末	10.5	41.8	3.3	12.5
グルテンフィード	副産動植物質肥料	7.1	44.8	3.5	12.6

表2 有機態窒素の無機化モデル

名称	式 ¹⁾
単純型モデル	$N=N_0(1-\exp(-k\times t))+b$ $t=\exp(E_a(T-298)/(8.317\times T\times 298))$
単純並行型モデル	$N=N_1(1-\exp(-k_1\times t_1))+N_2(1-\exp(-k_2\times t_2))+b$ $t_1=\exp(E_{a1}(T-298)/(8.317\times T\times 298))$ $t_2=\exp(E_{a2}(T-298)/(8.317\times T\times 298))$
有機化・無機化並行型モデル	$N=N_0(1-\exp(-k\times t))-N_{im}(1-\exp(-k_{im}\times t_{im}))+b$ $t=\exp(E_a(T-298)/(8.317\times T\times 298))$ $t_{im}=\exp(E_{a_{im}}(T-298)/(8.317\times T\times 298))$

1) N: 窒素無機化率(%) N_0, N_1, N_2 : 可分解性有機態窒素量(%) N_{im} : 有機化窒素量(%)
 k, k_1, k_2 : 25°Cにおける窒素無機化速度定数(day^{-1}) k_{im} : 25°Cにおける窒素有機化速度定数(day^{-1})
 t, t_1, t_2 : 窒素無機化反応における温度変換日数(day) t_{im} : 窒素有機化反応における温度変換日数(day)
b: 無機態窒素量(%) E_a, E_{a1}, E_{a2} : 窒素無機化反応における見かけの活性化エネルギー(J mol^{-1})
 $E_{a_{im}}$: 窒素有機化反応における見かけの活性化エネルギー(J mol^{-1}) T : 絶対温度(°C)

表3 供試土壌の化学性

pH	EC (1:5)	全炭素	全窒素	可給態窒素 ¹⁾	可給態リン酸	CEC	交換性塩基(mg kg^{-1})		
	dS m^{-1}	g kg^{-1}	g kg^{-1}	mg kg^{-1}	mg kg^{-1}	cmolc kg^{-1}	CaO	MgO	K ₂ O
6.5	0.04	8.7	1.0	29.3	271	11.8	1223	230	314

1) 30°C 4週間生土湛水培養

・pHメータ(WM-50EG、東亜ディーケーケー株式会社、東京)を用いて測定した。全炭素と全窒素含量は全炭素・全窒素測定装置(N.C-ANALYZER SUMIGRAPH NC-22F、住化分析センター株式会社、大阪)を用い、乾式燃焼法で測定した。可給態窒素含量は保温静置法(水田土壌)に準じて、連続流れ分析装置(AA2型、ビーエルテック株式会社、大阪)を用いて培養試験と同様に測定した。可給態リン酸含量はトルオーグ法で抽出した後、分光光度計(UV-160A、島津製作所、京都)を用い、モリブデン青吸光光度法で測定した。CECはセミマイクロSchollenberger法に準じて測定し、この1N酢酸アンモニウム浸透液を用いて交換性陽イオンを原子吸光光度計(Z-5310、株式会社日立ハイテクノロジーズ、東京)を用いて測定した。

試験結果

1 有機質肥料の成分

有機質肥料の成分組成を表1に示した。全窒素含量は、大豆油かすが8.7%と最も多かった。次いで、なたね油かす、あまに油かす、ひまし油かすが、5.1%~6.5%の範囲であった。脱脂米ぬかとグルテンフィードは、それぞれ3.3%と3.5%と少なかった。

C/N比は、グルテンフィードと脱脂米ぬかが、それぞれ12.6と12.5と大きかった。次いで、ひまし油かすが、9.1と大きく、あ

まに油かすとなたね油かすは、それぞれ7.9と7.0であった。大豆油かすが、5.3と最も小さかった。

2 培養試験に基づく窒素無機化推定式の作成

温度別の培養試験で得られた窒素無機化率を反応速度論的に解析した結果、図1に示した単純型モデルに最も適合し、得られた窒素無機化特性値を表4に示した。

なお、有機化・無機化並行型モデルは、いずれの有機質肥料も、有機化窒素量を示す N_{im} が0%となり、適合しなかった。単純並行型モデルは、なたね油かす以外の有機質肥料で、可分解性有機態窒素量 N_2 が0%となり、適合しなかった。なたね油かすは、単純型モデルと単純並行型モデルに適合したが、赤池情報量規準(AIC)がそれぞれ156、157であったため、単純型モデルが最も適合すると判定した。

有機質肥料に含まれる窒素のうち、土壌施用後に無機化する窒素の最大量を意味する可分解性有機態窒素量 N_0 は、大豆油かすが、69.3%と最も多かった。次いで、ひまし油かす、あまに油かす、なたね油かすが、それぞれ66.6%、61.5%、60.7%であった。脱脂米ぬかは、46.2%であり、グルテンフィードは31.7%と最も少なかった。いずれの肥料も全窒素量のすべてが無機化することはなかった。

算出された25°Cにおける窒素無機化定数 k は、なたね油かすが 0.055 day^{-1} と最も大きかった。次いで、あまに油かすが、 0.049 day^{-1} 、大豆油かすとひまし油かすが、 0.047 day^{-1} であった。グルテンフィードは、 0.031 day^{-1} であり、脱脂米ぬか

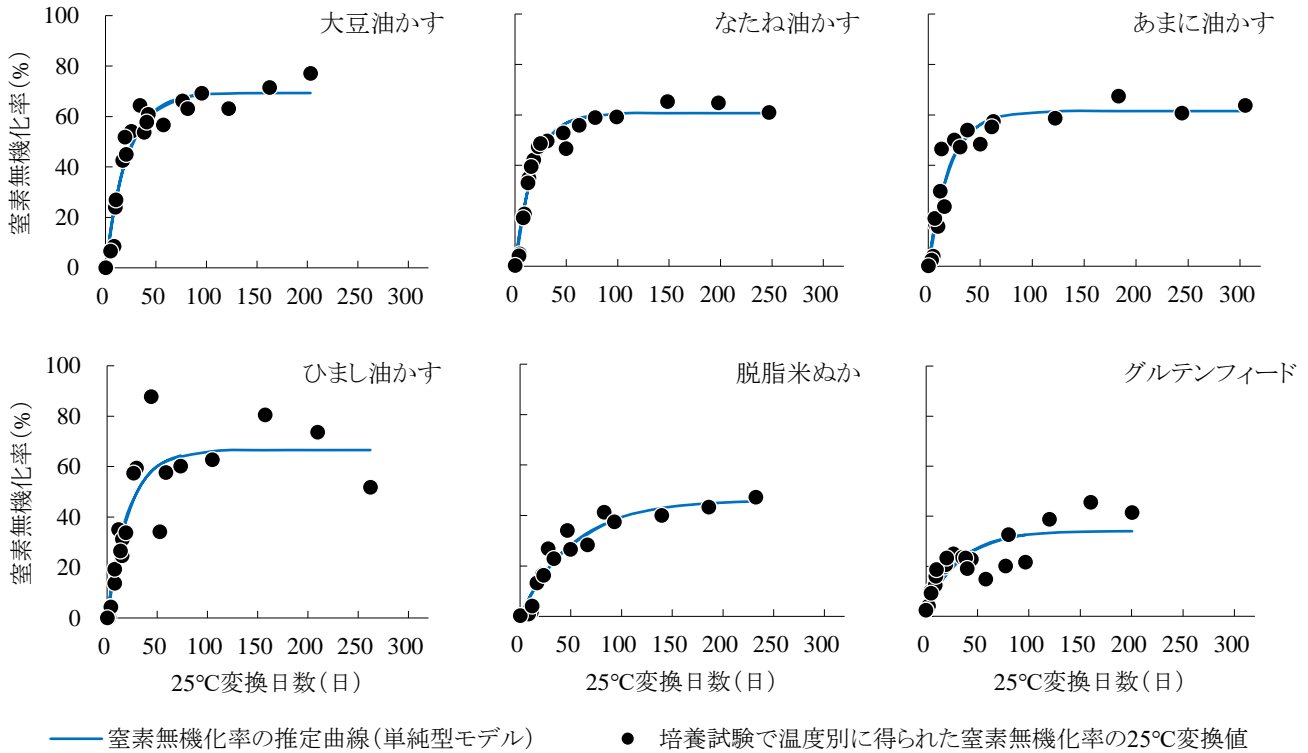


図1 温度別の培養試験で得られた窒素無機化率を反応速度論的に解析した結果

表4 供試有機質肥料の湛水条件下における窒素無機化特性値

肥料名	N_0 (%)	k (day^{-1})	b (%)	E_a (J mol^{-1})
大豆油かす	69.3	0.047	0.0	55810
なたね油かす	60.7	0.055	0.0	85306
あまに油かす	61.5	0.049	0.0	116891
ひまし油かす	66.6	0.047	0.0	94052
脱脂米ぬか	46.2	0.019	0.0	76039
グルテンフィード	31.7	0.031	2.4	53809

は、 0.019 day^{-1} と最も小さかった。

施用前の有機質肥料に含まれる無機態窒素量を意味する無機態窒素量 b は、グルテンフィードのみが2.4%であり、他はいずれも0.0%であった。

窒素無機化反応における見かけの活性化エネルギー E_a は、あまに油かすが、 $116891 \text{ J mol}^{-1}$ と最も大きかった。次いで、ひまし油かすが、 94052 J mol^{-1} 、なたね油かすが、 85306 J mol^{-1} 、脱脂米ぬかが、 76039 J mol^{-1} であった。大豆油かすは、 55810 J mol^{-1} で、グルテンフィードは 53809 J mol^{-1} と最も小さかった。

考察

1 窒素無機化特性値の妥当性

本試験で得られた窒素無機化特性値の N_0 と b の和を最大無機化窒素量とし、有機質肥料の全窒素含量とC/N比との関係を図2に示した。同様に、 k とそれらの関係を図3に示し

た。これらからC/N比と最大無機化窒素量及び k との間に負の相関関係が認められた。

大橋ら¹⁵⁾は、畑条件下での有機質肥料の窒素無機化特性値を本試験と同様の手法で算出し、栽培試験によって、これら特性値が妥当であることを確認した。また、この特性値を用いて、C/N比と最大無機化窒素量及び k との間に負の相関関係が認められたとした。前述のとおり本試験でも、同様の負の相関関係が認められており、本試験で得られた窒素無機化特性値の妥当性は高いと考えられた。

小田ら¹⁰⁾は、本試験と同様に湛水条件下での温度別の培養試験で得られた窒素無機化率を反応速度論的に解析する方法で、大豆油かすとひまし油かすの窒素無機化特性値を得ている。無機化モデルは単純型モデルが適合するとしており、本試験と一致した。一方、 N_0 は99%と、見かけ上ほぼ全量の窒素成分が無機化するとされたが、本試験では大豆油かすが69.3%、ひまし油かすが66.6%と大きく異なった。本試験との相違点として、培養試験に用いた有機質肥料の形態があげられる。小田らは、粉碎した有機質肥料を供試して

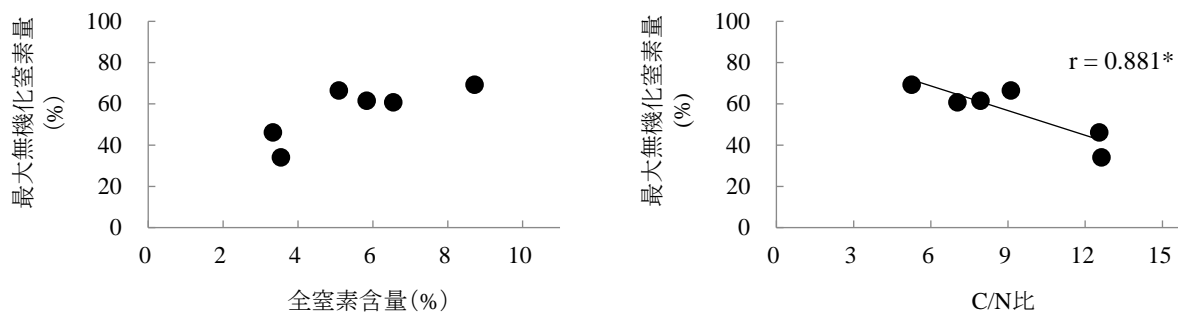


図2 最大無機化窒素量と全窒素含量及び C/N 比との関係

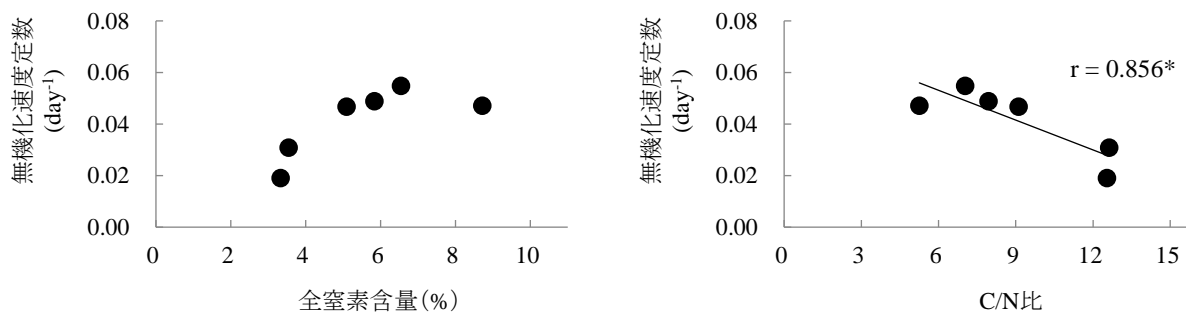


図3 無機化速度定数と全窒素含量及び C/N 比との関係

表5 湛水条件と畑条件での有機質肥料からの窒素発現量¹⁾の違い(地温25°C)

肥料名	土壌条件 ²⁾	50%の発現に要する日数 ³⁾		80%の発現に要する日数 ⁴⁾	
		湛水条件	畑条件	湛水条件	畑条件
大豆油かす	湛水条件	15	5.0	34	4.9
	畑条件	3		7	
なたね油かす	湛水条件	13	3.3	29	3.6
	畑条件	4		8	
あまに油かす	湛水条件	14	3.5	33	3.7
	畑条件	4		9	
ひまし油かす	湛水条件	15	3.8	34	4.3
	畑条件	4		8	
脱脂米ぬか	湛水条件	36	2.6	84	2.6
	畑条件	14		32	
グルテンフィード	湛水条件	23	1.3	52	1.3
	畑条件	18		40	

1) 単純型モデル $N = N_0(1 - \exp(-k \times t)) + b$ に窒素無機化特性値をあてはめて算出した。

2) 畑条件の窒素無機化特性値は大橋ら¹⁵⁾の値を用いた。

3) 算出した窒素発現量が可分解性有機態窒素量 N_0 の50%を超過した初日を示した。

4) 算出した窒素発現量が可分解性有機態窒素量 N_0 の80%を超過した初日を示した。

いるが、本試験では、未粉碎の形態で供試した。これは、生産現場では、有機質肥料を粉碎せず施肥することを想定したからである。未粉碎物と比べて、粉碎物を供試すると、培養時の土壌との接触面積は大きくなると推察される。実際、破碎処理によって新しい破断面が増加するため、窒素無機化が促進されるとする報告¹⁶⁾がある。よって、小田らの結果

は、粉碎処理によって微生物による分解が促進され、有機質肥料の窒素成分の無機化率が高まったためと推察された。

以上のことから、本試験で得られた N_0 は、生産現場での施肥時の窒素発現量を推定する目的で使用することに適していると考えられた。

2 湛水条件下での窒素無機化特性値の特徴

本試験で得られた湛水条件下での無機化特性値と大橋ら¹⁵⁾が畑条件下で得たそれらを比較すると、窒素無機化特性値の項目によって違いが見られた。

N_0 は、大豆油かすが畑条件下で65.1%であったのに対して湛水条件下では69.3%、同様に、なたね油かすは54.3%~56.7%に対して60.7%、あまに油かすは56.4%に対して61.5%、ひまし油かすは58.7%に対して66.6%、脱脂米ぬかは37.4%~42.3%に対して46.2%、グルテンフィードは31.4%に対して31.7%であった。このように、いずれも湛水条件下では畑条件下と同等以上の可分解性有機態窒素量となった。

一方、 k は、いずれも畑条件下と比べて湛水条件下で小さかった。すなわち、大豆油かすが畑条件下で 0.24 day^{-1} であったのに対して湛水条件下では 0.047 day^{-1} 、同様に、なたね油かすは 0.12 day^{-1} ~ 0.20 day^{-1} に対して 0.055 day^{-1} 、あまに油かすは 0.18 day^{-1} に対して 0.049 day^{-1} 、ひまし油かすは 0.20 day^{-1} に対して 0.047 day^{-1} 、脱脂米ぬかは 0.04 day^{-1} ~ 0.05 day^{-1} に対して 0.019 day^{-1} 、グルテンフィードは 0.04 day^{-1} に対して 0.031 day^{-1} であった。このようにグルテンフィードを除いて窒素無機化速度定数は、湛水条件下で畑条件下と比べて著しく小さくなった。

これらは、湛水条件下での有機質肥料からの窒素無機化は畑条件下と比べて緩やかに進行するが、最終的には同量あるいはそれ以上に無機化することを示していると考えられた。

3 湛水条件と畑条件での有機質肥料からの窒素肥効の違い

本試験で得られた窒素無機化特性値と大橋ら¹⁵⁾のそれを用いて可分解性有機態窒素量の50%と80%が無機態窒素として発現するのに必要な日数を湛水条件と畑条件において、25°C定温条件で算出した結果を表5に示す。

湛水条件の大豆油かすは、畑条件の約5倍の日数を必要とし、なたね油かすは3.3~3.6倍、あまに油かすはとひまし油かすは約4倍、脱脂米ぬかは、2.6倍、グルテンフィードは1.3倍の日数であった。このように6種の有機質肥料いずれも、湛水条件では畑条件と比べて窒素無機化が遅くなる傾向を示した。これは、湛水条件下での有機質肥料の窒素肥効の特徴であると考えられ、同じ有機質肥料でも、水稻栽培では畑栽培と窒素肥効が異なると考えられた。

以上のように、これまで明確でなかった湛水条件下での有機質肥料からの窒素無機化量の推定が、愛知県内で流通している主要な植物質由来の有機質肥料6種について可能となった。これにより水稻栽培での有機質肥料の効果的な利用が進む一助となると考えられた。

謝辞: 本研究を行うに当たり有機質肥料の収集について愛知県経済農業協同組合連合会の池田彰弘技術主管にご協力いただいたので、ここに感謝の意を表す。

引用文献

1. 藤沼喜亮, 田中房江, 福島正文. 施設栽培における有機質肥料の施用実態. 日本土壤肥科学雑誌. 43, 36-40(1972)
2. 小野寺政行, 中本洋. 北海道における堆肥と各種有機質肥料を用いた露地野菜の無化学肥料栽培. 日本土壤肥科学雑誌. 78, 611-616(2007)
3. 中本洋. 各種露地野菜における有機質肥料の化学肥料窒素代替性. 北海道立総合研究機構農業試験場集報. 96, 35-41(2012)
4. 杉原進, 金野隆光, 石井和夫. 土壤中における有機態窒素無機化の反応速度論的解析法. 農業環境技術研究所報告. 1, 127-166(1986)
5. 郡司掛則昭, 久保研一. 有機物の窒素分解特性と果菜類に対する効果的施用法. 熊本県農業研究センター報告. 5, 46-55(1996)
6. 日置雅之, 北村秀教, 加藤保. 家畜ふん堆肥の肥効特性と湛水条件下での窒素発現量の推定. 日本土壤肥科学雑誌. 72, 684-688(2001)
7. 古江広治, 上沢正志. 反応速度論的手法での土壌および有機質資材の有機態窒素無機化特性値データ集. 農業研究センター研究資料. 43, 1-50(2001)
8. 内村浩二, 三浦伸之. 黒ボク茶園における有機物資材の窒素無機化特性. 茶業研究報告. 98, 11-19(2004)
9. 新良力也. コメヌカとオカラの湛水培養での窒素無機化特性解析と圃場での窒素放出経過の推定. 日本土壤肥科学雑誌. 81(5), 511-513(2010)
10. 小田紫帆里, 日置雅之, 瀧勝俊. 湛水条件下における有機質肥料の窒素無機化推定式の作成. 愛知農総試研報. 53, 179-182(2021)
11. 植物栄養実験法編集委員会. 植物栄養実験法. 博友社. 東京. 159-160(1990)
12. 土壤環境分析法編集委員会. 土壤環境分析法. 博友社. 東京. 195-197, 208-211, 215-216, 226-228, 243-245, 255-257, 267-269(1997)
13. 金野隆光, 杉原進. 土壤生物活性への温度影響の指標化と土壤有機物分解への応用. 農業環境技術研究所報告. 1, 51-68(1986)
14. 土壤肥料試験ハンドブック編集委員会. 土壤肥料試験ハンドブック. 関東東海土壤肥料技術連絡協議会. 茨城県91-94(2011)
15. 大橋祥範, 日置雅之, 糟谷真宏. 愛知県内で流通する12種の有機質肥料からの窒素無機化量の推定. 愛知農総試研報. 49, 1-8(2017)
16. 板橋直, 山田和義, 木村龍介. 有機質肥料中窒素の無機化に対する粒子サイズの影響. 日本土壤肥科学雑誌. 73 (4), 411-415(2002)