

畑土壌の脱窒に及ぼす土壌含水率、仮比重、乾燥豚ふん施用の影響とそれらの相互関連性の評価

誌名	日本土壌肥料学雑誌 = Journal of the science of soil and manure, Japan
ISSN	00290610
著者	井上, 健一 西尾, 隆
巻/号	77巻6号
掲載ページ	p. 659-665
発行年月	2006年12月

畑土壌の脱窒に及ぼす土壌含水率、仮比重、乾燥豚ふん施用の影響とそれらの相互関連性の評価*

井上 健一**・西尾 隆***

キーワード 露地畑, 脱窒, 土壌含水率, 仮比重, 有機物

1. はじめに

集約的な農業形態をとっている我が国では、作物の増収、品質向上あるいは土づくりを目的に化学肥料および家畜ふん堆肥等有機質資材の農耕地への多量投入が行われてきた。近年、それに伴う農業関連水域の硝酸態窒素の汚染が表面化してきたため、環境へ負荷をかけない施肥管理技術が強く望まれている。その技術確立のためには、自然立地、土地利用形態、肥培管理等、様々な条件下にある農耕地の窒素収支を的確に把握することが必要である。

農耕地からの大気中への窒素循環の主要経路となっている脱窒作用は多くの環境要因によって影響を受けるが、中でも酸素は最も重要な要因とされている。通性嫌気性菌である脱窒菌は低酸素濃度条件下で硝酸態窒素あるいは亜硝酸態窒素を呼吸系の電子受容体として利用し、窒素(N_2)あるいは亜酸化窒素(N_2O)を生成する¹⁾。このため、栽培期間を長期にわたって湛水し、還元層をもつ水田では、畑に比べ脱窒が起こりやすい。また、水田の脱窒による窒素浄化能は¹⁵Nトレーサー法等によって評価され、硝酸態窒素濃度の高い用排水の水質浄化に脱窒を活用していることが示されている^{2,3)}。

一方、畑地は水田に比べて、通常は好气的条件下にあるため脱窒が起こりにくい。しかし、降雨やかん水の地下浸透によって通気性が悪くなって一時的に低酸素条件になった場合、畑地でも脱窒が活発に起こる¹⁾。さらに、有機物の質と量も脱窒の主要な律速要因と考えられるが、一般に、畑地は水田に比べ多様な有機物が施用されており投入量も多い。このように、畑地における脱窒は土壌水分変動や有機物施用等に伴う土壌条件の違いによって大きく影響を受けると考えられるが、いつ、どこで、どの程度起こるのか、定量的に予測するためのデータが著しく不足している。また、脱窒は作土層からだけでなく、下層土においても起こり⁴⁾、硝酸態窒素の溶脱低減に寄与すると考えられ

ている。しかし、¹⁵Nトレーサー法やチャンバー法⁵⁾では、下層土の脱窒量を現場で実測することは困難である。

そこで、アセチレン阻害法を用いた室内モデル実験において土壌の種類、水分、仮比重(かさ密度)の違い、有機物添加の有無等が脱窒速度に及ぼす影響を、それらの各種要因の複合的な作用にも留意しながら調査を行った。また、トウモロコシ栽培圃場においてアセチレン阻害法を未攪乱土壌に適用し⁶⁾、深さ30 cmまで層位10 cmごとの脱窒量を実測するとともに土壌の種類の違いおよび有機物施用の有無が下層土の脱窒に及ぼす影響を考察した。さらに、これらの結果を基に、畑土壌における脱窒速度の推定に必要な要因を検討した。

2. 材料および方法

1) 土壌含水率、仮比重、有機物施用の有無が脱窒に及ぼす影響

試験には中央農業総合研究センター(茨城県つくば市、北緯36°1′, 東経140°7′)のコンクリート枠圃場(1枠4.35×3.85 m, 無底)に深さ60 cmまで充填されている典型淡色黒ボク土(Typic Hapludand: 淡色黒ボク土と表す)および中粒質普通灰色低地土(Typic Hydrargent: 灰色低地土と表す)を用いた(土壌特性は三浦・西尾の測定値⁸⁾参照)。供試土壌はトウモロコシ(品種: ピーターコーン)を化学肥料だけで栽培している枠において、2003年6月17日(施肥後約1カ月、トウモロコシ4葉期)に深さ20 cm程度までの土壌を採取した。なお、この枠圃場は1999、2000年には休閑で無作付とし、2001年にはトウモロコシ、2002年にはニンジンに関する施肥試験を行った^{7,8)}。生土を2 mmの篩に通し供試土壌とした。脱窒の窒素源として硝酸カリウム水溶液を100 mg N kg⁻¹ 乾土添加後、土壌含水率を4段階に調製した。同時に、硝酸カリウム水溶液で土壌含水率を調整した土壌に、微粉碎した乾燥豚ふん試料10 g kg⁻¹ 乾土(乾物あたりT-C: 0.30 kg kg⁻¹, T-N: 24.8 g kg⁻¹, C/N: 12.1)を均一になるよう添加した土壌を調製した。有機物添加の有無と含水率が異なるそれぞれの土壌を、淡色黒ボク土で仮比重が4段階(0.6, 0.7, 0.8, 0.9)、灰色低地土で5段階(1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4)となるように採土管(内径5 cm, 高さ5 cm, 有底)に充填した。これを内径6.4 cm, 長さ20 cmのアクリルチューブに入れ両端をゴム栓で密栓し、手動式真空ポンプを用い0.05 MPaに減圧処理

* 本報告の一部は2004年度日本土壌肥料学会九州大会において発表した。

** 鹿児島県農業試験場(現在、鹿児島県農業開発総合センター徳之島支場 891-8114 鹿児島県大島郡伊仙町面鏡 2092)

*** 東北農業研究センター(020-0198 盛岡市下厨川字赤平4) 2005年8月12日受付・2006年6月22日受理
日本土壌肥料学雑誌 第77巻 第6号 p. 659~665 (2006)

後、アセチレンガスを 30 mL 注入した。外気圧と同じ空気圧に調整後、25°C で 4 日間培養し、発生したチューブ内の N_2O 濃度を経時的に ECD 付ガスクロマトグラフ（ヤナコ, G 2800 EN）で定量した。同時に、 CO_2 濃度を TCD 付ガスクロマトグラフ（島津製作所, GC 8 A）で定量した。発生したチューブ内のガス濃度を均一にするため、測定前にシリンジを用いてチューブ内のガスを攪拌した。なお、測定は 2 反復で行った。

2) 有機物施用の有無が層位別の脱窒に及ぼす影響

施肥試験は中央農業総合研究センターの淡色黒ボク土あるいは灰色低地土を充填したコンクリート枠圃場でトウモロコシ（品種：ピーターコーン）を供試作物として行った。土壌採取は 2003 年 7 月 8 日に化学肥料単独栽培圃場（以下、化学肥料区）と化学肥料と乾燥豚ふん（室内モデル実験で用いた乾燥豚ふんと同じ）の併用栽培圃場（以下、乾燥豚ふん区）で 10 cm ごとに深さ 30 cm まで層位別に 3 連で行い、硝酸態窒素含量および脱窒酵素活性を測定した。また、圃場条件下での脱窒速度、二酸化炭素発生速度の測定も同様の区で、2003 年 7 月 8 日と 7 月 28 日にアクリルチューブで層位別に採取した未攪乱土壌について、それぞれ 3 連で行った。なお、脱窒測定は降雨後の土壌水分が高まったときに行ったが、7 月 7 日の降水量は 10 mm day⁻¹、7 月 23~26 日の積算降水量は約 50 mm day⁻¹ であった。化学肥料区の施肥は基肥（N:P₂O₅:K₂O=100-150-150 kg ha⁻¹）を 2003 年 5 月 23 日に、追肥（化学肥料区のみ、N=50 kg ha⁻¹）を 2003 年 7 月 11 日に行った。乾燥豚ふんは 2003 年 5 月 23 日に土壌表層に散布した後、小型管理機で 10 cm 程度の深さまで一様に攪拌した。乾燥豚ふん区の窒素施用量は乾燥豚ふんの肥効を 5 割と仮定して、化学肥料を 60 kg ha⁻¹、乾燥豚ふんを 180 kg ha⁻¹ 相当量それぞれ施用した。リン酸およびカリウムも乾燥豚ふんの含有率を考慮して化学肥料区と同等となるように施用量を調整した。トウモロコシは 5 月 28 日に畝間 70 cm、株間 30 cm で播種した。なお、2003 年の年間降水量は 1,385 mm（平年値：1,287 mm）、平均気温は 13.6°C（平年値：14.0°C）であった。

(1) 層位別脱窒酵素活性⁹⁾

脱窒酵素活性は以下のように所定量の基質添加、嫌気条件下において、新たな酵素蛋白質の合成をクロラムフェニコールで阻害して行った。深さ 30 cm まで 10 cm ごとに均一に攪拌して採取した生土 5 g を真空採血管にとり、グルコース 1 mM、硝酸カリウム 1 mM、クロラムフェニコール 1 g L⁻¹ の混合溶液を 1 mL 加えた。ゴムキャップをして真空ポンプによる吸引と窒素ガス充填の操作を 3 回繰り返して採血管内の空気を窒素ガスで置換後、アセチレンガスを 1 mL 注入した。恒温器で 25°C で 2 時間培養後、発生した採血管内の N_2O 濃度を ECD 付ガスクロマトグラフで定量した。

(2) 層位別脱窒発生量および二酸化炭素発生量

土壌を深さ 30 cm まで 10 cm ごとの層位から、内径

6.4 cm、長さ 20 cm のアクリルチューブに土壌構造を破壊しないように採取した。チューブをゴム栓で密閉し、手動真空ポンプを用い 0.05 MPa に減圧処理後アセチレンガスを 30 mL 注入し、外気圧と同じ空気圧に調整してから元あった層位に埋め戻した。圃場の温度条件下で 24 時間培養後、ECD 付ガスクロマトグラフで N_2O 濃度を定量した。また同時に、TCD 付ガスクロマトグラフで CO_2 濃度を定量した。

(3) 土壌中硝酸態窒素

土壌の 2 mol L⁻¹ 塩化カリウム浸出液（土壌：溶液は重量比約 1:10）を Cd-Cu カラム還元法によってオートアナライザー（BRAN-LUBBE, TRAACS-800）で測定した。

3. 結果および考察

1) 土壌含水率、仮比重、有機物施用の有無が脱窒に及ぼす影響

淡色黒ボク土における脱窒速度は土壌含水率の増加に伴って増加した（ $p < 0.05$ ：土壌含水率と仮比重を要因とした脱窒速度の分散分析）。乾燥豚ふんを添加した場合、脱窒速度は土壌含水率と仮比重の増加に伴ってそれぞれ増加した（ $p < 0.05$ ）。有機物無添加条件下において含水率 0.398 kg kg⁻¹、仮比重 0.9 と含水率 0.418 kg kg⁻¹、仮比重 0.8 に調製した土壌では、その他すべての処理で 1 mg N m⁻² day⁻¹ 以下であった脱窒速度の値が 1 桁以上の急激な増加を示した。一方、乾燥豚ふんを添加した場合、無添加条件に比べ脱窒は促進されるが、無添加条件下と同様に土壌調製によって急激に脱窒速度が増加する境界域を認められた。しかし、含水率 0.378 kg kg⁻¹、仮比重 0.9 と含水率 0.398 kg kg⁻¹、仮比重 0.8 に調製した土壌で既に脱窒速度の増加がみられるなど、有機物添加条件下の境界域は有機物無添加条件下に比べ含水率、仮比重とも小さかった（表 1）。灰色低地土の脱窒速度は土壌含水率と仮比重の上昇に伴いそれぞれ増加し、乾燥豚ふんを添加した場合も同様であった（ $p < 0.05$ ）。また、淡色黒ボク土と同様に、脱窒速度が増加する境界域が認められ、有機物添加条件下の境界域における含水率は無添加条件下に比べ低く、仮比重は小さかった（表 2）。

淡色黒ボク土および灰色低地土における二酸化炭素発生速度は乾燥豚ふん添加によってほぼ 1 桁増加したが、脱窒速度のように 2~3 桁にも及ぶ増加は起こらなかった。一方、乾燥豚ふん添加の有無にかかわらず、含水率の高い処理区では、仮比重の増加に伴って発生速度が著しく減少する区がみられた（表 1, 2）。

土壌含水率および仮比重が高いほど脱窒速度が増加することは採土管内の気相率の減少によって、土壌中の還元的な領域が拡大したためと考えられる。仮比重の上昇に伴う脱窒速度の増加は気相率の減少に加え、単位体積あたりの呼吸量の増加に起因する土壌団粒内の酸素欠乏の進行も寄与していると推察される。一方、著しく二酸化炭素発生速

表1 淡色黒ボク土における脱窒速度および二酸化炭素発生速度（4日間の平均値）

(mg N m⁻² day⁻¹, g C m⁻² day⁻¹)

仮比重	含水率 (10 ⁻² kg kg ⁻¹)							
	35.6		37.8		39.8		41.8	
	脱窒	二酸化炭素	脱窒	二酸化炭素	脱窒	二酸化炭素	脱窒	二酸化炭素
0.6	0.28 (1.36)	0.06 (0.61)	0.19 (8.66)	0.06 (0.60)	0.81 (16.0)	0.06 (0.61)		
0.7	0.21 (1.66)	0.06 (0.64)	0.74 (14.6)	0.06 (0.62)	0.51 (25.0)	0.07 (0.66)		
0.8	0.58 (2.65)	0.06 (0.68)	0.25 (19.9)	0.07 (0.67)	0.89 (64.8)	0.07 (0.59)	8.94 (324)	0.04 (0.22)
0.9	0.98 (4.92)	0.06 (0.60)	0.93 (106)	0.06 (0.41)	9.57 (166)	0.05 (0.42)		

() 内は乾燥豚ふん添加時の脱窒速度および二酸化炭素発生速度。

表2 灰色低地土における脱窒速度および二酸化炭素発生速度（4日間の平均値）

(mg N m⁻² day⁻¹, g C m⁻² day⁻¹)

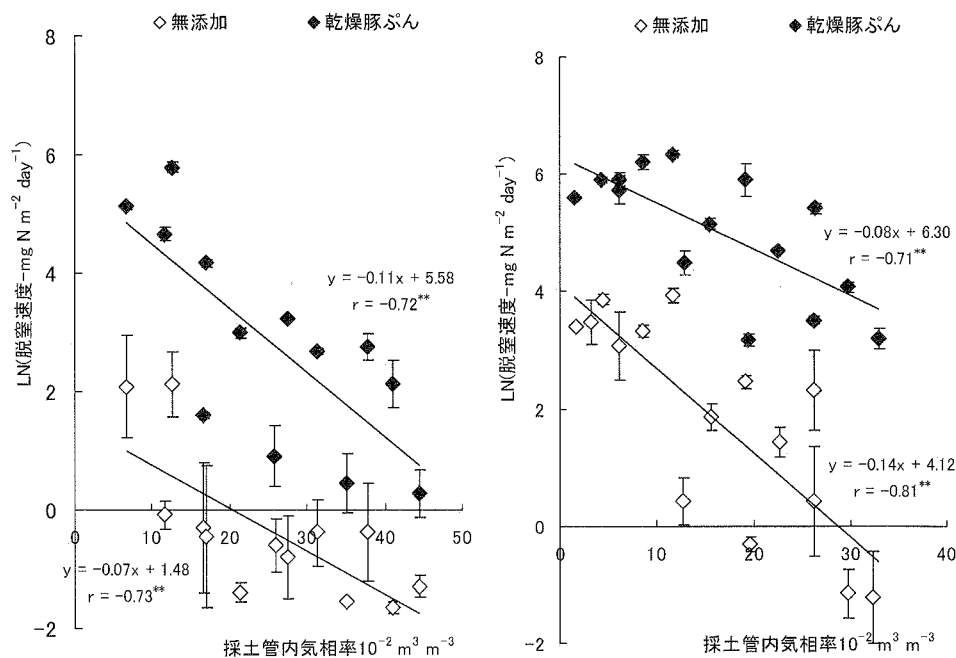
仮比重	含水率 (10 ⁻² kg kg ⁻¹)							
	22.7		24.7		26.5		28.2	
	脱窒	二酸化炭素	脱窒	二酸化炭素	脱窒	二酸化炭素	脱窒	二酸化炭素
1.0	0.34 (24.7)	0.35 (2.91)	0.33 (59.4)	0.32 (2.76)	11.3 (225)	0.33 (2.41)		
1.1	1.89 (33.5)	0.32 (3.27)	4.24 (109)	0.36 (2.89)	11.7 (374)	0.33 (2.24)		
1.2	0.73 (23.9)	0.31 (3.37)	6.54 (173)	0.37 (2.84)	51.2 (570)	0.34 (1.58)	33.4 (365)	0.11 (0.64)
1.3	1.58 (90.6)	0.36 (3.52)	27.9 (497)	0.34 (2.41)	47.8 (368)	0.16 (0.71)		
1.4	23.6 (368)	0.30 (2.89)	30.4 (274)	0.12 (0.59)				

() 内は乾燥豚ふん添加時の脱窒速度および二酸化炭素発生速度。

度が減少した区は酸素の拡散が制限されたことによって、微生物の呼吸が抑制されたためと考えられる。有機物添加によって、脱窒速度が著しく増加する境界域が低くなる傾向は、微生物呼吸量増加によって、土壌間隙内の酸素消費が、より速く進行したためと考える。

土壌の種類および乾燥豚ふん添加の有無に分けて、脱窒速度と採土管内の気相率の関係を検討した。採土管内の気

相率は実測値でなく、真比重（淡色黒ボク土2.67，灰色低地土2.66）と仮比重，含水率を用い計算した。その結果，土壌の違い，乾燥豚ふん添加の有無にかかわらず，脱窒速度の自然対数値と採土管内の気相率の間には負の相関関係が認められ，また，乾燥豚ふん添加による脱窒促進効果は無添加の回帰直線を上方方向に移動した直線で表すことができると考えられた（図1）。



淡色黒ボク土

灰色低地土

図1 淡色黒ボク土および灰色低地土における脱窒速度と気相率の関係

2) 有機物施用の有無が下層土の脱窒に及ぼす影響

現場で測定した未攪乱土壌の脱窒速度は測定時期にかかわらず、灰色低地土の方が淡色黒ボク土よりも高かった。また、化学肥料区の脱窒速度は両土壌とも下層ほど低かった。一方、乾燥豚ふん区の場合、7月8日では表層(0~10 cm 層位)よりも第2層(10~20 cm 層位)の方が高く、しかも、化学肥料区に比べ高かった。7月28日の乾燥豚ふん区では、表層は化学肥料区に比べ低く、7月8日の同区に比べ低かった(表3)。

脱窒酵素活性は表層ほど高く、化学肥料区よりも乾燥豚ふん区の方が高かった($p > 0.05$: 土壌, 施肥, 層位を要因とした脱窒酵素活性の分散分析)。また、淡色黒ボク土よりも灰色低地土の方で、脱窒酵素活性の高い傾向がみられた(図2)。

7月8日の灰色低地土における二酸化炭素発生速度は淡色黒ボク土に比べ高い傾向で、淡色黒ボク土および灰色低地土における二酸化炭素発生速度と脱窒酵素活性の間には正の相関関係がみられた(図3)。

7月8日の表層の土壌中硝酸態窒素含量は下層に比べ少

なかったが、すべての試験区で 10 mg N kg^{-1} 乾土以上の硝酸態窒素が残存していた。一方、7月28日の乾燥豚ふん区では、30 cm 層位まで硝酸態窒素含量が非常に少なかった。また、化学肥料区では、7月11日に追肥を行ったため、特に、表層の硝酸態窒素含量が多かった(表4)。

層位別気相率は概ね下層ほど少なくなる傾向が認められた(表5)。

脱窒酵素活性と二酸化炭素発生速度で高い相関関係がみられたことは有機物を施用した層位では、有機物分解が進むとともに従属栄養性の脱窒菌数が増加し、脱窒のポテンシャルが高まっているためと推察された。一般的に、畑土壌においては表層付近ほど易分解性有機物が豊富なので、化学肥料区で表層の脱窒速度が速いのは脱窒酵素活性が高いことに起因すると推察されるが、7月8日の乾燥豚ふん区では、第2層の脱窒速度は表層に比べ高かった。このことは、有機質資材の脱窒菌に対する直接的な影響よりも高水分で、仮比重が大きく(すなわち気相率が低く)、より嫌氣的になりやすい条件の方が脱窒を促進したことによると考えられる。Gilliam ら¹⁰⁾ は表層の溶存態有機物が降雨

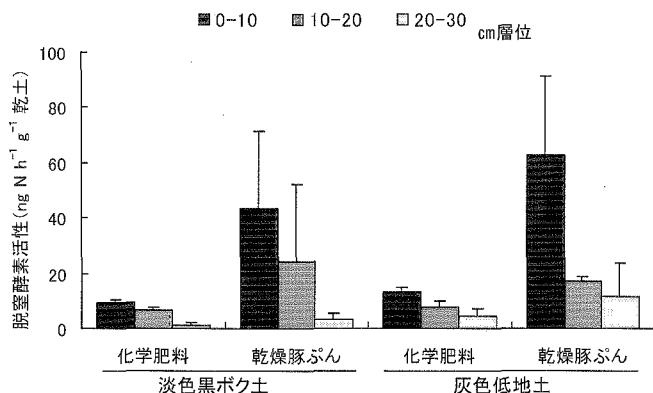


図2 層位別脱窒酵素活性 (7月8日)
エラーバーは標準偏差を示す。

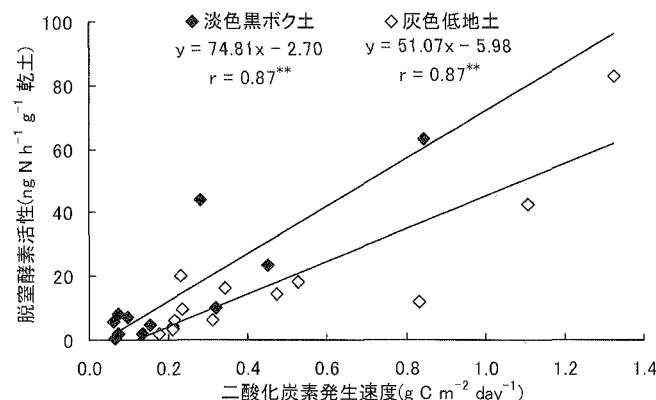


図3 脱窒酵素活性と二酸化炭素発生速度の関係 (7月8日)

表3 層位別脱窒速度 (mg N m⁻² day⁻¹)

		7月8日(平均地温 21.7°C)			7月28日(平均地温 23.3°C)		
		0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm
淡色黒ボク土	化学肥料	0.21±0.27	0.02±0.03	<0.01±0.01	0.27±0.32	0.03±0.01	0.05±0.05
	乾燥豚ふん	0.45±0.28	1.46±1.28	0.19±0.16	0.07±0.06	0.03±0.03	0.07±0.05
灰色低地土	化学肥料	0.80±0.77	0.40±0.53	0.12±0.11	1.45±1.23	0.35±0.07	0.38±0.35
	乾燥豚ふん	2.07±2.30	3.17±3.17	2.56±2.05	0.28±0.16	0.40±0.20	0.08±0.06

平均値±標準偏差 (n=3)。

表4 層位別硝酸態窒素含量 (mg kg⁻¹ 乾土)

		7月8日			7月28日		
		0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm
淡色黒ボク土	化学肥料	27.2	50.2	49.7	55.0	43.6	25.2
	乾燥豚ふん	13.7	37.1	46.2	1.88	0.26	10.2
灰色低地土	化学肥料	11.6	22.5	18.2	30.3	8.93	1.34
	乾燥豚ふん	10.1	24.5	17.6	0.26	1.39	4.40

平均値 (n=2)。

表5 層別別気相率

 $(10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3})$

		7月8日						7月28日		
		0~10 cm		10~20 cm		20~30 cm		0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm
淡色黒ボク土	化学肥料	37.5±3.5	27.8±8.7	26.8±6.3	38.8±1.1	30.3±2.7	29.0±2.4			
	乾燥豚ふん	34.0±6.0	29.0±1.2	27.9±1.8	40.1±3.7	30.7±3.3	26.2±0.3			
灰色低地土	化学肥料	29.8±12.4	26.2±3.4	26.0±5.9	25.8±5.0	13.8±5.7	12.6±2.4			
	乾燥豚ふん	31.5±4.5	15.6±3.0	29.5±3.2	25.9±5.5	13.5±2.6	16.4±6.7			

平均値±標準偏差 ($n=3$).

等によって溶脱することによって下層土の脱窒が促進されると報告しているが、本試験において同様の過程が乾燥豚ふん区の下層土の脱窒促進に寄与している可能性も考えられる。

一方、7月8日の脱窒速度は土壌中硝酸態窒素含量に比例しなかった。したがって、土壌中の硝酸態窒素含量は7月8日の条件下では脱窒の律速要因になっていなかったと考えられる。しかし、7月28日の乾燥豚ふん区では、土壌中硝酸態窒素がほとんど存在せず、7月8日に比べ気相率が低いにもかかわらず、脱窒速度は化学肥料区に比べ低かった。これは、この時点までに乾燥豚ふん区の脱窒の基質となるべき硝酸態窒素が脱窒、作物吸収、溶脱等の過程を通してほとんど失われてしまったことによるものと考えられる。

4. 総合考察

未攪乱土壌法を用いた畑地における年間脱窒量は0.8~約200 kg N ha⁻¹までと様々な報告がなされている^{6,11~15}。これは畑地での脱窒が土壌の種類、気象条件、肥培管理など多くの要因に支配され大きく変動するためと考えられる。このため、畑地における脱窒量を推定するためには、脱窒のメカニズムを理解し、特定時期や特定条件下での測定値を一般化し、期間発生量の積算値まで組み上げる手法を検討する必要がある。

今回は、室内モデル実験を中心に畑地における脱窒速度を検討した。その結果、淡色黒ボク土および灰色低地土における土壌の気相率と脱窒速度の対数値の間には、有機物添加の有無で有意な負の相関が得られた(図1)。この直線の位置はそれぞれの土壌の特性を反映していると同時に、脱窒促進効果を有する有機物(乾燥豚ふん)を施用することによって脱窒速度が上昇する方向に移動することが示された。

得られた回帰直線をもとに、それぞれの土壌の含水率と仮比重を用いれば、畑地での脱窒速度の簡易な予測につながると考えられる。このうち、土壌含水率はTDR水分計によって現場で経時的にモニターすることができ、容積密度が小さい火山灰土への適応性も検討されている^{16,17}。また、仮比重は堆肥の施用によって小さくなる傾向があるが、その発現には稲わら堆肥を年間50 Mg ha⁻¹施用した場合において、4~6年を要する¹⁸。このため、栽培期間の含水率および仮比重の値を把握することは十分可能であ

る。また、施用した有機物の種類や量によって脱窒速度に対する影響が異なるが¹⁹、その有機物の質と量に関する影響の大きさを、図1に示されているような回帰直線の上方への移動距離に置き換えて簡易に評価できれば一つの有力な方法になると思われる。

図1に示されている灰色低地土の脱窒速度をみると、気相率の低い部分において若干減少傾向がみられ、乾燥豚ふん添加で顕著であった。これは表1, 2に示されている二酸化炭素発生速度の結果と合わせて考えると、土壌圧密度の増加によるガス拡散速度の減少の影響と推察される。したがって、低気相率域の脱窒速度の値は過小評価になっており、回帰式の傾きはさらに小さくなる可能性がある。

また、本実験においては、節にかけた土と粉碎有機物試料を用いているために、不均一性に起因するバラツキは比較的少なかったが、実際の有機質資材施用条件下ではいわゆる hot spot といわれるように特に活発に脱窒の起こる箇所²⁰が部分的に存在して、全体としての脱窒速度をさらに押し上げる可能性もある。柿内・三角²¹は露地黒ボク畑での脱窒酵素活性に対する化学肥料の影響は小さいのに対して、堆肥の影響は大きく、しかも堆肥を施用した圃場の活性は年次変動が大きいとしているが、このような土壌の不均一性に起因する測定値の変動をいかに予測モデルに含めていくかが、前述の低気相率条件下の測定の問題とともに今後の大きな課題である。

本報告では、モデル実験を有機物添加直後に行ったため、圃場での有機物施用約50日後および約70日後の測定値とモデル実験の結果を直接比較することはできない。しかし、圃場での経時的な有機物分解を推定することにより脱窒の推移を予測することは可能と考える。西尾²²は本試験と同じ施設で製造された乾燥豚ふん、牛ふん堆肥および化学肥料を用いて4種類の異なる土壌タイプにおいて、作物(ニンジン)生育期間中に適宜圃場条件で脱窒の測定を行い、畑地での脱窒速度の平方根と二酸化炭素発生速度に高い相関関係があることを見出した。また、古江²³は有機物を土壌施用したときの二酸化炭素発生量は、易分解性有機物量推定につながるとしている。さらに、古江・上沢²⁴は全国各地の有機質資材を施用した土壌の反応速度論的手法による解析結果をまとめている。このような有機質資材施用効果に関する既往の研究結果、および本報告で得られた気相率と脱窒速度等の関係を合わせて活用することによって、有機質資材施用下における脱窒量推定手法を

開発していくことが期待される。

5. 要 約

有機質資材施用下の畑地の窒素収支を把握するためには、脱窒の定量的な予測手法の開発が不可欠である。そこで、土壌の種類、水分、かさ密度の違い、有機物添加の有無およびそれら要因の複合的な作用が土壌の脱窒速度に及ぼす影響を室内モデル試験によって調査し、未攪乱土壌法による圃場での層位別脱窒速度の実測結果と合わせて検討した。

1) 淡色黒ボク土、灰色低地土の両土壌とも土壌含水率と仮比重の増加とともに脱窒速度が増加したが、特に速度が著しく増加する境界域が存在した。乾燥豚ふんの施用で脱窒速度は大きく増加したが、境界域の値は無添加に比べ低下した。

2) 脱窒速度を圃場条件下で実測した結果、7月9日の乾燥豚ふん区の脱窒速度は化学肥料区に比べ高く、しかも、10~20 cm, 20~30 cm 層位において0~10 cm 層位を上回る結果となった。

3) 7月8日に採取した土壌の脱窒酵素活性と二酸化炭素発生速度の間には高い相関関係が認められた。

4) 以上の結果より、畑土壌の気相率を基に脱窒を推定する簡易予測手法について検討した。その結果、土壌の違いと施用有機物の有無で分けて気相率と脱窒速度の関係をみると、両者の間にそれぞれ負の相関関係がみられた。得られた回帰直線の係数は土壌と有機物の二要因の影響を強く受けていることが推察されることから、脱窒速度の推定には、この関係を考慮することが必要と考えられた。

謝 辞：この研究を遂行するにあたり協力して下さった農業技術研究機構中央農業研究センター土壌肥料部土壌生物研究室の方々に感謝の意を表します。

文 献

- 1) 長谷部亮：土壌の事典，p.235~236，朝倉書店，東京（1993）
- 2) 朴 光来・日高 伸・熊沢喜久雄：水田表面水中におけるNO₃-Nとδ¹⁵N値，土肥誌，**69**，287~292（1998）
- 3) 上藺一郎・長友 誠・上之藺茂・中園充紀・上村幸廣：シラス水田におけるかんがい水含有窒素の低減化，鹿児島農試研報，**31**，31~37（2003）
- 4) 小川吉雄・加藤英孝・陽 捷行：地下水面直上部における降下浸透水中の硝酸態窒素の消長と土壌の脱窒能，土肥誌，**71**，494~501（2000）
- 5) 西尾 隆：脱窒作用の測定と脱窒菌の計数，分離，新編土壌微生物実験法，土壌微生物研究会編，p.216~220，養賢堂，東京（1992）
- 6) Nishio, T., Li, X. and Komada, M.: Comparison of fate of nitrogen applied to 4 different kinds of soils with particular reference to denitrification. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **48**, 307~313（2002）
- 7) 西尾 隆・三浦憲蔵：有機質資材と化学肥料の併用下に

- おける畑土壌中の窒素の特徴と窒素収支，土肥誌，**75**，445~451（2004）
- 8) 三浦憲蔵・西尾 隆：エンジン作の窒素収支と土壌溶液中硝酸態窒素濃度に及ぼす有機質資材施用と土壌タイプの影響，同上，**75**，459~465（2004）
- 9) Tiedje, J. M.: Denitrifiers; in *Methods of Soil Analysis, Part 2, Microbiological and Biochemical Properties*, ed. R. W. Weaver et al., p.245~268, Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin（1994）
- 10) Gilliam, J. W., Dasberg, S., Lund, L. J. and Focht, D. D.: Denitrification in four California soils, effect of soil profile characteristics. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **42**, 61~66（1978）
- 11) Paul, J. W. and Zebarth, B. J.: Denitrification during the growing season following dairy cattle slurry and fertilizer application for silage corn. *Can. J. Soil Sci.*, **77**, 241~248（1997）
- 12) Mahmood, T. and Tahir, G. R.: Denitrification losses from an irrigated sandy-clay loam under a wheat-maize cropping system receiving different fertilizer treatments. *Biol. Fertil. Soils*, **26**, 35~42（1998）
- 13) Mahmood, T., Ari, R., Chaudhri, M. B., Tahir, G. R. and Azam, F.: Denitrification and total fertilizer-N losses from an irrigated cotton field. *ibid.*, **31**, 270~278（2000）
- 14) Rozas, H. R. S., Echeverria, H. E. and Picone, L. I.: Denitrification in maize under no-tillage: Effect of nitrogen rate and application time. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **65**, 1314~1323（2001）
- 15) 小林ひとみ・太田 健・村上 章：低湿重粘土転換畑における施肥窒素の動態と収支，土肥誌，**74**，685~689（2003）
- 16) 波多野隆介・長谷川周一・佐久間敏雄：TDR 土壌水分計のキャリブレーション，同上，**66**，678~680（1995）
- 17) 宮本輝仁・原口暢朗・塩野隆弘：TDR 法を用いた土壌水分・EC測定 of 火山性土への適用，九農研，**66**，56（2004）
- 18) 家寿多正樹・八槨 敦・戸辺 学・安西徹郎：黒ボク土における有機物および改良資材の連用が作物収量および土壌に及ぼす影響，千葉農試研報，**42**，43~53（2001）
- 19) Nishio, T. and Oka, N.: Effect of matter application on the fate of ¹⁵N-labeled ammonium fertilizer in an upland soil. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **49**, 397~403（2003）
- 20) Nielsen, T. H. and Revsbech, N. P.: Nitrification, denitrification and N-liberation associated with two types of organic hot spots in soil. *Soil Biol. Biochem.*, **30**, 611~619（1998）
- 21) 柿内俊輔・三角正俊：露地黒ボク土に対する化成肥料と堆肥の施用法の違いが土壌の脱窒活性に及ぼす影響，九農研，**65**，85（2004）
- 22) 西尾 隆：有機質資材施用畑における作土層中の脱窒と二酸化炭素発生との関係，土肥誌，**77**，401~406（2006）
- 23) 古江広治：微量熱量計を用いた家畜ふん堆肥の腐熟度評価の試み，農業技術，**55**，555~559（2000）
- 24) 古江広治・上沢正志：反応速度論的手法での土壌及び有機質資材の有機態窒素の無機化特性値データ集—アンケート調査とりまとめ—，農業研究センター研究資料，**43**，1~50（2001）

Interactive Effects of Moisture Content and Bulk Density of Soils and Addition of Dried Swine Feces on Denitrification in Upland Soils

Kenichi Inoue and Takashi Nishio*

(Kagoshima Pref. Agric. Exp. Stn., *Natl. Agric. Res. Cent. Tohoku Reg.)

The effects of the moisture content and bulk density of soils and the addition of dried swine feces on denitrification in upland soils were investigated in a laboratory experiment using an acetylene inhibition technique. Low-humic Andsols (LHA) or Gray Lowland Soils (GLS) were used in the experiment with or without adding dried swine feces at four levels of moisture content. In addition, soil columns were prepared by packing each soil so that the bulk density of them was adjusted to four different levels. Denitrification rates of the soil columns prepared were determined at 25°C during 4 days. We also determined the *in situ* denitrification rate of two upland soils (LHA, GLS) receiving dried swine feces during the growing season of maize by the combination of an intact core method and an acetylene inhibition technique. The intact cores were taken separately from three layers (0–10 cm, 10–20 cm, 20–30 cm) on 8 July and 28 July, and incubated for 24 h under *in situ* conditions. On 8 July, denitrifying enzyme activity was determined for the sieved soils collected from the three different layers. The results obtained were as follows. 1) In the laboratory experiment, denitrification rates increased with the increase in moisture content and/or bulk density of the soils. There were distinct boundary levels where denitrification rates were rapidly accelerated within the small increase of moisture content or bulk density of the soils. The levels were lowered by the addition of dried swine feces. 2) There was a negative correlation between the ratio of the gas phase and the logarithm of the denitrification rate if the soils were divided into 4 groups by the soil type (LHA or GLS) and organic materials (application or non-application). 3) The *in situ* denitrification rate of the soils on 8 July increased remarkably with the application of dried swine feces irrespective of soil type. The rates in the second layer (10–20 cm of the soil column) were the highest of all the layers, indicating that the effect of the bulk density of soils was much more significant than that of the organic content of soils in the experiment. 4) There was a positive correlation between denitrifying enzyme activities and CO₂ emission rates from the soils. 5) The procedure to estimate the denitrification rate in upland soils where organic materials were applied was discussed. It should be emphasized that the relationship between the ratio of the gas phase and the denitrification rate obtained in this study would be a promising tool for the assessment of denitrification in soils.

Key words bulk density, denitrification, moisture content, organic matter, upland field

(Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr., **77**, 659–665, 2006)