

# 硝酸塩を施用した畑土壌から揮散する窒素の様相と跡地土 壌中無機態窒素の存在形態

誌名	日本土壌肥料学雑誌 = Journal of the science of soil and manure, Japan
ISSN	00290610
巻/号	4210
掲載ページ	p. 379-383
発行年月	1971年10月

# 硝酸塩を施用した畑土壌から揮散する窒素の様相と 跡地土壌中無機態窒素の存在形態\*

井田 明\*\*・荒木浩一\*\*\*

## 1. 緒 言

著者ら<sup>1-4)</sup>は、東海地方に広く分布する赤黄色の鈹質畑土壌から揮散損失する窒素の実態と原因を明らかにして、合理的な窒素施肥を推進するための基礎的資料を得ようとしている。そして前報までに、畑土壌から揮散する窒素が捕集できる培養装置と、外部の空気を混入させずにその内部圧が測定できる装置を考案試作し、また主要な揮散形態と考えられる  $N_2$ 、 $N_2O$ 、 $NH_3$ 、 $NO_2$  はガスクロマトグラフ分析と化学分析を併用して定量できる見通しをたてた。そこでこれら装置と方法を用いて、重粘な武豊土壌から揮散する窒素の様相を調べた。その結果、土壌 pH が低い間は窒素揮散量は少ないが、土壌 pH が高くなるとアンモニア系肥料からの  $NH_3$  揮散もみられるものの概して  $N_2$  と  $N_2O$  の形態で揮散するものの方が多く、とくに硝酸系肥料を多水分土壌に施用すると、この両形態での揮散は著しく多くなり、さらにその際易分解性有機物が存在するとより一層増大することなどが明らかになった。そしてこの  $N_2$  と  $N_2O$  の揮散には、土壌の水分張力、孔隙量あるいは酸化還元電位などの要因が影響を及ぼしているものと考えられた。

以上の諸結果は、閉鎖的な培養容器内でおこなわれた実験から得られたものであるが、 $N_2$  と  $N_2O$  の揮散が起りやすい条件を現実の場面に当てはめると、梅雨期や秋の長雨時などの畑地が考えられる。またガラス室やビニールハウスなどの施設では、つねにこのような状態におかれているものといえよう。すなわち作物が正常に生育している土壌条件下でも、 $N_2$  と  $N_2O$  の形態での窒素揮散が起りうる可能性がある。

事実、大気と直接に接する土壌においても、多湿な条件下ではしばしば  $N_2O$  の発生が認められ<sup>4)</sup>、また安田<sup>5)</sup>も土壌空気中の  $O_2$  と  $CO_2$  を追跡中に高濃度の  $N_2O$  を検出している。通常の大気中の  $N_2O$  はきわめて少ないことから、これら  $N_2O$  は土壌中に存在する無機態あるい

は有機態窒素から発生したものと考えてよい。一方  $N_2$  は大気中にも 78% 前後存在するので、土壌中で発生する微量の  $N_2$  を測定することは通常きわめて困難である。さらに  $N_2$  と  $N_2O$  のいずれの形態で揮散するかは、窒素養分をとりまく土壌環境条件に支配されており、多くの研究者<sup>6-10)</sup>によって論議されてきたが現在でも不明点が多い。いずれにしても、 $N_2O$  のみを追跡するのは窒素揮散の重要な一面を見ずごすこととなる。

このようなことから、本報告では  $^{15}N$  硝酸塩を大気と接する土壌に施用し、これから発生する  $N_2$  と  $N_2O$  の様相を明らかにしようとした。またその際、易分解性有機物添加の影響と培養跡地土壌中に残存する無機態窒素の存在形態についても考察することとした。

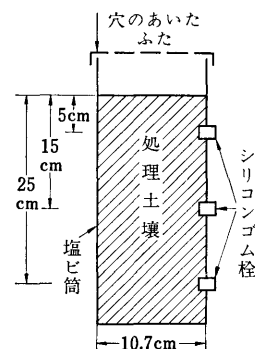
## 2. 実験方法

供試土壌は東海近畿農業試験場畑作部(愛知県武豊町)のは場の作土で、その二三の理化学的性質は第1表に示したが、腐植含量と塩基置換容量が小さい特徴をもっている。

第1表 供試土壌の性質

pH ( $H_2O$ )	腐植 (%)	塩基置 換容量 (me)	置換性塩基 (me)		無機態窒素 (mgN/100g)		土性	真比 重
			Ca	Mg	$NH_4-N$	$NO_3-N$		
5.1	1.0	7.4	2.2	0.4	0.7	1.2	SCL	2.69

この土壌を風乾ないし半風乾したのち、炭酸カルシウムを加えて土壌 pH を 6.8 前後に矯正し、1つは土壌 3,500 g (乾土換算) にグルコースを 6 g (0.17%) 添加し、さらに1つは同量の土壌にグルコースを添加しない処理を設けた。そしてそれぞれに 3.67  $^{15}N$  excess % の硝酸カリウムを 1,750 mgN (50 mgN/100 g) 均一に加



第1図 培養容器の様式

えて、第1図に示したように、側面に土壌空気採取用のシリコンゴム栓をとりつけた内径 10.7 cm の有底の塩化ビニール製円筒に、土壌の厚さが 30 cm になるように充てんした。そして土壌水分を含水比 25~30% に調整し、円筒上部に穴のあいたふたをかぶせたのち、30°C の恒温室で 20 日間培

\* 本研究は「鈹質畑土壌における窒素の行動に関する研究」の第6報としておこなわれた。

\*\* 東海近畿農業試験場(現九州農業試験場, 福岡県筑後市和泉)

\*\*\* 東海近畿農業試験場

昭和 46 年 5 月 18 日受理

日本土壌肥科学雑誌 第 42 巻 第 10 号 p. 379~383 (1971)

養をおこなった。

そして土壌空気組成の経時的変動を知るために、処理後 3, 6, 9, 12, 16, 20 日目に、地表下 25 cm の位置から注射器によって土壌空気の採取をおこなった<sup>4)</sup>。またこのうち 12 日目のものについては、深さごとの土壌空気組成の変化を知るために、5 cm と 15 cm の位置からも土壌空気の採取をおこなった。採取した土壌空気の一部は、まずガスクロマトグラフ分析によって N<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> の含量を測定し、また残りの土壌空気は別報<sup>11)</sup>の方法でガラス容器に封入して質量分析用の試料とした。

一方培養跡地土壌の無機態窒素の測定は、10 cm ごとの 3 層に分けておこなった。このうちアンモニア態窒素はアルカリ蒸留法によって、また硝酸態窒素はデパルタ合金によるアルカリ還元蒸留法でアンモニア態窒素との含量を求め、その差から求めた。さらにそれぞれの滴定液を微酸性下で減圧濃縮して、質量分析用の試料とした。

### 3. 結果および考察

#### 1) 揮散態窒素の発生状況

地表下 25 cm の位置における土壌空気組成の推移は第 2 表に示した。

まず N<sub>2</sub> の含量についてみると、グルコース無添加土壌、グルコース添加土壌（以下それぞれ無添加土壌、添加土壌と記す）とも通常の大気のものより 5~15% 程度低かったが、土壌間でくらべると 6 日目までは無添加土壌の方が高く、その後は添加土壌の方が高かった。さら

第 2 表 土壌空気組成の推移

土壌空気組成 (%)	グルコース無添加						グルコース添加					
	経過日数											
	3	6	9	12	16	20	3	6	9	12	16	20
N <sub>2</sub>	69.8	69.6	63.6	64.7	68.0	70.8	59.4	59.8	65.4	69.7	71.2	74.2
N <sub>2</sub> O	3.2	4.8	14.1	5.5	4.2	2.4	2.6	8.5	1.2	0.1	0.1	tr
O <sub>2</sub>	9.7	5.6	3.6	3.0	4.7	12.9	6.9	2.0	tr	tr	1.7	1.8

第 3 表 施肥窒素の揮散の様相

処理	経過日数	N <sub>2</sub>		N <sub>2</sub> O		施肥窒素に対する割合 (%)		
		土壌全層に存在する N <sub>2</sub> 量 (ml)		土壌全層に存在する N <sub>2</sub> O 量 (ml)		N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	合計
		<sup>15</sup> N (%)	揮散量 (ml)	<sup>15</sup> N (%)	揮散量 (ml)			
グルコース無添加	3	211~334	0.363	-0.1~-0.2	9.7~15.3	-0.01	0.63~0.99	0.62~0.98
	6	211~333	0.373	0.5~0.7	14.5~22.9	0.03~0.05	0.94~1.48	0.97~1.53
	9	193~304	0.384	1.0~1.6	42.7~67.4	0.06~0.11	2.76~4.35	2.82~4.46
	12	196~309	0.516	8.1~12.7	16.7~26.3	0.46~0.82	1.08~1.70	1.54~2.52
	16	206~325	0.569	11.5~18.1	12.7~20.1	0.66~1.17	0.82~1.30	1.48~2.47
	20	215~338	0.409	2.6~4.1	7.3~11.5	0.14~0.23	0.47~0.74	0.61~0.97
グルコース添加	3	180~284	0.461	4.7~7.4	7.9~12.4	0.30~0.48	0.51~0.80	0.81~1.28
	6	181~286	0.474	5.4~8.5	25.8~40.6	0.35~0.55	1.67~2.62	2.02~3.17
	9	198~313	3.47	167.5~264.8	3.6~5.7	10.82~17.10	0.23~0.37	11.05~17.47
	12	211~333	1.45	62.4~98.4	0.3~0.5	4.03~6.35	0.02~0.03	4.05~6.38
	16	216~340	1.44	63.3~99.6	0.3~0.5	4.09~6.43	0.02~0.03	4.11~6.46
	20	225~355	1.22	52.4~82.7	tr	3.38~5.34	tr	3.38~5.34

に添加土壌では培養期間の経過とともに漸増していた。つぎに N<sub>2</sub>O の含量についてみると、無添加土壌では 9 日目まで増加し、その後も減少していたとはいえかなりの高濃度で推移していた。これに対して、添加土壌では 9 日目以降はわずかしら認められなかった。また O<sub>2</sub> の含量は添加土壌が無添加土壌よりつねに低く、とくに 9~12 日目ではその存在がほとんど認められなかった。なお土壌空気組成の残りの部分はほとんどが CO<sub>2</sub> で占められていた。

ところでこの実験で用いた塩ビ製円筒の内径は 10.7 cm であるので、30 cm の厚さの土壌の容積は 2,700 cm<sup>3</sup> である。また処理土壌の気相率は 11.2~17.7% であるので、土層全体では計算上 302~478 ml の土壌空気が存在することとなる。そして第 2 表に示した土壌空気組成を土層全体の代表値と考えると、土層全体に存在する N<sub>2</sub> と N<sub>2</sub>O の容積が求められる。このうち N<sub>2</sub> は大気中にも 78% 前後存在するが、その中の <sup>15</sup>N % は 0.365 であることを考慮し、また供試肥料の <sup>15</sup>N excess % を考慮すると、供試肥料から N<sub>2</sub> 形態で揮散したもののうち土壌中にとどまっているものを、容量として求めることができる。一方 N<sub>2</sub>O は CO<sub>2</sub> とほぼ同じ分子量であることから、N<sub>2</sub> の共存下で N<sub>2</sub>O 中の <sup>15</sup>N を正確に求めることは困難である。しかしながら通常の大気中には 0.5 ppm 程度しか N<sub>2</sub>O が存在せず、また窒素肥料を施用しなければガスクロマトグラフ分析では多くの場合検出されないことから、土壌空気中に存在する N<sub>2</sub>O は施肥窒素から発生したものと考えることができる。そしてこれら N<sub>2</sub> と N<sub>2</sub>O はさらに重量へ換算することができる。このようにして求めたのが第 3 表である。

まず N<sub>2</sub> 形態の揮散についてみると、無添加土壌では培養初期には少ないが、その後増加して 16 日目まで最大となり、また添加土壌では無添加土壌よりさらに多くなり、とくに 9 日目では著しく多い。また N<sub>2</sub>O 形態の揮散傾向は前述したが、無添加土壌ではつねに N<sub>2</sub> 形態のものより多く、添加土壌では培養初期を除くと N<sub>2</sub> 形態のものより著しく少ない。

このような O<sub>2</sub> と CO<sub>2</sub> の経時的変動からみて、少なくとも 9 日目頃までは土壌の還元化が進み、しかも添

加土壌は無添加土壌よりその程度が大きいことが考えられ、またグルコースの分解量も9日目前後がもっとも多かったことが推察される。さらに添加土壌と無添加土壌の間で窒素の揮散量ばかりでなく、そのおもな形態が異なるのは、すでに報告<sup>8)</sup>したように土壌条件、なかでもこの還元程度のちがいによるものと考えられる。

いずれにしても、施肥窒素に対する割合の両形態の含量は、無添加土壌では9日目<sup>9)</sup>が2.82~4.46%ともっとも高く、少ない場合でも0.6~1.0%前後が存在していた。一方添加土壌では、この揮散割合の合計は培養初期を除くと無添加土壌の2~5倍にも達していることが明らかとなった。

これらの結果は土壌中に存在する揮散した窒素をみたものであって、揮散した窒素の発生傾向を直接みたものではない。しかしながら閉鎖的な条件下での窒素揮散は4~6日目頃がもっとも多いこと<sup>8)</sup>、また次項で述べるように培養跡地土壌中の硝酸態窒素は激減していることなどを考慮すると、培養後期での発生量はかなり少なくなっていたものと推察される。一方O<sub>2</sub>含量が培養後期になるとむしろ漸増していることからみて、土壌空気と大気中空気との間でガス交換がおこなわれていたことも明らかである。したがってこのガス交換の速度を解明することが必要であるが、これには多くの要因が複雑に関与

している<sup>12)</sup>、今後の研究の発展に期待したい。

つぎに添加土壌の深さ別にみた土壌空気組成を第4表に示したが、採取位置が深いものほどN<sub>2</sub>とO<sub>2</sub>の含量が明らかに低い。そして土

第4表 土壌空気組成の変動\*

土壌空気組成(%)	採取地点 (地表下 cm)		
	5	15	25
N <sub>2</sub>	74.7	73.2	69.7
N <sub>2</sub> O	0.1	0.1	0.1
O <sub>2</sub>	7.4	3.0	tr

\* 培養 12 日目、グルコース添加土壌

壌空気の採取位置に対応して土壌を3層に分け、前述した方法に準じて計算をおこなった。その結果は第5表に示したが、0~10cmの層における揮散した窒素量は20~30cmの層の1/3程度にすぎなかった。このことは大気からのO<sub>2</sub>供給量が土層の浅いものほど多いために

窒素の揮散が起こりがたかったとも考えられるが、培養跡地土壌に残存する無機態窒素量は上層と下層との間に大きな差が認められない。したがってこれらのちがいも、土壌空気と大気中空気とのガス交換のちがいによるものと考えられる。またこのことは、土壌中に存在する揮散した窒素量を計算するのに、大気中空気とのガス交換量をもっとも少ない最下層地点の土壌空気組成を土壌全体の代表値と考えたことの妥当性をも示している。

ところで無添加土壌におけるN<sub>2</sub>Oの含量は、著著<sup>4)</sup>や安田ら<sup>5)</sup>が経験したものよりかなり高い。その原因は本報の方がより多水分状態でおこなわれたことによるものと考えられる。すなわち土壌水分の増大は土壌空気量の減少を意味しており、①土壌の還元化を促進して窒素揮散量を増大させる、②相対的に揮散した窒素濃度を高める、③土壌空気と大気中空気とのガス交換を抑制する、などの影響をもたらすであろう。本報での土壌の含水比は25~30%であるが、これは32.5~39.0%の液相となり、また水分張力に換算するとpF1.5~1.8に相当する。しかしながらより多水分状態で畑作物が栽培されることも珍しくはないことから<sup>13,14)</sup>、今後合理的な窒素施肥を推進する上で、施肥窒素の揮散による損失については十分に配慮される必要がある。

2) 施肥窒素の収支と無機態窒素の存在形態

培養跡地土壌中に残存する無機態窒素量は第6表に示した。

まず硝酸態窒素についてみると、無添加土壌では上層

第6表 跡地土壌の無機態窒素

処 理	層 位 (cm)	無機態窒素 (mgN/100g)		
		NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	合 計
グ ル コ ー ス 無 添 加	1層 (0~10)	4.1	23.9	28.0
	2層 (10~20)	4.1	21.6	25.7
	3層 (20~30)	4.6	16.9	21.5
グ ル コ ー ス 添 加	1層 (0~10)	6.8	tr	6.8
	2層 (10~20)	8.0	tr	8.0
	3層 (20~30)	7.6	tr	7.6

第5表 揮散態窒素の分布状況\*

対象土層 (cm)	各土層中に存在するN <sub>2</sub> 量 (ml)	N <sub>2</sub>		各土層中に存在するN <sub>2</sub> O量 (ml)	施肥窒素に対する割合 (%)		
		<sup>15</sup> N (%)	各土層中に占める肥料からの揮散量 (ml)		N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	合 計
1層 (0~10)	75~119	0.681	6.4~10.2	0.1~0.2	1.23~1.97	0.02~0.03	1.25~2.00
2層 (10~20)	74~117	1.03	13.4~21.2	0.1~0.2	2.59~4.11	0.02~0.03	2.61~4.14
3層 (20~30)	70~111	1.45	20.7~32.8	0.1~0.2	4.03~6.35	0.02~0.03	4.05~6.38

\* 培養 12 日目、グルコース添加土壌

第7表 アンモニア態窒素の生成母体

処理	層位 (cm)	<sup>15</sup> N (%)	肥料窒素由来の NH <sub>4</sub> -N (%)			NH <sub>4</sub> -N の生成母体 (mgN/土層)	
			肥料	その他	肥料	その他	
グ無添加コース	1層(0~10)	0.464	2.7	1.3	46.7		
	2層(10~20)	0.418	1.4	0.7	47.3		
	3層(20~30)	0.491	3.5	1.9	52.1		
	合計(0~30)	—	—	3.9	146.1		
グ添加コース	1層(0~10)	1.05	18.7	14.8	65.2		
	2層(10~20)	1.11	20.3	18.9	74.1		
	3層(20~30)	1.07	19.2	17.1	71.9		
	合計(0~30)	—	—	50.8	211.2		

のものほど多い傾向があるが施肥窒素の 1/2~1/3 に相当するものがなお存在していたのに対し、添加土壌ではいずれの層でもほとんど存在しなくなっていた。またアンモニア態窒素についてみると、無添加土壌では 4.1~4.6 mgN/100 g であったが、添加土壌ではその 2 倍前後に相当するものが存在していた。

そこでアンモニア態窒素中の <sup>15</sup>N % に、自然状態で存在する <sup>15</sup>N % および施肥窒素の <sup>15</sup>N excess % を考慮して、施肥窒素に由来するものと有機物などに由来するものに分画することを試みた。その結果は第7表に示したが、アンモニア態窒素中に占める施肥硝酸塩の割合は、無添加土壌ではいずれの土層でもせいぜい 3~4% にとどまっているのに対し、添加土壌では 20% 前後にも達していた。したがってアンモニア態窒素が生成した母体は、無添加土壌の場合には肥料由来は土壌全体で 4 mgN 前後と土壌有機物など由来の 146 mgN にくらべると著しく少なかった。これに対して添加土壌の場合には、土壌有機物などに由来するものが 211 mgN であるが肥料由来も 50 mgN をこえており、つまり施肥窒素の 3% に相当する硝酸態窒素が 20 日間の培養後にはアンモニア態窒素として存在していた。すなわちこれらのことは、施用した硝酸塩の一部はいったん有機化され、それがふたたび無機化していること、およびグルコースが存在するとその量が著しく増大することを顕著に示している。そしてグルコース添加によってとりこまれた窒素の形態は、三木ら<sup>15)</sup>が論じたように酸加水分解性アルカリ

第8表 硝酸態窒素の生成母体

処理	層位 (cm)	<sup>15</sup> N (%)	無機態窒素中に占める肥料窒素 (%)		NO <sub>3</sub> -N の生成母体 (mgN/土層)	
			肥料窒素 (%)	肥料	その他	
グ無添加コース	1層(0~10)	3.04	77.0	92.5	258.1	20.9
	2層(10~20)	3.20	81.6	97.0	244.4	7.6
	3層(20~30)	3.23	82.5	104.2	197.0	—
	合計(0~30)	—	—	—	699.5	28.5

安定窒素、とくにアミノ酸態窒素のような無機化しやすい形態で存在するものと考えられる。

また硝酸態窒素は添加土壌中にはほとんど存在していなかったの、無添加土壌についてのみ同様な分画を試みた。ここでは前述した要因のほか、硝酸態窒素を定量する過程で用いたデバルタ合金中の窒素量をも考慮して、まず無機態窒素中に占める <sup>15</sup>N の割合を求め、これとアンモニア態窒素との差から算出した。その結果は第8表に示したが、施肥硝酸塩に由来する硝酸態窒素は上層のものほど多い傾向があるものの土壌全体では約 700 mgN と施肥窒素の 40% を占めているのに対し、有機物などに由来する硝酸態窒素は 29 mgN にも達していなかった。これらのことは、土壌が多水分状態であったために硝化作用が起こりにくかったことを示している。したがって有機化された施用窒素が再無機化されたのち、さらに硝酸態窒素へ形態変化されるものは、量的にはほとんど無視できるものと考えられた。

結局、施肥窒素の収支は第9表に示したとおりとなる。すなわち施用した硝酸塩から揮散および有機化する窒素の割合は、土壌に残存した無機態窒素の <sup>15</sup>N 含量から算出すると、無添加土壌では 60%、添加土壌では 97% にも達することが明らかとなった。ところで供試したこの土壌は、有機態窒素を蓄積しがたいという性質をもっている。たとえば生ワラを施用して有機態窒素を増加させても、再無機化が2週間目以降急速に進むこと<sup>16)</sup>が知られており、またグルコースを添加しても2週間後では有機態窒素としての増大はほとんど認められていない<sup>9)</sup>。このような土壌の特性を考慮すると、損失した施肥窒素は有機態窒素と窒素成分の交換という形で損失したのもあるとはいえ、実質的には揮散によってその大部分が損失したものと考えられる。

第9表 施肥窒素の収支

処理	層位 (cm)	無機態窒素の残存量 (mgN/土層)			施肥窒素の損失量 (mgN/土層)	施肥窒素の損失割合 (%)
		NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	合計		
グ無添加コース	1層(0~10)	1	258	259	324	—
	2層(10~20)	1	244	245	338	—
	3層(20~30)	2	197	199	384	—
	合計(0~30)	4	699	703	1046	59.8
グ添加コース	1層(0~10)	15	tr	15	568	—
	2層(10~20)	19	tr	19	564	—
	3層(20~30)	17	tr	17	566	—
	合計(0~30)	51	tr	51	1698	97.0

なお <sup>15</sup>N の分析は理化学研究所質量分析室に依頼した。関係各位についで謝意を表わす。

## 4. 要 約

大気開放下において、多湿な鈳質畑土壌から揮散する窒素の様相と培養跡地土壌中の無機態窒素の存在形態を明らかにするために、 $^{15}\text{N}$  硝酸塩を施用して追究した。

施肥窒素から揮散する窒素濃度はグルコース添加土壌の方が無添加土壌より終始高いこと、窒素揮散のおもな形態がグルコース無添加土壌では  $\text{N}_2\text{O}$  であるのに対し添加土壌では  $\text{N}_2$  であること、また揮散する窒素濃度を経時的にみると、土壌の還元化が進む 9 日目頃がもっとも高いこと、さらに培養後期のもほど  $\text{N}_2$  の占める割合が大きいことが明らかとなった。

培養跡地土壌の分析によれば、施肥窒素の損失はグルコース無添加土壌では 60%、添加土壌では 97% にも達しており、その大部分は揮散によるものと考えられた。

また培養跡地土壌中の無機態窒素は、グルコース無添加土壌では硝酸態窒素を主体にしているのに対して、添加土壌ではほとんどがアンモニア態窒素で占められていた。そして土壌中に残存していたアンモニア態窒素のうち施用した硝酸塩から形態変化したものは、グルコース無添加土壌では 3~4% にすぎなかったが、添加土壌では 20% (施肥窒素の 3%) 前後に達していることが明らかとなった。

## 文 献

- 1) 井田 明・森 哲郎：東近農試研報, 19, 110 (1970)
- 2) 井田 明・森 哲郎：同上, 21, 135 (1971)
- 3) 井田 明・荒木浩一：同上, 21, 151 (1971)
- 4) 井田 明・森 哲郎・荒木浩一：同上, 21, 164 (1971)
- 5) 安田 環・荒木浩一：土肥誌, 41, 413 (1970)
- 6) CADY, F.B and BARTHOLOMEW, W.V.: *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 25, 477 (1960)
- 7) COOPER, G.S. and SMITH, R.L.: *Ibid.*, 27, 659 (1963)
- 8) MEEK, B.D. and MACKENZIE, A.J.: *Ibid.*, 29, 176 (1965)
- 9) SCHWARTZBECK, R.A., MACGREGOR, J.M. and SCHMIDT, E.L.: *Ibid.*, 25, 186 (1961)
- 10) WIJLER, J. and DELWICHE, C.C.: *Plant Soil*, 2, 155 (1955)
- 11) 井田 明・荒木浩一：土肥誌, 42, 395 (1971)
- 12) レポート：土壤物理 (松田 宏訳), 123, 畑地農業振興会 (1968)
- 13) 河森 武：中部土肥要旨, 26, 21 (1968)
- 14) 湯村義男・中島田誠：土肥要旨集, 15, 116 (1969)
- 15) 三木和夫・森 哲郎：東近農試研報, 17, 67 (1968)