

# 黒ボク土および灰色低地土の深度別アンモニウム・硝酸吸着等温パラメータの算出

遠藤 明<sup>1</sup>・三島 慎一郎<sup>2</sup>・神山 和則<sup>2</sup>

Determination of adsorption isotherm parameters for ammonium and nitrate for the Andosol and Gray lowland soil with respect to each depth

Akira ENDO<sup>1</sup>, Shin-ichiro MISHIMA<sup>2</sup>, Kazunori KOHYAMA<sup>2</sup>

**Abstract:** In order to simulate the behavior of  $\text{NO}_3^-$  in the agricultural land, it is necessary to obtain the information of the relationship between solute concentrations of pore water and adsorbed solute amount, which are described as the adsorption isotherm (AI) lines at six depths. However, the parameters list of the AIs, which depend on soil type, has not yet been provided with all as inventory data. Therefore, it is necessary to provide with all parameter list as inventory data immediately. For the purpose of collection in substantial inventory data of AIs of  $\text{NH}_4^+$  and  $\text{NO}_3^-$ , as the first step, the authors conducted the adsorption experiment of Andosol and Gray lowland soil at the arbitrary depth. As a result, the AI lines in all soil type except for Andosol (30 cm depth of upland field) could be expressed as Langmuir type AI. In the Andosol (upland field), maximum adsorption  $\text{NH}_4^+$  tended to decrease with depth except for  $z = 50$  cm, while adsorbed  $\text{NO}_3^-$  was strongly dependent on depth and its maximum adsorption tended to increase with depth. **Key Words:** Andosol, Gray lowland soil, adsorption isotherm (AI), nitrate leaching from agricultural land

## 1. はじめに

近年、農作物の高品質・多収穫を目的に、施肥基準を超える施肥がなされてきた事例が見受けられる（農林水産省大臣官房統計部，2003）。農畜産由来の窒素成分が地下に浸透する結果、浅層地下水・河川水・閉鎖系水域の富栄養化による水質汚濁が進行している。農耕地土壌中の無機態窒素の輸送量の大小は、一般的に土壌間隙水中の移流の大きさと、土粒子と土壌溶液の間の吸脱着の強度に依存する。移流分散の大きさは、透水性と土壌水分保持特性といった土壌の物理的性質や溶質種の分子拡散係数に支配される。一方、吸着能力の大小は主に粘土鉱物の種類や量に依存し、対象とする溶質種の吸着等温線（adsorption isotherm、以下 AI と記す）の形状により

表現される。農耕地からの窒素溶脱のシミュレーションを行うためには、この吸着等温線のパラメータを取得しなければならない。しかし、現在、各種土壌型に依存する無機態窒素の吸着等温線のパラメータリストが整備されておらず、さらに、深度毎の AI パラメータの蓄積は非常に少ないのが現状である。このため、農耕地からの窒素溶脱のシミュレーションを行うために必要なインベントリーデータを整備する必要がある。

黒ボク土は変異荷電特性を有する、アロフェンやイモゴライト等の粘土鉱物を多く含有している傾向にある。このため、低 pH 領域においてアニオンを吸着する事実が多く、研究者により明らかにされてきた（Wada, 1989）。黒ボク土におけるイオン種の吸着実験では、pH により吸着特性が変化するため、pH を一定に保持し、且つ吸着時の土壌溶液温度を一定に保持しなければならない。筆者らは、Tani et al. (2004) の吸着実験の方法（ただし、試料の凍結乾燥は行わない）を用い、黒ボク土（地目：畑および水田）と灰色低地土（地目：水田）における硝酸イオンとアンモニウムイオンの吸着等温線を取得し、3 種類の土壌の両イオン種の吸着特性を比較検討した。また、様々な農耕地の土壌型における、両イオン種の吸着等温線のパラメータを整備し、シミュレーションを行うために必要なインベントリーデータを充実することを目標に、手はじめに 3 種類の土壌について、両イオンの吸着等温線のパラメータを取得した。

## 2. 吸着実験の方法

試料は、栃木県農業試験場本場の畑地および水田（表層多腐植質黒ボク土）と栃木県小山市内の水田（中粗粒灰色低地土）の深度 10, 30, 50, 70, 90 および 100 cm から採取した。その後、試料を室内の暗所におき 7 日間風乾したのち粉碎した。AI を測定する試料は、粉碎した風乾土壌を 2 mm ふるいにかけて、通過したものを使用した。はじめに、試料約 2 g を 50 mL 容蓋付き遠沈管に入れ、次いで 1 mol L<sup>-1</sup> 塩化ナトリウム水溶液を約 30 mL 入れて 1 時間振盪した後、上澄液を遠心分離により排除した。塩化ナトリウムでイオン交換を行うため、この過程を 3 回繰り返した。次に、塩化ナトリウムで飽和した土

<sup>1</sup>Toyo College of Food Technology, 4-23-2 Minamihanayashiki, Kawanishi, Hyogo 666-0026, Japan. Corresponding author: 遠藤明, 学校法人東洋食品工業短期大学包装食品工学科

<sup>2</sup>National Institute for Agro-Environmental Sciences, 3-1-3 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305-0864, Japan

2009年4月24日受稿 2009年9月24日受理  
土壌の物理性 113号, 25-30 (2009)

**Table 1** アンモニウムイオン ( $\text{NH}_4^+$ ) の深度別吸着等温パラメータ.  
Parameters for the adsorption isotherm of ammonium ion ( $\text{NH}_4^+$ ).

Depth (cm)	Andosol (upland field)			Andosol (paddy field)			Gray lowland field (paddy field)		
	$k_1$	$k_2$	$k_1/k_2$	$k_1$	$k_2$	$k_1/k_2$	$k_1$	$k_2$	$k_1/k_2$
10	15.558	$5.179 \times 10^{-3}$	3003.59	12.030	$3.207 \times 10^{-3}$	3751.17	17.118	$1.472 \times 10^{-2}$	1162.99
30	13.141	$3.735 \times 10^{-3}$	3518.69	11.043	$3.209 \times 10^{-3}$	3441.69	15.016	$1.019 \times 10^{-2}$	1473.88
50	2.483	$3.165 \times 10^{-4}$	7846.09	12.978	$5.131 \times 10^{-3}$	2529.30	27.038	$2.042 \times 10^{-2}$	1323.96
70	4.701	$2.040 \times 10^{-3}$	2304.28	13.584	$4.775 \times 10^{-3}$	2844.71	20.299	$1.635 \times 10^{-2}$	1241.76
90	6.320	$2.931 \times 10^{-3}$	2156.20	18.556	$6.880 \times 10^{-3}$	2697.11	17.296	$1.765 \times 10^{-2}$	979.77
100	2.861	$9.049 \times 10^{-3}$	3160.21	21.752	$9.049 \times 10^{-3}$	2403.88	20.713	$1.906 \times 10^{-2}$	1087.05

粒子表面を洗浄するために、遠沈管に約 30 mL の蒸留水を入れ振盪し、遠心分離により上澄液を除去した。この過程を、上澄液の EC が  $50 \mu\text{S cm}^{-1}$  以下になるまで繰り返し返した。次に、黒ボク土 (畑および水田) において、初濃度 0.75, 1.5, 3.0 および  $6.0 \text{ g L}^{-1}$  の硝酸アンモニウム水溶液を遠沈管に 5 mL 入れた。一方、灰色低地土 (水田) においては、初濃度 0.25, 0.5, 1.0, 2.0 および  $4.0 \text{ g L}^{-1}$  の硝酸アンモニウム水溶液を遠沈管に 5 mL 入れた。次に、希釈した塩酸または水酸化ナトリウム水溶液を用いて遠沈管内の土壌溶液を pH 6 に調整した。このとき、遠沈管中に含まれる水分 (試料を洗浄した際に残存している水分と pH 調整を行った際の水分) により、硝酸アンモニウム濃度が希釈されているため、その濃度を補正するために遠沈管重量を測定した。その後、遠沈管に蓋をして 24 時間の恒温室にて 2 時間振盪した。この状態の硝酸アンモニウムの吸着を、平衡状態の吸着とし、その時の pH を再度計測した。最後に、遠心分離により上澄み液を取り出し、孔径  $0.20 \mu\text{m}$  のシリンジ用メンブレンフィルター (Advantec 社製) を用いて濾過し、任意の希釈倍における濾過液のアンモニウムイオンおよび硝酸イオンを、イオンクロマトグラフ (IC7000, 横河電機) により測定した。

### 3. 実測吸着量の吸着等温式へのカーブフィッティング

Langmuir (1918) 型吸着等温式は、イオン種の脱着速度と吸着速度が等しい平衡状態の下での、吸着量と溶液溶質濃度を表した関係式であり、(1) 式で表される。

$$s(c) = \frac{k_1 c}{1 + k_2 c} \quad (1)$$

ここに、 $s$ : 風乾土 1 kg あたり吸着量 ( $\text{mg kg}^{-1}$ ),  $c$ : 溶液溶質平衡濃度 ( $\text{mg L}^{-1}$ , 以下、平衡濃度と記す),  $k_1$ ,  $k_2$ : 吸着パラメータであり、特に  $k_1/k_2$  は最大吸着量 ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) である (颯田, 1995)。

また、今回、(1) 式を用いてカーブフィッティングを行うことが不可能であったため、黒ボク土 (畑) の深度 30 cm における AI のみは、Freundlich (1906) 型吸着等温式である (2) 式により表した。

$$s(c) = K c^{1/b} \quad (2)$$

ここに、 $K$  と  $b$  は吸着パラメータである。(2) 式は  $b > 1$  の条件で AI が凸型となるが、 $b < 1$  の条件では凹型の形状になる。吸着パラメータはフリーソフトウェアのグラフ描画ソフト Sma4Win を用い、非線形カーブフィッティング法により算出した。実際の農耕地では、無機態窒素を含む間隙水が降下浸透する際、平衡吸着状態に到達する前に降下する場合も多々あることが容易に推察される。本報では、表面物理学で云うところの、溶液の溶質が土粒子に接触してから脱着するまでの平均滞在時間 (mean sojourn time) は考慮しない。

## 4. 実験結果および考察

### 4.1 試料の pH 条件の確認

pH6.0 調整時における遠沈管内土壌溶液の pH は、黒ボク土 (畑), 黒ボク土 (水田) および灰色低地土 (水田) において、それぞれ pH 5.998 ( $n = 30, \sigma = 0.019$ ), pH 6.002 ( $n = 30, \sigma = 0.027$ ) および pH 5.843 ( $n = 30, \sigma = 0.171$ ) であり、pH 一定の条件を満足した状態であったといえる。また、吸着平衡後の溶液中のアンモニウム・硝酸濃度と比較して、亜硝酸イオン濃度が極端に低かったことから、pH 調整、振盪、遠心分離の各処理過程において、吸着実験の条件を擾乱するような顕著な硝化は起きなかったと考えられる。吸着平衡後の pH が、黒ボク土 (畑), 黒ボク土 (水田) および灰色低地土 (水田) において、それぞれ pH 5.989 ( $n = 30, \sigma = 0.019$ ), pH 6.012 ( $n = 30, \sigma = 0.060$ ) および pH 5.997 ( $n = 30, \sigma = 0.019$ ) であったことから、吸着平衡前後での pH は変化しなかったといえる。

### 4.2 アンモニウムイオンの吸着パラメータ

黒ボク土 (畑および水田) と灰色低地土における深度毎のアンモニウムイオンの AI と吸着パラメータを、それぞれ Fig. 1 と Table 1 に示す。両土壌型ともに、平衡濃度の増加にともない吸着量が増大する傾向にあった。また、3 種類の土壌ともに低濃度領域での AI の勾配が大きく、平衡濃度の増加にともない勾配が緩やかに減少する傾向にあった。黒ボク土 (畑) では、表層深度 10, 30 cm の深度の低濃度領域における AI の勾配が最も大きく、最大吸着量も  $3004 \sim 3518 \text{ mg kg}^{-1}$  と高かったが、下層土の深度 50 cm 以深では低濃度領域の AI の勾配が小さく、最大吸着量は表層土壌の 75% 程度であった (深度 50 cm を除く)。深度 50 cm におけるアンモニ

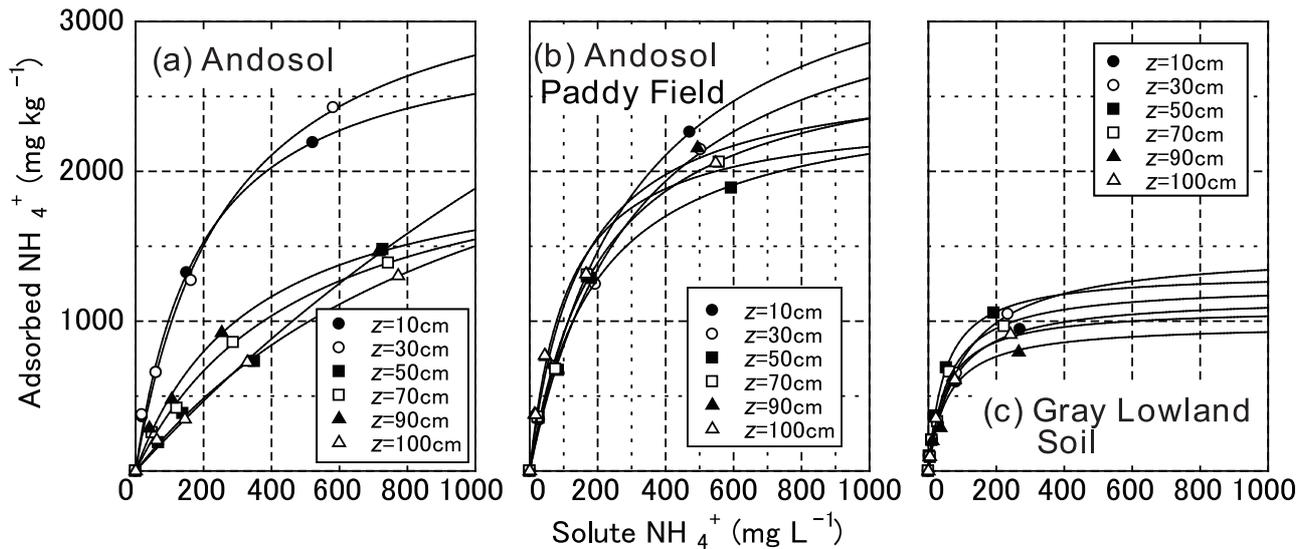


Fig. 1 深度毎のアンモニウムイオンの吸着等温線（横軸：平衡濃度，縦軸：風乾土 1 kg あたり吸着量）. (a) 黒ボク土（畑）, (b) 黒ボク土（水田）, (c) 灰色低地土（水田）.

Adsorption isotherm lines for ammonium ion ( $\text{NH}_4^+$ ) at different depths.

ウムイオンの最大吸着量が非常に高かった原因は、パラメータ  $k_2$  のオーダーが  $10^{-4}$  であり、AI が線形で表される Henry 型吸着等温線に近い形状を呈し、吸着量が単調増加傾向にあったためである。黒ボク土（水田）においても、黒ボク土（畑）と同様に、低濃度領域における AI の勾配が最も大きかった。また、最大吸着量は表層 10 cm で  $3751 \text{ mg kg}^{-1}$  と最も高く、深度の増加とともに減少する傾向が認められた。一方、灰色低地土の低平衡濃度領域  $0 \sim 50 \text{ mg L}^{-1}$  における AI の勾配は、深度に依らずほぼ同様であった。また、最大吸着量は各深度を問わず黒ボク土の 50% 程度であった。施肥直後の間隙水は高濃度のアンモニウム態窒素濃度を含有するが、降水・湛水による浸潤によって、溶質が徐々に移流拡散していくことで、その濃度が低下する。また、硝化作用によりその濃度は、時間の経過とともに減少指数関数的に低下する（直川，2006）。このことから、アンモニウムイオンの AI で最も重要なのは、肥料が溶出して硝化が完了するまでの比較的低濃度の領域における AI の傾きにあると考えられる。この AI の傾きの大きさを比較することにより、 $0 \sim 50 \text{ mg L}^{-1}$  の低濃度領域において黒ボク土よりも灰色低地土において、多くのアンモニウムイオンが吸着することが明らかになった。

#### 4.3 硝酸イオンの吸着パラメータ

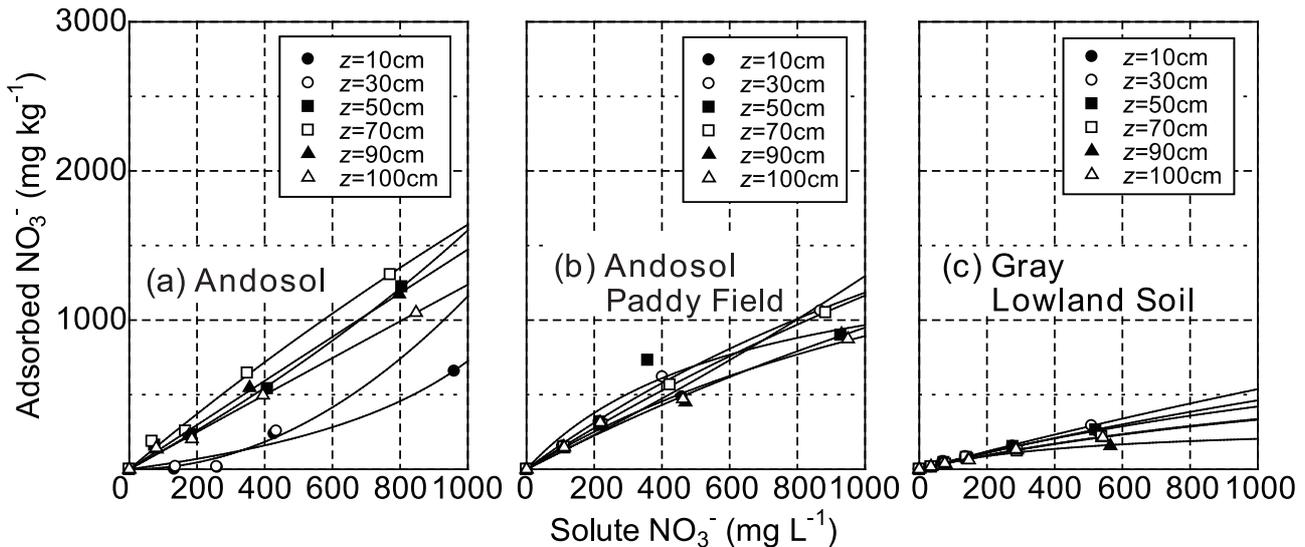
黒ボク土（畑）、黒ボク土（水田）および灰色低地土（水田）における深度毎の硝酸イオンの AI と吸着パラメータを、それぞれ Fig. 2 と Table 2 に示す。黒ボク土（畑）の深度 10, 30 および 50 cm 以外の土壌の AI の形状は凸型であった。これは、吸着剤表面と吸着質間に吸着を促進させる引力が作用していることを示しており、黒ボク土が硝酸を吸着するという既往の知見（Wada, 1989; 亀和田, 1997）と一致する。黒ボク土（畑）の土壌断面を観察したところ、地表面から深度 50 cm までは厚層多

腐植質黒ボク土（土色 7.5YR 2/1）、深度 50 cm 以深の下層土（土色 7.5YR 5/8）では、褐色の風化変質腐朽スコリアを含む軽石層が確認された。黒ボク土（畑）の AI は、深度 10, 30 および 50 cm において凹型を示した。このことは、深度 10, 50 cm における Langmuir 型の AI パラメータ  $k_2$  が負であったことと、深度 30 cm における Freundlich 型の AI パラメータ  $b$  が 1 よりも小さかったことに反映される。特に、黒ボク土（畑）の深度 10, 30 cm における AI の勾配は低濃度において非常に小さく、吸着量は約  $400 \text{ mg L}^{-1}$  の平衡濃度から急上昇する傾向を示した。また、深度 50 cm 以深（風化変質腐朽スコリアを含む軽石層）の硝酸イオン吸着量は、表層深度 10 ~ 30 cm の 5 ~ 7 倍程度であった（平衡濃度範囲  $100 \sim 200 \text{ mg L}^{-1}$  において）。表層黒ボク土壌における硝酸イオンの低吸着能の傾向と、深度 50 cm 以深における比較的高い吸着能の傾向を示した本実験結果は、亀和田（1997）が示した実験結果と一致している。表層黒ボク土壌が下層土壌と比較して硝酸イオン吸着能が小さくなった原因としては、腐植がアロフェン等の粘土鉱物の変異荷電部位に吸着し、この腐植が土粒子を覆う結果として正荷電を減少させたり、土粒子に吸着した腐植のカルボキシル基が負荷電を発生させたりすることが考えられる（Table 4 より、黒ボク土（畑）の深度 10, 30 cm の土壌はアロフェン質黒ボク土であることが判る）。著者らは年間を通じ、サンプリング地点の表層土を 1 ヶ月毎に定期的に取り出し、土壌抽出液の pH 等のモニタリングを行っている。その結果、pH は常時 6 付近（平均 pH = 5.985,  $\sigma = 0.447$ ,  $n = 14$ ）にあり、季節毎に大きな変化が認められないことから、年間を通じて表層土の AI の形状は変化しないと考えられる。また、低濃度領域における表層黒ボク土壌の硝酸吸着能力が小さいことを考慮すると、当該農耕地では、硝酸化成作用により生成した硝酸が雨水

**Table 2** 硝酸イオン ( $\text{NO}_3^-$ ) の深度別吸着等温パラメータ.  
Parameters for the adsorption isotherm of nitrate ion ( $\text{NO}_3^-$ ).

Depth (cm)	Andosol (upland field)			Andosol (paddy field)			Gray lowland field (paddy field)		
	$k_1$	$k_2$	$k_1/k_2$	$k_1$	$k_2$	$k_1/k_2$	$k_1$	$k_2$	$k_1/k_2$
10	0.3075	$-5.767 \times 10^{-4}$	-533.19	1.1206	$1.350 \times 10^{-4}$	8085.40	0.6092	$4.480 \times 10^{-4}$	1359.97
30	0.0011 <sup>*K</sup>	0.4970 <sup>*b</sup>	—	1.6907	$4.270 \times 10^{-4}$	3958.67	0.6140	$1.430 \times 10^{-4}$	4297.31
50	1.2447	$-2.232 \times 10^{-4}$	-5575.30	2.4826	$1.568 \times 10^{-3}$	1583.06	0.5734	$2.410 \times 10^{-4}$	2378.37
70	1.9138	$1.667 \times 10^{-4}$	11483.37	1.4483	$2.440 \times 10^{-4}$	5944.99	0.5239	$5.550 \times 10^{-4}$	944.71
90	1.4864	$8.566 \times 10^{-5}$	17353.23	1.1818	$2.440 \times 10^{-4}$	4837.08	0.6181	$2.028 \times 10^{-3}$	304.80
100	1.2514	$1.134 \times 10^{-4}$	11035.19	1.3933	$1.134 \times 10^{-4}$	2486.13	0.5144	$5.490 \times 10^{-4}$	937.16

数値 \*K および \*b は Freundlich 型吸着等温式である (2) 式のパラメータを表す



**Fig. 2** 深度毎の硝酸イオンの吸着等温線 (横軸: 平衡濃度, 縦軸: 風乾土 1 kg あたり吸着量). (a) 黒ボク土 (畑), (b) 黒ボク土 (水田), (c) 灰色低地土 (水田).

Adsorption isotherm lines for nitrate ion ( $\text{NO}_3^-$ ) at different depths.

とともに降下浸透し, 硝酸を含有した浸透水が下層風化軽石層まで到達したのち, 下層土壤に硝酸イオンが吸着されることが容易に推察される.

黒ボク土 (水田) の土壤断面は, 深度 0 ~ 15 cm が厚層多腐植質黒ボク土 (土色 5YR 2/1), 深度 15 ~ 72 cm が粘土分に富む厚層多腐植質黒ボク土 (土色 5YR 2/1), そして深度 72 cm 以深は風化変質腐朽スコリアを含む市軽石層 (土色 10YR 4/6) であった.  $0 \sim 200 \text{ mg L}^{-1}$  の低濃度領域における各深度の測定値は, それぞれほぼ重なり,  $c = 110 \text{ mg L}^{-1}$  において  $s \approx 150 \text{ mg kg}^{-1}$ ,  $c = 220 \text{ mg L}^{-1}$  において  $s \approx 320 \text{ mg kg}^{-1}$  であり, 表層黒ボク土 (畑) の 5 ~ 6 倍の硝酸吸着能が認められた.

一方, 灰色低地土 (水田) では黒ボク土とは対照的に, 低濃度領域における AI の勾配が非常に小さく, 最大吸着量は深度 30 cm を除き  $304 \sim 2378 \text{ mg kg}^{-1}$  と少なかった. また,  $c = 200 \text{ mg L}^{-1}$  以下の低濃度領域においては, 黒ボク土 (水田) と同様に, 各測定値がほぼ重なり,  $c = 100 \text{ mg L}^{-1}$  において  $s \approx 63 \text{ mg kg}^{-1}$ ,  $c = 200 \text{ mg L}^{-1}$  において  $s \approx 110 \text{ mg kg}^{-1}$  と, 黒ボク土 (水田) の約 50 % の硝酸吸着能を示した. リン酸アンモニウム液法 (土壤標準分析・測定法委員会, 1986) による黒ボク土 (水田) と灰色低地土 (水田) のリン酸吸収係

数を測定したところ, 黒ボク土 (水田) では  $12.3$  (深度 90 cm) ~  $17.4$  (深度 50 cm)  $\text{mg g}^{-1}$ , 灰色低地土 (水田) では  $6.20$  (深度 90 cm) ~  $9.49$  (深度 10 cm)  $\text{mg g}^{-1}$  であり, 本測定結果からも, 灰色低地土のアニオン吸着能が黒ボク土 (水田) よりも 50 % 程度少ないことが明らかになった.

本研究および今後の研究では, データベースとして利用する目的で, 吸着等温パラメータを整備して公表したいと考えている. そのためには, 各土壤層の基本的な理化学的記載が必要であるため, Table 3 と Table 4 に, 3 種類の土壤の深度毎の理化学的性質と選択溶解法 (伊藤, 1997) による鉄・アルミニウム・ケイ素含有率をそれぞれ記した.

## 5. まとめ

農耕地における無機態窒素の溶脱量を算定する既存の数理モデルに対し, 吸着量を過大評価した AI を適用すると, 窒素溶脱量を過小評価し, 環境に対する負のインパクトを小さく見積もる危険性が高い. このため, 本報にてカーブフィッティングを実施したように, 特に低濃度領域における AI の勾配を正確に表現することは非常に重要である. 今回実施した 3 種類の土壤における AI の

**Table 3** 3種類の土壌における深度毎の理化学的性質.

Chemical properties at different depths for three types of soils.

Soil type	Depth (cm)	pH (H <sub>2</sub> O)	EC (mS cm <sup>-1</sup> )	N content (g kg <sup>-1</sup> <sub>soil</sub> )	C content (g kg <sup>-1</sup> <sub>soil</sub> )	C/N ratio	CEC (cmol kg <sup>-1</sup> <sub>soil</sub> )	Na content (cmol kg <sup>-1</sup> <sub>soil</sub> )	K content (cmol kg <sup>-1</sup> <sub>soil</sub> )	Ca content (cmol kg <sup>-1</sup> <sub>soil</sub> )	Mg content (cmol kg <sup>-1</sup> <sub>soil</sub> )
Andosol (Upland field)	10	6.22	0.120	5.07	81.91	16.17	48.81	0.28	0.55	16.70	5.58
	30	6.10	0.100	5.27	86.20	16.37	48.54	0.39	0.55	17.17	4.40
	50	6.05	0.080	1.71	28.19	16.49	35.82	0.38	0.10	3.16	1.33
	70	6.12	0.080	0.94	12.04	12.81	43.69	0.35	0.18	3.43	1.65
	90	6.13	0.050	0.90	11.82	13.10	34.83	0.25	0.16	1.78	1.14
	100	6.11	0.030	0.47	5.46	11.55	30.83	0.27	0.14	1.96	0.35
Andosol (Paddy field)	10	6.60	0.179	5.43	80.52	14.82	54.97	0.28	0.96	24.25	4.99
	30	6.59	0.102	4.66	82.42	17.67	40.42	0.41	0.45	15.18	5.17
	50	6.34	0.124	4.93	87.57	17.75	52.46	0.39	0.33	14.76	2.84
	70	6.31	0.106	3.40	58.85	17.32	42.59	0.38	0.22	15.19	1.87
	90	6.66	0.081	1.26	12.37	9.84	24.87	0.43	0.68	9.77	1.68
	100	6.62	0.098	1.69	24.11	14.23	25.64	0.49	0.50	12.37	2.53
Gray lowland soil (paddy field)	10	5.82	0.150	2.14	24.86	11.60	18.50	0.18	0.15	8.04	1.56
	30	6.16	0.083	1.27	19.32	15.20	17.84	0.21	0.12	11.87	2.04
	50	6.23	0.079	0.89	13.15	14.81	22.77	0.24	0.16	11.00	2.82
	70	6.47	0.056	0.79	9.11	11.48	18.19	0.23	0.41	10.15	1.83
	90	6.44	0.085	0.70	7.60	10.91	15.78	0.24	0.24	10.20	1.65
	100	6.45	0.083	0.58	5.89	10.21	14.57	0.41	0.15	9.09	1.19

ECは電気伝導率, CECは陽イオン交換容量の略である. pHおよびECは, それぞれガラス電極法と1:5水浸出法により測定した. 全窒素量と全炭素量は乾式燃焼法を用いて測定した. CECはショーレンベルガー法を用いて測定した. Na, K, Ca, Mg量はCEC測定の際に得られた土壌の酢酸アンモニウム浸出液を用い, 原子吸光法により定量した.

**Table 4** 3種類の土壌における深度毎の土性・粘土含有率・選択溶解法による可溶鉄・アルミニウム・ケイ素含有量.

Soil texture, clay content and soluble Fe, Al, Si amounts at different depths for three types of soils.

Soil type	Depth (cm)	Soil Texture	Clay content (g g <sup>-1</sup> <sub>soil</sub> )	Fe <sub>ox</sub> (g kg <sup>-1</sup> <sub>soil</sub> )	Al <sub>ox</sub> (g kg <sup>-1</sup> <sub>soil</sub> )	Al <sub>py</sub> (g kg <sup>-1</sup> <sub>soil</sub> )	Si <sub>ox</sub> (g kg <sup>-1</sup> <sub>soil</sub> )	Al <sub>py</sub> / Al <sub>ox</sub>	Si <sub>ox</sub> content (%)
Andosol (Upland field)	10	CL	0.54	20.9	74.2	15.7	9.0	0.21	0.5
	30	SCL	0.58	18.4	68.0	15.8	11.2	0.23	0.6
	50	SL	0.72	23.4	95.1	12.9	14.6	0.14	1.1
	70	SCL	0.74	22.7	106.7	8.9	16.5	0.08	1.2
	90	SCL	0.65	24.2	105.0	7.2	11.7	0.07	0.8
	100	SCL	0.58	20.3	98.9	8.6	17.1	0.09	1.0
Andosol (Paddy field)	10	HC	0.62	19.4	77.9	14.3	19.4	0.18	1.2
	30	LiC	0.49	23.3	85.9	20.7	21.0	0.24	1.0
	50	LiC	0.34	21.7	73.9	17.8	13.9	0.24	0.5
	70	LiC	0.33	23.8	76.5	13.2	8.4	0.17	0.3
	90	HC	0.42	24.8	65.2	6.2	11.3	0.10	0.5
	100	LiC	0.35	20.8	55.7	8.2	14.3	0.15	0.5
Gray lowland soil (paddy field)	10	LiC	0.28	17.1	25.0	7.9	5.3	0.32	0.1
	30	SCL	0.1	18.0	26.3	9.6	4.7	0.36	0
	50	CL	0.17	24.5	20.7	7.6	3.9	0.37	0.1
	70	CL	0.15	9.9	23.4	12.3	1.6	0.53	0
	90	CL	0.18	7.0	22.4	11.4	2.0	0.51	0
	100	CL	0.15	15.8	23.0	8.8	2.1	0.38	0

Fe<sub>ox</sub>, Al<sub>ox</sub> および Si<sub>ox</sub> は, それぞれ 0.2 (mol L<sup>-1</sup>) 酸性シュウ酸溶液 (pH 3.0) 抽出による鉄含有量, アルミニウム含有量およびケイ素含有量の略である. Al<sub>py</sub> は 0.1 (mol L<sup>-1</sup>) ピロリン酸ナトリウム溶液 (pH 10.0) 抽出によるアルミニウム含有量の略である. 鉄およびアルミニウムは原子吸光法を用いて測定した. ケイ素は吸光度定量法を用いて測定した. Al<sub>py</sub> / Al<sub>ox</sub> < 0.5 且つ Si<sub>ox</sub> content ≥ 0.5 (%) の条件を満たす土壌はアロフェン質黒ボク土を表している (三枝ら, 1993).

形状のほとんどは凸型を呈した。しかし、黒ボク土(畑)の深度 0~50 cm の AI は凹型を呈した。これは、吸着剤と吸着質との間に作用する引力が非常に弱い場合に見られることが、近藤ら(2001)により示されている。

農耕地土壌中の無機態窒素の輸送動態を明らかにするための数値解析を実施する上で、本研究で得られた新たな知見を農耕地からの窒素溶脱シミュレーションのパラメータとして用いることで、各層位からの浅層地下水へと流出する無機態窒素の量を概算できるものと考えられる。さらに、環境に対する負のインパクトの大きさを見積もることも可能であり、窒素流出に対する地下水汚染の脆弱性を表現する指標を策定できるであろう。今後は、様々な土壌型の無機態窒素の吸着等温線を取得し、各深度の AI パラメータのインベントリを充実したいと考えている。

### 謝辞

本研究を実施するにあたり、栃木県農業試験場土壌作物栄養研究室および栃木県小山市の寺島征男氏からの圃場の土壌を提供して頂いたので、ここに深く感謝申し上げます。また、岩手県立盛岡農業高校の Ms. Sara Simon 氏に英文校閲を行って頂いたことを感謝いたします。

### 引用文献

- Freundlich, H.M.F.(1906): Über die adsorption in lösungen. Z. Phys. Chem., 57: 385-470.  
 伊藤豊彰(1997): 選択溶解法による可溶鉄・アルミニウム・

- ケイ素, 土壌環境分析法, 土壌環境分析法編集委員会. pp. 288-297, 博友社, 東京.  
 亀和田國彦(1997): 黒ボク土における養水分移動と作物生育に関する土壌溶液論的研究. 栃木県農業試験場報告, 46. p. 94.  
 近藤精一, 石川達雄, 安部郁夫(2001): 液相吸着, 吸着の科学 第2版. pp. 95-141, 丸善, 東京.  
 Langmuir, I.(1918): The adsorption of gases on plane surface of glass, mica and platinum. J. Am. Chem. Soc., 40: 1361-1402.  
 畑田尚哉(1995): 表層土壌中有害物質の挙動に関する基礎的研究—放射性の鉛・ヨウ素に注目した検討—. p. 2, 京都大学原子炉実験所学位論文.  
 直川拓司(2006): 肥料の種類と性質, 窒素質肥料各論, 肥料の事典, 尾崎尚人ら編. pp. 78-89, 朝倉書店, 東京.  
 日本土壌肥料学会監修(1986): 土壌標準分析・測定法. pp. 124-127, 博友社, 東京.  
 農林水産省大臣官房統計部(2003): 平成14年度持続的生産に関する実態調査, 農林水産統計 平成15年8月公表. p. 36.  
 三枝正彦, 松山信彦, 阿部篤郎(1993): 東北地方におけるアロフェン質黒ボク土と非アロフェン質黒ボク土の分布. 日本土壌肥科学雑誌, 60(4): 423-430.  
 Tani, M., Okuten, T., Koike, M., Kuramochi, K. and Kondo, R.(2004): Nitrate adsorption in some andisols developed under different moisture condition. Soil Sci. Plant Nutr., 50: 439-446.  
 Wada, K.(1989): Allophane and imogolite. In Minerals in Soil Environments, 2nd Ed. Eds. J.B. Dixon and S.B. Weed, pp.1051-1087, SSSA Book Ser. 1. SSSA, Madison, WI.

### 要 旨

近年, 化学肥料の施肥の増加により, 河川および地下水の硝酸汚染が進行している。農耕地中の硝酸の動態を把握するためには, 土壌深度毎の吸着等温線(AI)の情報を得る必要がある。しかし, 土壌型に依存するAIのパラメータリストは, まだ整備されていない状況にあるため, パラメータリストを早急に整備する必要がある。著者らは, アンモニウムイオンと硝酸イオンのパラメータリストを整備することを目的に, 手始めに黒ボク土(畑地), 黒ボク土(水田)および灰色低地土(水田)の土壌の吸着等温実験を行った。その結果, 黒ボク土(畑地)の深度30 cmを除くすべての試料においてLangmuir型のAIを得た。本研究では, 深度10~100 cmにおけるAIパラメータを算出し, シミュレーションプログラムの入力に必要な, アンモニウムイオンおよび硝酸イオンの吸着特性を比較できた。

キーワード: 黒ボク土, 灰色低地土, 吸着等温線(AI), 農耕地からの窒素溶脱