

各種有機物を 20 年間連用した黒ボク土畑圃場の各種養分の垂直分布

亀和田國彦・広沢美幸

摘要： 作物生産性への影響に併せて環境への影響を検討するため、20 年間各種有機物を連用した黒ボク土畑ほ場で深層の土壌の化学性への影響を明らかにした。表層から 5m まで、陰イオンではリン酸および硫酸が優占種であった。同様に陽イオンではカルシウムが優占種であった。リン酸は作土および耕盤層に最も多く下層ほど少なかった。硫酸は深さ 0.5~1.0m の今市軽石層に最も多く、それ以深では下層ほど少なかった。カルシウムは作土および耕盤層で最も高く、次いで 4m から 5m の粘土層、次いで 1m から 3m のローム層に多かった。今市軽石層は両極性が強く陰イオンを陽イオンと同等に吸着した。一方粘土層は陰イオンをほとんど吸着しなかった。リン酸の吸着は土層の電気化学的特徴に変化をもたらした。硫酸は固相および液相の双方に分布し、電気化学的性質の変化と液相無機イオン濃度の決定と移動に寄与した。土層内に存在する各イオン種の量は化学肥料および有機物の施用量に規定され、それらの垂直分布パターンは各土層の電気化学的特徴による影響を強く受けた。20 年間に施用されたリン酸の大部分は 1m 以内に蓄積した。同様に窒素は NO_3^- として 5m 以深に流亡しそのときの濃度はデントコーン鋤込み区で最も高く 2.1mmolL^{-1} (29.4mgkg^{-1}) であった。

キーワード： 有機物連用, 黒ボク土, 交換性陰イオン, 交換性陽イオン, 垂直分布

Vertical distribution of inorganic nutrients in the andosol field that had successive applications of various kinds of organic matter for 20 years

Kunihiko KAMEWADA, Miyuki HIROSAWA

Summary : We analyzed the effect of successive applications of organic matter over a period of 20 years on the deep-layer soil chemical characteristics of an andosol field. In particular, we focused on the effects of the organic treatment on crop productivity and on the surrounding environment. To a depth of 5 m, phosphate and sulfate were the dominant anions, whereas calcium was the dominant cation. The phosphate concentration was highest in the plowed topsoil and induced pan layers, and decreased at deeper layers. The highest concentration of sulfate was found in the Imaichi pumice layer, at depths of 0.5 – 1.0 m, and tended to decline with increasing depth. The calcium concentration, although highest in the plowed and induced pan layers, was highest next in the clay layer (at a depth of 4 – 5 m), followed by the loam layer (1 – 3 m). The Imaichi pumice layer had a strong bipolar charge and resulted in high adsorption of both anions and cations. Conversely, the clay layer adsorbed almost no anions. The adsorption of phosphate strongly affected the electrochemical characteristics of the soil layers. Sulfate was distributed in both the solid and liquid phases and contributed to changes in the electrochemical properties, concentrations and movement of inorganic ions in the liquid phase. The amounts of each ionic species in the soil layers was determined by the levels of chemical fertilizer and organic matter applied to the soil. The vertical distribution patterns of the ions were strongly affected by the electrochemical characteristics of each soil layer. Most of the phosphate applied over the 20 year period was accumulated within the top 1 m of the soil. Most of the nitrogen, however, was found at layers deeper than 5 m, in the form of NO_3^- . The highest concentration of NO_3^- at the 5 m depth was 2.1mmolL^{-1} (29.4mgkg^{-1}), in a test plot that had been treated with repeated applications of plowed-in dent corn.

Key words : successive applications of organic matter, Andosol, exchangeable anions, exchangeable cations, vertical distribution

I 緒言

著者らは黒ボク土畑地で作物を栽培しながら 20 年間各種有機物を連用し、前報⁹⁾では、有機物の種類の違いおよび施用の有無が作物生産量および作土の理化学性に及ぼす影響を検討した。その結果、作物生産量は有機物と化学肥料由来の窒素施用量、土壌の可給態リン酸水準および可給態窒素水準に大きく影響され、また可給態窒素含量は有機物施用量に比例することを明らかにした。有機物の連用が作土の生物性、化学性ならびに物理性に变化をもたらすことはこれまでに多数の知見がある。

さらに有機物から供給された各種養分は作土の富化のみならず、浸透水に溶解して下層に移動しているものと考えられる。それら養分は、それぞれ、土壌との反応性が異なり、そのため養分の種類毎に移動の速度は異なると考えられる。さらに土壌は各種性質の異なる各種土層により構成され、各種養分の吸着、移動および分布にはそれら性質の影響を受けるものと考えられる。各種養分の集積は比較的浅層においては作物への養分供給源として評価される一方、深層においては環境への負荷源となりうる。本報では、特に環境負荷の面から有機物連用の意義を検討するため、20 年間有機物を連用した圃場において表層から 5m までの土壌を採取し、主な物理性および化学性を測定した。

II 方法

1. 試験圃場

第 1 表 試験期間中の年平均気温および年間降水量

年	平均気温 ℃	年間降水量 mm
1976	13.2	1539
1977	13.1	1623
1978	13.4	989
1979	14.3	1355
1980	12.9	1457
1981	12.4	1459
1982	13.4	1587
1983	12.9	1308
1984	12.3	864
1985	13.2	1469
1986	12.5	1351
1987	13.6	1314
1988	12.7	1668
1989	13.9	1984
1990	14.6	1634
1991	14.1	1846
1992	13.6	1373
1993	13.0	1461
1994	14.5	1154
1995	13.7	1403
1996	13.3	1082
1997	14.1	1566
平均	13.4	1426

試験は、宇都宮市の栃木県農業試験場畑ほ場で行った。本ほ場は標高 170m の台地上にあり、土壌類型は「表層多腐植質黒ボク土」(農耕地土壌分類第 2 次案)に分類される。有機物の連用を開始した 1976 年から最終作付けの二条大麦を収穫した 1997 年の平均気温および年間降水量を第 1 表に示した。平均気温の 21 年間の平均値は 13.4℃、年間降水量は 1426mm であった。

2. 有機物の連用

栽培作型として穀類導入系および野菜導入系を設定し、穀類導入系には 1 無窒素区、2 三要素区(化学肥料のみ)、3 三要素+稲わら堆肥区、4 三要素+牛糞区および 5 三要素+豚糞区を、また野菜導入系には 6 三要素区(化学肥料のみ)、7 三要素+稲わら堆肥区、8 三要素+青刈デントコーン鋤込み区、9 三要素+麦わら鋤込み区および 10 無肥料区を設置した。

これら処理は 1976 年 11 月に施肥した二条大麦作から 1997 年 6 月に収穫した二条大麦まで 41 作、20 年間実施した。なお、詳しい処理内容は前報で述べたとおりである。

3. 土壌の採取および分析

土壌は、1997 年 6 月に、ハンドオーガーにより深さ 25cm 間隔で 5m まで採取した。各区から 3 点採取し、合わせて分析試料とした。なお、表層から 50cm までは、作土を最初の試料とし、耕盤層を 2 番目の試料、さらに耕盤下端から 50cm までを 3 番目の試料とした。土壌は含水率測定後、風乾し 2mm の篩で篩別し、分析に供した。

全試料について、pH(H₂O)、pH(KCl)、EC(導伝率)、交換性陽イオン類、交換性陰イオン類ならびに水溶性の陰イオン類および陽イオン類を測定した。交換性陽イオン類は、風乾土 1g に 0.05M 酢酸アンモニウム、0.0114M 塩化ストロンチウム溶液 200mL を加え 1 時間浸透、ろ過後、原子吸光分光光度計でカルシウム、マグネシウム、カリウムおよびナトリウムを測定した²⁾。またリン酸を除く交換性陰イオンは風乾土 2g に 0.01M 水酸化ナトリウム溶液 100mL を加え 1 時間浸透、ろ過後、イオンクロマトグラフで塩化物イオン、硝酸イオン、硫酸イオンを測定した。さらに Bray-2 変法(風乾土 1g に浸出溶液 50mL)測定値を交換性リン酸とした。さらに、水溶性陰イオン類および陽イオン類として EC 測定溶液、つまり、風乾土 10g に水 50mL を加え 1 時間振とうした懸濁液をろ過後、カルシウム、マグネシウム、カリウム、およびナトリウムを原子吸光分光光度計で、塩化物イオン、硝酸イオン、および硫酸イオンをイ

第 2 表 処理区の構成および処理概要

作型	処理	処理内容	
穀類系	無窒素	窒素無施用	
	(陸稲または大豆+二条大麦)	三要素	化学肥料で三要素(N+P+K)施用
	稲わら堆肥	稲わら堆肥	化学肥料+稲わら堆肥施用
	牛糞	牛糞	化学肥料+生牛糞施用
	豚糞	化学肥料+生豚糞施用	
野菜系	三要素	化学肥料で三要素(N+P+K)施用	
	(レタスまたは白菜+二条大麦)	稲わら堆肥	化学肥料+稲わら堆肥施用
	デントコーン鋤込み	デントコーン鋤込み	化学肥料+栽培デントコーン全量鋤込み
	麦わら鋤込み	麦わら鋤込み	化学肥料+栽培麦わら全量鋤込み
	無肥料	無肥料	

注. 資材施用量など処理詳細は前報参照

オンクロマトグラフで測定した。さらに、硝酸一過塩素酸分解後、バナドモリブデン法により全リン酸を測定した。

さらに、野菜導入系の三要素区の採取試料は固相率を 100mL 採土管法で、CEC をセミマイクロシローレンベルガー法で、ならびに全炭素含量を乾式燃焼法 (NC アナライザー) で測定した²⁾。

Ⅲ 結果

1. 層序

第 1 図に調査ほ場の層序を示した。調査圃場は、表層から 0.5m 程度まで腐植層が分布し、そのうちおおよそ 0.2m までが作土、0.35m までが耕盤層であった。

0.5m から 1.0m までは今市軽石層で、0.5m 付近の腐植層との境界面に、僅かに七本桜軽石が分布した。

1.0m から 3.25m まではローム層 (腐植の少ない黒ボク土) で、2.0 から 2.5m 程度に暗色帯が観察された。2.5m から 3.0m は粒径組成が粗粒質で土色の明度が高かった。3.0 から 3.25m は淡灰色の粗粒砂層で、安山岩・ガラス軽石等の岩片や少量の鹿沼軽石粒を含む火山性礫層と見なした。

3.25m から 4.25m に鹿沼軽石層が分布した。この層位内には、地点によって脱鉄、粒の崩壊ならびに粘土化が進んだ部分があり、長期間の滞水のためと判断した。4.25m から 5.0m

は土性が CL から LiC の半風化円礫を含む粘土層であった。沼軽石層と粘土層の境界面には鉄の集積層が観察された。また鹿沼軽石層内で脱鉄・粘土化が進んでいる箇所下部粘土層内に鉄の脈状斑およびマンガンの点状斑が観察された。

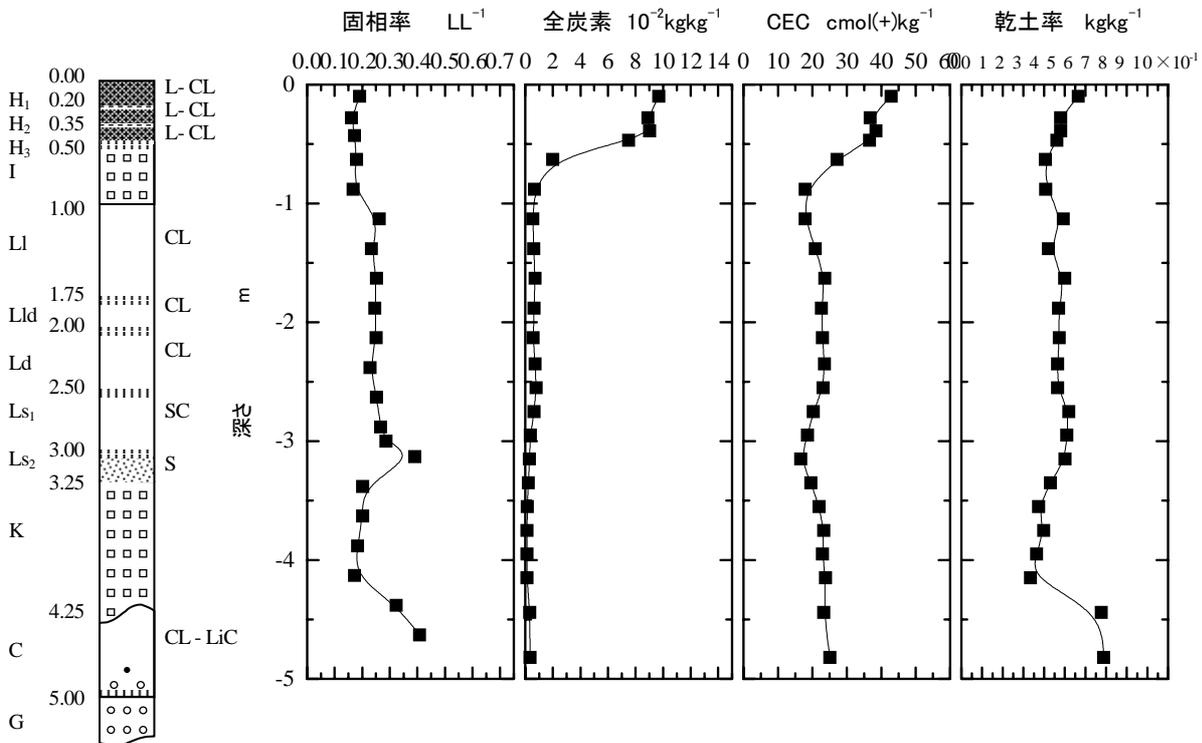
5.0m 以下は半風化円礫による礫層で、宝木段丘礫層に相当する礫層と判断した⁸⁾。

2. 基本的な物理性および化学性

第 1 図に野菜導入系の三要素区の固相率、全炭素含量、CEC および乾土率を併せて示した。

試料採取時の乾土率は、腐植層では作土層を除き 0.46 から 0.48kgkg⁻¹ (含水率 1.08 から 1.16kgkg⁻¹) であったのに対し、今市軽石層では 0.41kgkg⁻¹ (含水率 1.45kgkg⁻¹) と低かった。ローム層では 0.42 から 0.50kgkg⁻¹ (含水率 0.92 から 1.15kgkg⁻¹) の範囲にあり、暗色帯で低く砂質層で高い傾向であった。鹿沼軽石層では 0.34 から 0.43kgkg⁻¹ (含水率 1.32 から 1.99kgkg⁻¹) と他の層位に比べて非常に低く、また下層ほど低い傾向であった。粘土層は 0.68 から 0.69kgkg⁻¹ (含水率 0.45 から 0.48kgkg⁻¹) と最も高かった。

全炭素 (T-C) 含量は、腐植層では 7.5 から 9.7 × 10⁻³kgkg⁻¹ (%) の範囲にあった。ローム層では 0.3 から 0.8 × 10⁻³kgkg⁻¹ で、ローム層内の暗色帯で高く砂質層で低い傾向であった。



第 1 図 調査ほ場の層序および主な理化学性

注. 左側記号: 層位名 (H: 腐植層, I: 今市軽石層, L: ローム層・明色, Lld: ローム層・中間色, Ld: ローム層・暗色, Ls: ローム層・砂質, K: 鹿沼軽石層, C: 粘土層, G: 段丘礫層)
左側数値: 深さ (m), 右側記号: 土性 (触感)

CECは、腐植層では37から43 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、ローム層では17から24 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ で、T-Cと同様に暗色帯で高く砂質層で低い傾向であった。鹿沼軽石層では22から24 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ で、ローム層と同水準であった。

固相率は、腐植層では0.16から0.19 LL^{-1} であった。ローム層では0.23から0.39 LL^{-1} で、暗色帯で低く砂層で高い傾向であった。粘土層では0.32から0.41 LL^{-1} と非常に高かった。

以上から、表層から4.25mまでは火山放出物由来で、それ以下は、円礫を含み段丘礫層に接していることから河川堆積物と判断した。

3. 交換性陰イオンおよび同陽イオン

交換性陰イオンおよび陽イオンの垂直分布を第2図に示した。ただし、本図のリン酸はBray2測定値ではなく硝酸過塩素酸分解溶液の測定値を示した。また、図は測定値を深さ方向にスプライン補完し、さらに積み上げて示した。

穀類系三要素区の交換性陰イオンは、全層にわたり、リン酸(HxPO_4^{3-x} ,以下 PO_4^{3-})および硫酸イオン(SO_4^{2-})が優占種で、塩化物(Cl^-)イオンおよび硝酸イオン(NO_3^-)は相対的に低水準であった。リン酸は作土層で他の陰イオン種に比べて圧倒的に多く、作土以深では深くなるほど減少する傾向であった。0.7から0.8mの今市軽石層内、1.5mのローム層上部および2.5mのローム層中部にそれぞれピークが認められた。硫酸イオンは表層から0.5mまでには少なく、0.5mから1mの今市軽石層に最も多く、この層位では優占種であった。さらに1.5mのローム層上部および2.5mのローム層中部にピークが認められ、表層付近に少なかった他はリン酸と同様の傾向であった。この傾向はすべての区で共通であった。

穀類系三要素区の交換性陽イオンは全層にわたり、カルシウム(Ca^{2+})、マグネシウム(Mg^{2+})、カリウム(K^+)およびナトリウム(Na^+)が優占種であった。0.5mまでの表層、1mから3mのローム層および4mから5mの粘土層に分布が多く、0.5mから1mの今市軽石層および3mから4mの鹿沼軽石層には少なかった。ローム層の中でも2.5m付近の暗色帯付近に特に多かった。 Ca^{2+} が最も多い傾向は各層位間で共通していたが、イオン間のバランスは層位ごとに特徴的な分布を示した。 K^+ は1.2m程度のローム層上端部に特異的に多く分布した。ナトリウムは3mから4mの鹿沼軽石層に多く分布した。この傾向も、すべての区で共通であった。

穀類系・稲わら堆肥区では3~4mの鹿沼層の交換性陽イオンの値が穀類系他の処理区に比べて高く、その上部のローム層との差が小さかった。また同様に野菜導入系・三要素区、同堆肥区および同麦わら区も3~4mの値が他の処理区に比較して高い傾向であった。

また0.5~1mの今市浮石層の交換性 SO_4^{2-} の値が特に穀類系・三要素区で、野菜導入系・堆肥区、同・青刈デントコーン

区および同・麦わら区で高い傾向にあった。

4. pH

pHの値を第2図に併せて示した。 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ は各処理区ともに1mから5mまでの範囲で6.0前後の値で変化が小さかった。作土の値は前報で述べたとおり堆肥施用区で高いなど処理間差が大きく、耕盤層は一律に低下し、各処理区とも1m程度で最も高い測定値が得られた。

$\text{pH}(\text{KCl})$ の値は作土で高く、耕盤層で低下し、1mで最も高い値となる傾向は $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ と同様であったが、それ以下は同様に低下し最下層の粘土層では5.0未満の値であった。

5. 液相無機イオン濃度

土壌:水=1:5のEC測定溶液中の無機イオン存在量と土壌採取時の含水率から換算した液相無機イオン濃度を第3図に示した。重炭酸イオン(HCO_3^-)濃度は土壌の $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ に基づき、また土壌空気 CO_2 濃度を大気中の10倍と仮定して推定した。

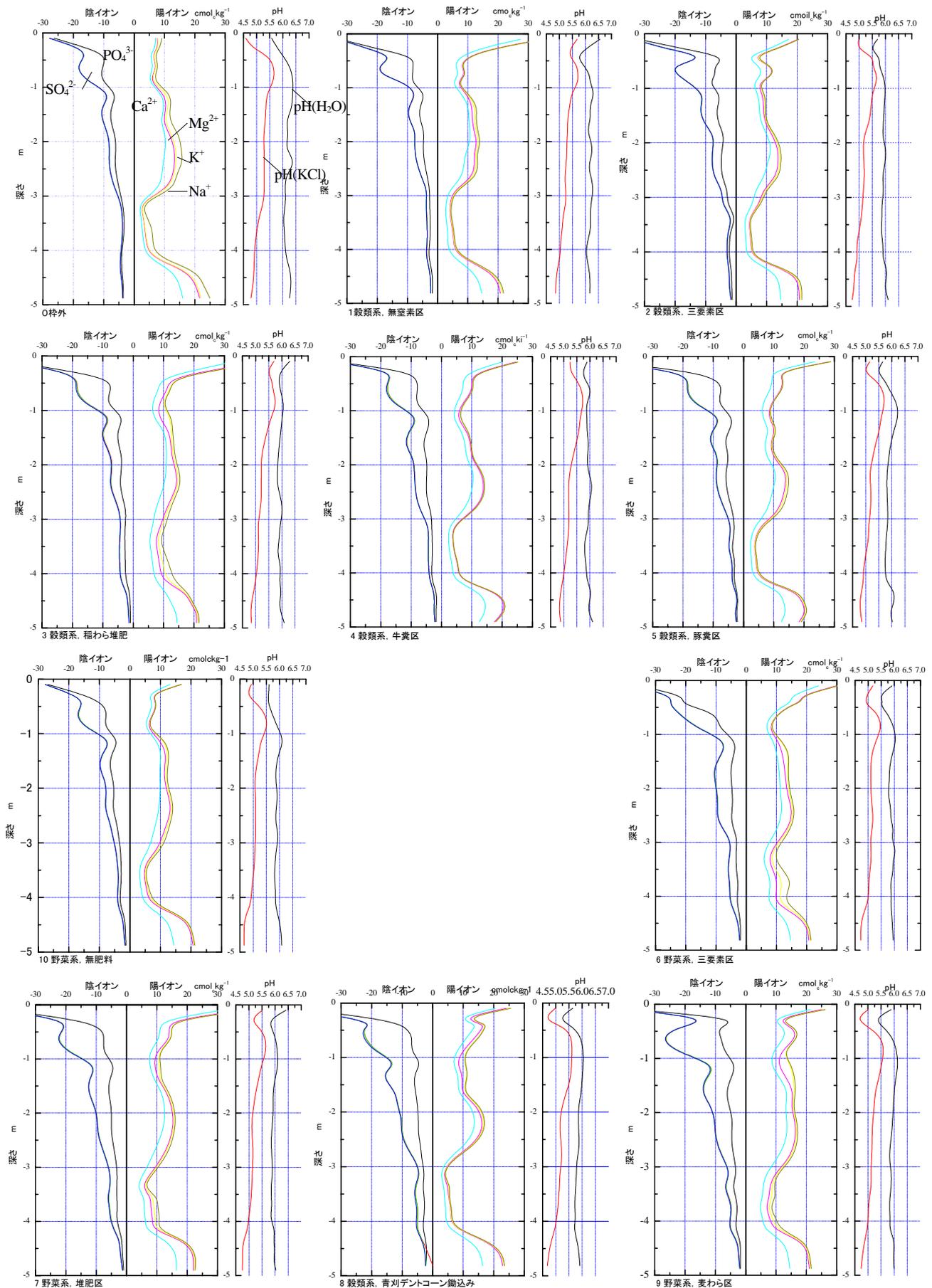
5mまでの水浸出性の各養分含量は、交換性に比べて、処理間差が大きかった。

各区、各層位で陰イオンの中では SO_4^{2-} が優占種で、次いで NO_3^- が多かった。pHが高い層位では HCO_3^- も比較的高かった。陽イオンでは Ca^{2+} が優占種であった。イオン種間のバランスは $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$ で、交換性陽イオンと同様であった。

液相無機イオン濃度合計値は、有機物を施用していない区では層位間の差が小さく全層にわたってより均一な値であったが、各種有機物を連用した区では0.5mから3.0m、つまり今市軽石層およびローム層で値が高く、鹿沼軽石層および粘土層で値が低い傾向であった。

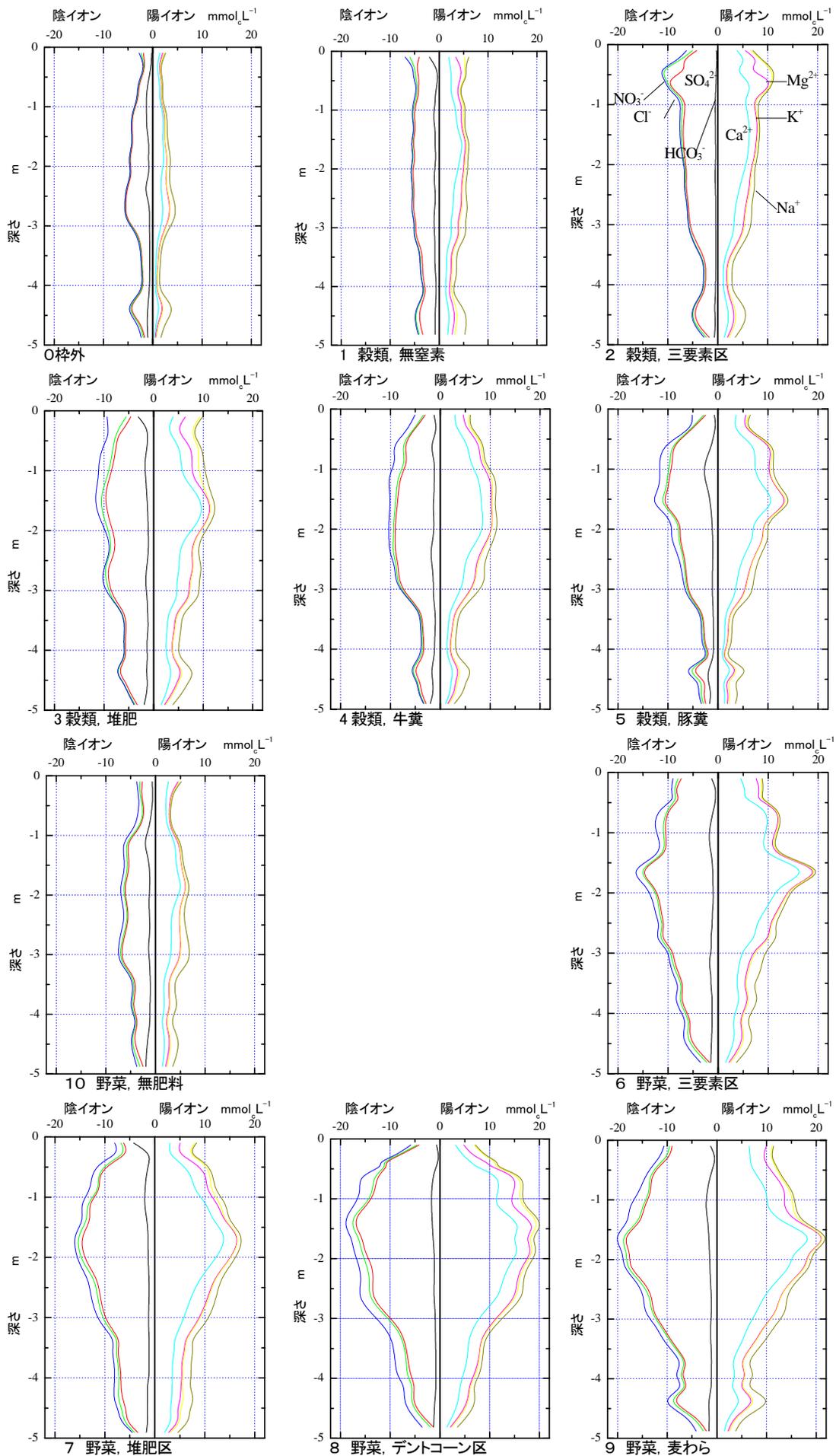
SO_4^{2-} 含量は野菜系のデントコーン鋤込み区ならびに麦わら鋤込み区で多く、この傾向は、交換性画分と同様であった。深さ方向の分布の傾向は、交換性画分同様に各処理区とも層序に対応し、この傾向も交換性画分と同様であった。分布のピークが深さ0.75m付近の今市軽石層下部、1.5m付近のローム層上部、ならびに深さ4m付近の鹿沼軽石層下部にあり、この傾向も交換性画分と同様であった。

交換性 SO_4^{2-} 含量とEC測定溶液中 SO_4^{2-} 濃度との関係を第4図に示した。両値には各層位毎に正の相関がみられた。腐植層(作土)、鹿沼軽石層および粘土層では交換性画分に対するEC測定溶液中濃度が高く、土壌の SO_4^{2-} 吸着能が小さく SO_4^{2-} の大半が液相中にあることが示された。一方、今市軽石および腐植層(耕盤下層)は交換性画分に対するEC測定溶液中濃度が低く SO_4^{2-} 吸着能が大きい事を示している。



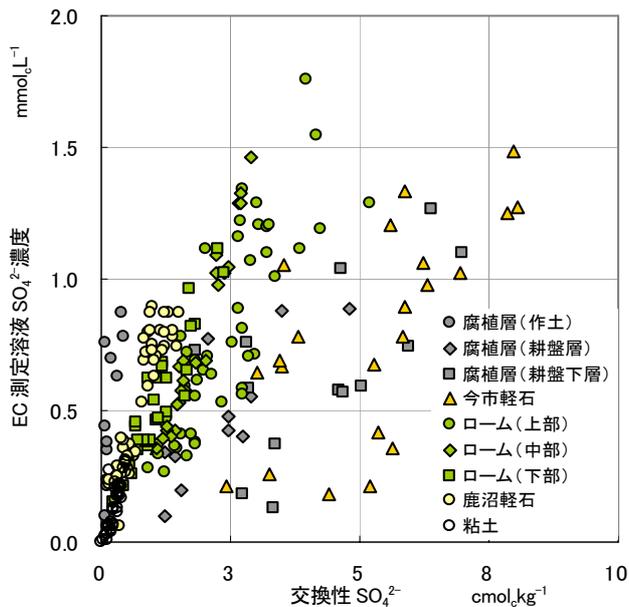
第2-a図 交換性陰イオン、陽イオンおよびpHの垂直分布(穀類系)

注. 陰イオンおよび陽イオン類含量は、ベースライン補完後、積み上げ表示。陰イオンは内側から PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , NO_3^- , Cl^- は相対的に値が小さいため図中ではほとんど認識できない。陽イオンは内側から Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ 。



第3図 液相無機イオン濃度推定値

注. 測定溶液中濃度および含水率から推定, 各線はベースライン補完後積み上げ表示



第 4 図 交換性硫酸含量と EC 測定溶液硫酸イオン濃度との関係
 注. 両値には正の相関がみられ, 腐植層(作土), 鹿沼軽石層および粘土層で交換性成分に対する EC 測定溶液注濃度が高く, 土壌の SO_4^{2-} 吸着能が小さい事を示している. 一方, 今市軽石および腐植層(耕盤下層)は交換性成分に対する EC 測定溶液中濃度が低く SO_4^{2-} 吸着能が大きい事を示している

6. 各層位の電気化学的特徴

第 5 図に $pH(H_2O)-pH(KCl)$ (以下「 ΔpH 」と言う)と陽イオン吸着総量-陰イオン吸着総量 (以下, 「無機イオンネット吸着量」という) の関係を, 層位別に示した. また, 第 6 図に $pH(KCl)$ と無機イオンネット吸着量関係を示した.

第 5 図の ΔpH と無機イオンネット吸着量の関係を示すプロットは, 作土を除いて層位ごとに特徴的に分布し, 全体の傾向は ΔpH が高いほど無機イオンネット吸着量も高い傾向であった. 粘土層は ΔpH , 無機イオンネット吸着量とも他の層位に比較して最も高い位置に分布し, 一方, 今市軽石層は両値とも最も低い位置に分布した. ローム層と鹿沼軽石層は ΔpH , 無機イオンネット吸着量ともに今市軽石層および鹿沼軽石層の中間に分布したが, 無機イオンネット吸着量はローム層でより高い値であった. 作土の ΔpH は 0.5~0.9 程度の範囲に分布したのに対し無機イオンネット吸着量は 7 から 40cmol.kg^{-1} と極めて広い範囲に分布した.

第 6 図の $pH(KCl)$ と無機イオンネット吸着量の関係も作土を除いて層位ごとに特徴的に分布し, 全体の傾向は $pH(KCl)$ が低いほど無機イオンネット吸着量が高い傾向であった. 粘土層の $pH(KCl)$ は層位間で最も低く, 一方, 今市軽石層の $pH(KCl)$ は最も高かった. ローム層と鹿沼軽石層の $pH(KCl)$ は, 両土壌の中間に分布した.

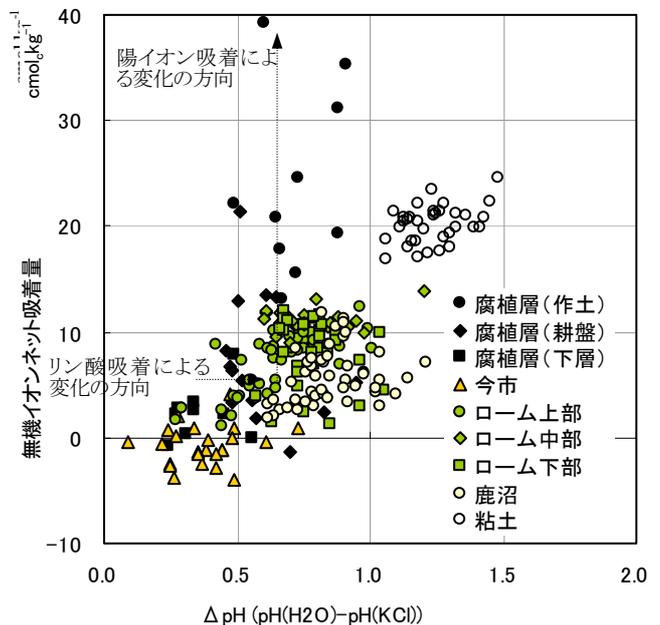
7. 養分の収支と土層内存在量

第 7 図に窒素(N), リン(P), カリウム(K), カルシウム(Ca)およびマグネシウム(Mg)について, 試験期間内の収支量(余剰量)と土層内存在量との関係を示した. 各養分の土層内存在

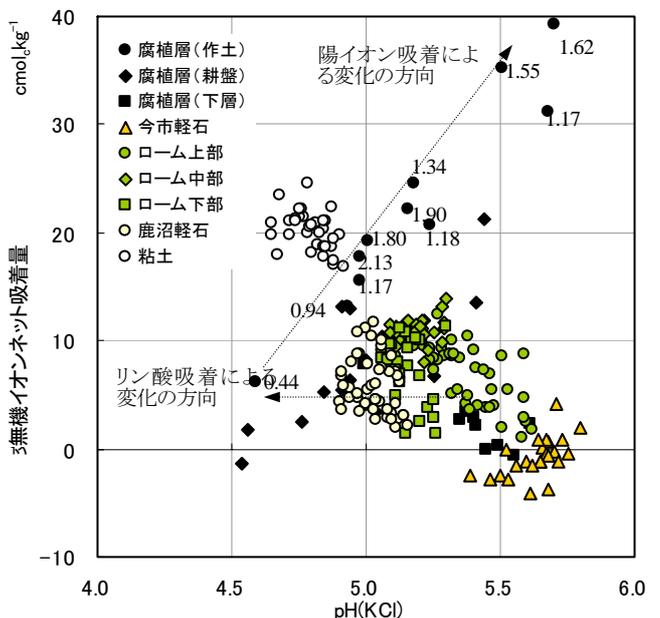
量は 1m まで, 5m までともに収支量とおおむね直線的な関係にあった.

N は 1m までの存在量と収支との関係を示す直線の傾きは 0.03 で, 同様に 5m までの傾きは 0.11 であった. P の 1m までの存在量の回帰直線の傾きは 1m では 0.12, 5m では 0.05 であった. 同様に K は 1m の傾きが 1.10 で存在量と収支量とがおおむね一致している. また Ca は 0.85, Mg は 0.91 であった.

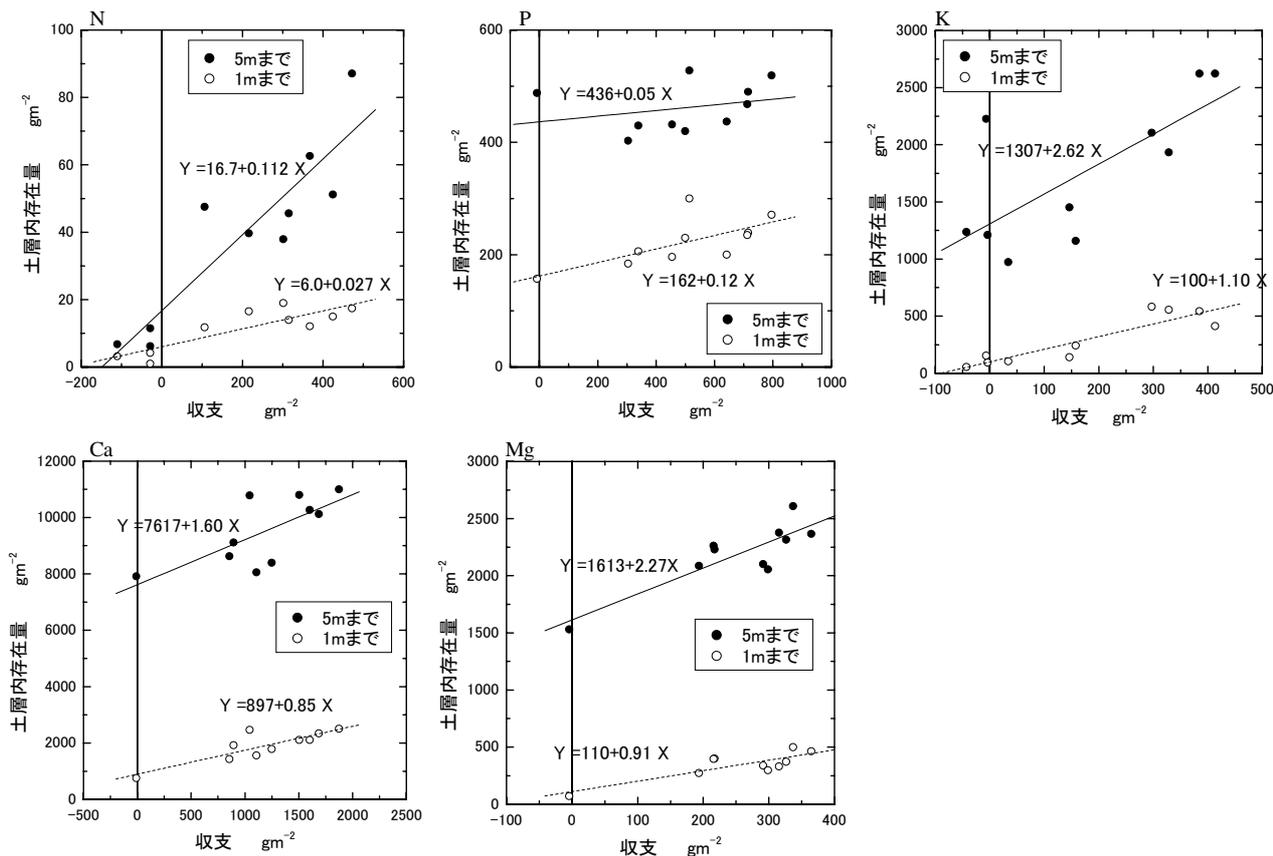
第 3 表に表層から 1m までと 5m までに存在する交換性 SO_4^{2-} の量を示した. 交換性 SO_4^{2-} 存在量は 1m まで, 5m までともに野菜系・麦わら区, ・デントコーン区および・稲わら堆肥区で多かった.



第 5 図 ΔpH と無機イオンネット吸着量との関係
 $\Delta pH = pH(H_2O) - pH(KCl)$



第 6 図 $pH(KCl)$ と無機イオンネット吸着量との関係
 無機イオンネット吸着量 = 交換性陽イオン - 交換性陰イオン
 図中の値は Bryll 報によるリン酸含量



第7図 窒素、リン、カリウム、カルシウムおよびマグネシウムの20年間の収支と土層内存在量との関係

第3表 土層内交換性硫酸存在量 molm⁻²

作型	処理	1mまで	5mまで
	区外	11.4	28.8
穀類系	無窒素	12.9	37.1
	三要素	17.2	48.9
	稲わら堆肥	14.8	46.8
	牛糞	16.4	51.7
	豚糞	17.0	46.5
野菜系	三要素	17.3	57.0
	稲わら堆肥	25.2	70.6
	デントコーン鋤込み	26.9	78.1
	麦わら鋤込み	30.3	80.2
	無肥料	13.6	37.4

IV 考察

1. 養分の垂直分布パタンの形成因子

栄養塩類の土層内垂直分布パタンの形成には、層序と、それぞれの土層を形成する土壌の物理的、電気化学的性質および養分の収支ならびに土層内での物質の形態変化が関わる。本試験結果で示した各種養分の土層内存在量は処理区間で異なるものの、垂直分布パターンは各区間で共通している。また、試験期間の20年間、各養分が毎年一定の余剰量

が土壌に供給されたと仮定すれば、土層内に形成された垂直分布パターンは土層ごとの電気化学的性質に影響されたと考えらるべきであろう¹¹⁾。

2. 各層位の電気化学的特徴

第5および6図に示したように、作土層の無機イオンネット吸着量およびpH(KCl)は、ともに広範囲に分布し、さらにpH(KCl)が高いほど無機イオンネット吸着量も高い傾向にあり、無機イオンネット吸着量の違いがpH(KCl)を変化させているものと考えられる。またPO₄³⁻水準が高いプロットほど同一pHでの無機イオンネット吸着量は高い傾向にあり、PO₄³⁻の吸着が陰イオン吸着量を低下させ電気化学的性質を変化させていることを示している。つまり、PO₄³⁻が高いほど陰イオン吸着量よりも陽イオン吸着量が増加することが示されている。

これに対して、腐植層・下層以深の土壌の無機イオンネット吸着量やpHとの関係は層位ごとに特徴的に一定の範囲に分布し、無機イオンネット吸着量に大きな処理間差は生じておらず、その結果として電気化学的性質にも大きな処理間差が生じていないことが示された。腐植層の中でも耕盤下層のプロットは今市軽石と同じ傾向を示した。腐植層のうち、作土および耕盤層は畑条件下での施肥によって、多量にPO₄³⁻が吸着しているため現在は陽イオン吸着能が上昇し陰イオン吸着能は低下しているものの、本来、腐植層も今市軽石層と同様に、

高い陰イオン吸着能、つまり両極性を有していることが示された。

今市軽石層は、第5図に示したように ΔpH 、無機イオンネット吸着量ともに他の層位よりも小さい。しかし、実際の今市軽石層は第2図に示したように陰イオン、陽イオンともに吸着し、特に SO_4^{2-} を $10\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ と比較的多量に吸着し無機イオンネット吸着量が小さくなっていることが読みとれる。つまり今市軽石層は、 ΔpH が小さいことが示すように通常のpH領域で両極性が高く、中性塩を添加しても陽イオンに相当する量の陰イオンを吸着するためpHの低下はわずかである。

1mから3mに分布するローム層は第5図に示すとおり今市軽石や腐植層耕盤下層に比べて無機イオンネット吸着量、 ΔpH ともに大きく陰イオンに比べて陽イオン吸着量が多い土壤

である。実際の吸着量も陰イオンに比べて陽イオンが多くなっている。陽イオン吸着量は、2mから2.5mの範囲で各区ともに最も多い。この層位は第5および6図でローム中部として示され、やはりローム上部および下部に比べて無機イオンネット吸着量が高くpH(KCl)が低く ΔpH が高いという特徴を有し、腐植層に似た性質を示している。この層位は土色の明度が暗く埋没腐植層と考えられ、 PO_4^{3-} 含量が高く、その結果、やや作土層に似た性質を示すものと考えられる。

鹿沼軽石層の無機イオンネット吸着量は $2\sim 12\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ の比較的低水準の狭い範囲に分布したのに対し ΔpH は広範囲に分布し、硫酸吸着量の違いが ΔpH に影響しているものと考えられる。実際の吸着量は直上のローム層に比較すると陰イオン、陽イオンともに少ない。ショーレンベルガー法によるCECは $20\sim 25\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 程度で上部のローム層と同水準であり、これらのことから鹿沼軽石層の無機イオン吸着量はpH依存性が高く、実際の土層内では陽イオン、陰イオンともに吸着量が少ないものと考えられる。

段丘礫層の上部に位置する粘土層は、 ΔpH が高く陰イオン吸着能が極めて低い。また無機イオンネット吸着量は高く陽イオン吸着能は高い。これらの性質は非火山性土壌の特徴である。またショーレンベルガー法によるCECと実際の無機イオンネット吸着量は同水準で無機イオン吸着量に対する液相塩濃度の影響が少ないことも示されている。粘土層は陰イオン吸着力が小さく、KCl添加によるpHの低下が著しく、実際に陰イオンをほとんど吸着していない。

3.各種養分の層位分布の形成経過

PO_4^{3-} は土壤への吸着力が極めて強く第2図に示すように表層に集積し、土層内をほとんど移動しないことが示された。第7図に示したリンの土層内存在量は、1m、5mともに収支の増加に伴って増加したが、両者の回帰直線の傾きは同水準で、20年間の収支量、つまり余剰量の大部分が1m以内に蓄積していること

を示している。

黒ボク土への PO_4^{3-} の吸着は土壤の電気化学的性質を大きく変化させる。つまり、 PO_4^{3-} 吸着によって陰荷電が増加し陽荷電が減少するため、陽イオン交換能が増加し陰イオン交換能が低下する。

その結果多量に PO_4^{3-} が吸着した表層土壤で硫酸等他の陰イオンの吸着は阻害されその結果、 SO_4^{2-} は耕盤層に深に浸透し、第2図に示したように陰イオン吸着能の高い次層の今市軽石層に多量に吸着したものと考えられる。栃木県内の畑圃場233点で表層から耕盤下層まで(60cm程度)を調査した結果、黒ボク土畑ほ場では NO_3^- イオンおよびCl⁻に比較して SO_4^{2-} イオンは含量が最も高く³⁾、また下層ほど高かった。これらの結果から作土層への PO_4^{2-} の蓄積が作土層からの硫酸の流亡と、下層への蓄積を促す現象は、黒ボク土畑ほ場で一般的なものと考えられる。

またリンの多量吸着による陰荷電の増加と陽荷電の減少によって、同一pHで陽イオン吸着量が増加することになる。つまり、土壤にリン酸が多量に吸着すると、同じ陽イオン吸着量でのpHが低下するとも言える。また、中性塩が添加された場合にpHの低下が大きくなる。リン酸吸着が多い土壤で適正pHを維持するためには陽イオン類も多量に必要になると言える。

pHの垂直分布は0.3m程度の耕盤層で低く、1.0mの今市軽石とローム層の境界付近で高いという特徴的なパターンを描いた。耕盤層は PO_4^{3-} の吸着量が比較的高いのに対し Ca^{2+} などの陽イオン類の吸着量が少ない。また1mの位置は PO_4^{3-} 吸着量が少なく、相対的に陽イオン吸着量が多く、これら傾向がpHのパターンを形作っていると考えられる。多量に PO_4^{3-} が集積している作土では、陽イオン類の流亡によってpHが低下しやすいと言える。穀類系、野菜系ともに稲わら堆肥区では、 PO_4^{3-} 吸着が多いのに併せて陽イオン類の供給と吸着が多く、pHは低下していないが、穀類系・豚糞区や野菜系・デントコーン鋤込み区では相対的に陽イオン類の供給が少ないため、pHが低下している。

黒ボク土は一般に硫酸イオンも多量に吸着する。 SO_4^{2-} の高い吸着性は、林地土壌では酸性沈着に伴うpHの緩衝作用の面から評価されている³⁾。本調査圃場で、 SO_4^{2-} の吸着量はローム層の中で上部の吸着量が最も多く、中部および下部は比較的小なかつた。ローム中部は暗色帯で PO_4^{3-} の吸着量が多いため、作土と同様に SO_4^{2-} が吸着しにくいものと考えられる。鹿沼軽石層は硫酸吸着量がさらに少ない。鹿沼軽石層は同時に陽イオン類の吸着量も少なく、前項で推測したとおり実環境下で無機イオン吸着活性が低いとめと考えられる。

液相中 SO_4^{2-} 濃度は穀類系に比べて野菜系で高く、各処理区とも1.5m程度のローム上部にピークがある。これにはそれ

それぞれの層位の交換性画分濃度が反映しているものと考えられる。 SO_4^{2-} は資材中含量や収穫作物中含量などの数値が未調査なので収支を計算できないが、硫酸アンモニウム、過リン酸石灰、硫酸カリウム、稲わら堆肥、牛糞、豚糞、デントコーンおよび稲わらが供給源になる¹⁰⁾。第3表に示した土層内存在量は特に野菜系の稲わら区およびデントコーン区で多い傾向にあり、化学肥料や麦わらからの投入が多いことが示されている。

SO_4^{2-} の吸着力は PO_4^{3-} リン酸に比較すれば小さいものの、リン酸同様、吸着によって陽イオン吸着能を増加させ、同時に他の陰イオン吸着能を低下させる^{4,7)}。第2図に示したように SO_4^{2-} 硫酸は最下部の粘土層を除いて全層にわたって吸着している。また粘土層は非黒ボク土で本質的に陰イオンを吸着しない。その結果、塩化物イオンおよび硝酸イオンは土層内全域でほとんど吸着せず、おおよそ全量が液相に存在するものと推測される。液相 NO_3^- 濃度は処理区間の差が大きく、穀類作型系の各有機物施用区ならびに野菜作型系の無窒素を除く処理区で高い傾向にあった。各処理区、各層位の濃度は交換性画分と同水準であり、 NO_3^- の大部分が液相に存在する事を裏付け、また液相濃度には土壤の電気化学的性質の影響が小さいことを示している。

第7図に示した土層内のN含量は NO_3^- 態の測定値を示している。1mまで、5mまでともに、土層内存在量は収支に対して原点付近を通る直線的な関係にあり、土層内の NO_3^- はその大部分が化学肥料および有機物からもたらされたことが示された。黒ボク土の土層内で、 NO_3^- は、おおよそ1年間で1m下方浸透することが示されており⁹⁾、したがって固相への吸着がない場合、土層内存在量は1mまでに収支1年相当、5mまでに収支5年相当である。余剰なNがすべて NO_3^- 態で存在するとすればN収支に対する土層内存在量を示す回帰直線の傾きはそれぞれ0.05および0.25が期待されるが実際にはその50%程度の値であった。

穀類系の液相 NO_3^- 濃度は、表層から深くなるほど低下したのに対し野菜系はその傾向が不明瞭で、特にデントコーン鋤込み区では明らかに全層にわたって同水準であった。穀類系の稲わら堆肥区、牛糞区および豚糞区では脱窒や有機化など、土層内で液相 NO_3^- 濃度が低下する反応がより高水準で生じ、一方、野菜系のデントコーン鋤込み区ではこの現象が相対的に低水準である事を示唆している。

交換性陽イオン類の中では全層にわたり Ca^{2+} が多くpHに大きく影響し間接的に土壤の電気化学的性質に影響している。さらに、リン酸や硫酸の吸着が陰イオンの吸着を阻害し陽イオンの吸着を促進すると同様にカルシウムイオンの吸着は陰イオンの吸着を促進する機能もあるとされる¹⁾。陽イオン類は、陰イオンのカウンターイオンとして土壤溶液中に溶出し移

動すると解積するのが妥当であるが、 K^+ 、 Ca^{2+} および Mg^{2+} はそれぞれ、収支に対する土層内存在量の5mまでの傾きが1mまでの2倍程度で、1m以深にも浸透しているものの表層ほど多く蓄積していることが示された。

施用された有機物は土壤中での分解過程で有機酸を生成し、牛糞、豚糞、デントコーンおよび麦わらの未熟有機物で生成が多いものと推測される。穀類系の牛糞区および豚糞区の陽イオン類の分布を堆肥区に比較すると、表層から0.5mまでは堆肥区よりも低く、0.5~1.0mにわずかなピークが形成され堆肥区よりも高い傾向にある。同様に、野菜導入系でも、青刈デントコーンおよび麦わら鋤込み区では堆肥区に比べて0.5mまでは低いものの、0.5~1.0mに明瞭なピークが形成され値は高くなっている。陽イオン類の分布について1m以深での有機物の違いによる違いは明らかではなく、未熟な有機物の分解過程で生成した有機酸が1m以内の陽イオン類の移動および分布に影響したとも考えられる。

4環境への影響

SO_4^{2-} は陰イオン種の中では黒ボク土への吸着量が比較的多く、その反応は可逆的なため固相中濃度と液相中濃度は平衡的な関係にある。第4図でも作土を除く腐植層やローム層では他の層位に比べて交換性に対する液相中画分の値が小さいことが示され、したがって、固相、液相比が減少しても液相中濃度はあまり上昇しない。従って、土壤:水=1:5の測定値を土壤の含水率に基づいて液相濃度に換算した第3図の SO_4^{2-} 濃度の推定値は吸着能の大きい今市軽石層やローム層では過剰に見積もられていると考えられ、実際の土壤溶液中 SO_4^{2-} 硫酸イオン濃度は第3図に示した推定値よりも全層にわたって均一な値になるものと推察される。第4図に示したように、本報の調査土壤のなかで、鹿沼軽石層は SO_4^{2-} 吸着能が低く、第3図に示した液相無機イオン濃度の推定値は実際の土壤溶液に近いとみなせる。さらに、この層は土層最下層(5m)に近い。そこで、この値を土壤層から礫層の浅層地下水へ流出する浸透水水質におおむね一致するものと見なし処理区間の比較を試みる。

各区の鹿沼軽石層の無機イオン濃度の推定値を第9図に示した。陰イオン種の中では SO_4^{2-} が最も高く、穀類系では1.6~2.4mmol/L⁻¹の範囲であったのに対し野菜系では無肥料区を除き5.4~5.9とおおよそ2倍程度の濃度であった。次いで NO_3^- が高く、穀類系では0.1~0.3mmol/L⁻¹の範囲であったのに対し、野菜系では無窒素区を除き0.8~2.1mmol/L⁻¹と非常に高かった。これらの値は無窒素区を除いて NO_3^- の環境基準0.71mmol/L⁻¹(10mg/L⁻¹)を上回っている。特にデントコーン鋤込み区は2.1mmol/L⁻¹と基準値の3倍程度の値であった。第8図に試験終了までの5年間の窒素収支と鹿沼軽石層の土壤溶液 NO_3^- 濃度の関係を示した。窒素収支、鹿沼軽石層

の NO₃ 濃度ともに野菜系のデントコーン鋤込み区が最も高く、これと、三要素区および無窒素区は同一の分布を形成し、その他の有機物施用区は鹿沼軽石土壌溶液 NO₃ 濃度は相対的に低かった。特に穀類系、野菜系ともに稲わら堆肥区は低かった。NO₃ の土層内垂直分布が、穀類系で下層ほど低かったことから NO₃ が土層内を浸透する過程でその濃度が徐々に低下していると考えられる。このような処理間の違いや現象は、有機化や脱窒などの窒素の形態変化によるものと推測され、土層内に余剰量の 50% 程度しか存在しない原因と併せて、具体的な原因の解明が今後必要である。

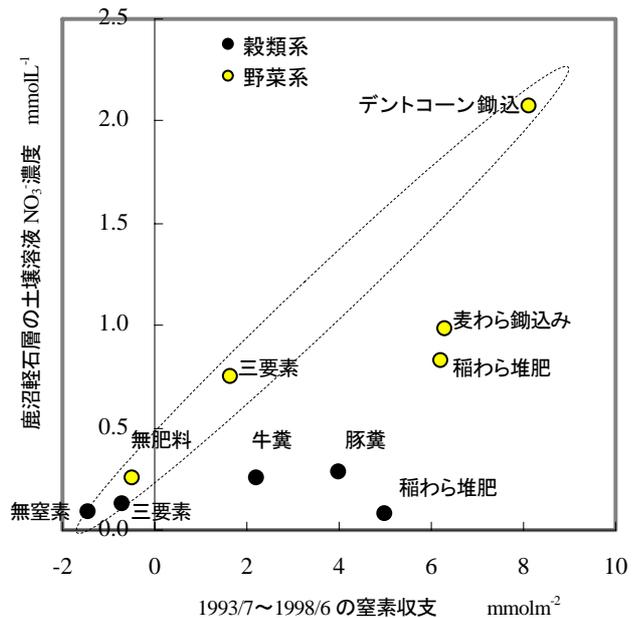
一方、P は第 7 図に示した各養分の土層内存在量から 20 年間の施用量の全量が 1m 以内に存在していることが示された。

5.まとめ

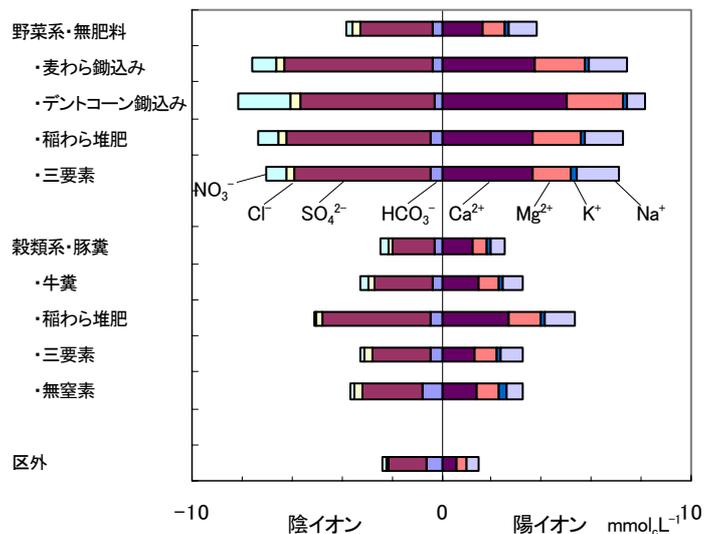
本調査結果からは、20 年間の有機質資材施用の違いは土層内養分蓄積量に変化をもたらしたが、蓄積パターンは主に土壌の電気化学的性質に大きく影響されたとと言える。有機物施用の違いが土壌の電気化学的性質の変化に大きな変化をもたらしたのは作土および耕盤層にとどまると言えよう。つまり、作土および耕盤層は、P 施用による大量の PO₄³⁻リン酸の吸着が生じて土壌の電気化学的性質に変化がもたらされ、さらに石灰の施用、アンモニウムの硝化および植物根による NO₃⁻や陽イオン類の吸収など、プロトンの吸脱着をもたらす現象によって pH や陽イオン吸着量の違いが処理間で大きくなった。これに対し、耕盤下層以深では表層でのそれら反応による緩衝作用を受けた後の中性塩溶液の浸潤が主な影響と考えられ、その結果、もたらされた変化は無機イオン類吸着量の増減とわずかな pH の変化であった。

この様な視点に立てば、土壌の状態変化に機能的かつ量的に影響力の特に大きい物質は PO₄³⁻、SO₄²⁻および Ca²⁺と考えられ、そのなかで PO₄³⁻は土壌の電気化学的性質を変化させる点で極めて重要な元素である。さらに SO₄²⁻および Ca²⁺は量的に優占イオン種であることが多く吸着によって無機イオンネット吸着量や pH への影響力が大きく、また SO₄²⁻は液相中濃度も高く物質移動にも影響が大きい。

地下水水質に対して環境基準が設定されている硝酸性窒素濃度は、残存窒素量、浸透水量および土層中での形態変化によって決定される。有機物利用区の鹿沼軽石層の硝酸性窒素濃度は化学肥料だけを施用した区に比べて低濃度で、さらにその程度は有機物の種類によって異なった。したがって、窒素に関する環境負荷を論じるには、土層中での脱窒や有機化など窒素の形態変化に関わる生物学的反応について明らかにする必要性が示された。



第 8 図 5 年間(1993/7~1998/6)の窒素収支と鹿沼軽石層の土壌溶液 NO₃ 濃度推定値の関係
注. 〰️は、無窒素、三要素およびデントコーン鋤込み区で形成される直線的関係



第 9 図 鹿沼軽石層の液相中無機イオン推定濃度の平均値

引用文献

1. Bolan, N.S.; Syers, J.K.; Sumner, M.E.(1993) Calcium-induced sulfate adsorption by soils, Soil Science Society of America journal 57 691-696
2. 土壌環境分析法編集委員会編(1997)土壌環境分析法, p.195-272, 博友社, 東京
3. 麓 多門・岩間秀矩・天野洋司(1996) 林地黒ボク土の硫酸イオン含量と土壌特性, 硫酸イオン吸着能との関係, 日本土壌肥科学雑誌 67: 648-654

4. 亀和田國彦(1995)黒ボク土露地畑での硝酸イオンの周年適垂直移動, 栃木農試研報 43:19-39
5. 亀和田國彦・青木一郎・岩崎秀穂・粕谷光正・佐藤文政(1988)黒ボク土における土壤中リン酸と作物生育に関する研究第2報リン酸多量施用に伴う土壤中リン酸および土壤の各種性質の変化, 栃木農試研報 37:115-132
6. 亀和田國彦(1994)畑地における土壤中陰イオン含量(Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-})の垂直分布, 土肥誌 65: 255-265
7. KAMEWADA, K and TAKAHASHI, Y. (1996) Increase in cation adsorption induced by surface complexation of sulfate on Andisols and prediction by 'Four-plane-model'. Soil Sci. Plant Nutr. 42 : 785-799
8. 関東ローム研究グループ(1967)関東ローム, p.142-203, 築地書館, 東京
9. 片峰美幸・亀和田國彦・鈴木康夫・伊藤良治・中山喜一・内田文夫(2000)黒ボク土畑における各種有機物の20年間連用が作物生育ならびに土壤理化学性に及ぼす影響. 栃木農試研報 50:25-32
10. 瀧 勝俊・沖野英男(1991)施設土壤における硫酸塩蓄積の原因(1)東三河地域トマト施設土壤について, 愛知県農業総合試験場研究報告 23:271-280
11. 和田光史(1981)土壤粘土によるイオンの交換吸着反応, 土壤の吸着現象, 日本土壤肥料学会編, p.5-75, 博友社, 東京