

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 7 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2011

課題番号：20580059

研究課題名（和文） 黒ボク土における腐植のアルミニウム制御物質としての機能

研究課題名（英文） Functions of humus in Andosols as a controller of aluminum dynamics

研究代表者

高橋 正（TAKAHASHI TADASHI）

東北大学・大学院農学研究科・准教授

研究者番号：80132009

研究成果の概要（和文）：黒ボク土のアルミニウム（Al）-腐植複合体（Alと有機物の結びついた物質）が、土壌の性質や植物生育に及ぼす影響を調べた。Al-腐植複合体は、その大部分は安定で土壌有機炭素の蓄積に大きく寄与していることが確認された。黒ボク土の Al 溶解性（溶けやすさ）を決定づけているのは腐植とアロフェン質鉱物であり、前者の Al の給源は Al-腐植複合体の一部であった。植物の生育に悪影響を及ぼす毒性 Al の由来は Al-腐植複合体であることが強く示唆された。

研究成果の概要（英文）：We studied the effects of aluminum (Al) – humus complexes in Andosols on soil properties and plant growth. We confirmed that a large part of the Al-humus complexes is very stable and contributes to accumulation of organic carbon in soils. Aluminum solubility of Andosols was controlled by soil humus or allophanic materials. In the former case, the source of Al was a part of the Al-humus complexes. It was strongly indicated that toxic Al ions to plants are derived from the Al-humus complexes.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：土壌学

科研費の分科・細目：農芸化学・植物栄養学・土壌学

キーワード：非アロフェン質黒ボク土，土壌有機物，アルミニウム-腐植複合体，毒性アルミニウム，アルミニウム溶解性

1. 研究開始当初の背景

土壌中のアルミニウムのダイナミクスは主に土壌鉱物でコントロールされていると考えられてきた。土壌が酸性化すれば土壌鉱物

が溶解し、放出されたアルミニウムイオンが粘土鉱物の永久荷電に吸着され、それが生物に影響を与えるとされてきた。

わが国に広く分布する黒ボク土のうち、強酸性を示す黒ボク土の多くはアロフェン質粘土を含まず、アルミニウム-腐植複合体に富み、植物根にアルミニウム毒性を示しやすい。この非アロフェン質黒ボク土のアルミニウム溶解性を調べたところ、土壌鉱物よりも土壌有機物が大きく関与していることが認められた (Takahashi et al. 1995)。一般に有機物はアルミニウム毒性を緩和し、アルミニウム-腐植複合体として土壌中に安定に存在すると考えられてきたが、アルミニウム-腐植複合体の一部は非常に不安定であることもわかってきている (Takahashi et al. 2003, 2006)。

このような黒ボク土の独特なアルミニウム可溶性を反映した、栽培学的な研究結果が得られていた。酸性土壌の改良として一般に石灰で酸性を矯正するが、この代わりに石コウを用いることもある。しかし腐植に富む酸性黒ボク土では石コウの効果は全く認められなかった (Takahashi et al. 2006)。インゲン根腐病 (Furuya et al. 1999) やジャガイモそうか病 (Mizuno et al. 1998) などの土壌病害は特定の土壌で発病が抑止される。その土壌に共通な点は、アルミニウム-腐植複合体が多く含まれていることであった。これらは、アルミニウム-腐植複合体が特異な作用をしていることを示唆した。また、アルミニウム-腐植複合体由来の Al イオンが土壌微生物全般に作用し、これが黒ボク土の有機炭素蓄積に寄与している可能性も考えられた。

2. 研究の目的

「黒ボク土のアルミニウムのダイナミックス (溶解平衡) をつかさどっているのは実質的には土壌有機物である」という仮説のもとに、以下について検討した。

(1) 自然状態と人為の影響を受けたアロフェン質および非アロフェン質の黒ボク土試料を用いてアルミニウム溶解特性を明らかにする。

(2) 黒ボク土での植物や微生物へのアルミニウムのアベイラビリティ (毒性あるいは可給性) を統一的に解明する。

(3) 黒ボク土の有機炭素蓄積要因を特定し、耕地化を想定した実験から土壌有機物の量と質の変化を予想する。

3. 研究の方法

(1) 黒ボク土のアルミニウム溶解性

① 自然状態および酸性化したアロフェン質黒ボク土 (茶園 2 断面) の Al の存在状態 (塩化カリウム, 塩化銅, ピロリン酸塩, 酸性シュウ酸塩溶液可溶の Al 濃度) と Al 溶解性 (0.01M 塩化カルシウム溶液中での平衡実験) を非アロフェン質黒ボク土と比較した。

② 毒性 Al の指標として用いられている 1 M KCl 抽出 Al (KCl-Al) の起源を特定するため、黒ボク土の A 層試料 14 点の KCl-Al と永久荷電量 (Wada 1983 の方法) との比較を行った。また、A 層または Oa 層のデータベース (105 点) を用いて、KCl-Al と pH との関連を調べた。

(2) 黒ボク土のアルミニウム毒性発現のメカニズム

① アロフェン質と非アロフェン質土壌の A 層 (各 1 点) から抽出した腐植溶液と塩化アルミニウム溶液から Al-腐植複合体を合成した。この人工 Al-腐植複合体を含む培地にオオムギとゴボウを栽培し、植物根への Al 毒性と、その毒性に及ぼすアロフェン質鉱物共存の影響を調べた。

② Al 毒性を示す黒ボク土を特定し、その要因を明らかにするため、非アロフェン質土壌 2 点、自然状態に近いアロフェン質土壌 3 点、酸性化したアロフェン質土壌 2 点を用いて、3 種類の植物を栽培し、Al 感受性植物 (ゴボウ, オオムギ) については Al 障害程度を観察し、Al 集積植物のソバについては Al 吸収量を測定した。

(3) 黒ボク土の有機炭素貯留機能とその要因

① pH の変化と Al の化学形態の変化が有機物の安定性と土壌微生物に与える影響を土壌中の窒素代謝と炭酸ガス放出量によって調べた。非アロフェン質黒ボク土試料 2 点とアロフェン質黒ボク土試料 1 点を用いて、炭酸カルシウム (炭カル) 添加 (pH を上げ、可溶性 Al を減少させる), リン酸添加 (pH を上げず、可溶性 Al を減少させる), 硫酸添加 (pH を下げ、可溶性 Al を増加させる) の 3 つの化学処理を行い、実験室でインキュベーションして土壌呼吸量を測定した。また、土壌から DNA を抽出し、細菌の 16S rDNA の PCR-DGGE 解析を行った。

② 東北大学フィールド教育研究センター内の

農耕地および森林から 32 点の黒ボク土 A 層試料を採取し、種々の中和資材処理 (CaCO_3 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH , KOH) 後に、土壌呼吸を測定した。

③Tohoku University World Andosol Database から 293 点の A 層のデータを抽出し (チリ, エクアドル, 米国アラスカ州・カリフォルニア州, ニュージーランド, インドネシア, 台湾, 日本の土壌), 有機炭素蓄積に及ぼす, 土壌 pH, 交換性 Al, 腐植複合体 (ピロリン酸塩抽出) Al と Fe の影響を統計的に解析した (パス解析)。

4. 研究成果

(1) 黒ボク土のアルミニウム溶解性 (発表論文: Takahashi et al., 2008 ; 高橋ら, 2011)

①自然状態および酸性化したアロフェン質黒ボク土の Al の存在状態と Al 溶解性を検討した結果, 自然のアロフェン質土壌の Al 溶解性はアロフェン質鉱物やギブサイトの溶解性にほぼ等しかったが, 酸性化したアロフェン質土壌の Al 溶解性は両鉱物に対して未飽和であった。酸性化した土壌では腐植複合体 Al が増加しており, このような Al の存在状態と溶解特性は非アロフェン質土壌によく似ており, 腐植が Al 溶解をコントロールしているとみられた。

この実験で得られた結果は, 世界中に分布する, アロフェン質黒ボク土と非アロフェン質黒ボク土の生成や土壌酸性 (Al 溶解性や毒性) の連続性を示すものであり, Al-腐植複合体とアロフェン質鉱物のバランスで諸性質が決定されていることを意味している。

②毒性 Al の指標として用いられている 1 M KCl 抽出 Al (KCl-Al) の起源を特定するため, 黒ボク土の A 層試料 KCl-Al と永久荷電量を比較したところ, KCl-Al が粘土鉱物の永久荷電量を上回る土壌が相当数存在し, KCl-Al は腐植複合体 Al も含んでいることが示唆された。また, データベースから, KCl-Al は抽出時の pH に大きく影響され, 必ずしも交換性 Al を測定していないことが示唆された。このように, 黒ボク土の KCl-Al は, 一般に定義されている交換性 Al ではなく, KCl 溶液中での平衡 Al 濃度を測定しており, Al-腐植複合体の影響を大きく受けると考えられた。

(2) 黒ボク土のアルミニウム毒性発現のメカ

ニズム (発表論文: Ito et al., 2009 ; Yamada et al., 2011)

①アロフェン質と非アロフェン質土壌から抽出した腐植から作成した人工 Al-腐植複合体は, どちらもオオムギとゴボウ根に Al 毒性を示した。アロフェン質鉱物を添加することによって, Al 障害の程度は添加割合に応じて緩和された。これらの結果は次のように解釈された。Al-腐植複合体は潜在的に生物毒性をもっており, そのため非アロフェン質土壌では Al 毒性を示す。アロフェン質土壌は Al-腐植複合体をもっているが, アロフェン質鉱物はその毒性を打ち消している。強い酸性化を受けるとアロフェン質土壌でも Al-腐植複合体の毒性が発現してくる。

②非アロフェン質土壌, 自然状態に近いアロフェン質土壌, 酸性化したアロフェン質土壌を用いた栽培実験の結果, Al 感受性植物 (オオムギとゴボウ) への毒性は非アロフェン質土壌だけではなく, 酸性化したアロフェン質土壌でも見られ, これらの土壌ではソバによる Al 吸収量も多くなっていた。酸性化したアロフェン質土壌での Al 溶解性は, 非アロフェン質土壌と同様に, 腐植複合体 Al に制御されており, Al 毒性が発現するとみられた。これらの結果から, 黒ボク土の Al 障害は, 非アロフェン質かアロフェン質にかかわらず, Al-腐植複合体が制御していることで統一的に説明される。

(3) 黒ボク土の有機炭素貯留機能とその要因
①黒ボク土 A 層の pH や Al の形態変化が窒素と炭素の無機化に及ぼす影響を調べた。炭カル処理により土壌呼吸量が増加した。これは土壌 pH の上昇と Al 毒性の軽減のためとみられた。リン酸処理により呼吸量と窒素無機化量が増加した。これは Al 毒性軽減に加えて, 水溶性有機物が増加したためとみられた。硫酸処理により, 呼吸量と窒素無機化量は低下, または変化がなかった。PCR-DGGE 法による細菌の群集解析の結果, リン酸処理と硫酸処理によって微生物相が顕著に変化することがわかった。

②東北大学フィールド教育研究センター内の 32 点の黒ボク土 A 層試料について種々の中和資材処理後の土壌呼吸を測定した。その結果, 呼吸速度は大部分の土壌で, 無処理 < NaOH 処理 \approx KOH 処理 < $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 処理 \leq

CaCO₃ 処理の順であった。Ca 資材処理により水溶性有機物の増加が認められた。これらのことより、中和によるプロトンや Al イオンの微生物活性阻害要因の緩和が作用していることに加え、Ca イオンによる腐植の易分解化がおこることも示唆された。

③ Tohoku University World Andosol Database から 293 点の A 層のデータを抽出し、有機炭素蓄積に及ぼす、土壌 pH、交換性 Al、腐植複合体（ピロリン酸塩抽出）Al と Fe の影響をみるためパス解析を行った。その結果、有機炭素量に最も影響があるのが腐植複合体 Al であり、土壌 pH と交換性 Al もかなり影響していることが示された。これらの結果は、上の実験結果を裏付けるものである。

以上より、黒ボク土中の Al-腐植複合体は、大部分は安定で黒ボク土の重要な構成成分となっているが、アルミニウム溶解性や毒性もコントロールしていることが明らかになった。Al-腐植複合体は植物だけではなく土壌微生物全般に影響を与えている可能性があるため、今後はその土壌反応プロセスを抑制する働きに注目して研究を進める予定である。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 8 件）

1. Yamada, K., Ito, K., Takahashi, T., Kanno, H. and Nanzyo, M. 2011. Inhibitory effect of acid Andosols on plants – Is aluminum toxicity true for allophanic Andosols? *Soil Science and Plant Nutrition*, 57:491-499. (査読有)
2. 高橋正・菅野均志・辻村夏希・南條正巳. 2011. 黒ボク土の 1 M 塩化カリウム抽出アルミニウムは何を測っているのか? 日本土壌肥科学雑誌, 82(1):1-6. (査読有)
3. Takahashi, T., Yamada, K., Kanno, H. and Nanzyo, M. 2010 . Organic carbon accumulation in Andosols: (2) Contribution of aluminum-humus complexes to carbon accumulation in non-allophanic Andosols. *Journal of Integrated Field Science*, 7:69-72. (<http://ir.library.tohoku.ac.jp/re/handle/10097/48839>) (査読無)
4. Kanno, H., Takahashi, T. and Nanzyo, M. 2010. Organic carbon accumulation in Andosols. (1) Unaccounted Andosols in Japanese forest soil. *Journal of Integrated Field Science*, 7:65-67.

(<http://ir.library.tohoku.ac.jp/re/handle/10097/48838>) (査読無)

5. Nanzyo, M., Kanno, H. and Takahashi, T. 2010. Organic carbon accumulation in Andosols: (3) Occurrence of apatite and biotite in young and matured volcanic ash soils, and discussion on nutrient supply for ecosystems. *Journal of Integrated Field Science*, 7:73-77 (<http://ir.library.tohoku.ac.jp/re/handle/10097/48840>) (査読無)
6. Ito, K., Takahashi, T. and Nanzyo, M. 2009. Aluminum toxicity of synthetic aluminum-humus complexes derived from non-allophanic and allophanic Andosols and its amelioration with allophanic materials. *Soil Science and Plant Nutrition*, 55:35-41. (査読有)
7. Nanzyo, M., Ito, T., Takahashi, T. and Kanno, H. 2008. Metal complexation of humus and horizon differentiation in Andisols and Spodosols. *Journal of Integrated Field Science*, 5: 41-49. (査読有)
8. Takahashi, T., Mitamura, A., Ito, T., Ito, K., Nanzyo, M. and Saigusa, M. 2008. Aluminum solubility of strongly acidified allophanic Andosols from Kagoshima Prefecture, southern Japan. *Soil Science and Plant Nutrition*, 54: 362-368 (査読有)

〔学会発表〕（計 14 件）

1. Miyazawa, M., Takahashi, T., Sato, T., Kanno, H. and Nanzyo, M. Effect of chemical treatments on mineralization of C and N in Andosols rich in Al-humus complexes. 9th International Symposium on Integrated Field Science, (2011. 9. 13) 東北大学
2. Takahashi, T., Yamada, K., Kanno, H. and Nanzyo, M. Organic carbon accumulation in Andosols: (2) Contribution of aluminum-humus complexes to carbon accumulation in non-allophanic Andosols. 7th International Symposium on Integrated Field Science “Biological Interactions in Arable land-Grassland-Forest Continuums and their Impact on the Ecosystem Functions, 東北大学 (2009.10. 11)
3. Yamada, K., Ito, K., Takahashi, T. and Nanzyo, M. Aluminum bioavailability of aluminum-humus complexes in Andosols. 7th International Symposium on Integrated Field Science “Biological Interactions in Arable land-Grassland-Forest Continuums and their Impact on the Ecosystem Functions, 東北大学 (2009. 10. 10-12)
4. 山田康平・伊藤聖史・高橋 正・南條正巳. 黒ボク土の Al-腐植複合体の Al 毒性評価.

日本土壤肥料学会京都大会．京都大学
(2009. 9. 16)

5. 高橋 正・菅野均志・南條正巳．黒ボク土の1M塩化カリウム抽出アルミニウムの再評価．日本土壤肥料学会京都大会．京都大学 (2009. 9. 15)
6. Takahashi, T., Ito, K., Nanzyo, M., Mittamura, A., Ito, T. and Saigusa, M. Aluminum solubility of strongly acidified allophanic Andosols. Soils 2008 “Soil The living Skin of Planet Earth”Massey University, Palmerston North, New Zealand (2008, 12.1-4)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

<http://www.agri.tohoku.ac.jp/soil/jpn/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 正 (TAKAHASHI TADASHI)
東北大学・大学院農学研究科・准教授
研究者番号：80132009

(2) 研究分担者

南條 正巳 (NANZYO MASAMI)
東北大学・大学院農学研究科・教授
研究者番号：60218071

佐藤 孝 (SATO TAKASHI)
秋田県立大学・生物資源科学部・准教授
研究者番号：50315602

(3) 連携研究者 ()

研究者番号：