

千葉大学森林環境園芸 (利根高冷地) 農場の土壌の諸性質について (第2報) —土壌の無機成分および粘土鉱物組成—

鈴木創三^{*1}・田中治夫^{*1}・浮田美央^{*2}・斉藤政一^{*2}・杉田亮平^{*2}・高橋直史^{*2}・古川信雄^{*2}・
矢野直樹^{*2}・双胡爾^{*3}・竹迫 紘^{*4}・岡崎正規^{*1}・豊田剛己^{*1}・隅田裕明^{*5}・犬伏和之^{*6}
(^{*1}東京農工大学大学院共生科学技術研究部 ^{*2}東京農工大学農学部 ^{*3}東京農工大学農学教育部
^{*4}明治大学農学部 ^{*5}日本大学生物資源科学部 ^{*6}千葉大学園芸学部)

Properties of Soil in Chiba University's Environmental Horticulture and Forestry (Tone Koreichi) Farm II. A Few Inorganic Elements and the Composition of Clay Minerals

^{*1}Sohzoh Suzuki, ^{*1}Haruo Tanaka, ^{*2}Mio Ukita, ^{*2}Sei-ichi Saito,
^{*2}Ryoohei Sugita, ^{*2}Naofumi Takahashi, ^{*2}Nobuo Furukawa,
^{*2}Naoki Yano, ^{*3}Shonghour, ^{*4}Hiroshi Takesako, ^{*1}Masanori Okazaki,
^{*1}Koki Toyota, ^{*5}Hiroaki Sumida, ^{*6}Kazuyuki Inubushi

(^{*1}*Institute of Symbiotic Science and Technology, Tokyo University of Agriculture and Technology,*
^{*2}*Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology,*
^{*3}*Graduate School of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology,*
^{*4}*Faculty of Agriculture, Meiji University,* ^{*5}*College of Bioresource Science, Nihon University,*
^{*6}*Faculty of Horticulture, Chiba University*)

Abstract

We investigated the composition of clay minerals and a few inorganic elements of the soils in the apple garden (TNF-3: A, Bw, 2A and 2Bw) and Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) forest (TNO-5: Ap, 4Bw, 5AB and 6A) in Chiba University's Environmental Horticulture and Forestry (Tone Koreichi) Farm. And we also clarified the following items.

1. Past surface soils and subsoils were buried under the present surface soils (A and Ap horizon) and subsoils (Bw horizon) in both TNF-3 and TNO-5. The arrangement of soil horizons were A, Bw, 2A and 2Bw horizons in TNF-3 and Ap, 2BC, 3BC, 4Bw, 5AB and 6A horizons in TNO-5.
2. Contents of Available phosphorus (Av-P) of present surface horizons (A, Ap) were higher than those of subsoils and buried horizons in both TNF-3 and TNO-5. Especially, that of Ap horizon in TNO-5 was 8 times as high as A horizon in TNF-3. On the contrary, phosphate adsorption coefficients (PAC) of A and Ap horizons were lower than those of subsoils in both TNF-3 and TNO-5 and there was the high and positive correlation between PAC and estimated contents of allophone.
3. Though cation exchange capacity (CEC) of A horizon was higher than those in Bw, 2A and 2Bw horizons in TNF-3, those of 5AB and 6A horizons were higher than Ap horizon in TNO-5. Exchangeable calcium, magnesium, potassium and base saturation ratios (BS) of each horizon in TNO-5 were higher than those in TNF-3.
4. Proportion of coarse sand of A (or Ap) horizon was higher and those of clay, silt and fine sand of A (or Ap) horizon horizons were lower than those in the subsoils in both TNF-3 and TNO-5.

5. The proportion of oxides, amorphous clay minerals and crystalline clay minerals of clay fraction of A and Ap horizon were about 30, 40 and 30% respectively in both TNF-3 and TNO-5. Those of 2A horizon in TNF-3, 4Bw, 5AB and 6A horizons in TNO-5 were about 10, 30 and 60%. There were less oxides and amorphous clay minerals and more crystalline clay minerals in 2A horizon in TNF-3 and in 4Bw, 5AB and 6A horizons of TNO-5.
6. Aluminium-vermiculite and chlorite were dominant and aluminium-smectite, smectite and vermiculite were subdominant in each horizon of TNO-5 and TNF-3.

1. はじめに

千葉大学森林環境園芸農場の土壌は小野子山、子持山の安山岩基盤の上に堆積した榛名山や浅間山などの火山灰を母材として生成されたものである [5]。これらの火山灰は給源、降灰時期が異なるばかりでなく、降灰後の自然環境の変化や人為により剥奪、再堆積、混合作用を受けることもあるために、場所によっては異なった火山灰からなる層が配列していることもある。異なった火山灰はその理化学性も異なるために、それらを母材として生成される土壌の性質は異なったものになる。一方、このように異なった性質を持つ火山灰であっても、その後の自然環境や土地利用に対応した土壌生成作用を受けることによって、その環境や利用条件に適合した特定の性質に変化して行く。とくに表層は下層に比べて環境変化や人為の影響を受けやすいことから、このような変化が認めやすいことが推察される。

農場の土壌を適切に利用して行くためには、現在の土壌が持っている性質を理解するだけでなく、その土壌がおかれた自然環境および人為により今後変化する性質にも対応した土地利用を行うことが大切である。

本報告では千葉大学森林環境園芸農場の森林および果樹園の土壌について、リン酸、カルシウムなどの無機成分の含量および保持力、この養分保持力をはじめ土壌の養・水分保持などの理化学性に関わる粘土鉱物組成について調べ、表層および下層の土壌の性質を比較して、土地利用にともなって変化する性質について考察した。

2. 試料および方法

1) 土壌試料

森林 (地点名TNF-3) からは最表層のA層 (0—27cm)、下層のBw層 (27—62cm)、埋没表層の2A層 (62—94cm) および埋没下層の2Bw層 (94—100cm) の4層より、果樹園 (地点名TNO-5) からは礫に富む埋没下層の2BCおよび3BC層 (各23—27, 27—38cm) を除いた表層のAp層 (0—23cm)、埋没下層の4Bw層 (38—54cm)、

埋没表層の5AB層 (54—65cm) および6A層 (65—100cm) の4層より、合計8層の土壌を採取し、土壌環境分析法 [1] に準拠して風乾後に孔径2 mmの篩を通過させたものを土壌試料とした。

2) 無機成分

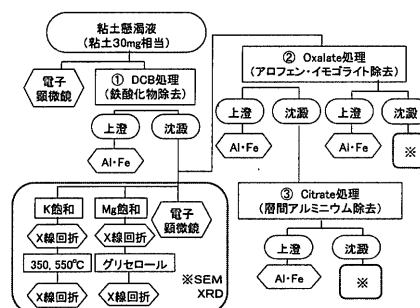
土壌環境分析法 [1] に準拠して以下の(1)~(5)を分析し、(3)および(4)から(6)を、(5)から(7)を算出した。

- (1) リン酸吸収係数 (リン酸アンモニウム液法)
- (2) 可給態リン酸 (プレイ第二法 (準法))
- (3) 陽イオン交換容量 (セミマイクロSchollenberger法)
- (4) 交換性陽イオン (常法・浸透法)
- (5) 選択溶解法による可溶性鉄・アルミニウム・ケイ素 (ジチオナイトークエン酸塩還元溶解法, 酸性シュウ酸塩溶解法, ピロリン酸塩溶解法)
- (6) 塩基飽和度
- (7) アロフェン推定含量

3) 粒径組成および粘土鉱物組成

粒径組成および粘土鉱物組成は土壌環境分析法 [1] および土の理工学性実験ガイド [7] に準拠して行ったが、粒径組成の粘土およびシルトの割合については沈定法により採取した粘土およびシルトのけん濁液の一定量を105℃乾燥した後の重量から算出して求めた。

粘土試料は「第1図」に示した手順の流れで、鉄酸化



第1図 粘土鉱物の分析流れ図

鉄酸化物、非晶質粘土鉱物および結晶性粘土鉱物の層間アルミニウムを逐次選択的に溶解し、各処理の上澄み液中の鉄、ケイ素およびアルミニウムを定量し、沈殿部の走査型電子顕微鏡観察、X線回折による結晶性粘土鉱物の分析手順を記載。

物、非晶質粘土鉱物（アロフェン・イモゴライト）および結晶性粘土鉱物の層間アルミニウムをNa-DCB（ジチオナイトークエン酸塩還元溶解法）、Na-oxalate（酸性シュウ酸塩溶解法）およびNa-citrate（クエン酸塩煮沸法）により逐次選択的に溶解し、各処理の上澄み液中の鉄、ケイ素およびアルミニウムを原子吸光光度法あるいは比色法で定量して各の鉱物含量を算出した。沈殿部の粘土試料の一部は凍結乾燥、金蒸着処理後に走査型電子顕微鏡による微細形態観察を、また残りはX線回折による結晶性粘土鉱物の底面間隔の測定を行って、それらの微細形態および鉱物組成を分析した。

3. 結果および考察

1) 無機成分

(1) 可給態リン酸およびリン酸吸収係数

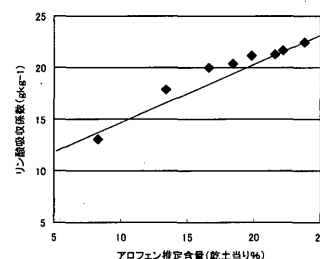
可給態リン酸含量 (A_v-P) は「第1表」のようにTNF-3ではA層の $0.031P_2O_5gkg^{-1}$ から2B層の $0.001P_2O_5gkg^{-1}$ まで漸減した。一方、TNO-5では4Bw、5ABおよび6A層ともに $0.01P_2O_5gkg^{-1}$ 前後であったが、Ap層は $0.242P_2O_5gkg^{-1}$ とこれら3層よりも20倍程度高く、さきのTNF-3のA層よりも8倍程度も高かった。以上のように、 A_v-P は表層のほうが下層および埋没表・下層よりも高かった。とくに果樹園のAp層の A_v-P が著しく高かったのはリン酸肥料の施用による影響と考察した。

リン酸吸収係数 (PAC) は可給態リン酸とは逆に、表層のほうが下層および埋没層より低かった。すなわち、TNF-3のA層は $17.9P_2O_5gkg^{-1}$ で、下層以深のBw、2Aおよび2Bw層の $20.0\sim 21.3P_2O_5gkg^{-1}$ より低かった。また、TNO-5でも下層以深の4Bw、5ABおよび6A層の $20.4\sim 22.5P_2O_5gkg^{-1}$ に比べて、Ap層は $13.0P_2O_5gkg^{-1}$ と低かった。「第1表」に示したPAC (Y) と土壌の逐

次選択溶解処理から算出した非晶質粘土鉱物のアロフェンの推定含量 (Allo, X) との間には「第2図」に示すような比較的高い正の相関関係 ($Y=0.57X+9.40$, $r=0.97$, $P<0.01$) が認められた。アロフェンは活性のアルミニウムと同様にリンとの反応性に富み、リンの肥効を低下させることが知られている [6]。表層ではリンとの反応性に富むアロフェンや活性のアルミニウムが腐植と結合してPACを低下させる可能性を考察した。

(2) 陽イオン交換容量 (CEC)、交換性陽イオンおよび塩基飽和度 (BS)

陽イオン交換容量 (CEC) は「第2表」のようにTNF-3ではBw層、2Bw層ともに $14.6cmolckg^{-1}$ であったが、A層および2A層はこれより大きい 19.9 および $16.6cmolckg^{-1}$ で、 $A層>2A層>Bw層$, $2Bw層$ のように下層および埋没下層に比べて表層および埋没表層のほうが大きかった。一方、TNO-5では4Bw層が $14.5cmolckg^{-1}$ とTNF-3の下層、埋没下層と同様であったが、Ap層は $15.2cmolckg^{-1}$, 5ABおよび6A層も 20.7 および $24.9cmolckg^{-1}$ で、埋没下層に比べて表層および埋没表層のほうが大きかった。表層は下層に比べて腐植が多く、こ



第2図 アロフェン含量とリン酸吸収係数の関係

土壌の逐次選択溶解処理から算出したアロフェン含量 (X) とリン酸吸収係数 (Y) の高い正の相関関係 ($Y=0.57X+9.40$, $r=0.97$, $P<0.01$) を示した図。

第1表 土壌の可給態リン酸含量 (A_v-P), リン酸吸収係数 (PAC), およびアロフェン推定含量 (Allo)

地点名		A_v-P	PAC	Allo
層位名		($P_2O_5gkg^{-1}$)		(乾土%)
TNF-3				
A		0.031	17.9	13.4
Bw		0.014	21.2	19.8
2A		0.004	21.3	21.6
2Bw		0.001	20.0	16.6
TNO-5				
Ap		0.242	13.0	8.3
4Bw		0.011	20.4	18.4
5AB		0.010	21.7	22.2
6A		0.010	22.5	23.8

第2表 土壌の陽イオン交換容量 (CEC), 交換性陽イオン含量および塩基飽和度 (BS)

地点名	層位名	CEC	交換性陽イオン					BS (%)
			Ca	Mg	K	Na	合計	
			(cmolc kg ⁻¹)					
TNF-3								
	A	19.9	2.14	0.10	0.11	0.06	2.41	12.1
	Bw	14.6	1.17	0.10	0.08	0.05	1.40	9.5
	2A	16.8	2.26	0.24	0.07	0.08	2.65	15.8
	2Bw	14.6	1.93	0.28	0.21	0.07	2.49	17.1
TNO-5								
	Ap	15.2	3.51	0.40	0.16	0.05	4.12	27.1
	4Bw	14.5	2.71	0.37	0.21	0.07	3.36	23.2
	5AB	20.7	5.19	0.34	0.27	0.05	5.85	28.2
	6A	24.9	5.47	0.45	0.15	0.05	6.12	24.6

の腐植は粘土とともに高い陽イオン交換能を持つことから、下層に比べて表層のCECが大きかったのはこの腐植による可能性を推察した。

CECに対する交換性陽イオン含量の割合を示す塩基飽和度(BS)はTNF-3では9.5~17.1%と20%以下であったが、TNO-5では23.2~28.2%でTNF-3より高かった。

交換性陽イオン4種の合計量はTNF-3では1.40~2.65cmolckg⁻¹であったが、TNO-5では3.36~6.12cmolckg⁻¹でそれより多かった。4種のイオンのうちで最も多かったのはいずれの層でもカルシウム(Ca)で70~80%を占め、TNF-3では1.17~2.26cmolckg⁻¹、TNO-5ではこれより多い2.71~5.47cmolckg⁻¹であった。同様にマグネシウム(Mg)およびカリウム(K)もTNF-3よりTNO-5のほうが多かったが、ナトリウム(Na)についてはTNF-3とTNO-5の間に大きな差異は認められなかった。また、下層および埋没下層に比べて表層および埋没表層のほうが大きい関係はTNF-3、TNO-5のいずれの区でもCaおよび4種の陽イオンの合計量では認められたが、Mg、KおよびNaについては認められなかった。カルシウムが交換性陽イオンの70~80%を占めていることについては母材の火山灰の一次鉱物組成の影響を考察した。

2) 粘土鉱物組成

(1) 粘土含量および粒径組成

有機物を除いた土壌の粘土、シルト、細砂および粗砂の割合すなわち粒径組成は「第3表」のように、TNF-3、TNO-5のいずれも表層は下層以深よりも粘土の割合は低く、粗砂の割合が高かった。

TNF-3のA層では粗砂と細砂で約80%を占め、粘土およびシルトの割合は各約10%であった。粗砂は50%で砂全体の6割以上を占めたことから、土性はCoSL(粗砂壤土)に区分された。下層以深のBw、2Aおよび2Bwの

第3表 土壌の粒径組成

地点名 層位名	粘土 (有機物除去後の乾土重量%)	シルト	細砂	粗砂	細砂+粗砂	土性 (記号)	土性区分
TNF-3							
A	13.0	9.8	26.8	50.4	77.2	CoSL	粗砂壤土
Bw	22.1	25.0	34.9	18.0	52.9	CL	埴壤土
2A	18.8	26.1	36.8	18.3	55.1	SCL	砂質埴壤土
2Bw	17.6	25.6	39.8	17.0	56.8	SCL	砂質埴壤土
TNO-5							
Ap	4.6	8.1	22.2	65.1	87.3	CoS	粗砂土
4Bw	28.9	22.8	28.4	19.9	48.3	LiC	軽埴土
5AB	21.9	23.5	29.9	24.7	54.6	CL	埴壤土
6A	25.6	26.9	33.0	14.5	47.5	LiC	軽埴土

3層ではA層に比べて、砂の割合は約55%と小さく、粗砂の割合も20%以下でA層の半分以上となったが、細砂は約37%、シルトは約25%、粘土は約19%で、いずれもA層よりも大きかった。

TNO-5でもAp層は粗砂と細砂で約90%を占め、粘土、シルトの割合は各4.6および8.1%であった。また、粗砂は65.1%で砂全体の6割以上を占めたことから、TNF-3のA層と同様のCoSLに区分された。TNO-5の4Bw、5ABおよび6A層はAp層に比べて、砂の割合は約50%、粗砂の割合も約20%といずれもAp層より小さかったが、細砂は約30%、シルトは約25%で、粘土は約25%で、いずれもAp層よりも大きかった。

TNF-3のA層およびTNO-5のAp層では各の下層以深の層よりも粗砂の割合が大きく、シルト、粘土の割合が小さかった。表層土壌では時間の経過とともに、細砂、シルト、粘土の割合が増加すると推察した。

(2) 酸化物、非晶質・結晶性粘土鉱物等の含量

TNF-3のA層では「第4表」のように粘土分中の酸化物(Ox)、アロフェンなどの非晶質粘土鉱物(AC)および結晶性粘土鉱物(CC)の割合は約30、40および30%で、CC中の層間アルミニウム等は(HI)5%弱であった。また、鉄とアルミニウム酸化物の重量比(IAO-R)は0.81と鉄よりもアルミニウム酸化物の割合が大きく、ACのケイバン比(SA-R:SiO₂/Al₂O₃)は1.01であった。

TNF-3のBwおよび2Bw層ではCCはA層とほぼ同様の30%であったが、Oxは約20%と小さく、逆にACは50%と大きかった。また、2A層ではOxは10%以下、

第4表 粘土分の酸化物、非晶質・結晶性粘土鉱物等の含量*

地点名 層位名	Ox (%)	IAO-R	AC (%)	SA-R	TOAH (%)	CC (%)	HI (%)
TNF-3							
A	30.0	0.81	41.3	1.01	71.3	28.7	4.4
Bw	19.2	0.60	51.3	1.00	70.5	29.5	3.4
2A	8.5	0.88	33.2	0.73	41.7	58.3	2.1
2Bw	19.7	0.56	54.0	0.68	73.7	26.3	2.4
TNO-5							
Ap	24.6	1.22	47.2	0.93	71.8	28.2	3.3
4Bw	11.5	1.35	28.3	0.90	39.8	60.2	1.9
5AB	11.7	1.44	27.7	0.67	39.4	60.6	1.7
6A	12.8	1.33	27.8	0.76	40.6	59.4	1.8

*: 数値の単位は乾燥粘土あたりの酸化物重量%あるいは比。項目の略称は以下のとおり、Ox: 酸化物(鉄酸化物+アルミニウム酸化物)、IAO-R: 鉄酸化物: アルミニウム酸化物の重量%比、AC: 非晶質粘土鉱物(アロフェンおよびイモゴライト)、SA-R: ACのケイ素: アルミニウムの酸化物重量比、TOAH: Ox+AC、CC: 結晶性粘土鉱物(100-TOAH, 層間アルミニウムを含む)、HI: 結晶性粘土鉱物層間のアルミニウム+鉄の合計量。

ACも約30%とA層より小さかったが、CCは約60%とA、Bw、2Bw各層の約2倍であった。2Aおよび2Bw層のACのSA-Rは約0.7でAおよびBw層の1.0に比べて小さかった。

TNO-5のAp層のOx, ACおよびCCの割合はそれぞれ約25, 47, および28%, HIも3%で、TNF-3のA層の30, 40および30%, 5%と概ね類似していた。しかし、4Bw, 5ABおよび6Aの3つの層はこれらとは異なる10, 30および60%の割合で、TNF-3の2A層と類似していた。また、TNO-5のIAO-Rは1.22~1.44で、TNF-3の0.56~0.88に比べて鉄酸化物の割合が大きかった。

(3) 電子顕微鏡による粘土粒子の微細形態観察

TNF-3のA層の無処理粘土試料は「第3図」左上の画面中央の粒子の集合体のように長径3~4 μm 、短径1~2 μm の粒子同士が結合したような団粒を形成し、その粒子の表面には細かい凹凸や粒径0.2 μm 前後の微細な粒子の存在が認められた。

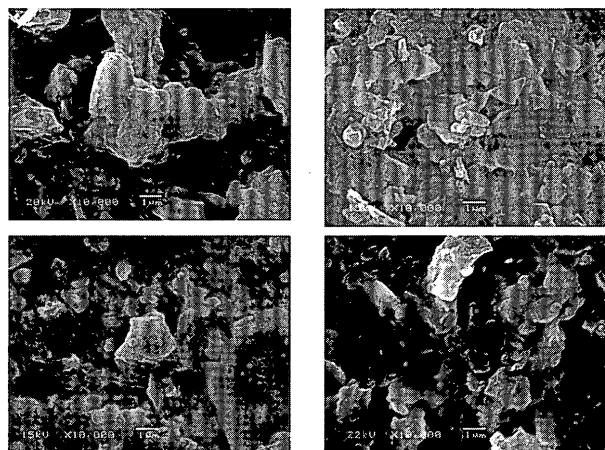
これをNa-DCBによる脱鉄処理を行ったものでは、「第3図」左下のように粒子表面の凹凸は少なくなり、粒子同士が結合した団粒は認められなくなった。この処理では溶解する結晶性および非晶質の鉄酸化物やアルミニウム酸化物が、無処理粘土試料で認められた団粒の形成に寄与していたと考察した。

Na-oxalateによる非晶質粘土鉱物溶解処理を行ったものでは、「第3図」右上のように長径2 μm 前後の粒子の形態が尖鋭化したものが多く見受けられ、粒径0.2 μm 前後の微細な粒子の数が少なくなった。この処理はアロフェンやイモゴライトのような非晶質粘土鉱物を溶解する。そのため、数が少なくなった微細な粒子はアロフェンやイモゴライトの集合体である可能性もあるが、アロフェンは直径5 nm前後の球状の単位粒子であり、イモゴライトは直径2~3 nmの繊維状粒子であることから[2]、この粒径0.2 μm の微細な粒子を明らかにするには、さらに高解像度で観察する必要がある。

Na-citrateによる層間アルミニウム除去処理を行ったものでは「第3図」右下のように長径2 μm 前後の粒子の角や先端は丸みを帯びていた。この処理は2:1型粘土鉱物の層間のアルミニウム水酸化物を溶かす処理とされているが、処理中に2:1型粘土鉱物の層間のみならず単位層の端面も溶解したため、それらの粒子の端が丸みを帯びたと考察した。

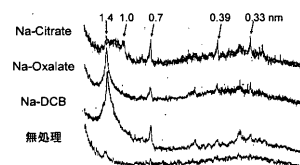
(4) X線回折による結晶性粘土鉱物組成の検討

① 選択溶解処理に伴う回折ピークの強度と位置の変化
無処理のTNF-3のA層の粘土では「第4図」に示したように1.4nmの小さなピークしか認められなかったが、Na-DCB処理後にはこの1.4nmのピークは極めて大きく



第3図 TNF-3：A層の無処理（左上）、DCB（左下）、Oxalate（右上）およびCitrate（右下）処理粘土のSEM写真（マーカー：1 μm ）

TNF-3のA層の無処理、Na-DCB、Na-oxalate、Na-citrate処理を行った粘土の形態の変化を説明。



第4図 TNF-3：A層粘土のNa-DCB、OxalateおよびCitrate逐次処理後のK-粘土のX線回折図

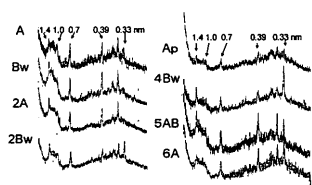
TNF-3のA層粘土の1.4nmの小さなピークが、Na-DCB、Na-oxalate、Na-citrateにより明瞭な強いピークが出る。

なり、新たに0.7, 0.5~0.3nmにかけて明瞭なピークが認められた。これらのピークはNa-oxalate処理後には相対的な大小関係は変わらなかったが、全体的に小さくなった。Na-citrateによる層間Al除去処理後には、0.7 nmのピークは再び大きくなったが、1.4nmのピークは小さくなり、新たに1.4から1.0nmにかけて連続するピークが出現した。

これらのピークに該当する可能性がある粘土鉱物として、2:1型粘土鉱物のクロライト (Ch)、スメクタイト (Sm) およびバーミキュライト (Vt)、さらに層間にアルミニウムの入ったアルミニウムバーミキュライト (Al-Vt) およびアルミニウムスメクタイト (Al-Sm) が挙げられる。また、0.7nmのピークは1:1型粘土鉱物のカオリン (Ka, カオリナイト群) およびChなどの2:1型粘土鉱物の二次反射の可能性もあるため、次の③で検討した。なお、0.39および0.33nmのピークは粘土分中に混入していた一次鉱物の長石 (Fd) および石英 (Qz) である。

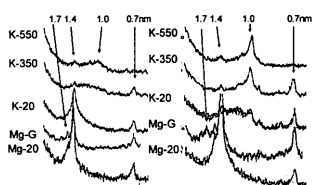
② 各層の粘土鉱物の組成

Na-DCB、Na-oxalate、Na-citrate逐次処理後にカリ



第5図 TNF-3 (左), TNO-5 (右) のNa-DCB-Oxalate-Citrate処理K-粘土のX線回折図

TNF-3 (左), TNO-5 (右) の各層のNa-DCB-Oxalate-Citrate処理K-粘土のX線回折図はTNF-3のA層粘土と類似したピークパターンを示し, 1.4~1.0, 0.7, 0.4, および0.33nmなどに明瞭なピークが認められた。



第6図 TNF-3: A層のNa-DCB-Oxalate (左) およびNa-DCB-Oxalate-Citrate (右) 処理粘土のX線回折図

TNF-3のA層粘土のMg飽和 (Mg-20) 1.4nmのピークは, グリセロール浸潤処理後 (Mg-G) にもほとんど変わらなかったが, 1.7nmに小さなスメクタイト (Sm) のピークが認められた。

ウム塩飽和して室温でX線回折した各層の試料 (K-20) は「第5図」に示したようにTNO-5のAp層のピークが他の層に比べて小さかったが, 前出の①で述べたTNF-3のA層粘土と類似したピークパターンを示し, 1.4~1.0, 0.7, 0.39, および0.33nmなどに明瞭なピークが認められた。このことから, 結晶性粘土鉱物組成は各層とも類似していると推察した。

③ 各種処理後のX線回折による2:1型粘土鉱物種の同定

TNF-3のA層粘土では「第6図」左に示したようにNa-DCB処理後のMg飽和 (Mg-20) に認められた大きな1.4nmのピークは, グリセロール浸潤処理後 (Mg-G) にもほとんど変わらなかったが, Mg-Gでは1.7nmに小さなSmのピークが認められた。また, K-20でも1.0nmのピークは認められなかった。これらのことから, 1.4nmのピークにはVtは含まれていないと判定した。350℃で加熱したK飽和試料 (K-350) では1.4nmの大きなピークは小さくなり, 1.4nmから1.0nmにかけて認められた連続的なピークはAl-Vtと同定した。さらに550℃で加熱した試料 (K-550) で認められた1.4nmの小さなピークはCh, 1.0nmの大きなピークはAl-Vtと同定した。

一方, 0.7nmの明瞭なピークがK-550以外のすべてに認められ, これらは1:1型粘土鉱物のKaおよびChなどの2:1型粘土鉱物の二次反射の可能性が考えられ

た。550℃加熱によりKaのピークは消失するが, Chが共存する場合にはChの2次反射のピークも著しく弱まる [4]。このため, Kaの存否の識別は改めて別の方法で行うこととした。

層間のアルミニウムを除去するNa-citrate処理後は「第6図」右のようにMg-Gの1.7nmのピークがNa-DCBのそれに比べて大きかったことから, この処理により増加した分の1.7nmピークをAl-Smと同定した。同じくK-350およびK-550の1.0nmの大きなピークはAl-Vtの層間アルミニウムの除去の影響と考察した。また, 0.7nmのピークもK-550以外のすべてに認められたが, 既述した理由でKaあるいはChの2次反射のピークの識別は行わなかった。

④ 各層の結晶性粘土鉱物組成

以上に述べたX線回折のピーク面積から各層の土壌の結晶性粘土鉱物の量を半定量的に求め, その組成を「第5表」に示した。なお, Kaの存否は明らかではないため, 表には示していない。

いずれの層もAl-VtおよびChを主体とし, これにAl-Sm, SmおよびVtが含まれる組成であった。Al-Vt, Ch, Al-Smのように, 層間にアルミニウム水酸化物が入った構造を持つ2:1型粘土鉱物が主要な結晶性粘土鉱物であった原因は, 火山灰土壌に多い活性アルミニウムなどがSmおよびVtの層間に侵入するインターカレーション (intercalation) が起こりやすい環境条件にあったためと推察した [4]。また, 同じ2:1型粘土鉱物でもItが認められなかった原因は, 母岩に雲母が含まれていなかったのか, 雲母が速やかに風化を受けてVtなどに変化した可能性を考察した。

第5表 TNF-3およびTNO-5の土壌粘土の結晶性粘土鉱物組成

地点名 層位名	Sm	Al-Sm	Ch	Al-Vt	Vt	It
TNF-3						
A	+	++	++	+++	-	-
Bw	++	++	++	+++	+	-
2A	+	+	+	+++	+	-
2Bw	+	+	++	+	+	-
TNO-5						
Ap	+	-	++	++	+	-
4Bw	+	+	++	+++	+	-
5AB	+	+	++	+++	-	-
6A	+	++	+	++	-	-

注: ピーク高さから, 富む (+++) ~ なし (-) まで4段階に分類

Sm: スメクタイト, Al-Sm: アルミニウム-スメクタイト, Ch: クロライト, Al-Vt: アルミニウム-パーミキュライト, Vt: パーミキュライト, It: イライト。

層によって鉱物組成はやや異なっていたが、その差異はあまり大きなものではなく、いずれの層の土壌の結晶性粘土鉱物組成も類似していると考えられた。このことから、ひとつは各層を構成する母材の火山灰の鉱物組成が類似していた可能性、もうひとつは鉱物組成が異なった火山灰層であっても堆積後の土壌環境条件が類似しているために同様の結晶性粘土鉱物が生成される可能性、このふたつの可能性を推察した。

4. 総合考察

以上に述べた無機成分および粘土鉱物の分析結果について、表層（埋没表層）と下層（埋没下層）の値の比を第6表に示した。

1) 表層と下層（埋没下層）の比較

TNF-3のA、Bw層およびTNO-5のAp、4Bw層についてみると、可給態リン酸含量および交換性カルシウムイオン含量は両土壌ともに1以上で表層のほうが下層より大きかった。土壌のリンの給源としては動植物や微生物の遺体中に含まれる有機態リンのほかにはリン鉱物などを含んだリン酸肥料があり、とくに22.0と著しく大きかった果樹園の表層については施肥リンの影響が大きいと推察した。また、カルシウムは灰長石や普通輝石のような一次鉱物の溶解のほか、施用された肥料や土壌改良資材の可能性を推察した。以上のようにこれらの無機成分は人為的な影響を受けて表層の集積量を増加させることを推察した。

このリン酸の保持力に関係するリン酸吸収係数

第6表 森林土壌と果樹園土壌の表層と下層の値の比

分 析 項 目	森林土壌 (TNF-3) A層/Bw層	果樹園土壌 (TNO-5) Ap層/4Bw層	森林土壌 (TNF-3) 2A層/2Bw層
可給態リン酸含量	2.21	22.00	4.00
交換性カルシウム含量	1.83	1.30	1.17
リン酸吸収係数	0.84	0.64	1.07
陽イオン交換容量	1.36	1.05	1.15
粗 砂 割 合	2.80	3.27	1.08
細 砂 割 合	0.77	0.78	0.92
シ ル ト 割 合	0.39	0.36	1.02
粘 土 割 合	0.59	0.16	1.07
アロフェン推定含量	0.68	0.45	1.30
酸 化 物 割 合	1.56	2.14	0.43
非晶質粘土鉱物割合	0.81	1.67	0.61
結晶性粘土鉱物割合	0.97	0.47	2.22
層 間 A l 割 合	1.29	1.74	0.92

(PAC)は両土壌ともに1以下であったが、カルシウムなどの陽イオンの保持力の指標となる陽イオン交換容量(CEC)は逆に1以上であった。さきに、このことについては表層土壌の腐植がリンとの反応性に富むアロフェンや活性のアルミニウムと結合してPACを低下させる可能性を持つこと、また腐植がCECを増加させる可能性をもつことを推察した。CECについては腐植とともに高い陽イオン保持力を持つ粘土の影響も大きい、その割合は1以下であった。粘土分の70~80%を占めている非晶質および結晶性粘土鉱物の割合は森林土壌では1以下、果樹園土壌でも結晶性粘土鉱物は1以下であったことから、表層土壌のCECの増加には粘土鉱物よりも腐植の影響が大きいことを推察した。

粘土分の酸化物および(結晶性粘土鉱物)層間Alの割合は両土壌ともに1以上で、鉄やアルミニウムの酸化物が表層では富化されることが示唆された。

2) 埋没表層と埋没下層の比較

TNF-3の2A、2Bw層の値がTNF-3のA、Bw層およびTNO-5のAp、4Bw層と同様の1以上あるいは1以下の値を示したのは可給態リン酸含量、交換性カルシウム含量、CEC、粗砂割合および細砂割合の5項目で、他の7項目はいずれも異なっていた。

TNF-3の2A、2Bw層の可給態リン酸含量および交換性カルシウム含量が1以上であったことから、可給態リン酸および交換性カルシウムは、埋没条件下でも比較的安定に保持される可能性を推察した。

CEC、粗砂割合および細砂割合は各1.15、1.08および0.92であったが、TNF-3のA、Bw層に比べてCECおよび粗砂割合は小さく、細砂割合は逆に大きかった。さらに、シルト割合および粘土割合および結晶性粘土鉱物割合はTNF-3のA、Bw層より大きかった。さきに表層土壌のCECには粘土よりも腐植の影響が大きいことを推察したが、埋没条件下の土壌では、腐植の緩やかな分解が進む一方で砂などの粒子の細粒化が進行して粘土分の増加が起こり、CECには腐植よりも粘土の影響が大きくなる可能性を推察した。

一方、地点および層の違いに関わらず結晶性の粘土鉱物の組成は概ね類似していた。結晶性粘土鉱物は酸化物や非晶質粘土鉱物と同様に、母材の火山灰に含まれる一次鉱物などを起源とする可溶性物質から土壌中で新たに生成される[3]。今回は調べていない一次鉱物組成がいずれの層も類似していたこと、土壌中の水分や温度条件が比較的類似していたこと、これらの条件が重なって類似した結晶性粘土鉱物となったことを推察した。

5. 摘 要

千葉大学森林環境園芸（利根高冷地）農場内の森林土壌および果樹園土壌（地点名は各TNF-3およびTNO-5）の無機成分および粘土鉱物組成を分析した結果、以下のことが明らかとなった。

1. 両土壌ともに、現在の表層と下層の土壌の下に過去の表層と下層の土壌が埋没し、それぞれA/Bw/2A/2Bw層およびAp/2BC/3BC/4Bw/5AB/6A層の配列であった。
2. 両土壌ともに可給態リン酸含量は表層（A, Ap層）が下層よりも高く、とくにTNO-5のAp層はTNF-3のA層より8倍程度も高かった。逆にリン酸吸収係数はA, Ap層が下層より低く、リン酸吸収係数とアロフェン推定含量とは高い正の相関関係が認められた。
3. 陽イオン交換容量はTNF-3ではA層のほうがBw, 2A, 2Bw層より高かったが、TNO-5ではAp層より5AB, 6A層のほうが高かった。交換性のカルシウム、マグネシウム、カリウム含量および塩基飽和度はTNF-3よりTNO-5が大きかった。
4. 両土壌ともに、A, Ap層は下層よりも粗砂の割合が大きく、粘土、シルトおよび細砂の割合が小さかった。
5. 両土壌ともに、A, Ap層の酸化物（Ox）、非晶質粘土鉱物（AC）および結晶性粘土鉱物（CC）の割合は概ね30, 40および30%であった。しかし、TNF-3の2A層、TNO-5の4Bw, 5ABおよび6A層ではOx, AC, CCの割合は約10, 30および60%で、A, Ap層よりOx, ACの割合が小さく、CCの割合が大きかった。

6. 両土壌ともに、結晶性粘土鉱物組成はいずれの層もアルミニウム—バーミキュライト（Al-Vt）およびクロライト（Ch）を主体とし、これにアルミニウム—スメクタイト（Al-Sm）、スメクタイト（Sm）およびバーミキュライト（Vt）が含まれる組成であった。

引用文献

- [1] 土壌環境分析法編集委員会（1997）：土壌環境分析法，博友社，東京，19-20，24-29，208-211，262-264，267-273，288-297。
- [2] Harsh, J., Chorover, J., and Nizeyimana, E. (2002): Al-
lophane and Imogolite. In Dixon, J.B., and D.G. Schulze (ed.) Soil Mineralogy with Environmental Applications. SSSA Book Ser: 7. SSSA, Madison, WI. 291-322.
- [3] 井上克弘（1997）：土壌の材料（最新土壌学，久馬一剛編），朝倉書店，東京，27-42。
- [4] Kohut, C.K., and C.J. Warren (2002): Chlorites. In Dixon, J.B., and D.G. Schulze (ed.) Soil Mineralogy with Environmental Applications. SSSA Book Ser: 7. SSSA, Madison, WI. 531-553.
- [5] 日本第四紀学会編（1987）：日本第四紀地図，日本第四紀地図解説，東京大学出版会，東京，13。
- [6] 三枝正彦（1989）：粘土鉱物（季刊化学総説No 4，土の化学，日本化学会編），学会出版センター，東京，50-65。
- [7] 鈴木創三（1983）：粘土鉱物（土の理工学性実験ガイド，土の理工学性実験ガイド編集委員会編），農業土木学会，東京，27-34。