

論文

長期間の堆肥連用が土壌（主として二毛作田）粒径画分の腐植組成に及ぼす影響*

田中麻依子・進藤晴夫
(山口大学 農学部)**Abstract**

We investigated the effect of continuous compost application on humus composition of soil particle size fractions in a field subjected mainly to double cropping (upland and paddy crops) for about 30 years. Soil samples were collected from two plots with different types of management: (a) F plot, chemical fertilizers containing N, P, and K were applied; (b) F+C plot, chemical fertilizers plus compost were applied. Each soil sample was divided into five fractions of three sand-sized aggregates, a silt-sized aggregate, and a clay-sized aggregate by wet-sieving and sedimentation. Furthermore, coarse and medium sand-sized fractions were subdivided into “mineral particles” and “decayed plants” by a density fractionation. Compost application increased the amounts of total organic matter, humic acids, and fulvic acids in many particle size fractions, particularly, silt-sized aggregate fraction. Those amounts were much larger in “decayed plants” than in “mineral particles”. On the other hand, the degree of humification of humic acids decreased markedly by compost application.

Key words: Compost application; Particle size fraction; Organic matter; Humic acid; Fulvic acid; Humification.

序論

わが国では、1970年代から、農耕地土壌の生産力の維持・増強における堆きゅう肥（堆肥）、生わらなど有機質資材の役割を把握するため、全国各地の農業試験場で有機質資材の連用試験が実施されてきた。山口県農業試験場でも、二毛作田（水稻およびビール麦）への堆肥連用効果を解析するため、1975年から肥培管理を異にする試験区を設定して圃場試験が実施されている。これらの試験区土壌は、長期間の堆肥連用が土壌の物理性、化学性、生物性、肥沃性、炭素の隔離・貯留などに及ぼす影響を明らかにする上で有用な試料であると考えられる。

このような見地から、上記の試験区土壌を対象とした一連の研究が行われてきた。これまでに得られた成果は、次のようにまとめられる。二毛作田に堆肥と化学肥料を長期間併用して連用すると、化学肥料単独の場合と比べて、1) 土壌の有機態炭素量、全窒素量、微

生物バイオマス量、各種酵素活性および耐水性団粒の大団粒化度が増加する（進藤・將積, 1999; Ibrahim and Shindo, 1999）、2) 土壌の腐植酸およびフルボ酸量は増加し、腐植酸の腐植化度は低下するが、リグニンの特徴は強くなる（進藤・島田, 2001; Shindo et al., 2006）、3) 土壌から中性リン酸緩衝液で抽出される炭素および窒素量（いわゆる地力窒素（樋口, 1982））が増加する（Shindo et al., 2006）。

腐植は、土壌の諸性質を大きく支配する重要な構成物質の一つである。土壌の腐植組成に及ぼす堆肥連用効果に関しては、上記の研究のほか、水田あるいは畑土壌を対象として研究が進められてきた。例えば、六本木ら（1994）は、稲わら堆肥を沖積土の畑土壌へ連用すると、全腐植、腐植酸およびフルボ酸量は増加するが、腐植酸の腐植化度は低下することを報告した。Aoyama and Kumakura（2001）は、黒ボク土の畑土壌に牛ふんきゅう肥を連用すると、腐植酸の腐植化度が低下することを示した。Watanabe et al.（2007）は、同じ

* Effect of long-term compost application on humus composition of soil particle size fractions in a field subjected mainly to double cropping. M. Tanaka, H. Shindo: Faculty of Agriculture, Yamaguchi University, Yoshida 1677-1, Yamaguchi, Yamaguchi 753-8515, Japan; E-mail shindo@yamaguchi-u.ac.jp

黒ボク土壌試料を分析し、多量にきゅう肥を連用すると、腐植酸およびフルボ酸量は増加すること、一方、赤黄色土壌では、通常の施用量でも腐植酸量が増加することを報告した。

ところで、和田・金沢 (1970) および和田ら (1970) によると、土壌の物理分画は、土壌構成物質の分布様式、存在状態および動態を明らかにする上で有用な手法である。青山 (1992) は、きゅう肥を連用した赤黄色土壌および黒ボク土壌に物理分画法を適用し、粒径画分に分けると、全炭素は粗砂画分 (210~2,000 μm) に集積することを示した。その後、Aoyama and Kumakura (2001) は、きゅう肥を連用した黒ボク土壌を53 μm で物理分画すると、 $>53 \mu\text{m}$ 画分の腐植酸およびフルボ酸量が増加することを示した。しかしながら、土壌を砂、シルト、粘土などの各粒径画分に分画する物理分画法を有機質資材連用土壌へ適用し、粒径画分の腐植組成を解析した研究は少ない。

そこで本研究では、前記の肥培管理を異にする二毛作田土壌を供試し、粒径画分の腐植組成に及ぼす堆肥連用効果を調べた。

試料および方法

供試土壌

山口県農業試験場(山口市)で1975年から圃場試験が実施されている2種類の試験区土壌(灰色低地土)を供試した。試験区土壌のうち、①化学肥料区(化肥区)には、N、PおよびK肥料が施用された。また、②堆肥施用区(堆肥区)には、化学肥料とともに、牛ふん稲わら堆肥が施用された。これらの試験区では、1975年から2000年まで、夏作に水稻、冬作にビール麦が栽培された。肥料は、両試験区ともに、各作物に対して100 kg ha^{-1} ずつ施用された。牛ふん稲わら堆肥は、6月と11月の各作物の収穫後に15 Mg ha^{-1} 施用した。ただし、2001年以降は水稻のみの栽培となり、施用された化学肥料および堆肥の量は半減した。なお施用された堆肥は、稲わらと牛ふんを約7:3の割合で混合し、約半年間、堆肥舎で熟成させ

たものである。

2007年4月に各試験区5カ所の作土層(0~15cm)から土壌を採取し、十分に混合した。これらの試料は、風乾し、2mmの篩に通した後、物理分画に用いた。

土壌の物理分画

土壌の物理分画は、Aoyamaら(1999)の方法を参考にして行った(Fig.1)。すなわち、500mL容のガラス製振とう瓶に50.0gの風乾細土を秤取し、水250mLとガラスビーズ(直径約6mm,比重2.53)を15粒加え24時間振とうした。振とう後、懸濁液を212 μm の篩に通し、篩上の土壌粒子を絵筆で崩しながら透明な洗浄液が得られるまで丁寧に脱イオン水で洗浄した。本研究では、篩上に残った粒子(212~2,000 μm)を粗砂サイズ粒団画分(CSA: Coarse sand-sized aggregate fraction)と呼ぶ。次に、212 μm の篩を通過した液(懸濁液I)を53 μm の篩に通し、CSAの場合と同様な操作を行い、篩上の粒子を脱イオン水で洗浄した。この粒子(53~212 μm)を細砂サイズ粒団画分(MSA: Medium sand-sized aggregate fraction)とした。通過液(懸濁液II)は2Lビーカーに集め、ガラス棒で十分に攪拌し、5°Cで沈降法を10回繰り返して $<2 \mu\text{m}$ の粘土サイズ粒団画分(CLA: Clay-sized aggregate fraction)回収した。また、2~20 μm のシルトサイズ粒団画分(SIA:

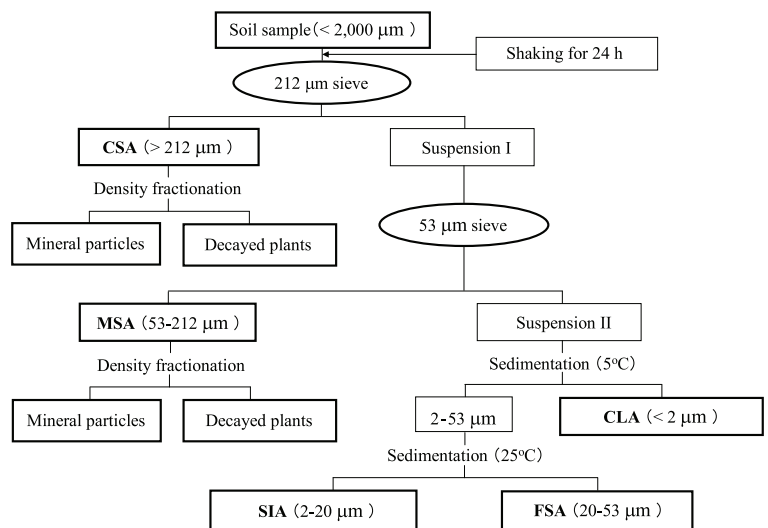


Fig. 1. Outline of particle size fractionation. CSA: Coarse sand-sized aggregate fraction; MSA: Medium sand-sized aggregate fraction; FSA: Fine sand-sized aggregate fraction; SIA: Silt-sized aggregate fraction; CLA: Clay-sized aggregate fraction.

Silt-sized aggregate fraction) は、ガラス棒で十分に攪拌し、25°Cで沈降法を10回繰り返して回収した。ピーカー中に残った20–53 μmの画分は、微砂サイズ粒団画分 (FSA: Fine sand-sized aggregate fraction) とした。CLA と SIA はともに、ロータリーエバポレーター (SIBATA, RE-111A-SW) を使って40°C以下で減圧濃縮した。CSA と MSA については、比重法 (水中デカンテーション法) を用いて (和田・金沢, 1970)、それぞれ“鉱物粒子 (MP: Mineral particles)”と“腐朽植物 (DP: Decayed plants)”に細分画した。

MP と DP を含む全ての画分は、凍結乾燥し (TAITEC, FREEZE DRYER VD-15)、秤量後、各粒径画分の分析用試料とした。

上記の物理分画法における土壌粒子の分散の程度を知るため、別途、H₂O₂ で土壌有機物を分解した後の粒径組成をピペット法 (青峰・原田, 1975) で分析した。

腐植の形態分析

腐植の形態分析は、混液抽出法 (Kumada, 1987) に準じた。すなわち、0.1M NaOH と 0.05M Na₄P₂O₇ 混液 (1:1) を用いて、試料から腐植を30分間加熱抽出し、得られた腐植抽出溶液に濃硫酸を加えて腐植酸 (沈殿画分) とフルボ酸 (沈殿しない画分) に分別した。土壌の全有機物量と抽出された腐植酸およびフルボ酸量は、KMnO₄酸化滴定法 (Kumada, 1987) で求めた。本研究では、0.02mol L⁻¹ KMnO₄ 溶液の消費量 1mL が

0.48mgの炭素に相当する (Ikeya and Watanabe, 2003) ものとして計算し、炭素量で表示した。さらに、腐植酸の相対色度 ($\Delta \log K$) と色調係数 (RF) を求め、腐植酸型をKumada (1987) の分類法で決定した。

結果および考察

粒径組成

Table 1に、物理分画法による土壌の粒径組成を示した。分画に用いた土壌の全重量に対する粒径画分の重量の合計の割合、すなわち重量回収率は、化肥区で97.0%、堆肥区で100.9%であった。そこで本研究では、これらの値を100%に補正し、各画分への分配率を算出した。各粒径画分の重量分配率は、化肥区で11.9–32.2%、堆肥区で9.3–34.0%の範囲にあり、両区ともCLA (<2 μm) < FSA (20–53 μm) < MSA (53–212 μm) < SIA (2–20 μm) < CSA (212–2,000 μm) の順であった。これらの結果は、各粒径画分への重量分配が堆肥連用によって大きい影響を受けなかったことを示す。

Table 2に、H₂O₂ で土壌有機物を分解した後に得られた土壌の粒径組成を示した。この分析法と上記の物理分画法の結果を比較すると、物理分画法の方が、210–2,000 μm画分と2–20 μm画分の分配率に対しては高い値を示し、逆に20–210 μm画分と<2 μm画分の分配率に対しては低い値を示した。これらの相違は、供試土壌中に、水中篩別を含む物理分画法を適用した場

Table 1. Percentage distribution (%) of mass weight in particle size fractions.

Plot	CSA ^c			MSA ^d			FSA ^e	SIA ^f	CLA ^g	Total
	MP ^h	DP ^h	Sum	MP	DP	Sum				
F ^a	31.1	1.1	32.2	19.7	0.9	20.6	14.1	21.3	11.9	100
F+C ^b	32.7	1.3	34.0	17.1	1.7	18.8	12.6	25.3	9.3	100

^a Fertilizers containing N, P and K were applied.

^b Fertilizers plus compost were applied.

^c Coarse sand-sized aggregate (212–2,000 μm) fraction.

^d Medium sand-sized aggregate (53–212 μm) fraction.

^e Fine sand-sized aggregate (20–53 μm) fraction.

^f Silt-sized aggregate (2–20 μm) fraction.

^g Clay-sized aggregate (<2 μm) fraction.

^h MP and DP stand for "Mineral particles" and "Decayed plants", respectively.

Table 2. Particle size distribution (%) fractionated by usual method ^a.

Plot ^b	Sand		Silt (2–20 μm)	Clay (<2 μm)	Total
	Coarse (210–2,000 μm)	Fine (20–210 μm)			
F	28.6	36.8	18.5	16.3	100
F+C	29.6	34.9	19.1	16.4	100

^a Isolated after digestion of soil organic matter with H₂O₂.

^b See Table 1.

合でさえ分散させることができない極めて安定な有機・無機複合体（水田状態でも安定）が存在していることを明示する。そのため、本研究では、物理分画法によって得られた画分を粒団画分（Aggregate fraction）と呼ぶことにした。粒団の形成は、土壌環境が水田状態から落水状態および畑状態に変わる際に促進されるものと考えられる。

腐植組成

Tables 3–5 に粒径画分の腐植組成を示した。全有機物量、腐植酸量およびフルボ酸量は、画分 1 kg 当たりと分画に用いた土壌 1 kg（乾土）当たりで換算して表示した。また、各表には画分における全有機物、腐植酸およびフルボ酸量の分配率を併記した。

Table 3 に示したように、各粒径画分の全有機物量は、化肥区で 1.00–246 g C kg⁻¹ 画分、堆肥区で 1.13–222 g C kg⁻¹ 画分の範囲にあった。また両区とも、SIA < CLA で

あった。“腐朽植物”（DP）の全有機物量は、“鉱物粒子”（MP）の約 70 倍ないし 190 倍の高い値を示した。

各画分の全有機物量を乾土当たりで換算すると、化肥区で 0.198–4.75 g C kg⁻¹、堆肥区で 0.192–7.06 g C kg⁻¹ の範囲にあり、殆どの画分で堆肥区は化肥区を凌駕した。また、化肥区では SIA < CLA、堆肥区では逆に CLA < SIA の関係がみられた。

各粒径画分における有機物量の分配率は、化肥区で 1.4–34.4%、堆肥区で 1.2–34.6% の範囲にあった。SIA と CLA の分配率を比べると、化肥区では SIA (28.2%) < CLA (34.4%)、堆肥区では CLA (27.4%) < SIA (34.6%) となった。また、DP の分配率（堆肥区 29.4%、化肥区 31.6%）は、MP の分配率の 2.8–12.9 倍高い値を示した。

青山（1992）および Aoyama and Kumakura（2001）は、黒ボク土の厨川土壌に 80–320 Mg ha⁻¹ のきゅう肥を最長 20 年連用した際に、土壌の有機物量は、< 53 μm 画分よりも > 53 μm 画分の方に多量に集積したと報告

Table 3. Amount and percentage distribution of total organic matter in particle size fractions.

Particle size fraction ^a		g C kg ⁻¹ fraction		g C kg ⁻¹ whole soil		Percentage distribution	
		F ^b	F+C ^b	F	F+C	F	F+C
CSA	MP	1.28	3.17	0.398	1.04	2.9	5.1
	DP	246	222	2.71	2.89	19.4	14.0
	Sum			3.11	3.93	22.3	19.1
MSA	MP	1.00	1.13	0.198	0.192	1.4	1.2
	DP	187	185	1.68	3.15	12.2	15.4
	Sum			1.88	3.34	13.6	16.6
FSA		1.52	3.72	0.214	0.469	1.6	2.3
SIA		18.3	27.9	3.90	7.06	28.2	34.6
CLA		39.9	60.3	4.75	5.61	34.4	27.4
Total				13.9	20.4	100	100

^a See Table 1.

^b See Table 1.

Table 4. Amount and percentage distribution of humic acids in particle size fractions.

Particle size fraction ^a		g C kg ⁻¹ fraction		g C kg ⁻¹ whole soil		Percentage distribution	
		F ^b	F+C ^b	F	F+C	F	F+C
CSA	MP	N.A. ^c	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	DP	111	118	1.22	1.53	23.4	13.5
	Sum			1.22	1.53	23.4	13.5
MSA	MP	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	DP	61.4	112	0.553	1.90	10.7	16.8
	Sum			0.553	1.90	10.7	16.8
FSA		N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
SIA		7.71	21.3	1.64	5.39	31.7	47.7
CLA		14.8	26.7	1.76	2.48	34.0	21.9
Total				5.17	11.3	100	100

^a See Table 1.

^b See Table 1.

^c Not applicable because the amount of humic acid is very small.

Table 5. Amount and percentage distribution of fulvic acids in particle size fractions.

Particle size fraction ^a		g C kg ⁻¹ fraction		g C kg ⁻¹ whole soil		Percentage distribution	
		F ^b	F+C ^b	F	F+C	F	F+C
CSA	MP	N.A. ^c	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	DP	73.6	55.7	0.121	0.152	3.5	2.6
	Sum			0.121	0.152	3.5	2.6
MSA	MP	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	DP	17.6	42.8	0.157	0.729	4.6	12.4
	Sum			0.157	0.729	4.6	12.4
FSA		N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
SIA		5.32	11.5	1.13	2.91	32.8	49.4
CLA		17.2	22.6	2.04	2.10	59.1	35.7
Total				3.45	5.89	100	100

^a See Table 1.^b See Table 1.^c Not applicable because the amount of fulvic acid is very small.

している。類似の結果は、黒ボク土の弘前土壌を用いた試験研究（青山・谷内，1992）からも得られている。しかしながら、30Mg ha⁻¹の堆肥が25年間、15Mg ha⁻¹の堆肥が7年間連用された本研究の灰色低地土では逆の結果が得られた（Table 3）。さらに、黒ボク土の場合でも、43年間にわたって稲わら堆肥が11もしくは34Mg ha⁻¹連用された藤坂土壌では、粒径画分当たりの全炭素含量と各画分への炭素の分配率は、シルトおよび粘土画分で高く（青山，1992）、本研究の結果（Table 3）と類似していた。藤坂土壌への年間の堆肥施用量は本研究と同程度、連用期間は本研究に比べて長期であることから、有機質資材の連用によって有機物が多量に集積する粒径画分は、1年当たりの有機質資材の施用量によって左右される場合もあるものと推察される。

Table 4に示したように、各画分の腐植酸含量は、MPとFSAを除き、化肥区で7.71–111g C kg⁻¹画分、堆肥区で21.3–118g C kg⁻¹画分の範囲にあった。また両試験区とも、SIA<CLAであった。

各画分の腐植酸量を乾土当たりに換算すると、化肥区で0.553–1.76g C kg⁻¹、堆肥区で1.53–5.39g C kg⁻¹の範囲にあり、いずれの画分でも堆肥区の方が化肥区を上回った。また、化肥区ではSIA<CLAであったが、堆肥区では逆にCLA<SIAであった。

画分における腐植酸量の分配率は、化肥区で10.7–34.0%、堆肥区で13.5–47.7%の範囲にあった。化肥区ではSIA（31.7%）<CLA（34.0%）であったが、堆肥区ではCLA（21.9%）<SIA（47.7%）となった。DPへの分配率は、堆肥区（30.3%）<化肥区（34.1%）であった。

Table 5に示したように、各画分のフルボ酸含量は、

MPとFSAを除き、化肥区で5.32–73.6g C kg⁻¹画分、堆肥区で11.5–55.7g C kg⁻¹画分の範囲にあった。また、両試験区とも、SIA<CLAであった。

各画分のフルボ酸量を乾土当たりに換算すると、化肥区で0.121–2.04g C kg⁻¹、堆肥区で0.152–2.91g C kg⁻¹の範囲にあり、どの画分でも堆肥区の方が化肥区を上回った。また、化肥区ではSIA<CLAであったが、堆肥区では逆にCLA<SIAの関係がみられた。

各画分におけるフルボ酸量の分配率は、化肥区で3.5–59.1%、堆肥区で2.6–49.4%であった。化肥区ではSIA（32.8%）<CLA（59.1%）であったが、堆肥区ではCLA（35.7%）<SIA（49.4%）となった。DPへの分配率は、化肥区（8.1%）<堆肥区（15.0%）であった。

化肥区および堆肥区における各粒径画分への全有機物、腐植酸およびフルボ酸の分配（Tables 3–5）をみると、両区ともに、CSAとMSAに存在するDPへの分配を看過することはできないが、SIAとCLAに多量の有機物が集積していることは明白である。すなわち、SIAとCLAへの分配率の合計は、化肥区と堆肥区それぞれにおいて、全有機物では62.6と62.0%、腐植酸で65.7と69.6%、フルボ酸では91.9と85.1%であった。SIAとCLAの間で上記の有機物量の分配率を比較すると、化肥区ではいずれもCLAの方が高い値を示したのに対し、堆肥区ではいずれもSIAの方が高い値を示した。この結果は、以下のように考察される。

本研究の分画法では、沈降法によるCLAの回収後にSIA、その後FSAが回収された（Fig. 1）。FSAへの有機物の分配率は、極めて低い（Tables 3–5）ので、遊離（鉱物と結合していない）で低比重の微細な腐朽植物遺体は、SIAよりもCLAとして回収されると考えたほう

が妥当であろう。したがって、堆肥区において、SIAへの全有機物、腐植酸およびフルボ酸量の分配率がCLAのそれらを上回ったのは、多量の微細な腐朽植物遺体がSIA中の鉱物（粘土サイズ鉱物の粒団を含む）と結合することによって安定な粒団が形成されたことに原因があるものと推察される。この推察は、後述するようにSIAの方がCLAに比べて腐植酸の腐植化度が低い（Fig.2）ことによって支持されるであろう。

土壌全体の腐植酸型は、化肥区ではほぼB型（ $RF:40$; $\Delta \log K:0.696$ ）、堆肥区でRp型（ $RF:28$; $\Delta \log K:0.807$ ）であり、堆肥連用により腐植化度は低下した。進藤・島田（2001）およびShindo et al.（2006）は、堆肥などの有機質資材の連用による土壌腐植酸の腐植化度の低下には下記の3つの要因が関係していると推測している。すなわち、(1) 有機質資材に含まれる植物成分（リグニン、炭水化物など）の特徴を強く保持する腐植化度の低い腐植酸（Rp型）が土壌に加えられたこと、(2) 化学肥料と有機質資材の連用によって作物の生育が良好となり、その結果、土壌中に作物の刈り株や根などの作物残渣が多量に還元されたこと、(3) 有機質資材と新鮮な作物残渣が供給されるため、微生物活性が高まり、その結果、元来土壌中に存在していた腐植化度の高い腐植酸も分解を受けるようになったこと（プライミング効果）。

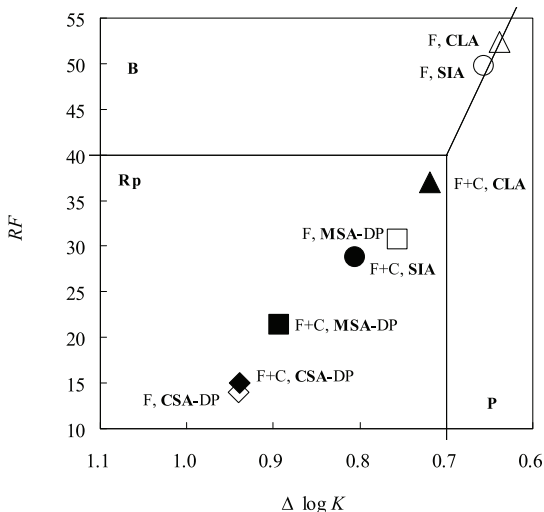


Fig. 2. RF and $\Delta \log K$ values of humic acids in particle size fractions. F: Chemical fertilizers including N, P and K were applied; F+C: Chemical fertilizers plus compost were applied. See Fig. 1 for CSA, MSA, SIA and CLA. DP indicates decayed plants. Rp, B and P in the figure indicate the types of humic acids.

Figure 2にCSA中のDP（CSA-DP）、MSA中のDP（MSA-DP）、SIAおよびCLAにおける腐植酸の RF および $\Delta \log K$ 値と腐植酸型を示した。なお、MPとFSAでは、腐植酸含量がきわめて低いため（Table 4）、それらの値を測定できなかった。 RF 値は、化肥区で14-52、堆肥区で15-37であり、両試験区とも粒径が小さくなるほど高くなった。また、画分ごとに比較すると、ほぼ堆肥区<化肥区の関係がみられた。一方、 $\Delta \log K$ 値は、化肥区で0.638-0.940、堆肥区で0.719-0.939の範囲内に分布し、両試験区とも粒径が小さくなるほど低くなった。また、ほぼ化肥区<堆肥区であった。 RF と $\Delta \log K$ 値から求めた腐植酸型は、化肥区のSIAとCLAではB型に属したが、これらを除く画分では全て腐植化度の低いRp型を示した。Table 4に示したように、堆肥区では、腐植酸の70%がSIAとCLAに含有されていた。したがって、土壌全体の腐植酸がRp型を示したのは、堆肥をはじめとする腐朽植物遺体由来の腐植化度の低い腐植酸（Rp型）がSIAとCLAに集積していることに起因する。また、化肥区でも、腐植酸の66%がSIAとCLAに含有されている（Table 4）ので、この場合でも土壌全体の腐植酸型（ほぼB型）は、両画分の腐植酸型（B型）を反映したものとイえる。

以上の結果は、堆肥連用によって、多くの粒径画分の全有機物、腐植酸およびフルボ酸量が増加すること、また、腐植酸の腐植化度が低下することを示した。さらに、堆肥連用によって、全有機物、腐植酸およびフルボ酸は、SIAに多量に集積することが明らかとなった。

謝辞

本研究を実施するにあたり、貴重な土壌試料を恵んでくださった山口県農業試験場土壌環境グループの方々に深く感謝いたします。

引用文献

- 青峰重範・原田登五郎（1975）土壌肥科学実験ノート．養賢堂，pp.9-12.
- 青山正和（1992）堆きゅう肥の連用に伴って土壌粒径画分へ集積する有機物とその窒素無機化．土肥誌，**63**，161-168.
- 青山正和・谷内豊（1992）きゅう肥連用土壌の粒径画分および団粒サイズ画分の有機物とその無機化．土肥誌，**63**，571-580.
- Aoyama, M., Angers, D.A. and N'Dayegamiye, A. (1999)

- Particulate and mineral-associated organic matter in water-stable aggregates as affected by mineral fertilizer and manure applications. *Can. J. Soil Sci.*, **79**, 295-302.
- Aoyama, M. and Kumakura, N. (2001) Quantitative and qualitative changes of organic matter in an Ando Soil induced by mineral fertilizer and cattle manure applications for 20 years. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **47**, 241-252.
- 樋口太重 (1982) 有機物連用土壌の地力窒素的な評価. 土肥誌, **53**, 214-218.
- Ibrahim, S.M. and Shindo, H. (1999) Effect of continuous compost application on water-stable soil macroaggregation in a field subjected to double cropping. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **45**, 1003-1007.
- Ikeya, K. and Watanabe, A. (2003) Direct expression of an index for the degree of humification of humic acids using organic carbon concentration. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **49**, 47-53.
- Kumada, K. (1987) *Chemistry of Soil Organic Matter*. Japan Sci. Soc. Press, Tokyo.
- 六本木和夫・石上忠・武田正人 (1994) 稲わら堆肥の連用が沖積畑土壌の腐植形態に与える影響. 土肥誌, **65**, 426-431.
- 進藤晴夫・將積路代 (1999) 二毛作田土壌の各種酵素活性に及ぼす堆肥連用効果. 土肥誌, **70**, 66-69.
- 進藤晴夫・島田みさと (2001) 二毛作田土壌の腐植組成に及ぼす堆肥連用効果. 土肥誌, **72**, 92-95.
- Shindo, H., Hirahara, O., Yamamoto, A. and Yoshida, M. (2006) Effect of continuous compost application on humus composition and nitrogen fertility of soils in a field subjected to double cropping. *Biol. Fertil. Soils.*, **42**, 437-442.
- 和田秀徳・金沢晋二郎 (1970) 土壌有機物の物理的分画法 (第1報). 土肥誌, **41**, 273-280.
- 和田秀徳・金沢晋二郎・高井康雄 (1970) 土壌の物理的分画法 (第2報). 土肥誌, **41**, 395-400.
- Watanabe, A., Kawasaki, S., Kitamura, S. and Yoshida, S. (2007) Temporal changes in humic acids in cultivated soils with continuous manure application. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **53**, 535-544.