

## 粘土の分散性に対する有機物の影響

—日置川造成農地の事例—

川田麻子・伊丹勝彦\*・久馬一剛\*\*・小崎 隆

The Effect of Organic Matter on Dispersibility of Clays  
 —A case study of Hikigawa reclaimed agricultural land—

Asako KAWATA・Katsuhiko ITAMI\*・Kazutake KYUMA\*\*  
 and Takashi KOSAKI

Faculty of Agriculture, Kyoto University,

\* Faculty of Bioscience, Fukui Prefectural University,

\*\* School of Environmental Science, the University of Shiga Prefecture

### Abstract

The effect of organic matter and charge characteristics on clay dispersibility of the soils from a newly reclaimed agricultural land, Hikigawa, Wakayama Prefecture, was investigated from the changes with the passage of six years. The adjacent forest soils were examined as a comparison. In 1987 the reduced plant growth in the reclaimed agricultural land was attributed to the unfavorable physical properties of the soil induced by high dispersibility of clay. However, continuous application of a great amount of organic matter to the surface layer of the reclaimed area since 1989, resulted in an increase in total carbon content by ten times in 1993 in comparison with that of 1987, and also favorable plant growth had been obtained. In addition, during those six years, for the surface layer, clay dispersion ratio had decreased from 25% to less than 10%; other physical properties such as water-stable aggregate content, solid phase ratio and hydraulic conductivity had also been improved. Little clay dispersion after saturated by sodium ion indicated that the binding agent of clay particles was hardly-exchangeable organic matter rather than easily-exchangeable cations. In contrast, for the subsoil which remained in lower level of organic matter, such changes in physical properties as the surface soil were not observed. Charge characteristics of clay particles in the subsoil largely determined the dispersion behavior.

**Key words** : Reclaimed agricultural land, Clay dispersibility, Organic matter, Charge characteristics

### 1. はじめに

わが国の耕地面積は1965年には約600万haであったが、1994年には約508万haにまで減少した。1994年度の人為潰廃面積は年間約4.7万haであったのに対し、拡張面積は年間約0.7万haであり、耕地面積の減少はこの1年間で4.0万haにも上る(農林統計協会, 1995)。

しかも新規開墾地の質は低く、既耕地の潰廃を補っているとは言い難い。なぜなら大規模造成農地では造成過程で肥沃な表土は失われ、生物性に乏しい未熟な下層土が地表に現れるため、期待される生産力のレベルに到達しえないばかりか、物理性悪化や土壌侵食等の問題が起こることもあるからである(久馬, 1990)。

和歌山県西牟婁郡日置川町の日置川造成農地はこのよ

京都大学農学部 606-01 京都市左京区北白川追分町, \* 福井県立大学生物資源学部 〒910-11 福井県吉田郡松岡町兼定島 4-1-1,  
 \*\* 滋賀県立大学環境科学部 〒522 彦根市八坂町 2500

キーワード: 造成農地, 粘土の分散性, 有機物, 荷電特性

うな大規模造成農地のひとつであり、日置川開拓建設事業所並びに筆者らにより経年的に調査が行われてきた。本研究ではそれらをまとめ、日置川造成農地における土壌特性値の変化を明らかにし、さらに分散性を規定する因子として有機物および荷電特性について考察することを目的とする。

## 2. 調査地の概要

農林水産省近畿農政局日置川開拓建設事業所による日置川開発事業は1966年に始まり、1985年には総事業費63億円をかけて総面積170haの日置川造成農地が完成した。その中で最大の面積63haを持つ小森団地は1973年に完工し当初柑橘類が植栽されたが、3~4年後には生育不良地域が見られ始めた。

そのため1978年に日置川開拓建設事業所による調査が行われ、小森団地における生育障害は土壌の化学性ではなく物理性に起因するものであること、すなわち土壌硬度や固相率が大きく透水性が悪いため、表層水の排除が不十分で植物根の伸長を阻害していることが明らかとなった(日置川開拓建設事業所・榎日さく、1978)。その後対策として暗渠排水が行われ、柑橘類から、日置川の気候や市場の要請により適している梅への改植も始められた。しかしながら1987年の筆者らによる調査でも作

物の生育不良は改善されていなかった。

久馬(1990)はこの土壌物理性悪化の要因として、造成過程で表層に現れた下層土が高い分散性を示し、透水性を悪化させることを挙げた。またItami and Kyuma(1995)は日置川造成農地に隣接する自然植生下の土壌は、造成農地と母材を同じくするにも関わらず分散性が低いことに注目し、この土壌では難交換性のアルミニウム水酸化物が分散を抑制していることを明らかにした。

ところが1989年から1990年にかけて小森団地の入植者が入れ替わり、梅への改植を推進するとともに有機物を積極的に施用し始めた。西牟婁農業改良普及所によると、有機物の投入量は年間10aあたり1,000kgと推奨されているが、農家では自主的にもっと大量に施用していた。加えて果樹の下に生えている雑草は定期的に刈り倒され、その残渣は土壌に還元されていた。

1993年に筆者らが調査したところ小森団地での梅の植栽面積は全面積の9割以上となり、その生育も良好であった。梅は根の酸素要求度が高く、気相の多い土壌を好む(星川、1985)ことから、湿害を惹起していたような劣悪な物理性はかなり改善されたことが推察された。

## 3. 供試土壌

供試土壌は日置川造成農地小森団地において1987お

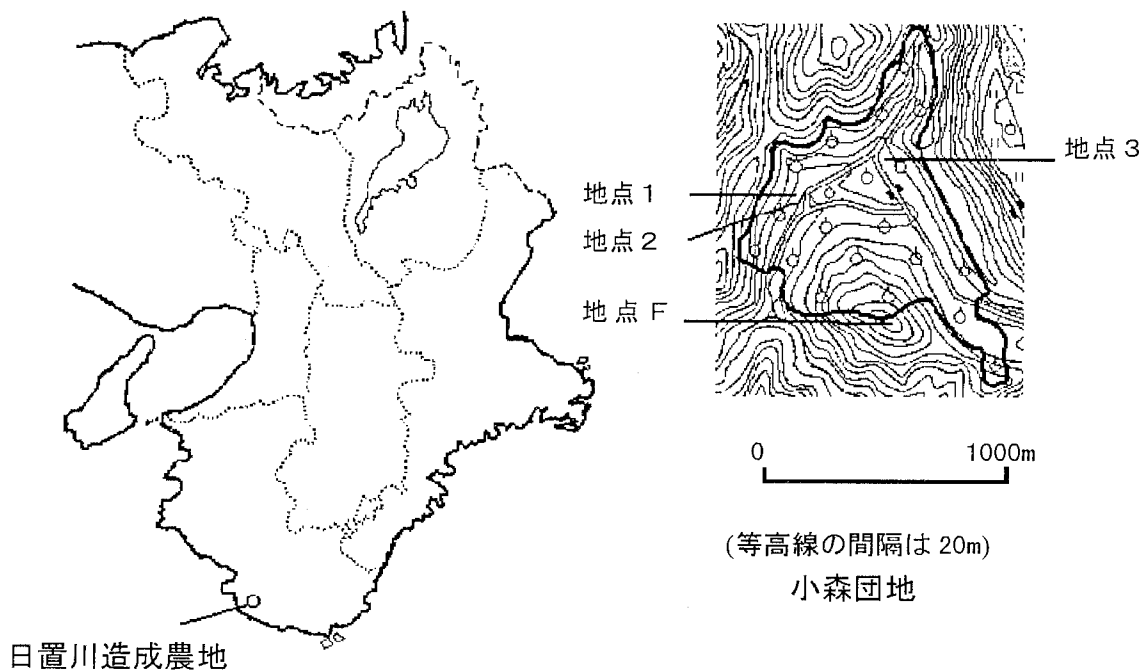


図-1 日置川造成農地の位置と小森団地内での土壌採取地点

Fig. 1 Location of Hikigawa reclaimed agricultural land and sampling sites in Komori.

および1993年に同じ三圃場(地点1, 2, 3)より採取した。対照として造成地に隣接するコナラを主とする自然植生下の土壌(地点F (Forest))からも両年に採取した。日置川造成農地の位置と小森団地内での土壌採取地点について図-1に示した。なお造成地上土壌と自然植生土壌の採取地点の標高は異なるため、同一の土壌生成環境にあるとは断言できないが、両者の母材はどちらも古第三系頁岩である。

土壌採取地点の概要を表-1に示した。小森団地は改良山成工法で造成され、地点1および地点2は盛土、地点3は切土が行われた区域である。営農不適地盤に対しては60 cm以上の表土扱いが行われたが本研究の対象となった三圃場で表土扱いが行われたかどうかは不明である。

1987年には、地点1では梅が植栽されており、小森団地で最も生育の悪い圃場の一つであった。地点2は所有者の事情により畑としては利用されておらず、雑草が繁茂していた。地点3では柑橘類が順調に生育していた。各地点とも明確な土壌層位の発達はみられなかったため、0-50 cmの土壌を混合して採取した。また非常に固い土壌で100 cm<sup>3</sup>のコアを打ちこめず、土塊を採取した。地点3は1987年には固相率以外の分析は行っていない。

1993年には地点1および地点3では梅が植栽されておりその生育は良好であった。地点3では表層における有機物の集積が少なかったため、土壌層位をBA, Bw (weathering)に分けた。地点2は1987年以来主として放棄地で、キジの養殖場として使用された経緯もあった

が、1993年には雑草が繁茂していた。土壌試料は各地点とも表層および下層から採取した。また100 cm<sup>3</sup> コアサンプルを下層(B層またはBw層)から3連で採取した。

地点Fの土壌試料および各3連の100 cm<sup>3</sup> コアサンプルは、1987年にはA層およびBw層から、1993年にはA層およびBC層から採取した。

各供試土壌の一般理化学性を表-2に示した。

#### 4. 実験方法

2 mm以下の風乾細土について土壌標準分析測定法(1986)に従ってpH(ガラス電極法)、電気伝導度、交換性塩基、陽イオン交換容量、全炭素および全窒素量(乾式燃焼法)、土性、飽和透水係数(定水位法)、固相率(実容積法)の各分析を行った。1987年の造成地土壌の固相率はクロッド法(Blake and Hartge, 1986)で測定した。

交換性アルミニウムはアルミノン法(Hsu, 1963)にて定量した。結晶質および非晶質の遊離酸化物はpH 7.3, デチオナイト・クエン酸・炭酸水素ナトリウム(DCB)液(Mehra and Jackson, 1960)およびpH 3.0, シュウ酸アンモニウム(Tamm)液(McKeague and Day, 1966)により抽出し、プラズマ発光分光分析装置(SPS 1550, Seiko)で定量した。粘土鉱物種はX線回折分析法(RINT-1200, Rigaku)により同定した。塩滴定法(Sakurai *et al.*, 1988)により荷電ゼロ点(ZPC)および永久負荷電量( $\sigma_p$ )を求めた。

分散性粘土は、風乾細土5 gを500 ml容の振盪ビンに入れ300 mlの脱塩水を加え15分間往復振盪し、その後500 mlに定容し、ピペット法により粒径0.002 mm以下

表-1 土壌採取地点の概要  
Table 1 Outline of the sampling sites

地点	造成方法	年	層位	深さ(cm)	土地利用	作物生育	有機質資材の10a当たり投入量
1	盛土	1987	—	0-50	梅	最も悪い	
		1993	A	0-25	梅	良好	牛フン 2,500 kg, 鶏フン 500 kg
			B	25-35			
2	盛土	1987	—	0-50	放棄地	—	
		1993	A	0-6	放棄地	—	なし
			B	6-30			
3	切土	1987	—	0-50	柑橘	普通	
		1993	BA	0-16	梅	良好	ナタネ粕 200 kg, カニガラ 90 kg
			Bw	16-32			
F	—	1987	A	0-24	自然植生	—	—
			Bw	50-75			
		1993	A	0-13	自然植生	—	—
			BC	32-46+			

表-2 供試土壌の一般理化学性  
Table 2 General properties of soil samples

地点	年	層位	EC (dS m <sup>-1</sup> )	-----交換性塩基-----			陽イオン 交換容量 K	交換性 Al	土性	粘土含量 (10gkg <sup>-1</sup> )	
				Ca	Mg	Na cmol (+)					
1	1987	---	0.06	1.60	2.12	0.07	0.40	11.4	0.32	CL	24.4
	1993	A	0.33	8.81	5.05	0.17	1.21	24.5	0.08	CL	20.1
		B	0.04	1.88	1.81	0.14	0.32	12.2	0.65	CL	23.7
2	1987	---	0.03	1.50	2.21	0.11	0.22	10.2	0.29	CL	23.2
	1993	A	0.20	9.88	4.63	0.34	1.26	22.6	0.05	CL	20.6
		B	0.05	3.25	2.49	0.21	0.34	11.7	0.28	SCL	16.8
3	1993	BA	0.19	2.71	0.62	0.16	0.91	14.2	1.22	CL	19.6
		Bw	0.11	3.24	1.14	0.45	0.79	11.7	0.90	CL	17.4
F	1987	A	0.03	0.51	0.35	0.05	0.34	12.5	1.98	CL	24.7
		Bw	0.03	0.05	0.13	0.07	0.15	11.9	1.91	LiC	26.2
	1993	A	0.09	0.63	0.59	0.22	0.39	17.4	4.12	CL	24.7
		BC	0.05	0.00	0.06	0.16	0.07	9.8	2.29	LiC	26.1

の粘土を定量した。完全分散時の粘土量を100%として、分散性粘土の割合を分散率として表した。風乾細土を1.0 mol L<sup>-1</sup>塩化ナトリウム溶液で飽和し、過剰の塩を透析によって除去した後、同様に分散率を求めた。

耐水性団粒は粒径2-4mmの団粒を圃場の水分状態で孔径2mmの篩上に供試し、振幅5cm, 1分間30往復, 5分間の湿式篩別により4連で分析した。篩上に残った団粒重量の、供試団粒全重量に対する割合を団粒化度とした。一次粒子の重量は差し引いた。

## 5. 結果および考察

### 1) 土壌特性値の経年変化

#### ① 化学性の経年変化

1987年には作物の生育不良が起こっていたが、表-2の各分析値を樹園地の土壌改良目標値(大羽, 1984)と比較しても化学性は生育不良の要因となるほど悪くはない。

1987年と1993年を比較すると、造成地表層土で交換性カルシウム、マグネシウム、カリウム含量が増加していた。これは施肥の影響であると考えられる。畑地としては使用されていない地点2における交換性塩基の増加は、キジ養殖場の影響や雑草からの還元が関与していると思われる。土性や表-3に示した鉄およびアルミニウム遊離酸化物含量には大きな変化はなかったが、交換性アルミニウム含量は造成地表層土で減少した。

1987年から1993年にかけての特筆すべき変化は、造成地表層土において全炭素量が0.3%から3%へと、約

10倍に増加したことである(表-3)。陽イオン交換容量も表層土で約2倍となったが、これは土性や粘土鉱物性に大きな変化がなかったことから、専ら有機物含量の増加を反映していると考えられる。

#### ② 物理性の経年変化

日置川造成農地では造成当初、固相率が約60%であり、その上透水係数が10<sup>-4</sup>~10<sup>-6</sup>cm s<sup>-1</sup>程度(日置川開拓建設事業所・磯日さく, 1978)と、土壌の物理性が劣悪で湿害を惹起していた。その後の暗渠排水などの対策にも関わらず、1987年においても固相率は三地点とも70%近くあった(表-4)。しかし1993年には、三地点とも下層土においても固相率は約50%まで減少し、透水性も約10<sup>-2</sup>cm s<sup>-1</sup>に増加した。

団粒の耐水性を表す団粒化度の経年変化を表-4に示した。造成農地土壌について1987年と1993年とを比較すると、表層土では団粒化度が約1.5倍に増加し、耐水性団粒が発達したことがうかがえる。

分散率の経年変化を表-4に示した。1987年から1993年にかけて分散率は造成地表層土では大きく減少したが、下層土ではほとんど変化していなかった。1987年と1993年の地点Fでは分散率に大きな差があった。これは両年に採取した深さが異なったこと、また1987年のBw層ではアルミニウム水酸化物含量が多く分散が抑制されていた(Itami and Kyuma, 1995)ことによると考えられる。

このように日置川造成農地では1987年から1993年にかけて、表層土で団粒の耐水性の増大と分散率の大幅な

表-3 供試土壌の遊離酸化物および有機物含量  
Table 3 Content of sesquioxides and organic matter of the soil samples

地点	年	層位	遊離酸化物 <sup>(a)</sup>				全炭素	全窒素
			Al-d	Fe-d	Al-o	Fe-o		
			-----10g kg <sup>-1</sup> -----					
1	1987	—	nd <sup>(b)</sup>	nd	0.10	0.20	0.34	0.06
	1993	A	0.18	1.01	0.10	0.15	3.23	0.40
		B	0.19	1.22	0.10	0.19	0.37	0.09
2	1987	—	0.11	1.46	0.10	0.17	0.28	0.05
	1993	A	0.16	1.02	0.06	0.14	3.51	0.40
		B	0.18	1.14	0.10	0.18	0.50	0.10
3	1993	BA	0.22	1.41	0.10	0.14	0.74	0.16
		Bw	0.20	1.41	0.08	0.13	0.46	0.12
F	1987	A	nd	nd	0.33	0.25	3.03	0.16
		Bw	0.42	1.48	0.27	0.19	0.32	0.02
	1993	A	0.30	0.82	0.24	0.25	2.73	0.22
		BC	0.23	0.94	0.13	0.10	1.38	0.06

<sup>(a)</sup> Al-d : DCB 抽出アルミニウム, Fe-d : DCB 抽出鉄, Al-o : Tamm 抽出アルミニウム, Fe-o : Tamm 抽出鉄

<sup>(b)</sup> not determined

表-4 物理的特性値の経年変化  
Table 4 Changes in physical properties

地点	年	層位	固相率	団粒化度 (%)	分散率	Na 飽和後の
						分散率
1	1987	—	69.6	29	25.4	75.2
	1993	A	49.1	41	5.3	7.9
		B	49.8	24	24.6	61.4
2	1987	—	70.5	26	24.4	81.8
	1993	A	46.8	40	5.8	20.1
		B	50.5	37	19.4	39.0
3	1987	—	68.0	—	—	—
	1993	BA	50.3	—	10.0	22.2
		Bw	50.5	—	19.1	42.5
F	1987	A	35.5	53	6.7	12.7
		Bw	46.1	29	0.4	13.6
	1993	A	30.7	72	1.7	4.1
		BC	54.7	28	14.2	43.1

低下が起こった。その結果、透水性の増大や固相率の低下などの他の物理的性質の改善につながったと考えられた。造成地表層土の示した物理性は、自然植生土壌と比較するとその下層土程度のものではあるが、湿害を惹起していたような劣悪な物理性は改善されたといえるであろう。

なお造成地下層土での物理性変化の程度は小さかった。

た。

## 2) 粘土の分散性

### ① 分散性に対する有機物の影響

土壌をナトリウムで飽和すると、分散抑制因子すなわち粒子間の結合剤が置換性のものならば分散性は増大する (Murray and Quirk, 1990)。本研究の供試土壌のナトリウム飽和後の分散率は、全て無処理試料の分散率よ

り高かった(表-4)。従って程度の差はあれ、交換性カチオン類に代表されるような易交換性物質が粒子間の結合剤の一部として働いていることが示唆された。

1987年の造成地上壌では、各地点ともナトリウム飽和後の分散率は約80%と非常に高かった。しかし、1993年にはナトリウム飽和後の分散率は、造成地下層土では依然40~60%と高かったのに対して、表層土では約20%以下となった。このことは、1993年の造成地表層土における主たる分散抑制因子が、ナトリウムでは置換さ

れない物質であることを示している。このような難置換性の物質には、鉄やアルミニウム遊離酸化物や有機物などがある。造成地表層土で有機物含量が顕著に増加したこと、遊離酸化物含量は1987年と1993年との間で差はなく、また造成地表層土と下層土でも有意な差はなかったことから、1993年の造成地表層土では主として有機物によって分散が抑制されていると考えられた。

そこで有機物含量と粘土の分散性との関係を見ると、全炭素量が多いほど分散性は低いという傾向が明らかとなった(図-2)。1987年の地点F-B<sup>w</sup>は全炭素量が少ないにも関わらず分散率が0.4%と低かったが、前述のとおりこの土壌はアルミニウム水酸化物によって分散が抑制されているためである(Itami and Kyuma, 1995)。

有機物は、主として負荷電を持つために荷電特性の観点からは分散を促進する可能性もある(Visser and Caillier, 1988)が、団粒内への急速な水の浸潤によっておこるスレーキングを回避し(Tisdall and Oades, 1982)、また腐植粘土複合体として粘土を架橋する(Edwards and Bremner, 1967)ことによって分散を抑制する働きもある。1993年の造成地表層土では、有機物は団粒のスレーキングや粘土粒子の分散を抑制する因子として作用していたと考えられる。

② 有機物の少ない下層土の分散性

土壌中の粘土粒子の物理的挙動は、その粒子の持つ荷電特性と外液の性質に大きく影響される(Bolt and Bruggenwert, 1980)。粘土粒子は、ケイ酸塩構造内部の

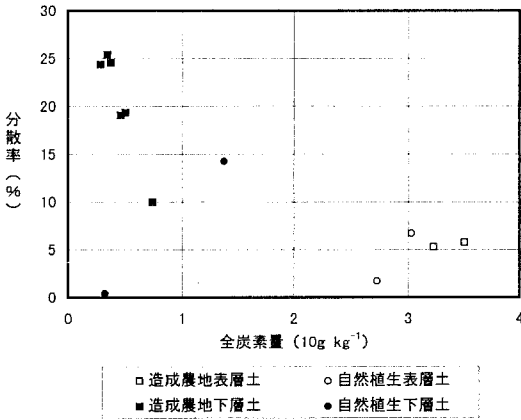


図-2 有機物含量と粘土の分散性の関係

Fig. 2 Relationship between organic matter content and dispersibility of clay.

表-5 粘土粒子の荷電特性  
Table 5 Charge characteristics of clay particles

地点	年	層位	pH (H <sub>2</sub> O)	荷電ゼロ点 (ZPC)	ΔpH <sup>(a)</sup>	永久負荷電量 (σ <sub>p</sub> ) cmol(-)kg <sup>-1</sup>	粘土鉱物種 <sup>(b)</sup>
1	1987	—	5.29	3.93	1.36	2.6	It>Al-Vt, Vt
	1993	A	5.61	4.25	1.36	1.0	It>Al-Vt
		B	54.6	3.60	1.86	3.5	It>Al-Vt
2	1987	—	5.58	3.97	1.61	2.3	It>Al-Vt, Vt
	1993	A	5.82	4.10	1.72	10.0	It>Al-Vt
		B	5.62	3.62	2.00	4.8	It>Al-Vt
3	1993	BA	4.46	3.45	1.01	4.0	It>Al-Vt
		Bw	4.75	3.55	1.20	3.5	It>Al-Vt
F	1987	A	4.94	nd <sup>(c)</sup>	nd	nd	Al-Vt
		Bw	4.90	4.21	0.69	0.5	Al-Vt
	1993	A	4.82	3.50	1.32	4.0	Al-Vt
		BC	4.57	4.20	0.37	0.4	Al-Vt

<sup>(a)</sup> pH (H<sub>2</sub>O) - ZPC <sup>(c)</sup> not determined

<sup>(b)</sup> Al-Vt: 2:1-2:1:1 中間種鉱物 (アルミニウム-パーミキュライト), It: イライト, Vt: パーミキュライト

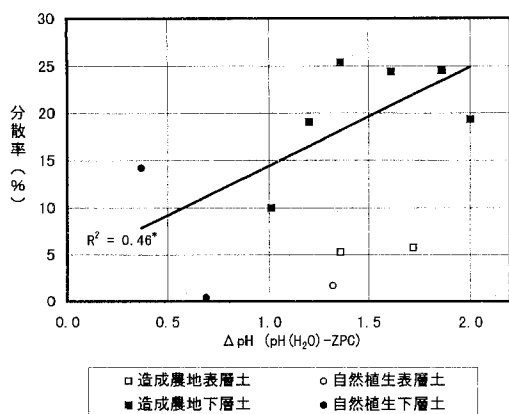


図-3 粘土の荷電特性と分散性の関係

Fig. 3 Relationship between charge characteristics and dispersibility of clay.

同形置換によって生じる永久負荷電と、外液の pH と塩濃度に依存して発現する変異荷電を持つ。荷電ゼロ点 (ZPC) よりも高い pH では変異荷電は負に発現するため、 $\Delta\text{pH}$  ( $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})-\text{ZPC}$ ) の値が大きいほど発現している変異負荷電も大きいと予想される。粘土の負荷電は粘土粒子間の静電的反発力の起源であり、発現している永久および変異負荷電が大きいほど反発力が増して分散が促進される。

表-5 に粘土の荷電特性を示した。1987 年と 1993 年で主要な粘土鉱物種に大きな変化はなかった。永久負荷電量は、2:1-2:1:1 中間種鉱物 (アルミニウム-バーミキュライト) 主体の地点 F の下層土では  $0.4\text{--}0.5 \text{ cmol} (-) \text{ kg}^{-1}$  であったのに対し、イライト主体の造成地下層土では  $2.3\text{--}4.8 \text{ cmol} (-) \text{ kg}^{-1}$  であった。各地点の表層土の永久負荷電量は下層土に比べて高かったが、これは有機物由来の負荷電によるものと考えられる。

図-3 に水 pH と荷電ゼロ点との差 ( $\Delta\text{pH}$ ) と分散率の関係を示した。有機物含量の高い表層土は  $\Delta\text{pH}$  の値に関わらず分散率は低かったのに対し、有機物の少ない下層土では  $\Delta\text{pH}$  が大きいほど分散性が高いという傾向があった。図中の直線は下層土のみについて回帰したものである。造成地下層土の分散性が自然植生下層土のそれに比べて高かったのは、イライト主体であるために永久負荷電量が大きく、さらに  $\Delta\text{pH}$  が大きいため、発現している変異負荷電も大きかったことによると思われる。

このように有機物の少ない下層土では、粘土の分散性は主に荷電特性によって決定されることが示唆された。

## 6. まとめ

1987 年の日置川造成農地における作物の生育不良は粘土の高分散性に起因する劣悪な物理性が原因であった。しかしながら 1989 年以来大量の有機物を施用するなどの営農対策により、1993 年には作物生育も良好となった。1987 年から 1993 年の間に、表層土の有機物含量は約 10 倍に増加し分散率は 25% から 10% 以下へと大きく低下した。同時に表層土では耐水性団粒、透水係数および固相率といった物理的特性値も向上した。対照的に下層土では土壌特性値に大きな変化はみられなかった。

表層土ではナトリウム飽和後にも粘土の分散率はそれほど増加しなかったことから、主たる分散抑制剤は交換性塩基などの易交換性物質ではなく、難交換性の有機物であると考えられた。有機物が少ない場合は粘土の分散性は主に荷電特性によって決定されることが示唆された。

## 7. 謝 辞

本研究の実施に際しては、西牟婁地域農業改良普及センターの川村実氏にサンプリングおよび農家への聞き取り調査の際に大変お世話になった。また日置川土地改良区の山崎慶子氏には参考文献を送付していただいた。記して深謝申し上げます。

## 参考文献

- Blake, G.R. and Hartge, K. H.(1986): Bulk density, Methods of soil analysis, pt.1, 2nd edn, Eds. A. Klute *et al.*, Agronomy, 9, 371~373
- Bolt and Bruggenwert 編 (1980): 土壌の化学, 第 3 章, p.54, 学会出版センター, 東京
- 土壌標準分析測定委員会編 (1986): 土壌標準分析測定法, 博友社, 東京
- Edwards, A. P. and Bremner, J. M. (1967) : Microaggregates in soils, J. Soil Sci., 18 : 64~73
- 日置川開拓建設事業所・(株)日さく (1978): 近畿農政局日置川開拓建設事業所小森団地土壌改良等補完対策調査報告書
- 尾川三郎 (1985): 果樹全書ウメ・イチジク・ビワ, p 127, 農山漁村文化協会, 東京
- Hsu, P.H. (1963): Effect of initial pH, phosphate and silicate on the determination of aluminum with aluminon, Soil Sci., 96 : 230~238
- Itami, K. and Kyuma, K.(1995): Dispersion behavior of soils from reclaimed lands with poor soil phys-

- ical properties and their characteristics with special reference to clay mineralogy, *Soil Sci. Plant Nutr.*, **41** : 45~54
- 久馬一剛 (1990) : 農地開発における土壌問題—土壌悪化機構の解明と対策—, 昭和62~平成元年度科学研究費補助金 (一般研究A) 研究成果報告書
- McKeague, J.A. and Day, J.H.(1966) : Dithionite and oxalate-extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes, *Can. J. Soil Sci.*, **46** : 13~22
- Mehra, O.P. and Jackson, M.L.(1960) : Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate, *Proc. 7th Natl. Conf. on Clays and Clay Minerals* : 317~327
- Murray, R.S. and Quirk, J.P.(1990) : Interparticle forces in relation to the stability of soil aggregates, *Soil Colloids and Their Associations in Aggregates*, p.443, Plenum Press, New York
- 農林統計協会 (1995) : 図説農業白書 (平成6年度版), p. 13, 農林統計協会, 東京
- 大羽裕 (1984) : 新土壌学, p.203, 朝倉書店, 東京
- Sakurai, K., Ohdate, Y. and Kyuma, K.(1988) : Comparison of salt titration and potentiometric titration methods for the determination of zero point of charge (ZPC), *Soil Sci. Plant Nutr.*, **34** : 171-182
- Tisdall, J.M. and Oades, J.M.(1982) : Organic matter and water-stable aggregates in soils, *J. Soil Sci.*, **33** : 141~163
- Visser, S.A. and Caillier, M.(1988) : Observations on the dispersion and aggregation of clays by humic substances, I. Dispersive effects of humic acids, *Geoderma*, **42** : 331~337

受稿年月日 : 1996年6月27日

受理年月日 : 1996年9月25日