

強熱減量と粘土含有量を用いた沖積水田土壌 の炭素含有量の推定

足立一日出*・小原 洋*・吉田修一郎*・高橋智紀**・谷本 岳*

Estimation of Carbon Content by Explanatory Variables of Ignition Loss
 and Clay Content for Lowland Multi-Purpose Paddy Soil

Kazuhide ADACHI*, Hiroshi OBARA*, Shuichirou YOSHIDA*, Tomoki TAKAHASHI**
 and Takeshi TANIMOTO*

* National Agricultural Research Center, NARO 1-2-1, Joetu, Niigata 943-0193, Japan

** Shizuoka Agricultural Experimental Station 4433, Goudo, Omaezaki, Shizuoka 437-1613, Japan

1. はじめに

作物生育の場である土壌環境において、有機物は様々な役割を演じている。有機物は、陽イオンの保持量を増加させるほか、小動物や微生物によって消費、分解され、作物の養分となる。また、土壌の構造形成の骨格や接着剤として重要な役割を演じている。その質や量の違いによって、土壌の物理性に大きな影響を及ぼすことも知られている。そのため、土地利用型農業の安定生産を持続的に展開していく上で、有機物含有量などの土壌の肥沃性は重要な要因となる。

しかしながら、化学肥料の増加と有機質肥料の減少などから土壌の有機物の消耗が危惧されている（吉田, 1971）。加えて、現在進められている水田の汎用化とともに、転換畑土壌では経年的に土壌有機物が消耗していくとされており（諸遊, 1983）、田畑輪換に伴って土壌肥沃度の低下が大きな課題としてあげられている。そのため、田畑輪換においては、地力維持を考慮した畑期間、水田期間の検討や有機質資材の投入管理を検討する必要がある（住田, 2005）。

一方、土壌有機物の評価・測定法には、乾式燃焼法、強熱減量法、酸化滴定（重クロム酸）法などが提示されている。乾式燃焼法は、土壌を燃焼し、放出される炭酸ガスを測定し、炭素含有量を求めるものであるが、測定機器が高価であるという欠点がある。また、強熱減量法は、測定機器が安価で、取り扱いが容易ではあるが、測定される強熱減量には有機物含有量に加えて、土壌の結

晶水等の含有量も含まれるという欠点がある。そのため、強熱減量法は、有機物含有量が多く、結晶水等の影響の少ない高有機質土における有機物含有量の指標として利用されているが、農耕地として広く分布する沖積土壌には用いられていない。なお、重クロム酸法は、有害な重クロム酸カリウムを用いているため取り扱いに注意が必要などで最近では使われていない。

ここでは、新潟県頸城平野（沖積平野）の汎用水田の土壌を対象に、重回帰モデルを用いて強熱減量と炭素含有量や粘土含有量との関係を明らかにするとともに、強熱減量と粘土含有量を用いた重回帰式による炭素含有量の推定法について提案する。加えて、推定法を用いて汎用水田の炭素含有量を推定し、作付け履歴と推定炭素含有量との関係について考察する。

2. 試験方法

2.1 供試土壌

分析に供した土壌は、新潟県上越市頸城区（旧頸城村）の12ほ場の作土全体、および、新潟県上越市にある北陸研究センター内の6ほ場の作土の上部（深さ0-5cm）と下部（深さ5-10cm）から採取した。用いた土壌を土壌群（農耕地土壌分類委員会, 1995）で分類すると、頸城区の12試料および北陸研究センター内のほ場はグライ低地土に分類される。採取した試料は室内で十分に空気乾燥を行った後、乳鉢で良くほぐし0.42mmふるいでふるい分けを行い、0.42mm通過試料（以下、風乾細土と呼ぶ）を試験に用いた（農業土木学会, 1983）。

* 中央農業総合研究センター 〒943-0193 新潟県上越市稲田1-2-1

** 静岡県農業試験場海岸砂地分場 〒437-1613 静岡県御前崎市合戸4433

キーワード：強熱減量, 土壌有機物, 炭素含有量, 粘土含有量, 結晶水

推定法の適用にあたっては、北陸研究センター内の6ほ場の中の3ほ場の作土と、頸城区では、上記12ほ場を含んだ38ほ場（グライ低地土30ほ場、灰色低地土8ほ場）の作土を用いた。

2.2 分析方法

2.2.1 強熱減量

風乾細土を105°Cで24時間炉乾燥した試料（約2g）を用いた。電気マッフルを用いて800°Cで質量がほぼ一定になるまで強熱した（農業土木学会, 1983）。なお、強熱減量（ L_i ）は次式で算出した。

$$L_i = (m_a - m_b) / (m_a - m_c) \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

ここで、 m_a : 試料とるつぼの質量 (g), m_b : 加熱後の試料とるつぼの質量 (g), m_c : りつぼの質量 (g) である。すなわち、強熱減量は、炉乾試料の質量に対する減少量の割合である。

2.2.2 粘土含有量

粘土含有量の分析には、風乾細土を用い、国際土壌学会法に準じて行った。すなわち、0.002 mm以下の粒径を粘土とし、土壌中の有機物の分解には過酸化水素水を用い、また、土壌の分散剤としてヘキサメタリン酸ソーダを用い、ピペット法によって求めた。なお、粘土含有量は炉乾試料の質量に対する粘土含有割合である。

2.2.3 炭素含有量

炭素含有量の測定には炭素硫黄分析装置（堀場EMIA-510）を用いた。本装置は、試料を酸素気流中で燃焼させて、非分散赤外線検出器によって炭素及び硫黄を測定するものである。風乾細土を用いて炭素含有量を測

定し、風乾細土の含水比を測定して、炉乾試料の質量に対する炭素含有量に換算した。一般に、有機物含有量を直接測定することはできない。そのため、炭素含有量（%）を測定し、その値に1.724を乗じて有機物含有量（%）が求められる。しかし、有機物も様々な形態からなり、1.724を乗じず、炭素含有量（%）をそのままの値で用いて、有機物を評価する場合も多い。ここでも、特にことわらない限り、有機物含有量の代用として炭素含有量の値を直接用いることとする。

3. 結果と考察

各土壌の測定結果を、調査時以前の土地利用の履歴とともに表-1, 2に示した。粘土含有量の値は1試料の結果であるが、その他は2~3試料の結果の平均値である。頸城区の土壌は、粘土含有量22.3~56.0%, 炭素含有量1.06~4.60%, 強熱減量5.51~14.60%の範囲の、北陸研究センター内の土壌は、粘土含有量34.2~49.0%, 炭素含有量2.03~3.17%, 強熱減量7.64~10.45%の範囲の土壌であった。

3.1 重回帰モデル

強熱減量是有機物の酸化燃焼に伴う炭酸ガスの放出、結晶水などの逸散および炭酸塩類、硫酸塩類、アンモニウム化合物、塩素イオンが混在している時のガスの揮散として発生し、一般には地盤工学で扱う土では、高有機質土では有機物の目安を、無機質土では粘土の結晶水などの目安を得るために行われる（地盤工学会, 2000）。一方、農耕地の土壌を扱う分野においては、無機質土を対象に熱重量分析として、連続した温度変化の中で各温度

表-1 分析に用いた試料の実験結果（上越市頸城区土壌）

ほ場番号	地区名	土壌群	作付履歴	粘土含有量	強熱減量	炭素含有量
			旧→新	%	%	%
1	北部	グライ低地土	UUPPP	41.9	10.17	2.52
2	北部	グライ低地土	PPPUU	44.6	9.14	2.07
3	明治	グライ低地土	UPPPP	39.0	11.18	2.83
4	中部	グライ低地土	UUUPP	50.9	14.60	4.60
5	中部	グライ低地土	PPPPP	48.9	12.88	3.61
6	北部	グライ低地土	UUUUU	24.6	5.51	1.06
7	北部	グライ低地土	PPPPP	30.2	8.47	2.23
8	中部	グライ低地土	PUUUP	55.4	11.23	2.58
9	北部	グライ低地土	PPPPP	22.3	8.17	2.28
10	西部	グライ低地土	PPUPP	34.4	8.77	2.37
11	大江	グライ低地土	PPPPP	34.1	7.65	1.72
12	南川	グライ低地土	PPPPP	56.0	11.56	2.95

注) U: 畑作物, P: 水稲

表-2 分析に用いた試料の実験結果（北陸研究センター内土壌）

は場番号	採土位置	作付履歴 旧→新	粘土含有量	強熱減量	炭素含有量
			%	%	%
1	作土上部	PPUUU	44.6	9.18	2.45
1	作土下部	PPUUU	43.3	9.06	2.38
2	作土上部	PPUUU	48.8	9.48	2.51
2	作土下部	PPUUU	48.0	9.58	2.50
3	作土上部	PPUUU	47.7	9.66	2.51
3	作土下部	PPUUU	49.0	9.53	2.46
4	作土上部	UUUUU	37.0	9.47	2.71
4	作土下部	UUUUU	39.3	9.35	2.53
5	作土上部	PPPPP	36.7	10.45	3.17
5	作土下部	PPPPP	36.3	10.40	3.08
6	作土上部	UUUUU	34.2	7.78	2.17
6	作土下部	UUUUU	37.6	7.64	2.03

注) U: 畑作物, P: 水稲

で減少した質量と、有機炭素含有量、窒素含有量、粘土含有量などとの相関分析が行われている (Siewert, 2004) が、強熱減量を無機質土を対象にした有機物含有量の評価に用いられている事例は少ない。

ここでは、強熱減量が主として粘土の結晶水と有機物含有量からなるとし、強熱減量 (y) は粘土含有量 (x_1) および炭素含有量 (x_2) を用いて、次の重回帰モデルが成り立っていると仮定する。

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + e \quad (2)$$

ここで、 $a_1 x_1$ は粘土含有量に関連した結晶水を表し、 $a_2 x_2$ は炭素含有量と関連した有機物含有量を示している。なお、 a_0 はその他の要因によって減少した値であり、 e は予測誤差である。

頸城区の土壌と北陸研究センター内の土壌が、それぞれ (2) 式で表されると仮定し、予測誤差が最小になるように重回帰分析を行った。結果を表-3 に示した。重相関係数はともに 0.99 以上と高く、回帰式および回帰係数は 1% 水準で有意であった。

重回帰分析によって得られた頸城区および研究センター内土壌のそれぞれの回帰式を (3)、(4) 式に示した。

$$y = 1.755 + 0.070x_1 + 2.089x_2 \quad (3)$$

$$y = 0.101 + 0.062x_1 + 2.595x_2 \quad (4)$$

ここに、 y : 強熱減量 (%), x_1 : 粘土含有量 (%), x_2 : 炭素含有量 (%) である。

それぞれの回帰式から得られた強熱減量の推定値と実

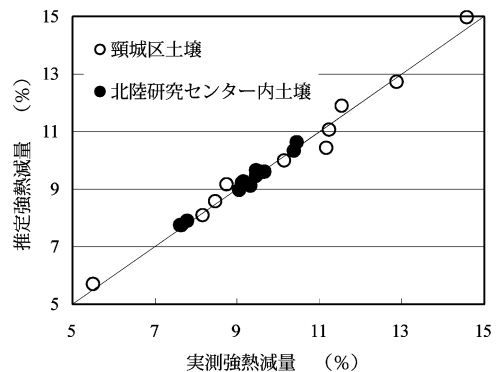


図-1 強熱減量の実測値と推定値

測値との関係を図-1 に示した。図から、共に良く適合しているのが読み取れる。

3.2 強熱減量への粘土含有量、炭素含有量の影響評価

(3)、(4) の回帰式は、回帰定数は異なるものの、回帰係数は比較的似通った値を示している。

粘土含有量 (x_1) の回帰係数 a_1 は、結晶水の強熱減量に係わる係数と考えることができる。強熱減量によって失われる結晶水の温度と量は粘土鉱物によって異なる。富田ら (1992) は、モンモリロナイトとカオリナイトを用いた実験より、カオリナイトは 530°C、モンモリロナイトは 800°C で脱水し、実験で得られた脱水量は、モンモリロナイトで 4.57%、カオリナイトで 13.12% として

いる。また、脱水量は粘土含有量と線形関係が認められている。(3), (4)式の回帰係数0.070, 0.062は粘土含有量の7.0, 6.2%が脱水したと考えることができる。本地区の土壌の主たる粘土鉱物はスメクタイト(中野, 1980)と考えられ、その他の粘土鉱物も含まれており、脱水量は富田らが実験で得たモンモリロナイトよりも若干大きな値を示している。

一方、炭素含有量の回帰係数は、有機物含有量への換算係数と考えることができる。一般には、有機物に58%の炭素が含まれているとし、係数は1.724が用いられている。しかし、Broadbent(1953)は、1.724は小さすぎ、表層土で1.9、下層土で2.5が適当であるとしている。なお、換算係数が大きいほど土壌有機物中に占める炭素割合が小さいことを表している。土壌有機物の質と量は、土壌に供給される有機物の質と量、土壌中での変化によって異なる。三土(1974)は畑土壌と水田土壌の有機物を比較し、低地水田土壌では、多湿還元条件に起因し、水稻栽培によって有機物含量は増加し、腐植化度の低い腐植酸を蓄積増加させるとしている。しかし、有機物中の炭素含有量の変化については不明である。また、本調査で用いた各汎用水田の有機物組成なども分からないため、係数の厳密な評価は難しいが、2.089, 2.595は一般的に用いられている1.724より大きな値となっている。

強熱減量に及ぼす粘土含有量と炭素含有量の影響を評価するため、それぞれ平均0、分散1の標準化したデータを用いて重回帰分析を行った。得られた標準化回帰係数を表-3に示した。標準化回帰係数の結果から、本実験で用いた土壌の場合、強熱減量は粘土含有量1に対して、炭素含有量約2.4の割合で影響していると考えられた。

3.3 炭素含有量の推定式とその適用

3.3.1 炭素含有量の推定式

強熱減量が粘土含有量と炭素含有量に大きく左右されることを重回帰モデルを用いて示した。換言すれば、炭素含有量は、強熱減量と粘土含有量から推定することが可能と考えられる。(3), (4)式は強熱減量の残差2乗和は最小であるが、炭素含有量の残差2乗和は最小ではないため、ここでは炭素含有量を目的変数、強熱減量と粘土含有量を説明変数とした重回帰分析を行い、推定式を求めた。分析結果は、頸城区の土壌、北陸研究センター内土壌のそれぞれで、重相関係数0.986, 0.990で回帰式および回帰係数は1%水準において有意であった。求められた推定式は以下の通りである。

$$y = -0.776 + 0.456x_1 - 0.030x_2 \quad (5)$$

$$y = 0.022 + 0.378x_1 - 0.024x_2 \quad (6)$$

ここで、 y : 炭素含有量(%), x_1 : 強熱減量(%), x_2 : 粘土含有量(%)である。なお、(5)式は頸城区の土壌、(6)式は北陸研究センター内土壌の結果である。

3.3.2 推定式の適用

3.3.2.1 作付け履歴と炭素含有量(頸城区)

頸城区では、重回帰分析に用いた12ほ場に加えて、26ほ場において、調査前5年間の夏作の作付け履歴と粘土含有量および強熱減量を調査し、(5)式を用いて炭素含有量を推定し、炭素含有量を粘土含有量や土地利用の側面から検討した。なお、26ほ場の粘土含有量および強熱減量は、それぞれ14.2~48.9%および6.12~12.05であった。1事例のみ粘土含有量が極端に少ない試料が認められたが、その他は推定式を決定するために用いた試料の範囲内であった。

表-3 強熱減量の評価のための重回帰分析の結果

頸城区					センター内				
重相関係数		0.992			重相関係数		0.990		
分散分析	自由度	変動	分散	F値	分散分析	自由度	変動	分散	F値
回帰	2	67.292	33.646	270.830**	回帰	2	7.848	3.924	230.726**
残差	9	1.118	0.124		残差	9	0.153	0.017	
合計	11	68.410			合計	11	8.001		
	係数	t値	標準化係数			係数	t値	標準化係数	
	a_0	1.755	4.420**	0		a_0	0.101	0.212	0
	a_1	0.070	5.753**	0.321		a_1	0.062	8.697**	0.408
	a_2	2.089	13.528**	0.754		a_2	2.595	20.929**	0.983

** : 1%水準で有意

** : 1%水準で有意

表-4 作付け履歴指数

土地利用	履歴指数	該当数
ppppp	5	16
upppp	4	2
*uppp	3	3
**upp	2	5
***up	1	1
***pu	-1	4
**puu	-2	3
*puuu	-3	1
puuuu	-4	2
uuuuu	-5	1

p：水稲

u：畑作物

*：水稲 or 畑作物

5年間の作付け履歴のうち調査直前の連続した土地利用に着目し、表-4に示すような作付け履歴指数を定義し、各ほ場を分類した。すなわち、調査直前に水稲が連続して栽培された年数を正の値で示し、一方、畑作物が連続して栽培された年数を負の値で示して作付け履歴指数とした。多くは連続して水稲栽培が行われたほ場であるが、5年連続して畑利用されたほ場も1ヶ所存在した。粘土含有量と推定炭素含有量、作付け履歴指数と推定炭素含有量の関係を図-2、3に示した。推定炭素含有量は、粘土含有量が多くなるほど多い傾向が認められる。米林ら(1974)は、粒径の違いに応じて有機機、無機の分画を行い、細粘土(0.0002mm以下)あるいは粗粘土(0.0002~0.002mm)での有機物集積が多いことを明らかにしている。有機物の集積にとって粘土含有量が大きな要因の一つと考えられる。また、作付け履歴指数と推定炭素含有量との関係では、直前が水稲の場合には明瞭でないが、畑作物の場合には、畑作期間が長くなるほど推定炭素含有量が少ない傾向が見られる。そこで、前作が水稲と畑作物に分け、推定炭素含有量を目的変数とし、粘土含有量と作付け履歴指数を説明変数に用いて重回帰分析を行った(表-5)。結果は、連続した畑作物栽培においては、1および5%水準において回帰式と回帰係数は有意であった。すなわち、畑作物栽培ほ場の炭素含有量は、粘土含有量が多い程多く、連続した畑期間が長いほど少ないものと考えられた。一方、前作水稲の場合、回帰式および粘土含有量の回帰係数は5%水準で有意であったが、履歴指数の回帰係数は有意ではなかった。すなわち、前歴水稲作付けの場合、粘土含有量に左右されるものの、履歴指数は大きな要因にはなっていない。連続して水稲が栽培されたほ場では、連続した期間よりも、稲わ

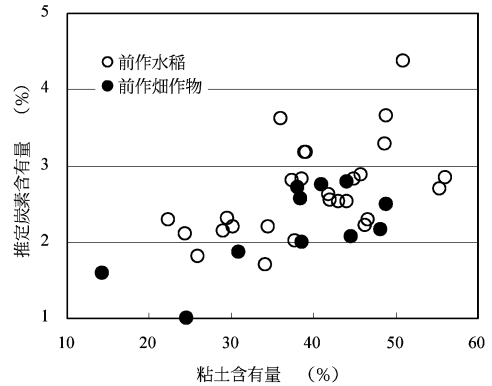


図-2 粘土含有量と炭素含有量

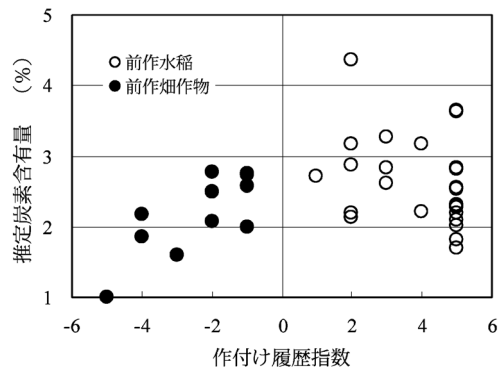


図-3 作付け履歴と炭素含有量

らの処理の違い等の土壌への有機物供給条件や、水管理、地温、透水性などの土壌の環境条件(前田・志賀, 1978; 志賀, 1984)等に左右されているものと考えられる。

3.3.2.2 畑転換後の炭素含有量の変化(北陸研究センター内ほ場)

北陸研究センター内では、水稲が連続栽培されたほ場を、1997年より畑転換し、大豆(夏作)-大麦(冬作)-キャベツ(夏作)の2年3作の作付けが行われた(表-2のNo.1~No.3ほ場)。各ほ場とも2分割し、大豆とキャベツの作付けをずらして栽培した。ここでは、転換2年後の1998年より転換5年目の2001年まで、大豆後の作土の粘土含有量と強熱減量を調査した。(6)式を用いて転換後の推定炭素含有量を求め、転換後の推定炭素含有量の経年変化を図-4に示した。各ほ場とも転換後の推定炭素含有量が減少している様子を読み取れる。No.1およびNo.2ほ場では、転作後2年目から5年目までで当初の約7%に相当する約0.17%の推定炭素含有量が

表-5 重回帰分析の結果 (作付け履歴が炭素含有量に与える影響評価)

前作畑作物					前作水稲				
重相関係数	0.871				重相関係数	0.555			
分散分析表	自由度	変動	分散	F 値	分散分析表	自由度	変動	分散	F 値
回帰	2	2.351	1.175	12.574**	回帰	2	2.961	1.480	5.351*
残差	8	0.748	0.093		残差	24	6.639	0.277	
合計	10	3.099			合計	26	9.600		

	係数	t 値	標準化係数
a_0	1.826	3.805**	0
a_1 (粘土含有量)	0.024	2.391*	0.452
a_2 (履歴指数)	0.228	3.106*	0.587

	係数	t 値
a_0	1.546	2.318*
a_1 (粘土含有量)	0.034	2.784*
a_2 (履歴指数)	-0.058	-0.721

** : 1% 水準で有意
* : 5% 水準で有意

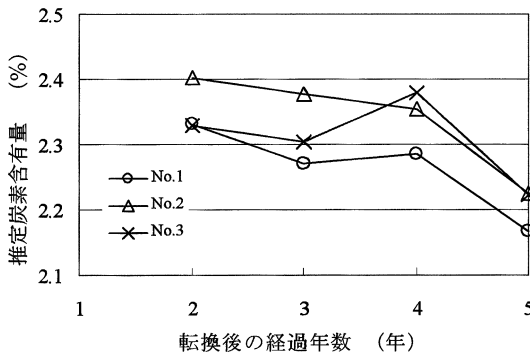


図-4 畑地転換後の炭素含有量の変化 (北陸研究センター内)

減少したことを示している。各ほ場とも有機質資材の投入を行っていないので、当初、土壌の炭素含有量が約2.4%の場合、大豆、大麦およびキャベツの収穫後の残渣だけでは有機物が減少することを表している。

4. おわりに

土壌の強熱減量が炭素含有量 (有機物含有量) と粘土含有量 (結晶水) を説明変数とした重回帰モデルで表されることを示し、強熱減量と粘土含有量を用いた重回帰式による炭素含有量の推定法を提案した。加えて、汎用ほ場の炭素含有量の推定に適用し、作付け履歴と炭素含有量、畑転換後の炭素含有量の減少について考察した。

今後、より多くの土壌に適用していくためには、強熱減量に与える粘土鉱物の違いや有機物の質的影響を評価する必要がある。

本研究の実施にあたり、ご協力をいただいた頸城土地改良区村田正美氏に感謝の意を表す。

引用文献

- Broadbent, F.E. (1953): The Soil Organic Fraction, *Adv. Agron.*, **5**: 153-183.
- 地盤工学会 (2000): 強熱減量試験. 土質試験の方法と解説—第一回改訂版—: 186-194.
- 前田乾一・志賀一一 (1978): 水田条件下における各種有機物資材の分解経過. *土肥誌*, **49** (6): 455-460.
- 三土正則 (1974): 低地水田土壌の生成的特徴とその土壌分類への意義. *農技研報*, **B25**: 29-115.
- 諸遊英行 (1983): 水田転換に伴う土壌の理化学性の変化. *土肥誌*, **54** (5): 434-441.
- 中野啓三 (1980): 重粘土水田の挙動と粘土. *粘土科学*, **20** (2): 37-46.
- 農業土木学会 (1983): 土の理工学性実験ガイド, pp. 83-90.
- 農耕地土壌分類委員会 (1995): 農耕地土壌分類 第3次改訂版. *農環研資*, **17**: 1-79.
- 志賀一一 (1984): 水田の有機物施用基準について. *土肥誌*, **55** (4): 374-380.
- Siewert, C. (2004): Rapid Screening of Soil Properties using Thermogravimetry. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **68**: 1656-1661.
- 住田弘一 (2005): 田畑輪換の繰り返しに伴う転作大豆の生産力低下. *農業技術*, **60** (9): 391-396.
- 富田武満・田辺和康・山本克己 (1992): マッフル炉を用いた強熱減量法による粘土鉱物の定量. *土木学会*

論文集, 445/Ⅲ-18: 55-63.

米林甲陽・久馬一剛・川口桂三郎 (1974): 土壌中の有機・無機複合体とその有機物の特性. 土肥誌, **45** (9): 416-420.

吉田武彦 (1971): 日本の耕地の生産力と施肥. 農業技術, **26** (5): 201-206.

受稿年月日: 2005年11月14日

受理年月日: 2005年12月25日