

テラローシャ土壌における不耕起栽培が作物の 根系分布と土壌の理化学性に及ぼす変化

島田輝男*・Artemio ROMERO**・早坂 猛***・Cantalicio PAREDES**

Effects of No-tillage Cultivation on Crop Root Distribution, Soil
 Physical and Chemical Properties in *Terra Roxa* Soil

Teruo SHIMADA*, Artemio ROMERO**, Takeshi HAYASAKA***, Cantalicio PAREDES**

* 2174 Hirai, Hinode-machi, Nishitama-gun, Tokyo-to 190-0182, Japan

** Centro Regional de Investigacion Agricola (CRIA) Capitan Miranda-Itapua, Paraguay

*** 573 Kusuno-machi, Kumamoto-shi, Kumamoto-ken 861-5511, Japan

Abstract

As *Terra Roxa* has a high clay content, and a lot of fissures occur in the surface soil under the no-tillage cropping in habitual drought terms, thus the root system of crops expands to the subsoil through the fissures. Under the tillage cropping, roots expand transversely among the granular structure of tilled soil layer. Roots can hardly penetrate through the underlying compact layer downward as there are only a few of finer fissures.

For the non-tilled surface soil, fissures occur in the parts where hardening has been developed. Since the broken structure is preserved, the state of surface soil gets closer to that of tilled one by the accumulation of the structure as time goes by.

An examination was conducted to make evident the process of nutrient supply to the subsoil which is brought about by falling of fertile surface soil into the fissures. Clods were collected from each soil horizon and fractionated samples were prepared; i.e. the main bodies of clods and fine soil particles which adhered to the surfaces of clods and these were lightly scraped off with a metal brush from the surfaces.

The contents of several nutrients were compared between the fine particle fraction and clod fraction at each horizon. Under the no-tillage cropping, generally, the nutrient content of fine particle fraction was higher than that of clod fraction, especially on K, Ca, and Mg. On the other hand, those differences were rather smaller under tillage cropping.

Thus, under no-tillage cropping, falling of fertile surface soil was presumed but nutrient supply attributable to root decay was also suggested, because the content difference was found in the subsoil as well where the fissures became less and finer.

Under the no-tillage cropping, improvements in the physical and chemical properties of subsoil are considered to be possible by such a mechanism mentioned above, with maintaining the surface soil in a fertile state.

Key word : No-tillage, Root system, Soil conservation, Sustainable cropping, *Terra roxa*

* 〒190-0182 東京都西多摩郡日の出町平井 2174

** パラグアイ地域農業研究センター (CRIA)

*** 〒861-5511 熊本県熊本市楠野町 573

キーワード : 不耕起, 根系, 土壌保全, 持続的農法, テラローシャ

1. はじめに

アメリカ合衆国で不耕起栽培法が提起された動機は、大規模なブラウ耕畑作がもたらす土壌侵食と、それに伴う地力低下の防止であったが、技術として確立されたのは、すぐれた除草剤が開発された今世紀中葉以降のことである (Sprague & Triplett, 1986, 金沢, 1995)。

1971年にはブラジルのパラナ州の農務省南部農業試験場 (当時) が、土壌侵食防止の目的でその導入試験を開始し、1980年には農家の間にもかなり普及した。この年に情報を入手した国際協力事業団パラグアイ農業総合試験場 (CETAPAR-JICA: パラグアイの日系人入植者のための営農指導機関) が、各種耕耘法の一つに不耕起栽培を組み込み、5年間の比較試験を開始した。その試験経過から土壌保全に最も有望と考えられた不耕起栽培法を、農家に普及する活動が1982年に起され、翌年にはそれを導入する農家が現れた。また1987年には導入農家による全パ日系不耕起栽培研究組織協議会が結成され、CETAPAR-JICAの後援のもとに、パラナ川沿いのアルトパラナ・イタプア両県の日系農家に、この栽培法が急速に普及した。その間にも農家自身による除草剤や薬剤の使用量の低減等の技術改良が進んだ。〔パラグアイにおける不耕起栽培〕編集・発行委員会, 1993, 茨木, 1997)。

不耕起栽培の導入はパラナ川沿いの畑作地帯の土壌侵食を軽減し、作物の収穫量も耕起栽培をしのぐ水準に安定させた。また土壌が耕起できない湿潤状態にあっても、不耕起のまま適期播種できる利益をもたらした。しかし、この栽培法が連作障害等を克服し、持続性のある農法として確立出来るか否かは未知であった。

その後、不耕起栽培の研究は国としても取り上げられた。すなわち国際協力事業団 (JICA) を通じて行なわれた、日本・パラグアイの国際協力事業「パラグアイ主要穀物生産強化計画」の主要課題の一つとして、不耕起栽培が取り上げられ、1991~1995年の期間、イタプア県のパラグアイ地域農業研究センター (CRIA) において、関連する問題点の研究が実施された。その研究課題の一つが「不耕起栽培が土壌の理化学性に及ぼす影響の解明」であり、栽培研究室と土壌肥料研究室の共同研究として、それぞれ作物根の分布特性、土壌断面の比較とその理化学的特性の解明を分担することとなった。最初に地域の主要土壌であるテラローシャに限定して調査研究を進め、以下に述べる結果を得た。

2. 実験方法

1) 調査対象圃場

図-1 にパラグアイ東部の調査対象地域の位置と、地質的背景を示した。東部の地質はパラグアイ川に並行するように古生代砂岩・中生代赤色砂岩・玄武岩と、東に向かって順次後代の地層が現われている。パラナ川沿いの玄武岩は大陸の分裂・移動の際に地殻が歪み、ブラジルから続く裂目からマグマが噴出し、赤色砂岩を覆う地層となった (小原, 1997 a)。これが風化を受けてテラローシャ (暗赤色土の意) 土壌が生成されたので、その分布域は図中の玄武岩の分布域に重なる。この土壌は粘土含量が60%以上と高く養分に富み (小川・堀田, 1991, 宮沢, 1997), 分布域はパラグアイにおける穀倉地帯となっている。

東部地域の気候分布は、等温線・等降雨量線ともパラナ川に並行しており、調査地域内では大差がなく (小原, 1997b), 図-2 に示す CRIA の年間降雨量約1,600 mm, 平均気温約21°C に代表される。降雨量の月別分布はほぼ100~160 mm の範囲にあり、冬季の雨がやや少ない。年ごとの気象要素の変動は大きいものの、基本的に降雨の偏りが少ないことが、周年不耕起栽培を成立させる要因と考えられる。また月平均気温は15~26°C の範囲にあり、冬といえるほど寒冷期が持続しないので、常習的な凍霜害による冬作物選択の制限は少ない。

このテラローシャ土壌地帯に限定し、不耕起栽培を始めてからの経過年数を追って調査対象圃場を選定した。それらの圃場条件は表-1 に示す通りで、アルトパラナ県のイグアス地区で1カ所、イタプア県のラパス地区で2カ所の農家圃場の他に、詳細な調査のための CRIA の試

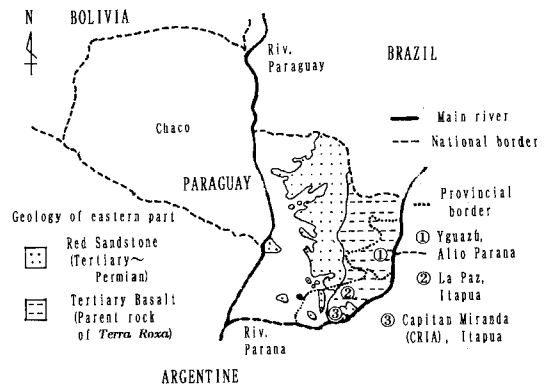


図-1 調査地域の所在とその地質的背景

Fig. 1 Locations of surveyed areas and the geological back ground

験圃場を加えた。さらに各地区それぞれ1カ所の耕起栽培の圃場を選んで対照とした。調査は土面に亀裂が多く発生する時期の夏作大豆を主とし、冬作小麦についてはCRIA 圃場の根系調査のみ行なった。

2) 調査分析項目

(1) 土壤断面調査

大豆が繁茂した開花期以後、根系の分布状態を広く見するために、複数の作条と直交する1m幅の調査断面を備えた深さ1mの試坑を掘り、常法による土壤断面調査を

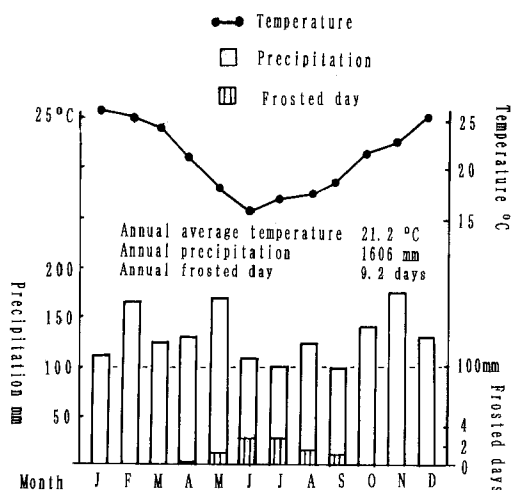


図-2 CRIAにおける気温・降水量・降霜日数の月別平均値

Fig. 2 Monthly average values of temperature, precipitation and number of frosted days at CRIA (1965~1994)

行なった。次いで区分した層位ごとに山中式硬度計による貫入抵抗値を測定したのち、物理性測定用の試料を3連制で容積100mlの金属製試料円筒に採取し、同時に化学分析用の試料も各層位から採取して、それぞれの分析に供した(土壤標準分析・測定法委員会, 1990)。

(2) 土壤の物理分析

試料円筒に採取した未攪乱土を1日飽水させ、砂柱法・加圧板法・遠心法とつないで、一定の土壤水分張力に対応する脱水量を秤量した。しおれ点まで測定したあと105°Cで乾燥して乾土重量を測定し、仮比重や各水分恒数を算出した。また、圃場容水量(pF1.75)における三相分布を実容積法で測定した。

(3) 土壤の化学分析

土壤の層位ごとの主な養分の分布状態を知るために、それぞれの風乾細土について、pH(H₂O)、チューリン法による有機物(OM)、ブレイII法による有効態リン酸(P)、ならびに1N酢酸アンモニウム溶液浸出のカリ(K)、カルシウム(Ca)、マグネシウム(Mg)の原子吸光法による定量を行なった。

(4) 根系分布調査

夏作大豆の土壤断面調査を終えた後、大豆根の分布状況を観察記録し、代表的な複数株を掘り取った。根を切らない様に断面を掘り崩しながら、一株づつの根系を土を付けたまま採取し、慎重に洗って標本を作成した。しかし土壤の粘性性が強く、洗浄の際に細根が失われたので重量ではなく、写真による形態比較にとどめた。

冬作小麦については、部分的にはあるが、根量の比較を目的としてCRIA 圃場で根系調査を行なった。大豆と同様の試坑を掘り、まず表土の土層断面上に25cm平

表-1 調査圃場の概要

Table 1 Field conditions of surveyed farm

Location	Name of farm	Cultivation (History ¹⁾)	Crop	Season of survey
Alto Parana, Yguazu	Zanuzo	Plow tillage	Soybean	Summer, Feb. 1994
	Fukami	No-tillage (11)	Soybean	Summer, Feb. 1994
Itapua, La Paz	Sano	Plow tillage	Soybean	Summer, Mar. 1994
	Ito	No-tillage (8)	Soybean	Summer, Mar. 1994
	Tani	No-tillage (1)	Soybean	Summer, Mar. 1994
	Capitan Miranda	CRIA ²⁾	Soybean	Summer, Mar. 1994
Capitan Miranda	CRIA ²⁾	Plow tillage	Wheat	Winter, Oct. 1994
	CRIA ²⁾	No-tillage (3)	Soybean	Summer, Mar. 1994
		No-tillage (4)	Wheat	Winter, Oct. 1994

¹⁾ History : Continued years of no-tillage cropping

²⁾ CRIA : Centro Regional de Investigacion Agricola (in spanish)
= Regional Investigation Center of agriculture

方の透明な OHP フィルムを置き、亀裂や根の分布域などの土壌構造を描き写した。次いで任意に選んだ小麦株直下の根の多い土層を深さ 10 cm 毎に 7 区分し、容積 100 ml の試料円筒を表面から挿入して、根を含む未攪乱土を 3 連制で採取した。表層土採取のあと順次土層を掘り崩して次層の表面を削り出して採取したので、各層とも上部約 5 cm についての調査である。円筒に含まれる小麦根を丁寧に洗い取り、60°C で乾燥して秤量し、各層位毎の根の平均重量と分布割合を算定した。

(5) 亀裂を通路とする下層土への養分輸送の調査 夏作大豆の根系および土壌断面の調査後に、亀裂面を通路とする、表土から下層土への養分移動を検証する調査を行なった。土壌母材が共通な CRIA の試験圃場において、耕起・不耕起両区の各土壌断面から、層位別に 1 kg 程度の大きい土塊を取り、それぞれの試料毎に室内で乾燥を進めながら、両手で軽く力をかけて亀裂面を割り、可能な限りの小土塊に分割した。それらの表面の軟らかい部分をワイヤブラシで軽くこすり落とし、分割の際に砕け落ちた微小団粒や土粒子と併せて 1 mm の円孔篩を通し、細土だけを集めて土塊表面付着細土試料とした。また処理済みの 4 mm 以上の土塊を集めて砕き、1 mm の円孔篩を通した細土を土塊本体試料とした。各層位のこれら二つの画分の化学分析値を比較して、耕起・不耕起栽培の土壌養分移動におよぼす影響を考察した。

3. 結 果

1) 不耕起栽培下の土壌断面調査とその物理的特性

(1) 夏作大豆畑の土壌断面調査

不耕起栽培の代表例として、表土が最も硬化していた CRIA の試験圃場の土壌断面調査成績の概要を、対照の耕起栽培の成績とともに表-2 として示した。簡略に記載したので要点を補足する。

両者共通の特性として、玄武岩に由来する暗赤色の重粘な土壌であり、基本的に付着性が強い。また下層土 (Bt 層) は層界が判然とせず、小土塊の表面に光沢があってニトソルの特徴を示すほか、弱度の亜角塊状の構造が見られ、物理性は悪くないと考えられた。例えば地上にさらされた下層土の塊は、半月程の間に 5 mm 程度の亜角塊状に自壊した。しかし、湿った状態の下層土は容易に指頭で構造を壊すことができ、この際に強い付着性が現れた。これに対して有機物の多い表土では付着性が弱められ、安定した団粒構造が発達していた。

不耕起土層断面の特徴は、乾燥時の表土が著しく硬化することで、山中式硬度計で測定した絶対硬度は、耕起表土の 4 kg に対して約 10 倍の 38 kg/cm² であった。両区の表土下の Ap₂ と AB 層はともに 12 kg で差がなく、

さらに下の Bt₁ 層では 4 と 9 kg で、不耕起の方が硬化していた。この様に不耕起下では表土の硬化が下層に向けて深化しており、それに対応して下向きに走る多くの亀裂が発生し、下層土への根の通路となっていた。

(2) 大豆畑土壌の物理分析成績

土壌断面調査の際に、各層位から内容 100 ml の試料円筒に未攪乱土試料を採取し、pF 1.75~3.0 の領域の迅速有効水分、pF 3.0~4.2 の難利用水分などの物理分析を行なった。CRIA 試験圃場のそれらの成績を、仮比重とともに表-3 に示した。仮比重の数値から、耕起・不耕起の耕作法による圧密土層の位置の違いが知られる。不耕起表土の仮比重は 1.614 で、耕起土層の 1.462 に対して密な状態にあり、有効水分含量は 1.2% 減少している。

各層位の有効水分含量に土層の厚さを加算して得た、層位別有効水分保留量の深さ 1 m までの積算値は、耕起栽培に比べて不耕起栽培の方が多く、しかも迅速有効水分の割合が増している。しかし両区とも深さ 1 m の土層の有効水分保留量は 100 mm 以下であり、夏季の連続晴天下では水不足になり易いと考えられる。

不耕起栽培の継続に伴う土壌の三相分布の変遷を図-3 に示したが、各圃場ごとに層位の深さが異なるので、縦軸には深さを採用した。不耕起栽培への出発点にあたる上段の耕起栽培の 3 例の間では、土壌三相の分布形態は類似している。

下段には、左から不耕起栽培の経歴順に三相分布図を配列した。不耕起栽培 1 年目の三相分布は耕起栽培と似ているが、3 年目の例では元の耕起土層とその下の圧密層の、0~24 cm の層が一体化して固相率が高まり、ち密な状態になっている。しかし 8 年目には、ち密土層の上部に固相率の減少した薄い表土が再生しており、さらに 11 年目の例では表土が厚くなるだけでなく、ち密な次表層直下でも固相率が低下しており、耕起栽培の三相分布の形に近づく傾向が見られる。

不耕起栽培 11 年目の圃場の所有者である深見氏の証言によれば、「不耕起栽培に転換した圃場では、初期には表土の硬化が進み、乾燥時の亀裂の発生が著しかったが、5 年目位から畑面を踏む足裏の感触が軟らかくなり、亀裂の発生が減少した。」とのことである。

2) 不耕起栽培下の根系分布特性

(1) 夏作大豆の根系分布

耕起栽培下では表土が膨軟であり、その下の圧密層にかけて亀裂の発生が少なく、下層土には少数の細い根が散在するだけで、根系の主体は耕起層を横に拡がっていた。不耕起栽培下では、元の耕土層とその下の圧密層とが一体化して硬化し、乾燥収縮の進行により生じた多数の亀裂に沿って大豆の主根が下層土に達し、分岐して拡

表-2 耕起・不耕起栽培下の大豆畑土壌断面の特徴

Table 2 The characteristics of soil profile of soybean field under tillage and no-tillage croppings

Tillage at CRIA

Horizon	Depth cm	Color ¹⁾	Organic mater	Texture	Structure	Compactness ²⁾ kg/cm ²	Content of roots
Ap ₁	0~ 10	10 R 3/2.5 (DRB)	low	HC (Heavy Clay)	strong, medium granular (a few fissures)	3	common, very fine & fine roots
Ap ₂	~ 20	10 R 3/3 (DRB)	low	HC	strong, coarse subangular blocky (few fissures)	12	a few, very fine roots
Bt ₁	~ 35	10 R 3/4 (DR)	very low	HC	weak, coarse subangular blocky (few fissures)	4	few, very fine roots
Bt ₂	~ 70	2.5 YR 3/4 (DRB)	very low	HC	weak, coarse subangular blocky (few fissures)	5	few, very fine roots
Bt ₃	~100 ⁺	2.5 YR 3/5 (DRB)	very low	HC	weak, coarse subangular blocky (few fissures)	5	few, very fine roots

No-tillage of 3 years at CRIA

Horizon	Depth cm	Color ¹⁾	Organic mater	Texture	Structure	Compactness ²⁾ kg/cm ²	Content of roots
A ₁	0~ 10	2.5 YR 3/3 (DRB)	low	HC (Heavy Clay)	strong, coarse subangular blocky (many fissures)	38	common, very fine & fine roots
AB	~ 24	10 R 3/3 (DRB)	low	HC	strong, coarse subangular blocky (many fissures)	12	a few, very fine & fine roots
Bt ₁	~ 34	10 R 3/6 (DR)	very low	HC	weak, coarse subangular blocky (a few fissures)	9	a few, very fine & fine roots
Bt ₂	~ 61	10 R 3/6 (DR)	very low	HC	weak, coarse subangular blocky (few fissures)	3	a few, very fine roots
Bt ₃	~100 ⁺	10 R 3/6 (DR)	very low	HC	weak, coarse subangular blocky (few fissures)	3	a few, very fine roots

¹⁾ Color : Referred to the Munsell color notation system, (DRB ; Dark Reddish Brown, DR ; Dark Red).

²⁾ Compactness : Resistance values measured by Yamanaka's handy type cone-penetrometer.

がっていた。

これらの代表的な根の標本を、耕起栽培から不耕起栽培に転換した経歴順に、左から右へ並べて写真-1に示した。粘土質の付着土壌を洗い落す際に、耕起区では下層に伸びる少数の根も細いために失われた。一方、健全な主根が亀裂を通じて下層に伸びるといふ不耕起栽培の根の分布特性は、写真中央の1年目の例において、すでに認められた。

(2) 冬作小麦畑表土の構造性と根の分布形態

夏作大豆畑での根系分布の特性は、冬作小麦畑でも同

様に見られたので、耕起・不耕起両区の根量の比較を試みた。それに先立って CRIA 試験圃場の両区の表土の、深さ 25 cm までの土層における根の分布領域、土塊や亀裂などの土壌構造の図化を行なった。図-4 に両区の模式図を比較したが、表土の団粒構造の発達した根の分布領域を打点で示し、播種溝跡には横線を加え、散在する土塊は白抜きのまま残した。表土の下に接する圧密層は、表面を限る線の内側にハッチを書き加え、中を走る亀裂は形のまま黒く塗り潰した。

耕起栽培下では、浅い播種溝跡を上部に含む、約 20

表-3 耕起・不耕起栽培下の大豆畑土壌の仮比重と有効水分含量

Table 3 Bulk density and available moisture retention of soybean field soil under tillage and no-tillage croppings

Tillage at CRIA

Horizon	Depth cm	Bulk density	Available moisture %		Retention of available moisture ¹⁾ mm	
			Rapidly	Non-easily	Rapidly	Non-easily
Ap ₁	0~ 10	1.462	6.4	4.1	6.4	4.1
Ap ₂	~ 20	1.640	3.2	5.5	3.2	5.5
Bt ₁	~ 35	1.532	3.9	5.2	5.9	7.8
Bt ₂	~ 70	1.329	4.1	4.8	14.4	16.8
Bt ₃	~100 ⁺	1.337	4.0	5.3	12.0	15.9
Total					41.9	50.1

No-tillage of 3 years at CRIA

Horizon	Depth cm	Bulk density	Available moisture %		Retention of available moisture ¹⁾ mm	
			Rapidly	Non-easily	Rapidly	Non-easily
A ₁	0~ 10	1.614	5.9	3.4	5.9	3.4
AB	~ 24	1.618	4.5	3.8	6.3	5.3
Bt ₁	~ 48	1.399	5.0	4.5	5.0	4.5
Bt ₂	~ 71	1.302	5.1	4.6	13.8	12.4
Bt ₃	~100 ⁺	1.377	4.5	5.8	17.6	22.6
Total					48.6	48.2

¹⁾ Retention of available moisture mm = available moisture% × (thickness of horizon cm/10 cm)

cmの厚さの表土が団粒構造の発達した根の分布領域であり、その下に根に乏しい圧密土層が水平方向の層として重なっていた。

これに対して不耕起栽培下では、団粒構造の発達した表土は浅く、すぐに硬い土層に変るが、そこに下向きの亀裂が大略10cmの間隔で走り、それらを中心として元の圧密層下部から下に、団粒構造の発達した根の分布域が出来ており、垂直方向の構造が形成されていた。なお圧密層直下の団粒構造の発達も、その部位の固相率の低下に寄与するものと考えられる。

(3) 冬作小麦の根系の垂直分布

部分的試料採取ではあるが、両区の小麦畦直下の垂直方向の根の分布量を、層位ごとの3連平均値により表-4に示した。また、その全層位合計値に対する分布割合を並記したが、表土の20cmまでの分布割合は、耕起区の86%に対して不耕起区が72%と少ない。中間の20~50cmの層への分布割合には差が少なく、したがって50cm以下の下層土ではそれぞれ2%と14%と、不耕起区の分布割合が著しく高くなっている。深い土層に多くの根が分布することは耐旱性を増し、また枯死後に有機物や養分を多く残すと考えられる。

3) 亀裂と根による下層土への養分輸送の可能性

(1) 不耕起栽培下土層の養分分布

不耕起栽培が土壌養分の消長におよぼす影響を知るため、調査圃場のうち不耕起経歴が最も長いFukami農場と、それに近接した耕起栽培のZanuzo農場の土壌断面各層位の化学分析成績を表-5で比較した。両圃場の土壌断面には、前述の耕起・不耕起の根系分布の差が明らかに見られた。

耕起圃場のAp層のカルシウム含量は下のBt層より低い。逆にリン酸・カリ含量はBt層で急減しており、とくにリン酸は溶出できない程であった。これに対して不耕起の例では、マグネシウムを別として各養分含量が表土で高く、下層に向って漸減する傾向を示し、Bt層での有機物以外の養分含量が耕起の例に比べて高い。

不耕起栽培では収穫残渣で畑面を被覆(マルチ)して管理し、肥料も表面に散布して土層へは混和しないから、溶解度の低い有機物やリン酸は表面に集積するという(Sprague & Triplett, 1986, 金沢, 1995)。表-5の不耕起栽培でも、有機物・リン酸の表土への著しい集積が見られる。

有機物の場合、一部はフルボ酸等の水溶性物質とし

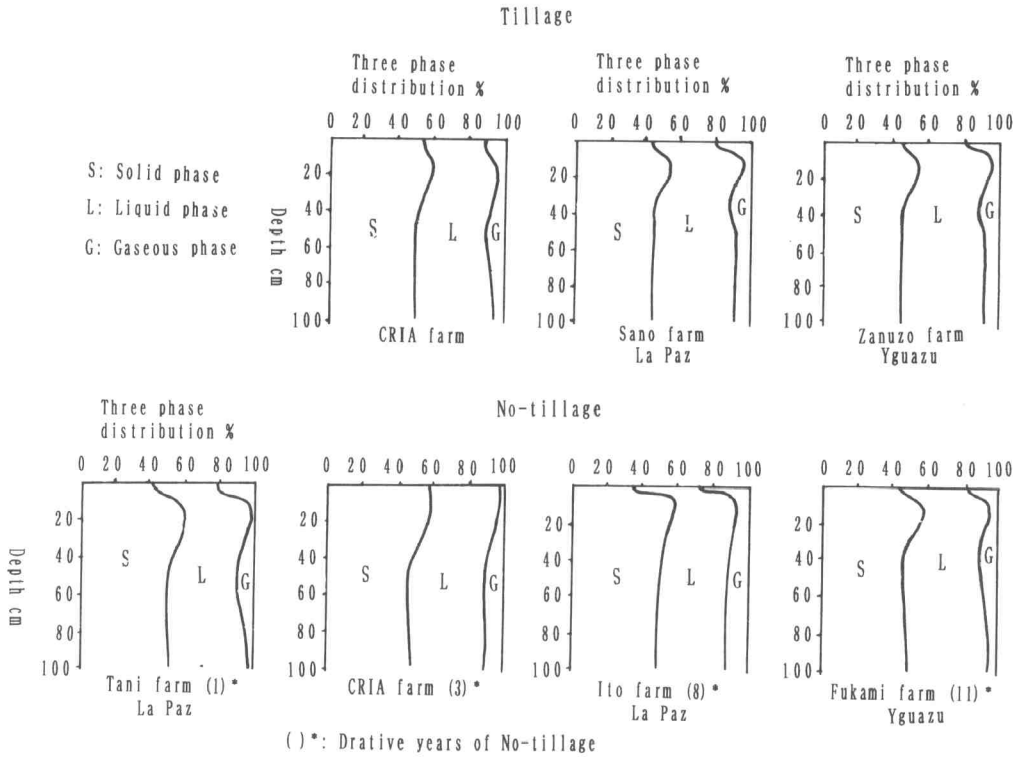


図-3 不耕起栽培下の土壤の三相分布の変遷

Fig. 3 Change of three phase distribution of the soil under non-tillage croppings

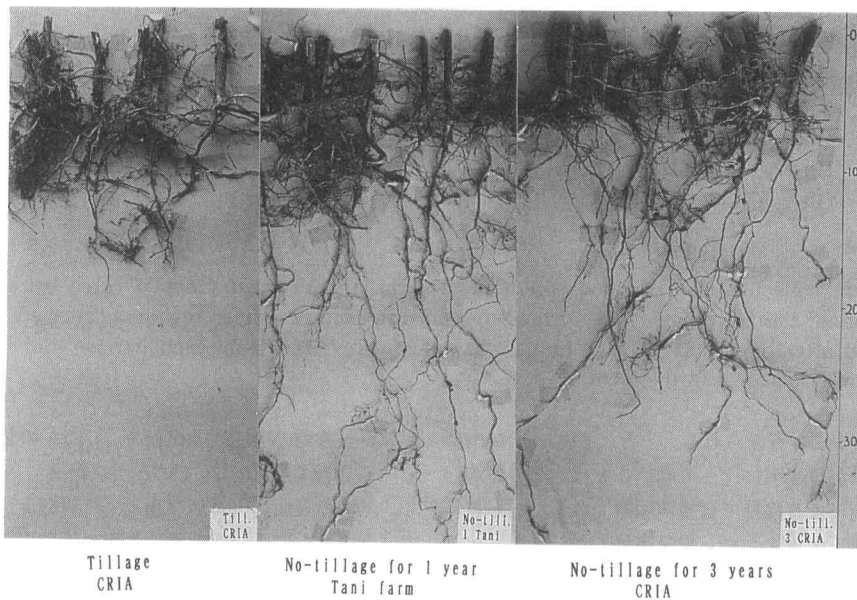


写真-1 耕起および不耕起栽培下での大豆根系分布

Photo. -1 Distribution of soybean root system under tillage and non-tillage croppings

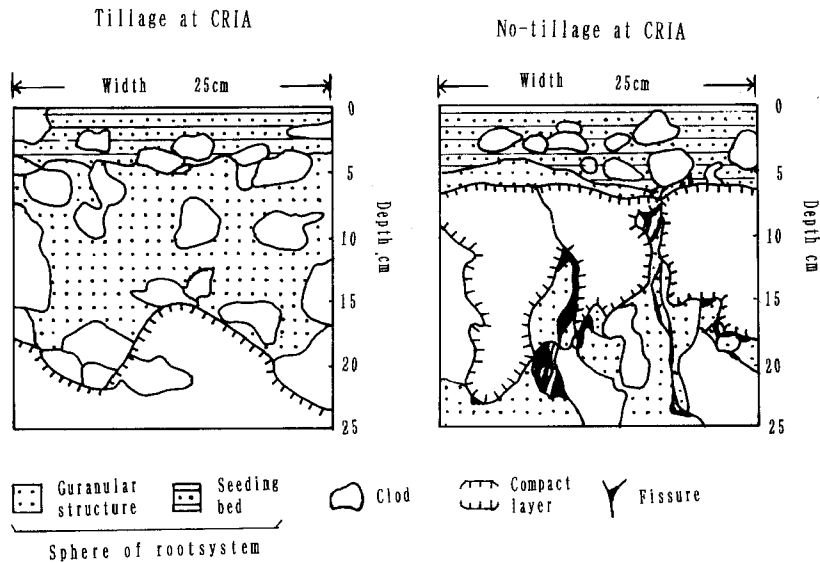


図-4 耕起栽培と不耕起栽培の小麦畑表土の構造性の模式図

Fig. 4 Schema of the surface soil structure in tillage and non-tillage wheat field

表-4 耕起および不耕起栽培下での小麦根系分布

Table 4 Distribution of wheat root systems under tillage and no-tillage croppings

Tillage at CRIA				No-tillage at CRIA			
Depth cm	(Horizon)	Distribution of root		Depth cm	(Horizon)	Distribution of root	
		weight mg	ratio %			weight mg	ratio %
0~5	(Ap ₁)	78.9	60.8	0~5	(A ₁)	128.2	56.3
10~15	(Ap ₂)	32.4	25.0	10~15	(AB)	35.9	15.7
20~25	(Bt ₁)	7.2	5.5	20~25	(AB)	9.5	4.2
30~35	(Bt ₁)	4.1	3.1	30~35	(Bt ₁)	10.9	4.8
40~45	(Bt ₂)	4.1	3.2	40~45	(Bt ₂)	10.9	4.8
50~55	(Bt ₂)	1.3	1.0	50~55	(Bt ₂)	13.6	6.0
60~65	(Bt ₂)	1.8	1.4	60~65	(Bt ₃)	18.8	8.2
Total		129.8	100.0	Total		227.8	100.0

Samples were collected from divided soil horizon right under wheat cropped ridge by using a soil sampling core of 100 ml volume. Wheat roots contained in each sampling core were collected by washing and weighed after drying at 60°C. 3 random samples were taken from each horizon and the average value of them was shown in the table.

て、下層へ浸透すると考えられる。一方、不耕起下のBt層のリン酸含量が耕起下に比べて高いことは、その難溶性からみて浸透による移動では説明困難である。むしろ亀裂に表土が落下・流入して、養分移動をもたらした可能性が高いと考えられたので、このことを検証するために次の実験を行なった。

(2) 亀裂と根による下層土への養分輸送の可能性
亀裂への表土の落ち込み、あるいは流下による下層土

への養分移動の可能性の検証を、CRIAの試験圃場の耕起・不耕起栽培の両区で試みた。両区の各層位について、土塊の表面に付着した細土（付着細土）と、土塊本体（土塊）との画分間の養分含量の比較を行なった結果を図-5に示した。なお、この方法では付着細土画分への土塊の一部の脱落混入は避けられない。

耕起区では、全層にわたり付着細土と土塊との養分含量の差は小さい。耕起が碎土と攪拌という均質化の作業

表-5 耕起・不耕起栽培下の大豆土壤断面の養分分布

Table 5 The nutrient distribution in the soil profile of soybean field under tillage and no-tillage croppings

Zanuzo farm : Tillage

Horizon	Depth cm	pH (H ₂ O)	O.M. ¹⁾ %	P ppm	K me	Ca me	Mg me
Ap ₁₁	0~ 2.5	5.8	2.6	5.6	0.5	3.9	0.6
Ap ₁₂	~ 7	5.7	2.7	6.0	0.3	4.0	1.1
Ap ₂	~ 19	5.5	2.2	0.7	0.1	3.7	0.9
Bt ₁	~ 43	5.5	1.7	0.0	0.1	5.2	0.8
Bt ₂	~ 60	5.9	1.5	0.0	0.4	6.0	0.8
Bt ₃	~100 ⁺	6.0	1.5	0.0	0.1	4.5	1.2

Fukami farm : No-tillage of 11 years

Horizon	Depth cm	pH (H ₂ O)	O.M. ¹⁾ %	P ppm	K me	Ca me	Mg me
A ₁₁	0~ 2.5	6.4	4.1	17.9	1.1	7.3	1.2
A ₁₂	~ 7	6.4	2.8	9.1	0.8	6.3	1.0
AB	~ 21	6.6	2.3	2.1	0.5	7.0	1.0
Bt ₁	~ 43	6.7	1.8	0.7	0.3	6.3	1.1
Bt ₂	~ 60	7.0	1.4	0.5	0.3	5.2	1.2
Bt ₃	~100 ⁺	6.9	1.0	0.5	0.5	4.6	1.5

¹⁾ O.M. : Organic Matter

にはかならず、また亀裂の発生と下層土への根の分布が少ないため、細土の落込みや根の腐朽による、表土から下層土への養分供給が期待できないことが理由として考えられる。なお例外的にマグネシウム含量が土塊の方で高くなっているが、理由は不明である。

不耕起区では、リン酸を別として全層にわたり付着細土の養分含量が土塊に比べて大きい。これは表土に多発する亀裂に、表面に集積する富栄養の土壤粒子が落ち込んだ結果と考えられる。また亀裂が減少する下層土では、耕起区に比べて根の分布量が多いため、その腐朽後に養分を多く残すと考えられる。

4. 考 察

1) 土層の亀裂の発生と根系分布の深化：

不耕起栽培は温暖地帯の粘土質土壤において、耕起栽培よりも増収するといわれるが、畑面からの無駄な水分蒸発が、収穫残渣マルチによって抑制されることが一つの要因であり、水分環境が良くなるために根系分布はむしろ浅くなると考えられている (Sprague & Triplett, 1986)。乾燥による土層の亀裂発生が作物の根の下層土への分布を助長することは、不耕起水稲作に関して報告されている (長野間ら, 1991) が、畑地での報告は見当

らなかつた。

図-2の CRIA の気象図に見るとおり、亜熱帯で乾季のないパラグアイ東部のテラローシャ土地帯であっても、蒸発量の多い夏季の晴天が10日以上も続けば、耕起栽培の土面にさえも乾燥による土層の亀裂の発生が見られる。表-2の CRIA 圃場の土壤断面の硬度や、図-3の三相分布の推移に見るとおり、不耕起栽培に転換した初期に表土が著しく硬化するが、亀裂の発生が盛んなのもこの時期で、その砕土作用の集積により表土が軟化するとともに、亀裂の発生も減少すると考えられる。一方、耕起土層の下の圧密層の硬度は、不耕起栽培下の次表層と同程度でありながら亀裂は少なかった。孔隙が多くて亀裂が起きにくい耕土層に保護されるためと考えられる。

テラローシャはオキシソルに近いまでに風化を受けているので、下層土にも亜角塊構造が弱度ながら発達している。しかも塩基類も高い水準で残されており、亀裂により圧密層が破られ、下層土への通気性が改良されれば、酸素を必要とする畑作物根域の下層土への拡大が可能となる。このことは写真-1の不耕起栽培1年目の例ですでに認められる。さらに不耕起栽培11年の FUKAMI 農場の土壤断面調査では、表層の粒状構造化が進んで

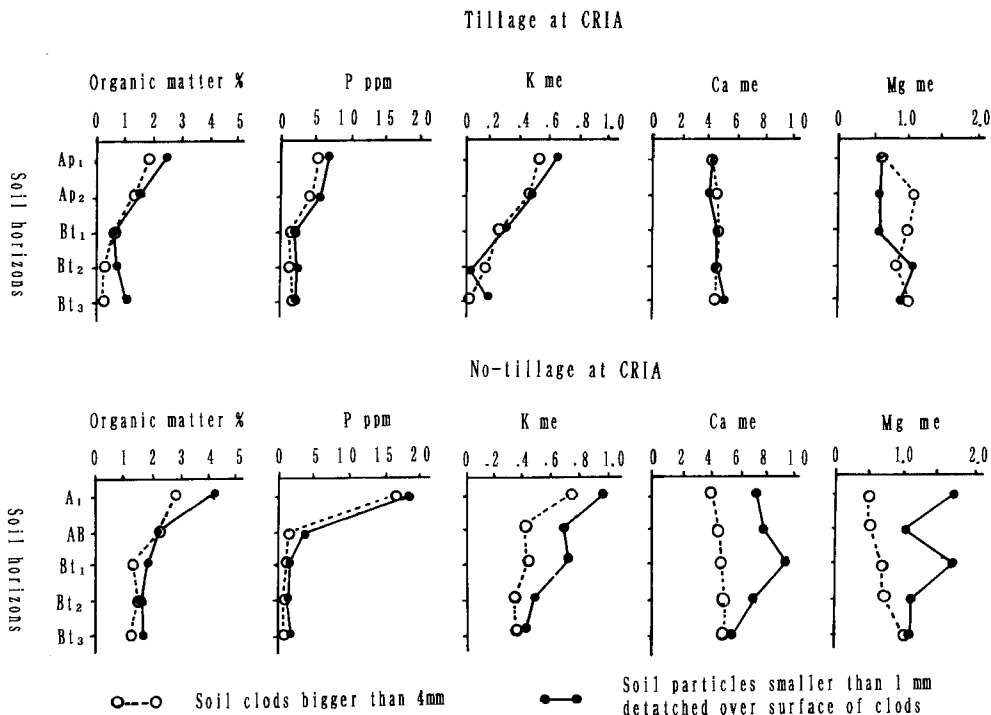


図-5 各土層から採取した土塊とその表面に付着した粒子との間の養分含量の比較

Fig. 5 A comparison of nutrient content between clods and soil particles adhering to the surface of the clods; the clods were collected from each soil horizon

も、硬化土層の亀裂を通じて大豆の根が広がる特性は、耕起という破砕作業がないために保持されており、60 cmの深さにも大きな根粒が、また1 mの深さにアリの巣が見られたことから、好気的環境は持続すると考えられた。

圧密土層をサブソイラーで破砕した畑の土壌断面においても、不耕起栽培下と同様に下層土への根域拡大が見られたので、不耕起栽培の導入が困難な場合は、圧密層の破砕耕がそれに代る手段と考えられる。

2) 下層土への養分の転送

テラローシャの粘土含量が高く、不耕起栽培下では特に乾燥・収縮による亀裂を起し易いので、ヴァーティソルと同様の、養分に富む表層土の亀裂への崩落や、懸濁水としての流入が起ると考えられるが、その可能性は図-5に関して説明した。しかし大きな亀裂は硬化土層に限られるので、表土の落ち込みによる下層土への養分供給は、硬化土層下面の境界付近から下へは急減すると考えられる。

一方、不耕起栽培下の下層土(Bt)では、亀裂を通路として分布する根系が、表-4の小麦作では全体の28%と耕起区の2倍に及んでいる。作目により変動するとし

ても、収穫後の残渣根の腐朽により下層土に供給される養分は不耕起区で大きいと考えられる。表土に施した養分を作物自身の働きで下層土に転送する可能性については、表-5のFUKAMI農場の下層土の養分の中で、浸透性の小さいリン酸含量がZanuzo農場に比べて明らかに高いことから推定される。

テラローシャは元来の肥沃度が高く、カリ肥料は施用しないのが農家の慣行となっている。しかし、Zanuzo農場の化学分析値に見られるように、カリ含量の低い例も散見されるので、将来の施肥上の問題点と考えられる。

3) 気象的条件

パラグアイの気候は南東部のパラナ川沿いの地帯で降水量1,600 mm、平均気温21°Cと恵まれた環境にあり、周年作物栽培を可能にしている。この南東部から北西部のチャコ地方に向かって高温・乾燥の度が強まる(小原, 1997 b)。

不耕起栽培では収穫残渣マルチによって、無駄な土面からの蒸発が抑制されるので、熱帯・亜熱帯の水分不足の起りやすい、雨の少ない地域での作物増収効果が大きい、砂質土壌ではその効果が見られないといわれる

(Sprague & Triplett, 1986)。この様に不耕起栽培はどこでも成功するとは限らない技術であり、その成否の原因についての土壤の理化学的解析がなければ、普遍的技術とはなり得ない。例えばパラグアイ東部の砂質土地帯では、不耕起栽培によりテラローシャ土地帯同様に増収したということである。これは通説に合わない結果であり、土壤環境の解析による相当の説明なしには、技術の適用条件を定めることができない。

また北西部チャコ地方の中央部では雨量が700mm程度であり、粘土質土壤の区域は塩害が起きるので被害の軽い草地として利用され、また塩害の軽い砂質土壤の区域には一般作物が栽培されるという。砂地は浸透性が良いので塩害が起きないという推論に立てば、粘土質土壤であっても、不耕起栽培により良好で均一な浸透性を付与できれば、雨季には一般作物の栽培が可能とも考えられる。この様に不耕起栽培の可能性に関して、パラグアイ国内に限っても興味ある問題が残されている。

5. 要 約

パラグアイ東部のテラローシャ土地帯に導入され、土壤侵食防止の成果をあげた不耕起栽培法について、その継続が土壤の理化学性に及ぼす影響を評価した。

テラローシャは粘土含量が高いので、不耕起栽培下の表土は乾燥時に著しく硬化・収縮して多くの亀裂を生じ、それを通じて作物の根系が下層土に拡がっていた。耕起栽培下では耕起土層の中を根が横に拡がっており、下の圧密層を破って下層土に拡がる根は僅かであった。不耕起下の亀裂によって破碎された構造は保存され、経過が進むにつれて表土は耕起された状態に近づくが、下層土での根の活動を可能にする好気的環境は維持される。

この亀裂に肥沃な表土が落下あるいは流下して下層土を肥沃化する可能性を検証するため、各層位毎に土塊本体とその表面付着土とを分画した試料をつくり、それぞれの養分含量を比較したが、不耕起下では画分間の差が大きく、養分の流下があると考えられた。不耕起栽培経歴が長い畑の、亀裂が微細になる下層土で、溶解度の低いリン酸の富化が見られるのは、分布域が深くなった根系の腐朽による養分転流が関与すると考えられる。この様にテラローシャ土地帯の不耕起栽培下では、表土の肥培管理を適切にすれば、自然の働きによる下層土の理化学性の持続的改良が可能と考えられる。

6. 謝 辞

本研究を実施するにあたり、イグアスおよびラパス農

業協同組合の指導部の方々から、不耕起栽培に関する情報を提供して頂いたが、とくに深見明伸氏からは表土の亀裂の発生の経過などの観察結果をご教示頂いた。また多くの農家の方々から調査圃場を提供して頂いた。

プロジェクトリーダーの岩田文男博士からは、研究推進上の多くのご援助を頂いた。

あわせて厚くお礼申し上げる。

引 用 文 献

- 土壤標準分析・測定法委員会 (1990) : 土壤標準分析・測定法, 博友社, 東京.
- 茨木和典 (1997) : 中南米の農地劣化地域における持続的作物生産技術 III. パラグアイの自然環境と持続的作物生産 [B] 持続的作物生産 2. 畑作物の生産 (栽培) 技術, 全国農業改良普及協会, 190~230.
- 金沢晋二郎 (1995) : 持続的・環境保全型農業としての不耕起栽培, 畑作物の収量と土壤の特性, 土壤肥料学雑誌 66 : 286~297.
- 宮沢数雄 (1997) : 中南米の農地劣化地域における持続的作物生産技術 II. ブラジル・セラードの自然環境と持続的作物生産 [A] 自然環境 4. セラードの土壤 6) 構造テラロッシュ, 全国農業改良普及協会, 63~64.
- 長野間宏・児玉 徹・金田吉弘・山谷正治 (1991) : 耕起方法が低湿重粘土汎用水田の土壤物理性に及ぼす影響, 土壤の物理性 62 : 43~52.
- 小川和夫・堀田利幸 (1991) : イグアス地域における畑土壤の理化学性 (肥沃度特性) と土壤管理法, パラグアイ農業総合試験場 (国際協力事業団), 3~55.
- 小原 洋 (1997a) : 中南米の農地劣化地域における持続的作物生産技術 III. パラグアイの自然環境と持続的作物生産 [A] 自然環境 1. 地形・地質, 157~159, 4. 土壤, 全国農業改良普及協会, 170~178.
- 小原 洋 (1997b) : 同上 [A] 自然環境 2. 気候 (気象・水文), 全国農業改良普及協会「パラグアイにおける不耕起栽培」編集・発行委員会 (1993) : パラグアイにおける不耕起栽培, 全パ日系不耕起栽培研究組織協議会, 160~162.
- Sprague, R.Q. and Triplett, G.B. (1986) : No-tillage and surface tillage agriculture The tillage revolution, John Wiley & sons, New York.

受稿年月日 : 1998年11月13日

受理年月日 : 1999年6月10日