

耕起, 不耕起が亜熱帯サトウキビ畑土壌の 養分溶脱に与える影響

朝田 景*・干川 明**・加藤 誠*・西村 拓***

Effects of No-tillage Practice on Nitrate Leaching in Sugar Cane Fields in Sub-tropic Area

Kei ASADA*, Akira HOSHIKAWA**, Makoto KATO* and Taku NISHIMURA***

* Graduate School of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology

** JIRCAS Okinawa Subtropical Station

*** Graduate School of Agricultural and Life Sciences, University of Tokyo

Abstract

No-tillage cropping (NT) is considered as a better onsite counter measure to reduce runoff and soil loss than the soil conservation techniques in sub-tropic area in Japan. In this paper chemical and physical soil analysis and field survey have been conducted to clarify effects of NT on retention and leaching of soil nutrients at sugarcane field.

Sugar cane fields under conventional tillage (CT) and the NT were the studied sites in Ishigaki, Japan. Shimajiri mahji soil, having clay content of more than 50%, covers the study site. An observation ditch of 100 cm in width and 70 cm deep was prepared at the boundary of the CT and NT fields. Soil samples for chemical and physical analysis were taken and PVC cores containing ion exchange resins to trap leaching ions were inserted at both side wall of the ditch. Also, observation of sugar cane root distribution was conducted. After the survey, the observation ditch was filled up by the original soil.

The CT had shallow and sparse root distribution while the NT showed denser and deeper root distribution. It corresponded to higher saturated hydraulic conductivity of the NT soil. At the same time the NT showed lower dry bulk density and penetration resistance at the layer of 15-25 cm where the NT had more roots than the CT. The NT had greater nutrient flux at 0-20 cm deep layer, however it rapidly decreased along the depth and reached the similar rate to the CT at 40 cm deep layer. Much of the nutrients in the NT could be soaked up by sugar cane roots. Development of roots may reduce the negative effects of the NT that may enhance leaching of nutrients by bio-macro pores.

Key word : No-tillage, Conventional tillage, Nutrient leaching, Simajiri mahji

1. はじめに

1960年代以降, 日本の亜熱帯島嶼では, 大規模な農地開発や宅地開発などの人為的攪乱により, 夕立, 梅雨や

台風時に, 地表面流去水によって肥沃な表土のみならず下層土までもが河川, 海へ流出するようになった。これは土壌流出問題として, 畑の生産力低下ばかりでなくサンゴをはじめとした海の生態系へ深刻な問題を引き起こ

*東京農工大学大学院連合農学研究科

** (独)国際農林水産業研究センター熱帯・島嶼研究拠点

*** 東京大学大学院農学生命科学研究科

キーワード: 不耕起栽培, 慣行耕起栽培, 養分溶脱, 島尻マージ

してきた。1995年、沖縄県は赤土等流出防止条例を施行し、これにより農地造成や道路工事などの公共工事に由来する土壌流出は大幅に減少した。しかし、この条例は既存農地には適用されないため、依然として土壌は既存農地から海へ流出し続けており、現在も土壌流亡に関する効果的な対策が模索されている。従来、圃場からの流去水を堰止めるコンクリート堰や流亡土壌を捕捉する沈砂池の設置、また植物によるグリーンベルト等、様々な対策が行われているが、いったん流去水中に浮遊した細かい土粒子は容易に沈降せず、海まで流れてしまうことが多い。従って農地から流出してしまった土粒子への対策よりも、農地内で地表面流去水中の浮遊土粒子を減少させることの方が効果的で効率的と考えられる。すなわち、農地内における土壌保全対策が重要である。

圃場内における土壌流亡対策としては、①降雨の土層への浸透を促進する方法と②土壌構造を安定させる方法がある。“深耕”は降雨の土層への浸透を促すためにしばしば行われてきた方法である。しかし、深耕によって生産性の低い下層土が作土層に反転されるため、深耕後に土壌改良材や化学肥料を大量に投与する必要がある。これらの化学物質が圃場外へ流出することで新たな環境負荷となっている。従来の慣行耕起作業は、浸透を促進する効果に加えて、表層に作物残渣を鋤きこんだり、発芽に適した苗床を作ったり、雑草繁茂を抑制したりするために行われてきた。しかし、この作業によって土の構造が不安定となり受食性が増すことがある。特に、耕起後に降雨があると、地表面に土壌クラストが形成され、降雨の浸入が低下することが多い(Thierfelder *et al.*, 2005)。不耕起栽培は、表土を覆う作物残渣が降雨時の土壌クラストの形成を抑制することで雨水の浸入低下を抑制する(Dao, 1993; Dick *et al.*, 1989; Sugahara *et al.*, 2001; Tebrügge and Düring, 1999)。また、毎年残される根成孔隙(Gish *et al.*, 1998)やミズなどの土壌動物が移動した跡(Edwards *et al.*, 1990; Tebrügge and Düring, 1999; Trojan and Linden, 1998)が下層へ速やかに水を浸透させるため、浸入速度を増加させる効果があると考えられている。さらに不耕起栽培は地表面の粗度が大きくなることで地表面流速を低下させる効果もあり、その結果、圃場内における土壌流亡対策として有効であるとされている。

他方、不耕起栽培農地では、化学肥料や除草剤の施用直後に降雨があると、散布した化学物質が根群域を超えてすばやく下層へ浸透し、地下水汚染となる可能性が指摘されている(Devitt and Smith, 2002; Dick *et al.*, 1989; Edwards *et al.*, 1990; Jones *et al.*, 1995; Tebrügge and Düring, 1999)。これは施用した化学肥料

の肥効の低下だけでなく、農業が周辺環境、特に地下水の水質に負荷を与えるという点で重要な問題である。地下水が重要な水資源である地域では、不耕起栽培が土壌保全に有効であっても、地下水の水質低下を生じるようであればその導入は難しい。本研究の対象地域である石垣島でも、地下水は生活用水の一部として使用されている。また、降水量が多く降雨強度が大きいため、施用した化学肥料が表面流去水と共に圃場外へ流出し、環境負荷となる可能性が大きい。

畑地の不耕起栽培に関する従来の研究の多くは、米国中西部やオーストラリアなど比較的乾燥した地域を対象としたものであり、熱帯、亜熱帯地域における不耕起栽培が農耕地土壌および周辺環境に及ぼす影響についてはよくわかっていない。

本研究は、亜熱帯地域における不耕起圃場と慣行耕起圃場の土壌の化学性、物理性の差異および無機態窒素の溶脱に関する実態調査を行う。そして、慣行耕起栽培から不耕起栽培への移行が畑作農業の環境負荷に与える影響について検討することを目的とする。

2. 方 法

2.1 調査地の概要

石垣島南部バナナ岳(標高231m)のふもとに位置するサトウキビ畑(北緯24°21.683', 東経124°09.330')を調査圃場とした。年平均気温24.5度、年平均降水量は2,000mmを超える。

対象圃場の土壌は琉球石灰岩を基盤とする台地(カルスト台地)上に分布する島尻マージであり、深さ60cm程度から部分的に基岩が出現する。土性はHC(粘土:54%, シルト:24%, 砂:22%)で、主要粘土鉱物はパーミキュライト-クローライト中間種鉱物、イライトおよびカオリン鉱物など(渡嘉敷, 1993)である。湿潤状態では粘着力が強いが、乾燥すると固結し、亀裂が発生したり耕起碎土が困難になる。

2.2 調査圃場の概要

圃場面積は4.1aである。この圃場に畝5列分の慣行耕起区(以下CT)、畝3列分の不耕起区(以下NT)を設けた。CTおよびNTの両試験区では、1987年から1997年までサトウキビの慣行耕起栽培を行い、1997年から2002年まで5年間は休耕し、雑草が繁茂する状況にあった。

CTでは、2002年8月に小型乗用トラクターで深さ25cmまでプラウによる耕起を行った際、刈り取った雑草を鋤き込んだ。同年9月に小型の乗用ロータリー耕うん機を用いて深さ20cm程度全面耕起を行った後、サトウキビを植え付けた。同12月に畝間部分においてロータ

リーで深さ 15 cm 程度耕うんを行い、培土をした。高培土（最終培土）はサトウキビの高さが 150 cm 程度に達した時に逆回転ロータリーで行った。

NT では、2002 年 8 月に不耕起栽培を開始する際、刈り取った雑草を土壌表面に残した。同年 9 月、ドリルによって土壌表面に垂直に穴を開け、サトウキビを植え付けた。NT では栽培期間中に高培土を行なわなかったため、台風による倒伏が生じた。

両圃場に施用した化学肥料は成分量 NPK=18-10-14 のサトウキビ用肥料である。元肥は与えず、2002 年 11 月 4 日に第 1 回目の追肥、2003 年 4 月 15 日に第 2 回目の追肥をそれぞれ窒素として 130 kg ha^{-1} 、 150 kg ha^{-1} となるように施用した。この肥料を CT では耕うん深 15 cm で畝間に鋤きこみ、NT では表面散布した。

2.3 土壌調査と分析方法

2002 年 12 月、CT-NT の境界において幅 100 cm×長さ 500 cm×深さ 70 cm の試験溝を掘削し、両耕区に面した側壁に土壌断面を設けた。ここで、15-25 cm、35-45 cm、45-55 cm の 3 層から土壌の物理性分析のための不かく乱試料を採取した。またこの 3 層に加えて 0-10 cm から化学性分析のための不かく乱試料を採取した。また、山中式硬度計を用いて深さ 0-60 cm まで 5 cm 毎に土壌硬度を測定した。

下層へ溶脱した無機態窒素などの化学物質を捕捉するため、既往の研究（生原ら、1990；Pampolino *et al.*, 2000；Qian and Schoenau, 2002；瀧, 1993；Wu *et al.*, 1996）を参考にイオン交換樹脂法を採用した。上下をナイロンメッシュで覆った内径 7.8 cm、高さ 2 cm の塩化ビニール円筒に、陽イオン（Rohm & Haas 社、アンバーライト IR120B）及び陰イオン交換樹脂（Rohm & Haas 社、アンバーライト IRA410）を混合して充填し、イオン交換樹脂カラムを作製した。CT、NT 土壌断面の深さ 20 cm、40 cm、50 cm において、試験溝の影響ができるだけ及ばないように奥行き約 15 cm の横穴を掘り、樹脂カラムの上面、下面が土壌面に密着するように穴を整形し、横穴の周りの土壌構造を乱さないように注意しながら樹脂カラムを奥に押し込んだ。埋設したカラムの反復数は各深さ 5 から 8 個である。土壌調査ならびに樹脂カラムの埋設後、試験溝は埋め戻した。樹脂カラムをサトウキビの移植後 3 ヶ月目の 2002 年 12 月から 2003 年 9 月まで約 10 ヶ月間埋設し、溶脱してきた化学物質を捕捉した。

2003 年 9 月、再び同じ地点に試験溝を掘削し、樹脂カラムの回収、土壌調査および NT と CT の根系分布調査を行った。根系分布調査では、NT、CT の各圃場を代表しているサトウキビを一株ずつ選定し、畝に直行する方

向で約 50 cm×50 cm の土壌断面を設けた。根の分布を目視が可能となるように、土壌断面をスコップで整形し、糸を張って 10 cm 四方の格子を作った。土壌断面を少しずつ掻き取りながら、各格子内に存在する根の本数を記録した。

回収した樹脂カラムからイオン交換樹脂を取り出し、以下の方法で、吸着したイオンの定量分析を行った（生原ら、1990；Wu *et al.*, 1996）。すなわち、樹脂湿重 4 g に 1 mol L^{-1} 塩化カリウム 100 mL を加え、一時間振とうした後ろ過し、その抽出液を 250 ml 容量フラスコに取った。この作業を再度行い、イオン交換水を加え 250 ml に定量して分析試料とした。

土壌の pH (H_2O) と電気伝導度 (EC) は土液比 1:5 で測定した。交換性陽イオンの抽出は 1 mol L^{-1} 酢酸アンモニウム溶液 (pH 7) 抽出後、原子吸光法で測定した。全炭素、全窒素含量は NC-ANALYZER（住友化学工業株式会社製 NC-80AUTO セミオート型、標準物質はアセトアニリドを用いた）により測定した。無機態窒素は水蒸気蒸留装置を用いてブレンナーの同時浸出定法で測定した。

土壌の粒径組成は、過酸化水素水で有機物を分解した後、ピペット法と篩別法によって測定した。また 100 cm^3 の金属円筒で採取した不かく乱土壌試料の飽和透水係数 (K_s) を変水位法で測定した。不かく乱土はその後 105 度で炉乾して乾燥重量を測定し、乾燥密度および間隙率を求めた。

2004 年 3 月に負圧浸入計を用いて現場で浸入試験を行い、Reynolds and Elrick (1991) の方法で現場透水係数を求めた。測定では、給水管とディスクが分離したタイプの負圧浸入計（Nishimura *et al.*, 2003）を使用し、地表面を均平した後、直径 20 cm のディスクを地表面に密着させて浸潤試験を行った。

負圧浸入計で測定を行った表層土の物理性に関するデータを測定するため、CT および NT の深さ 0-5 cm から 100 cm^3 金属円筒で不かく乱土壌試料を採取し、上述と同じ方法で乾燥密度、間隙率および飽和透水係数 (K_s) を求めた。

3. 結果と考察

3.1 耕起の有無と根系分布

図-1 は 2003 年 9 月に測定した NT および CT における根系分布である。CT では、垂直方向よりも水平方向に根系が発達し、土壌深さ 20 cm 以深では根の伸長が少なかった。一方、NT では水平方向よりも垂直方向へ根系が発達し、CT の分布と比較して土壌深さ 20-40 cm における根系の発達が顕著であった。NT では前作の根

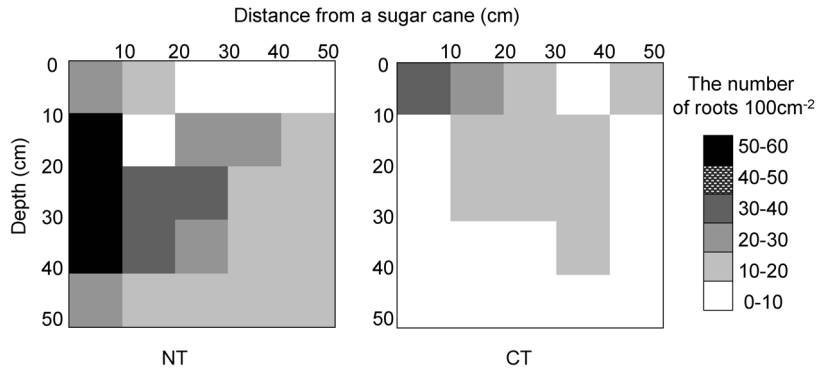


図-1 NT (左) および CT (右) の根系分布
縦軸に土壌深さ, 横軸に水平距離を示す。なおサトウキビは水平距離 0 cm 上に生育している。
凡例は 100 cm²あたりの根数を示している。

Fig. 1 Root distribution of sugar cane field under No-tillage (left) and Conventional tillage (right)

表-1 NT および CT の各土壌深さにおける主な土壌物理特性

Table 1 Physical properties of the sugar cane field soil under No-tillage and Conventional tillage

	土壌深さ (cm)	乾燥密度 (Mg m ⁻³)	間隙率 (%)	飽和透水係数 20°C (cm sec ⁻¹)
不耕起栽培 (NT)	0-5	1.40	47.6	2.6×10 ⁻³
	15-25	1.20*	55.6*	2.1×10 ^{-3*}
	35-45	1.29	53.0	8.1×10 ^{-4*}
	45-55	1.31	53.4	2.2×10 ⁻³
耕起栽培 (CT)	0-5	1.38	49.6	6.6×10 ⁻³
	15-25	1.36	51.3	3.4×10 ⁻⁴
	35-45	1.33	52.6	3.1×10 ⁻⁴
	45-55	1.28	54.6	4.2×10 ⁻³

*: NT, CT 各土壌の同じ深さの間において 1% 水準で有意差あり

が枯死した孔隙を利用して新しい根が伸張するため, 作物の根系分布が前作の根系分布の影響を受けることが報告されている (Rasse and Smucker, 1998)。NT において観察された根系の鉛直方向への拡大は, 鉛直方向に連続した根成孔隙が, 耕うんによって断ち切られることなく保存されていたためと考えられる。

3.2 不耕起が土壌の物理性に及ぼす影響

表-1 に NT および CT における土壌の主な物理性を示す。本調査では, 深さ 0-5 cm および 45-55 cm において NT の土壌が, CT に比べて若干乾燥密度が大きく, 間隙率が小さい傾向を示した。また, 深さ 15 cm-45 cm においては, CT に比べて NT の乾燥密度が小さくなる傾向があり, 特に深さ 15-25 cm の層において顕著であった。従来の研究の多くで, 深さ 10 cm までの表層土

壌では, CT よりも NT で乾燥密度が大きいことが報告されている (Chassot *et al.*, 2001; Dao, 1993; Eynard *et al.*, 2004; Meek *et al.*, 1990; Osunbitan *et al.*, 2005; 島田ら, 1999; Tebrügge and Düring, 1999)。しかし, 本研究では両者の間に有意な差がなかった。また, 表層における不かく乱試料採土時の観察でも CT と NT の土壌はいずれも同程度の緻密さ, 固さであった。耕うん後, 調査まで約 3 ヶ月間 CT はほとんど裸地状態であった。この間に, 重粘土質土壌である対象地土壌では, 耕うんによって膨軟化した表層近傍の土が, 高強度で降雨エネルギーの高い亜熱帯地域特有の降雨による分散や目詰まり, 乾湿の繰り返しによる膨潤・収縮等によって乾燥密度を増し (Mullins *et al.*, 1990), NT と同程度の乾燥密度になったものと考えられる。土壌深さ 0-10 cm の Ks

でも両者に有意な差は見られなかった。しかし、NTの25-45 cmのKsはCTよりも有意に大きく、特に15-25 cmでは1オーダー大きかった。これは、この層におけるNTの間隙率がCTよりも有意に大きいことに対応している。

図-2に山中式硬度計によって測定したNTおよびCTの土壌硬度分布を示した。土壌硬度はプローブの種類や挿入方式によって結果が異なるが、本研究と同様の硬度計を用いた既往の研究の多くにおいて、表層の土壌硬度はCTよりもNTで大きいと報告されている (Osunbitan *et al.*, 2005; 島田ら, 1999; Tebrügge and Düring, 1999)。しかし、より深い土層ではやはり乾燥密度と同様に研究報告毎に異なった傾向が報告されている。本研究では、CTとNTの深さ0-15 cmの土壌硬度に顕著な違いは見られなかったが、深さ20 cmにおいてNTが有意に小さな土壌硬度を示した。これは、NTの深さ20 cm付近における乾燥密度の低下と対応している。NTではCTと比べて深さ20 cmにおけるサトウキビの根密度が高かった (図-1)。また土壌断面の観察から、CTよりもNTにおいて土壌動物を多く観察した。これらのことから、NTでは、休耕期間に生成した根成孔隙やバイオポアが維持されたため、深さ20 cm付近の乾燥密度および土壌硬度が小さいと考えられる。

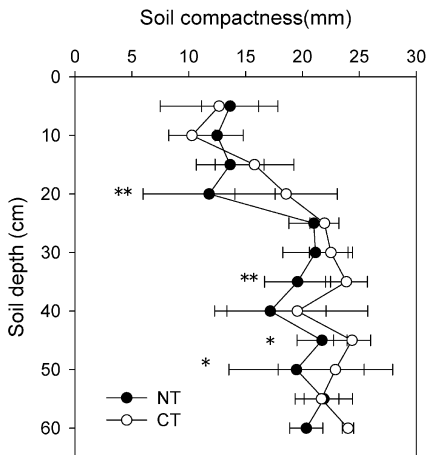


図-2 NTおよびCTの土壌硬度
* : NT, CT各土壌の同じ深さの間において5%水準で有意差あり, ** : 1%水準で有意差あり, 図中の横線 : 標準偏差

Fig. 2 Distribution of soil hardness by Yamanaoka penetrometer at the sugar cane field under No-tillage and Conventional tillage

図-3に2004年3月に負圧浸入計を用いて測定したNTおよびCTの地表面の現場透水係数とマトリックポテンシャルの関係を示す。マトリックポテンシャルが0 kPa (飽和) から-0.3 kPaにかけて、NTの表層土はCTよりも透水係数が大きかった。しかし、-0.3 kPa以下のマトリックポテンシャルにおいては、NTとCTは同程度の不飽和透水係数を示した。これは、マトリックポテンシャルが飽和から-0.3 kPa程度の負圧状態で浸透に寄与するような粗大な間隙や亀裂がNT表層土に多く存在していることを示している。また、両圃場の土が同じ土性であり、0-5 cmの土層の乾燥密度もほとんど変わらないことを反映して、マトリックポテンシャル-0.3 kPa以下における不飽和透水係数の一致は、粗大間隙以外の間隙構造が類似していることを示唆している。石垣島のように降雨強度が大きい地域では、降雨中に地表に湛水が発生することが多く、その際に表層土壌はほぼ水分飽和に達する。このとき、NTに存在するような粗大な間隙や亀裂は水の浸入を促進し、地表面流出水の発生を抑制すると考えられる。

3.3 不耕起化と土壌の化学性

表-2に、NTおよびCTにおける土壌の主な化学性を示す。CTおよびNTの深さ15-55 cmではpHがおおよそ7から8であるのに対し、NT表層の深さ0-10 cmの土壌のpHは6.30と低下していた。これは、植物残渣の分解過程で放出される有機酸により土壌表層が酸性化したものと考えられる (Naidu *et al.*, 1996)。また、NT表層

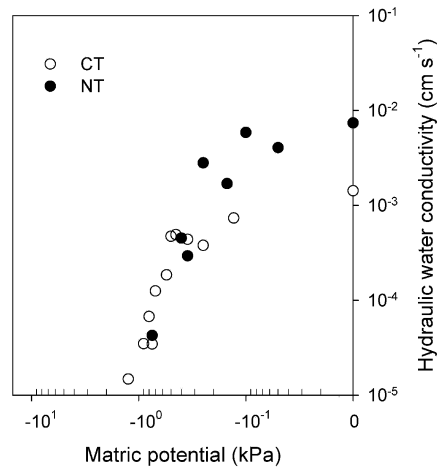


図-3 NTおよびCTの表層土の現場透水係数
Fig. 3 Hydraulic conductivity of the surface soil at sugar cane field under No-tillage and Conventional tillage

表-2 NT および CT の各土壌深さにおける主な土壌化学特性

Table 2 Chemical properties of the sugar cane field soil under No-tillage and Conventional tillage

	土壌深さ (cm)	pH (H ₂ O)	EC (mS cm ⁻¹)	全窒素 (%)	全炭素 (%)	交換性陽イオン (cmol (+) kg ⁻¹)		
						Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺
不耕起栽培 (NT)	0-10	6.30**	0.20**	0.23	1.95**	31.17	5.24*	2.28**
	15-25	7.23*	0.11	0.17*	1.33**	30.22	7.23*	1.10
	35-45	7.68	0.12	0.09	0.56**	36.37**	1.81	0.53
	45-55	7.86**	0.15**	0.09**	0.51**	34.43	3.53	0.57
耕起栽培 (CT)	0-10	7.15	0.09	0.23	1.42	30.14	4.53	1.50
	15-25	7.38	0.09	0.12	0.64	29.74	4.18	0.93
	35-45	7.70	0.10	0.12	0.50	30.50	3.66	0.63
	45-55	7.59	0.08	0.12	0.46	32.51	3.32	0.62

*: NT, CT 各土壌の同じ深さの間において5%水準で有意差あり, **: 1%水準で有意差あり

では EC 値が高いことから、サトウキビ用肥料の表面散布による酸性化も原因と考えられる。

深さ 0-55 cm において CT よりも NT で全炭素含量が有意に高く、特に深さ 0-25 cm では CT の約 1.4-2.1 倍であった。これは、NT において刈り取った雑草で表層を被覆したことにより、表層近傍への有機物投入量が多くなったためと考えられる (Lal, 1976; Tebrügge and Düring, 1999)。また、同時に NT では表層を覆うことにより土壌温度の上昇が抑えられ CT に比べて有機物の分解が抑制されたことも全炭素含量が異なった理由として考えられる。しかしながら、35 cm 以深の 2 土層の C/N 比は、表層土や有機物あるいは微生物バイオマスの値に比べてかなり低く、表層の有機物投入の影響が及んでいる範囲は、深さ 0-25 cm 程度であったと推察できる。

CT, NT 両圃場における交換性カリウム濃度は、一般的な島尻マージの診断基準値 (足立・興古田, 1981; 沖縄農業試験場, 2003) を上回っていた。これは、施肥によるイオンの蓄積によるものと考えられる (沖縄農業試験場, 2003)。また、深さ 0-10 cm において NT の交換性カリウム濃度が CT よりも有意に高かった結果は、NT では肥料を表層散布するのに対して、CT では土壌深さ 15 cm まで鋤き込むという、施肥法の違いが原因と考えられる。交換性マグネシウム濃度は、CT の深さ 0-25 cm において NT よりも低かった。これは、休耕期間に土壌最表層に蓄積していた交換性マグネシウムが、耕うんにより作土層全体に均一に分布し、その後下層へ溶脱したため (DeMaria *et al.*, 1999) で、CT における土壌深さ 35-45 cm の交換性マグネシウム濃度が NT の約 2 倍となっていることにも対応している。交換性カルシウム濃

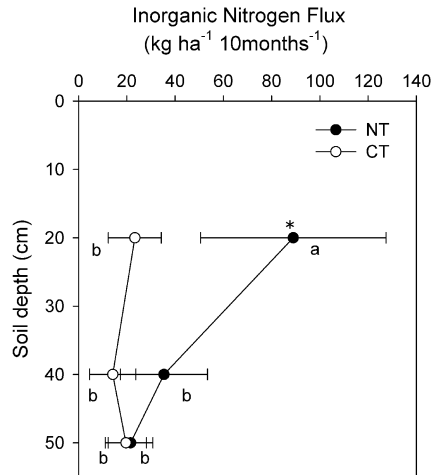


図-4 NT および CT の無機態窒素の下層への溶脱フラックス

*: NT, CT 各土壌の同じ深さの間において1%水準で有意差あり, a, b: NT, CT 各土壌の深さ間において1%水準で有意差あり, 図中の横線: 標準偏差

Fig. 4 Downward inorganic nitrogen flux of the sugar cane field under No-tillage and Conventional tillage

度は、本調査地の基岩である石灰岩の影響で他の交換性塩基と比べて濃度が非常に高く、全交換性塩基濃度の80%を占め、深さ 35-45 cm を除いて CT-NT 間で特に差が見られなかった。

3.4 耕起方法と養分フラックスの関係

図-4 に、NT および CT におけるイオン交換樹脂法に

よって測定した無機態窒素の下層への溶脱フラックスを示す。NTにおける深さ0-20 cmの溶脱フラックスはCTの約4倍であった。しかし、深さ20-40 cmにかけて溶脱フラックスは減少し、深さ40 cm以深においてはNTとCTは同程度であった。

ここで、施肥窒素量(追肥2回分)に対する窒素溶脱量(樹脂カラムによる捕捉量)の割合を溶脱率として求めた。なお、第1回目の追肥から樹脂カラムを埋設するまでの約1ヶ月間の積算降水量は、平年値の約40%の62.5 mmと少なく、日降水量の最大量は16 mmと集中的な降雨は記録されなかった。ソーンズウェイト法(長野ら, 1986)を用いて推定した可能蒸発散量が128 mm month⁻¹であったことから、この期間に、深さ55 cmを越える深層へ浸潤するようなことはないと思われた。そこで、樹脂カラム埋設時(2002年12月)には、第1回目の追肥で施用した窒素のすべてが土壌中に残留していたと仮定して計算を行った。

畑に施用した肥料の窒素成分のうち作物に吸収されなかった分は土壌に残留したり硝酸性窒素として地下に浸透したりする。小川(2000)によると、黒ボク土畑地における見かけの窒素利用率は窒素施用量に対して約48.7-75.0%であり、このとき残留分、脱窒分を考慮すると、溶脱率は窒素施用量の22.3-25.0%であった。しかし、多施肥の場合、土壌中に残留する窒素量が多く、将来的には50%以上の溶脱率が予想されるとしている(小川, 2000)。一方、亜熱帯島嶼地域の国頭マージ土壌におけるサトウキビ栽培では、慣行施肥の窒素利用率が22.0-58.0%という報告がある(増田ら, 2002)。国頭マージ畑地では、黒ボク土畑地よりも作物による窒素利用率が低く、多くの窒素が残留、脱窒または溶脱していると思われる。残留率を0%、脱窒率を10-15%(小川, 2000; 西尾, 1994; 和田・上原, 1977)と想定すれば、多い場合で窒素施用量の68.0%が溶脱する可能性がある。本研究では、CTの窒素溶脱率は、深さ20 cm, 40 cm, 50 cmにおいて各々、8.8±3.9%, 5.1±3.4%, 7.0±3.1%(いずれも後の数字は標準偏差)であり、各層で黒ボク土の溶脱率22.3-25.0%よりも低かった。耕うん深15 cmでCTに鋤きこんだ化学肥料は表面流去水とともに圃場外に流出する可能性は低く、主としてサトウキビによる吸収と大気中への揮散による損失が考えられる。一方、NTにおける窒素の溶脱率は、各深さにおいて31.8±13.7%, 12.6±6.5%, 7.7±3.3%であった。樹脂カラムを埋設していた期間は、移植後3ヶ月目から10ヶ月間とサトウキビがよく生長し、根からの吸水が著しい時期であった。NTの無機態窒素の溶脱フラックスが土壌深さ20-40 cmにかけて減少した原因として、マクロポアが水や溶質の移

動を助長する効果よりも、不耕起により、深くまで根が発達し、その結果、多くの養分イオンを吸収することで、窒素分の下層への溶脱を抑制する効果が卓越したことが挙げられる。逆に根群が未発達で養分吸収量が少ない期間、すなわちサトウキビの移植後数週間、根による吸収は期待できないため、NTの深さ50 cmまでの溶脱率は最大で31.8%となることが予想される。これはCTより約4倍大きい。一般に、サトウキビの根域下(深さ60 cm以深)まで移動した窒素分はサトウキビの根だけでなく土壌生物に利用される機会も減少すると考えられている(Dick, 1984)。さらに、本研究の調査対象圃場は、土層が薄く、透水性の良い基岩が、深さ60 cm程度から部分的に出現する。基岩まで到達した浸透水は容易に地下水へ浸入するため、慣行耕起栽培から不耕起栽培に移行した場合、根群があまり発達していない期間には、マクロポアを通じた養分イオンの溶脱による地下水の水質汚濁の危険性が高い。

4. ま と め

不耕起栽培圃場(NT)と慣行農法である耕起栽培圃場(CT)のサトウキビ畑の深さ0-30 cmの土層において土壌の化学性および物理性に違いが生じていた。NTではCTよりも一様に全炭素量が高かった。負圧浸入計で測定した現場透水係数は、飽和近傍ではNTがCTよりも大きかったが、給水圧が低下するにつれて両者の差は無くなった。これは、NTでは飽和に近い状態で水みちとなる粗大間隙や亀裂を多く含んでいることを意味する。根系分布について、NTでは根が鉛直方向に広く分布していたが、CTでは水平方向に浅く広がっており、下層へ伸長する根はわずかであった。

CTでは深さ55 cmまでの土層全体が無機態窒素の溶脱量はほぼ一定であった。一方、NT深さ20 cmまでの溶脱量はCTの約4倍であったが、深さ40 cmまでにはその半以下に減少し、深さ50 cmではCTの溶脱量と変わらない値になった。これは、深くまで発達した根群によって窒素が吸収されたためと考えられる。しかし、CTと比較してNTでは飽和近傍の現場透水係数が大きく、降雨時には下方への浸透流が生じやすい。そのため、移植直後の根群が未発達な時期には、吸収されずに溶脱する窒素量も多くなる。下層へ溶脱したこれらの窒素分は、生物的分解を受ける機会も少なくなるため、地下水汚染を生じる可能性が高い。

本研究の結果から、ある程度根群が発達すれば、NTにおいても窒素の溶脱が生じないと考えられる。これに着目すると、営農面では栽培ステージを考慮して施肥をするような工夫が窒素溶脱を減らすためには効果的であ

ると期待できる。

謝 辞

本研究の一部はトヨタ財団の補助 (H14-16, 代表者 干川 明) ならびに科学研究費補助金 (基盤研究 (B) 13556036 代表者 西村 拓) を受けて行われた。また, 東京農工大 FS センター, JIRCAS 沖縄支所には設備, 装置の使用について便宜をはかって頂きました。ここに記して感謝いたします。

引用文献

- 足立嗣雄・興古田幹也 (1981) : 沖縄県に分布する特殊土壌の生産的特性. 九州農業試験場研究資料, **60** : 1-35.
- Chassot, A., Stamp, P. and Richner, W. (2001) : Root distribution and morphology of maize seedlings as affected by tillage and fertilizer placement. *Plant and Soil*, **231** : 123-135.
- Dao, T.H. (1993) : Tillage and Winter wheat residue management effects on water infiltration and storage. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **57** : 1586-1595.
- DeMaria, I.C., Nnabude, P.C. and Castro, O.M. (1999) : Long-term tillage and crop rotation effects on soil chemical properties of a Rhodic Ferralsol in southern Brazil. *Soil & Tillage Research*, **51** : 71-79.
- Devitt, D.A. and Smith, S.D. (2002) : Root channel macropores enhance downward movement of water in a Mojave Desert ecosystem. *Journal of Arid Environments*, **50** : 99-108.
- Dick, W.A. (1984) : Influence of long-term tillage and crop rotation combinations on soil enzyme activities. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **48** : 569-574.
- Dick, W.A., Roseberg, R.J., McCoy, E.L., Edwards, W. M. and Haghiri, F. (1989) : Surface hydrologic response of soils to no-tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **53** : 1520-1526.
- Edwards, W.M., Shipitalo, M.J., Owens, L.B. and Norton, L.D. (1990) : Effect of *Lumbricus Terrestris* L. Burrows on hydrology of continuous no-till corn fields. *Geoderma*, **46** : 73-84.
- Eynard, A., Schumacher, T.E., Lindstrom, M.J. and Malo, D.D. (2004) : Porosity and pore-size distribution in cultivated ustolls and usterts. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **68** : 1927-1934.
- Gish, T.J., Gimenez, D. and Rawls, W.J. (1998) : Impact of roots on ground water quality. *Plant and Soil*, **200** : 47-54.
- 生原喜久雄・相場芳憲・川島 裕 (1990) : イオン交換樹脂による森林土壌浸透水の移動イオン量の測定. *日本生態学会誌*, **40** : 19-25.
- Jones, O.R., Smith, S.J., Southwick, L.M. and Sharpley, A.N. (1995) : Environmental impacts of dry-land residue management systems in the southern high plains. *Journal of Environ. Qual.*, **24** : 453-460.
- Lal, R. (1976) : No-tillage effects on soil properties under different crops in western Nigeria. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **40** : 762-768.
- 増田泰三・勝田義満・新崎正雄・菅原和夫 (2002) サトウキビ側枝苗の春植移植栽培での肥効調節型肥料による窒素節減と利用率. *日本土壌肥料学会講演要旨集*, **48** : 123.
- Meek, B.D., DeTar, W.R., Rolph, D., Rechel, E.R. and Carter, L.M. (1990) : Infiltration rate as affected by an Alfalfa and No-till cotton cropping system. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **54** : 505-508.
- Mullins, C.E., MacLeod, D.A., Northcote, K.H., Tindall, J.M. and Young, I.M. (1990) *Hardsetting Soils: Behavior, Occurrence, and Management*. *Adv. in Soil Sci.*, **11** : 37-108.
- Naidu, R., McClure, S., McKenzie, N.J. and Eitzpatrick, R.W. (1996) : Soil solution composition and aggregate stability changes caused by long-term farming at four contrasting sites in South Australia. *Aust. J. Soil Res.*, **34** : 511-527.
- 長野俊英 他共著 (1986) : 農業気象・環境学. pp. 52-54, 朝倉書店, 東京.
- Nishimura, T., Irshad, U., Kato, M. and Inoue, M. (2003) : Measurement of near saturated hydraulic conductivity in situ. *Proceedings of 2nd Asian Conference on Unsaturated soils*, 375-378.
- 西尾 隆 (1994) : 耕地土壌の脱窒過程. *日本土壌肥料学会誌*, **65** : 463-471.
- 小川吉雄 (2000) : 地下水の硝酸汚染と農法転換 流出機構の解析と窒素循環の再生. pp. 66-116, 農文協, 東京.
- 沖縄県農業試験場化学部土壌保全研究室 (2003) : 沖縄県八重山・南部離島地域の耕地土壌の理化学性. 九州沖縄農業研究センター研究成果情報, 19 生産環境 14.
- Osunbitan, J.A., Oyedele, D.J. and Adekalu, K.O.

- (2005) Tillage effects on bulk density, hydraulic conductivity and strength of a loamy sand soil in southwestern Nigeria. *Soil & Tillage Research*, **82** : 57-64.
- Pampolino, M.F., Urushiyama, T. and Hatano, R. (2000) : Detection of nitrate leaching through bypass flow using pan lysimeter, suction cup, and resin capsule. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **46** (3) : 703-711.
- Qian, P. and Schoenau, J.J. (2002) : Practical applications of ion exchange resins in agricultural and environmental soil research. *Can. J. Soil Sci.*, **82** : 9-21.
- Rasse, D.P. and Smucker, J.M. (1998) : Root recolonization of precious root channels in corn and alfalfa rotations. *Plant and Soil*, **204** : 203-212.
- Reynolds, W.D. and Elrick, D.E. (1991) : Determination of hydraulic Conductivity using a tension infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **55** : 633-639.
- 島田輝男・Romero, A.・早坂 猛・Paredes, C. (1999) : テラローシャ土壤における不耕起栽培が作物の根系分布と土壤の理化学性に及ぼす変化. 土壤の物理性, **82** : 55-65.
- Sugahara, K., Ohwaki, Y. and Banzai, K. (2001) : Erosion control in pineapple fields on the Island of Ishigaki. *JARQ*, **35** (2) : 91-96.
- 瀧 勝俊 (1993) : 農耕地土壌からの肥料成分溶脱に関する研究 (第1報) イオン交換樹脂を用いた肥料成分移行量測定法の検討. 愛知県農業総合試験場研究報告, **25** : 193-198.
- Tebrügge, F. and Düring, R.A. (1999) : Reducing tillage intensity- a review of results from a long term study in Germany. *Soil & Tillage Research*, **53** : 15-28.
- Thierfelder, C., Amezcuita E.C. and Stahr. K. (2005) : Effects of intensifying organic manuring and tillage practices on penetration resistance and infiltration rate. *Soil & Tillage Research*, **82** : 211-226.
- 渡嘉敷義浩 (1993) : 沖縄に分布する島尻マージおよびジャーガルの土壤特性. ペドロジスト, **37** (2) : 99-112.
- Trojan, M.D. and Linden, D.R. (1998) : Macroporosity and hydraulic properties of earthworm-affected soils as influenced by tillage and residue management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **62** : 1687-1692.
- 和田英太郎・上原洋一 (1977) : 自然界における脱窒過程. 化学と生物, **15** (2) : 98-110.
- Wu, G., Haibara, K., Koike, T. and Aiba, Y. (1996) : Dynamics of water-soluble base cations in a forest soil measured by an in situ combined IER method. *Jpn. J. For. Environment*, **38** (2) : 92-97.

要 旨

畑地の不耕起化が土壤の物理性，化学性，根系分布，土壤養分の溶脱フラックスに与える影響について調べた。CTのサトウキビ根は浅く水平方向へ拡大し，NTでは鉛直方向へ拡大していた。NTで根系の発達が見られた土壤深さ15-25cmではCTと比較して乾燥密度が小さく，間隙率が大きかった。また，NTにおける無機態窒素の溶脱量は表層から深さ20cmまではCTより約4倍多かったが，根群より下では同程度となった。これは，休耕していた5年間に生成した根成孔隙やバイオポアが不耕起により維持され，根系が発達し，多くの養分イオンが吸収されたためと考えられる。根成孔隙や土壤動物の移動跡のようなマクロポアが水の浸透へ大きく寄与するため，NTではサクションが0から-0.3kPaまでの飽和近傍の現場透水係数がCTよりも大きかった。したがって，根が十分発達していない時期に飽和に近い浸透流が発生すると，地表に散布された化学肥料等が浸透水とともに速やかに下層へ移動し，地下水汚染となる可能性があると考えられる。

受稿年月日：2006年1月4日
受理年月日：2006年9月1日