総 説

不耕起栽培の研究状況 (Ⅱ)

— 土壌の変化と作業性 —

坂井 直樹 *

A Review on No-Tillage Farming (Ⅱ)

— Changes in soil properties and characteristics of farm work —

Naoki SAKAI

1 はじめに

本稿は、不耕起栽培に関する既往の研究成果の一端をまとめたものである。プラウ耕による慣行の栽培法と対比させながら、前稿⁵⁵⁾では不耕起栽培の概況や作物の収量傾向について述べた。本稿はその続編として、かさ密度・硬度・水分・地温などの土壌の物理性、浸潤や水の利用効率などの土壌と水の問題、ミミズや線虫などの土壌と生物の問題、出芽や根系などの土壌と作物の問題、さらには投入エネルギー・作業時間・経済性などの問題を選び、不耕起栽培システムがもつ種々の特徴と問題点を整理してみた。

なお、本稿で取り上げた項目の多くは相互に関連するものであるが、便宜的に以下のように分けて扱った。前稿と同様に不耕起栽培は記号NT、ミニマムティレージはMT、プラウ耕はCTでそれぞれ表した。

2 不耕起栽培の土壌の特徴

1) かさ密度と土壌硬度

かさ密度：容積重とも称され、これには湿潤密度と乾燥密度がある。かさ密度は作物の地上部や根の生育に関係するといわれる²⁶⁾。CTとNTにおけるそれぞれのかさ密度の傾向から、ここでは既往の文献をつぎの2つのグループに大別した。

① CTとNT間に差がある…深さ0～10cmある

いは0～20cmでは、NTのかさ密度はCTに比べて高い。このような傾向は、土性を国際法分類で表したHC^{16), 51)}、SiL・CLなど⁴⁰⁾、SiL^{19), 20)}、SCL⁸⁾、SL⁵⁶⁾などの土壌（以下では、HC土壌のように土性で表した）で認められている。しかしこれより下層では、CTとNT間に差が認められないことが多い^{16), 19), 39), 40), 56)}。Opara-nadiら⁴⁷⁾によると、プラウ耕は単にCTのTop soil（表土）のかさ密度を減少させるだけで、CT・NTともむしろマルチの影響の方が大きいといわれる。

② CTとNT間に差がない…深さ0～10cmあるいは0～20cmでは、CTとNT間に差が認められない。このような傾向は、LiC²³⁾やSiL^{10), 11), 21)}の土壌で認められている。著者らがL土壌で測定したかさ密度⁵³⁾も、CTとNT間に差が認められないという、②のグループに該当する値であった。Mielkeら³⁹⁾は、供試の土壌のうちSiLでは耕うん方式の影響を受けなかったが、LではCTのかさ密度の方がNTよりも高かったというように、土壌によっても異なる結果を示している。Gerikら²⁷⁾によると、トラクタ車輪の踏圧の程度によっても結果は異なるようである。すなわち、踏圧がかからない部分ではCTとNT間にかさ密度の差が認められないが、踏圧のかかる走行部ではNTの方がより高い値になった（深さ0～6cm）。

土壌硬度：通常、土壌硬度はコーンペネトロメータによる貫入抵抗値として測定されることが多

昭和63年10月6日受理

* 東京大学農学部附属農場 東京都田無市緑町1-1-1 〒188

Experimental Farm, The University of Tokyo, Tanashi, Tokyo 188

いが、この値は水分やかさ密度と関係が深い。これについては、深さ0～10 cmあるいは0～20 cmにおけるNTの硬度はCTよりも高く、MTは両者の中間値になるという報告がある（土壌はSiL¹⁹⁾, 20), 26), LS¹³⁾, SL⁶⁵⁾, SiCL³²⁾）。しかしこの差はどこまでも保存されるわけではなく、深さ15～30 cmになると両者に差が認められなくなる場合がある^{13), 65)}。またCTではプラウにより形成される耕盤のために、該当する深さで硬度が高くなることがある¹⁹⁾。

既往の文献の多くが、Top soilではNTの硬度の方が高いという結果を示している。著者らが測定したL土壌の結果（深さ0～5 cmは測定対象から除いた）も、これと同様の結果⁵³⁾であった。さらに、SiL土壌の深さ15 cm以下ではCTの硬度がNTよりも高くなるという報告²⁶⁾がある一方で、LやSiL土壌の深さ0～30 cmではCTとNT間に硬度の差が認められないという報告³⁹⁾もある。

Whiteleyら⁶⁵⁾やEhlersら¹⁹⁾は、NTとCTの硬度が水分の増加にともない低下する傾向を認めている。Dickeyら¹⁷⁾は、深さ5～10 cmにおける硬度とトウモロコシ収量との間に負の相関を認めている。一方で、種子が適所に播種されていれば、NT土壌のかさ密度と硬度の増加はともにコムギ収量に影響しないという報告³²⁾がある。また、耕うん方式間の硬度の差がトウモロコシやダイズ収量に影響しなかったという報告の中で、Chaplinら¹³⁾は、とくに乾燥地では仮に耕うんにより一時的に低い硬度が得られたとしても、その効果は収穫時までには消滅してしまうと述べている。

2) 土壌水分、浸潤、水の利用率

土壌水分：土壌水分は、質量基準や体積基準、また湿量基準や乾量基準などで表される。深さ0～10 cmあるいは0～20 cmのTop soilでは、NTの水分が最高で、CTが最低、MTは両者の中間値になるという報告がある（土壌はSiL^{20), 33)}, L³⁹⁾, SiL・SiCLなど⁴⁰⁾, SCL^{8), 42)}, SL⁴⁵⁾, L・SCLなど⁴⁸⁾）。しかし、この差はどこまでも保存されるわけではなく、これ以下の層になると両者に差が認められなくなることがある^{39), 40)}。またSiL土壌のいずれの深さにおいてもNTとCT間に水分の差が認められないという報告²¹⁾があ

る。

Kladivkoら³⁵⁾によると、NTの方が浸潤速度の増加と蒸発量の減少で高水分になりやすい。これは夏の最中では有利になるが、春さきや排水不良地では播種や初期生育の遅れの原因になることがある。Gebhardtら²⁶⁾によると、5月播種のダイズでは①蒸発量が少ない、②水分の拡散抵抗が大きい、③地温が低いなどの理由で、NTはCTに比べて高水分となった。しかし6月播種では、どの深さにおいてもCTとNT間に水分の差が認められなかったという。Webberら⁶⁴⁾によると土壌水分が良好な条件ではCTダイズの方が大きな生長のポテンシャルを有しているが、降雨量が不十分な乾燥条件ではNTダイズの方が水分ストレスに対して強い耐性を有し、結果的に増収につながることが多いという。同様な現象はDerpschら¹⁶⁾も指摘しており、乾燥年においては有効水分（Available water, 24時間容水量と成長阻害水分点の差）はNTが最高で、CTが最低であったという。

浸潤速度（Infiltration rate）：通常NTの浸潤速度は大きく、CTの150～300%になるといわれる（土壌はHC¹⁶⁾, SL³⁸⁾, L・SiLなど³⁹⁾, L・SCLなど⁴⁸⁾）。しかし一部の処理を除いて、HC土壌のCTとNT間に差が認められないという報告⁵¹⁾がある。耕うん方式と残留物の施用の有無を組み合わせた処理の中で、残留物無施用のNTの浸潤速度は最低であったことから、NTの浸潤速度が大きい理由は残留物の影響によるものと考えられている³⁸⁾。NTでは、深さ2～3 cmで増加した有機物含量の影響で、土壌が比較的団粒化しやすい¹²⁾。とくに、シルト質や粘土質におけるNTはプラウ耕に比べて土壌が硬くなる傾向があるが、浸潤は急速に改善されてくる。これは、ミミズや根により形成される孔隙の働きによるといわれる^{12), 59)}。

水の利用率と水収支：水の利用率（Water use efficiency）は、雨水や灌漑水が作物の生育期間中に単位量の土壌にどの程度保持されるかを表す指標の一つであり、水収支と関係が深い。水収支（Water balance）は、雨水や地下水、地表水や蒸発量における流出入の差を求めるものである。Freebairnら²⁵⁾は、HCやLiCなどの土壌でコムギとソルガム栽培における雨水の収支を

求めている。CTとNT間に蒸発量の差は認められないが、NTでは流出(Run off)が減少し、その分土壤中に保持される水分が増加したという。またAllenら^{3), 5)}はCL土壌のソルガム栽培において、水の利用効率を求めているが、NTの利用効率はCTに比べて約10~14%高い値であった。さらに、Allenらの別の報告⁴⁾もNTの灌漑水の利用効率がやはりCTに比べて高いという結果を示している。Ungerら⁶³⁾は、ソルガム栽培における雨水の保持水分についてはNTが最高で、CTが最低、MTがその中間値であり、また水の利用効率も同じ順序で、NTはCTに比べて25%高いという結果を示している。

一方、異なる結果も報告されている。不耕起栽培を直接の対象とした実験ではないが、Bennieら⁹⁾によると、40cmより深く耕うんすることは土壌の圧密をやわらげ、灌漑水の利用効率を高める働きがあるという。

3) 残留物と表面被覆率

前作物などの残留物(Residue)で圃場表面を被覆すること(Mulching)は、不耕起栽培を種々の面で特徴づける基本になっている。通常、圃場への残留物の施用量は単位面積当たりの質量(kg/ha)で表されることが多いが、同時に圃場表面の2次元的な被覆率(%)を推定することも行われる。写真撮影による推定法などを採用している報告^{2), 15), 21), 23), 33)}によると、表面被覆率はNTが最高で、CTが最低、MTが中間値であった^{21), 22), 23), 35)}。Kenimerら³⁴⁾は、除草剤の種類・残留物の施用量・耕うん方式などを組み合わせた実験を行っており、NTが土壌や除草剤成分のロスを減少させる効果が高いことを示している。

しかし残留物が表面にある状態での作業、とくに播種にとって多量の残留物の存在は作業の防害になりやすい。そのために残留物の焼却が行われることがあるが、焼却には栽培上の利点がほとんどないといわれる⁴²⁾。

4) 地温

深さ0~5cmにおいて、昼間の最高到達温度はCTが最高で、NTが最低、MTが中間値という報告^{3), 16), 23), 32), 35), 42)}がある。CTはNTに比べて3~10℃高温であった。逆に、夜間ではCTの方が1℃程度低温となる報告もある⁵⁷⁾。CTと

NT間の地温の違いは主に残留物の施用の有無によると考えられるが、さらに耕うん方式による土壌の熱伝導率の違いも関係するといわれる²³⁾。NTは作物の生育にとって地温の好条件を作り出すことが少なくないが、いつもそうなるとは限らない。例えばImholteら³¹⁾は、CTに比べて1~4℃低温となるNTでは(深さ5cmにおける値)、早まきトウモロコシの出芽率が減少し、出芽や生育が遅れぎみとなるので、米国北部に不耕起早まきを導入する場合には、出芽率の減少に打ち勝つだけの播種量が必要になると述べている。

5) 団粒構造

団粒分布の状態を表す指標の一つとして、MWD(Mean weight diameter, 平均重量直径)が用いられる。Hughes³⁰⁾によると、MWDからみたNT土壌の構造安定性は、プラウ耕やロータリ耕の土壌に比べて優れていたという(土壌はSiL)。水中篩分法により求めた耐水性団粒(Water-stable aggregate)は、クラスト(Crust, 土膜)の形成や土壌侵蝕を減少させ、空気や水の土中への浸入を増加させるので、出芽条件の良否を判断する指標の一つになる。Kladivkoら³⁵⁾によると、SLやSiCLなどの土壌でMWDからみたNTの耐水性団粒はCTの2倍であったという。一方Erbachら²³⁾は、MWDは耕うん方式とは無関係に層が深くなると増加すると述べている。

6) 孔隙と生物

Derpschら¹⁶⁾は、土壌中の孔隙を孔径によって大孔(Coarse pore, 孔径は50μm以上)、中孔(Meso pore, 50~0.2μm)、微細孔(Micro pore, 0.2μm以下)に分けて測定している。CTはNTに比べて深さ3~20cmにおける微細孔の割合が高く、中孔の割合がやや低いという結果であった。また孔隙率(体積%)としては、NTの方が数%低い値であった。残留物を表面にもつNTはCTに比べて深さ0~40cmでの孔隙率が高いという結果³⁸⁾とともに、深さ0~20cmでの孔隙率はNTの方がCTに比べて低いという報告⁵¹⁾がある。Mielkeら⁴⁰⁾によると、通常のCT土壌は孔隙率が高く、通気性も高い。一方でこれらの違いは深さ0~10cmの層に限られるもので、測定値のバラツキが大きいことも関係して、耕うん方式間に通気性の差が認められないという報告³⁹⁾がある。

Gossら²⁸⁾は、プラウなどによる耕うんは Top soil では大孔を形成するが、NTやMTに比べてそれより下層ではCTが連続孔を減少させるという問題点を指摘している。NTを直接の対象としたものでなく、耕深の効果に関する実験ではあるが、深さ15 cmと30 cmの耕うんは5 cmの耕うんに比べて、雨水の保水力に優れていた。しかし、この孔隙率の増加に由来する効果も、栽培期間の終わりには消滅していたという¹⁾。同様な傾向¹³⁾は、硬度の項でも述べたが、耕うんの効果の持続については現在のところ不明の点が少なくない。

生物：NTでは土壌の攪拌が少ないことから、生物相がCTとは異なるようである。例えば、節足動物などの有益な活動は耕うんの増加にともなって逆に減少するといわれる⁶⁰⁾。Derpschら¹⁶⁾は、NTのミミズや節足動物などの生息数がCTに比べて2～9倍多く、土壌中から発生する炭酸ガス量もNTの方が2倍程度多いと述べている。ミミズや節足動物などの生息に関する同様な傾向は、O'Sullivan⁴⁸⁾、Pattersonら⁴⁹⁾、Stinnerら⁶⁰⁾によっても報告されている。一方Mielkeら⁴⁰⁾によると、土壌中の生物活動は根と微生物という2つの側面からみることができる。これら生物の活動領域としては深さ0～30 cmが重要であるが、仮に同じ量の雨水や灌漑水が与えられたとしても、CTとNTでは酸素の多少という点で異質な生息環境を作るようである。

ところでTylerら⁶²⁾によると、ダイズの害虫であるSCN(Soybean syst nemadode)は、CTの方がNTに比べて10～20倍多かったという。この理由として、マルチによる環境変化の少ない長期不耕起栽培では、線虫の抑制要因(残留物によるアレロパシーも含めて)がCTより多いということを挙げている。しかしEdwardsら¹⁸⁾は、耕うん方式よりも作付方式の方がSCNの生息数に対して顕著に影響すると述べている。またUngerら⁶³⁾は耕うんの役割に関して、ミミズの生息環境とバクテリアなどの微生物の生息環境とは必ずしも相いれない場合があることに触れている。

3 不耕起栽培の作物生育の特徴

1) 出芽率と個体数

同じトウモロコシを供試した実験でも、NTの出芽率の方が高いというSiL土壤の結果⁴⁵⁾と、

逆にCTの方が高いというSiL土壤の結果⁴⁴⁾が報告されている。また所定の出芽率に達するのはCTの方が早かったという報告²³⁾においては、NTでの播種深度の不均一さが出芽遅れの原因と考えられている。

播種後のダイズの個体数は年次により異なり、1年目はCTの個体数はNTに比べて少なかったが、2年目は両区に差が認められなかったという報告⁴²⁾がある。この1年目に両区で個体数の差を生じた原因はCTにおける播種深度の不均一さにあってという。一方、CTとNT間に基本的には個体数の差が認められないという報告⁶⁾、²⁰⁾、²²⁾、⁶⁴⁾がある。また、耕うん方式とともに土壌の排水程度が作物生育に関係することから、処理区として設けた排水溝の有無がNTトウモロコシの出芽率や収量に影響するという報告がある²⁴⁾。以上の例から考えると、とくに播種深度と土壌水分が出芽率や個体数に影響するようである。

2) 根の生育

根の生育を表すには、根長密度(Root length density, 単位は m/cm^3)や根長(Root length, 単位は m/m^2 など)が用いられる。NTの根長密度はCTに比べて低いというオオムギの例⁸⁾、⁴⁸⁾や、逆にNTの方が根長密度が高いというキャッサバの例⁴⁷⁾、あるいは深さ0～15 cmではNTの根長密度の方が高いが、それ以下の層ではCTの方が高いというダイズの例⁴²⁾など、CTとNT間の根の生育傾向は必ずしも一定していない。なお深さが30 cm以下の層になると、ソルガムやコムギの根長密度は耕うん方式や車輪通過の影響を受けなくなるという報告がある²⁷⁾。根の相対的な分布状況を見ると、NTの根は深さ0～10 cmの層に集中しているが、CTの根はより広域(より深い範囲)に分布するという報告⁴³⁾、⁵³⁾、⁵⁶⁾がある。

Ehlersら¹⁹⁾は、土壌の物理性の中では硬度の方がかさ密度よりも根の生育に関係するとして、硬度と根の生育との間に線形の関係を得ている。根の伸長限度硬度はNTとCTで異なる($NT=3.6$ MPa, $CT=4.6\sim5.1$ MPa)が、この違いは、NTではミミズや根により形成される連続孔が実質的に硬度を打ち消す働きをするためであると述べている。

不耕起栽培を直接の対象とした実験ではないが、トウモロコシの根の生育におよぼす土壌の物理性

の影響を調べている Logsdon ら³⁶⁾は、①かさ密度の増加とともに根長は減少したが、根の太さは増加した。②土壤温度の高い方が根長は増加した。③マトリックポテンシャル (Matric potential) で表した水分ストレスの増加とともに、根長は低下したと述べている。同様に、トラクタの踏圧の問題を扱っている Willatt⁶⁶⁾によると、踏圧は根の生育 (根長密度と根長ともに) に関係したが、トラクタの走行回数の増加とともに硬度は増加し、根長と硬度との間には負の相関が認められたという。Newell ら⁴³⁾によると、トウモロコシの根は耕うん方式にかかわらず乾燥条件では全層にわたって分布するが、水分が十分な条件では Top soil にかたよる傾向があるという。Goss ら²⁸⁾は、コムギの根の生育と活性は大孔の体積と関係しているが、排水不良などでこれらの孔隙の連続性が減少すると、根の生育は弱められると述べている。

4 不耕起栽培の作業性と経済性

1) 作業時間と直接投入エネルギー

通常の圃場作業では、作業時間は単位面積当たりの所要時間で表され、直接投入エネルギーは単位面積当たりの燃料消費量で表されることが多い。仮に燃料以外の直接エネルギーが投入されていたら、その分のエネルギーを加えることになる。

Patterson ら⁴⁹⁾によると、CL 土壤で耕うんから収穫までの工程に投入されたエネルギーを比べると、NT は CT の 12% であった。CT の投入エネルギーのうち、耕うん工程だけで 77% を占めていた。作業者 1 人で栽培可能な面積は、CL 土壤の場合は CT が 88 ha、NT が 350 ha、SiL 土壤の場合は CT が 131 ha、NT が 350 ha であるという。NT は工程が少ない分だけ作業時間が少なくてすむが、乾燥し硬くなった土壤やワラなどの残留物が多い場合には作業能率が低下する懸念がある。

Allen ら⁴⁾によると、耕うんから収穫までの作業時間については MT が CT の 69%、NT が CT の 52% であり、同様に直接投入エネルギー (燃料消費量) については MT が CT の 66%、NT が CT の 58% という結果であった。さらに、耕うんから薬剤散布までの作業時間については MT が CT の 76%、NT が CT の 57% であり、燃料消費量

については MT が CT の 89%、NT が CT の 57%、という別の報告がある。

Smith ら⁵⁸⁾は、コムギの作付方式別の投入エネルギーを比較している。調査地点の 1 ケ所では NT は CT に比べて作物当たりの投入エネルギーが少なく、連続栽培の NT コムギがエネルギー的には最も有利であった。しかし他の地点では、3 種類の作付方式間にエネルギーの差は生じなかった。

著者らの作業時間の測定⁶¹⁾によると、耕うんから収穫までの工程において、ムギ類では NT が CT の 47%、デントコーンでは NT が CT の 72%、飼料カブでは NT が CT の 69% でした。同様に直接投入エネルギーの測定⁵²⁾によると、ムギ類では NT が CT の 61%、デントコーンでは NT が CT の 49%、飼料カブでは NT が CT の 69% でした。NT の作業時間と投入エネルギーの節減効果は顕著であった。

2) 生産コスト

Freebairn ら²⁵⁾は、①適正収量の確保、②燃料費などの変動費の減少、③機械費などの固定費の減少という経済的側面から不耕起栽培の有利性を述べている。例えば、オーストラリアにおける典型的な 500 ha 規模の農家の試算では、耕うん・整地や播種のための機械費を比べると NT は CT の 50% に減少しており、土壤侵蝕が減少するという長期的な経済効果も考え合わせると、NT は有利な栽培システムになるという。Patterson ら⁴⁹⁾によると、NT は投入エネルギーとしては供試の耕うん方式の中で最低であるが、コストは CT と MT の中間値であるために、CL 土壤の場合の NT コストは CT の 57%、SiL 土壤の場合の NT コストは CT の 87% となった。この NT のコスト高は除草剤費が原因である。なお、耕うん方式の中では MT が最も有利であった。

Unger ら⁶³⁾によると、初期の不耕起栽培では多くの除草剤費を必要としたが、最近ではさほどでない。例えばイギリスの穀物栽培 (耕うんから中耕除草まで) においては、NT の単位面積当たりのコストは CT の約半分になっている。もし NT を含む Reduced tillage により増収するか、農場資源 (Farm resource) をより有効に使うことができれば、利益は増加するといわれる。

一方、不耕起栽培はそれほど有利でないという報告もある。Hakimi ら²⁹⁾によると、NT はコス

トが最高であるにもかかわらず、収量が最低であったため、NTの利益はCTの71%にすぎなかった。このコスト高は除草剤費が原因である。なお、耕うん方式の中ではMTが最も有利であった。

Allenら⁴⁾は、NT・MTともにCTに比べて労働費と燃料費が40～50%節減された。しかし、MTは除草剤費をCTの2倍、NTはCTの15倍を必要としたことから、最終的なコストは、MTがCTの76%、NTがCTの150%となり、NTは最も不利であったと述べている。

Malhiら³⁷⁾は、NTは工程が少なく低コストであるが、オオムギ収量が低く(NTはCTの88%)、除草剤コストを余計に必要とした。これらを考慮した4地域での試算結果によると、NTのコストはCTに比べて平均で49ドル/ha高くなる。ただし、長期的な土壌侵蝕防止効果や除草剤の環境への影響などについては考慮されていない。

3) 不耕起栽培用の播種機

当然のことであるが、不耕起栽培においても播種は重要な工程である。通常、不耕起栽培では圃場表面に多量の前作物などの残留物が存在しているが、不耕起栽培用の播種機はこれに妨害されることがなく正確な播種量と播種深度を確保することが要求される。また、土壌の種類によっても異なるが、仮に硬くなった土壌に対しても土壌攪乱を最小にしてオープンナは切り込んでいかなければならないこともあり、種々の工夫が必要になる。土壌の種類、残留物の種類や量によっては若干の調整を施すことで慣行栽培用の播種機を利用することが可能になるが、専用機の新たな開発が望まれる場合が少なくない。最近是不耕起栽培用の播種機が製品として市販されているが、一方でNT用の播種機の開発研究も広く行われている。これらの研究には、播種機の試作^{2), 41)}やオープンナを中心とした性能比較^{7), 14), 50)}などがある。

5 おわりに

前稿に続いて、本稿では不耕起栽培の研究状況の概略を述べてきたが、内容的にあるいは引用した文献の範囲において必ずしも満足できるものではなかった。例えば、土壌の化学的な変化や侵蝕の問題、あるいは作付方式や雑草の問題についてもほとんど触れることができなかった。また、耕うんを省略するという効果と残留物がもたらす効

果とを厳密な意味で分離することは、現状ではかなりむずかしいことであった。さらに、水稻やムギ作などの不耕起栽培を慣行的に行っていたわが国の例(大森の報告⁴⁶⁾などを参照されたい)もある。もし機会があれば、改めてこれらの点についても言及してみたい。

不耕起栽培がもつ特徴のいくつかは経営規模と密接な関係があり、規模の増大とともにその効果がより鮮明になるという性格をもつ。今後は地域性を問わない不耕起栽培の基礎技術を確立していくとともに、わが国の農業事情を考慮した独自の不耕起栽培システムを構築していくことが必要となるだろう。

引用文献

- 1) Adeoye, K. B. (1982). Effect of tillage depth on physical properties of a tropical soil and on yield of maize, sorghum and cotton. *Soil & Till. Res.* 2:225-231.
- 2) Adekoya, L. O. and W. F. Buchele (1987). A precision punch planter for use in tilled and untilled soils. *J. agric. Engng Res.* 37:171-178.
- 3) Allen, R. R. et al. (1975). No-till seeding of irrigated sorghum double cropped after wheat. *Trans. ASAE* 18:1109-1113.
- 4) Allen, R. R. et al. (1976). Limited tillage of furrow irrigated winter wheat. *Trans. ASAE* 19:234-236, 241.
- 5) Allen, R. R. (1985). Reduced tillage-energy systems for furrow irrigated sorghum on wide beds. *Trans. ASAE* 28:1736-1740.
- 6) Anderson, E. L. (1986). No-till effects on yield and plant density of maize hybrids. *Agronomy J.* 78:323-326.
- 7) Baker, C. J. (1976). Experiments relating to techniques for direct drilling of seeds into untilled dead turf. *J. agric. Engng Res.* 21:133-144.

- 8) Ball, B. C. and M. F. O'Sullivan(1987). Cultivation and nitrogen requirements for drilled and broadcast winter barley on a surface water gley(gleysol). *Soil & Till. Res.* 9:103-122.
- 9) Bennie, A. T. P. and F. J. P. Botha (1986). Effect of deep tillage and controlled traffic on root growth, water-use efficiency and yield of irrigated maize and wheat. *Soil & Till. Res.* 7:85-95.
- 10) Blevins, R. L. et al. (1977). Influence of no-tillage and nitrogen fertilization on certain soil properties after 5 years of continuous corn. *Agronomy J.* 69: 383-386.
- 11) Blevins, R. L. et al. (1983). Changes in soil properties after 10 years continuous non-tilled and conventionally tilled corn. *Soil & Till. Res.* 3:135-146.
- 12) Cannel, R. Q. (1985). Reduced tillage in North-west Europe-A review. *Soil & Till. Res.* 5:129-177.
- 13) Chaplin, J. et al. (1986). A study of compaction and crop yields in loamy sand soil after seven years of reduced tillage. *Trans. ASAE* 29:389-392.
- 14) Chaudhry, A. D. and C. J. Baker(1988). Barley seedling establishment by direct drilling in a wet soil(1). *Soil & Till. Res.* 11:43-61.
- 15) Chichester, F. W. et al. (1985). Minimum disturbance fertilizer knifing for no-till. *Trans. ASAE* 28:1013-1018.
- 16) Derpsch, R. et al. (1986). Results of studies made from 1977 to control erosion by cover crops and no-tillage techniques in Parana, Brazil. *Soil & Till. Res.* 8:253-263.
- 17) Dickey, E. C. et al. (1983). Yield comparisons between continuous no-till and tillage rotations. *Trans. ASAE* 26:1682-1686.
- 18) Edwards, J. H. et al. (1988). Influence of tillage and crop rotation on yield of corn, soybean and wheat. *Agronomy J.* 80:76-80.
- 19) Ehlers, W. et al. (1983). Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. *Soil & Till. Res.* 3:261-275.
- 20) Ellis, F. B. et al. (1982). Direct drilling, shallow tine-cultivation and ploughing on a silt loam soil, 1974-1980. *Soil & Till. Res.* 2:115-130.
- 21) Elmore, R. W. (1987). Soybean cultivar response to tillage systems. *Agronomy J.* 79:114-119.
- 22) Erbach, D. C. (1982). Tillage for continuous corn-soybean rotation. *Trans. ASAE* 25:906-911, 918.
- 23) Erbach, D. C. et al. (1986). Maize response to tillage-induced soil conditions. *Trans. ASAE* 29:690-695.
- 24) Fausey, N. R. (1984). Drainage-tillage interaction on Clermont soil. *Trans. ASAE* 27:403-406.
- 25) Freebairn, D. M. et al. (1986). Research and development of reduced tillage systems for Vertisols in Queensland, Australia. *Soil & Till. Res.* 8:211-229.
- 26) Gebhardt, M. R. et al. (1986). Soybean culture effects on Compaction of a claypan soil. *Trans. ASAE* 29:416-420.
- 27) Gerik, T. J. et al. (1987). Effects of controlled-traffic on soil physical properties and crop rooting. *Agronomy J.* 79:434-438.
- 28) Goss, M. J. et al. (1984). Effects of soil management practice on soil

- physical conditions affecting root growth. *J. agric. Engng Res.* 30:131-140.
- 29) Hakimi, A. H. and S. M. Chakrabarti (1976). The profitability of selected cultivations and their influence on growth and yield of silage corn. *J. agric. Engng Res.* 21:15-19.
 - 30) Hughes, K. A. and C. J. Baker (1977). The effects of tillage and zero-tillage systems on soil aggregates in a silt loam. *J. agric. Engng Res.* 22:291-301.
 - 31) Imholte, A. A. and P. R. Carter (1987). Planting date and tillage effects on corn following corn. *Agronomy J.* 79:746-751.
 - 32) Izaurralde, R. C. et al. (1986). Effects of reduced tillage practices on continuous wheat production on soil properties. *Agronomy J.* 78:787-791.
 - 33) Johnson, M. D. et al. (1984). Soil moisture regimes of three conservation tillage systems. *Trans. ASAE* 27:1385-1390, 1395.
 - 34) Kenimer, A. L. et al. (1987). Effects of residue cover on pesticide losses from conventional and no-tillage systems. *Trans. ASAE* 30:953-959.
 - 35) Kladvko, E. J. et al. (1986). Conservation tillage effects on soil properties and yield of corn and soya beans in Indiana. *Soil & Till. Res.* 8:277-287.
 - 36) Logsdon, S. D. et al. (1987). Corn seedling root growth as influenced by soil physical properties. *Agronomy J.* 79:221-224.
 - 37) Malhi, S. S. et al. (1988). An economic comparison of barley production under zero and conventional tillage. *Soil & Till. Res.* 11:159-166.
 - 38) Maurya, P. R. (1986). Effect of tillage and residue management on maize and wheat yield and on physical properties of an irrigated sandy loam soil in Northern Nigeria. *Soil & Till. Res.* 8:161-170.
 - 39) Mielke, L. N. et al. (1984). Soil physical characteristics of reduced tillage in a wheat-fallow system. *Trans. ASAE* 27:1724-1728.
 - 40) Mielke, L. N. et al. (1986). Physical environment near the surface of plowed and no-tilled soils. *Soil & Till. Res.* 7:355-366.
 - 41) Morrison, J. E. Jr. (1978). No-tillage experimental planter performance and depth regulation evaluation. *Trans. ASAE* 21:602-604, 609.
 - 42) NeSmith, D. S. et al. (1987). Tillage and residue management effects on properties of an Ultisol and double-cropped soybean production. *Agronomy J.* 79:570-576.
 - 43) Newell, R. L. and W. W. Wilhelm (1987). Conservation tillage and irrigation effects on corn root development. *Agronomy J.* 79:160-165.
 - 44) Newhouse, K. E. and T. M. Crosbie (1986). Interactions of maize hybrids with tillage systems. *Agronomy J.* 78:951-954.
 - 45) Ojeniyi, S. O. (1986). Effect of zero-tillage and disc ploughing on soil water, soil temperature and growth and yield of maize (*Zea mays* L.). *Soil & Till. Res.* 7:173-182.
 - 46) 大森 正 (1980). 水稻の不耕起栽培に関する土壤・肥料学的研究. 岡山農試臨時報告第77号.
 - 47) Opara-nadi, O. A. and R. Lal (1987). Effects of no-till and disk

- plowing with and without residue mulch on tropical root crops in Southeastern Nigeria. *Soil & Till. Res.* 9:231-240.
- 48) O'Sullivan(1985). Water redistribution and use by barley in two ploughed and direct drilled stagnogley soils. *J. agric. Engng Res.* 31:171-184
- 49) Patterson, D. E. et al. (1980). Long-term experiments with tillage systems to improve the economy of cultivations for cereals. *J. agric. Engng Res.* 25:1-35.
- 50) Payton, D.M. et al. (1985). Equipment and methods for no-tillage wheat planting. *Trans. ASAE* 28:1419-1424, 1429.
- 51) Roth, C.H. et al. (1988). Effect of mulch rates and tillage systems on infiltrability and other soil physical properties of an Oxisol in Parana, Brazil. *Soil & Till. Res* 11:81-91.
- 52) 坂井直樹ほか(1987). 不耕起栽培の評価(第2報). *農作業研究* 22:113-119.
- 53) 坂井直樹ほか(1988). 不耕起栽培の評価(第4報). *農作業研究* 23:25-32.
- 54) 坂井直樹ほか(1988). 不耕起栽培の評価(第5報). *農作業研究*(印刷中).
- 55) 坂井直樹(1988). 不耕起栽培の研究状況(I). *農作業研究* 23:179-188.
- 56) Sharma, R. B. (1985). Plant-water relations, crop growth and grain yield of spring barley in relation to tillage methods. *Soil and Till. Res.* 6:111-121.
- 57) Smith, E. S. and J. H. Lillard(1976). Development of no-tillage cropping systems in Virginia. *Trans. ASAE* 19:262-265.
- 58) Smith, J. A. and K. J. Fornstrom (1980). Energy requirements of selected dryland wheat cropping systems. *Trans. ASAE* 23:822-825.
- 59) Sprague, M. A. and G. B. Triplett (1986). No-tillage and surface-tillage agriculture. John Wiley & Sons.
- 60) Stinner, B. R. et al. (1988). Soil and foliage arthropod communities in conventional, reduced and no-tillage corn (Maize, *Zea mays* L.) systems. *Soil & Till. Res.* 11:147-158.
- 61) 春原 亘ほか(1985). 不耕起栽培の評価(第1報). *農作業研究* 54号:37-50.
- 62) Tyler, D. D. et al. (1987). No-tillage effects on population dynamics of soybean cyst nematode. *Agronomy J.* 79:799-802.
- 63) Unger, P. W. and T. M. McCalla(1980). Conservation tillage systems. *Advances in Agronomy* 33:1-58.
- 64) Webber III, C. L. et al. (1987). Effect of tillage on Soybean growth and seed production. *Agronomy J.* 79:952-956.
- 65) Whiteley, G. M. and A. R. Dexter (1982). Root development and growth of oilseed, wheat and pea crops on tilled and non-tilled soil. *Soil & Till. Res.* 2:379-393.
- 66) Willatt, S. T. (1986). Root growth of winter barley in a soil compacted by the passage of tractors. *Soil & Till. Res.* 7:41-50.