圃場通気試験による機械耕うん土壌の特性評価

加藤雅義・佐藤公俊

Evaluating the Characteristics of Tilled Soil by Using the Air Permeability Measurements

Masayoshi KATO and Kimitoshi SATO

1 まえがき

畑地における耕うんは、狭小圃場での作業を除き、今日では一般に農業機械で行われる。耕うんの目的は、除草と作物の播種・植え付け作業を容易にするとともに、作物根圏環境を形成している土壌の物理性を改善することといわれる¹⁾。耕うんにより生じる土壌の物理性の変化は、採土後の室内試験や圃場内の所定の位置に埋設した器具によって測定される^{2,3,4)}。土壌の物理性は、一般に採土法による乾燥密度・三相分布・土塊分布や土壌硬度などにより評価される。これらの方法では、採土や器具の埋設・移動などにより圃場の土壌状態が変化してしまうため、同一場所での経時的変化を測定することが困難である。一方、プラウで耕うんされた土壌では、大小の土塊が混在して不均一であり、測定ごとの採取位置による測定結果のばらつきや採土技術による誤差などが生じるため、土壌状態の経時変化の連続測定が難しい。

そこで、著者らは土壌物理性の測定方法として、通気性の変化⁵⁾に着目し、土壌状態を破壊・攪乱せずに測定を可能にする守島の方法⁶⁾に準拠した圃場通気試験器を新たに試作し、通気性から耕うん土壌の物理性を検討した⁷⁾。人力耕うんとロータリ耕についての圃場通気試験の結果⁸⁾によれば、通気性からみた耕うん効果の減少は、降雨時の雨滴の打撃による締め固め、ならびに碎土の土壌間隙への流入によ

る充填によるものであり⁹⁾、これらは耕うん後の経過日数にともなう積算降水量に関係するものと推察された¹⁰⁾。また、耕うん効果が停止した後の通気性の変化は土壌水分量の変化として表わされ、仮に土壌水分量を既知とすれば、通気性から乾燥密度を推定することが可能となった¹⁰⁾。

本報では、前述の耕うん土壌の物理性を通気性の変化から推定することを試み、さらには耕うん法により生じる耕うん土壌の特性変化を知り、作物の生育や農作業に適した機械耕うん方式¹¹⁾を選択するための基礎資料を得ることを目的とした。通気性の変化による土壌物理性としては、通常の耕うん土壌の物理性¹²⁾と同様な項目が対象となるが、とくに各種機械耕うん土壌の特性と耕うん効果の持続期間の検討が可能となることから、耕うん効果の持続性が高い耕うん法の選定が可能となる。

2 試験区および試験方法

関東ローム台地上の東京農業大学厚木農場の赤土の圃場で、図1に示す耕うん法の異なる試験区を4区1996年8月1日に設定した。各区の耕うん機械と耕うん法は表1に示すとおりであり、ロータリによる耕うん区をR区、プラウによる耕うん区をP区、サブソイラによる心土破碎とロータリ耕を組合わせた区をS区、耕うんをせずそのまま放置した区をN区とした。試験区の設定では、圃場状態を均一にするため、各区ともに人力で表面から40cmの深さまで掘

平成9年8月25日受理

東京農業大学農学部厚木農場 〒243-0034神奈川県厚木市船子1737

岩手県千厩地方振興局両磐土地改良事務所 〒029-0803岩手県東磐井郡千厩町千厩字北方37-2

Atsugi Farm, Tokyo University of Agriculture, 1737 Funako Atsugi Kanagawa 243-0034

Senmaya Regional Development Bureau, Ryoban Agricultural Land improvement office, 37-2 Senmaya-aza-Kitakata Senmaya Higashi-iwai Iwate 029-0803

表1 各区の耕うん法の設定

区	耕うん作業機	耕うん法
N区	なし	踏圧したまま放置
R区	耕幅 60 cm のロータリ	耕うんピッチ 10 cm、耕深 15 cm で 2 行程耕うん
S区	ウィングなし 1 本爪サブソイラと耕幅 60 cm のロータリ	サブソイラで深さ 30 cm を破碎し、ロータリで R 区と同様に耕うん
P区	14 インチ 2 連のモールドボードブラウ	耕深 15 cm で 3 行程耕起し、人力のレーキで 3 ～ 5 cm を碎土・整地

図1 試験区の設定概要

- 通気測定管設置位置
- ×含水比測定位置
- 採土位置（試験開始時）
- ◎採土位置（試験終了時）

表2 試験区土壌の物理性

土粒子の密度 (g/cm ³)	2.78
強熱減量 (%)	12.5
液性限界 (%)	83.8
塑性限界 (%)	52.5
塑性指数 (%)	31.3
粘砂分 (%)	61.1
土組シルト分 (%)	7.2
成粘土分 (%)	41.5
土性 (JIS分類)	粘土

図2 圃場通気試験器の概要

り起こし、人の踏圧により10cm厚さごとに順に締め固めて盛り上げた後に各区所定の方法で耕うんした。試験区土壌の物理性の測定結果を表2に示す。また、試験中の圃場は各耕うん法の及ぼす影響のみを抽出するように、今回は作物の栽培を行わなかった。

土壌の物理性としては通気性と土壌水分量を測定した。通気性の測定は図2に示す圃場通気試験器⁷⁾を用い、通気性の測定管(直径20cm×長さ20cm)を図1に示すとおりに配置し、測定管の挿入深さを耕深の1/2である7.5cm⁸⁾とした。測定は1週間に1回程度行い、各測定管における測定回数としては合計8回以上とした。通気性の評価指標には、圃場通気試験器で計測された通気量 Q (cm³/s) と通気圧 H (cm水柱) の比である Q/H (cm²/s) を採用し、 Q/H の変化がほぼ一定値となった時点を耕うん効果の停止時期とみなした^{8,10)}。土壌水分量の測定は、土壌を破壊せずに連続測定が可能な電気伝導度によるMcCorkleの四極法¹³⁾ (センサー：1極の直径が12 mmで間隔15mmの4極)を用いた。四極法による含水比は、圃場土壌での乾熱法の含水比と四極法の比抵抗との関係から求めた。土壌水分量の測定点を図1に示す、N区とR区を1点、S区(サブソイラ通過点と1行程中間点)とP区(山部分と谷部分)を2点

とし、深さ7.5cmの部分を実日9時に測定した。試験は測定器具が土壌になじんだと思われる耕うん経過後19日目から開始した。また、採土法による乾燥密度を図1に示す位置で開始時(耕うん経過後9日目)と終了時(耕うん経過後131日目)の2回測定した。

3 結果および考察

1) 耕うん効果

各区の耕うん後の経過日数とQ/Hによる通気性の関係を図3に示す。この図から、耕うんされていない区と耕うんされている区との間に明確な差が認められた。N区は踏圧したままであるために、全期間

にわたり、Q/Hはほぼ一定の小さい値で推移した。一方、耕うんされていた各区のQ/Hは耕うん経過後42日目まで徐々に減少する傾向を示したが、49日目以降は小さな変化はみられるもののほぼ一定の値で推移した。このことは前報¹⁰⁾で示したとおり、耕うんされた各区のQ/Hの変化は、耕うん経過後42日目までは主として土壌の乾燥密度の増大によるもので、49日目以降のQ/Hの変化は主として土壌水分量の変化によるものと考えられた。つまり、耕うんされた各区の耕うん効果の持続期間は42日間程度であると推察された。

耕うん効果が減少する原因を図3の降水量との関

図3 耕うん後の経過日数とQ/Hによる通気性の変化との関係

図4 耕うん土壌の模式図

Md: 測定管深さ(7.5cm) Td: 耕うん深さ(15cm) Sd: サブソイル破碎深さ(30cm)

係から推察すると、降雨による影響が大きいと考えられた。耕うん区であるR・S・P区の耕うん直後は、図4の模式図に示すように耕うんにより土壌間隙が増大していた。このために耕うん区では、降雨時に耕うんにより生じた大小の土壌間隙に泥水が流入し、間隙が徐々に充填され、雨滴の打撃による締め固め効果とともに密度が増大したものと推察された⁹⁾。特にP区では、他区よりも大間隙が多いため、この間隙が降雨により消滅し、急速に耕うん効果が減少したものと推察された。N区では、耕うんさ

れていないためにQ/Hの変化がほぼ一定の傾向で推移したものと思われた。

そこで、降雨の影響を明らかにするため、耕うん後の経過日数とQ/Hおよび積算降水量との関係を調べた。結果を図5に示す。この図に示すとおり、耕うん以降の積算降水量は42日目までは187mm、49日目までは235mmを示した。これ以降の期間ではQ/Hの変化は小さく、また積算降水量との関係も小さくなった。したがって、この時期が耕うん効果の停止時期であると推察された。前報¹⁰⁾での耕うん効果

図5 耕うん後の経過日数とQ/Hおよび日積算降水量との関係

図6 積算降水量とQ/Hの関係 (耕うん経過後42日目まで)

の停止時期の積算降水量は157mmであったことも合わせると、この圃場土壌での耕うん効果の停止時期は耕うん以降の積算降水量が150～200mmの範囲で生じると考えられた。

積算降水量とQ/Hの関係を図6に示す。積算降水量とQ/Hの相関係数は、P区 ($r=-0.863$) が最も高く、次いでS区 ($r=-0.827$)、R区 ($r=-0.787$)、N区 ($r=-0.539$) の順で小さくなっていった。つまり、耕うんした3区においては積算降水量とQ/Hとの関係が大きく、耕うん効果の持続期間は耕うん以降の積算降水量に反比例することが考えられた。一方、耕うんしなかったN区での相関は低く、降雨の影響は小さいものと判断された。積算降水量とQ/Hとの相関関係は、図4に示す模式図の土壌間隙の大きさの順と同様であることから、各耕うん法の特性がこの面に表れているものと考えられた。

以上のことから、耕うん効果の持続期間は積算降水量で推定することができ、しかも再耕うん時期を予測することが可能となる。しかし、圃場に作物が栽培されている場合には、降雨による雨滴の土壌への打撃は作物により緩和され、耕うん効果の持続期間がこの試験によって得られた49日間よりもさらに延びることが考えられた。

つぎに、耕うん効果の持続期間が終了した耕うん経過後49日目以降を耕うん効果の停止期間とし、この期間のQ/Hの変化について考察した。前述のとおり、図5に示す49日目以降の積算降水量とQ/Hとの

関係はそれ以前と比べて小さいことから、Q/Hの変化は土壌水分量の変化によることが示唆された。この点を明確にするため、全試験期間の耕うん後のQ/Hと含水比の経時変化との関係を調べた。結果を図7に示す。この図からは各区ともに耕うん経過後42日目までの含水比とQ/Hとの間に明確な関係はみられないが、49日目以降は各区ともに含水比とQ/Hの変化がほぼ並行状態で変化していることから、各区のQ/Hの変化は含水比変化と少なからず関係しているといえた。

耕うん効果の停止期間におけるQ/Hと含水比との関係を図8に示す。この図からQ/Hと含水比の間には相関係数 $r=-0.694$ の関係があり、降雨にともなう土壌含水比に変化が生じた。降雨が乾燥密度に変化を与えるとすれば、Q/Hと含水比には相関関係が存在しないことになる。したがって、耕うん効果停止後のQ/Hの変化は主として土壌水分量の変化によるものと推察された。

以上の結果から、圃場における通気性測定により耕うん効果停止後の土壌水分量が推定でき、土壌水分量に影響される収穫や耕うん作業などの実施の難易が従来とはやや異なる観点から検討できるものと考えられた。

2) 通気性による各耕うん法の特性

通気性に着目した各耕うん法の違いを比較するために、各区のQ/Hからみた通気特性を表3に示す。試験開始後における各区のQ/Hの最大値はP区(720)

図7 耕うん後のQ/Hと含水比の経時変化

図8 耕うん効果停止期間におけるQ/Hと含水比との関係

表3 各区のQ/Hからみた通気特性

区	耕うん効果の持続期間		停止期間
	最大値	低下割合	低下割合
N区	25 cm²/s	一定 5.0 cm²/s	一定 5 cm²/s
R区	490 cm²/s	7.5 cm²/s・day	一定 80 cm²/s
S区	410 cm²/s	6.8 cm²/s・day	一定 74 cm²/s
P区	720 cm²/s	14.1 cm²/s・day	一定 84 cm²/s

表4 採土法による乾燥密度

区	試験開始時	試験終了時
N区	0.642 g/cm³	0.650 g/cm³
R区	0.481 g/cm³	0.548 g/cm³
S区	0.504 g/cm³	0.537 g/cm³
P区	0.512 g/cm³	0.533 g/cm³

cm²/s) で最も大きく、次いでR区(490cm²/s)、S区(410cm²/s)の順に小さくなり、N区は25cm²/sと極端に小さい値を示した。各区の耕うん効果持続期間におけるQ/Hの1日当たりの低下割合については、P区がR区とS区の約2倍、すなわち14.1cm²/s・dayで減少した。P区は大きな土塊と大間隙が混在する反転耕であるため、耕うん初期段階において大間隙の存在に起因するQ/Hが他の区よりも良好であったものといえよう。一方、R区とS区はロータリによ

る攪拌耕であるために、両区ではほぼ同様な傾向となり、小土塊群の存在によってP区よりもQ/Hが低下していたものと考えられた。N区では一定条件下で踏圧したために、土塊間隙径および分布量が相対的に小さくなっていた。このため、概ね乾燥密度が大きく、Q/Hが小さい状態で推移したことになる。つまり、この期間のQ/Hは乾燥密度の増大傾向を示し、前報¹⁰⁾と同様に耕うん効果の指標である乾燥密度が大きく変化していることを示していた。一方、耕うん効果の停止期間では、持続期間に比べて各区ともQ/Hの減少傾向は認められなかった。持続期間における降雨時の雨滴の打撃ならびに泥水の土壌間隙への流入が、土壌の充填を促進させ、停止期間ではこれが主因となって乾燥密度を増大させ、Q/Hをほぼ一定としたと考えられる。表4に示す100ccの採土缶による乾燥密度の測定結果からも、このことは裏付けられた。

3) 各耕うん法の違いによる土壌水分量の変化

耕うん法の違いによる土壌水分量の変化は、Q/Hによる通気特性からも概ね推察できるが、より詳細に各耕うん法による土壌水分量の変化を知るために四極法により算定した含水比によって検討した。各区の耕うん効果の持続期間と停止期間の含水比変化の関係を図9に示す。耕うん効果の持続期間において降雨後から乾燥に向かう期間では、P区が最も早く低含水比になり、次いでS区・R区の順となった。また、持続期間における乾燥時と湿潤時では、含水比の較差もP区が最も大きく、R区が小さく、S区は

図9 耕うん効果持続期間と停止期間の含水比変化

両者の中間的变化を示した。しかし、耕うん後は経時的に降雨後のR区とS区との含水比の較差が小さくなり、P区との較差がさらに大きくなった。一方、耕うん効果の停止期間では各区の含水比の較差が相対的に小さくなった。各区の含水比の較差が小さくなることは、Q/Hによる通気特性で述べたとおり、耕うん効果が減少しつつあることを示唆していた。

耕うん効果の持続期間と停止期間における各区の乾燥期間（乾燥に向かう期間）と降雨期間（降雨の多い期間）の平均含水比の比較を表5に示す。持続期間における耕うん経過後19日目から28日目までの乾燥期間における平均含水比は、P区が最低で55.3%、N区はP区に近い56.8%を示し、R区が62.5%と最も高く、S区は中間の58.8%を示した。含水比の変動幅を変動係数でみると、P区は他の耕うん区の約1.3～1.6倍の8.3%を示した。このことはP区の含水比変動が他の耕うん区よりも大きく、乾燥促進効果が大きいことを示している。耕うん経過後29日目から42日目までの降雨期間の平均含水比は、P区（67.0%）が最低で、S区（70.5%）、R区（70.7%）の順に高い傾向を示した。特にN区は一旦水分を含むと排水不良で、平均含水比は最も高い72.0%を示した。降雨直後の各区の含水比の較差は小さいが、その後の乾燥過程では拡大する傾向であった。特にP区の変動係数は他の耕うん区の約1.5～2.2倍の11.5%を示し、降雨後の排水効果はP区が最も良好

で、次いでS区、R区の順に排水効果が低下すると推察された。また、S区は耕うん層がR区と同じでありながらも、降雨後の含水比変化から判断して排水性がR区よりも良好であるといえよう。すなわち、平均含水比の変動係数がR区の約1.5倍を示したことから、サブソイラによる心土破碎による効果がR区よりも大きく表れたものと判断された。耕うん効果の持続期間を通じてP区の平均含水比が最低値を示し、しかも含水比の変化が大きく、次いでS区、R区の順となり、耕うん法の違いによる土壌水分量変化の傾向の違いが認められた。一方、N区は耕うんされていないため、他の耕うん区に比べて雨水の浸透が低下したことが考えられた。

つぎに、表5に示す耕うん効果の停止期間における含水比の変化を、持続期間と同様に、耕うん経過後76日目から92日目までの乾燥期間と、93日目以降の降雨期間に分けて各区を比較した。乾燥期間では各区ともに持続期間の場合と同様に変化し、P区が69.7%と最も乾燥していたが、各耕うん区の平均含水比の変動係数の較差が持続期間よりも小さくなっていた。降雨期間である93日目以降も同様に各区の含水比の較差は小さくなり、変動係数の較差も小さくなった。このことは各耕うん区の耕うん特性の出現が弱くなり、耕うん効果がほとんどみられなくなったことを示しており、前述の耕うん効果の停止期間におけるQ/Hの変化と同様に耕うん効果の減少

表5 各区の含水比の比較

区	期間	耕うん効果の持続期間			耕うん効果の停止期間		
		平均(%)	標準偏差(%)	変動係数(%)	平均(%)	標準偏差(%)	変動係数(%)
N区	乾燥期間	56.8	6.5	11.5	63.9	1.3	2.0
	降雨期間	72.0	4.8	6.7	71.2	3.3	4.7
R区	乾燥期間	62.5	3.3	5.3	64.5	1.3	2.0
	降雨期間	70.7	3.8	5.3	72.7	2.6	3.5
S区	乾燥期間	58.8	3.9	6.6	62.3	0.9	1.4
	降雨期間	70.5	5.4	7.6	71.1	2.5	3.6
P区	乾燥期間	55.3	4.6	8.3	58.1	1.5	2.6
	降雨期間	67.0	7.7	11.5	69.7	3.7	5.3

注：耕うん効果の持続期間の乾燥期は、耕うん経過後19～28日目の乾燥に向かう期間を示す。

耕うん効果の持続期間の降雨期は、耕うん経過後29～42日目の降雨の多い期間を示す。

耕うん効果の停止期間の乾燥期は、耕うん経過後76～92日目の乾燥に向かう期間を示す。

耕うん効果の停止期間の降雨期は、耕うん経過後93～105日目の降雨の多い期間を示す。

が含水比変化からも推察された。

以上の結果、全試験期間を通じてP区は他の区よりも含水比変化が大きく、また低く推移する傾向にあった。S区の含水比変化はP区とR区との中間的様相を示し、耕うん層の構造がR区と同様であるにもかかわらず、サブソイラによる心土破碎効果があったものと推察された。一方、R区は耕うん効果の持続期間でN区と異なった含水比変化を示したが、耕うん効果の停止期間ではN区と同様な含水比変化となり、耕うん効果が失われたものと判断された。しかし、全区ともに耕うん効果停止後の含水比変化の較差は小さく、また各区の耕うん効果は失われつつあることを示している。

以上のように、圃場通気試験器による通気性変化の結果から各種耕うん法による耕うん効果の持続期間と各種の耕うんによる土壌物理特性を判定することが可能となった。通気性の変化に基づいた各種耕うん法の特性は、プラウによる反転耕が耕土の通気性や排水性を良好にし、サブソイラによる深部の破碎耕がロータリのみによる攪拌耕よりも排水性を高めるものとみることができる。今後はさらに研究を進め、通気性の変化が作業性に及ぼす影響について言及したい。

最後に、本研究を遂行するにあたっては、東京農業大学農学部農業水利学研究室、圃場機械学研究室および厚木農場の教職員の方々から有益な助言と協力を得た。また、本研究は東京農業大学プロジェクト研究として行われたものであり、関係各位に厚く

お礼を申し上げる。

4 摘 要

ロータリ耕・プラウ耕およびサブソイラによる破碎耕の耕うん圃場において圃場通気試験器による通気性の測定を行い、下記の結果を得た。

- 1) 通気性の減少と積算降水量の関係は密接であり、耕うん効果の終了時期を積算降水量により推定できること、および今回の圃場条件では積算降水量150mmから200mm位で耕うん効果が終了することを明らかにした。
- 2) 通気性が最も良好なプラウ耕では、他の耕うん法に比べて耕うん効果が急激に減少した。また、土壌水分量変化の幅が大きい一方で、土壌水分量が低い範囲で変化した。
- 3) ロータリ耕では、通気性がプラウ耕の約2/3であったが、耕うん効果はプラウ耕の1/2の時間で終了した。また、土壌水分は高く、排水性は不良であった。
- 4) 土壌水分量変化からみた場合、サブソイラによる深部の破碎耕は、ロータリ耕に対しても降雨時の排水性の向上効果がみられた。
- 5) プラウによる反転耕は耕土の排水性と通気性を良好にし、サブソイラ耕は畑地土壌の深層部の破碎により排水性を良好にすると考えられた。

引用・参考文献

- 1) 川村 登・木谷 収・梅田重夫・伊佐 務・石原 昂・江崎春雄・岡村俊民, (1981): 農作業

機械学, 9～14, 文永堂

- 2) 林 尚孝・森泉昭治・弓矢智生・唐橋 需・森本国夫, (1985) : 耕うんによる層別土塊分布評価法に関する研究 (第1報), 農業機械学会誌, 47(3), 343～348
- 3) 金谷 豊・倉田 勇, (1988) : 重粘土壌の耕うん法に関する研究 (第1報), 農業機械学会誌, 50(3), 45～51
- 4) 小林 正, (1991) : 耕うん方法の相違が土壌の物理性に及ぼす影響 第1報 貫入抵抗変化と三相分布変化の特徴, 農作業研究, 26(2), 118～126
- 5) 土壌物理測定法編集委員会編, (1975) : 土壌物理測定法, 270～277, 養賢堂
- 6) 守島正太郎, (1955) : 耕耘土壌の通気性に関する研究, 三重大学学術報告, 10, 61～69
- 7) 加藤雅義・渡辺文雄・高橋 悟・吉村正敬・白井清恒, (1994) : 圃場通気試験器の試作とその適用, 東京農業大学農学集報, 39(1), 33～39
- 8) 加藤雅義・渡辺文雄・吉村正敬・白井清恒, (1995) : 畑地における土壌耕うん効果の評価法について, 東京農業大学農学集報, 40(3), 171～177
- 9) 福士定雄, (1985) : 土壌物理学概論, 74～77, 博友社
- 10) 加藤雅義・渡辺文雄・吉村正敬・白井清恒, (1997) : 耕うんによる土壌通気性の変化について, 農作業研究, 32(1), 3～11
- 11) 塩谷哲夫, (1985) : 畑作栽培におけるディレックスシステムの研究について, 農作業研究, 54, 1～12
- 12) 雁野勝宣, (1993) : 耕土保全・環境保全からみた耕うん法に関する研究動向 1. 耕うん法が土壌の物理性に及ぼす影響, 農作業研究, 28(1), 1～8
- 13) 白井清恒, (1996) : 土の物理解析, 62～67, ライフリサーチプレス

キーワード

耕うん法, 降水量, 通気性, 土壌水分, 耕うん効果の持続

Summary

By an air permeability measurements, we tried to evaluate the difference of soil conditions in a field among the three tillage implements, a rotary tiller, a moldboard plow and a subsoiler.

The results of our study are as follows.

1. The soil aeration was effected by precipitation. The effect of tillage on the soil aeration was admonished for the amount of accumulated rainfall from 150 mm to 200 mm after tillage.
2. The soil aeration indexed showed the best soil tillage aeration at the plowed plot. The indexed decreased quickly after tillage. It indicated that aeration affect didn't remain long period of time in the plowed plot. The moisture content of soil in plowed plot was wide range and tend to changes in lower moisture content range.
3. The amount of soil aeration by rotary tillage were about 2/3 of that by plowing. The duration of tillage effect by the rotary tillage was approximately 1/2 shorter than that by the plowing.

The rotary-tilled plot had the characteristics for the high moisture content of soil and bad drainage.

4. The moisture contents at the rotary-tilled plot was changed by a subsoiler.
5. The plowing improved the both of aeration and permeability of the soil and the subsoiling improved only the permeability by breaking up the deep layer.

Key words

Tillage methods, Precipitation, Air permeability, Soil moisture, Duration of tillage effect