

水田転換畑における子実用トウモロコシのプラウ耕による  
省力安定栽培に関する研究

2019年1月

篠遠 善哉

水田転換畑における子実用トウモロコシのプラウ耕による  
省力安定栽培に関する研究

筑波大学大学院  
生命環境科学研究科  
生物圏資源科学専攻  
博士（農学）学位論文

篠遠 善哉

## 目次

第1章 緒論	1
第2章 黒ボク土の水田転換畑におけるプラウ耕がトウモロコシの生育および子実収量に及ぼす影響	8
第1節 トウモロコシの生育および子実収量に及ぼすプラウ耕の影響	9
1. 材料および方法	9
2. 結果	11
3. 考察	13
第2節 プラウ耕で栽培したトウモロコシの生育および子実収量に及ぼす登熟初期の遮光の影響	16
1. 材料および方法	16
2. 結果	17
3. 考察	19
第3節 プラウ耕に対するトウモロコシの品種の生育反応	21
1. 材料および方法	21
2. 結果	23
3. 考察	23
第4節 要約	25
図表	26
第3章 黒ボク土の水田転換畑におけるプラウ耕が土壌の物理化学性とトウモロコシの根系および倒伏に及ぼす影響	49
第1節 土壌の物理化学性に及ぼすプラウ耕の影響	50
1. 材料および方法	50
2. 結果	51
3. 考察	53
第2節 トウモロコシの根系に及ぼすプラウ耕の影響	56
1. 材料および方法	56

2. 結果	57
3. 考察	58
第3節 トウモロコシの倒伏に及ぼすプラウ耕の影響	61
1. 材料および方法	61
2. 結果	62
3. 考察	63
第4節 要約	65
図表	66
第4章 プラウ耕による土壌硬度および肥料分布の違いがトウモロコシの生育, 子実収量および根系に及ぼす影響	85
第1節 トウモロコシの生育, 子実収量に及ぼす土壌硬度と肥料分布の影響	86
1. 材料および方法	86
2. 結果	88
3. 考察	89
第2節 トウモロコシの根の伸長と分枝に及ぼす土壌硬度と肥料分布の影響	93
1. 材料および方法	93
2. 結果	93
3. 考察	95
第3節 トウモロコシの土壌深さ別の根長に及ぼす土壌硬度と肥料分布の影響	97
1. 材料および方法	97
2. 結果	98
3. 考察	99
第4節 要約	101
図表	102

第5章 プラウ耕水田輪作体系における土壌の物理化学性とトウモロコシの 生育, 子実収量および飼料品質	123
第1節 プラウ耕水田輪作体系における土壌の物理化学性	124
1. 材料および方法	124
2. 結果	126
3. 考察	128
第2節 プラウ耕水田輪作体系におけるトウモロコシの生育, 子実収量および飼料品質	131
1. 材料および方法	131
2. 結果	133
3. 考察	135
第3節 要約	140
図表	141
第6章 総合考察	165
摘要	173
謝辞	175
引用文献	177

# 第1章

## 緒論

### 1. 日本の水田農業の現状

現在、食生活の変化、高齢化や人口減少等により毎年約 8 万 t ずつ米需要量が減少しており、この傾向は今後も続くと予想される（農林水産省 2018f）。田耕地面積は 1971 年の最大 336 万 ha から 2017 年には 242 万 ha に減少したが、全耕地面積 444 万 ha の 54% を占めており（農林水産省 2018d）、重要な食糧生産基盤である。しかし、田耕地面積のうち水稲作付面積は 2017 年において 147 万 ha と 60% にとどまっており（農林水産省 2018d）、将来的には、田耕地面積の約 6 割で主食用米を賄えると考えられ、余剰水田がさらに増加することが予想されている（農林水産省 2010）。田耕地面積の減少に伴い、米生産量は 1963 年の最大 1341 万 t から 2017 年には 782 万 t に減少した。現在、田耕地面積のうち、水稲が作付けされていない水田では、ムギ類やダイズ、飼料作物等の転作作物が栽培されている。しかし、水田での畑作物の栽培では湿害による低収、梅雨および秋雨によって播種時や収穫時に適期作業が行えないことによる低収などの問題があり、ムギ類およびダイズの作付面積はこの 10 年間横ばい傾向である（農林水産省 2014）。そのため、今後も水田転換畑におけるムギ類やダイズの栽培改善と作付面積の増加を図るとともに、さらに増加する余剰水田で栽培することのできる新たな転作作物が必要である。現在、ムギ類やダイズに加えて飼料用米や飼料用イネ、米粉用などに用いられる新規需要米が主食用米に代わる新たな転作作物として作付面積を拡大している。

2015 年に策定された「食料・農業・農村基本計画」では、2025 年までにカロリーベース食料自給率を 50%、コムギ、ダイズの自給率をそれぞれ 16、12% に引き上げることが目標とされており、イネを除いた穀物の国内生産が一層求められている。また、純国内産飼料自給率は 2014 年の 27% から 2025 年には 40% に引き上げることが公表されており、国産飼料の増産が一層求められる。粗飼料自給率の 78% と比較して、濃厚飼料自給率は 14% と著しく低いため飼料自給率の向上には濃厚飼料を国内で生産する必要がある。濃厚飼料のなかでも、飼料用トウモロコシ子実は毎年約 1000 万 t 輸入されており、濃厚飼料増産のためには飼料用トウモロコシ子実を今後は国内で生産していく必要がある。

このように食糧生産基盤である水田の利活用のための新たな転作作物の要望および濃厚飼料増産という背景から飼料用トウモロコシ子実を水田転換畑で本作化することが期待されている。

## 2. 水田転換畑において子実用トウモロコシを栽培する意義

水田転換畑は、水田を畑作物生産のために利用形態を転換した農地であり、畑作物を栽培するためには良好な作物生育と機械作業のために排水対策が重要である（農業・生物系特定産業技術研究機構 2006）。圃場整備事業の伸展もあり、米の生産調整が開始された 1970 年と比較して排水良好な圃場は増加し、水田転換畑における排水性は向上している。再び水田に戻す予定のない永久転換畑を除いて、水田転換畑は水田に戻される。つまり、水稲と畑作物の水田輪作が行われている。作業機械を水稲と畑作物に共用できれば機械費の低減にもつながり、低コストとなる。後述するが、既に畑作用業機械を用いたプラウ耕鎮圧体系水稲乾田直播栽培技術が開発されており、従来の代かき水田のような耕盤が形成されにくい水稲栽培技術が広がりつつある。以上のことから、水田転換畑で栽培される畑作物は水稲と機械を共有化できるものが望ましい。

子実を収穫するために栽培するトウモロコシ（子実用トウモロコシ）は、サイレージ用トウモロコシを慣行法で栽培し、通常の収穫期である黄熟期には収穫せず、雌穂が完熟して子実水分が低下するのを待ってから収穫され、残った茎葉を畑にすき込む栽培体系である（尾崎 2015）。子実用トウモロコシは、1960 年代まで北海道を中心に全国で約 3.8 万 ha 栽培されていた（農林省農林経済局統計調査部 1969）。当時、トウモロコシ子実の 10 a 当たりの収量は 300 kg 未満と低く、安価な輸入子実用トウモロコシに押されて国内で子実用トウモロコシはほとんど栽培されなくなった。しかし、近年では子実収量の高い品種が開発され、子実用トウモロコシの収量は 10 a 当たり 900-1000 kg 程度まで到達し（中津ら 2015a）、北海道の道央地域ではコムギの連作障害回避のための新規作物として子実用トウモロコシが栽培され始めている（濱村ら 2011）。子実用トウモロコシの播種機や防除機はダイズと共用できる（盛川 2015）。収穫についても、専用アタッチメントやコーンヘッダ（スナッパヘッド）を汎用コンバインに取り付けて使用でき（稲野ら 2017, 昆 2017）、サイレージ用トウモロコシのようなハーベスターやラッピングマシーンなどの機械を新たに必要としないため、耕種農家の既存機械で栽培できる。さらに、乾燥には米麦用循環式乾燥機が利用可能であることが明らかにされている（稲野ら 2017）。生産現場の概算では子実用トウモロコシの労働時間は 10 a 当たり 1.3 時間であり（平井 2016）、2017 年のダイズおよびコムギの 10 a 当たりの労働時間 7.1 時間および 3.6 時間（農林水産省 2018b, c）と比較して短い。政府は、農地中間管理機構を設立して担い手の農地利用が全農家の 8 割を占める農業構造の実現を目指して、担い手への土地の集積を進めている。そのため、今後も担い手の経営面積のさらなる拡大が予想される。一方、農業就業人口は今後も減少することが予想され（中央農業研

究センター 2018), 土地利用型作物主体の経営ではこれまで以上に少人数で大面積を管理することが求められる. 労働時間がダイズおよびコムギより著しく短い子実用トウモロコシは水田転換畑における新たな省力作物として期待できる. このように, 品種改良による収量の高位安定化や, 農業機械の汎用利用に加えて, 労働時間の少ない省力作物として子実用トウモロコシは注目されており, 北海道では 2015 年には 100 ha 超まで子実用トウモロコシの栽培面積が拡大している (富沢 2016).

わが国は, 2016 年にトウモロコシ子実を年間 1534 万 t, 3331 億円相当輸入している (農林水産省 2018e). 輸入国別にみると, 2014-2016 年はアメリカが 75%以上を占めており, 最大の輸入相手国である (農林水産省 2018e). しかし, 2012 年にアメリカで深刻な干ばつが発生した際の翌年のトウモロコシ輸入量に占めるアメリカの割合は 45%にまで低下し, 代わりにブラジルやウクライナからの輸入が増加した (農林水産省 2018e). 今後も気象変動等により, 最大の輸入相手国であるアメリカからのトウモロコシ輸入量が年によって変動する可能性も考えられる. さらにアメリカでは, 遺伝子組み換えトウモロコシの作付け割合が 2017 年には 92%に達している. 今後, 非遺伝子組み換えトウモロコシの安定調達に 10-20 年後には困難になる可能性が高く, 国産の非遺伝子組み換えトウモロコシ子実の生産も検討する必要がある.

以上のことから, 水田転換畑における子実用トウモロコシ生産の普及拡大により, 食糧生産基盤である水田の維持, 活用および濃厚飼料の原料となる安全なトウモロコシ子実の安定供給と自給率向上が可能となる.

### 3. これまでの水田転換畑におけるトウモロコシ栽培

水田転換畑におけるトウモロコシ栽培はこれまでも検討されてきた. しかし, 湿害に弱い作物であるトウモロコシ (青田・星野 1978, Kono ら 1987) の水田転換畑での作付面積は統計のある青刈りトウモロコシの栽培面積をみても, 全面積の 9%, 8490 ha となっている (農林水産省 2017). 水田転換畑でのトウモロコシ栽培において, 重粘土転換畑における初年度は土壤物理性が劣るため根圏が狭く (中野 1979), 転換後 1-2 年は畑地化の進行が表層のみであり, 作土下の還元的な土層に分布する根量が少なく, 水分の吸収阻害および窒素とリンの吸収低下により雌穂が発育不全となって低収となり (青田ら 1985, 1986), 低湿重粘土の水田転換畑における乾物収量は転換後 3 年目までは低いことが報告されている (青田・星野 1978). つまり, 水田転換畑において安定的なトウモロコシの子実収量を得るためには圃場の畑地化が求められる (高屋ら 1985, 佃ら 1989). そのため, 水田転換畑におけるトウモロコシの湿害対策として, まずは圃場の畑地

化を進めるために明渠や暗渠による排水対策が必要である。

水田転換畑において暗渠による排水対策がトウモロコシの湿害を軽減することが明らかにされている。トウモロコシ栽培において、重粘土質土壌では本暗渠間隔を 10 m 毎、補助暗渠間隔を 1-2 m 毎にすることで排水性が向上し、子実収量が増加する（上山ら 1987）一方、排水性が劣るほど、茎葉部の割合が増大し、子実の割合が減少する（上山ら 1989）。岩崎・三宅（1983）は、多腐植質黒ボクグライ土において、トウモロコシを栽培する際の排水目標を降雨後 1-2 日以内に気相率を 20%以上、pF 1.5 以上、地下水位は 30-35 cm 以下とした。このように、水田転換畑でトウモロコシを栽培するには排水の徹底が必要である。圃場整備事業の伸展もあり、2016 年時点で田耕地面積の 44%が排水良好な汎用田である（農林水産省 2016a）。トウモロコシの排水対策に関する研究が盛んに行われていた 1980 年の 30 a 程度以上の区画整備済圃場は約 100 万 ha であったが、2016 年には 157 万 ha まで増加した（農林水産省 2018a）。近年、営農機械で補助暗渠や本暗渠の施工が可能な作業機が開発されている（北川ら 2008, 冠ら 2014）。さらに、FOEAS（Farm-Oriented Enhancing Aquatic System）のように地下水位制御システム（藤森 2007）が入った圃場整備も進められている。このように、水田の圃場排水機能は改善されつつある。そこで、水田転換畑でトウモロコシを安定生産するためには耕種的な湿害軽減技術についても検討する必要がある。

トウモロコシの湿害を軽減する技術として、耐湿性品種の選択、播種法および施肥法が挙げられる。品種について、耐湿性には品種間差異があることが明らかにされており（菅野ら 2010）、耐湿性に優れる品種開発が進められているが（間野ら 2009）、市販品種として販売はされていない。トウモロコシの湿害を軽減する播種法として不耕起作溝栽培法（柿原ら 1996）や耕耘同時畝立て播種（菅野ら 2014）が開発されている。いずれの播種機も湿害が発生する圃場では一定の効果を示したが、両播種機ともにトラクタからの動力（PTO）を用いるため時速 2-3 km 程度での作業速度であり、限られた適期に大面積への作付けが想定される子実用トウモロコシ栽培での導入は限定的と思われる。施肥法について、湿害が発生した際には追肥による湿害軽減方法が明らかにされている（青田ら 1986）。住田ら（2013）は、転換畑において肥効調節型肥料による増収効果を明らかにした。しかし、想定される子実用トウモロコシの乾燥子実での販売単価は輸入トウモロコシ並の 30-40 円  $\text{kg}^{-1}$ であることを考慮すると、現時点において追肥作業や化成肥料もしくは配合肥料より価格の高い肥効調節型肥料をトウモロコシ栽培に使用することは現実的ではない。これら既存の耕種的なトウモロコシ湿害軽減技術は、省力・低コスト栽培や高速作業が望まれる大規模経営への導入は限定的であると考えられる。

一方、これまでほとんど検討されていない耕種的な湿害対策軽減技術として耕起法が挙げられる。つまりトウモロコシの前作である水稲栽培を無代かき栽培に転換し、水田転換畑にした際に排水を良好にする方法である。水田転換畑にする際に、代かき栽培より無代かき栽培の方が後作の畑作物の栽培に適していることが報告されており（太田ら 2001, 松波ら 2012）、水田輪作では水稲を無代かきで栽培する方が適していると考えられる。水田転換畑にした際に代かき後より無代かき後の方が碎土性に優れている（松波ら 2012）。しかし、これらの無代かき栽培後の畑作物の耕起はロータリ耕を用いた方法であり、時速 2-3 km 程度の作業速度である。現在、1 筆 1 ha 以上の大区画圃場も増加しており（農林水産省 2018a）、中には 2 ha 区画での整備が進められている地域もある（鴫田ら 2016）。そのような地域では、高速作業でできる水稲の無代かき栽培が求められる。

#### 4. 水田転換畑へのプラウ耕の再導入

耕起作業のもつ機能には、作物の種子が出芽するのに適した軟らかい土壌条件を作出する機能や播種作業等の障害となる雑草や不必要な植物を地中に埋め込む機能等がある（中 1981）。昭和 30 年代中頃までは一部の地域を除いては、犁耕・プラウ耕等反転耕を基幹とした方式が多くみられた（中 1981）。しかし、その後水田地帯を中心として鋤・プラウに代わってロータリ耕等攪拌耕が普及し、畑作地帯にも普及・定着した（中 1981）。とくに、水稲作では耕うん・代かき作業まで利用でき、取り扱いも容易なロータリ（後藤 1997）が普及し、反転耕は激減した。前述したように操作性の良さから、長らくロータリ耕が水田農業における慣行耕起法として定着していた。しかし、近年、経営規模の拡大（農林水産省 2016b）や大区画圃場の整備（鴫田ら 2016）により水田農業においても高速作業が求められるようになり、100 馬力級以上のトラクタが使われるようになった。水田農業への大型トラクタの導入に伴い、トラクタからの動力（PTO）を用いないプラウ耕が水稲栽培でも使用されるようになり乾田直播栽培や湛水直播栽培で使用されている（盛川・大谷 2009, 大谷 2013a, 2015, 進藤ら 2017）。乾田直播は、代かきをしないため適地が限られていた（丸山 2006）。しかし、播種前後の鎮圧による灌漑水の浸透抑制手法が開発され（冠ら 2012）、営農現場においても鎮圧による減水深の低減が確認された（冠ら 2015, 2017）。さらに、鎮圧することで乾田直播の導入が可能となる面積は拡大する（冠ら 2016）。プラウ耕で耕起し、播種前後に鎮圧する乾田直播栽培技術はプラウ耕鎮圧体系水稲乾田直播と呼ばれ、畑作作業機を使うことで機械の汎用化を可能にしている（東北農業研究センター 2018）。プラウ耕鎮圧体系水稲乾田直播技術は水田農業へのプラウ耕の本格的な再導入に加えて、水田農業へ畑作作業体系を

導入したことにより、従来の水稲代かき移植栽培より高速作業を可能にした。

昭和 30 年代中頃以降に水田地帯でロータリ耕が普及して以降、水田におけるプラウ耕の研究は限られていた（上出 1979, 天野ら 1986, 飯田ら 1990）。ロータリ耕が慣行法として定着した後、水田転換畑でのプラウ耕の再導入の検討が北海道におけるコムギの初冬播き栽培で行われた。転換初年目の水稲後地の耕盤は堅く、砕土性が劣るため、慣行のロータリ耕では土の練り返しが問題となる（渡辺ら 1992）。一方、牽引式のチゼルプラウ耕は、緻密化した下層土の排水性や通気性を改良する目的で、土壤に亀裂を入れ、膨軟にするために開発され、高水分条件でも簡易耕起作業を実施できる（渡辺ら 1992）。そのため、1990 年代から、北海道において、春播コムギの根雪前播種栽培技術開発においてチゼルプラウを水田転換畑で利用する研究が始まった（渡辺ら 1992, 1994）。チゼルプラウ走行後は圃場の表面は凹凸が目立つが、春播コムギの発芽はロータリ耕と大差ないことが報告されている（渡辺ら 1994）。コムギのように粒径の小さい作物では砕土が荒くても播種することが可能であるが、粒径の大きいダイズやトウモロコシを播種する際には表層を耕耘機で砕土する必要がある。そこで、近年、水田転換畑においてチゼルプラウで粗耕起後に、パワーハローで砕土する体系が水田転換畑で研究されはじめている（松波ら 2017）。

## 5. 子実用トウモロコシを導入したプラウ耕水田輪作

大規模経営、大区画圃場に対応した高速作業かつ無代かき栽培を可能にしたプラウ耕鎮圧体系水稲乾田直播は畑作機械を共用できるため、ムギ類やダイズなど畑作物との輪作に適しており、大区画圃場におけるプラウ耕鎮圧体系水稲乾田直播を導入した 2 年 3 作の水田輪作体系が展開されている（大谷ら 2013b）。本体系では、2 年間でイネームギーダイズを栽培し、耕起体系は全てプラウ耕で行い、全作物の播種にグレーンドリルを用いる作業体系である（大谷ら 2013b）。プラウ耕による水田輪作技術開発が進んだことで、高速作業を可能にするプラウ耕と省力栽培が可能かつ濃厚飼料の原料となる子実用トウモロコシを導入したプラウ耕水田輪作の検討が必要になった。

農研機構東北農業研究センターでは、イネートウモロコシダイズの 3 年 3 作の水田輪作技術開発が進められており、イネはプラウ耕鎮圧体系水稲乾田直播栽培とし、全ての作物をプラウ耕で栽培できる耕起体系の確立を目指している（篠遠 2017）。佃ら（1989）は、田畑輪換でダイズを安定生産するためにはトウモロコシとの輪作が有効であることを明らかにしており、水田輪作にトウモロコシを導入することによりダイズの安定生産が期待できる。また、田畑輪換の繰り返

しや長期畑転換により地力の低下が明らかにされており（住田ら 2005, 新良 2016), 子実以外の茎葉部等をすき込める子実用トウモロコシを栽培することで地力の低下を軽減する効果が期待される。子実用トウモロコシ品種の栽植密度や肥培管理については明らかにされているが（中津ら 2015a, b, c, 富沢ら 2017a, b), 水田転換畑の子実用トウモロコシ栽培において耕起法を比較した知見はほとんどない。また, 子実用トウモロコシを導入した水田輪作において, プラウ耕とロータリ耕の比較研究は行われていない。今後, 水田輪作におけるプラウ耕体系の普及のためには, 作物の生育, 収量および品質を慣行耕起法であるロータリ耕と比較して評価する必要がある。

以上のことから, 本研究では, プラウ耕鎮圧体系水稻乾田直播を導入したイネートウモロコシ一ダイズの3年3作水田輪作体系の確立を目指して, 水田転換畑での高速作業体系であるプラウ耕が土壌の物理化学性, 子実用トウモロコシの生育, 子実収量および根系に及ぼす影響について慣行耕起法であるロータリ耕と比較検討する。

第2章では, 黒ボク土の水田転換畑において, プラウ耕がトウモロコシの生育, 子実収量に及ぼす影響および品種間差異を慣行耕起法であるロータリ耕と比較して明らかにする。第3章では, 黒ボク土の水田転換畑において, プラウ耕が土壌の物理化学性, トウモロコシの根系および倒伏に及ぼす影響をロータリ耕と比較する。また, 早生晩生の6品種を用いてプラウ耕がトウモロコシの耐倒伏性に及ぼす影響について比較検討する。第4章では, 黒ボク土の水田転換畑において, プラウ耕による土壌硬度と肥料分布の違いがトウモロコシの根系に及ぼす影響について明らかにする。第5章では, プラウ耕水田輪作体系におけるトウモロコシの生育, 子実収量, 作業特性および飼料品質について慣行耕起法であるロータリ耕体系と比較して明らかにする。

総合考察では, 第2章から第5章までの解析に基づいて, 水田転換畑においてプラウ耕で栽培したトウモロコシの生育, 子実収量および根系特性を基に, 水田輪作への子実用トウモロコシの導入の可能性と今後の普及に向けた課題を議論する。

## 第2章

### 黒ボク土の水田転換畑におけるプラウ耕が トウモロコシの生育および子実収量に及ぼす影響

畑地のサイレージ用トウモロコシ栽培ではプラウ耕が慣行耕起法であった（林ら 2009, 森田ら 2012）が、わが国の水田転換畑では慣行耕起法としてロータリ耕が定着しており、プラウ耕はこれまでほとんど使われてこなかった。その理由は、耕起と碎土を同時に行え、代かきまで利用でき、取り扱いも容易なロータリが、1960 年以降に水田地帯を中心に普及したためである（中 1981, 後藤 1997）。しかし、近年の大規模経営ではロータリ耕より高速作業が可能なプラウ耕を水稻栽培で導入する事例が増えている。子実用トウモロコシは省力作物として注目されているため、耕起作業にはロータリ耕より高速作業が可能なプラウ耕が用いられる場合が多いと推察される。また、わが国の水田転換畑でのトウモロコシ栽培に関する研究はサイレージ用が主であったため、茎葉乾物重もしくは雌穂乾物重が収量の指標として用いられ、子実収量に関してはほとんど報告されてこなかった（青田・星野 1978, 菅野ら 2014）。以上のことから、水田転換畑での子実用トウモロコシ栽培を普及するには、水田転換畑でプラウ耕を導入した際のトウモロコシの子実収量を慣行耕起法であるロータリ耕と比較して明らかにする必要がある。

そこで本章では、黒ボク土の水田転換畑において、プラウ耕で栽培したトウモロコシの生育、子実収量および品種の生育反応を慣行耕起法であるロータリ耕と比較して明らかにする。第1節では、耕深を同じにしたロータリ耕区およびプラウ耕区を設けて、トウモロコシ2品種を用いて2カ年の試験を実施した。第2節では、プラウ耕で栽培したトウモロコシの生育および子実収量に及ぼす登熟初期の遮光の影響について検討した。第3節では、早生および中生をそれぞれ3品種ずつ合計6品種用いて、プラウ耕に対するトウモロコシの品種の生育反応について検討した。日本の代表的な水田土壌である灰色低地土やグライ土ではなく、黒ボク土で試験を実施した理由は東北農業研究センター内の水田圃場が黒ボク土のみのためである。なお、本章におけるプラウ耕とはチゼルプラウで耕起後に、パワーハローで碎土する体系である。

## 第1節 トウモロコシの生育および子実収量に及ぼすプラウ耕の影響

本章では、黒ボク土の水田転換畑におけるプラウ耕がトウモロコシの生育および子実収量に及ぼす影響について明らかにする。草高、葉色値、乾物重、根重密度および根長密度を生育時期別に調査し、子実収量についても明らかにする。また、絹糸抽出期前後における成長解析を行い、子実収量との関係性を明らかにすることでプラウ耕が子実収量に及ぼす影響について解析する。

### 1. 材料および方法

#### (1) 栽培

試験は、2014年および2015年に農研機構東北農業研究センター内の多湿黒ボク土の水田転換畑（岩手県盛岡市，前作：代かき移植水稻，標高186 m）で実施した。東北北部の水田転換畑での子実用トウモロコシ栽培を想定し、水稻移植期後の5月下旬から6月上旬に播種した場合でも11月上旬までに成熟期に到達するトウモロコシ（*Zea mays* L.）2品種（早生：34N84，中生：34B39，パイオニアエコサイエンス社育成）を供試した。両品種は、福島県では飼料用トウモロコシの優良品種に選定されており（福島県農業総合研究センター 2008），34N84は標準品種のセシリアより紋枯病の耐病性に優れ，全乾物収量も優れる。34B39は，標準品種のセシリアより耐病性に優れ，全乾物収量は同等以上である。

試験区は，ロータリ区およびプラウ区を設けた。ロータリ区は，28馬力のトラクタ（GL280，クボタ社製）に装着した1.7 m幅のロータリ（RL6G，クボタ社製）を用いて耕深20 cmで耕耘した。プラウ区は，85馬力のトラクタ（TJ85CFS1GQCY，イセキ農機社製）に装着した1.9 m幅のチゼルプラウ（MSC6PSQLK，スガノ農機社製）を用いて耕深20 cmで耕起した後，2.3 m幅のパワーハロー（BETA230SP，スガノ農機社製）を装着して，表層5 cmを碎土した。2014年はロータリ区およびプラウ区をそれぞれ1区（48 m×7 m）ずつ設け，各耕起区内に各品種を1区ずつ設けた（24 m×7 m）（図2-1-1）。2015年は耕起法および品種を要因とした3ブロック制の細分区法（strip plot design）で実施し，18 a（38 m×48 m）を3分割して，各ブロック内にロータリ区およびプラウ区を設け（38 m×8 m），さらに，各耕起区内に各品種を1区ずつ設けた（19 m×8 m）（図2-1-2）。各耕起区1反復当たりの試験区面積は2014年が336 m<sup>2</sup>（48 m×7 m），2015年が304 m<sup>2</sup>（38 m×8 m）であった。なお，2014年および2015年の試験はそれぞれ異なる圃場で実施した。

2014年5月30日，2015年5月29日に目皿交換式大粒播種機（PL-110，みのる産業社製）を用いて条間75 cm，株間21 cmで2-3粒播種した。播種後14日に間引きを行い，一本立てとし

た. 基肥は, 耕起前に配合肥料 (N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=15:20:15) を N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O の成分でそれぞれ 15, 20, 15 g m<sup>-2</sup> 施用した. 播種後に除草剤はジメテナミド・リニュロン剤 (ジメテナミド P 8.5%, リニュロン 12%), 殺虫剤はダイアジノン剤 (ダイアジノン 5%) を処理した.

気象データは, 農研機構東北農業研究センター内気象観測所で測定した降水量, 平均気温および日照時間を用いた.

#### (2) 土壌貫入抵抗値

2014年5月31日にロータリ区およびプラウ区それぞれ3カ所ずつ深さ20 cmまでの土壌貫入抵抗値を貫入式抵抗計 (DIK-5521, 大起理化工業社製) を用いて測定した.

#### (3) 生育調査

播種後20日から約10日ごとに各反復で30株 (2014年) もしくは5株 (2015年) について草高および葉色を調査した. 葉色 (SPAD値) は, カラーの確認ができた最上位展開葉の葉身中央部を葉緑素計 (SPAD-502 Plus, コニカミノルタ社製) を用いて測定した. ただし播種後74, 80日ではそれぞれ最上位着雌穂節位葉の葉色を測定した.

#### (4) 根重, 根長および乾物重調査

第3葉期 (播種後25日), 雄穂形成期 (2014年; 播種後47日, 2015年; 播種後48日), 絹糸抽出期 (播種後63日), 乳熟期 (播種後80日), 糊熟期 (播種後101日) に各反復で18株 (2014年) もしくは3株 (2015年) を地際より抜き取り, 葉身, 葉鞘および稈, 雌穂 (苞葉含む; 乳熟期, 糊熟期に採取) に分解し, 80°Cで2日間乾燥後に各器官別の乾物重を秤量した. 成熟期 (2014年; 播種後132日, 2015年; 播種後133日) には, 各反復で30株 (2014年) もしくは5株 (2015年) の地上部乾物重を糊熟期までと同じ方法で調査した. 抜き取った個体のうち各反復6株 (2014年) もしくは1株 (2015年) の葉面積を葉面積計 (AAM-9, 林電工社製; LI-3100C, LI-COR社製) で測定し, 比葉面積を算出し, 葉身の乾物重から残りの株の葉面積を求めた. 地上部サンプル1株を中心に条に直交して40 cm (幅) × 21 cm (長さ) × 20 cm (深さ) の土壌をシャベルを用いて掘り出し, 丁寧に土壌を洗い流した後, 根を稈基部から切り離した. 各反復6株 (2014年) もしくは1株 (2015年) の根は根長の分析に供試するため70%エタノール水溶液で保存し, 残りの株は80°Cで2日間乾燥後に乾物重を測定した. 保存した根はフィルムスキャナー (Epson expression 1680; Epson expression 4870, Epson社製) を用いて, 読み込みの設定を8ビットグレースケール, 画像のドット密度を1000 dpiで撮影し, TIFF画像で保存した. 画像は, 根解析ソフト (WinRhizo, Regent Instruments社製) を用いて解析し, 根長を計測した後, 単位根乾物重当たりの根長で表される比根長を算出して, 根の乾物重から残りの株の根長を求めた. 根重

密度および根長密度は1株毎の根重および根長を採取した土壌体積 (16800 cm<sup>3</sup>) で除して求めた。

#### (5) 成長解析

絹糸抽出期前後の個体群成長速度は雄穂形成期 (2014年; 播種後47日, 2015年; 播種後48日) および乳熟期 (播種後80日) に採取した地上部乾物重の差を日数で除して算出した。

#### (6) 収量調査

成熟期に各反復当たり6カ所 (2014年) もしくは1カ所 (2015年) の隣接する3条を1.5 mの長さ (3.4 m<sup>2</sup>) で全雌穂を収穫した。全雌穂は脱穀した後, 粒数, 百粒重および子実収量を計測した。さらに, 成熟期に地上部乾物重調査用に抜き取った株について雌穂長を測定した。穀物水分計 (PM650, ケット科学研究所社製) で子実水分を測定し, 子実水分含有率15%に換算した値で求めた。

#### (7) 統計解析

2014年は供試2品種について, ロータリ区, プラウ区それぞれ1反復の平均値を示した。統計解析は統計解析ソフト (JMP11.2.0, SAS Institute Japan Ltd. 製) を用いて行った。

## 2. 結果

### (1) 気象概況

2カ年の生育期間中の気象概況を表2-1-1に示した。生育期間の気象の特徴について, 2014年は平年より多雨, 絹糸抽出期前後の8月上旬に寡照であり, 2015年は平年より少雨, 絹糸抽出期前後の8月上旬に多照であった。各年次について詳しくみると, 2014年は6月6日頃から7月25日頃が梅雨期であり, 低気圧や台風8号の影響で7月上旬の降水量は平年比280%であり, 梅雨期 (6月上旬-7月下旬) の降水量は平年比109%と平年をやや上回った。2015年は, 東北北部の梅雨入りがかなり遅く, 6月26日頃であり (気象庁 2015), 梅雨明けが7月29日頃であった。梅雨期の6月下旬から7月下旬の降水量は平年比62%と平年以下の少雨であった。8月上旬および中旬の平均気温は2014年より2015年の方がそれぞれ1.6, 0.6°C高かった。2014年の8月上旬から中旬の積算日照時間は44時間と平年比48%であったが, 2015年では116時間と平年比126%であった。8月上旬から中旬の積算日照時間は2015年と比較して2014年では38%と短かった。

### (2) 土壌貫入抵抗値

2014年の土壌貫入抵抗値を図2-1-3に示した。ロータリ区およびプラウ区ともに深さ5 cm程

度までは0.2-0.3 MPaで推移したが、深さ5 cmより深くなるにつれプラウ区で土壌貫入抵抗値が大きくなった。深さ7.5, 10, 12.5 cmの土壌貫入抵抗値はロータリ区では0.2 MPa程度で推移した一方、プラウ区ではそれぞれ0.5, 1.1, 1.4 MPaであった。

### (3) 乳熟期までの生育

2カ年の生育を図2-1-4に示した。結果については両品種の平均値を示した。草高が最大となる水熟期に耕起法の差は2カ年ともみられなかった。葉色値（SPAD値）は、2014年では耕起法による顕著な差はみられなかった。2015年の第3葉期（播種後20日）のプラウ区のSPAD値はロータリ区（35）よりプラウ区（37）で高かったが、それ以降の生育時期には耕起法の差がみられなかった。葉面積指数（LAI）は、全生育期間を通して2カ年とも耕起法による明瞭な差はみられなかった。

絹糸抽出期を表2-1-3に示した。絹糸抽出期は、ロータリ区よりプラウ区で1-2日早かった。

### (4) 根重密度および根長密度の推移

根重密度および根長密度の推移を図2-1-5に示した。2014年の乳熟期（播種後80日）の根重密度はロータリ区よりプラウ区で大きい傾向であったが、2015年の根重密度は生育期間を通じて耕起法による差はみられなかった。2014年の乳熟期（播種後80日）の根長密度はロータリ区よりプラウ区で大きい傾向であったが、2015年の根長密度には耕起法の有意な差はみられなかった。しかし、雄穂形成期（播種後47-48日）から乳熟期（播種後80日）において、ロータリ区よりプラウ区でやや大きい傾向がみられた。また、2015年の雄穂形成期、絹糸抽出期および乳熟期の根長密度はそれぞれ2014年比200%、125%、152%と2015年で大きい傾向であった。

### (5) 地上部乾物重の推移

地上部乾物重の推移を図2-1-6に示した。2カ年とも絹糸抽出期の地上部乾物重に耕起法の差はみられなかった。しかし、2014年では、乳熟期（播種後80日）および糊熟期（播種後101日）にロータリ区よりプラウ区で地上部乾物重が大きい傾向であった。

### (6) 絹糸抽出期前後の成長解析

絹糸抽出期前後（雄穂形成期-乳熟期）の個体群成長速度（CGR）、純同化率（NAR）および平均葉面積指数（平均LAI）を表2-1-2に示した。2014年のCGRおよびNARはロータリ区よりプラウ区で大きい傾向であった。平均LAIに耕起法による明らかな傾向がみられなかったことから、2014年にプラウ区でCGRが大きい要因はNARの向上によることが示された。2015年にも同じ傾向がみられたが、耕起法の差は2014年より小さかった。

### (7) 絹糸抽出期前後の個体群成長速度と乳熟期の根長密度との関係

絹糸抽出期前後の個体群成長速度と乳熟期の根長密度との関係を図 2-1-7 に示した。両者には 1%水準で有意な正の相関関係が認められた。

#### (8) 収量調査

子実収量および収量構成要素を表 2-1-3 に示した。2014 年より 2015 年で雌穂長が長く、粒数が多く、百粒重が大きく、子実収量が高い傾向であった。雌穂長および百粒重には耕起法の差がみられなかった。2014 年にはロータリ区よりプラウ区の粒数が多く、子実収量が高かったが、2015 年には耕起法の差がみられなかった。

子実収量と収量構成要素との関係を表 2-1-4 に示した。子実収量と粒数には 5%水準の有意な正の相関関係が認められた。

### 3. 考察

トウモロコシの草高、SPAD 値および LAI は 2 年間ともに耕起法による差はみられなかった (図 2-1-4) ことから、プラウ耕はロータリ耕と同程度の生育となることが明らかとなった。しかし、絹糸抽出期は、ロータリ区よりプラウ区で 1-2 日早く (表 2-1-3)、プラウ耕により生育はやや促進されたと考えられた。トウモロコシの北限地帯では、出芽期から第 4 葉期の地上部乾物増加速度が登熟期間の雌穂の成長に大きな影響を及ぼす (吉良 1985)。東北北部の水田転換畑で子実用トウモロコシを栽培する場合、水稻移植後の 5 月下旬から 6 月上旬が播種時期になると予想され、慣行のトウモロコシ播種適期である 5 月上中旬より晩播になると考えられる。子実用トウモロコシは成熟期に収穫されるため、黄熟期に収穫されるサイレージ用トウモロコシより長い生育期間を必要とする。したがって、ロータリ耕と同程度の生育を維持でき、絹糸抽出期を早めるプラウ耕は生育可能期間の短い東北地域や北海道の水田転換畑で子実用トウモロコシを栽培する際に有利であると考えられる。

雄穂形成期から乳熟期の根長密度には耕起法の有意差は認められなかったものの、ロータリ区よりプラウ区でやや大きい傾向が認められた (図 2-1-5c, d)。耕起と砕土を同時に行えるロータリ (後藤 1997) は本節の場合、耕深 20 cm まで砕土できるが、チゼルプラウは作土をけん引づめで破碎し膨軟にするのが主な役割であり (農業機械学会 1996)、ロータリと同程度の砕土率は期待できない。そのため、パワーハローで砕土された表層 5 cm 以下では、砕土されていない土塊がロータリ区よりプラウ区で多く存在していたと考えられる。これは、深さ 5 cm 以下の土壌貫入抵抗値がロータリ区と比較してプラウ区で急激に大きくなっていること (図 2-1-3) からも推察できる。イネ科作物の中でトウモロコシの根の圧縮土層への貫通力は小さい (田中丸ら 1998)。

そのため、プラウ区では表層 5 cm 以下への根の伸長が抑制され、下層方向ではなく表層の横方向へ根系が伸長したと考えられた (図 2-1-8). プラウ区の土壌深さ 5 cm 以下では十分に土壌が攪拌されず、プラウ区では土壌の浅い部分に肥料が分布していたものと推察される. このような条件は根系の浅いトウモロコシに対しては有利であると考えられている (Trachsel ら 2013). つまり、プラウ耕では肥料と根長が表層 0-5 cm に集中したため、表層の根系が拡大し、ロータリ耕より根長密度が大きくなったと推察された. これまでも不耕起あるいは簡易耕栽培によりトウモロコシの根量が表層で増加することが報告されている (Barber 1971, Anderson 1987, Ball-Coelho ら 1998, 辻ら 2002). その要因として、Anderson (1987) は簡易耕栽培による表層土壌の肥沃化をあげている. 耕起法の違いにより根系の分布が異なる場合、栽培管理法も異なる可能性が考えられ、今後、水田転換畑におけるプラウ耕がトウモロコシの根系に及ぼす要因について土壌の物理化学性および土壌中の生物相の観点からさらに解析していく必要がある. 2014 年より 2015 年で根重密度および根長密度が大きかった要因は梅雨期の降水量の違いによると考えられた. 2014 年と比べて 2015 年では、梅雨期 (6 月下旬-7 月下旬) の降水量が平年比 62% と少なかったことで (表 2-1-1), 降雨に伴う根の生育遅延が発生せず、根の生育にとって良好な生育環境であったと推察された.

2014 年において乳熟期および糊熟期の地上部乾物重はロータリ区よりプラウ区で大きい傾向であった (図 2-1-6a). 低収量品種群と比較して高収量品種群のトウモロコシは絹糸抽出後 30 日の地上部乾物重が大きく (Tao ら 2014), 2014 年のプラウ区で同様な現象が確認された. すなわち、絹糸抽出期以降の登熟期の乾物生産能はプラウ耕により向上する可能性が示唆された.

2014 年の子実収量はロータリ区と比較してプラウ区で高い傾向が認められた (表 2-1-3). また、2015 年の子実収量には耕起法による有意な差は認められなかったが、2015 年の子実収量は 2014 年比 122% と大きい傾向であった (表 2-1-3). そこで、2015 年に多収となり、2014 年では収量が低かった要因、2014 年にプラウ区で増収傾向となった要因について以下に考察する.

まず、2015 年の多収要因として気象および根系の発達はその要因として考えられた. 2014 年と比べて 2015 年では、梅雨期 (6 月下旬-7 月下旬) の降水量が平年比 62% と少なかったこと (表 2-1-1) で播種後 25 日以降の根系の発達が両耕起区ともに良好であった (図 2-1-5c, d). さらに、絹糸抽出期から絹糸抽出後 2 週間にあたる 8 月上旬から中旬にかけて高温・多照となり (表 2-1-1), この期間の個体群成長速度が 2014 年より優れ (表 2-1-2), 粒数も増加したことで多収になったと推察された. トウモロコシでは  $1000 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$  の収量水準は多収であり (中津ら 2015b), 2015 年ではロータリ区およびプラウ区ともに  $1000 \text{ g m}^{-2}$  以上の収量であった. つまり、2015 年

では両処理区ともに収量ポテンシャルが最大限引き出されたため耕起法による差が認められなかった可能性が大きいと推察された。

次に、2014年の収量が低かった要因について考察すると、2014年は、2015年および平年と比べて台風の影響もあり絹糸抽出期前の降水量が多く（表 2-1-1）、2015年より根系の発達が劣った（図 2-1-5c, d）。さらに、絹糸抽出期から絹糸抽出後2週間にあたる8月上旬から中旬の積算日照時間は2014年には平年比48%、2015年比38%と極端に少なかった（表 2-1-1）。絹糸抽出期から絹糸抽出後約2週間の間にトウモロコシの粒数は決定し（Reddy and Daynard 1983, Cirilo and Andrade 1994, Jones ら 1996）、絹糸抽出期前後の日射量はトウモロコシの粒数と密接な関係がある（Kiniry and Knievel 1995, Andrade ら 2000）。2015年と比較して2014年では絹糸抽出期前後のNARが減少したことによりCGRが小さくなった（表 2-1-2）ことから、光合成速度の低下が乾物生産を減少させたと推察された。また、2015年より2014年の粒数は少ない傾向であり（表 2-1-3）、子実収量と粒数には密接な関係がある（表 2-1-4）ことから2014年の子実収量の低下は粒数の減少によることが示された。これらのことから、2014年では絹糸抽出期から絹糸抽出後2週間にあたる8月上旬から中旬にかけての積算日照時間が少なかったことで植物体全体の光合成速度が低下し、粒数が減少して子実収量が2015年より低下したと推察された。

2014年にプラウ区で増収傾向となった要因は、耕起法による根系の発達の差であると推察された。2014年の絹糸抽出期（播種後63日）から乳熟期（播種後80日）の根重密度はロータリ区と比較してプラウ区で増加の程度が大きく、根長密度はロータリ区で減少した一方、プラウ区にて横ばい傾向であった（図 2-1-5）。絹糸抽出期前後のCGRおよび乳熟期の根長密度には正の相関関係が認められ（図 2-1-7）、この時期の根系の発達が乾物生産と密接な関係にあることが示唆された。さらに、絹糸抽出期前後のCGRは粒数と密接な関係があり（Andrade ら 1999, 2002）、2014年のプラウ区で粒数が増加傾向であった（表 2-1-3）。これらのことから、絹糸抽出期から乳熟期の根系の違いが絹糸抽出期前後の乾物生産能に影響を及ぼして、プラウ区では粒数が増加したことで増収傾向になったと推察された。

以上のように、2カ年を通して、黒ボク土の水田転換畑における子実用トウモロコシの生育および子実収量に耕起法による顕著な差は認められなかった。したがって、黒ボク土の水田転換畑で子実用トウモロコシを栽培する際にはプラウ耕でも十分に生育および子実収量を確保できた。

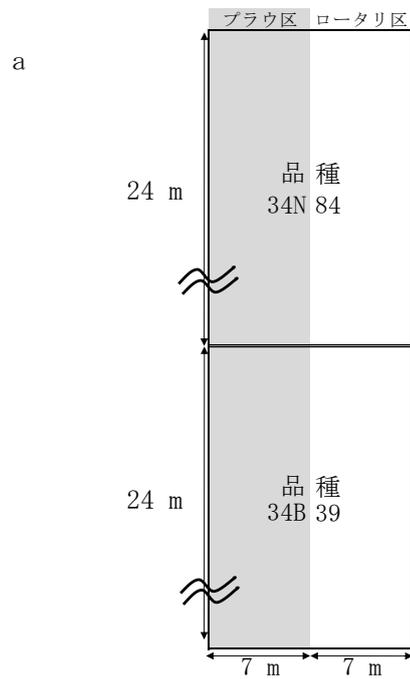


図 2-1-1 試験配置図 (a) および圃場の様子 (b : 播種前, c : 播種後 74 日) (2014 年).

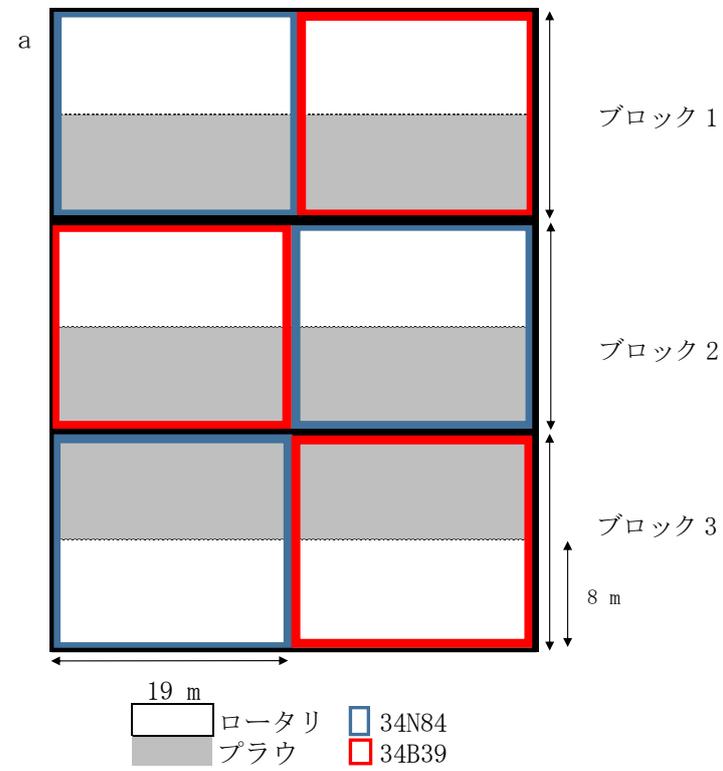


図 2-1-2 試験配置図 (a) および圃場の様子 (b: 播種後 24 日, c: 播種後 50 日) (2015 年).

表 2-1-1 2014 年および 2015 年の旬別の降水量, 平均気温, 日照時間.

月	旬	降水量 (mm)		平均気温 (°C)		日照時間 (hr)			
		2014 年	2015 年	2014 年	2015 年	2014 年	2015 年		
6 月	上	9	14	20.7	16.9	16.7	67	68	
	中	41	67	19.0	19.4	18.0	23	54	
	下	23	43	20.8	19.1	18.7	67	50	
7 月	上	193	4	22.2	20.4	19.9	53	66	
	中	43	8	21.9	23.7	20.9	34	52	
	下	27	97	23.9	25.8	22.8	82	55	
8 月	上	81	1	24.5	26.1	23.7	30	76	
	中	110	82	22.3	22.9	23.1	14	40	
	下	46	64	21.4	19.3	22.0	45	14	
9 月	上	27	39	20.0	19.8	20.5	47	22	
	中	12	63	16.1	17.9	18.3	61	44	
	下	57	4	15.1	16.1	15.7	72	66	
10 月	上	51	93	13.1	13.4	13.8	59	54	
6-10 月		720	579	658	20.1	20.1	19.5	654	661
平年値の統計期間		1981-2010 年 (降水量・平均気温)		1997-2010 年 (日照時間)					555

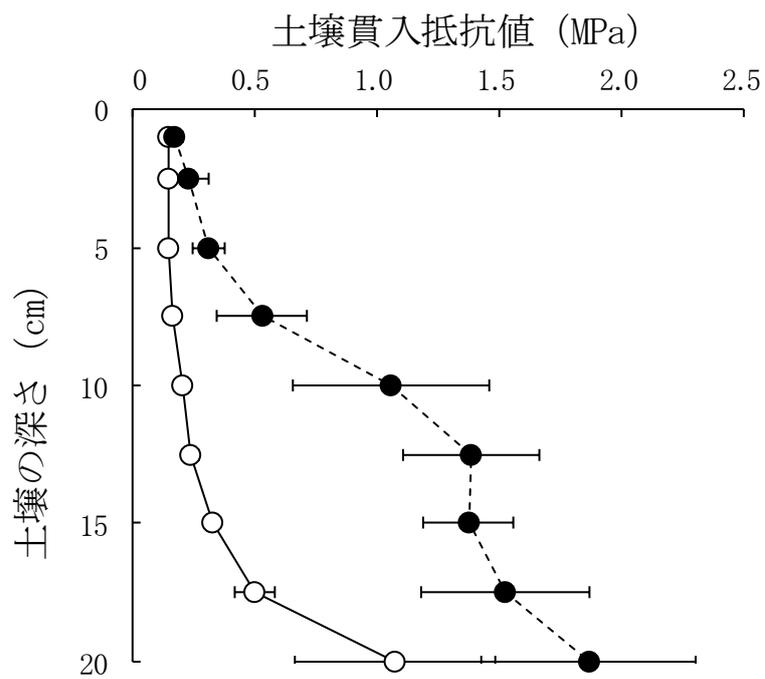


図 2-1-3 プラウ耕が土壤貫入抵抗値に及ぼす影響。  
 2014年5月31日に調査した3カ所の平均値。  
 図中の横棒は標準偏差を示す (n=3)。

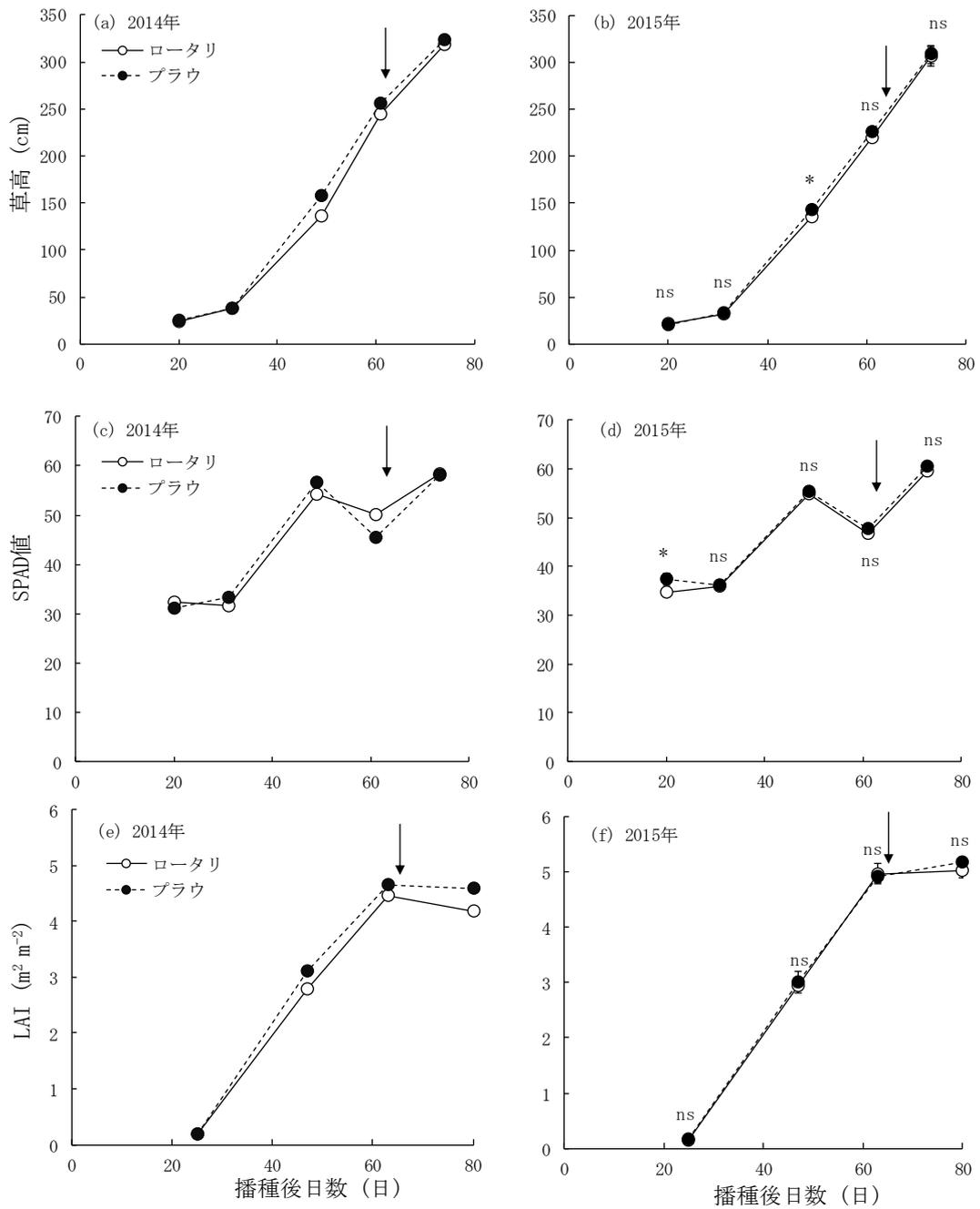


図 2-1-4 プラウ耕が草高，SPAD 値および葉面積指数（LAI）に及ぼす影響。  
 図中の縦棒は標準誤差を示す (n=6)。2015 年において，\*；5%水準で耕起処理について有意，ns；5%水準で耕起処理について有意差なし (n=6)。図中の矢印は絹糸抽出期を表す。

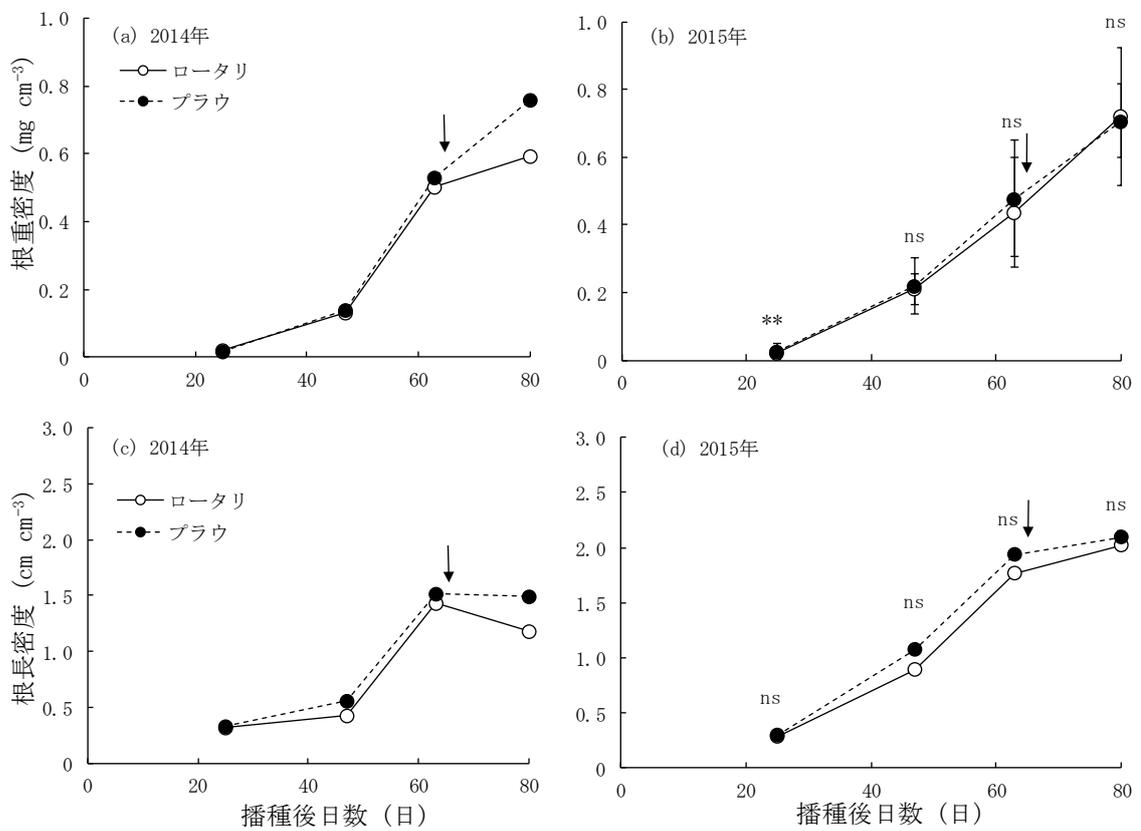


図 2-1-5 プラウ耕がトウモロコシの根重密度および根長密度に及ぼす影響。  
 図中の縦棒は標準誤差を示す (n=6)。2015 年において, \*\* ; 1%水準で耕起処理について有意, ns ; 5%水準で耕起処理について有意差なし (n=6)。図中の矢印は絹糸抽出期を表す。

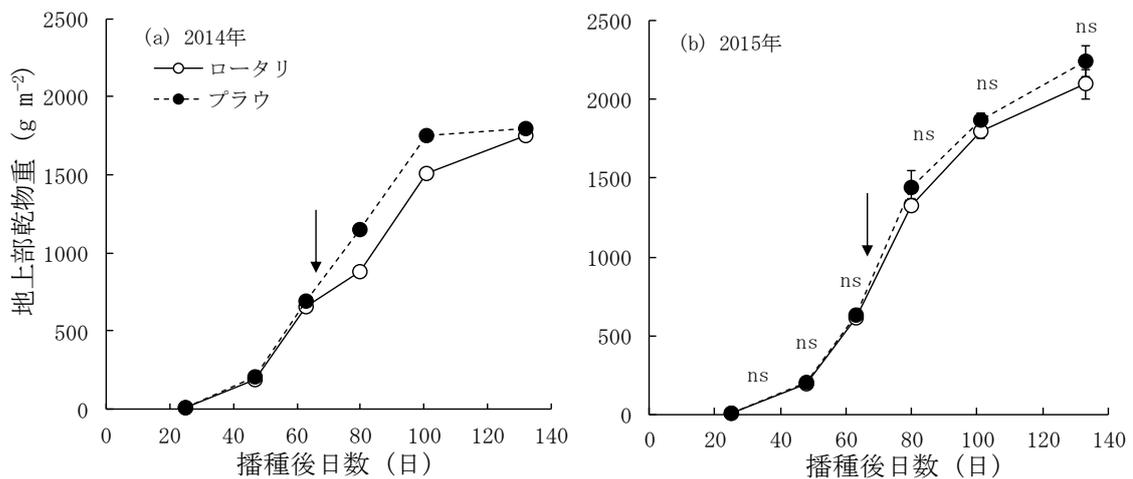


図 2-1-6 プラウ耕がトウモロコシの地上部乾物重に及ぼす影響。  
 図中の縦棒は標準誤差を示す (n=6)。2015 年において、ns ; 5%水準で耕起処理  
 について有意差なし (n=6)。図中の矢印は絹糸抽出期を表す。

表2-1-2 絹糸抽出期前後の個体群成長速度 (CGR), 純同化率 (NAR)  
および平均葉面積指数 (平均LAI).

年次	品種	耕起処理	CGR ( $\text{g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ )	NAR ( $\text{g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ )	平均LAI ( $\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$ )	
2014	34N84	ロータリ	21.4	6.2	3.4	
		プラウ	28.7	7.0	4.1	
	34B39	ロータリ	20.7	5.8	3.7	
		プラウ	28.1	7.5	3.8	
2015	34N84	ロータリ	35.5	9.4	3.8	
		プラウ	37.4	9.0	4.1	
	34B39	ロータリ	35.4	8.8	4.0	
		プラウ	39.8	10.3	3.9	
	分散分析		品種	ns	ns	ns
			耕起	ns	ns	ns
		品種×耕起	ns	ns	ns	

nsは5%水準で有意差がないことを示す (n=3).

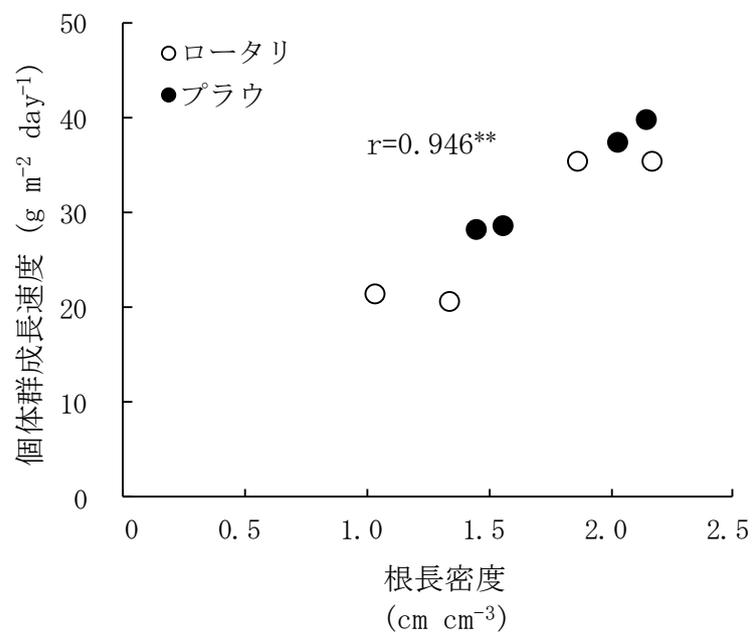


図 2-1-7 2014 年および 2015 年における絹糸抽出期前後の個体群成長速度と乳熟期の根長密度との関係。  
\*\* ; 1%水準で有意 (n=8).

表2-1-3 プラウ耕がトウモロコシの子実収量および収量構成要素に及ぼす影響.

年次	品種	耕起処理	絹糸抽出期 (播種後日数)	雌穂長 (cm)	粒数 ( $m^{-2}$ )	百粒重 (g)	子実収量 ( $g\ m^{-2}$ )	
2014	34N84	ロータリ	65	16.3	2668	30.5	815	
		プラウ	63	16.5	3006	30.2	909	
	34B39	ロータリ	66	18.6	2613	31.8	830	
		プラウ	65	17.0	3014	34.1	1026	
2015	34N84	ロータリ	65	17.8	3315	32.4	1077	
		プラウ	64	18.1	3537	32.9	1163	
	34B39	ロータリ	68	20.8	3395	32.4	1099	
		プラウ	67	20.5	3297	31.0	1022	
	分散分析		品種	**	**	ns	ns	ns
			耕起	*	ns	ns	ns	ns
		品種×耕起	ns	ns	ns	ns	ns	

\*, \*\*はそれぞれ5, 1%水準で有意であることを示す, nsは5%水準で有意差がないことを示す (n=3).

表2-1-4 2014年および2015年における子実収量と  
収量構成要素との相関係数.

	子実収量	雌穂長	粒数	百粒重
子実収量	1.000			
雌穂長	0.237	1.000		
粒数	0.870 **	0.338	1.000	
百粒重	0.639 *	-0.020	0.177	1.000

\*, \*\*はそれぞれ5, 1%水準で有意であることを示す  
(n=14).

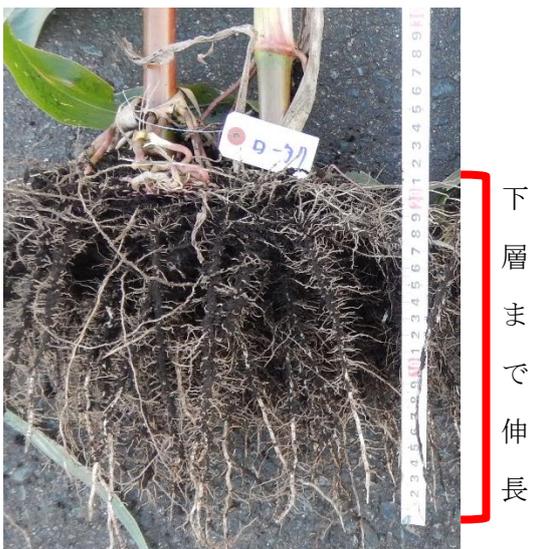
ロータリ耕



プラウ耕



ロータリ耕



プラウ耕



図 2-1-8 ロータリ耕とプラウ耕による根系の違い。  
第 5 章の水田輪作体系の試験と同様に実施した試験において、成熟期の 2015 年 10 月 6 日（播種後 126 日）における根系の様子。

## 第3章

### 黒ボク土の水田転換畑におけるプラウ耕が土壌の物理化学性と トウモロコシの根系および倒伏に及ぼす影響

土壌の表層部から下層部まで均一な碎土状態にできるロータリに対して、チゼルプラウは土をひっかくように耕起する（農業・生物系特定産業技術研究機構 2006）ため両耕起後の土壌物理性は異なる（渡辺ら 1994）。ロータリ耕では耕起した深さまで膨軟部分がほぼ均一に分布しているのに対して、チゼルプラウ耕では緻密な部分と破碎された膨軟部分が共存するきわめて不均一な状態となる（渡辺ら 1994）。渡辺ら（1994）は、春播コムギの根雪前播種栽培においてロータリ耕と比較してチゼルプラウ耕（パワーハローによる碎土は実施しなかった条件）で増収した要因を、土壌の物理的な不均一状態によって生じた養分や水分の不均一性が、作物の養分吸収にも有利に働いたと考察している。しかし、水田転換畑においてチゼルプラウで耕起後にパワーハローで碎土した際の土壌の物理化学性に及ぼす影響については明らかにされていない。

第2章では、プラウ耕により表層5 cm以下の土壌貫入抵抗値が1.0 MPa前後で推移することを明らかにした。土壌硬度が0.5 MPaを超える場合、作物の根の生育が阻害される（三好 1972）。トウモロコシを不耕起で栽培した場合、耕起した場合と比較して容積重および土壌貫入抵抗が大きいため出液速度が低下することが示唆されている（Guanら 2014）。また、プラウ耕やロータリ耕など耕起した場合と比較して不耕起ではトウモロコシの根系が表層で増加する（Barber 1971, Ball-Coelhoら 1998, 辻ら 2002）。したがって、水田転換畑においてプラウ耕でトウモロコシを栽培する場合、ロータリ耕と比較して根の生理的活性や根系分布が異なることが考えられる。また、耕起法により根系分布が異なるため、耐倒伏性についても異なる可能性が考えられる。

そこで本章では、黒ボク土の水田転換畑において、慣行耕起法であるロータリ耕と比較して、プラウ耕が土壌の物理化学性、トウモロコシの根系および倒伏に及ぼす影響を明らかにする。第1節では黒ボク土の水田転換畑において、プラウ耕が土壌の物理化学性およびトウモロコシの窒素吸収に及ぼす影響をロータリ耕と比較して明らかにする。第2節では、出液速度および成熟期の土壌深さ別の根長を調査して、プラウ耕がトウモロコシの根系に及ぼす影響について解析する。第3節では、早生と晩生それぞれ3品種ずつ合計6品種を用いてプラウ耕がトウモロコシ品種の耐倒伏性に及ぼす影響に検討する。なお、本章におけるプラウ耕とはチゼルプラウで耕起後に、パワーハローで碎土する体系である。

## 第1節 土壤の物理化学性に及ぼすプラウ耕の影響

黒ボク土の水田転換畑におけるプラウ耕が土壤の物理化学性に及ぼす影響について明らかにする。本節では、三相分布、土壤貫入抵抗値、作付前・第6葉期・成熟期の土壤養分、土壤中の肥料分布および生育時期別のトウモロコシの窒素吸収量を解析する。

### 3. 材料および方法

#### (1) 土壤硬度および土壤化学性

試験は、2015年に農研機構東北農業研究センター内の多湿黒ボク土の水田転換畑（岩手県盛岡市、前作：代かき移植水稻、標高186 m）で実施した。品種、施肥、耕起方法、播種方法は第2章第1節と同じである。

土壤の物理性について、ロータリ区およびプラウ区の砕土率、土壤貫入抵抗値および三相分布を3反復で調べた。砕土率は、耕起後に1反復につき3カ所の表層5 cmの土壤を採取し、目開き19 mmの網でふるい分けし、ふるいを通過した土塊の重量割合とした。播種日である2015年5月29日に貫入式抵抗計（DIK-5531、大起理化工業社製）を用いて土壤深さ30 cmまでの土壤貫入抵抗値を測定した。測定は1反復につき2回行い平均値を求めた。2015年6月8日に100 mLの採土円筒を用いてロータリ区およびプラウ区の土壤深さ10 cm（10-15 cm）、20 cm（20-25 cm）、30 cm（30-35 cm）から土壤を採取し、砂柱法（土壤環境分析法編集委員会1997）によりpF1.5に調整したときの固相率、液相率および気相率を測定した。

土壤の化学性については、耕起区を設定する前（播種前8日）に圃場全体から5地点、成熟期（播種後148日）にはロータリ区およびプラウ区それぞれ3反復において、各反復5地点から土壤採取器（HS-30S、藤原製作所社製）および採土円筒を用いて土壤を採取した。採取した土壤は、土壤深さ別（0-5、5-10、10-15、15-20 cm）に分けた後に5地点分を混合して土壤深さごとに1サンプルとし、風乾して分析に供試した。分析方法は、北海道立総合研究機構農業研究本部（2012）に従い、pH（H<sub>2</sub>O）はガラス電極法、有効態リン酸はトルオーグ法、交換性カリは原子吸光法、熱水抽出性窒素はオートクレーブ法、硝酸態窒素は硫酸ヒドラジニウム還元法、アンモニア態窒素はインドフェノール法で測定した。さらに、第6葉期（播種後34日）には土壤採取器（HSC-5、藤原製作所社製）を用いて0-5 cmおよび5-10 cmの土壤をロータリ区およびプラウ区それぞれ3反復において、各反復5地点から採取し、播種前および成熟期と同じ方法で調整して、同じ方法で土壤分析を実施した。

## (2) トウモロコシの窒素吸収量

第3葉期（播種後25日）、雄穂形成期（播種後48日）、絹糸抽出期（播種後63日）、乳熟期（播種後80日）、糊熟期（播種後101日）に各反復から平均的な草高の3株を地際より採取し、葉身、葉鞘および稈、雌穂（苞葉含む；乳熟期、糊熟期に採取）に分解し、80℃で2日間乾燥後に各器官別の乾物重を秤量した。成熟期（播種後133日）には各反復から平均的な草高の連続する5株の地上部乾物重を同様な方法で調査した。各部位はそれぞれ粉碎後に混和して全自動元素分析装置（Vario Max, Elementar社製）を用いて全窒素濃度を測定した。その後、全窒素濃度と地上部乾物重から全窒素含量を算出し、窒素吸収量とした。

## (3) 土壌中の肥料分布

土壌中の肥料分布のモデル試験は、2016年3月22日に農研機構東北農業研究センター内の畑圃場（岩手県盛岡市、標高186m）で実施した。あらかじめ200m<sup>2</sup>にLP肥料（LPコート30、ジェイカムアグリ社製）を500g/m<sup>2</sup>均一になるように土壌表面に全面施肥した後に耕起した。LP肥料の施肥量は、試験区全体に均一に肥料を散布できる量とした。本試験でLP肥料を用いた理由は白色であるため、土壌と肥料を選別する際に見つけやすいためである。

試験区は、ロータリ区およびプラウ区を設けた。ロータリ区は、85馬力のトラクタ（TJ85CFS1GQCY、イセキ農機社製）に装着したロータリ（LXR2408-L、松山社製）を用いて耕深20cmとした。プラウ区は、85馬力のトラクタ（TJ85CFS1GQCY、イセキ農機社製）に装着したチゼルプラウ（MSC6PSQLK、スガノ農機社製）を用いて耕深20cmで粗耕起した後、パワーハロー（BETA230SP、スガノ農機社製）に脱着後、表層5cmを碎土した。試験区は135m<sup>2</sup>（27m×5m）を3分割して、各区内にそれぞれロータリ区（4m×5m）、プラウ区（5m×5m）を設けた。

あらかじめ5cmごとに切断し、粘着テープで繋ぎ合わせた直径10cmの塩化ビニール管を土壌深さ25cmまで打ち込み、各反復3地点からそれぞれ土壌を採取した。採取した土壌は包丁を用いて深さ0-5、5-10、10-15、15-20cmごとに輪切りにして、風乾させた。風乾後に土壌深さごとのLP肥料の粒数を測定して、粒数比を算出した。

## (4) 統計解析

肥料分布試験については3反復のt検定で統計解析を実施した。解析は、統計解析ソフト（JMP11.2.0, SAS Institute Inc. 製）を用いて行った。

## 2. 結果

### (1) 碎土率、土壌貫入抵抗値および三相分布

耕起後の土壤表層 5 cm の碎土率はロータリ区、プラウ区それぞれ 71, 78%であり、耕起法による有意な差は認められなかった (図 3-1-1)。

土壤貫入抵抗値を図 3-1-2 に示した。土壤貫入抵抗値は、ロータリ区では土壤深さ 1-20 cm まで 0.2-0.3 MPa で推移した一方、プラウ区では土壤深さ 1-5 cm まで 0.2-0.7 MPa で推移したが、土壤深さ 5 cm より深くなると急激に増加し、耕起した 20 cm まで 1.0 MPa 前後で推移した。

土壤深さ別の三相分布を表 3-1-1 に示した。土壤深さ 10 cm では、ロータリ区と比較してプラウ区では気相率が低く、固相率が高かったが、液相率に耕起法による差はみられなかった。土壤深さ 20 cm では、ロータリ区と比較してプラウ区では気相率が低く、液相率および固相率は高かった。土壤深さ 30 cm では、気相率、液相率および固相率に耕起法による差はみられなかった。

## (2) 土壤化学性および肥料分布

作付前の土壤深さ別の土壤化学性を表 3-1-2 に示した。土壤の pH は 5.8-6.1 であり、土壤深さによる明瞭な差はみられなかった。有効態リン酸および硝酸態窒素は土壤深さ 0-15 cm と比較して土壤深さ 15-20 cm で少なかった。交換性カリおよび熱水抽出性窒素は土壤深さ 0-5, 5-10, 10-15 cm と深くなるにつれて増加した。

第 6 葉期の土壤深さ別の土壤化学性を表 3-1-3 に示した。土壤深さ 0-5 cm では、ロータリ区と比較してプラウ区において pH が低く、硝酸態窒素がロータリ区よりプラウ区で有意に多く、有効態リン酸、交換性カリおよび熱水抽出性窒素は有意ではないがロータリ区よりプラウ区で多い傾向であった。アンモニア態窒素に耕起法による顕著な差はみられなかった。土壤深さ 5-10 cm では、耕起法の有意差は認められなかったが、ロータリ区と比較してプラウ区において、pH が低く、有効態リン酸、交換性カリおよび硝酸態窒素は多い傾向であった。

成熟期の土壤深さ別の土壤化学性を表 3-1-4 に示した。土壤深さごとの pH, 有効態リン酸、交換性カリ、熱水抽出性窒素、硝酸態窒素に耕起法の差はみられなかった。土壤深さごとの交換性カリは、土壤深さ 0-5 cm において品種と耕起の交互作用が認められ、土壤深さ 15-20 cm では 34B39 より 34N84 で多かった。土壤深さごとのアンモニア態窒素は、土壤深さ 5-10 においてプラウ区よりロータリ区で多かった。

土壤深さ別の肥料粒数比を表 3-1-5 に示した。土壤深さ 0-5 cm の肥料粒数比はロータリ区よりプラウ区で高く、プラウ区では土壤深さ 0-5 cm の肥料粒数が全体の 87%であり、土壤深さ 0-10 cm に 95%以上の肥料が分布した。一方、土壤深さ 5 cm 以下の肥料粒数比はロータリ区よりもプラウ区で低く、土壤深さ 15-20 cm のプラウ区の肥料粒数比は 0%であった。なお、本節はプラウ耕が土壤中の肥料分布に及ぼす影響を調査するためのモデル試験である。そのため、LP 肥料

の散布量が少ないと調査が困難であるため、営農現場における施肥量を著しく上回る量を散布した。

### (3) トウモロコシの窒素吸収量

生育時期別の窒素吸収量を表 3-1-6 に示した。窒素吸収量に耕起法による有意差は認められなかった。

## 3. 考察

本節において、黒ボク土の水田転換畑における土壌物理性は耕起法により異なることが示唆された（表 3-1-1, 図 3-1-2）。ロータリ区とプラウ区の土壌貫入抵抗値は土壌深さ 5 cm を境に大きく異なった（図 3-1-2）。プラウ区の土壌貫入抵抗値は土壌深さ 1-5 cm までは 0.2-0.7 MPa で推移したが、土壌深さ 5-20 cm では 1.0 MPa で推移した。ロータリ耕では耕深 20 cm までほぼ均一に碎土された。プラウ区ではチゼルプラウ耕後の土壌表層にロータリ区より大きな土塊が確認された（図 3-1-1）。パワーハローによる碎土でプラウ区の表層の土塊はロータリ耕と同等であったことが碎土率により示された。しかし、土壌深さ 5-20 cm にはチゼルプラウ耕後のように碎土されていない土塊があるため土壌深さ 5 cm 以下の土壌貫入抵抗値が増加したと推察された。本節では、土壌深さ 5 cm 以上の平均重量直径を調査できなかったため、今後、プラウ耕が土塊の大きさに及ぼす影響について調査する必要がある。水田転換畑におけるチゼルプラウ耕では、水田時の土壌がそのまま残った緻密な部分と耕起された膨軟な部分が土壌深さ 10 cm まで約 1 : 1 の割合で存在することが報告されており（渡辺ら 1992）、パワーハローにより碎土されていない粗い土塊が 5 cm 以下の土壌貫入抵抗値を増加させた要因の一つとして考えられた。土壌深さ 10 cm および 20 cm の気相率はロータリ区よりプラウ区で低く、固相率はロータリ区よりプラウ区で高かった（表 3-1-1）ことから、土壌深さ 10 cm および 20 cm ではプラウ区で土壌が緻密であることが示唆された。さらに、気相率 10% 以下では酸素濃度が低く、トウモロコシの根（小川 1969）や植物の根（波多野 1996）の生育が妨げられるとされているが、本節におけるプラウ区では 10 cm の土壌深さで既に気相率が 10% 以下となっており、プラウ区の深さ 10 cm 以下の土壌物理性は根の生育に好ましくない環境であったと推察された。渡辺ら（1994）も、チゼルプラウ耕後の春播コムギの根は大部分が膨軟部分に分布したことを認めており、土壌硬度の高い緻密部分に根は伸長しづらいと考えられた。

肥料分布のモデル試験の結果、プラウ区では土壌深さ 0-10 cm に肥料粒数の 95% 以上が分布し、とくに土壌深さ 0-5 cm に 87% 集中しており、ロータリ区の 2.4 倍であった（表 3-1-5）。こ

れは、牽引爪により耕起するチゼルプラウ耕では土壌表面に施肥した肥料が下層まで攪拌されず、パワーハローで混和した土壌深さ 0-5 cm に肥料が集中したためと考えられた。一方、ロータリ耕では耕起した深さまで肥料が分布していた。第 2 章第 1 節では、第 3 葉期の SPAD 値がロータリ区よりプラウ区で高く、プラウ区で初期生育が向上した（図 2-1-4）。渡辺ら（1987）は、北海道の疑似グライ土でのロータリ耕で耕深 5 cm もしくは 10 cm と浅耕した場合、作土表層に土壌養分が濃縮して作物の初期生育が向上することを明らかにしている。北海道と同様に作物の生育期間が限られる東北北部でも表層施肥は作物の初期生育の安定化に有利であり、プラウ耕・パワーハロー体系は作土表層への肥料成分の濃縮効果が期待できる。

土壌化学性について、第 6 葉期の pH はロータリ区よりプラウ区で低く、プラウ区において酸化化した（表 3-1-3）。これは、今回供試した配合肥料の窒素成分が硫酸アンモニウムであり、プラウ区では土壌深さ 0-10 cm に肥料が多く分布し、硫酸塩、硝酸塩、塩化物のような化学肥料を施用した場合には、土壌 pH が低下する（橋本・中村 1971）ためと考えられた。さらに、Jing ら（2010）は、窒素およびリン酸の局所施肥は全面施肥と比較して pH が低下することを報告しており、本節でもこれと同じ傾向が認められた。

第 6 葉期では土壌深さ 0-10 cm に有効態リン酸、交換性カリおよび硝酸態窒素がプラウ区で多い傾向がみられたが（表 3-1-3）、成熟期には耕起法の差はみられなかった（表 3-1-4）。これは、トウモロコシによる吸収や降雨などによる溶脱のためと考えられた。Jing ら（2010）は、土壌深さ 0-15 cm における土壌中の無機窒素濃度が、播種後 31 日目には局所施肥で高かったが、播種後 51 日目には全面施肥と局所施肥に差が認められなかった要因を窒素成分の溶脱によると考察している。また、渡邊ら（2015）は、4 年間の水田輪作において慣行施肥と減肥体系を比較した際に熱水抽出性窒素、可給態リン酸、交換性カリに処理区間で明瞭な差がみられなかったことを明らかにしており、水田転換畑において生育初期における土壌化学性の差は植物体による吸収や溶脱等により成熟期には認められなくなると考えられた。

第 3 葉期にはプラウ耕のトウモロコシ窒素吸収量がロータリ区よりプラウ区で大きい傾向がみられたが、雄穂形成期以降の窒素吸収量に耕起法の差はみられなかった（表 3-1-6）。第 2 章第 1 節では、ロータリ耕とプラウ耕で成熟期の地上部乾物重や収量性に耕起法による差は認められず、第 6 葉期以降の雄穂形成期（播種後 48 日）から成熟期（播種後 133 日）までの地上部乾物重においても耕起法による差が認められなかった（図 2-1-6）。プラウ区では、第 6 葉期において土壌養分供給能に優れたものの、地上部の生育に及ぼす影響は小さいと考えられた。

以上のことから、ロータリ耕と比較してプラウ耕では、土壌硬度、肥料分布、第 6 葉期の土壌

化学性が異なったが，地上部に及ぼす影響は小さいと推察された。

## 第2節 トウモロコシの根系に及ぼすプラウ耕の影響

根の生理的活性を簡易に推定できる方法として出液速度を測定する方法があり（森田・阿部 2002），森田ら（2000）はトウモロコシの根の生理的活性を出液速度により評価している．そこで，本節では，トウモロコシの土壌深さ別の根長と出液速度を測定することにより，プラウ耕の根系分布と根の生理的活性をロータリ耕と比較検討する．

### 1. 材料および方法

#### (1) 出液速度

試験は，2015年に農研機構東北農業研究センター内の多湿黒ボク土の水田転換畑（岩手県盛岡市，前作：代かき移植水稻，標高 186 m）で実施した．品種，施肥，耕起方法，播種方法は第2章第1節と同じである．

第3葉期（播種後 20 日），第5葉期（播種後 32 日），雄穂形成期（播種後 45 日），絹糸抽出期（播種後 66 日），乳熟期（播種後 77 日）に森田ら（2000）の方法によって出液速度および根の関連形質を，各反復で平均的な草高の連続する3株について調査した（図 3-2-1a）．トウモロコシの茎葉部を土壌表面から約 5 cm の高さでハサミを用いて切除して，あらかじめ重さを測定した脱脂綿を茎基部の切断面に乗せてプラスチックフィルムで覆い，輪ゴムで固定した．1 時間後に脱脂綿を採取して，直ちに重さを測定し，増加した分をトウモロコシ1 個体の1 時間当たりの出液速度とした．トウモロコシの出液速度には日変化があり，午前 8 時前後に最大となる（森田ら 2000）ため，午前 7 時から午前 8 時までの1 時間測定した．トウモロコシの根系の大きさは乳熟期頃に最大となり，乳熟期以降に減少する（Peng ら 2010）ため，乳熟期までの出液速度を測定した．森田・阿部（1997）は，「出液速度＝根量×単位根量当たりの出液速度」という視点から出液速度を解析しており，本節でも森田ら（2000）の方法によって，出液速度を量的形質（節根直径）で除して算出した値を単位根量当たりの出液速度とした．

出液速度測定日の午前 7 時における土壌深さ 15 cm および 30 cm の地温は温度データロガー（TR-71wf，T&D 社製）を用いて測定した．

森田ら（2000）の方法によって，出液速度を調査した株の節根数および基部直径を調査した．出液速度を測定した個体は，測定後にシャベルを用いて株元部分を掘り出し，土壌を水で洗い流した．その後，全ての節根を基部で茎から切り離し，節根の数を記録し，基部直径をデジタルノギス（CD-15PSX，ミットヨ社製）で測定した．出液速度と節根の分枝程度には正の相関関係があ

ること（山崎・阿部 1987, 山口ら 1992）を踏まえ、すでに側根を形成している節根と、まだ側根を形成していない節根とに分けて記録した。

地上部は地際より刈り取り、葉身、葉鞘および稈、雌穂（苞葉含む；乳熟期）に分解し、80°Cで2日間乾燥後に各器官別の乾物重を秤量した。各部位はそれぞれ粉碎後に混和して全自動元素分析装置（Vario Max, Elementar 社製）を用いて全窒素濃度を測定した。その後、全窒素濃度と地上部乾物重から全窒素含量を算出した。

## (2) 成熟期における土壌深さ別の根長

成熟期（播種後 143 日）に村上・井沢（2008）のチェーンブロックを用いた土壌採取法に従って、5 cm（幅）×40 cm（長さ）×15 cm（深さ）の土壌を長い方向を条に直交して土壌モノリスにより掘り出した（図 3-2-1b, c）。掘り出した土壌は包丁を用いて 0-5, 5-10, 10-15 cm に切り出してチャック付きビニール袋に入れて 5°C で保存した。保存した土壌は、煮沸法（Murakami ら 1999, 村上ら 2000）により土壌や植物残渣などと根を分別した後、根を回収して -25°C 以下で保存した。保存した根は、解凍後に第 2 章第 1 節と同じ方法で解析し、根長を計測した。根長割合および根の深さ指数（RDI）（Oyanagi ら 1993）は次式より算出した。

根長割合 (%) = (ある層の深さの根長) / (0-15 cm の根長) × 100.

根の深さ指数 (RDI) =  $\sum \{ (\text{ある層の深さの中央値, cm}) \times (\text{その層に含まれる根長割合, \%}) \}$  / 100.

## 2. 結果

### (1) 出液速度

地上部乾物重および窒素吸収量の推移を図 3-2-2 に示した。いずれの生育時期においても地上部乾物重、窒素吸収量それぞれに品種および耕起法による差はみられなかった。

出液速度測定時の土壌深さ 15 cm および 30 cm の地温は 18.5-24.2°C であり、各生育時期における耕起法の違いによる地温の差は 0-0.3°C であった。

出液速度および節根数の推移を図 3-2-3 に示した。出液速度は生育に伴って増加し、乳熟期に最大となったが、品種および耕起法による差はみられなかった。単位根量当たりの出液速度は、生育期間を通じて耕起法による有意差は認められなかった。しかし、第 3 葉期および第 5 葉期ではロータリ区よりプラウ区で小さい傾向であった。節根数は、品種による差はみられなかったが、第 3 葉期および第 5 葉期にロータリ区よりプラウ区で多かった。

生育時期別の節根総直径の推移を表 3-2-1 に示した。第 3 葉期から雄穂形成期までの節根総直

径の合計はロータリ区よりプラウ区で大きかった。第3葉期では分枝無の節根総直径はロータリ区よりプラウ区で大きく、分枝有の節根総直径でも同じ傾向がみられた。第5葉期の分枝有および乳熟期の分枝無ではそれぞれ品種と耕起の交互作用が認められた。

第5葉期および雄穂形成期における節根総直径と窒素吸収量の関係を図3-2-4に示した。第5葉期および雄穂形成期ともに節根総直径と窒素吸収量との間に正の相関関係が認められた。

## (2) 成熟期における土壌深さ別の根長

成熟期のトウモロコシの根関連形質を表3-2-2に示した。根重、根長、比根長、根長割合および根の深さ指数に品種間差は認められなかった。土壌深さ0-5、5-10、10-15 cmの根重に耕起法の差はみられなかった。土壌深さ0-15 cmの根長に耕起法による有意差は認められなかったが、ロータリ区と比較してプラウ区では17-21%小さかった。土壌深さ別にみても、0-5 cmでは耕起法による明らかな差は認められなかったが、5-10 cmでは11-46%、10-15 cmでは44-58%ロータリ区よりプラウ区で短い傾向であり、深くなるほどプラウ区の根長が短くなる傾向が認められた。比根長についてみても、土壌深さ0-5 cmでは耕起法による差が認められなかったが、土壌深さ5-10 cmではプラウ区で小さい傾向であり、土壌深さ10-15 cmではプラウ区で47-68%小さかった。土壌深さ0-5、5-10 cmの根長割合に耕起法の差はみられなかったが、0-5 cmの根長割合はロータリ区よりプラウ区で大きい傾向であった。土壌深さ10-15 cmの根長割合はロータリ区よりプラウ区で小さかった。土壌深さ0-15 cmの根の深さ指数はロータリ区よりプラウ区で小さい傾向であり、プラウ区で根系が0.74-0.87 cm浅かった。

## 3. 考察

地上部乾物重および窒素吸収量ともに耕起法による有意差はみられなかった（図3-2-2）。Anderson（1987）は、耕起より不耕起で土壌表層に窒素が蓄積する条件であっても、トウモロコシによる窒素吸収量に耕起法の差がみられないことを報告している。本節では、地上部の生育には耕起法による差がみられなかった条件における根の生理的活性および根系分布について考察を進める。

第3葉期から乳熟期までの出液速度に耕起法による差はみられなかったことから（図3-2-3a, b）、黒ボク土の水田転換畑においてプラウ耕でトウモロコシを栽培しても、根の生理的活性はロータリ耕と同程度に維持されることが明らかとなった。Guanら（2014）は、耕起体系と比較して不耕起体系では表層0-30 cmまでの容積重および土壌貫入抵抗値が大きいためトウモロコシの出液速度が低下すると考察している。本節と同じ圃場で実施した試験では、ロータリ区と比較して

プラウ区では5-20 cmの土壤貫入抵抗値が1.0 MPa前後と著しく大きかったが(図3-1-2), 出液速度は低下しなかった。本節と同様の条件で実施した第2章第1節では, ロータリ区よりプラウ区において根長密度が大きかった(図2-1-5)。したがって, プラウ区では根長密度が優れていたため, トウモロコシの生育にとって好ましくない土壤硬度であっても, 出液速度の低下を抑制できたと推察された。

出液速度には耕起法による差がみられなかった一方, 第3葉期および第5葉期の単位根量当たりの出液速度はプラウ区で低い傾向であった。出液速度に明瞭な差がみられなかったが(図3-2-3a), 節根総直径がプラウ区で大きかった(表3-2-1)ことから, 単位根量当たりの出液速度の低下はプラウ区における節根総直径の増加によることがわかった。プラウ区における節根総直径の増加の要因については後述する。

プラウ耕により生育初期では節根数および節根直径の両者とも増加したため(図3-2-3c, 表3-2-1), どちらが節根総直径の増加に寄与したか考察する。第3葉期と第5葉期以降では増加に寄与した要因が異なった。第3葉期において, ロータリ区と比較してプラウ区では節根総直径が138%増加していた。第3葉期において, ロータリ区と比較したプラウ区の節根数は133%, 節根直径は104%であり, 第3葉期における節根総直径の差は節根数の差によることがわかった。第5葉期および雄穂形成期では, ロータリ区と比較してプラウ区では節根総直径がそれぞれ122, 116%増加していた。第5葉期と雄穂形成期において, ロータリ区と比較してプラウ区では, 節根数はそれぞれ109, 106%であり, 節根直径はそれぞれ111, 109%であった。したがって, 第5葉期および雄穂形成期の節根数および節根直径がプラウ耕により増加した結果, 節根総直径が増加したと推察された。

第3葉期から雄穂形成期において, ロータリ区よりプラウ区で節根総直径が増加しており, 生育前半における出液速度の維持に寄与した可能性が考えられた。水田転換畑におけるプラウ耕では土壤表層に肥料成分が分布し(表3-1-5), 節根総直径と窒素吸収量にも正の相関関係が認められた(図3-2-4)。また, トウモロコシにおいて, 1次根長当たり分枝根長を示す分枝指数と1次根の直径には指数関数的な関係があり(Moritaら1992), 根の直径が増加するほど根の伸長速度も増加する(Cahnら1989)。さらに, トウモロコシの根系は側根に依存する程度が高く(Yamauchiら1987), トウモロコシの根は窒素が存在する層では1次側根の発達を促進し, 窒素が存在しない層では1次側根の発達抑制により窒素獲得効率を向上させる(田中ら2000)。したがって, プラウ区では, 節根直径が増加したことで分枝根, すなわち側根が発達して, 表層の肥料成分を効率よく吸収でき, 土壤硬度の増加による根の生理的活性の低下を抑制したと推察された。

成熟期の根系分布調査の結果、有意差は認められなかったが、土壌深さ 0-5 cm の根長割合はロータリ区よりプラウ区の方が高く、根の深さ指数もプラウ区が小さい傾向であることから（表 3-2-2）、ロータリ区よりプラウ区で根系が浅い傾向であることが示された。そこで、プラウ区で根系が浅くなった要因について考察する。

プラウ区で浅根化した要因として、プラウ耕による土壌硬度の違いが挙げられる。第 3 章第 1 節において、プラウ区では土壌深さ 5 cm 以下の土壌貫入抵抗値が 1.0 MPa 前後と急激に増加した（図 3-1-2）。これは、ロータリ区と比較してプラウ区では土壌深さ 5 cm 以下に砕土されていない土塊が存在したためと考えられる。有馬・田中（1988）は、山中式土壌硬度計による指標硬度が 18 mm (0.5 MPa) の土層へトウモロコシの根が貫入できないことを明らかにした。プラウ区では、土壌深さ 5 cm 以下への伸長が土塊に阻害されて抑制され、土壌深さ 5 cm 以下に伸長した根も土塊に侵入できず水平方向に伸長した結果、相対的に表層の根長割合が増加して浅根化したと考えられた。

耐湿性トウモロコシの育種では、地表に不定根を形成する系統が有望として検討されている（間野ら 2005）。また、小柳ら（2004）は、コムギを浅根化させることで耐湿性が向上することを示唆した。プラウ耕では浅根化する現象が認められ、ロータリ耕とプラウ耕では湿害による影響が異なる可能性が推察される。今後、湿害発生条件におけるプラウ耕がトウモロコシの生育や収量に及ぼす影響について検討する必要がある。また、梅雨期の過湿条件下で生育したダイズは根が浅根化し、夏季の高温乾燥条件におかれると水ストレスを受ける（Hirasawa ら 1994）。したがって、夏季に少雨かつ乾燥傾向の年にプラウ耕で栽培したトウモロコシが水ストレスを受け易いか明らかにする必要がある。

以上のことから、黒ボク土の水田転換畑においてプラウ耕でトウモロコシを栽培した場合、根系は浅根化するが、節根直径が増加し側根が発達することで表層の肥料分を効率良く吸収でき、ロータリ耕と同程度に根の生理的活性が維持されることが明らかとなった。

ロータリ

プラウ(チゼルプラウ耕後)

(a)



チゼルプラウ耕後

パワーハロー後

(b)



図 3-1-1 ロータリ耕およびプラウ耕の耕起後の圃場の様子 (2015 年 5 月 28 日).

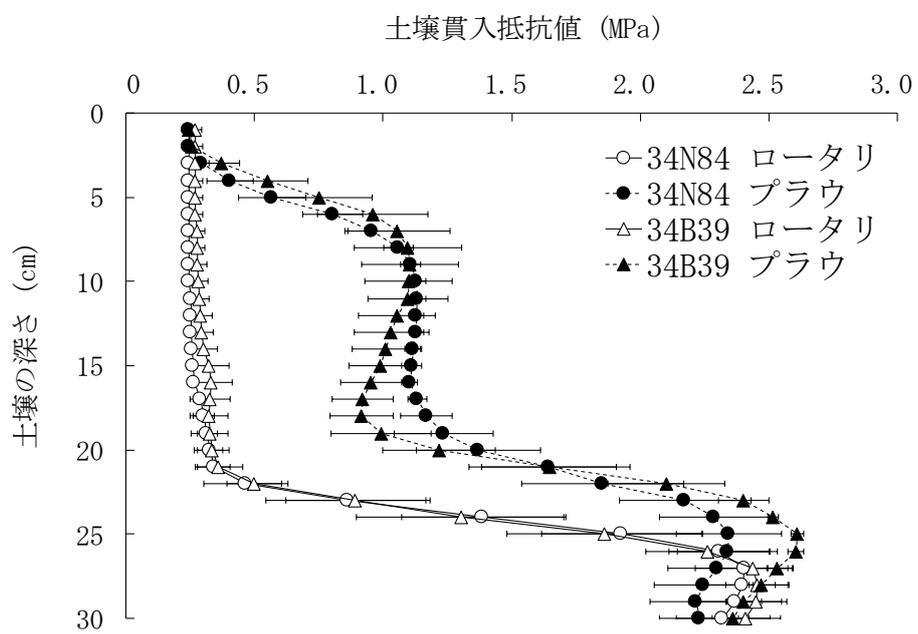


図 3-1-2 土壤貫入抵抗値 (播種後 0 日).

横棒は標準誤差を表す (n=3).

表3-1-1 土壌深さ別の三相分布 (播種後9日).

土壌深さ (cm)	耕起処理	pF1.5	三相分布 (%)	
		気相	液相	固相
10	ロータリ	18.2	52.1	29.7
	プラウ	9.5	54.1	36.4
	t検定	**	ns	**
20	ロータリ	14.1	54.2	31.7
	プラウ	5.1	56.5	38.4
	t検定	**	*	*
30	ロータリ	3.6	56.3	40.1
	プラウ	2.7	59.8	37.5
	t検定	ns	ns	ns

\*, \*\*はそれぞれ5, 1%水準で有意であること, nsは5%水準で有意差がないことを示す (n=3). 三相分布については, 角変換後に統計解析した.

表3-1-2 作付前（播種前8日）の土壌深さ別の土壌化学性.

土壌 深さ (cm)	pH (H <sub>2</sub> O)	有効態 リン酸 (mg 100g <sup>-1</sup> )	交換性 カリ (mg 100g <sup>-1</sup> )	熱水抽出性 窒素 (mg 100g <sup>-1</sup> )	硝酸態 窒素 (mg 100g <sup>-1</sup> )	アンモニア態 窒素 (mg 100g <sup>-1</sup> )
0-5	5.8	3.2	7.6	5.5	2.7	2.3
5-10	5.9	3.1	11.5	6.5	2.6	1.4
10-15	5.9	3.5	13.0	7.6	2.6	1.7
15-20	6.1	1.7	8.7	5.3	1.7	1.2

表3-1-3 第6葉期（播種後34日）の土壌深さ別の土壌化学性.

土壌深さ (cm)	品種	耕起処理	pH (H <sub>2</sub> O)	有効態リン酸 (mg 100g <sup>-1</sup> )	交換性カリ (mg 100g <sup>-1</sup> )	熱水抽出性窒素 (mg 100g <sup>-1</sup> )	硝酸態窒素 (mg 100g <sup>-1</sup> )	アンモニア態窒素 (mg 100g <sup>-1</sup> )
0-5	34N84	ロータリ	5.7	3.7	17.8	7.5	4.2	2.05
		プラウ	5.5	4.4	31.4	7.9	8.2	2.07
	34B39	ロータリ	5.8	3.5	20.6	7.3	3.5	2.04
		プラウ	5.5	4.6	29.3	8.2	9.1	2.18
分散分析	品種		ns	ns	ns	ns	ns	ns
	耕起		*	ns	ns	ns	*	ns
	品種×耕起		ns	ns	ns	ns	ns	ns
5-10	34N84	ロータリ	5.6	3.6	17.6	7.8	10.0	2.03
		プラウ	5.4	4.3	24.6	8.6	16.2	2.03
	34B39	ロータリ	5.6	3.3	21.8	7.7	8.8	2.13
		プラウ	5.4	3.8	25.0	7.9	18.3	2.09
分散分析	品種		ns	ns	ns	ns	ns	ns
	耕起		ns	ns	ns	ns	ns	ns
	品種×耕起		ns	ns	ns	ns	ns	ns

\*は5%水準で有意であること, nsは5%水準で有意差がないことを示す (n=3).

表3-1-4 成熟期 (播種後148日) の土壌深さ別の土壌化学性.

土壌深さ (cm)	品種	耕起処理	pH (H <sub>2</sub> O)	有効態リン酸 (mg 100g <sup>-1</sup> )	交換性カリ (mg 100g <sup>-1</sup> )	熱水抽出性窒素 (mg 100g <sup>-1</sup> )	硝酸態窒素 (mg 100g <sup>-1</sup> )	アンモニニア態窒素 (mg 100g <sup>-1</sup> )
0-5	34N84	ロータリ	6.0	3.4	14.1	6.1	1.1	1.5
		プラウ	5.9	4.1	19.7	6.1	0.8	1.5
	34B39	ロータリ	6.0	3.6	22.0	6.5	0.4	1.5
		プラウ	6.0	4.2	16.3	6.7	0.5	1.5
5-10	分散分析	品種	ns	ns	ns	ns	ns	ns
		耕起	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	34N84	品種×耕起	ns	ns	*	ns	ns	ns
		ロータリ	6.1	3.4	9.1	6.1	1.0	1.6
34B39	プラウ	5.9	4.1	9.0	6.6	2.5	1.4	
	ロータリ	5.9	3.7	9.0	6.0	0.9	1.6	
10-15	分散分析	品種	ns	ns	ns	ns	ns	ns
		耕起	ns	ns	ns	ns	ns	*
	34N84	品種×耕起	ns	ns	ns	ns	ns	ns
		ロータリ	6.0	3.6	11.4	6.5	1.4	1.5
34B39	プラウ	5.9	3.2	7.4	6.7	2.0	1.6	
	ロータリ	6.0	3.3	6.0	6.2	1.7	1.4	
15-20	分散分析	品種	ns	ns	ns	5.6	1.9	1.3
		耕起	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	34N84	品種×耕起	ns	ns	ns	ns	ns	ns
		ロータリ	6.0	3.1	6.5	5.5	2.0	1.3
34B39	プラウ	6.0	2.7	7.2	6.1	4.7	1.4	
	ロータリ	6.0	3.1	5.3	6.0	2.2	1.4	
分散分析	品種	品種	ns	ns	*	ns	ns	ns
		耕起	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	品種×耕起	品種×耕起	ns	ns	ns	ns	ns	ns
		品種×耕起	ns	ns	ns	ns	ns	ns

\*は5%水準で有意であること, nsは5%水準で有意差がないことを示す (n=3).

表3-1-5 土壌深さ別の肥料粒数比.

土壌深さ (cm)	粒数比 (%)		t検定
	ロータリ	プラウ	
0-5	36.0	87.4	**
5-10	25.3	10.3	†
10-15	24.3	2.3	**
15-20	14.4	0.0	**

†, \*\*はそれぞれ10, 1%水準で有意であることを示す (n=3). 粒数比は角変換後に統計解析した.

表3-1-6 生育時期別の窒素吸収量.

品種	耕起処理	窒素吸収量 (g m <sup>-2</sup> )					
		第3葉期	雄穂形成期	絹糸抽出期	乳熟期	糊熟期	成熟期
34N84	ロータリ	0.21	5.88	11.8	18.5	20.1	25.0
	プラウ	0.24	6.47	14.3	19.3	21.3	27.1
34B39	ロータリ	0.21	5.89	12.6	18.1	21.0	25.7
	プラウ	0.23	5.63	11.5	20.2	20.3	26.2
分散分析	品種	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	耕起	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	品種×耕起	ns	ns	*	ns	ns	ns

\*は5%水準で有意であること, nsは5%水準で有意差がないことを示す(n=3).

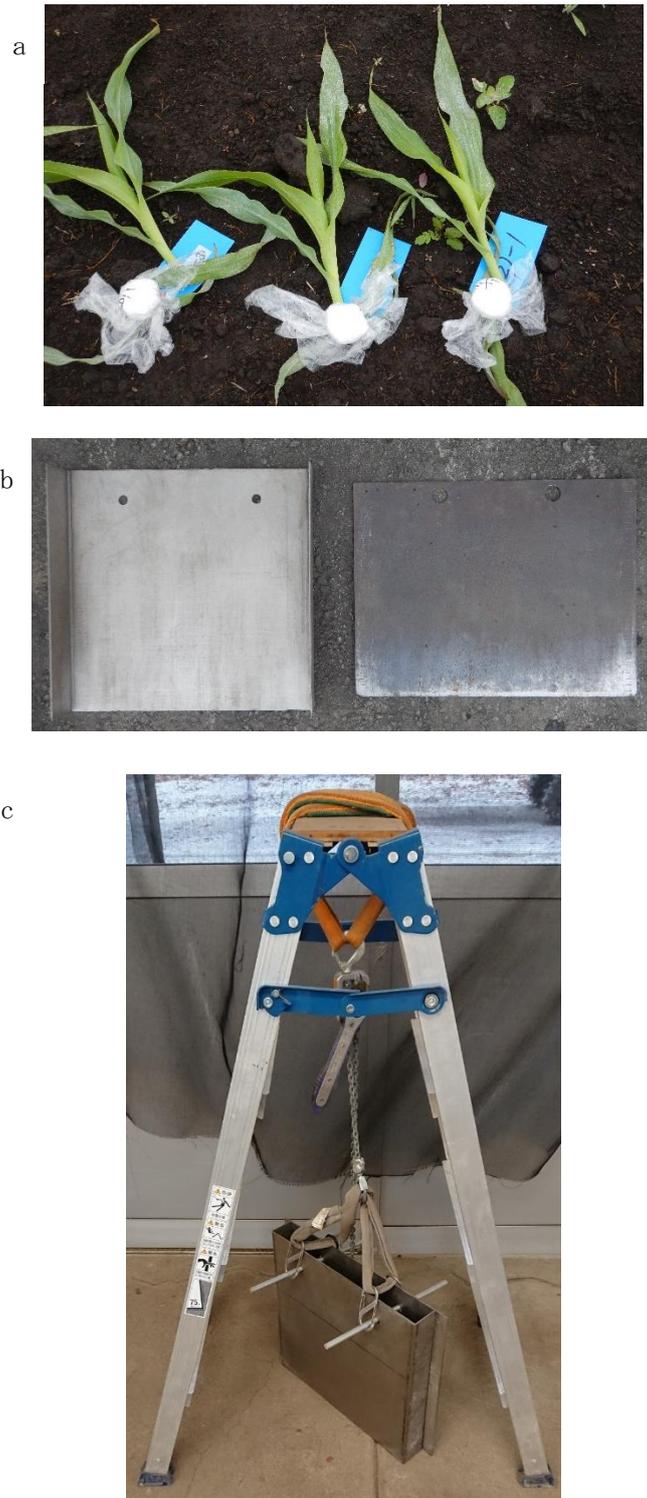


図 3-2-1 出液速度調査の様子 (a), 土壌モノリス (b) およびチェーンブロックを用いた根系採取法 (c).

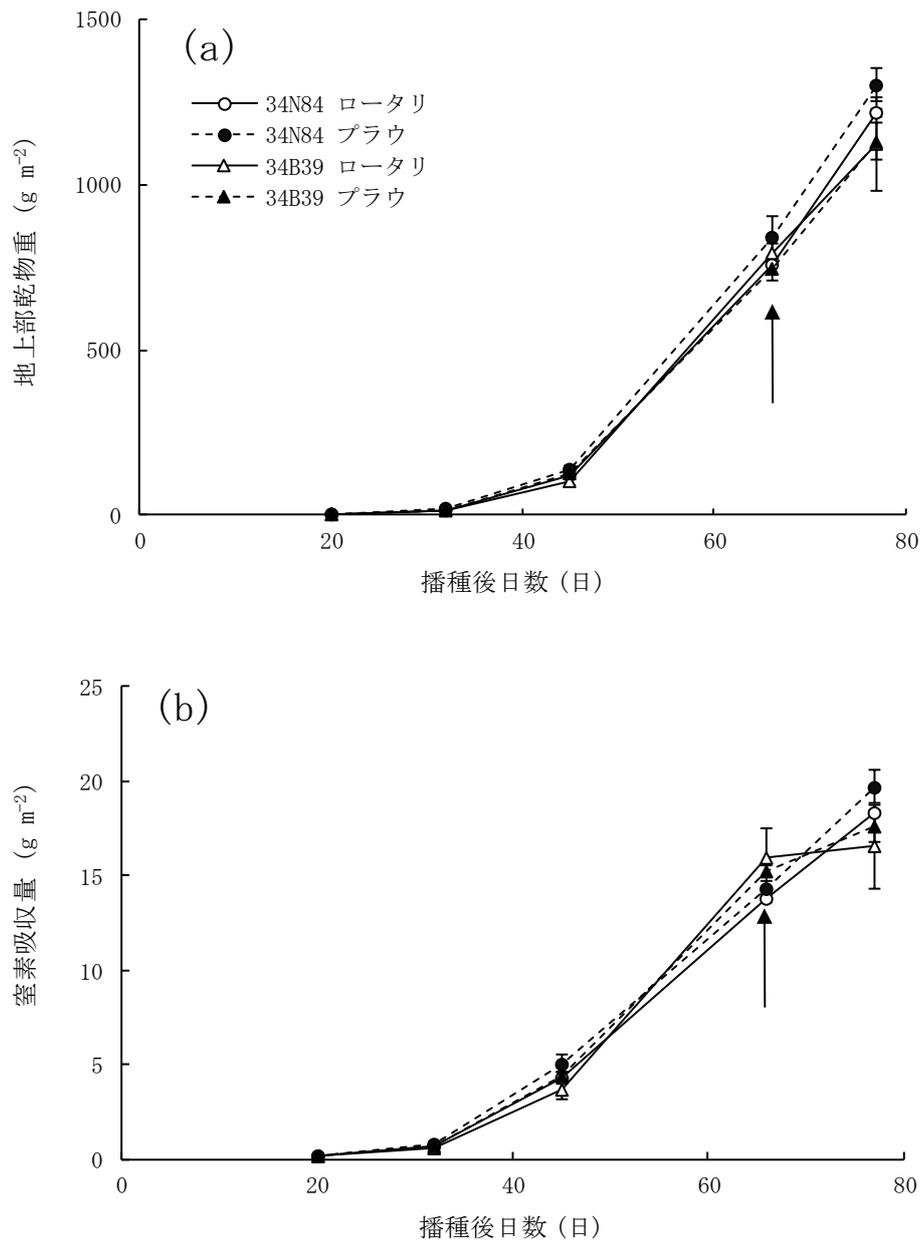


図 3-2-2 地上部乾物重 (a) および窒素吸収量 (b) の推移.

図中の縦棒は標準誤差を示す (n=3). 図中の矢印は絹糸抽出期を表す.

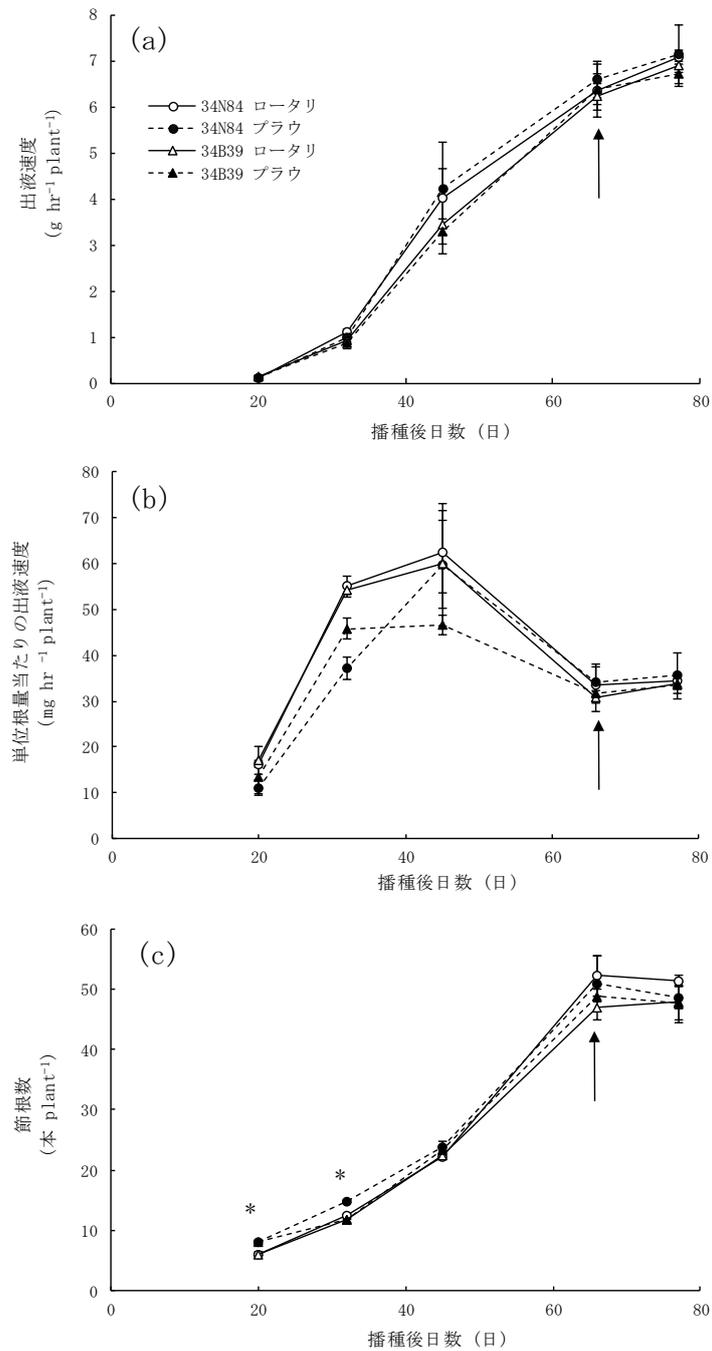


図 3-2-3 出液速度 (a), 単位根量当たりの出液速度 (b) および節根数 (c) の推移.  
 図中の縦棒は標準誤差を示す (n=3). \* ; 5%水準で耕起処理について有意 (n=3). 図中の矢印は絹糸抽出期を表す.

表3-2-1 生育時期別の節根総直径.

品種	耕起処理	節根総直径 (mm plant <sup>-1</sup> )														
		第3葉期		第5葉期		雄穂形成期		絹糸抽末期		乳熟期		合計				
		分枝 有	分枝 無	分枝 有	分枝 無	分枝 有	分枝 無	分枝 有	分枝 無	分枝 有	分枝 無					
34N84	ロータリ プラウ	4.5	2.6	7.1	11.0	9.1	20.1	37	28	64	146	44	190	204	7	211
	ロータリ プラウ	5.6	4.7	10.3	12.9	13.9	26.8	43	28	71	151	43	194	203	0	203
34B39	ロータリ プラウ	4.1	3.9	8.1	11.3	6.2	17.5	36	22	57	150	52	202	194	29	222
	ロータリ プラウ	4.9	5.2	10.1	11.4	7.9	19.3	40	30	71	144	57	202	190	32	222
分散 分析	品種 耕起 品種×耕起	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
		ns	**	*	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns
		ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns

\*, \*\*はそれぞれ5, 1%水準で有意であること, nsは5%水準で有意差がないことを示す (n=3).

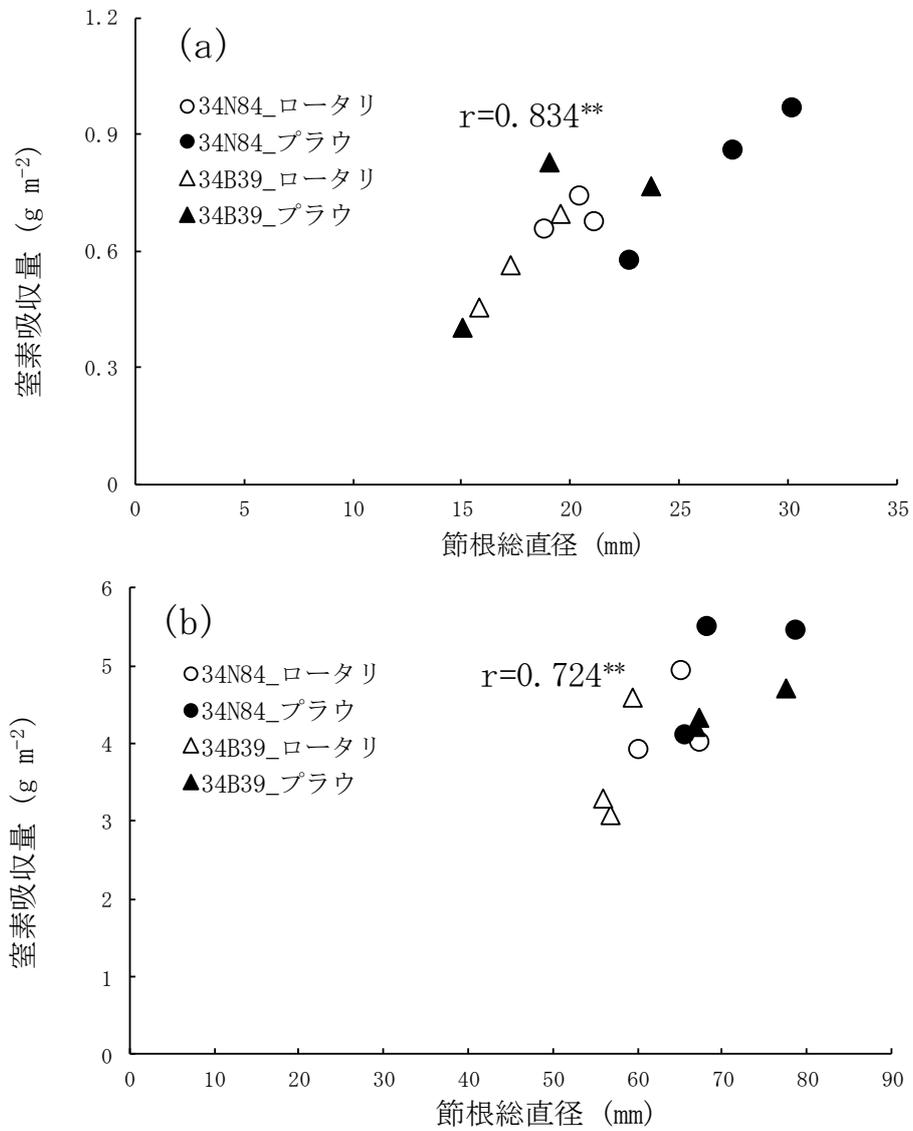


図 3-2-4 第 5 葉期における節根総直径と窒素吸収量との関係 (a) および雄穂形成期における節根総直径と窒素吸収量との関係 (b).

\*\* ; 1%水準で有意 (n=12).

表3-2-2 成熟期（播種後143日）のトウモロコシの根関連形質.

土壌深さ (cm)	品種	耕起処理	根重 (g plant <sup>-1</sup> )	根長 (m plant <sup>-1</sup> )	比根長 (m g <sup>-1</sup> plant <sup>-1</sup> )	根長割合 (%)	根の深さ指数 (cm)
0-15	34N84	ロータリ	4.59	212	46	-	5.82
		プラウ	4.03	175	43	-	5.08
	34B39	ロータリ	4.32	209	48	-	6.12
		プラウ	4.16	161	39	-	5.25
	分散分析	品種	ns	ns	ns	-	ns
		耕起	ns	ns	ns	-	ns
品種×耕起		ns	ns	ns	-	ns	
0-5	34N84	ロータリ	3.97	112	28	53	-
		プラウ	3.37	107	32	61	-
	34B39	ロータリ	3.60	102	28	49	-
		プラウ	3.58	102	29	64	-
	分散分析	品種	ns	ns	ns	ns	-
		耕起	ns	ns	ns	ns	-
品種×耕起		ns	ns	ns	ns	-	
5-10	34N84	ロータリ	0.39	55	143	26	-
		プラウ	0.45	49	108	28	-
	34B39	ロータリ	0.49	57	116	27	-
		プラウ	0.39	31	79	19	-
	分散分析	品種	ns	ns	ns	ns	-
		耕起	ns	ns	ns	ns	-
品種×耕起		ns	*	ns	ns	-	
10-15	34N84	ロータリ	0.23	45	194	21	-
		プラウ	0.21	19	93	11	-
	34B39	ロータリ	0.23	50	221	24	-
		プラウ	0.19	28	150	17	-
	分散分析	品種	ns	ns	ns	ns	-
		耕起	ns	*	**	*	-
品種×耕起		ns	ns	ns	ns	-	

\*, \*\*はそれぞれ5, 1%水準で有意であること, nsは5%水準で有意差がないことを示す (n=3). 根長割合は角変換後に統計解析した.

## 摘要

食糧生産基盤である水田の維持および濃厚飼料増産という背景から飼料用トウモロコシ子実の水田輪作への本格的な導入が期待されている。大規模経営体の増加や 1 ha 程度以上の大区画整備済み圃場の増加により、水田作においても高速作業が必要となり、畑作を中心に用いられているプラウ耕が導入されるようになった。しかし、これまで水田転換畑において慣行耕起法であるロータリ耕と比較して、プラウ耕で栽培したトウモロコシの生育および子実収量についてはほとんど明らかにされていない。そこで本研究では、水田転換畑においてプラウ耕が土壌の物理化学性、トウモロコシの生育、子実収量、根系および倒伏に及ぼす影響について解析した。

1. 東北北部で 5 月下旬から 6 月上旬に播種して成熟期に到達する品種を用いれば、黒ボク土の水田転換畑においてプラウ耕で栽培したトウモロコシの生育および子実収量は慣行法であるロータリ耕と同程度であった。したがって、黒ボク土の水田転換畑で子実用トウモロコシ（雌穂が完熟して子実水分が低下してから子実を収穫するトウモロコシ）を栽培する場合、プラウ耕でも十分に生育および子実収量を確保できることが明らかとなった。
2. 黒ボク土の水田転換畑におけるプラウ耕はロータリ耕と比較して、作土の土壌硬度が高く、肥料成分が土壌表層に集中するためトウモロコシ根系を浅根化させるが、根の生理的活性の指標である出液速度は同程度であった。プラウ耕による土壌硬度、肥料分布、根系の発達の違いがトウモロコシの地上部乾物重、窒素吸収量に及ぼす影響は小さかったが、プラウ耕により引倒し力が増加することで引倒し法評価値が低減し、トウモロコシの耐倒伏性は向上する傾向が認められた。
3. プラウ耕による肥料分布の違いは絹糸抽出期を早めた。前作の水稻栽培が無代かき栽培であった場合、プラウ耕では窒素の無機化量が小さく、草高および SPAD 値が小さかったが、施肥をしたことで肥料成分が表層に集中するためロータリ耕と同程度の生育を確保できることが示された。同様の傾向は子実収量および粒数にも認められた。したがって、水田転換畑にした場合、窒素の無機化量が少ない場合でもプラウ耕で栽培したトウモロコシの地上部の生育はロータリ耕と同程度に維持されると推察された。

プラウ耕による肥料分布の違いより土壌硬度の違いの方が根系に及ぼす影響は大きいと結論した。ロータリ耕と比較してプラウ耕による土壌硬度の増加は種子根の伸長を抑制した。しかし、全根長に占める節根の割合が 70% を超える雄穂形成期以降、プラウ耕では節根の分

枝根が増加して全根長が増加することが示された。また、プラウ耕により第7葉期以降、土壌深さ0-5 cmの根長および根長割合が増加したことで、根の深さ指数が低下し、根系が浅根化した。

4. 黒ボク土および疑似グライ土の水田輪作において、ロータリ耕と比較して、プラウ耕で栽培したトウモロコシの生育、子実収量および飼料品質に差はみられなかった。プラウ耕は水田土壌でも慣行法であるロータリ耕と同様に使えることが示された。プラウ耕による倒伏軽減効果は現地農家圃場である疑似グライ土でも確認され、黒ボク土より疑似グライ土で倒伏軽減効果は大きい傾向であった。さらに、延作業時間はロータリ耕よりプラウ耕の方が短く、燃料消費も少なかった。したがって、大規模水田作経営や大区画圃場でのトウモロコシ栽培においてプラウ耕はロータリ耕と同程度の子実収量を維持しつつ、作業能率を高めることができる耕起体系であることがわかった。

以上のことから、水田転換畑において慣行法のロータリ耕より高速作業体系であるプラウ耕でトウモロコシを栽培しても十分な生育および子実収量を水田土壌でも確保できる。また、プラウ耕でトウモロコシを栽培することで耐倒伏性が向上する傾向が認められ、とくに水田土壌で顕著である。

## 謝辞

本研究の遂行に当たりましては、筑波大学生命環境系丸山幸夫教授には終始懇切丁寧なご指導をいただきまして、本論文のとりまとめに導いていただきました。ここに衷心より深く感謝申し上げます。筑波大学生命環境系林久喜教授、同田村憲司教授、同野口良造准教授には、本論文のとりまとめに当たりまして有意義な示唆をいただき、ご校閲の労をとっていただきました。謹んで御礼申し上げます。

本研究の遂行にあたっては、農研機構東北農業研究センター企画部長大谷隆二博士に水田転換畑におけるトウモロコシ研究の端緒を作っていただくとともに、懇切な御指導と御助言および御激励をいただきました。同研究センター生産基盤研究領域の松波寿典博士には調査手法や論文執筆に関して御指導と御助言を多くいただきました。同領域長の中山壮一氏には統計解析について、御指導と御助言をいただきました。同領域の冠秀昭博士、関矢博幸氏（現農研機構中央農業研究センター北陸研究拠点）には土壌物理と土壌肥料に関して御指導と御助言をいただきました。同領域の長坂善禎博士、木村秀也博士、宮路広武博士、福重直輝博士、齋藤秀文博士、赤坂舞子博士には研究への御助力と御助言をいただきました。農研機構東北農業研究センター農業放射線研究センターの金井源太博士にはトウモロコシの収穫に際して御協力いただき、同村上敏文博士（現東京農業大学）には根の分析方法について、懇切に御指導いただきました。農研機構東北農業研究センター生産環境領域羽田野麻理博士には根分析機器をご提供いただき、同松波麻耶博士（現岩手大学農学部）には根の解析方法を御教授いただきました。同研究センター業務科の木村力也氏、堀江覚氏、吉田昭男氏、三浦幸浩氏、加藤大輔氏、小笠原篤氏、高橋博貴氏、柳村大地氏、吉澤信行氏、高橋栄廣氏、工藤一博氏には圃場管理および調査に御助力いただきました。同研究センター生産基盤研究領域非常勤職員の榊久美氏、田中智子氏、関矢幸枝氏にも調査に際して多大な御助力をいただきました。資材の調達や現地試験圃場への出張等、同研究センターの皆様には多大な御支援と御協力をいただきました。岩手県花巻市の現地試験においては、有限会社アグリリスト代表取締役の高橋章郎氏、同農場長の伊藤篤士氏には試験圃場を提供して頂いたとともに圃場管理に際して多大なご協力をいただきました。子実用トウモロコシ生産者の方、トウモロコシの研究者、農協やメーカーの方にも多大なる御助言や御協力いただきました。

本研究は、ここに記載した方々を始め、多くの方々の御指導、御助言ならびにお力添えにより実現したものです。この場を借りて心より感謝の意を表すとともに、厚く御礼申し上げます。最後に、トウモロコシ研究をはじめる端緒となり、これまで理解し支えてくれた妻サオに対し深く

感謝の意を表します。

本研究は、農林水産省委託プロジェクト研究「栄養収量の高い国産飼料の低コスト生産・利用技術の開発（2015-2019年度）」の一部として、子実用トウモロコシを導入したプラウ耕鎮圧体系水田輪作の開発研究において、農研機構東北農業研究センター（岩手県盛岡市）および現地農家圃場（岩手県花巻市）で2014-2018年に実施したものである。

## 引用文献

- 天野久・甲谷潤・松尾嘉重 1986. 水田転換畑におけるプラウ耕の効果. 京都農研報 13: 39-46.
- アメリカ穀物協会 2016. 2016/207トウモロコシ収穫時品質レポート. [http://grainsjp.org/cms/wp-content/uploads/dlm\\_uploads/Corn-Harvest-Report-J-Final-1.pdf](http://grainsjp.org/cms/wp-content/uploads/dlm_uploads/Corn-Harvest-Report-J-Final-1.pdf) (2019/02/03閲覧).
- Anderson, E.L. 1987. Corn root growth and distribution as influenced by tillage and nitrogen fertilization. *Agron. J.* 79: 544-549.
- Andrade, F.H., Vega, C., Uhart, S., Cirilo, A., Cantarero, M. and Valentinuz, O. 1999. Kernel number determination in maize. *Crop Sci.* 39: 453-459.
- Andrade, F.H., Otegui, M.E. and Vega, C. 2000. Intercepted radiation at flowering and kernel number in maize. *Agron. J.* 92: 92-97.
- Andrade, F.H., Echarte, L., Rizzalli, R., Maggiora, A.D. and Casanovas, M. 2002. Kernel number prediction in maize under nitrogen or water stress. *Crop Sci.* 42: 1173-1179.
- 青田精一・星野正生 1978. 低湿重粘土水田の転換畑におけるトウモロコシ収量の年次変化. 日草誌 24: 118-122.
- 青田精一・渡辺好昭・石田良作 1985. 低湿重粘土水田の転換畑における飼料作物の生育特性. 日草誌 30: 389-395.
- 青田精一・渡辺好昭・石田良作 1986. 低湿重粘土水田の転換畑における飼料作物の生育特性Ⅲ. 転換初期におけるトウモロコシの無機養分吸収. 日草誌 31: 413-419.
- 有馬進・田中典幸 1988. 禾本科作物の種子根に関する研究 2. 土壌硬度と種子根の伸長について. 佐賀大農彙 65: 17-26.
- Ball-Coelho, B.R., Roy, R.C. and Swanton, C.J. 1998. Tillage alters corn root distribution in coarse-textured soil. *Soil Tillage Res.* 45: 237-249.
- Barber, S.A. 1971. Effect of tillage practice on corn (*Zea mays* L.) root distribution and morphology. *Agron. J.* 63: 724-726.
- Borrás, L. and Otegui, M.E. 2001. Maize kernel weight response to postflowering source-sink ratio. *Crop Sci.* 49: 1816-1822.
- Bush, B.J., Carson, M.L., Cubeta, M.A., Hagler, W.M. and Payne, G.A. 2004. Infection and Fumonisin Production by *Fusarium verticillioides* in developing maize kernels.

- Phytopathology 94: 88-93.
- Cahn, M.D., Zobel, R.W. and Bouldin, D.R. 1989. Relationship between root elongation rate and diameter and duration of growth of lateral roots of maize. *Plant Soil* 119: 271-279.
- Carter, P.R. and Barnett, K.H. 1987. Corn-hybrid performance under conventional and no-tillage systems after thinning. *Agron. J.* 79: 919-926.
- 中央農業研究センター 2018. 2025年の地域農業の姿が把握できる地域農業情報. [http://www.naro.affrc.go.jp/publicity\\_report/press/laboratory/narc/080852.html](http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/press/laboratory/narc/080852.html) (2019/02/03閲覧).
- Cirilo, A.G. and Andrade, F.H. 1994. Sowing date and maize productivity: II. Kernel number determination. *Crop Sci.* 34: 1044-1046.
- Dick, W.A. 1983. Organic Carbon, nitrogen, and phosphorus concentrations and pH in soil profiles as affected by tillage intensity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 102-107
- 土壤環境分析法編集委員会 1997. 土壤環境分析法. 博友社, 東京. 52-54.
- 永西修 2009. 飼料成分の分析法. 自給飼料利用研究会編, 三訂版粗飼料の品質評価ガイドブック. 日本草地畜産種子協会, 東京. 4-63.
- Ellis, F.B. and Howse, K.R. 1980. Effects of cultivation on the distribution of nutrients in the soil and the uptake of nitrogen and phosphorus by spring barley and winter wheat on three soil types. *Soil Tillage Res* 1: 35-46.
- 福島県農業総合研究センター 2008. 飼料用トウモロコシの新しい優良品種「34N84」, 「34B39」, 「SH4681」. [http://www4.pref.fukushima.jp/nougyou-centre/kenkyuseika/h19\\_fukyu/h20f\\_16.pdf](http://www4.pref.fukushima.jp/nougyou-centre/kenkyuseika/h19_fukyu/h20f_16.pdf) (2019/02/03閲覧).
- 藤森新作 2007. 転作作物の安定多収をめざす地下水位調節システム—水田リフォーム技術の開発—. *農及園* 82: 570-576.
- 後藤隆志 1997. 耕うん整地作業の新技术. *農業機械学会誌* 59: 125-129.
- Guan, D., Al-Kaisi, M.M., Zhang, Y., Duan, L., Tan, W., Zhang, M. and Li, Z. 2014. Tillage practices affect biomass and grain yield through regulating root growth, root-bleeding sap and nutrients uptake in summer maize. *Field Crops Res.* 157: 89-97.
- Hallauer, A.R. and Colvin, T.S. 1985. Corn hybrids response to four methods of tillage. *Agron. J.* 77: 547-550.

- 濱村美由紀・相馬潤・中津智史・甲田裕幸・橋本庸三 2011. 道央地域における子実用トウモロコシの栽培法. (平成23年度北海道地域の成果情報). <http://www.naro.affrc.go.jp/harc/contents/files/kankyo03.pdf> (2019/02/03閲覧).
- 原田直人・小林洋美・宮園勉・竹之内豊・桑水郁朗 2009. 二期作トウモロコシ不耕起栽培における品種・播種作業性・年3作体系の検討並びに栽植密度が生産性, 耐倒伏性に及ぼす影響. 鹿児島農総研報 (畜産) 3: 19-26.
- 橋本武・中村和弘 1971. 施肥による土壤酸性化ならびに中和に関する研究 (第1報) 土壤と肥料との化学的反応ならびに硝酸化成による土壤pHの変化. 土肥誌 42: 453-458.
- 橋本武・中村和弘・横田弘司 1974. 施肥による土壤酸性化および中和に関する研究 (第2報) 溶脱による土壤pHの変化. 土肥誌 45: 213-218.
- 波多野隆介 1996. 根の伸長を予測する土壤の物理性. 農及園 71: 619-624.
- 林拓・牧野司・出口健三郎 2009. 播種床造成行程の簡易化がとうもろこしの生育・収量に及ぼす影響の品種間差. 北草研報 43: 46.
- 林拓 2011. 北海道における不耕起栽培. 日草誌 57: 162-166.
- 平井ゆか 2016. 日本に子実トウモロコシ産業をつくろう. 農業経営者 242: 21.
- 平久保友美・魚住順・川畑茂樹・雑賀優・佐野宏明 2011. 東北部における連続不耕起栽培が飼料用トウモロコシの収量に与える影響. 日草誌 57: 73-79.
- Hirasawa, T., Tanaka, K., Miyamoto, D., Takei, M. and Ishihara, K. 1994. Effects of pre-flowering soil moisture deficits on dry matter production and ecophysiological characteristics in soybean plants under drought conditions during grain filling. Jpn. J. Crop Sci 63: 721-730.
- 北海道立総合研究機構農業研究本部 2012. 土壤・作物栄養診断のための分析法2012. 北海道立総合研究機構本部, 北海道. 57-96.
- 星信幸 2013. 機械の汎用利用などによる3年4作水田輪作体系. 農業機械学会誌 75: 225-230.
- 細川寿 2004. 大豆の耕うん同時畦立作業機による重粘土転換畑の湿害回避技術. 農業機械学会誌 66: 14-16.
- 飯田周治・新村善男・上森晃・久津那浩三 1990. 耕耘方法の相違と大型機械による土壤の踏圧が水稻の生育収量に及ぼす影響. 日作紀 59: 672-678.
- 池永幸子・細川寿・足立一日出・大野智史・野村幹雄・関正裕 2012. 北陸地域における耕うん同時畝立て播種技術がオオムギの生育・収量に及ぼす影響. 日作紀 81: 49-55.

- 稲野一郎・石井耕太・木村義彰・竹中秀行 2017. 水田地帯におけるトウモロコシ子実の収穫乾燥工程の策定と所要エネルギーの推定. 農作業研究 52: 167-178.
- 井上博道・伊藤豊彰・三枝正彦 2000. 不耕起栽培における栽植密度および窒素施用量がデントコーンの倒伏および収量に与える影響. 日草誌 46: 249-253.
- 岩崎秀穂・三宅信 1983. 転換畑における土壌型別の排水施工法. 栃木農試研報 29: 33-48.
- 岩手県 2017. 岩手県農作物施肥管理指針. [http://www.pref.iwate.jp/dbps\\_data/\\_material/\\_files/000/000/029/027/zeubu.pdf](http://www.pref.iwate.jp/dbps_data/_material/_files/000/000/029/027/zeubu.pdf) (2019/02/03閲覧).
- Jing, J., Rui, Y., Zhang, F., Rengel, Z. and Shen, J. 2010. Localized application of phosphorus and ammonium improves growth of maize seedlings by stimulating root proliferation and rhizosphere acidification. Field Crops Res. 119: 355-364.
- Jones, R. J., Schreiber, B. M. N. and Roessler, J. A. 1996. Kernel sink capacity in maize: Genotypic and maternal regulation. Crop Sci. 36: 301-306.
- 椛木信幸・坂斉・秋田重誠 1979. 水稻の光合成およびRuBPカルボキシラーゼ, オキシゲナーゼ活性に及ぼす窒素, リン, カリ欠乏の影響. 日作紀 48: 378-384.
- 柿原孝彦・福田誠実・大石登志雄・馬場武志・藤井秀明 1996. 転換畑における青刈りトウモロコシ (*Zea mays* L.) の不耕起作溝栽培法の開発. 日草誌 42: 52-56.
- 上出順一 1979. 水田の耕耘整地および施肥の機械化作業に関する研究. 山形大学紀要 8: 409-506.
- 冠秀昭・大谷隆二・千葉克己 2012. 黒ボク土水田におけるプラウ耕鎮圧体系乾田直播での浸透抑制手法. 農業農村工学会論文集 282: 69-77.
- 冠秀昭・大谷隆二・関矢博幸・千葉克己 2014. 農業用トラクタで利用できる浅層暗渠施工器の開発と排水効果. 農業農村工学会論文集 292: 93-101.
- 冠秀昭・大谷隆二・関矢博幸・中山壮一・齋藤秀文 2015. 大規模水稻乾田直播圃場における鎮圧作用による浸透抑制効果. 農作業研究 50: 103-113.
- 冠秀昭・林貴峰・大谷隆二 2016. 新たな標準区画に対する水稻乾田直播栽培技術. 水土の知 84: 185-188.
- 冠秀昭・関矢博幸・大谷隆二 2017. 水田の土壌状態に基づいたプラウ耕鎮圧体系乾田直播栽培の適用性. 農作業研究 52: 63-75.
- 菅野勉・森田聡一郎・黒川俊二・佐藤節郎・間野吉郎 2010. サイレージ用トウモロコシ (*Zea mays*

- L.) 市販品種の幼苗期における耐湿性の差異. 日草誌 56: 211-214.
- 菅野勉・森田聡一郎・佐藤節郎・住田憲俊 2014. 二毛作条件下におけるサイレージ用トウモロコシ (*Zea mays* L.) の畝立て播種に関する現地試験. 日草誌 60: 49-54.
- Karlen, D.L. and Sojka, R.E. 1985. Hybrid and irrigation effects on conservation tillage corn in the coastal plain. *Agron. J.* 77: 561-567.
- Kaspar, T., Cruse, T., Erbach, R. and Timmons, D. 1987. Growth and productivity of four corn hybrids as affected by tillage. *Agron. J.* 79: 477-481.
- Kaspar, T.C., Brown, H.J. and Kassmeyer, E.M. 1991. Corn root distribution as affected by tillage, wheel traffic, and fertilizer placement. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 1390-1394.
- 川村富輝・中野恵子・光岡宗司・井上英二・岡安崇史 2013. 部分浅耕播種法がコムギの品質・収量および播種の省力化に及ぼす影響. *農作業研究* 48: 111-120.
- Kiniry, J.R. and Knievel, D.P. 1995. Response of maize seed number to solar radiation intercepted soon after anthesis. *Agron. J.* 87: 228-234.
- 吉良賢二 1985. 北限地帯におけるサイレージ用トウモロコシの生育および生産性に関する研究 第3報 初期生育が収量に及ぼす影響. *日作紀* 54: 47-53.
- 気象庁 2015. 平成27年の梅雨入り・明けと梅雨時期の特徴について. <http://www.jma.go.jp/jma/press/1509/01a/tsuyu2015.pdf> (2019/02/03 閲覧).
- 北川巖・竹内晴信・塚本康貴・末久美由紀 2008. 新方式の穿孔暗渠「カットドレーン工法」の開発. *土肥誌* 79: 313-316.
- 北倉芳忠・林恒夫・佐藤勉 1995. 大区画埴土湿田における乾田直播作業体系. *福井県農試研報* 32: 21-29.
- 濃沼圭一・池谷文夫・伊東栄作 1998. 引倒し力によるトウモロコシの転び型倒伏抵抗性の非破壊・計量的検定法. *日草誌* 43: 424-429.
- 昆吉則 2017. 子実トウモロコシの生産拡大に向けた現地研修会 in 茨城県境町～農業施策に子実トウモロコシが採り入れられる時代に～. *農業経営者* 260: 30-33.
- Kono, Y., Yamauchi, A., Kawamura, N., Tatsumi, J., Nonoyama, T. and Inagaki, N. 1987. Interspecific differences of the capacities of waterlogging and drought tolerances

- among summer cereals. *Jpn. J. Crop Sci.* 56: 115-129
- 久保寺秀夫 2001. 沖縄本島中央部のマージ土壌の乾燥に伴う硬化強度に影響する要因. *土肥誌* 72: 649-659.
- 久津那浩三・上森晶・新村善男・飯田祐二 1972. 乾田直播栽培の連作が地力に及ぼす影響について. *土肥誌* 43: 86-91.
- 間野吉郎・村木正則・藤森雅博・高溝正 2005. トウモロコシとテオシント幼植物において湛水条件下で地表に生じる不定根量の系統変異と遺伝解析. *日作紀* 74: 41-46.
- 間野吉郎・小柳敦史 2009. イネ科作物の耐湿性研究の現状と今後の展開方向. *日作紀* 78: 441-448.
- 丸山幸夫 2016. 直播栽培技術の開発状況と技術的問題点. *農業技術* 61: 488-492.
- 松波寿典・佐藤健介・佐藤雄幸・進藤勇人・佐藤信和・高橋善則・佐藤敬亮・佐々木景司・猿田進 2012. グライ土壌の水田転換畑での大豆狭畦密植栽培は代かき栽培後よりも無代かき栽培後のほうが有効である. 第233回日本作物学会講演会要旨集: 64-65.
- 松波寿典・齋藤秀文・大谷隆二・関矢博幸・篠遠善哉・冠秀昭・中山壮一・西田瑞彦・高橋智紀・浪川茉莉・林和信・長坂善禎・片山勝之 2017. 宮城県の津波被災後の大区画整備圃場におけるチゼルプラウ耕グレーンドリル播種体系によるダイズの晩播狭畦密植栽培. *日作紀* 86: 192-200.
- 三好洋 1972. 根群発達の良好な土壌条件からみた畑地の有効土層の検討 畑土壌生産力分級のための指標の再検討と千葉県畑土壌の生産力分級 (第1報). *土肥誌* 43: 92-97.
- 水田一枝 2001. 灌漑水による水田へのN, P, Kの流入量—福岡県における推定—. *日作紀* 70: 595-598.
- Mock, J.J. and Erbach, D.C. 1977. Influence of conservation-tillage environments on growth and productivity of corn. *Agron. J.* 69: 337-340.
- 盛川周祐・大谷隆二 2009. グレーンドリルを用いた乾田直播栽培. *日作東北支部報* 52: 67-70.
- 盛川周祐 2015. 花巻での栽培3年目で見えてきたポイント わくわくする高揚感のなかで. *農業経営者* 233: 22-23.
- Morita, S., Thonpae, S. and Abe, J. 1992. Root branching in maize. I. "Branching index" and methods for measuring root length. *Jpn. J. Crop Sci.* 61: 101-106.
- 森田茂紀・奥田浩之 1994. 土壌水分条件がコムギ幼植物の根の生育, とくに種子根の分枝に及

- ぼす影響. 日作紀 63: 418-422.
- 森田茂紀・阿部淳 1997. 茎葉部からの根系の生育を診断する. グリーンレポート 276: 8-9.
- 森田茂紀・岡本美輪・阿部淳・山岸順子 2000. 圃場で栽培したトウモロコシの出液速度と根量の関係. 日作紀 69: 80-85.
- 森田茂紀・阿部淳 2002. 水田で栽培した水稻の出液速度の日変化および生育に伴う推移. 日作紀 71: 383-388.
- 森田聡一郎 2011. 関東における不耕起栽培. 日草誌 57: 167-171.
- 森田聡一郎・中尾誠司・菅野勉・黒川俊二・佐藤節郎・吉村義則 2012. トウモロコシ (*Zea mays* L.) の不耕起播種栽培における土壌物理性が播種精度および初期生育に及ぼす影響. 日草誌 57: 185-189.
- Murakami, T., Yamada, K. and Yoshida, S. 1999. Improved method for easy and rapid determination of root length of vegetables. *Soil Sci. Plant Nutr.* 45: 471-478.
- 村上敏文・山田和義・吉田清志 2000. 簡便迅速なレタス・ハクサイの根-土分離法および根長測定法. 長野中信農試報 15: 95-105.
- 村上敏文・井沢憲行 2008. チェーンブロックを使った根系調査のための効率的土壌モノリス採取法. 根の研究 17: 127-130.
- 中精一 1981. 作物栽培と耕うん作業. 農業機械学会誌 42: 563-567.
- 中野啓三 1979. 低湿重粘土水田の畑転換に伴う土壌物理性の推移. 北陸作報 13: 43-46.
- 中野啓三 1980. 重粘土水田の挙動と粘土. 粘土科学 20: 37-46.
- 中津智史・濱村美由紀・中本洋・甲田裕幸・飯田憲司・相馬潤 2015a. 道央地域における子実用とうもろこしの栽培法 (第1報) 品種の早晚性が生育, 収量, 子実水分等に及ぼす影響. 北農 82: 159-168.
- 中津智史・濱村美由紀・中本洋・甲田裕幸 2015b. 道央地域における子実用とうもろこしの栽培法 (第2報) 無機養分の吸収推移と窒素施肥法. 北農 82: 267-273.
- 中津智史・濱村美由紀・中本洋・甲田裕幸・相馬潤 2015c. 道央地域における子実用とうもろこしの栽培法 (第3報) 栽植密度が子実収量・水分, 倒伏に及ぼす影響. 北農 82: 364-369.
- 日本ペドロロジー学会 1997. 土壌調査ハンドブック 改訂版. 博友社, 東京. 72-99.
- 新良力也 2016. 転作田における地力維持と大規模水田農家の課題. 水土の知 84: 189-192.
- 農業機械学会 1996. 生物生産機械ハンドブック. コロナ社, 東京. 410.
- 農業・生物系特定産業技術研究機構 2006. 最新農業技術事典. 農山漁村文化協会, 東京. 819,

964.

農林省農林経済局統計調査部 1969. 農林水産統計. 農林統計協会, 東京. 62.

農林水産省 2010. 米粉用米・飼料用米の生産をめぐる状況. <http://www.maff.go.jp/kyusyu/seisan/sinko/pdf/201003komekomj.pdf> (2019/02/03閲覧).

農林水産省 2014. 水稻の直播栽培について. [http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/zikamaki/z\\_genzyo/attach/pdf/index-5.pdf](http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/zikamaki/z_genzyo/attach/pdf/index-5.pdf) (2019/02/03閲覧).

農林水産省 2016a. 農業生産基盤の整備状況について (平成27年3月). [http://www.maff.go.jp/j/council/seisaku/nousin/bukai/h28\\_5/attach/pdf/index-13.pdf](http://www.maff.go.jp/j/council/seisaku/nousin/bukai/h28_5/attach/pdf/index-13.pdf) (2019/02/03閲覧).

農林水産省 2016b. 2015年農林業センサス. <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00500209&tstat=000001032920&cycle=7&year=20150&month=0&tclass1=000001077437&tclass2=000001077396&tclass3=000001085297> (2019/02/03閲覧).

農林水産省 2017. 作物別作付 (栽培) 面積 (2017年3月7日公表) 7-3 青刈りトウモロコシ. <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00500215&tstat=000001013427&cycle=7&year=20160&month=0&tclass1=000001032270&tclass2=000001032271&tclass3=000001095756> (2019/02/03閲覧).

農林水産省 2018a. 農業生産基盤の整備状況について (平成28年3月). <http://www.maff.go.jp/j/council/seisaku/nousin/bukai/h2903/attach/pdf/index-6.pdf> (2019/02/03閲覧).

農林水産省 2018b. 平成29年産麦類生産費. [http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/noukei/seisanhi\\_nousan/attach/pdf/index-23.pdf](http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/noukei/seisanhi_nousan/attach/pdf/index-23.pdf) (2019/02/03閲覧).

農林水産省 2018c. 平成29年産大豆生産費. [http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/noukei/seisanhi\\_nousan/attach/pdf/index-30.pdf](http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/noukei/seisanhi_nousan/attach/pdf/index-30.pdf) (2019/02/03閲覧).

農林水産省 2018d. 平成29年耕地及び作付面積統計. <https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00500215&tstat=000001013427&cycle=7&tclass1=000001032270&tclass2=000001032271&tclass3=000001112375&second2=1> (2019/02/03閲覧).

農林水産省 2018e. 品目別貿易実績. [http://www.maff.go.jp/j/kokusai/kokusei/kaigai\\_nogyo/k\\_boeki\\_tokei/sina\\_betu.html](http://www.maff.go.jp/j/kokusai/kokusei/kaigai_nogyo/k_boeki_tokei/sina_betu.html) (2019/02/03閲覧).

農林水産省 2018f. 米をめぐる関係資料. [http://www.maff.go.jp/j/seisan/kikaku/attach/pdf/kome\\_siryou-171.pdf](http://www.maff.go.jp/j/seisan/kikaku/attach/pdf/kome_siryou-171.pdf) (2019/02/03閲覧).

小原洋・高田裕介・若林正吉・神田隆志・神山和則・大倉利明・前島勇治 2016. 包括的土壌分類

- 第1次試案に基づいた1/20万日本土壌図. 農環研報告 37: 133-148.
- 尾形武文・松江勇次 1996. 北部九州における水稻湛水直播栽培に関する研究. 日作紀 65: 87-92.
- 小川和夫 1969. 鈣質畑地土壌における地力要因の解析的研究. 東海近畿農業試験場研究報告 18: 192-352.
- 大久保隆弘 1980. 農地の汎用化と土・作物・排水. 農土誌 48: 647-653.
- 太田健・舛谷雅弘・村上章・藤井芳一・小林ひとみ 2001. 不耕起および無代かき移植水稻栽培による畑地化の維持効果. 土肥誌 72: 797-802.
- 大谷隆二・西崎邦夫・柴田洋一 1996. 無代かき水稻直播栽培に関する研究(第1報) — 土壌物理性と易耕性 —. 農業機械学会誌 58: 73-80.
- 大谷隆二 2013a. プラウ耕鎮圧体系の乾田直播とこれからの水田農業. 農業 1579: 36-43.
- 大谷隆二・関矢博幸・冠秀昭・中山壮一・齋藤秀文 2013b. 大区画圃場におけるプラウ耕乾田直播を核とした2年3作水田輪作体系. 農業機械学会誌 75: 220-224.
- 大谷隆二 2015. 水田輪作の新しいフレームワークと土壌学・植物栄養学の展開方向 7. プラウ耕鎮圧体系の乾田直播と水田農業の今後. 土肥誌 86: 42-47.
- Oyanagi, A., Nakamoto, T. and Wada, M. 1993. Relationship between root growth angle of seedlings and vertical distribution of roots in the field in wheat cultivars. Jpn J. Crop Sci 62: 565-570.
- 小柳敦史・南石晃明・土田志郎・長野間宏 1998. 汎用水田において耕起および不耕起栽培したコムギ, ダイズおよび水稻の根の垂直分布の解析. 日作紀 67: 49-55.
- 小柳敦史・乙部(桐渕)千雅子・柳澤貴司・三浦重典・小林浩幸・村中聡 2004. 根系の深さが異なるコムギ実験系統群の過湿な水田圃場における生育と収量. 日作紀 73: 300-308.
- 尾崎政春 2015. 道央における子実用トウモロコシ利用の取り組み. 北畜草会報 3: 73-77.
- Payne, G. A. (1999). Ear and kernel rots. In G.P. Munkvold & D.G. White (Eds.), Compendium of Corn Diseases 3<sup>rd</sup>. St. Paul, MN: American Phytopathological Society Press. 44-49.
- Peng, Y., Niu, J., Peng, Z., Zhang, F. and Li, C. 2010. Shoot growth potential drives N uptake in maize plants and correlates with root growth in the soil. Field Crops Res. 115: 85-93.

- Reddy, V.M. and Daynard, T.B. 1983. Endosperm characteristics associated with rate of grain filling and kernel size in corn. *Maydica* 28: 339-355.
- 坂本英美・大下泰生 2008. 汎用ロータリシーダの導入効果とその特徴ー北海道南空知地域における稲・麦・大豆水田輪作経営を対象にしてー. 北海道農研研報 189: 19-39.
- 進藤勇人・齋藤雅憲・佐々木景司・佐藤雄幸・片平光彦 2017. スタブルカルチと縦軸駆動ハローを用いた播種床造成による水稲無代かき湛水直播栽培の特徴と水稲生育. 農作業研究 52: 121-131.
- 篠遠善哉 2017. 乾田直播栽培（イネ）とトウモロコシ栽培・子実生産. 国立研究開発法人 農業・食料産業技術総合研究機構 畜産研究部門編, 平成29年度 自給飼料利用研究会「自給飼料利用に関する研究成果の社会実装と課題」. 近代工房, 栃木. 67-73.
- 住田弘一・加藤直人・西田瑞彦 2005. 田畑輪換の繰り返しや長期畑転換に伴う転作大豆の生産力低下と土壌肥沃土の変化. 東北農研研報 103: 39-52.
- 住田憲俊・森田聡一郎・伊吹敏彦・井上秀彦・佐藤節郎・菅野勉 2013. 水田圃場において畦縦は手法および肥効調整型肥料を用いて栽培されたサイレージ用トウモロコシ (*Zea mays* L.) 2品種の乾物収量. 日草誌 59: 1-7.
- 高屋武彦・加藤明治・上沢正志 1985. 東北地方の火山灰水田における田畑輪換に関する研究. 日作紀 54: 72-73.
- 田中佐知子・山内章・矢野勝也・飯島盛雄・巽二郎 2000. トウモロコシ根系が発揮する可塑性の窒素獲得における意義. 根の研究 9: 167-171.
- 田中丸重美・林田慎一・望月俊宏・古屋忠彦 1998. 圧縮土層への種子根・主根の貫入および貫通の作物種間差について. 日作紀 67: 63-69.
- Tao, H., Chen, P., Li, L., Liao, S., Wang, L. and Wang, P. 2014. Maintenance of crop growth through 30 days after silking contributes to achieving super-high yield of spring maize. *Plant Prod. Sci.* 17: 268-275.
- Teal, R.K., Tubana, B., Girma, K., Freeman, K.W., Arnall, D.B., Walsh, O. and Raun, W.R. 2006. In-season prediction of corn grain yield potential using normalized difference vegetation index. *Agron. J.* 98: 1488-1494.
- 東北農業研究センター 2018. 乾田直播栽培技術マニュアループラウ耕・グレーンドリル播種体系ーver. 3.1. [http://www.naro.affrc.go.jp/publicity\\_report/publication/pamphlet/te](http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/pamphlet/te)

ch-pamph/030716.html (2019/02/03閲覧).

鶴田豊・廣野修・三上浩二・八巻智 2016. 宮城県における「新たな標準区画 (2ha)」の取り組みについて. 平成28年農業農村工学会大会講演会講演要旨集: 2-3.

富沢ゆい子 2016. 北海道における子実用トウモロコシの栽培法と輪作体系への導入効果. 牧草と園芸 64: 6-9.

富沢ゆい子・濱村美由紀・須田達也・渡部敢・笛木伸彦 2017a. 北海道における子実用トウモロコシの窒素利用特性と土壌診断に基づく窒素施肥対応 第1報 窒素利用特性と土壌窒素分析値による窒素吸収量の推定. 土肥誌 88: 89-99.

富沢ゆい子・濱村美由紀・須田達也・渡部敢・笛木伸彦 2017b. 北海道における子実用トウモロコシの窒素利用特性と土壌診断に基づく窒素施肥対応 第2報 土壌診断に基づく窒素施肥対応の構築. 土肥誌 88: 100-108.

Trachsel, S., Kaeppler, S.M., Brown, K.M. and Lynch, J.P. 2013. Maize root growth angles become steeper under low N conditions. Field Crops Res. 140: 18-31.

辻博之・山本泰由・松尾和之・臼木一英 2002. 火山性土壌畑におけるラッカセイ, トウモロコシ, 大豆の根系に及ぼす不耕起栽培の影響. 根の研究 11: 43-49.

佃和民・花井雅次・黒澤健 1989. 田畑輪換における水田期間・畑期間の組み合わせと作物生産力. 日作紀 58 (別1): 50-51.

上村幸正・宮坂昭・森谷睦夫 1971. 連年の乾田直播が水稻収量を低下させる原因について 第1報 生育・収量および土壌中チッソの動態に及ぼす直播連続の影響. 日作紀 40: 449-454.

上村幸正・宮坂昭 1974. 連年の乾田直播が水稻収量を低下させる原因について 第3報 地力消耗の影響について. 日作紀 43: 174-179.

植田精一・窪田文武 1981. 飼料用トウモロコシの栽培環境と生産性II. トウモロコシ品種の生産に及ぼす遮光処理の影響. 日草誌 27: 174-181.

上山泰・松井範義・南条巖・尾崎武・秋田謙司・石田薫 1987. 水田転換における飼料生産 第1報. 神大農研報 17: 181-189.

上山泰・南条巖・松井範義・尾崎武・秋田謙司・石田薫 1989. 水田転換における飼料生産 第2報. 神大農研報 18: 173-180.

U. S. Food and Drug Administration 2001. Guidance for industry: fumonisin levels in human foods and animal feeds. <https://www.fda.gov/food/guidanceregulation/guidancedocume>

- ntsregulatoryinformation/chemicalcontaminantsmetalsnaturaltoxinspesticides/ucml09231.htm (2019/02/03閲覧).
- USDA (United States Department of Agriculture) 2017. Crop production. 1-49. [https://www.nass.usda.gov/Publications/Todays\\_Reports/reports/crop1117.pdf](https://www.nass.usda.gov/Publications/Todays_Reports/reports/crop1117.pdf) (2019/02/03閲覧).
- Wall, D.A. and Stobbe, E.H. 1983. The response of eight corn (*Zea mays* L.) hybrids to zero tillage in Manitoba. *Can. J. Plant Sci.* 63: 753-757.
- 渡辺春朗・松本直・三好洋 1974. 転換畑の土壌物理性と地下水位が根群分布に及ぼす影響. 千葉農試研報 14: 87-93.
- 渡辺治郎・西宗昭・小川和夫・石田博 1987. 重粘性土壌における簡易耕の導入. 北海道農試研報 148: 139-156.
- 渡辺治郎・高屋武彦・高橋幹・川勝正夫 1992. 春播コムギの多収と根雪前播種一耕耘法を中心として一. 農業技術 47: 449-453.
- 渡辺治郎・高屋武彦・高橋幹 1994. 春播コムギの根雪前播種栽培におけるチゼル耕の効果. 土壌の物理性 69: 31-37.
- 渡邊和洋・松崎守夫・松尾和之・渡邊好昭 2015. 不耕起播種を基軸とする水田輪作における減肥体系が収量性および土壌の化学性に及ぼす影響. 日作紀 84: 162-175.
- 山口淳一・原徹夫・田中明 1970. 作物の生長効率に関する研究 (第2報). 土肥誌 41: 73-77.
- 山口武視・津野幸人・真野玲子・中野淳一 1992. 水稻茎基部からの出液に関する要因と出液中の無機成分と根の呼吸速度との関係. 日作紀 61 (別1): 252-253.
- Yamauchi, A., Kono, Y. and Tatsumi, J. 1987. Quantitative analysis on root system structures of upland rice and maize. *Jpn. J. Crop. Sci* 56: 608-617.
- 山崎耕字・阿部淳 1987. 水稻根の形態と出液速度との関係. 日作紀 56 (別1): 176-177.
- 吉村義則 2004. トウモロコシ. 日本草地学会編, 草地科学実験・調査法. 畜産技術協会, 東京. 112-115.
- 吉澤比英子・高沢由美・常見讓史・大島正捨 2011. 黒ボク土水田に連用する有機物の違いが水稻の窒素吸収パターンと収量構成要素に違いをもたらす. 栃木県農試研報 35: 27-36.