

## 圃場で栽培したトウモロコシの出液速度と根量との関係

誌名	日本作物學會紀事
ISSN	00111848
著者	森田, 茂紀 岡本, 美輪 阿部, 淳 ほか1名,
巻/号	69巻1号
掲載ページ	p. 80-85
発行年月	2000年3月

## 圃場で栽培したトウモロコシの出液速度と根量との関係

森田茂紀\*・岡本美輪・阿部淳・山岸順子  
(東京大学)

**要旨:** 植物の茎葉部を切除すると切口から溢泌液が出てくる出液現象は、根圧による能動的吸水に基づくため、根系全体の生理的活性の指標となる可能性が高い。そこで本研究では、圃場で慣行栽培したトウモロコシを用いて、出液速度の基礎的特性を検討した。出液速度を測定するために茎葉部を切除すると、生育段階や時刻に関係なく、その直後から出液速度が低下したことから、茎葉部を切除した影響が比較的早い時期から現われることが明らかとなった。そこで、毎回異なる個体について茎葉部を切除した直後の出液速度を調査したところ、午前8時前後に最大値となる日変化が認められた。この結果を踏まえて、午前中の一定時刻における出液速度を生育初期から登熟期にかけて調査したところ、雄穂が出現する(播種後50日目)ころまで増加し、それ以後は減少した。根系形成をみると、茎の頂端側から出現した節根ほど節当たりの数が多く、直径が大きかったが、雄穂が出現するころには新しく出現してくる節根の数が少なく、個体当たりの根量は生育に伴ってS字曲線を描いて増加した。個体当たりの出液速度と根系のいくつかの形質との関係を検討したところ、雄穂の出現時まではそれぞれの間密接な高い正の相関関係が認められたが、雄穂が出現してから成熟までは関係が明らかでなかった。出液速度は根量と単位根量当たりの出液速度によって規定される、という視点から解析を進めた結果、単位根量当たりの出液速度は播種後35日目ころまで増加し、その後減少することが明らかとなった。

**キーワード:** 溢泌液, 根系, 出液速度, 節根, トウモロコシ, 日変化。

植物による吸水には、受動的吸水と能動的吸水がある(Kramer and Boyer 1995)。受動的吸水は葉における蒸散に伴って起こる物理現象で、植物による水吸収の大部分をまかなっている。一方、能動的吸水は根圧を基盤とした生理現象で、受動的吸水に比べて量的には少ないが(Kramer and Boyer 1995)、夜間や曇りの日のように蒸散がほとんど起こらない間の吸水に役立っている。能動的吸水の原動力となる根圧が発生するメカニズムについては、まだ十分に解明されていないが(加藤 1995)、根がイオンを導管内へ積極的に取り込んだ結果、導管液と土壤溶液との間に濃度勾配が生じる結果に基づくと考えられている(Schurr 1998)。したがって、生理的活性の高い根は能動的吸水能力も高いと考えられることから、能動的吸水に基づく出液現象や排水現象に着目して根系の生理的活性を評価するというアイデアが比較的早くからある(馬場 1957)。

出液速度の測定は容易であるだけでなく、呼吸や酸化力の測定とは異なって、根を掘り出す必要がないため、圃場において根系の生理的活性を簡便に評価するための指標として期待されている。しかし、出液速度の基礎的な特性についてはいくつかの報告があるものの(山口ら 1992, 小柳 1995)、いまだに不明な点も少なくない。そこで本研究では、圃場で慣行栽培したトウモロコシを対象として、出液速度の日変化や生育に伴う推移を調査するとともに、出液速度と根量の関係について解析した。

### 材料と方法

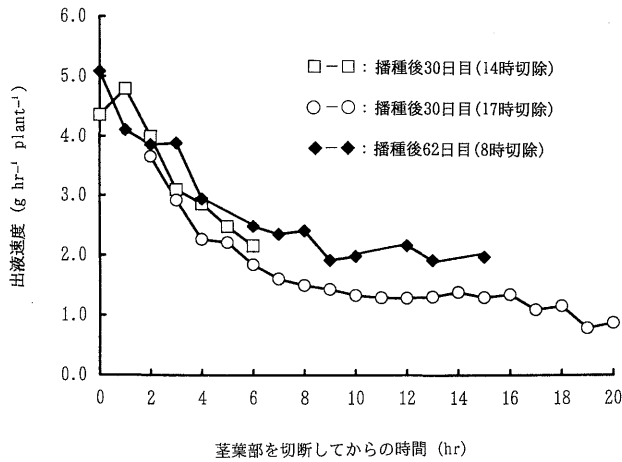
#### 1. 材料植物の栽培

材料として用いたトウモロコシ (*Zea mays* L.) は、1997年と1998年の2年間、東京大学農学部附属多摩農場において慣行栽培したデントコーン(品種:DK 789)である。播種日が若干異なることを除いて、両年の栽培概要はほぼ同じなので、1998年について簡単に記載する。すなわち、7月7日に高度化成肥料(A 907)を、1haあたりN:90 kg, P:130 kg, K:120 kgとなるように施肥した後、71 cm×23 cmの栽植間隔(栽植密度:約57,000個体/ha)で播種した。8月5日には、同じ高度化成肥料を基肥と同量だけ追肥した。

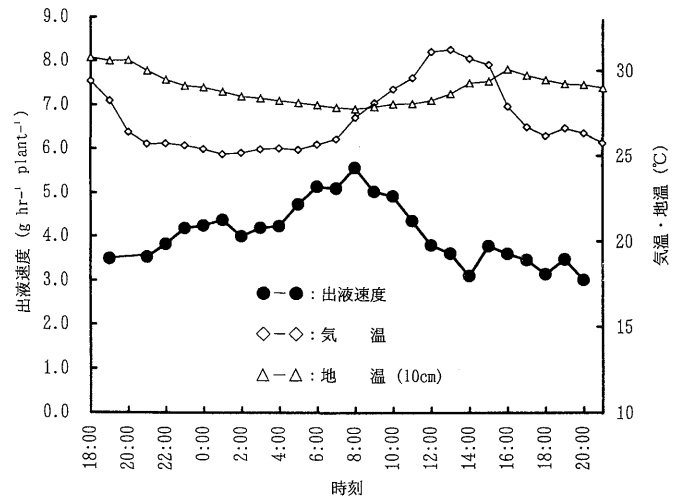
#### 2. 出液速度の測定

生育初期から成熟期まで、定期的に出液速度を測定した。両年とも、出液速度の測定は、午前中に実施した(1997年は8時ころ、1998年は10時ころから1時間)。測定にあたっては、まずトウモロコシの茎葉部を、土壌表面から約5 cmの高さで、剪定バサミを用いて切除した。茎の切断面に、あらかじめ重さを測定しておいた綿を当ててプラスチックシートで覆い、輪ゴムで固定した。1時間後、綿を取り外して再び重さを測定し、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(馬場 1957)。各回の測定個体数は、8ないし10である。

さらに、1998年には、生育段階の異なる播種後30日目(雄穂出現前)と62日目(雌穂出現後)に、出液速度の日変化を調査した。同一の個体について出液速度の経時的変化を調査するほか、1-3時間毎に新たに異なる個体の出液速度を測定した。いずれの場合も、測定個体数は8ないし10である。



第1図 トウモロコシの茎葉部を切除した後の出液速度の推移 (1998年).  
いずれも10個体の平均値.



第2図 播種後30日目におけるトウモロコシの出液速度の日変化および気温・地温の推移 (1998年).  
いずれも10個体の平均値.

### 3. 根系形態の測定

出液速度と根系形態との関係を解析するために根系形態を測定する必要があるが、トウモロコシの根域は非常に大きい (Weaver 1926, 山崎・帰山 1982), 継続して根系全体を掘り取ることは容易でない。そこで、今回は根量を規定している重要な形質の中で、とくに節根の数と直径に着目することにした。すなわち、1997年に生育時期別の出液速度を測定した個体は、測定後シャベルを用いて株元部分を掘り取った。根系を水で洗い出した後、すべての節根を基部で茎から切り離し、節根の本数を記録するとともに、基部直径をデジタルノギスで測定した。なお、出液速度と分枝程度との間に密接な関係が認められていること (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根数を記録した。また、節根の数だけでなく、直径にも着目したのは、根の基部直径と根軸長との間に比例的関係が認められることが多いという経験則があり (Morita and Hirose 1993), またトウモロコシの場合、節根の基部直径と分枝程度との間に密接な関係が認められているからである (Moritaら 1992)。さらに、節根の形態から機械的な通導機能を推定するために、直径の値を用いて節根の断面積を求めたほか、直径の4乗を算出した。トウモロコシの節根では、導管の根軸方向の通導抵抗が等価導管直径の4乗に反比例し、ハーゲン・ポワズイユの法則が成り立つこと、等価導管直径と根の直径との間には密接な相関関係が認められることが、明らかとなっているからである (長野ら 1993)。ここで等価導管直径といっているのは、根の横断面におけるすべての導管の通導能力を1本の仮想的導管で置き換えた場合の、その仮想的導管の直径のことであり、個々の導管の直径の4乗和の4乗根として計算できる。これらの根系形態に係わる指標と出液速度との関係について解析を行なった。

## 結 果

### 1. 出液速度の日変化 (1998年)

トウモロコシの同一個体について出液速度の経時変化をみたところ、茎葉部を切除した直後から減少を始め、約10時間後にほぼ一定値となった (第1図)。茎葉部を切除する時刻や生育段階を変えても、ほぼ同様の推移傾向が認められた。

これに対し、毎回新たに異なる個体について測定した場合は、出液速度は深夜から上昇を始め、翌日の午前8時前後に最大となり、夕方にかけて低下する山型の日変化を示した (第2図)。異なる生育段階において測定しても、ほぼ同様の日変化パターンが認められた。

出液速度と合わせて、それぞれの測定時刻における気温、および土壌表面から深さ10cmの位置の地温も調査した。しかし、気温・地温と出液速度との間には、いずれも明確な関係は認められなかった。

### 2. 生育に伴う出液速度の推移 (1997年および1998年)

トウモロコシの個体当たりの出液速度は生育に伴って増加し、播種後50日目頃に最高値に達した後、減少した (第3図)。出液速度が最高となる時期は、雄穂の出現期とほぼ一致していた。

また、それぞれの生育段階における出液速度の測定時に、土壌表面から深さ10cmの地温も調査した。しかし、地温は生育期間を通じて25°C前後で安定しており、出液速度との間に明確な関係は認められなかった (1998年)。

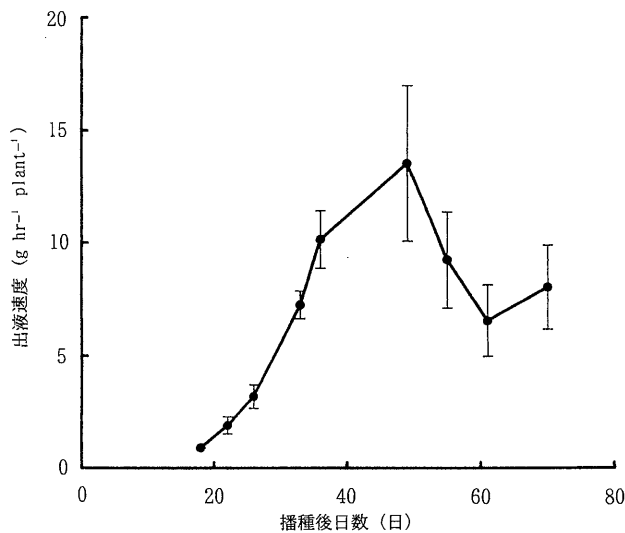
### 3. 根系の発達 (1997年)

茎葉部の生育に伴って順次茎の頂端側から節根が出現したが、生育後期に出現した節根ほど節当たりの数が多く、

直径も大きかった。しかし、雄穂が出現した播種後約50日目を以降後に出現した節根は数が少なく、茎の地上部分から出現したもの（いわゆる支柱根）の中には、土壌表面まで達しないものもあった。そのため、節根の数、直径、断面積、直径の4乗の、それぞれ個体当たりの合計値はいずれも生育に伴ってS字曲線を描きながら増加し、雄穂出現後にほぼ一定値に達した（第4図）。

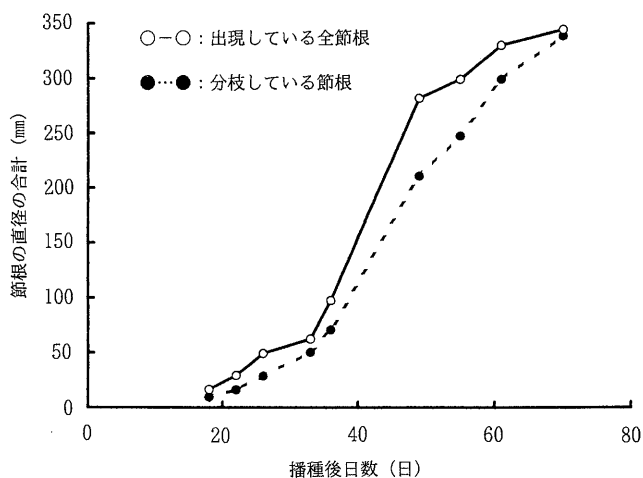
#### 4. 出液速度と根量の関係 (1997年)

根系の量的形質（節根の数、直径、断面積、直径の4乗の個体当たりの合計値）と出液速度との関係について、まず、全生育期間のデータを対象にして検討を行なったところ、いずれの場合もそれぞれに間に1%水準で有意な正の相関関係が認められた（第1表）。ところで、出液速度および根系形成はいずれも雄穂出現の前後で異なる様相を示



第3図 トウモロコシの生育に伴う出液速度の推移 (1997年)。

いずれも8~10個体の平均値。I: 標準誤差。



第4図 トウモロコシの生育に伴う節根の直径の個体当たりの合計値 (1997年)。

第1表 トウモロコシの根系の量的形質と出液速度との相関係数 (1997年)。

根系の量的形質	雄穂出現前	雄穂出現後	全生育期間
節根数の合計	0.839**	-0.401*	0.651**
節根直径の合計	0.858**	-0.400*	0.617**
節根断面積の合計	0.837**	-0.340NS	0.585**
節根直径の4乗の合計	0.764**	-0.364NS	0.521**

\*\* : 1%水準で有意, \* : 5%水準で有意, NS : 有意でない。

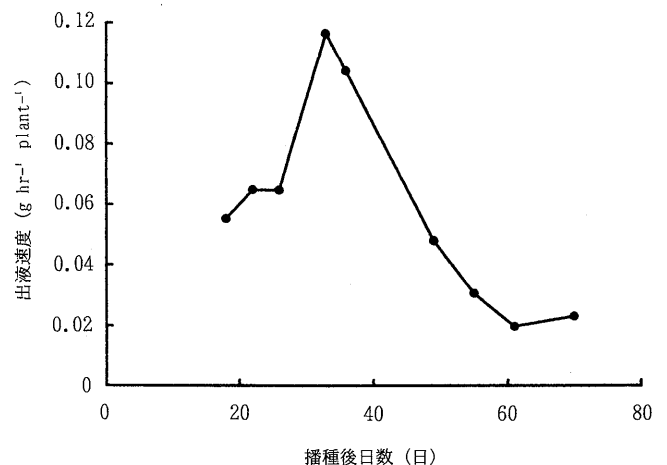
したので、それぞれのデータを分けて解析を進めた。その結果、雄穂出現期までは、すべての根系の量的形質と出液速度との間に1%水準で有意な正の相関関係が認められたが、雄穂出現以後は、それぞれの関係が明らかでなかった（第1表）。

つぎに、「出液速度=根量×単位根量当たりの出液速度」と考え、出液速度を根系の量的形質で割って算出した値を単位根量当たり出液速度として解析した。その結果、形質第5図によって若干様相が異なっていたが、節根の数、直径、断面積の場合は単位根量当たりの出液速度は播種後35日ころまで増加した後、減少した（第5図）。一方、直径の4乗の場合は、他の3形質の場合より早い時期から急速に減少していた。

## 考 察

### 1. 出液速度の日変化

トウモロコシの出液速度の日変化を調査するに当たって、測定方法を検討するために、まず茎葉部の切除が出液速度に与える影響について検討した。その結果、茎葉部を切除すると、その直後から出液速度は減少し、やがて低い値に落ち着くことが明らかになった。茎葉部を切除する時刻や生育段階を変えても同じ傾向が認められ、トウモロコシでは茎葉部切除の影響が大きく、しかも比較的早い時期から現われることが明らかとなった。著者らは、人工気象室内でポット栽培したトウモロコシの同じ品種の幼植物についても、同様の結果を得ている（岡本ら1999）。さら



第5図 トウモロコシの生育に伴う単位根量 (直径) 当たりの出液速度の推移 (1997年)。

に、イネ（山口ら 1995, 森田 1998）やコムギ（小柳ら 1989）でも、似たような現象が認められている。ただし、莖葉部を切除しても出液速度が減少しない場合もあり（穂積ら 1976, 森田・豊田 1996）、少なくとも種による違いがあると考えられる。莖葉部を切除する影響の出方が根系の種類によって異なる可能性もあるが、現段階では詳細が明らかでないので、対象とする植物に応じて出液速度の測定方法を検討する必要がある。

いずれにせよ、トウモロコシでは莖葉部を切除することが、出液速度に対して短時間で大きな影響を及ぼすことが分かったので、毎回異なる個体について莖葉部を切除した直後 1 時間の出液速度を検討したところ、午前 8 時ころ最大値となる日変化を示した。出液速度が日変化を示すことについては従来から比較的多くの報告があり、ヒマワリ（Vaadia 1960）、タバコ（MacDowall 1964）、ピーマン・ナス（穂積ら 1976）、トマト（穂積ら 1976, 榊田・島田 1993）、キュウリ（Masuda and Gomi 1982）、トウガラシ（森田・豊田 1996）のように日中高く、夜間は低いという例が多い。しかし、ブドウ（Andersen and Brodbeck 1988）では、夜間に高くなることが報告されている。また、イネでは午前中に高くなるという報告（森田 1998）と、夜間に高くなるという報告（Tsuda ら 1994）がある。さらに、ウリ科植物のように、明確な日変化が認められない場合もあり（穂積ら 1976, 森田・豊田 1996）、出液速度の日変化に関する調査の結果は様々である。その理由は明らかでないが、種や生育段階の違い、栽培条件の違い、測定方法の違いなどが関係している可能性が考えられるため、同一の生育段階や環境条件で同じ方法で出液速度を測定して比較検討する必要がある。また、根系の構造や、地上部—地下部関係に着目した検討が必要がある。いずれにせよ、本研究でトウモロコシの出液速度に日変化が認められたことはそれ自体に意義があるが、測定時刻を設定するためにも有益な知見である。

出液速度が日変化を示すメカニズムは明らかでないが、地温（山口ら 1995, 阿部ら 1998, 岡本ら 1999）、土壤水分（小柳 1995, 森田 1998）、肥料（Minshall 1968）、光条件（榊田・島田 1993）などの多くの環境条件が、出液速度に影響することについて報告がある。とくに地温は根の生理的活性に直接影響を与えるため、着目すべき要因と考えられる。今回、気温・地温の日変化についても調査を行なったが、いずれも出液速度との間に明確な関係は認められなかった。また、地温が出液速度の日変化に直接は関係していないという報告もある（Andersen and Brodbeck 1988）。少なくともトウモロコシでは、出液速度の日変化を地温の推移のみから説明することは難しい。トウモロコシ自身が持っている体内リズムや、光条件などの、地温以外の環境要因の影響についても検討する必要がある。なお、本研究では土壤水分を含む土壤条件や施肥条件について測定を行っていないが、今後、合わせて検討できれば

と考えている。

## 2. 生育に伴う出液速度の推移と根系の発達

生育段階別の出液速度については、従来いくつかの研究が行われているが（Widders and Lorenz 1982, 山口ら 1992, 小柳 1995）、全生育期間を通して検討を行なったものはほとんどない。そこで、出液速度の日変化に関する調査の結果を踏まえて、出液速度がほぼピークとなる時刻における出液速度が、生育とともにどのように推移するかについて検討した。その結果、出液速度は雄穂が出現するころまで増加し、それ以後は減少するというパターンが、2 年間にわたって認められた。著者らのグループでは、農家水田で栽培したイネについても同様の結果を得ている（森田 1998）。

出液速度と根系との関係を解析するために、根系の発達についても検討した。ただし、トウモロコシの根域は非常に大きく（Weaver 1926, 山崎・帰山 1982）、根系全体を採取して根長を測定することは難しい。そこで、本研究では節根の数と直径に着目して検討した。その理由は、「材料と方法」の項で説明したとおりである。また、「出液速度＝根量×単位根量当たりの出液速度」という視点から解析を進めたところ（森田・阿部 1997）、単位根量当たりの出液速度は、多くの場合、播種後 35 日ころまで増加し、その後減少することが明らかとなった。

著者らは、農家水田で栽培したイネの出液速度を測定した場合にも、単位根量当たりの出液速度について検討した（森田 1998）。イネの場合はトウモロコシと違って、生育初期に単位根量当たりの出液速度が顕著に増加するというのではなく、ほぼ一定の値を取った後、減少した。これに対して、トウモロコシでは生育初期に一旦増加してから減少に転ずるパターンが特徴的で、しかも増加から減少に転ずる時期が、雄穂出現期よりかなり早いことに注意しておきたい。

そこで、出液速度の推移と根系の形成との関係を見直してみると、雄穂出現の前後で 2 つの段階に分けられるだけでなく、雄穂出現期までをさらに 2 つの段階に、すなわち合わせて 3 つの段階に分けることができると考えられる。すなわち、第 1 相では根系が発達するのに伴って単位根量当たりの出液速度も増加し、根系全体の出液速度も増加する。第 2 相では第 1 相より急速に節根の数や直径が増えるが、単位根量当たりの出液速度は減少に転じ、そのため根系全体の出液速度の増加は頭打ちになる。雄穂が出現した後の第 3 相では根系形成がほぼ終わり、単位根量当たりの出液速度も低下する結果、根系全体の出液速度が減少する。

第 1 相では、新しく出現した節根が伸長するのに伴って盛んに分枝するため、根端の数が増加し、単位根量当たりの出液速度が増加すると考えられる（山崎・阿部 1987）。第 3 相では新しい節根の出現がほぼ終わり、ほとんどの根

で老化が進むため、単位根量当たりの出液速度が減少すると考えられる。以上のように、第1相と第3相における単位根量当たりの出液速度の動きは、比較的理解しやすい。それでは、第2相では直径の大きい節根の数がさらに増えているのに、単位根量当たりの出液速度が減少に転じているのはなぜであろうか。その詳細は明らかでないが、この時期に新しく出現した節根は直径が大きく伸長速度も速いが、一方、全節根に占める分枝した節根の割合が低下することが、第4図から推察できる。また、トウモロコシの節根において、中心柱の中央に位置している直径の大きい、すなわち機械的な通導能力が著しく高い導管が成熟して機能するのが、根端からかなり離れた部位であることも分かっている (St. Aubinら 1986)。以上のことが、第2相において単位根量当たりの出液速度が低下している理由ではないであろうか。第2相に出現する節根の発育や老化との関係も含め、今後の検討が必要な部分である。

以上、本研究では、出液速度が根量と単位根量当たりの出液速度によって規定されるという考えから解析および考察を行ってきた。すなわち、出液速度が根量という形態的な形質と、単位根量当たりの出液速度という生理的な形質とによって規定されているという考え方である。根系の活力 = 根量 × 単位根量当たりの活性と考えると、出液速度で根系の活力を、出液速度を根量で割って算出した単位根量当たりの出液速度で単位根量当たりの活性を評価できる可能性があるといえる。このような視点から、さらに検討を進めていきたいと考えている。

謝辞: 本研究を進めるうえで、東京大学農学部附属農場の坂齋教授からは多くのご配慮を頂いた。また、材料として利用したトウモロコシの栽培管理については、同農場の技術官である衛藤邦男氏に全面的にお世話になった。ここに記して感謝の意を表する。

## 引用文献

- 阿部淳・岡本美輪・森田茂紀 1998. トウモロコシ幼植物の出液速度に対する地温の影響. 日作紀 67(別2): 182-183.
- Andersen, P.C. and B.V. Brodbeck 1988. Water and solute fluxes through pruned muscadine grape spurs. HortSci. 23: 978-980.
- 馬場起 1957. 水稻の窒素及び珪酸の栄養生理に関する研究. 溢液及び溢液中の珪酸について. 日作紀 25: 139-140.
- 穂積清之・野中正義・木下隆雄 1976. 野菜のいっ泌液に関する研究 (第1報) 果菜類のいっ泌液量の日変化について. 園学要旨 昭51年秋: 132-133.
- 加藤潔 1995. 植物の根に関する諸問題 21. 根による水の吸収. 農及園 70: 519-526.
- Kramer, P.J. and J.S. Boyer 1995. Water Relations of Plants and Soils. Academic Press, New York. 167-181.
- MacDowall, F.D.H. 1964. Reversible effects of chemical treatments of the rhythmic exudation of sap by tobacco roots. Can. J. Bot. 42: 115-122.
- Masuda, M. and K. Gomi 1982. Diurnal changes of the exudation

- rate and the mineral concentration in xylem sap after decapitation of grafted and non-grafted cucumbers. J. Japan. Soc. Hort. Sci. 51: 293-298.
- 栢田正治・島田吉裕 1993. トマト木部いっ泌液における無機成分濃度の日変化およびその濃度に及ぼす光照度と苗齢の影響. 園学雑 61: 839-845.
- Minshall, W.H. 1968. Effects of nitrogen-containing nutrients on the exudation from detopped tomato plants. Nature 202: 925-926.
- 森田茂紀 1998. 農家水田で栽培した水稻の出液速度の生育に伴う推移および日変化. 日作紀 67(別2): 50-51.
- Morita, S., S. Thongpae, J. Abe, T. Nakamoto and K. Yamazaki 1992. Root branching in maize. I. "Branching index" and methods for measuring root length. Jpn. J. Crop Sci. 61: 101-106.
- Morita, S. and I. Hirose 1993. Root elongation in rice (*Oryza sativa*) with leaf-cutting method. XV International Botanical Congress Abstracts, 431.
- 森田茂紀・豊田正範 1996. メキシコ合衆国バハ・カリフォルニア州の沙漠地域で点滴灌漑を用いて栽培したトウガラシおよびメロンの出液の速度と成分. 日作紀 65(別2): 119-120.
- 森田茂紀・阿部淳 1997. 茎葉部から根系の生育を診断する. グリーンレポート 276: 8-9.
- 長野敏英・石田朋靖・森田茂紀 1993. 植物体内の水分状態とその制御に関する研究 (4) 一種々の根の通水抵抗について. 生物環境調節 31: 147-153.
- 岡本美輪・森田茂紀・阿部淳 1999. トウモロコシ幼植物の出液速度に対する温度の影響. 日作紀 68(別1): 178-179.
- 小柳敦史・佐藤暁子・和田道宏 1989. 出液速度の測定によるコムギ根系の活力評価の試み—出液速度に影響する環境要因の検討—. 日作紀 58(別2): 49-50.
- 小柳敦史 1995. 圃場におけるコムギ根系の能動的吸水に影響を与える諸要因. 根の研究 4: 39-42.
- Schurr, U. 1998. Xylem sap sampling—new approaches to an old topic. Trends Plant Sci. 3: 293-298.
- St. Aubin, G., M.J. Canny and M. E. McCully 1986. Living vessel elements in the late metaxylem of sheathed maize roots. Ann. Bot. 58: 577-588.
- Tsuda, M., T. Fujikawa and K. Ikeda 1994. Diurnal change in water droplets adhering to rice panicles at the booting stage. Jpn. J. Crop Sci. 63: 131-136.
- Vaadia, Y. 1960. Autonomic Diurnal fluctuations in rate of exudation and root pressure of decapitated sunflower plants. Physiol. Plant. 13: 701-717.
- Weaver, J.E. 1926. Root Development of Field Crops. McGraw-Hill, London. 180-191.
- Widders, I. and O. A. Lorenz 1982. Ontogenetic changes in potassium transport in xylem of tomato. Physiol. Plant. 56: 458-464.
- 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与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.
- 山口武視・津野幸人・中野淳一・真野玲子 1995. 水稻の茎基部からの出液速度に関与する要因の解析. 日作紀 64: 703-708.
- 山崎耕宇・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.

形態およびその伸長方向. 日作紀 51 : 584—590.

山崎耕宇・婦山長憲 1982. トウモロコシ根系を構成する1次根の外部

**Bleeding Rate of Field-Grown Maize with Reference to Root System Development :** Shigenori MORITA\*, Miwa OKAMOTO, Jun ABE and Junko YAMAGISHI (*Univ. of Tokyo, Bunkyo 113-8657, Japan*)

**Abstract :** Bleeding rate could be an effective index for the physiological activity of a whole root system in field-grown crops, because it is based on active water absorption caused by root pressure. We examined the bleeding rate of field-grown maize with reference to root system development. The bleeding rate decreased rapidly just after detopping, which suggested negative effects of shoot removal on bleeding in maize. The bleeding rate of different plants at every hour showed that it has a diurnal change pattern with the maximum value occurring at around 8 a.m. Then we examined the bleeding rate early in the morning with reference to shoot growth. It increased with shoot growth and root development to reach the maximum value at around tasselling and decreased thereafter. The number and diameter of nodal roots emerging acropetally along the stem were increasing until tasselling. Therefore significant positive correlations were evident between the bleeding rate and the root morphological traits, such as total number, diameter, and cross area of nodal roots of a whole root system until tasseling, although these relationships were not clear afterwards. Physiological activity per unit root mass was estimated on the assumption that bleeding rate is a product of root morphology and its physiological activity. The physiological activity per unit root mass increased in the former half of the growing period, then decreased, possibly because of the relative relationship between the formation of new roots and the senescence of existing roots.

**Key words :** Bleeding rate, Diurnal change, Maize, Nodal root, Root, Root system, Xylem sap, *Zea mays* L.

---