

Root

Research

Japanese Society for Root Research

ISSN 0919-2182
Vol.30, No.4
December 2021

目 次

【巻 頭 言】

会員の皆様へ 111

【ミニレビュー】

低温耐性サツマイモ系統育成のための選抜体系の検討

藏之内利和 113

【短 報】

オオムギ種子根の伸長角度の品種間差異

小西隼平・中野友貴・伊藤博武・長嶺敬 119

【教 育】

植物組織の空隙率測定方法—4. 各測定方法の特徴と選択—

島村聡・宮下智貴・江尻真斗・塩野克宏・野村康之・山内卓樹 124

【情 報】

菜根譚 野菜の根の話 14. スマートだ根

中野明正 129

【会 告】

2021 年度根研究学会賞の決定について 130

「根の研究」第 30 巻 総目次 132

根の研究
根研究学会(JSRR)

会員の皆様へ



告 示

○2021 年度根研究学会賞の決定 [概要]

根研究学会会則第3条ならびに根研究学会学術賞規定に基づき、2021 年度の研究会賞の推薦を受け付けました。審査の結果、学術功労賞 1 件、学術奨励賞 1 件の授賞が決定しました。詳細は、本号に掲載の会告をご覧ください。授賞式と受賞講演は、第 54 回根研究集会で行いました。

事務局からのお知らせ

1. 第54回根研究集会の開催と2021年度根研究学会賞の授賞報告

11月27日～11月28日に第54回根研究集会在開催されました。コロナウィルス感染症の終息の見通しが立たないため、ネット会議システムを利用したオンライン形式での開催になりました。関谷実行委員長ならびに学生を含む三重大の皆様のおかげをもちまして活発に開催することができました。ありがとうございました。招待講演「根を測る」では、中路達郎氏の「地中を分光観測してみると」および檀浦正子氏の「根を測る一スキャナ法による根の動態解析」が紹介されました。また田島亮介氏が「画像解析アプリケーションImageJを用いた解析の実例」と題してワークショップを行い、参加者がパソコンを用いて根長測定をその場で体験でき、オンライン形式での開催のメリットを生かすことができました。詳しくは次号に掲載の報告をご覧ください。また、学術功労賞（小柳敦史氏）および学術奨励賞（藤田早紀氏）の授賞式と受賞記念講演を執り行いました。次号に受賞講演の講演要旨を掲載します。優秀発表賞については、野村康之氏、橋本勲信氏の2名が受賞しました。

2. 2022 年の根研究集会

・第55回根研究集会

千葉県柏市の千葉大学柏の葉キャンパスで春に開催する予定で、中野明正会員に企画をお願いしています。

・第56回根研究集会

開催地は未定です。

3. 根研ロゴの使用料値下げについて

会員の皆様が使用料を支払うことで根研ロゴを使用したグッズを自由に製作することができるようにしていますが、積極的に会員の皆様にロゴを使用していただくため、2021 年 10 月 1 日からの使用料を 1 製品につき 100 円に値下げしました。詳しくは事務局までお問い合わせください。

4. 学生会員の参加費は無料です

2017 年から学生会員の参加費は無料になりました。これまで根研究集会の参加費は一般会員、学生会員、非会員を問わず同額でした。非会員の参加費は、一般・学生に関係なく、一般会員より 1,000 円程度高くなります。学生会員は集会受付で学生証の提示をお願いいたします。この機会にぜひ根研究学会学生会員にご加入いただけますよう、関係学生の皆さんにご周知いただけますようお願いいたします。

5. 電子版会誌のダウンロードについて

2021 年度から根研究学会ホームページおよび J-Stage から電子版会誌をダウンロードするためのパスワードを変更したのでご注意ください。ユーザー名の変更はありません。

根研究学会電子版会誌の URL <http://www.jsrr.jp/rspnsv/download.html>

J-Stage の URL <https://www.jstage.jst.go.jp/browse/rootres/-char/ja>

次ページに続く

6. 投稿のお願い

会誌「根の研究」では、原著論文のほかに、ご自身の一連の研究を他分野の会員にも分かりやすく解説したミニレビューを重視しています。学術功労賞・学術奨励賞の要件である、本会における研究成果の報告は、ミニレビューによる解説も認められていますので、積極的にご寄稿下さい。また、研究手法や学生向けの実験・実習法の解説なども歓迎します。

7. 名簿データ更新のお願い（異動のないかたもご協力下さい）

住所・所属・研究テーマ等に変更のある方は本号に掲載の案内、または根研究学会ホームページ (<http://www.jsrr.jp/>) の「諸手続—名簿データ更新」のコーナーをご参照頂き、データをお送り下さい。また、各種調査に備えて今後会員の性別と学生・社会人の別を集計することになりました。特に変更のない方も名簿データの更新にご協力ください。これら追加データは、主に会員構成（男女比など）を把握するために使わせて頂きます。なお、次回の名簿発行は2023年6月の予定です。

8. 会費納入のお願い

2021年度の会費をまだお支払い頂いていない方は、下記の郵便振替口座に納入をお願いします。請求書等の伝票をご希望の方は、事務局までお知らせ下さい。

年会費（2021年）： 電子版個人 3,000 円、冊子版（＋電子版）個人 4,000 円、冊子版団体 9,000 円
（年度は1月－12月です）

郵便振替口座 口座名義（加入者名）：根研究学会、 口座番号：00100－4－655313

〔他の銀行から振込の場合：ゆうちょ銀行 〇一九店（ゼロイチキウテン） 「当座」 0655313 〕

根研究学会所在地・連絡先： 〒104-0033 東京都中央区新川 2-22-4 新共立ビル 2F

（株）共立内 根研究学会事務局 TEL：03-3551-9891／FAX：03-3553-2047

- ・メールアドレス 事務局：neken2021@jsrr.jp 『根の研究』編集委員長：editor2021@jsrr.jp
Plant Root 編集委員長：editor2021@plantroot.org
- ・Web サイト 根研究学会：<http://www.jsrr.jp/> 『根の研究』オンライン版：<http://root.jsrr.jp/>
Plant Root：<http://www.plantroot.org/>

低温耐性サツマイモ系統育成のための選抜体系の検討

藏之内利和

農研機構作物研究部門

要 旨：サツマイモは南九州や関東で重要な畑作物であるが、近年では北海道のような冷涼地でも商業栽培が増えつつある。しかし、サツマイモは生育期の低温に弱い作物でもあり、今後の生産拡大のためには低温耐性品種の育成が重要と考えられる。サツマイモの低温耐性を発根によって評価する場合には、15℃またはやや高い温度が重要と考えられる。低地温となる地域での圃場試験の結果から、低温耐性についての基準品種を選定し、それらを用いて低温耐性検定法を確立した。次いで、主に低地温検定装置により、幅広い遺伝資源のスクリーニングを実施し、有望系統を用いた交配を実施した。後代からは低温耐性で多収かつ品質特性が良好な有望系統を選抜することができた。今後は育成系統の品種化を進めるほか、一般の育種プログラムにおける交配親としての利用も重要となろう。

キーワード：サツマイモ、低温耐性、低地温。

Study of a screening system for breeding low-temperature-tolerant sweetpotato lines : Toshikazu KURANOCHI (National Agriculture and Food Research Organization, Institute of Crop Science)

Abstract : Sweetpotato is a staple crop grown in the Kyushu and the Kanto regions. Recently, commercial sweetpotato production has been attempted in the cooler regions of Hokkaido. Sweetpotato is a crop with weak tolerance to low-temperature stress. Therefore, it would be important to breed low-temperature-tolerant sweetpotato cultivars to expand its cultivation areas. In the case of evaluating the low-temperature tolerance of sweetpotato lines by rooting, 15°C or a slightly higher temperature is critical. In this study, we determined low-temperature tolerance standard lines from the results of the field experiments performed in the region of low-temperature during the growth period of sweetpotato. The testing methods of low-temperature tolerance were established using the lines. In the upcoming stage, we continued the screening of sweetpotato worldwide genetic resources using mainly a low-soil-temperature testing device and identified highly tolerant lines that were used as parental lines in the cross-breeding. We successfully obtained several promising lines with low-temperature tolerance, just as well as high yield and quality. These lines would be examined to be registered as commercial cultivars in the future. Furthermore, these lines would also be important as parental lines in a general breeding program.

Keywords : Low soil temperature, Low temperature tolerance, Sweetpotato.

はじめに

サツマイモ (*Ipomoea batatas* (L.) Lam) は、世界では約 800 万 ha の栽培面積で 9 千万 t 強の年生産量となっており、日本では約 3 万 6 千 ha の栽培面積で 80 万 t 程度の年生産量がある (農林水産省, 2020)。このようにサツマイモは、世界的に見て重要な作物であり、我が国では特に南九州や関東地域の畑作で重要作物に位置づけられている。しかし、サツマイモは中南米の温暖な地域が原産とされる作物の一つで、圃場への植え付けから生育初期にかけて低温に遭遇した場合には、生育遅延等の障害を発生することがある。また、収穫期までには平均気温 18℃ 以上の月が 4 か月程度必要となる (坂井, 1999)。そのため、我が国におけるサツ

マイモの大規模な経済栽培は、茨城県の北部に分布する蒸切干 (干しいも) の生産地帯が北限と考えられる状況であった。また、蒸切干生産地では従来から無マルチ栽培が広く行われてきたが、マルチ被覆栽培よりも低地温に遭遇しやすいと考えられる。筆者らの調査でも、無マルチ栽培は白黒マルチ被覆栽培よりも全栽培期間を通じて地温が低い傾向であり (藏之内ら, 2010)、特に生育初期には問題となる。さらに、近年は北海道のような冷涼地でのサツマイモ栽培が広まりつつあり、普及に向けて道内の試験研究機関、実需者および生産者などによる様々な取り組みがなされるようになり、新しい品種への期待が高まっている。

これらのことから、生育期の低温に強いサツマイモの開発が重要と考えられ、農研機構作物研究所 (後に

次世代作物開発研究センター) では 2001 年から低温耐性サツマイモ系統の選抜のための取り組みを開始した。まず、低温耐性検定手法の開発を開始し、その後、遺伝資源からのスクリーニング、有望系統を用いた交配と後代の選抜等を継続してきた(蔵之内ら, 2019)。その結果、比較的冷涼な地域でも良好な生育が期待できる有望系統を育成することが可能となった(蔵之内ら, 2021)。ここでは、低温耐性サツマイモ系統育成における現在までの取り組みについて、特に選抜体系の確立を中心に紹介する。

1. サツマイモの発根における温度反応と低温耐性

これまで、サツマイモの発根に際しての温度反応について、いくつか報告がなされているが、ここでは特に低温域の温度反応について着目する。古くは山崎(1950)が、低温域での発根について記述しており、15℃が発根の限界温度であるとしている。また、中谷ら(1986)は品種「沖縄 100 号」の発根における地温への反応を調査し、16℃で僅かな発根を認めた。さらに、中谷ら(1989)はいくつかの品種を用いた調査の結果から 15℃を生育限界に近い温度としている。稲葉(2001)は、土壌温度調節処理を実施し、地温 20℃～30℃に比較して 15℃では葉の蒸散、光合成速度および呼吸速度の低下、総根長や根数の増加抑制を確認している。江口ら(2003)は、16℃以下で細根の生育が抑制される一方、葉の萎凋や退色は観察されなかったと報告し、この温度がサツマイモの生育限界温度と結論している。

一方、塊根の形成についても同様であり、長井・榎本(1953)は、15℃以下のような低温では塊根の形成・肥大が抑制されることを報告している。さらに、植木・佐々木(1987)は、塊根の形成は 25℃が好適であり、15℃以下では根の肥大が抑制されることを報告している。

これらのことから、サツマイモの発根における低温域の反応を調査し、低温耐性に関する選抜を実施するためには、15℃もしくはこれより若干高い温度域が重要と考えられた。

2. 過去の低温耐性系統育成に関する取り組み

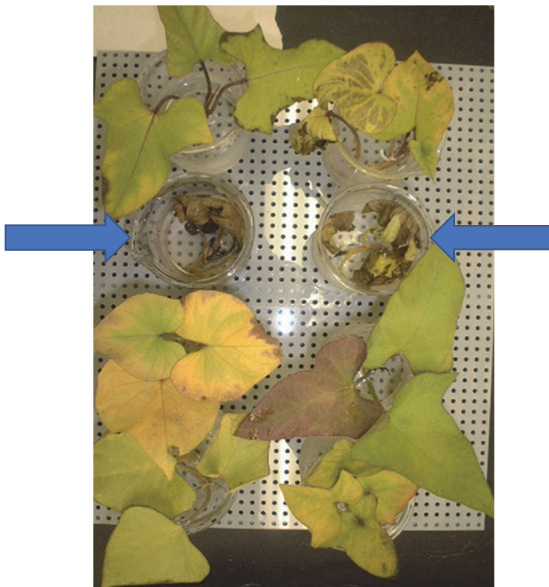
梅村(1990)および小中原・梅村(1996)は、低温耐性の期待できる導入系統を用いた交配育種により、いくつかの低温耐性系統を育成したが、実用品種育成までには至らなかった。一方、カルス培養や遺伝子導入による取り組みもいくつか報告されている。Ueno et al. (2000)は、青果用品種「高系 14 号」を用い、-1℃で 1 週間の低温下での培養でカルス選抜をおこない、再分化個体を得た。この個体群を供試し、4℃で 1 週

間の低温処理をすると、無選抜個体に比べて正常な生育を示し、壊死が見られず、低温耐性を示す個体群が出現した。Kasukabe et al. (2006)は、「高系 14 号」に *FSRDI* 遺伝子(スベルミジン合成遺伝子)を導入することで、低温耐性を高めることに成功した。また、Lim et al. (2007)や Kim et al. (2009)は、遺伝子導入により低温耐性個体の獲得に成功している。なお、これらの研究は、幅広い品種・系統を扱っているわけではなく、現状では実用品種の育成プログラムに組み込まれるまでには至っていないと考えられる。一方、筆者らは交配育種に基づく従来技術を用いて低温耐性系統の育成を進めてきた。

3. 現地圃場での生育状況による低温耐性系統候補の選定

サツマイモの低温耐性に関する品種・系統間差については、いくつか報告がなされている。Uritani & Yamaki (1969)は、「沖縄 100 号」は低温耐性が弱く、「農林 1 号」は耐性がやや高いと報告している。また、中谷ら(1989)は、12 サツマイモ品種・系統を用い、制御された地温下で発根に適する地温を調査し、18℃での総根長/28℃での総根長比でみると、「農林 1 号」と「ミナミユタカ」が高く、一方、「タムユタカ」、「農林 2 号」、「シロユタカ」、「シロサツマ」が低いと報告した。さらに、15℃という限界的な温度での総根長には品種・系統間差があり、「農林 1 号」と「ミナミユタカ」が高い数値で、これら 2 品種は低温耐性が高いとしている。筆者らは、これらの情報を参考にして低温耐性に関する圃場試験を実施し、系統育成における低温耐性の評価に際し基準となる品種・系統を選定しようとした。

まず、サツマイモ品種育成を実施している農研機構谷和原畑圃場(茨城県つくばみらい市)よりも気温の低い圃場での栽培による収量等の検討を計画した。具体的には、平均地温(深さ 10 cm)で比較すると、谷和原畑圃場よりも 2.4℃程度低く(約 4 か月にわたる栽培期間の平均)、栽培期間の前半の約 2 か月間の比較では 3.8℃程度低い西那須野圃場(栃木県那須塩原市)で栽培試験を実施することとした(蔵之内ら, 2007)。2002 年から 2006 年にかけてサツマイモ品種・系統を毎年 10 材料程度の規模で供試した。その結果を参考に、青果用品種「ベニアズマ」を標準品種とし、南米の遺伝資源系統を用いて国内で選抜された「S1-14」(小中原・梅村, 1996)および後代の「L01LS3」(Kuranouchi et al., 2008)を低温耐性強の品種・系統の候補として選定した。また、Kuranouchi et al. (2008)の結果から「沖縄 100 号」を低温耐性弱の品種・系統の候補として選定した。



第1図 水耕による低温耐性検定の例。
矢印の「沖縄100号」は低温耐性が弱く、
枯死。Kuranouchi et al. (2008) より引用。

4. 低温耐性検定法の確立

(1) 水耕による低温耐性検定

筆者らは、低温耐性検定に好適な温度条件の検討をするため、グロスチャンバー（日本医科器械製作所、LH-30-8CT）を用いて水耕栽培を実施した。設定温度は10℃、15℃および25℃とし、蔓の先端の3～4節を用いて3週間栽培した。なお、容器は容量100 mlのビーカーを用い、ハイポネックス1,000倍液を75 ml入れ、栽培中は加水しながら液量を維持した。全重、葉数、枯死葉率および発根数を調査し、低温下でも生育や発根が進み、葉の枯死の少ない系統を選抜しようとした。その結果、15℃や25℃では品種・系統間差が不明瞭であり、10℃付近が品種・系統間差を確認するためには最適と判断された（Kuranouchi et al., 2008）。この温度では、低温耐性の弱い「沖縄100号」で枯死が認められた（第1図）。しかし、10℃では発根の能力差を見るのが困難であったため、温度をはじめ検定条件の精査が必要と考えられ、今後さらに検討すべき課題が残っている。

(2) 低地温検定装置による検定

植木・佐々木（1987）は、水を入れたタンク内にステンレススチール製の鉢をセットすることで地温を制御し、サツマイモの生育を解析した。Eguchi et al. (1994) は、サツマイモの生育と塊根形成に適する地温を決定するため、土壌内および地上部の温度を正確に制御できる装置を試験用に開発し、砂耕によりサツマ

イモを栽培して解析実験を実施した。

これらの方法を参考に、水耕栽培よりも圃場栽培に近い栽培環境で選抜ができ、しかも簡便な構造の装置として、低地温検定装置を考案し、それを用いた選抜条件を検討した。まず、プラスチック製の水槽（内寸：85 (W) × 55 (D) cm × 20 (H) cm）に水を満たしたものを温室内に設置し、水温を制御するために冷却コイル（オリオン製、キャリークール LPA2-J）を水中に入れ、水槽内にはアルミニウム製容器（外寸：40 (W) × 43 (D) × 15 (H) cm）を設置し、小型の水中ポンプで水槽内の水を攪拌した。このアルミニウム製容器内には加水した園芸培土を満たした。サツマイモの蔓先端部（4～5葉）をサンプリングし、生重や葉数の調査後、約5 cmの深さで2～3節が埋まるように容器の約1 cm内側に植え付けた。地温の実測値は、設定値（17℃）の-0.5～+1℃の範囲に収まった。この装置1セットあたり20材料を同時調査可能であり、複数セットを設置することで数十材料規模の調査が同時に可能である。なお、この装置の詳細は藏之内ら（2019）を参照されたい。

現地圃場の試験結果から低温耐性が強と判定された「S1-14」は、14℃のような低温域でも僅かながら生育が確認され、17℃では旺盛に生育した。一方、多くの品種・系統では14℃では蔓が生育できず、部分枯死する系統も見られた。17℃で生育させた場合では、多くの品種・系統は中庸ないしは僅かな生育にとどまった。20℃では、多くの品種・系統の生育が促進された。検討の結果、品種・系統間差の最も明らかとなる17℃で3週間の栽培を選抜条件として設定した（藏之内ら、2019）。

低温耐性は、全重増加率、葉数増加率、発根数および根重を総合して評価した。低温耐性弱の基準品種である「沖縄100号」が常に弱く、低温耐性系統の「S1-14」やその選抜系統が常に強く、「ベニアズマ」はそれらの中間になる事が多かった。繰り返し実施した調査で、その傾向は安定して再現された。

以後、同装置を用いて幅広い遺伝資源系統からのスクリーニングを進め、いくつかの低温耐性系統を選定することとした。その詳細は後述する。

(3) 水耕と土耕との比較試験

2012年に、水耕検定と同じ容器を用い、加水した園芸培土を用いた土耕栽培を実施し、水耕栽培との比較試験を、10℃で繰り返し実施した（藏之内、未発表）。なお栽培期間は3週間であった。その結果、枯死葉数では土耕の方が3倍前後多い傾向であり、葉数の増加率でみると土耕の方が20～30%程度低い数値となった。また、発根数では明らかな差が見られず、全重の

第1表 谷和原畑圃場での早植栽培における「作 06188-26」および「作 11125-21」の特性.

品種・系統名	試験年次	低地温検定 での判定	収量特性			蒸しいもの特性		
			上いも重 (kg/a)	上いも数	乾物率 (%)	肉色	肉質	食味
作 06188-26	2010 ~ 2012	やや強	258 c	3.7 c	29.1 b	黄白～淡黄	中	やや下～中
ベニアズマ	同上	中	151 a	2.2 a	34.1 c	淡黄	やや粉	やや上
沖縄 100 号	同上	弱	185 b	2.6 b	27.6 a	淡黄白	中～やや粉	やや下
00LT01LS3	同上	強	200 b	2.3 ab	30.4 b	黄白	やや粉	やや下
作 11125-21	2014 ~ 2015	やや強	192 c	3.0 b	30.6 ab	黄白	中～やや粉	中
ベニアズマ	同上	中	128 ab	1.9 a	34.1 b	淡黄	やや粉	やや上
沖縄 100 号	同上	弱	111 a	1.8 a	25.3 a	淡黄白	中	やや下
00LT01LS3	同上	強	156 bc	1.8 a	28.8 ab	黄白	中～やや粉	やや下

注) 数値は試験期間中の平均値。収量特性で、上いもは 50 g 以上とする。上いも数は株当たりの数値で示す。蒸しいものの食味は、下、やや下、中、やや上、上の 5 段階で判定。Duncan の多重比較検定の結果、異なるアルファベット間では 5% 水準で有意差がある。蔵之内ら (2021) より引用。

増加率では土耕の方が 20 ~ 30% 程度低い数値となった。このように、水耕栽培と土耕栽培との間では、低温下での生育に差異が示唆された。この原因としては水分挙動の差が考えられ、今後の詳細な検討が必要と考えられる。

5. 低地温検定結果と圃場での早植栽培試験結果との関係

上記の低地温耐性検定試験から低温耐性系統として選抜された系統について、谷和原畑圃場において早植栽培試験を実施し、それらの生産力を調査した。植え付け後 3 週間の平均地温は、2014 年を例にとると、早植栽培で 18.1℃ (4 月 24 日植え付け) と、標準栽培での 21.6℃ (5 月 20 日植え付け) よりも 3.5℃ 低く、より生育限界に近い地温と考えられた。5 か年による調査の結果、低地温検定での根重や発根数と、圃場での早植栽培試験における収量性との間には明確な相関が認められなかった。これは各系統がもともと持っている塊根形成能力の差が影響していることによると考えられる。したがって、低地温検定で低温耐性を評価し、次いで低温耐性に優れる系統について圃場での早植栽培で収量による選抜を実施するような 2 段階での選抜の必要があると考えられた (蔵之内ら, 2019)。

6. 低温耐性系統育成に向けた取り組み

(1) 遺伝資源のスクリーニングと交配および後代の選抜

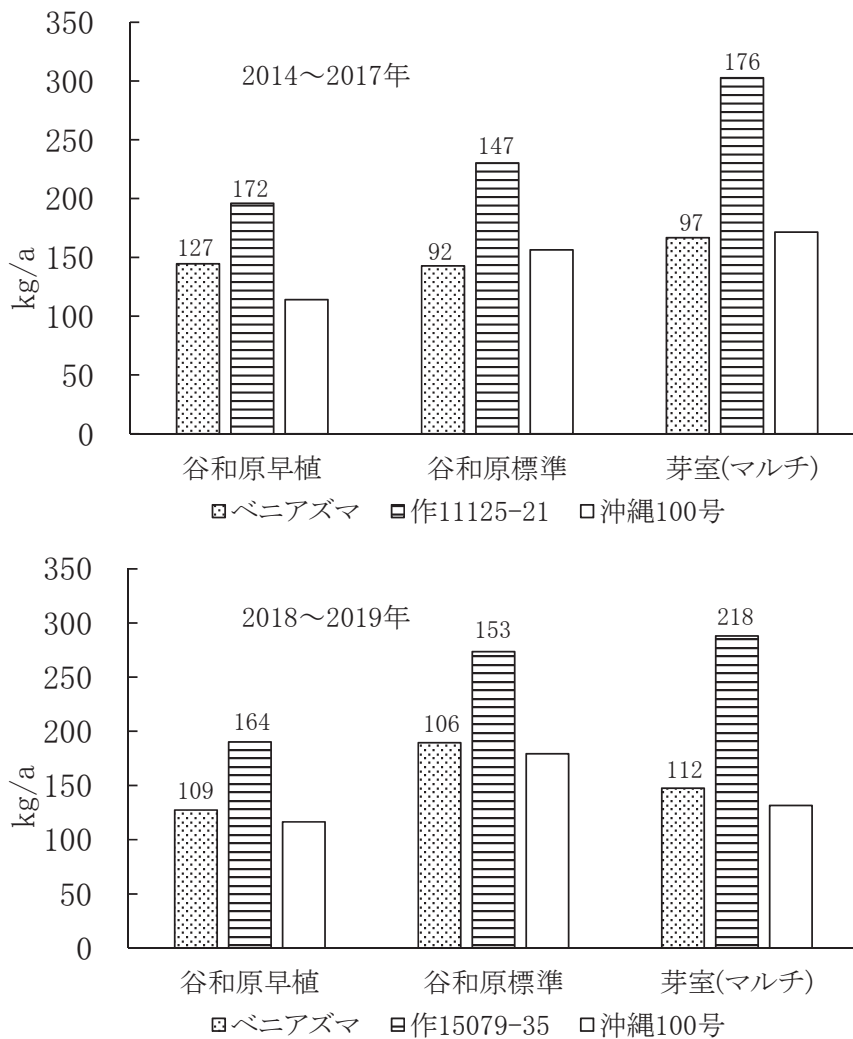
筆者らは、農研機構が谷和原畑圃場内で保存している約 1600 点のサツマイモ遺伝資源から、低温耐性検定によるスクリーニングを順次実施した。当初は水耕による検定で低温耐性を評価していたが、2007 年からは低地温検定装置による評価を主体とした。それらの結果、10 系統ほどを低温耐性系統育成のための交配親として選定し、一般の育成品種等との交配に供試することとした。交配の結果、採種種子が 15 年間の

総計で 53,000 粒あまり得られ、実生由来個体の低地温耐性検定や圃場での早植栽培による収量性の評価と選抜を順次実施した。これらの中から、青果用品種「ベニアズマ」より明らかに多収性を示すなど有望な低温耐性系統が数系統得られた (蔵之内ら, 2021)。代表的な系統の例を第 1 表に示す。当初は食味等の品質面で課題が残る選抜系統が多かったが、これら系統に一般青果用品種等を繰り返し交配し選抜することで、後代の中から品質面が改善された低温耐性系統が得られた。蒸しいものの食味と比較すると、「ベニアズマ」に近い良食味の低温耐性系統がいくつか出現してきている。これらの有望系統は、青果用の通常の育成プログラムに供試するほか、次に示すように北海道での栽培試験に供試した。

(2) 北海道での栽培試験

育成された低温耐性系統の中で特に有望と考えられる系統は、北海道内での栽培試験に供試されてきた。農研機構北海道農業研究センター芽室研究拠点では、2011 年から低温耐性系統の栽培試験を実施してきており、「ベニアズマ」を大幅に上回る多収性の系統がいくつか見られた (蔵之内ら, 2021)。また、芽室研究拠点では、谷和原畑圃場での早植栽培および標準栽培と比較し、低温耐性系統と低温耐性弱の「沖縄 100 号」との収量差が大きい傾向であった (第 2 図)。

食味等の品質面は、「ベニアズマ」に近い系統が見られたものの、青果用としての普及を考えると更なる向上が重要と考えられた。しかしながら、干しいもやペースト等加工用としてみれば、有望な低温耐性系統が複数出現した。特に、北海道において多収性と加工適性が評価された「作系 74」(「作 13066-4」) が道内外での試験結果からみて有望と考えられ、道県での系統適応性検定試験等に 2021 年度から供試される予定となった。



第2図 谷和原圃場と芽室圃場における低温耐性選抜系統の上いも収量。
 谷和原圃場は無マルチ栽培，芽室圃場はマルチ被覆栽培による。棒グラフ
 上の数値は「沖縄100号」に対する百分比(%)。藏之内ら(2021)より引用。

北海道で栽培されたサツマイモは、本州産よりも調理加工時の糖度が上がりやすいことが報告されており(高濱ら, 2013), この原因の一つとしてでん粉糊化開始温度の低下による糖化促進が指摘されている(中村ら, 2014)。こうした特長を活かせるような青果用あるいは加工用の品種育成を進めることも重要であろう。

7. 課題点と今後の展望

筆者が進めてきたのは、実際に低温条件をサツマイモ苗に与え、その反応によって各系統の低温耐性を評価し選抜する手法であるが、さらに多数の系統を同時にスクリーニングするには手法自体の見直しが重要になると考えられる。低温に遭遇することにより、サツマイモ体内でどのような生理的变化を生じ、それがどのように品種・系統の低温耐性の強弱に結びついているのかを解明することが解決の糸口となろう。選抜

マーカーの開発利用のほか、プロテオミクスやメタボロニクス等の新技術を活用した解析が可能になりつつあるので、その成果を活用した新しい選抜手法の開発も重要となる。

筆者らが育成した有望系統は、品種化へ向けて試験を継続するほか、新たな交配母本としての利用も考えられる。これは、品種育成事業における遺伝変異の拡大という面からも重要と考えられる。

引用文献

- Eguchi, T., Kitano, M., Eguchi, H. 1994. Effect of root temperature on sink strength of tuberous root in sweet potato plants (*Ipomoea batatas* lam.). Biotronics 23: 75-80.
- 江口壽彦, 北野雅治, 吉田敏, 筑紫二郎 2003. サツマイモ塊根の肥大に対する根温の影響—直接的および間接的な温度の影響—. 生物環境調節 41: 43-49.
- 稲葉健五 2001. サツマイモの増殖法の検討—挿苗後の初期生育

- と地温の関係— (講演要旨). 日作紀 70 (別1): 38-39.
- Kasukabe, Y., He, L., Watakabe Y., Otani, M., Shimada, T., Tachibana, S. 2006. Improvement of environmental stress tolerance of sweet potato by introduction of genes for spermidine synthase. *Plant Biotech.* 23: 75-83.
- Kim, Y.-H., Lim, S., Yang, K.-S., Kim, C. Y., Kwon, S.-Y., Lee, H.-S., Wang, X., Zhou, Z., Ma, D., Yun, D.-J., Kwak, S.-S. 2009. Expression of Arabidopsis *NDPK2* increases antioxidant enzyme activities and enhances tolerance to multiple environmental stresses in transgenic sweetpotato plants. *Mol. Breed.* 24: 233-244.
- 小中原錦, 梅村芳樹 1996. 耐冷性サツマイモの簡易育種法. 育種・作物学会北海道談話会会報 37: 128-129.
- 藏之内利和, 石黒浩二, 西中未央, 高田明子, 熊谷亨, 片山健二 2021. 低地温耐性が高く品質特性が良好なサツマイモ系統の育成経過. 育種学研究 23: 49-56. <https://doi.org/10.1270/jsbbr.20J08>.
- 藏之内利和, 熊谷亨, 黄川田智洋, 大同久明, 中谷誠 2007. 地温の異なる栽培地におけるサツマイモ生育の品種・系統間差 (講演要旨). 日作紀 76 (別1): 300-301.
- Kuranouchi, T., Kumazaki, T., Nakamura, Y., Ohara-Takada, A., Kumagai, T. 2008. Rapid evaluation method for low temperature tolerance of sweetpotato lines. *Proc. 3rd China-Japan-Korea workshop sweetpotato* 25-27.
- 藏之内利和, 中村善行, 高田明子, 田宮誠司, 中谷誠, 熊谷亨 2010. サツマイモ蒸切干加工用品種の収量・品質関連形質に及ぼすマルチ被覆および気象の影響. 日作紀 79: 491-498.
- 藏之内利和, 高田明子, 熊谷亨, 片山健二 2019. 低地温検定装置での発根・生育によるサツマイモ系統の低温耐性の評価. 根の研究 28: 3-8.
- Lim, S., Kim, Y.-H., Kim, S.-H., Kwon, S.-Y., Lee, H.-S., Kim, J.-S., Cho, K.-Y., Paek, K.-Y., Kwak, S.-S. 2007. Enhanced tolerance of transgenic sweetpotato plants that express both *CuZnSOD* and *APX* in chloroplasts to methyl viologen-mediated oxidative stress and chilling. *Mol. Breed.* 19: 227-239.
- 長井保, 榎本中衛 1953. 異なる地温及び土壤水分下に於ける甘藷の生育について. 日作紀 22: 141.
- 中村善行, 藏之内利和, 高田明子, 片山健二 2014. サツマイモを蒸した際のマルトース生成に及ぼす塊根の β -アミラーゼ活性およびデンプン糊化温度の影響. 日食科工会誌 61: 577-585.
- 中谷誠, 小柳敦史, 渡辺泰, 古明地通孝 1986. サツマイモ苗の発根に及ぼす地温の影響 第 1 報 苗の発根の最適地温並びに高地温が発根と根の生理的・形態的特性に及ぼす影響. 日作紀 55: 208-216.
- 中谷誠, 小柳敦史, 渡辺泰, 古明地通孝 1989. サツマイモ苗の発根に及ぼす地温の影響 第 2 報 苗の発根最適地温並びに低地温での発根能力の品種間差異. 日作紀 58: 35-41.
- 農林水産省 2020. いも類・でん粉に関する資料. 農林水産省, 東京. pp. 133.
- 坂井健吉 1999. ものと人間の文化史 90 さつまいも. 法政大学出版局, 東京. pp. 66-70.
- 高濱雅幹, 野田智昭, 植野玲一郎, 宗形信也 2013. 北海道産及び他県産サツマイモの食味及び澱粉糊化特性の比較. 園学研 12 (別1): 234.
- 植木健至, 佐々木修 1987. 甘藷の塊根肥大と地温との関係に関する一考察. 鹿大農学術報告 37: 1-8.
- Ueno, K., Shimonishi, K., Himeno, M. 2000. Chilling tolerance improvement in sweetpotato through somaclonal variation and cell line selection. *Proc. ISTRC 12th triennial symposium* 332-333.
- 梅村芳樹 1990. 耐低温性サツマイモ GR 39-2 の母本としての評価. 育種・作物学会北海道談話会会報 30: 15.
- Uritani, I., Yamaki, S. 1969. Mechanism of chilling injury in sweet potatoes. Part III. Biochemical mechanism of chilling injury with special reference to mitochondrial lipid components. *Agr. Biol. Chem.* 33: 480-487.
- 山崎肯哉 1950. 東北地方に於ける甘藷の晩植増収に対する苗の大小と植付方法に関する研究. 園学雑 19: 29-38.

オオムギ種子根の伸長角度の品種間差異

小西隼平¹⁾・中野友貴²⁾・伊藤博武^{*1)}・長嶺敬²⁾

1) 東京農業大学生物産業学部

2) 農研機構・中日本農業研究センター

要 旨：本研究では国内品種を中心とした多様なオオムギ 52 品種を用いて、種子根の伸長角度の品種間差異をスカイゲル培地法によって調査した。オオムギ種子根伸長角度には大きな品種間差異がみられ、最小値は 0° (シュンライ・北陸皮 48 号) で最大値は 58.8° (ビューファイバー) で、平均値は 23.7°であった。条性、皮・裸性ともグループ間に有意な差は認められなかった。北陸・長野で育成されたオオムギは他地域育成のオオムギに比べて、種子根伸長角度の小さいことが示された。こういった伸長角度の品種間差異は、育成地によって選抜された品種の特性の違いにより生じたと推測できる。

キーワード：オオムギ、種子根伸長角度、ハイドロゲルポリマー培地法、品種間差異。

Varietal differences of seminal root angle among barley cultivars : Junpei KONISHI¹⁾, Yuuki NAKANO²⁾, Hirotake ITOH^{*1)} and Takashi NAGAMINE²⁾ (¹⁾Faculty of Bioindustry, Tokyo Agriculture University, ²⁾NARO Central Agriculture Research Center)

Abstract : In this study, varietal differences in seminal root elongation angle among 52 barley cultivars were investigated using the hydrogel medium method. There were considerable differences in seminal root elongation angles among cultivars, with a minimum of 0° (Shunrai and Hokuriku kawa 48) and a maximum of 58.8° (Beau Fiber), and a mean of 23.7°. The seminal root elongation angle of barley grown in the Hokuriku and Nagano regions, where clay soils prevail, was smaller than that of barley grown in other areas.

Keywords : Barley, Hydrogel polymer medium method, Seminal root growth angles, Varietal differences.

緒言

日本国内での麦類の生産は北海道から九州にかけて広範囲に生産されており、生産する環境は気候や土壌など含めその地域による違いが大きい。北海道の麦類の主産地である網走市周辺の地域では、淡色黒ボク土が占める南部地区の収量水準は高いが、多腐植質黒ボク土と褐色森林土からなる西部地区の収量水準は低い(伊藤, 2020)。一方本州以南では水田転換畑での栽培が一般的である。そのため、排水性の低い土壌での栽培になることから、湿害の影響を受けており、生産量が安定していない。すなわち日本国内における麦類の生産量はいずれの地域でも安定しておらず、米の転作や北海道畑作地帯の輪作作物として生産を行っているものの、作付面積は横ばいである(農林水産省生産局, 2013)。

これらの麦類生産に関する課題を解決し安定多収を実現するため、本研究では麦類の根系分布に着目した。根は土壌中の水分と養分を吸収する器官であり、作物の安定多収には根張りの深さが大きく影響していると報告がされている(伊藤ら, 2008; 宇賀・木富 2016)。小柳ら(2001)は、コムギにおいてその種子根の伸長

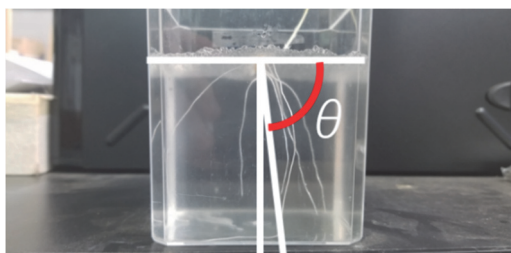
角度には品種間差異が存在し、種子根の伸長角度が地面に対して鉛直に近いほど根系は深くなることも報告している。これらのことから、ムギ類の作物の安定多収を目指す上で根系分布を把握することが重要であるが、根系調査には労力と時間を要する。そのため、コムギの種子根伸長角度を簡易に評価する方法として寒天ゲル(小柳ら, 1991)やハイドロゲルポリマーを用いて評価するゲル評価法が開発されている(Ito et al., 2016)。オオムギについてはこれらの種子根伸長角度の評価法についての研究報告が少ない。そこで、本研究ではハイドロゲルポリマーを用いたオオムギ種子根伸長角度の評価法について検討し、品種間差異を明らかにした。

材料と方法

本研究には国内で育成された品種・系統を中心とするオオムギ計 52 品種・系統(以下品種と略記)を用いた。

種子根伸長角度はハイドロゲルポリマー培地を用いる Ito et al. (2016) の方法を一部変更して測定した。種子根伸長角度の測定培地は、SkyGel(株式会社メビオール製) 2.75 g と常温の蒸留水 450 mL をコレクショ

ンボックス (7.0 cm × 7.0 cm × 8.2 cm; 株式会社大創産業社製) に入れて攪拌後, 20℃に設定したインキュベーターの中に1日静置し培地を固化, 定着させて作成した. その後, 培地の中央にオオムギ種子を1粒, 腹面を下に向けて播種し20℃, 暗条件に設定したインキュベーター内で7日間育成した. 各品種10反復の実験を行い, もっとも長い種子根の伸長角度を測定し, その平均値を各品種の伸長角度とした (第1図). なお, 最長根がボックスの底面, または側面に到達した場合は, その地点までの根の伸長角度を測定した. 計測した角度をアークサイン変換した後, 分散分析を



第1図 ハイドロゲルポリマー培地と測定方法 (θ の値を計測).

行った. また, 耐湿性に優れた作物は通気組織を発達させる (有門, 1975) ことから, 酸素濃度が根の生長に影響を及ぼすことが懸念されたため, 培地作成終了後に MicroxTX3 酸素メーターを用いて培地の酸素濃度の測定を行った.

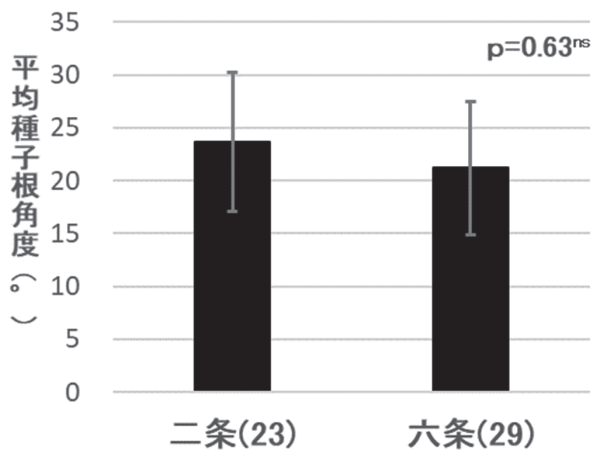
結果

供試品種の種子根伸長角度を第1表に示した (第1表). 種子根伸長角度は品種間に5%水準で有意な差異が認められ, 最小値は0° (シュンライ, 北陸皮48号) で最大値は58.8° (ビューファイバー) であり, 平均値は23.7°であった. 条性ごとの平均伸長角度は二条オオムギが25.7°であり, 六条オオムギでは21.2°であった (第2図). また, 「皮・裸性」での平均伸長角度は皮性が21.8°であり, 裸性が24.6°であった (第3図). 条性と「皮・裸性」のグループ間には, 両方とも統計学的に有意な差が認められなかった.

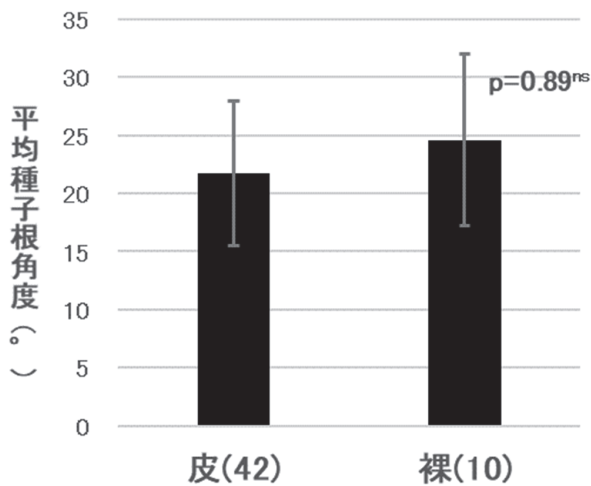
オオムギ品種の育成地・来歴地別の種子根伸長角度の平均値に地域間差異が見られた (第4図). 育成地・原産地ごとの平均種子根伸長角度が大きく, 根が深く

第1表 供試品種の特性および種子根伸長角度.

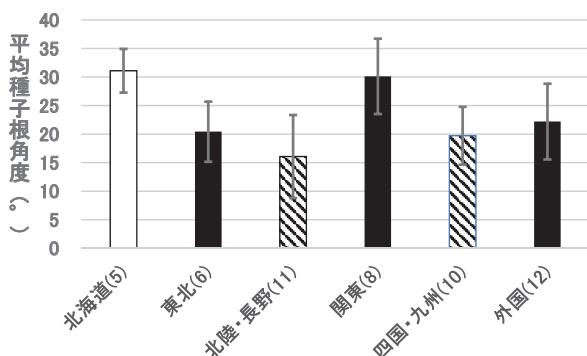
品種名	育成地・ 原産地	条性	皮裸 性	種子根 伸長角度	標準偏 差 (±)
札幌2号	北海道	二条	皮	19.5	9.4
りょうふう	北海道	二条	皮	30.6	10.5
日星	北海道	二条	皮	31.1	14.1
ほしまさり	北海道	二条	皮	33.4	23.1
春星	北海道	二条	皮	40.9	23.9
小春二条	東北	二条	皮	15.1	10.1
会系76号	東北	六条	皮	14.0	15.5
ミュキオオムギ	東北	六条	皮	27.6	16.3
べんけいむぎ	東北	六条	皮	29.6	10.5
会津1号	東北	六条	皮	31.0	16.6
会津裸3号	東北	六条	裸	5.0	6.6
シュンライ	北陸・長野	六条	皮	0.0	0.0
北陸皮48号	北陸・長野	六条	皮	0.0	0.0
ファイバースノウ	北陸・長野	六条	皮	2.7	8.0
クモガタシラズ	北陸・長野	六条	皮	5.5	10.1
北陸皮39号	北陸・長野	六条	皮	6.2	10.7
北陸皮35号	北陸・長野	六条	皮	14.4	15.1
シルキースノウ	北陸・長野	六条	皮	19.8	10.0
北陸皮50号	北陸・長野	六条	皮	21.4	13.4
ミノリムギ	北陸・長野	六条	皮	32.3	14.1
北陸皮38号	北陸・長野	六条	皮	35.8	12.0
大正麦	北陸・長野	六条	皮	38.7	9.8
ゴールデンメロン	関東	二条	皮	16.1	15.1
ミカモゴールド	関東	二条	皮	17.6	14.0
スカイゴールド	関東	二条	皮	21.7	16.3
ニューゴールド	関東	二条	皮	30.3	13.0
品種名	育成地・ 原産地	条性	皮裸 性	種子根 伸長角度	標準偏 差 (±)
ビューファイバー	関東	二条	裸	57.5	7.4
竹林茨城1号	関東	六条	皮	30.4	25.5
ドリルムギ	関東	六条	皮	30.9	18.1
カシマムギ	関東	六条	皮	36.5	31.9
ニシノホシ	四国・九州	二条	皮	14.3	12.7
ユメサキボシ	四国・九州	二条	皮	1.1	3.3
ミハルゴールド	四国・九州	二条	皮	18.3	8.9
キラリモチ	四国・九州	二条	裸	12.9	17.4
イチバンボシ	四国・九州	六条	裸	11.7	9.8
ダイシモチ	四国・九州	六条	裸	21.6	15.5
四国裸110号	四国・九州	六条	裸	25.5	16.0
トヨノカゼ	四国・九州	六条	裸	26.7	14.8
ダイシモチ	四国・九州	六条	裸	28.9	19.8
マンネンボシ	四国・九州	六条	裸	36.0	17.5
Alexis	外国	二条	皮	11.2	14.4
AC Metcalfe	外国	二条	皮	11.7	14.4
Carlsberg II	外国	二条	皮	13.2	16.6
Hungarian	外国	二条	皮	20.0	16.5
Chariot	外国	二条	皮	29.3	15.5
Schooner	外国	二条	皮	29.8	24.5
Chevallier	外国	二条	皮	49.7	7.5
CDC Fiber	外国	二条	裸	19.6	17.4
CDC Battleford	外国	六条	皮	3.5	10.6
Stein	外国	六条	皮	14.7	13.0
木石港3	外国	六条	皮	22.9	13.3
Karl	外国	六条	皮	40.8	19.2



第2図 条性ごとの平均伸長角度。
バーは標準誤差を示す。また、
括弧内の数値は品種数を示す。



第3図 皮裸性ごとの平均伸長角度。
バーは標準誤差を示す。また、
括弧内の数値は品種数を示す。



第4図 育成地・原産地別の平均伸長角度。
バーは標準誤差を示す。また、括弧
内の数値は品種数を示す。

貫入しやすい傾向がみられる順に北海道 (31.1°), 関東 (30.1°), 外国 (22.2°), 東北 (20.4°), 四国・九州

(19.7°), 北陸・長野 (16.1°) であった。最も差の大きかった北海道品種と北陸品種の間にt検定により5%水準で有意な差が認められた。すなわち、北海道品種は根を深い方向に伸長させ、北陸・長野品種と四国・九州品種は浅い方向に根を伸ばす傾向があることが示された。培地の酸素濃度は $250 \mu\text{mol L}^{-1}$ であった。

考察

大麦の種子根の観察に当たり、用いる培地を考慮した。寒天ゲル培地とハイドロゲルポリマー培地を用いたコムギの試験において、ハイドロゲルポリマー培地の方が、培地の柔軟性、発芽率、根の貫入率が優れていると報告されている (Ito et al., 2016)。そのため、今回のオオムギでもハイドロゲルポリマー培地を用いて、種子根の伸長角度の観察を行った。また、酸素濃度は Ito et al. (2016) で測定した機材と同じ物で測定し、同様の値となったため、Ito et al. (2016) で用いられた培地の条件と相違ないものと判断した。なお、予備試験では寒天ゲル培地も利用したが、オオムギ根のゲル内への貫入・伸長が見られず、品種間差異の評価には不適と考えられた。このことは一般にオオムギはコムギよりも耐湿性が劣ることとも関係がある可能性も考えられた。(加藤ら, 2007) なお、種子根の伸長角度の評価法として他にも、「土を詰めたザル」を用いた「バスケット法」(小柳ら, 2001) や、高橋・板野 (1947) による木箱を用いた手法があるが、ハイドロゲルポリマー培地は透明であるため、上記の手法よりも容易に種子根の形態や根系の展開の様子を観察することが可能である利点がある。また、上記の二つの手法は、必要となる資材が多い上に灌水の手間もかかるため、多くのサンプルの調査は難しい。今回のハイドロゲルポリマー培地は必要となる資材が少なく、灌水の手間無く種子の育成が可能であることから、多品種でも容易に省力的に検定することが可能である。これまで重要性が意識されながらも実現が不可能だった根系改良育種の実現のために有用な検定手法であると考えられる。また、Ito et al. (2016) は、培地作成の際に用いる蒸留水を煮沸してから用いることで、培地の酸素濃度が冷水を用いたものよりも低下すると報告している。このことから、ハイドロゲルポリマー培地は幼植物の低酸素応答に関する試験への応用にも期待が持てる。

1947年に高橋・板野 (1947) は、オオムギ種子根の伸長角度には品種間差異が認められたと報告しており、本研究でも同様にオオムギ種子根の伸長角度に品種間差異が認められた。これまでにムギ類では、久保ら (2002) がコムギにおいて、根の貫入力の品種間差異を報告しており、小柳ら (1991) がコムギの種子根伸長角度の品種間差異を報告している。イネ科作物の

最終的な根の深度は、根の伸長方向と伸長速度に影響されることが知られており(荒木・飯嶋, 1999), 種子根の伸長角度は根系分布に大きな効果があると考えられる。実際に、小柳ら(2001)も種子根伸長角度が大きいほど、根系分布が深くなる傾向があることを報告している。

また、本研究では北海道で育成されたオオムギに比べて、北陸・長野や四国・九州の育成・来歴品種の種子根伸長角度が小さい傾向にあることが示された。オオムギもコムギと同様に種子根の伸長角度と根系分布に関係があるとすれば、北陸地方産の品種は圃場で浅い根系分布を示すことが予測できる。北海道オオムギのほとんどが畑土壌で栽培されているのに対して、東北、北陸・長野、四国・九州はそのほとんどが排水性の劣る水田転作畑での作付けとなっており(酒井1988)、湿害が多発している。とくに北陸地域は水田土壌の61%は強粘質土壌または粘質土壌であるため、水田転換畑では排水対策がオオムギ生産においては特に重要な課題となっている(白倉, 1988; 池永ら, 2012; 高山ら, 1989)。このような排水性の低い土壌では、地上に近い層は大気に接しており、根が酸素を吸収し易くなるように浅根性の品種が有利であるとも考えられるため、北陸・長野育成品種は自ずと種子根伸長角度が小さい品種が選抜されやすかったことが推察された。なお、北陸・長野育成品種のほぼすべてが六条・皮性オオムギであるため、種子根伸長角度がオオムギの条性や皮裸性に影響される可能性も想定されたが、条性、皮裸性ともに、特性による有意差は認められず、地域特性に適応した選抜の効果が大きいと考えられた。

北海道でのコムギ栽培においては多収栽培事例では根系分布が深い傾向が明らかになっており(伊藤ら, 2013)、地域別の好適根系には差異がある可能性が高く、今後の多収性研究においては重要な課題であろう。さらに、イネでは根系深度に関わる遺伝子として*Dro1*や*qSOR*が報告されており(Uga et al., 2013; Kitomi et al., 2020)、オオムギでも同様の遺伝子が存在する可能性が高く、今回の結果を踏まえた検討が望まれる。加えて、今後は圃場での根系分布と照らし合わせ、種子根の伸長角度がどの程度根系分布に影響を及ぼしているか調査を行う必要がある。

謝辞

本研究に用いた一部の種子は、北海道立総合研究機構中央農業試験場より恵与頂いた。また、東京農業大学の中村隆俊博士には、本研究を行うにあたり多くの助言を頂いた。衷心から御礼申し上げる。

引用文献

- 荒木英樹, 飯嶋盛雄 1999. 作物の深根性に関する要因. 根の研究 8: 4-8.
- 有門博樹 1975. 通気組織系と作物の耐湿性. オリエンタル印刷, 三重. pp. 1-149.
- 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.
- 伊藤博武 2020. オホーツク地域に適した新たな作物管理体系の創出. 環境共生 36: 79-82.
- 伊藤博武, 笠島真也, 岡本泰輔, 佐藤三佳子, 吉田穂積 2013. 根系からみた秋播きコムギ品種「きたはなみ」の生産性. 日作紀 82 (別1): 69-70.
- Ito, H., Kaneko, M., Nakamura, T., Nakazawa, Y., Yoshida, H. 2016. Comparison of root growth angles of wheat cultivars grown in a hydrogel polymer medium. Plant Root 10: 4-10.
- 加藤常夫, 渡邊浩久, 長嶺敬 2007. ビール大麦の耐湿性評価法及び育種素材. 栃木農試研報 59: 55-60.
- Kitomi, Y., Hanzawa, E., Kuya, N., Inoue, H., Hara, N., Kawai, S., Kanno, N., Endo, M., Sugimoto, K., Yamazaki, T., Sakamoto, S., Sentoku, N., Wu, J., Kanno, H., Mitsuda, N., Toriyama, K., Sato, T., Uga, Y. 2020. Root angle modifications by the *DRO1* homolog improve rice yields in saline paddy fields. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 117: 21242-21250.
- 久保堅司, 古道郁恵, 内野宙, 岩間和人, 長谷川利雄 2002. 根貫入力が異なるコムギ 6 品種における圃場条件下での根系分布. 育種作物学会北海道談話会会報 43: 67-68.
- 農林水産省生産局 2013. 稲・麦・大豆の生産をめぐる状況について. https://www.jataff.or.jp/project/inasaku/koen/koen_h24_2.pdf (2021/12/02 閲覧).
- 小柳敦史, 乙部(桐渕)千雅子, 柳澤貴司, 本多一郎, 和田道宏 2001. 種子根伸長角度を指標にした根系の深さが異なる小麦実験系統群の作出. 日作紀 70: 400-407.
- 小柳敦史, 佐藤暁子, 和田道宏 1991. コムギ初生種子根の屈地性の品種間差異. 日作紀 60: 312-319.
- 酒井惇一 1988. 戦後東北における水田二毛作の展開過程. 農業経済研究報告 22: 1-30.
- 白倉治一 1988. 転換畑作生産技術マニュアル. 武井昭編, 北陸における水田の畑利用技術と営農. 第一印刷, 新潟. pp. 24-26.
- 高橋隆平, 板野弥壽夫 1947. 大麦幼植物の特性に関する研究. 第2報 種子根の角度とその品種間差異. 農学研究 37: 71-73.
- 高山鎮紀, 遠藤織太郎, 倉田和彦, 伊藤道秋, 中野和弘, 永井孝志, 竹園克祐 1989. 積雪地域における水田輪作と農作業体系に関する研究 第2報 水田輪作における機械化対応と機械利用の効率に関する事例分析. 農作業研究 24: 114-126.
- 宇賀優作, 木富悠花 2016. 作物生産における根伸長角度の遺伝的改良. 植物科学最前線 7: 250. https://bsj.or.jp/jpn/general/bsj-review/BSJ-review_7E_250-263.pdf (2021/12/02 閲覧).
- Uga, Y., Sugimoto, K., Ogawa, S., Rane, J., Isitani, M., Hara, N., Kitomi, Y., Inukai, Y., Ono, K., Kanno, N., Inoue, H., Takehisa, H., Motoyama, R., Nagamura, Y., Wu, J., Matsumoto, T., Takai, T., Okuno, K., Yano, M. 2013. Control of root system architecture

by *DEEPER ROOTING 1* increases rice yield under drought conditions. Nature Genet. 45: 1097-1102.

植物組織の空隙率測定方法—4. 各測定方法の特徴と選択—

島村聡^{*1)}・宮下智貴²⁾・江尻真斗²⁾・塩野克宏²⁾・野村康之³⁾・山内卓樹⁴⁾

1) 農研機構東北農業研究センター

2) 福井県立大学大学院生物資源学研究科

3) 龍谷大学食と農の総合研究所

4) 名古屋大学生物機能開発利用研究センター

要 旨：植物組織の空隙率測定によく用いられる方法には、比重瓶法、アルキメデス法および横断切片の観察による切片法がある。比重瓶法とアルキメデス法は植物組織内の空隙に含まれる全てのガス量で空隙率を測定する方法であるのに対し、切片法は空隙の形状を観察し、目的とする空隙を選択して空隙率を測定する方法である。それぞれの測定方法の原理、制約条件は異なるため、研究目的および植物組織の形態によって各手法を使い分ける必要がある。ここでは、読者の皆さんが適切に測定方法を選択できるように、各測定方法の特徴と長所・短所を紹介する。

キーワード：空隙率、細胞間隙、通気組織、方法論。

Measurement of plant tissue porosity: IV. Characteristic and selection of each method : Satoshi SHIMAMURA¹⁾, Tomoki MIYASHITA²⁾, Masato EJIRI²⁾, Katsuhiko SHIONO²⁾, Yasuyuki NOMURA³⁾ and Takaki YAMAUCHI⁴⁾ (¹⁾Tohoku Agricultural Research Center, NARO, ²⁾Graduate School of Bioscience and Biotechnology, Fukui Prefectural University, ³⁾Research Institute for Food and Agriculture, Ryukoku University, ⁴⁾Bioscience and Biotechnology Center, Nagoya University)

Keywords : Aerenchyma, Inter cellular space, Methodology, Porosity.

1. はじめに

これまでの連載では、植物組織の空隙率測定方法として比重瓶法(島村ら, 2021)、アルキメデス法(宮下ら, 2021)および切片法(野村ら, 2021)を解説した。比重瓶法とアルキメデス法は空隙に含まれるガス量で空隙率を測定するのに対して、切片法は空隙の形状を観察して空隙率を測定する方法である。すなわち、比重瓶法やアルキメデス法は立体的に、切片法は平面的に空隙率を解析する手法と言える。このように計測対象や測定原理の異なるそれぞれの方法には測定の制約条件の違いや長所・短所がある。そこで、実際の研究での使用には目的に合わせた使い分けが重要となる。

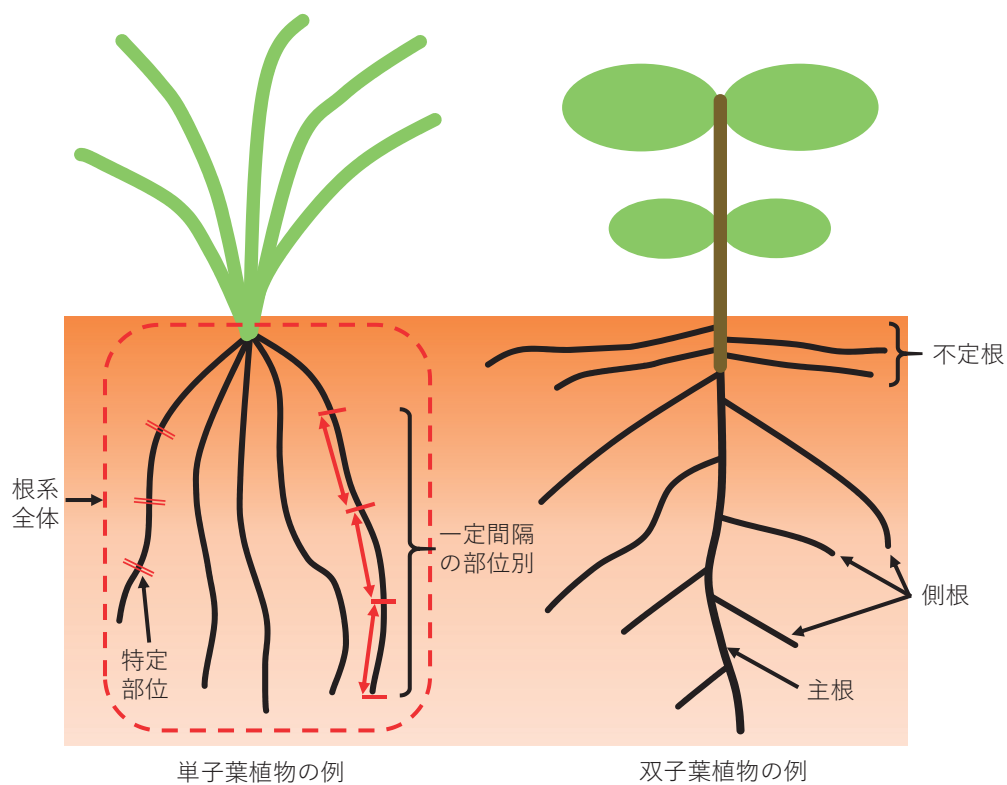
読者が実際に空隙率を測定する場面を考えてみた(第1図)。根系全体を計測したい場面、根を部位別・種類別に計測したい場面、特定の根の部位だけを計測したい場面と様々な状況が考えられる。さらに対象とする空隙の状態も様々であろう(第2図)。例えば、それが皮層に形成される通気組織なのか、コルク形成層から発達するスポンジ状の二次通気組織なのか、はたまた硬い樹木の通気組織なのか?といったように同じ通気組織であっても対象組織は大きく異なる。この

ように、新たに本法を取り入れようとする読者はどの測定方法を選択するのが良いのか、その判断に迷うかもしれない。そこで本報では、通気組織が発達した根などを例に、研究目的に合った適切な測定方法を選択できるように各測定方法の特徴を整理することにした。

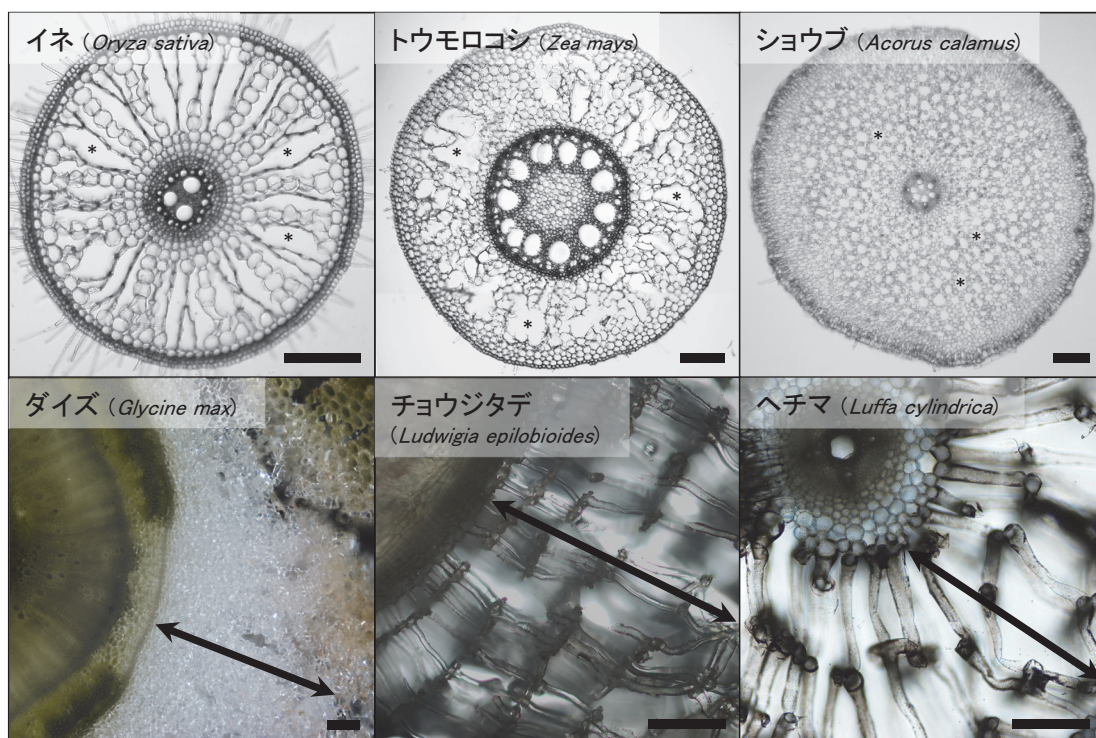
2. 各測定方法の特徴

まず、手法の選択にあたって重要なのは、目的とする空隙を組織別の空隙量もしくは全体の総和とした空隙量のどちらで評価するかである(第1表)。切片法は顕微鏡下での観察により通気組織とその他の空隙との区別が可能であるため、組織別の空隙率を正確に測定することができると同時に、組織の内部構造も把握することができる。また、皮層に形成された通気組織の発達程度を横断面に対する割合だけではなく、皮層組織に対する割合などとして算出でき、多くの解剖学的解析データが得られる。比重瓶法とアルキメデス法は使用する器具は異なるものの、どちらも原理的に浮力を応用した手法であり、通気組織と細胞間隙の総和として根の全ガス空間を計測できる。

手法の選択時にもう一つ考慮すべきなのは、計測に



第1図 空隙率を測定する根系および各部位のイメージ図.



第2図 通気組織が発達した根などの横断切片写真.

イネおよびトウモロコシは水耕栽培による低酸素条件下(嫌気条件下)で処理した個体を用いた. ショウブ, ダイズおよびヘチマは土耕ポットによる湛水条件下で栽培した個体を用いた. チョウジタデは水田に自生していた個体を用いた. 観察部位はダイズでは胚軸, 他の植物では根である. * は通気組織(空隙)を, 両矢印は通気組織が発達している領域を示す. Bar = 200 μ m.

第1表 各空隙率測定方法の比較と特徴.

項目	徒手切片法	比重瓶法	アルキメデス法
評価できる空隙	通気組織 (+細胞間隙※)	全ガス空間 (通気組織+細胞間隙)	全ガス空間 (通気組織+細胞間隙)
計測に必要なサンプル量	長さ 5 mm 以上の根	生重で 100 mg 以上	生重で 200 mg 以上
計測対象となるサンプル	1 本～数本の根	数本の根～根系全体	数本の根～根系全体
測定時間 (10 反復)	1 ～ 2 時間程度	4 ～ 5 時間程度	2 ～ 3 時間程度
実験操作の難易度	低い	高い	低い
測定時間の制限要因	切片作製技術の熟練度	比重瓶の数	特になし
適した計測対象			
一次通気組織	適	適	適
二次通気組織	不適 (面積などとしては適)	適	適
柔らかい組織	難	易	易
硬い組織	難	易	易

※きれいな切片で、細胞間隙が明瞭である場合は細胞間隙による空隙率を計測することができる。

必要なサンプル量であろう (第1表). 切片法は植物の切片が数枚作製できればいいので, 5 mm 以上の根があれば計測が可能であり, 微量サンプルでの計測に利用できる. 一方で比重瓶法とアルキメデス法の計測には比較的多くのサンプルが必要で, 最少でも比重瓶法では生重で 100 mg 以上 (上埜, 1994), アルキメデス法では生重で 200 mg 以上である. Visser and Bögemann (2003) が実験的に確認しているように, アルキメデス法では 200 mg 以下のサンプルの計測で測定誤差が大きくなる. 目安として, 技術的な問題がない場合に 10 反復の試料計測に要する時間を第1表にまとめた. 徒手切片法では 1 ～ 2 時間程度 (1箇所を 1 反復として), アルキメデス法では 2 ～ 3 時間程度 (数本を 1 反復として), 比重瓶法では 4 ～ 5 時間程度 (数本を 1 反復とし, 比重瓶 10 個使用) の時間を要する. なお, 同じ浮力を利用する手法でもアルキメデス法は各操作の難易度が低いのに対して, 比重瓶法は操作の難易度が高い (第1表). また, 切片法では切片作製技術の熟練度, 比重瓶法では比重瓶の数が測定時間の主な制限要因になる.

3. 測定方法の使い分け

ここでは, 第1図で示した計測したい条件毎に, どのような測定方法が最適なのかを考えてみたいと思う. まず, 根の測定部位による使い分けについて説明する. 十分なサンプル量が得られない特定の根の部位の測定, 例えば根端から正確に 10 cm の部位の空隙率を測定する場合では, 微量サンプルで計測できる切片法が適している. 特に主根の場合は, 植物体から 1 本しか得られないので本法が良い. 次に根を用いて根端から基部に向かって空隙率がどのように変化するか調べる場合である. 切片法では根 1 本を 1 反復として一定間隔で作製した切片を観察して空隙率を測定す

る. 比重瓶法とアルキメデス法では同程度の長さの複数の根を 1 反復として根端から 0 – 5 cm, 5 – 10 cm, 10 – 15 cm などある一定の長さに分割した部位毎に測定することでグラフ化できる. また同法により, 主根, 側根, 不定根など区別が可能な場合には根の種類別に空隙率を求めることもできる. 一方, 根系全体の空隙率を評価する場合, 切片法では量的に切片作製に限界があるので, 比重瓶法とアルキメデス法が適している. ただし, 比重瓶法では瓶の容量を超える大きな根系の場合は分割して複数回の測定が必要になるため, 1 回の測定で済むアルキメデス法が良い.

また植物組織の形態によって使い分けることも大切である (第2図, 第1表). イネ, トウモロコシ, ショウブなどの根の皮層に明瞭に発達する一次通気組織 (破生通気組織や離生通気組織) の場合, いずれの手法においても空隙率の測定は可能である (Justin and Armstrong, 1987; Atwell et al., 1988; Kawai et al., 1998; Visser et al., 2000). 一方, 海綿状組織のように発達するダイズ (Shimamura et al., 2003; 2014) やセスバニア (Shiba and Daimon, 2003) および立体的な網目構造をしたチョウジタデ (有門ら, 1990) やエゾミソハギ (Stevens et al., 1997) などの二次通気組織, 皮層細胞の伸長により形成され空隙境界が不明瞭なヘチマの通気組織 (Shimamura et al., 2007) では, 切片法による空隙の計測は困難であるため, 比重瓶法もしくはアルキメデス法で空隙率を求めた方が良い. ただし切片法においても, 二次通気組織の発達程度を面積や二次通気組織 / 横断面の面積比などとして評価することは可能である (Shimamura et al., 2010; Teakle et al., 2011). また, 極端に柔らかい組織 (細い幼根やチョウジタデの呼吸根など) や中心柱が木化して非常に硬化した組織 (特に樹木) では明瞭な徒手切片の作製には熟練した技術が必要となるので, 他の切片法 (パラ

フィン切片, 樹脂切片, 凍結切片) もしくは比重瓶法, アルキメデス法で空隙率を測定の方が容易である。

4. 測定方法の応用例

各手法による植物組織の空隙率測定について通気組織を例に紹介したが, 比重瓶法やアルキメデス法では空隙以外のガス量も応用して評価できる。2 報目(宮下ら, 2021)で紹介したが, 耐湿性が強いイネ科植物では葉の表面には撥水性があるため, 水中ではその表面にガスフィルムと呼ばれる空気層を形成する。このガスフィルムは大気もしくは水中の酸素や二酸化炭素と葉とのガス交換に関与していることが知られている(Pedersen et al., 2009; Mori et al., 2019)。界面活性剤を葉表面に塗布して撥水性を失わせることによって, ガスフィルムを除去できるため, 処理前と処理後の葉を利用することでガスフィルムの体積と葉の体積を測定することができ, 空隙率に類似したガスフィルム形成率を算出できる。

5. おわりに

各手法の長所・短所を理解した上で, 研究目的および植物組織の形態に合わせた適切な測定方法を選択して空隙率を測定することは重要である。各手法を比較した表(第1表)や各長所・短所および測定限界をデータ付きで論じている Visser and Bögemann (2003) の報告を参考にしていきたい。なお, 多くの論文では, 空隙率および植物組織内に通気組織などの空隙が形成されていることの証明として横断切片の写真を掲載している(Smirnoff and Crawford, 1983; Justin and Armstrong, 1987; Laan et al., 1989; Stevens et al., 1997)。実験をする際は, 比重瓶法やアルキメデス法による空隙率の測定とともに, 横断切片を作製して顕微鏡下で観察, 撮影を行う作業が生じることも忘れてはいけない。これまでの4回連載で植物組織の空隙率測定方法を紹介してきた。本連載が読者の測定に対する不安要素と技術的な問題を取り除き, 多くの研究に空隙率測定が活用されることを願っている。

謝辞

根の横断切片の作製に用いたショウブは, 名古屋大学の高橋宏和博士からご提供いただいた。ここに感謝の意を表する。

引用文献

有門博樹, 池田勝彦, 谷山鉄郎 1990. 水稻における通気組織と通気組織系に関する解剖学的ならびに生態学的研究. 三重大生物資源紀要 3: 1-24.
Atwell, B. J., Drew, M. C., Jackson, M. B. 1988. The influence of

oxygen deficiency on ethylene synthesis, 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid levels and aerenchyma formation in roots of *Zea mays*. *Physiol. Plant.* 72: 15-22.

Justin, S. H. F. W., Armstrong, W. 1987. The anatomical characteristics of roots and plant response to soil flooding. *New Phytol.* 106: 465-495.

Kawai, M., Samarajeewa, P. K., Barrero, R. A., Nishiguchi, M., Uchimiya, H. 1998. Cellular dissection of the degradation pattern of cortical cell death during aerenchyma formation of rice roots. *Planta* 204: 277-287.

Laan, P., Berrevoets, M. J., Lythe, S., Armstrong, W., Blom, C. W. P. M. 1989. Root morphology and aerenchyma formation as indicators of the flood-tolerance of *Rumex* species. *J. Ecol.* 77: 693-703.

宮下智貴, 江尻真斗, 島村聡, 山内卓樹, 塩野克宏. 2021. 植物組織の空隙率測定方法—2. アルキメデス法—. 根の研究 30: 41-45.

Mori, Y., Kurokawa, Y., Koike, M., Malik, A. L., Colmer, T. D., Ashikari, M., Pedersen, O., Nagai, K. 2019. Diel O₂ dynamics in partially and completely submerged deepwater rice: leaf gas films enhance internodal O₂ status, influence gene expression and accelerate stem elongation for 'snorkelling' during submergence. *Plant Cell Physiol.* 60: 973-985.

野村康之, 塩野克宏, 島村聡, 山内卓樹. 2021. 植物組織の空隙率測定方法—3. 切片法—. 根の研究 30: 76-82.

Pedersen, O., Rich, S. M., Colmer, T. D. 2009. Surviving floods: leaf gas films improve O₂ and CO₂ exchange, root aeration, and growth of completely submerged rice. *Plant J.* 58: 147-156.

Shiba, H., Daimon, H. 2003. Histological observation of secondary aerenchyma formed immediately after flooding in *Sesbania cannabina* and *S. rostrata*. *Plant Soil* 255: 209-215.

Shimamura, S., Mochizuki, T., Nada, Y., Fukuyama, M. 2003. Formation and function of secondary aerenchyma in hypocotyl, roots and nodules of soybean (*Glycine max*) under flooded conditions. *Plant Soil* 251: 351-359.

島村聡, 塩野克宏, 山内卓樹. 2021. 植物組織の空隙率測定方法—1. 比重瓶法—. 根の研究 30: 8-12.

Shimamura, S., Yamamoto, R., Nakamura, T., Shimada, S., Komatsu, S. 2010. Stem hypertrophic lenticels and secondary aerenchyma enable oxygen transport to roots of soybean in flooded soil. *Ann. Bot.* 106: 277-284.

Shimamura, S., Yoshida, S., Mochizuki, T. 2007. Cortical aerenchyma formation in hypocotyl and adventitious roots of *Luffa cylindrica* subjected to soil flooding. *Ann. Bot.* 100: 1431-1439.

Shimamura, S., Yoshioka, T., Yamamoto, R., Hiraga, S., Nakamura, T., Shimada, S., Komatsu, S. 2014. Role of abscisic acid in flood-induced secondary aerenchyma formation in soybean (*Glycine max*) hypocotyls. *Plant Prod. Sci.* 17: 131-137.

Smirnoff, N., Crawford, R. M. M. 1983. Variation in the structure and response to flooding of root aerenchyma in some wetland plants. *Ann. Bot.* 51: 237-249.

Stevens K. J., Peterson R. L., Stephenson G. R. 1997.

- Morphological and anatomical responses of *Lythrum salicaria* L. (purple loosestrife) to an imposed water gradient. Int. J. Plant Sci. 158: 172-183.
- Teakle, N. L., Armstrong, J., Barrett-Lennard, E. G., Colmer, T. D. 2011. Aerenchymatous phellem in hypocotyl and roots enables O₂ transport in *Melilotus siculus*. New Phytol. 190: 340-350.
- 上埜喜八 1994. 根の通気組織形成量の測り方. 根の研究 3: 121.
- Visser, E. J. W., Bögemann, G. M. 2003. Measurement of porosity in very small samples of plant tissue. Plant Soil 253: 81-90.
- Visser, E. J. W., Colmer, T. D., Blom, C. W. P. M., Voesenek, L. A. C. J. 2000. Changes in growth, porosity, and radial oxygen loss from adventitious roots of selected mono- and dicotyledonous wetland species with contrasting types of aerenchyma. Plant Cell Environ. 23: 1237-1245.

菜根譚 野菜の根の話

中野明正

千葉大学 学術研究・イノベーション推進機構

14. スマートだ根

「スマート」を辞書で引くと①からだつきや物の形がすらりとして格好がよいさま。②行動などがきびきびして洗練されているさま。③服装や着こなしが気のきいているさま。とある。そして、今社会はスマート化しているが、現在の辞書では、④として、電子機器が組み込まれた。ハイテクであるさま。とある。スマートフォンが社会に浸透し、スマホなしでは生きていけない現状ではあるが、私も手元の紙の辞書も追いついていないのだ。早晚、辞書の意味の順番も変わるだろう。

農業のスマート化も進んでいる。農林水産省によると「スマート農業とは、ロボット技術や情報通信技術を活用して、省力化・精密化や高品質生産を実現する等を推進している新たな農業のこと」と定義されている。日本の農業現場では特に労働力不足が大きな問題であり、「先端技術」を駆使した「スマート農業」に期待がかかっている。

スマート農業のキーテクノロジーの一つが、ロボットである。もともとロボット (robot) という言葉は「過酷な労働」を意味するチェコ語の robota に由来する。言葉の考案者は作家のカレル・チャペックで、今から100年前の1920年に発表された「R. U. R」というSF戯曲で初めて使われた。今に至る「スマート農業」まで労働を代替する発想が主流であった。しかし、未来のロボットは一味違うことを予感させる。生物の機能や形状に着想を得たユニークなロボットが表れつつある。

ロボット工学者のバルバラ・マッツォライ (2021)

は、植物ロボット (プラントイド) を開発している。曰く『もし〈プラントイド〉の何より斬新な点を一言で言い表すなら、それは「可塑性」を備えていることだ。〈プラントイド〉は、モデルとなった根と全く同じように、成長して自分の形を変えることのできる、史上初のロボットなのだ。』そしてマッツォライ博士は3Dプリンターなどを駆使し「根ロボット」を作製した。実際の根を模した先端の回旋能力のある人工根は、土の中を進む力が2割で済む。

「根の研究」で得られた知見がロボットに応用され、実用化される日も近いかもしれない。スマートな根が、食料の持続的生産や環境問題をスマートに解決してくれることだろう。

参考文献

バルバラ・マッツォライ 2021. ロボット学者、植物に学ぶ、白揚社。



現状の最先端の農業用ロボット
トマト収穫ロボット (パナソニック
プロダクションエンジニアリング)

2021 年度 根研究学会賞の決定について

今年度の根研究学会賞については、本誌『根の研究』の前々号（第 30 巻第 2 号）において候補募集の告示を致しました。推薦があった業績について、それぞれ評議員あるいは専門分野に近い複数の会員に評価を依頼し、その答申に基づいて正副会長で審議の結果、下記の通り、学術功労賞 1 件、学術奨励賞 1 件の授賞が決定しました。ここに、会員の皆様にご報告します。

授賞式は、11 月 27 日－28 日に開催された第 54 回根研究集会において、11 月 27 日に開催し、併せて功労賞および奨励賞については受賞記念講演を行いました。受賞者には、賞状と副賞（根研ロゴ入りパーカー）をお贈りしました。受賞記念講演の要旨は、次号に根研究集会の一般発表の要旨集と一緒に掲載します。

＊「業績の概要」は、推薦状や審査報告を基に、根研究学会事務局が要約したものです。

＊過去の受賞業績一覧は、根研究学会のホームページに掲載しています。

授賞が決定した業績とその概要

【学術功労賞 1 件】

業 績：コムギをはじめとする作物根の根系形成とその改善による環境ストレス耐性の向上に関する研究

受賞者：小柳 敦史（農研機構）

推薦者：辻 博之（農研機構・北海道農業研究センター）

業績の概要：受賞者は、世界的に極めて重要な作物であるコムギを材料に、根系形成に及ぼす各種環境要因を明らかにし、根の環境反応を特に重力屈性、水分屈性の面から解析し、作物栽培における根の役割の理解に大きく貢献した。また、根系形成と育成地の環境に関する考察、遺伝的背景を調節した実験法の検討等は、現在につながる根系の改良による耐湿性の向上の取り組みの原点であり、それまで極めて困難であった耐湿性研究を根と通気性等の機能に着目して発展させたことは、同研究の新たな方向性を明示し、多くの研究者に影響を与えた。さらに、根の伸長角度の調査法や根の深さ指数は、明確な作物根系の評価手法として、その後多くの研究者によって用いられている。作物種や研究分野にとらわれない形で根の研究の可能性を押し広げるとともに、根研究学会の発足以来、学会活動及び運営に多大な貢献をし、根研究学会の会長および副会長を務め、根の研究に取り組む人材確保のための環境を改善し、根の研究の持続的成長にも寄与してきた。以上の点から、根研究学会学術功労賞を受賞するに値する業績と評価する。

業績（関連の論文等）

1. Oyanagi, A., Sato, A., Wada, M. (1991) Varietal differences in geotropic response of primary seminal root in Japanese wheat. *Jpn. J. Crop Sci.* 60: 312-319.
2. Oyanagi, A. (1994) Gravitropic response growth angle and vertical distribution of roots of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Soil* 165: 323-326.
3. 小柳敦史 (1998) 深さの定量化による作物根系の新しいとらえかた. *日作紀* 67: 3-10.
4. 小柳敦史・乙部(桐渕)千雅子・柳澤貴司・本多一郎・和田道宏 (2001) 種子根伸長角度を指標にした根系の深さが異なるコムギ実験系統群の作出. *日作紀* 70: 400-407.
5. 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.
6. Abiko, T., Obara, M., Abe, F., Kawaguchi, K., Oyanagi, A., Yamauchi, T., Nakazono, M. (2012) Screening of candidate genes associated with constitutive aerenchyma formation in adventitious roots of the teosinte *Zea nicaraguensis*. *Plant Root* 6: 19-27.
7. Mori, M., Oyanagi, A., Haque, E., Kawaguchi, K., Miura, H., Abe, F. (2020) Terminal regions of

chromosome arms 6AL and 6BL carry QTL affecting seminal root angle in wheat (*Triticum aestivum* L.). Plant Root 14: 23-31.

他に、原著論文・総説・解説記事等 14 編。

【学術奨励賞 1 件】

業 績：東日本大震災の復興を担う海岸林造成に関する根系評価に関する基礎研究

受賞者：藤田 早紀（森林研究・整備機構 森林総合研究所）

推薦者：小池 孝良（北海道大学 大学院農学研究院）

業績の概要：東日本大震災の復興の象徴である海岸林造成には、耐潮性に優れ、貧栄養でも生育できるクロマツが各地で利用されてきたが、急速な造成により、造林した樹種の生育不良が散見される。受賞者は、異なる滞水期間が様々な樹種の細根生態に与える影響を明らかにした。これは、海岸林造成に関する重要な知見であり、東日本大震災の復興へむけての意義のある研究である。また、植物のストレス応答を基軸に樹木根系の形態、生理・菌根菌、葉の形質など、これまで異なる分野で単独に研究されていた項目を多角的に評価した一連の研究は、ストレス応答における、根の役割の総合的理解に寄与し得る成果であり、極めて高く評価できる。

業績（関連の論文等）

1. Fujita, S., Noguchi, K., Tange, T. (2021) Different waterlogging depths affects fine root growth distribution of *Pinus thunbergii* seedlings. Front. Plant Sci. 12: 386.
2. Fujita, S., Noguchi, K., Tange, T. (2020) Root response of five Japanese afforestation species to waterlogging. Forests 11: 552.
3. Fujita, S., Watanabe, H., Moraz, V., Tamai, Y., Satoh, F., Koike, T. (2020) Effects of biochar and litter on water relations of Japanese black pine (*Pinus thunbergii*). J. Forest Res. 25:76-82.
4. Fujita, S., Wang, XN., Kita, K., Koike, T. (2018) The effect of nitrogen loading under low and high phosphorus conditions on above and belowground growth of hybrid larch F₁ seedlings. iForest 11: 32-40.
5. 藤田早紀・野口京太郎・丹下健 (2020) 異なる滞水期間後のクロマツ苗木の細根成長. 第 52 回根研究集会. 11 月 (ポスター発表)
6. 藤田早紀・野口京太郎・丹下健 (2021) クロマツ苗の滞水解除後における回復応答. 第 53 回根研究集会. 6 月 (口頭発表)

他に、関連する査読付き原著論文3編，総説・解説4編，根研究集会での講演2件。

根の研究

第 30 卷 (2021 年) 総目次

【巻頭言】

会員の皆様へ	1(1)
東日本大震災から 10 年	1(3)
会員の皆様へ	27(2)
会員の皆様へ	51(3)
会員の皆様へ	111(4)

【原著論文】

いや地汚染土壌の添加がイチジク‘榊井ドーフィン’苗の根箱での生育に及ぼす影響 細見彰洋	29(2)
冷風と CO ₂ の同時処理によるイチゴの根系発達促進と炭素同位体比による効率評価 中野明正・大川千鶴・黒田史絵・川口哲平	53(3)
湛水条件下のマンゴー接ぎ木樹における根活性と穂木および台木間の炭水化物分配の関係 佐伯爽・岩崎直人	58(3)
2020 年 7 月に倒木化した岐阜県大湫町神明大杉の根系状況 平野恭弘・南光一樹・土居龍成・西村滯・杵山哲矢・谷川東子	65(3)

【研究ノート】

中空円筒ポットとフレキシブルピンネットによる根系採取法 中野明正・増田英莉子・石原良行	5(1)
新鮮水稻根重の測定—野菜水切り器を用いた簡易脱水法提案— 亀岡笑・吉野ひなき・鈴木弘隆・近江祐樹	33(2)

【ミニレビュー】

低温耐性サツマイモ系統育成のための選抜体系の検討 藏之内利和	113(4)
---	--------

【短 報】

オオムギ種子根の伸長角度の品種間差異 小西隼平・中野友貴・伊藤博武・長嶺敬	119(4)
--	--------

【教 育】

植物組織の空隙率測定方法—1. 比重瓶法— 島村聡・塩野克宏・山内卓樹	8(1)
植物組織の空隙率測定方法—2. アルキメデス法— 宮下智貴・江尻真斗・島村聡・山内卓樹・塩野克宏	41(2)
植物組織の空隙率測定方法—3. 切片法— 野村康之・塩野克宏・島村聡・山内卓樹	76(3)

植物組織の空隙率測定方法—4. 各測定方法の特徴と選択—	
島村聡・宮下智貴・江尻真斗・塩野克宏・野村康之・山内卓樹	124(4)
【情 報】	
複数画像の自動解析が可能な根長評価のための ImageJ マクロの公開	
田島亮介	13(1)
菜根譚 野菜の根の話 11. ダイコンの中の大根	
中野明正	15(1)
第 53 回根研究集会のお知らせ	16(1)
菜根譚 野菜の根の話 12. 臭わない根	
中野明正	46(2)
菜根譚 野菜の根の話 13. 根を深く	
中野明正	83(3)
第 54 回根研究集会のお知らせ	84(3)
菜根譚 野菜の根の話 14. スマートだ根	
中野明正	129(4)
【報 告】	
第 53 回根研究集会に参加して	87(3)
第 53 回根研究会発表プログラム	92(3)
第 53 回根研究会発表要旨	100(3)
【書 評】	
『森の根の生態学』	18(1)
【公 示】	
名簿データ登録（更新）のお願い	19(1)
根研究学会会則	21(1)
根研究学会学術賞規定	22(1)
『根の研究』投稿規程	23(1)
『根の研究』原稿作成要領	24(1)
『根の研究』論文審査要領	25(1)
国際誌 Plant Root に掲載の 2020 年の論文	26(1)
【会 告】	
2021 年度根研究学会総会報告	47(2)
2022—2023 年度根研究学会会長選挙の結果について	109(3)
2021 年度根研究学会賞の決定について	130(4)
「根の研究」第 30 巻 総目次	132(4)

Root Research 根の研究

編集委員長	小川 敦史	秋田県立大学生物資源科学部
副編集委員長	中野 明正	千葉大学
	福澤加里部	北海道大学北方生物圏フィールド科学センター
編集委員	岩崎 光徳	農研機構・果樹茶業研究部門
	宇賀 優作	農研機構・次世代作物開発研究センター
	亀岡 笑	酪農学園大学循環農学類
	唐澤 敏彦	農研機構・中央農業研究センター
	神山 拓也	宇都宮大学農学部
	辻 博之	農研機構・北海道農業研究センター
	仲田(狩野)麻奈	名古屋大学大学院生命農学研究科
	松波 麻耶	岩手大学農学部
	松村 篤	大阪府立大学大学院生命環境科学研究科
	南 基泰	中部大学応用生物学部
	森 茂太	山形大学農学部
	山崎 篤	農研機構・九州沖縄農業研究センター

事務局 〒104-0033 東京都中央区新川 2-22-4 新共立ビル 2F
株式会社共立内 根研究学会事務局
Tel : 03-3551-9891
Fax : 03-3553-2047
e-mail : neken2021@jsrr.jp

根研究学会ホームページ <http://www.jsrr.jp/>

年会費 電子版個人 3,000 円, 冊子版 (+ 電子版) 個人 4,000 円, 冊子版団体 9,000 円

根の研究 第30巻 第4号 2021年12月15日印刷 2021年12月20日発行
発行人: 平野恭弘 〒464-8601 愛知県名古屋市中千種区不老町
名古屋大学大学院環境学研究科
印刷所: 株式会社共立 〒104-0033 東京都中央区新川 2-22-4 新共立ビル 2F

Root Research

Japanese Society for Root Research

Mini Review

Study of a screening system for breeding low-temperature-tolerant sweetpotato lines

Toshikazu KURANOCHI 113

Short Report

Varietal differences of seminal root angle among barley cultivars

Junpei KONISHI, Yuuki NAKANO, Hirotake ITOH and Takashi NAGAMINE 119

Education

Measurement of plant tissue porosity: IV. Characteristic and selection of each method

Satoshi SHIMAMURA, Tomoki MIYASHITA, Masato EJIRI, Katsuhiko SHIONO,

Yasuyuki NOMURA and Takaki YAMAUCHI 124