

Root

Research

Japanese Society for Root Research

ISSN 0919-2182

Vol.33, No.S1

Sep 2024

第59回根研究集会要旨集

2024年7月20-21日 福井市地域交流プラザ

第33巻 別冊1号

根の研究

根研究学会(JSRR)



第 59 回根研究集会 要旨集 (59th Biannual Meeting of JSRR)

<開催日時 Date and time>

2024 年 7 月 20 日 (土) 13 : 00–18 : 15

21 日 (日) 9 : 00–17 : 30

※20 日・21 日の懇親会は福井駅周辺で開催予定

<開催場所 Venue>

〒910-0858 福井市手寄 1 丁目 4 番 1 号

AOSSA 6F・福井市地域交流プラザ 601B・601C

公開ワークショップ会場: 福井市観光交流センター 1F

電車でのアクセス: JR 福井駅より徒歩 1 分

AOSSA への地図: <http://www.aossa.jp/access/>

AOSSA フロアマップ: <http://www.aossa.jp/floor-cat/6f/>

<プログラム Program>

7 月 20 日 (土) Saturday, July 20th

13 : 00 受付 Registration, ポスター提示 Posters display

13 : 30–13 : 40 開会の挨拶 Opening remarks

13 : 40–14 : 40 特別講演 Special lecture

Poplar (*Populus x canescens*) root suberization in response to abiotic stress in soil

Prof. Lukas Schreiber (University of Bonn, Germany)

14 : 50–15 : 50 ポスター発表前半 (13 課題) Poster session

16 : 00–17 : 40 口頭発表 (6 課題) Oral presentation

17 : 50–18 : 30 総会 General meeting

19 : 00– 懇親会 Conference dinner (福井西武屋上 そらのガーデン)

7 月 21 日 (日) Sunday, July 21th

08 : 30–09 : 00 受付 Registration

09 : 00–10 : 20 口頭発表 (5 課題) Oral presentation

10 : 30–11 : 30 ポスター発表後半 (13 課題) Poster session

(昼休憩)

13 : 00–14 : 20 口頭発表 (5 課題) Oral presentation

14 : 30–14 : 40 優秀発表賞表彰 Best Presentation Award

15 : 00–17 : 00 公開ワークショップ

「掘らないと！掘らないの？ ～知っていそうで知らない 根の様子と画像解析のウルテク～」

神山 拓也 (宇都宮大学)

| 根箱ピンボード法による根の洗い出し

田島 亮介 (東北大学)

| 根の洗い出しと格子交点法による解析

檀浦 正子 (京都大学)

| 画像取得・画像解析 (WinRHIZO・ImageJ)

Shitephen WANG (京都大学)

| 画像取得・画像解析 (WinRHIZO・ImageJ)

寺本 翔太 (農研機構)

| 画像取得・画像解析 (Python)



根研究学会 Japanese Society for Root Research (JSRR)

- 17:20-17:25 次回予告 Announcement of next JSRR meeting
| 阿部 淳 大会実行委員長（東海大学）からのメッセージ
- 17:25-17:30 閉会の挨拶 Closing remarks
- 19:00- 懇親会 Farewell party

<第59回根研究集会実行委員>

実行委員長: 塩野克宏

庶務担当: 角田智詞

受付担当: 西嶋遼

(福井県立大学生物資源学部)

Chairman: Katsuhiko Shiono

General affairs: Tomonori Tsunoda

Registrar: Ryo Nishijima

(Department of Bioscience and Biotechnology, Fukui Prefectural University)

<問合せ先 Contact>

福井県立大学生物資源学部 塩野克宏

〒910-1195 福井県吉田郡永平寺町松岡兼定島 4-1-1 福井県立大学生物資源学部

E-mail: shionok@fpu.ac.jp 電話: 0776-61-6000

Department of Bioscience and Biotechnology, Fukui Prefectural University

Katsuhiko Shiono

4-1-1 Matsuoka-Kenjojima, Eiheiji, Fukui 910-1195, Japan

E-mail: shionok@fpu.ac.jp Tel: 0776-61-6000

<謝辞>

本会は公立大学法人 福井県立大学 学会開催支援および公益社団法人 福井県観光連盟 コンベンション開催助成金の支援を受けて実施されました。



<口頭発表 Oral Presentations> 講演 12 分+質疑 3 分

★優秀発表賞エントリー

7 月 20 日 (土) 16 : 00-17 : 40 (6 課題)

- 16:00 P01 森林における画像取得技術を用いた細根動態研究の進展
○福澤加里部・野口享太郎
- 16:15 P02 スダジイの根の形態
○田村秋汰
- 16:30 ★P03 亜高山帯樹木の非構造的炭水化物が駆動する根呼吸の季節変化
○橋本裕生・増本泰河・伊藤拓生・高橋耕一・牧田直樹
- 16:45 ★P04 *Zea* 属植物を用いた酸素漏出バリア形成制御遺伝子 *ROL Barrier Formation1* 遺伝子の
同定とその機能解析
○穴戸恵・中山洋平・井出健斗・高橋宏和・縣歩美・大森史恵・間野吉郎・中園幹生
- 17:00 P05 3D オブジェクト手法による根先端域での木部導管の起源と発達の解析
○仁木輝緒・幹康・斉藤進
- 17:15 P06 X 線 CT を用いた水田で栽培したイネ根系のゲノムワイド関連解析
○寺本翔太・宇賀優作

7 月 21 日 (日) 09 : 00-10 : 20 (5 課題)

- 09:00 ★P07 Root system architecture modification in response to soil nitrate availability is co-regulated by soil
pH
○Mutsutomo Tokizawa
- 09:15 ★P08 培養液の供給法が葉菜類の根の形態と外生成分の吸収能に及ぼす影響
○澤田佳穂・中野明正・淨閑正史
- 09:30 ★P09 塩分ストレスが C4 植物の生育, 光合成に与える影響
○鈴木健斗・岩崎泰永
- 09:45 ★P10 オオムギの湿害発生過程における地上部, 地下部の成長と根圏酸化の関係
○芝日菜子・江上泰広・檀浦正子・高梨聡・塩野克宏
- 10:00 ★P11 根が侵入できない硬い培地上で生育できるシロイヌナズナの突然変異株群の
原因遺伝子探索
○飯田秀利

7 月 21 日 (日) 13 : 00-14 : 20 (5 課題)

- 13:00 P12 根系形態の改変による高品質農産物の効率的生産に向けた戦略
○小河 樹・澤田 佳穂・塚越 寛・淨閑 正史・中野明正
- 13:15 P13 無加温パイプハウスにおける野菜の周年栽培時の連続不耕起栽培が
各品目の根系発達に及ぼす影響
○岡元英樹・地子立・古山真一
- 13:30 P14 空気電池による電気刺激がキャベツセル成型苗の生育に及ぼす影響
○本間知夫・柳澤志温・富岡厚則
- 13:45 P15 種子直下へのリン酸局所施肥が直播タマネギの生育ならびに根系発育に及ぼす影響
○亀岡笑・田島亮介・長南友也・宮下広大・服部壮見・西島宝恵・林怜史
- 14:00 P16 サツマイモ塊根の形状および表皮症状の 3D データベースの作成
○田口和憲・児玉晋洋・西中未央・郭威

<ポスター発表 Poster Presentations>

★優秀発表賞エントリー

グループ A : 7 月 20 日 (土) 14 : 50-15 : 50 (14 課題)

- A01 ウキクサ由来植物生育促進細菌を用いた養液栽培レタス発根促進
○渡邊高人
- ★A02 もみ殻炭の施用がダイコンの生育に及ぼす影響
○塔野岡 (寺門) 純子・垣内悠太郎・徳田進一
- A03 剪定枝炭を施用したポット栽培におけるニホンナシの生育
○堀井幸江・郭永・井上博道
- ★A04 二次元酸素オプトードによるイネ幼苗期の冠根伸長と根圏酸化の時空間的追跡
○田丸翔太郎・藤原七海・芝日菜子・塩野克宏
- A05 ダイズのころび型倒伏に関連する根系形質
成澤友香・青木博光・橋本叡信・○神山拓也
- ★A06 Salinity stress affects cell wall components and pectin localization in spinach (*Spinacia oleracea* L.)
Jia Liu・Haruyuki Fujimaki・Ryoichi Araki・Anthony Egrinya Enejia・Irshad Muhammad・○Ping An
- A07 全身・局所麻酔薬による根の接触屈性の抑制
曲徳泰・○陽川憲
- ★A08 乾燥ストレスが超深根性植物 *Nelumbo juliflora* の幼苗期の根系構造に与える影響の解析
○森井愛美・辻渉・山中啓介・永松大・明石欣也
- A09 X 線マイクロ CT を用いたヒメツリガネゴケ仮根系の 3D 可視化
- セグメンテーション精度向上の取組 -
○唐原一郎・若林孝尚・山浦遼平・八木原直樹・玉置大介・蒲池浩之・山内大輔・峰雪芳宣・
星野真人・上杉健太郎・日渡祐二・半場祐子・久米篤・藤田知道
- ★A10 遮根シートによるリン酸局所施肥位置へのコムギ根系誘導で収量は増加するのか
○藤元琴羽・橋本叡信・青木博光・神山拓也
- A11 SfM/MVS に基づく 3 次元モデルにより取得した立木間樹木根系データの評価
○池野英利・田中優斗・藤堂千景・谷川東子・平野恭弘・大橋瑞江・今若舞・檀浦正子・
山瀬敬太郎
- ★A12 Unraveling variation in rice lateral root under early phase nutrient deficiency
○MARCELO Via Ann Candelaria・INUKAI Yoshiaki・EHARA Hiroshi・KANO-NAKATA Mana
- A13 スキャナ法によるスギ末端次数根の分岐形成過程の観察
○趙星一・桑辺七穂・大橋瑞江
- ★A14 水平・垂直方向の直径の違いを考慮した 3 次元根系の可視化
○田中優斗・山瀬敬太郎・藤堂千景・大橋瑞江・今若舞・平野泰弘・谷川東子・檀浦正子・
池野英利

<ポスター発表 Poster Presentations>

★優秀発表賞エントリー

グループ B : 7 月 21 日 (日) 10 : 30-11 : 30 (13 課題)

- B01 湛水土壤に蓄積するアンモニアはイネの根の酸素通気に影響するのか？
塩野克宏・○吉田日向・江岸祐夏
- ★B02 シロイヌナズナにおけるストロンチウムによる根の生育阻害と活性酸素種の関連
○長田武・新井将生・岡田佳之・國分阜世
- B03 分子マーカーより個体識別されたブナ林における細根の貯蔵資源動態
○韓慶民・松本麻子・壁谷大介・宮澤真一・野口享太郎
- ★B04 ペーパーポットを用いたサツマイモの育苗条件と初期生育の比較
○勝田瑞皐
- B05 傾斜圃場を利用した土壌水分勾配に対するオオムギ生長の自然変異
○最相大輔・窪田竜太・岡田柊一・轟貴智
- ★B06 Extracellular ADP elicits the generation of reactive oxygen species in plant root
○Tomoko Kagenishi and Ken Yokawa
- B07 Schizogenous aerenchyma formation in *Cardamine amara*
○Hiroshi Kudoh・Masato Sakane・Karol Marhold・Rie Shimizu-Inatsugi・Kentaro K. Shimizu・Hidehiro Fukaki
- ★B08 表層から深さ 1.5m までの土壌炭素及び窒素濃度の変化がスギ細根形態に与える影響
○柳瀬亮太・谷川東子・杵山哲矢・黒見信輔・金子祥也・林亮太・山瀬敬太郎・藤堂千景・池野英利・大橋瑞江・檀浦正子・平野恭弘
- B09 機械学習によるスキャナ法を用いたスギ3 クローン細根成長動態解析
○シティフン ワン・能勢 美峰・平尾 知士・矢吹 新・檀浦 正子
- ★B10 アーバスキュラー菌根菌の感染根長密度の推定
○請川弘次朗・鴨下顕彦
- B11 自動撮影・解析システム構築による樹木根系の高解像度時系列データの集積と共有
○森健介・池野英利・中路達郎・高木正博・大橋瑞江
- ★B12 深層学習による細根抽出を用いた細根動態の評価
○山形拓人・池野英利・木村敏文・礪川悌次郎・中路達郎・大橋瑞江
- B13 4 月から 6 月にかけて脱落したヒノキ細根の形態学的・解剖学的特徴
○吉田陽向・柳瀬亮太・谷川東子・平野泰弘



Poplar (*Populus x canescens*) root suberization in response to abiotic stress in soil

Lukas Schreiber

Department of Ecophysiology, IZMB, Bonn University

*連絡先 (lukas.schreiber@uni-bonn.de)

The soil/root interface is formed by suberized cell walls. Exposure to various abiotic stress factors (osmotic stress, salt stress, nutrient deficiency, oxygen deficiency ...) leads to significantly enhanced root suberization. Here we investigated the ability of poplar roots responding to abiotic environmental stress factors by an enhanced root suberization. Enhanced root suberization, which is a typical response to abiotic stress in many plant species, was very weak or even totally missing in poplar roots. Poplar mutants compromised in root suberization were generated. Radial root water transport was not at all increased in suberin-deficient poplar roots. However, nutrient analysis revealed that iron levels were significantly decreased in mutants. In parallel, RNA-Seq studies indicated that genes specifically involved in iron uptake and transport were highly upregulated in suberin-deficient mutants. This leads to the following conclusions: i) suberin in poplar roots forming an apoplastic transport barrier seems to be of significance for nutrient homeostasis but not for water transport; ii) the high sensitivity of poplar to drought and salt stress may partially be due to its inefficiency responding to abiotic stress in soil with enhanced root suberization enforcing root apoplastic barriers.

森林における画像取得技術を用いた細根動態研究の進展

福澤加里部^{*1)}・野口享太郎²⁾

¹⁾北海道大学北方生物圏フィールド科学センター, ²⁾森林研究・整備機構 森林総合研究所

*連絡先 (caribu@fsc.hokudai.ac.jp)

細根は森林生態系の生産量や炭素・養分循環において重要な役割を果たしている。1980年代まで細根バイオマスや生産量は破壊的手法を用いて測定されてきた。しかし、例えば連続コア法においては、細根バイオマスの時間変化を検出することが困難な場合がしばしばあり、その結果細根生産量は過小評価されてきた。この原因として、細根の寿命が基本的に短く、出現、伸長、枯死、分解がサンプリング期間中に同時に起こっていることや、毎回測定箇所が変わるために空間変動が時間変動を覆い隠してしまうことが考えられる。一方、ルートウィンドウ法、ライゾトロン法、ミニライゾトロン法、スキャナー法などの非破壊的手法では、同一の根を出現から枯死（分解）まで追跡することができ、細根量の変化と分けて細根生産量と枯死量を評価することが可能である。その結果、非破壊的手法を用いて得られた細根生産量やターンオーバー速度は、破壊的手法を用いた値よりも大きくなることがしばしば報告され、細根動態を調べる上での有用性が確認されている。また、画像解析技術の発展により、細根生産、枯死、分解がより精確に評価できるようになった。ここでは、細根生産に焦点を絞り、ミニライゾトロン法やスキャナー法などの画像解析を用いた評価手法を紹介するとともに、そこから得られた細根生産の時間変化や重量ベースの細根生産量について議論したい。

ミニライゾトロン法では、透明のチューブを土壤に設置し、CCDカメラをチューブに挿入してチューブ表面の土壌面に出現した根の成長を観測する。ミニライゾトロン法の利点は、多地点で観測できることと設置時の攪乱が比較的小さい点である。一方、フラットベッド光学スキャナーを用いたスキャナー法は2000年代以降に使われるようになった技術である。スキャナー法の利点は、安価であること、そして画像サイズが大きいことが挙げられる。画像サイズが大きいことは、データのばらつきを抑えることにつながる。一方、それは設置時の攪乱エリアが大きいことでもあり、この方法の欠点となる。ミニライゾトロン法、スキャナー法ともに、設置直後は細根生産が異常に増加することが報告されており、設置した翌年以降から観測を始めることが推奨されている。

画像解析においては根長または細根投影面積が評価されている。細根生産は新たに出現した根の量と既に存在していた根の量の合計として計算される。実際の解析方法としては、根系解析ソフトウェア（例えば、WinRHIZO Tron）、フリーソフトウェアのGIMPやImageJなどを用いた研究例がある。いずれにしても、1本1本の根を手動でトレースする必要があり、非常に労力がかかる作業であり、研究を制限する要因になっている。これを解決すべく自動化の試みも進んでいる。微細な根端の位置の動きを自動で検出する技術、深層学習などを用いた自動抽出の技術などが開発された。また後者においては、複数の時間的に連続する画像における差から細根生産量や枯死量についても評価することが可能である。さらに細根画像の解析は可視光にとどまらず、近赤外の分光反射率を測定した研究もある。根の状態や樹種判別などへの応用が期待される。

これらの手法により観測された研究から、細根生産の季節変化については、温帯林では生育期（春～秋、特に夏）に集中すること、落葉広葉樹林に比べ常緑針葉樹において細根生産の期間が長い傾向があることが示された。一方、冬季に細根生産が事例や、熱帯での季節変化が明瞭でない観測事例もあった。

スダジイの根の形態

田村秋汰^{*1)}鈴木貢次郎²⁾

¹⁾東京農業大学大学院地域環境科学研究科, ²⁾東京農業大学地域環境科学部

*連絡先(12724005@nodai.ac.jp)

1. はじめに

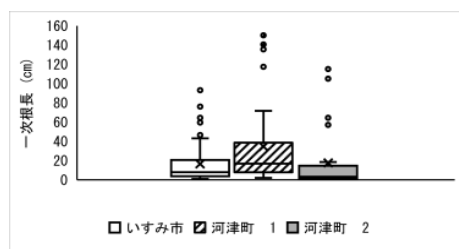
都市環境は、舗装や特殊土地が多く、樹木の根の生育にとって不適切な土壌条件になりやすい (山本, 農業および園芸, 2003). 近年, 都市内における樹木の倒木 (枝折れ, 主幹の折れ, 根上がり等) が社会問題となっている. 倒木の原因の一つとして地上部に対する地下部の生育不良が挙げられ (平野ら, 根の研究, 2021), 根系の生育を損なわない施工や管理が求められている.

2. 材料および方法

本研究では関東以西に多く分布し, 時に巨木となるスダジイの基本的な根の形態を明らかにするために, 現地調査を行った. スダジイ (*Castanopsis sieboldii*) は, 丘陵や斜面, 尾根に多く, 低地では極めて少ない (Watanabeら, Urban forestry & Urban Greening, 2021). また, 滞水条件で多く枯死するという (松永ら, 樹木医学研究, 2022). これらの報告から, スダジイの生育には土壌の三相割合が大きく影響し, 根には, 何かしらの特性があるものと予測した. このスダジイを実験供試個体とし千葉県いすみ市にある1個体, 及び静岡県河津町で2個体の, いずれも自然環境下で5年以上生育しているものを, 2024年4月28日~5月3日に掘り取った. 掘り取った個体は実験室に持ち帰り, 地上部 (樹丈, 葉数, 一次枝長, 一次枝元径, 二次枝長, 二次枝元径) と地下部 (一次根長, 一次根元径, 二次根長, 二次根元径, 三次根数) を計測した.

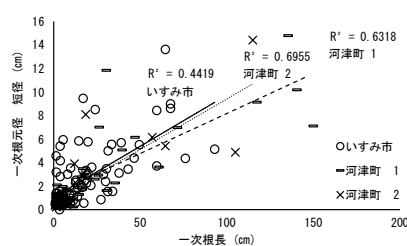
3. 結果及び考察

それぞれの個体の一次根長の平均値及び最大値, 一次根元径の長径と短径の平均値, 及び短径の最大値は, 地上部の樹丈が長く葉数の多い個体ほど大きくなった. しかし, 一次根元径の長径の最大値, 一次根及び二次根の本数と, 地上部の樹丈または葉数で関係が見られなかった. また全3個体において一次根長は大きな方向への外れ値 (第三四分位数から四分位範囲の1.5倍以上離れたもの) が見られた (第1図). 一次根長と一次根元径の短径との関係 (R^2 値) を見たところ, 正の相関が見られた (第2図). これらの結果から, 一次根長と一次根元径の関係がみられた一方, 外れ値となる一次根の形態の観察が必要と考えられた.



第1図 一次根長の分布

○ 外れ値, — 平均値, I 外れ値を除く極値



第2図 一次根長と一次根元径の短径との関係

実線はいすみ市 破線 河津町1, 点線 河津町2

亜高山帯樹木の非構造化炭水化物が駆動する根呼吸の季節変化

橋本裕生^{*1)}・増本泰河¹⁾・高橋耕一¹⁾・牧田直樹¹⁾

¹⁾信州大学大学院総合医理工学研究科

*連絡先(yuhashy@gmail.com)

細根 (直径<2 mm) の呼吸は樹木の土壌からの資源獲得や根の成長において重要な代謝であるが、その季節性を駆動する要因の理解には課題が残る。呼吸の基質となる非構造化炭水化物 (NSC) は季節や生育環境に応じて貯蔵量や機能が変化することから、根呼吸の季節性に影響していると考えられる。本研究は、細根における NSC の貯蔵機能と根呼吸の季節変化の関係を明らかにすることを目的とした。

調査は長野県に位置する乗鞍岳の標高 2000 m と高木限界の 2500 m で行い、両標高に共通して生育する常緑針葉樹のオオシラビソと落葉広葉樹のダケカンバを対象とした。2000 m に比べ 2500 m は土壌養分が少なく、より低温で成長期が短い。2000 m では 6–10 月、2500 m では 7–9 月と、各標高の春から秋にかけて細根の呼吸測定、糖濃度、デンプン濃度の季節変化を調べた。

結果、根呼吸速度は地温に追従するように変化した。そのピークは樹種や標高によって異なった。糖濃度は春に最も高く、夏にかけて大きく減少した後、オオシラビソの根では秋に糖濃度が高くなったのに対し、ダケカンバでは低いままであった。樹木は糖濃度を高めることで浸透圧調整を可能にし、低温ストレスに対処する。オオシラビソは耐寒性向上のため成長期の比較的早い時期に糖の消費を制限する一方、ダケカンバは休眠期直前まで糖を根呼吸によって消費していると考えられる。加えて 2500 m のオオシラビソは糖濃度と、総 NSC における糖の割合を高く維持していたことから、高木限界でオオシラビソの NSC は炭素源としてよりも耐寒性向上の役割が強く機能していたと考えられる。デンプン濃度は春と秋に低く、夏に高かったが、明瞭な樹種間および標高間差はなかった。成長期を通じて根呼吸と糖濃度の間に負の相関がみられたことから、糖は根呼吸に消費される関係にあることが示された。しかし季節によってそれらの関係は異なった。夏に根呼吸と糖濃度は負の相関を示したが、春と秋には明瞭な関係を示さず、また 2500 m のダケカンバでは全ての時期に負の相関がみられるなど標高や樹種間での違いもみられた。これらの結果から、環境変化に対する NSC、特に糖が果たす炭素源または耐寒性向上といった役割の変化は根呼吸の季節性に影響する重要な要因であることが示された。

Zea 属植物を用いた酸素漏出バリア形成制御遺伝子

ROL Barrier Formation1 遺伝子の同定とその機能解析

宋戸恵^{*1)}・中山洋平¹⁾・井出健斗¹⁾・高橋宏和¹⁾・縣歩美¹⁾・大森史恵²⁾・間野吉郎²⁾・中園幹生¹⁾

¹⁾名古屋大学・大学院生命農学研究科, ²⁾農研機構・畜産研究部門

*連絡先 (shishido.kei.d2@s.mail.nagoya-u.ac.jp)

【目的】水田のように土壌に水がたまってしまふ「湛水」は、作物の成長を遅らせ、収量低下を引き起こす環境ストレスである。トウモロコシのような非湿生植物は、湛水時に重大な酸素欠乏に陥る。一方で、湿生植物は酸素欠乏に適応するための複数の形質を有する。その一つに、酸素漏出 (Radial Oxygen Loss (ROL)) バリアの形成がある。ROL バリアは、根から根圏への酸素の漏出を抑制し、根端への効率的な酸素供給に寄与する。これまでに我々は、ROL バリア形成能を有すトウモロコシの近縁野生種であるニカラグアテオシント (*Zea nicaraguensis*) と、ROL バリア形成能が低いトウモロコシ (*Zea mays ssp. mays*) を材料に遺伝解析を進めてきた。その結果、第3染色体短腕に ROL バリア形成制御遺伝子 (*ROL Barrier Formation 1 (RBF1)*) が座乗することを明らかにした。本研究では、トウモロコシの自殖系統 Mi29 に *Z. nicaraguensis* の *RBF1* を導入した形質転換体とその対照系統を材料に、ROL バリア形成能を評価した。また、Mi29 を遺伝的背景とし、*RBF1* を含む領域を *Z. nicaraguensis* ホモ型でもつ準同質遺伝系統 (NIL#468-3) とその対照系統 (NIL#468-7) を材料に、RNA-seq を行った。これにより、*Z. nicaraguensis* 由来の ROL バリア形成制御遺伝子の同定とその機能解析を試みた。

【材料および方法】形質転換体とその対照系統を ROL バリアが形成される嫌気還元条件下で生育させた。メチレンブルー染色法を用いて、根における ROL バリア形成能の評価を行った。また、根の横断切片を作製し、フロログルニール-塩酸によりリグニンの染色を、また Fluorol Yellow 088 によりスベリンの染色を行い、リグニンとスベリンの蓄積について評価した。

嫌気還元条件下で栽培させた NIL#468-3 および、NIL#468-7 の根から、レーザーマイクロダイセクション (LM) 法により外層を単離した。RNA 抽出後、cDNA ライブラリーを作製し、RNA-seq を実施した。

【結果および考察】対照系統は弱い ROL バリアしか形成しないため、メチレンブルー染色により根全体が青色に染色された。一方で *Z. nicaraguensis* 由来の *RBF1* 遺伝子を導入した形質転換体では、根端のみが青色に染色され、強固な ROL バリアを形成している様子が確認された。そこで、対照系統と形質転換体のリグニンおよびスベリンの染色を行った。リグニン染色において、形質転換体では対照系統よりも濃い染色が観察された。特にその差は根端側で顕著であった。スベリン染色においても同様の傾向が観察された。

次に、NIL#468-3 および NIL#468-7 の根から LM 法により外層組織を回収し、組織特異的な RNA-seq 解析を行った。その結果、リグニン生合成関連遺伝子や一部のスベリン生合成関連遺伝子の転写産物が、ROL バリアを形成する NIL#468-3 で高蓄積していた。これらの RNA-seq 解析の結果は、上述した形質転換体を用いた実験結果を支持するものであった。今後は得られた遺伝子の中から転写因子である *RBF1* によって直接制御される遺伝子の同定を目指す。本研究は JSPS 科研費・基盤研究 (A) 21H04724 の支援により行われた。

3D オブジェクト手法による根先端域での木部導管の起源と発達の解析

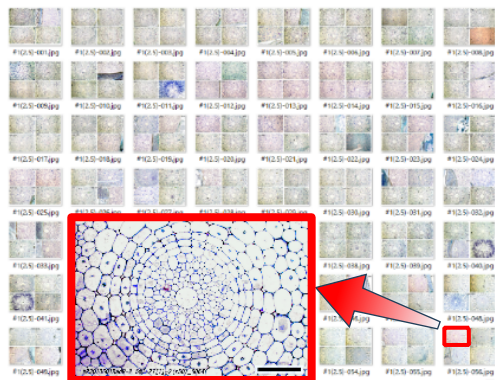
仁木輝緒・幹 康・斉藤 進

(同)ミキ音響イメージプロセッシング部門

連絡先 (teruo-niki@hb.tp1.jp)

根の中心柱木部維管束のうち、後生木部は先端始原を起源としているが、原生木部の起源については明確ではない。演者らはイネを用い、原生木部の形成起源部位を調べた。

播種 5~7 日後のイネ (*Oryza sativa* L.cv “ヒトメボレ”) 種子根の先端部位 (0~2000 μm) の連続薄切片 (図 1, 2), 及び先端から 1, 8, 10 cm 部位の切片



を作成した。

図 1 (Bar=50 μm)

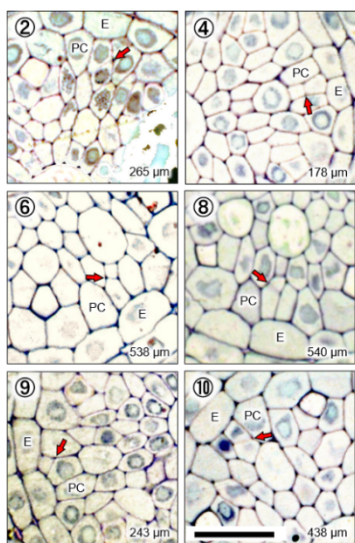


図 2 (Bar=20 μm)

図 3 は図 2 で観察された内鞘細胞の並層分裂の

位置を示す。

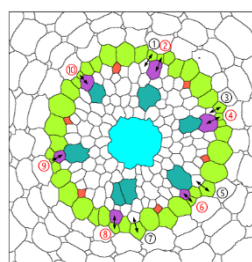


図 3

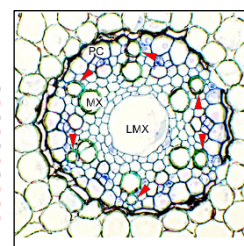


図 4

図 4 は先端から 8 cm 部位での組織構造であり、PC:内鞘, LMX:後生木部 II, MX:後生木部 I, 矢頭():原生木部である。

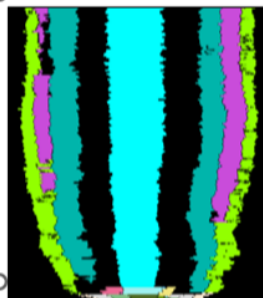


図 5

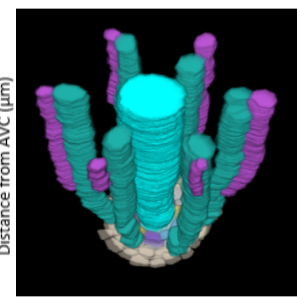


図 6

図 5, 図 6 は図 1 のデータファイルから原生木部、後生木部細胞の輪郭抽出、着色・透明化を行った後、FIJI の Plugin “Volume Viewer” と “3D Viewer” を用いて作成したものである。

[まとめと考察]

原生木部の形成起源は前形成層からとなっているが、内鞘細胞の関わりも議論されている。本研究では原生木部が、根先端 (RCJ) から 100~600 μm の位置の内鞘細胞の並層分裂により、生じることを示していた。このことは連続切片による Volume Viewer 及び 3D オブジェクト作成によっても示された。

X 線 CT を用いた水田で栽培したイネ根系のゲノムワイド関連解析

寺本翔太^{*1, 2)}・宇賀優作¹⁾¹⁾農研機構作物研究部門, ²⁾農研機構農業情報研究センター

*連絡先(teramotos154@affrc.go.jp)

【緒言】 イネの根系は養水分の吸収に影響する重要な形質である。根系を制御する QTL をマッピングし品種育成に用いることで、肥料の利用効率が改善された品種や干ばつなどの環境ストレスに強靱な品種の育成が可能になる。マッピングは環境の要因を最小限にするために屋内の水耕栽培など人為的に制御された環境下で実施し、その後マッピングした QTL の野外での効果を検証することが多い。しかし、人工環境と野外環境の違いからマッピングした遺伝子に期待通りの効果が認められない可能性がある。一方で、野外環境でマッピングする場合は土中にある根系を収集・計測する必要がありスループットが低くなる問題があった。水田土壌は比較的柔らかいため筒型の器具 (モノリス) を地面に打ち込み土壌ごと根を回収するモノリス法が省力で利用できる。しかし、回収した土壌から根を洗い出して 2D スキャナで定量化する作業に多大な労力がかかっていた。さらに、土壌から根を洗い出すことで土中の根の分布情報が失われてしまう問題があった。本研究では X 線 CT を用いた土壌中の水稻根系の非破壊計測手法を開発し、それらの問題を解決した。また、ゲノムワイド関連解析 (GWAS) による圃場での根系 QTL の検出を試みた。

【材料および方法】 GWAS には日本の水稻 133 系統を用いた。水田で通常条件で栽培し、全系統が登熟した後に直径 16 cm のモノリスを用いて深さ 10cm の土壌ブロックを 3 個体反復で採取した。収集した土壌ブロック X 線 CT で撮影後、3D 画像から根を抽出する画像処理フィルタ (特願 2023-131068、特願 2024-016261) を用いて CT 画像から根系画像を抽出した。得られた根系画像をイネの基部から半径 8cm でくり抜き、根の直径、根長、および根の伸長角度を計測した。ここで、イネの根は基部から放射状に発生することから、根長は根数と強く相関する。約 67 万の SNPs および InDels を用いて、血縁データが組み込まれた線形混合モデルで GWAS を行った。

【結果および考察】 GWAS により根の直径、根長 (根数)、および根の伸長角度からそれぞれ 1 つの QTL を検出した。根の直径の QTL は過去に同集団を用いて実施した水耕栽培での GWAS で検出された根数 QTL (*qNCR1*) と同一であった。この結果から、*qNCR1* は根数と根直径に影響を与える QTL と考えられた。しかし、*qNCR1* は今回の根長 (根数) の GWAS では検出されなかった。水耕栽培と野外栽培の環境の違いが影響しているものと考えられた。根長 (根数) の新規 QTL として *qNCR2* が検出された。候補領域内に根頂端分裂組織の維持に関わっている *OsGTE4* が座乗していたが、*OsGTE4* の近傍には SNPs および InDels が認められなかったため、さらなる検証が必要である。根の伸長角度の新規 QTL として *qRGA1* が検出された。この領域には根伸長角度に影響する既知の遺伝子が認められなかった。今後、ファインマッピングを行い原因遺伝子の絞り込みを行う必要がある。以上の結果より、水田での根形質について GWAS で候補 QTLs を取得することができた。土壌の収集から解析までに必要な労力が従来法と比較して 98%削減され、本手法の実用性が示された。

【謝辞】 本研究は JSPS 科研費 (22K14871) および JST CREST (JPMJCR17O1) の助成を受けたものである。

Root system architecture modification in response to soil nitrate availability is co-regulated by soil pH.

Mutsutomo Tokizawa^{*1)}

¹⁾Central Research Institute of Electric Power Industry

*連絡先 (tokizawa40492@criepi.denken.or.jp)

Nitrogen is one of the most important nutrients for plant growth, and most crop plants selectively absorb nitrate (NO_3^-) as a major nitrogen source. NO_3^- distribution in natural soils is often heterogeneous. To adapt the heterogeneous distribution, land plants have evolutionally obtained mechanism to better acquire NO_3^- by modifying root system architecture (RSA): inhibiting lateral root growth in poor NO_3^- -soil patches and stimulating lateral root growth in NO_3^- -rich soils. This response enables plants to concentrate their root growth on soil regions higher in NO_3^- (Fig.1).

Previous studies reported that the NITRATE TRANSPORTER 1.1 (NRT1.1) regulates lateral root growth inhibition under NO_3^- deficiency in *Arabidopsis*. NRT1.1 has been reported to not only transport NO_3^- , but also auxin under NO_3^- deficiency. NRT1.1 in lateral root primordia (LRP) which were grown on NO_3^- deficient soil regions transport auxin away from LRP, and this inhibits lateral root initiation/emergence. Recently, we discovered that a transcription factor SENSITIVE TO PROTON RHIZOTOXY1 (STOP1) regulates NRT1.1-mediated lateral root growth inhibition under NO_3^- deficiency (Tokizawa *et al.*, 2023, *PNAS*). In roots grown on NO_3^- deficient medium, STOP1 accumulates in the nuclei of LRP cells, and it activates *NRT1.1* expression (Fig.1). Because STOP1 is originally identified as a major responsible gene for plant acid soil tolerance, we examine whether medium pH affects the response of STOP1-mediated lateral root growth inhibition under NO_3^- deficiency. Interestingly, we observed that the lateral root growth inhibition under NO_3^- deficiency occurred at acid (pH 4.7) or mildly acid (pH5.7) conditions, but not at near neutral pH values. These results indicate that the lateral root growth inhibition in response to NO_3^- deficiency is co-regulated by soil acidity. I am looking forward to discussing with all of you at the conference why plants modify their RSA in response to NO_3^- exclusively under acidic conditions.

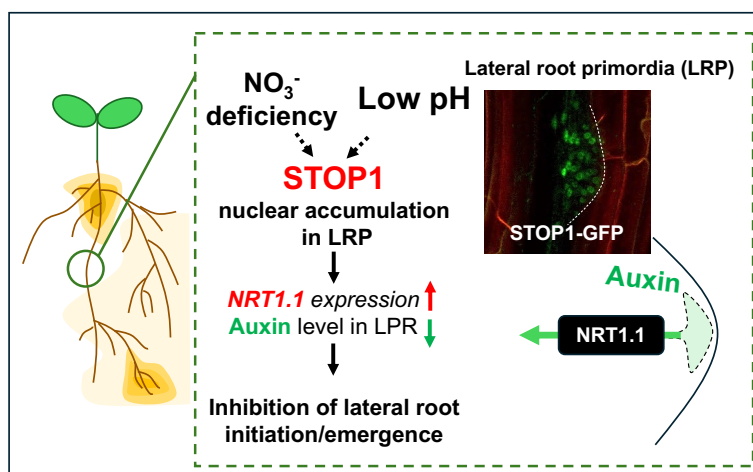


Fig 1. Schematic illustration of molecular mechanisms underlying STOP1-mediated root system architecture modification in response to soil nitrate status.

培養液の供給法が葉菜類の根の形態と外生成分の吸収能に及ぼす影響澤田佳穂^{*1)}・中野明正²⁾・淨閑正史²⁾・塚越覚³⁾¹⁾千葉大学大学院園芸学研究科, ²⁾千葉大学大学院園芸学研究院, ³⁾千葉大学環境健康フィールド科学センター

(aypa2423@chiba-u.jp)

噴霧耕とは、植物の根に培養液を霧状にして与える水耕法の一つである。噴霧耕の中でも培養液をより微細にして与えるシステム(以下、細霧耕)を用い、培養液の供給法の違いがコマツナの生育と根の形態に影響し、細霧耕では側根や根毛が発達することを定量的に示した(澤田, 2022)。しかし、他の葉菜類でも培養液の供給法が根の形態に影響を与えるかは不明である。そこで、培養液の供給法が3種の葉菜類の根の形態に及ぼす影響を調査した。また、根の形態変化は、根の機能の差につながる可能性が考えられた。カルシウム(Ca)は植物の必須元素であり、蒸散流に依存して根端から吸収されるとされている。ストロンチウム(Sr)はCaと同族の元素だが、必須元素ではないため、アポプラスト経路での吸収が想定され、特定のトランスポーターの寄与も考えにくい。そのため、植物に必須性のない任意の物質(以下、有用成分)の吸収を評価できると考え、Srを指標として根の形態の違いを利用した有用成分の効率的付与の可能性を検証した。

材料および方法 【実験1 培養液の供給法が葉菜類の根の形態に及ぼす影響】コマツナ'ひろみ'(野原種苗)、レタス'スマシャキ'(シンジェンタジャパン)、ホウレンソウ'NPL10号'(三菱ケミカルアクア・ソリューションズ)を培地(サカタのタネ)に播種し、閉鎖型苗生産システムで育苗した。2023年12月7日に、生育の揃った苗をNFT、細霧耕に16株ずつ定植した。同年12月23日に収穫し、生育および根の形態を調査した。

【実験2 コマツナへの有用成分の付与】コマツナ'ひろみ'(野原種苗)を供試して実験1と同様に育苗し、2023年6月5日に生育の揃った苗をNFT、細霧耕に25株ずつ定植した。同年6月14日に、NFT、細霧耕の培養液にSrを添加し、添加直前、添加24h、48h、および8日後のコマツナ中のSr濃度を、ICP発光分光分析装置(島津製作所)を用いて測定した。

結果および考察 【実験1】全ての品目の地上部および地下部新鮮重、地上部乾物率にシステムによる差はなかった。地下部乾物率はNFTより細霧耕で大きかった。コマツナではT/R比が細霧耕で低下した。最大根長や側根の生える割合はコマツナで最も大きく、レタスで最も小さかった。最大根長のシステムによる差については、NFTより細霧耕で小さかった。レタスでは、NFTより細霧耕で一次側根が多く、根端数も増加した。培養液の供給法が根の形態に及ぼす影響は品目により異なった。コマツナの根長や根端数にはシステムの影響は見られず、先行研究と異なった。これは栽培時期の違いによると考えられた。

【実験2】植物体中Sr濃度はSr添加後、時間の増加に伴い増加した。添加8日後にはNFTより細霧耕で高濃度のSrを含有していた。コマツナでは、細霧耕で発達した根がSrを多く吸収したと考えられ、有用成分を効率的に付与できる可能性が考えられた。

以上より、培養液の供給法、品目および季節は根の形態変化に影響し、コマツナは他2品目より根が発達しやすいことが明らかとなった。また、細霧耕では有用成分を効率的に付与できる可能性が示唆された。今後は細霧耕で根の形態を変化させ、普遍的に機能性葉菜類の効率的な栽培を可能にする条件を明らかにする。

塩分ストレスが C₄ 植物の生育, 光合成に及ぼす影響

鈴木健斗^{*1}・岩崎泰永¹⁾

¹⁾ 明治大学大学院農学研究科

^{*}連絡先(cf240212@meiji.ac.jp)

【緒言】 異常気象や不適切な栽培管理により塩類集積土壌が増加しており, そのような環境条件に適した作物生産が重要になる. 塩類集積土壌では塩分ストレスが発生し, 地上部では光合成能力の低下や活性酸素除去能力の低下による生育抑制, 地下部では養水分吸収能力の低下が生じる. ストレスに対する反応が異なるので, 耐塩性を調査する際は地上部, 地下部を分けて行う必要がある. C₄ 作物は C₄ 回路を持ち, 気孔閉鎖による体内水分量の維持や, CO₂ を濃縮して炭素固定をするため C₃ 植物よりも効率的に光合成を行うことができる. 予備的な実験結果から, NaCl を与えた C₄ 植物では NAR が増加, T/R 率が低下することが明らかとなっており, 塩分ストレス下でも根を発達させることで養水分吸収能力を維持し, 光合成速度を増加させたことが示唆された. 本研究では, 窒素肥料と塩分ストレスが生育と光合成能力に与える影響を比較, 調査した.

【材料および方法】 トウモロコシ‘ゴールドドラッシュ 86’, ソルガム‘メートルソルゴー’, エンバク‘アムリ 2’を供試し, 2023 年 9 月 29 日から 12 月 14 日まで明治大学黒川農場実験用温室にて栽培した. パーミキュライトを培地として播種し, 2 週間後にポリポットへ鉢上げした. 培養液は大塚 A 処方を使用して EC (dS/m) を 1.2 (N-1) と 2.4 (N-2) に調整, それに NaCl を加えて EC を 5.0, 10.0 にした培養液を浸して栽培した. 解体調査は計 3 回行い, 葉面積, 地上部, 地下部新鮮重, 乾物重を測定し, RGR, NAR, LAR, LMA, T/R 率を算出した.

【結果および考察】 トウモロコシ, ソルガムでは EC が高いほど葉面積が低下し, 地上部乾物重, NAR, LMA が増加した(第 1 表). 葉面積が低下しているにも関わらず NAR が増加した要因は, 葉を厚くして柵状組織を増やし, 効率的に光を吸収したことが考えられる. 両作物で N-2 区の地下部乾物重は NaCl による有意差がみられなかったが, T/R 率についてはトウモロコシで増加した. この違いは栄養成長期間の長さの違いに起因しており, トウモロコシの方が収穫期が早く, 塩分ストレス下で早期に生殖生長へ切り替わったことがその要因と考えられる. 全ての作物で窒素施用と NaCl の間に交互作用はみられなかったが, 特にエンバクでは N-2 区で NAR が維持される傾向がみられた. 塩分ストレス下においても, C₄ 作物は蒸散を抑制するために気孔を閉じ, 根を発達させて養水分吸収を維持する. C₄ 回路では CO₂ を濃縮して固定し, 体内 CO₂ 濃度は高くなる. そして葉を厚くして柵状組織を増やすことで効率的に光を吸収した. 光合成に必要な CO₂, 養水分, 光が十分に供給されることで光合成速度を維持し, 塩分ストレスに適応したことが考えられる.

Table 1. Effects of nutrition and NaCl on growth

N	NaCl	Leaf Area (m ²)			Shoot Dry Weight (g)			Root Dry Weight (g)		
		maize	sorghum	oats	maize	sorghum	oats	maize	sorghum	oats
EC1.2	×0	0.125 ± 0.013 ^a	0.065 ± 0.001 ^{cde}	0.161 ± 0.014 ^a	6.035 ± 0.977 ^b	2.925 ± 0.184 ^c	7.228 ± 0.747 ^a	0.923 ± 0.130 ^{ab}	1.253 ± 0.108 ^{ab}	1.730 ± 0.506 ^a
	×1	0.118 ± 0.009 ^{ab}	0.072 ± 0.005 ^{abc}	0.105 ± 0.026 ^{ab}	7.903 ± 1.087 ^{ab}	3.670 ± 0.436 ^{abc}	4.688 ± 1.129 ^{ab}	0.918 ± 0.195 ^{ab}	1.453 ± 0.188 ^{ab}	1.088 ± 0.234 ^{ab}
	×2	0.109 ± 0.009 ^b	0.046 ± 0.007 ^e	0.076 ± 0.010 ^b	6.533 ± 0.916 ^{ab}	3.268 ± 0.480 ^{bc}	3.940 ± 0.542 ^b	0.808 ± 0.076 ^b	1.148 ± 0.136 ^b	0.883 ± 0.065 ^b
EC2.4	×0	0.137 ± 0.014 ^a	0.087 ± 0.010 ^a	0.155 ± 0.042 ^a	8.118 ± 1.616 ^{ab}	3.735 ± 0.402 ^{abc}	6.500 ± 2.206 ^{ab}	1.178 ± 0.139 ^a	1.388 ± 0.239 ^{ab}	1.223 ± 0.524 ^{ab}
	×1	0.128 ± 0.004 ^{ab}	0.079 ± 0.006 ^{ab}	0.124 ± 0.013 ^{ab}	9.020 ± 1.156 ^a	4.178 ± 0.278 ^a	5.963 ± 0.468 ^{ab}	1.013 ± 0.199 ^{ab}	1.563 ± 0.123 ^a	1.018 ± 0.187 ^{ab}
	×2	0.115 ± 0.005 ^{ab}	0.055 ± 0.004 ^{de}	0.091 ± 0.004 ^b	7.630 ± 0.367 ^{ab}	3.855 ± 0.090 ^{ab}	4.760 ± 0.580 ^{ab}	0.935 ± 0.042 ^{ab}	1.630 ± 0.041 ^a	0.785 ± 0.061 ^b
N		ns	*	ns	*	**	ns	*	**	ns
NaCl		*	**	**	ns	*	**	ns	ns	**
N × NaCl		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

^a Means (n=4) ± standard error

^b Different letters compare the salinity and nutrition treatments, according to the Tukey test (p<0.05).

* ** significant at 0.05 and 0.01 levels, respectively; ns = non-significant

オオムギの湿害発生過程における地上部・地下部の成長と根圏酸化の関係

芝日菜子^{*1,2)}・江上泰広³⁾・檀浦正子⁴⁾・高梨聡⁵⁾・塩野克宏¹⁾¹⁾福井県立大学大学院生物資源学研究科, ²⁾日本学術振興会特別研究員, ³⁾愛知工業大学機械学科, ⁴⁾京都大学大学院農学研究科, ⁵⁾森林総合研究所関西支所

*連絡先(s2493005@g.fpu.ac.jp)

我が国では水はけが悪い水田転換畑でオオムギなど畑作物の湿害(生育阻害)が問題となっている。排水の良い土壌には根の呼吸に十分な酸素が存在するが、湛水すると数日で酸素濃度が低下する。湛水が継続すると土壌の還元化が進行し、植物に毒性のある物質が発生する。このように湛水した土壌では、植物にとって有害な複数のストレス要因が連続的に変化する。さらに、大気からの酸素の溶解込み(Miyashita and Shiono, Plant Root, 2022)と根による根圏の酸化(Larsen et al., Plant Soil, 2015)は、土壌の時間的、空間的な酸素状態を変化させる。植物の湿害は、時間的、空間的に変化する複数のストレス要因によって発生すると考えられている。そのため、私は湿害回避には、根系とストレス要因の起点となる酸素の時空間的変化を理解する必要があると考えた。私の所属研究室は、酸素の時空間分布を非破壊で定量できる2次元酸素オプトードを確立した(Shiono et al., Front. Plant Sci., 2022)。これまでの湿害研究では、過湿ストレス下の葉の枯れ上がりなど地上部の成長は追跡されており、下位葉から枯れ上がることがわかっている。しかし、地下部の成長や根圏酸化状態は追跡されていない。本研究では畑作物の湿害発生メカニズムを理解するために、2次元酸素オプトードを用いてオオムギの湿害発生過程における地上部・地下部の成長と根圏酸化はどう関連しているのかを理解することを目的とした。

オオムギ *Hordeum vulgare* (Morex) を排水土壌で14日間栽培した後、湛水させて21日間、栽培を継続した(深度3 cm)。湛水期間中、3日に1回、地上部の長さ、SPAD値、葉齢を測定し、オプトード測定系で撮影し根圏酸化状態を計測した。同様の方法で栽培し、3日に1回の生育データ測定とともにガラス面に露出した根系の状態をフラッドベッドスキャナ法(Dannoura et al., Plant Root, 2008)で計測した。湛水21日後、各種生育データとともに、洗い出した根をフラッドベッドスキャナで画像取得し、WinRHIZOおよびImageJを用いて表面積と総根長を計測した。その後、乾燥重量を計測した。

土壌が湛水したときの根からの酸素漏出を観察すると、湛水前に伸長していた根では測定期間中酸素漏出は確認されなかった。一方、湛水後に発根した根では酸素漏出が確認された。またその酸素漏出は数日経つと消失し、その根の伸長速度を測定すると、伸長停止と酸素漏出の消失は同時期に生じていた。湛水21日後、第1葉、第2葉の枯れあがりが見られた。葉の生育阻害の指標となるSPAD値は、第1葉は湛水6日目から、第2葉は湛水後9日目から低下しており、生育阻害を受け始めていた。湛水後6日目から伸長した根の伸長速度は湛水後12日目に低下した。この結果から、地上部の枯れ始めた後に根の伸長速度が低下することがわかった。以上のようにオオムギの湿害発生過程において、地上部の枯れ上がり後に根の伸長速度の低下、伸長停止と同時期に酸素漏出の消失が発生していることがわかった。

本研究を進めるにあたり、Ronnie N. Glud 教授, Morten Larsen 博士, 小栗一将博士上谷尚矢氏, 荒木僚太氏, 藤原七海氏からオプトード装置の開発・改良に関わる技術的支援を受けた。本研究は科研費(JP16KK0173, JP22K05587, 24KJ1881)の支援を受けて実施した。

根が侵入できない硬い培地上で生育できるシロイヌナズナの突然変異株群の

原因遺伝子探索

飯田秀利*

東京学芸大・教育学部・生命科学分野

*連絡先 (iida@u-gakugei.ac.jp)

陸上植物の根の土中への陥入は、水分と栄養を吸収する上でも、地上部を支える上でも極めて重要である。しかし、土中に貫入できない時、根は植物体の生存のためにどのように対処するのであろうか。我々は、この対処メカニズムを明らかにするため、根の侵入を許さず、野生型を死に至らしめる硬い培地でも生存できる突然変異体をスクリーニングし、その結果を先に発表した (Tojo *et al.*, *Frontiers in Plant Science* 2021)。方法は、突然変異誘発のために $^{12}\text{C}^{6+}$ イオンを照射したシロイヌナズナの種子を 5.0%ゲルライト 1/2MS 培地の硬い表面に播種し、10 日間生育させる、というものであった。この条件では野生株は死に至るが、生育し生き残った株を第一次候補とした。この突然変異株群の種子を更に同じ培地に播種し、生き残った株を最終候補として、その後の解析に用いた。この実験条件において、野生株の根は培地表面から浮き上がるように空中に浮き上がる（つまり、根は培地から水分も養分も吸収できない）ので死に至るのに対し、これらの変異株群の根は共通して硬い培地上を這うように伸びるので生き残れる。この生き残った変異株は、這うという表現型故に *creep* 変異株と名付けられた。我々は現在5株を単離しているので、それぞれを *creep1* - *creep5* と名付けた。今回、この5株の表現型の原因遺伝子を特定する目的のために次世代 DNA シークエンシングにより、*creep* 変異株群の全ゲノムの塩基配列を決定した。本発表では、この研究結果を基に根の振る舞いについて考察する。

根系形態の改変による高品質農産物の効率的生産に向けた戦略

小河樹^{*1)}・中野明正²⁾・塚越覚³⁾・淨閑正史⁴⁾¹⁾千葉大学園芸学研究科, ²⁾千葉大学園芸学研究院, ³⁾千葉大学環境健康フィールド科学センター
(20h1063f@student.chiba-u.jp)

緒言:養液栽培は、日本の生産現場においても普及が進み、現在 2,000 ha であり、施設生産の 3%を占めるに至っている。システム別の統計データのある 2009 年の情報では、養液栽培の総面積 1,411 ha の内、たん液型、NFT、噴霧型など、根が直接視認できるシステムが 24%を占め、実際の生産現場においても根の量や形態と、それらが生産物の品質に与える影響を結び付けて評価することが可能である。そこで本研究では、これらの実用的かつ根の調査が比較的容易な栽培システムにおいて、根の量および形態が地上部に与える影響を示す予備的な知見を紹介するとともに、今後の研究の方向性および戦略について整理したので報告する。

栽培システムの事例:本研究では、上記に挙げた、たん液型水耕(DFT)と、NFT、噴霧耕を対象として、研究を進める。株式会社いけうちによって開発されたエアロポニックシステム、通称セミドライフォグシステム(以下、細霧耕)で葉菜類を栽培すると、NFT や DFT と比較して、根毛や根端数の増加といった根の特異的な形態変化が起きた(澤田, 2022)。一方、根の内部構造であるカスパー線はアポプラスト経由の成分吸収を阻害するが、根端ではカスパー線の発達が見られない。以上のことから細霧耕による根の形態変化が作物の吸収機能にも影響を与える可能性が考えられる。また NFT でキュウリを生産した事例(Samba, 2024)においては、施肥の量的管理により根量の増加と出液速度の増加が認められた。

根の量・形態と環境情報のデータセットの整備:今後の研究では、DFT と NFT と噴霧耕において、根の形態に与える影響を品目ごとに定量化して記述していくことを目標とする。根においては可塑性があるが、示したような養液栽培システムにおいては、環境を制御することが比較的容易であるため、温度や溶存酸素、養分濃度などの環境データと根の量や形態などのデータとを紐づけたデータセットを整備することを提案する。

根の形態情報と養分吸収能力の関係の解明:それぞれのシステムで特徴的な根系が形成されることが想定される。特徴的な根系において、作物の吸収能力に影響を与えているかどうかを、多様な成分の吸収実験から解明する。

養液栽培ならではの地上部の成分制御の可能性の検証:近年の養液栽培では養液の成分を変化させることにより消費者のニーズにあった生産物が生産されてきた。例えば低カリウムのレタスやトマトなどの研究例がある一方で、カルシウムや亜鉛などのミネラルの富化した野菜も生産されている。これは、特に根の形態の変化を伴わない品質制御と考えられる。今後の研究では、根の形態を環境制御により改変して、任意の物質を効率的に吸収できるかを検証する。

吸収される物質の違い:根は、分裂が盛んな根端から成熟した基部まで多様な齢の細胞から構成されるとともに、成熟に伴う組織のスぺリン化の程度の違いになどに由来する物質の吸収の違いが生じている。吸収される物質についても、①植物に必須とされるカリウム等への影響はもちろん、②トランスポーターの存在が確認されているが量的な寄与は少ないと考えられるアミノ酸類への影響、③植物体に本来含有されていない成分の吸収について評価する必要がある。

無加温パイプハウスにおける野菜の周年栽培時の連続不耕起栽培が

各品目の根系発達に及ぼす影響

岡元英樹¹⁾・地子 立²⁾・古山真一³⁾¹⁾道総研天北支場, ²⁾(株)サカタのタネ, ³⁾道総研上川農試

*連絡先(okamoto-hideki@hro.or.jp)

【目的】 北海道では、無加温パイプハウスを用いて厳冬期においても葉菜類が生産可能な技術（地子・高濱，道総研農試集報，2021）が提案されたことにより、野菜の周年栽培が広がりつつある。こうした中、演者らは周年栽培においてマルチフィルムを張ったまま耕起等を省略し、多品目を植え替える「連続不耕起栽培」について検討を行っている（地子・岡元，北園談，2020；岡元ら，北園談，2021）。そこで本報では、連続不耕起栽培が各品目の根系発達に及ぼす影響を調査したので報告する。

【材料と方法】 試験は道総研上川農試（比布町，褐色低地土）の無加温パイプハウスを用いて 2021 年 9 月から 2022 年 8 月にかけて実施した。冬作型（リーフレタス，9-1 月）以降の早春作型（チンゲンサイ，2-4 月），夏作型 2 連作（スイートコーン，4-6 月と 6-8 月）と年 4 作の周年栽培体系を導入し，冬作型以降不耕起栽培を実施した「不耕起区」と，耕起区として同様の体系で毎回耕起を実施した「4 回耕起区」，冬作型後 3 ヶ月強休閑した後に夏作型を耕起して連作した「3 回耕起区」をそれぞれ 2 反復設けた。全区共通で，9 月上旬に基肥で $N : P_2O_5 : K_2O = 15 : 15 : 15$ kg/10a，各夏作型の追肥で 4 月下旬と 7 月上旬に $N : P_2O_5 : K_2O = 5 : 5 : 5$ kg/10a を各々土壌表面に施肥した。各作型において収穫時に収量を調査し，根を採取した。根の採取は①早春作型と夏作型収穫時に株元と株間で表層（0 - 5 cm）を 100ml 容量の採土管で 3 反復採取し，土壌物理性測定後に根を洗い出す，②各夏作型の収穫翌日に各区の株を 3 個体ずつ掘取り，根を洗い出す，の 2 方法で行い，根系解析ソフト（Winrhizo Pro）を用いて根長を直径別（0.5 mm 未満，0.5 - 1.0 mm，1.0 mm 以上）に測定後，70℃で 48 時間以上通風乾燥して根重を測定した。

【結果と考察】 各区とも冬作型での収量は北海道の目標値を上回ったが，早春作型では下回った。両夏作型での収量は目標値とほぼ同等で，不耕起区は両耕起区よりやや高かった。

採土管による調査（①）で不耕起区の根系をみると，不耕起 1 回目の早春作型では不耕起により株間，株元とも根長が短くなったが，根重は株間では減少せず，株元で減少した。一方，不耕起 2 回目の夏作型 1 作目では株間，株元のどちらも根長，根重ともに増加し，不耕起 3 回目の夏作型 2 作目では株元では耕起区と同様であったが，株間では不耕起により根長，根重ともに減少した。掘取り調査（②）で不耕起区は，夏作型 1 作目では根長の合計および根重は耕起区と同等だったが，直径 0.5 mm 未満の根が耕起区より長く，それより太い根は逆に短かった。夏作型 2 作目では太さにかかわらず耕起区より根長が短く，根重は軽かった。

不耕起区の土壌物理性は早春作型後では 4 回耕起区，夏作型 1 作目後では両耕起区よりそれぞれ株元で悪化した，株間では判然としなかった。一方，夏作型 2 作目後では株元，株間ともに両耕起区より悪化した。

以上のことから，不耕起によって根系発達は抑えられ，表層，垂直方向に集中し，根長が短く，細根が少なくなる傾向にあり，その傾向は夏作型 2 作目において特に顕著であった。ただし，収量性への影響は小さいことから，今回の試験条件の範囲では，連続不耕起栽培は実用性が高いと考えられた。

空気電池による電気刺激がキャベツセル成型苗の生育に及ぼす影響

本間知夫^{*1,2)}・柳澤志温²⁾・富岡厚則³⁾

¹⁾前橋工科大学工学部生命工学領域, ²⁾前橋工科大学工学部生物工学科, ³⁾(株)大和製作所

*連絡先 (thomma@maebashi-it.ac.jp)

1. 背景・目的

作物栽培では効率的な苗の生育のために化学肥料や土壌改良材などが利用されるが、近年、様々な要因で肥料を含む農業資材価格が高騰し、農家は厳しい状況に追い込まれている。最近、空気電池の原理を適用した電気刺激により作物苗の生育が促進されるようで、その作用機序を知りたいとの相談を受けた。電気刺激が植物の生育に及ぼす影響を調べた研究例はこれまでに報告されている。しかしその機序は不明な点が多く、またいずれも外部電源を使ったものであった。空気電池の原理を適用した系では外部電源無しに電気刺激を継続的に行うことができる。そこで本研究では、空気電池の原理を適用した電気刺激が苗の生育及び生理機能に及ぼす影響を調べ、この方法の可能性・実用性について検討することを目的として実施した。

2. 材料・方法

材料:キャベツセル成型苗(品種:いろどり or 金春, 200 本/トレイ, 播種後 3~6 週間)を JA 前橋市野菜育苗センターより購入し使用した。

方法:培養土をプランターあるいはプラスチックトレイに入れて苗を移植した。負極として Mg 板を使用し、プランターの場合は培養土を入れる前に底部に埋めた。プラスチックトレイの場合は空のトレイの底に Mg 板を置き、その上に苗を移植したトレイを置いた(トレイ底面には穴を開け、Mg 板は常に水に浸らせて苗を植えた土中の水と導通がある状態にした)。



第 1 図 空気電池の適用方法

移植した苗の周りに活性炭粉末をまき(0.6~2.6 g), 空気電池を適用するホトレイに(第 1 図)。

電圧測定:テスターの陽極端子は活性炭をまいたあたりの土壌に挿し、陰極端子はプラスチックトレイの場合は Mg 板に直接、プランターの場合は Mg 板に接続したケーブルに接触させ、負荷されている電圧を測定した。

生理活性測定:電気刺激が生理機能に及ぼす影響を調べるため、根系機能として根系呼吸活性を TTC 法で、葉の機能として光合成活性を Mini-PAM (WALZ, (株)NAMOTO)で調べた。

生育量評価:苗を移植して 1~2 ヶ月間の刺激後、苗を掘り出して地上部と地下部に分け、70℃で一晩乾燥させた後、それぞれの乾物重量を測定することで生育量評価を行った。

3. 結果・考察

活性炭(土壌)と Mg 板の間には 1.3~1.5 V の電圧が栽培期間中、常に掛かっていたが、土壌が乾いてくると電圧は小さくなった。また灌水等で活性炭が移動したせいか、活性炭をまいていない場所でも同じ電圧が掛かっていた。電気刺激により生理活性は増大する傾向が見られたが、生育量に差は見られなかった。今回セル成型苗を使ったため、根が巻いた状態のセルの形の塊になっていて、そこからさらに根が伸びていた。その塊に電気刺激が加わったために効果が現れにくかった可能性がある。今後は苗の種類を変える、播種段階から刺激を行うなど、さらなる検討を行う予定である。

種子直下へのリン酸品所施肥が直播タマネギの生育ならびに根系発育に及ぼす影響亀岡笑^{*1)}, 田島亮介¹⁾, 長南友也^{1,2)}, 宮下広大³⁾, 服部壮見³⁾, 西島宝恵³⁾, 林怜史³⁾¹⁾東北大学大学院農学研究科, ²⁾農研機北海道農業研究センター,³⁾酪農学園大学農食環境学群

*連絡先(emi.kameoka.c8@tohoku.ac.jp)

【目的】黒ボク土圃場が多い十勝地方では近年、直播タマネギの栽培面積が拡大傾向にある。タマネギの根量が少ないことを踏まえると、リン酸吸収係数が極めて高い黒ボク土場において直播タマネギの初期生育を改善するためには、根の発生位置とリン酸施肥位置を一致させる局所施肥が効果的だと考えられる。実際にこれまで、種子直下へのリン酸局所施肥が直播タマネギの初期生育ならびに球肥大に対して促進効果を示すことが報告されたが(臼木ら 2015, 2016, 2018)、根系発育への影響については未評価であった。本研究では、種子直下へのリン酸局所施肥が直播タマネギの生育ならびに根系発育に及ぼす影響を明らかにしようとした。

【方法】北海道農業研究センター(札幌市)の黒ボク土画場で、2019~21年の3年間にわたって栽培試験を実施した(供試品種オホーツク 22)。施肥処理として「全層施肥(全層)」「リン酸直下施肥(P直下)」をそれぞれ3反復分設け、P直下区では全層施肥を行った後に、播種と種子直下への局所施肥を同時に実施した(局所施肥したリン酸は10kg/10aで総施肥品は全層区と同一)。各試験年のタマネギ生育期間中は、出葉数を評価するとともに、株直下・条間の深さ別根系(5cm×4コア、計20cm深さ)を、約2週間おきにコア・サンプラー(DIK-1621, 大起理化工業)を出いて採取した。株直下の根長は、タマネギ鱗茎の直径がコアの直径を超える7月下旬まで実施し、同じタイミングで茎葉部も採取した。7月下旬から8月中下旬までの期間には、条間の深さ別根系を株直下と同じ方法で採取した。各深さの根系は、土地を流水で丁寧に洗い出したのち、根長解析マクロ(Tajima and Kato 2013)に改良を加えたものを使用して、5段階(<0.1 mm, 0.1-0.2 mm, 0.2-0.5 mm, 0.5-1.0 mm, 1.0 mm<)の直径別根長を測定した。播種後146~155日目に、タマネギ鱗茎50球を収穫し、園芸作物の調査基準(道総研花・野菜技術センター2024)に従って2L~Sまで規格分けした。

【結果と考察】2019年は目立った干ばつや過湿がなく、気温もおおむね平年並みであった。2020年は4月が平年に比べて低温で推移し、5~6月ならびに9月の日射量が平年を下回った。2021年は7~8月上旬の気温が高く著しく推移し、同期間の降水量がほとんどなく、タマネギ収量が例年に比べて全道的に大きく低下した。分散分析結果から、播種後52~55日の出葉数ならびに播種後58~89日の茎葉乾物重に対して、P直下施肥による有意な増加効果が認められた。根系発育に関しては、播種後70~78日の株直下において、いずれの深さ根長もP直下施肥によって増加傾向を示した。113~117日では、5-10 cmならびに10-15 cm深さの条間根長がP直下施肥によって有意に増加し、この根長増加には0.1~10 mm直径根の増加が寄与していた。分散分析結果より、2019年ならびに2021年において、タマネギ規格内収量ならびに2L収量に対してP直下施肥による増収効果が示され、この増収傾向は2021年において特に顕著だった。これらの結果から、黒ボク土条件でのタマネギ直播栽培において、種子直下へのリン酸局所施肥は、タマネギの早期出菜、垂直・水平方向の根系発育、茎葉発育を安定的に促進することが明らかとなった。さらに、P直下施肥に伴う茎葉と根系の生育促進効果は、干ばつ年において、より優れた鱗茎肥大効果をもたらす可能性が示された。

サツマイモ塊根の形状および表皮症状の3D データベースの作成

田口和憲¹⁾・児玉晋洋²⁾ 西中未央¹⁾・郭威²⁾

¹⁾国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 中日本農業研究センター

²⁾東京大学大学院農学生命科学研究科附属生態調和農学機構

*連絡先 (ktaguchi@naro.affrc.go.jp)

近年、日本産のサツマイモは、高品質かつ食味に優れるため、国内市場だけでなく、海外からの評価も高く、輸出も堅調に伸びている。海外輸出用のサツマイモは冬季海上輸送中に腐敗が多発しており、輸送中におけるサツマイモの腐敗を少なくするために腐敗リスクが高く、長期貯蔵や輸出に向かない損傷イモを出荷前の輸出対象から効率的に除外する手法の開発が求められていた。そこで、演者らは、冬季に貯蔵し、水洗したサツマイモ塊根(輸出用の主要品種「べにはるか」)の様々な形状や損傷程度が異なる塊根を光学カメラで撮影し、そこから 3D データを効率的に得るパイプラインを開発した(児玉ら, 2024)。さらに、打撲損傷を与えた塊根に軟腐病菌を接種して腐敗発生の有無を調査し、取得した塊根アバターから腐敗原因になった傷を特定し、それらを教師データに活用して学習した AI を開発し、腐敗リスクが高く、長期貯蔵や輸出には向かない塊根を選別する AI 選別装置を開発した(田口ら, 2024)。一方、青果用のサツマイモは、国内向けに出荷する際、形状、大きさ、重さなどにより細かく規格分けされるとともに、塊根の形状、病害虫の被害痕跡、損傷、皮むけ、打撲の程度など、塊根の形状および表皮症状の有無と大小も選別対象になる。このとき作業者は、自らの経験等に基づいて塊根の形状と表皮症状を目視判定しているが、これには豊富な経験に基づいた熟練が不可欠である。また、大量に箱詰めされるサツマイモの中から、目視判定により塊根を1本ずつ見分ける作業について高精度化、高速化を実現し、個人差を解消することは困難である。そこで、サツマイモ塊根の様々な形状および表皮症状を精度よく識別できる AI を効率的に開発するため、様々な塊根の形状および表皮症状のデータベースを作成してそれらのカタログ化を行った。材料は、2021年に農研機構中日本農業研究センターの谷和原畑圃場で収穫し、冬季間貯蔵庫で保管した遺伝資源保存用サツマイモ品種・系統の中から、国内市場流通している青果用品種と同系列である表皮色が赤紫の塊根であり、様々な形状および表皮症状が幅広い変異で認められた塊根 263 本である。これら塊根は、水洗して風乾した後、児玉ら(2024)の方法により塊根の3D データを取得した。3D データを取得した塊根は、目視判定により、形状については「販売可能形状」、「棒状形状」、「丸形状」、「異常形状」の4種類、表面症状は、「条溝」、「穴」、「皮目」、「折れ」、「皮むけ」、「えぐれ」、「ヤラピン」、「皮脈」、「傷」および「打撲」の10種類にアノテーションして画像分類した(第1図)。



第1図 幅広い外観・形状の変異 DB を作成し、取得した3D データからレンダリングした画像(例)

ウキクサ由来植物生育促進細菌を用いた養液栽培レタス発根促進

渡邊高人^{*1)}・田中靖浩²⁾・中野明正³⁾¹⁾伯東株式会社, ²⁾山梨大学生命環境学部, ³⁾千葉大学宇宙園芸研究センター

*連絡先(watanabe-takato@hakuto.co.jp)

<研究目的>

細菌の中には植物の成長促進を促す PGPB (Plant Growth-Promoting Bacteria) が存在することが知られている。我々はこれまでに、浮遊性の水生植物であるウキクサを対象に、本植物の生育を促進する細菌の検索を進めてきた。しかし、取得した PGPB のウキクサ根あるいは葉状体(葉)への導入にあたっては、種々の微生物が存在する条件下では、当該 PGPB が定着しにくい等の問題があった。その一方で、ウキクサのような水生植物の PGPB は、水耕栽培における野菜に対する生育促進効果も期待できる。そこで本研究では、ウキクサの根および葉状体に付着・定着しやすい細菌群にターゲットを絞って PGPB を検索・取得し、それらが養液栽培時のレタスに対しても生育促進効果を有するかについて検討することとした。

<研究方法>

武川ら(日本微生物生態学会第 33 回大会講演要旨集 p.58)により、ウキクサの根および葉状体と親和性が高いと推定された細菌系統群から構成される研究室保存の細菌 54 株を PGPB のスクリーニング源とした。ウキクサ(コウキクサ; *Lemna minor*) の PGPB 検索は岩下らの方法(日本水処理生物学会誌 57 (1), 1-9, 2021) に従い行った。

取得したウキクサの PGPB をレタスの養液栽培に導入する試験に際しては、Control 区、産生物(PGPB を NPB 培地にて培養後に 121℃, 15 分滅菌後、遠心分離で沈殿物を回収)添加区、菌体接種区の 3 試験区を設定した。菌体/産生物の接種/添加条件は次のように設定した。1.5 cm 立法の黒色ウレタンスポンジにレタスを播種し 7 日目に培養液(OAT-A 処方 0.25 単位)に OD₆₆₀=0.1 となるように PGPB/産生物を懸濁し、スポンジを浸漬することにより接種/添加した。その 7 日後の定植時に栽培用の培養液(OAT-A 処方 0.5 単位)3L に OD₆₆₀=0.001 となるように PGPB/産生物を接種/添加し、定植から 14 日目に栽培を終了し地上部および根部の各評価を行った。

<研究結果と考察>

スクリーニングに供した 54 株中、19 株がウキクサの生育を 1.5 倍以上促進した。このうち、最も生育促進効果が高かった 1RD-8 株について、レタス養液栽培時の生育促進効果について調べたところ、地上部新鮮質量に関しては、産生物添加区で 1.2 倍、菌体接種区で 1.4 倍、総根長に関しては、産生物添加区で 1.1 倍、菌体接種区で 1.2 倍の生育促進効果が確認された。また、菌体接種区では側根の発生が多くみられた。

1RD-8 株は陸生植物の PGPB が有する生育促進因子としてよく知られているインドール 3-酢酸(IAA)生産能、シデロフォア生産能、不溶性リン可溶化能は有しておらず、本菌株はこれらとは異なる植物生育因子を産出している可能性が示唆された。赤外吸収分光法の解析により PGPB 産生物は多糖類と推定されたことから、多糖類がレタスの成長促進に関与していることが示唆された。今後、PGPB が植物遺伝子に与えた影響を、植物側の RNA-seq 解析を行い評価する予定である。

もみ殻炭の施用がダイコンの生育に及ぼす影響

塔野岡(寺門) 純子^{*1)}・垣内 悠太郎¹⁾・徳田 進一¹⁾

¹⁾農研機構 中日本農業研究センター

^{*}連絡先 (tonokaj651@affrc.go.jp)

もみ殻炭は古くから土壌改良資材として利用されており、土壌の透水性、保水性、通気性の改善等に効果がある事が知られている。また、もみ殻炭は難分解性であることから、農地への施用により炭素が土壌中に貯留され、温室効果ガスの排出抑制への取り組みの一つとしても注目されている。本研究ではもみ殻炭の施用量が異なる土壌でダイコンを栽培し、生育への影響を調査した。

【試験方法】

供試土壌(農研機構圃場内、腐植質厚層多湿黒ボク土)にもみ殻炭を容積比で 0%(土のみ、対照区)、20%、40%、60%、80%、100%(もみ殻炭のみ)混合し、普通化成(化成8号)をN, P₂O₅, K₂Oともに12kg/10a相当添加した後、25 L 深型プランターに充填した。9月下旬にプランター当たりダイコン種子(品種「耐病総太り」)を5粒×3か所播種し、適期に3回間引を行い1本立ちにした。水道水を約1日おきに、全ての区で同量ずつ灌水し、無加温のビニルハウス内で約3か月間栽培した。植物体については、発芽率、草丈、新鮮重、乾物重、根長、SPAD値および植物体成分、土壌については土壌pHおよび土壌成分について調査を行った。

【結果および考察】

ダイコン栽培前の供試土壌の化学性を分析した結果、もみ殻炭の施用量に応じたカリ濃度の上昇が確認された。また供試土壌(pH 6.6)にもみ殻炭(pH 9.6)を体積比で80%混合して、pHは1上昇する程度(pH 7.8)であった。

発芽率については、もみ殻炭100%区で遅れが確認されたが、それ以外の区では良好であった。播種から30日程度までの生育初期では、もみ殻炭80%区までは対照である同0%区に比べて地上部ならびに地下部の生育促進が確認されたが、同100%区では生育の抑制が認められた。一方、地下部の肥大が旺盛になる生育後期では土壌へのもみ殻炭の混合割合が高くなるにつれ、葉におけるSPAD値の低下と生育の抑制が確認された。

これらの結果から、生育初期においては、もみ殻炭施用による土壌の化学性ならびに物理性の改善効果による生育促進、生育後期においては土壌をもみ殻炭に置き換えたことによる肥料成分の不足や吸収抑制等による生育停滞が推定された。今後はもみ殻炭施用によるダイコンの初期生育促進と根部肥大期以降の生育停滞のメカニズムを明らかにするとともに、もみ殻炭施用時の作業性を考慮し、作物栽培におけるもみ殻炭の適正な施用量ならびに施用方法を検討していく予定である。

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務の結果得られたものである。

剪定枝炭を施用したポット栽培におけるニホンナシの生育

堀井幸江^{*1)}・郭永²⁾・井上博道¹⁾

¹⁾農研機構 果樹茶業研究部門, ²⁾農研機構 植物防疫研究部門

*連絡先 (horiis404@affrc.go.jp)

農地へのバイオ炭施用は、土壌への炭素貯留が可能であるだけでなく、バイオ炭の理化学的特性から土壌の pH 矯正や、土壌の透水性、通気性の改善等の効果が期待できる。果樹栽培では、樹の管理において剪定枝が発生するため、剪定枝を炭化し農地に施用すれば、未利用バイオマスの活用につながる。本研究では、ニホンナシ剪定枝炭を土壌に混和する際の最大許容施用量を把握するため栽培試験を行い、混和した剪定枝炭が土壌化学性やニホンナシの生育、いや地を想定した生育阻害の軽減に及ぼす影響を調査した。

苗木育苗圃場の黒ボク土にニホンナシ剪定枝炭を 0, 10, 20 および 40% (v/v) となるように混合し、25L ポットに 1 年生“幸水”/マメナシ台を 2023 年 3 月に植えつけた。植え付け前、8 月および落葉後の 11 月に土壌を採取し、土壌化学性を評価した。土壌は、主幹から 10 cm 程度の位置に線虫スコープを差し込み 10 cm 深で採取した。切除した枝および主枝候補枝の長さを測定するとともに、葉の養分分析を行いニホンナシの生育を比較した。さらに根圏土壌アッセイ法 (戸谷ら, 2020) で、いや地を想定した生育阻害物質の評価を行った。

栽培前の調査では、剪定枝炭を混和しない区 (0%混和区) の土壌 pH は 6.3 で、剪定枝炭の混和割合が高くなると pH (H₂O) が上昇し 40%混和区では、7.5 であった。11 月には 0%区, 40%混和区でそれぞれ 5.8 および 7.1 となり、栽培期間中に pH が若干低下する傾向がみられた。ニホンナシの生育について、枝の伸長量に有意な差は認められなかった。葉の養分分析の結果、剪定枝炭の混和割合が増加すると、リン濃度が増加した一方で、マンガン濃度は低下していた。いや地を想定した生育阻害物質の評価については、植え付け前、8 月、11 月のいずれの時期でも、剪定枝炭の混和割合に関係なく、生育阻害は認められなかった。ニホンナシでは樹が生育する過程で根から生育阻害物質が分泌され、土壌に蓄積されていることが報告されている (戸谷ら, 2020)。今回の調査では剪定枝炭混和に関わらず、いや地を想定した生育阻害物質の評価において差は認められなかったが、栽培期間や土壌の採取位置等が関係しているためではないかと考えている。今後、葉のマンガン濃度等に注目しながら、栽培を継続し土壌化学性や生育への影響、いや地リスクの評価を行う予定である。

本研究は、NEDO GI 基金事業「食料・農林水産業の CO₂ 等削減・吸収技術の開発／農業副産物を活用した高機能バイオ炭の製造・施用体系の確立」において実施した。

二次元酸素オプトードによるイネ幼苗期の冠根伸長と根圏酸化の時空間的追跡

田丸翔太郎^{1,2*}・藤原七海³・芝日菜子^{1,2}・塩野克宏^{1,3}¹ 福井県立大学大学院生物資源学研究科・² 日本学術振興会特別研究員・³ 福井県立大学生物資源学部

*連絡先(pt-tamaru-g@g.fpu.ac.jp)

茎葉部から根への酸素通気は、イネをはじめとした湿生植物が低酸素状態になった過湿環境に適応するために中心的な役割を果たす重要形質である。湛水した土壌では、ほとんどの陸生植物は健全に出芽・発根することはできないが、湿生植物は生育初期においても根への通気系を発達させることで活着を可能にしていると考えられている。しかしながら、植物の健全な生育を左右する苗立ち期の根に対して、酸素がどのように通気され、根の伸長を助けるのかはブラックボックスであった。根への酸素供給の定量に常用される電極法(例: 円筒型酸素電極法や微小酸素電極法)は高精度かつ高速に空間的にはある1点の酸素定量に長けているが、多点の計測には制約がある。低酸素状態の土壌で根が活動を維持するためには、分裂組織があるために酸素消費の多い根端に酸素を十分に供給することが重要とされてきた。しかし、電極法では空間分解能の制約のため、実際に土壌や溶媒中を伸長する根の酸化がどのような継時的変化を見せるのか?といった植物の挙動を追跡することは困難であった。

近年、植物学分野への導入が進められてきた二次元酸素オプトード法は、センサ面に接触している酸素濃度を非破壊で二次元的に計測できることから、酸素ダイナミクスと根の伸長を同時に追跡することができる。水中で発芽したイネの苗立ち過程における根の成長と酸素通気の間関係を明らかにするために、この技術を用いて、これまでに湛水土壌を模した嫌気還元溶液で発芽したイネ(cv.日本晴)の苗立ち過程における根の成長とROL(Radial oxygen loss, 放射状酸素漏出)バリア形成について報告を行った(第58回根研究集会)。低酸素下での根の伸長速度は根への通気量に依存する(Wiengweera and Greenway, *J. Exp. Bot.*, 2004)一方で、根の長さは根端まで到達する酸素量に負の影響を与える(Armstrong, *Adv. Bot. Res.*, 1980; Pedersen et al., *New Phytol.*, 2020)。このように、低酸素下での根の伸長と根端での酸素可用性はトレードオフの関係にあると想定される。本研究ではこれまでに未解明であった、実際に根がどのように通気をしながら低酸素環境を伸長していくかについて視覚的・定量的に捕捉することが期待される。本報告ではセンサ内で伸長する複数の根の酸素情報を追跡することで、根長と酸化動態の関係について定量的に検証する。詳細な解析方法や結果については講演会にて報告し、議論を深めたい。

本研究は、科研費(JP16KK0173, JP19K05978, JP22K05587, JP22H02322, JP24KJ1880)の支援を受けて実施した。また、二次元酸素オプトードはRonnie N. Glud教授, Morten Larsen博士, 小栗一将博士, 江上泰広教授の技術的支援を受けて確立された。

ダイズのころび型倒伏に関連する根系形質

成澤友香¹⁾・青木博光²⁾・橋本叡信²⁾・神山拓也^{*1,2)}

¹⁾宇都宮大学農学部, ²⁾宇都宮大学大学院地域創生科学研究科

*連絡先 (koyama@cc.utsunomiya-u.ac.jp)

ダイズでは、倒伏によって最大 30%ほど減収する。特に、地際から傾くころび型倒伏は、倒伏後の回復が困難なため、大きな収量損失につながる。そして、このころび型倒伏には根系の支持機能が密接に関係すると考えられている。植物の根系は、幼根の伸長した主根、胚軸下部と主根上部の内鞘起源の basal root (BR)、植物体地上部と地下茎など根以外の部位から生じる hypocotyl root (HR)、根から発生する側根から構成される。そこで、本研究では、ころび型倒伏耐性とこれら根系形質との関係を調べ、ころび型倒伏耐性に関与する形質を明らかにすることを目的とした。

宇都宮大学農学部附属農場において、世界と日本のダイズコアコレクションからそれぞれ 40 系統と 47 系統、その他 3 系統の計 90 系統を供試品種として 10 個体植えた 1 条を 1 反復とし 3 反復で栽培した。子実肥大期に達した系統から、条毎に生育中庸な 3 個体を選抜し、地際から 15cm の地点で地上部を刈り取り、押倒し抵抗を測定した。押倒し抵抗は、倒伏試験器を用いて、地際から 10cm の部分を 45° 傾けたときの最大応力として測定した。根系形質に関しては、生育中庸な 3 個体のうち、押倒し抵抗が中央であった個体を Shovelomics 法によりサンプリング後、子葉節、主根 5cm と 10cm の直径、HR と BR の角度、HR と BR と側根（分枝根）の平均角度を測定した。その後、分枝根について、1.5mm 以上と 4mm 以上の根の本数を測定した。TDR 土壌水分計により採取個体周辺の体積土壌含水率を計測した。

90 系統の押倒し抵抗の最小値は「COL/PAK/1989/IBPGR/2323(2)」の 0.33 N、最大値は「ほうじゃく」の 28.1 N であり、多重比較を行った結果、品種間で有意な差が認められた。そこで、この押倒し抵抗の差異を説明する根系形質を明らかにするために、全 90 系統 3 反復の計 270 のデータを用いて、押倒し抵抗を目的変数、体積土壌含水率、子葉節直径、1.5mm 以上分枝根数、根平均角度を説明変数として重回帰分析を行った。その結果、決定係数は 0.423、それぞれの標準偏回帰係数は体積土壌含水率では 0.012、子葉節直径では 0.42、1.5mm 以上分枝根では 0.26、根平均角度では -0.17 であった。これらの要因のうち、0.1%水準で有意な影響が認められたのは、子葉節直径、1.5mm 以上分枝数、根平均角度であった。また、1.5mm 以上分枝根数と、1.5mm 以上の BR と HR と側根との単回帰分析の結果、それぞれの相関係数は 0.566, 0.284, 0.177 であった。以上より、耐倒伏性に強く関与していると考えられるのは、主根の太さと 1.5mm 以上の BR の数であると考えられた。

Salinity stress affects cell wall components and pectin localization in spinach (*Spinacia oleracea* L.)

Jia Liu¹⁾, Xiaohui Feng²⁾, Obok E. Edet³⁾, Ping An^{*4)}

¹⁾College of Forestry Engineering, Shandong Agriculture and Engineering University, China, ²⁾Center for Agricultural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, ³⁾Faculty of Agriculture, University of Calabar, Nigeria, ⁴⁾Arid Land Research Center, Tottori University

*連絡先 (an.ping@tottori-u.ac.jp)

Salt stress is a key environmental limitation to plant growth and productivity, mainly because of detrimental osmotic and ionic effects. Using spinach, we investigated the changes in root growth, cell wall extensibility and chemical composition and localization of pectin under a NaCl concentration gradient (0, 100, 200 and 300 mM). The results showed that salt stress significantly inhibited root growth and cell wall extensibility, and the inhibition was more pronounced with increasing NaCl concentration. The contents of pectin, hemicellulose 1 and cellulose showed significant negative correlations with root length. Microscopy analysis showed that salt stress induced severe osmotic stress and impaired the morphology of the root cells. Salt treatment increased the abundance of wrinkles and depression on the root cell wall and promoted the growth of root hairs. An intense pectin accumulation was observed in the endodermis, which may help to sequester and compartmentalize Na⁺ ions, thus preventing their excessive buildup in sensitive tissues. Our data show the critical role of cell wall composition and root morphology in plant salt tolerance and suggest that the cell wall may help to reduce the Na⁺ levels within the cell and improve the osmoprotective status of plants under salt stress.

Keywords: Plant cell wall; pectin; endodermis; root; spinach; salt stress

全身・局所麻酔薬による根の接触屈性の抑制

曲徳泰^{1,2)}・陽川憲^{*2)}

¹⁾慶應義塾大学医学部麻酔学教室, ²⁾北見工業大学工学部応用化学系

*連絡先(yokawaken@mail.kitami-it.ac.jp)

植物は、根の外部環境に応答して成長速度や伸長方向を変化させる。とくに接触刺激に反応し障害物を迂回するために伸長パターンを変化させる性質は接触屈性と呼ばれ、根端で複数のタンパク質やイオンの挙動変化が関係していることが知られている。オジギソウやハエトリソウは、接触刺激が加わると葉を閉じる性質を持つが、我々はこれらの植物に対して全身麻酔薬であるジエチルエーテルで処理を行うと接触応答が失われることをこれまでに報告した(Yokawa et al. *Ann Bot* 2018)。また、麻酔薬はシロイヌナズナ根とトウモロコシ根の接触応答を減弱させ伸長パターンを変化させたが、重力屈性には影響を及ぼさなかった。リドカインなどの局所麻酔薬も全身麻酔薬と同様に根の接触屈性を低下させ、これらは医学領域でヒトに使用される場合と同じ濃度で植物にも麻酔効果を示す点において大変興味深い。麻酔薬の植物根屈性に対する影響とその機序に関して、観察結果をもとに分子細胞生物学的観点から検討を行った。

乾燥ストレスが超深根性植物 *Neltuma juliflora* の

幼苗期の根系構造に与える影響の解析

森井愛美*・辻渉・山中啓介・永松大・明石欣也

鳥取大学大学院 持続性社会創生科学研究科 農学専攻

*連絡先 (m24j7050z@edu.tottori-u.ac.jp; manakuma0515surface@gmail.com)

【背景と目的】 *Neltuma juliflora* (旧学名: *Prosopis juliflora*, 通称メスキート) は, 地下 30 m 以上まで根系を発達させる深根性のマメ科植物である. *Neltuma* は地下水を吸い上げる能力に優れ, 高い乾燥耐性を有し乾燥地に広く分布している. この植物の根系については, 乾燥ストレスに応答した主根長の変化などについて報告があるものの, 根系全体の構造については報告されていない. そこで本実験では, 根系構造の観察に優れる根箱・ピンボード法 (神山ら, 根の研究, 2017) を参考にして自作した簡易型ピンボードを用いて, 乾燥ストレスに対して幼苗期の *Neltuma* 根系が示す形態的応答の理解を試みた.

【方法】 ピンボードについては, 建築用の有孔パンチングメタルを用い, ピン間隔約 12 mm の簡易版を作製した. 植物材料としてスーダンで採取された *N. juliflora* を使用し, 同じく乾燥耐性を有し, *Neltuma* と初期成長の速度にあまり差がなかったオクラ (*Abelmoschus esculentus*, cv Gokaku-okura) を対照植物とした. 用土には真砂土を使用し, 水分含量が 80, 70, 60, 50% になるように栽培開始時にのみ 1 回だけ灌水を行い, 以降は灌水を停止する 4 段階の乾燥条件 (以下, 80D, 70D, 60D, 50D と表記) と, 対照として土壤水分含量を 80% に保つ湿潤条件 (以下, C と表記) を設定し, 21 日間の栽培を行った. 栽培終了後にピンボードで根を採取し, 根系の写真撮影を行い, SmartRoot で根系構造を可視化し, 根系形態に関する各種の定量的パラメータを取得した. また 5 cm 深度ごとに根系を切断し, 根系の乾燥重量等を計測した.

【結果と考察】 4 段階の乾燥条件における根箱全体の土壤水分含量は, 約 30% に達するまでは約 4%/day の速度で低下し, 21 日目には 4 条件全てにおいて 10% 程度に低下した. 地表面から深度 5 cm までの表層は乾燥が著しく, その水分含量は全ての乾燥条件で 7% 以下にまで低下した. オクラでは, 80D 条件において既に根系の到達深度や根の水平方向への展開が減少し, 乾燥強度が強くなるにつれ根系の全体的な縮小が観察された. これに対して *Neltuma* では, 水平展開は 80D から減少したが, 深度は 60D まで維持された. 深度と水平展開の比率に着目すると, オクラでは条件間で差がみられなかったのに対して, *Neltuma* では乾燥が強くなるほど深度の比率が大きくなる傾向にあり, 50D にいたっては C と比較して 3 倍ほど深度の比率が大きいたことが確認された. また, 乾燥条件下の *Neltuma* では, 表層でのみ分枝密度が C の約 10–25% にまで減少し, 表層での顕著な水分含量低下との関連が考察される. これらの結果から, 幼苗期の *Neltuma* は乾燥下において, 根系全体の成長を維持するのではなく, 側根の成長や根の水平方向への展開を選択的に抑制し, 垂直方向への成長を優先的に維持することで, 水分獲得を図っている可能性が示唆された.



第 1 図. デジタル化した *Neltuma* 根系 (左 : C, 右 :

X 線マイクロ CT を用いたヒメツリガネゴケ仮根系の 3D 可視化

-セグメンテーション精度向上の取組-

唐原一郎^{*1)}・若林孝尚²⁾・八木原直樹³⁾・山浦遼平³⁾・玉置大介¹⁾・蒲池浩之¹⁾・山内大輔⁴⁾・峰雪芳宣⁴⁾・星野真人⁵⁾・上杉健太郎⁵⁾・日渡祐二⁶⁾・半場祐子⁷⁾・久米 篤⁸⁾・藤田知道⁹⁾

¹⁾富山大学学術研究部理学系, ²⁾富山大学理学部, ³⁾富山大学大学院理工学教育部, ⁴⁾兵庫県立大学大学院理学研究科, ⁵⁾高輝度光科学研究センター, ⁶⁾宮城大学食産業学部⁷⁾, 京都工芸繊維大学応用生物学系, ⁸⁾九州大学大学院農学研究院, ⁹⁾北海道大学大学院理学院

*連絡先(karahara@sci.u-toyama.ac.jp)

現生の陸上植物で最初に分岐したコケ植物は地衣類とともに土壌形成に貢献してきた。その過程においては、重力に応答した仮根系の形態形成が大きく関わると考えられるが、その仕組みは植物学および宇宙生物科学上重要であるがよく分かっていない。その解明は陸上植物が養水分を吸収するために地球の重力に応答しながら地下部を形態形成する仕組みを進化させてきた過程を明らかにすることにもつながる。2019年から2020年にかけて行われた宇宙実験Space Mossにおいて、微小重力下で26日間生育された蘚類のモデル植物ヒメツリガネゴケ(*Physcomitrium patens* (Hedw.) Bruch & Schimp. subsp. *patens*)の仮根系試料が軌道上で化学固定された。私たちはこの試料を地上でパラフィンに包埋し、SPring-8のビームラインBL20B2において屈折コントラストX線 μ CT撮影を行った。得られた再構成データを用いて、仮根系形態への重力影響を三次元で解析するための手法確立に取り組んでいる。本研究では、ImageJの機械学習プラグインTrainable Weka Segmentation 3D (TWS 3D)を用いた機械学習による仮根の自動セグメンテーションの効率化を行った。まず事前処理として、上下2回に分けて撮影したデータの背景輝度値の基準化に取組み、データ統合時に生じていた不連続性を解消することができた。統合後に機械学習させ3DMeanフィルタも追加した結果、セグメンテーション精度(F1値, IoU)が有意に向上した。定量解析にはVesselness指標による形状選抜が有効であるが、仮根近接部・分岐部を含むオブジェクトが丸ごと除去される問題があったため、意図的に仮根を切断し選別後に再接続する工夫を施した結果、試料によっては検出できた仮根の総延長が大幅に増えた。本研究は、JSPS KAKENHI (23K17399, 24K09514)および富山大学学長裁量経費による助成を受けた。 μ CT撮影はJASRI利用課題2020A1264, 2021B1316, 2022B1143で行った。

遮根シートによるリン酸局所施肥位置へのコムギ根系誘導で収量は増加するのか藤元琴羽^{*1)}・橋本叡信²⁾・青木博光²⁾・神山拓也^{1),2)}¹⁾宇都宮大学農学部, ²⁾宇都宮大学大学院地域創生科学研究科

*連絡先 (a233138@s.utsunomiya-u.ac.jp)

【背景および目的】リン酸肥料は枯渇への危惧などにより価格が高騰している。そのため、効率的な利用が求められる。コムギにおいては、リン酸を同量施肥しても、全層施肥より局所施肥が根を繁茂させて収量を増加させることが知られている。これを踏まえ、リン酸局所施肥位置へ遮根シートによりコムギの根を誘導することで収量は増加するのかを調査した。

【材料および方法】試験は、リン酸施肥方法（全層 U もしくは局所 L）と遮根シートによる誘導の有無（誘導あり G もしくは誘導なし N）を組み合わせた 4 つの処理を 4 反復設けた乱塊法で実施した。全層施肥区では窒素、リン酸、カリを 6, 12, 6g m⁻² で施用し、局所施肥区ではリンのみ同量を深さ 8cm、幅 12cm の位置に局所施用した。遮根シートは深さ 25cm まで条播したすじから 7.5cm の位置に左右均等に埋めた。コムギ品種は「農林 61 号」を条間 150cm、株間 3cm で播種した。根系はミニライゾトロン法で調査した。全ての処理区で直径 7cm のチューブを深さ 40cm まで、条上に垂直に挿入した。UN と LN では条から 15 cm 離れた位置にも 1 本挿入した。ミニライゾトロン法で取得した画像から、根をセグメンテーションするソフト（RootPainter）で根の抽出画像を作成し、その画像から画像解析ソフト（WinRHIZO）により根長を解析した。収穫後、収量および収量構成要素を計測した。

【結果および考察】収量は LN, LG, UN, UG の順に大きく、250, 194, 186, 138g m⁻¹ となった。二元配置分散分析の結果、施肥方法と誘導による有意な効果はそれぞれ認められたが、有意な交互作用は認められなかった。これらの結果から、収量は局所施肥によって有意に増加するが、遮根シートの設置により有意に減少する、つまり、遮根シートによって根をリン酸局所施肥位置へ誘導しても、相乗効果は得られないことが示唆された。条上に挿入したチューブの画像を解析した結果、遮根シートを用いた誘導により根が増加する様子が観察できた。さらに、局所施肥した処理区では、局所施用された肥料の周辺で根が繁茂する様子を観察できた。現在、取得した根の画像解析を進めている。

SfM/MVS に基づく 3 次元モデルにより取得した立木間樹木根系データの評価

池野英利^{*1)}, 田中優斗¹⁾, 藤堂千景²⁾, 平野恭弘³⁾, 谷川東子⁴⁾,

大橋瑞江⁵⁾, 今若舞⁶⁾, 檀浦正子⁷⁾, 山瀬敬太郎²⁾

¹⁾福知山公立大学情報学部, ²⁾兵庫県立農林水産技術総合センター,

³⁾名古屋大学大学院環境学研究科, ⁴⁾名古屋大学大学院生命農学研究科,

⁵⁾兵庫県立大学環境人間学部, ⁶⁾兵庫県立大学大学院環境人間学研究科,

⁷⁾京都大学大学院農学研究科

*池野英利(ikeno-hidetoshi@fukuchiyama.ac.jp)

山中において土壌を掘り取り樹木根系形状を調べる調査においては、土砂を除去した後、手動による計測が一般的であり、計測のための時間、労力、精度などについて改善が求められてきた。さらに、計測の対象となる樹木根については、多くの場合そのサイズが大きく、形状も複雑であることから保管が難しく、また、サンプル採取によって破壊される場合もあることから、再度の計測、評価が難しい。このような状況の中、森林、建築物などを対象に SfM, LiDAR などを用いた計測方法は、その簡便性、精度の点からも多くの対象について適用が進んでおり、樹木の根系計量における活用も期待されている。Okamoto らは、海岸クロマツの掘り取り根に対して SfM /MVS 法を適用し、根系の三次元形態の点群モデルを構築、このモデル上での計測結果が手動で計測した結果と対応づけられることを示した(Okamoto et al., 2022)。さらに、田中らは同様の手法を、部分的に掘り取りを実施した立木間に適用し、土を除いた状態における地中の根系についても三次元のモデル化が可能であることを示した(田中他, 2023)。

しかしながら、この立木間モデルによって根の位置、サイズなどを計測した場合に、実際の根系形態データがどの程度の精度で得られるのかについて、詳細な評価を行なっておらず、調査への本格的な導入には至っていなかった。本研究では、SfM/MVS 法によって構築された立木間三次元掘り取りモデルから得られた根の位置やサイズに関するデータと調査地において手動によって実測した結果を比較することによって、SfM/MVS 法によるモデル計測の妥当性を評価した。

この評価にあたっては、まず、スケール変換を行なって手動計測データ点を三次元掘り取りモデル上にマッピングした。次に、このモデルについて測線に沿った断面スライス画像を生成し、手動計測データ点とモデル上の点を対応づけて、これらの位置のずれ、サイズの違いを計算した。手動計測では、地表面から 10cm 上方に設置した測線を基準に、その水平位置と深さを計測したが、深い位置の根については測線直下の点を正確に特定することは難しく、誤差を生じる可能性が以前から指摘されていた。本研究においても、モデル計測と手動計測の結果を比較した結果、根の位置については測線に近い浅い点に比べて、測線から遠い深い点でその差が大きくなっており、手動計測における問題点が浮き彫りになった。

【参考文献】

Okamoto et al., 3D reconstruction using Structure-from-Motion: a new technique for morphological measurement of tree root systems, Plant Soil, doi:10.1007/s11104-022-05448-8, 2022

田中他, 立木間の樹木根系計測に対する SfM/MVS の適用, 第 58 回根研究集会予稿集, P-19, 2023.

Unraveling variation in rice lateral root under early phase nutrient deficiency

Via Ann Candelaria Marcelo¹⁾ Yoshiaki Inukai^{1,2)} Hiroshi Ehara^{1,2)} and Mana Kano-Nakata^{*1,2)}¹⁾Graduate School of Bioagricultural Sciences, Nagoya University, ²⁾International Center for Research and Education in Agriculture, Nagoya University

*mnakata@agr.nagoya-u.ac.jp

Roots are the primary interface for nutrient uptake playing a crucial role in enabling plants to withstand abiotic stresses. In this study, a set of 26 chromosome segment substitution lines (CSSLs) and their parents, IR64 and Kinandang Patong (KP) (Uga et al., Rice, 2015) were tested under a non-destructive semi-hydroponics platform to compare the effects of nitrogen (-N), phosphorus (-P) and, potassium (-K) deficiencies on early-stage lateral root (LR) growth and development. Daily root images were photographed over eight days, segmented using PlantCV (Fahlgren et al., Molecular Plant, 2015), and analyzed using Rhizovision Explorer (Seethepalli et al., AoB Plants, 2021) and Fiji plug-in SmartRoot (Lobet et al., Plant Physiology, 2011). Rice seedlings without N exhibited greatest shoot dry weight (SDW) loss compared to all treatments. The decrease may be due to a more essential role of nitrogen in protein synthesis and chlorophyll production. KP showed a reduction of 25.4% and 15.0% in IR64, and mean decrease of 13.0% across CSSLs relative to control. These N-deficient seedlings also displayed the longest rooting depth, as deeper rooting varieties are more suitable for accessing nitrogen through mass flow. IR64 exhibiting a slightly higher medium angle frequency of LR (30 - 60°) than KP, which was contrasting with other treatments wherein KP had the advantage. On the other hand, Phosphorus deficient seedlings showed a mean 12.3% SDW decrease in both KP and IR64, which was lower than the CSSLs at 20.2%. It also exhibited greatest total root length, which can be contributed by an increase in the number of root tips and increase in width of L-type LR, thereby leading to an overall increase root volume and convex area higher than all treatments. As phosphorus is a relatively immobile, diffusion-limited nutrient, it may have promoted LR branching over nodal root elongation. Moreover, it also showed greater root gap frequency as generated by overlapping lateral root branching which were also larger, which may signify that the root system indicating a dense and unevenly distributed root system. In -K seedlings, a 10.2% decrease in SDW in IR64 and 11.7% in KP, while a 10.8% decrease among CSSLs. These seedlings also exhibited a reduction in total root length, specifically due to the reduction in L-type LR length and number, leading to decreased width and surface area compared to all other treatments. Also, an overall increase in root solidity was observed in the -K treatment relative to all treatments due to a root orientation forming decrease shallow root angle (0 - 30°) in KP compared to IR64 but increase steep angle frequency (60 - 90°), pointing to a downward growth in lateral roots, especially in KP than IR64. These findings highlight some difference in root growth responses to nutrient deficiencies between KP and IR64, underscoring the importance of the use of CSSLs in identifying distinct responses and related QTLs for optimizing root system architecture for plant resilience.

スキャナ法によるスギ末端次数根の分岐形成過程の観察

趙星一^{*1)}・桑辺七穂¹⁾・大橋瑞江²⁾¹⁾兵庫県立大学大学院環境人間学研究所, ²⁾兵庫県立大学環境人間学部

*連絡先(ne24n002@guh.u-hyogo.ac.jp)

樹木根の研究の多くが, その機能とサイズによって根系の先端部にある直径 2 mm 以下を細根と定義する. 樹木細根は生産, 枯死, 脱落を行い, 土壌に多くの炭素を投入している. そして森林生態系全体の炭素固定に大きく貢献している. 日本の人工林面積のうち, スギ・ヒノキ林が約 7 割を占めている. スギの細根の年生産量はおよそ $2 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ で, 葉の年生産量のおよそ半分に相当する. 近年, 細根の形質は, 細根分類方法の一つである分岐次数法 (Order-based classification) を用いて研究されている. 分岐次数法は樹種と生育地を問わず細根の形質を比較することができる. しかし, 土壌の根が地下に見えにくいため, 分岐根の異質性に関する情報は十分ではない. 例えば, 各分岐次数根の直径や成長速度が時間と共にどのように変化するかについて, 不明点が多く残されている.

本研究では, 近年注目されているスキャナ法を用い, スギ細根の分岐数の変化に注目し, 末端次数根 (最末端である個根) の形質の時間変化を求めることを目的とした. 調査地は兵庫県神戸市の再度公園のスギ人工林とした. 2017 年 4 月から 2020 年 3 月まで, 3 年間取得した 3 ヶ所の画像を画像処理ソフト GIMP, ImageJ, WinRHIZO を用いて解析した. 抽出した根系について, 各次数の細根の成長時期を明らかにした. その結果, 細根の成長は 8 月~10 月に生じることが確認された.

水平・垂直方向の直径の違いを考慮した 3 次元根系の可視化

田中優斗¹⁾・山瀬敬太郎²⁾・藤堂千景²⁾・大橋瑞江³⁾

今若舞⁴⁾・平野恭弘⁵⁾・谷川東子⁶⁾・檀浦正子⁷⁾・池野英利^{*1)}

¹⁾福知山公立大学情報学部, ²⁾兵庫県立農林水産技術総合センター,

³⁾兵庫県立大学環境人間学部, ⁴⁾兵庫県立大学大学院環境人間学研究科,

⁵⁾名古屋大学大学院環境学研究科, ⁶⁾名古屋大学大学院生命農学研究科,

⁷⁾京都大学大学院農学研究科

*連絡先 (ikeno-hidetoshi@fukuchiyama.ac.jp)

樹木は山地の斜面を支え、災害を防止、減少させる役割を果たしており、その生態のみならず、防災の面からも注目されている。特に、根系は樹木本体の支持だけでなく、土壌を支える機能に直接影響しており、斜面保持に大きく寄与している。この保持力に対して、樹木根の形状は大きく影響する重要なパラメータであり、その詳細な形状の計測、モデル記述を行うことは、根の特性、機能を明らかにしていく上で不可欠と言える。近年、地上部については LiDAR を使った計測に基づき、森林の構成要素である単一樹木レベルでの形状測定、モデル記述が行われている。LiDAR で計測された点群データから円柱を繋げた形での樹木モデルも構築されており、枝の分布や樹冠面積など、その構造的特徴が詳細に観察、評価できるようになってきている。一方、地下部である根系については、計測時には土壌を掘り取る必要があるというだけでなく、その形状も土壌層の違いや地下水の影響などによって複雑に変化しており、重力方向と水平方向では成長速度が異なる場合も多く、単純な円断面とはなっていない。我々はこれまで計測時に、重力方向とそれと直交する水平方向の根断面の直径を計測してきたが、最終的に 3D の根系モデルとして表示する際、直径の異方向性を省き、平均直径の根断面で近似した円柱を接続した形で表示を行ってきた。これは 3D モデルを編集、表示するソフトウェアの制約によるものであったが、根の形状をより正確に示し、成長の異方向性を調べる上では、樹木根の断面を単純な円とする円柱をつなげて構成したモデルだけでは不十分である。

そこで本研究では、樹木根の形状をより正確に表現する 3D モデルの開発を目的とし、樹木根断面の重力方向の直径（垂直直径）と水平方向の直径（水平直径）を用いた樹木個体根系の 3D モデルを構築するプログラム RootModeler の開発を試みた。本プログラムは、手動で計測された根の特徴的な点（根ノード）のデータを記録した CSV ファイル、モデルデータを保存する出力ファイル名を引数として与えて実行することで、STL フォーマットの根系 3D メッシュデータが得られる。この CSV ファイルには根ノードの識別番号、親ノード（つながっている元）の識別番号、幹中心からの方角、中心からの距離、地表水平面からの深さ、水平直径、垂直直径をカンマ区切りで記録されている。プログラムの基本的な処理は、①親側のノードを表す楕円と子側のノードを表す楕円の二つの楕円を端とするチューブの生成、②親ノード側から見た子ノードの方角と距離の計算、③この結果に基づきチューブの長さを決めて配置、という 3 ステップからなる。この処理をノード数だけ繰り返し行うことで 3D モデルが得られる。本研究では、このプログラムを 2022 年に六甲山系唐櫃地区で実施したヒサカキ（胸高直径 7.4cm）とヤブツバキ（胸高直径 8.0cm）の根系データに適用し、異方向性を考慮した根系 3D モデルが構築できることを確認した。

湛水土壌に蓄積するアンモニアはイネ根の酸素通気に影響するのか？

**Dose accumulated ammonium in waterlogged conditions affect
the root aeration system in rice (*Oryza sativa*)?**塩野克宏^{*1), 2)}・吉田日向¹⁾・江岸祐夏²⁾¹⁾福井県立大学生物資源学部, ²⁾福井県立大学大学院生物資源学研究科

*連絡先 (k-shiono@g.fpu.ac.jp)

排水性の良い土壌は、間隙に空気があるため、好気的な状態にある。土壌はひとたび湛水すると、植物の根や土壌微生物により酸素分子が消費されるため、数日で嫌気状態に至る。分子状酸素が不足すると、第二段階として土壌微生物が有機物の酸化分解のために硝酸 (NO_3^-) に含まれる酸素を利用しはじめる。さらに湛水状態が継続すると、微生物は MnO_2 , $\text{Fe}(\text{OH})_3$, SO_4^{2-} に含まれる酸素を順番に消費していく。この微生物による別形態の酸素消費により、土壌の酸化還元電位が低下し (高井, 肥料科学, 1980), 植物が過剰に吸収することで生育阻害を被る有毒イオンが発生する。

湿生植物は、根への酸素輸送機能を強化することで湛水土壌に順応している (Pedersen et al., New Phytol, 2021). 特に地上部から地下部を連結する酸素の通路として機能する、通気組織の誘導は低酸素状態がきっかけ (トリガー) となることはよく分かっていた (Pedersen et al., New Phytol, 2021). 最近、私たちは湛水時、酸素分子の枯渇に続いて起こる、硝酸減少がイネの通気組織の発達と、根を太くさせて通気組織の形成領域を拡大させる反応のトリガーとなることを見いだした (Shiono et al., Plant Physiol, 2024). さらに、酸素の長距離輸送に関わる、酸素漏出バリアの誘導にも硝酸の減少が関わっており、湛水初期の硝酸減少が根の形態適応応答 (通気組織、根の肥大化、酸素漏出バリア) を促進するトリガーとなることを明らかにした (Shiono et al., Plant Physiol, 2024). 実は、湛水土壌において、硝酸の減少とほぼ同時にアンモニウム (NH_4^+) が増加する (高井, 肥料科学, 1980). さらに、高濃度のアンモニウム溶液で栽培したイネはバリアの構成成分である、スベリンやリグニンを促進する (Ranathunge et al., Planta, 2015). そのため、我々は硝酸の減少だけでなく、アンモニウムの増加が酸素通気に関わる形態応答の誘導に関わるのではないかと考えた。本研究ではアンモニウムの増加が酸素通気に関与するかどうかの検証を進めた。結果の詳細については、会場で紹介させていただく。

【謝辞】本研究は科研費 (JP16KK0173, JP19K05978, JP22K05587) の支援を受けて実施された。

シロイヌナズナにおけるストロンチウムによる根の生育阻害と活性酸素種の関連

長田武*・新井将生・岡田佳之・國分皐世

摂南大学理工学部生命科学科

*連絡先 (t-nagata@lif.setsunan.ac.jp)

ストロンチウム(Sr)は土壤中に含まれているアルカリ土類金属の一種である。軽金属に分類され、液晶ガラスのディスプレイ等に含まれる。植物において Sr は非必須元素であるが、ダイズやアマランサスなどの植物種では高い Sr 吸収活性を有することが明らかにされている。我々はこれまでに、シロイヌナズナ(*Arabidopsis thaliana*)において Sr による根の伸長阻害や細胞死を報告している。しかし、その毒性誘導機構は全く不明である。その一方、カドミウムなどの重金属の毒性では、活性酸素種(ROS)の関与が知られている。そこで、Sr による生育阻害や細胞死に ROS が関与しているか解析を試みた。

まず、Sr によって根に ROS が生成しているかジアミジノベンジジン(DAB)を用いて染色を試みた。DAB は活性酸素種のうち、過酸化水素に対して反応性が高い。Sr 濃度 0, 0.1, 1, 10 mM の寒天培地に播種し、2 週間培養した。培養後、根を染色し、顕微鏡観察を行った。その結果、Sr 0.1 mM 以上で褐色に染色された。とくに、Sr 1 mM 以上のメリステム領域に顕著な染色が観察された。よって、Sr はメリステム領域において過酸化水素の生成を惹起し、生育を阻害している可能性が考えられる。

次に、根における過酸化水素の生成量について 2-メチル-6-(4-メキシフェニル)イミダゾ[1,2-a]ピラジン-3(7H)-オン・塩酸塩(MCLA)を用いて測定を試みた。Sr 存在下で生育させたシロイヌナズナの根を収穫し、洗浄後、MCLA 溶液中に浸漬した。再度、根を洗浄した後、ルミノメーターを用いて化学発光量を測定した。その結果、Sr 0.1 mM および 1 mM 条件の根では高いスーパーオキシドイオン濃度が検出された。しかし、予想に反して Sr 10 mM 条件の根では未処理の根と同程度のスーパーオキシドイオン濃度であることがわかった。このことから、1 mM 以下の Sr 濃度では酸化バーストが生じているが、Sr 10 mM ではスーパーオキシドジスムターゼによるスーパーオキシドアニオンから過酸化水素への代謝が阻害されていると考えられる。

一般的に、細胞内で生じた ROS は細胞膜などの脂質を酸化することが知られている。そこで、細胞膜障害の指標としてイオン漏出の測定を試みた。まず、Sr 存在下で生育させたシロイヌナズナの根を収穫し、洗浄後、超純水中に浸漬した。3 時間インキュベート後、浸漬溶液中に漏出したイオンについて電気伝導度を測定した。さらに、1時間沸騰水浴中で加熱処理し、その電気伝導度を測定した。加熱前の電気伝導度を加熱後の電気伝導度で除し、その割合から細胞膜障害を評価した。その結果、Sr 1 mM 以下の条件で生育させた根では未処理の根と有意な差が認められなかったのに対し、Sr 10 mM 条件の根はイオン漏出が有意に増加していた。このことから、Sr 10 mM 存在下では Sr によって誘導された過酸化水素によって、細胞膜が損傷し、最終的に細胞死に至ると考えられる。

以上から、Sr による生育阻害や細胞死における ROS の関与が示唆された。しかし、Sr による ROS 誘導メカニズムは全く不明である。現在までに、重金属によって NADPH オキシダーゼの触媒反応を介して ROS が誘導されることが知られている。よって、今後の展望として、Sr の ROS 誘導に NADPH オキシダーゼが関与しているか明らかにしたいと考えている。

分子マーカーより個体識別されたブナ林における細根の貯蔵資源動態

(Resource dynamics in fine roots of *Fagus crenata* individuals identified by molecular markers)

韓慶民*・松本麻子・壁谷大介・宮澤真一・野口享太郎

¹⁾ 森林総合研究所

*連絡先 (qhan@ffpri.affrc.go.jp)

Reproduction is vital for regeneration and maintaining biodiversity of forest ecosystems, as it provides energy to pollinators and predators. Numerous perennial plant species exhibit mast seeding, characterized by synchronous and highly variable seed production across years at a population level. However, the physiological mechanisms underlying mast seeding remain largely uncertain, particularly the role of resources (Bogdziewicz et al. Trends Ecol Evol, 2024). Nitrogen dynamics are closely correlated with masting in *Fagus crenata*, a flower masting species distributed throughout Japan; these findings were derived from the study of aboveground organs (Han et al. Tree Physiol 2008, Miyazaki et al. Ecol Lett 2014, Han et al. Oecologia 2014). However, belowground processes related to nutrient acquisition remain unknown, particularly whether this correlation is driven by soil N availability or internal N dynamics following N uptake by fine roots.

Here, we present the seasonal dynamics of both nitrogen and non-structural carbohydrates (starch and soluble sugars) in fine roots within a mature *Fagus crenata* forest. Each individual fine root was divided into absorptive and transport roots according to the method of Pregitzer et al (Ecol Monogr 2002) because there is growing recognition that the functional classification of fine roots enhances our understanding of root process dynamics (McCormack et al. New Phytol, 2015). Additionally, individual identification of fine roots was conducted using microsatellite markers (Kenta et al. Theor Appl Genet 1999, Asuka et al. Mol Ecol Note 2004). The main finding is that transport fine roots exhibited seasonal fluctuations in starch concentration, whereas absorptive fine roots showed only detectable starch levels. Moreover, the starch concentration in individually identified fine roots was up to twice as high as in fine roots sampled using traditional methods, which arbitrarily assume that fine roots collected from the periphery of a target tree's trunk are representative of that tree. In contrast, the difference in nitrogen concentration between these two methods was negligible. We will discuss the implications for mast seeding and the carbon and nitrogen cycles in forest ecosystems.

ペーパーポットを用いたサツマイモの育苗条件と初期生育の比較

勝田瑞卓^{*1)}・西中未央¹⁾・田口和憲¹⁾¹⁾国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 中日本農業研究センター^{*}連絡先 (katsutam052@naro.affrc.go.jp)

サツマイモの慣行栽培では、作業労働時間の約 4 割を育苗・植付け作業が占めている。また、植付けする苗の大きさは 1 株あたり 5 葉 5 節 (20 cm～30 cm) 程度であり、苗の形が不揃いであるため多くの作業工程が手作業に依存しており、一戸あたりの栽培面積を拡大する妨げになっている。このため、大規模栽培が可能となる機械作業体系に転換できるよう、植付け作業を機械化することが最重要の技術的課題である。これまでサツマイモの植付け作業の機械化に向けセル成型苗を用いた技術開発が進められてきたが、青果用の主要品種の多くではセル内で形成された根鉢が肥大して奇形根が多発するなどの問題が認められ、セル成型苗移植法を適用できる品種は限られる (姫野 2011)。そこで、セル成型苗と同様に機械移植法が確立されているペーパーポット移植栽培法に着眼した。本報告では、ペーパーポットを用いた数種の育苗条件について、ペーパーポット内での発根程度および圃場移植後の初期生育を比較した。

試験 1: 育苗条件と品種間差の比較

材料は、「関東 162 号」、「高系 14 号」および「べにはるか」の 3 品種である。処理条件は、苗 (1 節, 1 節 1 葉), 土 (ニッテンハードソイル, ニッテン培土), 紙筒長 (5 cm, 10 cm), 育苗日数 (1 週間, 2 週間) および移植時に苗 (1 節 1 葉) の茎葉部分を除去する摘葉 (有, 無) を加えた合計 5 種類である。実験は L4 型直交表に基づく実験計画法のもと、品種ごとに各処理条件の効果とその交互作用を比較した。ペーパーポットの育苗は 2024 年 5 月 8 日から開始し、圃場移植は同 16 日および 24 日にハンド移植機を用いて行った。発根程度の調査は、育苗 1 週間後 (1 節 1 葉) および 2 週間後 (1 節) にペーパーポット内で伸長した根長および本数を測定した。また初期生育の調査は移植後 5 および 6 週間後同 6 月 25 日に行い、各試験区の活着数および最長つる長を測定した。その結果、紙筒長 (5 cm) では「関東 162 号」の苗 (1 節 1 葉) では根長が紙筒内におさまらず、移植時に大半がちぎれた。一方で、紙筒長 (10 cm) では移植後に根が水平方向に展開できず、根が折れ曲がってしまうことが観察された。初期生育は、苗 (1 節 1 葉), 土 (ハードソイル) および育苗日数 (1 週間) の最長つる長が長い傾向があり、いずれの品種も苗 (1 節 1 葉) は苗 (1 節) に比べて有意に長かった。よって、苗 (1 節 1 葉) は苗 (1 葉) より、ペーパーポット育苗時の発根だけでなく、移植後の初期生育にも有利と考えられた。また、慣行苗との比較ではいずれの品種も育苗日数 (1 週間) かつ苗 (1 節 1 葉苗) の条件が慣行苗と同等ないしは、それ以上に初期生育が旺盛であった。

試験 2: 発根の経時的変化および採苗日の違いによる比較

試験材料は「関東 162 号」、「高系 14 号」の 2 品種である。処理条件は、苗形態 (1 節, 1 節 1 葉), 採苗日 (当日採苗, 2 週間取り置き苗), 紙筒長 (5 cm, 7.5 cm), の 8 処理である。ペーパーポットの育苗は 5 月 18 日から開始し、育苗 1 週間, 2 週間, 3 週間後に根長および根の本数の調査を行った。

謝辞: 本研究の遂行にあたり、日本甜菜製糖株式会社より様々な長さのペーパーポット作成にご協力いただいた。ここに記して感謝申し上げます。

傾斜圃場を利用した土壤水分勾配に対するオオムギ生長の自然変異最相大輔^{*1)}・窪田竜太¹⁾・岡田柊一¹⁾・轟貴智²⁾¹⁾岡山大学資源植物科学研究所, ²⁾福岡県農林業総合試験場

*連絡先 (saisho@rib.okayama-u.ac.jp)

日本は降水量が多く、また西南暖地では二毛作が行われ水田転換畑での作物栽培も多くみられることから、オオムギ栽培にとっては湿害が発生しやすい環境である。オオムギは湿害に対して感受性が高く、収量や品質の低下を引き起こすことから、耐湿性品種の育成が求められている。イネ科作物における湿害応答については、通気組織や Radical Oxygen Loss (ROL) バリアの形成を介して根からの酸素の漏出の抑制や浅根化することによる耐湿性の付与が提唱され、遺伝解析をとおして関連する QTL が数多く報告されている(Xu et al. 2023)。湿害は土壤物性や生長段階等の影響を受けて複雑な応答反応と捉えられており、一方作物が進化の過程で多様化させた形質の中には、湿害をはじめとする土壤水分に適応した形質が潜在する可能性がある。全球的に栽培環境が変化する中、適応的な形質を探索しその遺伝構造を明らかにすることは、耐湿性育種の選択肢を拡大する観点からも重要である。

本研究では湿害から乾燥の多様な土壤水分条件を連続的に設定できる岡山資源植物科学研究所の傾斜圃場施設を利用し、多様な土壤水分に対するオオムギ遺伝資源の応答特性の評価に取り組んだ。湿害耐性の指標品種(はるな二条(弱)、成城 17 号(強))、在来品種(早木曾 2 号、赤神力)および野生オオムギ(OUH602)を傾斜圃場に播種し、三葉期から登熟期にかけて土壤水分の勾配が出来るような湛水処理を行い、生長や収量に対する影響を評価している。種々の農業形質やサーモグラフィ画像を使った葉面温度などの生理形質を測定し、土壤水分勾配に対するオオムギ遺伝資源の生長変異を詳述してきた。一部の系統については、複数の圃場環境における根の分布についても調査し、土壤水分に対する応答との関連について研究している。本発表では、調査の結果見えてくる土壤水分に対するオオムギの自然変異と、供試材料の進化的、育種的側面との関連を議論したい。

Extracellular ADP elicits the generation of reactive oxygen species in plant rootTomoko Kaegnishi^{*1)} Ken Yokawa²⁾¹⁾Department of Engineering, Kitami Institute of Technology^{*}(tkagenishi@mail.kitami-it.ac.jp)

Adenosine triphosphate (ATP) functions are energy resources and signaling molecules in mammals and plants. Plant tissues release ATP (eATP) to extracellular space in response to biotic or abiotic stresses such as salt and touch. In 2014, the first membrane receptor of eATP in plants was reported and named DORN1 (Does not Respond to Nucleotides 1) [Choi et al. Science 2014]. Recognition of eATP by DORN1 induces reactive oxygen species (ROS) followed by direct phosphorylation of NADPH oxidase [Chen et al. Nat commun 2017]. It is also known that exogenously added adenosine diphosphate (ADP) to plants induces ROS generation [Jeter et al. Plant cell 2004; Song et al. Plant Physiol 2006]. Plants have apyrases that hydrolyze ATP to ADP and adenosine outside the cell membrane. It means that extracellular space contains not only eATP but also eADP. However, the effect of eADP on ROS response in plant tissues is not well known. In this study, ROS generation was observed after exogenously added nucleotides. The first root elongation of seedlings was observed with each nucleotide (AMP, ADP, and ATP). As a result, only ATP-treated plants almost completely inhibited root elongation. Hydroxyl radical generation was observed through electron paramagnetic resonance (EPR) from intact roots containing exogenously added nucleotides and the spin-trapping reagent 4-POBN. The generation of superoxide from roots was visualized by nitroblue tetrazolium (NBT). In these results, exogenously added ATP and ADP induced both hydroxyl radical and superoxide. NBT staining was observed at the root transition zone, which is located between the apical meristem and basal elongation zone. Our results showed that the exogenously applied ADP promoted a stable generation and abundant hydroxyl radicals and superoxide. Extracellular ADP might be a signaling molecule in plants and play a different function from eATP.

タネツケバナ属植物 *Cardamine amara* における離生通気組織形成Schizogenous aerenchyma formation in *Cardamine amara*工藤洋^{*1}・坂根雅人²・Karol Malhold³・清水(稲継)理恵⁴・清水健太郎⁴・深城英弘²¹京都大学生態学研究センター, ²神戸大学理学部, ³スロバキア科学アカデミー,⁴チューリヒ大学進化生物学環境学研究所

*連絡先(kudoh@ecology.kyoto-u.ac.jp)

離生通気組織形成は、湿原植物の根や茎にしばしばみられ、根端に酸素を移送する構造として地下部が浸水する状況下での生存に欠かせない。アブラナ科タネツケバナ属 (*Cardamine*) は、多くの湿原植物を含み、それらは根に通気組織を形成していると考えられる。また、シロイヌナズナ (*A. thaliana*) に近縁であることから、離生通気組織形成のモデル系の探索が期待される。ヨーロッパ原産の *C. amara* は常に地下部が浸水状況にあるような湿地に生育する2倍体の湿原植物である。先行研究において、むしろ地下部が常時水に浸かった条件で、そうでない条件よりも良好に生育することが示されている (Shimizu-Inatsugi et al. Mol. Ecol. 2017)。

私達は *C. amara* の実生の根において、非常に規則正しい離生通気組織形成を発見したので、ここに報告する。*C. amara* の発芽したばかりの実生の根の横断切片を作成して観察したところ、1周で12個からなる一層の内皮細胞の外側に、3層の皮層細胞をもつことが分かった。内皮に接する1層目の皮層細胞は内皮細胞と同数で、円周方向(根の伸長軸に垂直な方向)に隣接する細胞間は接着している。一方、2層目の皮層細胞では、1層目と同じ細胞数であるが、円周方向の細胞壁の接着が離れることで、1細胞おきに空隙が形成されている。3層目の内皮細胞は、細胞数がおおよそ内皮細胞の2倍となっており、円周方向に接着が保たれている。その結果、皮層2層目に、1細胞おきの12本の通気組織が形成されることとなる。

タネツケバナ属の根における通気組織形成は、*C. hupingshanensis* の不定根で皮層の細胞間が不規則に離れるタイプのものが報告されている (Xiang et al., Open Life Sci. 2019)。その他のアブラナ科では、オランダガラシ属のオランダガラシ *Nastrutium officinale* (Jung et al., Plant Biol., 2008)、沈水性の *Subularia aquatica* (Nowak, Aquat. Bot., 2010) で、ハチの巣状の高度に複雑化した離生通気組織の形成が報告されている。これらの種の実生の根における通気組織が *C. amara* と同様な規則性を示すかどうかは不明である。一方で、シロイヌナズナに代表される湿原植物ではないアブラナ科では、根に通気組織が形成されない場合が多い (Combs-Giroir & Gschwend, Env. Exp. Bot., 2024)。シロイヌナズナ実生の根の内皮と皮層は、皮層/内皮始原細胞の娘細胞が根の伸長軸方向と平行に不等分裂すること由来し、その結果、内皮と皮層の細胞数は円周方向に同数となり、皮層は互いに接着した1層の細胞からなる。これと比べて、*C. amara* に通気組織の発生を理解するには、(1)皮層の3層化、(2)皮層第3層の円周方向の分裂、(3)皮層第2層の円周方向の細胞壁間の離脱の3つのプロセスが説明されれば良いことになる。今回発見された *C. amara* の実生の通気組織は、離生通気組織形成の発生機構の要素を十分含むもっとも単純な系として、今後の研究対象として注目されるべきものである。

表層から深さ 1.5m までの土壤炭素及び窒素濃度の変化がスギ細根形態に与える影響柳瀬亮太^{*1)}・谷川東子²⁾・黒見信輔¹⁾・金子祥也¹⁾・杵山哲矢¹⁾・林亮太²⁾山瀬敬太郎³⁾・藤堂千景³⁾・池野英利⁴⁾・大橋瑞江⁵⁾・檀浦正子⁶⁾・平野恭弘¹⁾

¹⁾名古屋大学大学院環境学研究科, ²⁾名古屋大学大学院生命農学研究科, ³⁾兵庫県農林水産技術総合センター森林林業技術センター, ⁴⁾福知山公立大学情報学部, ⁵⁾兵庫県立大学環境人間学部, ⁶⁾京都大学大学院農学研究科

*連絡先 (yanase.ryouta.y5@s.mail.nagoya-u.ac.jp)

樹木の細根は、土壤から養水分を吸収・輸送する役割を担うだけでなく、生産・枯死・分解を通して森林生態系の炭素循環に大きく貢献している。また、大気中の二酸化炭素濃度増加によって、根の分布域は深くなることが報告されている。森林土壌における土壌硬度や炭素濃度、窒素濃度などの土壌特性は地表からの深さによって変化し、それらに伴い細根の太さ、長さなどの形態や分布は変化することが示唆されてきた。しかし、これまで森林地下部生態系の調査の多くはその労力や技術の限界から、深さ 50 cm 程度までの土壌表層を対象としており、樹木個体根系の深部に生育する細根の形態特性や活性については十分に理解されていない。二酸化炭素濃度の上昇を含めた環境変動による樹木根の垂直分布の変化が、樹木と土壌との間の炭素循環に与える影響について精度高く評価するためには、土壌深部における細根の形態特性や活性について十分に理解することが必要である。本研究では、表層から根系最深部までの土壌硬度や土壌炭素および窒素濃度など土壌特性の深さに伴う変化が、スギ細根の分布や形態特性にどのような影響を与えるのかを明らかにすることを目的とした。

本研究は、粘土質で比較的硬い土壌の広がる名古屋大稲武フィールドに生育する 44 年生スギ 2 個体と、比較的やわらかい風化花崗岩マサ土の広がる兵庫県神戸市再度山に生育する 50 年生スギ 2 個体を対象とした。エアースコップを用いてスギ成木の個体根系を構造が保たれた状態で掘り出し、土壌深度 5 区分(0–10 cm, 10–50 cm, 50–100 cm, 100–150 cm, 150– cm)において、3 次根程度までの細根系を 1 区分につき 16 個採取した。細根系は実験室にて回数分類した後、根長や乾燥重量などを測定した。また、区分別に全細根の乾燥重量を測定した。掘り取り後、土壌断面の層位と硬度を測定し、土壌試料を採取し、土壌中の炭素及び窒素濃度を測定した。

回数別の細根形態について、稲武では深さに伴い太く長くなる傾向が見られたが、再度山では深さに伴う変化は見られなかった。土壌特性について、稲武では、土壌硬度が深さに伴い増加する傾向、土壌炭素及び窒素濃度は深さに伴い減少する傾向が見られた。再度山では、土壌硬度は深さに伴う大きな変化は見られず、土壌炭素及び窒素濃度は深さ 0–10 cm 以深で深さに伴う変化は見られなかった。また、再度山のスギ林における土壌硬度と土壌炭素および窒素濃度はいずれも稲武と比較して著しく低かった。本発表では、土壌深さと細根形態特性、土壌硬度や土壌炭素および窒素濃度などの土壌特性との関係性について考察する。

機械学習によるスキャナ法を用いたスギ3クローンの細根成長動態解析

Analysis of fine root growth dynamics of Japanese cedar in three clones using scanning method with convolutional neural networkワン シティフン^{1,*}, 能勢 美峰², 平尾 知士², 矢吹 新¹, 檀浦 正子¹Shitephen WANG^{1,*}, Mine NOSE², Tomonori HIRAO², Arata YABUKI¹, Masako DANNOURA¹¹京都大学大学院農学研究科 (Graduate School of Agriculture, Kyoto University),²国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所林木育種センター

(Forest Tree Breeding Centre, FFPRI),

*連絡先 corresponding (gn03138868@gmail.com)

A large portion of carbon assimilated by trees is allocated to fine root production. The amount of carbon returned to the soil from fine root turnover surpasses that returned through leaf litter in forests. Analysing fine root growth dynamics is crucial for understanding this process. However, destructive sampling affects observations. Recently, non-destructive techniques like installing scanners in forests and using software and machine learning for quantitative assessment have gained popularity, enhancing our understanding of fine root growth dynamics. In this study, the ARATA (a root auto tracing and analysis) method was employed to quantify the root growth of three Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) clones (Tsukuba-1, Kamitsuga-7, and Godai-1) planted in pots placed outside at the Forest Tree Breeding Centre (FTBC), FFPRI, Hitachi. We set up 9 scanners, each with dimensions of 216×296 mm² (5,100×7,019 pixel²). The scanning started from February to December 2023, with the root images occurring per 7 to 30 days (244 images from 9 scanners). After collecting the data, the first step involved washing data, and then creating 16.9×16.9 mm² (400×400 pixel²) bicolour-labelled images for training the ARATA model. Our findings revealed that fine root growth begins in mid-March in Kamitsuga-7 and Godai-1, and growth slows down in late June. In Tsukuba-1, growth continues from the mid-March until mid-October. And elongation growth continues longer in Kamitsuga-7 than in Godai-1. We also notice that many very fine roots (<1mm) are produced after mid-April generally. Still, only Kamitsuga-7 continues after July. Overall, all three clones develop belowground slightly earlier than aboveground although there are different strategies for ending belowground growth.

アーバスキュラー菌根菌の感染根長密度の推定

請川弘次朗¹⁾・鴨下顕彦¹⁾¹⁾ 東京大学大学院農学生命科学研究科

*連絡先(kekekeu91@g.ecc.u-tokyo.ac.jp)

作物に共生的に感染するアーバスキュラー菌根菌 (AMF) は、耕起法 (Kabir 2005) や前作の作物種 (唐澤 2004) の影響を受ける。土壌に残存している AMF の菌糸・胞子をプロギュール (散布体) というが、土壌中の胞子の密度や種類は土壌の深さによって変化し、感染率に影響する。感染率は一般的に根長当たりの感染根長の割合として測定される器官レベルの形質である。しかし、個体レベルでの指標としては、根長密度と感染率との積である感染根長密度の推定が望ましいが、そのような研究は多くない。また、AMF はイネでは皮層を欠く短い側根には感染せず、冠根よりも長い側根により多く感染するが (Gutjahr et al. 2009)、根径も感染率に関与しているかもしれない。本研究では、トウモロコシ、ダイズ、ヒマワリについて、慣行耕起区と不耕起区を設けて比較栽培試験を行い、根径ごとの根長密度と感染率から感染根長密度を推定した。

西東京市で、耕起を主区画 (慣行耕起, 不耕起)、作物種を副区画 (トウモロコシ:KD731, ダイズ:えんれいのそら, ヒマワリ:太陽) の 3 反復の分割区法で栽培試験を行った。2023 年 5 月 31 日に条間 75 cm で株間はトウモロコシ、ダイズ、ヒマワリそれぞれ、20 cm, 15 cm, 30 cm で機械点播した。N-P₂O₅-K₂O を 10 a 当たりトウモロコシ 10-15-10 kg, ダイズ 3-8-8 kg, ヒマワリ 8-8-10 kg 相当量を施用した。播種後約 3 か月に塹壕 (135 cm x 55 cm x 90 cm) から深さ 2 層 (①クロボク土 0-40 cm, ②立川ローム 40-90 cm) に分けて掘り出した土壌を篩にかけて根を採取し、スキャナーで取り込み、WinRhizo を用いて根長密度 (cm/cm³) を算出した。さらに塹壕の土壌断面から、株本から伸びている根をそのまま採取し、層ごとにスキャナーで取り込み、WinRhizo を用いて画像の根を根径ごとに分類した。根径を判定した根ごとに、トリパンブルー染色をし、格子交差法を用いて、感染率を算出した。本発表ではダイズについて、根長密度 (cm/cm³) と感染率 (%) をかけ合わせて、感染根長密度 (cm/cm³) を推定した。塹壕の土壌 10 g から AMF の胞子を湿式ふるい分けによって収集し、胞子数の測定と単離を行った。単離された胞子を INVAM の情報 (<https://invam.ku.edu/species-descriptions>) から識別し、分類した。

耕起区において、不耕起区よりも草丈が高く、乾物重が重く、収量が多い傾向が見られた。塹壕の土壌から測定した胞子密度は、耕起区 2.84 個 cm⁻³ に対して、不耕起区は 4.60 個 cm⁻³ で多かった。耕起によって土壌中の胞子密度が低下したと考えられるが、耕起区と不耕起区との間に感染率の差は見られなかった。土壌深度に関しては、土壌の深さが増すにつれ胞子密度が小さくなり、感染率が低下した。感染率も胞子密度も、作物間差に有意な差は見られなかった。ダイズの根系ごとの感染率は、根径が 0.1 mm 以上 0.3 mm 以下の根で感染率が高かった。感染率は耕起法によって差は見られなかったが、感染根長密度は耕起区が不耕起区よりも高かった。根系に影響を及ぼす試験においてアーバスキュラー菌根菌の作物レベルでの感染効果を考察するためには、根長密度を考慮する必要があると考えられる。

謝辞: 本研究は科研費 (23K26885) によって行われ、生態調和農学機構技術部より圃場管理の支援を受けた

自動撮影・解析システム構築による樹木根系の高解像度時系列データの集積と共有

森健介^{1*}、池野英利²、中路達郎³、高木正博⁴、大橋瑞江¹¹⁾兵庫県立大学環境人間学部, ²⁾福知山公立大学情報学部, ³⁾北海道大学 北方生物圏フィールド科学センター, ⁴⁾宮崎大学農学部附属フィールド科学教育研究センター

*連絡先 (moriken@shese.u-hyogo.ac.jp)

木本の細根の成長は森林の純一次生産の20%以上に及ぶとされ(McCormack et al., 2015), その成長と枯死の理解は樹木の栄養吸収や森林の炭素循環の把握に重要である。しかし、従来、細根を観測するには根を掘り出す必要があり、多くの労力を必要とする上に、破壊的であるため、同じ対象に対して連続的な測定が行えないという問題があった。その打開策としてスキャナー法 (Dannoura et al., 2008) が開発され土壌を連続的に撮影しデータを取得することが可能になったが、土壌断面の撮影は研究者が手動でスキャナーを操作しそのデータを持ち帰る必要がある。そのため様々な事情により土壌断面の撮影が行える期間に限られる、不定期になる等の問題が発生し細根の成長枯死の変動や季節性、環境要因などを正確に把握するには時間的解像度が十分ではない可能性があった。本研究の目的はこの問題点への打開案としてより定期的かつ短い間隔でのデータの収集システムを開発することにある。

この研究目的に向けた第一歩として、自動化されたスキャナー撮影とクラウドへのアップロードシステムを設計した。この自動撮影システムを構築・設置していくことでこれまで以上の時間的解像度で細根動態データの収集が期待される。さらにはスキャナー撮影画像の撮影からアップロードまでの手順を自動化されたプログラムで行うことにより、ファイル名の規定の統一や人的ミスの回避などが見込める。この自動撮影システムと ARATA を用いることにより、より具体的な根のフェノロジーへの理解、細根動態に影響を与える環境変数などの特定、そして森林の炭素循環の把握につながると考えられる。

Dannoura, M., et al. (2008) Plant Root, 2, 14-18., McCormack, M. L., et al. (2015) New Phytologist, 207(3), 505-518.

深層学習による細根抽出を用いた細根動態の評価

山形拓人^{*1)}・池野英利²⁾・木村敏文³⁾・磯川悌次郎⁴⁾・中路達郎⁵⁾・大橋瑞江³⁾¹⁾兵庫県立大学大学院環境人間学研究科, ²⁾福知山公立大学情報学部, ³⁾兵庫県立大学環境人間学部, ⁴⁾兵庫県立大学大学院工学研究科, ⁵⁾北海道大学北方生物圏フィールド科学センター

*連絡先 (takuff0630@gmail.com)

細根の成長と枯死, すなわち細根動態は連続撮影された土壌断面(根圏)画像から細根を抽出し、それらの時間変化を解析することで解明することができる。しかし、この細根抽出は手動で行われてきたため、多くの時間を要してしまう。この課題を解決するため、近年、深層学習を用いて細根抽出を自動で行うソフトウェアがいくつか開発された。例えば ARATA (Yabuki et al., Method in Ecology and Evolution, 2022) や RootPainter (Smith et al., New Phytologist, 2022), Trenchroot-SEG (Teramoto and Uga, Plant Phenomics, 2020), SegRoot (Wang et al., Computers and Electronics in Agriculture, 2019) などが公開されている。これらのソフトウェアは短時間で任意の根圏画像から細根を抽出することができる。そして、それらの画像を時系列で解析することで細根動態を簡単に解明することができると思われている。しかし、手動抽出画像を用いた解析では成長・枯死根を目視で確認しながら取り出しているのに対し、自動抽出画像を用いた解析では1枚毎に抽出された領域の単純な面積の変化のみでしか動態を評価できていない。そのため、自動抽出画像を用いて計測された細根動態は成長・枯死根を正しく検出した上で評価されているか分かっていない。筆者らは複数の深層学習を用いた細根自動抽出ソフトウェアによって抽出された細根画像を用いた細根動態の解明を試みた(山形ら, 根研究集会, 2023)。そこでは、経時による細根面積の変化を手動と同様に評価することができる細根自動抽出ソフトウェアがあることが分かった。だが、自動抽出ソフトウェアによって抽出された根領域の面積や形状等を調べるまでには至っていなかった。

そこで私たちは自動抽出における細根領域の変化が成長・枯死根によるものであるか調べるための調査を行い、細根動態の解析に適した細根自動抽出ソフトウェアを探索することを目的とした。本研究では ARATA, RootPainter, SegRoot, TrenchRoot-SEG の 4 種類の細根自動抽出ソフトウェアを評価対象とした。そして、手動で抽出した細根画像と、自動抽出ソフトウェアを用いて抽出した細根画像を比較することで、自動抽出ソフトウェアが成長・枯死を正しく評価できているか調べた。その結果、ARATA が最も良く成長・枯死根を抽出していたことが分かった。

4 月から 6 月にかけて脱落したヒノキ細根の形態学的・解剖学的特徴

吉田陽向^{*1)}・柳瀬亮太²⁾・谷川東子³⁾・平野恭弘²⁾

¹⁾名古屋大学理学部, ²⁾名古屋大学大学院環境学研究科, ³⁾名古屋大学大学院生命農学研究科

*連絡先(yoshida.hinata.b6@s.mail.nagoya-u.ac.jp)

樹木細根は、一般に直径 2 mm 以下で定義される根であり、養水分の吸収・輸送機能を有する。また、細根は土壌への有機物供給機能も担っており、森林の純一次生産量の約 3 割に寄与する (Jackson et al., 1997)。そのため、細根動態評価は森林土壌における炭素循環を解明するために重要である。しかし、これまでの枯死根動態に関する研究の多くは、生根と枯死根を目視により分類している (Vogt and Persson, 1991; Hishi, 2005a)。したがって、メッシュ袋を用いた脱落根採取装置 (Kuromi, 2024) を調査地に設置し、生根と枯死根を現地における回収段階で分類することで、より正確な枯死根動態評価ならびに細根動態評価が得られる可能性がある。本研究では、4 月から 6 月にかけて脱落したヒノキ細根が、どのような形態学的・解剖学的特徴を持つかを明らかにすることを目的とした。

本調査は愛知県岡崎市の幸田ヒノキ林モニタリングサイトにて行われた。2024 年 4 月、5 月にヒノキの手のひらサイズの細根系について、メッシュ袋を用いた脱落根採取装置を設置し、設置から約 1 ヶ月後の同年 5 月、6 月に脱落根を回収した。回収した脱落根は形態解析を行い、根長や根直径などを測定した。また、プラントミクロームを用いた厚さ 100 μm の断面標本の作成、及び蛍光顕微鏡による原生木部数などの解剖観察を試みた。本発表では、形態解析の結果と、解剖観察における今後の課題・展望について報告する予定である。



Root Research

Japanese Society for Root Research