

# Root

# Research

Japanese Society for Root Research

ISSN 0919-2182  
Vol.33, No.3  
September 2024

## 目 次

### 【巻 頭 言】

会員の皆様へ ..... 75

### 【原著論文】

リンドウ科植物を基源とする生薬抽出液を用いた植物とアーバスキュラー菌根菌の共生促進  
齊藤光・酒井彩衣・東優花・富永貴哉・上中弘典 ..... 77

### 【ミニレビュー】

熱帯多雨林の細根動態の解析—スキャナー法による研究事例とその課題—  
遠藤いず貴 ..... 84

### 【連載 根の研究の30年を展望する】

根の研究への“憧れ”や“想い”とその“支え” 犬飼義明 ..... 93

### 【情 報】

菜根譚 野菜の根の話 25. 根をアイス 中野明正 ..... 100

### 【報 告】

第59回根研究集会に参加して 澤田佳穂 ..... 101

北陸新幹線の改札横でやってみた！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～」の開催報告

角田智詞・田丸翔太郎・芝日菜子・澤田佳穂・小河樹・西嶋遼・塩野克宏 ..... 102

第59回根研究学会プログラム ..... 104

### 【会 告】

2024年度根研究学会総会報告 ..... 109

「根の研究」の発行形態に関するアンケートのお願い ..... 114

根の研究  
根研究学会(JSRR)



## 会員の皆様へ



### 事務局からのお知らせ

#### 1. 第 59 回根研究集会の開催と優秀発表賞受賞報告

7月20日-21日に第59回根研究集会が開催されました。塩野克宏実行委員長ならびに学生を含む福井県立大学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す。一般発表（口頭，ポスター）に加えて，細胞壁構造研究の世界的権威であるドイツ・ボン大学の Lukas Schreiber 教授による特別講演，「掘らないと！掘らないの？～知っているようで知らない根の様子と画像解析のウルテク～」と題して，根箱で育てた植物体を使って，根系の採取，画像の取り込み，画像解析を実践しながら，ノウハウを交換する，誰でも参加できる公開ワークショップも行われました。詳しくは本号のプログラム，別冊1号および掲載の報告をご覧ください。また，優秀発表賞は，時澤睦朋氏（電力中央研究所），田丸翔太郎氏（福井県立大学大学院生物資源学研究科）と藤元琴羽氏（宇都宮大学農学部）の3名が受賞しました。

#### 2. 第 59 回根研究集会要旨集をオンライン公開します！

第59回根研究集会要旨集を「根の研究 第33巻 別冊1号」としてオンライン限定公開します。根研究学会ホームページにある，会誌「根の研究」ダウンロード(<http://www.jsrr.jp/rspnsv/download.html>)からダウンロードすることができます。ダウンロードに関する，ユーザー名，パスワードは通常の会誌ダウンロードのものと同一ものです。

#### 3. 総会において予算・事業計画が承認されました

7月20日の第59回根研究集会内で総会を行い，本年度の予算，事業計画が承認されました。詳しくは今号に掲載の報告をご覧ください。

#### 3. 2024年・2025年度の根研究学会

##### ・2024年度の集会

冬の研究集会は熊本県上益城郡の東海大学農学部で開催します。詳しい案内はホームページでご案内し，10月以降に発表申し込みを受け付ける予定です。

日程；2024年12月14日（土）～15日（日）

会場；東海大学 阿蘇くまもと臨空校舎（東海大学農学部）

熊本空港から徒歩15分，JR熊本駅から電車30分＋大学バス20分

問い合わせ先：阿部淳（[abejun@tokai.ac.jp](mailto:abejun@tokai.ac.jp)）

##### ・2025年度の集会

春の研究集会は宮城県仙台市の東北大学農学部にて現地開催する予定です（亀岡笑・田島亮介実行委員長）。秋の集会につきまして，開催地については募集中です。立候補ありましたら事務局長にお知らせください。

#### 4. 電子版会誌のダウンロードについて

2024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ました。ご注意ください。なお，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

## 5. 「根の研究」への投稿にテンプレートをご使用ください！

著者の執筆負担軽減と校正・編集作業の効率化のため、根の研究のテンプレートを整備しました。テンプレートの word ファイルは根研究会ホームページ「根の研究投稿規定」(<http://www.jsrr.jp/rspnsv/rule.html>)からダウンロードできます。こちらにしたがって原稿を作成していただきますようお願いいたします。なお、テンプレート中の青字は投稿に関する規定や記載例です。投稿時には削除してください。

## 6. 「苜住」国内研修支援の募集

・本年度は渡航費の高騰もあり、国内の会員間の横のつながりを強めることとより支援の回数を増やすことを目的に、ポストドク・学生会員向けに根に関する研究方法習得のためなどの国内研修の旅費として年間 4 件程度（前後期各 1～2 件，1 件 3 万円を目安）を助成します。

・受付は随時行い（1月～12月）、採択数に達した時点で終了とします。

※詳細は根研究学会ホームページ（<http://www.jsrr.jp/img/AQyPg4sU.pdf>）でご確認ください。

## 7. 学生会員の研究集会への参加費は無料です

学生会員の研究集会への参加費は無料です！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。この機会に是非、根研究学会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。なお、一般会員の研究集会への参加費は有料です。また、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。

## 8. 会費納入のお願い

2024 年度の会費をまだお支払いいただけていない方は、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ください。

年会費（2024 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

[他の銀行から振り込みの場合：ゆうちょ銀行 ○一九店（ゼロイチキユウテン）「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：[neken2024@jsrr.jp](mailto:neken2024@jsrr.jp) 『根の研究』編集委員長：[editor2024@jsrr.jp](mailto:editor2024@jsrr.jp)  
Plant Root 編集委員長：[editor2024@plantroot.org](mailto:editor2024@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/>

## リンドウ科植物を基源とする生薬抽出液を用いた植物とアーバスキュラー菌根菌の共生促進

齊藤光<sup>1)</sup>・酒井彩衣<sup>1)</sup>・東優花<sup>1)</sup>・富永貴哉<sup>2)</sup>・上中弘典<sup>\*3)</sup>

1) 鳥取大学大学院持続性社会創生科学研究科農学専攻

2) 鳥取大学大学院連合農学研究科

3) 鳥取大学農学部

**要 旨** : アーバスキュラー菌根 (AM) 菌は陸上植物の約 7 割と根において共生できる糸状菌であり、相利共生により植物に対して土壤中のリン酸を供給する。そのため、AM 菌接種により貧リン酸条件でも効率的なリン酸の利用と植物生育の改善が期待できる。先行研究において、リンドウ科植物のセコイリド配糖体に AM 菌の菌糸分岐促進能が備わっており、その処理により AM 菌の感染が促進されることを明らかにしている。本研究では、リンドウ科植物由来のセコイリド配糖体の機能を利用した農業資材開発を目的に、低コスト化のためにリンドウ科の生薬から調製した抽出液が化学的純品を代替できるかについて検討した。リンドウ科の生薬リュウタンの熱水抽出液を調製し、HPLC を用いて測定したセコイリド配糖体含有量をもとに、以後の試験を行った。AM 菌を用いたバイオアッセイの結果、生薬抽出液には化学的純品に相当する菌糸分岐促進能が認められた。また、生薬抽出液を処理することで、チャイブとトマトにおいて AM 菌の感染が有意に高まった。一方で、トマトにおける共生のマーカー遺伝子の発現解析では、生薬抽出液の処理による変化は認められなかった。植物の生育に対する影響が認められなかったことも合わせて考えると、リンドウ科植物由来のセコイリド配糖体が備える AM 菌の菌糸分岐促進能を発揮させる目的で、生薬を基源とする抽出液が利用可能であると考えられる。

**キーワード** : アーバスキュラー菌根共生, 生薬, チャイブ, トマト, リンドウ科。

**Promotion of symbiosis between plants and arbuscular mycorrhizal fungi using crude drug extract derived from plants belonging to the Gentianaceae family** : Hikaru SAITO<sup>1)</sup>, Ayae SAKAI<sup>1)</sup>, Yuka HIGASHI<sup>1)</sup>, Takaya TOMINAGA<sup>2)</sup> and Hironori KAMINAKA<sup>\*3)</sup> (<sup>1)</sup>Department of Agricultural Science, Graduate School of Sustainability Science, Tottori University, <sup>2)</sup>The United Graduate School of Agricultural Science, Tottori University, <sup>3)</sup>Faculty of Agriculture, Tottori University)

**Abstract** : Arbuscular mycorrhizal (AM) fungi can establish a mutual symbiotic relationship with approximately 70% of terrestrial plants in their roots and supply them with phosphate. Thus, inoculation with AM fungi leads plants to use the phosphate efficiently and improve growth even under phosphate-starvation conditions. We previously demonstrated that secoiridoid glycosides derived from plants belonging to family Gentianaceae can promote hyphal branching and colonization of AM fungi. The present study investigated whether gentian crude drug extract could replace chemical secoiridoid glycoside and be developed as a new agricultural resource at a low cost. The amount of secoiridoid glycoside in a hot water extract of the gentian crude drug (Ryutan) was measured by high-performance liquid chromatography, which was used for the experiments. Bioassay using AM fungus revealed that the crude drug extract promoted hyphal branching equivalent to that promoted by chemical secoiridoid glycoside. Furthermore, treatment with crude drug extract substantially enhanced the colonization rate of AM fungus in chives and tomatoes. Expression analysis of marker genes for symbiosis in tomatoes revealed no significant changes after treatment with crude drug extract. Considering that crude drug extract had no effect on plant growth, our results demonstrate that gentian crude drug extract can be used as secoiridoid glycoside derived from plants belonging to the Gentianaceae family.

**Keywords** : Arbuscular mycorrhizal symbiosis, Chive, Crude drug, Gentianaceae, Tomato.

## 緒言

陸上植物の約 9 割が、菌類と根において共生器官で

ある菌根を形成できる。菌根を形成する菌類は一般的に菌根菌と呼ばれる。菌根は形態や構造などを基に分類されており、その中でもアーバスキュラー菌根

(AM) は 70%以上の植物種で形成が認められる最も代表的な菌根である (齊藤, 2020). AM を形成する AM 菌はケカビ門グロムス亜門に属する菌類であり, 土壤中で胞子から菌糸を伸ばし, 植物の根に到達すると根内に菌糸を伸長させ, 皮層細胞内で樹枝状体 (アーバスキュール) や囊状体といった特徴的な形態を示す. 樹枝状体は植物との栄養交換の場となっており, 植物からは糖や脂肪酸の形で炭素源の供給を受ける代わりに, AM 菌からは土壤から得たリン酸などが植物に供給される. そのため, AM 菌を接種することでリン酸が少ない土壤でも効率的なリン酸の利用と植物生育の改善が期待できる. AM 菌はアブラナ科, タデ科, ヒユ科を除く大部分の作物に感染できることから, AM 菌の農業利用が期待されてきた (齊藤, 2020). しかしながら, AM 菌を用いた菌根菌資材 (VA 菌根菌資材) は地力増進法で定められた唯一の微生物資材ではあるが, 国内での普及は進んでいないのが現状である. 連年の多量のリン肥料の施用により菌根菌資材の使用効果が発揮されにくいこと, ならびに他の土壤改良資材と比べて非常に高価であることなどが, その理由に挙げられる.

土壤中には様々な微生物が生息しているため, 植物は AM 菌を誘引するために根からストリゴラクトンを分泌していることが知られている (秋山・林, 2006). 一方で, 我々はストリゴラクトンとは異なる AM 菌の菌糸分岐促進物質として, リンドウ科植物に多量に含まれるモノテルペン類で, 苦み配糖体としても広く知られるセコイリドイド配糖体を新規に同定した (Tominaga et al., 2023). この報告において, リンドウ科植物の代表的なセコイリドイド配糖体であるゲンチオピクロシド (GPS) とスウェルチアマリン (SWA) について AM 菌の菌糸分岐活性を調べた結果, *Rhizophagus* 属の AM 菌に対してストリゴラクトンと同程度かそれ以上の活性が備わっていることが明らかとなった. さらに, AM 菌接種時に GPS を栽培土壤に施用することで, リンドウ科以外の作物においても AM 菌の感染率が 2 倍以上増加した. すなわち, リンドウ科植物由来セコイリドイド配糖体による AM 菌の菌糸分岐の促進により, AM 菌の感染促進が起こっていると考えられる. 特筆すべきは, これらセコイリドイド配糖体は 1-10 nM という非常に低濃度で十分な菌糸分岐活性と AM 菌との共生促進効果の両方を示したことである.

これまでの研究成果から, リンドウ科植物由来のセコイリドイド配糖体が備える AM 菌に対する機能を利用することで, 作物と AM 菌の共生を促進する新しい農業資材の開発が可能であると考えられた. しかしながら, 先行研究にて使用されたリンドウ科植物由来の

セコイリドイド配糖体の化学的純品は高価であるため, その利用にはコスト面での課題がある. 一方, リンドウ科植物はセンブリやリュウタン, ゲンチアナなどの生薬として広く市場にも流通している. そして, 日本薬局方に記載されているように, これら生薬の主成分はセコイリドイド配糖体である. すなわち, これら生薬はセコイリドイド配糖体を多量に含有している. そのため, 化学的純品の代わりにリンドウ科植物の生薬から得た抽出液を利用することで, コスト面での課題を解決できると考えた. しかしながら, 生薬抽出液にはセコイリドイド配糖体以外の成分も含まれていることから, 植物への副作用がある可能性も否定できない. そこで本研究では, AM 菌の共生を促進する農業資材の原料開発を最終目的として, 実際にリンドウ科植物を基源とする生薬抽出液による AM 菌および共生に対する効果を検証した. また, 作物栽培への適用を考え, 化学的純品と同じ効果を検証するだけでなく, 植物の生育への影響も調査することで, 副作用についても検討した.

## 材料と方法

### 1. 生薬抽出液の調製

リンドウ科植物の生薬であるリュウタン (竜胆) は, 中国産の刻みの形状のものを中屋彦十郎薬舗より購入した. リュウタン 10 g に対して沸騰蒸留水 500 mL を用いて 10 分間熱水抽出を行うことで, 生薬抽出液を得た. 得られた生薬抽出液は再度 500 mL にメスアップ後, 吸引式ろ過ユニット (Sartolab RF, Sartorius, Göttingen, Germany) を用いて滅菌した上で, 4°C にて保存した.

### 2. ゲンチオピクロシド量と AM 菌の菌糸分岐活性の測定

HPLC を用いた GPS 量の測定と AM 菌 *Rhizophagus irregularis* DAOM197198 の菌糸分岐活性の測定は, 既報の通りに実施した (Tominaga et al., 2023). *R. irregularis* DAOM197198 の無菌胞子液は Premier Tech (Quebec, Canada) より, 合成ストリゴラクトン GR24 と GPS は StrigoLab (Torino, Italy) と東京化成工業より, それぞれ購入したものをを用いた. 菌糸分岐活性の測定では, まず 24 well 細胞培養プレート (日本ジェネティクス) に 350  $\mu$ L の M 培地を含有する 0.4% Phytigel (Sigma-Aldrich, MO, USA) を分注し, 冷え固まった培地中央に *R. irregularis* DAOM197198 の胞子を約 8 個ずつ置床した. その後, 40°C 程度まで冷ました 3 mM  $MgSO_4$  含有 0.3% Phytigel を 150  $\mu$ L ずつ胞子を乗せた培地にゆっくりと分注し, 胞子を培地内に閉じ込めた. プレートは 25°C, 暗所で 5 日間培養することで胞子

第1表 RT-qPCR に使用したプライマー.

Gene	GeneID	Forward primers (5'-3')	Reverse primers (5'-3')
<i>PT4</i>	Solyc06g051860	TTGCTCGGGGTATCTTTTG	AGGATAATCTCCCCAATGC
<i>STR</i>	Solyc01g097430	ATGACCATCCATCAGCCTTC	ATTTTCGCCATCTGGAACGTG
<i>Actin</i>	Solyc11g005330	TTGCTGACCGTATGAGCAAG	GGACAATGGATGGACCAGAC

を発芽させた。段階希釈した生薬抽出液もしくは蒸留水 200  $\mu$ L を培地表面に滴下し、さらに同条件で 7-10 日間培養を続けた後に、実体顕微鏡を用いて発芽菌糸上で分岐した菌糸数を測定した。なお、発芽しなかった胞子は測定から除外した。生薬抽出液は滅菌蒸留水を用いて  $10^4$ ,  $10^5$ ,  $10^6$  倍に段階希釈したものを、GR24 は 100 nM の濃度にて、それぞれ使用した。対照区 (無処理) としては滅菌蒸留水を用いた。各処理区につき well を 3 から 4 つ用意し、well 内の全ての胞子について測定を行った。

### 3. 植物の栽培と AM 菌の接種

トマト (*Solanum lycopersicum* L. cv. Sugar Lump, サカタのタネ) とチャイブ (*Allium schoenoprasum*, サカタのタネ) の種子を、70% エタノール中にて 30 秒間表面を洗浄後、蒸留水にて洗浄した。その後、1.5% 次亜塩素酸ナトリウム溶液を用いて 15 分間表面殺菌した種子をクリーンベンチ内で滅菌蒸留水にて洗浄後、滅菌蒸留水にて湿らせたろ紙 (ADVANTEC) 上に静置し、25°C、暗所にて 3 日間、その後明所にて 4 日間培養することで実生を得た。川砂とバーミキュライトを 2 : 1 の割合で混合した土壌をプラントボックス (SP インキュティッシュ PP, バイオメディカルサイエンス) に入れ、オートクレーブを用いて滅菌 (121°C, 20 分) したものを滅菌土壌として用いた。AM 菌を接種する場合は、*R. irregularis* DAOM197198 の research grade の胞子ベースの接種資材 (SYMPLANTA, Darmstadt, Germany) を 1 ボックスあたり 1000 胞子ずつ滅菌土壌と混合した。トマトは 2 つのプラントボックスに 3 個体ずつの計 6 個体、チャイブは 12 個体の実生をプラントボックス内の滅菌土壌に移植した。培養液はリン濃度のみ 20  $\mu$ M に調製した 1/5 Hoagland 溶液を使用し、60 mL ずつプラントボックスに添加した。生薬抽出液は滅菌蒸留水にて 10 倍に希釈後、培養液 10 mL に対して 1  $\mu$ L 加えた (最終希釈倍率  $10^5$ )。対照区 (無処理) としては滅菌蒸留水を用いた。明期 14 時間、暗期 10 時間、25°C の条件で AM 菌接種後 5 週間栽培を行い、得られた植物の根を AM 菌の感染率の測定と遺伝子発現解析に供した。

### 4. AM 菌の感染率の測定

トマトとチャイブの根を 1 cm 程度に細断し、FAA

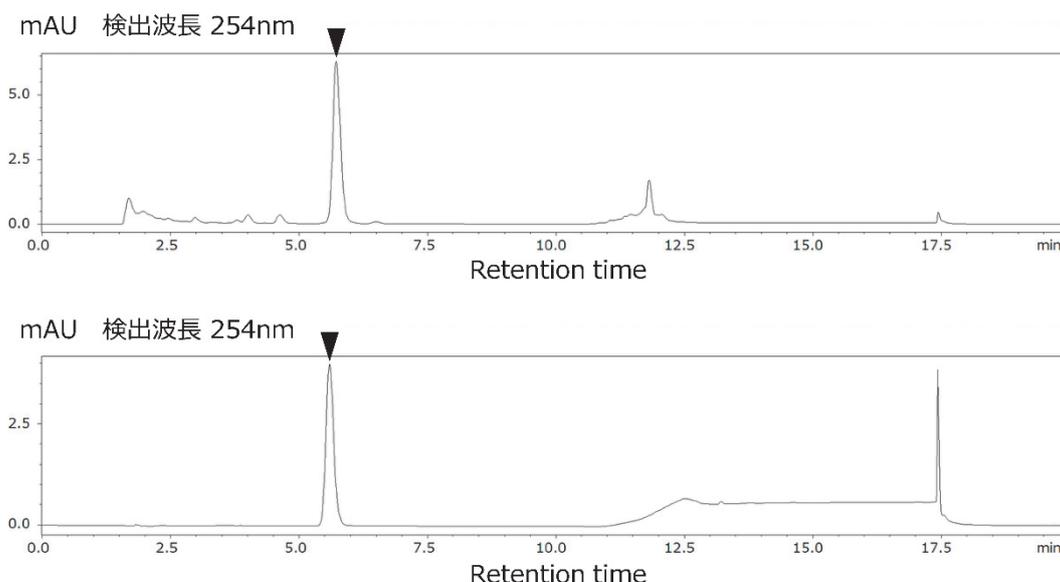
に浸漬することで固定した。固定した根はトリパンブルーを用いて染色を行い、McGonigle 法 (McGonigle et al., 1990) を用いて感染率の測定を行った。

### 5. 遺伝子発現解析

5 週栽培したトマトのうち代表的な 3 個体の根からの Total RNA の抽出は、Fruit Mate for RNA purification (タカラバイオ) による前処理後、RNAiso Plus (タカラバイオ) を用いて行った。微量分光光度計 (DS-11+ : Denovix, DW, USA) を用いて RNA 量を測定後、100 ng の Total RNA を用いて ReverTra Ace qPCR RT Master Mix with gDNA Remover (東洋紡) によりゲノム DNA 除去反応と逆転写反応を行った。得られた cDNA を鋳型に用い、THUNDERBIRD SYBR qPCR Mix (東洋紡) を用いて PCR を行った。定量 PCR は CFX Connect Real-Time System (BIO-RAD) を用いて実施した。PCR の反応条件は、95°C で 20 秒反応後、95°C で 15 秒、55°C で 15 秒、72°C で 30 秒の反応を 50 サイクル実施後、95°C で 10 秒反応し、最後に融解曲線分析のための反応 (65°C から 95°C に徐々に上昇) を行った。トマトにおいて AM 共生時に発現が特異的に誘導されるマーカー遺伝子 *PHOSPHATE TRANSPORTER 4 (PT4)* と G-type ABC transporter (*STR*) の配列は既報の論文 (Tominaga et al., 2022) にて同定された情報を用い、PCR に使用するプライマーを設計した。内在性コントロールとして使用した *Actin* 遺伝子については、既報の論文にて使用されたものを用いた (Karniel et al., 2022)。これらのプライマーの塩基配列は第 1 表に示した。各遺伝子の平均発現量は *Actin* 遺伝子の発現量に対して  $2^{-\Delta\Delta Ct}$  法 (Livak and Schmittgen, 2001) を用いて正規化した。

### 6. チャイブの生育に対する生薬抽出液の影響評価

前述通り発芽させたチャイブの実生を、300 mL の滅菌土壌を入れた 3 つのプラスチックポット (プレステラ 105 型, アップルウェア) に 3 個体ずつ、計 9 個体移植した。川砂とバーミキュライトを 1 : 1 の割合で混合後、前述通りオートクレーブ滅菌したものを滅菌土壌とした。実生移植時に生薬抽出液を水道水で 10 倍希釈したものを土壌に 500 mL 添加することで生薬抽出液の処理をした。対照区 (無処理) としては水道水を与えた。栽培期間中は窒素濃度 250 ppm となる



第1図 生薬抽出液の HPLC クロマトグラム。上段は生薬抽出液，下段はゲンチオピクロシド標準試料のピーク形状をそれぞれ示す。矢尻はゲンチオピクロシドに対応するピークを示す。

よう 1000 倍希釈した液肥ピータース N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O = 25-5-20 (ハイポネックス) を底面灌水にて毎週 1 回与えた。先述通りの栽培条件で 2 か月間栽培後、各個体の地上部新鮮重量を電子天秤 (ME204, メトラー) を用いて測定した。

### 7. 統計解析

第 2 図における処理区間の菌糸分岐数については、one-way ANOVA と Tukey HSD 検定による分散分析と多重比較を R 言語で行い、有意水準 5% 未満で統計的に有意差が認められるか判断した。AM 菌の感染率とチャイブの地上部新鮮重量の平均値の比較については、マイクロソフトエクセルを用いた *t* 検定により実施した。

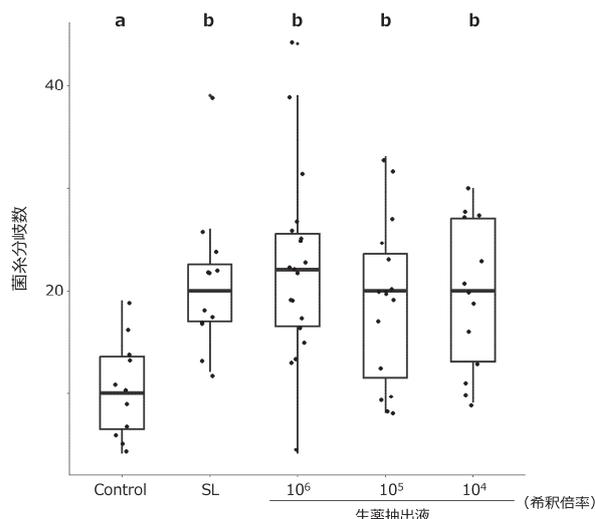
## 結果

### 1. 生薬抽出液中のセコイリド配糖体の定量

一般的な生薬の煎じ方に従い生薬リュウタンより熱水抽出液を調製し、HPLC を用いて含有する GPS 量を測定した。GPS の標準試料と保持時間が一致するピークが、生薬抽出液でも認められた (第 1 図)。得られた HPLC のピークパターンは、トルコギキョウの根抽出液のものと同様であった (Tominaga et al., 2023)。生薬抽出液中の GPS 濃度は、ピーク面積より 5.071 mM と算出された。

### 2. AM 菌の菌糸分岐と菌根共生に対する生薬抽出液の効果

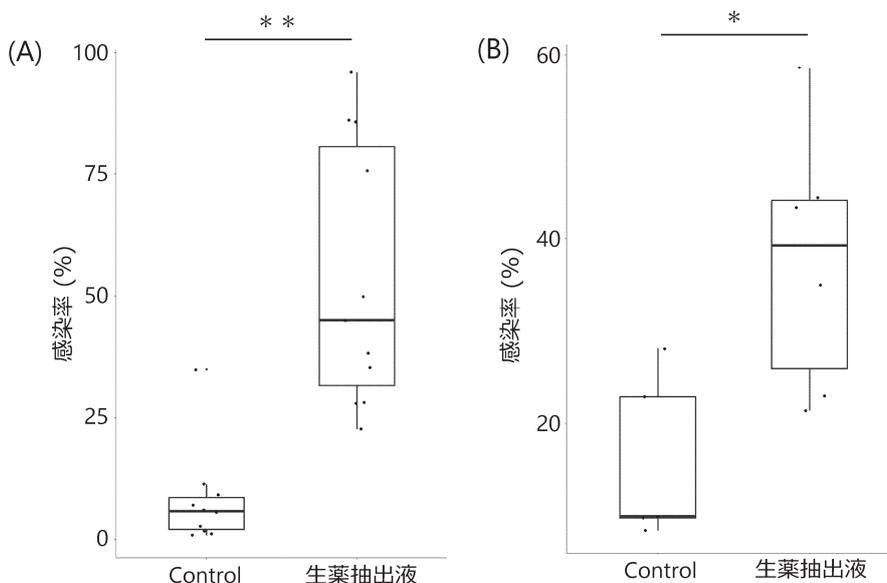
次に、化学的純品で認められたストリゴラクトンと



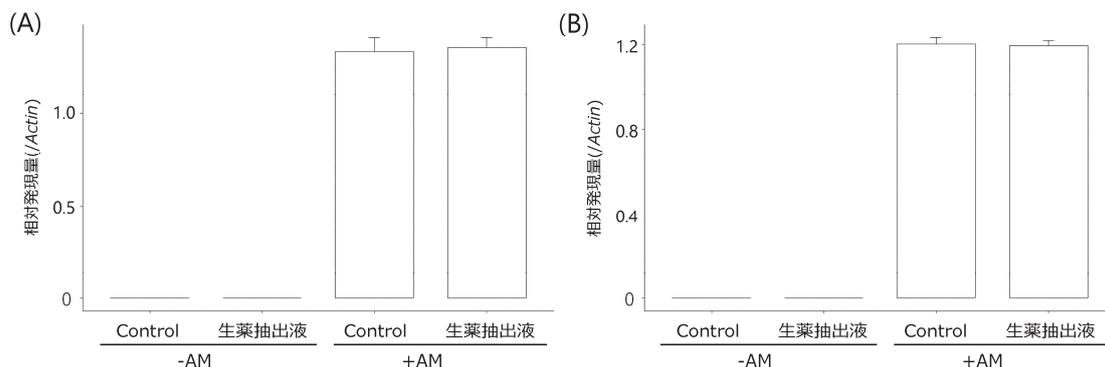
第 2 図 アーバスキュラー菌根菌 *Rhizophagus irregularis* の菌糸分岐に対する生薬抽出液の影響。

Control は対照区 (無処理)、SL は合成ストリゴラクトン GR24 を 100 nM 処理した実験区をそれぞれ示す。エラーバーは標準誤差を示す。異なるアルファベット間では、TukeyHSD 検定による多重比較の結果から統計的に有意な差があることを示す ( $n > 11; P < 0.05$ )。

同程度以上の菌糸分岐活性と AM 共生の促進効果が、GPS を含有する生薬抽出液にも認められるかについて調査した。*R. irregularis* の菌糸分岐数を測定した結果、10<sup>4</sup> から 10<sup>6</sup> 倍に段階希釈した生薬抽出液の処理全てで有意な菌糸分岐数の増加が認められた (第 2 図)。これらの生薬抽出液には GPS が約 5-500 nM 含まれているが、100 nM の合成ストリゴラクトン GR24 と同程度の菌糸分岐活性が認められた。これらの結果は GPS



第3図 アーバスキュラー菌根菌 *Rhizophagus irregularis* を接種したチャイブ (A) とトマト (B) における感染率に対する生薬抽出液の影響。  
Control は対照区 (無処理), 生薬抽出液は  $10^5$  倍希釈した生薬抽出液を処理した実験区をそれぞれ示す。エラーバーは標準誤差を示す。\*印は、*t* 検定の結果、対照区との平均値間に有意な差があることを示す ([A]  $n = 12$ , [B]  $n = 6$ ; \*:  $P < 0.05$ , \*\*:  $P < 0.01$ )。



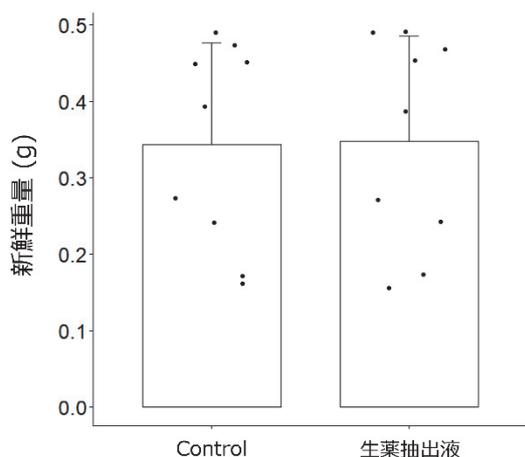
第4図 アーバスキュラー菌根 (AM) 菌 *Rhizophagus irregularis* を接種したトマトにおける共生マーカー遺伝子 *PT4* (A) と *STR* (B) の発現に対する生薬抽出液の影響。  
Control は対照区 (無処理), 生薬抽出液は  $10^5$  倍希釈した生薬抽出液を処理した実験区, -AM は AM 菌非接種区, +AM は AM 菌接種区をそれぞれ示す。各遺伝子の平均発現量は *Actin* 遺伝子の発現量に対して  $2^{-\Delta\Delta C_T}$  法を用いて正規化した相対発現量で示した。エラーバーは標準誤差を示す ( $n = 3$ )。

を使用した先行研究 (Tominaga et al., 2023) と一致していた。次に、チャイブとトマトにおける *R. irregularis* との共生に対する生薬抽出液の影響を調査した。その結果、どちらの植物においても生薬抽出液の処理により AM 菌の感染率が有意に増加した (第3図)。

### 3. AM 共生マーカー遺伝子の発現と植物の生育に対する生薬抽出液の影響

生薬抽出液については、AM 菌に対する菌糸分岐活性と共生の促進効果が認められた。この効果は生薬抽出液の AM 菌に対する作用によるものと考えら

れるが、一方で植物における共生の制御に対しても効果がある可能性は否定できない。そこで、AM 菌との共生における生薬抽出液の植物に対する影響を明らかにするために、植物における AM 菌との共生度を評価できるマーカー遺伝子の発現解析を行った。その結果、AM 共生のマーカー遺伝子である *PT4* と *STR* の両遺伝子の発現は AM 菌非接種区 (-AM) では全く認められなかった。一方で、AM 菌接種区 (+AM) ではこれら遺伝子の発現が顕著に誘導されたが、生薬抽出液処理による有意な発現量の変化は認められなかった (第4図)。また植物の生育に対する生薬抽出液処理の影響を評価した。高濃度の生薬抽出液 (10 倍希釈) を栽



第5図 チャイブの生育に対する生薬抽出液処理の影響。Controlは対照区(無処理)、生薬抽出液は $10^5$ 倍希釈した生薬抽出液を処理した実験区をそれぞれ示す。栽培土壌に移植後2ヶ月のチャイブ実生の地上部新鮮重量を測定した。t検定の結果、対照区との平均値間に有意差は認められなかった。エラーバーは標準誤差を示す(n=9)。

培土壌に添加し、チャイブの実生を2ヶ月間生育させたが、未処理区と比較して地上部新鮮重量に有意な差は認められなかった(第5図)。

### 考察

リン鉱石の鉱脈をもたない我が国は、作物栽培に必須なリン酸の原料を海外資源に完全に依存している。そのため、AM菌を利用したリン酸の減肥は安定的な作物生産を行う上で有効な手段になりうると考えられる。また、農林水産省は「みどりの食料システム戦略」において化学肥料の30%削減を掲げているが、リン酸についてはAM菌の効率的な利用が目標達成手段の一つであると考えられる。本研究では、リンドウ科植物由来の生薬リュウタンより簡単に調製できる抽出液の処理によりAM菌の菌糸分岐が促進されるとともに、AM菌の植物への感染も高めることが可能であることを明らかにした。

生薬リュウタンは、「トウリンドウ *Gentiana scabra* Bunge, *Gentiana manshurica* Kitagawa 又は *Gentiana triflora* Pallas (*Gentianaceae*) の根及び根茎である。」と日本薬局方で規定されている。リンドウ科植物はセコイリドイド配糖体であるGPSとSWA、アマロゲニチン等が含有されることが知られているが、リュウタンにはGPSが多量に含まれている(林, 1976)。生薬リュウタンから調製した生薬抽出液にはセコイリドイド配糖体だけでなく他のリンドウ科植物由来の成分も含まれていることから、生薬抽出液の処理によるAM菌の菌糸分岐の促進以外に植物に対する副作用が認められ

る可能性が考えられた。実際、リュウタンは通風、解熱、鎮痛に利用されているため、生体に様々な生理作用を示す可能性がある(林, 1976)。また、リンドウ科植物由来のセコイリドイド配糖体であるGPS、SWAおよびスウェロシドだけでなく、リンドウ科の *Centaurium pulchellum* の地上部や根のメタノール抽出液には、様々な細菌や真菌に対する抗菌性が認められている(Šiler et al., 2010)。植物への影響に関しては、AM共生の促進効果が認められた濃度の $10^4$ 倍の濃度の生薬抽出液を与えても、チャイブの生育に対する負の影響は認められなかった。また、トマトでの遺伝子発現解析を行ったが、AM共生マーカー遺伝子の発現に対する生薬抽出液の影響は認められなかった。一般的にはAM共生マーカー遺伝子の発現量とAM菌の感染率には相関が認められる。しかしながら、本研究ではAM菌を接種したが生薬抽出液は加えなかった処理区において上限まで発現が誘導されたため、感染率が増加した生薬抽出液処理区であっても更なる発現量の増加が認められなかったと示唆される。AM菌 *R. irregularis* の菌糸分岐に対する生薬抽出液の処理効果は、含有する主なセコイリドイド配糖体であるGPSの化学的純品を与えた場合と同程度であった(Tominaga et al., 2023)。すなわち、生薬リュウタンからはセコイリドイド配糖体以外の成分も熱水抽出されていると考えられるが、本研究においては生育への悪影響などの植物への影響はなく、生薬抽出液の処理によりAM菌の感染促進のみが期待できると考えられる。

ストリゴラクトンは比較的不安定であることが知られている(Akiyama et al., 2005; Yoneyama, 2020)。近年植物ホルモンとしても知られるストリゴラクトンについては、広く知られる植物の側芽の生長抑制効果や寄生植物の発芽促進だけでなく、植物に対する様々な効果が報告されている(Chesterfield et al., 2020)。ストリゴラクトンの合成品であるGR24は比較的安定であるとの報告もあるが(Akiyama et al., 2010)、市販品は非常に高価である。これらを総合すると、ストリゴラクトンをAM菌の感染促進を目的として利用することは現実的ではない。一方で、化学的純品のGPSとSWAはfMオーダーでも菌糸分岐の促進効果が認められており、植物へのAM菌の感染促進はnMオーダーの範囲で確認されている(Tominaga et al., 2023)。本研究では、短時間の熱水抽出のみで生薬リュウタンから非常に高濃度のセコイリドイド配糖体GPSを抽出でき、AM菌の菌糸分岐と感染の促進効果が約50 nMのGPSを含有する $10^5$ 倍希釈の生薬抽出液でも確認できた。熱水抽出によりセコイリドイド配糖体が得られることから、本物質の熱安定性は非常に高いと考えら

れる。また本研究で使用した生薬リュウタンは約 1 万円/kg で国内にて市販されており、1 kg のリュウタンから 5 mM の生薬抽出液が 50 L 調製でき、かつ  $10^5$  倍希釈で利用できる。そのため、リンドウ科植物由来の生薬を原料とした AM 菌の感染促進を効能とする新しい農業資材の開発が、普及の問題となるコスト面から見て十分実現可能であると考えられる。リンドウ科植物由来のセコイリド配糖体による効果は *Gigaspora* 属の AM 菌に対しては認められないが (Tominaga et al., 2023)、本研究でも効果が認められた *Rhizophagus* 属の AM 菌は市販の菌根菌資材の多くで用いられている。また菌根菌資材由来の接種菌の利用以外にも、作物の栽培には土着の AM 菌を有効利用する輪作体系の構築も行われている (神山・佐藤, 2019)。そのため、菌根菌資材由来の接種菌だけでなく土着菌の感染も安定的に高める目的で、本研究での知見を基にリンドウ科植物の生薬を基源とする抽出液が今後広く利用可能であると期待される。

#### 謝辞

本研究の一部は、JST A-STEP トライアウトの支援を受けて実施した。

#### 引用文献

- 秋山康紀, 林英雄 2006. アーバスキュラー菌根共生におけるシグナル物質. 蛋白質核酸酵素 51: 1024-1029.
- Akiyama, K., Matsuzaki, K-I., Hayashi, H. 2005. Plant sesquiterpenes induce hyphal branching in arbuscular mycorrhizal fungi. *Nature* 435: 824-827.
- Akiyama K., Ogasawara S., Ito S., Hayashi H. 2010. Structural requirements of strigolactones for hyphal branching in AM Fungi. *Plant Cell Physiol.* 51: 1104-1117.
- Chesterfield, R. J., Vickers, C. E., Beveridge, C. A. 2020. Translation of strigolactones from plant hormone to agriculture: Achievements, future perspectives, and challenges. *Trends Plant Sci.* 25: 1087-1106.
- 林輝明 1976. リンドウ科植物を基源とする生薬の研究 (第 1 報) ゲンチアナ, リュウタン中の苦味成分 Gentiopicroside の定量. *Yakugaku Zasshi* 96: 356-361.
- Karniel, U., Berke, N. A., Mann, V., Hirschberg, J. 2022. Perturbations in the carotenoid biosynthesis pathway in tomato fruit reactivate the leaf-specific phytoene synthase 2. *Front. Plant Sci.* 13: 844748.
- 神山拓也, 佐藤匠 2019. アーバスキュラー菌根菌の接種効果を決定する環境要因. *根の研究* 28: 23-37.
- Livak K. J., Schmittgen, T. D. 2001. Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the  $2^{-\Delta\Delta Ct}$  method. *Methods* 25: 402-408.
- McGonigle, T. P., Miller, M. H., Evans, D. G., Fairchild, G. L., Swan, J. A. 1990. A new method which gives an objective-measure of colonization of roots by vesicular arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytol.* 115: 495-501.
- 齊藤雅典 2020. 菌根の世界: 菌と植物のきってもきれない関係. 築地書館.
- Šiler, B., Mišić, D., Nestorović, J., Banjanac, T., Glamočlija, J., Soković, M., Ćirić, A. 2010. Antibacterial and antifungal screening of *Centaurium pulchellum* crude extracts and main secoiridoid compounds. *Nat. Prod. Commun.* 5: 1525-1530.
- Tominaga, T., Miura, C., Takeda, N., Kanno, Y., Takemura, Y., Seo, M., Yamato, M., Kaminaka, H. 2020. Gibberellin promotes fungal entry and colonization during *Paris*-type arbuscular mycorrhizal symbiosis in *Eustoma grandiflorum*. *Plant Cell Physiol.* 61: 565-575.
- Tominaga, T., Ueno, K., Saito, H., Egusa, M., Yamaguchi, K., Shigenobu, S., Kaminaka, H. 2023. Monoterpene glucosides in *Eustoma grandiflorum* roots promote hyphal branching in arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Physiol.* 193: 2677-2690.
- Tominaga, T., Yao, L., Saito, H., Kaminaka, H. 2022. Conserved and diverse transcriptional reprogramming triggered by the establishment of symbioses in tomato roots forming *Arum*-type and *Paris*-type arbuscular mycorrhizae. *Plants* 11: 747.
- Yoneyama, K. 2020. Recent progress in the chemistry and biochemistry of strigolactones. *J. Pestic. Sci.* 45: 45-53.

## 熱帯多雨林の細根動態の解析—スキャナー法による研究事例とその課題—

遠藤いず貴

兵庫県立大学環境人間学部

公立千歳科学技術大学理工学部

酪農学園大学獣医学群

**要 旨** : 熱帯多雨林の年間の総一次生産量は陸地合計の約 1/3 に達する。さらに、葉の光合成による同化産物の約 1/3 が細根生産に配分されるとも試算されている。細根の成長、枯死分解は熱帯多雨林の炭素循環に大きな役割を果たすが、細根の成長、枯死分解は比較的短い期間に同時に起こることから、その年間を通じた観測およびそれらに影響する要因を解明することは難しい。本稿では、非破壊的に連続して根の動態を観測できるスキャナー法を用いて、マレーシア、ボルネオ島のランビル・ヒルズ国立公園の熱帯多雨林において細根の成長および枯死分解を経時的に調査し、その季節性、場所ごとの違いや根直径の特徴に関する研究事例を紹介する。ランビル・ヒルズ国立公園の森林内 5 か所で撮影したスキャナー画像をもとに、画像解析ソフトを用いて根を抽出し、根直径ごとの根長を測定した。その結果、月平均の細根成長量と枯死分解量に明確な季節性は認められなかった。また、場所ごとの細根成長量と枯死分解量が多い月について、気象要因との相関関係はほとんど認められなかった。さらに、直径 0.5 mm 以下の細い根が成長量と枯死分解量の 8 割以上を占めた。これらのことは熱帯多雨林に明確な季節性がないことや、樹種の多様性が高いことが影響していると考えられた。本稿では、さらにスキャナー法を用いた細根動態の研究の課題や展望についても提示した。

**キーワード** : 気象要因, 細根の成長と枯死分解, 樹種間差, 炭素循環, フラットベッドスキャナー。

**Fine root dynamics analyses in a tropical rain forest—A case study and challenges on root scanner method—** : Izuki ENDO (School of Human Science and Environment, University of Hyogo, Department of Applied Chemistry and Bioscience, Chitose Institute of Science and Technology, School of Veterinary Medicine, Rakuno Gakuen University)

**Abstract** : It is estimated that the annual gross primary production in tropical rainforests is as high as 1/3 of which produced on terrestrial area. Additionally, about 1/3 of the assimilated products by photosynthesis is allocated to fine root. However, because fine root growth, mortality, and decomposition occur simultaneously in a relatively short period of time in underground, it is difficult to observe them throughout the year to elucidate the factors that affect them. In this mini-review, I present our case study that investigated the spatial and temporal patterns of root dynamics in a Bornean tropical rainforest, Malaysia, using a scanner method. Scanner images were taken at five locations in the forest of Lambir Hills national park. Roots were extracted from scanner images using software, and root lengths were measured for each root diameter. The results showed that there was no clear seasonal pattern in the monthly average amount of fine root growth and mortality. In addition, there was little correlation with climatic factors with peak fine root growth and/or mortality for each location. These results may be due to the lack of clear seasonality in tropical rainforests and high diversity of tree species. Furthermore, very fine roots (<0.5 mm diameter) dominated substantial proportion of fine root growth and mortality. I also stated the challenges and perspectives of research on fine root dynamics using the scanner method.

**Keywords** : Carbon cycle, Climatic factors, Fine root growth and mortality, Flat-bed scanner, Interspecific differences in tree species.

## 1. はじめに

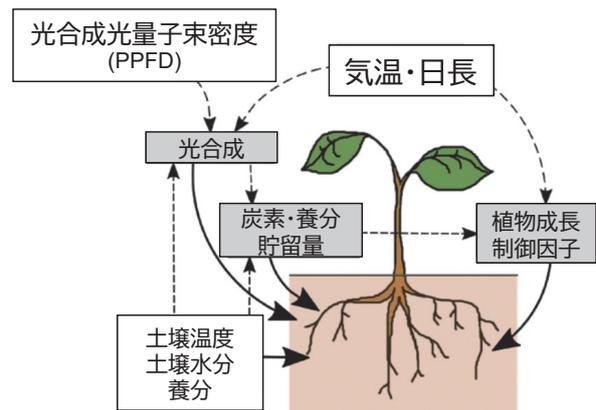
熱帯多雨林は、熱帯のうち赤道付近の降水量の多い地域に分布する森林で、年間平均気温が 26°C 以上、年間降水量が 1800 mm 以上の気象条件の場所に分布す

る(西村, 2017)。熱帯多雨林は地球の陸地面積の約 11% を占めるが、その年間の総一次生産量(植物が一年間に光合成によって二酸化炭素と水と太陽エネルギーから生産した有機物総生産量)は陸地合計の約 1/3 に達する(Beer et al., 2010)。これは、他の気候帯

に比べて熱帯多雨林で植物の生産性が高いことに加え、植物を構成する組織の入れ替わり（ターンオーバー；既存する器官が新しいものに置き換えられるプロセスで、生産と枯死で説明される現象）が一年を通して起こっているためであり、消失する量も多いことが大きく影響している。

光合成によって生産された同化産物は地下部の細根にも配分される。熱帯林の細根に配分される純一次生産量（総一次生産量から植物体による独立栄養呼吸を差し引いた量）は全体の約 27% とされ、樹冠や木質部分（幹、枝、粗根を含む）それぞれに配分される量と同程度であると報告されている (Malhi, 2012)。細根は、一般に直径 2 mm 以下の根と定義され、養水分吸収を担う器官である。細根のバイオマス量は樹木全体に対して大きくないが、多くの細根は数週間から数年で枯死する。一方で、細根は土壌から養水分を獲得するため、樹木は細根量を維持させる必要があると考えられる。そのため、細根のターンオーバーが短期間でくり返されることになり、同化産物の多くが細根に配分されることになる。特に、熱帯における樹木細根のターンオーバーの速度は温帯や北方林に比べて速いことが報告されている (Gill and Jackson, 2000)。また、細根からの滲出物や枯死根は土壌への炭素の供給源となる。そのため、熱帯多雨林の細根の生産量と枯死量の時間的な変動（細根動態）が地球上の森林生態系内の炭素循環に果たす役割は大きいと言える。一方で、細根動態を調査することは技術的に難しく、依然として不明な点が多い。特に、熱帯多雨林の細根動態に関するデータは少ない。したがって、全球的な森林の炭素収支の推定において、細根由来の炭素量が正確に評価されていない可能性がある。正確な炭素収支を推定するためには、熱帯多雨林における更なるデータの蓄積と、細根動態を制御する因子を明らかにしていくことが求められる。

根の成長による炭素固定は、大気中の二酸化炭素が葉の光合成によって有機物に変換され、その一部が地下部に運ばれることで起こる (野口, 2020)。また、根が枯死すると、植物によって固定された有機物は土壌に移行する。これらの植物から土壌への一連の炭素の流れは様々な要因によって影響を受ける。樹木の葉について、特に日本のような温帯地域においては、春になると展葉し、落葉樹は秋から冬に落葉するという季節性（フェノロジー）を示す (石井, 2019)。既往研究からは、根と枝の成長の関係は地域によって異なるとされ (小林, 2020)、根のフェノロジーは内因性や外因性の因子の、おそらく両方に左右されていることが示されている (第 1 図)。Radville et al. (2016) は、内因性因子として光合成、炭素・養分の貯留量、植物の成長

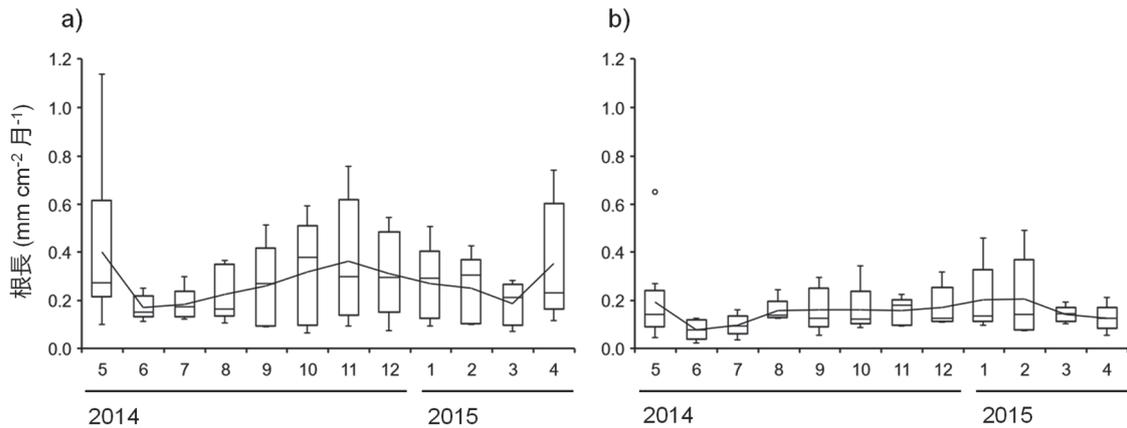


第 1 図 根のフェノロジーの制御要因 (Radville et al., 2016 より改変)。  
 実線：直接制御、破線：間接制御を示し、  
 灰色：内因性因子、白色：外因性因子を示す。

制御因子を挙げており、外因性因子として光合成量子束密度、気温・日長、土壌の温度や養水分を挙げている (第 1 図)。そして、これらの役割は樹種や環境によって異なるとしている。McCormack et al. (2014) は圃場栽培実験 (common garden experiment) を行い、環境要因等の外因性因子が同じであっても、根が成長する時期や成長ピークを示す年間の回数が年変異を示す樹種や、一定のフェノロジーを示す樹種といった、樹種間に根のフェノロジーの違いがあることを示した。この実験では、種が異なれば、資源供給等の内因性因子や気候要因等の外因性因子に対処するための戦略も異なることを示唆している。また、外因性因子として地温や水分量といった環境要因は根の成長開始や停止に影響するとされる (Radville et al., 2016)。さらに、熱帯多雨林では細根生産量に降水量が寄与していることが示唆されている (Kho et al., 2013)。しかしながら、熱帯多雨林において年間を通じたデータが不足していることから、細根がいつ、どのような要因によって成長や枯死するのかという年間を通じた細根のフェノロジーは不明である。

スキャナー法は、土壌中に透明なアクリルボックスを埋設し、そこに市販のフラットベッドスキャナーを定期的に挿入して地下部をスキャンし、画像に写り込んだ個々の根の成長から消失を追跡するという方法である。根を掘り取るなどの破壊的な手法と異なり、連続的に根の成長や枯死を追跡できる有効な手法の一つである (Dannoura et al., 2008; 大橋ら, 2012; 平野・野口, 2012; 福澤, 2022)。

以上のような背景のもと、熱帯多雨林の細根動態を明らかにするために、筆者らはマレーシア、ボルネオ島の森林内においてスキャナー法を用いた調査研究を行ってきた。本ミニレビューでは、Endo et al. (2019)



第2図 月毎の画像面積あたりの細根成長量 (a) と枯死分解量 (b).  
 実線は平均値, 箱の中央の線は中央値, 上下のバーは最大値と最小値, 白抜き丸は外れ値を示す ( $n=5$ ).

のデータを中心に紹介した後, スキャナー法による細根動態研究の課題と展望について解説することを目的とする.

## 2. 調査地と方法の概要

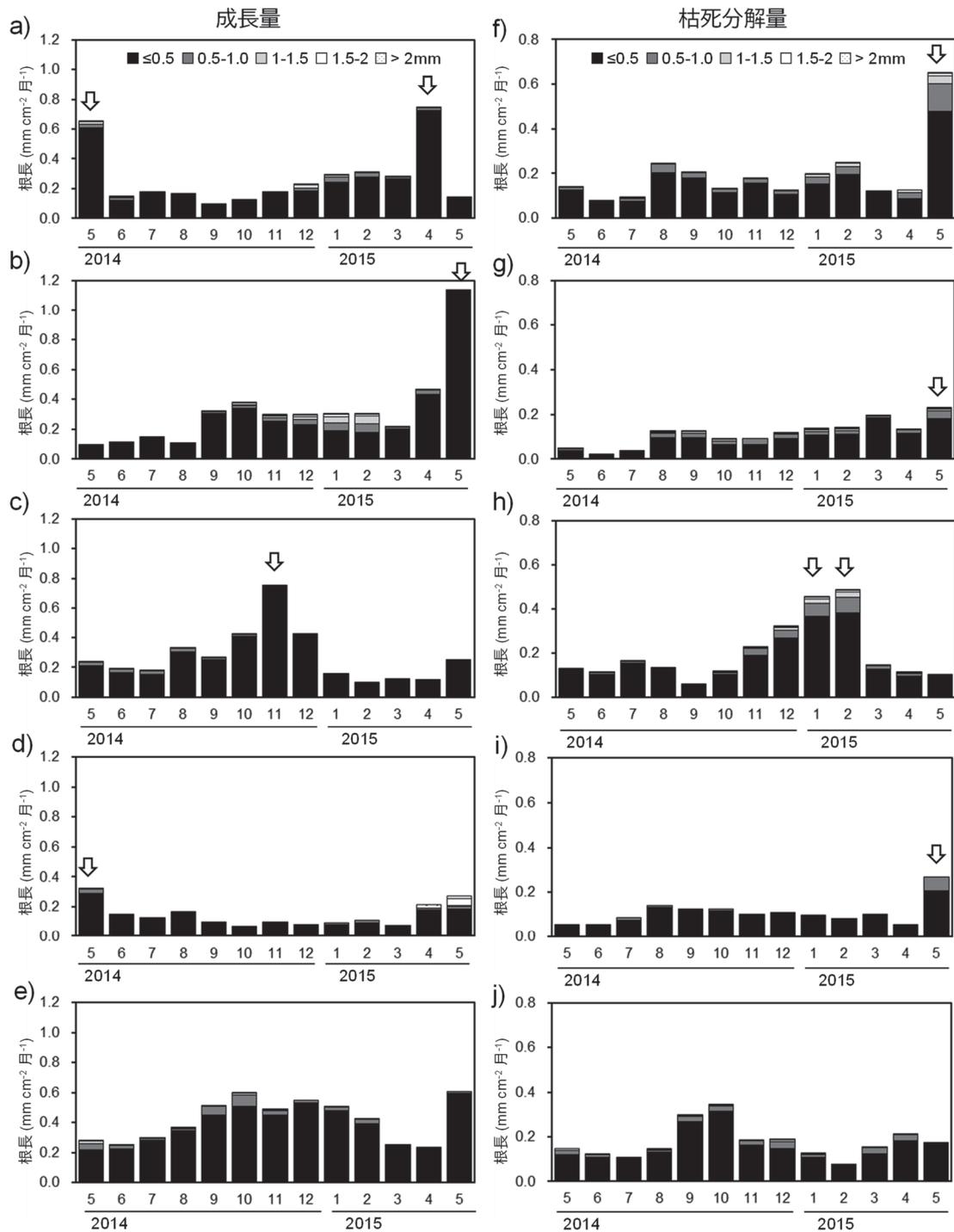
調査は, マレーシアのボルネオ島にあるランビル・ヒルズ国立公園 (以下, ランビル) の熱帯多雨林で行った. ランビルは 6500 ha の広さで, 面積の約 85% を低地混交フタバガキ林が占めている (市栄ら, 2009). 樹木の高さは 40 ~ 50 m に達し, 森林内に設置されている大面積調査区 (52 ha) では 1100 種を超える木本種が記録されている (市栄ら, 2009; Nakagawa et al., 2019). 年間の降水量は 2600 mm, 年平均気温は 26°C で, 明瞭な乾期がない (Kume et al., 2011). 公園内には大面積調査区他, 8 ha と 4 ha の林冠調査区が設定されている (市栄ら, 2009). 本研究では, そのうちの 4 ha の調査区内を対象地とした. この調査区には高さ 80 m の林冠クレーンが設置されており, 半径 75 m の範囲内の林冠調査が行われてきた (市栄ら, 2009). また, 林内ではリタートラップによるリターフォール量の調査や, 毎木調査が定期的に行われてきた (Nakagawa et al., 2019). これらのデータがあることは, 細根フェノロジーの研究において地上部との関連性を調査する上で有用な情報につながる可能性がある.

細根の動態調査はスキャナー法を用いて行った. 本研究では, 2013 年 3 月にランビルの 4 ha プロット内にランダムに選んだ 5 か所に, 透明なアクリルボックスの撮影面が, 地表面に対して 45 度の角度になるよう地中に埋設した. 攪乱に伴う根の成長への影響を少なくするために, 2014 年 4 月から地下部の撮影を開始し, 2 週間から 1 か月に一度, 現地の共同研究者の協力により地中のアクリルボックス面をフラットベッドスキャナーでスキャンした. スキャナーで得られた画像からの根の抽出および解析方法については Kume

et al. (2018) に詳しく書かれている. 方法を簡単に説明すると, スキャナー画像内に写った根をフリーソフト GIMP (the GIMP Team, USA) を用いて手作業で抽出し, その抽出した画像 (レイヤー) を次の画像 (2 週間 ~ 1 ヶ月後に同じ場所で撮影された画像) に重ね合わせて, 根の成長した部分 (成長量) と消失した部分 (枯死分解量) をそれぞれ追加, または塗りつぶすという作業を行った. そして, フリーソフト Fiji (Schindelin et al., 2012) を用いて, 各月の現存量, 成長量, 枯死分解量のレイヤーを作成した後, 根の形態解析に特化した画像解析システムの WinRHIZO (Regent Instruments, Quebec, Canada) を用いることで, 成長および枯死分解した根の長さを根直径別 (0.5 mm ごと) に取得した. 本研究では Fukuzawa et al. (2013) と同様に, 根が画像から消失したものを枯死分解として扱った. そして, 本研究でスキャンした間隔は月毎に異なったため, 連続する 2 期間で撮影された画像間の細根量の増減を撮影間隔の日数で割り, その値を対象となる月の日数で乗じることで補正した (Endo et al., 2019). 得られた値は月毎の根の成長量または枯死分解量として, 単位はスキャナー画像の面積あたりの根の長さ ( $\text{mm cm}^{-2}$ ) で示した.

## 3. 細根動態の経時変化と気象要因の影響

本研究では, スキャナー法により根の成長と枯死分解の経時変化を可視化することができた (Endo et al., 2019). 5 か所のスキャナー画像に写った 1 年間の根長を解析した結果, ランビルの月平均の細根成長量と枯死分解量に明確な季節性は認められなかった (第 2 図). ただ, 5 か所それぞれの成長量では, 場所によって 2014 年 5 月, 11 月と 2015 年 4, 5 月にピークが認められ, 枯死分解量では 2015 年 1, 2 月と 5 月ピークが認められた (第 3 図, 矢印). 加えて, 直径 0.5 mm 以下の細い根は, 成長量の総根長の  $91.5 \pm 2.75\%$

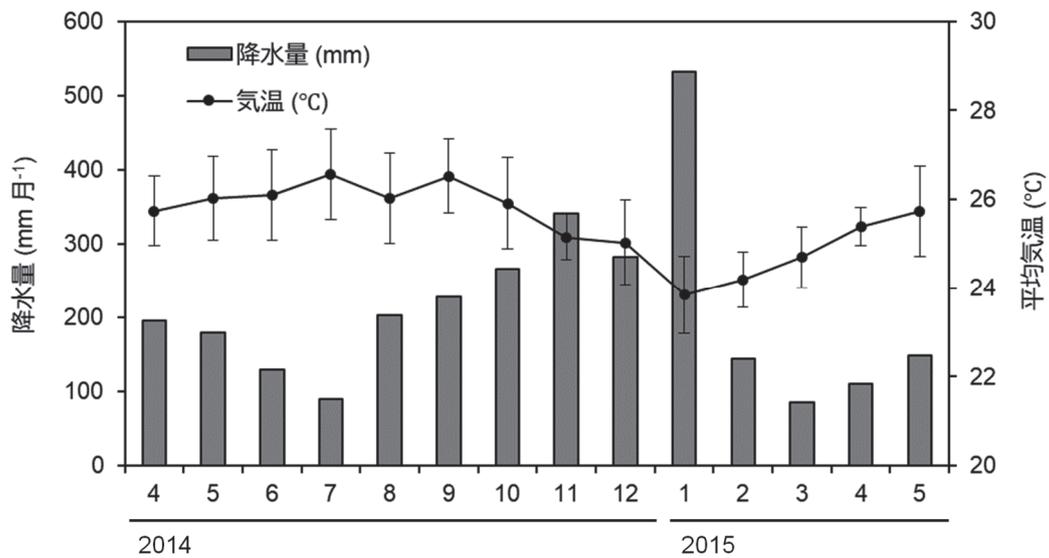


第3図 各スキャナーボックスの月毎の画像面積あたりの細根成長量 (a-e) と枯死分解量 (f-j) (Endo et al., 2019 より改変).  
 バーの色の違いは細根の直径の違いを示す. 図中の矢印はピークを表す. 年間平均値の2倍の値を示した月をピークとした.

( $n=5$ ), 枯死分解量の総根長の  $85.4 \pm 4.23\%$  ( $n=5$ ) を占めたことから, 細い根が細根動態に大きく寄与していることが明らかになった (第3図).

既往研究 (Kho et al., 2013) をもとに, 細根成長量および枯死分解量のピークが気象要因と関連するかを明らかにするために, 降水量や気温との関連を検討した. 調査期間中の月平均降水量は  $210 \pm 119$  mm であり,

2014年9月から2015年1月は月平均降水量を上回った (第4図). また, 平均気温は  $25.5 \pm 0.8^\circ\text{C}$  (14ヶ月) であり, 2014年11月から2015年4月の月平均気温は期間中の平均気温より低い傾向を示した (第4図). このような降水量と気温の傾向は10年平均と一致しており (Kho et al., 2013), ランビルの気温と降水量は年間でゆるやかなパターンがあると言える. そこで,



第4図 調査期間中の月毎の降水量と気温 (Endo et al., 2019 より改変).  
気温のデータの上下のバーは標準偏差を示す.

スキャナーボックスを埋設した5カ所の各地点の細根成長量および枯死分解量と、降水量または気温との相関関係を調べたところ、1カ所で成長量と降水量に正の相関が認められ、別の1カ所で枯死分解量と気温に負の相関が認められたが ( $p < 0.05$ ), それ以外は認められなかった。このことから、ランビルの細根動態は気象データのみで説明しきれない場合があり、その場合は、微地形や植生の密度といったより局所的な要因によって生じる土壌水分量の違いが細根動態に寄与している可能性がある。また、Hiiragi et al. (2022) は、ランビルの樹木による水の利用深度は時期や樹種によって異なると報告している。そのため、スキャナーで観察された根の樹種も細根動態に影響している可能性がある。種数が非常に多い熱帯多雨林では困難ではあるが、根の分布特性や形態、菌根共生の種類や有無などの樹種特性を重視した細根動態の研究が期待される。

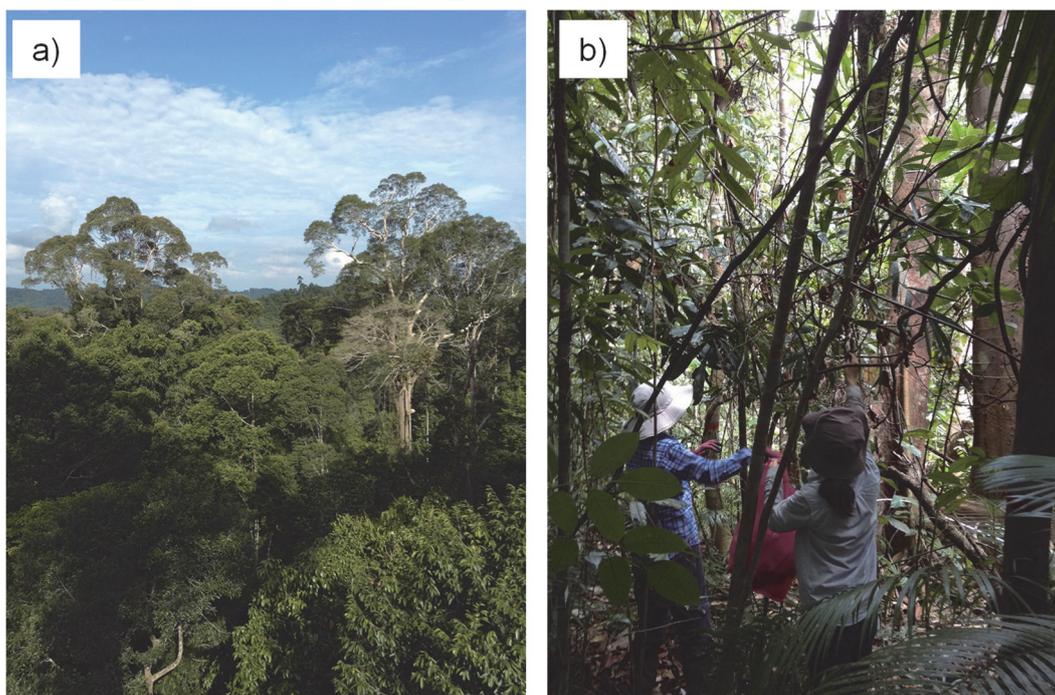
#### 4. 細根動態における樹種間差の影響

上述したようにランビルの樹種の多様性は非常に高い (Ashton, 2005; Nakagawa et al., 2019)。加えて、根の動態のフェノロジーパターンは樹種によって異なることが圃場栽培実験で報告されている (McCormack et al., 2014)。これらのことから、第3図において、場所ごとに異なる時期に細根成長量および枯死分解量のピークが認められた要因として、各スキャナー画像に写った根の樹種の影響 (内因性因子) が考えられた。また、外因性因子とも関連するが、種間の樹高の違いも細根動態に作用しているのではないだろうか。熱帯多雨林では異なる高さの樹木により階層構造が発達し

ている (第5-a図)。そのため、上層木と下層木とでは受け取れる光の量が大きく異なる (第5図; 吉村ら, 2008)。熱帯多雨林では樹高が高いほど個葉の光合成能力が増加するという報告がある (Kenzo et al., 2015)。根のフェノロジーは光合成量にも影響を受けることから (第1図)、樹高と細根の動態との関連が予想される。Fitter et al. (1999) は、曇天の日が多いイギリスの草地において、イネ科草本植物の根の成長に対する最適な説明環境変数は、過去10日間を平均した光合成有効放射 (PAR) フラックスであることを報告している。また、Radville et al. (2016) は、常緑樹や樹体に多くの同化産物を保持するような樹種の根のフェノロジーは、葉の成長ピークと関連せず、成長シーズンの期間中に根が一貫して成長するのに対して、他の樹種では根の成長がその時点の同化産物に制限を受けるため、根の成長ピークは葉の成長が始まった後に起こるとしている。そして、これらのパターンは同じ生態系内に混在するとしている。スキャナーの撮影地点に生育する樹種や樹高、光条件などの情報を取得することは、細根フェノロジーを理解する上で重要な情報となる可能性がある。

#### 5. 細根動態における根直径の影響

本研究から、細根動態に直径0.5 mm以下の細い根の占める割合が高いことが明らかになった (第3図)。一般に、根の寿命は直径が小さいほど短い (Wells and Eissenstat, 2001; Weemstra et al., 2016)。細根の平均寿命 (年) は、以下のようなターンオーバー速度 (年<sup>-1</sup>) の逆数で計算される (野口, 2020)。



第5図 ランビル・ヒルズ国立公園の樹冠上 (a) と林内 (b) の様子。

細根寿命 = 1 / 細根ターンオーバー速度

例えば、ある細根のターンオーバー速度が  $2 \text{年}^{-1}$  であれば、細根の寿命は 0.5 年となる。また、細根のターンオーバー速度は、細根が 1 年間で入れ替わる回数であり、以下の式で計算される (野口, 2020)。

細根ターンオーバー速度 = 細根生産量 / 細根バイオマス

細根生産量と細根バイオマスが重量ベースの場合、単位はそれぞれ  $(\text{g m}^{-2} \text{year}^{-1})$  と  $(\text{g m}^{-2})$  となる。画像データから得られる根長ベースの場合、画像面積あたりの根長 (例えば、 $\text{mm cm}^{-2}$ ) に変換してから解析される (福澤, 2022)。ターンオーバー速度が  $2 \text{年}^{-1}$  ということは、1 年間に 2 回細根が入れ替わることを意味する。また、一年生作物は 1 年間で全ての細根が入れ替わることから、ターンオーバー速度は  $1 \text{年}^{-1}$  となる。重量ベースの細根のターンオーバー速度や寿命の測定方法として、攪乱を伴う連続コアサンプリング法やイングロスコア法がある (Ostonen et al., 2005; 野口, 2020)。また、根長ベースでは、これまでミニリゾトロン法やリゾトロン法で測定された報告例が多い (Keyes and Grier, 1981; McCormack et al., 2012; Fukuzawa et al., 2013)。それぞれの手法によって得られる推定値が異なることを留意しておく必要がある。ミニリゾトロン法で得られる根の統計的属性データから細根の寿命を解析する方法として、Kaplan and Meier

(1958) や Cox (1972) の回帰分析が用いられてきた。この方法では、観測期間中に追跡した細根を枯死と生存に分けてデータとして用いるが、ミニリゾトロン法の観察窓の大きさが小さいため ( $1.35 \text{ cm} \times 1.8 \text{ cm}$ )、観察範囲から出てしまった根を追うことが難しい場合がある。また、多くの場合、枯死まで追跡することができないことや、代表値を推定するためにある程度のサンプル数が必要となるといったことがあるため、正確なターンオーバー速度を計算することは不可能であるとされる。Majdi et al. (2005) はミニリゾトロン法で得られたデータから Kaplan and Meier や Cox の手法を用いて細根の寿命を求める場合、寿命の平均値が推定されるとしている。本研究で用いたスキャナー法は、撮影面が広いために ( $21.0 \text{ cm} \times 29.7 \text{ cm}$ ) ミニリゾトロン法では画面から外れてしまうような根であっても追跡することができ、より多くの根を観測可能である。また、連続コアサンプリング法やイングロスコア法では取りこぼしてしまう可能性のある直径が細い根についても画像から観測ができる可能性がある。それゆえ、スキャナー法は過小評価されてきたより細い細根を検出できると考えられる。

根のターンオーバーと環境要因との関係については、草地、低木林、森林のいずれにおいても気温との間に有意な指数関数的な関係が認められていることが示されている (Gill and Jackson, 2000; de Kroon and Visser, 2008)。Finér et al. (2011) は細根のターンオーバー速度が北方林や温帯林に比べ熱帯林で大きいこと

を報告している (熱帯林 :  $1.44 \pm 0.76 \text{ yr}^{-1}$ , 温帯林 :  $1.21 \pm 1.04 \text{ yr}^{-1}$ , 北方林 :  $0.77 \pm 0.70 \text{ yr}^{-1}$ ). この値から, 熱帯林では 8-9 カ月で細根が入れ替わるのに対し, 北方林では 15-16 カ月かかって入れ替わることになる. ランビルは熱帯低地林で, 気温や降水量に明確な季節性のない森林である. 本研究ではターンオーバー速度を算出していないが, 小さい直径サイズの細根が多くの割合を占めていたことと, 年間の平均気温が高いことから, 細根動態が他の気候条件の森林 (北方林や温帯林) に比べて活発に起こっていることが考えられる. 一方で, 熱帯の樹木根のターンオーバー速度のデータ数は限られている (Finér et al., 2011 :  $n = 1$ ; de Kroon and Visser, 2008 :  $n = 3$ ). ランビルの森林での細根のターンオーバー速度が算出できれば, 熱帯多雨林の炭素循環における細根の寄与率を求めることに貢献できると考える.

## 6. 細根動態研究の課題と展望

Endo et al. (2019) でマレーシア, ボルネオ島を対象地としたことと, スキャナー法を用いたことを踏まえて, 遠隔地での観測の課題と画像解析を行う上での課題について挙げ, その対策や近年の研究動向について紹介する.

### (1) 観測について

スキャナー法の特徴として, 非破壊的かつ連続的に根の動態を追跡できる点がある. スキャナー法では多くの場合, 地下部をスキャンするために定期的に試験地に赴いて撮影を行うが, 試験地が遠い場合は撮影の頻度が下がることがある. 特に, 熱帯多雨林といった海外の試験地を対象に観測を行う場合, 頻繁に行くことは難しい. 遠隔地でスキャナー法を用いる場合, 撮影の自動化が有効である. 野外でスキャンを行う際には, 撮影のためのフラットベッドスキャナーの他にスキャナーを作動させるためのバッテリーが必要となる. 近くから電源を得られることが望ましいが, そうでない場合は自動で長期間スキャナーを作動させるための電源としてソーラーパネルによる発電が利用される場合もある. 自動撮影を行うことができれば, 遠隔地での撮影の他, 日単位やそれ以下の細かい時間間隔での撮影が可能となり, 非常に高精度に根の動態を把握することができる (Ding et al., 2020).

### (2) 解析について

高頻度や多くの地点での撮影によって多数のスキャナー画像を得た場合, その画像処理の労力が大きくなる. スキャナー法で得られた画像からの根の抽出は, 基本的に手作業で行う. スキャナー法で得られる画像

面積はミニリゾトロン法に比べて広く (ミニリゾトロン法 :  $1.35 \times 1.8 \text{ cm}$ , スキャナー法 :  $21.0 \times 29.7 \text{ cm}$ ), スキャナー法の方が多くの情報が得られるという長所がある半面, 1 枚の画像から根を抽出する時間が長くなるという点で短所となる (平野・野口, 2012). 抽出に時間がかかる理由としては, 画像に写る根やリターの判別が難しいことや, 土壌や撮影条件によっては根が見えにくいこと等が挙げられ, 同じ画像であっても作業する人でばらつきが出ることもある (Kume et al., 2018). これらの根の抽出作業の時間を短縮する手段として, 近年, 深層学習を活用して土壌断面画像から自動で細根の抽出を行うソフトウェアの開発が進んでいる (例えば, SegRoot : Wang et al., 2019; TrenchRoot-SEG : Teramoto and Uga, 2020; RootPainter : Smith et al., 2022; ARATA : Yabuki et al., 2022). 深層学習を活用したこれらの技術では, 根抽出前の土壌断面画像と, 細根を抽出した画像を学習データとして入力し, 複数回学習させることで細根の抽出率を向上させている. ARATA や TrenchRoot-SEG といったソフトウェアでは, 高い精度で細根抽出が可能となっている. これらの技術の利用が進めば, 様々な気候帯の細根動態を比較することも容易になり, 細根動態が地下部の炭素循環に与える影響の評価が飛躍的に進むことが期待される.

解析のもう一つの課題として, 画像に写った根から樹種を見分ける方法が現在のところ確立されていないことが挙げられる. 圃場や純林などの樹種が特定できる場合を除いて, 現状では根のみの画像情報から樹種を特定し, 根の動態に関わる樹種を明らかにするといった詳細な検討は難しい. 現在, 根の画像から樹種を推定する方法として, 可視～近赤外波長の分光反射率や, 形態の計測・解析が注目されている. Tanikawa et al. (2019) は, 土壌や植物器官の化学組成の予測に利用される可視および近赤外の分光反射率と, 細根の形態, 解剖および化学的形質間の関係を 12 樹種で調べたところ, 可視および近赤外の分光反射率の大きさは, 一部の波長で種間に有意な差があることを示した. 著者は, 分光反射画像で細根形質の種間差を予測できると結論付けている. また, Yahara et al. (2019) は, 特定の根の形質が種のグループ間で一致するかどうかを明らかにするために, 根の構造 (分枝強度), 比根長, 組織密度, 窒素とカリウム濃度や解剖学的特性といった項目を 11 樹種で調べたところ, 分枝強度が測定された根の形質において最も大きくばらついたことを示した. さらに, 根の形質の主成分分析によって被子植物と裸子植物で分けられることや, 多次的な根の形質をもとに, 系統的に異なる菌根共生で種を集団に分けられるとしている. これら細根の分光反射率や形態

の情報,あるいはそれらの組み合わせをスキャナー画像の細根の解析に適用することで,将来的には画像から特定の樹種の細根動態が追跡できるようになるのではないかと期待される。

## 7. 終わりに

マレーシア,ボルネオ島の熱帯多雨林における,スキャナー法を用いた年間を通した細根成長量および枯死分解量の経時変化に関する研究事例を紹介した。細根の成長量と枯死分解量に明確な季節パターンは認められず,気温や降水量との相関関係もほとんどの地点で認められなかった。細根の成長と枯死分解の総根長のうち,直径0.5 mm以下の細い根が占める割合はそれぞれ92%と85%だった。これらの結果から,熱帯多雨林の気候の特徴である明確な季節性がないことや,高い種多様性が細根のフェノロジーを不明瞭にしていることが示唆された。また,細い細根のターンオーバーが活発におこっていることが推測された。一方で,熱帯多雨林の細根動態に関する研究事例は限られており,今後さらに研究を進めていくためには遠隔地や森林内でのスキャナー調査を実施・継続するための撮影の自動化を挙げた。実際には,森林内に生息する様々な動物や昆虫から撮影機材等を保護するための対策も必要になるだろう。さらに,多くの画像解析に必要な時間や労力の短縮として,近年深層学習を活用したソフトウェアの開発について挙げた。また,スキャナー画像の根の樹種の推定に関する近年の研究の進展についても紹介した。環境要因や個々の樹種が持つ形質が作用し合って形成される細根動態について,観測方法やデータ解析技術の進展により,今後その実態がより明らかになっていくことが期待される。

## 謝辞

本ミニレビューへの投稿の機会を与えて下さった根研究学会,ならびに信州大学の牧田直樹博士に大変感謝いたします。本研究を進める上で久米朋宣博士,片山歩美博士,牧田直樹博士,池野英利博士,井手淳一郎博士,大橋瑞江博士には多大なご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。また,根の抽出作業を行って下さった元兵庫県立大学の山内里佳さんに感謝いたします。本研究の一部はJSPS科研費(20KK0241)の支援を受けて実施しました。そして,本研究は海外の試験地を対象としたことから,L. K. Kho博士をはじめとしたマレーシアの研究者らの協力無しには定期的な画像データを得ることはできませんでした。海外調査においては現地の友好的なカウンターパートの存在が重要だと感じました。ここに改めて感謝したいと思います。

## 引用文献

- Ashton, P. S. 2005. Chapter 17. Lambir's Forest: the world's most diverse known tree assemblage? In: Roubik, D. W., Sakai, S., Karim, A. A. H. eds., *Pollination Ecology and the Rain Forest Sarawak Studies, Ecological Studies 174*. Springer. pp. 191-216.
- Beer, C., Reichstein, M., Tomelleri, E., Ciais, P., Jung, M., Carvalhais, N., Rödenbeck, C., Arain, M. A., Baldocchi, D., Bonan, G. B., Bondeau, A., Cescatti, A., Lasslop, G., Lindroth, A., Lomas, M., Luysaert, S., Margolis, H., Oleson, K. W., Rouspard, O., Veenendaal, E., Viovy, N., Williams, C., Woodward, F. I., Papale, D. 2010. Terrestrial gross carbon dioxide uptake: Global distribution and covariation with climate. *Science* 329: 834-838.
- Cox, D. R. 1972. Regression models and life-tables. *J. Roy. Stat. Soc. B. Met.* 34: 187-220.
- Dannoura, M., Kominami, Y., Oguma, H., Kanazawa, Y. 2008. The development of an optical scanner method for observation of plant root dynamics. *Plant Root* 2: 14-18.
- de Kroon, H., Visser, E. J. W. 編, 森田茂紀, 田島亮介監訳. 2008. 第3章 根系のターンオーバー, p. 53-80. *根の生態学*, シュプリンガー・ジャパン株式会社. pp. 364.
- Ding, Y., Schiestl-Aalto, P., Helmisaari, H. S., Makita, N., Ryhti, K., Kulmala, L. 2020. Temperature and moisture dependence of daily growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) roots in Southern Finland. *Tree Physiol.* 40: 272-283.
- Endo, I., Kume, T., Kho, L. K., Katayama, A., Makita, N., Ikeno, H., Ide, J., Ohashi, M. 2019. Spatial and temporal patterns of root dynamics in a Bornean tropical rainforest monitored using the root scanner method. *Plant Soil* 443: 323-335.
- Finér, L., Ohashi, M., Noguchi, K., Hirano, Y. 2011. Fine root production and turnover in forest ecosystems in relation to stand and environmental characteristics. *Forest Ecol. Manag.* 262: 2008-2023.
- Fitter, A. H., Self, G. K., Brown, T. K., Bogie, D. S., Graves, J. D., Benham, D., Ineson, P. 1999. Root production and turnover in an upland grassland subjected to artificial soil warming respond to radiation flux and nutrients, not temperature. *Oecologia* 120: 575-581.
- 福澤加里部 2022. 林床にササが生育する冷温帯林における細根バイオマス, 生産量および枯死量の時間変化. *根の研究* 31: 7-20.
- Fukuzawa, K., Shibata, H., Takagi, K., Satoh, F., Koike, T., Sasa, K. 2013. Temporal variation in fine-root biomass, production and mortality in a cool temperate forest covered with dense understory vegetation in northern Japan. *Forest Ecol. Manag.* 310: 700-710.
- Gill, R. A., Jackson, R. B. 2000. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytol.* 147: 13-31.
- Hiragi, K., Matsuo, N., Sakai, S., Kawahara, K., Ichie, T., Kenzo, T., Aurelia, D. C., Kume, T., Nakagawa, M. 2022. Water uptake patterns of tropical canopy trees in Borneo: species-specific and temporal variation and relationships with aboveground traits.

- Tree Physiol. 42: 1928-1942.
- 平野恭弘, 野口亨太郎 2012. 樹木細根のターンオーバー. 森林科学 65: 3-6.
- 市栄智明, 市岡孝朗, 伊東明 2009. 野外研究サイトから (12) ランビル・ヒルズ国立公園. 日本生態学会誌 59: 227-232.
- 石井弘明 2019. 3章 森林の成長と物質生産. 石井弘明 (編集代表) 森林生態学. 朝倉書店. pp. 39-73.
- Kaplan, E. L., Meier, P. 1985. Nonparametric estimation from incomplete observations. J. Am. Stat. Assoc. 53: 457-481.
- Kenzo, T., Inoue, Y., Yoshimura, M., Yamashita, M., Tanaka-Oda, A., Ichie, T. 2015. Height-related changes in leaf photosynthetic traits in diverse Bornean tropical rain forest trees. Oecologia 177: 191-202.
- Kho, L. K., Malhi, Y., Tan, S. K. S. 2013. Annual budget and seasonal variation of aboveground and belowground net primary productivity in a lowland dipterocarp forest in Borneo. J. Geophys. Res.-Biogeo. 118: 1282-1296.
- 小林真 2020. 2.3 根の季節動態, 平野恭弘, 大橋瑞江, 野口亨太郎 編 森の根の生態学, 共立出版. pp. 90-95.
- Kume, T., Ohashi, M., Makita, N., Kho, L. K., Katayama, A., Endo, I., Matsumoto, K., Ikeno, H. 2018. Image analysis procedure for the optical scanning of fine-root dynamics: Errors depending on the observer and root-viewing window size. Tree Physiol. 38: 1927-1938.
- Kume, T., Tanaka, N., Kuraji, K., Komatsu, K., Yoshifuji, K., Saitoh, T. M., Suzuki, M., Kumagai, T. 2011. Ten-year evapotranspiration estimates in a Bornean tropical rainforest. Agr. Forest. Meteorol. 151: 1183-1192.
- Keyes, M. R., Grier, C. C. 1981. Above- and below-ground net production in 40-year-old Douglas-fir stands on low and high productivity sites. Can. J. Forest Res. 11: 599-605.
- Majdi, H., Pregitzer, K., Morén, A. S., Nylund J. E., Ågren G. I. 2005. Measuring fine root turnover in forest ecosystems. Plant Soil 276: 1-8.
- Malhi, Y. 2012. The productivity, metabolism and carbon cycle of tropical forest vegetation. J. Ecol. 100: 65-75.
- McCormack, M. L., Adams, T. S., Smithwick, E. A. H., Eissenstat, D. M. 2012. Predicting fine root lifespan from plant functional traits in temperate trees. New Phytol. 195: 823-831.
- McCormack, M. L., Adams, T. S., Smithwick, E. A. H., Eissenstat, D. M. 2014. Variability in root production, phenology, and turnover rate among 12 temperate tree species. Ecology. 95: 2224-2235.
- Nakagawa, M., Ushio, M., Kume, T., Nakashizuka, T. 2019. Seasonal and long-term patterns in litterfall in a Bornean tropical rainforest. Ecol. Res. 34: 31-39.
- 西村尚之 2017. 第9章 世界の生物の分布とバイオーム. 原登志彦監修 大学生のための生態学入門. 共立出版株式会社. pp. 131-150.
- 野口亨太郎 2020. 3.3 炭素循環と樹木根—蓄積・生産・ターンオーバー—. 平野恭弘, 大橋瑞江, 野口亨太郎編 森の根の生態学, 共立出版. pp. 167-182.
- 大橋瑞江, 中野愛子, 平野恭弘 2012. 土の中の根をみる方法. 森林科学. 65: 8-11.
- Ostonen, I., Löhmus, K., Pajuste, K. 2005. Fine root biomass, production and its proportion of NPP in a fertile middle-aged Norway spruce forest: comparison of soil core and ingrowth core methods. Forest Ecol. Manag. 212: 264-277.
- Radville, L., McCormack, M. L., Post, E., Eissenstat, D. M. 2016. Root phenology in a changing climate. J. Exp. Bot. 67: 3617-3628.
- Smith, A. G., Han, E., Petersen, J., Olsen, N. A. F., Giese, C., Athmann, M., Dresbøll D. B., Thorup-Kristensen, K. 2022. RootPainter: deep learning segmentation of biological images with corrective annotation. New Phytol. 236: 774-791.
- Schindelin, J., Arganda-Carreras, I., Frise, E., Kaynig, V., Longair, M., Pietzsch, T., Preibisch, S., Rueden, C., Saalfeld, S., Schmid, B., Tinevez, J. Y., White, D. J., Hartenstein, V., Eliceiri, K., Tomancak, P., Cardona, A. 2012. Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. Nat. Methods 9: 676-682.
- Tanikawa, N., Nakaji, T., Yahara, H., Makita, N. 2019. Exploring patterns of fine root morphological, chemical, and anatomical traits of 12 tree species from visible-near-infrared spectral reflectance. Plant Soil 445: 469-481.
- Teramoto, S., Uga, Y. 2020. A deep learning-based phenotypic analysis of rice root distribution from field images. Plant Phenomics. Article ID 3194308.
- Wang, T., Rostamza, M., Song, Z., Wang, L., McNickle, G., Iyer-Pascuzzi, A. S., Qiu, Z., Jin, J. 2019. SegRoot: A high throughput segmentation method for root image analysis. Comput. Electron. Agr. 162: 845-854.
- Weemstra, M., Mommer, L., Visser, E. J. W., Ruijven, J. V., Kuyper, T. W., Mohren, G. M. J., Sterck, F. J. 2016. Towards a multidimensional root trait framework: a tree root review. New Phytol. 211: 1159-1169.
- Wells, C. E., Eissenstat, D. M. 2001. Marked differences in survivorship among apple roots of different diameters. Ecology 82: 882-892.
- Yabuki, A., Ikeno, H., Dannoura, M. 2022. A root auto tracing and analysis (ARATA): An automatic analysis software for detecting fine roots in images from flatbed optical scanners. Methods in Ecol. Evol. 13: 2372-2378.
- Yahara, H., Tanikawa, N., Okamoto, M., Makita, N. 2019. Characterizing fine-root traits by species phylogeny and microbial symbiosis in 11 co-existing woody species. Oecologia 191: 983-993.
- 吉村充則, 山下恵, 市栄智明 2008. 葉面積指数・光合成有効放射の鉛直プロファイル計測による熱帯雨林の光環境解析. 写真測量とリモートセンシング. 47: 25-22.

## 根の研究への“憧れ”や“想い”とその“支え”

犬飼義明

名古屋大学農学国際教育研究センター

これまでの本連載記事にあるように、根研究会(根研)の発足は1992年です。その頃の私は愛知教育大学という小さな大学の学部2年生でしたので、根研との関わりは1996年の秋に開催された第6回根研究集会への参加からでした。そういった世代の私がこの「根の研究の30年を展望する」連載に記事を書かせて頂くのは甚だ恐縮ですが、少しでも今後の展望のお役に立てる箇所がありましたら幸いと思い、筆を執らせて頂きます。

### 二人の恩師の根の研究への想い

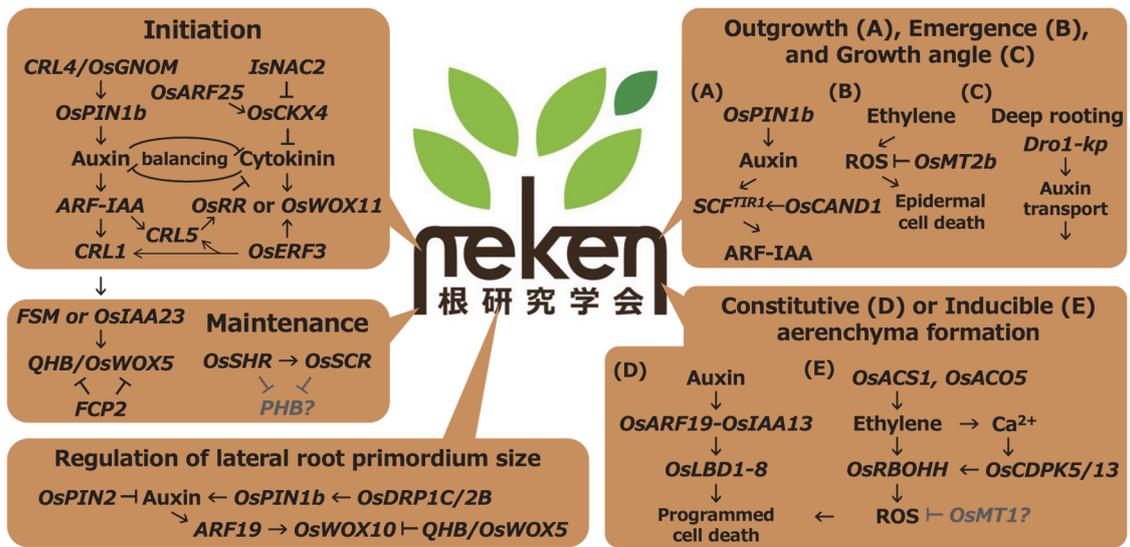
私には、学部生・院生時代の恩師が二人おり、一人は卒業論文をご指導頂いた北野英己先生(当時、愛知教育大学)で、もう一人は修士・博士論文をご指導頂いた元根研会長の山内章先生(名古屋大学)です。ありがたいことに、両者にはその後の研究員・教員時代も含め大変お世話になりました。学部生当時、私は修士号を取得後にJICAの青年海外協力隊員に応募したいと考えていました。北野先生から「それなら名古屋大学の山内先生がいらっしゃる作物学研究室へ進学する」と勧められ、「作物学研究室では根の研究をしているので、ここにある変異原処理したイネの種子を播いて、根の突然変異体を探して解析してみよう」との流れで卒業論文のテーマが決まりました。ちょうどその頃に発行された「根ハンドブック」の“根の突然変異(1)と(2)”の項目を一井眞比古先生(当時、香川大学)と北野先生がそれぞれ執筆されていました(一井, 1994;北野, 1994)。早速それに目を通したところ、当時、イネで見つかった変異体はいずれも根が短くなる *root growth inhibiting (rt)* と *short root1 (srt1)*, *srt2* の3つのみであり(一井, 1994)、しかもこの段階ではこのような根の長さを制御する遺伝子の存在が認められたのみで、それら遺伝子の実体は何も分かっていませんでした。また、「根の研究の難しさから突然変異体の発見が遅れているのか、それとも、見つかりにくいことが根の遺伝的特性を反映しているのかはわかりませんが、大根や一部の野菜の品種改良に見られるように、根を直接利用しない他の植物においてもまだ多くの未知の遺伝子が存在しているものと思われま

す。最大の理由は根の遺伝を研究する人が少ないことにあるかもしれません(北野, 1994)」とのことでした。加えて、翌年に「農業および園芸」に掲載された根の連載記事に「突然変異体が得られていない現状では、今のところ、その全体像は暗闇の中にある。花の器官形成のような地上部での研究の発展に続いて、地下部でもそのような研究がやがて花開く時期が訪れることを期待したい(北野, 1995)」とありました。その時の私は、(将来、研究職に就くとは全く考えてはいませんが)純粋に「ほとんどないなら見つけたいし、遺伝的な仕組みを知りたいし、このような研究分野に貢献したい」という想いを抱いたことを記憶しています。

その後、無事、名古屋大学大学院に進学し、山内先生の下でもイネの根の突然変異体を用いた解析を続けることとなりました。少し余談ですが、当時の作物学研究室の皆様には温かく迎えて頂けてとてもありがたかったです。当時から根研を牽引されていた山内先生、飯嶋盛雄先生(現近畿大学)、矢野勝也先生(名古屋大学)、泉泰弘先生(現滋賀県立大学)、また院生時代を共に過ごした小川敦史さん(現秋田県立大学)、荒木英樹さん(現山口大学)、関谷信人さん(現三重大学)らにキャンパス内の水田にて田植えを手伝ってもらったことが懐かしく思い出されます。さて、その水田が実りの秋を迎えた頃、名古屋大学にて第6回根研究集会が開催され、記念すべき第1回目の学術功労賞の授与式・受賞講演が行われました。受賞者は、東北大学遺伝生態研究センターに所属されていた高橋秀幸先生であり、その研究内容は根の重力応答に異常を示すエンドウの突然変異体を巧みに利用することで、根の水分屈性反応メカニズムの解明に迫る目覚ましい成果でした。山内先生も「突然変異体を使って、自分らもああいう研究がしたいなあ」と仰っていましたが、私も心の底から強く憧れ、この衝撃がその後の博士課程への進学を決めた大きな要因の一つとなりました。

### 30年で根の研究はどれだけ発展したか?

この問いに、私が専門とする根の形を決める遺伝学的な制御機構に特化して振り返って見ます。とは言っ



第1図 これまでに明らかになったイネ根系形態の遺伝的制御機構 (Tanaka et al., 2023 を基に作成)

でも、自分がまとめたものでも何でもなくて恐れ入りますが、昨年、根研評議員の山内卓樹さん(名古屋大学)らが“Genetic basis controlling rice plant architecture and its modification for breeding”と題するイネを対象にした全43ページにもわたる壮大な総説(Tanaka et al., 2023)を仕上げてくださいましたので、こちらを基に考えてみます。この総説中には“Shoot meristems”, “Leaf”, “Tiller”, “Stem”, “Inflorescence”,そして“Root”といった器官の項目がありますが、全引用文献数419報のうち、その3割を超える133報が“Root”の項目の引用文献であり、もはや地上部諸器官に全く引けを取らない圧巻の文献数を誇っています。このうち、根の形態制御に関わり、実体や機能が既に判明している重要遺伝子群を第1図に転記しましたが、驚くことにこれらの約半数は根研会員による成果です。このように研究が進んだ背景には、2004年にゲノム解読が完了するなど、イネがモデル植物、かつモデル作物としての確固たる地位を確立したことで、イネの根の遺伝学・分子生物学分野の研究者数が飛躍したことが挙げられます。一方、他の技術革新がもたらした貢献も非常に大きく、例えば私が「根の研究」の編集委員長時には、当時は東京大学にいらっしゃった根研会員の中園幹生先生(現名古屋大学)に「イネ、トウモロコシの根から皮層または表皮・外皮をLM(Laser Microdissection)で単離し、(発現している遺伝子情報を網羅的に検出することができる)マイクロアレイを行い、通気組織形成や根からの酸素漏出を防ぐバリア[barrier to radial oxygen loss (ROL)]の形成に関わる遺伝子の同定を試みている」とする画期的な取り組みを「会員の研究紹介コーナー」へ寄稿して頂きました(中園, 2007)。このような技術発展により、第1図にあ

る *OsARF19* や *OsCDPK5/13*, *OsLBD1-8*, *OsRBOHH*, *OsWOX10* etc. といった根の形態を制御する新規遺伝子群が次々と見出されています。

この傾向は、もちろん遺伝学・分子生物学分野に留まるものではなく、後述する第50回記念根研集會時のグループディスカッションにおいて、“物質循環グループ”からも「さらにこの25年の間に根の研究分野で起きた画期的な出来事として、根の研究者が飛躍的に増大したことが挙げられた。これは根研学会がもたらした最も大きな功績と言える(藤井ら, 2020)」との報告があり、根研発足以来、根とそれを取り巻く環境を対象とした種々の研究分野が目覚ましく発展したものであるでしょう。

### 人材育成の重要性

これまでに根研の先輩方は「会員の役に立つことはどんどんやろうというポリシー(森田, 2020)」から、若い研究者を育てるために様々な取り組みをされてきました。「当初、奨励賞は修士論文レベル、本賞は博士論文レベルということ想定し、若手にどんどん賞を出し、それがキャリアアップに繋がることを願っていた(森田, 2020)」や、「日本の根の研究を発展させるためには、現役の研究者の努力もさることながら、将来にわたっては、若い研究者がポストと研究資金を得て生き残ることが必須である(阿部, 2024)」などの想いから、先輩方の若手育成への本気度が伺えます。その他にも「荏住基金」の設立があります。このいきさつも樹木根研究の大家であり、偉大なる業績を世に残した荏住昇先生(野口, 2022; 平野, 2022)から、「本学会に対し注文をつけない多額の寄付を頂いた。学会としてはこの寄付を長く残すことはせず、有効に使



第2図 第50回記念根研究集会時の集合写真(上), 苧住先生からのビデオレターの上映(左)と懇親会の様子(右)

いきることで対応しようと考えた。それで、若手が海外で研究成果を発表したり、国内で研修することを支援する制度を作り、募集をかけた(森田, 2023)」との想いからでした。そして「実際、苧住基金で海外渡航した会員の中から、後年、北海道大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、九州大学などの助教に採用されてプロの研究者として活躍(阿部, 2024)」する方々が輩出され、現在は根研副会長、副事務局長、編集委員長、監査、評議員等々としてご活躍されています。

私が会長のときに、ちょうど50回目の節目の根研究集会を2019年11月に名古屋大学にて開催することとなり、山内章先生、平野恭弘先生、仲田麻奈先生らとその運営に携わりました(第2図)。その際、苧住基金の支援を受けた方々から事前にお礼の手紙を受け取り、苧住先生へお送りしました。50回記念大会時にも読み上げましたが、以下にその内容をいくつか抜粋させていただきます。

- ・研究をするにあたって海外へ行くことへの恐怖感・抵抗感が大幅に改善され、その後の博士課程でフィリピンへの渡航に何度もチャレンジすることができ、本当にたくさんのことを学ぶことができました。
- ・2008年からのポストドク先を決めることになった、自分の研究史において重要な海外渡航になりました。そのおかげで、新しい手法の修得や、人脈が広がり、今があります。とても感謝しています。
- ・現在は大学教員として働いておりますが、あの学会

を経験できたことが研究者として生きていく上で少しの自信と糧となったことは間違いありません。

- ・根と土壌動物の繋がりについての研究を発展させたいと考えていた時期に、海外の土壌動物学者と知り合う機会をいただけたことは、私にとっては大きな転換点となったと考えています。
- ・振り返ってみると、いまま根の研究をしている原点がこの学会でした。大学院生のときに海外での国際学会を経験して、研究のモチベーションをあげることができたのは、本当によかったです。
- ・あの頃、仕事も研究費も十分でないときに苧住海外渡航支援をいただけたことは大変励みになりました。
- ・参加者の中にはよく引用する論文を書かれている有名な先生方が何人もいらっしゃって、その先生方と直接話す機会に恵まれたことはとても幸運だったと今でも思っています。
- ・世界最先端の部位を扱う研究者の挑戦的な試みに触れ、言葉にならない高揚感に包まれました。「こんなおもしろい道があるんや!」と、ワクワクし、目の前が明るくなったのを覚えています。その経験が、私の博士課程への進学および現在の職業につながっています。

ありがたいことに、この返礼として当時既に90歳を超えてらっしゃった苧住先生からビデオレターを送って頂けることとなり、50回記念大会時にスクリーンにて皆で拝見しました(第2図左)。苧住先生は「海



第3図 第50回記念根研究集会時のグループディスカッションの様子(1)

外に行かれた方々からお礼のお手紙を頂きまして、ありがとうございました。皆様のご活躍を非常に心強く思っております。」と述べられた後に、「研究という仕事は非常に地味ですので、根気強くやって下さい。」とおっしゃられ、学生さんの1人は「参加者一同大いに励まされた(舛谷, 2020)」とその時の様子を振り返ってくれています。

加えて、「対外的にははっきり学会と名乗った方が、成果を発表するにしても役職を務めるにしても良いだろうという意見(阿部, 2024)」から根研究学会への転換へ大きく貢献され、奨励賞の重みを高めて下さった巽二郎元会長(当時、京都工芸繊維大学)を始めとする先輩方のご決断や、数々の困難を乗り越え「うなりながら(唐原, 2024)」Plant Rootの創刊・継続にご尽力下さった唐原先生を始めとする編集委員による若手研究者らの投稿論文への懇切丁寧なご対応も、人材育成にとってかけがえのないものとなりました。この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

### 第50回記念根研究集会時のグループディスカッション「これまでの50回、これからの50回」

この記念集会では、今回の「30年を展望する」連載と同様に「これまでの50回、これからの50回」と題して、9つのグループ(水吸収、養分吸収、物質循環、測定/評価方法、環境応答/ストレス1、環境応答/ストレス2、生物間相互作用、形態形成、収量/生産性/成分)に別れて参加者全員で自由に議論しました(第3, 4図)。その後、各グループの代表者らに報告記事として根の研究へご寄稿頂いています(根の研究 29:24-38)。しかし、「まとまるかな? グループディ

スカッションをはじめる前から少し不安でした(塩野ら, 2020)」や、「メンバーは(教員3名以外は)研究を始めて1-2年しかたっていない面々である(藤井ら, 2020)」との声もあり、ちょっと強引な企画だったかなと少し反省もしていますが、全体を通して以下のようなご意見が頂けました。

#### ① 議論の場の大切さ

- ・参加者は専門に扱う植物も違えば、着目しているスケールも組織・器官レベルから生態系レベルまで様々だったが、植物の根と土壤中の養分吸収という大枠のテーマは共通しており、思っていたよりも共通点が見られた(野口ら, 2020)。
- ・研究のスケールはポット、圃場、森林など様々であったが、実際に土の中の根を研究対象としている点では、予想よりもギャップは小さかった(野口ら, 2020)。
- ・自身の研究から近い分野を飛び越えて広く知見を深めたり議論したりできる場というのはなかなか他にないと思う。今後もこうした会があればぜひ参加したい(野口ら, 2020)。
- ・根研究学会は、個々の研究者が挑戦する新しい測定手法を場として受け入れ、議論し、そこで得られた情報をこれまでの研究と関連づけて掘り下げ、深めていくことが必要だろう。議論を通じて、その土壤は根研究学会にすでにあると感じた。こういった議論を今回のような場に限らず継続的に実践していきたい(田島ら, 2020)。

といった意見があり、また学生さんからは



第4図 第50回記念根研究集会時のグループディスカッションの様子(2)

- ・私も研究の発展に貢献したいと改めて想いました (且原ら, 2020).
- ・まだ多くの課題が残されていると感じました. だからこそ多くの可能性を秘めているこの分野は面白いと感じました. これから始める研究への期待がわき上がっています (且原ら, 2020).

と頼もしい声も聞かれ, 勝手ながら昔の自分を思い出して嬉しくなりました. 今後, 研究集会の前後?, 全く別の日にオンライン?, あるいは真逆の合宿形式? で“議論の場”に特化した企画も面白いのではと思います.

## ② 知の共有の必要性

- ・一般のジャーナルでは記載されないような実験上のコツ, 測定上の細かいノウハウなどを共有化して, 根の水透過性測定技術をより一般的な物とするために, 「根の研究」誌などで方法論文としてまとめる案ができました (且原ら, 2020).
- ・手法再現時に論文の「材料と方法」部分での説明だけでは不十分な際や, 自分が実施している環境ストレス再現・制御方法について不安・悩みが尽きない際に具体的な相談場所があれば (亀岡・間野,

2020).

- ・「根ハンドブック」のように「ストレスの与え方ハンドブック」が欲しい (亀岡・間野, 2020).

などの意見が挙がり, これを受けて

- ・学会として取り組むべき解決方法として, 前述した「ストレスの与え方」のプロトコル集を作り技術の共有を図ることが提案された. 例えばプロトコル集のアーカイブを作り, 学会のHP上で会員が見ることができるサイトを作り情報を蓄積するとともに未来に伝達するというものである. このような情報は, 今後50回の根研究集会(25年)を見据えた根の研究の発展につながる (亀岡・間野, 2020).

といった具体案が提示されています. 関連して, 本連載記事には「だんだんと普通の学会のように『こんな研究をしてうまくいきました』というような発表が多くなってきた. 私は, このままでは発足当時のアットホームな雰囲気が失われてしまうのではないかと心配し, 会長として自ら失敗した話を書いて発足当時の雰囲気を残したいと思い, 『根の研究』に巻末エッセイとして『会長の“楽しいかな”根の研究』を連載した(小

柳, 2024)」との想いが述べられています。

また、

- ・モデル条件としてストレス再現と自然条件の乖離については多くの葛藤が聞かれた(亀岡・間野, 2020)。

ことに対して、

- ・経験値が上がることによって、検定中の植物の状態を見ながらストレスの与え方を臨機応変に調整する手段が身に付いていくため、悩み・不安は解消されていく。この段階になってはじめて、実験として設定するストレス環境と現実のストレス環境の乖離について考えるスタート地点に立つことが出来る(亀岡・間野, 2020)。

とする長年の経験を踏まえた見解には非常に奥深さを感じます。今後、是非こういった根研独自の“知の共有”に創意工夫して挑戦したいものです。

### ③ 将来への展望

- ・これまでの50回の根研究集会は、様々な対象を様々な方法で研究する者が「根」という共通点で集まり、成果をもちよる「場」を作り出してきた。「次の50回」では、その「場」を活用し、共同研究等を活性化し、成果の創出や社会実装の実現の起点となることがもためられると考える(辻・関谷, 2020)。
- ・ワークショップや共同研究が大切、分野横断的なチームで競争的資金にもチャレンジしたい(且原ら, 2020)。

との意見があり、本連載記事にも「形式にとらわれない自由な討論の場の提供を目指し、さらにはそれを形にするために、本学会をバーチャルな組織と見立てて、研究予算を獲得する試みを何度か挑戦した。いまだ成功には至っていないが、ぜひ、挑戦を継続していただければと思う(山内, 2024)」とあります。私も院生時代に根研の先輩方が奮闘されていた姿を思い出しました。このような分野横断的な共同研究は「根と根を取り巻く環境に興味を持ち、仕事をしているものなら誰でも歓迎することを最大のモットーとして作り出したもの(森田, 2020)」である“根研”にとってはまさに十八番中の十八番と言えます。今後の展開が楽しみです。

加えて、

- ・長期目標を考えるには、できることがなにか、とい

う技術的問題よりも、何が知りたいのかを考えたほうが良いという意見も出された(仁木・菱, 2020)。

- ・生物間相互作用-形態の変化-養分吸収のつながりは今後のテーマとして面白いかもしれない(野口ら, 2020)。
- ・根を介した植物と環境の相互作用について、遺伝子から気候変動まで幅広いスケールを視野に入れた研究が進められるでしょう(塩野ら, 2020)。
- ・分子メカニズム・組織・個体・生理・生態レベルでの知見を統合して、「すべての植物に共通する水吸収とはこういうものだ!」という水吸収の「基本形」を明らかにすることが、これからの大事なテーマになる(且原ら, 2020)。
- ・“根からの浸出液組成”に注目した研究に、進化生物学の視点も加えていくことで、今後の植物種の種特異性解明の糸口が生まれるかもしれない(遠藤ら, 2020)。
- ・今から25年かけて研究対象として観察すれば、粗根の枯死・分解過程をも直接追跡できるのではないかという自由で大胆な意見も生まれた(藤井ら, 2020)。
- ・今回の50回記念集会でも、学部生や修士学生らの活発な参加が印象的だった。この傾向が続けば25年には根の研究者がさらに増えて、地上部の研究者に匹敵する数、すなわちTR比(植物の地上部と地下部の比率)で言えば1.0となるかもしれない、という未来志向的な見解も出された。もしそうなれば、これまで土壌というブラックボックスに隠されていた生態系の物質循環の全容が白日の下にさらされる日が来るかもしれない(藤井ら, 2020)。

といった種々の“展望”が示されており、全くもって頼もしい限りです。

### おわりに

繰り返しになりますが、上記のグループディスカッションにて「私も研究の発展に貢献したい」や「多くの可能性を秘めているこの分野は面白い」、「これから始める研究への期待がわき上がっています」といった声がありました。また、荊住基金にて渡航された方からは「よく引用する論文を書かれている有名な先生方が何人もいらっしゃって、その先生方と直接話す機会に恵まれた」や「『こんなおもしろい道があるんや!』と、ワクワクし、目の前が明るくなった」とあります。これに関連して、他の国際学会の話になりますが、私は2021年に開催された第10回アジア作物学会議において“Root Genetics and Breeding”と題する一つのセッションの座長を務め、根研元副事務長で現評議員・編

集委員の宇賀優作さん(農研機構)に招待講演を依頼しました。その際、このセクションの口頭発表者の一人としてクイーンズランド大学の院生さんを選出したのですが、彼は尊敬する宇賀さんと同じセッションで口頭発表し、議論できたことをとても喜び、何度も私にお礼を言ってくれました。その時の彼の大興奮した様子は忘れられません。このような素晴らしい研究者らとじっくりと議論できる“根研究集会”などを通して、「こんなおもしろい道があるんや!」という驚きが継承されていけば、前途洋々たる根の研究の30年が待っていることでしょう。

さて、最後に私の「二人の恩師の根の研究への想い」を振り返って見たいと思います。上述のように、北野先生の「…地下部でもそのような研究がやがて花開く時期が訪れることを期待したい」には、嬉しいことに根研会員の奮闘もあり「上手く行っています!」と胸を張って答えられそうです。一方、(私事で恐れ入りますが)山内章先生の「突然変異体を使って、自分もああいう研究がしたいなあ」には残念ながら未だに込められていません。当然ですが、あれから30年近くも経ち私の研究者人生も潤沢ではなくなっており、焦る気持ちがこみ上げてきます。しかし、この焦りも根研が和らげてくれます。なぜなら、第50回記念集会の際、谷本英一元会長がポスター発表にて、退職後にもかかわらず共同研究者らと奮闘し、遂に“茎の伸長ホルモンとして発見されたジベレリンは、なぜ根の伸長を促進しないのか?”という長年の謎を見事に解き明かされたのを目の当たりにしたからです!(谷本, 2019; 谷本, 2024)。また、上述した「研究という仕事は非常に地味ですので、根気強くやって下さい」という菊住先生のお言葉にも、苦しいときに幾度も励まされています。根の研究はこうした“憧れ”や“想い”,そして“支え”により未来へと続いていくものだ、とつくづくそう感じています。

#### 引用文献

- 阿部淳 2024. 闊達な議論の場としての根研根の研究 33: 67-70.
- 遠藤いず貴, 神山拓也, 小池孝良 2020. グループディスカッション報告「6. 生物間相互作用」. 根の研究 29: 34-36.
- 藤井黎, 大橋瑞江, 平野恭弘 2020. グループディスカッション報告「3. 物質循環」. 根の研究 29: 28.
- 平野恭弘 2022. 樹木根研究者 菊住昇先生を偲ぶ一文献調査から. 根の研究 31: 122-126.
- 一井眞比古 1994. 根の突然変異 (1). 森田茂紀, 阿部淳編 根ハンドブック. 根研究会. pp. 149-150.
- 亀岡笑, 間野吉郎 2020. グループディスカッション報告「5-1. 環境応答/ストレス」. 根の研究 29: 31-32.
- 唐原一郎 2024. 根の研究と Plant Root. 根の研究 33: 61-66.
- 且原真木, 牧田直樹, 松波麻耶, 井ノ口華帆, 大西亜耶, 増本泰河, 矢原ひかり, 渡邊友美加, Farahnak, M. 2020. グループディスカッション報告「1. 水吸収」. 根の研究 29: 24-25.
- 北野英己 1994. 根の突然変異 (2). 森田茂紀, 阿部淳編 根ハンドブック. 根研究会. pp. 151-152.
- 北野英己 1995. 植物の根に関する諸問題 (20)—根の発生分化と形態形成の遺伝的制御—. 農業および園芸. 70: 119-123.
- 舩谷悠祐 2020. 第50回記念根研究集会に参加して. 根の研究 29: 41-42.
- 森田茂紀 2020. 根研究会から根研究学会へ. 根の研究 29: 21-23.
- 森田茂紀 2023. 根研究会の設立趣旨—できるだけ手を抜いて、会員の役に立つことを—Establishment of Japanese ASociety for Root Reseach. 根の研究 32: 43-53.
- 中園幹生 2007. 会員の研究紹介コーナー. 根の研究 16: 123.
- 仁木輝夫, 菱拓雄 2020. グループディスカッション報告「7. 形態形成」. 根の研究 29: 37.
- 野口享太郎, 福澤加里部, 菅井徹人, 古谷舞 2020. グループディスカッション報告「2. 養分吸収」. 根の研究 29: 26-27.
- 野口享太郎 2022. 菊住さん, ありがとうございます. 根の研究 31: 120-121.
- 小柳敦史 2024. 発足 15 ~ 16 年目の根研究会を振り返って. 根の研究 33: 35-38.
- 塩野克宏, 清水香那, 久米篤 2020. グループディスカッション報告「5-2. 環境応答/ストレス」: 根の潜在能力と根の環境を知る. 根の研究 29: 33.
- 田島亮介, 檀浦正子, 寺本翔太, 服部林太郎, 鈴木大介, 武井玄, 谷川夏子, 田村梓 2020. グループディスカッション報告「4. 測定/評価方法」. 根の研究 29: 29-30.
- Tanaka, W., Yamauchi, T., Tsuda, K. 2023. Genetic basis controlling rice plant architecture and its modification for breeding. Breed. Sci. 73: 3-45.
- 谷本英一 2019. ジベレリンによる根の成長制御 (Review) ~ジベレリン合成阻害剤から GID1 受容体まで~. 根の研究 28: 85.
- 谷本英一 2024. 「根の研究」が広げてくれた「研究と教育」. 根の研究 33: 23-34.
- 辻博之, 関谷信人 2020. グループディスカッション報告「8. 収量/生産性/成分」. 根の研究 29: 38.
- 山内章 2023. 「根の研究」と根研究会. 根の研究 32: 79-82.

## 菜根譚 野菜の根の話

中野明正

千葉大学 大学院 園芸学研究院

## 25. 根をアイス

2024年の夏は、100年に一度の記録的な猛暑の夏として記憶されるだろう。地球沸騰化のとは口であるとすると、さらに恐ろしいことである。適正な地球環境に戻すためにも根の研究は大いに貢献できる。

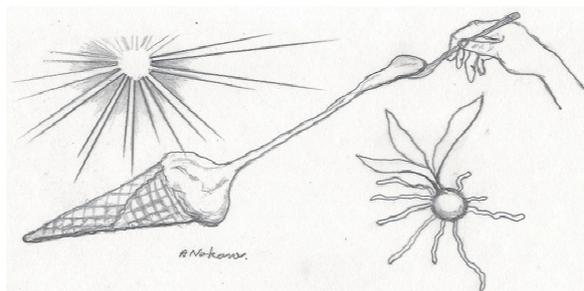
さて、暑い夏でアイスクリームの消費は伸びていることは言うまでもない。かくいう私も熱中症を警戒して、例年以上にせっせとアイスクリームを食べた。世界にはいろいろなアイスクリームがあるのもで、根と関係するアイスがあるのだ。

皆さんは“トルコアイス”を御存知だろうか。一言でいうと「のびるアイス」である。トルコではアイスクリームなど氷菓を“ドンドゥルマ（意味は凍らせたもの）”と呼び、“マラシュ・ドンドゥルマ”（マラシュは町の名前）が粘ってのびるトルコの伝統的なアイスのことである。のびるのはアイスに“サーレップ”を加えるからである。これはトルコの山岳部に自生するラン科の植物の呼び名で、この球根の乾燥粉末がアイスに使われている。“サーレップ”自体は、ビタミン、ミネラルそして多糖類を多く含むため消化管の粘膜にやさしいということで、生薬として用いられてきた歴史がある。のびをもたらず化学物質はグルコマンナンでありこれ自体は増粘多糖類として、様々な食品に使

われているような物質である。

本場トルコの“サーレップ”は人工栽培ではなくて、標高約1000mに自生するものが採取され、近年は絶滅の危機にあり輸出禁止となっている。つまり私たちが日本で食べる“トルコアイス”には“サーレップ”は使われておらず、正確には“トルコ風アイス”ということになる。実際、本当の“トルコアイス”には、材料や製造法に厳しい規定あり、トルコに行かないと食べられないような代物である。

そもそも“サーレップ”をアイスクリームに入れたのは「粘り気を加えることで、暑くてもアイスが溶けないようにするため」といわれている。昨今の暑さではその効果も十分発揮できていないかもしれないが、根の食文化を継承するためにも、危機に瀕する自生地の保全を進めねばならない。



## 第 59 回根研究集会に参加して

澤田佳穂

千葉大学大学院園芸学研究科

第 59 回根研究集会は福井県立大学の塩野先生実行委員長の元、福井県で開催された。

口頭発表 16 題、ポスター発表 27 題に加え、懇親会や福井駅での公開ワークショップと充実した 2 日間となった。

本会を通じて、「根」という、たった一つの共通ワードから広がる世界が大きいこと、「研究においても大切なのは人との繋がりであること」を強く感じた。

研究発表では、「根」という一つのキーワードを元に、樹木の研究、作物の研究、野菜の研究、遺伝子の研究、根の分析方法の簡易化に関する研究など、多岐の分野にわたる発表が行われ、根から広がる世界は想像以上に広いと感じた。他分野の研究同士でも共通する部分があったり、自分の研究にも活かせる部分があったりと、興味深かった。また、研究発表だけでなく提案型の発表もあり、根の研究会の風通しの良さがよく現れた場面の一つだと感じた。私自身も、初めて「学会で発表する」という経験をさせていただいた。私の発表に対してご質問をいただいたり、発表終了後にもわざわざ声をかけてご意見をくださったりと、今後研究を進める上でもモチベーションとなる貴重な経験となった。

懇親会では、著名な先生方も、研究機関の方も、企業の方も、学生も同じテーブルを囲むことで、一つの繋がりが新たな繋がりを生み出しており、人と人の繋がりが増えていくのが目に見えるような懇親会であった。人との繋がりが増えれば、会話する中で一人一人

が持つ研究手段や意見の幅が広がり、今後の研究がより豊かになると感じた。

懇親会を含む本会を通じて、「人の雰囲気」という根研究集会の良さを実感した。私は日頃から、生きていく上で最終的に大切なのは地位でも名誉でも功績でもなく、「人柄」だと思っている。根研究集会に集まった研究者の方々は、私たち学生にも驕らずお話ししてくださり、誰かの発表に対して詰めることもなく、素直にお話を伺いたいと思う方々ばかりだった。これは、これまで根研究学会や根研究集会を運営して作りあげてきて下さった先生方の賜物だ。

公開ワークショップは福井駅内で行われ、見る人の好奇心をくすぐるものであった。福井駅内を通る多くの方は根を研究する学会があることを知らないだろうし、増してや、根を取り出すところを見たことがある人はほとんどいないだろう。学びの第一目は、「これはどういうことなのだろうか。」と好奇心が生まれることから始まると思っている。「何をしているんだろう？」そう思わせる公開ワークショップは、根を研究対象とする私たちだけでなく、駅を通る人の知的好奇心をもくすぐるものであり、駅内で行われた意義は大きいと感じている。私自身も実際に根を分析するところを見ることができて、非常に楽しい時間だった。

最後に、本会の準備・運営をしてくださった塩野先生、角田先生をはじめとした福井県立大学の皆様、本会に参加し交流を持ってくださった皆様、素晴らしい研究集会をありがとうございました。

## 北陸新幹線の改札横でやってみた！ 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～」の開催報告

角田智詞<sup>1)</sup>・田丸翔太郎<sup>1,2)</sup>・芝日菜子<sup>1,2)</sup>・澤田佳穂<sup>3)</sup>・小河樹<sup>4)</sup>・西嶋遼<sup>1)</sup>・塩野克宏<sup>\*1)</sup>

1) 福井県立大学大学院生物資源学研究所

2) 日本学術振興会・特別研究員

3) 千葉大学大学院園芸学研究所

4) 千葉大学園芸学部

2024年7月21日、福井県福井市で開催された第59回根研究集会において、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～」が開催されました。このワークショップは「根」についての知識を一般の人に広めるために、JR福井駅内にある屋内広場で開催されました(第1図a, b)。

ワークショップは、福井県立大学の大会実行委員が企画し、宇都宮大学の神山拓也さん、東北大学の田島亮介さん、京都大学の檀浦正子さん、農研機構の寺本翔太さんといった第一線の専門家たちが講師を務めました。参加者は、根を採取して画像に取り込み、それを解析する方法を学ぶとともに積極的な意見交換をしました。

まず、神山さんが、根箱で栽培したトウモロコシの根を取り出す実演をしました(第1図c)。根系構造を維持したまま簡単に根を採取できる、根箱ピンボードを使って、土の中から根が見事に現れたときには、会場中から拍手が起きました(第1図d)。駅を通りかかった人たちからも、思わず驚きの拍手が送られました。

次に、檀浦さんがA3サイズのフラッドベットスキャナを使って、根の画像を取り込みました。この画像を使い、根系解析のスタンダードとなっている市販ソフトWinRHIZOで、根の太さ、総根長などを計測する方法を紹介しました。また、寺本さんは、透明な容器内にある根でも、表面に露出した部分を解析できることを実演しました。さらに、解析ソフト「Arata」を使って、根以外のもの(例えばビニールテープ)を除外し、根だけを正確に分析できる方法を説明しました。田島さんは、格子交点法という方法を使って、根の長さを測る原理を解説しました。ワークショップでは実演だけでなく、会場から寄せられる質問に答え、ゆっくりと

理解を深めました。

ワークショップの最後には、自由に質問や意見を交換する時間が設けられ、参加者たちは短いながらも根研らしい充実したひとときを過ごしました(第1図e)。

最後に参加者の感想をいくつかご紹介します。

「根箱ピンボード法やWinRHIZOによる解析など、私の研究の中でこれまで触れてきた方法もありましたが、知っているつもりで知らなかったテクニックやコツの発見がありました。また、機械学習を取り入れた解析はなんとなく難しい印象があり、手を出していませんでしたが、根の自動抽出の実演や学習させる過程の話聞いて、今後の研究にも取り入れてみようと思えました。専門家にすぐに質問できる場というのはありがたいですね。」

(田丸翔太郎さん・福井県立大学大学院)

「私は今後の実験でピンボード法を使用したいと考えていた。ワークショップを通して実際にその手法を使用している先生に実践のコツや細かな注意点を聞くことができ、有意義な学びを得ることができた。ワークショップ中は参加者が自由に根に触れ、先生たちに教わりながら根の取り出しを実践できる環境であっただけでなく、取り出した根の解析までの一連の流れを実践していたため、自身の研究で使用するときのイメージに繋げることができた。私の地元福井で根の研究への理解を深められて楽しい時間を過ごすことができた。」

(芝日菜子さん・福井県立大学大学院)

「百聞は一見にしかずと言いますように、言葉から得た情報だけで見たことのないものを想像することは難しいですから、様々な手段で根を解析する様子を実際



第1図 公開ワークショップの様子。(a), (b) JR 福井駅内にある屋内広場に集まった講師と参加者。(c) 根箱で栽培した植物の根を根箱ピンボード法により洗い出している参加者。(d) 根箱ピンボード法により、空間的な広がりを維持したまま洗い出された根に興味津々の参加者。(e) 画像取得・解析装置を操作しながら意見を交換する講師と参加者。

に拝見でき、非常に学びの多い時間となりました。また、参加者が自由に移動できる会場で行われたことで、情報交換がしやすくなり、それぞれの交流が深まったように感じています。」

(澤田佳穂さん・千葉大学大学院)

「私は養液栽培を用いて研究を行っているため、今回の公開ワークショップでは普段見ている根とはまた違った根の姿を見ることができた。論文の中の知識の

あった根箱やその解体方法などを直接見られたことは、根に対する興味・関心が高まる経験だった。また本ワークショップに参加されていた先生方が交わすディスカッションからは、側から聞いているだけで根の研究の過酷さが伝わってきた。本ワークショップは駅中の広場で行われていたが、オープンな環境で自由に意見交換をできるという点で根研究会のフランクさがとても良く出ており、まだまだ根のことを知らない私でも楽しむことができた。」(小河樹さん・千葉大学)

## 第 59 回根研究学会プログラム

第 59 回根研究集会在 2024 年 7 月 20 日 (土) ~21 日 (日) に、福井県福井市の福井市地域交流プラザにて現地開催されました。福井県立大学が開催を担当するのは 1995 年に第 2 回アジア作物学会議のミニ・シンポジウムのひとつとして、開催された「第 3 回 JSRR シンポジウム イネ根系の理想型」以来、29 年ぶりとなりました。

国内外から 84 名の参加があり、口頭発表 16 件、ポスター発表 26 件の一般発表がありました。また、特別講演を細胞壁構造研究の世界的権威であるドイツ・ボン大学の Lukas Schreiber 教授にご発表いただきました。さらに、神山拓也博士 (宇都宮大学)、檀浦正子博士 (京都大学)、田島亮介博士 (東北大学)、Shitphen WANG (京都大学)、寺本翔太博士 (農研機構) を講師にお迎えして、「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~」と題した公開ワークショップを行いました。公開ワークショップでは根箱で育てた植物体を使って、根系の採取、画像の取り込み、画像解析を実践しながら、ノウハウを交換することができました。

### <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)

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性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  
○宍戸恵・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 覚・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 *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
- 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壤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・Kentarō K. Shimizu・Hidehiro Fukaki
- ★B08 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・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クローンの細根成長動態解析  
○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・磯川悌次郎・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

## 2024 年度 根研究学会総会報告

福井市地域交流プラザで開催された第 59 回根研究集会の一部として、7 月 20 日に定期総会を開催しました。本間知夫会員に議長を務めて頂き、下記の通り 2023 年度の会務報告・決算報告・会計監査報告、2024 年度の事業計画・予算が承認されました。

## 1. 2023 年度 会務報告

## 1) 会誌『根の研究』第 32 巻を発行した。

(福澤 加里部 編集委員長)

第 1 号 (2023 年 3 月発行) pp. 1 - 29 (29 頁)

第 2 号 (2023 年 6 月発行) pp. 31 - 63 (33 頁)

第 3 号 (2023 年 9 月発行) pp. 65 - 75 (11 頁)

第 4 号 (2023 年 12 月発行) pp. 77 - 99 (23 頁)

別冊 1 号 (2023 年 6 月発行) pp. 1 - 35  
(35 頁)

別冊 2 号 (2023 年 12 月発行) pp. 1 - 46  
(46 頁)

## 2) 研究集会

以下 2 回の研究集会を開催した。第 57 回根研究集会内では特別講演が 2 件、第 58 回では公開特別講演が 1 件行われた。

- ・第 57 回根研究集会  
於：明治大学農学部  
5 月 20 日 (土) ~ 21 日 (日)  
実行委員長 塩津文隆会員
- ・第 58 回根研究集会  
於：兵庫県立大学環境人間学部  
11 月 3 日 (金) ~ 5 日 (日)  
実行委員長 大橋瑞江会員

## 3) 2023 年度根研究学会賞

選考の結果、以下の業績を表彰した。

## 【学術功労賞】 1 件

受賞者：平野恭弘

(名古屋大学大学院環境学研究科)

業績：地中レーダ探査技術を利用した樹木根構造の非破壊解析に関する研究

## 【学術奨励賞】 2 件

受賞者：亀岡笑

(酪農学園大学農食環境学群)

業績：土壌水分条件に対してイネ根系が発揮する発育的可塑性及び水通導性応答の機能解析

受賞者：江尻真斗

(株式会社ファイテック研究開発部)

業績：イネ科野生種の過湿環境への適応メカニズムの研究

## 【学術特別賞】 1 件

受賞者：本間知夫

(前橋工科大学工学部生命工学領域)

業績：根系にかかわる生体電位研究

## 【優秀発表賞】 5 件

受賞者：石川 愛佳氏

(福井県立大学 生物資源学部、東北大学大学院生命科学研究所)

業績：サイトカイニンは外皮のスベリン化を介したイネの Radial Oxygen Loss バリア形成に関与する

受賞者：細井 彩氏

(信州大学大学院 総合理工学研究科)

業績：同一環境下で生育した異なる産地由来のスギ細根形態の比較

受賞者：江岸 祐夏

(福井県立大学大学院生物資源学研究科)

業績：過湿環境で変動する窒素肥料成分はイネの酸素漏出バリア形成に影響を与えるのか？

受賞者：芝日菜子

(福井県立大学大学院生物資源学研究科)

業績：オオムギの湿害発生過程における根系・根圏酸化状態デュアルイメージングの挑戦

受賞者：増本泰河

(信州大学大学院総合理工学研究科)

業績：亜高山林における樹木の水獲得戦略を根の Pressure-Volume 曲線特性と根機能形質から紐解く

#### 4) 国際誌 *Plant Root* の刊行

(野口享太郎 編集委員長ら)

<http://www.plantroot.org/>

第 17 巻として、7 の論文 (全 81 頁) を掲載した。受理後早期の掲載、並びに編集委員の負担を軽減する目的で BIB 作成費を計上した。

#### 5) 会誌以外の出版物・根研ロゴライセンス

「根の研究の最前線 7」および同シリーズのうち、在庫があるバックナンバーについては、引き続き販売した (セット割りを適用)。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た。

#### 6) 会員勧誘と費用節減対策

会員数は 10 名程度の微増傾向にあり、会費収入は下止まり傾向にある。財政状況改善を目的として、第 55 回根研究集会から根研究集会要旨の公開は別冊 (PDF オンライン公開) のみとして、冊子体への掲載を取りやめた (2022 年度削減額: 72,600 円, 算出根拠: 要旨集 44 ページ×1,650 円/ページ)。また、学生や若手研究者の入会を促すため、根研究学会優秀発表賞、若手会員研修支援、研究集会参加費無料化を継続した。

## 2. 2023 年度 決算報告

期間: 2023 年 1 月 1 日 - 12 月 31 日

### 1) 2023 年度 一般会計

1. 収入				単位: 円
事項	予算	2023 年度	予算との差額	
前年度繰越金	568,083	568,963	0	
会費未納分 <sup>※1</sup>	53,000	50,000	-3,000	
2023 年会費 <sup>※1</sup>	280,000	337,000	57,000	
2024 年以降の会費前納分 <sup>※1</sup>	550,000	511,000	-39,000	
寄付・雑収入 (許諾料利子) <sup>※2</sup>	40,000	486,187	446,187	
会誌改善費 (特別会計から)	0	0	0	
合計	1,489,963	1,951,150	461,187	
2. 支出				
事項	予算	2023 年度	予算との差額	
会誌・名簿の製版・印刷費 <sup>※3</sup>	600,000	555,500	-44,500	
会誌・名簿の送付費 <sup>※4</sup>	55,000	52,251	-2,749	
Plant Root BIB 作成費 <sup>※5</sup>	49,000	53,900	4,900	
事務局委託費・謝金 <sup>※6</sup>	372,900	356,400	-16,500	
事務通信費 <sup>※9</sup>	15,000	10,179	-4,821	
事務用品費	2,000	3,300	1,300	
研究会集経費	40,000	40,000	0	
学食費 <sup>※7</sup>	25,000	29,012	4,012	
サーバー使用料	27,000	27,120	120	
予備費 <sup>※8</sup>	50,000	43,047	-6,953	
次年度繰越金	254,063	780,441	526,378	
合計	1,489,963	1,951,150	461,187	
繰越金を除く 2023 年の実収入		1,384,187		
繰越金を除く 2023 年の実支出		1,170,709		
繰越金を除く 2023 年の実収収		213,478		

※ 1 年会費は電子版個人会員 3,000 円, 冊子版 (+ 電子版) 個人会員 4,000 円, 冊子版団体会員 9,000 円。前納は、12 月までに 2023 年度を納入した分など。

※1 2023 年に納入された会費の内訳		合計	898,000
1) 未納分	2022 年度以前	90,000	3,000 円 × 8 名 + 4,000 円 × 2 名 + 9,000 円 × 2 社
2) 当年度分	2023 年	337,000	3,000 円 × 87 名 + 4,000 円 × 19 名
3) 前納分	2024 年度以降	511,000	3,000 円 × 105 名 + 4,000 円 × 40 名 + 9,000 円 × 4 社
※2 雑収入の内訳		合計	486,187
1) 第 58 回大会収益金		42,000	
2) 寄付 (「根っこのふしぎな世界」原稿料) 他		399,832	
3) 根研グッズ販売		24,190	
4) オープンアクセス費		20,000	
5) 許諾料 (サメメディア)		165	
※3 会誌・名簿印刷費の内訳 (製版を除いた頁数)		合計	555,500
1) 32 巻第 1 号 (30 頁)		125,400	
2) 32 巻第 2 号 (34 頁)		129,800	
3) 会員名簿		85,800	
4) 32 巻第 3 号 (12 頁)		100,100	
5) 32 巻第 4 号 (26 頁)		114,400	
※4 会誌・名簿発送費の内訳		合計	52,251
1) 31 巻第 4 号		8,148	
2) 32 巻第 1 号		7,056	
3) 32 巻第 2 号 + 会員名簿		23,520	
4) 32 巻第 3 号		13,527	
※メール便・郵便 (新入会員及び再送費等含む) * メール便は翌月払			
※5 Plant Root BIB 作成費の内訳		合計	53,900
1) J-STAGE 登録料 (7 件)		53,900	
※6 謝金の内訳		合計	356,400
1) 2023 年事務委託費 (補共立)		330,000	
2) 2023 年 HP 管理費 (補共立)		26,400	
※7 学食費の内訳		合計	29,012
1) 賞状用紙		2,035	
2) パーカー購入費		22,960	
3) 送料等		1,817	
4) 賞状作成代		2,200	
※8 予備費の内訳		合計	43,047
1) 会費請求書作成代 (ラベルシール代含む)		19,611	
2) 会費請求書送料		23,436	
※9 事務通信費の内訳		合計	10,179
1) 振込手数料		2,783	
2) 郵便送料 (切手代他)		7,396	

### 2) 2023 年度 特別会計

1. 収入				単位: 円
事項	予算	決算	予算との差額	
前年度繰越金	107,089	107,089	0	
出版物販売 <sup>※1</sup>	5,000	3,520	-1,480	
Plantroot 掲載料	20,000	20,000	0	
寄付・雑収入 (ロゴ使用料)	1,000	2,000	1,000	
合計	133,089	132,609	-480	
2. 支出				
事項	予算	決算	予算との差額	
出版物 (印刷費・製作費)	0	0	0	
「根の研究」デジタル化	0	0	0	
送料・手数料など	10,000	729	-9,271	
国際誌刊行経費 (サーバーレンタル料)	23,000	24,920	1,920	
Plantroot BIB 作成費	7,000	0	-7,000	
会長裁量経費	50,000	0	-50,000	
会誌改善費 (一般会計への補助)	0	0	0	
副任基金運営維持費	0	0	0	
次年度への繰越金	43,089	106,960	63,871	
合計	133,089	132,609	6,520	
繰越金を除く 2023 年の実収入	25,520			
繰越金を除く 2023 年の実支出	25,649			
繰越金を除く 2023 年の実収収	-129			
※1 出版物販売の内訳				合計 3,520
1) 根の研究の最前線 1~5 巻売上 (送料込)				3,520

### 3) 2023 年度 苜住基金

1. 収入				単位: 円
事項	予算	決算	予算との差額	
前年度繰越金	735,448	735,448	0	
特別会計繰入金	0	0	0	
寄付金(森の根の生態学印税)	10,000	0	-10,000	
利子	0	6	6	
雑収入	0	0	0	
	745,448	735,454	0	

2. 支出 <sup>※</sup>				
事項	予算	決算	予算との差額	
若手会員海外渡航支援(1名)	240,000	60,000	-180,000	
送料・手数料	1,500	330	-1,170	
次年度への繰越金	503,948	675,124	171,176	
	745,448	735,454	-9,994	

※若手会員海外渡航支援 1 件

### 3. 2023 年度会計の監査報告

2024 年 2 月 21 日に、リモート会議にて、根研究学会監査の二瓶直登会員に事務局業務担当者(共立の栗本さん)が説明を行い、会計監査をして頂いた。以下がその監査報告の写しである。

#### 会計監査報告書

根研究会会則第 9 条に基づき、2023 年度(2023 年 1 月 1 日～12 月 31 日)の会計監査を行った結果、適正に執行されていることを確認しました。

2024 年 2 月 21 日

### 4. 2024 年度事業計画(案)

#### 1) 会誌『根の研究』第 32 巻発行

(編集委員長: 福澤 加里部)

第 1 号(2024 年 3 月発行) pp. 1-52 (52 頁)

第 2 号(2024 年 6 月発行予定) pp. 55-73 (19 頁)

第 3 号(2024 年 9 月発行予定)

第 4 号(2024 年 12 月発行予定)

別冊 1 号(2024 年 9 月発行予定)

別冊 2 号(2024 年 12 月発行予定)

#### 2) 研究集会等の開催

- 第 59 回根研究集会

(福井市地域交流プラザ)

7 月 20 日(土)～21 日(日)

実行委員長 塩野克宏会員

- 第 60 回根研究集会

(東海大学農学部・熊本キャンパス)

12 月 14 日(土)～15 日(日)

実行委員長 阿部淳会員

#### 3) 2024 年度根研究学会賞の公募・選考・授与

6 月発行の会誌で告示し、7 月に公募。第 60 回根研究集会において授賞。

これまでの受賞者について、他団体の賞への推薦も検討する。

#### 4) 一般会計・特別会計による学会活動と会員の研究活動の支援(予算案を参照)

- 国際誌 *Plant Root* 第 18 巻発行(編集委員長: 野口享太郎ら)。投稿数・掲載数の増加に努める。
- 根の研究に掲載された原著論文・総説・ミニレビュー等の J-Stage に収録される論文について、著者がオープンアクセス権の取得料金を支払うことで、非会員でも根研会員への公開と同時に論文を読める状態にできる「オープンアクセスオプション」を導入する。オープンアクセス料は 1 編あたり 20,000 円とする。本制度により、著者にとって論文公開を早める選択肢が生まれる。根研究学会にとっては財源の 1 つになる。
- 根研ロゴ使用料による特別会計の増収を図るため、会員によるグッズ作製を促進する。

#### 5) 根研究学会「苜住」海外渡航支援

根研究学会所属の若手会員(申請時の年齢が 40 歳以下)の研究活動を支援するため、国内の学会等に参加して根に関する研究成果を公表したり調査に出向いたりするための経費の一部を補助する。年 1~2 件程度(1 件 6~12 万円を目安)を助成する。

#### 6) 会運営に関する問題

単年度収入の減少に対しては一層の節約に努める。運営の基盤となる会費を増やすため、根研究学会 HP を整理・拡充(研究集会案内ページの追加、根研はじめませんか? バーナーの追加)し、会員の増加をはかる。あわせて、助成金や広告料の取得に努める。

根研ホームページや *Plant Root* のためのサーバーの維持費が値上がりとともに予算を圧迫しており、昨年度は会員による出版物の印税寄付などにより収入があったため、今年度サーバーの移行にかかる手数料(¥150,000)を支払えると

判断したため実施する。サーバー使用料¥46,920 (内訳 plantroot.org ¥19,800 + jsrr.jp ¥27,120) が、¥17,820 (内訳 xserver ¥13,200 + plantroot.org ¥1,518 + jsrr.jp ¥3,102) に圧縮出来る。なおサーバー移行に伴う支出は、移行によるサーバーレンタル料の支出が毎年¥29,100 減少するため、5年間の継続使用により相殺できる予定。

7) 出版

「根の研究の最前線7」およびバックナンバーの販売促進に努める。その他、出版社等から、根の研究の発展や社会へのアピールに役立つような出版の企画提案があれば協力する。

8) 他の学術関連団体などとの協力

- 日本学術会議等

協力学術研究団体として、委員候補の推薦やアンケートなどの依頼があれば協力する。

- 国際研究集会等

会誌への開催情報の掲載など、情報の伝達に協力する。

- その他

学術活動に関するアンケートなど、根の研究や日本の学術発展に有意義と思われる要請については、大きな負担のない範囲で協力する。

他の学術団体からの共催、講師推薦等の要請に対しては、執行部・評議員で検討する。

9) その他

総会の場で議論したい事項。

5. 2024年度予算(案)

期間： 1月1日 - 12月31日

1) 2024年度 一般会計

2024年7月現在の会員数は、282名(海外含む)、団体8件。年会費は、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円とする。

収入 事項	単位:円		
	予算	前年実績	前年との差額
前年度繰越金	780,441	566,963	213,478
会費未納分※1	108,000	50,000	58,000
2024年会費※1	752,000	337,000	415,000
2025年以降の会費前納分※1	550,000	511,000	39,000
寄付・雑収入※2	40,000	486,187	-446,187
合計	2,230,441	1,951,150	279,291

支出 事項	単位:円		
	予算	前年実績	前年との差額
会誌・名簿の製版・印刷費※3	550,000	555,500	-5,500
会誌・名簿の送付費※3	32,000	52,251	-20,251
事務局委託費・謝金※4	356,400	356,400	0
事務通信費	15,000	10,179	4,821
事務用品費	2,000	3,300	-1,300
研究会集経費	40,000	40,000	0
学会賞経費※5	25,000	29,012	-4,012
サーバー使用料	16,302	27,120	-10,818
サーバー移行料※6	150,000	0	150,000
予備費	50,000	43,047	6,953
次年度への繰越金	993,739	780,441	159,398
合計	2,230,441	1,951,150	279,291
繰越金を除いた2024年の実収入		1,450,000円	
繰越金を除いた2024年の実支出		1,236,702円	
繰越金を除いた2024年の実質収支		213,298円	

- ※1 10月に次年度分の会費納入をお願いするので、多額の前納分が発生し、当該年になってからのその年分の会費納入額は会員数×年会費より少ない。財源の安定化のためには、30名程度会員が増えることが望ましい。
- ※2 オープンアクセス料、会誌広告・ホームページのバナー広告で収入を上げることが望ましい。
- ※3 会誌(全4号)の発行。名簿本年度に発行。
- ※4 事務局委託経費(年30万円+消費税10%)。ホームページ管理委託費(年3万円+消費税10%)。
- ※5 3名程度の授賞を想定。受賞者が増えた場合は予備費等で対応する。
- ※6 サーバーを移行する際の手数料

2) 2024年度 特別会計

収入 事項	単位:円		
	予算	前年実績	前年との差額
前年度繰越金	106,960	107,089	-129
出版物販売※1	5,000	3,520	1,480
Plant Root掲載料※2	105,000	20,000	85,000
寄付・雑収入(利息等)※3, 4	1,000	2,000	-1,000
合計	217,960	132,609	85,351

支出 事項	単位:円		
	予算	前年実績	前年との差額
出版物(印刷・製作費)	0	0	0
「根の研究」デジタル化※5	0	0	0
送料・手数料など	700	729	-29
国際誌刊行経費(サーバーレンタル料)	1,518	24,920	-23,402
Plant Root BIB作成費※6	35,000	0	35,000
会長裁量経費	50,000	0	50,000
会誌改善費(一般会計へ)	0	0	0
苅住基金運営維持費	0	0	0
次年度への繰越金	130,742	106,960	23,782
合計	217,960	132,609	85,351

- 繰越金を除く2024年の実収入 111,000円
- 繰越金を除く2024年の実支出 87,218円
- 繰越金を除く2024年度の実質収支 23,782円
- (会長裁量経費50,000円を使わずにすれば、赤字は縮小)
- ※1 「根の研究の最前線7」を中心に販売予定。
- ※2 Plant Root掲載料(根研究学会会員:20,000円/編; 非会員:25,000円/編)。5編で計算。
- ※3 根研ロゴ使用料(1製品につき100円)。
- ※4 銀行口座利息。
- ※5 論文以外のコンテンツも含めた画像PDF化委託費。
- ※6 7,000円/編、5編で計算。

## 3) 2024 年度 苜住基金

収入		単位:円		
事項	予算	前年実績	前年との差額	
前年度繰越金	735,454	735,448	6	
特別会計繰入金	0	0	0	
寄付金(森の根の生態学印税)	10,000	0	10,000	
利子	0	6	-6	
雑収入	0	0	0	
合計	745,454	735,454	10,000	

支出		単位:円		
事項	予算	前年実績	前年との差額	
若手会員旅費支援	100,000	60,000	40,000	
送料・手数料	1,500	660	840	
次年度への繰越金	643,954	674,794	-30,840	
合計	745,454	735,454	10,000	

国内において根に関する研究成果を公表したり調査したりするための経費支援として 2 名 (12 万円/件)を予定.

以上の 3 会計は, 2025 年 2 月頃に会計監査を実施予定.

以上

### 「根の研究」の発行形態に関するアンケートのお願い

根の研究は1992年の発刊以来、年4回発行（冊子体、電子体）を行ってきました。論文のほかさまざまな記事が掲載され、会員間の情報交換のプラットフォームになっています。また、この30年間にインターネットが普及し、電子体会員区分の新設、論文のインターネット上（J-STAGE）での公開など、インターネットを活用したサービスも導入されています。その一方、投稿論文数が少ない現状で、各号に論文を掲載することが難しい場面が生じています（皆様には引き続きぜひ積極的な論文投稿をお願いします）。また、論文以外の記事を含めて J-STAGE に登録することにより、記事がより広く読まれるというメリットや、メールニュース（根研ニュース）など、紙媒体以外の連絡手段も活用することで、会員への迅速な連絡や編集業務の効率化がはかれる可能性があります。

そこで、年4回発行にこだわらず、柔軟に発行形態を検討したいと考えています。その際に会員の皆様の意向を把握することは重要と考え、このたび発行形態に関するアンケートを実施いたします。なお、アンケートの結果を参考に事務局・「根の研究」編集委員会で検討し、必要に応じて今後の発行形態を提案させていただく予定です。

以下の URL にアクセスしていただき、ご回答をお願いします。

<https://forms.gle/yxaWKmLTTgJ4jzru5>

回答期限は2024年12月1日（日）といたします。ぜひ皆様のご協力のほどをよろしくお願いいたします。

根研究学会事務局・「根の研究」編集委員会

# Root Research 根の研究

編集委員長	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
副編集委員長	松波 麻耶	岩手大学農学部
	神山 拓也	宇都宮大学農学部
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・作物研究部門
	小川 敦史	秋田県立大学生物資源科学部
	篠遠 善哉	農研機構・東北農業研究センター
	辻 博之	農研機構・北海道農業研究センター
	仲田(狩野)麻奈	名古屋大学農学国際教育研究センター
	菱 拓雄	九州大学農学部附属演習林
	松村 篤	大阪公立大学大学院農学研究科
	南 基泰	中部大学応用生物学部
	山崎 篤	農研機構・東北農業研究センター
	山本 岳彦	農研機構・東北農業研究センター
上級編集補佐	島村 聡	農研機構・東北農業研究センター

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 : neken2024@jsrr.jp

根研究学会ホームページ <https://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 33 巻 第 3 号 2024 年 9 月 15 日印刷 2024 年 9 月 20 日発行  
発行人: 大橋瑞江 〒670-0092 兵庫県姫路市新在家本町 1 丁目 1-12  
兵庫県立大学 環境人間学部  
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**

## **Original Paper**

Promotion of symbiosis between plants and arbuscular mycorrhizal fungi using crude drug extract derived from plants belonging to the Gentianaceae family

Hikaru SAITO, Ayae SAKAI, Yuka HIGASHI, Takaya TOMINAGA and Hironori KAMINAKA ..... 77

## **Mini Review**

Fine root dynamics analyses in a tropical rain forest—A case study and challenges on root scanner method—

Izuki ENDO ..... 84