

Root Research

ISSN 0919-2182
Vol.33, No.1
March 2024

Japanese Society for Root Research

目 次

【巻 頭 言】

会員の皆様へ 1

【ミニレビュー】

作物根系解析の効率化 寺本翔太 7

地上部・地下部呼吸の芽生え～成木での変化 黒澤陽子・森茂太 15

【連載 根の研究の30年を展望する】

「根研究会」が広げてくれた「研究と教育」 谷本英一 23

発足15～16年目の根研究会を振り返って 小柳敦史 35

【情 報】

「根っこのふしぎな世界」全4巻刊行 中野明正 39

菜根譚 野菜の根の話 23. 美しい青い木の根 中野明正 40

第59回根研究集会のお知らせ(59th Biannual Meeting of JSRR) 41

【報告 苜住海外渡航支援による海外研修】

国際植物表現型シンポジウム—PhenoVeg 2023(台湾・台南市)に参加して

Via Ann Candelaria Marcelo 45

【公 示】

根研究学会会則 46

根研究学会学術賞規定 47

『根の研究』投稿規定 48

『根の研究』原稿作成要領 49

『根の研究』論文審査要領 50

国際誌 Plant Root に掲載の2023年の論文 51

根の研究
根研究学会(JSRR)

会員の皆様へ



告 示

○根研究学会 2024 年度総会の開催について

第 59 回根研究集会(塩野克宏実行委員長)の一部として、2024 年度の定例総会を開催します。皆様ご参加ください。

開催日:2024 年 7 月 20 日(土)(対面形式)

予定されている主な議題: 2023 年度活動報告・決算, 2024 年度活動方針・予算, 規定等の変更について(審議事項については, その場でもご提案いただけますが, 時間をかけて議論すべき議題や, 資料の配付を必要とする議題については, なるべく事前に事務局までご提案ください)。

事務局からのお知らせ

1. 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>

2. 2024 年の根研究集会

- ・ 第59回根研究集会 [本号に開催案内を掲載・詳細はホームページにて]

発表申込みは6月13日(木)が締切り, 講演用紙提出は7月3日(水)が締切りです。

参加のみの場合の申し込みは7月3日(水)が締切りです。

開催日時 **2024年7月20日(土)~21日(日)**

福井市地域交流プラザにて, 現地開催します!

- ・ 第60回根研究集会

秋・冬の研究集会は熊本県の東海大学(阿蘇くまもと臨空キャンパス)で**11月~12月**頃現地開催する予定です(阿部淳実行委員長)。詳細が決まりましたら根の研究, メルマガ, HPなどで告知します!

- ・2025年度の集会 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。

3. 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。

次ページに続く

4. 「苺住」国内研修支援の募集

- ・本支援は、根研究学会所属の若手会員（申請時の年齢が40歳以下）の国際的な活躍を支援するため、海外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渡航経費の一部を補助するものです。
- ・今回は会員間の横のつながりを強めることを目的に、ポスドク・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。
- ・期間は前期を1月～6月、後期を7月～12月とします。受付は随時行い、各期間で採択数に達した時点で終了とします。
- ・審査方法は正副会長と正副事務局長で合議し、評議員にメーリングリストで報告後、決定します。
- ・採択された場合には「根研究学会国内研修助成採択」の証明書を授与するとともに、会誌に1ページの報告をしていただきます。
- ・申請書（書式A4 一枚）には、以下の書式に従い、1）申請者情報、2）訪問先、3）現在行っている主な研究の概要と訪問による研究進展効果（400字程度）を記載し、指導教官または受入研究者経由で以下の根研究学会事務局までE-mailの添付ファイルとして提出の上、郵送でもお送り下さい。

〒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

E-mail : neken2024@jsrr.jp

根研究学会「苺住」国内研修支援申請書

申請題名：

1) 申請者

申請者氏名：

申請者所属：

連絡先（住所 メールアドレス 電話番号）：

生年月日：

会員種別： 正 / 学生

指導教官または受入研究者氏名：

印

所属・職：

2) 訪問先

訪問場所（連絡先 受入研究者名）：

訪問期間：

3) 現在行っている主な研究の概要と訪問による研究進展効果（400字程度）：

- ・採択された場合には、訪問終了後に会誌「根の研究」にレポートとして投稿（写真2枚程度を含む原稿量1ページ）をお願いします。

次ページに続く

5. 投稿のお願い

会誌「根の研究」では、投稿規定等の一部を改訂し、「短報」の論文審査の査読者を1名とし、英文要旨提出を任意とすることにしました。これにより「短報の速報性が高まり、より投稿しやすくなりますので、積極的なご寄稿をお願いいたします。」また、原著論文のほかに、ご自身の一連の研究を他分野の会員にもわかりやすく解説したミニレビューを重視しております。学術功労賞・学術奨励賞の要件である、本会における研究成果の報告は、ミニレビューによる解説も認められていますので、積極的にご寄稿ください。研究手法や学生向けの実験・実習法の解説なども歓迎します。さらに、特集企画についても検討しますのでご提案ください。

投稿の際には、著者の執筆負担軽減と校正・編集作業の効率化のために整備された、テンプレートをご使用ください。テンプレートのwordファイルは、根研究学会ホームページ「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。

6. 根研ロゴの使用について

これまで「根研」のロゴを入れたTシャツなどのグッズを事務局が製作し、研究集会で販売することで、その収益を特別会計の収入としていました。しかし、売れ残りが生じると特別会計の赤字になってしまうため、なかなかグッズを積極的に製作できませんでした。そこで、会員の皆様が使用料を支払うことで根研ロゴを使用したグッズを自由に製作できるようにしています。

会員の皆様により気軽に根研ロゴを使用していただくため、2021年10月1日からの使用料を1製品につき100円に値下げしました!これを機に、会員の皆様オリジナルの「根研」のロゴを入れたTシャツ、グッズを着て、根研究集会、職場や研究室のイベントに参加しませんか?積極的なご利用を期待しています!詳しくは事務局(neken2024@jsrr.jp)までお問い合わせください。

7. 名簿データ更新のお願い

根研究学会では、会員の皆様にデータ登録をお願いしております。これは、会誌発送を確実にするとともに、会員相互の交流を目的とするものです。特に異動など変更が生じた方は、お手数ですが根研究学会ホームページ(<http://www.jsrr.jp/>)の「諸手続一名簿データ更新」の入会・登録変更フォームより、データを入力してください。なお、この名簿データをもとにして、隔年で会員名簿を皆様に届けいたします。次回の名簿発行は2025年6月の予定です。

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 『根の研究』編集委員長: editor2024@jsrr.jp
Plant Root 編集委員長: 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/>

LET'S ROOT! 会 長 大橋 瑞江

2024年から2025年に根研の会長を務めることになった大橋瑞江です。初めて根研に参加した修士学生の際は、まさか自分が会長になる日が来るなんて、夢にも思いませんでした。自分が今日まで研究者としてやってこれたのは、根研などで知り合った研究仲間たちが支えてくれたからです。これからは、根研の運営を通して、支える側として少しでも恩返ししていきたいと思っています。

今期の根研究学会は、過去に例の無い、女性のみによる会長・副会長体制となります。これは他の学会でも珍しい例では無いかと思います。根の研究に対して、地味で暗いイメージを持つ人がいるかもしれませんが、実は多くの女性を魅了する

奥深い研究対象であることを、これを機にアピールしたいと思います。

この数年はコロナ禍で、根研究学会も例にもれず十分な学会活動ができずにいました。しかしこれからは、対面交流による活性を取り戻すとともに、コロナ禍に培った SNS による交流も取り入れていきたいと思っています。また、これまでの根研究学会が多様性を重んじてきたように、これからの根研究学会も、世代や研究分野、立場や国籍を超えた多様な繋がりを生み出していきたいです。

皆さん、“Let’s root! (応援しよう!)” のマインドがあふれる根研で、どうぞ様々な交流を楽しんでください!

根研究学会 2024～2025 年度 役員一覧

(2024年1月～2025年12月)

昨年実施の会長選挙で選出された会長が、会則に基づき、以下の方々に役員を委嘱しました。「自分も評議員/編集委員を務めて根研の活動に貢献したい」という会員がいらっしゃいましたら、年度途中での委嘱も検討しますので、事務局 neken2024@jsrr.jp までご連絡下さい。

会 長

大橋瑞江 (兵庫県立大学環境人間学部)

樹木の根を介した物質循環に関する研究に長年、取り組んできました。学生時代の研究室には、根の研究をする学生が他にいませんでしたが、この学会を通して多くの仲間恵まれて今に至ります。私が根研で学んだ根の研究の魅力を、今度は伝える側になれたらと思います。2年間、どうぞよろしくお願いします。

副会長

檀浦正子 (京都大学農学研究科)

根研究学会副会長を務めさせていただくことになり、身の引き締まる思いです。根であれば分野は問わない根研。機関紙に「こんな根どうだ根」というハイセンスなコーナーをもつ根研。いつかの学会の「下を向いて計ろう」の大合唱に、連れてきた外国人研究者がドン引きしていた根研。学会で発表時間が少々伸びても「まっか根研だし」で許される根研。それなのに組織運営は意外ときちんとしています。日本の研究力や論文の質の低

下が問題視されている今、分野を超えた地道な活動から、より本質的な研究を進めていくことのできる根研の一助になれば幸いです。どうぞよろしくお願いいたします。

亀岡笑 (酪農学園大学農食環境学群)

本年から副会長を務めさせていただきます。職業や年代を問わず、「根への好奇心と関心」を共有することで自然に交流が深まる根研の環境は、根の研究を継続していく上で私自身にとって大きな励みとなってきました。このような根研の雰囲気はこれからもさらに盛り上げていくために、自分にできることを積極的に探求し、取り組んでいきたいと思っています。イネを中心とした草本植物の根について研究していますが、根研を通じて樹木根の奥深さも学ぶことができています。根研のさらなる発展をサポートするとともに、今後も新たな発見を通じて根の魅力を楽しんでいきたいです。

事務局長

陽川憲 (北見工業大学工学部)

ついに事務局長へ上り詰めてしまいました。実

際に仕事を始めてから、こんなに運営面で様々なことがしっかり整備されていたのだと分かることが多いのと同時に、先輩方の学会運営への努力に頭が下がる思いです。世の中もどんどん変わる中、研究環境や研究のあり方ももちろん、次世代の育成も新しい方法を積極的に取り入れていかないといけないと思います。それでは何が新しいのか？それが難しい。もう若手ではなくなった私も気を付けないといけません。本学会が存在価値のあるものとして柔軟に発展していけるよう、事務局として尽力出来ればと思います。

副事務局長

牧田直樹（信州大学理学部）

本年から副事務局長を務めさせていただきます。つい最近まで学生をやっていたつもりですが、月日が経つのはおもしろいほかに早く、自分が大好きな場である根研の運営に携わらせていただく立場となりました。分野や立場の垣根を超えて、「根」という共通な部位を対象に、みんなであーでもない、こーでもない議論できる場が、まさに根研究学会にあると思っています。この貴重な場をより一層、面白くするためにはどうしたらよいでしょうか？皆さまと一緒にアイデアを出し合いながら新しい根研究学会をつくりあげていけたらと思っています。

監査

二瓶直登（福島大学食農学類）

評議員（50音順）

池野英利（福知山公立大学情報学部）
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）
且原真木（岡山大学資源植物科学研究科）
唐原一郎（富山大学学術研究部理学系）
久保堅司（農研機構・東北農業研究センター）
神山拓也（宇都宮大学農学部）
島村 聡（農研機構・東北農業研究センター）
田島亮介（東北大学大学院農学研究科）
辻博之（農研機構・北海道農業研究センター）
中園幹生（名古屋大学大学院生命農学研究科）
仲田（狩野） 麻奈（名古屋大学農学国際教育研究センター）
野口享太郎（森林総合研究所東北支所）
馬場隆士（農研機構・果樹茶業研究部門）
平野恭弘（名古屋大学大学院環境学研究科）
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）
古川純（筑波大学アイソトープ環境動態研究センター）
本間知夫（前橋工科大学工学部）
松浦朝奈（信州大学農学部）
松波麻耶（岩手大学農学部）
森茂太（山形大学農学部）
山内卓樹（名古屋大学大学院生命農学研究科）

山崎篤（農研機構・東北農業研究センター）

*国立大学法人、国立研究開発法人などの表記は省略しました。「農研機構」の正式名称は「国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構」です。

「根の研究」編集委員会 （「根の研究」の奥付参照）

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）

二期目の編集委員長を務めさせていただくことになりました。森林で研究していますが、「根の研究」に掲載される情報はフィールドを問わず非常に多様であり、私自身とても勉強になっています。

「根の研究」は会員間の情報提供・情報交換の場です。ご自身の研究アピールやディスカッションの場として、ぜひご活用いただきますようお願いいたします。特集企画、連載企画を随時募集していますので、積極的なご提案をお願いします。また、より投稿しやすいように、投稿規定、原稿作成要領・テンプレート、論文審査要領の一部改訂を予定しています。詳しくは巻頭言のお知らせをご覧ください。多くの投稿をお待ちしています！引き続きどうぞよろしくお願いいたします。

副編集委員長

松波麻耶（岩手大学農学部）

前回に引き続き編集副委員長を務めさせていただきます。この2年間、副委員長を経験する中で、目下の課題は投稿数の増大であると痛感しています。編集委員会で知恵を出し合いながら、魅力的で持続的な「根の研究」の発信に努めてまいります。「根の研究」は、根の真理を追究する熱い研究や、根への愛溢れる記事など、全国の会員の皆様が「よし、今日も根に向き合おう！」と励まされるような内容を提供しております。ぜひ皆様の研究を紹介していただき、根掘り・根洗い・根スキヤンのエネルギーになるよう、ご投稿よろしくお願いいたします。

神山拓也（宇都宮大学農学部）

大学時代はほとんど根っこに触れていませんでしたが、いつの間にか、編集副委員長になってしまいました。今は、畑作物の根の研究をしています。気軽に出来る「根の研究」を目指して頑張りたいと思います。ご投稿、お待ちしております！

編集委員（50音順）

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）

「Plant Root」編集委員会
(Plant Root ホームページの編集委員一覧参照)

編集委員長 (Editors-in-chief) (Alphabetical order)

Dr. Kyohei Hirano
(Nagoya University, Nagoya, Japan)
Dr. Yoshiro Mano
(Institute of Livestock and Grassland Science, NARO, Tsukuba, Japan)
Dr. Akimasa Nakano
(Chiba University, Matsudo, Japan)
Dr. Kyotaro Noguchi
(Tohoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute, Morioka, Japan)

上級編集補佐 (Senior Editorial Assistant)

Dr. Satoshi Shimamura
(Tohoku Agricultural Research Center, NARO, Morioka, Japan)

編集委員 (Subject Editors) (Alphabetical order)

Dr. Tomomi Abiko
(Kyushu University, Fukuoka, Japan)
Dr. Hideki Araki
(Yamaguchi University, Yamaguchi, Japan)
Dr. Hiroyuki Daimon
(Ryukoku University, Kyoto, Japan)
Dr. Karibu Fukuzawa
(Hokkaido University, Sapporo, Japan)
Dr. Shintaro Hara
(Institute for Agro-Environmental Sciences, NARO, Tsukuba, Japan)
Dr. Maki Katsuhara
(Okayama University, Kurashiki, Japan)
Dr. Akihiko Kinoshita
(Kyushu Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute, Kumamoto, Japan)
Dr. Yoshihiro Kobae
(Rakuno Gakuen University, Ebetsu, Hokkaido, Japan)
Dr. Bohdan Konôpka
(National Forest Centre, Forest Research Institute Zvolen, Zvolen, Slovakia)
Dr. Katashi Kubo
(Tohoku Agricultural Research Center, NARO, Fukushima, Japan)

Dr. Takeshi Kuroha
(Institute of Agrobiological Sciences, NARO, Tsukuba, Japan)
Dr. Naoki Makita
(Shinshu University, Matsumoto, Japan)
Dr. Atsushi Matsumura
(Osaka Metropolitan University, Sakai, Japan)
Dr. Motoyasu Minami
(Chubu University, Kasugai, Japan)
Dr. Mikio Nakazono
(Nagoya University, Nagoya, Japan)
Dr. Atsushi Ogawa
(Akita Prefectural University, Akita, Japan)
Dr. Mizue Ohashi
(University of Hyogo, Himeji, Japan)
Dr. Atsushi Oyanagi
(NARO, Tsukuba, Japan)
Dr. Kosala Ranathunge
(The University of Western Australia, Perth, Australia)
Dr. Yowhan Son
(Korea University, Seoul, The Republic of Korea)
Dr. Koya Sugawara
(NARO Institute of Livestock and Grassland Science, Nasushiobara, Japan)
Dr. Daisuke Takata
(Fukushima University, Fukushima, Japan)
Dr. Yusaku Uga
(Institute of Crop Science, NARO, Tsukuba, Japan)
Dr. Akihiro Yamamoto
(University of Miyazaki, Miyazaki, Japan)
Dr. Takaki Yamauchi
(Nagoya University, Nagoya, Japan)
Dr. Ken Yokawa
(Kitami Institute of Technology, Hokkaido, Japan)

*このほか、事務局の実務は株式会社共立の三角誠司さん、栗本佳世子さん、宮下英夫さんをお願いしています。

作物根系解析の効率化

寺本翔太

農業・食品産業技術総合研究機構作物研究部門

要 旨 : 根系は養水分の吸収に影響するため、重要な育種対象である。根系を改良することで、肥料吸収効率や乾燥ストレス耐性などの重要形質を改善することができる。しかしながら、土中の根の収集および計測は労力がかかり植物体を破壊するため、根系は育種で優先されていない。本ミニレビューでは、根の収集および計測の省力化、および非破壊計測技術の開発に焦点をあてた近年の研究動向を紹介する。根の収集では、鋼鉄製モノリスとバックホーを用いてイネ (*Oryza sativa*) の根の収集が効率化された。世界のイネ品種を用いたモノリス調査により、イネ亜集団間で根のバイオマスと相関の高い分けつ数および冠根直径が異なっていることを定量的に評価した。根の計測では、深層学習の画像解析によりイネの根の計測が効率化された。塹壕法は作物横に溝を掘り作物根の土壌内分布を観察する手法である。塹壕法写真を深層学習により画像解析することで、世界のイネ品種の根の土壌内分布の多様性を定量的に評価した。非破壊計測技術の開発では、エックス線 CT (コンピュータ断層撮影) の画像を解析するための画像解析ソフトウェアが開発・利用された。最適な栽培条件と撮影条件を決定し、CT 画像から根系の形を可視化・定量化した。以上のように、屋内外における根系解析のための労力のかかる作業が効率化された。これらの技術を用いて、根系に関する育種がより促進すると期待する。

キーワード : X 線 CT, 画像解析, 根系, 深層学習, 非破壊撮影。

Improved efficiency of crop root system analysis : Shota TERAMOTO (Institute of Crop Science, National Agriculture and Food Research Organization)

Abstract : Root system is an important breeding target because it affects water and nutrient uptake. Improving the root system can enhance important traits such as fertilizer absorption efficiency and drought stress tolerance. However, root collection and measurement in soil are laborious and destructive, making root system not to be a priority target for breeding. This mini-review introduces recent research trends focusing on labor-saving root collection and measurement, and development of nondestructive measurement techniques. In root collection, steel monoliths and a backhoe were used to collect rice (*Oryza sativa*) roots to save labor. A monolithic study of rice cultivars worldwide quantitatively evaluated the differences in tiller numbers, correlated with root biomass, and crown root diameters among rice subpopulations. In root measurement, a deep learning-based image analysis was used to measure rice roots to save labor. The trench method is a technique to dig trenches next to crops to observe the distribution of crop roots in soil. By analyzing trench images with deep learning, distribution diversity of roots in soil of rice varieties worldwide was evaluated. In nondestructive measurement, image analysis software was developed to analyze X-ray CT (computed tomography) images. Optimal cultivation and imaging conditions were determined, and shape of root system was visualized and quantified from the CT images. As described above, the labor-intensive tasks of root system analysis both indoors and outdoors had been improved in efficiency. Using these techniques, breeding related to root systems is expected to be further promoted.

Keywords : Deep learning, Image analysis, Nondestructive imaging, Root system, X-ray CT.

1. はじめに

作物の根系は土中の養水分を吸収する重要な器官である。個々の土壌環境に適した理想的な根系が存在し、根系の形を遺伝的に改変することで土壌に起因する様々な環境ストレスに頑強な品種を育成できる (Lynch, 1995; Uga, 2021)。干ばつ条件では、水分を含む下層まで根を伸ばす深根性品種が有利である

(Lynch, 2013)。イネ (*Oryza sativa*) では、深根性遺伝子 *DRO1* を浅根性品種 IR64 に導入することで深根化し、干ばつ条件で収量が向上した (Uga et al., 2013)。また、根域の変化は肥料の吸収に影響を与える。施肥は土壌上層に施されるため、土中で難移動性のリンを施肥する場合、浅根性品種が有利である (Lynch, 2011; Oo et al., 2021)。以上のように、根系の改良は様々な環境下で作物の収量を最適化するために重要であ

る。しかしながら、根系は土中にあるため、収集および計測に労力がかかり多検体の評価が難しいこと、計測が破壊的であり経時的な根系の変化を計測できないことが問題である。

根の計測をするための収集手法は土壌ブロックと土壌断面の収集の2種類に大別される。土壌ブロックの収集では、細い筒状の器具を地面に挿し垂直方向の土壌サンプルを収集するコアサンプラー法 (Arai-Sanoh et al., 2014), 栽培前にメッシュ状のパイプを地面に埋めておきパイプごと根を収集するイングロースコア法 (Allard et al., 2005), 上下に穴の空いた直方体もしくは円筒状の器具 (モノリス) を用いてより広い体積を収集するモノリス法 (森田・阿部, 2001; Kano et al., 2011), ショベルを用いて作物を掘り上げ根系を収集するショベロミクス法 (Trachsel et al., 2011) などが利用される。コアサンプラー法およびイングロースコア法は解析できる土壌体積が限られるため、広範囲の土中の根の分布を計測するために多数のコアを収集する必要がある (Wu et al., 2018)。モノリス法はコアサンプラー法よりも大きな器具を用いて広い体積を解析できるが、器具が重く地面への打ち込みや引き抜きに労力がかかる。ショベロミクス法は解析できる体積が広く簡便であるが、掘り上げが目測になり半定量的である (Trachsel et al., 2011)。土壌断面の収集では、透明な側面を持つ栽培容器の側面に露出した根を計測する根箱法 (Jia et al., 2019), 透明な板を地面に埋め込み表面に露出した根を計測するライゾトロン法 (Böhm, 1979), 透明な板の代わりに小さな筒を地面に打ち込みスキャナなどを用いて根を撮影するミニライゾトロン法 (Cheng et al., 1991), 作物の株際をショベルカーなどの重機で掘り下げ断面に露出した根を計測する塹壕法 (Vansteenkiste et al., 2014) などが利用される。根箱法は主に室内で根系を計測するために、ライゾトロン法や塹壕法は野外で広範囲の根系を計測するために、ミニライゾトロン法は野外でより狭い範囲の根系を計測するために利用される。手法ごとに長所・短所があり、目的に応じて選択する必要がある。

土壌ブロック内の根は土を洗い流すことで収集・計測される。土を洗い流すため、土中の根の3次元の位置情報が失われてしまう。洗い出された根は平面スキャナで撮影され、根長、太さ、および表面積などの1次元の根系パラメータの計測に利用される (Tajima and Kato, 2013; 田島, 2014)。平面スキャナを用いることにより側根などの細かい根まで計測できるが、撮影時に根同士が重ならないようにスキャナに広げる必要があり労力がかかる。画像解析技術が普及していないときの土壌断面の定量化では観測面に格子を設置し、格子と根の交点の個数から根の総根長を推定する格子

交点法が利用されてきた (Tennant, 1975) が、解像度が低く長時間の計測作業を行う必要があったため近年はより簡便に画像解析が利用される。根箱法やミニライゾトロン法では土壌表面のデジタル写真から深層学習により根系画像を自動的に取得・定量化する手法が広く利用されている (Wang et al., 2019; Smith et al., 2020, 2022)。一方、塹壕法は野外でデジタル写真を撮影する必要があるため、光条件が安定せず深層学習による解析は行われていなかった。

根箱, ライゾトロン, およびミニライゾトロン法は非破壊の計測であるため、根の成長を空間的な次元だけでなく経時的にも計測できる (Bontpart et al., 2020)。しかしながら、断面に露出している根しか計測できない。一方、ポット栽培ではあるが、エックス線 CT (Computed Tomography) や MRI (Magnetic Resonance Imaging) などの3次元の非破壊撮影装置を利用することでポット内の根の経時的な計測が可能である (Morris et al., 2017)。エックス線 CT や MRI を用いた手法では、基点 (例えば、種子を植えた場所) から根の画素情報をトラッキングして根の形の情報を取得する方法が主流である (Mairhofer et al., 2012)。しかしながら、側根などの細かい根を計測するために直径 10 cm 以下の小さい栽培ポットを利用する必要がある、連続撮影時の作物の積算被曝を考慮していないなど、作物のような比較的大きい根系を経時的に撮影して計測する上での課題があった。

上記で述べた収集・計測手法および非破壊計測にはそれぞれボトルネックが存在する。根系の解析は時間と労力がかかるため、根系の研究は地上部に比べ進展が遅く、根系の品種改良は積極的に行われてこなかった。特に圃場からの根系収集の大きな労力、未だ画像処理技術の応用されていない根系画像の解析、および画像サイズが大きく解析が困難な3次元画像データからの根系定量化は、根系改良を通じた品種改良を効率的に行うためには解決したい課題である。本ミニレビューでは、モノリスの打ち込みおよび回収に労力がかかったモノリス法の重機を用いた効率化、圃場での計測に時間がかかった塹壕法の深層学習を用いた効率化、またエックス線 CT の3次元画像から作物根系の経時変化を定量化するための技術開発について紹介する。

2. バックホー支援型モノリス法

一般的なモノリス法はモノリスの打ち込みと引き抜きが重労働である。ハンマーを用いる手法が簡便であるが (Yoshino et al., 2019), モノリスが大きい場合は動力駆動の専用の打ち込み機を利用する (Böhm, 1979)。計測対象がエネルギーと水の収支、ガスと液

体のフラックス、汚染物質の輸送などの場合、50 kg 以上の土壌が採取できるモノリスが必要であり、巨大モノリスとトラクターなどの重機を用いて土壌採取を行う (Allaire and Van Bochove, 2006). これは一般的な作物根を収集するには大きすぎるため、作物の根系収集に最適化された手法が必要である。

干ばつなど極端な条件を除いて、作物の生育は肥料が多く分布している作土層の根密度に依存する (Cai et al., 2014). したがって、作土層の根系を定量化できれば肥料の利用効率の高い品種育成に役立つと考えられた。日本ではイネを灌漑水で栽培することがほとんどだが、海外では天水で栽培する地域が多い (Cha-un et al., 2017). そのため、畑作条件で栽培したイネの作土層の根系を効率的に収集する手法開発は、新たな品種育成に有用であると考えられた。

そこで、畑作のイネ根系収集に特化した省力型モノリス法として、バックホー支援型モノリス法が開発された (Teramoto et al., 2019). 作土層の厚みは気候や作型、栽培種に依存するが、陸稲栽培では深い場合で 25 cm 程度である (Gupta and O'Toole, 1986). また、モノリスの直径は株間の距離に依存するが、今回は 20 cm とした。したがって、深さ 30 cm・直径 20 cm の円筒モノリスが作成された (第 1 図 A). 重機の圧力に耐えるため、素材は鋼鉄とした。この円筒モノリスを汎用性の高い重機であるバックホーを用いて地面へ 25 cm 打ち込み (第 1 図 B), バックホーを用いて引き上げるにより (第 1 図 C), 作土層内のイネ根系を効率的に収集することに成功した (第 1 図 D). 本手法の有用性を評価するため、バックホー支援型モノリス法を用いて、世界のイネコアコレクション (Kojima et al., 2005) を含む 61 品種の根系を収集し、イネ亜種群 (*japonica*, *indica*, *aus*, *admixed*) 間の根系の差異が定量化された (Kawakatsu et al., 2021). *aus* では分けつ数の多い系統は冠根直径も太いという相関関係が認められた一方、*japonica* では相関の傾きが大きく、*indica* では相関の傾きが小さくなっていた (第 1 図 E). この結果は、*japonica* では根が太い系統はあるが分けつが少なく、または *indica* では分けつが多い系統はあるが根が細いことを意味している。分けつ数は根量と (Kawakatsu et al., 2021), 冠根直径は乾燥ストレス耐性と相関がある (Jeong et al., 2013) ことから、亜種間の交雑育種により、*japonica* では分けつを増やすことで根量を増大させ肥料の利用効率を、*indica* は冠根を太くすることで乾燥耐性を向上できる可能性が明らかとなった。

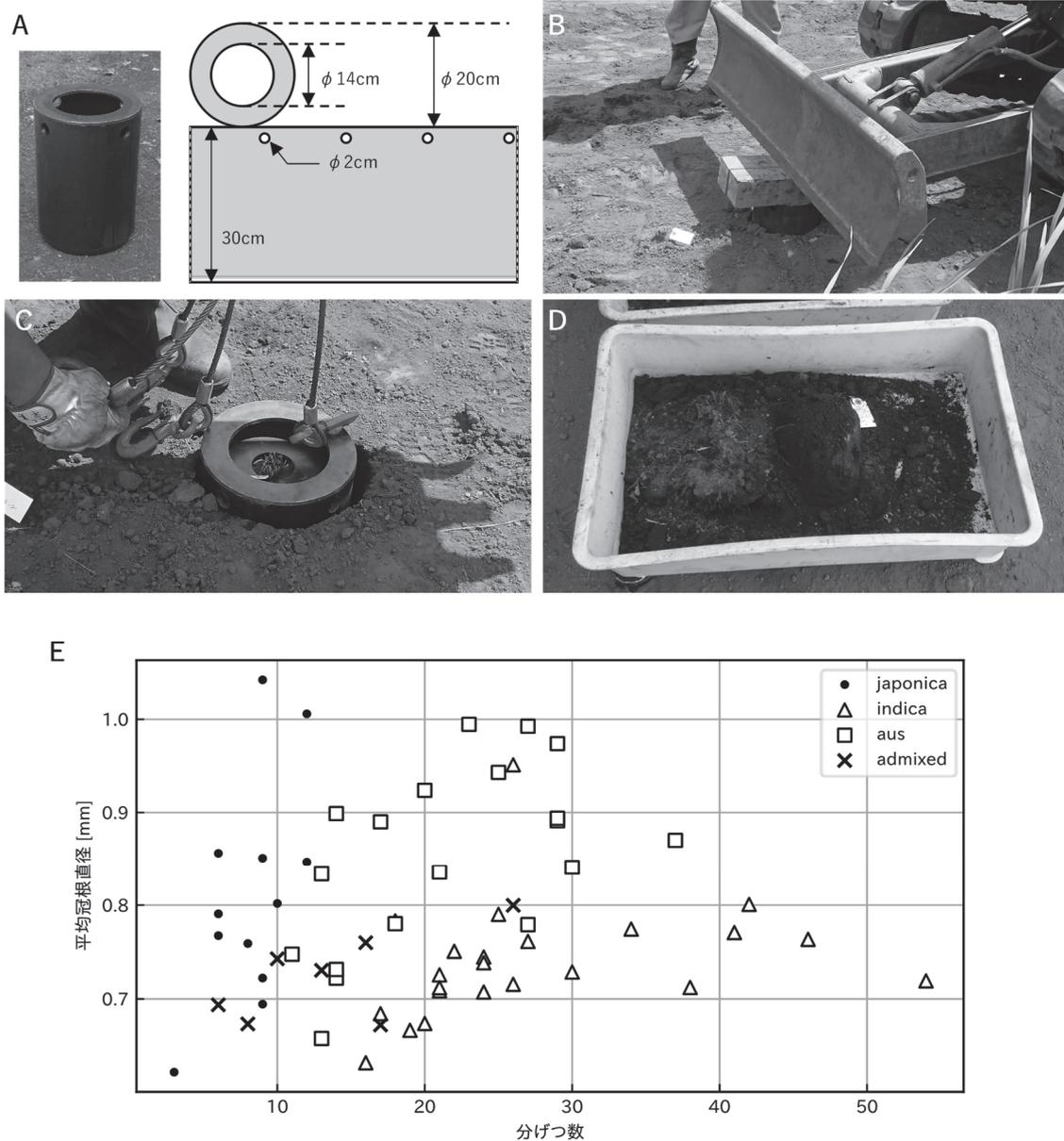
3. 深層学習による塹壕法画像の解析

塹壕法は断面に露出した根の計測に時間と労力がか

かる (van Noordwijk et al., 2000). 圃場で計測が可能な格子交点法は解析できる個体数が制限されるため圃場では断面からコアサンプルを多数収集し実験室に持ち帰って計測するなどの工夫が必要である (Sekiya et al., 2013). このコアサンプルの収集手法は実験者間での定量値が安定する利点があるが、定量に労力がかかる、コアサンプル単位での大まかな根の分布しか定量できないなどの問題がある。より簡便には、塹壕法の断面の根を紙などに書き写したもの、もしくはデジタル写真などの画像データを取得して後で画像解析する手法が望まれる。

近年、機械学習を用いた画像解析技術が進歩し、植物の根系解析に利用されている。特にデジタル写真からのセマンティックセグメンテーション (画像中から関心のある領域を抽出する手法) は適切な訓練データがあれば、複雑な背景画像から関心領域のみを抽出することが可能である。セマンティックセグメンテーションは根箱やミニライゾトロンの写真データから根系を抽出する目的で広く利用されている (Wang et al., 2019; Smith et al., 2020). 一方、塹壕法の断面写真には利用されてこなかった。根箱は暗室で、ミニライゾトロンは土中で撮影することにより安定した光条件で画像を取得できるため訓練データの背景が均一になる。一方、塹壕法は屋外で写真撮影をするため光条件が不安定である。そこで、この光条件の違いをデータ拡張などを用いて訓練データに含めれば、塹壕法写真でセマンティックセグメンテーションが可能になると考えられた。

データ拡張とは、画像に対して反転・回転・拡大・縮小、明るさ・コントラスト・色調の変更などの処理を加えることで、擬似的にデータセットをかき増やす手法である (Shorten and Khoshgoftaar, 2019). 塹壕法写真でのセマンティックセグメンテーションの実施例では、回転や反転などの幾何学的変換や明るさや色相、コントラストなどの変更がデータ拡張として利用された (Teramoto and Uga, 2020). より詳細には、塹壕法画像 (120 × 120 cm) から根系のみを抽出したラベル画像を作成し、各画像から 20 × 20 cm の小さいタイルが分割された (第 2 図 A). 塹壕法画像とラベル画像のタイルはペアにされ、データ拡張が行われた (第 2 図 B). 合計 10 枚の塹壕法写真を用いて、セマンティックセグメンテーションのモデルである U-Net (Ronneberger et al., 2015) が学習された。その結果、太陽光による明るさや影の変化に頑健なセマンティックセグメンテーションモデルが構築された。手動で根系をなぞった画像と構築したモデルが抽出した根系画像はほぼ同じであった (第 2 図 C). そこで、世界のイネコアコレクション (Kojima et al., 2005) を含む 60 品



第1図 バックホー支援型モノリス法.

(A) モノリスの写真および展開図. 引き上げ時に2 cmの穴にフックを引っ掛ける. バックホーを用いたモノリスの(B) 打ち込みおよび(C) 引き上げ. (D) 引き上げ後のモノリスからの土の回収. (E) 世界のイネコアコレクションを含む61品種の分けつ数および冠根直径. ブロックデザインで3反復栽培した平均値を示す. (A-D) Teramoto et al. (2019) より改変して転載. (E) Kawakatsu et al. (2021) の表現型データを用いて描画.

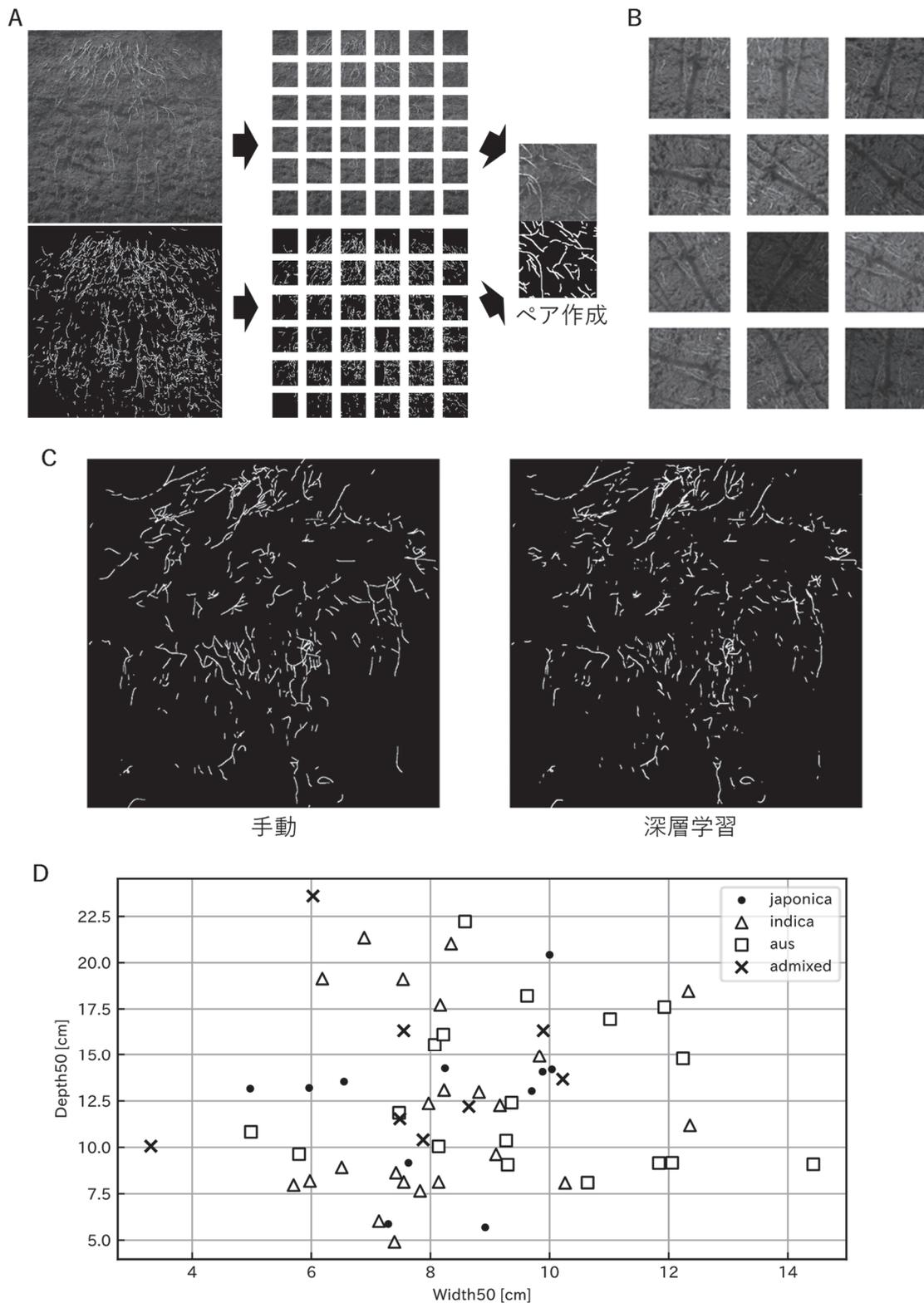
種を畑条件で栽培し, 3個体反復で塹壕法写真を取得した. 構築したモデルを用いて根画像を抽出し根の分布の深さと幅を示すパラメータを計算したところ, 幅広い品種間差異が確認できた(第2図D). 亜種群ごとの傾向が認められなかったことから, 各地域での育成過程で品種間差異が生じたと考えられた.

4. エックス線CTを用いたイネ根系の非破壊計測システム

エックス線は電磁波の一種であり, 多くの物体を減

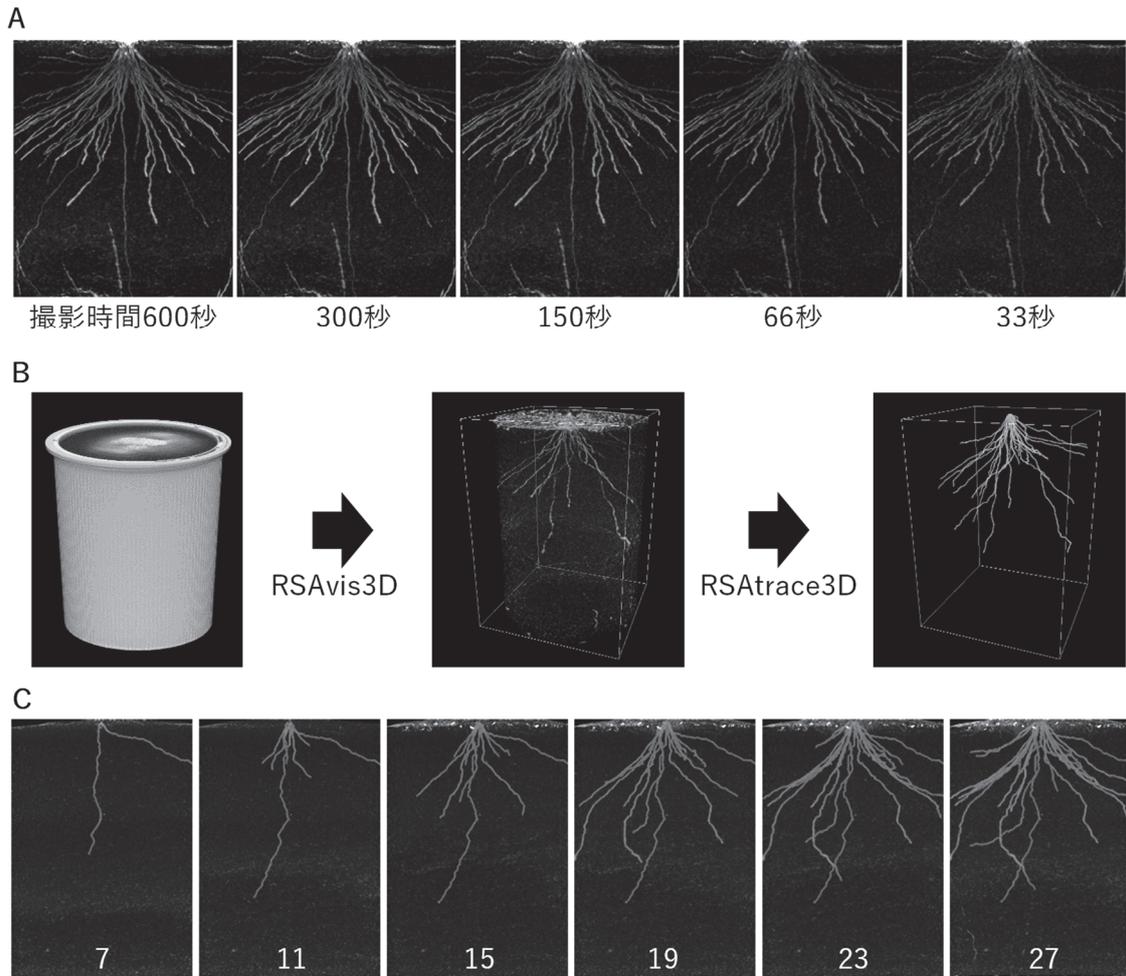
衰しながら貫通する. 物体により減衰率が異なり, 減衰率の違いから透過画像を撮影することが可能である(例: レントゲン写真). エックス線CTは撮影対象を様々な角度から撮影することにより, 3次元画像をコンピュータ上で再構築する技術である. 土中の様々な植物根を撮影するために使用されているが(Morris et al., 2017), 作物の大きな根系を十分に可視化できるほど大きなポットを使用した使用例がほとんどなかった.

そこで, 撮影の条件が検討され, CT画像からの根



第2図 深層学習による壟壕法写真の画像解析.

(A) 壟壕法写真 (上段) およびラベル画像 (下段). 画像は 36 枚に分割した. (B) データ拡張による明るさ・コントラスト・色相・回転などの変更. (C) 手動で作成したラベルと深層学習で作成したラベルの比較. (D) 世界のイネコアコレクションを含む 60 品種の水平方向および垂直方向の根の広がりを示すパラメータ Width50 および Depth50. 圃場で 3 個体反復で栽培した平均値を示す. Width50 および Depth50 はそれぞれ水平方向および垂直方向に見た時に 50% の根が出現する距離である. (A-C) Teramoto and Uga (2020) より CC BY 4.0 ライセンス (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) の下, 改変して転載. (D) Teramoto and Uga (2020) の表現型データを用いて描画.



第3図 エックス線 CT を用いたイネ根系の非破壊イメージング。

(A) 様々な撮影時間で撮影した CT 画像を RSAvis3D を用いて可視化. (B) CT 画像から RSAvis3D を用いて根系画像を抽出, RSAtrace3D を用いてベクトル化した根系画像. (C) 経時的なイネ根系の変化. 下の数字は播種後日数を示す. (A, C) および (B) はそれぞれ Teramoto et al. (2020) および Teramoto et al. (2021) より CC BY 4.0 ライセンス (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) の下, 改変して転載.

根系画像抽出および根系画像からの根系の定量化までの非破壊計測システムが構築された (Teramoto et al., 2020). まず, ポットの大きさ, エックス線のエネルギーと線量に関わる管電圧, エックス線の線量に関わる管電流, 撮影時間の条件が検討された (Teramoto et al., 2020). 栽培ポットの大きさを深さ 30 cm, 直径 20 cm とした. 撮影装置の検出器により表層から 25 cm の範囲が撮影される. ポットの直径が大きいため, 管電流と管電圧をそれぞれ 500 μ A および 225 kV と高めに設定した. 撮影時間は 1 日に撮影できる個体数を重視し 10 分以下とした. CT 画像には根以外にポット, 土なども写り込んでおり, 根の画像を抽出する必要がある. CT 画像から根系画像を抽出するために作成されたソフトウェア RSAvis3D は撮影時のノイズを 3D メディアンフィルタで低減し, エッジ抽出により根をエッジとして抽出する. この処理は撮影時間 33 秒から 10 分

までの幅広い CT 画像からイネ根系を抽出した (第 3 図 A).

得られた根系画像は 3 次元の画像データであるため, 例えば根の繋がり方など根のトポロジーに関する情報を計算するためには画像からベクトルへ変換する必要がある. ベクトルは, 2 点の座標を繋げば線になるように, 座標の連続で根の形を表現する形式である. 繋がり方の情報を含むため, 根の形質を計算する上で有用である. さらに, アルゴリズムの特性から, RSAvis3D により抽出される根系画像は土壌の亀裂や土粒子間の空隙など根以外の画像が含まれてしまうが, 根系をベクトル化することにより, そうした根以外の画像を取り除くことが可能となる. 根系抽出画像をベクトル化するため, ベクトル化ソフトウェア RSAtrace3D が作成された (Teramoto et al., 2021). RSAtrace3D は Graphical User Interface のソフトウェア

であり、マウス操作で根系画像をベクトル化する。CT 画像, RSAvis3D 処理画像, RSAttrace3D 処理画像の例を第3図Bに示す。これらのソフトウェアを用いることでCT画像から根系の情報のみが抽出された。

エックス線は放射線の一種であるため、生体に影響を与える。エックス線発生源と撮影対象の距離が近いほど高解像度で撮影できるが、被曝が距離の2乗に反比例して多くなる。また、土などを撮影する場合はエネルギーの高いエックス線を利用するために高めの管電圧を用いるが、エネルギーが高くなるほど生体を与える影響が大きくなる。植物では33 Gyの被曝で生育に影響が生じることが報告されている (Johnson, 1936; Zappala et al., 2013)。本撮影条件の10分間の撮影では1撮影あたり0.09 Gyの被曝と計算され (Teramoto et al., 2020)、単純計算で366回の連続撮影が可能であった。したがって、同じサンプルを連続で撮影することにより、生育に影響を及ぼさずに経時的な根系の成長を評価することが可能であると示された。播種後7, 11, 15, 19, 23, 27日目の根系の経時的成長を可視化した例を第3図Cに示す。これらの画像のように、経時的な根系の変化が可視化された。

5. おわりに

根の研究の効率化の観点からバックホーを用いた省力化モノリス法、深層学習を用いた塹壕法写真の解析手法、エックス線CTを用いた作物根系の非破壊計測技術の開発を紹介した。土中の根系計測は困難であるため、根系の解析は敬遠されがちである。しかしながら、根系形質を対象とした品種育成が近年注目されており、今後根系を対象とした品種改良が盛んになると期待される。特に、機械学習を用いた画像解析技術は日々進歩しており、根の研究者それぞれが自身の根の研究の効率化を図ることが可能になった。また、独自のソフトウェアを開発することにより複雑な形質の定量化が可能になった。機械学習を含めたプログラミング技術は今後より重要になってくると考えられる。効率化により根の研究の分野がより発展すると期待される。

謝辞

本ミニレビューの作成は、JST CREST (JPMJCR1701), JSPS 科研費 22K14871 の支援を受けたものである。本ミニレビュー中で紹介された研究を遂行するにあたり、農業・食品産業技術総合研究機構作物研究部門の宇賀優作博士、同機構生物機能利用研究部門の川勝泰二博士、かずさDNA研究所の七夕高也博士に多大な支援を頂いた。ここに感謝の意を表す。

引用文献

- Allaire, S. A., Van Bochove, E. 2006. Collecting large soil monoliths. *Can. J. Soil Sci.* 86: 885-896.
- Allard, V., Newton, P. C. D., Lieffering, M., Soussana, J. F., Carran, R. A., Matthew, C. 2005. Increased quantity and quality of coarse soil organic matter fraction at elevated CO₂ in a grazed grassland are a consequence of enhanced root growth rate and turnover. *Plant Soil.* 276: 49-60.
- Arai-Sanoh, Y., Takai, T., Yoshinaga, S., Nakano, H., Kojima, M., Sakakibara, H., Kondo, M., Uga, Y. 2014. Deep rooting conferred by *DEEPER ROOTING 1* enhances rice yield in paddy fields. *Sci. Rep.* 4: 5563.
- Böhm, W. 1979. *Methods of studying root systems.* Springer.
- Bontpart, T., Concha, C., Giuffrida, M. V., Robertson, I., Admkie, K., Degefu, T., Girma, N., Tesfaye, K., Haileselassie, T., Fikre, A., Fetene, M., Tsaftaris, S. A., Doerner, P. 2020. Affordable and robust phenotyping framework to analyse root system architecture of soil-grown plants. *Plant J.* 103: 2330-2343.
- Cai, H., Ma, W., Zhang, X., Ping, J., Yan, X., Liu, J., Yuan, J., Wang, L., Ren, J. 2014. Effect of subsoil tillage depth on nutrient accumulation, root distribution, and grain yield in spring maize. *Crop J.* 2: 297-307.
- Cha-un, N., Chidthaisong, A., Yagi, K., Sudo, S., Towprayoon, S. 2017. Greenhouse gas emissions, soil carbon sequestration and crop yields in a rain-fed rice field with crop rotation management. *Agric. Ecosyst. Environ.* 237: 109-120.
- Cheng, W., Coleman, D. C., Box, J. E. 1991. Measuring root turnover using the minirhizotron technique. *Agric. Ecosyst. Environ.* 34: 261-267.
- Gupta, P. C., O'Toole, J. C. 1986. Upland rice: a global perspective. *Int. Rice Res. Inst.*
- Jeong, J. S., Kim, Y. S., Redillas, M. C. F. R., Jang, G., Jung, H., Bang, S. W., Choi, Y. Do, Ha, S. H., Reuzeau, C., Kim, J. K. 2013. *OsNAC5* overexpression enlarges root diameter in rice plants leading to enhanced drought tolerance and increased grain yield in the field. *Plant Biotechnol. J.* 11: 101-114.
- Jia, Z., Liu, Y., Gruber, B. D., Neumann, K., Kilian, B., Graner, A., von Wirén, N. 2019. Genetic dissection of root system architectural traits in spring barley. *Front. Plant Sci.* 10: 400.
- Johnson, E. L. 1936. Susceptibility of seventy species of flowering plants to X-radiation. *Plant Physiol.* 11: 319-342.
- Kano, M., Inukai, Y., Kitano, H., Yamauchi, A. 2011. Root plasticity as the key root trait for adaptation to various intensities of drought stress in rice. *Plant Soil.* 342: 117-128.
- Kawakatsu, T., Teramoto, S., Takayasu, S., Maruyama, N., Nishijima, R., Kitomi, Y., Uga, Y. 2021. The transcriptomic landscapes of rice cultivars with diverse root system architectures grown in upland field conditions. *Plant J.* 106: 1177-1190.
- Kojima, Y., Ebana, K., Fukuoka, S., Nagamine, T., Kawase, M. 2005. Development of an RFLP-based rice diversity research set of germplasm. *Breed. Sci.* 55: 431-440.

- Lynch, J. 1995. Root architecture and plant productivity. *Plant Physiol.* 109: 7-13.
- Lynch, J. P. 2011. Root phenes for enhanced soil exploration and phosphorus acquisition: Tools for future crops. *Plant Physiol.* 156: 1041-1049.
- Lynch, J. P. 2013. Steep, cheap and deep: an ideotype to optimize water and N acquisition by maize root systems. *Ann. Bot.* 112: 347-357.
- Mairhofer, S., Zappala, S., Tracy, S. R., Sturrock, C., Bennett, M., Mooney, S. J., Pridmore, T. 2012. RooTrak: Automated recovery of three-dimensional plant root architecture in soil from X-ray microcomputed tomography images using visual tracking. *Plant Physiol.* 158: 561-569.
- Morris, E. C., Griffiths, M., Golebiowska, A., Mairhofer, S., Burr-Hersey, J., Goh, T., von Wangenheim, D., Atkinson, B., Sturrock, C. J., Lynch, J. P., Vissenberg, K., Ritz, K., Wells, D. M., Mooney, S. J., Bennett, M. J. 2017. Shaping 3D root system architecture. *Curr. Biol.* 27: R919-R930.
- Oo, A. Z., Tsujimoto, Y., Mukai, M., Nishigaki, T., Takai, T., Uga, Y. 2021. Synergy between a shallow root system with a *DROI* homologue and localized P application improves P uptake of lowland rice. *Sci. Rep.* 11: 9484.
- Ronneberger, O., Fischer, P., Brox, T. 2015. U-net: convolutional networks for biomedical image segmentation. *Med. Image Comput. Comput. Interv.* 2015 18th Int. Conf. Munich, Ger. Oct. 5-9, 2015, Proceedings, Part III 18. 234-241.
- Sekiya, N., Shiotsu, F., Abe, J., Morita, S. 2013. Distribution and quantity of root systems of field-grown *Erianthus* and napier grass. *Am. J. Plant Sci.* 4: 16-22.
- Shorten, C., Khoshgoftaar, T. M. 2019. A survey on image data augmentation for deep learning. *J. Big Data.* 6: 60.
- 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.
- Smith, A. G., Petersen, J., Selvan, R., Rasmussen, C. R. 2020. Segmentation of roots in soil with U-Net. *Plant Methods.* 16: 13.
- Tajima, R., Kato, Y. 2013. A quick method to estimate root length in each diameter class using freeware ImageJ. *Plant Prod. Sci.* 16: 9-11.
- Tennant, D. 1975. A test of a modified line intersect method of estimating root length. *J. Ecol.* 63: 995-1001.
- Teramoto, S., Kitomi, Y., Nishijima, R., Takayasu, S., Maruyama, N., Uga, Y. 2019. Backhoe-assisted monolith method for plant root phenotyping under upland conditions. *Breed. Sci.* 69: 508-513.
- Teramoto, S., Takayasu, S., Kitomi, Y., Arai-Sanoh, Y., Tanabata, T., Uga, Y. 2020. High-throughput three-dimensional visualization of root system architecture of rice using X-ray computed tomography. *Plant Methods.* 16: 66.
- Teramoto, S., Tanabata, T., Uga, Y. 2021. RSAtrace3D: Robust vectorization software for measuring monocot root system architecture. *BMC Plant Biol.* 21: 398.
- Teramoto, S., Uga, Y. 2020. A deep learning-based phenotypic analysis of rice root distribution from field images. *Plant Phenom.* 2020: 3194308.
- Trachsel, S., Kaeppeler, S. M., Brown, K. M., Lynch, J. P. 2011. Shovelomics: high throughput phenotyping of maize (*Zea mays* L.) root architecture in the field. *Plant Soil.* 341: 75-87.
- Uga, Y. 2021. Challenges to design-oriented breeding of root system architecture adapted to climate change. *Breed. Sci.* 71: 3-12.
- Uga, Y., Sugimoto, K., Ogawa, S., Rane, J., Ishitani, M., Hara, N., Kitomi, Y., Inukai, Y., Ono, K., Kanno, N., Inoue, H., Takehisa, H., Motoyama, R., Nagamura, Y., Wu, J., Matsumoto, T., Takai, T., Okuno, K., Yano, M. 2013. Control of root system architecture by *DEEPER ROOTING 1* increases rice yield under drought conditions. *Nat. Genet.* 45: 1097-1102.
- van Noordwijk, M., Brouwer, G., Meijboom, F., do Rosário G. Oliveira, M., Bengough, A. G. 2000. Trench profile techniques and core break methods. In Smit, A. L., Bengough, A. G., Engels, C., van Noordwijk, M., Pellerin, S., van de Geijn, S. C. eds., *Root Methods: A Handbook*. Springer Berlin Heidelberg. pp. 211-233.
- Vansteenkiste, J., Van Loon, J., Garré, S., Pagès, L., Schrevels, E., Diels, J. 2014. Estimating the parameters of a 3-D root distribution function from root observations with the trench profile method: case study with simulated and field-observed root data. *Plant Soil.* 375: 75-88.
- 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. Agric.* 162: 845-854.
- Wu, Q., Wu, J., Zheng, B., Guo, Y. 2018. Optimizing soil-coring strategies to quantify root-length-density distribution in field-grown maize: Virtual coring trials using 3-D root architecture models. *Ann. Bot.* 121: 809-819.
- Yoshino, K., Numajiri, Y., Teramoto, S., Kawachi, N., Tanabata, T., Tanaka, T., Hayashi, T., Kawakatsu, T., Uga, Y. 2019. Towards a deeper integrated multi-omics approach in the root system to develop climate-resilient rice. *Mol. Breed.* 39: 165.
- Zappala, S., Helliwell, J. R., Tracy, S. R., Mairhofer, S., Sturrock, C. J., Pridmore, T., Bennett, M., Mooney, S. J. 2013. Effects of X-ray dose on rhizosphere studies using X-ray computed tomography. *PLoS One.* 8: e67250.
- 田島亮介 2014. ImageJ を用いた画像解析による根長の評価. *根の研究* 23: 75-81.
- 森田茂紀, 阿部淳 2001. 水田における根量の測定と評価 円筒モノリス法. *根の研究* 10: 13-17.

地上部・地下部呼吸の芽生え～成木での変化

黒澤陽子*・森茂太

山形大学農学部

要 旨：長寿の樹木の成長と適応は、個体呼吸で得られるエネルギーで支えられている。このエネルギーは水獲得と炭素獲得を担う地下部と地上部に配分され、その配分は成長過程でサイズに応じて変化する。しかし、広い成長段階で地下部・地上部全体の呼吸を実測した研究は殆ど無い。著者らはブナ (*Fagus crenata*) の吸水種子～成木 377 個体の地上部と地下部の呼吸、重量、表面積を実測した。この結果、地下部と地上部の呼吸速度と個体生重量の関係は、両対数軸上でそれぞれ上に凸と下に凸の非線形でモデル化された。これは、個体呼吸に占める地下部の割合が成長初期に増加し、成長後期に低下するためであった。しかし、成長初期の地下部の割合は、呼吸 (最大 47.8%) よりも表面積 (最大 78.2%) において大きく増加した。これは、芽生え期の急速で低コストな根表面積の拡大がその後の地上部成長を加速させることを示す。成木期には地下部成長の低下・飽和に続いて地上部及び個体全体の成長が低下することが示された。さらに、これらブナの個体呼吸は、ロシア～インドネシアの 51 種の芽生え～大木の個体呼吸の範囲内にあり、多様な系統や環境を包括した樹木の統一的な個体呼吸スケーリングの存在が示された。本稿では、個体レベルの地下部と地上部の関係を巡る研究を紹介し、樹木成長メカニズムを理解する上での根を含む個体呼吸の重要性を解説する。

キーワード：個体呼吸、根系呼吸、根系：地上部比、根系表面積、メタボリックスケーリング。

Ontogenetic changes of root and shoot respiration in trees : Yoko KUROSAWA and Shigeta MORI (Faculty of Agriculture, Yamagata University)

Abstract : Growth and adaptation of long-lived trees are supported by energy produced by whole-plant respiration. The energy is allocated to root and shoot for water and carbon acquisition, and the allocation changes during ontogeny according to body size. However, few empirical studies have investigated the respiration of root and shoot throughout ontogeny. We measured the respiration, fresh mass, and surface area of entire roots and shoots for 377 beech (*Fagus crenata*) trees, from germinating seeds to mature trees. On log-log coordinates, the root and shoot respiration rates versus whole-plant fresh mass were modeled by upward and downward convex trends, respectively. This was because root fraction in respiration increased during early growth stages and decreased in later stages. However, during early growth stage, increase of root fraction was more largely in surface area (max. 78.2%) than in respiration (max. 47.8%). These indicate that a rapid and low-cost increase of root surface area during early growth stage promotes shoot growth at later stages. In mature stage, declines of root growth toward an asymptote was followed by declines of shoot and whole-plant growth. Furthermore, the whole-plant respiration of beech were within the range of whole-plant respiration of seedlings to large trees of 51 species from Russia to Indonesia. This indicates that there is a general pattern in the scaling of whole-plant respiration that transcends phylogeny and environment. Here, we review the whole-plant level root-shoot relationships and explain the significance of whole-plant respiration, including roots, for understanding underlying mechanisms of tree growth.

Keywords : Metabolic scaling, Root : shoot ratio, Whole-plant respiration, Whole-root respiration, Whole-root surface area.

1. はじめに

樹木は芽生え (生重量で数 mg) ～大木 (約 10^5 kg) の個体重量で約 1 兆倍にも成長する。こうした樹木成長は呼吸により作られるエネルギーを利用しており、成長にともなう個体呼吸の変化を定量化、理論化する研究は Metabolic ecology として数理モデルを中心に議論

が進んできた (Kleiber, 1932 ; Sibly et al., 2012 ; West et al., 1997)。小さな芽生えは環境から受ける影響が大きく、死亡率が高く、耐乾性も低く、吸水量の割に光合成は低い。一方、大木は太い幹に多くの水分を持ち、栄養類の保持量も多く、芽生えに比べて葉は厚く、光合成能力や耐乾性も高い。このような芽生え～大木で生理学的・形態学的特性の変化とともに、個

体呼吸の地下部と地上部への配分比も変化する。この地下部と地上部への配分はトレードオフ関係にあるとされる (Gedroc et al., 1996; Müller et al., 2000; Cheng et al., 2010; Chave, 2013; Poorter et al., 2015; Ledo et al., 2018; Koyama and Smith, 2022; Kawai et al., 2023)。こうした芽生え～大木の地下部と地上部の関係には、長寿命で巨大化する樹木の成長に限界をもたらす未知の成長制御メカニズムが隠されているのではないだろうか (Collalti et al., 2020)。これまで芽生え～成木個体の様々な変化は、稚樹と成木の間の離散的なサイズ間での比較が多く、その研究の多くは地上部の生理学的な変化に焦点を当ててきた。このため、個体サイズを説明変数にして地下部への配分を連続関数でモデル化した例は限られ、地下部と地上部へのエネルギー配分の関係には不明な点が多い。近年はメタデータ解析での問題解決も試みられているが (Enquist and Niklas, 2002; Poorter et al., 2015)、ここには推定値も含まれ、圃場で健全に管理された個体を対象に測定した結果が多く、サンプリングや測定方法の検証が必要に思える。さらに、地下部を含む大型樹木全体の呼吸実測は極めて限定的である。理由は、大型樹木の地下部の調査には時間と労力がかかるためである (第1図)。

個体レベルでの根へのエネルギーなどの配分変化には、上記の個体発生学的変化も広く知られるが、生育環境によっても大きく変動し、可塑性は非常に高い。一般的に、乾燥地では地下部への配分が高まり、日陰で生育する樹木個体は弱い光を効率的に利用するために地上部へより多く配分するとされる。このような環境に応じた最適配分理論 (Thornley, 1972; Bloom et al., 1985) は、環境適応をモデル化する前提条件となる場合が多い。しかし、以上のように地下部への配分は、「個体発生学的変化」と「環境に応じた最適配分」の双方によって制御されており、両制御の兼ね合いは不明瞭なままといえる。この問題の解決には、芽生え～成木の成長段階と多様な環境を組み合わせた網羅的なサンプリングが必要となる。

そこで、我々はロシアの北方林～インドネシアの熱帯降雨林の多様な樹種 271 個体 (Mori et al., 2010) と日本国内 5 産地 (高知、静岡、長野、山形、岩手) のブナ 377 個体 (Kurosawa et al., 2021, 2023) を材料に、地下と地上部全体の呼吸を実測した。これら呼吸測定個体の中には、被陰され殆ど葉の無い枯死寸前の個体 (第1図, e) や、光を十分受け葉を多くもつ優勢個体も含まれている。可能な限り広い立木密度で広い林齢の個体をサンプリングすることで孤立木や高密度林の被陰個体を含め、大きく変化する樹木個体の地下部への配分幅の全体像をとらえることを目的とした。本稿



第1図 個体呼吸測定の様子。

(a) グラップルを装備した重機で地下部を掘出し、チャンパーに入れる様子。(b) チャンパーに地下部を密閉後、内部の CO₂ 濃度の上昇速度を記録する様子。測定材料に応じた適切なチャンパーサイズを選択すると内部の CO₂ 濃度は急上昇し、測定は数分で完了する。密閉にはガスバリア性能が高い荷造り用のセロハンテープを用いる。(c) 主要な地下部を重機で掘り出した後、地中に残った根をできるだけ丁寧に人海戦術で掘り出す。(d) 種子など小型の材料は二酸化炭素センサーのセル内部の脇にある空間に、小型 DC ファンとともに密閉する。(e) 被陰されて殆ど葉の無い個体の呼吸も測定した。このような個体も林冠ギャップ形成などで光を受けると不定枝を出して呼吸を高めることが多い。数 mg の芽生えから 10 ton、樹高 34 m の大木まで、すべて同一センサーを使用して同一原理 (Mori et al., 2010) で測定するため、測定結果の再現性は高い。(Kurosawa et al. (2023) より改変。)

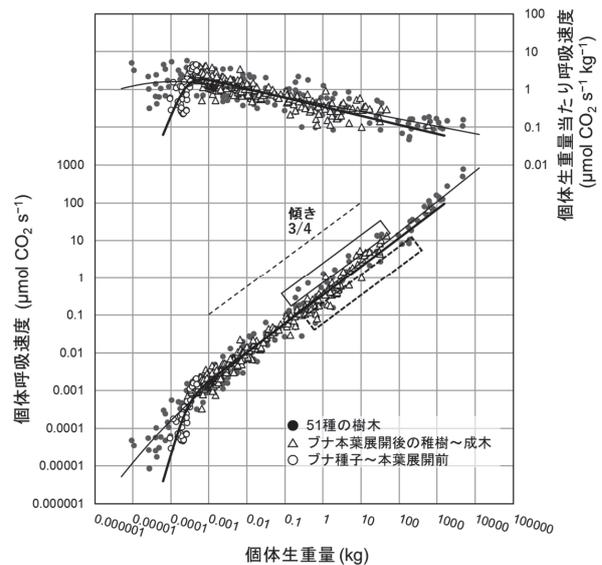
では、地下部呼吸と地上部呼吸のトレードオフ関係の上に成立する芽生え～成木の個体呼吸スケーリング (本稿では個体呼吸速度と個体重量の関係を指す) を巡る議論とともに、Mori et al. (2010) と Kurosawa et al. (2021, 2023) の意義を解説する。さらに、近年上昇しつつある大気中の二酸化炭素を吸収する樹木個体の成長や炭素固定能力に果たす地下部の役割を確認する機会としたい。

2. 個体呼吸スケーリングを巡る論争

様々な生物の個体呼吸速度はその個体重量の 3/4 乗に比例する、つまり両対数軸上で傾き 3/4 の直線 (べき乗式) になるというのが、Max Kleiber のスケーリング法則 (Kleiber, 1932) であり、動植物を含む多様な生物に共通であると主張されてきた。Metabolic ecology ではこれまで消費や損失として理解されることの多かった個体呼吸の 3/4 乗則の制御メカニズムの解明を試みてきた。生物個体の体内の空間を満たす

循環パイプ構造から理論的に説明したとする WBE モデル (West et al., 1997 の著者 3 名のイニシャルからこのように呼ばれることが多い) は Science 誌に掲載され大きな反響を呼んだ (Whitfield, 2006; 森ら, 2013). この 3/4 乗則が脚光を浴びる中で、個体呼吸速度は個体重量比例 (傾き 1) であると主張した論文 (Reich et al., 2006) が Nature 誌に掲載され、同誌上で大きな論争となった。しかし、この論文の個体呼吸は推定値であり、個体サイズ幅は 10^6 倍とやや狭かった。この研究では、根、幹、葉などの一部で測定した重量当たりの呼吸に器官総重量を掛けて個体全体の呼吸を推定している。また、主にガラス室の均一な環境で栽培した健全な小型樹木を主な材料にした。このため、これら「健全な」樹木では、樹冠内の葉の呼吸や構造は個体全体で均一となり、500 個体のサンプルの生理学的、形態学的性質も均一となったようである。個体重量比例の個体呼吸スケーリングは、健全な樹木のみを材料とした結果だったのである。一方、我々の根を含む芽生え～大木の個体毎の実測では、成長初期は傾きが 1 前後であり、個体サイズが大きくなるとともに徐々に 3/4 に近づく 2 相系の上に凸の曲線が最適モデルとして選択された (第 2 図) (Mori et al., 2010; Schmiege et al., 2023). これは 2 本の漸近線をもつ混合べき関数で、上記の傾き 1 (Reich et al., 2006) と傾き 3/4 (West et al., 1997) を統合するモデルとなった (この意義は、3. 地下部を含む個体呼吸スケーリングの実測でも述べる)。驚いたことに、本葉開葉前のブナ芽生えの個体呼吸 (第 2 図○、種子～本葉展開前の個体) を除いて Mori et al. (2010) と Kurosawa et al. (2023) の個体呼吸は両対数軸上でほぼ同じ範囲、傾向 (傾き) にあり、日本国内 5 産地のブナ個体呼吸とロシアの北方林～インドネシアの熱帯降雨林の樹木個体呼吸の間には、統計上の違いはなかった。現在では「3/4 乗則は死んだ」とする批判も多い (Kozłowski and Konarzewski, 2004; Glazier, 2018). しかし、芽生え～大木まで地下部を含む樹木全体の個体呼吸を実測した研究は稀であり、個体生理学的な検証を進めるべき課題と繰り返し指摘されている (Levin, 2000; Mori et al., 2010; Chave, 2013; Schmiege et al., 2023).

森林動態等のメカニズムを理解する基盤となる一般性の高い個体レベルの呼吸スケーリングを検討するのであれば、多様性が高く環境の不均一な天然林などを調査地に含めて「枯死寸前の個体～不定枝を持つ復活途上の個体～健全な個体」などを網羅することが必要だろう。様々な状態の樹木個体を測定により、生きている樹木が持ち得る個体呼吸の限界範囲とともにその傾向 (両対数軸上の傾き) が明らかとなることで、生態系への柔軟なスケールアップにつながり、ひいては



第 2 図 ロシアの北方林～インドネシアの熱帯降雨林の 51 種の樹木 (●, Mori et al., 2010) と国内 5 産地のブナ種子～本葉展開前 (○) と本葉展開後～成木 (△) (Kurosawa et al., 2023) の個体呼吸速度と個体生重量の関係の比較。

細実線は Mori et al. (2010)、太実線は Kurosawa et al. (2023) による混合べき関数モデルを示し、破線は 3/4 の傾きを示す。異なるサイズ間の個体呼吸の比較のため、重量当たりの呼吸速度を図の上部に示した。実線四角内は優勢個体、破線四角内は被陰個体の個体呼吸の例を示す。すべての個体呼吸速度は、温度が 10°C 上昇すると呼吸が 2 倍になる一般的な仮定 $Q_{10} = 2$ を用いて 20°C の値に補正済みである。Mori et al. (2010) と Kurosawa et al. (2023) は同じ測定方法を用いており、いずれも 2 本の漸近線をもつ上に凸の混合べき関数が最適モデルとして選択された。種子の呼吸は吸水によって急上昇する (Huang et al., 2020a, 2020b; Ferrio et al., 2018). (Mori et al. (2010), Kurosawa et al. (2023) より改変.)

動態予測などへの応用が期待される (Levin, 2000). 樹木の生態学特性の評価には様々な手法、目的があるが、重要なことはどのレベルで何を比較するかである。環境問題を背景に森林の炭素収支の評価を主目的にすることは多い。生態系の土地面積当たりの炭素収支は重要なターゲットであり、土地面積当たりの地下部 (特に細根) の機能把握は重要である。しかし、進化学的な長期の環境適応を考えるのであれば、個体レベルでの生理測定も重要であることが繰り返し指摘されてきた (Levin, 2000; Chave, 2013; Schmiege et al., 2023). これは、生物個体の進化や適応を決める生死は、個体全体の成長、呼吸、光合成による根を含む個体全体のエネルギー収支で決まるためである。多くの生物は、通常は飢餓で死なないようにエネルギーを節約・貯蔵し、エネルギーが必要な場面になると節約を解除

して貯蔵エネルギーを利用する。樹木は多様な呼吸基質（しかも物質が不明な場合も多い）をエネルギー源として貯蔵している。このため、たとえ被陰された光の少ない環境で生育して長期間にわたり個体光合成が低くても、林冠ギャップが形成されると貯蔵エネルギーで個体呼吸を高め、不定枝、不定根を発生させる個体はよく見られる。こうした成長再開の能力を持つことは、変動環境（一時的な低温や乾燥などの環境ストレスも含む）を突破する原動力ではないだろうか。移動することのできない樹木は（間伐などの）生育環境の変化に応じて成長曲線を乗り換えることが多く、成長曲線乗り換えの分析方法は Hozumi (1985, 1987) により考案されている。天然林の年輪では、繰り返されるかく乱で何度も成長曲線を乗り越えるのは一般的に見られる現象である。こうした成長曲線の乗り換え現象は個体成長や個体呼吸の低下と再上昇（揺らぎ）を生じさせ (Yamakawa et al., 2023), 系統間の個体呼吸の差を吸収し消滅させるのであろう。健全に圃場で育成された樹木や栽培植物の個体呼吸はこの「揺らぎ」が生じることはないため、個体重量にほぼ比例となるものと思われる。変動環境を柔軟なエネルギー利用によって乗り越えてきた樹木の個体呼吸のスケーリングには、個体呼吸を構成する地下部と地上部が柔軟でかつ物理化学的な安定性でバランスを保つゆえに系統や環境を包括した統一性が生まれたようである。ここには、「器官レベルの生態形質の多様性」と「個体レベルの物理化学的な統一性」を結ぶ未知の概念が存在する可能性を感じる。

3. 再現性の高い個体呼吸測定

エネルギーを節約、貯蔵して必要な場面で成長再開に利用する「エネルギーの揺らぎ（個体呼吸の低下と再上昇）」は樹木に限らず魚類を含む様々な生物にも確認されており、多くの生物に広く見られる一般性の高い現象である (Yagi et al., 2010; Yagi and Oikawa, 2014; Kim et al., 2023)。光が届かず餌の少ない深海にすむ生物と暗い林床環境の樹木の生き方は、エネルギーを節約して貯蔵し、稀なエネルギー獲得の機会（樹木では受光、深海生物では摂餌）を活かす点で似ているのかもしれない (Tanaka et al., 2023)。本来、樹木の器官レベル呼吸などの生態特性には系統や環境による違いがある。しかし、我々の網羅的な個体サンプリングの結果、これらの系統や環境による違いは成長低下／再開の繰り返しに生じる個体呼吸の揺らぎに吸収された（第2図）。人類の経済活動も環境悪化に相当する不況場面では個人も会社なども貯蓄を高める一方で、チャンスを感じれば資金投資を増やす。これも一つの「エネルギーの揺らぎ」であり、人類の経済は

樹木や魚類の経済と類似性があるとの指摘もある (King, 2021)。このように Metabolic ecology では、個体、個体群、群集レベルの成長や適応はエネルギーを利用しているとの考えのもとに、生理から生態系を結び付けて統合理解を試みてきた。しかし、個体レベルの生理実測研究は重要であるものの、芽生え～大木の個体全体の呼吸を正確に多数実測するのは困難であり、実測研究が少ないことが理論を進展させる一つの障害であった。特に、個体呼吸を正確に測定して再現性を高めることは極めて重要である。呼吸測定に際して留意しなければならない点について以下で言及したい。

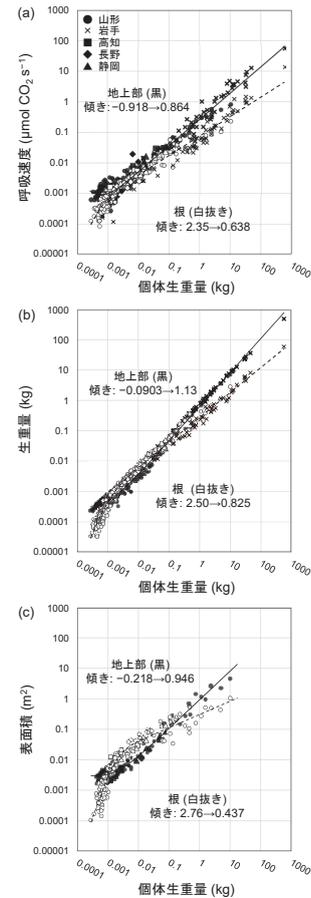
Mori et al. (2010) は芽生え～大木の網羅的な個体サンプリングで地下部を含む樹木個体呼吸を実測した結果、両対数軸上で傾きが1から3/4に徐々に変化する2相系の混合べき関数式のモデルが選択されることを示した（第2図）。この研究では、測定した個体生重量幅は 10^9 倍に及び、芽生えから樹高34 mの大木の広いサイズ幅を大小のチャンバーでまんべんなくカバーした。個体呼吸と個体生重量の全てに推定値は含まれず、正確な実測値である。大木の個体生重量は、1 kgの分解能の2トンホイストスケールで実測した。篠崎 (1979) は、この混合べき関数で表現される生物現象は多くあり、 $\log(\text{個体生重量}) \div \text{時間}$ と仮定を立てた場合に、この混合べき関数はロジスチック成長曲線に変換できると指摘している。この点でも、混合べき関数モデルは生物学的合理性が高いとされる (篠崎, 1979)。その一方で、個体サイズの増加とともに力学的な支持コストも増加するなど、重力も関与するとされる (Ballesteros and Luque, 2018)。同様の「上に凸型」の2相系の個体呼吸スケーリングは多くの魚類にも確認されており (Yagi et al., 2010; Yagi and Oikawa, 2014; Kim et al., 2023)、生態系、栄養段階が全く異なる樹木と魚類の個体呼吸スケーリングは驚くほど類似することが明らかとなりつつある。この類似性が生じる理由は、以下のとおりである。まず、樹木も魚類ともに種子や卵を通じエネルギーを親から引き継ぐため呼吸が急上昇する。次に、樹木では本葉が充実して光合成が高まり、魚類では摂食に必要な消化器の完成と同時に重量増加とエネルギー貯蔵を開始するためである。King (2021) は人類のグローバルなエネルギー消費と経済成長のスケーリングにも、樹木や魚類と同様の上凸型の非線形モデルが適応されると指摘している。近年も上記の樹木個体呼吸の実測データ (Mori et al., 2010; Kurosawa et al., 2021, 2023) を用いて、動植物に共通の個体呼吸の法則性が非線形力学の視点から検討されている (Camacho-Vidales and Robledo, 2024)。

Kurosawa et al. (2021, 2023), Mori et al. (2010),

Wang et al. (2021) では、CO₂ センサーは GMP343 を使用した。しかし、センサーヘッドには CO₂ バリア性能の低い天然ゴム製の O 型リングが複数使用されているため、センサーヘッド全体をチャンバー内に密閉して CO₂ がリークしないように改造して対策を講じ、すべての個体呼吸測定装置のリークテストを行った。Mori et al. (2010) のシベリア～熱帯の個体呼吸データと Kurosawa et al. (2021, 2023) のブナ個体呼吸が一定範囲に集中していたこと (第 2 図) は、測定の再現性が高いことを示す。これらの研究では、樹木を切断して個体呼吸を測定したが、立木状態で光を遮蔽して樹液流を停止させて測定した個体呼吸と差はなかった (Mori et al., 2010)。樹木が蒸散を行うと、夏季の晴天の日中は樹液流で地面に近い幹下部が冷却され、気温より 10°C 以上も幹温度が低くなることもあり、温度を説明変数とする呼吸の比較が困難となる。この点を考慮すると、立木状態で個体呼吸の温度依存性を厳密に評価するには、暗チャンバーに個体全体をしばらく入れて樹液流を停止させ、個体全体をほぼ一定温度にする必要がある。以上のように、「切断による個体呼吸測定」や「立木の暗呼吸測定」は、樹木個体呼吸を同じ温度条件下で比較するには向いている (Mori et al., 2010 ; Kurosawa et al., 2021, 2023 ; Wang et al., 2021)。

4. 地下部が牽引する樹木成長

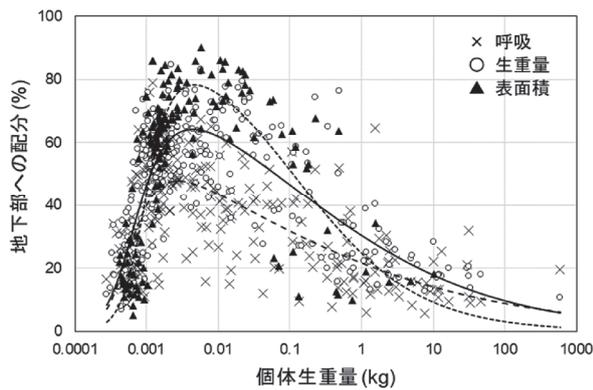
なぜ第 2 図の個体呼吸スケールリングは「2 相系の上に凸型の混合べき関数モデル」となるのだろうか。これを説明するため、Kurosawa et al. (2021, 2023) はブナの個体呼吸を地下部と地上部の 2 つの部分に分割して検討した。地下部と地上部は、水獲得と炭素獲得をめぐりトレードオフの関係にあるとされる (Bloom et al., 1985 ; Thornley, 1972)。ブナ芽生えでは、種子内部の貯蔵エネルギーはまだ地上部の双葉内部にとどまっているが (Ampofo et al., 1976)、その大半は発芽後に地下部に一気に転流し、急速成長するため地上部への配分は減少した (第 3, 4 図, Kurosawa et al., 2021)。種子の生態学的役割は散布に焦点を当てることが多いが、「地下部の急速成長」を実現させて個体の生き残りの可能性を高めるための装置とも言えるだろう (Ampofo et al., 1976 ; Kurosawa et al., 2021, 2023)。親からのエネルギーを地下部で使い切り、本葉が未発達なこの時期の個体の死亡率は高く、森林の樹木個体群動態のボトルネックといわれる。また、この時期の本葉は薄く、窒素含量なども低いため個体レベルの水利用効率も低い。芽生え期に地下部への配分を高めることは、その後の地上部の炭素獲得能力を高め、成長を加速するための準備段階であり、個体の生死を決め



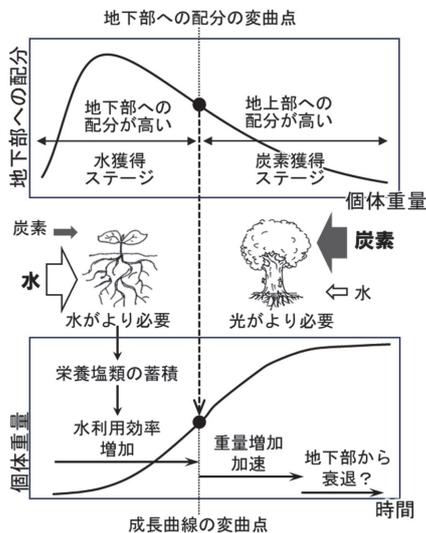
第 3 図 日本国内 5 産地のブナの地下部 (破線)・地上部 (実線) の (a) 呼吸速度, (b) 生重量, (c) 表面積と個体生重量の関係。

本図は、第 2 図の本葉展開後のブナ個体を地下部と地上部に分割して測定、作成した。生重量、呼吸、表面積のいずれについても、両対数軸上で「地下部-個体重量」には上に凸、「地上部-個体重量」には下に凸の混合べき関数式が最適モデルとして選択された。図中の→で繋がれた 2 つの数値は、混合べき関数式の 2 本の漸近線の傾きを示す。いずれの関係にも明確な産地間差は見られず、同じ混合べき関数式が最適モデルとして選択された。(Kurosawa et al. (2023) より改変。)

るカギなのだろう。当年生後半～4 年生 (概ね 0.0003 ~ 0.03 kg) にかけて、個体呼吸の地下部への配分は最大で 47.8% である (第 4 図) が、個体表面積の地下部への配分は 78.2% にもなり、地下部への配分は呼吸よりも表面積において大きく増加する。これはエネルギー利用を抑えつつ地下部表面積を拡大し、水と栄養塩類を低コストで効率的に吸収することを示す (Kurosawa et al., 2021, 2023)。この後、成木に近づくにつれ地下部への配分は減少した。長寿命の樹木では大型化を実現するため、成長初期に種子貯蔵エネルギーの大半を地下部へ急速配分させた結果、第 2 図の上に凸型の個体呼吸スケールリングが出現するのだろう。



第4図 個体生重量に応じた地下部への表面積 (▲, 細かい破線), 生重量 (○, 実線), 呼吸 (×, 破線) の配分変化曲線 (第3図から描いた). 図には日本国内5産地の材料が含まれる. (Kurosawa et al. (2023) より改変.)



第5図 個体生重量に応じた地下部への配分変化 (上: 第3, 4図より作成) から推察される個体重量のロジスチック成長曲線 (下) の制御を示す概念図.

以上の概要を重量成長曲線と関連づけ、第5図にまとめ直した。芽生え～稚樹期 (当年生後半～4年生) は地下部への配分が高く「水獲得を重視する」個体構造と機能を持ち、活発な水や栄養塩類の獲得によってその後の地上部の炭素獲得に向けた準備期である。この時期は、水利用率 (炭素獲得/水獲得) は低く、個体重量の増加は緩やかである。その後、十分な地下部への配分を成功させ運よく生き残った個体は、地下部の機能・構造に牽引され個体成長を加速する (地下部への配分の変曲点)。個体生重量が1～数kg、樹高約2m程度 (5～8年生) が個体生重量幅 (対数軸上) の大まかな中央値になり、ロジスチック成長曲線の変曲点 (第5図、黒丸) に相当する。この時期以降は地上部への配分を高め「炭素獲得を重視する」個体構造

と機能となり、水よりも光への要求性が高まり始める。さらに時が経過し成長後期に入ると、地下部の成長飽和により個体全体の成長に抑制が生じると推察される。この点では、巨木の倒壊は地下部に起因するケースが多いのかもしれない (平野ら, 2021)。樹木に限らず多くの生物の成長がこのようなロジスチック成長曲線を示すメカニズムは今も未解明の生物学上の課題であるが、樹木の場合、地下部成長が地上部成長に先行して個体全体の成長を牽引制御することにより生じている可能性がある。

5. 今後の課題

第2図に示したように、日本産のブナだけでなく世界の様々な生育環境や系統を含めても、樹木個体呼吸スケーリングには広いサイズ幅で上に凸の傾向が見られた (Mori et al., 2010; Kurosawa et al., 2021, 2023)。この背景には、地下部と地上部の間にサイズに応じて柔軟に変化するトレードオフ関係が存在するのだろう。ここには、生物学だけでは説明しがたい物理化学的な制御も関与すると指摘されている (Ballesteros and Luque, 2018; Camacho-Vidales and Robledo, 2024)。

では、同じ陸上植物でも草本と木本では地下部と地上部の関係は異なるのであろうか。我々は、1～数年の短い寿命でコストをかけて小型のまま素早く生き抜く草本と長寿命でゆっくりと低コストで大型化する木本では、地上部・地下部呼吸スケーリングに明確な相違点があることを確認しつつある。こうした情報は陸上植物が環境に応じた地下部と地上部のつながり方を長寿命の樹木と短命な草本に分岐させて、長期と短期の環境変動に応じて森林生態系や草地生態系を成立させた適応進化プロセスを知る基本である。しかし、地下部と地上部の呼吸を個体レベルで実測した研究は樹木・草本の双方で少なく不明な点がいまだに多い。草本と木本を包括した個体レベルの呼吸スケーリングの検証は、陸上生態系の成り立ちや今後の変動予測を行うためには不可欠である (O'Leary, 2019; Schmiege et al., 2023)。なぜなら個体レベルの生態特性はマイクロとマクロの双方向へ見通しの良い峠のような場所だからである。今後進めるべきは、個体レベルの蒸散や光合成の実測であると指摘されている (Vasseur et al., 2023)。

謝辞

本稿の執筆にあたり、兵庫県立大学の橋本瑞江博士、福井県立大学の塩野克宏博士、名古屋大学の平野恭弘博士、森林総合研究所東北支所の野口亨太郎博士より有益なご助言を頂いた。Kurosawa et al. (2021, 2023) で用いたブナ種子の一部は高知大学の市栄智明博士、

静岡大学の飯尾淳弘博士より頂いた。本研究の一部は JSPS 科研費 (19H02987, 19H01161) の支援を受けて実施した。ここに記して感謝の意を表します。

引用文献

- Ampofo, S. T., Moore, K. G., Lovell, P. H. 1976. The role of the cotyledons in four *Acer* species and in *Fagus sylvatica* during early seedling development. *New Phytol.* 76: 31-39.
- Ballesteros, F. J., Luque, B. 2018. Gravity and life. In Gordon R, Sharov A. eds., *Habitability of the Universe before Earth*. Academic Press. pp. 3-26.
- Bloom, A. J., Chapin, F. S., Mooney, H. A. 1985. Resource limitation in plants resource limitation in plants—an economic analogy. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 16: 363-392.
- Camacho-Vidales, L. J., Robledo, A. 2024. A nonlinear dynamical view of Kleiber's law on the metabolism of plants and animals. *Entropy* 26: 32.
- Chave, J. 2013. The problem of pattern and scale in ecology: What have we learned in 20 years? *Ecol. Lett.* 16: 4-16.
- Cheng, D. L., Li, T., Zhong, Q. L., Wang, G. X. 2010. Scaling relationship between tree respiration rates and biomass. *Biol. Lett.* 6: 715-717.
- Collalti, A., Tjoelker, M. G., Hoch G., Mäkelä A., Guidolotti G., Heskell M., Petit G., Ryan M. G., Battipaglia G., Matteucci G., Prentice I. C. 2020. Plant respiration: controlled by photosynthesis or biomass? *Glob. Change Biol.* 26: 1739-1753.
- Enquist, B. J., Niklas, K. J. 2002. Global allocation rules for patterns of biomass partitioning in seed plants. *Science* 295: 1517-1520.
- Ferrio, J. P., Kurosawa Y., Wang M., Mori S. 2018. Hydraulic constraints to whole-tree water use and respiration in young *Cryptomeria* trees under competition. *Forests* 9: 449.
- Gedroc, J. J., McConnaughay, K. D. M., Coleman J. S. 1996. Plasticity in root / shoot partitioning: optimal, ontogenetic, or both? *Funct. Ecol.* 10: 44219-44226.
- Glazier, D. S. 2018. Rediscovering and reviving old observations and explanations of metabolic scaling in living systems. *Systems* 6: 4.
- 平野恭弘, 南光一樹, 土居龍成, 西村滂, 杵山哲矢, 谷川東子 2021. 2020年7月に倒木化した岐阜県大湫町神明大杉の根系状況. *根の研究* 30: 65-75.
- Hozumi, K. 1985. Phase Diagrammatic approach to the analysis of growth curve using the u-w diagram—Basic aspects—. *Bot. Mag, Tokyo.* 98: 230-250.
- Hozumi, K. 1987. Analysis of growth curve of stem volume in some woody species using the u-w Diagram. *Bot. Mag, Tokyo.* 100: 89-97.
- Huang, H., Ran, J., Li, X., Wang, Z., Chen, R., Wu, F., Ye, M., Jia, F., Niklas, K. J., Deng, J. 2020a. A general model for seed and seedling respiratory metabolism. *Am. Nat.* 195: 534-546.
- Huang, H., Ran, J., Ji, M., Wang, Z., Dong, L., Hu, W., Deng, Y., Hou, C., Niklas, K. J., Deng, J. 2020b. Water content quantitatively affects metabolic rates over the course of plant ontogeny. *New Phytol.* 228: 1524-1534.
- Kawai, K., Tanaka, K., Ito, S., Kanna, K. 2023. Size-related changes in leaf, wood, and bark traits in even-aged *Falcataria falcata* trees. *Tropics* 32: 15-27.
- Kim, D. I. 2023. Metabolic rates of Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) during early development using a novel modified respirometry method. *Animals* 13: 1035.
- King, C. W. 2021. Systems thinking for energy and the economy: size and structure. In *The Economic Superorganism: Beyond the Competing Narratives on Energy, Growth, and Policy*. Springer Nature. pp. 197-248.
- Kleiber, M. 1932. Body size and metabolism. *Hilgardia* 6: 315-353.
- Koyama, K., Smith, D. D. 2022. Scaling the leaf length-times-width equation to predict total leaf area of shoots. *Ann. Bot.* 130: 215-230.
- Kozłowski, J., Konarzewski, M. 2004. Is West, Brown and Enquist's model of allometric scaling mathematically correct and biologically relevant? *Funct. Ecol.* 18: 283-289.
- Kurosawa, Y., Mori, S., Wang, M., Ferrio, J. P., Yamaji, K., Koyama, K., Haruma, T., Doyama, K. 2021. Initial burst of root development with decreasing respiratory carbon cost in *Fagus crenata* Blume seedlings. *Plant Spec. Biol.* 36: 146-156.
- Kurosawa, Y., Mori, S., Wang, M., Ferrio, J. P., Nishizono, T., Yamaji, K., Koyama, K., Haruma, T., Doyama, K. 2023. Ontogenetic changes in root and shoot respiration, fresh mass and surface area of *Fagus crenata*. *Ann. Bot.* 131: 313-322.
- Ledo, A., Paul, K. I., Burslem, D. F. R. P., Ewel, J. J., Barton, C., Battaglia, M., Brooksbank, K., Carter, J., Eid, T. H., England, J. R., Fitzgerald, A., Jonson, J., Mencuccini, M., Montagu, K. D., Montero, G., Mugasha, W. A., Pinkard, E., Roxburgh, S., Ryan, C. M., Ruiz-Peinado, R., Sochacki, S., Specht, A., Wildy, D., Wirth, C., Zerihun, A., Chave, J. 2018. Tree size and climatic water deficit control root to shoot ratio in individual trees globally. *New Phytol.* 217: 8-11.
- Levin, S., 2000. *Fragile dominion*. Helix Books / Perseus Publishing.
- 森茂太, 小山耕平, 八木光晴, 福森香代子 2013. 植物個体呼吸スケリングの生態学的意義. *日生態誌* 63: 125-132.
- Mori, S., Yamaji, K., Ishida, A., Prokushkin, S. G., Masyagina, O. V., Hagihara, A., Hoque, A. T. M. R., Suwa, R., Osawa, A., Nishizono, T., Ueda, T., Kinjo, M., Miyagi, T., Kajimoto, T., Koike, T., Matsuura, Y., Toma, T., Zyryanova, O. A., Abaimov, A. P., Araki, M. G., Kawasaki, T., Chiba, Y., Umari, M. 2010. Mixed-power scaling of whole-plant respiration from seedlings to giant trees. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 107: 1447-1451.
- Müller, I., Schmid, B., Weiner, J. 2000. The effect of nutrient availability on biomass allocation patterns in 27 species of herbaceous plants. *Perspect. Plant Ecol. Evol. Syst.* 3: 115-127.
- O'Leary, B. M., Asao, S., Millar, A. H., Atkin, O. K. 2019. Core principles which explain variation in respiration across biological scales. *New Phytol.* 222: 670-686.
- Poorter, H., Jagodzinski, A. M., Ruiz-Peinado, R., Kuyah, S., Luo, Y.,

- Oleksyn, J., Usoltsev, V. A., Buckley, T. N., Reich, P. B., Sack, L. 2015. How does biomass distribution change with size and differ among species? An analysis for 1200 plant species from five continents. *New Phytol.* 208: 736-749.
- Reich, P. B., Tjoelker, M. G., Machado, J. L., Oleksyn, J. 2006. Universal scaling of respiratory metabolism, size and nitrogen in plants. *Nature* 439: 457-461.
- Schmiege, S. C., Heskel, M., Fan, Y., Way, D. A. 2023. It's only natural: Plant respiration in unmanaged systems. *Plant Physiol.* 192: 710-727.
- 篠崎吉郎 1979. ベキ関数の和 (生物現象のやさしい数理解析—5—). *化学と生物* 17: 331-333.
- Sibly, R. M., Brown, J. H., Kodric-Brown, A. 2012. *Metabolic ecology: a scaling approach*. John Wiley & Sons.
- Tanaka, S., Ono, Y., Tanimae, S., Moriyama, T., Fujimoto, S., Yagi, M. 2023. Metabolic responses to food and temperature in deep-sea isopods, *Bathynomus doederleini*. *Deep-Sea Res. I.* 196: 104019.
- Thornley, J. H. M. 1972. A balanced quantitative model for root: shoot ratios in vegetative plants. *Ann. Bot.* 36: 431-441.
- Vasseur, F., Violle, C., Enquist, B. J., Vile D. 2023. Genetic variability and plasticity of plant allometry. *Funct. Ecol.* 37: 1095-1105.
- Wang, M., Mori, S., Kurosawa, Y., Ferrio, J. P., Yamaji, K., Koyama, K. 2021. Consistent scaling of whole-shoot respiration between Moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) and trees. *J. Plant Res.* 134: 989-997.
- West, G. B., Brown, J. H., Enquist, B. J. 1997. A general model for the origin of allometric scaling laws in biology. *Science* 276: 122-126.
- Whitfield, J. 2006. *In the beat of a heart: life, energy, and the unity of nature*. Joseph Henry Press.
- Yagi, M., Kanda, T., Takeda, T., Ishimatsu, A., Oikawa, S. 2010. Ontogenetic phase shifts in metabolism: links to development and anti-predator adaptation. *Proc. R. Soc. B.* 277: 2793-2801.
- Yagi, M., Oikawa, S. 2014. Ontogenetic phase shifts in metabolism in a flounder *Paralichthys olivaceus*. *Sci. Rep.* 4: 7135.
- Yamakawa, M., Onoda, Y., Kurokawa, H., Ogura, M., Nakashizuka, T., Hikoska, K. 2023. Competitive asymmetry in a forest composed of a shade-tolerant species depends on gap formation. *For. Ecol. Manag.* 549: 121442.

「根研究会」が広げてくれた「研究と教育」

谷本英一

名古屋市立大学名誉教授

根研究学会会員

日本植物学会 50 年会員

日本植物生理学会永年会員

The Advanced Tree Doctor 研修会顧問

鶴舞公園緑化センター「グリーンカレッジ」講師

根研究会（現在の根研究学会 以下、根研）は 1992 年 1 月 1 日に誕生し、2024 年に 32 歳になった。根研生みの親である森田茂紀氏は、発足から代表（1991～1993）として、更に、初代会長（1994～1995、1996～1997 の 2 期）として会を育てられた。また、次の会長山内章氏（1998～1999、2000～2001 の 2 期）は、国際会議の開催等々、さらに大きく会を発展させた。お二人のお仕事は、本誌の前号（Root Research Vol. 32, No. 2 と No. 4）で詳しく述べられている（森田, 2023；山内, 2023）。とりわけ、森田氏の記事には、根研の発足から現在までの成長ぶりが、ご自身の活動を含めて詳しく網羅されている。

私は、山内氏からバトンを受け取り 2002～2003 年と 2004～2005 年の 2 期会長を務めたが、根研の運営に関しては、森田氏と山内氏が築かれた路線を歩んだに過ぎない。森田氏の記事（森田, 2023）には、そのタイトルにあるように「会の設立趣旨は“会員の役に立つこと”である」ことが強調されている。では、本会が具体的にどのように会員の役に立ってきたのか？また、役立ちうるのか？これらを考察することは、「30 年の展望」に文字通り“役立つ”のではないかと思う。

それには、会員の皆様からの客観的な講評を受けなければならないが、本稿では、私自身の研究・教育活動にとって「根研」が具体的にどのように役だったかを振り返ってみたい。小さな体験に過ぎないが、根研を通じた国内外の人々との交流が私の研究・教育活動に大変役立った。“役立ち方”の一例として参考となれば幸いである。

根研究会との出会いは 1 枚の張り紙

山内氏は前号の記事（山内, 2023）で、会員の根への関わり方として興味深い分類を行っている。(a) 根「を」研究する人、(b) 根「も」研究する人、(c) 根も研究「せざるを得ない」人、(d) 自分では根は研究しない

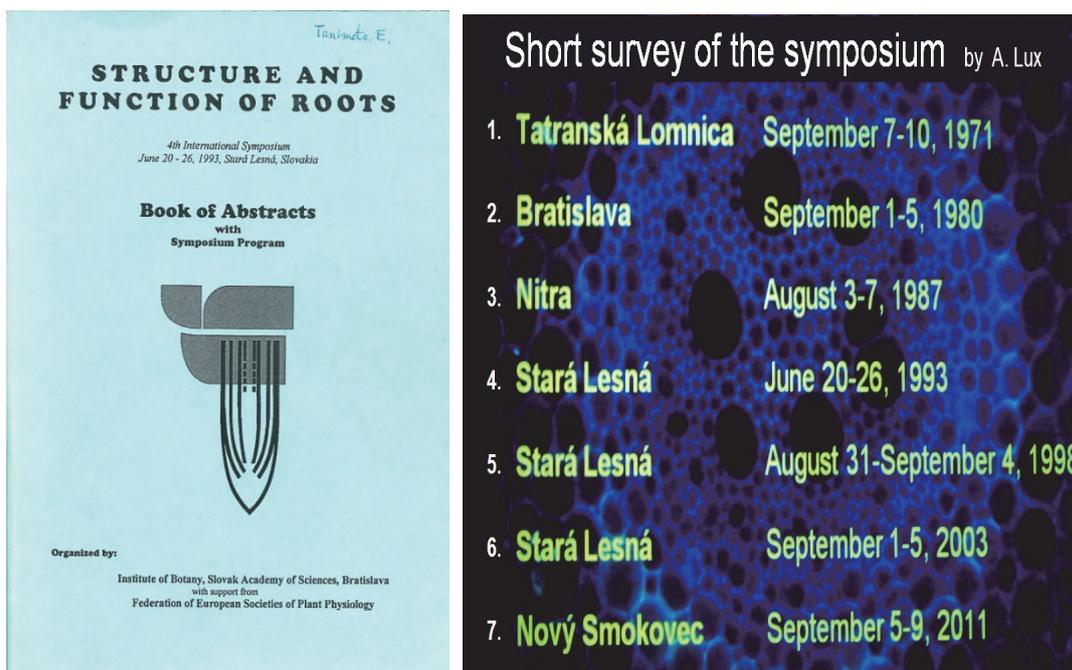
けれどもどんな研究がされているかちょっと覗いてみたい人など、会員諸氏は様々な動機で研究会に参加している。

私は、もっぱら“空气中を上へ伸びる茎”の成長を追っかけてきた“成長生理屋”であったが、ある理由から (b) 根「も」研究する人となり、(c) 根も研究「せざるを得ない」人を経て、やがて (a) 根「を」研究する人となった。

理学部育ちの私は、植物の成長生理学をメインテーマとして「植物学会」や「植物生理学会」などで研究発表を行い、その時々で最も便利な植物器官を実験材料として選択してきた。

オーキシンやジベレリンといった成長制御ホルモンの作用機構研究には、イネ科植物の暗所発芽で得られる「幼葉鞘」や、エンドウ芽生えの「茎」などが、反応性の高い研究材料として広く用いられてきた。しかし、1970 年代から私は根を使った研究を始めた。在籍していた教養部ではいくつかの学部の基礎教育を担当し、文系も理系も含めて、生物実習や様々なクラスの講義が毎週の時間割のあちこちに散らばっていて、まとまった実験研究の時間が取りにくかった。そこで研究用植物材料の準備開始から実験までの時間が短い方が実験計画を立てやすいと考えた。多くの植物は播種後最初に成長し始めるのが「根」である。幼葉鞘や茎を使うより「根」を使えば 2、3 日から一週間早く実験が始められる。こんな事情があって、それまでの茎の研究に加えて「根も研究する人」となった（Tanimoto and Pilet, 1978；Tanimoto, 1985）。

1993 年 3 月金沢大学で開催された植物生理学会年会の会場掲示板に「根研究会へのお誘い」（森田茂紀）という A4 一枚の張り紙が目に入った。前年に誕生した根研への入会案内であった。森田氏は、農学分野の研究者を中心に誕生した根研へ、理学系生理屋の参加を期待したと推察される。少なくとも私 1 名は、この張



第1図 第4回スロバキアシンポの抄録(左). 右は第7回スロバキアシンポで, Lux氏が紹介した同シンポの歴史(Lux氏のスライドに著者が加筆). 左列は開催地名.

り紙によって根研へ入会し, 農学分野の方々と広く交流を深めることになった. ちなみに, “記念すべき”1993年の金沢大学での植物生理学会年会では, 3月30日第2日目の午後, 次のような発表を行っている.

『14:15 2pG04 矮性エンドウの根の細胞壁多糖の分子量分布と糖組成に対するジベレリンの効果 谷本英一, D.J. ヒューバー (名古屋大・教養・生物, フロリダ大・農・園芸)』

更に, 同年(1993年)9月には, 誕生したばかりのスロバキア『1989年にチェコスロバキアで「ビロード革命」が起こり, 大きな流血のないまま共産主義体制が崩壊して民主化が始まった. 1993年にチェコとスロバキアが平和裏に分かれ(「ビロード離婚」とも呼ばれる), スロバキア共和国が誕生した。』で開催された第4回「根の構造と機能に関する国際シンポジウム」(以下, スロバキアシンポ)に参加した(Tanimoto, 1993, 第1図). 現地では, 森田氏や, 彼の親友であるスロバキア・コメニウス大学のA. Lux氏と親交を深めることができた. このシンポジウムについては, 森田氏の記事に詳述されているが(森田, 2023), 比較的少人数(100名前後)の参加者が山中にあるアカデミーの宿舎で寝食を共にしながら過ごすので, 実に深い親交を深めることができる. 実際, Lux氏とは, この会議で懇意になり, その後の森田氏と共同研究者の阿部淳氏を含めた長い研究交流へと繋がった(Lux et

al., 2003). この体験は, コンパクトな集会のメリットを示す一例であろう. その後, このシンポへは第5回, 第6回, 第7回と続いて参加することになった(第2図).

根研で広がった研究・教育交流

新たに根研に入会された植物生理学系の方々を含めて, 年2回の研究集会等を通じて多くの方々と交流できるようになった. 最も大きな恩恵は, 森田氏と共同研究者の阿部淳氏を介して, 鳥取大学乾燥地研究センター(以下: 乾地研)との共同研究に加えて頂いたことである. 当時, 乾地研のセンター長であった稲永忍氏にもこの場を借りて謝意を表したい. 乾地研が行ってきた歴史ある中国との砂漠化問題共同研究の一端を勉強させて頂き, 現地(河北省石家荘)でのシンポジウム(Symposium on the Rehabilitation of Grassland and Control of Desertification in Dry Area, June 28-July 4, 2000, in Guyuan Country, Heibei Province, China)とField Trip等へも参加させて頂いたことは研究の視点や教育資料の編纂などで大いに役立った. さらに, 同センターのサウジアラビアとの共同研究では, 現地でナツメヤシの長根栽培実験を担当されていた松井猛彦氏のお手伝いもさせて頂いた. これらの経験で, 乾燥地問題・砂漠化問題の生理学的側面は, 特に「根の生長・育成」が重要であることを再認識するとともに, 根研の果たす社会的役割の一面を実感した.

研究活動に加えて, 乾地研では大学院生の指導にも



第2図 2011年スモコベッツで開かれた第7回スロバキアシンポでの筆者の発表
(この写真は、スライドの左端に写っている長身のLux氏による撮影)。

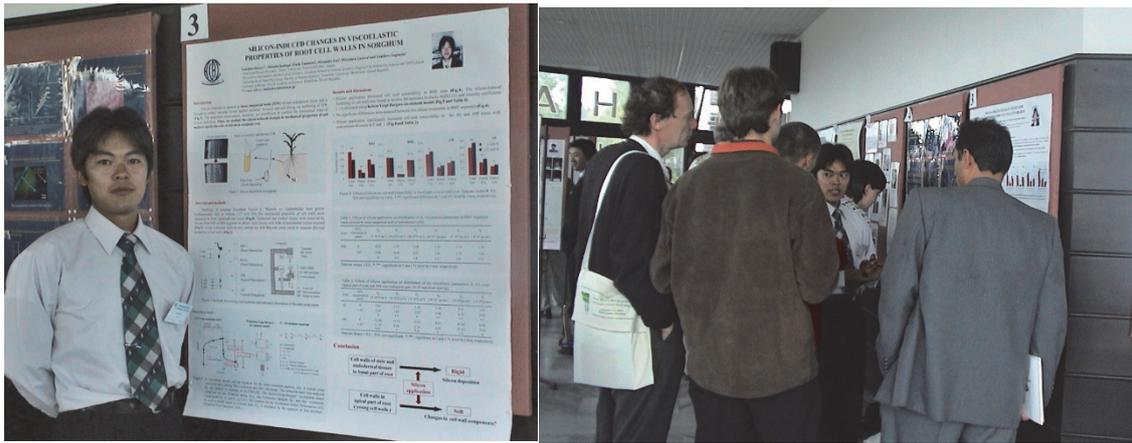


第3図 第6回スロバキアシンポ (2003年 @Stara Lesna) には乾地研の若手も参加した。

参加させて頂いた。丁度外国人研究者として招聘されていたLux氏の指導を受けていた服部太郎君とは特に細胞壁の研究で深い繋がりを持ち、論文の執筆指導にも加わった (Hattori et al., 2003)。中国やスロバキアでのシンポジウムには、乾地研の大学院生も参加し、見聞を広めると共に国際交流にも貢献した (第3図～第5図)。

根研には、大学以外に各種の研究機関からも多くの

方々が参加されている。農林水産省野菜茶業試験場 (現：独立行政法人農研機構 果樹茶業研究部門 金谷茶業研究拠点) で1995～2000年まで、チャノキのミスト栽培や電気生理学研究をされていた本間知夫氏 (現・前橋工科大学教授) と懇意になり、チャノキの根の成長制御実験を開始した (1997年)。私は、これまでエンドウやレタスのような草本の根を研究してきたが、細胞壁の組成、力学的堅さ、及びホルモン応答性



第4図 第6回スロバキアシンポ (2003年@Stara Lesna) でのポスター発表風景. (左) 服部太郎氏 (現, 農研機構・沖縄), (右) 討論中の服部氏 (左端は Lux 氏).



第5図 第6回スロバキアシンポ懇親会で活躍する大学院生諸氏.

の観点から、木本植物の根を調べて草本と対比しようという試みであった。本間氏は試験場のミストルームを使って、チャノキの白色根誘導実験を行い、白色根育成に成功し、美しい写真を提供して下さった (第6図)。

本間氏の実験を参考にして、私の実験室では、衣装ケースを改変してミニミスト装置を作成し、通常の水耕栽培装置と併用して、ジベレリンとの関係を調べた。この研究では、同試験場の松尾喜義氏からご提供頂いたチャノキの苗が大変役だった。この共同研究の結果、「木本植物の根」も土壌ストレスが無ければ、草本植物

の根と同様に、頂芽優勢の形態を保ちながら成長し、ジベレリンによる伸長と肥大の制御を受けることが明らかになった (谷本ら, 1999)。根研を介して始まったチャノキの研究で、土壌ストレスに応じた変幻自在なチャノキの根系形成の力強さに感動した。これらの成果は2004年と2007年に、茶の本場、静岡で開催された International Conference on O-CHA (Tea) Culture and Science (ICOS) で発表した。2004年の発表では、「Outstanding Poster Award」を頂いた (第7図～第9図)。

根研での交流をきっかけに始まった「チャノキの根」の研究は、私にとって、お茶の文化や健康増進効果な



第6図 本間知夫氏(現・前橋工科大学教授)による茶業試験場でのミスト耕によるチャノキの白色根誘導(写真右), 写真左は土から掘り出されたばかりの根。



第7図 2004年の「お茶の文化と科学の国際会議」(ICOS)のプロシーディング表紙(左)と ICOS2004 Outstanding Poster Award 表彰状(右)。

Pr-P-30

SS-1

**PHYTOHORMONE GIBBERELLIN REGULATES VEGETATIVE
GROWTH AND FLOWERING OF HYDROPONICS-GROWN TEA TREES.**

Eiichi Tanimoto^{1*}, Tomoo Homma², Alexander Lux³, Miroslava Luxova⁴, Kiyoshi Matsuo⁵, Jun Abe⁶, Shigenori Morita⁶, Shinobu Inanaga⁷

1: Graduate Sch. of Natural Sciences, Nagoya City Univ., Nagoya, 467-8501, Japan, 2: Medical Res. Inst., Tokyo Medical & Dental Univ., Tokyo, 101-0062, Japan, 3: Faculty of Natural Sciences, Comenius University, Bratislava, 842 14, Slovak, 4: Inst. of Botany, Slovak Acad. Sciences, Bratislava, 842 23, Slovak, 5: Dept. of Tea, National Institute of Vegetable and Tea Science, Shizuoka, 428-8501, Japan, 6: Graduate Sch. of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, Tokyo, 113-8657, Japan, 7: Arid Land Research Center, Tottori University, Tottori, 680-0001, Japan. *E-mail: tanimoto@nsc.nagoya-cu.ac.jp

Phytohormone gibberellin(GA) regulates shoot and root growth and flowering of many plants. Since the physiological function of GA in the growth and development of tea trees is not well known, we studied the morphological and growth-enhancing effects of GA in combination with the inhibitor of GA-biosynthesis to decrease the endogenous GA level. Root-applied GA₃ promoted shoot and root elongation, but suppressed flower formation. The inhibitor of GA-biosynthesis promoted flower formation but inhibited shoot and root elongation with remarkable thickening of root apices. The possibility was presented that the shoot and root growth, and flower initiation are controlled by restraining the GA level of tea plants.

第8図 2004年 ICOSでの谷本, 本間, Luxらの発表要旨.

Pr-P-35

00

**CHARACTERIZATION OF HYDROPONICS-GROWN WHITE ROOTS OF TEA
PLANTS, WITH SPECIAL REFERENCE TO ACID AND ALUMINUM TOLERANCE**

Tomoo Homma¹, Eiichi Tanimoto², Alexander Lux³, Miroslava Luxova⁴, Tomoki Hoshino², Kiyoshi Matsuo⁵, Jun Abe⁶, Shigenori Morita⁶, Shinobu Inanaga⁷, and Jian Feng Ma⁸

1: Medical Research Inst., Tokyo Medical & Dental Univ., Tokyo, 101-0062, Japan. 2: Grad. Sch. of Natural Sci., Nagoya City Univ., Nagoya, 467-8501, Japan. 3: Fac. of Natural Sci., Comenius Univ., Bratislava, 842 14, Slovak. 4: Inst. of Botany, Slovak Acad. Sci., Bratislava, 842 23, Slovak. 5: Dept. of Tea, National Inst. of Vegetable and Tea Sci., Shizuoka, 428-8501, Japan. 6: Grad. Sch. of Agric. and Life Sci., The Univ. of Tokyo, Tokyo, 113-8657, Japan. 7: Arid Land Research Center, Tottori Univ., Tottori, 680-0001, Japan. 8: Faculty of Agric., Kagawa Univ., Kagawa, 761-0795, Japan.

Tea trees grow well in the up-hill land where many other crop plants are uncomfortable. One reason is ascribed to the acid- and aluminum-tolerance of tea roots. To characterize the physiological and biochemical properties of tea roots, acid-growth response of root cell walls and acidification properties of hydroponics-grown white roots were analyzed with special reference to aluminum tolerance. The pH value of hydroponics dropped down to 2.9 after several weeks of hydroponics culture. The acidifying activity localized in the young elongation zone of apical part of roots. Mechanical extensibility of root cell walls were viscoelastically analyzed by a creep extension method. The pH-dependent increase in extensibility was not clear in tea roots in contrast to the case of pea roots. The pH shift and mechanical properties of cell walls will be discussed with reference to aluminum tolerant properties of tea roots.

第9図 2004年 IOCOでの本間, 谷本, Luxらの発表要旨.

どの勉強を通じて、講義やサイエンスカフェなどのアウトリーチ活動でも大いに役立った。そればかりか、私自身の日常生活でも毎日「お茶」を味わい、健康管理上の重要な食品として緑茶が定着した。数ある「お茶の文化」と「緑茶のサイエンス」の書物の中で、一つだけお勧めしたいものがある。1906年に出版された岡倉天心(覚三)著「The book of tea (茶の本)」である。2016年には関岡孝平による現代日本語訳と朗読がCDとなって発売された(パンローリング発売, でじじ発行)(第10図左)。その印刷本としては、「日本のこころ」

3大名著「茶の本・武士道・代表的日本人」がお勧めで、パンローリング社から発刊されている(第10図右, 第11図)。日本文化をより正しく理解しつつ、日本語を学びたい方、英語の発音を学びたい方など、特に留学生の教材にお勧めである。

根研を介して本間氏と始めた「チャノキの根」の研究が、緑茶の成分化学, 健康増進科学, さらには「茶道」と深く繋がっている「日本文化」の再勉強に至るまで、私の視野を広げてくれた。

お茶の本場, 静岡県牧ノ原の茶業研究所でのチャノ



第10図 茶の本 CD 岡倉覚三 (岡倉天心) (著), 関岡孝平 (翻訳) (でじじ発行/パンローリング発売 (左) と茶の本・武士道・代表的日本人の3大名著が一冊になった「世界に誇る「日本のこころ」岡倉天心, 新渡戸稲造, 内村鑑三 著, 関岡孝平 翻訳 (パンローリング発行) (右).

2014年12月2日 初版第1刷発行

フェニックスシリーズ²⁴

現代語新訳 世界に誇る「日本のこころ」3大名著

—「茶の本」「武士道」「代表的日本人」—

著者 岡倉天心 新渡戸稲造 内村鑑三
訳者 関岡孝平
発行者 後藤康徳
発行所 パンローリング株式会社
〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-9-18-6F
TEL 03-5386-7391 FAX 03-5386-7393
<http://www.panrolling.com/>
E-mail info@panrolling.com

装丁 パンローリング装丁室
印刷・製本 株式会社シナノ

ISBN978-4-7759-4130-0

落丁・乱丁本はお取り替えます。

また、本書の全部、または一部を複写・複製・転訳載、および磁気・光記録媒体に入力することなどは、著作権法上の例外を除き禁じられています。

©Kohei Sekioka 2014 Printed in Japan

第11図 現代日本語訳 世界に誇る「日本のこころ」奥付。

キとの出会いは、木本の根へ研究の幅を広げてくれただけでなく、市民講座などでの「お茶の科学と文化の話題」で好評を得ている。

いささか、根研の話から脱線したが、“お茶の味と薬効は、根から運ばれてくる旨味成分・テアニンに左右されていて”、「根の機能」は「お茶の文化」にも深く関

係しているのでお許し願いたい。

次に、根研を介して教材用の写真作成に役だった経験を紹介したい。キャベツなどのロゼット植物はジベレリンによって抽臺する(第12図)。茎の伸長を促進するジベレリンの作用を端的に示す教材写真である。比較のため立て頂いたのは、このキャベツを育てて



第 12 図 ジベレリンで誘導されたキャベツの抽臺。4 ヶ月間キャベツを育てて下さった中野有加氏 (左) と中野明正氏 (右)。左の写真は高校生物の教科書 (啓林館) に採用されている。

いただいた中野有加氏 (左) (現・農研機構 基盤技術研究本部) と中野明正氏 (右) (現・千葉大学大学院園芸学研究院) である。2007 年当時名古屋近郊の武豊町にあった農水省野菜茶業試験場でキャベツなどの品種改良・品種管理の研究をされていることを根研で知り、ご協力をお願いした。この写真は、大学や市民講座で活躍しているだけでなく、第 12 図左の写真は高等学校生物の教科書 (啓林館) にも採用されている。

Alexander Lux 氏は、東大、乾燥地研、名市大などに数度にわたって来日して共同研究に参画された。研究成果は多数の学術論文に発表されているが、それ以外に、学生教育にも大いに貢献された。大学院生の共同研究指導はもちろんだが、それ以外に、講義用の顕微鏡写真 (一例として第 13 図) をご提供頂いた。

国際交流・学会の開催

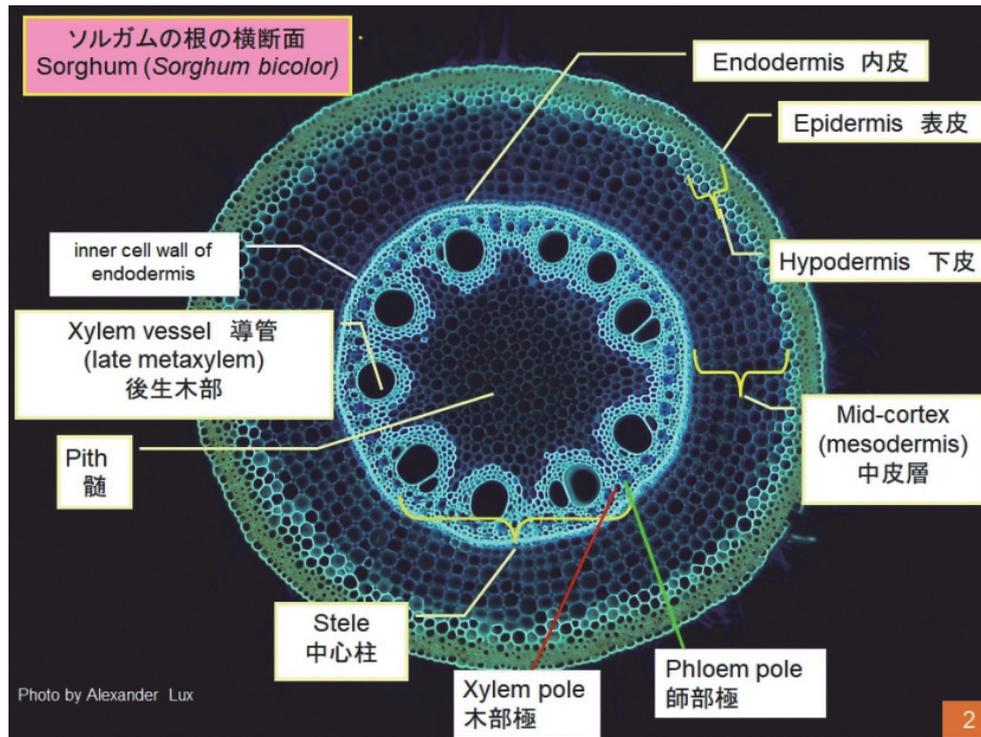
根研 30 年の歩みの中で大きな国際事業は、2001 年 11 月に開催された第 6 回国際根研究学会シンポジウ

ム @ 名古屋国際会議場の開催ではないかと思う。

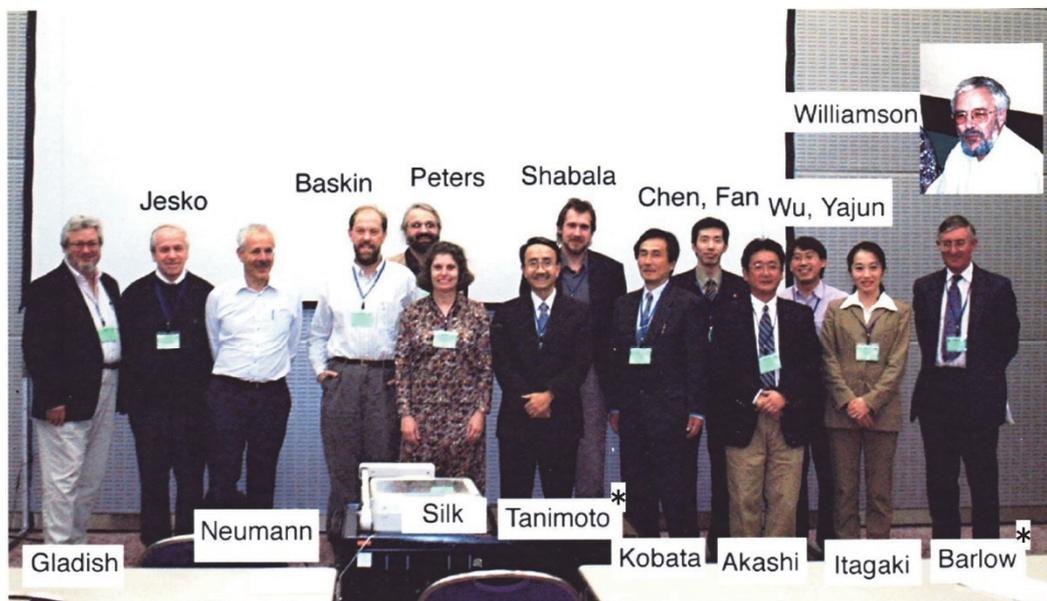
開催の経緯や内容については、森田氏の 2002 年の記事 (森田, 2002) と前号の記事 (森田, 2023) に詳しく述べられている。組織委員会での私の役割は、生理学関係のセッションを開くことであった。Peter W. Barlow 氏 (英国 Bristol 大学) の助けも借りて 17 名のスピーカーをお招きし、Session C: Growth physiology and environmental stress を開催した (第 14 図)。この交流のお陰で、後日、根の細胞壁の力学物性測定の依頼があり、共同研究が行われた (Fan et al., 2006)。

書籍の発刊・執筆

根研が発刊した書籍「根ハンドブック」(1994 年, 第 15 図) と「根の事典」(1998 年 朝倉書店) は、研究教育上大変役立っている。これらの出版の経緯も前号の森田氏の記事に紹介されている (森田, 2023)。ちなみに、「根ハンドブック」の表紙の図は、私の講義用スライドである (第 15 図左)。



第13図 ソルガムの根の横断面の顕微鏡写真 (顕微鏡写真は A. Lux 氏の提供)。



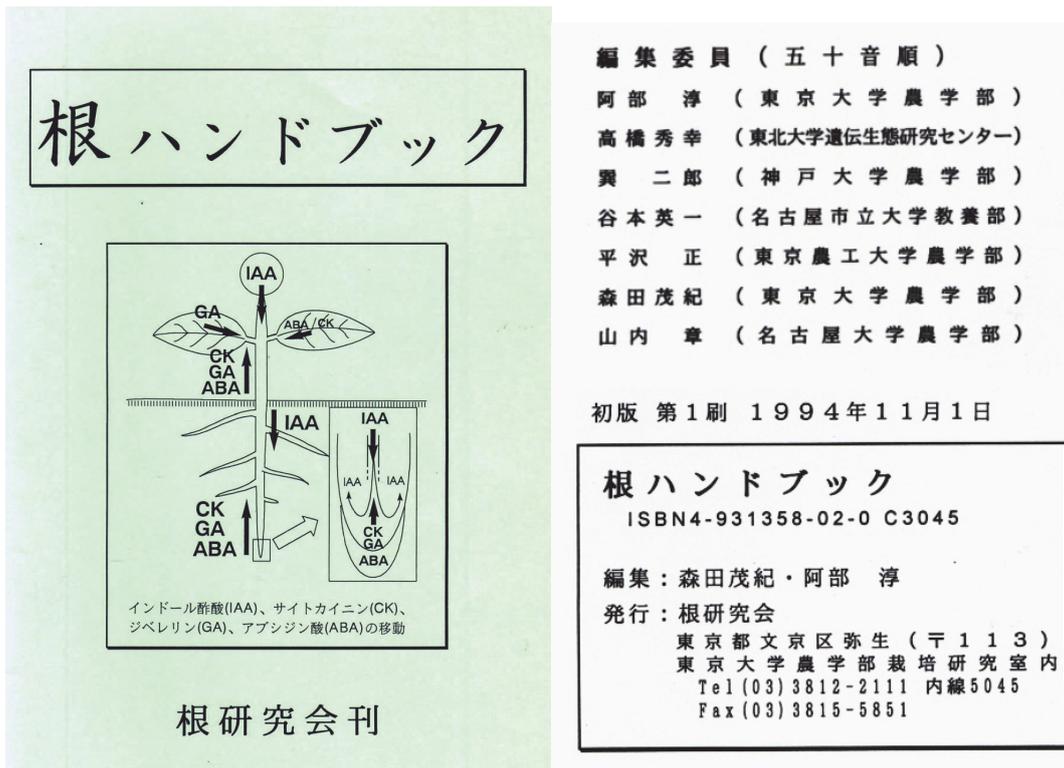
Session C: Organizers and speakers. Drs. Kawano, Pardales and Schwartz are missing.

The 6th Symposium of the International Society of Root Research.
Nov. 13, 2001. @Nagoya Congress Center

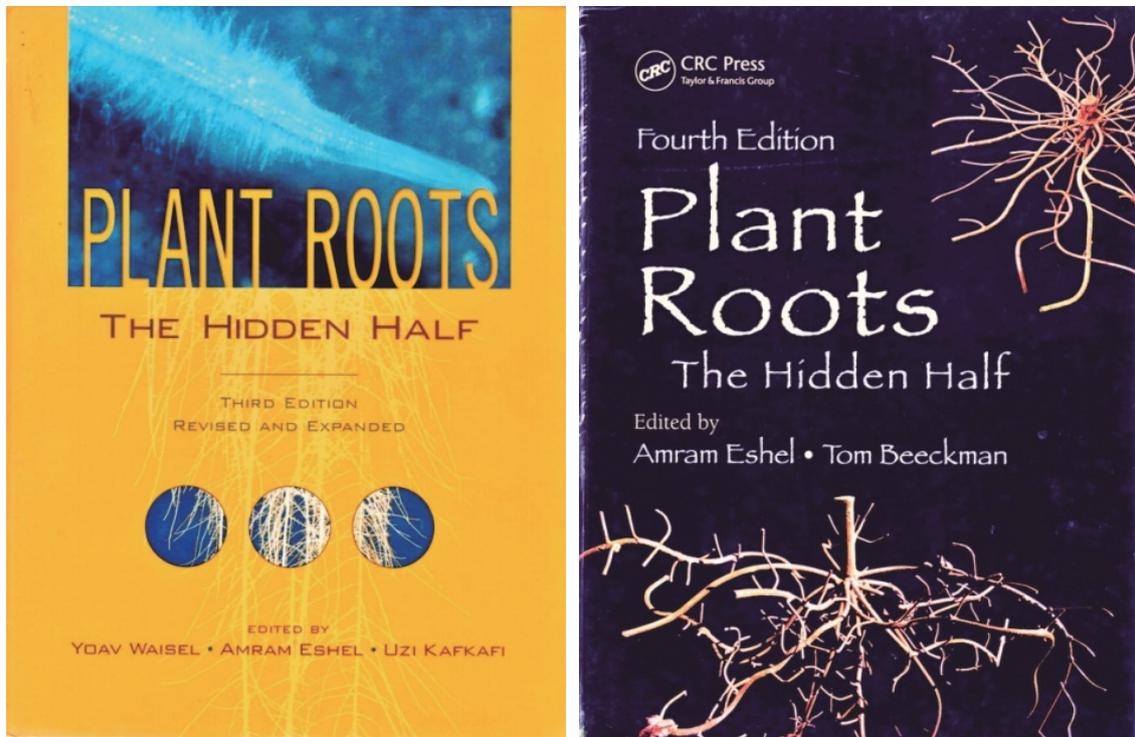
第14図 第6回国際根研究学会シンポジウム2001年(名古屋国際会議場)セッションC。

国際シンポジウムの開催や、スロバキアなどの国際会議への参加によって、海外の根研究者との交流も深まり、大著(ページ数1120, 3kg)、「Plant Roots The Hidden Half」の第三版(第16図左)への改訂に際して、

編者から執筆依頼が届き、「24 Gibberellins」の節を担当した(Tanimoto, 2002)。さらに11年後の改訂(第四版)(第16図右)では、平野恒氏(当時、名古屋大学生物機能開発センター)の協力を得て、新しい知見を加え



第 15 図 根ハンドブックの表紙 (左) と編集委員・編者・発行所を記した奥付 (右)。



第 16 図 Plant Roots The Hidden Half 第三版 (左) と第四版 (右) の表紙。

て「13 Role of gibberellins in root growth」を執筆した (Tanimoto and Hirano, 2013). 平野氏が所属していた名古屋大学生物機能開発センターでは、松岡信教授と

上口 (田中) 美弥子助教授のグループが、ジベレリン受容体などの分子生物学研究をイネやシロイヌナズナなどを用いて展開されていた。植物分子生物学の「モ



第17図 根研のロゴ(左)とロゴ入りのグッズ(右).

デル植物」と言われた「シロイヌナズナ」の根がジベレリンにどう反応するのか興味を持っていたところ、65歳定年の1年前に松岡氏と上口(田中)氏のお誘いで研究グループに参加させて頂き、定年退職後もジベレリン受容体遺伝子の各種変異体を用いた根のジベレリン応答研究を進めることができた(Yoshida et al., 2018). 紙面を借りて厚く御礼を申し上げたい。

根研グッズの製作・販売

長期にわたって事務局を支えて下さった阿部氏らのご努力下、根研ロゴ(第17図)が作成され、ロゴマーク入りのグッズの販売・頒布が自由化された。さらに、年2回の研究集会には、製作されたTシャツやマウスパッド、絵はがきなどのグッズが運び込まれて販売された。第17図(右)の白いTシャツは、10年以上経た今もテニスやジョギングで活躍している。ロゴマーク入りのマグカップは、2019年名古屋大学で開かれた第50回記念集会で頒布されたもので、これも日々愛用している。ついでに、下敷きになっている緑のシャツは、1998年根研究学会学術功労賞の副賞として頂いたもので、これも大変着心地が良く、2019年の第50回名古屋記念集会にはこれを着て参加した。このようなグッズの製作や頒布は、学会の特徴として続くことを願っている。

おわりに

はなはだ個人的な体験ばかりを書き綴ってきたが、これらの活動が根研の役に立てたかどうかは疑わしい。しかし、根研が私の研究教育の視野を広げ、発展させてくれたことは間違いない!

小規模の研究集会やシンポジウムは、研究者間の接触を密にしてくれる。スロバキアシンポや根研集会での私の体験は、このことを実証したように思う。今後も少人数集会の利点を生かした学会運営を期待したい。

謝辞

2002年から2005年までの会長在任中、丁度、研究の補助をお願いしていたYさんが、根研の名簿管理や会計などの事務を重ねて担って下さいました。また、事務の運営については阿部淳氏(当時、東京大学)に全面的にお世話になりました。山内氏からの引き継ぎに際しては、山内研の皆様大変お世話になりました。皆様に、紙面を借りてお礼を申し上げます。

引用文献

- Fan, L., Linker, R., Gepstein, S., Tanimoto, E., Yamamoto, R., Neumann, P. M. 2006. Progressive inhibition by water deficit of cell wall extensibility and growth along the elongation zone of maize roots is related to increased lignin metabolism and progressive stelar accumulation of wall phenolics. *Plant Physiol.* 140: 603-612.
- Hattori, T., Inanaga, S., Tanimoto, E., Lux, A., Luxova, M., Sugimoto, Y. 2003. Silicon-induced changes in viscoelastic properties of sorghum root cell walls. *Plant Cell Physiol.* 44: 743-749.
- Lux, A., Luxova, M., Abe, J., Tanimoto, E., Hattori, T., Inanaga, S. 2003. The dynamics of silicon deposition in the sorghum root endodermis. *New Phytol.* 158: 437-441.
- 森田茂紀 2002. 第6回国際根研究学会を主催して。農業および園芸 77. 262-266.
- 森田茂紀 2023. 根研究会設立の趣旨—できるだけ手を抜いて、会員の役に立つことを—。根の研究 32: 43-53.
- Tanimoto, E. 1985. Axial distribution of glycosidases in relation to cellular growth and ageing in *Pisum sativum* root. *J. Exp. Bot.* 36: 1267-1274.
- Tanimoto, E. 1993. Interaction of gibberellins and ancymidol on the growth and cell-wall components of pea (*Pisum sativum* L.) roots. The 4th International Symposium on Growth and Function of Roots 1993, p. 103, Stara Lesna, Slovakia.
- Tanimoto, E. 2002. Gibberellins. In Waisel, Y., Eshel, A., Kafkafi, U. eds., *Plant Roots—The Hidden Half—* Third Edition. Marcel Dekker, Inc. pp. 405-416.

- Tanimoto, E., Hirano, K. 2013. Role of gibberellins in root growth. In Eshel, A., Beeckman, T. eds., *Plant Roots—The Hidden Half—Fourth Edition*. CRC Press. pp. 13_1-13_14.
- Tanimoto, E., Pilet, P. -E. 1978. α - and β -Glycosidases in maize roots. *Planta* 138: 119-122.
- 谷本英一, 松尾喜義, 本間知夫, LUX Alexander, LUXOVA Miroslava. 1999. 根の生長と細胞壁粘弾性変化: チャの根の場合. *根の研究* 8: 162-163.
- 山内章. 2023. 「根の研究」と根研究会. *根の研究* 32: 79-82.
- Yoshida, H., Tanimoto, E., Hirai, T., Miyanoiri, Y., Mitani, R., Kawamura, M., Takeda, M., Takehara, S., Hirano, K., Kainosho, M., Akagi, T., Matsuoka, M., Ueguchi-Tanaka, M. 2018. Evolution and diversification of the plant gibberellin receptor GID1. *PNAS* 115: E7844-E7853.

発足 15 ～ 16 年目の根研究会を振り返って

小柳敦史

農機機構中日本農業研究センター転換畑研究領域 再雇用職員

私が根研究会（現在の根研究学会）の会長だったのは 2006 年から 2007 年の 2 年間で、1992 年に研究会が発足してから 15 ～ 16 年目のことである。そもそもの研究会への参画のきっかけは、森田茂紀先生が根研究会の設立を考えていた 1991 年（森田，2023）当時、私が「つくば作物根セミナー」の世話役をしていたことと関係する。この「つくば作物根セミナー」は 1989 年 1 月に茨城県にある筑波農林研究団地の根に興味を持つ研究員が集まって始まった。世話役は農林水産省農業研究センター（当時）の寺島一男さんから私に代わり、その後、辻博之さんに引き継いだ（辻，1998）。このことが縁で、根研究会が発足する少し前に森田茂紀先生からお誘いをいただいた。

それから十数年たって、私に「会長に立候補しませんか？」というお話をいただいたときは、学会設立の発起人のひとりとして会の運営に責任を感じてはいたが、リーダーシップをとるのが苦手なほうなので二の足を踏んだ。ところが、森田茂紀先生と一緒に根研究会の発足に尽力された阿部淳先生が事務局長をしてくださるということを知り、安心して会長を引きうけることにした。副会長は唐原一郎先生と中野有加さんをお願いした。

根研究会は森田会長（森田，2023）の時に軌道に乗る、山内会長（山内，2023）の時に日本学術会議の登録団体になるとともに国際根研究学会シンポジウムを成功させ、谷本会長（谷本，2002）の時には会員がそれまでの農学中心から理学や工学の分野にも拡大して順調に運営されていた。会費は今とほぼ同じ 3 千円になっていたが、会の活動が活発だったため一般会計は赤字で、前年度から繰り越してきた特別会計で赤字を補てんしていた。このため、私が会長を引き受ける時に心配したのはこの財政問題だけだった。

会員 500 名

この文章を書くにあたって、当時の私の手帳を見返してみると「根研究会への入会を誘う葉書を出した」という記載があった。その頃から根研究会は、現在も学会ホームページで紹介している「根研究会の絵はがき」を作って会員に売っていた。おそらく私はそれを

買い自分で切手を貼って出したのだろう。当時はまだ根研究会の知名度は今ほど高くなく、分野によってはほとんど知られていなかったもので、春や秋に行われるさまざまな学会で根に関する発表があったことを知ると、その人に葉書を出して「根研究会というのがありますよ」とお知らせした。もちろん私だけではなく、多くの会員が周囲の人達に根研究会のことを宣伝した。その甲斐もあってか、会員数は山内会長から谷本会長の時期にかけて一時的に 500 名を超えたが（谷本，2002）、その後は、お一人誘うとお二人やめるといった具合となり、少しずつ会員は減っていった。現在の会員数は 300 名弱のようであるが、ごく最近では会員数が下げ止まり、微増に転じているらしい。歴代の役員 の努力により、会の活動の意義を理解された会員が継続し、さらに新たな入会者が生まれていることは幸いである。

「Plant Root」誌の創刊

私の会長着任前後に「根研究会で国際誌を出そう」という機運が盛り上がり、2006 年に有志の若手の皆さんが中心となって準備委員会が立ち上がった（唐原，2007）。そして、2007 年に根研究会が発信する国際的なオンラインジャーナル「Plant Root」が創刊された（第 1 回，Karahara，2007）。それまでは会員が研究した成果を発表する場としては、日本語の「根の研究」があるだけで、英語で論文発表する場はなかった。このため、会員の英語の論文はさまざまな国際誌に投稿され、いわば根研究会の会員の研究成果が散逸してしまうような状態にあった。創刊の計画を伺った時、私は心配していた財政負担が少ないことから「いいですね。ぜひ国際誌を出しましょう」と言ったのだが、その後、編集委員長や編集委員の方々は大変なご苦勞をされたと聞いた。というのは、「Plant Root」は根研究会の会員以外からの投稿も歓迎し、掲載料が無料だったこともあり、知名度が上がるにつれて海外からの投稿が増えると同時に、言い方は悪いが粗雑な投稿も増えてしまった。「Plant Root」の編集委員と査読者は、「厳しさの中にも論文の質を高め、最後まで面倒をみよう」という意気込み（Plant Root 編集部，2007）」で論文審

The "Plant Root" has been launched

Ichirou Karahara

Department of Biology, Faculty of Science, University of Toyama, 3190 Gofuku, Toyama 930-8555, Japan. E-mail: karahara@sci.u-toyama.ac.jp, Fax: + 81-76-445-6549

Received on January 20, 2007; Accepted on March 1, 2007

The "Plant Root" is taking off. It is fitting that we should commemorate the birth of our new journal for a moment. It is certainly an honor to have a chance to send a message for the inaugural issue. Here I would like to describe the background of launching this journal and our hopes for its destination. I think it is good to capture and write down the atmosphere now, I believe, that is shared by the people who are involved in the launching of this journal.

and organized the editorial board in September 2006 with the help of root research experts. Of course, we still had so many technical details to discuss, like how to handle manuscripts, how to connect the journal to the scientific information network on the internet. These kinds of activities and decisions formed the foundation of the journal. Members of the preparatory committee remained on the Editorial Board and formed the steering committee to discuss these issues



第1図 2007年に創刊した「Plant Root」



第2図 2006年に誕生した「根の研究」電子アーカイブ

査を続けたが、これを続けることは大変なことで、あるとき編集委員の方々が論文の審査で疲弊していると聞いたことがあった。私としては、ずっと関係者に負担を強いて申し訳ないと思いながらも、どうすることもできずにいた。ところが、私の心配をよそに「Plant Root」は順調に発行を続け、2023年までの17年間に合計125本もの英語論文を世に送り出している。

「Plant Root」は長らく根研究会が運営費を出してきたが、財政的に「自己運転」させるために、2023年に著者から掲載料を徴収することが決まった。その副産物としてはあるが、海外や非会員の著者にも投稿時にそれなりの覚悟が求められるようになり、いわゆる粗雑な原稿が少なくなり、長年の懸案だった編集委員会への過剰な負担が今後は少なくなるだろうと思い、私はようやく胸をなでおろした。

「根の研究」電子アーカイブの誕生

2006年12月、阿部事務局長が中心になって「根の研究」の電子アーカイブを誕生させた(第2図、根研

究会事務局, 2006)。「根の研究」の1992年の第1巻創刊号から2007年の第16巻4号までの全ての記事をイメージスキャナーでパソコンに取り込んで、画像PDF化したものをホームページで公開したのだ。現在もこの期間の「根の研究」の論文以外の記事はこの電子アーカイブで読むことができる。この電子アーカイブに入るには、根研究学会のホームページの「広告: バナーをクリック」の中にある「根の研究 Root Research online version」と書いてある緑色のマークをクリックするか、または、根研究学会のホームページから会誌「根の研究」、会誌ダウンロード、「根の研究アーカイブ」と進み、論文以外の記事も読む、『根の研究』年代別一覧と進むと読むことができる。

私の会長任期中に「根の研究」(犬飼義明編集委員長)は第15巻1号から第16巻4号までの計8号が発行された。表紙はきれいな絵柄のカラー印刷で、デザインを会員から募集していた(第3図、犬飼, 2007)。

一方で、その頃の根研究会は会員数が多くなり、発足当初の「顔の見える関係」が少し難しくなりはじめた。たとえば当初、根研究会では「根についてこんな研究をしているのですが、うまくいきません」とか、「根を観察する時にこんな失敗をしてしまいました」とか、「今後の研究では、こんなアイデアがありますが、どう思いますか?」というようなことを話し合うのが楽しかったのが、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



第3図 2006年の「根の研究」の表紙デザイン

して「会長の『楽しいかな』根の研究」を連載した。エッセイでは、私が根の研究に取り組み始めたきっかけ（残念ながら消去法によるものだった）や、根の研究に行き詰って研究所の廊下をフラフラ歩いていたこと、大発見だと思ったことが実は50年も前にしっかり報告されていてがっかりしたことなどを書いて楽しかった。ただ、最後のエッセイ（小柳, 2007）の終わりに「つづく」と書いたのに、結末を書けずに今日に至ってしまったことが少し気になっていた。そこで、この場を借りて最終号で書きたかったことを書いてみたい。

その完結編ではこんなことを書こうと思っていた。「根の研究は大事ですが、根だけにとらわれることなく地上部や農作物としての収穫物にも注意を払って研究を進める必要があると思います」と私にアドバイスしてくれた北條良夫さんはすでに鬼籍に入りました。これからの根研究会は、それにとどまらず、根が環境に与える影響の研究とか、子供たちの素朴な疑問に答える研究を行い、誰にでも開かれた会になるとよいと思います（おわり）。こんなことを書きたかったのだが、最近の根研究学会の活動を見ると、私が書かなくても、これらのことはすでに実現されているようである。

根研究集会

2006年から2007年にかけて4回の根研究集会が行

われた。このうち、拓殖大学八王子キャンパス（仁木輝緒実行委員長）では、懇親会のあとで「バトル討論会」が行われ、主に院生の研究紹介・研究の成果、悩みなどの話題が提供され、夜遅くまで大変盛り上がった（山影, 2006）。拓殖大学では2002年にも根研究集会が行われているので、その時の記憶かもしれないが、会場に講師が使う張扇のようなものが用意されていて、参加者が机をバンバンたたきながら日ごろの悩みや言いたいことを大声で叫んでいた。富山大学理学部（唐原一郎実行委員長）では、海の幸が並ぶ懇親会の机の上にポスターを広げて議論する姿が随所で見られた（諸橋, 2006）。福岡県久留米市にある農研機構九州沖縄農業研究センターで行われた研究集会（山下正隆実行委員長）では、初めての参加者が「もっと研究をがんばろう」と思うような温かい議論が行われ（出口, 2007）、根の研究が農業の現場で生産性の向上に役立つような期待を感じさせる研究会になった（木富, 2007）。また、福島市の福島テルサで行われた研究集会（村上敏文実行委員長）には66名の研究者が参加し（池永, 2007）、気取らなさと研究に対するひたむきな姿勢（増田, 2007）で活発に議論したことが印象深かった。思い返すと、その頃の根研究集会は同好会の集まりのような楽しさがあった。そういえば、根研究会が発足して間がない頃に「楽しいところで研究集会をやりたいね」という意見が出たので、ディズニーランドのオフィシャルホテルの会議室の使用料を電話で問い合わせたことがある。しかし、百万円くらいかかるとのことで、結婚式の会場を借りるような値段で研究集会を行うことはできず断念したのを思い出した。

なんで根っこをしらべるの？

根は土の中であって見えないので、研究するのは大変だ。土を掘り取って、その中から根を洗い出し、来る日も来る日も根とゴミを分ける作業をしていると心が重くなる。だから研究している人が少なくて分かっていないことも多い。こんなに苦労して、どうして根なんか調べるのだろうか？と自問自答することもある。これについて、根研究学会が編集に協力している子供向けの本「根っこのふしぎな世界 (1) 根っこってなんだろう」（中野・小泉, 2023）では、マンガの中で小学生くらいの女の子が「なんで根っこを調べるの」と聞いている。すると根研究学会の会員らしき男の人が「草や木の成長に根っこがたいせつだからだよ」と答えている。私は「なるほど、そうだったのか」と改めて思った。

ただ、他の学会で研究結果を発表する時、根の研究に植物の地上部の研究と同じような精度を求められると、それにはなかなか応えることができず口をつぐん

でしまう。それではだめだと思いついて何か言うと、実は間違っていたり、再現性が低かったりする。このような研究上の困難を共有し、理解しあい、知恵を出し合って前に進んで行くのが根研究学会だと思ふ。

根は遺伝的に決まっている部分も多いが、環境によって変化しやすい。昔、コムギの多収研究のために水耕栽培したことがあるが、ガラス温室の中で培養液に通気しながらコムギを育てると温度や養分の条件が良いので地上部の重さや子実の収量が畑のコムギの2～3倍に大きくなった。ところが、根の量はもっと変化が大きくて、畑の10倍以上に多くなっていて驚いた。いっぽう、湿害の研究をしていた時に、過湿な土壌で発生することがある硫化水素が湿害の原因のひとつだということで、湿害を再現させたくて硫黄を含む温泉の水でコムギを育てたことがある。すると根は基部の2～3cmを残して全部枯れてしまったが、地上部は黄色くなるどころか青々と元気よく育ってしまった。このことから、根がほとんどなくても、ミネラルが豊富な水を与えればコムギはよく育つことを知った。また、施肥の研究をしている時に、畑で窒素肥料を与えずにコムギを育てたら、植物体は小さくなったが根の量は比較的多いまだだった。それはまるで植物ができるだけ根を減らさずに土の中から窒素を得ようとしているかのようにみえた。植物が環境の変化に遭遇すると、まず根が変化して地上部の生育が不都合にならないように支えて行くのではないだろうか。このような根の遺伝的な性質や環境に対する反応は、根研究学会の会員が当初から研究している重要なテーマであるが、まだまだ分かってないことも多い。環境問題への対応や子供達の素朴な疑問に答える姿勢を持ちながら、今後も最先端の研究が進んで行くことを期待している。

謝辞

東海大学農学部農学科作物学研究室阿部淳教授、農研機構畜産研究部門畜産飼料作研究領域飼料作物育種グループ間野吉郎グループ長および農研機構中日本農業研究センター転換畑研究領域吉永悟志研究領域長にご校閲いただきました。心より感謝申し上げます。

引用文献

- 出口崇 2007. 第 26 回根研究集會に参加して. 根の研究 16: 59.
池永幸子 2007. 第 27 回根研究集會に参加して. 根の研究 16: 161.
犬飼義明 2007. “根の研究” 表紙デザイン大・大・大募集!! . 根の研究 16: 209.
Karahara, I. 2007. The “Plant Root” has been launched. Plant Root 1: 1-2.
唐原一郎 2007. “Plant Root” にぜひご投稿を!. 根の研究 16: 17.
木富悠花 2007. 第 26 回根研究集會に参加して. 根の研究 16: 59.
増田さやか 2007. 第 27 回根研究集會に参加して. 根の研究 16: 162.
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—. 根の研究 32: 43-53.
諸橋恵太 2006. 第 25 回根研究集會に参加して. 根の研究 15: 164.
中野明正, 小泉光久 2023. 根っこのふしぎな世界 (1) 根っこってなんだろう. 文研出版. p. 17.
根研究会事務局 2006. 『根の研究』電子アーカイブ誕生のお知らせ. 根の研究 15: 206.
小柳敦史 2007. 巻末エッセイ (6) 会長の「楽しいかな」根の研究. 根の研究 16: 141.
Plant Root 編集部 2007. Plant Root 編集部より. 根の研究 16: 97.
谷本英一 2002. 会員の皆様へ—新任のご挨拶—. 根の研究 11: 2.
辻博之 1998. 10 年目を迎えた「つくば作物根セミナー」. 根の研究 7: 45.
山影茜 2006. 第 24 回根研究集會に参加して. 根の研究 15: 65.
山内章 2023. 「根の研究」と根研究会. 根の研究 32: 79-82.

「根っこのふしぎな世界」全4巻刊行

中野明正

千葉大学 大学院 園芸学研究院

「根っこのふしぎな世界」全4巻が根研究学会の協力を得て、2024年1月29日に文研出版から刊行されました。誰でもその存在を知っている「植物の根」について、その生態や役割、人々の生活との関わりなどについて、小中学生にもわかりやすく解説しています。

第1巻は、根っこの形や生長、いろいろな植物の根について、その基本的なところを、「草と木の根っこはどこがちがうの?」「根っこはどうやって養分を吸収するの?」などの質問に答える形で解説しています。

第2巻は、私たちの毎日の食生活に、深くかかわっている根っこについて、「落花生は根っこじゃないの?」「あまいミカンの根っこのひみつは?」など、その利用方法やおいしい農産物につながるひみつを解説しています。

第3巻は、災害から私たちを守ってくれる根のはたらきや、地球環境の保全に重要な働きをしている根に

ついて、「津波で流されなかったクロマツのひみつは?」「風でたおれた木の根っこはどうなっているの?」などの興味深い質問に答えています。

第4巻は、根っこと文化そして、今後人類が生活する可能性のある宇宙空間について、「根っこの漢字の成り立ちは?」「宇宙でどう根が伸びるのか?」などの質問に答えています。そして、巻末の様々な種類の根っこを収録した「根っこの図鑑」は多様な根を俯瞰するのに便利です。

主に小中学生を対象にして企画しましたが、内容は高度であり、根の研究の次世代をになう、若い研究者が読者からも出てほしいと願っています。

なお、ほとんどの原稿料は、根研究学会の運営に寄付していただきました。執筆へのご協力およびご寄付をいただきました諸先生方に、この場をかりて御礼を申し上げます。



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

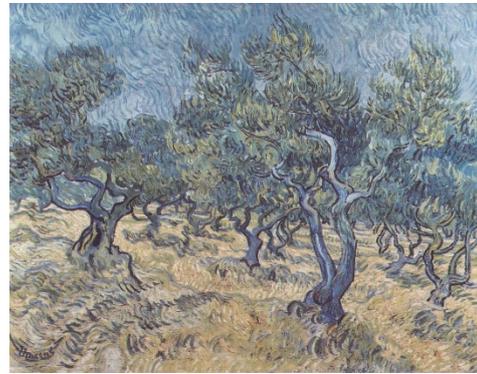
23. 美しい青い木の根

フィンセント・ファン・ゴッホ (1853-1890) の最後の作品は根をモチーフにしたものである (菜根譚 22 参照)。ゴッホが何を根に見ていたのかは気になるところである。ゴッホの生涯を描いた作品は多いが、その中でも最近の映画『永遠の門 ゴッホの見た未来』(2018) ではゴッホ役のウィレム・デフォーが好演し、アカデミー賞最優秀主演男優賞にノミネートされている。ゴッホのひととなりが出てくる出色の作品である。映画ファンなら御存知かもしれないが、ウィレム・デフォーは、スパイダーマンの宿敵グリーンゴブリン役の俳優である。「悪人面」を活かした「悪役」が多いようであるが、ゴッホの朴訥とした、そして絵画に対してはまっすぐで狂人的な役どころ、当たり役である。

この映画の中では、根に関する重要なシーンがある。ゴッホはヨーロッパ各地を写生の旅に出て、イーゼルを立てて日長一日自然と対峙する。フランスのオリーブ園で、その日も創作に勤しんでいたゴッホに、女性の教師が引率した 10 人ぐらいの小学生達が遭遇する。教師の抑止を振り切り生徒がゴッホの周を取り囲む。ゴッホは集中して倒れた木の根を描写している。生徒が「何を描いているのか？」を問うとゴッホは「根だ “racine (フランス語)” と答える。生徒の「きれいだと思うから？」の問いには「そうだ」と答える。ここから面白い。「根だけを描くのか？」と生徒は問い、「学校では、葉っぱや花を描く」と生徒らは続ける。それからゴッホの根に難癖をつけ始める。ゴッホの「根」は「蛇」だの「ウナギ」だの「ミミズ」だの…。先生も

生徒の言葉に乗っかりゴッホを変人扱いし、挙句に「根を描いて芸術家気取りだ!」と言い放つ。生徒が作品に触ったことがきっかけとなり、ゴッホが激怒し生徒たちを追い払う。

当時の社会からはまったく理解されないゴッホが描かれた象徴的なシーンであり、当時から「根を美しい」とみるのは変人の域なのかもしれないとも思った。ゴッホの絶筆「木の根」(1890 年作) と同様に、このシーンに現れる根っこも、また青く太い。作品「オリーブの木」(1889 年作) を見るにつけ、ゴッホには茶色が青く見えていたのか？ そして青く見えるのには何か理由があったのかもしれないと思う。子供たちや先生の意見もうなずける面もある。私も生徒の一人なら、「へたくそな絵!、変な色!」とやじっていたらろう。しかし今は私もゴッホの根を美しいと思える。ゴッホは絵画の自由さそして多様性を今に教えてくれる。



ゴッホ「オリーブの木」(1889 年)

第 59 回根研究集会のお知らせ (59th Biannual Meeting of JSRR)

第 59 回根研究集会を 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する予定です。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を行います。また、「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~ (仮)」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を、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) 寺本翔太博士 (農研機構) を講師にお迎えして開催します。

2024 年 3 月には福井まで北陸新幹線が延伸します。米ワシントン・ポスト紙が「人混みを避けて、2024 年に旅すべき場所」に選んだ福井には曹洞宗の大本山「永平寺」や世界三大恐竜博物館の 1 つ福井県立恐竜博物館があります。皆さまお誘い合わせのうえ、ふるってご参加ください。ご参加をお待ちしています。

<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

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/>

<参加費 Registration fee>

一般会員	General members	3,000 円	¥3,000
一般非会員	General non-members	5,000 円	¥5,000
学生会員	Student members	無料	Free
学生非会員	Student non-members	4,000 円	¥4,000

※参加費は不課税です。

※お申し込み後に、参加費お支払い等について、ご案内いたします。

After registration, the payment of the registration fee will be informed.

※非会員の方で、会員として参加される場合には、参加申込み前に学会入会手続きを済ませてください。

<プログラム (予定) Tentative program>

7月20日 (土)

- 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
Prof. Lukas Schreiber (University of Bonn, Germany)
14 : 50-15 : 50 ポスター発表前半 (12 課題) Poster session
16 : 00-17 : 20 口頭発表 (4 課題) Oral presentation
17 : 30-18 : 15 総会 General meeting
18 : 30- 懇親会 Conference dinner

7月21日 (日)

- 08 : 30-09 : 00 受付 Registration
09 : 00-10 : 20 口頭発表 (4 課題) Oral presentation
10 : 30-11 : 30 ポスター発表 後半 (12 課題) Poster session

(昼休憩)

- 13 : 00-14 : 20 口頭発表 (4 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～ (仮)」

- 神山 拓也 (宇都宮大学) | 根の洗い出し
檀浦 正子 (京都大学) | 画像取得
田島 亮介 (東北大学) | 画像解析
寺本 翔太 (農研機構) | 土の中にある根の画像解析

- 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)
17 : 25-17 : 30 閉会の挨拶 Closing remarks
19:00- 懇親会 Farewell party

【詳細は、根研究学会 HP (<http://www.jsrr.jp>) に更新します】

Information will be updated in <<http://www.jsrr.jp>>.

<参加または発表の申込み Registration>

- 発表申込み締切日 (タイトルの申請) : 2024 年 6 月 13 日 (木) Registration deadline for presenters (submission of the title): June 13, 2024 (Thu.)
- 参加申し込み締切日 : 2024 年 7 月 3 日 (水) Registration deadline for participants: July 3, 2024 (Wed.)
- 講演要旨提出の締切日 : 2024 年 7 月 3 日 (水) Registration deadline for participants: July 3, 2024 (Wed.)

参加・研究発表のお申し込みは下記の「第 59 回根研究集会参加申込書」に必要な事項を記入し、電子メールにて受付担当の西嶋遼 (福井県立大学, mishiji@fpu.ac.jp)宛てに、お送りください。メールの件名は 59thJSRR としてください。なお、プログラム編成の都合により発表形式がご希望にそえない場合もあることをご了

承ください。

Please send below information by e-mail. Title '59thJSRR' would be good.

=====
第 59 回根研究集会参加申込書 (Registration Form for the 59th JSRR)

1. 氏名 (Name) :

2. 所属先および住所, e-mail アドレス (Affiliation and e-mail address) :

3. 発表の有無 (Only participation or Oral/Poster presentation) :

4. 懇親会 [20 日 (土曜日)] 参加希望の有無 (Participate Banquets Yes/No) :

7 月 20 日 (土) 学生: 3000 円 | 一般: 5000 円 (福井駅前にて計画中) Conference dinner

※懇親会費は不課税です。

5. 懇親会 [21 日 (日曜日)] 参加希望の有無 (Participate Banquets Yes/No) :

7 月 21 日 (日) 学生: 3000 円 | 一般: 5000 円 (福井駅前にて計画中) Farewell party

※懇親会費は不課税です。

6. 発表「有」の場合

表 題 (Title) :

著者名 (Authors) :

発表形式 (Presentation format) : 口頭発表(Oral presentation) or ポスター発表 (Poster presentation)

根研究学会優秀発表賞へのエントリー

(Do you entry into The JSRR Excellent Presentation Award? Yes or No)

口頭発表を希望される場合

口頭発表の講演数には制限があるため, 申込多数の場合はポスター発表への変更をお願いすることがありますが, 変更は可能でしょうか (Since there is a limit to the number of oral presentations, we may ask to change to poster presentations if there are too many applications. Is it possible or acceptable?) :

可・不可 (いずれかを選んで下さい) (Yes or No)

7. 会員の確認 (Membership) :

一般会員 (General members), 学生会員 (Student members), 非会員 (Non-members)

=====
<要旨の書き方 Style of abstract>

*根研究学会ホームページの要旨様式をダウンロードしてご利用ください。

1. A4 版 1 頁以内. 上 3.5 cm 下 3.5 cm 左右 2.5 cm ずつの余白を取る.

One page of A4 size paper with margins (top: 3.5 cm, bottom: 3.5cm, right and left 2.5 cm for each).

2. 冒頭にタイトル・講演者名・所属・連絡先（電子メールアドレス）を記載した後、1行あけて本文を書く。

Type the title, author(s), affiliation, email address and then abstract sentences.

3. タイトル：MSP ゴシックの太字・12ポイント・センタリング（中央寄せ）。

Use 12-point Bold Arial font with centering for the title.

4. 講演者名・所属・連絡先：MSP 明朝・11ポイント・センタリング。連絡先は括弧に入れる。

Use 11-point Times New Roman font, centering for the name(s) of author(s), affiliation and corresponding email.

5. 本文：MSP 明朝（英数字半角は Times New Roman）・10ポイント。図表も含めて記載可能。

Insert a break line under the affiliation, and then type the abstract sentences with 10-point Times New Roman font.

<第59回根研究集会実行委員>

実行委員長: 塩野克宏 (福井県立大学生物資源学部)

庶務担当: 角田智詞 (福井県立大学生物資源学部)

受付担当: 西嶋遼 (福井県立大学生物資源学部)

Chairman: Katsuhiko Shiono (Department of Bioscience and Biotechnology, Fukui Prefectural University)

General affairs: Tomonori Tsunoda (Department of Bioscience and Biotechnology, Fukui Prefectural University)

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

国際植物表現型シンポジウム—PhenoVeg 2023 (台湾・台南市) に参加して Attending the International Plant Phenotyping Symposium—PhenoVeg 2023 in Tainan, Taiwan

Via Ann Candelaria Marcelo

名古屋大学大学院生命農学研究科

From September 26-27, 2023, the World Vegetable Center (WorldVeg) headquarters hosted the International Plant Phenotyping Symposium—PhenoVeg 2023. The symposium was a focal point for advancements in phenotyping technologies and their implications for plant breeding.

On the 1st day of the symposium, presenters navigated the status and challenges of using sensors, cameras, and automation, complementing their in-silico aspects. The morning session highlighted the need to balance throughput, information, and data-sharing tradeoffs. The afternoon session explored big data, deep learning, and plant modeling, which addressed phenotyping bottlenecks by refining automation strategies by categorizing and identifying regions of interest through machine learning and artificial intelligence. Presentations on the final day underscored the efficiency of high-throughput plant phenotyping under abiotic stresses by the synergistic use of automated tools, digital image processing, and analysis for plant modeling.

A total of 20 oral presentations and 10 posters sparked in-depth discussions. Since most of the research dealt with shoot phenotyping, the participants were enthralled with the poster dedicated to roots. Participants expressed interest in the dynamic, non-destructive processing of roots and nuances of root system architecture under stress. Finally, the symposium concluded with a tour of a field trial as monitored by Phenospex 3D laser scanners and a demonstration of their gardens boasting over 200 vegetable species.

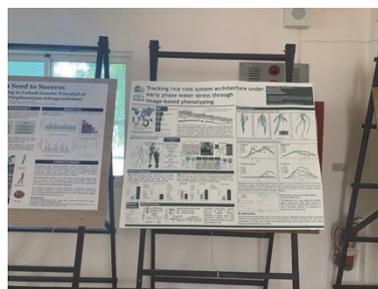
Throughout the symposium, I gained valuable insights on other non-destructive methods across different plants, potential avenues for enhancing data analysis protocols, and new insights for further exploration of stress phenotyping.

I extend my gratitude for the support and funding provided by the JSRR (Karizumi) Young Researcher Travel Award, without which attending this event would not have

been possible. The symposium fostered extensive interaction across a multi-disciplinary approach distinct from traditional conferences, making the event a truly enriching experience.



Group photo of symposium participants in the facade of the World Vegetable Center



Poster of the JSRR (Karizumi) Young Researcher Travel Award recipient



Field tour of Phenospex 3D field scanner

* 連絡先 〒464-8601 名古屋市千種区不老町
E-mail: marcelo.via.ann.candelaria.j7@s.mail.nagoya-u.ac.jp

公 示

根研究学会会則

(2021年6月総則改定・2022年1月附則改定)

総 則

第1条 本会は、根研究学会（英語名称は Japanese Society for Root Research, JSRR）と称する。本会は、1992年1月1日に根研究会として設立され、2013年1月1日より根研究学会と改称する。

第2条 本会は、植物の根（その他の地下器官を含む、以下同様）およびこれを取り巻く環境に関する学術を発展させるとともに、同学の士の親睦を深めることを目的とする。

第3条 本会は、第2条で規定した目的を達成するために、つぎの事業を行なう。

1. 研究集会・シンポジウムその他の会合の開催
2. 会誌「根の研究」及び国際誌「Plant Root」の刊行
3. 根研究学会賞の授与
4. 「名誉フェロー」称号の授与
5. 国際交流の推進
6. その他、本会の目的を達成するために必要な事業

第4条 本会の所在地は、事務局の所在地とし、附則においてこれを定める。

会員

第5条 本会の会員は、個人会員および団体会員とする。個人会員は本会の趣旨に賛同して入会した個人、団体会員は同じく本会の趣旨に賛同して入会した団体または機関とする。

第6条 本会に入会しようとする場合は、氏名、所属、連絡先、その他の必要事項を明記した文書に、会費を添えて本会に申し込むものとする。また、本会を退会しようとする場合は、その旨を文書で本会に連絡しなければならない。ここでいう文書は電子媒体も認める。

第7条 会員は、下記の年会費を前納しなければならない。2016年度以降の年会費は、1. 電子版会誌のみ購読の個人会員 3,000円、2. 電子版と冊子版会誌購読の個人会員 4,000円、3. 冊子版会誌のみ購読の団体会員 9,000円。ただし、1月をもって年度の始まりとする。長期に渡り会費を滞納した場合は、退会扱いにすることがある。

役員

第8条 本会に、つぎの役員をおく。会長1名、副会長2名、監査1名、評議員数十名、正副事務局長各1名。評議員数は、個人会員数の5%~10%を目安とする。

第9条 会長は、その他の役員と協議しながら会務を統括し、本会を代表する。副会長は会長を補佐し、会長に事故あるときや長期に渡り不在となる場合に、その代理を務める。監査は、会務を監査する。評議員は、重要な会務を審議し、執行する。

第10条 会長は個人会員の中から選出する。選出方法は別にこれを定める。副会長、監査、評議員および正副事務局長は、個人会員の中から会長が委嘱する。

第11条 役員任期は、2年とする。任期途中で役員交代があった場合、後任者の任期は前任者の残余の任期とする。会長、副会長、監査、事務局長、副事務局長の各役職は連続して5年以上は重任できない。

委員会

第12条 第3条で規定した事業を遂行するために、重要な事業については、それぞれ委員（および委員長）をおく。委員（および委員長）は、会長が委嘱する。

会則の施行と改定

第13条 本会の会則は、1992年1月1日より施行され、2022年1月1日より現行の改定版の会則が適用される。

第14条 会則の改定は、本会の総会において審議し、出席者の過半数の賛成をもって行うことができる。

以上

附則

会の所在地

第1条 会の所在地は2014年1月より「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」とする。

会長および事務局長

第2条 2024年度・2025年度の会長と事務局長は以下のとおりである。

会長：大橋 瑞江（おおはし みずえ）

勤務先：兵庫県立大学 環境人間学部

自宅住所：〇〇〇〇

事務局長：陽川 憲（ようかわ けん）

勤務先：北見工業大学 工学部

自宅住所：△△△△

以上

[自宅住所は個人情報保護のため略記してあります]

根研究学会学術賞規定

1. 本会は、会則第3条に基づき、本規定を定める。
2. 本会は、植物の根（その他の地下器官を含む、以下同様）およびこれを取り巻く環境に関する学術の発展に寄与したものに対して根研究学会賞を贈り、これを表彰する。
3. 根研究学会賞としては、根研究学会学術功労賞、根研究学会学術奨励賞、根研究学会学術論文賞、根研究学会学術特別賞、および根研究学会優秀発表賞をおく。根研究学会学術功労賞および根研究学会学術奨励賞は、植物の根およびこれを取り巻く環境に関する学術の発展に寄与した根研究学会会員の研究を対象とする（すでに原著論文として発表されたもので、少なくともその一部が、根研究学会の研究集会・シンポジウムなどの会合、あるいは会誌などで会員に紹介されていること）。根研究学会学術論文賞は、植物の根およびこれを取り巻く環境に関する学術に寄与した根研究学会会員により「根の研究」または「Plant Root」に公表された論文を対象とする。なお発表形態（例えば、原著論文であるか総説であるか）を問わない。根研究学会学術特別賞は、植物の根およびこれを取り巻く環境に関する学術の発展に寄与した応用研究、技術開発、著作活動等の業績を対象とする。会員であるかどうか、また、業績の形態（例えば、出版物かどうか）を問わない。根研究学会優秀発表賞は、根研究学会の研究集会における優秀な口頭発表ならびにポスター発表を対象とする。
4. 根研究学会学術論文賞および根研究学会優秀発表賞を除く各根研究学会賞はいずれも会員もしくは関連分野の研究者などから推薦のあった対象について、根研究学会学術論文賞は「根の研究」または「Plant Root」の編集委員から推薦のあった対象について、いずれも評議員が審議し、その結果を踏まえて、会長および副会長が協議して決定を行なう。ただし、会長および副会長は、根研究学会学術論文賞および根研究学会優秀発表賞を除き、任期中に推薦すること、あるいは推薦されることができない。根研究学会優秀発表賞は研究集会内で決定を行なう。

以上

各賞の業績や候補者年齢などの目安については、会誌『根の研究』第20巻1号を参照するか、事務局にお問い合わせ下さい。

各賞の英語名称は以下の通りです。

根研究学会賞：Academic Awards of Japanese Society for Root Research

学術功労賞：The JSRR Award for Excellent Achievement in Root Research

学術特別賞：The JSRR Special Prize for Applied Root Research

学術論文賞：The JSRR Excellent Paper Prize

学術奨励賞：The JSRR Young Investigator Award

優秀発表賞：The JSRR Excellent Presentation Award

『根の研究』
投稿規定

(2024年3月改定)

1. 本誌は根に関する「原著論文」や「短報」のほか、新しい実験・調査技術を紹介する「技術ノート」、ご自身の研究を中心に紹介する「ミニレビュー」、特定のテーマに関する「総説」、学生等初心者を対象とした実験手法の開発・工夫を紹介する「教育」、学会・シンポジウムなどの「報告」、「文献紹介」、「研究室紹介」、「会員の研究紹介」、「オピニオン」などの原稿を募集しています。これまでに掲載されていないジャンルや特集企画についても検討しますのでご提案下さい。
2. 原著論文、短報、総説、ミニレビュー、技術ノート、教育については、匿名の査読者による審査に基づいて、採用・不採用を編集委員長が決定します。なお、上記査読付き論文類については、J-STAGEにも掲載されます。
3. 根研究学会ホームページ「根の研究投稿規定」 (<http://www.jsrr.jp/rspnsv/rule.html>) に掲載の原稿作成要領・テンプレートをダウンロードし、必ずそれを使用して原稿を作成し、PDFに変換して編集委員長宛にお送り下さい。また投稿に際して、同じく掲載のカバーレターをご使用ください。原稿送付はE-mailの添付ファイルによる送付を基本としますが、ファイル容量が膨大なときにはご相談ください。
4. 画像・動画や生データ等の補足資料を原稿に添付することができます。補足資料は採用決定後に著者により J-STAGEのデータリポジトリ (J-STAGE Data) にファイルのアップロードおよびメタデータ登録をしていただきます。補足資料についても審査の過程で修正を求められることがあります。J-STAGE Dataにおいては、データは論文の出版(公開)とともに公開され、DOIが付与されます。その他のデータベースをご利用希望の場合はご相談ください。
5. 著者名は本名を原則とします。ペンネームや匿名での投稿を希望される場合はご相談下さい。
6. 採用決定後は、原則として毎年3月・6月・9月・12月の4回発行の冊子体および本会ホームページでのオンラインで掲載されます。各発行月の前月下旬に掲載記事を最終決定します。
7. 著者に課せられる投稿料はありません。また、原稿料や謝礼金もありません。ただし、原稿作成・送付の過程で生じる著者側の経費については学会では負担しませんのでご了承下さい。図表は原則として著者自身で作成して下さい。やむを得ずトレースなどが必要な場合には、実費を負担して頂きます。図は、オンライン版のPDFはカラーが使えますが、印刷は原則として白黒です。印刷もカラーをご希望の場合には、カラー印刷の経費をご負担いただきます。別刷はPDF版を無料で進呈致します。紙印刷の別刷を希望される方には経費著者負担にて50部単位で作成します。採択後、必要部数をお知らせください。別刷1部の基本単価は1ページ25円×ページ数ですが、アート紙の使用やカラー印刷等の特殊な場合には、追加の実費を負担していただきます。
8. オープンアクセスは、論文の情報発信力を高めるためのオプションサービスで、論文受理後に著者がオープンアクセス料(20,000円/編)を支払うことにより、根研究学会非会員でも出版と同時に論文にアクセスできるようになります。非会員がJ-STAGEに掲載された論文を出版1年後にアクセスできるディレイド・オープンアクセスは無料(0円)です。
9. 原稿および編集に関する問い合わせは「根の研究」編集委員長宛とします。
10. 本誌に掲載された著作物の著作権は根研究学会に帰属します。ただし、著者自身による再利用・再加工は自由にできます。掲載された著作物・画像は、根研究学会により、電子ファイルやバックナンバー集などとして再発行・再配布されることがあります。投稿後、本誌への掲載が決定した時点で、著者(共著者を含む)にこれらをご了解いただいたものとみなします。一方、J-STAGE Data等データリポジトリに公開された補足資料の著作権は著者または所属機関の帰属とします。
11. 所属機関のリポジトリに登録された博士論文でも学会誌などに未掲載の内容については掲載可とします。ただし、以下の点に注意してください。(1)元原稿が存在する旨を付記してください(「本稿は、〇〇大学大学院〇〇研究科提出の博士論文の一部に、加筆修正を行った」など)。(2)博士論文そのままではなく、単独の論文として寄与しうるよう必要な改変・修正を施してください。

<原稿送付先: 2024-25 年度>

〒098-2501 北海道中川郡音威子府村字音威子府 483

北海道大学北方生物圏フィールド科学センター中川研究林

「根の研究」編集委員長 福澤加里部

電子メール: editor2024@jsrr.jp, [Tel:01656-5-3216](tel:01656-5-3216)

『根の研究』原稿作成要領

(2024年3月改定)

校正時に修正が少なくなるので、投稿には必ず根研究学会ホームページから『根の研究』原稿作成要領・テンプレートをダウンロードしてご利用ください (<http://www.jsrr.jp/rspnsv/rule.html>)。ここに記載の内容に加えて、テンプレート中に記載された、句読点の表記法や文献の引用方法などの原稿の体裁に関する詳細な説明に従って作成してください。

1. 本テンプレートを必ず使用し、本文、図、表、写真などを1つのファイルとして原稿を作成してください。そして作成したファイルをPDFに変換して原稿をお送りください。ファイル名には、投稿者名を記入してください。論文採択後、掲載のために解像度の良い図、表、写真ファイルを提出していただくことがあります。PDF変換が難しい場合にはご相談ください。
2. 以下の要素で原稿を構成して下さい。各箇所における説明も参照してください。
 - (1) 表題 (原著論文・短報・総説・ミニレビュー・技術ノート・教育は英文併記)
 - (2) 著者名・所属 (原著論文・短報・総説・ミニレビュー・技術ノート・教育は英文併記)
 - (3) 要旨 (原著論文・短報・総説・ミニレビュー・技術ノート・教育) 日本語 600字以内、英語 250単語以内。ただし、短報と教育の英語要旨は任意とします。原則として著者の責任で英文添削を受けたものを投稿して下さい。困難な場合には編集委員会にご相談下さい。その他のジャンルについて要旨の有無は任意とします。
 - (4) キーワード (原著論文・短報・総説・ミニレビュー・技術ノート・教育) : 5つまでとし、和文は五十音順、英文はアルファベット順に記載してください。その他のジャンルについてキーワードの有無は任意とします。
 - (5) 本文 : 適宜小見出しをつけながら、読みやすいように作成して下さい。読者には様々な分野の方がいますので、専門用語には説明をつけるなどご配慮下さい。原著論文および短報については、緒言・材料と方法・結果・考察 (あるいは結果と考察)・謝辞という体裁で作成して下さい。
 - (6) 引用文献は下記「引用文献」欄に記載の説明に従ってください。
 - (7) 図表は図・表ごとに1ページを使用して本文の後に作成して下さい。本文中の挿入希望位置があれば、テキストを原稿右端に挿入して示してください (下記結果欄の記載例を参照ください)。著作権・版權を侵害するような引用・複写をしないようご注意ください。他の研究者またはご自身の既発表論文をもとにご自身で作図した場合にも、図の説明文中に (Smith et al., (1992) より改変) などの但し書きを加えてください。図表以外でも、版權者の承諾なしに他の文献から複写したものをそのまま掲載することはできませんのでご注意ください。また、図および図中の文字の大きさは、段組1段分または2段分の幅を考慮して作成して下さい (1ページ最大字数 2100字, 21字/行×50行/段×2段)。
3. 図は、オンライン版のPDFはカラーが使えますが、印刷は原則として白黒ですので、グラフなどは色の違いだけでなく濃淡の差などで凡例の区別がつくようにご配慮下さい。印刷もカラーをご希望の場合には、カラー印刷の経費をご負担いただきます。
4. 原稿の分量は、短報・報告・文献紹介・研究室紹介については刷り上がり2ページ以内を目安にし、その他は特に分量を指定しません。
5. その他、詳細については、最新号をご参照ください。

『根の研究』
論文審査要領

(2024年3月改定)

1. 編集委員長は編集委員を委嘱します。
2. 編集委員長は投稿原稿の内容に対応する編集委員を選び、審査を依頼することがあります。
3. 編集委員長あるいは編集委員は査読者2名を選び、投稿原稿の校閲を依頼します。ただし、短報については査読者を1名とします。
4. 著者は査読者候補を挙げることができます。
5. 査読結果に基づき、編集委員は論文の採否を編集委員長に答申します。
6. 投稿原稿の最終的な採否は編集委員長が決定します。採択決定日を受理日とします。
7. 修正を求めた原稿が3ヶ月以内に再提出されない場合は取り下げたものとみなします。
8. 採択された論文の掲載順序や体裁は編集委員長が決定します。
9. 校正は著者が行います。校正に際しては原稿の改変を行ってはいけません。

国際誌 *Plant Root* に掲載の 2023 年の論文*Plant Root* Editors in Chief

犬飼義明, 野口享太郎, 間野吉郎, 平野恭弘

2023 年に *Plant Root* に掲載された論文の一覧です。今年も、多くの方からの投稿・寄稿で *Plant Root* を読み応えのある雑誌に高めて頂くよう、皆様のご協力をお願いします。2023 年 1 月より「Plant Root」の掲載料が有料化され、根研究学会会員 20,000 円/編、非会員 25,000 円/編となりました。*Plant Root* の論文閲覧・投稿規定の確認などは、<http://www.plantroot.org/> をご覧頂き、投稿やお問い合わせは editor2023@plantroot.org までご連絡ください。また、投稿の際には *Plant Root* のトップページに掲載した「論文の本文」と「送り状」の雛形 (Manuscript sample (docx), Cover letter sample (docx)) のファイルをお使いください。

2022 年以降に *Plant Root* に掲載された論文は、クリエイティブコモンズ表示ライセンス (CC-BY; <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) の条件下で公開されます。2021 年以前に掲載された論文の著作権は JSRR に帰属されます (<http://www.plantroot.org/copyright.htm> を参照下さい)。

原著論文 5、実験手法 2 (査読制)

Original Research Article

Plant growth-enhancing traits of rhizobacteria isolated from brinjal, okra, and leaf mustard

Amirul H.M. Umar, Fitri A.A. Zakry

2023 Volume 17 Pages 1-15

<https://doi.org/10.3117/plantroot.17.1>

Method Article

Development of a method for high-throughput quantitation of soil-surface roots of rice (*Oryza sativa*) and wild rice (*O. glumaepatula*) using an overhead scanner

Tomoki Miyashita, Katsuhiko Shiono

2023 Volume 17 Pages 16-25

<https://doi.org/10.3117/plantroot.17.16>

Original Research Article

Acidic soil tolerance of sugarcane and Erianthus root assessed by cell membrane stability

Hiroo Takaragawa, Hiroshi Matsuda, Yoshifumi Terajima

2023 Volume 17 Pages 26-35

<https://doi.org/10.3117/plantroot.17.26>

Original Research Article

Strontium-induced mineral imbalance, cell death, and reactive oxygen species generation in *Arabidopsis thaliana*

Takeshi Nagata

2023 Volume 17 Pages 36-44

<https://doi.org/10.3117/plantroot.17.36>

Original Research Article

Genotypic variation in rice root system distribution and activity in response to short-term soil drought

Emi Kameoka, Shiro Mitsuya, Roel R. Suralta, Akira Yamauchi, Amelia He ...

2023 Volume 17 Pages 45-58

<https://doi.org/10.3117/plantroot.17.45>

Method Article

Application of the pressure chamber method to evaluate root hydraulic conductance in rice plants with tillers

Emi Kameoka, Shiro Mitsuya, Akira Yamauchi

2023 Volume 17 Pages 59-70

DOI <https://doi.org/10.3117/plantroot.17.59>

Original Research Article

Physiological, biochemical and root exudate response of maize seedlings to hydrogen sulfide applications

Kabir Ghoto, Gui-Feng Gao, Martin Simon, Zhi-Jun Shen, Huan Li, Ming-Y ...

2023 Volume 17 Pages 71-81

<https://doi.org/10.3117/plantroot.17.71>

論文の審査状況について

2023年に *Plant Root* に投稿された論文数は8報(3報が海外からの投稿)で、そのうち受理されたものが2報、審査中が3報です。投稿数は前年の22報から8報になりましたが、これは2023年1月からの「Plant Root」の掲載料の有料化に伴う海外からの投稿の減少(前年の16報から3報)が影響していると考えられます。国内からの投稿数や受理の数は前年とあまり変わっていません。編集委員や審査員の皆様には改めて感謝申し上げます。今後も査読や運営に関するご助言などご支援いただけますよう、よろしくお願いいたします。

Plant Root に投稿された論文は、編集委員と審査員によって accept・reject に拘わらず非常に丁寧に審査されています。この労力を多くの根研の会員の皆様の投稿論文に向けられれば良いと思っております。根研究会で発表された成果など、会場で Editors in Chief や編集委員に声をかけていただければ投稿に向けた相談に乗りますので、是非 *Plant Root* にご投稿ください!

Plant Root ホームページ : <http://www.plantroot.org/index.htm>

J-Stage (*Plant Root*) : <https://www.jstage.jst.go.jp/browse/plantroot/-char/en>

編集委員 (2024年1月~2025年12月)

Editors in Chief

Dr. Yasuhiro Hirano (Nagoya University, Nagoya, Japan), **Dr. Yoshiro Mano** (Institute of Livestock and Grassland Science, NARO, Nasushiobara, Japan), **Dr. Kyotaro Noguchi** (Tohoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute, Morioka, Japan), **Prof. Akimasa Nakano** (Chiba University, Matsudo, Japan)

Senior Editorial Assistant

Dr. Satoshi Shimamura (Tohoku Agricultural Research Center, NARO, Daisen, Japan)

Subject Editors (in alphabetical sequence of family names)

Dr. Tomomi Abiko (Kyushu University, Fukuoka, Japan), **Dr. Hideki Araki** (Yamaguchi University, Yamaguchi, Japan), **Prof. Hiroyuki Daimon** (Ryukoku University, Kyoto, Japan), **Dr. Karibu Fukuzawa** (Hokkaido University, Sapporo, Japan), **Dr. Shintaro Hara** (Institute for Agro-Environmental Sciences, NARO, Tsukuba, Japan), **Prof. Maki Katsuhara** (Okayama University, Kurashiki, Japan), **Dr. Akihiko Kinoshita** (Kyushu Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute, Kumamoto, Japan), **Dr. Yoshihiro Kobae** (Rakuno Gakuen University, Ebetsu, Hokkaido, Japan), **Dr. Bohdan Konôpka**

(National Forest Centre, Forest Research Institute Zvolen, Zvolen, Slovakia), **Dr. Katashi Kubo** (Tohoku Agricultural Research Center, NARO, Fukushima, Japan), **Dr. Takeshi Kuroha** (Institute of Agrobiological Sciences, NARO, Tsukuba, Japan), **Dr. Naoki Makita** (Shinshu University, Matsumoto, Japan), **Dr. Atsushi Matsumura** (Osaka Prefecture University, Sakai, Japan), **Prof. Motoyasu Minami** (Chubu University, Kasugai, Japan), **Prof. Mikio Nakazono** (Nagoya University, Nagoya, Japan), **Prof. Atsushi Ogawa** (Akita Prefectural University, Akita, Japan), **Prof. Mizue Ohashi** (University of Hyogo, Himeji, Japan), **Dr. Atsushi Oyanagi** (NARO, Tsukuba, Japan), **Dr. Kosala Ranathunge** (The University of Western Australia, Perth, Australia), **Prof. Yowhan Son** (Korea University, Seoul, The Republic of Korea), **Dr. Koya Sugawara** (NARO Institute of Livestock and Grassland Science, Nasushiobara, Japan), **Dr. Daisuke Takata** (Fukushima University, Fukushima, Japan), **Dr. Yusaku Uga** (Institute of Crop Science, NARO, Tsukuba, Japan), **Dr. Akihiro Yamamoto** (University of Miyazaki, Miyazaki, Japan), **Dr. Takaki Yamauchi** (Nagoya University, Nagoya, Japan), **Dr. Ken Yokawa** (Kitami Institute of Technology, Hokkaido, Japan)

Root 根の研究 Research

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 <http://www.jsrr.jp/>

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

根の研究 第 33 巻 第 1 号 2024 年 3 月 15 日印刷 2024 年 3 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

The background of the cover is a detailed, light-colored illustration of a root system, showing a dense network of primary and secondary roots spreading out from a central point. The roots are rendered in a fine, branching pattern, typical of a tree's root structure.

Root Research

Japanese Society for Root Research

Mini Review

Improved efficiency of crop root system analysis

Shota TERAMOTO 7

Ontogenetic changes of root and shoot respiration in trees

Yoko KUROSAWA and Shigeta MORI 15