

令和 2 年 7 月 4 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03779

研究課題名(和文)植物耐酸性研究の新展開：菌根形成による耐酸性獲得の生理・分子機構

研究課題名(英文)New insight into plant acid tolerance: physiological and molecular mechanisms of acid tolerance through mycorrhizal formation

研究代表者

江澤 辰広 (Ezawa, Tatsuhiro)

北海道大学・農学研究院・准教授

研究者番号：40273213

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：酸性土壌は世界中に分布しており、植物の生長の主要な制限因子である。本研究は、菌根共生による耐酸性形質獲得機構の統合理解を目指す。我々が強酸性土壌から単離したアーバスキュラー菌根菌 *Rhizophagus clarus* RF1株が共生することで植物の耐酸性は著しく高まるが、この時、*R. clarus* RF1株では、活性酸素消去遺伝子やマグネシウム輸送体遺伝子の発現が上昇した。また、この株に共生しているウイルス RcmV3の存在量も土壌pHの低下に伴って増加した。これらのことは、RF1株の耐酸性には、マグネシウム恒常性の維持やウイルス共生によるストレス耐性の向上が関わっていることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

酸性土壌における植物の定着機構や定着促進の研究は、食糧生産だけでなく、環境保全の見地からも社会的に重要な課題である。本研究から、植物単独では適応できない劣悪環境も微生物強制により突破できるということが示されると共に、その分子機構の一端が明らかにされた。さらに、土壌化学的知見を耐性遺伝子の探索に利用するという、「土壌」「共生」「分子」を繋ぐ研究の端緒となった点は、学術的に重要な進展となったと言える。

研究成果の概要(英文)：Soil acidity is a major constraint of plant productivity. The objective of this study was understanding of the mechanism underlying the improved acid tolerance by mycorrhizal formation. The arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus clarus* strain RF1 isolated from acidic soil improved plant survival and growth in acidic soil, which accompanied the upregulation of genes involved in radical scavenging and magnesium transport. In addition, the abundance of a symbiotic mycovirus RcmV3 was also increased in response to soil acidity. These observations suggest that the improvement of magnesium homeostasis via upregulation of the transporter gene and general stress tolerance by viral symbiosis are involved in the acid tolerance of the strain.

研究分野：植物-微生物相互作用

キーワード：アーバスキュラー菌根菌 共生 酸性土壌 菌類ウイルス トランスクリプトーム 土壌リン分画

1. 研究開始当初の背景

酸性土壌は世界中に分布しており、植物の生長の主要な制限因子である。酸性土壌では、高い濃度のアルミニウムイオン(Al^{3+})の存在により、根の伸長が著しく阻害されると共に、 Al^{3+} とリン酸が難溶性の塩を形成することから、植物は極度のリン欠乏に陥る。植物の耐酸性機構の研究に関しては、日本は世界をリードしてきた：シュウ酸による Al^{3+} の液胞への隔離、根からのリンゴ酸放出による Al^{3+} の排除、耐酸性遺伝子群の発現制御を行う転写因子 STOP1 の発見、膜構成成分の変換による Al^{3+} 害の回避などの主要な成果はすべて日本の研究グループのものである。一方、アーバスキュラー菌根菌 (AM 菌) は、障害を受けた宿主植物の根に代わってリン酸吸収の代替経路を提供し、植物の酸性土壌における定着と生残性を劇的に改善する (Maki *et al.*, 2008)。しかし、自然界では AM 菌は生きた植物と共生しなければ増殖しない、いわゆる絶対活物栄養生物であること (Smith & Read, 2008)、さらに多核性の真菌であるために遺伝子組み換えの手法が確立されていないことから、その耐酸性の分子機構にはまったく手が付けられていなかった。

酸性土壌の AM 菌生態に関する研究として、我々はこれまでに、AM 菌の耐酸性には種間差があること(江沢・河原, 2012)、酸性土壌に棲息する AM 菌種は、中性土壌にも分布するジェネラリストであること (Kawahara *et al.*, 2016)、さらに、これら知見を応用して強酸性土壌から分離した AM 菌を利用した酸性土壌の緑化工法を民間企業と共同開発し (田中ほか, 2010)、その商業利用を実現する (http://www.nittoc.co.jp/kouhou/sander_green.html) などの成果を上げてきた。また、酸性土壌からの分離株を用いた生理・分子生物学研究においては、いずれも国際的に高い評価を受けた：i) AM 菌のリン酸獲得に関わる陽イオンの取り込みとそれを担う輸送体遺伝子の発現制御機構を解明し (Kikuchi *et al.*, 2014)、国際菌根会議において招待講演を行った；ii) 耐酸性 AM 菌がウイルスを保持していることを世界で始めて報告し、そのウイルスの一部が宿主菌の孢子形成に影響を及ぼすことを示した (Ikeda *et al.*, 2012; Kitahara *et al.*, 2014)；iii) 植物ウイルスベクターを利用して AM 菌の遺伝子をノックダウン (= virus-induced gene silencing, VIGS) 可能であることを世界で初めて示すとともに、この手法を使って宿主の蒸散が AM 菌の菌糸内のリン酸輸送を駆動していることを明らかにした (Kikuchi *et al.*, 2016)。特にこの論文は本研究分野に特に強いインパクトを与え、New Phytologist 誌 (Bitterlich & Franken, 2016) および F1000Prime に相次いで推薦記事が掲載された。

これまで我々は、菌根形成が有効態リン酸をほとんど含まない強酸性土壌においても、宿主のリン栄養を改善するものの、 Al^{3+} による根の伸長阻害は緩和しないことから、AM 菌は植物とは異なる未知のメカニズムによって、植物が吸収できない土壌リンの画分 (例えば Al 結合型リン酸) からリン吸収している可能性を示唆した。一方、北米の地熱地帯に自生するパニックグラスでは、内生糸状菌が特定のウイルスに感染して初めて宿主植物が耐熱性を獲得することが知られている (Márquez *et al.*, 2007)。当研究室で維持している耐酸性種 *Rhizophagus clarus* の地理的隔離株 3 株は、塩基配列が 100% 同一のウイルス (RcMitovirus 3, RcMV3) を共通して保持しており、他のウイルスの存在量が強酸性土壌で減少するのに対して、RcMV2 の存在量は逆に増加することを見いだした(鈴木ら 2016 土肥学会)。このことは、本ウイルスが *R. clarus* 種の耐酸性形質において、重要な役割を果たしている可能性を示唆している。

2. 研究の目的

本研究は、以下の仮説を土壌化学および分子生物学的アプローチで検証し、菌根共生による耐酸性形質獲得機構の統合理解を目指す。仮説 1：酸性土壌での宿主への持続的リン供給のため、AM 菌は Al 結合型および有機態リンの画分からリン酸を獲得する。仮説 2：AM 菌の耐酸性には、 Al^{3+} 存在下で細胞の恒常性を維持するための Mg^{2+} 、 Ca^{2+} など陽イオン吸収輸送体や活性酸素種 (reactive oxygen species, ROS) 消去を担う酵素群の遺伝子が関わっている。仮説 3：ウイルス (RcMV3) 感染は、AM 菌における ROS 消去系などのストレス耐性システム全般を活性化することで耐酸性(ストレス耐性)を向上させている。

3. 研究の方法

(1) 菌根菌のリン吸収画分の同定

酸性硫酸塩土壌および国頭マージの二種類の酸性土壌に川砂を 1:4 の比率で混合した培土に、0, 10, 50, 200 kg P_2O_5 ha⁻¹ の割合でリン酸水素カリウムを施肥した後、pH を 4.2 に調整した。その培土を用いてナイロンメッシュ区画栽培法により、耐酸性 AM 菌 *Rhizophagus clarus* RF1 株 (北海道分離株) を接種したミヤコグサ (*Lotus japonicus* cv. Miyakojima MG-20) を人工気象器内で 7 週間栽培した。その後、菌糸コンパートメントの土壌をヘドレー法により水溶性、有効態および難溶性画分に分画し、それぞれに含まれる無機および有機態リン酸含量を分別定量した。

(2) 菌根菌耐酸性遺伝子のスクリーニングおよび共生ウイルスの探索

酸性硫酸塩土壌の pH を 3.4–5.2 の範囲で 4 段階に調整した土壌を用い、ナイロンメッシュ区画栽培法により *R. clarus* RF1 株を接種したミヤコグサを人工気象器内で 7 週間栽培した。各 pH

の菌糸コンパートメントから採取した RF1 株の外生菌糸から RNA を抽出し、150 bp ペアエンドシーケンスを行った後、得られたリードをスーパーコンピューターを用いてアセンブルして RF1 株の遺伝子レパートリー（リファレンス）を得た。このリファレンスにリードをマッピングし、土壌 pH に依存した遺伝子発現変動プロファイルを得るとともに、この中から同定した原形質膜型マグネシウム輸送体遺伝子 *ALMINUM RESISTANCE 2* (MacDiarmid & Gardner, 1998) の *R. clarus* オーツログをクローニングした。この遺伝子を酵母に形質転換し、得られた過剰発現体の Al^{3+} 耐性を調べた。

R. clarus の耐酸性発現に重要な役割を果たす遺伝子群やウイルスをさらに絞り込むために、地理的隔離株である CK001 株（インドネシア分離株）を接種したミヤコグサを同様にメッシュ区画栽培法によって7週間栽培した。その後、それぞれの pH 区から採取した AM 菌の外生菌糸から RNA を抽出し、同様に 150 bp シーケンスから得られたリードをアセンブル、マッピング、発現プロファイルの取得、およびウイルスの探索を行った。

4. 研究成果

(1) 菌根菌のリン吸収画分の同定

酸性硫酸塩土壌において栽培後の菌糸圏土壌に残存したリン酸を水溶性、易利用性、および難利用性の無機態および有機態リンに分画して定量したところ、AM 菌は植物が広く利用できる水溶性および易利用性の無機リン酸に加えて、植物がほとんど利用しない難利用性の有機態リンからも吸収できることがわかった。一方、AM 菌による難利用性リンの利用は、国頭マージにおいては観察されなかったことは、AM 菌が利用できるリンの画分は土壌によって異なることを意味し、このことは AM 菌による難利用性リン画分の可溶化メカニズムのヒントになると考えられた。AM 菌が難利用性の有機態リン酸を利用する能力を有することについては、本研究で初めて明らかにされた。

(2) 菌根菌耐酸性遺伝子のスクリーニングおよび共生ウイルスの探索

pH の低下に伴って直線的に発現上昇する RF1 株の遺伝子群を抽出したところ、酵母や植物において耐酸性に関わることが報告されている種々の遺伝子のオーツログが含まれていた。*R. clarus* は、酵母の *ALR2* のオーツログ *R. clarus ALR1* および *ALR2* (*RcALR1*, *RcALR2*) の二つを持っており、これらのうち、*RcALR2* が pH の低下に伴ってその発現量が直線的に増加するのに対し、*RcALR1* の発現量は pH の影響を受けていなかった。そこで、*RcALR2* をクローニングし、酵母における過剰発現体を作製して Al^{3+} 耐性を評価したものの、その耐性は野生型とほぼ同等であった。

CK001 株においても同様の手法で pH の低下に伴って直線的に発現上昇する 48 個の遺伝子群を抽出したが、RF1 株と共通の遺伝子はそのうちのわずか 14 個であった。RF1 株において耐酸性に関わる重要遺伝子として抽出された *RcALR2* は土壌 pH には反応せず、代わりにオルガネラ局在が予想されるマグネシウム輸送体遺伝子 (Goytain & Quamme, 2008) の発現が pH の低下に伴って発現上昇していた。RF1 株は強酸性を示す酸性硫酸塩土壌から分離された株であるのに対し、CK001 株は熱帯泥炭土壌から分離された株であり、土壌酸性への応答の相違は、両株の生育環境の相違と関係しているものと推定された。

R. clarus の地理的隔離株 3 株が共通して保持している RcMV3 および RF1 株のみが保持している RcMV1 の存在量を RNA-Seq および qRT-PCR で調べたところ、RcMV1 の存在量は土壌酸性度に関わりなく一定であったのに対し、RcMV3 の存在量は pH の低下に伴って有意に増加していた。CK001 株では、他の株で見つかったものとは異なる *R. clarus* Mitovirus 4 (RcMV4) および *R. clarus* Mitovirus 5 (RcMV5) が検出されたものの、前回同定され、他の地理的隔離株からも検出されている RcMV3 は検出されなかった。これらのうち、RcMV5 は最も低い pH において、コピー数が増加した。これら酸性環境で存在量が増加するウイルスがどの分離株にも認められたことから、ウイルスが宿主 AM 菌の耐酸性（またはストレス耐性）に関わっている可能性が強く示唆されたものの、ウイルスの中には検出の再現性が低いものもあり、継代培養中に脱落、またはコピー数が減少してしまう可能性も考えられた。

本研究から、植物単独では適応できない劣悪環境も AM 菌と共生するにより突破できるということが示されると共に、その分子機構の一端が明らかにされた。さらに、土壌化学的知見を耐性遺伝子の探索に利用するという、「土壌」「共生」「分子」を繋ぐ研究の端緒となった点は、学術的に重要な進展となったと言える。

引用文献

Bitterlich M, Franken P. 2016. Connecting polyphosphate translocation and hyphal water transport points to a key of mycorrhizal functioning. *New Phytologist* **211**: 1147-1149.

- Goytain A, Quamme GA. 2008.** Identification and characterization of a novel family of membrane magnesium transporters, MMgT1 and MMgT2. *American Journal of Physiology-Cell Physiology* **294**: C495-C502.
- Ikeda Y, Shimura H, Kitahara R, Masuta C, Ezawa T. 2012.** A novel virus-like double-stranded RNA in an obligate biotroph arbuscular mycorrhizal fungus: a hidden player in mycorrhizal symbiosis. *Molecular Plant-Microbe Interactions* **25**: 1005-1012.
- Kawahara A, An G-H, Miyakawa S, Sonoda J, Ezawa T. 2016.** Nestedness in arbuscular mycorrhizal fungal communities along soil pH gradients in early primary succession: Acid-tolerant fungi are pH generalists. *PLoS ONE* **11**: e0165035.
- Kikuchi Y, Hijikata N, Ohtomo R, Handa Y, Kawaguchi M, Saito K, Masuta C, Ezawa T. 2016.** Aquaporin-mediated long-distance polyphosphate translocation directed towards the host in arbuscular mycorrhizal symbiosis: application of virus-induced gene silencing. *New Phytologist* **211**: 1202-1208.
- Kikuchi Y, Hijikata N, Yokoyama K, Ohtomo R, Handa Y, Kawaguchi M, Saito K, Ezawa T. 2014.** Polyphosphate accumulation is driven by transcriptome alterations that lead to near-synchronous and near-equivalent uptake of inorganic cations in an arbuscular mycorrhizal fungus. *New Phytologist* **204**: 638-649.
- Kitahara R, Ikeda Y, Shimura H, Masuta C, Ezawa T. 2014.** A unique mitovirus from Glomeromycota, the phylum of arbuscular mycorrhizal fungi. *Archives of Virology* **159**: 2157-2160.
- MacDiarmid CW, Gardner RC. 1998.** Overexpression of the *Saccharomyces cerevisiae* magnesium transport system confers resistance to aluminum ion. *Journal of Biological Chemistry* **273**: 1727-1732.
- Maki T, Nomachi M, Yoshida S, Ezawa T. 2008.** Plant symbiotic microorganisms in acid sulfate soil: significance in the growth of pioneer plants. *Plant and Soil* **310**: 55-65.
- Márquez LM, Redman RS, Rodriguez RJ, Roossinck MJ. 2007.** A virus in a fungus in a plant: Three-way symbiosis required for thermal tolerance. *Science* **315**: 513-515.
- Smith SE, Read DJ. 2008.** *Mycorrhizal Symbiosis*. San Diego, CA, USA: Academic Press.
- 江沢辰広, 河原愛. 2012.** 強酸性土壌に棲息するアーバスキュラー菌根菌: パイオニア植生を支える「化石的」絶対共生菌. *生物科学* **63**: 238-246.
- 田中 淳, 堀江 直, 江澤 辰, 伴 資. 2010.** 耐酸性菌根菌を活用した強酸性法面緑化適用の可能性. *日本緑化工学会誌* **36**: 119-122.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Ezawa T, Maruyama H, Kikuchi Y, Yokoyama K, Masuta C	4. 巻 2146
2. 論文標題 Application of virus-induced gene silencing to arbuscular mycorrhizal fungi	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Methods in Molecular Biology	6. 最初と最後の頁 249-254
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-1-0716-0603-2_19	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sato T, Hachiya S, Inamura N, Ezawa T, Cheng W, Tawaraya K	4. 巻 29
2. 論文標題 Secretion of acid phosphatase from extraradical hyphae of the arbuscular mycorrhizal fungus <i>Rhizophagus clarus</i> is regulated in response to phosphate availability	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Mycorrhiza	6. 最初と最後の頁 599-605
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00572-019-00923-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kameoka H, Tsutsui I, Saito K, Kikuchi Y, Handa Y, Ezawa T, Hayashi H, Kawaguchi M, Akiyama K	4. 巻 4
2. 論文標題 Stimulation of asymbiotic sporulation in arbuscular mycorrhizal fungi by fatty acids	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Microbiology	6. 最初と最後の頁 1654-1660
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41564-019-0485-7	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Atunnisa R, Ezawa T	4. 巻 34
2. 論文標題 Nestedness in arbuscular mycorrhizal fungal communities in a volcanic ecosystem: Selection of disturbance-tolerant fungi along an elevation gradient	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Microbes and Environments	6. 最初と最後の頁 327-333
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1264/jsme2.ME19073	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ryan Megan H., Kaur Parwinder, Nazeri Nazanin K., Clode Peta L., Keeble Gagnere Gabriel, Doolette Ashlea L., Smernik Ronald J., Van Aken Olivier, Nicol Dion, Maruyama Hayato, Ezawa Tatsuhiro, Lambers Hans, Millar A. Harvey, Appels Rudi	4. 巻 42
2. 論文標題 Globular structures in roots accumulate phosphorus to extremely high concentrations following phosphorus addition	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plant, Cell & Environment	6. 最初と最後の頁 1987-2002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/pce.13531	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kobayashi Yuuki, Maeda Taro, Yamaguchi Katsushi, Kameoka Hiromu, Tanaka Sachiko, Ezawa Tatsuhiro, Shigenobu Shuji, Kawaguchi Masayoshi	4. 巻 19
2. 論文標題 The genome of Rhizophagus clarus HR1 reveals a common genetic basis for auxotrophy among arbuscular mycorrhizal fungi	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 BMC Genomics	6. 最初と最後の頁 465
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s12864-018-4853-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ezawa Tatsuhiro, Saito Katsuharu	4. 巻 220
2. 論文標題 How do arbuscular mycorrhizal fungi handle phosphate? New insight into fine-tuning of phosphate metabolism	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 New Phytologist	6. 最初と最後の頁 1116 ~ 1121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/nph.15187	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計57件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 26件)

1. 発表者名 江沢辰広
2. 発表標題 植物の菌根共生制御モジュールが語る真実：支配は従属の始まり？ 土壌微生物が奏でる陸域生命ハーモニー：「共に生きて躍進する」
3. 学会等名 微生物ウィーク (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tatsuhiko Ezawa・Yusaku Sugimura・Ai Kawahara・Hayato Maruyama
2. 発表標題 Absolute control or dedication? Evolutionary implications of the plant gene-coexpression network for mycorrhizas - the plant-fungal symbiosis
3. 学会等名 日本進化学会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮島奈々子・杉原 創・江沢辰広・田中治夫
2. 発表標題 温度がアーバスキュラー菌根共生系の獲得するリン形態に与える影響
3. 学会等名 日本土壌肥料学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中西夏輝・Tingting Li・杉村悠作・俵谷圭太郎・丸山隼人・江沢辰広
2. 発表標題 アーバスキュラー菌根菌Rhizophagus clarus における生態型分化：地理的隔離株間における酸性応答遺伝子群の極端な不一致
3. 学会等名 日本土壌肥料学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 丹羽理恵子・佐藤修正・平川英樹・吉田重信・佐藤 孝・鈴木貴恵・佐藤 匠・俵谷圭太郎・福永亜矢子・小八重善裕・大友 量・林 正紀・唐澤敏彦・神山拓也・丸山隼人・江沢辰広
2. 発表標題 農耕地管理強度に沿ったアーバスキュラー菌根菌群集の入れ子構造：その生存戦略とインパクト
3. 学会等名 日本土壌肥料学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉村悠作・河原 愛・丸山隼人・江沢辰広
2. 発表標題 野外における植物・菌根菌の環境応答 - フィールドトランスクリプトミクスが語る頑強かつ柔軟な制御 -
3. 学会等名 日本土壌肥料学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 浅枝諭史・杉村悠作・丸山隼人・江沢辰広
2. 発表標題 菌根経路からのリン酸獲得により発現誘導される植物の樹枝状体形成遺伝子群
3. 学会等名 日本土壌肥料学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木耶々・佐藤 匠・江沢辰広・杉原 創・程 為国・俵谷圭太郎
2. 発表標題 アーバスキュラー菌根菌の外生菌糸から浸出される酸性ホスファターゼ活性と土壌中のリンの形態
3. 学会等名 日本土壌肥料学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 江沢辰広
2. 発表標題 菌根共生における養分交換の分子機構 - 植物の献身、共生菌の傲（おご）り -
3. 学会等名 糸状菌分子生物学コンファレンス（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 江沢辰広・杉村悠作
2. 発表標題 アーバスキュラー菌根菌群集構造解析におけるRNA-Seqの応用：利点と課題
3. 学会等名 菌根研究会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 若森春輝・杉村悠作・江沢辰広
2. 発表標題 菌根経路の窒素輸送はリン輸送とは独立して制御される
3. 学会等名 菌根研究会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤 匠・丹羽理恵子・江沢辰広・佐藤修正・平川英樹・吉田重信・程 為国・俵谷 圭太郎
2. 発表標題 ネギの根における接種したアーバスキュラー菌根菌の追跡及び圃場におけるリン吸収と生育に及ぼす影響
3. 学会等名 菌根研究会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hayato Maruyama・Kaede Yokoyama・Satoshi Asaeda・Yusuke Kikuchi・Yusaku Sugimura・Hiromu Kameoka・Ayumi Abe・Teruo Sone・Katsuharu Saito・Chikara Masuta・Tatsuhiko Ezawa
2. 発表標題 SYG1 encodes a phosphate exporter in the fungal symbiont: the last piece of phosphate delivery pathway in arbuscular mycorrhizal symbiosis
3. 学会等名 5th Asian Conference on Plant-Microbe Symbiosis and Nitrogen Fixation (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusaku Sugimura · Ai Kawahara · Hayato Maruyama · Tatsuhiko Ezawa
2. 発表標題 Two distinct gene-coexpression networks mycorrhizal module and phosphate-starvation module are independently regulated in the field
3. 学会等名 Rhizosphere 5 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takumi Sato · Shihomi Hachiya · Nozomi Inamura · Yaya Suzuki · Tatsuhiko Ezawa · Weiguo Cheng · Keitaro Tawaraya
2. 発表標題 Arbuscular mycorrhizal fungi secrete acid phosphatase to hyphosphere in response to phosphorus deficiency
3. 学会等名 Rhizosphere 5 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ai Kawahara · Yusaku Sugimura · Hayato Maruyama · Tatsuhiko Ezawa
2. 発表標題 Field transcriptomics reveals a gene-coexpression module that regulates mycorrhizal formation and functioning
3. 学会等名 Rhizosphere 5 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Asaeda Satoshi · Hayato Maruyama · Tatsuhiko Ezawa
2. 発表標題 Phosphate acquisition through the mycorrhizal pathway upregulates the genes involved in arbuscule development and Pi homeostasis in the host
3. 学会等名 10th International Conference on Mycorrhiza (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keitaro Tawaraya · Rieko Niwa · Tatsuhiro Ezawa · Shusei Sato · Hideki Hiramawa · Shigenobu Yoshida · Weiguo Cheng
2. 発表標題 Tracking introduced arbuscular mycorrhizal fungus in root of <i>Allium fistulosum</i> and its effect on phosphorus uptake and growth under field with or without indigenous fungi
3. 学会等名 10th International Conference on Mycorrhiza (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Turgut Yigit Akyol · Rieko Niwa · Hideki Hiramawa · Hayato Maruyama · Takumi Sato · Takae Suzuki · Ayako Fukunaga · Takashi Sato · Shigenobu Yoshida · Keitaro Tawaraya · Masanori Saito · Tatsuhiro Ezawa · Shusei Sato
2. 発表標題 Impact of introduction of arbuscular mycorrhizal fungi on the root microbial community in agricultural fields
3. 学会等名 10th International Conference on Mycorrhiza (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tatsuhiro Ezawa · Yusaku Sugimura · Ai Kawahara · Hayato Maruyama
2. 発表標題 Field transcriptomics: learning from gene-coexpression networks towards optimization and prediction of mycorrhizal functioning in the field
3. 学会等名 10th International Conference on Mycorrhiza (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yaya Suzuki · Takumi Sato · Tatsuhiro Ezawa · Sugihara Soh · Cheng Weiguo · Tawaraya Keitaro
2. 発表標題 Acid phosphatase activity released from extraradical hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi and fractions of phosphorus in soil
3. 学会等名 10th International Conference on Mycorrhiza (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hayato Maruyama · Yusaku Sugimura · Ayumi Tezuka · Atushi J. Nagano · Tatsuhiro Ezawa
2. 発表標題 Gene co-expression analysis and modeling reveal distinct gene regulatory networks for phosphate acquisition in mycorrhizal plants
3. 学会等名 10th International Conference on Mycorrhiza (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nuri Luthfiana · Takumi Sato · Yaya Suzuki · Fikri Maulana Ahdar · Tatsuhiro Ezawa · Weiguo Cheng · Keitaro Tawaraya
2. 発表標題 Species difference of acid phosphatase activity in hyphal exudates of arbuscular mycorrhizal fungi
3. 学会等名 10th International Conference on Mycorrhiza (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Rifa Atunnisa · Tatsuhiro Ezawa
2. 発表標題 Disturbance and stability act as selection pressure for arbuscular mycorrhizal fungi in a volcanic ecosystem
3. 学会等名 10th International Conference on Mycorrhiza (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusaku Sugimura · Ai Kawahara · Hayato Maruyama · Tatsuhiro Ezawa
2. 発表標題 Tight and flexible regulation of mycorrhizal formation and functioning through a gene-coexpression network module in diverse and fluctuating environments
3. 学会等名 10th International Conference on Mycorrhiza (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideki Hirakawa・Rieko Niwa・Shusei Sato・Tatsuhiko Ezawa
2. 発表標題 Web interface of arbuscular mycorrhizal fungal and bacterial classification pipeline
3. 学会等名 10th International Conference on Mycorrhiza (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林裕樹・前田太郎・山口勝司・亀岡啓・田中幸子・江沢辰広・重信秀治・川口正代司
2. 発表標題 アーバスキュラー菌根菌Rhizophagus clarus HR1株の新規ゲノム解読による絶対共生性の分子基盤の解明
3. 学会等名 日本菌学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮島奈々子・杉原創・岡田千裕・江沢辰広・田中治夫
2. 発表標題 アーバスキュラー菌根菌が土壌から獲得するリン画分の解明
3. 学会等名 日本土壌肥料学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 丸山隼人・中西夏輝・浅枝諭史・杉村悠作・江沢辰広
2. 発表標題 菌根形成植物における有機態リン獲得の分子機構
3. 学会等名 日本土壌肥料学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 杉山知穂・杉村悠作・長竹新・安田花穂・八巻憲和・平克郎・河合正人・江沢辰広・波多野隆介
2. 発表標題 有機質肥料の施用が植物リン利用効率と菌根菌感染ポテンシャルに与える影響
3. 学会等名 日本土壌肥料学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐藤匠・江沢辰広・程為国・俵谷圭太郎
2. 発表標題 アーバスキュラー菌根菌が浸出する酸性ホスファターゼ活性の菌種間差
3. 学会等名 日本土壌肥料学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岡田千裕・宮島奈々子・杉原創・江沢辰広
2. 発表標題 酸性硫酸塩土壌においてアーバスキュラー菌根菌が獲得するリン形態
3. 学会等名 日本土壌肥料学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 浅枝 諭史・丸山隼人・江沢辰広
2. 発表標題 菌根経路を介したポリリン酸長距離輸送・リン酸移行の分子機構
3. 学会等名 日本土壌肥料学会
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 Hayato Maruyama; Yusaku Sugimura; Ayumi Tezuka; Atushi J. Nagano; Tatsuhiro Ezawa
2 . 発表標題 Gene co-expression analysis and modeling reveal distinct regulatory networks for phosphate homeostasis in mycorrhizal plants under phosphate deficiency
3 . 学会等名 6th Symposium on Phosphorus in Soils and Plants (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Nanako Miyajima; Soh SugiharavChihiro Okada; Tatsuhiro Ezawa; and Haruo Tanaka
2 . 発表標題 Identification of phosphorus fractions accessible for arbuscular mycorrhizal fungi: Sequential fractionation of hyphosphere soil
3 . 学会等名 6th Symposium on Phosphorus in Soils and Plants (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Satoshi Asaeda; Hayato Maruyama; Tatsuhiro Ezawa
2 . 発表標題 Molecular mechanisms of phosphate delivery via the mycorrhizal pathway
3 . 学会等名 6th Symposium on Phosphorus in Soils and Plants (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Takumi Sato; Shihomi Hachiya; Nozomi Inamura; Tatsuhiro Ezawa; Weiguo Cheng; Keitaro Tawaraya
2 . 発表標題 Acid phosphatase activity in hyphal exudate of arbuscular mycorrhizal fungus Rhizophagus clarus under low P condition
3 . 学会等名 6th Symposium on Phosphorus in Soils and Plants (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 山隼人・浅枝諭史・横山 楓・杉村悠作・齋藤勝晴・増田 税・江沢辰広
2. 発表標題 菌根菌からのリン酸放出が樹枝状体形成に関わる植物遺伝子群の発現を調節する
3. 学会等名 菌根研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuuki Kobayashi; Taro maeda; Katsushi Yamaguchi; Hiromu Kameoka; Sachiko Tanaka; Tatsuhiro Ezawa; Shuji Shigenobu; Masayoshi Kawaguchi
2. 発表標題 Missing metabolic pathways concerning symbiosis-based auxotrophy revealed by genome sequencing of an arbuscular mycorrhizal fungus <i>Rhizophagus clarus</i> HR-1
3. 学会等名 International Molecular Mycorrhiza Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hayato Maruyama; Satoshi Asaeda; Kaede Yokoyama; Yusaku Sugimura; Katsuharu Saito; Chikara Masuta; Tatsuhiro Ezawa
2. 発表標題 Fungal phosphate export via SYG1 triggers symbiosis-specific lipid biosynthesis in the host of arbuscular mycorrhiza
3. 学会等名 60th Annual Meeting of the Japanese Society of Plant Physiologists (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hayato Maruyama; Yusaku Sugimura; Ayumi Tezuka; Atushi J. Nagano; Tatsuhiro Ezawa
2. 発表標題 Distinct gene regulatory networks for phosphate acquisition and carbon-phosphate trade-offs in mycorrhizal plants
3. 学会等名 60th Annual Meeting of the Japanese Society of Plant Physiologists (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 Maruyama, H., Yokoyama, K., Kikuchi, Y., Nakanishi, N., Abe, A., Sone, T., Saito, K., Masuta, C. and Ezawa, T.
2 . 発表標題 PHO1-type fungal transporter is responsible for phosphate export to the host in arbuscular mycorrhizal symbiosis
3 . 学会等名 3rd International Molecular Mycorrhiza Meeting (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Suzuki, M., Nakanishi, N., Maeda, T., Kobayashi, Y., Kawaguchi, M., Tawaraya, T., Maruyama, H., Masuta, C. and Ezawa, T.
2 . 発表標題 An identical virus found in three intercontinental isolates of <i>Rhizophagus clarus</i> is absent in the host genome, but positively selected in acidic soil
3 . 学会等名 3rd International Molecular Mycorrhiza Meeting (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Ezawa, T., Kikuchi, Y., Hijikata, N., Ohtomo, R., Handa, Y., Kawaguchi, M., Saito, K. and Masuta, C.
2 . 発表標題 Molecular mechanism of long-distance phosphorus transport in arbuscular mycorrhizas as revealed by virus-induced gene silencing
3 . 学会等名 9th International Conference on Mycorrhiza (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Thi Cuc, N., Koide, M., Kikuchi, Y., Ezawa, T. and Saito, K.
2 . 発表標題 Catalytic properties of vacuolar transporter chaperon 4 (VTC4) protein in arbuscular mycorrhizal fungus <i>Rhizosphagus irregularis</i>
3 . 学会等名 9th International Conference on Mycorrhiza (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 Hachiya, S., Inamura, N., Sato, T., Ezawa, T., Cheng, W. and Tawaraya, K.
2. 発表標題 Low-phosphorus conditions increase release of acid phosphatase (or acid phosphatase secretion) from extraradical hyphae of <i>Rhizophagus clarus</i>
3. 学会等名 9th International Conference on Mycorrhiza
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Maruyama, H., Yokoyama, K., Kikuchi, Y., Nakanishi, N., Abe, A., Sone, T., Saito, K., Masuta, C. and Ezawa, T.
2. 発表標題 PHO1-type transporter of arbuscular mycorrhizal fungi mediates phosphate export in the plant-fungal interface
3. 学会等名 9th International Conference on Mycorrhiza
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Nakanishi, N., Sugimura, Y., Maruyama, H. and Ezawa, T.
2. 発表標題 Molecular basis for mycorrhizal functioning in plant survival and establishment in acidic soil
3. 学会等名 9th International Conference on Mycorrhiza
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小林裕樹・前田太郎・山口勝司・亀岡啓・田中幸子・江沢辰広・重信秀治・川口 正代司
2. 発表標題 国内産アーバスキュラー菌根菌 <i>Rhizophagus clarus</i> HR1株の新規ゲノム解析
3. 学会等名 環境微生物系合同大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 江沢辰広・河原愛・鈴木芽以・中西夏輝・丸山隼人・増田税
2. 発表標題 菌根共生による植物耐酸性の限界突破...そんなに単純じゃない: 第三のプレーヤー候補マイコウィルス
3. 学会等名 環境微生物系合同大会(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 蜂矢志保美・稲村希・佐藤匠・江沢辰広・程為国・俵谷圭太郎
2. 発表標題 アーバスキュラー菌根菌 <i>Rhizophagus clarus</i> の外生菌糸から浸出される酸性ホスファターゼ活性の低リン酸応答
3. 学会等名 日本土壌肥料学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中西夏輝・丸山隼人・江沢辰広
2. 発表標題 耐酸性アーバスキュラー菌根菌との共生による植物の耐酸性獲得とその分子メカニズム
3. 学会等名 日本土壌肥料学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 丸山隼人・手塚あゆみ・永野惇・江沢辰広
2. 発表標題 菌根経路からのリン酸獲得に対する植物の特異的トランスクリプトーム応答
3. 学会等名 日本土壌肥料学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Suzuki, M., Duan, Y., Nakanishi, N., Maeda, T., Kobayashi, Y., Kawaguchi, M., Tawaraya, T., Maruyama, H., Masuta, C. and Ezawa, T.
2. 発表標題 Identical mitovirus in three intercontinental isolates of an obligate plant symbiont <i>Rhizophagus clarus</i> : absence in the host genome and selective replication in acidic soil
3. 学会等名 4th International Mycovirus Symposium (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 丸山隼人・江沢辰広
2. 発表標題 アーバスキュラー菌根菌における宿主へのリン酸供給の分子機構
3. 学会等名 菌根研究会大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 杉村悠作・丸山隼人・横山楓・菊池裕介・中西夏輝・阿部歩・曾根輝雄・齋藤勝晴・増田税・江沢辰広
2. 発表標題 免疫電顕法を用いたアーバスキュラー菌根菌PH01型リン酸排出輸送体の局在解析
3. 学会等名 日本植物生理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 quisition through the mycorrhizal pathway via transcriptome responses in <i>Nicotiana benthamiana</i> Maruyama, H., Tezuka, A., Nagano, A.J. and Ezawa, T.
2. 発表標題 Estimation of phosphate acquisition through the mycorrhizal pathway via transcriptome responses in <i>Nicotiana benthamiana</i>
3. 学会等名 日本植物生理学会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	増田 税 (Masuta Chikara) (60281854)	北海道大学・農学研究院・教授 (10101)	
研究 分担者	曾根 輝雄 (Sone Teruo) (00333633)	北海道大学・農学研究院・教授 (10101)	