

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K05869

研究課題名(和文) H₂O₂高分泌植物と樹木有機物-鉄新錯体との根圏フェントン反応による農地環境修復研究課題名(英文) Remediation of the agricultural environments using the plant species with roots containing high H₂O₂ in the presence of woody plant organics-Fe complex via rhizosphere Fenton reaction

研究代表者

我妻 忠雄 (Wagatsuma, Tadao)

山形大学・農学部・客員教授

研究者番号：70007079

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：樹木phenolics-Fe錯体資材を創製し、Fenton反応による有機汚染代替物MBの分解、米ぬか・phytic acidからのPi遊離を立証した。NO₃ラジカル生成による脱窒防止/土壌有機化が示唆された。確立したBES-H₂O₂法で、有機物と非晶質Fe₃+酸化物投与による土壌H₂O₂濃度の上昇が明らかとなった。H₂O₂濃度とpHの関係式の上部はH₂O₂化学分解によるH₂OとO₂生成エリア、下部はFeとのFenton/Pseudo-Fenton反応による・OH生成エリアと整理され、高H₂O₂分泌植物根の高pHでのH₂OとO₂の生成は、土壌通気性を改善しアルカリ土壌耐性に貢献出来ると考えた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

間伐材に大量に含まれ難生物分解性phenolicsをFeと錯体化し資源有効化を図り、以下を初めて明らかにした。有機体PからのPi遊離がFenton純化学反応で可能。植物・土壌のH₂O₂の濃度を、簡易なBES-H₂O₂蛍光顕微鏡法で測定。有機物と非晶質Fe₃+酸化物の投入で、土壌H₂O₂濃度を上昇。Fenton系でのNO₃-の存在でNO₃ラジカルが生成し、これは土壌有機物に取り込まれ、容易に脱窒を回避できる。アルカリ性で土壌H₂O₂が化学的にH₂OとO₂に分解され、通気性改善で植物のアルカリ土壌耐性に貢献。キク科植物根apoplastの高H₂O₂とaquaporinとの関連性。

研究成果の概要(英文)：We produced a new Fe-material complexed with wood phenolics for Fenton reaction. MB as the alternative organic pollutant was decomposed, and Pi was solubilized from rice bran and phytic acid by Fenton reaction. The highest soil H₂O₂ was found by the application of organic matter and amorphous Fe₃-oxide based on the newly established BES-H₂O₂ fluorescent method. Above portion of the correlation equation line between H₂O₂ concentration and pH was regarded as the H₂O and O₂ formation area and the below portion as the ・OH formation area by Fenton/Pseudo-Fenton reaction. Formation of H₂O and O₂ by chemical reaction under high pH conditions can contribute to the plant tolerant strategy for alkaline soil through the alleviation of soil aeration. NO₃ radical was suggested to be formed in the system composed of Fe, H₂O₂ and nitrate, and to be combined with the soil organic matters. The highest root apoplast H₂O₂ in Asteraceae plants could be scavenged by the H₂O₂ aquaporin inhibitor AgNO₃.

研究分野：植物栄養学・土壌学

キーワード：過酸化水素高分泌性植物 樹木フェノリックスー鉄錯体 根圏フェントン反応 脱窒の抑制 OHラジカル NO₃ラジカル Ferrihydrite

1. 研究開始当初の背景

農地を取り巻く水系・土壌系環境には、残留農薬や各種有害有機化学物質が存在し、安心できる食糧生産のネックとなっており、種々の修復法が適応されているが、それらには多くの難点がある。いまこそ、それらにとって代わる水系・土壌系の優良な修復法が必要である。我々は、根細胞壁に高濃度の過酸化水素(H_2O_2)を有する植物群が有り、湿生植物タウコギは、この H_2O_2 と湛水土壌溶液中の高濃度の Fe^{2+} との Fenton 反応によってラジカルを発生させ、化学的に非常に安定で強い温室効果を有する根圏メタンを酸化菌の 2 桁以上の高速で消失させ (Wagatsuma et al. 2021)、他のキク科植物は、 Fe^{3+} 有機試薬錯体の投与で、この機構によって石油系炭化水素や除草剤アトラジン汚染を除去・分解できることを、世界で初めて見出した (Prematuri et al. 2000, Wagatsuma et al. 2023)。

2. 研究の目的

現在、 Fe^{3+} と錯形成可能なフェノール性物質を高濃度に含む樹木などの未利用資源が莫大に放置されている。そこで、この資源の有効化・付加価値化を図るとともに、中性付近の酸化的環境でも有効・安全な天然由来フェノール性物質 Fe^{3+} 錯体新資材(A)を創製する。また、初めて見出した H_2O_2 高分泌植物を網羅的に探索し、より優れた高分泌植物種(B)を特定する。未知な H_2O_2 高分泌機構を解明するとともに、(A)と(B)を併用した新手法で農業環境を修復する。

3. 研究の方法

新しい根アポプラスト H_2O_2 濃度判定法の確立：従来は KI-starch 法を用い、また、これは広く用いられているが、0.5 M KI という高濃度によって根の正常性が失われている可能性が考えられた。そこで、今回、BES- H_2O_2 (cell-permeant)試薬とともに、世界で初めて BES- H_2O_2 (cell-impermeant) 試薬 (in HEPES buffer, pH 7.5) による蛍光顕微鏡法を検討することとした (BES, 6'-O-pentafluorobenzen sulfonyl-2',7'-difluorofluorescein)。BES- H_2O_2 は、 H_2O_2 に specific な蛍光染色剤である。 H_2O_2 は、OH の供給によって強力な酸化分解力を有する・OH を生成し、これによって、BES から、485 nm UV で蛍光を発する DFF が分離する。従来は、蛍光プローブとして DCFH (2',7'-dichlorofluorescein) が多用されてきたが、この試薬は H_2O_2 への特異性が低いことが解っている。また、BES- H_2O_2 (cell-permeant)は、最近、生物の H_2O_2 蛍光プローブとして用いた報告があるが (Tsukagoshi et al. 2010)、これは細胞内部の H_2O_2 を見たものであり、apoplast H_2O_2 を調べた報告は、今のところない。そこで、初めての挑戦を行うこととした。**根 apoplast 高濃度 H_2O_2 分泌の意義に関する検討**：Wagatsuma et al. (2023)は、根 apoplast 高濃度 H_2O_2 を 17 目 24 科 59 種の植物に関して調査した結果、植物の系統樹の最も新しく分岐した目の一つであるキク目(93 Myr [9,300 万年前])に分岐、Bremner et al. 2004, Zhang et al. 2016) のうち分岐の早いキキョウ科を除いて分岐が最も遅いキク科植物 (51 Mya) の調べたすべての種の根で高濃度分泌が確認された。キク目の系統樹と自生植物の生息・生息地の特徴との関係を調べた結果、キク目の発生・生息は、高塩・乾燥地帯であることが解った (Wagatsuma et al. 2023) (なお、キキョウ科は、非高塩・非アルカリ性土壌地帯に生息)。そこで、キク科植物の H_2O_2 高分泌性と高塩・乾燥耐性との関係を調査することとした。すなわち、in vitro 系で、(i) 溶存 H_2O_2 濃度と高塩あるいは高 pH との関係、(ii) H_2O_2 と OH の接触時間との関係、(iii) 接触後の溶存 O_2 濃度 (溶存酸素系で測定)、(iv) pH と H_2O_2 濃度との関係、を調査した。**樹木 Phenolics-Fe 新素材の創製**：生物環境で循環している有機炭素の約 40% を占る植物 Phenolics (Lewis 2000)は、Al などと錯体を作りやすく (Tahara et al. 2014)、ユーカリ (*Eucalyptus camaldulensis*) は、世界で最も多く植栽されている樹種の一つで、加水分解性タンニンを豊富に含んでいる。そこで、ユーカリ葉を、70% 含水アセトンで抽出後、アセトンを除去し、遠心、上清に 5 mM phenolics を含むように調整後、5 mM $FeCl_3$ を添加し、pH を 4、5、6 に調整し、更にアセトンを除いたのち凍結乾燥し、Phenolics-Fe 錯体の粉末を得た。これを水に再溶解、遠心し、可溶性画分 A、不溶性画分 B を得、これらをメチレンブルー (MB)を用いる Fenton 反応活性の評価に用いた。なお、MB は、芳香環ヘテロ環状塩基性 (正電荷) 色素で、中心に N/S ヘテロ発色団を有し、煩雑で有害な有機汚染化合物実験にとって代わり得る代替物として用いられており、今回の研究においても、NTA-Fe 錯体に H_2O_2 を加えると MB を効果的に分解できることを、事前に確認している (詳細を省略)。**可溶性画分 A によるフィチン酸、米糠からのリン酸の遊離の検討**：Fenton 反応は、各種の有機汚染化合物を効果的に分解除去できることは我々のみならず多数報告され、また、麦わらなどの有機質資材からの CO_2 放出に関しても報告されているが (Merino et al. 2020, Chen et al. 2020 など)、各種有機質資材からのリンのような植物栄養成分の遊離に対する効果に関しては報告されていない。そこで、可溶性画分 A (pH 6)の水再溶解溶液に、フィチン酸 (*myo*-inositol hexakisphosphate, *myo*-IP₆)Na 水溶液または米ぬか懸濁液を加え、さらに 0.5 mM H_2O_2 を添加し、1 時間ごとに攪拌しつつ、室温で 5 時間反応させ、反応液中のリン酸の濃度をモリブデンブルー法で測定した。**Fenton 反応の制御による温室効果ガス発生・窒素ロスの阻止の可能性の検討**：(i) 嫌気湛水土壌系での実験：Masuda and Senoo(2017, 2021, 2022, 2023)は、水田に Fe 資材を投入すると鉄還元バクテリア活性の増大を通じた土壌窒素固定量の増大によってイネが増収したと報告した。他方、Ding et al.(2014), Li et al. (2018), Wan et al. (2022)や他の研究では、嫌気環境では anamox, Feamox, NAFO 機構を通じて NH_4^+ はロスすると報告していて両者は相対立している。しかしながら、い

ずれの研究においても、窒素(N)の挙動に対する純化学反応である Fenton 反応の関与に関しては、全く検討・考慮されていない。そこで、in vitro 系での嫌気環境で、イナワラ・Fe 資材の有無による N などの挙動を調査した。なお、短範囲規則度 Short-range-order Fe(III)鉱物 (SRO)、結晶性 Fe(II)含有鉱物が、Fenton 反応による・OH 生成能が高いことは既に報告されているので (Wang et al. 2010, Sun et al. 2015, Choquehuanca et al. 2021)、本研究では、SRO である Ferrihydrite を Villacís-García et al. (2015)に基づいて新たに合成して用いた。この鉱物の同定は、XRD によって行った。山形大農場有機イネ圃場の風乾土(無施肥)を窒素ガス封入のもとで H₂O を加え、19 日間 preincubation して土壌微生物を活性化させた後、12 日間、以下の本処理を N₂ 下で行った：(1) Soil <S>, (2) Soil [S] +Rice straw powder [R] <SR>, (3) Soil [S] + Ferrihydrite [F] <SF>, (4) S + R + F <SRF>。本処理終了後、Vial 上部のガス中の CO₂ を GC-TCD で測定した。土壌溶液は、No. 2 ロシで濾過後、さらに 0.45 μm membrane filter でろ過し、直ぐに 0.5 M H₂SO₄ を添加して酸性化した後、口液中の全 Fe 濃度を ICP-MS で測定した。土壌の可給態 Fe²⁺濃度は、0.5 M HCl による土壌抽出溶液を o-Phenanthroline spectrometry の 510 nm 値から求め、土壌の NH₄⁺と NO₃⁻濃度は、10 % KCl での抽出液を、それぞれ Nitroprusside 法 (510 nm)、Sulfanilamide-N-(1-naphthyl) ethylenediamine · 2HCl 法 (540 nm) で測定した。なお、濾過後の土壌はすぐに凍結保存した。H₂O₂ 濃度は、溶液 pH を約 6 程度に調節後に BES-H₂O₂ 試薬を加え、その蛍光強度を数値化して求めた。この方法は、未だ報告されていず、本課題研究で開発した新規なものである。凍結土壌を風乾後、Balieri et al. (2007) 法を応用し、土壌を 0.5 M NaOH で抽出し、1 M HCl で沈殿させた画分を crude humic acid (Crude HA)、上澄み液を crude fulvic acid (Crude FA)とし、それらの全炭素 (C)、全窒素 (N) を CN コーダーと全有機態炭素計で測定した。(ii) Fenton 反応による NO₃⁻ラジカル(・NO₃) の生成、・NO₃ と土壌有機物代替物 Cellulose acetate powder (CA)との反応に関する実験：放射線化学研究で HNO₃ は・OH によって・NO₃ となることが解っている (Poskrebyshev et al. 2001)。また、大気化学、地球物理学、物理化学研究で・NO₃⁻/・NO₂ は、各種蛋白質・脂質・アルキル・フラン類などと即座に反応して、ニトロ化合物などに変化することが多数報告されている (Augusto et al. 2002, Lee Ng et al. 2017, Rissanen et al. 2018 ほか)。土壌有機物での実験の第一段階として、土壌有機物代替物として Cellulose acetate powder (CA)を用い、以下の区を設け、(A,B,E,F)は 1 日間、(C,D)は、CA を加える前に 1 日間、加えた後に更に 1 日間 incubate した：(A) 2 mM FeSO₄, (B) 2 mM HNO₃ + FeSO₄, (C) HNO₃ + FeSO₄ + CA, (D) HNO₃ + FeSO₄ + 2 mM H₂O₂ + CA, (E) HNO₃ + FeSO₄ + H₂O₂, (F) FeSO₄ + H₂O₂。処理後の口液は、190 ~ 800 nm の範囲の Absorbance を測定し、酢酸は、「E - キット Liquid 酢酸」の酵素反応液を 340 nm で測定した。CA は、乾燥後に CN コーダーによる全 C と全 N の測定と IR 分析計による IR 吸収 spectra を解析した。

4. 研究成果

(1) 細胞内 H₂O₂ は、非キク科植物根ではキュウリ根端が非常に弱く、オオムギでは全く検出されなかったが、キク科のマリーゴールドでは弱く検出された。他方、apoplast H₂O₂ は、キュウリで非常に弱かったが、キク科のマリーゴールドやペニバナでは非常に高濃度検出され、以前の KI-starch 法の結果と一致するとともに、より詳細・微妙な相違も検出できた。本法による apoplast H₂O₂ の検出は世界初である。

(2) H₂O₂ 溶存濃度は、高塩(NaCl)には無反応であるが、アルカリ条件では OH⁻と接触後、速やかに分解し、H₂O₂ 濃度依存的に O₂ が生成された。pH (Y)と Log H₂O₂ (μM) (X)との関係は、 $Y = -0.155 X + 6.39$ ($R^2 = 0.7937$, $P < 0.05$)であることが解った。Isbell et al. (1981)他の報告では、H₂O₂ に OH⁻が加えられると Perhydrolysis (過加水分解反応)が起こり、数段階の連鎖・非連鎖反応を経て最終的には、 $3 H_2O_2 \rightarrow 2 \cdot OH + 2 H_2O + O_2$ の式にまとめられることが解っている。結局、この関係式の上部は、O₂、H₂O、・OH 供給領域であり、下部は、Fe/Amorphous Fe oxides 存在下での Fenton/Pseudo-Fenton(PF)反応領域であると整理され、低濃度 H₂O₂ ほど、両領域の境界 pH が高かった。実際の根圏 H₂O₂ 濃度は、我々の種々の測定により 200 μM ~ 1.7 mM 程度(結果は省略)であることを考慮すると、土壌 pH が中性付近以上では、根圏 H₂O₂ の分解反応が起こり、根圏に H₂O と O₂ が供給されると推定された。以上より、高塩・乾燥化で分岐したキク科植物は、根から構成的に H₂O₂ を分泌し、アルカリ条件で速やかに H₂O、O₂ に分解されることによって、アルカリ性土壌における土壌の団粒破壊・緻密化による通気性の不良 (Crescimanno et al. 1995, Barzegar et al. 1997 他)に対処できるという戦略を持つ可能性が予想された。土壌・水系の各種 bacteria や赤潮藻類 (*Heterosigma akashiwo*)の H₂O₂ や・O₂ の放出能に関しては幾つかの報告が有るが (Bond et al. 2020, Diaz et al. 2013, Taylor and Haigh 1993 他)、高等植物であるキク科植物の、このような H₂O₂ の分泌は、未だ、他に報告がない。なお、最近、各種植物のアルカリ環境での酸化ストレス回避法としての根外への根細胞膜 Aquaporin PIP2 の関与が報告された(Zhang et al. 2023)が、これは非常事態時の細胞内ストレス回避戦略であり、キク科植物の構成的な H₂O₂ 分泌戦略、いいかえると H₂O₂ 高分泌植物の存在とは異質な機構であると思われる。我々の研究の進展は、高塩・乾燥地帯に耐える植物・作物の創製に貢献できる可能性が期待された。予備的な実験で、この大量の H₂O₂ の構成的分泌への根細胞膜中の、ある種の Aquaporin の関与が示唆されており、現在さらに検討中である。

(3) 新たに創製された樹木由来 Phenolics と Fe³⁺との錯体と H₂O₂ との Fenton 反応によっ

て、有機体リンから Pi が遊離されることが見い出された。従来は、特異的な加水分解酵素や微生物による Pi の遊離が報告されているが、基質特異性を考慮する必要のない純化学反応で Pi を遊離できることは非常に有益な結果であるとともに、遊離した Pi が、Fe ion と反応して沈殿・不可給化する恐れのない錯体であることも非常に有利な特性であると考えられる。また、草地土壌などでは、光学異性体の *scyllo*-IP₆ が *myo*-IP₆ と同程度含まれ、施肥・栽培作物によっても、その蓄積傾向が異なり (Turner and Richrdson 2004, Cheesman et al. 2014, Neal et al. 2017, 2021)、*scyllo*-IP₆ の分解・利用機構は未だ不明であり、土壌中の資化性細菌数は *myo*-IP₆ よりも著しく少ないことが解っている (海野 2002)。更に、IP₆ は、種々の土壌中で全有機態リンの 1/3 以下であり、1/2 近くは Acid phosphatase + nuclease + phytase の酵素混合液でも Pi を遊離しない安定な高分子として存在する (Jarosch et al. 2015)。また、IP₆ は、長年、主要な有機態リンとして考えられてきたが、50 % 以上が腐植酸を含む高分子画分に P-O-C の phosphomonoester の形で存在すると報告されている (McLean et al. 2020)。以上のように、有機態リンからの Pi の遊離策には各種の困難性があると報告されている。しかしながら、我々が見出した、Phenolics-Fe 錯体による Fenton 反応を利用すれば、Fenton 反応には基質特異性がないので、効果的に Pi を遊離させ、種々の有機体リンを有効化させることが可能となるものと期待される。

(4) Ferrihydrite を合成し XRD 解析の結果、この Fe 酸化物は、結晶化度の最も低い 2-line ferrihydrite (Drits et al. 1993) と同定された。嫌気条件下での ±イナワラ、±Ferrihydrite の湛水土壌処理の結果、土壌溶液中の Fe 濃度は、数 μM 程度と極めて低く、好気土壌での値に近く、土壌の還元はほんのわずかしが進行していなかったと思われる (Linsay and Schwab 1982, Läuchli et al. 2012)。また、土壌の Eh は、ほぼ +200 mV 程度であると推定された (Ponnaperuma et al. 1967, Wlodarczyk et al. 2007)。SR 区では、NO₃⁻の低下と NH₄⁺の大量の生成が認められ、脱窒とイナワラ分解が進行していたものと推定された。一方、SRF 区では、0.5 M HCl 可溶性 Fe に占める Fe²⁺の割合が高く、これは Ferrihydrite 由来の Fe³⁺が酸化鉄表面で還元されたことを示唆している。また、NO₃⁻が顕著に低下し、CO₂ 生成も顕著であった。このことは、土壌微生物由来の H₂O₂ と Ferrihydrite との PF 反応が進行し、生成した・OH が NO₃⁻を消去した可能性が予想された。なお、BES-H₂O₂法による土壌溶液中の H₂O₂ 濃度の順位は、SRF > SF > SR > S であり、SRF 区では、200 μM 以上であったので、この高濃度の H₂O₂ が Ferrihydrite 表面の Fe³⁺と反応して Fe²⁺を還元し、生じた Fe²⁺と残りの H₂O₂ との Fenton 反応によってイナワラ分解が進行して大量の CO₂ を発生させたものと考えられ、これら一連の反応は、PF 反応に該当する。土壌腐植 Crude HA と Crude FA の全 C、全 N 分析の結果では、SRF 区で Crude FA の N/C 比が有意に低く、これは Crude FA の一部が PF 反応によって高 N 有機物として失われ、土壌への有機物と非晶質 Fe³⁺酸化物の投与が、土壌の有機体窒素の有効化に効果的であることを示唆している。次いで、NO₃⁻の大幅減少が PF 反応によるものか否かを推定するために、有機物の存否 (本研究では、Cellulose acetate powder, CA) NO₃⁻、Fe²⁺、H₂O₂ 共存溶液中での in vitro 実験を行った。・OH の存在量を、今回、190 ~ 800 nm Absorbance で簡易に調査した。その結果、Fenton 区で、205、300 nm 付近に二つの極大値を持つ曲線が得られた。本法のような簡易な・OH 検出方法は未だ報告のない新規なものである。また、(F) - (A) (= G とする) は、生成された全・OH 量、(E) - (B) (= H とする) は、全・OH が NO₃⁻と反応し・NO₃を生成した残余の・OH 量、(D) - (C) (= I とする) は、全・OH が NO₃⁻、CA と反応して、・NO₃、・CA、CA 断片物を生成した後の残余・OH 量を、それぞれ示すと考えられた。それらの順位は、G > H > I であり、・NO₃の生成には全・OH の約 1/6、・NO₃や・CA や CA 断片物の生成には全・OH の約 1/3 が、それぞれ消費されると考えられた。IR 吸収スペクトル解析では、Acetylation specific wave number の 3525-3564 cm⁻¹(-OH)、1747-1751 cm⁻¹(C=O)、1377 cm⁻¹(C-H)、1242 cm⁻¹(-CO-) (Djuned et al. 2014, Yunita et al. 2018, Tulos et al. 2019, Huda et al. 2019 他)の全てで Transmittance (%)が(D)で高まった。このことは、Acetyl 基が失われたことを示している。なお、・NO₃は、Cellulose acetate の Acetyl 基と反応して、NO₃⁻、・CH₃、CO₂を生ずることが報告されており、・NO₃のラジカルが転移することが解っている (Exner et al. 1994)。また、溶液中には Acetate は全く検出されず、CA の全 C、全 N 分析では、N が全く検出されなかった。以上から、Fenton 反応が起こると、共存する NO₃⁻はラジカル化されて・NO₃となり、これは、共存する有機物と反応すると考えられた。今回用いた有機物代替物の CA では、・NO₃の有機化は証明できなかったが、Ng et al. (2017)、Newland et al. (2022)他の研究から、生成された・NO₃は有機化されるものと推定される。以上の結果、嫌気湛水 Ferrihydrite 添加土壌で、NO₃⁻が著しく低下したのは、脱窒によるものではなく、PF 反応によって・NO₃としてラジカル化され、さらに、それが、土壌中の有機物に有機化されて取り込まれたものと推定された。土壌中の NO₃⁻の脱窒を PF 反応によって防止できることになれば、脱窒の過程で生ずる温室効果ガス N₂O の発生を防止するだけでなく、NO₃⁻による環境汚染の防止、さらに、施用窒素肥料の有効利用にも大きく貢献できる可能性があることを、本研究が世界で初めて示唆したものと考える。

<引用文献>

都合により、省略する。web など、十分に検索可能である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tadao Wagatsuma, Takashi Otani, Nobuyasu Seike, Sayuri Namiki, Tomohiro Ezura, Rina Fitriana, MSH Khan, Keitaro Tawaraya	4. 巻 4
2. 論文標題 Asteraceae degrade atrazine in the presence of iron under circumneutral conditions via a rhizosphere Fenton reaction	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Plant and Soil	6. 最初と最後の頁 101-121
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11104-021-05102-9	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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 我妻忠雄、俵谷圭太郎、程為国、渡部敏裕、丸山隼人、和崎淳
2. 発表標題 根圏の有機物・ガスに関する植物栄養学研究の一視点－根の細胞壁・細胞膜での各種の化学的・物理的な力と下流遺伝子群への注目
3. 学会等名 日本土壌肥料学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 我妻忠雄、田原恒、且原真木、土屋善幸、俵谷圭太郎
2. 発表標題 鉄との協同による植物の新規な根圏改変機能－根圏フェントン反応による有機環境の改変・ストレスの回避
3. 学会等名 日本土壌肥料学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 我妻忠雄、Toan Nguyen Sy、程為国、田原恒、且原真木、土屋善幸、俵谷圭太郎
2. 発表標題 根圏でのH ₂ O ₂ とFeによるFenton反応を制御して、有機質資源と地球温暖化阻止を進める
3. 学会等名 日本土壌肥料学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 我妻忠雄、且原真木、土屋善幸、田原恒、Toan Nguyen Sy、程為国、俵谷圭太郎、塩野義人、本間幸
2. 発表標題 根圏のH2O2・鉄・有機物を制御して環境修復・地球温暖化阻止・有機物利用を進める
3. 学会等名 日本土壌肥料学会
4. 発表年 2024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	且原 真木 (Katsuhara Maki) (00211847)	岡山大学・資源植物科学研究所・教授 (15301)	
研究分担者	俵谷 圭太郎 (Tawaraya Keitaro) (70179919)	山形大学・農学部・教授 (11501)	
研究分担者	田原 恒 (Tahara Kou) (70445740)	国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員 等 (82105)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------