

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 9 日現在

機関番号：30109

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K12299

研究課題名（和文）植物による根圏土壌中の活性塩基生成が土壌炭素隔離に及ぼす影響の解明

研究課題名（英文）The effect of active base production by plants in rhizosphere soils on soil carbon sequestration

研究代表者

保原 達（Hobara, Satoru）

酪農学園大学・農食環境学群・教授

研究者番号：70391159

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、植物による根圏土壌中の活性塩基生成が土壌炭素隔離に及ぼす影響を解明することを目的とした。まず、複数の栽培実験によりイネをはじめとする植物の根圏土壌を調べ、特にケイ酸吸収能の高いイネの根圏でアルミや鉄、そして吸着性の溶存有機炭素が多く、植物のケイ酸吸収によって根圏土壌中の塩基が活性化して有機物と結びつき、炭素蓄積をもたらしていることが示唆された。また難分解性土壌有機物の分解実験により、活性塩基と有機物の結びつきの脱着を促すような物質を添加することで分解が促進される可能性が示唆された。これらのことから、本研究により植物根圏における塩基の活性と土壌炭素隔離との関係が明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、植物が根圏土壌の塩基活性化や植物根が関係する新たなプロセスを通じて土壌の炭素蓄積隔離に影響するメカニズムを提示するとともに、そのプロセスによって蓄積する炭素が将来的に放出される過程でも同様の塩基と有機物の結びつきが深く関係していることを示唆している。これらの研究成果から、土壌中における活性塩基と有機物の関係は、植物を介して土壌への難分解性有機物および炭素の蓄積と放出の双方に関与すると考えられ、今後これが地球や地域の規模でどれほどの影響に及ぶかについてさらなる研究が必要と考えられた。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study was to elucidate the effect of reactive base production by plants in rhizosphere soils on soil carbon sequestration. First, we investigated the rhizosphere soils of rice and other plants through several cultivation experiments, and found that the rhizosphere of rice plants with high silica absorption capacity has high levels of aluminum, iron, and adsorbed dissolved organic carbon, suggesting that the bases in the rhizosphere soil are activated by plant absorption of silica, and are associated with organic matter, leading to carbon accumulation. Experiments on the decomposition of recalcitrant soil organic matter suggested that the addition of substances that promote the desorption of reactive base-organic matter associations may accelerate decomposition. Thus, the present study clarified the relationship between the reactivity of bases in the plant rhizosphere and soil carbon sequestration.

研究分野：環境科学

キーワード：土壌炭素 土壌有機物 根圏土壌 ケイ酸吸収 炭素隔離

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

土壌有機物は陸域最大の炭素貯蔵体であり、炭素を数千年以上に渡り保持しうる (Schlesinger 1990)。そのため、土壌有機物の蓄積メカニズムや、蓄積された土壌有機物の環境変動への応答に関心が寄せられている。近年、土壌有機物を通じた長期炭素貯蔵や炭素隔離に土壌有機物の土壌鉱物間への強い吸着が関与していることが指摘されている (Schmidt et al. 2011)。土壌鉱物の一部は、土壌有機物と強く結びついてこれを保持しうる (Guggenberger and Kaiser 2003)。特に、土壌鉱物表面の活性を持った塩基 (非晶質の水酸化アルミニウム及び水酸化鉄) は、土壌有機物と安定的な結合体を形成する (Shoji and Fujiwara 1984)。こうした活性塩基は土壌中の鉱物風化や溶脱の結果として自然環境下で徐々に生成されると考えられている (Dahlgren et al. 2004)、実際にどのような過程を経て生成されるのか、またこの生成過程を促進させる機構などについては、これまでほとんど明らかになっていなかった。

土壌中の活性塩基生成を促進させる自然の機構として、我々は以前から、植物による根圏作用を明らかにしてきた。具体的には、我々は植物が土壌中のケイ酸 ( $\text{SiO}_2$ ) 吸収を通じて根圏土壌の活性塩基 (特にアルミニウムと鉄) の生成を促進させることを発見した (Hobara et al. 2016)。これは、鉱物の主要な構成要素であるケイ酸が風化により鉱物から溶出したのちにイネ科植物 (ケイ酸を多く必要とする) などによって多量に吸収されることで、土壌からケイ酸が多く除去され、他方でケイ酸に次いで土壌鉱物中に多い塩基類が相対的に残るためと考えられる (Hobara et al. 2016)。これにより増加する活性塩基は土壌有機物を強く吸着しうるため、結果として植物は根圏土壌鉱物への作用を通じて土壌有機物の保持・蓄積を導く可能性があると考えられる。

こうした植物による活性塩基の生成促進は、実際の土壌有機物の蓄積にどれほど寄与するのだろうか？また、このプロセスによって蓄積した炭素はどれほどの安定性を示しうるのだろうか？高いケイ酸吸収能を示すとされるイネ科植物が主体の草地では土壌有機物が多量に長期蓄積される事例が見られ (De Deyn et al. 2008)、植物のケイ酸吸収を通じた活性塩基生成促進が土壌有機物の長期蓄積に寄与している可能性が考えられる。しかしながら、植物作用を通じた活性塩基生成が実際にどれほどの土壌有機物の蓄積に繋がるのか、そしてこれにより蓄積された土壌有機物は安定に保持されるのか、といった実質的な炭素隔離への寄与の可能性に関してはほとんど確かめられていなかった。

### 2. 研究の目的

本研究では、植物による根圏土壌中の活性塩基生成が土壌炭素隔離に及ぼす影響を解明するため、植物の根圏における活性塩基生成促進作用の土壌有機物蓄積に対する寄与、及び根圏で生成された活性塩基によって保持される土壌有機物の安定性を明らかにすることを目的とした。これらを明らかにすることによって植物による活性塩基の生成が土壌有機物の蓄積にどれほど寄与するかについての知見が得られ、さらに当該プロセスで蓄積した炭素がどれほどの安定性を示すかが明らかとなる。これらを通して、植物による根圏土壌中の活性塩基生成が土壌炭素隔離にどのような実質的影響を及ぼすかを明らかにすることとした。

### 3. 研究の方法

第一の目的である植物の根圏における活性塩基生成促進作用の土壌有機物蓄積に対する寄与については、ケイ酸吸収能の異なるイネやその他植物の根圏土壌を複数の栽培実験によって調べた。主な栽培実験は、ケイ酸吸収に関わるトランスポーター欠損株 (*Isi1*) を用いた実験で、これと野生株 (WT: Wild type) とで、根圏土壌の活性塩基や吸着性の溶存有機物を比較することによって、植物 (特にイネ) のケイ酸吸収が根圏土壌の塩基や炭素に及ぼす影響について調べた。また、こうしたプロセスに関わるイネの根の特性を知るため、栽培時のカリウム環境をコントロールした条件を設定した栽培も行った。この条件設定による研究では、根表面の細胞壁の化学特性や根の形態などが調べられた。さらに、第二の目的である根圏で生成された活性塩基によって保持される土壌有機物の安定性については、塩基と土壌有機物が結びついている難分解性の有機物を用いた分解実験を複数実施して調べた。これらの分解実験では、生化学的に塩基と有機物の結合を脱着させると考えられるリン酸やクエン酸などを添加して、その影響からそうした有機物の分解性を調べた。

#### 4. 研究成果

ケイ酸吸収能の異なるイネやその他植物の根圏土壌を複数の栽培実験によって調べた。その結果、いずれの栽培試験においてもケイ酸吸収能の高い植物、特にイネの根圏において、アルミニウムや鉄、そして吸着性の溶存有機炭素が多くなることが明らかになった（杉村 2020、Kusa et al. 2021、Moriizumi et al. 2021）。こうした実験結果から、植物のケイ酸吸収によって根圏土壌中の塩基が活性化して有機物と結びつき、炭素蓄積をもたらしていることが示唆された。

また、こうしたイネの作用が根のどのような作用によるかを明らかにするため、いくつかの土壌環境を設定して、イネの根の形態や根表面の化学特性、そして根圏土壌の塩基活性化の仕組みを調べた。その結果、カリウムを欠乏させた環境下で栽培したイネでは、通常環境下のイネに比べ根への鉄の結合が多くなったほか、根の形態にも変化が見られた。これらの結果から、イネの根では土壌中養分の欠乏によって根の形態が変化するとともに根表面の官能基が変化して（図）、根圏土壌の塩基に影響を及ぼすことが示唆された（宮城 2022、茂木 2022、茂木ら 2023）。すなわち、イネの根表面の官能基によってイネの根圏土壌の塩基が活性化されると考えられた。

さらに、活性化された塩基と結びつく難分解性土壌有機物について、生化学特性を明らかにするとともに（Hobara et al. 2020）分解実験によって検討した。その結果、活性塩基と有機物の結びつきの脱着を促すような物質、例えばリン酸やクエン酸を添加することで、こうした有機物の分解が促進されることが示唆された（河合 2022）。このことは、難分解性有機物の形成に活性塩基との結合が肝要であることを示していると考えられる。

これらの一連の研究とその結果は、植物が土壌の炭素蓄積に果たす新たなプロセスを提示するとともに、そのプロセスによって蓄積する炭素が将来的に放出される過程でも同様の塩基と有機物の結びつきが深く関係していることを示唆している。以上のことから、土壌中における活性塩基と有機物の関係は、植物を介して炭素の蓄積または放出に関与すると考えられ、これが地球や地域規模でどれほどの影響に及ぶかといったことについては、今後さらなる研究が必要と考えられた。

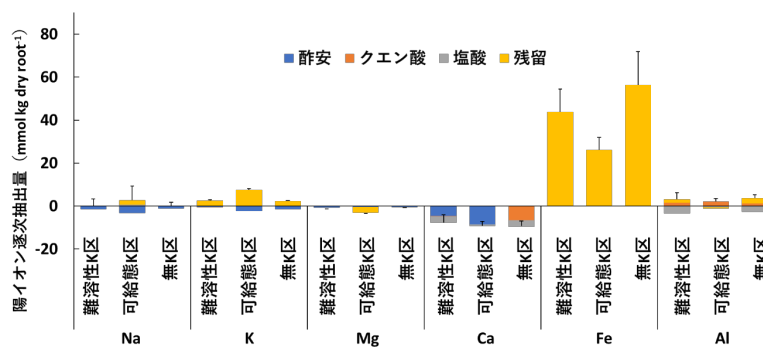


図. イネに陽イオン混合溶液 ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ) を吸着させ、その後酢酸アンモニウム→クエン酸→塩酸→残留と逐次抽出したときの各イオン溶出量のカリウム施肥による違い（茂木ら 2023 より抜粋）

#### <引用文献>

- Dahlgren, R. A., Saigusa, M., Ugolini, F. C. (2004) The nature, properties and management of volcanic soils. *Advances in Agronomy* 82: 113-182.
- De Deyn, G. B., Cornelissen, J. H. C., Bardgett, R. D. (2008) Plant functional traits and soil carbon sequestration in contrasting biomes. *Ecology Letters* 11: 516-531.
- Guggenberger, G., Kaiser, K. (2003) Dissolved organic matter in soil: challenging the paradigm of sorptive preservation. *Geoderma* 113: 289-310
- Hobara, S., Fukunaga-Yoshida, S., Suzuki, T., Matsumoto, S., Matoh, T., Ae, N. (2016) Plant silicon uptake increases active aluminum minerals in root-zone soil: Implications for plant influence on soil carbon. *Geoderma* 279: 45-52
- Hobara, S., Ogawa, H., Benner, R. (2020) Amino acids and amino sugars as molecular indicators of the origins and T alterations of organic matter in buried tephra layers. *Geoderma* <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114449>
- 河合梨江 (2022) 埋没腐植土壌からの  $\text{CO}_2$  発生量を変化させる化学物質の探索. 酪農学園大学卒業論文
- Kusa, K., Moriizumi, M., Hobara, S., Kaneko, M., Matsumoto, S., Kasuga, J., Ae, N.

(2021) Mineral weathering and silicon uptake by rice plants promote carbon storage in paddy fields. Soil Science and Plant Nutrition, <https://doi.org/10.1080/00380768.2021.1878471>

宮城 慧 (2022) カリウム欠乏環境がイネの根の形態に与える影響. 酪農学園大学卒業論文

Moriizumi, M., Ae, N., Ozawa, K., Yoshida, Y., Hamano, R., Numadate, K. (2021) Effects of weathering and silicic acid uptake by rice plants on weathered products - Quantitative changes in potassium, silica, and aluminum in granitic Fluvisol-. Soil Science and Plant Nutrition, <https://doi.org/10.1080/00380768.2021.1944307>

茂木京菜 (2022) カリウム欠乏環境でイネ (*Oryza sativa* L.) の根の細胞壁表面の吸着特性は変化するのか. 酪農学園大学修士論文

茂木京菜・宮城慧・亀岡笑・小八重善裕・中谷暢丈・金子命・森泉美穂子・春日純子・松本真悟・阿江教治・保原達 (2023) 土壌のカリウム供給能の違いがイネおよびトマトの根の特性に与える影響. 酪農学園大学紀要 47: 99-107

野崎 巧 (2021) イネ科植物の根表面における鉱物溶解の可能性. 酪農学園大学卒業論文

Schmidt, M.W.I., Torn, M.S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I.A., Kleber, M., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Manning, D.A.C., Nannipieri, P., Rasse, D.P., Weiner, S., Trumbore, S.E. (2011) Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. Nature 478: 49-56.

Schlesinger, W.H. (1990) Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils. Nature 348: 232-234

Shoji, S., Fujiwara, Y. (1984) Active Al and Fe in the humus horizons of Andosols from northeastern Japan: Their forms, properties, and significance in clay weathering. Soil Science 137: 216-226

杉村 文 (2020) 植物による根圏土壌中における活性塩基生成が土壌炭素隔離に及ぼす影響の解明. 酪農学園大学卒業論文

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 茂木京菜・宮城慧・亀岡笑・小八重善裕・中谷暢丈・金子命・森泉美穂子・春日純子・松本真悟・阿江教治・保原達	4. 巻 47
2. 論文標題 土壌のカリウム供給能の違いがイネおよびトマトの根の特性に与える影響	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 酪農学園大学紀要	6. 最初と最後の頁 99-107
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 Mihoko Moriizumi, Noriharu Ae, Kaho Ozawa, Yuki Yoshida, Rei Hamano & Kaisei Numadate	4. 巻 67
2. 論文標題 Effects of weathering and silicic acid uptake by rice plants on weathered products - Quantitative changes in potassium, silica, and aluminum in granitic Fluvisol-	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Soil Science and Plant Nutrition	6. 最初と最後の頁 439-445
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/00380768.2021.1944307	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 Hobara, S., Ogawa, H., Benner, R.	4. 巻 373
2. 論文標題 Amino acids and amino sugars as molecular indicators of the origins and alterations of organic matter in buried tephra layers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geoderma	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.geoderma.2020.114449	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 Kusa, K., Moriizumi, M., Hobara, S., Kaneko, M., Matsumoto, S., Kasuga, J., Ae, N.	4. 巻 68
2. 論文標題 Mineral weathering and silicon uptake by rice plants promote carbon storage in paddy fields	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Soil Science and Plant Nutrition	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/00380768.2021.1878471	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

〔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 茂木京菜・宮城 慧・亀岡 笑・小八重善裕・中谷暢丈・金子 命・森泉美穂子・春日純子・松本真悟・阿江教治・保原 達
2. 発表標題 土壌のカリウム供給能の違いがイネおよびトマト根表面のイオン吸着特性に与える影響
3. 学会等名 第64回日本植物生理学会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 杉村 文・保原 達・金子 命・森泉美穂子・松本真悟・春日純子・阿江教治
2. 発表標題 イネのケイ酸吸収は土壌中の炭素蓄積を増加させるか？
3. 学会等名 日本土壌肥料科学会2021年度北海道大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小川弥玲・川村美沙妃・畑中朋子・阿江教治・保原 達
2. 発表標題 イネ科植物の根細胞壁表面の官能基特性について / Functional group characteristics of the root cell wall surface of grass plants
3. 学会等名 第65回日本植物生理学会年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 杉浦和音・畑中朋子・吉田 磨・保原 達
2. 発表標題 有機物分解初期における窒素固定の可能性
3. 学会等名 日本生態学会第71回全国大会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

杉村 文(2020)植物による根圏土壌における活性塩基生成が土壤炭素隔離に及ぼす影響の解明．酪農学園大学卒業論文 野崎 巧(2021)イネ科植物の根表面における鉱物溶解の可能性．酪農学園大学卒業論文 河合梨江(2022)埋没腐植土壌からのCO2発生量を変化させる化学物質の探索．酪農学園大学卒業論文 宮城 慧(2022)カリウム欠乏環境がイネの根の形態に与える影響．酪農学園大学卒業論文 茂木京菜(2022)カリウム欠乏環境でイネ(Oryza sativa L.)の根の細胞壁表面の吸着特性は変化するのか．酪農学園大学修士論文
---

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	松本 真悟  (Matsumoto Shingo)  (00346371)	島根大学・学術研究院農生命科学系・教授   (15201)	
研究分担者	森泉 美穂子  (Moriizumi Mihoko)  (10220039)	龍谷大学・農学部・教授   (34316)	
研究分担者	澤本 卓治  (Sawamoto Takuji)  (60364246)	酪農学園大学・農食環境学群・教授   (30109)	

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
---------	---------