

## 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

茂木 京菜<sup>1)</sup>・宮城 慧<sup>2)</sup>・亀岡 笑<sup>3)</sup>・小八重 善裕<sup>1), 3)</sup>  
中谷 暢丈<sup>1), 2)</sup>・金子 命<sup>2)</sup>・森泉 美穂子<sup>4)</sup>・春日 純子<sup>5)</sup>  
松本 真悟<sup>5)</sup>・阿江 教治<sup>4)</sup>・保原 達<sup>1), 2), \*</sup>

Effects of soil potassium supply on root characteristics of rice and tomato plants

Keina MOTEGI<sup>1)</sup>, Satoshi MIYAGI<sup>2)</sup>, Emi KAMEOKA<sup>3)</sup>, Yoshihiro KOBAE<sup>1), 3)</sup>,  
Nobutake NAKATANI<sup>1), 2)</sup>, Mikoto KANEKO<sup>2)</sup>, Mihoko MORIIZUMI<sup>4)</sup>, Junko KASUGA<sup>5)</sup>,  
Shingo MATSUMOTO<sup>5)</sup>, Noriharu AE<sup>4)</sup>, and Satoru HOBARA<sup>1), 2), \*</sup>

(Accepted 2 December 2022)

### 1. はじめに

カリウム (K) は、農業上重要な肥料要素の一つである。K 肥料は天然の鉱物を主な資源としており、日本は K 肥料のほぼ全量を輸入に頼っている (農林水産省 2022)。世界的に人口が増加し続ける中で安定的に農産物供給を維持する上で、K 肥料の適切な利用管理の重要性が近年一層高まってきている (Dhillon et al. 2019)。

イネを含む一部の植物は、土壌中で植物に利用可能とされる K (主に交換態の K) が非常に少ない土壌環境下でも施肥時と変わらぬ程度の K 量を吸収して生育することが報告されている (塩田ほか 1980, 杉山・阿江 2000, 初井・井澤 2007, Kusa et al. 2021)。例えば初井・井澤 (2007) は、K の長期連用試験において、イネは無 K 条件でも K 施肥とほとんど変わらない高収量をもたらしたことを報告している。また、杉山・阿江 (2000) は、イネのポット栽培試験において土壌中の交換態以外の形態である鉱物中の K を吸収利用している可能性を示唆している。このように、イネは根圏域で起こる何らかの反応により鉱物中の K を溶解・吸収している可能性がある。

こうした鉱物中に存在する養分を植物が吸収する手段としては、根から放出される有機酸によって鉱物が風化・溶解され、鉱物中の養分が遊離し吸収される、といったプロセスが考えられる (平館 1999)。Kusa et al. (2021) は、イネがこのような機能を持つ有機酸を放出するかを調べたが、イネの根はシュウ酸をわずかに放出したのみであった。したがって、イネにおいて有機酸による鉱物中 K の吸収が卓越しているとは考えにくく、有機酸以外の鉱物溶解に依存している可能性がある。

有機酸以外に植物が鉱物中 K を可溶化させる機構として、植物根表面に存在する陽イオン交換部位が考えられる。陽イオン交換部位は古くから養分の吸収に関係する可能性が示唆されており (Jenny and Overstreet 1939)、根の一次細胞壁を構成するペクチン由来の官能基とされている (White and Broadley 2003)。近年、これら根の表面に存在する官能基がもたらす特異的な吸着部位での反応は、イネの高い K 吸収能力を説明する説として注目されている (Kusa et al. 2021)。イネではないが、この反応の例として、ラッカセイの根の表面にある金属との特異的な吸着部位が鉱物の結晶構造中に存在する 3 価の陽イオンと吸着することで、鉱物の結晶構造

1) 酪農学園大学大学院酪農学研究科

Graduate School of Dairy Science, Rakuno Gakuen University, Ebetsu, 069-8501, Japan

2) 酪農学園大学農食環境学群環境共生学類

Department of Environmental Sciences, Rakuno Gakuen University, Ebetsu, 069-8501, Japan

3) 酪農学園大学農食環境学群循環農学類

Department of Sustainable Agriculture, Rakuno Gakuen University, Ebetsu, 069-8501, Japan

4) 龍谷大学農学部

Department of Agriculture, Ryukoku University, Ohtsu, 520-2194, Japan

5) 島根大学生物資源学部

Faculty of Life and Environmental Sciences, Shimane University, Matsue, 690-8504, Japan

\* 責任著者

所属する学会：日本生態学会、日本土壌肥料学会

が崩壊し、結果的に鉍物中の構造 K が放出され、植物体への吸収が可能になることが示唆されている (Ae et al. 1996)。それゆえ、根表面に存在する官能基は、根と鉍物との相互作用において重要な役割を担うと考えられる。しかしながら、イネの根細胞壁表面に官能基がどのように存在し、どのような特性を有するかは不明である。

本研究では、土壤中の K 環境の違いによってイネの根や根細胞壁表面に存在する官能基がどのように異なるかについて明らかにすることを目的とした。そのために、イネと、それに加え対照植物として農地での K に対する要求性の高いトマトを選定し、これらを栽培して根を採取し、これらの根の形態や根の官能基のイオンの吸着に着目して試験を行った。植物の根の陽イオン交換部位の密度や、根の分布様式は、植物栽培溶液中のイオンの濃度や pH によって変化する可能性が報告されている (Yang et al. 2003, Lu et al. 2020)。さらに、イネは可給態 K の欠乏環境においても、鉍物中の K を利用する可能性が考えられていることから、培地中の K 存在形態の違いによって根細胞壁表面の官能基についても変化が生じる可能性が考えられる。そのため、K の存在形態が異なる処理区を設定して栽培を行って根を採取し、処理区間で K の吸収や根の形態を比較した。また、根表面官能基の特性評価については、通常の水田環境で生育したものを評価するために、K 施肥の有無の処理区を用いて別途イネ及びトマトを栽培して根を採取し、これら異なる K 形態の供給に対する栽培作物の応答から、イネの根細胞壁表面に存在する官能基の特性を考察した。

## 2. 材料と方法

本研究では、K 供給の違いが K の吸収および根の形態に及ぼす影響についての試験 (試験 1)、K 供給の違いが根表面の陽イオン吸着に及ぼす影響についての試験 (試験 2) を行った。以下、それぞれについて方法等の詳細を述べる。

### 2-1. K 供給の違いが K の吸収および根の形態に及ぼす影響についての試験 (試験 1)

異なる形態の K 供給が作物の栄養状態および作物の根形態に及ぼす影響を把握する試験を行うため、K 供給形態の異なる処理区を用意し、イネ (*Oryza sativa* L. cv. Nipponbare (日本晴)) とその対照作物であるトマト (*Solanum lycopersicum* (ロソナポリタン)) の栽培試験を酪農学園フィールド教育研究センター作物生産ステーションエリア II

のビニールハウス FE04 にて行った。処理区は、鉍物 K 区、可給態 K 区、無 K 区の 3 処理区を設定した。鉍物 K 区には難溶性 K 源としてカリ長石 (Kusa et al. 2021) を、可給態 K 区には塩化カリウム (KCl) をそれぞれ使用し、無 K 区は K 無施肥とした。いずれの処理区も 6 号珪砂 (北日本産業株式会社) を培地として用いたが、鉍物 K 区においてはカリ長石 (共立マテリアル株式会社) を粉砕して  $710\ \mu\text{m}$  のメッシュを通したものをカリ長石:珪砂=3:7 となるように混合して培地とした。これらの培地は、使用前に水道水、0.5 M 塩酸、イオン交換水の順でよく洗浄した。

本試験では、栽培時に Yang et al. (2003) を参考に液肥を調製して用いた。多量要素は、硝酸アンモニウム ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) 1.5 mmol/L、塩化カルシウム ( $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) 1.0 mmol/L、塩化カリウム (KCl) 1.1 mmol/L、リン酸二水素ナトリウム二水和物 ( $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) 0.3 mmol/L、硫酸マグネシウム七水和物 ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) 1.6 mmol/L とした。微量要素は、ホウ酸 ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) 462.6  $\mu\text{mol/L}$ 、EDTA-Fe ( $\text{C}_{10}\text{H}_{12}\text{FeN}_2\text{NaO}_8 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) 197.1  $\mu\text{mol/L}$ 、塩化マンガン四水和物 ( $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) 91.5  $\mu\text{mol/L}$ 、硫酸銅五水和物 ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) 3.2  $\mu\text{mol/L}$ 、硫酸亜鉛七水和物 ( $\text{CuSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) 7.7  $\mu\text{mol/L}$ 、モリブデン酸アンモニウム ( $\text{H}_8\text{N}_2\text{O}_4\text{Mo}$ ) 0.2  $\mu\text{mol/L}$  とした。液肥の pH は塩酸 (HCl) もしくは水酸化ナトリウム (NaOH) を用いて pH 5.5 に調節した。鉍物 K 区および無 K 区は、上記の液肥から KCl を除いたものを別途作成・調製して与えた。

イネ苗の作成に用いるイネ種子は、温湯消毒 ( $60^\circ\text{C}$ , 10 分) および給水处理したのち、50 倍に希釈した食酢溶液に 20 時間浸水させて催芽処理を行った。その後、育苗トレーで培土 (くみあい軽量培土成苗用水稲用育苗培土, カネサン工業株式会社) と覆土 (くみあい粒状ふくど (無肥料) 水稲用育苗培土, カネサン工業株式会社) で発芽させ、4 週間育苗した後、根を水洗して各処理区のポットへ定植した。ポットは 400 mL 容のプラスチックポットに上述の処理区ごとの培地を約 400 g 充填し、1 ポット当たり 3 つの苗を植えた。各処理区の反復は 3 反復 (3 ポット) とした。定植後は、水田の湛水状態で管理し、イオン交換水を用いて培地の上 2 cm 程度まで灌水した。液肥は 3 日おきに与え、3 週間栽培を行った。

トマトについては、種子を水に浸して発芽させた後、トレー (横 37 cm × 縦 25 cm × 深さ 11.5 cm) に各種培地を 2.5 kg 充填し、これにトマトの苗を 21

個体ずつ定植した。水は、イオン交換水を2日に一回与え、液肥は3日おきに与え7週間栽培を行った。

イネおよびトマトは、栽培終了後、植物体を回収し、根をバケツ内で水道水に浸し、水道水とイオン交換水でよくすすいで洗浄した。その後、発根している箇所から2 cm上を切断して地上部と地下部を分離した。分離した地上部は50℃に乾燥させ、乾燥重量を測定し、元素含有量測定用に取り分けた。また、根長測定用の根は、50%エタノールで湿らせた後、5℃の冷蔵庫内で冷蔵保存した。

作物中の元素含有量は、植物体の地上部および地下部を湿式灰化した後、溶解液中の各種元素濃度を測定して求めた。まず、地上部は粉碎し、地下部はハサミを用いて3 mm程度に細切れにして、それぞれ灰化用試料とした。これらの試料を0.1 g、25 mLの標線付き試験管に量り取り、濃硝酸2.5 mLおよび過塩素酸1 mLを加えて80℃で1時間、130℃で30分、160℃で3時間、200℃で1時間、と順に加熱を施した後、1時間以上放冷した。次に灰化した溶解液を超純水で25 mLにメスアップし、攪拌して分解液を得た。この分解液を濾紙(No.5, Advantec)で濾過し、濾液はポリ瓶に入れ、冷蔵庫にて測定まで保管した。その後、原子吸光光度計(AA-7000, 島津製作所社製)を用いてKの濃度を測定した。

根長の測定は、Tajima and Kato (2013)を参考にして行った。保存しておいた根を3 cmの細切れに切断し、水を張ったアクリル製トレー(幅250 mm×縦200 mm×高さ20 mm(内寸)、底板1 mm、側板3 mm)上に、根同士が重ならないよう、また根が水面上に出ないように注意して並べ、スキャナー(GT-X980, EPSON)を用いて画像を取得した。スキャナーの出力設定はイメージタイプを8ビットグレー、解像度を400 dpi、原稿サイズを幅203.2 mm、縦254.0 mm、出力サイズを等倍、カラーを色補正無しとした。スキャナーを用いて取得した画像から、画像解析ソフトウェアImage Jに根長解析マクロ(Tajima and Kato 2013)を用いて根長を直径(d)階級別の2段階( $d < 0.2$  mm,  $0.2$  mm  $\leq d$ )に分けて算出した。Tajima and Kato (2013)を用いて直径別に算出した根長のうち根の直径が0.2 mm以上の根を節根として(Kano-Nakata et al. 2011, Kato and Okami 2011, Kato et al. 2013)、トレーごとに節根長を積算し、さらに全てのトレー分の節根長を積算することで総節根長を算出した。直径0.2 mm未満の根については側根として(Kano-Nakata et al. 2011, Kato and Okami 2011, Kato et al. 2013)、同様に積算

して総側根長を算出した。

## 2-2. K供給の違いが根表面の陽イオン吸着に及ぼす影響についての試験(試験2)

異なる形態のK供給が根細胞壁表面の電荷特性に及ぼす影響を把握するため、イネとトマトを用いて試験1とは別に栽培試験を行った。栽培後、根を採取し、根に付着したイオンを置換強度の異なる抽出溶液で逐次的に抽出を行った。栽培においては、処理区はK施肥の有無で、+K区(K施肥区)、-K区(K無施肥区)の2処理区を設けた。

イネについては、苗は試験1と同様に育苗し、土壌(酪農学園フィールド教育研究センター作物生産ステーション内圃場の土壌)を200 g充填した400 mL容量のポットに、3苗ずつ植えた。+K区については、元肥にKを含むか否かでこれらの処理を設定した。元肥は、北海道施肥ガイド2010を参考に、土壌1 kgあたり、窒素(N)を硫酸アンモニウム( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ )として0.25 g、リン(P)をリン酸二水素カルシウム( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ )として0.07 g、Kは+K処理区のみ塩化カリウム(KCl)として0.05 gを、それぞれメノウ乳鉢を用いて粉末化したのちに培地に混合した。トマトについては、育苗は試験1と同様に実施し、土壌を充填したトレーで試験1と同様に栽培した。またKの処理はイネと同様に元肥を施肥した。これらの栽培は、試験1と同様に行い、試験用の根(植物体地下部)を得た。なお、収穫、洗浄後の根は試験まで-40℃で冷凍保存した。

冷凍保存していた根を自然解凍し、根5 mm長に切断し、よく水洗した。根に付着したイオンの吸着形態とその容量を把握するため、抽出力の異なる3種類の溶液を用いて抽出を行った。1種類目の抽出として、0.01 M酢酸アンモニウム抽出溶液(pH 7.0) 10 mLを根30 mgを入れた軟膏瓶へ注ぎ、150 rpmで1時間振盪させた。振盪後、0.45  $\mu\text{m}$  シリンジフィルターで抽出液を濾過し、分析測定まで-40℃で保管した。その後、根を一度水洗し、2種類目の抽出として、0.01 Mクエン酸抽出溶液(pH 2.2)、3種類目の0.01 M塩酸抽出溶液(pH 2.0)をそれぞれ用いて、順次抽出を同様に行い、各種抽出溶液を得、冷蔵保管した。その後、K、ナトリウム(Na)、マグネシウム(Mg)、カルシウム(Ca)についてはイオンクロマトグラフィー(IC-2010, 東ソー)、鉄(Fe)は原子吸光光度計(AA-7000, 島津製作所)、アルミニウム(Al)は誘導吸着プラズマ質量分析装置(ICP-MS8800, Agilent Technologies Germany)を用いて、それぞれ濃度測定を行った。



また塩酸の抽出を終えた根は、試験1と同様の方法で灰化して各種元素濃度を測定した。なお、トマトのAl測定については試料が足りず測定できなかった。

統計解析は、イネおよびトマトの乾物重、K吸収量、総側根長、総節根長、総側根長+総節根長、それぞれについて処理による影響を検出するため、種ごとに一元配置分散分析(ANOVA)を用いて有意差の判定を行った。なお、有意差の判定水準は $P < 0.05$ とした。これらの統計解析は、いずれもStatcel 3 (OMS出版)を用いて行った。

### 3. 結 果

試験1により求められた植物体乾物重は、イネではいずれの処理区も地上部が地下部より重く、トマトではやや地下部で重く、結果としてイネの方がトマトよりも地下部に対して地上部の重量が相対的に大きかった(表1)。植物体の乾物量は、イネおよびトマトともに、地上部、地下部、全体、いずれにおいても有意な差は見られなかった。Kの吸収量は、イネの地下部および全体においてのみ有意な差が認められた。イネよりもトマトにおいて、可給態K区が鉍物K区および無K区に比べ特に高い値を示した。

試験1で求められた根長については、地下部乾物重の結果と同様に、イネは処理区間での差が小さく、トマトは可給態K区で突出して長くなった(図1)。イネでは、総側根長、総節根長、そしてそれらの合計のいずれにおいても、処理区間で有意な差は見られず、Kを可給態として与えずとも、可給態K区と同等の根の長さを維持し、またその傾向は根の形態によって変わらなかった。他方、トマトにおいては、総側根長、総節根長、そしてそれらの合計のいずれにおいても、可給態K区で他区の10倍ほど長く、有意な差が認められた。

試験2において根から段階的に抽出された元素は、作物により大きく異なる傾向を示した(図2AおよびB)。イネでは、酢酸アンモニウムではKがよく抽出され、クエン酸、塩酸ではFeが、残渣ではFeまたはAlに多く認められた。FeやAlは酢酸アンモニウムによって吸着されるものの割合が非常に少なく、特にAlはほぼ残渣として認められた。K、Fe、Alに比べると、それ以外の元素はトータルの抽出量としては非常に小さかった。また、処理区による元素の抽出量の違いは、イネではKを除きほとんど見られなかった。一方トマトでは、トータルの抽出量が全体的にイネよりもかなり大きく、特

表1 イネおよびトマトの乾物重およびK吸収量の平均値。イネの地上部および全体のK吸収量において、一元配置分散分析による処理間の有意な差( $P < 0.05$ )が認められた。

試験植物	部位	処理 (K 給源)	乾物重 (g/pot)	K 吸収量 (mg-K/pot)
イネ	地上部	鉍物 K	1.48	14.1
		可給態 K	1.25	19.0
		無 K	1.40	18.3
	地下部	鉍物 K	0.82	9.6
		可給態 K	0.97	17.6
		無 K	0.82	9.7
	全体	鉍物 K	2.30	23.6
		可給態 K	2.23	36.7
		無 K	2.21	28.0
トマト	地上部	鉍物 K	0.31	1.5
		可給態 K	0.49	3.0
		無 K	0.26	1.8
	地上部	鉍物 K	0.44	2.4
		可給態 K	0.40	13.9
		無 K	0.35	1.8
	全体	鉍物 K	0.75	3.8
		可給態 K	0.90	16.8
		無 K	0.61	3.6

にイネで低かったNa、Mg、Caにおいて高い傾向にあった。また、これらの元素に比べイネでよく多かったKやFeはトマトでは少なかった。さらに、トマトでは酢酸アンモニウムで抽出される元素がイネよりも多く、抽出される金属の種類も大きく異なった。Na、Mgでは特に酢酸アンモニウムで抽出されるものが多く、Caはクエン酸で抽出されるものが多かった。処理区間の違いは、イネよりトマトにおいて明確で、特にNa、K、MgではK添加区で低い値となった。

### 4. 考 察

#### 4-1. イネの根細胞壁の特異性

本研究結果より、試験植物としてイネおよびトマトの2種類ではあるが、植物種によってカリウムイオンを吸収する能力が異なるだけでなく(表1)、特にイネの根細胞壁表面にFeとの強力な吸着部位が存在することが明らかとなった(図2)。根の表面にイオンとの吸着部位が存在することは1930年代以前から知られている(Jenny and Overstreet 1939)。本研究では、イネの根に吸着されていたFeはクエン酸抽出性のもや残留のもがほとんどであり(図2)、他の元素に比べて強固に根に吸着していると考えられた。これらの結果から、イネは多数のイオンが混在する土壌環境においてFeとの強固な吸着を優先的に行っている可能性が考えられる。

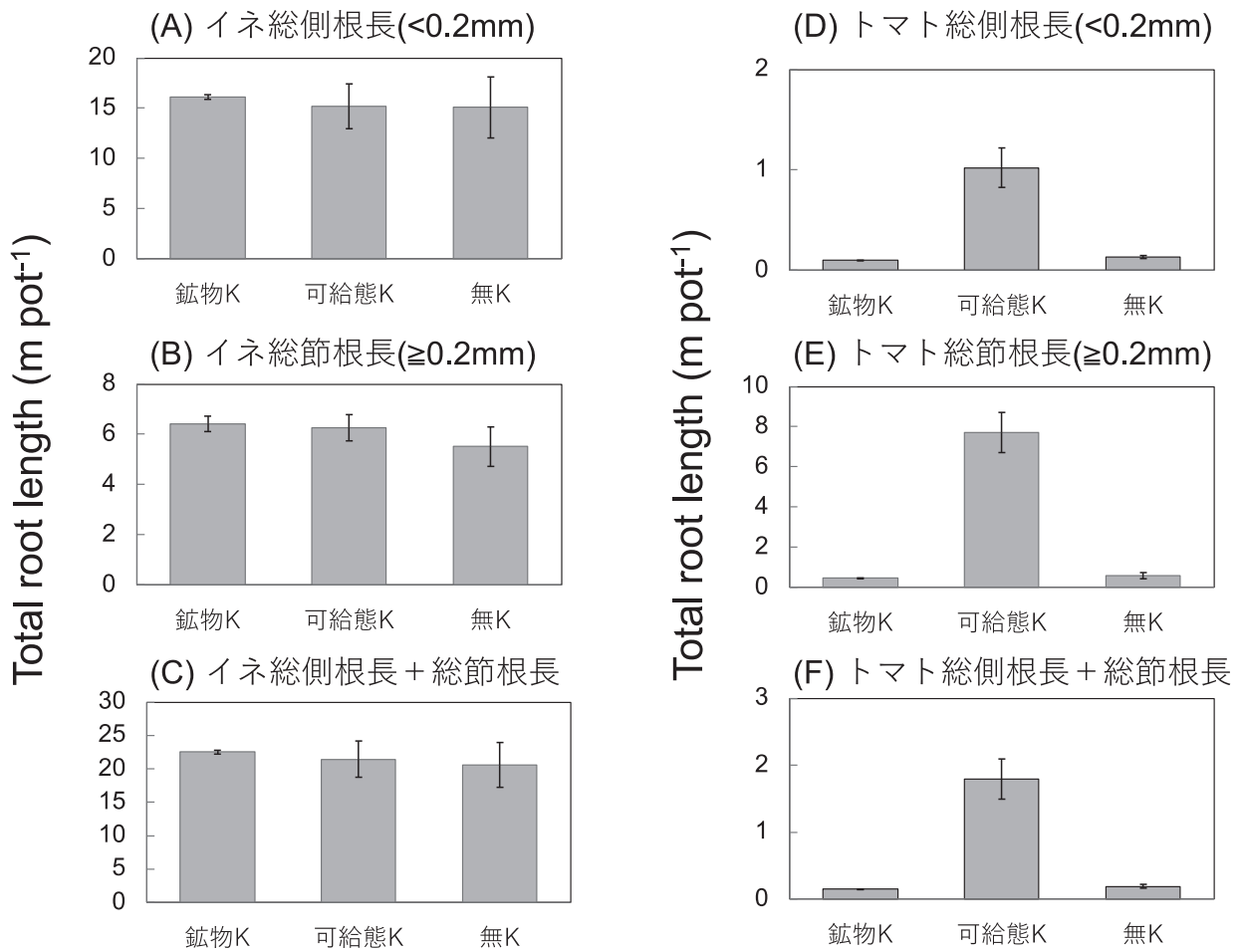


図1 イネ (A, B, C) およびトマト (D, E, F) の処理別の総側根長 (A, D), 総節根長 (B, E), およびその合計 (総側根長 + 総節根長) (C, F)。エラーバーは標準偏差を表す。

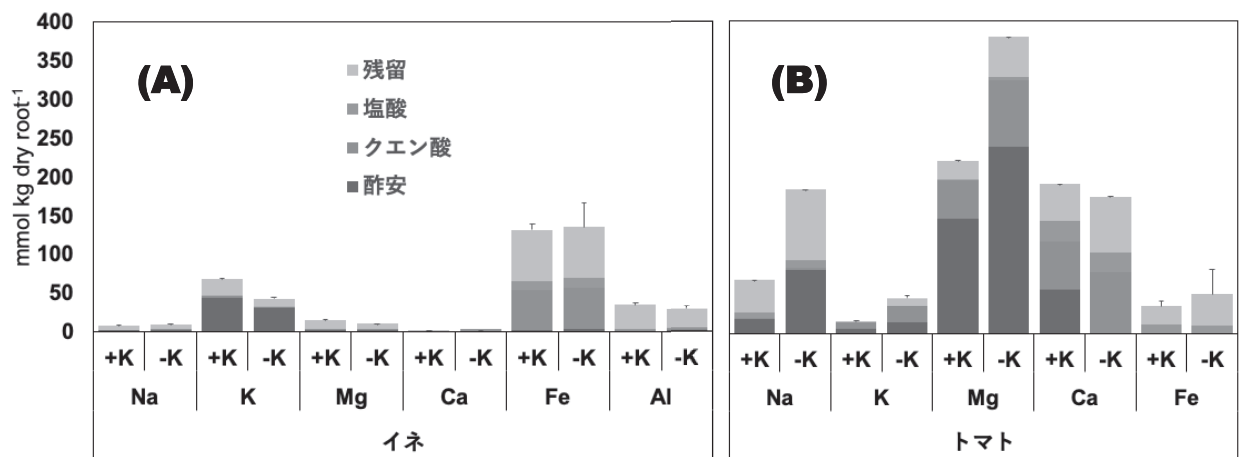
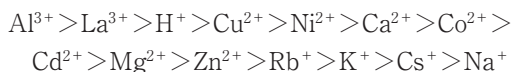


図2 イネ (A) およびトマト (B) の根から脱着された各種元素量。エラーバーは標準偏差を表す。

一方、トマトの根細胞壁表面には Mg や Ca の吸着割合が大きく、特に Mg では酢酸アンモニウムで抽出される交換性のものが多く、イネよりも弱い吸着が主であると考えられた。双子葉類の根表面においては 2 価イオンとの吸着が単子葉類よりも優先するとされるが (森田 1972)、その傾向と一致するような傾向が見られた。これらのことから、イネとトマトでは、細胞壁表面に特異的に吸着するイオンの種類が異なると考えられ、さらにその吸着様式もイネでは Fe の非常に強い吸着が主体になると考えられた。

イオン交換基へのイオン吸着の程度は一般に価数が多いものの方が強く吸着され、同じ価数の元素であれば、イオン半径が大きいものほど半径の小さいイオンと比較して強く吸着される。これは、イオン半径の大きい元素ほど表面電荷密度が小さく、溶液中の水分子を引き付けた水和層が薄くなることでイオン性が大きくなり、基質表面のイオン交換基に対する親和性が大きくなるためであるとされる (Williams and Coleman 1950, Helmy and Elgabal 1958)。この法則性は、植物細胞壁へのイオン吸着においても同様であり、土壤中で陽イオンとして存在する元素の植物細胞壁への吸着順は以下のように、



とされる (Shomer et al. 2003)。このような吸着強度傾向は、細胞壁から単離したペクチンに結合する陽イオンの強度についてもほぼ同様の順序が確認されている (Franco et al. 2002)。本研究では、イネの根細胞壁表面に吸着していた Fe の約半分、Al のほぼすべてが、それぞれ残渣として存在した (図 2)。先行研究によって、イネの細胞壁についての Fe の吸着力は、クエン酸と同様の保持力を持つことが明らかになっている (福永 2011) が、本研究による結果では、クエン酸で抽出した後も根には残渣として Fe や Al が確認された。また、トマトの根細胞壁では Ca や Mg についても残渣中にも多く見られ、これもイネとは異なる吸着傾向となった。これらのことから、植物根には種特有のイオンの選択性や吸着の強度の違いがあることが示唆される。

本研究で明らかとなったイネの根細胞壁表面における Fe や Al との特異的な吸着部位は、鉍物中に存在する K の利用に関与するかもしれない。Kusa et al. (2021) は、イネの特異的な吸着部位が鉍物の溶解に関係することを示唆している。Kusa et al. (2021) では、イネ品種「北陸 193 号」の根細胞壁と K を含む一次鉍物を緩衝液中で反応させることで、

一次鉍物に含まれる K が溶出することを確認した。しかし細胞壁の表面を 3 価の Al でコーティングしたのちに同様の試験を行った時には K の溶出が起きなかった。このことから、イネの根細胞壁表面には 3 価の金属との強力な吸着部位が発達し、この部位が鉍物の結晶構造に含まれる 3 価の金属である Al や Fe と吸着することで、鉍物の結晶構造が崩壊し、K が溶出する可能性が考えられている。植物の根表面では、鉍物の結晶構造中に存在する 3 価の陽イオンが根に吸着することで鉍物の結晶構造が崩壊し、結果的に鉍物中の構造 K が放出され、植物体への吸収が可能になることが示唆されている (Ae et al. 1996)。本研究ではこうした鉍物の溶解について検討できなかったが、本研究でイネ根の細胞壁表面に多く、且つ強く吸着していた Fe や Al は 3 価の陽イオンとなり得る。そのため、こうしたイネ根表面の Fe や Al との強力な吸着部位は、こうした鉍物の結晶構造の崩壊に関わり、難溶性 K の溶解とイネによる吸収に寄与するかもしれない。

#### 4-2. K 環境の違いによるイネの根細胞壁表面の変化

本研究結果から、イネの根の形態や根細胞壁表面で金属を吸着する部位は、K 環境によって変化するものがトマトの根に比べ少ないと考えられた。試験 1 の結果からは、乾物重、側根、節根長はいずれも処理間の違いとしては、トマトでは K を液肥に入れた場合に顕著に大きくまたは長くなったが、イネでは明瞭な違いは見られなかった (図 1)。また試験 2 の結果では、イネの根表面における K 吸着は -K 区で小さくなったが、Fe 含め多くの元素では違いが認められなかった。他方トマトでは K 環境によって抽出される元素の違いが大きく、特に酢酸アンモニウム抽出性の Na および Mg が -K 区で多くなった (図 2)。これは K の養分が少ないことで、トマトでは陽イオンの根への吸着性が上がったことによると考えられる。イネではその違いが小さいか、むしろ K の欠乏によってイネの根表面の K に対する親和性は下がったと考えられる。イネは K を施肥しない場合でも施肥した場合と変わらぬ程度の K 量を吸収して生育することが報告されており (塩田ほか 1980, 杉山・阿江 2000, 初井・井澤 2007, Kusa et al. 2021)、本研究結果でもそのような傾向が見られた。そのため、イネは K の少ない環境では、K 吸着を特段高めず、根表面の Fe などにも根表面の状態に大きな変化を伴わないにもかかわらず K の吸収を保っていることが考えられる。した

がって、例えば Kusa et al. (2021) で示唆されているような根表面での鉱物風化と鉱物中の K の溶出作用があるとしても、そうした作用は必ずしも K の有無によって発現したりしなかったりということではなく、常にそのような作用がある程度はたらいっているものと考えられる。このようにイネに K 処理による違いが少ないことは、イネが K を常に鉱物から得ているためかもしれない。

#### 4-3. さらなる研究の可能性

本研究結果から、今後さらなる研究が望まれる内容について言及する。まず、本研究からはイネに Fe との強力な吸着部位が存在することが明らかになったが、この Fe は難溶性の K を溶解する可能性が考えられた。今後の研究で Fe との吸着部位がどのような官能基の組み合わせによって担われ、この部位の発現が、pH や溶液濃度、植物の発育段階などの周囲の条件による影響をどの程度受けるかを把握していくことで、吸着部位のさらなる役割の解明につながると思われる。

また、本研究ではいくつかのイネ根表面の化学的特性に関する情報が得られたが、実際にどのような官能基がこうしたイネの根細胞壁表面で Fe などの吸着に深く関与するかについては検討できなかった。本研究ではイネの試験品種として「日本晴」を使用した。イネによる接触溶解反応を確認した Kusa et al. (2021) の研究では、「北陸 193 号」を試験に使用し、根表面の官能基には 3 価の陽イオンとの吸着に強力な吸着部位を提供するカルボキシ基や、水酸基の密度が高いことが明らかになっている。その他の研究でも、イネは根圏土壌中の Al や Fe などの 3 価の陽イオンになりうる元素の化学性を変化させることが知られる (Hobara et al. 2016)。今後、物質の表面に存在する官能基の測定が可能なフーリエ変換赤外分光光度計 (FT-IR) などを用いて細胞壁表面の官能基の種類を把握するなどし、根表面の特性がイネの品種によって異なるかも含め検討してゆく必要があると思われる。また、こうした根の特異性が実際に根による鉱物の溶解を導くかについて、接触溶解反応 (Ae et al. 1996, Kusa et al. 2021) から検討することも大いに有用と考える。

さらに、イネやトマトの根表面の吸着特性は種間差があることもわかった。他の植物においても養分状態によって根表面の吸着特性や官能基構造に違いがある可能性が示唆される。官能基は、作物以外の植物、例えばシダ類や樹木などにも存在し、それぞれの種によって陽イオン交換容量は様々である (森

田 1972)。したがって、イネやトマト以外の植物も固有の官能基の組み合わせをもっており、現在に至るまでそうした機能を用いて環境に適応しながら生きてきたことが想像できる。今後様々な種の多様な根表面の特性やそれに伴う環境適応機能を明らかにできれば、そうした機能を持つ作物の農地での有効利用や作物の品種選抜などを通して K の減肥につなげることが期待される。

## 5. 要 約

カリウム (K) は、農業上重要な肥料要素の一つとされ、世界的な人口増と食料確保などの観点から近年 K 肥料の適切な利用管理の重要性が一層高まってきている。本研究では、土壌中の K 環境の違いによってイネの根や根細胞壁表面に存在する官能基がどのように異なるかについて明らかにすることを目的とした。本研究では、イネに加え、対照植物としてトマトを栽培して根を採取し、これらの根の形態や根の官能基のイオンの吸着に着目した試験を行った。まず、K 供給の違い (鉱物 K 区、可給態 K 区、無 K 区) が K の吸収および根の形態に及ぼす影響についての試験を行ったところ、植物体乾物重量および根長はイネでは地上部および地下部いずれでも K の処理間差が小さく、逆にトマトでは可給態 K 区で特に大きい値を示した。また、K 環境の異なる条件で栽培した根から段階的に抽出された元素を求めたところ、イネとトマトでは大きく異なる傾向を示し、特にイネではトマトよりも根細胞壁表面に Fe との強力な吸着部位が存在し、その吸着は K 環境にあまり影響を受けないことが示された。こうした結果は、イネの根細胞壁表面で金属を吸着する力がトマトの根に比べ強いことや、イネの根の形態や機能が K 環境によらないことを示唆する。イネの根表面の金属に対する強い反応性は、K などの鉱物中に含まれる養分の溶解を通じて、作物の減肥に耐えうる機能としての役割を持つ可能性が考えられる。

## 謝 辞

本研究は、2021 年度酪農学園大学共同研究の助成および JSPS 科研費 (JP19K12299) の支援を受けて行われた。また本研究は、著者である茂木の修士論文および同じく著者の宮城の卒業論文として行われたものを含む。畑中朋子修士および生態系物質循環研究室の皆様には、栽培試験や室内実験において多大なご協力をいただいた。これらの方々に、心より感謝申し上げます。



## 引用文献

- Ae, N., Otani, T., Makino, T., Tazawa, J. (1996) Role of cell wall of groundnut roots in solubilizing sparingly soluble phosphorus in soil. *Plant Soil*. 186: 197-204.
- Dhillon, J.S., Eickhoff, E.M., Mullen, R.W., Raun, W.R. (2019) World potassium use efficiency in cereal crops. *Agron. J.* 111: 889-896.
- Franco, C.R., Chagas, A.P., Jorge, R.A. (2002) Ion-exchange equilibria with aluminum pectinates. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*. 204: 183-192.
- 福永祥子 (2011) イネ科植物が鋳物の風化に及ぼす影響～植物のケイ酸吸収能および植物細胞壁のキレート能の検討～. 神戸大学大学院生命機能科学専攻修士論文.
- Helmy, A. K., Elgabaly, M. M. (1958) Exchange capacity of plant roots: II. Some factors affecting the cation exchange capacity. *Plant Soil*. 10: 93-100.
- 平館俊太郎 (1999) 根から分泌される有機酸と土壌の相互作用. *化学と生物* 37: 454-459.
- 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.
- Jenny, H., Overstreet, R. (1939) Cation interchange between plant roots and soil colloids. *Soil Sci.* 47: 257-272.
- Kano-Nakata, M., Inukai, Y., Wede, L.J., Siopongco, J. D.L.C., Yamauchi, A. (2011) Root development, water uptake, and shoot dry matter production under water deficit conditions in two CSSLs of rice: Functional roles of root plasticity. *Plant Prod. Sci.* 14: 307-317.
- Kato, Y., Okami, M. (2011) Root morphology, hydraulic conductivity and plant water relations of high-yielding rice grown under aerobic conditions. *Ann. Bot.* 108: 575-583.
- Kato, S., Wachi, T., Yoshihira, K., Nakagawa, T., Ishikawa, A., Takagi, D., Tezuka, A., Yoshida, H., Yoshida, S., Sekimoto, H., Takahashi, M. (2013) Rice (*Oryza sativa* L.) roots have iodate reduction activity in response to iodine. *Front. Plant Sci.* 10 <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00227>.
- 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 Sci. Plant Nutr.* 67: 162-170.
- Lu, H., Nkoh, J.N., Baquy, M.A., Dong, G., Li, J., Xu, R. (2020) Plant alter surface charge and functional groups of their roots to adapt to acidic soil conditions. *Environ. Pollut.* 267: 115590.
- 舛井隆誌・井澤敏彦 (2007) 77年間継続した四要素無施用区と堆肥施用区にみられる水稻玄米収量の経年推移と各要素の施用効果. *日本作物学会記事*. 76: 288-294.
- 森田修二 (1972) 植物根のカチオン置換容量と養分摂取. *京都府立大学学術報告*. 農学. 24: 142-158.
- 農林水産省 (2022) 肥料をめぐる情勢 [https://www.maff.go.jp/j/seisan/sien/sizai/s\\_hiryo/attach/pdf/index-7.pdf](https://www.maff.go.jp/j/seisan/sien/sizai/s_hiryo/attach/pdf/index-7.pdf) (2022年10月28日確認)
- 塩田悠賀里・稲垣 明・長谷川徹・沖村逸夫 (1980) 四要素および対比の長期施肥による水田土壌の理化学性の変化と水稻の生育について. *愛知農総試研報* 12: 52-60.
- Shomer, I., Novacky, A.J., Pike, S.M., Yermiyahu, U., Kinraide, T.B. (2003) Electrical potentials of plant cell walls in response to the ionic environment. *Plant Physiol.* 133: 411-422.
- 杉山 恵・阿江教治 (2000) 黒ボク土および黒ボク土に施用した鋳物に対する作物のカリウム吸収反応. *日本土壌肥科学雑誌* 71: 786-793.
- Tajima, R., Kato, Y. (2013) A quick method to estimate root length in each diameter class using freeware Image J. *Plant Prod. Sci.* 16: 9-11.
- White, P.J., Broadley, M.R. (2003) Calcium in plants. *Ann. Bot.* 92: 487-511.
- Williams, D.E., Coleman, N.T. (1950) Cation exchange properties of plant root surfaces. *Plant Soil*. 2: 243-256.
- Yang, L., Zheng, B., Mao, C., Yi, K., Liu, F., Wu, Y., Tao, Q., Wu, P. (2003) cDNA-AFLP analysis of inducible gene expression in rice seminal root tips under a water deficit. *Gene*. 314: 141-148.



### Summary

Potassium (K) is one of the important fertilizer elements in agriculture, and the importance of proper use management of K fertilizer has increased in recent years from the viewpoint of global population increase and food security. The purpose of this study was to clarify how the functional groups present on the root and root cell wall surface of rice plants differ depending on the K environment in the soil. In this study, in addition to rice, we cultivated tomato as a control plant, collected roots, and conducted experiments focusing on the morphology of these roots and the adsorption of ions on the functional groups of the roots. First, we examined the effects of different K supplies (mineral-K plot, available-K plot, and no-K plot) on K uptake and root morphology. Differences in K between treatments were small in both the above-ground and below-ground parts. In addition, elements extracted sequentially from roots cultivated under different K conditions were clearly different between rice and tomato: rice root surface had adsorption sites of iron more abundantly than tomato, and these sites were largely unaffected by the K environment. These results suggest that the ability to adsorb metals on the cell wall surface of rice roots is stronger than that of tomato roots, and that the morphology and functions of rice roots are independent of the K environment. It is possible that the strong reactivity of the root surface of rice to metals may play a role in the ability of crops to withstand reduced fertility through the dissolution of nutrients, such as K, from minerals.