

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25870340

研究課題名(和文) 水稲によるカリウム獲得様式を解明するための手法の開発と圃場への適用

研究課題名(英文) Development of field methods for evaluating acquisition of potassium by rice plants

研究代表者

森塚 直樹 (Moritsuka, Naoki)

京都大学・(連合)農学研究科(研究院)・助教

研究者番号：10554975

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,500,000円

研究成果の概要(和文)：水稲によるカリウム獲得様式を明らかにするための試験を行った結果、以下の知見を得た。
1) 植栽区と無植栽区を設置したプロットスケールでの試験では、水稲によるカリウム吸収に伴って、土壤中の交換態カリウムは穂揃い期まで減少し、その後は増加に転じた。2) より大きな圃場スケールでは交換態画分と熱硝酸可溶性非交換態画分は弱い対心関係しか示さず、前者は有機物含量、後者は粘土含量によって制御されていた。3) 室内での栽培あるいは培養試験から採取した試料をカリウム飽和後に酢安と塩酸で連続抽出することによって評価されたカリウム固定容量は、土壌固有の安定な特性値ではなく、生物活動や水田湛水管理の影響を受けて変化した。

研究成果の概要(英文)：Experiments were attempted to find how rice plants acquire potassium (K) in a paddy field. I obtained the following results.

1) In a field experiment where planted and unplanted plots were equipped, it was found that exchangeable K in soil decreased from planting to full heading stages and increased thereafter. 2) At a greater scale covering five paddy fields, only a weak relationship was found between exchangeable K and boiling HN03-extractable nonexchangeable K. The former and the latter fractions were regulated by organic matter and clay contents, respectively. 3) The K-fixation capacity was quantified by saturating a soil sample with KCl, which was followed by repeated extraction of fixed K with NH40Ac and HCl. The K-fixing capacity thus evaluated was found to increase, when the soil was located around plant roots or it was subjected to flooding.

研究分野：土壌肥料学

キーワード：水田土壌 カリウム 根域 空間変動 固定容量

1. 研究開始当初の背景

植物の土壤養分獲得様式は、根系の拡大（位置的可給度の増加）と根からの周辺土壌への働きかけ（化学的可給度の増加）に大別できる。その両者の相互作用を評価した圃場レベルでの研究は、適切な評価法がなかったため、ほとんど行われてこなかった。

土壌中のカリウムの最も植物に利用しやすい形態は、中性酢酸アンモニウム溶液で抽出される交換態画分であるが、それらのカリウム全量に対する割合は施肥を伴う農耕地の場合でも通常 5% に満たない。残りの大半は、非交換態として粘土層間や結晶構造内に存在している。

植物根のごく近傍では、交換態カリウムだけでなく、非交換態カリウムも放出され、植物に利用されることが知られているが、それらの知見は制御されたポット試験から得られたものが多く、圃場条件下での土壌中のカリウムの動態に関する知見はほとんどない。

2. 研究の目的

本研究は、植物によるカリウム獲得様式を圃場レベルで評価できる試料採取法と分析法の確立を目的とする。

3. 研究の方法

(1) 水稻によるカリウム獲得様式：京都大学附属農場の水田圃場で、植栽区と無植栽区を設置した無施肥栽培試験を行い、水稻根域土壌試料を採取した。試料中の交換態および非交換態カリウム含量を常法によって測定した。さらに被覆肥料を用いた肥料試験を行い、カリウムが生育制限要因となっていたかどうかを評価した。

(2) 土壌のカリウム含量の圃場内変異：土壌のカリウム含量の空間変異が生じる要因をより大きなスケールで評価するために、試験圃場に隣接する 5 筆の大区画水田から圃場あたり約 50 点の作土を 10×10m の密度で採取し、分析に供試した。

(3) 土壌のカリウム固定容量に及ぼす植物根や湛水培養の影響：土壌のカリウム固定容量を評価する手法として、カリウム飽和後の試料を酢酸アンモニウムで洗浄後に 0.01 mol/L 塩酸で連続的に抽出するという手法を試みた。

4. 研究成果

(1) 水稻によるカリウム獲得様式

2010 年から無施肥で水稻を栽培してきた圃場において、水稻植栽区と無植栽区を各 2 連で設置し、作付け前と作付け後に作土を採取するとともに、水稻収量を測定した。その結果、作土の交換態カリウム含量は、2010 年の作付け前の約 75 mg/kg から 2012 年の作付け後の 40 mg/kg 弱まで減少した。これと連動する形で熱硝酸可溶性非交換態カリウム含量も同期間に約 300 mg/kg から約 240 mg/kg に減少したが、水稻の粗粒収量は維持されて

いた。また植栽区と無植栽区では作土のカリウム含量に違いが見られなかった。無施肥栽培 5 年目となる 2014 年の粗粒収量（ヒノヒカリ）は 639 g m⁻² となり、無施肥栽培 1 年目の粗粒収量（630 g m⁻²）と同等の収量を維持していた。

2012 年には水稻の作付け期間中とその後の非作付け期間中に経時的に根域土壌と植物体地上部あるいは残渣圏土壌を採取した。植栽区からの土壌採取は、株元からの距離に応じて土壌試料を採取できる同心円モノリス法（瀬戸ら、2011）を適用した。分析の結果、水稻によるカリウム吸収に伴って、土壌中の交換態カリウムだけでなく熱硝酸可溶性非交換態カリウムも減少する傾向が見られたこと、さらに交換態画分の減少は穂揃い期に最大に達し、その後は増加に転じることが明らかとなった（図 1）。

穂揃い期以降に見られた根域土壌のカリウム含量の回復は、植物によるカリウム吸収速度の減少に伴う固液平衡の変化あるいは根からのカリウム放出によると推測されるが、いずれにせよ非作付け期間には植栽区と無植栽区での作土のカリウム含量が変わらないことの一因であると考えられた。

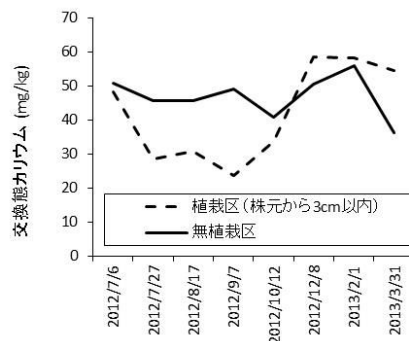


図1 植栽区および無植栽区での交換態カリウム含量の推移

圃場の一部の区画で、尿素と塩化カリウムのポリオレフィン被覆肥料を組み合わせた施肥試験を行い、成熟期の生育量を評価した結果、2013 年（ヒノヒカリ）は N 単用区 > N + K 混合区 > K 単用区と無施肥区、2014 年（ミナミユタカ、ヒノヒカリ、たちすずか、クサノホシ）は N 単用区 > K 単用区と無施肥区となった。両年ともに、無施肥での栽培条件下では、窒素が制限要因となっており、カリウムは制限となる元素ではなかった。しかし、蒸留水を灌水に用いたポット試験では、ヒノヒカリの生育量は K 単用区 > 無施肥区となった。圃場条件では、作土からのカリウム供給だけでなく、灌漑水や下層土からの供給（あるいは Na による K の代替）があるために、作土の交換態カリウム含量が 50 mg kg⁻¹ を下回っていてもカリウムによる生育阻害が生じていなかったと考えられた。

当初、植栽区と無植栽区の作土のカリウム動態を調べることによって、水稻のカリウム獲得様式を評価する予定であった。しかし試

験圃場の 1 アール弱の区画内でも作土のカリウム含量の空間変異が大きかったため、植物によるカリウム吸収の影響を定量的に評価することは難しいと判断された。そこで、圃場内あるいは圃場間で土壌のカリウム含量が変動する要因を調べることにした。

(2) 土壌のカリウム含量の圃場内変異

2013 年 11 月末に試験圃場に隣接する 5 筆の大区画水田から圃場あたり約 50 点の作土を 10×10m の密度で採取し、交換態および非交換態（熱硝酸可溶性）カリウムの空間変異の生じる要因を評価した。

交換態カリウム含量は、全炭素と正の相関(0.60)を示し、砂含量とは対応しなかった。土壌の陽イオン交換容量は、全炭素と正の相関(0.59)、砂含量と負の相関(-0.71)を示した。交換態カリウムは、有機物の持つ負荷電量によって規定されており、このことが粘土の持つ負荷電量の影響を強く受ける交換態 Ca 及び Mg とは異なる空間分布を示す要因であると考えられた。

一方、熱硝酸可溶性非交換態カリウムは、全炭素と弱い正の相関(0.38)、砂含量と負の相関(-0.52)、陽イオン交換容量と強い正の相関(0.76)を示した。そして、交換態カリウムとは弱い正の相関(0.21)しか示さなかった(図2)。有機物の影響を強く受けていた交換態画分とは異なり、非交換態画分は、主に粘土層間に固定されているカリウムに由来するため、粘土含量の影響を強く受けていたと考えられた。

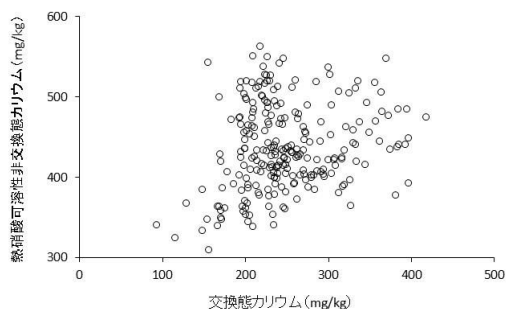


図2 水田圃場群試料の交換態カリウム含量と非交換態カリウム含量の関係

上記のように、土壌中のカリウムの交換態画分と非交換態画分があまり対応しないという結果は、土壌の砂含量と全炭素含量の間にほとんど対応が見られなかった($r=-0.06$)ことに由来している。交換態だけでなく非交換態カリウムも水稻によって利用されることを考えると、少なくとも調査圃場では、カリウム供給力を評価する上で非交換態画分を無視できないことが示された。粘土鉱物性の異なる試料群において、交換態含量と非交換態含量が連動しないということは、既報(森塚、2009)で示したとおりである。

調査圃場では頻繁に堆肥が施用されており、堆肥の施用履歴が土壌の有機物蓄積量に大きな影響を及ぼしてきたことが示唆

される。そこで、土壌の窒素同位体比($\delta^{15}\text{N}$)の測定によって、堆肥の施用が土壌有機物含量に及ぼす影響を評価する予定である。

また、供試試料に関しては、リンの抽出に用いられる Bray-2 抽出液(0.1M HCl + 0.03M NH_4F)や鉄・アルミニウム・ケイ素の抽出に用いられる酸性シュウ酸アンモニウム抽出液でも 1M 酢酸アンモニウム溶液による抽出とほぼ等量のカリウムを回収できた。土壌分析で行われる各種元素の抽出は、対象とする元素によって抽出剤が異なるという煩雑さが問題となっているが、上記の抽出剤によって交換性陽イオンを同時に抽出できる可能性が示された。

(3) 土壌のカリウム固定容量に及ぼす植物根や湛水培養の影響

土壌の易抽出性非交換態カリウム含量は、主に粘土含量、特に雲母由来粘土鉱物の量によって規定されているが、土壌がカリウムを非交換態として層間に保持できる量は、土壌の静的な特性値だけでなく、環境要因によっても変化しうる。土壌のカリウム固定能は、従来は、土壌にカリウムを含む溶液を添加後に振とうし、その濾液中のカリウムを定量し、未回収分を固定とするという間接的手法が一般的であった。しかし、環境要因の変化に伴うカリウム固定容量の変化を検知するためには、固定容量全体ではなく、その一部を評価できるより高感度な手法が求められる。そこで、土壌のカリウム固定容量を評価する手法として、カリウム飽和後の試料を酢酸アンモニウムで洗浄後に 0.01 mol/L 塩酸で連続的に抽出するという手法をいくつかの試料に適用してきた結果を報告する。

トウモロコシ根圏：根の密集領域からの距離に応じて、ミリメートル単位で土壌を採取できる栽培装置「根箱」を用いて、トウモロコシを 17 日間栽培した後に、根圏土壌を採取し、カリウム固定容量などの分析を行った。植栽区と無植栽区の土壌を比較した結果、植栽区の植栽部 - いわゆる根圏 - では交換態だけでなく、非交換態カリウムの放出が認められた。そして灰色沖積土(京都大学附属京都農場)区ではカリウム固定容量が増加したのに対して、黒ぼく土区(鳥取県赤碕町)では増加しなかった(図3)。

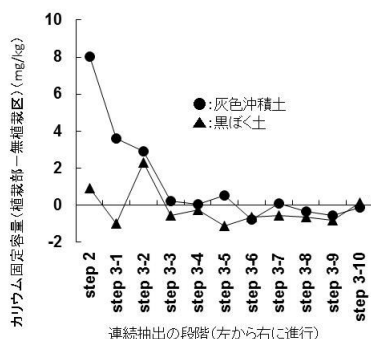


図3 トウモロコシ根圏(植栽部)におけるカリウム固定容量

水田湛水条件：京都大学附属農場の水田作土（灰色沖積土）を室内で計 70 日間湛水培養を行い、カリウム固定容量の経時変化を評価した。その結果、培養 28 日目までは層間固定容量は増加し、その後は変化しなかった（図 4、Matsuoka and Moritsuka, 2015 の Table 1 を改変）。

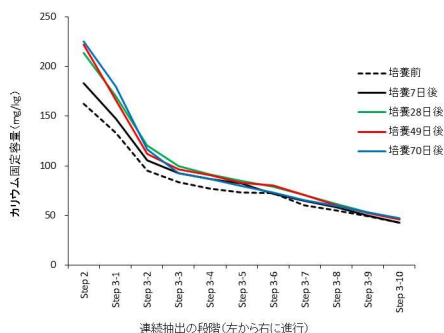


図4 湛水培養による土壌のカリウム固定容量の経時変化

上記の沖積土区で見られたカリウム固定容量の増加は、根圏の場合は、有機物の分解促進による 2:1 型粘土鉱物を被覆していた有機物の除去、さらに湛水培養の場合は、有機物分解に加えて、還元進行に伴う、酸化鉄の還元と被膜の剥離によると解釈できる。2:1 型粘土鉱物に乏しい黒ぼく土では、根圏でのカリウム固定容量の増加は検知できなかった。関与しているプロセスについては特定できなかったが、いずれにせよ、カリウム固定容量は土壌固有の安定な特性値ではなく、生物活動や水田湛水管理の影響を受けて変化しうることが明らかとなった。

上記で示されたカリウム固定容量の変化は、制御された環境下で得られた知見であり、圃場条件下で陽イオン交換容量やカリウム固定容量が植物生育や土壌管理によってどのくらい影響を受けるのかは不明である。酸化と還元の繰り返される水田の作土では、カリウム固定容量が季節ごとに増減している可能性が高い。0.01 mol/L 塩酸による連続抽出によって、カリウム固定容量のわずかな差を検知できるようになったとはいえ、圃場条件下でカリウム固定容量が空間的にどのくらい変動するかは不明である。本研究で見られた熱硝酸可溶性非交換態カリウムと陽イオン交換容量の強い正の相関関係は、非交換態カリウム含量がカリウム固定容量によって支配されていたことを示唆しているとも考えられた。

以上の知見をまとめると、土壌の均質化の可能な制御環境下で得られた植物によるカリウム獲得様式に関する知見をより不均質な圃場条件下で明らかにしようと試みたが、土壌のカリウム含量が不均質に分布していたことによって、植物によるカリウム獲得様式を評価することは困難であることが判明した。そこで、土壌のカリウム含量の空間変異

を支配している要因を評価するための試料採取と分析を行った。本研究の調査圃場では、交換態画分と熱硝酸可溶性非交換態画分は弱い対応関係しか示さず、前者は有機物含量、後者は粘土含量によって制御されていることが示された。調査圃場において、有機物含量と粘土含量が連動していなかった原因については、さらに分析を進める予定である。

カリウム固定容量に関しては、2:1 型粘土鉱物の層間をカリウムで飽和後に、外側から内側に向かって、段階的に層間カリウムを抽出するという手法の考案によって、層間末端付近での固定容量をより高感度に定量できるようになったと考えている。ここで得られた固定容量の値は、カリウムだけでなく、同様に層間に固定されるアンモニウム (Matsuoka and Moritsuka, 2015)、セシウム、ルビジウムの土壌による固定と放出を理解する上で、重要な指標となる可能性がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

Kaori Matsuoka and Naoki Moritsuka (2015) Increase in the capacity of interlayer sites in a paddy soil as a possible factor affecting the dynamics of fixed ammonium at the initial stage of anaerobic incubation. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **46**, 1278-1287, DOI: 10.1080/00103624.2015.1033538

[図書](計2件)

土の百科事典編集委員会編、丸善出版、土の百科事典(各論編での「根圏」の用語などを担当) 2014
「土のひみつ」編集グループ編、朝倉書店、土のひみつ(「根圏」のコラムを担当) 2015(印刷中)

[その他]

京都大学 教育研究活動データベース (<https://kyouindb.iimc.kyoto-u.ac.jp/view/>)

6. 研究組織

(1)研究代表者

森塚 直樹 (MORITSUKA, Naoki)
京都大学・大学院農学研究科・助教
研究者番号：10554975