

植物とリンと土壌の問題：植物生産におけるリン消費節減に向けて

名古屋大学大学院生命農学研究科准教授 矢野勝也

1. はじめに

現在世界の多くの耕地で、農作物の生産性はリン肥料に依存している。その一方で、肥料原料のリン鉱石の枯渇が懸念され、特にリンを肥料として土壌に与えても大部分は難溶化し、農作物に利用されず蓄積することが大きな課題となっている。リン資源を輸入に依存する日本では、年間70万トンのリンが持ち込まれる一方で、その76%に相当する53万トンが耕地土壌に蓄積している¹⁾。地球規模では、陸上生態系に10.5-15.5 Tg 年⁻¹のリンが蓄積し続けているとみられ、そのほとんどは耕地土壌に投じた肥料に由来する^{2,3)}。

生態系内のリン循環において、土壌から植物への移行に大きな抵抗があり、土壌と植物を橋渡しする根系の機能が鍵となる。ここでは、まず土壌から植物根に至る溶質移動をリンと他の養分とで比較し、それを踏まえていくつかの研究例を紹介しつつ、植物生産性を損なうことなくリン肥料を節減させる方策について議論してみたい。

2. 土壌から根までの養分移動

植物は動物のように自由に移動できないかわりに、土壌に根を伸長・分枝させながらCO₂以外の養分を獲得している。耕地ではm²当たりkmオーダーの長さで根系は発達しているが、どんなに密集した植物根系であっても土壌空間に占める割合は5%を超えることは稀で、通常は1%以下に過ぎない⁴⁾。根と土壌が直接接触する、この微少な空間だけでは、Ca以外の多量養分の要求を満たすことはできず⁴⁾、ほとんどの多量養分は大なり小なり土壌から根の表面までを移動する必要がある。

土壌から根表面に至る養分移動にはマスフローと拡散の2つがある。前者は蒸散を駆動力とし、後者よりもはるかに速く移動するが、後者は根の吸収で生じた根近傍とその周辺土壌の濃度勾配を駆動力とする。リン酸イオン(Pi)はほとんど拡散に依存して移動し、比較的湿潤な壤質土壌での拡散速度を比較すると、NO₃⁻で3mm日⁻¹、K⁺やNH₄⁺で1mm日⁻¹に対して、Piではわずか0.03mm日⁻¹程度に過ぎない⁵⁾。このため、根から数mm離れたPiでも、植物にとっては利用困難である。

今、1cmの細根が10日間にこれら養分を拡散のみで獲得するとしよう。たかたが1cmの細根でも、根周辺の約30cm³の土壌からNO₃⁻を獲得でき、K⁺やNH₄⁺では約3cm³の土壌空間からしか獲得できないことになる。さらに拡散速度の低いPiでは、わずか根周辺0.003cm³程度の土壌空間からしか獲得できない。根長密度(土壌空間当たりの根の長さ)が1cm cm⁻³という値はあまり繁茂した状態の根ではないが、この程度の根長密度であっても移動しやすいNO₃⁻のみならずK⁺やNH₄⁺の獲得にとっても根は過剰に存在し、逆にPiの獲得には極めて不十分である。言い換えると、植物は土壌中を移動しやすいNO₃⁻などの養分を獲得するのに多くの根を必要としないのに、移動しにくいPiの獲得には根を発達させなければならないジレンマを抱えている。

3. 根毛・菌根菌の役割

このジレンマ解消に、根の表面構造(根毛・菌根菌)が関与する。根毛の長さや発生密度は種間差が大きく、たとえばタマネギやニンジンの根毛は0.04mm程度と短い、コムギやトマトでは0.3-0.4mm程度で細根の太さの数倍にもなる⁴⁾。Piの拡散速度(0.03mm日⁻¹)

を考慮すれば、0.3mm 程度の長さであっても根毛の役割はかなり重要となる。実際、根毛の長さや密度の違いはリン獲得能の種間差をうまく説明し、発生密度よりも根毛の長さがむしろ重要であることも指摘されている⁴⁾。

この根毛と類似した役割を演じるのが根に共生する菌根菌である。この菌根菌が宿主植物の根に感染すると、根の外に菌糸を広げて種々の養分を取り込み、特に移動速度が低い Pi の獲得能を向上させる。菌根にはいくつかのタイプがあるが、最も起源が古く普遍的なのがアーバスキュラー菌根菌で、陸上植物種の 80%以上に感染する。アーバスキュラー菌根菌には土壤に蓄積した難溶性リンを直接溶解する能力はないと考えられるが、溶解物質を根から分泌する植物との相互作用で難溶性リンの利用能を向上させることを示唆した⁶⁾。

4. リン肥料の局所施肥

窒素・カリウム肥料の利用効率 (20-50%程度) と比較して、農作物によるリン肥料の利用効率は 10%程度と低い。このリン肥料利用効率の低さは (おそらく根毛や菌根菌による拡張を考慮しても) 根系が占有可能な土壤空間の割合を反映しており、この空間と施肥空間のギャップに依存している可能性がある。そうであるならば、土壤空間全体にリンを施肥するのではなく局所的に与えた方が、根系占有空間と施肥空間のギャップを埋めることにつながるかもしれない。同量のリン肥料を与える条件で施肥空間を様々に変化させて検証したところ、局所施肥が肥料利用効率を向上させる結果となった^{7,8)}。施肥した土壤空間では、高濃度のリンに反応して根が繁茂しており、根系占有空間と施肥空間のギャップを埋めることに貢献していたと思われる。ただし、局所施肥した土壤空間サイズが小さくなると、繁茂した根が施肥空間の外にはみ出す頻度が増加して効率が低下した。

5. リン富化種子

土壤がリンを固定する力は非常に強く、土壤を介してリン肥料を植物に供給しようとするが無駄を回避するのは難しい。そうであるならば、リンを直接植物に供給できないだろうか。Watanabe et al (2005)は、幼植物の根に高濃度のリン酸溶液を吸収させることで圃場でのリン施肥量を抑制させた⁹⁾。しかし、この方法は移植を前提としており、移植を前提としない穀類には適用が難しい。では、作物種子に多量のリンを吸収させることはできないだろうか。この発想から、高濃度のリン溶液を吸収させた種子 (リン富化種子) を作成し、リン施肥量の削減にどれだけ有効なのかを調べた¹⁰⁾。その結果、コムギで生産性を損なうことなく、大幅な削減も可能であることがわかった。ただし、高濃度のリン酸溶液に浸漬するために塩ストレスが生じる可能性があり、耐塩性の強い植物種には適用できても、弱い植物種には適用が難しい問題がある。

引用文献

- 1) 黒田章夫ら (2005) J Environ Biotech 4:87-94.
- 2) Bennett et al (2001) Bioscience 51:227-234.
- 3) Carpenter SR (2005) PNAS 102:10002-10005.
- 4) Barber SA (1995) Soil Nutrient Bioavailability, Wiley.
- 5) Gregory P (2006) Plant Roots, Blackwell.
- 6) Shibata & Yano (2003) Appl Soil Ecol 24:133-141.
- 7) Yano & Kume (2005) Plant Prod Sci 8:427-432.
- 8) Kume et al (2006) Ann Bot 98:1271-1277.
- 9) Watanabe et al (2005) Plant Prod Sci 8:608-616.
- 10) Sekiya & Yano (2010) Plan Soil 327:347-354.