

水稻根によるイオンの積極的排除について

誌名	日本土壌肥料学雑誌 = Journal of the science of soil and manure, Japan
ISSN	00290610
巻/号	4111
掲載ページ	p. 457-460
発行年月	1970年11月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波事務所
Tsukuba Office, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council Secretariat



水稻根によるイオンの積極的排除について

田 中 明*

植物根による養分の吸収機作に関する研究は多い。養分吸収の特殊性として、いわゆる積極的吸収と選択的吸収という二つの概念が一般に認められている。すなわち、前者は、培地溶液中のイオンを根が濃度勾配にさかかって吸収すること、いいかえれば、根の水の吸収速度より、イオン吸収速度が速いことであり、これに必要なエネルギーは、根の好気呼吸によっているために代謝的吸収とも呼ばれる。後者は、植物が吸収する各種養分の比率は、培地中に存在する養分の比率と必ずしも同一でないとする考え方であり、この選択的吸収が起こる原因としては、イオンの種類によって積極的吸収を受ける程度に差があり、あるイオンは強く積極的吸収を受け、他のイオンは単に水分の吸収と平行して吸収されると考えるのが普通である。

ここで、これらの現象に加えて、もう一つ考えられることは、積極的排除ということである。すなわち、水の吸収速度よりイオンの吸収速度の方が遅い場合、これを積極的排除と呼ぶことができるわけである。言いかえると、水の吸収との相対関係において根が特定のイオンの根への侵入を阻止する現象が考えられるわけである。このような現象が培養液中の鉄濃度が高い場合に起こることを先に指摘¹⁾したが、さらに一般的に、この積極的排除が存在するか否かを明らかにせんとして実施した実験の結果を報告する。

実験方法および結果

実験 I

以下の実験にはすべて NH_4NO_3 , NaH_2PO_4 , K_2SO_4 , CaCl_2 , MgSO_4 , FeSO_4 , MnSO_4 を用い、水道水を用いて調製した第 1 表のごとき組成の培養液で培養した水稻品種ユウカラを使用した。実験 II 以下でも同様である。各ポットに 4 個体が生育している出穂期の稲を用い、つぎの 3 処理を作って 48 時間にわたって、ガラス室において吸収実験を行なった。使用した培養液は上記の標準培養液である。

処理 1: 3.5l 入りのポットに 3l の培養液を入れ、実験期間中培養液が減少するままに保った。すなわち通常の培養法である。

処理 2: 3.5l 入りのポットに 3l の培養液を入れ、培養液の減少に伴い、適時培養液を追加して、なるべく出発時の水位を保ち、根の大部分がたえず培養液中に存在するようにした。

処理 3: 20l のポットに 3l の培養液を入れ、これから吸収させた。すなわち、稲の根の長さは約 40 cm であったが基部 25 cm はポット内の気相中にあり、以下 15 cm の根がポットの底の深さ約 6 cm の培養液中に入っている状態で出発した。

残存培養液中の要素濃度は各処理とも、要素の種類によって出発時の培養液より濃度が高くなったものと、低くなったものがあった (第 1 表)。

第 1 表 標準培養液よりの各種イオンの選択的吸収

要素	標準培養液の組成 (ppm)	処 理	1	2	3
		吸水量 (ml)	1,620	1,970	1,390
	(a)	残存培養液の要素濃度 (a に対する比)			
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	38		0.07	0.42	0.18
K^+	40		0.03	0.35	0.50
Ca^{2+}	45		1.82	1.40	1.56
Mg^{2+}	50		1.54	1.36	1.26
Mn^{2+}	0.5		0.00	0.26	0.26
Na^+	36		1.53	1.31	1.31
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	40		0.00	0.43	0.89
$\text{H}_2\text{PO}_4^-\text{-P}$	10		0.01	0.43	0.52
$\text{SO}_4^{2-}\text{-S}$	31		1.77	1.33	1.33
Cl^-	49		1.78	1.39	1.35
$\text{Si(OH)}_4\text{-Si}$	21		0.00	0.43	0.16

Fe^{2+} は標準培養液には 1ppm 添加した。ただし、実験中酸化されるので、本実験ではデータを示さなかった。

濃度の低下の著しいものから、変化のほとんどないもの、上昇したものの順に要素を列記すると、つぎのごとくである。

$\text{Mn}^{2+} > \text{Si(OH)}_4 > \text{NH}_4^+$, K^+ , $\text{NO}_3^- > \text{H}_2\text{PO}_4^- > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{Ca}^{2+}$ 。そして、 Mn^{2+} より H_2PO_4^- までは濃度が出発時の培養液中濃度に対して低下しており、 Mg^{2+} から Ca^{2+} までは濃度が上昇した。

参考処理として処理 3 と同様に 20l のポットに 3l の培養液を入れ培養液の表面より 1cm 上に金網を張り、根が直接培養液に接しないように保った場合、実験期間中の蒸散量は 175 ml であった。このことから、培養液の水が一度気化してこれが直接培養液に接していない根の表面から吸収される量は、根が培養液から直接吸収す

* 北海道大学農学部 (札幌市北 9 条西 9 丁目)
昭和 44 年 11 月 14 日受理
日本土壤肥科学雑誌 第 41 巻 第 11 号 p. 457~460 (1970)

る水の量の一割程度に過ぎないことが明らかになった。

さらに処理 2 においては、すべての根がたえず培養液中に浸っていたのであるが $Mg^{2+} \sim Ca^{2+}$ の要素ではやはり、実験期間中に濃度の上昇が認められた。

以上のことから培養液から水が根によって吸収される場合、 $Mn^{2+} \sim H_2PO_4^-$ などは、水が吸収されるより、よりすみやかに根によって吸収されることから、積極的に吸収されると考えることができる。一方 $Mg^{2+} \sim Ca^{2+}$ などの吸収は水の吸収速度よりも遅く、積極的に排除されると考えられる。

さらに水稲による培養液の吸収によって培養液中の $Mg^{2+} \sim Ca^{2+}$ 濃度が上昇するのは培養液から水が蒸発し、この水蒸気がそのままあるいは一度根の表面で液化して、気相中にある根によって吸収されるために、残液中でイオンが濃縮されるのではなく、根が水を吸収する場合 $Mg^{2+} \sim Ca^{2+}$ 等の一部分は培養液中に取り残される機作があると考えねばならない。

実験 II

実験 I と同様の培養液で生育させた 4 個体の稲を穂孕期に 3 l の培養液につけ、24 時間の培養液の減量および残存培養液中の各要素濃度を調べた。なお、この場合吸収をガラス室（自然処理）で行なったものと、暗室（暗処理）で行なったものの 2 処理を作った。この吸収実験に使用した培養液は、N, K, Ca, Mg をそれぞれ 40 ppm, P を 10 ppm となるように NH_4NO_3 , K_2SO_4 , $CaCl_2$, $MgSO_4$, NaH_2PO_4 を使用して作成したものである。

自然処理の吸水量は 1,000 ml であったが暗処理ではわずかに 120 ml であった。 NH_4^+ , NO_3^- , K^+ , $H_2PO_4^-$ は濃度が低下し、その低下度合は自然処理で暗所処理より大きかったが、 K^+ ではこの関係が逆転した（第 2 表）。一方 Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- , Na^+ では濃度の上昇が認められ、自然処理で明らかに上昇が大きく、暗処理では上昇がわずかであった。

各イオンの吸収量をみると、いずれのイオンについて

第 2 表 各種イオン吸収に対する日射有無の影響

処 理	原液濃度に対する比		出発時の量に対する吸収割合	
	自然	暗所	自然	暗所
NH_4^+	0.11	0.57	0.93	0.45
NO_3^-	0.87	0.87	0.42	0.17
K^+	0.68	0.52	0.54	0.50
$H_2PO_4^-$	0.45	0.53	0.70	0.49
Ca^{2+}	1.33	1.01	0.11	0.03
Mg^{2+}	1.30	1.04	0.13	0.01
SO_4^{2-}	1.22	1.05	0.17	0.00
Cl^-	1.22	1.04	0.17	0.01
Na^+	1.30	1.04	0.13	0.01

も、自然処理で吸収量が大きく、 $NH_4^+ \sim H_2PO_4^-$ のイオンでは、両処理間のひらきはあまり大きくないが、 $Ca^{2+} \sim Na^+$ では暗処理ではほとんど吸収が起こらず、自然処理ではかなりの量に達した。すなわち、積極的吸収を受けるイオンの吸収に対する日射の有無の影響は、積極的排除を受けるイオンの吸収より小さい。もちろんこれは暗処理が 24 時間に限定された場合の結果である。

実験 III

前実験同様 3.5 l のポットに 4 個体の稲が水耕されている状態で幼穂形成期に 34 時間にわたってガラス室内で吸収実験を行なった。この場合、4 種の培養法を使用した。すなわち、標準培養液としては $10^{-3} M (NH_4)_2SO_4$, $0.5 \times 10^{-3} M K_2SO_4$, $0.7 \times 10^{-3} M CaSO_4$, $10^{-3} M MgSO_4$ の組成をもつものを使用した。これは、N=28 ppm, K=39 ppm, Ca=28 ppm, Mg=24 ppm, S=102 ppm に相当し、通常使用されている培養液の組成に近い。4 種の培養液は No. 1, No. 2, No. 3, No. 4 とし、それぞれ標準培養液の 1/4, 1, 4, 8 倍濃度のものである。吸収実験終了後、吸水量および残存溶液の各要素の濃度の測定を行なった。

一般的傾向として出発時の培養液中のイオンが低濃度の場合には残存培養液中のイオン濃度は低下し、積極的吸収が起こる。これに反して出発時の培養液中のイオンが高濃度の場合には積極的排除が起こった（第 3 表）。この場合積極的吸収から積極的排除へと転換する濃度には各イオン間で差異があり、その濃度を各イオンの M 濃度で比較すると $NH_4^+ > K^+ > SO_4^{2-} > Mg^{2+}$, Ca^{2+} の順であった。

なお、各イオンについて吸収量を算出してみると、いずれのイオンも培養液中濃度の上昇により吸収量は増加した。

また、前培養の培養液には Na^+ が含まれており、この実験に使用した培養液には Na^+ は含まれていなかったが、実験中に Na^+ が培養液中に溶出し、その溶出は培養液の濃度が高い場合ほど大きかった。 Cl^- は前培養液には含まれていたが定量可能なほどには溶出が認められなかった。

第 3 表 濃度を異にする複合培養液よりの各種イオンの吸収

培養液	吸水量 (ml)	残液中濃度の原液濃度に対する比					残液中濃度 Na^+ (ppm)
		NH_4^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	SO_4^{2-}	
No. 1	1,670	0.00	0.06	1.10	1.18	0.64	0.0
No. 2	1,580	0.21	0.60	1.25	1.46	1.22	3.2
No. 3	1,490	0.80	1.54	1.50	1.67	1.26	4.5
No. 4	1,470	1.27	1.50	1.50	1.70	1.36	6.8

第4表 各種濃度の K_2SO_4 または KH_2PO_4 単塩溶液よりの K^+ , SO_4^{2-} または $H_2PO_4^-$ の吸収

M 濃度	吸水量 (ml)	出発時の濃度に対する比	
		K^+	SO_4^{2-} または $H_2PO_4^-$
K_2SO_4			
0.024	120	1.22	1.60
0.006	100	1.20	1.33
0.003	140	1.18	1.12
0.0015	100	0.98	0.76
0.00075	95	0.68	0.50
0.00019	90	0.18	0.43
KH_2PO_4			
0.016	130	0.68	1.23
0.004	110	0.52	1.18
0.002	130	0.42	1.05
0.001	125	0.08	0.75
0.0005	120	0.02	0.62
0.000125	110	0.00	0.13

実験 IV

標準培養法で培養した幼穂形成期の水稻を用い、500 ml の濃度を異にする K_2SO_4 または KH_2PO_4 の溶液に1個体ずつ移植し、30時間ガラス室内で吸収を行なわせた後、残存液の分析を行なった。出発時の単塩培養液の組成および実験結果は第4表のごとくである。

K_2SO_4 および KH_2PO_4 いずれの場合も、 K^+ および SO_4^{2-} または $H_2PO_4^-$ について、低濃度で積極的吸収が、高濃度で積極的排除が認められた。

積極的吸収から積極的排除に転ずる濃度は SO_4^{2-} と $H_2PO_4^-$ で相違が認められ、 SO_4^{2-} が低い濃度であった。またこれと同時に K^+ については K_2SO_4 と KH_2PO_4 の場合で相違が認められ、 K_2SO_4 の場合にはるかに低濃度で、この逆転が起こった。すなわち、 K^+ の吸収についてみると、その吸収は、随伴イオンの種類により影響を受けることが明らかである。

議 論

植物根による養分吸収機構に関しては多くの研究がなされてきたがきわめて複雑であって、不明な点が多い。しかし、吸収機構には根の代謝作用と関連した積極的な側面と、蒸散作用に伴って起こる受動的な側面があると考えられている。

さて、蒸散作用に伴う側面について考えてみると、イオンの吸収が水の吸収に平行して行なわれることにより、イオン吸収量は蒸散量と、そのイオン濃度の積と考えることができる。

先に明らかにしたごとく²⁾、正常に生育している水稻

の蒸散係数はほぼ一定であり280程度である。この数値を用いると、仮に土壤溶液または培養液中の要素濃度が1ppmと仮定すると1gの乾物生産に対応して280mlの蒸散があることになり、この量の水に伴って0.28mgの要素が吸収されることになり、乾物のその要素含有率は0.028%となる。

このことを前提として考えると、たとえばPについては土壤溶液中の濃度はほとんどの場合0.1ppm以下であるから水稻体の含有率は、受動的吸収のみであれば0.0028%以下であることになり、実際はこれよりはるかに高い含有率を示すからPは積極的吸収を受けていることが確実である。

一方、Caについては、土壤溶液中の濃度が40ppmであればこれは1.12%に相当することになる。しかし実際には土壤溶液中のCa濃度は40ppmより高い場合も往々あるにもかかわらず稲の含有率は0.3%ていどのが通常である。このことからCaは積極的排除を受けられる場合が多いと判断される。

植物の要素組成は培地の要素濃度に支配されることはもちろんであるが、養分吸収における選択機構のために各植物に固有の要素組成を保つ傾向がある。この選択機構は、培地から特定のイオンを積極的に吸収する機構にもよっているのではなく、積極的に排除する機構にもよっていると考えることができる。すなわち、あるイオンについてみると、培地中の濃度が低い場合には、積極的に吸収が起こり、高い場合には積極的排除が行なわれてその植物固有の含有率が保たれる傾向を示すのである。

この積極的排除の機構については全く不明であるが、少なくとも根の表面における水の通過速度よりもイオンの通過速度が遅いことによっていると考えねばならない。

ここに得られた実験結果からは、通常の培養液を使用した場合は NH_4^+ , NO_3^- , $H_2PO_4^-$, K^+ , $Si(OH)_4$, Mn^{2+} などは積極的吸収を受け、 Mg^{2+} , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- などは積極的排除を受けるとみることができる。そして培地のイオン濃度が低濃度の時は積極的吸収が、高濃度の時は積極的排除が起こるのであって、これら両吸収の転換する培地中の濃度があり、この転換濃度はイオンの種類により、また、随伴イオンの種類など、さまざまな条件によって変化する。

上記のことから考えると培養液組成を適当に調整し、すべてのイオンが転換濃度となるようにすれば培養液から養分の吸収が起こっても培地の組成が変化しないということが起こり得るはずである。もちろんこのような培養液組成は、各種の環境条件、水稻の生育時期によっても変

化することが予測されるので、実際上は、この調整はきわめて困難と考えねばならない。

以上本論文においては植物根による養分吸収にあたり、水の吸収速度に比べて、イオンの吸収速度の方が速い積極的吸収が起こると同時に、条件によってはイオン吸収速度の方が遅い積極的排除も起こることを指摘した。

このような排除が起こる機作は全く不明であり、今後の研究課題である。

要 約

1) 水耕培養液から水稻が水およびイオンを吸収する場合、残存液中のイオン濃度は出発時の濃度に比べて、低下する場合と上昇する場合がある。低下する場合に

は、積極的吸収が行なわれたと考えるならば、上昇する場合は積極的排除が行なわれたと考えることができる。

2) 積極的吸収を受けるか積極的排除を受けるかは、培養液中のイオン濃度に支配され、一般に低濃度の時には前者が、高濃度の時は後者が行なわれる。

3) 両者の転換が起こる濃度は、イオンの種類、随伴イオンの種類などに支配されるが、一般に NH_4^+ , K^+ , NO_3^- , H_2PO_4^- の転換濃度は高く、 Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} , Cl^- などのそれは低い。

文 献

- 1) 田中 明・但野利秋：土肥誌，40，469 (1969)
- 2) 田中 明・山口淳一・桑原真人：土肥誌，41，59 (1970)