

リン酸資源と微生物

誌名	農林水産技術研究ジャーナル
ISSN	03879240
著者	都留, 信也
巻/号	4巻4号
掲載ページ	p. 23-26
発行年月	1981年4月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



リン酸資源と微生物

都 留 信 也

1. はじめに

リン酸資源が有限であって、従来どおりリン酸資源を利用するならば約 100 年後には涸渇するおそれがあるといわれるようになってきている。リン酸資源はこれまでも重要な肥料の一つであったが、食糧生産に不可欠のリン酸肥料の施用はこれからも増加しつづけていくものと考えられている。

リン酸は窒素について重要な植物の必須元素である。窒素と異なり大気中への移行は殆んどない。植物体内では核酸、糖リン酸、リン脂質などいろいろの化学成分として分布している。植物遺体が土壌中で分解される過程で有機態リン酸は無機化され、無機態リン酸へ転化される。

土壌中では酸性あるいはアルカリ性ホスファターゼならびにホスホジエステラーゼなどの酵素活性が認められている。無機化されたリン酸はカルシウム、鉄、アルミニウムと不溶性塩類を形成する。鉄およびアルミニウムと結合したリン酸の回収は難しいが、いろいろの有機酸を生成できる土壌中の微生物はリン酸カルシウムを可溶化することができる。

植物根域における有機態リン酸の無機化あるいは有機酸の細胞外への蓄積に関与する微生物は、植物に吸収利用できるリン酸を供給する可能性をもっている。わが国は、リンを含有する鉱床がすくなく、また火山性土壌のようにリン酸を固定して不可給態リン酸に転化してしまう土壌が多く分布している。したがって、有機態リン酸の可溶化過程に関与する微生物の利用を積極的に検討する必要がある。

2. リンの循環と微生物の役割

リンは P^{3-} から P^{5+} までの荷電状態をとる元素

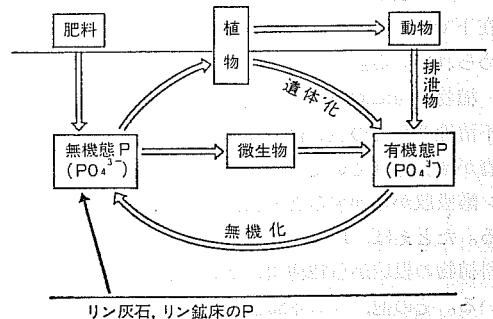
Shinya Tsuru : Microbial transformation of phosphorous compounds in soils.

であるが、土壌中では、殆んどの場合に P^{5+} の酸化状態をしていて、酸素 4 原子と結合した HPO_4^{2-} あるいは $H_2PO_4^-$ などと塩あるいはエステル結合した形態で存在している。

前述したように、リンが揮発性物質として存在するため、大気中には殆んど認められない。このことは、大気中ではリンの供給あるいはリンの移動が存在しないことを意味している。

水溶性リンは、土壌および底質に多量に存在している鉄、アルミニウムの酸化物および水酸化物、炭酸カルシウムあるいは粘土鉱物に強く吸着されたり、難溶性化合物を形成する。こうした反応は、水溶性リン濃度を低く保持させることとなり、リンの移動速度を抑えるとともに、土壌および底質がリンの重要な蓄積の場となることを意味している。

その他、岩石中には平均 0.15—0.20% のリンが含まれており、植物が水溶性の無機態リン酸しか吸収・利用できないことからリンの生物地球化学的循環の模式図はつぎのように表わされる(第 1 図)。



第 1 図 土壌におけるリンの循環

土壌中でのリン酸の挙動について見る場合に、植物根域がもっとも多くの情報を提供している。ここでは、いくつかの事例について述べることにする。たとえば、BOWEN と ROVIRA (1966) は植物のリン酸吸収に関与する根域の微生物の影響を調べているが、トマトとクローバの幼植物を ^{32}P 標識のリン酸溶液に浸漬し、非殺菌および殺菌条件下で比較を行

なっている。これによると、リン酸吸収とリン酸移行は、微生物の存在していたほうで促進されていたことが明らかにされている(第1表)。

第1表 微生物の存否によるリン酸の吸収およびその移動 (Bowen と Rovira, 1966)

植 物	吸収時間 (分)	生育条件	リン酸吸収 (10^{-13} モル)	
			根 部	地上部
ト マ ト	5	滅 菌	114	9
	〃	非 滅 菌	215	27
ト マ ト	20	滅 菌	777	36
	〃	非 滅 菌	1,247*	159*
ク ロー バ	5	滅 菌	666	44
	〃	非 滅 菌	1,138**	59
ク ロー バ	20	滅 菌	971	119
	〃	非 滅 菌	1,718*	125

注 *5% DS, **1% DS 分析は植物12個体の平均値

また、植物根の断面の ^{32}P 標識のリン化合物の分布パターンからも微生物がリン酸吸収に関与していることが明らかとなっている。非殺菌条件下では、 ^{32}P 標識のリン化合物が表皮に多く分布することをはじめしたが、殺菌条件下では、リン酸吸収が抑制された結果として、表皮などへの蓄積が見られなかった。

その他、BENIANS と BARBER (1974) は土壌ポット試験により、微生物存在下および無菌条件下でオオムギによるリン酸吸収を比較している。微生物存在下ではリン酸吸収が促進され、乾物量の増加が認められている。

植物根域におけるリン酸可溶化の現象については不溶性リン酸の殺菌砂ポットへの添加による植物生育が観察されていて、土壌を接種することによりリン酸吸収が増加すると結果が明らかにされている。たとえば、PAUL と SUNDARA RAO(1971)はマメ科植物の根域から12種類のリン酸溶解菌を分離している。その他、コムギおよびソラマメの根域からはリボ核酸、レンチン分解菌なども分離されている。

植物根域ばかりでなく、広く土壌中には有機態リンを分解、利用できる微生物の存在が知られている。ただしこの場合には、植物根に由来するホスファターゼなどの酵素のほうが、根域微生物に由来する同様の酵素にくらべ重視される結果がしめされている。たとえば、RIDGE と ROVIRA(1971)は、非殺菌条件下および殺菌条件下のコムギの根のホスファターゼ活性を比較している。この酵素活性の大部分が植物根面にあり、土壌微生物の関与があまり大きくないことを明らかにしている。

植物生育にとって直接有効な微生物の作用については、内生菌のリン酸供給能が注目されている。とくに、内生菌は共生する微生物の種類によっていくつかに分けられる。もっとも普遍的なものは蕈菌類の仲間が羊歯、蘚苔、その他高等植物にまでつくるVA菌根である。このVA菌根の分離、培養は難しく、特殊な条件で培養できるようになったものはわずか数種類にすぎない。

たとえば、ROSS と HARPER(1970)は土壌から採集した内生菌の厚膜胞子を殺菌土壌に接種してダイズにVA菌根を形成させた上で、さらにダイズ根粒菌を接種すると、無菌根のものにくらべて子実収量が35—40%増加することを確かめている。また、畑地の圃場試験においても同様の結果を得ており、この場合の子実収量は約30%に増加している。

ROSS と GILLIAM(1973)は、ダイズの子実収量は、菌根がないとリン酸施用量に比例し、菌根が存在すると無関係になることを確かめている。リン酸塩の種類をかえて施用すると、リン酸アルミニウムおよびリン酸カルシウムで高収が得られるが、菌根の有無により利用できるリン酸塩の種類は異なることを明らかにしている。こうした試験から、ダイズ根粒の窒素固定にリン酸が関与しており、VA菌根がリン酸供給に関与していることが明らかにされている(第2表)。

ROSS と GILLIAM(1973)は、ダイズの子実収量は、菌根がないとリン酸施用量に比例し、菌根が存在すると無関係になることを確かめている。リン酸塩の種類をかえて施用すると、リン酸アルミニウムおよびリン酸カルシウムで高収が得られるが、菌根の有無により利用できるリン酸塩の種類は異なることを明らかにしている。こうした試験から、ダイズ根粒の窒素固定にリン酸が関与しており、VA菌根がリン酸供給に関与していることが明らかにされている(第2表)。

第2表 リン酸肥料施用と内生菌接種がダイズ子実収量に及ぼす効果 (Ross と Gilliam, 1973)

リン酸資源*	内生菌	子実収量 (g/ポット)
無 施 用	—	4.5
	+	4.2
リ ン 酸 鉄	—	1.7
	+	9.1
リン酸アルミニウム	—	23.8
	+	42.6
リ ン 鈣 石	—	1.7
	+	3.6
リン酸カルシウム	—	34.1
	+	53.3

* 施用量=土壌 1 kg 当たり 17.6mgP

3. 有機態リン酸と微生物の作用

年間光合成により生産されるバイオマスは 5×10^{10} トンと推定されており、その約20%が微生物バイオマスとされている。土壤微生物はヘクタール当たり生菌体として4—20トンを占め、土壤有機物2—4%の畑地土壤の全窒素の5—10%に相当するものとされている。土壤中の平均窒素含量0.25%を想定するならば、微生物菌体窒素は0.025%となる。また、土壤微生物に対して窒素・有機態リン酸比を10対1とするならば、約0.0025%、すなわち25ppmの有機態リン酸が土壤微生物に関連しているということとなろう。これは、いろいろの土壤に見出される全有機態リン酸の5—10%に相当するものである。

核酸およびリン脂質のリン酸含量は全有機態リン酸の5—10%に相当する。核酸は土壤中で急速に分解され、無機態リン酸およびプリン、ピリミジン塩基に転化されてしまうが、この反応はヌクレアーゼ生産微生物により制御されている。

土壤に見出されるポリヌクレオチドは主として細菌DNAに由来するものである。土壤中の細菌密度をATP法を用いて測定した結果、HOLM-HANSEN (1969)によると、濃度は 8×10^{-3} から $1.3 \times 10^{-1} \mu\text{g ATP} \cdot \text{g}^{-1}$ まで広い濃度分布をしめしている。過剰のATPを測定しているとの反対も述べられているが、いろいろの土壤中のATP濃度を測定することが可能となっている。

0.1% レンチン濃度に対する活性を基準にした相対活性を用いた試験が行なわれているが、Ko WEN HSUING と HORA (1970) は土壤有機物中のリン脂質分解菌として放線菌が主要微生物相であることを明らかにし、放線菌由来のホスホリパーゼ活性が65—80%、細菌および糸状菌由来のホスホリパーゼ活性が15%以下であるとしている。

その他、有機態リン酸化合物であるイノシトール分解について見ることにする。たとえばTHEODOROU (1971)によると、内生菌、*Rhizopogon luteolus* がマイオイノシトール6リン酸を加水分解する場合に、二つの分解経路に関与するフィターゼ活性をしめしたとしている。マイオイノシトール6リン酸の加水分解については、*Pseudomonas sp.* あるいは *Aerobacter aerogenes* のフィターゼ活性についても検討されている(第2図)。

1. マイオイノシトール6リン酸→
D-マイオイノシトール5(1,2,4,5,6)リン酸→
D-マイオイノシトール4(1,2,5,6)リン酸→
D-マイオイノシトール3(1,2,5;1,2,6)リン酸→
D-マイオイノシトール2(1,2)リン酸→
D-マイオイノシトール1リン酸
2. サイロイノシトール6リン酸→
サイロイノシトール5(1,2,3,4,5)リン酸→
DL-4(1,2,3,4)リン酸エナンチオモルフ→
3(1,2,3)リン酸エナンチオモルフ→
DL-2(1,2)リン酸エナンチオモルフ→
サイロイノシトール1リン酸
3. D-チロイノシトール6リン酸→
D-チロイノシトール5(1,2,3,5,6;1,2,3,4,6)リン酸→
D-チロイノシトール4(1,2,3,5)リン酸→
D-チロイノシトール3(1,2,6)リン酸→
D-チロイノシトール2(1,6)リン酸→
D-チロイノシトール1リン酸

第2図 有機態リン酸の加水分解経路

IRVING と COSGROVE(1971) は *Pseudomonas sp.* のフィターゼ(酸性ホスホモノエステラーゼ)の至適pHが40°Cで5.5であること、Pニトロフェニル、リン酸およびイノシトール6リン酸のみを加水分解できることを明らかにしている。フィターゼに関してはすくなくとも二種類の酵素が存在していて、一つは植物由来のものであり、他の一つは微生物由来のものであることが示唆されている。

有機態リン酸は土壤肥沃度において重要な役割をもっているが、リン酸固定あるいはリン酸保持の過程に関与していることが知られている。たとえばMcKERCHER と ANDERSON (1968)はイノシトール6リン酸が同一の吸着部位で無機態リン酸と競合し、高濃度の有機態リン酸が無機態リン酸の吸着を大幅に減少させることを見出している。

有機態リン酸は土壤中に微生物の働きによって蓄積されるが、その大部分は植物や動物遺体の有機態リン酸に由来するものである。しかし、植物栄養に対するリン酸供給の基礎を微生物活性に求めるにしても、その解析は不十分のものであり、今後ともリンの循環あるいはリン酸の無機化に関与する微生物活性については、土壤および植物根域におけるリン酸の挙動について詳細な実体を把握し、解明する必要がある。

4. あとがき

土壤中における有機態リン酸の転化あるいはその挙動については、土壤化学および生化学的解析がいろいろ試行されている。しかし、土壤有機態リン酸に関する知見のうち、生化学的知見は最近の5ヶ年間に集積された情報が大部分を占めており、現時点でもゆっくりではあるが情報の集積が継続しつつあるのが実状である。

土壤酵素の抽出、分離、同定の確立とともに、土壤微生物のリン酸加水分解酵素の起源、さらには有機態リン酸の脱リン酸経路などについても若干ふれては見たが、こうしたリン酸の循環における酵素作用パターンおよび微生物活性については未解決の問題が残されている事実を指摘しておきたい。

参考文献

- 1) Benians, G. I. and Barber, D. A., Soil Biol. Biochem., 6, 195 (1974)
- 2) Bowen, G. D. and Rovira, A. D., Nature, 211, 665 (1966)
- 3) Holm-Hansen, O., Limnol. Oceanogr., 14,

740 (1969)

- 4) Irving, G. C. and Cosgrove, D. J., Austral. J. Biol. Sci., 24, 547 (1971)
- 5) Ko Wen Hsuing and Hora, F. K., Soil Sci., 110, 355 (1970)
- 6) Mckercher, R. B. and Anderson, G., J. Soil Sci., 19, 47(1968).
- 7) Paul, N. B. and Sundara Rao. W. V. B., Plant Soil, 35, 127(1971).
- 8) Ridge, E. H. and Rovira, A. D., New Phytol., 70, 1017(1971).
- 9) Ross, J. P. and Harper, J. A., Phytopathology, 60, 1552(1976).
- 10) Ross, J. P. and Gilliam, J. W., Soil Sci., Soc. Am, Proc., 37, 237 (1973)
- 11) Theodorou, C., Soil Biol, Biochem., 3, 89 (1971)

追記

土壤微生物によるリン酸の転化およびリン酸化合物分解酵素に関する文献としては、金沢、早野、都留(化学と生物、印刷中、1981)を参照されたい。

(農業技術研究所土壤微生物研究室長)

バイオミメティック化学の登場

コロンビア大学の R. Breslow 教授によって提案された "Biomimetic chemistry" という耳なれぬ科学技術が定着しつつある。従来、生物学では "mimesis" といえば、"擬態" と理解されてきたと思うが、これはそれとは異なって、強いて訳せば生体模倣化学といったらよいのだろうか、"生体機能の化学" 的シミュレーションにはかならない。米国や欧州では、この分野の研究に国をあげて力を注ぎ、21世紀の世界をリードするのは、Biomimetic chemistry だという確信が高まっている。

分化して進歩する自然科学の境界領域は多々あるが、時に軽視できぬ重要な "はざま" を埋めるべく非常な努力が傾けられる。まさに Biomimetic chemistry にも最近大きな関心が集まっている。この分野は、生物学と化学との間に位置するが、同じく生物学と化学の間に位置する Biochemistry (生化学, 生物化学) が主として分子の構造と反応を守備しているのに対して、これは分子の機能を語ることを主眼にしている。そこでは分子の構造や反応は、

すべて機能の発現と結びつけて論じられるのが大きな特徴だという。

相間移動触媒の研究で知られる田伏岩夫氏によると、この領域は初期には、生物領域で解明の最も進んでいた酵素の機能を分子レベルで化学的に考察することから始まり、酵素モデルを設計・合成する方向に進み、次いで酵素以外の重要な機能分子に同じような解析・設計・人工化の手法を拡張しつつある、という。このような古典化学と現代化学の様相激変の原因は、田伏氏によると、「古典化学は製品の安価大量生産がニーズで、その目的のために生体器管の物質とは無関係の人工反応をエネルギーに開拓したバベルの塔建設にも比すべき時期であったが、近年、環境・エネルギー・資源問題が社会からのニーズとしてつきつけられ、しかもこの問題解決に向うためには、どうしても生物のマネをしないと、化学単独ではたち向えそうもないことがわかってきた」からだとのべている(「分子研レターズ」1980年№7)。(協会技術主幹 山田良夫)