半乾燥熱帯の農業生態系

キマメとヒヨコマメの栽培を中心として

阿江教治^{*1}

有原文二^{*2}

岡田謙介^{*3}

半乾燥熱帯に位置するインドのデカン高原の主な作付け体系はソルガム・ミレット型に分類される。肥沃度の低い Alfisol と Vertisol が主な土壌であるが、主穀物のソルガムやミレットとマメ科のヒヨコマメやキマメが間作や混作の形で伝統的に作付け体系に組み入れられ、三千年以上の間生産力を失うことなく、今なお1億人以上の人々の生活と文明を支えている。このようなインドの畑作農業システムは低投入持続型農業（LISA）のモデルとして科学的に位置づけることができる。

1983 年から 1990 年にかけて、筆者らはインドのデカン高原のほぼ中央にある国際半乾燥熱帯作物研究所（International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics ; ICRISAT）へ派遣され、半乾燥熱帯、特にインドにおいて重要な作物であるキマメ（*Cajanus cajan* (L.) Millsp.）とヒヨコマメ（*Cicer arietinum* L.）のリン酸栄養の研究に従事した。その中で、マメ科作物を含む作付け方式が半乾燥熱帯地域の作物生産にとって重

要な意味をもっていることを学んだ。本稿では、キマメやヒヨコマメの特異的なリン酸吸収機構や、根系の発達が半乾燥熱帯地域の農業生産に果たしている役割を考えていきたい。

半乾燥熱帯の農業基盤

Troll⁽¹⁾ の定義によれば、半乾燥熱帯とは、月間平均降水量が月間蒸発散量を越える期間が 2～7 カ月あり、かつ最寒月の月平均気温が 18°C 以上

図 1 ■ 半乾燥熱帯地域の分布 (ICRISAT Research Highlight, 1983 より)

Understanding agroecosystem of the Semi-Arid Tropics—the Role of Pigeonpea and Chickpea in the Cropping Systems of Indian Subcontinent

^{*1} Noriharu AE, 農林水産省農業環境技術研究所, ^{*2} Joji ARIHARA, 同省北海道農業試験場, ^{*3} Kensuke OKADA, 同省熱帯農業研究センター

の地域を言う。うち、2~4.5 カ月の湿潤な期間を有する地域を乾燥型 (thorn Savanna vegetation) 半乾燥熱帯、4.5~7 カ月続く場合を湿潤/乾燥型 (dry Savanna) 半乾燥熱帯と区別している。世界的に半乾燥熱帯は 1,960 万 km² の面積があり、四大大陸に及んでいる (図1)。最も広い地域はアフリカのサハラ砂漠の南側に広がり、1,210 万 km² (62%) もある。そのほかに半乾燥熱帯はラテンアメリカに 17%, オーストラリアに 10%, アジアに 11% と広がっている。アジアではインド亜大陸のほとんどが半乾燥熱帯地域に属し、4 億人の生活を支えている。半乾燥熱帯の総人口は約 7 億人であることから考えても、インド亜大陸における農業生産の仕組みを研究することは重要であると思われる。

典型的な半乾燥熱帯であるハイデラバード市の (ICRISAT の所在地) の降雨の様子をみると (図2)、一年は 6 月中旬から 10 月初めまでの雨期と 10 月から翌年の 6 月初めまでの乾期にはっきりと分かれている。年平均降水量は 750 mm であるが、年次間変動が激しいだけでなく、年次内の降

図 2 ■ ハイデラバード市の降雨と日照のパターン

雨パターンも予測ができない。雨期といえども、激しい雨とそれに続く小乾期の繰り返りで土壌水分の変動はきわめて大きい。

半乾燥熱帯に分布する土壌⁽²⁾は、Vertisol と Alfisol, およびこれらの近縁の土壌群に大別できるが、インド亜大陸においてもこれらの土壌はその大部分を占めている。

Vertisol は地質的には比較的新しい塩基性岩を母材とする黒色の土壌である。半乾燥地帯全体の 16% を占め、石灰質に富み、pH は 8.5 から 9.0 付近、粘土含量は 40~60% と高い重粘土質のアルカリ土壌である。主たる粘土はモンモリロ

図 3 ■ インド亜大陸における主要土壌の分布 (a)・と主要作付け形式 (b)
Muthiah, 1987 より一部修正

ナイトで、有機炭素含量は低く 0.3~0.7% の範囲にある。Vertisol は炭酸カルシウムの結核を含む石灰質土壌で、CEC (陽イオン交換容量) は 47~65 meq/100 g と高く、Ca イオンのほか、Mg イオン、K イオン、Na イオンおよびその他の微量要素も多く含む、熱帯では肥沃な土壌の一つとされている。モンモリロナイトを多く含むため乾燥すると収縮し、乾期には 50~100 cm もの深さまで亀裂を生じる。また、高い水分保持能力 (150 mm/年) があり、雨期に土壌に蓄えられた水分を利用してソルガムやヒヨコマメの乾期作を可能にしている。重粘土質のため、雨期にはしばしば透水性や通気性が低下して湿害をひき起こす。

Alfisol は主に酸性岩を母材とし、風化の進んだ赤黄色の土壌である。土壌層位中に粘土の集積層 (argillic horizon) をもち、粘土の主体はカオリナイトである。土壌中の粘土含量は 10~20%、全炭素含量も 1% 以下で CEC は 1~10 meq/100 g 程度で肥沃度は低い。Vertisol とは異なり水分保持能力は低く (50 mm/年)、そのため作物の栽培は灌漑水の得られないところでは雨期のみに限られる。土壌表層にクラスト (土膜) が生じやすく作物の出芽が阻害される。Alfisol に近縁の土壌として、Ultisol や Oxisol などがあり、これらの土壌は風化が一層進み土壌中に鉄分が多いため黄色から赤色をしており、Alfisol とともに半乾燥熱帯に占める割合は多い (図 3-a⁽³⁾ 参照)。

インド亜大陸におけるマメ科作物

インドの農業生産上の特徴は、炭水化物源としての穀類であるイネ科作物とタンパク源としてのマメ科作物の種類の豊富なことである。たとえば、コムギはインド西北部の主穀物であるが、イネはインド東部と南部の主穀物である。また、ソルガムやミレット類 (pearl millet, barnyard millet, fox-tail millet, finger millet) も chapati (発酵させないで焼いたパン) の材料としてかなりの頻度で食卓に供せられる。宗教上あるいは経済的理由から動物性タンパクよりも植物性であるマメ科作物が重要で、その種類も多い。キマメやヒヨコマメは重要なマメ科作物ではあるが、その

他に black gram (*Vigna mungo* L. Hepper), green gram (mungbean, *Vigna radiata* L. Wilczek), lentil (レンズマメ, *Lens esculenta* Moench), pea (*Pisum* spp.), cowpea (*Vigna sinensis* L.), ラッカセイ、ダイズなどがある。

キマメ (英語で pigeonpea あるいは red gram, ヒンズー語では ahar あるいは tur と呼ばれる) は、インドでは三千年以上も前から栽培されているマメ科作物であるが、栽培の歴史が古いにもかかわらずインドには野生種がなく、野生種が見つかるアフリカが原産地と考えられている。インドでの生産は南部が中心である。キマメはもともと灌木であるため燃料としての用途もある。その栽培面積は 267 万ヘクタール、生産量は 192 万トンである。

一方、ヒヨコマメ (英語で chickpea あるいは bengal gram, ヒンズー語で chana と呼ばれる) は、地中海からインド北部にかけて広く栽培されており、原産地はアフガニスタンからイランにかけての地域とされているが、はっきりしない。サンスクリット名をもつことから、インドでの栽培の歴史はきわめて古いものと思われる。インドでの生産は北部が中心である。その栽培面積は 787 万ヘクタール、生産量は 583 万トンである。

インド亜大陸における栽培体系

インド亜大陸における主な作付け体系⁽⁴⁾は、以下に示す 5 つに分けられる (図 3-b)。

① 水稻型: ガンジス川沖積平原の中央部からデルタ地帯にかけてと、南インドの東側海岸沿いの狭い沖積土壌地域で行なわれている。

② 小麦型: ガンジス平原北部より西部にかけての乾燥地帯で営まれている。ヒマラヤからの肥沃な土砂で成立した沖積土壌に栄養塩類の豊富な運河による灌漑水を利用して、二毛作による栽培が行なわれている。雨期作としてソルガム、イネ、ラッカセイを含むマメ科作物などがある。

③ ソルガム・ミレット型: インド亜大陸の中央部にあるデカン高原を主要な地域とする。気象および土壌的には典型的な半乾燥熱帯に属し、伝統的な半乾燥型農業が営まれている。①や②にみ

られる沖積土壌と比較して肥沃度の低い Alfisol と Vertisol が主な土壌で、有力な河川はなく灌漑は期待できない。

④ 果樹型：カンミールやヒマラヤ山岳地帯が中心地域で、インドにおける果実類の最大の供給地である。トウモロコシや水稻の作付けも存在する。

⑤ プランテーション型：アッサム地方やニルギリ山地に代表される茶やコーヒーの栽培地帯。

これらのうち、①、②、③ではマメ類が作付け体系の中に組み込まれているが、マメ科作物の種類は地域によって異なり、①では black gram や mungbean が、②ではヒヨコマメやレンズ豆、③ではキマメやヒヨコマメが主に栽培されている。

①や②の地域では肥沃な土壌と豊富な灌漑水という好条件が重なって二毛作の集約栽培が行なわれており、施肥量も多い。ちなみに、②のパンジャブ州での年間の窒素施肥量は 110 kg/ha である。

③の地帯では、原則として乾期の作付けはできない (Vertisol では乾期にヒヨコマメの栽培が行なわれている)。土壌の肥沃度が低く、かつ窒素施肥量も少ないことから (20~30 kg/ha)、イネ科であるソルガムやミレットとマメ科であるキマメとの伝統的な間作 (intercropping) や混作 (mixed cropping) が雨期に行なわれている。すなわちマメ科作物を作付け体系の中に組み入れることは、その窒素固定能力により、施肥窒素がなくても作物生産を維持できるという利点をもっている。

しかし、なぜ③の地域でヒヨコマメとキマメが作付けされているかについては窒素固定能力ということだけでは説明ができない。多用な種類のマメ科作物が栽培されているインドにおいてはこの疑問は重要であろう。その他の理由として、この2つの豆類が肥沃度の低い土壌でもよく生育するだけでなく、耐旱性に優れていることがあげられる。

一般に半乾燥熱帯では土壌の肥沃度は低いが、降雨量が少ないことから、土壌養分の洗脱は少なく、微量元素の欠乏は言われているほど深刻ではない。作物において最も制限となる主要な養分は、

窒素、リン酸、カリウムである。マメ科の窒素固定能力から考えると、土壌の窒素肥沃度に関しては考慮する必要がない。半乾燥地の土壌ではカリウムは比較的豊富に含まれていると思われる。

ICRISAT の長期カリウム欠如試験の結果からもカリウムの施用効果は認められず、したがってカリウムの肥沃度についても考慮の対象外である。リン酸については Alfisol や Vertisol の可給態リン酸は沖積土壌に比較してかなり低い。にもかかわらず、ICRISAT の試験結果でみるとソルガムやミレットでは施用リン酸によく反応するが、キマメやヒヨコマメではリン酸の施肥反応のないことが認められていた。次に、これら両作物のリン酸施肥反応の特異性について述べる。

キマメとヒヨコマメの特異的リン酸吸収機構^(5,6)

キマメやヒヨコマメがリン酸施肥に対して反応が少ない理由として、以下のことが考えられた。

- ① 著しい深根性のため、他の作物よりも根系に接する土壌が多い。
- ② VAM (vesicular-arbuscular mycorrhiza) 菌と強力な共生関係にある。
- ③ 特別なリン酸吸収機構をもつ。

まず、キマメとヒヨコマメのリン酸反応を観察するため、Olsen 法*に従って、有効態リン酸が、それぞれ 5 ppm, 1 ppm のきわめて低い低リン酸肥沃度をもつ Alfisol と Vertisol の圃場を選んだ。対照作物としてはソルガムを用いた。図4にみられるように、ヒヨコマメは Vertisol ではほとんどリン酸の施肥反応がなく、ソルガムの場合でもあまり顕著でなかった。すなわち、リン酸量を 0 から 70 kg/ha まで変化させて施用してもソルガムでは 3,040 から 4,000 kg/ha、ヒヨコマメでは 1,740 から 2,030 kg/ha という収量変化にすぎず、リン酸に対してほとんど反応のないことがうかがえる。キマメは 364 から 590 kg/ha とわずかながらリン酸施肥反応が認められた。

* 石灰質やアルカリ性土壌での可給態リン酸量を計測する標準法として広く用いられている。pH 8.5 の重炭酸ナトリウムをその抽出液に用いる。

図 4 ■ 低リン酸肥沃度の Alfisol と Vertisol 圃場で栽培したソルガム、キマメ、ヒヨコマメのリン酸施肥反応

Alfisol の場合、ソルガムは 87 から 3,940 kg/ha、ヒヨコマメでは 640 から 1,530 kg/ha と施肥により増収し、施肥反応を示したが、Vertisol の場合と異なりキマメでは 1,640 から 1,890 kg/ha とほとんどリン酸に対して反応が認められなかった。このように、ヒヨコマメは Vertisol で、キマメは Alfisol でのみリン酸の施肥反応がなく、作物と土壌の間に特異的な反応がみられた。

キマメやヒヨコマメは深根性であり、どちらも 2.0 m の深さまで根が到達していた。このことは他の作物と比べてこれら両作物の有効土層が深く、たとえ低リン酸肥沃度土壌からでも十分に養分を吸収する可能性がある。

深根性の要因について検討をするため、制限された土壌量を用いてポット試験を行ない、作物のリン酸施肥反応を観察した（圃場試験と同じ土壌をポットに充填）。表 1 にその結果を示した。また圃場およびポット実験に用いた土壌のリン酸およびその他の一般的性質を表 2 に示した。供試した Alfisol のリン酸肥沃度はきわめて低く、ソ

表 1 ■ 低リン酸土壌で生育させた各種作物によるリン酸吸収量* (P-mg/pot)

	キマメ	ヒヨコマメ	ソルガム	ダイズ	トウモロコシ	トウジンビエ
Alfisol	5.72	4.73	0.59**	1.40**	0.51**	0.64**
Vertisol	2.34	6.79	3.91	6.53	6.13	5.38

* 三反復の平均値, ** リン酸欠乏のため枯死

表 2 ■ 低リン酸肥沃度の Alfisol および Vertisol におけるリン酸の形態

リン酸の形態 (P-ppm)	Alfisol	Vertisol
pH(H ₂ O)	6.0	8.1
電気伝導度 (mS/cm)	0.04	0.11
Total-P	122	153
Ca-P	3.8	52.8
Al-P	8.1	77.4
Fe-P	51.3	77.4
Olsen's P	4.1	0.7
Bray No.2	6.0	20.2

ルガム、ダイズ、トウモロコシ、トウジンビエ (pearl millet) はリン酸欠乏のため播種後 1 カ月で枯死した。しかしキマメはこのような土壌でも順調に生育し結実もみられた。ヒヨコマメは枯死はしなかったが生育は小さかった。Vertisol ではいずれの作物ともリン酸無施用にもかかわらず生育は良好で、特にヒヨコマメの生育およびリン酸吸収量は優れていた。キマメだけは Vertisol での生育は Alfisol でのそれよりも劣った。この結果から、Olsen 法によるリン酸肥沃度の判定は適当でないことがわかった。さらに、このポット実験では、土壌量を制限し作物の根圏域を制限した条件下でも、ヒヨコマメは Vertisol で、一方キマメは Alfisol でリン酸を効率良く吸収していることを示している。すなわち深根性の要因は除外できた。

VAM 菌根菌がこれらキマメとヒヨコマメのリン酸吸収に及ぼす影響については、低リン酸肥沃度の土壌に VAM 菌根菌を接種することによって明らかにすることができる。表 2 に示した低リン酸肥沃度土壌にオートクレーブによる殺菌処理を施した後、5 種類の菌根菌を接種した区と無接種区に、キマメあるいはソルガムを播種しその生育を観察した（表 3）。リン酸は施用しなかった。キマメは菌根菌がなくても生き延び、VAM 菌根

表 3 ■ 低リン酸肥沃度土壌における VAM 菌根菌*がソルガムおよびキマメの生育に及ぼす影響 (乾物生産量: g/pot)**

作物	土壌	殺菌処理	殺菌後 VAM 接種
ソルガム	Alfisol	0.10***	0.09***
	Vertisol	0.30	16.61
キマメ	Alfisol	0.36	11.18
	Vertisol	0.36	13.46

* 5 種類の VAM を混合接種, ** 三反復の平均値, *** 枯死

表 4 ■ 砂耕栽培した作物の根分泌中の一般的有機酸組成 (mg/g 根乾物)

作物	マロン酸	コハク酸	クエン酸	リンゴ酸
ソルガム	trace	trace	0.045	0.008
ダイズ	0.324	0.046	0.481	0.078
キマメ	trace	0.025	0.101	0.043
ヒヨコマメ	trace	0.054	1.292	0.025

trace : ごく微量

菌の接種で生育は著しく促進した。これに対して、ソルガムを、Alfisol に栽培した場合は根に VAM 菌根菌が寄生したにもかかわらず枯死した。このことは、ソルガム、ダイズ、トウモロコシなどの作物が枯死するほどの低リン酸肥沃度の Alfisol からでも、キマメはリン酸を吸収できるという特異的な機能をもっていることが推察できる。換言すれば、キマメが低リン酸肥沃度の Alfisol からリン酸を吸収できる能力は VAM 菌根菌によって付与されるものではない。

キマメやヒヨコマメが土壌中のどのようなリン酸を吸収しているのかを検討するには、まず実験に用いた 2 つの土壌中のリン酸の形態を知る必要がある (表 2 参照)。Vertisol の無機リン酸の主要形態はカルシウム型であった。カルシウム型リン酸のうち比較的低い溶解度をもつアパタイトを溶かしそのリン酸を利用する作物についての事例は多くある。たとえば、コムギは根から 2-ケトグルコン酸を分泌し根圏の pH を低下させることによってカルシウム型リン酸を溶解させ吸収する⁽⁷⁾。カルシウム型リン酸は pH の低下に従ってその溶解度を増すが、アルミニウムや鉄型のリン酸の溶解度は pH の低下に影響されない。

Vertisol で高いリン酸吸収能力を示したヒヨコマメの根から分泌される一般的な有機酸の量を表 4 に示す。ソルガム、ダイズ、キマメと比較して、

クエン酸はヒヨコマメで最も多く分泌されていた。このことはヒヨコマメが根圏土壌の pH を低下させることによって、Vertisol 中のカルシウム型リン酸を溶解させているものと推察できる。実際、pH 9.0 近くもある Vertisol に生育させたヒヨコマメの根面に付着した土壌の pH を測ったところ 6.5 以下の値が、また根面では 4.0 付近の値が得られた。したがって、石灰質アルカリ土壌においても Olsen 法よりもむしろ Bray No. 2 のようなカルシウム型リン酸を溶解する能力の強い可給態リン酸の評価法がより適当であることが示唆された (表 2 参照)。

一方、Alfisol に含まれる主要無機リン酸の形態は鉄型であった。鉄型リン酸を吸収利用できる植物についての事例は限られており、キマメの鉄型リン酸吸収能力を確認する必要がある。そのため、リン酸源として試薬の CaHPO_4 、 AlPO_4 、および FePO_4 を用い、ヒヨコマメ、キマメ、トウモロコシ、ダイズ、トウジンビエなどの作物を砂・パーミキュライト培地で栽培した。これらリン酸化合物の溶解性は CaHPO_4 で最も高く、次いで AlPO_4 、そして FePO_4 の順になる (ちなみに、砂・パーミキュライトに添加したリン酸の溶解度は pH 7.0 の条件で、 CaHPO_4 : 44 ppm, AlPO_4 : 5.1 ppm, そして FePO_4 : 2.9 ppm であった)。ヒヨコマメは明らかに溶解性の高い CaHPO_4 区で最も生育 (リン酸吸収量) が良く、次いで AlPO_4 区、最も溶解度の低い FePO_4 区での生育は劣った。ソルガム、トウモロコシ、ダイズ、トウジンビエなどは、その生育の程度は異なるが、ヒヨコマメの場合と同様の傾向を示した。これに対して、キマメでは最も溶解度の低い FePO_4 区と CaHPO_4 区の生育がほぼ等しく、 AlPO_4 区の生育が最も少なかった (図 5)。これらの実験から、キマメは他の作物と異なり、Alfisol に多量に含まれる難溶性の鉄型リン酸を可溶化し、吸収・利用する能力に優れているものと結論できた。

これまでに、キマメと同様に鉄型リン酸を吸収利用できる作物として、ルーピンが報告されている^(8,9)。ルーピンは根から大量のクエン酸を分泌

図 5 ■ 種々のリン酸源がキマメおよびソルガムのリン酸吸収量に及ぼす影響

し、それが土壌中のリン酸鉄(II)と高分子の錯体を形成し、ルーピン根面で鉄が(II)から(I)へと還元されることによってリン酸を遊離させ、根にとり込むという機構になっている。最もクエン酸分泌量の多いヒヨコマメが Alfisol で生存できたのは、ルーピンと同様なリン酸吸収機構で説明できる。

しかしながら、キマメにとって、クエン酸が鉄型リン酸吸収の鍵となる物質とは考えられない。なぜなら、クエン酸分泌量のより少ないキマメのリン酸吸収量はヒヨコマメよりも多いからである。またキマメよりもクエン酸分泌量が多いにもかかわらず、ダイズは Alfisol で枯死したからである。したがって、クエン酸以外の物質を検討する必要がある。

キマメの根から分泌される物質を酸性、中性、および塩基性に分け、リン酸鉄(II)溶解能を調べた。その結果、酸性画分に高い溶解能が認められたので、さらにキマメと各種作物根分泌物の酸性画分をガスクロマトグラフで比較検討したところ、キマメのみに特有の2つのピークが検出された。これらは (*p*-hydroxybenzyl) tartaric acid (1), および (*p*-methoxybenzyl) tartaric acid (2) と同定された。前者は piscidic acid とも呼

ばれ、1901年に Jamica dogwood の樹皮に含まれる魚毒成分として命名されていた⁽¹⁰⁾。これら両物質の酒石酸部分にあるカルボキシル基とアルコール基が Fe^{3+} イオンとキレート形成を形成することが、fukiic acid (piscidic acid の酒石酸部分の立体構造が同じフェノール性化合物でメタの位置にもフェノール性 OH 基をもつ) のメチル誘導体⁽¹¹⁾を用いた実験から確かめられた。

この piscidic acid およびその誘導体が鉄(II)とキレートを形成した後、遊離したリン酸は根から吸収されるが、生成した錯体はどのようなものか。piscidic acid は、植物の生育阻害物質、あるいはアレロパシー物質としてよく知られている *p*-クマリン酸やフェルラ酸、カフェイン

図 6 ■ キマメによる Alfisol 中の鉄型リン酸吸収機構(仮説)

酸などと同様のフェノール性酸であり、キマメにとっても生育阻害作用があると思われる。Alfisolに生育させたキマメが吸収した鉄とリン酸の比(Fe/P)は、ソルガム、ダイズ、トウモロコシ、ラッカセイ、ヒヨコマメと比較して最も低かった。このことは、 Fe^{3+} -piscidic acid 錯体はキマメに吸収されず、むしろ排除されるように作用することを示唆している(図6)。このようなリン酸吸収機構はすでに Marschner⁽¹²⁾ が予測しており、彼の言う養分吸収機構のⅢに相当するものである。

ソルガム・ミレット作付け地帯におけるヒヨコマメおよびキマメの意義

上述のリン酸吸収機構を基にして、ソルガム・ミレット地帯において両作物が栽培される意義について考察してみよう。すでに述べたように、インドの半乾燥地帯では、キマメはソルガムやミレットなどの穀類と間作あるいは混作される。間・混作の行なわれる理由として、以下の3つが挙げられている。

- ① 不安定な気象条件下では少なくとも一つの作物の収量は確保できるという保険的要素がある。
- ② Land Equivalent Ratio (LER : [一定面積で栽培された間・混作の合計収量]/[それぞれの作物の占有面積で単作したときの合計収量]) が高い。
- ③ マメ科作物の固定窒素をイネ科作物が利用できる。

しかし、なぜ半乾燥地帯でキマメが間・混作されるのかについては、これらは十分な説明であるとは言いがたい。キマメの特徴を考慮に入れる必要があろう。前述のように、キマメはソルガムなどのイネ科作物の生育が不良な低リン酸 Alfisol においても無肥料でタンパク質を供給できる優れた作物と言える(図4参照)。

キマメのもつ生産性のよさ以外に、キマメを導入することは土壤のリン酸肥沃度にどのような影響を及ぼすのであろうか。キマメのもつ特異的な鉄型リン酸吸収能力を配慮すれば、肥沃度の低い

表 5 ■ 様々な作付け体系が低リン酸 Alfisol のリン酸肥沃度に及ぼす影響*

作物	土壌からのリン酸の収奪 (P-mg/pot)		跡作トウモロコシの生育 (乾物 g/pot)	
ソルガム	143	(14)	54	(7)
キマメ	165	(17)	70	(3)
ヒヨコマメ	91	(4)	68	(3)
ソルガム/キマメ	199	(14)	54	(3)

* すべてリン酸無施用で栽培(窒素, カリは施用した)。
() 内の数字は標準誤差。

Alfisol のリン酸の肥沃度を高めるという効果も期待できる。

この推察を実験によって確かめるため、低リン酸 Alfisol を 10 kg 充填したポットでヒヨコマメ、ソルガム、キマメ、およびキマメ/ソルガム(混作)の4区を設けリン酸無施用条件下で連続して4回、2年にわたり栽培し、それぞれのリン酸吸収量を測定した(表5)。4回栽培した合計のリン酸吸収量は、Alfisol でキマメ/ソルガム混作区のリン酸獲得量(199 mg/pot)が最も多く、次いでキマメ(165 mg)、ソルガム(143 mg)、ヒヨコマメ(95 mg)の順であった。キマメとソルガム混作区のリン酸獲得量が最も多いことは、キマメは Alfisol 中の鉄型リン酸を、ソルガムは Alfisol でわずかに存在する溶解度の高いカルシウム型リン酸を吸収し、この2つの作物間では窒素の場合と同様、リン酸の吸収に関して競合の少ないことを意味している。これは、土壤に投入される堆肥や肥料の少ない地域では最も効率の良い肥培管理技術であろう。また、4回の作付けによって、Alfisol からリン酸を収奪した跡地土壤のリン酸肥沃度を観察するため、トウモロコシを栽培(窒素施肥で無リン酸条件下)した。その結果、ソルガム区(143 mg)より 22 mg も多い 165 mg ものリン酸を土壤から収奪したにもかかわらず、キマメ跡のトウモロコシの生育はソルガム跡よりも良好であった。またソルガム/キマメ混作区跡地はソルガム単独区跡地よりもリン酸肥沃度が一層低くなると予想されたにもかかわらず、跡地土壤のトウモロコシの生育は同じであった。すなわち、キマメとソルガムの間・混作はリン酸栄養上優れた作付け体系であることを示している。

図7 ■ Alfisol あるいは Vertisol 圃場で栽培したキマメ、ダイズ、トウモロコシ、ヒヨコマメの根系の比較

() 内の数字は播種後の日数を示す。キマメ、ダイズ、トウモロコシは Alfisol で、ヒヨコマメは Vertisol で栽培した。

さらに、キマメとヒヨコマメのリン酸吸収機構はその深根性と大きく関連している。図7にはソルガムの代わりにトウモロコシやダイズと比較したキマメおよびヒヨコマメの根系の調査結果を示した。

Vertisol に生育するヒヨコマメはソルガムに比べてかなり深根性である。Vertisol は下層になればなるほどカルシウム含量は増え、その pH は高くなる。前述のように、ヒヨコマメは大量のクエン酸を分泌して根圏土壌の pH を好適な範囲にまで下げることが可能なため、アルカリ条件下でも容易に養水分を吸収でき、乾期に根系を下層へと発達させることができる。キマメも Alfisol において著しい深根性を示す。Alfisol では下層に酸化鉄の結核が集積した堅い層を形成している。このため多くのイネ科作物はこの層を貫通できず浅い根系を作っている。しかし、キマメの根はこの層も容易に貫通し、さらにその下の養水分に富む層にまで到達する。その結果、保水量の少ない Alfisol においても乾燥によるストレスを受けずに十分な収穫を維持できるものと考えられる。

キマメやヒヨコマメは、その特異的なリン酸吸収能力と深根性を考え合わせると、下層土壌の難溶性リン酸を吸収利用して、バイオマスとして地上部へ送り出し、落葉や地上部残渣の形で表層土壌へ還元するというポンプの役割を果たしている

と思われる。一般に、熱帯半乾燥地における作物根系の占める有効土壌層は厚いのが特徴であり、そこでの作物生産の安定には土壌の厚さを利用した農業形態が鍵となる。特に半乾燥熱帯では土壌養分の溶脱が少ないため下層土壌のミネラル含有率は比較的高く、下層にも水分があることを考えると深根性のマメ科作物を利用することは重要なことである。

キマメとソルガムの根系の違いについて付け加えると、これらを混作した場合、ソルガムの

根系はキマメと比較して浅く、そのため養水分を吸収する土壌の層位が異なると考えられ、リン酸の吸収形態が異なることと同様に、これら作物は根系における“棲み分け”をしていることになる。日本のように降雨量が多く、平均気温が半乾燥熱帯地域に比べて低いところでは、畑作物が有効に利用できる土層の深さはせいぜい 50 cm 程度であり、多量の肥料が土壌表層に散布されると根系はますます土壌表層近くに集まる傾向にあることを考えると、半乾燥熱帯と湿潤気候下にある日本との農業の違いがはっきりするであろう。

*

以上、キマメ、ヒヨコマメの特異的なリン酸吸収機構を中心に、半乾燥熱帯の作付け体系の中で、これらマメ科の果たしている役割を述べてきた。すなわち、キマメは① Alfisol 中の鉄型リン酸を吸収利用し、②土壌のリン酸肥沃度を高め、③下層土壌の養分を表層へポンプアップする。また、ヒヨコマメも① pH 緩衝力の強い Vertisol の根圏土壌を酸性化することによって、カルシウム型リン酸を有効化する、② Vertisol 下層土壌の養分を表層へポンプアップするという役割をもっている。

日本では肥料や農薬の投入量の増大とともに作付け方式の重要性は忘れられ、以前東北地方で調

査されたような「ナタネ-大豆-麦」,「稗-麦-大豆」などの作付け体系の研究についても、有機的な把握をすることもなく途絶えてしまった⁽¹³⁾。現在、地球環境の保護の上からも LISA (Low Input Sustainable Agriculture: 低投入持続型農業) の観点から、肥料、農薬、耕耘などあらゆる段階での見直しが必要とされている。しかし、LISA 研究の雛型となるものは見つからないと言ってよい。

インドのデカン高原を中心とした半乾燥地においては三千年以上も畑作農業が営まれ、その生産力を失うことなく今なお1億人以上の人々の生活と文明を支えている。筆者らはキマメとヒヨコマメの研究を通じてインドの畑作農業システムに感嘆した。これを科学的に理解し、現在の技術で手直しすれば LISA の雛型になり得ると信じている。しかし、私達はインド半乾燥地農業の合理性をまだ十分には理解していないのである。

文献

1) C. Troll: in "World Maps of Climatology", ed. by

- E. Rodenwaldt and H. Juszatz, Springer-Verlag, Berlin, 1965, p. 28.
 2) S. A. El-Swaify, P. Pathak, T. J. Rego & S. Singh: in "Advances in Soil Science", ed. by B. A. Stewart, Vol. 1, Springer-Verlag, New York, 1985, p. 1.
 3) S. Muthiah (ed.): "A Social and Economic Atlas of India", Oxford University Press, Delhi, 1987.
 4) I. C. A. R. (Indian Council of Agricultural Research, ed.): in "Handbook of Agriculture", I. C. A. R., New Delhi, 1987.
 5) N. Ae, J. Arihara, K. Okada, T. Yoshihara & C. Johansen: *Science*, **248**, 477 (1990).
 6) N. Ae, J. Arihara & Y. Ohwaki: in "Phosphorus in Indian Vertisol", ICRISAT Patancheru, India, 1988, p. 21.
 7) A. Moghimi, M. Tate & J. M. Oades: *Soil Biol. Biochem.*, **10**, 283 (1978).
 8) W. K. Gardner, D. A. Barber & D. G. Paeberry: *Plant Soil*, **70**, 107 (1983).
 9) W. K. Gardner & K. A. Boundy: *Plant Soil*, **70**, 107 (1983).
 10) P. C. Feer & A. M. Clover: *Amer. Chem. J.*, **25**, 390 (1901).
 11) T. Yoshihara, A. Ichihara, A. H. Nuide, S. Sakamura, M. Sugita, S. Imamoto & S. Senoh: *Agric. Biol. Chem.*, **38**, 121 (1974).
 12) H. Marschner: "Mineral Nutrition of Higher Plants", Academic Press, London, 1986.
 13) 田中耕司: "近世農書に学ぶ", 飯沼二郎編, NHK ブックス, 日本放送協会, 1976.

プロフィール

佐藤 英介 (Eisuke F. Sato) 昭和35年8月8日生<略歴>昭和58年岡山大学農学部畜産学科卒業/60年同大学大学院農学研究科修了/平成元年高知医科大学大学院医学研究科修了(医博)/同年日本学術振興会特別研究員, 現在にいたる<研究テーマと抱負>トランスメンブランコントロール機構, 生体膜-タンパク質相互作用(特にアネキシン様タンパク質), 活性酸素と脂質過酸化反応など。発生と分化にも興味<趣味>音楽, 映画鑑賞, テニス

崎山 文夫 (Fumio Sakiyama) 昭和9年2月19日生<略歴>昭和31年大阪大学理学部化学科卒業/35年同大学大学院理学研究科博士課程(生物化学専攻)中

退, 同大学蛋白質研究所助手/46年同助教授/57年同教授(蛋白質化学構造部門担当)/平成元年同研究所蛋白質工学基礎研究センター長併任, 現在にいたる。

この間, 37~40年米国 NIH 出張<研究テーマと抱負>蛋白質化学, 酵素化学, 蛋白質工学。加水分解酵素の構造と機能の理解を深め, 生理的意義を明らかにしたい。プロテアーゼの基質特異性の変更や自家不和合性の分子機構の解明が目下の主な興味<趣味>写真, 音楽鑑賞

下山田 真 (Makoto Shimoyamada) 昭和38年5月23日生<略歴>昭和61年東北大学農学部食糧化学科卒業/同年同大学大学院農学研究科食糧化学専攻進学, 現在にいたる<研究テーマと抱負>植物

生理学, 天然物化学的な見方から食品素材としての大豆をみつめる<趣味>旅行(特に鉄道の歩き), 将棋

塚本 知玄 (Chigen Tsukamoto) 昭和32年10月29日生<略歴>昭和55年岩手大学農学部農芸化学科卒業/57年同大学大学院修士課程修了/同年太子食品工業(株)入社/平成2年博士号取得を条件に同社より4年間の有給休暇/同年東北大学大学院農学研究科研究生, 現在にいたる<研究テーマと抱負>大豆の利用価値・用途の拡大を通じて世界に貢献したい<趣味>人生相談(人間とは何かにについて思い悩む人々と語り合うこと)