

インドの半乾燥熱帯地域の土壌の 物理性と作物生産

有原 丈二*・阿江 教治**・岡田 謙介***

Soil Physical Conditions and Crop Production in Alfisols
and Vertisols of the Indian Semi-Arid Tropics.

Joji ARIHARA*・Noriharu AE**・and Kensuke OKADA***

*Hokkaido National Agricultural Experiment Station, **National Institute of
Agro-Environmental Sciences, ***Tropical Agriculture Research Center

1. はじめに

半乾燥熱帯とは1年のうち蒸発散量が降雨量を越える期間が5~10ヵ月以上の地域と定義されている。半乾燥熱帯は南アジアとアフリカを中心に広く分布しており、熱帯の実に7割を占める広大な地域である。

半乾燥熱帯地域の作物の生産性は低く、かつその変動も著しく、その住民は、常に飢餓の危険にさらされている。その原因は、降雨量が少く不安定である事と、土壌の肥沃度が低い事にあるとされてきている。

しかしながら、年間500~1,200mmの降雨は雨期の数ヵ月間に集中し、主要な作期である雨期に限れば雨が少くないとは言いがたい。また、半乾燥熱帯に分布する2つの主要な土壌である Alfisols と Vertisols は、熱帯の土壌の中ではむしろ肥沃な部類に属しているのである。

私たちはインドのデカン高原のほぼ中心に位置するハイデラバード市近郊の国際半乾燥熱帯作物研究所(International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, ICRISAT)に派遣され、「熱帯半乾燥地域における土壌管理とマメ科作物の栽培」の研究に6年間携わってきた。その中で、半乾燥熱帯では、降雨量や土壌の肥沃度よりも、土壌の物理性が作物生産を大きく左右している事を経験した。そして、インドの在来農法では、マメ科作物の栽培や、簡易な土壌管理法によって土壌の物理性を改善しつつ、作物生産を行なっている事を学んだ。ここでは、その事に付いて述べてみたい。

2. 半乾燥熱帯の気候

図1に半乾燥熱帯の気候の例として、ハイデラバード

*北海道農業試験場 〒062 札幌市羊ヶ丘1番地

**農業環境技術研究所 〒305 つくば市観音台3-1-1

***熱帯農業研究センター 〒305 つくば市大わし1-1
土壌の物理性 第63号 pp.13~18 (1991)

市の年間の降雨と日射量のパターンを示した。降雨は6月初旬から10月初旬までの雨期に集中しており、それ以外の期間には殆ど降雨はない。雨期の降雨量は図2に示すように、350mmの乾燥年から1,450mmという湿潤年まで、年によって大きく変動する。年次内の降雨のパターンも一定せず、図3の様に、数回の豪雨の間に、乾燥した期間が続く事が多い。そして、このような不規則さは降雨量の少ない年ほど甚だしくなる。このため、土壌は豪雨の直後には極端な湿潤になるが、高い蒸発能のため、乾燥するのも早い。作物はこのような激しい土壌水分の変化について行けず、生育が阻害される事が多い。

3. 半乾燥熱帯の土壌

半乾燥熱帯における最も代表的な土壌は Alfisols であり²⁾、半乾燥熱帯の陸地面積の約33%を占めている。Alfisols には鉄分が多く含まれ、赤色を呈している。土壌表層には粘土粒子が少なく、シルトや細砂が多く、また粘土鉱物のカオリナイトは活性が低いために、降雨の後には土壌孔隙が塞がりやすく、表層にクラストを発生しやすい。クラストが形成されると、通気性が低下し、降雨後には土壌中の酸素不足から作物に湿害を生じやすい。しかも、降雨は土壌に浸透しにくくなり、元来保水力の劣る土壌であるため、乾燥が著しくなる。さらに、深さ60cm附近には数10cmの鉄の集積層があり、多くの作物の根はこの層を通過できず浅根性となり、乾燥の害を受けやすくなる。Alfisols に、近縁の土壌である Aridisols, Oxisols, Ultisols を加えると、その面積は半乾燥熱帯のほぼ70%を占める。

半乾燥熱帯のもう1つの代表的な土壌は Vertisols で²⁾、半乾燥熱帯の11%を占めている。塩基性にとむ母材から形成された比較的若い土壌である。モンモリロナイトを主体とする粘土の含量は60%以上と高く、乾燥すると収

縮して亀裂を生じ、湿潤となると膨潤する。このため、土壌が水で飽和するまでの期間は透水性に極めて優れ、作物も良好に生育するが、いったん飽和すると透水性は極端に低下し、通気性も失われ、作物は湿害を被ることになる。

このように、半乾燥熱帯では、降雨と土壌の特性から、降雨量の少ない地帯でありながら作物は湿害を被りやすい。また、Alfisolsとそれに近縁な土壌の分布する地帯では、極端な湿潤と乾燥が繰返され、作物の生育は甚だしく阻害される。

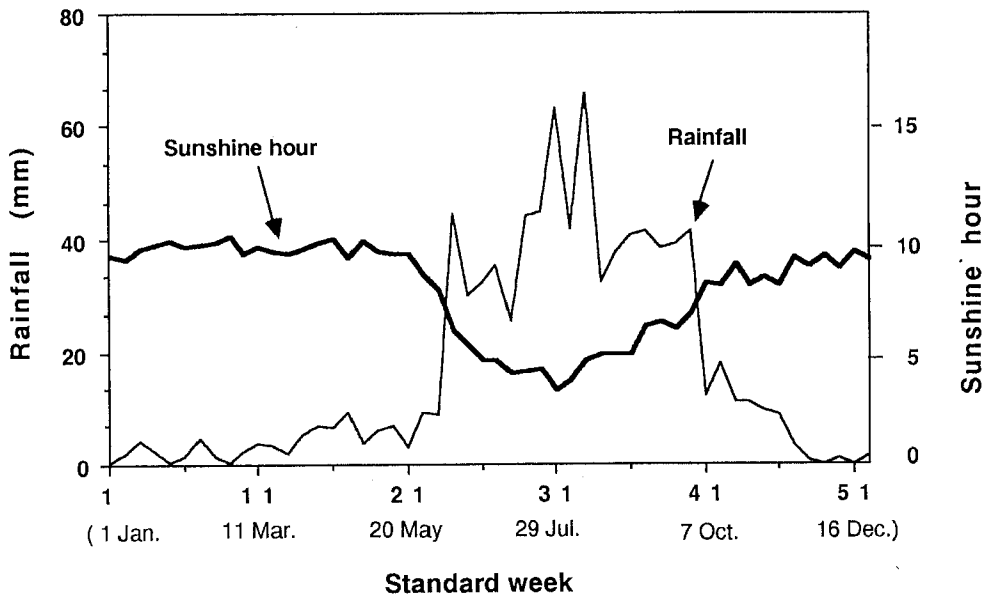


Fig. 1 Long-term average pattern of rainfall and sunshine hours at ICRISAT Center (1974-88).
ICRISAT センターにおける年間降雨量と日照時間の平均値 (1974-88)

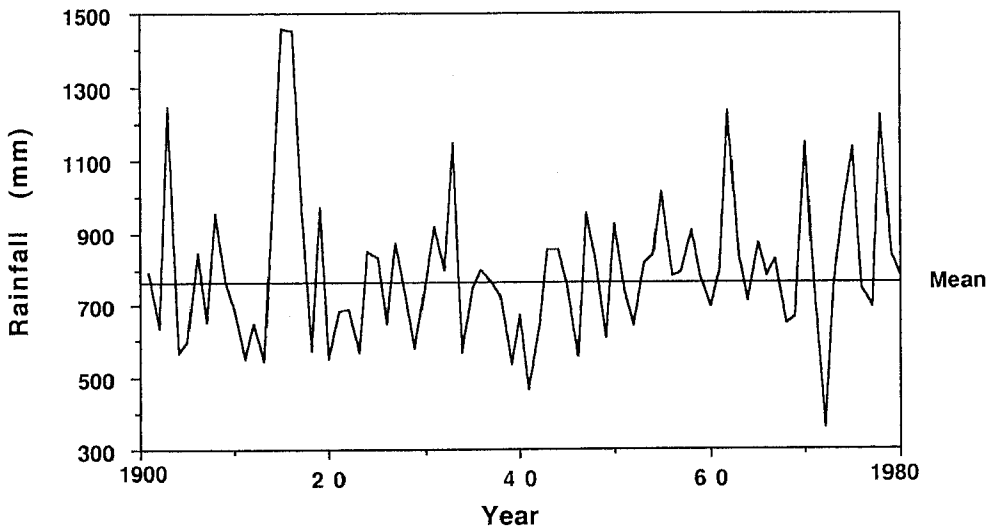


Fig. 2 Annual rainfall totals at Hyderabad, India, during the period 1901-1980 (from Virmani et al., 1980⁶).

インド、ハイデラバード市における年間降雨量の1901年から1980年までの変動

4. キマメとヒヨコマメの特異的磷酸吸収と根系の発達

キマメはインドで広く栽培されているマメ科作物であるが、とくに南部の Alfisols 地帯で重要である。Alfisols 中の磷酸は鉄と結合して極めて難溶性となっていて、多くの作物はそれを吸収出来ないため、生育はかなり貧弱で、根系は小さい。また、鉄の集積層を貫通できず、根

は浅くなっている。ところが、キマメは根から鉄とキレート結合するピスシジン酸を分泌して、磷酸を解き放ち、それを吸収利用するため、Alfisols でも旺盛な生育を示す¹⁴⁾。このため、キマメの根系は大きくなり、さらには鉄の集積層も容易に貫通出来るため、下層の養水分の豊富な粘土層まで根が発達している(図4)。

ヒヨコマメが広く栽培されている Vertisols は、カル

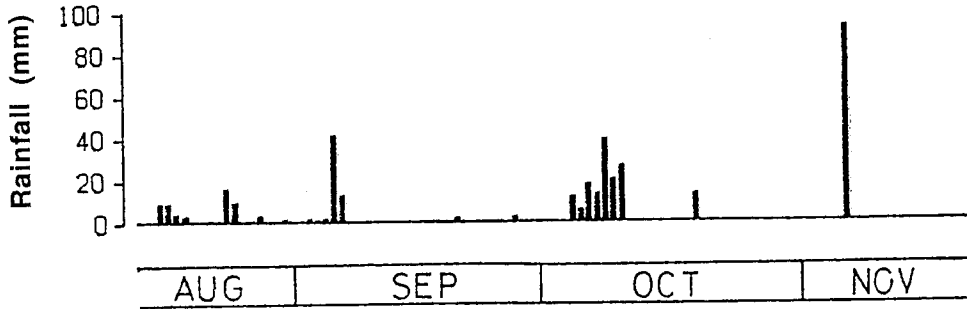


Fig. 3 Rainfall distribution pattern at ICRISAT Center in 1987 when annual rainfall is 12% above average or 879 mm.

降雨量が平年より12%多かった1987年の ICRISAT センターにおける降雨パターン

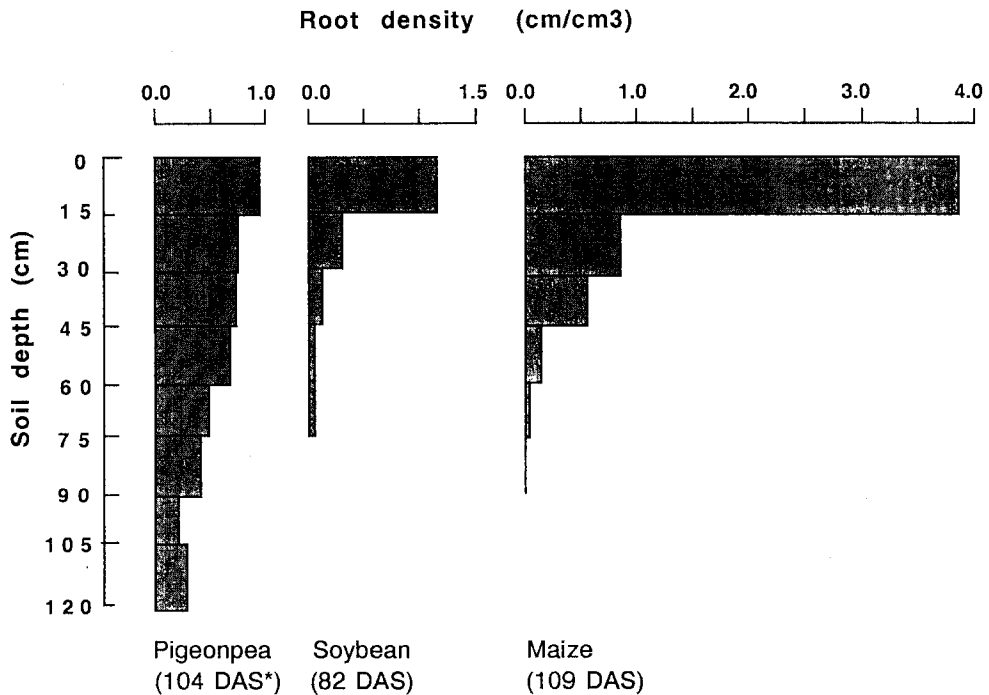


Fig. 4 Root distribution of pigeonpea, soybean, and maize in an Alfisol field, rainy season, 1985.

*DAS : Days after sowing.

アルフィソルにおけるキマメ、大豆、そしてトウモロコシの根系 (1985年雨期)

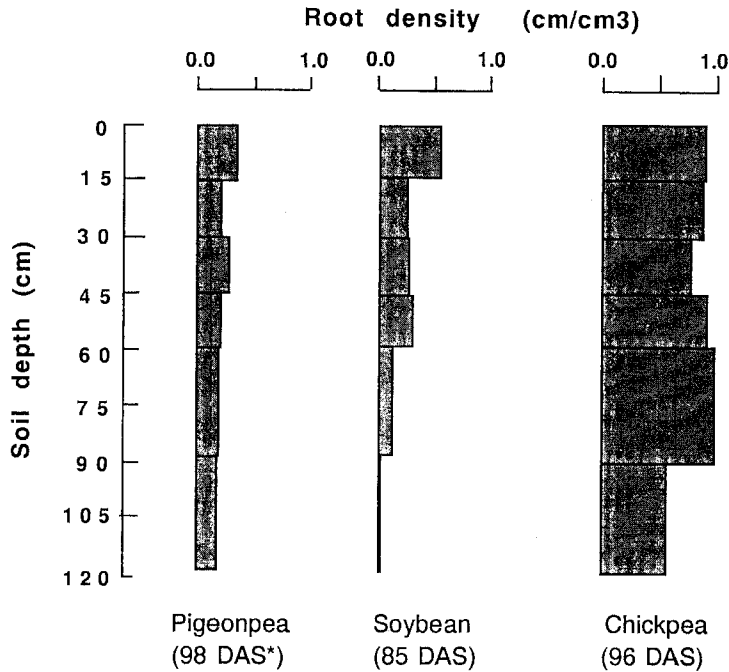


Fig. 5 Root distribution of pigeonpea and soybean (rainy season, 1985), and chickpea (postrainy season, 1984/85) in a Vertisol field.

*DAS : Days after sowing.

パーティソルにおけるキマメと大豆 (1985年雨期), そしてヒヨコマメ (1984/85年乾期) の根系

シウムを多く含むアルカリ土壌であり、リン酸はカルシウムと結合し、溶解性も低くなっている。ところがヒヨコマメは、その根からクエン酸を大量に分泌して根圏域の土壌 pH を低下させ、カルシウムと結合したリン酸を溶解して、吸収する事が出来る⁴。とくに、Vertisols の下層はアルカリ度が高く、カルシウムも多いためリン酸の溶解度も低い。ヒヨコマメは下層への根の発達が他作物より優れている (図 5) が、これには、ヒヨコマメのクエン酸を分泌してリン酸を吸収するという特性の影響と考えられた。

5. キマメとヒヨコマメによる土壌の物理性の改善

土壌の透水性は、土壌表面のクラスト、土壌孔隙、団粒構造などの程度によって左右されるため、土壌の物理性の良い指標となると考えられる。

Alfisol の圃場で、前年にソルガムを栽培した区と、キマメを栽培した区にソルガムを栽培して、その透水性を比較したところ、キマメ栽培後区の方が、ソルガム連作区より明らかに勝っていた。これは、キマメが土壌の物理性を改善した事を示している。ソルガムの子実収量も、

ソルガム連作区よりもキマメ栽培後区の方がかなり高くなっていた。ソルガムへの施肥は十分であったので、土壌の物理性が改善された事が、収量向上の原因と考えられた。

キマメの作付けは、後作のソルガムの根系の発達にも影響しており、3年間裸地として放置した区と、キマメを連作した区にソルガムを作付けして根系の発達を比較したところ、キマメ後のソルガムでは裸地後に比べて、根系がかなり深くなっていた。

一方、キマメを栽培した Alfisol 圃場の透水性は、ソルガム栽培後区の方が、キマメ連作区よりも優れていた。これは、土壌の物理性の改善に輪作が重要であることを示すものである。

このように、キマメとソルガムの組合せは、Alfisols の土壌の物理性を改善しつつ、作物生産を向上させ得る、望ましい組合せである。

これに対して Vertisol 圃場では、キマメは Alfisol 圃場の様に、ソルガムの収量を改善しなかった。しかし、ヒヨコマメの後作のキマメの収量は、ソルガムの後作のものに比べてかなり高くなっていた。この場合も肥料は

十分に施用しているので、Vertisol 圃場の物理性がヒヨコマメによって改善された可能性を示唆していた。しかし、これについては、検討が不十分であり、今後の研究を期待している。

6. キマメとソルガムの間作と土壌通気性

ソルガムとキマメの間混作はインドの半乾燥熱帯地域で広く行なわれており^{5,7)}、その収量性は単作した場合よりも高い。ソルガムが間作で収量性が向上するのは、生長の早いソルガム群落⁶⁾がキマメ群落を覆って、単作した場合よりも受光量が增大するためとされてきた⁷⁾。

私たちが行なった間作の試験でも、ソルガムの畦当りの収量は単作の場合よりも高かった。しかし、間作のソルガムの出穂期の葉面積はキマメより少なく、ソルガムが受光上、単作よりも有利であったとは言えなかった。

これから、間作によるソルガムの収量向上の原因は地下部にあると考えたが、窒素、リン酸、カリに不足は無いことから、土壌の物理性が関与しているものと考えられた。

土壌空気中の酸素は、植物の根や土壌微生物等の呼吸によって消費され、土壌の通気性が劣ると、その濃度は低下しやすい。そこで、土壌の通気性の指標として、土壌空気中の酸素濃度を間作と単作とで比較した。ソルガムとキマメの単作では、AlfisolとVertisolのいずれの圃場においても、酸素濃度はキマメの方がソルガムよりも高く推移していた。そして、間作区ではソルガム単作区よりも高く推移していて、土壌の通気性がキマメとの間作によって、改善されている事を示していた。これがソルガムの収量が間作によって向上した大きな理由の1つと考えられた。

しかしながら、間作による土壌の通気性の改善効果は、もともと通気性の良い圃場では見られなかった。この場合には、土壌の通気性への影響以外の要因が、ソルガムの収量の向上に関与しているものと思われる。

7. 畦立による土壌の通気性の改善

土壌表面の形状を変える事は、その通気性の改善に効果的であるとされる³⁾。

Vertisolsでは、幅が1m程の広畦を作る事によって、畦が乾燥し、また排水が促進され、雨期における湿害の防止に効果的であり、作物生産の安定と向上に繋がる事がICRISATにおける試験で実証されている。

一方、Alfisolsでは、畦立てによってクラストが形成され、土壌浸食を助長するとされ、これまで畦立ては奨励されていなかった。ところが、私たちがキマメを用い

て行なった実験では、高さ10cm程度の畦を作る事によって、Alfisol圃場とVertisol圃場のいずれでも、大きな増収効果が見られた。

土壌空気中の酸素濃度は、畦立区の方が平畦区よりも常に高く維持され、土壌の通気性が畦立てによって改善された事を示していた。また、根系の発達も畦立区が平畦区に勝っていて、キマメの開花期から登熟期の水ストレスも、畦立区の方が平畦区よりも小さかった。

これから、Alfisols, Vertisolsのいずれの土壌でも畦立てをする事によって、土壌の通気性の改善が出来ると考えられた。

8. おわりに

半乾燥熱帯の作物生産は土壌の物理性の悪さによって大きく阻害されている。しかしながら、半乾燥地帯は世界で最も貧しい地帯であるため、農業機械や資材を投入して、それを改良する事は極めて難しい。私たちは、インドでの経験を通じて、マメ科作物の栽培や、ごく簡単な耕起作業が、土壌の物理性の改善に極めて効果的である事を知る事が出来た。これらの技術の多くは、インドの在来農法の中ですでに広く行なわれている。このような在来農法の合理性を解明していく事は、半乾燥熱帯に導入可能な技術を確立する上で極めて大切な事と思われる。このことはまた、環境の荒廃の危険が叫ばれ、資源多投型の近代農法の見直し⁸⁾が迫られている日本の農業技術にとっても、多くの示唆を与えるように思える。

参考文献

- 1) Ae, N., Arihara J., Okada, K., Yoshihara, T. and Johansen, C. (1989) : *Science* 248 : 477-480.
- 2) El-Swaify, S. A., Pathak, P. and Singh, S. (1985) : *Advances in Soil Science* 1 : 1-64.
- 3) ICRISAT (1987) : *Alfisols in the Semi-Arid Tropics*. ICRISAT, Patancheru, A. P., 502324 India.
- 4) ICRISAT (1991) : *Phosphorus Nutrition of Grain Legumes in the Semi-Arid Tropics*. ICRISAT, Patancheru, A. P., 502324 India.
- 5) Ofori, K. and Stern W. R. (1987) : *Advances in Agronomy*. 41: 41-90.
- 6) Virmani, S. M., M. V. K. Sivakumar and S. J. Reddy (1980) : *Agroclimatological Research Needs of the Semi-Arid Tropics*. Page 5-16. ICRISAT, Patancheru, A. P., 502324 India.
- 7) Willey, R. W. (1985) : *Experimental Agriculture* 21 : 119-133.

Summary

Alfisols and Vertisols are major soil types in the Indian Semi-Arid Tropics (SAT). An unstable crop production in the Indian SAT caused by the undependable rainfall is quite often aggravated by the poor physical conditions of these soils, such as poor soil aeration, crust formation, low infiltration rate etc.

Pigeonpea grown on Alfisols was confirmed to develop deep root systems and to improve soil physical conditions, such as infiltration rate, aeration etc., in an Alfisol field at ICRISAT (International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics) Center. As a result of these improvements, sorghum grain yield in the same field was increased after the cultivation of pigeonpea under an adequate fertilizer management.

Residual effect of chickpea was found to improve grain production of subsequent pigeonpea in a Vertisol field at ICRISAT Center. As an adequate amount of fertilizer was applied in this field, the beneficial effect of chickpea could be ascribed to improvement of soil physical conditions. However, this possible effect awaits quantification.

In an intercropping system, pigeonpea also improved the grain yield of the associated sorghum. Planting crops on ridges also increased grain yields of sorghum and pigeonpea in both Alfisol and Vertisol fields. These increases of yield were attributed to the enhanced root development through the improvement of soil physical conditions especially soil aeration.

Traditional cropping systems of the Indian SAT are found to maintain the crop productivity under low input conditions through the utilization of those legumes.

Many suggestions could be drawn out from them for the development of the technology suitable for the SAT and the ecologically healthy crop production system for developed countries.

(Soil Phys. Cond. Plant Growth, Jpn., 63, 13-18, 1991)