

## 第2回



# 野菜畑の

安全・安心な野菜作りと  
環境に配慮した生産を  
心掛けましょう。

# 土壌管理 技術

元・筑波大学農林工学系教授

西尾 道德

## 2 日本の畑土壌の特性と土壌改良技術

その2

今回は、前回に引き続いて日本の畑土壌の特性のリン酸欠乏、アルミニウムの害、低いチッソの天然肥沃度についてお話しします。



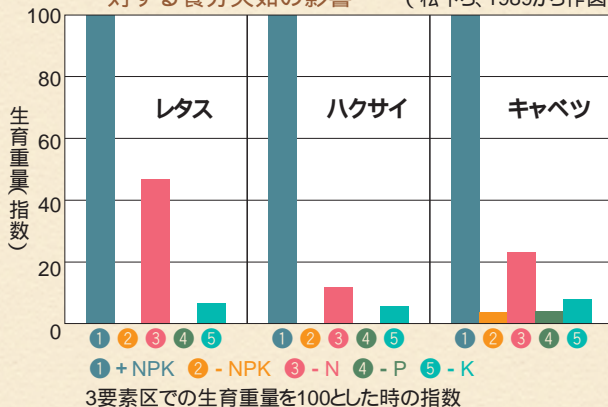
### 畑のリン酸固定

リン酸は作物の生育に必須です。リン酸肥料はリン鉱石から製造しますが、日本にはリン鉱石の鉱脈がないことから分かるように、土壌中のリン酸レベルがもともと低く、長い間、日本の作物生産はリン酸不足

のために強く抑制されてきました。アルカリ性土壌では、リン酸とカルシウムが結合して、水に溶けにくいリン酸カルシウムが生成されます。しかし、植物は根からクエン酸などの有機酸を分泌して、リン酸カルシウムを簡単に溶かすことができます。リン酸肥料に「く溶性リン酸」と書いてあるのは、クエン酸で溶けるリン酸の意味です。しかし、日本に多い酸性土壌はカルシウムが少なく、代わりにアルミニウムや鉄がリン酸と結合して、水に溶けにくくしてし

まいます。しかも、アルミニウムや鉄と結合したリン酸はリン酸カルシウムよりも根の分泌する有機酸に溶けにくく、かつての日本の特に畑土壌ではリン酸不足が深刻でした。長野県の黒ボク土畑で、野菜を用いて3要素試験を行った結果（第1図）は、リン酸不足の深刻さを物語っています。すなわち、土壌に化学肥料でチッソ、リン酸、カリを施用した3要素区では野菜がきちんと育ち、可食部を収穫できました。無肥料区（NPKS区）でほとんど生育せ

第1図 黒ボク土(火山灰土)の畑における野菜の生育に対する養分欠如の影響 (松下ら、1989から作図)



3要素区での生育重量を100とした時の指数

ずに、可食部の収穫量が皆無だったことは当然にしても、リン酸欠如区（P区）、つまり、チッソとカリを施用してリン酸だけを欠如した区でも、無肥料区と同様にほとんど生育しませんでした。チッソだけ（N区）、またはカリだけ（K区）を欠如した区でも、生育はわずかだけでしたが、リン酸欠如が最も強く生育を抑制しました。

水田でも、リン酸がアルミニウムや鉄と結合します。しかし、水田ではアルミニウムが畑ほど多くないうえに、湛水にもなつて土壌が還元になり、赤い三価の鉄が青い二価の鉄に変わってきます。二価の鉄は比較的水によく溶け、それにもなつて鉄と結合していたリン酸が溶け出します。このため、無肥料で栽培した水稻は生育の前半にリン酸欠乏になりますが、生育後半には自然にリン酸欠乏症状が消えてしまします。このようにリン酸の点でも、かつては水田に比べて畑での作物生産は厳しかったわけです。



### リン酸固定のメカニズム

リン酸が、土壌中で水に溶けにくい状態に変化する（不溶化する）こ



第2図 酸性土壌におけるリン酸の固定の仕方



とを、リン酸の固定と呼びます。酸性土壌でリン酸はいくつかのメカニズムで固定されますが、その代表的なものを紹介します。

第一は、リン酸が土壌中に存在する鉄やアルミニウムのイオンと結合し、不溶化するものです。リン酸と鉄やアルミニウムが1…1で結合しただけなら、リン酸カルシウムほどではないにせよ、根の分泌するクエン酸などの有機酸で溶解されます。しかし、土壌水中にはモワモワしたゲル状の水酸化鉄や水酸化アルミニウムが多量に存在します。これらがリン酸鉄やリン酸アルミニウムを、<sup>とえはたえ</sup>十重二十重に取り囲んでしまします(第2図上)。そして、土壌の乾燥にともなうゲルが収縮してかたい塊

となり、その中にリン酸が閉じ込められます。こうなったリン酸は、もはや水にも、クエン酸のような有機酸などにも溶けません。

第二は、黒ボク土の粘土鉱物によるリン酸の固定です。粘土鉱物には、ケイ酸とアルミナが板状の結晶になった結晶性粘土鉱物と、結晶度合いの低い非晶質粘土鉱物がありますが、黒ボク土には独特の粘土鉱物が含まれています。黒ボク土の約半分には、アロフェンやイモゴライトなどの非晶質粘土鉱物が、残りの黒ボク土には結晶性粘土鉱物が含まれています。アロフェンやイモゴライトは、中空のそれぞれ球状や糸状の構造をしていて、表面にアルミニウムがむき出しになっています。この表面のア

ルミニウムがリン酸と結合し、しかも、中空でもろいために、陥没してリン酸を中に閉じ込めてしまします(第2図中)。表面のアルミニウムと結合したリン酸も溶けにくいのですが、陥没して閉じ込められたリン酸はさらに溶けにくくなります。

一方、黒ボク土にある結晶性粘土鉱物は、2枚のケイ酸の板状結晶にアルミナの板状結晶がはさまれた構造を基本構造として、いくつもの基本構造が重なっています。この粘土鉱物の表面はケイ酸層で、アルミニウムはむき出しになっていません。

しかし、ケイ酸層の表面に多量のアルミニウムイオンが電氣的に保持されていて、このアルミニウムが土壌の酸性を強めたり、リン酸と結合したりします。また、粘土鉱物の基本構造と基本構造の間に、水酸化アルミニウムの層がはさまれているものもあります。この水酸化アルミニウムがやはり、土壌の酸性を強めたり、リン酸と結合したりします(第2図下)。こうして、黒ボク土では酸性が強いと同時に、固定されるリン酸量も多くなります。

土壌のリン酸を固定する能力をリン酸吸収係数と呼び、乾土100g相当の土壌が固定するリン酸のmg数は

( $\text{P}_2\text{O}_5$ で計算)で表します。リン酸吸収係数は黒ボク土で1500以上、非黒ボク土なら700前後で、黒ボク土が圧倒的にリン酸を固定しやすいことが分かります。



## 有機態リン

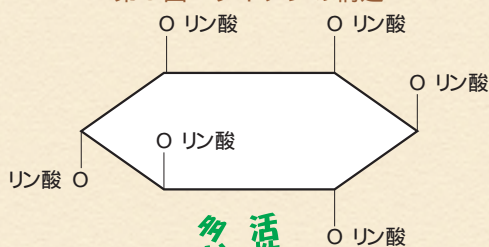
さらに、リン酸を溶けにくくするもう一つのメカニズムがあります。

植物に吸収されたリン酸は、体内で各種の有機化合物に合成されます。植物遺体が土壌に戻されると、植物体中のDNAなどの核酸やリン脂質などは、微生物によってすぐに分解されて、無機態のリン酸に戻ります。しかし、植物の種子にはフィチン(イノシトール6リン酸)という、リン酸を含んだ化合物が存在します。これは、炭素の六つのベンゼン環に六つのリン酸が結合した化合物です(次頁第3図)。植物はフィチン分解酵素を持っていて、発芽する時にフィチンを分解してリンを利用します。穀物ではフィチン中のリン量が、穀物のリン全体の30～50%にも達します。

余談ですが、鶏や豚には穀物主体の濃厚飼料を与えますが、その中にはフィチンが多く含まれています。



第3図 フィチンの構造



活性な鉄やアルミニウムの多い酸性土壌では、リンの利用も妨害されることがある。

で蓄積しています。活性な鉄やアルミニウムの多い酸性土壌では、リンの循環利用も妨害されています。



## アルミニウムの害

鶏や豚はこれを分解できないので、穀物だけではリン不足で生長が抑制されます。そこで、肥料と同じ無機態のリン酸をエサに添加しています。牛はルーメン内の微生物がフィチンを分解してリン酸を放出してくれるので、リン酸を添加する必要がありません。このため、鶏や豚のふんは無機態リン酸を多く含み、牛ふんは少ししか含んでいません。鶏ふんや豚ふん堆肥を連用した土壌で、リン酸過剰が生じるのはこのためです。

さて植物体、家畜ふんや堆肥が土壌に施用されると、フィチンのリン酸に土壌中の鉄やアルミニウムが結合します。そうすると、微生物によるフィチンの分解が妨害されて、未分解のフィチンが土壌に蓄積します。黒ボク土では土壌中のリンの60〜80%強が、利用できないフィチンの形

pH 5以下の酸性土壌で、アルミニウムによって植物の生育が強く阻害されます。しかし、なぜアルミニウムが植物の生育を阻害するかメカニズムは、まだ十分には解明されていません。面倒な細かい話は避けて、簡単にメカニズムを述べてみます。

pH 5以下の酸性土壌では、アルミニウムが三つのプラス電荷を持ったイオンで存在しています。アルミニウムイオンはリン酸などと結合しやすく、植物の細胞膜に存在するリン脂質や核酸などと結合して、細胞膜をかたくし、水や養分の吸収を阻害してしまいます。特に、活発に分裂する根の先端部分の細胞が阻害されて、根が伸びなくなり、やがて植物全体が枯死してしまいます。アルミ

ニウムに耐性のある植物は、リンゴ酸、クエン酸、シユウ酸などの有機酸を分泌する能力が高く、有機酸によってアルミニウムを無毒化していると考えられます。

作物の種類と好適土壌pHの範囲を示した図(1月号32頁第2図参照)は、チャがpH 5以下も好適pHとしていた例外的な作物であることを示しています。明治維新の時に、政府は徳川將軍家へ駿河に領地を与えたので、旧幕臣たちは牧之原台地を開墾して農業を始めました。この地域は強酸性鉬質土壌と呼ばれる黄色土地帯で、ほとんどの作物が作れず、入植した人たちは辛苦をなめました。ですが、幸いにもチャが適していたので、チャの産地となって生活できるようになったのです。

## 土壌有機物の分解阻害

代表的な酸性土壌である黒ボク土と黄色土では、土壌のでき方に由来して、大きな違いがあります。

黄色土や赤色土はかつて日本が湿润亜熱帯であった時代に、岩石の風化によってつくられた土壌です。当時の高温のために、土壌有機物の分

解が進んで土壌有機物含量が少なくなり、このために酸化した鉄の色が直接表れて黄色や赤になっています。かつ、風化した岩石の破片が多いと同時に、土壌有機物が少ないため、微細な粘土鉱物が団粒化せずに、土壌のすき間を埋めて、排水や通気も悪い土壌となりました。

これに対して、黒ボク土は火山噴出物からつくられた土壌で、一部には軽石などの粗粒な鉱物もあります。多くの黒ボク土は微細な火山灰からつくられており、粗粒な鉱物はありません。火山灰の上に生えたススキなどの植物遺体が分解されて生じた腐植物質に、土壌中のアルミニウムが結合して、微生物に分解されにくい形態に変えてしまいました。

おかげで、黒ボク土には多量の土壌有機物が蓄積し、色が黒くなり、土壌有機物によって土壌の団粒化が進み、排水や通気の良い土壌となりました。つまり、黄色土・赤色土は化学的性質だけでなく、物理的性質も悪い土壌ですが、黒ボク土は化学的性質が悪いものの、物理的性質はよい土壌です。

黒ボク土だけでなく黄色土・赤色土でも、残っている土壌有機物はアルミニウムと結合して分解されにく



なくなっています。むしろ、土壌に施用したわらなどの作物遺体の初期分解が、黄色土・赤色土や黒ボク土で特に遅いことはありません。しかし、初期分解の次に、残さを微生物が分解して腐植物質をつくと、それにアルミニウムが結合するので、分解が遅くなり、土壌有機物として蓄積します。酸性土壌中の腐植物質は、簡単に微生物に分解されて、無機態チッソやリン酸を放出できません。このため、酸性土壌の天然肥沃度は低く、リン酸不足に加えて土壌からの無機態チッソも少なく、かつてはこの面でも畑での作物生産は厳しかったわけです。



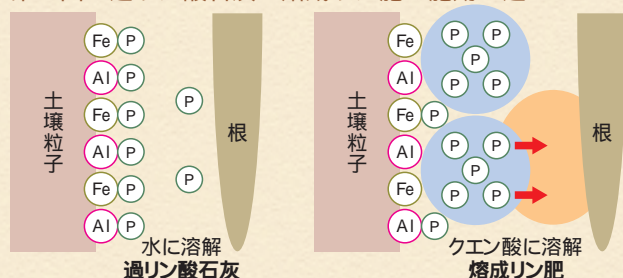
## 畑土壌の改良技術

日本の畑土壌は、強酸性、リン酸欠乏、アルミニウムの害、それに低いチッソの天然肥沃度という四重苦を持っていました。四重苦のうち、酸性を直すだけなら炭酸カルシウムを施用すればよいのですが、炭酸カルシウムではアルミニウムイオンを減らせません。

その四重苦を一気に解決する技術が、1960年代前半につくられました。リン酸肥料として一般に使わ

れている過リン酸石灰は、原料のリン鉱石に硫酸を作用させてつくった酸性の粉末状肥料です。通常の量の過リン酸石灰を、アルミニウムイオンの多い土壌に施用しても、粉末状であるために、リン酸がすぐにアルミニウムと結合して作物に利用できなくなってしまう（第4図左）。そこで、マグネシウムを含む蛇紋岩とリン鉱石を、電気炉で溶かして混合した後、水で冷やして、砕けた顆粒状の熔成リン肥（熔リン）という肥料がつくられました。これはアルカリ性で、土壌の酸性を矯正します。少しアルカリ性が強すぎるので、熔成リン肥4と過リン酸石灰1を混合して多量に施用します。リン酸吸収係数の5〜10%に相当する多量のリン酸を施用します。

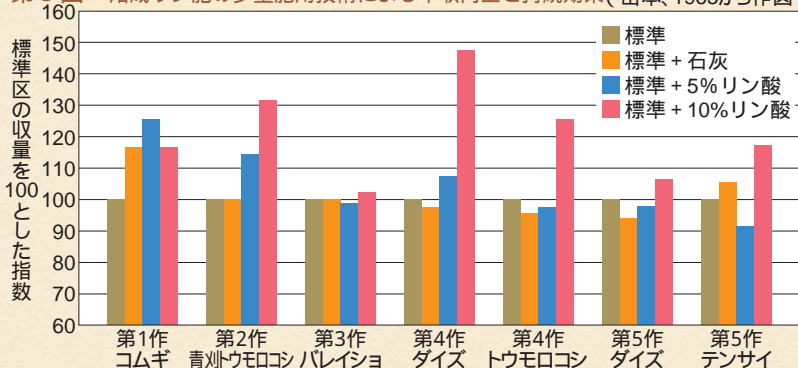
第4図 過リン酸石灰と熔成リン肥の肥効の違い



過リン酸石灰は微粉末で、水溶性リン酸が多く、土壌中のアルミニウムや鉄と結合して不溶化しやすい。熔成リン肥のリン酸はケイ酸塩ガラスに溶解していて、水に溶けず、クエン酸に溶解するため、熔成リン肥を多量施用した場合には、アルミニウムや鉄と結合していないリン酸が多く存在し、根の分泌するクエン酸で溶解して吸収される。

台地土壌での野菜、果樹、牧草の生産が可能になりました（第5図）。ただ、熔リンなどの多量施用は時たま行えばよいのですが、頻繁に行われて、リン酸レベルの高すぎる土壌が出現するようになってしまい、今日では野菜畑のあらかたがリン酸過剰となっています。リン酸資材をふんだんに使った土壌の劣悪な化学的性質が改善できたので、物理的性質のよい黒ボク土は野菜生産に適した優れた土壌に変わりました。土壌に対する見方が、昔と今では大きく変わった好例です。このように、今日では黒ボク土は、

第5図 熔成リン肥の多量施用技術による単収向上と持続効果（山本、1965から作図）



標準区：化学肥料で通常の量のチッソ、リン酸、カリを施用した区  
標準+石灰：標準区に炭酸カルシウムを追加して施用  
標準+5%リン酸：標準区に土壌のリン酸吸収係数の5%のリン酸を熔成リン肥で追加施用  
標準+10%リン酸：標準区に土壌のリン酸吸収係数の10%のリン酸を熔成リン肥で追加施用

野菜生産に適した土壌に変わりました。ただし、強酸性鉱質土壌は、その劣悪な化学的性質はリン酸資材で改善できたものの、礫と粘土の多い劣悪な物理性を十分には克服できていません。いずれにせよ、リン酸資材は今日では昔ほど施用する必要がありません。時代とともに土壌管理の仕方が変わっています。この問題は、後にまた述べることにします。