

13. 畑の土



畑とは、ムギ、トウモロコシなどの穀物、イモ、大根、ニンジンなどの作物や果樹などを栽培するために人が管理している土地である。日本は、ほぼ全域で森林が成立しうる気候条件下にあるため、現在畑として利用されているところは、過去にはほとんどすべて森林におおわれていたはずである。畑の土を調べることで、森林伐採、定期的な耕耘、施肥などが土にどのような影響を与えるのかを理解することができる。また、生産力を維持しながら継続的に畑として利用し続けることができるような土の管理法に関しては、まだまだ研究すべきことが多く残されている。

13.1. 畑という生態系の特徴

畑は、ムギ、トウモロコシなどの穀物、ダイズなどの豆類、レタスやホウレンソウなどの葉菜類、ダイコン、ニンジンなどの根菜類などを栽培するためにヒトが管理し、肥料や水などを人為的に投入している土地である。また、エンバクなどの家畜の飼料作物を栽培している土地、ブドウ、リンゴなどの果樹を栽培している土地も畑に区分される。さらに、ガラス温室やビニールハウスなどの中に囲い込まれてイチゴやスイカなどを栽培している土地も畑である。



図 13.1 ソバ畑（左）とネギを栽培しているビニールハウス（右）。

畑で栽培される植物は、ムギや葉菜類のような草本植物から果樹のような木本植物まで多様であり、生育する植物という点では共通点はない。しかし、栽培植物が何であれ、次のような共通点がある。

- 1) 目的とする植物だけを生育させ、その他の植物は人力や除草剤を用いた除草によって極力排除される。
- 2) 生育した植物の一部または全部が収穫によって持ち去られ、天然林におけるような、閉じた物質循環がない。
- 3) 作物の収穫量をできるだけ多くするため、食味や糖度などの品質をできるだけ高めるため、そして収穫によって持ち去られた必須元素を補充するため、また土の pH を調節するなどのために、多量の土壌改良資材や肥料が投入される。
- 4) 自然な降水以外にも、灌漑水として人為的に水が供給されることがある。

この他、面積としては小さいが、ガラス温室、ビニールハウスなどの栽培施設では、ほぼ全面的に降水が遮断され、加温によって施設外よりもはるかに気温が高く保たれるなど、施設外部とは全く異なった微気候が作り出されているという際立った特徴を持っている。

13.2. 畑の土の特徴

一般に土が、その場所での機構や植生に対応した特徴的な断面形態を持つようになるには、少なくとも数千年単位の長時間を要する。人類が畑作を開始してからの時間は、仮に同じ場所で継続的に畑作が行われていたとしても、それによって特徴的な B 層が形成されるには十分ではない。そのため大部分の畑の土は、すくなくとも表層 15 cm 程

度以深の部分は、それが畑として利用される前の土の特徴を強く残していることが多い。

例外は表層部であり、畑作の影響を強く受けている。表層部は、繰り返し耕耘されるために、同じような成り立ちの未耕地土と比較すると乾燥密度が小さい傾向がある。森林土を畑に転換した場合、厚い O 層は、L 層の排除、F 層、H 層の下層への混和などのために短期間で失われる。畑では播種したのち、作物が成長するまでの間、そして作物を収穫した直後には、土の表面が植生に覆われることなく露出する。この期間に表流水を生ずるような強度の降雨があると、膨軟になった表土は表流水に分散して流出する。いわゆる土壌侵食（水食）である。浸食の結果、畑地化する以前の土の A 層の一部または全部が失われていることも稀ではない。場合によっては A 層と B 層の全体が失われることもある。このような深刻な土壌侵食をうけると、もはや畑としては利用することができず放棄される。

土壌侵食が軽微で、作物生育に適するように管理された畑土壌の表層は、乾燥密度が $0.8-1 \text{ g cm}^{-1}$ と低く、土壌 pH は 6-6.5 である。交換性陽イオンはカルシウムイオン、マグネシウムイオン、カリウムイオンからなり、その電荷割合は、カルシウムイオンが 50-70%、マグネシウムイオンが 10-15%、カリウムイオンが 4-6% である。また未耕地と比較するとリン酸含量が高いのが特徴である。このような特徴を備えた、人為的に管理された表層は作土層とよばれ、土壌調査においては Ap 層という記号が当てられる。添え字の p は plough（鋤）の p からきている。

表 13.1 には黒ボク土地帯の畑土壌と、隣接する森林土壌の化学的性質を比較したものである。畑土壌では pH が高く、交換性 Ca, Mg, K, Na 含量、可給態リン酸含量がはるかに高くなっている。一方リン酸吸収係数は相当低下している。これは、多年の土壌改良資材や肥料の投入による結果である。

表 13.1 畑と、隣接する森林土壌の表層の化学的性質の比較。（三枝・木村，2005）

項目	畑土壌	隣接する森林土壌
pH(H ₂ O)	6.4	4.8
pH(KCl)	5.8	4.3
交換性陽イオン/ $\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$		
Ca	23.7	2.9
Mg	5.4	0.7
K	1.2	0.35
Na	0.6	0.06
CEC/ $\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$	50.6	49.3
塩基飽和度	61.0	8.2
リン酸吸収係数	1920	2430
可給態リン酸/ g kg^{-1}	1.455	0.021

13.3. 畑における主要元素の動態の特徴

13.3.1. 作物による元素吸収量

畑で栽培された作物の一部または全部は収穫物として持ち出される。このことは、畑の土から作物が吸収した窒素、リン、カリウムなどの元素も畑から持ち出されることを意味する。森林（天然林）の場合には、樹木が土から吸収した

元素は、樹木の中に蓄えられ、その一部は落葉・落枝として土に還元される。しかし畑の場合には、土→作物→畑の外という一方的な流れが存在する。表 13.2 には、いくつかの作物の 1 作当たりの収穫量と、それらの作物による元素の吸収量を示す。この表の数値は北海道において測定された事例であり、日本あるいは世界の平均を示しているわけではないが、自然災害や病虫害などによる極端な生育不良などがなければおおよその程度であると考えてよい。収穫量は可食部の収穫量を示し、元素吸収量は可食部だけでなく作物体全体による吸収量を示す。まず、作物によって元素の吸収量が大きく異なることがわかる。窒素についてみると、収穫量の割にダイズの吸収量が多い。これは蛋白質含量が高いダイズの特徴である。カリウムについてはバレイショで著しく多いことがわかる。これはイモ類の特徴である。この表には示されていないが、吸収された元素の作物体における分布も多様である。カリウムの場合、バレイショではその 70%が可食部である塊茎に取り込まれ、したがって畑から持ち出される。しかしトウモロコシや小麦の場合には子実に取り込まれるカリウムの割合は 10%程度にすぎない。またカルシウムについては、コムギ、バレイショともに収穫部位への取り込み割合は全吸収量の 5%程度である（久馬ら, 1984）。

いま、作土層（Ap 層）の厚さを 15 cm とし、乾燥密度を 1.0 g/cm^3 とすると 1ha の畑の作土の質量は $1.5 \times 10^6 \text{ kg}$ である。作物が作土層の土のみからこれらの元素を吸収したと仮定し、表 13.2 に示した作物による元素吸収量のうちコムギによる吸収量を例にとり、土 1 kg あたりの量に換算して表 13.3 に示した。量は mg/kg と mmol/kg の両方で示した。同じ表に、比較のため土の平均元素含有量の値も示した。またこの表の右端には土の平均含有量と 1 作のコムギによる吸収量の比を示した。この表からわかるように、このコムギの事例では、土からの吸収量はその土に含まれている元素含有量のごく一部である。しかしこれらの数値は次のような事情を考慮して解釈する必要がある。第 1 に、同じ畑で持続的に作物生産を行うという観点から見ると、いくつかの元素の含有量はそれほど多くない。たとえば窒素やリンにいたっては、それぞれコムギ 1 作による吸収量の 20 倍および 30 倍しか存在しない。カリウム、カルシウム、マグネシウム、ケイ素の含有量も、コムギ 1 作による吸収量の 200 倍から数百倍でしかない。第 2 に、土に含まれる元素の大部分は鉱物の構造中に存在し、植物が直ちに吸収できるような形態のものは少ないという点である。窒素やリンの場合には、植物に直ちに利用可能な形態のものは、コムギを 1 作するためにも不十分な量しか存在しないことが普通である。

表 13.2 いくつかの作物の 1 作当たりの収量および元素吸収量。単位はすべて kg/ha. (田中, 1979)

元素	コムギ	トウモロコシ	ダイズ	バレイショ
	1 作当たりの収穫量/ 乾物 kg/ha			
	3830	6160	2750	10520
N	152	165	235	224
P	25	33	21	33
K	140	200	90	322
Ca	20	33	35	56
Mg	11	17	18	27
Fe	2.03	1.61	0.55	1.86
Mn	0.60	0.71	0.37	1.37
Zn	0.23	0.31	0.15	0.35
Cu	0.07	0.11	0.06	0.07
B	0.12	0.21	0.44	0.36
Mo	0.006	0.0013	0.0016	2.3
Na	2.00	3.05	0.96	1.77
Si	567	340	60	40

表 13.3 作土の土 1 kg あたりのコムギの元素吸収量および土の平均元素含有量.

元素	コムギ吸収量 (表 13.2 から)		土の含有量		含有量/吸収量
	mg/kg	mmol/kg	mg/kg	mmol/kg	
N	101	7.21	2100	150	20
P	16.7	0.54	500	16.1	30
K	93.3	2.38	17500	447	188
Ca	13.3	0.332	6500	162	489
Mg	7.33	3.31	2750	113	375
Fe	1.35	0.0242	55000	984	40740
Mn	0.40	7.28×10^{-3}	4600	83.7	11500
Zn	0.15	2.29×10^{-3}	387	5.92	2580
Cu	0.046	7.24×10^{-4}	70	1.10	1521
B	0.080	7.40×10^{-3}	105	9.71	1321
Mo	4.0×10^{-3}	4.17×10^{-5}	5	0.0521	1250
Na	1.33	0.0578	5500	239	4135
Si	378	13.5	233000	8298	616

コムギによる吸収量は表 13.2 から、土の含有量は中央値を示す。

一般に、畑で生育した植物体の全体が持ち出されるわけではない。たとえばコムギの場合、すくなくとも根は残されるし、麦ワラも何らかの形でその畑に還元されることもある。このことを考慮してもなお、表 13.3 に示す計算例が示唆するように、平均的な土の必須元素含有量は、そこで長期間（100 年以上）にわたって畑作を行い、高い収穫量を維持していくには十分とは言えない。この意味で、施肥を一切行わない農業というのは幻想でしかない。

13.3.2. 畑土壤に投入される土壤改良材や肥料

前節で述べたような土の必須元素含量の不足を補うために、現代農業では、様々な資材が投入されている。それらのうち、もっぱら植物の必須元素を供給するために投入するのが肥料、pH など、土の性質を制御するために投入される資材を土壤改良剤とよぶ。

土壤改良剤

土壤改良材の代表的なものは炭酸カルシウム、水酸化カルシウムなどの、いわゆるアルカリ資材である。植物による陽イオンの吸収と、降水や灌漑水の浸透による溶脱のため、土の層状ケイ酸塩に保持されている交換性陽イオンは水素イオンと交換して徐々に減少する（12.4 参照）。交換性水素イオンは交換体の鉱物を溶解するので、最終的には交換性アルミニウムイオンとなる。交換性水素イオンやアルミニウムイオンの存在は土壤溶液を酸性化させる。またアルミニウムイオン自体有害元素である。土の酸性化については森林土壌の特徴として述べたが、森林土壌に限定されるわけではなく、浸透水量が蒸発量を上回るような湿潤地域では、程度の差はあれ共通の現象である。

酸性化および交換性アルミニウムイオンの出現を防止したり、酸性化した土を中性化したりするために炭酸カルシウムや水酸化カルシウムが施用される。交換性アルミニウムと炭酸カルシウムの反応は



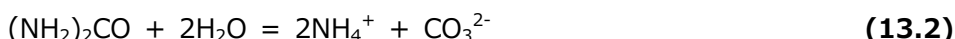
で表される。交換性アルミニウムイオンが水酸化アルミニウムとして除去され、交換サイトにはカルシウムイオンが吸着する。交換性カルシウムだけでなく交換性マグネシウムも補給するためドロマイト（ $(\text{CaMg})(\text{CO}_3)_2$ ）が用いられることもある。

肥料

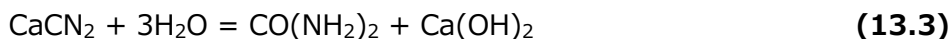
肥料としては、作物の要求量が多く、土における賦存量が少ない窒素、リン、カリウム（土の含有量は比較的多いが直ちに吸収できる量は少ない）が最も多く供給される。現代の農業においてもっともよく用いられるのは化学肥料である。化学肥料に含まれる代表的な化合物を表 13.4 にまとめて示す。

代表的な窒素肥料は、ハーバー・ボッシュ法によって大気中の窒素から合成されたアンモニアと硫酸から合成される硫酸アンモニアやその他のアンモニア塩類である。アンモニアを酸化することによって製造される硝酸の各種塩類や、同じくアンモニアと二酸化炭素から合成される尿素なども用いられる。これらの塩類は土に施用されると直ちに間隙水に溶解して、アンモニウムイオンや硝酸イオンを与える。これらのイオンは直ちに植物に吸収される。アンモニウムイオンの、大半はいったん層状ケイ酸塩鉱物に交換性陽イオンとして吸着され、交換反応で溶出したのち、そのままあるいは土壤微生物のエネルギー獲得に利用されて硝酸イオンとなってから吸収される。

尿素は施用後に土中で



のように加水分解してアンモニウムイオンを生成する。石灰窒素の主成分であるカルシウムシアナミドは土の間隙水と反応し、



のように尿素に転換する。尿素は(13.2)式に示すようにアンモニアに転換して利用される。

リン肥料は、ヒドロキシアパタイトをはじめとする難溶性のリン酸カルシウムを主成分とするリン鉱石を硫酸で分解することによって製造される、比較的溶解度の高いリン酸カルシウムが代表的である。カリウム肥料は、カリウムに富む岩塩（塩化カリウム）の粉末が代表的であり、それに加えて硫酸や硝酸から合成される硫酸カリウム、硝酸カリウムも用いられる。

表 13.4 化学肥料の成分として用いられる代表的な化合物

元素	化合物	製造法など
窒素	$(NH_4)_2SO_4$	大気中の窒素と水素から合成したアンモニアを硫酸に吸収させて製造。
	NH_4Cl	アンモニアを塩酸に吸収させる。
	NH_4NO_3	アンモニアを、アンモニアの酸化で製造した硝酸に吸収させる。
	$NH_4H_2PO_4$	アンモニアをリン酸に吸収させる。リン肥料でもある。
	$CO(NH_2)_2$	尿素。アンモニアと二酸化炭素から合成する
	$CaCN_2$	カルシウムカーバイドと窒素ガスから合成される $CaC_2 + N_2 = CaCN_2 + C$ 石灰窒素とよばれる。
リン	$Ca(H_2PO_4)_2$	リン鉱石（主成分はヒドロキシアパタイト $Ca_5(PO_4)_3(OH)$ 、OHの代わりにFが入ったフルオロアパタイトなど）に硫酸を作用させて製造する。反応式は次の通り $2Ca_5(PO_4)_3(OH) + 7H_2SO_4 = 3Ca(H_2PO_4)_2 + 7CaSO_4 + 2H_2O$ この方法で製造したリン肥料はリン酸カルシウムと石膏の混合物であり、過リン酸石灰（super phosphate）とよばれる。
	$NH_4H_2PO_4$	アンモニアをリン酸に吸収させる。過リン酸石灰にアンモニアを吸収させ、リン酸カルシウムの一部をリン酸アンモニウムにした、アンモニア過リン酸石灰もある。
	ケイ酸カルシウム・ケイ酸マグネシウムとリン酸カルシウム・リン酸マグネシウムの固溶体	リン鉱石と、カンランセキなどケイ酸マグネシウムやケイ酸カルシウムを含む岩石を混合して 1500-1600 °C で溶融して急冷する。様々な形のケイ酸カルシウムやケイ酸マグネシウムと、リン酸カルシウム、リン酸マグネシウムの固溶体が生成する。
カリウム	KCl	カリウムを多く含む岩塩の水溶液から晶出させる。
	K_2SO_4	塩化カリウムに硫酸を反応させ、塩化水素を除去する。

カリウムとカリ、リンとリン酸

土壌学に関する論文や著書、技術文書などではカリウムとリンという元素名の代わりに、「カリ」、「リン酸」あるいは「リンサン」という言葉が用いられることがある。「カリ」というのはカリウムの省略形ではなく、酸化カリウム (K_2O) のことを意味する。かつては漢字で「加里」と書かれたこともある。そして、「リン酸」あるいは「リンサン」とは、リンの別称として用いられているわけでも文字通りのリン酸 (H_3PO_4) の意味で用いられているのでもなく五酸化リン (P_2O_5) を意味する。カリウム、リンと書かれている場合にはいうまでもなく、K、P を意味する。交換性カリウム含量はカリウムイオンの電荷量 $cmol_c/kg$ で表すのが普通であるが、土壌診断報告書などではカリ (K_2O) の質量で表されることもまれではない。しかも土 1 kg ではなく 100 g 当たりだったりする。たとえば $mg P_2O_5/100 g$ 。土壌診断報告書などを読むときには単位や物質の表現には注意が必要である。

この本では、基本的にかりやリンサンではなく、カリウムおよびリンの量で示すことにしている。

カリ (K_2O) 質量をカリウム質量に換算するには 0.8301 を乗ずればよい。また、リンサン (P_2O_5) の質量をリンの質量に換算するには 0.4364 を乗ずればよい。

有機質肥料

代表的なものは、作物や樹木の利用残渣、家畜の排せつ物、食品産業で発生する有機廃棄物などを原料として調製される堆肥である。堆肥の製造は、これらの有機物をそのまま、あるいは窒素、リン、カリウムなどの含量を調節するために配合したり、場合によっては化学肥料を添加して堆積し、一定の時間（1 か月ないし数か月）発酵させることによって行われる。

主原料となる植物体は多糖類に富むので、それをエネルギー源として微生物が増殖する。この過程で炭素は二酸化炭素として失われるため、減量すると同時に C/N 比が次第に低下し、腐植物質と微生物菌体の占める割合が大きくなる。このような状態になった堆肥を完熟堆肥といい、C/N 比が 10 に近くなることがその一つの尺度である。発酵中は、何度か切り返しを行って上下反転させ、酸素不足にならないようにする。製造施設の保温が適切であれば、発酵中の堆肥の温度は数十℃以上になり、大腸菌をはじめとする病原性の細菌の多くは死滅する。

堆肥の窒素の多くは、菌体を構成するタンパク質として存在し、一部は硝酸塩、アンモニア塩などの無機化合物として含まれる。このため、施用後、土の中での無機化を経て作物に供給されるため、肥効が徐々に発現するという特性がある。また、腐植物質の存在によって土粒子の集合体化が促進されるなどの副次的な効果もある。

堆肥中のリンは、微生物菌体を構成するリン化合物として存在する。また、カリウムは、生物体中と同様単純なカリウム塩として存在する。したがって、堆肥（およびその他の有機質肥料中の）カリウムの肥効は化学肥料と異ならない。

13.4. 畑土壌における養分収支

13.4.1. 畑土壌における施肥量と作物による吸収

表 13.5 には、日本の農業試験研究機関の畑におけるいくつかの作物の収穫量、窒素、リン、カリウムの化学肥料施肥量と作物による吸収量の調査結果を示す。吸収量の数値の後には、施用量に対するパーセント値も示した。この調査結果では、作物による窒素、リン、カリウムの吸収量はそれぞれ 1 ha あたり 100~300 kg, 15~60 kg, 80~450 kg 程度であり、それに対して施肥量は窒素、リン、カリウムについてそれぞれ 70~130 kg, 60~130

kg, 70~300 kg 程度であった。吸収量/施用量で機械的に計算した施肥元素の（見かけの）利用率をみると、窒素、リン、カリウムについてそれぞれ70~1000%, 20~50%, 95~200%となっている。窒素では共生窒素固定菌による窒素固定にともなう窒素供給のあるダイズをのぞけばほぼ100%前後であり、カリウムもまた100%に近いがそれよりやや高い。それに対してリンの利用率は20~50%と他の元素と比較して著しく低い。

表 13.5 日本の農業試験研究機関の畑における平均的な作物収穫量、施肥量および作物による吸収量。（尾和, 1996）

作物名	収穫量	化学肥料施肥量/ kg ha ⁻¹			吸収量/ kg ha ⁻¹			収穫物中元素量/ kg ha ⁻¹		
		N	P	K	N	P	K	N	P	K
コムギ	4770	111	72	80	120	20	123	91	16	20
ダイズ	2960	20	70	83	205	21	79	189	19	53
バレイショ	7280	81	82	114	94	17	211	67	14	147
キャベツ	4290	232	87	191	272	31	242	142	18	129
タマネギ	7360	199	132	163	147	31	156	132	29	137
ダイコン	3040	97	57	74	119	23	196	58	14	121
ニンジン	6030	150	87	166	127	17	261	78	14	164
キュウリ	4510	248	134	203	212	58	393	127	29	225
トマト	7730	350	103	291	236	44	459	142	30	317

窒素の利用率が100%を超えるのは、この調査の対象になった畑では継続的に堆肥などの有機物資材を施用しており、有機物中の窒素化合物の無機化によってアンモニウムイオンや硝酸イオンが供給されているからである。またカリウムの利用率が100%を超えるのは、堆肥などにもカリウムが含まれていること、土の層状ケイ酸塩鉱物に吸着されていたカリウムの供給による。リンの利用率が低いのは施肥された肥料中のリン酸イオンが、土に含まれる酸化物鉱物や水酸化物鉱物に表面錯体として強く吸着されるからである。

この調査結果から計算される見かけの利用率は比較的高い。これは上に述べたように、堆肥など有機資材からの供給や土壌からの自然供給を無視しているからである。正味の施肥養分の利用率を知るためには、¹⁵N や ³²P など標識した化学肥料を施用し、標識元素を追跡するなどの作業が必要である。そのような研究によれば、一般には施肥窒素の利用率は20~50%、リンは5~20%、カリウムは40~70%とされている。

13.4.2. 収穫による系外への持ち出しと養分収支

作物体に吸収された元素は全量が持ち出されるわけではない。この表の最後の欄には、畑の系外に持ち出される収穫物中の元素量を示した。持ち出される量は、窒素についても化学肥料施用量以下であり、リンについては施用量よりもはるかに低い。カリウムについてはほぼバランスが取れているか、持ち出し量の方が施用量よりもやや多い、という結果になっている。この表に掲げてある施肥量は、化学肥料としての施肥量のみであり、一般には化学肥料の他に堆肥などの有機質資材も施用されることが多い。このことを考慮すると、調査対象になった畑では、すくなくとも窒素とリンに関しては、持ち出し量よりも施用量の方がはるかに多い。カリウムに関しても、有機質資材として相当量が施用されているとすれば施用量が持ち出し量よりも多いと考えられる。

畑の系外に持ち出されなかった部分とは、いわゆる収穫残渣である。たとえば、落葉やイネやムギの切り株などがこ

れに相当する。これらは次の作付前には土と混合され、土壌生物に利用される。窒素化合物は無機化されてアンモニウムイオンを経て硝酸イオンとなる。リンも、有機リン化合物の分解にともなってリン酸イオンとして放出される。カリウムイオンは植物細胞が破壊されると直ちに溶出する。

表 13.5 に示した調査例では、収穫によって持ち出される窒素、リン、カリウム量よりも、肥料等として供給される量の方が多し。これは後述するように環境負荷の原因となるので好ましくない。しかし、収穫物の持ち出しに伴う窒素、リン、カリウムの持ち出し量は自然供給量を上回っている。この表に示した程度の収穫を継続的に得ようとするなら、化学肥料であれ、堆肥などの有機質資材であれ、持ち出された元素を補充するための資材の供給は不可欠である。肥料の類を一切施用しない栽培法が提唱されているが、そのような栽培法で持続的な作物生産をすることは不可能である。もし、そのような栽培法が成功しているように見える場合には、農地管理者の把握していない形で養分の流入があるはずである。たとえば、傾斜地の段々畑における作物栽培では、上部の農地から過剰な窒素などが流入することもある。

13.4.3. 浸透による溶脱

収穫残渣由来の硝酸イオンおよび肥料由来の硝酸イオンは、土にはほとんど吸着されず、浸透水とともに下方へ溶脱する。カリウムイオンは層状ケイ酸塩に対する陽イオン交換選択性が大いため移動しにくく、大部分は作土に留まる。リン酸イオンも表面錯体として吸着されるため大部分は作土に留まる。

畑地で過剰な施肥を行うと、吸収されなかった窒素は硝酸イオンとして下層に浸透し、河川に流出したり、地下水に到達したりする。多量の窒素肥料を施用する野菜や茶の産地では地下水の硝酸イオン濃度が環境基準（N として 10 mg/L）を超えることもある。

13.4.4. 土壌浸食による流出

畑は、作物の収穫後は裸地になることが多い。また、作物の播種直後および作物体が小さい期間中もまた裸地に近く、しかも耕耘のため表土が膨軟になっている。このような状態の時に強い降雨があると、雨滴の衝撃によって土の集合体が破壊され粘土ないしシルト粒子が水に分散して畑から流出する。畑の表土の粘土粒子には、多量のリン酸イオンが表面錯体として吸着されているので、粘土粒子の流出にともなってリン酸イオンも流出することになる。流出した粘土粒子やシルト粒子は、河川の下流域、湖沼などに堆積する。

表面錯体として吸着されたリン酸イオンは溶出しにくいとはいえ、貧栄養状態で平衡している自然生態系に流入するとリンのバランスを破壊することになる。また、湖沼の底では、夏季の活発な微生物活動によって無酸素状態となり、流入した土粒子に含まれる酸化鉄鉱物や酸化水酸化鉄鉱物の 3 価鉄イオンが微生物の呼吸のための電子受容体として用いられるようになる。この結果、鉄鉱物は表面から部分的に溶解し、表面錯体としていたリン酸イオンが溶出する。その結果、藻類やシアノバクテリアなどの生育の制限要因となっていたリン酸イオンの濃度が上昇し、これらの微生物の爆発的な増殖を引き起こすことがある。

13.5. 畑土壌の管理

13.5.1. 畑土壌の改善目標

表 13.6 と表 13.7 には露地畑土壌および施設畑土壌の改善目標の例を示した。

表 13.6 露地畑土壌の改善目標（福岡県）

項目	土の種類					
	非火山灰土			火山灰土		
	粘質	壤質	砂質	黒ボク土	淡色黒ボク土	
pH(H ₂ O)	6.0-6.5	6.0-6.5	6.0-6.5	6.0-6.5	6.0-6.5	
陽イオン交換容量/cmol _c kg ⁻¹	> 15	> 12	> 8	> 15	> 15	
塩基飽和度 /%	Ca	50-70	54-75	64-90	50-70	50-70
	Mg	10-15	11-16	13-19	10-15	10-15
	K	4-6	4-6	5-8	4-6	4-6
Ca/Mg 比	3-7	3-7	3-7	3-7	3-7	
Mg/K 比	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	
可給態リン酸/ mg/ kg	100-500	100-500	100-500	50-500	50-500	
腐植含量/%	> 3	> 3	> 2	> 5	> 4	
硝酸態窒素/ mg/ kg	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	
EC/ dS m ⁻¹	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.3	
作土の厚さ/ cm	> 20	> 20	> 20	> 25	> 25	
有効根群域の深さ/ cm	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	
現地乾燥密度/ g/ cm ³	0.8-1.0	0.8-1.0	0.9-1.1	0.5-0.7	0.5-0.7	
粗孔隙率/ %	> 15	> 15	> 15	> 20	> 20	
有効根群域の最高緻密度 /mm	< 22	< 22	< 22	< 22	< 22	
有効根群域の最小透水係数/ cm s ⁻¹	> 10 ⁻⁴	> 10 ⁻⁴	> 10 ⁻⁴	> 10 ⁻⁴	> 10 ⁻⁴	
地下水位/ cm	< 60	< 60	< 60	< 60	< 60	

表 13.7 施設畑土壌の改善目標（福岡県）

項目	土の種類					
	非火山灰土			火山灰土		
	粘質	壤質	砂質	黒ボク土	淡色黒ボク土	
pH(H ₂ O)	6.0-6.5	6.0-6.5	6.0-6.5	6.0-6.5	6.0-6.5	
陽イオン交換容量/cmol _c kg ⁻¹	> 15	> 12	> 8	> 15	> 15	
塩基飽和度 /%	Ca	50-70	54-75	64-90	50-70	50-70
	Mg	10-15	11-16	13-19	10-15	10-15
	K	4-6	4-6	5-8	4-6	4-6
Ca/Mg 比	3-7	3-7	3-7	3-7	3-7	
Mg/K 比	2-4	2-4	2-4	2-4	2-4	
可給態リン酸/ mg/ kg	200-500	200-500	200-500	100-500	100-500	
腐植含量/%	> 3	> 2	> 2	> 5	> 4	
硝酸態窒素/ mg/ kg	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	
EC/ dS m ⁻¹	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.3	
作土の厚さ/ cm	> 20	> 20	> 20	> 25	> 25	
有効根群域の深さ/ cm	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50	
現地乾燥密度/ g/(100 cm ³)	80-100	80-100	90-110	50-70	50-70	
粗孔隙率/ %	> 15	> 15	> 15	> 20	> 20	
有効根群域の最高緻密度/mm	< 22	< 22	< 22	< 22	< 22	
有効根群域の最小透水係数 /cm s ⁻¹	> 10 ⁻⁴	> 10 ⁻⁴	> 10 ⁻⁴	> 10 ⁻⁴	> 10 ⁻⁴	
地下水位/ cm	< 60	< 60	< 60	< 60	< 60	

ここで露地畑とは通常の畑であり、施設畑とはガラス温室やビニールハウスなどの栽培施設内の畑である。ここに示した表は福岡県の例であるが、他の都道府県によって設定されているものは農林水産省のウェブサイトで公表されている（農林水産省、2012）。この表に示されている改善目標は、作付け前の土の状態に関するものである。施肥、作付け前に土を採取して分析し、これらの表に示された状態から著しく逸脱している場合には何らかの改善対策をすること

が好ましい、という趣旨の目標である。

土壌 pH の推奨値は 6-6.5 である。これは、測定された pH がこの範囲を下回る場合には、作物によっては酸性障害が生ずることがあるので、すくなくともこの程度に上昇させることが好ましい、という意味の基準である。日本の土では pH がこれ以上なることはほとんどないが、たとえば測定された pH が 7 であった場合、6.5 以下になるまで下げる必要があるという意味ではない。乾燥気候下の土では、土に多量の炭酸カルシウムが含まれ、土壌 pH が 8 をこえることがあるが、多くの場合、作物生育に対する悪影響はない。ただし、場合によっては銅、亜鉛などの微量必須元素の表面錯形成が促進されて土壌溶液中濃度が低下するため、欠乏症を生ずることがある。このような場合にはその元素を含む肥料や資材を施用しなければならない。

陽イオン交換容量は、砂質土を除いては 12 ないし 15 cmol_c/kg 以上あることが好ましい、とされているが、これより低くても、土の陽イオン交換容量を増加させることは実際には難しい。極端に低く、どうしてもその土地を畑として利用したい場合には、スメクタイトやスメクタイト質の土を客土することにより増加させることが可能である。この場合には、投入する資材の持つ交換性陽イオン組成に注意しなければならない。堆肥などの有機物資材の投入が陽イオン交換容量の増大に効果があるとして推奨されることがある。有機物の投入によって陽イオン交換容量の測定値は増加するが、有機物の陽イオン交換基は弱酸的なカルボキシ基であるので、pH が 6.5 以下でイオン濃度の低い土壌溶液と平衡させた場合の交換性陽イオン保持能は低い。このため、畑条件下での交換性陽イオン保持能の増強策としてはあまり効果的ではない。

水田土壌と異なり、畑土壌では化学肥料として投入されたアンモニウムイオンや有機物の分解によって生じたアンモニウムイオンは短期間に硝酸イオンとなり、土には吸着されない。このため、畑土壌における陽イオン交換容量の意義は水田と比較すると低い。

交換性陽イオン組成は、カルシウムが 50-90%、マグネシウムが 5-15%、カリウムは 4-8% であり、Ca/Mg 比が 3-7、Mg/K 比が 2-4 であることが推奨されている。Ca/Mg 比がこの値より大幅に大きいときにはマグネシウム欠乏が、低い場合にはカルシウム欠乏が生ずることがある。同様に Mg/K 比がこの範囲よりも大幅に低いと、カリウムの過剰によるマグネシウムやカルシウムの欠乏症が起こることがある。植物残渣を主原料とする堆肥などの有機質資材はカリウム含量が高いことが多く、多量に投入するとイオンバランスを乱すことがある。有機質資材を多量に投入するときには、それによるカリウム投入量を把握し、化学肥料の施用量を調節しなければならない。

可給態リン酸とは、土に存在するリン酸のうち、比較的土壌溶液に溶出しやすく、植物に利用されやすいリン酸イオン量の目安として測定される量である。土の中のリン酸イオンの形態は、土壌溶液中に溶存するもの、溶解度の低いカルシウム塩、土の鉱物に表面錯体として吸着されているもの、有機化合物として存在するものなどである。植物は、根からプロトンや有機酸を分泌して、リン酸カルシウムを溶解したり、表面錯体として存在するリン酸イオンを脱着させたりしてリンを吸収している。そこで、可給態リンの測定法としては、このような過程を模倣するような方法が用いられている。たとえば、希薄な酸溶液、有機酸溶液、表面錯形成能がありリン酸イオンと競合するような化合物の溶液などによる抽出である。日本では、0.0005 mol/L の硫酸水溶液による抽出法が採用されることが多く、この表の可給態リン酸もその方法によって抽出されたものである。0.0005 mol/L の硫酸を用いる抽出法はトルオグ法とよばれている（10.13 参照）。表 13.6 および 13.7 における可給態リン酸量は P ではなく、いわゆるリンサン（P₂O₅）換算で示されている。

硝酸態窒素量は 50 mg/kg 以下が望ましいとされている。硝酸イオンは重要な植物養分であるので 50 mg/L 以下が好ましいというのはおかしい気もするが、これは作付け前の土の状態に関する推奨値であることを忘れてはいけない。硝酸態窒素含量がこの値よりもはるかに低ければ、次作のための施肥において残存する窒素を考慮する必要はないが、

この値を超えるようであれば、その存在を考慮して施肥設計しなければならない。硝酸イオンは畑土壌の土壌溶液中の主要陰イオンであり、土にはほとんど吸着されないため、土に含まれる硝酸イオン量が多いということは土壌溶液の電気伝導率が高くなり、塩類濃度障害の原因になる。

電気伝導率は、土壌に含まれる水溶性塩類量の尺度として測定される。日本では土：水比=1：5 の懸濁液で測定される。畑状態の含水比が 20% であれば、その畑の土壌溶液の電気伝導率は、測定された値の約 25 倍と推定される。土：水比=1：5 で測定された電気伝導率の値が 1.4 dS/m を超えると、作物によっては塩類障害が発生する。

有効根群域とは根が伸長できる範囲を意味し、通常の畑では作土層とほぼ同義語である。ち密度とは、土がどの程度締め固まっているかの度合い、という意味であるが、ここでは中山式硬度計という器具を用いて測定される値で表示されている。山中式硬度計とは、金属製の円錐が円筒容器に取り付けられ、内部から定められた強さのばねで押さえる仕組みの器具である（図 13.2 参照）。

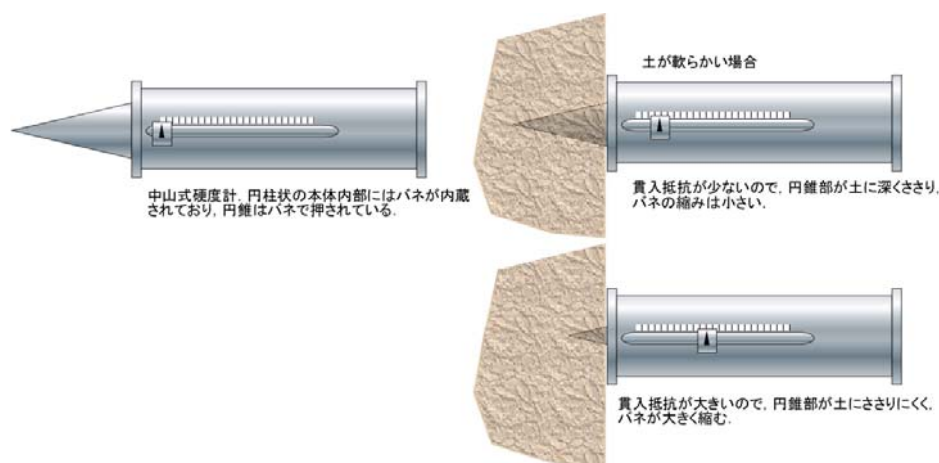


図 13.2 山中式硬度計。

調査用の試坑を掘り、その断面の土に円錐部分を貫入させるように押し付けると、土が緻密でない場合には容易に貫入するのでばねの縮みは少なく、土が緻密であればばねの縮みが大きくなる。円筒部に取り付けた指針と目盛によりばねの縮みが読み取れるようになっており、それを土のち密度と定義している。ち密度が 22 mm 以上では、植物根の伸長が阻害される。土のち密度が大きすぎる場合には、耕耘、有機物の施用などの対策が取られる。

13.5.2. 連作障害の回避

同じ作物を同じ畑で継続して栽培すると、連作障害とよばれる生育障害が発生することが多い。連作障害とは連作が原因と思われる、全般的な生育不良、微量元素の欠乏症、病害による根の障害など一連の障害をさす。連作障害の原因や発生機構については不明なことも多いが、次のような原因が考えられている。

- 1) 微量必須元素の欠乏
- 2) 土の酸性化
- 3) 透水性、通気性などの悪化
- 4) 有害な生理活性物質の集積
- 5) センチュウ、土壌細菌などによる病虫害

肥料や農薬などが利用できなかった時代には、連作障害を回避するためには連作そのものを回避するしかなかった。そのため、（特にヨーロッパでは）輪作という作付方式が行われてきた。コムギを作付した翌年は休閑（作付しないこと）する方式、秋まきコムギ→春まきオオムギ→休閑という体系等を経て18世紀にはイギリスでノーフォーク式輪作（4圃式輪作）という輪作体系が確立された。この体系では、秋まきコムギ→カブ→春まきコムギとクローバの混播→クローバの順に作付し、4年目のクローバは土に緑肥としてすきこんだ。マメ科植物であるクローバによる窒素固定のため、土の窒素含量を回復することができ、全量のすきこみにより有機物も供給することができた。類似の方式は、現在でも持続的な畑作のために有効である。しかし日本のような農家当たりの農地面積の小さいところでは体系的な輪作は定着していない。

現在、肥料や土壌改良剤の利用は難しくないので、微量元素の欠乏、土の酸性化、透水性・通気性の悪化などは、適切な土や植物体の分析が行われれば障害の原因にはならない。連作障害としてもっとも大きな問題になるのはセンチュウ、土壌細菌などによる病虫害である。土の生物の章で述べたように、植物根は様々な物質を分泌しており、それが土壌生物相に影響する。特定の植物を連作すると、その影響によって特定の微生物群が優勢になり、その中の病原性のものである病害が発生しやすくなると考えられる。この障害に対しては、臭化メチル（プロモタン）、クロルピクリン（トリクロロニトロメタン）等の燻蒸材による完全な殺虫、殺菌が行われてきた。しかし、有用な細菌まで死滅させるため、土の生物学的な緩衝能が低下するという問題がある。

効果的な燻蒸剤であった臭化メチルはモントリオール議定書によって原則生産禁止となり、クロルピクリンも使用者に対する毒性、土壌微生物生態系の大規模攪乱などが問題視されている。最近、ビニールハウスでは収穫後の土壌面をビニールシートで被覆して地温を60℃程度に上昇させることによる病原菌の殺菌法が試みられている。

13.5.3. 塩類集積の回避

土の表面からの水の蒸発量が浸透量よりも多いような地域（乾燥地域）では土の表面に塩類が集積する。塩類集積は、地下水面から毛管上昇してきた地下水が溶質を土に残して蒸発する。また乾燥地域の河川水は塩類濃度が高いことが多く、そのような河川水を灌漑水として用いる場合も、それに溶解していた塩類は表土に濃縮される。

乾燥地で灌漑農業を行うときには塩類の集積は原理的には不可避である。可能な対策としては、できるだけ塩濃度の低い灌漑水を利用し、可能蒸発量に見合った分だけの灌漑を行い、肥料としては塩化物塩はできるだけ避ける等に限られる。いったん、植物生育に不都合なほどの塩類が集積した場合には、多量の淡水で洗浄除去するか、表土を掘削除去する以外の対策はない。同じことは、台風に伴う高潮や津波により多量の海水が浸透した場合にもあてはまる。蒸発量に見合った分だけの灌漑を行う手法のひとつとして、点滴灌漑という方法が用いられる。これは、圃場に、作物の基部を通るように灌水チューブを配置し、基部に接する部分にあげた小さな穴から灌漑水を滴下する方法である。

塩類集積による土壌溶液の塩濃度の上昇よりもさらに深刻なのは、土の交換性陽イオンに占める交換性ナトリウムイオンの割合の増加である。乾燥地の河川水の中には溶存陽イオンに占めるナトリウムイオンの割合の高いものがある。このような河川水を灌漑水として継続的に利用すると、土の交換性陽イオンに占めるナトリウムイオンの割合が高くなる。この割合をパーセンテージで示したものを交換性ナトリウムパーセンテージ（ESP）とよぶ。一般にESPが40%を超えると土の粘土粒子が分散しやすくなる。分散した粘土粒子は灌漑水とともに下方に移動し、徐々に土の間隙を目詰まりさせる。その結果、土の透水性が極端に悪化する。ESPが同じでも、浸透水の塩類濃度が高いほど分散は抑制されるので、合衆国では灌漑水の陽イオン組成によって許容灌漑量が定められている。

日本の露地畑では塩類集積の恐れはない。しかしガラス温室や施設畑などの、降水が遮断されている環境下では

多量の施肥の結果土壌溶液の塩濃度が著しく上昇することがある。塩類集積の原因は化学肥料の多施用に求められることが多いが、堆肥の多施用が塩類集積を引き起こす事例もある。堆肥を多量に施用すると、無機化によって生成したアンモニウムイオンの硝酸化成にともなってプロトンが生成する。それによる土の酸性化を防止するために炭酸カルシウムなどのアルカリ資材も多用される。この結果、土壌溶液中の硝酸カルシウム濃度が上昇する。

塩類が集積した施設畑では、屋根を除去して休閑し、集積した塩類を降水によって溶脱させるという対策が取られたことがあった。しかし、これは地下水の硝酸汚染につながることで、施設が大型化、恒久化したため、屋根を除去すること自体が難しい、などの理由で次第に行われなくなっている。施設畑における塩類集積を回避するには、土壌分析に基づいた適正な施肥を行うことが最も合理的である。

13.5.4. 土壌浸食の回避

通常の畑作では、収穫後および作物体が小さいときには、土の表面は裸地に近い状態である。この時強い降雨があると、雨滴の衝撃によって土の集合体は破壊し、粘土やシルト粒子が表流水とともに流亡する。これによる土壌の損失を土壌浸食という。土壌浸食はその程度によって

- 1) シート (sheet) 浸食：土の表面が薄く、一様に浸食される。
- 2) リル浸食 (rill)：表流水が土地の低いところに集まって流れることにより細かい溝が形成される。リルは樹状のネットワークを形成することもある。
- 3) ガリ (gully) 浸食：リルが幅広く、深くなり、沢状に成長したものに区分される。

表流水が発生するような条件下ではある程度の土壌浸食は不可避である。乾燥地以外では植生の被覆のあるところでも年間 0.05 mm~0.5 mm 厚さの表土が浸食によって失われているという推定もある。畑では、少なくとも一定期間は畑の表面が裸地あるいはそれに近い状態になることは避けられない。また、耕うんによって、土壌の表面が膨軟になるため、浸食を受けやすくなる。土壌浸食を防ぐための対策としては、

- 1) 収穫残渣などによって常に土の表面を被覆して裸地期間をできるだけ短くする。
 - 2) 斜面を耕作する必要があるときには、棚田のようなテラスを作る。
 - 3) 等高線に沿った土塁や石垣を設置する。
 - 4) 出来てしまったガリには、内部に木柵や、石、コンクリートなどの堰を設置する。
- などがある。

すでに述べたように、土壌浸食の最大の誘因は、畑の表面が裸地状態になることと、耕耘によって土が膨軟になることである。特に後者の影響は大きい。これを避けるために不耕起栽培という栽培法が提案され、合衆国では普及しつつある。この栽培法の基本形は、収穫残渣は基本的に土の表面に残して被覆材とし、雨滴の衝撃を緩衝させ、播種や施肥のために最小限の耕起を行う、というものである (no till)。この基本形の他、畝立てするが、畝の全面は耕起せず中央部に溝を掘って播種する型 (ridge till)、播種前に全面を耕起するが、中耕などはせず、収穫残渣は土の表面に残す (mulch till) などの変形がある (Horowitz et al., 2010)。2009年には、オオムギ、トウモロコシ、ワタ、エンバク、ダイズ、コムギなどの主要穀物畑の約 20~50%で無耕起栽培が採用されていると推定されている (Horowitz et al., 2010)。

無耕起栽培が推進される理由は土壌浸食の低減だけではない。耕起回数を減らすことにより農機の運転を減らすことができ、燃料代の節約と二酸化炭素放出量の低減につながる。また、収穫残渣を土の表面に残すことにより土の炭素貯留量の増加が期待できる、などの理由もある。

13.6. 問題

- 1) ネットで「肥料取締法」を検索し、それに基づいて肥料とは何か、肥料はどのように分類されているか述べなさい。
- 2) 土壌分析の結果、硝酸態窒素含量が 100 mg/kg であった。この土の含水比が 20% のとき、土壌溶液中の硝酸イオン濃度を計算しなさい。
- 3) 土の陽イオン交換容量を 1 cmol_c/kg 増加させるためには、陽イオン交換容量 100 cmol_c/kg のスメクタイトを 1 ha あたりどれだけ投入する必要があるか計算しなさい。ただし、改良対象は厚さ 15 cm の作土であり、作土の乾燥密度は 1.0 g/cm³ とする。
- 4) 土壌分析の結果、硝酸態窒素含量が 100 mg/kg であった。作土の厚さが 15 cm、乾燥密度が 1.0 g/cm³ であるとき、この畑 1 ha の作土に存在する硝酸態窒素量を計算しなさい。またそれを表 11.5 の、平均的な施肥量と比較しなさい。
- 5) 有機物資材を多量に投入した結果、交換性陽イオンに占めるカリウムイオンの割合が高くなりすぎた。これを改善するためにはどのような方法があるか考えなさい。
- 6) 温室栽培における土壌の塩類集積の原因は化学肥料の多施用と考えられることが多い。しかし化学肥料を施用せず堆肥と炭酸カルシウムのみを多量に施用するような場合にも塩類集積が起こる。その機構を推定しなさい。
- 7) 1 年間に厚さ 0.5 mm の土壌がシート浸食された。1 ha の土地から浸食で失われる土の量を kg 単位で計算しなさい。ただし、表土の乾燥密度は 1.1 Mg m⁻³ とする。

13.7. 引用文献

- Horowitz, J., Ebel, R. and Ueda, K. (2010) "No-Till" farming is a growing practice. Economic Information Bulletin Number 70, USDA.
- 久馬一剛ら (1984) 新土壌学. 朝倉書店.
- Montgomery, D. R. (2007) Dirt: The Erosion of Civilizations. University of California Press. 邦訳: 土の文明史, 片岡夏実訳, 築地書館.
- 農林水産省 (2012) 都道府県施肥基準等.
http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/h_sehi_kizyun/
- 尾和尚人 (1996) 我が国の農作物の養分収支. 環境保全型農業研究連絡会ニュース 33, 428-445.
- 三枝正彦・木村真人 (編) (2005) 土壌サイエンス入門, 文英堂, 東京.
- 田中明 (1979) 作物栄養学からみた北海道畑作の問題点. 日本土壌肥料学会・昭和 54 年大会シンポジウム－北海道の畑作と土壌肥料, p. 87-130.

