

2. 我々の生活と土



おそらく、陸上植物は土から養分を吸収していることは誰でも知っている。しかし、具体的には養分というのは何の事であろうか。

ヒトは土から生まれて土に還る、といわれることがある。土から生まれるというのはともかく、土に還ることは納得する方が多いであろう。人に限らず、人も物もすべて土に還る。だからこそ、死体でも、ゴミでもとりあえず土に埋める。ところで、土に埋めたら何が起ころのであろうか。

2.1. 植物の培地としての土

2.1.1. 植物への養分の供給

土の重要な機能のひとつは植物への養分供給である。ここで養分というのは、植物の生育や植物体の維持に不可欠な成分のことである。なくても致命的ではないが、それがあると生育が促進される、というようなものも養分といえるが、通常養分といえば必須養分のことを意味する。

植物の場合、その正常な生育（栄養成長と生殖成長）には 17 種の必須元素が必要であることが知られている。ということで、植物の養分とは、

17 種の必須元素のいずれかを含み、植物が吸収できるような形態の物質

のことである。そして必須元素とは、次のような性質をもつ元素のことである（間藤ら, 2001）

1. **その元素が欠乏すると、種子→幼植物→成熟植物→種子形成、というライフサイクルが完結できない。またその元素の欠乏症状はその元素を与えることによるのみ回復する。**
2. **その元素を必要とする細胞成分や酵素が存在する。**
3. **その元素は、生育を損ねる物質の作用を抑えたり、特定の環境下でのみ生育を促進したりするものではない。**

植物の必須元素は 17 種である。それらは、炭素、水素、酸素、窒素、リン、カリウム、イオウ、カルシウム、マグネシウム、塩素、ホウ素、鉄、マンガン、銅、亜鉛、ニッケル、モリブデンである。もっともこれは現在の知見に基づくものであり、将来他の元素が実は必須元素だった、ということになる可能性もある。現に、ニッケルが必須元素であることが認識されたのは 1980 年代後半のことである。

上に述べた必須元素の定義にあるように、必須元素は植物体内での生命活動に直接かかわっている元素である。表 2.1 には必須元素の種類と、植物体内での機能、欠乏したときの典型的な症状をまとめて示した。

表 2.2 には、植物の必須元素の吸収形態と被子植物における平均的含量（Bowden, 1966）をまとめて示した。植物が正常に生育している場所では、その土は植物に対して、この表に示すような化学形態の元素を、毎年、少なくとも必要量以上供給していることを意味する。

炭素の大部分は、大気から二酸化炭素として吸収する。また水素は水として根から吸収する。そして酸素の大部分は酸素分子として大気から吸収する。そして上表で淡橙色に塗った元素、窒素からモリブデンまでの大部分は、ある特定の化学形態で、根から吸収される。植物の養分吸収を考えると、吸収されるとき化学形態を理解しておくことが重要である。たとえば窒素、大気中の約 80% は窒素分子からなるが、植物は分子状窒素を吸収して利用することはできない。植物が吸収利用する窒素化合物の大部分は、アンモニウムイオン (NH_4^+) または硝酸イオン (NO_3^-) である。植物はこのほかにもアミノ酸など多くの窒素化合物を根あるいは葉面から吸収する能力を持つことが知られている。しかし、自然界では葉面からアミノ酸が供給されることはなく、土壌溶液（土壌の間隙水のこと）のアミノ酸濃度も極めて低い。そのため、実質的には植物が吸収する窒素化合物は硝酸イオンとアンモニウムイオンに限られることになる。

表 2.1 植物の必須元素の種類と植物体内での機能

元素名	元素記号	機能, 欠乏症状など
炭素	C	植物体を構成する有機物の構成元素.
水素	H	植物体を構成する有機物の構成元素.
酸素	O	植物体を構成する有機物の構成元素.
窒素	N	植物体を構成する有機物の構成元素, 特にタンパク質, 核酸塩基. 欠乏すると下葉から黄化する.
リン	P	拡散やリン脂質, 糖リン酸などの構成元素
カリウム	K	体内濃度の最も高い陽イオン. 細胞の水ポテンシャル制御, カリウム依存性酵素の活性化. 欠乏すると, 下位葉先端の黄化, 白斑形成, 壊死など.
硫黄	S	システインやメチオニンなどの含硫アミノ酸の構成元素. 欠乏症は窒素欠乏症に似る.
カルシウム	Ca	細胞壁を構成するペクチンと固定して安定化させる. 欠乏症は, 上位葉の黄化, 白斑生成. トマトでは果実の壊死, 白菜の芯部葉の褐変など.
マグネシウム	Mg	クロロフィルの構成元素, 多くの酵素の補因子. 典型的な欠乏症は, 下位葉からはじまるクロロシス (葉脈は緑色を保ったまま, 葉脈間の部分が黄化する症状)
ホウ素	B	細胞壁のペクチン分子間を架橋する. 欠乏すると, 若い組織から節間の伸長が抑制される.
塩素	Cl	陰イオンとして浸透圧調整, 膜電位の安定に寄与. 欠乏すると, 葉面積減少, 葉の萎凋, 葉の縁辺部の巻き上がりなどが起こる.
鉄	Fe	生体の酸化還元反応にかかわる. ポルフィリン環と結合したヘム鉄として多くの酵素の補欠分子族として機能. 典型的な欠乏症状はクロロシス.
マンガン	Mn	タンパク質と結合し, 水の分解, 酸素の発生に関与. 土耕栽培では欠乏症は少なく, むしろ過剰症が問題となることが多い.
銅	Cu	タンパク質と結合して電子の授受反応に関与. 欠乏すると葉の先端が黄化.
亜鉛	Zn	多くの酵素に結合してその機能発現に関与. 欠乏症状は多様. 葉身や節間の伸長が抑制される症状や褐色の斑点形成がよく知られている.
ニッケル	Ni	ウレアーゼの活性中心に存在. 土耕栽培では欠乏することはほとんどない.
モリブデン	Mo	硝酸還元酵素に結合し, 硝酸還元反応に関与. 欠乏症状は窒素欠乏に似る.

リン酸はこの表に示した以外にも H_3PO_4 , PO_4^{3-} という形態を取りうるが, 植物が生育しうる土壌の土壌溶液の pH が 4~8 であることを考慮すると, 実質的に表に示したリン酸水素イオン, リン酸二水素イオンが主要な存在形態となる. ホウ酸, モリブデン酸についても同様である. 鉄の吸収形態としては Fe^{2+} と Fe^{3+} が掲げられているが, Fe^{3+} として根の表皮細胞に到達したものは, そこに存在する 3 価鉄還元酵素によって 2 価鉄に還元されて細胞質に取り込まれると考えられている.

このように, 根から吸収されるのは特定の形態で土壌溶液に溶存した元素に限られる. したがって, 土の, 植物に対する養分供給能を考えるとときには, 土の元素組成ではなく, 土壌溶液に表 2.2 のような形態で存在する元素の量およびそのような形態で速やかに土壌溶液に溶出するような形態で存在している元素の量に注目することが重要である. たとえばカリウムは大部分の土には 10 g/kg 程度含まれている. しかしそのうち, 土壌溶液に溶存するものや, 速やかに土壌溶液に溶出するカリウムの量はその 1%にも満たない. もっと極端なものは鉄である. 土は 10 g/kg~100 g/kg の鉄を含む. しかし土壌溶液中の鉄の濃度はしばしば検出できないほど低いし, 高い鉄含量にも関わらず植物は鉄欠乏に陥ることが珍しくない.

表 2.2 被子植物の平均必須元素含量, 主要な吸収形態.

元素名	元素記号	平均含量/mg kg ⁻¹	根からの吸収形態
炭素	C	454000	CO ₂ (葉から)
水素	H	55000	H ₂ O
酸素	O	410000	H ₂ O, O ₂ (葉から)
窒素	N	30000	NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻
リン	P	2300	H ₂ PO ₄ ⁻ , HPO ₄ ²⁻
カリウム	K	14000	K ⁺
硫黄	S	3400	SO ₄ ²⁻
カルシウム	Ca	18000	Ca ²⁺
マグネシウム	Mg	3200	Mg ²⁺
ホウ素	B	50	H ₃ BO ₃
塩素	Cl	2000	Cl ⁻
鉄	Fe	140	Fe ³⁺ , Fe ²⁺
マンガン	Mn	630	Mn ²⁺
銅	Cu	14	Cu ²⁺
亜鉛	Zn	160	Zn ²⁺
ニッケル	Ni	3	Ni ²⁺
モリブデン	Mo	0.9	MoO ₄ ²⁻

含有量は乾燥した植物体 1 kg あたりの含有量。

2.1.2. 水の供給

陸上植物の生育には大量の水が必要である。水は、光合成による有機物合成における原料のひとつ、という面もあるが、様々な機能性物質を溶解して機能させるための溶媒として細胞を満たすためにも必要である。また太陽光を受ける葉の温度上昇は、葉面の気孔からの大量の水の蒸発（蒸散）で奪われる気化熱によって抑制されている。植物生育に必要とされる水の大半は、植物体の冷却のための蒸散に使われる水である。

単位乾燥質量の植物体を生産するために必要な蒸散量の量比は蒸散係数、蒸散率などとよばれる。蒸散係数は植物の種類や、生育期間中の温度や湿度の推移によって異なり、おおよそ 100~1000 の間にあるとされている (Martin *et al.*, 1976)。日本で栽培されている主要な作物に対する測定値は日本の気候条件下では 100~300 程度である (塩谷・田中, 1977)。作物種よりもむしろ湿度の影響の方が大きい。蒸散係数が 100 であれば、乾物として 1 kg の植物体が生育するためには 100 kg の水が必要ということになる。

植物はこのように大量の水を土から得ている。日本は比較的雨が深い地域であり、1 mm 以上の降水のある日は全国平均で 110 日程度である。しかし一方で 20 日~30 日間無降水が続くこともそれほど珍しくない。このような場合でも草木が枯死してしまうことはない。これは土が蒸発に抗して大量の水を貯留しており、表層の水が減少したときには地下深くから表層に水を移動させる機能を持っているからである。

自然の生態系において、植物が正常に生育しているということは、その場所の土の間隙には十分な水が含まれており、その中にはすべての必須元素が、植物の生育期間全体にわたって、この表に示す濃度あるいはその 1/10 程度の濃度で溶存していることを意味している。養液栽培においては、植物の根は養液に浸されているのに対し、土の中の根は土の間隙に保持された比較的少量の間隙水と接しているだけである。しっかりと湿った土の場合、間隙水の量は土 1 L (10 cm×10 cm×10 cm の乱さない土) あたり 200 mL 程度である。つまり、単量の根が利用できる養液

の量は養液栽培の場合と比較するとはるかに少ない。単純に考えると植物の養分吸収による濃度の低下の割合は、土においてはるかに大きいはずである。しかも、日本のように年間 1000～2000 mm の降水がある地域では、土は頻繁に蒸留水で洗浄されているようなものである。しかし、植物が正常に生育しているという事実は、土はその間隙水の養分濃度を、生育期間全体にわたって少なくとも必要最低限の水準に維持することができることを示している。

そのようなことが起こりうるのは、植物養分は土の間隙水に溶存しているだけでなく固体である土粒子にも含まれてそれが徐々に放出されているからである。土粒子に存在する植物養分の形態や、それがどのような機構で土の間隙水に溶出してくるのかを理解することは、近代的な農業にとっては最重要問題のひとつであり、土壌学の研究の相当部分はこの問題の解決のためにあてられてきた。

2.2. 土木建築材料としての土

土は、建築物や土木構造物を建設するための地盤であると同時に、その材料でもある。図 2.1 は建設中の高速道路（東九州道）をそれと並行する県道から眺めた写真である。高速道路は一般道と同じ面での交叉を避けるため、一般道より高く作られることが多い。高架橋の上に道路が作られることもあるが、比較的平坦な場所では、台形に盛土し、それを締め固めて道路建設のための基礎とする。図 2.1 は大分県南部のある場所であるが、約 20 m ほど盛土され、その上に高速道路が建設されている。



図 2.1 盛り土によって作られた東九州道。

図 2.2 はある都市の郊外における市道の建設現場である。砂利と土によって盛土され、締め固めた上にアスファルト舗装の道路が建設される。道路の向こうに見える住宅地もまた盛土によって造成された土地である。土は岩石ほど強固ではないが、岩石よりも加工や運搬が容易である。なによりも、水分含量を調節すれば任意の形に成形できることは非常にありがたい点である。強度の確保に関しては、水分含量を調節して締め固めることによって、千年以上も風雨に耐える構造物を構築することができる。このことは日本各地にある大型の古墳をみれば明らかである。

土はまた、建築物の基礎でもある。大規模な高層建築は、適当な深さに岩盤がある場合には、それに達する基

礎杭を打ち、その上に建設される。しかし一般の住宅や小規模なビルは、地盤を少し掘り下げて、コンクリートと鉄筋で基礎を作り、その上に建設される。しかし岩盤が非常に深い場合には、土に打ち込んだ基礎杭の上に建設される。たとえば東京スカイツリーが立っているところでは岩盤が非常に深いところがあるので、約 50 m 深さまで基礎杭を入れ、その上に建設されている（図 2.3）。



図 2.2 盛土による郊外の市道の建設。奥に見える住宅地も盛土によって造成されたものである。

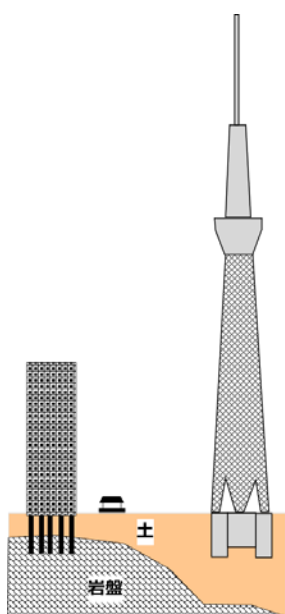


図 2.3 建築物の基礎としての土。

土は古くから建築材料としても使われてきた。図 2.4 はローマのネロ皇帝が築いたと言われているドムスアウレアとよばれる建造物の遺跡である。土（粘土）を焼いて作ったレンガを積みあげ、火山灰土と石灰で作ったセメントでレンガの間を充てんすることによって建造されている。



図 2.4 ローマの遺跡のレンガとセメント.

現代でも、レンガは土を加熱して焼結することによって製造されている。また、加熱せず天日によって乾燥した日干し煉瓦も、地域によっては建築材料として使われている。

2.3. 自然災害と土

土は、締め固めることにより強度を確保することができる。しかし、自然界の土は締め固められておらず、多量の降水や地震などによって自然災害を引き起こすことがある。自然災害とは、台風や集中豪雨などの気象現象や、火山の噴火や地震などの地質現象によって直接引き起こされる災害と、それらの現象によって誘起される様々な災害がある。この中で土と特に関係の深いものは、地すべりと土石流、地震によって引き起こされる液状化であろう。

地すべりは、斜面の土や岩塊が、斜面の地下に形成される円弧上のすべり面を境に下方に移動する現象である。移動の速度は年間数 mm から数十 mm 程度である。

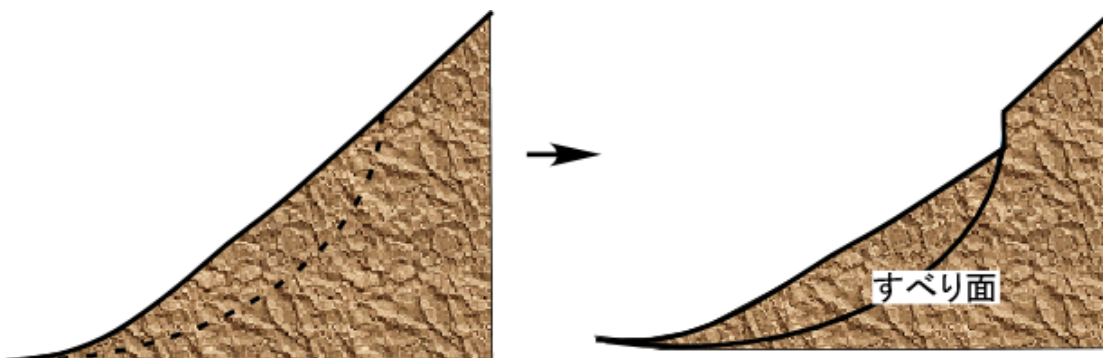


図 2.5 地滑り

土石流は溪流に堆積している土砂が、多量の降雨にともなう増水の結果液状化し、水と土粒子の混合した懸濁液が勢いよく流下する現象である。堆積している土砂としては、豪雨などによって崩壊した山腹の土、火山の噴火に伴う火砕流堆積物などがある。



図 2.6 土石流によってほとんど埋没した家屋。

2.4. 廃棄物処理と土

家庭で発生する野菜などの生ごみは庭に穴を掘って埋めておくと悪臭もなく1～2週間以内にはほとんど消失する。これは、直接的には土を棲家とする小動物や微生物の機能による。しかし、悪臭や汚水の発生もなく跡形もなく分解されてしまうのは、土の微粒子の間隙が小動物や微生物の棲家となるため、おびただしい数の生物を収容でき、分解産物の一部を吸着することができるという、土というシステムの総合的な働きによる。土の中では、動植物遺体を構成する有機物が短時間で分解されてしまうのはいうまでもないが、長期的には、動物の骨（安定なリン酸カルシウムからなる）までも、跡形もなく分解されてしまう。古い遺跡から発掘される人骨がまれなのはこのためである。

土には、動植物遺体だけではなく様々な産業廃棄物を分解したり変質させたりして、最終的には土に還すことが期待されている。図 2.7 は主としてシュレッダーダストを受け入れている産業廃棄物処分場の例である。シュレッダーダストとは、廃自動車や廃家電を粉砕し、有価物（主として金属）を回収した後に残る廃棄物である。この処分場では、受け入れたシュレッダーダストをある程度の厚さに充填しその上に土をかけるという方式をとっている。

図 2.8 は福岡県南部の山中の谷間に建設された廃棄物の最終処分場である。この処分場には主として都市ごみの焼却灰が持ち込まれている。処分場の底面はビニールシートが張られ、浸透水が地下に侵入しないようになっている。また処分場の下端にはコンクリートの擁壁が設置されており、ここに集まってきた浸透水は処理されて放水されている。

これらの廃棄物処分場では、埋め立てられた廃棄物や廃棄物からの浸出水は環境中に拡散しないように配慮されている。しかし、底面に敷かれたビニールシートやコンクリートの擁壁は永遠の耐久性があるわけではない。現在、処分場に埋め立てられている廃棄物は、いずれは安全な土になることが暗黙の裡に期待されている。しかしこれは科学的に証明されているわけではなく、単に我々が期待しているだけという面もある。



図 2.7 シュレッダーダストを受け入れている廃棄物処分場.

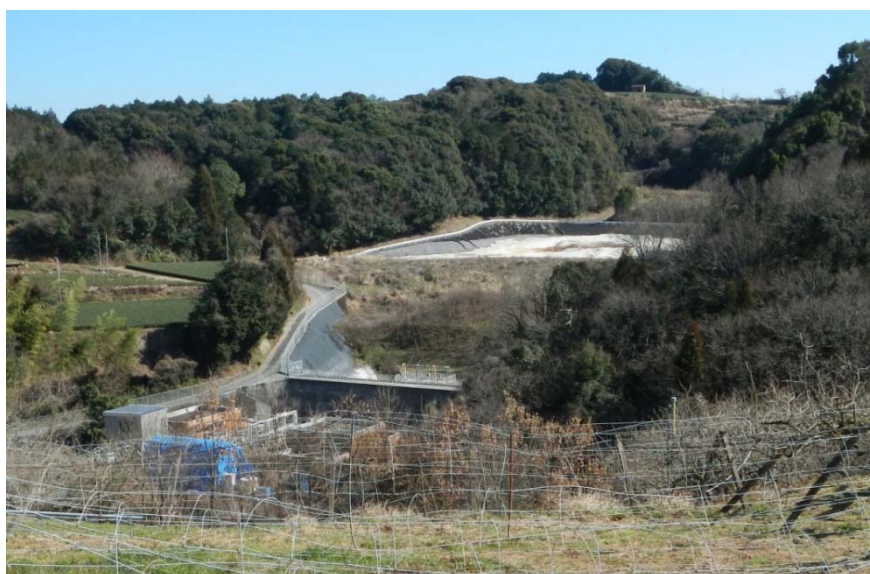


図 2.8 福岡県南部の、主として焼却灰を受け入れている廃棄物処分場の遠景.

2.5. 地球環境と土

土は地球温暖化、オゾン層破壊などの地球環境問題とも密接に関係している。現在、地球温暖化の主な原因と考えられているのは二酸化炭素などの、いわゆる地球温暖化ガスの濃度の増加である。二酸化炭素の発生源としてもっとも重要と考えられているのは、石油や石炭などの化石燃料の燃焼である。

一方、植物は光合成のため大気中の二酸化炭素を吸収するので、森林や草地は二酸化炭素濃度の減少に寄与するといわれることがある。しかし実際はそうに単純ではない。確かに植物は二酸化炭素を吸収するが、植物自体が生きていくために呼吸もしており、二酸化炭素の排出源でもある。また、1年生の草本植物は毎年植物体が枯死するし樹木は落葉・落枝を土に還元する。これらの植物体は土に住む動物や微生物に利用され、その過程で二酸化炭

素が発生する。したがって、土とその上の植生は、場合によっては二酸化炭素の正味の発生源にもなりうる。さらに、土の環境によっては、植物遺体が微生物によって利用される過程でメタンや一酸化二窒素などの、より地球温暖化効果の高いガスが発生することもある。

枯死した植物体や、落葉・落枝は土に住む動物や微生物によって利用される。このとき、植物体のすべてが利用されつくされることはなく、植物体を構成する有機物の一部は、比較的安定な有機物（土壌有機物とか腐植物質などとよばれる）に変化する。この土壌有機物（腐植物質）は、微生物に利用されにくいいため、比較的長時間土壌中に貯留されている（図 2.9）。表 2.3 は、地球上の主要な炭素の存在形態とその量をまとめたものである。土には、土壌有機物として 1580 Gt の炭素が存在する。この量は、大気中に二酸化炭素として存在する炭素と陸上生態系に植物を構成する各種有機化合物として存在する炭素の合計量よりも多い。

土に土壌有機物として貯留されている炭素の量を維持すること、さらにより安定化することは、地球温暖化のために決定的に重要である。

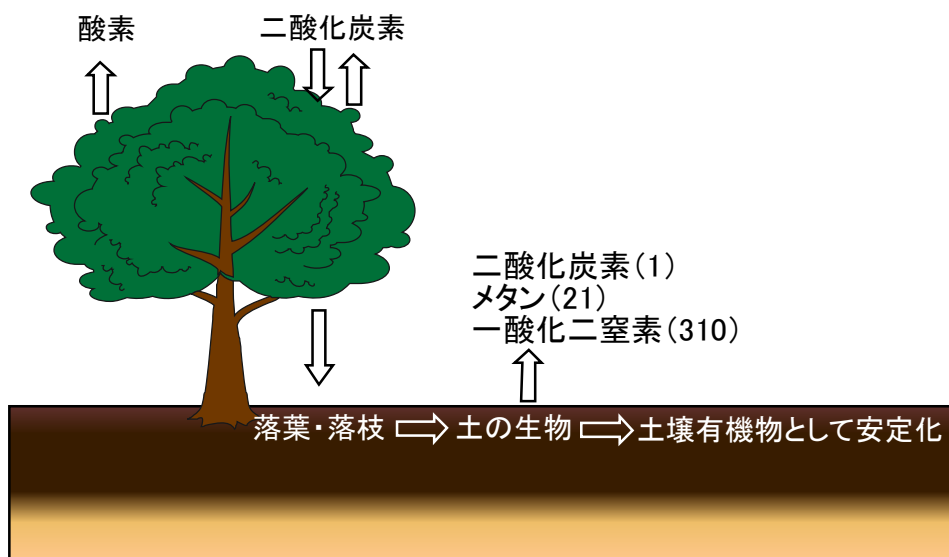


図 2.9 土からの地球温暖化ガスの発生や土による固定。土から発生するガス名の後の括弧の中は地球温暖化係数。

表 2.3 地球上における主要な炭素の形態およびその形態での存在量。

存在形態	存在量/Gt (= 10 ⁹ t)
大気中に二酸化炭素として	750
陸上生態系に植物を構成する有機化合物として	610
土壌有機物として	1580
海洋表層に溶存炭酸として	1,020
深海に溶存炭酸として	38,100
化石燃料として	4,000
地殻中に炭酸カルシウムなどの無機物として	65,500,000

土自身が密接にかかわる地球環境問題として土壌汚染がある。土壌汚染とは、土に有害物質が混入することである。日本では、特に重要な有害物質として 27 の物質または物質群が土壌環境基準において指定されている。表 2.4 はその抜粋である。この表の土壌溶出量基準というのは、

土 1 に対して純水 10 を添加して 6 時間振とうし、ろ過によって得たる液中の有害物質の濃度

に基づいて定められている。溶出濃度がこの表に示す濃度を超過した場合には、その土は汚染土と判定される。日本において、水への溶出が土壤汚染の判断基準の 1 つとされているのは、土が汚染されると、その土を浸透する雨水も汚染され、結果として地下水が汚染されることになるからである。

表 2.4 日本の土壤環境基準の抜粋

有害物質の種類	土壤環境基準 mg/L
テトラクロロエチレンなどの揮発性有機塩素化合物 10 物質	0.006~0.04
ベンゼン	0.01
カドミウムおよびその化合物	0.01
六価クロム化合物	0.05
シアン化合物	不検出
水銀及びその化合物	0.0005
アルキル水銀	不検出
セレンおよびその化合物	0.01
鉛及びその化合物	0.01
ヒ素およびその化合物	0.01
フッ素及びその化合物	0.8
ホウ素及びその化合物	1
ポリ塩化ビフェニル (PCB)	不検出
農薬 4 種	不検出~0.02

日本の年平均降水量は約 1700 mm である。市街地や工場などにおける、コンクリートやアスファルトで覆われていない地面では降水の 50%程度が地面に浸透すると推定されている。農地や原野では浸透割合は 80%程度である。ということは、市街地や工場では毎年 850 mm 程度、農地や原野では 1360 mm 程度の雨水が毎年地面に浸透することになる。もし土壤汚染物質が単に土に混入しているだけであれば、たちまち表土からは洗い流されてしまうはずである。しかし実際には土に入った汚染物質、特にカドミウムや鉛などの重金属類は、ほとんど下層には移動していないことが多い。これは、汚染物質が土の構成物質（特に微粒子成分）に強く吸着されることが多いからである。

土は大気や水と比較すると移動性に乏しい。しかし、毎年西日本で観測される黄砂現象からもわかるように、風によって相当量が運搬されている。日本上空に飛来する黄砂の量は年間 200~700 万トンと推定され、このうち 180 万トン程度が日本の国土に降下すると推定されている。さらに、黄砂とは言わないが、日本国内の土の微粒子も相当量が風によって別の地域に運搬され降下する。上に述べたように、土の汚染物質は土の微粒子成分に吸着保持されている。土が有害物質で汚染されている場合にはそこを発生源とする黄砂や風成塵は有害物質の運び手となる。

2.6. 問題

- 1) 炭素、水素、酸素以外の植物の必須元素をすべて挙げ、それらが植物根から吸収されときの化学形態（イオンの場合にはその価数も）を示しなさい。
- 2) ある農地で栽培した作物を地上部から根まで全部を収穫し、乾燥して計量したところ、収量は 1 ha あたり 15 t

であった。その作物の元素含量が表 2.2 のとおりであるとして、この作物が 1 ha の土地から吸収した元素（窒素～モリブデン）の量を計算しなさい。

- 3) 乱さない土 1 L に 200 mL の水が含まれているとき、 340 km^2 の土地（福岡市の面積に相当）の、地表から 1 m の土に含まれる水の量を計算しなさい。この水量を福岡市に水を供給している主要なダム（正確には利水容量）約 4 千 6 百万 m^3 と比較しなさい。
- 4) ★動物の死体を土に埋めておく最終的には骨まで消失する。遺跡から出土する骨が貴重であるのはこのためである。動物体がどのような物質からできているかを調べ、消失する過程でどのようなことが起こるのか考察しなさい。
- 5) 日本では、廃棄物処分場の建設は簡単ではない。その理由の 1 つは近隣地域の住民の賛同が得られないことである。もしあなたの住居の近くにこのような処分場が建設されることになった場合、あなたはどのように反応するか、またそれはどのような理由かを述べなさい。
- 6) ある地域で金属精錬工場からの煤塵によってカドミウム汚染されたある水田土は、乾土 1 kg あたり 7.5 mg のカドミウムを含んだ。この土 50 g に 500 mL の純水を加えて振とう、ろ過して得られたろ液中のカドミウム濃度は $4.5 \mu\text{g/L}$ であった。土に含まれる全カドミウムが溶出した場合に予想されるろ液中カドミウム濃度、およびこの土によるカドミウムの吸着割合を計算しなさい。
- 7) 日本の国土に 200 万トンの黄砂が降下した場合、 1 m^2 当たりの降下量を計算しなさい。国土面積は各自調べなさい。

★は難しい問題

2.7. 引用文献

Bowden, H. J. M. (1966) Trace Elements in Biochemistry. Academic Press, New York.

間藤徹・馬建鋒・藤原徹（編）（2001）植物栄養学，文英堂出版，東京。

Martin, J., Leonard, W., Stamp, D. (1976) Principles of Field Crop Production (Third edition).
Macmillan Publishing Co. Inc., New York.

塩谷未知・田中明（1977）蒸散係数の作物種間差。土肥誌 48, 402-405.