

## 4. 土の生物

---



土には様々な生物が住んでいる。ミミズをはじめとする小動物や、膨大な種類の微生物。植物の根も、見方によっては土に棲む生物とみなすこともできる。

種類や個体数は膨大であるが、土に占める割合は意外と小さい。しかし、生物活動は物理的、化学的に土の性質に大きな影響を持つ。それどころか地球大気の組成にも少なからず影響している。

## 4.1. 土に棲む生物の種類

### 4.1.1. 植物根

植物根、つまり植物の根は植物の器官のひとつであるので、これを土に棲む生物として挙げるのはちょっと変である。しかし、陸上植物の根の大部分は土の中にあり、地上部とは少し異なる活動パターンをもっている。しかもその量は、土に棲む他の生物の量よりもはるかに多いことも少なくない。そこで、この本ではあえて植物根を、土に棲む生物のひとつとして数え、しかもその筆頭にあげる。

図 4.1 はコムギとオウシュウアカマツの根系を示したものである。ここで根系とは植物の地下部全体を指す用語である。このコムギの根系は地表から 90 cm より浅いところに存在するが、その密度は表層 15 cm の部分が最も高い。それに対してこのオウシュウアカマツ（胸高直径 32 cm、樹齢 60 年）の根系は 2 m よりも深いところにも分布しているが、根の密度はやはり表層で高く、大部分の根は表層 30 cm より浅い土層に分布している。この図では定性的にしか判断できないが、一定の深さごとに根を掘り取り、その質量や長さを測定したデータからも、根の量は表層で多く、下層に行くにしたがって急減することが示されている。一般的に植物の根系は地表下 15 cm 程度の領域に密に分布し、それ以下の密度は低い。

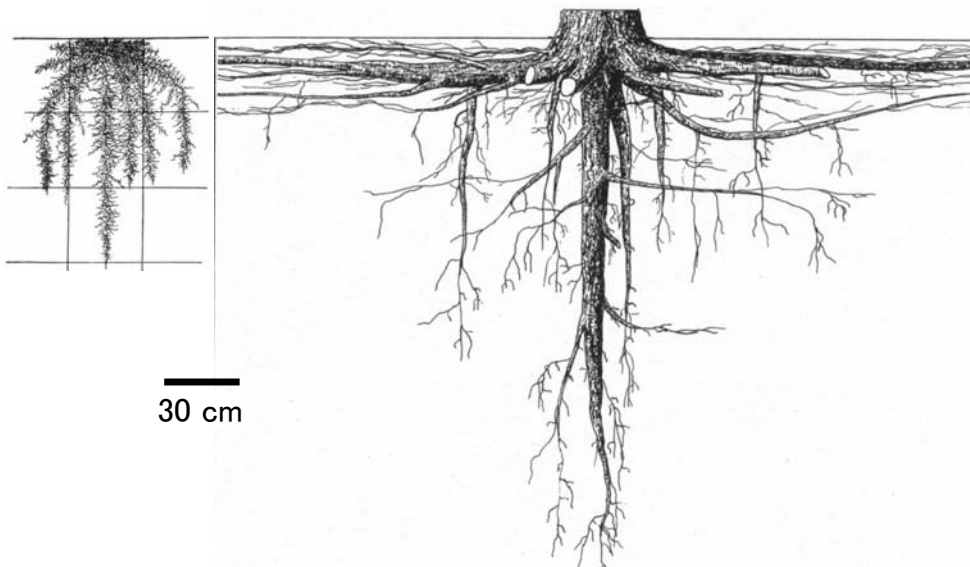


図 4.1 コムギ(左)とオウシュウアカマツ(右)の根系。コムギの図は Russel (1973)、オウシュウアカマツの図は 苧住著 最新樹木根系図説 (誠文堂新光社 2010 年刊) より許可を得て転載。

図 4.2 はコムギ根系の一部を接写したものである。左図は約 10 mm×5 mm の領域をみたもの、右図はさらに小さい領域を見たものである。左図を見ると根は結構密に分布しているのがわかる。右の図は 1 本の根を接写したものであるが、直径約 0.2 mm の根から放射状に根毛が伸びているのがわかる。写真の中央部にあるのは土粒子の集合体であり、根毛は集合体の間隙に侵入している。第 3 章で示したように、土には大小さまざまな孔隙が存在する。大きな孔隙からは水は重力によって速やかに排除されるが、小さな孔隙に保持された水は重力によって下方に移動しにくい。

図 4.2 の左図に示されるように、植物根の表面の大部分は多くは水で満たされていない大孔隙に面しているので、この部分から水を吸収することはできない。一方根毛の多くは水で満たされた小孔隙に侵入しており、そこから水や、水に溶存する養分を吸収している。このようにして、多様な孔隙のおかげで、植物根は酸素と水とを同時に取り入れることができる。

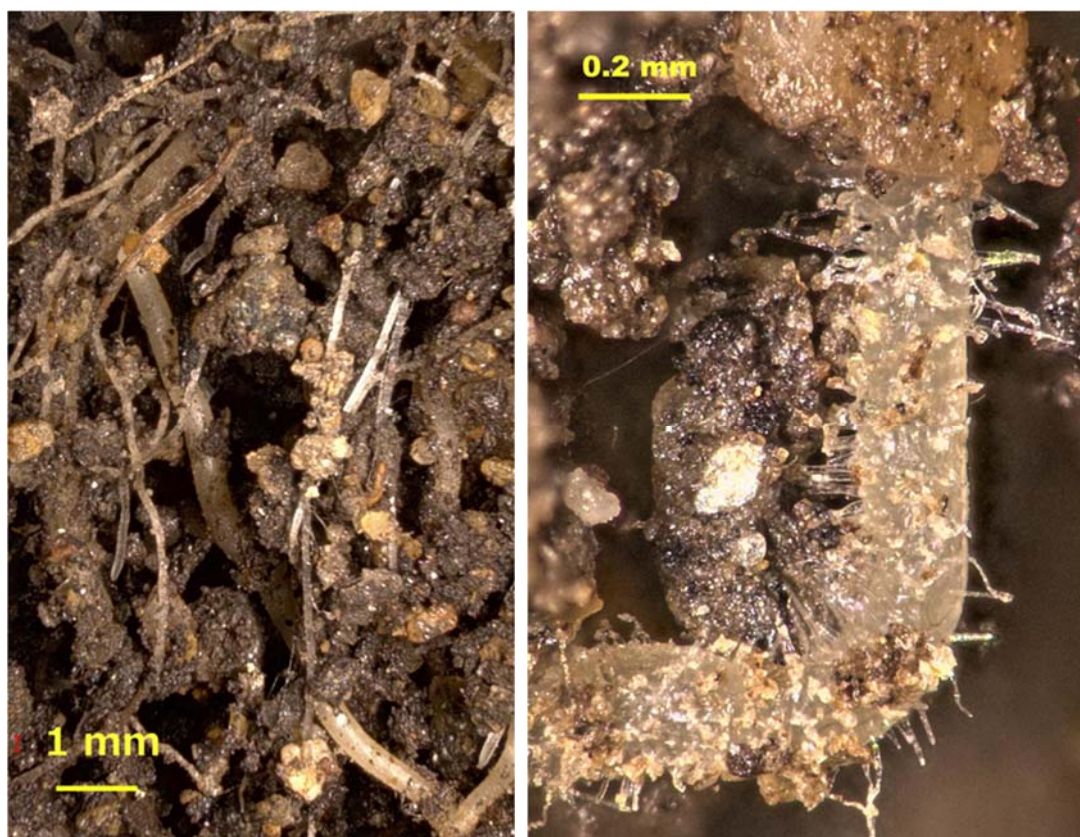


図 4.2 コムギ根系の接写写真。(株)キーエンスの協力により著者撮影。

農地においては植物根の量は作物の生育段階に応じて大きく変化するが、作物が成長した段階では非常に大きな量になる。表 4.1 はいくつかの作物や芝草の根と根毛の長さを測定し、その表面積を計算した結果の一覧である。この計測は直径 3 インチ (= 7.62 cm) , 深さ 6 インチ (= 15.24 cm) の円筒状に掘り取った土に含まれる根について行われたものであるが、この表では結果を面積 1 m<sup>2</sup> , 深さ 15 cm の表土あたりに換算して示している。たとえばエンバクの場合、1 m<sup>2</sup> の表土 (表層 15 cm) に含まれる根と根毛の長さはそれぞれ 9.87 km および 1700 km にも達する。ただし、大部分の根は細く、根毛は特に細いため (図 4.2 参照) , 土の体積に占める根の体積の割合 (体積分率) は 0.4% 程度である。

根の水分含量を 90% とすると、土に含まれる植物根の乾物量は、エンバク、ライムギ、ケンタッキーブルーグラスについてそれぞれ約 0.43 kg m<sup>-3</sup> , 0.86 kg m<sup>-3</sup> , 1.9 kg m<sup>-3</sup> となる。また土の乾燥密度を 1.0 Mg m<sup>-3</sup> とすると、根の乾物含量は 0.43 g kg<sup>-1</sup> , 0.86 g kg<sup>-1</sup> , 1.9 g kg<sup>-1</sup> となる。

**表 4.1 いくつかの作物の根，根毛の長さとその表面積（Dittmer, 1938）．面積 1 m<sup>2</sup>，深さ 15 cm の表土あたりの量に換算．**

作物	根		根毛		根の体積分率
	長さ/km	表面積/m <sup>2</sup>	長さ/km	表面積/m <sup>2</sup>	
エンバク	9.87	6.96	1700	74.2	0.43%
ライムギ	13.8	10.9	3470	164	0.86%
ケンタッキーブルーグラス	82.9	45.9	11100	338	1.90%

#### 4.1.2. 動物

土に住む動物（土壌動物）と言えませんが，モグラやミズが思い浮かぶ。しかし土に非常に多種類の動物が生息している。特に，微小なダニや原生動物などの種類は多く，ダニの場合にはいくらでも新種が見つかると言われているほどである。土にすむ動物には，一生のうち一定期間だけを土の中あるいは表面で生活するもの（たとえば甲虫などの幼虫）と，一生の全体を土の中あるいは表面で過ごすものがあるが，ここではそれら全部を土壌動物としてあつかう。

土壌動物の分類は，基本的には普通の動物の分類に従うべきである。しかし，説明の便宜のため，またそれらの土の中でのたらしきの対応から，通常の動物の分類と体の大きさによる分類を組み合わせられて分類されることが多い。通常，大型，中型，小型土壌動物に分類される。大型土壌動物は体長が約 2 mm より大きいものであり，肉眼でも割と簡単に識別できるものであり，ミズ，ムカデ，アリなどがこのグループに入る。中型土壌動物は体長が約 2 mm～0.2 mm 程度のものである。この中にはダニやトビムシなどが含まれる。そして小型土壌動物は体長が 0.2 mm 程度以下のものであり，アメーバや繊毛虫などが含まれる。その他，モグラのような大型土壌動物よりはるかに大きいものが，巨大土壌動物として区別されることもある。

表 4.2 は，Petersen and Luxton（1982）および金子（2007）による土壌動物の分類を抜粋して示したものである。大きさによる区分を重視しているため，環形動物門などは大型土壌動物区分と中型動物の区分の両方に現れている。環形動物門のミズ綱は大型ミズを含み，大型土壌動物に分類され，環形動物門ミズ綱のうちヒメミズ科は中型土壌動物に分類されているためである。大型土壌動物とは体長がおおよそ 2 mm 以上のものを，中型土壌動物とは体長が 2～5 mm 以下で体幅が 2 mm 以下のものを，小型土壌動物とは体長が 0.1 mm 程度以下のものをさす（金子，2007）。これらのうち，小型土壌動物の多くは土の液相部に，体を水に浸して生活しており，中型土壌動物は土の孔隙に生息，そして巨大土壌動物および大型土壌動物の多くは土に穿孔して生活している（金子，2007）。

土中の動物の生息密度は，植生，季節などによって大きく変動する。ただ，大きい動物は，より小さい動物を捕食することによって生活しているため，大きい動物の個体数が小さい動物の個体数を上回るというようなことは起こりにくい。図 4.3 には青木（1978）の示したデータに基づいて，いくつかの土壌動物の体長と生息密度との間の関係を示した。おおざっぱに言えば，小さな土壌動物ほど棲息密度が高く，大きなものは低い傾向がある。この図ではその相関はあまりはっきりしないが，Petersen and Luxton（1982）は体の大きさ（体重）と棲息密度との間に非常に高い負の相関があるというデータを示している。図 4.3 においては，生息密度は地面の面積 1 m<sup>2</sup> あたりの数値として示しているが，ダニやトビムシなどの土壌動物の大半は表層 5 cm の生息密度がそれ以下と比較すると桁違いに大きい。それゆえ，生息密度の値は実質的には土の表層 15 cm 程度のものであって差し支えない。ただし，地温の低下する冬季には 0～5 cm 層の生息密度がやや低下し，から 5～10 cm 層の密度が増加するという報告がある。

表 4.2 Petersen and Luxton (1982), 金子(2007)による土壌動物の分類.

体の大きさによる区分	分類	例
巨大土壌動物 (Soil Megafauna)	哺乳動物門	モグラ, トガリネズミ
大型土壌動物 (Soil Macrofauna)	環形動物門	
	ミミズ綱	ミミズ
	節足動物門	
	クモガタ綱	
	サソリ目	サソリ
	ザトウムシ目	ザトウムシ
	クモ目	クモ
	甲殻綱	
	ワラジムシ目	ワラジムシ
	ヨコビエ目	ヨコビエ
	多足類	
	ムカデ綱	ムカデ
	ヤスデ綱	ヤスデ
	昆虫綱	
	ハサミムシ目	ハサミムシ
	シロアリ目	シロアリ
	コウチュウ目	
	ハエ目	ハエ
	ハチ目	
	アリ科	アリ
中型土壌動物 (Soil Mesofauna)	環形動物門	
	ミミズ綱	
	ヒメミミズ科	ヒメミミズ
	クモガタ綱	
	カニムシ目	カニムシ
	ダニ目	ダニ
	多足類	
	エダヒゲムシ綱	エダヒゲムシ
	コムカデ綱	コムカデ
	昆虫綱	
	カマアシムシ目	カマアシムシ
	トビムシ目	トビムシ
	コムシ目	コムシ
小型土壌動物 (Soil Microfauna)	原生動物	繊毛虫, アメーバ, 有殻アメーバ
	線虫綱	センチュウ
	緩歩動物門	クマムシ



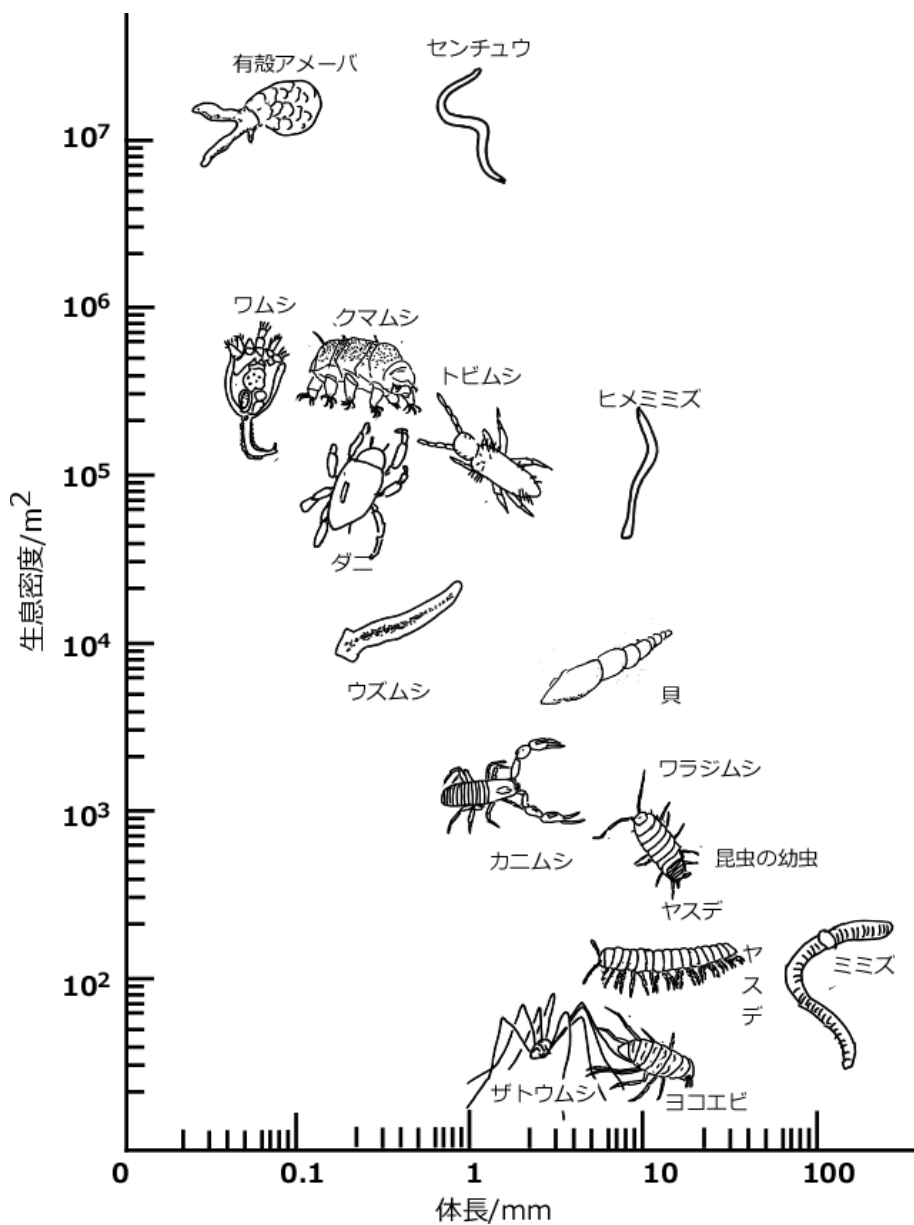


図 4.3 土壌動物の体の大きさと生息密度. 青木 (1978) に基づいて著者が作図. 縦軸の数値は 1 m<sup>2</sup> 当たりの生息密度.

図 4.3 によれば、たとえばササラダニの生息密度は 10<sup>5</sup> m<sup>-2</sup> 程度である。Petersen and Luxton (1982) によればササラダニの平均乾燥重は 5.3 · g であるので、1 m<sup>2</sup> あたりの乾燥重は 0.5 g 程度となる。ヤスデについては生息密度が 100 m<sup>-2</sup> 程度、平均乾燥重は 14 mg であるので 1 m<sup>2</sup> あたりの乾燥重は 1.4 g 程度となる。仮に、どの土壌動物の生息密度も 1 g m<sup>-2</sup> とし、40 種類の土壌動物が生息していたとすれば、その全乾燥重は 40 g m<sup>-2</sup> 程度である。土の乾燥密度を 1 Mg m<sup>-3</sup> とすれば、1 m<sup>2</sup>、表層 5 cm の土の乾燥質量は 50 kg であるので、土壌動物の占める割合 (質量比) は 0.08% 程度ということになる。

4.1.3. 微生物

微生物とは顕微鏡を用いなければ識別できないような微小な生物の総称であり、古細菌、真正細菌、カビ（糸状菌）がその代表である。真正細菌と古細菌は、分類学上は別のドメインに属する生物であるが、通常ひとまとめにして細菌（バクテリア）とよばれる。また土壌動物の項で述べたアメーバなどの原生動物も微生物に含まれることもある。ここでは細菌とカビを微生物として扱う。

細菌は単細胞で、細胞壁を持つが細胞核をもたない原核生物である。細菌の細胞の大きさは1～数 $\mu\text{m}$ で、球形ないし桿状であることが多い。細菌は細胞分裂によって増殖する。細菌の中には、細胞が糸状に伸長する放線菌とよばれるグループもある。放線菌はカビのように菌糸をつくり、先端に孢子を形成する。

土に棲む微生物の個体数を正確に数える標準法はまだ確立されていないが、土の直接顕微鏡観察による測定によれば、湿潤で植物生育が旺盛な農地の表層土中には1gあたり $10^{12}$ 個またはそれ以上の数の細菌と20cm程度のカビの菌糸が存在すると推定されている。比較的最近、群馬県の森林土を対象に行われた研究によれば、表層5cmの土の細菌数は $7.5 \times 10^9 \sim 15 \times 10^9 \text{ g}^{-1}$ 、カビの菌糸長は3～5 km  $\text{g}^{-1}$ であった（戸田ら、2009）。一般に細菌もカビも表土で多く、下層土に行くにしたがって急減する。微生物バイオマス炭素量は表土で200～1000 mg  $\text{kg}^{-1}$ 程度である。

### 生物体の炭素含量と生物体量

土壌微生物の量は、その生物体量（バイオマス量）や、それを構成する炭素の量（バイオマス炭素量）で表されることが多い。個体数を数えることが難しいことと、細菌とカビのように1個体の大きさが異なるものをこみにして個体数で表しても意味がないからである。生物体の炭素含量は乾物あたりで、微生物で500 g  $\text{kg}^{-1}$ 、植物で450 g  $\text{kg}^{-1}$ 、動物で470 g  $\text{kg}^{-1}$ 程度とされている。いずれも500 g  $\text{kg}^{-1}$ に近い。また水分含量は微生物で650～750 g  $\text{kg}^{-1}$ である。これらの数値から、微生物の乾燥重は微生物バイオマス炭素量を2倍すれば求めることができ、さらにそれを3～4倍したものが新鮮微生物重となる。

土壌微生物は古くから、土における有機物（生物遺体）の分解に非常に大きな役割を果たしていると考えられており、種類や量について多くの研究がされている。しかし現在でも全貌は明らかにされたとはいえない。まず微生物は小さく、土粒子の間隙に生息するため、それを直接正確に数えることが非常に難しい。また数えることができたとしても、顕微鏡下での形態のみからその種類を同定することが難しいなどの問題がある。現在微生物の種類や数量の推定には以下のような方法が用いられている。

#### 1) 直接検鏡法

蛍光色素で染色して蛍光顕微鏡で直接観察する。死菌と生菌を区別して計測することができる。いうまでもなく、この方法で測定できるのは個体数である。図4.4には植物根およびその近傍に生息する細菌を蛍光色素で染色して蛍光顕微鏡で観察した写真を示す。

#### 2) 培養法

■ 希釈平板法：栄養分を含んだ寒天のプレート上に希釈した土の懸濁液や土に水を加えて振とうすることによって得た抽出液を薄く広げて一定時間培養する。微生物は分裂して肉眼でも観察できるコロニーをつくるので、コロニー数を計測することによりプレート上に広げた懸濁液や抽出液中にいた微生物個体数を知ることができる。

■ 最確値法（希釈頻度法）：土の懸濁液を段階的に希釈し、一定量を培地を含む複数の容器に入れて培養する。希釈度が高くなると、微生物の生育が認められる容器（陽性）と認められない容器（陰性）が出てくる。微生物が容器に入る確率はポアソン分布に従うので、いくつかの希釈段階における陽性容器の割合から微生物

個体数を推定できる。

### 3) 生化学法

■ クロロホルム燻蒸法：土試料を密閉容器に入れクロロホルム（トリクロロメタン）蒸気を流通させて（1 日程度）微生物を死滅させ、菌体を自己溶解させる。燻蒸土に  $0.5 \text{ mol L}^{-1}$  硫酸カリウム水溶液を加えて溶解成分を抽出し定量する。同じ処理を非燻蒸土についても行い、燻蒸土と非燻蒸土の差を微生物由来成分とする。通常、炭素、窒素、リンなどが定量される。定量分量に経験定数を乗じて微生物量とする。この方法で測定されるのは菌体数ではなく、微生物体を構成していた炭素等の量である。この炭素量をバイオマス炭素量という。

■ ATP 法：土試料に、界面活性剤などの抽出材を加えて音波処理によって菌体を破碎して ATP（アデノシン三リン酸）を抽出して定量する。抽出量に経験定数を乗じて微生物バイオマス量を推定する。

### 4) 分子生物学的方法

土試料に酵素や界面活性剤などを添加して微生物菌体を化学的に破壊したり、ガラスビーズを加えて強力で振とうすることにより機械的に破碎して微生物から DNA を溶出させ、PCR 法による増幅と電気泳動による遺伝子解析を行う。いったん微生物を分離したのち、DNA を回収する方法もある。この方法は、微生物量の定量というより微生物の種類分析に有用である。

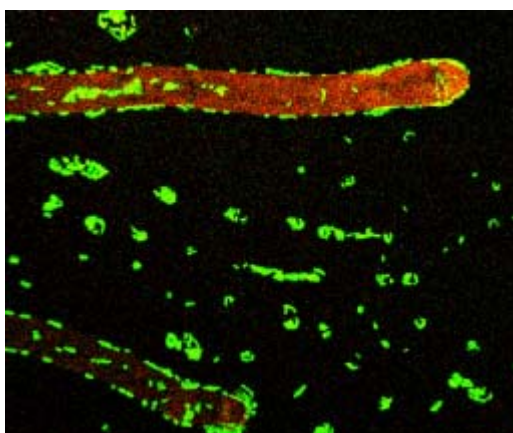


図 4.4 根の近傍の微生物の蛍光顕微鏡写真の例（境雅夫氏提供）。

これらの方法のうち、直接検鏡法と培養法では微生物の個体数が測定され、そのほかの方法（DNA 分析以外の方法）で推定されるのはバイオマス量であるので、すべての結果を直接比較することはできない。しかし、細菌 1 個体の平均炭素含量や単位長さのカビの平均炭素含量の値を用いて直接検鏡法や培養法によって得られた結果をバイオマス炭素量に換算すれば相互比較が可能である。そのような比較（木村ら，1994）によれば、ある農地土壌におけるバイオマス炭素量の推定値として、

希釈平板法：	$160 \text{ mg kg}^{-1}$
直接検鏡法：	$778 \text{ mg kg}^{-1}$
クロロホルム燻蒸法：	$605 \text{ mg kg}^{-1}$
ATP 法	$733 \text{ mg kg}^{-1}$

という値が報告されている。この結果からわかるように、培養法（希釈平板法）が他の方法と比較して著しく低い推定値を与えている。この傾向は他の多くの土においても認められている。このような結果から、土壌微生物の個体数を測定する方法としては、面倒で経験を必要とする方法ではあるが直接検鏡法が優れていると考えられ、バイオマス量の測



定法としてはクロロホルム燻蒸法が優れていると考えられている。

培養法による菌体数の測定値が低いのは、すべての土壤生物の生育に適した培地がないこと、土壤微生物の大部分は増殖が非常に遅かったり、生育に最適な条件が与えられてもごく一部しか増殖を開始しない特性を持ったりする、などの理由がある。土壤微生物の大部分は難培養性であり、これまでに単離して培養されているのは全土壤微生物の 1/100 程度にすぎないのではないかという推定もある。

## 4.2. 微生物の棲家としての土

### 4.2.1. 生物が生息できる大きささまざまな間隙

土粒子の主成分は大きささまざまな大きさで様々な形状の鉱物であり、それに植物遺体や腐植物質などの有機物が混ざっている。土粒子間の間隙の半分程度は水（土壤水、土壤溶液）で満たされており、残りには空気が入っている。土粒子の大きさは大きいものは直径数センチまたはそれ以上、小さいものは数 nm である。土に多種多様な生物（特に微小生物）が生息できる第一の理由は、土が大きささまざまな粒子から構成されており、その間隙に多くの生物を収容できるからである。また、多くの土壤動物は土に穴を穿って、自らの居住空間を作り出している。このようなことが可能なのは、土が土壤動物の大きさよりもはるかに小さい粒子から構成されているからである。

一般に、粒子がランダムに集合する場合、粒子間の間隙の大きさは粒子の大きさと同じくらいのオーダーになる。粒径 1 mm 程度の砂粒子が集合すればその間隙の大きさは 1 mm 前後であり、粒径 0.1  $\mu\text{m}$  の粘土粒子が集合すればその間隙は 0.1 mm 前後である。しかし土の場合には、微細粒子が集合体を形成することにより、構成粒子の大きさよりも何桁も大きな間隙が形成されていることが多い。この集合体は団粒とよばれる。粒子同士を接着しているのは、植物根や微生物が分泌した有機物、腐植物質、二次鉱物の超微粒子などである。

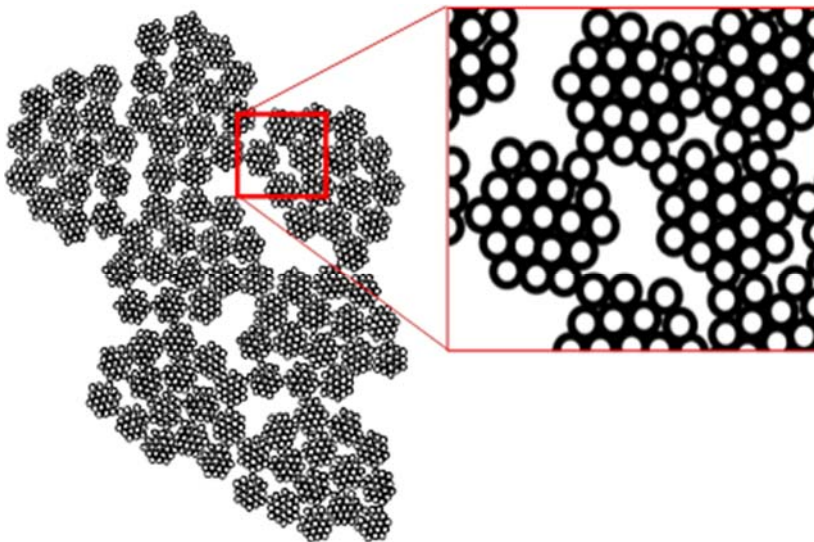


図 4.5 土粒子の集合体化（団粒化）によって作られる階層的な間隙構造の模式図。

図 4.5 は、微粒子の集合によって形成された団粒の模式図である。微粒子が集合して 1 次団粒が形成されると、一次団粒間にはその粒子の大きさよりもはるかに大きな間隙が形成される。さらに 1 次団粒が集合して 2 次団粒が形成されると、二次団粒間にはさらに大きな間隙が形成される。図 4.6 は実際の土の中の団粒の構造を示したものであ

る。この写真でははっきり識別できないくらい小さな土粒子が集合して細菌と同じくらいの大きさの一次団粒が形成され、一次団粒の集合によって 2 次団粒が形成されていることがわかる。1 次団粒の内部の間隙の大きさは nm のオーダーであるのに対し、一次団粒や二次団粒の間隙の大きさは  $\mu\text{m}$  のオーダーとなっており、実に 3 桁の違いがある。肥沃な農地の表土では肉眼で mm オーダーの団粒を見ることができるがこれは高次の団粒であり、その 1 粒子のなかには階層的な孔隙構造が内包されているのである。もちろん、どの土でも 1 次団粒や 2 次団粒の大きさが図 4.6 に示すように小さいというわけではない。

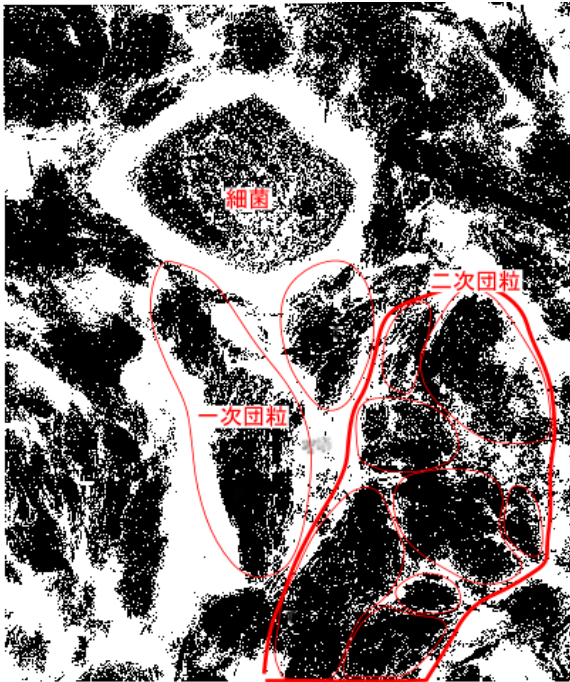


図 4.6 土の微細な団粒の構造を示す電子顕微鏡写真。写真の横幅は約  $5 \mu\text{m}$ 。土に樹脂を浸透させて固化し、固化体をダイヤモンドナイフで削って作成した超薄切片を透過電子顕微鏡で観察した写真 ( )。

#### 4.2.2. 土の中の環境の多様性と穏やかさ

土が微粒子、超微粒子を含み、図 4.6 に示すような階層的な団粒構造をもつため、微小空間内に極端に異なった環境が共存しうる。3 章で述べたように、植物根や土壌生物の呼吸のため、土壌空気の酸素濃度は大気よりも低い。通常測定されるのは土壌空気の平均組成である。微視的にみると、場合によっては図 4.6 に示すような 1 次団粒や 2 次団粒の内部はほとんど無酸素状態であることもある。細菌の中には、分子状酸素のある条件では生息できない種類のものもある（偏性嫌気性菌）。しかし多くの土の中には、酸素が豊富な環境を好む菌（好気性菌）とともに偏性嫌気性菌が共存している（増殖しているわけではなく、芽胞とよばれる耐性細胞の形で休眠していることが多い）。このことひとつをとっても土の中の環境がいかに多様であるかがわかるであろう。

土に多様な生物が生息できる理由として、土の内部の環境変化（特に温度、水分条件）が地表面あるいは大気中よりも穏やかであることもあげられる。その一例として、図 4.7 には、八ヶ岳連峰稲子岳における、土壌温度、水分含量（体積含水率）、降水量の年間変化の観測例（飯島・篠田、2003）を示している。地表面の温度は日変動も大きく、季節変化に伴って大きく変化している。標高 2230 m の高山であるため最高気温は低いものの、それでも夏には  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  を超え、冬季には氷点下になっている。しかし地表から 50 cm 以深では、温度の日変動はほとん

どなくなり、年間の温度変化も地表よりもはるかに小さくなっている。地表下 10 cm でもその変動は小さく抑えられており、冬季でも氷点下にはなっていない。また、土壌の体積含水率は、20 mm を超える降雨の後では 15% 程度まで上昇するもののすぐに元に戻り、年間を通じて 12~13% 程度に保たれている。

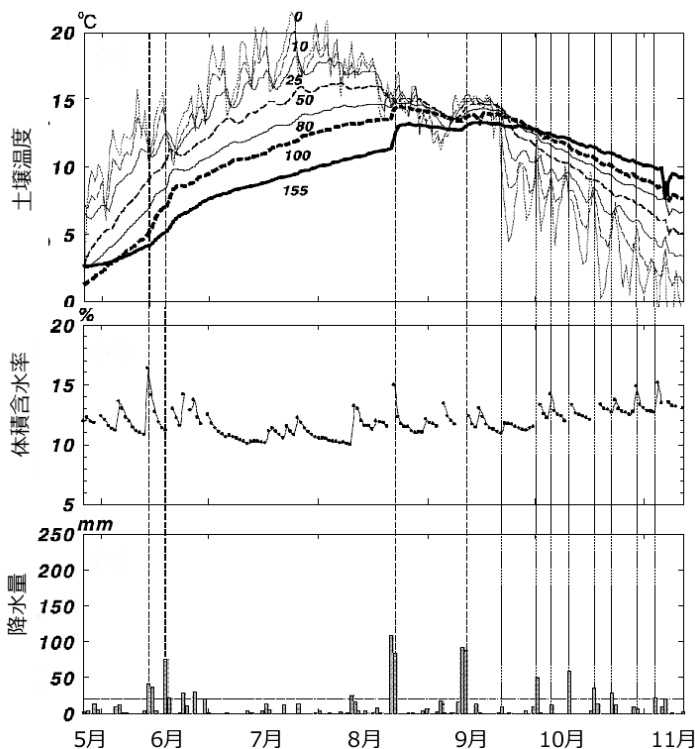


図 4.7 ハヶ岳連峰稲子岳における、土壌温度、土の含水比と降水量の観測データ（飯島・篠田，2003）の抜粋。土壌温度中のプロットに示した数値は深さ。0 は地表面温度。

気温の変動が土中で緩衝されるのは、土粒子と間隙水の比熱が大気よりもはるかに大きいことと、土が間隙だらけであり土粒子同士が密に接触していないために土の熱伝導率が小さいためである。また水分含量変化が小さいのは、土の間隙が大小さまざまであるため、降雨時に土に侵入してきた水のうち、大間隙中の水は重力によって速やかに排水されて水分含量がすぐに低下すること。それに対して微細間隙中の水は重力に抗して保持され、蒸発もしにくいからである。

温度や水分含量の恒常性という点からは、土の深部の方が生物の生育に適しているといえる。しかし、土壌生物のエネルギー源となる有機物は地表のみから（主として落葉・落枝、植物根などとして）供給されること、深いところでは酸素濃度が低下するため、土壌動物や多くの好気性微生物のように酸素呼吸する生物にとっては土の深部の環境はその生存に都合がいいとは言えない。

### 4.3. 土壌生物の活動

#### 4.3.1. 生きているということ

生物は、外部から様々な物質やエネルギーを取り込み、それらを利用して自分の体を作ると同時に自分自身の複

製（全く同じものとはかぎらないが）を作り出している。生きていくための様々な反応の大半は細胞の中で行われているが、細胞の外の世界と物質やエネルギーのやり取りをしている。生きていくことに伴う細胞への物質の出入りや形態変化を模式的にまとめたのが 図 4.8 である。

生物の細胞は、細胞外から様々な物質（いわゆる養分）を取り込む。その中には有機化合物も無機化合物もあるが、生物によっては無機化合物だけを取り込むものもある。取り込まれたものの一部は細胞内で化学エネルギー生産のために用いられる。このエネルギーを利用し、取り込んだ物質を化学変化させて細胞構成物質が合成される。そして合成されたものを使って細胞が複製されたり、修復されたりする。生物の中には、細胞構成物質の一部を合成するためのエネルギーとして光エネルギーを利用するものもある（光合成生物）。図 4.8 は 1 つの細胞を表しているが、これは細菌のような単細胞の生物にだけあてはまるといわけではなく、すべての生物の細胞にあてはまる。

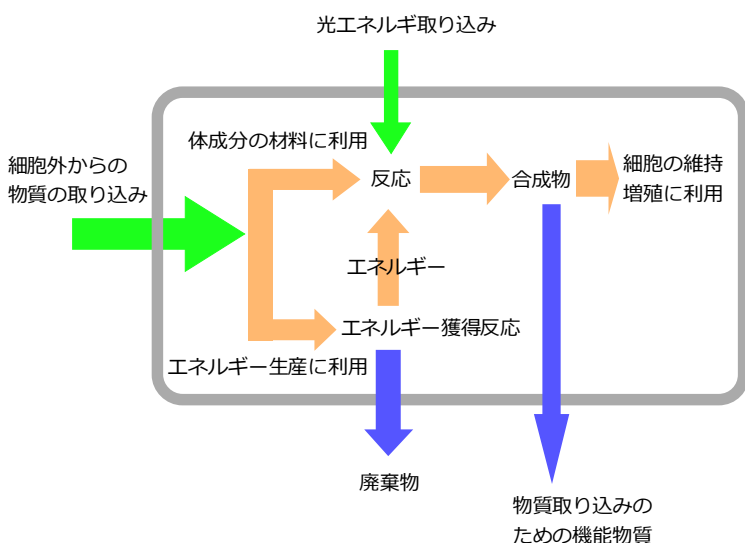


図 4.8 生きている細胞の内外で進行する諸プロセスの模式図。

エネルギーの生産過程や細胞構成物質の合成過程では、細胞構築に不要なものも生産されるが、これらは廃棄物として細胞外に排出される。たとえば、我々は、体外から取り込んだ炭水化物と酸素を反応させてエネルギーを獲得しているが、この過程で発生する二酸化炭素は廃棄物として体外に排出される。生物、特に微生物のエネルギー獲得反応は多様であり、それに応じて様々な物質が廃棄物として体外（細胞外）に排出される。

生物はまた、細胞内への物質の取り込みのため、細胞外に様々な機能性物質を分泌する。その代表格は各種酵素である。細胞外に出された酵素は、たとえば多糖類の加水分解の触媒として作用し、単糖類が生成される。低分子の単糖は細胞に取り込まれて利用される。クエン酸やリンゴ酸などの有機酸が分泌されることもある。これらの有機酸は鉱物を溶解したり、生物に不都合なアルミニウムイオンなどと結合してその害作用を抑制したりする。

#### 4.3.2. 植物根の生活

植物は光合成を行う生物の代表であるが、その器官のひとつである植物根は（光の当たらない土中に存在するので）ほとんど光合成を行っていない。植物根の細胞は、植物の地上部で二酸化炭素から合成された有機物を受け取り、

土壌空気から取り入れた酸素によって酸化することによって生活している。この意味では植物根は、多くの（光合成をしない）土壌微生物と似たような性格を持っている。

植物の器官としての植物根はただ生きているだけではなく、植物の地上部が必要とする水や無機養分を土から取り入れ、自らも利用し、残りは地上部に輸送している。この役割を果たすために、植物根の表皮細胞の一部は毛状に変形している。これは根毛とよばれる。根毛は土の微細間隙に保持された間隙水から水およびそれに溶存する必須元素を吸収している。植物は生育のために、外部から有機物を取り入れる必要はない。2章で述べたように、根から吸収するのは水と、窒素やリンをはじめとする14種の必須元素である。

水は植物の表皮細胞の細胞膜表面にある水チャネルとよばれるたんぱく質でできた分子装置から取り込まれる。水チャネルはアクアポリンとよばれる。水チャネルの役割は、それを開閉することによって水の透過性を調節することである。水が土から細胞へ移動するか、細胞から土の方へ出ていくかはあくまでも内外の水の化学ポテンシャルの差によって決まる。土が十分に間隙水を含み、その間隙水の塩濃度が低いときには、間隙水の化学ポテンシャルが細胞内の水の化学ポテンシャルよりも大きく、水は土から細胞内へ移動する。水チャネルは必要に応じてその透過性を調節する。もし、土の水分含量が低い上に塩濃度が高く、間隙水の化学ポテンシャルが細胞内の水の化学ポテンシャルよりも低い場合には、細胞内から土へと水が吸い出される。この場合、水チャネルは閉じられて水移動をできるだけ抑制し、その間に細胞の溶質濃度を高めるなどの適応が行われる。水だけでなく、カルシウムイオンなどの多量必須元素に対してもチャネルが見いだされている。

表皮細胞の細胞膜表面にはまたトランスポーターとよばれる分子装置も存在する。トランスポーターもチャネルと同様物質輸送にかかわる装置であるが、チャネルと異なり、化学ポテンシャルの勾配に逆らってイオンや分子を輸送することができる。そのためにはエネルギーが必要であるが、このエネルギーは輸送とカップリングした化学反応によって供給される。アンモニウムイオン、硝酸イオン、カリウムイオン、ホウ酸、ケイ酸などの多くの必須養分に選択的なトランスポーターが発見されその構造や作動様式が明らかにされつつある。

チャネルは、細胞膜上に存在する蛋白質でできた分子装置であり、細胞膜の透過性を制御する。物質は、細胞内外の化学ポテンシャル勾配に沿って移動する。物質ごとにチャネルがある。水チャネルはアクアポリンとよばれる。

トランスポーターも細胞膜上に存在するたんぱく質でできた分子装置である。トランスポーターはエネルギーを使い、化学ポテンシャル勾配に逆らって物質を輸送することができる。物質の種類ごとに多くのトランスポーターが見いだされている。イオン輸送の場合、イオンと同時にプロトンの出し入れによって細胞内外の電気的中性が保たれる。

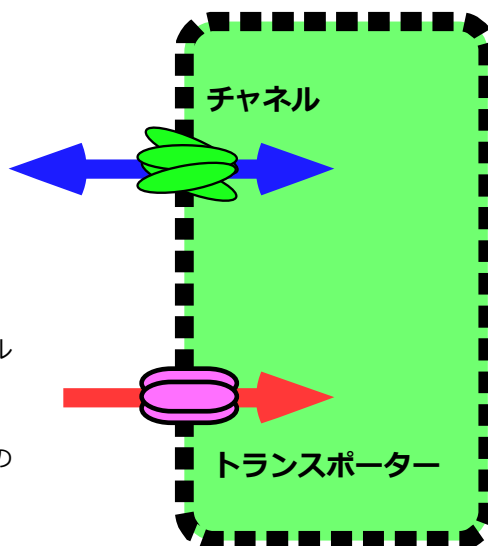


図 4.9 細胞表面のチャネルとトランスポーター

根から吸収される物質ごとにチャネルやトランスポーターがあると考えられている。つまり、各チャネルやトランスポーターは特定の物質に選択的である。ただし、この選択性は完全ではなく、カリウムイオントランスポーターを通じてセシウムイ



オンが取り込まれることもある。いずれにせよ、植物根表面から取り込まれる物質は、それぞれ別々のチャネルやトランスポーターを通過する。このため、植物の養分吸収は、土壤溶液がそのまま細胞内に吸引されるというような単純なものではない。水チャネルから水が吸収されると、土から植物へ向かう水の移流が生ずる。土壤溶液に溶存する養分はその水の流れに乗って植物根表面に達するが、あまり多量に必要とされない養分は、その養分に対応するチャネルが閉じぎみに制御されるため細胞内への移動が抑制される。この結果、根の近傍での濃度が土壤溶液中の濃度よりも高くなることがある。一方、土壤溶液中濃度が低いにも関わらず多量に必要とされるような養分、たとえばリン酸イオンやカリウムイオンでは、トランスポーターの働きによって積極的に細胞内に取り込まれる。その結果、根の近傍の濃度はさらに低下することになる。

根は土から養分を吸収するだけでなく、土に様々なものを放出している。まず、多年生の植物であっても根は更新されており、古い根は枯死して土壤生物に利用される。また、生きている根の先端部からは多糖類等が分泌されている。これは吸水して根端を取り巻くゲル状物質となる。これはムシゲルとよばれ、固い土粒子との接触を緩衝する役割があると考えられている。このほか、根からは各種の有機酸がかなり多量に分泌されており、土粒子に強く吸着されたリンなどの必須元素を溶出させたり、アルミニウムなどの植物にとって毒性のあるイオンと結合して無害化するなどの機能を果たしている。これらの有機化合物は、土壤微生物にとっては貴重な炭素源である。

このように植物根は土の生物にとっては貴重な有機化合物の供給者として機能しており、根の周りには根から離れた部分とは異なる生態系が構成されている。この部分は根圏 (rhizosphere) とよばれる。

#### 4.3.3. 土壤動物の生活

土壤動物は例外なく炭素源として有機物を取り入れ、取り入れた有機物の一部（主として糖類）を、酸素を使って酸化することによってエネルギーを獲得している。土壤動物は(陸上動物も同じであるが)、有機物を取り入れるといっても、特定の化合物をとりいれているというわけではなく、何らかの生物（生きているものも死んでいるものもある）の生物体をまるごとあるいはその一部を食べ、体内で消化して単純な化合物とし、それをエネルギーの生産や体構成物質の合成のための材料として用いている。金子（2007）によれば、代表的な土壤動物の食性は以下のようなものである。

モグラのような巨大土壤動物に分類されるモグラやトガリネズミは動物食である。モグラは主としてミズを、トガリネズミはミズや節足動物を捕食する。

大型土壤動物の代表であるミズ（ヒメミズではない）は落葉（腐朽したもの）や土を食べる。土を食べるといっても、土の主成分である鉱物を利用するわけではない。土を丸ごと食べ、鉱物と混じっている有機物やカビ、細菌を消化管内で消化する。このため、ミズのふんは鉱物粒子と消化利用されなかった有機物がよく混合されたものとなっており、高次構造を持つ団粒である。

シロアリ（土にすむシロアリ）やハエ、甲虫の幼虫は主として枯死した植物や腐植物質を食べている。甲虫の幼虫の中には生きた植物の根を食べる者もあり、これらは農業にとっては害虫である。

ムカデとヤスデは形態は似ているが食性は異なる。ヤスデは主として落葉を食べるのに対し、ムカデは顎肢に毒腺を持ち、この毒を用いて昆虫などの動物を捕食する。

ワラジムシやダンゴムシは主として落葉や腐植物質を食べる。ダンゴムシは動物の死体や植物の芽生えも食べるので農業上は害虫である。

中型土壤動物のうちエダヒゲムシ、カマアシムシなど多くの節足動物は腐植や微生物を食べている。同じ節足動

物であるがカニムシはより小型の土壌動物であるトビムシなどを捕食している。

ダニ類には多くの種類があるが微生物食のものと、より小さな土壌動物を捕食するものがある。トゲダニ、ケダニは主として捕食性で、コナダニ、ホコリダニは微生物食である。

中型土壌動物の中でも小さいトビムシやヒメミズ、小型土壌動物であるアメーバなどの原生動物の大部分は腐植や微生物食である。

大型、中型土壌動物には、落葉などの植物遺体を食べるものが多い。これらによる摂食によって植物遺体は破碎され、それが微生物による植物体構成有機物の利用（つまり植物体の分解）を促進する効果があると考えられる。しかし、植物体の分解（植物体を構成する各種有機物を二酸化炭素、水などの無機物にしてしまうこと）に対する土壌動物の寄与は 10%程度であり、残りの 90%は微生物によって担われていると推定されている。

#### 4.3.4. 微生物の生活

微生物の特徴は、エネルギー獲得のための反応が非常に多様であることである。表 4.3 にはその例を示す。エネルギーを獲得するための化学反応はたいてい酸化還元反応である。ある物質が別の物質によって酸化されその時に発生するエネルギーが利用される。酸化還元反応とは電子の授受反応であり、電子は、酸化を受ける物質から酸化剤へ移動する。したがって（慣例に従い）この表では、酸化される物質を電子供与体、酸化剤を電子受容体と書いている。

**表 4.3 微生物のエネルギー獲得反応における反応物と生成物の例。**

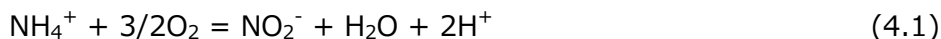
反応物		生成物	微生物の例*
電子供与体	電子受容体		
H <sub>2</sub> S	有機酸	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	紅色イオウ細菌, 緑色イオウ細菌
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	O <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	亜硝酸菌
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	O <sub>2</sub>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	硝酸菌
H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	水素細菌
Fe <sup>2+</sup>	O <sub>2</sub>	Fe <sup>3+</sup>	鉄細菌
S	O <sub>2</sub>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	イオウ酸化細菌
S, H <sub>2</sub> S	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , N <sub>2</sub> O, N <sub>2</sub>	イオウ酸化脱窒菌
H <sub>2</sub>	有機物		紅色非イオウ細菌
有機物	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	カビ, 多くの細菌
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O	脱窒菌
有機酸, H <sub>2</sub>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> などイオウ酸化物	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, S	イオウ還元菌
有機物	有機物, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	発酵性細菌
H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	メタン生成菌
有機物	Fe <sup>3+</sup>	CO <sub>2</sub> , Fe <sup>2+</sup>	鉄還元細菌

\*ここでは系統分類名ではなく一般名をあげている。

#### 呼吸基質として有機物以外の物質を利用

動物の場合、例外なく、有機物（代表的なものはグルコース）を、酸素を用いて酸化し（有機物が電子供与体、酸素が受容体）、その時に生成するエネルギーを利用している。この反応の全体が呼吸であり、有機物は呼吸基質とよばれる。この結果、二酸化炭素が生成する（表 4.3、上から 9 列目の例）。動物だけでなく、カビや多くの細菌もこの反応を利用している。このため、この反応が生じると土壤空気には二酸化炭素が排出される。

微生物のなかには、呼吸基質として、有機物以外の物質を利用するものが多く存在する。たとえば、アンモニア酸化菌（亜硝酸菌）はアンモニウムイオンを酸素を用いて酸化することによってエネルギーを獲得する。



この結果、アンモニア酸化菌は体外に亜硝酸イオンを廃棄物として排出する。土壤中にはこの亜硝酸イオンを利用する微生物も存在するので、硝酸化成菌は



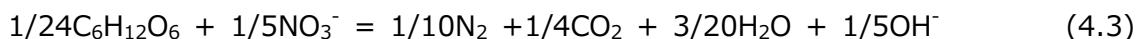
のように、亜硝酸イオンを酸化して硝酸イオンを生成し、これは体外に排出される。このため、土壤中に亜硝酸イオンが残留することはほとんどない。

硝酸イオンはそれ以上酸化されることはないので、エネルギー獲得反応のために利用されることはない。しかし蛋白質合成のための原料として、多くの微生物および植物によって取り込まれる。

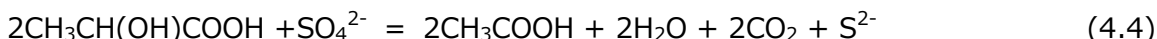
この他、表 4.3 に示すように、2 価鉄イオン、イオウなどを呼吸基質として利用する微生物もいる。これらの微生物の呼吸では、3 価鉄イオン、硫酸イオンが生成される。

### 酸素を用いない呼吸

微生物のエネルギー獲得反応の多様性のもう一つの面は、酸化剤（電子受容体）として酸素以外の物質を利用するものが多く存在することである。たとえば脱窒菌類は糖や有機酸を呼吸基質（電子供与体）とし、硝酸イオンを電子受容体として呼吸する。実際の反応は、亜硝酸イオン、一酸化窒素、一酸化二窒素等を経る複雑な反応であるが、全部まとめると、呼吸基質がグルコースの場合



という反応になる。また、硫酸イオンを電子受容体とする細菌も存在し、呼吸基質が乳酸の場合、反応は



のようになり、酢酸と硫化物イオンが生成する。このほか、3 価鉄イオンや二酸化炭素を電子受容体として利用する微生物も存在し、それぞれ 2 価鉄、メタンが生成される。

エネルギー獲得の効率という点から見ると、酸素以外の化合物を電子受容体とする反応の効率は低く、これらの反応を利用する微生物が優勢になるのは分子状酸素が乏しくなったり、存在しなくなったりした後である。典型的なケースは、湛水下の土である。湛水によって大気から土への酸素の供給が制限されると、まず溶存酸素が消費されてしまう。そうなると酸素を電子受容体とする呼吸は不可能になり、硝酸イオン、3 価鉄、硫酸イオンなどを電子受容体として利用できる微生物が次第に優勢になる。

湛水などにより土への酸素の供給が制限されたときに酸化剤として用いられる物質は、硝酸イオン、マンガン酸化物、鉄の酸化物や水酸化物、硫酸イオン、二酸化炭素などである。いま、グルコースを呼吸基質としたときの、様々な電子受容体による酸化反応とその平衡定数および反応の標準自由エネルギー変化を表 4.4 にまとめて示した。これらの値は反応物および生成物の全てが標準状態（25 °C、1 気圧で溶存成分の濃度は 1 mol/L）と仮定したときの値である。平衡定数の値が 1 より大きい場合、そして標準自由エネルギー変化の値が 0 より小さい場合にはこれらの反応は自発的に進行する。標準自由エネルギー変化は、生成物の自由エネルギーの合計から反応物の自由エネルギー

一の合計を引いた値であるので、この値がマイナスで小さければ小さいほど、その反応が進行したときに得られるエネルギーが大きいことを意味する。

**表 4.4 様々な呼吸反応**

反 応 式	log K	ΔG°/kJ mol <sup>-1</sup>
$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 = 6CO_2 + 6H_2O$	503.52	-2871
$C_6H_{12}O_6 + 24/5NO_3^- + 24/5H_2O = 6CO_2 + 24/10N_2 + 42/5H_2O$	510.24	-2909
$C_6H_{12}O_6 + 12MnO_2 + 24H^+ = 6CO_2 + 12Mn^{2+} + 18H_2O$	501.36	-2859
$C_6H_{12}O_6 + 24FeOOH + 48H^+ = 6CO_2 + 24Fe^{2+} + 42H_2O$	317.28	-1809
$C_6H_{12}O_6 + 3SO_4^{2-} + 6H^+ = 6CO_2 + 3H_2S + 6H_2O$	138.24	-788
$CH_3COO^- + H^+ = CH_4 + CO_2$	13.31	-326
$H_2 + 1/4CO_2 = 1/4CH_4 + 1/2H_2O$	5.72	-33

表 4.4 から、グルコースを電子供与体とする反応では、酸素、硝酸イオン、二酸化マンガンを電子受容体とする反応の標準自由エネルギー変化が大きく、酸化水酸化鉄鉱物、硫酸イオンを電子受容体とする反応では小さい。標準状態ではなく、土環境における関連成分の存在する濃度等を考慮すると自由エネルギー変化の絶対値は、酸素を電子受容体とする場合が最も大きく、ついで硝酸イオン > 二酸化マンガン > 酸化水酸化鉄 > 硫酸イオンの順である。したがって、酸素濃度が低下すると、硝酸還元菌、マンガン還元菌、鉄還元菌、硫酸還元菌の順に生育が優勢になる。

これらの電子受容体が利用できなくなると（利用できなくなって初めて）、酢酸や水素を基質としてメタンを生成する菌（メタン生成菌）が優勢になる。

### 植物遺体の変化と土壌酵素

土壌に枯葉などの植物遺体が入ってきたとしよう。そのうちの一部は前項で述べたように土壌動物によって摂食される。植物体は断片化され、一部の植物細胞も破壊される。そうすると細胞の内容物は土に放出される。細胞液に溶存している低分子の糖類やアミノ酸、カリウムイオン、マグネシウムイオン、カルシウムイオンなどは直ちに微生物が利用することができる。しかし、細胞壁を構成する多糖類や、タンパク、核酸などの高分子は巨大分子過ぎ、微生物は細胞膜を通してそれらを取り入れることはできない（実際には不可能ではないが、効率が悪い）。これらの生体高分子物質を利用するために、微生物は体外に様々な酵素を放出して高分子化合物を分解し、分解産物の低分子化合物を細胞内に取り入れている。図 4.10 はその様子を示す電子顕微鏡写真である。稲ワラ表面に細菌が存在するが、細菌の周りの表皮がちょうど細菌の形に溶食されている。これは細菌が細胞内に出したセルロース分解酵素が稲ワラの表皮細胞のセルロースを加水分解して溶かしているからである。セルロースの加水分解によって生成したグルコース（ブドウ糖）はその場に存在する水に溶解して細菌表面へ拡散し、細菌の細胞に取り入れられる。

微生物細胞の外で機能する酵素を土壌酵素（soil enzyme）という。土壌酵素の中には、微生物が上述のような目的で体外に放出する菌体外酵素（extracellular enzyme）の他に、死菌から放出された体内酵素（intracellular enzyme）も含まれる。代表的土壌酵素は、カタラーゼ、パーオキシダーゼのような酸化還元酵素、トランスアミナーゼのような転移酵素、セルラーゼ、プロテアーゼ、ウレアーゼなどの加水分解酵素がある。酵素はタンパクであるので、それ自体土壌酵素によって加水分解され、生成物のアミノ酸は微生物に利用される。しかし、土壌酵

素は微細な二次鉱物粒子や腐植物質に吸着されて存在しており、比較的安定に土壌中に存在する。いわば固定化酵素のような存在ということもできる。土壌酵素の存在のため、土壌は、ガンマ線などによって殺菌して微生物を死滅させた後でも酵素活性を発揮する。

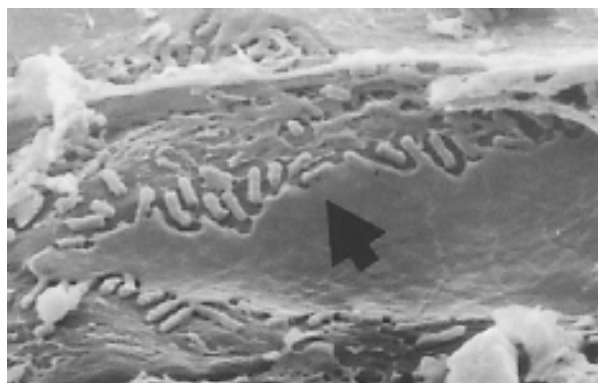


図 4.10 稲わらの表皮を分解している土壌微生物。木村（2000）。朝日新聞社および著者の許可を得て転載。

#### 土壌微生物の活動性

植物遺体の近傍や、様々な有機化合物を分泌している根の近傍では微生物の活動は活発である。しかし、新鮮な有機物が存在しない部位の微生物の大半は1年に1～2回の細胞分裂を行うほかは休眠状態にある。また芽胞という耐久細胞の形で休眠しているものもある。現在のところ土壌微生物の大部分は、人工的に培養することができない。つまり、生育に適していると考えられる培地の上に移して培養しても、ほとんど細胞分裂しないものが多い。

この原因としては、培地が最適でないということも考えられるが、それが土壌生物の本質的な生活様式であるとも考えられる。土の内部は、土の表面やと比較すると温度変化や湿度の変化が少ない。しかしそれでも自然界である以上予測しない環境変化がある。しかも養分の供給も安定していない。もし、生育に適した条件が与えられたとき一斉に休眠状態から脱して細胞分裂を開始すると、その後の環境の変化によって全滅する可能性がある。土のような予想外の変化のある環境では、いくら好適な条件でも、一定割合の固体は休眠状態を継続する方が、種の存続には有利であると考えられる。微生物以外でも、高山植物の一部では種子の発芽率が非常に低いものが知られているが、これも同じような生存戦略のためであると考えられている。

#### 土壌呼吸

土は生きているといわれることがある。正確に言えば土が生きているわけではなく、土の中に生物がいるのであるが、我々は土の中の生物の種類や量を完全に知っているわけではなく、知っているものについてもそれらの活動を個別に測定することはできない。土の生物の多くは酸素によって有機物を酸化してエネルギーを獲得し、二酸化炭素を排出している。つまり酸素呼吸をしている。このため、土の表面からは二酸化炭素が発生しているが、個別の発生源を特定し、それぞれからの発生量を測定することはできない。このため、土からの二酸化炭素発生はまとめて土壌呼吸とよばれている。土壌呼吸は植物根の呼吸と土壌微生物の呼吸の合計と考えられる。

### 4.4. 土壌微生物活動と植物への養分供給



有機物を土に混入することによって植物の生育が促進されることはよく知られている。落葉落枝や作物の収穫残渣や、家畜の糞尿などは古来有機質肥料として利用されてきた。最近再び、硫酸アンモニウムやリン酸カルシウムなどの単純な合成無機化合物を主成分とする化学肥料を用いず、有機物のみを施用して栽培する、いわゆる有機栽培が注目されている。

しかし、2.1 で述べたように、植物が根から吸収するのは硝酸イオン、リン酸イオンなどの単純な無機化合物のみであるといっても過言ではない。大きな蛋白質分子をそのまま根から吸収することなどはほとんどない（全くないわけではない）。植物遺体などの有機物の施用によって植物生育が促進されるのは、それを構成する有機物が土壌微生物によって利用される過程で、植物が吸収可能な無機イオン類が生成されるからである。

植物遺体が土に混入されると、その一部は土壌動物によって摂食され、細片化する。糸状菌や細菌は、菌体外酵素によって細胞壁のセルロースを加水分解してグルコースを生成する。グルコースは微生物に取り込まれ、エネルギー源として利用される。このような過程で細胞壁が破壊されると細胞内部からはカリウムイオンやマグネシウムイオンなどが溶出し、これらはそのまま植物根から吸収される。

細胞から溶出した蛋白質は別の菌体外酵素によって加水分解され、アミノ酸が生成する。アミノ酸は微生物に取り込まれ、一部はそのままタンパク質の合成に利用される。一部は微生物体内で有機酸（アミノ酸の種類によって異なる）とアンモニウムイオンに分解され、有機酸はエネルギー獲得のために消費される。アンモニウムイオンの一部はアミノ酸やその他の窒素化合物の合成のために利用されるが、残りは体外に排出される。そして体外に排出されたアンモニウムイオンの一部は植物に吸収利用される。残りは亜硝酸化成菌、そして硝酸化成菌のエネルギー獲得のために利用され、硝酸イオンに転換され、植物に吸収利用される。

イオウやリンについても同様なことが当てはまる。イオウは生物体では含硫アミノ酸に SH 基として含まれている。蛋白質やアミノ酸の分解過程で硫酸イオンに転換され、一部は再び微生物によって利用され、一部が土に放出されて植物に利用される。核酸や脂質に含まれるリンについても同様である。

このように、土に施用された有機物は、いったん微生物によって、低分子有機化合物あるいは無機化合物に転換され、その一部は微生物によって利用され、残りが植物によって吸収利用されるのである。

### 有機栽培 vs 化学肥料を用いた栽培

最近、有機栽培が注目されている。有機栽培とは基本的には化学肥料を用いず、有機質肥料の実を用いた栽培であるが、この他農薬を使用しないなどの条件も付されることが多い。

化学肥料の大部分は単純な塩類の混合物である。代表的な複合肥料は窒素化合物として硫酸アンモニウムや硝酸アンモニウム、リン酸化合物としてはリン酸カルシウム（いくつかの種類がある）、カリウム化合物としては塩化カリウムや硫酸カリウムを含んでいる。これらが土に施用されると土の間隙水に溶解してアンモニウムイオン、硝酸イオン、リン酸イオン、カリウムイオン等になり、植物の根のチャネルやトランスポーターから吸収される。

有機質肥料の場合、カリウムは化学肥料同様単純なカリウム塩として含まれており、土に施用すると直ちにカリウムイオンとなる。窒素やリンは、それらを含む化合物が微生物によって利用される過程でアンモニウムイオン、硝酸イオン、リン酸イオンが生成し、それが植物に吸収される。

結局、化学肥料の場合も有機質肥料の場合も植物に吸収される養分の形態には差がない。しかし、ひよっとしたら、有機物が分解する過程で生成する低分子の有機化合物が吸収されることもあり、それが植物の成長に何らかの影響をしている可能性など、様々な副次的な影響はあるのかもしれない。しかし現在のところよくわかっていない。

## 4.5. 問題

- 1) バイオマス炭素とはなにか簡潔に説明しなさい。
- 2) 植物の炭素含量は乾物あたり約  $450 \text{ g kg}^{-1}$  である。表 4.1 のデータから、土の表層 15 cm の植物根由来のバイオマス炭素量を推定しなさい。ただし土の乾燥密度は  $1.10 \text{ kg L}^{-1}$  としなさい。
- 3) ある土の細菌密度（個体数）が  $10^{10} \text{ g}^{-1}$  であった。この土の乾燥密度を  $1.10 \text{ kg L}^{-1}$  とし、細菌がこの土に均一に分布しているとして、細菌間の平均距離を計算しなさい。
- 4) 亜硝酸菌は酸素とアンモニウムイオンを体内にとりこみ、亜硝酸を生成するとき発生するエネルギーを利用し、亜硝酸イオンを体外に排出する。また硝酸菌は亜硝酸イオンと酸素を取り込み、硝酸イオンを生成して細胞外に排出する。それぞれの化学反応式を書きなさい。さらに、これらの反応が継続して起こった時の反応の反応式を書きなさい。
- 5) 硫酸アンモニウムは代表的な窒素肥料である。いま、1 ha の畑に窒素 (N) として 140 kg 相当の硫酸アンモニウムを施用して表層 15 cm に均一に混合した。この硫酸アンモニウム中のアンモニウムイオンが、亜硝酸化成菌と硝酸化成菌によって酸化されるときに生成するプロトンの量を計算しなさい。このプロトン量と、pH 4 の酸性雨が年間 2000 mm 降ったときに土にもたらされるプロトン量を比較しなさい。
- 6) 10 a の畑の表層 15 cm に 100 kg の硫酸アンモニウムを施肥して混合した。この肥料のアンモニウムイオンがすべて硝酸に酸化された時に生成する水素イオンの量 (mol) を計算しなさい。また、土の乾燥密度が  $1.05 \text{ kg/L}$  であるとき、それは土 1 kg あたり何モルに相当するか計算しなさい。
- 7) 23) のような反応がおこったとき、実際には土壌溶液の pH の変化は 23) のような仮定の下での計算値よりもはるかに小さい。その理由を説明しなさい。
- 8) グルコース ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ ) が 3 価鉄によって酸化される化学反応を完成させなさい。ヒント：3 価鉄イオンは 2 価鉄イオンに還元される。
- 9) 湿地に硝酸イオンを含む汚水を流入させると、硝酸イオンが消失する。これほどどのような機構によるか考察しなさい。
- 10) 落葉・落枝や農作物の収穫残渣などが土の生物の生育に利用される過程では、その炭素と窒素の含量比 (C/N 比) が次第に低下する。この理由を説明しなさい。

## 4.6. 引用文献

青木淳一 (1978) 森林の土壌生物。遺伝, **32**, 2-7.

Dittmer, H. J. (1938) A comparative study of the subterranean members of three field grasses. *Science* **88**, 482.

飯島慈裕・篠田雅人 (2003) 中部日本山岳地域の気象環境の形成に果たす大気-陸面の熱・水循環過程。地学雑誌 **112**, 419-422.

金子信博 (2007) 土壌生態学入門, 東海大学出版会, 神奈川県秦野市。

木村真人 (2000) 物質を循環させ植物を助ける様々な微生物の高い代謝能。サイアス **5**, 74-76.

苅住昇 (2010) 最新樹木根系図説。誠文堂新光社, 東京。

Petersen, H. and Luxton, M. (1982) A comparative analysis of soil fauna populations and role in

decomposition process. *Oikos* **39**, 287-388.

Russel, E. W. (1973) *Soil Condition and Plant Growth*. Longman, London.

戸田浩人・筒井希美子・喜多智・浦河梨恵子・生原喜久雄 (2009) 斜面位置の違いによる森林土壌の糸状菌と最近のバイオマス. *日緑工誌* **35**, 15-20.

