

有機物と土壌肥沃度

筒木 潔

Organic Matter and Soil Fertility

Kiyoshi TSUTSUKI

1. はじめに

肥沃な土壌では多量の植物バイオマスが生産され、これは再び土壌に返される。その結果、肥沃な土壌にはますます多くの有機物が蓄積する。また自然の生態系では、植物は自らの力でより地中深く根を張り、また分布域を拡大することによって、新たな資源を開拓し、より良い土壌環境を作りだし、それを自らの子孫あるいは遷移における後継者へと引き継いでいる。集約農業を開始する前の自給的農業においては、人類はこの自然の自己施肥作用を模倣し、農耕地の肥沃度を維持するために、必ず有機物を利用してきた。しかし、近代的な集約農業においては、ともすれば有機物の重要性は忘れられがちである。これは、人類が近代科学によって、有機物が植物の必須栄養素ではないことを発見し、無機質の養分を補給するだけで植物が生育することに気がついたためである。

そして現代、化学万能の農業が風靡するなかで、農耕地の地力低下や農作物の病害などが顕在化し、農作物の食品としての安全性も、農業の使いすぎなどから危惧されるようになってきた。私たちは現在、植物生産における土壌有機物の役割を、再び評価しなくてはならない段階にある。このためには、土壌有機物に関するより深い科学的知識が必要である。

2. 地球上における土壌有機物の存在量

地球上の陸上の炭素は、約 550 ギガトン (Gt=10⁹ t) の植物バイオマス炭素と、約 1500 Gt の土壌有機物の炭素からなっている¹⁾。このように、土壌有機物に含まれる炭素含量は、植物バイオマスの炭素含量

表1 地球上の炭素の貯蔵庫とその大きさ
(Eswan, H., Berg, V.D. and Reich, P. 1993)

貯 蔵 庫	炭素量 (Gt=10 ⁹ t)
陸 上	
植 物	550
土 壌	1,500
大 気	750
海 洋	38,000
化石燃料	4,000
地 殻	65.5×10 ⁶

の約3倍に相当し、また、大気中に含まれる炭素の約2倍に相当する(表1)。しかし、先史時代には、土壌有機物の炭素はさらに2014 Gtにも達していたと推察されている²⁾。人類の文明と農業の行いは土壌有機物を消耗することによって、陸上の炭素貯蔵庫のバランスに重大な影響を及ぼしてきたわけである。この土壌炭素の消耗は、一般的に認識されている化石燃料の燃焼が及ぼす効果と同じくらい重要な効果をもたらしている。人間の生産および消費活動によって引き起こされた地球の温暖化は、有機物分解を促し、再び土壌有機物の貯蔵庫からの炭酸ガスやメタンの発生を促進する³⁾。このことは、終わることのない地球温暖化の悪循環をもたらすことになる。土壌有機物は陸上生態系の物質循環における有機物の最大の貯蔵庫である。従ってその変化は深刻な影響をもたらすことになる。

3. 土壌有機物の組成

土壌動物および土壌微生物は、量的には土壌中に

存在する有機物の5%以下を占めるに過ぎない。量的には少ないが、これらの生命体は、土壤中での、有機物および無機物の代謝と変換を司る重要な役割をはたしている。それ以外の部分(95%)は、分解途上あるいは腐植物質への再合成の途上にある死んだ有機物である(図1)。これらの有機物はいずれも生命を持っていないが、土壤生物の働きによって

ダイナミックに変動しており、また地上の生命を支えている。

土壤有機物は、概念的に、粗大残渣、非腐植物質および腐植物質に分けられる。粗大有機残渣は、主として、植物の本来の組織構造をまだ認識可能な植物遺体からなる。

非腐植物質は、土壤中の生物の体を構成していた物質であり、未変性のリグニン、タンパク質、酵素、多糖類、および脂質等からなっている。これらの成分の中で、特定の分類の生物群にのみ存在する成分は、バイオマーカーとして、土壤有機物の給源を確かめる上で有用である。例えば、リグニンを構成するフェノール性化合物の種類は植物の分類毎に異なっているため、分解によって生成するフェノール性化合物の組成から、土壤有機物の形成に加わった植物の種類が判定できる。また、微生物一般から生産される物質(例えばATP、グルコサミン、リン脂質等)からは微生物バイオマスが推定され、糸状菌のみから生産される化合物(エルゴステロール)や細菌のみから生産される化合物(ジアミノピメリン酸)の量からは、それぞれの貢献割合が推定可能である。

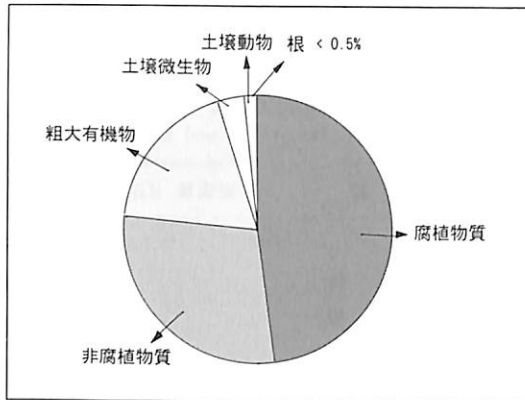


図1 土壤有機物の構成

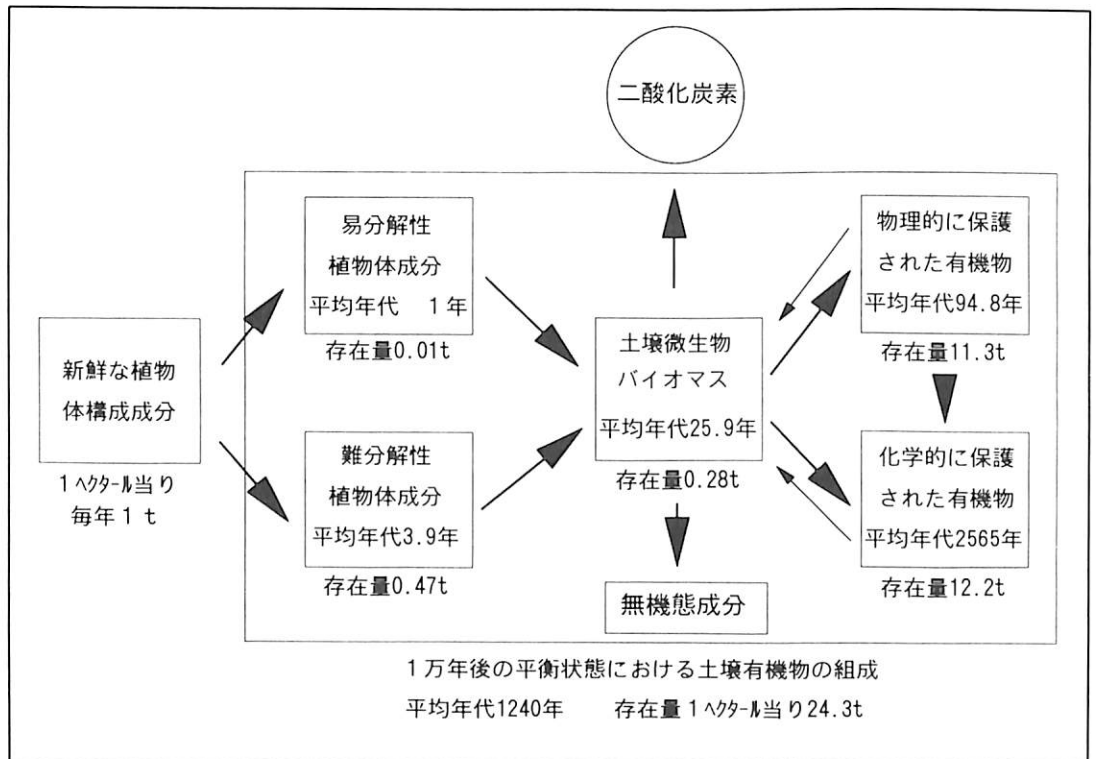


図2 土壤有機物の代謝回転モデル

腐植物質は、土壤中で粗大有機残渣や非腐植物質から生成される。腐植物質は、土壌固有の、暗色、非晶質の高分子有機物である。

しかしながら、これらの物質群を実際的に分離することは困難である。これらの3つの物質群は、以下のような理由から、連続的な変化の途上にあると考えたほうがよい。

- (1) 腐植物質の生成は既に粗大有機残渣の中で始まっている。
- (2) 既知の物質群に属するリグニン、タンパク質、多糖類、脂質等の非腐植物質もその大部分はかなりの変性を受けている。
- (3) 非腐植物質のうちかなりの部分は、腐植物質と共有結合、イオン結合、ファンデルワールス力等で結合して存在している。

粗大有機残渣、非腐植物質、腐植物質の相対割合は、土壌型、土壌条件、土壌断面の各層位によっても異なっている。

土壌有機物の区分に関しては、以下のような5区分に分ける考えかたもある⁴⁾。

- (1) 易分解性の植物残渣
- (2) 難分解性の植物残渣
- (3) 土壌微生物バイオマス
- (4) 土壌有機物のうち物理的に安定化された画分
- (5) 土壌有機物のうち化学的に安定化された画分

この区分のうち、物理的に安定化された画分とは、土壌団粒中で分解から保護された有機物を意味し、他方、化学的に安定化された画分とは、腐植化の過程で高度の難分解性を獲得した腐植物質を意味する。図2はこれら5画分をめぐる炭素の流れと、それぞれの平均年代および存在量をモデル的に示したものである。

4. 腐植物質形成の経路

腐植物質はどのような経路をたどって形成されるのであろうか？この問題は、多くの土壌学者、土壌化学者が挑戦してきた難問である。

多くの土壌で、リグニンは土壌腐植酸の芳香族単位の主要な給源である⁵⁾。このことは炭素を¹⁴C標識したリグニンを土壌中に加えて保温静置した場合、放射能の大部分が腐植酸に取り込まれることから確認されている⁶⁾。リグニンは土壌中でかなりの分解を受ける。リグニンとセルロースの間の結合は切られ、

メトキシ基やメチル基等の官能基は分解消失する。他方、カルボキシ基は増加する。窒素含量はリグニンの分解生成物と微生物代謝産物の反応の結果増加する。リグニン分子表面に現れた芳香環は微生物によって分解され、高度に分岐した脂肪族の炭素骨格が形成される。

リグニン、タンニン、フラボノイド等が分解して生成するポリフェノールもまた腐植物質の形成に参加する⁵⁾。また、粘土鉱物や金属酸化物(Fe₂O₃, Al₂O₃, MnO₂等)の触媒作用によって、ポリフェノールとキノンの縮合が促進される。これはさらにアミノ化合物やタンパク質と酸化重合し暗色の高分子が生成する。

メラニンと腐植物質の類似性も、官能基分析の結果や熱分解生成物、酸化還元分解生成物の類似、各種の吸収スペクトル等から指摘されている⁷⁾。土壌中にはメラニン生産能を持った糸状菌が多数生息することから、微生物由来のメラニンが腐植物質の形成に関与することは大いに可能性のあることである⁸⁾。

上記のような腐植物質の生成機構は、しかしながら、腐植化過程の初期の段階に関与しているに過ぎない。換言すれば、これらのプロセスは、分解途上の植物体や微生物の代謝産物が高濃度に存在し、互いに容易に反応しうるような条件の下でのみ進行する。他方、腐植質火山灰土(Andisol)やチェルノーゼム土壌(Mollisol)から得られる高度に腐植化の進んだ腐植酸は、リグニン、タンニン、メラニン等との類似性は少ない。腐植物質はいったん形成された後も、土壌中で炭化作用類似の作用を受け、非常に長い時間をかけて腐植物質固有の複雑な構造を獲得していくものと考えられる⁹⁾。図3に腐植物質の生成経路を要約した。

5. 土壌有機物諸画分の化学組成と性質

5-1. 元素組成

腐植酸の元素組成については、多数の研究者により多くの試料について研究されている^{9,10,11,12)}。

腐植酸は腐植化度が高くなるほど水素含量やH/C比が減少し、他方、次式で示されるような不飽和度(DUS)が増大する¹³⁾。腐植酸の腐植化度(RF)と水素含量および不飽和度の間には負および正の高い相関が認められた。

$$DUS = (2[C] + [N] - [H]) \times 100 / (2[C])$$

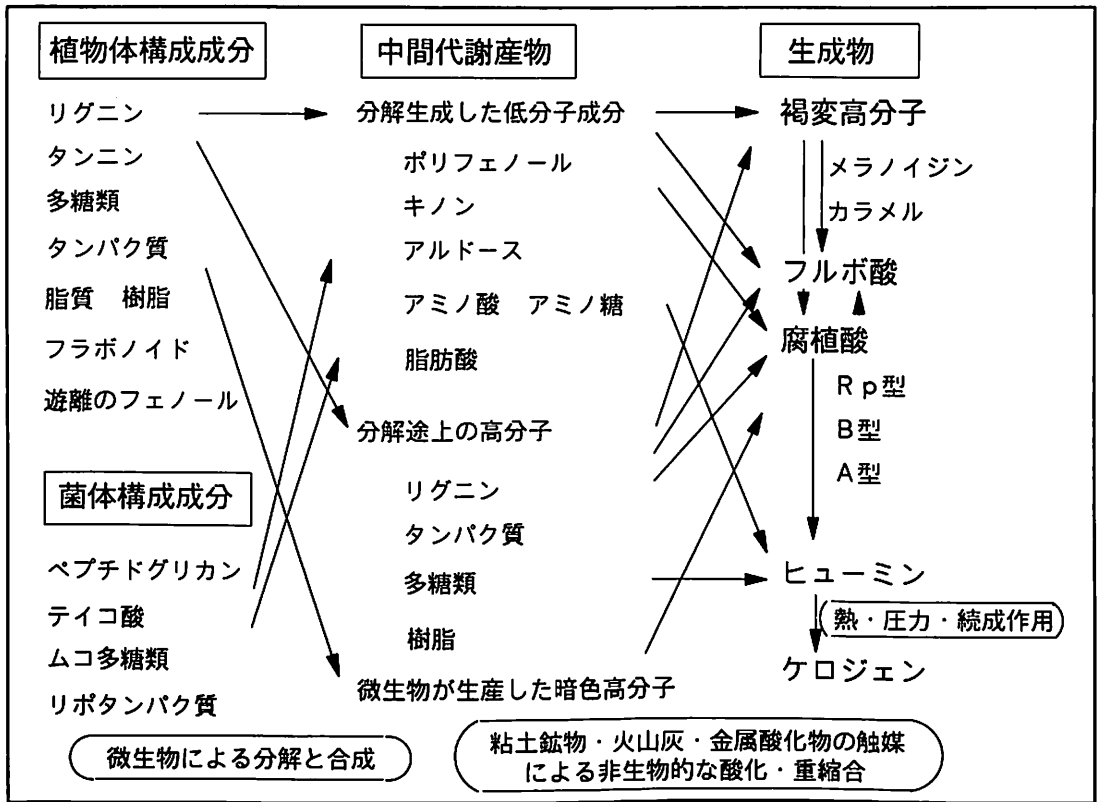


図3 腐植物質の生成経路

表2 腐植酸およびフルボ酸の元素組成と官能基組成

(Kuwatsuka *et al.* 1978¹⁾, Tsutsuki and Kuwatsuka 1978²⁾, Schnitzer and Khan 1978³⁾)

	腐植酸38試料 ^{1,2)}	腐植酸 ³⁾	フルボ酸 ³⁾
元素組成 (%)			
C	53.0-60.4	53.6-58.7	40.7-50.6
H	2.5- 7.1	3.2- 6.2	3.8- 7.0
N	1.1- 6.9	0.8- 5.5	0.9- 3.3
S	N. D.	0.1- 1.5	0.1- 3.6
O	29.0-39.1	32.7-38.3	39.7-49.8
官能基組成 (mol/kg)			
全酸度	3.6- 8.5	5.6- 7.7	6.4-14.2
カルボキシル基	2.4- 6.3	1.5- 5.7	5.2-11.2
フェノール性水酸基	0.8- 3.7	2.1- 5.7	0.3- 5.7
アルコール性水酸基	0.2- 4.4	0.2- 4.9	2.6- 9.5
カルボニル基	2.2- 8.8	0.1- 5.6	1.2- 4.2
メトキシル基	0.1- 2.6	0.3- 0.8	0.3- 1.2

N.D.: 測定せず

([C], [N], [H] は原子数比である。)

腐植酸の窒素含量は腐植酸生成の初期の段階には増加するが、その後、腐植化度の増大に伴って減少する。

腐植酸の炭素含量および酸素含量と腐植化度の関係は、水素含量や窒素含量と比べて、相関の程度が低い。しかし、同種の型の土壤間や一つの土壤から得られた腐植酸の細画分を比較すると、腐植化度の増大とともにこれらの含量が増加することが明かとなる。

腐植酸と比較すると、フルボ酸は炭素含量および窒素含量が低く、不飽和度も低い。他方、水素含量および酸素含量は高い。フェノール性化合物の吸着剤である Polyclar-AT 樹脂に吸着されたフルボ酸画分と吸着されなかったフルボ酸画分を比較すると、樹脂に吸着された腐植物質に富んだフルボ酸画分は H/C や N/C が低く、他方 O/H や不飽和度は高かった¹⁴⁾。

ヒューミン画分の元素組成に関する情報は少ないが、ヒューミン画分から酸処理後抽出された腐植酸は、通常の方法で得られた腐植酸よりも水素および酸素含量が高く、炭素含量は低かった⁵⁾。また、DMSO 抽出や HF 処理で得られたヒューミン試料は腐植酸よりも水素含量が高いことを示した¹⁵⁾。これらの結果はヒューミン画分が脂肪族の構造を持つ物質に富んでいることを示している。

5-2. 官能基組成

土壤有機物を構成する腐植酸、フルボ酸、ヒューミンは様々な官能基を含んでいる。それらの主なものは、カルボキシル基、カルボニル基、フェノール性水酸基、アルコール性水酸基、メトキシル基、アミノ基などである(表2)。これらの官能基は腐植物質が示す各種の反応性に大きく関与している。

腐植酸のカルボキシル基は 2.5~6.3 mol/kg、カルボニル基は 2.5~6.8 mol/kg であった¹⁶⁾。両官能基はいずれも腐植化度が高くなるほど増加した。腐植酸のフェノール性水酸基は 1.9~3.3 mol/kg であったが、腐植化の初期の段階でいったん減少した後、腐植化度の増大とともに増加した。アルコール性水酸基は 1.0~5.0 mol/kg、メトキシル基は 0~2.6 mol/kg の範囲であったが、腐植化度が高くなるにもなって減少した。これは、腐植化の進行にもなって炭水化物成分およびリグニン成分が減少するこ

とに対応している。

フルボ酸は腐植酸と比較してはるかに多量のカルボキシル基および水酸基を含んでいる。フルボ酸はまた腐植酸よりも酸度の強い ($pK_a < 3.8$) カルボキシル基を多く含んでいる。この強い酸は隣接したカルボキシル基 (1,2-ジカルボン酸) などによって発現するものである¹⁷⁾。

5-3. 窒素成分

土壤中の窒素の大部分は腐植物質の構造中に含まれているものである。腐植物質中の窒素は難分解性であり、植物にとっては緩効性である。腐植物質中の窒素は 6 N HCl あるいは同じ程度の酸による加水分解によって、(1) 酸不溶性窒素、(2) アンモニウム態窒素、(3) アミノ酸態窒素、(4) アミノ糖態窒素、(5) 加水分解性未知窒素の 5 画分に分けることができる。

これらの形態の窒素のうちで、アミノ酸態窒素およびアミノ糖態窒素は最も多量に存在する。腐植酸に含まれるアミノ酸の組成は、各種の土壤の間で著しく類似している^{18,19)}。このことから、土壤中のアミノ態窒素の給源は、例えば微生物細胞壁等のように、各種の土壤の間でかなり類似していることが唆される。

腐植酸中のアミノ態窒素の含量は腐植化の初期の段階には増加するが、その後腐植化度が高くなるにもなって減少する¹⁹⁾。

腐植酸中の酸で加水分解されない窒素の割合は、全窒素の 30~60% を占めた。この割合は腐植化度が高くなるほど増加した。非加水分解性窒素は、芳香環あるいはキノン環中に組み込まれた窒素、あるいはペプチド鎖の末端アミノ基が芳香環に付加して生成した N-フェニルアミノ酸などからなるものと考えられている。同様な形態の窒素は、酸加水分解性の未知窒素の中にも含まれており、特にフルボ酸には多く含まれる。

酸加水分解液中に検出されるアンモニウム態窒素は、一部はグルタミンやアスパラギン等のアミド基から分解生成するが、アミド基では説明できない部分は偽アミド態窒素と呼ばれている²⁰⁾。アミド基および偽アミド態窒素は有機態窒素の中でも最も分解無機化されやすい画分であろう。

5-4. 土壤多糖類

土壌有機物を酸加水分解すると各種の中性糖、ウロン酸、アミノ糖等が検出される。これらの糖は土壌多糖類を構成していたものである。土壌中の多糖類は土壌有機物の5%から30%を占め、腐植酸やフルボ酸の構成成分としてもかなりの量含まれている。アミノ糖やウロン酸を含めた土壌多糖類とその金属との錯体はヒューミン画分中にも含まれている^{7,21)}。

土壌多糖類の給源は、微生物にも植物にも遡ることができる。例えば、キシロースやアラビノースは主として植物体のヘミセルロース成分に由来し、アミノ糖は糸状菌の細胞壁や節足動物の外骨格に由来するなど、比較的その起源の明確な糖類も存在する。しかし、多くの構成糖は微生物にも植物にも含まれるため、個々の単糖がどの多糖類に由来したものかを確定することは困難な場合が多い。

また、微生物由来の糖と植物由来の糖は土壌中で無変化のまま存在しているわけでもなく、分解の過程で互いに結合したり、土壌有機物に固有な安定な構造を獲得したりする。このことは、土壌多糖類の構成糖の組成が非常に複雑なことによって示されている。土壌多糖類は金属成分や粘土鉱物と錯体を形成することによって、微生物による分解や資化が困難となり高度な安定性を獲得する。土壌団粒の内部や間隙に局在することによっても、土壌多糖類は分解から物理的に保護される。また、土壌粒子をつなぎとめる糊の役割も果たし、団粒構造の安定化に貢献している。

5-5. 土壌脂質

ろう、ワックス、スベリン、クチン、テルペン類、脂肪、脂肪酸等、多種多様な脂質構成成分が土壌中にも含まれている。有機物分解の緩慢な泥炭土壌や、森林土壌のA層も多量の脂質を含有し、土壌中の全炭素の30%から40%に及ぶ例も報告されている¹⁸⁾。脂質は植物や動物の外表面に分布して、乾燥や病害などから生体を保護する役割をもっているものと、生物体の内部に分布して、代謝の中間産物や炭素源やエネルギー源として機能しているものがある。土壌中に主として残るのは、かなりの分解抵抗性を始めから具備した生物体の外表面に分布する脂質である。好氣的条件下でpHが中性に近く微生物の活動が活発な条件下ではこのような脂質も分解を受けるため、土壌中の脂質含量は高くならない。しかし、嫌氣的条件下や低pH条件下では脂質の分解は著しく

遅れる。脂質の組成から過去の植生や環境の変化を探る試みは泥炭地のような環境では可能であろう。

5-6. 腐植物質の構造

腐植物質の構造の解析にあたっては、紫外・可視吸収スペクトル、赤外線吸収、プロトン核磁気共鳴(H-NMR)、¹³C-NMR、電子スピン共鳴(ESR)、X線回折、メスバウアースペクトル等、各種のスペクトル的方法が適用されてきた。

腐植物質の紫外・可視部吸収スペクトルは、吸光度が長波長側に向かって指数関数的に減少する単調な形状を示す。ただし、Pg等の土壌色素を持つものや未熟な植物遺体から得られた腐植物質は例外である。紫外・可視部吸収の指数曲線は土壌腐植物質に固有の特性であると考えられる。このような吸収曲線から、腐植物質の暗色は特定の発色団に起因するものではなく、ランダムに重合した共役二重結合系によるものであることが示唆される。紫外・可視部吸収から腐植物質の腐植化度の指標(RFおよび $\Delta \log K$)が定義され、これによって腐植酸はA、B、Rp、P等の型に区分される⁹⁾。腐植酸の化学的特性はこの腐植化度および腐植酸の型と非常に高い相関および関連を示す。

¹³C-NMRは腐植物質を構成する各種形態の炭素の相対的な分布について、明確な情報を与えてくれる。すなわち、脂肪族、芳香族、多糖類、カルボキシル基、カルボニル基の炭素が区別され、それらの存在比がわかる²²⁾。この技法は土壌から分離しないままの土壌有機物に対しても適用可能である。腐植酸中の芳香族炭素が50%を越えることはあまりなく、脂肪族炭素の割合がかなり高いことを明らかにしたのはこの方法である。その極端な例はThengら²³⁾によって発見された粘土腐植層間複合体から抽出された有機物の場合である。雲母-バイテライトの層間に入り込んだ有機物はほとんど脂肪族炭素のみからなり、芳香族炭素を含んでいなかった。

腐植酸のX線回折により、腐植化度の非常に高いA型腐植酸は無定型のグラファイト炭素に類似した乱層構造を持つことが明らかにされた⁹⁾。

乱層構造とは、数個のベンゼン核からなる縮合環が数枚積み重なった構造を特徴とする。電子顕微鏡観察もこのことを明らかにした。X線回折以外のスペクトル的手法ではまだこのことは証明されていない。

様々なスペクトル的手法は、腐植物質の構造について、時には相矛盾する情報を与えることもある。これは、それぞれの技法の原理の違いばかりではなく、腐植物質の構造の複雑性によるところも大きいと考えられる。

5-7. 分子量・分子サイズ・分子形

腐植酸、フルボ酸、土壌多糖類の分子量は約500から数百万の範囲にわたっている。一般に腐植酸はフルボ酸よりも大きめの分子量を持っている。Tsutsukiら²⁴⁾によれば、腐植酸の重量平均分子量は20万から200万の間に分布していた。腐植酸の平均分子量は腐植化度の高いA型腐植酸では低く、腐植化度の低いRp型腐植酸では高かった。腐植酸の腐植化度の増大が構造の縮重合の進行と対応していることと、腐植酸の平均分子量における上記の結果は、一見矛盾しているように思われる。しかし、腐植酸を分子量によって分別した画分の腐植化度を詳細に検討すると、最も腐植化度の高い画分は、数十万の分子量に相当する画分であり、数百万の分子量に相当する画分の腐植化度は低かった。腐植酸の分子のうち数百万の分子量を持つ巨大分子画分は、リグニン、多糖類、タンパク質等の巨大な分子量を持つ生体高分子が腐植物質へと変化していく途上の成分であろうと考えられる。Watanabeら²⁵⁾によれば、フルボ酸の重量平均分子量は、約2万であり、各種の土壌であまり大きく異ならなかった。フルボ酸においても、Polyclar AT樹脂に吸着される腐植物質に富んだ画分の平均分子量(17,100-19,700)は、この樹脂に吸着されない多糖類に富んだ画分の平均分子量(21,800-26,500)よりも低かった。

腐植酸およびフルボ酸の分子形は、その存在環境によって容易に変化する。このことは、ゲルろ過のクロマトグラムが溶離液のpHやイオン強度に依存して変化することから明かとなる²⁶⁾。腐植酸やフルボ酸中に多量のカルボキシル基が含まれること、また最近¹³C-NMRによって明らかにされているように、腐植物質中に脂肪族構造が卓越することなどは、腐植物質の分子形が変化しやすいことと良く対応関連するものである。腐植酸は、変化自在なランダムな鎖を持った線形高分子電解質であり、溶液中では球形から楕円形の形状をとるといのが、その分子形についての現在最も妥当なイメージである。

6. 土壌有機物の機能と農業への貢献

土壌有機物は各種の成分から構成されており、そのそれぞれは異なった特性と機能を持っている。植物の生育に及ぼす効果という観点からは、有機物単独によってもたらされる効果はまれであり、土壌微生物や土壌無機成分との相互作用によって植物の生育に影響を及ぼす。土壌の有機物含量がそのまま土壌肥沃度と結びつかないのはこのためである。土壌肥沃度に関連した土壌有機物の機能には、直接的なものと同接的なものがある。

6-1. 直接的効果

無機養分が過不足ない条件下では、腐植物質(腐植酸およびフルボ酸)は植物の生育に促進的な効果をもたらす。その効果は、発芽、幼植物の生育、発根、地上部および根部の伸長、などに及んでいる²⁷⁾。その効果は、地上部よりも根の生育に対して著しい。水耕実験において腐植物質が最大の効果をもたらすのは、最適な濃度の下であり、過剰濃度の腐植物質は負の効果をもたらす。葉面散布もまた、根と地上部の生育を促進する。

腐植物質が植物の生育を刺激するメカニズムは、多量元素および微量元素の吸収の促進と関連している。腐植物質は遷移金属と錯塩を形成する。不可給態で存在する金属イオンは錯体形成によって可給態へと変化する。他方、ある種の金属が過剰に存在する場合、錯体形成によってその金属の活動度は抑えられ、毒性の軽減に役立つ。

また、腐植物質のうち分子量の比較的低い成分は植物によって直接吸収され、ホルモンの作用を及ぼし、細胞膜の透過性を促進するといわれている。

6-2. 間接的効果

土壌有機物の間接的効果には以下のようなものが考えられる。

(1) 植物質の暗色によって、太陽エネルギーの土への吸収が促進され、土壌温度が上がる。

(2) 土壌の団粒形成を促進することによって、水分保持や通気性等の物理的性質や土壌構造の改良に貢献する。糸状菌の菌糸、土壌多糖類、腐植物質などはいずれも土壌団粒の形成に貢献するが、最も安定で持続性のある団粒を形成するのは腐植物質である。

(3) 土壌の無機養分を保持する。多くの土で土壌有機物は土壌の陽イオン交換能の20-70%を受け持っている。粘土鉱物の強度の退化分解が起りやすい熱帯や亜熱帯地方では、有機物の陽イオン保持への役割は大きい。

(4) 土壌のpHが急激に変化しないよう緩衝作用をもたらす。

(5) 土壌有機物は微生物によって分解され、N, P, S, およびその他の必須元素を植物に供給する。

(6) 土壌微生物へ養分を供給する。土壌中には、多様な微生物が生活しており、複雑な組成を持つ土壌有機物はこれらの微生物の非常に多様な栄養要求性を満たしている。ひるがえって、豊富で複雑な微生物相は、植物への養分供給を保障し、また病原菌の侵入等の際には生物的緩衝材としてその蔓延を防止する。さらに、農業や人造有機物の分解にも土壌微生物は貢献している。

このように土壌有機物は土壌を肥沃に保つ上で非常に重要な役割を果たしている。しかし、その効果は肥料や農業の効果と比べて顕著ではないため、近代農業では等閑視されがちである。近代農業の通常の耕種法のもとでは、土壌の有機物は年毎に減少する。土壌有機物の減少傾向を放置すれば、数十年の経過の内には土壌の肥沃度の深刻な減退をもたらす。また、土壌侵食の促進によって耕土そのものが失われる。農耕地への有機物施用は、人類が自然のプロセスから学んだ技術であり、農耕地の生命を維持するためには不可欠の行いである。

7. 文 献

- 1) Eswan, H., Berg, E. V. D., and Reich, P. 1993: Organic carbon in soils of the world. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **57**, 192-194.
- 2) Buringh, P. 1984: Organic carbon in soils of the world. In *The role of terrestrial vegetation in the global carbon cycle: Measurements by remote sensing*. Ed. G. M. Woodwell, p.91-109, Wiley, Chichester.
- 3) Jenkinson, D. S., Adams, D. E. and Wild, A. 1991: Model estimates of CO₂ emission from soil in response to global warming. *Nature*, **351**, 304-306.
- 4) Jenkinson, D. S. and Rayner, J. S. 1977: The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Sci.*, **123**, 298-305.
- 5) Kononova, M. M. 1966: *Soil organic matter*. 2nd ed. Pergamon Press, Oxford, p.544.
- 6) Martin J. P. and Haider, K. 1976: Decomposition of specifically ¹⁴C-labeled ferulic acid: free and linked into model humic acid-type polymers. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **44**, 1114-1118.
- 7) Stott, D. E. and Martin, J. P. 1990: Synthesis and degradation of natural and synthetic humic material in soils. In *Humic substances in soil and crop sciences: selected readings*. Ed. P. MacCarthy, C. E. Clapp, R. L. Malcolm, and P. R. Bloom, p.37-63, Amer. Soc. Agronomy, Inc., Madison.
- 8) Coelho, R. R. R. and Linhares, L. F. 1993: Melanogenic actinomycetes (*Streptomyces* spp) from Brazilian soils. *Biol. & Fertility of Soils*, **15**, 220-224.
- 9) Kumada, K. 1987: *Chemistry of soil organic matter*. Japan Scientific Soc. Press, p.241.
- 10) Schnitzer, M. and Khan, S. U. 1978: *Soil organic matter*. Elsevier, New York.
- 11) Kuwatsuka, S., Tsutsuki, K. and Kumada, K. 1978: Elementary composition of humic acids. Chemical studies on soil humic acids I. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **24**, 337-347.
- 12) Yonebayashi, K. and Hattori, T. 1988: Composition of elemental and functional groups of humic acids. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **34**, 571-584.
- 13) 筒木 潔・熊田恭一 1980: 腐植酸の化学, 肥料科学, **3**, 93-131.
- 14) Watanabe, A. and Kuwatsuka, S. 1992: Ethanol soluble and insoluble fractions of humic substances in soil fulvic acids. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **38**, 391-400.
- 15) Tsutsuki, K. and Kuwatsuka, S. 1992: Characterization of humic metal complexes in a buried volcanic ash soil and a peat soil. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **38**, 297-306.
- 16) Tsutsuki, K. and Kuwatsuka, S. 1978: Composition of oxygen containing functional

- groups of humic acids, *Soil Sci. Plant Nutr.*, **24**, 547-560.
- 17) Arai, S. and Kumada, K. 1983: Preparation of powdered sample of fulvic acid and analysis of its functional groups. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **29**, 543-548.
- 18) Stevenson, F. J. 1982: Humus chemistry Genesis, composition, reactions. John Wiley & Sons, New York.
- 19) Tsutsuki K, and Kuwatsuka, S. 1978: Nitrogen distribution in humic acids. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **24**, 561-570.
- 20) Aldag, R. W. 1977: Relations between pseudo-amide nitrogen and humic acid nitrogen released under different hydrolysis conditions. In Soil organic matter studies, Proc. Symp. 1976 (Braunschweig, 6-19 Sept.) p.293-299, IAEA, Vienna.
- 21) Cheshire, M. V. 1979: Nature and origin of carbohydrates in soils. pp.216, Academic Press, London.
- 22) Wilson, M. A. 1990: Application of nuclear magnetic resonance spectroscopy to organic matter in whole soils. In Humic substances in soil and crop sciences: selected readings. Ed. P. MacCarthy, C. E. Clapp, R. L. Malcolm, and P. R. Bloom, p.221-260, Amer. Soc. Agronomy, Inc., Madison.
- 23) Theng, B. K. G., Churchman, G. J. and Newman, R. H. 1986: The occurrence of interlayer clay organic complexes in two New Zealand soils. *Soil Science*, **142**, 262-266.
- 24) Tsutsuki, K. and Kuwatsuka, S. 1989: Determination of molecular weights of humic acids by osmotic pressure measurement and by permeation chromatography on controlled pore glass. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **35**, 393-403.
- 25) Watanabe, A. and Kuwatsuka, S. 1992: Chemical characteristics of soil fulvic acids fractionated using polyvinylpyrrolidone (PVP). *Soil Sci. Plant Nutr.*, **38**, 31-41.
- 26) Tsutsuki, K. and Kuwatsuka, S. 1984: Molecular size distribution of humic acids as affected by the ionic strength and the degree of humification. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **30**, 151-162.
- 27) Chen, Y. and Aviad, T.: Effects of humic substances on plant growth. In Humic substances in soil and crop sciences: selected readings. Ed. P. MacCarthy, C. E. Clapp, R. L. Malcolm, and P. R. Bloom, p.161-186 Amer. Soc. Agronomy, Inc., Madison.