

堆肥の利用と 土壤微生物の効果②

京都大学農学部農芸化学教室

小林 達 治

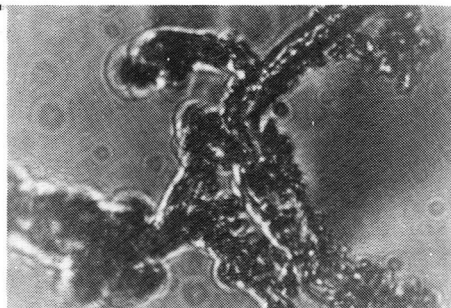


写真4 植物病原性糸状菌の菌糸に群がり、食い殺しつつある放線菌 ×1500

無機肥料多施用と土壤微生物

無機の化学肥料を土壤に過剰施用すると、土壤微生物の作用を通して、土壤の化学性・物理性・その他にかなりの影響を与えることになる。

アンモニア性窒素肥料を例にあげて説明しよう。硫酸や塩安、尿素などアンモニア性窒素肥料を土壤に施用すると、水田・畑土壤ともだいたい土壤粒子は負に荷電しているため、アンモニアイオンはその粒子に結合して、水田のように水がよく動く所においても流亡しない。そこへ水稻の根が伸長してくると、そのアンモニアは吸収され、水稻の代謝系に取り込まれて、生長に効果を発揮する。ところが、畑土壤の場合には、好気性条件であるので、硝化菌がかなり生存している（前述；アンモニアを亜硝酸に酸化する亜硝酸生成菌と亜硝酸を硝酸に酸化する硝酸生成菌とに分けられる）。これら一連の硝化菌により生成された硝酸イオンは負に荷電しているため土壤粒子と結合せず、雨水の流れと共に流亡してしまう。昔は、そのような窒素肥料の経済的施用法という意味あいでは、硝酸態窒素肥料の効果について論ずる場合が多いようであった。しかし、硝酸態窒素肥料は、もっと人間を含む動植物の生理・生化学的な面において問題視されるようになってきた。

無機窒素肥料過剰施用の有害性

第2次世界大戦後、窒素固定化学工業は飛躍的に伸び、化学肥料は安価となり、硫酸・塩安・尿素などの生産量も莫大となり、農家は競って化学窒素肥料を農作物に施用することになった。その結果、収量は増大し、戦後の食糧不足は解決されたのである。しかし、「過ぎたるは及ばざるが如し」

という諺でいわれるように、化学窒素肥料の施用量に応じて増収した施肥技術も、実は思わぬ伏兵にみまわれ、これから述べるような大きな公害問題を起してしまったのである。

化学窒素肥料過剰施用による公害問題

牧草を増産するために無機の化学窒素肥料を大量に牧草地帯に施用しました。前述したようにアンモニア性窒素肥料である硫酸・塩安・尿素のいずれで畑土壤に施用しても土壤中に生存する亜硝酸生成菌・硝酸化菌により、好気的な条件においては、次のような反応でアンモニアは酸化される。 $\text{NH}_4 \rightarrow \text{NO}_2 \rightarrow \text{NO}_3$ 。牧草や野菜類など畑作物は、その硝酸態窒素をよく吸収し、体内に蓄積し、光合成により生産されてきたTCAサイクル系有機酸と代謝反応をおこし、植物体の生長に大切なアミノ酸、核酸の塩基類などを合成し、更にそれらが高分子化して植物体を構成してゆくのである。硝酸態窒素を吸収した牧草は見掛け上、よく生長していました。しかし、その牧草に大量蓄積した硝酸態窒素(10,000 ppm以上蓄積することがある)は、そのまま牛に喰べられた時、牛の胃腸内ルーメンバクテリア等の酵素作用により還元されて($\text{NO}_3 \rightarrow \text{NO}_2$)亜硝酸ができ、それが胃腸を通して吸収されると、ひどい場合には牛が「ボックリ」と死ぬ事故が発生した。また、硝酸を多量に吸収したハウレンソウなどを摂取した離乳期にある乳幼児が貧血を起こす事態も現われた。

この原因は亜硝酸イオンが血液中の血色素と結合して、呼吸代謝にとって重要な酸素運搬能力を減退し、極端な場合には、牛が呼吸困難になって死亡し、また軽い場合には貧血症状におちいることが判明した。ところがどうでしょう。無機の化

学窒素肥料を過剰施用した公害問題は牧草やハウレンソウに限ったものではなく、他の植物に対しても同じようなことが起っていたのである。

大量の無機の化学窒素肥料で栽培されたトマトの果実から生産されたトマトジュースの中には硝酸・亜硝酸が数十～数百ppm 以上も含まれており、そのジュースを連日飲んだ人が頭痛・目まい・貧血症などにおちいる被害もでした。

缶詰製品を食べた場合、缶くさいことがよくあります。これは缶をメッキしている錫がわずかに溶けているために缶くさく感ずるのであるが、硝酸・亜硝酸を含む食料品を缶詰にした場合、それらは鉍酸なので金属をよく溶かすのです。無機の化学肥料をそれほど多量施用しなかった昔のころは、それら農作物中の硝酸・亜硝酸はそれほど植物体内に蓄積しておらず、従って缶詰を長期保存しても、それほど缶くさいものはありませんでした。そこで缶詰会社では缶の内表層を種々のプラスチック製フィルム等で被覆したが、完全におおくと、内容物が溶存酸素により長期保存中に酸化反応を起して褐変現象を引き起し、せっかくのおいしそうな内容物が茶褐色に変色して、一見腐ったように見え、困り果てた末、現在の缶詰は被覆フィルムに小さな穴をあけて、適当に缶の錫を少しずつ溶出させて、その金属を酸化させて内容物の酸化防止を行なっているものもある。このように缶詰会社を苦勞させた犯人は無機の化学肥料の過剰施用による害作用であることはいうまでもありません。

そのような作用以外に硝酸・亜硝酸を含む農作物を食べた場合、味が非常にまずくなるという、よくない作用もあります。

また、ハウス栽培では亜硝酸生成菌により二酸化窒素が揮散してハウス内に充満し、茎葉部の水滴などに溶けて亜硝酸となり、障害を受けて緑葉が黄化したり、枯れたこともあります。そしてそのような NO_x の充満したハウス内で農作業を長年にわたり行ってきた人が健康障害を訴えることもありました。

硝酸態窒素も人体に有害

農作物中に含まれる硝酸態窒素は人体に無害であるといわれた時期がありました。しかし市場で

購入して家庭の台所で放置しておく間に、植物体細胞はまだ生きており、その細胞内の硝酸還元酵素作用により亜硝酸に変えられるのである。また硝酸を数百 ppm 以上含むキャベツを市場から購入し、試食させ、唾液中の亜硝酸を調べたところ、数十 ppm 程度の発生を認めた報告もあります。人体においても口中バクテリアや腸内細菌が多数共存しており、多分それらの硝酸還元作用と考えられるが、食料品中に硝酸を含んでいるものを食べた場合に、人体内で有害な亜硝酸に変化するのである。

亜硝酸は人体内で「発ガン」物質に変化する可能性あり

亜硝酸は以上のように血色素と結合して酸素の運搬能力に障害を与えるが、それ以外にもっと害作用のある可能性ができました。亜硝酸イオンが血液にのって胃袋にいきますと、魚肉・牛肉・その他蛋白質中にある2級アミン $\left(\begin{smallmatrix} R_2 \\ R_1-N-H \end{smallmatrix} \right)$ が胃中の酵素並びに酸性条件により遊離してくる。その2級アミンは胃中の酸性側では亜硝酸と化学反応をおこしてニトロサミンに変化する。このニトロサミンは発ガン性が非常に強いのである。わずか数 ppm のニトロサミンを含む飲水を与えてマウスを飼うと、数カ月後には、ほとんど100%近く発ガンすることを認めました。

良質の有機質肥料で栽培していた昔のタバコは肺ガンと無関係であったかもしれない。しかし過剰の無機化学窒素肥料を施用したタバコの煙の中にニトロサミンをはっきり認めた報告をイギリスで発表している。

完熟堆肥で栽培したタバコからはニトロサミンを検出できませんでした。もちろん、体内へ入った硝酸・亜硝酸はPCBのように体内の脂肪中に入りこんでなかなか体外へ排出されないということはなく、尿として割合容易に排出されるし、また、ニトロサミンと拮抗する発ガン抑制物質の存在も推定されるので、硝酸・亜硝酸を含む農作物を摂取したから明日にでも「ガン」が発生するというものではない。しかし多種類の食料品中に少しずつでもそれらが蓄積していたら、やはり毎日たべるものですから危険であるということは言えるでしょう。

ひどいのは一夜漬の漬物である。硝酸をたくさん含んでいる野菜を一夜漬すると、微生物の作用により漬物になるのであるが、その還元酵素の作用によりもし最初 3,000 ppm くらい硝酸を含んでいたとすると、2,000 ppm くらい亜硝酸ができることになる。漬物は発ガン性のある染料で染色されていたころ(今は発売禁止になっている)、漬物とガンとの関係が一時騒がれていたことがあったが、それ以外にも亜硝酸による害作用は、現在においても存在するのである。もちろん、完熟堆肥・その他良質の有機質肥料で栽培した農作物中には、そのような有害物質は含まれないので、心配する必要はありません。

有機物と土壤微生物

前述したように有機物が土壤に施用されると有機栄養微生物を中心として猛烈に繁殖し、その有機物は分解を受ける。微生物の中には粘質物を分泌するものがあり、土壤粒子を団粒化し、土をふくませ(図4参照)、空気の流通はよくなり、保水性や肥料成分の吸着など化学性もよくなり、根の伸長を促進する環境を作る。これまでは、有機物の土壤施用による効果については、以上のような物理性や化学性の改善のみと考えていた。しかし、前述したように、土壤微生物の分泌する有効成分は植物根に直接、あるいは間接的に吸収され、後述するような農作物の品質向上にも大きな効果を及ぼすことになるのである。

各種有機物・堆肥の完熟化

落葉、稲わら、畜糞等の素材を堆肥化するには、まず、原材料と土壤または、糞尿を交互に堆積して微生物による分解作用を順調に行わせなければならない。必要に応じて水分を補給し(水分含量 50~60%程度)稲わらや樹皮、ノコ屑など炭素/窒素(C/N)比が高いものには、C/N 比の低い畜糞などを混合すると微生物発酵は促進される。日本のような雨量の多い所では、発酵過程中に溶出した有効成分が流出する場合がありますので、雨のかからないようにした方がよい。一口に有機物を堆肥化させるといっても植物性と動物性とで C/N 比も非常に異なるもので、その構成成分の構造も難分解性のものから易分解性のものまで千差万別であ



図4 土壤団粒構造と微生物分布

- a) 微粒子の集まった団粒
- b, b₁) 団粒構造中の小さな穴
- c) 微生物の集落が存在する空隙
- d) 細菌・カビ・放線菌などが認められる。

り、土壤微生物による分解過程における菌相並びに分泌、生産物も有益なものから有害なものまで蓄積してくることになる(表2の例も参考になるであろう)。

微生物がなかなか分解できない難分解性の素材である樹皮やもみがらで堆肥を作る場合、良質の堆肥として完熟化するには、かなり長期間を必要とする。自然発酵の場合、数年以上はかかるであろう。

樹皮やもみがらなどを堆肥化して、数ヵ月後、一応色が黒褐色に変色したからといって、そのまま土壤へ施用すると植物根に大変な危害を与えることがある。毒素を出すような有害菌が多数、そのような未完熟堆肥中に存在することもあり、その毒素で根が壊死することがある。また、C/N 比が高いこともあって、植物根に必要な窒素が微生物の増殖、すなわち、急激な微生物の増殖により土壤中の窒素成分が吸収利用され、植物に必要な窒素が微生物に利用され、植物は一時的に窒素飢餓の状態に陥り、また、同時に酸素不足をも引き起して、根は呼吸困難に直面するという害作用もでてくる。その他、未完熟堆肥の中には、初期の微生物分解で生成した有機酸等を多量含んでいることがあり、その高濃度蓄積による根の壊死作用も認められる(但し、低級脂肪酸等の有機酸の適当濃度、例えば数 ppm~数 10 ppm 以内の場合に

は根の伸長促進が観察される)。

堆肥化過程で重要なことは堆積した有機物の表層部分の未発酵のものと内部の分解が進んだものとを十分混合する——すなわち切返しをして未分解のものが残らないよう分解を均一にしなければ良質の完熟堆肥を得ることはできない。最低4回くらいは切返し、水分補給などをする必要がある(有効菌の種付けや通気操作などを行う場合には7日~2週間ほどで完熟化させることもありうる)。C/N比の低い畜糞など要素成分のバランスのとれているものを素材にする場合には、自然発酵でも数カ月以内に完熟するであろう。

繰返しになるが、有機物の素材によっては堆肥化過程において、しばしば植物病原性菌など有害菌が増殖したり、植物根に有害な物質を蓄積することがあるので、未完熟の堆肥を土壤に施用することは避けなければならない(有機物を土壤にすき込めば、地力が上がると早計して生の素材を土壤中へすき込むと、時によっては、ひどい障害を引き起すことがあるので注意してほしい)。

堆肥化過程中有機物中の易分解性のものは初期の段階で既に分解は完了しており、初期に生育していた有害な微生物も拮抗関係にある有益な微生物により死滅させられたものが多くなり、堆肥化の最終段階では有害なものも、有益なものも雑居するという形態となり、土壤へ施用した場合、急激な微生物増殖を引き起さない状態に達する。その時、その素材は完熟化したということができ

る。

完熟堆肥化したものは黒褐色化した上、素材の原形を認めないまでにぼろぼろになっており、悪臭・アンモニア臭・刺激臭はなく、土の香り、あるいは、素材によっては芳香性すら感ずるものになっている(乾燥し過ぎたような堆肥の場合には、そのままでは、におい成分が揮散してこないで、アルミ箔かフライパンの上に、その堆肥をのせ、下から火であぶると上記のにおい成分が揮散してきて、鼻で感ずるようになり、発酵堆肥の善悪を判定することが可能になる)。悪臭やアンモニア臭・刺激臭が残っていれば、まだ未完熟であり、芳香性や土のにおいを感じようになっていけば、完熟化したということができる。

前述したように、土壤中には植物に病気を引き起す植物病原性糸状菌や寄生性線虫がたくさん生存している。畜舎においてノコ屑などを敷いたものが糞にまざる場合には、そのまま土壤に施用するとそれらが病原性菌の「えさ」として利用され、障害を引き起すことがあるので、是非堆肥化のための発酵をしてほしい。

現在、世界で最高の堆肥化装置(減圧併流発酵槽)が吉田忠幸氏により開発・実用化され、広く利用されてきている。また畜舎から流出する廃水についても、適当に廃水処理(例えば、高濃度有機廃水処理に最適の光合成細菌利用による浄化法)をするか、または、微生物生態系が安定化するまでの期間(各期は3カ月間以上)経過してから清澄水で稀釈し、牧草地へ散布するようにしてほしい。完熟堆肥の中には、有害な菌と拮抗し、それらを溶菌死滅させる一例えば、放線菌や、線虫を好んで捕食する一例えばアースロボトリス等—農業的に有益な微生物もたくさんいる。

そして次に述べるようないろいろな効果を発揮するのである。

有機物の効用

前述したように植物の根の回りには根圏微生物が多数共存している。それらの関係は、ちょうど我々人間の腸内細菌と同様で、もし根圏に有害な微生物が大量に増殖すると根は障害を受け、ひどい場合には、その植物を枯死せしめるに至る。しかし、この根圏微生物として植物に有用な物質を

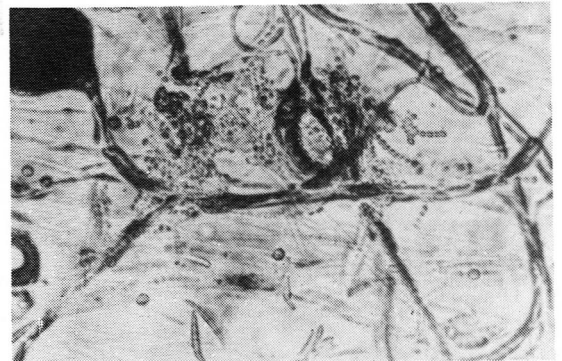


写真5 植物病原性糸状菌の菌糸が拮抗菌により犯され、破壊されてしまった状態 ×1000

(まだ胞子がところどころ残っているのが認められる。このような状態から、更に完熟化する期間をおくと、それらの胞子も完全に殺されてしまう。)

与える有益菌が適当量繁殖していると、その植物は好影響を受けて健全に生長し、多収穫をうることができる。それら有益微生物は植物にとって重要なアミノ酸、低分子量核酸、ビタミン、ホルモンなどを分泌し、植物はそれら有用物質を直接、間接に吸収して多収穫をもたらすとともに、収穫物の品質向上(味、色つや、香り、貯蔵性の増大)栄養素含量(ビタミン含有量)の増大などを引き起こすことが明らかとなった。

連作障害と土壤微生物

トマト、ナス、キュウリ、イチゴ、メロン、ピーマン等農作物によっては連作すると「イヤ地」現象、すなわち連作障害を引き起こし、収量は著しく減少する。また、ひどい場合には枯死に至ることがある。昔は経験的にそのような「イヤ地」現象を知っていて、輪作することが常識であった。しかし最近ではハウス栽培など効率生産を行うようになり、そのような障害を化学農薬施用や蒸気滅菌操作等で切り抜けてきた。しかし土壌中の小動物や微生物(特に有害菌)は化学農薬に耐性を獲得し、化学肥料の多量施用による塩類集積も災いして、連作障害を完全に防ぎきれない状態に立ち至ってしまった。このような連作障害は何故起こるのか? 我々は基礎研究を続け、その根本的な原因は寄生性線虫のような有害小動物の大量生息と植物病原性菌の優勢、偏重増殖によることをつきとめることができた。

土壌に有機物を施用したり、植物を栽培すると、土壌中では種々の微生物が増

減を繰り返し、拮抗関係でお互いに殺し合い、また、お互いに助け合いながら生命活動を続けているが、「イヤ地」を引き起す農作物の栽培土壌中には、連作回数が増えるにしたがい、有害なものもますます集積増殖してくることになる。

完熟堆肥中には、そのような有害な植物病原性菌を溶菌死滅させる拮抗菌が多数生存し(写真4, 5 参照)、また、線虫を喰い殺す微小生物がいるので、完熟堆肥施用や、有益菌の利用は連作障害を防除するのに有効な手段となる。

牧草栽培土壌においても開田直後しばらくは無機の化学肥料施用で牧草はよく生長するが、年々、

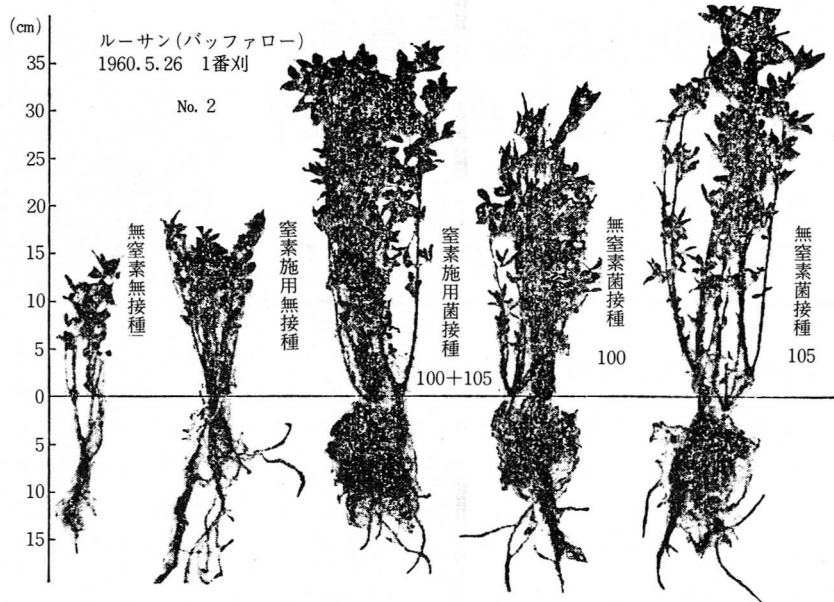


図5 ルースンに対する根粒菌接種効果(1番刈直前; 畜試草地部 小原)

表7 土壤微生物の関連する事項

- 炭素・窒素・硫黄等の元素循環
- 高等植物との相互作用
 - 土壌中の物質代謝(無機化・有機化・分解と合成に関与)
 - 根圏微生物の分泌物の植物栄養代謝に与える影響: 植物ホルモン、ビタミン、低分子量核酸、アミノ酸、有機酸等の分泌その他、環境条件の変化
- 化学肥料施用による種々の影響、農薬の分解
- 有毒物質の生産、食物の腐敗、発ガン物質の生産
- 人間・動物・植物の病原菌、木材質の腐食化
- イヤ地、連作障害
- 抗生物質、調味料その他食品製造
- 環境問題: 汚染と浄化、地盤沈下、金属腐食、有害重金属の生物濃縮
- 副産物の再資源化
- エネルギー生成: メタン、水素ガス等

その収穫量は減少してくる。土壌中の肥料成分を分析してみても十分な量は存在している。それにもかかわらず、牧草収量はますます減少するのである。このような現象も一種の連作障害ということができよう。

根粒性の牧草では、図5に示すように、やはり根粒を着生させた方が収量ははるかに増加している。

ま と め
以上、高等植物と土壌微生物、有機物との関連性を中心に論述してきたが、自然界における土壌

微生物の役割は表7に示すようにかなり広範囲にわたり関係があります。

良質の農産物を多収穫するためには完熟堆肥や良質の有機肥料を施用し、農業有益菌を「バランス」よく繁殖させることにつぎると結論することができる。そのようにすれば土壌条件は非常に良好なものとなり、いわゆる「地力」のある土づくりができ、農作物は健全に生長するようになるのです。

読者の皆さん、土壌中の小動物、微生物の役割を十分理解して、農作業に従事するよう希望します。

畑作における 緑肥作物の導入事例

北海道名寄地区農業改良普及所
鈴木清史



秋播コムギ収穫跡の緑肥牧草の生育状況（1983年11月）

名寄市智恵文地区の農業

当地区は、北海道で最も北に位置する畑作地帯である。名寄盆地の北部にあり、寒暖の差が激しく、気象条件は厳しい。加えて、耕地の大半は、透・排水性の悪い重粘土におおわれ、営農条件は、決して良いとはいえない。

耕地面積は約2,600 haで、180 数戸が農業経営

を行なっている。その多くは、テンサイ、バレイショ、コムギ等を栽培する畑作専業、あるいは、畑作物とカボチャやハクサイの露地野菜を取り入れた畑作＋野菜の複合経営を行なっている。

当地区の各作物の作付は、表1のように、特定の作物にかたよることなく、均衡のとれた作付配

表1 智恵文地区農作物作付面積（昭和58年度）

種 類		面 積(ha)	比 率 (%)	
麦 類	コ ム ギ	385	15.4	(20.4)
	エ ン パ ク	13		
豆 類	ア ズ キ	352	13.9	(18.5)
	そ の 他	9		
バ レ イ シ ョ		372	14.4	(19.0)
テ ン サ イ		266	10.3	(13.6)
野菜類	葉 菜	159	6.1	(8.1)
	果 菜	103	4.0	(5.3)
	根 菜	20	0.8	(1.0)
	スイートコーン	276	10.7	(14.1)
	(畑作物・野菜計)	(1,955)	(75.5)	(100.0)
飼 料 作 物		553	21.4	—
そ の 他		82	3.2	—
合 計		2,590	100.0	—

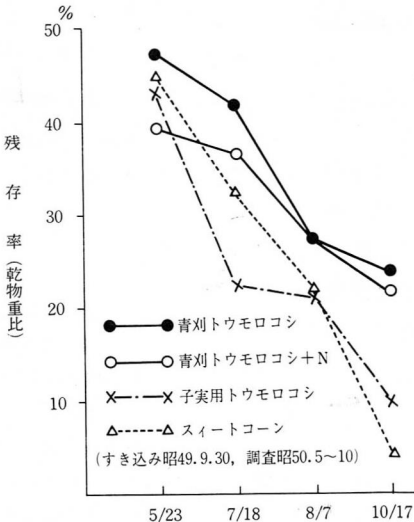


図1 トウモロコシ茎葉すき込み後の残存率（名寄）