

今日の環境問題と土壌改良資材

誌名	農業および園芸 = Agriculture and horticulture
ISSN	03695247
著者名	宮下,清貴
発行元	養賢堂
巻/号	84巻1号
掲載ページ	p. 197-202
発行年月	2009年1月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



今日の環境問題と土壌改良資材

宮下清貴*

〔キーワード〕: 食の安全, 炭素貯留, 微生物資材, 土壌微生物, バイオレメディエーション

1. 深刻化する地球環境問題と農業

2007年に出されたIPCC(気候変動に関する政府間パネル)の第4次評価報告書は,地球温暖化の影響はすでにさまざまところに現れており,このまま推移すれば人間の生活環境ばかりでなく農業生産にも大きな影響が及ぶことを強く警告した。干ばつによる不作から始まった世界の穀物価格の高騰は,バイオエネルギー生産,投機筋,さらには穀物生産国の輸出制限も受けて貧しい国の人々を直撃し,われわれの食卓にも大きな影響を及ぼしている。今後1年に7,000万人ずつ増え続ける世界の人口を養い,そのうえ急成長している国々の畜産物等の需要増に応えるためには生産量の増大が必要であるが,これ以上の農地の拡大は熱帯雨林の破壊や土壌浸食の増加等,大きな環境負荷をもたらす危険が大きい。一方,食の安全を巡る動きは相変わらず深刻であり,生産環境における化学物質汚染によるリスクの低減は世界共通の課題である。

こうしたなか,環境問題,食料・農業問題の解決のために,資源としての土壌に注目が集まっており,さらに土壌の有する機能についても,植物の生育基盤のほかに,炭素の貯留,生物多様性維持等,新たな機能が期待されている。

以上のような背景の下,前半は主として環境問題の視点からみた「土壌改良資材」の新たな意義について,そして後半では,環境問題解決の切り札として期待されながらいまだに混乱が続いているいわゆる「微生物資材」について,考えてみたい。

2. 土壌改良資材の研究の変遷

(1) 不良土壌の改善から環境保全へ

土壌改良資材に関する研究について,戦後から現在まで振り返ると,時代により変化していることが

わかる。

終戦後,食料(コメ)不足の解消と引揚者が入植した耕作不適地への対応の必要性から,収量の低い耕地を対象に収量を阻害している原因を解明することを目的とした低位生産地調査(1947~1969年)が,またこれと相前後して1959~1979年には,土壌の地力,浸食状況,地力対策実施状況などを調査して改良対策を提案することを目的とした「地力保全基本調査」が実施された。その後,地力保全基本調査の結果をふまえ,土壌管理が土壌に及ぼす影響を長期にわたって調べることを目的とした,「土壌環境基礎調査」(1979~1999)が実施されている。地力保全基本調査では,土壌の生産力と関連した性質を測定することでその阻害要因を明らかにし,その程度や種類によって分級し,不良土壌に対しては土地改良,土壌改良等により,克服の努力が行われてきた(中井 2006)。

産業の発展や都市廃棄物の増大を受け,1970年代後半ごろからは省資源や環境保全の立場からの研究が行われている。すなわち,各種有機性廃棄物や副産物の農用資材としての利活用や評価に関する研究,さらには肥料等農用資材の施用が環境に及ぼす影響を解明する研究がなされるようになった(麻生・杉原 1985, 越野・吉羽 1989)。この時期は,時代の変化に伴い土壌管理の粗放化が進み,その結果としての地力の低下が懸念されており,土作りのためにそうした資材の利用のための研究が行われた。

さらに,環境保全型農業の推進が図られるなかで土壌を環境資源として位置づけ,持続的に維持するために土作りを進め,そのために土壌改良資材が使われている。(小川・日高 1996)このように廃棄物を改良資材に変えるリサイクル技術開発とともに,微生物資材の開発も活発に行われるようになってきた(藤原・後藤 1999)

*独立行政法人農業環境技術研究所(Kiyotaka Miyashita)

(2) 食の安全・安心と土壌改良資材

近年、食の安全・安心の観点から、環境浄化や安全な農産物生産のための資材の開発・利用研究が増加しており、日本土壌肥料学会 2008 年度大会における「土壌改良資材」と銘打った発表は、その大半が食の安全に関連している。

代表的な土壌汚染物質であるカドミウムは、CODEX (FAO, WHO 共同の食品規格委員会) において玄米中の国際基準濃度が 0.4 ppm と定まったことを受け、関心が高まっている。農林水産省が実施した全国調査によると、1997 年と 1998 年の調査では玄米試料 37,250 点のうち 0.4 ppm を超えた試料は 94 点と、約 0.3% であった。2007 年の調査では、過去に 0.4 ppm 以上が検出された地域では、水管理の徹底により 0.4 ppm 未満に低減されていることが確認されている。しかし今後、転換畑においてダイズやホウレンソウ等のカドミウム吸収農が高い作物が汚染されることが予想される。カドミウム吸収抑制のための土壌改良資材としては、ケイカル、熔リンのほかに、ALC (多孔質ケイカル)、石灰窒素、鉄資材、ゼオライト、リン酸セルロース資材、カキ殻、その他有機資材 (堆肥) 等が検討されている。(石川 2008)

POPs (残留性有機汚染物質, Persistent Organic Pollutants) に関しては、かつて農薬として使われていたドリソ剤 (ディルドリン, アルドリン, エンドリン) が、ほとんど分解を受けないために土壌中に残存し、農作物に吸収されて基準値を超えた汚染が発見される。ドリソ剤の作物の吸収を抑制するために土壌に添加する吸着資材、吸収抑制資材として活性炭が有効であるが、その他、ピートモス、木材チップ等が検討されている。

カドミウムや POPs 汚染土壌の修復技術として、それら物質の高吸収植物を利用したファイトレメディエーションの開発が進められている (村上 2007)。ファイトレメディエーションは他の方法と比較して、コスト的に有利で、環境にもやさしい方法である。この場合、ファイトレメディエーション植物による汚染物質の吸収効率を高めるための土壌改良資材の利用が検討されている。

3. 地球温暖化と土壌有機物

(1) 炭素プールとしての土壌有機物

温暖化の防止が人類の大きな課題となる中で、炭素蓄積 (炭素貯留) としての土壌有機物の役割に注目が集まっている。

土壌中には腐植等の土壌有機物として多量の炭素が蓄積されている。世界の土壌に蓄積されている有機物炭素の量は 1,550 ギガ t (1 ギガ t は 10 億 t) と、その量は大気にプールされている炭素 760 ギガ t の約 2 倍、植物バイオマスとしてプールされている炭素 560 ギガ t の約 3 倍である。土壌にはさらに炭酸カルシウム等の無機態として、950 ギガ t の炭素が蓄積されている。このように、土壌には膨大な量の炭素が蓄積されており、その変動は地球の気候変動そのものに大きな影響を与えることになる (Lal 2004)。

森林や草地等の自然生態系を農地に変換すると、土壌への植物遺体等の有機物の添加量は減るのに対し、土壌中の有機物の分解が進み、その結果、土壌炭素の概ね 60~70% が失われるとされている。表 1 は、人間活動の結果大気に放出された炭素量の、産業革命前と産業革命後の比較である。産業革命前は農耕等による自然生態系の改変の結果、年に 0.04 ギガ t の炭素を 7,800 年間放出し、その量は 320 ギガ t にのぼる。産業革命以後は化石燃料の大規模な燃焼により、1850 年から 1998 年の間に 270 ギガ t の炭素が消費されている。一方、同期間中に陸上生態系から失われた炭素は 136 ギガ t で、うち 78 ギ

表 1 土地利用の変さらに伴う土壌からの炭素の放出と化石燃料の燃焼による炭素の損失

(産業革命以前)	
化石燃料の燃焼	0
土地利用の変さらによる陸上生態系からの損失	320
(産業革命後)	
化石燃料の燃焼(1850年以降)	270±30
土地利用の変さらによる陸上生態系からの損失	136±5
うち、農業(耕作)による損失	78±12
土壌浸食	26±9
無機化(分解)	52±8

単位:ギガt

R. Lal(2004)より

ガtは土壌からの損失であり、さらにそのうちの1/3は浸食等により、残り2/3は無機化(有機物分解)による損失である。歴史的にみると土壌有機物の分解により失われた炭素量も、膨大な量であることがわかる。

(2) 土壌への炭素貯留(炭素蓄積)

一般に炭素貯留とは、大気中のCO₂を長寿命のプールに移動させ、安定的に保管することである。工業では、工場等から放出され、あるいは放出される寸前のCO₂を集め、地中や水中に封じ込める。CO₂地中隔離などとも呼ばれるこれらの技術は開発が急がれているが、大規模な応用までにはまだ時間がかかるとされている。それに対し、土壌への炭素蓄積は、すぐにでも実現可能であり、コスト的に有利で、環境にも優しい現実的な方法と言える。

土壌の炭素蓄積とは、適切な土地利用や土壌管理により、土壌の有機物や無機炭素を増加させることである。世界で農耕地等の管理生態系に今後蓄積できる炭素量は、歴史的に人間活動により失われてきた炭素量とほぼ等しいと考えると、55から78ギガtと見積もられる。実際に可能な量はそのうちの50~66%程度とすると、吸収される炭素の量は年に0.4から1.2ギガtで、その量は全排出量の5~15%に相当すると見積もられる。

一方、土壌中への炭素の蓄積は無制限ではなく、漸減して一定のレベルに近づいていくが、その効果は数十年は続くと考えられる。土壌の炭素貯留のもう一つの特徴は、このことが農耕地土壌の改良にもつながり、農業生産にも貢献することである。

(3) 日本 の 農 耕 地 土 壌 に よ る 炭 素 蓄 積 の 可 能 性

1979年から行われた、全国2万地点を対象とした定点調査の結果より、中井(2006)は20年間の土壌炭素の変化を解析している。それによると、普通畑は減少、水田はほぼ維持、樹園地や茶園土壌は増加といった傾向がみられている。炭素貯留の可能性に関しては、堆肥連用試験の結果をもとに、農耕地土壌では、以下のように試算している(表2、福田2008)。全国の農地土壌に対して、水田に1t、畑に1.5tの堆肥を施用した場合、炭素窒素の増加量は220万tC/年となる。この値か

ら堆肥の施用により水田から発生するメタンガスを差し引くと、193~204万tCの増加となり、この量は、京都議定書におけるわが国の第1約束期間における年間削減目標量2,063万tの約1割に相当する。

(4) 炭素貯留の視点から見た有機物資材

農地土壌の炭素貯留(土壌有機物)を増やすためには、さまざまな土壌管理が考えられる。湛水(水田)条件では有機物の分解は抑制されるし、畑条件では不耕起(耕起回数の減少)が広く有効である。一方、添加する有機物資材について、炭素蓄積を目的とした場合、考慮すべき点は何であろうか。土壌の有機物含量(有機炭素含量)を高めるためには、施用する有機物量を増やすことと、土壌中の有機物の分解を抑制することである。有機物の種類としては、新鮮な植物遺体は一般的に分解されやすい。成分として最も難分解性のリグニン、ベンゼン環の開裂に酸素添加反応が必要なため嫌気的条件下(湛水条件)では分解が進まないが、好気的条件下では徐々に分解する。セルロースはリグニン等と複雑な構造体を形成していると微生物の攻撃から守られるが、純品は比較的容易に分解される。

植物遺体の主要成分であるセルロースを下層土に添加したところ、古い有機物(年代測定で2,567年前)の微生物分解が促進されたという報告がある(Fontaineら2007)。このことは、下層土では、微生物の基本的な代謝に必要な易分解性の有機物が不足しているために、有機物分解が抑制されているが、新鮮な有機物が加わるとブライミング効果となり、それまで蓄積されていた有機物の分解も促進されるためと考えられている。新鮮な有機物の施用は逆に土壌中に蓄積していた有機物の分解を促進する可能性もあり、注意が必要である。

炭素蓄積の視点からは、施要する有機物資材は腐

表2 10a当たり、水田1.0t、畑1.5tの堆肥を全国の農地土壌に施用した場合の炭素貯留増加量の試算

	年間炭素貯留 増加量(A)	有機物施用に伴う メタン発生量(B)	農地土壌の炭素収支 (A-B)
水田	85	17~27	58~69
普通畑	135	-	135
全農地土壌	220	17~27	193~204

単位:万tC/年
福田(2008)より

朽が十分に進んでいることが重要である(堆肥肥)。十分に腐熟した有機物資材は、多価陽イオンと結合できる官能期が多く、 Al^{3+} イオンは腐植と配位化合物を形成する。このことが、火山灰土壌等で有機物が多量に蓄積する要因と考えられている。久保田ら(1986)は、堆肥化の過程でヒドロキシアルミニウムを添加することで、その後の堆積期間および完成堆肥として土壌に添加されたのちの微生物分解が抑制されることを示している。また熊谷ら(2006)は、牛ふんコンポストに浄水ケーキを混合したアルミニウム型牛ふんコンポストを調整し、分解の低減化を図っている。

土壌有機物研究の、炭素貯留の視点からの本格的な研究は、これからである。

4. 「微生物資材」を巡る混乱

微生物は地球上の物質循環において重要な役割を演じており、さまざまな環境問題や農業生産上の問題の解決のためにもその利用が期待されている。土壌で微生物を利用するためのいわゆる「微生物資材」は多くの種類が出回っているが、その中身は多様であり、時に社会的な混乱を招いてきた。

(1) 土壌の性質

作物生産との関連における土壌の性質は、土壌の

物理性、化学性、生物性の3つに分けて考えることが多い。このうち通気性や保水性に代償される物理性については土壌の固相、液相、気相の3相分布で表すことができるし、化学性については植物の養分となる元素の含量、土壌反応(pH)、陽イオン交換容量(CEC)などの代表的な性質で表すことができる。それに対し作物生産との関連における土壌の生物性については、限られた性質で表すことはそもそも困難である。

(2) 土壌の生物性は化学性・物理性に依存する

土壌の化学性と物理性は、それぞれが独立して存在すると言える。このため、何か問題が起こった場合も、原因を究明して対策を立てやすい。それに対し土壌の生物性は、土壌の物理性や化学性と独立して単独に存在することはあり得ない。生物であるからには環境に依存するのは当然であるが、土壌の生物性に関しては、ときとして単独に論じられることが多い。実際に、土壌の生物性の改良は、化学性や物理性に変更を加えることで行われる。

この点を、バイオレメディエーションを例に見てみる。微生物の力を利用して汚染物質をその場で分解するバイオレメディエーションでは、汚染されている土壌自体に汚染物質分解能があるかどうか(分



図1 油汚染土壌のバイオレメディエーションの現場(オランダ)

微生物を活性化するために、土壌を掘り起こして通気し、微生物の栄養分を添加する。重機が並んだ、一見すると土木工事現場であり、「バイオ」からくるイメージとはほど遠い。

解微生物の存在)を調査し、分解能を有することが確認された場合には分解微生物を活性化する方策がとられる。油污染土壌の場合には、分解は酸化的反応のため、パイプを通した通気や攪拌、耕起、過酸化水素水の供給等により、酸素の供給が行われる。汚染物質が多塩素芳香族化合物の場合には、嫌氣的微生物により脱塩素反応を促進するために、湛水処理をして還元的条件とする。土壌温度が生物活性には低い冬季の場合には、温水パイプの敷設等により加温する。土壌に微生物を活性化するための養分(窒素、リン等)が不足している場合には、それらの養分を添加する。このように、実際のバイオレメディエーションの作業自体は、一般的なイメージとは異なり、むしろ土木工事に近いと言える(図1)。

汚染土壌が分解能を有していない場合、あるいは分解能が十分でない場合には、外から分解菌の添加(接種)が考えられるが、土壌に分解微生物を添加しても、その効果は一般的には認められない。ただし、土壌への微生物接種の問題は、ここでは論じない。

(3)「接種剤」か、微生物のための「肥料」か

微生物資材とは、特定の微生物を土壌に添加することを目的に鉱物や有機物に添加した微生物を含んだ「接種剤(inoculum, inoculant)」であると、一般的には考えられている。しかし現実にはこうした接種剤のほかに、微生物そのものは添加しないで(土壌中の)微生物を増殖・活性化することを目的とした資材も「微生物資材」と称して販売されており、混乱の元となっている。後者の場合には、有機物資材や鉱物資材、化学的資材とは物質の違いではなく、目的による違いということになる。

その点バイオレメディエーションでは、微生物を活性化するための資材は「肥料(fertilizer)」と呼び、接種剤とは明確に区別している。

(4)微生物資材と科学的根拠

微生物資材に関しては、目的が漠然としていている、微生物やその他の内容物に関して明確でない、何にでも効果があるかのように説明しているなど、科学的に見ておかしいものも少なからずみられる。こうした資材に関しては、学術論文としての発表がなされないため、他の研究者が同じ条件で追試することができず、したがって実証も反証も不可能とい

うことになる。その一方で、一般的な市民向けの商業雑誌や講演会では科学的用語を駆使して宣伝が行われる。池内(2008)は、一見科学を装いながらその実科学的方法を満たしていない「疑似科学」を、3種類に分類しているが、科学的根拠がない微生物資材に関しては、このうち第2種(科学的に見せながらその根拠がないもので、科学の活用・緩用・乱用・剽窃・誤用・悪用・盗用)に該当すると言えよう。

土壌では、複雑な物理環境、化学環境の中で、それこそ無数の数と種類の微生物が棲息し、活動している。このため、スケール(サイズ)は小さくても生態系としての複雑さはきわめて高い。このような複雑な系に対は、「系を構成する各要素に分解し、それを理想状態において徹底的に調べることで全体像が把握できる」とする現代の「要素還元主義」の科学が苦手とするところである。他方、複雑な社会の中で、受け取る側の人間には「心の揺らぎがあり、非合理ではあってもそれを選びたい心理になってしまう」傾向があると池内は指摘する。現代は科学の時代と言われながらも、科学は必ずしも明確な答えを出してはくれない。科学者はむしろ科学を知れば知るほど、その発言は慎重になる。そんなとき、手っ取り早く明確な答えを与えてくれるものに飛びつきたくなるのも、人間の心理であろうか。

(5)微生物資材の添加と環境影響

あるとき、一般の健康・スポーツ誌で、微生物資材を用いて都心の川を浄化する取組みの記事が目に入った。そこには都心に設置された培養タンクと、「菌」を汚染した河川に流している写真が掲載されていた。さらに都心の区の「総合ホームページ」には、「毎週10tの活性液(培養液であろうか?)を培養して川に投入している」、「〇〇菌でつくった8,000個の土団子を子供も参加して川に投げ入れた」ことが記されていた。菌の効果はまだ認められないと書かれていたが、それよりも気にかかったのは、そうした「資材」を川に添加することによる環境への影響である。「微生物資材」を添加して川を浄化しようとするならば、事前の調査、資材の添加による環境影響評価(アセスメント)を十分に行ったうえで実施の是非を判断し、その後も定期的に環境影響のモニタリングが行われなければならない。微生物資材やバイオレメディエーションの効果は

条件に依存しており、時には環境に負の影響を及ぼす恐れがある。微生物は環境にやさしいという先入観の下に、安易に実施していることはないであろうか。

(6) 微生物の有効な利用のために

40億年近い年月をかけて環境との相互作用の産物として進化してきた微生物は、実に多様な機能を有しており、環境問題が深刻化する中で、環境中でその機能をいかにうまく発揮して生かしていくかが問われている。しかし微生物への安直な期待は禁物である。微生物が環境との総合作用による進化の産物であることを十分理解し、目的とする微生物が十分機能するような環境を作り上げることこそが、微生物利用のポイントである。

参考文献

- 麻生昇平・杉原進 1985. 第10部門, 肥料および施肥法. 日本土壤肥科学雑誌 56(6):561-570.
- Fontaine, S., S. Barot, P. Barre, N. Bdioui, B. Mary and C. Rumpel 2007. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature* 450:277-28.
- 藤原俊六郎・後藤逸男 1999. 土壌改良資材. 日本土壤肥科学雑誌 70(5):707-712.
- 福田英明 2008. 農地土壌の現状と課題, 土壌資源の今日的役割と課題. 大日本農会, 東京, p33-53.
- 池内了 2008. 疑似科学. 岩波書店, 東京.
- 石川寛 2008. 農用地における重金属汚染土壌の対策技術の最前線, 7. 水稲のカドミウム吸収抑制技術. 日本土壤肥科学雑誌 79(4):408-416.
- 越野正義・吉羽雅昭 1989. 肥料および施肥法. 日本土壤肥科学雑誌 60(6):584-596.
- 久保田徹・箱石正・高橋茂 1986. ヒドロキシアルミニウム処理による堆肥の分解抑制. 日本土壤肥科学雑誌 57(2):155-160.
- 熊谷千冬・三枝正彦・齋藤公夫・伊藤豊彰 2006. アルミニウム型牛ふんコンポストの作成と強酸性黒ボク土下層土への施用効果. 日本土壤肥科学雑誌 77(5):507-515.
- Lal, R. 2004. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science* 304:1623-1627.
- 村上政治 2007. 農用地における重金属汚染土壌の対策技術の最前線, 3. ファイトレメディエーション技術の現状と展望. 日本土壤肥科学雑誌 78(6):525-533.
- 中井真 2006. 農耕地土壌調査の現状と課題. 農業 1487:31-42.
- 小川吉男・日高伸 1996. 土壌改良資材. 日本土壤肥科学雑誌 67(5):575-579.
- 農林水産省 2008. 食品中のカドミウムに関する研究. <http://www.maff.go.jp/cd/index.html>