

## バイオマス循環活用を可能にするプロバイオティクス農業原理

### Principles of Probiotics Agriculture Promoting Biomass Recycle

京都大学名誉教授 松井三郎

2009. 4. 5

#### 1. はじめに

バイオマスを活用することは、日本や世界の農業を救い、地球環境保全の切り札となる。バイオマス循環活用は、伝統的な有機農業の発展活用に他ならない。有機農業とは、農業有機系廃棄物、家畜糞、人尿尿、生ごみ等をコンポスト（堆肥化）して農業肥料資材として循環する農業であり、化学肥料と農薬が導入される以前の伝統的農業であり、有機農業方式は2000年有機JAS法で認証されている。しかし、有機農業実施の理解はまだ進んでいない。ここでは、有機農業の本質である肥料循環、有機資材循環と微生物活用（生菌利用プロバイオティクス）について、最新の情報を整理して原理を紹介する。

#### 1. 化学肥料、農薬の問題と有機農業の弱点克服

単一作物大規模農業を容易にした機械化農業、化学肥料依存農業はもう一方で連作障害が発生するため、それとの戦いでさまざまな農薬の開発使用を続けている。新規除草剤、殺虫剤の使用は飲料水汚染、水中生態系への影響、昆虫による受粉障害など、農業の持続可能性に疑問を提起している。アメリカで見られる化学肥料と農薬の多量な使用は、土壌の著しい劣化を引き起こし、小麦、トウモロコシ、大豆などの大規模農業の持続性において深刻な状況になっている。アメリカ農業の非持続性は、世界の穀物輸出国の持続性を心配させている。稲作は連作障害が起りにくいところが、持続可能な農業として評価されている。しかし、除草剤の利用により、また化学肥料の利用により問題がないわけではない。野菜、果実には必ず連作障害が生じる。化学肥料と農薬依存農業の負の影響は、土壌細菌を殺し、有機資材（腐食質）がなくなる地力低下、さらに農地に連続する湿地生態系の破壊がある。例えば天然記念物の朱鷺、コウノトリの絶滅の原因は、餌となる昆虫、小魚が水田生態系と連続する湿地生態系において植物プランクトン、動物プランクトンの連鎖破壊の結果、生息していないことによっている。農地生態系の破壊と同時に、気がついていない伝統的な果実、野菜の「うま味」をも失っている。その原因が、有機農業の特質を忘れた農業に他ならない。一方、有機農業は、

化学肥料、農薬使用農業と比較して労力がかかり、省力化による人権費抑制をはかる現代実施が困難とされてきた。しかし、農業環境の変化が進行している。窒素肥料の生産のため、天然ガス消費、ナフサ消費、石炭消費が伴うことから、地球温暖化対策との関係で、このまま無制限に窒素肥料製造することに問題が提起されている。リン肥料は、リン鉱石資源の埋蔵量に限界が見えはじめ、リンピーク（リン鉱石年間発掘量の最大年がもう直ぐ起こること—石油のオイルピークと比較）が、指摘されており、アメリカが既にリン鉱石を戦略物資として考え、中国も同様の立場をとり輸出に高い税金を課して、日本は輸入困難になっている。中国農業の大量の農薬使用が、日本の消費者に食の安全性を考えさせる切っ掛けとなった。中国批判の目は、実は日本の農業にも向いている。

このように、現代農業が抱える根本問題である肥料確保、農薬使用の減量を解決する方向は、有機農業の弱点を克服しつつ、近代的な科学の視点で新しい有機農業方法の開発を進めることに他ならない。伝統的な有機農業は、どこにその長所があるのか？

#### 2. 有機農業 —コンポスト利用の3つの意義

有機農業の実施は、農業有機系廃棄物、家畜糞、人尿尿、生ごみ等をコンポスト（堆肥化）して農業肥料資材と活用することである。コンポストの「質」を理解する研究が遅れている。コンポスト利用の3つの意義は、次の側面でまとめられる。1) 肥料価値、2) 有機資材価値、3) 微生物活用（生菌利用プロバイオティクス）の連作障害防止と植物ホルモン利用である。

##### 2-1. 肥料価値

コンポストは、窒素、リン、カリのどれかの栄養素を含む。3種類がバランスよく含まれているのは、人尿であり、また家畜尿、鶏糞である<sup>1)</sup>。人糞、動物糞はバランスに欠けることから、窒素、リン、カリの最終成分の調整が必要で、他のものと組み合わせる（表1参照）。生ごみコンポストは、カリが多い、窒素リンは不足気味、したがって家畜糞などの追

加が必要。下水汚泥は、リンが含まれているが窒素、カリは少ない。

一般に植物が生育するには、最初に窒素分の補給が必要で、最初から最後までリン分は持続して必要である。最終的に果実として収穫するにはカリが必須となる。従って、生育段階にタイムリーに必要とする肥料の補給がなければ、収穫に繋がらない。特に窒素は、尿素、アンモニア態、硝酸態の補給になることから、溶解性で雨が降ると流出して無効になりやすい。窒素肥料の持続した土壌供給は難しい。また、窒素施肥は植物成長の初期に多量に必要、不足すると成長障害一多すぎると成長し過ぎて、植物の高さが必要以上に成長し、花の開花、結実が遅れる問題が発生する。適切な窒素施肥の問題解決は、依然として残されている。

表 1 尿と尿の栄養素比較(after SEPA,1995)

	尿		尿		合計	
	g/人/日	%	g/人/日	%	g/人/日	%
総重量	900-1200	90	70-140	10	1000-1400	100
乾燥重量	60	63	35	37	95	100
窒素	11.0	88	1.5	12	12.5	100
リン	1.0	67	0.5	33	1.5	100

## 2-2. 有機資材価値

有機資材とは有機質の最終分解物が腐植質となって、土の団粒構造(砂、粘土を結合し大きな団粒を作る結合剤が腐植質)づくりに役立つものである。結合剤となる腐食質は、さらに水分保持して、かつイオン交換能力を持つことから、窒素、リンの栄養分保持、ミネラル(カリ、マグネシウム、アンモニア、カルシウム、ナトリウム、コバルトなど)を保持し、肥料流出を防ぐ。栄養素を持続して供給する優れた価値を有することから、豊かな土壌は、「黒い土」と称される理由がこの点にある。

## 2-3. 微生物活用(生菌利用プロバイオティクス)の連作障害防止と植物ホルモン利用

植物が生育する土壌中には、その植物に攻撃をかけて自身の栄養源とする無数の微生物が存在する。悪玉菌(病害を発生する微生物、昆虫、線虫)を抑制することが連作障害を防止し、農薬無しで栽培できる鍵を握っている。

連作障害を起こしやすい植物は以下のものである。

- ナス科: トマト、ジャガイモ、ピーマン、トウガラシなど
- ウリ科: ウリ、キュウリ、スイカ、メロンなど
- アブラナ科:
  - 結球: ハクサイ、キャベツ、芽キャベツ、ブロッコリー、カリフラワーなど
  - 葉菜: コマツナ、シロナなど
  - 根菜: ダイコン、ハツカダイコン、カブなど
- マメ科: エダマメ、インゲンマメなど
- ヤマノイモ科: ナガイモなど

連作障害を起こす悪玉菌の生育を止める善玉菌をコンポスト中に繁殖させて、微生物農薬として土壌に供給することが、コンポストの重要な側面である。コンポスト産物に善玉菌を多数存在させることを生菌利用プロバイオティクスと呼んでいる。現在、多く活用されている微生物は、次の2グループである。他に多くの善玉菌も存在するが、意図的な活用にはいたっていない。今後の研究と開発で、発展する可能性が残されている。特にこの分野の研究は未だ発展途上といえる。日本のみならず世界的にみて、この分野の研究が遅れている。

### プロバイオティクス利用微生物群

#### 1) 乳酸菌属枯草菌属グループ

好気性高温発酵菌(主として乳酸菌属、酵母菌属を含む)

1-1 発酵温度が65°C度-80°Cまで上げることができる。

1-2 好気性超高温発酵菌(枯草菌属) 発酵温度が85°C超えて100°C以上になるときもある。

#### 2) 放線菌属グループ

好気性中温発酵菌(主として放線菌属) 発酵温度が、低温発酵菌 65°C以下

#### 1) 乳酸菌属枯草菌属グループ

1-1. 第1グループの、好気性高温発酵菌(主として乳酸菌属、酵母菌属を含む)は、コンポスト温度を上昇させて病原菌となるグラム陰性菌を殺菌することから、コンポスト産物(安定化したもの)は、腐敗菌(グラム陰性菌)がなくなり、乳酸菌属、酵母菌属の孢子が多数存在している。コンポストは安全で扱いやすく、農地に肥料として利用することがで

きる。

乳酸菌、酵母菌は、殆どの野菜、果実、稲作などの生育植物に攻撃をかけて悪玉菌となることはない。好気性状態を維持することで、発酵温度が上昇する。嫌気性になると発酵温度が上昇せず、発酵が持続し、グラム陰性菌を殺菌することに成功しない。胞子が土壌中で目覚めて、連作障害病原菌や、線虫、昆虫を排除する物質を分泌する。コンポスト中には、有機資材として価値のある腐植質の生産量はすくなく、施肥した土壌中で腐植化が継続する。

1-2. 好気性超高温発酵菌(枯草菌属)は、枯草菌(バチルス菌)によるコンポストで好気性発酵期間が 45日-120日程度、種菌の種類と方法により45日以下に短縮可能。北海道や韓国の厳寒期でも高温発酵が可能で実施されている。

好気性のため常時空気供給が必要。アミノ酸分解が強く、アンモニア気散が強い。悪臭対策からアンモニア臭気の回収が必要な場所がある。したがってコンポスト産物の窒素成分が少ないので、後で窒素追肥が必要。コンポスト産物には枯草菌の胞子が多数含まれている。胞子が土壌中で目覚めて、連作障害病原菌や、線虫、昆虫を排除する。例えば、線虫による芋の「根こぶ病」が起こらないなど効果が証明されている。また超高温発酵により、病原菌の死滅、線虫、人糞中の回虫卵などが死滅。枯草菌や乳酸菌の胞子が土中で目覚めて増殖する過程で、分泌する物質が他の病原菌などを抑制する。

枯草菌が分泌する植物成長ホルモンが重要である。枯草菌は「オーキシシン」(インドール酢酸)を分泌しそれが植物成長を促している。有機農業の特質は、果実が大きくなり、また味が「旨い」と言われる、理由はこの点にある。

## 2) 放線菌属グループ

第2グループの、好気性中温発酵菌(主として放線菌属))は、発酵温度が、低温発酵菌 65℃以下である。好気性が主たる働きで嫌気性と混合した低温発酵で、発酵期間が 150日から200日(秋から冬を越すため)。日本の伝統的コンポスト発酵法は、この方法でつくられた。発酵期間が長く、この間に大半のグラム陰性菌は死滅するが、回虫卵などは生存する。最終産物の中に、放線菌胞子が含まれ、それらが土壌の中で目覚めて主役になると他の微生物を攻撃して連作障害を止めている。放線菌が生産するキチナーゼ

は、「根腐萎ちよう病」や「青枯病」などを引き起こすフザリウム菌の細胞壁のキチンを分解するので、これらの病気を抑制するほか、有機物分解能力に優れ、作物の生育促進にも働く。発酵過程の最初から最後まで中温発酵で、放線菌が優勢となる摂氏60度前後の中温に保つ。病気を引き起こす一部の低温菌を死滅させつつ、高温にしないことで発酵が長時間持続し、有機物の分解を促す。

伝統的コンポストは多数の細菌、酵母、カビ菌が関与して発酵分解を促進するが、必ずしも放線菌を多く含むことができない場合がある。そこで、土中で放線菌を増殖させる促進剤として、「かに」、「えび」の甲羅キチンを発酵で低分子化した物質であるキトサンを使うと良いことが、有機農業家では、常識になっている。さらに放線菌が分泌するサイトカイニン(ゼアチン)は、栽培する作物の天然植物ホルモン剤として作用し、発芽、細胞分裂に働き野菜の生育が活発になり、さらに野菜果実の糖度味の向上が認められている<sup>2)</sup>。放線菌が多いコンポストは、弱い悪臭がする。イチゴ栽培には、放線菌効果が顕著な効果をあげている。

## 3. 人の健康の善玉菌、悪玉菌と有機農業の善玉菌、悪玉菌

人の腸内細菌叢の研究が急速に進んでいる。新発見では腸内細菌の数は推定100兆個、重さ1.8kg、人の細胞数60兆個と比較して、明らかに第6の臓器であり、健康と深く係わっている。乳幼児の腸内細菌叢と成人、老人の細菌叢の変化を追跡し、ビフィズス菌群の減少が発見されて以来、ヨーグルト等の食品の重要性が認められ、積極的に有用細菌を摂取する健康法に、プロバイオティクス健康法が、導入されたのは最近のことである。

人糞の1/3-1/4はこの腸内細菌でしめられている。糞便の適切な処理が衛生対策の基本であるが、とりわけ病原性細菌の殺菌が要点である。腸内細菌の善玉菌は、一般にグラム陽性菌である。これらは一般的に病原性がなく、グラム陰性菌と戦って陰性菌の腸内悪影響を防いでいる。例えば、大腸菌O157毒素が小腸で吸収されるのをある種の乳酸バチルス菌-ラクトバチルスの分泌物質が毒素吸収を防いでいる。動物乳のヨーグルト菌(多数種、ヤクルトなどの)、腸内細菌の「ビフィズス菌」、京都スグキの植物性乳酸発酵菌、好気性通性嫌気性のラクトバチルス・ファーマンタム菌、納豆菌(枯草菌納豆)などが含まれた健康食品と

しての多数の健康増進事例が研究発表されている。放線菌もグラム陽性菌で、グラム陽性菌は大腸の嫌気性条件では孢子形成し眠ってしまう。糞便中には、孢子で排泄される。放線菌は、抗生物質を分泌し、人の健康障害となるグラム陰性菌の増殖を防止する重要な役割を果たす。下水処理場では、食用油が流れ込むと、ある種の放線菌がスカムーバルキングの原因となることは、活性汚泥法下水処理における世界共通の問題である。

### 自然免疫が区別する善玉菌、悪玉菌

免疫学が進歩し、「自然免疫」の機能が分かり、人はグラム陽性菌にたいして免疫反応を起こさず受け入れていることが、解明された。審良静男教授(大阪大学微生物研究所癌抑制遺伝子研究分野)は、自然免疫とTLR 細胞膜存在受容体(Toll-like receptors)の重要な解明を行った<sup>3)</sup>。哺乳動物の免疫機構は、大きく自然免疫と獲得免疫に分けることができる。獲得免疫は、利根川進教授等により、遺伝子再構成という方法で、B細胞やT細胞上に無数の個々に異なる抗原特異性をもつ受容体を作製し、あらゆる外来抗原に対処することが解明された。一方、従来まで自然免疫は、おもにマクロファージ、白血球などによる非特異的な貪食作用による外来異物や病原体の処理システムと考えられていた。しかしながら、この自然免疫にかかわる免疫細胞も、ゲノム上にコードされた遺伝子再構成を伴わない特異的な受容体をもちいて病原体の構成成分に共通のパターンを認識していることが、あきらかにされた。そのうちTLR(Toll-like receptor)と呼ばれる一群の受容体が病原体の認識とその後の免疫反応に必須の分子であることが判明した。病原体の構成成分は、病原体に特有でヒトには存在しない構成成分で、グラム陰性菌のリポ多糖、微生物DNA (CpG DNA)、リポタンパク質、ウイルス由来の二本鎖RNAなどがその例である。各病原体の構成成分は、TLRにより特異的に認識され、自然免疫系の活性化を誘導する。さらに、哺乳動物ではTLRを介して自然免疫が獲得免疫の成立を支配していることがあきらかになりつつある。

### 有機農業の善玉菌、悪玉菌

グラム陰性菌が、健康障害に多く関係するため、小腸内進入、肝臓進入にたいして防御機構である「自然免疫」が働き、白血球、リンパ球群が協同して殺し(貪食)に働く。幸いにここに、人に対して一般に善玉菌である乳酸菌、酵母菌、枯草菌、放線菌等のグラム陽性菌は、コンポストにおいても

主役となってきて、土壌に還元して穀物、野菜、果実の連作障害菌と闘う善玉菌となってくれる。

野菜の連作障害として:立枯れ(ビシウム・フザリウム菌)・青枯れ・萎凋病(いちょうびょう)・べト病などの土壤病害が出るのは、栽培土壌中の放線菌・枯草菌、乳酸菌・その他の善玉菌の数が大きく減っていることによる。このことが、有機農業者の間で、経験となってきている。蟹やエビのキトサンの適用で放線菌が増殖して、「軟腐病菌」、「潰瘍病菌」、「黒腐病菌」、「根頭癌腫病菌」などの細菌類、「灰色カビ病菌」、「つる割れ病菌」、「斑点病菌」、「雪腐病菌」などのカビ類の障害に対抗する抗菌力があることが確認された。枯草菌と放線菌の増殖で、芋の「根こぶ病」原因となる、「線虫」を抑制することが明らかになっている。

遺伝子改変作物の大豆、トウモロコシは、枯草菌チュービンゲネシスの遺伝子一部を取り出し、注入したことで、栽培中に昆虫、線虫に食べられることが少なくなり、農薬使用量を減らす効果が出ている。遺伝子改変作物をBt作物とも呼ぶ理由は、枯草菌の*Bacillus thuringiensis* からBtを取っている。アメリカの有機農業では、Bt作物の代わりに枯草菌チュービンゲネシスを培養して、液体でこの枯草菌を噴霧し農薬代替品にしている。

### 4. 日本の有機農業(プロバイオティクス農業)の将来

日本の有機農業の将来は、間違いなく拡大する。日本の農業の基本である水稲栽培は、連作障害が生じない優れた農業である。しかし除草剤使用などで、植物プランクトンが無くなり動物プランクトンが成育できないことから、その結果田圃の昆虫、エビ、ドジョウがなくなり、食物連鎖の上位にいるトキやコウノトリが息できなくなった。これを避けるために、全く除草剤を利用しない方法が望ましいし、さらに減農薬法を拡大する必要がある。そのとき、コンポストが利用できる可能性がある。例えば、除草剤撒布の後に、枯草菌や乳酸菌利用のコンポストを撒いて、残留農薬をこれらの生菌により早く分解する。そして、植物プランクトンの速やかな出現にともなう食物連鎖—生態系発達のように、積極的に善玉菌を利用する農業は、プロバイオティクス農業である。アンティバイオテックスは、抗生物質のことを呼ぶが、その抗生物質を生産する放線菌や、動物、植物に未知な有用物質を提供する枯草菌、乳酸菌などの生きた善玉菌を活用することをプロバイオティクスと呼んでいる。この分野の技術開発が遅れているが、日本には農業と発酵の伝

統的な知恵と経験が未発掘で眠っている。

野菜、果実栽培の分野では有機農業形態が拡大する可能性が高い。その理由1は、窒素(平成18-19年に過去の2倍高騰)、りん(平成18-19年に過去の3倍高騰)、カリ(平成18-19年3倍高騰)の国際価格が暴騰、特に100%輸入しているりんは、限られた国しか供給できず、日本の国家的見地からも最重要戦略物質になっている。理由2は、有機農業の安全性に対する消費者の関心と野菜果物の旨さ一味に関心が高まる。京野菜が有名になったが、その理由は、生産者が減農薬、有機農業を行って、京野菜の味の良さを証明したことによる。旨さの秘密は、オーキシンやサイトカイニンなどの植物ホルモンの活用にある。植物ホルモンは、植物自身が生成して成長するが、外部から適度な濃度で供給すると、刺激剤となり葉、果実の味を改善する効果が指摘されている<sup>2)</sup>。理由3、地球温暖化対策から、農業活動、輸送距離短縮等の理由で化石燃料消費を減少させるため「地産地消」の方向に、農業が進む。理由4、農業後継者問題解決に、農業振興が進む時に、有機農業産物の「安全性」と「味」の「品質」が見直される。

## 1. おわりに

プロバイオティクス農業を実行するには、さまざまな課題が存在している。まず農家の大半は有機農業の実行を困難と考えている。農業研究者の中で、有機農業の専門家が育っていない。農業有機系廃棄物、(家畜糞、人尿尿、生ごみ等)を安定した品質のコンポストにする技術開発の余地が大きい。特に有機系廃棄物は、農業、漁業の生産現場で発生するものと、家庭、レストランなど消費過程で発生するものがある。ともにコンポスト資材に供給する段階で、何らかの品質制御を行う必要がある。前者は比較的容易であるが、後者は、品質制御が極めて重要である。コンポスト産物に有害なものが混入したり、残されていないで生産する野菜、果実、穀物への影響がないことの証明が必要になる。環境衛生工学研究は、この分野の問題解決に取り組むことができる技術開発力を持っていると考えられる。

### 参考文献

1. SEPA (スウェーデン環境省報告)
2. 経塚淳子「ホルモン活性を利用した作物の生産性向

上に期待」東京大学大学院農学研究科生産・環境生物学専攻  
プレスリリース 2007年2月5日  
[www-admin@www.a.u-tokyo.ac.jp](http://www-admin@www.a.u-tokyo.ac.jp)

3. 「自然免疫を制御する Toll 様受容体を介した細胞内シグナル伝達経路の解明」科学技術振興事業団報第278号