

# 土・堆肥の基本概念について

平成15年7月

金澤 晋二郎

九州大学大学院 農学研究院

# 土・堆肥の基本概念について

金澤 晋二郎

九州大学大学院 農学研究院

## はじめに

土壌の起源は、陸上の植物が出現した約 3 億 5000 前のシルル紀に始まる。土壌は地球生態系の要である。その延長上に今日の人類の生存がある。土壌は砂、微砂や粘土の鉱物類、および有機物の単なる集合体ではなく、長期間にわたる植物、動物、微生物などの生物学的な営みがあって生成されたものである。人類の生存を支える食糧生産を永遠に持続するための土壌の厚さは、平均 18 cm といわれる。北アメリカの例では 1 cm の土壌の生成には、約 500 年かかるとされている。このように土壌の生成には長年月が必要で、一度失うとそれを回復するのは至難の技である。現在、アメリカでの土壌の損失は、その十倍にも達している。“人類生存の要”である土壌層の破壊は、地球の物質循環の破壊と同意語である。

人類は新石器時代に入り、原始的な農業が営まれるようになり、肥料の歴史はその時代にさかのぼる。近代的な肥料の生産、即ち“人造肥料”の生産と使用が始まったのは 1840 年代になってからである。ドイツの化学者リービヒ (Justus von Liebig) は、著書「化学、農業と生理学への応用」(1840)において、植物の生育に必要である窒素、リン、カリウムは何らかの方法で外から供給しなければならないと論じている。その形態はこれらの元素を含む無機化合物であれば十分とした。いわゆる“無機栄養説、鉱物説”である。ほぼ同時期に、イギリスのロザムステット (Rothamsted) でローズとギルバートによって始められた圃場実験が、この無機栄養説を実証した。この理論に基づき、各種の無機塩類が工業的に人造、化学肥料として製造されるようになった。1943 年に世界で始めてイギリスのロースにより、過リン酸石灰が工業的に生産されている。現在の農業生産は、この化学肥料と第二次世界戦後の 1950 年代から急速に開発進んで農業に支えられており、60 億に達する地球上の人口は化学肥料と農業の恩恵に浴している。

しかしながら、飢える恐怖から開放された先進諸国の人たちは、健康な身体を造る健康な農産物を嗜好するようになり、無農薬・オーガニック農業への向かいつつある。何故なら、健康な「食」は健康な「人間」を育み、東洋では昔から「医食同源」という言葉で表されている。健康な「食＝作物」は健康な「大地」からのみ生産される。「健康な土づくり」の基本は有機肥料の施用である。その農地から生産された農作物には、人間の健康な身体を造り、それを維持する炭水化物、タンパク質、ビタミン類やミネラル栄養分が豊富に含む。我が国では、昭和 30 年代の後半から始まった農村近代化により耕種農家と畜産農家が分離したため、農耕に必要な馬や牛が農村から消え、自給肥料としての堆厩肥の生産がで

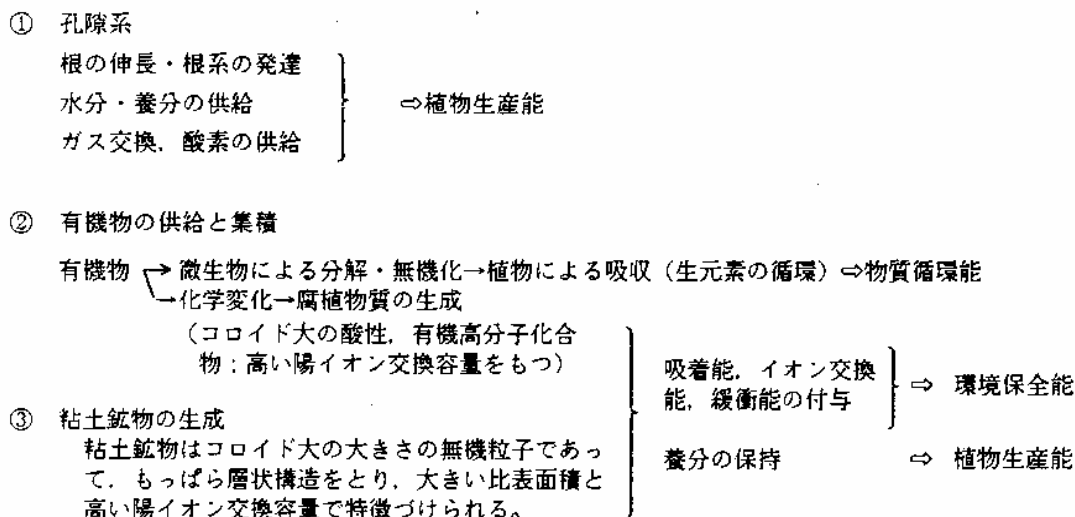
きなくなり、化学肥料および農薬の多投型農業に変わった。生産残留農薬や農産物の質の低下をきたし、多くの健康障害を引き起こしている。例えば、戦前のように農家に農耕馬が1頭いたとしたならば、約1町歩（1ヘクタール）の農地に必要な堆厩肥（自給肥料）が生産できた。また、公園、街路樹および緑地帯などの都市緑地でも落葉の除去や焼却など、有機物収奪と化学肥料や農薬の多用がなされている。そのため、農地・緑地への高品質なコンポストの施用が切に望まれている。

そこで、本論文では、1. 土壌の機能、2. 土壌の構成体、3. 堆肥の基本概念、4. 堆肥原料の熱発生量とその発酵に関する微生物フロア、6. 理想的なクリーンな堆肥製造とは、7. 施肥の原理及び堆肥の施肥効果、8. 有機（オーガニック）農業、等に中心に述べる。

## 1. 土壌の機能

土壌の機能は、植物生産能、物質循環能及び環境保全能である。その内容は、次のようにまとめることができる。

図1. 土壌の3つの機能（江頭、1997）



土壌は地球生態系の要である。何故ならば、そこに生息する土壌微生物が担う物質代謝により、地球の生命圏の隅々にまで、栄養とエネルギーを補給する重要な役割を果たしている。この物質代謝のおかげで、限りある地球上の栄養物質やエネルギーが繰り返して利用され、人間を含むあらゆる生物が無限に生存できるのである。例えば、大気中濃度の約15%が毎年植物により固定され、それがほぼ同量植物遺体として大地に還元されている。

土壌微生物の働きにより、固定された同量の炭素が土壌から大気に回帰して、均衡を保っている。従って、土壌の微生物の働きが止まり、土壌にそのまま植物遺体が残留すれば、大気中の炭素は約7年で使い尽くされ、地球上の全生物が死滅することになる。

つまり、陸上自然生態系は、土壌、大気、水の3脚から成り立っている。従って三脚の一本の土壌が失われると、人類の食糧を生産する農耕地はもとより、森林などの陸上自然生態系が消滅し、人類の生存・生産拠点の都市や工場等々、全てのものが存在し得ないものである。

## 2. 土壌の構成体

土壌とは、一般的には、地球の表面にある自然物で生物を含み、野外で植物を支えているか、あるいは支える能力を有するもの定義づけられている。地球表面の岩石は大気、日射、雨、生物などの関与する環境下で化学的、物理的、生物的作用を受けて土壌になる。従って、土壌の構成体としては、大きく分けて、鉱物、有機物、生物、水、空気からなる。

### 1) 2次鉱物（粘土）

鉱物は、一次鉱物（岩石）と2次鉱物（粘土）に分けられる。肥料の保持能力に優れ、農業に深く係っているのは粘土鉱物であるので、ここでは粘土鉱物について述べる。

一次鉱物の風化により溶質した各元素が、再び再結晶化したのが二次鉱物である。二次鉱物は化学組成からケイ酸塩鉱物、酸化物及び水和酸化物にわけられるが、ケイ酸塩鉱物を粘土鉱物と呼ぶ。粘土鉱物の形成は、地球内部と表面を巡るケイ素の循環の一部としてとらえることができる。ケイ酸塩鉱物はケイ酸イオンとその間の陽イオン（ケイ素四面体）の結合様式によって多様なケイ酸鉱物が形成される。地球表面の常温・常圧、大気・水の存在下で最も安定なケイ酸塩鉱物は、フィロケイ酸塩好物である。フィロケイ酸塩鉱物は粘土の大きさ（0.002mm以下）にあり、そのため粘土鉱物と呼ばれる。ケイ酸鉱物はその表面が負に帯電し、微細で比表面積が大きい。そのため、植物養分（肥料成分）の保持・供給に深く関与している。土壌中の主な粘土鉱物の構造、粒子の形、比面積及び陽イオン交換容量は表2に示す。また、その構造の模式図は、図2に示す。

結晶性粘土では、2：1型鉱物のパーミキュライトとモンモリロナイトの陽イオン交換量が最も大きく、1：1型鉱物のカオリナイトが最も低い。非結晶鉱物のアロフェンは、2：1型鉱物に相当する陽イオン交換性能を有する。

日本は火山国なので、畑生産物の大部分は火山灰土壌から生産されている。火山灰土壌（黒ボク土）の主要な粘土鉱物は、非結晶のアロフェンである。アロフェンは直径約50オングストロームの球状（中空）をした酸化アルミニウム（アルミナ）とケイ酸が結合した鉱物である。アロフェンは中空でもろいため、リン酸と結合した場合構造が壊れて、リン酸を埋め込む。埋め込まれたリン酸は植物や微生物には利用できなくなる。そのため、図

表 2 土壌中の主な粘土鉱物、粒子の形、比表面積および陽イオン交換容量 (三枝 1989)

鉱物名	構造式	粒子の形態	比表面積/ m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup>	陽イオン交 換容量/me (100 g) <sup>-1</sup>
<b>1:1 型</b>				
カオリナイト	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	板~薄板状	10~55	2~10
ハロイナイト (10 Å)	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	中空管状, 球状	60~1100	5~40
ハロイナイト (7 Å)	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	中空管状	60~1100	5~15
蛇紋石	(Mg, Fe <sup>2+</sup> ) <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	板状~管状		
<b>2:1 型</b>				
スメクタイト (0.2 < x < 0.6)				
モンモリロナイト	M <sup>+</sup> <sub>1-0.33</sub> Si <sub>4</sub> (Mg <sub>0.33</sub> Al <sub>1.67</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ·nH <sub>2</sub> O	薄板状	770	60~100
パイダライト	M <sup>+</sup> <sub>1-0.33</sub> (Al <sub>0.33</sub> Si <sub>3.67</sub> )Al <sub>2</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ·nH <sub>2</sub> O			
ノントロナイト	M <sup>+</sup> <sub>1-0.33</sub> (Al <sub>0.33</sub> Si <sub>3.67</sub> )Fe <sup>2+</sup> <sub>0.33</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ·nH <sub>2</sub> O			
パーミキュライト (0.5 < x < 0.9)				
パーミキュライト	M <sup>+</sup> <sub>0.5x</sub> (Al <sub>0.5x</sub> Si <sub>3.5x</sub> )Al <sub>2</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ·nH <sub>2</sub> O	板~薄板状	770	100~150
<b>翼母 (x=1)</b>				
イライト	K(AlSi <sub>3</sub> )Al <sub>2</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	板~薄板状	10~55	10~15
<b>2:1:1 型</b>				
クロライト	(Mg <sub>0.5</sub> Al)(AlSi <sub>3</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>4</sub>	板~薄板状	10~55	2~10
<b>2:1~2:1:1 型 中間種鉱物</b>				
混合層型 混合層鉱物 (規則型, 不規則型)				
<b>準晶質</b>				
イモゴライト	(OH) <sub>6</sub> Al <sub>4</sub> O <sub>8</sub> Si <sub>4</sub> (OH) <sub>2</sub>	繊維(中空管)状	1025	20~30
<b>非晶質</b>				
アロフェン	1~2SiO <sub>2</sub> ·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·nH <sub>2</sub> O	塊(中空球)状	1050	30~135

a) x は単位化学式当りの層荷電。b) M<sup>+</sup> は 1 価陽イオンで代表させた交換性陽イオン。

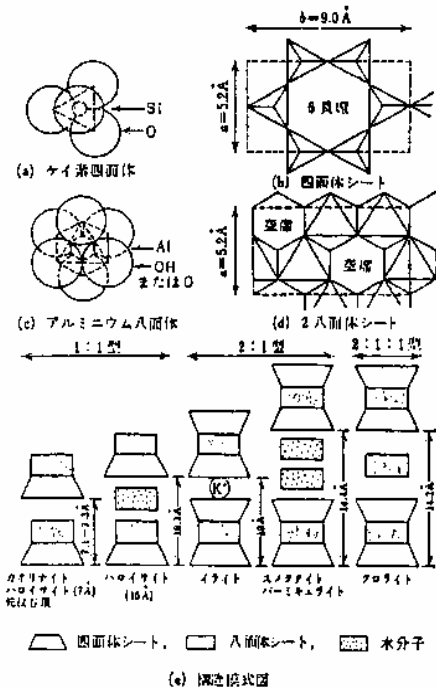


図 2 層状ケイ酸塩鉱物の構造単位と模式図 (三枝 1989)

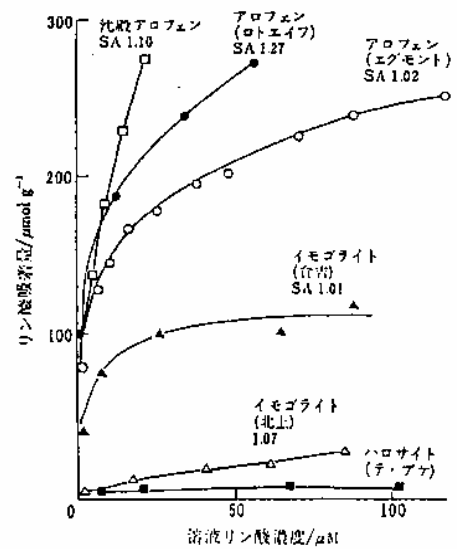


図 3 アロフェン、イモゴライト、ハロサイトのリン酸吸収係数 (三枝 1989)

3に示すようにリン酸吸収量が極めて大きい。戦前における黒ボク畑土壌は、リン酸欠乏で生産性が低かった。溶燐の多量施用による改良技術が開発されて、黒ボク畑土壌の生産力は飛躍的に改善された。

## 2) 土壌有機物

土壌有機物は、腐植、動植物残渣（遺体）及び微生物体からなる。狭義の定義では土壌有機物では、腐植を指す。鈹質土壌の表層には、0.5～5%、黒ボク土では8～40%、泥炭土では20～100%の有機物を含んでいる。これらの土壌有機物は、主に微生物により分解されて、そのエネルギー源や体構成成分の合成に利用するだけでなく、その過程で生成される窒素、リン、イオウ等の多量要素や微量元素は植物への養分の給源となっている。腐植は地表の酸化条件で生成するため多量の酸性官能基（カルボキシル基）をもっているため、高い陽イオン交換能を持つ。そのため、植物の生育に必要な養分を吸着保持する機能を有する。

土壌腐植の生成過程は、図4に示すように植物遺体のリグニンが腐植物質の芳香族成分の主要な給源となっている。微生物により、リグニンのグアヤシル基が酸化分解し、メトキシル基が離脱して芳香環が解裂して腐植物質が生成する。また、リグニンやセルロースから誘導されたフェノール化合物がキノンとなり、アミノ酸やペプチドが重合に関与する。

## 3) 土壌微生物

土壌には微小な膨大な数の極めて多様な環境が存在し、それぞれその微環境に適応した微生物が生息している。例えば、1グラムの土壌には数万種類の微生物が生息し、その数はゆうに1億をこえる。そのため、土壌微生物は陸上生態系の物質代謝の担い手として極めて重要な位置を占める。及び原生動物の4種類に大別されるが、特に多様な機能を有する土壌微生物は細菌、放線菌、糸状菌の3種類である。

土壌における種々の巨大有機化合物（炭水化物、タンパク質、有機態リン、有機態イオウなど）は、主に土壌に生息する微生物から分泌される土壌酵素によって、無機化されている。その主な土壌酵素とその反応様式は、図5に示す。また、土壌中の菌体（バイオマス）は、植物養分のプールとしての機能を担っている。例えば、10アールの畑には乾燥菌体で約140kg存在する。乾燥菌体には炭素50%、窒素15%、リン11.6%、カリウム9.8%、カルシウム1.4%含まれているので、10アールの畑の乾燥菌体には炭素70kg、窒素11kg、リン8kg、カリウム7kg、カルシウム1kg存在することになる。普通作物への施肥量は窒素10kg、リン4.4kg、カリ8kg、カルシウム8.4kgである。従って、10アールの畑に存在する菌体の保持する栄養分は、普通畑への施肥量に相当するほど多量である。

## 4) 土壌溶液

土壌にある大孔隙で過剰水が排除されるが、ゆっくりと張力による水の下降運動が起こ

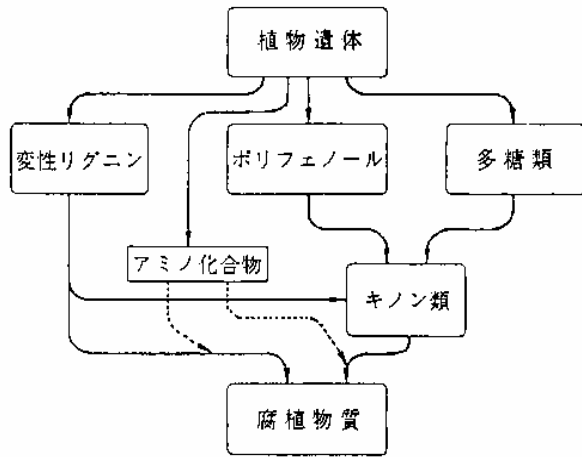


図4 腐植物質の生成メカニズム (米林 1997)

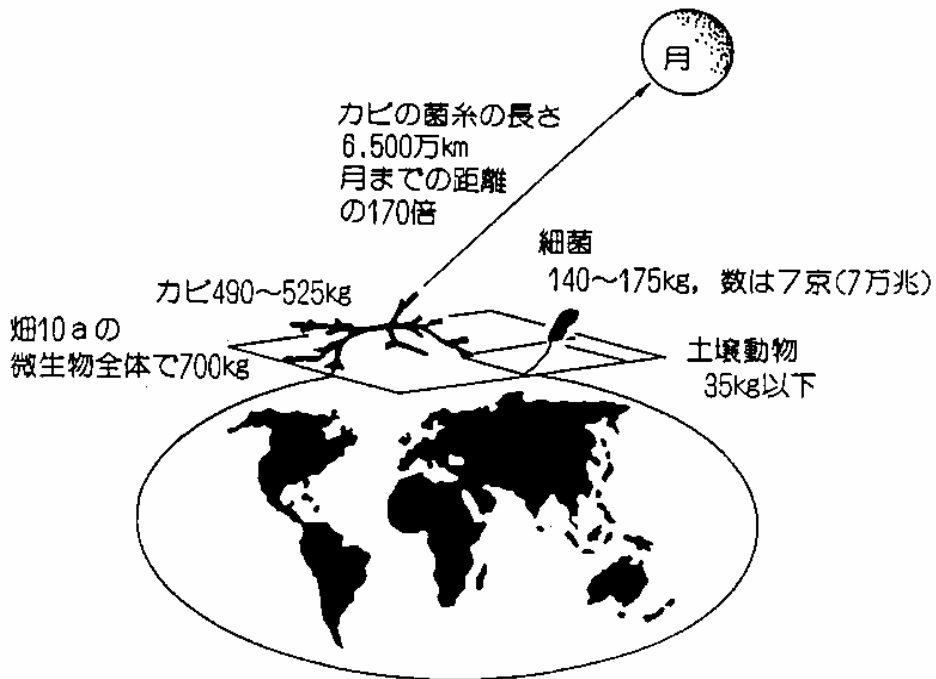


図5 畑土壌 10 a に生息する微生物の量 (西尾 1989)

る。この下降運動が極めて小さくなったときの水分量を圃場水分と呼ぶ。土壤水分が減少すると、植物根はエネルギー的に水分を吸収できなくなり、しおれ始める。このしおれ始めた水分を初期萎凋点という。さらに水分が減少すると、植物はしおれが激しくなり飽和水蒸気圧下で水を補給しても生き返らない。これを永久萎凋点と呼ぶ。圃場用水量と萎凋点との間の水分量の差が有効水分となる。

これら土壤有効水分は単なる水ではなく、各種の成分が溶解した溶液として存在する。従って土壤溶液の濃度は温度、降水量、粘土鉱物、腐植や植物種等の特性と深い係りを持つ。土壤固層-液層間では、図6に示すように土壤固層のうち粘土鉱物や腐植から各種の成分が土壤溶液に放出され、溶解・沈殿平衡が成立する。

タマネギ畑（沖積土）における定植から収穫時までの土壤溶液の濃度変化は、図7に示した。これによると、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ などの陰イオンに律されて固層から放出される陽イオン種（ $\text{Ca}_2^+$ 、 $\text{Mg}_2^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ など）の動態がよく理解できる。土壤溶液中の陽イオン種は交換複合体の吸着サイトに保持されていたものである。

#### 5) 土壤空気

土壤中では、微生物、土壤動物や植物根による呼吸により酸素が使われ炭酸ガス（ $\text{CO}_2$ ）が生成する。土壤の炭酸ガスは、大気のそれと較べると、数十倍あるいは数百倍高い濃度で維持されている。作物生育期間中や湿潤・高温下では炭酸ガス濃度が上昇し酸素濃度は低下する。嫌気条件下ではメタン（ $\text{CH}_4$ ）、一酸化炭素（ $\text{CO}$ ）、亜酸化窒素ガス（ $\text{N}_2\text{O}$ ）、二酸化窒素（ $\text{NO}_2$ ）、窒素ガス（ $\text{N}_2$ ）、アンモニア（ $\text{NH}_3$ ）、アミン、硫化水素（ $\text{SH}_4$ ）、二硫化水素（ $\text{S}_2\text{H}$ ）、メチルメルカプタン（ $\text{CH}_3\text{SH}$ ）、揮発性有機酸（プロピオン酸、酪酸、酢酸など）、などが生成する。好気条件下では硝酸（ $\text{NO}_3$ ）、亜酸化窒素を生成する。表3に示すように、土壤空気は大気と異なるガス組成を有する。

これらのうち、揮発性有機酸、アミン、 $\text{SH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{NO}_2$ などは植物の健全な生育にとって有害なガスである。また、 $\text{CH}_4$ は地球の温暖化ガス、 $\text{N}_2\text{O}$ はオゾン層の破壊ガスである。

また、土壤は併せて大気ガスを吸収する機能をもつ。例えば、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{SH}_2$ 、一酸化炭素（ $\text{CO}$ ）、窒素化合物ガス（ $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{NH}_3$ ）、 $\text{CH}_4$ などのガスが土壤に吸収されることが知られている。即ち、土壤生態系で行われるガス代謝は、大気圏のガス組成に影響を及ぼしている。土壤空気のある成分が高まれば、土壤圏から大気圏へ移行することになる。逆に土壤空気のある成分の濃度が低下すれば、大気圏から土壤圏へ移行する。土壤のガス交換は、空気で満たされた孔隙を通して、そのほとんどが拡散によって行われる。

オゾン層の破壊に大きく関与する亜酸化窒素（ $\text{N}_2\text{O}$ ）ガスの制御には、窒素施肥法の改善（分施、葉面散布など）、有機肥料、ウレアーゼ阻害剤、緩行性・肥効調節型肥料、などの有効である。その基本は、植物による施肥窒素の利用効率を高めることにある。

### 4. 堆肥づくりの基本



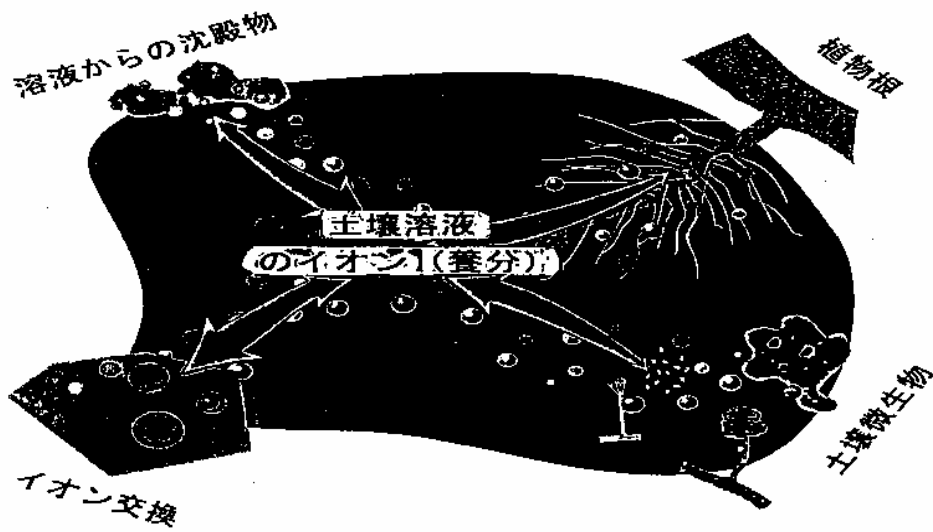


図6 土壤固相—液層間のイオン（養分）の動態

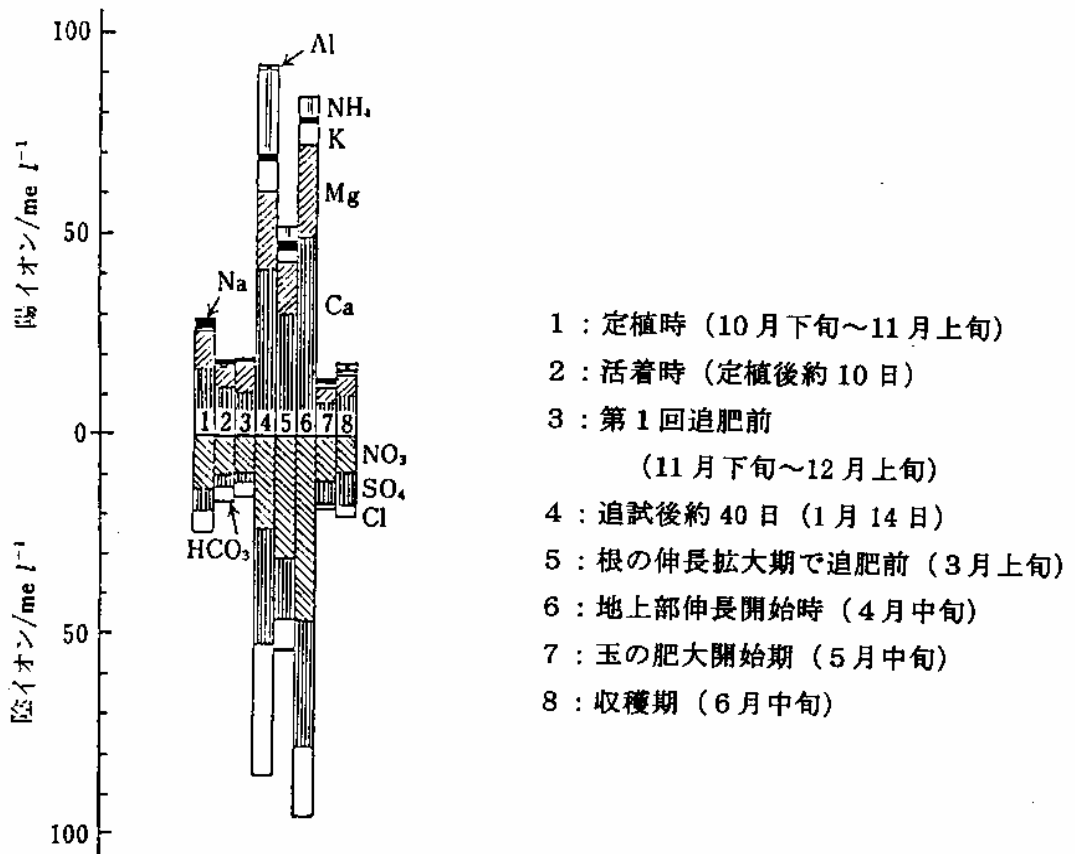


図7 作物の生育期間中の土壤溶液濃度の変化 (加藤 1989)  
 土壤試料の採取時期 (1983年11月～1984年6月)

表2 清浄な大気と土壤空気の成分組成 (楊、1994)

成分	大気	土壤空気
	vol %	
N <sub>2</sub>	78	75~90
O <sub>2</sub>	21	2~21
Ar	0.93	0.93~1.1
CO <sub>2</sub>	0.0345	0.1~10
CH <sub>4</sub>	0.00017	trace~5
N <sub>2</sub> O	0.00003	trace~0.1
	ppmv	
He	5.2	その他
Kr	1.0	各種炭化水素,
H <sub>2</sub>	0.5	NH <sub>3</sub> , NO, H <sub>2</sub> ,
CO	0.1	H <sub>2</sub> S, CS <sub>2</sub> ,
Xe	0.08	COS, CH <sub>3</sub> SH,
O <sub>3</sub>	0.02	DMS, DMDS,
NH <sub>3</sub>	0.01	揮発性アミン,
NO <sub>2</sub>	0.01	揮発性有機物
SO <sub>2</sub>	0.0002	など多数

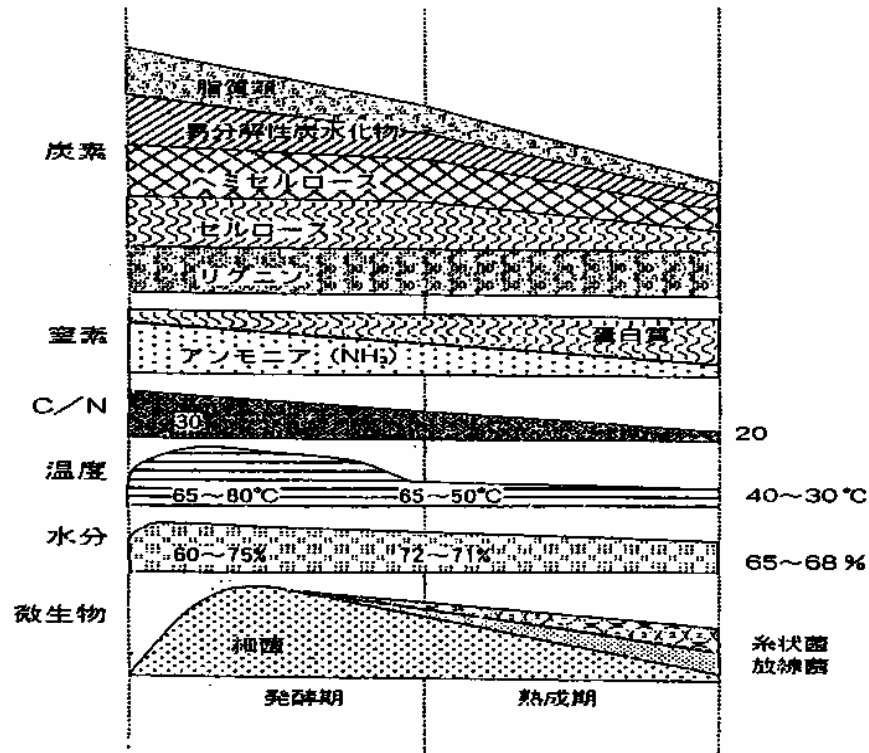


図8 堆肥化過程における有機物組成および微生物相の変化の模式図 (金澤原図)

堆肥化過程による炭・窒素化合物組成とそれにかかわる微生物の変動、および温度や水分含量の変化については、図8に示した。堆肥化過程は、普通この模式図（金澤、1986）のような過程を経て製品になる。

堆肥化の初期過程では、温度が上昇して高温を維持する期間を発酵期と呼んでいる。この時期の有機物構成成分の中で主に分解を受けるのは、脂質、水溶性多糖類、低分子の窒素化合物（遊離アミノ酸類、アマイド態窒素など）などである。この時期これらの易分解性有機物を基質（エサ）に、好気性の中温および高温（好熱）微生物が著しく増殖するために、堆肥の温度が急激に上昇する。植物遺体（ワラ類、籾殻など）は、この時高温の水蒸気に蒸されて組織の主成分であるヘミセルロースやセルロースが膨潤・軟化し、分解され易くなる。しかしながら、発酵期に働く微生物の多くは高分子のヘミセルロースやセルロースの分解能を有していないので、これらの化合物の分解はほとんど起こらない。この時期、鶏糞、豚糞や下水汚泥などの窒素化合物の多い資材の堆肥化では、多量のアンモニアが発生する。それと同時に菌体成分として多量に蛋白質が合成されるため、堆肥の蛋白質含量が増加する。そのため、炭素量の減少に比べて窒素量の減少は極めて少ないので、C/N比が低下する。なお、糞の汚染物質を代表するBOD（生物化学的酸素要求量）源は、主に易分解性の低級の脂肪酸から構成されており、十分な酸素さえあれば堆肥化処理で、ほぼ2週間位で分解される。糞のC/N比は、完熟堆肥と同じかそれよりもかなり低い値であるため、糞中のBOD源の分解が終われば、糞の堆肥化は、ほぼ終了したと言える。従って、家畜糞の腐熟の判定としては、堆肥水抽出液のBOD濃度の測定はよい指標となる。

温度が低下した後熟期では、この時期進入してくる多種多様な糸状菌や放線菌によって植物組織ヘミセルロースやセルロースの分解が開始され、組織の崩壊が進行する。それと同時に発生するアンモニアと低分子の糖が結合する、いわゆるアミノ・カルボニル反応によって褐変が進行して、堆肥を益々黒褐色に変化させる。特に、作物残さの中で籾殻や木質物を副資材した場合は、組織が堅牢で硬いため、微生物による分解が緩慢となるのでできるだけ後熟期を長く取る必要がある。

製品の堆肥（コンポスト）は、土壤に施用した時、1) 肥え焼けを起こさないこと、2) 肥効が持続すること、3) 微量要素を供給すること、4) 土壤改良効果があること、等で農家の自給肥料として使われてきたものである。

有機物を堆肥にする理由は、1) 易分解性有機物を分解させて有機物の安定化、2) 高温による有害生物の死滅による衛生面、3) 貯蔵、運搬及び易施用など取扱い性、等が向上することにある。

主要な有機性廃棄物は、家畜糞尿、厨芥（生ごみ）、食品工場廃棄物、パーク（樹皮）、下水汚泥等がある。これらを原料にした堆肥は、1) 肥料成分の不安定、2) 腐熟性の不安定、3) 難取扱い性、等で化学肥料に比べて劣る。そのため、有機肥料と化学肥料の両特性を生かす施肥技術が望まれる。

有機物の分解特性は、C/N比である程度説明できる。例えば、C/Nの大きいパーク、オガクズでは窒素を添加する必要がある。1トン当り窒素を10kg程度、尿素や鶏糞で添加してC/Nを約40に低下させて発酵させる。稲ワラや麦ワラもC/Nが極めて高いが比較的分解され易いので石灰窒素などでC/Nを約30に調節して発酵させる。石灰は中和剤として必要である。C/Nの低い下水汚泥（高分子凝集剤添加）ではワラ類、オガクズ、モミガラ、パーク等を混合してC/Nを低下させて発酵させることが多い。但し、石灰・塩鉄添加汚性の場合、そのまま発酵が可能である。生ごみの場合、野菜屑等の窒素の少ないものはワラ類に準じて、魚介・肉類等の窒素の多いものは下水汚泥に準じて発酵させれば良い。但し、生ごみにワラ類、パーク、モミガラ、オガクズを使用してはならない。

なお、ここでは家畜糞尿及び木質系を中心に以下に記す。

### 1) 家畜糞尿（窒素質資材）

家畜糞尿は悪臭と汚物感が強く、水分が多いためべとべとし、搬出・貯蔵・施用などの面で極めて扱いにくいものである。加えて、病原菌、寄生虫やその卵、雑草種子（牛糞）が含まれている。家畜糞尿に含まれている窒素と炭水化物は極めて易分解性である。そのため未熟な堆肥の施用は爆発的な微生物の分解を受け、濃度障害や異常還元を引き起こしやすい。堆肥化の目的はこれらの障害を取り除くことにある。家畜糞尿の堆肥化は、混合する有機資材で（作物収穫残さ、木質物など）で大きく異なる。表4は、松崎によって開発された連続堆肥化法によって製造された鶏糞、豚糞および牛糞の有機成分の変化を示したものである。

#### (1) 鶏糞

鶏糞のC/N比は堆積前が極めて低く、腐熟化過程（1ヶ月間）で炭素の減少（減少率21%）よりも窒素の減少（減少率36%）の方が大きくC/N比を高めていた。これは、炭素化合物とともに窒素化合物も同時に分解され、無機化により生成したアンモニアが堆肥のpHが高いため、揮散して失われたためである。炭水化物ではヘミセルロースのみが減少を示し、セルロースでは相対的に増加していた。リグニンもセルロースと同様にかなりの増加（20%）を示す。これは堆肥化過程でセルロースおよびリグニンがほとんど分解されていないことを示す。蛋白質は多少とも増加を示すのは、微生物の増加により菌体の蛋白質が増えたことによる。

#### (2) 豚糞

豚糞のC/N比が開始時に比べ減少するのは全炭素が減少し全窒素が増加することによる。炭水化物のヘミセルロースおよびセルロースは減少するが、その程度は全炭素の減少率よりも小さい。蛋白質が多少とも富化していた。おおむね、これらの結果は鶏糞と類似している。これは原料に窒素分が多いことにある。

#### (3) 牛糞

牛糞の堆肥の成分は、原料の生糞に比べ、粗灰分を除きあらゆる成分が著しく減少する。

表3 家畜糞尿の堆肥化過程における有機成分の変化 (井ノ子, 1982)

(乾物%)

資材	発酵・堆肥期間	全炭素 %	全窒素 %	C/N 比	粗灰分 %	熱水可溶有機物 %	炭水化物			還元糖割合	リグニン %	粗蛋白質 %
							ヘミセルロース %	セルロース %	合計 %			
鶏ふん	原料	33.3	4.98	6.7	24.6		22.2	4.5	26.8	32.1	8.9	3.38
	開始時	34.6	5.19	6.7	47.8		14.9	2.4	17.3	20.0	7.4	2.77
	1カ月後	27.4	3.33	8.2	46.5		13.5	2.9	16.4	23.9	9.5	2.90
	原料に対する残存率(%)	(104)	(104)		(194)		(67)	(53)	(65)	(62)	(83)	(82)
	開始時に対する残存率(%)	(79)	(64)		(97)		(91)	(121)	(95)	(120)	(128)	(86)
豚ふん	原料	44.8	5.32	8.4	16.4		23.4	3.6	27.0	24.0	20.1	5.15
	開始時	41.0	3.63	11.3	21.4		22.3	4.4	26.7	26.1	18.6	5.12
	1カ月後	38.2	4.10	9.3	24.7		20.2	4.0	24.2	25.4	21.1	5.91
	原料に対する残存率(%)	(92)	(68)		(130)		(95)	(112)	(99)	(109)	(93)	(99)
	開始時に対する残存率(%)	(93)	(113)		(115)		(91)	(91)	(91)	(97)	(113)	(115)
牛ふん	原料	32.9	2.03	16.2	16.5		23.0	6.1	28.1	35.4	20.5	4.08
	開始時	16.3	1.49	10.9	55.1		7.9	1.8	9.7	24.0	9.4	2.47
	1カ月後	14.1	1.48	9.5	69.3		4.4	1.1	5.5	15.4	7.4	2.90
	原料に対する残存率(%)	(50)	(73)		(334)		(34)	(30)	(34)	(68)	(46)	(61)
	開始時に対する残存率(%)	(87)	(99)		(123)		(56)	(61)	(57)	(64)	(79)	(117)

開始時の組成は次のようである。

鶏ふんと豚ふん：発酵させた種堆肥の上に生ふんを散布し、堆積物の上部だけを混合し、順次積み上げながら堆肥化する“積み上げ方法”による。

牛ふん：発酵させた種堆肥をほぼ等量の生ふんと混合して堆肥化する“全量混合方式”による。

原料：生ふん

表4 稲わらの堆積腐熟期間中における有機成分の変化 (井ノ子, 1982)

堆積期間	全炭素	全窒素	C/N	灰分	熱水可溶有機物	炭水化物			還元糖割合	リグニン
						ヘミセルロース	セルロース	合計		
原料	41.3	0.81	51.0	18.8	11.6	20.6	24.7	45.3	43.9	7.7
1週間	40.3	0.81	49.8	20.7	9.6	23.0	30.4	54.3	53.0	8.6
2 "	40.1	0.86	46.7	21.7	9.5	21.5	31.3	52.8	52.6	9.1
3 "	38.1	1.03	37.0	26.1	13.2	18.3	28.9	47.2	49.5	9.0
4 "	37.7	1.07	35.3	26.8	12.6	17.5	27.8	45.2	47.9	8.9
5 "	34.9	1.39	25.1	34.7	13.9	14.0	20.1	34.1	39.1	10.4
6 "	33.9	1.50	22.6	34.2	11.1	14.9	19.5	34.4	40.5	11.4
8 "	28.8	1.92	15.0	43.8	17.0	10.2	10.3	20.5	28.4	9.6
12 "	25.7	2.23	11.5	51.0	19.3	6.3	3.9	10.2	15.9	8.9
残存率(%)	62.2	275.3	22.5	271.3	166.4	30.6	15.8	22.5	36.2	115.6
変動係数(%)	15.1	39.7	45.5	35.3	25.0	33.7	43.4	38.9	29.7	11.6
$\gamma_1^{**}$	0.96	-0.96		-0.97	-0.73	0.96	0.88	0.92	0.86	-0.58
$\gamma_2^{***}$	0.94	-0.95	0.86	-0.94	-0.92	0.95	0.99	0.99		-0.17

\*全炭素に占めるヘミセルロース、セルロース態炭素の割合、パーセント \*\*C/N比との相関係数 \*\*\*還元糖割合との相関係数

これは堆肥の腐熟過程による変化というよりも、残存率をみれば明かのように混合する種堆肥に起因する。堆肥の有機成分を開始時のそれを比べると、全炭素と全窒素の変化が小さく、C/N比の変化が認められない。しかしながら、鶏糞や豚糞と異なり、炭水化物のヘミセルロースやセルロース、還元糖割合等が明瞭な減少を示す。これは牛糞堆肥の腐熟過程では、窒素の有機化と無機化の速度が見かけ上、定常状態であるのに対して炭水化物は微生物のエネルギー源に使われて、速やかに分解されることを示す。

井ノ子(1982)は、上記のデータをもとに、有機物の腐熟判定の指標をC/N比と還元糖割合から求めることを試みた。その結果、鶏糞および豚糞では両者とも腐熟判定には使えないことを明らかにしている。牛糞は両者とも腐熟判定に使える可能性を有しているが、具体的な目標値を設定するにはさらに広範囲に検討する必要があるとしている。藤原ら(1981)は、家畜糞の腐熟の判定には、円形クロマトグラフィー法が有効であるとしている。

## 2) 稲わら(繊維質資材)

昔から堆肥の代表として、稲わら堆肥がある。上記の家畜糞堆肥との比較の意味で、稲わら堆肥(井ノ子、1982)について、表5に示した。12週目の堆積腐熟により、全炭素量は41.3%から25.7%とその残存率を62.2%迄減少させ、一方全窒素量は0.81%から2.23%とその残存率を275.2%に著しく増大させている。その結果C/Nを51.0から11.5迄大きく低下させている。熱水可溶多糖類量は発酵の2週目まで減少を示したが、その後12週目まで増加を示した。この熱水可溶多糖類の増加は、微生物菌体由来の糖分に由来するものと思われる。ヘミセルロース量は、2週まで原料の稲わらよりも相対的に増加するがそれ以後減少し続け、最初20.6%あったものが6.3%と残存率30.6%迄激減した。すなわち、ヘミセルロースの分解が開始されるのは、3週目あたりからであることがわかる。セルロース量は、4週目まで原料の稲わらよりも増加するが5週目から原料の稲わらよりも少なくなり、12週目には最初24.7%から3.9%と残存率が15.8%迄激減する。セルロースの分解が開始されるのはヘミセルロースよりかなり遅く5週目からであることがわかる。また、セルロースの分解率はヘミセルロースよりも大きい。還元糖割合は、週の経過に伴い明瞭に低下していた。

従って、稲わら堆肥では、家畜糞尿堆肥と異なり、腐熟の指標としてはC/N比および還元糖割合が有効である。

## 3) 木質資材

木質資材の多くは、普通窒素量が少ないため、C/N比が極めて高い。木質資材の組織はリグニンで覆われ硬いため、極めて難分解性で微生物分解の抵抗性が大きい。例えば、セルロースの存在状態はわら類とは大きく異なり、微結晶の形態でリグニンと強固に結合している。そのため、木質資材を用いた堆肥の場合、腐熟の促進が遅いため腐熟度判定に困難

さが常に伴う。従って、堆肥化の最も難しい資材である。腐熟の判定法として、上記の方法はほとんど使えない。堆積期間を腐熟度の尺度とするのが、最も無難な判定法である。河田（1981）により一応判定基準が提案されてはいるが、木質資材の種類（針葉樹、広葉樹、木質、樹皮など）や副資材の種類（鶏糞、豚糞、牛糞、）および両者の混合割合によっても C/N 比やその他の成分が大きくことなるので、極めて難しい。

## 5. 有機物の熱発生量とその発酵に関する微生物フロラ

### 1) 有機物の熱発生量

発酵（堆肥化）過程において微生物により分解を受ける主な有機成分は、脂質、炭水化物および低分子の窒素化合物である。これらの有機成分は発酵初期の温度の上昇に大きく関わっている。そのため、これらの有機成分がどの程度のエネルギー、即ちカロリーを有しているかを知ることが重要である。

これらの燃焼熱（カロリー）（藤田ら、1984）は、表6に示す。この表から各有機組成分とも物質名が異なっても、その組成が有するカロリーはほぼ同じであることがわかる。従って三者で著しくカロリーが異なり、最もカロリーが高いのは脂質で平均 9,400kcal/kg、次いで蛋白質で平均 5,600kcal/kg、最も低いのは炭水化物で平均 4,150kcal/kg となる。このことから、堆肥化初期の高温の発生には脂肪が深く関与していることが推定される。

堆肥の発酵過程における有機組成の変化から、実測した熱量と計算値からの熱量とを比較したのが、表7である。この表から明らかなように、計算値と実測値（藤田ら、1984）は良く一致している。従って、発酵前の有機組成量と発酵後のこれらの減少量さえわかれば、発酵（堆肥化）過程で発生した熱量（カロリー）が計算で求められることを意味する。つまり、堆肥化前の有機組成と堆肥化後の有機物組成の差から、堆肥化過程に発生した熱量（カロリー）が推定できる。堆肥化過程におけるエネルギー発生量の計算値からも、堆肥の腐熟度が推定できると思われる。この方法を腐熟の指標とするためには、有機物の分析をしなければならないので、現場での簡易な腐熟度の判定には無理である。しかしながら、この方法は有機物の成分組成からの腐熟の判定と併用できるので、極めて正確な判定ができるものと思われる。

### 2) 発酵に関する微生物フロラ

コンポスト生成過程における微生物の動態に関する知見は、以外と少ない。特に微生物種の変化から、コンポストの生成過程を見た研究は極めてまれである。そのため、微生物フロラによる有機物の腐熟の判定は、現在のところできないと言わざるを得ない。何故なら、堆肥化に関わる微生物フロラの分離とその同定には、その道の深い専門の知識のみならず、多くの機材とかなりの日時が必要とされるからである。また、微生物フロラの中には、分離・同定が極めて難しい特殊な好熱（高温）微生物が主体をなす。現在のところ明

表5 各種有機物の栄養素別発熱量 (藤田、1984)

物質名		発熱量[kcal/kg]	適用	範囲, 計算値
炭水化物・セルロース	デキストリン	4 110	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub> C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub>	3 750~4 200  平均値 4 150kcal/kg 17.4MJ/kg
	グリコーゲン	4 188		
	グルコース	3 750		
	イヌリン	4 190		
	でんぷん	4 200		
	蔗糖	3 940		
	卵 (炭水化物)	3 750		
	果物 (〃)	4 000		
	穀物 (〃)	4 200		
	牛乳 (〃)	3 950		
	きのこ (〃)	4 100		
	綿 (α-セルロース)	4 050		
蛋白質	ゼラチン	5 150±100		5 150~5 800  平均値 5 600kcal/kg 23.4MJ/kg
	グルテン	5 750		
	卵アルブミン	5 710		
	卵蛋白質	5 750		
	牛乳カゼイン	5 670±200		
	牛乳蛋白質分	5 650		
	魚肉蛋白質分	5 650		
	果物蛋白質分	5 200		
	穀物蛋白質分	5 800		
	きのこ蛋白質分	5 000		
脂	トウモロコシ油	9 280		9 030~9 500  平均値 9 400kcal/kg 39.3MJ/kg
	小麦粉	9 360		
	小麦エーテル抽出物	9 070		
	穀物油脂分	9 300		
	動物性油脂	9 500		
	牛脂肪	9 500		
	牛肉エーテル抽出物	9 240		
	鶏肉油脂分	9 030		
	魚肉油脂分	9 500		
	バター	9 200		
	卵油脂分	9 500		
	果物油脂分	9 300		
	牛乳油脂分	9 250		
	植物油	9 400		

表6 堆肥の発熱過程における栄養素組成の変化 (藤田、1984)

発酵時間 [h]	揮発性物質 [g]	炭水化物 [g]	蛋白質 [g]	脂質 [g]	熱量計算値 [kcal/kg]	実測熱量 [kcal/kg]	
						全量	VSあたり
3.5	3 513	2 811	550	152	4 604	4 678	4 914
40.5	3 146	2 526	464	156	4 624	4 662	4 914
111.0	2 454	2 038	264	152	4 631	4 716	5 032
157.5	2 259	1 814	221	224	4 812	4 728	5 090
230.5	2 239	1 984	197	58	4 414	4 485	4 859



らかにされている堆肥化に関与する微生物フロラを述べる。

### (1) 細菌フロラ

堆肥化に関与する細菌フロラ (Poincelot, 1975) は、表 8 に示した。堆肥化の初期には多様な属の中温好気細菌が認められる。これらは土壌や水圏、あるいは家畜糞尿の場合は腸内細菌に由来する菌を含む。これら好気性中温菌が徐々に増加して、その働きにより温度が 50°C 前後に達する。この温度になると孢子形成菌の中から好気性高温菌の増殖が始まり、温度がさらに上昇して 60~75°C に達する。即ち、*Bacillus stearothermophilus* が優性種となる。高い場合は 85°C にもなる。この菌の生育最高温度が 75°C である。堆肥から 75°C 以上で生育可能な好気性高温菌は、まだ分離されていない。従って、これ以上の高温域で安定して生育する好気性高温細菌フロラの検索は、これからの重要な研究課題の 1 つである。堆肥化初期の中温菌の役割は、高温菌の増殖のために必要な最低限の温度になるまで堆肥の温度を上昇させることにある。中温および高温細菌はいずれもセルロースおよびリグニン分解能は認められていない。従って、これはこの時期、化学分析で示したようにセルロースおよびリグニンが分解されていないことを裏付けている。

今までの知見では、堆肥の温度が 85°C 付近まで上昇することが認められているので、生物学的な温度上昇の限界は 85°C であると考えられている。

### (2) 放線菌フロラ

堆肥化に関与する放線菌フロラは、表 9 に示した。放線菌 (Poincelot, 1975) は、発酵過程の後期にあたる温度が 50~60°C に下がりはじめた時期に、堆肥堆積物の表面から 10~15cm の部位に white lime like coating と呼ばれる灰白色の薄い層が認められることがある。この層は好熱性放線菌 *Thermoactinomyces vulgaris* である。特にこの菌と *Actinobifida dichotomica* は耐熱性の孢子をつくることが知られている。堆肥化に関与する放線菌フロラの変遷については、まだほとんど解明されていないので、今後の研究が待たれる。

### (3) 糸状菌フロラ

堆肥化過程の糸状菌の変遷については、麦わら堆肥 (Chang ら、1967) で詳細に調べられている。それによると、表 10 に示すように、糸状菌は 3 つのグループに分けられる。

グループ 1 は、堆肥化過程の初期の中温および高温糸状菌からなる。

グループ 2 は、高温期にあらわれる高温糸状菌からなる。

グループ 3 は、温度が低下した後熟期にあらわれる中温および高温糸状菌からなる。

堆肥化の初期に生存する中温糸状菌は、温度の上昇とともに減少して消滅するが、40~60°C になると高温糸状菌がそれにかわり増加するようになる。高温糸状菌の生育上限温度は 60°C であるので、それ以上になると堆肥の外側で生き延びると推定されている。初期に

表7 堆肥から分離された細菌 (Poinclot, 1975)

中温菌: *Cellulomonas folia*  
*Chondrococcus exiguns*  
*Myxococcus virescens*  
*Myxococcus fulvus*  
*Thiobacillus thriooxidans*  
*Thiobacillus denitrificans*  
*Enterobacter sp.*  
*Proteus sp.*  
*Pseudomonas sp.*

高温(好熱)菌: *Bacillus stearothermophilus*

表8 堆肥から分離された放線菌

耐熱および高温(好熱)菌:  
*Micomonaspora vulgaris*  
*Nocardia brasiliensis*  
*Pseudonocardia thermophila*  
*Streptomyces rectus*  
*S. thermofuscus*  
*S. thermophilus*  
*S. thermoviolanceus*  
*S. thermoovulgaris*  
*S. violaceoruler*  
*Thermoactinomyces vulgaris*  
*Thermononospora curvata*  
*T. fusca*  
*T. glaucus*  
*Thermopolyspora polyspora*

(Poinclot, 1975)

表9 麦わら堆肥における糸状菌の変遷 (Changら, 1967)

グループ1: 初期の中温期に見られるもの  
 中温菌: *Cladosporium herbarum*  
*Alternaria tenuis*  
*Aureobasidium pullulans*  
*Aspergillus repens*  
*A. amstelodani*  
*A. versicolor*  
*A. candidus*  
*A. nidulans*  
*Penicillium sp.*

高温(好熱)菌: *Mucor pusillus*  
*Absidia ramosa*  
*Aspergillus flavus*

グループ2: 高温期に見られるもの  
 高温(好熱)菌: *Humicola insolens*  
*H. lanuginosa*  
*Chaetomium thermophile*  
*Malbranchea pulchella var. sulfurea*  
*Talaromyces dupontii*

グループ3: 後熟期にみられるもの  
 高温(好熱)菌: *Sporotrichum thermophile*  
*Mycelia sterilia*

中温菌: *Fusarium culmorum*  
*Stysanus stemonitis*  
*Coprinus megacephalus*  
*Clitopilus pinsitus*

表10 病原菌及び寄生虫の耐熱性 (Golueke, 1977)

	致死条件		備考		致死条件		備考
	温度, °C	時間, 分			温度, °C	時間, 分	
チフス菌	55~60	30	46°C以上で生長停止	ジフテリア菌	55	45	シスト
サルモネラ菌	56	60		ブルセラ菌	61	6	
赤痢菌	60	15		アメーバ赤痢	55		50°C, 1時間処理で感染症減少
大腸菌	55	60		条毛虫	55~60	5	
ブドウ球菌	55	15~20		アメリカ鉤虫	45	50	卵
連鎖球菌	60	15~20		回	60	15~20	
結核菌	50	10					
	54	10					
	66	15~20					

あらわれる高温糸状菌はヘミセルロースおよびセルロースの分解能を欠いているのですぐに消滅する。グループ3の *Coprinus* は和名では“ひとよたけ”と呼ばれ、後熟期に堆肥の表面に白色のきのこ状に生育する。後熟期のよい指標となる。

糸状菌の大きな役割は、発酵過程の末期から後熟期にかけて植物遺体由来のリグニンの保護層に囲まれている難分解性有機物であるヘミセルロースおよびセルロース等の分解である。堆肥中の糸状菌の多くは、リグニン分解能を有していない。しかしながら、担子菌類のみが弱いリグニン分解能を有し、この菌が生育した場合のみわずかな量であるがリグニンが分解されることがある。

## 6. 理想的なクリーンな堆肥製造に向けて

生物系廃棄物の中で最も発生量が多いのは家畜糞尿で9,430万トンもの膨大な量が発生している。有機性総廃棄物（2億8000万トン）に占め割合は19%にも達している。従って、増加の一途を辿る家畜糞用の資源化は、我が国にとって解決しなければならない緊急課題である。しかしながら、あまりにも多量なため堆肥化のみでは処理できず、家畜糞尿を農地に直接積上げる“野積み”や穴に埋める“素堀り”などで処理されている。

余りにも多量なため、堆肥化も良質な完熟堆肥を製造するものとは程遠く、巨大な堆肥化設備で単に処理するだけなので、堆肥化された製品の多くは未熟な状態にある。未熟な堆肥の土壌への施用は、易分解性有機物の爆発的な分解によって作物の生育障害が発生する。すなわち、家畜糞尿の堆積腐熟化の主な目的は、この多量に含まれる易分解性有機物に分解にある。さらに、家畜糞尿には大腸菌をはじめ様々な腸内微生物が存在し、時には病原菌が混入している場合がある。加えて、豚回虫をはじめ多くの寄生虫も存在する。これらの腸内細菌や病原菌、および寄生虫は堆肥化過程の発酵期の高温（好熱）菌による高熱と後発酵（熟成）期の十分な熟成により、多くの場合死滅する。しかしながら、発酵期の高温と熟成期間の両者が十分でないと、作物の生育障害および病原菌や寄生虫による健康障害を引き起こすことになる。

最近とみに、「家畜糞堆肥の施用後見たこともない雑草が繁茂して、その防除に苦慮する」との話をよく耳にする。これは輸入飼料に混入する外国雑草種子によってもたらされたものである。勿論、糞中の雑草種子も発酵期の温度が十分に上昇して高温が維持するように管理さえすれば、回避できることである。しかしながら、わが国の食生活の急速な西欧化により食肉の需要の高まりと畜産振興政策とが相まって、巨大化した畜産企業や畜産団地から膨大な家畜糞尿が集中的に排泄し続けている。その膨大な量ゆえに、未熟なまま販売せざるをえない現実がある。そのため耕種農家では、圃場に施用後一定期間おいて播種して生育障害を回避するか、あるいは庭先に貯留して十分に腐熟させて使用するか、等の対策を講じている。特に肉牛、豚及び鶏の頭数が日本1で、670万トンも発生する鹿児島県では未熟な家畜堆肥の施用により、肝蛭症や豚回虫症などの寄生虫病が増大していることが、

納ら（1998）により指摘されている。

そこで、以上の考察から理想的な堆肥について述べる。理想的なクリーンな家畜糞尿の堆肥製造（資源化）の大きな目標は、1) 病原菌・寄生虫の死滅、2) 雑草種子の死滅、及び3) 臭気の除去、などである。緑農地に還元して有効利用するには、公衆衛生上の観点から、病原菌等の滅菌が前提条件になる。病原菌と寄生虫の耐熱性（Golueke, 1977）は、表11に示した。この表からわかるように、製品（堆肥）はその発酵過程で65℃以上、2日間以上経過しなければならない。また、通常の堆積方式による堆肥化では、均一に高温が維持されるわけではなく、表層の温度はかなり低い。そのため、表層の指標微生物の大腸菌が再度増殖する可能性がある。都市ごみや家畜糞尿を野外で堆積した場合、ジフテリア菌とチフス菌は50℃以上で2～3日間で死滅するが、回虫卵の死滅には55～70℃の温度で数日を必要（羽賀, 1997）とする。加えて、病原菌や寄生虫（羽賀, 1997）は表12に示すように、土壌中や植物体上で生残性の長いものがあり、特に回虫卵が顕著である。公衆衛生上の見地から、堆肥を制限なしに緑農地に施用すれば、危険が伴うことを留意しなければならない。

最近、現場で「堆肥を農地に施用したところ、見知らぬ雑草が繁茂し、強い繁殖力のため防除し難い」との話をよく耳にする。その大きな原因は、堆肥化過程で第1次発酵温度の上昇が弱く、表13から分かるように、60℃以上になっていないことにある。

これらのうち、1) 及び 2) の目標を達成するには、発酵温度を上げなければならない。温度を上げるためには、通気可能な密閉型コンポスターに電熱器を取り付けて外部から熱を加える方法と、高い発酵熱を出す微生物を利用する方法とがある。電熱器を用いる方法は設備費が高価で、電力を使うためランニング・コストが高くなり、普通採算が取れない。高い発酵熱をもつ微生物、いわゆる超高温菌（75℃以上で生育可能な微生物）の利用は、設備費が不要で、かつランニング・コストもほとんどかからない。そのため、将来の堆肥製造には、超高温微生物の利用は不可欠であると考えられる。

臭気の除去には、好気発酵、いわゆる好気性微生物による堆肥化が望ましい。何故なら、好気性発酵では種々の悪臭成分が分解される。例えば、主要な悪臭成分の窒素化合物の場合、その最終分解である無機態窒素のアンモニア臭程度である。アンモニアは、水洗塔（水洗浄）や安価な土壌脱臭法で比較的容易に除去できる。それに比べ、嫌気発酵では臭気成分である硫化水素、メチルメルカプタン、硫化メチルおよび二硫化メチルなどの硫黄系、およびトリメチルアミンの窒素系が発生する。その除去には、吸着炭法や薬洗浄＋活性炭法などの高価な設備と高いランニング・コストが強いられるからである。

従って、理想的なクリーンな堆肥製造には、超高温・好気発酵法の確立こそが望ましい。加えて、発酵期間を短縮できる。例えば、発酵温度が10℃上昇するだけで、有機物の分解速度が1.5～1.8倍速くなるからである。現在、超高温細菌による未利用有機性廃棄物の資源化（堆肥）について研究を当研究室で続けているところである。

表 11 各種病原菌・寄生虫の土壌及び植物体上での生残性 (藤田、1984)

生物	培地	生存期間
回虫卵	土野 壇菜壇菜	7年まで 27~35日
チフス菌	土野 壇菜壇菜	29~70日 31日
コレラ菌	ハウレンソウ、レタス	22~23日
アミーバ赤痢	非酸性野菜壇菜壇菜	2日 3日
大腸菌	土野 壇菜壇菜	8日 14日
鉤虫(幼虫)	土野 壇菜壇菜	14日 35日
レプトスピラ	汚染水	6週 15~43日
ポリオビールス	汚染水	20日
チフス菌	ダイコン 壇	53日 74日
赤痢菌	トマト 壇	2~7日
結核菌	土野 壇	6月
チフス菌	土野 壇	2~40日

表 12 堆積牛糞内に11~14日間埋設した雑草種子の発芽率 (藤田、1984) (単位: %)

	堆積牛糞内の埋設条件			対照
	表面 (50℃未満)	上層 (80℃2日間)	中層 (60℃2日間)	
メヒシバ	96	0	0	74
ノビエ	72	0	0	87
カヤツリグサ	56	0	0	30
シロザ	26	0	0	16
オオイヌタデ	8	0	0	53
スベリヒユ	85	0	0	91
イヌビユ	68	0	0	70
エノキグサ	7	0	0	51
クワクサ	26	0	0	19
陸稲	75	0	0	98
オオムギ	16	0	0	96

(羽賀 1997)

表 13 水稻の生育及び収量に及ぼすブレンド堆肥の効果 (大田・有馬、2000)

	最高分けつ期		成熟期			倒伏程度	玄米重(kg/a)
	草丈(cm)	茎数(本/㎡)	稈長(cm)	穂長(cm)	穂数(本/㎡)		
対 照 区	73	505	84	19.9	377	0	56.3
牛ふん主体+穂肥区	73	505	83	19.7	362	1	59.4
鶏ふん主体+穂肥区	72	502	82	19.7	391	0	57.5
豚ふん主体+穂肥区	73	509	83	19.6	403	1	59.7

表 14 九州各県における有機農業への取り組み (平成11年3月)

自治体名	全農家戸数	有機農業農家戸数	有機農業の農家割合%	有機農業団体数	耕地面積(ha)	生産量(t)	栽培7.57%	認証制度	認証制度導入予定	全市町村数	有機農業振興施設市町村	認証制度のある市町村
福岡県	84,400	1,408	1.7	24	590	-			H11予定	97	8	0
佐賀県	43,150	-	-	-	-	-			検討中	49	0	0
長崎県	48,496	-	-	39	-	-			検討中	79	-	1
熊本県	82,700	1,537	1.9	64	1,108	10,350	○	○	H2導入済	94	10	1
大分県	60,500	642	1.06	33	304.2	-			検討中	58	-	0
宮崎県	61,900	800	1.3	21	423.7	6,098.1			なし	44	2	2
鹿児島県	14,892	913	0.9	48	650	-	○		なし	96	-	3

自然と農業 (1999) 4: No. 2

## 7. 施肥の原理及び堆肥の施肥効果

### 1) 施肥の原理

肥料とは土壤肥沃度を増進し、作物の収量を向上させるために土壤または作物に施させる物料と定義される。土壤肥沃度とは作物を生産し得る土壤の能力のことである。植物の正常な生育収量をあげるためには、多くの種類の無機成分が植物の必要量を満たすような割合で供給する必要がある。植物の生育量は最も不足している無機成分量によって支配される。これがリービッヒにより提唱された植物養分に関する“最小養分率”である。ウォルターはこの最小養分率を補足訂正して、植物の生産量はその生育に必要な諸因子（養分、水、温度、光線など）の中で、1つでも不足するものがあれば、他の因子が十分にあって、植物の生育はその因子によって支配され、他の因子を増やしても生育は良くならないとした。これを“最小率”と呼ぶ。養分の供給は人為的に変えることができるので、人類は古来より肥料を使用することにより、制限因子を見出しその供給量を増やし、作物の収量の増加を図ってきた。他の因子を一定にしてある養分の供給量を増大した場合、始めは収量が増大してもやがて頭打ちになる。この時の収量増大曲線をミッチェルリッヒは、次の式で表した。

$$\frac{dy}{dx} = (A - y)k$$

y : 収量、 A : 最高収量、 x : 養分量、 k : 定数

この式では、養分の供給量が増大するに伴い、単位養分量の増大分に対する収量の増大分が次第に少なくなる。これが“収量斬減の法則”である。これを無視すると肥料の無駄使いになり、経済的にも引き合わないことになる。

### 2) 堆肥の施肥効果

堆肥は、基本的には微生物のエネルギー源である植物遺体由来、あるいはその他の炭水化物をエサとして微生物を増殖させることにある。いわゆる、良質な有機肥料ほど菌体成分が多い。菌体成分には、植物を健康に保つ多量要素（窒素、リン酸、カリ、硫黄、カルシウム、マグネシウムなど）から微量元素（鉄、亜鉛、銅、マンガン、ヨウ素、コバルト、クロム、セレンなど）まで豊富に含んでいる。

#### (1) 長期連用圃場

有機質肥料の土壤施用による効果は、欧米をはじめ、わが国においても古くから多くの試験がなされている。わが国で最も有名な有機肥料連用水田圃場は、現在筑波にある農水省の農業センター（旧農事試・鴻巣から圃場を移設）にある。この圃場は、大正15年（1926年）に開設され、今日に及んでいる。同じく対象5年に開設された愛知県総農試、大正8

年(1919年)開設の福島県会津会場, 昭和25年(1950年)開設の静岡県農試におけるそれぞれの土壌中の微生物性を調べた。その結果, 土壌微生物フロラ(図9および10)及び土壌酸素活性(図11及び12)は, いずれも有機肥料区が最も高く, 次いで化学肥料区, 無肥料区が最も低く, 施肥管理の差が明瞭に示された。ヨーロッパを代表するドイツの畑土壌においても同様である。このように, 有機質肥料(堆肥)は明瞭に生物性を改善することがわかる。微生物の菌体(微生物バイオマス)は, 植物の可給態養分のプールを担っているので, 有機質肥料施用により, 極めて良質な肥料成分が集積することを示している。

筆者と平成11年から13年まで共同研究を行っているイギリスのロザムセット(Rothamsted)研究所における長期肥料連用試験における成果の1部を紹介する。当研究所は, ご存知のように近代的農業研究所の発祥地である。世界で最古(1843年開始)で, 現在に至るまで化学および有機質肥料の連用試験(Broadbalk)があるからである。

本圃場における120年にわたる化学及び堆肥肥料連用試験における結果は, 図13に示した。それによると, 窒素肥料の増肥の効果が明瞭に認められるが, 連作よりも輪作の方が収量は高いことも分かる。また堆肥の効果は化学肥料に何ら劣るものではなく, 堆肥+化学窒素肥料の組み合わせが最も効果的である。その窒素肥料の増肥の効果については, 図14に示すように詳細に調べられ, 品種によってその効果が異なる。

## (2) 肥効の高い堆肥(ブレンド・ペレット堆肥)の製造とその施用効果

家畜糞尿堆肥は良質であれば, 肥効が気温条件と対応するため, 作物の養分要求量に高い利用率が高く, 窒素負荷が少なく, かつ土壌の物理性の改善効果などが期待される。それに根圏環境の改善による肥料成分利用率の向上も加わる。そのため, 農耕が始まった一万年前から昭和40年代まで堆肥は, 貴重な自給肥料として使用されていた。例えば, 戦前のように農家に農耕馬が1頭いたとしたならば, 約1町歩(1ヘクタール)の農地に必要な堆肥(自給肥料)が生産できた。しかしながら, 昭和40年代に始まった農村近代化により, 耕種農家と畜産農家が分離したため, 農耕に必要な馬や牛が農村から消え, 自給肥料としての堆肥の生産ができなくなり, 化学肥料および農薬の多投型農業に変わった。その結果, 農作物や土壌の残留農薬(その多くは環境ホルモンである)や農産物の質の低下(微量元素欠乏など)をきたし, 多くの健康障害を引き起こしている。

従って, 如何にして農家が安心して, 化学肥料に匹敵する堆肥を製造するかが重要となる。そのための方策の1つが作物の養分吸収特性に応じた家畜糞尿堆肥のブレンド化である。

鹿児島県においては, 既に家畜糞のブレンド堆肥が製造され, 県下の各試験場で施肥試験が行なわれている。農業の実務者が高齢化している農業現場を考慮して, ブレンド堆肥をペレットに加工して, 運搬および取扱い易いものとしている。

水稻(ヒノヒカリ)におけるブレンド堆肥の効果(太田ら, 2000)を, 表14に示した。家畜糞堆肥の基肥窒素2.0kg/aと化成肥料の穂肥0.1kg/aを組合せた体系により慣行栽培

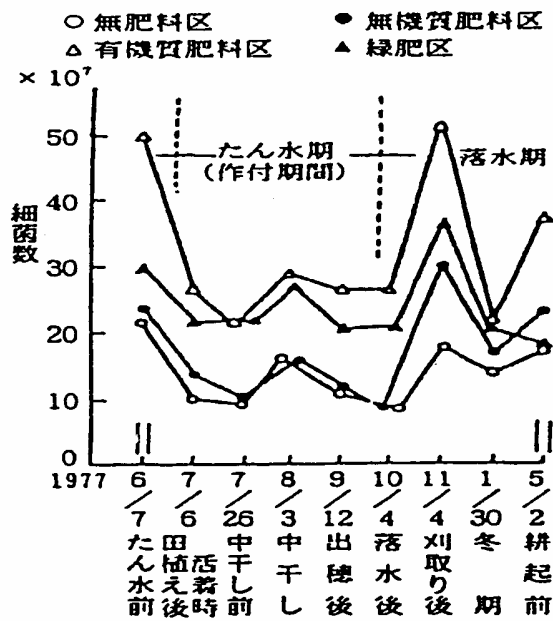


図9 水田土壌の好気性細菌数 (金沢・長谷部・高井、1980)

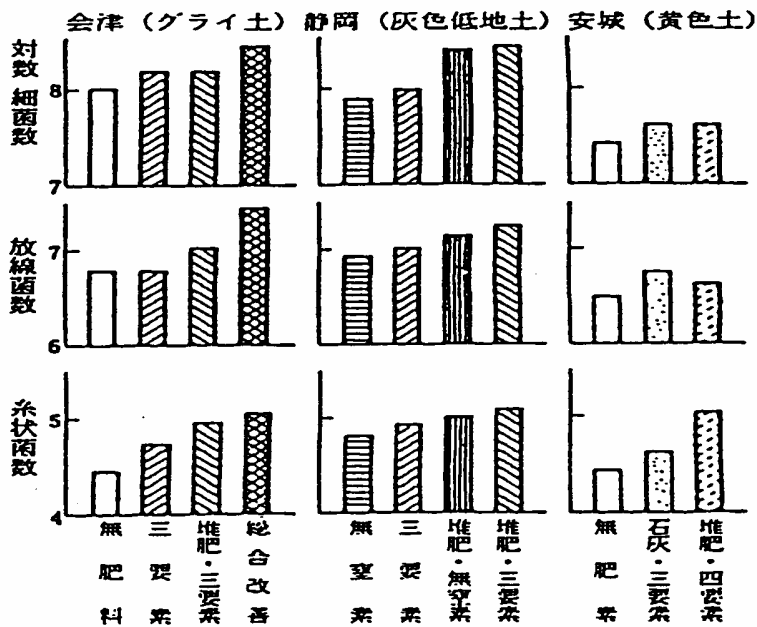


図10 土壌型及び肥培管理の異なる水田土壌の各微生物数 (金沢ら、1981)

会津：福島県農試会津支場

静岡：静岡県農試

安城：愛知県総農試安城支場



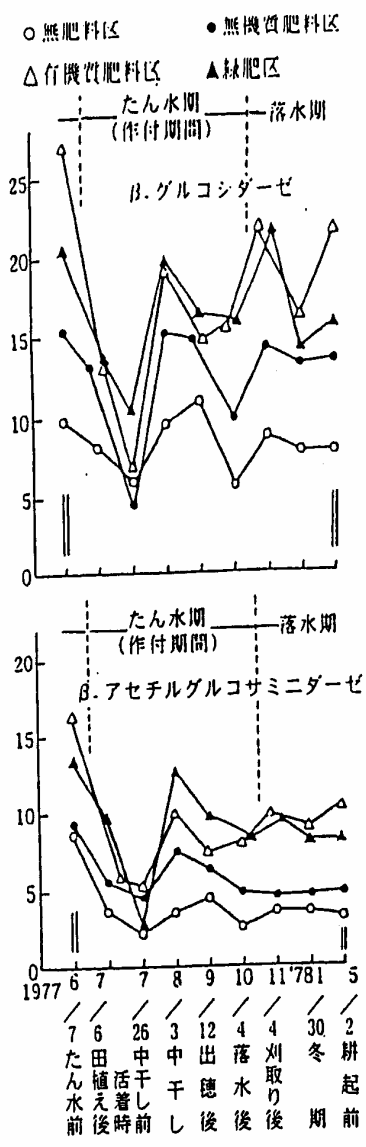


図 11 水田土壌の酵素活性の季節的変動 (金澤、1980)

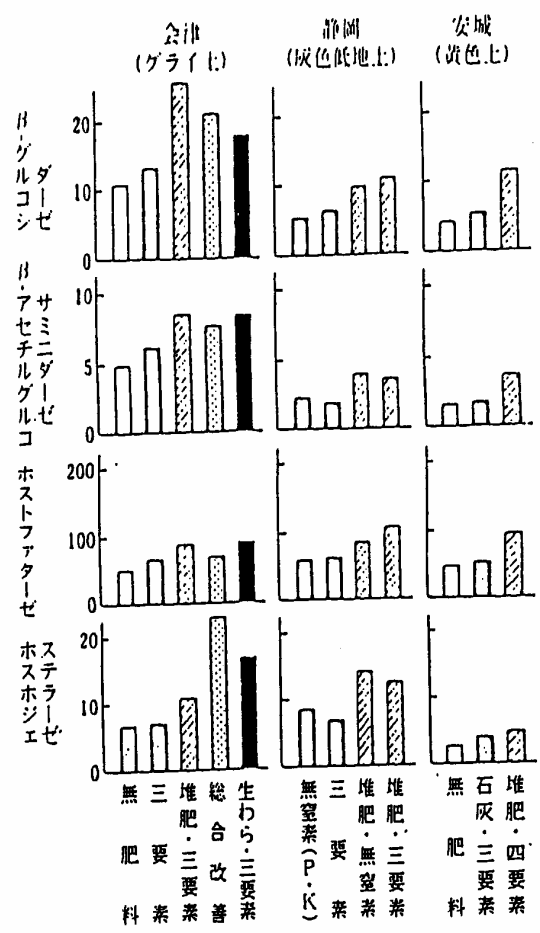


図 12 土壌型及び肥培管理の異なる水田土壌の各種酵素活性 (金澤、1980)

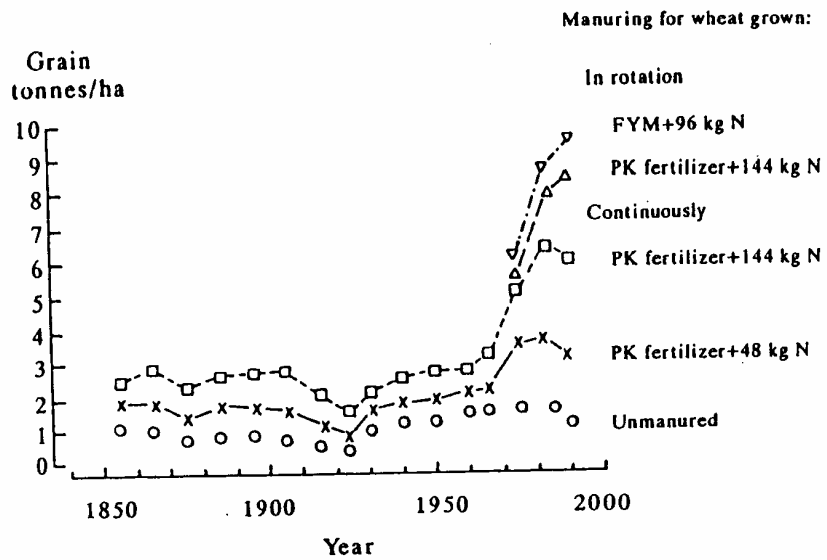


図 13 化学及び有機質肥料の長期連用施用試験における収量の変動 (イギリス・ロザムステット、1991)

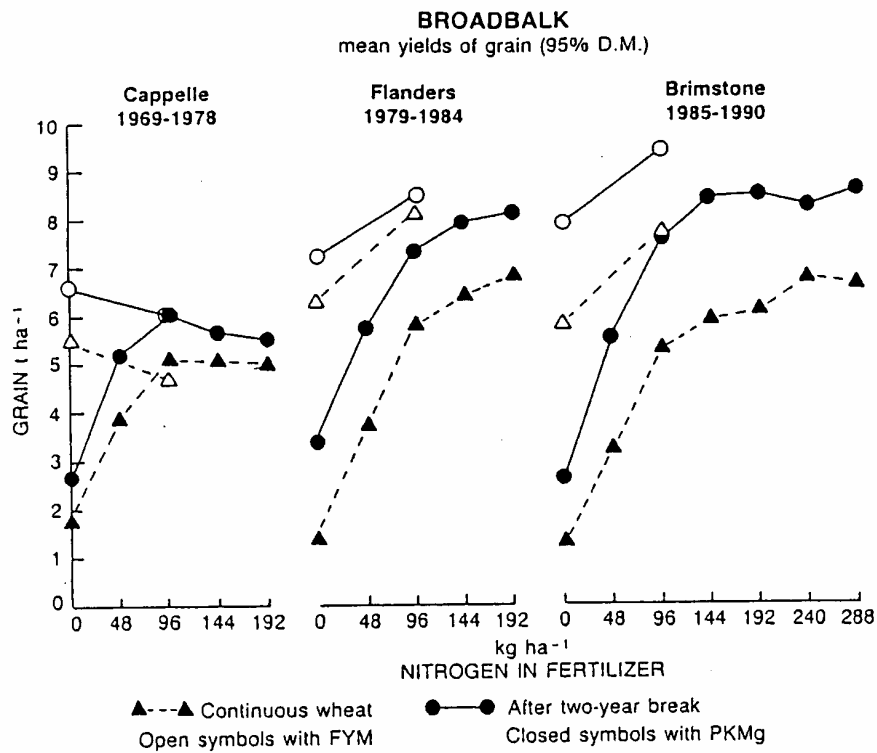


図 14 化学窒素肥料の効果 (イギリス・ロザムステット、1991)

と同等の収量をうることが可能で、倒伏もほとんど認められない。この場合のブレンド堆肥は、鶏糞主体・牛糞堆肥（鶏糞：牛糞＝2：1）が最も優れていた。この理由は窒素発現の速い鶏糞の肥効パターンにあると推定される。

でん粉用甘藷における各種家畜糞ペレット堆肥の単独およびブレンド施用の3年間にわたる生育および収量に関する結果（森ら，2000）では、堆肥連用2年目および3年目になると対照（化性肥料）区と同等以上の“上いも”収量が得られている。従って、家畜糞堆肥のみの原料用甘藷栽培は充分可能であることが認められた。

キュウリに対する家畜糞ペレット堆肥の効果（三角ら，2000）は、抑制作型で収量がやや低下するものの総収量では豚主体・牛糞堆肥（豚：牛糞＝2：1）が多収であった。また、現地試験においても、収量は豚ふん主体・牛糞堆肥区が多収で、次いで豚ふん主体・牛糞＋化成肥料区、現地慣行区の順であったことから、家畜糞ブレンド堆肥は、有望であると結論づけている。

サトイモに対する家畜糞ペレット堆肥の効果（餅田，2000）は、子・孫芋の収量では豚主体・牛糞堆肥は対照区を上回っていた。これは、子・孫芋の着生数の増加に起因していた。

以上の結果は、作物の養分吸収特性に対応した各家畜糞堆肥のブレンドにより肥料成分を調節した“ブレンド堆肥”が有効であることを示唆している。

## 8. 有機（オーガニック）農業

視点を変えて、家畜糞尿を含む有機性廃棄物を貴重な資源として捉え、有機（オーガニック）農業に必須な有機質肥料の原料として活用することが肝要である。本資源の活用で、九州独自の「有機農業システム」を構築し、九州を“健康な農産物生産基地”として創生することができる。

オーガニック農業を成功させるには、産地直送のシステムを構築して“生産者の顔がみえる農産物生産”を行うことにつぎ。何故なら、我が国では自給可能な農作物として、農林水産省が最も力を入れていた野菜が農産物の自由化され、特に中国からの大量輸入により価格が低迷する場面が多いからである。特にスパークなどの量販店では、量や品目の指定等により、オーガニック農業ではそれに対応するのが難しい。特に雑草、害虫や病害などの防除で人手と手間がかかると同時に、大量に生産できない欠点を有しているため、どうしても価格が高くなるからである。これをクリアして、安定的な生産活動をするには、産地直送が最も優れている。勿論、オーガニック農産物には、“安全・安心”とか“おいしい”といった品質面からのセルースポイントがあるため、静かなるブームとなり、大手デパートやスパークでもオーガニック野菜やオーガニック農産物コーナーが設けられるようになった。それらとの提携することも経営の安定化のためには重要である。

より安定したオーガニック農産物の生産活動を行うためには、大消費地の市場に出荷で

きる“有機農産物の認証制度“の整備が必要である。そのため、農林水産省では、積極的にそれを推進し、1992年にまとめた有機食品の表示ガイドラインよりも厳しくした基準を設けて、それを受けて各地で有機認証制度がスタートしている。九州の各県においても積極的に有機農産物の認証制度を整備し、健康な農産物供給基地として、全国的なブランドにすることが肝要であるとする。

なお、九州各県における有機農業への取り組み状況は、表15に示すように、始まったばかりである。これを推進する政策を施行することが極めて重要であると言える。

## おわりに

今日、地球生態系における土壌の重要性が再認識され、その果たしている機能と役割が大きくクローズアップされるようになった。その契機は、間違った耕作法や農地の過度の酷使による塩類・砂漠化による不毛地の拡大、また熱帯雨林が焼畑や開発により激減している様子が、宇宙から人間が直に地球の表面を観察できるようになったことが大きい。さらに、我々人類の生存に深く係る地球表面に薄皮のように薄く広がる土壌が、過度の農薬や化学肥料の施用により、農作物の健康が消費者を中心に懸念されている。先進国を中心とした有機（オーガニック）農産物への嗜好の高まりである。幸いなことに我が国には、家畜糞尿、下水汚泥、食品残渣などの未利用有機性廃棄物が2億8千万トンも発生している。我が国でもこの貴重な資源を活用することなく、化学肥料の多量施用が続いている。それに加え過度の農薬（その多くは内分泌攪乱物質「環境ホルモン」と見なされている）により、農作物の健康が消費者を中心に懸念されている。そのため、先進国を中心に有機（オーガニック）農産物への嗜好の高まりである。有機性廃棄物に含有する栄養分は、農産物輸出国の肥沃な大地そのものである。視点を変えて、有機性廃棄物ではなく、貴重な資源として捉え、従って、現在世界に先駆けて、我が国独自の「オーガニック農業システム」を構築し、国民が望む健康な農産物を供給するシステムを創生する絶好の機会である。

現在の人類の生存を可能にしているのは、化学肥料や農薬であることは厳然たる事実である。そのため、肥料成分の挙動を規制する土壌の基本的な知識を知ることが、極めて重要なことである。土壌学は奥が深いのでここに挙げたのはほんの基礎であるが、これを契機に興味をもっていただければ幸である。

堆肥とその利用についての知見は、農業の発生と同じ長い歴史があり、かつ膨大な成果が蓄積している。中国はもとより、日本やヨーロッパの古い農書を紐解けば、必ず堆肥の利用法と効用が記載されている。特にわが国では、昭和40年代までの肥料の研究の中心は、堆肥や堆厩肥であった。従って、これらには、有機性廃棄物の資源化とその農業活用の知恵が一杯詰まっている。これら人類の英知の蓄積した農書は、家畜糞尿を中心とした未利用有機性廃棄物の資源化を進めるバイブルである。例えば、環境保全型農業に盛んに利用されている“木炭”の利用も江戸時代の農書から得たものである。従って、これらバイブ

ルの活用は、有機性廃棄物の資源（有機肥料）化に多くのヒントを与えてくれるものと思われる。