

環境保全に配慮した家畜ふん堆肥の利用

独立行政法人 農業・生物系特定産業技術研究機構
中央農業総合研究センター 土壌肥料部 木村 武

堆肥など有機質資材の農地利用は、これまで伝統的に行われてきた最も実績のある有機性資源の循環利用である。そのため、家畜排せつ物の処理方式のなかで堆肥化は耕種部門への流通利用を考える場合、基本となる処理方式に位置づけられる。

確かに、農地土壌には有機質資材の施用が必要であり、農業の有する物質循環機能の発揮による有機性廃棄物の資材化とその農地利用を通じて循環型社会の形成に貢献することが期待されている。しかし、農業生産に伴う環境負荷の状況をみるならば、生産と環境保全を両立するために越えるべき課題は大きい。

ここでは、土づくりにおける役割や必要な品質など堆肥の基礎知識、家畜ふん堆肥の耕種農家による利用において農業生産と環境保全の適正なバランスをとる上での課題、環境保全により配慮した施用法の考え方や試験研究部門における技術開発の取組状況などについて紹介する。

I. 堆肥に関する基礎知識

1. 土づくりと有機物施用

■堆肥の施用は土づくりの重要な手段

作物の生育にとって「良い土」とは、「水分、空気、養分などを適度に保持し、それを供給するとともに、外部から加えられる降雨、乾燥、温度の変化などの影響を和らげる緩衝機能に優れている土」といわれる。こうした「良い土」の機能を維持・増進する上で有機物は重要な働きを担っているが、土の中で微生物によって分解され、特に農耕地では耕耘の影響もあって有機物の消耗が大きい。そのため、人為的な有機物の補給が必要で、古くから農業では、作物残渣や家畜ふん尿などの有機物を堆肥化し、「土づくり」の重要な手段として循環利用してきた。

最近では、従来行われてきた有機性廃棄物の焼却や埋立処分がもたらす環境への負荷を軽減し、有害物質の発生を抑え、化石エネルギーの消費抑制に貢献する視点からも各種有機性廃棄物の堆肥化と農地への利用促進が期待されている。

■堆肥の品質として備えるべき基本条件

堆肥等の有機質資材は、通常、1回の施用量がヘクタール当たり数十トン程度に達する。また、原料の有機性廃棄物・副生物の種類と熟成程度によっては、悪臭や有害成分、有害生物のリスクがある。そのため、品質に関して備えるべき基本的な条件は、取り扱い易く作物と土壌に対して安全かつ有効であることであり、その内容は表1のように整理される。

表1 堆肥の品質について備えるべき条件

- | |
|---------------------|
| A. 取り扱いやすい性状であること |
| ①水分が適度である |
| ②臭気が強くない |
| ③病原菌・寄生虫卵などを含まない |
| B. 土壌・作物にとって安全であること |
| ①施用後、急激な分解をしない |
| ②窒素飢餓を生じさせない |
| ③生育阻害物質を含まない |
| ④有害物質を含まない |
| ⑤塩類濃度が低い |
| ⑥植物病原菌等を含まない |
| ⑦雑草の種子を含まない |
| C. 土壌・作物にとって有効であること |
| ①植物に養分を供給する |
| ②土壌の化学的性質を改善する |
| ③土壌の物理的性質を改善する |
| ④土壌中の生物活動を維持・増進する |

(原田, 1985)

■堆肥にする理由（安全性と取扱性の確保）

表1のA及びBの項目は原料となる有機性廃棄物・副生物が有する好ましくない点の改善について示したもので、重金属等の有害物質と塩類濃度の項目以外は堆肥化することによって改善される。

作物残渣や家畜ふん尿は、微生物の栄養源となり易い糖、アミノ酸、脂肪酸などの易分解性有機物を多量に含み新鮮有機物と呼ばれる。これ

を土壤に施用すると急激な微生物の増殖が起こる。その結果、酸素不足による根腐れを起こしたり、C/N比の高い新鮮有機物では、微生物が増殖する際に土壤中の窒素を菌体中に取り込むため、作物が利用できる窒素が不足する「窒素飢餓」をもたらす。

新鮮有機物を適当な水分条件で堆積すると、図1に示したように、まず低分子の糖、アミノ酸、脂肪酸などの易分解性有機物が消失し、この過程でフェノール化合物などの植物生育阻害物質も分解する。次いでヘミセルロース、セルロース、さらにリグニンが分解する。これらの過程で炭素は二酸化炭素として大気中に失われるが、窒素の相当部分は微生物に取り込まれて残存するため、C/N比は次第に低下し、土壤に施用しても急激な微生物の増殖や作物の窒素飢餓を生じない安定した堆肥化物となる。また、微生物の増殖に伴う発熱によって堆積物中の温度は60～70℃にも達するため、雑草種子や有害微生物が死滅する（表2、表3）。さらに、切り返しによって十分に酸素を供給すれば、有機物の分解が促進されて悪臭物質の生成は抑制され、取扱い性も向上する。こうした一連の過程を経ることを「腐熟」といい、腐熟の程度は堆肥の品質を左右する。

一方、原料中の無機塩類は堆肥化の過程で分解・消失しないため、むしろ堆肥化によって高濃度になる。

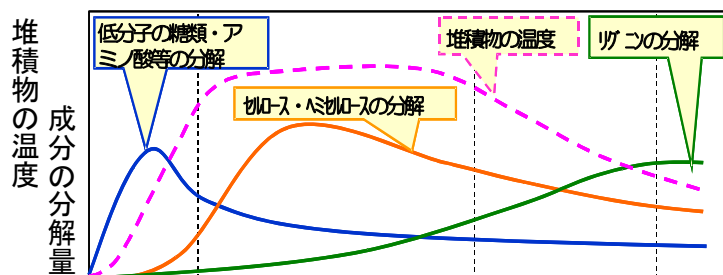


図1 堆肥化過程における成分の分解と堆積物の温度変化（西尾、1997）

表2 病原菌・寄生虫卵の熱耐性

種類	致死条件	
	温度(℃)	時間(分)
チフス菌	55～60	30
サルモネラ菌	56～60	15～60
赤痢菌	55	60
ブドウ状球菌	50	10
連鎖球菌	54	10
ジフテリア菌	66	15～20
ブルセラ菌	61	3
アメーバ赤痢	55	
条虫	55～60	5
繊毛虫	62～65	
アメリカ鉤虫	45	50
回虫	60	15～20

(Golueke)

表3 牛ふんたい肥に埋設した雑草種子の発芽率

種類	埋設条件		対照
	50℃未満	60℃2日間	
メヒシバ	96	0	74
ノビエ	72	0	87
カヤツリグサ	56	0	30
シロザ	26	0	16
オオイヌタデ	8	0	53
スベリヒユ	85	0	91
イヌビユ	68	0	70
ヘノキグサ	7	0	51
クワクサ	26	0	19
陸稲	75	0	98
大麦	16	0	96

(高林ら)

■一様ではない堆肥の施用効果

表1のCの項目は、堆肥等有機質資材の施用効果について示したものである。堆肥は、植物に養分を供給する肥料としての効果と、養分以外の土壌の化学性・物理性・生物性を改善する土壌改良資材としての土づくり効果を併せ持つ資材であるが、両効果の程度は堆肥の種類と成分組成によって大きく異なる。

大まかにみると、**図2**に示すように、含有する有機態成分の分解が緩やかで肥料成分の濃度が低いパーク堆肥や稲わら堆肥など(C/N比20~30以上が目安)は、土壌改良資材的な効果が大きく、窒素などの肥効すなわち肥料的な効果が小さい。逆に汚泥肥料や鶏ふん堆肥など(C/N比10以下が目安)は、有機態成分の分解が速く肥料成分濃度も高いため、有機物供給効果は持続しないが窒素等の肥効は大きい。それは、堆肥中の窒素の大部分はタンパク質や核酸などの有機態成分として存在し、土壌中で微生物による有機態成分の分解に伴って無機化してくる窒素が主として作物に利用されるためである。

このように、土壌改良資材としての効果と肥料としての効果の程度は裏腹であり、作物の種類や使い方によって優先的に求められる施用効果も異なる。

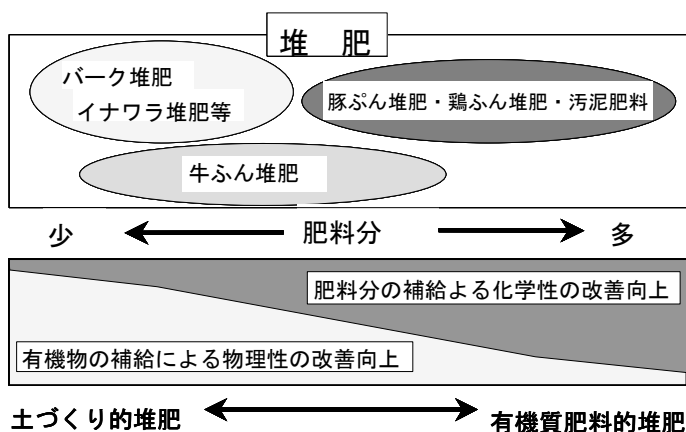


図2 土づくり的堆肥と有機質肥料的堆肥
(安西の原図より作成)

2. 品質の基準

■肥料取締法と地力増進法における堆肥についての規定

堆肥は、**表4**に示すように、肥料の生産・流通を規定する「肥料取締法」(法律第127号、1950)で特殊肥料と普通肥料に区分される。なお、「肥料取締法」では「たい肥」と記述されているが本稿では「堆肥」と記述する。

家畜ふん堆肥は特殊肥料に区分され、保証成分に関する公定規格は定められていないが、「堆肥」と「動物の排せつ物」については、「特殊肥料の品質表示基準」に基づき、原料、主要成分の含有量などの表示義務がある。また、家畜ふんの種類により一定以上の銅、亜鉛を含有する場合はその数値を表示する必要がある。すなわち、「豚ふんを原料として使用するものであって、銅全量を現物1kg当たり300mg以上含有する場合に限り、mg/kg単位の整数で表示する。また、豚ふんや鶏ふんを原料として使用するものであって、亜鉛全量を現物1kg当たり900mg以上含有する場合に限り、mg/kg単位の整数で表示する」となっている。これらの家畜の飼料には銅・亜鉛が添加されており、堆肥中の銅・亜鉛が高濃度である場合が想定されるためである。

表4 肥料取締法における区分と品質に関連する項目の取り扱い概要

区分	対象肥料の例	公定規格の内容	表示の内容
特殊肥料	魚かす、米ぬか	公定規格なし	表示基準なし
	たい肥、動物の排せつ物	公定規格なし	品質表示基準を制定し、①種類・名称、②含有成分量、③原料の種類等を表示
普通肥料	汚泥肥料、汚泥発酵肥料	有害成分の最大量等	保証票の添付を義務付け、①種類・名称、②含有成分量、③原料の種類等を表示
	化学肥料、有機質肥料	主成分の最小量、有害成分の最大量等	保証票の添付を義務付け、①種類・名称、②保証成分量、③原料の種類等を表示

なお、家畜ふんが主原料であっても、汚泥を含む場合は、その量の多少に関わらず汚泥肥料とみなされ普通肥料に区分される。汚泥肥料では、含有を許される有害成分の最大量が公定規格として定められている。具体的には乾物 1kg 当たり、ヒ素 50mg、カドミウム 5mg、水銀 2mg、ニッケル 300mg、クロム 500mg、鉛 100mg である。

バーク堆肥は、「肥料取締法」での表示基準はないが、「地力増進法」（法律第 34 号、1984）において品質表示基準が設定されている土壌改良資材であり、資材の種類、製造者、原料、用途（主たる効果）、施用方法（施用上の注意）などを表示することが義務づけられている。さらに、日本バーク堆肥協会及び全国バーク堆肥工業会の統一品質基準による規格が設定されており、出荷段階で家畜ふん堆肥の場合と同様の表示をすることが義務づけられている。

■有機質肥料等推奨基準における規定

良質な有機質資材の供給を目的とした民間の自主的な品質保全対策を支援するため、全国農業協同組合中央会を事業主体として、「有機質肥料等品質保全推進事業」が実施され、1994 年にバーク堆肥、汚泥肥料、汚泥堆肥及び家畜ふん堆肥（鶏ふん堆肥は対象から除いている）について、**表5**に示す品質保全のための推奨基準が作成されている。なお、この基準はガイドラインであり、公定規格ではない。

この推奨基準は堆肥を有機質肥料とみなす場合のもので、三要素（N、P₂O₅、K₂Oとして）の含有率は各々1%以上と設定されている。ただし、三要素含有率が1%以下の堆肥は品質が悪いというわけではない。肥料成分濃度の低い堆肥は土壌改良資材と考えるべきものであり、そうした堆肥を望む耕種農家は多い。しかし、家畜ふん堆肥を対象とした全国的な実態調査では、殆どの堆肥で三要素が1%を超えていたことなどにみられるように、現在では土壌改良資材というよりむしろ有機質肥料とみなすべき堆肥が増えている（**図3**、**図4**）。

また、電気伝導度（EC）に関しては、5mS/cm以下と設定されている。この基準値は、堆肥の幼植物試験の結果を踏まえ、濃度障害の発生を防止する目的で設定されたものである。最近の調査事例では推奨基準値を越えるものが多く、高塩類化の傾向が認められている（**図5**）。施設園芸などを中心に耕種農家では高塩類の堆肥は敬遠される傾向がある。戻し堆肥方式による堆肥生産が増えていることや、「家畜排せつ物法」の施行により、雨ざらしによる除塩を期待できないことなどから、堆肥の高塩類化は、耕種農家への流通促進の上で対策が必要な重要課題であると指摘されている。

表5 堆肥等有機質資材の品質保全のための推奨基準

基準項目	バーク堆肥	下水おてい肥料	し尿おてい肥料	食品工業おてい肥料	下水おてい肥料	し尿おてい肥料	食品工業おてい肥料	家畜ふんたい肥
有機物(乾物当たり%)以上	70	35	35	50	35	35	40	60
要 C/N比以下	40	10	10	10	20	20	10	30
種 示 窒素(N)全量(乾物当たり%)以上	1	2	2	2.5	1.5	2	2.5	1
類 示 無機態窒素(乾物100g当たりmg以上)	25	-	-	-	-	-	-	-
別 項 リン酸(P ₂ O ₅)全量(乾物当たり%)以上	-	2	2	2	2	2	2	1
品 目 アルカリ分(乾物当たり%)以下	-	25	25	25	25	25	25	-
質 目 カリ(K ₂ O)全量(乾物当たり%)以上	-	-	-	-	-	-	-	1
基 表示 水分現物当たり%)以下	60	30	30	30	50	50	50	70
準 不要 電気伝導率(現物につきmS/cm以下)	3	-	-	-	-	-	-	5
項目 陽イオン交換容量(乾物100g当たりmeq以上)	70	-	-	-	-	-	-	-
pH(以下)	-	-	-	-	8.5	8.5	8.5	-

共通 ①肥料取締法に基づく特殊肥料等の規定に掲げる重金属等規制*に適合すること。
品質 ②植物の生育に以上を認めないこと。なお、コマンナによる幼植物試験により異常の有無を検定することが望ましい。
基準 ③乾物当たり銅及び亜鉛の含有率が、それぞれ600ppm及び1800ppm以下であること。

*: 現行の肥料取締法平成11年改訂以降)では、おていを含む普通肥料の公定規格における重金属規制が相当する。

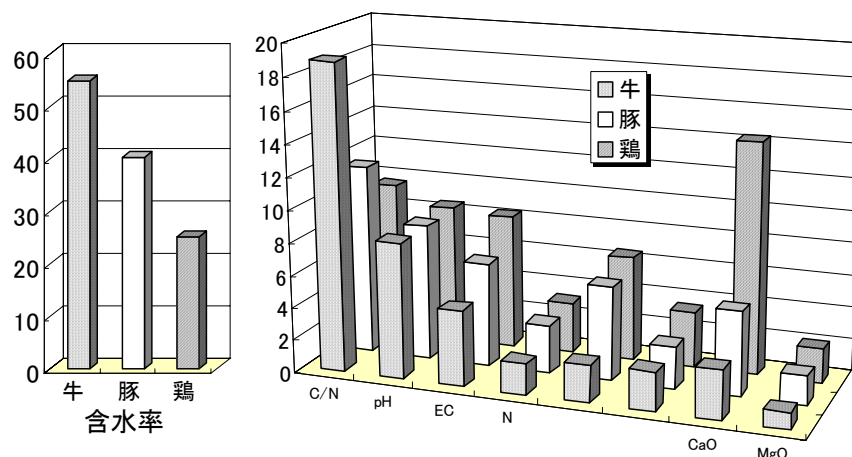


図3 畜種別にみた家畜ふんたい肥の成分 (原田ら、1997)

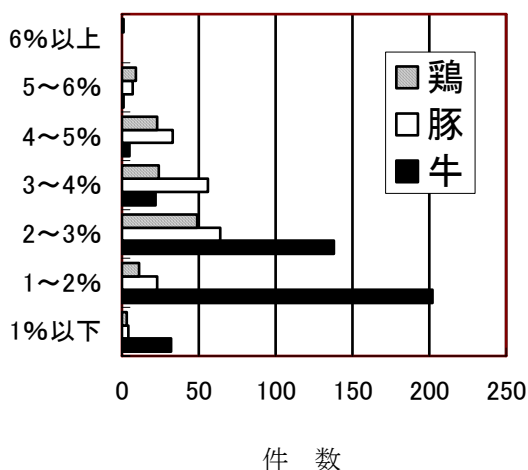


図4 堆肥の窒素濃度の階級別分布

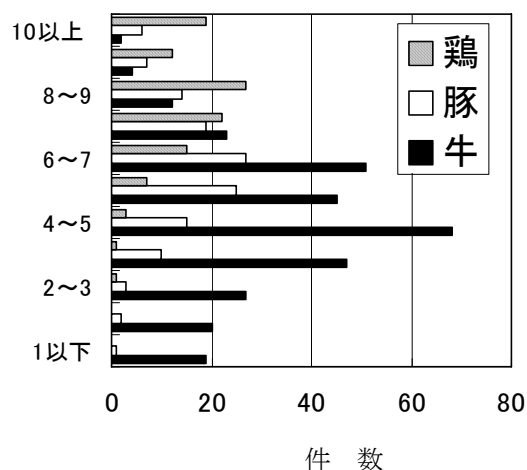


図5 堆肥の EC(mS/cm)の階級別分布

■堆肥中の重金属について

重金属は、一般に比重が水の4~5倍以上ある金属元素を指し、カドミウム、水銀、ひ素、六価クロム、鉛など有害なものが多い。そのため、堆肥等の有機質資材を利用する上で、重金属濃度は大きな関心事になる。一方、必要不可欠な重金属もあり、マンガン、鉄、銅、亜鉛、モリブデンなどは植物の必須元素である。

堆肥化過程では、有機物の分解に伴い炭素や窒素はガス化して減少するが、重金属は除去されず、むしろ濃縮される。そのため、有機質資材の種類により原料に混入の可能性が想定される重金属については規制値や基準が設定されている。

表6には堆肥中の重金属濃度の調査例を示したが、一般に汚泥を原料とするものは他の資材に比べて重金属濃度が高い。これは、工場排水など処理場への流入水中の重金属濃度が高い場合もあるが、生活排水やし尿のように低濃度であっても処理過程で重金属が汚泥中に数千~1万倍に濃縮するためである。そのため、原料に汚泥を含む有機質資材は肥料取締法上の普通肥料に区分され、公定規格で有害重金属の上限濃度が定められている。具体的には、乾物1kg当たりひ素50mg、カドミウム5mg、水銀2mg、ニッケル300mg、クロム500mg、鉛100mgである。

表6 わが国の堆肥中の重金属等微量元素含量の調査例 (乾物中 mg/kg)

元素	下水汚泥堆肥	家畜ふん堆肥		稲わら堆肥	木質資材堆肥
		牛ふん	豚ふん		
As	4.6 (- 16)	1.1 (- 9.6)	1.2 (- 3.7)	2.2 (- 4.8)	1.1 (- 0.2)
B	9.9 (- 41)	34 (- 90)	30 (- 81)	11 (- 27)	20 (- 99)
Cd	2.8 (- 6.9)	0.56 (- 1.5)	0.77 (- 1.8)	0.82 (- 2.9)	0.91 (- 2.7)
Cu	184 (3 - 680)	27 (3 - 85)	290 (9 - 830)	28 (2 - 62)	31 (1 - 86)
Hg	1.4 (- 3.3)	0.04 (- 0.28)	0.05 (- 0.20)	0.11 (- 0.32)	0.07 (- 0.50)
Mn	500 (70 - 1400)	300 (20 - 850)	400 (30 - 920)	1200 (80 - 1600)	400 (8 - 1100)
Pb	37 (1 - 130)	8.8 (- 26)	13 (- 88)	9.5 (- 47)	13 (- 72)
Zn	1110 (170 - 3320)	113 (3 - 270)	430 (40 - 1280)	82 (15 - 222)	88 (2 - 305)

平均値および括弧内に範囲を示す。ただし、元素によって信頼性が欠ける最小値は削除した。

(越野、2001)

汚泥からの重金属除去については、イオン交換、熱や酸、微生物の利用が研究されてきたが、除去効率・コストの面で実用化には至っていない。一方、最近では、重金属除去効率の高い熔融処理によるリン酸質肥料化が報告されている。

家畜ふん堆肥は肥料取締法上の特殊肥料であり、汚泥肥料のような公定規格は設定されていないが、上記の有害重金属が高濃度に混入することは考えにくく、これまでの調査例でも、銅、亜鉛以外の重金属は汚泥類に比べて低濃度であることが示されている。ただし、鶏ふん堆肥では亜鉛が、また、豚ふん堆肥では銅と亜鉛の濃度が高い。これは、飼料に銅・亜鉛が添加されているためである。銅、亜鉛は作物に必要な元素であり、ヒ素やカドミウムなどのような有害物質ではないが、高濃度であるのは好ましくない。飼料への銅、亜鉛の添加は極力抑えるよう指導されているが現在でも高濃度の堆肥が見受けられる。そのため、豚ふんや鶏ふんを原料とし、現物1kg当りに銅を300mg以上または亜鉛を900mg以上含むものについては、特殊肥料の品質表示基準に基づく濃度表示の義務がある。

■ 土壌中の重金属蓄積の防止

重金属元素は、有機物と異なり土壌中で分解しないため、重金属を含む資材を長期間、過大に施用すると土壌蓄積が進行する。重金属は多様な形態で土壌中に存在し、作物による吸収の程度はpHやEhなどの条件が大きく影響する。例えば、汚泥堆肥の連用に伴い重金属の土壌蓄積が進むが、pHが高く維持されるため、作物中の重金属は低濃度の例もある。しかし、汚泥の施用を止めると土壌の酸性化が進行し、蓄積していた重金属が可溶化して作物に吸収され易くなるので、重金属の投入量を抑えて土壌蓄積を防ぐことが基本的に重要な対策である。

「農用地における土壌中の重金属等の蓄積防止に係る管理基準について」の通達（環水土第149号、1984）では、当面の措置として管理指標（亜鉛の含有量）と管理基準（乾燥土壌1kg当たり強酸分解法による亜鉛120mg）を暫定的に定め、これを目安にカドミウムなどの有害重金属の蓄積防止への努力を求めている。この基準は欧米諸国に比べて厳しい基準になっており、自治体によっては、この管理基準に基づき汚泥類の施用上限を設定している。ただし、この管理基準を家畜ふん堆肥に適用すると、豚ふんや鶏ふんのように亜鉛含量は高いが有害重金属含量は低い資材の施用が制限されてしまう可能性も指摘されている。

そのほか、「土壌の汚染に係る環境基準について」（環境庁告示第46号、1991）、「農用地の土壌の汚染防止等に関する法律」（法律第139号、1970）においても対策を施すべき有害重金属の濃度基準が設定されている。

3. 堆肥の適正施用の効果と多量施用の弊害

品質の良い堆肥を適量施用すれば、作物に養分を供給するとともに、土壌の物理性・化学性・生物性を改善して地力を高めることによって、作物の安定増収を望むことができる(表7、図6、図7)。しかし、堆肥が適正に施用されない場合には、却って土壌環境を悪化させる結果になる。とくに未熟な堆肥の場合には、多量施用によって様々な害作用を生ずる恐れがある(表8)。

表7 有機物施用の効果

- I. 植物養分としての効果(直接的効果)
 1. 多量要素の給源
 2. 微量元素の給源
 3. 緩効的・持続的・累積的效果
 4. 炭酸ガスの給源
 5. 生育促進物質
- II. 土の物理的・化学的性質の改善(間接的効果)
 1. 土壌団粒の形成
孔分布、透水性、保水性、通気性
易耕性、耐食性の改善
 2. 陽イオン交換容量の増大
 3. キレート作用
活性アルミナの抑制
リン酸の固定防止・有効化
 4. 緩衝能の増大
- III. 土の中の生物相とその活性の維持・増進(間接的効果)
 1. 中小生物・微生物の富化・安定化
 2. 物質循環能の増大
 3. 生物的緩衝能の増強(有害微生物の突発的増殖防止)
 4. 有害物質の分解・除去

(甲斐、1976)

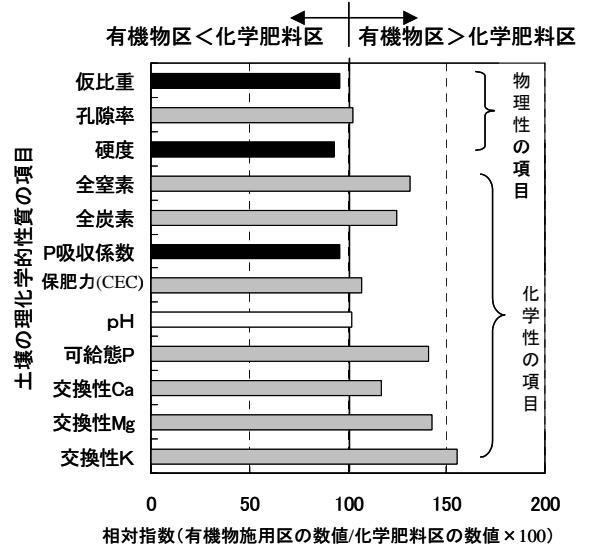


図6 畑土壌に対する有機物施用の効果(上沢、1991より作図)

土壌環境基礎調査事業の1976~1983年の結果に基づく。
有機物区は各種堆肥を1作当たり約1.5t/10aずつ上乘せ施用。

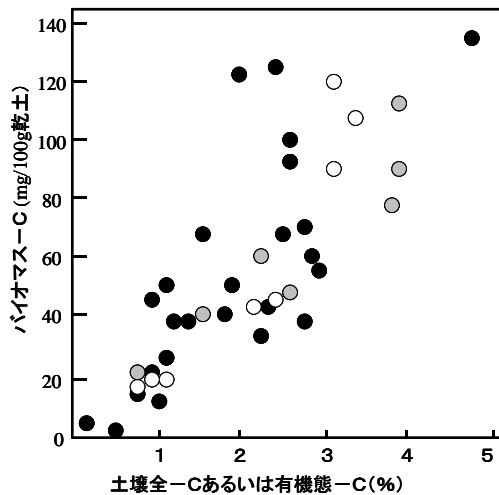


図7 土壌のバイオマス-Cと全-Cあるいは有機態-Cとの関係

● Jenkinson&Powlsonのデータ ○ Jenkinsonらのデータ
○ Anderson&Domschのデータ

(丸本、1984)

表8 堆肥の多量施用による影響

1. 窒素過剰(C/N比の低い堆肥を過剰施用した場合)
高濃度の無機態窒素による濃度障害
作物体中の硝酸態窒素濃度の上昇
硝酸態窒素の流亡による地下水汚染
2. 窒素飢餓(C/N比の高い堆肥を過剰施用した場合)
有機化による窒素飢餓
3. 生育阻害物質(副資材を多量に含む未熟堆肥あるいは嫌氣的に発酵した堆肥を施用した場合)
副資材中の生育阻害物質
嫌氣的発酵で生成された生育阻害物質
4. 土壌の異常還元(未熟堆肥を過剰施用した場合)
土壌の還元による根の障害
土壌中での生育阻害物質の生成
5. ミネラルの過剰(特定のミネラルを多量に含む堆肥を施用した場合)
作物体中のミネラルバランスの変動
土壌中での銅・亜鉛の蓄積
6. 土壌の物理性の悪化(未熟堆肥・オガクズ堆肥を過剰施用した場合)
土壌の圧密化
保水性の悪化

Ⅱ. 家畜ふん堆肥の農地利用における環境保全上の課題

1. 堆肥原料の変遷と過剰養分による環境負荷

■現在の堆肥は肥料成分を豊富に含む

かつての堆肥は稲ワラなどの作物残渣や野草などの植物質を主原料とするものが多く、含有する窒素等の肥料成分濃度が低いこともあり、堆肥中の肥料成分を勘定することなく施肥に上乗せ施用されてきた。しかし、最近では、家畜ふん尿、生ごみ、汚泥等の有機性廃棄物を主原料とするものが多くなり、これらの堆肥は窒素を初めとする肥料成分を豊富に含む。そのため、充分な量の化学肥料を施用した上に肥料成分濃度の高い堆肥を施用すると、過剰となった肥料成分が作物の収量・品質を低下させたり、環境中に流出して汚染の原因となる恐れがある。

■過剰施用による環境への負荷

肥料成分による環境への影響の点で最も問題にされるのが窒素である。図8に示すように、作物にとって重要な養分である窒素は、堆肥や作物残渣、有機質肥料などの有機態および化学肥料などの無機態の形態で施用される。有機態の窒素は土壤中で微生物の作用によって無機化され、生成したアンモニウム態窒素や硝酸態窒素が主に作物に吸収利用される。施用後の栽培期間中に未分解の有機態窒素や無機化後に土壤微生物に吸収されて再度有機態に変換された窒素は、次作以降にその一部が無機化される。このように、堆肥中の窒素の肥料的効果すなわち「肥効」は化学肥料に比べて緩効的かつ持続的であるが、その程度は堆肥の原料、副資材、堆肥化法、土壤条件などによって大きく異なる。

施用される窒素が過剰であると畑の条件では硝酸態窒素が残存するが、土の粒子の表面は全体的にはマイナスに帯電しているため、マイナスイオンである硝酸イオンは土壤に吸着されずに水の移動とともに地下に溶脱して地下水系に流入する、これが農地の系外へ排出されると、水系の富栄養化や飲料水質の劣化の原因となる。硝酸態窒素の摂取にともなう健康影響を考慮して以前から飲料水の基準が設定されており、国内では、硝酸態窒素及び亜硝酸態窒素の合計量として 10mg/L 未満であることが必要である。さらに、地下水及び河川などの公共用水には平成 11 年 2 月から飲料水基準と同じ値の環境基準が設定され、これを守ることが求められている。

したがって、堆肥を有機物の供給源としてだけでなく、養分供給源として捉え、窒素などの肥料成分による環境負荷が許容範囲を超えない施用を行う必要がある。

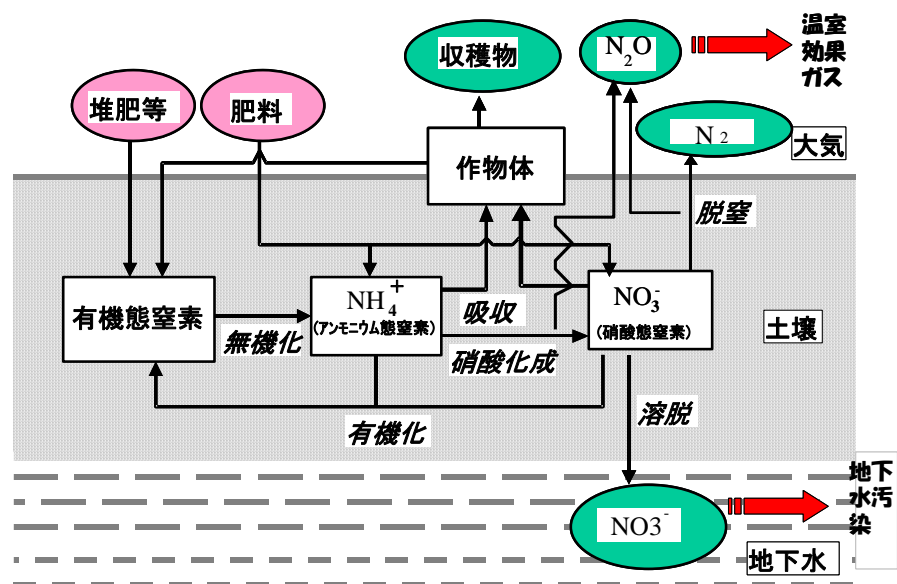


図8 畑地における窒素のフローと形態変化

2. 我が国の耕地における有機物施用、養分管理と環境負荷の実態

■有機物施用と肥培管理からみた我が国の畑作・野菜作圃場の実態と問題点

草場(2004)は、土壤環境基礎調査における基準点調査と定点調査、農業生産環境調査結果などを基に、我が国の農耕地のうち畑作物・野菜圃場について、養分投入や土壤特性の実態および肥培管理の土壤炭素レベルへの影響などについて検討している。

それによれば、地力増進基本指針における非黒ボク土畑の腐植含有率の基本的な改善目標値は3% (炭素含有率で約1.7%)となっており、基準点調査の解析結果を用いれば、目標値の達成・維持には少なくとも年間20t/ha以上の有機質資材の投入が必要となる。

一方、農業生産環境調査の農家調査結果を肥料・資材の施用実態とすると、堆肥化資材による主要な畑・野菜圃場(一般畑作物と野菜類、ただしむぎ類を除く)への窒素投入量の平均値は約130kg/ha/作(葉茎菜類や果菜類では200kg/ha/作)であり、これを山口ら(2000)の調査における家畜ふん堆肥の窒素濃度を用いて牛ふん堆肥の重量に換算すると、堆肥化資材の投入量は年間20~30t/haとなる。

しかし、同時に農業生産環境調査からは、肥料による窒素とカリウムの施用量は概ね施用基準量に等しく、リンは基準量を超える実態が認められる。このような状態では、作物体地上部による吸収量の約5倍(果菜類では約8倍)の窒素と約20倍(果菜類では約30倍)のリンが肥料と堆肥化資材によって投入されることになり、農業地域での地下水汚染や土壤中におけるリンの過剰蓄積などの進行が懸念されるとしている。また、定点調査からは、普通畑では半数程度が可給態窒素の目標値を満たしていないことが伺われる。

このように、現在の状態では、作物生産と環境保全の狭間で、畑・野菜圃場での有機物施用と養分管理は矛盾した状況となっていることが指摘されている(図9)

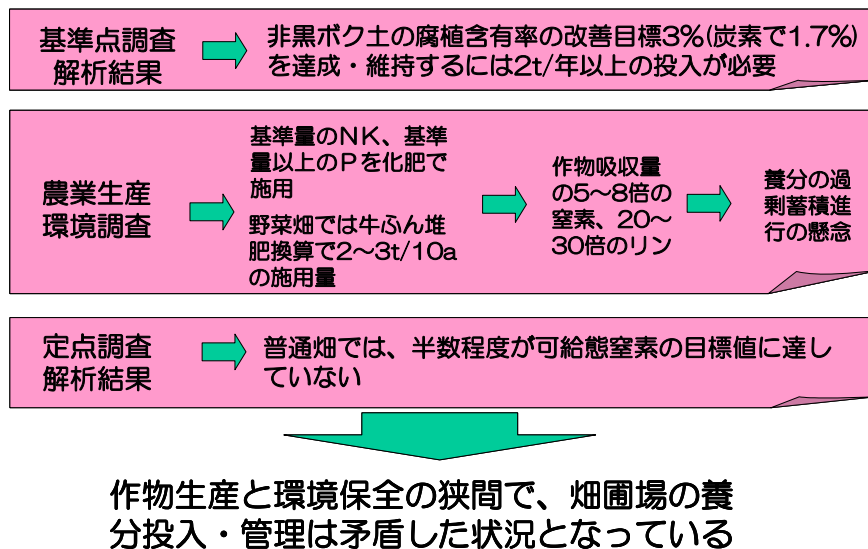


図9 畑作・野菜圃場における肥培管理および土壌の実態と問題点 (草場、2004 より作図)

■水田における堆肥施用量の減少と田畑輪換管理における地力低下

多くの指摘があるように、水田における堆肥施用量は減少の一途を辿っている。コンバインによる収穫が一般化されて稲わらの殆ど全量が直接圃場に還元されるようになっているが、近年、ムギ・ダイズなどの畑作との輪換利用が進み、土壤の腐植含量や地力窒素の低下が指摘されている。

平成15年度の東北農業研究センターの成果情報では、寒冷地の沖積水田において、畑期間が過半を占める田畑輪換の繰り返しや長期にわたる畑転換は、可給態窒素を減耗させ、転作大豆の生産力を低下させることが示されている。また、同じく富山県農業技術センターの成果情報でもダイズとの田畑輪換において負の窒素収支となることが示されている。これらは、水田への積極的な有機物投入による土づくりの必要性を示すものである。ただし、わら還元のみで田畑輪換利用を継続しても、復元水田の水稻収量は低下

していなかった。そのため、転作畑作物への窒素供給を高めながら、水稲作において窒素の過剰供給とされない堆肥施用の制御と施肥削減が必要である。また、このような堆肥利用を生産者が経営に組み込むことに対する優位性(減肥、生産物の差別化と価格への反映、循環型農業への支援・補助など)を提示していく必要性が指摘される。

■肥料や堆肥に由来する硝酸性窒素による地下水汚染の実態と低減対策の必要性

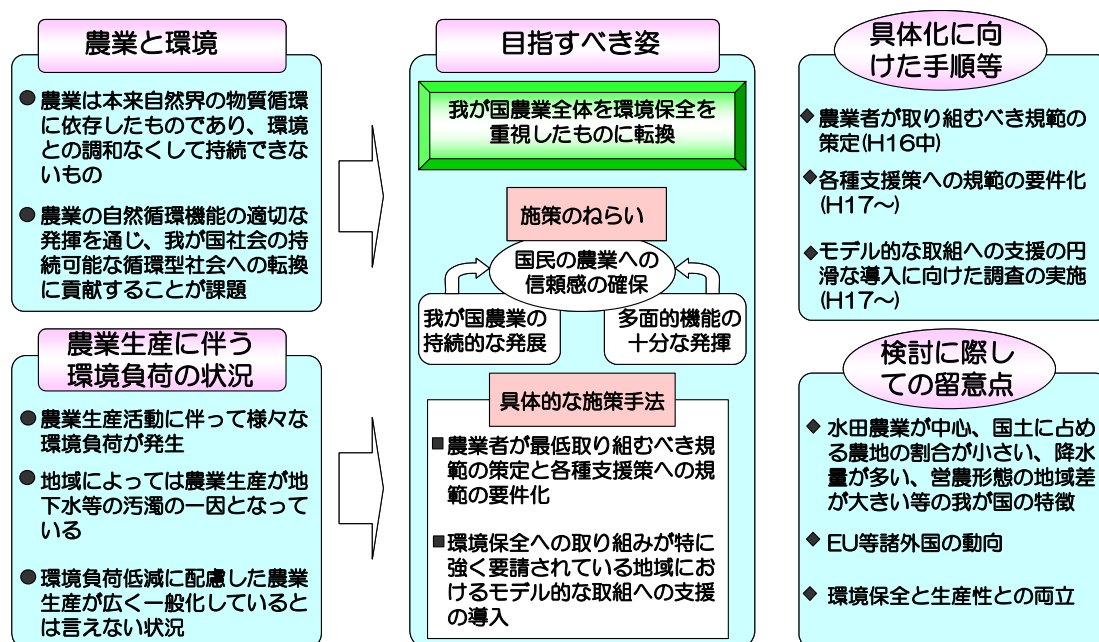
環境省環境管理局水環境部の「硝酸性窒素による地下水汚染対策事例集」(平成16年7月、一部データを除きインターネット上の環境省サイトからPDFで入手可能)では、「硝酸性窒素総合対策推進事業」における自治体の取組が報告され、生活排水とともに農耕地・畜産が負荷源として指摘されている。また、都道府県及び水質汚濁政令市を対象に、硝酸性窒素による地下水汚染への取組状況に関するアンケート調査が紹介されており、現状認識と対策が不十分である解析結果が示されている。さらに、環境省の地下水調査において、依然として5%を超える高い環境基準超過率を示すことが指摘されている。

このように、農耕地・畜産からの負荷低減対策が一層強く求められると考えられるが、その一方で上記の草場の指摘のように、農地における有機性資源の循環利用の現状は問題点を抱えており、環境保全を重視した農業生産方式全体の中で、有機性資源についても適正な循環利用を促進する施策が望まれる。

■農水省における農業環境施策の考え方と「規範」の策定

食料・農業・農村基本計画(平成17年3月)では、環境と調和のとれた農業生産活動を確保するため、農業者が最低限取り組むべき規範を策定し、各種支援策を実施する際の要件として農業者に規範の実践を求めるとともに、環境保全への取組が特に強く要請されている地域において、農業生産活動に伴う環境へ負荷の大幅な削減を図るためのモデル的な取組に対する支援を導入する考え方が示されている(図10)。

農業者が取り組むべき「規範」には、「Ⅰ. 作物の生産」に関する規範と「Ⅱ. 家畜の飼養・生産」に関する規範が設定されており、各々について、点検シートと取組例が示されている。表9には、作物の生産における土づくりと施肥管理に関する規範の各項目についての取組例を示した。



(食料・農業・農村政策審議会企画部会資料「新たな基本計画に向けた中間論点整理について、平成16年8月」より)

図10 食料・農業・農村政策審議会企画部会における農業生産環境施策の考え方

それによれば、堆肥等の有機物施用による土づくりと窒素等の養分による環境負荷を許容範囲内にする適正な施肥によって、環境と調和のとれた農業生産活動規範に対応した取組を行うとされている。一方、現在利用されている堆肥の主体が養分を豊富に含む家畜ふん堆肥になっていること（**図3**）、十分な施肥をした上に家畜ふん堆肥を従来の感覚で施用すると窒素等の養分の過剰施用となり環境負荷を生ずる状況が野菜畑等で認められることなど（**図9**）は前述した通りである。したがって、堆肥中の肥料成分に配慮した養分管理が規範に対応する施肥基準に反映される必要がある。

表9 環境と調和のとれた農業生産活動規範（作物生産活動）の取組例（一部省略）

土づくり	◎ たい肥の施用、家畜の飼料や敷料などに利用しない稲わら・麦わらのすき込み、緑肥の栽培などにより土壌に有機物を供給する（原則として1年に1度）。
施肥	◎ 都道府県の施肥基準、JAの栽培歴等で示している施肥量、施肥方法等に則した施肥を行う。 ◎ 地域向けの施肥量等が示されていない場合は、次の取組のうちいずれか一つを実行す ① 他の都道府県が示している基準、各種試験研究成果等を目安とした施肥を行う。 ② 土壌診断の実施とその結果を活用した施肥を行う。 ③ 残存肥料成分の流出を防止するためのクリーニングクロップの作付け等を行う。
防除	省 略
廃棄物の処理	◎ 稲わら、麦わら、野菜くず等作物残さのたい肥、飼料、敷料等へのリサイクル又はほ場への還元を励行する。（病害虫のまん延防止のために処分が必要な場合などを除く） ◎ 使用済みプラスチック等の廃棄物が発生する場合は、廃棄物の処理及び清掃に関する法律に基づく廃棄物の適正な処分、保管等を行う。
エネルギーの節減	省 略
知見・情報の収集	省 略
生産情報の保存	◎ 生産活動の点検・確認を行うための施肥、防除の実施状況等についての記録帳票（ノート、伝票等を含む）を保存する。

（農林水産省、2005）

Ⅲ. 家畜ふん堆肥の環境保全的施用の考え方

堆肥の施用に当たっては、作物の収量・品質にとって適正であるだけでなく、環境に与える負荷を許容範囲内に維持する必要がある。そのためには、施用しようとする農地土壌の状態を把握するとともに、堆肥に含まれる成分を考慮し、それを作物の「施肥基準」に照らして施用することが基本となる。また、堆肥中の肥料成分の作物による利用率を向上する施用技術が重要である。

1. 堆肥中の肥料成分を勘定した施用量算出の考え方と手順

一般に、堆肥の施用量は農地 10a あるいは 1ha 当たりに施用される現物重量で示され、施肥基準と呼ばれている。例えば、水田・普通畑における牛ふん堆肥の施肥基準は 1~2t/10a のように表示される。しかし、堆肥の水分や養分含有率は大きくばらついているため、現物重量で表示するだけでは、適正な施用量を示したことにはならない。施用する堆肥の養分、特に窒素を始めとする三要素含有率を把握し、それらに基づいて堆肥の施用量を計算する必要がある。以下にその手順を畜産環境対策検討委員会のガイドライン（1998）を中心に紹介するとともに、概要を**図11**に示す。

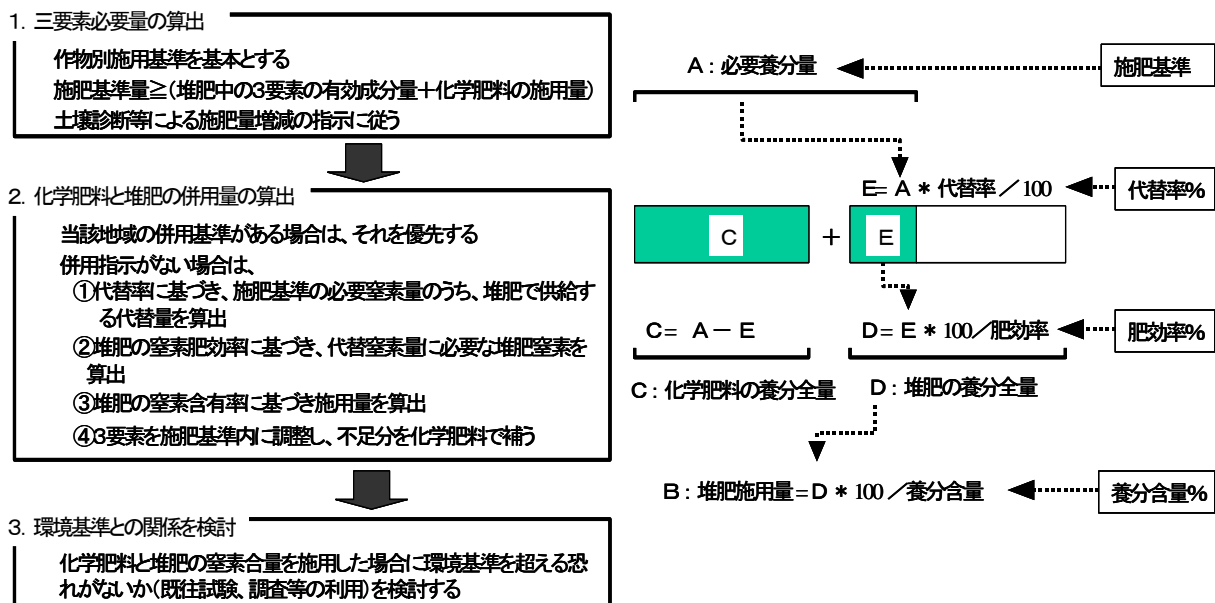


図 1 1 堆肥中の肥料成分を勘案した施用量算出の考え方と手順

■施肥基準と土壌診断に基づき必要な養分量を把握する

まず、地域で設定されている作物別施肥基準に基づき窒素、リン酸、カリの三要素必要量を知る。また、土壌診断等により、施肥量増減の指示がある場合にはそれに従う。

■窒素について化学肥料と堆肥の併用量を算出する

施肥基準に堆肥の併用量が示されている場合にはそれに従う。堆肥併用量の指示がない場合には、一般に使用されている堆肥による化学肥料の代替可能率（家畜ふん堆肥の場合、牛ふん：30%、豚ふん・鶏ふん：60%）に準じて必要養分量のうち、堆肥で補う窒素量（図11のEに相当）を求め、その分を化学肥料施用量から削減する。通常、施肥基準は化学肥料の成分相当量で示されているが、前述のように、堆肥中の窒素は化学肥料と同じ働き方をする訳ではないので、堆肥中の窒素の肥効率（化学肥料中の養分利用率と比較した場合の堆肥中養分利用率の比率）に基づき、削減した窒素を補填できる堆肥等の量を算出する。ただし、

表10に示す肥効率は平均的な値であり、堆肥の処理方式、副資材、腐熟度、土壌条件等の違いによって大きく異なる。そのため、利用する堆肥の肥効率が別に示されている場合には、それを用いる。

表 1 0 家畜ふん堆肥等の成分の肥効率 (%)

	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
牛 堆肥	30	60	90
液状きゅう肥	55	60	95
豚 堆肥	50	60	90
鶏 乾燥ふん	70	70	90

注) 化学肥料の肥効を100とした場合のふん尿成分の肥効率を示す。

■リン酸、カリ量の過不足を求め、補正する

堆肥に含まれる三要素の成分のバランスは、多くの場合、施肥基準に示されるものと異なる。そのため、一つの成分のみを指標として施用量を決めると、他の成分が過剰になるなどの問題が起きる。そこで、窒素について施用量を算出した堆肥等中のリン酸、カリのいずれかの有効成分量が施肥基準量を超えた場合には、その要素が施肥基準量の水準になるまで堆肥等の量を削減する。その結果、不足するようになる窒素および他の要素は化学肥料で補い、施肥基準に示されている三要素の量とバランスを維持する。

こうした一連の計算は煩雑だが、千葉県「家畜ふんたい肥利用促進ナビゲーションシステム」のように、計算を自動化するソフトウェアも開発されている。

■圃場の窒素収支に基づき環境負荷の可能性を検討する

堆肥施用量の算出後、化学肥料窒素と堆肥等の窒素の合計量（総窒素量）を算出し、その総窒素量を施用した場合、地下浸透水中の硝酸態窒素濃度が環境基準値 10mg/L を超える恐れがないかについて検討する必要がある。

施用する総窒素量と収穫物として圃場から搬出される窒素量との差を圃場における窒素収支とすれば、その大小が環境負荷発生の目安となる。例えば、窒素収支の全てが硝酸態窒素に変換され浸透水とともに排出されるとした場合を潜在的な負荷発生可能量と仮定でき、下式で示される。

$$\text{浸透水中の硝酸態窒素の潜在的な濃度 (mg/L)} = \frac{\text{窒素収支 (mg/ha)}}{\text{地下浸透水量 (L/ha)}}$$

しかし、**図8**に示したように、土壤中では窒素の有機化や脱窒の経路もあり、窒素収支として算定される窒素が直ちに硝酸態窒素の溶脱量にはならない。窒素収支が 200~300kg/ha を超える作目が分布する地帯で地下水の硝酸濃度が環境基準を超える比率が高くなる調査事例があること、わが国の平均降水量の約半分が地下浸透するとすれば硝酸態窒素の溶脱量が 80kg/ha 以上で環境基準を超えること、などから、窒素収支 100kg/ha を暫定的な目安とする提案もあるが、現段階では一般化された指標にはなっていない。

2. 堆肥の窒素肥効の簡易・迅速評価手法の開発

ガイドラインで計算に用いる窒素の肥効率について、最近の公立試験研究機関における施用試験から試算すると、**図12**のように非常に幅広く分布しばらつきが大きい。また、**表10**に示した従来の目安（**図12**では矢印の位置）に比べて低い値のものが多い。そのため、次の段階では従来の目安とされている数値のみを用いるのではなく、地域あるいは堆肥センターごと、また季節ごとなど、実際に利用する堆肥の肥効特に窒素の肥効評価の簡易・迅速・高精度化によって、より過不足のない養分管理を可能にすることが目標になる。

既に以下に示すような塩酸抽出や尿酸含量の測定などによる堆肥の可給態窒素量推定法などが開発されており、これらの適用も含めて、例えば堆肥センターで窒素肥効を表示した製品を提供することにより、流通促進を図ることなども目標のひとつになると考えられる。

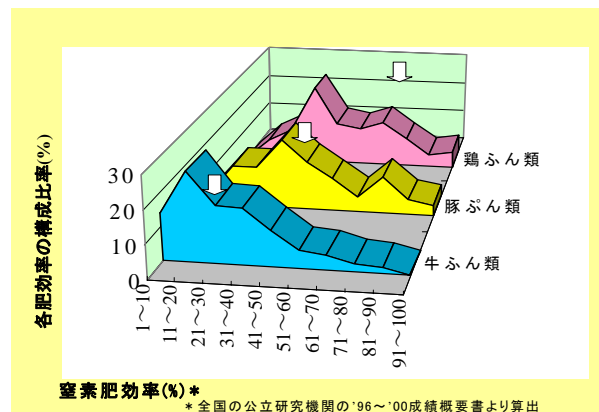


図12 家畜ふん堆肥の窒素肥効率の分布（渋谷ら）

■塩酸抽出性無機態窒素による肥効評価

堆積発酵した家畜ふん堆肥には2M KCl で抽出されない無機態窒素が存在し、これはMAP（リン酸苦土アンモニウム）や尿酸水素アンモニウムであるとされている。また、0.5M HCl（試料：抽出液=1:10）によりMAPを含めた無機態窒素の抽出され、その量は畑状態培養無機化窒素量（データ略）およびポット栽培したコマツナ（**図13**）との高い相関を示すことが示されているさらに、塩酸抽出液中のアンモニウム態窒素、硝酸態窒素、リン酸、カリウム、カルシウム、マグネ

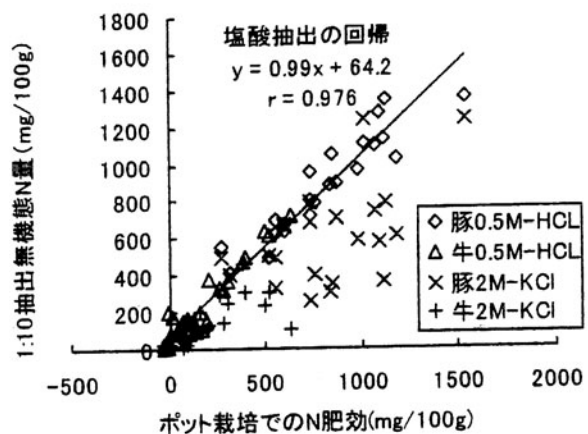


図13 牛ふん、豚ふん堆肥の抽出性無機態窒素量とコマツナ栽培での窒素肥効の関係（岐阜県成果）

シウムは小型反射式光度計で定量可能である（棚橋、2005）。

■尿酸態窒素量を指標とする鶏ふん堆肥の可給態窒素量の推定

鶏は尿（尿酸）とふんを同時に排泄するため、新鮮鶏ふん中窒素の40～70%は尿酸態窒素が占める。この尿酸は、堆肥化過程で分解されてアンモニア変換しガスとして揮散するが、堆肥中に残存した尿酸は土壤中で急速に無機化するため、尿酸の残存量は鶏ふん値阿肥の窒素肥効を支配する要因とされている。そのため、鶏ふん堆肥の可給態窒素量は、堆肥中に残存する尿酸態窒素量と高い正の相関関係を示す（図14）。したがって、堆肥中の尿酸含量を測定することにより、可給態窒素量を推定することが可能である。なお鶏ふん堆肥中の尿酸態窒素量は、0.6%炭酸リチウム溶液を用いて2回の反復抽出を行い、定容後に酵素法（ウリカーゼ・ペルオキシダーゼ法）を用いることによって簡易かつ迅速に定量可能であることも示されている（原、2004）。

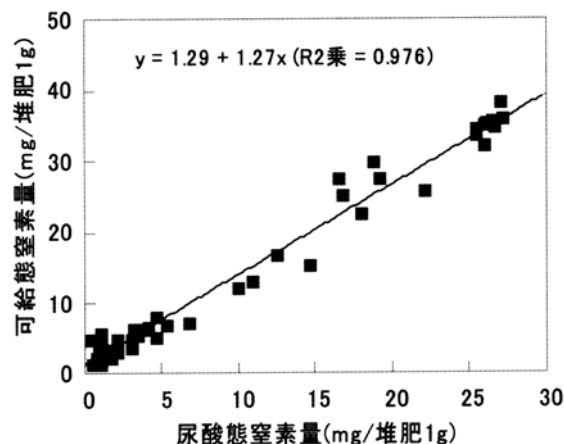


図14 尿酸態窒素含量による鶏ふん堆肥の可給態窒素量推定（三重県成果）

3. 環境負荷低減と流通利用に適した資材化技術と施用技術の開発

野菜畑では、化学肥料とともに堆肥に由来する窒素投入量が多く、窒素収支（投入窒素－搬出窒素）が大きいことが示されている。また、堆肥は主として基肥に作土の全層に施用されるため、生育初期の作物根系が未発達の間における可溶性養分の損失が懸念される。そのため、窒素などの養分利用率を向上する施用技術の開発が作物生産と環境保全のバランスを調和する上で重要な点のひとつである。ここでは、作物の要求する成分組成と肥効に適合する堆肥の調製、その成型化による取扱性の向上、堆肥の局所施用による養分利用率の向上の可能性について研究事例を紹介する。

■成分調整堆肥とそのペレット化

作物の要求する成分組成と肥効に適合する堆肥の調製、その成型化による取扱い性の向上は重要で、九州地域の取組では、これまでに水稲用、麦用、ダイズ用、メロン用、トマト用などが開発され、施用試験が積み重ねられている（図15）。

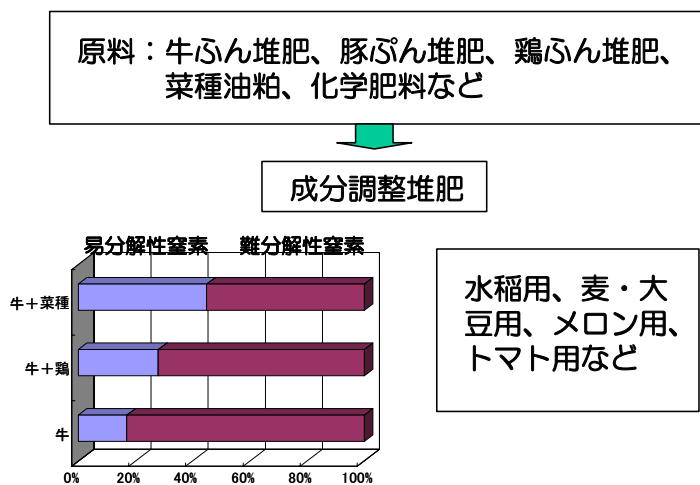


図15 原料組合せによる堆肥の成分調整

■堆肥と化学肥料の局所施用

スイートコーンとハクサイについて、局所施肥を組み合わせた施肥量削減の影響が検討されている。すなわち、ある県の施肥基準量を堆肥と速効性の化学肥料として作土の全層に施用して栽培すると、窒素の投入量に対して作物による搬出量が小さく、1作当たりの窒素収支が200kg/haを超える大きな数値になる。それに対して、併用する化学肥料として肥効調節型肥料を使い、肥料と堆肥を播種溝や植孔に局所施用し、投入する全窒素を半減すると、作物による利用率が大幅に向上し、搬出窒素量はほぼ同程度で窒素収支は各々100kg/ha未滿まで大幅に縮小された（図16）。

この試験では、肥効調節型肥料の局所施用と堆肥の局所施用の効果を分けて評価してはいないが、堆肥を含めての局所施用が、作物による窒素の利用効率を向上する可能性を示したものである。

■ペレット堆肥の機械化局所施用

畜産地帯で多量に排出される家畜ふん尿を肥料として広域に流通・利用するため、異なる畜種の堆肥等を混合して肥料成分のバランスを整え、ペレットに成型して輸送・貯蔵・施用に適した資材化の研究が行われている。こうしたペレット堆肥は従来の施肥機による機械化局所施肥が可能であり、図17に示すように、キャベツの機械化栽培体系に組み込み、株直下に条施用することで畝内の全層に施用するよりも窒素の利用効率が向上することが認められている。

このように、省力・軽労化を目指す機械化栽培体系に組み込める環境保全型の堆肥施用技術が重要な視点のひとつである。

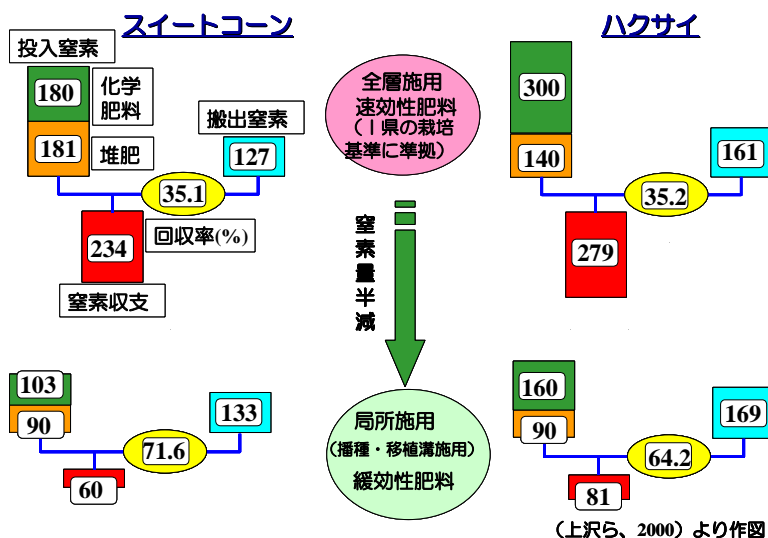


図16 堆肥と肥料の局所施用による窒素収支の改善
(数値はha当たりの窒素量kg)

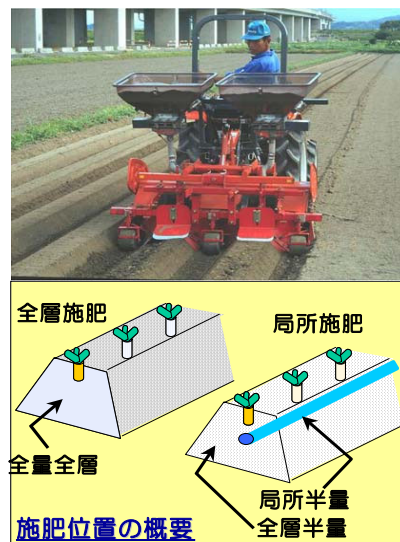


図17 条施肥機による畝立同時施用(上)と施用位置の模式図(下)

家畜排せつ物などの有機性廃棄物を資材化して農地利用する場合は地域であり、その特性に応じた取組が必要になる。そのため、上記のような個別の資材化技術、肥効評価技術、施用技術の開発・改良を通じて地域で利用可能な技術メニューが拡充される必要がある。また、どの技術をどのように組み合わせてその地域に適用することが生産と環境保全のバランスをとる上でより望ましいシナリオであるかを評価する手法が重要であり、LCA手法の適用や環境経済統合指標の開発なども取り組まれている。

主な参考資料

- 1) 原田靖生：家畜ふん尿堆肥の品質評価基準及び判定法と残された問題点、有機物の処理・流通・利用システム—堆肥センターを軸として—、総合農業研究叢書、7、142-163 (1985)
- 2) 栗原 淳：たい肥等特殊肥料の品質保全と自己認証制度、肥料71、22-37 (1995)
- 3) 原田靖生・山口武則：家畜排せつ物堆肥の品質の実態と問題点、環境保全と新しい畜産、(社)農林水産技術情報協会、229-246 (1997)
- 4) 越野正義：微量元素の自然界における循環と肥料、季刊肥料90、16-41 (2001)
- 5) 畜産環境対策検討委員会：家畜ふん尿の処理・利用に関するガイドライン、畜産環境対策検討委員会報告書、19-25 (1998)
- 6) 千葉県農林水産部・社団法人千葉県畜産会：環境にやさしい家畜ふん尿処理利用の手引き—家畜ふんたい肥の利用編—、205-215 (2002)
- 7) 棚橋寿彦：家畜ふん堆肥からの塩酸抽出の意義と肥料成分の簡易分析法、農業技術60、308-312 (2005)
- 8) 原 正之：鶏ふん堆肥中の尿酸含量測定による可給態窒素量の推定法、家畜ふん堆肥の品質評価・利用マニュアル、農林水産技術会議事務局 農業・生物系特定産業技術研究機構、57-59 (2004)
- 9) 薬師堂謙一：成分調整・成型による高機能堆肥の生産システム、家畜ふん堆肥の品質評価・利用マニュアル、農林水産技術会議事務局 農業・生物系特定産業技術研究機構、5-10 (2004)
- 10) 上菌一郎：堆肥ペレットの施用法(1) 水稲栽培における施用法、家畜ふん堆肥の品質評価・利用マニュアル、農林水産技術会議事務局 農業・生物系特定産業技術研究機構、77-81 (2004)
- 11) 山本克巳：堆肥ペレットの施用法(2) 小麦・大豆栽培における施用法、家畜ふん堆肥の品質評価・利用マニュアル、農林水産技術会議事務局 農業・生物系特定産業技術研究機構、82-85 (2004)
- 12) 郡司掛則昭：堆肥ペレットの施用法(13) 野菜栽培における施用法、家畜ふん堆肥の品質評価・利用マニュアル、農林水産技術会議事務局 農業・生物系特定産業技術研究機構、86-89 (2004)
- 13) 木村 武：堆肥の環境保全的施用法、環境保全型農業事典、丸善、56-61 (2005)
- 14) 柚山義人：有機性資源の利活用促進方策、農業土木学会誌72、667-672 (2004)