

家畜ふん堆肥の化学肥料代替を進めるためのペレット化と窒素付加

荒 川 祐 介 *
YUSUKE ARAKAWA

農業・食品産業技術総合研究機構九州沖縄農業研究センター 〒861-1102 熊本県合志市須屋 2421

* TEL: 096-242-7763 FAX: 096-249-1002

* E-mail: arakaw@affrc.go.jp

NARO Kyushu Okinawa Agricultural Research Center,
2421, Suya, Koshi, Kumamoto 861-1102, Japan

キーワード：家畜ふん尿，堆肥ペレット，窒素付加，肥効率

Key words: Manure, compost pellet, nitrogen-enrichment, nutrient-use efficiency

(原稿受付 2015年7月21日/原稿受理 2015年7月28日)

1. はじめに

食料生産や人の日常生活に伴い排出される有機性資源の循環利用は持続可能な循環型社会の形成のために大変重要な課題である。これら有機性資源に含まれる肥料成分を有効に利用して化学肥料の使用量を節減することは、営農面・環境面・社会面・地域経済面において意義が大きい。

家畜ふん尿は推計で年間約8,300万トン(2013年)と大量に発生している国内最大の有機性資源であり¹⁾、堆肥化したときの潜在的な窒素およびリンの資源量は各々18.4万トン、10.5万トンと推計されている²⁾。1999年の家畜排せつ物の管理の適正化及び利用の促進に関する法律(平成11年法律第112号)の制定以降、野積みや素掘りといった家畜ふん尿の不適切な管理が解消し、現在では堆肥化や液肥化処理等への仕向けが発生量の約9割に増えるとともに残る約1割が浄化や炭化・焼却処理等へ仕向けられている状況にある³⁾。しかしながら家畜ふん堆肥が畜産地域に集中して産生されている状況があり、かさばることからその利用の広域化が難しいこと、散布作業が重労働であり農業従事者の高齢化等による労力不足が深刻であること、加えて堆肥の利用を望む農家が多い地域でも利用者が期待する品質・価格等が十分満たされていないことなど有効利用が進まない状況が認められる⁴⁾。

わが国では家畜ふん堆肥は良質な土づくり資材との認識が共有されている。2005年度農林業センサスによれば堆肥による土作りに取り組んだ農業経営体の数は全国で465,114にのぼり、全経営体1,679,084に占める割合は28%であった。比較の方法は異なるが米国において家畜ふん尿(manure)が施用されている農地の割合が5%に過ぎない⁵⁾ことと比較するとわが国の農業経営体は既によく堆肥を利用しているとも言える。そこで家畜ふん堆肥の需要をさらに喚起するためには、造粒や成分

調整によって平均的な農家が化学肥料感覚で利用可能な形態・特性を備えた“肥料”として使える資材とすることが求められる。

2. 家畜ふん堆肥ペレット

2.1 家畜ふん堆肥ペレットの製造

有機質肥料の造粒には、転動造粒、圧縮造粒、押し出し造粒等が用いられる。転動造粒は、わずかに傾斜させたドラムまたは浅い皿型容器を回転し、その中に肥料粉体と水を連続的に入れて粒を成長させる方法である。圧縮造粒(ブリケット化)は、くぼみをつけた二つの回転するロールの間で粉体を圧縮する方法である。押し出し造粒(ペレット化)は、肥料粉体を水やバインダー(結合剤)水溶液と混練してからスクリーやローラーを使って孔の開いたスクリーンから押し出す方法である。家畜ふん堆肥の造粒では造粒歩留まりが高く、乾燥工程に負担をかけない低水分で堆肥を造粒できる、ローラー・ダイ方式の押し出し成型機がよく用いられている。

ローラーダイ方式のひとつであるローラー・ディスクダイ方式の造粒機を用いた牛ふん堆肥ペレットの製造工程を図1に示した。通常の堆肥生産と同様、牛ふんを強制通気発酵により1次発酵、2次発酵(後熟発酵)を行い完熟堆肥とする。完熟堆肥は含水率が50~60%と高くこのままでは造粒に適さないため、攪拌機付きのビニルハウス内に移し含水率を30%以下まで予乾する。予乾した牛ふん堆肥は水分調整を行い、造粒機の保護のため石礫や粗大な木くず等を分離・破碎した後、造粒機に導入する。造粒機の中でローラーが回転し、ディスクダイ(孔の開いた鉄製の円盤)の孔から牛ふん堆肥が押し出される。これをディスクダイの下で一定の長さで円柱状に切断しペレット状に造粒する(直径5mm、長さ8mm程度)。堆肥ペレットは貯蔵中の変質を防止するため含水率15%以下に仕上げ乾燥を行い、粉部分を篩



図1. 牛ふん堆肥ペレットの製造工程 (ローラー・ディスクダイ方式による造粒)

分けしてから袋詰めし貯蔵・出荷する。一連の工程を経ることで原料の完熟堆肥に比べて貯留必要容積が約40%、重量が約60%に減少する。造粒に先立ち鶏ふん堆肥や油粕と混合し成分調整を行うことも可能である。

窪田は化学肥料を粒状化する意義として①品質の均一性、②肥料効果の改善、③運搬施肥労働の削減、④耐湿性等物性の改善を挙げており、造粒は肥料メーカーと需要家双方の利益になるとしている⁸⁾。同様なことが家畜ふん堆肥のペレット化でも言える。堆肥のペレット化は取扱性の改善、汎用管理機による施用可能化、成分や肥料効果の安定化、貯蔵性の改善、流通コストの低減などの多くのメリットがある¹⁹⁾。

2.2 家畜ふん堆肥ペレットの肥料としての効果

堆肥ペレットの造粒過程で堆肥に加わるのは破碎、圧縮、摩擦熱といった物理的な作用のみである。水分調整に用いる水以外のバインダー(結合剤)は通常必要としないため造粒された堆肥ペレットの化学組成は乾物当たりで見ると造粒前の原料堆肥(以下、バラ堆肥)とほぼ等しい^{6,7)}。一方、形態的には高密度の造粒された有機物であり、畑土壤中では1ヶ月経過後でも、若干の膨潤と、側面に鱗状の亀裂が観察されるものの一定の形状を保持し、微細形態も維持される⁹⁾。

堆肥のペレット化が堆肥に由来する窒素の土壤中での動態に及ぼす影響に関しては多様な報告がある。山田らは直径5mmに造粒した牛ふん堆肥、豚ふん堆肥、鶏ふん堆肥の窒素無機化について調査し、バラ堆肥と比較して窒素無機化量が抑制されるとしている²⁰⁾。同様に荒木らは鶏ふん堆肥でバラ堆肥と比較して窒素無機化量が半減することを報告している³⁾。また、堆肥のペレット化による硝酸化速度の低下を認める報告もある^{4,13)}。これに対して浦野らは、豚ふん堆肥を造粒したときに窒素の有機化が抑制される一方、窒素無機化が促進されるこ

とを報告している¹⁷⁾。また、松元は牛ふん堆肥、鶏ふんを直径3mmおよび5mmで造粒したときに窒素無機化は大きく抑制されることなかったことから、堆肥ペレットの窒素成分の有効性はバラ堆肥と変わらなかったと推察している¹¹⁾。造粒時含水率等造粒条件⁵⁾や原料の違いが堆肥窒素の無機化に影響するものと考えられるが統一された見解は無い。

堆肥のペレット化が堆肥に由来するリン酸の土壤中での動態に及ぼす影響に関しては、ペレット化によりリン酸の土壤固定が抑制されることが指摘されている¹⁷⁾。荒川は堆肥ペレットのリン酸の有効性について検討するためリン酸施肥水準を異にした条件でコマツナとソバの栽培試験を行った²⁾。その結果、堆肥のペレット造粒により造粒前のバラ堆肥に比べてリン酸の吸収量が増加し、リン酸の利用率がコマツナで平均8.6%から12.6%へ、ソバで平均16.3%から24.5%へと大幅に向上することを明らかにした(図2)。栽培終了後のポットから根を掘り出したところ、多数の根が堆肥ペレットにからみついているのが観察され、作物が堆肥ペレットから直接養分を吸収していることがうかがわれた。堆肥の造粒によるリン酸肥効の増大の効果を圃場試験で検討したところ、スイートコーン、ハクサイではリン酸吸収量が堆肥ペレットでバラ堆肥と過リン酸石灰を上回り、供試した4作物において収量が過リン酸石灰と同等以上であったことから堆肥ペレットにより過リン酸石灰を全量代替できる可能性が示された(表1)。

3. 堆肥脱臭と窒素付加

3.1 窒素付加堆肥の製造

家畜ふんには作物生産に必要な養分が含まれているものの、堆肥化過程で有機態窒素が急速に分解され、生成したアンモニアが大量に揮散する。そのため家畜ふん堆

肥に残る窒素成分はリン酸、カリ成分に比べて少なく、作物を栽培する上で不足する窒素を化学肥料で補う必要がある。

オガクズを混合した乳牛ふんを原材料とし、ローダー切返し方式の通気型堆肥舎で堆肥化する場合、原材料1

トンあたりの一次発酵期間のアンモニア揮散量は約1 kgであり、そのうち9割が最初の2週間で発生する¹⁶⁾。堆肥化2週目までの堆肥化材料の入った発酵槽から発生したアンモニアを主体とする悪臭を含む空気を、完熟の牛ふん堆肥に通過させるという簡単な方法で脱臭を行うことができる技術が開発された¹⁶⁾ (図3)。二次発酵を経た完熟の牛ふん堆肥には臭気を吸着する能力があり、2~3か月の吸着処理を経ることで、乾物あたり2%程度だった堆肥の窒素濃度を4%以上まで高めることができる(以下本堆肥を窒素付加堆肥と呼ぶ)。堆肥に吸着したアンモニアは硝化菌によって硝酸態に酸化されて弱酸性になるため残存するアンモニアも揮散せずほとんど臭わない。窒素付加堆肥の分析例を表2に示した。窒素付加堆肥の全窒素含量は39.7~44.5 gkg⁻¹で、その約半分は無機態窒素でその大半が硝酸態窒素であった。窒素付加堆肥は有機農産物の日本農林規格(平成18年10月27日農林水産省告示第1463号)に適合し、有機栽培への利用が可能である。

3.2 窒素付加堆肥の窒素肥効と作物栽培への適用

窒素付加堆肥の肥料効果についてポット栽培試験と圃場栽培試験並びに農家実証試験により化学肥料施肥と比較検討した。

多腐植質黒ボク土を充填した1/5000 a ワグネルポットに窒素の施肥量(0~600 mg pot⁻¹)と肥料の種類(硝酸アンモニウム、窒素付加堆肥)を変えてポット栽培試験を行い窒素付加堆肥の窒素肥効率の検討を行った¹⁾。窒素付加堆肥はローラーディスクダイ方式の押し造粒機によりペレットに造粒した(直径5 mm 長さ約8 mm 以下同じ)ものを用いた(表2)。

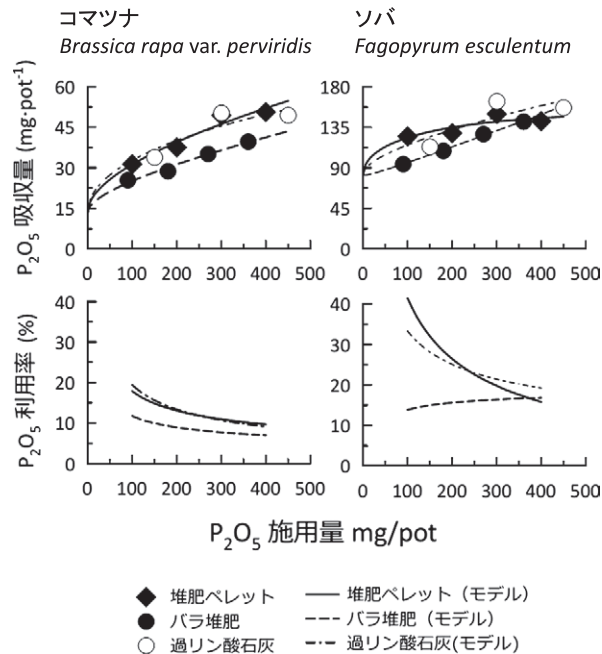


図2. 牛鶏糞混合堆肥のリン酸肥効(荒川, 2012)リン酸施肥量と吸収量の関係を平方根モデルにあてはめを行った。リン酸利用率は各区のリン酸吸収量から無リン酸区の吸収量を差し引き、施肥量で除して求めた。

表1. 堆肥の形態が収穫物収量ならびにリン酸吸収量に及ぼす影響(圃場試験)

	チンゲンサイ (2011年) ^a		スイートコーン (2012年) ^a		ダイズ (2012年) ^a		ハクサイ (2012年) ^a	
	収穫物収量 ^b	リン酸吸収量 ^c	雌穂収量 ^b	リン酸吸収量 ^c	子実収量 ^c	リン酸吸収量 ^{c,d}	結球収量 ^b	リン酸吸収量 ^c
ペレット	145a	2.14ab	286a	6.61a	374a	4.08a	1,874a	7.51a
バラ堆肥	147a	2.11b	272a	5.94b	394a	3.61a	1,623b	5.36c
過リン酸石灰	148a	2.21a	260ab	5.78b	391a	3.82a	1,781ab	6.23b
無リン酸	113a	1.32b	222b	4.76c	374a	3.24a	0	1.16d

^a リン酸の施肥量はチンゲンサイ, スイートコーン, ハクサイが 15 gm⁻², ダイズは 10 gm⁻²。

^b 単位; g/株 ^c 単位; gm⁻² ^d 子実肥大期の吸収量。

データの後のアルファベットが異なる場合処理区間で5%水準で有意差あり(TukeyHSD検定)。

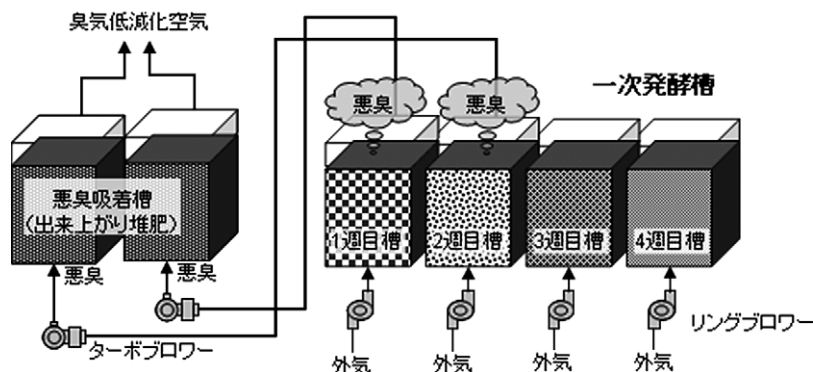


図3. 堆肥脱臭の概念図

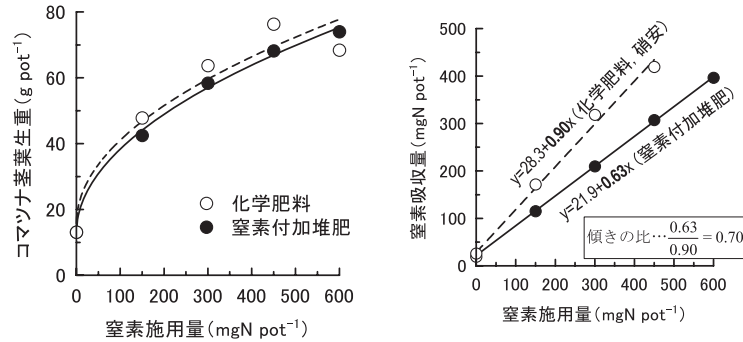


図4. 窒素付加堆肥を施用したコマツナの生体重，窒素吸収量と窒素施用量の関係

表2. 窒素付加堆肥の分析例

供試作物	形状*	全炭素	全窒素	アンモニウム態窒素	硝酸態窒素	全リン酸	全カリ
コマツナ	ベレット	330	39.7	8.5	17.5	17.3	30.8
スイートコーン	ベレット	363	41.7	2.6	19.5	21.9	36.2
レタス，ハクサイ	ベレット	291	40.1	3.9	20.5	16.9	27.4
ハクサイ	バラ	306	44.5	4.9	22.5	19.1	32.6

(単位 g kg^{-1} 乾物)

表3. 窒素付加堆肥を施用して栽培した野菜の収量結果
(九州沖縄農業研究センター所内圃場における栽培試験。土壌：厚層多腐植質黒ボク土)

作物 ^a	化学肥料区		窒素付加堆肥		収穫物収量 ^d (kg m^{-2})		
	施肥量 ^b ($\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$; g m^{-2})	施肥量 ^c (g m^{-2})	無施肥区	化学肥料区	窒素付加バラ区	窒素付加ベレット区	
スイートコーン	8(+10)-15-15	274 (346)	0.57a	1.08a	—	1.08a	
ハクサイ	15(+5)-20-15(+5)	503 (—)	3.11a	9.22b	8.77b	10.03b	
レタス	16-16-16	537 (—)	2.52a	3.48a	—	3.66a	

^a いずれの作物ともラテン方格に試験区を配置した。スイートコーン，レタスは施肥の全量を，ハクサイは基肥のみ窒素付加堆肥で代替した。^b 括弧内は追肥。^c 乾物当たり。括弧内は追肥。堆肥の肥料成分の肥効率を考慮し，窒素基準で堆肥を施用し，施用基準量に満たないリン酸（場合によってはカリも）は別途施肥で補った。^d スイートコーン；雌穂重，ハクサイ・レタス；調整重。平均値の右に付したアルファベットが異なる場合処理区間で5%水準で有意差あり（TukeyのHSD検定）。—は試験区の設定無し。

コマツナの生体重は，肥料の種類によらず施肥量の増加に伴い増加した（図4左）。同一窒素施肥量で肥料間に有意な差は認められなかった。一方，窒素吸収量は，窒素施肥量と直線関係にあるが，硝酸アンモニウムを施用した場合と窒素付加堆肥を施用した場合で差が認められ，直線の傾き（利用率）の比率から，窒素付加堆肥の窒素肥効率は硝安に対して0.7と計算された（図4右）。この窒素肥効率は，当然に作物，季節，対照とする窒素肥料の種類により変動すると考えられるが，およそその目安として活用できると考えられた。

次いで，上記の窒素肥効率を元に基肥を全量窒素付加堆肥で代替した作物の圃場栽培試験を行った（表2，3）。すなわち窒素付加堆肥の窒素施肥量が施肥基準に相当する量の1.4倍量（ $1 \div 0.7$ ）となる窒素付加堆肥ペレットを施用した。ハクサイについては，造粒を行っていないバラ堆肥の窒素付加堆肥も供試し，合わせてガラス繊維ろ紙埋設法¹⁰により栽培期間中の窒素溶出率を調査した。各野菜における基肥としての窒素付加堆肥の施肥量（乾物換算）は 1 m^2 当たり，スイートコーンで274 g，レタスで537 g，ハクサイで503 gであった。スイート

コーン，レタス並びにハクサイの収穫物収量は化学肥料区と同等であった（表3）。夏秋期のハクサイに窒素付加堆肥を施用した場合，施用した窒素のうち6~7割は降雨により短期間に溶出し，その後の溶出はきわめて少なかった。また造粒は窒素溶出に影響を及ぼさなかった（図5）。データは示さないが，各野菜の窒素吸収量並びに栽培跡地土壌のpH，EC，全炭素，全窒素，有効態リン酸，交換性塩基含量は，化学肥料栽培と大差がなかった。

さらに営農圃場において窒素付加堆肥ペレットを用いたニンジンの実証試験を行った。慣行栽培の冬ニンジンでは施肥窒素は 120 kg ha^{-1} である。窒素付加堆肥は窒素肥効率0.7を勘案し， 170 kg （ $12 \div 0.7$ ）の窒素施肥量となるように $4,440 \text{ kg ha}^{-1}$ 施用した。その際に計算上リン酸が不足するためリン酸質肥料を別途 600 kg 施用した。同様に慣行栽培の春ニンジンでは窒素 70 kg ha^{-1} を施用するので，窒素付加堆肥は 100 kg （ $7 \div 0.7$ ）の窒素が施用されるよう $2,920 \text{ kg ha}^{-1}$ の窒素付加堆肥を施用した。冬ニンジンでは窒素付加堆肥施用のニンジンの生育・収量は慣行施肥と同等で，秀品率は高い傾向にあった（表

4a)。また、春ニンジンにおいても、窒素付加ペレット堆肥施用のニンジンの収量は、慣行施肥と遜色無かった(表 4b)。

以上の検討から、窒素付加堆肥ペレットは窒素肥効率を考慮すれば化学肥料と同等の収量・品質の露地野菜を減化学肥料で栽培が可能であることが示された。

4. おわりに

わが国は肥料原料のほぼ全量を海外資源に依存しておりその需給状況によって肥料価格は左右されやすく農家経営への影響も大きい。畜産地域に集中して産生されている家畜ふん堆肥を造粒し肥料とし流通させることで、広い地域で肥料高騰下での生産コストと化学肥料の施用量が削減可能で環境保全型農業の実践が促進されるだろう。家畜ふん堆肥の養分バランスの改善は堆肥脱臭による窒素付加で可能だが、窒素含量を高めるのに2~3ヶ月を要するため生産できる量は限定される。今後は食品残さ等有機性資源と家畜ふん堆肥を組み合わせ、作物の養

分吸収特性に合致した肥料の生産や施肥法を開発していくことが必要と考える。さらに2012年には普通肥料の公定規格として混合堆肥複合肥料が新設され、条件付きながらこれまで認められていなかった家畜ふん堆肥と化成肥料等普通肥料を混合した複合肥料を生産することが可能になった。これまで培われてきた家畜ふん堆肥ペレットの製造並びに利用技術が多種多様な混合堆肥複合肥料の開発利用技術に発展応用されることを期待したい。

文 献

- 1) 荒川祐介, 田中章浩, 原口暢朗, 草場 敬, 薬師堂謙一, 山田一郎. 2010. 堆肥脱臭法により産生した窒素付加堆肥の利用に関する研究(第1報) コマツナ栽培試験による肥料効果の検証. 土肥誌. 81: 153-157.
- 2) 荒川祐介. 2012. 堆肥のペレット成型がそのリン酸肥効に及ぼす影響. 土肥誌. 83: 249-255.
- 3) 荒木雅登, 山本富三, 小山 太, 満田幸恵. 2007. 家畜ふん堆肥の成型が窒素無機化に及ぼす影響. 福岡県農総試研報. 26: 31-34.
- 4) 原 正之, 石川裕一, 小畑 仁. 2003. 豚ふんのペレット堆肥の畑土壌中における肥料成分の溶出特性. 土肥誌. 74: 453-458.
- 5) 原 正之, 古市幸生, 小畑 仁. 2004. 単軸エクストルーダーでの成型条件がペレット堆肥の肥効に与える影響. 土肥誌. 75: 223-227.
- 6) 原 正之. 2005. 豚ふんペレット堆肥の製造と肥効特性に関する研究. 三重農研特別報告. 8: 1-71.
- 7) 加納正敏, 豊島浩一, 大橋秀一, 増田達明, 田中 明, 福留 豊, 藤本栄一. 1997. 家畜ふん堆肥のブレンド及び成型技術. 愛知農総試研報. 29: 299-304.
- 8) 窪田 実. 1975. 肥料工業における造粒, pp. 445-483. 日本粉体工業協会編, 造粒便覧. オーム社, 東京.
- 9) 久保寺秀夫, 山根 剛, 脇山恭行, 荒川祐介. 2009. 樹脂固化薄片を用いた牛ふん堆肥ペレットの微細形態観察. 土肥誌. 80: 522-525.
- 10) 前田乾一, 鬼鞍 豊. 1977. 圃場条件における有機物分解率の測定法. 土肥誌. 48: 567-568.
- 11) 松元 順. 1999. 畜産集中地域における家畜ふん尿処理・利用の現状と展望. 土肥誌. 70: 487-492.
- 12) 三島慎一郎, 遠藤 明, 白戸康人, 木村園子ドロテア. 2009. 国・都道府県に存在する有機性廃棄物資源量と農耕地の有機物受入れ量の推計. 土肥誌. 80: 226-232.

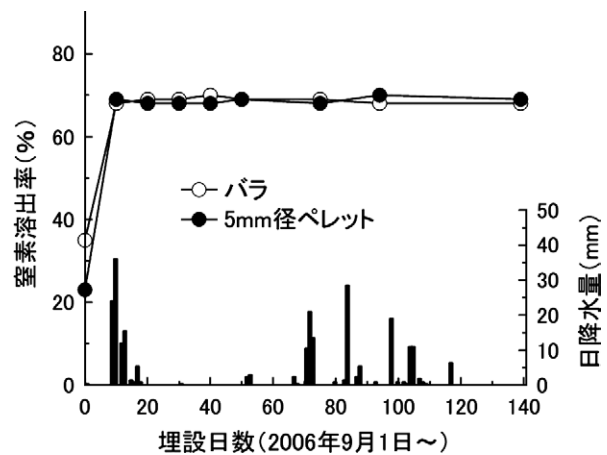


図 5. ハクサイ栽培期間中の窒素付加堆肥からの窒素溶出率並びに期間中の降水量

表 4. 窒素付加堆肥を施用して栽培した野菜の収量結果 (熊本県菊池地域における現地実証試験)

(a) 冬ニンジン (品種:「ベータ 312」 黒ボク土, 露地栽培, 栽培期間 2007/8/18~12/27)

	肥料名 (資材量 kg ha^{-1})	化学肥料換算 (kg ha^{-1}) ^a			秀品収量 t ha^{-1}	同左 L, M 収量 t ha^{-1}	優品収量 t ha^{-1}	首径 mm
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O				
慣行施肥 ^c	配合肥料 (1200) P 肥料 (600) ^b	120	320	120	25.8	17.9 (69%)	24.0	41.5
窒素付加	窒素付加堆肥 (4440) P 肥料 (600) ^b	120	240	106	32.8	23.3 (71%)	17.2	43.2

(b) 春ニンジン (品種:「ベータリッチ」 褐色低地土, トンネル栽培, 栽培期間 2007/12/1~2008/4/25)

	肥料名 (資材量 kg ha^{-1})	化学肥料換算 (kg ha^{-1}) ^a			秀品収量 t ha^{-1}	同左 L, M 収量 t ha^{-1}	優品収量 t ha^{-1}	首径 mm
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O				
慣行施肥 ^c	配合肥料 (600)	72	90	72	31.3	21.6 (69%)	2.1	46.7
窒素付加	窒素付加堆肥 (2920) 重焼燐 (200)	70	96	64	28.9	17.0 (59%)	2.9	48.2

^a 両処理ともに基肥のみ施用。

^b 重焼燐, 焼成マグを混合した肥料でク溶性リン酸 35%の肥料 ^c 農家慣行の施肥量。

- 13) 水流正裕, 浅井貴之. 2001. 原料堆肥の種類, 水分および成型機のディスク口径がペレット堆肥の成型効率および理化学性に及ぼす影響. 長野県畜産試験場研究報告. 29: 1-7.
- 14) 中村 修, 佐藤 剛, 田中宗浩. 2005. 循環型社会形成に向けた有機液肥の水田利用の可能性: 堆肥市場と有機液肥市場との比較研究. 長崎大学総合環境研究. 7: 13-23.
- 15) 農林水産省生産局. 2015. 家畜排せつ物の発生と管理の状況. http://www.maff.go.jp/j/chikusan/kankyo/taisaku/tmondai/02_kanri/ (2015年7月7日閲覧)
- 16) 田中章浩. 2009. 出来上がり堆肥による悪臭の除去と堆肥の窒素成分調整. におい・かおり環境学会誌. 40: 229-234.
- 17) 浦野義雄, 山田正幸, 鈴木陸美, 松本尚子. 2005. 造粒等による堆肥の利用性向上技術の開発. 群馬畜試研報. 12: 87-93.
- 18) USDA-Economic Research Service. 2009. Manure use for fertilizer and for energy Report to congress. Administrative publication no. (AP-037) p. 53. http://www.ers.usda.gov/media/156155/ap037_1_.pdf (2015年7月7日閲覧)
- 19) 薬師堂謙一. 2002. 成分調整成型堆肥の生産・利用技術の開発. 農機誌. 64: 25-29.
- 20) 山田良三, 日置雅之, 関 稔, 早川岩夫. 1998. プレンド及び成型した家畜ふん堆肥の露地野菜に対する肥料代替用法. 愛知農総試研報. 30: 173-181.