

# キャベツ及びハクサイの年内どり作型における全量基肥施用に適する混合堆肥複合肥料の開発と施用効果

森次真一・鷲尾建紀・水木剛\*・鳥家あさ美\*\*・上田直國・大家理哉・白石誠\*\*\*

Development of the Compost-mixed Compound Fertilizer Suitable for Total Basal Fertilization of Cabbage and Chinese Cabbage Harvest within the Year and Application Effects

Shinichi Moritsugu, Tatsuki Washio, Takeshi Mizuki, Asami Toya, Naokuni Ueda, Masaya Ooya and Makoto Shiraishi

## 緒言

県内を代表するキャベツ及びハクサイ産地である牛窓地域では、圃場の土壌養分バランスが悪化しつつある。具体的には、土壌診断基準値と比べて、土壌中の有機物含量の指標である腐植が少なく、リン酸は大幅に超過し、苦土が少ない圃場が増加している（岡山県農林水産総合センター農業研究所，2015）。土壌中の養分バランスが悪化している原因は、有機物を投入する生産者の施用労力の不足に加えて、これまでに施用された肥料や家畜ふん堆肥に由来する肥料成分の投入量が不適切であったことが推察され、これらを改善するための土壌管理が求められている。また、キャベツやハクサイの夏まき年内どりの作型では、追肥時期に当たる9月は台風や秋雨前線の停滞により降水量が多いため、適期の施肥作業が難しく窒素成分の肥効が不安定な場合があり、持続的な肥効を確保できる施肥技術が必要である。

一方、2012年の肥料取締法（昭和25年法律第127号、法律の題名：2020年12月1日以降は「肥料の品質確保等に関する法律（略称、肥料法）」に変更）の改正により、普通肥料の新規格として、家畜ふん堆肥と普通肥料を

肥料原料にした「混合堆肥複合肥料」が製造できるようになった。これにより、特殊肥料である家畜ふん堆肥と普通肥料が1回の作業で施用できることとなった。混合堆肥複合肥料は、有機物を土壌に供給できることに加えて、家畜ふん堆肥に含まれる養分含量を予め勘案して製品の成分を調整できるため、作物や土壌に対する肥料成分のアンバランス化が生じにくいと考えられる。

そこで、本研究では、キャベツ及びハクサイ栽培における施肥作業及び有機物施用作業の省力化、土壌化学性の改善を目指し、これまで製造事例のない家畜ふん堆肥と緩効性窒素肥料を混合した混合堆肥複合肥料を開発し、肥料の物性や肥効特性等を明らかにした。また、開発した混合堆肥複合肥料の年内どり作型のキャベツ及びハクサイの生育や収量等に対する施用効果、混合堆肥複合肥料の有機物供給効果や連用した土壌への影響を検討した。

混合堆肥複合肥料の開発に当たり、三興株式会社代表取締役社長荻野隆氏をはじめ関係各位には本研究の趣旨をご理解いただき、試作、製造等に技術的なご助言、ご協力をいただいた。また、現地試験の実施に当たり、牛窓地域のキャベツ生産者、JA岡山及び備前

本報告の一部は日本土壌肥料学会2016年度大会シンポジウム、2017年度大会一般講演、2020年度大会シンポジウム、平成28年度家畜ふん尿処理利用研究会において発表した。

本研究は、農林水産省委託プロジェクト研究「生産コストの削減に向けた有機質資材の活用技術の開発」により実施した。

\*元畜産研究所

\*\*元農業研究所

\*\*\*畜産研究所

2023年12月20日 受理。

広域農業普及指導センターの関係各位には、現地圃場での栽培管理作業及び調査に多大なご協力をいただいた。記して御礼申し上げる。

## 材料及び方法

### 1.混合堆肥複合肥料の開発及び特性評価

#### (1)原料及び配合設計

肥料原料とその配合割合は、生産現場で課題となっている土づくりや施肥改善対策として、効果が期待でき、混合堆肥複合肥料のメリットを最大限に活かせるよう決定した(表1)。まず、生産現地の土壤中に少ない腐植の増強対策として、有機物供給効果が期待できる牛ふん主体の畜種混合堆肥(牛ふん50%、豚ふん尿25%、鶏ふん25%、含水率24%、C/N比12.8、窒素2.8乾物%リン酸4.5乾物%、加里5.0乾物%)をなるべく多く配合するため、公定規格の上限(乾物割合で50%)程度配合した。また、牛窓地域の土壤中に不足している苦土及びホウ素を補うため、原料として硫酸苦土、ホウ砂及び安価なリン酸・加里原料として鶏ふん燃焼灰を配合した。さらに、造粒歩留を向上させるため米ぬかを配合した。一方、土壤中に過剰なリン酸は、出来上がり製品のリン酸含量が低成分となるよう配合設計した。

窒素成分については、追肥を省いても長期間の窒素肥効が期待できる緩効性窒素肥料を配合した。緩効性窒素肥料は、製造工程を想定した短時間の高温条件(90℃、3分間)において窒素無機化特性に変化がみられず(鷺尾ら、未発表)、造粒時に肥料粒の崩壊の恐れが少ない「ハイパーCDU細粒-5(ジェイカムアグリ株式会社:以下、CDU)」を選定した。また、速効性窒素成分を賄う原料は、窒素含量の高い尿素を使用した。尿素は吸湿性の高い肥料で、配合割合を増やすと固結等の品質低下が生じることが一般に知られている。筆者らが混合堆肥複合肥料に配合する尿素的配合割合について検討した結果、膨化や固結を抑制するためには5%以内が適当であった(水木ら、2016)ことから、本試験では尿素的配合割合は5%程度とした。そして、混合堆肥複合肥料の窒素肥効は、混合する窒素肥料の無機化特性と配合割合からおおまかに推定できるため

(森次ら、2016)、分施体系の窒素肥効に近づくように窒素肥料の配合割合を決定した。

以上の基本設計及び混合堆肥複合肥料の公定規格等を基にして、開発する混合堆肥複合肥料の保証成分(現物当たり%)は、窒素10-リン酸3-加里7-苦土1-ホウ素0.05に設計した。

#### (2)混合堆肥複合肥料の製造

製造は、三興株式会社山陽肥料工場において原料を配合し、実規模のローラーリング・ダイ方式の造粒機で直径5mmのペレット状に成形した。

肥料の含水率が保存性に及ぼす影響を知るために開発肥料と同様の原料設計で製造した含水率が約10%の試作肥料を長期保存したところ、保存3か月目以降に肥料から発生するアンモニアガス濃度が徐々に高まり、同時にpHも9前後まで上昇し、肥料袋の開封時に強いアンモニア臭が発生した(水木、2018)。さらに、保存期間中のアンモニアガスの抑制には低水分化が有効であった(水木、2018)ことから、製品の含水率は5%を目標とし、ロータリーキルン方式の乾燥機で加熱乾燥(出口温度90~95℃)した。

以下、本報告では、開発した混合堆肥複合肥料を「開発肥料」と記す。

#### (3)開発肥料の品質及び窒素無機化特性の評価

開発肥料の硬度は、電気機械式万能試験機(INSTRON3344、インストロンジャパンカンパニイリミテッド)に直径5mmの押し込み治具を装着して測定した。造粒歩留率は、肥料成形後の重量に対する3mm目篩上重量の割合とした。安息角は、流動表面角測定器(FSA-100S、筒井理化学機械株式会社)で測定した。含水率は105℃乾熱法で測定した。肥料成分及びpHは、肥料等試験法(2015)に準じて測定した。

窒素無機化特性は、瓶培養法により10、15、20、30℃の畑条件で培養し、温度別の窒素無機化率を基にして反応速度論的解析法(杉原ら、1986)により算出した。すなわち、225ml容のガラス瓶に湿潤土(水分量は最大容水量の50%、pH5.9の黄色土)50gをとり、開発肥料2粒(0.4~0.5g、小数点第4位までの重量を測定)を混合し、厚さ0.03mmポリエチレンフィルムで覆い恒温培養した(3反復)。培養日数は、7、14、

表1 開発した混合堆肥複合肥料の原料配合割合

	堆肥 (牛ふん主体)	尿素	ハイパー CDU細粒-5	硫酸 加里	鶏ふん 焼却灰	硫酸 苦土	ホウ 砂	米 ぬか	計
乾物重量%	44.0	5.8	25.5	11.5	4.6	4.4	0.2	4.0	100

21, 28, 60, 90日とした。培養後は、塩化カリウム溶液で無機態窒素を抽出し、フローインジェクション法 (FIA5000, フォス・ジャパン株式会社) でアンモニウム態窒素と硝酸態窒素を定量し、湿潤土のみの値をそれぞれ差し引き、窒素無機化率を算出した。

**2.開発肥料の全量基肥施用がキャベツ、ハクサイの生育並びに収量等に及ぼす影響**

**(1)所内栽培試験**

開発肥料の施用効果を明らかにするため、農業研究所 (赤磐市) の所内圃場 (典型台地褐色森林土、試験開始前は耕起せず10年以上休耕, pH5.9, 腐植2.6%, 可給態リン酸45mg/100g, 苦土飽和度11%, 熱水可溶性ホウ素0.29mg/kg) において、2015年及び2016年はキャベツ (品種名 ‘彩ひかり’), 2017～2019年はハクサイ (同

‘黄ごころ85’) の栽培試験を5年間同一圃場で実施した。試験は、開発肥料を全量基肥施肥する開発肥料全基区、対照として高度化成肥料を基肥と追肥に分施する高度化成成分施区及び有機化成肥料を同様に分施する有機化成成分施区、リン酸、加里のみ基肥に施肥する無窒素区を設け、1区18㎡, 3反復の乱塊法で実施した (表2)。総窒素施肥量は、野菜栽培指針 (岡山県, 2017) に準じて、キャベツは2.5kg/a, ハクサイは2.8kg/aとした。2015年の開発肥料全基区に供試した肥料は、開発肥料のプロトタイプに当たる、当センター畜産研究所で試作した混合堆肥複合肥料 (以下、開発肥料PT) であったが、原料及び配合割合、肥料成分量、ペレットの形状等は開発肥料と概ね同様であったため、開発肥料として扱った。なお、各年次の耕種概要は表3のとおりで、

表2 キャベツ、ハクサイ栽培試験の各試験区の施肥量 (所内試験) (kg/a)

試験区名	キャベツ (2015,2016年)			ハクサイ (2017,2018,2019年)		
	基肥	追肥	合計 (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	基肥	追肥	合計 (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)
開発肥料全基区	開発肥料 <sup>z</sup> 25kg	—	2.5-0.75-1.75 (基2.5)	開発肥料 <sup>z</sup> 28kg	—	2.8-0.84-1.96 (基2.8)
高度化成成分施区	高度化成 <sup>y</sup> 9.4kg	同左 6.3kg	2.5-2.5-2.5 (基1.5-追1.0)	高度化成 <sup>y</sup> 9.4kg	同左 8.1kg	2.8-2.8-2.8 (基1.5-追1.3)
有機化成成分施区	有機化成 <sup>x</sup> 15kg	同左 10kg	2.5-2.0-2.5 (基1.5-追1.0)	有機化成 <sup>x</sup> 15kg	同左 13kg	2.8-2.24-2.8 (基1.5-追1.3)
無窒素区	PK化成 12.5kg	—	0-2.5-2.5	PK化成 14kg	—	0-2.8-2.8

注) 施肥量合計量の括弧内の基, 追の数値は, 基肥及び追肥の窒素施肥量を示す

<sup>z</sup> 開発肥料であるキャベツ一発堆肥入り037 (N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O%=10-3-7)

2015年のみ開発肥料のプロトタイプを使用 (N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O%=10-5-9)

<sup>y</sup> 尿素硫加磷安48号 (N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O%=16-16-16)

<sup>x</sup> 野菜いちばん (N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O%=16-16-16)

表3 キャベツ、ハクサイの耕種概要 (所内試験)

作目名 (品種名)	試験年次	基肥	定植 <sup>z</sup>	追肥 ・中耕	収穫
キャベツ (彩ひかり)	2015年	8月28日	9月2日	9月15日	11月30日
	2016年	8月31日	9月2日	9月16日	12月19日
ハクサイ (黄ごころ85)	2017年	9月20日	9月20日	10月1日	12月13日
	2018年	9月19日	9月23日	10月3日	12月10日
	2019年	9月18日	9月18日	10月1日	12月3日

<sup>z</sup> 栽植密度は、いずれも畝幅60cm, 株間35cm, 1条植え

栽培管理方法は現地慣行に準じた。なお、収穫残さ（外葉及び根）は収穫後にすき込んだ。

キャベツの調査項目は、定植約1か月後の最大葉長、収穫期の地上部の全重、結球重、結球緊度とし、いずれも1処理区当たり10株を調査した。なお、結球緊度は、結球重 (g) ÷ (1 ÷ 6 × π × (縦径 (cm) × 横径 (cm) × 球高 (cm))) から算出した。

ハクサイの調査項目は、定植約1か月後の最大葉長、収穫期の地上部の全重、結球重とし、最大葉長は1処理区当たり10株、それ以外は8株を調査した。また、両作物ともに収穫物を結球部と外葉部に分け、各反復ごとに4個体について約1/8ずつを切り出した後1つに混合し、養分含量（窒素、リン酸、加里、石灰、苦土、ハクサイはこれらに加えてホウ素）を測定した。養分含量は、収穫物を乾燥後に微粉碎した試料を分析に供試した。窒素は、NCアナライザー（SUMIGRAPH NC-

220F、株式会社住化分析センター）を用いて乾式燃焼法で測定した。ホウ素は、0.5N塩酸で抽出したろ液をICP発光分析装置（ICPE-9000、株式会社島津製作所）で測定した。これら以外は、硫酸-過酸化水素による湿式分解後、塩基成分は原子吸光光度計（AA-7000、株式会社島津製作所）で、リン酸はバナドモリブデン法により発色後、分光光度計（U-5100、株式会社日立ハイテク）で測定した。

また、供試作物の栽培期間中における開発肥料の窒素肥効を把握するため、作土の無機態窒素含量を定期的に測定した。無機態窒素は、採取した湿潤土壌に10%塩化カリウム溶液を加え、ろ液をフローインジェクション法により測定した。

#### (2)現地栽培試験

瀬戸内市牛窓地域の現地圃場（中粗粒普通褐色低地土、壤質、pH6.5、腐植2.0%、可給態リン酸

表4 キャベツ栽培試験の各試験区の施肥量（現地試験） (kg/a)

試験年次	試験区名	基肥	追肥	合計 (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)
2016年	開発肥料区	開発肥料 24kg	—	2.4-0.72-1.68 (基2.4)
	現地慣行区 <sup>z</sup>	高度化成 10kg	固形粒状肥料 10kg	2.4-2.4-2.4 (基1.4-追1.0)
2017年	開発肥料区	開発肥料 25kg	—	2.5-0.75-1.75 (基2.5)
	現地慣行区 <sup>y</sup>	高度化成 10.7kg	固形粒状肥料 10kg	2.5-2.5-2.5 (基1.5-追1.0)

<sup>z</sup> 基肥、追肥以外に苦土石灰10kg/aを施肥

<sup>y</sup> 基肥、追肥以外にミネGスーパー12kg/aを施肥

注) 施肥量合計量の括弧内の基、追の数値は、基肥及び追肥の窒素施肥量を示す

表5 キャベツ<sup>z</sup>の耕種概要（現地試験）

試験年次	基肥	定植 <sup>y</sup>	追肥 ・中耕	収穫
2016年	8月26日	9月1日	9月12日	12月1日
2017年	8月28日	9月4日	9月14日	2月3日 <sup>x</sup>

<sup>z</sup> 品種‘彩ひかり’

<sup>y</sup> 栽植密度は、畝幅55～60cm、株間30～31cm、1条植え

<sup>x</sup> 台風による9～10月の多雨や11～12月の低温の影響により収穫時期が大幅に遅れた

297mg/100g, 苦土飽和度18%, 熱水可溶性ホウ素1.1mg/kg)において, 2016年及び2017年に, キャベツ(品種名‘彩ひかり’)の栽培試験を実施した。栽培試験は, 2年間同一圃場で実施した。

試験は, 開発肥料を全量基肥施肥する開発肥料区, 基肥に高度化成肥料, 追肥に粒状固形肥料を施肥する現地慣行区を設け, 1区90~180m<sup>2</sup>, 2反復で実施した(表4)。総窒素施肥量は, 野菜栽培指針(岡山県, 2017)に準じて, 2016年は2.4kg/a, 2017年は2.5kg/aとした。なお, 各年次の耕種概要は表5のとおりであった。本作型での収穫時期は通常年内であるが, 2017年は, 低温等の影響により2月となった。

調査項目は, キャベツの生育, 収量, 結球緊度, 土壌中の無機態窒素含量であり, 調査方法は, 前項の所内栽培試験と同様とした。

### 3.開発肥料の施用が土壌に及ぼす影響

#### (1)連用が土壌の理化学性に及ぼす影響

土壌化学性は, 所内栽培試験の試験開始から5年後(2019年のハクサイ収穫後)に各試験区の作土を採取し, 風乾後2mmで篩別した風乾細土等を供試し(ただし, pHは湿潤土, 腐植は0.5mm以下の微粉碎土を供試), 主に「土壌, 水質及び植物体分析法(日本土壌協会, 2001)」に準じて行った。すなわち, pHは, 土:水=1:2.5のガラス電極法で測定し, 腐植は, 乾式燃焼法で測定した全炭素量に1.724を乗じた。可給態窒素は, 30℃4週間の畑培養で生成する無機態窒素をフローインジェクション法で測定した。塩基交換容量(以下, CEC)は, セミマイクロSchollenberger法により抽出したアンモニウム態窒素をフローインジェクション法で測定し, 交換性塩基(石灰, 苦土, 加里)は, CEC測定の際に得られるpH7, 1N酢酸アンモニウム浸透液を原子吸光度計で測定した。可給態リン酸は, トルオーグ法により抽出発色後, 分光光度計で測定した。

熱水可溶性ホウ素は, 熱水抽出法による抽出液をICP発光分析装置で測定した。なお, 試験圃場は, 試験開始後の腐植の消耗が激しく, 試験開始後2年間で概ね0.7ポイント程度減少した。これは, 試験開始前は10年以上長期間にわたり不耕起状態で休耕しており, この間に繁茂した雑草や残根等の易分解性有機物が試験開始後の野菜栽培によって急激に分解したためと考えられた。このため, 連用による土壌化学性への影響を検討するに当たり, 本報では試験開始前との比較は行わず, 連用5年後の試験区間の比較により, 開発肥料による土壌化学性への影響を評価した。

土壌物理性は, 化学性調査と同様に試験開始から5年後(2019年のハクサイ収穫後)の各試験区の作土から100ml円筒試料を採取し, 仮比重, 三相分布, 砂柱法による粗孔隙率(pF1.5の孔隙率)を測定した。測定は, 「土壌, 水質及び植物体分析法(日本土壌協会, 2001)」に準じて行った。

#### (2)有機物供給効果の検討

混合堆肥複合肥料等の有機物供給効果(炭素貯留効果)をガラス繊維ろ紙埋設試験(土壌環境分析法編集委員会編, 1997)により検討した。試験には, 開発肥料PT, 牛ふん主体の堆肥3種類, 有機化成肥料1種類を供試した(表6)。牛ふん堆肥Aは開発肥料及び開発肥料PTの原料堆肥であった。さらに, 有機化成は, 所内の栽培試験に供試した市販の有機化成肥料(原料配合割合は不明)であった。

ガラス繊維ろ紙埋設試験は, 前述した研究所内の栽培試験圃場で実施した。試験圃場の風乾細土(全炭素1.3%, 全窒素0.14%, C/N比9.6)30gに全炭素含量として1.5g相当量の各資材を粉碎せずに混和し, これを5×7cmの封筒状に加工したガラス繊維ろ紙(Whatman GF/A, 150mm)で包み, 2015年9月2日に深さ5cmに埋設した。埋設後は, 3年間定期的に回収し, 乾式燃焼法で全炭素

表6 ガラス繊維ろ紙埋設試験に供試した資材の概要

資材名	資材の種類	有機物原料	性状	全炭素(乾物%)	全窒素(乾物%)	C/N	備考
開発肥料PT	混合堆肥複合肥料	牛ふん主体の畜種混合堆肥	ペレット(φ5mm)	29.4	10.1	2.9	開発肥料のプロタイプ(牛ふん堆肥Aを配合し, 原料の配合割合は開発肥料と同等)
牛ふん堆肥A	牛ふん主体の畜種混合堆肥	牛ふん, 鶏ふん, 豚ふん尿	風乾粉碎物	37.6	2.6	14.5	混合堆肥の原料堆肥。牛ふん50%, 鶏ふん25%, 豚ふん尿25%, 副資材は戻し堆肥
牛ふん堆肥B	牛ふん堆肥	牛ふん堆肥	〃	33.0	2.0	16.9	副資材は粉碎もみ殻
牛ふん堆肥C	〃	〃	〃	36.4	2.1	17.3	副資材はもみ殻
有機化成	有機化成肥料	菜種油粕, フェザーミール等	ペレット(φ3.2mm)	16.8	12.0	1.4	所内栽培試験で使用した有機化成肥料

含量及び全窒素含量を測定し、土壌のみの埋設試料の測定値を差し引き、各資材の炭素残存率及び窒素残存率を算出した。試験は各資材3反復で実施した。さらに、肥料に含まれる炭素の土壌での残存しやすさを、牛ふん堆肥の炭素を基準として数値化するため、次式のように、混合堆肥複合肥料（開発肥料PT）及び有機化成料の炭素残存率を、牛ふん堆肥の炭素残存率で除したものを炭素残存割合とした。

炭素残存割合（%）＝混合堆肥複合肥料又は有機化成の炭素残存率（%）÷牛ふん堆肥A～Cの炭素残存率（平均値%）×100

## 結果

### 1. 開発肥料の品質及び窒素無機化特性

開発肥料の外観を図1に、物性及び品質を表7に示した。開発肥料の直径は5.0mm、長さは6.7mm、造粒歩留率は95%であり、固結、膨化は見られずペレットの成形具合、製造効率ともに良好であった。また、含水

率は4.4%、硬度は8.3kgf、嵩比重は0.75g/L、安息角は41°であった。

開発肥料の肥料成分含量（三興株式会社調べ）は、いずれも設計した保証成分含量（現物当たり%、窒素10－リン酸3－加里7－苦土1－ホウ素0.05）を上回った（データ省略）。また、開発肥料のpHは8.2、石灰含量は約4%であった。

開発肥料の温度別の窒素無機化率を図2に示した。窒素無機化率は、全てのデータが正の値であり、見かけ上有機化は見られず、培養開始後速やかに増加した。窒素無機化速度は温度の影響を受け、低温になるほど無機化速度が緩やかであった。30℃の培養60日目以降と20℃の培養90日目で、無機化率が明らかに低下し、脱窒の影響が考えられたため、これらのデータを除き、反応速度論的解析を行った。各温度データを標準温度25℃変換日数でプロットしたところ25℃重ね合わせ曲線におおむね一致した（図3）。25℃変換日数の5～10日目で、無機化が見かけ上やや停滞したが、窒素無機



図1 開発した混合堆肥複合肥料  
（ペットネーム「キャベツ一発堆肥入り037」）

注）写真下のスケールは1目盛りが1mmを示すスケール  
下の数値は1cm毎の値

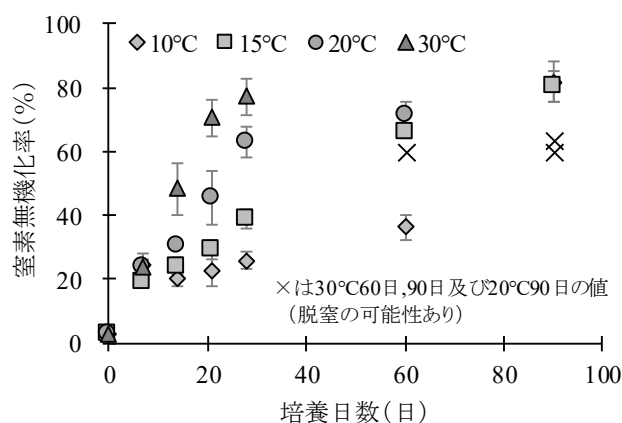


図2 開発肥料の温度別の窒素無機化率

注）図中の各シンボルに付したエラーバーは標準誤差を示す（n=3）

表7 開発肥料の物性等

造粒歩留率 (%)	直径 (mm)	長さ (mm)	硬度 (kgf)	嵩比重 (kg/L)	安息角 (°)	含水率 (%)
95	5.0	6.7	8.3	0.75	41	4.4

化特性は、窒素無機化モデルの1次反応式単純型で表すことができ、最大無機化率は87%、無機化速度定数は0.0431/日で、25℃条件の場合、約50日後に無機化率が80%に達するものと推定された(表8, 図3)。

## 2. 開発肥料の基肥施用がキャベツ、ハクサイの生育並びに収量等に及ぼす影響

### (1) 所内栽培試験

試験を実施した5年間(2015~2019年)のうち、降水量に差があった3か年の土壤中の無機態窒素含量の推移を図4に示した。結球性葉菜類では、生育初期~結球初期における窒素肥効がとりわけ重要とされている(興津・本多, 1982)。このため、本作型の生育初期~結球初期に相当する定植後2か月間の降水量が最も多かった2016年(343mm, 平年比129%)、3番目に多かった2015年(236mm, 同86%)及び最も少なかった2019年(122.6mm, 同55%)の3か年の結果を示した。開発肥料全基区の無機態窒素含量は、3か年とも、基肥の施肥後、両分施区の追肥時期にかけて増加し、追肥時期以降から収穫期にかけて低下した。追肥時期の無機態窒素含量については、2016年では試験区間差はみられず、2015年及び2019年では開発肥料全基区で両分施区に比べて有意に高い値を示した。追肥時期の後、無

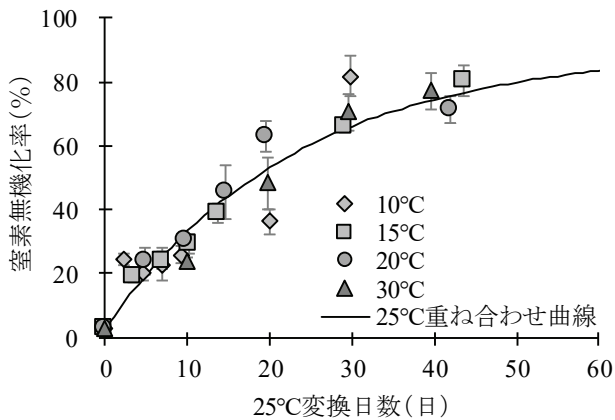


図3 25℃変換日数における開発肥料の窒素無機化曲線  
注) 30℃60日, 90日及び20℃90日の培養結果は、脱窒した可能性があり、解析から除外した図中の各シンボルに付したエラーバーは標準誤差を示す (n=3)

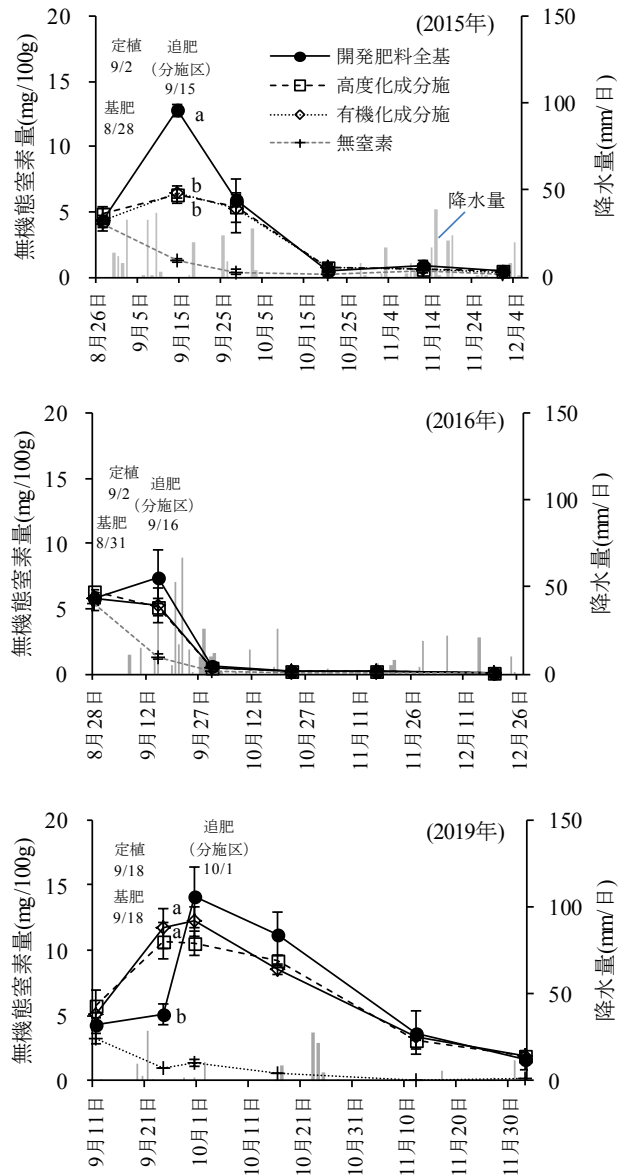


図4 土壤中の無機態窒素含量の推移(所内試験)

注) 測定位置は作土層, 追肥期は分施区の追肥前の値  
凡例は各年次とも同じ  
図中の各シンボルに付したエラーバーは標準誤差を示す (n=3)  
図中の異なる英文字間に5%水準で有意差あり (Tukeyの多重比較, n=3)  
英文字のない調査日は有意差なし (有意差検定は無窒素区を除いた)

表8 開発肥料の窒素無機化特性値

	最大無機化率 A(%)	無機化速度定数 k(/日)	活性化エネルギー Ea(cal/mol)	初期値 b(%)
無機化特性値 <sup>z</sup>	87	0.0431	12,338	3

<sup>z</sup> 窒素無機化モデル: 1次反応式単純型  $N=A(1-\exp(-kt))+b$ ; tは25℃変換日数

窒素区を除いて試験区間に有意差がなく推移した。定植後2か月間の降水量が平年よりも多かった2016年の無機態窒素含量は、定植約1か月後以降にいずれの区も1mg/100g未満で推移した。一方、降水量が最も少なかった2019年は、定植約2か月後以降もいずれの区も高い値で推移し、収穫期においても1～2mg/100g程度の値を示した。データを省略した2017年及び2018年については、降水量の多少によって値が異なったが、栽培期間を通した傾向はデータを示した3か年と同様に推移した。

キャベツ、ハクサイの定植約1か月後の最大葉長は、無窒素区を除き、各年次とも試験区間差はみられなかった(表9)。

地上部の全重、結球重及び結球収量は、キャベツ、ハクサイともに、各年次とも開発肥料全基区と高度化成分施肥区及び有機化成分施肥区との有意差はみられなかった(表10、表11)。開発肥料全基区の1a当たりの結球収量は、キャベツでは803～927kg、ハクサイでは1,169～1,660kgであった。キャベツの結球緊度は、試験区間に有意差はみられなかった(表10)。また、ハク

表9 キャベツ及びハクサイの定植約1か月後の最大葉長(所内試験)

試験区名	最大葉長(cm)				
	キャベツ		ハクサイ		
	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年
開発肥料全基区	30.0 a	28.2 a	35.4 a	35.3 a	36.6
高度化成分施肥区	30.2 a	26.4 a	35.0 a	33.3 a	34.6
有機化成分施肥区	29.9 a	27.1 a	34.0 a	33.9 a	34.0
無窒素区	22.2 b	21.0 b	31.5 b	26.4 b	33.1

注)表中の異なる英文字は5%水準で各試験区の平均値に有意差あり(Tukeyの多重比較,n=3)  
数値の右に英文字がない場合は、試験区間に有意差なし

表10 キャベツの収量及び結球緊度(所内試験)

試験区名	2015年				2016年			
	地上部全重(kg/株)	結球重(kg/株)	結球収量(kg/a)	結球緊度	地上部全重(kg/株)	結球重(kg/株)	結球収量(kg/a)	結球緊度
開発肥料全基区	3.20 a	1.95 a	927 a	0.63	2.59 a	1.69 a	803 a	0.55
高度化成分施肥区	3.29 a	2.02 a	962 a	0.59	2.53 a	1.62 a	770 a	0.54
有機化成分施肥区	3.19 a	1.90 a	903 a	0.61	2.43 a	1.56 a	742 a	0.55
無窒素区	2.19 b	1.14 b	543 b	0.62	1.32 b	0.70 b	335 b	0.57

注)表中の異なる英文字は5%水準で各試験区の平均値に有意差あり(Tukeyの多重比較,n=3)  
数値の右に英文字がない場合は、試験区間に有意差なし

表11 ハクサイの収量(所内試験)

試験区名	2017年			2018年			2019年		
	地上部全重(kg/株)	結球重(kg/株)	結球収量(kg/a)	地上部全重(kg/株)	結球重(kg/株)	結球収量(kg/a)	地上部全重(kg/株)	結球重(kg/株)	結球収量(kg/a)
開発肥料全基区	3.43 a	2.46 a	1,169 a	4.42 a	3.17 a	1,509 a	4.99 a	3.49 a	1,660 a
高度化成分施肥区	3.37 a	2.48 a	1,180 a	3.93 a	2.88 a	1,373 a	4.71 a	3.08 a	1,467 a
有機化成分施肥区	3.21 a	2.38 a	1,134 a	3.96 a	2.78 a	1,386 a	4.47 a	2.97 a	1,414 a
無窒素区	1.70 b	1.02 b	485 b	1.49 b	0.88 b	419 b	2.93 b	1.80 b	856 b

注)表中の異なる英文字は5%水準で各試験区の平均値に有意差あり(Tukeyの多重比較,n=3)



サイでは生育初期の窒素過剰により収穫物の心腐れ症状（アン入り症）の発生が懸念されるが、いずれの試験区も発生は認められなかった。

キャベツ、ハクサイの窒素吸収量について、無窒素区を除くと、各年次とも試験区間に統計的な有意差はみられなかった（図5）。無窒素区との差し引き法による開発肥料全基区の施肥窒素の窒素利用率は、年次によって異なり、キャベツでは68～78%、ハクサイでは49～88%であった。定植後2か月間の降水量の多かった2016年及び2017年の窒素利用率は、他の年次に比べて低い値を示した。5か年の窒素利用率の平均値は、開

発肥料全基区で71%、高度化成分施肥区で69%、有機化成分施肥区で67%であった。

結球部、外葉部の三要素、石灰、苦土吸収量及び各成分含量について、試験開始から4年間、つまり2018年のハクサイ作までは、無窒素区を除いて、試験区間差はみられなかった（データ省略）。試験開始から5年目に当たる2019年のハクサイの養分含量について、三要素及び石灰に試験区間差はみられなかったが、苦土含量及び苦土吸収量に試験区間差がみられた。すなわち、開発肥料全基区の苦土含量及び苦土吸収量は、高度化成分施肥区と比べて同等以上で有機化成分施肥区よりも有

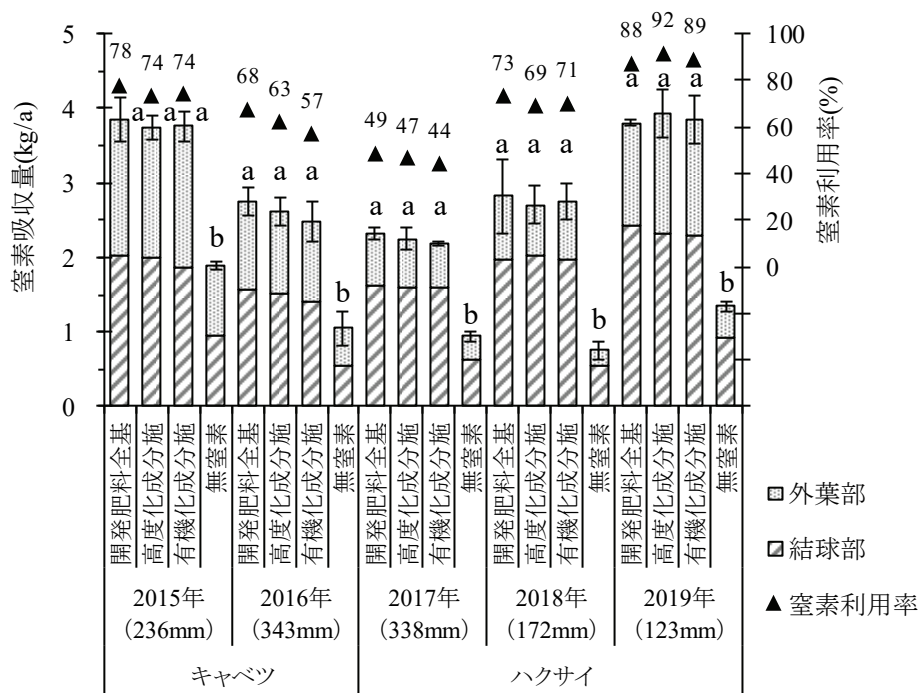


図5 収穫物の窒素吸収量及び窒素利用率

注) 窒素利用率は、各試験区の地上部（結球部+外葉部）の窒素吸収量から無窒素区の窒素吸収量を差し引いた後、総施肥窒素量で除した値  
 図中の異なる英文字は、各調査年次における地上部の窒素吸収量に5%水準で有意差あり（Tukeyの多重比較, n=3）  
 各年次の下の括弧内数値は、定植後2か月間の降水量  
 図中の各シンボルに付したエラーバーは標準誤差を示す（n=3）

表12 5年連用時のハクサイの養分含量（所内試験，2019年，収穫物）

試験区名	結球部							外葉部								
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	B	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	B				
	(乾物%)					(mg/kg)	(乾物%)					(mg/kg)				
開発肥料全基区	3.2	1.8	5.3	1.5	0.33	b	26	b	4.1	1.3	6.7	4.3	0.60	b	39	b
高度化成分施肥区	3.5	1.7	5.8	1.2	0.28	ab	16	a	4.4	1.4	7.0	4.1	0.45	ab	21	a
有機化成分施肥区	3.2	1.6	5.2	1.1	0.24	a	14	a	4.2	1.4	7.5	4.0	0.34	a	18	a

注) 表中の異なる英文字は5%水準で各試験区の平均値に有意差あり(Tukeyの多重比較,n=3)  
 数値の右に英文字がない場合は、試験区間に有意差なし

意に高い値を示した(表12, 13). ホウ素含量は, 2017年及び2018年は外葉部で(データ省略), 2019年は結球部及び外葉部で, 開発肥料全基区において高度化成分施肥区及び有機化成分施肥区よりも有意に高い値を示した(表12).

## (2)現地栽培試験

試験期間中の土壌の無機態窒素含量の推移を図6に示した. 開発肥料区は, 2か年とも同様の傾向を示した. すなわち, 基肥施肥後に増加し, 現地慣行区の追肥時期に当たる9月中旬頃に約20~23mg/100gを示した後, 減少し, 10月下旬以降は収穫期まで1mg/100g以下の値で推移した. 現地慣行区と比べると, 9月中旬頃に約3

~4mg/100g程度高く, 10月上旬頃に同等かやや高い傾向を示し, その後は差がなく推移した. 試験圃場に近接する虫明(アメダス地点)の観測値によると, キャベツの生育に影響が大きい定植後2か月間の降水量は, 2016年が409mm(平年対比144%), 2017年が593mm(同209%)であり, 2か年とも平年に比べて降水量が多かった.

定植約1か月後の最大葉長は, 2か年とも試験区間差はみられなかった(データ省略).

全重, 結球重及び結球緊度は, 2か年とも試験区間差はみられなかった(表14). なお, 本作型では年内に収穫時期を迎えるが, 2017年は, 台風による大雨(9~

表13 5年連用時のハクサイの養分吸収量(2019年, 収穫物)

試験区名	結球部(kg/a)					外葉部(kg/a)				
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO
開発肥料全基区	2.4	1.3	4.0	1.1	0.25 b	1.4	0.4	2.3	1.5	0.20 b
高度化成分施肥区	2.3	1.2	3.9	0.8	0.18 a	1.6	0.5	2.5	1.5	0.16 ab
有機化成分施肥区	2.3	1.2	3.8	0.8	0.17 a	1.5	0.5	2.7	1.4	0.12 a

注) 表中の異なる英文字は5%水準で各試験区の平均値に有意差あり(Tukeyの多重比較, n=3)

数値の右に英文字がない場合は, 試験区間に有意差なし

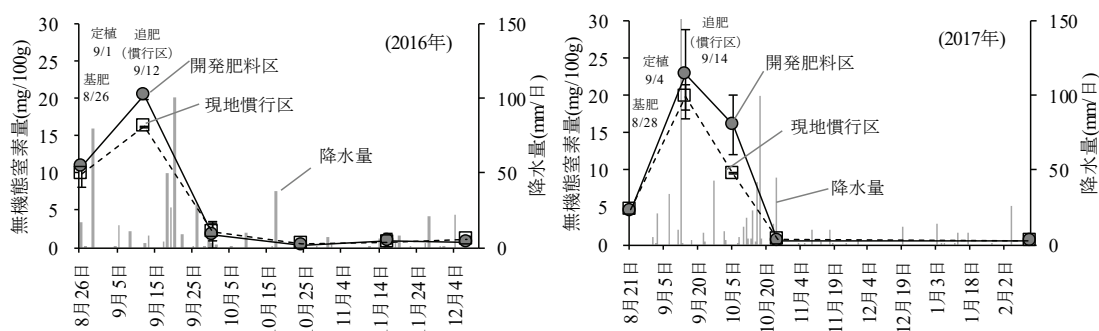


図6 土壌中の無機態窒素含量の推移(現地試験)

注) 測定位置は作土層, 追肥期は慣行区の追肥前の値  
図中の各シンボルに付したエラーバーは標準誤差を示す

表14 キャベツの収量及び結球緊度(現地試験)

試験区名	2016年				2017年			
	全重(kg/株)	結球重(kg/株)	結球収量(kg/a)	結球緊度	全重(kg/株)	結球重(kg/株)	結球収量(kg/a)	結球緊度
開発肥料区	2.63	1.66	890	0.54	1.66	0.96	582	0.52
現地慣行区	2.66	1.68	901	0.52	1.49	0.85	516	0.51
t検定 <sup>z</sup>	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

<sup>z</sup> n.s.は5%水準で試験区間に有意差がないことを示す(n=2)

10月の降水量は平年比約200%)や11～12月の低温(11月中旬～12月中旬の平均気温は平年比-1.9℃)の影響で、収穫時期が大幅に遅れ、低収であった。

3. 開発肥料の施用が土壤に及ぼす影響

(1)5年連用後の土壤の理化学性

各肥料を5年連用した栽培試験終了後の土壤化学性を表15に示した。開発肥料全基区で、高度化成分施肥区及び有機化成分施肥区に比べて、pH, 可給態窒素, 交換性苦土, 熱水可溶性ホウ素が有意に高い値を示し、塩基バランスが改善する傾向を示した。仮比重, 三相分布, 粗孔隙率について、有意な試験区間差はみられなかった(データ省略)。

(2)炭素残存率等の推移

各資材の炭素残存率及び窒素残存率の推移を図7及び図8に示した。資材の違いによって有機物分解速度

に違いがみられ、炭素残存率は、牛ふん堆肥>開発肥料PT>有機化成の順で推移した。開発肥料PTは、埋設3か月後までに含まれる炭素の48%が消失した後は、炭素残存率が緩やかに低下し、埋設1年後には56%、3年後には30%であった。牛ふん堆肥A～Cでは、いずれも他の資材に比べて緩やかに分解が進み、炭素残存率は埋設後漸減し、1年後に60～62%、3年後は32～35%であった。有機化成では、他の資材に比べて分解が顕著に速く、埋設1か月後で炭素の約75%が消失し、その残存率は最も低く、1年後に14%、3年後は8%であった。

牛ふん堆肥の炭素残存率を100とした場合、3年後の開発肥料PTの炭素残存割合は88%、同じく有機化成は26%であった。

窒素残存率は、炭素残存率と同様に牛ふん堆肥>開

表15 5年連用後の土壤化学性(所内試験)

試験区名	pH (H <sub>2</sub> O)	EC (dS/m)	腐植 (%)	可給態 窒素 (mg /100g)	可給態 リン酸 (mg /100g)	CEC (meq /100g)	交換性塩基 (mg/100g)			塩基 バランス		熱水可溶 性ホウ素 (mg/kg)
							石灰	苦土	加里	Ca / Mg	Mg / K	
開発肥料全基区	5.2 b	0.06	2.0	3.0 b	50	9.9	159	17 b	12	6.6a	3.4 b	0.7 b
高度化成分施肥区	4.8 a	0.07	1.9	2.5 a	44	10.2	144	11a	13	9.1 b	2.0a	0.3 a
有機化成分施肥区	4.6 a	0.12	1.7	2.3 a	37	8.8	132	11a	11	8.7ab	2.3a	0.2 a

注)ハクサイ収穫後の2019年12月3日に作土層を採土

表中の異なる英文字は5%水準で各試験区の平均値に有意差あり(Tukeyの多重比較,n=3)

数値の右に英文字がない場合は、試験区間に有意差なし

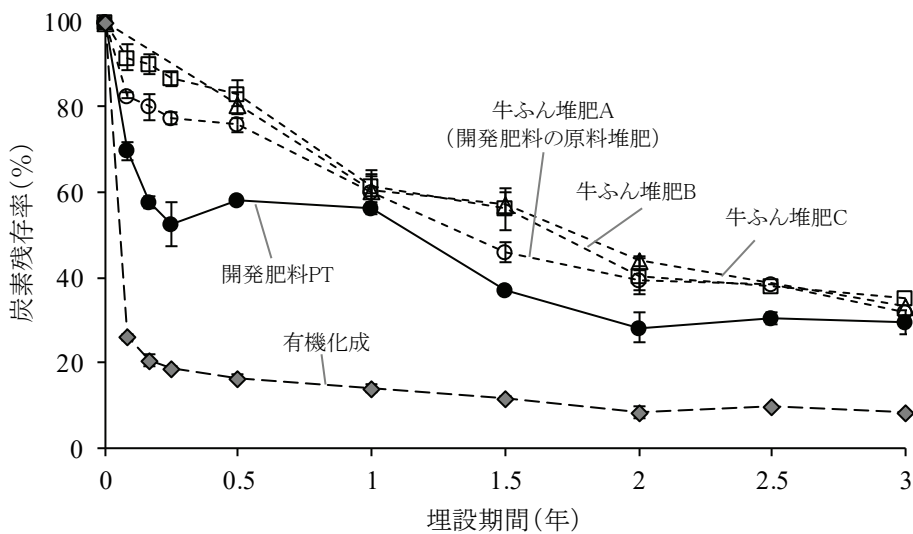


図7 各資材の炭素残存率の推移

注) 図中のエラーバーは標準誤差 (n=3)

発肥料PT>有機化成の順で推移した。開発肥料PTは、埋設3か月後までに窒素の8割程度が消失した後は緩やかに低下し、埋設1年後の残存率は13%、3年後は9%であった。牛ふん堆肥A～Cは、いずれも他の資材に比べて緩やかに分解が進み、1年後の残存率は72～92%、3年後は49～62%であった。また、牛ふん堆肥Aは牛ふん堆肥B及びCに比べて埋設1か月後の残存率が約20%程度低い値を示したが、その後の分解速度は同等かやや遅く、3年後の残存率の差は約10%程度であった。有機化成は、他の資材に比べて分解が顕著に速く、埋設1か月後で窒素の約90%が消失し、残存率は1年後に4%、3年後は2%であった。

## 考 察

### 1. 開発肥料の製造条件及び品質

開発肥料の形状は、概ね設計どおりであり、固結や膨張等の製品率を低下させる現象がみられなかったことから、製造時に配合した尿素による吸湿は発生しなかったと推察された。一般に、牛ふん堆肥は、他の有機質の肥料原料に比べて、含水率が高く、粒子が粗い等の利用上の課題がある（農林水産省委託プロジェクト有機質資材コンソーシアム, 2020）。開発肥料に使用した原料堆肥の含水率は24%程度であり、押し出し造粒法で適正とされる40%以下であった。また、原料堆肥は、出荷前のトロンメル（回転篩）により、そのほとんどが造粒適性が優れるとされる4mm以下の粒度に調整された。製造された開発肥料は、品質基準の目安とされる硬度2kgf以上、嵩比重0.7g/L以上、安息角42

°以下（農林水産省委託プロジェクト有機質資材コンソーシアム, 2020）を満たしており（表7）、機械による施肥作業に問題のない物性を確保できたと判断される。また、造粒歩留率も高い値を示し（表7）、使用した原料や製造条件が適正であったことが示唆された。

肥料の含水率は、保存性に大きく影響する。開発肥料では、目標とした5%以下となり（表7）、その後の長期保存試験において、保存1年後の開封時に、問題となるアンモニア臭は確認されなかった。また、含水率が高いと製品硬度が不足したり、粉化、固結、カビ発生の原因になるが、開発肥料ではこれらの品質低下はみられなかった。

製品のpHも品質を安定させるために重要である。pHが高い場合は、アンモニアガスが揮散し、製造時の窒素成分の減耗だけでなく、保存中や施肥時にも問題となる。開発肥料は、安価なリン酸、加里原料としてアルカリ性原料である鶏ふん燃焼灰を配合しており、製品のpHは8.2であった。適正なpHの目安は3～8（望ましくは5～7）とされており（農林水産省委託プロジェクト有機質資材コンソーシアム, 2020）、開発肥料のpHはこの値よりもやや高い値であったが、前述したように、保存1年後の開封時に問題となるアンモニア臭の発生は確認されず、許容範囲であったと考えられた。

製品の肥料成分含量は設計した保証成分値以上であったことから、造粒・乾燥等の製造工程における減耗がなく、原料設計や製造条件が適正であったことが示唆された。開発肥料の窒素含量は10%であり、野菜栽培指針（岡山県, 2017）におけるキャベツやハクサイ

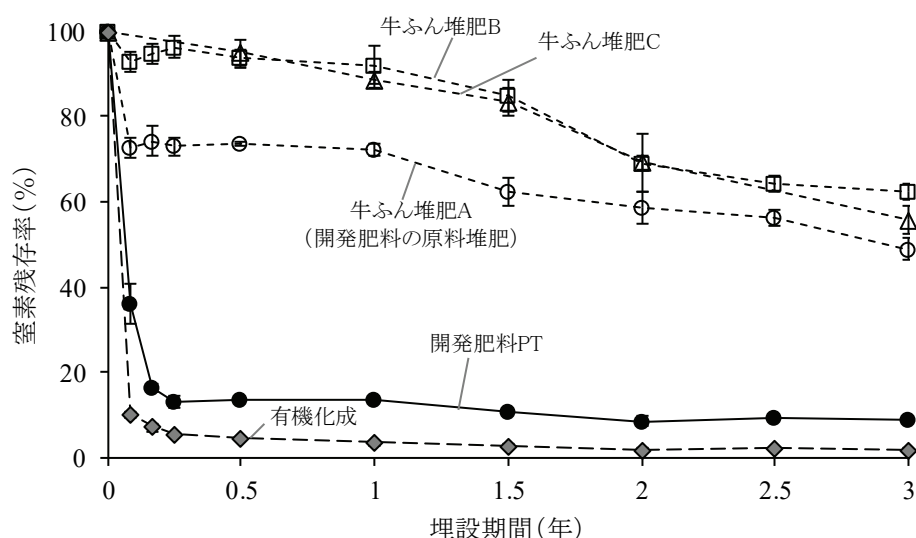


図8 各資材の窒素残存率の推移  
注) 図中のエラーバーは標準誤差 (n=3)

栽培の標準的な窒素施肥量を基に計算すると、開発肥料の現物施肥量は25～28kg/aである。開発肥料は、基肥に全量を施肥するため、高度化成肥料による分施肥栽培に比べて1回の現物施肥量は多いが、前述したように開発肥料の物性は機械施肥に適応しており、ブロードキャスターやライムソワーによる機械散布作業は問題なく行えると考えられた。

開発肥料の肥効の中で特に重要な窒素無機化特性について、瓶培養法により明らかにした。反応速度論的解析による25℃変換日数の5～10日目において、窒素無機化速度が見かけ上やや停滞したが（図3）、この理由は、原料にした速効性の窒素肥料である尿素と緩効性の窒素肥料であるCDUの無機化速度の違いによって、尿素的無機化が概ね終了する日数とCDUの無機化が本格的に始まる日数の若干のズレが影響しているものと考えられた。無機化モデルの決定に当たり、単純型だけでなく単純平行型でも解析を行ったが、推定精度は単純型と同等であり（データ省略）、無機化予測式は単純型で実用上問題はないと考えられた。一方で、加藤ら（2008, 2009）は、堆肥と硫酸を同時に土壤に添加した場合の窒素無機化量を調査し、堆肥に含まれる易分解性炭素含量が多いほど培養初期の有機化量が多いことを明らかにしている。本試験において、窒素無機化率はいずれの温度条件でもマイナスの値を示さず、見かけ上窒素の有機化は認められなかった（図2）。加藤ら（2009）が示している図表から易分解性炭素含量（塩酸可溶性炭素含量）と有機化量との関係を読み取ると、易分解性炭素含量が約13～18%の堆肥を添加した場合、25℃で培養7日目では、添加した硫酸由来の窒素の20～25%程度が有機化している。本調査では易分解性炭素量を測定していないため、ガラス繊維ろ紙埋設試験における埋設1か月後の炭素分解率（図7）を易分解性炭素含量と仮定して、有機化の可能性について検討した。本研究では堆肥と肥料を混合して造粒した肥料を用いているため、堆肥と硫酸をそれぞれ添加した加藤ら（2008, 2009）の報告と単純に比較できないが、原料堆肥（牛ふん堆肥A）の1か月後の炭素分解率は約20%であったことから、培養初期の有機化に影響を及ぼす易分解性炭素量を含んでいる可能性が高い。一方で、加藤ら（2009）は、堆肥及び肥料由来のC/N比が20を下回った場合は、培養28日目頃になると堆肥からの窒素無機化が促進されることも明らかにしており、開発肥料のC/N比は約3であることから、堆肥からの無機化が促進された可能性が示唆される。以上から、開発肥料を土壤に添加すると、極初期には窒素

の有機化が起こる可能性があるものの、培養法による窒素無機化率（図2）やガラス繊維ろ紙埋設試験による窒素残存率（図8）をみると見かけ上の有機化は確認されないことから、作物の栽培において有機化の影響は実用上無視できると考えられた。

開発肥料の窒素無機化特性は、温度依存性が認められ（図2）、また、25℃条件下では積算窒素無機化率が80%に達するまでに約50日を要した（図3）ことから、窒素無機化速度は緩効的であると判断される。開発肥料の窒素全量に占める各原料の構成割合を各原料の窒素含量と配合割合から推定すると、その内訳は堆肥由来の窒素成分が11.5%、CDUが64.9%、尿素が22.6%、米ぬかが1.0%であった。窒素全量の64.9%を占めるCDUの肥効期間は30～60日とされている（ジェイカムアグリ株式会社, 2023）こと及び他の原料の構成割合と窒素無機化特性から推察すると、開発肥料の窒素無機化特性は、主にCDUの窒素無機化特性に由来する部分が大きいのと考えられた。反応速度論的解析により算出される最大無機化率は、87%であった（表8）。無機化特性値の1つである見かけの活性化エネルギーは、無機化速度に及ぼす温度の影響の強さを示す指標である（杉原ら, 1986）。開発肥料の見かけの活性化エネルギーは12,338cal/molであり、地温が低下する時期に窒素の溶出が抑制されやすいとされる被覆尿素（赤井・久山, 2002）のうち、岡山県土壌施肥管理システム（石橋, 2005）に登録されているリニア溶出型被覆尿素的の平均値約17,000cal/molに比べて低いことから、秋から冬にかけて栽培される年内どり作型では、開発肥料は被覆尿素に比べて窒素肥効が発現しやすいと考えられた。

窒素無機化特性値と生産現地の地温を基にして、開

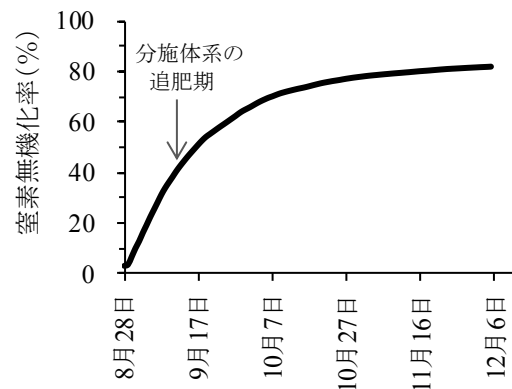


図9 開発肥料の窒素無機化パターン  
注) 現地試験（2016年）の地温を基に、8月下旬に施肥した場合を推定した

発肥料の窒素無機化パターンを推定した(図9)。生産現地での追肥作業は、中耕除草を兼ねて、外葉が管理機のロータリに巻き込まれないように定植約2週間後頃に実施される。このことから、分施肥体系による追肥時期を定植約2週間後とした場合、開発肥料の基肥施用は、分施肥体系の追肥時期までに施肥窒素の約40%、追肥時期以降に同じく約40%が無機化すると推定され、追肥時期以降に分施肥体系における追肥窒素量と同等の窒素肥効が期待できると考えられた。開発肥料の窒素無機化特性が明らかになったことで、年内どり作型のキャベツ栽培における施肥設計や他作型、他作物に対する利用の可否判断に活用できる。

## 2. 開発肥料の基肥施用がキャベツ、ハクサイの生育並びに収量等に及ぼす影響

開発肥料の全量基肥施肥による年内どりのキャベツ及びハクサイ栽培は、高度化成や有機化成肥料による分施肥栽培と同等の生育、収量を示した(表9, 10, 11, 14)。また、キャベツでは結球の締まり具合を示す結球緊度も同様に分施肥栽培と同等であった(表10, 14)。興津・本田(1982)は、ハクサイとキャベツにおいて、生育期間中の土壌中の無機態窒素含量と収量との関係性を検討した結果、年次変動はあるものの、正の相関関係があることを報告している。また、キャベツは、外葉の生長期に養分吸収の増加量が著しいため、生育初期から肥切れを起こさせないように肥培管理することが重要とされている(塚田, 1985)。本研究において、開発肥料を基肥に施肥した区では、土壌の無機態窒素含量が生育期間を通じて分施肥栽培と同等以上で維持されたことが、生育や結球収量が同等となった大きな要因と考えられた。

窒素利用率と降水量との関係性について、キャベツ及びハクサイの所内試験における各年の各試験区の結果を利用し、定植後1か月間、定植後2か月間及び全生育期間の降水量と窒素利用率との相関分析を行ったところ、相関係数はそれぞれ-0.344 ( $p=0.206$ ), -0.858 ( $p<0.001$ ), -0.662 ( $p<0.01$ )であった。年内どり作型では、定植時期や気象条件により異なるものの、定植2か月後は概ね結球開始期頃に当たる。これまで一般に言われているように、キャベツ、ハクサイでは生育初期～結球開始期頃までの窒素肥効の確保が重要と考えられた。

各試験年次の定植後2か月間の降水量と窒素利用率との関係をみたところ、試験区に関係なく、キャベツ、ハクサイともに、降水量が多いほど窒素利用率は低い値を示した(図10)。降水量が多い年次の窒素利用率

は、緩効的な窒素肥効を示す開発肥料においても分施肥栽培と同様に低下することが示唆され、実際に、極端な多雨条件であった2017年の現地試験の収量は低水準であった。

開発肥料の窒素無機化特性値と地温を基に試算される栽培期間中の窒素無機化率は施肥窒素量の約8～9割程度である(表8, 図9)。しかし、開発肥料を用いて全量基肥施肥栽培したキャベツ、ハクサイの施肥窒素利用率は総窒素施肥量を同一にして栽培した高度化成肥料や有機化成肥料の分施肥栽培と同等であった。このことは、無機化した窒素量をベースにした開発肥料の実質的な窒素利用率は、高度化成肥料の分施肥体系よりも高いことを示唆している。実際に、栽培期間中の開発肥料からの推定窒素無機化量を基に窒素利用率を試算したところ、高度化成の分施肥栽培に比べて約10%程度高い値を示した(データ省略)。肥料原料にCDUを使用していることに加えて、ペレット状に造粒された肥料の内部は施肥後に還元的になり硝酸化成が遅延するため、降雨による硝酸態窒素の流亡が減少し、窒素利用率が向上すると言われており(農林水産省委託プロジェクト有機質資材コンソーシアム, 2020)、これらにより実質的な窒素利用率が向上したと考えられた。

安原・猪居(1970)は、CDUの分解速度は主に微生物作用により律速され、CDUの施用は土壌微生物を増加させ、CDUの連用によって無機化速度が促進されることを室内試験によって明らかにしている。本研究では、圃場試験において、CDUを原料に配合した開発肥料を5年間連用したが、試験期間中の土壌中の無機態窒素含量の推移からは、無機化が促進される現象は確認されなかった。

赤井・久山(2002)は、10月上～中旬に定植し翌年

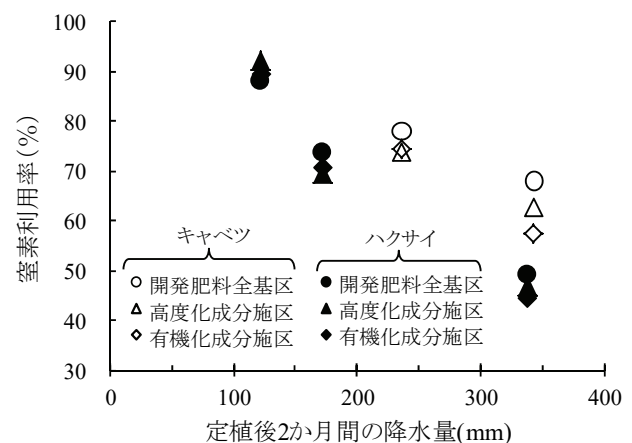


図10 定植後2か月間の降水量がキャベツ、ハクサイの施肥窒素利用率に及ぼす影響

の1～3月にかけて収穫を行うハクサイの秋冬作栽培において被覆尿素有の施用を検討し、地温が低下する時期の作型では窒素の溶出が抑制されるため、被覆尿素有の施用は適していないことを指摘している。本研究で対象とした作型は9月定植年内どりの作型であるため、単純に比較できないが、窒素無機化特性の観点からみても温度依存性の低いCDUがより適していると考えられた。

開発肥料はリン酸含量が少ない肥料である。このため、開発肥料によるリン酸施肥量は、対照とした高度化成肥料や有機化成肥料によるリン酸施肥量に比べて約6～7割程度減肥した栽培であったが、キャベツ、ハクサイのリン酸含量やリン酸吸収量は対照と比べて低下しなかった。県内の非黒ボク土壌における夏まきキャベツ栽培では、可給態リン酸含量が75mg/100gを超えるとリン酸は施肥しなくても減収せず、20mg/100gを下回ると減収する場合がある（鷺尾・荒木，2013）。また、ハクサイでは、他県の基準になるが、非黒ボク土壌では可給態リン酸含量が40あるいは50mg/100g以上でリン酸無施肥栽培が可能であるとされる（望月ら，2013；岩手県農林水産部農業技術普及課，2022）。試験圃場の可給態リン酸含量は、所内圃場で約50mg/100g、現地圃場では約300mg/100gであったため、リン酸を減肥した影響がみられなかったと考えられた。荒川（2012）は、本研究と同じ5mm径の堆肥ペレットを試験し、ペレット成形により、堆肥原体に比べてリン酸利用率が向上することを明らかにしている。ペレット成形により肥料のリン酸成分と土壌との接触が減り、土壌によるリン酸固定が抑制されることが考えられ（農林水産省委託プロジェクト有機質資材コンソーシアム，2020）、開発肥料においても同様の効果が期待される。

結球性葉菜類は、一般に、石灰やホウ素の要求量が大きい（塚田，1985）。開発肥料は、保証成分としてホウ素を含有しているとともに、原料の家畜ふん堆肥や鶏ふん焼却灰由来の石灰を4%程度含有している。所内試験では、開発肥料の施用によってハクサイのホウ素含量が有意に高まっており（表12）、ホウ素欠乏症が発生しやすい圃場では施用効果が期待できる。一方、キャベツ、ハクサイの石灰含量は対照とした高度化成肥料や有機化成肥料による栽培との差はみられなかったが、土壌への影響がみられ、連用5年後の土壌pHがこれらの2試験区よりも高い値を示した（表15）。開発肥料に含まれる石灰含量は、炭カルや苦土石灰等の石灰質肥料に比べてわずかであるため、過度な期待はで

きないものの連用することで一定のpH矯正効果があると考えられた。

開発肥料によるキャベツの収量性をみると、所内及び現地試験の2か年4事例において、結球収量が582～927kg/aであり、夏まきキャベツの経営指標（岡山県農林水産部，2021）の500kg/aを上回った。また、ハクサイは、所内試験の3か年3事例において、結球収量は1,169～1,660kg/aであり、夏まきハクサイの経営指標（岡山県農林水産部，2021）の900kg/aを上回った。また、1玉当たりの結球重は、多雨と低温の影響を受けたキャベツの1事例でやや軽かったものの、いずれもおおむね可販重量に達していた。

以上から、開発肥料は、年内どり作型のキャベツ、ハクサイの全量基肥栽培に用いる肥料として適しており、収量も分施肥体系の慣行栽培並みに確保できると判断された。

### 3. 開発肥料の施用が土壌に及ぼす影響

開発肥料には、地力低下対策として有機物供給効果をねらい、公定規格の上限である5割程度の割合で牛ふん主体の堆肥を配合している。ここでは、ガラス繊維ろ紙埋設試験結果を基に、開発肥料の有機物供給効果（炭素貯留効果）を推定する。資材の炭素残存率が高いほど有機物供給効果が大きい（炭素貯留効果が大きい）とみなした。ガラス繊維ろ紙法はロータリー等の耕耘による影響を考慮できないが、土壌と資材を混和して圃場条件で埋設しており、実際の栽培条件下に近い結果を示しているものと考えられる。

まず、各資材の炭素残存率の推移（図7）をみると、埋設から3か月後頃までの炭素分解速度は、開発肥料と牛ふん堆肥で大きく異なっていた。原料堆肥及び米ぬかの炭素含量、尿素及びCDUの分子量から計算される炭素含量（理論値）を基に各原料由来の炭素含量の構成割合を算出すると、原料堆肥が56%、米ぬかが4%、尿素が4%、CDUが36%である。CDUの分解は複雑である（越野，2006）が、窒素肥効期間が30～60日とされている（ジェイカムアグリ株式会社，2023）ことや米ぬか及び尿素は比較的速やかに分解すると考えられることから、埋設3か月後までにはこれらの原料由来の炭素成分は概ね消失したと推察される。また、家畜ふん堆肥は成形によって分解が緩やかになる（原，1999）ことから、開発肥料に含まれる堆肥の炭素が原料堆肥（牛ふん堆肥A）の埋設3か月後の残存率約8割よりもやや多い8～9割程度残存したと仮定すると、開発肥料の埋設3か月後の炭素残存率は約45～50%と試算され、実測した炭素残存率の52%と近似している。また、開

発肥料の埋設3か月後以降の炭素分解速度は、原料堆肥(牛ふん堆肥A)と同様に緩やかであった。以上から、開発肥料に含まれる炭素は、土壤に施用されてから比較的早い時期に原料の米ぬか、尿素、CDUに含まれるものが消失し、次いで堆肥が長期間にわたり緩やかに消失していくと推察された。

3年後の炭素残存率は、開発肥料が30%、原料堆肥が32%であった(図7)。前記同様に堆肥以外の原料が比較的早い時期に全て分解すると仮定した場合、3年後に残存する炭素は全て堆肥由来のものと考えられる。開発肥料の炭素含量に占める堆肥由来の炭素含量割合は56%(前述)であることから、開発肥料に含まれる堆肥由来の炭素は53%(開発肥料の炭素残率30%÷堆肥由来の炭素含量割合56%)が残存していたことになり、堆肥を単独で施用した場合よりも20ポイント程度高い値を示した。家畜ふん堆肥の炭素残存率に対するペレット成形の影響を長期間調査した事例はほとんどなく、Kubotera et al. (2016) が図示している18か月の調査事例から読み取ると、ペレット成形した牛ふん堆肥の炭素残存率は未成形の堆肥に比べて6か月後以降において約5%前後高く推移している。ペレット堆肥の分解は、その形状や硬度、成形条件等によって影響を受けるが、一般的にペレット堆肥は畑土壌中では形状の崩壊が少ないため、ペレット内部が嫌氣的に保たれ有機物の分解が緩やかであることから(原ら, 2003)、開発肥料では造粒効果によって配合した堆肥の炭素残存率が高まった可能性が示唆された。また、牛ふん堆肥単独の炭素残存率は、堆肥の種類に関わらず大きな差はなかったが(図7)、これは、C/N比がいずれも約15~17で同等であったこと、もみ殻等の副資材の分解速度に大きな差がなかったことが示唆され、C/N比が高い堆肥や副資材におがくずを使用した牛ふん堆肥では傾向が異なった可能性が考えられた。

上記のように開発肥料は埋設後3か月程度とそれ以降では炭素分解速度が異なり、様々な原料を配合した混合堆肥複合肥料の炭素分解パターンは配合した原料による影響が大きいことが明らかになった。このため、数年単位の試験結果を用いて有機物供給効果を評価する必要があると考えられた。

本研究では、試験開始から長期間経過し炭素分解速度が安定した埋設3年後の各資材の炭素残存率を基にして、開発肥料の有機物供給効果を試算した。前述したように、牛ふん堆肥の炭素残存率を100とした場合、3年後の開発肥料の炭素残存割合は88%であった。この値と開発肥料の炭素含量及び県内の平均的な牛ふん堆

肥の炭素含量(岡山県農林水産部, 2014)を基にして、開発肥料の有機物供給効果(炭素貯留効果)を試算し、図11に示した。また、同様に有機化成肥料についても試算した。その結果、開発肥料をキャベツ、ハクサイ栽培に施用する場合、牛ふん堆肥を約30~35kg/a施用したことに相当する有機物供給効果があるとみられた(例えば、開発肥料の施肥量が25kg/aの場合を試算すると、開発肥料の炭素含量が29.5%、牛ふん堆肥の炭素含量の平均値が21.2%、開発肥料の牛ふん堆肥に対する炭素残存割合が88%であることから、 $25 \times 0.295 \div 0.212 \times 0.88 \approx 30\text{kg/a}$ となる)。開発肥料の標準的な施用量である25~28kg/aを上回った理由は、含水率と炭素貯留効果の違いによるものである。つまり、平均的な牛ふん堆肥は含水率が約50%であるのに対して開発肥料は約5%であり、重量ベースで考えると、開発肥料は有機物を効率的に供給できること、加えてペレット成形によって堆肥の炭素貯留効果が向上したことによる。この有機物供給効果は、堆肥の標準的な施用量と比べると少ない量であるが、有機化成肥料や高度化成肥料にはない効果である。

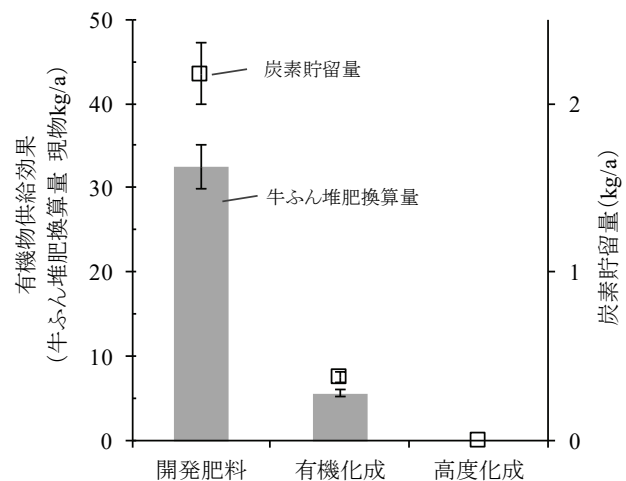


図11 各肥料の有機物供給効果

注) 有機物供給効果及び炭素貯留量は、窒素施用量が2.5kg/a及び2.8kg/aの試算値の平均値を示した。炭素貯留量は、施用3年後の炭素残存率から求めた図中のエラーバーは標準偏差を表す。牛ふん堆肥を100とした炭素残存割合は、開発肥料が88、有機化成が26、高度化成が0と仮定した。牛ふん堆肥は、県内の平均値(炭素含量は21.2現物%、C/N比は19.3、含水率は51%)を用いた。<有機物供給効果の計算例> 開発肥料の施肥量が25kg/aの場合；開発肥料の炭素含量が29.5%、牛ふん堆肥の炭素含量の平均値が21.2%、開発肥料の牛ふん堆肥に対する炭素残存割合が88%であることから、 $25 \times 0.295 \div 0.212 \times 0.88 \approx 30\text{kg/a}$



次に、開発肥料連用後の土壤理化学性調査結果（表15）から、土壤に及ぼす影響を考察する。開発肥料を5年連用した土壤の可給態窒素含量が、高度化成肥料や有機化成肥料を連用した土壤に比べて高かった理由は、開発肥料の窒素残存率が両肥料よりも高いことに起因するのではないかと考えられた。つまり、ガラス繊維ろ紙埋設試験による埋設1年後の窒素残存率（図8）は、開発肥料（開発肥料PT）が13%、有機化成肥料が4%であり、高度化成肥料由来の窒素は1年で全て消失すると仮定すると、開発肥料は両肥料よりも窒素残存率が高い。また、開発肥料に含まれる原料堆肥（牛ふん堆肥A）の窒素分解速度が緩やかであるため、開発肥料は埋設3年後においても有機化成肥料より高い残存率を示している。以上から、開発肥料を連用すると、未分解の有機態窒素が少しずつではあるが土壤に蓄積していくため、可給態窒素含量の差となって現れたのではないかと考えられた。

交換性石灰及び苦土、熱水可溶性ホウ素において開発肥料による連用効果が認められたが、これらの成分は開発肥料だけに含まれるため、当然の結果と言える。生産現場では、年次によって、キャベツやハクサイで苦土やホウ素の欠症が発生している。開発肥料の施用によって植物体中のこれらの濃度が高まったことから（表12, 13）、これらの欠乏症が発生する圃場では開発肥料の施用が有効な対策として期待できる。また、酸度矯正のため石灰の施用が必要な圃場では、開発肥料の施用がpH維持の補助的な手段となる可能性が示唆された。さらに、土壤の塩基バランスが改善される傾向を示したことから、開発肥料はリン酸成分が少なく土壤中の可給態リン酸含量を高めないことから、土壤の養分バランスを改善できることも期待される。前記において、牛ふん堆肥30～35kg/a相当量の有機物供給効果が試算されたが、4.総合考察でも指摘するように、一般的な200kg/a程度の堆肥の施用を行ったときに比べて少ないために、連用5年では腐植含量を有意に増加させることはできず、土壤の物理性も肥料による差は認められなかった。土壤物理性については、畝内部分施肥等の局所的な施用によって根域の物理性が改善できる可能性があり、今後の検討が必要である。また、生産現場では夏作に冬瓜等の栽培を行っているため、輪作体系の中でも有機物供給対策を検討していく必要があると考えられた。

#### 4. 総合考察

本研究では、キャベツの生産現場で課題となっている土壤改良と施肥改善対策として、2012年に公定規格

に新設された「混合堆肥複合肥料」を開発し、肥料特性や施用効果等について検討した。

これまで、家畜ふん堆肥と普通肥料は混合して製品化することはできず、別々に散布しなければならなかった。このため、生産現場では、家畜ふん堆肥の散布労力が確保できないことにより有機物施用量が減少する一方で、過去に施用された家畜ふん堆肥に含まれる肥料成分や土壤実態に合わない施肥により土壤化学性が悪化している。また、近年では化学肥料の高騰により、肥料コストを削減できる施肥技術の導入が求められている。これまで家畜ふん堆肥の肥効評価について多くの研究が行われてきたが、混合堆肥複合肥料は、加藤（2018）が述べているように、堆肥中成分の有効利用に関するこれまでの土壤肥料研究の成果が集大成されたものと考えられ、混合堆肥複合肥料の普及によって生産現場の土壤肥料的課題の幾つかが解決できるものと期待される。また、農林水産省が先般策定したみどりの食料システム戦略（農林水産省, 2021）では、2050年までに輸入原料や化石燃料を原料とした化学肥料の使用量の30%低減を目指し、堆肥等の地域資源の最大活用を図ることとしている。混合堆肥複合肥料に係る研究課題としては、(1)原料堆肥の物性と造粒性や成形性の関係、(2)窒素無機化特性及び有機物の貯留効果や連用効果、(3)コストメリットの定量化等が挙げられており（加藤ら, 2017）、総合考察では、本研究の結果や他の事例を踏まえてこれらの課題について考察したい。

##### (1) 原料堆肥の物性と造粒性や成形性の関係

本研究では、有機物供給効果をねらうため、家畜ふん堆肥の中で最も分解しにくいと考えられる牛ふん堆肥を原料として、研究開始時に公定規格の上限であった5割程度を配合し、肥料メーカーの協力により実規模での製造を検討した。一般に牛ふん堆肥は粒径が粗く含水率が高いため、造粒・成形しにくい原料とされているが、原料に使用した牛ふん堆肥は含水率が約24%と適正であったこと、堆肥センターからの出荷前に篩により4mm以下に粒度調整してあったことから、良好なペレット成形が行えた。造粒が難しいと言われる牛ふん堆肥の成形に成功したことは、有機物供給効果が期待できる肥料開発を進めていく上で大変意義が大きいと考えられる。

##### (2) 窒素無機化特性及び有機物の貯留効果や連用効果

混合堆肥複合肥料は、三要素を含む肥料であるため、施用によって対象作物を安定的に生産するためには、窒素肥効を明らかにした上で利用することが不可

欠である。開発肥料の窒素無機化特性は、瓶培養法によって明らかにでき、圃場試験における土壤中の無機態窒素含量は、分施体系と同等以上の値で推移したことから、長期的な窒素肥効が確保できるものと考えられた。これは緩効性窒素肥料であるCDUを配合した効果であり、造粒過程での変質がなかったものと考えられた。夏まき年内どり作型のキャベツ、ハクサイ栽培では、開発肥料を基肥に1回施肥することで収量性に問題はなく、全量基肥用の肥料として適用できると考えられた。これまで、緩効性窒素肥料を配合した混合堆肥複合肥料は製品化されていなかったため、家畜ふん堆肥を含み窒素肥効を調節した肥料を開発できることが明らかになった点で意義が大きいと考えられた。

開発肥料に含まれる堆肥の炭素貯留効量（有機物供給量）は、未成形の原料堆肥の炭素貯留量に比べて高い値を示すことが示唆された。混合堆肥複合肥料の炭素貯留量は配合する家畜ふん堆肥の畜種や配合割合、副資材や成形方法等の影響が考えられるため、今回開発した肥料による炭素貯留量への効果が全ての混合堆肥複合肥料に当てはまるとは言えず、1事例として評価する必要があるが、ローラーリング・ダイ方式で造粒した混合堆肥複合肥料の造粒効果と考えられた。開発肥料をキャベツ、ハクサイ栽培で利用する場合の有機物供給量は、牛ふん堆肥換算で約30～35kg/aと推定され、開発肥料の標準的な現物施用量である25～28kg/aを上回った。このように有機物供給効率が高いことは混合堆肥複合肥料の大きなメリットであると考えられる。一方で、農水省委託プロジェクト研究の事例では、混合堆肥複合肥料の施用量は、1回当たり20～30kg/a、多くとも40kg/a程度であること（農林水産省委託プロジェクト有機質資材コンソーシアム、2020）、当時の公定規格では堆肥の混合割合が乾物で5割以下であることから、堆肥の一般的な施用量（野菜栽培指針（岡山県、2017）では200kg/a）に比べてかなり少ない。多量に施用すれば有機物が多く供給できるが、肥料成分が過剰になったり、散布労力の問題も生じるために容易ではなく、現状では有機物補給の補助的手段としての域を出ないと判断される。この点については、本研究終了後の2021年に、「混合堆肥複合肥料」に配合できる家畜ふん堆肥の混合割合の上限及び原料堆肥のC/N比の上限が撤廃されたことから、堆肥の混合割合を高めた製品での検討が期待される。

開発肥料の連用によって可給態窒素含量が増加し、塩基バランスが改善される等、肥料設計時のねらいに合致した連用効果が確認された。混合堆肥複合肥料は

家畜ふん堆肥に含まれる肥料成分を勘案して成分設計ができるため、有機物由来成分である可給態窒素、腐植以外の土壌養分は、目的に応じた原料設計を行い、その肥料を連用することによりある程度の調整が可能であると考えられた。混合堆肥複合肥料の施用により残存する有機物由来の窒素成分は多くないが、連用によって徐々に可給態窒素含量が増加していくと考えられた。2020年に施行された肥料法に規定される「指定混合肥料」では、混合堆肥複合肥料での堆肥品質規格が水分以外撤廃され、さらに通常の特種肥料から政令指定土壌改良資材までの混合、造粒が可能となり、極めて自由度の高い配合設計が可能となったことから、さらに新たな施用体系への展開が期待されている（浅野、2022）。

### (3)コストメリットの定量化

化学肥料の原料はそのほとんどを海外からの輸入に頼っており、その価格は国際情勢の影響を受け高騰する傾向にあるため（農林水産省、2023）、農業経営への影響を緩和できる肥料の開発が求められている。混合堆肥複合肥料は、国内資源である家畜ふん堆肥を原料として活用することで化学肥料の使用量を削減でき、コストの低減が期待できる。本報告では、施肥作業の省力化を含めた施肥コストに関する記述は省略したが、開発肥料の施肥コストを試算すると、キャベツの栽培指針や経営指標に基づく慣行施肥（堆肥+土づくり肥料+高度化成）と比べて約15%程度のコスト低減効果がみられた（森次ら、2020）。また、混合堆肥複合肥料の施肥コスト低減効果については、有機化成肥料と比べて10～30%程度のコスト削減効果が期待されているが（小宮山・辻、2013）、農水省委託プロジェクト研究の事例（農林水産省委託プロジェクト有機質資材コンソーシアム、2020）では、必ずしも慣行施肥と比べてコストが減っている事例ばかりではなく、慣行施肥が高度化成のみの場合はコストが増加している事例もある。施肥コスト低減効果については、昨今の肥料価格の変動による影響が大きいこと、生産者によって現行の施肥コストやニーズが異なることから、一律にコスト低減効果を評価することは乱暴であり、生産者は各々でコスト評価を行うだけでなく製品の特長をよく把握した上で利用を判断することが必要と考えられる。例えば、開発肥料はペレット状に成形されているため、ハンドリングが良く機械施肥も可能であること、牛ふん堆肥を同重量施用した以上の有機物供給効果が期待できること、追肥が不要であるとともに、同時に苦土やホウ素も施用でき土壌養分バランスの改善につ

ながることなど多様な特長を持つ。このように、混合堆肥複合肥料は、肥料コストだけでは評価できない効果を有していると考えられる。

## 摘要

県内のキャベツ及びハクサイ産地の土壌改良や施肥改善対策を目的とし、有機物供給効果の高い牛ふん堆肥と緩効性窒素肥料や微量要素等を配合したペレット状の混合堆肥複合肥料を開発し、その品質と窒素無機化特性及び有機物供給効果を検討した。さらに、本肥料を夏まき年内どり作型で全量基肥施用した時のキャベツ、ハクサイの生育、収量等や連用による土壌改良効果について検討した。結果は以下のとおりである。

1. 含水率が24%程度、粒度がおおむね4mm以下の牛ふん堆肥を乾物ベースで約5割程度配合した混合堆肥複合肥料は、ローラーリング・ダイ方式でペレット状に成形でき、機械施肥が可能な物性を示した。また、製品の含水率は5%であり、肥料の吸湿や固結、膨張もみられなかった。
2. 主な窒素源としてCDUと尿素を配合した結果、窒素無機化特性から施肥窒素量の8割が無機化するまでの日数は約50日程度と推定され、緩効的な窒素肥効を示した。また、圃場条件における無機態窒素含量の推移から、基肥施肥によって慣行の分施肥栽培と同等以上の窒素肥効が確保できることが明らかとなった。
3. 開発した混合堆肥複合肥料を全量基肥施用し、追肥を省略してキャベツ及びハクサイを栽培したところ、高度化成や有機化成の分施肥栽培と同等の収量、品質を示した。
4. 開発した混合堆肥複合肥料の有機物供給効果を牛ふん堆肥施用量に換算すると、キャベツ及びハクサイ栽培で、一般的な施肥窒素量である2.5～2.8kg/aが投入される量を施用した場合、約30～35kg/a相当量であった。また、ローラーリング・ダイ方式で造粒した混合堆肥複合肥料に含まれる牛ふん堆肥の炭素貯留効果は、未成形の牛ふん堆肥よりも高いことが示唆された。
5. 混合堆肥複合肥料を5年連用した土壌では、高度化成や有機化成を連用した土壌に比べて、可給態窒素含量が増加した。混合堆肥複合肥料に含まれる未分解の残存窒素が連用によって徐々に蓄積し、発現することが示唆された。また、混合堆肥複合肥料に配合した肥料原料由来の成分の土壌中の増加や塩基バランスの改善傾向、生産現場で欠乏症が発生する養分含量の作物中の増加が認められた。混合堆肥複合肥料は、土壌実

態に応じた原料設計を行うことで、家畜ふん堆肥を施用しつつ土壌化学性を改善できる肥料としての有効性が示された。

## 引用文献

- 赤井直彦・久山弘巳（2002）秋冬作ハクサイ栽培への被覆尿素利用の可能性。岡山農試研報。20: 35-40.
- 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.
- 浅野智孝（2022）肥料制度見直しによる堆肥等の国内資源の粒状加工による利用拡大。肥料科学。44: 21-56.
- 土壌環境分析法編集委員会（1997）土壌環境分析法。博友社、東京、pp.120-123.
- 原正之（1999）成型家畜ふん堆肥（ペレット堆肥）。農業技術体系 畜産編。第8巻。農文協、東京、pp.181の14-19.
- 原正之・石川裕一・小畑仁（2003）豚ふん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.
- 肥料等試験法（2015）独立行政法人農林水産消費安全技術センター
- 石橋英二（2005）土壌施肥管理システムの開発。岡山農試研報。23: 33-41.
- 岩手県農林水産部農業技術普及課（2022）岩手県肥料コスト低減技術マニュアル。https://www.pref.iwate.jp/\_res/projects/default\_project/\_page\_/001/049/686/hiryokoutoumanyuaru0406.pdf（2023.7検索）
- ジェイカムアグリ株式会社（2023）https://www.jcam-agri.co.jp/product/cdu.html。（2023.7検索）
- 加藤雅彦・荒川祐介・見城貴志・小宮山鉄兵・森次真一・棚橋寿彦・上野秀人・西田瑞彦（2017）混合堆肥複合肥料の開発とこれから。土肥誌。88: 272-276.
- 加藤雅彦・林康人・森國博全（2009）15Nラベル硫酸と豚糞・鶏糞堆肥との併用が堆肥窒素の無機化に及ぼす影響。土肥誌。80: 152-156.
- 加藤雅彦・林康人・田中福代・森國博全（2008）畑条件下での重窒素ラベル硫酸と各種牛糞堆肥の併用下における由来別無機態窒素の増減要因の解析。土肥誌。79: 163-171.
- 加藤直人（2018）資源循環型農業のための家畜ふん堆肥中肥料成分の有効利用。肥料化学。40: 1～27.
- 小宮山鉄平・辻あゆみ（2013）混合堆肥複合肥料の開発～堆肥と普通肥料を混合した安価な有機複合肥料～。グリーンレポート。531: 10-11.

- 越野正義 (2006) 緩効性窒素肥料, 肥料の事典, 朝倉書店, 東京, pp.134-140.
- Kubotera, H., Yamane, T., Wakiyama, Y. and Arakawa, Y. (2016) Long-term temporal changes in micromorphology of cattle manure compost pellets mixed with soils. 土壌の物理性. 134: 5-13.
- 水木剛 (2018) 夏まきキャベツ向けの混合堆肥複合肥料の開発. 畜産技術. 760: 11-16.
- 水木剛・白石誠・森次真一・鷺尾建紀 (2016) 新規格肥料「混合堆肥複合肥料」の製造技術の検討 (第3報). 岡山畜研報. 6: 11-17.
- 望月久美子・長坂克彦・山崎修平 (2013) リン酸過剰圃場におけるスイートコーン・葉根菜類の適正リン酸施用量と減肥可能期間. 山梨県総合農業技術センター成果情報.
- 森次真一・鷺尾建紀・大家理哉・鳥家あさ美・上田直國・水木剛・白石誠 (2020) キャベツ, ハクサイ栽培に利用できる堆肥入りの混合堆肥複合肥料を開発. 岡山県農林水産総合センター農業研究所令和元年度試験研究主要成果. pp.36-37.
- 森次真一・鷺尾建紀・鳥家あさ美・大家理哉・藤原宏子・水木剛 (2016) 混合堆肥複合肥料の窒素肥効パターンとその推定方法. 岡山県農林水産総合センター農業研究所平成27年度試験研究主要成果. pp.1-2.
- 日本土壌協会 (2001) 土壌機能モニタリング調査のための土壌, 水質及び植物体分析法. 日本土壌協会, 東京, 322p.
- 農林水産省 (2021) みどりの食料システム戦略. <https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/midori/attach/pdf/index-10.pdf> (2023.7検索)
- 農林水産省 (2023) 肥料をめぐる情勢. [https://www.maff.go.jp/j/seisan/sien/sizai/s\\_hiryu/attach/pdf/index-6.pdf](https://www.maff.go.jp/j/seisan/sien/sizai/s_hiryu/attach/pdf/index-6.pdf). (2023.7検索)
- 農林水産省委託プロジェクト有機質資材コンソーシアム (2020) 混合堆肥複合肥料の製造とその利用～家畜ふん堆肥の肥料原料化の促進～. [https://www.naro.go.jp/publicity\\_report/publication/files/kongotaihi\\_manual.pdf](https://www.naro.go.jp/publicity_report/publication/files/kongotaihi_manual.pdf). (2023.7検索)
- 岡山県 (2017) 野菜栽培指針.
- 岡山県農林水産部 (2014) 家畜ふん堆肥適正施用の手引き. pp.65.
- 岡山県農林水産部 (2021) 令和2年度農業経営指導指標.
- 岡山県農林水産総合センター農業研究所 (2015) 土壌機能実態モニタリング調査. 平成26年度農業研究所試験研究成績書. 環境研究室野菜部門: 89-92.
- 興津伸二・本多藤雄 (1982) 溶脱問題を中心とした露地野菜の施肥の合理化に関する研究: II 結球性葉菜に対する緩効性窒素並びに窒素液肥の施用上の問題について. 野菜試報. C6: 51-72.
- 杉原進・金野隆光・石井和夫 (1986) 土壌中における有機態窒素無機化の反応速度論的解析法. 農環研報. 1: 127-166.
- 塚田元尚 (1985) キャベツ (施肥技術). 農業技術体系 土壌施肥編. 第6-1巻. 作物別施肥技術. 農文協, 東京, 技術pp.221-226.
- 鷺尾建紀・荒木有朋 (2013) 夏播きキャベツ栽培でのリン酸減肥基準. 岡山県農林水産総合センター農業研究所平成24年度試験研究主要成果. pp.43-44.
- 安原稔・猪居武 (1970) 土壌中におけるCDUの分解と無機化について (その1) 緩効性肥料CDUに関する研究 (第3報). 土肥誌. 41: 83-88.