

重窒素ラベル硫酸と牛糞堆肥の併用下における堆肥の施用時期の相違が堆肥窒素の無機化およびホウレンソウへの窒素供給に及ぼす影響*

加藤雅彦^{1,2}・林 康人^{1,3}・森國博全^{1,4}

キーワード 牛糞堆肥, 重窒素硫酸, 窒素供給, 併用, ホウレンソウ

1. はじめに

安定的に作物の収量を得ながら、循環型農業を確立するためには、無機質肥料（以下、肥料）と有機質資材を併用した適切な施肥が重要である（三枝, 2006）。著者らは、肥料と家畜ふん堆肥を併用した際の無機態窒素の挙動を明らかにするため、一連の研究を行ってきた（加藤ら, 2008a, b, 2009）。これまで得た知見では、肥料と併用することで牛糞堆肥（以下、堆肥）窒素の無機化量が増加すること（加藤ら, 2008b, 2009）、増加した無機態窒素量は、作物の窒素吸収量に反映されること（加藤ら, 2008a）、を明らかにしてきた。これらの研究は¹⁵N 硫酸アンモニウム（以下、¹⁵N 硫酸）と堆肥を同時に施用して検討したものであるが、実際の栽培では、堆肥は施肥の数ヶ月前に施用されることが多い。

本報では堆肥の施用時期を段階的に変え、¹⁵N 硫酸との併用下における堆肥の施用時期の相違が堆肥窒素の無機化量、ホウレンソウへの窒素供給量に及ぼす影響を検討した。

2. 材料および方法

1) 供試土壌と堆肥

供試土壌は、多腐植質厚層黒ボク土（農耕地土壌分類委員会, 1995）（神奈川県横浜市）であり、土性は壤土であった。無機態窒素含量は、アンモニウム態窒素： 5.0 mg kg^{-1} 、硝酸態窒素： 2.0 mg kg^{-1} であり、他の化学性は、pH (H₂O)：5.2, EC： 0.1 dS m^{-1} 、全炭素： 65 g kg^{-1} 、全窒素： 5.0 g kg^{-1} であった。

堆肥は、市販の牛糞堆肥を用いた。本堆肥は、既報（加藤ら, 2008b）の堆肥5と同一のものである。堆肥の理化学性は、全炭素： 315 g kg 乾物^{-1} 、全窒素： 25 g kg 乾物^{-1} 、C/N比：13、無機態窒素量： $4.1 \text{ g-N kg 乾物}^{-1}$ 、無機化窒素量（25℃, 28日間）： $-0.45 \text{ g-N kg 乾物}^{-1}$ 、塩酸可溶性炭素量： 6.4 g kg 乾物^{-1} であった。塩酸可溶性炭素量は、 1 mol L^{-1} 塩酸で抽出（堆肥：水＝1：50）し、濾紙（No. 5ろ紙, Advantec）で濾過後、全有機炭素計（TOC-V_{CPN}, Shimadzu）で測定した。

2) 栽培方法

神奈川県平塚市にあるJA全農 営農・技術センター内のガラス温室でホウレンソウ（*Spinacia oleracea* L., 品種：アクティブ）の栽培を行った。面積 0.14 m^2 （ $0.49 \text{ m} \times 0.28 \text{ m}$ ）、土層深 0.20 m のプラスチック製プランターに土壌を充填し、1区とした。施肥後、プラスチック製の板で仕切り、プランターの一部（ $0.12 \text{ m} \times 0.28 \text{ m}$ ）を無作付けとした。ホウレンソウの播種は2006年5月11日、収穫は6月16日に行なった。間引きを5月25日に行い、最終的な栽植密度を 96 株 m^{-2} とした。栽培期間中の灌水は適宜水道水で行なった。

3) 処理区の概要

試験区の概要を表1に示した。試験区は、硫酸併用の有無2水準と堆肥の施用時期3水準を組み合わせた計6処理とした。¹⁵N 硫酸（3.05 atom%）を 13 g-N m^{-2} 施肥した日を基準とし、堆肥を0ヶ月、1ヶ月、2ヶ月前に乾物あたり 1 kg m^{-2} 施用した。また、硫酸のみを単用した区、硫酸、堆肥を施用しなかった無窒素の区を設けた。全区ともに、2006年3月7日よりガラス温室内に静置し、播種前まで週に2, 3回、プランターの底面より水が流出しない程度に水道水にて灌水した。すべての区に重焼リン、硫酸カリウムを用いてP, Kをそれぞれ 6.5 g-P m^{-2} , 12.5 g-K m^{-2} 施用した。以上の処理はすべて3反復で行なった。堆肥、肥料は、表層約 0.12 m までの土壌に均一に混和した。

4) 収穫調査、土壌の採取および分析項目

収穫期に各区から全株採取し、その新鮮重と栽植密度から単位面積あたりの収量をもとめた。採取した作物を $80 \text{ }^\circ\text{C}$ で粗乾燥し粉碎後 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ で通風乾燥して乾物生産量を求めた。N, P, K, Ca, Mg含有率を既報（加藤ら, 2008a）と同様な方法で求め、乾物重を乗じて養分吸収量を算出した。また、ホウレンソウ全窒素中の¹⁵N存在比（atom%）を元素分析計一同位体比質量分析計（NA2500-DELTA plus, ThermoScientific）で測定し、窒素吸収量と¹⁵N存

Masahiko KATO, Yasuhito HAYASHI and Hiromasa MORIKUNI: Effects of timing for applications of cattle manure compost on nitrogen mineralization of compost and nitrogen supply to spinach under combined applications of ¹⁵N-labeled ammonium sulfate and cattle manure compost

* 本報告の一部を2007年度日本土壌肥料学会関東支部会において発表した。

¹ JA 全農 営農・技術センター 肥料研究室（254-0016 平塚市東八幡4-18-1）

² 現在、岐阜大学工学部（501-1193 岐阜市柳戸1-1）

³ 現在、札幌市環境局環境事業部（060-8611 札幌市中央区北1条西2丁目）

⁴ 現在、コープケミカル株式会社農材開発部（102-8283 千代田区一番町23-3）

Corresponding Author：加藤雅彦

2010年4月7日受付・2010年9月3日受理

日本土壌肥料学雑誌 第81巻 第6号 p.589~593 (2010)

表1 試験区の概要

硫安併用の有無	堆肥の施用時期	¹⁵ N 硫安施肥量 (g-N m ⁻²)	堆肥 施用量*1 (kg m ⁻²)	堆肥窒素 施用量 (g-N m ⁻²)	¹⁵ N 硫安施肥日 (年. 月. 日)	堆肥施用日 (年. 月. 日)
硫安単用	—	13	—	—	2006.5.11	—
無窒素	—	—	—	—	—	—
有	0ヶ月前	13	1	25	2006.5.11	2006.5.8
	1ヶ月前	13	1	25	2006.5.11	2006.4.5
	2ヶ月前	13	1	25	2006.5.11	2006.3.7
無	0ヶ月前	—	1	25	—	2006.5.8
	1ヶ月前	—	1	25	—	2006.4.5
	2ヶ月前	—	1	25	—	2006.3.7

—無施用

*1 堆肥の施用量は乾物あたり

P, Kは、2006年5月11日にすべての試験区で重焼燐、硫酸カリウムを用い、それぞれ6.5g-P, 12.5g-K m⁻²施用。

在比から¹⁵N硫安由来の窒素吸収量を次式よりもとめた。

$$NdfF = N_t \times ({}^{15}N_p - {}^{15}N_{c+s} / {}^{15}N_t - {}^{15}N_{c+s})$$

ここで、NdfF：¹⁵N硫安由来の窒素吸収量 (g-N m⁻²)、N_t：全窒素吸収量 (g-N m⁻²)、¹⁵N_p：ハウレンソウ全窒素中の¹⁵N存在比 (atom%)、¹⁵N_{c+s}：堆肥、土壌窒素の¹⁵N存在比 (0.37 atom%)、¹⁵N_t：¹⁵N硫安の¹⁵N存在比 (3.05 atom%)。

また、全窒素吸収量から¹⁵N硫安由来分を差し引き、土壌+堆肥由来の窒素吸収量を算出した。

本試験条件下においてハウレンソウの窒素吸収が旺盛になる前の施肥後14日目に無作付け土壌を採取し、土壌水分を加熱減量法で測定した。既報 (加藤ら, 2008a) と同様な方法で乾土当たりの無機態窒素 (アンモニア態窒素+硝酸態窒素) 量、無機態窒素中の¹⁵N存在比 (atom%) を測定した。¹⁵N硫安由来の窒素吸収量をもとめた方法と同様に無機態窒素量と¹⁵N存在比から¹⁵N硫安由来の無機態窒素量を算出した。また、全無機態窒素量から¹⁵N硫安由来の無機態窒素量を差し引いたものを土壌と堆肥由来の無機態窒素量とした。

5) 統計解析

ハウレンソウの収量、全窒素吸収量、堆肥+土壌由来の窒素吸収量、養分吸収量ならびに無作付け土壌の堆肥+土壌由来の無機態窒素量のデータは、硫安施用の有無、堆肥の施用時期を要因とする二元配置分散分析をJMP Ver. 8.0.2 (SAS Institute Inc.) を用いた。分散分析の結果、有意差 ($p < 0.05$) が認められた場合、更にTukey's HSD検定により多重比較を行った。なお、ハウレンソウ全窒素中の¹⁵N存在比、¹⁵N硫安由来の窒素吸収量ならびに無作付け土壌の¹⁵N硫安由来の無機態窒素量のデータは、堆肥の施用時期を要因とする一元配置分散分析を行い、有意差 ($p < 0.05$) が認められた場合、更にTukey's HSD検定を行った。

3. 結果

1) 収穫期のハウレンソウの収量と養分吸収量

ハウレンソウの収量を表2に示した。ハウレンソウの収量は、硫安の併用によって高まった。また、堆肥と硫安を

同時に施用するよりも堆肥を施肥1ヶ月前に施用した区で収量が高かった。なお、硫安を併用した区、堆肥を単用した区の収量は、それぞれ硫安単用区、無窒素区に比べて高かった。

ハウレンソウの全窒素吸収量は、収量と同様な傾向であり、堆肥と硫安を同時に施用するよりも堆肥を施肥1ヶ月前に施用したほうが大きかった (表2)。硫安と堆肥を同時に施用した区のハウレンソウの¹⁵N硫安由来の窒素吸収量、施肥窒素利用率は、それぞれ6.9 g-N m⁻², 53%であり、堆肥を施肥1ヶ月前に施用した区のほうが大きかったが、硫安単用区と同程度であった。ハウレンソウの堆肥+土壌由来の窒素吸収量は、硫安併用の有無、堆肥の施用時期において有意差が認められたが、硫安併用の有無と堆肥の施用時期の交互作用に有意差は認められなかった。堆肥を施肥2ヶ月前に施用するよりも堆肥を施肥0, 1ヶ月前に施用したほうが堆肥+土壌由来の窒素吸収量が大きかった。

ハウレンソウのP, K, Ca, Mg吸収量は、堆肥の施用時期によらず硫安の併用によって大きくなった (表3)。なお、硫安を併用した区、堆肥を単用した区のP, K, Ca, Mg吸収量は、それぞれ硫安単用区、無窒素区と同等以上であった。

2) 施肥14日目の無作付け土壌における由来別の無機態窒素量

施肥後14日目における無作付け土壌の¹⁵N硫安由来の無機態窒素量を図1に示した。¹⁵N硫安由来の無機態窒素量は、硫安を併用した区において堆肥の施用時期の違いによる有意差は認められず、105~109 mg-N kg⁻¹であった。施肥後14日目における無作付け土壌の堆肥+土壌由来の無機態窒素量を図2に示した。堆肥の施用時期によらず硫安の併用によって堆肥+土壌由来の無機態窒素量が増加した。

4. 考察

1) 堆肥の施用時期の違いによるハウレンソウの収量と養分吸収量

硫安と堆肥を併用した区のハウレンソウの収量は、いずれの区も十分な収量が得られたが、硫安と堆肥を同時に施用した区よりも堆肥を施肥1ヶ月前に施用した区の収量が高かった (表2)。この要因として、肥料由来窒素の有

表2 ホウレンソウの収量と由来別の窒素吸収量

硫安併用の有無	堆肥の施用時期	収量 (kg m ⁻²)	全窒素中の ¹⁵ N存在比 (atom%)	窒素吸収量			施肥窒素利用率* ² (%)	併用による堆肥窒素の吸収増加量* ³ (g-N m ⁻²)
				全窒素	¹⁵ N硫安由来 (g-N m ⁻²)	堆肥+土壌由来		
硫安単用	—	1.97	2.55	8.9	7.2	1.7	55	—
無窒素	—	0.53	—	1.1	—	1.1	—	—
有	0ヶ月前	2.34 b* ¹	2.31 c	9.6 b	6.9b	2.6	53	1.0
	1ヶ月前	2.65 a	2.41 b	10.9 a	8.3a	2.6	64	1.1
	2ヶ月前	2.46 ab	2.45 a	10.2 ab	7.9ab	2.3	61	1.3
無	0ヶ月前	0.89 c	—	1.6 c	—	1.6	—	—
	1ヶ月前	0.85 c	—	1.5 c	—	1.5	—	—
	2ヶ月前	0.82 c	—	1.0 c	—	1.0	—	—
分散分析								
硫安併用の有無 (AN)		***	—	***	—	***		
堆肥の施用時期 (T)		*	***	NS	*	***		
AN×T		*	—	*	—	NS		
Tukey's HSD								
0ヶ月前		1.62 ab			2.2 a			
1ヶ月前		1.75 a			2.1 a			
2ヶ月前		1.54 b			1.7 b			

NS: 有意差なし, *: p<0.05, **: p<0.01, ***: p<0.001

*¹異なるアルファベットは, 有意差 (p<0.05) があることを示す (Tukey's HSD 検定).

*²¹⁵N硫安由来の窒素吸収量 (g-N m⁻²) / ¹⁵N硫安施肥量 (13 g-N m⁻²) × 100

*³硫安併用区 (0ヶ月前, 1ヶ月前, 2ヶ月前) から堆肥単用区 (0ヶ月前, 1ヶ月前, 2ヶ月前) の堆肥+土壌由来の窒素吸収量 (g-N m⁻²) を差し引いた.

表3 ホウレンソウの養分吸収量

硫安併用の有無	堆肥の施用時期	養分吸収量 (g m ⁻²)			
		P	K	Ca	Mg
硫安単用	—	1.2	15	1.3	2.6
無窒素	—	0.6	7	0.6	0.3
有	0ヶ月前	1.3	23 a	1.1	2.4
	1ヶ月前	1.6	26 a	1.2	2.7
	2ヶ月前	1.5	25 a	1.1	2.5
無	0ヶ月前	0.9	10 b	0.8	0.6
	1ヶ月前	0.9	10 b	0.8	0.5
	2ヶ月前	0.6	7 b	0.6	0.3
分散分析					
硫安併用の有無 (AN)		***	***	***	***
堆肥の施用時期 (T)		NS	NS	NS	NS
AN×T		NS	*	NS	NS

NS: 有意差なし, *: p<0.05, **: p<0.01, ***: p<0.001

異なるアルファベットは, 有意差 (p<0.05) があることを示す (Tukey's HSD 検定).

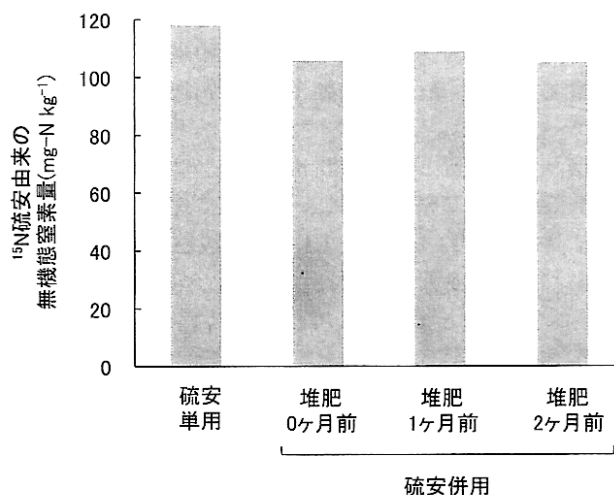


図1 施肥14日目の無作付け土壌における¹⁵N硫安由来の無機態窒素量

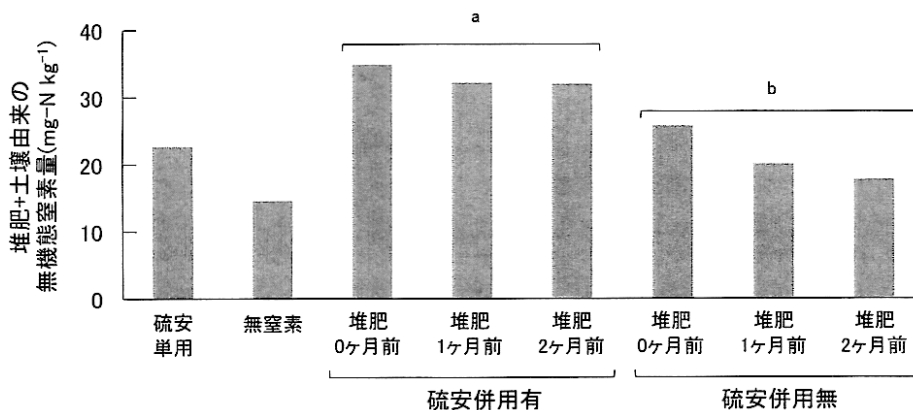


図2 施肥14日目の無作付け土壌における堆肥+土壌由来の無機態窒素量
異なるアルファベットは, 硫安の併用の有無で有意差 (p<0.05) があることを示す (Tukey's HSD 検定). 硫安単用, 無窒素は土壌由来.

機化によるハウレンソウへの窒素供給量の低下が考えられた。しかし、施肥14日目の無作付土壌における¹⁵N 硫安由来の無機態窒素量に堆肥の施用時期による違いはなく、併用による肥料由来窒素の有機化量に違いはないと考えられた(図1)。また、この他の要因として堆肥に含まれる生育阻害物質によって硫安と堆肥を同時に施用した区においてハウレンソウの生育が遅延したことが考えられた(古江, 2000; 田中, 2001; 片山ら, 2007)。古江(2000)は、堆肥に含まれる易分解性炭素化合物量、C/N比、アンモニウム態窒素濃度、ECとコマツナの発芽率との関係を調査したところ易分解性炭素化合物量とコマツナの発芽率にはもっとも密接な負の関係があることを報告した。しかし、供試堆肥の易分解性炭素と考えられる塩酸可溶性炭素量は 6.4 g kg^{-1} と既往のデータ(加藤ら, 2008b, 2009; 新妻ら, 2010)に比べ少ない堆肥であった。加えて、硫安と堆肥を同時に施用した区のハウレンソウの養分吸収量は、硫安を単用した区と比べ劣っておらず、堆肥に含まれる生育阻害物質による影響も考えにくい(表2, 3)。堆肥を硫安施肥の1ヶ月前に施用した区において両者を同時に施用した区よりも収量が高かった要因は明確ではないが、一因として堆肥施用と施肥の間隔を空けることによって土壌の物理性、生物性が改善され、ハウレンソウの生育が向上したことが推測された。しかし、本試験では物理性、生物性に関するデータはなく、今後検討する必要がある。

硫安と併用することによるハウレンソウの堆肥由来窒素の吸収量は、硫安を併用しなかった区に比べて堆肥施用0, 1, 2ヶ月前でそれぞれ $1.0, 1.1, 1.3 \text{ g-N m}^{-2}$ 増加し、これは施用した堆肥窒素 25 g-N m^{-2} に対し、それぞれ $4.0, 4.4, 5.2\%$ に相当した(表2)。堆肥施用時期による差は最大でも1.2ポイントであった。また、この堆肥由来窒素の吸収増加量は、全窒素吸収量(堆肥施用0, 1, 2ヶ月前でそれぞれ $9.6, 10.9, 10.2 \text{ g-N m}^{-2}$)に対し、それぞれ $10.4, 10.1, 12.7\%$ に相当し、その差は最大でも2.6ポイントであった。これらのことから、併用によるハウレンソウの堆肥由来窒素の吸収増加量に及ぼす堆肥の施用時期の違いは小さいことが明らかとなった。

堆肥+土壌由来の窒素吸収量は、堆肥の施用時期による差が認められた(表2)。供試堆肥は、培養試験条件下において、培養120日にかけて見かけ上緩やかに有機化する堆肥である(加藤ら, 2008b)。このことから、堆肥を施肥2ヶ月前に施用した場合、0, 1ヶ月前施用に比べ、播種までに有機化された堆肥由来窒素の量が多く、堆肥+土壌由来の窒素吸収量が低下したものと思われた。

2) 堆肥の施用時期の違いによる堆肥由来のハウレンソウへの窒素供給

施肥14日目の無作付土壌における堆肥+土壌由来の無機態窒素量は、硫安と併用することで堆肥の施用時期の違いによらず大きくなった(図2)。また、ハウレンソウの堆肥+土壌由来の窒素吸収量は、硫安と併用することで大きくなった(表2)。加えて、施肥14日目の無作付土壌

の堆肥+土壌由来の無機態窒素量とハウレンソウの堆肥+土壌由来の窒素吸収量との関係を検討したところ、両者に正の直線関係が認められた(図3)。これらのことから、堆肥の施用時期の違いによらず、肥料と堆肥を併用することで、堆肥由来窒素の無機化量が増加し、ハウレンソウの窒素吸収量に反映されることが明らかとなった。

本研究は、プランター試験であり、堆肥を1種類用いた条件であるが、本研究結果より、肥料と併用によるハウレンソウの堆肥由来窒素の吸収増加量に及ぼす堆肥の施用時期の影響は小さいことが示された。加えて、堆肥施用と播種の間隔が最大2ヶ月であっても堆肥窒素の無機化量が増加し、ハウレンソウの窒素吸収量に反映されることが明らかとなった。供試堆肥より腐熟が進んでいない堆肥の場合、肥料と同時に堆肥を施用すると作物の生育に影響を及ぼすことも考えられる。また、圃場条件下においては、堆肥施用と播種の間隔を長くすることで、播種するまでに養分が下方浸透などにより作土から減少する可能性もある(瀧, 1996)。しかし、供試堆肥のように易分解性炭素量が少なく緩やかに窒素が有機化するような牛糞堆肥においては、堆肥施用と播種の間隔が長くても作土からの無機態窒素の減少は比較的少ないものと思われる。

本研究において硫安との併用による堆肥由来窒素のハウレンソウの吸収増加量は、堆肥の施用時期の違いによらず $1.0 \sim 1.3 \text{ g-N m}^{-2}$ であり、これは全窒素吸収量の約10%に相当した(表2)。堆肥由来窒素の吸収増加量は、硫安と併用することによって増加した無機化窒素量であり、この無機態窒素の作物への利用率が、硫安由来窒素と同程度(53%, 64%, 61%の平均59%:表2)と仮定すると、堆肥由来窒素の無機化増加量は $1.7 \sim 2.2 \text{ g-N m}^{-2}$ と算出される。このことから、本条件下において堆肥と併用すれば施肥窒素量をおよそ 2 g-N m^{-2} 削減できるものと思われる。本試験は、溶脱のない条件であったため、堆肥由来窒素の無機化増加量は作物に吸収利用されたが、圃場条件下では、堆肥由来の無機態窒素が作物に利用されず下方へ浸透することも考えられるため、堆肥の施用時期にかかわらず、併

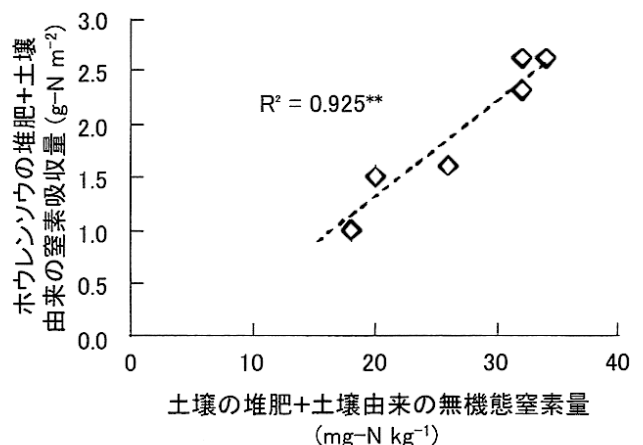


図3 施肥14日目の無作付土壌における堆肥+土壌由来の無機態窒素量とハウレンソウの堆肥+土壌由来の窒素吸収量との関係

用による堆肥由来窒素の無機化増加量を考慮した施肥を行うことが重要と考えられた。

謝辞：窒素安定同位体比の測定にあたり、名古屋大学大学院生命農学研究科准教授 渡邊 彰博士には多大なご協力を頂きました。また、本研究の実施にあたり、栽培および分析にご協力いただいた（株）全農ビジネスサポート平塚支店 肥料グループの皆様には感謝いたします。

文 献

- 古江広治 2000. 微小熱量計を用いた家畜ふん堆肥の腐熟度評価の試み. 農業技術, 55, 555-559.
- 片山信也・佐藤克昭・望月建治・芹澤駿治 2007. コマツナ発芽試験のための堆肥からの生育阻害物質抽出法. 日草誌, 53, 34-37.
- 加藤雅彦・林 康人・森國博全 2008a. 重窒素ラベル硫安と各種牛糞堆肥の併用下におけるハウレンソウへの窒素供給特性の解析. 土肥誌, 79, 283-289.
- 加藤雅彦・林 康人・田中福代・森國博全 2008b. 畑条件下での重窒素ラベル硫安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.
- 加藤雅彦・林 康人・森國博全 2009. ¹⁵Nラベル硫安と豚糞・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.
- 新妻成一・日高秀俊・小宮山鉄兵・森國博全 2010. 家畜ふん堆肥の肥料成分迅速分析法における塩酸抽出条件の検討. 土肥誌, 81, 135-139.
- 農耕地土壌分類委員会 1995. 農耕地土壌分類第3次改訂版. 農業環境技術研究所資料, 17, 1-78.
- 三枝正彦 2006. 食糧生産における施肥の役割. 尾和尚人・木村真人・越野正義・三枝正彦・但野利秋・長谷川功・吉羽雅昭編集 肥料の事典, p.14-22. 朝倉書店, 東京.
- 瀧 勝俊 1996. 水田における家畜ふん堆肥の適正施用技術に関する研究（第1報）施用時から移植時までの肥料成分の挙動. 愛知県農総試研報, 28, 89-95.
- 田中福代 2001. フィールドから展開される土壌肥科学—新たな視点でデータを採る・見る— 2. 水田における施用有機物の分解と水稻生育. 土肥誌, 72, 582-587.