

寒冷地灰色低地土水田における堆肥長期連用試験からみた 化成肥料及び堆肥中の窒素の行方

住田 弘一^{*1)}・加藤 直人^{*1)}・西田 瑞彦^{*1)}

抄 録 : 有機物中の窒素の行方については、近年、重窒素標識法による解析が始められているが、長期連用下におけるその行方については差し引き法による推定が有効である。そこで、寒冷地灰色低地土水田(東北農業研究センター大曲研究拠点内)における、稲わら堆肥(1968年～)及び家畜ふん堆肥(1973年～)の長期連用試験において、堆肥の肥効が安定した1981年以降の19年間について、化成肥料及び堆肥中の窒素の行方を差し引き法により推定した。窒素無施用栽培における窒素収支からみると、毎年、系外から約3～4kg/10aの窒素富化が認められた。10a当たり8kgの化成肥料窒素の作土への集積は見かけ上認められず、水稻による収奪が約4kg、系外への損失が約4kgであった。10a当たり11kg(堆肥現物2トン)の稲わら堆肥中の窒素は、見かけ上土壌への集積が2kg弱、水稻による収奪が3kg弱、系外への損失が約6.5kgであった。稲わら堆肥の施用量が2t/10a以上で水稻収量は一定(2割増収)になり、水稻による収奪割合が減少し、系外への損失割合が増大した。10a当たり17kg(堆肥現物3.6トン)の家畜ふん堆肥中の窒素は、見かけ上土壌への集積が約5kg、水稻による収奪が約6kg、系外への損失が約6kgであった。

キーワード : 水田, 長期連用試験, 堆肥, 化成肥料, 窒素収支

Fate of fertilizer nitrogen and compost nitrogen in long-term experiments on gray lowland soil in a cool region : Hirokazu SUMIDA^{*1)}, Naoto KATO^{*1)} and Mizuhiko NISHIDA^{*1)}

Abstract : Recently, the fate of nitrogen in some organic matter has been studied using organic matter labeled with ¹⁵N, however ¹⁵N labeling requires many expenditures and labor. In a long-term experiment, the comparison of nitrogen balance sheets between compost applied and non-applied plots is useful to estimate the fate of the applied nitrogen. In this report, the fate of applied fertilizer nitrogen and applied compost nitrogen during the last nineteen years (1981~1999) was estimated by long-term experiments with rice straw compost (1968~) and livestock waste compost (1973~) on gray lowland soil in a cool region (NARCT, Omagari, Akita). The nitrogen balance in the plot without nitrogen application indicated that about 3-4kg/10a of nitrogen every year was supplied through irrigation water, rainfall and biological fixation. Fertilizer nitrogen applied at 8kgN/10a as basal and supplement applications scarcely remained in the plow layer (topsoil), and about 4kgN of that was taken up by rice plants, and about 4kgN was lost. Nearly 2 kgN of rice straw compost nitrogen applied at 11 kgN/10a was accumulated in the topsoil. Nearly 3kgN of that was recovered by rice plants and the remainder (about 6.5kgN) was lost. When the application rate of rice straw compost was larger than 2t/10a, rice grain yield leveled off (20% higher than without rice straw compost), and the nitrogen recovery by rice plants decreased and the nitrogen loss increased. About 5kgN of the livestock waste compost nitrogen applied at 17kgN/10a accumulated in the topsoil, about 6kgN of that was recovered by rice plants and the remainder (about 6kgN) was lost.

Key Words : Paddy field, Long-term experiment, Compost, Fertilizer, Nitrogen balance

*1) 東北農業研究センター (National Agricultural Research Center for Tohoku Region, Omagari, Akita, 014-0102, Japan)

2001年12月10日受付, 2002年3月25日受理

I はじめに

消費者の有機農産物への関心の高まりや、化学肥料に由来する成分による環境汚染の危惧から、化学肥料偏重の農業を見直す機運が高まっている。しかし、化学肥料、特に窒素肥料の使用量を減らせば、農産物の生産量を維持することは難しくなる。そのため、不足する農作物への窒素供給源として、堆肥を施用するという考え方がある。その場合、堆肥からの窒素供給は、化学肥料と異なり遅いので、施用した年だけではなく翌年以降も徐々に効いてくる。こうした特性によって、堆肥を長く連用すると、農地の窒素肥沃度は向上し、農作物への窒素供給量が増えてくる。

現在、家畜ふん尿や生ごみといった窒素成分を多く含んだ有機性資源が大量にあふれ、その地域的な偏在もあり、その処理が大きな問題になっている。飼料生産をはじめ畑作農業ですでに堆肥が過剰に施用されているところも多く、水田農業での利用が期待されている。さらに、最近、水田での飼料用稲の生産が各地で取り組まれるようになってきており、飼料用稲と家畜ふん堆肥を通じた耕種部門と畜産部門との連携が期待されている。飼料用稲は、食用稲と異なり、多窒素栽培で生産される高栄養価の稲がむしろ望まれている。一般の良食味の食用米生産では、高タンパク化は敬遠され、窒素の発現が多い家畜ふん堆肥などの有機物を受け入れられる量は制限される。これに対して、飼料用稲の生産では、むしろ家畜ふん堆肥などの有機物の活用が期待される。

近年、重窒素で標識した稲わら堆肥や家畜ふん堆肥が入手できるようになり、これらを用いて堆肥中の窒素の動態解析が可能となった。すでに西南暖地では、いくつかのグループ (Matsushita et al. 2000, 松山ら1999, 西田・土屋1999, 柴原ら1998, 樽見・山室1997, 上之蘭ら1998) により解析が進められている。この手法は、標識した試料由来の窒素動態が正確に測定でき、動態解析法としての信頼性

が高い。しかし、生産現場と同一の堆肥が利用できないことや、重窒素標識に多大な労力、あるいは購入に多額の資金が必要とされることから、その利用場面は制限される。また、重窒素の存在比が高い家畜ふん堆肥を作成することは困難であり、10年以上もの長期にわたる解析には活用できない。

一方、全国各地の農業関係試験研究機関には多くの有機物・肥料等の長期連用ほ場試験が継続されており (金森2000)、作物収量や養分吸収量、土壤肥沃度に関するデータが蓄積されている。これらを活用すれば、有機物中の窒素が作土の窒素肥沃度向上や水稲による窒素吸収の増加にどの程度貢献し、系外への程度影響を及ぼしているかを推定することが可能である。上沢 (1993) は、環境保全型農業では、作物の生産・品質と環境へのインパクトの大きい窒素の環境容量の把握が最初に必要なであり、諸先輩が残してくれた長期にわたる有機物連用試験における作物の窒素回収率や土層ごとの窒素含量の分布は、窒素環境容量の把握の大きなよりどころになる、としている。

そこで、約30年にわたって稲わら堆肥及び家畜ふん堆肥を連用してきた水田において、堆肥中の窒素を化成肥料窒素と比較しながらその行方を明らかにし、堆肥の肥効特性を評価した。

なお、本報告で取り上げた、稲わら堆肥連用試験及び家畜ふん堆肥連用試験は、どちらも約30年の長期にわたり、水田土壌管理研究室 (旧土壌肥料研究室) 及び業務科により管理され、膨大なデータが蓄積されてきた。歴代の関係者に深く感謝する。

II 材料と方法

1. 供試ほ場及び供試堆肥

東北農業研究センター大曲研究拠点内 (秋田県大曲市) の、1968年開始の稲わら堆肥連用試験ほ場、及び1973年開始の家畜ふん堆肥連用試験ほ場を供試した。どちらも、沖積水田土壌 (細粒灰色低地土, 金田統) で、土壌の主な理化学性は表1の通りである。

表1 供試ほ場の土壌の主な理化学性

(乾土kg当たり)

層位 (cm)	土性	pH (H ₂ O)	T-C (g)	T-N (g)	CEC (cmol)	交換性塩基 (cmol)			リン酸 吸収係数	
						Ca	Mg	K		
0~13	SiCL	5.32	20.2	1.74	23.5	11.6	1.8	0.6	0.6	1,120
13~25	L	5.75	11.6	0.90	26.5	15.7	2.7	0.9	0.8	1,200

注. 1968年5月に採取した土壌の分析値であり、住田ら(1990)の報告より抜粋引用。

供試した堆肥の現物当たりの水分及び全窒素含量を表2に示した。なお、堆肥の分析は次の通り行った。ほ場散布時の生状態（現物）の稲わら堆肥及び家畜ふん堆肥を70℃で数日間通風乾燥し、水分含量を求めた。この乾燥堆肥を粉砕して分析試料とし、ケルダール分解液を水蒸気蒸留法により、あるいは硫酸一過酸化水素水分解液をインドフェノール法により窒素量を定量した。

稲わら堆肥は大曲研究拠点内のほ場から産出された稲わらを堆肥化したものであり、1986年以前は1年半の堆積、1987年以降は半年の堆積期間である。そのため、1986年以前の稲わら堆肥の平均水分含量は約0.64 g/gであったのに対して、1987年以降のものは約0.76 g/gで水分含量が高まった。また、現物当たりの全窒素含量は、1986年以前が8.4 mg/g、1987年以降が4.2 mg/gであり、1987年以降のものはそれ以前の半量にとどまっている。

一方、家畜ふん堆肥は、秋田県畜産試験場で生産されたものである。1997年以降は、開放型攪拌方式の堆肥化施設によって製造されたものであるが、それ以前は堆積方式の堆肥舎または野積み状態で堆肥化したものである。1990年代前半は副資材が多量に使用されたものと思われ、この間の全窒素含量は3 mg/g前後と低くなっている。

なお、風乾処理過程での窒素損失量を評価するため、2000年産の稲わら堆肥及び家畜ふん堆肥について、秋田農試の方法（秋田県農業試験場2001）を参考にして、生状態で形態別窒素を3反復で分別定量した。具体的な方法は次の通りである。生試料20 gを500 mlのポリ瓶に採取し、水200 mlを加えて往復振とう器により室温下で30分振とうした。次に、振とう液を30メッシュのポリエチレンネットですろ過し、ネット上の固体残渣を水300 mlで十分に洗浄した。この残渣を風乾し、粗大未分解部とした。ろ液と洗浄液を合わせたものはよく振り混ぜてネット通過の沈殿物を懸濁し、一定量（40 ml）を素早く遠沈管に採取し、3500 rpmで20分間遠心分離した。この沈殿部を風乾し、微細未分解部とした。上清液にはタンパク質沈殿剤として酢酸鉛を0.7 g加え、3500 rpmで20分間遠心分離した。この沈殿部を風乾し、水溶性高分子部とした。上清液は水溶性低分子部とした。粗大未分解部、微細未分解部、水溶性高分子部の各画分は、硫酸一過酸化水素水分解し、インドフェノール法により窒素量を定量した。また、水溶性低分子

表2 施用有機物の現物当たりの水分及び全窒素含量

年次	稲わら堆肥		家畜ふん堆肥	
	水分 g/g	全窒素 mg/g	水分 g/g	全窒素 mg/g
1981年	0.700	7.0	0.781	5.1
1982年	0.690	6.6	0.805	5.4
1983年	0.643	9.7	0.847	3.1
1984年	0.610	9.4	0.781	4.5
1985年	0.541	6.2	0.830	4.0
1986年	0.639	11.7	0.790	3.2
1987年	—	—	0.730	4.3
1988年	0.803	4.8	0.793	3.1
1989年	0.773	6.5	0.791	4.9
1990年	0.794	2.6	0.933	2.6
1991年*	0.756	4.5	0.785	2.9
1992年	0.712	4.6	0.832	2.6
1993年*	0.756	4.0	0.785	2.3
1994年	—	—	—	—
1995年	0.645	3.3	0.790	2.7
1996年	0.770	3.8	0.721	4.4
1997年	0.735	4.7	0.701	5.7
1998年	0.791	4.9	0.699	6.0
1999年	0.777	2.6	0.730	4.5
平均	0.714	5.7	0.785	4.0
標準偏差	0.076	2.6	0.057	1.2
C. V.	10.6%	45.1%	7.3%	29.7%
最大	0.803	11.7	0.933	6.0
最小	0.541	2.6	0.699	2.3
'81-86				
平均	0.637	8.4		
標準偏差	0.058	2.2		
C. V.	9.1%	25.8%		
'87-99				
平均	0.756	4.2		
標準偏差	0.045	1.1		
C. V.	6.0%	26.8%		

注. *: 1991年、1993年は水分含量欠測のため、稲わら堆肥は1987年以降の平均水分含量を、家畜ふん堆肥は全期間の平均水分含量を用いて現物当たりの全窒素含量を推定した。

- 1) —は欠測値
- 2) 1981～1986年の稲わら堆肥は1年半堆積したものの、1987年以降は半年堆積したものである。
- 3) 1981～1996年の家畜ふん堆肥は牛ふん堆肥、1997年以降は牛ふん主体に豚ふんと鶏ふんを混合堆肥化したものである。

部の画分については、インドフェノール法によりアンモニア態窒素量を、AQUATEC 5400 Analyzer（カドミウム還元法）により硝酸態窒素量を定量した。

2. 試験区の設計と肥培管理及び作物品種

稲わら堆肥連用試験ほ場は、1968年以降、稲わら

表3 家畜ふん堆肥連用試験ほ場の窒素施肥設計

(kg/10a)

試験区名 (堆肥・化成肥料)	'73-75	'76-81	'82-85	'86-89	'90-99	平均窒素施肥量	
						'73-99	'81-99
無施用・少肥	4.8	3.6	6	0	0	2.2	1.5
無施用・標肥	9.6,14.4	7.2,10.8	8~13	6,13	6~10	8.6	8.0
無施用・多肥	19.2('75:0)	14.4	5~16	16	12~16	14.1	14.2
3.6トン・少肥	4.8	3.6	6	0	0	2.2	1.5
3.6トン・標肥	9.6,14.4	7.2,10.8	6~8	6	4~6	7.3	6.1
3.6トン・多肥	19.2('75:0)	14.4	5~8	6	6~10	9.1	7.2

注. 窒素施肥量は、基肥と追肥の合計量である。

堆肥(表2)を毎年10a当たり4トン、3トン、2トン、1トン及び0トン(無施用)連用してきた。化成肥料(硫安)による窒素施肥量は10a当たり8kgで、1989年までは全量基肥、1990年以降は基肥6kgに加え幼穂形成期に追肥2kgを施用した。稲わら堆肥無施用には化成肥料の窒素を無施肥(無窒素)の区も設けている。1区の面積は40㎡で、2連制である。品種は、1968年から1972年まではフジミノリ、1973年以降はキヨニシキを作付けした。

一方、家畜ふん堆肥連用試験ほ場は、1973年以降、家畜ふん堆肥(表2)を毎年10a当たり3.6トン及び0トン(無施用)連用してきた。化成肥料による窒素施肥は、少肥(1986年から無窒素)、標肥及び多肥の3水準で、その年次別の施肥量は表3に示した。1区の面積は約110㎡で、単連である。品種は、1973年から1981年まではレイメイ、1982年から1985年まではアキヒカリ、1986年から1988年までは奥羽315号、1989年から1995年までは奥羽316号、1996年以降はふくひびきで、一貫して多収品種・系統を作付けした。ふくひびきは、極多収品種で飼料用稲として期待されている。

3. 水稻の窒素分析

成熟期の稲体の窒素分析試料は次の通り調整した。1989年以前は、各試験区から生育中庸な数株を抜き取り、1990年以降は、各試験区の坪刈り試料から適当量を抽出し、わらと穂に分けて乾燥・粉碎した。ただし、1985年以降は穂ではなく籾を粉碎しないでそのまま分析試料とした。窒素の定量は、ケルダール分解液あるいは硫酸-過酸化水素水分解液を水蒸気蒸留法により行った。

4. 作土の窒素分析

1981年の春及び2000年の春に、稲わら堆肥連用試験ほ場及び家畜ふん堆肥連用試験ほ場の各試験区より作土を採取し、風乾後メノウの乳鉢で微粉碎した

ものを全窒素分析の試料とした。1981年の作土の全窒素含量はケルダール法により、2000年はCNコーダー(ヤナコMT-700)により求めた。

また、2000年の春には、稲わら堆肥連用試験ほ場の各試験区における作土の深さと容積重を求めた。作土の深さは各区5地点調査した。容積重は、各区2地点から0~5cm、5~10cm、10cm~鋤床の各層位別に100ml試料円筒により土壌を採取して、作土全体の容積重を算出した。

III 試験結果及び考察

1. 堆肥施用に伴う窒素吸収増加量の経年変化

図1は、稲わら堆肥施用区と無施用区の水稲による窒素吸収量の差、すなわち、見かけ上の稲わら堆肥中の窒素吸収量について、稲わら堆肥連用開始年からの経年変化を示したものである。年次変動が大きいので、3次の多項式にあてはめて、その経年変化の傾向をみた。見かけ上の稲わら堆肥中の窒素吸収量のピークは1980年前後であり、堆肥の施用量が多いほど年数を要する傾向があった。その後、見かけ上の稲わら堆肥中の窒素吸収量は低下傾向がみられる。これは、施用された稲わら堆肥が、1987年前後で大きく異なっており(表2)、全窒素含量が8.4

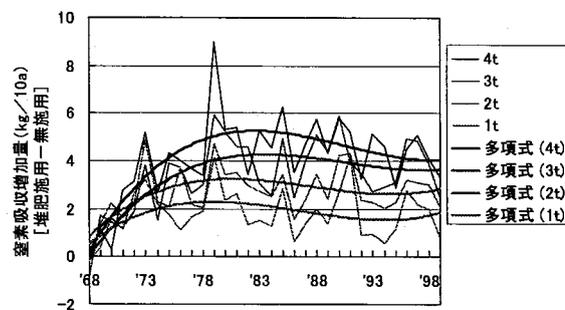


図1 水稻による見かけ上の稲わら堆肥中の窒素吸収量の推移

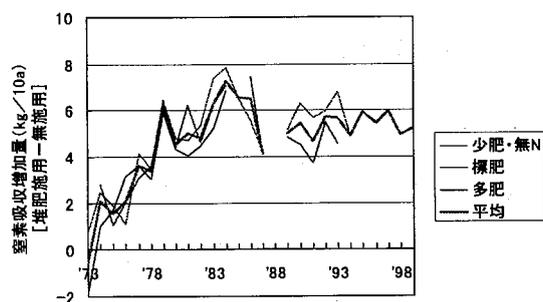


図2 水稻による見かけ上の家畜ふん堆肥中の窒素吸収量の推移

注. 1988年は欠測。また、標肥は1985年及び1994年以降、多肥は1985年以降、家畜ふん堆肥の有無に対応する試験区の窒素施肥量が異なるためデータがとれない。

表4 稲わら堆肥連用試験ほ場の作土深と容積重

堆肥化成	作土深	容積重	作土量
(/10a) 肥料	cm	g/cm ³	t/10a
無施用 標肥	16.3±0.9	1.03±0.05	168
1トン 標肥	16.5±0.7	0.99±0.01	163
2トン 標肥	16.9±0.9	0.90±0.02	152
3トン 標肥	17.3±0.7	0.85±0.02	147
4トン 標肥	18.3±1.0	0.86±0.03	157

注. 2000年春に調査。作土深と容積重は、平均±標準偏差。

mg/gから4.2mg/gと半分になったことも大きな原因と考えられる。しかし、各年次の見かけ上の稲わら堆肥中の窒素吸収量は、1980年頃から1987年頃まではほぼ一定と読み取れる。このことから、供試した稲わら堆肥中の窒素吸収量は、施用量4トンまでは連用12~13年の内に安定すると考えられる。

図2は、図1と同様に、家畜ふん堆肥施用区と無施用区の水稲による窒素吸収量の差である見かけ上の家畜ふん堆肥中の窒素吸収量について、家畜ふん堆肥連用開始年からの経年変化を示したものである。見かけ上の家畜ふん堆肥中の窒素吸収量も、連用12~13年目にやや高い値を示したが、7~8年目以降はほぼ一定とみてよい。

そこで、稲わら堆肥連用試験ほ場と家畜ふん堆肥連用試験ほ場のどちらでも見かけ上の堆肥中の窒素吸収量が安定した、1981年から1999年までの19年間を対象として、堆肥連用試験ほ場における窒素収支を求めることとした。

2. 堆肥連用に伴う作土の全窒素含量の変化

2000年春に調査した各試験区の作土深と容積重を表4に示した。作土深は、稲わら堆肥無施用区で浅

表5 稲わら堆肥連用試験ほ場の作土の全窒素含量の変化

堆肥化成	肥料	作土全窒素量 (g/kg)		作土の窒素増減量 (kg/10a)	
		1981年春	2000年春	19年間	年平均
無施用	無窒素	1.45	1.50	7.5	0.39
	標肥	1.59	1.67	12.0	0.63
1トン	標肥	2.04	2.23	28.5	1.50
2トン	標肥	2.40	2.70	45.0	2.37
3トン	標肥	2.63	3.07	66.0	3.47
4トン	標肥	2.99	3.53	81.0	4.26

注. 作土の窒素増減量は、作土量150t/10aとして計算した。

表6 家畜ふん堆肥連用試験ほ場の作土の全窒素含量の変化

堆肥化成	肥料	作土全窒素量 (g/kg)		作土の窒素増減量 (kg/10a)	
		1981年春	2000年春	19年間	年平均
無施用	少肥	1.30	1.21	-13.5	-0.71
	標肥	1.43	1.41	-3.0	-0.16
3.6トン	多肥	1.72	1.71	-1.5	-0.08
	少肥	1.94	2.50	84.0	4.42
多肥	標肥	2.06	2.59	79.5	4.18
	多肥	2.39	2.83	66.0	3.47

注. 作土の窒素増減量は、作土量150t/10aとして計算した。

く、堆肥施用量が多くなるに従い深くなる傾向にある。容積重は逆に、稲わら堆肥無施用区で大きく、堆肥施用量が多くなるにつれて小さくなっている。単位面積当たりの作土重を計算すると、各試験区ともおよそ150~160トン/10aである。

一方、稲わら堆肥及び家畜ふん堆肥連用試験ほ場の作土の全窒素含量の変化を表5、6に示した。2000年春の作土の全窒素含量は、19年前の1981年春に比べて、稲わら堆肥連用試験ほ場では堆肥無施用条件でもやや高まったが、家畜ふん堆肥連用試験ほ場の堆肥無施用条件では逆にやや低下した。それに対して、稲わら堆肥や家畜ふん堆肥の連用は、作土の全窒素含量を大きく上昇させた。

そこで、この19年間にどの程度窒素が作土で増減したかを計算した。ここでは作土量を次の通り仮定した。すなわち、表4に示したように、2000年春の稲わら堆肥連用試験ほ場の各試験区の作土量はおよそ150~160トン/10aであることから、全試験区一律に150トン/10aとし、1981年春の作土量も同一量とした。

その結果、稲わら堆肥連用試験ほ場の作土では、

堆肥無施用区(無窒素, 標肥)で19年間に10a 当たり10kg前後の窒素が増加し, 稲わら堆肥1トン区で約30kg, 4トン区で80kg以上の窒素が増加した計算になる。1年当たりでは, それぞれ0.5kg前後, 約1.5kg, 4kg以上の増加となる(表5)。一方, 家畜ふん堆肥連用試験ほ場の作土では, 堆肥無施用の少肥区で19年間に10a 当たり13kg, 標肥区で3kgの窒素が減少したのに対して, 家畜ふん堆肥3.6トン施用の少肥区, 標肥区で80kg前後の窒素が増加した計算になる。1年当たりでは, 堆肥無施用でそれぞれ0.7kg, 0.2kgの減少, 家畜ふん堆肥3.6トン施用で4kg以上の増加となる(表6)。

3. 堆肥連用試験ほ場における窒素収支

1) 窒素無施用条件での見かけ上の系外からの窒素富化量

堆肥連用試験ほ場における窒素収支を表7, 8に示した。作土の窒素増加量は表5で計算したように, 稲わら堆肥無施用で化成肥料の窒素を無施肥のいわゆる窒素無施用条件では, 10a 当たり年平均0.4kgとほとんどない。一方, 1981年から1999年の19年間の水稲による年平均窒素収奪量は3.7kgである。そ

こで, 投入窒素量(0kg)から作土の窒素増加量と水稲による窒素収奪量を差し引いた残りの分を系外への窒素損失量とすると, 10a 当たり年平均-4.1kgになる。言い換えれば, 見かけ上, 毎年10a 当たり4.1kgの窒素が系外から富化されていることになる。

家畜ふん堆肥連用試験ほ場における少肥区では, 1986年以降の14年間は化成肥料の窒素は投入されていない。1981年から1985年の5年間の窒素少肥栽培に伴う作土の窒素増減はほとんどないと仮定して, 前述と同様に系外からの見かけ上の窒素富化量を計算した(表8の()内の数値)。その結果, 家畜ふん堆肥連用試験ほ場では, 見かけ上, 毎年10a 当たり3.0kgの窒素富化となった。大曲研究拠点内の両ほ場は, 作付品種に違いがあるものの, 土壌・栽培環境条件はほぼ同一である。以上のことから, 寒冷地の比較的痩せた沖積水田土壌(細粒灰色低地土)では, 窒素無施用条件で水稲を栽培すると, 見かけ上, 毎年10a 当たり3~4kgの窒素が富化されることが明らかとなった。この数値は, 安田ら(2000)が大曲研究拠点内の水田において, 上部開放で底面

表7 稲わら堆肥連用試験ほ場における窒素収支

(kg/10a/yr, kg/kg N)

堆肥 (/10a)	化成肥料	投入N量 堆肥	肥料	作土の N増減量	水稲による N収奪量	系外への N損失量	水稲収量	窒素の玄米 生産効率
無施用	無窒素(A)	0.00	0.00	0.39	3.69±0.38	-4.08	254±29	68.8
無施用	標肥(B)	0.00	8.00	0.63	7.54±0.90	-0.17	534±42	70.9
1トン	標肥(C)	5.54	8.00	1.50	9.28±0.91	2.76	611±38	65.8
2トン	標肥(D)	11.07	8.00	2.37	10.37±0.78	6.33	634±47	61.1
3トン	標肥(E)	16.61	8.00	3.47	11.43±0.75	9.71	637±60	55.7
4トン	標肥(F)	22.15	8.00	4.26	12.12±1.22	13.76	636±69	52.5

注. 水稲によるN収奪量及び水稲収量は, 1981~1999年の年平均±標準偏差である。
系外へのN損失量は, 投入N量から作土のN増減量と水稲によるN収奪量を減じて求めた。

表8 家畜ふん堆肥連用試験ほ場における窒素収支

(kg/10a/yr, kg/kg N)

堆肥	化成肥料	投入N量 堆肥	肥料	作土の N増減量	水稲による N収奪量	系外への N損失量	水稲収量	窒素の玄米 生産効率
無施用	少肥(G) (無窒素*)	0.00 (0.00)	1.45 (0.00)	-0.71	4.31±0.38 (3.73±0.57)	-2.15 (-3.02)	302±91 (264±45)	70.1 (70.9)
	標肥(H)	0.00	8.01	-0.16	7.98±1.38	0.18	547±86	68.5
	多肥(I)	0.00	14.23	-0.08	11.28±2.15	3.03	657±91	58.2
3.6トン	少肥(J) (無窒素*)	14.00+2.87 (14.00+2.87)	1.45 (0.00)	4.42	10.08±1.90 (9.27±0.88)	0.95+2.87 (0.31+2.87)	616±83 (601±73)	61.1 (64.8)
	標肥(K)	14.00+2.87	6.06	4.18	11.98±1.24	3.89+2.87	675±67	56.3
	多肥(L)	14.00+2.87	7.18	3.47	12.87±1.22	4.84+2.87	686±90	53.3

注. 水稲によるN収奪量及び水稲収量は, 1981~1999年の年平均±標準偏差である。
系外へのN損失量は, 投入N量から作土のN増減量と水稲によるN収奪量を減じて求めた。
*: 1986年以降の無窒素栽培における水稲によるN収奪量に基づいて窒素収支を求めた。
+2.87: 家畜ふん堆肥中のアンモニア態窒素分を考慮したもの。

に網をつけたポリ容器に土壌を詰めてほ場に一定期間埋設し、表層と下層の窒素含量の差から算出した窒素富化量とほぼ一致する。

見かけ上の系外からの窒素富化は、雨水や灌漑水からの流入、大気中の窒素の生物的固定による供給から、下層への溶脱や大気中への脱窒による損失を差し引いたものである。雨水に含まれる窒素はおよそ0.7mg/lとされる(岡本ら1992)ので、大曲における年間降水量1800mmからは10a 当たり1.3kgが供給される計算になる。また、灌漑水の全窒素含量は0.4kg/lであり(住田ら1990)、稲作期間の灌漑水量1500mmからは10a 当たり0.6kgが供給されることになる。両者を合わせると毎年、10a 当たり1.9kgが供給されている。関矢(1987)がまとめた水田における窒素収支では、灌漑水と雨水からの供給が10a 当たり1.8kg、大気中の窒素固定が2.0kg、田面水や浸透水による流出が2.0kg、大気中への脱窒が4.00kgと見積もられているが、窒素固定と脱窒は信頼性を欠く推定値としている。

2) 化成肥料による窒素施用条件での見かけ上の系外への窒素損失量

稲わら堆肥無施用の標肥栽培でも、窒素無施用栽培と同様に、作土の窒素増加量は10a 当たり年平均0.6kgと少ない。一方、水稻による窒素収奪量は7.5kgであり、系外への窒素損失量は、-0.2kgになる(表7)。つまり、見かけ上、化成肥料による窒素施肥量にほぼ相当する窒素量が水稻に吸収され、作土への窒素集積はほとんどなく、系外との窒素収支も差し引きゼロということになる。

家畜ふん堆肥無施用の標肥栽培でも同様の結果である(表8)。しかし、窒素施肥量14kg/10aの多肥栽培では、見かけ上、窒素施肥量のほぼ80%に相当する窒素量の11kg/10aが水稻に吸収されるが、残りは作土にはとどまらず、3kg/10aが系外に損失したと推定される。

水稻が吸収した窒素の玄米生産効率(玄米生産量/窒素吸収量)をみると、稲わら堆肥連用試験ほ場、家畜ふん堆肥連用試験ほ場のどちらのほ場でも、堆肥無施用の標肥栽培では窒素無施用栽培と同様に高く、窒素1kg当たり70kg前後である。これに対して、多肥栽培では、58kg/kgNの玄米生産効率にとどまった。この多肥栽培では、水稻がもはや吸収しきれないほどの窒素施肥量の水準にあるといえる。

3) 堆肥施用条件での見かけ上の系外への窒素損失量

稲わら堆肥による投入窒素量は次の通りである。表2に示したように、稲わら堆肥の窒素含量の欠測値(1987年と1994年)を、同じ堆積期間の稲わら堆肥の平均窒素含量と仮定すると、1981年から1999年の19年間の平均窒素含量は稲わら堆肥現物1トン当たり5.5kgとなる。これに化成肥料による窒素施肥量を加えた10a 当たりの年平均投入窒素量は、稲わら堆肥1トン区では13.5kg、2トン区では19.1kg、4トン区では30.2kgとなる。この投入窒素量から作土の窒素増加量と水稻による窒素収奪量を差し引いて、見かけ上の系外への窒素損失量を計算すると、稲わら堆肥1トン区では毎年10a 当たり2.8kg、2トン区では6.3kg、4トン区では13.8kgとなる。4トン区では水稻による収奪量よりも系外への損失量が多い。水稻が吸収した窒素の玄米生産効率も3~4トン区では56~53kg/kgNに低下し、2トン区以上では増収は認められない。

家畜ふん堆肥による投入窒素量は次の通りである。家畜ふん堆肥の窒素含量も1994年に欠測値があるが、同じ性状の1990年から1993年と1995年の平均窒素含量で補正すると、1981年から1999年の19年間の平均窒素含量は、家畜ふん堆肥現物3.6トン当たり14.0kgとなる。これに化成肥料による窒素施肥量を加えた10a 当たりの年平均投入窒素量は、3.6トン・少肥区では15.5kg、3.6トン・標肥区では20.1kg、3.6

表9 2000年産堆肥の形態別窒素量

有機物	pH (H ₂ O)	水分 (g/g)	形態別窒素含量 (Nmg/g)					
			水抽出 NH ₄ -N	水抽出 NO ₃ -N	水溶性 高分子	微細 未分解	粗大 未分解	合計
稲わら堆肥	8.0	0.775	0.04 (1) ±0.00	0.00 (0) ±0.00	0.57 (18) ±0.03	1.60 (51) ±0.01	0.95 (30) ±0.06	3.16 (100) ±0.03
家畜ふん堆肥	7.8	0.747	0.88 (17) ±0.06	0.00 (0) ±0.00	1.03 (20) ±0.01	1.71 (34) ±0.10	1.45 (29) ±0.04	5.08 (100) ±0.12

トン・多肥区では21.2kgとなる。また、同様にしてこの投入窒素量から作土の窒素増加量と水稻による窒素収奪量を差し引いて、見かけ上の系外への窒素損失量を計算すると、3.6トン・少肥区では1.0kg、3.6トン・標肥区では3.9kg、3.6トン・多肥区では4.8kgである。

家畜ふん堆肥3.6トン(標肥・多肥)区の作土の窒素増加量や水稻による窒素収奪量については、稲わら堆肥3~4トン(標肥)区のそれらとほぼ同じ量である。それに対して、系外への損失量はかなり小さな値である。この理由の一つとして、家畜ふん堆肥として投入した窒素量を過少評価していることが考えられる。

表9に示したように、2000年産の堆肥について生状態で形態別窒素を分別定量すると、稲わら堆肥には水溶性のアンモニア態窒素がほとんど含まれていないのに対して、家畜ふん堆肥には全窒素量の17%がアンモニア態窒素であった。この家畜ふん堆肥のpHは7.8なので、アンモニア態窒素は風乾過程で揮散することが予想される。実際に、乾燥処理したものは、水抽出のアンモニア態窒素分にほぼ相当する窒素量が損失した(表10)。表2で求めた全窒素含量は、乾燥堆肥を分析したものなので、生状態で

表10 2000年産堆肥の乾燥処理による全窒素含量の変化

有機物	生状態の堆肥 の全窒素含量 Nmg/g 乾物	乾燥処理堆肥 の全窒素含量 Nmg/g 乾物	乾燥処理に 伴う窒素損失率 (%)
稲わら堆肥	14.0	13.9	1
家畜ふん堆肥	20.1	16.1	20

表11 化成肥料及び堆肥中の窒素の行方

効果	事例*	堆肥中 の N	化成肥 料の N	作土への N集積量	水稻による N収奪量	系外への N損失量	水稻収量の 変化
化成肥料	B-A	0	8.00	0.24[3]	3.85[48]	3.91[49]	254→534
	H-G	0	6.56	0.55[8]	3.67[56]	2.33[35]	302→547
	I-H	0	6.22	0.08[1]	3.30[53]	2.85[46]	547→657
	K-J	0	4.61	-0.24[-5]	1.90[41]	2.94[64]	616→675
稲わら堆肥	C-B	5.54	0	0.87[16]	1.74[31]	2.93[53]	534→611
	D-B	11.07	0	1.74[16]	2.83[26]	6.50[59]	534→634
	E-B	16.61	0	2.84[17]	3.89[23]	9.88[60]	534→637
	F-B	22.15	0	3.63[16]	4.58[21]	13.93[63]	534→636
家畜ふん堆肥	J-G	16.87	0	5.13[30]	5.77[34]	5.97[35]	302→616
	L-H	16.87	-0.83[5]	3.63[22]	4.89[29]	7.53[45]	547→686

注. []内の数値は、化成肥料及び有機物中の窒素の行方の百分率を示す。

*: 事例の記号は、表7, 8と同一である。

含まれているアンモニア態窒素については、表2の数値には考慮されていないことになる。稲わら堆肥にはアンモニア態窒素がほとんど含まれていないことから問題は小さい。しかし、家畜ふん堆肥には多くのアンモニア態窒素が含まれており、表2では過小評価している。アンモニア態窒素の含有量(含有比)は製造方法や副資材の種類や混合割合によって変動が予想される(原田・山口1997)が、ここでは、2000年産の家畜ふん堆肥のアンモニア態窒素含有比である17%を用いて、投入窒素量を再推定してみると、家畜ふん堆肥現物3.6トン当たり16.9kgとなる。この再推定に基づいて系外への窒素損失量を計算したときの値は、2.9kg増える(表8のイタリック)。

4. 化成肥料及び堆肥中の窒素の行方

1) 化成肥料の窒素の行方

稲わら堆肥無施用・標肥区と同・無窒素区との差し引き[B-A]により、見かけ上の化成肥料の窒素の行方を推定した(表11)。10a当たり8.0kgの化成肥料の窒素は、作土には0.2kgとほとんど集積せず、水稻による収奪が3.9kg、系外への損失が3.9kgとほぼ半々で、水稻による利用率は約50%である。この数値は、全量基肥(1981~1989年)と基肥+追肥(1990~1999年)からなる19年間の平均値であるが、本ほ場における全量基肥の場合の利用率もほぼ同様の値である(住田ら1990)。

この化成肥料の窒素の見かけ上の分配は、10a当たりの水稻収量が250kg水準と550kg水準との差し引きにより得られたものであるが、同様に、家畜ふん堆肥連用試験ほ場のデータを用いて、10a当たりの収量水準の差が250kg, 100kg, 50kgにおいて、化成

肥料の窒素の行方を推定した(表11)。稲わら堆肥連用試験は場の[B-A]に相当する[H-G](収量水準の差250kg)では、水稻による収奪の割合、すなわち水稻による利用率がさらに高い値となっている。また、地域の標準的な収量である600kgを挟んだ、収量水準の差が100kgの[I-H]でも、水稻による収奪の割合はほぼ50%である。このことから、本試験が行われた気象条件、土壌条件、栽培条件における化成肥料の窒素(基肥+追肥)の利用率は、標準的な施肥量ではほぼ50%が期待できると考えてよい。これは、一般にいわれている基肥窒素の利用率20~40%(庄子・前1984)よりもやや高い値となっている。一方、極多収や、高栄養価の飼料用稲の生産をねらった、家畜ふん堆肥3.6トンに併用した化成肥料の窒素は、[K-J]の差し引き結果にみられるように、水稻による収奪の割合が低下し、系外への損失の割合が60%以上に増大した。

ところで、重窒素で標識した施肥窒素の一部は、有機化によって土壌に固定(作土への集積)されることはよく知られている(庄子・前1984, 山室1990)。このことは、施肥窒素が見かけ上作土に集積しないとの本報告の差し引き法の結果と一見矛盾するよう思われる。しかし、蜂ヶ崎・相馬(1989)によれば、重窒素で標識した化成肥料(硫安)を連用すると、水稻による施肥由来窒素の積算利用率は年々向上しており、連用10年目までのその利用率(Y)は、連用年数(X)と $Y=25.6+6.16\ln X$ ($R^2=0.99$)の関係が示されている。このことは、当年に施用された施肥窒素の一部は土壌に固定されるが、その窒素は再び無機化して、翌年以降にも水稻に利用されることを示している。つまり、化成肥料の窒素は、施用当年ばかりでなく、翌年以降にもごくわずかではあるが肥効がある。化成肥料の長期連用試験において、差し引き法により求められる施肥窒素の行方は、単に当年施用した施肥窒素の行方をみているのではなく、前年、前々年と過去に施用したすべての施肥窒素を加味したものになっている。

2) 堆肥中の窒素の行方

稲わら堆肥施用区(C, D, E, F)と無施用区(B)との差し引きにより、見かけ上の稲わら堆肥中の窒素の行方を推定した(表11)。10a当たり5.5kg~22.2kgの稲わら堆肥中の窒素は、作土への集積が0.9kg~3.6kg、水稻による収奪が1.7kg~4.6kg、系外への損失が2.9kg~13.9kgとなった。これを比

率でみると、堆肥の投入量にかかわらず作土には16~17%が集積した。一方、水稻による収奪率は、堆肥の投入量が増えるに従って低下し、10a当たり1トンでは31%あったものが、4トンでは21%にとどまった。逆に、系外への損失率は、堆肥の投入量が増えるに従って増大し、1トンでは53%であったものが、4トンでは63%にまで達した。

稲わら堆肥連用試験ほ場においては、化成肥料の標準的な窒素施肥量(標肥)に、稲わら堆肥を上乗せ施用している。前述したように、稲わら堆肥無施用でも収量は530kg/10aを超えており、稲わら堆肥を10a当たり1トン施用で610kg、2トンで630kgに達し、それ以上の施用量では増収しなかった。水稻の窒素吸収量の増加も小さく、可給化した窒素の多くは系外へ損失した。

一方、家畜ふん堆肥3.6トン・少肥区と家畜ふん堆肥無施用・少肥区との差し引き[J-G]により、見かけ上の家畜ふん堆肥中の窒素の行方を推定した(表11)。ここでは、分析試料の乾燥調整過程で揮散したと予想されるアンモニア態窒素を補正した家畜ふん堆肥の窒素含量により計算した窒素収支の数値を用いた。その結果、10a当たり16.9kgの家畜ふん堆肥中の窒素は、作土への集積が5.1kg、水稻による収奪が5.8kg、系外への損失が6.0kgとなった。また、家畜ふん堆肥3.6トン・多肥区と家畜ふん堆肥無施用・標肥区との差し引き[L-H]により、見かけ上の家畜ふん堆肥中の窒素の行方を推定すると、10a当たり16.9kgの堆肥中の窒素は、作土への集積が3.6kg(22%)、水稻による収奪が4.9kg(29%)、系外への損失が7.5kg(45%)となった。なお、この差し引きでは、肥料による投入窒素量が異なるので、わずかではあるが0.8kg(5%)の施肥窒素の差があるため、堆肥中の窒素の作土への集積、水稻による収奪及び系外への損失の合計は100%とならない。

5. 総合考察

環境保全型農業の立場から土壌の環境容量(上沢1993)という概念があり、作土の堆肥受け入れ可能量の把握が重要である。本試験においては、堆肥の肥効(堆肥中の窒素吸収量)が安定している時期では、稲わら堆肥の施用量にかかわらず堆肥中の窒素の作土への集積率はほぼ一定であった(表11)。このことは、連用する稲わら堆肥の施用量がたとえ1トンと少なくとも、堆肥中の窒素の50%以上が系外

表12 稲わら堆肥30年連用に伴う作土と下層土の全窒素含量の変化

	全窒素含量 (g/kg)			差	土 壌 量 (トン/10a)	堆肥中の窒素の集積量 (kg/10a)	
	堆 肥 2 トン	堆 肥 無 施用				30 年間	年 平均
作 土	2.88	1.97	0.91	150	136.5	4.6	
下 層 土	1.37	1.18	0.19	120	22.8	0.8	

注. 全窒素含量は2000年春に調査。

へ損失することを意味する。

ところで、大山(1993)は、この稲わら堆肥連用試験ほ場において、稲わら堆肥の連用開始から13年目までの堆肥中の窒素の行方を計算している。それによれば、作土への集積率は50% (1トン) ~39% (4トン) であり、本試験で求めたその後の19年間における作土への集積率16~17%と比較するとかなり高い値である。一方、水稲による収奪率は18% (1トン) ~14% (4トン) で、連用11年目から13年目の3年間ではすでに22%に達していることを示している。本試験で求めたその後の19年間における水稲による収奪率は31% (1トン) ~21% (4トン) で、3トン、4トン連用ではこの時期から水稲による収奪率はほぼ一定になっているとみられる。

このように、本試験で用いた稲わら堆肥中の窒素は、堆肥連用開始から10年程度は作土への集積に大きく寄与し、水稲による収奪は少ない。しかし、その後は水稲による収奪率が作土への集積率を上回っている。また、系外への損失率は、連用開始から13年目まで (32% (1トン) ~47% (4トン)) より、その後の19年間 (53% (1トン) ~63% (4トン)) の方が大きくなっている。すなわち、稲わら堆肥の長期連用によって、作土の窒素肥沃度が向上し、水稲への窒素供給も向上しているが、一方で系外への損失も大きくなると推定される。

この系外への損失のなかには、下層土への集積が含まれている。稲わら堆肥連用試験ほ場と同じ大曲研究拠点内に、1970年以降、毎年、同じ稲わら堆肥を10a当たり2トン及び0トン(無施用)連用してきた試験ほ場がある。このほ場において、連用開始30年後にあたる2000年春に作土と下層土(鋤床から約10cmの厚さ)の全窒素含量を分析した(表12)。作土では、堆肥2トンと無施用との間に0.91 g/kgの差があり、作土重150トン/10aとすれば、30年間の平均で、毎年、4.6kgの堆肥中の窒素が集積していることになる。これに対して、下層土でも同様

に0.19 g/kgの差があり、下層土重を120トン/10a(下層土の厚さ10cm×容積重1.2 g/ml)とすれば、毎年、0.8kgの堆肥中の窒素が集積していることになる。作土への集積量と比べれば少ないが、それでも作土への集積量の20%近くにはなる。このことから、系外への損失として扱っているうちのいくらかは下層土にとどまっていることになる。このように、下層土にとどまっている堆肥中の窒素は考慮すべき量ではあるが、それを除いた系外への損失は依然として多い。

この系外への損失としては、田面水や浸透水による流出、脱窒があげられる。水田では、多くは環境汚染にはつながらない窒素ガスによる脱窒であるが、この脱窒の過程で地球温暖化ガスやオゾン層破壊ガスとされている亜酸化窒素が発生する(楊1994)。また、畑地で大きな問題となっている硝酸性窒素の溶脱も少なからずある(関矢1987)。

以上みてきたように、稲わら堆肥や家畜ふん堆肥の長期連用は、どちらも作土の窒素肥沃度を向上させるものの、見かけ上の堆肥中の窒素の水稲による収奪率(利用率)は、化成肥料の窒素のそれよりも低い。水稲による収奪率に作土への集積率を加えても、堆肥は肥料と同等かそれ以下である。なお、家畜ふん堆肥の一例[J-G]を除いて、見かけ上の堆肥中の窒素の行方は、化成肥料の標準的な窒素施肥量に堆肥を上乗せ施用した条件で推定している。稲わら堆肥の施用量の増加に伴い、見かけ上の堆肥中の窒素の水稲による利用率が低下していることから、化成肥料の窒素についても同様に利用率が低下しているとすれば、化成肥料の窒素の利用率を一定としている差し引き法では、堆肥中の窒素の利用率を過少評価し、系外への損失率を過大評価している可能性がある。

現在、家畜ふん尿の処理という立場からその堆肥化物の水田での利用が期待されているが、こうした堆肥の肥効特性を踏まえて、その活用法を考えてい

く必要がある。

引用文献

- 1) 秋田県農業試験場生産環境部土壤基盤担当. 2001. 堆きゅう肥の水抽出による窒素成分分析法. 平成12年度研究成果情報(東北農業) p.89-90.
- 2) 蜂ヶ崎君男, 相馬駛春. 1989. 重窒素利用水田土壤における施肥窒素の動向. 土肥要旨集 35: 263.
- 3) 原田靖生, 山口武則. 1997. 家畜排泄物堆肥の品質の実態と問題点(西尾道徳監修, 環境保全と新しい畜産). 農林水産技術情報協会. p.229-246.
- 4) 金森哲夫. 2000. 国公立試験研究機関における有機物・肥料等の長期連用試験の現状について. 土肥誌 71: 286-293.
- 5) Mastushita, K.; Miyauchi, N.; and Yamamuro, S. 2000. Kinetics of ¹⁵N-labelled nitrogen from co-compost made from cattle manure and chemical fertilizer in a paddy field. Soil Sci. Plant Nutr. 46: 355-363.
- 6) 松山 稔, 牛尾昭浩, 桑名健夫, 山室成一. 1999. 水稻ポット栽培における有機物由来窒素の吸収利用率—有機物連用時の各施用年次別吸収割合—. 土肥要旨集 45: 177.
- 7) 西田瑞彦, 土屋成一. 1999. 暖地水田に施用した有機物由来窒素の移植水稻による吸収と土壤残存. 土肥要旨集 45: 178.
- 8) 大山信雄. 1993. 水田における施用有機物の分解・集積及び水稻に対する効果. 東北農業研究 30: 52-72.
- 9) 岡本玲子, 大嶋秀雄, 山口武則, 尾崎保夫, 川上一夫, 藤井國博. 1992. 筑波地区における降雨の化学的性状に関するモニタリングデータ(1985~1990年). 農環研資料 13: 1-308.
- 10) 関矢信一郎. 1987. 水田における養分動態と養分収支(農業技術体系土壤施肥編1. 土壤と根圏V). 農山漁村文化協会. p.1-12.
- 11) 柴原藤善, 小松茂雄, 長谷川清善, 犬伏和之, 山室成一. 1998. ¹⁵Nトレーサー法による稲わらおよび牛糞堆肥連用水田の窒素動態解析 第3報 有機物由来窒素の動態. 土肥要旨集 44: 134.
- 12) 庄子貞雄, 前 忠彦. 1984. 土壤中の窒素の動きとイネの窒素吸収(佐藤庚ら共著, 作物の生態生理). 文永堂. p.102-110.
- 13) 住田弘一, 大山信雄, 野副卓人, 佐藤智男. 1990. 要素欠除処理にみられる水稻の生育, 収量及び養分吸収特性と土壤養分の動態. 東北農試研報 82: 19-45.
- 14) 樽見美有希, 山室成一. 1997. 水田土壤中に施用した牛ふん堆肥と牛ふんオガ堆肥の窒素動態. 土肥要旨集 43: 432.
- 15) 上之蘭茂, 長友 誠, 山室成一. 1998. ¹⁵N標識有機物用いた植物由来窒素の動態解析—シラス水田における家畜ふん堆肥由来窒素の動態—. 土肥要旨集 44: 133.
- 16) 上沢正志. 1993. 物質循環機能が形成する環境容量はいかほどだろうか?. 農及園 68: 333-334.
- 17) 山室成一. 1990. 窒素動態に関する¹⁵Nトレーサー法の理論的展開と水稻吸収量予測(日本土壤肥料学会編, 水田土壤の窒素無機化と施肥). 博友社. p.169-181.
- 18) 安田道夫, 岡田泰明, 野副卓人. 2000. 東北地域における汎用水田の窒素富化機能の特徴. 土肥誌 71: 849-856.
- 19) 楊 宗興. 1994. 亜酸化窒素(陽捷行編著, 土壤圏と大気圏—土壤生態系のガス代謝と地球環境). 朝倉書店. p.85-105.