

Dynamics of Nitrogen Derived from Organic Materials Applied to Paddy Fields as Estimated by a Direct Evaluation Method Using 15 -Nitrogen

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2019-03-22 キーワード (Ja): キーワード (En): δ ^{15}N , N dynamics, ^{15}N , ^{15}N -labeling technique, organic materials, paddy field, rice 作成者: 西田, 瑞彦 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24514/00001242

重窒素を用いた直接的な手法による水田における 有機質資材由来窒素の動態解明

西 田 瑞 彦*¹⁾

抄 録：水田における有機質資材由来窒素の動態を重窒素 (^{15}N) による直接的な追跡手法により明らかにする目的で、 ^{15}N で標識した有機質資材の施用試験を行い、長期連用試験における施用有機質資材と土壌の重窒素自然存在比 ($\delta^{15}\text{N}$ 値) の関係を検討した。その結果、有機質資材の分解率の評価法であるガラス繊維ろ紙法において、窒素量に基づき評価される従来の窒素分解率は、必ずしも有機質資材由来窒素の分解率を示さないことが明らかとなった。暖地水田における7種類(牛ふんオガクズ堆肥、鶏ふん堆肥、乾燥豚ふん、稲わら堆肥、米ぬか、稲わら、小麦わら)の有機質資材由来窒素の収支が生育時期別に明らかとなった。牛ふん堆肥との併用により、無機質肥料のみならず有機質資材も緩効化され得ることが明らかとなった。寒冷地水田における牛ふんオガクズ堆肥由来窒素の収支を3年間にわたり検討した結果、堆肥を由来とする窒素の無機化とその水稲による吸収が温度に依存することが明らかとなった。さらには、長期連用試験における $\delta^{15}\text{N}$ 値の推移から、水田土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値は化学肥料や有機質資材として施用される窒素の $\delta^{15}\text{N}$ 値とその蓄積量の影響を受けること、天然供給される窒素の影響も受けることが明らかとなった。

キーワード：水田、水稲、有機質資材、重窒素標識法、重窒素自然存在比、窒素動態

Dynamics of Nitrogen Derived from Organic Materials Applied to Paddy Fields as Estimated by a Direct Evaluation Method Using ^{15}N -Nitrogen : Mizuhiko NISHIDA*¹⁾

Abstract : In order to directly elucidate the dynamics of nitrogen (N) derived from organic materials applied to paddy fields, ^{15}N -labeled organic materials were used in field experiments, and the ^{15}N natural abundances ($\delta^{15}\text{N}$) of soils and organic materials in long-term field experiments were investigated. Applying ^{15}N -labeled organic materials for the glass fiber-filter paper bag method, a discrepancy in the N remain rate of organic materials was observed between the evaluation by the N content and the evaluation by the ^{15}N abundance. Budgets of N derived from ^{15}N -labeled cattle manure compost, poultry manure compost, dried swine feces, rice straw compost, rice bran, rice straw, and wheat straw, which were applied to a paddy field in the warm climate region of Japan, were clarified. By the simultaneous application of cattle manure compost and ^{15}N -labeled organic materials (swine manure compost and rice bran), the N recovery from swine manure compost and rice bran was impeded compared with their single application. Well-composted cattle manure compost, which was applied to a paddy field in the cool climate region of Japan, was a stable N source for rice plants for at least 3 years. The $\delta^{15}\text{N}$ values of soils and composts in long-term field experiments indicated that the $\delta^{15}\text{N}$ values of paddy soils could be affected by the natural N input in addition to extraneous N that was applied in the form of chemical N fertilizers and organic materials.

Key Words : $\delta^{15}\text{N}$, N dynamics, ^{15}N , ^{15}N -labeling technique, organic materials, paddy field, rice

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

2009年7月29日受付、2010年2月3日受理

目 次

I 緒言	2	V 寒冷地水田に施用された ¹⁵ N標識牛ふんオガ	
1. 背景	2	クズ堆肥由来窒素の3年間の動態	19
2. 既往の研究	3	1. 材料および方法	19
3. 研究の目的	4	2. 結果	21
II ¹⁵ N標識有機質資材を用いたガラス繊維ろ紙		3. 考察	22
法における有機質資材の窒素残存率	5	4. まとめ	24
1. 材料および方法	6	VI 長期堆肥連用水田における ¹⁵ N自然存在比	
2. 結果	7	($\delta^{15}\text{N}$ 値)の変化	24
3. 考察	7	1. 材料および方法	25
4. まとめ	9	2. 結果	27
III 暖地水田に施用された多様な ¹⁵ N標識有機質		3. 考察	28
資材由来窒素の水稲1作期間中の動態	9	4. まとめ	30
1. 材料および方法	10	VII 総合考察	30
2. 結果	11	1. ガラス繊維ろ紙法による有機質資材の窒	
3. 考察	12	素分解率/残存率の注意点	30
4. まとめ	15	2. 水稲栽培における有機質資材の利用と課	
IV 牛ふん堆肥との併用による ¹⁵ N標識有機質資		題	31
材由来窒素の水稲による吸収過程の変化	15	3. $\delta^{15}\text{N}$ 値による有機質資材由来窒素動態の評	
1. 材料および方法	16	価法の課題	33
2. 結果	17	引用文献	33
3. 考察	17	Summary	39
4. まとめ	19		

I 緒 言

1. 背景

農業においては、作物残渣や家畜排泄物といった多様で大量の有機性廃棄物が生じる。これらは本来貴重な有機性資源であり、それを再び農業において利用し、なるべく循環的でしかもそれが生産性とも結びつく農業を進めていく必要がある。一方、近年消費者においても、環境問題に対する意識の高まり、安全・安心な食品への志向などから、有機農産物に代表されるような有機性資源を活用した農産物の需要が高まっている（農林水産省 2006）。このような状況下で2006年12月に有機農業推進法が成立し、国を挙げて有機質資材を活用した農業を推進しようとしている。

米について2006年にJAS規格に基づく有機食品として格付けされているのは、全生産量の0.13%に留まっている（農林水産省 2007）。また、水田に施用される有機質資材の施用量は減少傾向にあり、堆きゅう肥の施用量は1970年の4,510 kg ha⁻¹に対し、2001年は910 kg ha⁻¹にまで減っている。一方、収穫残渣である稲わらでさえも全水田面積の30%以上で鋤き込みが行なわれておらず、2001年の稲わらの平均鋤き込み量は3,600 kg ha⁻¹に留まっている。こ

のように現在の水稲作は必ずしも有機性資源を活かしたもにはなっていない。

さらに近年では、水田の地力低下さえ懸念される事態が生じている。ひとつには、バイオマス燃料としての稲わらの利用があり、特に最近原油価格の高騰を背景に現実味を帯びてきている。可食部に留まらず稲わらさえも圃場外へ持ち出すとなると、水田において生産された全地上部が系外に出されることになる。こうなると養分収支からみて現在の地力は低下する。ふたつめは、水田における飼料イネ生産である。近年その栽培面積が増加傾向にあったが（農林水産省農林水産技術会議事務局 2006）、特に最近アメリカ、ブラジルなど食糧輸出国におけるバイオ燃料向け作物栽培面積の増加による飼料の高騰が飼料イネ生産の追風となっている。飼料イネ生産では全地上部が系外に持ち出されるため、有機質資材を投入しなければ現在の地力は低下する。そしてもうひとつは水田転作によって生じる地力低下が課題となっている。食料自給率向上のために、30年以上にわたり水田転作が勧められてきた。長年畑状態にすると地力が低下し減収するが（松村 1992、和田 1984）、2～3年の畑期間に対して2～3年の水田期間で圃場を管理する田畑輪換を行なうことで高生産が持続可能とされてきた（高橋 1983、花井

1987、佃 1989、北田ら 1993)。しかし、最近水田期間が畑期間と同程度の田畑輪換においても窒素肥沃度が低下することが明らかにされている(住田ら 2005)。このように、有機質資材の施用を必要としている水田の割合が確実に増加しつつある。

一方、畜産が高密度に行なわれている地域においては、窒素を含む膨大な量の家畜ふん尿が排泄されている(築城・原田 1997、生雲 2003)。畜産が高密度に行なわれている地域の中には、窒素収支からみて過剰な窒素が排泄物を通じて農地に還元されている場合すらある(神山ら 2003)。このような畜産地帯で生じた過剰な家畜排泄物は地域外へ持ち出し、有機質資材の施用を必要としている地域で用いられることが望ましい。このように、農業から生じる有機物は偏在しており、それを解消するための利用が強く求められている。

以上のように、水田において有機質資材が有効に活用されているとは言えず、しかも有機質資材の施用がないと地力が低下してしまう状況が存在する。こうした状況を解消し、偏在著しい家畜排泄物を含む有機質資材を活用する水田農業技術を確立するためには、作物生産および環境への影響が最も大きい養分である窒素の動態を把握する必要がある。水田に施用された有機質資材由来窒素の動態に関する詳細な情報は、水田を含む農業生態系の中で有機質資材の循環的な利用を続けるためには不可欠である。

2. 既往の研究

1) 間接的手法

水田に施用された有機質資材の窒素動態については、これまで多くの研究が行なわれてきた。そのひとつは水田圃場における有機質資材の施用試験で、そこでは無施用区との差引き法により水稲による有機質資材由来窒素の吸収量や土壌への残存量が推定されてきた(岩田ら 1980、大山 1982、志賀ら 1985b、上山ら 1995、瀧 1996、香西・平木 1997、住田ら 2002、他多数)。この手法は長期連用試験では比較的明瞭な結果が得られるが、通常の施用量を単年施用した場合、有機質資材施用の有無は土壌の窒素量の違いとして明瞭には表れないことがある。さらに、実際の圃場においては、施用有機質資材由来の窒素は圃場全体に均一に存在するわけではなく、現実問題として短期的な窒素残存量を正確に評価するのは容易ではない。また、水稲による有機質資材由来窒素の吸収についてもその評価が難しい

場合がある。例えば、堆肥化されていないわら等粗大有機物の施用によっては、施用区の方が無施用区よりも水稲の窒素吸収量が少ない場合も報告されており(前田・南 1981、田中 2002)、その場合には、わら由来窒素は見かけ上全く吸収されなかったことになってしまう。

一方、有機質資材の分解率を効率的に推定するためにガラス繊維ろ紙法が考案され(前田・鬼鞍 1977)、各地で同手法が利用されている(前田・志賀 1978、渡辺ら 1981、Murayama 1984、久保田・高柳 1984、斉藤ら 1985、志賀ら 1985a、山本・久保田 1985、渡部・石垣 1985、山本ら 1987、北田 1988、Murayama *et al.* 1990、宗林ら 1991、後藤・江口 1998、佐藤・中村 2000)。ガラス繊維ろ紙法においては、高い炭素率(C/N比)の有機質資材はしばしば窒素の残存率が100%を超えた評価値となり(前田・鬼鞍 1977、前田・志賀 1978、渡辺ら 1981、久保田・高柳 1984、志賀ら 1985a、山本・久保田 1985、山本ら 1987、北田 1988、Murayama *et al.* 1990、宗林ら 1991)、長期間の土壌埋設を経ても有機質資材の窒素は減少するどころか、むしろ増加することになる。圃場に施用された有機質資材は確実に分解し、有機質資材の窒素も時間の経過とともに減少すると想定される。この増加はガラス繊維ろ紙筒外部から窒素が入り込むことによると推定されるので、ガラス繊維ろ紙法での100%超の評価はろ紙筒内部の有機物の分解を正確に表しているものではないと考えられる。

この他に、土壌からの窒素無機化量を反応速度論的手法により推定する方法があり(杉原ら 1986)、本手法を用いて有機質資材からの窒素無機化量の推定も行なわれている(郡司掛・久保 1996、酒井・山本 1999)。しかし、本手法では有機質資材由来窒素の作物による吸収量、土壌残存、消失については対象としてはいない。

以上のように、有機質資材そのものの窒素動態に注目した場合、これらの間接的な評価手法から得られる情報では十分ではなく、水稲による有機質資材由来窒素の吸収量、土壌残存量、またこれらの水稲生育期間中の経過、年次経過等の詳細は不明な点が多い。

2) 直接的的手法

重窒素(^{15}N)で標識された有機質資材を用いることにより、その資材を由来とする窒素の動態を直接評価することができる(^{15}N 標識法)。有機質資材

由来窒素の動態を正確に評価するには ^{15}N 標識有機質資材の利用が有効であることは山室 (1995)、Hood *et al.* (1999)、Muñoz *et al.* (2003) によって指摘されている。また、高橋ら (2000) は ^{15}N 標識牛ふん堆肥と ^{15}N 標識稲わらを施用してポット試験を行い、両有機質資材からの窒素吸収は差し引き法では明確な差はなかったが、 ^{15}N 存在比で見ると有機質資材により異なることを報告している。この結果は、 ^{15}N 標識有機質資材を用いなければ得られないものであり、 ^{15}N 標識有機質資材を用いた窒素動態の直接的評価法の有効性を示している。この ^{15}N 標識法を用いることにより、対象とする有機質資材由来の窒素と土壌由来の窒素を区別することができ、短期、長期と時間に関わりなく有機質資材由来窒素の動態が追跡可能となる。

水稲を対象とした研究としては、 ^{15}N 標識稲わらを用いた研究が1970年代にIRRI (Yoneyama・Yoshida 1977)、1980年代に福島県 (安藤ら 1986) において行なわれている。本手法は、高額な ^{15}N 試薬を大量に必要とすること、均一に標識された有機質資材を確保する必要があること、並びに分析が煩雑であることから広くは使われてこなかった。そのため、水田において ^{15}N 標識有機質資材が用いられた研究事例は限られている (Azam 1990、三枝ら 1999、Matsushita *et al.* 2000ab、高橋・上之菌 2001、Ueno・Yamamuro 2001、Yamamuro *et al.* 2002、松山ら2003、Takahashi *et al.* 2003、上之菌ら 2004)。したがって、対象となった有機質資材の種類も限定されていることに加えて、試験条件もガラス室内でのポット試験のように圃場条件とは明らかに異なるものが多い。

自然界における ^{15}N 自然存在比 ($\delta^{15}\text{N}$ 値) には変異があり、それを利用してマメ科植物の窒素固定量の推定等が行なわれている (米山 1987、Stewart 2001)。また、 $\delta^{15}\text{N}$ 値を用いて水稲が吸収した堆肥や化学肥料を由来とする窒素量を推定する試みが行なわれている (徳永ら 2000)。自然条件での ^{15}N 存在比の変異を利用し、堆肥の窒素動態を推定する手法も ^{15}N を用いた直接的な窒素追跡法であり、 ^{15}N 標識資材を作製するための多大な費用、労力、時間を要せず、現場の農家圃場で実際に起きている現象を明らかにすることができるため、有望な手法である。この徳永ら (2000) の手法は、水稲の $\delta^{15}\text{N}$ 値が栽培された土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値に近く (Yoneyama *et al.*

1990、吉羽ら 1998)、窒素源の $\delta^{15}\text{N}$ 値と水稲の $\delta^{15}\text{N}$ 値が類似していることに基づく。この手法を有機質資材由来窒素の水田土壌中での動態の推定に利用するためには、供給される窒素源の $\delta^{15}\text{N}$ 値と水田土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値との関係を明らかにする必要がある。また徳永ら (2000) による推定値は必ずしも生産現場での堆肥の肥効の現れ方および ^{15}N 標識堆肥の施用試験結果とは合致しておらず、精度改善の余地はあると考えられる。そのためにも、供給される窒素源の $\delta^{15}\text{N}$ 値と水田土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値との関係に係る基礎的知見が必要である。水田土壌については、動物性有機物を施用した方が植物性有機物を施用したものよりも高くなる傾向のあることが報告されているが (吉羽ら 1998)、施用された資材の $\delta^{15}\text{N}$ 値と土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値との関係については検討されていない。また、水田に天然供給される窒素の $\delta^{15}\text{N}$ 値と土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値との関係についての報告は見られない。

3. 研究の目的

背景において述べたように、水田を含む農業生態系の中で有機質資材の循環利用を続けるためには、水田に施用された有機質資材由来窒素の動態に関する詳細な情報が不可欠である。しかし、既往の研究で述べたように、主に手法上の問題から有機質資材を由来とする窒素の動態には不明な点が多く、有機質資材由来窒素の水稲による吸収量、土壌残存量、またこれらの水稲生育期間中の経過、年次経過等の詳細は不明である。有機質資材由来窒素の動態を把握するためには、 ^{15}N を用いた直接的な窒素動態追跡法が有効である。本研究の目的は、水田に施用された有機質資材の窒素動態を ^{15}N による直接的追跡手法を用いて明らかにすることである。このために、以下のような一連の試験を行った。なお、それぞれの試験の目的については該当部分で改めて述べる。

(1) ガラス繊維ろ紙法は一部の有機質資材については施用基準の根拠となっているが (志賀 1984)、 ^{15}N 標識法を用いて有機質資材由来窒素の収支が直接調べられたことはない。そこで、 ^{15}N 標識有機質資材をガラス繊維ろ紙法に供試して ^{15}N 存在比から有機質資材由来窒素の収支を明らかにするための試験を行った。

(2) 水田においてその窒素動態が解析された ^{15}N 標識有機質資材の種類は限られており、圃場条件で行なわれた事例も少ない。また、有機質資材由来の窒素動態が水稲の生育時期別に明らかにされたこ

とはほとんどない。そこで、多様な有機質資材に由来する窒素の動態を水稲の生育時期別に明らかにするために、7種類の ^{15}N 標識有機質資材を施用し、圃場条件における水稲1作期間中の窒素動態を追跡した。

(3) 畜産地帯外での利用が望まれている家畜ふんの中で、最も大量に発生するのが牛ふんである(山口ら 2000)。その活用法のひとつとして、肥効の低い牛ふん堆肥と肥効の高い他の有機質資材との併用が提案されている(松元 1999)。しかし、牛ふん堆肥とともに施用された硫酸の肥効が緩効化することが報告されており(Matsushita *et al.* 2000b)、牛ふん堆肥とともに施用される有機質資材の肥効も変化する可能性がある。したがって、牛ふん堆肥を併用した場合の ^{15}N 標識豚ふん堆肥と ^{15}N 標識米ぬか由来窒素の直播水稲による吸収過程を明らかにするための試験を行った。ここで、直播水稲を対象としたのは、水稲栽培の省力化が進められる中でその重要性が増していることによる。

(4) ここまでの本研究も含めて、水田に施用された ^{15}N 標識家畜ふん堆肥の窒素動態についての報告は、ほとんどが日本の暖地についてのものであり(Matsushita *et al.* 2000ab, Ueno・Yamamuro 2001, Yamamuro *et al.* 2002, 松山ら 2003, 上之蘭ら 2004)、この手法が日本の寒冷地水田において用いられたことはない。したがって、寒冷な気象条件下の水田における家畜ふん堆肥の窒素動態はよくわかっていない。また、過去の報告のなかで、 ^{15}N 標識有機質資材の窒素動態が2年以上追跡されたのは2例にとどまっており、そこでは ^{15}N 標識家畜ふん堆肥由来窒素は3年以上水稲によって吸収されていた(Ueno・Yamamuro 2001, 松山ら 2003)。これは有機質資材由来窒素の追跡を複数年継続することの重要性を示すものである。そこで、寒冷地水田における ^{15}N 標識牛ふんオガクズ堆肥の窒素動態を3年間にわたり追跡した。

(5) 水稲、堆肥、化学肥料、土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値から水稲が吸収した由来別窒素吸収量を推定する試みが行なわれている(徳永ら 2000)。これも ^{15}N を用いた直接的窒素追跡法と言える。今後この手法を有機質資材由来窒素の水田土壌における動態の推定にも利用していくためには、施用した資材と水田土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値の関係について明らかにする必要がある。そこで、長期間堆肥連用試験が行われてきた水田土壌と堆肥の $\delta^{15}\text{N}$ 値と窒素含量の推移を調査し、長

期にわたる土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値の変化と窒素源の $\delta^{15}\text{N}$ 値の関係を検討した。

本研究は九州沖縄農業研究センター(九州農業試験場)と東北農業研究センターにおいて行なったものである。本論文は既に公表した論文(西田ら 2001, Nishida *et al.* 2003, Nishida *et al.* 2004, Nishida *et al.* 2005, Nishida *et al.* 2007, Nishida *et al.* 2008)をもとにとりまとめたものである。本論文のとりにまとめにあたり東北大学大学院教授南條正巳博士には懇切なご指導をいただいた。元佐賀大学教授山室成一博士(故人)、元東北農業研究センター水田土壌管理研究室長(現野菜茶業研究所研究管理監)住田弘一博士には本研究の端緒を与えていただき、ご指導をいただいた。元東北農業研究センター水田土壌管理研究室長(現中央農業総合研究センター資源循環・溶脱低減研究チーム長)加藤直人博士には研究の遂行に当たりご指導、ご助言をいただき、終始激励をいただいた。東北農業研究センター関矢博幸主任研究員、契約研究員吉田光二博士には本論文のとりにまとめにあたりご助言とご協力をいただいた。元栃木県農業試験場(現栃木県芳賀農業振興事務所)薄井雅夫氏、青森県農林総合研究センター岩谷香緒里氏には本研究の遂行に特にご協力いただいた。元九州沖縄農業研究センター土屋一成博士(現東北農業研究センター)、森泉美穂子博士(現中央農業総合研究センター)には研究の遂行にご協力いただいた。一部の重窒素分析には秋田県農業試験場の分析装置を使用させていただいた。本研究を行なった九州沖縄農業研究センター(九州農業試験場)および東北農業研究センターの職員各位には多くのご援助、ご協力をいただいた。ここにこれらの方々へ深く感謝の意を表す。

II ^{15}N 標識有機質資材を用いたガラス繊維ろ紙法における有機質資材の窒素残存率

ガラス繊維ろ紙法はわらや堆肥等の有機質資材の窒素、炭素の圃場における分解を定量的に評価するために開発された(前田・鬼鞍 1977)。本手法における残存/分解率は土壌中に埋設された期間中のガラス繊維ろ紙内容物(土壌と有機質資材を混合したもの)の窒素量および炭素量の変化によって決められる。本手法を用いて種々の有機質資材の窒素、炭素の残存/分解率が様々な土壌条件において評価され(前田・志賀 1978, 渡辺ら 1981, Murayama

1984、久保田・高柳 1984、斉藤ら 1985、志賀ら 1985a、山本・久保田 1985、渡部・石垣 1985、山本ら 1987、北田 1988、Murayama *et al.* 1990、宗林ら 1991、後藤・江口 1998、佐藤・中村 2000)、一部は水田への有機質資材の施用基準決定の根拠となっている(志賀 1984)。

しかしながら、ガラス繊維ろ紙法においては、高いC/N比の有機質資材でしばしば窒素の残存率が100%を超えた評価値となり(前田・鬼鞍 1977、前田・志賀 1978、渡辺ら 1981、久保田・高柳 1984、志賀ら 1985a、山本・久保田 1985、山本ら 1987、北田 1988、Murayama *et al.* 1990、宗林ら 1991)、長期間の土壤埋設を経ても有機質資材の窒素が増加する事例も見られる。圃場に施用された有機質資材は分解し、有機質資材の窒素も時間の経過とともに減少することが想定される。この増加はガラス繊維ろ紙筒外部から窒素が入り込むことによると推定されるので、100%超の評価はろ紙筒内部の有機質資材の分解を表現するものではないと考えられる。そこで、ガラス繊維ろ紙法における有機質資材由来窒素の収支を正確に評価するために、ガラス繊維ろ紙法に¹⁵N標識有機質資材を供試し、水田圃場での埋設試験を行った。

1. 材料および方法

1) ¹⁵N標識有機質資材の作製

供試した¹⁵N標識有機質資材は、小麦わら、稲わら、牛ふんオガクズ堆肥のC/N比の異なる3種類とした。0.05m²のポットにパーミキュライトを充填した後、Hoaglandの水耕液(Hoagland・Arnon 1938)を液肥として施用しコムギ(*Triticum aestivum* L., 品種チクゴイヅミ)を栽培し、収穫後のわらを¹⁵N標識小麦わらとして用いた。液肥(水耕液)の窒素源としては約7 atom%の¹⁵N標識硝酸カリウムのみを用いた。¹⁵N標識稲わらについては、パーミキュライトを充填した0.05m²のポットに春日井氏の水耕液(吉羽 1990)を液肥として与え、そこでイネ(*Oryza sativa* L., 品種ヒノヒカリ)を栽培し、そのわらを用いた。本水耕液では約5 atom%の¹⁵N標識硫酸アンモニウムのみを窒素源として用いた。この方法で¹⁵N標識することにより、作物の部位別の¹⁵N存在比は均一になるとされている(山室 1995)。¹⁵N標識牛ふんオガクズ堆肥は、¹⁵N標識したトウモロコシ(*Zea mays* L.)を牛に給餌し、その牛が排泄したふんを収集し、重量比で30%程度のオガクズを混合し堆肥化したものである(山室 2000)。なおこれ

表1 供試¹⁵N標識有機質資材および土壌の化学的特性

	T-C (g kg ⁻¹)	T-N (g kg ⁻¹)	¹⁵ N (atom %)	C/N比
小麦わら	424	2.25	7.14	188
稲わら	408	10.1	4.93	40
牛ふんオガクズ堆肥	307	13.1	2.38	23
土壌	27.3	2.21	0.370	12

乾物重当たり

と同様の方法で作製された牛ふん堆肥の¹⁵N標識の均一性は松波・寶示戸(2005)、上之蘭ら(2008)によって逐次抽出法により確認されている。これらの有機質資材および土壌の化学的特性を表1に示した。

2) ガラス繊維ろ紙法の手順

ガラス繊維ろ紙法における有機質資材、土壌の前処理は前田・鬼鞍(1977)の方法にしたがった。九州沖縄農業研究センター筑後研究拠点(福岡県筑後市)の水田の作土を採取し、2mmの篩を通過させ供試土壌とした。土壌は細粒灰色低地土でWRB(World Reference Base for Soil Resources)ではEndogleyi-Hydragric Anthrosolsに分類される(FAO, ISRIC, and ISSS 1998)。表1に示すように、供試土壌の全炭素含量は27.3 g kg⁻¹、全窒素含有量は2.21 g kg⁻¹であった。小麦わらと稲わらはウイレー式粉砕器で粉砕し、わらの炭素が乾土1 kg当たり50 gとなるよう小麦わらと稲わらを40 gの生土と混合し、ガラス繊維ろ紙筒内に封入した。牛ふんオガクズ堆肥については、牛ふんオガクズ堆肥の炭素が乾土1 kg当たり43 gとなるよう30 gの生土と混合し、ガラス繊維ろ紙筒内に封入した。なお、牛ふんオガクズ堆肥については粉砕はせずにそのまま供試した。これらのガラス繊維ろ紙筒を2000年6月28日に九州沖縄農業研究センター内の水田圃場の作土約5 cm深に埋設した。なお、有機質資材を混合せず土壌だけ封入したガラス繊維ろ紙筒(対照区)も埋設した。供試圃場では窒素施肥は行わず、リン酸とカリをPK化成肥料にて各8 g m⁻²相当を全量基肥施用し、水稻栽培を行なった。ただし、ガラス繊維ろ紙筒を埋設した周辺は波板で囲い、ガラス繊維ろ紙筒内への水稻根の侵入を防いだ。本水田の水管理は慣行にしたがった。すなわち、8月初旬に1週間程度中干しを行なった以外は9月下旬まで湛水し、以降は落水状態で管理した。本圃場の日減水深は約2 cmであった。

3) 試料採取および分析

埋設したガラス繊維ろ紙筒の採取、内容物の処理、分析の手順についても前田・鬼鞍（1977）の方法にしたがった。ガラス繊維ろ紙筒の採取は埋設から42、153、310日後に行い、42および153日後については4反復、310日後については5反復で採取した。ガラス繊維ろ紙筒の内容物はロスのないように注意深く取り出し風乾した。風乾後その重量を測定し、振動粉碎器（C.M.T社 TI-100）で微粉碎した。微粉碎試料の窒素含量、¹⁵N存在比、炭素含量を全自動窒素炭素同位体比質量分析計（PDZ Europe社 ANCA-SL）にて測定した。供試有機質資材ならびに土壌の窒素含量、¹⁵N存在比、炭素含量も同様に微粉碎したうえでANCA-SLにて測定した。

ガラス繊維ろ紙筒の内容物の窒素量および炭素量に基づく残存率の推定は前田・鬼鞍（1977）の以下の方法にしたがった。この窒素残存率（以後窒素量から求めた窒素の見かけの残存率をNrcと記す）はガラス繊維ろ紙法において通常残存率とされている数値である。

$$\text{窒素残存率 (Nrc, \%)} = (W_2 \times N_2 - W_1 \times N_1) / (W_0 \times N_0) \times 100$$

$$\text{炭素残存率 (\%)} = (W_2 \times C_2 - W_1 \times C_1) / (W_0 \times C_0) \times 100$$

W₀：ろ紙筒内へ添加した有機質資材（埋設前）の乾物重（g）

N₀：供試有機質資材の窒素含量（kg kg⁻¹）

C₀：供試有機質資材の炭素含量（kg kg⁻¹）

W₁：埋設後の有機質資材無添加区（対照区）のろ紙筒内容物の乾物重（g）

N₁：埋設後の対照区のろ紙筒内容物の窒素含量（kg kg⁻¹）

C₁：埋設後の対照区のろ紙筒内容物の炭素含量（kg kg⁻¹）

W₂：埋設後の有機質資材添加区のろ紙筒内容物の乾物重（g）

N₂：埋設後の有機質資材添加区のろ紙筒内容物の窒素含量（kg kg⁻¹）

C₂：埋設後の有機質資材添加区のろ紙筒内容物の炭素含量（kg kg⁻¹）。

¹⁵N存在比からも供試有機質資材由来の窒素残存率を求めた。すなわち、ガラス繊維ろ紙筒内容物の¹⁵N存在比と窒素含量から、¹⁵N標識有機質資材を由来とする窒素量を求め、もともとガラス繊維ろ紙筒

に入れた全有機質資材窒素量に対するある時点の有機質資材由来窒素量の割合を以下の式により求めた（以後この真の残存率をNriと記す）。

$$\text{窒素残存率 (Nri, \%)} = [A_2 / A_0 \times (W_2 \times N_2)] / (W_0 \times N_0) \times 100$$

A₀：供試有機質資材の¹⁵N atom% excess

A₂：埋設後の有機質資材添加区のろ紙筒内容物の¹⁵N atom% excess

¹⁵N atom% excessは各試料の¹⁵N存在比（atom%）から0.366（自然存在比）を減じたもの。

なお、埋設実験を行った2000年は、平年と比較して有機質資材の分解に影響を与えるような特別な気象条件ではなかった。

2. 結果

1) 小麦わら

小麦わらのNrcとNriは、図1に見られるように大きく異なった。小麦わらのNrcは埋設後42日目には207%、埋設後153日目には306%、埋設後310日目には376%となり、全埋設期間を通して100%よりも高く増加を続けたが、Nriは埋設後42日目においてすでに85%と100%よりも低く、埋設後153日目には80%、埋設後310日目には77%となり、低下し続けた。このように、NrcとNriの違いは時間の経過とともに増大し、埋設後310日目にはその差は約300%となった。

2) 稲わら

稲わらについてもNrcは埋設後42日目には101%、埋設後153日目には118%、埋設後310日目には104%となり、全埋設期間にわたり100%を超えた。一方、Nriは埋設後42日目においてすでに71%と100%よりも低く、その後も低下し続け埋設後153日目には67%、埋設後310日目には61%となった。

3) 牛ふんオガクズ堆肥

牛ふんオガクズ堆肥についても埋設後のNrcとNriの推移は異なった。しかし、牛ふんオガクズ堆肥の場合は、小麦わら、稲わらの場合と比べてNrcとNriが同様な傾向を示し、埋設後42、153、310日目のNrcはそれぞれ91、96、97%、Nriはそれぞれ84、83、80%であった。また、牛ふんオガクズ堆肥のNriは供試有機質資材の中で最も高かった。

3. 考察

1) ¹⁵N存在比による残存量と全窒素量による残存量

供試有機質資材の中で最もC/N比の高い小麦わらのNrcとNriは著しく異なった。小麦わらのNrcは全

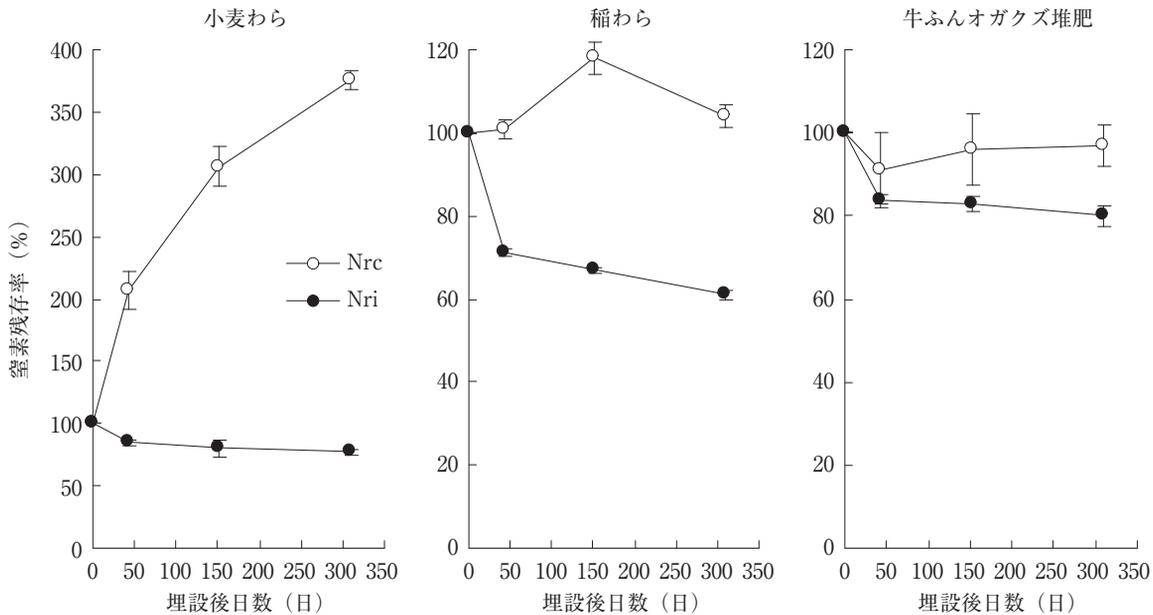


図1 ガラス繊維ろ紙法における ^{15}N 標識有機質資材の窒素残存率の推移 (エラーバーは標準誤差、埋設後42日目と153日目は $n=4$ 、埋設後310日目は $n=5$)

Nrc: 窒素量から求めた見かけの残存率、Nri: ^{15}N 存在比から求めた真の残存率

埋設期間中100%よりも高く、増加し続けた。志賀ら (1985a) の報告においても小麦わらのNrcは高く、ガラス繊維ろ紙筒の埋設から5年が経過しても100%を超えていた。しかし、 ^{15}N 標識小麦わらを用いることで、埋設後42日目ですでに小麦わらの窒素の消失が認められ、微生物による小麦わらの分解が速やかに進められることが示された。

稲わらについてもNrcは全埋設期間にわたり100%を超えた。これと同様に、ガラス繊維ろ紙法では稲わらからの窒素の消失が1年以上認められないことが多数報告されており (前田・鬼鞍 1977、前田・志賀 1978、久保田・高柳 1984、志賀ら 1985a、山本・久保田 1985)、ガラス繊維ろ紙法において稲わらの窒素は全体の収支をみる限りにおいては1年以上分解しないと評価されるのが一般的である。しかし小麦わらと同様に、稲わらを由来とする窒素が速やかに消失し始めることがNriから示された。

牛ふんオガクズ堆肥についてもNrcとNriは異なり、C/N比が23と比較的低く、堆肥化過程を経ている有機質資材でも、窒素量から求める見かけの残存率は有機質資材由来窒素の残存率よりも高いことが示された。

各有機質資材におけるNrcとNriはガラス繊維ろ紙筒内への窒素のインプットとアウトプットが同時に生じていることを示している。C/N比の高い有機

質資材では、ガラス繊維ろ紙筒内へ外から窒素が入り込むことが推定されていた (前田・志賀 1978)。本研究においては、有機質資材のC/N比にかかわらず窒素の出入りが同時に生じていること、すなわち有機質資材の分解による窒素の消失とガラス繊維ろ紙筒外から入り込んだ窒素の有機化が並行して進むことが確認された。ここで供試された全ての有機質資材において、炭素量から推定された炭素残存率は減少し続けた (図2)。すなわち有機質資材は分解し続け、炭素はガラス繊維ろ紙筒から消失し続けることが示された。また、炭素の分解過程とNriで示される窒素の分解過程は類似した傾向が見られた。

2) C/N比と窒素残存率

ガラス繊維ろ紙筒内への窒素の入り込みは窒素量から求める有機質資材の窒素残存率 (Nrc) に大きく影響し、結果として有機質資材そのものの窒素の残存率 (Nri) よりも高い残存率が導かれる。本研究において、NrcとNriの相違は有機質資材のC/N比が高くなるほど大きかった (図3)。すなわち、ガラス繊維ろ紙筒外からの窒素の入り込みはC/N比の高い小麦わらで多く、C/N比の低い牛ふんオガクズ堆肥で少なかった。また、ガラス繊維ろ紙筒外からの窒素の入り込みはC/N比の高い小麦わらでは増加し続け、C/N比の低い牛ふんオガクズ堆肥ではほとんど増加しなかった。このことから、窒素量から

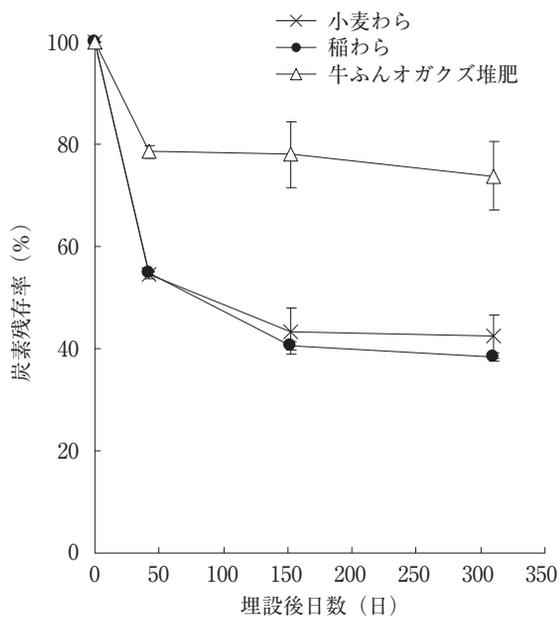


図2 ガラス繊維ろ紙法における炭素量から求めた¹⁵N標識有機質資材の炭素残存率の推移（エラーバーは標準誤差、埋設後42日目と153日目は $n=4$ 、埋設後310日目は $n=5$ ）

求める有機質資材の窒素残存率と¹⁵N存在比から求める有機質資材由来窒素の残存率の相違の程度は、有機質資材のC/N比に依存し、C/N比の上昇に伴い大きくなると考えられた。

4. まとめ

ガラス繊維ろ紙法における有機質資材由来窒素の収支を正確に評価する目的で、¹⁵N標識された小麦わら、稲わら、牛ふんオガクズ堆肥をガラス繊維ろ紙法に供試し、暖地水田において有機質資材の窒素残存率の評価を行なった。供試した全ての有機質資材において、窒素量と¹⁵N存在比により評価された有機質資材の窒素残存率は異なった。窒素量による小麦わらと稲わらの窒素残存率は310日間の埋設期間を通じて100%を超えていたが、¹⁵N存在比によると有機質資材由来窒素の消失が認められた。供試有機質資材の中で最もC/N比の低い牛ふんオガクズ堆肥では、窒素量から求めた窒素残存率と¹⁵N存在比から求めた窒素残存率は他の有機質資材よりも類似した値となった。窒素量および¹⁵N存在比から求めた窒素残存率の結果から、ガラス繊維ろ紙筒外から紙筒内への窒素の入り込みとろ紙筒内からの窒素の消失が同時に起きていることが確認された。また、窒素量から求める有機質資材の窒素残存率と¹⁵N存在比から求める有機質資材そのものの窒素残

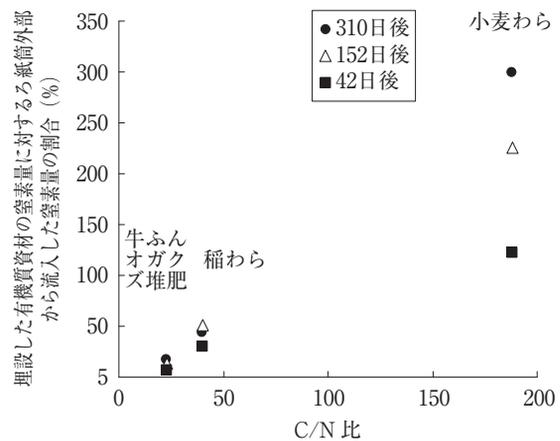


図3 ガラス繊維ろ紙筒に入れた有機質資材の窒素量に対する外部からの流入窒素量の割合（窒素量から求めた見かけの残存率 $N_{rc} - ^{15}N$ 存在比から求めた真の残存率 N_{ri} ）と供試有機質資材のC/N比との関係

存率との相違の程度は、有機質資材のC/N比に依存し、C/N比の上昇に伴い大きくなることが明らかとなった。

III 暖地水田に施用された多様な¹⁵N標識有機質資材由来窒素の水稲1作期間中の動態

水田において¹⁵N標識有機質資材が施用された研究事例は限られており、使用された有機質資材の種類も限定されている（Yoneyama・Yoshida 1977、安藤ら 1986、Azam 1990、三枝ら 1999、高橋ら 2000、Matsushita *et al.* 2000ab、高橋・上之菌 2001、Ueno・Yamamuro 2001、Yamamuro *et al.* 2002、松山ら 2003、Takahashi *et al.* 2003）。また、種類の異なる¹⁵N有機質資材の窒素動態を、水稲の生育時期別に比較した報告はほとんどない。さらに、生産現場では堆肥の肥効（化学肥料の窒素吸収率に対する堆肥の窒素吸収率の比）が作物に対する堆肥の窒素肥効の指標として用いられているが（原田 1998）、¹⁵N標識堆肥を用いてこの肥効率が評価されたことはない。

そこで、暖地水田において7種類の¹⁵N標識有機質資材の施用試験を行った。供試有機質資材には、豚ふん、米ぬか、麦わらの未だ¹⁵N標識法による報告事例のないものも含めた。本研究の目的は、北部九州の水田に施用された種々の¹⁵N標識有機質資材の水稲1作期間中における窒素動態を明らかにすること、およびこれらの肥効率を評価することである。

1. 材料および方法

1) 圃場試験の設定

九州沖縄農業研究センター、筑後研究拠点内の水田において1998年に小規模枠内への¹⁵N標識有機質資材の施用試験を行い、有機質資材由来窒素の水稻吸収量、土壌残存量を調査した。土壌は細粒灰色低地土でWRB (World Reference Base for Soil Resources) ではEndogleyi-Hydragric Anthrosolsに分類される (FAO, ISRIC, and ISSS 1998)。作土の全炭素含量は27.3 g kg⁻¹で全窒素含量は2.21 g kg⁻¹である。

代かきの済んだ圃場の作土 (約15 cm深) に15×30 cm、高さ30 cmの塩化ビニール製の枠を作土の深さに埋設し、枠内の作土を除去した。そこにあらかじめ採取し2 mmの篩いを通過させた作土の生土 (乾土として6.95 kg) と¹⁵N標識有機質資材、PK化成肥料を混合して入れた。供試した¹⁵N標識有機質資材は、家畜排泄物を由来するものとしては、牛ふんオガクズ堆肥、鶏ふん堆肥、乾燥豚ふんの3種類、作物残渣を由来するものとしては、稲わら堆肥、米ぬか、稲わらおよび小麦わらである。これらの有機質資材の化学的特性と施用量を表2に示した。施用量は有機質資材の現物重ベースとし、家畜排泄物を由来とするものは1,000 g m⁻²としたが、牛ふんオガクズ堆肥については2,000 g m⁻²施用区も設けた。作物残渣を由来とするものの施用量は500 g m⁻²としたが、稲わら堆肥については1,000 g m⁻²および2,000 g m⁻²とした。窒素肥料は施用せず、リン酸とカリについてはPK化成肥料を各8 g m⁻²相当施用した。先に述べたように、土壌と¹⁵N標識有機質資材、PK化成肥料を混合して枠内に入れ、6月24日に代かきを行った。その翌日イネ (品種ヒノヒカリ) の35日苗3個体を1株として各試験枠に移植した。

試験枠は1株 / (15×30 cm) の栽植密度の圃場内に2列おきに4列に配置し、列内の試験枠の配置は2株おきとした。各処理の配置は無作為に割り当てた。試験を実施した圃場の試験枠以外にはPK化成のみを施用した。圃場は9月下旬までは湛水し、以降は落水した。

2) ¹⁵N標識有機質資材の作製と調整

¹⁵N標識牛ふんオガクズ堆肥は¹⁵N標識したトウモロコシを牛に給餌し、その牛が排泄したふんを収集し、それに水分調整用のオガクズを重量比で30%程度混合し堆肥化した。この手順は山室 (2000) によって報告されているものと同様である。¹⁵N標識鶏ふん堆肥は¹⁵N標識された米を含む飼料を鶏に給餌し、そのふんを用いて堆肥化されるものである (Uenosono *et al.* 2002)。¹⁵N標識乾燥豚ふんは¹⁵N標識された米を豚に給餌し、そのふんを収集して風乾した後ウイレー式粉碎機で粉碎したものを供試した。

バーミキュライトを充填した0.05 m²のポットに約7 atom%の¹⁵N標識硫酸アンモニウムを唯一の窒素源として含む春日井氏の水耕液 (吉羽 1990) を液肥として与えて¹⁵N標識イネを栽培・作製した。そのわらを2~3 cmに切断して供試¹⁵N標識稲わらとし、わらの一部は堆肥化し¹⁵N標識稲わら堆肥とした。また、その玄米を精米し、そのぬかを¹⁵N標識米ぬかとした。¹⁵N標識コムギについては、バーミキュライトを充填した0.05 m²のポットに約4.5 atom%の¹⁵N標識硝酸カリウムを唯一の窒素源として含むHoaglandの水耕液 (Hoagland・Arnon 1938) を液肥として与えて栽培・作製した。そのわらを2~3 cmに切断し、¹⁵N標識小麦わらとした。

なお、本試験で用いた¹⁵N標識牛ふんオガクズ堆肥、稲わら、小麦わらは本論文のIIとは別途作製したものである。

表2 供試¹⁵N標識有機質資材の化学的特性と施用量

有機質資材の種類	施用量 (g FW m ⁻²)	T-N (g kg ⁻¹)	施用N量 (gN m ⁻²)	¹⁵ N (atom %)	T-C (g kg ⁻¹)	C/N	NH ₄ -N/T-N (%)
牛ふんオガクズ堆肥	1,000/2,000	4.41	4.41/8.82	4.57	138	31	0.9
鶏ふん堆肥	1,000	30.9	30.9	2.06	389	13	33
乾燥豚ふん	1,000	45.9	45.9	2.83	429	9	2.9
稲わら堆肥	1,000/2,000	2.79	2.79/5.58	6.83	92.3	33	1.1
米ぬか	500	25.0	12.5	6.90	405	16	0.1
稲わら	500	6.46	3.23	6.84	348	54	0.7
小麦わら	500	3.74	1.87	4.53	416	111	0.8

現物重当り

3) 試料採取および分析

牛ふんオガクズ堆肥の2,000 g m⁻²施用区、鶏ふん堆肥区、稲わら堆肥の2,000 g m⁻²施用区を除く全ての区において、植物と土壌の採取を移植後32、54、77、113日目 (DAT: Days after transplanting) に行った。牛ふんオガクズ堆肥の2,000 g m⁻²施用区と鶏ふん堆肥施用区は54、113 DATに、稲わら堆肥の2,000 g m⁻²施用区は68、113 DATに植物と土壌の試料採取を行った。試料採取は全て各処理2反復で行った。32 DATは最高分け時期、54 DATは幼穂形成期に、77 DATは穂ばらみ期に、113 DATは成熟期にほぼ相当する。植物試料はよく水洗した後70℃で通風乾燥した。乾燥試料は秤量後振動粉砕器 (C.M.T社 TI-100) で微粉砕した。土壌試料は全体をよく混合してから一部を風乾した。この風乾土を砕いた後そこから注意深く植物の根を除去し、振動粉砕器で微粉砕した。この微粉砕試料を用いて全窒素および¹⁵N存在比の分析を行った。全窒素はケルダール分解後、水蒸気蒸留法によって分析した (Bremner 1996)。¹⁵N存在比は全自動窒素炭素同位体比質量分析計 (PDZ社 ANCA-SL) を用いて測定した。供試有機質資材の全炭素はNC-Analyzer (住化分析センター社 Sumigraph NC-80) を用いて測定した。また、有機質資材を2 mol L⁻¹の塩化カリウム溶液で1時間振とうし、抽出液に酸化マグネシウムを添加し水蒸気蒸留法によりアンモニア態窒素を分析した (Mulvaney 1996)。

4) 肥効率の計算方法

有機質資材の肥効率は以下の式 (西尾2007) により求めた。

肥効率 (%) = 有機質資材の窒素吸収率 (%) / 化学肥料の窒素吸収率 (%) × 100

ここで、有機質資材の窒素吸収率とは、施用した有機質資材の窒素量に対する水稲が吸収した有機質資材由来窒素量の割合である。化学肥料の窒素吸収率とは、施用した化学肥料の窒素量に対する水稲が吸収した化学肥料由来窒素量の割合である。これらの窒素吸収率は以下の式により求めた。

有機質資材 (化学肥料) の窒素吸収率 (%) = $(A_p / A_m \times N_p) / N_m \times 100$

A_p : 水稲の¹⁵N atom% excess (%)

A_m : 有機質資材 (化学肥料) の¹⁵N atom% excess (%)

N_p : 水稲の窒素吸収量 (g m⁻²)

N_m : 施用した有機質資材 (化学肥料) の窒素量 (g m⁻²)

¹⁵N atom% excessは各試料の¹⁵N存在比 (atom%) から0.366 (自然存在比) を減じたもの。

化学肥料の窒素吸収率は、本試験が行われた圃場において同じイネ品種を対象に¹⁵N標識硫酸アンモニウム (硫安) を5および8 gN m⁻²基肥として与えたときの¹⁵N標識硫安の吸収率、すなわち、それぞれ38%および36%を用いた (西田ら 1993)。ここでは、有機質資材の窒素としての施用量が5 g m⁻²以下の場合に化学肥料の吸収率を38%、5 g m⁻²よりも多い場合には36%として計算した。この吸収率は本試験とは異なる年次に得られたものであるが、この他の年次の¹⁵N標識硫安の基肥の吸収率も同様であり、同圃場におけるヒノヒカリの基肥硫安の吸収率は同程度であると考えられた。

各¹⁵N標識有機質資材の窒素としての施用量から資材由来窒素の水稲による吸収量と土壌残存量を減じたものを未回収量とした。

水稲の全窒素吸収量、有機質資材由来窒素吸収量、有機質資材由来窒素の分配率についてTukey-Kramerの多重比較法を用いて検定を行なった。統計計算にはJMPを用いた (SAS Institute Inc. 2002)。

2. 結果

1) 水稲の全窒素吸収量

表3に各区の水稲の全窒素吸収量の経過を示した。鶏ふん堆肥区の全窒素吸収量は、試料採取を行った54および113 DATで牛ふんオガクズ堆肥、稲わら堆肥、米ぬか、稲わら、小麦わらの各区よりも有意に多かった。乾燥豚ふん区でも全窒素吸収量は多く、77および113 DATで牛ふんオガクズ堆肥、稲わら堆肥、稲わら、小麦わらの各区よりも有意に多かった。米ぬか区でも全窒素吸収量が多い傾向がみられ、有意差は認められなかったが、牛ふんオガクズ堆肥、稲わら堆肥、稲わら、小麦わらの各区よりも多かった。

なお、ヒノヒカリの目標収量を5.5 Mg ha⁻¹前後とした場合、成熟期の窒素吸収量として11 g m⁻²が必要であるが (角重ら 1993)、本試験の窒素吸収量は全てそれを上回るものであった。窒素吸収量から示されるように、本試験における水稲の生育等は慣行栽培の水稲に比べて劣るようなことはなかった。

2) 有機質資材由来窒素の分配

各採取時期における有機質資材由来窒素の分配率

表3 水稲による全窒素吸収量の推移

有機質資材の種類	移植後日数 (日)				
	32	54	68	77	113
牛ふんオガクズ堆肥 1 ^{a)}	4.4±0.1 a ^{b)}	8.4±0.3 b	- ^{c)}	11.1±0.0 b	14.6±0.1 c
牛ふんオガクズ堆肥 2	-	9.4±0.4 b	-	-	15.5±0.8 c
鶏ふん堆肥	-	16.9±1.8 a	-	-	21.7±1.4 a
乾燥豚ふん	5.4±0.5 a	12.3±1.1 ab	-	18.3±0.3 a	21.2±0.1 ab
稲わら堆肥 1 ^{a)}	4.2±0.4 a	8.9±0.8 b	-	11.2±0.3 b	13.4±0.6 c
稲わら堆肥 2	-	-	11.5±1.3	-	14.3±1.6 c
米ぬか	4.9±0.5 a	10.6±0.9 b	-	14.8±1.5 ab	16.6±1.0 bc
稲わら	4.6±0.2 a	8.7±0.7 b	-	11.9±0.7 b	14.2±0.2 c
小麦わら	4.6±0.1 a	8.5±0.9 b	-	11.6±0.2 b	14.0±0.2 c

a) 牛ふんオガクズ堆肥、稲わら堆肥に付けられた数値は施用量を表し、1は1,000g m⁻²施用、2は2,000g m⁻²施用(現物重として)

b) 平均値±標準誤差 (n=2)、同列内の同符号間では有意な差はない (Tukey-Kramer 法、p<0.05)

c) データ無し

を表4に示した。32 DATにおいては、米ぬか区で水稲による吸収率が最も高く、牛ふんオガクズ堆肥、乾燥豚ふん、稲わら堆肥の各区よりも有意に高かった。54 DATでは、鶏ふん堆肥区と米ぬか区における吸収率が他の有機質資材区よりも有意に高かった。77および113 DATでは乾燥豚ふん区での吸収率が増加し、鶏ふん堆肥区、米ぬか区と同程度となった。全生育期間を通じて牛ふんオガクズ堆肥区での吸収率が最も低かった。牛ふんオガクズ堆肥区と稲わら堆肥区においては、有意な違いは認められなかったものの、堆肥施用量の増加とともに吸収率が低下する傾向がみられた。

土壌への残存率については、有機質資材の種類による有意な違いは認められなかったが、稲わら堆肥区と牛ふんオガクズ堆肥区で残存率が高い傾向がみられた。未回収率についても有機質資材の種類による有意な違いは認められなかったが、牛ふんオガクズ堆肥区、稲わら区、小麦わら区において比較的高かった。

3. 考察

1) 有機質資材施用量の影響

本試験における有機質資材の施用量は現物重ベースとしたため、窒素としての施用量は一定ではなかった。この窒素としての施用量の違いは、全窒素吸収量に影響したと考えられる。鶏ふん堆肥、乾燥豚ふん、米ぬかの各区において全窒素吸収量が多かったのは、これらの有機質資材の高い吸収率と窒素としての施用量が多かったことが影響したものと考えられる。牛ふんオガクズ堆肥の2,000 g m⁻²施用区では、窒素としての施用量は稲わら堆肥の1,000 g m⁻²区と小麦わら区の3倍以上であった。しかし牛

ふんオガクズ堆肥由来窒素の吸収率は低く、牛ふんオガクズ堆肥の2,000 g m⁻²施用区、稲わら堆肥の1,000 g m⁻²施用区および小麦わら区における全窒素吸収量は同程度であった。

窒素としての施用量の違いは、有機質資材の吸収率をはじめ、その窒素の分配にも影響すると考えられる。しかし、牛ふんオガクズ堆肥区と稲わら堆肥区では、堆肥を倍量施用すると全窒素吸収量は増加したが、堆肥由来窒素の分配には大きな違いは生じなかった。それでも堆肥施用量の増加に伴い吸収率に若干の低下傾向は見られたことから、それぞれの有機質資材について、現物あるいは窒素としての施用量の違いの影響については、さらに検討を要する。

2) 有機質資材の肥効率

(1) 家畜排泄物を由来とする有機質資材の肥効率は、牛ふんオガクズ堆肥が16~19%、鶏ふん堆肥が81%、乾燥豚ふんが71%となった(表5)。¹⁵N標識法を用いたこれら家畜排泄物を由来とする有機質資材の肥効率は、間接的な手法(差引き法)で推定された飼料畑における肥効率、すなわち牛ふん堆肥30%(原田 1998)、鶏ふん堆肥70%、豚ふん70%(佐賀県植物防疫協会 1996)に比べて牛ふんオガクズ堆肥で低く、鶏ふん堆肥で高く、乾燥豚ふんでは類似していた。鶏ふん堆肥にもともと含まれていたアンモニア態窒素の吸収率を硫酸と同じと仮定すると、アンモニア態窒素を除いた鶏ふん堆肥由来窒素の吸収量は5.35 g m⁻²となる。するとともに含まれていたアンモニア態窒素を除いた鶏ふん堆肥の肥効率は72%となり、従来の飼料畑における数値(70%)に近い数値となった。乾燥豚ふんと鶏ふん堆肥の肥効率は同程度であったが、これらの有機質

表 4 有機質資材由来窒素の分配率の推移 (%)

有機質資材の種類	移植後日数 (日)					
	32	54	68	77	113	
水稲吸収	牛ふんオガクズ堆肥 1 ^{a)}	3.2±0.6 d ^{b)}	4.1±0.1 b	— ^{c)}	5.1±0.1 c	7.1±1.7 bc
	牛ふんオガクズ堆肥 2	—	3.9±0.4 b	—	—	5.6±0.8 c
	鶏ふん堆肥	—	27.5±2.9 a	—	—	29.2±1.5 a
	乾燥豚ふん	4.1±0.5 cd	13.2±1.9 b	—	22.1±1.0 a	25.4±1.1 a
	稲わら堆肥 1 ^{a)}	5.5±0.9 bcd	10.3±1.7 b	—	12.7±0.9 bc	11.8±0.5 bc
	稲わら堆肥 2	—	—	8.1±1.3	—	8.9±1.6 bc
	米ぬか	12.0±1.4 a	25.4±2.2 a	—	26.2±2.9 a	26.1±0.9 a
	稲わら	9.8±1.2 ab	13.7±1.0 b	—	13.7±1.0 b	12.4±0.1 b
	小麦わら	8.6±0.3 abc	13.8±2.7 b	—	13.7±1.0 b	13.0±1.1 b
土壌残存	牛ふんオガクズ堆肥 1	75.6±0.1 a	66.0±0.9 a	—	62.2±3.1 a	59.4±3.9 a
	牛ふんオガクズ堆肥 2	—	66.5±1.5 a	—	—	61.9±4.4 a
	鶏ふん堆肥	—	55.2±4.1 a	—	—	52.3±6.3 a
	乾燥豚ふん	87.7±4.4 a	73.1±5.5 a	—	59.5±4.9 a	56.5±2.1 a
	稲わら堆肥 1	88.6±2.8 a	74.2±10.0 a	—	69.3±6.0 a	68.4±5.5 a
	稲わら堆肥 2	—	—	76.8±2.5	—	69.4±5.6 a
	米ぬか	73.8±2.0 a	59.5±3.5 a	—	55.3±3.6 a	53.9±2.7 a
	稲わら	71.1±9.7 a	60.8±4.3 a	—	52.5±6.3 a	51.3±5.3 a
	小麦わら	80.1±7.4 a	68.6±2.6 a	—	63.1±4.3 a	57.7±3.6 a
未回収	牛ふんオガクズ堆肥 1	21.2±0.4 a	29.9±1.0 a	—	32.7±3.1 a	33.5±5.6 a
	牛ふんオガクズ堆肥 2	—	29.6±1.1 a	—	—	32.5±3.6 a
	鶏ふん堆肥	—	17.3±1.2 a	—	—	18.5±4.8 a
	乾燥豚ふん	8.2±3.9 a	13.7±3.5 a	—	18.4±5.9 a	18.1±2.7 a
	稲わら堆肥 1	5.9±1.9 a	15.5±8.3 a	—	18.0±5.1 a	19.8±3.0 a
	稲わら堆肥 2	—	—	15.1±1.2	—	21.7±4.1 a
	米ぬか	14.2±3.4 a	15.1±5.7 a	—	18.5±6.5 a	20.0±2.4 a
	稲わら	19.1±8.6 a	25.5±5.3 a	—	33.8±7.3 a	36.3±7.1 a
	小麦わら	11.3±7.1 a	17.6±5.3 a	—	23.2±5.2 a	29.3±4.6 a

a) 牛ふんオガクズ堆肥、稲わら堆肥に付けられた数値は施用量を表し、1は1,000g m⁻²施用、2は2,000g m⁻²施用（現物重として）

b) 平均値±標準誤差 (n=2)、同列内の同符号間では有意な差はない (Tukey-Kramer 法、p<0.05)

c) データ無し

表 5 ¹⁵N 標識有機質資材から推定された水田における肥効率とその他の特性

有機質資材の種類	施用量 (g m ⁻²)	肥効率 (%)	有機質資材由来窒素が吸収される時期	その他
牛ふんオガクズ堆肥	1,000~2,000	16~19	全生育期間	土壌残存、未回収率が高い
鶏ふん堆肥	1,000	81 (72) ^{a)}	主に幼穂形成期~穂ばらみ期まで	
乾燥豚ふん	1,000	71	全生育期間	
稲わら堆肥	1,000~2,000	25~31	主に幼穂形成期~穂ばらみ期まで	土壌残存率が高い
米ぬか	500	73	主に幼穂形成期~穂ばらみ期まで	
稲わら	500	33	幼穂形成期~穂ばらみ期まで	未回収率が高い
小麦わら	500	34	幼穂形成期~穂ばらみ期まで	未回収率が高い

a) カッコ内の数値は鶏ふん堆肥中の NH₄-N を除外した場合

資材由来窒素の吸収過程は異なっていた。すなわち、乾燥豚ふんと牛ふんオガクズ堆肥由来窒素の吸収は水稲の全生育期間にわたり継続したが、鶏ふん堆肥を含む他の有機質資材からの窒素吸収は54 DAT以降はほとんど見られなかった。

(2) 作物残渣を由来とする有機質資材
生産現場において、窒素肥料としての効果も期待

して米ぬかが水田に施用されることがある（農山漁村文化協会 2000）。また、大分県において米ぬかが化学肥料の基肥の代替として有効であることが明らかにされている（大分県農業技術センター 2003）。本試験においては、¹⁵N標識米ぬかを用いることでその肥効率が73%と高いことが示され、米ぬかが化学肥料の基肥の代替となり得ることが確認さ

れた。小麦わらについては¹⁵N標識されてその水稻による吸収を含めた動態が調べられたことはなかったが、小麦わら由来の窒素吸収率は稲わらと同等であった。作物残渣であるわらを由来とする供試有機質資材、すなわち稲わら堆肥、稲わら、小麦わらの間では、有機質資材の窒素吸収率には有意な違いは認められなかった。堆肥化過程を経ている稲わら堆肥と稲わらで吸収率に有意な違いがなかったのは、供試した稲わら堆肥のC/N比が33と比較的未熟な堆肥であったためと推察された。

3) 有機質資材の残存率・未回収率

供試有機質資材の間で残存率、未回収率には有意な違いは認められなかったが、稲わら堆肥および牛ふんオガクズ堆肥由来窒素の残存率が高い、牛ふんオガクズ堆肥、稲わら、小麦わら由来窒素の未回収率が高いといった傾向がみられた。これらの傾向が各有機質資材の特性と言えるかどうか、さらに検討を行う必要がある。稲わら堆肥については、長年にわたり水田への施用が進められてきた。実際に、九州沖縄農業研究センターにおける稲わら堆肥の長期連用試験において、水稻の収量に対するその連用効果が認められている (Yoo *et al.* 1992)。しかし、¹⁵N標識稲わら堆肥を用いた本試験で示された低い肥効から、施用した稲わら堆肥単年分の窒素のみでは明確な増収とはならないことが示唆された。一方、本試験で示された高い稲わら堆肥由来窒素の残存率からは、その窒素が土壌に蓄積しやすく、連用で蓄積された稲わら堆肥由来窒素によって増収効

果が明確になるのであろうと推察された。本試験における未回収分については、ほぼ消失とみなすことができる。同圃場において施用¹⁵N標識硫酸の作土および下層土での動態を追跡した結果、¹⁵N標識硫酸の消失はほとんどが脱窒によるものであった (山室 1988)。したがって、本試験における有機質資材由来窒素の消失についても多くの脱窒によるものと考えられる。

4) 同手法を用いた他の報告との比較

¹⁵N標識堆肥を用いたこれまでの報告 (表6) と本研究における堆肥由来窒素の吸収率は必ずしも一致していない。この理由は明らかではないが、施用量、堆肥の熟度、副資材、土壌条件、気象条件の違いが関与したものと推察される。堆肥化方法、堆肥の特性、圃場における堆肥由来窒素の動態との関係についてさらに詳細な情報を得るための研究が必要であろう。

5) 有機質資材の窒素肥効についてのまとめ

有機質資材の窒素肥効および本試験でみられた他の特徴を表5にまとめた。¹⁵N標識法によって評価された鶏ふん堆肥、乾燥豚ふんの肥効率は約70%と高く、牛ふんオガクズ堆肥は最も低かった。作物残渣を由来とする有機質資材 (稲わら堆肥、米ぬか、稲わら、小麦わら) については、米ぬかその他の有機質資材の間で水稻によるその窒素吸収率に有意な違いが認められた。米ぬかの肥効率は、作物残渣を由来とする有機質資材の中で最も高く、鶏ふん堆肥、乾燥豚ふんと同程度であった。乾燥豚ふんおよ

表6 ¹⁵N 標識堆肥を用いて評価された堆肥窒素の水稻による吸収率の報告例

	水稻による吸収率 (%)	C/N比	備考	出典
牛ふん堆肥	4.0	37	オガクズ牛ふん堆肥、圃場試験 (小規模)	上之菌ら 2004
	5.6	38	オガクズ入、圃場試験 (小規模)	Matsushita <i>et al.</i> 2000a
	6.0 ~ 9.2	26	オガクズ入、圃場試験 (小規模)	Matsushita <i>et al.</i> 2000b
	6	10	移植後61日目、ポット試験	高橋・上之菌 2001
	11.0 / 13.7	34/16	オガクズ入/オガクズ無、ポット試験	松山ら 2003
	12.3 / 14.9	データ無	オガクズ入/オガクズ無、ポット試験	Ueno and Yamamuro 2001
	16.5 ~ 17.7	10	移植後56日目、有機農業圃場土、ポット試験	Yamamuro <i>et al.</i> 2002
	17.4 ~ 17.8	10	移植後69日目、低肥沃土壌、ポット試験	Yamamuro <i>et al.</i> 2002
	5.6 ~ 7.1	31	圃場試験 (小規模)	本研究
鶏ふん堆肥	13.8	10	圃場試験 (小規模)	高橋・上之菌 2001
	15.7	10	圃場試験 (小規模)	上之菌ら 2004
	29.2	13	圃場試験 (小規模)	本研究
稲わら堆肥	4.4	22	ポット試験	Takahashi <i>et al.</i> 2003
	5.0	20	ポット試験	松山ら 2003
	7.7	データ無	ポット試験	Ueno and Yamamuro 2001
	8.9 ~ 11.8	33	圃場試験 (小規模)	本研究

び牛ふんオガクズ堆肥由来窒素の吸収は成熟期まで継続したが、他の有機質資材からの窒素吸収は54 DAT以降はほとんどなかった。

農業現場では有機質資材は連用されることが多い。したがって、今後は土壌に残存し蓄積した有機質資材由来窒素の動態を¹⁵N標識有機質資材を用いて定量的に評価する必要がある。さらに、農業において生じる有機物が非常に多様であることを考えると、より多様な有機質資材を種々の条件で検討する必要があると思われる。

4. まとめ

7種類（牛ふんオガクズ堆肥、鶏ふん堆肥、乾燥豚ふん、稲わら堆肥、米ぬか、稲わら、小麦わら）の¹⁵N標識有機質資材を北部九州の水田に施用し、その窒素の動態（水稲による吸収、土壌残存）を追跡し肥効率を評価した。供試有機質資材には水田において¹⁵N標識法によりその窒素動態が追跡されたことのないものも含めた（豚ふん、米ぬか、小麦わら）。有機質資材の種類によって水稲による窒素吸収率に有意な違いが認められた。成熟期における水稲による吸収率は、鶏ふん堆肥（29%）、乾燥豚ふん（25%）、米ぬか（26%）で他の有機質資材（6～13%）より有意に高かった。一方、最も吸収率が低いのは牛ふんオガクズ堆肥であった。この吸収率をもとに、¹⁵N標識硫酸の吸収率に対する各有機質資材の窒素肥効率を求めた。肥効率は、牛ふんオガクズ堆肥が16～19%、鶏ふん堆肥は81%で堆肥に含まれるアンモニア態窒素を除外すると72%、乾燥豚ふんは71%であった。作物残渣由来の有機質資材の肥効率は、稲わら堆肥が25～31%、米ぬかは73%、稲わらは33%、小麦わらは34%であった。有機質資材由来窒素の吸収は、牛ふんオガクズ堆肥と乾燥豚ふんでは水稲の全生育期間にわたり継続したが、他の有機質資材では移植後54日目以降はほとんどなかった。土壌残存率と未回収率については、供試有機質資材間で有意な違いは認められなかった。しかし稲わら堆肥、牛ふんオガクズ堆肥の残存率が高い、牛ふんオガクズ堆肥、稲わら、小麦わらの未回収率が高いといった傾向がみられた。

IV 牛ふん堆肥との併用による¹⁵N標識有機質資材由来窒素の水稲による吸収過程の変化

我国で生じる家畜排泄物の中で、牛からの排泄物が最も多い（山口ら 2000）。したがって、効果的

に牛ふん堆肥を利用して種々の作物を生産することが求められている。しかし、本論文Ⅲの移植水稲での試験結果および直播水稲への予備試験（表7）で示されたように、牛ふん堆肥の水稲に対する窒素肥効は低い。また他の研究でもこれと同様の傾向が認められている（Matsushita *et al.* 2000ab、上之蘭ら 2004）。松元（1999）は、水田における家畜排泄物の効果的な利用法として、ペレット化された牛ふん堆肥と豚ふん堆肥あるいは牛ふん堆肥と鶏ふん堆肥といった異種の有機質資材の併用を提唱している。このように、牛ふん堆肥と肥効が高い他の有機質資材とを併用することは、有機質資材を有効利用するための一手段であると考えられる。その一方、牛ふん堆肥と併用することによって、そのような肥効の高い資材由来窒素の水稲による吸収が変化する可能性がある。例えば、¹⁵N標識硫酸アンモニウム（硫酸）と牛ふん堆肥を施用すると、硫酸を単独で施用した場合よりも硫酸由来窒素の水稲による吸収が遅くなることが報告されている（Matsushita *et al.* 2000b）。しかし、有機質資材については、このように¹⁵Nを用いた直接的な手法で、牛ふん堆肥と併用した際の窒素の吸収過程が評価された事例はない。

直播水稲に対する各種¹⁵N標識有機質資材の肥効を本試験の前年（1999年）に予備的に調べた結果、豚ふん堆肥と米ぬか由来窒素の水稲による吸収率は高く（表7）、牛ふん堆肥と併用する有機質資材として有望と考えられた。そこで本研究では、¹⁵N標識豚ふん堆肥と¹⁵N標識米ぬかを供試し、直播水稲に対するその単独施用と牛ふん堆肥との併用試験を行った。ここで直播水稲を対象としたのは、水稲栽培の省力化、低コスト化が強く進められるなかで、その重要性が増しているからである。本研究の目的

表7 各種¹⁵N標識有機質資材の直播水稲による窒素吸収率（1999年予備試験結果）

有機質資材の種類	現物施用量 (g m ⁻²)	窒素としての施用量 (g m ⁻²)	有機質資材の窒素吸収率 ^{a)} (%)
牛ふん堆肥	4,000	17.5	4.2
乾燥牛ふん	2,000	20.6	5.8
豚ふん堆肥	2,000	36.6	18.7
米ぬか	500	11.2	30.0
稲わら	500	3.3	14.9
小麦わら	500	3.3	16.6

a) 施用した有機質資材の窒素量に対する水稲が吸収した有機質資材由来窒素量の割合

は、 ^{15}N 標識法を用いて、牛ふん堆肥と併用、および単独施用された豚ふん堆肥、米ぬかを由来とする窒素の直播水稻による吸収過程を明らかにすることである。

1. 材料および方法

1) 圃場試験の設定

九州沖縄農業研究センター、筑後研究拠点内の水田において2000年に小規模枠内での施用試験を行った。土壌は細粒灰色低地土でWRB (World Reference Base for Soil Resources) ではEndogleyi-Hydragric Anthrosolsに分類される (FAO, ISRIC, and ISSS 1998)。作土の全炭素含量は 27.3 g kg^{-1} で全窒素含量は 2.21 g kg^{-1} である。代かきの済んだ圃場の作土 (約15 cm) に $20 \times 30 \text{ cm}$ 、高さ30 cmの塩化ビニール製の枠を作土の深さに埋設し、枠内の作土を除去した。そこにあらかじめ採取し2 mmの篩いを通過させた作土の生土 (乾土として 9.5 kg) と ^{15}N 標識有機質資材および無標識牛ふん堆肥、または ^{15}N 標識有機質資材のみを混合して入れた。供試した ^{15}N 標識有機質資材は豚ふん堆肥と米ぬかである。無機態窒素である ^{15}N 標識硫安の単独施用区および牛ふん堆肥との併用区も設けた。リン酸およびカリはPK化成を用いて各 8 g m^{-2} 相当分を施用した。5月31日に枠内を湛水し代かきを行なった。 ^{15}N 標識硫安については代かきの直前に施用した。試験区の概要を表8に示した。栽培試験に供試したイネの系統、西海203号は耐肥性が高い多収性の系統であるので、家畜ふん堆肥の施用量は慣行よりも多量とし、 ^{15}N 標識豚ふん堆肥単独施用区 ($^{15}\text{N-SMC}$) は現物として $1,980 \text{ g m}^{-2}$ (40 gN m^{-2})、 ^{15}N 標識豚ふん堆肥と無標識牛ふん堆肥併用区 ($^{15}\text{N-SMC} + \text{CMC}$) はそれぞれ 990 g m^{-2} (20 gN m^{-2})、 $3,610 \text{ g m}^{-2}$ (20 gN m^{-2}) とした。また、 ^{15}N 標識米ぬかと無標識牛ふん堆肥との併用区 ($^{15}\text{N-RB} + \text{CMC}$)、 ^{15}N 標識硫

安と無標識牛ふん堆肥との併用区 ($^{15}\text{N-AS} + \text{CMC}$) では、牛ふん堆肥の施用量は現物として $3,610 \text{ g m}^{-2}$ (20 gN m^{-2}) とし、米ぬかの施用量は現物量として 500 g m^{-2} (6.3 gN m^{-2})、硫安は 5.0 gN m^{-2} 相当とした。 ^{15}N 標識米ぬか単独施用区 ($^{15}\text{N-RB}$) の米ぬか、 ^{15}N 標識硫安単独施用区 ($^{15}\text{N-AS}$) の硫安の施用量は各牛ふん堆肥との併用区と同じとした。

カルパー粉衣した催芽種子10粒を代かき直後に各区に約1 cm深に播種した。出芽後間引きをして5個体を各区に残した。試験枠は1株 / ($20 \times 30 \text{ cm}$) の栽植密度 (点播直播) の圃場内に2列に配置し、配置した列間は2列で、列内では2株おきとし、圃場全体が同様の栽植密度となるようにした。各処理の配置は無作為に割り当てた。試験を実施した圃場の試験枠以外にはPK化成のみを施用した。水管理は出芽促進の目的で播種後10日間落水管理とし、以後は9月下旬まで湛水管理とした。

2) ^{15}N 標識有機質資材の作製と調整

^{15}N 標識豚ふんは、 ^{15}N 標識した米を豚に給餌し、そのふんを収集して堆肥化させた。

バーミキュライトを充填した 0.05 m^2 のポットに約9 atom%の ^{15}N 標識硫安を唯一の窒素源として含む春日井氏の水耕液 (吉羽 1990) を液肥として与えて ^{15}N 標識イネを栽培・作製した。その玄米を精米し、そのぬかを ^{15}N 標識米ぬかとした。

なお、無標識牛ふん堆肥は袋入りの市販品を供試した。供試有機質資材の特性を表9に示した。

3) 試料採取および分析

$^{15}\text{N-RB}$ 区、 $^{15}\text{N-RB} + \text{CMC}$ 区、 $^{15}\text{N-AS}$ 区、 $^{15}\text{N-AS} + \text{CMC}$ 区については、播種後55日目 (55 DAS: Days after seeding)、91日目 (91 DAS)、140日目 (140 DAS) に水稻を採取した。試料採取の反復数は55 DASおよび91 DASでは2反復、140 DASでは3反復とした。 $^{15}\text{N-SMC}$ 区および $^{15}\text{N-SMC} + \text{CMC}$

表8 試験区の構成と試料の採取時期

試験区名 ^{a)}	供試資材	^{15}N 標識資材		牛ふん堆肥		試料採取時期 (播種後日数)
		施用量 (gFW m^{-2})	施用N量 (gN m^{-2})	施用量 (gFW m^{-2})	施用N量 (gN m^{-2})	
$^{15}\text{N-SMC}$	豚ふん堆肥	1,980	40	0	0	55, 140
$^{15}\text{N-SMC} + \text{CMC}$	豚ふん堆肥	990	20	3,610	20	55, 140
$^{15}\text{N-RB}$	米ぬか	500	6.3	0	0	55, 91, 140
$^{15}\text{N-RB} + \text{CMC}$	米ぬか	500	6.3	3,610	20	55, 91, 140
$^{15}\text{N-AS}$	硫安	23.6	5.0	0	0	55, 91, 140
$^{15}\text{N-AS} + \text{CMC}$	硫安	23.6	5.0	3,610	20	55, 91, 140

a) SMC: 豚ふん堆肥, CMC: 牛ふん堆肥, RB: 米ぬか, AS: 硫安

表9 供試有機質資材の特性

有機質資材の種類	T-N (g kg ⁻¹)	¹⁵ N (atom %)	T-C (g kg ⁻¹)	C/N	NH ₄ -N (g kg ⁻¹)	NO ₃ -N (g kg ⁻¹)	水分 (g g ⁻¹)
牛ふん堆肥	5.54	0.369	150	27	0.01	0.01	0.64
豚ふん堆肥 (¹⁵ N標識)	20.2	1.39	123	6	0.13	0.01	0.50
米ぬか (¹⁵ N標識)	12.5	8.68	331	26	0.08	ND	0.16

現物重当り

区については55 DASに2反復で、140 DASに3反復で水稻を採取した。本試験における55 DASは分けつ期、91 DASは出穂期、140 DASは成熟期にあたる。植物試料は水洗後70℃で乾燥し、乾燥試料重を秤量し、振動粉碎機 (C.M.T.社 TI-100) で粉碎した。全窒素分析はケルダール分解および水蒸気蒸留法により行なった (Bremner 1996)。¹⁵N存在比は全自動窒素炭素同位体比質量分析計 (PDZ社 ANCA-SL) を用いて測定した。供試有機質資材の全炭素はNC-Analyzer (住化分析センター社 Sumigraph NC-80) を用いて測定した。また、有機質資材を2 mol L⁻¹の塩化カリウム溶液で1時間振とうし、抽出液のアンモニア態窒素および硝酸態窒素を酸化マグネシウムとデバルダ合金を用いた水蒸気蒸留法により分析した (Mulvaney 1996)。

水稻による全窒素吸収量と各資材由来の窒素吸収率 (施用資材の窒素量に対する水稻による資材由来窒素吸収量の割合) について、単用区と牛ふん堆肥との併用区の比較を *t* 検定により行なった。統計計算にはJMPを用いた (SAS Institute Inc. 2002)。

2. 結果

1) 水稻の全窒素吸収量への影響

水稻の全窒素吸収量の推移を図4に示した。¹⁵N-SMC区と¹⁵N-SMC + CMC区とでは窒素としての施用量は同じであったが、全窒素吸収量には有意な違いが認められ、¹⁵N-SMC区の方が全窒素吸収量が多かった。¹⁵N-RB区と¹⁵N-AS区よりも、牛ふん堆肥を上乗せ施用した¹⁵N-RB + CMC区、¹⁵N-AS + CMC区の方が窒素としての施用量は多かったが、全窒素吸収量の増加は認められず、見かけ上牛ふん堆肥の肥効はみられなかった。

なお、本試験における水稻の生育は旺盛であり、品種は異なるがヒノヒカリの目標窒素吸収量11g m⁻² (角重ら 1993) を大きく上回るものであった。

2) 水稻による有機質資材由来窒素吸収への影響

水稻による¹⁵N標識資材窒素の吸収率を図5に示した。55 DASには、豚ふん堆肥、米ぬか、硫酸、

全ての¹⁵N標識資材について牛ふん堆肥との併用により資材由来窒素の吸収率が有意に低下した。しかし、91 DASと140 DASではそれぞれの単独施用と牛ふん堆肥との併用で有意な違いは認められなかった。したがって、硫酸のような無機態の窒素肥料ばかりでなく、有機質資材である豚ふん堆肥、米ぬかでも牛ふん堆肥との併用によりその窒素肥効の発現が遅くなった。

3. 考察

1) 牛ふん堆肥との併用で¹⁵N標識資材を由来とする窒素の吸収過程が変化した理由

C/N比が約20以上の有機質資材を施用することによって、土壌中では無機態窒素の有機化が進む (植田・松口 1994)。本研究で用いた牛ふん堆肥のC/N比は27であるので、無機態窒素である硫酸と牛ふん堆肥との併用区では硫酸由来窒素が有機化され、55 DASの硫酸由来窒素吸収率が硫酸単用区よりも低下したものと推定される。一度有機化された硫酸由来窒素の一部は、以降の生育期間中に再無機化され、水稻に吸収されたものと考えられる。豚ふん堆肥、米ぬかについても牛ふん堆肥と併用した場合には同様の現象が生じたものと考えられる。すなわち、水稻の生育初期に豚ふん堆肥、米ぬかから無機化した窒素の一部が再有機化し、その後その一部が再無機化して水稻に吸収されたものと考えられる。なお、これは本試験条件における窒素吸収過程の変化の要因を説明しようとしているもので、C/N比が20以上であればどのような有機質資材でも同様の現象が生じるということではない。例えば、C/N比では米ぬかは牛ふん堆肥と同様であるが、本論分Ⅲで示されたように米ぬかの窒素の無機化率は高く、有機化が少ないことは明らかである。したがって、この現象は有機質資材のC/N比のみで決まるものではないであろう。

この他に、牛ふん堆肥との併用条件で¹⁵N標識資材由来の窒素吸収が生育初期に低下した原因として、牛ふん堆肥の施用で生育初期に土壌が強還元状

態となり生育障害が発生した可能性がある(上村ら 1986、大山ら 1998)。しかし、本試験では、生育障害の症状は観察されなかった。また、米ぬかと硫安で牛ふん堆肥の併用による全窒素吸収量の低下はみられなかった。したがって、併用条件における生育初期の¹⁵N標識有機質資材由来窒素の吸収低下は、

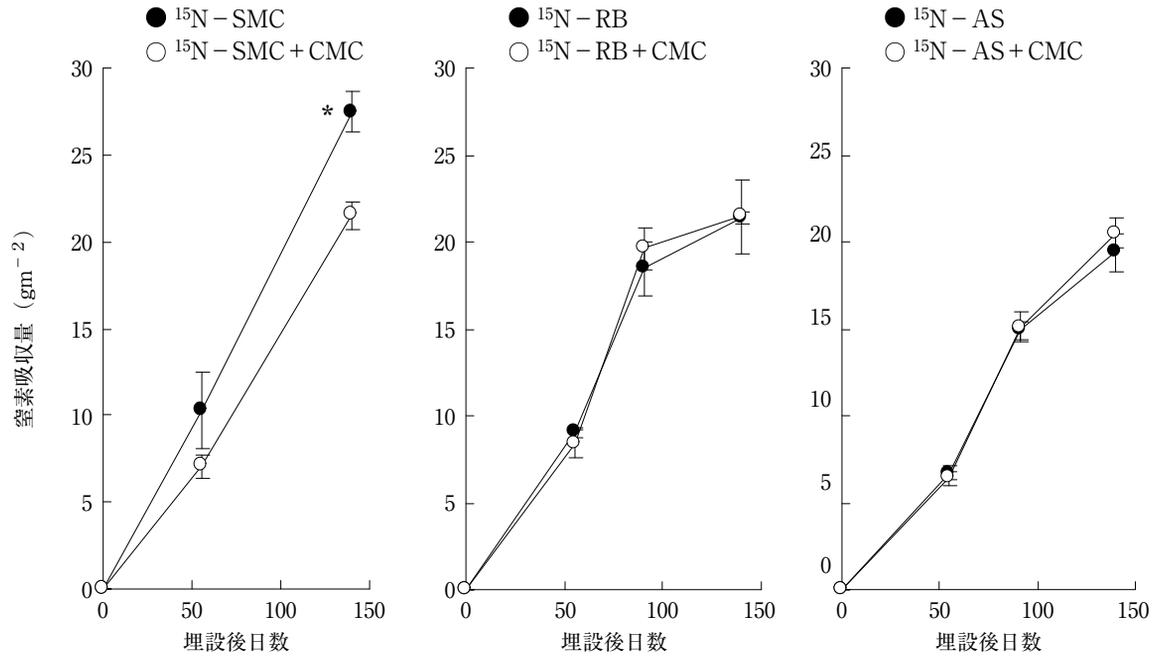


図4 水稻の全窒素吸収量(エラーバーは標準誤差、播種後55、91日目はn=2、播種後140日目はn=3)

CMC:牛ふん堆肥、SMC:豚ふん堆肥、RB:米ぬか、AS:硫安
 *は同時期の窒素吸収量で有意差あり(p<0.05)

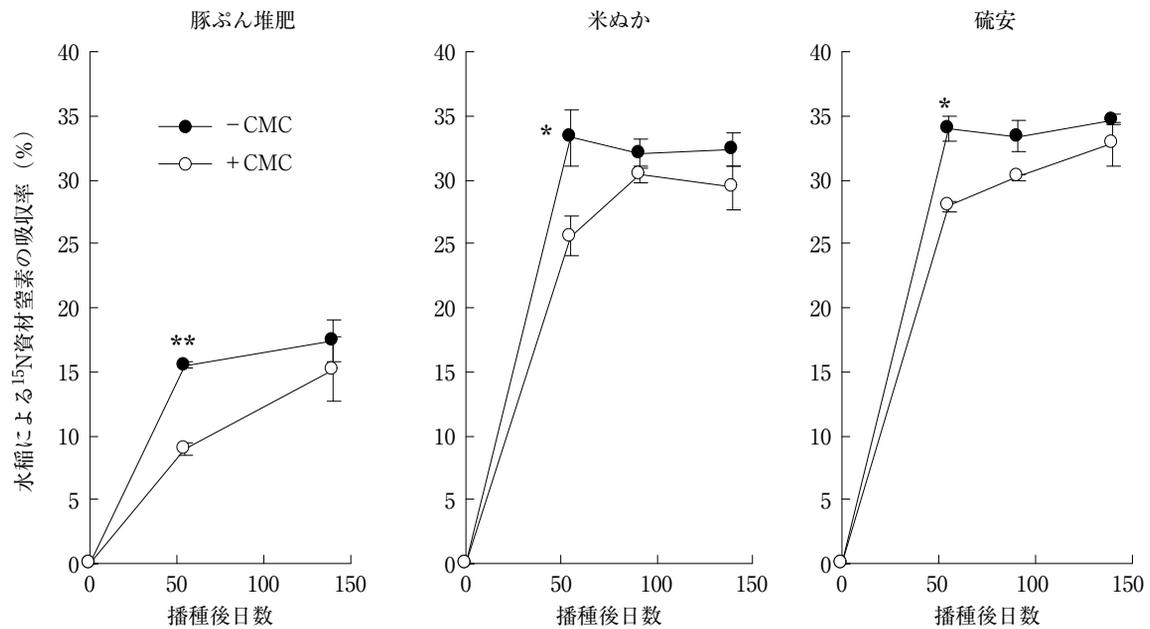


図5 水稻による¹⁵N資材窒素の吸収率(エラーバーは標準誤差、播種後55、91日目はn=2、播種後140日目はn=3)

*および**は同時期の窒素吸収率で有意差あり(*p<0.05, **p<0.01)

牛ふん堆肥を同時に施用することで再有機化が生じたため、土壌の強還元によるものではないと考えられた。

2) 牛ふん堆肥を水田で活用するための一考察
九州沖縄農業研究センター内で同イネ系統を対象に別途行なった牛ふん堆肥の施用試験においては、施用初年目の水稲の乾物重と全窒素吸収量は牛ふん堆肥の施用によっては増加しなかった（西田2004）。一方、牛ふん堆肥を3年以上連用することで水稲の収量が増加することが報告されている（大山ら 1998、上之菌・長友 1998）。このように収量に対する牛ふん堆肥施用の効果は連用することによって顕在化する。したがって、牛ふん堆肥を水稲作に活用する際には、連用効果が顕在化するまで窒素肥効が高い資材を牛ふん堆肥と併用するのが妥当と考えられる。

しかし無機態窒素である硫酸にとどまらず、そのほとんどが有機態である有機質資材由来窒素の水稲による吸収も牛ふん堆肥と併用することにより変化した。このことは、比較的速効的な有機質資材の窒素肥効を牛ふん堆肥で緩効化できる可能性を示唆するものである。この有機質資材由来窒素の吸収過程は、牛ふん堆肥の性質や有機質資材の種類によってさらに大きく変化する可能性がある。また、それは栽培方法によっても変化するであろう。本研究では直播水稲を対象としたが、移植水稲の場合はより早い時期から窒素吸収が始まるので、牛ふん堆肥併用の影響はより大きくなる可能性がある。したがって、複数の有機質資材の窒素肥効をより活用するためには、併用する有機質資材の種類、それらの性質と窒素吸収過程との関係を種々の条件で検討することが重要であろう。

4. まとめ

¹⁵N標識された豚ふん堆肥、米ぬか、硫酸を供試し、それぞれの単独施用と牛ふん堆肥との併用条件での直播水稲による窒素の吸収過程を比較した。牛ふん堆肥との併用条件では、供試した全ての¹⁵N標識資材、すなわち豚ふん堆肥、米ぬか、硫酸由来窒素の水稲による吸収過程はそれぞれの単独施用の場合とは異なった。分けつ期においては、牛ふん堆肥との併用によって¹⁵N資材由来窒素の吸収率は単独施用の場合に比べて低下した。しかし、その吸収率の相違は生育の進行とともに小さくなり、成熟期では同等の吸収率となった。以上のことから、牛ふん

堆肥との併用により無機質肥料である硫酸のみならず、有機質資材である豚ふん堆肥、米ぬかも緩効化されることが明らかとなった。またそれは牛ふん堆肥との併用条件において、水稲の生育初期に豚ふん堆肥、米ぬかから無機化した窒素の一部が再有機化し、その後その一部が再無機化して水稲に吸収されたことによるものと考えられた。

V 寒冷地水田に施用された¹⁵N標識牛ふんオガクズ堆肥由来窒素の3年間の動態

ここまでの本研究も含めて、水田に施用された¹⁵N標識家畜ふん堆肥の窒素動態についての報告は、ほとんどが日本の暖地についてのものであり（Matsushita *et al.* 2000ab、Ueno・Yamamuro 2001、Yamamuro *et al.* 2002、松山ら 2003、上之菌ら 2004）、この手法が日本の寒冷地水田において用いられたことはない。したがって、寒冷な気象条件下の水田における家畜ふん堆肥の窒素動態の詳細は不明である。

また過去の報告のなかで、¹⁵N標識有機質資材の窒素動態が複数年にわたり追跡されたのは2例にとどまっている（Ueno・Yamamuro 2001、松山ら 2003）。これらの報告では、¹⁵N標識家畜ふん堆肥由来窒素は複数年にわたり水稲によって吸収されていた。これは、有機質資材由来窒素の追跡を複数年継続することの重要性を示すものである。

そこで、¹⁵N標識牛ふんオガクズ堆肥を寒冷地水田に施用し、堆肥由来窒素の動態を3年にわたり追跡した。

1. 材料および方法

1) 圃場試験の手順と試料採取

東北農業研究センター、大仙研究拠点内（秋田県大仙市、北緯39° 29'、東経140° 30'、標高30 m）の水田において、2000年から2002年にかけて小規模枠内での栽培試験を行った。土壌は細粒灰色低地土（Typic Fluvaquents、Soil Survey Staff 1998）で、作土の全窒素含量は乾土当たり2.35 g kg⁻¹、全炭素含量は26.1 g kg⁻¹であった。

2000年5月22日に移植直後の圃場の作土（約15 cm）に底部を不織布（ユニセル社、ユニセルBT-1808W1）で覆った17×30 cm、高さ20 cmの塩化ビニール製の枠を埋設した。なお、試験枠の地中の容積に相当する作土は枠の埋設の際に除去した。あらかじめ採取し1 cmの篩いを通過させた作土の生土

(乾土として6.27 kg) と¹⁵N標識牛ふんオガクズ堆肥と化成肥料(多木化学、タキホスカ3号)をよく混合し、その試験枠へ入れた。

牛ふんオガクズ堆肥の施用量は現物として1、2、4 kg m⁻²の3水準とし、化成肥料は窒素、リン酸、カリとして各8 g m⁻²とした。牛ふんオガクズ堆肥は、¹⁵N標識したトウモロコシを牛に給餌し、その牛が排泄したふんを収集し、それに水分調整用のオガクズを重量比で30%程度混合し堆肥化したものである(山室 2000)。

試験枠内の代かきは5月23日に行い、5月25日にイネ(品種あきたこまち)の35日苗3個体を1株として各試験枠に移植した。試験枠の全ての面には地際よりやや高い位置に直径2 cmの穴をあけてあったが、代かきから数日間はその穴はゴム栓で塞ぎ、以後はゴム栓をとって田面水が通過できるようにした。試験を実施した圃場の試験枠以外には化成肥料のみ窒素、リン酸、カリそれぞれ8 g m⁻²相当を代かき直前に施用した。また、圃場全体の栽植密度は試験枠面積相当の1株/(17×30 cm)とした。

牛ふんオガクズ堆肥1 kg m⁻²施用区および4 kg m⁻²施用区については3反復とした。牛ふんオガクズ堆肥2 kg m⁻²施用区については21反復で試験を開始した。これは後で述べるように2 kg m⁻²区では以後3ヵ年の生育期間中の試料採取(幼穂形成期と出穂期)により18反復分を試験から除外することになるためである。試験枠は稲株2列おきに3列に配置した。列内の試験枠の配置は2株おきとし、圃場全体の栽植密度を乱すことなく試験枠を設置した。各処理の配置は無作為に割り当てた。

2 kg m⁻²区については幼穂形成期(7月10日)と出穂期(8月3日)に水稻の地上部を各時期3反復で採取した。ここで水稻が採取された試験枠の土壌(2 kg m⁻²の6反復分)については試料採取とともに除去した。成熟期(9月13日)にはこれ以外の全ての試験区について、すなわち1 kg m⁻²区および4 kg m⁻²区を各3反復、2 kg m⁻²を15反復で土壌および水稻地上部の試料採取を行なった。成熟期の試料採取後、各試験枠(土壌と水稻の残根が枠に入れられた状態)は圃場(約15 cm深)に設置し、非作付け期間中そのまま埋設しておいた。

2001年は、化成肥料のみを前年と同じ施用量(窒素、リン酸、カリを各8 g m⁻²)で5月21日に各試験枠の土壌に施用した。代かきは5月22日に、移植

は5月27日に行なった。試験枠の配置は前年と同様に3列に無作為に配置した。幼穂形成期(7月10日)と出穂期(8月7日)に2 kg m⁻²区の水稲の地上部を各時期3反復で採取した。ここで水稻が採取された試験枠の土壌(2 kg m⁻²の6反復分)については試料採取とともに除去した。成熟期(9月18日)にはこれ以外の全ての試験区について、すなわち1 kg m⁻²区および4 kg m⁻²区を各3反復、2 kg m⁻²を9反復で土壌および水稻地上部の試料採取を行なった。成熟期の試料採取後、各試験枠(土壌と水稻の残根が枠に入れられた状態)は圃場(約15 cm深)に設置し、非作付け期間中そのまま埋設しておいた。

2002年についてもほぼ同様の手順で栽培試験を行なった。化成肥料のみをこれまでと同じ施用量(窒素、リン酸、カリを各8 g m⁻²)で各試験枠の土壌に施用し、5月24日に代かき、5月29日に移植を行なった。幼穂形成期(7月15日)と出穂期(8月12日)に2 kg m⁻²区の水稲の地上部を各時期3反復で採取した。ここで水稻が採取された試験枠の土壌(2 kg m⁻²の6反復分)については試料採取とともに除去した。成熟期(9月25日)にはこれ以外の全ての試験区について、すなわち各区3反復で土壌および水稻地上部の試料採取を行なった。

2) 試料の調整と分析

植物試料はよく水洗した後70℃で通風乾燥した。乾燥試料は秤量後ウイレー式粉碎器で粉碎した。土壌試料は風乾後2 mmの篩いを通過させた。植物および土壌試料は硫酸・過酸化水素分解し、100 mL定容とした。この分解液の一部を用いて水蒸気蒸留法により全窒素分析した(Bremner 1996)。また、¹⁵N分析用の試料は拡散法により調整した(米山ら1975)。すなわち、分解液100 μg N相当量を50 mL容の三角フラスコに入れ、水酸化ナトリウム溶液を添加し、拡散したアンモニアを塩酸で捕集し、試料の窒素を塩化アンモニウム溶液とした。この塩化アンモニウム溶液をスズ箔に移し、全自動窒素炭素同位体比質量分析計(PDZ社ANCA-SL)を用いて¹⁵N存在比を測定した。堆肥の全窒素および¹⁵N存在比もこれと同様の方法で分析を行なった。堆肥中の水溶性硝酸態窒素およびアンモニア態窒素は、堆肥(現物)に対して10倍量の蒸留水を添加して1時間振とうし、その抽出液を用いてAquatec 5400 Analyzer(Foss Tecator社)により測定した。堆肥の全炭素はVario MAX CN(Elementar Analysensysteme

社)を用いて測定した。また、供試堆肥の腐熟度判定のために、35℃における堆肥現物50 gの30分間の生物的酸素消費量をコンポテスター(富士平工業社)を用いて測定した。

3) 標準温度変換日数の計算方法

半旬別日平均気温のデータ(東北農業研究センター 2001~2003)を用いて非作付け期間を含む全試験期間中の標準温度変換日数(25℃)を求めた。標準温度変換日数の計算はアレニウスの法則から得られた以下の式を用いた(杉原ら 1986)。

$$\text{標準温度変換日数} = \exp [E_a \times (T_a - T_s) / (R \times T_a \times T_s)]$$

T_a : 日平均気温 (K)

T_s : 標準温度 (298K)

R : 気体定数 (1.987 cal deg⁻¹ mol⁻¹)

E_a : みかけの活性化エネルギー

E_a の値としては牛ふんオガクズ堆肥を湛水条件で培養して得られた13,800 kcal mol⁻¹(酒井・山本 1999)を用いた。

4) 肥効率の計算方法

堆肥の窒素肥効の指標として一般的に用いられている堆肥窒素の化学肥料に対する肥効率を以下の式により求めた(西尾 2007)。

$$\text{肥効率 (\%)} = \text{堆肥の窒素吸収率 (\%)} / \text{化学肥料の窒素吸収率 (\%)} \times 100$$

ここで、堆肥の窒素吸収率とは、施用した堆肥の窒素量に対する水稲が吸収した堆肥由来窒素量の割合である。化学肥料の窒素吸収率とは、施用した化学肥料の窒素量に対する水稲が吸収した化学肥料由来窒素量の割合である。これらの窒素吸収率は以下の式により求めた。

$$\text{有機質資材 (化学肥料) の窒素吸収率 (\%)} = (A_p / A_m \times N_p) / N_m \times 100$$

A_p : 水稲の¹⁵N atom% excess (%)

A_m : 有機質資材 (化学肥料) の¹⁵N atom% excess (%)

N_p : 水稲の窒素吸収量 (g m⁻²)

N_m : 施用した有機質資材 (化学肥料) の窒素量

(g m⁻²)

¹⁵N atom% excessは各試料の¹⁵N存在比 (atom%) から0.366 (自然存在比) を減じたもの。

化学肥料の窒素吸収率は、本試験が行われた圃場において、2003~2005年に同じイネ品種を対象に¹⁵N標識硫酸を基肥として施用した際の水稲による吸収率が40%であったので、それを用いた。

施用した牛ふんオガクズ堆肥の窒素量から水稲による堆肥由来窒素の吸収量と堆肥由来窒素の土壤残存量を減じたものを未回収量とした。

水稲の窒素吸収に関する結果および堆肥由来窒素の土壤残存量について、牛ふんオガクズ堆肥の施用量の影響をTukey-Kramerの多重比較法により検定した。非作付け期間を含む全試験期間中の標準温度変換日数と2 kg m⁻²区の累積牛ふん堆肥由来窒素吸収量について一次回帰分析を行なった。統計計算にはJMPを用いた(SAS Institute Inc. 2002)。

2. 結果

1) 供試牛ふんオガクズ堆肥の性質

供試牛ふんオガクズ堆肥の化学的特性と生物的酸素消費量を表10に示した。牛ふんオガクズ堆肥のC/N比は24であった。アンモニア態窒素は0.15 g kg⁻¹、硝酸態窒素は0.02 g kg⁻¹と無機態窒素は少なかった。酸素消費量は1 μg g⁻¹ min⁻¹と低かった。また、臭いはほとんど感じなかった。

2) 水稲の窒素吸収量および牛ふんオガクズ堆肥由来窒素の吸収

水稲の全窒素吸収量、堆肥由来窒素吸収量、堆肥窒素吸収率を表11に示した。全窒素吸収量は2000年が最も多く9.5~10.7 g m⁻²で、次いで2002年が9.0~9.2 g m⁻²、2001年が最も少なく8.5~8.9 g m⁻²であった。これら全窒素吸収量の年次変動は大きなものではなかった。全ての年次で水稲の全窒素吸収量は牛ふんオガクズ堆肥の施用量の増加とともに増える傾向にあり、2000年は4 kg m⁻²が有意に多かった。なお、所内の施肥試験におけるあきたこまちの窒素吸収量と精玄米収量との関係式(未発表)から推定すると、本試験における収量は5.3~6.1 Mg ha⁻¹程

表10 供試¹⁵N 標識牛ふんオガクズ堆肥の化学的特性と生物的酸素消費量

T-N (g kg ⁻¹)	¹⁵ N (atom %)	T-C (g kg ⁻¹)	C/N ratio	NH ₄ -N (g kg ⁻¹)	NO ₃ -N (g kg ⁻¹)	水分 (g g ⁻¹)	生物的酸素消費量 (μg g ⁻¹ min ⁻¹)
3.95	2.54	93.0	24	0.15	0.02	0.73	1

現物重当り

度と推定され、根域を作土に制限していたものの、同施肥条件としては概ね妥当な収量と考えられた。

牛ふん堆肥由来窒素は3作にわたり水稻に吸収され続けた。堆肥由来窒素吸収量の年次的な変動は全窒素吸収量と同様の傾向であった。成熟期の堆肥由来窒素吸収量は牛ふんオガクズ堆肥の施用量とともに増加し、1 kg m⁻²区で0.1 g m⁻²、2 kg m⁻²区で0.2 g m⁻²、4 kg m⁻²区で0.3~0.5 g m⁻²であった。

各年の成熟期における堆肥窒素吸収率は2~3%で3年間ほぼ同程度の値であり、堆肥窒素吸収率には堆肥施用量の影響は認められなかった。また、水稻生育期間中の堆肥由来窒素吸収の推移が2 kg m⁻²区において示され、堆肥窒素吸収率は幼穂形成期で1~2%、出穂期で2%、成熟期では2~3%であった。

3) 牛ふんオガクズ堆肥窒素の分配

牛ふんオガクズ堆肥由来窒素の分配を図6に示し

た。施用から水稻が3作栽培された後の牛ふんオガクズ堆肥窒素の分配率は、累計で6.9~7.3%が水稻に吸収され、66~69%が土壌に残存し、24~27%が未回収であった。牛ふんオガクズ堆肥由来窒素の分配は施用量にかかわらず同様であり、試験期間を通じて土壌残存率には施用量の影響は有意には認められなかった(多重比較の結果は図5には表示せず)。

3. 考察

1) 供試堆肥の熟度

堆肥の生物的酸素消費量が3 μg g⁻¹ min⁻¹以下の場合、その堆肥は熟度が高く安定した状態である(古谷ら 2003)。供試した牛ふんオガクズ堆肥の生物的酸素消費量が1 μg g⁻¹ min⁻¹であったこと、無機態窒素含量はわずかであったこと、堆肥の臭いをほとんど感じなかったことから本試験で用いた牛ふんオガクズ堆肥は完熟堆肥とみなすことができる。

表11 水稻の全窒素吸収量、¹⁵N 標識牛ふんオガクズ堆肥由来窒素吸収量、施用堆肥窒素量に対する水稻が吸収した堆肥由来窒素量の割合(堆肥窒素吸収率)

	年次	堆肥施用量	生育ステージ		
			幼穂形成期	出穂期	成熟期
全窒素吸収量 (g m ⁻²)	2000	1 kg m ⁻²	-	-	9.51 ± 0.26 b
		2 kg m ⁻²	6.63 ± 0.34	8.19 ± 0.34	9.80 ± 0.42 b
		4 kg m ⁻²	-	-	10.74 ± 1.01 a
	2001	1 kg m ⁻²	-	-	8.52 ± 0.34 a
		2 kg m ⁻²	6.16 ± 0.20	7.90 ± 0.38	8.67 ± 0.20 a
		4 kg m ⁻²	-	-	8.85 ± 0.45 a
	2002	1 kg m ⁻²	-	-	9.00 ± 0.52 a
		2 kg m ⁻²	5.98 ± 0.16	8.15 ± 0.05	9.02 ± 0.34 a
		4 kg m ⁻²	-	-	9.24 ± 0.38 a
堆肥由来窒素吸収量 (g m ⁻²)	2000	1 kg m ⁻²	-	-	0.10 ± 0.02 c
		2 kg m ⁻²	0.12 ± 0.03	0.17 ± 0.03	0.21 ± 0.02 b
		4 kg m ⁻²	-	-	0.45 ± 0.00 a
	2001	1 kg m ⁻²	-	-	0.08 ± 0.00 c
		2 kg m ⁻²	0.08 ± 0.01	0.12 ± 0.01	0.16 ± 0.01 b
		4 kg m ⁻²	-	-	0.31 ± 0.02 a
	2002	1 kg m ⁻²	-	-	0.09 ± 0.01 c
		2 kg m ⁻²	0.08 ± 0.01	0.16 ± 0.01	0.19 ± 0.02 b
		4 kg m ⁻²	-	-	0.39 ± 0.02 a
堆肥窒素吸収率 (%)	2000	1 kg m ⁻²	-	-	2.6 ± 0.6 a
		2 kg m ⁻²	1.5 ± 0.3	2.1 ± 0.4	2.6 ± 0.3 a
		4 kg m ⁻²	-	-	2.8 ± 0.0 a
	2001	1 kg m ⁻²	-	-	1.9 ± 0.1 a
		2 kg m ⁻²	1.0 ± 0.1	1.6 ± 0.2	2.0 ± 0.2 a
		4 kg m ⁻²	-	-	2.0 ± 0.2 a
	2002	1 kg m ⁻²	-	-	2.4 ± 0.2 a
		2 kg m ⁻²	1.1 ± 0.1	2.1 ± 0.1	2.4 ± 0.2 a
		4 kg m ⁻²	-	-	2.5 ± 0.1 a

平均値 ± 標準偏差 (2000年の2 kg m⁻²区の成熟期はn=15、2001年の2 kg m⁻²区の成熟期はn=9、その他はn=3)、同列内の同一符号間では有意な差はない (Tukey-Kramer 法、p<0.05)

2) 水稲に対する牛ふんオガクズ堆肥の窒素肥効
 牛ふんオガクズ堆肥由来窒素は3年にわたり吸収され続け、その間堆肥窒素吸収率に明瞭な減少傾向がみられなかったことから、牛ふんオガクズ堆肥を由来とする窒素の肥効が施用後3年間は継続していたとみることができる。また、各年次の生育期間中の堆肥由来窒素吸収過程が示された2 kg m⁻²区においては、牛ふんオガクズ堆肥由来窒素の吸収が全生育期間継続することが示された。このことから寒冷地水田に施用された完熟牛ふんオガクズ堆肥を由来とする窒素は、3年間は水稲の全生育期間にわたり吸収され続けることが明らかとなった。また施用量によって堆肥窒素吸収率は変化しなかったため、施用量1~4 kg m⁻²の範囲では、牛ふんオガクズ堆肥の単位重量当たりの窒素肥効は同程度であることが明らかとなった。

非作付け期間を含む全試験期間の標準温度変換日数(25℃)と2 kg m⁻²区の累積堆肥由来窒素吸収量との関係を図7に示した。全生育期間の標準温度変換日数と累積堆肥由来窒素吸収量との間には有意な正の一次相関が認められ、牛ふんオガクズ堆肥を由来とする窒素の無機化とその水稲による吸収が温度に依存することが示された。

3) 牛ふんオガクズ堆肥の窒素肥効率

本試験の牛ふんオガクズ堆肥の施用年の窒素肥効率は7%であった。福岡県(本論文Ⅲ)および鹿児島県(上之蘭ら 2004)における¹⁵N標識牛ふんオガクズ堆肥の窒素肥効率はそれぞれ16~19%および10%であった。これらは、畑条件で差引き法による牛ふん堆肥の窒素肥効率が30%とされている(原田1998)よりも低かった。

4) 牛ふんオガクズ堆肥由来窒素の土壤残存および未回収量

牛ふんオガクズ堆肥由来窒素の土壤残存率は高く、施用から水稲が3作栽培された後でも約70%が土壤に残存していた。このように、完熟堆肥由来窒素は長年にわたり土壤にとどまり、本研究でみられたように水稲の安定した窒素源になるものと考えられる。

未回収量は、牛ふんオガクズ堆肥窒素の消失量と2 mmの篩を通過しなかった水稲根に含まれる堆肥由来窒素量の合計とみることができる。本試験では水稲根を別途回収しておらず、その窒素含量は不明である。しかし、水稲のT/R比(地上部乾物重/根乾物重)が5~20であること(寺島ら 1994、名

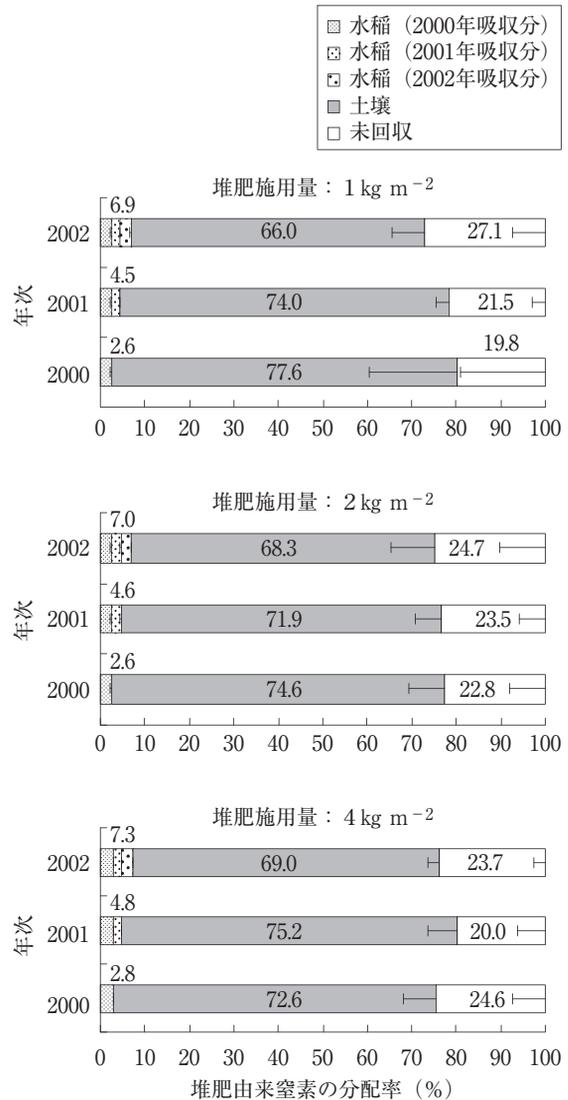


図6 ¹⁵N 標識牛ふんオガクズ堆肥由来窒素の各年次の成熟期における分配率(エラーバーは標準偏差、2000年の2 kg m⁻²区は n=15、2001年の2 kg m⁻²区は n=9、その他は n=3)

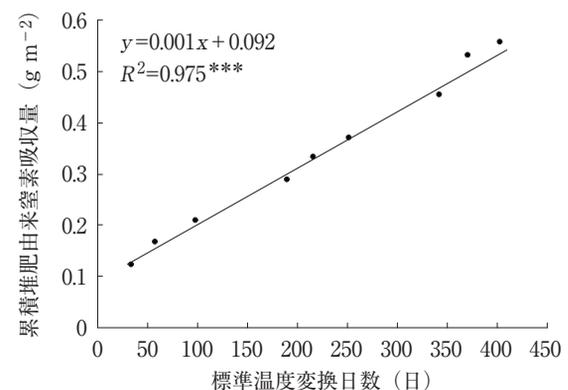


図7 全試験期間中(非作付け期間含む)の標準温度変換日数(25℃)と¹⁵N 標識牛ふんオガクズ堆肥由来窒素吸収量の累積値との関係

越ら 2001) を考慮すると、未回収量のほとんどは消失量とみることができる。未回収率は1作後に20~25%となり、その後は大きな増加はなかったので、1作目に多くの消失が生じたことになる。この理由は明らかではない。供試牛ふんオガクズ堆肥は完熟堆肥であったとはいえ、堆肥中に無機態窒素および易分解性有機物は存在していた。そのもとと堆肥中に存在していた無機態窒素および易分解性有機物中の窒素が、施用初年目の水稻根が発達する以前に消失した可能性がある。表12に示したように、水田に施用された¹⁵N標識牛ふんオガクズ堆肥由来窒素の分配を明らかにした研究は数例しかないが、その分配は報告によって異なっている。したがって、ここで堆肥の窒素分配について一般化した説明はできない。ところで環境への影響を考えたときに溶脱による消失量は重要となる。溶脱には圃場における浸透水量が影響すると考えられる。本試験水田における浸透水量は10 mm day⁻¹と多くはないが(住田1993)、溶脱、脱窒、揮散といった消失の内訳については今後検討する必要がある。

5) 寒冷地における牛ふんオガクズ堆肥由来窒素動態の特徴

本試験で示された寒冷地水田における完熟牛ふんオガクズ堆肥由来窒素動態の特徴について、以下のように整理することができる。

- (1) 水稻による牛ふんオガクズ堆肥由来窒素の吸収は、明瞭な減少傾向を示すことなく少なくとも3年間は継続した。
- (2) 各年の水稻作において、全生育期間にわたり牛ふんオガクズ堆肥由来窒素は吸収され続けた。
- (3) 堆肥由来窒素は非作付け期間を含めた3カ年の標準温度変換日数に対応して直線的に吸収された。
- (4) 牛ふんオガクズ堆肥の施用量1~4 kg m⁻²

表12 水田に施用された¹⁵N標識牛ふんオガクズ堆肥由来窒素の分配率の報告例

出典	分配率 ^{a)} (%)			C/N	試験地
	水稻	土壌	未回収		
Ueno・Yamamuro (2001)	12	33	55	データ無	広島県
上之蘭ら (2004)	4	91	5	37	鹿児島県
本研究 (Ⅲ)	6	62	32	31	福岡県
本研究 (Ⅴ)	3	73~78	20~25	24	秋田県

a) 堆肥施用から1作経過後の分配率

(現物当たり)の範囲では、堆肥の単位重量当たりの水稻への窒素肥効は同程度であった。

- (5) 牛ふんオガクズ堆肥の真の窒素肥効率は、これまで畑条件で認識されていた見かけの肥効率よりも低かった。
- (6) 施用後に水稻を3作栽培しても、土壌には牛ふんオガクズ堆肥由来窒素の約70%が残存した。

施用から3年が経過しても牛ふんオガクズ堆肥由来窒素の過半が土壌に残存することから、さらに長期にわたる堆肥由来窒素の追跡が必要と考えられる。さらに、生産現場で堆肥が連用されることが多いことを考えると、連用された堆肥由来窒素の水稻、土壌、環境への影響を¹⁵N標識法によって定量的に解析する必要がある。

4. まとめ

寒冷地水田に施用された牛ふんオガクズ堆肥由来窒素の動態を明らかにする目的で、¹⁵N標識牛ふんオガクズ堆肥(完熟)の施用試験を行った。牛ふんオガクズ堆肥由来窒素は、施用した2000年から3作後の2002年まで減少傾向を示すことなく水稻に吸収され続けた。施用された牛ふんオガクズ堆肥の窒素量に対する水稻による堆肥由来窒素吸収量の割合(堆肥窒素吸収率)は各年2~3%であった。堆肥由来窒素は全生育期間を通じて水稻に吸収され続け、堆肥窒素吸収率は幼穂形成期で1~2%、出穂期で2%、成熟期で2~3%であった。3年間の堆肥由来窒素の水稻による吸収経過(累積)と標準温度変換日数(25℃)との間には、有意な正の一次相関が認められた。堆肥窒素吸収率は、堆肥現物施用量1~4 kg m⁻²の範囲では同程度であった。以上のことから、寒冷地に施用された完熟牛ふんオガクズ堆肥を由来とする窒素は、少なくとも3年間は水稻の安定した窒素源となることが明らかとなった。水稻3作後の堆肥由来窒素の収支は、7%が水稻に吸収され(累計)、66~69%が土壌に残存し、24~27%が未回収であった。

Ⅵ 長期堆肥連用水田における¹⁵N自然存在比(δ¹⁵N値)の変化

ここまでは¹⁵N標識された有機質資材を用いてその窒素動態を追跡してきたが、δ¹⁵N値を用いて堆肥由来窒素の動態を推定する手法(徳永ら 2000)も¹⁵Nを用いた直接的窒素追跡法と言える。この手

法は¹⁵N標識資材を作製するための多大な費用、労力、時間を要せず、¹⁵N標識の均一性についても気にする必要もなく、試験規模を制限されず農家圃場の現場で有機質資材の窒素動態を明らかにすることができる。そのため非常に有望な手法であると言える。さらに、有機米栽培農家でよく使われている魚粕系の有機肥料のような¹⁵N標識がほぼ不可能なものも追跡できる可能性がある。

これを水田土壌への有機質資材由来窒素の蓄積等、有機質資材の土壌中での窒素動態の推定にも利用するためには、供給される窒素源の $\delta^{15}\text{N}$ 値と水田土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値との関係を明らかにする必要がある。また徳永ら(2000)による推定値は必ずしも生産現場での印象および¹⁵N標識堆肥の施用試験結果とは合致しておらず、精度改善の余地はある。そのためにも、供給される窒素源の $\delta^{15}\text{N}$ 値と水田土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値との関係についての基礎的知見が必要である。水田土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値については、動物性有機物を施用した方が植物性有機物を施用したものよりも高くなる傾向が報告されているが(吉羽ら 1998)、施用された資材の $\delta^{15}\text{N}$ 値と土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値との関係については検討されていない。また水田に天然供給される窒素の $\delta^{15}\text{N}$ 値と土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値との関係についての報告はない。そのため有機質資材と水田土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値の詳細な関係については不明である。

Yoneyama *et al.* (1990) は水田を含めた日本の耕地土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値の変異を報告している。また、吉羽ら(1998)は有機質資材が連用された日本の多くの地域の水田土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値を報告している。これら報告された土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値は、過去の土壌管理履歴を反映したものである。しかし、水田土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値の変化は調べられていない。種類の異なる長期的な土壌管理下での水田土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値の変化は、供給窒素源と土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値の関係を解明するための重要な情報となるであろう。

そこで、長期堆肥連用試験が行われてきた水田土壌とそこで用いられた堆肥の $\delta^{15}\text{N}$ 値と窒素含量の分析を行い、長期にわたる土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値の変化と窒素源の $\delta^{15}\text{N}$ 値の関係を検討した。

1. 材料および方法

1) 分析試料と分析方法

東北農業研究センター・大仙研究拠点の水田において、家畜ふん堆肥連用試験が1973年から、稲わら堆肥連用試験が1968年から続けられている。これら

の連用試験水田から採取した土壌試料(細粒灰色低地土、Typic Fluvaquents)を供試して分析を行った。土壌試料は過去にそれぞれの時期の目的に応じて採取し、風乾土としてポリビンに入れ、実験室内に室温条件で保管されていたものである。各採取時期の採取目的が同一ではないため、採取された試験区も採取時期も規則的ではなかった。

また、1981年以降にこれらの連用試験で用いられた堆肥についても70℃で通風乾燥後同様に保管されていた。ただし、家畜ふん堆肥については1985年と1994年の試料が欠損しており、稲わら堆肥については1985年、1987年、1994年の試料が欠損していた。これらの土壌および堆肥の試料を振動粉碎器(C.M.T社 TI-100)を用いて微粉碎した。微粉碎試料の¹⁵N自然存在比を全自動窒素炭素同位体比質量分析計(PDZ社 ANCA-SL)により測定した。¹⁵N自然存在比は δ 値で表示され次の式で求められる。

$$\delta^{15}\text{N}(\%) = [\text{R}(\text{試料})/\text{R}(\text{標準}) - 1] \times 1,000$$

ここでRは¹⁵N/¹⁴Nで標準は大気N₂である。試料の全窒素および全炭素含量はVario MAX CN(Elementar Analysensysteme社)によって測定した。堆肥以外の窒素源の $\delta^{15}\text{N}$ 値を評価するために2002年と2003年に肥料として用いられた硫安、2002年の水稲栽培期間中の6月5日、6月26日、7月9日、8月9日、8月28日に採取したかんがい水の $\delta^{15}\text{N}$ 値の分析もおこなった。 $\delta^{15}\text{N}$ 値分析のためのかんがい水試料の調整法は山田ら(1999)およびMorita *et al.* (2002)の方法にしたがった、すなわちホットプレート上で加熱して約500 $\mu\text{gN mL}^{-1}$ となるまで濃縮し、その濃縮試料0.2 mLをスズ箔に入れて凍結乾燥した。

2) 長期圃場試験の履歴

(1) 家畜ふん堆肥連用試験

各連用試験の堆肥、化学肥料の施用量、試験区名、土壌の採取時期を表13にまとめて示した。家畜ふん堆肥連用試験は1973年に開始され、その処理区は(1)堆肥、化学肥料ともに施用しない無堆肥・無化学肥料区(-LMC-AS区)、(2)堆肥は施用せず化学肥料は施用する無堆肥・化学肥料施用区(-LMC+AS区)、(3)堆肥は施用し化学肥料は施用しない堆肥施用・無化学肥料区(+LMC-AS区)(4)堆肥、化学肥料ともに施用する堆肥施用・化学肥料施用区(+LMC+AS区)である。家畜ふん堆肥の施用量は現物として各年36 Mg ha^{-1} で、毎年移植のほぼ1

ヶ月前の4月中旬に散布し、直後に作土(約15 cm深)に鋤きこんだ。化学肥料施用区の窒素(硫安)、リン酸(過リン酸石灰)、カリ(塩化カリ)肥料の施用量は各時期に設定された目的に応じて変更されている。硫安の施用量は単年で窒素として60~192 kg ha⁻¹であり、-LMC+AS区における単年の平均施用量は窒素として151 kg ha⁻¹、+LMC+AS区における単年の平均施用量は窒素として96 kg ha⁻¹であった。硫安は年次により回数は異なるが、2~4回に分けて施用した。過リン酸石灰の単年の施用量はリンとして26~63 kg ha⁻¹で平均は34 kg ha⁻¹、塩化カリの単年の施用量はカリウムとして50~199 kg ha⁻¹で平均は64 kg ha⁻¹であった。過リン酸石灰と塩化カリは全量基肥として施用した。

栽培されたイネの品種は1973~1981年はレイメイ、1982~1985年はアキヒカリ、1986~1988年は奥羽315号、1989~1995年は奥羽316号、1996~2002年はふくひびき、2003年はべこあおばであった。これらは全て多収品種・系統である。各年の収穫期に地際から約5 cm高の刈り株を残し、他の茎葉、籾は全て圃場外へ持ち出した。1区面積は約110 m²で、単連制である。

家畜ふん堆肥は秋田県農林水産技術センター畜産試験場(秋田県大仙市)において作製されてきた。1997年までは堆積方式で堆肥化した。その方法は1983年までとその後では異なった。1983年までは屋外の堆肥盤にて牛ふんを野積み状態で堆積し、切り返しはほとんど行わずに堆肥化した。1984~1997年は堆肥舎内に牛ふんを堆積し、時々切り返ししながら堆肥化した。1998年以降は牛ふん、豚ふん、鶏ふん(約6:3:1の割合)を開放型攪拌施設において強制通気しながら堆肥化し、さらに堆肥舎に堆積した。

(2) 稲わら堆肥連用試験

稲わら堆肥連用試験は1968年に開始され、その処理区は(1)無堆肥・無窒素肥料区(-RSC-AS区)、(2)無堆肥・硫安施用区(-RSC+AS区)、(3)堆肥10 Mg ha⁻¹施用・硫安施用区(+RSC10+AS区)、(4)堆肥30 Mg ha⁻¹施用・硫安施用区(+RSC30+AS区)である。稲わら堆肥は毎年移植のほぼ1ヶ月前の4月中旬に散布し、直後に作土(約16 cm深)に鋤きこんだ。硫安の単年の施用量は窒素として80 kg ha⁻¹であり、1989年までは全量を基肥として施用し、1990年以降は60 kg ha⁻¹を基肥として、20 kg ha⁻¹は幼穂形成期に追肥として施用した。過リン酸石灰の単年の施用量はリンとして35 kg ha⁻¹で、全量を基肥として施用した。塩化カリの単年の施用量はカリウムとして66 kg ha⁻¹で、1989年までは全量を基肥として施用し、1990年以降は49.5 kg ha⁻¹を基肥として、16.5 kg ha⁻¹は幼穂形成期に追肥として施用した。

栽培されたイネの品種は1972年まではフジミノリで、その後はキヨニシキであった。各年の収穫期に地際から約5 cm高の刈り株を残し、他の茎葉、籾は全て圃場外へ持ち出した。1区面積は約40 m²で、2連制である。

稲わら堆肥は東北農業研究センターの堆肥舎において時々切り返しを行いながら堆積方式で堆肥化した。用いた稲わらは東北農業研究センター内の試験圃場から収集しており、栽培方法や品種は様々である。堆肥舎における堆積期間(堆肥化した期間)は1986年までは1年半で、1987年以降は半年であった。

3) 土壌試料採取

(1) 家畜ふん堆肥連用試験

表13 長期連用試験の試験区の構成と試料採取年次

堆肥の種類	開始年	堆肥現物施用量 (Mg ha ⁻¹ year ⁻¹)	化学肥料施用量 ^{a)} (kg ha ⁻¹ year ⁻¹)			試験区名	試料採取年次 ^{b)}
			N	P	K		
家畜ふん堆肥	1973	0	0	0	0	-LMC-AS	1973, 1981, 1989, 2000, 2003
		0	60~192 (151)	26~63 (34)	50~119 (64)	-LMC+AS	1973, 1981, 1989, 2000, 2003
		36	0	0	0	+LMC-AS	1973, 1981, 1989, 2000, 2003
		36	60~192 (96)	26~63 (34)	50~119 (64)	+LMC+AS	1973, 1981, 1989, 2000, 2003
稲わら堆肥	1968	0	0	35	66	-RSC-AS	1974, 1985, 2000, 2003
		0	80	35	66	-RSC+AS	1974, 1985, 2000, 2003
		10	80	35	66	+RSC10+AS	1977, 1985, 1992, 2000, 2003
		30	80	35	66	+RSC30+AS	1977, 1985, 1992, 2000, 2003

a) 化学肥料の施肥量は各時期に設定された目的に応じて変更されている。カッコ内の数値は施肥量の平均値。

b) 土壌試料は過去にそれぞれ時期の目的に応じて採取したものである。各採取時期の採取目的が同一ではないため、採取年次に規則性はなく、採取した試験区も採取年次により異なる。1989年、1992年、2003年の試料は水稲作後に採取した(秋採取)もので、その他は水稲作前に採取した(春採取)ものである。

土壌試料は1973、1981、1989、2000、2003年に採取したものを分析に供試した。1989年と2003年の試料については水稲作後に採取、他の試料については水稲作前に採取した土壌である。各土壌試料は処理区内の数箇所から採取し、混合したものである。

(2) 稲わら堆肥連用試験

先に述べたように、過去に土壌採取を行った各時期においてその土壌採取の目的が必ずしも同じではないため、採取した年次ごとに全ての処理区の土壌がそろっているわけではない。+RSC10+AS区および+RSC30+AS区の試料は1977、1985、1992、2000、2003年に採取したもの、-RSC-AS区および-RSC+AS区の試料は1974、1985、2000、2003年に採取したものを分析に供試した。1992年と2003年の試料については水稲作後に採取、他の試料については水稲作前に採取した土壌である。各土壌試料は処理区内の数箇所から採取し、混合したものである。

異なる堆肥化方法、畜種の家畜ふん堆肥の化学的性質、異なる年次の稲わら堆肥連用試験土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値と全窒素含量についてTukey-Kramerの多重比較法を用いて検定を行なった。異なる堆積期間の稲わら堆肥の化学的性質について t 検定を行った。以上の統計計算にはJMP (SAS Institute Inc. 2002)を用いた。

2. 結果

1) 堆肥の $\delta^{15}\text{N}$ 値

家畜ふん堆肥の $\delta^{15}\text{N}$ 値、全窒素含量、全炭素含量、C/N比、水分含量を表14に、稲わら堆肥につい

ては表15に示した。1983年までの牛ふん堆肥の $\delta^{15}\text{N}$ 値の平均値は+6.4%で、同じく牛ふん堆肥でも1984~1997年の平均値は+11.6%と上昇した。1998年以降ではさらに高く+17.4%であった。家畜ふん堆肥の $\delta^{15}\text{N}$ 値は堆肥化方法または畜種と堆肥化方法の両方によって有意に異なった。稲わら堆肥の $\delta^{15}\text{N}$ 値は1981~1986年の平均値は+6.0%で、堆積期間の短い1988年以降では+5.3%とわずかに低下した。稲わら堆肥の $\delta^{15}\text{N}$ 値には堆肥化期間の長さによる有意な違いは認められなかった。

2) 土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値

家畜ふん堆肥連用試験における土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値と全窒素含量の推移を表16に、稲わら堆肥連用試験の土壌については表17に示した。家畜ふん堆肥連用試験では、+LMC-AS区と+LMC+AS区の土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値は上昇したが、-LMC-AS区と-LMC+AS区の土壌では反対に低下傾向がみられた。家畜ふん堆肥施用の有無にかかわらず、硫酸施用は土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値を低下させる傾向があった。家畜ふん堆肥が連用された土壌は窒素含量が大きく増加した。一方、家畜ふん堆肥が施用されなかった土壌では窒素含量は同程度の水準で推移した。

稲わら堆肥連用試験では、+RSC10+AS区と+RSC30+AS区の土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値はほぼ同様の値で推移した。一方、-RSC-AS区と-RSC+AS区の土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値は有意に低下した。-RSC+AS区の土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値は-RSC-AS区よりも大きく低下する傾向がみられた。稲わら堆肥が施用されなかった-

表14 家畜ふん堆肥の $\delta^{15}\text{N}$ 値および化学的特性

堆肥化方法/畜種	年次	$\delta^{15}\text{N}$ (%)	T-N ^{b)} (g kg ⁻¹)	T-C ^{b)} (g kg ⁻¹)	C/N	水分 ^{c)} (g g ⁻¹)
屋外での堆積方式・ほぼ切り返しなし/牛ふん	1981~1983	+ 6.4±1.0 c ^{a)}	4.49±1.04 ab	75.2±10.7 b	17±3 a	0.811±0.033 a
堆肥舎内での堆積方式・時々切りかえし/牛ふん	1984~1997	+11.6±1.7 b	3.98±1.59 b	76.4±18.2 b	21±6 a	0.786±0.059 a
強制通気付き開放型攪拌方式・後に堆肥舎内での堆積/牛ふん：豚ふん：鶏ふんが約6：3：1	1998~2003	+17.4±0.7 a	6.03±0.94 a	116.8±11.8 a	20±2 a	0.703±0.031 b

a) 平均値±標準偏差、同列内での同符号間では有意な差はない (Tukey-Kramer 法、 $p<0.05$)

b) 現物重当たり

c) 住田ら (2002) より引用

表15 稲わら堆肥の $\delta^{15}\text{N}$ 値および化学的特性

堆積期間	年次	$\delta^{15}\text{N}$ (%)	T-N ^{b)} (g kg ⁻¹)	T-C ^{b)} (g kg ⁻¹)	C/N	水分 ^{c)} (g g ⁻¹)
1年6ヶ月	1981~1986	+6.0±1.7 ^{a)}	9.43±2.07***	89.8±16.1***	10±1*	0.656±0.038***
6ヶ月	1988~2003	+5.3±1.0	4.21±0.95	62.2±11.8	16±5	0.766±0.042

a) 平均値±標準偏差、*および***は同列内で有意差あり (t -検定、* $p<0.05$ 、*** $p<0.001$)

b) 現物重当たり

c) 住田ら (2002) より引用

RSC-AS区と-RSC+AS区の土壌の全窒素含量はほぼ同程度の水準で推移した。稲わら堆肥が連用された土壌の全窒素含量は増加傾向がみられたが、各値間に統計的有意差はなかった。

3. 考察

1) 堆肥の材料、堆肥化方法と $\delta^{15}\text{N}$ 値

家畜ふん堆肥の $\delta^{15}\text{N}$ 値は堆肥化方法または畜種と堆肥化方法の両方の影響を受けた。堆肥化過程においては、窒素の代謝回転でより複雑な窒素化合物へ移行する際の微生物による同位体分別、およびアンモニア揮散に伴う同位体分別を含む複合的メカニズムによって堆肥の $\delta^{15}\text{N}$ は富化される (Lynch *et al.* 2006)。1984年以降の家畜ふん堆肥、すなわち堆肥舎で切り返しながらかつられたものおよび強制通気を伴う開放型攪拌施設において作られたものはそれ以前の堆肥、すなわち屋外に野積みされほとんど切り返しが行われなかったものよりも堆肥化は進み熟度は高いと推察できる。したがって、堆肥化方法による堆肥の $\delta^{15}\text{N}$ 値の違いは堆肥の熟度を反映したものと考えられる。しかし堆肥のC/N比には有意な違いは認められず、C/N比からは堆肥の熟度は判別で

きなかった。

堆肥化されたふんの畜種も家畜ふん堆肥の $\delta^{15}\text{N}$ 値に影響すると考えられる。鶏ふん堆肥と豚ふん堆肥の $\delta^{15}\text{N}$ 値は牛ふん堆肥よりも高いことが報告されている (中野ら 2003、徳永ら 2000)。前田ら (2001) によれば、豚ふんと鶏ふんは牛ふんよりもアンモニア態窒素含量または無機化しやすい窒素が多いため、堆肥化過程でのアンモニア揮散量が多い。これらの知見は堆肥化するふんの畜種も堆肥の $\delta^{15}\text{N}$ 値を決定する要因になり得ることを示唆している。

稲わら堆肥のC/N比は堆積期間の長さによって異なり、堆積した時間の長い方が熟度が高かったことが示された。しかし、稲わら堆肥の $\delta^{15}\text{N}$ 値には堆積期間の長さによる有意な違いは認められなかった。これらのことから、1年間の堆積期間の違いから生じた稲わら堆肥の熟度の違いは、稲わら堆肥の $\delta^{15}\text{N}$ 値には有意には影響しなかったことが明らかとなった。

2) 堆肥および窒素肥料無施用条件における土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値低下の要因

興味深いことに、堆肥も化学肥料の窒素も施用さ

表16 家畜ふん堆肥連用試験における土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値と全窒素含量の推移

年次	-LMC-AS ^{a)}		-LMC+AS		+LMC-AS		+LMC+AS	
	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	T-N ^{b)} (g kg ⁻¹)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	T-N (g kg ⁻¹)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	T-N (g kg ⁻¹)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	T-N (g kg ⁻¹)
1973	+2.6	0.88	+3.2	1.58	+3.7	0.97	+4.2	1.44
1981	+2.5	0.96	+2.5	1.61	+4.0	1.73	+3.4	2.18
1989	+2.3	1.02	+1.8	1.55	+4.3	1.98	+3.8	2.47
2000	+2.0	0.99	+1.3	1.67	+5.6	2.35	+5.1	2.68
2003	+2.1	1.00	+1.4	1.62	+6.9	2.59	+6.1	2.86

a) +: 施用、-: 無施用、LMC: 家畜ふん堆肥、AS: 硫安

b) 乾土当たり

表17 稲わら堆肥連用試験における土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値と全窒素含量の推移

年次	-RSC-AS ^{a)}		-RSC+AS		+RSC10+AS		+RSC30+AS	
	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	T-N ^{b)} (g kg ⁻¹)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	T-N (g kg ⁻¹)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	T-N (g kg ⁻¹)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	T-N (g kg ⁻¹)
1974	+3.1 a ^{c)}	1.26 a	+3.6 a	1.65 a	-	-	-	-
1977	- ^{d)}	-	-	-	+2.7 a	1.75 a	+3.1 a	2.35 a
1985	+3.0 a	1.30 a	+2.5 ab	1.40 a	+3.0 a	1.82 a	+3.1 a	2.63 a
1992	-	-	-	-	+2.8 a	1.92 a	+3.3 a	2.80 a
2000	+2.5 ab	1.31 a	+1.8 b	1.47 a	+2.6 a	1.93 a	+3.4 a	2.76 a
2003	+2.1 b	1.31 a	+1.9 b	1.45 a	+2.5 a	1.91 a	+3.1 a	2.72 a

a) +: 施用、-: 無施用、RSC: 稲わら堆肥、AS: 硫安、“RSC”の後に付けられた数値は稲わら堆肥の施用量を表す (Mg ha⁻¹ year⁻¹)

b) 乾土当たり

c) 2反復の平均値、同列内の同符号間では有意な差はない (Tukey-Kramer 法、 $p < 0.05$)

d) データ無し

れていない水田土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値は低下する傾向がみられた。この $\delta^{15}\text{N}$ 値の変化は水田土壌における窒素の出入り、すなわち水田土壌からの窒素の消失と水田土壌への窒素供給に伴って生じたものと考えられる。まず水田土壌からの窒素の消失に伴う $\delta^{15}\text{N}$ 値の変化について考察する。水田からの窒素の消失は水稲による吸収、脱窒、揮散、溶脱、流亡による(Kyuma 2004)。圃場条件では水稲とそれが栽培された土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値は類似し(Yoneyama *et al.* 1990、吉羽ら 1998)、水耕栽培においては水稲が低い $\delta^{15}\text{N}$ 値の窒素を吸収することが観察されているので(Yoneyama *et al.* 2001)、水稲による窒素吸収が土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値の低下を招くことはないと考えられる。脱窒、アンモニア揮散では同位体分別によって残留する窒素の $\delta^{15}\text{N}$ 値は高くなるので(Chien *et al.* 1977、Mariotti *et al.* 1977、米山 1987)、脱窒、揮散によって $\delta^{15}\text{N}$ 値が低下することもないであろう。拡散、マスフローおよびイオン交換における同位体分別に関する研究のとりまとめによれば(Högberg 1997)、水田における窒素の溶脱と流亡は土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値には大きな影響をおよぼさないと推察される。したがって、このような水田土壌からの窒素の消失によっては、土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値の低下は生じないと考えられる。

次に水田土壌に天然供給される窒素による土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値への影響について考察を行う。水田への窒素の天然供給はかんがい水からの窒素供給、雨水からの窒素供給および生物的窒素固定による(Kyuma 2004)。かんがい水からの窒素供給量については、住田ら(2002)が東北農業研究センターの圃場を対象に推定しており、かんがい水の窒素含量が1982~1987年の平均値で 0.4 mg L^{-1} で(住田ら 1990)、水稲1作のかんがい水の総量が約1,500 mmであることから、かんがい水からの窒素供給量は1年で 6 kg ha^{-1} としている。雨水からの供給量については、近隣の横手市における1994~2004年の雨水の窒素含量の平均値が 0.59 mg L^{-1} で(秋田県生活環境部 1998、1999、秋田県生活環境文化部 2000~

2005)、東北農業研究センターにおける降雨量の平均値(1971~2000年の平均値)が1,812 mm(東北農業研究センター 2006)であることから、1年で 11 kg ha^{-1} と推定される。生物的窒素固定量については、東北農業研究センターの堆肥無施用で通常の管理がされた水田において1年で 20 kg ha^{-1} と推定されている(安田ら 2000)。

それぞれの $\delta^{15}\text{N}$ 値についてであるが、2002年の水稲生育期間中のかんがい水の $\delta^{15}\text{N}$ 値は $+4.3 \sim +5.9 \%$ で、平均値は $+5.0 \%$ であった(表18)。雨水の $\delta^{15}\text{N}$ 値はマスバランス法により次に示す式から算出した。

$$\delta_{rain} = (\delta_a \times N_a + \delta_n \times N_n) / (N_a + N_n)$$

δ_{rain} は雨水の窒素の $\delta^{15}\text{N}$ 値、 δ_a は雨水のアンモニア性窒素($\text{NH}_4\text{-N}$)の $\delta^{15}\text{N}$ 値、 δ_n は硝酸性窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)の $\delta^{15}\text{N}$ 値、 N_a は雨水の $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量、 N_n は $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量である。雨水の $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ の $\delta^{15}\text{N}$ 値にはWada *et al.* (1975)のとりまとめからそれぞれ $+4.0 \%$ と -1.7% を用いた。雨水の $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_3\text{-N}$ の含量には横手市において調査された平均値、それぞれ 0.35 mg L^{-1} と 0.24 mg L^{-1} (秋田県生活環境部 1998、1999、秋田県生活環境文化部 2000~2005)を用いた。その結果、雨水の窒素の $\delta^{15}\text{N}$ 値は $+1.7 \%$ と推定された。これらの数値および*Azolla-Anabaena*共生の $\delta^{15}\text{N}$ 値である -1.4% (Yoneyama 1987)を生物的窒素固定による供給窒素の $\delta^{15}\text{N}$ 値として次の式より水田への天然供給窒素の $\delta^{15}\text{N}$ 値を推定した。

$$\delta_{nip} = (\delta_{iw} \times N_{iw} + \delta_{rain} \times N_{rain} + \delta_{bf} \times N_{bf}) / (N_{iw} + N_{rain} + N_{bf})$$

δ_{nip} は天然供給窒素の $\delta^{15}\text{N}$ 値、 δ_{iw} 、 δ_{rain} 、 δ_{bf} はそれぞれかんがい水、雨水、生物的窒素固定により供給される窒素の $\delta^{15}\text{N}$ 値、 N_{iw} 、 N_{rain} 、 N_{bf} はそれぞれかんがい水、雨水、生物的窒素固定による窒素供給量である。その結果、水田への天然供給窒素の $\delta^{15}\text{N}$ 値は $+0.6 \%$ と推定された。

推定された天然供給窒素の $\delta^{15}\text{N}$ 値が土壌よりも低いことから、堆肥も化学肥料も施用されていない

表18 かんがい水および圃場試験に使用した硫安の $\delta^{15}\text{N}$ 値

	かんがい水 (2002年)						硫安 (圃場試験に使用)	
	6/5 ^{a)}	6/26	7/9	8/9	8/28	平均値	2002年	2003年
$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	+5.1	+5.9	+5.3	+4.3	+4.6	+5.0	-0.9	-1.4

a) 採取月日 (月/日)

土壌における $\delta^{15}\text{N}$ 値の低下傾向は、低い $\delta^{15}\text{N}$ 値の窒素が天然供給されるためであると考えられた。

3) 化学肥料・堆肥施用が土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値におよぼす影響

Yoneyama *et al.* (1990) は複数の長期連用試験を調査し、作物の $\delta^{15}\text{N}$ 値には化学肥料の施用による大きな変動がみられるが、土壌については化学肥料の施用による変動が非常に小さいことを認め、これが他の報告 (Kohl *et al.* 1973, Meints *et al.* 1975) ととも一致するとした。しかし本研究の土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値の変化には、堆肥施用の有無にかかわらず硫酸は土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値を低下させる傾向が認められた。化学肥料の窒素の $\delta^{15}\text{N}$ 値は大気 N_2 (0%) に近い値となることが知られている (Black・Warning 1977, Freyer・Aly 1974, Shearer *et al.* 1973, Yoneyama 1996)。本研究においても、2002年と2003年に用いられた硫酸の $\delta^{15}\text{N}$ 値はそれぞれ -0.9%、-1.4%と低かった (表18)。これらのことから、土壌よりも $\delta^{15}\text{N}$ 値が低い硫酸が施用され続けた場合は、その硫酸により水田土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値が変化し得ることが明らかとなった。

家畜排泄物を由来とする有機質資材が施用された水田土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値は、植物を由来とする有機質資材が施用された土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値よりも高い傾向が報告されている (吉羽ら 1998)。本研究においても同様の傾向がみられ、家畜ふん堆肥の連用により土壌の全窒素含量が大きく増加し、 $\delta^{15}\text{N}$ 値が上昇した。これは、家畜ふん堆肥連用土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値の上昇が、高い $\delta^{15}\text{N}$ 値の家畜ふん堆肥由来窒素の多量の蓄積によるものであることを示している。一方稲わら堆肥については、その $\delta^{15}\text{N}$ 値は土壌よりも高かったが、連用によっても土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値は上昇しなかった。これは、稲わら堆肥と土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値の違いが比較的小さかったことと稲わら堆肥の窒素の土壌蓄積が比較的少なかったためと推察された。

このように、長期連用試験における土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値の長期的変化から、水田土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値は施用される化学肥料の窒素、有機質資材の窒素、さらに天然供給される窒素の $\delta^{15}\text{N}$ 値とその量の影響を受けることが明らかとなった。

4. まとめ

家畜ふん堆肥および稲わら堆肥長期連用水田土壌の ^{15}N 自然存在比 ($\delta^{15}\text{N}$ 値) の推移および連用に用いられた堆肥の $\delta^{15}\text{N}$ 値を調査した。家畜ふん堆肥

連用は1973年から、稲わら堆肥連用は1968年から行われており、どちらも堆肥無施用区も設けてある。家畜ふん堆肥は時期により製造方法が異なり、製造方法によりその $\delta^{15}\text{N}$ 値は異なっていた。稲わら堆肥は1986年以前とその後では堆積期間が異なるが、 $\delta^{15}\text{N}$ 値には有意な違いはみられなかった。家畜ふん堆肥が連用された土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値は上昇し、家畜ふん堆肥無施用土壌では低下傾向がみられた。稲わら堆肥が連用された土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値はほとんど変化しなかったが、稲わら堆肥無施用土壌では低下した。堆肥と窒素肥料が長期間施用されなかった土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値の低下は、水田に天然供給される窒素の $\delta^{15}\text{N}$ 値が土壌よりも低いためと推定された。 $\delta^{15}\text{N}$ 値の長期的推移から、水田土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値は、化学肥料や有機物として施用される窒素の $\delta^{15}\text{N}$ 値およびその蓄積量の影響を受けることが明らかとなった。さらに、天然供給される窒素の影響も受けることが明らかとなった。

Ⅶ 総合考察

本論文のⅡ～Ⅴでは ^{15}N 標識有機質資材を用いてその窒素動態を追跡した。それによってガラス繊維ろ紙法で生じている現象を解明し、暖地水田における7種類の有機質資材由来窒素の動態を明らかにした。また、異なる有機質資材の併用で水稲に対する窒素肥効が変化することを見出した。さらに寒冷地水田における牛ふんオガクズ堆肥の3年間にわたる窒素動態を明らかにした。Ⅵでは、 ^{15}N 自然存在比を用いた有機質資材の窒素動態解析の基礎となる窒素源と水田土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値の関係についての新たな知見を得た。ここでは、Ⅱ～Ⅵにおいて十分には触れなかった点について補足しつつ全体を通じた議論をし、今後の課題について整理する。

1. ガラス繊維ろ紙法による有機質資材の窒素分解率／残存率の注意点

過去の報告例と同様に、C/N比の高い小麦わら、稲わらについては窒素量からみると残存率は100%を越え、分解率は負の値となった。一方 ^{15}N 存在比でみると小麦わら、稲わらが分解され、その窒素がガラス繊維ろ紙筒外へ出て行くことが明瞭に示された。九州沖縄農業研究センターでの小麦わら施用試験では、小麦わらを施用すると、施用しない場合よりも水稲の窒素吸収量が少ない場合もあれば、逆に多い場合もあった。志賀ら (1985a) が示したよう

に小麦わらからの窒素供給が5年以上も生じないとすると、小麦わらの施用によっては水稻の窒素吸収量は増加しないことになる。田中（2002）は小麦わらの施用で水稻の窒素吸収量が減少するのは、土壌中の無機態窒素不足ではなく、芳香族カルボン酸による生育阻害であることを推定している。さらに本研究では、C/N比が111の¹⁵N標識小麦わらの窒素の13%もが施用年の水稻によって吸収されることを示した。稲わらについてもガラス繊維ろ紙法の窒素量の変化によれば施用年の水稻作期間中には稲わらの窒素は供給されないことになるが、C/N比54の¹⁵N標識稲わらの窒素の12%が水稻によって吸収された。このように従来のガラス繊維ろ紙法による有機質資材の窒素残存率は、必ずしも有機質資材由来窒素の実態を示しているものではないことに注意する必要がある。また、¹⁵N存在比に基づく有機質資材由来窒素残存率と窒素量による残存率の乖離は、有機質資材のC/N比が高くなると大きくなり、C/N比が低くなると小さくなる。したがって、ガラス繊維ろ紙法による有機質資材の窒素分解率/残存率の評価値については、特にC/N比に注意する必要がある。

2. 水稻栽培における有機質資材の利用と課題

1) 暖地水田

暖地水田における¹⁵N標識有機質資材の施用試験によって、有機質資材によりその窒素動態が異なることが明らかとなった。堆肥化過程を経た牛ふんオガクズ堆肥、稲わら堆肥の水稻への窒素肥効は低く、堆肥化されていない稲わら、小麦わらはそれよりも高かった。鶏ふん堆肥、米ぬか、乾燥豚ふんの肥効はさらに高かった。

稲わら、小麦わらでも水稻にとっては一定の窒素源となるが、稲わら500 g m⁻²を施用しても全窒素量としては約3 gN m⁻²である。肥効率33%から換算すると約1 gN m⁻²の減肥が可能となる。しかし、北部九州の標準施肥量9 gN m⁻²を満たすには、残り8 gN m⁻²相当の窒素肥料が必要となる。同様に小麦わらにおいては、8.4 gN m⁻²の窒素肥料が必要となり、ほとんど減肥できない。水稻が吸収する窒素を稲わらや小麦わらだけで賄うためには大量のわらが必要となるが、水稻の生育障害の懸念から（前田・南 1981、田中 2002）現実的ではない。稲わら堆肥については2 kg m⁻²施用すれば1.4 gN m⁻²相当の減肥が可能となり、稲わら堆肥だけで標準施肥量9 gN m⁻²を賄おうとすると約13 kg m⁻²の施用が

必要となる。堆肥化されているとはいえ、これだけの量では生育への悪影響が懸念される。またこれだけの堆肥を作るためには、その水田で収集される稲わらの約13倍量が必要である。堆肥の残効が長期間安定しているとすれば、施肥量を減らして連用するのが有効と考えられる。ただし、稲わら堆肥由来窒素の肥効が同程度で継続すると仮定しても、稲わら堆肥を主たる窒素源として栽培を行なうには2 kg m⁻²を6～7年は連用する必要がある。九州沖縄農業研究センターで稲わら堆肥2 kg m⁻²を30年程度連用した場合、窒素肥料無施用でも慣行栽培（標準施肥量）の1割程度の減収に留まっており、連用の有効性を裏付けている。米ぬかについては490 g m⁻²の施用で標準施肥量を賄える。大分県では米ぬかを基肥として利用する方法として、代かきの7～10日前に10a当たり200～300 kg鋤き込み施用するとしている。代かき時の施用ではなく、鋤き込むことによって還元程度は軽くなり、水稻生育抑制の悪影響はみられなかったとしている（大分県農業技術センター 2003）。米ぬか490 g m⁻²は大分県の場合よりも多いが、問題ないとされる300 g m⁻²は鋤き込み、残りは除草目的も兼ねて表面散布することも考えられる。ただしこの米ぬか量はその水田で収集される米ぬかの約10倍もの量に相当する。

必要量の有機質資材を確保することを考えると、有機質資材を主たる窒素源として水稻を栽培するには家畜ふん堆肥を主体とし、必要に応じてそれに作物残渣由来の有機質資材を併用するのが適当と考えられる。本論文のⅢにおいては準備の都合上堆肥化していない豚ふんを用いたが、堆肥の原料となる家畜ふんにはヒトの病原体となり得る大腸菌が含まれる可能性がある（Vuorinen・Saharinen 1997、本多 1999）、家畜ふんは適正な管理下で堆肥化してから用いるのが望ましい。肥効率から計算すると、牛ふんオガクズ堆肥を2 kg m⁻²施用すれば約1.4 gN m⁻²の化学肥料の減肥が可能となる。牛ふんオガクズ堆肥だけで標準窒素施肥量9 gN m⁻²を賄おうとすると6.5倍の約13 kg m⁻²もの施用が必要となるが、これだけの多量施用によっては倒伏、いもち病の発生を招く可能性があるため避けるべきである（伊藤ら 1982）。したがって本論文のⅣにおいて論じたように、牛ふん堆肥を主たる窒素源として水稻栽培を行なうには連用が必要となるが、牛ふん堆肥由来窒素の肥効が同程度で継続すると仮定しても、

牛ふん堆肥を主たる窒素源として栽培を行なうには 2 kg m^{-2} を 6～7 年は連用する必要がある。一方、鶏ふん堆肥については、 350 g m^{-2} 程度の施用で標準施肥量を賄えることになる。

有機質資材を施用する際には、化学肥料の場合と同様に分施にするか全量基肥にするかという点も考慮に値する。有機質資材の肥効は生育後期まで続くとは限らず、牛ふんオガクズ堆肥、乾燥豚ふんを除いて有機質資材由来窒素の吸収は幼穂形成期から穂ばらみ期よりも前に終わっている。したがってこの他の有機質資材を用いる場合には生育後期の追肥が必要になる可能性がある。一方で、食味を低下させる原因となる米の窒素含有率を上げないために、生育後期の窒素を抑える栽培法がとられる良食味米栽培にはむしろ好都合である可能性もある。ただし有機質資材の肥効は化学肥料よりは遅く、気象条件によっては生育後期まで肥効が継続することもあり得る。また土壤に残存した有機質資材由来窒素が翌年以降のようなパターンで無機化するかは不明であるので、温度と各種有機質資材の肥効発現との詳細な関係、そして土壤に蓄積した有機質資材由来窒素が次年度以降のような動態を示すのか検討する必要がある。

本論文のIVにおいて論じたように異なる肥効の有機質資材を組み合わせる施用法も考えられる。しかし、異なる肥効の有機質資材を組み合わせても、その全体としての肥効は単なる加算的なものになるとは限らないことが明らかとなった。これは有機質資材の組み合わせによってその肥効を調節できる可能性を示唆するもので、より水稻の窒素吸収パターンに近いものができる可能性もある。有機質資材主体の水稻栽培技術の確立に向けて、これから取り組む価値のある課題と言える。

有機質資材の残存率には有意な違いは認められなかったが、堆肥化したものが高い傾向がみられた。同様の試験方法で行なわれた本研究の寒冷地と暖地を比較すると、牛ふんオガクズ堆肥窒素の残存率は暖地の方が低かった。温度の高い暖地の方が微生物活性は高く窒素の代謝回転が速いので、牛ふんオガクズ堆肥の分解は早く、残存率が低いものと考えられた。他の有機質資材についてもその窒素動態は暖地と寒冷地では異なると考えられ、特に不足している寒冷地におけるデータの集積が必要である。

環境への影響を考えたときに未回収の割合は重要

である。本研究においては、未回収の多くの部分が脱窒と考えられるが、全てが N_2 ではなくその一部は温室効果ガスである亜酸化窒素 (N_2O) の可能性がある (Minami 1987)。また溶脱による消失分も存在する。有機質資材は化学肥料よりも水稻による吸収率が低く、肥効率に基づいて施用すると成分としての施用量は化学肥料よりも多量となる。この未回収の内訳が今後の重要な課題であり、堆肥の肥効だけではなく系外への消失量とその内訳も考慮した施用法を検討する必要がある。

2) 寒冷地水田

寒冷地水田においては、同様の試験方法で行われた本研究の暖地の結果と比較すると、水稻に対する牛ふんオガクズ堆肥の窒素肥効は低く、土壤への残存率は高く、未回収率は低かった。本研究では寒冷地、暖地ともに土壤は細粒灰色低地土で浸透水量もほぼ同じであったことから、これらの違いは主に気象の影響と考えられた。水稻に対する窒素肥効が低いことから、寒冷地においても牛ふんオガクズ堆肥を主たる窒素源として水稻を栽培するためには連用する必要があり、一定の水稻収量を得るために必要な連用年数は暖地の場合よりも多くなると考えられる。牛ふんオガクズ堆肥由来窒素吸収量の水稻3作分の合計は堆肥 2 kg m^{-2} 施用で 0.6 gN m^{-2} であった。堆肥を連用したと仮定し、2 年目以降に施用された堆肥の窒素収支が初年目施用の堆肥と同様に推移すると仮定すると、3 作目の水稻に吸収される堆肥由来窒素は合計で 0.6 g m^{-2} になる。寒冷地 (秋田県) における標準窒素施肥量は 8 gN m^{-2} 程度で、基肥窒素 (化学肥料) の水稻による吸収率が 40% 程度であるので、全量基肥とした場合 3.2 gN m^{-2} を水稻が肥料から吸収することになる。すると牛ふんオガクズ堆肥を 3 年連用しても 2.6 gN m^{-2} 不足となる。分施では追肥窒素の吸収率が高く、水稻が肥料から吸収する窒素はさらに多くなるので、分施体系と比較すると不足分は増える。したがって 3 年程度の連用では、牛ふんオガクズ堆肥だけの施用で十分な生産量を得ることはできないであろう。さらに長期の連用が必要となるが、堆肥由来窒素が施用から 4 年目以降にどのような挙動を示すか、長期の追跡が必要である。また連用した場合にはその窒素肥効が変化する可能性もあり (松山ら 2003)、連用条件での解析も必要である。なお寒冷地では暖地よりも牛ふんオガクズ堆肥由来窒素の未回収率が低かつ

たことから、短期的な環境負荷リスクは寒冷地の方が低いと判断された。

3. $\delta^{15}\text{N}$ 値による有機質資材由来窒素動態の評価法の課題

土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値の推移から、窒素源の $\delta^{15}\text{N}$ 値が水田土壌に反映されていくことが確認できた。また、水田特有の窒素富化機能により、水田土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値が低下し得ることが明らかとなった。さらに、本研究により、ある時点だけの処理区と無処理区を単純に比較することの問題点も明らかとなった。例えば5～6%の稲わら堆肥を連用した土壌の2003年の $\delta^{15}\text{N}$ 値は3%で、堆肥を施用しなかった土壌では2%という結果だけからは、土壌よりも稲わら堆肥の $\delta^{15}\text{N}$ 値が高いので、稲わら堆肥が連用された土壌は稲わら堆肥の影響により $\delta^{15}\text{N}$ 値が上昇したと理解されるであろう。ところが土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値の推移をみると、稲わら堆肥連用土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値は変化しておらず、変化したのは無堆肥区の土壌であった。このようにある時点だけの土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値の比較では、土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値の変化を正確には理解できないことに注意する必要がある。

本研究における土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値の長期的な推移を、土壌の窒素量の変化、土壌に供給された窒素の $\delta^{15}\text{N}$ 値と窒素量からマスバランスを用いて説明する試みを行ってみたが、必ずしも妥当な説明はつかなかった。すなわち、各窒素源の窒素はそのままの $\delta^{15}\text{N}$ 値で水田土壌に蓄積されるわけではなく、土壌中での形態変化や消失に伴って $\delta^{15}\text{N}$ 値が変化して蓄積されるものと考えられる。この水田土壌中での窒素動態に伴う施用窒素の $\delta^{15}\text{N}$ 値の変化の解析が進めば、特に家畜ふん堆肥のように土壌との $\delta^{15}\text{N}$ 値の違いが大きい有機質資材については、 $\delta^{15}\text{N}$ 値を用いてその窒素動態を推定できる可能性はある。また、窒素源と水稲の $\delta^{15}\text{N}$ 値の関係を詳細に検討したところ、有機質資材、化学肥料ともに窒素源を施用しない条件での土壌と水稲の $\delta^{15}\text{N}$ 値は一致はしないが、一定の関係があることが明らかになりつつある（未発表）。この窒素源の $\delta^{15}\text{N}$ 値と水稲の $\delta^{15}\text{N}$ 値の関係についての補正を導入すれば、水稲の起源別窒素吸収量の推定精度は向上すると考えられる。

引用文献

- 1) 秋田県生活環境部. 1998. 平成10年版環境白書. 秋田. 秋田県生活環境部. p.189.
- 2) 秋田県生活環境部. 1999. 平成11年版環境白書. 秋田. 秋田県生活環境部. p.188.
- 3) 秋田県生活環境文化部. 2000. 平成12年版環境白書. 秋田. 秋田県生活環境文化部. p.195.
- 4) 秋田県生活環境文化部. 2001. 平成13年版環境白書. 秋田. 秋田県生活環境文化部. p.201.
- 5) 秋田県生活環境文化部. 2002. 平成14年版環境白書. 秋田. 秋田県生活環境文化部. p.202.
- 6) 秋田県生活環境文化部. 2003. 平成15年版環境白書. 秋田. 秋田県生活環境文化部. p.38.
- 7) 秋田県生活環境文化部. 2004. 平成16年版環境白書. 秋田. 秋田県生活環境文化部. p.41.
- 8) 秋田県生活環境文化部. 2005. 平成17年版環境白書. 秋田県生活環境文化部. p.38.
- 9) 安藤 豊, 庄子貞雄, 及川 勉, 菅野忠教. 1986. 水田土壌中での稲わらの分解と窒素の挙動. 土肥誌. 57 : 359-364.
- 10) Azam, F. 1990. Comparative effects of organic and inorganic nitrogen sources applied to a flooded soil on rice yield and availability of N. *Plant Soil*. 125 : 255-262.
- 11) Black, A.S.; Waring, S.A. 1977. The natural abundance of ^{15}N in the soil water system of a small catchment area. *Aust. J. Soil Res.* 15 : 51-57.
- 12) Bremner, J.M. 1996. Nitrogen-total (Bigham J. M. ed, *Method of Soil Analysis. Part 3 Chemical Methods*). Madison, WI. SSSA. p.1085-1122.
- 13) Chien, S.H.; Shearer, G.; Kohl, D.H. 1977. The nitrogen isotope effect associated with nitrate and nitrite loss from waterlogged soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41 : 63-69.
- 14) FAO, ISRIC, and ISSS. 1998. World reference base for soil resources. Rome. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 87p.
- 15) Freyer, H.D.; Aly, A.I.M. 1974. Nitrogen-15 variations in fertilizer nitrogen. *J. Environ. Qual.* 3 : 405-406.

- 16) 古谷修, 古川智子, 伊藤稔. 2003. 堆肥化過程における堆肥品温と堆肥腐熟度判定のための酸素消費量との関係. 土肥誌. 74 : 645-648.
- 17) 後藤忍, 江口洋. 1998. 琉球石灰岩風化土壌の圃場条件における各種有機物の分解速度と土壌有機物の集積予測. 土肥誌. 69 : 129-134.
- 18) 郡司掛則昭, 久保研一. 1996. 有機物の窒素分解特性と果菜類に対する効果的施用法. 熊本農研研報. 5 : 46-55.
- 19) 花井雄次. 1987. 汎用水田における作付け体系. 研究ジャーナル. 10 : 28-32.
- 20) 原田靖生. 1998. 家畜ふん尿処理物の施用量 (畜産環境整備機構編, 家畜ふん尿処理・利用の手引き). 畜産環境整備機構, p.68-73.
- 21) Harada, Y.; Haga, K.; Osada, T.; Izawa, T.; Nishimura, Y. 1998. Decomposition of organic matter during the maturing process of cattle waste compost. Anim. Sci. Technol. 69 : 1085-1093.
- 22) Hoagland, D.R.; Arnon, D.I. 1938. The water culture method for growing plants without soil. Calif. Agr. Exp. Sta. Circ. 347 : 1-39.
- 23) Högborg, P. 1997. ¹⁵N natural abundance in soil-plant systems. New Phytol. 137 : 179-203.
- 24) 本多勝男. 1999. 家畜糞の堆肥化処理ハウス. 畜産の研究. 53 : 193-198.
- 25) Hood, R.C.; Goran, K.; Aigner, M.; Hardarson, G. 1999. A comparison of direct and indirect ¹⁵N isotope techniques for estimating crop N uptake from organic residues. Plant Soil. 208 : 250-270.
- 26) 生雲春久. 2003. 家畜ふん堆肥による化学肥料代替可能割合の都道府県別試算 - 2000年度農業センサスデータ -. 農業技術. 58 : 469-474.
- 27) 伊藤信, 佐藤智男, 白石道夫. 1982. 未熟厩肥の大量施用が水田土壌の化学性と水稻の生育・収量に及ぼす影響. 東北農試研報. 67 : 97-130.
- 28) 岩田久史, 沢田守男, 森健治郎, 加藤虎治. 1980. 水稻作へのおがくず混合家畜ふん堆肥の利用 (第1報) 多量施用が水稻生育及び土壌に与える影響. 愛知農総試研報. 12 : 45-51.
- 29) 角重和浩, 山本富三, 井上恵子, 末信真二, 田中浩平. 1993. 水稻品種ヒノヒカリの窒素吸収パターンの解析 第4報望ましい窒素吸収パターンの策定. 九州農業研究. 55 : 50.
- 30) 上村幸廣, 宇田川義夫, 吉留昭夫, 古江広治. 1986. 各種有機物の施用が水稻の生育及び土壌に及ぼす影響. 鹿児島県農試報告. 14 : 21-28.
- 31) 上山紀代美, 藤原俊六郎, 船橋秀登. 1995. 牛ふん堆肥連用が作物収量と土壌の化学性に及ぼす影響. 神奈川農総研研報. 136 : 31-42.
- 32) 北田敬宇. 1988. 灰色低地土における施用有機物の分解過程. 石川農試研報. 16 : 67-80.
- 33) 北田敬宇, 下田英雄, 亀川健一, 秋山豊. 1993. 灰色低地土水田における田畑輪換による土壌養分動態と最適な水田・畑期間. 土肥誌. 64 : 154-160.
- 34) Kohl, D.H.; Shearer, G.B.; Commoner, B. 1973. Variation of ¹⁵N in corn and soil following application of fertilizer nitrogen. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 37 : 888-892.
- 35) 神山和則, 寶示戸雅之, 佐々木寛幸, 宮路広武. 2003. 農業統計メッシュデータを用いた養牛に起因する水系への窒素負荷量の推定. 土肥誌. 74 : 425-433.
- 36) 香西清弘, 平木孝典. 1997. 牛ふん堆肥の連用が土壌の理化学性に及ぼす影響. 香川農試研報. 49 : 61-67.
- 37) 久保田勝, 高柳英夫. 1984. 北陸地方の重粘土水田における稲わらの分解. 土肥誌. 55 : 36-42.
- 38) Kyuma, K. 2004. Paddy soil science. Melbourne, Kyoto University Press, Kyoto and Trans Pacific Press. p.132-168.
- 39) Lynch, D.H.; Voroney, R.P.; Warman P.R. 2006. Use of ¹³C and ¹⁵N natural abundance techniques to characterize carbon and nitrogen dynamics in composting and in compost-amended soils. Soil Biol. Biochem. 38 : 103-114.
- 40) 前田要, 南松雄. 1981. 強粘質水田土壌の物理・化学的特性と生産力向上に関する研究. 北海道立農試集報. 46 : 41-50.
- 41) 前田乾一, 鬼鞍豊. 1977. 圃場条件における有機物の分解率の測定法. 土肥誌. 48 : 567-568.
- 42) 前田乾一, 志賀一一. 1978. 水田条件化における各種有機物資材の分解経過. 土肥誌. 49 : 455-460.
- 43) 前田武己, 松田従三, 近江谷和彦. 2001. 家畜糞の堆肥化におけるアンモニア揮散 (第2報) - 畜

- 糞の違いが揮散に及ぼす影響－. 農機誌. 63 : 41-47.
- 44) Mariotti, A.; Germon, J.C.; Hubert, P.; Kaiser, P.; Letolle, R.; Tardieux, A.; Tardieux, P. 1977. Experimental determination of nitrogen kinetic isotope fractionation: Some principles; Illustration for the denitrification and nitrification processes. *Plant Soil*. 62 : 413-430.
- 45) 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.
- 46) 松村 修. 1992. 水田作付体系における地力維持対策. 農業技術. 47 : 488-492.
- 47) 松波寿弥, 寶示戸雅之. 2005. 実規模の圃場と乳牛を用いた重窒素標識牛ふん尿堆肥製造過程における窒素収支. 土肥誌. 76 : 153-160.
- 48) Matsushita, K.; Miyauchi, N.; Yamamuro, S. 2000a. Kinetics of ^{15}N -labelled nitrogen from co-compost made from cattle manure and chemical fertilizer in a paddy field. *Soil Sci. Plant Nutr.* 46 : 353-363.
- 49) Matsushita, K.; Uenosono, S.; Nagatomo, M.; Nishida, M.; Honmura, T.; Miyauchi, N.; Yamamuro, S. 2000b. Kinetics of ^{15}N -labelled nitrogen from co-compost made from cattle manure and chemical fertilizer in a paddy field: Effect of mixing ratio of cattle feces and ammonium sulfate. *Soil Sci. Plant Nutr.* 46 : 905-916.
- 50) 松山 稔, 牛尾昭浩, 桑名健夫, 吉倉惇一郎. 2003. 施用有機物由来窒素の5年間にわたる水稲への吸収利用と施肥窒素の削減. 土肥誌. 74 : 533-537.
- 51) Meints, V.W.; Boone, L.V.; Kurtz, L.T. 1975. Natural ^{15}N abundance in soils, leaves and grains as influenced by long term addition of fertilizer N at several rates. *J. Environ. Qual.* 4 : 486-490.
- 52) Minami, K. 1987. Emission of nitrous oxide (N_2O) from agro-ecosystem. *JARQ*. 21 : 22-27
- 53) Morita, A.; Takano, H.; Oota, M.; Yoneyama T. 2002. Nitrification and denitrification in acidic soil of Tea (*Camellia sinensis* L.) field estimated by $\delta^{15}\text{N}$ values of leached nitrogen from the soil columns treated with ammonium nitrate in the presence or absence of a nitrification inhibitor and with slow-release fertilizers. *Soil Sci. Plant Nutr.* 48 : 585-593.
- 54) Mulvaney, R.L. 1996. Nitrogen-inorganic forms (Bigham, J.M. ed, *Method of Soil Analysis. Part 3 Chemical Methods*). Masidon, WI. SSSA. p.1123-1184.
- 55) Muñoz, G.R.; Powell, J.M.; Kelling, K.A. 2003. Nitrogen budget and soil N dynamics after multiple applications of unlabeled or ^{15}N -enriched dairy manure. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67 : 817-825.
- 56) Murayama, S. 1984. Decomposition kinetics of straw saccharides and synthesis of microbial saccharides under field conditions. *J. Soil Sci.* 35 : 231-242.
- 57) Murayama, S.; Asakawa, Y.; Ohno Y. 1990. Chemical properties of subsurface peats and their decomposition kinetics under field conditions. *Soil Sci. Plant Nutr.* 36 : 129-140.
- 58) 中野明正, 上原洋一, 山内 章. 2003. 堆肥施用がトマトの収量、糖度、無機成分および $\delta^{15}\text{N}$ 値に与える影響. 土肥誌. 74 : 737-742.
- 59) 名越時秀, 中村吉範, 田邊 猛. 2001. 耕耘深度の相違が湛水直播水稲の根量と耐倒伏性との関係に及ぼす影響. 東農大農学集報. 46 : 13-17.
- 60) 西田瑞彦, 井田 明, 田中福代. 1993. 水稲品種ヒノヒカリの窒素施肥条件を異にした生産量及び施肥窒素の分配. 土肥講要. 39 : 155
- 61) 西田瑞彦, 土屋一成. 2001. 暖地直播水稲栽培に施用した有機物の肥効. 九州農業研究. 63 : 58
- 62) Nishida, M.; Usui, M.; Tsuchiya, K.; Moriizumi, M. 2003. Demonstration of discrepancy in N remaining rate of organic matter evaluated by N content and ^{15}N content in the glass fiber-filter paper bag method. *Soil Sci. Plant Nutr.* 49 : 297-300.
- 63) 西田瑞彦. 2004. 九州・沖縄の農業と土壤肥料 2004. 日本土壤肥料学会九州支部. p.97-98.
- 64) Nishida, M.; Tsuchiya, K.; Yamamuro, S. 2004. Fate of N and relative efficiency of ^{15}N -labeled organic materials applied to transplanted rice in northern Kyushu region of Japan. *Soil Sci.*

- Plant Nutr. 50 : 225-232.
- 65) Nishida, M.; Moriizumi, M.; Tsuchiya, K. 2005. Changes in the N recovery process from ¹⁵N-labeled swine manure compost and rice bran in direct-seeded rice by simultaneous application of cattle manure compost. Soil Sci. Plant Nutr. 51 : 577-581.
- 66) Nishida, M.; Iwaya, K.; Sumida, H.; Kato, N. 2007. Changes in natural ¹⁵N abundance in paddy soils under different, long-term soil management regimes in the Tohoku region of Japan. Soil. Sci. Plant Nutr. 53 : 310-317
- 67) Nishida, M.; Sumida, H.; Kato, N. 2008. Fate of nitrogen derived from ¹⁵N-labeled cattle manure compost applied to a paddy field in the cool climate region of Japan. Soil. Sci. Plant Nutr. 54 : 459-466
- 68) 西尾道徳. 2007. 堆肥・有機質肥料の基礎知識. 農文協. p.137-139.
- 69) 農林水産省. 2006. 平成18年度版食料・農業・農村白書. 農林水産統計協会. p.164-169.
- 70) 農林水産省. 2007. 平成18年度認定事業者に係る格付け実績. http://www.maff.go.jp/j/jas/jas_kikaku/pdf/youki_jisseki_f.pdf (2008年1月).
- 71) 農林水産省農林水産技術会議事務局. 2006. 農林水産研究開発レポートNo.15イネで牛を育てる－飼料イネによる国産牛生産－. 農林水産省農林水産技術会議事務局. p.3.
- 72) 農山漁村文化協会. 2000. 米ぬかを使いこなす. 農山漁村文化協会. p.142-162.
- 73) 大分県農業技術センター. 2003. 試験ニュース No.93. 宇佐. 大分県農業技術センター. p.3.
- 74) 大山信雄. 1982. 水田における施用有機物の分解・集積及び水稲に対する効果. 東北農業研究. 30 : 57-72.
- 75) 大山信雄, 片野 学, 長谷川利拡. 1998. 阿蘇黒ボク土水田における有機物連用効果 第1報. 初期3年間の水稲の生育・養分吸収に対する効果. 九州東海大農紀要. 17 : 9-24.
- 76) 佐賀県植物防疫協会. 1996. 水稲の施肥基準. 施肥基準・病害防除基準・雑草防除基準. 佐賀. 佐賀県植物防疫協会. p.1-24.
- 77) 三枝正彦, 花木真由美, 伊藤豊彰. 1999. 不耕起湿田土壌における稲わらの分解過程と水稲による稲わら窒素の吸収利用. 土肥誌. 70 : 157-163.
- 78) 齊藤博之, 及川光史, 村上芳子, 高橋和吉, 遠藤征彦. 1985. 水田に対する各種有機物の施用効果－各種有機物の特性とその肥効－. 東北農業研究. 37 : 47-48.
- 79) 酒井憲一, 山本富三. 1999. 家畜ふん堆肥の窒素無機化予測および被覆肥料の利用による水稲施肥量の削減と環境負荷低減. 土肥誌. 70 : 185-189.
- 80) SAS Institute Inc. 2002. JMP 5.0.1 a, Cary, NC
- 81) 佐藤賢一, 中村幸二. 2000. 家畜ふん・コーヒー粕堆肥の窒素無機化推定とその水稲への影響. 土肥誌. 71 : 826-833.
- 82) Shearer, G.B.; Kohl, D.H.; Commoner, B. 1973. The precision of determinations of the natural abundance of nitrogen-15 in soils, fertilizers, and shelf chemicals. Soil Sci. 118 : 308-316.
- 83) 志賀一一. 1984. 水田の有機物施用基準について. 土肥誌. 55 : 374-380.
- 84) 志賀一一, 大山信雄, 前田乾一, 鈴木正昭. 1985a. 各種有機物の水田土壌中における分解過程と分解特性に基づく評価. 農研センター研報. 5 : 1-19.
- 85) 志賀一一, 大山信雄, 鈴木正昭, 前田乾一, 鈴木弘吾. 1985b. 水田における有機物管理が土壌の有機物集積、窒素供給能、水稲生育に及ぼす影響. 農研センター研報. 5 : 21-38.
- 86) Soil Survey Staff. 1998. Keys to Soil Taxonomy, 8th edn. Washington. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- 87) 宗林 正, 田中康隆, 北川芳雄. 1991. 水田輪換畑野菜作における有機質資材施用技術(第2報) ガラス繊維ろ紙筒埋設法による各種有機質資材の分解特性. 奈良農試験報. 22 : 57-64.
- 88) Stewart, G. 2001. What do $\delta^{15}\text{N}$ signatures tell us about nitrogen relations in natural ecosystems? (Unkovich, M.; Pate, J.; Mcneill, A.; Gibbs, D.J. ed., Stable isotope techniques in the study of biological processes and functioning of ecosystems). Dordrecht. Kluwer Academic Publishers. p.91-101.
- 89) 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.
- 90) 住田弘一, 大山信雄, 野副卓人, 佐藤智男. 1990. 要素欠如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.
- 91) 住田弘一. 1993. 水田土壤のケイ酸供給力と合理的資材施用法. 農業技術. 48 : 539-543.
- 92) 住田弘一, 加藤直人, 西田瑞彦. 2002. 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. 東北農研研報. 100 : 49-59.
- 93) 住田弘一, 加藤直人, 西田瑞彦. 2005. 田畑輪換の繰り返しや長期畑輪換に伴う転作大豆の生産力低下と土壤肥沃度の変化. 東北農研研報. 103 : 39-52.
- 94) 高橋 均. 1983. 田畑輪換と集团的土地利用－技術研究サイドから－. 農業経営研究. 42 : 14-22.
- 95) 高橋 茂, 山室成一, 小野信一. 2000. 重窒素標識された牛糞堆肥由来窒素の水稻およびトマトによる吸収. 土肥誌. 71 : 246-248.
- 96) 高橋 茂, 上之菌 茂. 2001. 重窒素で標識した家畜糞堆肥の作成と堆肥由来窒素吸収量測定の試み. 農業技術. 56 : 412-415.
- 97) Takahashi, S.; Uenosono, S.; Ono S. 2003. Short- and long-term effects of rice straw application on nitrogen uptake by crops and nitrogen mineralization under flooded and upland conditions. *Plant Soil*. 251 : 291-301.
- 98) 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. 愛知農総試研報. 28 : 89-95.
- 99) 田中福代. 2002. 水田への麦わら施用に伴う芳香族カルボン酸の生成と水稻の生育抑制機構に関する研究. 九州沖繩農研報. 40 : 33-78.
- 100) 寺島一男, 尾形武文, 秋田重誠. 1994. 直播水稻の耐倒伏性に関与する生理生態的形質 第2報 耐ころび型倒伏性品種の根の生育特性. 日作紀. 63 : 34-41.
- 101) 東北農業研究センター. 2001. 平成12年度東北農業研究センター年報. 盛岡. 東北農業研究センター. p.194-195.
- 102) 東北農業研究センター. 2002. 平成13年度東北農業研究センター年報. 盛岡. 東北農業研究センター. p.150-151.
- 103) 東北農業研究センター. 2003. 平成14年度東北農業研究センター年報. 盛岡. 東北農業研究センター. p.162-163.
- 104) 徳永哲夫, 福永明憲, 松丸泰郷, 米山忠克. 2000. 堆肥および化学肥料を施用した水田における $\delta^{15}\text{N}$ 値を用いた水稻の起源別窒素量の推定の試み. 土肥誌. 71 : 447-453.
- 105) 築城幹典, 原田靖生. 1997. 酪農経営から発生する家畜排泄物中窒素、リン、カリウム量の推定. 農研センター研報. 27 : 1-9.
- 106) 佃和民. 1989. 田畑輪換における輪換年数の設定－関東東海地域における試験成績の紹介. 農及園. 65 : 385-388.
- 107) 植田 徹, 松口龍彦. 1994. 窒素の循環 (土壤生化学). 朝倉書店. p.111-131.
- 108) Ueno, H.; Yamamuro, S. 2001. Fate of nitrogen derived from ^{15}N -labeled plant residues and composts in rice-planted paddy soil. *Soil Sci. Plant Nutr.* 47 : 747-754.
- 109) 上之菌 茂, 長友 誠. 1998. 家畜ふんだけの施用が水稻の収量、品質に及ぼす影響. 九農研. 60 : 56.
- 110) Uenosono, S.; Takahashi, S.; Nagatomo, M.; Yamamuro S. 2002. Labelling of poultry manure with ^{15}N . *Soil Sci. Plant Nutr.* 48 : 9-13.
- 111) 上之菌 茂, 長友 誠, 高橋 茂, 國枝栄二, 山室成一. 2004. 重窒素標識法による鶏ふん堆肥およびオガクズ牛ふん堆肥の水稻に対する窒素供給能の評価. 土肥誌. 75 : 313-319.
- 112) 上之菌 茂, 長友 誠, 高橋 茂, 西田瑞彦. 2008. 重窒素標識牛ふん堆肥作製と牛ふん堆肥施用畑地における2作間の窒素動態. 土肥誌. 79 : 37-44.
- 113) Vuorinen, A.H.; Saharinen, M.H. 1997. Evolution of microbiological and chemical parameters during manure and straw co-composting drum composting system. *Agriculture Ecosystems and Environment*. 66 : 19-290.
- 114) Wada, E.; Kadonaga, T.; Matsuo, S. 1975. ^{15}N abundance in nitrogen of naturally occurring substances and global assessment of denitrification from isotopic viewpoint. *Geochem. J.* 9 : 139-148.

- 115) 和田秀徳. 1984. 二毛作、田畑輪換、畑地転換 (新編土壌学). 朝倉書店. p.181-183
- 116) 渡部育夫, 石垣幸三. 1985. ガラス繊維ろ紙埋設法による茶園土壌における施用有機物の分解の推移. 茶業技術研究. 68 : 25-26.
- 117) 渡辺治郎, 小川和夫, 岩間秀矩. 1981. 重粘性土壌における有機物の分解過程. 北海道農試研報. 132 : 1-16.
- 118) 山田 裕, 森田明雄, 米山忠克. 1999. 3種の土壌を充填したライシメーターでの施肥窒素の $\delta^{15}\text{N}$ 値と栽培作物、浸透水、土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値の関係. 土肥誌. 70 : 533-541.
- 119) 山口武則, 原田靖生, 築城幹典. 2000. 家畜ふん堆肥の製造・利用の現状とその成分的特徴. 農研センター資料. 41 : 1-178.
- 120) 山本富三, 久保田忠一. 1985. 水田に施用した有機物資材の分解過程 第1報 水稲収穫後に施用した牛ふん、豚ふん及び稲わらの分解過程. 福岡農総試研報. A-5 : 75-78.
- 121) 山本富三, 久保田忠一, 兼子 明. 1987. 水田に施用した有機物資材の分解過程 第2報 未熟牛ふん及び敷料として用いられるおがくずの分解過程. 福岡農総試研報. A-6 : 89-92.
- 122) 山室成一. 1988. インキュベーションおよび圃場における地力窒素の動態と水稲窒素吸収量予測. 土肥誌. 59 : 549-556.
- 123) 山室成一. 1995. ^{15}N トレーサー法と環境保全農業. ^{15}N Information. No.11 : 1-14.
- 124) 山室成一. 2000. ^{15}N 標識有機物堆肥の作成とその土壌中における窒素動態. RADIOISOTOPES. 49 : 323-324.
- 125) Yamamuro, S.; Ueno, H.; Yamada, H.; Takahashi, Y.; Shiga, Y.; Miyahara, S.; Shimonihara, T.; Murase, J.; Yanai, J.; Nishida, M. 2002. Uptake of carbon and nitrogen through roots of rice and corn plants, grown in soils treated with ^{13}C and ^{15}N dual-labeled cattle manure compost. Soil Sci. Plant Nutr. 48 : 787-795.
- 126) 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.
- 127) 米山忠克, 有馬泰紘, 熊沢喜久雄. 1975. 発光分光分析法による重窒素定量に際しての供試アンモニアの濃縮法. 土肥誌. 46 : 146-147.
- 128) Yoneyama, T.; Yoshida, T. 1977. Decomposition of rice residue in tropical soils. I. Nitrogen uptake by rice plants from straw incorporated, fertilizer (ammonium sulfate) and soil. Soil Sci Plant Nutr. 23 : 33-40.
- 129) 米山忠克. 1987. 土壌-植物系における炭素、窒素、酸素、水素、イオウの安定同位体自然存在比 : 変異, 意味, 利用. 土肥誌. 58 : 252-268.
- 130) Yoneyama, T. 1987. N_2 fixation and natural ^{15}N abundance of leguminous plants and Azolla. Bull. Natl. Inst. Agrobiol. Resour. 3 : 59-87.
- 131) Yoneyama, T.; Kouno, K.; Yazaki, J. 1990. Variation of natural ^{15}N abundance of crops and soils in Japan with special reference to the effect of soil conditions and fertilizer application. Soil Sci. Plant Nutr. 36 : 667-675.
- 132) Yoneyama, T. 1996. Characterization of natural ^{15}N abundance of soils (Boutton, T.W.; Yamasaki S. ed., Mass spectrometry of soils). New York. Marcel Dekker, Inc. p.205-223.
- 133) Yoneyama, T.; Matsumaru, T.; Usui, K.; Engelaar W.M.H.G. 2001. Discrimination of nitrogen isotopes during absorption of ammonium and nitrate at different nitrogen concentrations by rice (*Oryza sativa* L.) plants. Plant, Cell and Environment. 24 : 133-139.
- 134) Yoo, C.; So, J.; Ida, A.; Tanaka, F.; Nishida, M. 1992. Effect of long-term organic matter application on the fine textured paddy soils of double cropping system in temperate area. J. Korean Soc. Soil Sci. Fert. 25 : 325-333 (in Korean with English summary).
- 135) 吉羽雅昭. 1990. 養液栽培 (植物栄養実験法編集委員会編, 植物栄養実験法). 博友社. p.1-7.
- 136) 吉羽雅昭, 田村幸美, 朴 光来, 熊澤喜久雄, 麻生昇平. 1998. 有機物連用試験水田における土壌および水稲玄米の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{15}\text{N}$. 土肥誌. 69 : 299-302.

Dynamics of Nitrogen Derived from Organic Materials Applied to Paddy Fields as Estimated by a Direct Evaluation Method Using ^{15}N -Nitrogen

Mizuhiko NISHIDA

Summary

In order to directly elucidate the dynamics of nitrogen (N) derived from organic materials applied to paddy fields, ^{15}N -labeled organic materials were used in field experiments, and the ^{15}N natural abundances ($\delta^{15}\text{N}$ value) of soils and organic materials in long-term field experiments were investigated. This comprehensive research consists of five studies which can be summarized as follows.

Rice straw, wheat straw, and cattle manure compost labeled with ^{15}N were used to directly evaluate the N remain rate of organic materials in the glass fiber-filter paper bag method. In all three kinds of organic materials examined, a discrepancy in the N remain rate of organic materials was observed between the evaluation by the N content and the evaluation by the ^{15}N abundance. Loss of N from organic materials was observed using the ^{15}N abundance, though the N remain rate of wheat straw and rice straw evaluated by the N content were above 100% throughout the experimental period. The N inflow into and N outflow from the glass fiber-filter paper bag occurred simultaneously. The discrepancy between the N remain rates of organic materials evaluated by the N content and that by the ^{15}N abundance increased as the C/N ratio of organic materials increased.

Seven kinds of ^{15}N -labeled organic materials were applied to a paddy field to investigate their N fate and relative efficiency in the northern Kyushu region of Japan. The ^{15}N -labeled organic materials examined in a micro-plot experiment were cattle manure compost, poultry manure compost, dried swine feces, rice straw compost, rice bran, rice straw, and wheat straw. With respect to swine feces, rice bran, and wheat straw, the direct evaluation of their N fate in paddy fields using ^{15}N organic materials has not previously been reported. A significant difference in the N fate in response to the type of organic materials was observed in the N use efficiency (NUE: the percentage of N recovered from organic materials by rice plants). The NUE at the maturity stage was significantly higher for poultry manure (29%), dried swine feces (25%), and rice bran (26%) than for the other organic materials (6-13%). Cattle manure compost showed the lowest value, namely 6-7%. Using the NUE of ^{15}N -labeled ammonium sulfate, the relative efficiency of organic materials (relative NUE of organic materials to chemical fertilizer) was calculated as the index of the organic material N efficiency. These relative efficiencies of organic materials derived from animal wastes were 16-19%, 81%, and 71% for cattle manure compost, poultry manure compost, and dried swine feces, respectively. The N uptake from the organic materials in dried swine feces and cattle manure compost continued throughout the rice growth period, whereas those from other organic materials declined remarkably after 54 days after transplanting. There were no significant difference among the organic materials in either the amount of N distributed to soil or the amount of un-recovered N. However, some tendencies that might be related to the properties of the organic materials were revealed, such as the high N distribution to soil for cattle manure compost and rice straw compost, and the high

un-recovered N of cattle manure compost, rice straw, and wheat straw.

The N recovery from ^{15}N -labeled swine manure compost and rice bran with or without simultaneous application of unlabeled cattle manure compost was examined in a paddy field in the northern Kyushu region of Japan. In all the ^{15}N -labeled materials, including ammonium sulfate, the process of N recovery from the ^{15}N materials by rice plants was different between the plots with and without application of cattle manure compost. At the tillering stage, the NUE values of the ^{15}N materials in the plots with application of cattle manure compost were significantly lower than those in the plots without application of cattle manure compost. At the maturity stage, however, these NUE values became close and no significant differences were observed. Thus, simultaneous application of cattle manure compost could impede the N recovery from swine manure compost and rice bran, as well as ammonium sulfate.

Cattle manure compost labeled with ^{15}N was applied to a paddy field in the Tohoku region of Japan. Throughout the experimental period of three crop seasons, N from cattle manure compost was taken up by rice plants without a marked decline. The NUE values of cattle manure compost were 2-3% for each year. The N from cattle manure compost taken up by rice plants over the entire growth period, i.e., the NUE values for cattle manure compost were 1-2%, 2%, and 2-3% at the panicle initiation, heading, and maturity stages, respectively. A significant positive linear correlation was found between the cumulative uptake of N from compost and the number of days transformed to standard temperature (25°C) over the entire experimental period, including the fallow season. The NUE was identical at CMC application rates ranging from 1 to 4 kg m^{-2} . Using ^{15}N -labeled cattle manure compost, the results showed that well-composted cattle manure compost was a stable N source for rice plants for at least 3 years, regardless of the cattle manure application rate (ranging from 1 to 4 kg m^{-2}) in the cool climate region of Japan. At the end of the third crop season, the distribution of N from cattle manure compost was 7% accumulated in the rice plants, 66-69% in the soil, and 24-27% un-recovered.

Long-term temporal changes in the $\delta^{15}\text{N}$ value in paddy soils from long-term field experiments with livestock manure and rice straw composts, and in the composts used for the experiments, were investigated. These field experiments using livestock manure and rice straw composts have been conducted in an ongoing manner since 1973 and 1968, respectively. In both experiments, control plots to which no compost had been applied were also maintained. The $\delta^{15}\text{N}$ values of livestock manure compost reflected the composting method. The composting period had no significant effect on the $\delta^{15}\text{N}$ value of the rice straw compost. The $\delta^{15}\text{N}$ values increased in soils to which livestock manure compost was successively applied, and tended to decrease in soils without compost. In soils to which rice straw compost was successively applied, the $\delta^{15}\text{N}$ values of the soils remained constant. Conversely, the $\delta^{15}\text{N}$ values in soils without rice straw compost decreased. The downward trend in $\delta^{15}\text{N}$ values observed in soils to which compost and chemical N fertilizer were not applied could be attributed to the natural input of N, which had a lower $\delta^{15}\text{N}$ value than the soils. Thus, the transition of the $\delta^{15}\text{N}$ values in soils observed in long-term paddy field experiments indicated that the $\delta^{15}\text{N}$ values of paddy soils could be affected by natural N input in addition to extraneous N that was applied in the form of chemical N fertilizers and organic materials.