

# 浸透性水田における窒素の動態について

—環境負荷低減を目指して—

富山県農業技術センター

農業試験場 土壌肥料課

統括研究員 田村 有希博

## 1. はじめに

近年、世界的に環境問題がクローズアップされており、農業分野でも例外ではない。特に欧米では、畑地や草地での硝酸態窒素による地下水汚染が問題になっており、その対策として施肥量を減らした生産技術、すなわち、低投入型生産技術の確立が求められている。このような動きに日本が傍観者となることは許されない。ご存じの通り、日本での肥料消費量は世界的に見ても多く、これが海外からの批判の対象となっている。耕地面積が狭い日本で食料を確保するためには、多くの資材と労力を投入して多くの収穫物を得る集約的農業を実施せざるを得ないと自己弁護したとしても、外国から見れば、コストの高い農業は止めて安い外国産の食料を輸入すれば良いではないかとの議論になり、日本を特別扱いしてくれそうもない。逆に、日本の特殊事情のために、肥料の投入量は多くても環境への負荷は少ないことを証明して反論する必要がある。日本の特殊事情とは、日本農業が水田作中心であるということである。畑地や草地等の酸化的な耕地環境では、施肥窒素は硝酸態窒素となり土壤中に存在する。土壤中の粘土鉱物や腐植の表面はマイナスに帯電しているから、アニオンである硝酸態窒素は土壌粒子表面に吸着されることなく土壌溶液中を拡散や水移動に伴って移動する。従って、降雨時に発生する重力水の降下に伴って土壌中の硝酸態窒素は下層に移行して地下水を汚染する可能性がある。逆に湛水状態である水田では土壌環境が還元的であるため、施肥窒素は土壤中でカチオンであるアンモニウム態窒素として存在する。よって、マイナスに帯電している土壌粒子表面に吸着されて土壌中での移動は少ないものと考えられる。従って、水田では施肥窒素による地下水への負荷は考え難く、む

しろ、灌漑水中に含まれる無機態窒素を吸着し濾し取るため、水田には浄化機能があるとの考え方が一般的である。しかし、対外的にこれを説明するためには具体的なデータが必要である。そこで、粘土含量や腐植含有量が少なく保肥力が弱い上、透水性が大きいため、施用した窒素が流亡し易くて施肥効率が悪く、地下水を汚染する恐れがある中粗粒質灰色低地土水田においても水田の浄化機能が発揮されるかどうかを確認すると共に、このような土壌条件での環境負荷低減技術の開発を目的とする課題を平成5年から指定試験事業のなかで取り組んできた。

上記研究目的を達成するための基礎資料として、保肥力が弱く透水性の大きい水田土壌中で、実際に施肥窒素がどのような挙動を示すのかを把握する必要がある。そこで、環境負荷の軽減と施肥窒素の利用率向上を図るため、施用した窒素の動きを重窒素で標識した肥料を用いて検討した。本報告で扱われる施肥窒素の形態は、主にアンモニウム態窒素である。最近では、被覆尿素等緩効性肥料を用いた基肥一回施肥法が普及されつつあり、速効性肥料を用いた分施型の栽培方式に取って代わりつつあるが、基肥一回施肥法であっても初期生育を確保するための速効性肥料の使用は避けられない。また、速効性肥料は、施肥方法の違いにより施肥効率や流亡量が大きく変わると考えられる。そこで、施用された速効性の窒素の土壌中での挙動を中心に述べる。

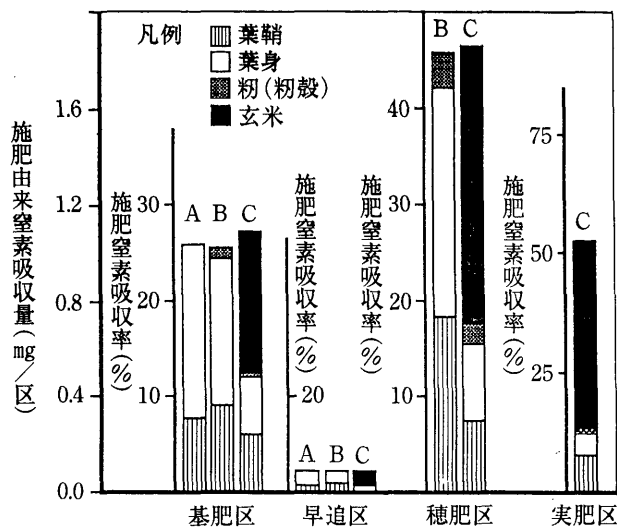
## 2. 水稲に吸収された施肥窒素の行方

近年、消費動向の変化に伴い、米の食味が生産性より重要視されるようになってきており、生産現場では米のタンパク含量を下げる目的から窒素の施肥量を減らす傾向にある。私が着任した平成5年から比べても、米のタンパク含量を上げる恐

れのある実肥を施用しない等の普及サイドの指導もあって、窒素の総施用量が2~3割減っている。この動向は、環境負荷低減を視野に入れたものとは言えないが、環境負荷軽減を目的に日々研究に勤しんでいる我々にとっては喜ばしいことである。結果的に施肥量は削減されているものの、環境負荷低減の観点から考えれば、施用した窒素がどこに配分されたかを追跡することが重要である。そこで、重窒素で標識した硫酸を用い、基肥、早期追肥、穂肥及び実肥として施用した窒素の動態を検討した。窒素施用量はそれぞれ、4, 2, 2×2回及び2kg/10aである。ちなみに、富山県では現在、米のタンパク含量を上げる恐れのある実肥は施用されていない。また早期追肥とは、活着を促進して茎数を確保する目的で、移植後1週間目位に施用する追肥である。

基肥、早期追肥、穂肥及び実肥として施用された窒素のうち、水稻に吸収された量を部位別及び時期別に調査した結果を図1に示した。

図1 基肥、早期追肥、穂肥および実肥由来窒素の水稻による部位別の穂肥前(A)、実肥前(B)および収穫期(C)の吸収量(平成5年度)



まず、基肥窒素の行方を追ってみる。施用した基肥窒素の27%強が穂肥前(出穂18日前頃)までに水稻に吸収され、その65%以上が葉身に蓄えられた。その後、穂肥直前までに葉身に蓄えられた

窒素は実肥(穂揃期)ごろには葉鞘と籾に移りし始め、収穫期には吸収された基肥窒素の51%が玄米に転流し、葉鞘に22%、葉身に21%、籾殻に3%及び根に4%が残留して最終的な利用率は28%となった。

早期追肥窒素の利用率は4.8%と低かった。また、吸収された窒素の稲体中での動きは、基肥と同様の傾向を示したが、玄米に66%が転流して基肥よりも玄米への転流率は高かった。しかし、早期追肥の利用率は極端に低く、その効果は疑問である。

2回施用した穂肥窒素は、実肥前までに44%が水稻により吸収され、葉鞘に39%、葉身に52%が蓄えられた。それが収穫期には玄米に62%が転流して穂肥窒素の利用率は47%であった。

また、実肥窒素の収穫期での利用率は53%で、玄米への転流率は74%と高く、実肥が玄米窒素濃度を高める恐れの大いことを示した。

全体の傾向として、施用時期が遅いほど葉身及び根に残存する割合が低くなり、玄米へ転流する割合が増加することが認められた。

表：速効性肥料窒素の水稻による利用率(%)の年次変動

	平成5年	平成6年	平成7年	平成8年	平成9年
基肥(全層)	26	22	29	28	36
基肥(中層)				40	
基肥(側条)				32	
基肥(局所)					55
早期追肥	5	11	26	13	8
穂肥(-20)	45	59	55	66	50
穂肥(-10)		63	61	61	56
実 肥	46	75	51	49	46

なお、解析に用いたデータは低温年であった平成5年度の結果である。その他の年次の結果を表に示したが、高温年であった平成6年の基肥、早期追肥、1回目穂肥、2回目穂肥及び実肥の利用率は、それぞれ22%、11%、59%、63%及び75%である等、年次によって変動した。このことは、廣川ら(1991)によって報告されているとおり、水稻による吸収期間中の天候により施肥窒素の利用率が変動することを示している。

### 3. 基肥として全層施用した窒素の土壌中での動き

施肥窒素の水稲による吸収について述べたが、ここでは施肥窒素の土壌中での挙動について明らかにする。まず、基肥として全層施用した窒素の動きについて検討した。

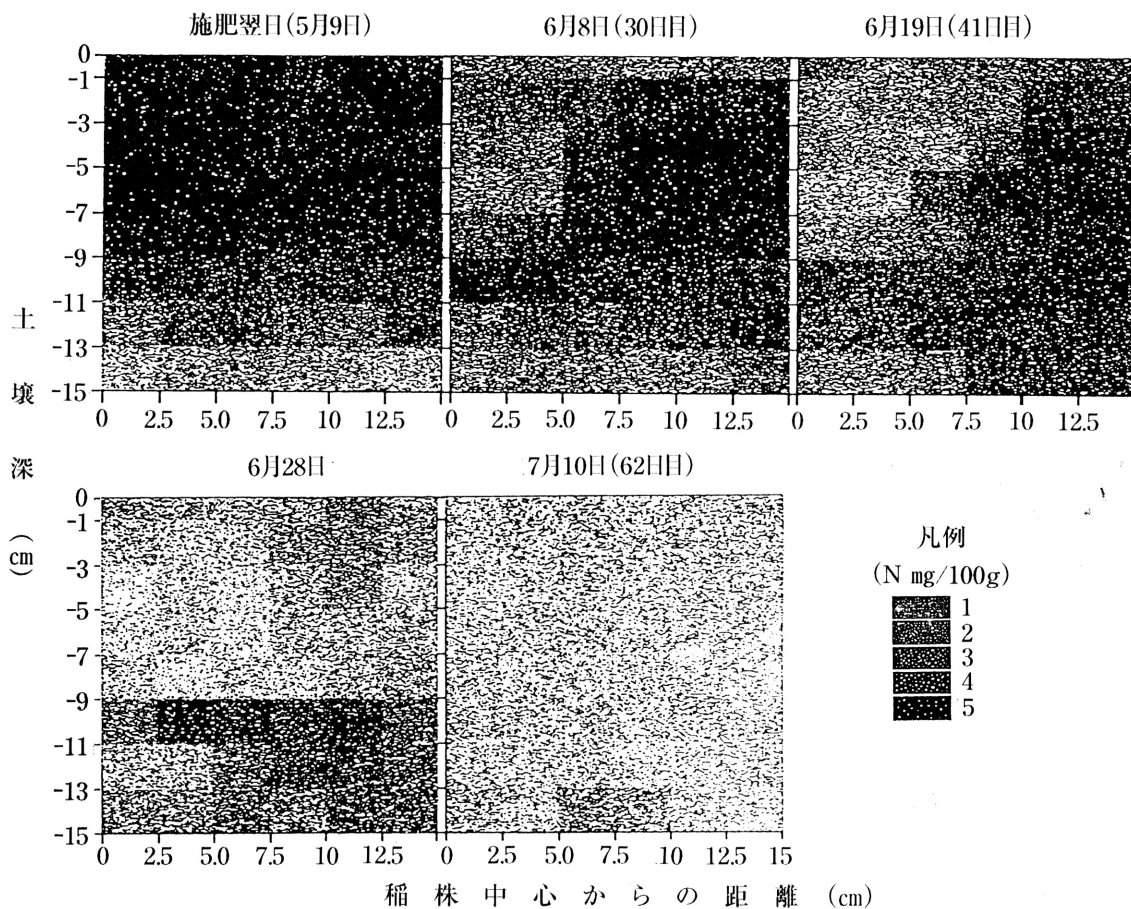
窒素として 4 kg/10a 相当量の重窒素で標識した硫安を圃場の無窒素区に設置した 30×30 cm の金柵内に全層施用し、施肥の翌日に水稲（コシヒカリ）稚苗 2 株を移植した。移植後経時的に土壌をブロック状に採取して測定したアンモニア態窒素の分布を図 2 に深さと稲株中心からの距離とともに示した。

移植後30日目まで稲株中心～5 cm、深さ 3～7 cm の位置の窒素濃度の減少が認められるとともに、

表層の窒素濃度の顕著な低下が認められた。41日目以降、主に深さ 1～9 cm の層の窒素濃度が水平に減少しており、この位置の窒素が主に水稲により吸収されていることが示された。そして、62日目には下層の一部を除いてほぼ無機態窒素は消失した。

このことから、①全層に施用した窒素は深さ 1～9 cm の層が先に吸収される、②表層の窒素は水稲に吸収される前に減少する、③無機態窒素は徐々に下層に移行することが明らかとなった。逆に言えば、3～7 cm のところに層状に施肥すれば、利用率が向上すると考えられる。表に示すとおり、中層施肥では、全層施肥だけでなく側条施肥に比べても利用率が向上した。施肥技術的には難しい面があるが、検討に値すると考えられる。

図 2 基肥として全層施用したアンモニア態窒素の土壌中での挙動 (平成 5 年度)



#### 4. 施用窒素の上壤中での有機化

富山県では、稲ワラの全量鋤込みを指導している。特に県内に広く分布する有機物含量の低い中粗粒質灰色低地土水田では、有機物源としての稲ワラの水田への還元は重要である。稲ワラを水田に鋤込む場合は、異常還元や窒素飢餓の発生が懸念されるため、秋鋤込みが望ましい。稲ワラを鋤込むと、有機態炭素をエネルギー源とした微生物による施肥窒素の有機化が起こる。一方、栽培期間中に起こる土壌中有機態窒素の無機化は作物の生育に重要であり、水稻が吸収する窒素の60%程度を占めている。土壌中に有機態炭素が存在する場合、この土壌窒素の無機化と平行して無機態窒素の有機化が進行している。このことから、施肥窒素の動態を把握するためには、この有機化の実態を知ることが重要である。

図2に示したとおり、表層に存在する無機態窒素

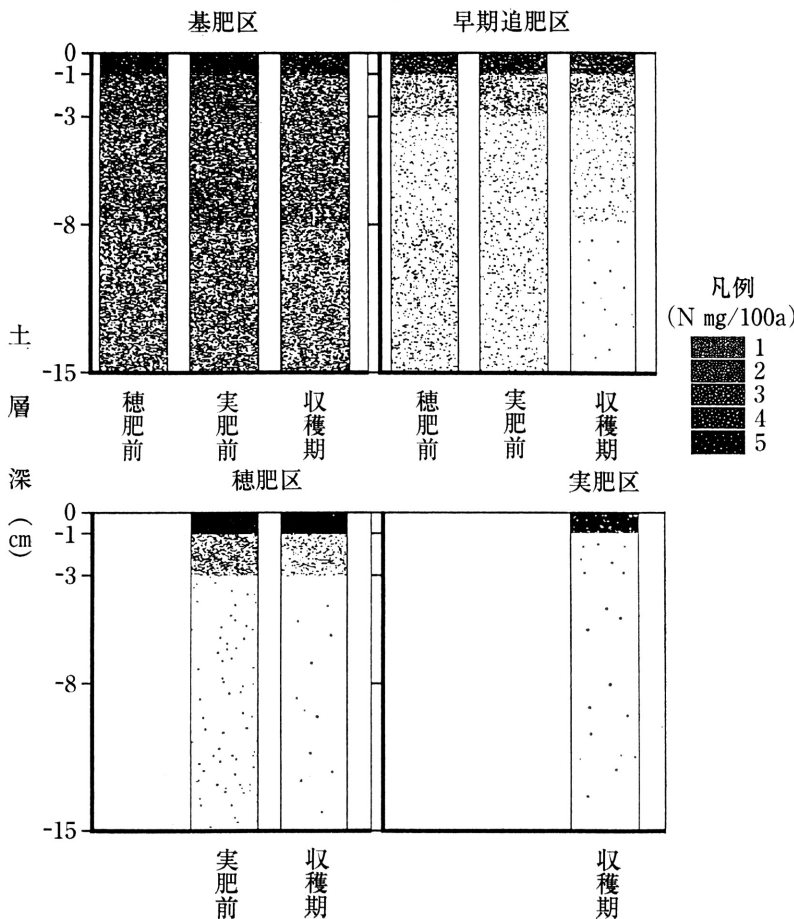
は水稻による吸収とは無関係に減少する。その行方については、下層への移行、脱窒及び有機化が考えられる。

図3は、基肥、早期追肥、穂肥及び実肥由来の有機態窒素量を示したものである。表層施用した追肥はともかく、全層施用した基肥窒素も表層に高濃度で集積していた。基肥窒素の表層への集積量は、施肥直後に表層に存在した量に匹敵しており、施用窒素の大部分が有機化されたとも考えられるが、後述するとおり、拡散等により下層から表層への窒素の移動も認められるため、表層に施用した窒素の大部分が有機化されたとは断定できない。一般に表層においては、アンモニア態窒素が硝化作用を受けて硝酸態窒素となって脱窒すると言われている。表層に存在するアンモニア態窒素が脱窒するか有機化するかについては厳密に検討したわけではないが、差し引き法で検討した結果、ある程度の脱窒が起こっていると推定されたが、有機化量に比べて少なかった。

表層に施肥窒素が有機化されて残存する理由としては、①代掻き後比重の軽い作物残渣等の無機態窒素の有機化に必要なエネルギー源としての有機態炭素が多く集積する、②代掻き後粒子の細かい粘土粒子が多く集積して微生物密度が高まる、③表層は比較的酸化的で地温も高いので微生物が活動が盛んである。等が考えられる。この表層での特異的に多い施肥窒素の有機化による窒素の残存のため、翌年の耕起前の土壌表面の地力は特異的に高くなっているものと考えられる。そこで、地力の指標として用いられる乾土効果を比べると、表層土壌が中層土壌の2倍ほど高く、施肥窒素の有機化が圃場の地力維持に貢献していると考えられる。

なお、基肥、早期追肥、穂肥及び実肥窒素の作土全体での有機化率は、それぞれ32%、13%、18%、13%で

図3 基肥、早期追肥、穂肥および実肥由来窒素の土壌別、時期別有機化窒素量の分布 (平成5年度)





あった。

水稻による利用率と土壌への残存率を合計すると基肥は60%、早期追肥は18%、穂肥は65%及び実肥は66%となり、脱窒や流亡により失われた窒素量は、それぞれ40%、82%、35%、34%であった。すなわち、早期追肥以外は60%以上が利用されるか利用され得る形で残存した。しかし、早期追肥窒素の80%以上は失われ、環境負荷が大きい施肥法であると言える。

### 5. 土壌中での窒素の動態およびそのシミュレーション

我々が研究対象としている土壌のCECは、6~8meq/100g乾土程度と非常に低く保肥力が弱いため、これまで述べてきたように土壌中でアンモニア態窒素が移動し、水稻による吸収や流亡に影響すると考えられる。そこで、土壌中での窒素の動きと水稻による窒素の吸収をシミュレーションすることを試みた。

作土深が17cm、減水深が2cm/日程度の圃場の無窒素区に30×30cmの金枠を設置し、2株分の窒素量(360mg)を株間中央5cm深に重窒素で標識した硫酸で局所施用した。施用後2週間目の土壌中での分布を図4に示した。トレーサー窒素の分布をみると、下方への移動のみならず、上方や水平方向への移動が認められた。すなわち、水田土壌中でも水の移動や濃度勾配に伴う拡散によって、アンモニア態窒素も移動することが認められる。

中粗粒質灰色低地土水田における窒素の吸着、拡散、溶脱、土壌窒素の無機化、無機態窒素の有機化、脱窒並びに水稻による吸収を表すシミュレーションモデルを北海道農試の伊藤氏が作成した。本モデルを改良して3次元空間での窒素動態を検討したところ、局所施用したアンモニア態窒素の3次元分布を得ることができた(図5)。また、他の条件を同じにして減水深だけを変えてシミュレーションした結果を図6に示したが、CECが小さく、減水深が大きい場合は、作土下への流亡が大きくなる可能性が示された。そこで、土壌を

土壌厚11cmとなるように箱形カラムに詰め、減水深を3cm/日に調節し、360mgのトレーサー窒素を硫酸で局所施用した結果、3日目に多量の施肥由来のアンモニア態窒素が流出し、4日目までの溶出量は、施肥窒素の40%に及び、さらにも後も徐々に流出が続き、1カ月後には施肥窒素の55%が流出する結果となった(図7)。このとき、土壌中には、35%程度が無機態窒素として残存

図4 水田土壌中における、株間に局所施用した施肥由来のアンモニア態窒素の施肥2週間後の分布(平成9年度)

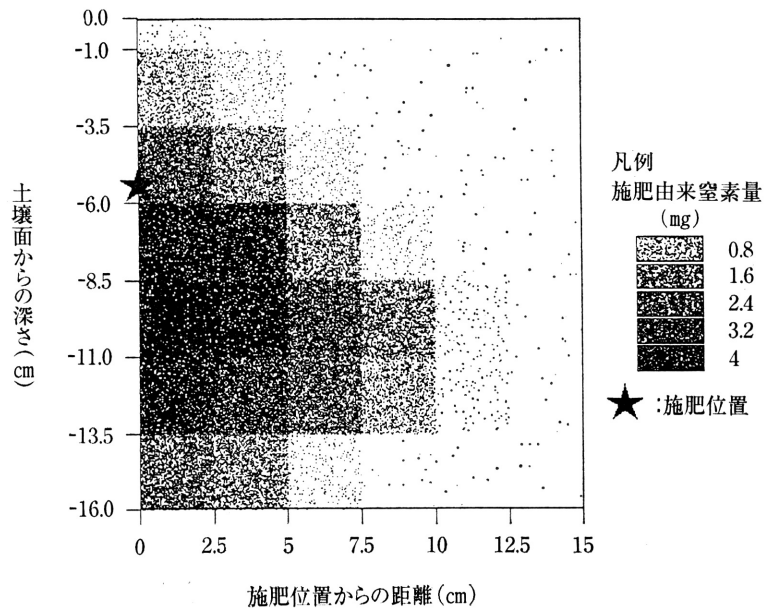


図5 局所に施用した窒素の土壌中における動態の3次元シミュレーション結果

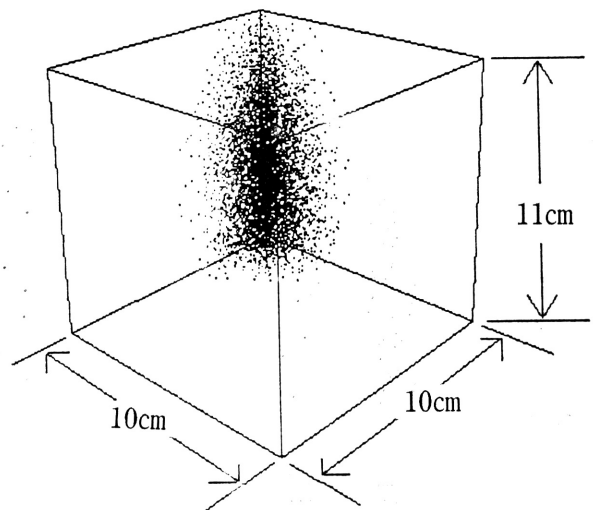
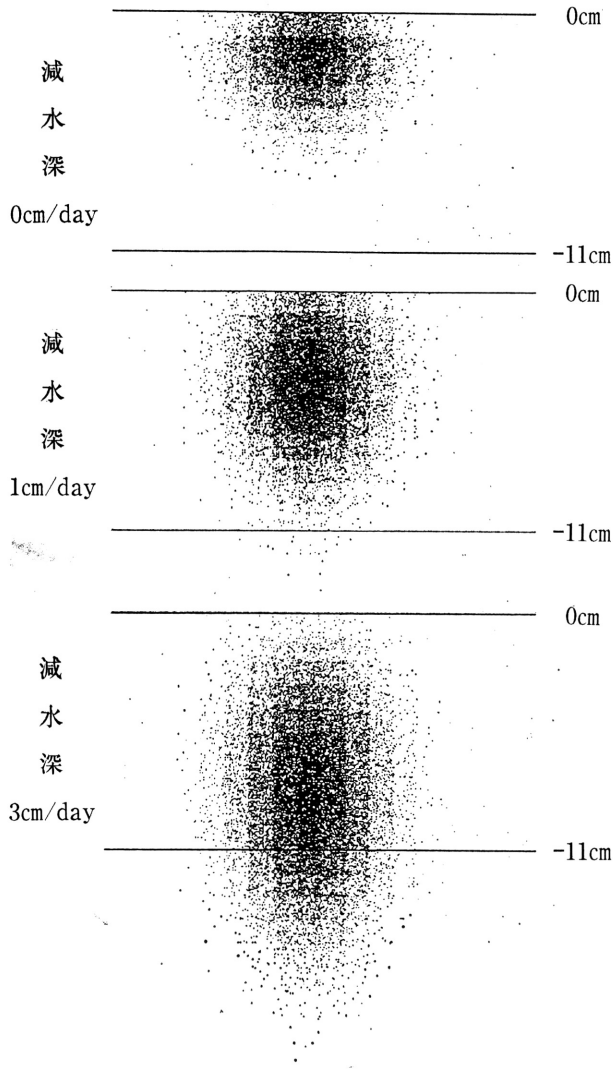
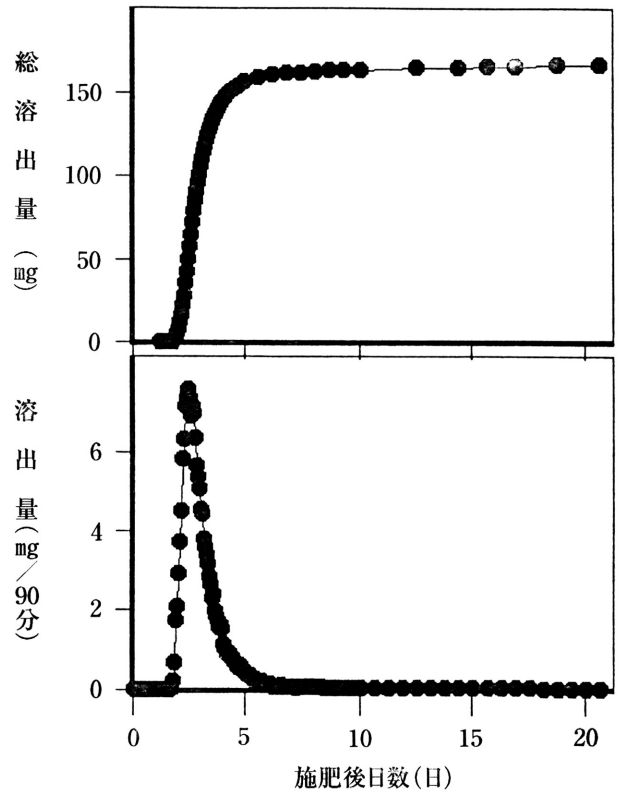


図6 減水が異なる場合の土壌中の窒素動態シミュレーション結果



し、2%程度の窒素が有機態として残存した。差し引き8%程度が行方不明となり、脱窒したものと考えられる。同じ量の窒素を全層に施用した場合、作土深11cmで考えると、施肥窒素の分布範囲は $30 \times 30 \times 11 \text{ cm} = 9,900 \text{ cm}^3$ である。局所施用した場合を考えてみると、仮に、拡散および水の移動に伴う窒素の移動によって、底辺の半径が4cmで高さが11cmの円錐状に均一に分散したとすると、 $4 \times 4 \times 3.14 \times 11 / 3 = 184 \text{ cm}^3$ であり、分布範囲は全層施肥の2%弱である。すなわち、窒素の存在量が均一に拡散したとしても50倍の濃度となる。吸着能が有限である土壌中に高濃度のイオンが存在する場合、液層に留まるアンモニア態窒素の割合は増加し、液層に存在するイオンは

図7 局所施用した施肥由来のアンモニア態窒素の溶出パターン（箱カラム試験）



水の移動と拡散により容易に流亡する結果となる。また、有機化によって土壌中に固定される窒素量は全層施肥の場合、約30%である。有機化量は、無機態窒素濃度と有機化に必要な有機態炭素量に依存するから、無機態窒素濃度が50倍であっても、有機化量はそれほど増加せず、局所施用した窒素の有機化量は施肥量の2%程度であった。そのため、カラム実験において、土壌中に吸着されて無機態窒素として35%、有機化されて2%が残存した。残り63%は流亡あるいは脱窒して失われたものと考えられる。カラム実験の場合、流出量が施肥量の55%と特定できるから、脱窒量は $100 - (35 + 2 + 55) = 8\%$ と推定された。

このカラム実験の結果を基に圃場での局所施肥の窒素収支を推定すると、水稻による施肥窒素の利用率は55%、土壌中に有機化して残存した量が3%であった。損失量は、 $100 - (55 + 3) = 42\%$ となる。カラム実験から局所施用の場合、脱窒量は少なく、10%以下と仮定すると、流亡した量は施肥量の32%以上であると推定された。全層施用の

場合、条件によって異なるが、流亡率は1～7%程度であった。従って、吸着範囲の狭い局所施肥の場合は全層施肥に比べ、流亡による施肥窒素の損失が多くなる恐れがある。すなわち、条件によっては、施肥窒素の利用率向上が必ずしも環境負荷低減につながるとは言えない。

ちなみに、減水深が2cm/日とすると、 $10 \times 100 \times 0.02 = 20 \text{ t} / 10 \text{ a} / \text{日}$ の水が地下に移行するから、施肥量(4kg/10a)の30%が一日で流亡すると仮定したとき、作土下に流出する降下浸透水中のアンモニア態窒素濃度が1日の平均で60ppmに達する恐れがある。実際にカラム実験では、ピーク時の濃度が500ppmに達した。これを、全層施肥で仮に施肥量の5%が流亡すると仮定した場合、局所施肥と異なり土壌中での窒素の移動速度は小さいから、10日間程度の期間に徐々に流出すると考えると、降下浸透水中のアンモニア態窒素濃度は、1ppm程度となる。実際に施肥後の作土下の土壌溶液中のアンモニア態窒素濃度は低く、水田においては、保肥力が小さい土壌であっても、局所施肥のような一ヶ所に高濃度の施肥をした場合を除けば、地下水への施肥の影響は少ないと考えられる。

## 6. おわりに

有機化されて土壌中に残存する窒素はいわゆる地力窒素となり、再無機化されるので無駄にはならないが、見かけの施用窒素利用率は低下する。また、全層施用した窒素の内、作土の下部に存在する窒素はなかなか水稻に吸収されず、その間徐々に作土層より流亡してしまい利用されない。よって、深さ1～9cmの層に存在する窒素が最も水稻に吸収され易いと考えられる。このことから、側条施肥はこの位置に施肥されるので理にかなっていると言える。しかし、局所施肥のように、極端に集中施肥した場合、保肥力が小さく減水深が大

きい圃場では、施肥効率の向上は期待できるものの、地下水への負荷が増大する懸念もある。

産業としての農業が環境を汚染しているのではないかとの危惧から、低投入型生産技術の確立が求められている。しかし、現状では環境を意識した農業が営まれているとは言い難い。現在、農業分野でも地下水の硝酸態窒素濃度の規制が検討されている。既に規制されている工場排水等では、排水口で採取された排水での濃度規制ができる。しかし、農業分野では、規制すべき地下水の調査地点の議論がなされている段階であると聞いている。今後、規制値がどの程度になるかを含めて気になるところであるが、このような規制が実施された場合、施肥量を作物側からではなく、環境負荷量を考慮して決定しなくてはならない時代がやがてやって来ると考えられる。本研究でも示されたように、水田では、地下水への施肥窒素の影響は少ないようである。逆に、集約的畑作等で汚染された地下水を水田に導入して浄化する研究も推進されている。いずれにしても、肥料会社には申し訳ないが、施肥量を減らす方向は今後とも揺るがないであろう。

現在、減肥の対象は主に窒素成分であるが、リン酸やカリの減肥の検討も始まっている。今後、肥料の消費量がますます減少すると考えられ、環境負荷低減を考慮した付加価値の高い肥料の創出が求められる。最近では、緩効性肥料の全量苗箱施肥等の技術により施用窒素利用率が80%を達成している事例も報告されている。しかし、せっかく施用窒素利用効率の高い新しい技術を導入しても、施肥量を減らしていない事例が見受けられる。無駄な資材を環境にバラ撒かないと同時に、タンパク質含量の低い品質の良い米作りのためにも節肥に努めたいものである。