

ノ ー ト

水稻に対する流入施肥追肥の窒素形態や施肥量が肥料窒素利用率および田面水の養分動態等に与える影響

土田 徹^{1,2}・南雲芳文^{1,2}・大竹憲邦²
 大山卓爾²・高橋能彦²

キーワード 水稻, 追肥, 田面水, 利用率, 窒素

1. はじめに

食生活の変化に伴って、米の消費量は年々減少し、米政策改革で米の生産・流通の規制緩和が実施されて米価の低迷が続く、産地では売れる米づくりが求められている。気象変動に左右されず高品質な良食味米を安定生産するためには、施肥による生育調節は重要な技術である。一方、近年は圃場整備によって水田が大区画化し、動力散布機による追肥作業の労働強度は著しく大きくなり、改善すべき課題となっている。省力的追肥技術として、水に溶けやすい顆粒状肥料を水口から流し込む方法があるが、大区画水田では施肥ムラが大きいことや大量のかんがい水を必要とすること、高い畦畔を必要とすることなどの制約条件が問題となっていた。著者らは、大区画水田に対応する追肥技術として少ないかんがい水量でもムラなく均一に施肥することができる流入施肥を検討し、均一施肥法の開発(久保田, 1998)や施肥ムラ判定方法の提案(高橋ら, 1998)、追肥時の田面水深や日減水深などの各条件によって施用窒素の利用効率が異なること(土田ら, 2005)を報告してきた。

本報では追肥の窒素形態や施肥量が肥料窒素利用率および田面水の養分動態等に与える影響を検討した。

2. 材料および方法

1) 試験圃場および栽培

試験は2000年に新潟県農業総合研究所作物研究センターの4a区画水田圃場内で実施した。当該水田は沖積・

細粒グライ土(LiC)でpH(H₂O)は5.5, CECは27.8 cmolc kg⁻¹, 全炭素15.3 g kg⁻¹, 全窒素1.80 g kg⁻¹, 可給態窒素236 mg kg⁻¹, 可給態リン酸(P₂O₅)343 mg kg⁻¹, 交換性カリ(K₂O)0.18 g kg⁻¹, 交換性カルシウム(CaO)2.96 g kg⁻¹, 交換性マグネシウム(MgO)1.20 g kg⁻¹であった。

水稻コシヒカリ稚苗を5月11日に機械移植した。基肥は窒素(N), リン酸(P₂O₅), カリ(K₂O)を各3.0 g m⁻²全層施用し, 追肥までの栽培管理は同センターの慣行で実施した。

2) 追肥処理

効率的な追肥条件, 追肥窒素の形態, 窒素量と追肥窒素利用率の関係を検討するため, ¹⁵N 標識肥料を用いて枠試験を行った。移植4日後に30×30 cmの正方形金枠を移植株の周囲に10 cm深まで差し込むようにランダムに設置し, 枠内の1株苗数を4本に調整した。近年, 高温による生育過剰のため花粉母細胞分裂期にあたる出穂18~15日前の1回目の穂肥を省略する場面が多くなっている。そのため, 本試験での施肥は慣行の2回目の穂肥時期である出穂9日前の7月24日に1枠内に¹⁵N 標識の硫酸あるいは尿素を表面施用した。施用方法は, 肥料を約10 mLの水に溶かし, 枠内に均一に滴下した。肥料は¹⁵N 標識の硫酸(¹⁵N 5.04 atom%)と尿素(5.14 atom%)を供試し, 施肥量は窒素成分で1, 2, 5 g m⁻²になるように枠内に施用した。施用時の田面水深は3 cmに設定し, 各処理はそれぞれ3反復とした。

3) 試料採取および分析

1時間後, 24時間後および48時間後に田面水を採取し, 採水時に水深を測定した。田面水は東洋濾紙(No. 6)でろ過後, 分析に供した。アンモニアNはインドフェノール法(日本分析化学会北海道支部, 1994), 硝酸Nは濃縮後にカタルド法(植物栄養実験法編集委員会, 1994), 尿素Nはウレアーゼ分解法(高橋ら, 1998)でそれぞれ分析した。溶存カチオンのうちCa, Mgは原子吸光光度法, K, Naは炎光光度法(日立社製Z-5010), アニオンはイオンクロマトグラフ(DIONEX社製CRB-1)で分析した。

成熟期に枠内の稲体を採取し, 茎葉と穂に分解して, 70°C通風乾燥機で乾燥後, 粉碎した。粉碎試料の窒素はケルダール分解後, 自動水蒸気蒸留装置(ケルテックオートアナライザー tecator1035Analyzer)で分析し, リン酸とカリ, カルシウム, マグネシウムは硝酸一過塩素酸で分解後, リン酸はバナドモリブデン法, カリは炎光法で, カルシウム, マグネシウムは原子吸光光度法で分析して含有量を算出した。同時に発光分析法(狩野ら, 1974)による¹⁵N分析値から水稻の施肥窒素吸収量を算出し, 施肥窒素利用率を計算した。

3. 結果および考察

1) 生育の概要

移植後, 高温多照で推移したため, 初期分げつの発生は早く, 最高茎数は平年よりやや多かった。6月上旬は低温であり, 6月下旬から7月上旬が高温多照に推移し, 幼穂

Toru TSUCHIDA, Yoshifumi NAGUMO, Norikuni OHTAKE, Takuji OHYAMA and Yoshihiko TAKAHASHI: Relationship between forms of topdressing nitrogen and amounts, and uptake rates of fertilizer nitrogen and nutrients movement in paddy water

¹ 新潟県農業総合研究所作物研究センター (940-0826 長岡市長倉町 857)

² 新潟大学大学院自然科学研究科 (950-2181 新潟市西区五十嵐2の町 8050)

2008年3月12日受付・2009年8月12日受理

日本土壌肥科学雑誌 第80巻 第6号 p.606~610 (2009)

形成期の茎数は株当たり 33~38 本となった。幼穂伸長期間も高温多照であったので、出穂期は平年より 5 日早く、8 月 1 日であった。穂数は硫安区で 28 本、尿素区で 27 本であった。登熟期間も好天に恵まれ、収量は平年よりやや多く、外観品質は良好であった。

2) 追肥後の田面水

表 1 に追肥後の田面水深、pH、EC の推移を示す。追肥 1 時間後の平均田面水深は 2.7 cm (最低-最高: 2.2-3.0 cm) であった。追肥翌日に 12 mm の降雨があったため 24 時間後の水深は 2.8 cm (2.4-3.1 cm) であったが、48 時間後には 1.6 cm (1.2-2.0 cm) となった。降水量や水深の変化から本圃場での見かけ上の日減水深は約 1.2 cm であり、県内グライ土水田の平均的な減水深である。

硫安区の pH は追肥 1 時間後、24 時間後、48 時間後とも施肥量による差はなく、時間経過とともにわずかに低下する傾向であった。尿素区の pH は追肥 1 時間後では、施肥窒素量 1 g m^{-2} (以下, N1) で 2 g m^{-2} , 5 g m^{-2} (以下, それぞれ N2, N5) よりやや低かったが、24 時間後・48 時間後では施肥量による差は小さくなった。また、いずれの施肥量でも時間経過にしたがって上昇した。

硫安区での pH の低下は硫安に含まれる硫酸根の影響と思われた。尿素区での pH の上昇は尿素が土壌表面のウレアゼによって分解され、田面水に炭酸アンモニアが増加

したためと思われた。

硫安区の EC は追肥 1 時間後、24 時間後、48 時間後とも施肥量が多いほど高かった。24 時間後では著しく低下し、追肥 1 時間後の 50% 程度となったが、24 時間後から 48 時間後にかけてはほとんど変化がなかった。尿素区の EC は追肥 1 時間後では施肥量による差がなかったが、24 時間後では施肥量が多いほど高かった。48 時間後は 24 時間後とほぼ同等であった。硫安区の EC は硫安の NH_4^+ と SO_4^{2-} で高まり、時間経過とともに土壌吸着や水稲への吸収などで低下したと思われる。尿素区の EC は追肥 1 時間後では電荷を持たない尿素が大部分のため、施肥量に関わらず低かったが、時間経過とともに尿素がアンモニア化を受けため、施肥量に応じて高まったと思われる。

図 1 に追肥後の田面水に含まれる窒素の動態を示す。硫安区の追肥 1 時間後のアンモニア N は N1, N2, N5 でそれぞれ $26.7, 31.0, 109.4 \text{ mg L}^{-1}$ であった。24 時間後には急激に減少し、それぞれ $2.7, 8.0, 28.6 \text{ mg L}^{-1}$ となった。48 時間後ではさらに減少し、それぞれ $1.0, 4.2, 21.8 \text{ mg L}^{-1}$ まで低下した。施肥窒素量が多いほど残存率が高まる傾向であった。尿素区の追肥 1 時間後では大部分が尿素 N で存在し、N1, N2, N5 でそれぞれ $31.1, 78.5, 139.4 \text{ mg L}^{-1}$ であった。24 時間後では急激に減少し、それぞれ $5.1, 11.0, 33.6 \text{ mg L}^{-1}$ となった。24 時間後ではアンモニア N でも存

表 1 追肥後の田面水深、pH、EC の推移

	田面水深 (cm)			田面水 pH			田面水 EC (mS cm^{-1})		
	1時間後	24時間後	48時間後	1時間後	24時間後	48時間後	1時間後	24時間後	48時間後
硫安 1	2.9 (0.07)	2.9 (0.11)	1.7 (0.16)	6.6 (0.03)	6.5 (0.02)	6.4 (0.04)	0.37 (0.01)	0.18 (0.01)	0.17 (0.01)
硫安 2	2.7 (0.29)	2.7 (0.29)	1.6 (0.31)	6.7 (0.00)	6.5 (0.04)	6.4 (0.01)	0.41 (0.04)	0.27 (0.00)	0.25 (0.00)
硫安 5	2.7 (0.27)	2.7 (0.29)	1.5 (0.36)	6.6 (0.08)	6.5 (0.06)	6.4 (0.35)	1.05 (0.05)	0.51 (0.02)	0.48 (0.04)
尿素 1	3.0 (0.11)	3.1 (0.13)	2.0 (0.09)	6.2 (0.42)	6.8 (0.12)	7.5 (0.06)	0.11 (0.00)	0.10 (0.00)	0.10 (0.00)
尿素 2	2.2 (0.22)	2.4 (0.24)	1.2 (0.18)	6.7 (0.07)	6.9 (0.03)	7.5 (0.03)	0.11 (0.00)	0.15 (0.01)	0.14 (0.01)
尿素 5	2.8 (0.24)	2.7 (0.16)	1.6 (0.22)	6.7 (0.01)	7.0 (0.01)	7.5 (0.01)	0.11 (0.00)	0.22 (0.01)	0.23 (0.01)

() 内は標準偏差、硫安・尿素の次数字は施肥窒素量 g m^{-2} を示す。

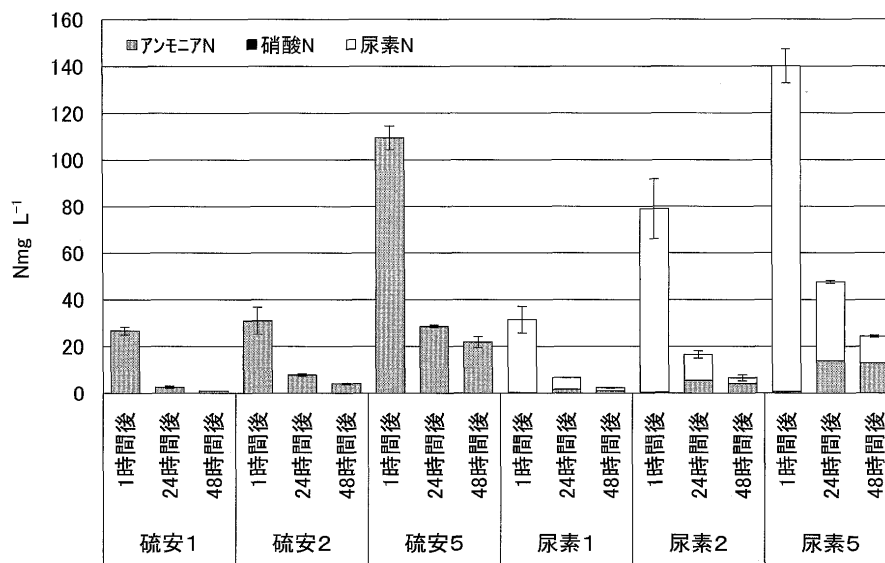


図 1 追肥後の田面水窒素の動態

エラーバーは標準偏差、硫安・尿素の次数字は施肥窒素量 g m^{-2} を示す。

在し、それぞれ1.7, 5.5, 13.9 mg L⁻¹であった。施肥量が多いほどアンモニアN濃度も高かった。尿素Nは48時間後ではさらに減少し、それぞれ1.4, 2.4, 11.2 mg L⁻¹まで低下したが、アンモニアNは48時間後でも24時間後とほぼ同等の濃度で、それぞれ1.0, 4.3, 13.0 mg L⁻¹であった。尿素区で24時間後と48時間後のアンモニアNの変化が小さかったのは、尿素的アンモニアNへの転化量とアンモニアNの水稻への吸収などによる消失量が同等のためと思われる。

図2に追肥後の田面水に含まれるカチオンの動態を示す。田面水中のカチオンは硫安区、尿素区ともNa⁺が多く存在し、次いでCa²⁺があり、K⁺とMg²⁺は少なかった。カチオン全体で見ると、硫安区、尿素区とも施肥量が多いほど高い傾向であった。また、時間経過とともに増加する傾向があり、硫安区の増加割合は尿素区に比べて著しく高かった。硫安区での増加は主にCa²⁺, Mg²⁺によるもので

あった。硫安区でカチオンが増加したのは、土壤の負荷電に引き付けられていたカチオンが、硫安のNH₄⁺とイオン交換したためと思われる。尿素区で増加が少なかったのは、荷電を持たない尿素が大部分のためと思われる。

図3に追肥後の田面水アニオンの動態を示す。田面水中のアニオンは、硫安区では施肥成分であるSO₄²⁻が大部分で、次いでCl⁻であり、NO₃⁻はほとんど存在しなかった。SO₄²⁻は施肥量が多いほど多く存在し、時間経過にしたがって減少した。Cl⁻は施肥量による差が小さく、時間経過による変化は小さかった。尿素区ではCl⁻とSO₄²⁻が存在し、NO₃⁻はほとんどなかった。Cl⁻, SO₄²⁻とも施肥量による差は小さかった。Cl⁻では時間経過による変化が少なかったが、SO₄²⁻では時間経過にしたがって減少する傾向であった。硫安区では硫安の施用でSO₄²⁻が多量に存在したが、水稻による吸収や流亡、微生物による取り込み等で時間経過とともに減少したと思われる。Na⁺やCl⁻で施肥量によ

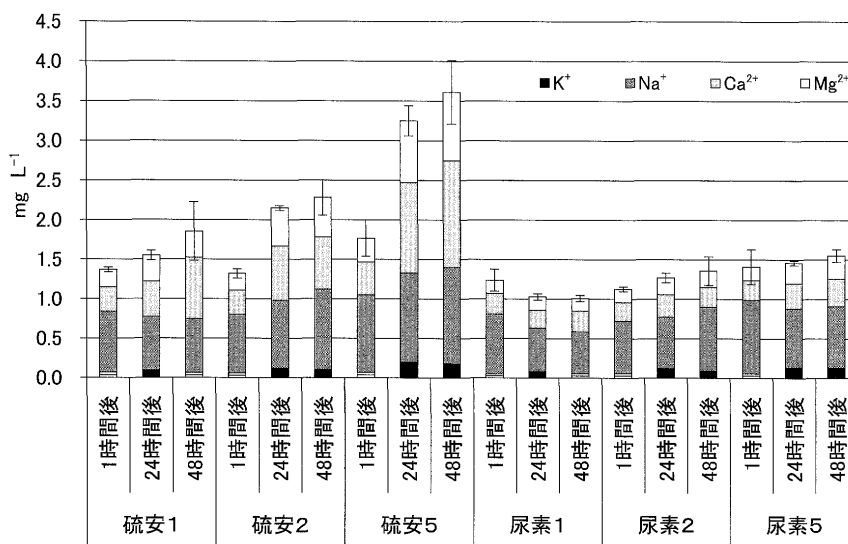


図2 追肥後の田面水カチオンの動態
エラーバーは標準偏差, 硫安・尿素的の次数字は施肥室素量 g m⁻²を示す。

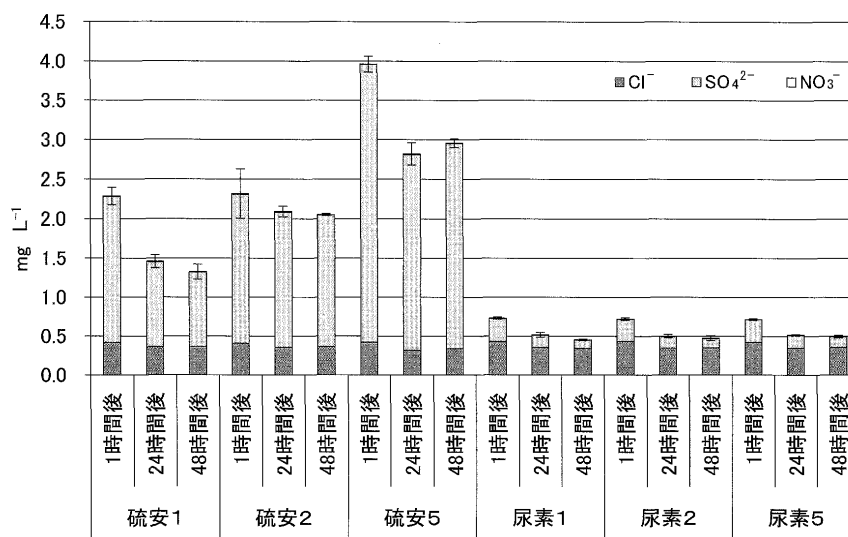


図3 追肥後の田面水アニオンの動態
エラーバーは標準偏差, 硫安・尿素的の次数字は施肥室素量 g m⁻²を示す。

る差や時間経過による変化が少なかったのは、灌漑用水中に存在し、施肥などの影響が小さかったためと思われる。

3) 収穫期の稲体養分含量

表2に収穫時の稲体養分含有量を示す。養分含有量は K_2O が多く、次に $N, P_2O_5 > Ca, Mg$ の順であった。Nは尿素区のほうが硫酸区より高く、両区とも施肥量が多くなるほど高まる傾向であった。Ca, Mgも尿素区で硫酸区より高かったが、両区とも施肥量による差は小さかった。 K_2O, P_2O_5 は硫酸区、尿素区による差は小さく、施肥量による差も小さかった。

尿素区でN含量が高まったのは、施肥窒素利用率が硫酸区より高かったためと思われる。

施肥後の時間経過とともに田面水中に置換溶出した Ca^{2+}, Mg^{2+} が硫酸に随伴する SO_4^{2-} の流亡に伴って溶脱したため、硫酸区では尿素区より稲体のCa, Mg含量が少なくなったものと思われた。しかし、Ca, Mgは灌漑水からの供給もあるので、その差は小さかった。

4) 施肥窒素利用率

図4に収穫時稲体の ^{15}N 標識肥料を利用した追肥窒素吸収利用率を示す。追肥窒素利用率を肥料の種類別にみると、硫酸区で58.9% (標準偏差10.8%)、尿素区67.5% (11.3%)であった。施肥量別にみると、N1で53.7% (11.7%)、N2で64.5% (7.1%)、N5で71.2% (8.9%)とN2, N5では60%以上と高かったが、N1では反復の変動が大きく不安定であった。統計的に有意ではないものの、尿素区の窒素利用率が硫酸区よりやや高まる傾向がみ

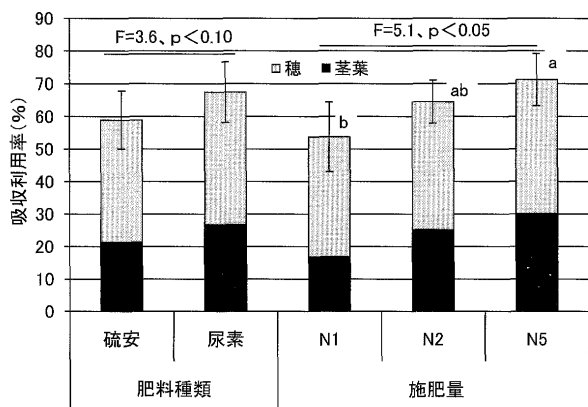


図4 収穫時稲体の追肥 ^{15}N 吸収利用率
エラーバーは標準偏差、Nの次数字は施肥窒素量 $g\ m^{-2}$ を示す。同一英字間は5%水準で有意差なし。(2元配置の分散分析、Tukeyの多重比較)

られた。また、施肥窒素量が多くなるほど窒素利用率が高まる傾向が認められた。

アンモニアの硝酸化作用は田面表層の酸化層で起こり、これによって脱窒が進行する。硫酸のアンモニア態窒素は陽イオンとなり、土壌へ吸着されやすく、土壌表面での硝化・脱窒作用の影響を受けやすい。尿素の場合は電荷を持たないため土壌に吸着されにくく、速やかに酸化層の下へ移動するため、硝化作用を受けにくいと考えられる。尿素は炭酸アンモニアに分解されるまでに土壌中のウレアーゼによるアンモニア化成の過程が必要であるが(岡崎ら, 2001)、一度炭酸アンモニアになれば硫酸より吸着力が大きいといわれている(高橋ら, 1980)。このため、尿素区の窒素利用率が硫酸区より高まったものと思われる。

また、土壌に施されたアンモニア態窒素の吸着量は、添加アンモニア態窒素の濃度が高いほど吸着量が多くなるといわれている(高橋ら, 1980)。一方、追肥時期は出穂8日前であり、追肥窒素のイネによる吸収速度が大きい時期である。追肥由来の土壌アンモニアは、短期間作土の最表層に存在するが、その期間は追肥時期によって異なり、その期間はイネの追肥窒素の吸収期間とほぼ一致し、出穂8日前では4~7日とされている(和田ら, 1971)。したがって、施肥窒素量が多いほど窒素の消失が少なく水稲に有効に利用されたため、窒素利用率が高まったと考えられる。

減水深が大きいほど窒素利用率が高まる傾向が認められており(土田ら, 2005)、前報の試験に比べて日減水深が大きい条件であったことなどの影響があり、本試験での肥料利用率は前報より高まったのではないと思われる。

流入施肥において、窒素成分を均一に施用するためには電荷を持たない尿素が有利である。本試験では尿素区の窒素利用率が硫酸区より高まる傾向があり、慣行の穂肥窒素利用率とも同等であることが確認された。ただし、 $1g\ m^{-2}$ と施肥量が少ない場合には、効果が不安定であり、減水深などの施肥条件についてさらに検討する必要があると思われる。

4. まとめ

^{15}N 標識の硫酸と尿素を供試して、出穂9日前に表面施肥し、窒素形態や施肥窒素量が田面水中の養分動態および窒素利用率に与える影響を検討した。

1) 施肥時水深2.7cm、見かけの日減水深1.2cmの施肥条件では、施肥窒素量が $2, 5g\ m^{-2}$ の場合、硫酸、尿素とも60%以上と高い施肥窒素利用率であった。 $1g\ m^{-2}$ の場

表2 収穫時の稲体養分含有量

	$N\ mg\ g^{-1}$		$P_2O_5\ mg\ g^{-1}$		$K_2O\ mg\ g^{-1}$		$Ca\ mg\ g^{-1}$		$Mg\ mg\ g^{-1}$	
	茎葉	穂	茎葉	穂	茎葉	穂	茎葉	穂	茎葉	穂
硫酸 1	3.35 (0.19)	7.52 (0.20)	3.53 (0.06)	5.41 (0.06)	17.07 (0.49)	3.51 (0.03)	2.24 (0.07)	0.19 (0.01)	1.06 (0.02)	1.02 (0.02)
硫酸 2	3.48 (0.14)	7.82 (0.21)	3.15 (0.08)	5.39 (0.06)	13.50 (2.33)	3.44 (0.03)	2.01 (0.41)	0.19 (0.02)	0.87 (0.13)	0.41 (0.40)
硫酸 5	4.08 (0.27)	8.36 (0.16)	3.67 (0.35)	5.70 (0.08)	14.27 (2.29)	3.46 (0.04)	1.79 (0.42)	0.19 (0.01)	0.80 (0.18)	1.07 (0.06)
尿素 1	3.68 (0.08)	8.00 (0.30)	3.53 (0.11)	5.55 (0.12)	16.43 (0.82)	3.48 (0.03)	2.24 (0.29)	0.21 (0.02)	0.98 (0.03)	1.12 (0.01)
尿素 2	3.76 (0.06)	8.07 (0.17)	3.48 (0.16)	5.48 (0.06)	15.90 (0.40)	3.46 (0.08)	2.23 (0.01)	0.22 (0.01)	1.10 (0.05)	1.11 (0.04)
尿素 5	4.26 (0.14)	9.53 (0.21)	3.69 (0.14)	5.67 (0.09)	16.80 (1.27)	3.56 (0.11)	2.05 (0.18)	0.23 (0.00)	1.08 (0.09)	1.15 (0.04)

()内は標準偏差、硫酸・尿素の次数字は施肥窒素量 $g\ m^{-2}$ を示す。

合は窒素利用率の変動が大きく、不安定であった。

2) 統計的に有意ではないものの、尿素区の窒素利用率が硫安區よりやや高まる傾向が認められた。また、 $1\sim 5\text{ g m}^{-2}$ の範囲内では硫安、尿素とも施肥窒素量が多いほど窒素利用率が高まる傾向であった。

3) 施肥窒素利用率が高まり、収穫時の稲体窒素含量は尿素区のほうが硫安區より高まった。収穫時の稲体 Ca, Mg 含量は尿素区のほうが硫安區より高まる傾向がみられたが、その差は小さかった。

文 献

- 久保田勝 1998a. 水稻に対する流入施肥の現状と新しい流入施肥法 (1). 農及園, 73, 685-689.
- 久保田勝 1998b. 水稻に対する流入施肥の現状と新しい流入施肥法 (2). 農及園, 73, 795-799.
- 高橋能彦・土田徹・久保田勝 1998. 水稻流入施肥における田面水の電気伝導度と肥料養分の相互関係. 土肥誌, 69, 638-640.
- 土田徹・高橋能彦・大竹憲邦・大山卓爾・久保田勝 2005. 水口流入施肥器を用いた大区画水田における水稻液肥流入の均一施肥効果と効率的施肥条件の検討. 土肥誌, 76, 811-816.
- 日本分析化学会北海道支部編 1994. 水の分析 (第4版), p. 253-256, 化学同人, 京都.
- 植物栄養実験法編集委員会編 1990. 植物栄養実験法, p. 177-178, 博友社, 東京.
- 狩野宏美・米山忠克・熊澤喜久雄 1974. 発光分析法による重窒素の定量法について. 土肥誌, 45, 549-559.
- 岡崎正規・安西徹郎・加藤哲郎 2001. 新版土壤肥料. p. 119, (社) 全国農業改良普及協会, 東京.
- 高橋英一・谷田沢道彦・大平幸次・山田芳雄・田中 明 1980. 新版作物栄養学. p. 134, 朝倉書店, 東京.
- 和田源七・庄子貞雄・高橋重郎・斎藤公夫・新保 到 1971. 水田における窒素の動態と水稻による窒素吸収について 第3報追肥窒素の土壤中における行動ならびに水稻による吸収. 日作紀, 40, 287-293.