研究論文

圃場で液肥が調製できる水稻用流入施肥装置の開発

森 拓也^{*,**}・真壁周平^{***}・飯島智浩^{****}・平田雅敏^{*****}・

横田修一^{*****}・重田一人^{**},^{*****}

^{*} 茨城県農業総合センター農業研究所, ^{**} 筑波大学大学院生命環境科学研究科,

^{***} 山形県村山総合支庁産業経済部北村山農業技術普及課, ^{****} 茨城県立農業大学校,

^{*****} 有限会社 横田農場, ^{*****} 農研機構中央農業研究センター

Development of a Fertilizer Application Device Capable of Producing and Pouring Liquid Fertilizer in Paddy Fields

Takuya MORI^{*,**}, Shuhei MAKABE^{***}, Tomohiro IJIMA^{****}, Masatoshi HIRATA^{*****},

Shuich YOKOTA^{*****} and Kazuto SHIGETA^{**},^{*****}

^{*}Ibaraki Agricultural Center Agricultural Research Institute,

^{**}Graduate School of Life and Environmental Science, University of Tsukuba,

^{***}Kitamurayama Agricultural Technology and Extension Division, Department of Industry and
Economy, Murayama Area General Branch Administration Office, Yamagata Prefectural Government,

^{****}Ibaraki Agricultural Academy, ^{*****}Yokotanojo Co., Ltd,

^{*****}Central Region Agricultural Research Center, NARO

安価な尿素を使用して圃場で液肥を調製でき、散布精度の高い水稻用の水口流入施肥装置を開発した。本装置を使用した流入施肥において、液肥の滴下流量および窒素濃度は、施肥開始から施肥終了まで、ほぼ一定に推移した。本装置を使用した流入施肥の現地実証試験では、施肥後の水稻の葉色、坪刈収量は、背負式動力散布機を使用した硫安の慣行追肥区と同程度であった。流入施肥において良好な散布精度を確保するためには、施肥前に田面が露出する程度まで完全に落水しておくとともに、施肥終了後は灌漑水を止水する必要があることを明らかにした。

キーワード：水稻、液肥、灌漑水、流入施肥、収量

1. 緒言

米の消費量が低迷する中、米の販売価格は長く下落傾向にある。一方、販売農家1戸当たりの経営耕地面積は年々増加しており、特に米麦等の土地利用型農業においては、農地全体のうち20ha以上の農業経営体が耕作する面積の割合が増加し

ている（農林水産省2010）。1戸当たりの経営耕地面積が増加するなか、大規模経営体を中心とした水稻栽培においてコスト削減は必須である。

米の生産コストに視点を移すと、平成27年産米の10a当たりの全算入生産費は約13万円3千円で、うち約6割が物財費である（農林水産省2015）。物財費のうち約1割を肥料費が占めており、肥料費を削減することで一定の生産性向上が図られる。茨城県内において、水稻の施肥は肥効調節型肥料による基肥一発型肥料の使用が一般的であるが、肥効調節型肥料は基本的に追肥を必要としないため効率的な施肥を可能とする反面、資材費が高価であることや、肥効が気象条件に影響

2017年7月20日受付

2017年10月28日受理

Corresponding author

森 拓也 Takuya MORI

〒311-4203 茨城県水戸市上国井町 3402

3402, Kamikunii, Mito, Ibaraki, Japan

E-mail : ta.mori@agri.pref.ibaraki.jp

図1 開発した流入施肥装置（試作1号機）

流入施肥装置主要諸元(試作1号機)		
1	適用肥料	尿素
2	機体寸法	直径 55 cm 高さ 115 cm
3	主な材質	第1容器: ポリプロピレン
		第2容器: ステンレス
		架台・脚部: ステンレス
4	最大容量(第1容器)	80 L
5	形状(第1容器)	樽型
6	重量	24 kg
7	液肥流量調節方式	手動式バルブ開度調節式 (軟質塩化ビニルチューブ付属)
8	液肥滴下流量範囲	2~7ml/秒
9	その他	傾斜設置対応型

されやすいこと等の課題が残る。

そこで筆者らは、従来から一部の生産者で実践されている水稻の施肥方法として水口からの流入施肥（流し込み施肥）に着目し、安価な資材として尿素が利用でき、かつ従来よりも均一な拡散性が得られる流入施肥技術の開発を目指した。これまでに開発された流入施肥技術として、専用の流入施肥装置を使用する方法や既存の資材を活用した簡易な方法が開発されている。例えば、市販の20L給水ポリタンクと尿素液肥を用いた流入施肥法（本田ら2014）は、低コストかつ簡易な方法であるが、液肥の滴下流量は容器内部の液肥残量に依存するため流入施肥開始時と終了時で液肥の滴下流量が大きく異なることから、散布精度の高い施肥方式とは言い難い。また、密閉式の容器内に空気を装着するマリオットサイフォン式流入施肥器（山崎ら1965, 久保田1998a, 久保田1998b）は、容器内の液肥残量に関係なく常時一定の液肥流量が得られる特徴を持つが、市販の専用液肥を使用することが前提とされているため資材が高価であることや、装置は密閉式のため施肥途中の滴下流量の変更が困難であることが課題である。さらに、肥料樹脂袋と硫酸を活用した流入施肥法（関矢ら2009）は、既存の資材を活用するため低コストかつ省力的な方法であるが、水口付近の肥料濃度が高くなる傾向があり、主に飼料用米用途として推奨される。

そこで今回筆者らは、省力的かつ高精度な施肥技術の開発を目的として、食用米にも活用できる新しい流入施肥装置（試作1号機、試作2号機）を開発し、その効果を確認したので報告する。

2. 材料および方法

1) 流入施肥装置の開発

(1) 試作1号機の概要

2014年に製作した流入施肥装置の試作1号機を図1に示す。試作機1号機の特徴は、①安価な固形尿素を使用して圃場で肥料に直接灌漑水を加え簡易に肥料溶液を作出できること、②肥料溶液を少量かつ定量的に水田へ供給できること、③施肥途中に肥料溶液の滴下流量を微調整できること、④装置は軽トラックでの運搬が可能であることである。

装置は、肥料と水を投入し肥料溶液（以下、「液肥」とする）を調製する第1容器と、第1容器で調製した液肥を一時貯留する第2容器の2層構造を持つ。第1容器に約80L容量の容器を採用したため20kg入りの尿素1袋を1度に溶かすことが可能である。第1容器から流出した液肥は、第2容器内のフロート弁により常時一定量の液肥が貯留されるため、第2容器外側に取り付けられた流量調節バルブで施肥開始前に液肥の滴下流量を調節することで、安定的に一定量の肥料が流出する。さらに開放式のため内部圧力に影響されず、流量調節バルブの開度を変化させることにより施肥途中に液肥の流量調節が可能である。第2容器の流量調節バルブから流出した液肥は、軟質塩化ビニル樹脂製チューブを経由して水田の水口に設置された灌漑水枡へ液肥を流し入れることが可能である。容器を支持する脚部は4本構造となっており、それぞれの脚が独立して伸縮するため、傾斜のある畦畔上でも装置を水平に保った位置で固

図2 開発した流入施肥装置(試作2号機)

定できる。

(2) 試作1号機の基礎試験方法

2014年に試作1号機の動作状況を茨城県農業総合センター農業研究所(水戸市)内の水稲作付圃場(30a)で確認した。水口近隣の水田畦畔上に装置を設置したのち、尿素20 kg(窒素として9.2 kg、窒素施肥量約3 kg/10 a)を装置の第1容器に投入し、肥料を溶解させるため約55 Lの水を第1容器に投入した。尿素と水の投入後は攪拌せずに流入施肥を行っている間に自然溶解させ液肥とした。装置の第1容器から液肥が流れ出し、第2容器に液肥が十分に溜まった状態を確認したのち、圃場へ液肥の流入施肥を開始した。圃場へ流し込む液肥の流量は開始時に流量調節バルブで約4 ml/秒に設定し、実際の吐出量を測定した。また、尿素態窒素濃度は流量測定時にサンプリングを行い、ジメチルアミノベンズアルデヒド法(越野編著1988)にて定量した。

水稲栽培は、4月30日に「一番星」を栽植密度15.2株/m²に設定して機械移植し、基肥として化成肥料(N:P₂O₅:K₂O=14:14:14)で窒素量5 kg/10 aを移植と同時に側条で施肥を行った。試験区は、背負式動力散布機による硫酸追肥を行った慣行区に対し、試作1号機による尿素的流入施肥区を設けた。施肥窒素量は3 kg/10 aとした。葉色は、施肥前と施肥後に葉色素計(コニカミノルタ, SPAD-502)により最上位展開葉の葉身を測定し、連続10株の平均値とした。収量は、圃場を複数の区画に分け、それぞれの区画から坪

刈りし、籾摺り脱穀後、1.85 mmのグレーダー調製後の精玄米重を算出した。玄米タンパク質含有率は、上記で得られた精玄米を近赤外透過連続波長方式の米粒食味計(サタケ, RCTA11A, 水分15%換算)で1サンプルあたり3回測定しその平均とした。整粒歩合は、上記で得られた精玄米1000粒を穀粒判別器(サタケ, RGQI10B, 粒数比)で測定した。

(3) 試作2号機の概要

2015年に試作1号機をベースに改良を加え新たに製作した試作2号機を図2に示す。試作2号機は、第1容器の形状を試作1号機の樽型から角型へ変更した。角型の採用により、同容量の樽型よりも開口部を広くすることで、肥料と水の投入作業をし易くした。また、装置から流出した液肥を水田の灌漑水柵に誘導する滴下方式として試作1号機で採用した軟質塩化ビニル樹脂製チューブ方式では、チューブの曲管部で細かな気泡が生じ、一時的に液肥の滴下流量が不安定となる現象が確認されたため、試作2号機では硬質塩化ビニル管方式へ変更した。さらに、肥料を迅速に溶かすために、第1容器上部にモーター式の着脱可能な攪拌装置を試作し装着した。攪拌装置の電源は持ち運びができるように自動車用鉛蓄電池(DC 12V)とした。

(4) 試作2号機の基礎試験方法

試作2号機の動作状況を茨城県農業総合センター農業研究所の水稲作付圃場(18 a)で確認した。尿素11.7 kg(窒素として5.4 kg、窒素施肥

量約3 kg/10 a)を装置の第1容器に投入したのち、上部から約30 Lの水を投入した。第1容器に投入した尿素と水は直ちにモーター式の攪拌装置で完全に溶解させ液肥とした。圃場へ流し込む液肥の流量は開始時に流量調節バルブで約3.5 ml/秒に設定した。水稻栽培は、5月1日に「一番星」を栽植密度15.2株/m²設定で機械移植し、基肥として化成肥料(N:P₂O₅:K₂O=14:14:14)で窒素量5 kg/10 aを移植同時に側条で施肥を行った。試験区は2014年と同様に背負式動力散布機による硫安追肥を実施した慣行区に対し、試作2号機による尿素的流入施肥区を設け、同区は試験前日に田面水を落水した。窒素施用量はどちらも3 kg/10 aとした。葉色は施肥前と施肥後に調査した。収穫後の玄米タンパク質含有率は、精玄米を近赤外線透過式の食味分析計(静岡製機, AG-RD, 水分15%換算)で分析した。その他の手法については、2014年と同様に実施した。

2) 流入施肥の現地実証

2014年と2015年に、試作1号機および試作2号機を使用して有限会社横田農場(茨城県龍ケ崎市, 以下「Y農場」とする)の営農圃場の水口(パイプライン)から流入施肥の実証試験を行った。試験は、Y農場で実際に作付されている各品種の追肥時期(幼穂形成期)に実施した。試作機による尿素的流入施肥区と背負式動力散布機による硫安の慣行追肥区を設け、慣行区の追肥作業はY農場の作業員により流入施肥と同日に実施した。

試作1号機を使用した2014年は、「一番星」、「コシヒカリ」、「あきだわら」の作付圃場で試験を行った。葉色は、施肥前と施肥後に実施した。調査区は圃場面積に応じて圃場内を複数区画に分け、1区画あたり10株の葉色(SPAD値)を調査し、その平均値と変動係数を算出した。水稻収量は、圃場を複数の区画に分け、それぞれの区画から坪刈りし、籾摺り脱穀後、1.85 mmのグレーダー調製後の精玄米重を算出した。玄米タンパク質含有率は、サタケの米粒食味計で測定した。整粒歩合は、穀粒判別器で分析した。田面水中の窒素濃度は、流入施肥終了後、直ちに灌漑水を止水するとともに圃場内の複数箇所から田面水を採水し、ウレアーゼ分解後インドフェノール青法(高橋ら1998)またはジメチルアミノベンズアルデヒド法で定量した。

試作2号機を使用した2015年は、「一番星」、「コシヒカリ」、「ゆめひたち」の作付圃場で施肥試験を行った。「一番星」の試験では計3箇所の水口から同時に流入施肥を行い、「コシヒカリ」および「ゆめひたち」は水口1箇所から行った。「一番星」および「コシヒカリ」の試験では、慣行区として2014年と同様に流入施肥と同日にY農場の従業員により背負式動力散布機で硫安を施肥した圃場を設けた。流入追肥にかかる作業時間は2015年の「一番星」の試験時に調査を行い、作業時間は水口3箇所の装置設置時間、資材投入、流量調節および撤去時間を含む合計の作業時間とした。水稻の葉色、田面水中の窒素濃度および収量調査および整粒歩合は2014年と同様に調査した。玄米タンパク質含有率は、静岡製機の食味分析計で測定した。

3) 流入施肥における田面水中の窒素濃度分布

流入施肥において均一な散布精度を確保するために、各種施肥条件の検討を行った。検討した項目は、①施肥後田面水中の窒素濃度分布の評価時期、②流入施肥前の田面水深の影響、③流入施肥終了後の灌漑水継続流入の影響の3項目である。

①の施肥後田面水中の窒素濃度分布の評価時期についての試験は、2014年に試作1号機を使用してY農場の2圃場で行い、流入施肥直後と施肥後24時間に各圃場内の同一地点から採取した田面水中の窒素濃度を比較した。②の流入施肥前の田面水深の影響については、前述2)の流入施肥の現地実証試験および同年に行った現地圃場における他の流入施肥試験において、流入施肥開始前の田面水深を圃場内複数箇所で実測し、施肥後に採取した田面水中窒素濃度の変動係数との関係性を評価した。③の流入施肥終了後の灌漑水継続流入の影響についての試験は、2015年に茨城県農業総合センター農業研究所内水田(20 a)で試作2号機により試験を行った。流入施肥終了後、直ちに灌漑水を止水し、圃場内10カ所から田面水を採取した。その後再び灌漑を行い、灌漑終了後に施肥終了時と同じ場所から田面水を採取した。施肥終了後と灌漑終了後における田面水中窒素濃度の分布および変動係数を評価した。①と②の試験では流入施肥終了後、直ちに灌漑水を止水し、圃場内の複数箇所から採水した田面水中の窒素濃度を測定した。施肥直後の田面水中窒素濃度は、

表 1 流入施肥の試験概要

試験年度	2014				2015			
流入施肥機	試作 1 号機				試作 2 号機			
試験場所	水戸市	龍ヶ崎市			水戸市	龍ヶ崎市		
栽培品種	一番星	一番星	コシヒカリ	あきだわら	一番星	一番星	コシヒカリ	ゆめひたち
試験日	6月18日	6月26日	7月16日	7月30日	6月19日	6月25日	7月19日	8月3日
試験面積 (a)	30	10	32	30	18	87	27	15
圃場形状	整形	整形	整形	整形	整形	整形	整形	整形
短辺 (m)	30	20	28	40	18	87	38	20
長辺 (m)	100	50	114	75	100	100	70	75
水口の数 (箇所)	1	1	1	1	1	3	1	1
施肥窒素量 (kg/10a)	3.0	3.0	2.0	3.5	3.0	3.0	2.0	3.5
使用肥料	尿素	尿素	尿素	尿素	尿素	尿素	尿素	尿素
肥料重量 (kg)	20	6.2	14.1	22.5	11.7	19	11.8	11.4
加水量 (kg)	55	25	40	60	30	40	58	29
平均滴下流量 (ml/ 秒)	4.4	3.9	2.9	3.5	3.5	2.9	3.4	2.6
流入施肥時間 (分)	256	120	300	350	233	300	340	260
平均水深 (施肥開始時・cm)	2.6	3.4	0.6	0.2	1.0	0.0	0.3	0.1
平均水深 (施肥終了時・cm)	5.9	4.8	1.6	1.0	6.9	1.5	2.5	2.4

注) 試験場所は、水戸市は茨城県農業総合センター農業研究所内水田、龍ヶ崎市は現地圃場 (Y 農場) で実施した。

ウレアーゼ分解後インドフェノール青法またはジメチルアミノベンズアルデヒド法により定量した。①の試験で施肥後 24 時間に採取した田面水には尿素が加水分解して生成したアンモニア態窒素が含まれたため、尿素態窒素濃度とアンモニア態窒素濃度の合計量で評価した。③の試験は、尿素態窒素濃度で評価した。

3. 結果および考察

1) 流入施肥装置の開発

(1) 試作 1 号機の基本性能

2014 年度に試作 1 号機を供試して水戸市で実施した流入施肥試験の概要を表 1 に示す。施肥開始から終了までの流入施肥時間は 256 分で、液肥の平均滴下流量は 4.4ml/ 秒であった。

図 3 に試作 1 号機から流出する液肥の尿素態窒素濃度および滴下流量の推移を示す。第 1 容器に尿素と水を投入後、流入施肥開始後約 2 時間で第 1 容器に投入した尿素が溶けた状態となり、圃場へ流出する液肥の流量は、施肥開始から施肥終了時にかけてほぼ一定で推移した。一方、液肥の尿素態窒素濃度は、施肥開始当初は一定の濃度で

図 3 流入施肥装置から流出する液肥中の尿素態窒素濃度および滴下流量の推移 (試作 1 号機)

推移したものの、施肥開始から約 2 時間経過後に徐々に濃度が低下した。液肥の濃度が途中で低下した理由は、装置投入直後に尿素と水を攪拌混合しなかったため第 1 容器内で肥料の濃度差が生じたことによるものだと考えられる。すなわち、第 1 容器底面に沈殿する尿素が完全に溶解するまでは、容器内下方にある尿素飽和溶液が流出し、尿

素溶解後は、容器上方にある低濃度の液肥が流出したため、施肥途中で液肥の濃度が低下したと推察される。

(2) 試作2号機の基本性能

2015年度に試作2号機を供試して水戸市で実施した流入施肥試験の概要を表1に示す。施肥開始から終了までの流入施肥時間は233分で、液肥の平均滴下流量は3.5 ml/秒であった。

図4に試作2号機から流出する液肥の尿素態窒素濃度および滴下流量の推移を示す。第1容器に尿素と水を投入後、流入施肥前に試作した攪拌装置ですぐに攪拌した結果、攪拌無しとした試作1号機と比較して、試作2号機でより安定した液肥

図4 流入施肥装置から流出する液肥中の尿素態窒素濃度および滴下流量の推移 (試作2号機)

濃度が確認された。尿素は溶解度が高く、水と混合するだけでも容易に溶け始めるが、さらに攪拌することでより均一な施肥が可能となったと考えられる。また、流入施肥装置から流出する液肥の滴下流量は、試作1号機と同様に施肥開始から施肥終了時にかけてほぼ一定に推移した。

表2に試作2号機を使用した流入施肥による水稻の葉色および流入施肥直後の田面水中の尿素態窒素濃度を示す。流入施肥直後の田面水中の尿素態窒素濃度の変動係数は約32%、施肥10日経過後の葉色の変動係数は約5%となり、試作1号機を用いた2014年の結果と比較して、2015年は尿素態窒素濃度の変動係数を抑えることができた。この要因としては、試作機から流出する液肥の尿素態窒素の濃度が一定であったことに加え、後述するように、施肥前に田面水を排水し落水状態で施肥を行ったことに起因したと考えられた(表1, 図6)。

表3に試作2号機を供試した流入施肥による水稻の収量および玄米品質結果を示す。坪刈収量と玄米タンパク質含有率は、流入施肥区と慣行区とで同程度であった一方、整粒歩合は、流入施肥区でやや高まった。流入施肥区で整粒歩合が高まった要因については判然としないが、慣行区は硫酸、流入施肥区は尿素を使用したため、追肥資材が玄米品質に影響した可能性があり、今後の検討を要する。

2) 流入施肥の現地実証

2014年および2015年に龍ヶ崎市の営農圃場で

表2 流入施肥による水稻葉色および田面水中尿素態窒素濃度

試験年度	試験区	流入施肥機	試験面積 (a)	調査区数 (n)	葉色						田面水中の尿素態窒素濃度		
					施肥前			施肥後			平均水深 (cm)	窒素濃度 (mg/L)	変動係数 (%)
					調査日 (月・日)	SPAD値 (平均値)	変動係数 (%)	調査日 (月・日)	SPAD値 (平均値)	変動係数 (%)			
2014	流入施肥区	試作1号機	30	15	6/17	33.8	4.8	6/26	31.0	9.2	5.9	44.9	101.9
	流入施肥区	試作2号機	18	10	6/19	33.1	3.4	6/29	29.5	5.1	6.9	53.9	31.5
2015	慣行区	—	18	10		30.8	4.3		28.7	7.7	—	—	—
t-test						**	—		ns	—	—	—	—

注1) 茨城県農業総合センター農業研究所(水戸市)における試験結果。品種は「一番星」。

2) 流入施肥区は尿素による水口からの流し込み追肥、慣行区は硫酸を背負式動力散布機で追肥した。

3) 田面水中の尿素態窒素濃度は、施肥終了直後に採水して調査した。

4) 平均水深は、流入施肥終了後の圃場内の平均値とした。

5) 統計処理は、2015年度の流入施肥区と慣行区をt検定により検証した。nsは有意差無し、**は1%水準で有意差あり。

表3 流入施肥による水稻収量および玄米品質

試験 年度	試験区	流入施肥機	試験 面積 (a)	調査 区数 (n)	収量 (kg/10 a)		玄米タンパク質 (%)		整粒歩合 (%)	
					坪刈収量 (平均)	変動係数 (%)	玄米 タンパク質 (平均)	変動係数 (%)	整粒歩合 (平均)	変動係数 (%)
2014	流入施肥区	試作1号機	30	15	577	11.9	6.0	1.7	89.6	2.3
	流入施肥区	試作2号機	18	10	613	8.0	6.3	2.4	85.0	1.5
2015	慣行区	—	18	10	595	6.4	6.3	2.3	82.6	3.3
t-test					ns	—	ns	—	*	—

注1) 茨城県農業総合センター農業研究所（水戸市）における試験結果。品種は「一番星」。

2) 流入施肥区は尿素による水口からの流し込み追肥。慣行区は硫酸を背負式動力散布機で追肥した。

3) 統計処理は、2015年度の流入施肥区と慣行区をt検定により検証した。nsは有意差無し、*は5%水準で有意差あり。

実証した流入施肥の試験概要を表1に示す。2014年の試作1号機による流入施肥試験では、実証した圃場面積は10～32 a、流入時間は120～350分であった。流入施肥前の田面水の状況は「一番星」の試験では湛水条件下で流入施肥を行い、他の試験では、試験前日に田面水を排水し、試験当日は田面にほぼ水がない落水条件下で流入施肥を行った。液肥の平均滴下流量は「一番星」の試験では3.9 ml/秒、「コシヒカリ」の試験では2.9 ml/秒、「あきだわら」の試験では3.5 ml/秒であった。

2015年の試作2号機による流入施肥試験では、実証した圃場面積は15～87 a、流入時間は260～340分であった。すべての試験で試験前日に田面水を排水し、試験当日は落水条件下で流入施肥を行った。液肥の平均滴下流量は「一番星」の試験では2.9 ml/秒、「コシヒカリ」の試験では3.4 ml/秒、「ゆめひたち」試験では2.6 ml/秒であった。

表4～表5に2014年および2015年の現地実証試験結果を示す。

2014年に実施した試作1号機による流入施肥試験では、流入施肥直後に採水した田面水中の尿素態窒素濃度変動係数は、「一番星」の試験では106%、「コシヒカリ」の試験では62.3%、「あきだわら」の試験では80.1%となり、総じて尿素態窒素濃度の変動係数が大きくなった（表4）。これは試作1号機から流出する液肥の尿素態窒素濃度が施肥途中に変動したことに加え、6月26日の「一番星」の試験では、流入施肥前の田面水深が約3 cmの湛水状態であったこと、さらに、7月30日の「あきだわら」の試験では、灌漑水量

不足により施肥終了までに圃場全体が十分に湛水されなかったこと等に起因すると考えられる。

2014年に調査した施肥後の葉色は、流入施肥区は慣行区と比べやや葉色が淡い傾向を示したが、葉色の変動については、慣行区と同程度であった（表4）。水稻収穫後の坪刈収量、玄米タンパク質含有率は、流入施肥区と慣行区で同等であった（表5）。

2015年に実施した試作2号機による流入施肥試験では、施肥直後に採水した田面水中の尿素態窒素濃度の変動係数が、「一番星」の試験では37.5%、「コシヒカリ」の試験では48.0%、「ゆめひたち」の試験では45.6%となり、試作1号機を用いた2014年と比較すると2015年は総じて良好な肥料の拡散性が得られた。また、施肥後の葉色は、例えば「一番星」の試験では、流入施肥区33.3、慣行区33.5となるなど、流入施肥区と慣行区で同程度であった（表4）。水稻収穫後の坪刈収量、玄米タンパク質含有率、整粒歩合は、「一番星」の流入施肥区で坪刈収量と玄米タンパク質含有率が慣行区より高まる傾向となったが、「コシヒカリ」の試験では流入施肥区と慣行区で同程度であった（表5）。

一方、本装置を使用した流入施肥法と背負式動力散布機による慣行施肥法との肥料散布精度の比較では、試作2号機を用いた2015年の流入施肥試験で、施肥直後の田面水中尿素態窒素濃度の変動係数が37.5～48.0%であったのに対し、土田ら（2005）の報告では、新潟県内の約60a区画の圃場における試験結果で背負式動力散布機による粒状肥料散布区で尿素態窒素濃度の変動係数が

表4 流入施肥による水稻葉色および田面水中尿素態窒素濃度

試験 年度	品 種	試験区	試験 面積 (a)	調査 区数 (n)	葉 色						田面水中の 尿素態窒素濃度		
					施肥前			施肥後					
					調査日 (月・日)	SPAD 値 (平均値)	変動係数 (%)	調査日 (月・日)	SPAD 値 (平均値)	変動係数 (%)	平均水深 (cm)	窒素濃度 (mg/L)	変動係数 (%)
2014	一番星	流入施肥区	10	10	6/25	32.9	3.5	7/ 4	34.3	6.4	4.8	77.9	106.0
	一番星	慣行区	10	10		33.2	2.6		35.2	7.1	—	—	—
	t-test			ns		—	ns		—	—	—	—	
	コシヒカリ	流入施肥区	32	15	7/15	26.9	2.9	7/24	30.0	5.9	1.6	58.9	62.3
	コシヒカリ	慣行区	42	15		27.3	6.0		31.1	5.6	—	—	—
	t-test			ns		—	ns		—	—	—	—	
	あきだわら	流入施肥区	30	9	7/29	25.2	6.5	8/ 8	29.4	10.1	1.0	149.3	80.1
	あきだわら	慣行区	30	9		25.7	7.0		30.5	9.4	—	—	—
	t-test			ns		—	ns		—	—	—	—	
	2015	一番星	流入施肥区	87	20	6/24	26.8	5.1	7/ 2	33.3	6.5	1.5	143.8
一番星		慣行区	94	20	26.6		6.0	33.5		6.9	—	—	—
t-test				ns	—		ns	—		—	—	—	
コシヒカリ		流入施肥区	27	8	7/15	26.4	1.7	7/29	26.9	6.4	2.5	55.1	48.0
コシヒカリ		慣行区	25	8		29.3	2.3		28.5	5.7	—	—	—
t-test				**		—	ns		—	—	—	—	
ゆめひたち		流入施肥区	15	8	8/ 3	30.3	1.6	8/10	35.4	3.3	2.4	129.7	45.6

注1) Y農場（龍ヶ崎市）の現地圃場における試験結果。

- 2) 流入施肥区は尿素による水口からの流し込み追肥，慣行区は硫酸を背負式動力散布機で追肥した。
- 3) 田面水中の尿素態窒素濃度は，施肥終了直後に採水して調査した。
- 4) 平均水深は，流入施肥終了後の圃場内の平均値とした。
- 5) 統計処理はt検定による。nsは有意差無し，**は1%水準で有意差あり。

43.9%となった。この結果と比較すると今回の流入施肥装置による尿素態窒素濃度の変動係数は、背追式動力散布機による慣行施肥と同程度であることが推測される。

また、試作1号機と試作2号機の比較では、液肥調製の際に肥料と水を攪拌しなかった2014年と事前に攪拌を行った2015年において、どちらも流入施肥区は慣行区と同程度以上の収量が得られたことから、溶解度の高い尿素を用いる場合、液肥調製時における肥料と水の攪拌は実用上必要が無いと考えられる。しかしながら、尿素以外の肥料（例えば硫酸等）を用いる場合は、事前に攪拌を省略すると流入施肥終了後に肥料が溶け残る懸念があることから、肥料と水の攪拌は必要であると考えられる。

表6に試作2号機による流入施肥の作業時間を示す。現地慣行の背負式動力散布機による追肥作

業が10aあたり約10分を要していたのに対し、流入施肥では10aあたり約4分となり、慣行区と比較して追肥にかかる作業時間が約6割削減された。但し流入施肥区は、同時に3箇所の水口に3台の流入施肥装置を設置したため、水口間の移動等により準備作業に時間を要した。更なる省力化を目指す場合、装置の設置台数を最小限とする等、設置にかかる作業時間を削減させる必要がある。

3) 流入施肥における田面水中の窒素濃度分布

図5に流入施肥直後と施肥24時間後の田面水中窒素濃度の関係を示す。A圃場、B圃場ともに両者には有意な相関が認められたことから、流入施肥後の田面水中窒素濃度分布は大部分が流入施肥直後に決定されることが考えられる。従来、肥料成分の拡散性はEC値で説明されており、流入施肥直後の肥料散布ムラは施肥後2～3日で均一化する

表5 流入施肥による水稻収量および玄米品質

試験 年度	品種	試験区	試験 面積 (a)	調査 区数 (n)	収量 (kg/10 a)		玄米タンパク質 (%)		整粒歩合 (%)	
					坪刈収量 (平均)	変動係数 (%)	玄米 タンパク質 (平均)	変動係数 (%)	整粒歩合 (平均)	変動係数 (%)
2014	一番星	流入施肥区	10	10	644	7.4	6.2	1.9	85.3	1.8
	一番星	慣行区	10	10	626	4.9	6.2	2.1	81.6	4.2
	t-test				ns	—	ns	—	**	—
	コシヒカリ	流入施肥区	32	9	552	7.6	6.1	4.5	75.5	3.6
	コシヒカリ	慣行区	42	9	542	6.5	6.3	2.4	76.1	3.3
	t-test				ns	—	ns	—	ns	—
	あきだわら	流入施肥区	30	9	553	7.1	6.6	3.7	76.8	2.4
	あきだわら	慣行区	30	9	580	10.2	6.7	3.8	75.9	1.5
	t-test				ns	—	ns	—	ns	—
	一番星	流入施肥区	87	20	494	10.9	7.6	4.0	62.9	5.0
2015	一番星	慣行区	94	20	448	12.1	7.3	3.7	60.1	10.5
	t-test				*	—	**	—	n.s.	—
	コシヒカリ	流入施肥区	27	8	523	6.7	6.3	2.5	75.1	1.9
	コシヒカリ	慣行区	25	8	543	2.5	6.5	4.8	74.3	4.9
	t-test				ns	—	ns	—	ns	—
	ゆめひたち	流入施肥区	15	8	429	3.3	6.7	3.2	74.0	3.2

注1) Y農場（龍ヶ崎市）の現地圃場における試験結果。

2) 流入施肥区は尿素による水口からの流し込み追肥、慣行区は硫安を背負式動力散布機で追肥した。

3) 2015年度の「一番星」流入施肥区は水口3箇所からの同時流し込み、その他は水口1箇所からの流し込みとした。

4) 統計処理はt検定による。nsは有意差無し、*は5%水準、**は1%水準で有意差あり。

表6 試作2号機による流入施肥にかかる作業時間

試験区（施肥法）	慣行	流入施肥
使用機器	背負式動力散布機	流入施肥装置
使用資材	硫安（N 21%）	尿素（N 46%）
圃場面積（a）	94	87
施肥装置の設置台数（台）	—	3
施肥窒素量（kg/10 a）	3	3
作業時間	準備	2.2
（分 / 10 a 換算）	資材投入	0.7
	流量調整	0.3
	圃場作業	7.7
	撤去	—
	—	0.6
	合計	10.1
		3.8

注1) 作業は2015年6月25日にY農場で実施した。

2) 作業は両試験区とも、それぞれ1名で実施した。

3) 作業時間のうち、慣行区の準備は現地慣行で行われていた施肥範囲の目印とするための棒立て及び背負式動力散布機への肥料投入とした。

4) 作業時間のうち、流入施肥区の準備は施肥装置の設置、資材投入は肥料（尿素）及び灌漑水の投入、流量調整は液肥の滴下流量調整、撤去は施肥装置の撤去とした。

図5 施肥直後と施肥24時間後の田面水中窒素濃度の関係

注) 圃場面積はどちらも15a。各圃場を10区画に分け、各区画から1サンプルずつ採水した。回帰直線は全データに対する。
(***: $p < 0.001$)

図6 流入施肥直前の田面水深と施肥直後の田面水中窒素濃度の変動係数との関係

注) 破線内のプロットは、灌漑水量不足で施肥終了までに圃場全体が湛水されなかったため、回帰直線から除外した。(*: $p < 0.05$)

ると言われているが、高橋ら(1998)によると、流入時間を2時間とした短時間流入と5時間とした長時間流入とを比較した場合、EC値では施肥養分の分布度合いを説明できず、流入施肥における施肥養分の分布は施肥後数時間以内に検討すべきであると指摘している。本試験でも同様に散布ムラの少ない流入施肥を行うためには流入施肥終了時に良好な田面水中窒素濃度分布を確保することが重要であると示唆された。

図6に流入施肥直前の田面水深と施肥直後の田面水中窒素濃度の変動係数との関係を示す。施肥直前の田面水深と施肥直後の田面水中窒素濃度の変動係数とは相関が高く、流入施肥後の田面水中窒素濃度変動を小さくするためには、流入施肥前に田面水を排水し、流入施肥時の田面水深をできるだけ浅くする必要がありと考えられる。

図7に流入施肥終了後の灌漑水継続流入が田面水中の窒素濃度分布に与える影響について示す。流入施肥終了後に灌漑水のみ流し続けると水口付近の窒素濃度が薄まり窒素濃度の均一性が悪化することが明らかとなったことから、肥料散布ムラの少ない流入施肥を行うためには、流入施肥終了と同時に灌漑水の流入を止める必要があると考えられる。

施肥終了直後 (水深3.8 cm)		灌漑終了後 (水深6.8 cm)	
111	99	0	0
87	89	7	6
84	81	66	80
88	32	79	75
86	0	51	9
平均 76 mg/L		平均 37 mg/L	
変動係数 44 %		変動係数 96 %	

図7 流入施肥終了後の灌漑水継続流入が田面水中窒素濃度分布に与える影響

注) 圃場面積は20a。図中の数値は窒素濃度(mg/L)、○印は水口を示す。

4. 今後の展望と課題

背負式動力散布機による追肥作業は、大区画圃場の場合、肥料を担いで圃場内で作業をする必要があるが、流入施肥は圃場内に入らず農道で作業が完結できるため、特に大区画圃場での省力化へのメリットが高い方法であるとされる(日本硫酸工業協会1967)。従来の装置や容器を使用した流入施肥法は、事前に液肥を調製するかまたは市販の液体肥料を用いることが前提とされるが、事前に多量の液肥を調製してそれを各水田に運搬する

ことは必ずしも省力化とは言えず、また市販品を用いると高コストとなる。

そこで今回、安価な尿素を使用して水田で直接尿素に灌漑水を加えて液肥を調製し、その場で液肥を流し入れることのできる新たな流入施肥装置を開発した。試作1号機では、調製した液肥を水田に流し入れる前に常時液肥を一定量貯留する第2容器を設けたことで、少量ずつ長時間かけて安定的に液肥を水田内へ流し入れることを可能とした。試作2号機は、試作1号機をベースに改良を加え、肥料を投入するための第1容器の形状を角型へ変更するとともに、一定濃度の液肥を調製するため、第1容器上部に着脱可能な攪拌装置の付与を行った。

また、開発した流入施肥装置による食用米品種を対象とした幼穂形成期の尿素追肥において、圃場の均平度が高くかつ十分な灌漑水量が確保できる圃場を選定し、施肥前に田面水を落水する条件下で流入施肥を行うことで、慣行の収量・品質を維持しながら追肥作業の大幅な省力化が期待できることが示された。

流入施肥において良好な散布精度を確保するために残された課題としては、従来から指摘されているように、圃場内の均平度の確保、漏水防止対策の実施、十分な灌漑水量の確保等である。圃場の均平については、流入施肥を行う場合、近年、大規模経営体で導入が進むレーザーレベラ等による事前整地が前提となるであろう。さらに、本機は食用米品種において流入施肥を可能とするが、前述したように玄米タンパク質含有率をわずかに高める可能性があるため、タンパク質含有率を基準として厳格に区分管理されるような高付加価値米への適用の際は施用時期等の詳細な検討が必要であると考えられる。

施肥前の田面水深と施肥後の田面水中窒素濃度分布との関係では、施肥前の田面水深が浅いほど施肥後に良好な窒素濃度分布が得られたが、施肥終了後に灌漑水のみ流し続けると窒素濃度分布の変動が大きくなった。このことから、流入施肥において良好な肥料の散布精度を確保するためには、流入施肥前に田面が露出する程度まで完全に田面水を排水しておくとともに、流入施肥終了後は灌漑水を止水する必要がある。さらに今回、一部の現地圃場において日中に灌漑水流量が変動する現象が確認されたため、より均一な施肥のため

には、灌漑水流量に合わせて液肥の流量を制御する必要があると考えられる。

本装置を使用した流入施肥の今後の展開方向としては、施肥の自動化技術の開発が期待される。本研究で明らかとなったように、流入施肥は施肥前後の水管理との相関が高いため、開始前の湛水状態から自動で流入施肥に適した水深となるまで田面水が排水されたのち、施肥の完了とともに灌漑水の流入が停止される一連の自動入排水制御システムが構築されれば、施肥作業の更なる省力化が期待できる。かつて新妻ら（1984）は、パイプライン施設の多目的利用を目的として水口からの肥料、除草剤、殺菌・殺虫剤施用の可能性について詳細な検証を行っているが、パイプライン施設等の基盤整備を前提とした一連の自動制御システムが確立されれば、肥料の他、除草剤や殺菌・殺虫剤散布への施用も可能となるであろう。

謝辞

九州大学大学院の南石晃明氏、松江勇次氏、長命洋佑氏には本研究の遂行に際し多大なるご支援を頂いた。また、ヤマト農磁株式会社の山田真弘氏、根本正久氏には装置の製造および現地試験に際し全面的にご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表する。本研究成果は生研センター「攻めの農林水産業の実現に向けた革新的技術緊急展開事業（うち産学の英知を結集した革新的な技術体系の確立）」のうち、「農業生産法人が実証するスマート水田農業モデル（IT農機・圃場センサー・営農可視化・技能継承システムを融合した革新的大規模稲作営農技術体系の開発実証）」で得られたものである。

引用文献

- 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.
- 越野正義（1988）：第二改訂詳解肥料分析法，養賢堂；pp.60-62.
- 関矢博幸・土屋一成・大谷隆二・河本英憲（2009）：飼料用イネ向けの簡易な硫酸の流入施肥技術，東北農業研究（62）；35-36.

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, 日本土壤肥料学雑誌 69(6) : 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, 日本土壤肥料学雑誌 76(6) : 811-816.

新妻芳弘・島田裕之・鯉渕幸治・広木光男・武井昌秀・窪田 満・祝迫親志 (1984) : 水田用水多目的利用に関する基礎調査研究, 茨城県農業試験場研究報告第 23 号 : 37-69.

日本硫安工業協会 (1967) : 水稻追肥に関する土壤肥料研究収録.

農林水産省 (2010) : 世界農林業センサス報告書.

農林水産省 (2015) : 平成 27 年度食料需給表.

農林水産省 (2015) : 農業経営統計調査 平成 27 年産米生産費.

本田修三・佐藤一良・阿部倫則 (2014) : 尿素を用いた水田流入施肥による水稻追肥の軽労化, 東北農業研究 (67) : 15-16

山崎欣多・久津那浩三・瀬川篤忠・上森 晃 (1965) : 水田に対する液体肥料の流入施用に関する研究 (第 1 報) 液体肥料の流入施用法

について, 日本土壤肥料学雑誌 36(12) : 379-381.

Abstract

We have developed a liquid fertilizer application device that, utilizing irrigation water and inexpensive urea, can produce and apply the liquid fertilizer necessary for use in paddy fields onto the crop in a highly accurate manner. The drop flow rate of the fertilizer, and the nitrogen concentration rate, remained almost constant throughout field demonstration tests. After the fertilizer was applied, the leaf color, rice yield (calculated by crop cutting surveys) were the same as those achieved when a conventional fertilization method was used, namely, application of ammonium sulfate using a backpack-type spreader. In order to ensure accurate fertilizer application using irrigation water, it was necessary to first completely drain the field to expose the paddy, and to stop the flow of irrigation water after the application was complete.

Key Words

fertilizer application, irrigation water, liquid fertilizer, paddy rice, yield