水稲の高精度流入施肥に関する研究

筑波大学大学院

生命環境科学研究科

先端農業技術科学専攻

博士（農学）学位論文

森　拓也

目次

図表目次

第 1 章 序論

1.1 農業を取り巻く環境 －茨城県を例として－

日本の米の 1 人当たりの年間消費量は, 1962 年の 118.3 kgをピークに一貫して減少傾向にあり，2016 年（平成 28 年）には，その半分程度の 54.4 kgにまで減少している（図 1-1，農林水産省 2017a). 消費量が減少傾向となっている要因として，①経済成長に伴う生活水準の向上やライフスタイルの変化，さらには多様な商品開発等により，食料消費における選択が拡大し，食生活における米の地位が相対的に低下したこと ②少子高齢化，世代交代の進展，世帯構成の変化等の社会構造の変化が, 米の消費を減少させる方向に働いたこと ③食生活の洋風化，簡便化志向の強まり等食における消費者の志向も米の消費を減少させる方向に変化したこと 等が指摘されている（農林水産省 2004). そのような背景のなか，農業経営体の数は一貫して減少し，2017 年では 2016 年に比べ 6 万（4.6 %）減少して 125 万 8 千経営体となり，このうち販売農家は同 6 万 2 千（4.9 %）減少して 120 万戸，法人経営体は 1 千（4.8 %）増加の 2 万 2 千経営体となっている（農林水産省 2017a). そのため，2017 年に閣議決定された食料・農業・農村基本計画においては，農業生産額の増大や生産コストの縮減による農業所得の増大に向けた施策を推進している（農林水産省 2017b).

米をめぐる状況については，農地集積・集約の加速化及び省力栽培

技術・品種の開発・導入等により，生産コスト低減を実現するとしており，2023年までに担い手の米の生産コストを現状全国平均（16,001円/60kg）から4割低減（9,600円/60kg）し，所得を向上させることを目標として掲げている（農林水産省 2018）．

一方，農業産出額が全国第2位（2016年）の農業県である茨城県において，2016年3月に策定された「茨城農業改革大綱（2016-2020)」では，「人と産地が輝く，信頼の『いばらきブランド』」を改革の基本方向としている．そこでの目標は，安全・安心で高品質な農産物を安定的に供給する従来からの取り組みに加えて，ブランド化や6次産業化，輸出等に取り組む革新的な産地づくり，経営感覚に優れた経営体の育成等を進め，消費者が満足する価値ある農産物の提供により，信頼に応え発展する「いばらき農業」を目指すことである．茨城県の農業産出額全体のうち約16%を占める水稲栽培は，同県において重要な基幹作物である．

しかしながら米消費量の減少に伴い，兼業農家数は減少し続けており，農地は地域の担い手である専業農家に集積しつつある．全国的な統計を見ると，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（図1-2，農林水産省 2017a)，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20 ha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（図1-3，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稲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，同県における 2016 年産米の 10 a 当たりの全算入生産費は約 12 万円 9 千円で，うち約 6 割が物財費となっている（農林水産省 2017c）．物財費の内訳として，最も高い費用を占めるのは農機具費（38 %）で，次いで賃借料及び損料（14 %）となっており，肥料費（8 %）は 3 番目に高く（図 1-4)，肥料費を削減することでかなりの生産性向上が図られると考えられる．同県において，水稲の施肥は肥効調節型肥料を用いて田植え時に側状施肥とする基肥一発施肥が一般的であるが，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されやすいこと等の課題が残る．また，水稲施肥の省力化を目的として育苗箱全量施肥技術が実用化されている（金田ら 1994，日高ら 2000，鈴木ら 2010)．本技術は，シグモイタイプの溶出特性を有する緩効性被覆尿素を育苗時に全量施用し，本田の窒素施肥作業を省略する施肥技術であるが，専用の肥効調節型肥料を用いるため，前述した基肥一発施肥と同様の課題がある．さらに，施肥の省力化を目的とした技術として，流入施肥技術（「1.3 流入施肥の現状と課題」の項を参照）がある．流入施肥技術は，水田の水口から灌漑用水とともに安価な肥料を流し入れる非常にシンプルな施肥法で，古くから一部の農家や研究機関で実践・研究されてきたが，肥料の良好な拡散性が得られる施肥条件や施肥方法についてまだ不明な点が残されており，十分に実用化された技術とは言えない．近年，水田の有効活用と飼料自給率の向上を目的として飼料用米の作付面積

が全国的に拡大する中で，収量向上のための省力的かつ低コストな水稲施肥法として，流入施肥が注目されつつある．そこで，本研究では省力的な水稲の施肥技術として流入施肥に着目し，肥料の良好な拡散性が得られる基礎的な施肥条件や施肥方法について検証するとともに，食用米に適用可能な，従来よりも均一な拡散性が得られる高精度流入施肥技術の開発を目指した．

1.2 水稲用肥料の特徴と一般的な施肥方法

肥料は，正しくは農薬取締法によって普通肥料と特殊肥料に区別され，さらに公定規格による主成分によって種類が区別される（新町 2006）．実用上の分類としては，原料，副成分，化学反応，生理的反応，肥効，肥料成分の含量比等，様々な分類に分けられるが，ここでは，本研究の目的である施肥の省力化との関連が深い肥効による分類について記載する．

肥料は，肥料成分の溶出速度によって，速効性肥料，遅効性肥料，緩効性肥料に分類される（表 1-1）．速効性肥料は，施肥した際に速やかに植物体に吸収されて肥効が現れる肥料で，代表的なものとして，尿素，硫酸アンモニア，塩化アンモニア等がある．安価であること，適切な時期に回数を分けて分施することにより作物体の生育に応じた施肥が可能であること等の利点がある．一方，施肥量が多すぎると過剰害が出やすいこと，溶脱や流亡，土壌への固定等により肥料のロス

が多く肥効に乏しいこと等の欠点がある．

遅効性肥料は，有機質肥料のような C/N 比が大きい肥料等，施肥直後はほとんど肥効がなく一定期間経過後に肥効が現れる肥料で，その特徴は，肥効が持続的であるため濃度障害が起きにくいとされる反面，単独では生育初期の肥料成分が不足することや，発現は微生物や気温に左右されるため肥料の制御が難しいこと等である．

緩効性肥料は，水溶性肥料を硫黄や合成樹脂等の膜で被覆して温度によって肥料の溶出量を調節する肥効調節型肥料に代表される．施肥効率が高く，被覆資材の種類や膜の厚さを変えることで肥料の溶出量を制御できるため，作物の生育に沿った肥料設計を行うことで，生育期間を通して作物の栄養状態を良好に保つことができる．肥効調節型肥料を用いる利点としては，水温に依存する複数の溶出パターンを持つ肥料を適切に組み合わせ，水稲の生育ステージに合わせて肥料が溶出するよう施肥設計を行うことで追肥を省略できることや，田植えと同時に側状施用することで，肥料の利用効率が高く，減肥が可能となること等である．但し，速効性肥料と比べると高価であることと，肥効が温度に依存されるため気象条件に左右されやすいこと等の欠点がある．

茨城県における標準的な水稲の施肥体系は，移植日前後に行う基肥と，出穂前 20～15 日頃に行う追肥の 2 回である．基肥の目的は，作物の栄養生長期に作物体に養分を供給し，稲体を丈夫な草型に形作ることで，追肥の目的は，生殖生長期（幼穂形成期）に穂に養分を供給し

子実を充実させることである．出穂期から穂揃い期にかけて，登熟歩合や千粒重の向上を目的に実肥を行う場合もあるが，倒伏や子実中のタンパク質含有量を高める恐れがあるため，同県では一般的に推奨されていない．基肥は，施用方法の違いによりさらに分類され，代かき前にブロードキャスタ等の機械を利用して，速効性肥料を圃場の全面に散布する全層施肥と，田植えと同時に，田植機付属の施肥機等によって植え付けた苗の側条に溝を切って，肥効調節型肥料を土中に施用する側条施肥に分けられる．茨城県においては，前述したように，基肥としては肥効調節型肥料を用いた側状施肥が多く実施されており，速効性肥料は，基肥として，田植前にブロードキャスタ等で圃場全面に散布する（全面全層施肥）か，あるいは，水稲の出穂前後に追肥として背負式の動力散布機等を用い人力で散布するのが一般的である。

1.3 流入施肥技術の現状と課題

水稲の流入施肥法は，水田の水口から液体または固体の肥料を灌漑用水と一緒に流し入れる施肥方法で，別名，水運法とも呼ばれる（石居ら 1967，石居 1969）．流入施肥は主に追肥時期に実施される．安価な速効性肥料を使用して水田内に入ることなく水口から肥料を施用できるため，重い肥料と散布機を背負って圃場の中に入って施肥する従来の追肥法と比べて省力的な施肥方法である．同様に，省力的な施肥を目的として開発された肥効調節型肥料は，肥料の溶出速度が温度に

依存するため，施肥した後は必ずしも適切な時期に肥効成分が溶出するとは限らないというリスクを負うが，流入施肥は稲の生育ステージを見極めることで適切な時期での施肥が可能である．一方，流入施肥は以下に示すように多くの課題を抱えている．例えば，均一な肥料散布を行うためには田面の均平がとれていること，肥料を水田の奥まで行き渡らせるためには一定量以上の水が必要であること，漏水田では肥料成分が圃場外に流出するため，減水深が小さい圃場を選定する必要があること等である．さらに同様の理由から，流入施肥前には水田の排水口や暗渠を閉め，畦畔の穴を完全に塞ぐこと等の対策が最低限必要とされる．そのため，流入施肥は，以前から技術の確立を目指して農家や研究機関等，各地で実践・研究されており，多種多様な方法が存在する．既存の流入施肥法を分類すると，水田内に流し入れる肥料の種類（形状）として，液体肥料（以下「液肥」とする）か固体（粒状）肥料に大別される．また，肥料の灌漑水への流入場所として，灌漑水が流れる本管に直接肥料を混入する本管流入方式と末端の水口で灌漑水と肥料を混合する末端流入方式に分別され，さらに肥料の水田への流入方式として，装置または施肥法の特徴から，開放式と密閉式に分けられる（表 1-2）．

末端流入方式かつ密閉式の代表例として山崎ら（1965）及び久保田ら（1998a，1998b）の研究成果が顕著である．山崎らは，専用のマリオットサイフォン式容器を用いて液肥を毎秒一定量継続して滴下することと，流入施肥前に田面水をできる限り落水しておくことが，液肥

の均一施用を行うために重要であることを指摘している．山崎らの研究成果は，液肥を用いた流入施肥において，肥料の散布濃度変動をいかに低減させるかを主眼においた研究として一定の結論を導いたと言える．一連の研究成果は，液肥を用いた流入施肥の考え方の基本を築くともに，それに続くものとしては，より省力的かつ安価な方法の探索に向けて研究が進んでいる．課題として山崎らの方法は，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るため資材が高価であることや，施肥途中の滴下流量の微調節が困難であること等が挙げられる．

他にも密閉式の例として，近年では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）がある．本田らは，市販の 20 L 給水ポリタンクと尿素液肥を用いた流入施肥において，動力散布機を用いて同量の窒素量の施肥を行った対照区と比較して，流入施肥区で追肥作業の軽労化の効果を認めている．同法は低コストかつ取り扱いが簡易である一方，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との差が大きいことから，散布精度が高い施肥方式とは言えない．

次に，末端流入方式かつ大気開放式の例として，久津那ら（1971）が開発した装置を用いた施肥法が挙げられる．久津那らは，液肥の代わりに固体肥料をそのまま水田に散布する開放型の装置を用いて，尿素，硫安，塩化加里等数種類の肥料において肥料の落下実験を行ったところ，高い散布精度を確認している．同法は安価な固体肥料を使用

して直接水田に施用する施肥方法であるが，本田における実験結果を見ると，肥料と一緒に流し入れた灌漑水の平均流量が 75～76.5 L/s と記されており, 通常茨城県での灌漑水流量が末端で 100～120 L/min(2 L/s 程度）であることを考えると実用的な方法ではない．

他にも大気開放式の例として，近年では関矢ら（2008，2009）の研究成果が挙げられる．関矢らは，主に飼料用米用途として，既存の肥料樹脂袋やコンバイン収穫用籾袋を活用した安価で簡易な流入施肥法を開発した．開放式のため肥料の取り扱いが容易で，手元にある資材だけで容易に行えることが最大の特徴である．同法は，既存の資材を活用するため最も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恐れがあり，主に飼料用米用途として推奨される．

一方，本管流入方式の例として，新妻ら（1984）の研究報告が挙げられる．新妻らは，1975 年から 1979 年にかけて，パイプラインの多目的利用を目的としてパイプライン流路途中に施肥タンクを設け，送水ポンプにより灌漑水と一緒に複数の圃場に同時に肥料を流し入れる方式（本管流入方式）について詳細な研究を行っている．新妻らの研究の特筆すべき点として，パイプライン施設をそのまま活用して複数圃場に効率的に肥料または農薬を流し入れる試みを行っていることや，基肥から流入施肥を行い，分げつ期，穂肥と施肥のすべてにおいて流入施肥を実施していることが挙げられる．同報告では，流入施用は表層施肥となるため，全層施肥と比べて肥効が劣ることから，施肥量を増加するか分施回数を多くする必要があると指摘している．本管流入

方式の課題として，施設整備に関わる経費の問題の他，広範囲に一度に施肥を行うことから，品種・栽培法の統一等が課題とされており．現場への適応を考慮すると末端流入方式の検討が必要であると指摘している．

1.4 本研究で開発する装置の特徴とねらい

以上，述べてきた農業を取り巻く環境や水稲施肥をめぐる現状を踏まえ，本研究では高精度な流入施肥技術を確立するために，第 2 章及び第 3 章においては，目的や方式の異なる 4 種類の流入施肥装置を開発しその効果を確認するとともに，第 4 章では，開発した装置を活用した高精度な流入施肥を通して今まで明らかにされていなかった流入施肥の基礎的な条件，具体的には，①施肥後田面水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が与える影響の 3 項目について個別要因解析を行った．

表 1-3 に本研究で開発する流入施肥装置の特徴とねらいを整理した．「手動弁開度調節式流入施肥装置」（以下「装置 A」とする）は，追肥作業の省力化を目的として，安価な固形肥料を使用して液体肥料（以下「液肥」とする）を調製するとともに，そのまま水田内へ液肥を滴下できる装置の開発を目指した．「改良型手動弁開度調節式流入施肥装置」（以下「装置 B」とする）は，装置 A の改良型のため目的は装置 A と同様であるが，装置から滴下する液肥の濃度を一定に保つために撹

拌機能を付与するものとした．「電動弁開度調節式流入施肥装置」（以下「装置 C」とする）及び「アスピレータ吸引式流入施肥装置」（以下「装置 D」とする）については，装置 A または装置 B よりもさらに高精度な流入施肥を可能とするために，灌漑水の流量変動に対応して液肥の滴下流量を変化する機構を備える施肥装置の開発を目指した．液肥の滴下流量を制御する方式の違いにより，装置 C は電動弁開度調節式，装置 D はベンチュリ効果を活用したアスピレータによる吸引式とした．以上の装置を開発し，その効果を検証した結果について次章以降に述べる．

表 1-1　主な水稲肥料の種類と特徴

Table 1-1　Types and characteristics of rice fertilizers

肥料の種類	肥効速度	肥料の種類
速効性肥料	肥効の発現が早いもの.	尿素, 硫酸アンモニア, 塩化アンモニア, 過リン酸石灰等.
遅効性肥料	施肥直後はほとんど肥効がなく一定期間経過後に肥効が現れる肥料. 土壌中での分解を伴う.	有機態成分を主成分とする肥料や, 可溶性成分を主成分とする肥料（一部, ク溶性成分も含む）.
緩効性肥料	肥効が緩やかに現れ, 持続するもの；化学的・物理的な加工により肥効を調整.	IBDU, CDU, 肥効調節型肥料等.

資料：新町文絵（2006）：肥料の定義と分類, 肥料の辞典, 朝倉書店

表 1-2　流入施肥の分類

Table 1-2　Classification of inflow fertilization methods

分類		特徴
A 肥料の種類（形状）	a 液体肥料	液体肥料を使用する
	b 固体（粒状）肥料	固体（粒状）肥料を使用する
B 肥料の流入位置	a 本管流入	灌漑水が流れる本管に直接肥料を混入する
	b 末端流入	水口で灌漑水と肥料を混合する
C 肥料の密閉の有無	a 開放式	流し入れる肥料が容器等に密閉されておらず，大気に開放されている
	b 密閉式	流し入れる肥料が大気に開放されておらず，容器等に密閉されている

表 1-3　開発する流入施肥装置の特徴とねらい

Table 1-3　Characteristics and objectives of developed fertilizer application device

	装置A	装置B	装置C	装置D
装置名称	（手動弁開度調節式流入施肥装置）	（改良型手動弁開度調節式流入施肥装置）	（電動弁開度調節式流入施肥装置）	（アスピレータ吸引式流入施肥装置）
流入施肥の分類	開放／末端流入	開放／末端流入	開放／末端流入	密閉／末端流入
使用肥料	固形尿素	固形尿素	固形尿素	液体尿素（固形は，事前に溶解）
液肥滴下制御方式	手動式バルブ開度調節式	手動式バルブ開度調節式	電動式バルブ開度調節式	アスピレータ吸引式
電源（動力）	なし	DC12V自動車用鉛蓄電池	DC24Vリチウムイオン電池	なし（灌漑水）
装置の特徴	・肥料を溶解させる第1容器と、調製した液肥をフロートにより一定量貯留する第2容器の2層構造を持つ ・液肥の滴下流量は一定 ・水と混合した尿素は混合せずに自然溶解	・構造は装置Aと同一 ・肥料を事前に溶解するための撹拌装置を備えることで，液肥の濃度は一定	・構造は装置Aと同一 ・灌漑水を流量計で直接計測し，流量の変動比率に対応して液肥の滴下流量を自動制御	・電源を使用せずに液肥の滴下（吸引）が可能 ・灌漑水の流量変動に対応して，液肥の吸入量が変化 ・市販品の組み合わせて自作が可能
装置開発のねらい	・追肥を想定 ・安価で高精度	・追肥を想定 ・比較的安価で高精度	・追肥のほか，基肥からの全量流入施肥も想定 ・最も高精度	・追肥のほか，基肥からの全量流入施肥も想定 ・最も安価
製造コスト（製造原価）	6万円～	8万円～ （バッテリーは別途）	12万円～ （流量計，制御盤及びバッテリーは別途）	5千円～ （肥料を溶解させる容器と撹拌器具は別途）

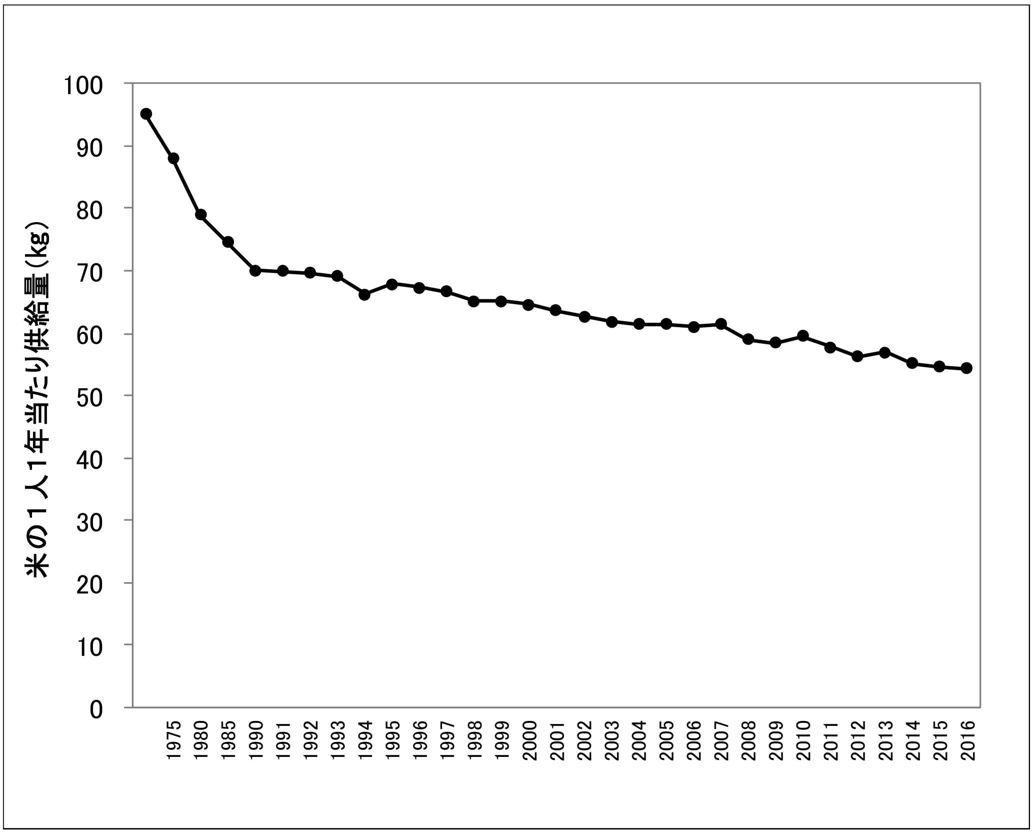


図 1-1　日本における米の年間消費量の推移

Fig. 1-1　Trends in rice consumption in Japan

資料：農林水産省（2017）平成 29 年度食料・農業・農村白書

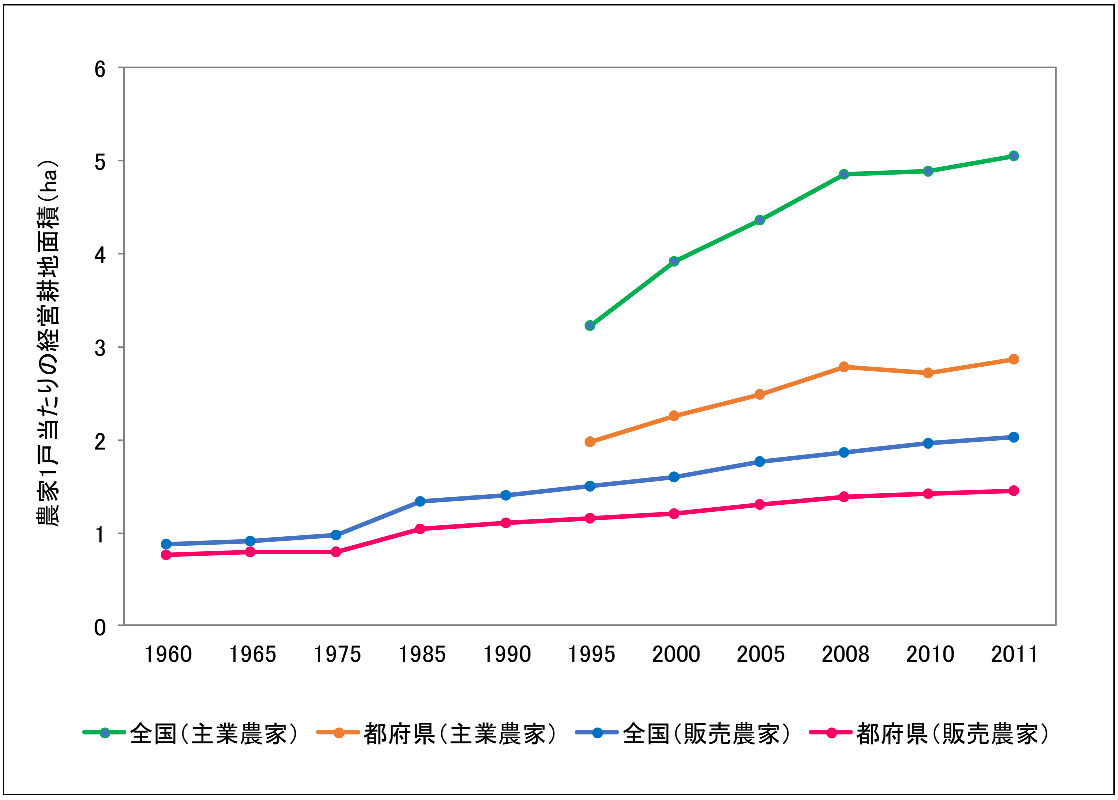


図 1-2　農家 1 戸当たりの経営耕地面積の推移

Fig. 1-2　Growth of cultivated land area under management per farm household

資料：農林水産省（2017）平成 29 年度食料・農業・農村白書

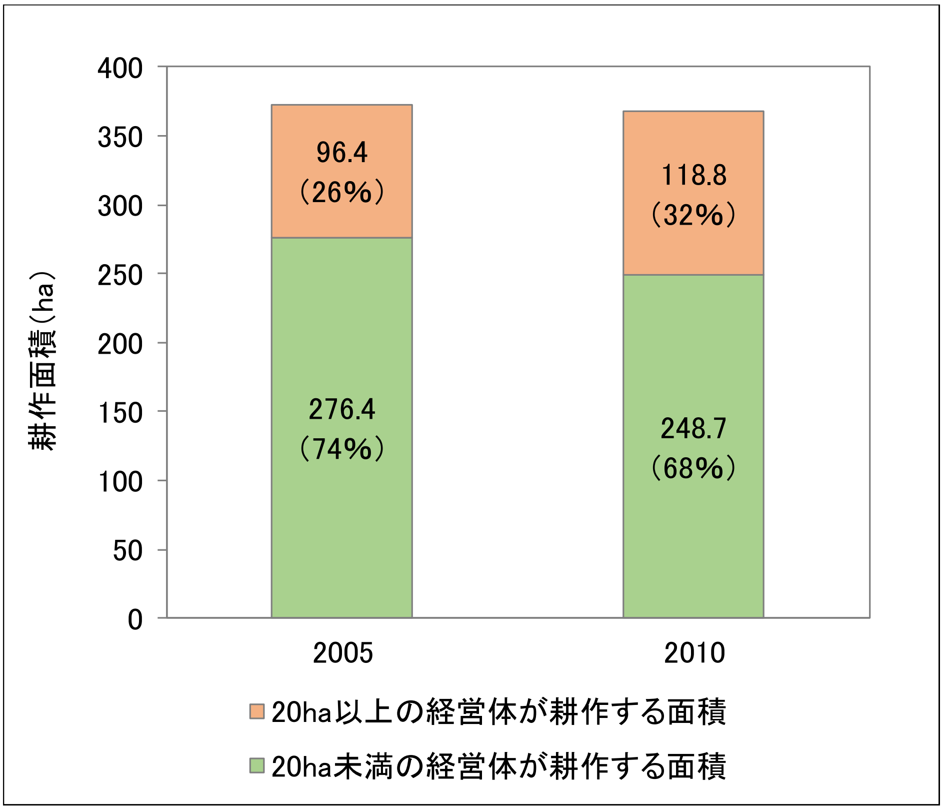


図 1-3　土地利用型農業における 20 ha 以上の農業経営体が耕作する面積の割合

Fig. 1-3　Ratio of area cultivated by agricultural management entities of 20 ha or more regarding land-use-type agriculture

資料：農林水産省（2010）世界農林業センサス報告書

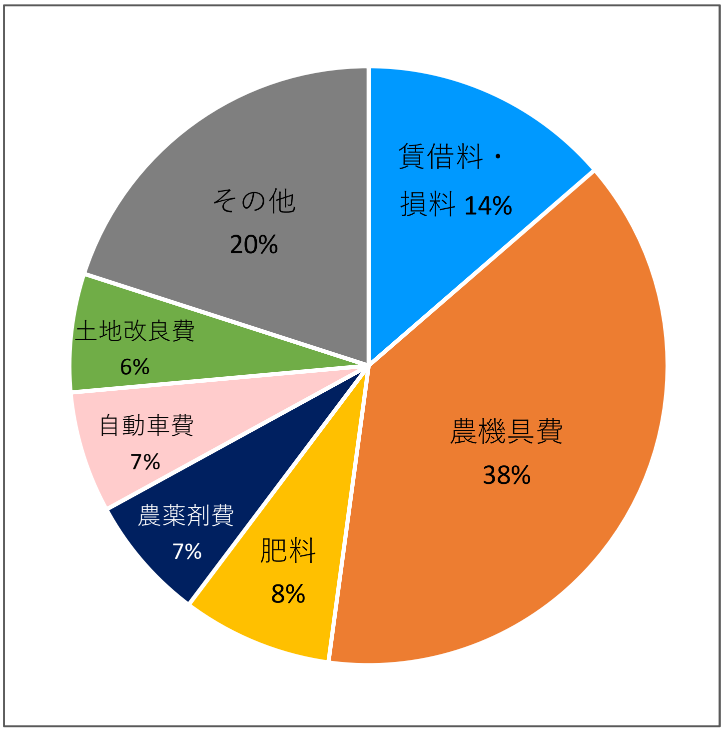


図 1-4　茨城県における米生産費にかかる物財費の内訳

Fig. 1-4　Breakdown of Material cost related to rice production in Ibaraki prefecture

資料：農林水産省（2017）農業経営統計調査平成 28 年産米生産費

第 2 章 圃場で液肥が調製できる水稲用流入施肥装置

2.1 目的

前章「1.3 流入施肥技術の現状と課題」で示したように，これまでに先行研究として様々な流入施肥法が開発されている．流入施肥においては，最大の特徴である省力性を確保するとともに，いかに均一な肥料散布を可能とするかが重要な課題である．山崎ら（1965）の研究は，肥料拡散性に着目した点において，流入施肥の礎を築く非常に重要な成果であるが，専用の液肥を使用することが前提とされており，施肥対象圃場が複数存在する場合は，重い液肥を各圃場まで運ばなくてはならず省力性の観点に欠ける．関矢ら（2008，2009）の研究成果は，安価な固体肥料を使用する点において最も省力的な流入施肥法であると考えられるが肥料拡散性に乏しい．そこで，本研究では，省力性と良好な肥料拡散性の両方を満たす流入施肥法の開発を目的として，安価な固体肥料を使用することで低コスト化と省力性を確保しつつ，食用米にも活用できる良好な肥料拡散性が得られる新しい流入施肥装置を開発し，その効果の確認を行った．

2.2 方法

2.2.1 手動弁開度調節式流入施肥装置（装置 A）の概要

装置Aの外観と仕様を図2-1に示す．装置は，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農家に普及している軽トラックの荷台に搭載可能な大きさであること等の特徴を有するように開発した．

装置は，肥料と水を投入し液肥を調製する第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手動で調節することで，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定できる．さらに，大きさは，幅75 cm×奥行75 cm×高さ110 cm，質量24 kgで，軽トラックの荷台に搭載して運搬が可能であり，1名で設置が可能である．

2.2.2 装置 A を用いた基礎実験方法

装置 A 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 30 a（以下「所内圃場」とする）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，施肥窒素量として約 3 kg/10a となるように尿素（N=46 %）20 kg(窒素成分量として 9.2 kg)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撹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/s に設定したのちは微調節をせず，経時的に吐出量を測定した．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，試験区，慣行区ともに，2014 年に茨城県で品種登録された食用品種「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（$N:P_2O_5:K_2O$ =14:14:14）を用い，窒素量換算で 5 kg/10a となるように，移植と同時に側条施肥を行った．追肥は，背負式動力散布機を用いて硫安を施用した慣行区に対し，装置 A による尿素の流入施肥区を設けた．追肥の窒素量は，試験区，慣行区ともに 3 kg/10a とした．両区ともに落水処理は行わず．湛水状態で施肥を行った．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，圃場を複数のブロックに分け，各ブロックにつき1.8 m×1.8 m区画を坪刈りし，籾摺り脱穀後，1.85 mmのグレーダ調製後の精玄米重を算出した．玄米タンパク質含有率は，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．

2.2.3 改良型手動弁開度調節式流入施肥装置（装置B）の概要

装置Aをベースに新たに開発した装置Bの模式図（外観）と仕様を図2-2に示す．装置Bは，装置Aで採用した2層構造を保持し，装置の形状，液肥の水田への滴下方式及び肥料の溶解方法等を改良した．具体的な改良点を以下に記す．まず，第1容器の形状を装置Aで採用した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枡に誘導する滴下方式として装置A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，装置Bでは，軟質塩化ビニル樹脂製チューブの代わりに硬質塩化ビニル管を用いる方式（硬質塩化ビニル管方式）へ変更した．さらに，装置Aにおける肥料の溶解方法は，施肥前に攪

拌しない自然溶解としたため，流入施肥中に溶液濃度の不均一が見られたが，装置Bでは流入施肥中の溶液濃度を常に一定に保つため，第1容器上部にモーター式の着脱可能な撹拌装置を装着し，流入施肥前に肥料を迅速に溶解させた．撹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．

2.2.4 装置Bを用いた基礎実験方法

装置B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．施肥窒素量として約3 kg/10aとなるように尿素（N=46 %）11.7 kg(窒素成分量として5.4 kg)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撹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/sに設定したのちは微調節をせずに実験を行った．水稲栽培は,「一番星」を栽植密度15.2 株/m^2に設定して機械移植し，基肥として化成肥料（$N:P_2O_5:K_2O$=14:14:14）で窒素量5 kg/10a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安追肥を実施した慣行区に対し，装置Bによる尿素の流入施肥区を設けた．流入施肥区は実験前日に圃場の排水口を開放し，田面水の落水処理を行った．追肥の窒素施用量はどちらも3 kg/10a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,「2.2.2 装置Aを用いた基礎実験方法」と同様に実施した.

2.2.5 装置A及び装置Bを用いた実証実験方法

茨城県龍ケ崎市の（有）横田農場（以下「Y農場」とする）の圃場において,装置A及び装置Bを使用して営農圃場の水口(パイプライン)から注入する方式で流入施肥の実証実験を行った．本実験は，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.開発機による尿素の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農場の作業者により流入施肥と同日に実施した.

装置Aは，Y農場において「一番星」,「コシヒカリ」,「あきだわら」の作付圃場で実験を行った.「コシヒカリ」及び「あきだわら」の流入施肥区は，実験前日に落水処理を行い，落水条件下で流入施肥を行った．一方,「一番星」の実験では，前日に落水処理を実施しなかったため，湛水条件下で流入施肥を実施した．水稲の葉色，田面水窒素濃度及び収量調査整粒歩合及び玄米タンパク質含有率は「2.2.2 装置Aを用いた基礎実験方法」と同様に調査した．田面水窒素濃度は，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.

装置Bは，Y農場において「一番星」,「コシヒカリ」,「ゆめひたち」

の作付圃場で施肥実験を行った．すべての流入施肥区は，実験前日に落水処理を行い落水条件下で流入施肥を行った．施肥当日は,「一番星」の実験は 87 a の大区画圃場で実施したため，圃場内計 3 箇所の水口に装置を各 1 個ずつ設置して 3 台で同時に流入施肥を行い，「コシヒカリ」及び「ゆめひたち」は 15～30 a 程度の標準区画圃場で実施したため，水口 1 箇所に 1 個の装置を設置して，1 台で流入施肥を行った．「一番星」及び「コシヒカリ」の実験では，慣行区として装置 A の実験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装置 B で流入施肥を行った「一番星」の実験時に調査を行い，流入施肥区の作業時間は水口 3 箇所における，装置設置時間等の準備，資材投入，流量調節及び撤去時間を含む合計とした.慣行区の作業時間は,準備，資材投入及び圃場作業の合計とし，準備は現地慣行で行われている施肥範囲の目印のための棒立てにかかる作業時間とした．水稲の葉色，田面水窒素濃度及び収量調査及び整粒歩合は「2.2.2 装置 A を用いた基礎実験方法」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．

2.3 結果

2.3.1 装置 A を用いた基礎実験結果

表 2-1 に，装置 A 及び装置 B を供試して実施した流入施肥実験の概

要を示す．装置 A を供試して所内圃場にて行った流入施肥実験では，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 4.4 mL/s となり．本装置を用いた流入施肥において，液肥を少量ずつ長時間かけて継続的に水田内に流し入れることが可能となった．

図 2-3 に装置 A から流出する液肥の尿素態窒素濃度及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完全に溶けた状態となり，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撹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．また，施肥開始約 250 分後に液肥の尿素態窒素濃度が上昇した要因は，施肥完了直前に第 1 容器内に溶け残っていた尿素を手で完全に溶かしたためである．

2.3.2 装置 B を用いた基礎実験結果

装置 B を供試して所内圃場で実施した流入施肥実験では，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/s であった（表 2-1）．装置 A と同様に，液肥を少量ずつ長時間かけて水田に流し入れることが可能となった．

図 2-4 に，装置 B から流出する液肥の尿素態窒素濃度及び滴下流量の推移を示す．装置 B の液肥濃度は，撹拌無しとした装置 A と比較すると，流入施肥開始直後から一定の値となり，より安定的な値の推移を示した．これは，第 1 容器に尿素と水を投入後，流入施肥前に開発した装置に付属する撹拌装置ですぐに撹拌したためであると推測された．尿素は溶解度が高いため，水と混合するだけでも直ちに溶け始めるが，撹拌することでさらに溶解速度が速くなり，より均一な肥料溶液が調製されたことで．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，装置 A 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 2-2 に，装置 A または装置 B を使用した流入施肥による水稲の葉色及び流入施肥直後の田面水中の尿素態窒素濃度を示す．装置 B を使用した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，装置 A を用いた際の実験結果と比較して，装置 B を用いた流入施肥実験では，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，装置 B から流出する液肥の尿素態窒素の濃度が装置 A より一定であったことに加え，施肥前日に落水処理を行い，施肥開始時の平均水深が 1 cm の浅水状態で施肥したことに起因したと考えられる（表 2-1）．

次に，表 2-3 に装置 A または装置 B を使用した流入施肥による水稲

の収量及び玄米品質結果を示す．装置Bの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が， 整粒歩合は流入施肥区でやや高まる傾向が見られ，玄米品質の向上につながった．玄米品質については多数の要因が相互に関連するため，断定はできないが，慣行区は硫安，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．

2.3.3 装置A及び装置Bを用いた実証実験結果

表2-1に，Y農場で実証した流入施肥の実験概要を示す．装置Aによる流入施肥実験では，実験に供試した圃場面積は10～32 a，流入時間は，圃場面積の違いや施肥量によって120～350分と異なった．流入施肥開始時の田面水は「一番星」の実験のみ湛水条件下で流入施肥を行った結果，施肥当日の圃場内の平均水深は3.4 cmとなり，その他の実験では，実験前日に田面水を排水した結果，平均水深は0.2～0.6 cmで田面にほぼ水がない落水条件となった.液肥の平均滴下流量は2.9～3.9 mL/s となり，設定した液肥滴下流量と実測値とが概ね一致した．

装置Bによる流入施肥実験では，実証した圃場面積は15～87 a，流入時間は260～340分で，装置Aと同様に圃場面積や施肥量の違いによって異なった．すべての実験で前日に田面水を排水した結果，当日の圃場内の平均水深は0.0～0.3 cmとなり，田面にほぼ水がない落水条件となった．また，液肥の平均滴下流量は2.6～3.4 mL/sで，装置Aと同様に，設定した液肥滴下流量と実測値とが概ね一致した．

表 2-4，表 2-5 に装置 A 及び装置 B の現地実証実験結果を示す．

装置 A による流入施肥実験では，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」の実験では 106 %，「コシヒカリ」の実験では 62.3 %，「あきだわら」の実験では 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 2-4）．これは装置 A 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，「一番星」の実験では，流入施肥前の田面水深が約 3cm の湛水状態であったこと，さらに，「あきだわら」の実験では，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．

装置 A を用いて施肥を行った水稲の葉色は，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 2-4）．また，水稲収穫後の坪刈収量，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 2-5）．

装置 B による流入施肥実験では，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」の実験では 37.5 %，「コシヒカリ」の実験では 48.0 %，「ゆめひたち」の実験では 45.6 %となり，装置 A を用いた流入施肥実験と比較すると，装置 B を用いた流入施肥実験では，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（SPAD 値）は，例えば「一番星」の実験では流入施肥区 33.3，慣行区 33.5 となるなど，両試験区で同程度であった（表 2-4）．

水稲収穫後の坪刈収量，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」の実験では流入施肥区と慣行区で同程度であった（表 2-5).

一方，装置 B 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，流入施肥した圃場で，施肥直後の田面水中尿素態窒素濃度の変動係数は 37.5～48.0 %であった. 土田ら（2005）の報告によると，新潟県内の約 60 a 区画の圃場における実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は 43.9 %であったと報告されている. このことから，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，背負式動力散布機による慣行施肥と同程度であり，慣行施肥と比べて遜色のない肥料散布精度が確保されたと推測される.

また，装置 A と装置 B の比較では，液肥調製の際に肥料と水を撹拌しなかった際と事前に撹拌を行った場合において，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，本実験で用いた尿素のように溶解度の高い肥料では，水の投入直後から容易に溶け始めるため，液肥調製時における肥料と水の撹拌の効果は少ないが，尿素以外の硫安等を用いる場合は，事前に撹拌を省略すると流入施肥終了時までに肥料が溶け残る懸念があることから，肥料と水の撹拌は必要であると考えられる.

表 2-6 に装置 B を使用した流入施肥にかかる作業時間を示す. 現地慣行の背負式動力散布機による追肥作業が 10 a あたり約 10 分を要し

ていたのに対し，流入施肥では 10 a 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．流入施肥区は 87 a の大区画圃場であったため，圃場内 3 箇所の水口に 3 台の流入施肥装置を設置したことにより，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する必要がある．

2.4 考察

慣行で行われている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（日本硫安工業協 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．装置 A（手動弁開度調節式流入施肥装置）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．装置 B（改良型手動弁開度調節式流入施肥装置）は，装置 A 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撹拌装置の付与を行った．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．なお，装置 A と装置 B との比較においては，装置 A は動力が必要な撹拌装置を省略した仕様であり製造コストも安価であるが，現場における使用場面を想定すると，装置 A を使用する場合であっても事前に肥料と水を手で撹拌する必要があるものと考えられる．

装置 B を使用し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，装置 B 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．

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，灌漑水流量の変化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．

表 2-1　装置 A（手動弁開度調節式流入施肥装置）または装置 B（改良型手動弁開度調節式流入施肥装置）を使用した流入施肥実験の概要（所内実験・現地実験）

Table 2-1　Outline of inflow fertilization experiment using Device A (manual valve opening type) or Device B (improved manual valve opening type) (in-house experiment /field test)

流入施肥機	装置A				装置B			
試験場所	所内	Y農場			所内	Y農場		
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
設定滴下流量(mL/s)	4.0	4.0	3.0	3.5	3.5	3.0	3.5	3.0
平均滴下流量(mL/s)	4.4	3.9	2.9	3.5	3.5	2.9	3.4	2.6
流入施肥時間(min)	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）所内は茨城県農業総合センター農業研究所内圃場（茨城県水戸市），Y農場は現地圃場（茨城県龍ケ崎市）とした.

表 2-2　装置 A（手動弁開度調節式流入施肥装置）または装置 B（改良型手動弁開度調節式流入施肥装置）を使用した流入施肥実験の水稲葉色及び田面水尿素態窒素濃度（所内実験）

Table 2-2　Rice leaf color and water urea nitrogen concentration in paddy field for inflow fertilization experiments using Device A (manual valve opening type) or Device B (improved manual valve opening type) (in-house experiment)

流入施肥機	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（%）
装置A	流入施肥区	30	15	6/17	33.8	4.8	6/26	31.0	9.2	5.9	44.9	101.9
装置B	流入施肥区	18	10	6/19	33.1	3.4	6/29	29.5	5.1	6.9	53.9	31.5
－	慣行区	18	10		30.8	4.3		28.7	7.7	－	－	－
					**	－		ns	－	－	－	－

注1）茨城県農業総合センター農業研究所内圃場（茨城県水戸市）における実験結果．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，慣行区は硫安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検定により検証した．nsは有意差無し，**は1%水準で有意差あり．

表 2-3　装置 A（手動弁開度調節式流入施肥装置）または装置 B（改良型手動弁開度調節式流入施肥装置）を使用した流入施肥実験の水稲収量及び玄米品質（所内実験）

Table 2-3　Rice yield and brown rice quality in inflow fertilization experiments using Device A (manual valve opening type) or Device B (improved manual valve opening type) (in-house experiment)

流入施肥機	試験区	試験面積(a)	調査区数(n)	収量(kg/10 a)		玄米タンパク質含有率(%)		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(%)
装置A	流入施肥区	30	15	577	11.9	6.0	1.7	89.6	2.3
装置B	流入施肥区	18	10	613	8.0	6.3	2.4	85.0	1.5
―	慣行区	18	10	595	6.4	6.3	2.3	82.6	3.3
				ns	―	ns	―	*	―

注1）茨城県農業総合センター農業研究所内圃場（水戸市）における実験結果．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，慣行区は硫安を背負式動力散布機で追肥した．
3）統計処理は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．

表 2-4　装置 A（手動弁開度調節式流入施肥装置）または装置 B（改良型手動弁開度調節式流入施肥装置）を使用した流入施肥実験の水稲葉色及び田面水尿素態窒素濃度（現地実験）

Table 2-4　Leaf color of rice plants and urea nitrogen concentration in paddy field for inflow fertilization experiment using Device A (manual valve opening type) or Device B (improved manual valve opening type) (field test)

流入施肥機	品種	試験区	試験面積 (a)	調査区数 (n)	葉色 施肥前 調査日（月・日）	葉色 施肥前 SPAD値（平均値）	葉色 施肥前 変動係数（%）	葉色 施肥後 調査日（月・日）	葉色 施肥後 SPAD値（平均値）	葉色 施肥後 変動係数（%）	田面水中の尿素態窒素濃度 平均水深（cm）	田面水中の尿素態窒素濃度 窒素濃度（mg/L）	田面水中の尿素態窒素濃度 変動係数（%）
装置A	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	—	—	—
						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	—	—	—
						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	—	—	—
						ns	—		ns	—	—	—	—
装置B	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	37.5
	一番星	慣行区	94	20		26.6	6.0		33.5	6.9	—	—	—
						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	—	—	—
						**	—		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（茨城県龍ケ崎市）の現地圃場における実験結果.
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) 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.

表 2-5　装置 A（手動弁開度調節式流入施肥装置）または装置 B（改良型手動弁開度調節式流入施肥装置）を使用した流入施肥実験の水稲収量及び玄米品質（現地実験）

Table 2-5　Rice yield and brown rice quality in inflow fertilization experiments using Device A (manual valve opening type) or Device B (improved manual opening type) (field test)

流入施肥機	品種	試験区	試験面積(a)	調査区数(n)	収量(kg/10 a)		玄米タンパク質含有率(%)		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(%)
装置A	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
					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
					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
					ns	―	ns	―	ns	―
装置B	一番星	流入施肥区	87	20	494	10.9	7.6	4.0	62.9	5.0
	一番星	慣行区	94	20	448	12.1	7.3	3.7	60.1	10.5
					*	―	**	―	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
					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(茨城県龍ケ崎市)の現地圃場における実験結果.
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) 装置B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 2-6　装置 B（改良型手動弁開度調節式流入施肥装置）を使用した流入施肥にかかる作業時間

Table 2-6　Working time related to inflow fertilization experiments using Device B (improved manual opening type)

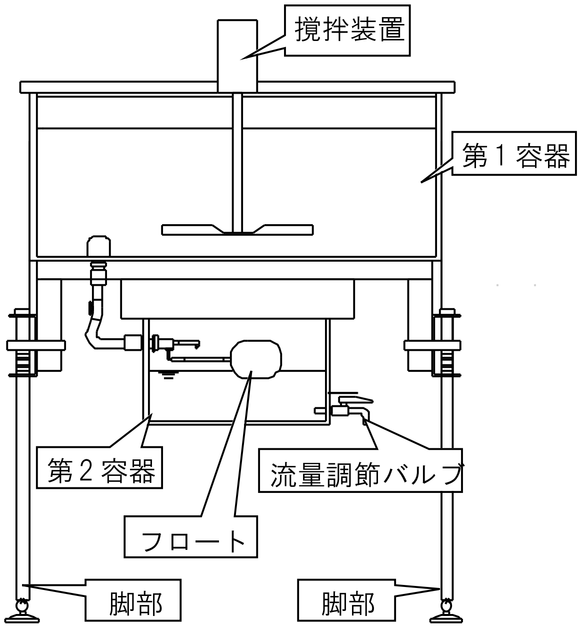
試験区(施肥法)		慣行	流入施肥
使用機器		背負式動力散布機	装置B
使用資材		硫安(N 21 %)	尿素(N 46 %)
圃場面積(a)		94	87
施肥装置の設置台数(台)		-	3
施肥窒素量(kg/10a)		3	3
作業時間	準備	0.5	2.2
(min/10a換算)	資材投入	1.9	0.7
	流量調整	-	0.3
	圃場作業	7.7	―
	撤去	―	0.6
	合計	10.1	3.8

注1）作業は両試験区とも，それぞれ1名で実施した．
　2）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．

流入施肥装置主要諸元（装置A）				
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	
		第2容器	4.5 L	
5	形状		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		2～7 mL/s	
9	その他		傾斜設置対応型	

図 2-1　開発した流入施肥装置（装置 A：手動弁開度調節式流入施肥装置）

Fig. 2-1　Developed fertilizer application device (Device A: manual valve opening type)



流入施肥装置主要諸元（装置B）					
1	適用肥料		尿素・硫安		
2	機体寸法		幅75 cm	奥行75 cm	高さ110 cm
3	主な材質		第1容器：ポリプロピレン		
			第2容器：ポリプロピレン		
			架台・脚部：鉄鋼		
4	最大容量	第1容器	80 L		
		第2容器	4.5 L		
5	形状		角型		
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 （硬質塩化ビニル管付属）		
8	液肥滴下流量範囲		2～7 mlLs		
9	その他		傾斜設置対応型		
			撹拌装置（DC12 V）付属		

図 2-2　開発した流入施肥装置（装置 B：改良型手動弁開度調節式流入施肥装置）

Fig. 2-2　Schematic of the developed fertilizer application device (Device B: improved manual valve opening type)

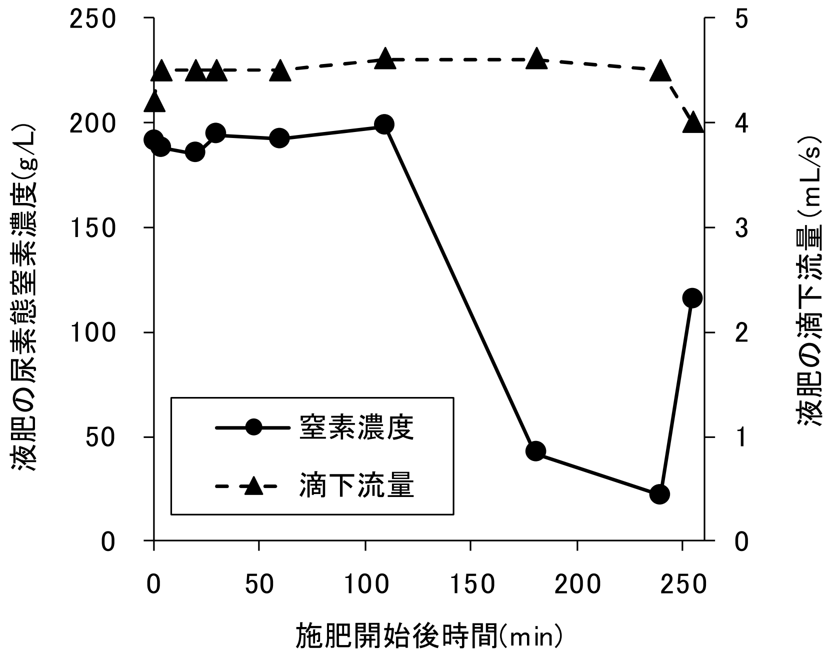


図 2-3　流入施肥装置から流出する液肥中の尿素態窒素濃度及び滴下流量の推移（装置 A：手動弁開度調節式流入施肥装置）

Fig. 2-3　Changes in urea nitrogen concentration and drip flow rate in liquid fertilizer flowing out of the developed fertilizer application device (Device A: manual valve opening type)

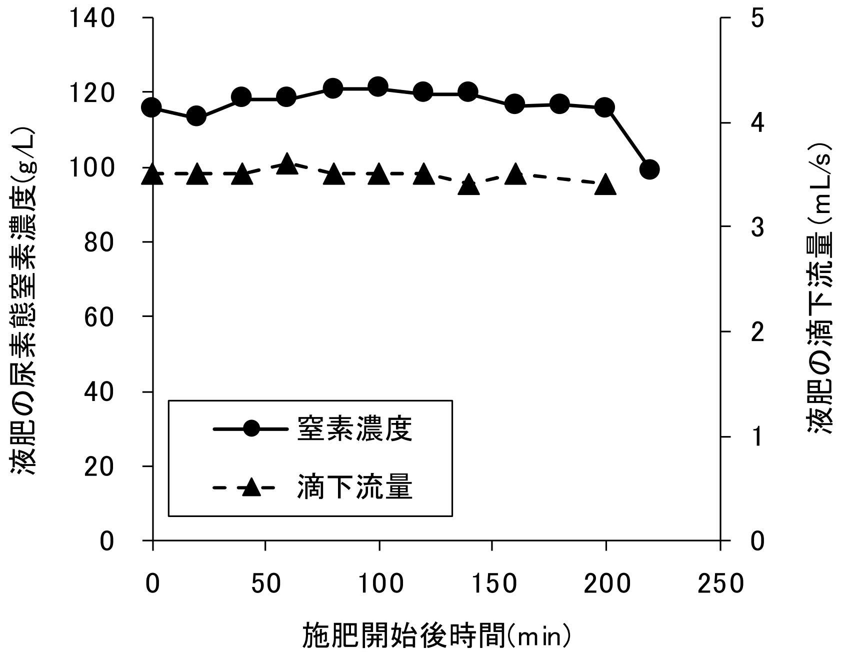


図 2-4　流入施肥装置から流出する液肥中の尿素態窒素濃度及び滴下流量の推移（装置 B：改良型手動弁開度調節式流入施肥装置）

Fig. 2-4　Changes in urea nitrogen concentration and drip flow rate in liquid fertilizer flowing out of the developed fertilizer application device (Device B: improved manual valve opening type)

第 3 章 灌漑水流量変動に対応した水稲用流入施肥装置

3.1 目的

第 2 章では，水口から流出する日中の灌漑水流量がほぼ一定であることを前提とした条件下において，流入施肥中の液肥の滴下流量変動を可能な限り一定にすることで肥料の拡散性を向上させることを主眼に置いて開発を行った．しかし，パイプライン水系では，時期によって圃場における日中の水需要が大きく変動することが知られており（三沢 1987，中村ら 1997），灌漑用水の取水量の増減に伴い，水口から流出する灌漑水流量は少なからず変動する．特に，代かき等で水需要が増える春先や，中干し直後等，流入施肥途中の灌漑水流量変動が大きい場合は，均一な施肥を行うために液肥の滴下流量と灌漑水の通水量の比率を常に一定に保ながら液肥を水田内に流し入れる必要があると考えられる．また前章では，一般的な追肥時期として出穂前の幼穂形成期における追肥として実施した実験であったが，基肥からの全量流入施肥により肥料コストの削減を目指す研究を進める必要がある．全量流入施肥では，追肥 1 回のみの流入施肥と比べると流入施肥で行う施肥量が多くなることから，1 回あたりの施肥ムラが累積され，最終的な稲の生育・収量に及ぼす影響が大きくなることが予想される．そのため，全量流入施肥を行う際には，追肥のみの時以上に施肥ムラに留意する必要がある．しかし，基肥からの全量流入施肥を目的とし

た研究成果はそれほど多くはない．例えば，第 1 章の「1.3 流入施肥方法（先行研究)」でも示したように，パイプラインの多目的利用に関する一連の研究（新妻ら 1984）の中で基肥からの流入施肥を検討しており，西川ら（1995）も 1987 年～1990 年にかけて基肥一発施肥体系の流入施肥実験を実施しているが，その後に続く研究例は少ない．そこで，将来的に全量流入施肥技術の確立を目指すため，より散布精度の高い流入施肥を目指して，灌漑水の流量変動に対応して液肥の滴下流量を変動させる新たな流入施肥装置（2 方式）の開発を試みた．まず, 第 2 章で開発した改良型手動弁開度調節式流入施肥装置（装置 B）に付属する流量調節バルブの代わりに新たに電動弁を付与し，別途設けた流量計により灌漑水流量を常時モニタリングしつつ，液肥の滴下流量と灌漑水流量の比率を常時一定となるように電動弁開度を制御する「電動弁開度調節式流入施肥装置」（以下「装置 C」とする）を開発した. さらに, それまで開発してきた開放式流入施肥装置とは異なり，パイプラインの水口に装置を直結する密閉方式を採用し，主に施設園芸の養液土耕栽培等で使用されるベンチュリ効果を活用した液肥混入器（アスピレータ）の例（加藤ら 2003，西山ら 2008）を参考として，塩ビ管等の安価な市販品を組み合わせて製作した「アスピレータ吸引式流入施肥装置」（以下「装置 D」とする）を開発した.

3.2 方法

3.2.1 電動弁開度調節式流入施肥装置（装置 C）の概要

本研究で開発した装置 C の外観を図 3-1 に，主要諸元を表 3-1 に示す．装置 C は，前章で示した液肥滴下流量を一定にできる装置 B（改良型手動弁開度調節式流入施肥装置）をベースに改良を行い．主として，装置 B，電動弁（日本バルブコントロールズ（株），E 型），灌漑水流量計測用流量計（積水化学工業（株），type8030），PLC（Programmable Logic Controller，三菱電機（株），FX3G CPU），タッチパネル式制御盤（（株）前川製作所），DC24V リチウム式充電池（（株）日泉，24VC100T2 型）で構成した．装置本体は，装置 B に付属する手動式の流量調節バルブの代わりに電動弁を付与，液肥の滴下量は電動弁のバルブ開度で制御する方式とした．また，灌漑水の流量を計測する流量計は硬質塩化ビニル（以下「塩ビ」とする）製のユニオン継手を介して，呼び径 30mm，外径 38 mm の塩ビ製直管（以下「VP30」とする）から構成されるパイプライン本管に直接着脱可能とした．液肥流量の制御プログラムは，流入施肥開始時に流量計で測定した灌漑水流量と，施肥装置から流出する液肥の滴下流量の比が常に一定となるように，灌漑水の流量変化に対応して電磁弁開度を自動的に変化させるように開発し，制御盤内部に設置した PLC（別名：シーケンサ）にプログラムを組み込んだ．制御盤は，流量計と流入施肥装置（装置 C）の電動弁にそれぞれケーブルで接続した．

装置 C の液肥流量制御プログラムは，MELSOFT GX Works2 ver.1.545T 及び GT デザイナー3 ver.1.151H で作成した．プログラムの制御フロー図を図 3-2 に示す．制御盤に付属する液晶画面はタッチパネル式とし，事前に初期設定値の入力を行う．初期設定及び運転の手順については以下の通りである．①初期設定画面 1（図 3-3）で，流入施肥開始前に電動弁開度と液肥の滴下流量との関係においてキャリブレーションを行う．手動で 1～5％刻みで電動弁開度を制御し，それぞれの開度で液肥滴下流量を実測し，順番に本画面に入力する．②初期設定画面 2（図 3-4）で，灌漑水流量と液肥滴下流量の入力画面で，流入施肥開始後，本設定画面で入力した灌漑水流量と液肥滴下流量の比率を保つように電動弁開度の制御を行う．電源投入と同時に灌漑水流量の計測が開始され，値が画面上で確認できるため，灌漑水流量の初期設定値は流入施肥開始時に計測された値を手動で入力する．③初期設定画面 3（図 3-5）で，自動・停止・手動の各運転モードを設定する．自動運転モードにすることで，灌漑水流量の計測値から②の比率となるように液肥の滴下流量が計算され，①で設定した電動弁開度を決定し，流入施肥を開始する．④灌漑水流量が変動すると，その都度液肥の滴下流量が計算され，①の設定値に従い電動弁開度が変化する．

3.2.2 装置 C を用いた基礎実験方法

図 3-6 に装置 C を用いた基礎実験の模式図を示す．実験の実施にあたり，FRP 製実験用プール（短辺 1 m×長辺 3 m×高さ 0.25 m）と塩

ビ管（VP30）及び流量調節バルブ（呼び径 1・1/4 ゲートバルブ），300 L 容器，水中ポンプ（最大吐出量 100 L/min）等により室内実験用の簡易なパイプラインを製作した．また，パイプライン通水量を測定するため，パイプラインの管路途中に流量計を設置した．パイプライン水口付近に設置した装置 C の電動弁より流出した液肥は，軟質塩化ビニル製チューブを介してプール内に流し入れ，上部直径 12 cm，下部直径 8 cm，高さ 10 cm の植木鉢内で，パイプライン末端の水口から流出した水と混合させながら肥料の流入施肥を行った．肥料の拡散性は，流入施肥終了直後に実験用プール内に設置した導電率計（マルチ水質測定器）でプール内の水を直接測定し，プール内 8 箇所の変動係数で評価した．

装置 C を用いた流入施肥の基礎実験条件を表 3-2 に示す．実験は，すべての試験区で施肥時間の合計を一定（24 分）とし，液肥滴下流量とパイプライン通水量は，すべての実験で同一となるように，施肥時間合計の平均値である液肥滴下流量 5 mL/s，灌漑水流量 0.2 L/s とした．パイプライン通水量を 2 段階に変化させた実験 1～5 については，流入施肥開始 12 分後，3 段階に変化させた実験 6 及び 7 については流入施肥開始 8 分後と 16 分後にパイプライン管路のゲートバルブを手動で開閉してパイプライン通水量を増加または減少させた．液肥流量制御有の試験区は，パイプライン通水量変化の割合に応じて，開発した液肥流量制御プログラムによって液肥流量の自動制御を行った．なお，流入施肥開始時のプール内の水深はすべて 0 cm とした．

3.2.3 アスピレータ吸引式流入施肥装置（装置 D）の概要

装置 D は，水田のパイプライン末端の水口へ連結し，ベンチュリ効果を活用したアスピレータで液肥を吸い上げ，パイプ内で灌漑水に直接混入する方式とした．装置は，液肥を吸入するための塩ビ製アスピレータ（図 3-7）と，水田における使用場面を想定し，多量の灌漑水のうち一部をアスピレータへ分流させる塩ビ製分岐管（図 3-8）から構成される．アスピレータは，2 個の塩ビ製異径継手（呼び径 25 mm×13 mm）の間に，縮小管として呼び径 13 mm，外径 24 mm の塩ビ製チーズ継手（以下「T13」とする），または呼び径 13 mm，外径 18 mm の塩ビ製直管パイプ（以下「VP13」とする）を連結し，縮小管内部のベンチュリ効果によって液肥を吸入する機構とした．用いた縮小管は，実験 1 及び実験 2 では, 呼び径 13 mm の塩ビ製 TS 継手(以下「TS13」とする)，実験 3 では，VP13 を使用した．アスピレータの縮小管部分には，吸入管としてアクリルパイプまたはシリコンチューブを装着した．吸入量の調整は，吸入管としてシリコンチューブを用いた場合のみシリコンチューブ途中にローラークランプを装着し，吸入管内径を変化させることで調節した（図 3-9)．資材の大半は市販されている部品を用いるため，容易に入手できる．

3.2.4 装置 D を用いた基礎実験方法

ベンチュリ効果を活用した装置 D の開発では，実験 1 から実験 4 の

基礎的な実験を実施した．各実験の方法について以下に示す．

実験 1　吸入管の内径の違いが液肥吸入量に及ぼす影響

アスピレータのみをパイプラインの水口に接続し，40～60 L/min のパイプライン低通水量条件下において，吸入管の内径の違いが液肥（実験では液肥の代用として水を使用したが，ここでは以下「液肥」とする）の吸入量に与える影響を調査した．吸入量は，液肥を一定時間吸水させたのち，吸入前と吸入後の重量差を求め，単位時間当たりの吸入量（g/s）を算出した．吸入管は，すべて長さを 30 cm とし，内径 4 mm，7 mm，11 mm の 3 種類のアクリルパイプを使用した（図 3-10）．縮小管は，T13 を使用し，吸入管は，穴を開けたゴム栓に 30 cm のアクリルパイプを挿入し，T13 に装着した．通水量は，アスピレータ側の水口より流出した水を一定時間容器で回収後，重量から換算した．使用したパイプラインは，「3.2.2 装置 C の基礎実験方法」で示したように，室内実験用として，塩ビ管 VP30，流量調節バルブ等を組み合わせて作製し，通水用のポンプは，エンジンポンプ（吐出口径 50 mm）を使用した．パイプラインの全通水量は，流路途中に設けた流量計で流量を常時確認しながらエンジンポンプの回転数または流路途中の流量調節バルブ開度を変化させた．

実験 2　吸入管の長さの違いが液肥吸入量に及ぼす影響

吸入管の長さの違いが液肥の吸入量に与える影響を調査した．吸入

管内径は 4 mm で一定とし，吸入管の長さは，10 cm，30 cm のアクリルパイプを用い(図 3-11)，その他の実験条件は実験 1 と同様とした．

実験 3　縮小管の長さの違いが液肥吸入量に及ぼす影響

縮小管の長さの違いが液肥の吸入量に与える影響を調査した．吸入管は，外径 5 mm，内径 3 mm，長さ 30 cm のシリコンチューブを使用した．縮小管は，実験 1 及び実験 2 で用いた TS13 の代わりに，長さ 3 cm，5 cm，7 cm に切断した 3 種類の VP13 を用い，直管パイプの両端をそれぞれ異径ソケットに 1.2 cm ずつ挿入した（図 3-12）．各直管パイプ中央に約 7 mm の穴を開け，外径 7 mm、内径 5 mm，長さ 2cm の模型工作用プラスチック製パイプ（以下「プラパイプ」とする）を接続し，プラパイプ内に外径 5 mm，内径 3 mm，長さ 30 cm のシリコンチューブを挿入して吸入管とした．その他の実験条件は実験 1 と同様とした．

実験 4　縮小管の管径の違いが液肥吸入量に及ぼす影響

縮小管の管径の違いが液肥の吸入量に与える影響を調査した．検討したアスピレータは，縮小管に，呼び径 13 mm，外径 18 mm の VP13 を用いた「装置 D（13 mm)」と，呼び径 16 mm，外径 22 mm の塩ビ製直管パイプ（以下「VP16」とする）を用いた「装置 D（16 mm)」の他，V13 内に内径 10 mm，外径 13 mm のシリコンチューブを挿入して縮小管の管内径をさらに細くした改良型アスピレータ（以下「装置

D（10mm)」とする）の計3種類を用いた（図3-13)．縮小管の長さはすべてのアスピレータで3 cmとし，直管パイプの両端を1 cmずつ異径継手 (呼び径25 mm×13 mm) の内側に挿入し接着した．吸入管は，VP13またはVP16の中央部分にドリルで穴を開け，外径7 mm、内径5 mm，長さ2cmのプラパイプを接続し，プラパイプ内に外径5 mm，内径3 mm, 長さ30 cmのシリコンチューブを挿入して吸入管とした．その他の実験条件は実験1と同様に行った．

3.2.5 装置C及び装置Dを用いた実証実験方法

装置C及び装置Dを使用して, 所内圃場のパイプライン水口から流入施肥の実験を行った．供試品種は「コシヒカリ」を用い，栽植密度は15.2 株/m^2, 1株あたり4〜5本を目標に移植した．流入施肥は出穂後に実施した．試験区は，装置C及び装置D（10mm）に加えて，対照区として装置 B（改良型手動弁開度調節式流入施肥装置，以下「対照機」とする）を設け計3区とし，面積は各区15 a（15 m×100 m）とした．田面水は，実験当日に水深が0cmとなるように前日から排水を行った．肥料は，各区で尿素及び塩化加里を使用し，窒素及びカリの成分量でそれぞれ1 kg/10aとなるように70 Lの水に溶かし液肥とした．液肥滴下流量は，流入施肥開始時に各区4 mL/sに設定した．

流入施肥は，対照機，装置D，装置Cの順に開始し，装置Dは対照機による流入施肥開始から6分後に，装置Cは対照機開始から22分後に開始した．流入施肥開始時の灌漑水量は，施肥開始前に水口のバ

ルブの開度を調節し各区 90 L/min とした．流入施肥途中の灌漑水流量は，同じパイプライン水系で実験圃場の上流側に位置する水田の水口の開閉により変動した．灌漑水流量の確認は，装置 C を設置した実験圃場の水口から約 3 m の管路途中に設置した流量計において，流入施肥開始から終了までの 1 分間の平均灌漑水流量を計測するとともに．約 1 時間おきに各試験区の水口から流出する水量を実測した．液肥滴下量は，装置 C については，流入施肥開始前に，手動で電動弁開度を変えて 10 秒間の液肥滴下量を実測し, あらかじめ電動弁開度と液肥滴下流量を対応させた．装置 D の液肥滴下流量は，液肥が入ったステンレスビーカーで液肥を 10 秒間吸入させ, 吸入前と吸入後の重量差を電子天秤（最小表示 0.1 g）で求め単位時間当たりの吸入量（g/s）を算出したのち，吸入管に装着したローラークランプで目標の液肥滴下量となるように調節した．装置 A 及び対照機の確認は，装置から流出する 10 秒間あたりの液肥滴下量をメスシリンダーで実測することで算出した．流入施肥後の肥料拡散性は，各圃場内 10 箇所から採水した田面水窒素濃度の変動係数で評価した．田面水窒素濃度は，ウレアーゼ処理後インドフェノール青法（高橋ら 1998）にて測定した．

3.3 結果

3.3.1 装置 C を用いた基礎実験結果

表 3-3 に，装置 C を用いた流入施肥の基礎実験結果を示す．パイプ

ラインの通水量変化と液肥流量制御をともに無しとした実験 1 では，流入施肥終了直後の電気伝導率の変動係数は 2.38%であった．次に，実験 2 と実験 3 では，パイプライン通水量を途中で 0.28 L/s から 0.12 L/s へ減少させた結果，液肥流量制御を有りとした実験 3 の変動係数は 2.25 %となり，流量制御無しとした実験 2 の変動係数 9.62 %と比較して肥料の拡散性が改善された．また，実験 4 と実験 5 では，パイプライン通水量を途中で 0.12 L/s から 0.28 L/s へ増加させた結果，液肥流量制御を有りとした実験 5 の変動係数は 2.81 %となり，流量制御無しとした実験 4 の変動係数 8.66 %と比較して肥料の拡散性が改善された．さらに，実験 6 と実験 7 では，パイプライン通水量を当初 0.2 L/s に設定したのち，途中で 0.28 L/s へ増加させ，最終的に 0.12 L/s へ減少させた結果，液肥流量制御を有りとした実験 7 の変動係数は 2.08 %となり，流量制御無しとした実験 6 の変動係数 11.26 %と比較して大幅に肥料の拡散性が改善した．

これらのことから，灌漑水の流量変動に合わせて液肥の流量を制御することで，流入施肥後の肥料拡散性が向上することが示唆された．

3.3.2 装置 D を用いた基礎実験結果

装置 D を用いた流入施肥の基礎実験を実施した．実験 1～実験 4 のそれぞれの結果について以下に示す．

実験1　吸入管の内径の違いが液肥吸入量に及ぼす影響

吸入管の内径が異なるすべてのアスピレータでパイプラインの通水量の増加に伴い，単位時間あたりの液肥の吸入量が増加した．また，同一のパイプライン通水条件下では，吸入管の内径が小さいほど単位時間あたりの液肥の吸入量が少なくなった（図 3-14）．また，内径が大きいほど通水量変化に対する吸入量変化の割合が大きくなった．流入施肥の圃場への供給量は通常 3～5 mL/s 程度であり，かつ吸入量は，吸入量を調節する最小単位として 1 mL/s 以下の精度が求められることから，吸入管内径は単位時間あたりの吸入量が少なく，かつ灌漑水の通水量変化に伴う液肥吸入変化の割合が小さい内径（4 mm 以下）が適していると考えられる．

実験2　吸入管の長さの違いが液肥吸入量に及ぼす影響

吸入管の長さが異なるすべてのアスピレータでパイプラインの通水量の増加に伴い，単位時間あたりの液肥の吸入量が増加した．また，同一のパイプライン通水条件下では，吸入管の長さが長い 30 cm で単位時間あたりの液肥の吸入量が少なくなった（図 3-15）．

実験3　縮小管の長さの違いが液肥吸入量に及ぼす影響

縮小管の長さが異なるすべてのアスピレータでパイプラインの通水量の増加に伴い，単位時間あたりの液肥の吸入量が増加した．また，同一のパイプライン通水条件下では，縮小管の長さが短いほど単位時

間あたりの液肥の吸入量が増加する傾向が認められた（図 3-16）.

実験 4　縮小管の管径の違いが液肥吸入量に及ぼす影響

図 3-17 に, 縮小管の管径が異なる 3 種類のアスピレータを試作して施肥実験を行った結果を示す. 縮小管に VP13 の直管パイプ（内径 13 mm）を用いた装置 D（13 mm）ではパイプラインの通水量の増加に伴い, 単位時間あたりの液肥の吸入量が増加した. 一方, 縮小管に VP16 の直管パイプ（内径 16 mm）を用いた装置 D（16 mm）では, パイプライン通水量が 30L/min または 40 L/min の条件下では液肥が吸入せず, アスピレータ内の水が吸入管から逆流した. 同一のパイプライン通水量条件下において, 装置 D（13 mm）は装置 D（16 mm）よりも単位時間あたりの吸入量が増加した. さらに, VP13 内に, 外径 13mm, 内径 10mm のシリコンチューブを挿入して管内径を細くした装置 D（10 mm）では, 装置 D（13 mm）と比較して, パイプパイプラインの通水量が 20 L/min の低水量条件下でも液肥の吸引が可能となった. また, パイプライン通水量が同一であれば, 装置 D（13 mm）と比べて装置 D（10 mm）で, 単位時間あたりの吸入量が増加した.

以上のことから, 縮小管は細い方が灌漑水の通水量が低い条件下でも液肥の吸入が可能となることが示唆された. 縮小管の管径が小さいほど吸入量が増加する傾向は, Huang,H.ら（2009）が行った点滴灌漑用ベンチュリシステムの CFD（Computational Fluid Dynamics）によるシミュレーション結果と同様の結果となった. 一般的に市販されてい

る塩ビ製直管パイプは既成品としては VP13 が最も内径が小さいため，流入施肥機の縮小管として用いる塩ビ製直管パイプは VP13 が適しており，さらに低水量条件下で行う場合は，直管パイプより内径の小さいシリコンチューブを直管パイプ内に挿入する等の改良を加えた装置 D（10 mm）が適していると考えられる．

3.3.3 装置 C 及び装置 D を用いた実証実験結果

装置 C，装置 D 及び装置 B（「改良型手動弁開度調節式流入施肥装置」、対照機）を使用して，実際の水田で流入施肥実験を実施した．装置 D は，VP13 の縮小管内に外径 13mm，内径 10mm のシリコンチューブを挿入して管内径を細くした装置 D（10 mm）を用いた．図 3-18 に，パイプライン途中の管路に設置した流量計で計測した灌漑水流量の推移を示す．灌漑水流量は，対照機による流入施肥開始から 120 分後に約 100 L/min まで上昇したのち，その後最大で約 110 L/min となり，180 分後に実験圃場に隣接する水田のパイプラインの水口が開放されたため約 80 L/min に減少した．さらに 315 分後に隣接圃場の水口の一部が閉じられたため約 90 L/min まで増加した．

図 3-19 に，装置 C から滴下された液肥流量の推移と圃場の水口で測定した灌漑水流量の推移を示す．灌漑水流量と液肥滴下流量の比率が概ね 1：400 の比率となるように灌漑水流量の変化に対応して電動弁開度が決定され，液肥の滴下流量が変化した．

図 3-20 に，装置 D により吸入された液肥吸入量の推移と圃場の水口で測定した灌漑水流量の推移を示す．装置 C と同様に，灌漑水の変化に応じて，液肥吸入量の増加や減少が確認されたが，その増加または減少の変化量は，装置 C よりも大きくなった．

図 3-21 に，装置 B（対照機：改良型手動弁開度調節式流入施肥装置）から滴下された液肥流量の推移と圃場の水口で実測した灌漑水流量の推移を示す．対照機には，灌漑水の流量変化に対応して液肥の滴下流量を変動させる機構が備わっていないため，外的要因により灌漑水流量が変化しても，液肥の滴下流量はほぼ一定のまま推移した．

図 3-22 に，流入施肥後に採水した各実験の水田内 10 箇所の田面水窒素濃度分布とその変動係数を示す．灌漑水の流量変動に対応して液肥の滴下流量を制御する装置 C（試験区 1）では，流入施肥後の田面水中に含まれる窒素濃度の変動係数が 31.5 %となり，常に一定の液肥滴下流量とする装置 B（対照区）の 43.8 %と比較して 12.3 %小さくなり拡散性が向上したと考えられる．一方，装置 D（試験区 2）では，流入施肥後の田面水の変動係数が 62.2 %となり，装置 B（対照区）の 43.8 %と比較して 18.4 %大きくなり，対照区と比較して拡散性が悪化したと考えられる．

以上のことから，装置Cでは，灌漑水流量の変動に対応して液肥の滴下流量を制御することで，より均一な施肥が可能となることが実圃場の規模における実験でも明らかになった．一方，装置 D では，液肥滴下流量の変動幅が大きくなり，逆に拡散性が悪化した．

3.4 考察

これまでの知見から，実際の営農圃場では時期によって，日中の灌漑水流量が大きく変化することが知られているが，水稲の流入施肥において，肥料拡散性の向上を目的として水口から流出する灌漑水の流量変動に応じて液肥の滴下流量を正確に変化させる研究成果は既存の研究では見当たらず．本研究は初めての試みであると思われる．装置C（電動弁開度調節式流入施肥装置）を用いた流入施肥の基礎実験では，灌漑水の流量変動が大きい場合に肥料の流入施肥後の肥料拡散性が不均一となることが示唆され，その対策として，灌漑水の流量変動に対応して液肥の滴下流量を正確にコントロールすることにより，液肥の滴下流量を可能な限り一定とすることを是としていた従来の流入施肥装置と比較して，より均一な肥料散布が可能となることが圃場レベルで明らかとなった．液肥の滴下流量を正確に変動させるためには，今回実験した 2 方式においては，灌漑水の流量を流量計でモニタリングしつつ，PLC を介してその変動に応じた適切な液肥の電動弁開度を決定する装置 C が有効であった．一方で，より安価な流入施肥を目指して密閉式のベンチュリ方式を採用した装置 D（アスピレータ吸引式流入施肥装置）では，灌漑水流量変動に対応して液肥の吸入量が変化するものの，装置 C と比較するとその変化量が大きくなり，正確な制御は困難であった．

今後の課題については，液肥の供給量を変動させる装置 C について

は，電動弁，制御盤，流量計，PLC，リチウム電池等の専用の部材・機材が必要となり，水田の水口ごとに装置を設置する現段階の方式では価格が高額となり実用上，現実的ではないこと，同様に液肥の供給量を変動させる装置 D については，「3.3.3 装置 C 及び装置 D を用いた圃場実験結果」で示したように，灌漑水の流量変動が大きいとベンチュリ管内の圧力変化によって，液肥の吸入量が大きく変化し，かえって施肥の均一性が悪化するため，圧力変化を補正する機構の開発に向けて，別途検討を要することが示唆された．

表 3-1　装置 C（電動弁開度調節式流入施肥装置）の主要諸元

Table 3-1　Primary specifications of Device C (Device C: motorized valve opening type)

<table>
<tr><th colspan="7">主要諸元</th></tr>
<tr><td rowspan="13">施肥部</td><td>1</td><td colspan="2">適用肥料</td><td colspan="3">尿素・硫安等</td></tr>
<tr><td>2</td><td colspan="2">機体寸法</td><td>幅 75 cm</td><td>奥行 75 cm</td><td>高さ 110 cm</td></tr>
<tr><td rowspan="3">3</td><td colspan="2" rowspan="3">主な材質</td><td colspan="3">第1容器：ポリプロピレン</td></tr>
<tr><td colspan="3">第2容器：ポリプロピレン</td></tr>
<tr><td colspan="3">架台・脚部：鉄鋼</td></tr>
<tr><td rowspan="2">4</td><td rowspan="2">最大容量</td><td>第1容器</td><td colspan="3">80 L</td></tr>
<tr><td>第2容器</td><td colspan="3">4.5 L</td></tr>
<tr><td>5</td><td colspan="2">形状</td><td colspan="3">角型</td></tr>
<tr><td>6</td><td colspan="2">重量</td><td colspan="3">24 kg</td></tr>
<tr><td>7</td><td colspan="2">液肥流量調節方式</td><td colspan="3">電動式バルブ開度調節式</td></tr>
<tr><td>8</td><td colspan="2">液肥滴下流量範囲</td><td colspan="3">2～7 mL/s</td></tr>
<tr><td rowspan="2">9</td><td colspan="2" rowspan="2">その他</td><td colspan="3">傾斜設置対応型</td></tr>
<tr><td colspan="3">撹拌装置（DC12 V）付属</td></tr>
<tr><td rowspan="5">制御部</td><td>1</td><td colspan="2">機体寸法</td><td>幅35 cm</td><td>奥行18 cm</td><td>高さ35 cm</td></tr>
<tr><td>2</td><td colspan="2">主な材質</td><td colspan="3">ポリカーボネート</td></tr>
<tr><td>3</td><td colspan="2">制御方式</td><td colspan="3">PLC（Programmable Logic Controller）
制御方式</td></tr>
<tr><td>4</td><td colspan="2">電源</td><td colspan="3">リチウムイオン電源
（容量100 Wh、DC 24 V×3）</td></tr>
<tr><td>5</td><td colspan="2">その他</td><td colspan="3">防塵・防雨仕様</td></tr>
</table>

表 3-2　装置 C（電動弁開度調節式流入施肥装置）を用いた流入施肥の基礎実験条件

Table 3-2　Basic experimental conditions for inflow fertilization experiments using Device C (Device C: motorized valve opening type)

	パイプライン		液肥		施肥時間
	流量変動の有無	通水量 (L/s)	流量制御の有無	滴下流量 (mL/s)	(min)
実験1（対照）	変動なし	0.2（一定）	制御なし	5（一定）	24
実験2	変動あり	0.28→0.12（変動）	制御なし	5（一定）	24
実験3			制御あり	7→3（変動）	12→12
実験4	変動あり	0.12→0.28（変動）	制御なし	5（一定）	24
実験5			制御あり	3→7（変動）	12→12
実験6	変動あり	0.2→0.28→0.12（変動）	制御なし	5（一定）	24
実験7			制御あり	5→7→3（変動）	8→8→8

注）茨城県農業総合センター農業研究所のビニルハウス内で実験した.

表 3-3　装置 C（電動弁開度調節式流入施肥装置）を用いた流入施肥の基礎実験結果

Table 3-3　Basic procedures of inflow fertilization experiments using Device C (Device C: motorized valve opening type)

	実験１（対照）	実験２	実験３	実験４	実験５	実験６	実験７
パイプライン通水量（L/s）	変動なし（0.2）	変動あり（0.28→0.12）		変動あり（0.12→0.28）		変動あり（0.2→0.28→0.12）	
液肥流量制御	制御なし	制御なし	制御あり	制御なし	制御あり	制御なし	制御あり
液肥流量（mL/s）	一定（5）	一定（5）	変動（7→3）	一定（5）	変動（3→7）	一定（5）	変動（5→7→3）
初期水深（cm）	0	0	0	0	0	0	0
終了時水深（cm）	10.8	11.0	10.5	11.5	11.5	11.4	11.5
施肥時間（min）	24	24	24	24	24	24	24
電気伝導率 平均（mS）	0.51	0.52	0.50	0.52	0.51	0.50	0.51
標準偏差	0.01	0.05	0.01	0.04	0.01	0.06	0.01
変動係数（%）	2.38	9.62	2.25	8.66	2.81	11.26	2.08

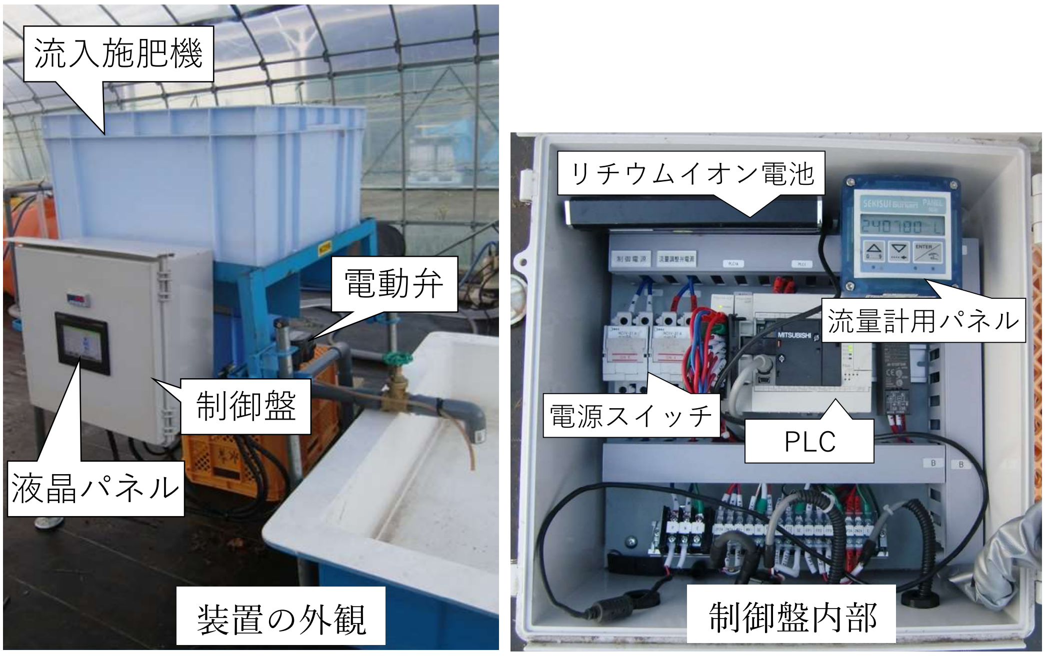


図 3-1　開発した電動弁開度調節式流入施肥装置（装置 C：電動弁開度調節式流入施肥装置）

Fig. 3-1　Developed motor-operated valve opening type fertilizer application device (Device C: motorized valve opening type)

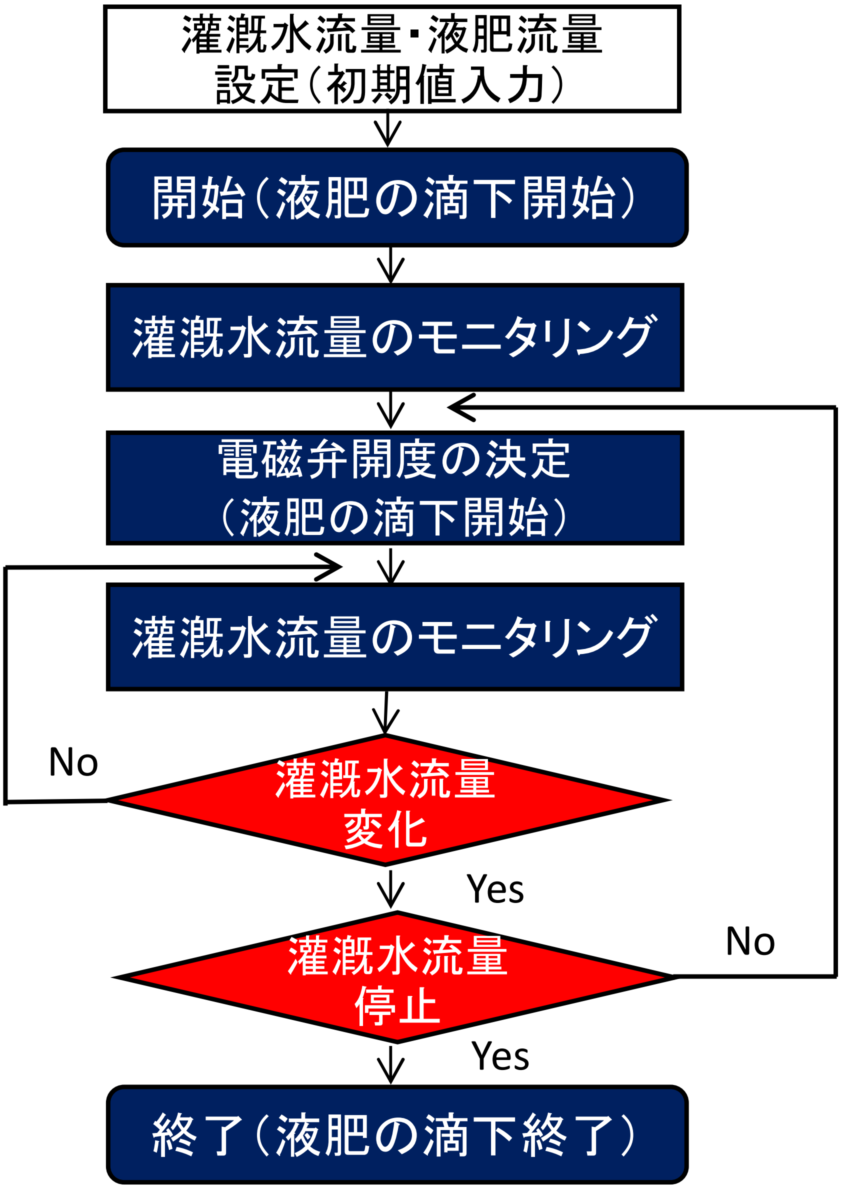


図 3-2　装置 C（電動弁開度調節式流入施肥装置）の液肥流量制御フロー

Fig. 3-2　Flowchart of liquid fertilizer flow control using Device C (Device C: motorized valve opening type)

図 3-3　液肥流量制御プログラム（初期設定画面 1）

Fig. 3-3　Liquid fertilizer flow control program (initial setting screen1)

図 3-4　液肥流量制御プログラム（初期設定画面 2）

Fig. 3-4　Liquid fertilizer flow control program (initial setting screen2)

図 3-5　液肥流量制御プログラム（初期設定画面 3）

Fig. 3-5　Liquid fertilizer flow control program (initial setting screen3)

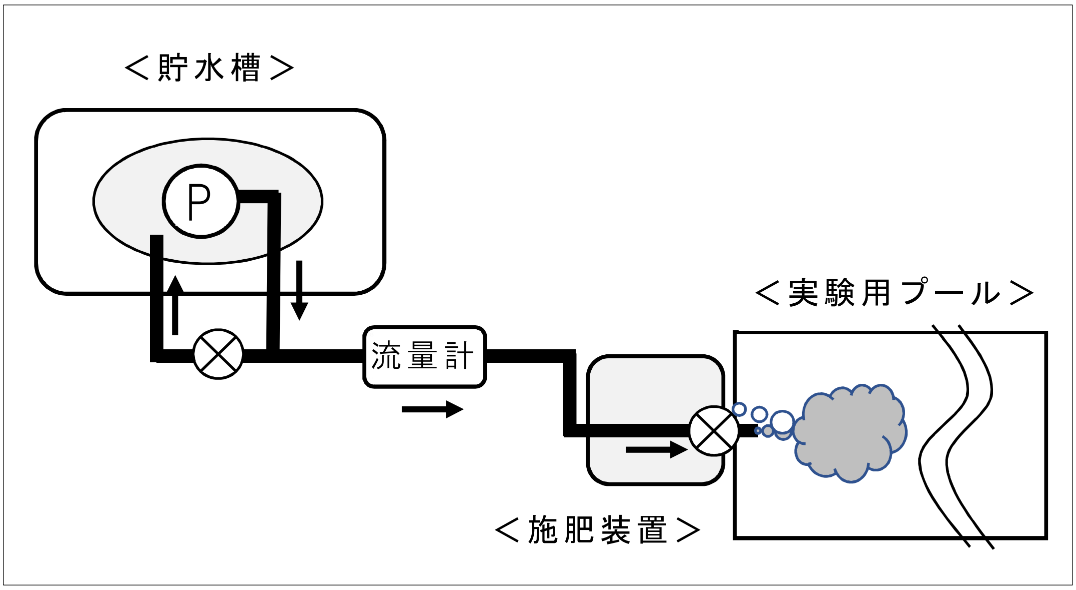


図 3-6　装置 C（電動弁開度調節式流入施肥装置）を用いた基礎実験の模式図（平面図）

Fig. 3-6　Schematic diagram of basic experiments using Device C (Device C: motorized valve opening type) (plan view)

注 1）太い黒線は塩ビ管，矢印は水の流れを示す．

2）Ⓟ は水中ポンプ，⊗ は灌漑水の流量調節バルブを示す．

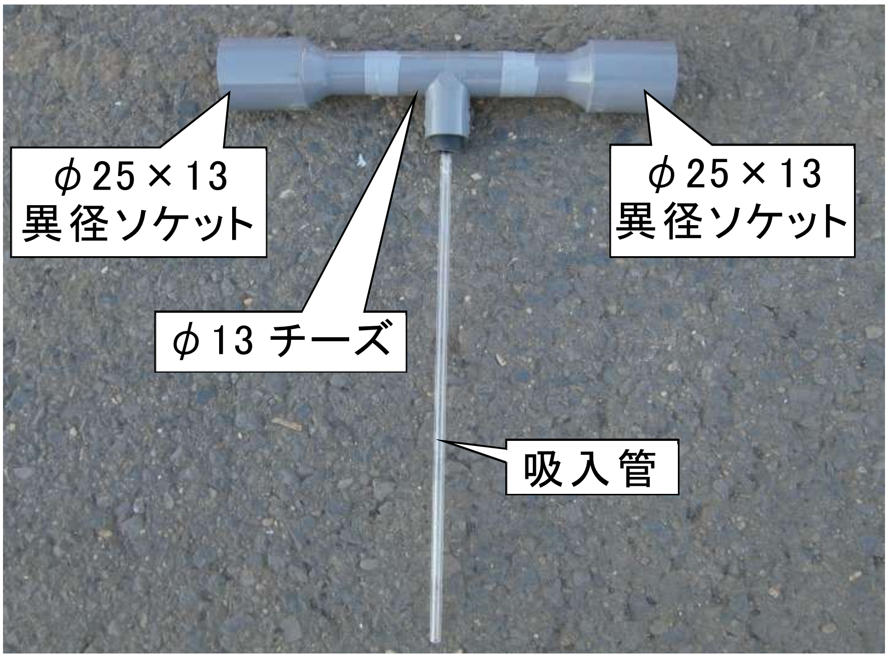


図 3-7　装置 D（アスピレータ吸引式流入施肥装置）のアスピレータ部

Fig. 3-7　Aspirator part of Device D (Device D: aspirator suction type)

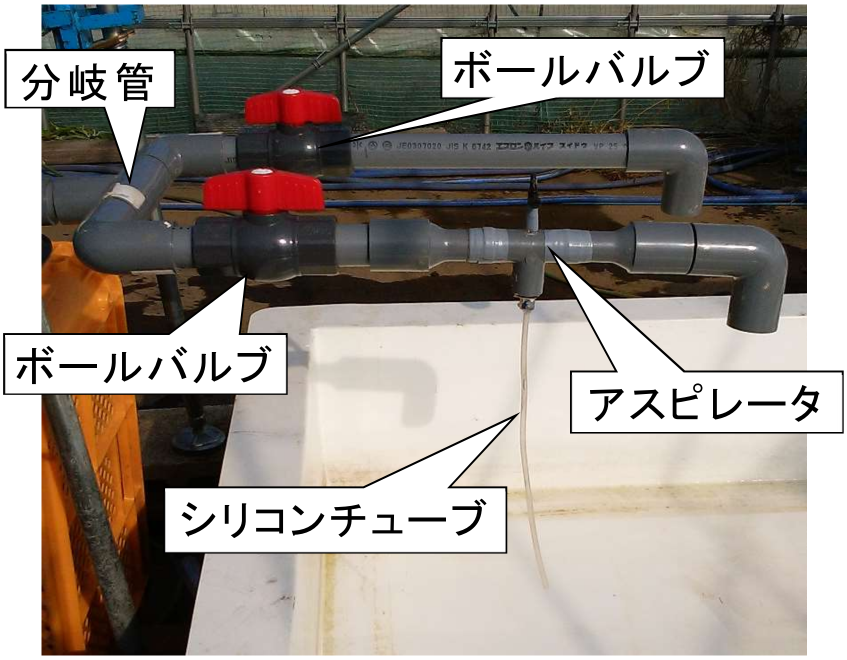


図 3-8　開発した装置 D(アスピレータ吸引式流入施肥装置）

Fig. 3-8　Developed Device D (Device D: aspirator suction type)

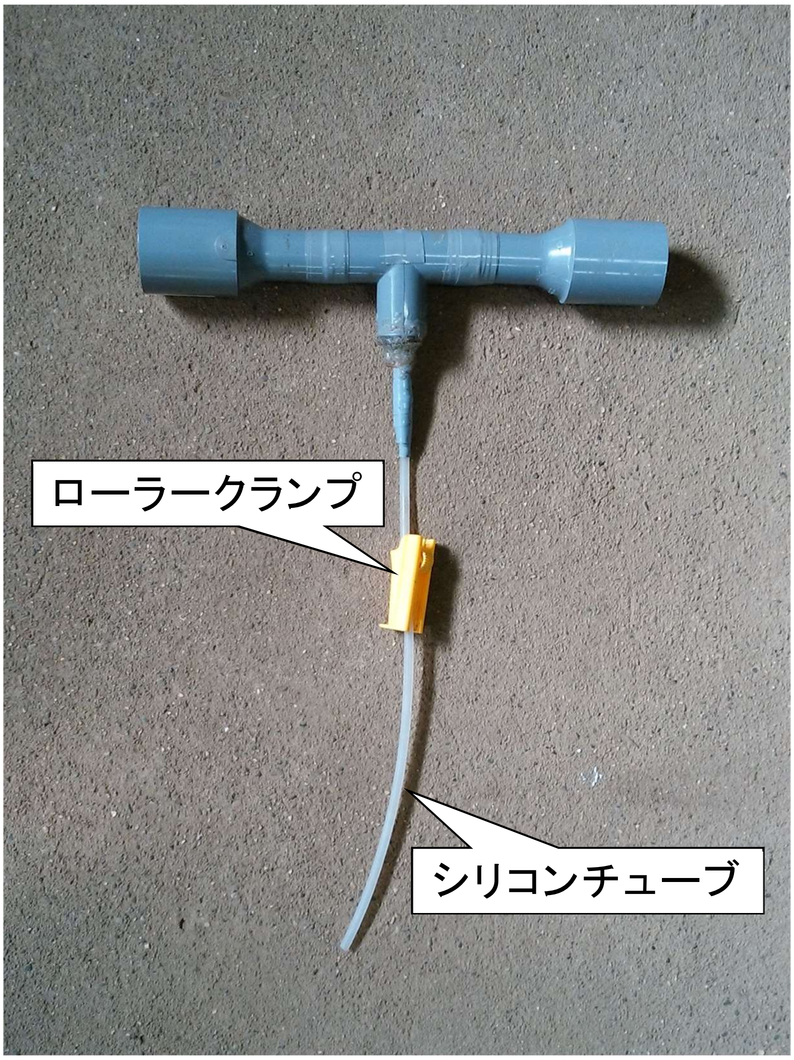


図 3-9　装置 D（アスピレータ吸引式流入施肥装置）のアスピレータ部とローラークランプ

Fig. 3-9　Aspirator part of Device D and roller clamp (Device D: aspirator suction type)

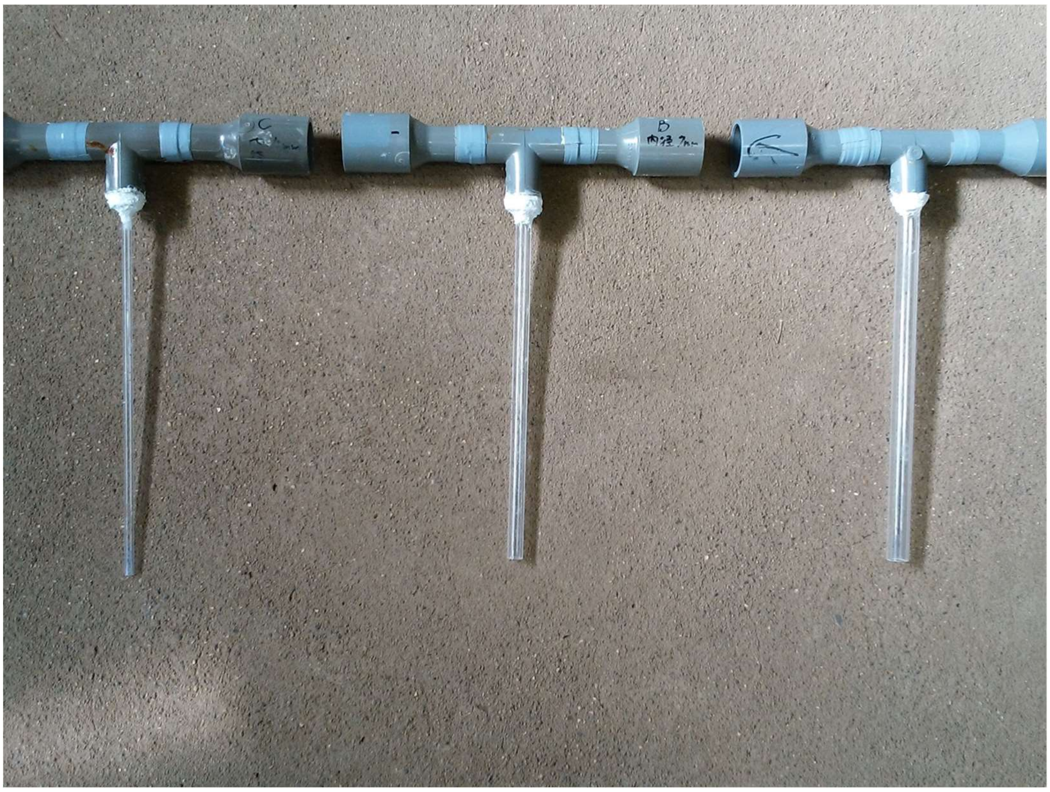


図 3-10　吸入管内径の異なるアスピレータ

（左から，吸入管内径 4mm，7mm，11mm）

Fig. 3-10　Aspirators with different inner diameters for the suction pipes　（From the left: Inner diameters of 4 mm, 7 mm, and 11 mm）

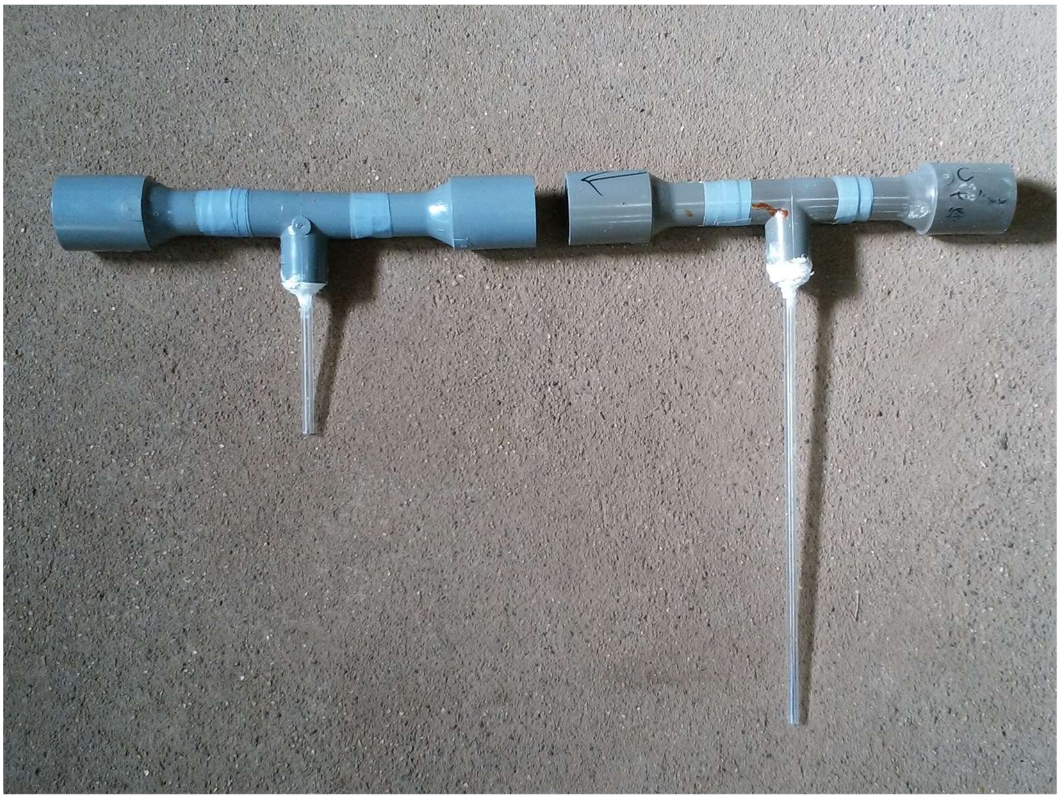


図 3-11　吸入管長さの異なるアスピレータ

（左から，吸入管長さ 10cm，30cm）

Fig. 3-11　Aspirator with different lengths of suction pipes

（From the left: Length of suction pipe 10 cm and 30 cm）

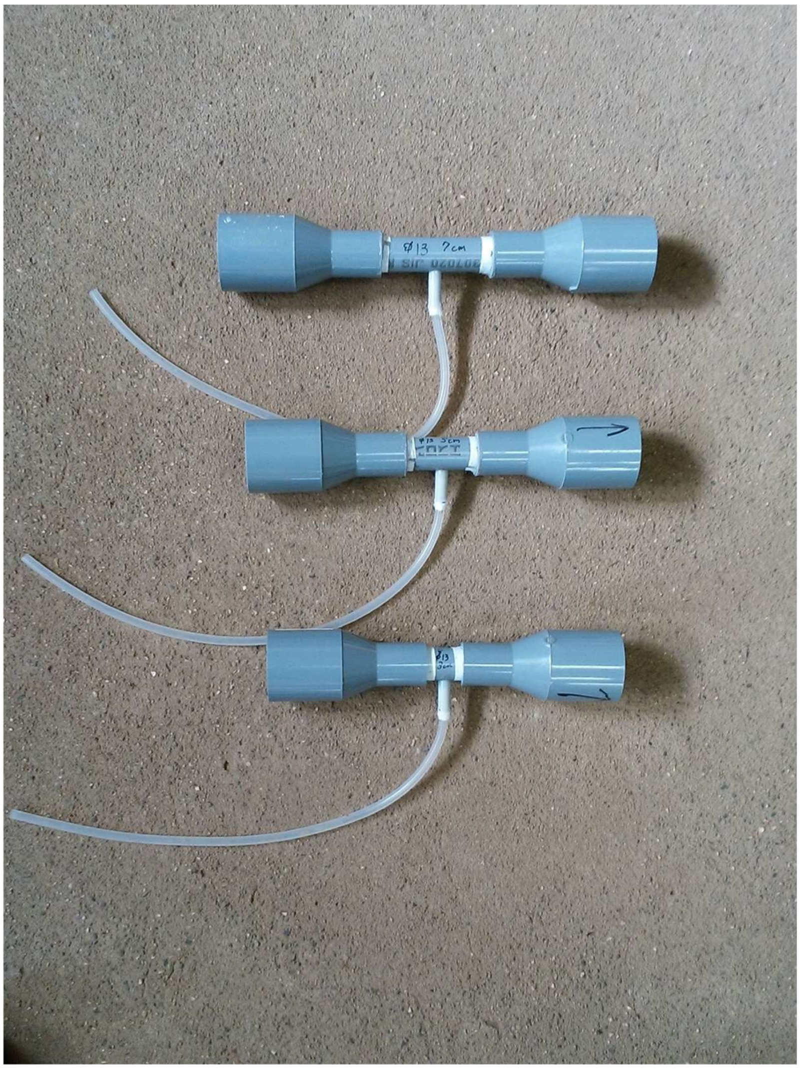


図 3-12　縮小管長さの異なるアスピレータ

（上から，縮小管長さ 7cm，5cm，3cm）

Fig. 3-12　Aspirator with different lengths of throat tubes (From the above: Lengths of throat tubes 7 cm, 5 cm, and 3 cm）

図 3-13　縮小管径の異なるアスピレータ

（左から，装置 D（13mm），装置 D（10mm），装置 D（16mm））

Fig. 3-13　Aspirator with different inner diameters for the throat tubes

（From the left: Device D (13 mm), Device D (10 mm), and Device D (16 mm))

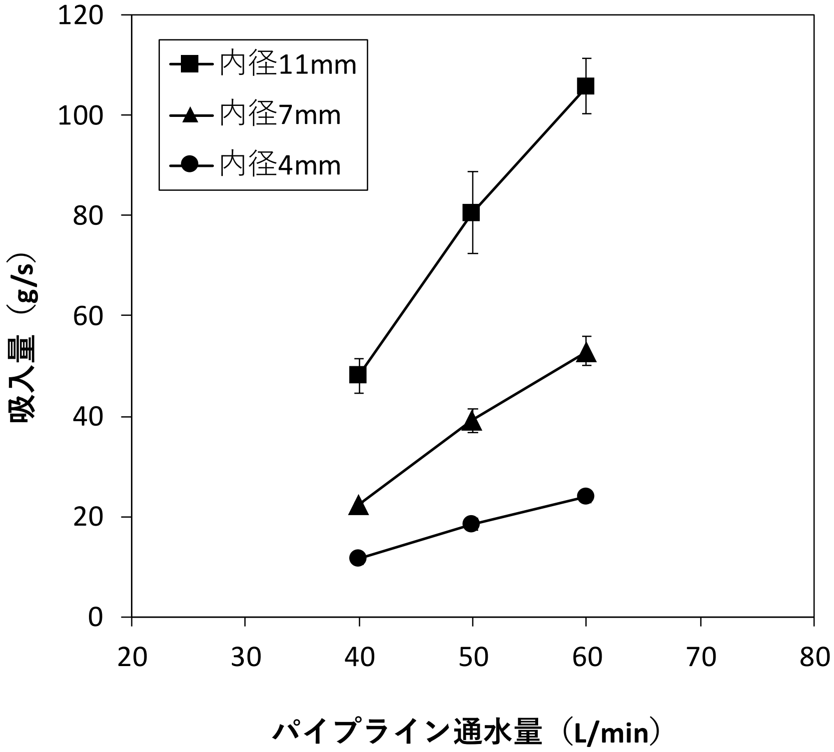


図 3-14　吸入管内径及び通水量の違いによる液肥吸入量の推移

Fig. 3-14　Changes in the amount of liquid fertilizer intake owing to differences in suction pipe inner diameter and water flow rate

注）図中のエラーバーは標準誤差を示す.

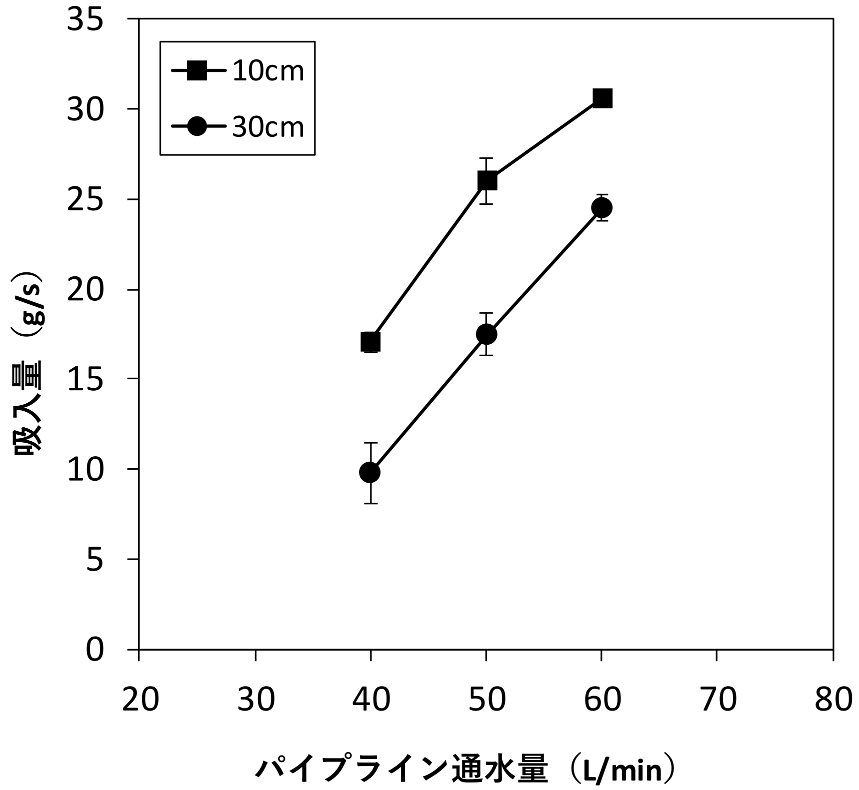


図 3-15　吸入管長さ及び通水量の違いによる液肥吸入量の推移

Fig. 3-15　Changes in the amount of liquid fertilizer intake owing to difference in suction pipe length and water flow rate

注）図中のエラーバーは標準誤差を示す.

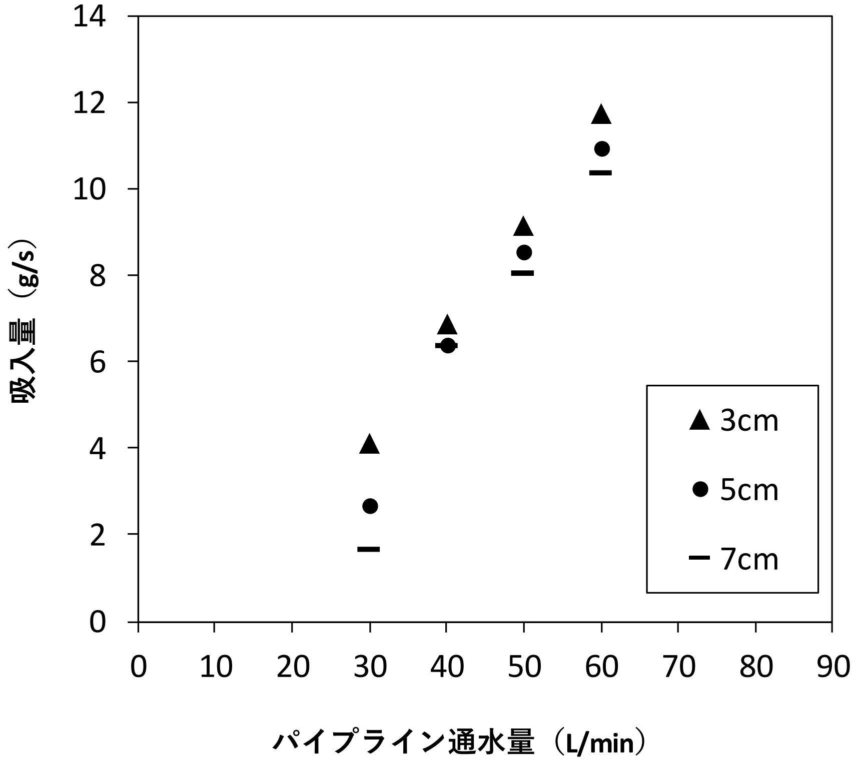


図 3-16　縮小管長さ及び通水量の違いによる液肥吸入量の推移

Fig. 3-16　Changes in the amount of liquid fertilizer intake owing to differences in throat tube length and water flow rate

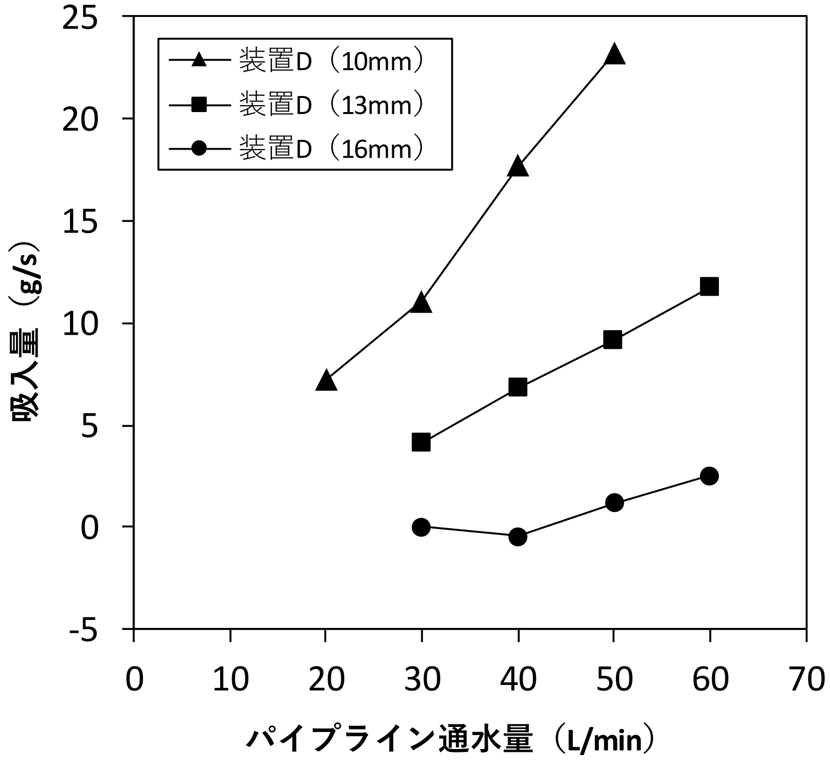


図 3-17　縮小管の管径及び通水量の違いによる液肥吸入量の推移

Fig. 3-17　Changes in the amount of liquid fertilizer intake owing to differences in throat tube diameter and water flow rate

注）吸入量がマイナスの場合は，吸入管より水が逆流して，液肥を吸引せずに重量が増加したことを示す．

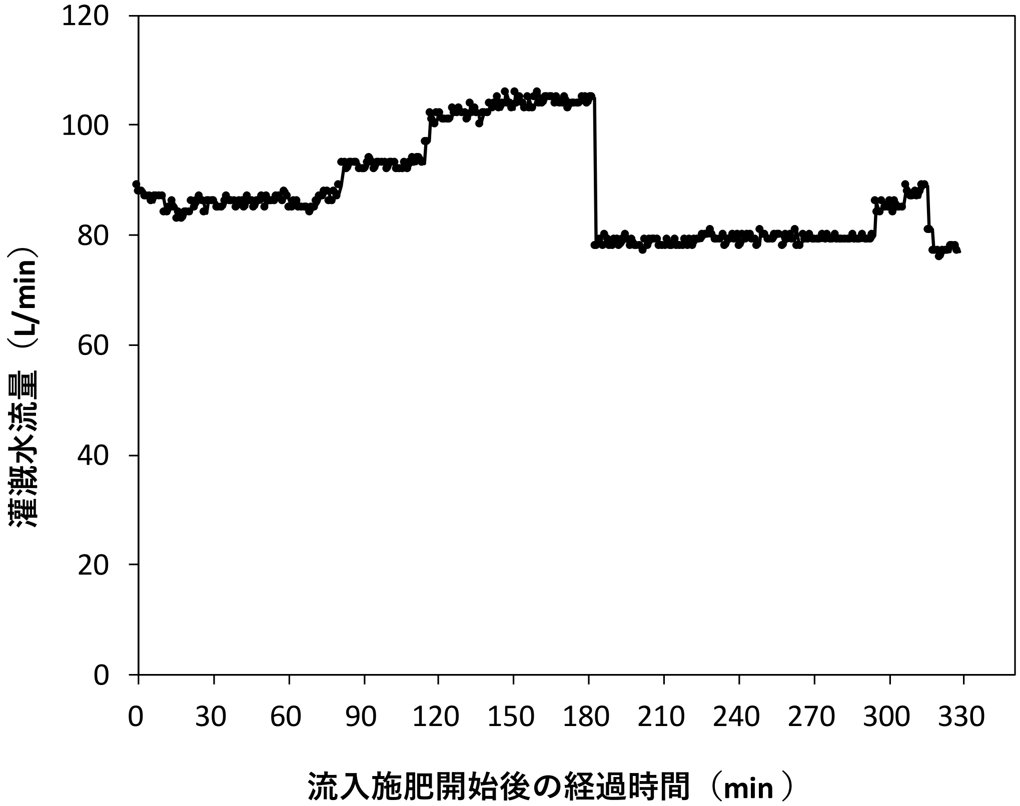


図 3-18　パイプラインに設置した流量計で測定した灌漑水の流量変化

Fig. 3-18　Changes in flow rate of irrigation water measured using flowmeter connected to pipeline

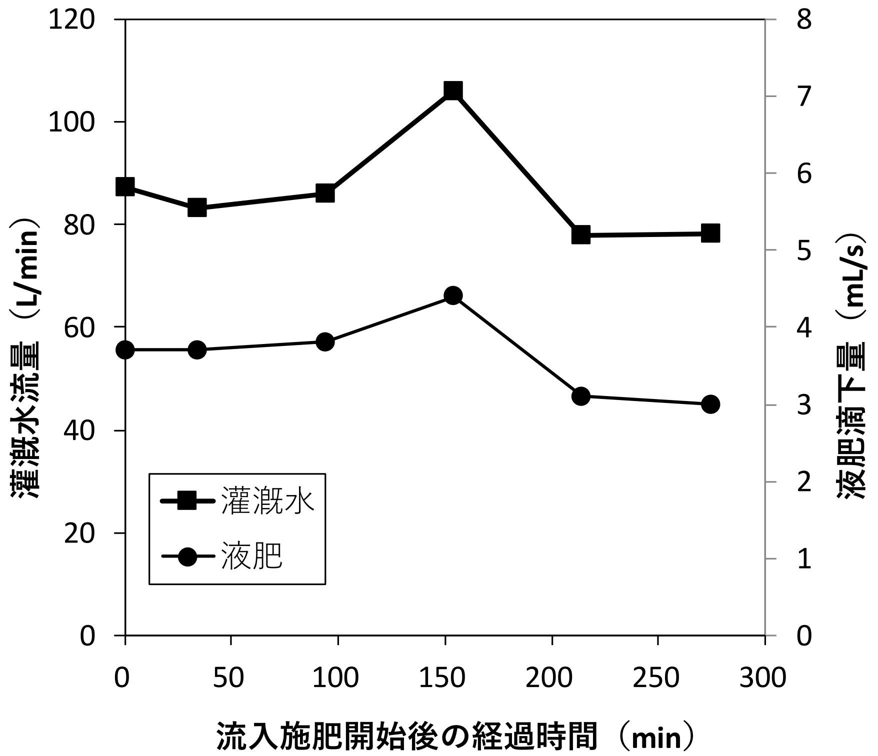


図 3-19　装置 C（電動弁開度調節式流入施肥装置）を使用した流入施肥実験における液肥滴下流量と水口で実測した灌漑水流量の推移

Fig. 3-19　Changes in liquid fertilization dropping flow rate using Device C (motorized valve opening type) and irrigation water flow rate measured at the pipeline faucet of the inflow fertilization experiment

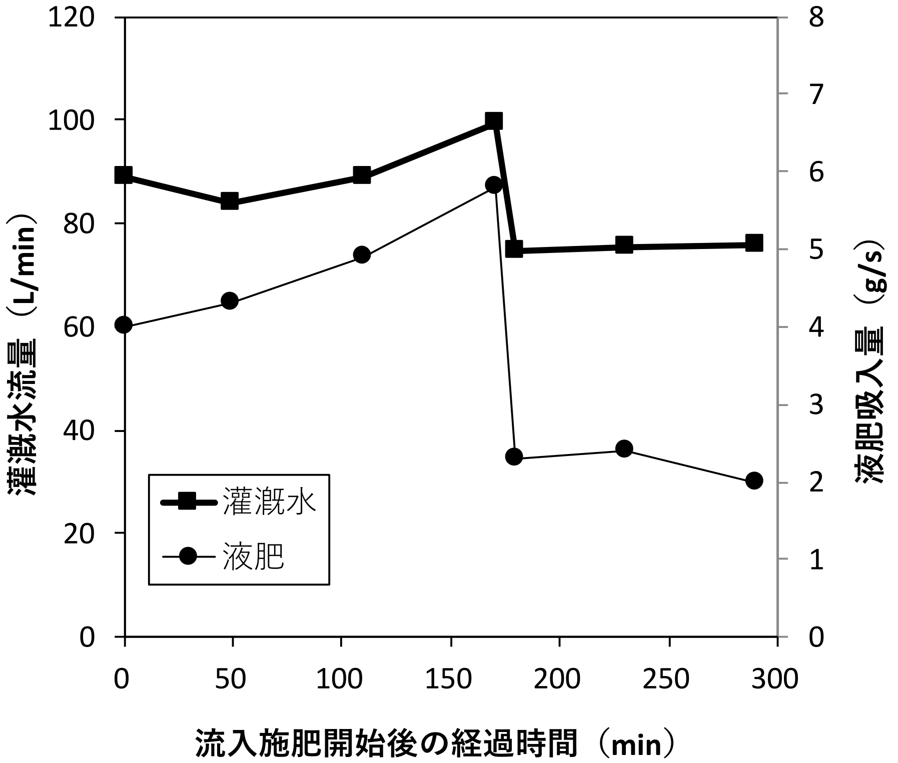


図 3-20　装置 D（アスピレータ吸引式流入施肥装置）を使用した流入施肥実験における液肥吸入量と水口で実測した灌漑水流量の推移

Fig. 3-20　Changes in the amount of liquid fertilizer intake using Device D (aspirator suction type) and irrigation water flow rate measured at the pipeline faucet of the inflow fertilization experiment

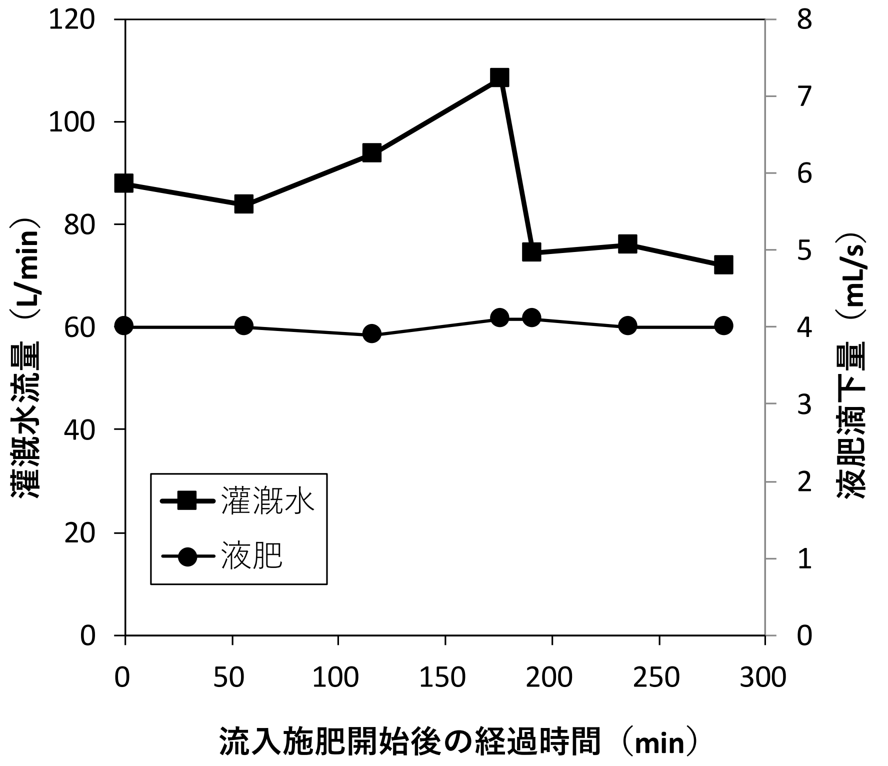


図 3-21　対照機（装置 B：改良型手動弁開度調節式流入施肥装置）を使用した流入施肥実験における液肥滴下流量と水口で実測した灌漑水流量の推移

Fig. 3-21　Changes in liquid fertilization dropping flow rate using a control device (Device B: improved manual valve opening type) and irrigation water flow rate measured at the pipeline faucet of an inflow fertilization experiment

試験区1
（装置C）

排水側

32	13
39	31
40	48
50	52
52	54

入水側

平均（mg/L）	41.1
標準偏差	13.0
変動係数（%）	31.5

試験区2
（装置D）

排水側

8	17
12	27
54	22
66	66
36	35

入水側

平均（mg/L）	34.3
標準偏差	21.3
変動係数（%）	62.2

対照区
（装置B）

排水側

29	33
23	48
28	55
33	62
84	66

入水側

平均（mg/L）	46.1
標準偏差	20.2
変動係数（%）	43.8

図 3-22　灌漑水流量変動に対応した流入施肥実験結果

Fig. 3-22　Results of inflow fertilization experiments corresponding to fluctuations in the irrigation water flow rate

注 1）図中の数字は，田面水窒素濃度（mg/L）を示す．

注 2）装置 C：電動弁開度調節式流入施肥装置

装置 D：アスピレータ吸引式流入施肥装置

装置 B：改良型手動弁開度調節式流入施肥装置

第 4 章 水稲の流入施肥に関する個別要因の解析

4.1 目的

流入施肥では，施肥後の肥料拡散の濃度や速度，分布等の違いが施肥量変動の要因となり，その後の水稲の生育，収量に影響を与えるため，技術の確立にあたっては，施肥後の肥料拡散性を正しく把握し，評価を行うことが重要である．本章では，水稲の流入施肥において肥料拡散性を適切に把握するために，第 2 章または第 3 章で開発した施肥装置を用いて，①施肥後田面水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が与える影響の 3 項目について個別要因解析を行った．

4.2 方法

4.2.1 流入施肥後の尿素態窒素濃度分布の評価時期

流入施肥において，流入施肥後の肥料拡散性を正しく評価するために，施肥後の尿素態窒素濃度分布の評価時期について検討を行った．実験は，装置 A を使用して Y 農場の A 及び B の 2 圃場で流入施肥を実施したのち，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窒素濃度を比較した．圃場面積は A，B ともに 15 a である．窒素濃度の測定は，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窒素濃度を測定した．各圃場を10区画に分け，各区画から1サンプルずつ田面水を採水したのち，窒素濃度の測定は，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．本実験では，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．

4.2.2 流入施肥前の田面水深と施肥後の肥料濃度分布

流入施肥前の田面水深が流入施肥後の肥料拡散性に与える影響について，室内実験及び圃場実験で検討した．室内実験においては，FRP製実験用プール（短辺1 m×長辺3 m×高さ0.25 m）と塩ビ製パイプ（VP30）及び流量調節バルブ（呼び径1・1/4ゲートバルブ），300 L容器，水中ポンプ（最大吐出量100 L/min）等により灌漑水を通水させるための室内実験用の簡易なパイプラインを試作してビニルハウス内で実験を行った．灌漑水流量の測定は，パイプラインの管路途中に流量計を設置した．電動弁から流出した液肥は，ビニル製チューブを介してプール内に流し入れ，上部直径12 cm，下部直径8 cm，高さ10 cmの植木鉢内で，灌漑水と混合させながら肥料の流し込みを行った．

まず，灌漑水流量と液肥流量をそれぞれ一定（灌漑水流量25 mL/s，液肥流量3 mL/s）として，流入施肥開始前のプール内初期水深を0 cm，1 cm，2 cm，3 cmと4段階に変えた場合の肥料拡散性を調査した．す

べての試験区で灌漑水流量及び液肥滴下流量は一定とし，最終水深が 5 cm となるように流入施肥時間を変化させた．液肥は，固形硫安（21 %）を事前に水で溶解し，液肥濃度は，施肥終了時に窒素成分で 4 g/m²(=4 kg/10a)となるように調製した. 拡散性の評価については，実験用プール（幅 1 m×長さ 3 m）内を 8 ブロックに分け，ブロック毎に導電率計（Mother Tool 社製マルチ水質測定器）を設置して，流入施肥後の各ブロックの電気伝導率（mS/cm）を測定し，8 つの測定値の変動係数を算出した．

圃場実験では，装置 A（手動弁開度調節式流入施肥装置）または装置 B（改良型手動弁開度調節式流入施肥装置）を使用して Y 農場で行った流入施肥実験において，流入施肥開始前の田面水深を圃場内複数箇所で測定し，施肥後に採取した田面水窒素濃度の変動係数との関係を評価した．

施肥直後の田面水窒素濃度は，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尿素態窒素濃度とアンモニア態窒素濃度の合計量とした．

4.2.3 流入施肥後の灌漑水継続流入が田面水窒素濃度分布に与える影響

流入施肥終了後の灌漑水継続流入の影響について，茨城県農業総合センター農業研究所内水田（20 a）で，装置 B を使用して実験を行った．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

水を採取した後，再び 2 時間灌漑水の流入を継続して行い，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．田面水窒素濃度分布は，施肥終了後と灌漑終了後における田面水窒素濃度の分布及び変動係数で評価した．

4.3 結果

4.3.1 流入施肥後の尿素態窒素濃度分布の評価時期

図 4-1 に流入施肥直後と施肥 24 時間後の田面水窒素濃度の関係を示す．A 圃場，B 圃場ともに流入施肥直後と施肥 24 時間後の田面水窒素濃度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窒素濃度分布は大部分が流入施肥直後に決定されると考えられる．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の濃度変動は施肥後 2～3 日で均一化す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．本実験でも同様に流入施肥の肥料拡散性を評価する時期として, 施肥終了直後が適切であることが示唆された．

4.3.2 流入施肥前の田面水深と施肥後の肥料濃度分布

表 4-1 に，室内実験で得られた流入施肥直前の水深（これを「初期水深」とする）が施肥直後の水中電気伝導率の変動係数に及ぼす影響について示す．初期水深 0 cm における流入施肥直後の水中電気伝導率の変動係数は 1.7 %であったのに対し，初期水深 1 cm で変動係数が 36.7 %，初期水深 3 cm における変動係数は 48.9 %となり，初期水深が深いほど流入施肥直後における窒素濃度の変動係数が大きくなる傾向を示した．

図 4-2 に現地実験で得られた流入施肥直前の田面水深と施肥直後の田面水窒素濃度の変動係数との関係を示す．流入施肥直前の田面水深と施肥直後の田面水窒素濃度の変動係数とは，ほぼ直線的な関係が見られ，室内実験と同様に施肥直前の田面水深と施肥直後の田面水窒素濃度の変動係数とは相関が高かった．一般的に水田は湛水状態となっているが，流入施肥後の田面水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，可能な限り流入施肥時の田面水深を浅くする必要があると考えられる．

4.3.3 流入施肥後の灌漑水継続流入が田面水窒素濃度分布に与える影響

図 4-3 に流入施肥終了後の灌漑水継続流入による田面水窒素濃度分布について示す．流入施肥終了後に灌漑水のみ流し続けた場合，水口付近の田面水窒素濃度が 0～7 mg/L と低くなり，窒素濃度の均一性が

悪化することが明らかとなった．肥料散布後に濃度変動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ことが重要であると考えられる．

4.4 考察

施肥前の田面水深と施肥後の田面水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．本実験は，主に営農圃場において装置 A（手動弁開度調節式流入施肥装置）または装置 B（改良型手動弁開度調節式流入施肥装置）を使用して肥料を液肥化したのち，比較的長時間かけて流入施肥を行った結果である．本実験で示した流入施肥における肥料拡散性の評価時期や流入施肥前の田面水深と施肥後の肥料濃度分布との関連性性及び流入施肥後の灌漑水継続流入の影響については，使用する装置に関わらず液肥を圃場へ流入させる多くの流入施肥方式で普遍的であることから，本実験結果は，液肥を使用する他のあらゆる流入施肥全般で適用可能であると考えられる．一方，関矢ら（2008，2009）のような固形肥料を袋に入れて直接水口から固形肥料を溶解させながら短時間で

流し入れる施肥法においては，施肥前の田面水深と施肥後の田面水窒素濃度分布との関係について上記と同様の結果が得られるかどうかの確認がなされていないため，今後検討を要する．

表 4-1　流入施肥直前の水深が施肥直後の水中電気伝導率の変動係数に及ぼす影響

Table 4-1　Effect of water depth before inflow fertilizer experiments on coefficient of variation of underwater electrical conductivity after fertilizer application

初期水深（cm）		0	1	2	3
最終水深（cm）		5	5	5	5
施肥時間（min）		100	80	60	40
電気伝導率（n=8）	平均値（mS/cm）	0.74	0.78	0.79	0.92
	標準偏差	0.01	0.27	0.31	0.45
	変動係数（%）	1.7	36.7	39.6	48.9

注1）流入施肥前の田面水深を初期水深，流入施肥後の田面水深を最終水深とした
　2）液肥の滴下流量は3 mL/s，灌漑水流量は25 mL/sとした.
　3）電気伝導率の平均値は，試験終了後にプール内8箇所の田面水を測定し，その平均値とした.

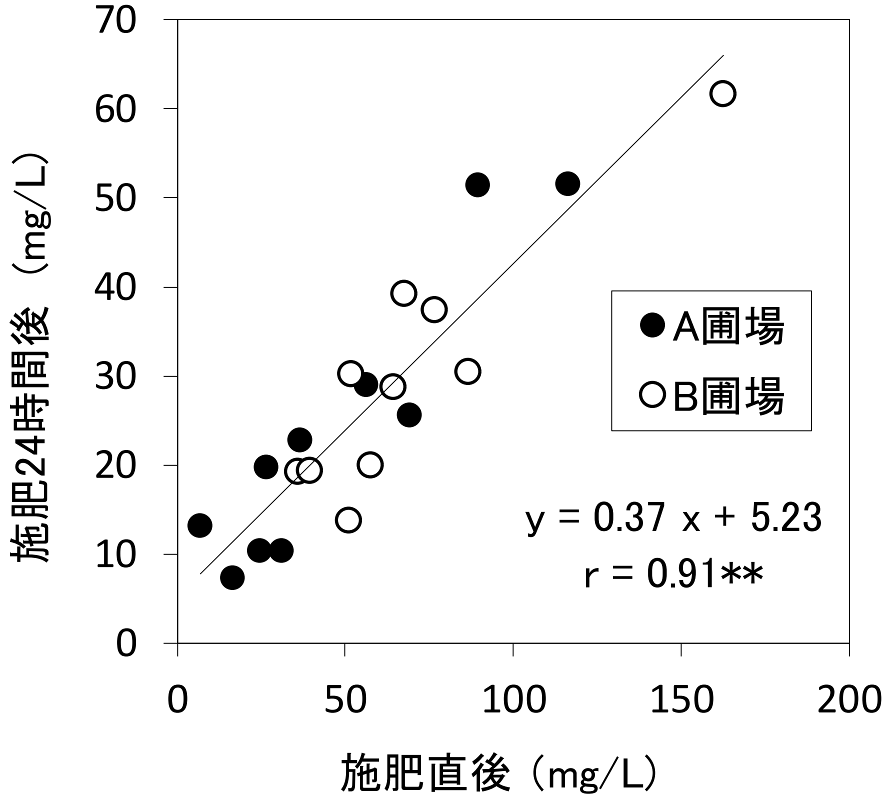


図 4-1　施肥直後と施肥 24 時間後における田面水の窒素濃度の関係

Fig. 4-1　Relationship between the concentration of paddy water nitrogen immediately after fertilization and 24 hours after fertilization

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<0.01）

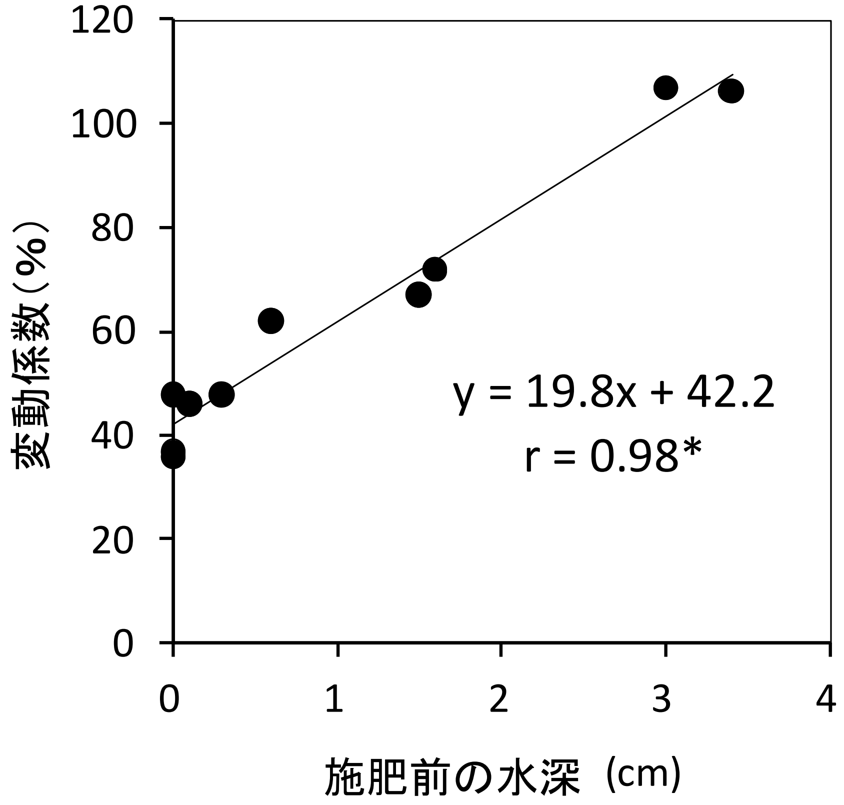


図 4-2　流入施肥直前の田面水深と流入施肥直後の田面水窒素濃度変動係数との関係

Fig. 4-2　Relationship between the depth of paddy field before inflow fertilization experiments and coefficient of variation of paddy water nitrogen concentration after fertilization

注）回帰直線は全データに対する．（*：p<0.05）

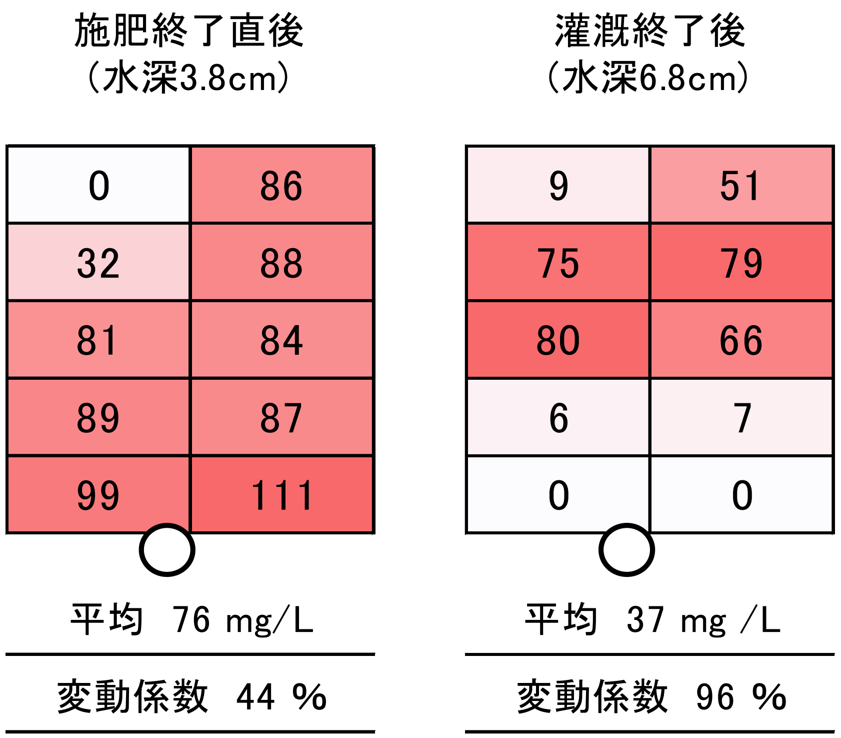


図 4-3　流入施肥終了後の灌漑水継続流入による田面水窒素濃度分布

Fig. 4-3　Distribution of paddy water nitrogen concentration owing to continuous flow of irrigation water after inflow fertilization experiments

注）圃場面積は 20 a．図中の数値は窒素濃度(mg/L)，○印は水口位置を示す．

第 5 章 総合考察

今日までに様々な流入施肥法が開発・実証されてきたが，第 1 章に示したように，いずれも肥料拡散性や装置の取り扱いの面において実用性に乏しかった．第 2 章「圃場で液肥が調製できる水稲用流入施肥装置」では，それまで研究されてきた成果・知見を参考にして，特別な動力を必要としない簡便な機構で液肥の圃場への供給量を一定にできる新たな施肥装置の開発を目指した．ここでは，尿素等一般的に入手が可能な固体肥料を用いて液肥を圃場で調製しつつ，液肥の供給量をほぼ一定とする流入施肥装置 2 機種を開発した．装置 A（手動弁開度調節式流入施肥装置）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．水田の水口で灌漑水を流しながら固体肥料を溶解して流し入れる従来の流入施肥技術（関矢ら 2008，2009）は，水田に供給される肥料濃度が不安定となるため，肥料の散布精度が悪化しやすい課題があったが，装置 B（改良型手動弁開度調節式流入施肥装置）は装置 A 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結果，装置 B を用いた実証実験では，慣行で行われている追肥法と比較して，省力的な施肥作業を可能にしつつ，水稲の生育や収量，玄米品質はほぼ同等であることが明らかになった．

さらに第3章「灌漑水流量変動に対応した水稲用流入施肥装置」では，第2章の研究を一歩進めて，従来の流入施肥において常識とされていた液肥の水田への供給量をできるだけ一定にするという考え方を転換し，灌漑水流量の変化に合わせて液肥の供給量を適切に変動させる装置を開発することで，従来よりもさらに散布精度の高い流入施肥を目指した．その結果，灌漑水流量を流量計で直接計測しつつ，流量変化に応じて適切な液肥の電動弁開度を決定する方式を採用した装置C（電動弁開度調節式流入施肥装置）では，圃場実験の結果，液肥の圃場への供給量を一定とした装置Bより流入施肥後の肥料拡散性が向上した．一方，ベンチュリ効果によるアスピレータ吸引方式を採用した装置D（アスピレータ吸引式流入施肥装置）では，液肥の吸引についての基礎的な実験を行い，一般的に市販される安価な資材の組み合わせにより，簡易に液肥を圃場に供給できる流入施肥装置を開発した．圃場実験の結果，灌漑水流量に対応して液肥の吸入量が変化したものの変動幅が大きくなり，逆に流入施肥後の肥料拡散性が悪化する結果となった．このことから灌漑水流量の変動が大きい場合においては，灌漑水流量と肥料滴下流量の比率を可能な限り常に一定とすることが重要であることが示唆された．

本研究で開発した装置の今後の展望については，装置A及び装置Bについては，追肥を対象とした従来の流入施肥技術の代替として実用化が期待できる．また，装置Dは，散布精度の面で装置Bや装置Cよりも劣るものの製造コストや取り扱いの面で優れており，今後改良を

加え簡単な仕組みで液肥の吸入量を灌漑水の流量変化に対応させることができれば，高精度な水稲用流入施肥装置としての実用化が可能である．装置Cについては，より高精度な流入施肥が可能となることから，追肥だけでなく基肥を含む水稲の施肥全量を流入施肥とする全量流入施肥体系における活用が期待できる．装置Cの実用化にあたっては，第3章「灌漑水流量変動に対応した水稲用流入施肥装置」の考察で述べたように，導入費用の面から圃場単位での装置設置は現実的ではないため，例えば，機場単位で本装置を設置して，本管流入方式による広域的な施肥管理で有効であると考えられる．本管流入方式については，第1章「1.3 流入施肥技術の現状と課題」の中で課題について述べたように，1970年代に実施された研究で，広範囲に一度に施肥を行う必要があることから品種・栽培法の統一が課題とされている．近年の農業をめぐる状況として，農家1戸当たりの経営耕地面積が増加しており，茨城県においても100ha規模の水田を経営する農家がめずらしくなくなってきており，政策的にも農地中間管理機構等を活用しながら農地集約を進めていくことで，機場単位で品種・栽培法の統一ができる環境が整いつつある．また，現在，国の戦略として農業分野においても積極的にICTやAIを取り入れていく方針が打ち出される中，内閣府主導で「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）」プロジェクトが進められている（内閣府 2018)．特に，水田の自動水管理の分野においては，ICT活用の期待が高く，例えば同プロジェクトにおいても，パイプライン水系を対象とした自動水管理システムの

開発が進められており，これらのスマート農業と本管流入方式の流入施肥技術は非常に親和性が高いと考えられる．例えば，機場に大型の流入施肥装置を設置して，前日までに自動で複数の水田の田面水を排水したのち，施肥当日は流入施肥装置で本管内に肥料を投入しながら入水を開始することで，一度に複数圃場の流入施肥が可能となる．このようなシステムの実用化のためには，基盤整備やコストの面で越えなければいけないハードルがいくつもあるが，将来的な実用化に向けて，高精度流入施肥に関する基礎的な研究を進めておくことは大変意義深いことであると考える．本研究が，今後の新たな流入施肥技術に関する研究の一助となることを期待する．

摘要

水稲の流入施肥法は，施肥作業の省力化を目的として，水田の水口から灌漑水と一緒に肥料を流し入れる施肥方法である. 今日まで, 様々な流入施肥法が開発・実証されてきたが，第 1 章「序論」に示したように，いずれも肥料の散布精度の課題が残り，実用化には至っていない．そこで第 2 章「圃場で液肥が調製できる水稲用流入施肥装置」では，流入施肥に関する従来の研究成果や事例を参考にして，安価でかつ溶解度の高い尿素を使用して圃場で液肥を調製でき，液肥を水田内に流し入れることができる水稲用の流入施肥装置を開発した．開発した装置を用いた流入施肥の基礎実験において，装置から流出する液肥の滴下流量及び窒素濃度は，施肥開始から施肥終了まで，ほぼ一定に推移し，散布精度の高い施肥が可能となることを確認した．また，本装置を使用した流入施肥の実証実験では，営農圃場で実際に作付される複数の水稲品種を対象に流入施肥実験を実施した結果，背負式動力散布機を使用した硫安の慣行追肥区と比較して，施肥後の水稲葉色，坪刈収量は同程度を確保するとともに，施肥作業の省力化効果を明らかにした．

さらに，第 3 章「灌漑水流量変動に対応した水稲用流入施肥装置」では，第 2 章で得られた研究成果をベースとして，従来よりも散布精度の高い流入施肥法の確立を目指し，灌漑水の流量変動に対応して液肥の滴下流量を変動させる新たな 2 方式の流入施肥装置を開発した．装置 C は，灌漑水の流量変化に応じて適切な液肥の電動弁開度を決定

する電動弁開度調節方式を採用した．本装置を用いた圃場実験の結果，圃場への液肥の供給量を一定とした従来の施肥装置よりも流入施肥後の田面水窒素濃度分布がより均一になることが明らかとなった．一方，簡易かつ高精度な流入施肥装置を目指した装置Dは，ベンチュリ効果を活用して液肥を吸引し灌漑水へ混入させるアスピレータ吸引施肥方式を採用した．装置Dの開発にあたり，液肥の吸引方法についての基礎的な研究を行い，市販品の組み合わせによって流入施肥に適した装置の仕様を明らかにした．圃場実験の結果，灌漑水流量に比例して液肥の吸入量が変化したが，その変動幅は想定より大きく散布精度は悪化したため，装置内部の圧力変化を補正する機構の開発に向けて別途検討を要することが示唆された．

また，第4章「水稲の流入施肥に関する個別要因の解析」では，開発した流入施肥装置を用いて実験した結果をもとに，田面水窒素濃度分布の評価時期や流入施肥前の田面水深と田面水窒素濃度分布との関係及び流入施肥後の灌漑水継続流入による窒素濃度分布変化等の肥料拡散性に関連する各種の個別要因について検証を行った．その結果，流入施肥後の田面水窒素濃度分布を評価する時期として流入施肥直後が適しており，良好な窒素濃度分布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確認した．

以上のように，本研究では目的や方式の異なる4種類の流入施肥装置を開発し，肥料の散布精度や水稲の生育，収量等へ及ぼす影響につ

いて確認するとともに，開発した装置を活用した実験を通して，流入施肥において良好な肥料散布精度を確保するための基礎的な条件を明らかにした．

Improving the spreading accuracy of the inflow fertilization method in paddy fields

Abstract

Introducing a liquid fertilizer along with water during the irrigation of paddy fields allows for a labor-saving fertilization method called inflow fertilization method. Many studies have been conducted to better understand this method. However, the spreading accuracy of the method is yet to be established. Furthermore, it has not been put to practical use. Therefore, in Chapter 2 of this thesis, with reference to conventional research results and examples related to the inflow fertilization method, we have developed liquid fertilizer devices that combine irrigation water and inexpensive urea; the device can also produce and spread the requisite liquid fertilizer in paddy fields for the crops in a highly accurate manner. In the basic examination of the inflow fertilization using the developed devices, the dropping flow and nitrogen concentration of the liquid fertilizer flowing out of the equipment changed almost uniformly from the start of the fertilization process to the end and ensured that fertilization with high diffusibility was attained. After the fertilizer was spread, it was observed that the leaf color and rice yield (calculated by crop-

cutting surveys) were the same as those achieved with a conventional fertilization method, that is, the application of ammonium sulfate using a backpack-type spreader.

In Chapter 3, based on the research results obtained in Chapter 2, we aimed to establish an inflow fertilization method with improved spreading accuracy. As a result, we developed two types of fertilizer application systems for rice paddies to control the drip rate of liquid fertilizers in response to changes in the flow rate of irrigation water. In the first device (Device C), the valve opening rate could be controlled for the spreading of liquid fertilizer according to variations in the flow rate of irrigation water. In field tests for this device, the distribution of nitrogen concentration in the paddy water flowing out after the inflow from the device was better than that with the conventional fertilizer application device, which supplied liquid fertilizer to the field at a fixed rate. The second device (Device D) is simple and cost-effective. It uses the venturi effect, which sucks liquid fertilizer into the device and mixes it with the irrigation water. A study investigating the aspirating liquid fertilizers using a combination of commercial products showed that the specification of the device is suitable for inflow fertilization. In field tests for Device C, the amount of aspirated liquid fertilizer varied in relation to fluctuations in the irrigation water flow rate. Thus, as the fluctuation range increased, spreading accuracy decreased.

Further, in Chapter 4, based on the test results obtained from deploying the devices that were developed, we have examined various individual factors related to fertilizer diffusibility, such as the evaporation time of the paddy water nitrogen concentration distribution, relationship between the depth of the paddy fields before the inflow fertilization and distribution of the nitrogen concentration of the paddy field, and change in the distribution of nitrogen concentration due to the continuous inflow of the irrigation water after the fertilizer is spread. As a result, it was established that the best time to estimate paddy water nitrogen concentration distribution after fertilization is immediately after spreading the fertilizer. To ensure optimal nitrogen concentration distribution, it is necessary to completely drain the field until the field surface is exposed before fertilization. In addition, it is necessary to stop the flow of irrigation water immediately after fertilization is completed.

As mentioned above, we developed four types of inflow fertilizer devices with different objectives. Afterwards, we confirmed the impact of the spreading accuracy of the fertilizer on the growth and yield rate of rice plants by experiments utilizing the devices that were developed; thus, we established the basic conditions for ensuring optimum spreading accuracy during inflow fertilization.

謝辞

本研究の計画，遂行ならびに本論文のとりまとめにあたり，筑波大学大学院生命環境科学研究科先端農業技術科学専攻　重田一人教授（国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構中央農業研究センター）におかれましては，終始懇切な御指導と多大な御助言を賜りました。謹んで深甚なる感謝の意を表します。

筑波大学大学院生命環境科学研究科先端農業技術科学専攻　深津時広教授（国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構農業技術革新工学研究センター），筑波大学大学院生命環境科学研究科生命産業科学専攻　北村豊教授，筑波大学大学院生命環境科学研究科国際地縁技術開発科学専攻　野口良造准教授，国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構生物系特定産業技術研究支援センター新技術開発部　宮崎昌宏博士におかれましては，本研究の遂行及び論文の御校閲に関しまして多くの御指導と有益な御助言をいただきました．謹んで感謝の意を表します．

研究の実証農場と貴重な御助言を提供して下さいました有限会社横田農場の横田修一代表取締役，同社生産管理部長の平田雅敏氏に深く感謝の意を表します．

流入施肥後の田面水窒素濃度分析を始め，土壌肥料学に関して全般的な知見を与えてくださいました山形県村山総合支庁産業経済部北村山農業技術普及課（元茨城県農業総合センター農業研究所）の真壁周

平博士，国立大学法人大阪大学微生物病研究所の成川恵博士（元茨城県農業総合センター農業研究所），茨城県農業総合センター農業研究所の安田丈洋嘱託研究員に深く感謝申し上げます．

第２章の装置開発及び実験を全面的にサポートしていただきましたヤマト農磁株式会社の山田真弘代表取締役社長，同社開発部長根本正久氏に心より感謝申し上げます．

第３章の装置開発を全面的に引き受けていただきました株式会社前川製作所電機ブロック営業開発グループの宮本昌典氏，同社ソリューション事業本部制御システムセンターシステム設計グループの瀧上弁太朗氏に心より御礼申し上げます．

本研究は，独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構生物系特定産業技術研究支援センターが実施する「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）」と，国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構生物系特定産業技術研究支援センターが実施する「革新的技術開発・緊急展開事業（うち地域戦略プロジェクト）」のうち「農匠稲作経営技術パッケージを活用したスマート水田農業モデルの全国実証と農匠プラットフォーム構築」の助成を受けて実施しました．この２つのプロジェクトの研究代表者を引き受けて下さいました九州大学大学院農学研究院農業資源経済学部門

南石晃明教授に深く感謝の意を表します．

なお，本研究は，筆者が茨城県農業総合センター農業研究所に勤務を行いながら筑波大学大学院生命環境科学科先端農業技術科学専攻に在籍して行われました．茨城県農業総合センター農業研究所　渡邊健所長，同研究所　横須賀知之研究調整監，同研究所　田中研一作物研究室長並びに同研究所職員各位に深謝の意を表します．

引用文献

日高 伸・藍島雅之（2000）：水稲の育苗箱全量施肥技術，埼玉県農業実験場研究報告(52)；13-25

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稲追肥の軽労化，東北農業研究（67)；15-16

Huang X.，Li G. ，Wang M. (2009)：CFD simulation to flow field of venturi injector，In Li D.，Zhao C. (eds) *Computer and Computing Technologies in Agriculture II Volume 2*，Boston Springer；805-815

石居企救男・秋本俊夫（1967)：水田における液肥の利用，日本土壌肥料学雑誌 38(1）；43-50

石居企救男（1969)：肥料農薬の水運施用に関する研究，埼玉県農業試験場研究報告（32）；35-58

金田吉弘・粟崎弘利・村井 隆（1994)：肥効調節型肥料を用いた育苗箱全量施肥による水稲不耕起移植栽培，日本土壌肥料学雑誌 65(4)；385-391

加藤宏明・榊原正典 （2003)：農家が簡単に手作りできる液肥混入器，関東東海北陸農業研究成果情報 2003（1)；46-47

越野正義（1988)：第二改訂詳解肥料分析法，養賢堂；pp.60-62

久保田　勝（1998a)：水稲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)：水稲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

久津那浩三・上森 晃（1971）：固体肥料の流入施用について，日本土壌肥料学雑誌 42(12)；471-475

三沢真一(1987)：農業用水取水実態の変化に対応を，農業土木学会誌 55(8)；2-4

内閣府（2018)：戦略的イノベーション創造プログラム（ＳＩＰ）次世代農林水産業創造技術（アグリイノベーション創出）研究開発計画ウェブページ [http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/keikaku/9_nougyou.pdf]（最終検索日:2018 年 11 月 18 日）

中村和正・九本康嗣・沢口芳範・島崎昌彦（1997)：水田配水管路の水需要のモデル化，農業土木学会誌 65(3)；261-266

日本硫安工業協会（1967)：水稲追肥に関する土壌肥料研究収録

新町文絵 (2006)：肥料の定義と分類，尾和尚人・木村眞人・越野正義・三枝正彦・但野利秋・長谷川功・吉羽雅昭(編)，肥料の辞典，朝倉書店；67-72

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，茨城県農業実験場研究報告第 23 号；37-69

西川康之・渡部富男(1995)：水稲の施肥における液肥の流入施用方法，千葉県農業実験場研究報告（36)；11-22

西山芳邦・中西 充・神余暢一・十河 和博（2008)：液肥混入器を利用した TPN 水和剤の簡易希釈法の検討，香川県農業実験場研究報告

（59）；41-43
農林水産省（2004）：米穀の需給及び価格の安定に関する基本指針
農林水産省（2010）：世界農林業センサス報告書
農林水産省（2017a）：平成 29 年度食料・農業・農村白書
農林水産省（2017b）：食料・農業・農村基本計画
農林水産省（2017c）：農業経営統計調査 平成 28 年産 米生産費
農林水産省（2018）：米をめぐる状況について
関矢博幸・木村勝一・西田瑞彦（2008）：飼料用イネ向けの簡易な流入施肥による追肥法，東北農業研究(61)；25-26
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安の流入施肥技術，東北農業研究(62)；35-36
鈴木良則・多田勝郎・小菅裕明（2010）：岩手県における育苗箱全量施肥専用肥料の溶出と水稲の生育，東北農業研究（63）；45-46
高橋能彦・土田 徹・久保田 勝(1998)：水稲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，日本土壌肥料學雑誌 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稲液肥流入の均一施肥効果と効率的施肥条件の検討，日本土壌肥料學雑誌 76(6)；811-816
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，日本土壌肥料學雑誌 36(12)；379-381