

水稻の打込み式代かき同時土中点播栽培における播種後落水および施肥条件が出芽・苗立ちに及ぼす影響

古畑昌巳¹⁾

(2006年 3 月22日 受理)

要 旨

古畑昌巳 (2007) 水稻の打込み式代かき同時土中点播栽培における播種後落水および施肥条件が出芽・苗立ちに及ぼす影響。九州沖縄農研報告 48:79-124.

九州沖縄農業研究センターで開発した打込み式代かき同時土中点播方式で湛水土中に播種した水稻の出芽・苗立ちの実態を解析し、水管理を中心とした出芽・苗立ち安定化に向けて検討した。出芽の遅速と出芽後の生育の関係をみると、早期に出芽した場合、最終的な出芽率は高まって初期生育も促進されたが、出芽が遅れた場合、最終的な出芽率は低下して初期生育も遅れた。また、播種後、湛水管理を続けると、出芽後も鞘葉の伸長が続き、第1葉・第2葉の生育が遅延した。一方、落水管理は、気相の拡大により通気性を向上させたため、出芽後、鞘葉、第1葉は伸長を早めに停止し、第2葉の抽出は早まり、茎葉と根の乾物重が増加した。播種後の落水日数と生育の関係をみると、播種後の落水完了が遅れるほど通気性の改善がなされず、出芽・苗立ちが不良となった。さらに、入念な代かきは、土壌の団粒構造をより破碎して通気性を低下させ、落水管理の生育促進効果を損なった。施肥との関係では、打込み式代かき同時土中点播方式は、種子と粒状化成肥料の同時打込みが可能であるが、種子と肥料が近接するため、出芽率は低下し、地上部・地下部の初期生育が遅れる傾向を示し、基肥由来のアンモニア態窒素濃度が高まるにつれて種子のグルコース含量および出芽率はともに低下する傾向を示した。この場合、播種後の落水管理により出芽率が改善され、地上部・地下部の初期生育も回復し、同時施肥による初期生育の遅れが解消された。

キーワード：アンモニア態窒素，稲，出芽，代かき，施肥，湛水直播，苗立ち，落水。

目 次

I. 緒論	79
II. 播種後の水管理が湛水直播水稻の出芽と苗立ちに及ぼす影響	81
III. 播種前の代かき程度が湛水直播水稻の出芽と苗立ちに及ぼす影響	87
IV. 落水開始時期が湛水直播水稻の出芽と苗立ちに及ぼす影響	94
V. 圃場における播種前の代かきおよび播種後の落水程度が打込み点播機を利用した湛水直播水稻の出芽と苗立ちに及ぼす影響	99
VI. 打込み同時施肥と播種後の落水が湛水直播水稻の出芽と苗立ちに及ぼす影響	104
VII. 出芽速度および種子の代謝産物が湛水直播水稻の出芽と苗立ちに及ぼす影響	109
VIII. 総合考察	116

IX. 総合摘要	118
引用文献	119
Summary	123

I. 緒 論

わが国の稲作において散播や条播による湛水土中直播栽培は、慣行の稚苗移植栽培に比べて省力であるが、耐倒伏性が劣り、収量も減少しやすいという問題がある。しかし、九州沖縄農業研究センターで開発された打込み式代かき同時土中点播栽培⁵⁴⁾では、約1 cmの土壌中に均一な播種が可能なることから他の播種様式で行う湛水直播栽培に比べて耐倒伏性が改善された^{55, 81)}。また、打込み式代かき同時土中点播直播栽培は、収量確保のために重要な株当たりの穂数が多くなり、乾物生産面でも出穂後の上位葉のSLA(比葉面積)が小さく、群落下層部へのPAR(光合成有効放射)透過度が高くなり、乾物生産特

性に優れ⁷⁶⁾、収量性が移植水稻並みとなる^{28, 82)}。これらのことから、本直播栽培は2005年度で、全国で約2700haに普及している。一方、出芽・苗立ちの向上と安定化は直播栽培の技術を確立する上で最も重要な課題の一つであり、打込み式代かき同時土中点播栽培でも、従来の湛水土中直播栽培と同様、種子を土壤中に埋没させるため、表面播種に比べて出芽率が低下しやすい。そのため、播種直後から7～10日間程度の自然落水管理を行うことによって出芽・苗立ちの確保が図られている⁷⁷⁾。この播種直後の長期間の落水は、従来の湛水土表直播栽培および湛水土中直播栽培において出芽期以降に行われていた短期間の一時落水である「芽干し」とは異なるもので、打込み式代かき同時土中点播栽培ばかりではなく湛水直播栽培全般に適用される基本技術として全国的に普及してきた^{32, 33, 47)}。

従来、湛水土中直播栽培において出芽・苗立ちを向上させ、またその後の生育を安定させる方法については、種子への過酸化カルシウム剤被覆処理⁴²⁾をはじめ、浸種時のジベレリン処理⁴⁸⁾、過酸化カルシウム剤への殺菌剤の添加⁴⁴⁾、過酸化カルシウム剤被覆種子の貯蔵条件⁷⁹⁾などの様々な検討がなされてきた。また、古くは種子の塩水選⁶⁸⁾および催芽程度^{13, 68)}などの種子予措が出芽・苗立ちに影響を及ぼすことが報告されている。種子の塩水選を比重1.13前後で行い、また催芽程度を鳩胸状態とすることは、湛水土中直播栽培における種子予措においても基本技術となっている。一方、出芽・苗立ちを低下させる要因については、播種期の低温と播種深の影響^{36, 52)}、湛水土壌中での土壌還元による出芽阻害²²⁾などが明らかにされており、湛水土中直播ではこれら複数の環境要因が同時に、出芽・苗立ちに影響を及ぼしていると考えられている。さらに、播種深と過酸化カルシウム剤被覆量が出芽・苗立ちに及ぼす影響⁶²⁾、麦稈の有無が出芽・苗立ちに及ぼす影響⁴⁹⁾、粘土混合被覆剤など新たな被覆資材が出芽・苗立ちに及ぼす影響^{20, 29, 41)}、播種後の水管理が水稻の初期生育に及ぼす影響⁵³⁾なども報告されている。

播種後の落水管理による出芽・苗立ちの向上については、ポット実験では播種後5日間の芽干しが有効であり⁶³⁾、圃場実験では出芽盛期の落水および出芽揃い期からの浅水管理³⁰⁾、播種直後から出芽ごく初期における2～3cm以上の亀裂ができるほどの強

い落水⁴⁷⁾、出芽揃い期までの落水^{32, 64)}が有効であると報告されている。また、播種後の落水期間が長い場合には、苗立ち率は変わらないが下位葉節からの分げつの発生が多くなり増収すること⁵⁸⁾、播種後の湿潤管理の出芽・苗立ちは湛水管理に比べて優れるが、落水管理に比べて劣ること⁵³⁾が報告されている。これらの研究では、播種後の落水管理の有効性は示されているが、落水程度を土壌条件から評価する点ではまだ不十分で、落水した場合の土壌表層の含水比が出芽およびその後の生育に密接に関わることを示す報告²⁷⁾があるのみである。

打込み式代かき同時土中点播機は、播種と同時に粒状肥料の施肥も行えるため、基肥散布作業の省力化が可能になっており⁷⁸⁾、肥料の緩効成分の割合を高めることによって、基肥のみで従来の分施肥とほぼ同等の収量を確保した事例の報告もある³⁹⁾。しかし、本点播機は、土壌全層に施肥する全層施肥に比べて出芽・苗立ちの不良や初期生育の遅延が認められることがある。これまでに施肥が出芽・苗立ちに及ぼす影響については、土壌溶液中のアンモニア態窒素濃度の上昇が出芽を阻害することが報告されている^{18, 23)}。また、種子近傍に肥料があることによって出芽・苗立ちが劣ること⁶⁸⁾、緩効性肥料を用いて打込み施肥を行った場合には苗立ちに及ぼす影響は小さいことが報告されている⁷⁸⁾。さらに、その後の生育・収量について、播種後落水と同時に緩効性肥料を基肥として施用した場合、湛水管理と比べて生育の差は小さかったが、播種後落水と同時に速効性肥料を基肥として施用した場合、湛水管理に比べて落水終了時には土壌中アンモニア態窒素含有量が低下しており、初期生育は旺盛なものの、幼穂分化期の窒素吸収量は低下して減収となることが報告されている⁸⁰⁾。このように、打込み同時施肥は施肥位置が表層に偏ることで生じる幾つかの問題点を抱えており、また、それは前述の播種後の水管理とも関連していることから、打込み同時施肥を行った点播水稻の出芽から苗立ちに至る生育経過を明らかにして生育遅延を回避する方策を検討する必要がある。

上述のように、打込み式代かき同時土中点播栽培を含む湛水直播栽培では、土中播種された水稻種子の出芽・苗立ちを栽培面からより向上、安定化させる必要があるにもかかわらず、出芽・苗立ち過程における土壌環境およびイネ幼植物の生長過程が十分に

明らかにされていない。ましてや、打込み式代かき同時土中点播により、土壌中約1 cmの限定された深さに播種された場合のイネ幼植物の出芽から苗立ちに至る生育の実態ならびに、その土壌環境の変化についての詳細な調査研究は、これまでにない。そこで本研究は、播種後の落水および施肥が出芽・苗立ちに及ぼす影響を、土壌環境については土壌物理性や土壌中に溶出した窒素濃度、イネ幼植物の生育については形態や出芽速度に着目し、土壌環境とイネ幼植物の生育を併せて解析することによって、打込み式代かき同時土中点播機で湛水土中直播した水稻の出芽・苗立ちの実態と問題点を抽出し、その改善方法ならびに新たな技術の確立に向けて検討した。

本研究を遂行するにあたって、九州農業試験場（現九州沖縄農業研究センター）水田利用部栽培生理研究室長であった楠田宰博士（現農研機構本部総合企画調整部研究管理役）および同研究室主任研究官であった福島陽博士（現農林水産省農林水産技術会議事務局研究調査官）には、共同研究者として終始懇切丁寧なご指導、ご助言をいただいた。また、佐賀大学大学院生の岩城雄飛氏、野間貴文氏および九州沖縄農業研究センター（筑後）の技術専門職の東定洋氏、山口政義氏、水田作研究部非常勤職員の小宮富士子さん、薮文恵さん、堤妙子さん、村上米子さん、中村陽子さんには実験の遂行にあたって多くの支援を賜った。

九州農業試験場水田利用部（現九州沖縄農業研究センター水田作研究部）の元部長であった下坪訓次博士（現富山短期大学教授）、九州沖縄農業研究センター水田作研究部水田作総合研究チームの元主任研究官であった吉永悟志博士（現東北農業研究センター東北水田輪作研究チーム上席研究員）、同部土壌管理研究室の原嘉隆氏（現九州水田輪作研究チーム主任研究員）、草佳那子氏（現中央農業総合研究センター関東飼料イネ研究チーム研究員）、同センター環境資源研究部土壌資源利用研究室（現土壌環境指標研究チーム）の久保寺秀夫主任研究員および荒川祐介主任研究員には実験遂行への支援および数多くのご助言とご教示を賜った。

本論文のとりまとめに際して佐賀大学名誉教授である芝山秀次郎博士および同大学農学部有馬進教授は絶大なご支援およびご教示を頂き、終始懇切丁寧なご指導とご校閲を賜った。また、佐賀大学田代洋

丞教授、鹿児島大学佐々木修助教授、宮崎大学小川紹文教授、佐賀大学上埜喜八助教授にご指導を賜った。

九州沖縄農業研究センター水田作研究部水田作総合研究チームのチーム長であった森田弘彦博士（現中央農業研究センター北陸研究センター北陸農業研究監）には今回の学位取得のきっかけを与えて頂くとともに、終始懇切丁寧なご指導、ご助言、ご激励を頂いた。

以上の方々に心から深謝の意を表する次第である。

なお、本稿は鹿児島大学に提出した学位論文である。

Ⅱ．播種後の水管理が湛水直播水稻の出芽と苗立ちに及ぼす影響

1．緒 言

播種後の落水管理による出芽・苗立ちの向上については、ポット実験⁶³⁾ および圃場実験^{30), 32), 47), 64)} で報告されているが、これらの研究では、播種後落水管理を行った場合の土壌環境および土壌中に播種された水稻種子の生育の実態は十分に明らかにされていない。したがって、これらの実態を明らかにして問題点を抽出する必要がある。

このような問題の検討は播種深度および水管理程度が不均一となりやすいため、圃場では容易ではない。そこで、Ⅱでは、土壌条件を均一に設定できるポット条件において打込み式湛水土中直播を想定して、播種直後から異なる水管理条件を設定し、土壌環境の変化が個体の発芽から出芽・苗立ちまでの生育に及ぼす影響を土壌三相構造に着目して検討を行った。

2．材料と方法

1) 試験方法

九州農業試験場（福岡県筑後市和泉。現九州沖縄農業研究センター。以下「九州農試（筑後）」と呼ぶ）内の水田土壌（細粒灰色低地土）を風乾砕土後に1/5000aワグネルポットに充填した。水稻品種「ヒノヒカリ」の催芽初に、コーティングマシン（クボタ製 KC-15）を用いて過酸化カルシウム粉粒剤（過酸化カルシウム16%含有）乾初重の2倍重量被覆して被覆種子を作成し、播種当日まで一週間程度10℃で密封貯蔵した。土壌表面から種

子を挿入することによる表層土壌の攪乱を避けるため、播種は以下の方法により行った。播種前日に入水して代かきを行ったワグネルポットを1日間静置し、土壌と表面水とが分離した後、表面水を除去し、ポットあたり20粒の過酸化カルシウム剤被覆種子を土壌表面に置床した。これとは別に、風乾碎土した土壌を播種当日にコンテナ内で代かきをし、種子が所定の深さになるまでポットに丁寧に充填して覆土した。播種は1997年5月1日、5月22日および6月19日に行い、播種深は1, 2, 3cmの3水準とした。また、播種後、落水区と湛水区を設けた。落水区のポットは、播種数時間後に駒込ピペットを用いて表面水を除去し、その後は土壌表面からの蒸発のみによる自然減水の落水管理とした。湛水区のポットには、あらかじめくみ置きしておいた水道水を、1日3回、駒込ピペットで加えて1cmの水深を維持した。

2) 出芽と苗立ちの調査および解析

出芽数、第1葉（不完全葉）および第2葉を抽出した個体数を、2週間、毎日調査した。播種後3, 5, 7, 10, 14日に、各区1ポット20個体を3ポット（反復）分採取し、各個体の鞘葉と第1葉鞘の全長、種子、茎葉部と根の乾物重を測定した。長さの測定においては屈曲している個体は伸ばして測定した。また、第1葉長については第1葉を抽出した個体のみを測定した。なお、本論文では、第2葉を抽出した個体では葉身の白化、枯死が観察されないこと⁵⁾、イネでは実質的に第2葉抽出後に光合成を開始すること³⁷⁾などから、鞘葉を地表面上に出現させた個体を出芽個体、第1葉抽出後、第1葉葉鞘頂部から抽出した第2葉に緑化が認められた個体を苗立ち個体とした。出芽個体数、第1葉抽出個体数および苗立ち個体数、乾物重については3反復の平均値を求め、鞘葉長、第1葉長は1ポット内の20個体の平均値を求めて、さらにこれらの3反復の平均値を算出した。

出芽率は出芽の評価に最も多く用いられ、播種法の良否を表す最も有効な指標の一つである。しかし一方では、出芽率は、(調査時点での累積出芽個体数/播種粒数)×100(%)で示されるため、出芽過程での日毎の増減やばらつきは評価しにくい。そこで本実験では、(日毎の出芽個体数/播種粒数)×100(%)を日別出芽率として別に表した。さらに、第1葉抽出率、苗立ち率についても同様に日別

第1葉抽出率、日別苗立ち率として算出した。さらに、播種後t日の出芽数をnとして、平均出芽日数(日)を $\Sigma (t \cdot n) / \Sigma n$ (t=1~14)とした。またこれを第1葉抽出、苗立ちにも適用して、それぞれ、第1葉抽出までの平均日数、苗立ちまでの平均日数を求めた。

3) 気温および土壌環境の測定

被覆種子を播種したポットとは別に、代かき土壌のみを充填した1/5000aワグネルポットで落水区と湛水区とを設け、土壌環境の変化を以下の方法により調査した。地温および酸化還元電位(Eh)は、播種深に相当する深さに測温抵抗体および酸化還元電極を差し込んで固定したポットを各条件別に3ポット用意し(1ポット内で1ヶ所のEh測定で3ポット使用)、1時間ごとに測定し、24時間の平均値で示した。気温は、ビニールハウス内のポットの高さに測温抵抗体を設置し、直射光がこれに当たらないようにして測定した。土壌中の酸素拡散速度は深さ1cmおよび3cmで土壌酸素拡散計(大起理化学工業製DIK-1120)を用いて、表面土壌硬度は土壌硬度計(藤原製作所製 山中式平面型)を用いて、それぞれ3反復(3ポット使用、1ポット内では5ヶ所測定)で調査した。土壌の三相分布は、以下の方法により求めた。まず、土壌表面から深さ5cmまでの100mLの土壌コアを、1ポットで1ヶ所、4反復で、2週間の調査期間内に4~6回採取した。秤量後、105℃、24時間通風乾燥で乾固した土壌を再度秤量して乾燥前の重量との差から液相の重量(容積)を求めた。そして、乾固した土壌は粉碎して200mLのメスフラスコに入れ、あらかじめメスシリンダーで200mLとしておいた蒸留水の一部を加えて全量を200mLにフィルアップした。フィルアップに要した水量{この量は(液相と気相の容積を加えた量)+(100mL)となる}から上述で求めた液相の容積を差し引いて気相の容積を求めた。また、メスシリンダー中に残った蒸留水の容積を固相容積とした。土壌構造の指標となる孔隙率は、(液相+気相)/(液相+気相+固相)×100(%)で算出した。

3. 結 果

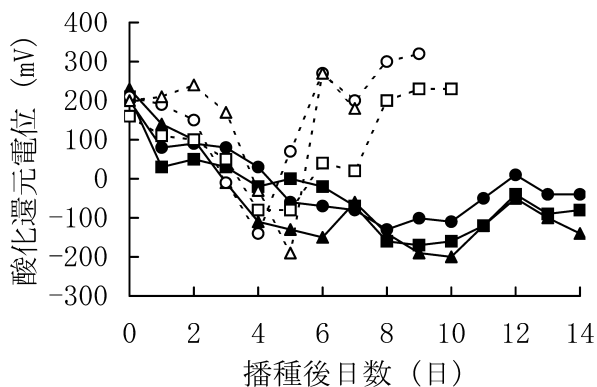
1) 土壤環境の推移

(1) 気温および地温の推移

実験期間中のハウス内（高さ約20cm）の日平均気温および落水区と湛水区の日平均地温はそれぞれ、5月1日播種では21.3℃, 21.2℃, 21.3℃, 5月22日播種では22.0℃, 22.5℃, 22.5℃, 6月19日播種では26.4℃, 26.5℃, 26.4℃であった。日平均気温および地温は3播種時期間で異なったが、それぞれの播種時期における日平均気温と落水区、湛水区の日平均地温はほぼ同じであった。

(2) 土壤中の酸化還元電位 (Eh) の推移

5月1日播種の土壤中のEhは落水区、湛水区とも播種後に低下したが、落水区では播種後5日目以降に急速に上昇し、播種後8日目以降は測定が不能となった。一方、湛水区では、播種後10日目以降は上昇して-200~0 mVの範囲となった。また、両区ともに測定位置が深いほどEhは低く推移し、より還元の進んだ状態であった（第1図）。5月22日播種および6月19日播種のEhも5月1日播種とほぼ同様に推移して、落水区では播種後数日目には測定不能となった。

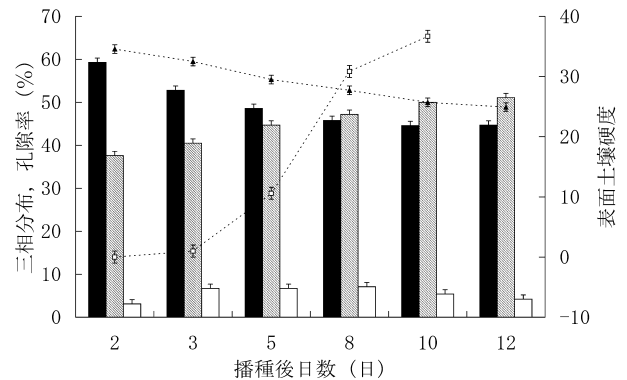


第1図 土壤中の播種位置における酸化還元電位 (Eh) の推移 (5月1日播種区)

注) ○: 落水 1 cm, △: 落水 2 cm, □: 落水 3 cm,
●: 湛水 1 cm, ▲: 湛水 2 cm, ■: 湛水 3 cm.

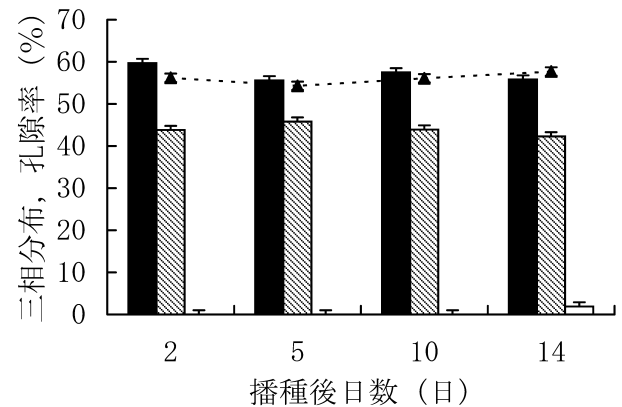
(3) 土壤の三相分布および表面土壌硬度の推移

5月1日播種の土壌表面から深さ5 cmまでの土壌三相分布は、落水区では、播種後日数の経過に伴って液相率が減少し、その一方で固相率は増加した。また、気相は実験期間を通して認められた。土壌構造の指標である孔隙率は、播種後日数の経過に伴って低下した。表面土壌硬度は、播種後5日目から急速に上昇した（第2図）。一方、湛水区では、



第2図 落水区における土壌の三相分布の変化と表面土壌硬度の推移 (5月1日播種区)

注) 黒棒は液相率, 斜線の棒は固相率, 白棒は気相率を示し, 白四角は土壌硬度, 黒三角は孔隙率を示す.
孔隙率 = $\{(\text{液相} + \text{気相}) / (\text{液相} + \text{気相} + \text{固相})\} \times 100 (\%)$. エラーバーは標準誤差 (n = 4).



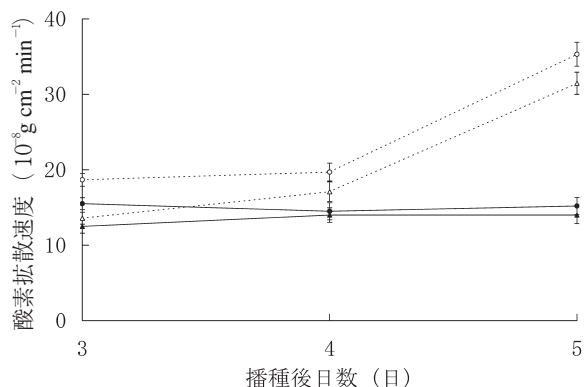
第3図 湛水区における土壌の三相分布の変化 (5月1日播種区)

注) 黒棒は液相率, 斜線の棒は固相率, 白棒は気相率を示し, 黒三角は孔隙率を示す. エラーバーは標準誤差 (n = 4).

土壌の三相分布と孔隙率は実験期間を通してあまり変化しなかった（第3図）。また、土壌は軟弱であったため、土壌表面の硬度は測定できなかった。5月22日播種および6月19日播種の落水区および湛水区の三相分布、孔隙率、表面土壌硬度は5月1日播種とほぼ同様の結果であった。

(4) 土壌中の酸素拡散速度の推移

5月1日播種の落水区の土壌中酸素拡散速度は播種後3日目から5日目にかけて上昇し、土壌通気性が向上していることが認められた。一方、湛水区の土壌中酸素拡散速度は、播種後3日目から5日目にかけてほとんど変化せず、土壌通気性は変化しなかった。また、落水区、湛水区ともに土壌中酸素拡散速度は測定位置が浅いほど大きく、高い通気性を示した（第4図）。5月22日播種および6月19日播



第4図 土壌中の播種位置における酸素拡散速度の推移 (5月1日播種区)

注) ○: 落水 1 cm, △: 落水 3 cm, ●: 湛水 1 cm, ▲: 湛水 3 cm. エラーバーは標準誤差 (n = 3).

種の落水区および湛水区の土壌中酸素拡散速度は5月1日播種とほぼ同様の結果であった。

2) 出芽と苗立ちの様相

(1) 播種後14日目の苗立ち率

3播種時期ともに播種深 1 cm では湛水区, 落水区の苗立ち率には有意差はなかった。播種深 2, 3 cm の落水区の最終苗立ち率は5月1日播種, 5月22日播種では湛水区に比べて有意に低く, とくに播種深 3 cm では大きく低下し, 6月19日播種の播種深 3 cm でも落水区が小さい傾向であった (第1表)。出芽から第1葉抽出までの日数, 苗立ちまでの日数は, 5月1日播種で最も長く, 6月19日播種で最も短く (データ省略), 実験期間中の平均気温が高いほど日数が短かった。

第1表 播種後の水管理と最終苗立ち率の関係

播種日	播種後 水管理	最終苗立ち率 (%)		
		播種深		
		1cm	2cm	3cm
5月1日	落水	93±4	90±2	62±6
	湛水	98±1	98±1*	83±4*
5月22日	落水	95±4	85±2	65±5
	湛水	95±2	92±3*	92±1**
6月19日	落水	100±0	93±2	75±4
	湛水	95±2	92±1	82±3

注) 最終苗立ち率 = (播種後14日目の苗立ち個体数/播種粒数) × 100 (%). 平均値 ± 標準誤差で示す (n = 3). *は5%水準, **は1%水準で落水区と湛水区間に有意差があることを示す (t検定).

(2) 出芽から苗立ちまでの推移

播種後の異なる水管理条件における日別出芽率, 日別第1葉抽出率および日別苗立ち率の推移を播種深度別に第5図に示した。各播種時期とも同様の傾向が認められたため, ここでは5/1播種の結果を示した。播種深 1 cm の場合, 落水区の出芽は播種後4日目から認められ, 日別出芽率は播種後3日目から5日目にかけて急激に高くなり, 5日目にピークに達した後に急激に低下した。第1葉の抽出, 苗立ちは出芽後それぞれ1日目, 2日目から認められた。日別第1葉抽出率は播種後4日目から5日目にかけて急激に高くなり, 5日目にピークに達した後に急激に低下した。また, 日別苗立ち率は播種後5日目から7日目にかけて急激に高くなり, 7日目にピークに達した後に急激に低下した。湛水区の日別出芽率の推移は落水区とほぼ同様であったが, 日別第1葉抽出率および日別苗立ち率は増加とピークに達する日が落水区よりも遅かった。

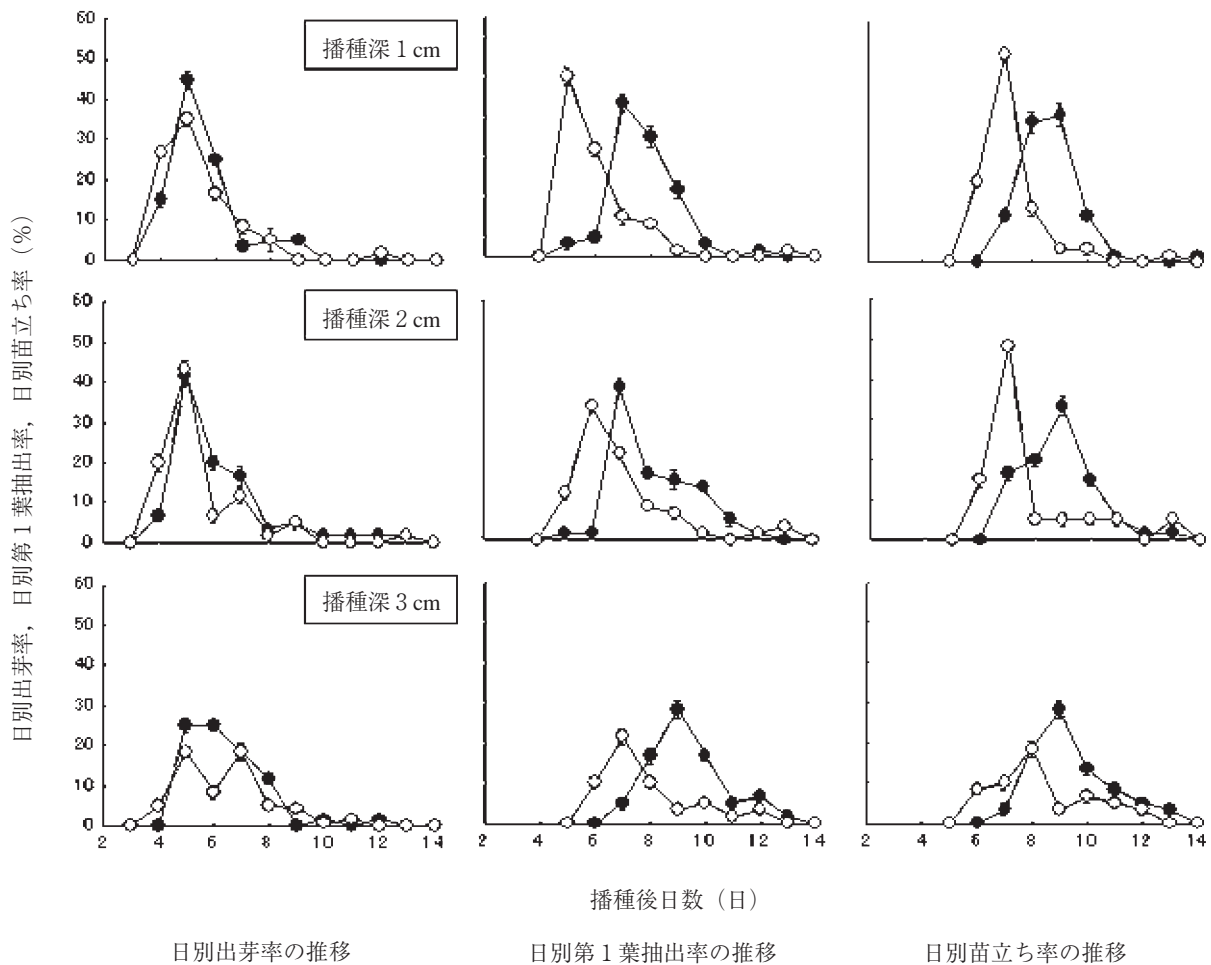
播種深 2 cm および 3 cm の場合, 播種深 1 cm と同様に落水区の日別第1葉抽出および苗立ちは湛水区に比べて早まる傾向が認められた。また, 落水区, 湛水区ともに, 出芽から苗立ちまでの日数は播種深 1 cm の場合と大きく異なることはなかったが, 播種深 1 cm に比べて, 出芽, 第1葉の抽出日および苗立ちがピークに達した日は遅く, 出芽から苗立ちまでの日数が長くなる傾向を示した。

(3) 播種から出芽までの平均日数および第1葉抽出, 苗立ちまでの平均日数

第5図に示した結果を用いて, 播種から出芽, 第1葉抽出および苗立ちまでの平均日数を求め, 第2表に示した。播種から出芽までの平均日数は, 播種深にかかわらず落水区と湛水区で有意な差はなかったが, 落水区での第1葉抽出と苗立ちまでの日数は, いずれの播種深でも湛水区に比べて有意に短かった。また, 落水区, 湛水区とも播種深が深いほど出芽や第1葉抽出および苗立ちに要する平均日数は長かった。

(4) 鞘葉長および第1葉長の推移

鞘葉の伸長は落水区では播種後7日目にはほぼ完了した。湛水区では鞘葉の伸長が完了したのは播種後10日目で, 落水区に比べて約3日を多く要した。また, 伸長完了した時の鞘葉長は湛水区が落水区に比べて長く, また播種深が深いほど長かった (第6



第5図 播種後の日別出芽率，日別第1葉抽出率および日別苗立ち率の推移（5月1日播種区）

注）○：落水区，●：湛水区．エラーバーは標準誤差（n = 3）．

第2表 播種後の水管理が播種から出芽，第1葉抽出，苗立ちまでの平均日数に及ぼす影響

播種後 水管理	平均出芽日数(日)			平均第1葉抽出日数(日)			平均苗立ち日数(日)		
	播種深1cm	2cm	3cm	播種深1cm	2cm	3cm	播種深1cm	2cm	3cm
落水	5.3	5.5	6.2	6.0	7.0	7.7	7.1	7.4	8.0
湛水	5.5	5.9	6.4	7.7**	8.0*	8.9**	8.6**	8.6*	8.8*

注) 播種後14日目の調査結果．播種後t日の確認数をnとし，平均出芽（第1葉抽出，苗立ち）日数 $\Delta t = \frac{\sum (t \cdot n)}{\sum n}$ (t = 1 ~ 14)．*は5%水準，**は1%水準で落水区と湛水区間に有意差があることを示す（t検定）．

図)。

第1葉は落水区では播種後7日目以降，伸長を停止したが，湛水区では播種後10日目以降も伸長を続けた。その結果，実験終了時の湛水区での第1葉長は落水区に比べて長かった（第7図）。

（5）器官別乾物重の推移

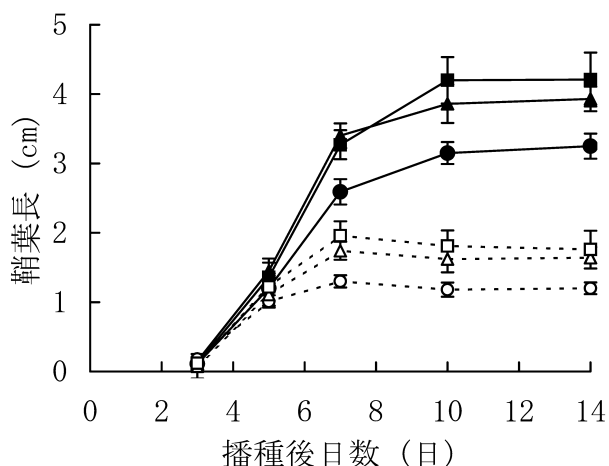
播種後3日目から実験終了時までの乾物重の推移をみると，落水区では，種子乾物重は湛水区に比べて小さく推移する傾向を示し，茎葉部と根の乾物重

は播種後7日目以降に湛水区に比べて大きく増加した。また，両区とも播種後7日目以降には茎葉部乾物重が根の乾物重より大きくなった（第8図）。

4. 考察

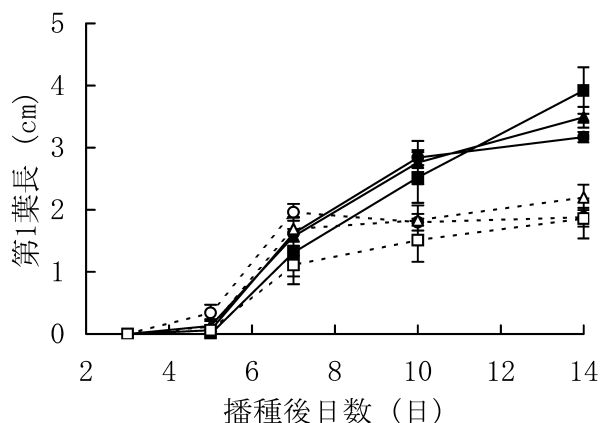
1) 播種後の落水が表層土壌の硬化に及ぼす影響

Ⅱの実験の結果，播種直後から落水した場合，土壌表層の硬さは播種後6日目には親指の貫入にやや抵抗がある程度であったが，その後に土壌硬化は急



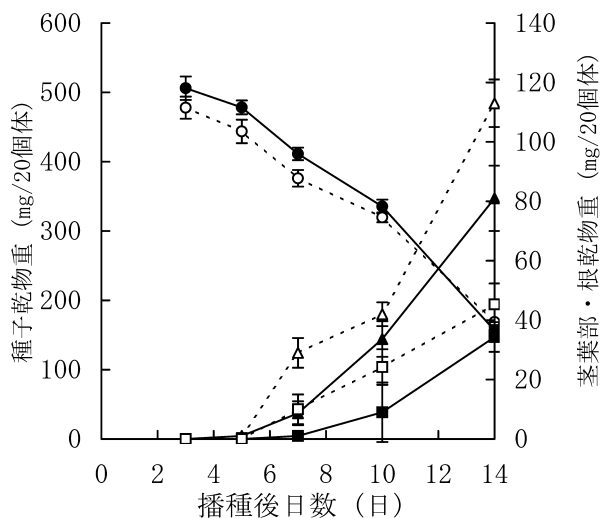
第6図 鞘葉長の推移 (5月1日播種区)

注) ○: 落水1 cm, △: 落水2 cm, □: 落水3 cm,
●: 湛水1 cm, ▲: 湛水2 cm, ■: 湛水3 cm.
エラーバーは標準誤差 (n = 3).



第7図 第1葉長の推移 (5月1日播種区)

注) ○: 落水1 cm, △: 落水2 cm, □: 落水3 cm,
●: 湛水1 cm, ▲: 湛水2 cm, ■: 湛水3 cm.
エラーバーは標準誤差 (n = 3).



第8図 部位別乾物重の推移 (5月1日播種区)

注) ○: 落水種子, △: 落水茎葉部, □: 落水根,
●: 湛水種子, ▲: 湛水茎葉部, ■: 湛水根.
各値は播種深1 cm~3 cm区での平均値です.
エラーバーは標準誤差 (n = 3).

速に増大した (第2図)。また, 落水区の日別出芽率の推移をみると, 播種深3 cmでは, 播種後5日目には種子発芽率は90%を超えていたにもかかわらず, 多くの個体で鞘葉の伸長が土壤中で停滞して (データ省略), 播種深1, 2cmに比べて出芽が遅れた (第5図)。このように落水区の播種深3 cmの条件では, 播種深1, 2cmに比べて出芽に至るまでに日数を要したため, この間に土壌表層が硬化して出芽が抑えられたと考えられた。しかし, 打込み式代かき同時土中点播機による播種深は, 種子打ち込み速度 12m s^{-1} , 標準的な土壌硬度 (粘度 $50 \sim 250\text{dPa s}$) の条件で出芽種子の深さは $12\text{mm} (\pm 6\text{mm})$ であり, 播種された種子の90%以上が播種深2 cm以内であること⁶⁶⁾ から, 打込み式代かき同時土中点播機で播種を行い, その直後から落水管理を行っても実用的には問題ないと判断された。

なお, IIの実験において, 落水区では播種後14日目の時点で, 播種深2 cmと播種深3 cmでは鞘葉長は播種深よりも短かった (第6図)。これは, 未出芽個体では土中で鞘葉が伸長を停止しているため鞘葉長が短く, これを含めた20個体の平均値を算出したためである。また, 落水区では播種後14日目の播種深3 cmの第1葉長も播種深よりも短かった (第7図)。これは, 第1葉抽出が認められなかった場合, 第1葉長を0 cmとしたためである。

2) 播種後の落水が土壌構造に及ぼす影響

一般に, 土壌の孔隙が水で満たされた飽水状態にある土壌では, 排水するとき土壌粒子が水の表面張力によって引き寄せられて土壌収縮が生じるが, その収縮に作用する力は粒径が小さいほど大きくなる¹⁹⁾。また, 代かきは団粒構造を物理的に破壊し団粒の粒径を小さくする⁵¹⁾ ため, 落水によって土壌収縮程度は一層大きくなると考えられる。IIの実験では, 飽水状態の代かき土壌を自然落水させ, 酸化還元電位 (Eh) の経時的測定を試みたが, 播種後8日目以降の落水区では計測が困難であった (第1図)。この要因としては, 落水による土壌収縮が播種後日数の経過に伴って進み, 酸化還元電位センサーの電極と土壌との間に空隙ができ, 電極と土壌との間の水膜が切れたために測定不能の状態になったことが考えられた。また, 落水区における液相率の減少に伴う固相率の増加 (第2図) は, 土壌収縮が進行したことを示しており, 土壌収縮に伴う土壌

表層の硬化は出芽を物理的に阻害し、播種深が深い播種深 3 cm 区では顕著に阻害が認められた（第 5 図）。

3) 播種後の落水が出芽・苗立ち期の苗の生理に及ぼす影響

Ⅱの実験における落水区では湛水区に比べて苗立ちが早く（第 5 図）、種子乾物重は小さく推移したが、茎葉部と根の乾物重は大きく推移し、初期生育が促進された（第 8 図）。この要因として、好気的条件下での種子貯蔵養分の酵素分解および好気呼吸を通じて作られたエネルギーを利用した茎葉部と根の生育が、生育初期から進んだことが推測された。イネでは実質的に第 2 葉が抽出した後に光合成を開始する³⁷⁾ことから、落水区では第 2 葉を早く抽出したことで従属栄養状態から独立栄養状態への移行が湛水区よりも早かったと考えられた。また、出芽が遅れた個体は出芽後に枯死することが多いが⁵⁾、第 2 葉を抽出した個体では、葉身の白化、枯死は観察されないことから、緑化した第 2 葉を抽出した状態を苗立ちと判断した。さらに、Ⅱの実験では、落水土壌中で土壌通気性の向上（第 4 図）と土壌収縮に伴う表層土壌の硬化（第 2 図）とが同時に生じていた。これに関しては、硬い寒天および土壌条件でイネ種子を発芽させた場合、鞘葉の伸長は物理的に阻害される一方、鞘葉の伸長を促進するエチレンの生成が多く、呼吸活性は高まる³⁵⁾との報告がある。

4) 播種後の落水が出芽・苗立ち期の苗の形態に及ぼす影響

Ⅱの実験において、日別出芽率の推移は湛水区、落水区間ではほぼ同様であったにもかかわらず、湛水区では出芽から苗立ちまでに多くの日数を必要としたが、その要因の一つは出芽から第 1 葉抽出までに時間を要したことであった（第 5 図）。湛水土壌は地表数 mm を除いて還元（低酸素）状態であり、地表面（好気的環境）上まで伸長した鞘葉はシュノーケルのような役割を果たし、これによって生長点に送られた酸素を利用して第 1 葉を抽出すると考えられている⁷⁵⁾。Ⅱの実験の湛水区では、表層水の存在によって出芽直後に第 1 葉抽出に必要な酸素が十分になかったため、鞘葉をさらに伸長させた後に第 1 葉を抽出したと考えられた。一方、落水区の出芽から苗立ちまでの時間が短かった要因として、落水土壌では微細なひび割れが生じており²⁷⁾、この孔隙を

通じて地表から入った空気によって種子近傍の土壌通気性は向上し、この条件の中で速やかに出芽から苗立ちへと移行したことが考えられた。これらの結果は、異なる水管理によって生じる酸素分圧あるいは土壌水分の相違が鞘葉の伸長完了から第 1 葉抽出までの過程を制御していたことを示唆しており、湛水・落水の相違による影響は、鞘葉の伸長に要する時間の長さに現れたと考えられる。また、苗立ち時の第 1 葉は、落水区では地際で伸長を停止し、湛水区ではさらに伸長したことが観察され、水管理の違いは第 1 葉の伸長完了および苗立ちの制御にも何らかの形で関わっていることが考えられる。

5. 摘 要

打込み式代かき同時土中点播機での播種を想定し、播種後の落水管理が湛水土中直播した水稻の出芽・苗立ちに及ぼす影響をポット条件で調査した。過酸化カルシウム剤被覆種子を代かき土壌中に播種した後に落水状態とした落水区では、表層土壌の土壌水分（液相）が減少すると同時に土壌収縮によって固相が増加し、気相が生じて通気性は向上した。また同時に表面土壌硬度は高まったが、打込み式代かき同時土中点播機の利用による通常の播種深度、すなわち 1 cm および 2 cm を前提とした場合、出芽にとって問題とはならなかった。また、落水区では、湛水状態とした湛水区に比べて出芽後、鞘葉、第 1 葉（不完全葉）は早く伸長を停止し、同時に第 2 葉の抽出は早まり、種子の乾物重は小さく、茎葉部と根の乾物重は大きく推移した。一方、湛水区では、表層土壌の構造、通気性に変化はなく、鞘葉、第 1 葉ともに出芽以後も伸長を続ける一方で、第 2 葉の抽出は遅れた。以上の結果、過酸化カルシウム剤被覆種子を代かき土壌中に播種した後に落水を行うと、土壌通気性の向上により、出芽後の初期成長が促進され、安定した出芽・苗立ちが可能になると推察された。

Ⅲ. 播種前の代かき程度が湛水直播水稻の出芽と苗立ちに及ぼす影響

1. 緒 言

水田における代かきは土壌の団粒構造を破壊し、その後の落水により土壌は顕著に収縮するので²⁵⁾、直播直後の落水は落水しない場合に比べて、土壌収

縮による土膜形成（表層土壌の硬化）が出芽および苗立ちに影響すると考えられる。また、イネの出芽・苗立ちにとって重要なのはそれに至るまでの期間の長短や土壌条件（土壌通気性、土壌の還元状態等）であり、湛水土中への播種深が深い場合^{7, 62)}のほか、麦稈施用した土壌に湛水直播した場合⁴⁹⁾にも、出芽や苗立ちが低下することが報告されている。したがって、播種後落水栽培下において土壌構造に加えてこれらの要因についても検討する必要があるが、異なる代かき程度が播種、落水後の土壌条件と出芽・苗立ちに至る成長過程に及ぼす影響について十分な解析は行われていない。

このような問題の検討は播種深度および落水程度が不均一となりやすく、土壌内での麦稈等の有機物のむらも生じやすいため、圃場では容易ではない。そこで、Ⅲでは、土壌条件を均一に設定できるポット条件において打込み式代かき同時土中点播栽培を想定して、代かき程度とともに播種深度を変え、また播種前の麦稈施用の有無も加えて、土壌構造や土壌の環境条件が湛水直播後の落水下での鞘葉の伸長、出芽・苗立ちに及ぼす影響を検討した。

2. 材料と方法

1) 試験方法

水稻品種「ヒノヒカリ」を供試し、実験は1998年に九州農試（筑後）の裾上げしたビニールハウス内で行った。土壌と過酸化カルシウム剤被覆種子の準備および播種法はⅡ⁷⁾と同様とし、播種を5月21日に行った。播種前日の代かき時には、1ポット当たり約10秒間攪拌を行った区（以下標準代区とする）、標準代区の3倍の時間をかけて攪拌を行った区（以下3倍代区とする）の2水準を設け、それぞれの土壌粘度をビスコテスター（リオン社製、VT-04）で測定した。また、播種当日の覆土時には、同じ土壌をコンテナ内で上記設定時間と同時間の代かきを行って、標準代区、3倍代区と同様の覆土用土壌を作成し、これをポットにゆっくり流し込んで播種深が1 cmと3 cmとなるようにした。全ての区を覆土した後、駒込ピペットを用いて表層水を除去して、土壌表面からの蒸発のみによる自然減水の落水管理とした。これに加えて各代かき区に前年の成熟期に刈り取って保存していたコムギ（チクゴイズミ）の稈部分を粉碎した麦稈粉を供試し、覆土用

の代かき土壌にポットあたり10 g（500kg/10a相当）ずつ加えて混和した区（麦稈区）および加えない区（対照区）を設定した。なお、Ⅲの実験で麦稈粉を施用したのはポット土壌内のむらを抑えるためであった。そして麦稈を加えない標準代区を標準代対照区、麦稈を加えた標準代区を標準代麦稈区、麦稈を加えない3倍代区を3倍代対照区、麦稈を加えた3倍代区を3倍代麦稈区とし、各区とも反復数を3として実験を行った。

2) 出芽と苗立ちの調査および解析

播種後の出芽・苗立ちの調査期間を2週間とし、出芽個体数を毎日調査した。また、2～4日おきに各ポットから未発芽種子を含む全て（各20粒）の個体を採取し、各個体の鞘葉長を調べた後、種子、茎葉部および根の乾物重を調査した。あわせて鞘葉長/播種深比を求めた。

3) 気温および土壌環境の測定

調査期間中の外気温およびビニールハウス内の気温は、ビニールハウス内に設置したポットの高さで温度カード（Panasonic 製、VS-4050A）を用いて測定し、平均気温を算出した。播種を行わなかった以外は上記と全く同様に作成し、管理した無播種の標準代区、3倍代区のポットを用い、以下の方法により土壌環境の推移を調査した。土壌の三相分布、播種深に相当する土壌中の深さ1 cmおよび3 cmの酸素拡散速度および表面土壌硬度はⅡ⁷⁾と同様の方法で測定した。なお、代かき直後の土壌採取は、100mLの蓋無しの土壌コアの上端が土壌表面に隠れる程度まで垂直にいれ、土壌で完全に満たされた状態で下から蓋をして行い、播種後の採取は畑状態での採取と同様に行った。また、湿式篩別法⁶¹⁾を用いて、篩目2.0～0.1mmまで5層に組み合わせた団篩を水中で上下に一定時間振とうして、篩目0.25mm以上の篩目に残った粗大団粒（粒径0.25mm以上の砂粒子、粒径0.25mm以下の一次粒子からなる団粒を共に含む）の乾土重量割合（集合度）を5反復で求めた後、団粒のみを洗い流し、残った砂粒子の乾土重量を差し引いて、団粒のみを含む粒径0.25mm以上の粗大団粒の乾土重量割合（団粒化度）を5反復で算出した。さらに粒径0.02mm以下の微細団粒の粒径組成についてピペット法⁴⁰⁾を一部改変して測定し、粒径0.002～0.02mmのシルトに相当する画分、0.002mm以下

の粘土に相当する画分に分け、それぞれの乾土重量割合を5反復で求めた。

3. 結 果

1) 土壤環境の推移

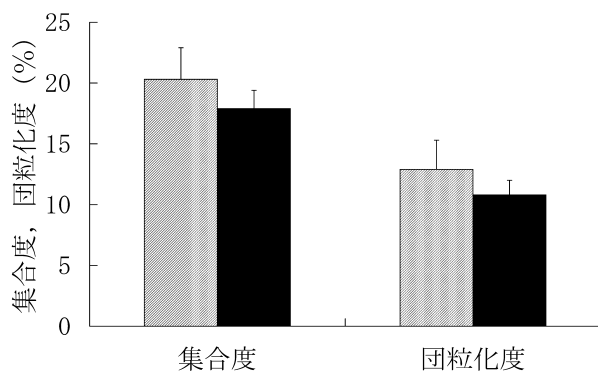
(1) 土壤粘度および土壤表層の団粒の割合

播種前日の代かきでは、土壤粘度は標準代区が50.3dPa S、3倍代区が78.5dPa Sであった。また播種当日の覆土用の代かきでは土壤に加える水の割合を2割程度増やしたために土壤粘度は低下したが、標準代区が10.8dPa S、3倍代区が33.6dPa Sとなり、ともに3倍代区は標準代区に比べて土壤粘度が高かった。

表層から深さ5 cmまでの土壤（以下表層土壤）における粗大団粒の割合は、3倍代区は標準代区に比べて集合度および団粒化度ともに低かった（第9図）。一方、微細団粒の割合は、シルト、粘土のいずれにおいても3倍代区は標準代区に比べて高い傾向が認められた（第10図）。

(2) 調査期間中の気温、土壤の三相分布、孔隙率および表面土壤硬度の推移

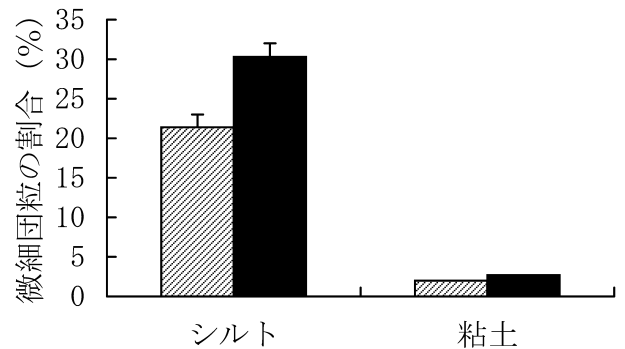
調査期間中の日平均気温の平均値は、外気が21.8℃、ハウス内が24.0℃であった。また、表層土壤の三相分布をみると、標準代区、3倍代区ともに、落水後日数の経過に伴って液相の割合は減少し、その一方で固相の割合が増加した。また気相は、標準代区では播種直後から播種後8日目まで認められたが、3倍代区では播種後2～6日の間のみ、わずかに認められた（第11図）。



第9図 代かき程度が表層土壤における粗大団粒の集合度および団粒化度に及ぼす影響

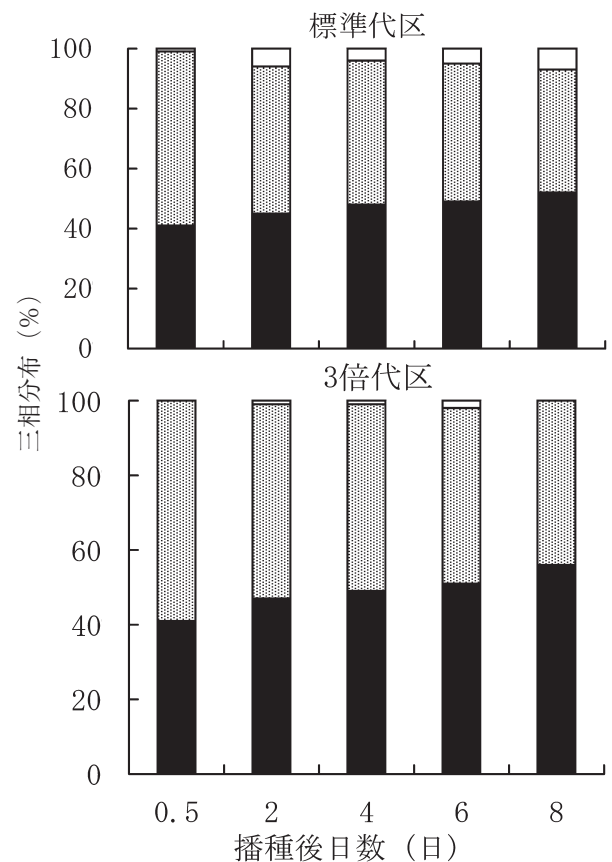
注) 斜線の棒は標準区、黒棒は3倍代区を示す。集合度 = $\{(\text{粒径}0.25\text{mm以上の砂, 団粒の乾土重量}) / (\text{全乾土重量})\} \times 100 (\%)$ 。団粒化度 = $\{(\text{粒径}0.25\text{mm以上の団粒の乾土重量}) / (\text{全乾土重量})\} \times 100 (\%)$ 。エラーバーは標準誤差 (n = 5)。

表層土壤では、標準代区、3倍代区ともに落水後日数の経過に伴って土壤含水率および土壤構造の指標である孔隙率は低下し、土壤水分の低下に伴って土壤構造が変化することが示された。また、3倍代区は標準代区に比べて土壤含水率は高く推移したが、



第10図 代かき程度が表層土壤における微細団粒の割合に及ぼす影響

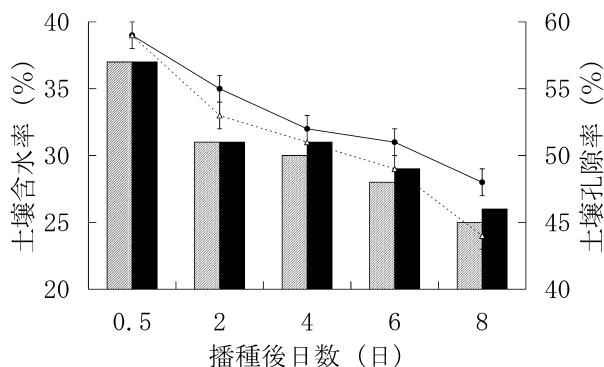
注 斜線の棒は標準区、黒棒は3倍代区を示す。表層土壤に占めるシルトの割合 = $\{(\text{粒径}0.002\sim0.02\text{mmの土壤の乾土重量}) / (\text{全乾土重量})\} \times 100 (\%)$ 。表層土壤に占める粘土の割合 = $\{(\text{粒径}0.002\text{mm以下の土壤の乾土重量}) / (\text{全乾土重量})\} \times 100 (\%)$ 。エラーバーは標準誤差 (n = 5)。



第11図 代かき程度が表層土壤における三相分布（容積率）の推移に及ぼす影響

注) □：気相率，▨：液相率，■：固相率。

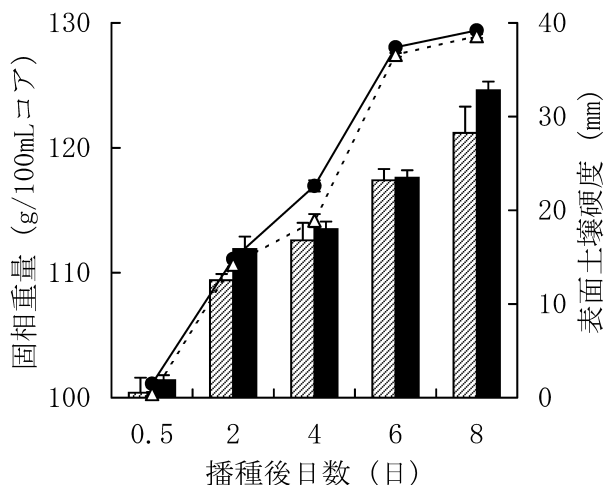
孔隙率は大きく減少し、土壤構造がより大きく変化したことが示された (第12図)。



第12図 代かき程度が表層土壌における土壌含水率および孔隙率に及ぼす影響

注) 斜線の棒は標準区の含水率, 黒棒は3倍代区の含水率を示し, 黒丸は標準代区の孔隙率, 白三角は3倍代区の孔隙率を示す. 土壌孔隙率 = $\{(\text{気相} + \text{液相}) / (\text{気相} + \text{液相} + \text{固相})\} \times 100 (\%)$. 土壌含水率 = $\{(\text{液相重量} / (\text{気相} + \text{液相} + \text{固相}) \text{重量})\} \times 100 (\%)$. エラーバーは標準誤差 ($n = 4$).

表層土壌では, 標準代区, 3倍代区ともに落水後日数の経過に伴って土壌コア (100mL) 当たりの固相重量 (乾土重量) および表面土壌硬度は増加した。また, 3倍代区は標準代区に比べて固相重量は高く推移したが, 表面土壌硬度は低く推移する傾向を示した (第13図)。

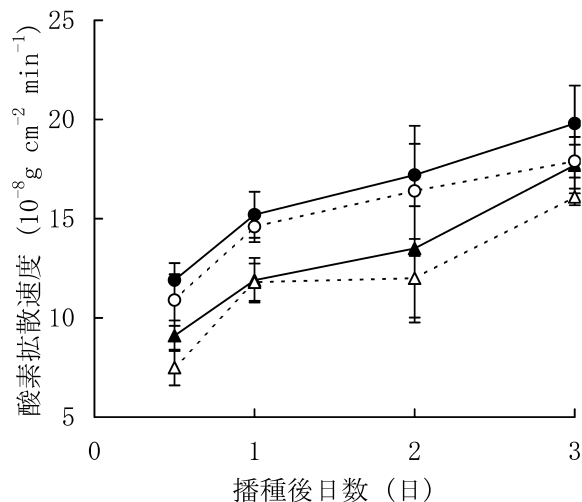


第13図 代かき程度が表層土壌における固相重量および表面土壌硬度に及ぼす影響

注) 斜線の棒は標準区の固相重量, 黒棒は3倍代区の固相重量を示し, 黒丸は標準代区の表面土壌硬度, 白三角は3倍代区の表面土壌硬度を示す. エラーバーは標準誤差 ($n = 4$).

標準代区, 3倍代区はともに落水後日数の経過に伴って酸素拡散速度は増加し, 土壌通気性の向上が認められた。また, 3倍代区は標準代区に比べて通

気性が低く, 深さ3cmでは深さ1cmに比べて著しく低かった (第14図)。



第14図 代かき程度が土壌の酸素拡散速度に及ぼす影響

注) ●: 標準代 1cm, ▲: 標準代 3cm, ○: 3倍代 1cm, △: 3倍代 3cm. エラーバーは標準誤差 ($n = 5$).

2) 出芽と苗立ちの様相

(1) 播種後14日目の苗立ち率

播種後14日目の苗立ち率は, 3倍代区は標準代区に比べて低く, 播種深が3cmの場合は播種深が1cmの場合に比べて著しく低かった。特に麦稈区では, 播種深が3cmの場合はほとんど出芽, 苗立ちがみられなかった (第3表)。

(2) 日別出芽率の推移

出芽開始から日別出芽率のピークまでの日数は, 播種深が同じ場合, 対照区, 麦稈区ともに, 標準代区の方が3倍代区よりも早く, ピーク時の出芽率 (ピーク値) は, 播種深が1cmの場合は播種深が3cmの場合に比較して大きかった (第15図)。このように, 3倍代区は全般的に標準代区に比べて日別出芽率がピークを示した日 (ピーク日) は遅れ, 播種深が深い場合はピーク値も低かった。また, 日別出芽率のピーク日が遅く, ピーク値が低い区ほど苗立ち率 (第3表) は低かった。

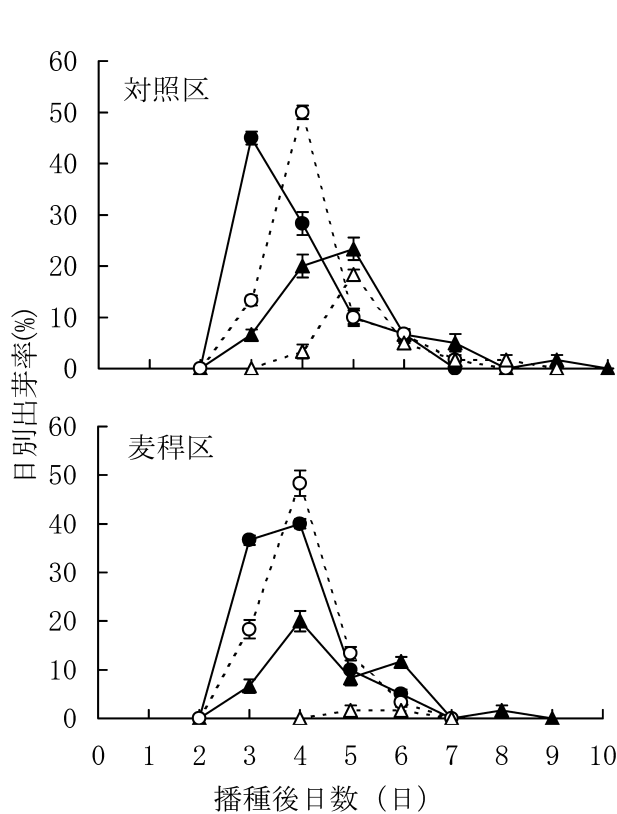
(3) 鞘葉長の推移

播種深が1cmの場合, 標準代対照区は播種後3日目には播種深に相当する1cmまで鞘葉が伸長して, 伸長を完了したが, 標準代麦稈区, 3倍代対照区と同麦稈区では, 播種後3日目以降も伸長を続け, 最終的な鞘葉長は1cm以上となった (第16図)。播種深が3cmの場合, つねに鞘葉長は標準代対照

第3表 代かき程度が播種後14日目の苗立ち率(%)に及ぼす影響

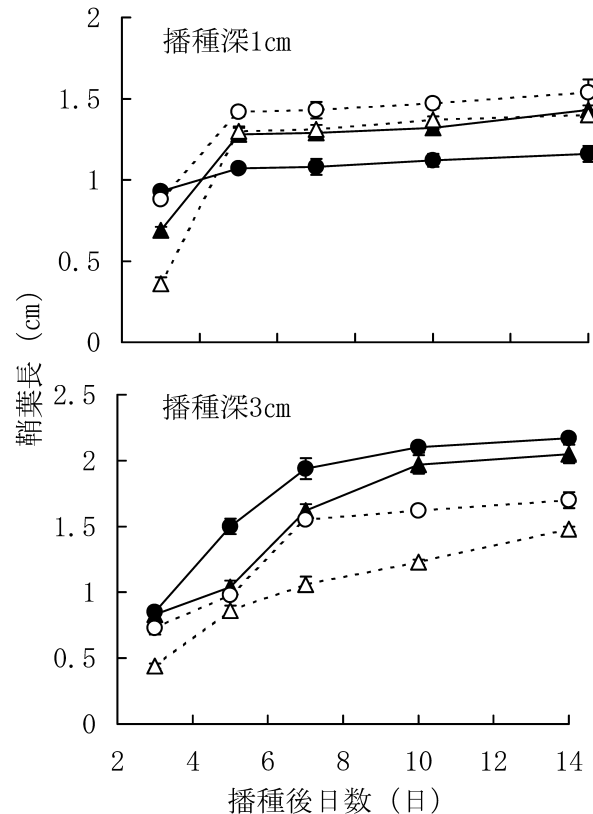
代かき程度	対照区		麦稈区	
	播種深1cm	播種深3cm	播種深1cm	播種深3cm
標準代区	90±3	63±7	92±2	48±6
3倍代区	82±3	30±2	83±6	3±2

注) 苗立ち率: (第2葉抽出個体数/播種粒数) × 100 (%). 平均値 ± 標準誤差 (n = 3) で示す.



第15図 代かき程度が日別出芽率に及ぼす影響

注) ●: 標準代区播種深1 cm, ▲: 標準代区播種深3 cm, ○: 3倍代区播種深1 cm, △: 3倍代区播種深3 cm. エラーバーは標準誤差 (n = 3).



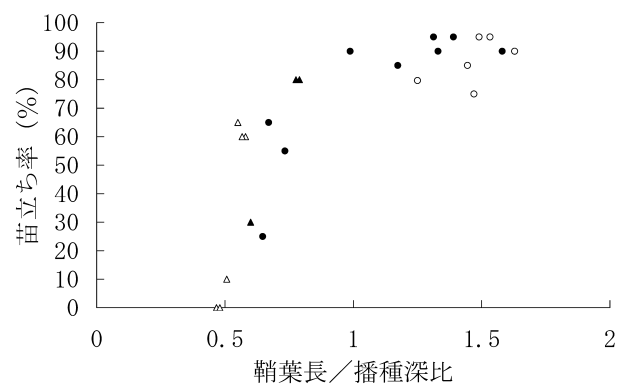
第16図 代かき程度が鞘葉長に及ぼす影響

注) ●: 標準代対照区, ▲: 標準代麦稈区, ○: 3倍代対照区, △: 3倍代麦稈区. エラーバーは標準誤差 (n = 3).

区>標準代麦稈区>3倍代対照区>3倍代麦稈区の順に長かったが、播種後14日目でも全区において播種深の3 cmに達しなかった(第16図)。また3倍代区は、対照区、麦稈区ともに標準代区に比べて鞘葉長が短かった。ここで苗立ち率との関係を見ると、播種深が3 cmの場合では、播種後14日目の鞘葉長が短い区ほど苗立ち率(第3表)は低かった。

(4) 鞘葉長/播種深比と苗立ち率との関係

各区の鞘葉長/播種深比と苗立ち率との関係を見ると、比值が0~1の間では、この値の増加に伴って苗立ち率は増加し、1を越える条件では苗立ち率が安定して高かった。また、播種深が1 cmの場合は1以上、播種深が3 cmの場合は1未満であった(第17図)。

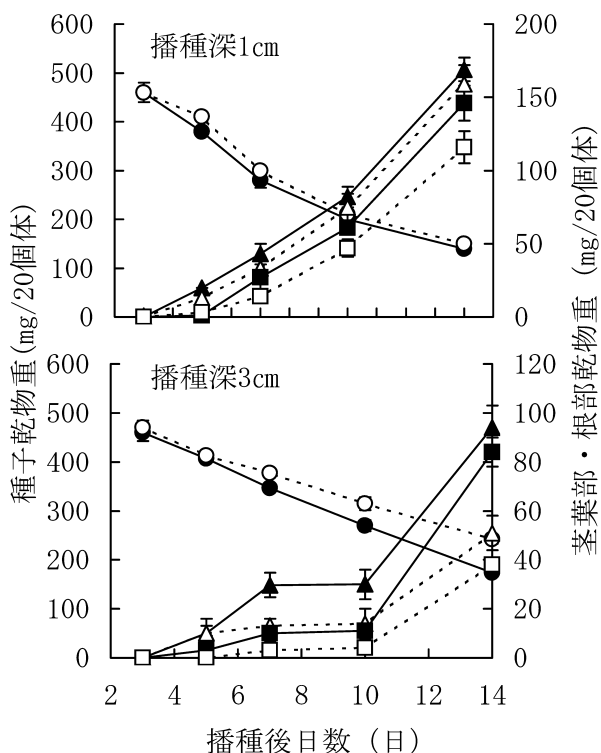


第17図 播種後14日目の鞘葉長/播種深比と苗立ち率との関係

注) ●: 標準代1 cm, ▲: 標準代3 cm, ○: 3倍代1 cm, △: 3倍代3 cm. 各区ともに、対照区および麦稈区を含む。

(5) 乾物重の推移

対照区の各区について、播種後乾物重の推移をみると、3倍代区は標準代区に比べて茎葉部・根の乾物重は小さく、その結果、種子乾物重はやや大きく推移した(第18図)。また、この傾向は麦稈区でも同様に認められた(データ省略)。



第18図 代かき程度が水稻幼植物の乾物重に及ぼす影響(対照区)

注) ●: 標準代区種子, ▲: 標準代区茎葉部, ■: 標準代区根, ○: 3倍代区種子, △: 3倍代区茎葉部, □: 3倍代区根。エラーバーは標準誤差(n=3)。

4. 考 察

1) 代かき程度が落水後の土壌構造と通気性に及ぼす影響

一般に土壌における水の吸着に最も影響を与えるのは土壌粒子の粒径であり、粒子が細かいほど単位重量当たりの表面積が増大する。そのため、微粒質の土壌ほど水への関与は大きくなる。また飽水土壌では、排水するときに土壌粒子同士が水の表面張力によって引き寄せられて土壌収縮を生じ、その収縮に作用する力は粒径が細かくなるほど大きくなる¹⁹⁾。水田土壌では、代かきにより団粒構造が物理的に破壊されて団粒の粒径は細かくなる⁵¹⁾が、Ⅲの実験の3倍代区では、標準代区に比べて表層土壌に占める粗大団粒の割合は減少し(第9図)、微細団粒の

割合が増加した(第10図)。この細かい粒径の土壌粒子の割合が増加した結果、3倍代区では標準代区に比べて高い保水性を維持した(第12図)。また同時に、土壌コア当たりの固相重量割合が高く推移したこと(第13図)は、固相の充填密度がより高まったことを示しており、3倍代区では標準代区に比べて土壌収縮がより進行したことによって、土壌構造が大きく変化した(第12図)と考えられた。さらに、湛水直播栽培で落水を行った場合には、表層土壌が収縮して硬度が増加する(Ⅱ⁷⁾)⁷⁾が、Ⅲの実験の3倍代区では標準代区に比べて表面土壌硬度は若干低く推移した(第13図)。これは、3倍代区では保水性が高かったことによると考えられる。

Ⅲの実験の代かき土壌における気相は、標準代区では播種直後から播種後8日目まで認められ、3倍代区では播種後2~6日の間のみ、わずかに認められた(第11図)。中干しおよび登熟期の落水では土壌収縮と気相の出現が同時に生じるとされ⁵⁰⁾、Ⅲの実験の播種直後に落水した土壌でも同様に土壌収縮と気相の出現が同時に生じたと考えられる。また、3倍代区では標準代区に比べて気相の出現期間は短く、出現した気相の割合も小さかった(第11図)が、これは土壌通気性が低く推移したこと(第14図)に大きく関与していることが考えられた。

2) 代かき程度、播種深および麦稈施用が落水後の鞘葉の伸長に及ぼす影響

出芽時には湛水条件で播種された水稻の鞘葉が地表まで到達しているため、出芽した個体の鞘葉長は播種深度よりも長く、鞘葉長/播種深比は1よりも大きくなる。一方、出芽していない個体では鞘葉長/播種深比は1よりも小さくなるため、各区の鞘葉長/播種深比と出芽率との関係を比較することによって、異なる播種深度が出芽に及ぼす影響を検討することができる。Ⅲの実験では、代かき程度および麦稈施用の影響はまず出芽の有無として現れ、出芽(鞘葉出現)個体はそのまま苗立ち(第2葉抽出)した。こうした影響は特に播種深度が深い場合に顕著であり、播種深3cm区では、鞘葉長/播種深比が1に近づくにつれて出芽率は向上したが、3倍代区および麦稈区では特に鞘葉長は短く、鞘葉長/播種深比は1よりも小さく(第17図)、出芽率および播種後14日目の苗立ち率を低下させた(第3表)。

一方、播種深1cm区では、鞘葉長/播種深比は

1 よりも大きかったが（第17図）、出芽率および播種後14日目の苗立ち率には代かき程度、麦稈の有無によって差が認められ（第3表）、3倍代区および麦稈区では鞘葉の伸長完了に日数を要し、鞘葉長は長くなった（第16図）。この要因として、同じ播種深（1 cm）・播種後水管理（落水）であっても3倍代区および麦稈区では、出芽個体の鞘葉が播種深以上に大きく伸長した一方で、生育の遅れた未出芽個体では土中で伸長を停止していたように、ポット内での個体の生育のばらつきが大きかったことが考えられた。さらには、鞘葉の伸長は落水時には早期に完了する一方、湛水時には鞘葉が播種深以上に伸長するのに長くかかること（Ⅱ⁷⁾）から、出芽後の鞘葉長および鞘葉の伸長完了時期は土壤条件の影響を受けることが考えられる。Ⅲの実験の3倍代区では標準代区に比べて土壤が高い保水性を示す（第12図）一方で、土壤通気性は低く推移した（第14図）。また麦稈区では、麦稈の分解によって土壤の還元程度が進んだことが推測された。これらの土壤条件は出芽・苗立ちにとって不利であり、鞘葉の伸長期間がやや長くなって、第2葉抽出が遅れ、苗立ちが不安定となることが考えられた。なお、Ⅲの実験の麦稈区は、均一な土壤条件を得るために麦稈粉を用いているが、圃場における施用後の麦稈の分解および土壤の還元化はポット実験に比べて緩やかに進行するものと推測される。

3) 播種深および麦稈施用が落水後の出芽・苗立ちの向上に及ぼす影響

Ⅲの実験の播種深1 cm区では播種後3～6日目までに多くの個体が出芽した一方、播種深3 cm区では多くの個体が出芽したのは播種後4日目以降であった（第15図）。このことから、播種深が深いと出芽が遅れ、出芽および苗立ち率が低下することが示唆された。播種後4日目における表面土壤硬度は20程度（親指での貫入時には強い抵抗を感じる）であったが、播種後6日目以降の表面土壤硬度は40程度（土壤表面を押しても全く指跡が付かない）でかなり乾固しており（第13図）、この時期の出芽はかなり困難であったことが推測された。また実際に、未出芽個体のほとんどは発芽後、土中で鞘葉を伸長した状態で生育が停止していることが観察された。したがって、播種深3 cm区では多くの個体が土中で鞘葉を伸長する時期に土壤収縮による土壤構造の

変化（第12図）によって土壤の充填密度が高まり（第13図）、これに伴って表層土壤が硬化して鞘葉の伸長が抑制され、出芽が大幅に低下した（第3表）と考えられた。

一般に出芽時において、鞘葉は地表面（好気的環境）上まで伸長してシュノーケルのような役割を果たして生長点に酸素を送り、第1葉が抽出されると考えられている⁷⁵⁾。しかし、出芽に必要な鞘葉の伸長量が増える播種深が深い場合や鞘葉の伸長に有効な積算温度が十分に確保できない低温下などでは出芽に時間を要するために第2葉の抽出が遅れる⁴⁾。また、種子予措が不十分な場合にも鞘葉伸長開始までに時間を要し、出芽が遅れることが推測される。さらに、出芽が遅れた個体は出芽後に枯死することが多い⁵⁾。Ⅲの実験の播種深3 cm区は、このような鞘葉の伸長や出芽を抑える要因、すなわち深い播種深、低温や種子予措が不十分な場合を想定して設定した。Ⅲの実験ではこれに加えて、過度の代かきが表層土壤の通気性を低下させること（第14図）や、麦稈施用が土壤還元を促進させること²²⁾によって、出芽・苗立ちがより顕著に低下すること（第15図、第3表）を明らかにした。したがって、湛水播種、播種後落水栽培法で出芽・苗立ちをより向上、安定させるためには、播種時期を適切に選定し、種子予措を十分におこない、出芽を早める（遅らせない）ことが必要であると考えられた。

水稻を播種した湛水土壤中では元肥として入れた化成肥料の溶出¹⁸⁾、麦稈等の有機物の分解²²⁾などが生じ、さらに土壤内の複雑な反応過程に生じた二価鉄、有機酸等の反応産物^{17, 21)}が出芽前の幼植物の生育を抑えることが報告されている。Ⅲの実験で加えた麦稈粉は土壤の量に対して微量（10g/ポット）であったため、土壤構造を変えるには至らず、土壤還元を促進したのみと推測された。また、Ⅲの実験では過酸化カルシウムを被覆した種子を利用した。過酸化カルシウムは水と反応して酸素を発生する⁶⁹⁾ことから、これを種子に被覆することにより土壤還元程度を抑え、出芽、苗立ちを向上させる技術として全国的に適用性がほぼ認められている。しかし、過酸化カルシウム剤の土壤酸化効果は種子近傍にとどまり、播種後短期間にその効果を失うことも明らかにされている¹⁶⁾。したがって、麦稈区で播種深が深い場合には、土壤の還元化が進む中で、過

酸化カルシウム剤の土壌酸化効果が播種直後において種子近傍にとどまり、出芽率の向上には結びつかなかったと考えられた。

4) 代かき程度が落水後の出芽・苗立ちの向上に及ぼす影響

Ⅲの実験の標準代区は3倍代区に比べて播種直後の土壌通気性が高く(第14図)、このことが土壌の還元化をより強く抑制して、播種深にかかわらず鞘葉の伸長を促進し出芽を早めたことが推察された。一方、播種深が浅い場合には、標準区では播種深とほぼ同様の深さで鞘葉は伸長完了したが、3倍代区では播種深以上に伸長を続けて、鞘葉の伸長停止は遅れた(第16図)。鞘葉の伸長の制御には表層土壌の酸素分圧や土壌水分量などが要因として関わっていることが考えられるが、この点については今後検討が必要である。また、標準代区の幼植物は、3倍代区のそれに比べて、播種直後から好気的条件を利用した呼吸によって種子貯蔵物を分解したために種子乾物重は小さく、またこの分解産物を利用して初期生育が促進されたために茎葉部および根の乾物重は大きく推移したこと(第18図)が推察された。

Ⅲの実験の3倍代区では、標準代区に比べて過度の代かきによって土壌団粒を破碎して、粗大団粒の割合を減少させる一方で、微細団粒の割合を増大させた結果、保水性は高かったが、通気性は低くなり、出芽・苗立ちを低下させた。Ⅲの実験では土壌の保水性のみを高めた条件での実験は行っていないが、落水した圃場における土壌表層の含水比が直播水稻の出芽およびその後の生育と密接に関係していることが報告されている²⁶⁾。

5. 摘 要

打込み式代かき同時土中点播機での播種を想定し、代かき程度が播種後の落水条件下における出芽、苗立ちに及ぼす影響をポットで調査した。標準代区の3倍の時間をかけて代かきを行った3倍代区では、代かき直後の土壌粘度は高まり、表層土壌に占める粗大団粒の割合は小さく、微細団粒の割合は大きかった。その結果、3倍代区の土壌収縮力は大きく、気相を生じにくい土壌構造となり、保水性は高い一方で通気性は低くなった。また、3倍代区は標準代区に比べて落水後14日目の苗立ち率が低く、茎葉部および根の乾物重も小さかったが、苗立ち率の低下、

乾物重増加の抑制は播種深が深い場合および麦稈施用した場合に顕著であった。以上の結果、湛水土中播種・落水栽培法で安定した出芽・苗立ちを得るためには、特に播種深が深い場合や圃場で麦稈が施用された場合に過度の代かきを避ける必要があることが示唆された。

Ⅳ. 落水開始時期が湛水直播水稻の出芽と苗立ちに及ぼす影響

1. 緒 言

現在、打込み式代かき同時土中点播栽培では、播種直後から7~10日間程度の落水管理によって出芽・苗立ちの確保を図っている⁷⁾。また、打込み式代かき同時土中点播機における標準的な播種深12mm(±6 mm)に相当する深さ1~2 cm程度に播種された種子は、出芽から第2葉抽出までにはほぼ10日間を要すること(Ⅱ⁷⁾)から、播種直後からの10日間の落水が出芽・苗立ちに最も影響を与えると考えられる。さらに暖地において初期除草剤の散布を前提とした場合、落水期間の一つの目安が播種後10日であると考えられる。

このような問題の検討は播種深度および落水程度が不均一となりやすいため、圃場では容易ではない。そこで、Ⅳでは、土壌条件を均一に設定できるポット条件において打込み式代かき同時土中点播栽培を想定して、落水開始時期を変えた場合の土壌環境の変化が、水稻の初期生育、とくに出芽・苗立ちに及ぼす影響を、播種後10日間について土壌三層構造の変化との関連において検討した。

2. 材料と方法

1) 試験方法

水稻品種「ヒノヒカリ」を供試し、実験は1999年に九州農試(筑後)の裾上げしたビニールハウス内で行った。土壌と過酸化カルシウム剤被覆種子の準備および播種法はⅡ⁷⁾と同様とし、播種を5月7日に行った。播種前日に入水して代かきを行ったワグネルポットを1日間静置し、土壌と表面水とが分離した後、表面水を除去し、全ての区の播種深を1 cmとして播種・覆土した後、水管理として次の3処理区を設けた。すなわち、圃場での排水が良く、播種直後の落水管理で早期に落水する場合を想定した播種直後落水区(播種当日に駒込ピペットを用いて

表層水を除去後、土壌表面からの蒸発のみによる自然減水)、圃場での排水が悪く、播種直後に落水を行っても数日間は飽水条件が継続することを想定した播種後5日目落水区(播種当日から播種後5日目まで駒込ピペットを用いて湛水深2 mmから表土湿润状態に維持し、その後は播種直後落水区と同様な水管理)、圃場での排水が著しく悪い条件あるいは湛水管理を想定した飽水区(播種当日から播種後10日目まで駒込ピペットを用いて湛水深2 mmから表土湿润状態に維持)とした。また、各区のポット反復数を3とし、播種後10日目まで調査した。

2) 出芽と苗立ちの調査および解析

播種後は毎日、出芽個体数および第1葉と第2葉の抽出個体数を調査した。また、播種後3, 5, 7, 10日目に各ポットから全て(各20粒)の出芽および未出芽種子を採取し、各個体の鞘葉長および種子根長、種子、莖葉部および根の乾物重を調査した。器官の長さは基部から先端までの距離とし、屈曲しているものは伸ばして測定した。また、出芽個体および苗立ち個体の定義はⅡ⁷⁾と同様として、日別出芽率、第1葉抽出率、苗立ち率の調査を行った。さらにこれらのデータを使って播種から出芽、第1葉抽出および苗立ちまでの平均日数および斉一性を数量化するため、同じイネ科植物であるヒエ類の日別発芽率を数量化する手法⁷⁴⁾を適用して、以下の解析を行った。すなわち、まず播種粒数をN、播種後日数をt、日別の出芽数をnとして、平均出芽日数(日) = $\Sigma (t \cdot n) / \Sigma n$ 、斉一出芽係数 = $\Sigma n / \Sigma \{(平均出芽日数 - t)^2 \cdot n\}$ 、累積出芽率(%) = $100 \times (\Sigma n) / N$ を求めた。ここで平均出芽日数は種子が出芽に要する日数の平均を示し、斉一出芽係数は毎日の出芽数をプロットした曲線を正規曲線とみなしたときの分散の逆数を示し、値が大きいほど斉一性が高いことを示す。累積出芽率は調査終了時(播種後10日目)の出芽率を示す。また日別出芽数(n)にかわって日別第1葉抽出数および日別苗立ち数から平均第1葉抽出日数および平均苗立ち日数、斉一第1葉抽出係数および斉一苗立ち係数、累積第1葉抽出率および累積苗立ち率を算出した。

3) 気温および土壌環境の測定

調査期間中のビニールハウス内の気温は温度カード(Panasonic製VS-4050A)を用いてビニールハウス内に設置したポットの高さで測定し、平均気温

を算出した。また、上記ポット作成と同時に播種当日に無播種のポットを作成し、表層水を除去して、上記と同様の水管理を行った。土壌環境については、土壌の三相分布および播種深に相当する深さ1 cmの土壌中の酸素拡散速度をⅡ⁷⁾と同様の方法を用いて、調査した10日間のうち数回にわたって測定した。

3. 結 果

1) 土壌環境の推移

(1) 調査期間中の気温および土壌の三相分布の推移

調査期間中のハウス内の日平均気温の平均値は25.6℃であった。また、表層から深さ5 cmまでの土壌における三相分布をみると(第19図)、播種直後落水区では、播種後日数の経過に伴って液相率は減少し、その一方で固相率は増加した。また気相率は、播種後9日目まで増加が認められた。播種後5日日落水区では、播種後3日目までは液相率と固相率は変わらなかったが、播種後6日目から9日目にかけて液相率は減少し、その一方で固相率は増加した。また気相は播種後6日目から9日目にかけてわずかに認められた。飽水区では調査期間中、液相率と固相率はほとんど変わらずに推移し、気相はほとんど認められなかった。

(2) 土壌の通気性の推移

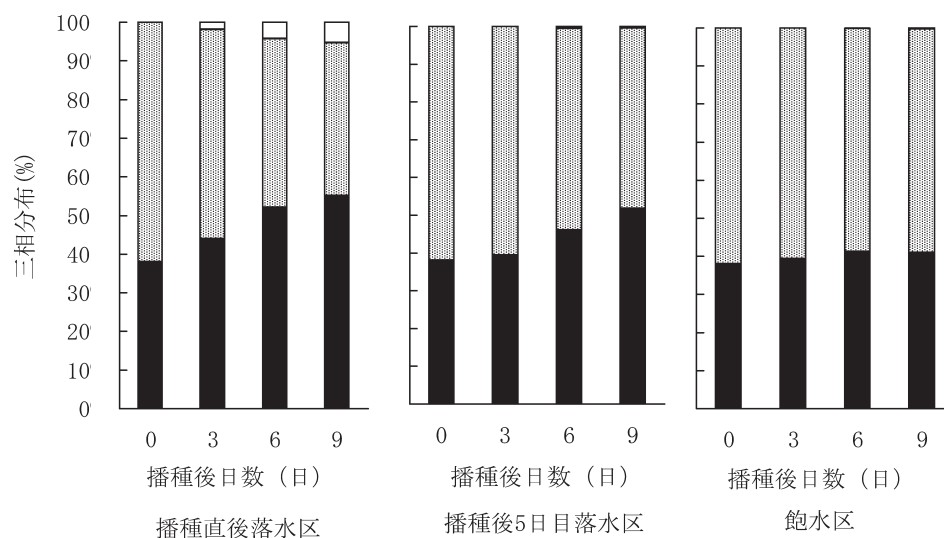
表層から深さ5 cmまでの土壌における土壌含水率および土壌構造の指標である孔隙率をみると(第20図)、いずれも播種直後落水区では飽水区に比べて播種後日数の経過に伴って低下した。また、播種後5日日落水区でも落水した5日目以降に土壌含水率、孔隙率のいずれも低下した。しかし、飽水区では土壌含水率、孔隙率ともに調査期間中はほとんど変わらずに推移した。

播種直後落水区では落水後日数の経過に伴って酸素拡散速度は増加し、通気性の向上が認められた(第21図)。一方、飽水区では、播種後4日目までの間に酸素拡散速度はほとんど増加せずに推移した。

2) 出芽と苗立ちの様相

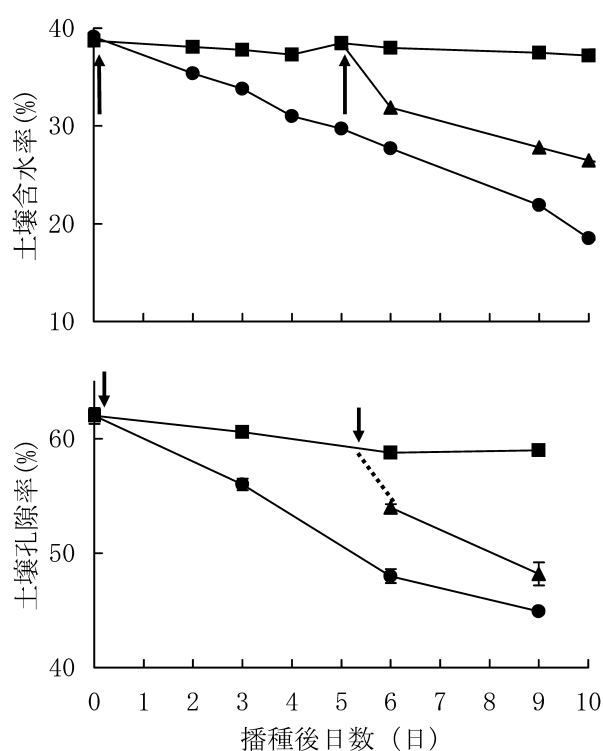
(1) 出芽から苗立ちまでの推移

播種直後落水区では播種後5日日落水区と飽水区に比べて平均出芽日数は短い傾向を示し、斉一出芽係数は有意に大きかったことから、出芽が早く、出



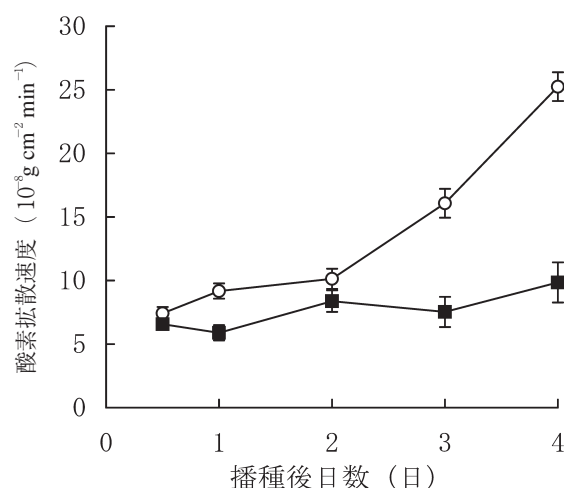
第19図 播種後の落水開始時期が表層（深さ0～5 cm）の土壌における三相分布（容積率）に及ぼす影響

注) □：気相率，▨：液相率，■：固相率.



第20図 播種後の落水開始時期が表層土壌（深さ0～5 cm）の含水率および孔隙率に及ぼす影響

注) ●：播種直後落水区，▲：播種後5日目落水区，■：飽水区. 土壌含水率 = $\frac{\text{液相重量}}{\text{気相} + \text{液相} + \text{固相}} \times 100 (\%)$. 土壌孔隙率 = $\frac{\text{液相} + \text{気相}}{\text{液相} + \text{気相} + \text{固相}} \times 100 (\%)$. 矢印は落水開始時期. 点線は播種後5日目落水区において予想される土壌孔隙率の推移を示す. エラーバーは標準誤差 ($n = 4$).



第21図 播種後の落水開始時期が表層（深さ1 cm）の土壌通気性に及ぼす影響

注) ○：播種直後落水区，■：飽水区，播種後5日目落水区. エラーバーは標準誤差 ($n = 3$).

芽の斉一性が高いことが示された（第4表）。平均第1葉抽出日数および平均苗立ち日数は、播種直後落水区では播種後5日目落水区と飽水区に比べて有意に早く、斉一第1葉抽出係数および斉一苗立ち係数は有意に大きかった。したがって、播種直後落水区は他の2区に比べて第1葉抽出および苗立ちが早く、その斉一性が高いことが示された。一方、調査終了時に当たる播種後10日目の累積出芽率、累積第1葉抽出率および累積苗立ち率には3区の間で有意な差は認められなかった。

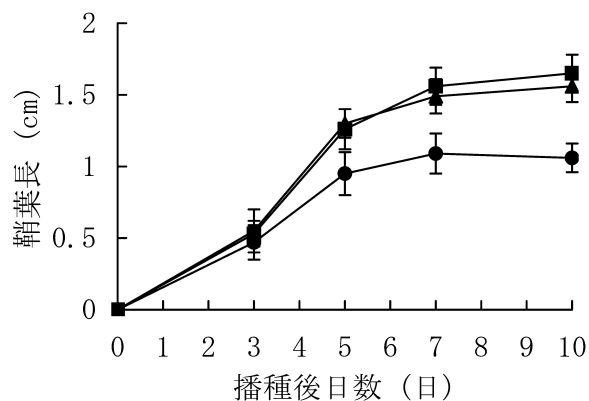
第4表 播種後の落水開始時期が水稻の出芽・苗立ちに及ぼす影響

処理区	出芽			第1葉抽出			苗立ち		
	平均出芽 日数 (日)	斉一 出芽 係数	累積 出芽率 (%)	平均抽出 日数 (日)	斉一 抽出 係数	累積 抽出率 (%)	平均苗 立ち日数 (日)	斉一 苗立ち 係数	累積 苗立ち 率 (%)
播種直後落水区	4.0a	1.83a	95a	5.0a	1.74a	95a	6.0a	5.94a	95a
播種後5日目落水区	4.7a	0.64b	95a	6.0b	0.79b	92a	6.6b	1.24b	93a
飽水区	4.7a	0.68b	93a	6.2b	0.59b	93a	6.7b	0.72b	93a

注) 播種後10日間の調査結果。同一記号は5%水準で有意差が無いことを示す (Fisher's LSD)。

(2) 鞘葉長、種子根長および乾物重の推移

播種直後落水区の鞘葉長は、播種後7日目には播種深と同じ約1 cmの長さで伸長を完了したが、播種後5日目落水区および飽水区では播種後5日目(落水前)に1 cm以上となり、それ以降も伸長を続けて、播種後10日目には播種後5日目落水区では約1.5cm、飽水区では最も長い約1.6cmとなった(第22図)。

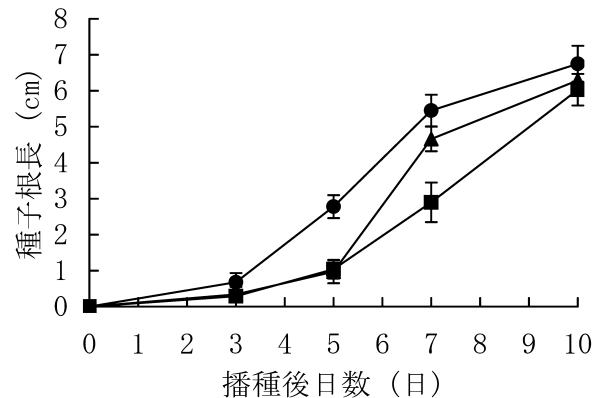


第22図 播種後の落水開始時期が水稻の鞘葉長に及ぼす影響

注) ●：播種直後落水区，▲：播種後5日目落水区，■：飽水区。エラーバーは標準誤差 (n = 3)。

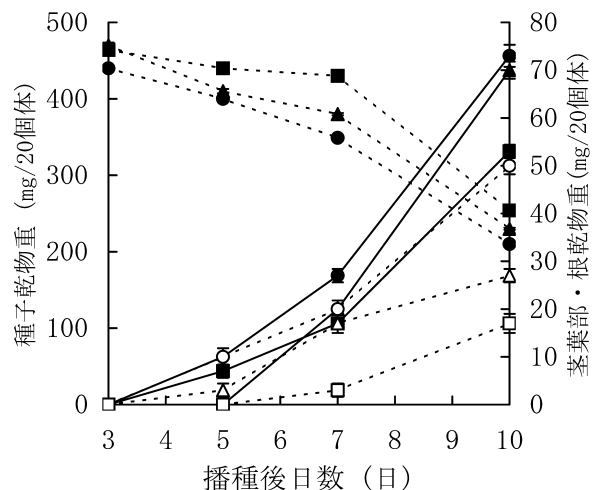
種子根長は、播種直後落水区では播種後3日目以降に大きく伸長し、播種後5日目落水区では落水後に急速に伸長した(第23図)。飽水区は最も根の伸長が遅れたが、播種後10日目には3区ともにほぼ同じ根長となった。

播種後の乾物重の推移をみると、種子乾物重は播種後日数の経過とともにいずれの処理区でも小さくなったが、播種直後落水区では最も小さく、ついで播種後5日目落水区で小さく、飽水区では最も大きかった(第24図)。茎葉部および根の乾物重は播種後日数の経過とともにいずれの処理区でも大きくなったが、播種直後落水区で最も大きく、ついで播種後5日目落水区で大きく、飽水区では最も小さかった。



第23図 播種後の落水開始時期が水稻の種子根長に及ぼす影響

注) ●：播種直後落水区，▲：播種後5日目落水区，■：飽水区。エラーバーは標準誤差 (n = 3)。



第24図 播種後の落水開始時期が水稻各器官の乾物重に及ぼす影響

注) —●—：種子・播種直後落水区，—▲—：種子・播種後5日目落水区，—■—：種子・飽水区，—○—：茎葉部・播種直後落水区，—△—：茎葉部・播種後5日目落水区，—□—：茎葉部・飽水区，—●—：根・播種直後落水区，—▲—：根・播種後5日目落水区，—■—：根・飽水区。エラーバーは標準誤差 (n = 3)。

4. 考 察

1) 播種後の落水開始時期が土壤環境に及ぼす影響

Ⅳの実験の播種直後落水区および播種後5日日落水区では、落水開始直後から液相率が低下して固相率が増加し、播種直後落水区では播種後3日目には気相の出現が認められた。一方、飽水区では、播種後10日間にわたって三相分布の変化はほとんどなかった。また播種後5日日落水区、飽水区ともに播種後9日目までは気相はほとんど認められなかった(第19図)。打込み式代かき同時土中点播機を用いた水稻の湛水土中点播直播栽培では播種後7~10日間の落水管理が必要とされているが⁷⁷⁾、Ⅳの実験結果から、播種後10日間の土壤の三相分布は、落水時期によって大きく異なり、播種直後落水区は播種後5日日落水区および飽水区に比べて気相が生じやすいことが明らかとなった。一方、播種後に飽水条件を続けた場合は、湛水条件を続けた場合(Ⅱ⁷¹⁾)と同様に、土壤団粒が崩壊して細くなった後に、粒子間で互いに引き合って凝集体を形成して沈降し、膨軟で変化しにくい土壤構造となる⁵¹⁾。したがって、播種後5日日落水区の播種から播種後5日目に落水するまでの期間および飽水区の播種後10日間では、三相分布に変化がほとんど生じなかったと考えられた(第19図)。また、土壤収縮程度は土壤の粒径が細かいほど大きい¹⁹⁾が、播種後5日日落水区では、それまでの飽水により土壤団粒の水浸崩壊によって団粒が細くなった後に落水が開始された結果、過度の代かきを行った場合(Ⅲ⁸⁾)と同様に土壤収縮程度がさらに大きくなり、土壤団粒が密に充填された結果、液相から固相への移行時に気相が出現しにくかったと推察された。さらに、気相が出現した播種直後落水区は、気相がほとんど出現しなかった播種後5日日落水区および飽水区に比べて播種後4日間の表層土壤の通気性が高く推移した(第21図)。気相の出現は表層土壤の通気性が良好な状態にあることを示唆している(Ⅱ⁷¹⁾)ため、気相が出現した播種直後落水区は気相がほとんど出現しなかった播種後5日日落水区および飽水区に比べて播種後4日目以降においても表層土壤の通気性が良好であったといえる。

2) 播種後の落水開始時期が水稻の生育に及ぼす影響

水稻種子を湛水土中に播種した後に落水した場合、

湛水を続けた場合に比べて第2葉の抽出が早く、種子乾物重は小さくなり、茎葉部と根の乾物重は大きく増加し、初期生育が促進することが認められている(Ⅱ⁷¹⁾)。鞘葉長、種子根長、各器官の乾物重の結果(第22図、第23図、第24図)から、出芽・苗立ちおよび初期生育の様相では、Ⅳの実験における播種直後落水区は上記報告の落水区に、飽水区は同湛水区に類似し、播種後5日日落水区はその中間であると考えられた。また、播種後5日日落水区の落水開始は播種後5日目であり、この区の平均出芽日数4.7日より後のため、播種後5日日落水区では、初期生育を促進する効果は出芽以降に限定されると考えられた。さらに、播種直後落水区では播種後5日日落水区および飽水区に比べて表層土壤の通気性が早期から良好であったため、出芽時および出芽以降の生育がともに促進された結果、播種後10日目には生育が最も良好であったと考えられる。

圃場において播種後に落水した場合、排水が不十分のため土壤含水比が高い箇所では水稻の生育は劣る²⁷⁾一方で、出芽期以降まで落水を続けた場合には生育促進効果は同等、むしろ効果が低下する場合もあると報告されている⁶⁵⁾。このことは、播種後の落水は生育を促進するが、長期間の落水によって土壤含水率が大きく低下した場合には生育促進効果は小さくなることを示唆している。その一方、長期間の落水では苗立ち率は変わらないが、下位葉節からの分げつ発生が多くなり増収するという報告もある⁵⁸⁾。Ⅳの実験における播種後10日目の土壤含水率は、播種直後落水区では18.5%、播種後5日日落水区では26.5%であり、ともにかなり土壤の乾燥が進んだ状態であった(第20図)が、圃場実験では排水の良い箇所でも28.4%にとどまった⁶⁾。すなわち、Ⅳの実験で行った落水処理では、圃場で播種直後に落水処理した場合に比べて土壤の乾燥程度は大きく、幼植物の生育促進効果が圃場で落水した場合に比べて低く見積もられた可能性がある。

3) 播種後の落水開始時期が表層土壤の硬化に及ぼす影響

飽水区では土壤の含水率、孔隙率ともに調査期間中の変化は小さかったが、播種直後落水区および播種後5日日落水区ではそれぞれの落水日以降に土壤含水率が低下し、これに伴って孔隙率も低下して土壤構造が変化した(第20図)。また、液相率の減少

に伴う固相率の増加（第19図）は表層土壌の土壌収縮が進行したことを示しており、これに伴って表層土壌は硬化したが（データ省略）、Ⅳの実験で行った播種深1 cmの場合には、播種直後落水区、播種後5日目落水区ともに出芽への物理的な阻害は認められなかった（第4表）。

なお、Ⅳの実験の供試土壌は灰色低地土であるが、暖地において保水性が低く、比較的乾燥の進みやすい黒ボク土壌やシラス土壌条件では短期間に表層土壌が硬くなりやすく、出芽を促進するために落水期間中のかけ流し等が必要であるとの報告もある⁶⁰⁾。そのため、保水性や土壌収縮による表層土壌の硬化など、土壌の特性に応じた適正な落水期間について、今後さらに検討する必要がある。

4) 播種後の落水開始時期が出芽・苗立ちに及ぼす影響

打込み式代かき同時土中点播機での標準的な播種深12mm(±6 mm)に相当する深さ1～2 cm程度に播種された種子は、出芽から第2葉抽出までにはほぼ10日間を要すること⁷⁾から、播種直後からの10日間の落水が出芽・苗立ちに最も影響を与えと考えられる。さらに同栽培では、落水期間の後に入水し、湛水条件で初期除草剤の散布を行う作業体系が確立されている。一般に、水稻の初期除草は、湛水条件でかつ減水深が2 cm以内の条件で行われているが、適期を過ぎた葉齢の雑草では除草効果が低下するため、落水期間の長さは除草剤散布を考慮する必要がある。特に現在も湛水直播栽培で全国的に問題となっているノビエは、暖地では播種後10日を過ぎると葉齢が2.0を越えるため、一部の除草剤では除草効果が低下することが明らかになっている³⁸⁾。そのため初期除草剤の散布を前提とした場合、落水期間の一つの目安が播種後10日であると考えられる。

一般的に水稻が栽培される圃場では基肥が施用され、暖地では前作の麦わらが鋤込まれる場合もあるため、播種後に湛水条件とした場合には土壌の還元が進みやすいと考えられる。麦稈等の有機物の分解²²⁾や化成肥料の溶出¹⁸⁾は出芽・苗立ちを低下させるが、播種直後からの落水管理は出芽以前から表層土壌の通気性が良好となる（第21図）ため、土壌の還元化を抑える効果が期待される。また、播種直後からの落水によって出芽・苗立ちが早まり、出芽・苗立ちの斉一性が高まること（第4表）は、出芽時

および出芽以降の生育がともに促進され、かつ生育むらが小さいことを示唆している。一方、播種後5日目の落水では、生育促進効果は出芽以降のみであり、斉一性が低いことから、生育むらが大きいと考えられた。出芽が遅れた個体は出芽後に枯死することが多く⁵⁾、生育が大幅に遅れた個体では、その後の湛水条件で十分な生育ができずに収量に寄与しない可能性もあるため、播種直後からの落水管理はその後の生育の点からも有用な管理法であると考えられる。

5. 摘 要

打込み式代かき同時土中点播機での播種を想定し、落水時期が出芽、苗立ちに及ぼす影響をポットで調査した。過酸化カルシウム剤で被覆した水稻種子を湛水土壌中に播種した後に落水を行った播種直後落水区および播種後5日目落水区では、落水直後からの土壌収縮によって土壌水分（液相）が低下して固相が増加し、土壌構造が大きく変化した。播種後に土壌の孔隙が水で満たされている状態とした飽水区では、三相分布と土壌構造は変わらなかった。また、播種直後に落水した区では、播種後3日目頃から気相が出現して通気性は向上したが、飽水区および播種後5日目落水区では、播種後9日目でも気相が出現しなかった。播種直後落水区は、他の区に比べて播種から出芽、第1葉抽出および苗立ちまでの日数が短く、茎葉部および根の乾物重は著しく増加した。以上の結果、湛水土中播種・落水栽培法では、播種直後からの落水が出芽・苗立ちの向上に有効であることが示唆された。

V. 圃場における播種前の代かきおよび播種後の落水程度が打込み点播機を利用した湛水直播水稻の出芽と苗立ちに及ぼす影響

1. 緒 言

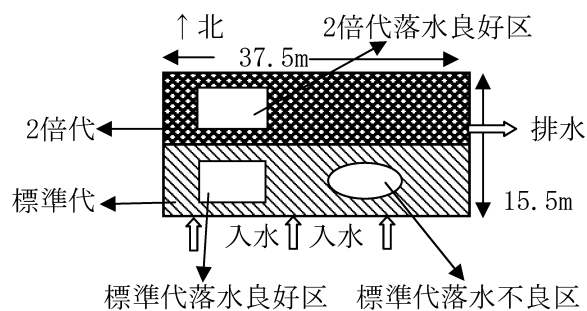
Ⅱ⁷⁾、Ⅲ⁸⁾、Ⅳ⁹⁾ではポット条件によるモデル試験であったが、Ⅴでは、それらの結果を検証し、実用的技術確立につなげるための圃場試験を行った。また、圃場条件で湛水播種後に落水した水稻の出芽・苗立ちについて播種後の土壌環境を併せて評価した報告は少なく、落水した圃場の土壌表層の含水比は直播水稻の出芽およびその後の生育と密接に係している²⁷⁾という報告があるのみである。Ⅴで

は、代かき後に落水した土壌では、落水に伴う土壌収縮によって、埋め込んだ Eh センサー等を使った経時的な測定が困難なため (Ⅱ⁷⁾)、代かき程度の異なる水田圃場の土壌環境を土壌物理性の面から評価し、播種後落水とした圃場において異なる代かき程度が出芽・苗立ちに及ぼす影響を調査した。また、過酸化カルシウム剤被覆後の貯蔵温度が出芽・苗立ちに影響を及ぼすという報告⁷⁸⁾ から、貯蔵温度条件が異なる種子を用い、同様な調査を行った。

2. 材料と方法

1) 試験方法

水稻品種「ヒノヒカリ」を供試し、試験は九州農試(筑後)内の圃場(細粒灰色低地土) 5.8a (37.5m × 15.5m) を用いて2000年6月に行った。まず十分に吸水させた催芽初めにコーティングマシンを用いて過酸化カルシウム剤(過酸化カルシウム16%含有)を乾籾重の2倍重量被覆した種子を作成した。作成した種子の半分は、播種当日まで7日程度、10℃で密封貯蔵した種子(以下10℃貯蔵種子とする)とし、のこり半分は、4日程度10℃で密封貯蔵した後、播種直前の3日間は20℃で密封貯蔵した種子(以下20℃貯蔵種子とする)として準備した。播種時期は2000年6月6日として、打込み式代かき同時土中点播機を用い、3kg/10a 設定で播種した。代かきは播種前日に行い、その程度は、圃場全面に対して縦方向および横方向に1回ずつの代かき作業が1行程(以下標準代とする)および2行程(以下2倍代とする)の2水準とした。水管理は、代かきから播種時までは湛水深を2cm前後に保ち、播種直後に落水して、播種後10日目に再入水(かけ流し)を行い、再入水数時間後には再び落水とした。なお、播種翌日に標準代とした区域内に均平不十分のために排水不良で湛水深数mm～表土露出の飽水状態となった大きな区域が出現したため、標準代とした区域で落水が良好な箇所(播種翌日に落水した箇所。以下標準代落水良好区とする)、2倍代とした区域で落水良好な箇所(以下2倍代落水良好区とする)、標準代とした区域で落水不良な箇所(播種後数日間にわたって飽水状態となった箇所。以下標準代落水不良区とする)の計3区について調査を行った(第25図)。



第25図 試験区配置の模式図

2) 出芽と苗立ちの調査および解析

播種後6日目から2日おきに、各区内において1ヵ所6.0m²(1.2×5.0m)内の水稻の出芽個体数を4反復(1区内で4ヵ所)で調査した。なお、出芽および苗立ちの定義はⅡ⁷⁾と同様とした。また播種後14日目に、地表面から深さ約3～5cmまでの土壌を1ヵ所1.2m²(1.2×1.0m)を2反復(1区内で2ヵ所)採取して全ての水稻種子を回収し、葉の先端から鞘葉基部の緑色部の最下部までを測定して草丈とした。

3) 気温および土壌環境の測定

調査期間中の平均気温は、場内に設置された気象観測計から日平均気温を求め、さらにその値の平均値として算出した。供試圃場各区における土壌環境の推移は、播種後の調査期間14日間の内、3～11回にわたって、以下の方法により調査した。土壌含水率は、100mL土壌コアで表層(地表面から深さ5cmまで)の土壌を4反復ずつ抜き取り、105℃、24時間乾燥後、秤量して乾燥前の重量との差から求めた。なお、代かき直後の土壌採取は、標準代区および2倍代区のほぼ中央部分で100mLの蓋なしの土壌コアの端が土壌表面に隠れる程度まで垂直にいれ、土壌で完全に満たされた状態で底に蓋をして行ったが、以後の採取は畑土壌での採取と同様に行った。土壌中の酸素拡散速度は、土壌酸素拡散計(大起理化工業製 DIK-1120)を用いて各区5反復ずつ、表面土壌硬度は土壌硬度計(藤原製作所製 山中式平面型)を用いて各区10反復ずつ調査した。また、それぞれの区の粗大団粒および微細団粒の割合は、Ⅲ⁸⁾と同様の方法で測定した。

3. 結 果

1) 土壤環境の推移

(1) 土壤の団粒の割合

表層（地表面から深さ5 cmまで）の土壤に占める粒径0.25mm以上の粗大団粒の割合は、代かき回数の少ない標準代が2倍代に比べて高かった。一方、0.02mm以下の微細団粒の割合は、標準代が2倍代に比べて低かった（第5表）。

第5表 圃場の代かき程度が土壤表面から5 cmまでの土層内の粗大団粒および微細団粒の割合に及ぼす影響（播種当日）

代かき程度	粗大団粒の割合 ^{a, c} (%)	微細団粒の割合 ^{b, c} (%)
標準代	55.2 ± 1.1a	2.5 ± 0.3a
2倍代	41.5 ± 5.4b	3.0 ± 0.3a

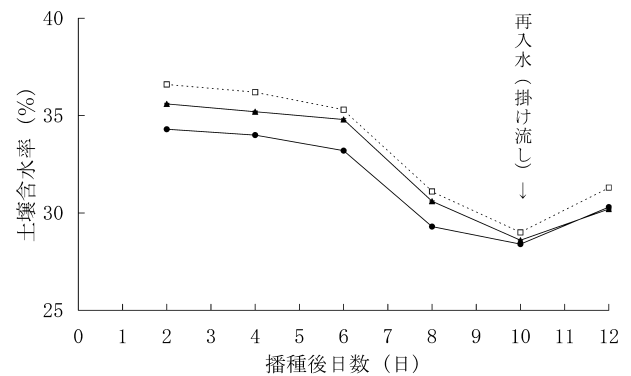
注)a) (粒径0.25mm以上の砂および土壤の乾土重量/全乾土重量) × 100 (%). b) (粒径0.02mm以下の土壤の乾土重量/全乾土重量) × 100 (%). 平均値±標準誤差を示す. c) 同一記号は5%水準で有意差が無いことを示す (t検定).

(2) 調査期間中の降雨状況、気温および土壤含水率の推移

調査期間中には降雨は若干あったものの、圃場表面にたまるほどの降雨とはならなかったため、播種後日数の経過に伴って土壤の乾燥が進んでいた状況であった、日平均気温の平均値は23.5℃であり、平年と比べて大きな相違はなかった（データ省略）。表層（地表面から深さ5 cmまで）の土壤では、全区ともに播種後の日数経過に伴って土壤含水率が低下し、播種後10日目の再入水（かけ流し）によって再び高まった。落水良好区では、標準代の土壤含水率は2倍代に比べて低く推移した。また同じ標準代でも落水不良区の土壤含水率は落水良好区に比べて高く、標準代落水不良区が3区の中で最も高く推移した（第26図）。

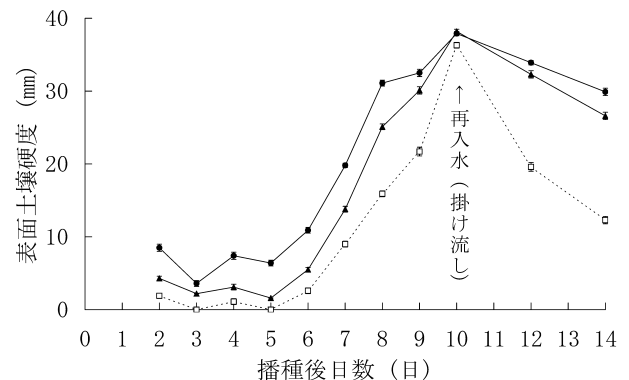
(3) 表面土壤硬度の推移

表面土壤硬度は全区とも播種後の日数経過に伴って上昇し、播種後10日目の再入水（かけ流し）によって低くなり、土壤含水率の推移と対照的な推移を示した。落水良好区では、標準代の表面土壤硬度は2倍代に比べて高く推移した。また同じ標準代でも落水不良区は落水良好区に比べて低く、標準代落水不良区が3区の中で最も低く推移した（第27図）。



第26図 圃場の代かきおよび落水程度が土壤含水率に及ぼす影響

注) ●：標準代落水良好区，▲：2倍代落水良好区，□：標準代落水不良区．エラーバーは標準誤差 (n = 4)．



第27図 圃場の代かきおよび落水程度が表面土壤硬度に及ぼす影響

注) ●：標準代落水良好区，▲：2倍代落水良好区，□：標準代落水不良区．エラーバーは標準誤差 (n = 10)．

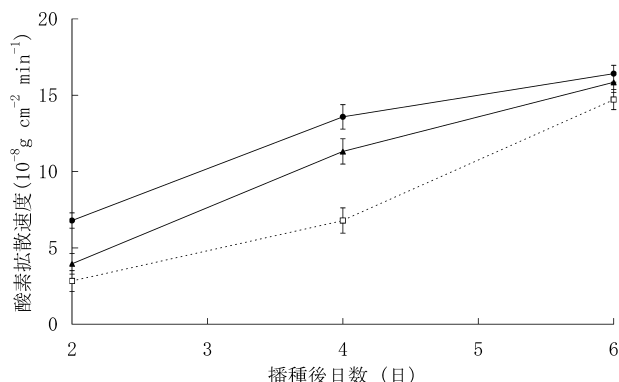
(4) 土壤通気性の推移

播種後2～6日の間は、3区ともに日数の経過に伴って酸素拡散速度は増加し、土壤通気性の向上が認められた。落水良好区では、標準代の酸素拡散速度は2倍代に比べて高く推移する傾向を示した。また同じ標準代でも落水不良区は落水良好区に比べて低く、標準代落水不良区が3区中で最も低く推移した（第28図）。

2) 出芽と苗立ちの様相

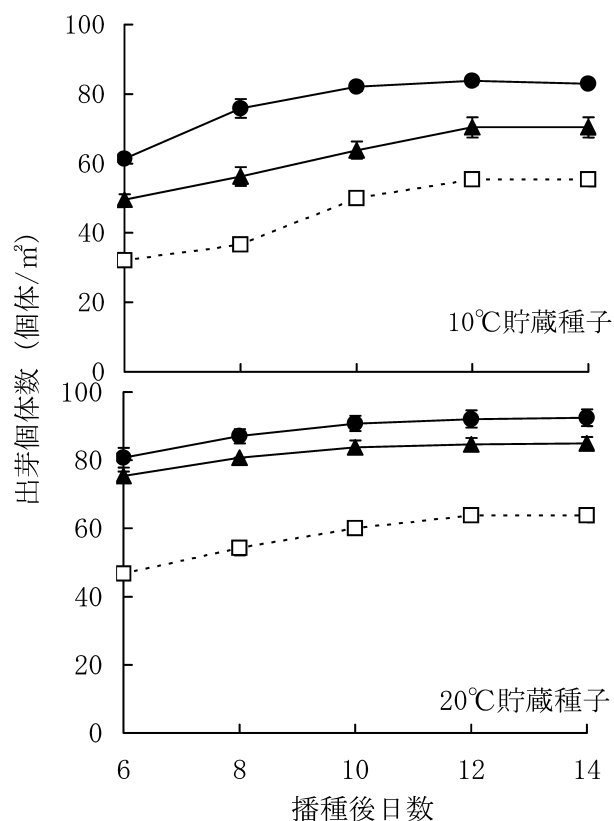
(1) 出芽個体数の推移

10℃貯蔵種子の出芽個体数は、落水良好区では、標準代が2倍代に比べて多く、同じ標準代でも落水不良区は落水良好区に比べて少なく、標準代落水不良区が3区中で最も少なかった。またこの傾向は20℃貯蔵種子にも認められたが、20℃貯蔵種子区では出芽個体数が全体的に多かった（第29図）。



第28図 圃場の代かきおよび落水程度が土壌通気性に及ぼす影響

注) ●：標準代落水良好区，▲：2倍代落水良好区，□：標準代落水不良区．エラーバーは標準誤差 (n = 5)．



第29図 圃場の代かきおよび落水程度が水稻の出芽に及ぼす影響

注) ●：標準代落水良好区，▲：2倍代落水良好区，□：標準代落水不良区．エラーバーは標準誤差 (n = 4)．

(2) 播種後14日目における m² 当たり 苗立ち 個体数

10℃貯蔵種子の m² 当たり 苗立ち 個体数は、落水良好区では標準代が2倍代に比べて多く、同じ標準代でも落水不良区は落水良好区に比べて少なく、標準代落水不良区が3区中で最も少なかった。またこ

の傾向は20℃貯蔵種子にも認められたが、20℃貯蔵種子では苗立ち個体数が全体的に多かった(第6表)。

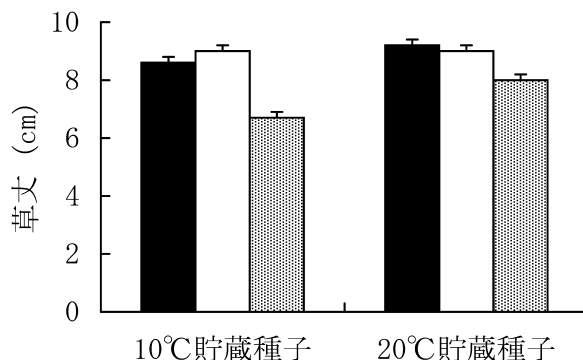
第6表 圃場の代かきおよび落水程度が水稻の苗立ち個体数(個体/m²)に及ぼす影響(播種後14日目)

代かき 程度	落水 程度	10℃貯蔵 種子	20℃貯蔵 種子
標準代	良好	82.9 ± 1.0a	92.5 ± 2.5a
2倍代	良好	70.4 ± 2.9ab	85.0 ± 1.9a
標準代	不良	55.4 ± 0.6b	63.8 ± 0.6a

注) コドラート内の調査結果．平均値 ± 標準誤差で示す．同一貯蔵処理間の同一記号を付した値間では5%水準で有意差がないことを示す (Fisher's LSD)．

(3) 播種後14日目における草丈

10℃貯蔵種子で出芽した個体の初期生育を比較してみると、落水良好区では、標準代および2倍代の播種後14日目の草丈はほぼ同等であった。また同じ標準代でも落水不良区の草丈は落水良好区に比べて小さく、標準代落水不良区が3区中で最も小さくなり、明らかに生育が劣っていた。また20℃貯蔵種子でも同様の傾向が認められたものの、10℃貯蔵種子に比べて草丈が全体的に大きく、初期生育は促進される傾向が認められた(第30図)。



第30図 圃場の代かきおよび落水程度が播種後14日目の水稻の草丈に及ぼす影響

注) ■：標準代落水良好区，□：2倍代落水良好区，▨：標準代落水不良区．エラーバーは標準誤差 (n = 2)．

4. 考 察

1) 圃場の代かきおよび落水程度が土壌環境に及ぼす影響

Vの実験において、標準代は2倍代に比べて粗大団粒の割合は大きい一方で、微細団粒の割合は小さく(第5表)、また落水良好区では、標準代は2倍

代に比べて土壌含水率が低く（第26図）、表面土壌硬度（第27図）、土壌通気性（第28図）はともに高く推移した。水田土壌では、代かきにより団粒構造が物理的に破壊されて団粒の粒径は細くなる⁵¹⁾ことから、標準代は2倍代に比べて代かき回数が少なかったために団粒構造の破壊程度が小さく、粗大団粒の割合は大きく、微細団粒の割合は小さくなったと考えられた。また土壌粒子は細かいほど単位重量当たりの表面積が増大して水の吸着力が増すこと¹⁹⁾から、標準代の土壌含水率は低く推移したと考えられた。さらにポット実験において代かき後に落水した土壌では、土壌含水率の低下に伴って気相が生じて土壌通気性は向上し、同時に土壌収縮によって固相が増加して表面土壌硬度は高まった（Ⅱ⁷⁾）。また代かき時間が短い場合、気相が生じ易いために土壌通気性が向上し、土壌含水率が低くなるために表面土壌硬度はより高まった（Ⅲ⁸⁾）。Ⅴの実験において代かき回数の少ない標準代は代かき回数の多い2倍代に比べて代かき時間が短いため、ポット実験と同様に表面土壌硬度および土壌通気性は2倍代に比べて高く推移したと考えられた。

Ⅴの実験において、代かき程度が同じ標準代でも落水不良区は落水良好区に比べて土壌含水率は高く（第26図）、表面土壌硬度（第27図）および土壌通気性（第28図）ともに低く推移した。直播水稻圃場の土壌含水比が大きい箇所では、他の箇所に比べて飽和透水係数は小さく、この要因として土壌の微細形態が異なり、含水比の小さい地点では径0.1～0.5mm程度の亀裂が多く見られるのに対して、含水比の大きい箇所では壁状となっていたこと²⁷⁾が報告されている。また、ポット実験では、数日の飽水とした後に落水した場合、飽水とした期間だけではなく、落水後も気相が生じにくく、両期間を通じて土壌通気性が低く推移した可能性があること（Ⅳ⁹⁾）から、落水程度によって、土壌三相といった土壌構造あるいは微細な亀裂といった小さな形態に変化を生じた結果、その後の土壌含水率や土壌通気性が異なることが推察された。Ⅴの実験では、落水不良区は播種後数日にわたって水が停滞して土壌構造などが変化した結果、落水良好区に比べて土壌含水率は高く、土壌通気性は低く推移しやすくなったと考えられた。

2) 圃場の代かきおよび落水程度が水稻の出芽・苗立ちに及ぼす影響

落水良好区では、播種後14日目の m^2 当たり苗立ち個体数は、標準代が2倍代に比べて多くなった（第6表）。この要因の一つとして、播種後6日目の出芽個体数が多いこと（第29図）から、標準代落水良好区は2倍代の同区に比べて出芽が早まったことで苗立ち個体数が増加したと推察された。また、ポット実験において代かき時間が短い場合には播種直後の土壌通気性が高く推移して、このことが土壌の還元化をより強く抑制して、播種深にかかわらず鞘葉の伸長を促進し出芽を早めること（Ⅲ⁸⁾）から、Ⅴの実験の落水良好区では、代かき回数の少ない（代かき時間の短い）標準代の土壌通気性が2倍代に比べて高く推移した結果、鞘葉の伸長が速やかに行われ、早期に出芽したと推察された。また、出芽個体の草丈には大きな違いは認められず（第30図）、Ⅴの実験の代かき程度は出芽後の生育には大きな影響を与えていないことが示唆された。

同じ標準代では、落水不良区の播種後14日目の m^2 当たり苗立ち個体数は落水良好区に比べて少なかった（第6表）。この要因の一つとして、播種後6日目の出芽個体数が少ないこと（第29図）から、標準代落水不良区は落水良好区に比べて出芽が遅れた結果、苗立ち個体数も低下したと推察された。ポット実験で播種直後から落水した場合は、数日間飽水状態が続いた後に落水した場合に比べて土壌通気性が高く推移して出芽・苗立ちが早まり、出芽・苗立ちの斉一性も高まること（Ⅳ⁹⁾）から、Ⅴの実験の標準代では、落水不良区の土壌通気性が落水良好区に比べてかなり低く推移した結果、鞘葉の伸長が遅れて出芽した個体も出芽時期が遅かったことから草丈が小さくなったと考えられた。

3) 水稻の安定した出芽・苗立ちを確保する種子予措および播種栽培技術

Ⅴの実験では、20℃貯蔵種子の播種後14日目の m^2 当たり苗立ち個体数は10℃貯蔵種子に比べて多かった（第6表）。この要因の一つとして、20℃貯蔵種子は10℃貯蔵種子に比べて播種後6日目での出芽個体数が多いこと（第29図）から、出芽が早まった結果、苗立ち個体数が多くなったと推察された。また、この結果は、吉永ら⁷⁹⁾が15～30℃で3日間貯蔵した種子は10℃で貯蔵した種子に比べて平均出芽日数

が短縮したという結果と同様であり、この加温処理によって出芽・苗立ちが向上する可能性は高い。

5. 摘要

圃場条件下において、播種前の代かきおよび播種後の落水程度が打込み式代かき同時土中点播機を利用した湛水直播水稻の出芽と苗立ちに及ぼす影響を調査した。代かきロータリを用いた代かきを2行程行った場合(2倍代)は、1行程の場合(標準代)に比べて表層土壌の粗大団粒の割合は小さく、微細団粒の割合は大きかった。その結果、2倍代は保水性が高く、気相を生じにくい土壌構造となり、落水後の土壌含水率は高く、酸素拡散速度は低く推移した。また、同じ代かき区内の田面の凹凸で生じる落水の良否によって土壌含水率および酸素拡散速度は変化し、落水が良好な(播種後翌日には落水した)箇所は、落水が不良な(播種後数日にわたり表面水が停滞した)箇所に比べて土壌含水率は低く、酸素拡散速度は高く推移した。2倍代は標準代の落水良好箇所に比べて水稻の苗立ち数は少なく、標準代の落水不良箇所は、それよりさらに苗立ち数が少なく、出芽した個体の生育も悪かった。以上の結果から、打込み式代かき同時土中点播機を利用した湛水土中播種・落水栽培法では、過度に代かきを行わないことと圃場の均平に留意して水の停滞箇所を作らないことが、安定した出芽・苗立ちに必要な要素と考えられた。

Ⅵ. 打込み同時施肥と播種後の落水が 湛水直播水稻の出芽と苗立ちに及ぼす影響

1. 緒言

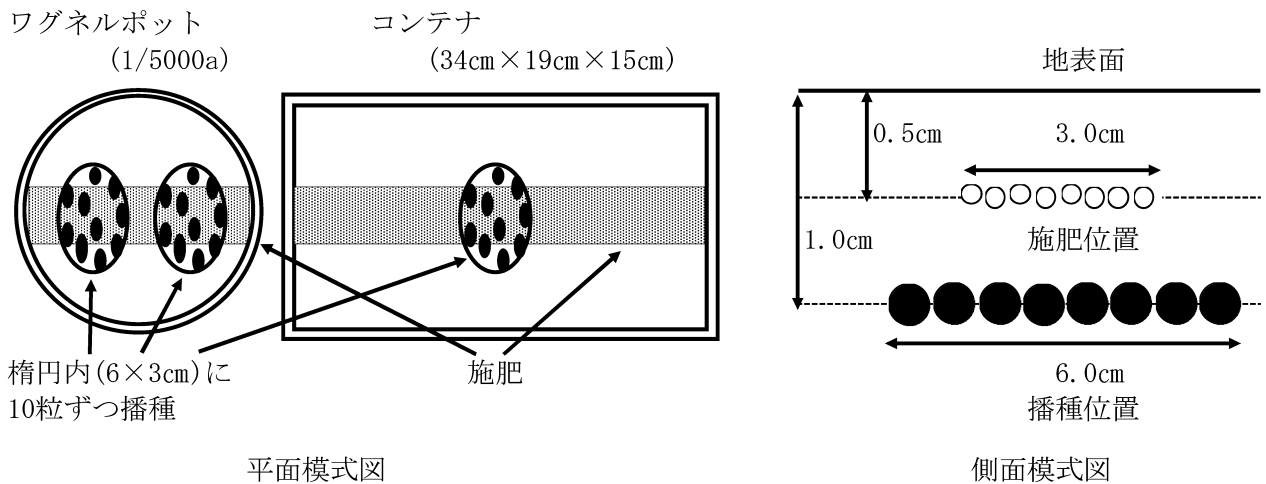
打込み式代かき同時土中点播機は、高速回転する鋸歯型ディスクにより過酸化カルシウム剤で被覆した種子を打ち出す機構を有し、粒状肥料を供給することで、施肥と播種の同時化による基肥散布作業の省力化が可能であるが、打込み同時施肥は土壌全層に施肥する全層施肥に比べて出芽率の低下⁷⁸⁾や初期生育の遅延も認められている。そのため、打込み同時施肥を行った点播水稻の出芽から苗立ちに至る生育経過を明らかにして生育遅延を回避する方策を検討する必要がある。Ⅵでは打込み同時施肥がイネ幼植物の生育に及ぼす影響を明らかにするために、ポット栽培において播種同時施肥条件を作出し、全

層施肥を対照として出芽・苗立ちに至るまでの地上部および地下部の生育を解析するとともに、イネ幼植物の生育に関連すると考えられる土壌中の窒素濃度を測定した。その際、Ⅱ⁷⁾と同様に播種後の湛水管理に対する落水管理の生育促進効果を併せて検証した。

2. 材料と方法

1) 試験方法

水稻品種「ヒノヒカリ」を供試し、実験は2004年に九州沖縄農業研究センター(福岡県筑後市和泉)の裾上げしたビニールハウス内で行った。土壌と過酸化カルシウム剤被覆種子の準備はⅡ⁷⁾と同様とし、播種を5月7日に行った。また、出芽・苗立ち調査用としては1/5000aワグネルポットに、根系解析用としてはコンテナ(34×19×15cm)にあらかじめ土壌を充填して、播種前日に入水して代かきを行ったポットおよびコンテナを1日間静置し、土壌と表面水とが分離した後、表面水を除去し、施肥および播種を行った。Ⅵの実験での播種深と施肥深は、打込み式土中点播機による標準的な打込み速度と土壌硬度条件下での播種深が平均12mmであること⁶⁶⁾、播種深が平均10mmの時の施肥深が平均5mm前後であること、施肥量は種子量に比べて重量比で4~5倍程度に量が増えるため施肥が帯状となることを考慮し、播種深を10mm、施肥深を5mmの帯状に設定した。打込み同時施肥を想定した区(以下打込み区とする)では第31図に示した条件とした。ポットでは点播形状を想定した楕円(6×3cm)を2箇所設け、各円内の土壌表面に被覆種子を10粒ずつ播種した。コンテナでは中央部に1箇所同様の楕円を設定し、被覆種子を10粒播種した。播種直後、代かき土壌を厚さ5mmになるように均一に流し込み、さらに窒素成分で0.75kg/aに相当する肥料{速効成分(リン安):緩効成分(LP50):遅効成分(LPSS100)=1:3:6}¹⁵⁾を3cmの幅で帯状に施肥し、この上に代かき土壌を5mmの厚さになるように覆土した。一方、対照とする全層施肥を想定した区(以下全層区とする)では作土深に相当する厚さの土壌に肥料を混和することが一般的であるが、打込み区と同様の播種深度設定とし施肥日を播種同日としたため、打込み区と同様に被覆種子を土壌表面に播種し、窒素成分で0.75kg/aに相



第31図 播種形状及び施肥位置の設定

注) 全層区は覆土(厚さ1cm)に相当する代かき土壌全体に混和。

当する肥料を厚さ1cmの分量の代かき土壌と混和し、これを均一に流し込んで覆土した。また、打込み区および全層区それぞれに落水と湛水の2処理区を設けた。落水管理のポットおよびコンテナは、播種数時間後に駒込ピペットを用いて表面水を除去し、その後は土壌表面からの蒸発のみによる自然減水の落水状態とし、湛水管理のポットおよびコンテナには、くみ置きした水道水を1日3回加えて1cmの水深を維持した。なお、調査期間中のハウス内の日平均気温の平均値は、22.3℃であった。

2) 出芽と苗立ちの調査および解析

出芽数、第1葉(不完全葉)および第2葉が抽出した個体数を、播種後2週間、毎日調査した。また、播種後3, 5, 7, 10, 14日目に、各12ポット(2区×2管理×3反復)から全ての個体を採取し、各個体の鞘葉と第1葉の全長、葉齢(鞘葉のみ抽出した個体の葉齢を0、第1葉まで抽出した個体の葉齢を1とする)、種子、茎葉部と根の乾物重を測定した。この場合、第1葉長については第1葉の抽出した個体のみを測定した。出芽および苗立ちの定義はⅡ⁷⁾と同様として、出芽個体数、第1葉抽出個体数および苗立ち個体数、乾物重については3反復(3ポット)の平均値を求めた。また、鞘葉長、第1葉長は1ポット内の20個体の平均値を求めて、3反復(3ポット)の平均値を算出した。さらにこれらのデータを使って播種から出芽、第1葉抽出および苗立ちまでの平均日数および斉一性の数量化は、Ⅳ⁹⁾と同様の方法で解析した。

3) 根系解析

播種後4, 6, 8, 10, 14日目に各12個(2区×2管理×3反復)のコンテナから出芽個体10個体を慎重に洗い出しFAA溶液で保存した。根系の生育が中庸な5個体を選び、根をクリスタルバイオレット0.25%溶液で染色した。各根系の形状をイメージスキャナーにより画像データとしてパソコンに取り込み、Kimura and Yamasakiの画像解析法²⁶⁾によって全根長および根端数を測定した。また、全根長および根端数については各処理ごとに5個体の平均値を求めて、さらにこれらの3反復(3コンテナ)の平均値を算出した。

4) 土壌のアンモニア態および硝酸態窒素濃度の測定

2004年12月10日、コンテナ(34×19×15cm)に土壌を充填し、代かきを行い、表面水を除去した後、施肥および覆土を行った。この実験では播種を行わず、帯状施肥および覆土の設定は上記1.と同様とした。コンテナは平均気温を22.5℃(25℃・12時間・明条件(約100μmol m⁻² s⁻¹)、20℃・12時間・暗条件)に設定した恒温器内に設置し、落水管理と湛水管理を設けた。分析用土壌は、打込み区で施肥後0, 3, 5, 7, 10, 14日目にコンテナ中央の施肥位置において100mL土壌コアを用いて土壌表面から深さ5cmまでの土壌を3反復(3コンテナ)で採取し、全層区も同時期に同様の箇所において採取した。抜き取った土壌は生土のまま均一に混ぜた後、10gをポリ瓶に採取して10%塩化カリウム溶液で1時間振とう抽出を行った。その後、ろ過を行い、溶液を

分析時まで4℃で保管した。硝酸態窒素およびアンモニア態窒素濃度の測定はオートアナライザー (BRAN + LUEBBE 製 TRAACS800) を用いて行った。

3. 結 果

1) 土壌環境の推移

(1) 土壌のアンモニア態および硝酸態窒素濃度の推移

土壌中のアンモニア態窒素濃度は打込み区で全層区の2倍近い10~15mg/乾土100gの範囲で高く推移した。また、打込み区では落水区が湛水区に比べて高く推移した。硝酸態窒素濃度はアンモニア態窒素濃度に比べて施肥法による区間差異が小さかった。いずれも5mg/乾土100g前後で推移したが、播種後水管理ごとに同様の推移を示し、落水区では落水処理の数日後にはほぼ半減し、土壌水分が低下した7~14日目にかけて増加して安定したのに対し、湛水区では漸減した (第32図)。

2) 出芽と苗立ちの様相

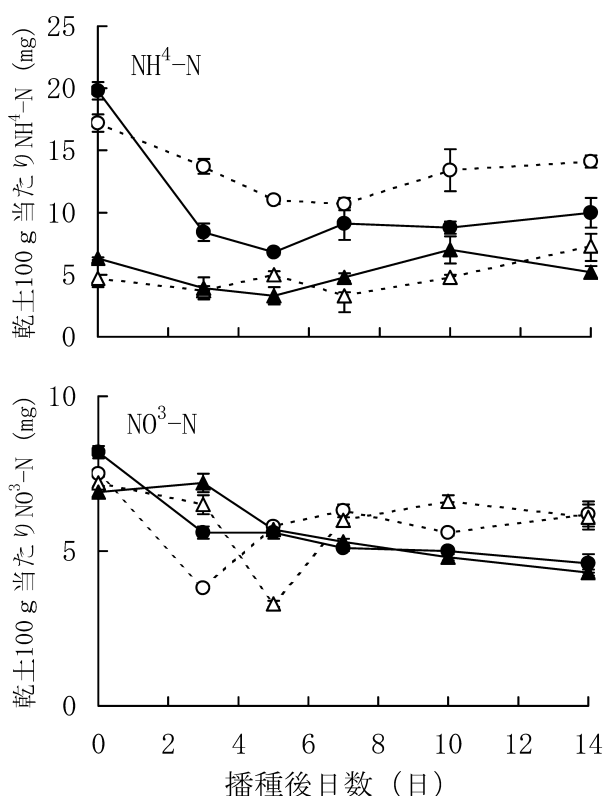
(1) 出芽から苗立ちまでの推移

出芽については、平均出芽日数に処理区間で大きな差は認められなかったが、累積出芽率は、湛水区では施肥の影響が認められ、打込み区で全層区に比べて10ポイント低下したのに対し、落水区では施肥法による差は小さかった (第7表)。第1葉の抽出については、落水区は湛水区に比べて平均抽出日数が有意に短く、斉一性は有意に高まったが、施肥の影響は認められなかった。このような傾向は苗立ちについても同様に認められた。なお、Ⅵの実験では出芽個体は全て第1葉抽出個体および苗立ち個体へ

移行したため、累積出芽率の値は累積第1葉抽出率および累積苗立ち率と同じになった。

(2) 鞘葉長、第1葉長、葉齢および乾物重の推移

鞘葉の伸長は湛水区で旺盛で落水区の約1.7倍の長さまで伸長したが、施肥法の影響は認められなかった (第33図)。このような傾向は第1葉の伸長についても同様に認められた。



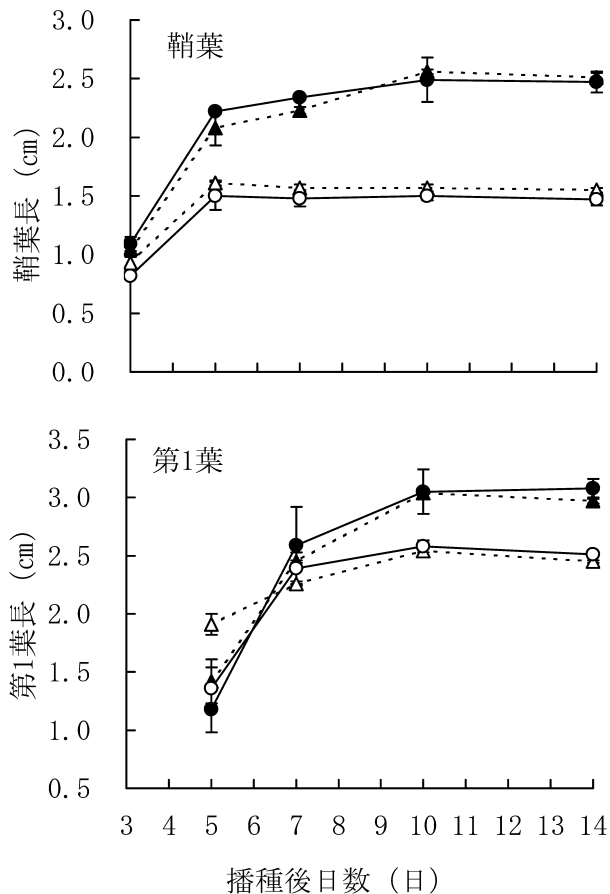
第32図 土壌のアンモニア態および硝酸態窒素濃度の推移

注) ●：打込み湛水区，▲：全層湛水区，○：打込み落水区，△：全層落水区．エラーバーは標準誤差 (n = 3)．

第7表 異なる施肥法と播種後水管理が出芽、第1葉抽出、苗立ち特性に及ぼす影響

施肥法	播種後水管理	出芽			第1葉			苗立ち		
		平均出芽日数 (日)	斉一係数	累積出芽率 (%)	平均抽出日数 (日)	斉一係数	累積抽出率 (%)	平均苗立ち日数 (日)	斉一係数	累積苗立ち率 (%)
全層区	湛水	4.1	0.6	95.0	5.7	0.4	95.0	6.3	0.4	95.0
	落水	3.9	0.5	98.3	5.0	1.0	98.3	5.5	1.0	98.3
打込み区	湛水	4.1	1.1	85.0	5.7	0.5	85.0	6.4	0.5	85.0
	落水	4.3	0.6	95.0	5.2	1.0	95.0	5.5	1.0	95.0
施肥法 (A)		ns	ns	**	ns	ns	**	ns	ns	**
播種後水管理 (B)		ns	*	**	**	**	**	**	**	**
A×B		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

注) **, *: 分散分析の結果、1%および5%水準で有意差があることを示す。ns: 有意差なし。



第33図 鞘葉長および第1葉長の推移

注) ●：打込み湛水区, ▲：全層湛水区,
○：打込み落水区, △：全層落水区.
エラーバーは標準誤差 (n = 3).

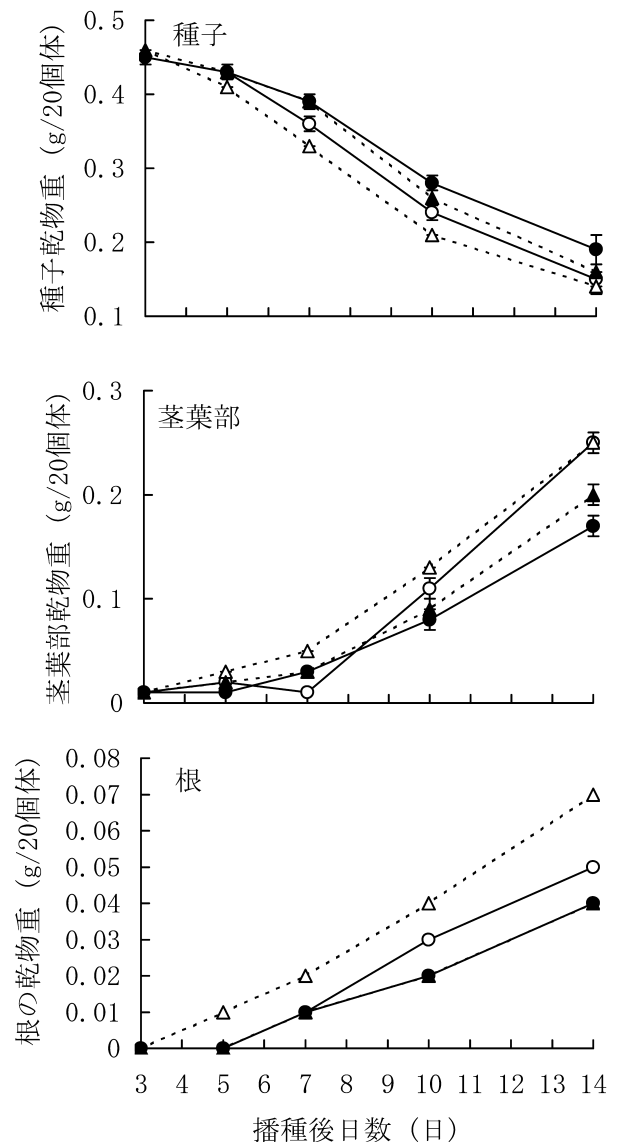
第8表 異なる施肥法と播種後水管理が播種後14日目の葉齢に及ぼす影響

施肥法	播種後水管理	葉齢
全層区	湛水	3.0 ± 0.1
	落水	3.5 ± 0.1
打込み区	湛水	2.6 ± 0.1
	落水	3.2 ± 0.0
施肥法 (A)		**
播種後水管理 (B)		**
A × B		ns

注) 数値は平均値 ± 標準誤差. ** : 分散分析の結果, 1%水準で有意差があることを示す.
ns : 有意差なし.

葉齢は施肥法および水管理の影響を受け, 同じ水管理では打込み区が全層区より0.3程度遅れる傾向を示した (第8表). また, 同じ施肥法では落水区は湛水区に比べて0.5~0.6進む傾向を示した.

種子乾物重は播種後に直線的に減少した (第34図). その減少程度は施肥法および水管理の影響を



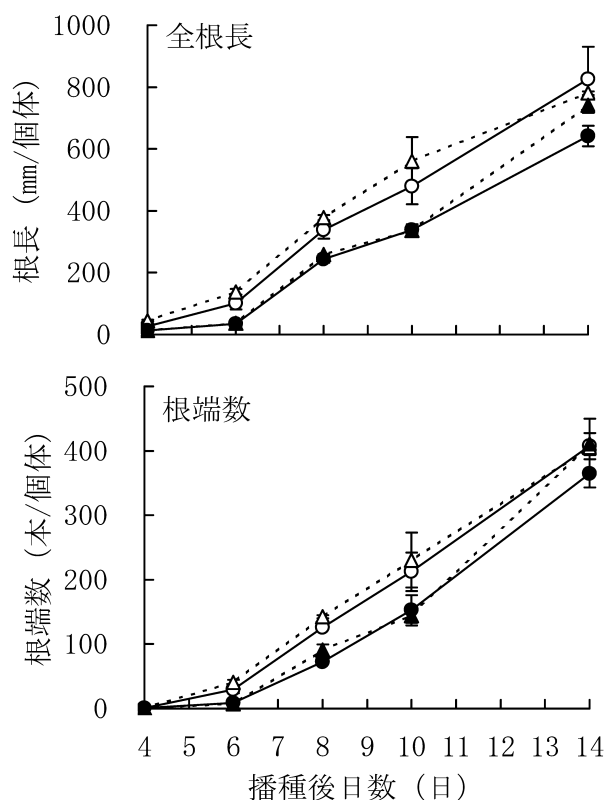
第34図 種子, 茎葉部および根の乾物重の推移

注) ●：打込み湛水区, ▲：全層湛水区, ○：打込み落水区, △：全層落水区. エラーバーは標準誤差 (n = 3).

受け, 打込み区よりも全層区で, 湛水区よりも落水区で種子乾物重の減少程度が大きかった. 一方, 茎葉部と根の乾物重は, 播種後5日目頃から直線的に増加した. その増加程度は施肥法および水管理の影響を受け, 打込み区よりも全層区で, 湛水区よりも落水区で茎葉部と根の乾物重の増加程度が大きくなる傾向を示した.

(3) 根系形成の推移

全根長については, 同じ施肥法では落水区が湛水区に比べて生育期間を通じて長かった. また, 同じ水管理では施肥法による差は小さかったが, 打込み区は全層区に比べて短い傾向を示した (第35図). このような傾向は根端数についても同様に認められ,



第35図 全根長、根端数の推移

注) ●: 打込み湛水区, ▲: 全層湛水区,
○: 打込み落水区, △: 全層落水区。
エラーバーは標準誤差 (n = 3)。

落水区の根端数は湛水区に比べて播種後10日目頃まで多く推移したことから根の分岐の促進が示唆された。

4. 考 察

1) 打込み施肥と播種後落水管理が土壤中のアンモニア態窒素濃度に及ぼす影響

湛水直播水稻における土壤溶液中のアンモニア態窒素濃度の上昇が出芽・苗立ちを低下させることが既に報告されている^{18, 23)}。Ⅵの実験においても打込み区では種子近傍のアンモニア態窒素濃度が全層施肥に比べて明確な上昇を見せ (第32図), 出芽の低下や地上部・地下部の初期生育を遅らせた主要因になっていると考えられた。しかし, Ⅵの実験では土壤中のアンモニア態窒素濃度が最も高く推移した打込み区の落水管理では出芽・苗立ちに対する抑制は, 湛水管理より軽微であり (第7表), このことはアンモニア態窒素濃度のみで生育抑制が説明できないことを示している。これについて, 播種後に落水管理を行うことによって表層土壤の通気性が向上した (Ⅱ⁷⁾) ため, 土壤中のアンモニア態窒素によ

る生育抑制が緩和されたと考えられた。

現在, アンモニア態窒素が出芽・苗立ちを阻害するという現象については確認されているが^{18, 23)}, 土中播種された種子の生長に対しアンモニア態窒素がどのように影響を及ぼすかについては十分に明らかにされていない。打込み同時施肥を行った水稻について栽培面のみならず品種面からも出芽・苗立ちの向上を図るためには, 今後アンモニア態窒素がイネの幼植物の生長に対する作用機作の詳細を明らかにしていく必要がある。

2) 打込み施肥と播種後落水管理が出芽・苗立ちに及ぼす影響

Ⅵの実験の打込み区は全層区に比べて出芽率を低下させ, 地上部および地下部の初期生育を遅らせる傾向を示した (第7表, 第8表, 第34図, 第35図)。このことは, 種子近傍の肥料濃度が関与して何らかのストレスとなり生育を阻害したと考えられ, 種子近傍に肥料があることによって出芽・苗立ちが劣ることを指摘した渡部らの報告⁶⁸⁾と同様の結果となった。一方, 本実験で用いた肥料は吉永らの報告⁷⁸⁾で用いた肥料と緩効度が異なり, 速効成分の割合が低いことが出芽への影響を小さくした可能性がある。

Ⅵの実験における打込み同時施肥の生育抑制は湛水条件において顕著に認められたが, 落水管理を行うことで出芽率ならびに地上部・地下部の生育が促進される傾向が認められた (第7表, 第8表, 第34図, 第35図)。この結果は, 著者らがⅡ⁷⁾で確認してきた落水管理の生育促進効果であり, 播種後落水管理下の乾物重が湛水管理に比べて増加すること⁵³⁾, 播種後落水は出芽後の生育を促進すること⁶⁵⁾などの報告とも一致している。したがって, 湛水直播における打込み同時施肥は, 播種後落水管理と組み合わせることによって初期生育の遅れを小さくして, 全層施肥を行った場合とほぼ同等の生育を確保できるものと考えられた。

5. 摘 要

打込み式代かき同時土中点播機での播種を想定し, 緩効性肥料を用いた播種同時施肥が出芽・苗立ちに及ぼす影響をポットおよびコンテナで調査した。土壤中に溶出した基肥由来の窒素の割合は, アンモニア態窒素が硝酸態窒素に比べてかなり多かった。ま

た、土壌中のアンモニア態窒素濃度は播種同時施肥を想定した打込み区が全層区に比べて高く、同じ打込み区では、落水管理が湛水管理に比べて高く推移した。さらに、打込み区では、全層区に比べて出芽率が低下し、地上部・地下部の初期生育が遅れる傾向を示した。この場合、播種後の落水管理をすることにより出芽率が向上し、加えて地上部・地下部の初期生育が促進され、同時施肥による初期生育の遅れが解消された。以上の結果、打込み式代かき同時土中点播機による播種同時施肥栽培では、播種後の落水管理によって出芽・苗立ちが安定化することが示唆された。

VII. 出芽速度および種子の代謝産物が湛水直播水稻の出芽と苗立ちに及ぼす影響

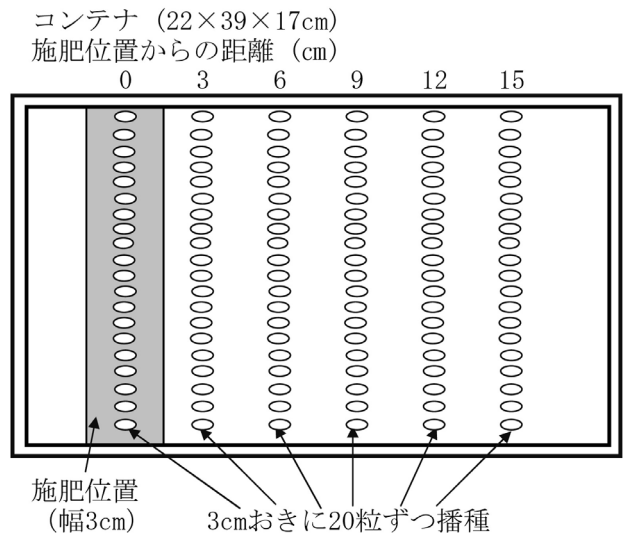
1. 緒 言

水稻の湛水直播栽培において幼植物の生長の遅速と種子の物質代謝との関係を明らかにすることは、出芽・苗立ちを制御し、安定した初期生育を確保するために重要である。イネの発芽過程における種子の物質代謝の研究は以前より行われ⁵⁹⁾、湛水直播水稻における物質代謝についても、低温条件下での出芽・苗立ちと種子の α および β -アミラーゼ活性との関係²⁾や、種子の胚部分における糖代謝と出芽との関係^{3, 45)}などの報告がある。また、代謝とも関連する胚の重さと出芽速度との関係¹⁾、葉色と苗立ち率との関係⁶⁷⁾などが報告されている。一方、湛水土中直播栽培における水稻の出芽・苗立ちは、栽培条件により多様に変化するが、この要因として土壌の物理的および化学的性質だけではなく、栽培条件に応じた種子の物質代謝もその一つになっている可能性がある。特に、VI¹¹⁾で取り上げた播種同時打込み施肥では、種子近傍への施肥による幼植物の生育遅延は、いわゆる肥料濃度障害と捉えられ、種子の物質代謝にも影響を与えたことが考えられることから、その実態を解明する必要がある。VIIの実験では、施肥量と種子に対する施肥の位置、播種後水管理という栽培条件を変えて異なる出芽条件を多数作出し、出芽速度および種子の代謝に関わる α -アミラーゼの活性やスクロース、グルコース、フルクトース含量と出芽・苗立ちとの関係について検討した。

2. 材料と方法

1) 試験方法

水稻品種「ヒノヒカリ」を供試し、実験は2004年に九州沖縄農業研究センター（福岡県筑後市和泉）の恒温機内で行った。土壌と過酸化カルシウム剤被覆種子の準備はII⁷⁾と同様とし、播種を7月28日に行った。播種前日に野外で入水して代かきを行ったコンテナを1日間静置し、土壌と表面水とが分離した後、表面水を除去し、施肥および播種を行った。施肥は被覆複合肥料（LPコート入り複合022-BD90号）を用いて幅3cmの帯状に行った。播種は肥料の帯と平行となるよう施肥位置から3cmおきに0, 3, 6, 9, 12, 15cmの位置ですじ状に被覆種子を20粒ずつ置床した（第36図）。播種深および



第36図 播種および施肥位置の設定（平面図）

注）播種深および施肥の深さは1cm.

施肥の深さをともに1cmとするため、同じ土壌を用いて別の容器に準備した代かき土壌を播種深（施肥の深さ）になるまで種子（肥料）上に均平に流し込んで覆土した。施肥は、窒素成分で7.5kg/10aに相当する施肥量（速効性成分（リン安）：緩効性成分（LP50）：遅効性成分（LPSS100）＝1：3：6）を標準量とし¹⁴⁾、2倍量（15kg/10a相当）、3倍量（22.5kg/10a相当）の3水準とした。上記のように設定したコンテナは、平均気温を22.5℃（25℃・12時間・明条件（約 $100\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ）、20℃・12時間・暗条件）に設定した恒温器に設置した後、落水と湛水の2種類の水管理を設けた。落水管理のコンテナは、播種数時間後に駒込ピペットを用いて表面水を除去し、その後は土壌表面からの蒸発のみによ

る自然減水の落水状態とした。湛水管理のコンテナには、くみ置きした水道水を、1日1回加えて、1 cm の水深を維持した。

2) 出芽と苗立ちの調査および解析

出芽個体数を2週間、毎日調査した。播種後3, 14日目に全ての個体を採取し、各個体の鞘葉長、草丈、葉齢と茎葉部乾物重を測定した。長さの測定において屈曲している個体は伸ばして測定した。出芽の定義はⅡ⁷⁾と同様とし、出芽個体数、茎葉部乾物重については3反復の平均値を求め、鞘葉長、草丈、葉齢は1区内の20個体の平均値を求めて、さらにこれらの3反復の平均値を算出した。また、これらのデータを使って平均出芽日数、平均出芽速度(平均出芽日数の逆数)の数量化をⅣ⁹⁾と同様の方法によって算出した。

3) 種子の α -アミラーゼ活性および糖含量の測定

播種後3日目にコンテナから全ての種子を採取し、 -20°C で保管して分析に供した。各処理区の α -アミラーゼ活性分析には5粒、糖類分析には10粒の玄米を供試し、3反復で測定を行った。 α -アミラーゼ活性は分析キット(Megazyme社製)を用い、スクロース、グルコースおよびフルクトースの含量はいずれもF-kit(インターナショナル社製)を用いて分光光度計により測定した。

4) 土壌のアンモニア態および硝酸態窒素濃度の測定

2004年12月3日、コンテナ(34×19×15cm)に

7月28日の実験と同じ土壌を充填し、代かきを行い、表面水を除去した後、施肥および覆土を行った。この実験では播種は行わず、帯状施肥および覆土の設定は7月28日の実験と同様とした。コンテナは平均気温を 22.5°C に設定した($25^{\circ}\text{C} \cdot 12$ 時間, $20^{\circ}\text{C} \cdot 12$ 時間)恒温器に設置し、落水管理と湛水管理を設けて7月28日の実験と同様の水管理とした。分析用土壌は、施肥後3日目に施肥位置から0, 6, 12cmの中央部分において100mL土壌コアを用いて土壌表面から深さ5 cmまでの土壌を3反復(3コンテナ)で採取した。また、抜き取り以降の作業および分析手順はⅥ¹¹⁾と同様の方法で測定した。

3. 結 果

1) 出芽速度と出芽・苗立ちとの関係

(1) 施肥位置、施肥量および播種後水管理と出芽率との関係

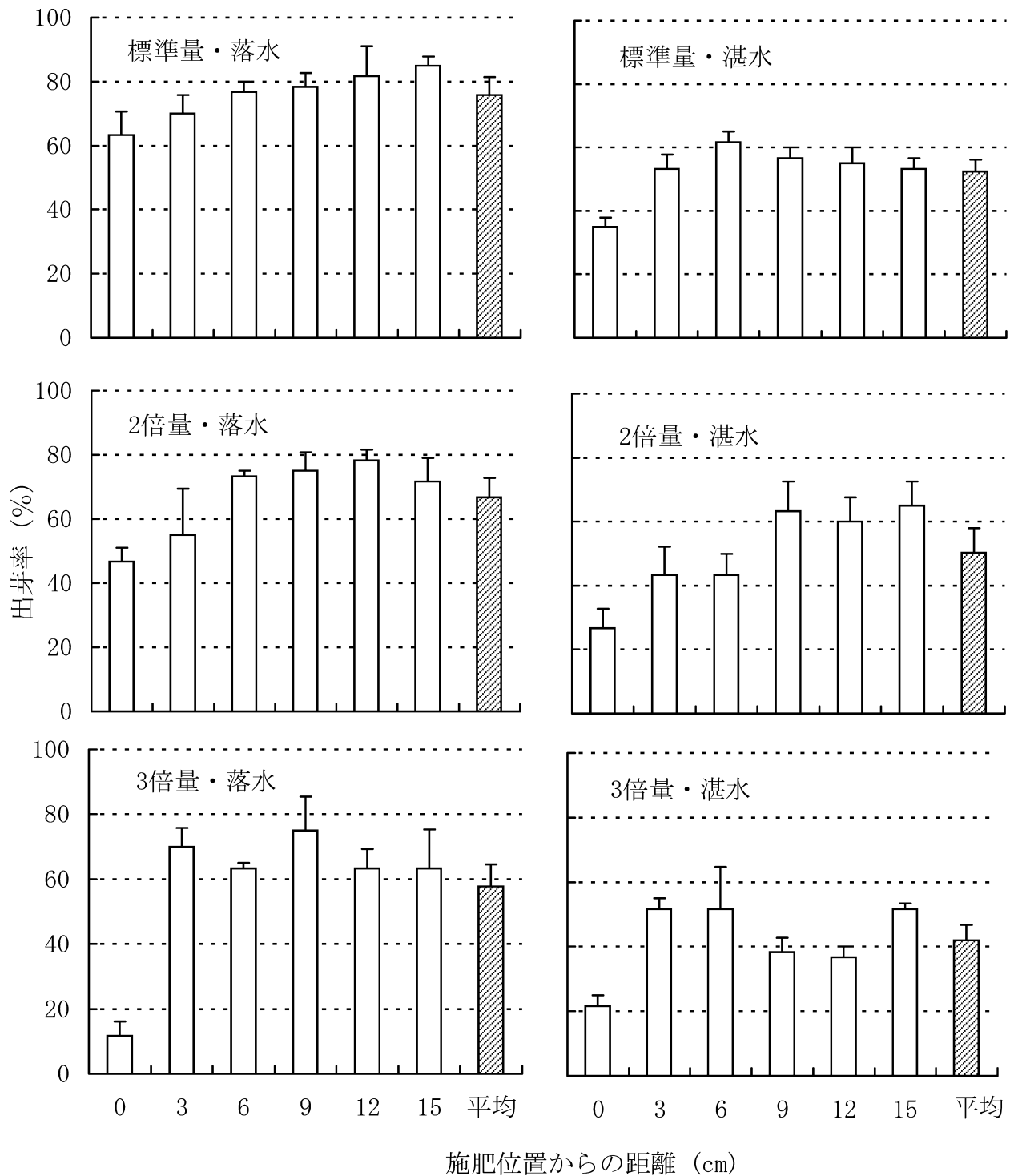
出芽・苗成ちは施肥位置の影響を受け、施肥位置(0 cm)の生育が最も遅延し、施肥位置から数 cm 離れると、その程度は軽微になった。その傾向を明確に示した播種後14日目の最終的な出芽率についてみると、出芽率はいずれの条件でも施肥位置(0 cm)が最も低く、3cm以遠で高まる傾向を示した。また、施肥位置の出芽は施肥量が増加するほど不良となり、コンテナ全体の平均出芽率は、施肥量の増加に伴って低下し、落水区より湛水区が低い傾向を示した(第37図)。

第9表 施肥量と施肥位置が出芽率(%)に及ぼす影響

施肥量	種子位置 ^{a)}	播種後3日目出芽率 ^{b)}		播種後14日目出芽率 ^{b)}	
		湛水	落水	湛水	落水
標準量	施肥位置	13.3*	36.7	35.0**	63.3
	他区平均	32.7	53.3	56.0	78.3
	相対値(%)	41	69	63	81
2倍量	施肥位置	0.0**	0.0**	26.7*	46.7**
	他区平均	36.0	41.3	55.0	70.7
	相対値(%)	0	0	49	66
3倍量	施肥位置	0.0**	0.0**	21.7**	11.7**
	他区平均	20.7	29.3	46.0	67.0
	相対値(%)	0	0	47	18

注) a) 施肥位置は施肥位置からの距離が0 cmの値、他区平均は施肥位置からの距離が3, 6, 9, 12, 15cmの値の平均値を示す。相対値は他区平均値に対する施肥位置播種区の相対値を示す。

b) *, **は同じ水管理の施肥位置播種区と他区平均間にt検定による5%, 1%水準で有意差があることを示す。



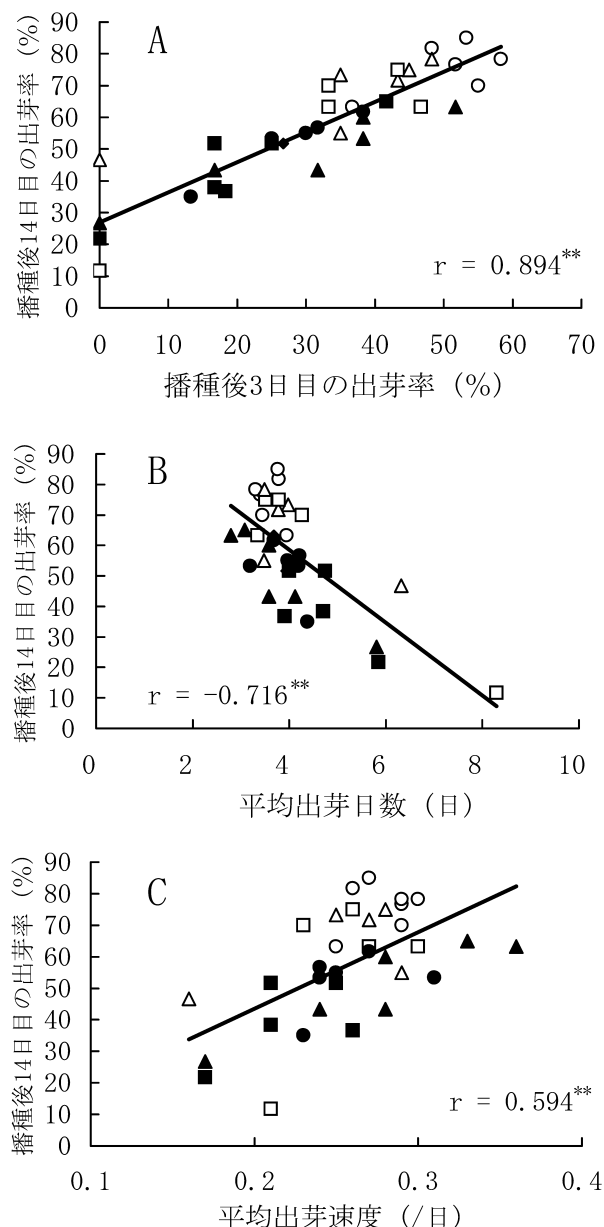
第37図 施肥量，施肥位置からの距離，播種後水管理が播種後14日目の出芽率に及ぼす影響
 注) エラーバーは標準誤差 (n = 3)。

施肥位置の出芽率は，播種後3日，14日ともに施肥位置からの距離が3～15cmにおける出芽率の平均値に比べて低かった。また，施肥量が2倍量，3倍量と増えると施肥位置の出芽率は有意に低下したことから，種子近傍の施肥および施肥量の増加は出芽を低下させることが明らかとなった（第9表）。

（2）出芽速度と出芽率との関係

早期に良好な出芽を示した区は，播種後14日目の最終的な出芽率も高くなる傾向があり，落水区に比べて早期の出芽率が低い湛水区では播種後14日目の最終的な出芽率も低くなる傾向が認められた。その結果，播種後3日目の出芽率と14日目の最終的な出

芽率の間には相関係数が $r=0.894$ という 1 % 水準で有意な正の相関関係が認められた (第38図 A)。さらに、播種後14日目の出芽率と平均出芽日数、平均出芽速度との関係についても、それぞれ相関係数が $r=-0.716$, $r=0.594$ という 1 % 水準で有意な負および正の相関関係が認められた (第38図 B, C)。

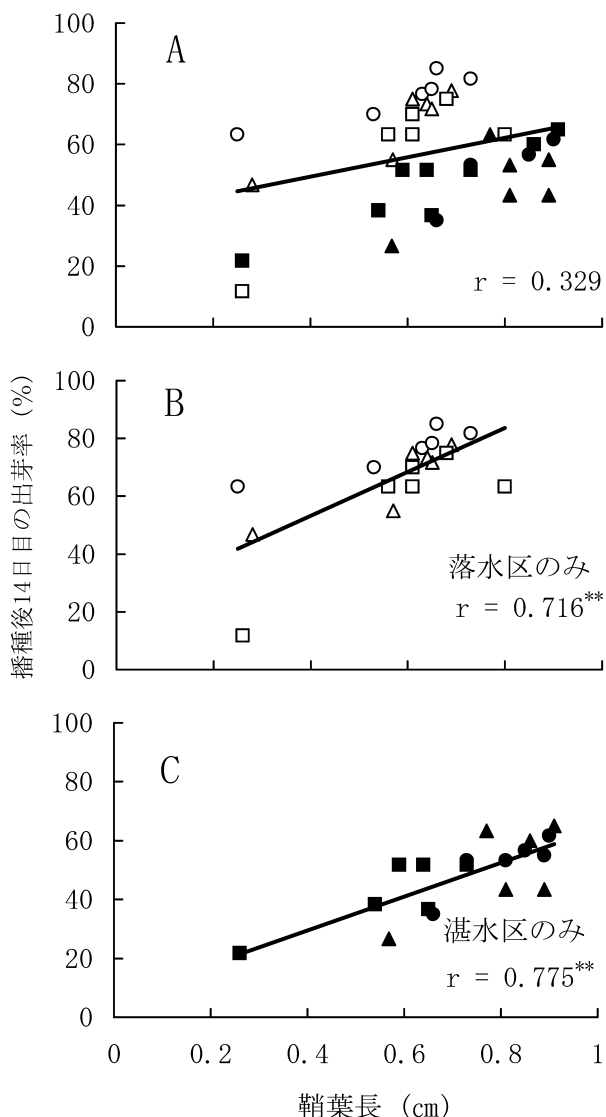


第38図 播種後3日目の出芽率、平均出芽日数、平均出芽速度と播種後14日目の出芽率との関係

注) ○: 標準量・落水, ●: 標準量・湛水, △: 2倍量・落水, ▲: 2倍量・湛水, □: 3倍量・落水, ■: 3倍量・湛水. **は1%水準で有意な相関関係が有ることを示す。

(3) 鞘葉長と出芽率との関係

播種3日目の鞘葉長と播種後14日目の出芽率との間には有意な相関関係は認められなかった (第39図 A)。しかし播種後水管理別にそれぞれの鞘葉長と出芽率との関係で整理した結果、鞘葉長と出芽率との間には落水区で相関係数 $r=0.716$, 湛水区で相関係数 $r=0.775$ という 1 % 水準で有意な正の相関関係が認められ、同じ播種後水管理では早期の鞘葉長が長い区ほど最終的な出芽率も高い傾向を示した (第39図 B, C)。

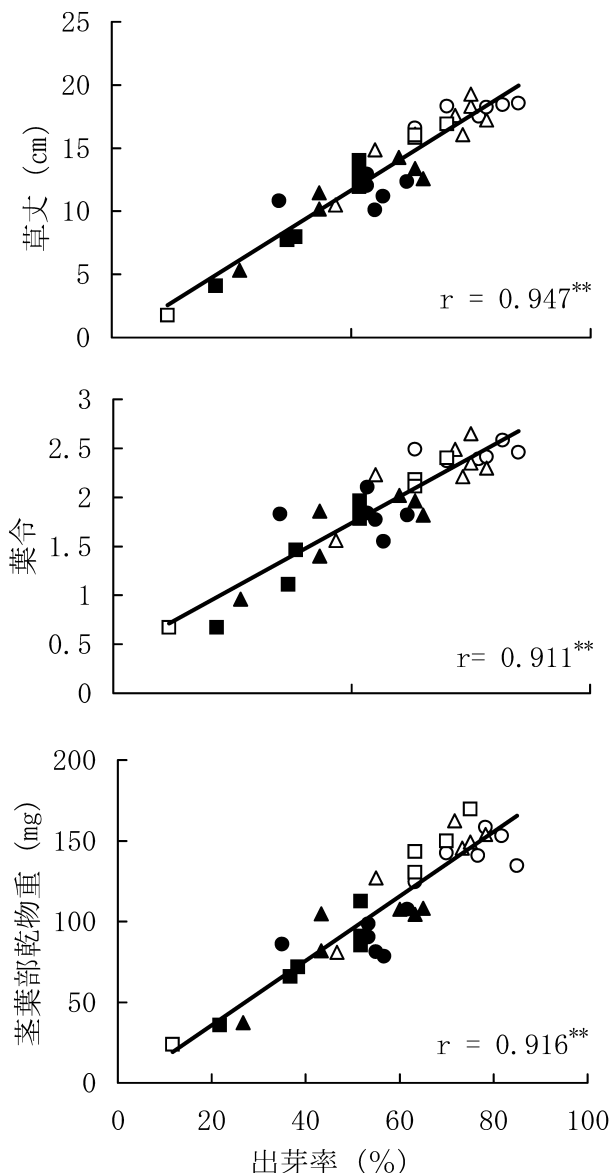


第39図 播種後3日目の鞘葉長と播種後14日目の出芽率の関係

注) ○: 標準量・落水, ●: 標準量・湛水, △: 2倍量・落水, ▲: 2倍量・湛水, □: 3倍量・落水, ■: 3倍量・湛水. **は1%水準で有意な相関関係が有ることを示す。

(4) 出芽率と草丈、葉令および茎葉部乾物重との関係

早期に良好な出芽を示した区は、初期生育が旺盛で、乾物重の増加が良好となる傾向があり、落水区は湛水区に比べて生育速度が速い傾向が認められた。播種後14日目の出芽率と同日の草丈との間には相関係数 $r=0.947$ 、同日の葉令との間には相関係数 $r=0.911$ 、同日の茎葉部乾物重との間には相関係数 $r=0.916$ という1%水準で有意な正の相関関係が認められた(第40図)。



第40図 播種後14日目の出芽率と草丈、葉令および茎葉部乾物重との関係。

注) ○: 標準量・落水, ●: 標準量・湛水, △: 2倍量・落水, ▲: 2倍量・湛水, □: 3倍量・落水, ■: 3倍量・湛水, **は1%水準で有意な相関関係が有ることを示す。

2) 種子の代謝産物と出芽・苗立ちとの関係

(1) 種子の代謝産物と出芽率との関係

施肥量および施肥位置が種子の α -アミラーゼ活性に及ぼす影響をみると、施肥量が2倍以上になると α -アミラーゼ活性も倍増したが、施肥位置による差は明らかでなかった。種子の糖含量に及ぼす影響は、スクロース含量は施肥量が2倍、3倍となるのに伴って湛水区では微増し、落水区では漸減する傾向を示した。グルコース含量およびフルクトース含量は施肥量の増加に伴い施肥位置で有意に減少した(第10表)。播種後3日目の種子の代謝産物と出芽率との関係についてみると、出芽率と α -アミラーゼ活性の間には相関係数 $r=-0.207$ 、スクロース含量との間には相関係数 $r=-0.150$ と有意な相関関係が認められなかったが、出芽率とグルコース含量との間には相関係数 $r=0.625$ 、フルクトース含量との間には相関係数 $r=0.383$ という有意な正の相関関係が認められた(第41図)。

(2) 土壌中のアンモニア態、硝酸態窒素濃度と出芽率ならびに種子の代謝産物との関係

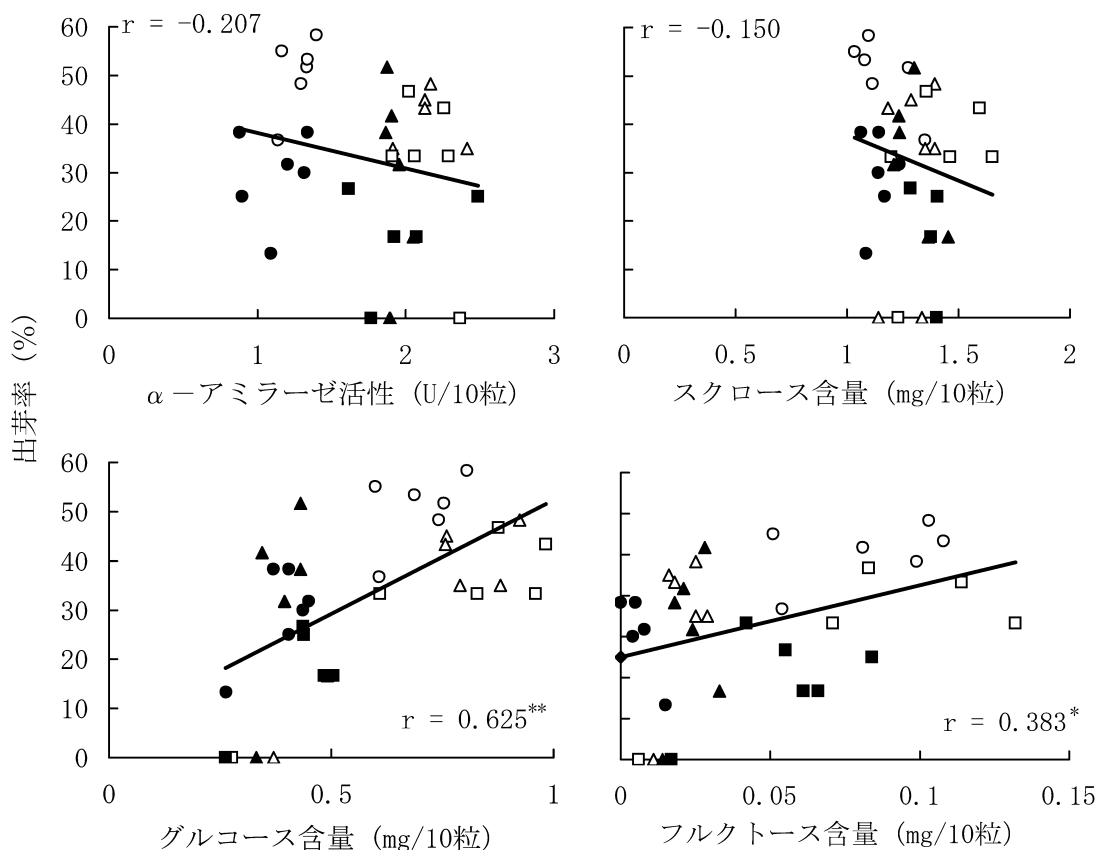
上記試験と同様の条件を作出して土壌中のアンモニア態窒素濃度および硝酸態窒素濃度を調査した結果、アンモニア態窒素濃度は施肥位置(0 cm)で高く、施肥位置からの距離が6 cm以上では急速に低下した。またアンモニア態窒素濃度は施肥量が多いほど高くなり、湛水より落水条件で高まる傾向を示した。一方、土壌中の硝酸態窒素濃度は、施肥位置、施肥量、播種後水管理に関わらず乾土100g当たり3 mg前後の値であった(第42図)。播種後3日目の土壌中のアンモニア態窒素濃度と出芽率の間には1%水準で負の相関関係が認められたが、硝酸態窒素濃度との間には相関関係は認められなかった(第43図)。さらに、アンモニア態窒素濃度と種子の代謝産物の関係をみると(第44図)、 α -アミラーゼ活性、スクロース含量およびフルクトース含量との間には有意な相関関係は認められなかったが、グルコース含量との間には5%水準で負の相関関係が認められた。

第10表 施肥量と施肥位置が種子の α -アミラーゼ活性、糖含量に及ぼす影響 (播種後3日目)

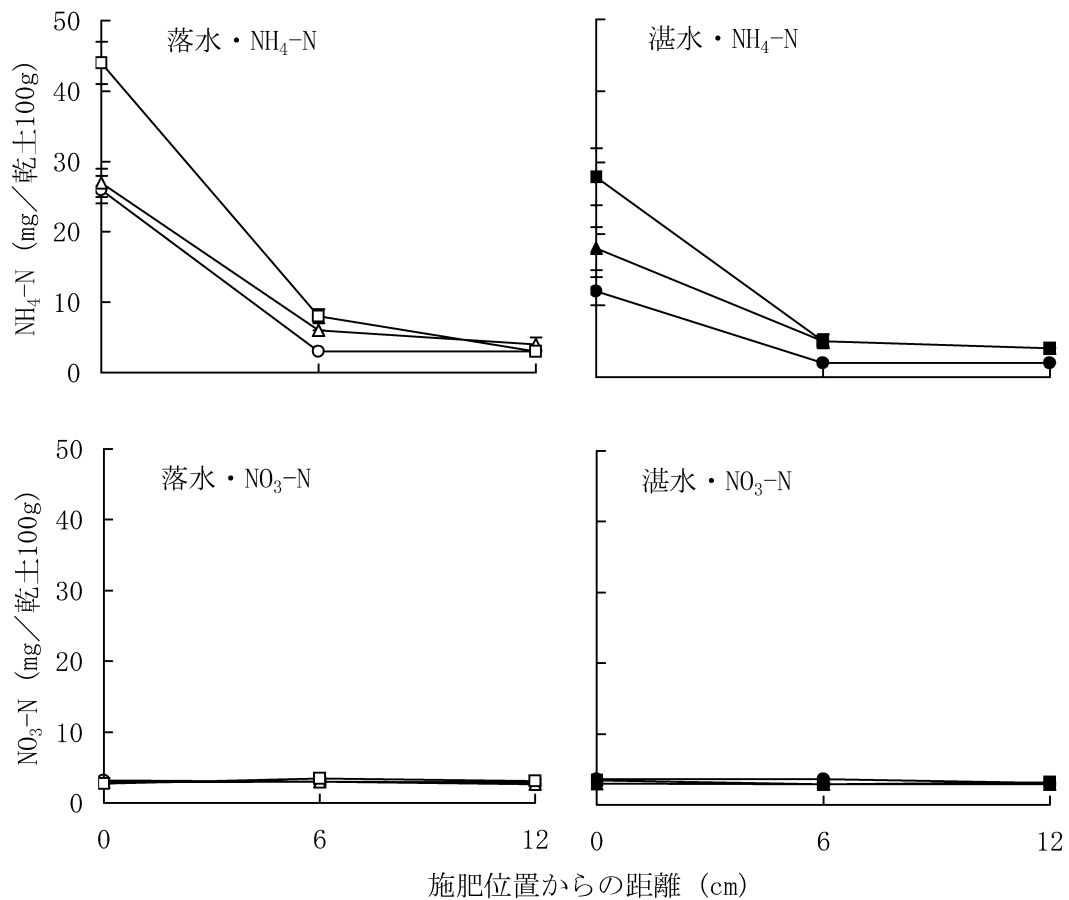
施肥量	種子位置 ^{a)}	α -アミラーゼ活性 ^{b)} (U/10粒)		スクロース含量 ^{b)} (mg/10粒)		グルコース含量 ^{b)} (mg/10粒)		フルクトース含量 ^{b)} (mg/10粒)	
		湛水	落水	湛水	落水	湛水	落水	湛水	落水
標準量	施肥位置	1.09	1.14	1.09	1.35	0.33	0.61	0.01	0.05
	他区平均	1.13	1.31	1.15	1.12	0.41	0.72	0.01	0.09
	相対値(%)	96	87	95	121	80	85	100	56
2倍量	施肥位置	1.89	1.89	1.34	1.14	0.26*	0.37*	0.01	0.01
	他区平均	1.93	2.15	1.29	1.32	0.42	0.82	0.02	0.02
	相対値(%)	98	88	104	86	62	45	50	50
3倍量	施肥位置	1.77	2.37	1.40	1.23	0.26**	0.28**	0.02*	0.01**
	他区平均	2.00	2.11	1.32	1.45	0.46	0.85	0.06	0.09
	相対値(%)	89	112	106	85	57	33	33	11

注) a) 施肥位置は施肥位置からの距離が0 cmの値, 他区平均は施肥位置からの距離が3, 6, 9, 12, 15cmの値の平均値を示す. 相対値は他区平均値に対する施肥位置播種区の相対値を示す.

b) *, **は同じ水管理の施肥位置播種区と他区平均間にt検定による5%, 1%水準で有意差があることを示す.

第41図 播種後3日目の種子の α -アミラーゼ活性および糖含量と出芽率との関係

注) ○: 標準量・落水, ●: 標準量・湛水, △: 2倍量・落水, ▲: 2倍量・湛水, □: 3倍量・落水, ■: 3倍量・湛水. *は5%水準, **は1%水準で有意な相関関係があることを示す.



第42図 施肥位置・施肥量と土壌のアンモニア態および硝酸態窒素濃度との関係

注) ○：標準量・落水，●：標準量・湛水，△：2倍量・落水，▲：2倍量・湛水，□：3倍量・落水，■：3倍量・湛水。縦棒は標準誤差 (n = 3)。

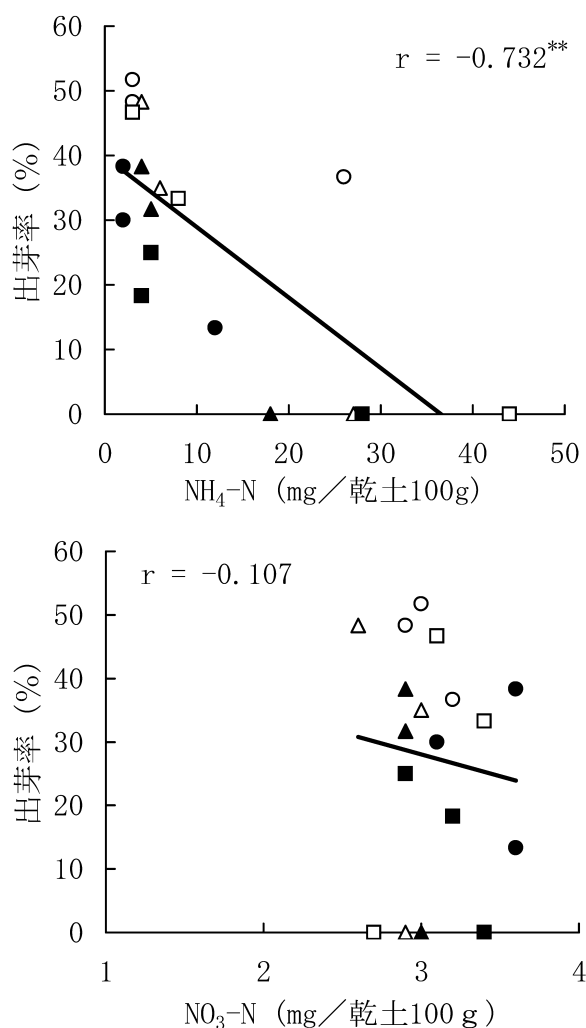
4. 考察

1) 出芽速度が出芽・苗立ちに及ぼす影響

本実験では平均出芽日数が短い（出芽速度が速い）条件下では、最終的な出芽率（苗立ち率）が高まる傾向が示された（第38図）。早期に出芽した個体は、第1葉および第2葉抽出が早く、イネでは実質的に第2葉抽出後に光合成が開始されること³⁷⁾を考慮すると、早期に従属栄養状態から独立栄養状態へ移行して初期生育を促進することに結びつく。逆に、出芽が遅れた個体は出芽後に枯死することが多く⁵⁾、より出芽率を低めて苗立ち率を悪くすると考えられる。そのような観点から、栽培面では分施肥系において基肥量を控えること、全量基肥系において速効性の窒素の割合を減らすこと、そして播種後落水を適用することといった技術の組み合わせによって第2葉抽出までを早める技術体系とするほか、品種面からも出芽速度の速い品種を選定することなどが必要である。

2) 種子の代謝産物が出芽・苗立ちに及ぼす影響

本実験では α -アミラーゼ活性と最終的な出芽率との間には相関関係が認められなかった（第41図）。これに関しては鞘葉伸長期の胚乳内の α -アミラーゼ活性と低温での鞘葉伸長の遅速や苗立ち率の間には相関が認められないという報告もある⁴⁶⁾。一方、本実験では播種後3日目の出芽率と種子のグルコース含量、フルクトース含量との間に正の相関関係が認められ、スクロース含量との間には相関関係が認められなかった（第41図）。イネ種子ではスクロースを地上部や地下部に送っており⁴³⁾、胚盤で再合成されたスクロースは、嫌気条件でスクロースシンターゼによってグルコースとフルクトースに分解される過程が存在していると報告されている¹⁴⁾。また、福田らは、嫌気条件では胚部分のスクロースシンターゼの活性が高まった結果、スクロース分解によるグルコースとフルクトースの含量が増加したとしている³⁾。このような種子内の糖含量の変動と出芽



第43図 土壌のアンモニア態および硝酸態窒素濃度と播種後3日目の出芽率との関係

注) ○: 標準量・落水, ●: 標準量・湛水,
△: 2倍量・落水, ▲: 2倍量・湛水,
□: 3倍量・落水, ■: 3倍量・湛水.
*は1%水準で有意な相関関係が有ることを示す。

の因果関係については、本実験では、測定対象を種子全体(胚乳+胚盤+胚軸等)としたため、十分な説明ができず、今後詳細な調査が必要である。

3) アンモニア態窒素が出芽・苗立ちに及ぼす影響

本実験では土壌中のアンモニア態窒素濃度が高まるにつれて出芽率は低下し(第43図)、種子のグルコース含量が同時に低下する傾向を示した(第44図)。この結果は土壌中のアンモニア態窒素が鞘葉の伸長を抑制することによって出芽を阻害することおよび種子のグルコース含量に影響を及ぼすことを示唆している。一方、同程度のアンモニア態窒素濃度に対し、播種後の水管理によって出芽率および種子のグルコース含量は異なり、落水区は湛水区に比

べて高かった。このことは種子近傍への施肥によるアンモニア態窒素の生育阻害を落水管理が軽減したことを示唆している。

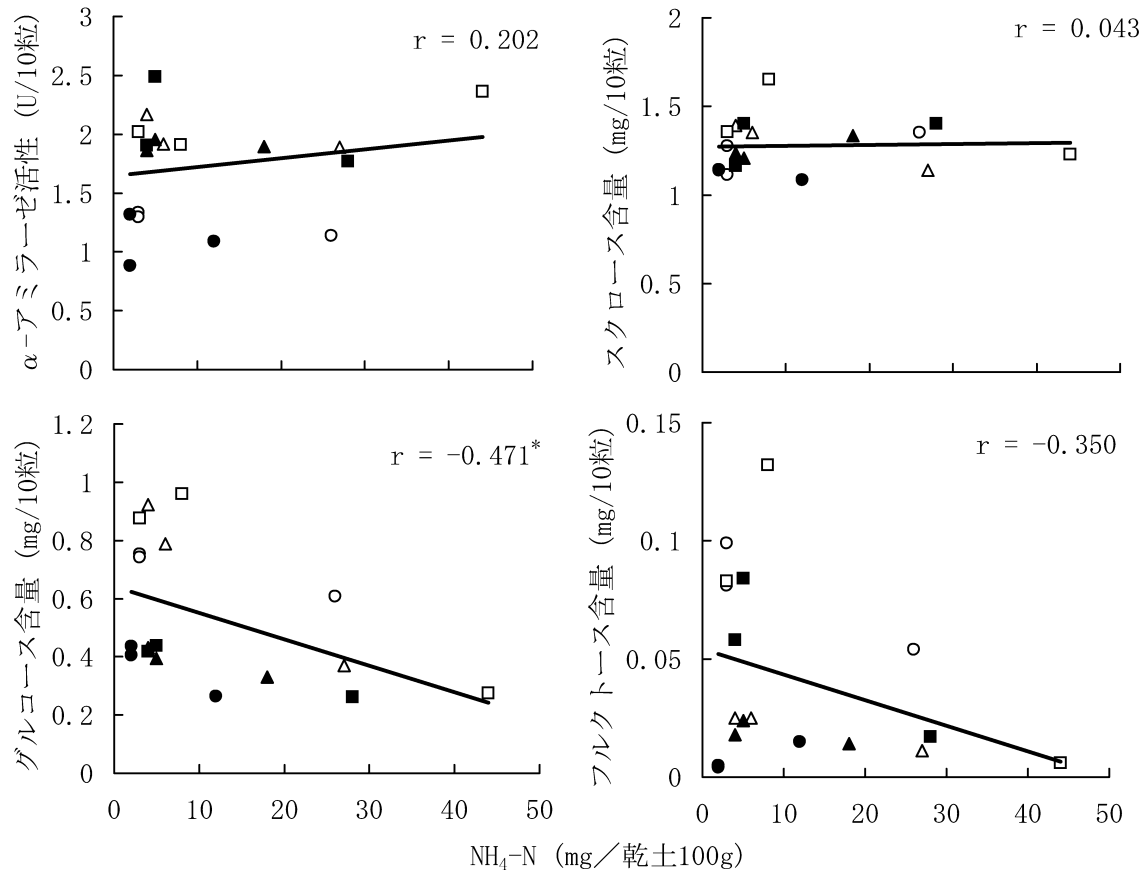
アンモニア態窒素が水稻の出芽・苗立ちを阻害する濃度については、全層施肥した土壌から真空採血管を用いて土壌溶液を採取した場合、0.7ppm以上¹⁸⁾、2ppm以上²³⁾との報告がある。本実験は局所施肥した土壌を採取した後、KCl抽出した溶液を分析したため、それらの報告との直接の濃度の比較を行えないが、本実験の湛水区では4~12mg/乾土100g、落水区では26~44mg/乾土100gの間で出芽率の低下が認められた。しかし、湛水土中に播種された種子の生長に対しアンモニア態窒素がどのような影響を及ぼすか十分に明らかにされていないため、今後、より正確なアンモニア態窒素濃度と出芽および種子の部位別の代謝産物の測定を行い、それらの因果関係を整理する必要がある。

5. 摘要

打込み式代かき同時土中点播機での播種を想定し、出芽速度および種子の代謝産物が湛水土中直播した水稻の出芽・苗立ちに及ぼす影響をポット条件で調査した。過酸化カルシウム剤被覆種子を湛水土壌中に播種した後に落水した場合、出芽の遅速により出芽率、地上部形質が異なった。早期に出芽した場合には播種後14日目の出芽率は高まり、出芽が遅れた場合には播種後14日目の出芽率は低下した。また、播種後14日目の出芽率と同日の草丈、葉齢、茎葉部乾物重との間には高い正の相関関係が認められた。さらに、播種後3日目の出芽率と種子の α -アミラーゼ活性、スクロース含量との間には相関関係は認められなかったが、グルコース含量ならびにフルクトース含量との間には正の相関関係が認められた。さらに基肥由来のアンモニア態窒素濃度が高まるにつれて出芽率は低下し、種子のグルコース含量が同時に低下する傾向を示した。以上の結果、湛水土中播種・落水栽培法では、出芽を早めることおよび基肥由来のアンモニア態窒素の溶出を抑制することによって出芽・苗立ちが向上することが示唆された。

VIII. 総合考察

日本は1993年のガット・ウルグアイ・ラウンド農業合意を受け、1995年からミニマムアクセスを導入



第44図 土壌のアンモニア態窒素濃度と種子の代謝産物との関係

注) ○：標準量・落水，●：標準量・湛水，△：2倍量・落水，▲：2倍量・湛水，□：3倍量・落水，■：3倍量・湛水．*は5%水準で有意な相関関係が有ることを示す．

し、1999年からミニマムアクセスを越える輸入米に高率の関税をかけてコメの市場開放に踏み出そうとしているが、今後、コメ輸出国からの関税引き下げ要求が強まることが予想される。これに対応して日本では稲作の大規模化ならびに低コスト化、省力化の要請がより強まり、直播栽培技術の開発・普及が緊急な課題となっている。湛水土中直播栽培は、従来の散播・条播様式の栽培技術においても移植栽培に比べて省力であったが、耐倒伏性が劣り減収しやすいという問題があった。このために新しく開発された打込み式代かき同時土中点播機を用いた栽培法は従来の直播栽培水稻に比べて耐倒伏性に優れ、現在、国内で評価を高めている。しかし、緒論でも述べたように、本栽培法では播種直後から7～10日間程度の自然落水管理によって出芽・苗立ちの確保を図っているが、播種後落水の有効性について十分な検証と科学的な解析が行われていない。

本研究ではⅡ⁷⁾で、まず、これまで十分に解明されていなかった播種後の落水について土壌三相構

造に着目して出芽・苗立ちに及ぼす影響を調査し、落水した場合は、気相が生じることによって通気性が向上し、湛水状態に比べて出芽後、鞘葉、第1葉（不完全葉）は早く伸長を停止し、同時に第2葉の抽出は早まり、茎葉部と根の乾物重が高く推移することなどを明らかにした。また、Ⅲ⁸⁾では、代かきを入念に行った場合、土壌の通気性は低下し、苗立ち率は低く、茎葉部および根の乾物重も小さくなることを明らかにした。Ⅳ⁹⁾では、播種直後から落水を行った場合、気相が生じて通気性は向上し、播種から出芽、第1葉抽出および苗立ちまでの日数が短く、茎葉部および根の乾物重は著しく増加することを明らかにした。さらにⅤ¹⁰⁾では、ⅡからⅣまでのポットを用いた精密な実験の結果を検証するため、圃場条件下における代かきおよび播種後の落水程度が打込み式代かき同時土中点播機を利用した湛水直播水稻の出芽と苗立ちに及ぼす影響について調査した。すなわち、代かきロータリを用いた代かきを2行程行った場合、1行程に比べて播種後に落

水しても土壌含水率は高く、酸素拡散速度が低くなり、その結果として出芽した個体の生育も悪く、苗立ち数は少なくなった。また、この傾向は排水不良箇所で見られた。

一般に代かきした水田土壌では、地下へ浸透する水の割合が小さく、播種後の落水は主に排水溝への地上排水で行う必要があり、排水溝への集水の良否は田面の凹凸によって決まるとされている⁵⁶⁾。また、圃場内での局所的な滞水がその部分での苗立ち数の減少を招き、これには圃場の均平性が大きく関与していることも報告されている³¹⁾。本研究のV¹⁰⁾の実験においても、圃場の凹凸があった箇所では、代かき程度が同じであっても滞水し、出芽個体数および苗立ち個体数は減少する傾向が認められた。一方、圃場の大区画化は、機械作業の効率を高め、一層の省力化、低コスト化を可能とする²⁴⁾が、地表および地下方向への排水性は圃場内で大きく異なると報告されている^{57, 72)}。地表の排水性を高めるためには、田面に傾斜をつける、または均平精度を向上させる、地表に排水溝を設けることなどが有効である^{34, 70)}。また、圃場の均平精度を高めることは湛水深や排水時の土壌水分を均一に保つことを可能とし⁷¹⁾、今後の直播栽培の普及拡大には必要であると考えられる。

ついで本研究のVI¹¹⁾では、種子と化成肥料の同時打込みは、出芽率を低下させ、地上部・地下部の初期生育を遅延させたが、それは、土壌表層中のアンモニア態窒素濃度の上昇によるものと考えられた。しかし、播種後の落水管理をすることにより出芽率が向上し、加えて地上部・地下部の初期生育が促進され、同時施肥による弊害を緩和できることを明らかにした。また、VII¹²⁾では、湛水土中直播において早期に出芽する場合は、出芽率が高く、地上部の生育も旺盛であること、ならびに基肥由来の表層土壌中のアンモニア態窒素濃度の上昇に伴って鞘葉の伸長が阻害された結果、出芽率が低下することを明らかにした。施肥に打込み式代かき同時点播機を利用した場合、種子近傍に施肥するため、出芽・苗立ちが低下しやすいことを指摘したが、渡部らも同様の報告をしている⁶⁸⁾。しかし、本研究の実験で用いた肥料は吉永らの報告⁷⁸⁾で用いた肥料と緩効度が異なり、速効成分の割合が少ないことが出芽への影響を小さくした可能性が考えられる。また、過酸化カルシウム被覆は施肥由来のアンモニア態窒素によ

る出芽・苗立ちの阻害効果を緩和するとの報告もある⁷³⁾。

湛水直播栽培を暖地で行った場合、平均的な播種量である3 kg/10a程度の種子使用時には約2倍量の6 kgの過酸化カルシウム剤が必要になるが、現在、10a当たりの被覆資材には2千円程度のコストがかかり、この点も湛水直播栽培の普及拡大を図るうえで大きな妨げとなっている。今後、湛水直播栽培の低コスト化ならびに省力化を図るためには、過酸化カルシウム剤の被覆量の減量あるいは全く用いない播種技術を検討する必要がある。また、その場合、播種後は落水管理とすること、アンモニア態窒素の生育阻害を回避するために「緩効性」の窒素肥料を基肥として施用することならびに出芽速度の速い品種を利用することなどの技術を組み合わせることによって、出芽・苗立ちの安定化を図る必要性が考えられる。

本研究によって、代かき土壌中に播種された水稻種子の出芽・苗立ちの実態が明らかとなり、その改善技術についても知見を得ることができた。これらの知見は、今後、打込み式代かき同時土中点播栽培において出芽・苗立ち向上を通じて栽培技術の確立にも貢献するものと考えられる。

IX. 総合摘要

わが国の稲作は田植機の導入による機械移植体系により労働生産性を飛躍的に向上させた。しかし、今後の稲作を展望すると、米価の引き下げに対応できるより一層の低コスト化・省力化・大規模化のための技術開発が求められている。水稻の直播栽培は、育苗管理、苗の運搬などの作業が省略できるため、大幅な省力化や経営規模の拡大が可能になる。そこで本研究では九州沖縄農業研究センターで開発した打込み式代かき同時土中点播機の利用による湛水土中直播の拡大を目的に、同機で湛水土中直播した水稻の出芽・苗立ちの実態と問題点を抽出し、その改善技術ならびに新たな技術確立に向けての検討を行った。以下にその摘要を述べる。

1. 過酸化カルシウム剤被覆種子を代かき土壌中に播種した後に落水を行うと、表層土壌では、土壌水分（液相）が減少すると同時に土壌収縮によって固相が増加し、気相が生じて通気性は向上した。また、出芽後、鞘葉、第1葉（不完全葉）は早く伸長

を停止し、同時に第2葉の抽出は早まり、茎葉部と根の乾物重が増加した。一方、湛水状態を続けると、表層土壌の構造、通気性が変化せず、鞘葉、第1葉ともに出芽後も伸長を続けるため、第2葉の抽出は遅れた。これらの結果から、過酸化カルシウム剤被覆種子を代かき土壌中に播種した後の落水管理は、土壌通気性を向上させ、出芽後の初期成長の促進ならびに出芽・苗立ちの安定化に役立つことが示唆された。

2. 過酸化カルシウム剤被覆種子を湛水土壌中に播種した後に落水すると、表層土壌における三相分布と土壌構造は播種前の代かき程度によって大きく変化した。標準代の3倍の時間をかけて代かきを行った3倍代は、標準代に比べて落水後の土壌の保水性は高く、通気性は低かった。また、3倍代は標準代に比べて落水後14日目の苗立ち率が低く、茎葉部および根の乾物重も小さかった。そして苗立ち率の低下、乾物重増加の抑制は播種深が深い場合および麦稈施用した場合に顕著であった。これらの結果から、実際の圃場において湛水土中播種後の落水によって安定した出芽・苗立ちを図るためには、特に播種深が深い場合や圃場で麦稈が施用された場合には、過度の代かきを避ける必要があることが示唆された。

3. 過酸化カルシウム剤被覆種子を湛水土壌中に播種した後に落水すると、落水の遅速により、土壌含水率や土壌構造が異なった。播種直後に落水が完了した場合には、播種後3日目頃から気相が出現して通気性は向上したが、播種後5日目に落水が完了した場合には、播種後9日目でも気相が出現しなかった。播種直後に落水した場合は、播種から出芽、第1葉抽出および苗立ちまでの日数が短く、茎葉部および根の乾物重が著しく増加した。これらの結果から、湛水土中播種・落水栽培法では、播種直後の落水が出芽・苗立ちの向上に有効であることが示唆された。

4. 圃場で代かきロータリを用いた代かきを2行程行った場合（2倍代）は、1行程の場合（標準代）に比べて播種、落水後の土壌含水率は高く、酸素拡散速度が低く推移した。また、田面の凹凸で生じる落水の良否は、土壌含水率および酸素拡散速度を変化させ、落水が良好な箇所は、落水が不良な箇所と比べて土壌含水率は低く、酸素拡散速度も高く推移

した。2倍代は標準代の落水良好箇所と比べて水稻の苗立ち数は少なく、標準代の落水不良箇所は、それよりさらに苗立ち数が少なく、出芽した個体の生育も悪かった。これらの結果から、打込み式代かき同時土中点播機による湛水播種・落水栽培法では、過度に代かきを行わないことと圃場の均平に留意して水の停滞箇所を作らないことが、安定した出芽・苗立ちに必要であると考えられた。

5. 打込み方式により、播種同時施肥を行うと、出芽率ならびに地上部・地下部の初期生育が遅れる傾向を示した。また、土壌中のアンモニア態窒素濃度は打込みにより高く推移した。この場合、播種後の落水管理をすることにより出芽率が向上し、加えて地上部・地下部の初期生育が促進され、同時施肥による初期生育の遅れが解消された。これらの結果から、打込み式代かき同時土中点播機による播種同時施肥栽培では、播種後の落水管理によって出芽・苗立ちが安定化することが示唆された。

6. 過酸化カルシウム剤被覆種子を湛水土壌中に播種した後に落水した場合、出芽の遅速により出芽率、地上部形質が異なった。早期に出芽した場合には最終的な出芽率は高まり、出芽が遅れた場合には最終的な出芽率は低下した。また、最終的な出芽率と草丈、葉齢、茎葉部乾物重との間には高い正の相関関係が認められた。さらに基肥由来のアンモニア態窒素濃度が高まるにつれて出芽率は低下する傾向を示した。これらの結果から、湛水土中播種・落水栽培法では、出芽を早めることおよび基肥由来のアンモニア態窒素の溶出を抑制することによって出芽・苗立ちが向上することが示唆された。

7. 以上、本研究では、打込み式代かき同時土中点播栽培において出芽・苗立ちを向上させる要因について検討を行った。これらの成果は打込み式代かき同時土中点播機を利用した湛水直播水稻栽培の出芽と苗立ちの向上に大きく寄与するものと考えている。

引用文献

- 1) 秋田重誠・尹炳星・梶木信幸 1998. 低温・湛水条件下でのイネの出芽速度と胚重の関係. 日作紀 67: 318-322.
- 2) 尹炳星・山口淳二・秋田重誠 1996. 出芽性とデンプン分解酵素活性の関連性にみられる水稻品種

- 間差. 日作紀 65 (別2): 55-56.
- 3) 福田あかり・長田健二・萩原均・吉永悟志 2004. 湛水条件における水稻種子胚中の糖代謝と鞘葉伸長速度との関係. 日作紀 73 (別1): 178-179.
- 4) 古畑昌巳・楠田幸・北川壽 1997. 湛水直播における酸素発生剤被覆種子の出芽・苗立ちに及ぼす環境要因の影響. 日作紀 66 (別1): 40-41.
- 5) 古畑昌巳・楠田幸 1998. 湛水直播における酸素発生剤被覆種子の出芽特性と出芽率の関係. 九州農業研究 60: 14.
- 6) 古畑昌巳・楠田幸・福嶋陽 2001. 湛水直播における播種後の落水が出芽・苗立ちに及ぼす影響. 第4報 圃場条件下における代かき程度の違いが出芽・苗立ちに及ぼす影響. 日作紀 (別1): 8-9.
- 7) 古畑昌巳・楠田幸・福嶋陽 2005a. 落水処理による土壤三相構造の変化が湛水直播水稻の出芽と苗立ちに及ぼす影響. 日作紀 74: 1-8.
- 8) 古畑昌巳・楠田幸・福嶋陽 2005b. 代かき程度が湛水直播した水稻の落水条件下における出芽と苗立ちに及ぼす影響. 日作紀 74: 9-16.
- 9) 古畑昌巳・楠田幸・福嶋陽 2005c. 水稻の湛水直播・落水栽培における落水時期が出芽・苗立ちに及ぼす影響. 日作紀 74: 134-140.
- 10) 古畑昌巳・楠田幸・福嶋陽 2005d. 圃場における播種前の代かきおよび播種後の落水程度が打込み点播機を利用した湛水直播水稻の出芽と苗立ちに及ぼす影響. 日作紀 74: 212-217.
- 11) 古畑昌巳・岩城雄飛・野間貴文・有馬進 2006a. 打込み同時施肥と播種後落水が湛水土中点播水稻の出芽・苗立ちと初期生育に及ぼす影響. 日作紀 75: 7-12.
- 12) 古畑昌巳・岩城雄飛・野間貴文・有馬進 2006b. 湛水土中直播水稻の出芽・苗立ちと出芽速度および種子の代謝産物との関係. 日作紀 75: 182-190.
- 13) 嶺石進・福田兼四郎 1988. 湛水土中直播栽培の苗立安定化. 東北農業研究 41: 43-44.
- 14) GUGLIELMINETTI, L. and P. PERATA and A. ALPI 1995. Effect of anoxia on carbohydrate metabolism in rice seedlings. Plant Physiol. 108: 735-741.
- 15) 羽生友治 1998. 新版土壤肥料用語辞典 肥料・用土編 肥料の種類. 農文協, 東京. 198-208.
- 16) 萩原素之・井村光夫・三石昭三 1990. 酸素発生剤を被覆した水稻種籾の近傍で起こる局所的土壤還元と発芽・出芽との関係. 日作紀 59: 56-62.
- 17) HAGIWARA, M. and M. IMURA 1993. Seedling emergence and establishment of direct-sown paddy rice in soils incorporated with substances produced in reductive paddy soil. Jpn. J. Crop Sci. 62: 609-613.
- 18) HARA, Y. and K. TORIYAMA. 1998. Ammonium nitrogen in soil solution and seed nitrogen affect the percentage of establishment of rice plants in submerged soil. Soil Sci. Plant Nutr. 44: 415-422.
- 19) HARTGE, K. H. 1978. 土壤物理学概論. 福士定雄訳. 1985. 博友社, 東京. 95-98.
- 20) 平岡博幸・西山岩男・寺島一男・下田英雄・高梨純一・田中耕逸 1988. 湛水直播水稻における出芽・苗立の安定化に関する研究. 第1報 新資材利用による出芽・苗立の改善. 日作紀 57 (別1): 289-290.
- 21) 稲の発芽におよぼす影響. 三重県農試研報 4: 1-11.
- 22) 井澤敏彦・平岡博幸・西山岩男 1985. 湛水直播水稻の苗立ちにおよぼす土壤還元の影響. 第1報 小麦わらおよび炭水化物添加土壌における酸化還元電位と湛水直播水稻の苗立ちとの関係. 日作紀 54 (別1): 24-25.
- 23) 菅野千秋・佐藤健司・酒井博幸 1999. 土壌中のアンモニア態窒素濃度が直播水稻の出芽に及ぼす影響. 日作東北支部報 42: 5-7.
- 24) 川崎健 1989. 水田区画と機械化作業. 農土誌 57: 29-34.
- 25) 喜田大三・川口桂三郎 1960. たん水・還元・脱水条件の土壌構造への影響. 第1報 一構造の安定性一. 土肥誌 31: 375-379.
- 26) KIMURA, K. and S. YAMASAKI 2001. Root length and diameter measurement using NIH Image. Application of the line-intercept principle for diameter estimation. Plant and Soil 234: 37-46.
- 27) 久保寺秀夫・山田一郎 1997. 極表層土壌の物理性が直播水稻種子の発芽に及ぼす影響. 土肥誌講演要旨集 43: 3.
- 28) 楠田幸・古畑昌巳・三原実 1998. 点播水稻における稲体窒素含有率が初生産と収量性に及ぼす影響. 日作紀 67 (別2): 72-73.
- 29) 小山豊・深山政治 1987. 湛水土中直播栽培における酸素供給資材「新OK 3号」の効果. 第1報 各種条件における出芽・苗立に及ぼす影響. 日作紀 56 (別1): 28-29.
- 30) 小山豊・深山政治 1990. 水稻の早期栽培地帯における湛水土中直播栽培法に関する研究 3. 水管理による出芽・苗立ち及び初期生育の制御. 千葉農試特報 17: 23-32.
- 31) 牧山正男・山路永司 1997. 直播稲作の現状と農業土木技術から見た湛水直播の問題解決の可能性. 農業および園芸 72: 1097-1102.
- 32) 丸山幸夫 2001. 直播水稻の栽培技術 一水管理

- 一.「農業技術体系作物編2 イネ.基礎技術編」
追録23号:技402の1の8.
- 33) 丸山幸夫 2002. 水稻栽培技術の現状と展望. 食糧月報 7:38-46.
- 34) 丸山利輔 1975. 水田の水収支 ―とくに, 水田内における地表残留水量について―. 土壌の物理性 32:11-15.
- 35) 増岡彩子・高橋久光・太田保夫 1998. 培地の硬度の差異がイネの初期生育に及ぼす影響. 日作紀 67(別1):6-7.
- 36) 三石昭三・中村喜彰 1977. 水稻の湛水土壤中直播栽培に関する研究. 第1報 過酸化石灰の粉衣方法と粉衣量. 日作紀 46(別1):35-36.
- 37) 三宅博・前田英三 1973. イネ葉身における維管束鞘内葉緑体の発達について. 日作紀 42(別2):107-108.
- 38) 森田弘彦 1995. 水稻直播栽培における雑草防除の現状と問題点. 植物防疫 49:9-15.
- 39) 森田弘彦・吉永悟志・古畑昌巳・山下浩 2005. 代かき同時土中点播直播における播種同時打込み施肥技術. 九州沖縄農研研究資料 91:43-49.
- 40) 中井信 1997. 土壌環境分析法 第II章 土壌物理 2. 粒径組成 (ピペット法). 博友社, 東京. 24-29.
- 41) 中嶋泰則・関稔・高橋成徳 1996. 酸素発生剤と粘土の混合種子被覆による湛水直播水稻の出芽促進. 日作紀 65:430-436.
- 42) 中村喜彰 1976. 湛水直播用コーティング種子の基礎的研究. 農機誌 38:75-78.
- 43) NOMURA, T., Y. KATO and T. AKAZAWA 1969. Enzymic mechanism of starch breakdown in germinating rice seeds. II. Scutellum as the site of sucrose synthesis. Plant Physiol. 44:765-769.
- 44) 小川正巳・太田保夫 1973. 水稻の直播栽培におけるカルパーとタチガレンの混用処理効果. 農及園 48:1297-1300.
- 45) 荻原均・寺島一男 1996. 出芽時におけるイネ種子の α -アミラーゼ活性および糖類蓄積の品種間差異. 日作紀 65(別2):249-250.
- 46) 荻原均・寺島一男・趙志超・福田あかり・吉永悟志 2003. イネの低温苗立ち性と成熟種子胚中のショ糖含量との関係. 東北農業研究成果情報. 17:33-34.
- 47) 大場茂明 1997. 落水出芽法の由来. 農業技術 52:33-34.
- 48) 太田保夫・中山正義 1970. 湛水条件における水稻種子の発芽におよぼす過酸化石灰粉衣処理の影響. 日作紀 39:535-536.
- 49) 大塚一雄・田村真美・鈴木計司 1988. 稲麦二毛作北限地帯における小麦跡湛直栽培に関する研究. 第2報 麦跡湛直の出芽苗立確保. 日作紀 57(別1):283-284.
- 50) 大山信雄・坂井弘 1970. 水管理による水田耕土の酸化還元状態の変化. 第2報 落水に伴う耕土の収縮と気相の生成との関係. 土肥誌 42:349-354.
- 51) 斎藤万之助・川口桂三郎 1971. 水田土壌の凝集性. 第1報 稲作期間中における水田作土の物理性の経時的変化. 土肥誌 42:1-6.
- 52) 佐藤勉・畠山武・中谷治夫 1974. 水稻の埋没直播栽培に関する研究. 第1報 CaO 2 粉衣種子の出芽におよぼす気温と埋没深度の影響. 日作紀 43(別2):165-166.
- 53) SATO, T. and S. MARUYAMA 2002. Seedling emergence and establishment under drained conditions in rice direct-sown into puddled and leveled soil - Effect of calcium peroxide seed coating and sowing depth -. Plant Prod. Sci. 5:71-76.
- 54) 下坪訓次・富樫辰志 1996a. 水稻の代かき同時土中直播栽培に関する研究. 1 点播直播について (予報). 日作紀 65(別1):12-13.
- 55) 下坪訓次・富樫辰志 1996b. 水稻の代かき同時土中直播栽培の確立に関する研究. 2 点播水稻と条播水稻の押倒し抵抗の比較. 日作紀 65(別1):14-15.
- 56) 田淵俊夫 1969. 土壌物理 第6章 水田土層と水移動 第4節 粘土質の水田土層の排水. 養賢堂, 東京. 261-267.
- 57) 多田敦 1989. 大区画水田と水田構造 ―排水を中心として―. 農土誌 57:185-190.
- 58) 高橋久光・増岡彩子・太田保夫 1998. 湛水土壤中直播栽培における落水処理がイネの初期生育および収量に及ぼす影響. 日作紀 67(別1):252-253.
- 59) 高橋成人 1962. 稲種子の発芽に関する生理遺伝学的研究. 東北大学農学研究所彙報 14:1-87.
- 60) 竹牟禮稯・吉永悟志・脇本賢三・吉田典夫 2000. シラス土壌における水稻湛水直播栽培の落水出芽法が土壌条件および出芽・苗立ちに及ぼす影響. 日作紀 69(別2):30-31.
- 61) 田中樹 1997. 土壌環境分析法 第II章 土壌物理 5. 団粒分析 (湿式篩別法). 博友社, 東京. 40-43.
- 62) 田中英彦・山崎信弘・天野高久 1986. 直播水稻の苗立率に及ぼす播種深度と過酸化石灰被覆量の影響. 日作紀 55(別2):29-30.
- 63) 手塚隆久・伊藤延男・上原泰樹 1986. 湛水土中

- 直播栽培における芽干しの効果. 九州農業研究 48:33.
- 64) 土屋学・丸山幸夫 2002. 出芽苗立期の落水管理による湛水直播水稻の生長促進. 一落水期間の影響一. 日作紀 71 (別1):154-155.
- 65) TSUCHIYA, M. and S. MARUYAMA 2004. Growth enhancement by during seedling establishment in rice direct-sown into puddled leveled soil. Plant Prod. Sci. 7:324-328.
- 66) 富樫辰志・下坪訓次・吉永悟志 2001. 水稻代かき同時打込み点播機の作業性能および栽培特性. 農作業研究 36:195-203.
- 67) 趙志超・高橋清 1999. 栽培イネ (*Oryza sativa* L.) の出芽・苗立ちに關与する2, 3の要因. 日作紀 68:379-384.
- 68) 渡部富男・和田潔志・小山豊・西川康之・恵畑康利 1990. 水稻の早期栽培地帯における湛水土中直播栽培法に關する研究. (2) 出芽・苗立ちの安定化. 千葉農試特報 17:3-21.
- 69) 山田登 1951. 過酸化石灰による酸素の供給 (予報). 日作紀 21 (別1):65-66.
- 70) 山路永司・富田正彦・竹中肇・岩淵吉博 1981. 3次元囲い込みモデルによる地表水残留状況の検討一大区画汎用圃場に關する研究 (I) 一. 農土論集 94:16-22.
- 71) 山路永司 1987. レーザー光測量の大区画圃場整備への応用. 農業および園芸 62:943-948.
- 72) 山路永司 1989. 大区画水田の均平. 農土誌 57:191-196.
- 73) YAMAMOTO, A. and A. HATANAKA and O. ITO 2004. Inhibition of seeding establishment by nitrogen application in direct sowing culture of paddy rice in cold region. Soil Sci. Plant Nutr. 50:103-107.
- 74) 山末祐二 2001. 雑草科学実験法 第1章 雑草の生物・生態に關する試験 第2節 雑草の形態・生理・生態に關する調査 第4項 種子の休眠・発芽調査法. ニッセイエブロ, 東京. 54-55.
- 75) 山内稔 1997. 湛水土壌中における直播水稻の苗立ち. 土肥誌 68:467-476.
- 76) 吉永悟志・下坪訓次・富樫辰志1997a. 水稻の代かき同時土中直播栽培の確立に關する研究. 3 点播水稻の生育特性. 日作紀 66 (別1):14-15.
- 77) 吉永悟志・富樫辰志・脇本賢三・下坪訓次 1997b. 水稻の代かき同時土中直播栽培の確立に關する研究. 4 播種後の水管理が出芽・苗立ちに及ぼす影響. 日作紀 66 (別2):3-4.
- 78) 吉永悟志・西田瑞彦・富樫辰志・下坪訓次 1997c. 代かき同時土中点播栽培における播種同時打込み施肥が水稻の生育に及ぼす影響. 日作九支法 63:3-6.
- 79) 吉永悟志・脇本賢三・富樫辰志・田坂幸平 2000a. 土中出芽性向上のための酸素供給剤被覆水稻種子の乾燥および貯蔵条件. 日作紀 69:146-152.
- 80) 吉永悟志・西田瑞彦・脇本賢三・田坂幸平 2000b. 湛水直播栽培における播種後の落水管理が施肥窒素の動態および水稻の生育・収量に及ぼす影響. 日作紀 69:481-486.
- 81) 吉永悟志・脇本賢三・田坂幸平・松島憲一・富樫辰志・下坪訓次 2001. 打込み式代かき同時土中点播栽培による湛水直播水稻の耐倒伏性向上一播種様式および苗立ち密度が耐倒伏性に及ぼす影響一. 日作紀 70:186-193.
- 82) 吉永悟志・竹牟礼穰・脇本賢三・田坂幸平・松島憲一・下坪訓次 2002. 暖地の湛水直播栽培における土中点播水稻の生育特性一後期重点施肥による生育特性の変化と収量性の向上一. 日作紀 71:328-334.

Influences of Fertilizer Application and Drainage of Flooded Water after Seeding on Seedling Emergence and Establishment of Rice Plants in Submerged Hill Seeding Cultivation

Masami FURUHATA

Summary

In Japan, rice production by mechanical transplanting has increased rapidly since the introduction of the rice transplanter in the 1970s. However, further labor-saving rice cultivation technology should be developed to reduce rice prices. Direct-seeding rice cultivation would resolve these problems by eliminating such management practices as raising the seedlings and carrying the seedling boxes, which are necessary in transplanting rice cultivation. Thus, the National Agricultural Research Center for the Kyushu Okinawa Region developed a shooting hill-seeded direct seeder. In this research, we investigated the emergence and establishment of rice seedlings seeded by this machine and examined how to improve the technology to expand the machine's direct seeding cultivation area.

1. Draining flooded water after sowing rice seeds coated with calcium peroxide into puddled soil caused the paddy surface soil to contract and the solid phase to increase with the decrease in soil water (liquid phase). A change in soil structure resulted, and the air permeability of soil increased due to the increased air phase. In the drained pots, coleoptiles and the first leaves (incomplete leaves) of rice seedlings stopped elongating soon after seedling emergence, and the emergence and growth of the second leaves immediately followed. Dry weights of the shoots and roots in drained pots were greater than those in flooded pots. Under flooded conditions, the soil structure and air permeability of the surface soil did not change, and the coleoptiles and the first leaves of seedlings continued to elongate after seedling emergence, resulting in delayed growth of the second leaves. These results suggested that increased air permeability in the surface soil after draining improved the early growth of rice seedlings. Drainage of flooded water, therefore, helped stabilize the emergence and establishment of seedlings in submerged direct seeding of rice.

2. Draining flooded water after seeding rice seeds coated with calcium peroxide into puddled soil changed the three-phase ratio of soil and soil structure in the surface soil proportionally with the degree of puddling before seeding. In addition, the water-holding capacity (air permeability) of soil in over-puddled pots was higher (lower) than in normally puddled pots. Seedling establishment rates of rice seedlings at 14 days after seeding in over-puddled pots were lower than those in normally puddled pots, especially when they were seeded deep and wheat straw was applied. Furthermore, dry weights of shoots and roots of seedlings were affected by the degree of puddling. These results suggested that normal puddling (not over-puddling) improved both seedling emergence and establishment after flooded water was drained following seeding of rice, especially when they were seeded deeply and wheat straw was applied.

3. Water content and soil structure varied somewhat with the speed of draining flooded water after sowing rice seeds coated with calcium peroxide into puddled soil. Draining immediately after seeding produced an air phase in the soil, due to increased air permeability. In contrast, no air phase was found in the soil drained five days after seeding. Furthermore, in the pots drained immediately after seeding, the number of days to the second leaf emergence decreased, and the dry weights of shoots and roots of the seedlings increased, compared with the pots drained on the fifth day after seeding. These results suggested that drainage immediately after seeding improved the rates of emergence and establishment of submerged direct-seeded rice seedlings.

4. Water content (oxygen diffusion rate) of puddled soil was higher (lower) in the plots puddled twice with a paddy harrow than in the plots puddled only once. Water content and the oxygen diffusion rate of puddled soil varied somewhat with the degree of drainage after sowing, even within the same plot, due to irregular leveling there. The water content (oxygen diffusion rate) of soil was lower (higher) in the well-drained part than in the poorly drained part. The number of established rice seedlings per square meter in the twice-puddled plot was lower than that in the once-puddled plot. The number of established rice seedlings per square meter was the lowest in

the poorly drained part of the once-puddled plot, and seedling growth there was the worst. These results suggested that, in rice seeding with a shooting hill-seeder followed by drainage, less puddling (avoiding over-puddling) and proper draining with uniform leveling are necessary for both stable seedling emergence and establishment.

5. In the pots (containers) of fertilizer shot, early growth of the aerial part and the subterranean part was delayed more than early growth in pots (containers) of fertilizer incorporated into the plowed layer. The soil with fertilizer shot had a higher ammonium nitrogen content than the soil with fertilizer incorporated into the plowed layer. Seedling emergence and establishment improved in the pots of fertilizer shot that had been drained of flooded water following seeding of rice, and the early growth of the aerial part and the subterranean part was promoted, compared with that in flooded pots. These results suggested that the delay of the early growth in fertilizer shot with seed was reduced by drainage.

6. When flooded water was drained after sowing rice seeds coated with calcium peroxide into puddled soil, the seedling emergence rate and early growth of the aerial part varied with the speed of seedling emergence. The final emergence rate increased (decreased) by emergence at an early stage (a late stage). The plant length, the leaf age, and the dry weight of vegetative parts at 14 days after seeding were highly and positively correlated with the final emergence rate. The seedling emergence rate was negatively correlated with the concentration of ammonium nitrogen from the basal dressing. These results suggested that seedling emergence at an early stage and elution control of ammonium nitrogen from the basal dressing improved the rates of emergence and establishment of submerged direct-seeded rice seedlings.

7. These results will surely improve emergence and establishment of rice seedlings in the new direct-seeding method using a shooting hill-seeder.

Key words: Ammonium nitrogen, Direct seeding in flooded paddy field, Drainage of flooded water, Fertilizer application, Puddling, Rice, Seedling emergence, Seedling establishment.