

播種後の水管理による湛水直播水稻の  
出芽・苗立ちと収量の安定化に関する研究

2019年1月

佐藤 徹

播種後の水管理による湛水直播水稻の  
出芽・苗立ちと収量の安定化に関する研究

筑波大学大学院  
生命環境科学研究科  
博士（農学）学位論文

佐藤 徹

## 目次

第1章 緒論	1
第2章 過酸化カルシウムコーティング直播水稻の出芽・苗立ちに及ぼす水管理の影響	10
第1節 播種深および水管理が出芽・苗立ちに及ぼす影響	11
2-1-1 材料と方法	11
2-1-2 結果	12
2-1-3 考察	14
2-1-4 まとめ	15
第2節 過酸化カルシウムコーティングと水管理が初期生育に及ぼす影響	16
2-2-1 材料と方法	16
2-2-2 結果	17
2-2-3 考察	18
2-2-4 まとめ	19
第3節 乾物生産と炭水化物およびタンパク質含量に及ぼす水管理の影響	20
2-3-1 材料と方法	20
2-3-2 結果	22
2-3-3 考察	23
2-3-4 まとめ	24
第3章 鉄コーティング湛水直播水稻の出芽・苗立ちに及ぼす水管理の影響	46
第1節 鉄コーティングと水管理が出芽・苗立ちに及ぼす影響	47
3-1-1 材料と方法	47
3-1-2 結果	48
3-1-3 考察	48
3-1-4 まとめ	49
第2節 鉄コーティング量, 播種深および水管理が出芽・苗立ちに及ぼす影響	50
3-2-1 材料と方法	50
3-2-2 結果	51
3-2-3 考察	52
3-2-4 まとめ	53

第3節	播種後の種子水分に及ぼす水管理の影響	54
3-3-1	材料と方法	54
3-3-2	結果	54
3-3-3	考察	55
3-3-4	まとめ	55
第4節	コーティング資材および水管理が初期生育に及ぼす影響	56
3-4-1	材料と方法	56
3-4-2	結果	56
3-4-3	考察	57
3-4-4	まとめ	58
第4章	湛水直播水稻の生育および収量に及ぼす播種後の水管理の影響	71
第1節	過酸化カルシウムコーティング直播水稻の播種深と水管理が生育 および収量に及ぼす影響	72
4-1-1	材料と方法	72
4-1-2	結果	72
4-1-3	考察	73
4-1-4	まとめ	73
第2節	鉄コーティング直播水稻の播種様式と水管理が生育および収量に 及ぼす影響	74
4-2-1	材料と方法	74
4-2-2	結果	75
4-2-3	考察	76
4-2-4	まとめ	78
第5章	総合考察	92
	摘要	99
	謝辞	101
	引用文献	102

## 第1章

### 緒論

#### 1-1 日本における稲作の現状

米は日本における主要な農産物であり、白米のごはんとして食べるだけでなく、酒や餅や米菓など広く日本の食文化をつかさどっている。2016年産の米の産出額は1兆6549億円であり、農業生産額の約18%を米が占めている（農林水産省2017）。一方、欧米化してきている食生活の中で米の消費量は年々減少傾向にあり、米の一人当たり年間消費量は54kgで1962年度のピーク時の118kgから半分以下に減少している（農林水産省2018a, 図1-1）。米の生産量も減少しており、2016年の生産量は804万トンで1968年の1445万トンに比べ56%にまで減少した（農林水産省2018a）。米離れは米価の下落も招いており、2016年産の米の販売価格は60kg当たり約1万4千円で、20年で約6千円低下した（農林水産省2018a, 図1-1）。世界的にみると日本の水稲生産コストに比べアメリカは約3割、中国は約1割であり、可能な限り生産コストおよび労働力を削減する必要がある（農林水産省2008a）。このように米の需要が低迷している中、農業従事者も減少しており、2015年の販売農家の農業就業人口は209万7千人で2010年に比べ50万9千人（19.5%）減少し、農業就業人口の平均年齢は66.4歳で65歳以上が63.5%となり、高齢化が進んでいる（農林水産省2016a）。2015年の農業経営体数は137万7千経営体で、2010年に比べ18%減少している一方、農業経営体当たりの耕地面積は5ha以上が57.9%で2005年に比べ14.6%増加し（農林水産省2016a）、農地の集積は進んでおり、経営体ごとの規模は拡大傾向にある。現在、多く行われている機械移植栽培は、育苗箱に水稲種子を播種し、育苗ハウス内で苗を作り、機械によって植える栽培体系であり、トラクタ、田植え機、コンバインなどの中型機械化体系を構成している。機械移植は昔の手植えに比較して明らかに田植え作業労力を低減させた。しかし、中型機械化体系の10a当たり労働時間は近年は同水準に推移しており、省力化の限界に達している。特に育苗は約4リットルの土を詰めた育苗箱を播種後、育苗ハウスに並べ、田植え前に運びだし、田植え時には田植え機への苗の補給作業など、人力に頼る作業が多い。育苗および移植作業は水稲栽培における全労働時間の4分の1を占め（農林水産省2008b）、育苗作業はスケールメリットが期待できないため、規模拡大に向けた阻害要因となっている。直播栽培のメリットは春の移植作業の省力化、育苗ハウスや苗箱の省略による低コスト化、作業者の労働負荷軽減などである（梅本2005）ため、直播栽培は規模拡大や複合営農を推進する上で最も有効な技術であり（丸山1997）、育苗作業の省略等による省力化に資する直播栽培の導入を一層促進する必要がある（農林水産省2008a）。

#### 1-2 日本における水稲直播栽培

水稲直播栽培は大きく分類して湛水直播と乾田直播に分類される（農業研究センター

1997). 湛水直播は播種前に湛水を伴い、乾田直播は播種前に湛水を伴わない播種様式である。また、湛水直播は播種様式により条播、点播、散播に分類される。湛水直播のメリットは①雑草防除が乾田直播に比べ容易、②代かきするので漏水の問題もない、③作業が天候に左右されにくい、などであり、デメリットは①酸素発生剤粉衣が基本的に必要、②代かきが必要、③大型機械の適用が困難、などである。一方、乾田直播のメリットは①代かきや酸素発生剤が不要、②大型機械が利用可能で作業速度も速い、③倒伏に強い、などであり、デメリットは①播種時の降雨により作業困難になりやすい、②雑草が繁茂しやすい、③土壌が過乾燥・過湿になった場合、出芽・苗立ちが低下しやすい、などである（北陸農政局 2018）。

直播栽培が始まったのは 1905 年に「黒田式蛸足直播機」が北海道で開発された以降で、1932 年に北海道で約 16 万 ha まで普及したが、その後、早植えが可能となり、直播面積は急速に減少した。第二次世界大戦後、労働力不足と食糧増産から直播栽培技術が再び注目された。暖地を中心に乾田直播栽培が普及し、直播栽培面積は 1974 年に 5 万 5 千 ha に達したが、湛水直播栽培は不安定な苗立ちや雑草繁茂、倒伏といった制限要因があり、さらに、直播栽培の収量は移植栽培よりやや劣る傾向があり、田植え機の普及に伴い次第に減少し、1964 年の普及面積は約 5 千 ha で、その後、数千 ha まで減少した（丸山 2006）。乾田直播では 1989 年に愛知県で不耕起 V 溝直播機が開発され、愛知県以外にも広まってきているが、2016 年の乾田直播栽培面積は全国で 9362ha であり（農林水産省 2018b, 図 1-2）、直播栽培全体では乾田直播栽培が 29%で、湛水直播栽培が 71%である。しかし、田植え機の開発により 1970 年頃から機械移植栽培が急速に普及拡大し（鷲尾 1989）、1990 年には機械移植面積が 98.4%を占めたが（澤村・松村 1992）、2016 年の水稲直播栽培面積は約 3 万 2 千 ha であり、直播栽培面積はやや増加傾向にあるものの、日本の全水田面積の約 2%程度にとどまっている（農林水産省 2018b, 図 1-2）。

### 1-3 湛水直播栽培の変遷

湛水に播種された種子は土中に埋没すると出芽が阻害されるため、発芽後に一時落水して幼芽および幼根の伸長を促進する芽干しが行われていた。しかし、芽干しの不完全による浮き・転び苗の発生や稈基部が土壌表面にあるため倒伏しやすいなどの欠点があった。これらの問題を解決するため湛水土壌中直播法が検討された（姫田 1995）。出芽・苗立ちの不安定さを解消するための技術開発として、山田（1951）は水稲直播栽培において過酸化カルシウムが湛水土壌中に播種された種子の出芽を促進することを発見し、太田・中山（1970）は過酸化カルシウムの種子コーティングは湛水土壌中において初期生育を促進することを報告した。これらの知見をもとに、三石・中村（1977）は過酸化カルシウムの種子コーティングを使った湛水土壌中直播栽培技術を開発した。しかしながら、この方法を用いても苗立ちが不安定であった。その理由は、過酸化カルシウムの効果が湛水条件下で種子近傍の土壌還元によって制限されるためであった（萩原ら 1990）。

播種時期が低温に遭遇する恐れがある日本では、播種後湛水で管理することは低温からイネを保護するために必要であると広く受け入れられていた（姫田ら 1999）ため、播種後の湛水管理が 1990 年代前半まで広く行われていた。気温が高く安定的な苗立ちが確保できる東南アジアの直播栽培において播種後の落水処理（図 1-3）が検討された（De Datta 1986）。この水管理方法は日本では無コーティング種子を用いた代かき直播に適応された（椛木・金 1991）が、大場（1997）は過酸化カルシウムの種子コーティングを用いた湛水直播栽培において落水管理が湛水管理よりも苗立ちに効果があることを報告した。

#### 1-4 水稲湛水直播栽培の普及に向けた課題

省力効果の優れた直播栽培は日本における稲作技術として極めて重要な役割を担っている（鷺尾 1999）。直播栽培の制限要因となっている雑草防除については日々、新たな除草剤が直播栽培に登録され（濱村 2014）、対応している。とくに葉齢が進んだヒエに対しては除草効果が高く、葉害の少ないシハロホップブチル剤の開発は直播栽培において大きな技術である。また、倒伏については食味や価格の面から倒伏に弱いコシヒカリを用いている場合が多いが、近年、短稈で耐倒伏性が高く、食味や多収性を備えた品種が開発されてきている（農林水産省 2008b）。

しかし、湛水直播栽培を取組むにあたって不安定な苗成ちは特に制限要因となっており（田中 2000）、直播栽培の普及定着に向けて、出芽・苗成ちに関与する要因の解明や安定多収管理技術の確立が必要である（鷺尾 1989）。

過酸化カルシウムコーティング種子の出芽・苗成ちの安定化の要因として出芽促進と鞘葉の伸長によること（三石 1975）が知られている。一方、落水管理による出芽の促進効果についていくつかの報告があり（吉永ら 1997b, 高橋ら 1998, 古畑ら 2005b）、落水管理は湛水直播栽培における苗の生長を促進し、苗成率を向上することが報告されている（田中 2000, 吉永ら 2000）。しかし、圃場条件下において落水管理による出芽・苗成ちの向上効果は完全には解明されていない。さらに、幼植物の生長は種子の貯蔵養分と光合成の両方に依存する（Whalley ら 1966）ことから、幼植物の生長解析のためには種子養分の転換効率と光合成による同化産物の供給を測定する必要がある。

一方、過酸化カルシウムコーティング直播栽培にはいくつかの欠点もある。過酸化カルシウムコーティング直播栽培は土壌表面下約 1 cm の深さに播種しなければならず、それよりも深い場合には出芽率の低下を招き（佐藤ら 1974）、逆に、表面に露出した場合には浮き・転び苗の発生や、白く目立つため鳥害を受けやすくなる（古畑ら 2009b）。さらに、催芽種子を用いて過酸化カルシウム粉粒剤をコーティングするため、コーティング後の貯蔵期間が短く、作業計画を立てにくいなどの欠点がある。山内（2004）は気温 15～20℃で消毒 1 日、その後 1～2 日浸種した活性化種子を鉄粉と焼石膏を用いてコーティングし、土壌表面に播種する鉄コーティング直播を開発した。鉄コーティング直播栽培は播種後湛水管理した場合にも、浮き苗が少ない。また、鳥害が少ない（山内 2003, 松村・古畑 2007, 古畑

ら 2009b) ことが報告されており、その要因として、鉄による皮膜が硬いことやコーティング種子の表面の色が土壌の色と近いことによるカモフラージュ効果の可能性 (古畑 2009a) が指摘されている。さらに、催芽前の籾をコーティングするため、コーティング後の貯蔵期間が長くとれ、春作業の分散が可能であることなどから、近年、徐々に増加してきている。新潟県における鉄コーティング直播の普及面積は 2007 年が 91 ha, 2008 年が 198 ha (水沢 2009), 2012 年は 377 ha と推定され (佐藤 2013), 2016 年は約 1200 ha で湛水直播面積の 49%となった (図 1-4)。また、全国では 2010 年に 36 県で 1137 ha の作付けとなり (宮越 2011), 2015 年には 1 万 5 千 ha を超えていると推定される (全農技術センター 2016)。鉄コーティング種子は過酸化カルシウムコーティング種子に比べ出芽・苗立ちが遅れる場合がある。その要因として、播種後の低温時や播種深が深い場合 (古畑ら 2009b) やコーティング量の違い (山内 2005) などの影響が報告されている。一方、鉄コーティング直播において、播種後の水管理条件が出芽・苗立ちに与える影響についてはほとんど報告がない (山本・貝淵 2009)。

#### 1-5 論文の構成

本研究では、第 2 章において、出芽・苗立ちに及ぼす播種後の水管理の影響を明らかにするために過酸化カルシウムのコーティングの有無および播種深を変え、圃場試験を実施した。また、落水による生長促進の生理機構が種子コーティングの効果と同様か明らかにするため、過酸化カルシウムのコーティングと播種後の水管理の生長促進に対する効果を比較する圃場試験を実施した。また、落水管理による生長促進効果を明らかにするため、茎葉および根の生長への種子貯蔵養分の転換効率を計算し、湛水管理および落水管理下で育った幼植物の乾物生産に対する種子貯蔵養分および光合成の貢献度を評価した。さらに出芽後の苗の生長を制御している生理的要因を解明するため、湛水および落水管理した幼植物の糖、デンプン、クロロフィルおよびタンパク質含量を分析した。

第 3 章では、近年、普及してきている鉄コーティング直播栽培の播種後の水管理が出芽・苗立ちに及ぼす影響を明らかにするため、出芽・苗立ちの変動要因の解析を行うとともに、鉄コーティング量や播種深を変え、過酸化カルシウムコーティング種子を比較として圃場試験を実施した。また、出芽時の籾水分が出芽率に及ぼす影響について試験を実施し、コーティング資材および播種後の水管理が初期生育に及ぼす影響について検討した。

第 4 章では、湛水直播水稻の生育、倒伏および収量・収量構成要素に及ぼす播種様式および播種後の水管理の影響を検討した。第 2 章の出芽・苗立ちを調査した圃場の生育および収量について解析するとともに、鉄コーティング直播種子の条播および点播と新潟県で最も多く行われている直播方式である過酸化カルシウムコーティング種子の条播と比較し、播種後の水管理を変えて生育、倒伏、収量・収量構成要素を調べた。

第 5 章では、第 2~4 章の研究成果に基づき無コーティング直播栽培、過酸化カルシウムコーティング直播栽培および鉄コーティング直播栽培における播種後の水管理が出芽・苗

立ち，生育，倒伏および収量等に及ぼす影響について考察し，それぞれのコーティング方法に適した最適な水管理法を提案する．さらに，湛水直播栽培の安定収量確保等，普及拡大を目指した播種後の水管理を含めた栽培管理の方向について展望する．

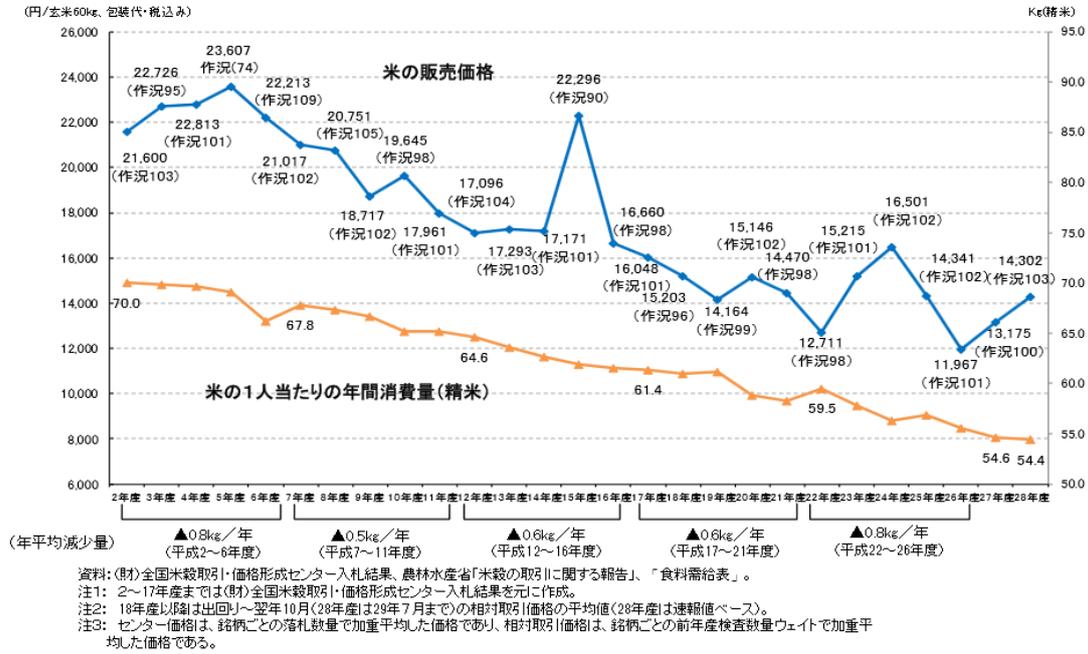


図 1-1 米の販売価格と一人当たりの年間消費量の推移。  
(農林水産省 2018a 米をめぐる関係資料)。

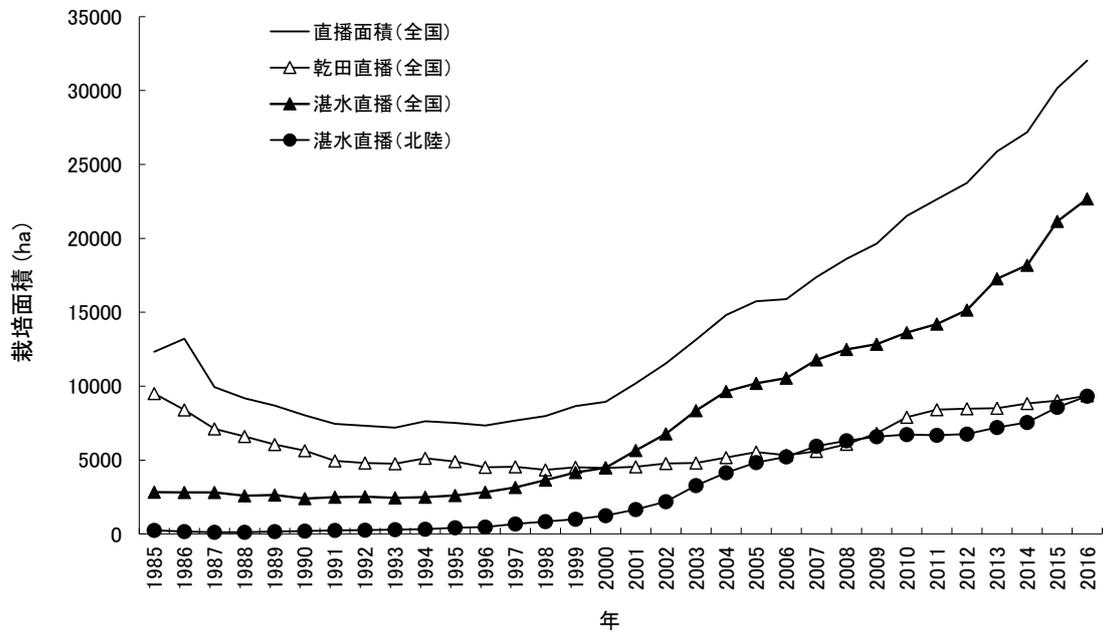


図 1-2 全国および北陸地域における水稲直播栽培面積の推移。  
 (農林水産省 2018b, 「水稲直播栽培の現状について」一部改変).

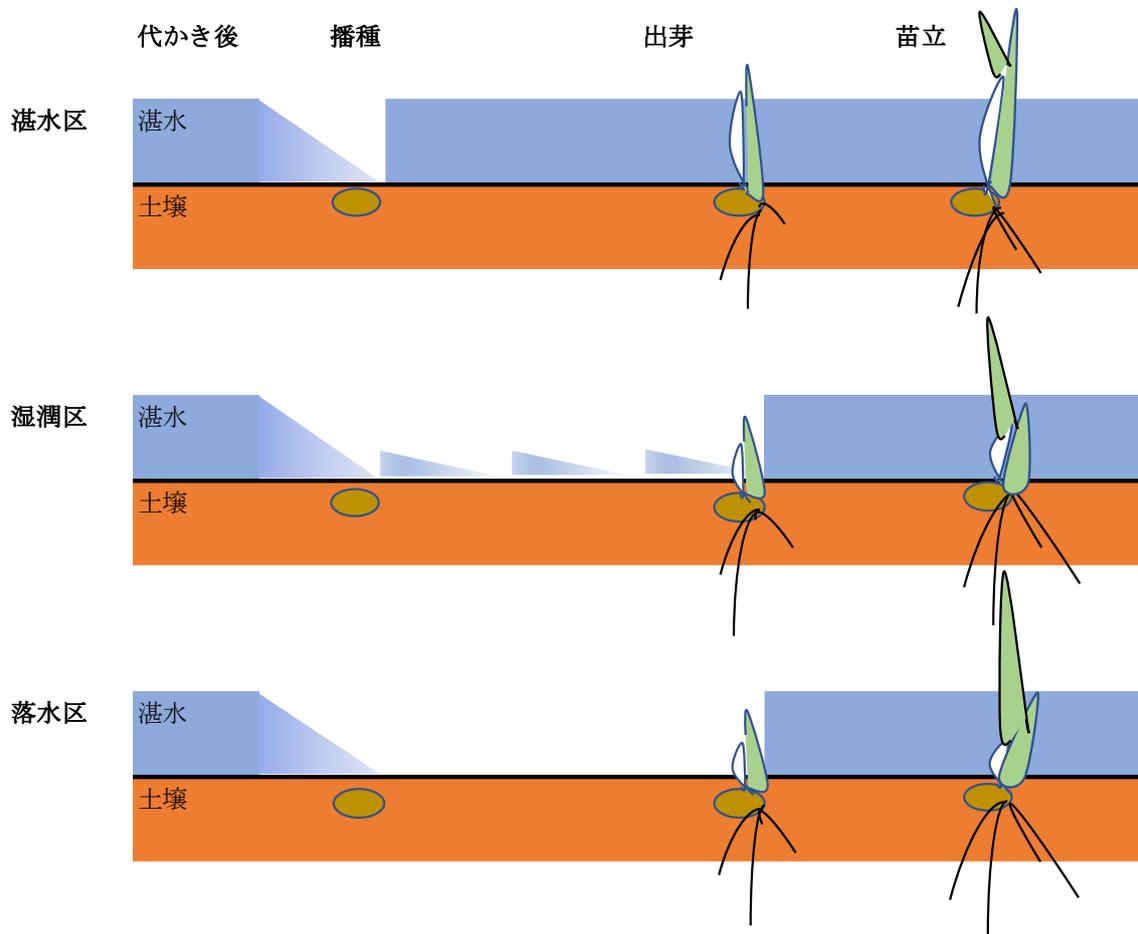


図 1-3 播種後の水管理の違い.

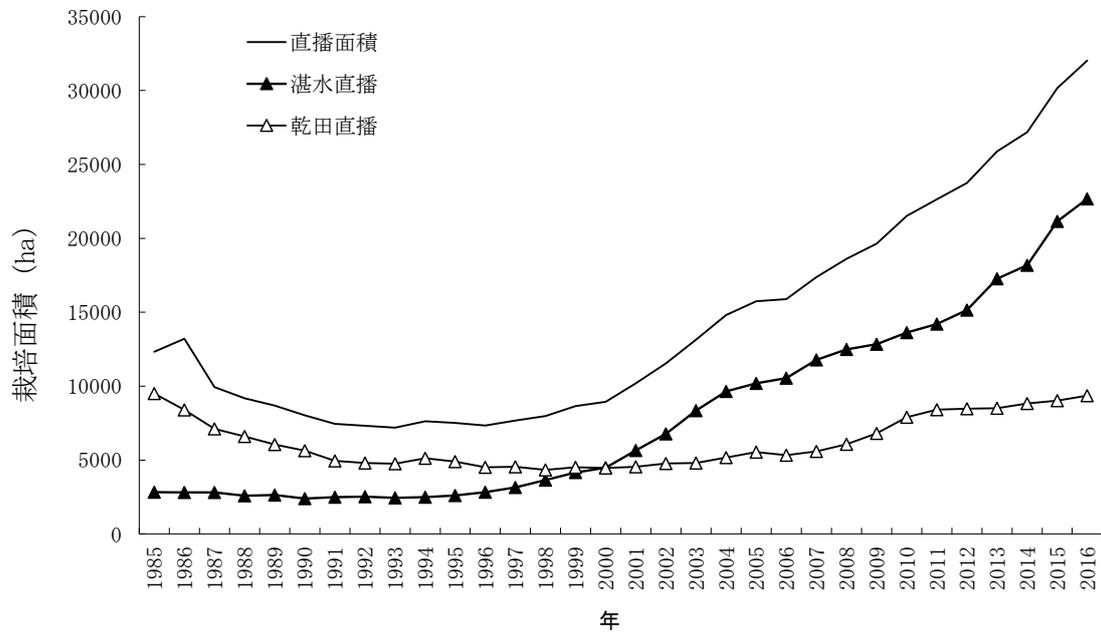


図 1-4 新潟県における水稲直播栽培面積および鉄コーティング直播栽培面積の推移  
(新潟県農林水産部調査, 2016).

## 第2章

### 過酸化カルシウムコーティング直播水稻の出芽・苗立ちに及ぼす水管理の影響

大場（1997）は過酸化カルシウムコーティング種子を用いた湛水直播栽培において、播種後の落水管理が湛水管理より苗立ち向上効果があることを報告した。その後の研究で落水管理は直播栽培における苗の生長を促進し、苗立ちを向上することが確認された（田中2000，吉永ら2000）。しかし，落水管理の出芽・苗立ちが湛水管理と同等との報告（古畑ら1998，高橋ら1998）もみられ，落水管理が常に出芽・苗立ちを促進するとは限らない（吉永ら2000）。このため，第2章では落水管理の出芽・苗立ちの促進効果の有無を確認するとともに，効果の得られる栽培・環境条件を明らかにする。また，落水管理と過酸化カルシウムコーティングとの出芽・苗立ち促進効果の相違を調べ，落水管理による生育促進の生理機構を解明しようとした。

## 第1節 播種深および水管理が出芽・苗立ちに及ぼす影響

播種後の落水管理が出芽・苗立ちに及ぼす影響を検討するため、過酸化カルシウムコーティングの有無、播種深および播種後の水管理を変えて出芽・苗立ちを調べた。

### 2-1-1 材料と方法

#### 2-1-1-1 栽培条件

試験は1999年および2000年に農林水産省農業研究センター（現農研機構中央農業研究センター、以下、農業研究センター）谷和原水田圃場（茨城県谷和原村（現つくばみらい市））で実施した。水稻品種コシヒカリの種子を水温20℃で4日間浸種し、一部は三石・中村（1977）の方法により過酸化カルシウム粉粒剤（カルパー粉粒剤16、保土ヶ谷化学）でコーティングした。すなわち、浸種した種子と乾籾の2倍量の過酸化カルシウム粉粒剤とを水を噴霧しながら、コーティングマシン（YCT15、ヤンマー農機）の中で種子が過酸化カルシウム粉粒剤でコーティングされるまで回転した。過酸化カルシウム粉粒剤コーティング種子（以下、CaO<sub>2</sub>種子）はコーティング後、5から6時間室温で乾燥した後、播種までビニル袋に入れて4℃で保存した。

播種後に異なった水管理（落水、湿潤、湛水）を行うため、3枚の苗代圃場を使用した（図2-1-1）。圃場面積は36m<sup>2</sup>で、それぞれ代かきを行い、播種の1日前に落水した。圃場は基肥として窒素、リン酸、カリをm<sup>2</sup>当たり3gずつ施用した。播種は1999年6月4日および2000年6月6日に行った。CaO<sub>2</sub>種子および無コーティング種子を条間30cm、株間6cm間隔で、土壌表面から0、10、20mmの深さに細い棒の先で押し込みながら播種した。実際の播種深は苗立調査終了後に苗の葉鞘基部の白色部分の長さを播種深ごとに10個体測定して求めた。

落水区は播種後も灌漑しなかった。湿潤区は水位を土壌表面に保持した。これらの区は1999年が播種後10日、2000年が播種後15日以降は水深5cmに湛水した。また、湛水区は播種直後から水深5cmに湛水した。

#### 2-1-1-2 出芽および苗立調査

1999年は播種から10日後まで2から3日おきに1区40粒について4～6反復で出芽数を調査した。播種後17日に最終出芽数を調査し浮き苗・転び苗および遅延苗（葉齢2.0未満）を出芽数から除き、残った個体を数えて苗立数とした。2000年は播種後21日に最終出芽数と苗立数を調査した。

#### 2-1-1-3 苗立個体の生長と乾物重

苗立個体の生育調査のため1999年に各水管理区から播種後24日、3個体を無作為に採取し、水で洗い、茎葉と根に分け、葉齢、草丈、分けつ数、最長根長、根数を調査した。幼

植物は茎葉と根に分離し、それぞれ 80°C で 48 時間乾燥し、乾物重を測定した。

### 2-1-1-3 気象条件および落水区の土壌水分

平均気温および降水量は農業研究センター谷和原水田圃場の気象観測値を使用した。土壌水分の測定は、落水管理の開始日と終了日に落水区の 3 箇所から土壌を採取し、採取した土壌の重さを直ちに測定し、105°C、24 時間乾燥した。乾燥土壌の重さを測定し、土壌水分を乾燥土壌に対する比率（含水比）として算出した。

## 2-1-2 結果

### 2-1-2-1 CaO<sub>2</sub> 種子および無コーティング種子の播種深

播種深は苗立個体の基部の白色部分の長さを測定することにより求めた。種子は地表下 0, 10, 20 mm に播種したが、1999 年の実際の播種深は CaO<sub>2</sub> 種子ではそれぞれ 0.0±0.0, 7.5±2.4, 16.0±4.1 mm（平均±標準偏差）で、無コーティング種子ではそれぞれ 0.0±0.0, 8.0±2.3, 15.7±3.8 mm であった。同様に 2000 年では CaO<sub>2</sub> 種子では 0.0±0.0, 10.0±1.7, 18.1±1.2 mm で、無コーティング種子では 0.0±0.0, 8.5±1.3, 16.5±2.8 mm であった。このため、1999 年の播種深は CaO<sub>2</sub> 種子、無コーティング種子ともに 0, 8, 16 mm, 2000 年の播種深は CaO<sub>2</sub> 種子が 0, 10, 18 mm, 無コーティング種子が 0, 9, 17 mm と表記する。

### 2-1-2-2 気象条件および落水区の土壌水分

1999 年は播種後 10 日間落水し、2000 年は播種後の 10 日間に大量の降雨（83.5 mm）があったため 15 日間落水した。処理期間の平均気温は 1999 年が 22.5°C、2000 年が 21.2°C であった。落水期間の降水量は 1999 年が 31.5 mm、2000 年が 87.5 mm であった。このような条件下で土壌含水比は 1999 年が 83.7±8.2（平均±標準偏差）から 61.8±5.4%、2000 年は 85.8±12.0 から 60.5±4.5% に低下した。

### 2-1-2-3 出芽

1999 年の出芽率の推移を図 2-1-2 に示した。8 mm に播種した種子は 3 日後に出芽し始め、出芽率は 5 日から 10 日に急激に増加し、その後はわずかに増加した。出芽は無コーティング種子に比べ CaO<sub>2</sub> 種子が早く、出芽速度も速かった。水管理の違いは播種後 7 日までは出芽にほとんど影響しなかった。落水区と湿潤区の出芽は播種後 7 日から 10 日に湛水区に比べ速く増加した。最終出芽率は落水、湿潤、湛水区の順で高かった。0 mm に播種した場合、無コーティング種子の落水区と湿潤区の出芽は播種 3 日後には 20% 程度みられ、3 日から 5 日後に急速に増加した。無コーティング種子、CaO<sub>2</sub> 種子の湛水区は 3 日後から出芽し始め、7 日後にかけて急速に増加した。一方、CaO<sub>2</sub> 種子の落水、湿潤区の出芽は 3 日後から出芽したが、5 日後までの増加は小さく、5 日から 7 日にかけて急速に増加した。16 mm に播種した場合、7 日後に出芽し始め、出芽率は 7 日から 10 日に増加した。出芽速度は無コーティ

ング種子に比べ  $\text{CaO}_2$  種子が速く、最終出芽率が高かった。水管理の違いは播種後 7 日までは出芽にほとんど影響しなかったが、播種後 7 日から 10 日にかけて顕著となり、 $\text{CaO}_2$  種子は落水、湿潤、湛水区の順で出芽が速く、最終出芽率も高かった。無コーティング種子は 10 日までは湿潤区、湛水区に比べ落水区の出芽が速かったが、湿潤区はその後も出芽がみられ、最終出芽率は落水、湿潤、湛水区の順で高かった。

1999 年および 2000 年の最終出芽率に及ぼす水管理の影響を 3 播種深間で比較した (図 2-1-3)。播種深による出芽率の変動は  $\text{CaO}_2$  種子と無コーティング種子の間で違いがみられ、無コーティング種子は播種深が浅くなるほど最終出芽率が増加した。 $\text{CaO}_2$  種子では 8~10 mm に播種したものが最終出芽率は 16~18 mm に播種したものより高く、0 mm に播種した最終出芽率は 8~10 mm に播種したものよりわずかに低かった。土壌表面に播種した場合には最終出芽率への過酸化カルシウムコーティングの影響はほとんどみられなかった。一方、土中に播種した場合の  $\text{CaO}_2$  種子の最終出芽率は無コーティング種子よりも高かった。水管理は播種深や過酸化カルシウムコーティングに関係なく最終出芽率に影響し、落水区は湛水区に比べ 1999 年が 12~24%、2000 年が 22~44% 高くなり、湿潤区は落水区と湛水区の間に位置した。

#### 2-1-2-4 苗立ち

1999 年に 出芽率、苗立ち率、浮き・転び苗率、遅延苗率に対する  $\text{CaO}_2$  コーティングの有無、播種深および水管理の影響を比較した (表 2-1-1, 図 2-1-4)。分散分析の結果、出芽率はコーティング、播種深および水管理に有意差がみられ、無コーティング種子に比べ  $\text{CaO}_2$  種子が高く、播種深 0 mm, 8 mm, 16 mm の順で高く、落水、湿潤、湛水区の順で高かった。浮き・転び苗率はコーティング、播種深および水管理に有意差がみられ、無コーティング種子に比べ  $\text{CaO}_2$  種子が高く、播種深 8 mm や 16 mm に比べ 0 mm が高く、落水や湿潤に比べ湛水区が高かった。遅延苗率は播種深および水管理に有意差がみられ、播種深 0 mm や 8 mm に比べ 16 mm が高く、湛水で高く、落水で低く、湿潤は中間の値を示した。苗立ち率はコーティング、播種深および水管理に有意差がみられ、 $\text{CaO}_2$  種子が無コーティング種子に比べ高く、播種深 0 mm や 8 mm が 16 mm に比べ高く、落水、湿潤、湛水の順に高かった。また、各要因に交互作用がみられ、 $\text{CaO}_2$  種子区は播種深 0 mm や 16 mm に比べ 8 mm の出芽率が高い傾向がみられ、 $\text{CaO}_2$  種子、無コーティング種子ともに 0 mm の湛水で浮き・転び苗率が高く、苗立ち率が大きく低下した。

#### 2-1-2-5 苗立個体の生長と乾物重

1999 年に播種後 24 日目の  $\text{CaO}_2$  区の葉齢、草丈、茎数、最長根長、根数、茎葉および根の乾物重に及ぼす播種深および水管理の影響を比較した (表 2-1-2)。分散分析の結果、播種深で葉齢、草丈、茎数、最長根長、根数および茎葉の乾物重に有意差がみられ、葉齢は 16 mm が小さく、草丈は 0 mm が短く、茎数は 8 mm が多く、最長根長は 8 mm, 0 mm, 16 mm の順

で長く、根数は 0 mm が少なく、茎葉乾物重は 8 mm, 16 mm, 0 mm の順で重かった。一方、水管理では分散分析の結果、葉齢、草丈、茎数、最長根長および乾物重（茎葉、根、全重）に有意差がみられ、湛水区の葉齢が小さく、草丈が短く、茎数が少なく、乾物重（茎葉、根、全重）が軽かった。また、最長根長は落水、湿潤、湛水の順で長かった。また、根数および根重に交互作用がみられ、0 mm の落水で大きく減少した。

### 2-1-3 考察

落水管理は湛水管理に比べ種子近傍の土壤温度および土壤還元を低下させる（吉永ら 1997b, 田中 2000）。落水管理における土壤温度の低下は一時的に初期生育を抑制させるが、土壤還元の低下は出芽率を向上させる（田中 2000）と考えられる。大場（1997）および田中（2000）は播種後の落水管理が過酸化カルシウムコーティング種子の土中直播において出芽率を向上させることを報告した。しかしながら、既報の報告がすべてこの現象を確認するものではなかった。吉永ら（2000）は圃場条件で落水管理が常に湛水管理に比べ最終出芽率を向上させるわけではないことを報告している。古畑ら（1998）はポット試験で落水と湛水の間の出芽率の差を認めていない。さらに、高橋ら（1998）は圃場試験の苗立率に落水と湛水の間には差がないことを報告している。本節では圃場試験の落水区が湛水区に比べ明らかに出芽率が高かった（図 2-1-3）。湛水管理で 80% 以上の出芽率が見られる場合（古畑ら 1998, 高橋ら 1998）、また、圃場試験で多量の降雨があった場合（吉永ら 2000）には落水の効果がほとんどみられないため、この違いは落水期間の気温や土壤還元および土壤水分の違いによると考えられた。

田中（2000）は落水管理が湛水管理に比べ浮き苗が少ないことを報告している。吉永ら（2000）も落水管理は湛水管理に比べ浮き苗や転び苗が少ないことを報告している。本節ではこれらの現象を播種深 0 mm と 8 mm で確認した（表 2-1-1）。また、本節において落水区の遅延苗が湛水区に比べ減少することを認めた。したがって、落水管理は湛水管理に比べ浮き苗や転び苗、遅延苗を減少させて出芽した個体の苗立ちを向上させると結論した。落水管理は苗立期間の出葉を促し（古畑 2005a）、乾物重を増加させる（吉永ら 1997b, 高橋ら 1998, 吉永ら 2000）効果があり、本節においても落水管理が幼植物の乾物重を増加させることを示した。そのため落水管理は湛水管理に比べ生育を促進し苗立ちを向上させると考えられた。

CaO<sub>2</sub> 種子は湿潤区および湛水区の表面播種においては出芽にほとんど影響しなかった（図 2-1-3）。このことは酸素供給の有無がこれらの条件ではほとんど制限要因とならないことを示唆している（Yamauchi and Chuong 1995）。一方、CaO<sub>2</sub> 種子は落水区の表面播種では、むしろ出芽を抑制した（表 2-1-1）。この抑制はおそらくカルシウム過剰（太田・中山 1970）によると考えられた。種子にコーティングされた過酸化カルシウムは落水区では長時間硬く結合しているため、落水条件で CaO<sub>2</sub> 種子の苗立ちを向上するためには土中に播種することが重要である。

土中に播種された場合、過酸化カルシウムのコーティングと落水管理は同様に最終の出芽率を向上させる効果が認められた (図 2-1-3). 過酸化カルシウムは初期の出芽を増加させ、一方、落水管理は初期の出芽にはほとんど影響しないが、後半の出芽を増加させた (図 2-1-2). このように落水管理の生長促進の生理機構は過酸化カルシウムでコーティングした場合の生長促進の生理機構とは異なると考えられる. Barbier ら (1991) は過酸化カルシウムの発芽への影響を湛水および湿潤土壌の播種深 10 mm で試験した. その結果、湿潤での無コーティング種子の発芽は湛水の  $\text{CaO}_2$  種子の発芽よりも速かった. Yamauchi and Chuong (1995) も  $\text{CaO}_2$  種子の苗立ちへの影響を 3 つの水分条件で試験を実施し、25 mm に播種された場合、水管理が  $\text{CaO}_2$  種子より大きく苗立ちに影響することを報告した. 本節の結果では種子が土中により深く播種された場合、出芽に対する落水の効果は過酸化カルシウムコーティングの効果よりも小さかったが、過酸化カルシウムコーティングの有無にかかわらず落水区の出芽率が高かった (図 2-1-3). 類似の現象はポット試験でみられており (田中 2000), より深く播種された場合には落水管理下でもより高い出芽率を得るために過酸化カルシウムコーティングが必要であることを示唆している.

#### 2-1-4 まとめ

播種後の落水管理は播種深や過酸化カルシウムコーティングにかかわらず出芽と苗立ちを向上させることが明らかとなった. 土中に播種された場合、過酸化カルシウムコーティングは初期の出芽を増加させ、一方、落水管理は初期の出芽にはほとんど影響しないが、後半の出芽を増加させた. このように落水管理の生長促進の生理機構は過酸化カルシウムでコーティングした場合の生長促進の生理機構とは違うと考えられた. さらに、落水管理は湛水管理と比較し、苗立期の生育および乾物重を増加させることが判明した.

## 第2節 過酸化カルシウムコーティングと水管理が初期生育に及ぼす影響

第1節において苗立期の落水管理は湛水管理に比べ出芽と苗立ちを向上させた。そこで、本節では落水管理による初期生育の促進効果を過酸化カルシウムコーティングと比較検討した。

### 2-2-1 材料と方法

#### 2-2-1-1 供試材料および環境条件

試験1および試験2は2000年に新潟県農業総合研究所作物研究センター（新潟県長岡市）の水田圃場で行った。播種は試験1が4月28日、試験2が5月12日に行った。試験3は2001年に農業研究センター谷和原水田圃場（茨城県谷和原村（現つくばみらい市））で行い、播種は6月6日に行った。水稻品種コシヒカリの種子を4~10日間浸種し、第1節で示したようにコーティングマシーンの中で水を噴霧しながら乾粒重量の2倍量の過酸化カルシウムをコーティングした種子（CaO<sub>2</sub>種子）と無コーティング種子を用いた。

試験1および試験2は20 m<sup>2</sup>、試験3は36 m<sup>2</sup>の2圃場を使用した。それぞれの圃場は代かき後播種前に1から2日落水した。基肥は試験1および試験2では窒素、リン酸およびカリをそれぞれ1.5 g m<sup>-2</sup>、試験3ではそれぞれ3 g m<sup>-2</sup>施用した。CaO<sub>2</sub>種子および無コーティング種子は条間30 cm、種子間6 cmで1列に播種した。種子は土壌表面から10 mmの深さに試験1と2はピンセットで、試験3は細い棒で押し込み播種した。実際の播種深は苗立期にそれぞれの圃場の5~6個体について葉鞘基部の白色部分の長さを測定して求めた。

水管理は播種直後から実施し、落水区では播種後灌漑せず、試験1では播種後13日に、試験2および3では播種後10日に水深5 cmに湛水した。湛水区は試験期間中水深を5 cmに保持した。

#### 2-2-1-2 出芽および苗立ち

出芽について試験1と試験2では播種後20日まで、試験3では播種後25日まで2~4日おきに出芽した個体を調査した。浮き苗、転び苗、2葉未満の遅延個体数を最終出芽数から除き、残りを苗立数とした。試験1と試験2では3反復、試験3では4から7反復それぞれ35から40個体を調査した。

#### 2-2-1-3 生育および茎葉乾物重

試験1では25日後に、試験2では27日後にそれぞれの処理から苗立ちした3個体を採取し、葉齢と草丈を測定した。試験3では播種から26日後まで約5日おきに3個体を採取した。採取した個体は根を切除した後、葉齢と草丈を記録し、茎葉を80°C48時間乾燥し、乾物重を測定した。

#### 2-2-1-4 気象条件および落水区の土壌水分

試験 1 および試験 2 の平均気温および降水量は新潟県農業総合研究所の気象観測施設の値を用い、試験 3 は農業研究センター谷和原水田圃場の気象観測施設の値を用いた。試験 1 と 2 では落水区と湛水区の地温を土壌表面下 10 mm で測定した。

土壌水分は落水区の処理開始時と終了時に 3 箇所から土壌表面下 1 から 3 cm の部分の土を採取し、直ちに土壌の重さを測定し、105°C で 24 時間乾燥後、土壌の乾燥重を測定し、土壌の乾物重に対する水分の比率を土壌含水比とした。

#### 2-2-2 結果

##### 2-2-2-1 気象条件および落水区の土壌含水比

表 2-2-1 に落水期間、平均気温、平均地温、処理期間の降水量を示した。落水期間は試験 1 では 13 日間、試験 2 と 3 では 10 日間であった。平均気温は試験 1 が低く、試験 2 がそれに次ぎ、試験 3 が最も高かった。降水量は試験 1 と 2 が少なく、試験 3 が多かった。土壌含水比は試験 3 が高温による蒸発により低下したため、降水量にはほとんど影響されなかった。試験 2 が他の試験よりも高いのは周りの圃場から水が浸入したことによる。

落水区の平均地温は試験 1 が 15.8°C、試験 2 が 18.6°C でそれぞれ湛水区よりも 0.5 および 0.3°C 低かった。

##### 2-2-2-2 出芽と苗立ち

実際の播種深を苗立期に苗の葉鞘基部の白色部分の長さを測定して求めた。湛水区の無コーティング種子の播種深は試験 1 が  $5.8 \pm 1.3$  mm (平均±標準偏差)、試験 2 が  $7.3 \pm 1.1$  mm、試験 3 が  $10.2 \pm 3.0$  mm であり、CaO<sub>2</sub> 種子は試験 1 が  $7.2 \pm 2.2$  mm、試験 2 が  $8.8 \pm 1.1$  mm、試験 3 が  $7.0 \pm 3.9$  mm であった。同様に落水区の無コーティング種子は、それぞれ  $7.6 \pm 1.7$  mm、 $8.8 \pm 2.3$  mm、 $7.7 \pm 2.9$  mm であり、CaO<sub>2</sub> 種子は  $6.4 \pm 2.2$  mm、 $9.6 \pm 1.7$  mm、 $9.0 \pm 2.3$  mm であった。

図 2-2-1 に出芽の推移を示した。各試験とも CaO<sub>2</sub> 種子が無コーティング種子に比べ出芽が速かった。水管理の出芽への影響は過酸化カルシウムコーティングの影響より小さかったが、各試験ともコーティングにかかわらず播種後 10 日の出芽率は湛水区に比べ落水区が高かった。

表 2-2-2 に最終出芽率および苗立率を示した。無コーティング種子の出芽率と苗立率は試験 3 に比べ試験 1 と試験 2 が低く、CaO<sub>2</sub> 種子では試験 2 と試験 3 に比べ試験 1 が低かった。落水管理は出芽への影響は比較的小さいが、周辺圃場からの漏水があり土壌水分が高かった試験 2 を除いて落水区の苗立率は湛水区に比べ有意に高かった。一方、CaO<sub>2</sub> 種子は無コーティング種子に比べ試験 1 と試験 2 の出芽と苗立ちが明らかに高く、試験 3 の苗立率においても湛水条件で CaO<sub>2</sub> 種子が有意に高く、落水区でも同様な傾向がみられた。

### 2-2-2-3 播種から苗立ちまでの生長

図 2-2-2 に草丈の推移を示す。試験 1 は播種後 18 日、試験 2 は播種後 15 日、試験 3 は播種後 10 日の CaO<sub>2</sub> 種子の草丈が無コーティング種子よりも大きかったが、それ以降は同様な速度で伸長した。一方、落水管理の草丈の伸長は湛水管理に比べ初期は遅かったが、湛水後、落水区の方が速く増加し、各試験とも 20 日後の草丈は湛水区に比べ落水区が長かった。表 2-2-3 は試験 3 における播種後 6~26 日の茎葉乾物重の推移を示す。落水管理による茎葉乾物重への影響は播種後 10 日まではほとんどみられなかったが、15 日以降は湛水区に比べ有意に増加した。また、CaO<sub>2</sub> 種子の茎葉乾物重は無コーティング種子に比べ有意に重かった。播種後 26 日の茎葉乾物重は落水管理した CaO<sub>2</sub> 種子が最も重かった。

### 2-2-3 考察

過酸化カルシウムコーティングは湛水において出芽とその後の生長を促進し（太田・中山 1970）、湛水直播の出芽を向上させる（Hagiwara and Imura 1993）。本節において CaO<sub>2</sub> 種子は湛水と落水ともに出芽を促進し、水管理にかかわらず過酸化カルシウムのコーティングは出芽を早めることを示した（図 2-2-1）。

過酸化カルシウムのコーティングとは対照に、落水管理は常に出芽を促進するとは限らない。吉永ら（1997b）は落水管理による出芽促進について報告したが、一方で落水と湛水管理との差を認めない報告（古畑ら 1998、高橋ら 1998）もある。本節の結果では出芽に及ぼす落水の効果は長岡の試験 1 および試験 2 では僅かであり（表 2-2-2）、おそらく試験 1 では気温が低いため、試験 2 では土壤水分が高いためと推定される。試験 1 で落水による土壤温度の低下は出芽率の低下をもたらした可能性がある。幼植物の生長は低温で抑制される（丸山・田嶋 1986）ため、落水の効果は過酸化カルシウムのコーティングに比べ劣ることを示唆する。

過酸化カルシウムのコーティングは湛水条件で茎葉および根の生長を促進する（太田・中山 1970）。そして湛水直播において出葉を促進する（Hagiwara and Imura 1993）。本節の結果、CaO<sub>2</sub> 種子は苗立数を増加させ（表 2-2-2）、茎葉乾物重を増加させた（表 2-2-3）。また CaO<sub>2</sub> 種子の出芽後の草丈の推移は無コーティング種子の生長と同様に増加した（図 2-2-2）。過酸化カルシウムのコーティングは湛水中で鞘葉の生長を促進するが、緑葉や種子根の生長は促進しない（三石 1975）。過酸化カルシウムコーティング種子から出芽した個体の形態は解剖学的解析から嫌気条件で出芽した形態と類似している（井村 1986）。このことは過酸化カルシウムのコーティングは鞘葉の伸長と出芽率を高めて苗立ちを増加させることを示唆している。

播種後の落水管理は出芽後の出葉を促進し（古畑ら 1998）、草丈や乾物重を増加させ、苗立ちを高める（Yamauchi and Chuong 1995）。本節において落水管理の生長促進および苗立率の向上効果を確認した。また、落水管理は出芽期までの茎葉の生長をむしろ抑制したが、落水区が湛水された後は明らかに増加させることを示した（図 2-2-2、表 2-2-3）。この

ように、播種後の落水管理は主に発芽後の生長を促進することにより苗立ちを向上させる。さらに第 1 節で述べたように落水管理は発芽期の根長や根数、根重を増加させた。したがって、落水管理による根の生長促進は発芽期後の茎葉の生長促進と関係している可能性がある。

第 1 節において過酸化カルシウムのコーティングと落水管理は発芽・苗立ちを向上させることを示したが、播種後の落水管理の効果は過酸化カルシウムコーティングの効果との違いを示している。過酸化カルシウムのコーティングは初期の発芽を促進し、一方、播種後の落水管理は後期の発芽を促進していた。圃場条件や気象条件の異なる本研究においても同様な結果であった。これらのことから、過酸化カルシウムのコーティングは発芽期まで生長を促進することを示し、一方、落水管理は発芽期以降の生長を促すことが明らかとなった。過酸化カルシウムのコーティングは湛水直播において種子近傍の土壤還元を軽減させる（萩原ら 1987）。また、播種後の落水管理は種子の近傍において土壤を高い酸化状態に保つ（田中 2000）。さらに、落水管理は土壤 3 相構造や土壤硬度のような土壤の性質に影響する（古畑ら 2005a）。これらの土壤の物理化学性の違いが過酸化カルシウムのコーティングと播種後の落水管理の生長促進の違いをもたらすと推察される。本節において播種後の落水管理は過酸化カルシウムのコーティングの効果を補完するものではなく、苗立ち向上には過酸化カルシウムのコーティングと落水管理ともに必要であることを示した。本節において最も苗立ち率が高かったのは  $\text{CaO}_2$  種子で落水管理した区であった（表 2-2-2）。

#### 2-2-4 まとめ

過酸化カルシウムのコーティングは発芽期の生育を促進し、発芽率を向上させた。一方、播種後の落水管理は発芽後の生育を促進することにより苗立ち率を向上させることを示した。したがって、落水管理による生長促進の生理機構は過酸化カルシウムのコーティングと違うことが明らかとなった。

### 第3節 乾物生産と炭水化物およびタンパク質含量に及ぼす水管理の影響

第2節において過酸化カルシウムのコーティングが出芽を促進し、播種後の落水管理は苗立ちを向上させることが示唆され、落水管理による生長促進の生理機構は過酸化カルシウムのコーティングと異なることが明らかとなった。発芽時に種子貯蔵養分の主な構成成分である炭水化物は新しい器官へ移動し、呼吸と生長に使われる。種子の乾物重減少と茎葉および根の乾物重の増加は光合成が行われていない時において種子の貯蔵養分が苗の生育に貢献する程度を示す。苗の生育は緑葉の展開に伴い次第に光合成に依存していく。そのため、茎葉のクロロフィル含量と可溶性タンパク質含量は光合成機能を反映する。そこで、播種後の水管理を変えたポット試験を実施し、部位別の乾物重、糖、デンプン、クロロフィルおよびタンパク質含量への影響を調査することにより、播種後の落水管理による苗立過程の乾物生産や生理的变化に及ぼす影響について検討し、播種後の落水管理による生長促進機構を解明しようと試みた。

#### 2-3-1 材料と方法

##### 2-3-1-1 供試材料および環境条件

試験は1999年10月に農業研究センター（茨城県つくば市）のハウス内で実施した。1998年に新潟農総研圃場で採種した水稻品種コシヒカリの種子を水温20℃で5日間浸種し、第1節と同様に過酸化カルシウムを乾物重の2倍量コーティングした。CaO<sub>2</sub>種子は室温で5日間乾燥後、プラスチックケースに入れ、播種まで4℃で5日間保管した。

基肥として窒素、リン酸、カリをそれぞれ0.5gずつ入れた埴壤土を3.8Lのプラスチックポット（直径16cm、深さ19cm）に詰め、代かき後播種前日に落水した土壤にCaO<sub>2</sub>種子を10月4日に1ポット当たり10粒播種した。種子は細い棒を使って土壤表面下10mmに播種した。この播種深は第2節の圃場試験およびわが国における一般的な湛水直播の方法（中村1981、萩原ら1990、吉永ら2000）を参考に選んだ。

水管理は播種直後に開始した。落水区は播種後水を入れず、播種後10日目に3cmに湛水した。湛水区は試験の期間中3cmに湛水し、ハウス内の気温は15℃から27℃であった。

##### 2-3-1-2 出芽

出芽を播種から播種10日後まで毎日調査した。落水区、湛水区それぞれ10粒の種子を播種した12ポットを使用した。

##### 2-3-1-3 苗の生長と乾物重

苗の生長および乾物重を2から6日おきに播種後25日まで測定した。それぞれの採取時期に2ポットから無作為に5個体を選び、葉齢、草丈、最長根長、総根長、根数を調査した。総根長には種子根および冠根を含んでいる。苗は水で洗い、茎葉と根と種子に分離し、

80°C4 日間乾燥した後に乾物重を測定した。茎葉+根の生長速度 (GR), 貯蔵養分に依存する生長速度 (GRg) および光合成に依存する生長速度 (GRp) は次式により計算した。

$$GR = [(S2 - S1) + (R2 - R1)] / (t2 - t1) \dots \dots (1)$$

$$GRg = E \times (G1 - G2) / (t2 - t1) \dots \dots (2)$$

$$GRp = GR - GRg \dots \dots (3)$$

ここで, S1 と S2 は t1 と t2 における茎葉の乾物重, 同様に R1 と R2 は根の乾物重, G1 と G2 は種子の乾物重を示す。E は貯蔵養分の転換効率で, 種子乾物重の減少に対する茎葉と根の乾物重の増加割合によって求められる (Tanaka and Yamaguchi 1968)。

#### 2-3-1-4 糖およびデンプン測定

それぞれのサンプリング時期に 2 ポットから幼植物を採取し, 茎葉と根を切り離した。すぐに生体重を測定し, 分析まで -85°C で保管した。糖とデンプンは Ding and Maruyama (2004) の方法で測定した。茎葉と根は 20 mM の HEPES-NaOH (pH7.4) に浸漬し, 90°C5 分処理した。試料を氷上で海砂を用いて磨砕し, そして 4°C, 18000 g で 10 分遠心分離した。上澄み液は可溶性糖の測定に用いた。上澄み液中のグルコース, フルクトース, シュクロースを酵素法 (Bergmeyer and Bernt 1974) によって測定した。

沈殿物は可溶性糖を取り除くため 80%エタノールで 3 回洗い, 蒸留水に懸濁した。懸濁液は 90°C で 2 時間加熱し, 糊化したデンプンにアミログルコシダーゼを加え, 55°C30 分処理して生じたグルコースを上述の酵素法 (Bergmeyer and Bernt 1974) で測定した。デンプン含量は茎葉または根の生体重あたりのグルコース量として算出した。

#### 2-3-1-5 クロロフィルとタンパク質の測定

幼植物のクロロフィルとタンパク質含量は Maruyama ら (1990) の方法で測定した。茎葉の組織を抽出緩衝液 (Tris-HCl (pH7.5) 50 mM, 1 mM EDTA, 8 mM 塩化マグネシウム, 2% (v v<sup>-1</sup>) メルカプトエタノール) の中で磨砕した。試料の一部は Arnon (1949) の方法によりアセトンで抽出しクロロフィル含量を測定した。

可溶性タンパクを測定するため試料を 4°C, 18000 g で 20 分遠心分離し, 上澄み液はトリクロ酢酸を加えて生じた沈殿物を 2% のドデシル硫酸ナトリウムを含む 0.1 M 水酸化ナトリウムで 40°C60 分再抽出した。試料のタンパク質含量を Lowry ら (1951) の方法によって測定した。

不溶性タンパク質の測定において, 遠心分離後の沈殿物から可溶性タンパク質を取り除くため 2 メルカプトエタノールを含まない抽出緩衝液で 3 回洗った。2% ドデシル硫酸ナトリウムを含む 0.1 M 水酸化ナトリウムで 40°C60 分処理し, 25°C20 分遠心分離した後の不溶性タンパクを抽出した。上澄み液を可溶性タンパク質と同じ方法でタンパク質を測定した。全タンパク質含量は可溶性タンパク質と不溶性タンパク質を合計して算出した。

#### 2-3-1-6 気温、日照、落水期間の土壌水分

温室内の気温は 5 分おきに温度記録計 (TR-71S, ティアンドデイ社, 日本) で測定し, 日平均気温を計算した. 湛水区と落水区の土壌表面下 10 mm の温度を同じ方法で測定し, 播種後 10 日間の平均温度を求めた. 日射量は温室から約 1000 m 離れた農業研究センターの気象観測装置から得た.

土壌含水比の測定のため, 播種から播種後 10 日まで 2, 3 日おきに落水区の 3 ポットの 1 から 3 cm の深さの土を採取した. 土の重さをすぐに測定し, 105°C 24 時間乾燥後, 土壌乾燥重を測定し, 土壌乾燥重に対する水分の比率を土壌含水比とした.

#### 2-3-2 結果

##### 2-3-2-1 気温、日射量、落水区の土壌含水比

図 2-3-1 は試験期間中の気温, 日射量, 土壌含水比を示す. 播種後 10 日間の温室内の平均気温は 23.6°C であり, 日平均日射量は 12.5 MJ m<sup>-2</sup> であった. 落水期間中, 土壌含水比は 71.8% から 52.3% に減少した. 落水区の落水期間中の地表面下 10 mm の平均温度は 21.6°C で湛水区の地温よりも 0.2°C 低かった.

播種後 11 日から 20 日までの平均気温は 18.5°C に低下した. その後 21 日から 25 日までの平均気温は 22.0°C まで上昇した. 日射量は試験期間中大きく変動した.

##### 2-3-2-2 出芽

図 2-3-2 は出芽に及ぼす落水管理の影響を示す. 出芽は播種後 5 日目に始まり, 5 日目から 8 日目にかけて著しく増加し, その後はわずかに増加した. 初期の段階では落水管理は出芽にほとんど影響しなかったが, 後半, わずかに出芽を促進した. t-検定による 5% 水準で有意な差は認められなかったが, 最終出芽率は落水区が 88%, 湛水区が 83% であった.

##### 2-3-2-3 幼植物の生長

表 2-3-1 は苗立期間の幼植物の生長に及ぼす落水管理の影響を示す. 落水管理は湛水管理と比較して出芽期 (播種後 5, 6 日) までは茎葉の生長をわずかに抑制した. しかし, 出芽期後の葉齢でみる葉の出現は促進され, 草丈も増加した. 一方, 落水管理は出芽期の根の生長を促進したが, 出芽後の最長根長, 総根長, 根数にはほとんど影響しなかった.

##### 2-3-2-4 部位別乾物重の変化

図 2-3-3 は苗立期間の茎葉, 根, 籾の乾物重に及ぼす落水管理の影響を示す. 落水区の籾乾物重は湛水区よりも速く減少した. 出芽後の茎葉, 根の乾物重は落水区の方が湛水区よりも速く増加した.

図 2-3-4 は播種後の籾乾物重減少と茎葉および根の乾物重の増加との関係を示す. この図の中で 2 本の回帰直線が得られた. 光合成が行われていない初期の段階では茎葉+根の生

長は胚乳養分によることを示し、胚乳の減少に対する茎葉+根の乾物重増加率は 0.586 と計算された。胚乳養分による茎葉+根の乾物重増加は湛水区と落水区で同様な傾向であり、苗の生長への胚乳養分の転換効率に水管理はほとんど影響していないことを示す。

#### 2-3-2-5 乾物生産

図 2-3-5 は乾物生産に及ぼす落水管理の影響を示す。落水区の茎葉+根の生長速度 (GR) は試験期間を通じて湛水区よりも高かった。出芽期までの胚乳養分による生長速度 (GRg) は落水区が湛水区よりも高かったが、その後、違いは認められなくなった。一方、出芽後の落水区の光合成による生長速度 (GRp) は湛水区よりも高かった。

#### 2-3-2-6 糖およびデンプン含量

図 2-3-6 は茎葉および根の糖およびデンプン含量に対する落水管理の影響を示す。図 2-3-6 B で播種後 5 日目の値が示されていないのは、根の出現がほとんどなく、測定できなかったためである。出芽時の落水区の茎葉および根の糖含量は湛水区に比べ低かった。茎葉および根のデンプン含量は糖含量よりも低く、湛水区と落水区の違いもほとんどなかった。

#### 2-3-2-7 クロロフィルおよびタンパク質含量

図 2-3-7 に茎葉のクロロフィル含量に及ぼす落水管理の影響を示す。出芽後において落水区のクロロフィル含量は湛水区よりも高かった。

図 2-3-8 に可溶性および全タンパク質含量に対する落水管理の影響を示す。落水区の茎葉の可溶性および全タンパク質含量は試験期間中を通して湛水区よりも多かった。根の可溶性および全タンパク質含量は茎葉に比べ少なく、水管理の違いによる差はわずかであった。

#### 2-3-3 考察

水稻の鞘葉の生長は水中より空気中で緩慢であるが、種子根の生長は水中よりも空気中の方が速い (Yamada 1954)。高橋ら (1998) は播種後の落水管理は茎葉の生長を抑制するが、苗立ち初期に根の生長を促進することを報告した。本節の結果はこれらの報告を支持するものである。すなわち、落水管理は出芽期の茎葉の生長を抑制するが、根の生長を促進した (表 2-3-1)。落水管理は出芽後の出葉と茎葉の生長を促進する (古畑ら 1998) ことが知られているが、本節でこれらのことを確認するとともに、苗立期の茎葉と根の乾物重も増加することを認めた (図 2-3-3)。これらの結果から出芽後の茎葉と根の乾物重増加に及ぼす落水管理の効果を確認したが、落水管理は苗立ち後の根の増加や伸長にはほとんど影響を及ぼさず、落水管理は根の乾物重より茎葉の乾物重の増加程度が大きかった。以上のことから、播種後の落水管理は出芽期は根の生長、出芽後は茎葉の生長を促進すると言

える。

穀類の幼植物は初期の生育段階において異なる養分源により生長する。胚乳の養分に完全に依存する段階から、胚乳の養分と光合成の両方によって生長が支えられる期間に移る (Whalley ら 1966)。その後、幼植物は最終的に完全に光合成に依存する独立栄養になる。Yoshida (1973) は播種後に胚乳の栄養は幼植物の生長を補助し、そして幼植物は 3.7 葉で独立栄養となることを報告している。そこで、水稻幼植物の生長についてはこの期間の胚乳減少量と光合成量との関係を解析する必要がある。本節では落水管理は新たな組織の形成に対する胚乳養分の利用効率にはほとんど影響しなかった (図 2-3-4) にもかかわらず、落水管理は出芽期の籾乾物重の減少と茎葉および根の乾物重の増加を促進した (図 2-3-3)。胚乳養分の転換効率は本節では水管理に関係なく 0.586 と計算された。これは暗条件で 21, 26, 32℃ で栽培した水稻苗の値 (0.56~0.58) の報告と類似していた (Tanaka and Yamaguchi 1968)。これらの結果は幼植物の生長のための胚乳の利用効率は約 0.6 であり、環境要因によってほとんど影響されないことを示唆している。落水管理は籾乾物重の減少を促進した。酸化的な土壌における幼植物の生長には胚乳からのより多くの炭水化物を必要としたためと考えられた。

本節では胚乳に依存する幼植物の生長について、胚乳養分の転換効率が 0.586 と算出した。本節の結果は出芽期では幼植物の生長は完全に胚乳に依存しており、出芽期後は胚乳養分と光合成の両方に支えられていることを示した。生長解析の結果、出芽期の湛水区と落水区の幼植物の生長の違いは胚乳養分利用量によっていたこと、出芽期後は光合成によっていたことを示した (図 2-3-5)。しかしながら、茎葉および根の糖含量は湛水区より落水区で低い (図 2-3-6) ことから、胚乳からの炭水化物は出芽期において幼植物の生長の制御要因ではない可能性がある。湛水区の高い糖濃度は胚乳からの炭水化物の供給が呼吸や生長に必要な量を超えていたことを示している。

播種後の落水管理は出芽後の出葉を促進する (古畑ら 1998)。本節の結果は出芽後の茎葉のクロロフィル含量および可溶性タンパク質含量を増加したことを示し (図 2-3-7, 2-3-8)、一方、炭水化物含量にはほとんど影響していないことを示した。また、本節の結果は出芽後、胚乳に依存する生長速度は水管理に関わらず同様であったが、光合成による生長速度が湛水区より落水区の方がより高いことを示した。これらの結果は落水管理が出葉を促し、茎葉のクロロフィルやタンパク質合成を促進し、出芽後の光合成による生長を促進することを示している。

#### 2-3-4 まとめ

播種後の水管理の違いが乾物生産に及ぼす影響について、幼植物の生長解析を行うとともに、クロロフィル、タンパク質および糖・デンプン含量を測定した。落水管理は出芽期までは茎葉の生長をわずかに抑制したが、出芽期後の葉の出現は促進され、草丈も増加した。幼植物の生長は出芽期は胚乳に依存し、出芽後は光合成に依存するが、乾物重に対す

る胚乳養分の転換効率には水管理の違いによる差はみられなかった。播種後の落水管理は出芽期の根の生長を促進し，出芽後の出葉を促し，茎葉のクロロフィルおよびタンパク質含量を増加させ，光合成を促進し，乾物生産を高めることが明らかになった。

湛水管理



湿潤管理



落水管理



図 2-1-1 播種後の水管理の違い（播種後 9 日目）.

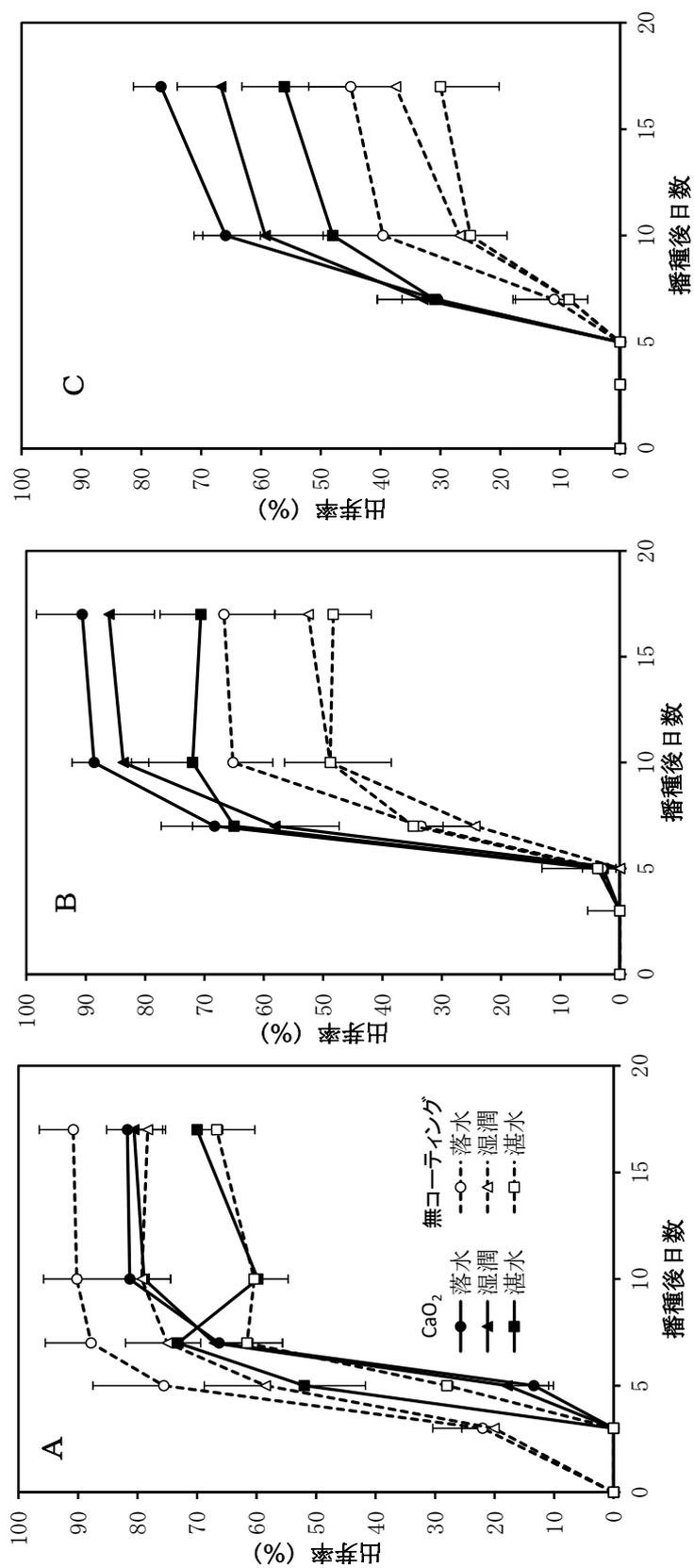


図2-1-2 湛水直播水稻の出芽の推移に及ぼす過酸化カルシウムコーティング、播種深および水管理の影響 (1999) .

A : 0 mm区, B : 8 mm区, C : 16 mm区. 縦棒は標準誤差 (n=4~6) .

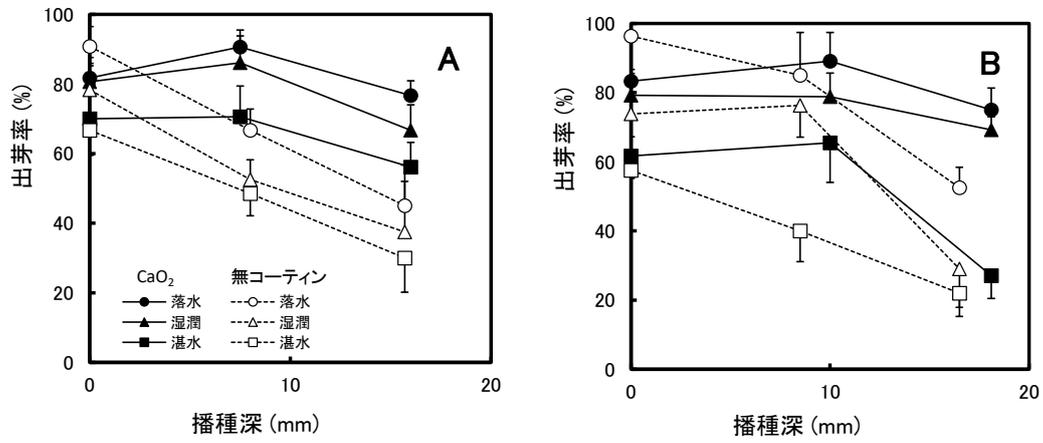


図 2-1-3 湛水直播水稻の出芽率に及ぼす過酸化カルシウムコーティング，播種深および水管理の影響.

A : 1999 年, B : 2000 年. 縦棒は標準偏差.

表 2-1-1 出芽率，苗立率，浮き・転び苗率および遅延苗率に及ぼす過酸化カルシウムコーティング，播種深および水管理の影響（1999）.

水管理	播種深 (mm)	出芽率 (%)		苗立率 (%)		浮き・転び苗率 (%)		遅延苗率 (%)	
		CaO <sub>2</sub>	無コーティング <sup>*</sup>						
落水	0	81.7	90.8	75.6	87.5	2.8	0.8	3.3	2.5
	8	90.6	66.7	89.4	63.3	0.0	0.0	1.1	3.3
	16	76.7	45.0	70.6	43.3	0.0	0.0	6.1	1.7
湿潤	0	80.6	78.3	74.4	71.7	2.8	0.8	3.3	5.8
	8	86.1	52.5	82.8	45.8	0.0	0.0	3.3	6.7
	16	66.7	37.5	59.4	33.3	0.0	0.0	7.3	4.2
湛水	0	70.0	66.7	15.0	31.7	53.9	27.5	1.1	7.5
	8	70.6	48.3	57.2	40.8	6.1	3.3	7.2	4.2
	16	56.1	30.0	41.7	20.8	0.0	0.0	14.4	9.2
平均	CaO <sub>2</sub>	75.5		62.9		7.3		5.2	
	無コーティング <sup>*</sup>	57.3		48.7		3.6		5.0	
	落水	75.3 a		71.6 a		0.6 b		3.0 b	
	湿潤	67.0 b		61.2 b		0.6 b		5.1 ab	
	湛水	57.0 c		34.5 c		15.1 a		7.3 a	
	0	78.0 a		59.3 a		14.8 a		3.9 b	
	8	69.1 b		63.2 a		1.6 b		4.3 b	
16	52.0 c		44.9 b		0.0 b		7.2 a		
分散分析	コーティング <sup>*</sup> (A)	**		**		**		ns	
	水管理 (B)	**		**		**		**	
	播種深 (C)	**		**		**		*	
	A×B	**		**		**		ns	
	A×C	**		**		**		*	
	B×C	ns		**		**		*	

分散分析の\*, \*\*はそれぞれ 5%, 1%水準で有意差があること, ns は有意差がないことを示す. 同一英文字間には5%水準で有意差 (LSD) がないことを示す.

湛水管理



湿潤管理



落水管理



図 2-1-4 播種後の水管理の違いによる苗立ちの状況 (播種後 30 日).

表 2-1-2 苗立期の生育に及ぼす播種深および水管理の影響 (1999, CaO<sub>2</sub> 区).

水管理	播種深 (mm)	葉齢	草丈 (cm)	莖数 (本)	最長根長 (cm)	根数 (本)	乾物重 (mg plant <sup>-1</sup> )		
							茎葉	根	全重
落水	0	4.9	22.2	1.7	13.3	10.3	60.0	15.7	75.7
	8	4.9	27.0	2.7	17.4	16.7	116.0	25.7	141.7
	16	4.4	28.0	2.3	13.4	19.0	95.3	22.7	118.0
湿潤	0	4.9	25.2	2.7	13.2	12.7	97.7	26.0	123.7
	8	4.9	25.2	3.0	14.6	16.7	99.7	21.0	120.7
	16	4.4	26.1	1.7	11.8	16.7	74.7	21.0	95.7
湛水	0	4.4	20.4	1.0	13.6	13.3	53.3	16.3	69.7
	8	4.9	23.4	2.0	13.0	14.7	67.7	14.0	81.7
	16	4.0	25.9	1.0	10.3	14.7	60.0	14.0	74.0
平均	落水	4.7 a	25.7 a	2.2 a	14.7 a	15.3	90.4 a	21.3 a	111.8 a
	湿潤	4.7 a	25.5 a	2.4 a	13.2 ab	15.3	90.7 a	22.7 a	113.3 a
	湛水	4.4 b	23.2 b	1.3 b	12.3 b	14.2	60.3 b	14.8 b	75.1 b
	0	4.7 a	22.6 b	1.8 b	13.4 ab	12.1 b	70.3 b	19.3	89.7
	8	4.9 a	25.2 a	2.6 a	15.0 a	16.0 a	94.4 a	20.2	114.7
	16	4.2 b	26.7 a	1.7 b	11.8 b	16.8 a	76.7 ab	19.2	95.9
分散分析	水管理	*	*	**	*	ns	**	**	**
	播種深	**	**	**	*	**	*	ns	ns
	交互作用	ns	ns	ns	ns	*	ns	**	ns

分散分析の\*, \*\*はそれぞれ 5%, 1%水準で有意差があること, ns は有意差がないことを示す. 同一英文字間には5%水準で有意差 (LSD) がないことを示す.

表 2-2-1 落水期間中の気象条件および土壌含水比.

試験No.	場所	播種日	落水 期間 (日)	平均 気温 (℃)	平均地温		降水量 (mm)	土壌含水比	
					湛水区 (℃)	落水区 (℃)		落水管理開始時 (%)	落水管理終了時 (%)
1	長岡市	2000年4月28日	13	14.3	16.3	15.8	45.5	102.7±8.0	64.5±3.3
2	長岡市	2000年5月12日	10	16.7	18.9	18.6	25.5	132.8±8.9	75.8±3.5
3	谷和原村	2001年6月6日	10	19.4	-	-	107.5	93.6±1.9	65.7±2.1

土壌含水比の値は平均±標準偏差.

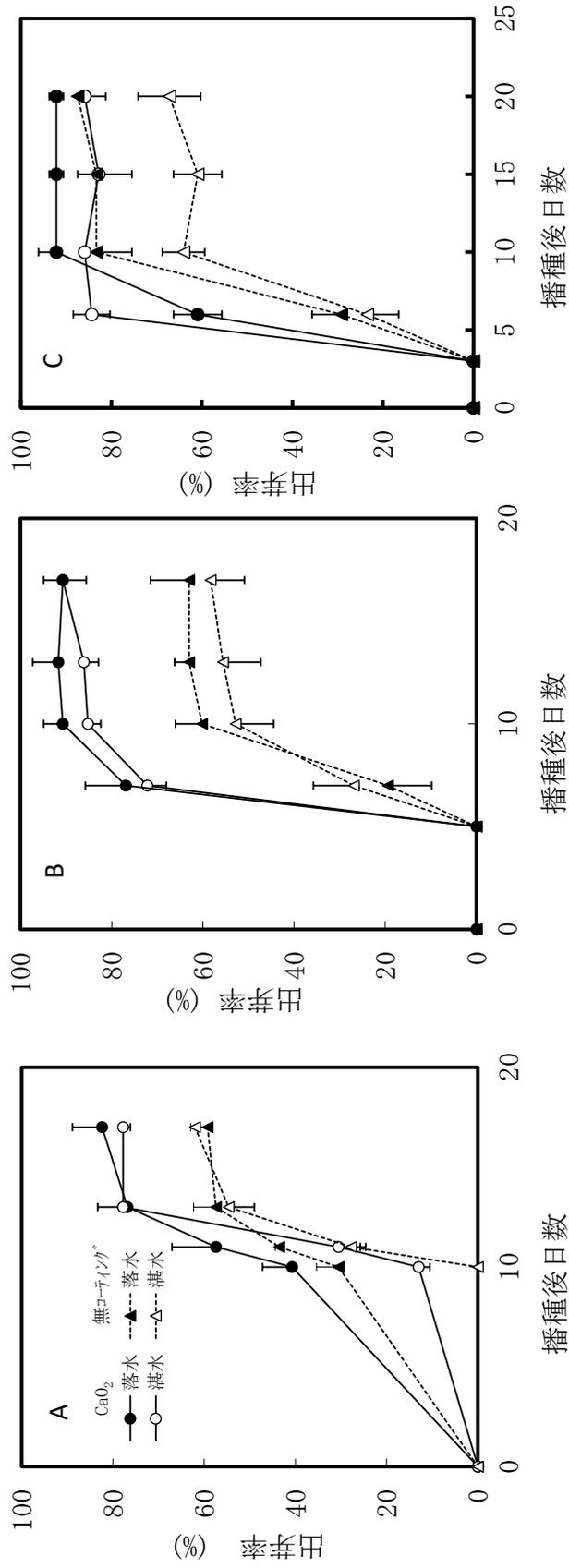


図2-2-1 出芽の推移に及ぼす過酸化カルシウムコーティング、播種後の水管理の影響。

A : 試験1, B : 試験2, C : 試験3. 縦棒は標準誤差.

表 2-2-2 出芽率および苗立率に及ぼす過酸化カルシウムコーティングおよび水管理の影響.

試験区	出芽率(%)			苗立率(%)		
	試験1	試験2	試験3	試験1	試験2	試験3
落水-無コーティング	59.3 b	63.0 b	84.8 ab	49.0 b	56.7 b	84.8 ab
落水-CaO <sub>2</sub>	82.4 a	90.7 a	92.9 a	71.9 a	90.7 a	92.9 a
湛水-無コーティング	62.0 b	58.3 b	75.0 b	38.5 c	45.6 b	62.5 c
湛水-CaO <sub>2</sub>	77.8 a	90.7 a	84.8 ab	54.2 b	84.4 a	81.7 b

出芽率および苗立率は播種後 20～25 日に調査した.

試験 1 および 2 は 3 反復, 試験 3 は 4～7 反復の平均値. 同一英文字間には 5%水準で有意差 (LSD) がないことを示す.

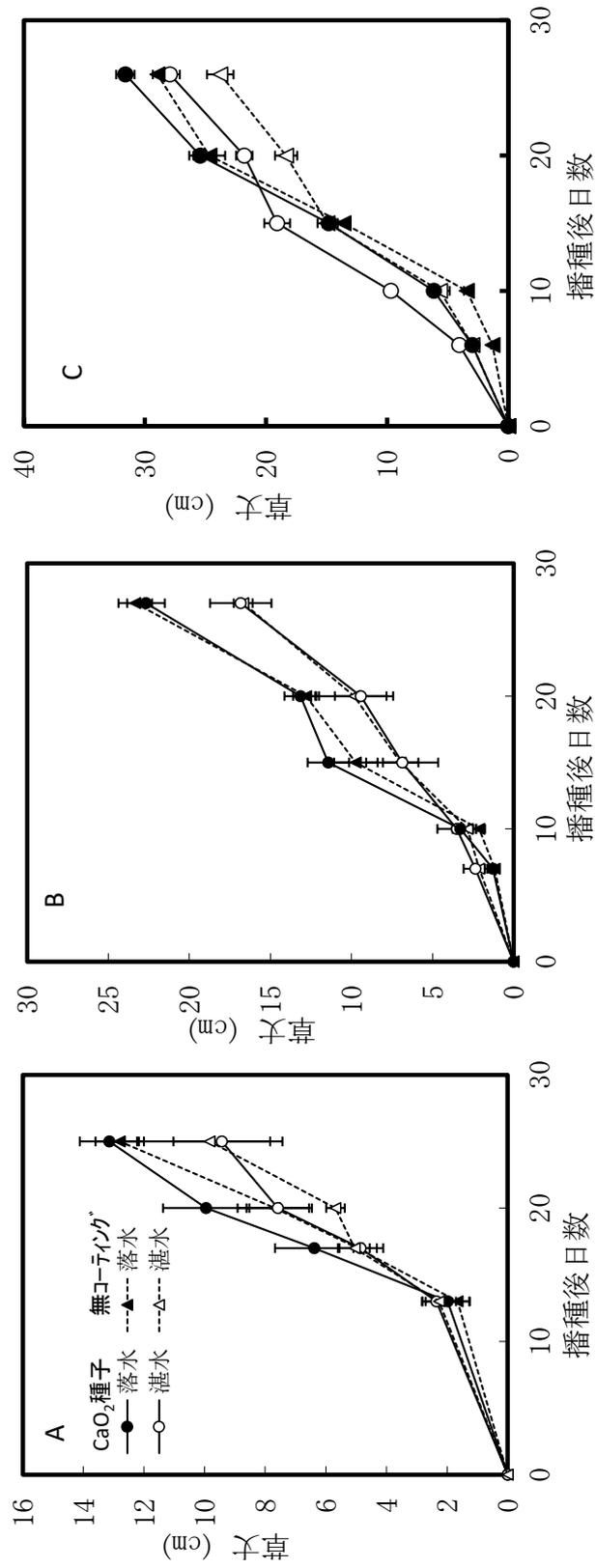


図2-2-2 草丈の推移に及ぼす過酸化カルシウムコーティング, 播種後の水管理の影響.

A: 試験1, B: 試験2, C: 試験3. 縦棒は標準誤差.

表 2-2-3 試験 3 における播種後 6～26 日の茎葉乾物重に及ぼす過酸化カルシウムコーティングおよび水管理の影響.

試験区	茎葉乾物重 (mg)				
	播種後6日	播種後10日	播種後15日	播種後20日	播種後26日
落水-無コーティング <sup>o</sup>	0.5 b	2.3 b	14.7 c	34.3 c	198.7 b
落水-CaO <sub>2</sub>	1.7 a	4.7 a	21.1 a	57.4 a	334.3 a
湛水-無コーティング <sup>o</sup>	0.6 b	2.8 b	9.1 d	23.0 d	123.5 c
湛水-CaO <sub>2</sub>	1.7 a	4.3 a	17.6 b	44.4 b	199.5 b

数値は 6 個体の平均値.

同一英文字間には 5%水準で有意差 (LSD) がないことを示す.

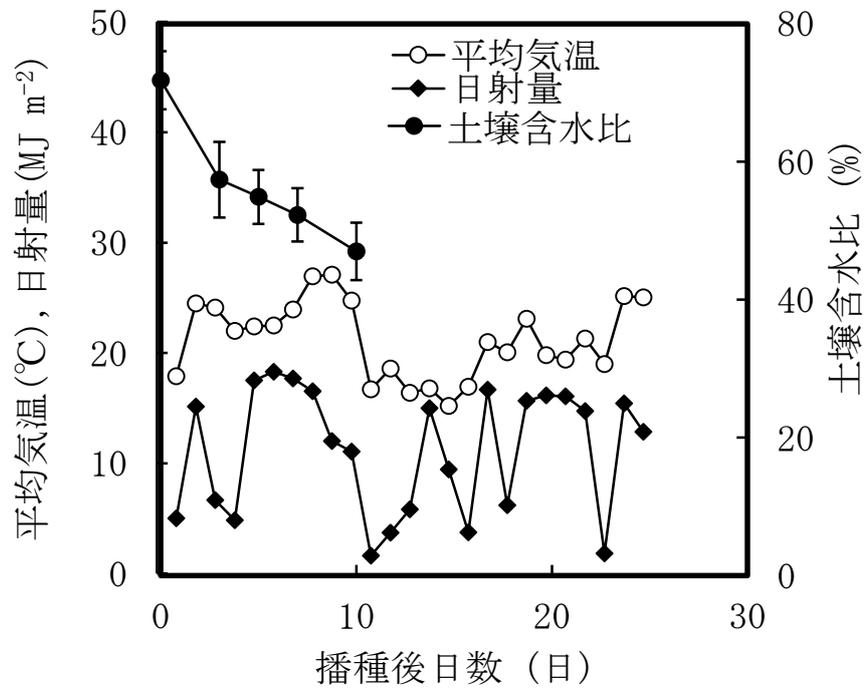


図 2-3-1 試験期間中の平均気温，日射量および土壌含水比.  
土壌含水比は落水区の数值，平均±標準誤差 (n=3).

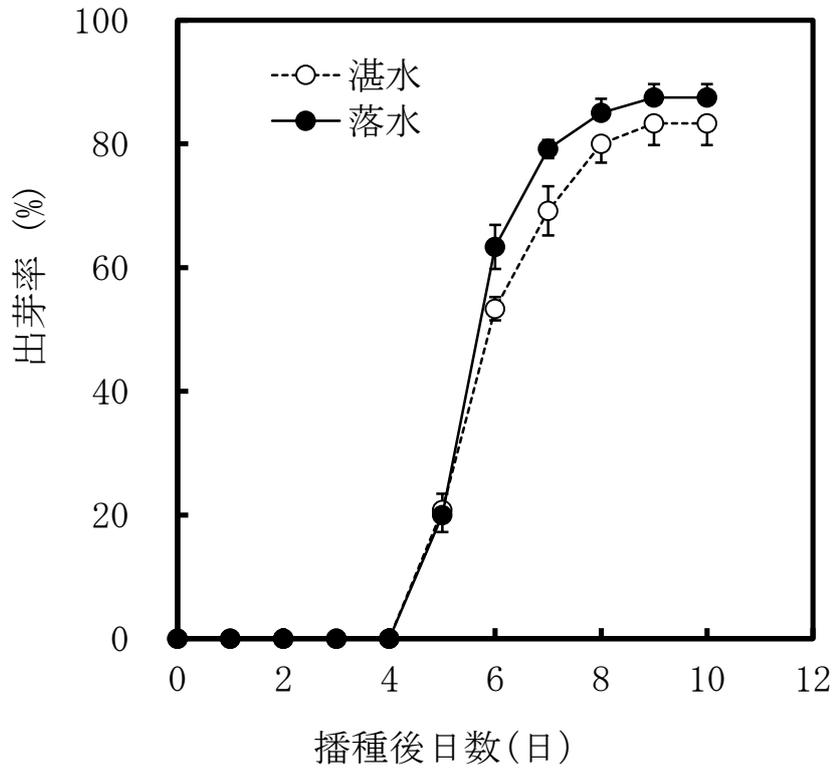


図 2-3-2 出芽率に及ぼす水管理の影響.  
縦棒は標準誤差 (n=12) を示す.

表 2-3-1 播種から苗立ちまでの生長に及ぼす落水管理の影響.

項目	水管理	播種後日数					
		5	7	10	15	21	25
葉齢 (L)	落水	0.0	1.0**	2.0**	2.7**	3.0**	3.4
	湛水	0.0	0.0	1.6	2.2	2.7	3.2
草丈 (cm)	落水	0.6*	2.1	6.5	12.4**	17.7**	18.4**
	湛水	1.4	1.8	5.7	8.2	13.0	14.8
最長根長 (cm)	落水	1.6**	3.1**	9.3	10.0	13.4	18.4*
	湛水	0.1	1.0	7.1	10.0	13.5	13.8
総根長 (cm)	落水	1.6**	3.1**	15.4	30.7	38.5	65.7
	湛水	0.1	1.0	11.9	26.3	39.7	56.2
根数 (本)	落水	1.0	1.0	3.4	4.4	5.4	7.6
	湛水	1.0	1.0	4.0	4.4	4.8	6.2

数値は 5 個体の平均を示す.

\*, \*\*はそれぞれ 5%, 1%水準で有意差があることを示す (Student's t-test).

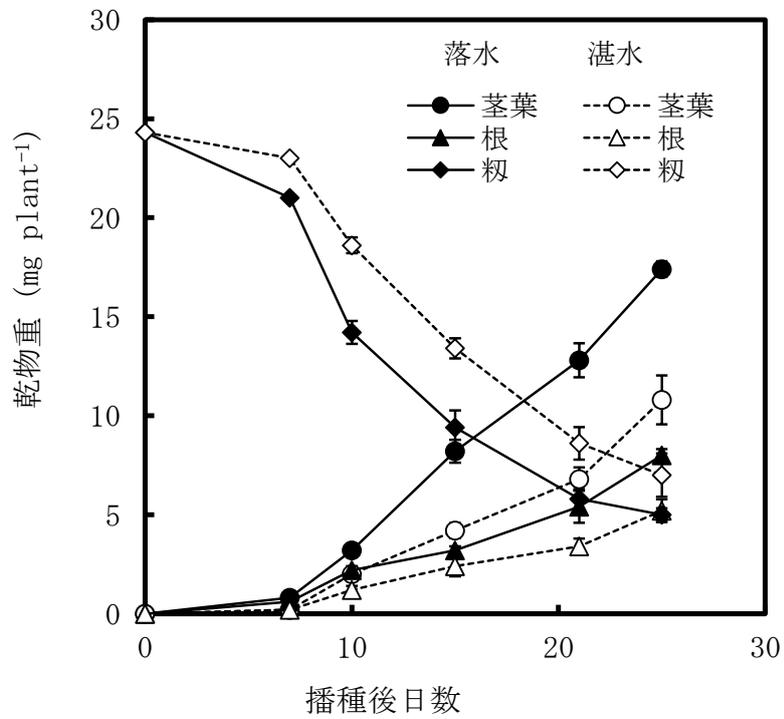


図 2-3-3 播種から苗立ちまでの茎葉，根，粃の乾物重に及ぼす水管理の影響。縦棒は標準誤差を示す (n=5)。

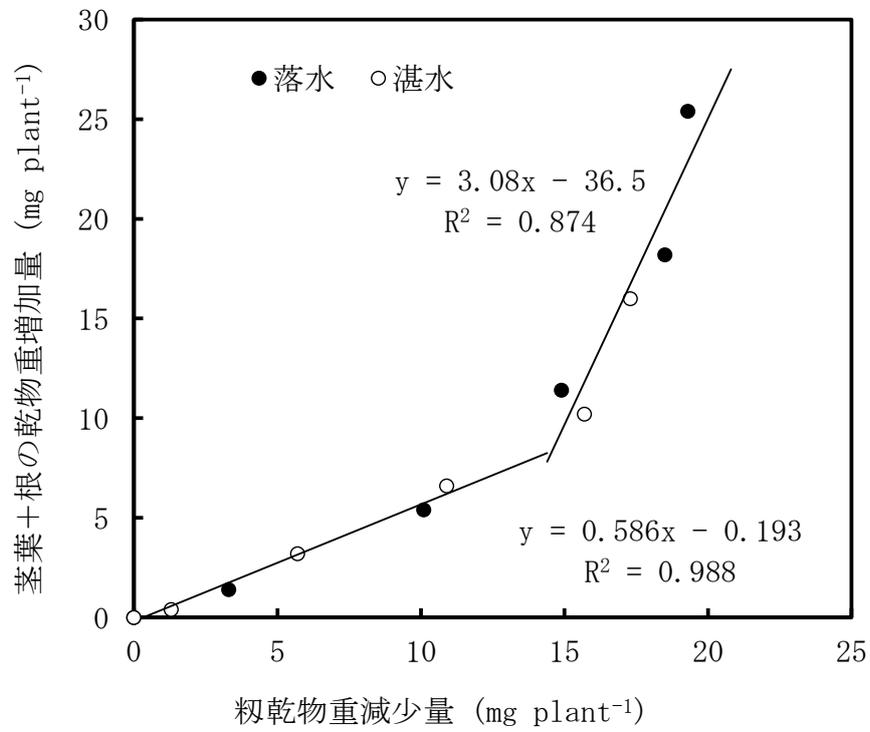


図 2-3-4 湛水および落水管理における籾重減少量と茎葉および根重の増加量との関係.

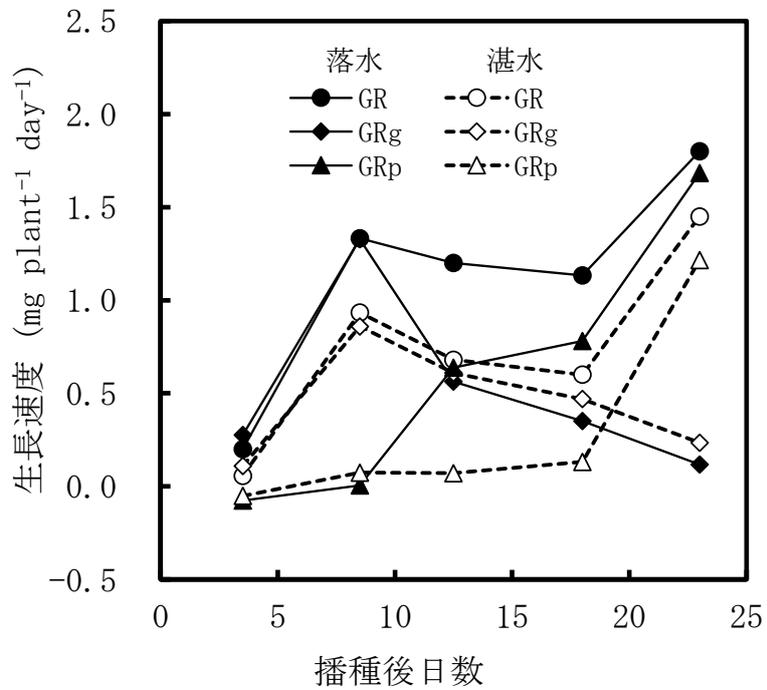


図 2-3-5 播種から苗立ちまでの生長速度 (GR), 胚乳養分による生長速度 (GR g) および光合成による生長速度 (GR p) に及ぼす水管理の影響.

GR, GR g および GR p は本文中の式 (1), (2) および (3) によって計算した.

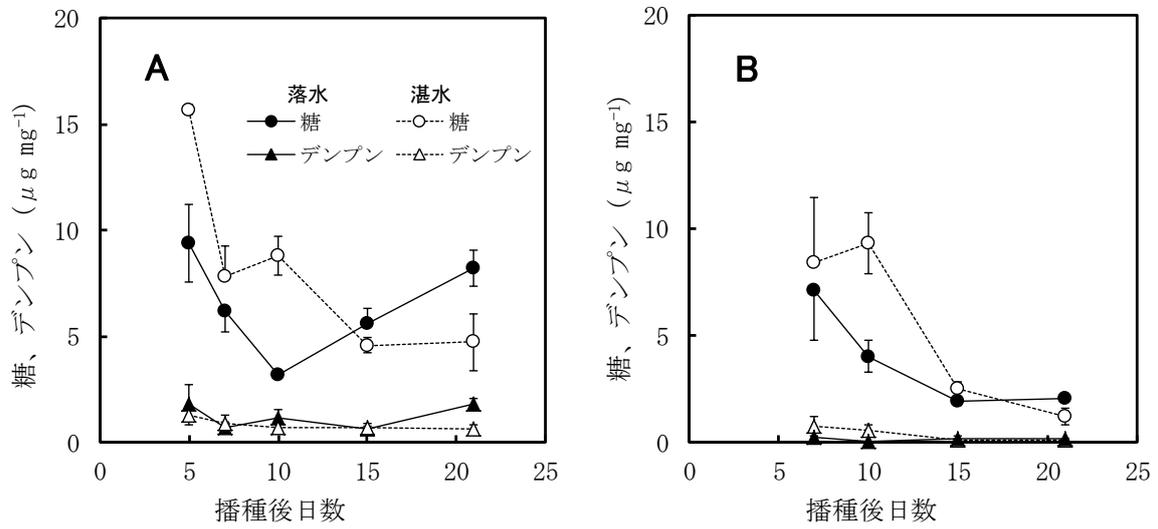


図 2-3-6 播種から苗立ちまでの茎葉 (A) および根 (B) の糖およびデンプン含量に及ぼす水管理の影響.  
縦棒は標準誤差 (n=3) を示す.

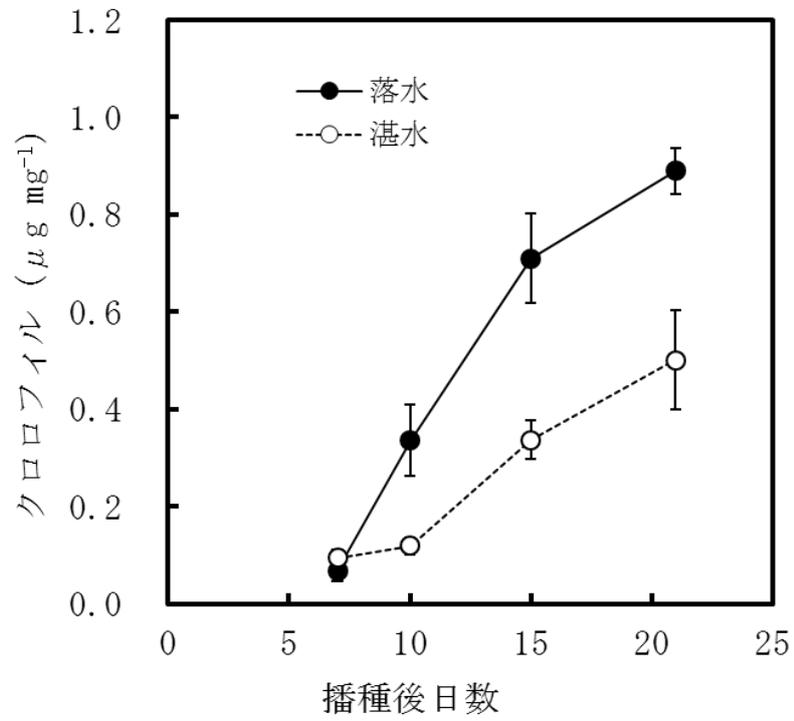


図 2-3-7 播種から苗立ちまでの茎葉のクロロフィル含量に及ぼす水管理の影響.  
縦棒は標準誤差 (n=3) を示す.

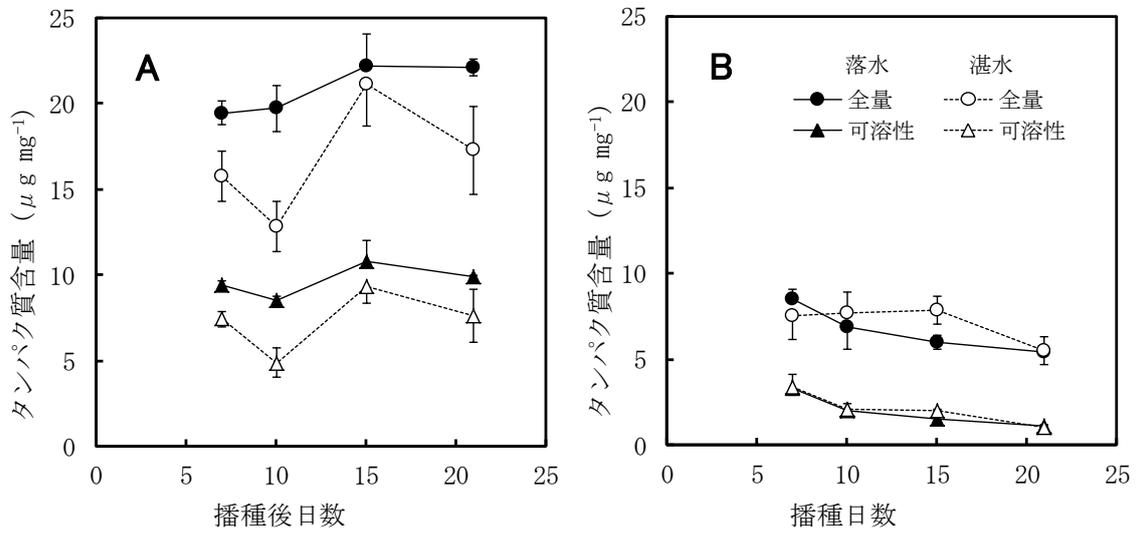


図 2-3-8 播種から苗立ちまでの茎葉 (A) および根 (B) の可溶性および全タンパク質含量に及ぼす水管理の影響。

縦棒は標準誤差 (n=3) を示す。

### 第3章

#### 鉄コーティング湛水直播水稻の出芽・苗立ちに及ぼす水管理の影響

第1章で述べたように過酸化カルシウムコーティング直播栽培の欠点として、土壌表面から約1 cmの深さに播種しなければならず、それよりも深い場合には出芽率の低下を招き(佐藤ら 1974)、逆に、表面に露出した場合には白く目立つため、鳥害を受けやすくなる(古畑ら 2009b)。さらに、催芽種子を用いるため、コーティング後の貯蔵期間が短く、作業計画を立てにくいなどが指摘されている。山内(2004)は気温15~20℃で消毒1日、その後1~2日浸種した活性化種子を鉄粉と焼石膏を用いてコーティングし、土壌表面に播種する鉄コーティング直播を開発した。この方法では、播種後湛水管理した場合にも、浮き苗が少ないこと、また、催芽前の籾をコーティングするため、コーティング後の貯蔵期間が長くとれること、さらに鉄による皮膜が硬いことやコーティング種子の表面の色が土壌の色と近いことによるカモフラージュ効果の可能性(古畑 2009a)もあり、鳥害が少ない(松村・古畑 2007, 古畑ら 2009b)ことなどから、近年、過酸化カルシウムコーティング直播栽培に代わって次第に増加してきている。しかし、鉄コーティング種子は過酸化カルシウムコーティング種子に比べ出芽・苗立ちが遅れる場合があり、播種時の低温や播種深が深い場合(古畑ら 2009b)、コーティング量の違い(山内 2005)などの影響が報告されている。一方、播種後の水管理条件が出芽・苗立ちに与える影響についてはほとんど報告が無い。

そこで、本章において鉄コーティング直播栽培の最適な水管理法を明らかにするため、過酸化カルシウムコーティング種子を比較として、気温、コーティング量、播種深および播種後の水管理が出芽・苗立ちに及ぼす影響を検討した。

## 第1節 鉄コーティングと水管理が出芽・苗立ちに及ぼす影響

第2章第1節において、過酸化カルシウムコーティング直播栽培における播種後の落水管理は湛水管理よりも出芽・苗立ちが向上することを明らかにした。鉄コーティング種子は過酸化カルシウム種子と異なり、コーティング資材の鉄粉に酸素発生能力がないこと、また、そのために土壌表面播種しなければならず、出芽・苗立ち期の環境条件が過酸化カルシウムコーティング直播栽培と異なる。そこで、本節において気温、鉄コーティング量、播種後の水管理が出芽・苗立ちに及ぼす影響について検討した。

### 3-1-1 材料と方法

試験は新潟県内の現地試験圃場 2 箇所および新潟県農業総合研究所作物研究センター（新潟県長岡市，以下，場内）で2008年および2009年に実施した。試験圃場の土性，調査年次および播種に関する主な耕種概要を表3-1-1に示した。播種後14日間の平均気温は，現地試験は気象庁のアメダスデータ，場内は新潟県農業総合研究所気象観測値を用いた。また，苗立ち調査時に第2葉が完全展開している個体を苗立ち個体とした。

#### 3-1-1-1 現地機械播種試験における苗立ち（試験1）

新潟県内において鉄コーティング直播栽培が多く行われている新発田市と上越市において，水稻品種コシヒカリ BL を用いた鉄コーティング直播の苗立ち状況を調査した。コーティング種子は山内（2004）の方法により作成した。すなわち浸種した粳をコーティングマシンで鉄粉および焼石膏と混合しコーティングし，コーティングした種子を直ちに育苗箱に薄く敷き詰め，酸化が終了するまで水の噴霧と攪拌を繰り返し，播種まで室温で保存した。新発田市圃場では2008年，2009年に乾粳重の0.5倍量鉄コーティング種子（以下，Fe0.5）を専用条播機で土壌表面播種した。上越市圃場では2008年が専用条播機による土壌表面播種，2009年が動力散布機による土壌表面散播で，両年とも0.25倍量鉄コーティング種子（以下，Fe0.25）を用い，播種後14日間落水管理し，その後中干し時期まで湛水管理した。また，コーティング後の発芽率が90%以上であることを確認し試験に供した。苗立ち率調査は2008年が両圃場とも1圃場につき3～5箇所，50 cm間の苗立ち率を調査，2009年は新発田市圃場では1 m間の苗立ち率を5箇所調査，上越市の散播試験では圃場内の15箇所について50 cm×50 cm枠内の苗立ち率を調査した。

#### 3-1-1-2 苗立ちに及ぼすコーティング量の影響（試験2）

2008年に品種コシヒカリ BL の Fe0.25 および Fe0.5 の種子を用いて実施した。鉄コーティング種子の Fe0.25 および Fe0.5 は山内（2004）の方法により作成した。播種は5月12日に場内において機械条播し，播種後14日間落水管理した圃場（以下，場内 A）で，播種後30日に5箇所，50 cm間の苗立ち率を調査した。また，2009年4月30日に新発田市圃場

において Fe0.25 および Fe0.5 の種子を各 50 粒, 2 反復で土壌表面に手で播き, その後湛水管理とし, 播種後 28 日に苗立率を調査した.

### 3-1-1-3 苗立ちに及ぼす水管理の影響 (試験 3)

2008 年および 2009 年に品種こしいぶきを用いて, Fe0.5 を手で土壌表面散播した圃場 (以下, 場内 B) において, 播種後約 10 日間落水管理した区と播種後 3 日間湛水管理し, その後自然落水した区を 2 反復設置した.

苗立率調査は圃場の一部に苗立率調査用にあらかじめ 30 粒播種し, 播種後 30 日に調査した.

### 3-1-2 結果

表 3-1-1 に播種後 14 日間の平均気温, 苗立率を示した. 播種後 14 日間の平均気温は新発田市では 2008 年が 16.3°C, 2009 年が 17.3°C であり, 上越市では 2008 年が 15.8°C, 2009 年が 16.9°C であった. それぞれの m<sup>2</sup> 当たりの推定播種量は新発田市圃場の 2008 年が 68 粒, 2009 年が 131 粒であり, 上越市圃場では 2008 年が 63 粒, 2009 年が 68 粒であった. 苗立率を調査した結果, コーティング量 Fe0.5 で播種後湛水管理した新発田市圃場では 2008 年が 47.9%, 2009 年が 55.1% であった. 場内の同一圃場で鉄コーティング量を変えた試験 2 の苗立率を調査した結果, 播種後の水管理を落水管理とした場内 A では, Fe0.25 が 87.6%, Fe0.5 が 78.5% であり, Fe0.25 が Fe0.5 に比べ 9.1 ポイント高かった. 一方, 播種後の水管理を湛水管理とした新発田市圃場では, Fe0.25 が 55.0%, Fe0.5 が 54.0% であり, ほぼ同等であった. 次に, Fe0.5 を用いて場内の同一圃場で播種後の水管理を変えた試験 3 (場内 B) で, 播種後の落水管理した区の苗立率は 2 ヶ年の平均で 77.2%, 湛水管理した区で 66.2% であり, 落水区が湛水区より 11.0 ポイント高かった. さらに, 地域, 年次および播種日により播種後の気象条件も異なるため, 播種後 14 日間の日平均気温と苗立率との関係を図 3-1-1 に示した. 湛水および落水管理した場合, それぞれ日平均気温と苗立率との間に有意な関係が認められ, 気温の上昇に伴い苗立率が高まる傾向がみられ, また, 気温に関係なく落水区が湛水区に比べ苗立率が高かった.

### 3-1-3 考察

試験 1~3 では地域, 年次および播種日により播種後の気象条件も異なるため, 図 3-1-1 で播種後 14 日間の平均気温と苗立率との関係をみたところ, 湛水および落水管理ごとにそれぞれ両者の間に有意な関係が認められ, 気温の上昇に伴い苗立率が高まる傾向がみられた. 古畑ら (2009b) は恒温機内で播種後 15°C, 20°C, 25°C で湛水管理した結果, 低温ほど出芽率が低下することを報告しており, 圃場試験において同様な傾向が認められた. また, 試験 1~3 では播種後の平均気温にかかわらず, 落水期間の長い区の苗立率が高いことから, 播種後の水管理および播種後の気温が苗立率に及ぼす影響が大きいと考えられた. 一方,

コーティング量の影響は判然としなかった。

#### 3-1-4 まとめ

気温，鉄コーティング量，播種後の水管理が出芽・苗立ちに及ぼす影響について新潟県内の現地ほ場および新潟農業総合研究所作物研究センター内ほ場で調査した。その結果，播種後の湛水管理および落水管理ごとにそれぞれ気温と苗立率の間に有意な相関関係が認められ，気温の上昇に伴い苗立率が高まる傾向がみられた。さらに，播種後の平均気温にかかわらず，落水期間の長い区の苗立率が高かった。一方，コーティング量の影響については判然としなかった。

## 第2節 鉄コーティング量，播種深および水管理が出芽・苗立ちに及ぼす影響

第1節において出芽・苗立ちに気温，播種後の水管理が影響することが示唆され，鉄粉のコーティング量については判然としなかった．そこで，第2節では気象・土壌条件を同じにするため，同一圃場内において，鉄粉のコーティング量，播種深および播種後の水管理の影響について検討した．

### 3-2-1 材料と方法

#### 3-2-1-1 鉄コーティング量と播種後の水管理の影響（試験1）

試験は2009年に新潟農総研内圃場で実施した．品種はコシヒカリBLを用い，コーティング方法として，Fe0.25，Fe0.5およびCaO<sub>2</sub>の3水準を設けた．鉄コーティング種子は山内（2004）の方法により作成し，播種まで室温で保存した．一方，CaO<sub>2</sub>は水温10～15℃で，5日間浸種し，催芽した種子を播種前日に等倍量の過酸化カルシウム粉粒剤をコーティングマシンで水を噴霧しながら混合しコーティングした．コーティング後は新聞紙の上に薄く広げて乾燥し，播種まで室温で保存した．

圃場の耕起前に窒素，リン酸，カリをそれぞれ m<sup>2</sup>当たり 3.0 g 施用し，直ちに耕起し，代かきは播種の4日前に行った．除草剤は播種16日後に初中期一発処理剤（キックバイ1キログラム剤）を散布した．播種当日の5月12日の朝に落水した圃場において鉄コーティング専用播種機（8条播き，（株）クボタ）で播種した．Fe0.25およびFe0.5の播種量は，鉄コーティング種子の平均的な苗立率が50%（山内2004）とされることから，CaO<sub>2</sub>よりも多い10 a 当たり乾粒で4 kg（1 m 当たり51粒）に設定し，覆土板をはずし，土壌表面播種を目標に播種した．CaO<sub>2</sub>の播種量は10 a 当たり乾粒で3 kg（1 m 当たり38粒）に設定し，覆土板を付け，土壌表面下約1 cm のところに播種した．水管理は播種後14日間落水管理し，その後，水深4～5 cm に湛水した区（以下，落水区）および播種後14日間3～4日おきに土壌表面が湿る程度に水を入れ，湿潤状態に管理し，その後，水深4～5 cm に湛水した区（以下，湿潤区），さらに播種直後から水深を4～5 cm に保つよう湛水管理した区（以下，湛水区）の3水準を設けた．

出芽・苗立ち調査は水管理終了時の播種後14日目に出土数を，また，播種後20日目に第2葉が完全展開している個体を苗立ち個体として，苗立数を各区2箇所1 m 当たり調査し，1 m 当たりの播種粒数をFe0.25およびFe0.5は51粒，CaO<sub>2</sub>は38粒に調節して播種したため，その粒数を分母として出芽率および苗立率を算出した．さらに，落水区の土壌含水比（土壌乾物重当たりの水分，105℃24時間乾燥）を調査した．なお，鳥害の影響を避けるため，播種直後から苗立ち調査終了時まで圃場全体に防鳥網を張った．

#### 3-2-1-2 コーティング量，播種深および播種後の水管理の影響（試験2）

鉄コーティング直播と過酸化カルシウムコーティング直播では播種深が違うことや，鉄

コーティング種子が土中に埋没する可能性もあるため、試験 1 と同じ種子 (Fe0.25, Fe0.5 および CaO<sub>2</sub>) を用いて、同じ圃場において播種深および播種後の水管理を変えた手播き試験を行った。すなわち、播種後水管理を変える 3 箇所それぞれにコーティング方法の違う 3 種類 (Fe0.25, Fe0.5 および CaO<sub>2</sub>) の種子を土壌表面 (以下、表面) または土壌表面から 0.5 cm の深さ (以下、土中) に約 2 cm 間隔でピンセットを用いて播種した。1 区 30 粒播種し、2 反復で実施した。播種後の水管理は落水区、湿潤区、湛水区の 3 水準を設けた。

出芽調査は播種翌日から水管理終了時の播種後 14 日目まで毎日出芽個体数を調査した。苗立ち調査は播種後 20 日目に実施し、第 2 葉が完全展開していない個体を遅延、株基部が地表面より浮いている個体、茎葉が地表面の垂線から 45 度以上傾いている個体をそれぞれ浮き苗および転び苗 (以下、浮き・転び) とし、それ以外を正常とした。

### 3-2-2 結果

2009 年の場内における試験 1 および 2 の播種後の気象条件を図 3-2-1 に示した。播種後 14 日間の平均気温は 16.2°C、積算降水量は 45.5 mm であり、播種後 7 日間の降水量が多かった。また、落水区における落水管理終了時の土壌含水比は 77.9% であり、土壌表面には細かい亀裂がみられた。

試験 1 において Fe0.25 および Fe0.5 を土壌表面播種、また CaO<sub>2</sub> を土中に専用条播機により播種した場合の出芽率および苗立率に及ぼす播種後の水管理の影響について表 3-2-1 に示した。分散分析の結果、コーティング方法や水管理の違いによる出芽率の差は有意ではなかったが、苗立率には有意差が認められ、コーティング方法では Fe0.5 より Fe0.25 および CaO<sub>2</sub> が高く、また、水管理では湛水区より落水区および湿潤区の方が高かった。なお、鉄コーティング区では落水区より湿潤区の出芽率および苗立率が高い傾向が認められた。

さらに、試験 2 のコーティング量、播種深および播種後の水管理を変えた場合の出芽率の推移を図 3-2-2 に示した。Fe0.25 の表面播種では湿潤区の出芽が速く、落水区では出芽がやや遅れ、湛水区は出芽が最も遅く、最終出芽率も低かった。土中播種でも同様な傾向であったが表面播種より出芽が遅れ、最終出芽率も低かった。Fe0.5 の出芽率の推移は Fe0.25 とほぼ同様な傾向を示した。CaO<sub>2</sub> は播種深に関係なく、出芽は湛水区で早い、最終出芽率は落水区で高くなった。苗立ちに及ぼすコーティング方法、播種深および播種後の水管理の影響について表 3-2-2 に示した。分散分析の結果、コーティング方法が正常苗立率、遅延苗率、浮き・転び苗率、合計苗立率に及ぼす影響は 1% 水準で有意であった。播種深は正常苗立率、遅延苗率には有意な影響を及ぼさなかったが、浮き・転び苗率および合計苗立率に及ぼす影響は 1% 水準で有意であった。また、水管理が正常苗立率、浮き・転び苗率、合計苗立率に及ぼす影響は 1% 水準で有意であったが、遅延苗率に有意な影響は及ぼさなかった。

合計苗立率は Fe0.25, Fe0.5 より CaO<sub>2</sub>, 土中播種より表面播種、湛水管理より湿潤、落水管理の方が高かった。遅延苗率は CaO<sub>2</sub> より Fe0.25, Fe0.5 が高く、浮き・転び苗率は表

面播種の湛水管理で多く認められ、Fe0.25、Fe0.5よりCaO<sub>2</sub>の方が高かった。このため、正常苗立率はFe0.25、Fe0.5よりCaO<sub>2</sub>で、また、湛水管理より湿潤管理や落水管理で高かった。なお、CaO<sub>2</sub>の正常苗立率に及ぼす播種深の影響は小さかったが、Fe0.25、Fe0.5では土中播種より表面播種の正常苗立率が高かった。

### 3-2-3 考察

鉄コーティング直播栽培の播種深の影響について古畑ら（2009b）は深さ0.5 cm、1.0 cm、1.5 cmで比較し、播種深が深いほど苗立率が低下することを報告している。本研究では土壤表面播種と土中播種（深さ0.5 cm）で検討した結果、CaO<sub>2</sub>に比べFe0.25やFe0.5の土中播種による苗立率の低下が大きく（表3-2-2）、鉄コーティング種子が土中に埋没した場合の出芽率の低下は過酸化カルシウムコーティング種子に比べ大きいことが確認された。

鉄コーティング量の影響については、皮膜の厚さによる生育遅延（山内 2005）について報告されている。試験1において、Fe0.25およびCaO<sub>2</sub>の苗立率がFe0.5に比べ高かった（表3-2-1）、一方、Fe0.25とFe0.5を土壤表面に、CaO<sub>2</sub>を土中に手播きした試験2の結果では、Fe0.25とFe0.5との差は小さかった（表3-2-2）。同様な傾向は第1節での試験でもみられ、同一圃場で機械播種し、鉄コーティング量を変えた場内A（埴壤土）ではFe0.25がFe0.5に比べ苗立率が9.1ポイント高く、一方、手で土壤表面播種した新発田市圃場ではFe0.25とFe0.5の苗立率に差がみられなかった（表3-1-1）。これらのことから手で丁寧に土壤表面に播種した場合と違い、機械播種した場合にFe0.25よりも比重の重いFe0.5（山内 2005）は土中に埋没した種子が多く、出芽の遅延や出芽率が低下していた可能性があり、Fe0.25とFe0.5のコーティング量の影響は小さいと考えられた。

播種後の水管理が出芽・苗立ちに及ぼす影響について、過酸化カルシウムコーティング直播栽培では播種後の落水管理が出芽・苗立ちを安定させる（吉永ら 2000）。そこで、鉄コーティング直播栽培における出芽・苗立ちに及ぼす播種後の水管理の影響をみるため、Fe0.25、Fe0.5、CaO<sub>2</sub>を機械播種した後に水管理を落水、湿潤、湛水と変えた試験1の結果、落水区および湿潤区の出芽率と苗立率は湛水区に比べ高かった（表3-2-1）。また、第2章で過酸化カルシウムコーティング直播において播種後の落水管理は初期の出芽率に及ぼす影響は小さいが、後半の出芽率を高くし、苗立期の浮き苗を抑制し、正常苗立率を高めることを明らかにした。試験2の結果、コーティング方法や播種深に関係なく落水区に比べ湛水区の出芽率が低下しており、CaO<sub>2</sub>における出芽率の低下に比べ、Fe0.25およびFe0.5では初期から出芽率が著しく劣った（図3-2-2）。また、鉄コーティング種子は過酸化カルシウムコーティング種子に比べ浮き・転び苗は少ないものの湛水区において発生がみられ、落水管理による浮き・転び苗の抑制が認められた。合計苗立率は落水区と湿潤区が高く、湛水区が低く、湛水管理による苗立率の低下はCaO<sub>2</sub>よりもFe0.25およびFe0.5で大きかった。鉄コーティング種子では土中播種で湛水管理した区の苗立率が最も低く、土壤表面に播種して播種後落水または湿潤管理することにより過酸化カルシウムコーティング種子の

土中播種とほぼ同等の苗立率が得られる可能性が示唆された（図 3-2-2）。これらのことから、鉄粉は過酸化カルシウムのような酸素供給能がないため、鉄コーティング種子は土中播種や湛水条件など酸素が少ない条件下で過酸化カルシウムコーティング種子より出芽・苗立ちが低下しやすいことが確認された。播種後の落水管理と湿潤管理による出芽率の影響は過酸化カルシウムコーティング種子と鉄コーティング種子で異なっており、CaO<sub>2</sub>は落水区の出芽率が高かったが、Fe0.25 および Fe0.5 では湿潤区の出芽率が落水区よりも高く推移し（図 3-2-2）、Fe0.25 の苗立率はやや高かった（表 3-2-1）。山本・貝淵（2009）は落水時期が早すぎると吸水不足による発芽の不斉一の可能性を示唆しており、湿潤管理による出芽率向上の確認とその生理機構の解明が必要である。

#### 3-2-4 まとめ

鉄コーティング種子の出芽・苗立ちに及ぼす鉄粉のコーティング量、播種深および播種後の水管理の影響について同一ほ場内において検討した結果、鉄コーティング種子が土中に埋没した場合の出芽率の低下は過酸化カルシウムコーティング種子に比べ大きいことが示唆された。そのため、機械播種した場合に乾籾 0.25 倍の鉄コーティング種子（Fe0.25）よりも比重の重い 0.5 倍コーティング種子（Fe0.5）は土中に埋没した種子が多く、出芽の遅延や出芽率が低下していた可能性があり、Fe0.25 と Fe0.5 のコーティング量の影響は小さいと考えられた。また、播種後の水管理については落水区および湿潤区の出芽率および苗立率が湛水区に比べ高かった。

### 第3節 播種後の種子水分に及ぼす水管理の影響

第3章第1節および第2節で、播種後の落水管理は湛水管理に比べ、出芽・苗立ちが向上することが認められた。しかし、鉄コーティング直播は土壌表面播種のため、播種後の落水管理で降雨がない場合、土中播種に比べ種子が乾きやすいことが考えられる。本節では種子水分と出芽との関係を検討し、鉄コーティング直播の最適な播種後の水管理方法を明らかにしようとした。

#### 3-3-1 材料と方法

新潟農総研内の天幕を有する育苗ハウス内において40 cm×35 cm×7 cmのプラスチック容器（以下、バット）に水田土壌を入れ、代かき後落水した土壌に第3節の試験1と同じFe0.25種子を2009年6月5日に土壌表面（表面）および土壌表面から0.5 cmの深さ（土中）にピンセットでそれぞれ90粒播種した。播種後8日間落水し、その後毎朝、土壌表面まで灌漑した区（落水区）、播種翌日から毎朝土壌表面まで灌漑した区（湿潤区）および播種後毎朝水深2 cmまで湛水した区（湛水区）の3水準を設定した。播種したコーティング種子の内50粒について出芽率の推移を調査し、残りの種子については播種後2～5日おきに5粒採取し、茎葉を切除した後、1粒ずつコーティング種子の表面水をふき取り重量を測定後、80°C48時間乾燥し、水分含有率を測定した。また、落水区の土壌含水比（土壌乾物重当たりの水分、105°C24時間乾燥）を測定した。

#### 3-3-2 結果

播種後14日間の平均気温は21.0°Cで、落水区の播種後9日目の湛水直前の土壌含水比は39.7%であり、5月播種の圃場条件に比べ気温が高く、土壌水分の低下が大きい条件であった。

播種深および播種後の水管理の違いが籾の水分含有率と出芽に及ぼす影響を図3-3-1に示した。表面播種した場合、湿潤区および湛水区の籾水分は播種後3日目に27%以上となっており、5日目から出芽が始まり、10日目まで出芽が増加し、18日目の出芽率は湿潤区が76.0%、湛水区が84.0%であった。一方、落水区は3日目の籾水分が20.6%であり、その後徐々に低下し、8日目に18.6%まで低下した。8日目の出芽率は8.0%であった。その後、落水区に灌漑した後は籾水分含有率の上昇とともに出芽率も増加し、播種後12日目には籾水分含有率が23.6%で、出芽率44.0%となり、18日目の出芽率は82.0%であった。一方、土中播種では、湿潤区および湛水区の籾水分含有率は表面播種と同様な推移を示したが、出芽は表面播種に比べ遅く、湿潤区では後半まで出芽がみられたが、湛水区では9日目以降、新たな出芽がなく、18日目の出芽率は湿潤区が80.0%、湛水区が42.0%であった。落水区の籾水分は3日目が25.3%であり、表面播種よりもやや高かったが、出芽はわずかであり、表面播種と同様に8日目に灌漑した後、籾水分含有率の上昇に伴い、出芽率

が上昇し、18日目の出芽率は94.0%であった。

### 3-3-3 考察

Fe0.25を用いてバット試験を実施した結果、落水区では表面播種および土中播種において籾水分が低い時期は出芽が抑えられていたが、籾水分の増加に伴い出芽が促進され、最終出芽率も高まった(図 3-3-1)。一方、湛水区では土中播種において出芽の抑制が顕著であり、土中に埋没するような状態での湛水管理は出芽率を著しく低下させると考えられた。一方、落水時期が早すぎると吸水不足による発芽の不斉一の可能性がある(山本・貝淵 2009)。

これらのことから、鉄コーティング種子は過酸化カルシウムコーティング種子よりも土壌を湿潤に保つ必要があり、実際の栽培場面における播種後の水管理方法としては落水管理とし、降雨がなく、圃場が乾きすぎ、種子が吸水不足になる場合には走水などの対策(山内 2005)をし、出芽に必要な水分を種子に供給することにより出芽率が向上すると考えられた。

### 3-3-4 まとめ

落水区では籾水分含有率が低い時期は出芽が抑えられていたが、籾水分の増加に伴い出芽が促進され、最終出芽率も高まった。一方、湛水区では土中播種において出芽の抑制が顕著であり、土中に埋没するような状態での湛水管理は出芽率を著しく低下させると考えられた。これらのことから、鉄コーティング種子は過酸化カルシウムコーティング種子よりも土壌を湿潤に保つ必要があり、出芽に必要な水分を種子に供給することにより出芽が向上すると考えられた。

#### 第4節 コーティング資材および水管理が初期生育に及ぼす影響

鉄コーティング直播水稻の播種後の水管理が初期生育に及ぼす影響を過酸化カルシウムコーティング直播水稻と比較検討する。

##### 3-4-1 材料と方法

試験は2009年および2010年に新潟農総研内圃場で、品種はコシヒカリBLを用い、コーティング方法はFe0.25およびCaO<sub>2</sub>の2水準を設けた。

2009年は第3章第2節で出芽・苗立ちに及ぼすコーティング量と播種後の水管理の影響(3-2-1)を調査した圃場で実施した。すなわち、播種当日の5月12日の朝に落水した圃場において鉄コーティング専用直播機(8条播き、(株)クボタ製)で条播した。Fe0.25は土壌表面播種を目標に播種した。CaO<sub>2</sub>は土壌表面から約1cmの深さに播種した。水管理は播種後14日間落水管理し、その後、水深4~5cmに湛水した区(以下、落水区)および播種後14日間3~4日おきに土壌表面が湿る程度に水を入れ、湿潤状態に管理し、その後、水深4~5cmに湛水した区(以下、湿潤区)、さらに播種直後から水深を4~5cmに保つよう湛水管理した区(以下、湛水区)の3水準を設けた。

2010年はFe0.25およびCaO<sub>2</sub>を5月11日に播種した。Fe0.25は播種前日に落水した土壌表面に鉄コーティング専用直播機(8条播き、(株)クボタ製)で条間30cmとして条播した。また、CaO<sub>2</sub>を土壌表面から約1cmの深さに条間30cm、種子間4cmで手播きした。水管理は播種後13日間落水管理し、その後、水深4~5cmに湛水した区(以下、落水区)、および播種後から中干し開始時期まで水深4~5cmに保った区(以下、湛水区)の2水準を設定した。

両年とも基肥は耕起前に窒素、リン酸、カリをそれぞれm<sup>2</sup>当たり3.0gずつ施用し、直ちに耕起し、代かきを播種の4日前に行った。

初期生育調査として、2009年は播種後14日、21日および29日に5~8個体を採取し、草丈(播種後14日は鞘葉長、第一葉身長も調査)、葉齢、地上部生体重(播種後14日、21日)および地上部乾物重を調査した。2010年は播種後13日、20日および27日に5~7個体を採取し、草丈(播種後14日は鞘葉長、第一葉身長、20日は第二葉身長も調査)、葉齢、地上部生体重および地上部乾物重を調査した。地上部乾物重は80℃72時間乾燥後、各区採取個体をまとめて重量を測定し、採取個体数で除して1個体当たりの乾物重を算出した。平均気温および日射量は新潟県農業総合研究所気象観測値を用いた。

##### 3-4-2 結果

2009年の水管理を変えた播種後14日間の平均気温は16.2℃であり、試験期間中の平均気温は18.0℃であった。2010年の水管理を変えた播種後13日間の平均気温は16.0℃であり、試験期間中の平均気温は16.3℃であった。

表 3-4-1 に 2009 年の初期生育を示した。分散分析の結果、水管理の違いで有意差があった項目は播種後 14 日の草丈、鞘葉長、第一葉身長、生体重、播種後 29 日の草丈および葉齢であり、播種後 14 日では湛水区の草丈、鞘葉長、第一葉身長が長く、生体重が重く、播種後 29 日では落水区の草丈が長く、湿潤区の葉齢が小さかった。また、コーティング方法では播種後 14 日の草丈、鞘葉長、第一葉身長、葉齢および生体重、播種後 21 日の草丈および生体重に有意差が認められ、CaO<sub>2</sub> 区の播種後 14 日の草丈、鞘葉長、第一葉身長が長く、葉齢が進んでおり、生体重が重く、播種後 21 日の草丈が長く、生体重が重かった。表 3-4-2 に 2010 年の初期生育を示した。分散分析の結果、水管理の違いで有意差があった項目は播種後 13 日の草丈、鞘葉長、第一葉身長および生体重、播種後 20 日の第二葉身長、播種後 27 日の草丈であり、湛水区が落水区に比べ播種後 13 日の草丈、鞘葉長、第一葉身長が長く、生体重が重く、播種後 20 日の第二葉身長が長かった。一方、播種後 27 日の草丈は落水区が長かった。コーティング方法では播種後 13 日の草丈、第一葉身長および生体重、播種後 20 日の草丈、第二葉身長および生体重、播種後 27 日の草丈に有意差が認められ、CaO<sub>2</sub> 区の播種後 13 日の草丈、第一葉身長が長く、生体重が重く、播種後 20 日の草丈、第二葉身長が長く、生体重が重く、播種後 27 日の草丈が長かった。また、2009 年および 2010 年の乾物重の推移をそれぞれ表 3-4-3、表 3-4-4 に示した。両年とも落水管理終了時の乾物重に有意差がみられ、Fe0.25 区より CaO<sub>2</sub> 区が重く、さらに、2010 年は水管理の違いでも有意差がみられ、湛水区が重かった。播種後 27~29 日の乾物重に有意差は無かったが、2009 年の CaO<sub>2</sub> 区の落水区および 2010 年の Fe0.25 区の落水区が湛水区に比べ重かった。また、2010 年は 2009 年に比べ乾物重が小さく推移した。

### 3-4-3 考察

コーティング資材が初期生育に及ぼす影響について、過酸化カルシウムは初期の茎葉および根の生長を促進する（太田・中山 1970）効果があることが知られており、一方、鉄コーティング種子は過酸化カルシウムコーティング種子に比べ出芽・苗立ちが遅れ、初期生育量が小さくなることを報告されている（古畑ら 2009b）。本節においても Fe0.25 は CaO<sub>2</sub> に比べ鞘葉長、第一葉身長および第二葉身長が短く、播種後 20 日頃まで草丈が短く、生体重も軽いことが確認された（表 3-4-1、3-4-2）。また、播種後の水管理の違いでは、第 2 章において過酸化カルシウムコーティング種子の土中播種は落水管理終了後の初期生育促進効果があることを確認しており、落水管理により根の生育が促進され、光合成が早い時期から行われることにより乾物生産が有利となることを明らかにした。さらに、吉永ら（2000）は窒素吸収量も増大することを報告している。本節の落水管理終了時の生育は湛水区が落水区より旺盛であったが、播種後 27~29 日目の草丈は落水区が長く（表 3-4-1、3-4-2）、また、2010 年は落水管理終了後の気温が低く推移し（図 3-4-1）、乾物生産が緩慢であったが、播種後 27 日の Fe0.25 の落水区の乾物重が湛水区より重かった（表 3-4-4）。以上のことから、鉄コーティング直播栽培においても落水管理の初期生育促進効果があると考えら

れた。過酸化カルシウムコーティング種子に比べ初期生育が劣る鉄コーティング種子において、初期生育を促進するためには播種後の落水管理することが有効と考えられた。

#### 3-4-4 まとめ

新潟農総研圃場において、初期生育に及ぼす播種後の水管理の影響を鉄コーティング種子および過酸化カルシウムコーティング種子を用いて調査した結果、鉄コーティング種子は過酸化カルシウムコーティング種子に比べ播種後約 20 日間は草丈が短く、生体重が軽いことが明らかとなった。また、播種後の水管理の影響は落水期間中の草丈が湛水区に比べ落水区が短かったが、播種後 27～29 日目には落水区の草丈が長くなった。そのため、過酸化カルシウムコーティング種子に比べ初期生育が劣る鉄コーティング種子において、初期生育を促進するためには播種後に落水管理することが有効と考えられた。

表 3-1-1 現地および場内圃場（長岡市）における耕種概要および苗立率.

調査地 (土性)	播種後 水管理	コーティング量 (倍)	調査 年次	播種方式	播種日	平均気温 (°C)	播種後の 水管理条件	苗立率 (%)
新発田市 (壤土)	湛水	0.5	2008	機械条播	4月30日	16.3	播種後14日間湛水, 15~22日落水	47.9
		0.5	2009	機械条播	4月30日	17.3	播種後14日間湛水, 15~22日落水	55.1
		0.25	2009	手播き	4月30日	17.3	播種後14日間湛水, 15~22日落水	55.0
		0.5	2009	手播き	4月30日	17.3	播種後14日間湛水, 15~22日落水	54.0
上越市 (軽埴土)	落水	0.25	2008	機械条播	5月8日	15.8	播種後14日間落水	75.3
		0.25	2009	動散播	5月11日	16.9	播種後14日間落水	80.8
場内A (埴壤土)	落水	0.25	2008	機械条播	5月12日	17.5	播種後14日間落水	87.6
		0.5	2008	機械条播	5月12日	17.5	播種後14日間落水	78.5
場内B (埴壤土)	湛水	0.5	2008	手播き	5月8日	15.2	播種後3日間湛水, 4~10日自然落水	66.0
		0.5	2009	手播き	5月8日	16.8	播種後3日間湛水, 4~9日自然落水	66.4
	落水	0.5	2008	手播き	5月8日	15.2	播種後10日間落水	72.0
		0.5	2009	手播き	5月8日	16.8	播種後9日間落水	82.3

場内：新潟県農業総合研究所作物研究センター内圃場（長岡市）.

平均気温：播種翌日を起点として播種後14日間の日平均気温の平均.

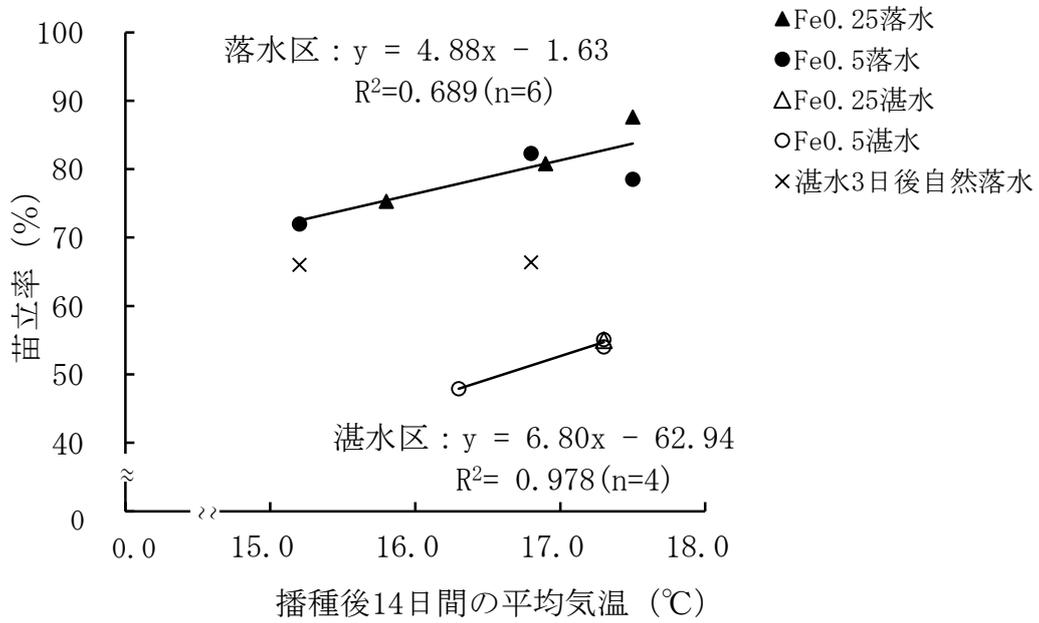


図 3-1-1 播種後 14 日間の平均気温と苗立率との関係.

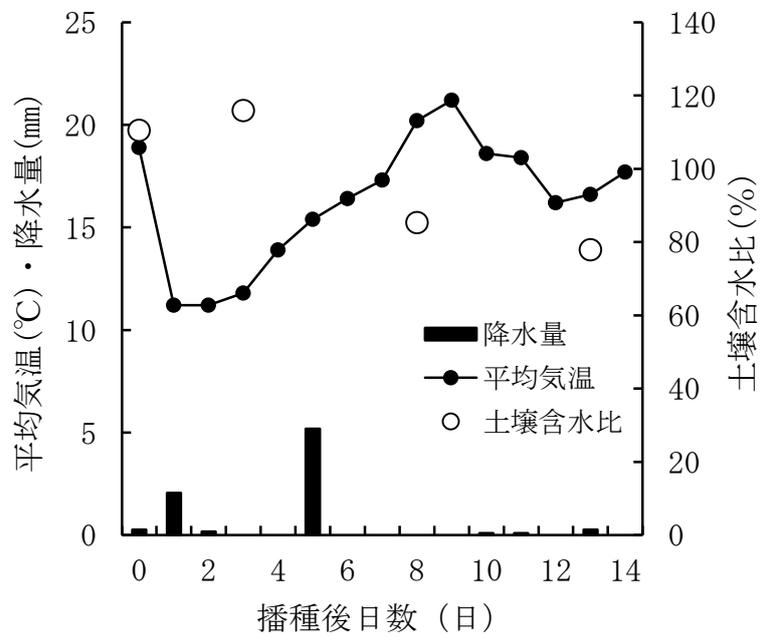


図 3-2-1 播種後 14 日間の日平均気温・降水量および落水区の土壌含水比の推移 (2009 年).

横軸は播種日の 5 月 12 日を 0 日とした.

表 3-2-1 出芽・苗立ちに及ぼすコーティング方法および  
播種後の水管理の影響.

コーティング	播種後の 水管理	出芽率 (%)	苗立率 (%)
Fe0.25	落水	62.7	60.8
	湿潤	74.5	65.7
	湛水	52.9	40.2
Fe0.5	落水	53.9	43.1
	湿潤	54.9	47.1
	湛水	52.0	38.2
CaO <sub>2</sub>	落水	64.5	60.5
	湿潤	57.9	52.6
	湛水	53.9	43.4
分散 分析	コーティング (A)	ns	*
	水管理 (B)	ns	**
	A×B	ns	ns

2009年5月12日機械播種.

表中の数値は2反復の平均値を示す.

\*, \*\*はそれぞれ5%, 1%水準で有意差あり,  
nsは有意差がないことを示す.

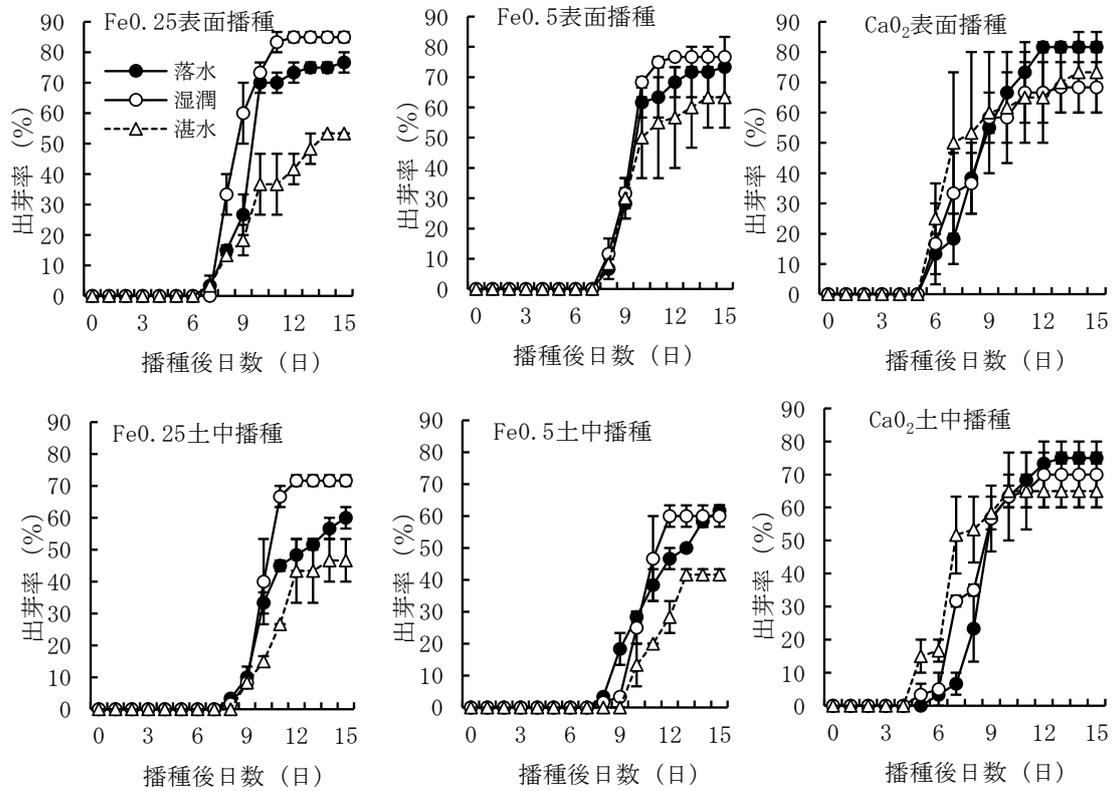


図 3-2-2 出芽に及ぼすコーティング方法，播種深および播種後の水管理の影響．  
播種日の 2009 年 5 月 12 日を 0 とした．縦棒は標準誤差 (n=2) を示す．

表 3-2-2 コーティング方法，播種後の水管理および播種深が苗立ちに及ぼす影響.

コーティング <sup>*</sup>	播種後の 水管理	正常苗立ち (%)		遅延 (%)		浮き+転び (%)		合計 (%)	
		表面播種	土中播種	表面播種	土中播種	表面播種	土中播種	表面播種	土中播種
Fe0.25	落水	63.3	55.0	6.7	5.0	0.0	0.0	70.0	60.0
	湿潤	66.7	51.7	3.3	6.7	1.7	1.7	71.7	60.0
	湛水	33.3	30.0	6.7	10.0	5.0	0.0	45.0	40.0
Fe0.5	落水	65.0	56.7	6.7	5.0	0.0	0.0	71.7	61.7
	湿潤	51.7	36.7	6.7	8.3	5.0	0.0	63.3	45.0
	湛水	43.3	33.3	6.7	8.3	3.3	0.0	53.3	41.7
CaO <sub>2</sub>	落水	76.7	73.3	0.0	1.7	0.0	0.0	76.7	75.0
	湿潤	53.3	50.0	5.0	10.0	5.0	0.0	63.3	60.0
	湛水	41.7	58.3	0.0	0.0	28.3	6.7	70.0	65.0
コーティング (A)		**		**		**		**	
分散 分析	播種深 (B)	ns		ns		**		**	
	水管理 (C)	**		ns		**		**	
	A×B	ns		ns		*		ns	
	A×C	*		*		**		ns	
	B×C	ns		ns		**		ns	

2009年5月12日手播き.

表中の数値は2反復の平均値を示す. \*, \*\*はそれぞれ5%, 1%水準で有意差あり, nsは有意差がないことを示す.

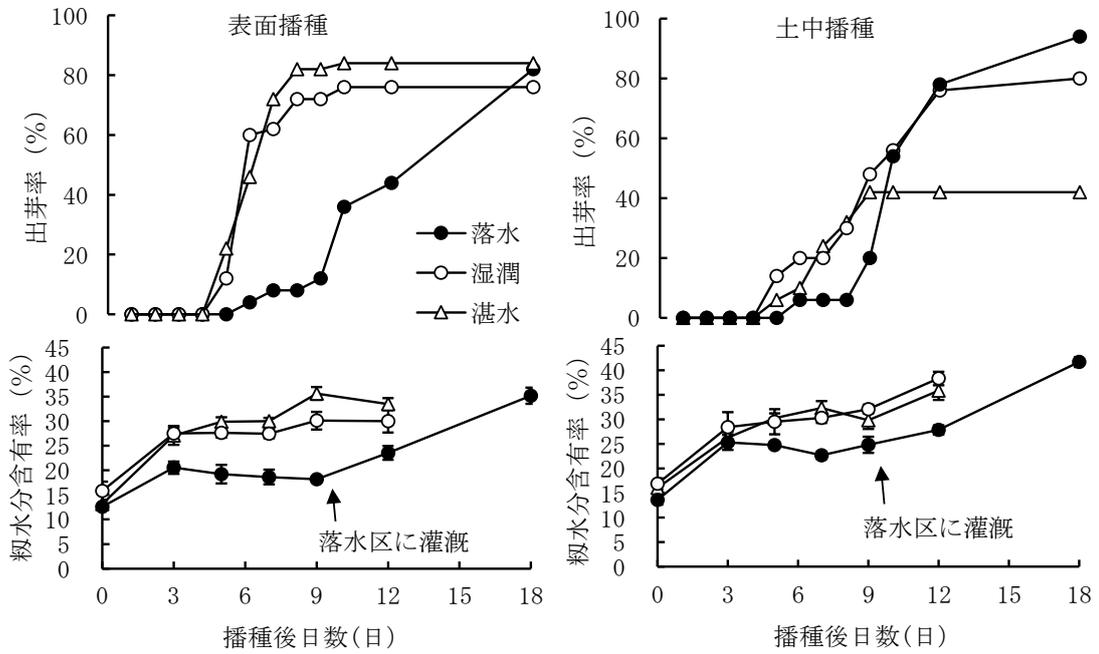


図 3-3-1 籾水分含有率および出芽率に及ぼす播種深と播種後水管理の影響.

2009年6月5日に鉄0.25倍コーティング種子をバット内に播種した.

落水区: 播種後9日間落水管理, その後毎朝土壌表面が湿る程度に灌漑.

湿潤区: 毎朝, 土壌表面が湿る程度に灌漑.

湛水区: 毎朝, 水深2cmに湛水.

播種日の2009年6月5日を0とした. 縦棒は標準誤差 (n=5).

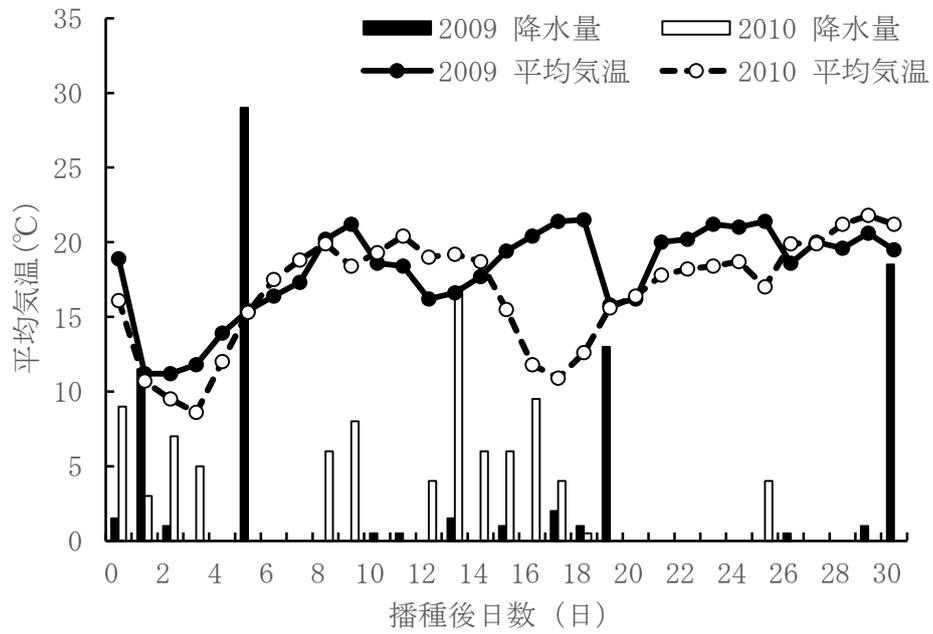


図 3-4-1 播種後の平均気温の推移.  
 播種日は 2009 年が 5 月 12 日, 2010 年が 5 月 11 日.

表3-4-1 コーティング資材および水管理が初期生育に及ぼす影響 (2009).

コーティング資材	播種後の水管理	苗立数 (本 m <sup>-2</sup> )	播種後14日				播種後21日				播種後29日	
			草丈 (cm)	鞘葉長 (cm)	第1葉身長 (cm)	葉齢	生体重 (mg plant <sup>-1</sup> )	草丈 (cm)	葉齢	生体重 (mg plant <sup>-1</sup> )	草丈 (cm)	葉齢
Fe0.25	落水	102	1.8	0.3	0.7	1.8	4.2	12.8	3.6	50.4	19.3	5.6
	湿潤	112	1.8	0.4	0.7	2.0	8.4	11.6	3.5	48.0	17.3	5.2
	湛水	69	4.0	1.7	1.8	1.8	16.2	12.3	3.8	61.6	17.2	5.6
Ca0 <sub>2</sub>	落水	76	4.5	1.0	1.6	2.4	27.2	13.8	3.8	92.6	19.5	5.7
	湿潤	66	4.9	2.6	3.0	2.0	27.0	13.7	3.4	84.8	18.1	5.0
	湛水	56	7.6	3.0	3.4	2.2	35.4	12.2	3.8	76.8	16.9	5.3
分散分析	コーティング	-	**	**	**	**	**	*	ns	**	ns	ns
	水管理	-	**	**	**	ns	**	ns	ns	ns	**	**
	交互作用	-	ns	**	**	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns

分散分析の\*, \*\*はそれぞれ5%, 1%水準で有意差が有ることを, nsは有意差が無いことを示す (n=5~10).

表3-4-2 コーティング資材および水管理が初期生育に及ぼす影響 (2010).

コーティング 資材	播種後13日						播種後20日						播種後27日					
	草丈 (cm)	鞘葉長 (cm)	第1葉身長 (cm)	葉齡	生体重 (mg plant <sup>-1</sup> )	草丈 (cm)	第2葉身長 (cm)	葉齡	生体重 (mg plant <sup>-1</sup> )	草丈 (cm)	葉齡	生体重 (mg plant <sup>-1</sup> )	草丈 (cm)	葉齡	生体重 (mg plant <sup>-1</sup> )			
Fe0.25	落水	1.9	0.3	0.7	1.9	5.6	7.9	1.0	3.0	29.2	14.9	4.8	119.0					
	湛水	4.2	1.5	1.8	2.0	16.0	8.7	1.6	3.0	38.2	11.9	4.8	73.6					
Ca0 <sub>2</sub>	落水	3.1	0.8	1.3	2.0	13.4	11.4	1.7	3.0	41.4	18.6	4.6	126.6					
	湛水	6.4	1.7	2.1	2.2	21.0	10.3	2.1	2.9	44.8	15.5	4.6	126.2					
分散	**	ns	*	ns	**	**	**	ns	ns	*	ns	ns	ns					
分析	**	**	**	ns	**	ns	ns	**	ns	ns	**	**	ns					
交互作用	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns					

分散分析の\*, \*\*はそれぞれ5%, 1%水準で有意差が有ることを, nsは有意差が無いことを示す (n=5~6).

表 3-4-3 乾物重に及ぼすコーティング資材および水管理の影響 (2009).

コーティング 資材	播種後の 水管理	播種後日数		
		14日 (mg plant <sup>-1</sup> )	21日 (mg plant <sup>-1</sup> )	29日 (mg plant <sup>-1</sup> )
Fe0.25	落水	1.2	10.4	43.6
	湿潤	1.0	8.8	45.5
	湛水	1.6	12.0	44.1
CaO <sub>2</sub>	落水	3.8	17.6	66.8
	湿潤	3.6	14.6	49.9
	湛水	4.0	13.4	38.5
分散分析	コーティング*	**	ns	ns
	水管理	ns	ns	ns

\*\*は1%水準で有意差あり, nsは有意差がないことを示す.

表 3-4-4 乾物重に及ぼすコーティング資材および水管理の影響 (2010).

コーティング 資材	播種後の 水管理	播種後日数		
		13日 (mg plant <sup>-1</sup> )	20日 (mg plant <sup>-1</sup> )	27日 (mg plant <sup>-1</sup> )
Fe0.25	落水	1.0	4.2	26.6
	湛水	2.3	6.4	22.6
CaO <sub>2</sub>	落水	2.2	5.6	28.8
	湛水	3.6	5.6	30.8
分散 分析	コーティング <sup>*</sup> 水管理	*	ns	ns

\*は5%水準で有意差あり，nsは有意差がないことを示す。

## 第4章

### 湛水直播水稻の生育および収量に及ぼす播種後の水管理の影響

過酸化カルシウムコーティング直播栽培では播種後の落水管理により出芽・苗立ちが向上することが報告されている（大場 1994, 吉永ら 1997b）。また、第3章において鉄コーティング直播においても、落水管理の苗立ち向上効果が確認されている。コシヒカリは移植でも倒伏しやすい品種であるが、価格差からコシヒカリでの直播栽培が望まれており、直播栽培において出芽・苗立ちの安定に加え耐倒伏性の向上も重要課題である（姫田ら 1999）。鉄コーティング種子は土中播種すると出芽が抑制されるので（山内 2004）、土壌表面播種が基本となるが、播種深が浅いため、倒伏が懸念される（佐藤 1973）。過酸化カルシウムコーティング直播栽培では条播に比べ点播で耐倒伏性が向上することが知られている（尾形・松江 1998）が、鉄コーティング直播栽培では確認されていない。また、落水管理が収量へ及ぼす影響については報告が少なく、過酸化カルシウムコーティング直播栽培では播種後の落水処理で穂数が増加し増収する報告（高橋ら 1998）がある一方で、暖地において落水処理は幼穂分化期までの窒素吸収量の低下を招き減収するとの報告（吉永ら 2000）もあり、不明な点が多い。

以上のことから、本章では播種後の水管理が生育や収量に及ぼす影響について、過酸化カルシウムコーティング種子の条播栽培で播種深を変えて検討するとともに、鉄コーティング直播栽培の播種様式を変えて検討した。

## 第1節 過酸化カルシウムコーティング直播水稻の播種深と水管理が生育および収量に及ぼす影響

本節では過酸化カルシウムコーティング直播水稻の播種深を 0, 8, 16 mm, 播種後の水管理を湛水, 湿潤および落水に変えて生育および収量へ及ぼす影響を検討した.

### 4-1-1 材料と方法

試験は第 2 章第 1 節において, 1999 年に農業研究センター谷和原水田圃場で出芽・苗立ちを調査した圃場の生育および収量について調査した. 各区 9 株について苗立期から出穂期までの茎数および出穂期の止葉の SPAD 値 (SPAD-502, ミノルタ), 成熟期の稈長を測定した. 登熟後期の倒伏程度について無 (0) ~ 甚 (5) で調査した (反復なし). 収量は成熟期に各区 3 株を採取し, 1 株ごとの穂数および精玄米収量を調べた. 気象データは農業研究センター谷和原水田圃場の気象観測装置の値を用いた.

### 4-1-2 結果

#### 4-1-2-1 気象条件

生育期間の平均気温, 日射量および降水量を表 4-1-1 に示した. 気温は平年より高く, とくに 8 月の平均気温は 27.7°C で平年より 1.6°C 高く, 9 月は 25.1°C で平年より 2.6°C 高かった. 7 から 9 月の日射量は平年よりやや多く, 6 月から 8 月の降水量は平年よりやや多かったが, 9 月は少雨であった.

#### 4-1-2-2 生育および倒伏程度

播種深 8 mm 区の茎数の推移を図 4-1-1 に示した. CaO<sub>2</sub> 区は無コーティング区に比べ茎数が多く推移した. また, 水管理の違いでは CaO<sub>2</sub>, 無コーティング区とも落水区および湿潤区の茎数増加が旺盛で, 湛水区の茎数の増加は緩慢であった. 出穂期の SPAD 値, 稈長および倒伏程度を表 4-1-2 に示した. 分散分析の結果, 出穂期の SPAD 値は湛水区が大きく, 播種深 16 mm 区がやや大きかった. また稈長は播種深が深いほど長くなった. 倒伏程度に及ぼす播種深および水管理の影響に有意差は認められなかったが, 湛水区の 8 mm 播種および 16 mm 播種の倒伏程度が大きかった.

#### 4-1-2-2 穂数および収量

CaO<sub>2</sub> 区の苗立数, 穂数および精玄米収量を表 4-1-3 に示した. 穂数は播種深と水管理で有意差があり, 8 mm 区が多く, 0, 16 mm 区が少ない傾向がみられ, また, 湛水区は落水区, 湿潤区より減少した. とくに湛水区の 0 mm 区が 93 本 m<sup>2</sup> と大きく減少した. さらに, 精玄米収量も穂数と同様な傾向がみられ湛水区が低く, 落水区と湿潤区が高く, 湛水区の 0 mm 区が大きく減収した.

#### 4-1-3 考察

過酸化カルシウムコーティング直播栽培の播種後の水管理が生育に及ぼす影響について、吉永ら（2000）は落水処理によって初期の分けつ発生は旺盛となるが、幼穂形成期までの窒素吸収量が低下し、減収する場合があることを報告している。本研究においても、第2章で落水区の初期生育は湛水区に比べ旺盛であることが明らかとなり、落水区や湿潤区の初期の茎数が増加した（図 4-1-1）と考えられた。出穂期の SPAD 値は落水区や湿潤区が湛水区に比べ低かったが、本節では落水区よりも湛水区で減収する傾向がみられ、とくに苗立数が  $8 \text{ 本 m}^{-2}$  と大きく減少した湛水区の 0 mm 区では SPAD 値は高かったが、苗立数の減少を補償できず（佐々木ら 1999）、減収したと考えられた。また、倒伏については播種深および水管理に有意差は認められなかった。表面播種した場合、浮き苗等によりタコ足状態の苗が多くなり、倒伏しやすくなる（坂井・伊藤 1978）が、播種深が深くなるほど稈長が長くなり（表 4-1-2）、倒伏しやすくなるため差が無かったと考えられた。また、湛水区の 0 mm 播種での倒伏が小さかった要因としては苗立密度が低下し、地上部モーメントが小さくなった（柳瀬ら 1992）ためと考えられた。しかし、1 株穂数が落水区および湿潤区よりやや多いにもかかわらず湛水区の 8 mm 播種および 16 mm 播種の倒伏程度が大きかったことは湛水区の倒伏指数が大きくなった（寺島ら 2002）可能性が考えられ、倒伏程度を地上部モーメントと押し倒し抵抗値に分けて解析する必要がある。また、本研究では苗立数の違いが生育や収量に大きく関与したと考えられ、今後、同じ苗立数において、水管理の影響を比較する必要がある。

#### 4-1-4 まとめ

過酸化カルシウムコーティング直播栽培における播種深および播種後の水管理が生育および収量へ及ぼす影響について検討した結果、播種後の落水管理および湿潤管理は、苗立数が確保され茎数の増加に伴い穂数が確保され、収量を安定的に確保できると考えられた。さらに、押し倒し抵抗値を高め、倒伏を軽減することにより登熟が良好となり、収量が向上する可能性が示唆された。

## 第2節 鉄コーティング直播水稻の播種様式と水管理が生育および収量に及ぼす影響

本節では鉄コーティング直播栽培の播種様式および播種後の水管理が生育および収量へ及ぼす影響について過酸化カルシウムコーティング種子の条播と比較検討した。

### 4-2-1 材料と方法

2010年および2011年に新潟県農業総合研究所作物研究センター（新潟県長岡市）内圃場で、水稻品種コシヒカリ BL の鉄コーティング種子および過酸化カルシウムコーティング種子を用いて試験を2反復で実施した。鉄コーティング種子は山内（2004）の方法に従い、播種の1週間前に作成し、コーティング後、直ちに育苗箱に薄く敷き詰め室内で播種まで保管した。コーティング量は乾籾重の0.25倍量とした。また、過酸化カルシウムコーティング種子は三石・中村（1977）の方法により過酸化カルシウム粉粒剤（カルパー粉粒剤16，保土ヶ谷 UPL（株））で播種の2日前に乾籾重等倍量コーティングし、コーティング後は新聞紙に広げ、室内で播種まで保管した。播種日は2010年が5月11日、2011年が5月12日で、播種前日に落水した土壌表面に鉄コーティング種子を鉄コーティング用専用直播機（8条播き，（株）クボタ製）を用いて、条間30 cmで条播および点播した。条播は苗立ち後に手で間引いて条1 m当たり17本（57本 m<sup>2</sup>）に調節した区（以下，Fe条播）を設定し，点播は株間17 cm（以下，Fe点播）で播種した。また，新潟県で最も多く行われている直播栽培方法は過酸化カルシウムコーティング種子を土中に条播する方法である（阿部 2011）ため，過酸化カルシウムコーティング種子を土壌表面下約1 cmの深さに条間30 cm，種子間4 cmに手播きし，苗立ち後に間引いて1 mの条当たり17本（57本 m<sup>2</sup>）に調節した区（以下，CaO<sub>2</sub>区）を設置した。両年とも基肥は耕起前に窒素，リン酸，カリをそれぞれ m<sup>2</sup>当たり3.0 g 施用し，直ちに耕起し，代かきを播種の4日前に行った。

水管理は播種後に落水し（2010年は13日間，2011年は8日間），その後，中干し開始時期まで水深4～5 cmに湛水した区（以下，落水区），および播種後から中干し開始時期まで水深4～5 cmに保った区（以下，湛水区）の2水準を設定した。なお，中干し期間は2010年が6月25日～7月16日，2011年が6月27日～7月15日であった。穂肥は2010年が7月28日（出穂18日前）と8月6日（出穂9日前），2011年が7月27日（出穂18日前）と8月3日（出穂11日前）にそれぞれ窒素成分で m<sup>2</sup>当たり1.0 g ずつ施用した。

苗立数調査は2010年が6月4日，2011年が6月2日に実施した。出穂期に葉身乾物重および地上部乾物重を，成熟期に地上部乾物重を各区2株測定（80℃，72時間乾燥）した。また，9月6日および成熟期の倒伏程度を0（無）～5（甚）で調査した。さらに，押し倒し抵抗値（寺島ら 1992）を2010年は出穂後12日に，2011年は出穂後15日に測定した。押し倒し抵抗値の測定方法は条播が各区10個体，点播が10株について地際から15 cmの高さにデジタルフォースゲージ（日本電産シンポ（株））を押し当て，地表面の垂直方向から45度の角度まで押し倒したときの最大値を測定した。また，測定株の最長稈長および生

体重を測定し、地上部モーメント（稈長×生体重）および倒伏指数（地上部モーメント/（測定高×押し倒し抵抗値））を算出した。

収量調査は成熟期に2010年は1箇所2.4 m<sup>2</sup>、2011年は1箇所1.2 m<sup>2</sup>を各2箇所刈取り、収量（水分含量15%換算）および収量構成要素の調査を行った。登熟歩合は、m<sup>2</sup>当たり玄米収量を精玄米千粒重で除し1000をかけて精玄米粒数を求め、これをm<sup>2</sup>当たり全粒数で除した値に100をかけて算出した。

精玄米の整粒歩合を穀粒判別機（RGQIOB（株）サタケ）で測定した。

試験期間中の気象データは新潟県農業総合研究所の気象観測値のデータを用いた。また、落水期間中の土壌水分を測定するため2010年は5月11日および18日に、2011年は5月12日および20日に土壌を約30 g採取し、直ちに105°C24時間乾燥し土壌含水比（乾燥土壌当たりの水分含有率）を求めた。

## 4-2-2 結果

### 4-2-2-1 気象条件および土壌含水比

表4-2-1に月別の日平均気温、日射量および降水量を示した。2010年は5月の平均気温が平年より低かったが、その後は平年より高く推移し、記録的な猛暑となった。日射量は5月が平年並みであったが、その後は多く推移した。降水量は5月、7月および8月が少なかったが、6月および9月は多かった。2011年の平均気温および日射量は期間を通して平年より高かった。また、8月および9月の平均気温は2010年より低かった。降水量は5月および8月が平年より少なく、6月、7月および9月はやや多かった。

5月10日から6月10日までの平均気温、降水量および落水区の土壌含水比を図4-2-1に示した。2010年の落水期間の平均気温（5月12日～24日の平均気温）は16.0°C、降水量は3.8 mm 日<sup>-1</sup>で、落水区の土壌含水比は播種後7日目が87.8%まで低下したが、その後、断続的に降雨があった。2011年の落水期間の平均気温（5月13日～20日の平均気温）は16.9°C、降水量は0.3 mm 日<sup>-1</sup>で、落水区の土壌含水比は湛水直前の5月20日に52.0%まで低下した。

### 4-2-2-2 苗立ち

鉄コーティング種子の播種粒数を表4-2-2に示した。m<sup>2</sup>当たり播種粒数はFe条播区がFe点播区よりやや多かった。また、Fe点播区は直径約3 cmの円内に平均4.8～5.3粒播種された。苗立率を表4-2-3に示した。年次、播種様式および播種後の水管理による差は小さかったが、鉄コーティング種子の苗立率は過酸化カルシウムコーティング種子に比べ低い傾向がみられた。また、2010年の鉄コーティング種子の苗立率は落水区が湛水区よりも高い傾向がみられたが、2011年は落水管理による苗立率向上効果が認められなかった。点播区におけるm<sup>2</sup>当たり苗立数（表4-2-4）は、2010年は落水区が多い傾向がみられたが、2011年は同等であった。

#### 4-2-2-3 出穂期および成熟期の乾物重

出穂期および成熟期の地上部乾物重を表 4-2-5 に示した。分散分析の結果、出穂期の葉身乾物重および地上部乾物重には年次および水管理に有意差がみられ、2011 年が重く、落水区が重かった。葉身乾物重に水管理と播種様式に交互作用がみられ、CaO<sub>2</sub> 区は落水区の地上部乾物重が重く、Fe 条播や Fe 点播は水管理の差が小さかった。地上部乾物重に年次と水管理で交互作用がみられたが、両年とも落水区が重い傾向であった。成熟期の地上部乾物重に年次による有意差がみられ、2011 年が重かった。播種様式による有意差は認められなかった。

#### 4-2-2-4 倒伏程度および押し倒し抵抗値

倒伏程度を表 4-2-6 に示した。出穂後 25 日頃の 9 月 6 日（出穂期は 2010 年 8 月 15 日、2011 年 8 月 14 日）の倒伏程度は年次による有意差がみられ、2011 年が小さかった。成熟期の倒伏程度には有意差は認められなかった。また湛水管理より落水管理が、条播より点播の倒伏が軽い傾向がみられた。

地上部モーメント、押し倒し抵抗値および倒伏指数を表 4-2-7 に示した。どの倒伏関連形質にも播種様式による有意差がみられ、CaO<sub>2</sub> 区の地上部モーメントが大きく、押し倒し抵抗値も大きく、倒伏指数が小さかった。また、押し倒し抵抗値および倒伏指数に水管理による有意差がみられ、落水区の押し倒し抵抗値が大きく、倒伏指数が小さかった。

#### 4-2-2-5 収量・収量構成要素および整粒歩合

収量・収量構成要素および整粒歩合を表 4-2-8 に示した。収量に 5%水準で有意差はみられなかったが、水管理の違いでは落水区が湛水区に比べ 32 g m<sup>-2</sup> 多い 595 g m<sup>-2</sup> であった。播種様式の違いでは CaO<sub>2</sub> 区が最も多い 602 g m<sup>-2</sup> を示し、次いで Fe 点播区が 580 g m<sup>-2</sup> であり、Fe 条播区が 555 g m<sup>-2</sup> であった。穂数は播種様式に有意差がみられ、Fe 点播区、Fe 条播区、CaO<sub>2</sub> 区の順に多かった。一穂粒数は播種様式に有意差がみられ、CaO<sub>2</sub> 区が多かった。m<sup>2</sup> 当たり粒数に有意差は認められなかったが、CaO<sub>2</sub> 区、Fe 点播区、Fe 条播区の順に多かった。千粒重は年次および水管理に有意差がみられ、2011 年が重く、落水区が重かった。登熟歩合に有意差は認められなかった。

整粒歩合は年次に 1%水準で有意差がみられ、2010 年が 63.9%、2011 年が 75.4%であった。

#### 4-2-3 考察

鉄コーティング種子の苗立率に 2010 年は落水区が湛水区よりも高い傾向がみられたが、2011 年は落水管理による苗立率向上効果が認められなかった要因として、降雨が少なく、種子が乾きすぎた可能性がある。水稻湛水直播栽培において、播種後の水管理が生育に及

ばす影響について、落水管理によって初期の分けつ発生は旺盛となるが、幼穂形成期までの窒素吸収量が低下する事例（吉永ら 2000）がある。本節の結果、出穂期の葉身乾物重および地上部乾物重が落水区で多く、異なる結果となった。その要因として、地力の違いや播種時期が早いことによる地温の影響、さらに、本節では苗立数を揃えたことなどが考えられた。一方、コーティング資材と播種様式が生育に及ぼす影響について、寒冷地において条播した場合、鉄コーティング種子は過酸化カルシウムコーティング種子に比べ初期生育量が不足し、地上部乾物重、分けつ、LAI、窒素吸収量の増加が遅れる場合がある（古畑ら 2012）ことが報告されている。本節の結果では播種様式の違いによる乾物重への有意な差は認められず、Fe 点播区は CaO<sub>2</sub> 区並みの乾物重であった。その要因として、条播や点播は散播に比べ登熟期の稲体活力が高く維持され、乾物生産と登熟に有利であり、特に点播は移植並みの生育となることや（菊池ら 1999）、点播することにより受光態勢が改善された（金田・松橋 2000）ことが考えられる。

また、倒伏に及ぼす影響として、寺島ら（2003）は生育中期の落水により耐倒伏性が向上することを報告しており、その要因として、落水による根の発達および土壌硬度が高まり、株支持力を高める可能性を示唆している。本研究の第 2 章において播種後の落水管理においても、苗立期の根量が増加することが認められており、耐倒伏性の向上に対する生育中期の落水と同様の効果が播種後の落水でもみられた可能性がある。播種様式の違いでは散播に比べ点播の耐倒伏性が高いこと（吉永ら 2001）や、条播に比べ点播は押し倒し抵抗値が大きい（下坪・富樫 1996、尾形・松江 1998）こと、過酸化カルシウムコーティング直播栽培では条播に比べ点播は倒伏に強いこと（尾形・松江 1998）、播種深が浅いと倒伏しやすいこと（坂井・伊藤 1978、中村 1981）が報告されている。本節では、CaO<sub>2</sub> 区、Fe 点播区、Fe 条播区の順で押し倒し抵抗値が大きく、倒伏指数が小さかった（表 4-2-7）。そのため、鉄コーティング直播は過酸化カルシウムコーティング直播に比べ倒伏に注意する必要があるが、点播でやや押し倒し抵抗値が高まり倒伏が軽減される可能性がある。

播種後の水管理が収量に及ぼす影響について、落水処理によって増収する報告（高橋ら 1998）や、逆に、減収する報告（吉永ら 2000）がある。また、播種様式が収量に及ぼす影響として、九州地域では条播に比べ点播は倒伏に強いが収量は同等である（尾形・松江 1998）ことや、寒冷地では条播に比べ点播は屑米が多くなり減収する傾向があること（丹野ら 2007）が報告されている。しかし、いずれも過酸化カルシウムコーティング直播栽培の試験であり、鉄コーティング直播栽培での報告はない。また、寒冷地において条播した場合、鉄コーティング種子は過酸化カルシウムコーティング種子に比べ減収する場合がある（古畑ら 2012）ことが報告されている。本節の結果、落水区が湛水区に比べ収量が多い傾向がみられた（表 4-2-8）。収量構成要素をみると落水区の m<sup>2</sup> 当たり粒数が湛水区よりもやや多く、さらに、落水区の登熟歩合がやや高く、千粒重が有意に重くなっていた。その要因として落水区の出穂期の地上部乾物重が多いこと（表 4-2-5）や、倒伏程度が小さく推移した（表 4-2-6）ことにより登熟が良好となったためと考えられた。また、新潟農総研圃

場で慣行の移植栽培の収量は  $615 \text{ g m}^{-2}$  であり（新潟県農林水産部 2010, 2011），落水区の収量は移植栽培比 97% で，移植並みの収量が期待できると考えられた。

播種様式の違いが収量に及ぼす影響について，有意差は認められなかったが  $\text{CaO}_2$  区が最も多収であり，次いで Fe 点播，Fe 条播の順であった（表 4-2-8）。古畑ら（2012）は鉄コーティング直播栽培の初期生育が過酸化カルシウムコーティング直播栽培に比べ劣ることが，減収につながる可能性を示唆している。また，点播することにより，条播に比べ受光態勢が良好になる（吉永ら 1997a, 金田・松橋 2000）ことから鉄コーティング直播栽培では条播よりも点播で収量が高まる可能性が考えられた。

直播栽培は移植栽培に比べ出穂期が遅れ，登熟期の気温が低いことなどから整粒歩合は移植栽培に比べ高いことが報告されている（吉永ら 2012）。本試験の整粒歩合は 8 月が高温であった 2010 年（表 4-2-1）が低かったが，新潟農総研圃場で慣行の移植栽培の整粒歩合は 2010 年が 61.8%，2011 年が 66.9%（新潟県農林水産部 2011, 2012）であり，両年とも移植栽培より整粒歩合が高かった。近年，夏季の高温が米の白濁による品質低下を招いており，対策として移植時期を遅くして出穂期を遅らせ，高温登熟を避ける取組みがなされている（森田 2011）。直播栽培は移植に比べ一週間から 10 日程度出穂期が遅れるため，高品質米生産として有効な手段である。

#### 4-2-4 まとめ

水稻湛水直播栽培におけるコーティング資材，播種様式および播種後の水管理が生育および倒伏へ及ぼす影響について，鉄コーティング種子の条播と点播を過酸化カルシウムコーティング種子の条播と比較して検討した。その結果，水管理では出穂期の地上部乾物重は落水区が多かった。落水区は湛水区に比べ押し倒し抵抗値が大きく，倒伏指数が小さかった。また播種様式の違いでは Fe 条播区と Fe 点播区は  $\text{CaO}_2$  区に比べ押し倒し抵抗値が小さく，倒伏指数が大きくなった。そのため，鉄コーティング直播栽培は過酸化カルシウムコーティング直播栽培に比べ倒伏に弱い，落水管理により耐倒伏性が高まることが示唆された。

播種様式および播種後の水管理が収量に及ぼす影響について検討した結果，落水管理により，出穂期の地上部乾物重が増加し，また，耐倒伏性が向上するため登熟が良好となり，千粒重が高まり，収量も向上すると考えられた。さらに，鉄コーティング直播栽培の収量は過酸化カルシウムコーティング直播栽培よりやや低いが，鉄コーティング直播栽培では条播より点播の方が収量が高い傾向がみられた。

表 4-1-1 1999 年の 6 月から 9 月の月別気象概況.

	年次	6月	7月	8月	9月
平均気温 (°C)	1999	21.9	25.2	27.7	25.1
	平年	21.1	24.5	26.1	22.5
日射量 (MJ m <sup>-2</sup> 日 <sup>-1</sup> )	1999	15.2	16.7	18.0	12.3
	平年	15.7	15.8	17.5	12.0
降水量 (mm 日 <sup>-1</sup> )	1999	4.7	7.3	6.0	2.2
	平年	3.5	3.7	4.1	7.1

平年値は 1987-1998 年の平均.

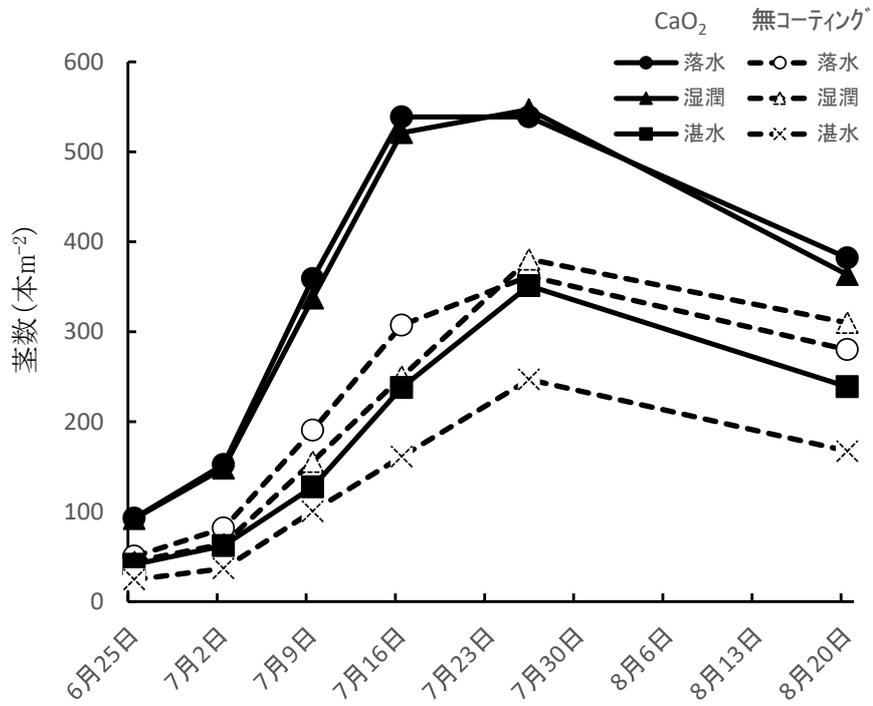


図 4-1-1 過酸化カルシウムコーティングおよび播種後の水管理が茎数に及ぼす影響 (播種深 8 mm 区).

表 4-1-2 過酸化カルシウムコーティング直播水稻の播種深および播種後の水管理が SPAD 値, 稈長および倒伏程度に及ぼす影響.

水管理	播種深 (mm)	出穂期 SPAD値	稈長 (cm)	倒伏程度	
				9月27日	10月4日
落水	0	29.5	89	3.0	3.0
	8	29.4	92	3.0	3.0
	16	29.9	101	3.0	3.0
湿潤	0	29.7	92	3.0	3.5
	8	29.8	94	3.5	3.5
	16	32.8	98	3.0	3.0
湛水	0	35.0	94	2.0	2.0
	8	33.2	101	3.5	4.0
	16	33.2	102	3.0	3.5
平均値	落水	29.6	96	3.0	3.0
	湿潤	30.8	95	3.2	3.3
	湛水	33.8	99	2.8	3.2
	0	31.4	92	2.7	2.8
	8	30.8	96	3.3	3.5
	16	32.0	100	3.0	3.2
分散分析	水管理	*	ns	ns	ns
	播種深	ns	*	ns	ns

\*は 5%水準で有意差あり, ns は有意差がないことを示す.

表 4-1-3 過酸化カルシウムコーティング直播水稻の播種深と播種後の水管理が苗立数，穂数および精玄米収量に及ぼす影響.

水管理	播種深 (mm)	苗立数 (本 m <sup>-2</sup> )	穂数 (本 m <sup>-2</sup> )	精玄米収量 (g m <sup>-2</sup> )
落水	0	42	336 abc	435 a
	8	49	408 a	487 a
	16	39	338 abc	384 a
湿潤	0	41	328 abc	470 a
	8	46	383 ab	473 a
	16	33	352 abc	554 a
湛水	0	8	93 d	119 b
	8	31	279 bc	398 a
	16	23	261 c	401 a
分散分析	水管理	-	**	**
	播種深	-	**	**
	交互作用	-	**	**

\*\*は 1%水準で有意差があることを示す.

同一英文字間には多重検定法 (Tukey) で差がないことを示す.

表 4-2-1 2010 年および 2011 年の 5 月から 9 月の月別気象概況.

	年次	5月	6月	7月	8月	9月
平均気温 (°C)	2010	15.7	21.8	26.0	28.4	23.0
	2011	16.5	21.6	26.4	26.5	22.3
	平年	16.0	20.3	24.2	25.4	21.4
日射量 (MJ m <sup>-2</sup> 日 <sup>-1</sup> )	2010	15.9	17.4	17.2	17.9	11.9
	2011	17.6	15.8	17.1	16.8	13.5
	平年	15.9	14.6	14.3	15.5	10.8
降水量 (mm 日 <sup>-1</sup> )	2010	3.1	6.3	3.4	1.3	14.6
	2011	3.7	9.4	12.4	2.0	7.0
	平年	4.1	5.1	7.1	5.4	6.3

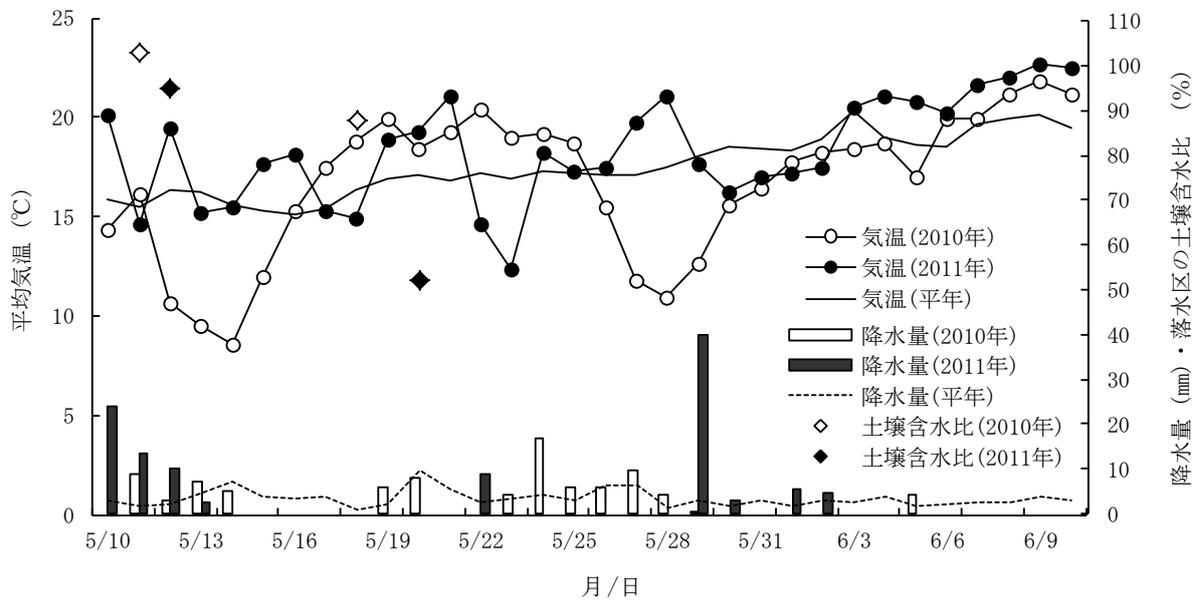


図 4-2-1 生育期間の気象条件.

播種日は 2010 年 5 月 11 日および 2011 年 5 月 12 日.

表 4-2-2 鉄コーティング条播および点播の播種粒数.

試験区	2010年		2011年	
	(粒 m <sup>-2</sup> )	(粒 株 <sup>-1</sup> )	(粒 m <sup>-2</sup> )	(粒 株 <sup>-1</sup> )
Fe条播	104.5±5.9	-	117.2±4.5	-
Fe点播	94.1±4.9	4.8±0.3	102.9±5.5	5.3±0.3

平均±標準誤差.

表 4-2-3 鉄コーティングおよび過酸化カルシウム  
コーティングの苗立率.

試験区		2010年 (%)	2011年 (%)
Fe条播	落水	62.0±3.3	57.5±4.0
	湛水	54.7±4.3	64.4±3.4
Fe点播	落水	63.9±5.3	62.3±3.6
	湛水	55.6±4.6	62.3±1.8
CaO <sub>2</sub>	落水	69.3±4.0	71.7±1.8
	湛水	70.0±2.0	71.1±1.3

平均±標準誤差.

表 4-2-4 鉄コーティング点播の苗立数.

試験区	2010年		2011年	
	(本 m <sup>-2</sup> )	(本 株 <sup>-1</sup> )	(本 m <sup>-2</sup> )	(本 株 <sup>-1</sup> )
落水	60.1±5.0	3.1±0.3	64.1±3.7	3.3±0.2
湛水	52.3±4.4	2.7±0.2	64.1±1.8	3.3±0.1

平均±標準誤差.

表 4-2-5 播種様式および播種後の水管理が地上部乾物重に及ぼす影響.

試験区		出穂期葉身重 (g m <sup>-2</sup> )		出穂期地上部重 (g m <sup>-2</sup> )		成熟期地上部重 (g m <sup>-2</sup> )	
		落水	湛水	落水	湛水	落水	湛水
2010年	Fe条播	198	210	930	851	1536	1340
	Fe点播	209	177	902	772	1444	1407
	CaO <sub>2</sub>	230	186	942	786	1533	1498
2011年	Fe条播	220	208	1001	960	1329	1293
	Fe点播	208	226	1044	1014	1436	1449
	CaO <sub>2</sub>	238	220	990	1012	1376	1401
平均值	2010	202		864		1380	
	2011	220		1004		1460	
	落水	217		968		1442	
	湛水	204		899		1398	
	Fe条播	209		935		1374	
	Fe点播	205		933		1434	
	CaO <sub>2</sub>	218		932		1452	
分散	年次 (A)	**		**		*	
分析	水管理 (B)	*		**		ns	
	播種様式 (C)	ns		ns		ns	
	A×B	ns		**		ns	
	A×C	ns		*		ns	
	B×C	*		ns		ns	

分散分析の\*, \*\*はそれぞれ 5%, 1%水準で有意差あり, ns は有意差なしを示す.

出穂期は 2010 年 8 月 15 日および 2011 年 8 月 14 日. 成熟期は両年とも 9 月 22 日.

表 4-2-6 播種様式および播種後の水管理が倒伏に及ぼす影響.

試験区		9月6日	成熟期
年次	2010年	2.6	4.6
	2011年	1.7	4.5
水管理	落水	2.0	4.4
	湛水	2.3	4.6
播種様式	Fe条播	2.3	4.7
	Fe点播	2.0	4.3
	CaO <sub>2</sub>	2.2	4.6
分散分析	年次 (A)	**	ns
	水管理 (B)	ns	ns
	播種様式 (C)	ns	ns
	A×B	ns	ns
	A×C	ns	ns
	B×C	ns	ns

倒伏程度は0（無）～5（甚）で観察調査.

分散分析の\*\*は1%水準で有意差あり, nsは有意差なしを示す.

成熟期は両年とも9月22日.

表 4-2-7 播種様式および播種後の水管理が倒伏関連形質に及ぼす影響.

試験区	地上部モーメント (cm g)		押し倒し抵抗値 (g 茎 <sup>-1</sup> )		倒伏指数		
	落水	湛水	落水	湛水	落水	湛水	
2010年	Fe条播	880	976	85.1	88.8	0.72	0.78
	Fe点播	874	899	92.4	83.5	0.62	0.72
	CaO <sub>2</sub>	1009	1047	108.8	124.1	0.67	0.59
2011年	Fe条播	954	876	97.1	63.3	0.70	0.99
	Fe点播	1052	900	87.7	79.1	0.83	0.77
	CaO <sub>2</sub>	1175	1058	131.9	92.7	0.62	0.78
平均値	2010年	947		97.1		0.68	
	2011年	1003		92.0		0.78	
	落水	991		100.5		0.69	
	湛水	959		88.5		0.77	
	Fe条播	922		83.6		0.79	
	Fe点播	931		85.7		0.74	
	CaO <sub>2</sub>	1072		114.4		0.66	
分散 分析	年次 (A)	ns		ns		**	
	水管理 (B)	ns		**		*	
	播種様式 (C)	**		**		**	
	A×B	**		**		ns	
	A×C	ns		ns		ns	
	B×C	ns		ns		ns	

分散分析の\*, \*\*はそれぞれ 5%, 1%水準で有意差あり, ns は有意差なしを示す.

表 4-2-8 播種様式および播種後の水管理が収量・収量構成要素および整粒歩合に及ぼす影響.

試験区	収量 (g m <sup>-2</sup> )		穂数 (本 m <sup>-2</sup> )		粒数 (粒 穂 <sup>-1</sup> ) (千粒 m <sup>-2</sup> )				登熟歩合 (%)		千粒重 (g)		整粒歩合 (%)		
	落水	湛水	落水	湛水	落水	湛水	落水	湛水	落水	湛水	落水	湛水	落水	湛水	
2010年	Fe条播	621	544	386	352	81	85	31.3	30.0	92.4	85.9	21.5	21.2	63.3	66.6
	Fe点播	575	553	367	361	83	84	30.5	30.3	88.4	86.4	21.3	21.2	64.2	60.2
	CaO <sub>2</sub>	643	615	378	344	86	91	32.7	31.4	90.9	91.5	21.7	21.4	63.3	65.7
2011年	Fe条播	545	509	343	363	84	78	28.8	28.3	85.6	83.9	22.0	21.5	75.5	76.0
	Fe点播	605	587	358	402	88	77	31.5	31.1	86.9	87.3	22.1	21.6	77.3	77.0
	CaO <sub>2</sub>	580	572	325	338	95	94	30.9	31.6	88.0	84.5	21.3	21.3	72.7	74.1
平均値	2010年	592		365		85		31.0		89.3		21.4		63.9	
	2011年	566		355		86		30.4		86.0		21.7		75.4	
	落水	595		360		86		31.0		88.7		21.7		69.4	
	湛水	563		360		85		30.5		86.6		21.4		69.9	
	Fe条播	555		361		82		29.6		87.0		21.6		70.4	
	Fe点播	580		372		83		30.8		87.3		21.6		69.7	
	CaO <sub>2</sub>	602		346		92		31.7		88.7		21.4		69.0	
	分散分析	年次 (A)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	*	**	**
	水管理 (B)	△	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	*	ns	ns	
	播種様式 (C)	ns	*	**	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
	A×B	ns	**	**	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
	A×C	△	*	△	△	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	*	**	
	B×C	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	

分散分析の△, \*, \*\*はそれぞれ 10%, 5%, 1%水準で有意差あり, ns は有意差なしを示す.

## 第5章

### 総合考察

日本の就農人口は減る傾向にあり、担い手不足と高齢化のため農地の集積が進み、一生産組織の圃場面積は拡大している（農林水産省 2016a）。さらに、米の消費量が減っている中、米価の下落も続いている（図 1-1）。そのため、持続可能な稲作栽培のためには省力・低コスト技術が必須であり、直播栽培技術について研究・普及がなされてきた。しかし、直播栽培面積は全水稻作付面積に対してわずか 2%程度にとどまっている（図 1-2）。直播栽培の普及を拒む原因として出芽・苗立ちの不安定と収量の不安定とがあげられ（農林水産省 2008b）、一般に直播栽培の収量は移植栽培に比べ約 1 割減収する（農林水産省 2008b）といわれている。そのため、生産コストを下げ生産者の所得向上のためには収量の確保が重要である。本研究では湛水直播水稻の播種後の水管理が出芽・苗立ち、初期生育および収量へ及ぼす影響を検討した。第 2～4 章で得られた結果を基に、種子コーティングの異なる湛水直播栽培における最適な水管理を含む栽培法を考察するとともに、落水管理の導入に伴う課題の検討を通して、今後の湛水直播栽培の技術開発の方向を展望する。

#### 5-1 水稻直播栽培における播種後の落水管理の効果

湛水直播栽培において、播種後の水管理は保温効果を期待して湛水管理することが長い間実施されていた（姫田ら 1999）が、播種後の落水管理が苗立ちを向上させることが報告された（大場 1997）。本研究でも気温に関係なく出芽・苗立ちの向上効果が確認され（図 2-2-1）、落水管理は湛水管理に比べ出芽率が約 18 ポイント向上し、さらに、浮き・転び苗や遅延苗が減少し、苗立率は約 37 ポイントの向上効果がみられた（表 2-1-1）。落水管理の苗立率向上は初期生育の促進に起因していると考えられる（古畑ら 2006）。そこで、落水出芽がどのような生理機構で初期生育を促進しているのかを検討した。その結果、落水管理は播種後、出芽期にかけて胚乳養分の利用を促進し（図 2-3-3）、根の生長を促進し（表 2-3-1）、出芽期後は出葉を促進し（表 2-3-1）、クロロフィルおよびタンパク質含量を増加させ（図 2-3-7, 2-3-8）、光合成を活発にし、茎葉の生長および乾物生産を高めることが明らかとなった。

湛水直播栽培の播種後の水管理と収量との関係では、落水管理によって増収する事例（高橋ら 1998）や減収する事例（吉永ら 2000）が報告されている。本研究の結果、落水区が湛水区に比べ収量が多くなる傾向がみられた（表 4-1-3, 4-2-8）。落水管理は湛水管理に比べ明らかに出芽・苗立ちを向上する効果があり、安定した苗立数により必要な生育量を確保しやすく、安定した収量の確保につながると考えられる。落水区は湛水区に比べ倒伏程度が小さかった（表 4-1-2）ため、登熟が向上し増収したと考えられた。さらに、苗立数が同じ場合でも播種後の落水管理は押し倒し抵抗値を大きくし（表 4-2-7）、耐倒伏性を高

めた。寺島ら（2003）は生育中期の落水により耐倒伏性が向上することを報告しており、その要因として、落水による根の発達および土壌硬度の増加により、株支持力が高まる可能性を示唆している。本研究において播種後の落水管理においても、苗立期の根量が増加することが認められており（表 2-1-2）、生育中期の落水と同様の耐倒伏性の向上効果が播種後の落水でもみられた可能性がある。倒伏しやすいコシヒカリでの湛水直播栽培において登熟向上による収量や品質の安定化にとって大きなメリットとなる。

落水管理の効果について、その初期生育促進や苗立ち向上の生理機構、および収量向上が明らかとなったことは、湛水直播栽培において播種後の落水管理を普及していく上で、よりの確に指導でき、湛水直播栽培における低コスト・省力化と安定収量確保に寄与するものである。

## 5-2 コーティングの違いによる湛水直播栽培法

表 5-1 に湛水直播栽培で用いる種子コーティングの状態について分類し、その特徴を示した。すなわち、催芽種子を播種する無コーティング直播栽培、過酸化カルシウムコーティング直播栽培および鉄コーティング直播栽培の 3 播種様式について、播種後の水管理を中心に最適な栽培管理方法を考察する。

### 5-2-1 無コーティング湛水直播栽培

欧米やオーストラリアでの水稻の湛水直播栽培は、無コーティング種子による直播栽培である。アメリカでは日本と違い播種時期の気温が高く、病虫害も少なく、また、用いる品種は直播条件下で選抜されたため発芽特性や耐倒伏性に優れた高い直播適性を有している。さらに、経営規模が大きく、省力化の必要性が高く、大型機械を効率的に利用できるため移植栽培よりも直播栽培が行われている。湛水直播栽培方法は整地した圃場に溝を付け、湛水した圃場に大量の催芽した種籾を湛水した圃場に小型飛行機などで散播する方法が一般的で、播種後も湛水状態を続ける（秋田 1995）。また、イタリアでは発芽特性や耐倒伏性に優れた高い直播適性を有している品種を高密度で播種している。しかし、日本の品種には欧米並みの高い直播特性を有している品種がないことや、種子の価格が高いこと、さらに鳥害の影響があることなどから、欧米のような直播方式をそのまま取り入れることは困難である（笹原・吉永 2014）。

日本での無コーティング湛水直播栽培を顧みると、1905年に種籾を一度に16株分播種できる蛸足式播種機の開発により北海道で飛躍的に直播面積が拡大したが、苗代技術の発達と収量の安定確保のため、その後は移植栽培体系にとって代わった（姫田 1993）。

催芽した種子を播種する無コーティング直播栽培のメリットはコーティング資材やコーティング作業が不要であること、催芽種子のため出芽が比較的早いことなどであり、デメリットは表面播種では鳥害に遭いやすいことや、土中に埋没すると出芽率が低下すること、そのため、播種量が多いことなどがあげられる。

本研究の結果、無コーティング種子の出芽に良好な条件は土壌表面播種で、播種後は落水管理することで湛水管理に比べ出芽率が約 24% 向上し、最終出芽率は 90% 以上で、苗立率も 85% 以上であった（表 2-1-1）。もし、8 mm 程度土中に埋没したとしても落水管理であれば約 63% の苗立率が得られ（表 2-1-1）、播種時の気温を考慮する必要があるが、無コーティング種子を用いた湛水土中直播栽培の可能性が見出された。直播栽培での目標苗立数は多くの地域で  $\text{m}^2$  当たり 70~100 本（水稻湛水直播研究会 2012）であり、苗立率 63~85% とすると必要な種子量は 10 a 当たり約 3 kg であり、移植栽培に必要な種子量と同等からやや多い程度と試算される。

近年、東北地域で無コーティング種子の代かき同時浅層土中播種栽培が試験され実証段階に入っている（東北農研 2018）。この播種方法は代かき直後に催芽種子を散播しローラーで鎮圧し、種子を土壌表面直下に埋没させる方法で、播種後の水管理は落水管理を基本としている。苗立率は平均で 65% 程度であり、収量も従来の直播と比べ同等以上であった（白土ら 2016）。

#### 5-2-2 過酸化カルシウムコーティング湛水直播栽培

直播栽培の出芽・苗立ちを向上するため、1977 年に過酸化カルシウムコーティング直播栽培が開発され、さらに、1997 年に播種後の落水管理による出芽・苗立ちへの効果について報告された。土中に播種された過酸化カルシウムコーティング種子は鞘葉の伸張と出芽を促進する（三石 1975）ことが知られている。一方、本研究の結果、湛水直播栽培では播種時の土壌条件や気象条件により播種深は変化しやすい。播種後の湛水管理では表面播種や播種深が深くなった場合、過酸化カルシウムコーティング種子でも苗立率が 50% 以下となり、不安定であるが、播種後の落水管理は播種深や過酸化カルシウムコーティングの有無にかかわらず出芽と苗立ちを向上させることが明らかとなった。本研究の結果、過酸化カルシウムコーティングは初期の出芽を促進し、播種後の落水管理は後半の出芽を促進し、苗立ちを向上させることが明らかとなった（図 2-1-2）。出芽率に対する過酸化カルシウムコーティングの効果は約 20 ポイントの向上効果があり、落水管理の効果も湛水管理に比べ約 20 ポイントの効果がみられた。苗立率に対しては過酸化カルシウムコーティングが約 24 ポイントの向上効果に対し、落水管理は約 37 ポイントの向上効果がみられた（表 2-1-1）。これらのことから、落水管理による生長促進機構は過酸化カルシウムコーティングと異なることが判明した。そのため、湛水直播栽培で出芽・苗立ちを向上させるには過酸化カルシウムのコーティングと播種後の落水管理で出芽させることの両方を行うことが重要であると言える。

落水管理では播種深の影響は比較的小さく、播種深に関係なく 70% 以上の安定した苗立率が得られる（表 2-1-1）。安定した苗立ち確保は収量の確保にもつながると考えられ、面積当たりの茎数が多く推移し（図 4-1-1）、穂数を十分確保できた（表 4-1-3）。さらに、落水管理は出穂期の地上部乾物重が大きく、また、浮き・転び苗が少ないことや土壌硬度が

増すことにより、湛水管理に比べ倒伏が軽減され（表 4-1-2）、受光態勢が良好となり、登熟期の乾物生産が高まる（表 4-2-5）と考えられた。これらのことから、過酸化カルシウムコーティング直播栽培において播種後の落水管理は出芽・苗立ちの向上による穂数確保と倒伏防止による登熟の良好により、安定多収につながると考えられた。

### 5-2-3 鉄コーティング直播栽培

近年、増加してきている鉄コーティング直播栽培（宮越 2011, 全農技術センター 2016）は過酸化カルシウムコーティング直播栽培に比べ資材費が安く、より低コストに稲作栽培が可能であると期待される技術である。表 5-1 に示したように、コーティング資材の過酸化カルシウムは水と反応すると酸素を発生するが、鉄コーティング直播栽培に使用される鉄粉は酸素を発生しない。一方、通常の播種深では過酸化カルシウムコーティング直播栽培は土中で種子が還元状態にさらされ、鉄コーティング直播栽培では土壌表面播種で酸化的な状態が出芽する。このように出芽時の環境条件が異なる鉄コーティング直播栽培においても播種後の落水管理による出芽・苗立ち向上効果があるのかは明らかにされていないため、播種後の水管理が出芽・苗立ちに及ぼす影響について明らかにし、鉄コーティング直播栽培における播種から苗立期の最適な管理方法を提案する。

本研究の結果、播種後の平均気温が高いほど苗立率が高く、平均気温に関係なく落水区の苗立率が湛水区に比べ高いことが認められ（図 3-1-1）、鉄コーティング直播栽培においても播種後の落水管理の効果があることが明らかとなった。一方、同じ圃場内で播種後の水管理を落水、湿潤、湛水とした区で調査した結果、出芽率は湿潤、落水、湛水の順で高く、落水よりも湿潤での出芽促進が認められた（図 3-2-2）。その要因として、落水区では籾水分が低い時期は出芽が抑えられていたが、籾水分の増加に伴い出芽が促進され、最終出芽率も高まった（図 3-3-1）ことから、土壌表面播種で籾が乾燥する状況においては、種子が発芽に必要な水分を十分吸水できるくらいの水分補給が必要であることが明らかとなった。一方、湛水区では土中播種において出芽率の低下が顕著であり、土中に埋没するような状態での湛水管理は出芽率を著しく低下させると考えられた（図 3-2-2）。また、鉄コーティング種子が土中に埋没した場合の出芽率の低下は過酸化カルシウムコーティング種子に比べ大きいことが明らかとなった。そのため、鉄 0.25 倍種子より比重が大きい鉄 0.5 倍種子は埋没による出芽率の低下が懸念された。さらに、鉄コーティング種子の初期生育は過酸化カルシウムコーティング種子に比べ劣るが、鉄コーティング種子においても落水管理による初期生育の促進効果があることが明らかとなった（表 3-4-1, 3-4-2）。

以上より、鉄コーティング直播栽培における出芽・苗立ちおよび初期生育促進のためには、気温が低い時期の早播きは避け、土中に種子が埋没しないよう播種床を軟らかくしすぎず、鉄コーティング量として比重の軽い乾籾重量の 0.25 倍の鉄コーティング種子を土壌表面に播種し、播種後の水管理は落水管理を基本とし、種子が乾燥しすぎる場合には、出芽に必要な水分を籾に補給する程度に適宜、灌漑して土壌表面を湿潤に保つことが重要で

あると考えられた。

一般的な鉄コーティング直播栽培における播種後の水管理は播種直後から約5日湛水し、その後、落水管理に移行し苗立ち後に再湛水する（近畿中国四国農業技術センター 2010）。この播種直後の湛水は主に種子の吸水と除草剤散布を目的に実施されている。播種後5日目の落水は初期生育促進効果がない（古畑ら 2005b）可能性がある。また、播種後の落水管理はイネの出葉を促進するため播種後早い時期から除草剤を散布でき、さらに、落水期間中のヒエの草丈も抑制されているため、湛水後ただちに除草剤を散布することにより、雑草防除が可能である（佐藤・東 2012）ことから、播種直後からの落水管理を提案する。

鉄コーティング種子は過酸化カルシウムコーティング種子に比べ減収する場合がある（古畑ら 2012）ことが報告されている。また、播種様式の違いが収量に及ぼす影響について、条播に比べ点播は倒伏に強いが収量は同等である（尾形・松江 1998）ことや、条播に比べ点播は屑米が多くなり減収する傾向がある（丹野ら 2007）ことが報告されている。本研究の結果、鉄コーティング種子の条播区、点播区および過酸化カルシウムコーティング種子の条播区で比較すると過酸化カルシウムコーティング種子が最も多収であり、初期生育が遅い鉄コーティング種子は過酸化カルシウムコーティング種子に比べ減収しやすいと考えられた。鉄コーティング直播の中では点播が条播に比べ多い傾向がみられた（表 4-2-8）。過酸化カルシウムコーティング直播栽培では条播に比べ点播は倒伏に強いことが報告されており（尾形・松江 1998）、本研究における鉄コーティング直播栽培においても、点播区の倒伏程度がやや小さい（表 4-2-6）ことが登熟期の受光態勢を良好にしたと考えられた。

以上から、鉄コーティング直播栽培の収量は過酸化カルシウムコーティング直播栽培に比べやや低下する傾向がみられたが、鉄コーティング直播栽培の安定収量確保のためには播種様式は点播とし、播種後の水管理は落水管理することが必要であると考えられた。本研究ではコシヒカリを中心に検討した。コシヒカリの欠点として倒伏しやすいことがあげられるが、播種後の落水管理と点播により耐倒伏性が向上することは、土壌表面播種となる鉄コーティング直播栽培を行う上で、重要なポイントである。

### 5-3 今後の展望

水稻湛水直播栽培における播種後の落水管理は苗立率を高め、また、収量の安定多収化に寄与することが明らかとなった。本研究ではコシヒカリを用いて試験を行ったが、耐倒伏性に優れる直播適性の高い品種が育成されてきている（農林水産省 2008b）。今後、播種後の落水管理がどの品種にも適応されるかの検討が必要である。落水管理の効果に品種間差があるのか、また、品種間差があった場合、どのような遺伝子によって差が生じているのかを解明することにより、落水出芽でより大きく効果が発揮される品種開発にも期待するところである。特に無コーティング種子や鉄コーティング種子は過酸化カルシウムコーティング種子に比べ初期生育が劣るため、出芽が速く、初期生育が旺盛な品種が望まれる。

また、湛水直播栽培では、雑草防除がキーポイントであり、直播栽培のイネは生育初期から雑草との厳しい競争下に置かれ、条件によっては大きな雑草害を受ける（森田 1997）。最近では落水状態で散布できる除草剤もあり（日本植物調節剤研究協会 2018）、今後、除草剤の散布時期や除草効果、薬害等について播種後の水管理との影響を検討し、播種後の落水管理の効果を最大限に引出す除草体系を構築する必要がある。

近年、労働力不足や生産者の高齢化により動力散布機を背負っての追肥作業は敬遠され、基肥と一緒に穂肥分も施用する全量基肥肥料のニーズが高まっている（農林水産省 2016b）ため、それぞれの品種において目標とする収量、品質、食味にみあった肥料溶出パターンや施肥量の検討が必要である。施肥後の灌漑時期は施肥の脱窒に関係し、水稻生育に影響を及ぼす（新潟県農林水産部 2016）ため、播種後の水管理の影響についても検討が必要である。

#### 5-4 まとめ

播種後の落水管理は播種深や過酸化カルシウムコーティングにかかわらず出芽と苗立ちを向上させることが明らかとなった。また、過酸化カルシウムコーティングが初期の出芽を促進し、落水管理は苗立ちを促進させることを示した。落水管理は生育速度を高め、出芽後の出葉を促し、茎葉のクロロフィルおよびタンパク質含量を増加させ、光合成を促進し、乾物生産を高めることで苗立ちを向上していることが明らかとなった。鉄コーティング種子においても落水管理による苗立ち向上効果が認められたが、過酸化カルシウムコーティング種子よりも土壌を湿潤に保つ必要があり、出芽に必要な水分を種子が吸水することにより出芽が向上すると考えられた。落水管理により、無コーティング種子での土中播種栽培の可能性も見出された。収量への影響については、落水管理により苗立ちが安定し、穂数を確保でき、さらに倒伏軽減効果がみられ、収量が向上した。また、近年、増加している鉄コーティング直播栽培は過酸化カルシウム直播栽培に比べ収量がやや低い傾向がみられたが、点播で播種し、播種後の落水管理することにより収量が向上する可能性が示された。今後は落水による効果への品種間差の確認や雑草防除、施肥法等について技術の体系化が必要である。

表 5-1 種子コーティングの違いによる分類と特徴.

	無コーティング	過酸化カルシウムコーティング	鉄コーティング
種子	催芽	催芽	浸種（活性化種子）
コーティング資材	不要	過酸化カルシウム（水と反応して酸素を発生）	鉄粉（比重が重いいため湛水中でも浮き・転び苗が少ない）
播種深	土壌表面直下	土中約 1 cm	土壌表面
播種様式	散播	条播	点播
播種後の水管理	落水	落水	落水（湿潤に保つ）
出芽	早い	早い	遅い
初期生育	やや早い	早い	遅い
倒伏	やや弱い	やや強い	やや弱い

## 摘要

直播栽培は育苗や田植えを必要としない。そのため、コスト削減や省力において最も効果的であると注目されている。しかし、直播栽培面積は水稲作付面積の約 2%に過ぎない。直播栽培面積の 71%を占める湛水直播栽培において苗立ちの不安定が最も普及を拒む制限要因となっている。過酸化カルシウムのコーティング種子を用いた湛水土壌中直播栽培において落水管理が湛水管理よりも苗立ちを向上する報告があるが、圃場条件下における苗の生長への効果は解明されていない。

そこで、播種後の水管理条件が湛水直播水稲の出芽苗立ちに及ぼす影響について、過酸化カルシウムコーティング種子に播種深を組み合わせることで検討したところ、播種後の落水管理は湛水管理と比較して初期の出芽にはほとんど影響を及ぼさなかったが、落水管理は過酸化カルシウムの種子コーティングの有無や播種深を問わず湛水管理より後半の出芽を増加させた。また、落水管理は浮き苗や転び苗、遅延苗が湛水管理と比較して少なく、落水管理ではとくに表面播種の場合に苗立率が高かった。さらに、過酸化カルシウムコーティング種子を土壌中に播種した場合、落水管理の苗立期における植物体の乾物重は湛水管理に比較して明らかに大きかった。以上のことから過酸化カルシウムの種子コーティングは出芽を促進する効果が大きく、播種後の落水管理は苗立ちを向上する効果が大きいものと考えられ、落水管理の生長促進の生理機構は過酸化カルシウムの種子コーティングと異なることが明らかとなった。

そこで、播種後の落水管理が出芽・苗立期の水稲の生長と部位別乾物重に及ぼす影響を調べたところ、落水管理は出芽期の根の伸張を促進するが、茎葉の生長をむしろ抑制した。また、落水管理は出芽後の葉の発達と茎葉の伸長を促進するが、同期間の根の生長に及ぼす影響は比較的小さかった。落水管理の水稲は湛水管理と比較して籾の乾物重の減少速度と茎葉および根の乾物重の増加速度が大きかったが、胚乳養分が茎葉および根の生長に利用される転換効率は両区ともほぼ同等であった。生長解析の結果、出芽期における落水管理と湛水管理の生長速度の差異は籾からの養分供給量に、出芽後の両区の生長速度の差異は光合成による炭水化物供給量に基づくことが判明した。さらに、出芽期における落水管理の茎葉の糖含量は湛水管理よりもむしろ低いが、出芽後における落水管理の茎葉のクロロフィルおよびタンパク質含量は湛水管理より明らかに高いことが認められた。これらのことから、播種後の落水管理は湛水直播水稲の葉の発達を促進し、茎葉のクロロフィルおよびタンパク質含量を増加させ、光合成速度を高めることによって出芽後の乾物生産を向上させると考えられた。

近年、栽培面積が増加してきている鉄コーティング湛水直播栽培の出芽・苗立ちに及ぼす鉄コーティング量、播種深および播種後の水管理の影響を調査した。圃場における出芽・苗立ちを調査した結果、播種後の気温と水管理が出芽・苗立ちに影響することが示された。また、鉄コーティング量を乾籾の 0.25 倍と 0.5 倍、播種後の水管理を落水、湿潤、湛水に

変え、過酸化カルシウムコーティング種子を比較として専用直播機で播種したところ、苗立率は鉄 0.5 倍コーティング種子より鉄 0.25 倍コーティング種子および過酸化カルシウムコーティング種子が、また、水管理では湿潤管理が高く、湛水管理が低く、落水管理は湿潤管理よりわずかに低かった。さらに、播種深を表面播種と土中播種に変えた場合には、鉄コーティング種子は過酸化カルシウムコーティング種子に比べ土中播種した場合の苗立率の低下が大きかった。落水管理の出芽の遅れについて調査した結果、播種後、落水管理の種子水分が低く推移し出芽が遅れたが、灌漑による種子の水分含量の増加とともに出芽率が高まったことから、鉄コーティング直播栽培は過酸化カルシウムコーティング直播栽培に比べ播種後の土壌水分を湿潤に保つ必要があると考えられた。以上のことから鉄コーティング直播栽培において苗立率を高めるためには、鉄 0.25 倍種子を土壌表面に播種し、播種後の水管理は落水管理を基本とし、適宜、灌漑して出芽に必要な水分を種子が吸水させることが重要と考えられた。

過酸化カルシウムコーティング直播栽培における播種後の水管理が生育および収量に及ぼす影響について検討した結果、収量は落水管理が湛水管理に比べ同等か、やや高い傾向があり、とくに表面播種の湛水管理は苗立率が低下し、穂数が減少し収量が低下した。また、過酸化カルシウムコーティング種子の条播と鉄コーティング湛水直播の条播および点播、播種後の水管理を湛水管理と落水管理として検討したところ、播種様式が収量に及ぼす有意な影響は認められなかったが、鉄コーティング直播栽培は過酸化カルシウムコーティング直播栽培に比べやや減収する傾向がみられ、鉄コーティング直播栽培では点播が条播に比べ収量が高まる傾向がみられた。水管理の違いでは、播種後の落水管理は湛水管理より収量が多い傾向がみられ、その要因として押し倒し抵抗値が大きく、倒伏指数が小さいため倒伏程度が小さく、その結果、登熟が良好となり収量が増加したと考えられた。以上より、播種後の落水管理は湛水管理に比べ苗立数が高まり、安定した穂数を確保でき、さらに、耐倒伏性が増すことにより、登熟が良好となり収量が高まると考えられた。また、鉄コーティング直播栽培の収量は過酸化カルシウムコーティング直播栽培に比べやや減収する傾向がみられたが、点播で播種することで収量が高まる可能性が示唆された。

## 謝辞

本研究の遂行および本論文の取りまとめに当って終始御懇篤な御指導を賜った筑波大学生命環境系教授丸山幸夫博士に深謝の意を表します。筑波大学大学院生命環境科学研究科生物圏資源科学専攻村中聡准教授（国立研究開発法人国際農林水産業研究センター）、同先端農業技術科学専攻松井勝弘准教授（国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構次世代作物開発研究センター）、筑波大学生命環境系加藤盛夫助教には本論文のとりまとめに当たり有意義な示唆をいただき、御校閲の労をとっていただきました。謹んで御礼申し上げます。本研究の計画および遂行に当って御懇切な御指導を賜った有坂通展新潟県農業総合研究所作物研究センター長、原澤良栄新潟県農業総合研究所長、田村良浩新潟県農業総合研究所副所長、長澤裕滋元新潟県農業総合研究所作物研究センター長に謹んで深謝いたします。さらに本研究の計画および実施に当たって、多大なる御支援、御指導をいただいた宮越疆元新潟県農林水産部経営普及課長、植木一久元新潟県農林水産部経営普及課長、星豊一元新潟県農業総合研究所長、種田貞義元新潟県農業総合研究所作物研究センター長、斎藤祐幸元新潟県農業総合研究所基盤研究部長に深く感謝申し上げます。また、本研究の実施にあたり、常日頃より御支援、御協力を賜った市川岳史柏崎農業普及指導センター参事、東聡志新潟県農業総合研究所作物研究センター栽培科専門研究員に深く御礼申しあげるとともに、圃場作業に御協力いただいた新潟県農業総合研究所作物研究センターの技術員、生育調査および収量調査に御協力いただいた非常勤職員の方々、並びに常に有意義な助言をいただいた作物研究センター研究員諸氏に心より感謝申し上げます。

## 引用文献

- 阿部聖一 2011. 新潟県における鉄コーティング湛水直播栽培の普及状況. 夢農業 東日本版 22:5-6.
- 秋田重誠 1995. 1. アメリカ合衆国における省力大規模直播栽培の技術的特徴. 直播稲作への挑戦 第3巻 新しい日本型直播稲作の戦略. 農林水産水産技術協会. 東京:83-92.
- Arnon, D. I. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. Plant Physiol. 24:1-15.
- Barbier, J.M., Mouret, J.C. and Stutterheim, N. 1991. Germination and Crop establishment of direct seeded rice in the south of France. In Direct Seeded Flooded Rice in the Tropics. International Rice Research Institute, Manila. 103-104.
- Bergmeyer, H.U. and Bernt, E. 1974. Sucrose. Sucrose. In H. U. Bergmeyer ed. Methods in Enzymatic Analysis. Vol. 3, 2nd ed. Academic Press, New York. 1176-1179.
- De Datta, S.K. 1986. Technology development and the spread of direct-seeded flooded rice in southeast Asia. Exp. Agric. 22:417-426.
- Ding, Y. and Maruyama, S. 2004. Proteins and carbohydrates in developing rice panicles with different numbers of spikelets. — Effect of cultivars nitrogen topdressing —. Plant Plod. Sci. 7:16-21.
- 古畑昌巳・楠田幸・三原実 1998. 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. 日作紀 67 (別 1):256-257.
- 古畑昌巳・楠田幸・福寫陽 2005a. 落水処理による土壌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.
- 古畑昌巳・楠田幸・福寫陽 2005b. 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.
- 古畑昌巳・岩城雄飛・有馬進 2006. 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.

- 古畑昌巳 2009a. 湛水直播水稻の出芽・苗立ち向上にむけて. 日作紀 78:153-162.
- 古畑昌巳・帖佐直・松村修・湯川智行 2009b. 鉄資材のコーティングが湛水直播水稻の出芽・苗立ちに及ぼす影響—酸素発生剤との比較—. 日作紀 78:170-179.
- 古畑昌巳・帖佐直・大角壮弘・松村修 2012. 寒冷地における酸化鉄コーティング種子を利用した湛水直播水稻栽培の出芽・苗立ち, 乾物生産および収量特性. 日作紀 81:33-38.
- 萩原素之・井村光夫・三石昭三 1987. 湛水土壌中に播種した水稻種籾近傍の酸化還元状態. 日作紀 56:356-362.
- 萩原素之・井村光夫・三石昭三 1990. 酸素発生剤をコーティングした水稻種籾の近傍で起こる局所的土壌還元と発芽・出芽との関係. 日作紀 59:56-62.
- 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.
- 濱村謙史朗 2014. 新たに直播水稻への適応が可能となった除草剤. 水稻直播研究会誌 37:29-40.
- 姫田正美 1993. 第5節 田植労働からの解放を目指して—直播栽培—. 昭和農業技術発達史 第2巻水田作編. 農文協. 東京:146-155.
- 姫田正美 1995. 直播稲作への挑戦 第1巻 直播稲作研究四半世紀のあゆみ 第2章 湛水直播栽培. 農林水産技術情報協会. 東京:123-256.
- 姫田正美・今井秀昭・井村光夫 1999. コシヒカリの直播栽培. 農文協. 東京. 1-220.
- 北陸農政局 2018. 水稻直播栽培の分類と特徴  
<http://www.maff.go.jp/hokuriku/seisan/supply/zikamaki051.html> (2018/12/5 閲覧).
- 井村光夫 1986. イネおよび数種イネ科作物におけるメソコチルの維管束系に関する解剖学的研究. 石川農短大特報 17:1-50.

椛木信幸・金忠男 1991. 水稻の高密度散播直播栽培における生育制御. 北陸農業試験場報告 33:55-81.

金田吉弘・松橋秀男 2000. 多粒点播による乾田土中早期湛水直播栽培. 第3報 点播水稻の登熟特性. 東北農業研究 53:49-50.

菊池栄一・大江栄悦・中山芳明 1999. 水稻湛水直播栽培における播種様式別生育特性. 日作東北支部報 42:19-20.

近畿中国四国農業技術センター 2010. 鉄コーティング湛水直播マニュアル:1-28.

Lowry, O. H., Resebrough, N. J., Farr, A. L. and Randall, R. J. 1951. Protein measurement with the Folin phenol reagent. J. Biol. Chem. 193:265-275.

丸山幸夫・田嶋公一 1986. イネ品種の幼植物生長の温度反応. 日作紀 55:68-70.

Maruyama, S. Yatomi, Y. and Nakamura, Y. 1990. Response of rice leaves to low temperature. I. Changes in basic biochemical parameters. Plant Cell Physiol. 31:303-309.

丸山幸夫 1997. 日本型直播稲作の確立・普及に向けて. 技術と普及:30-33.

丸山幸夫 2006. 直播栽培技術の開発状況と技術的問題点. 農業技術 61:488-492.

松村修・古畑昌巳 2007. 鉄・過酸化石灰混合粉衣が直播水稻の鳥害と生育に及ぼす影響. 日作紀 76 (別2) :8-9.

三石昭三 1975. 水稻の湛水直播における土壌中埋没播種に関する作物学的研究. 石川農短大特報 4:1-59.

三石昭三・中村善彰 1977. 水稻の湛水土壌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.

宮越疆 2011. 水稻鉄コーティング直播栽培の機械化と普及. 日作紀 80 (別1):500-501.

水沢誠一 2009. 新潟県における水稻の鉄コーティング湛水直播栽培の普及状況. グリーン

レポート 482:6-7.

森田弘彦 1997. 雑草防除技術 水稲直播栽培における雑草防除の現状と問題点. 日本型直播稲作導入指針 (農林水産省農業研究センター):183-188.

森田敏 2011. イネの高温障害と対策. 農文協. 東京.

中村善彰 1981. 水稲の湛水土壌中直播機の開発に関する研究—適正播種深度と稲の生育—. 農業機械学会誌 43:203-209.

日本植物調節剤研究協会 2018. 技術情報 直播水稲表面播種 (鉄コーティング種子) にて実用性が確認された薬剤・平成 30 年 1 月現在. <http://www.japr.or.jp/gijyutu/014.html> (2018. 12. 26 閲覧).

新潟県農林水産部 2011. 平成 22 年度水稲気象感応生育調査結果 (作物研究センター). 平成 22 年度稲作概況と課題: 81-84.

新潟県農林水産部 2012. 平成 23 年度水稲気象感応生育調査結果 (作物研究センター). 平成 23 年度稲作概況と課題: 103-106.

新潟県農林水産部 2016. コシヒカリの初期生育を改善する有機入り肥料の基肥施用時期. 平成 28 年度新潟県農林水産業研究成果集:1-2.

農林水産省生産局 2008a. “米の直播技術等の現状”. [http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/zikamaki/z\\_genzyo/pdf/k\\_zikamaki.pdf](http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/zikamaki/z_genzyo/pdf/k_zikamaki.pdf) (2018/12/28 閲覧).

農林水産省生産局農産振興課 2008b. “水稲直播栽培の現状について”. [http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/zikamaki/z\\_genzyo/pdf/all.pdf](http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/zikamaki/z_genzyo/pdf/all.pdf) (2018/11/5 閲覧).

農林水産省大臣官房統計部 2016a. “農林水産統計 2015 年農林業センサス結果の概要”. [http://www.maff.go.jp/j/tokei/census/afc/2015/pdf/census\\_15k\\_20160427.pdf](http://www.maff.go.jp/j/tokei/census/afc/2015/pdf/census_15k_20160427.pdf) (2018/11/29 閲覧).

農林水産省生産局技術普及課 2016b. “水稲向け肥料調節型肥料について”. <http://www.maff.go.jp/j/seisan/sizai/pdf/matome.pdf> (2018/12/24 閲覧).

農林水産省大臣官房統計部 2017. “平成 28 年 農業総産出額及び生産農業所得(全国)” . <http://www.maff.go.jp/j/press/tokei/keikou/attach/pdf/171226-1.pdf> (2018/11/29 閲覧).

農林水産省 2018a. “米をめぐる関係資料” . [http://www.maff.go.jp/j/seisan/kikaku/attach/pdf/kome\\_siryou-171.pdf](http://www.maff.go.jp/j/seisan/kikaku/attach/pdf/kome_siryou-171.pdf) (2018/12/5 閲覧)

農林水産省 2018b. “最新の直播の状況 (28 年産)” . [http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/zikamaki/z\\_genzyo/attach/pdf/index-5.pdf](http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/zikamaki/z_genzyo/attach/pdf/index-5.pdf) (2018/11/5 閲覧).

農林水産省農業研究センター 1997. 日本型直播稲作導入指針. I. 地域に適した直播稲作の選択. 1-45.

尾形武文・松江勇次 1998. 北部九州における水稲湛水直播栽培に関する研究—苗立ち密度ならびに播種様式が水稲の生育, 収量および米の食味特性に及ぼす影響—. 日作紀 67 (4):485-491.

太田保夫・中山正義 1970. 湛水条件における水稲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.

大場茂明 1994. 無人ヘリによる水稲湛水土壌中直播栽培と雑草防除. 今月の農業 5:30-34.

大場茂明 1997. 落水出芽法の由来. 農業技術 52:33-34.

坂井定義・伊藤延久 1978. 水稲湛水散播栽培に関する研究 第 2 報  $\text{CaO}_2$  粉衣種子の埋没による倒伏防止方策. 日作九州支部会報 (44):25-26.

笹原和哉・吉永悟志 2014. イタリアに学ぶ高密度直播栽培の効果. 農業経営者 6月号:36-39.

佐々木良治・山口弘道・松葉捷也 1999. イネの最大分げつ力からみた散播直播水稲の限界苗立密度. 日作紀 68:10-15.

佐藤徹・東聡志 2012. 水稲直播栽培における播種後の水管理がノビエの生育に及ぼす影響. 北陸作物学会報 47:23-25.

佐藤徹 2013. 新潟県における鉄コーティング直播栽培普及拡大への研究成果. 水稲鉄コーティング直播栽培普及拡大フォーラム in 新潟:14-27.

佐藤勉 1973. 過酸化石灰による湛水直播水稲の出芽苗立安定化に関する研究 第2報 過酸化石灰粉衣種子の埋没による出芽性と倒伏抵抗性向上について. 北陸作物学会報 8:8-9.

佐藤勉・畠山武・中谷治夫 1974. 水稲の埋没直播栽培に関する研究. 第1報  $\text{CaO}_2$  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.

澤村篤・松村修 1992. 水稲直播栽培のための作業技術研究の最近の動向. 農業技術 47 (9) :391-395.

下坪訓次・富樫辰志 1996. 水稲の代かき同時土中直播栽培の確立に関する研究 2. 点播水稲と条播水稲の押倒し抵抗の比較. 日作紀 65 (別1) :14-15.

白土宏之・安藤正・浅野目謙之・松田晃・川名義明・片平光彦・小野洋・菅原金一・伊藤景子・大平陽一・山口弘道 2016. 寒冷地の現地圃場における水稲の無コーティング催芽種子を用いた代かき同時浅層土中直播の作業性, 苗立および収量. 日作紀 85:178-187.

水稲湛水直播研究会 2012. 水稲湛水直播栽培の手引き. [http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/zikamaki/z\\_kenkyu\\_kai/pdf/24chokuha.pdf](http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/zikamaki/z_kenkyu_kai/pdf/24chokuha.pdf) (2018/12/21 閲覧).

高橋久光・増岡彩子・太田保夫 1998. 湛水土壌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.

Tanaka, A. and Yamaguchi, J. 1968. The growth efficiency in relation to the growth of the rice plant. Soil Sci. Plant Nutr. 14:110-116.

田中英彦 2000. 湛水直播栽培技術 (1) 出芽・苗立ち安定化技術. 北農 67:132-134.

丹野久・相川州宗・山崎信弘・森脇良三郎・天野高久 2007. 寒地における水稲の湛水土中直播栽培の播種様式が収量に及ぼす影響. 日作紀 76:586-590.

寺島一男・秋田重誠・酒井長雄 1992. 直播水稲の耐倒伏性に関与する生理生態的形質 第1報 押し倒し抵抗測定による耐ころび型倒伏性の品種間比較. 日作紀 61:380-387.

寺島一男・酒井究・椛木信幸 2002. 直播水稻における一株の生育量と耐ころび型倒伏性との関係. 日作紀 71:161-168.

寺島一男・谷口岳志・荻原均・梅本貴之 2003. 水管理条件が湛水直播水稻の耐ころび型倒伏性と収量に及ぼす影響. 日作紀 72:275-281.

東北農業技術センター・山形県農業総合研究センター・山形大学・(株)石井製作所 2018. 水稻無コーティング種子の代かき同時浅層土中播種栽培マニュアル (ver. 3).

[http://www.naro.affrc.go.jp/publicity\\_report/publication/files/NonCoatedRiceSeed180228v3.pdf](http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/files/NonCoatedRiceSeed180228v3.pdf) (2018/12/21 閲覧).

梅本雅 2005. 稲作機械技術の展開と課題ー新たな移植技術と直播を中心としてー. 食農と環境 2:62-71.

鷺尾養 1989. 水稻湛水土壌中直播栽培における最近の動向 (1) 栽培技術の成立経過と現状. 農業技術 44 (4):6-9.

鷺尾養 1999. I 直播栽培の意義と現状. (社) 農業改良資金協会設立 30 周年記念 直播稲作技術. 35-39.

Whalley, R. D. B., Mckell, C. M. and Green, L. R. 1966. Seedling vigor and the early nonphotosynthetic stage of seedling growth in grasses. *Crop Sci.* 6:147-150.

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.

Yamada, N. 1954. Auxin relationships of the rice coleoptile. *Plant Physiol.* 29:92-96.

山本真之・貝淵由紀子 2009. 湛水播種後の落水時期および再かん水時期が鉄コーティング種子の発芽・苗立ちに及ぼす影響. 日作紀 78 (別 1) :108-109.

Yamauchi, M., and Chuong, P.V. 1995. Rice seedling establishment as affected by cultivar, seed coating with calcium peroxide and water level. *Field Crops Res.* 41:123-134.

山内稔 2003. 鉄コーティング直播栽培の概要. 日作紀 72 (別 1):4-5.

山内稔 2004. 水稻の鉄コーティング湛水直播. 農及園 80:947-953.

山内稔 2005. 浮き苗と鳥害を防ぎ, いつでもまける鉄コーティング種子. 「農業技術体系作物編 2 イネ. 基礎技術編」追録 27 号:技 402 の 1 の 7:2-8.

柳瀬満・林征三・川口祐男・高橋渉 1992. 水稻の湛水土中散播直播栽培における苗立密度が生育ならびに耐倒伏性に及ぼす影響. 北陸作物学会報 27:28-30.

Yoshida, S. 1973. Effects of temperature on growth of the rice plant (*Oryza sativa* L.) in a controlled environment. Soil Sci. Plant Nutr. 19:299-310.

吉永悟志・下坪訓次・富樫辰志 1997. 水稻の代かき同時土中直播栽培の確立に関する研究. 3. 点播水稻の生育特性. 日作紀 66 (別 1) :14-15.

吉永悟志・富樫辰志・脇本賢三・下坪訓次 1997. 水稻の代かき同時土中直播栽培の確立に関する研究. 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.

吉永悟志・西田瑞彦・脇本賢三・田坂幸平・松島憲一・富樫辰志・下坪訓次 2000. 湛水直播栽培における播種後の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.

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—播種様式および苗立ち密度が耐倒伏性に及ぼす影響—. 日作紀 70 :186-193.

吉永悟志・長田健二・白土宏之・福田あかり 2012. 寒冷地の水稻湛水直播栽培における品質関連形質の特徴とその変動要因. 日作紀 81 :432-440.

全農技術センター 2016. 全国 15 か所の大規模実証圃における鉄コーティング水稻直播の導入効果. グリーンレポートNo.561 :18-19.