

水稻代かき同時浅層土中播種栽培における
根出し種子の苗立ちおよび保存に関する研究
Studies on Seedling Establishment and Storage of Root-elongated
seeds in Direct-Seeded Rice with a Puddling Seeder.

2023年3月

伊藤 景子

Keiko Ito

目次

第1章 緒言	
1-1 研究の背景	1
1-2 研究の目的と構成	3
第2章 代かき同時浅層土中播種における苗立ち向上技術の開発	
2-1 はじめに	7
2-2 材料および方法	
1) 試験1 種子処理方法の検討 (室内試験)	7
2) 試験2 根出し処理の有効性 (圃場試験)	8
3) 統計処理	9
2-3 結果	9
2-4 考察	10
第3章 現地圃場における根出し種子の苗立率と初期生育の向上	
3-1 はじめに	17
3-2 材料および方法	
1) 種子処理	17
2) 栽培管理	18
3) 調査方法	18
4) 統計処理	19
3-3 結果	19
3-4 考察	20
第4章 根出し種子の保存方法と保存可能期間の検討	
4-1 はじめに	26
4-2 材料および方法	
1) 試験1 長期保存を想定した低温保存温度の検討 (室内試験)	27
2) 試験2 常温および低温保存期間の検討 (圃場試験)	28
3) 統計処理	28
4-3 結果	28
4-4 考察	29
第5章 総合考察	35
5-1 根出し種子の苗立ち向上要因	36
5-2 根出し種子の作製方法および播種時の留意点	36
5-3 根出し種子の利用と留意点	37
5-4 今後の展望	38
第6章 謝辞	42
引用文献	43

第1章 緒言

1-1 研究の背景

我が国における水稻栽培は、経営体数の減少により 2000 年以降 1 経営体当たりの耕地面積は増加傾向にある (図 1-1)。このような耕地面積の増加により、圃場準備や播種、移植、収穫等の作業集中や、機械設備不足、人員不足等が深刻な問題となっている。さらに 2021 年 4 月以降、水稻生産に係る肥料や農業薬剤、光熱動力、農機具、農用被覆等の価格は上昇傾向 (農林水産省 農業物価統計調査 速報値) にあり、耕地面積の増加に伴う生産資材量やコストの増加も深刻な問題となっている。

このような問題を解決する手段の一つとして、直播栽培への関心が高まっている。直播栽培は機械移植栽培とは異なり、育苗や移植作業、またそれらに係る生産資材や機械、労働力が不要であり、省力低コスト生産が可能な技術といえる。さらに、直播栽培は移植栽培と播種時期や収穫時期が異なるため、移植栽培と組み合わせることで作業分散が可能となる。このようなことから、全国の直播栽培面積は 1996 年以降増加傾向にあり、2010 年から 2020 年の 10 年間では 1.6 倍に増加した (農林水産省 2010、2020)。

直播栽培は、水田に水を入れる前に播種する乾田直播栽培と水を入れた後播種する湛水直播栽培に分けられる。中でも湛水直播栽培は、播種までの圃場準備や出芽・苗立ち後の圃場管理、病虫害防除において移植栽培と類似した栽培体系であることから、生産者が取り組みやすく、全国における栽培面積は 2010 年から 2020 年の 10 年間で 1.5 倍に増加した (農林水産省 2010、2020)。今後、新たに湛水直播栽培は移植栽培から転換する生産者の間で普及が進むものと予想される。

湛水直播栽培は、種子を代かき後の圃場に直接播種する。播種後の種子は、湛水または落水条件において出芽するが、移植栽培に比べ出芽環境を制御しにくく、圃場全体の出芽や苗立ちは温度 (Yoshida 1973) や気温 (渡部 1990) と、水管理の影響を受けやすい。特に、落水時に土壤硬度が柔らかい箇所では、種子がより沈下しやすく、種子は酸素不足により出芽が遅れ、苗立ち不良や生育が遅延 (寺中・黒澤 1969、花見・阿部 1984、荒川・高橋 1998) する。一方で、土壤が固く、種子が表面に露出した場合では酸素不足の影響は受けにくいものの、気温や水分の変化、スズメやカラスなどの鳥害 (酒井ら 1999、佐藤・東 2003) の影響を受けやすくなる。このような種子の露出による悪影響を回避するためには、播種後の水管理を湛水とする方法が有効な場合がある。しかし、露出した種子は出芽後発根時に浮力がかかり、幼根が土壤中に侵入できず浮き苗や転び苗になりやすい (三石 1982)。浮き苗や転び苗になった種子は土壤定着が不安定のため、入排水や降雨、風等により流され、苗立ちが不均一となるだけでなく、分けつ数の減少や乾物重の低下 (周ら 1999)、転び型倒伏 (三石 1982) の要因ともなる。このほかにも、湛水直播栽培の出芽時には、土壤中の還元生成物である硫化物や二価鉄、酪酸 (Hagiwara and Imura 1993、Hara 2013) の発生や Pythium 属菌 (松浦ら 2012、田中ら 2016) 等の土壤病菌が活発化することに加え、種子近傍の還元が進行することが出芽率低下 (萩原ら 1986、萩原・井上 1999) の要因となり湛水直播栽培の苗立ちに大きな影響を与えることが報告されている。さらに、出芽後の幼苗を食害する害虫や水生生物等の悪影響 (山崎・青山

1987、村岡ら 1997、和田ら 1999、山本ら 2011) も加わり、湛水直播栽培における苗立ちは不安定になりやすい。直播水稻の苗立率や苗立ち数は、大幅に低下した場合、生育むらや雑草害を助長させるだけでなく収量にも影響を及ぼす(牧山・山路 1997a)。収量安定化のための苗立ち数は、100~300 個体 m^2 (山内 1997) が必要とされており、安定的な苗立ち数の確保のために、播種早限温度(三石・井村 1982、高橋ら 1997、三浦・若林 2006、中林ら 2007) や、作付け品種等様々な検討がされてきた。

そのなかで、これまで湛水直播栽培の苗立ち安定化のために種子にコーティングを施す技術が開発され、現在各地で普及が進んでいる。過酸化石灰資材をコーティングした種子では、出芽時の酸素不足を種子表面の酸化剤が補うため生長が促進(山田 1952、太田・中山 1970、Hagiwara and Imura 1993) し、土中播種が可能となる。土中播種により、出芽時の種子環境を一定に保つことができるだけでなく、浮き苗軽減が可能となるため、出芽や苗立ち安定化につながる。鉄(山内 2004) をコーティングした種子では、高比重物質を種子にコーティングすることで浮き苗を抑制(山内 2002) し、その色調や強度から鳥害を抑制(山内 2004、松村・古畑 2008、古畑ら 2010) できる。さらに、種子伝染性病害の抑制効果(井上ら 2009) もあることから、出芽や苗立ち安定化が可能である。ベンガラ(酸化鉄) を主成分とし、機能性成分(土壌中で有害な硫化物イオンが発生することを抑制)としてモリブデン化合物、接着剤としてポリビニルアルコールを含む「ベンモリ資材」(原 2017) をコーティングした種子は、酸化鉄被覆による種子流亡の防止や、モリブデン被覆による硫化物イオンの生成抑制(Hara 2013) により、出芽苗立ちの安定化が可能となる。一方で、以上のようなコーティング種子は、コーティング時の種子の損傷や、播種時のコーティング破損による機械への詰まりが原因となり、出芽や苗立ちに悪影響となる可能性がある。また、種子のコーティングには専用資材や機械、作業労力が必要となるため、更なる低コスト、省力化のためにはコーティングをせずに出芽や苗立ちが安定する技術が必要である。

一方これまでに、コーティングをしない種子(以下、無コーティング種子)を使用した湛水直播栽培が検討されてきた。従来の無コーティング種子を用いた湛水直播栽培では、前述したように種子の埋没による出芽不良を回避するため土壌表面に播種する必要があった。しかし、浮き苗や鳥害(牧山・山路 1997b) による苗立ち低下や倒伏に弱い場合が見られたことから、土中に播種しても出芽や生育進展が早い、幼芽長の長い種子を播種する播種法(荻原 1987、菊池ら 1987、石川ら 1990) が開発された。しかし、幼芽長の長い種子は、表面播種では 5 mm までは折損による出芽や苗立ちへの影響は少ない(齋藤・五十嵐 1996) が、芽の再生により出芽までの時間を要すること(永峯ら 2000) や土中播種では出芽が著しく阻害される(長坂ら 1999) ことが明らかとなっている。そこで、幼芽の損傷抑制や苗立ち安定化に対応したペースト状土壌に種子を混和する播種法(荻原 1987、鶴田ら 1989、1991、荻原・北田 1991) やベルト式操出播種機の開発(菊池ら 1987)、乗用田植え機に装着した播種機を使用した播種法(木村・金 2000、永峯ら 2000) が検討された。一方で、鳩胸催芽種子を使用した播種法も検討されており、トラクター(澤村 1998、白土ら 2015) や、乗用田植え機(山口ら 2008、青木ら 2016) に装着した播種機を使用した播種法が開発されてきた。こうした播種法の多くは、寒冷地における農業の担い手不足の深刻化や耕作放棄田増大の問題解決、さらには水稻作の維持発展のために開発されたものである。

2020年の東北地方における湛水直播栽培面積は8,366 haであり、2010年の3,861 haから10年間で2.2倍に増加(農林水産省 2022)した。特に東北日本海側の多雪地域では、雪融けが遅く、乾田での直播栽培が困難である。このような状況から、東北地方の湛水直播面積は全体の42%(農林水産省 2022)を占めており、全国の中でも導入面積が広いことが分かる。しかし、東北地方では寒冷地のため播種後に低温に遭いやすく、暖地に比べ出芽が遅いため、無コーティング種子を播種した場合コーティング種子を播種した場合より出芽や苗立ちが不安定になる可能性がある。しかし、コーティング種子より播種量を増加させることや、種子の表層播種(青木ら 2014、白土ら 2016)、水管理(青木ら 2016、白土ら 2020)等の工夫によりコーティング種子より出芽が早く安定した苗立ちが得られる可能性がある。

こうしたなかで、農研機構東北農業研究センターにおいて、無コーティング種子を代かきと同時に播種する「代かき同時浅層土中播種機」が開発された(白土ら 2015)。本播種機は、2.0~2.6 m幅の代かき用ハローが装着されたトラクターに、吐出口が6箇所ある施肥機とハローと同様の幅の鎮圧ローラーを取り付けたものである(白土ら 2016)(図 1-2)。施肥機のホッパーには、鳩胸状に催芽した種子(以下催芽種子)を入れる。種子は、播種時にホッパー直下にある繰り出し用ロール(図 1-3)の穴に入り、ロールの回転により繰り出される。繰り出し用ロールの回転は車速連動となっているため、常時一定量の種子が繰り出される仕組みとなっている。播種は本代かきと同時に行う。種子は代かき直後の土壌表面に落下し、鎮圧ローラーによって鎮圧されると同時に薄く覆土される(図 1-4)。播種後の種子は、0.26~0.55 cm(今須ら 2022)の浅層に播種されるため酸素不足が回避でき、鳥の飛来抑制(白土ら 2015)や転び苗の抑制(白土ら 2016)が可能と考えられる。さらに播種が代かきと同時であるため、事前に代かきを行う湛水直播栽培と比較した場合、雑草の出芽開始が遅延し雑草防除の適期幅が広がるというメリットがある(図 1-5)。本播種栽培の苗立率は、東北日本海側で平均65%であり、苗立数が101~254本 m²の場合の全刈収量は480~688 kg 10a⁻¹である(白土ら 2016)。収量は、実用化されている直播方法やこれまでの無コーティング湛水直播栽培と同等以上(白土ら 2016)であり、現在、東北地域を中心に各地においてその実用性が実証されている。

1-2 研究の目的と構成

本博士論文研究では、無コーティング種子を使用した代かき同時浅層土中播種栽培における苗立ちを向上させる種子処理方法の開発と、処理種子の保存条件や保存可能期間の解明を目的とする。

寒冷地における代かき同時浅層土中播種栽培では、圃場内の排水不良箇所でも局所的に苗立ちが不良となる場合が認められた(白土ら 2016)。苗立ち安定化のためには、多様な圃場条件においても苗立ちが向上する技術を開発する必要がある。そこで、本研究では無コーティングの催芽種子より優れる出芽や苗立ちを示す種子処理方法について検討した。また、種子処理時には圃場準備等により作業が競合するため、事前の種子処理や保存により作業の効率化を図る必要がある。そこで、処理後の種子を保存し、無保存種子と同程度の出芽や苗立ち、生育が得られるような保存条件や保存期間について検討した。本論文の具体的な構成は以下の通りである。

第2章では、無コーティング代かき同時浅層土中播種栽培における苗立ちを向上させる種子処理法について検討した。まず種子処理法の違いが出芽率や初期生育に与える影響を調査した。次に圃場において苗立ちや初期生育の向上効果、収量を催芽種子と比較し、新たな種子処理法の有効性について検討した。

第3章では、第2章で得られた種子処理法を用い、秋田県内陸南部にある2地点の現地圃場において実証試験を行った。現地規模量の種子を使用した一括処理の可能性や、代かき同時浅層土中播種後の苗立率や初期生育の向上効果、出穂期、収量を催芽種子や鉄コーティング種子と比較し、第2章で得られた種子処理法の実用性について検討した。

第4章では、第3章の種子処理法を用いて作製した種子の保存可能期間を検討した。短期保存の場合は常温、長期保存の場合は低温での保存を想定し、最初に、最適な低温保存温度について保存期間中の芽や根の伸長や出芽、生育から検討した。次に、常温または低温で保存した種子を実際に圃場に代かき同時浅層土中播種し、保存期間中の芽や根の伸長、播種後の苗立率や初期生育から、保存条件と保存可能期間を検討した。

第5章では、上記で得られた結果をもとに、根出し処理の有効性や保存性について残された課題を含めて考察した。

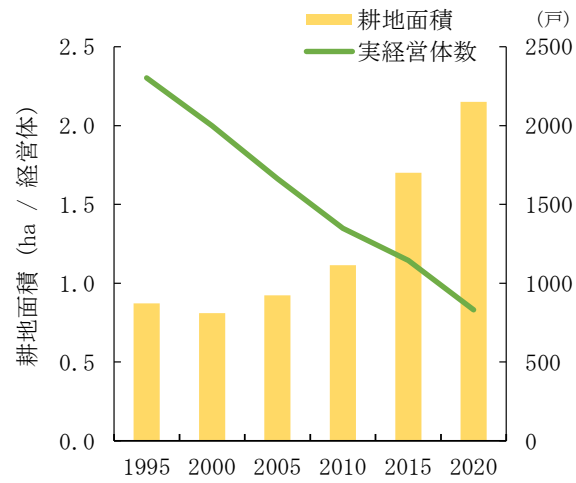


図 1-1 1 経営体当たりの田の面積と実経営体数の推移
(農林水産省 世界農林業センサス 2010、農林業センサス 2020)



図 1-2 代かき同時浅層土中播種機



図 1-3 種子繰り出し装置



図 1-4 浅層土中播種

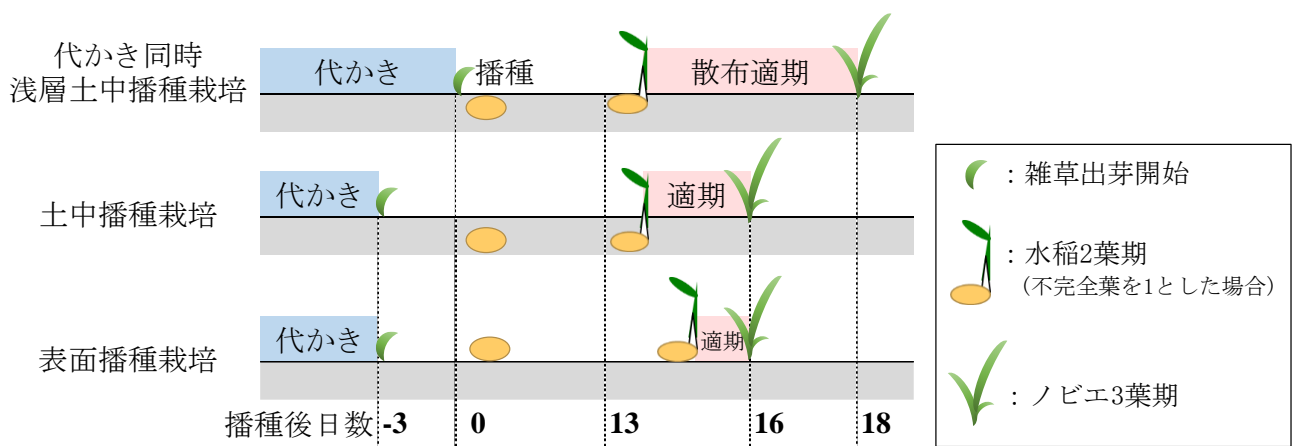


図 1-5 湛水直播栽培における初期除草剤散布適期
(秋田県大仙市における5月中旬播種の場合)

第2章 代かき同時浅層土中播種における苗立ち向上技術の開発

2-1 はじめに

水稻の無コーティング種子代かき同時浅層土中播種栽培 (白土ら 2016) は、無コーティング種子を代かきと同時に播種する、省力・低コスト水稻栽培が可能となる技術である。この技術を用いた寒冷地における平均苗立率は 65% であるが、田面の低い箇所での停滞水により苗立率が低下する場合がある (白土ら 2016)。同様に、無コーティング種子を用いた直播栽培圃場において、落水が不良な箇所は良好な箇所に比べて苗立ち数、生育が劣ると青木ら (2016) は報告している。苗立ち安定効果のある過酸化石灰資材 (太田・中山 1970) をコーティングしていても、温度条件 (嶽石・福田 1985) や播種深度 (花見・阿部 1984、荒川・高橋 1998)、土壌還元 (萩原ら 1986、萩原・井上 1999) 等様々な要因により苗立率が低下する場合がある。過酸化石灰資材をコーティングしていない種子は、さらに種子への酸素供給不足 (寺中・黒澤 1969) が加わり、苗立ちが不安定となる恐れがある。従って、無コーティング種子の直播栽培において苗立ちの安定化技術は重要である。

これまで、無コーティング種子を用いた直播栽培において、苗立ち安定化のために芽や根を伸ばした種子の播種が検討されてきた。芽を伸ばさせた種子を播種することで、出芽が早まり、苗立ちが促進される (菊池ら 1987) ことや、芽と根を同時に伸ばさせることで、鳩胸状態の種子より苗立ちが向上する (木村・金 2000) ことが報告されている。経験的に発根のみさせて播種している生産者もいる (農山漁村文化協会 2015)。一方、芽を伸ばさせた種子を土中に播種する場合、鞘葉が損傷すると出芽が著しく阻害される (長坂ら 1999) ことや、苗立率が不安定になる (萩原 1987) ことが報告されている。代かき同時浅層土中播種では、種子の芽や根が長いと、播種の際に損傷すると想定される。したがって、芽または根を伸ばさせた種子による苗立ち向上のためには、芽や根の損傷の影響も考慮する必要がある。

本章では、無コーティング種子の代かき同時浅層土中播種栽培における、苗立ち向上のための種子処理技術の開発を目的とした。まず、種子の根または芽の伸長、およびその損傷が苗立ちに与える影響を明らかにするために室内試験を行い、出芽、苗立ち、初期生育を調査した。次に、その結果に基づき、圃場において根を伸ばさせた種子を代かき同時浅層土中播種し、苗立ちや初期生育の向上効果、収量への影響について検討した。また、早期と普通期の 2 作期を設け、播種後の気温が処理種子の効果に与える影響を検討した。

2-2 材料および方法

1) 試験 1 種子処理方法の検討 (室内試験)

水稻品種「萌えみのり」の乾粃 5 kg を、7.5 倍濃度のイプコナゾール・銅水和剤 (30ml/kg) で塗沫処理した後、網袋に入れて常温で 24 時間風乾させ、15°C に設定した人工気象器内で 5 日間浸漬した。種子処理として、催芽種子、芽が伸びた芽出し種子、根が伸びた根出し種子を設けた (図 2-1)。さらに、播種機による損傷を想定して各伸長部を切除した芽切除種子と根切除種子を設けた。催芽種子と芽出し種子は、それぞれ 24 時間と 40 時間、30°C に設定した循環式催芽器 (ダイガーカワシマ社、AQ-500、以下催芽器) で発芽させた (図 2-2)。根出し種子は、脱水後 30°C の蒸気式育苗器 (啓文社、KT120AD、以下

育苗器) 内に設置した育苗箱上に 40 時間置いて発根させた (図 2-4)。各処理後の種子の中から、催芽種子として芽長 1 mm 未満の発芽種子、芽出し種子として芽長 2 mm 根長 0 mm の種子、根出し種子として芽長 0 mm 根長 6 mm の種子を選んだ。芽出し種子の芽を切除した種子を芽切除種子とし、根出し種子の根を切除した種子を根切除種子とした。

風乾後代かきをした水田土壌を、アグリポット (東京硝子器械、直径 6.5 cm×深さ 5.6 cm) に 4 cm 充填した。1 ポットを 1 区として各処理後の種子 20 粒を、横向きに置床 (図 2-3) して播種深度が 5 mm になるよう前述の代かき土壌で覆土した。コンテナ (21 cm×28 cm×深さ 9.6 cm) 内に 5 処理を配置して 1 ブロックとし、試験区配置を 6 ブロック乱塊法とした。播種後の水深が 1 cm になるようにコンテナ内を湛水し、15°C の人工気象器 (明期・12 時間・ $400 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、暗期 12 時間) 内で生育させた。

出芽率は、播種後 2~4 日おきに鞘葉が地表面に出現した生存個体数から算出し、播種後 21 日目の値を苗立率とした。播種後 21 日目に全苗立ち個体の草丈、葉齢を測定し、苗立ち個体あたりの平均値を算出した。葉齢は不完全葉を 1 葉とした。茎葉乾物重は、1 区ごとまとめて測定し、苗立ち個体あたりの平均値を算出した。

2) 試験 2 根出し処理の有効性 (圃場試験)

圃場試験は 2015 年および 2016 年に実施した。2015 年は水稲品種「萌えみのり」を、2016 年は水稲品種「べこごのみ」を供試した。両品種とも、土中播種時の低温苗立ち性は中 (片岡ら 2007、中込ら 2008) である。室内試験と同様に、種子消毒した種子を 15°C で 5 日間または 20°C で 4 日間浸種した後、催芽処理を行った。催芽処理として、催芽種子と根出し種子を設けた。催芽種子は、30°C に設定した催芽器で 14~20 時間処理した。根出し種子は、処理時間の短い根出し 1 と処理時間の長い根出し 2 の 2 処理を設けた (表 2-1)。根出し処理は、図 2-4 のように 30°C に設定した育苗器内の育苗箱に、脱水した種子の入った網袋を置き、根出し 1 は 33~37 時間、根出し 2 は 47~52 時間処理した。育苗器内の棚上部には、水滴落下を防ぐため板の入った育苗箱を置いた。

東北農業研究センター大仙研究拠点 (N 39.4944°、E 140.4979°) 内の中粗粒褐色低地土灰褐色の水田を耕起、荒代かき後、代かき同時浅層土中播種機 (白土ら 2016) を巾 3.1m にした播種機で散播した。播種時期は 4 月下旬の早期と 5 月中旬の普通期の 2 水準を設けた。施肥量は表 2-1 に示した。1 区面積は、 $3 \times 13 \text{ m}^2$ とし、4 ブロック乱塊法で配置した (図 2-5)。水管理は、2015 年早期は播種後 5 日間湛水、普通期は播種後 8 日間湛水、2016 年早期は播種後 8 日間湛水、普通期は播種後 7 日間湛水し、その後 5~7 日間落水した。鳥害を防ぐために、防鳥網を播種後約 30 日間 2015 年は生育調査用の枠に、2016 年は圃場全体に設置した。除草、病虫害防除は適宜行った。

各処理後の種子 100 粒の根長と芽長を 1 mm 単位で測定し、小数点以下は切り捨てた。根または芽が見えている割合を発芽割合とした。播種後 10 日間の平均気温は、播種日から播種後 9 日目までの秋田県大曲の日平均気温のアメダスデータを用いて算出した。播種後の生育は、出芽期 (2015 年早期は播種後 15 日目、普通期は播種後 14 日目、2016 年早期は播種後 21 日目、普通期は播種後 14 日目) に草丈と葉齢、苗立期 (2015 年早期、普通期は播種後 31 日目、2016 年早期は播種後 30 日目、2016 年普通期は播種後 31 日目) に苗立ち数、苗立率、草丈、葉齢、白化茎長、茎葉乾物重を測定した。苗立率は、 0.48 m^2 の生育調査用枠内の苗立ち数と播種粒数から算出した。葉齢は不完全葉を 1 とした。草丈、

葉齡、白化莖長、莖葉乾物重は各区 20 個体を調査し、個体あたりの平均値を算出した。成熟期(2015 年早期は 9 月 18 日、普通期は 9 月 25 日、2016 年早期は 9 月 5 日、普通期は 9 月 16 日) に 3 m² の坪刈りを行い、1.9 mm の篩選により精玄米重を求めた。精玄米重と千粒重は水分 15% に換算した。

3) 統計処理

統計的検定は R3.3.1 (The R Foundation for Statistical Computing) を用いて行った。室内試験の苗立率はブロックを込みにして Ryan 法で多重比較を行った。草丈、葉齡、莖葉乾物重は乱塊法として Tukey 法を用いて多重比較を行った。

圃場試験では、苗立率は年・作期毎にブロックを込みにして Ryan 法で多重比較を行い、さらに年・作期を込みにして全体を Ryan 法で多重比較した。草丈、葉齡、苗立ち数、白化莖長、莖葉乾物重は年・作期毎に 4 ブロック乱塊法として Fisher's protected LSD 法で多重比較を行い、さらに年・作期を込みにして全体を 16 ブロックの乱塊法として Fisher's protected LSD 法で多重比較を行った。

2-3 結果

1) 試験 1 種子処理方法の検討 (室内試験)

芽出し種子、根出し種子、根切除種子は、播種後 3 日目には 80% 以上が出芽し (図 2-6)、同日の催芽種子の平均出芽率 15.8% を大きく上回った。播種後 5 日目には、根出し種子の平均出芽率は 99.2%、芽出し種子と根切除種子の平均出芽率は 97.5% となり、催芽種子の 77.5% を上回った。その後の根出し種子、根切除種子の出芽率は、日数が経過しても低下することなく推移した。一方で、芽切除種子の出芽率は芽出し種子や催芽種子より低く、さらに播種 14 日目以降の出芽個体の腐敗により、最終的な平均苗立率は 47.5% となった (表 2-2)。出芽個体の腐敗は催芽種子にも見られ、鞘葉が伸長しないまま土中で腐敗した個体と、鞘葉は伸長したが第 1 葉が伸長せず腐敗した個体が確認された (図 2-7)。これらの腐敗個体が出芽個体に占める割合は、催芽種子では 28%、芽切除種子では 25% であった。芽出し種子、根出し種子、根切除種子は、催芽種子より播種後 21 日目の葉齡および莖葉乾物重が有意に大きかった。芽切除種子は、催芽種子より葉齡が有意に大きかった。しかし、草丈は両区に有意差は認められず、根出し種子や根切除種子と比較して莖葉乾物重は有意に劣った。

2) 試験 2 根出し処理の有効性 (圃場試験)

試験年および作期を込みにすると、播種後 14~21 日目の出芽期の草丈、葉齡は、根出し種子が催芽種子よりも有意に大きかった (表 2-3)。播種後 30~31 日目の苗立期の草丈、葉齡、莖葉乾物重も同様に根出し種子は催芽種子よりも有意に大きかった。苗立率は、全体では催芽種子 < 根出し 1 < 根出し 2 で有意差が認められた (図 2-8)。2015 年普通期と 2016 年早期の根出し 1 では、催芽種子より苗立率が低かったが、より根長が長い根出し 2 では苗立率が有意に向上した。白化莖長は、いずれの種子処理でも 0.2 cm であり差がなかった。

試験年および作期を込みにすると、苗立率や、出芽期と苗立期の初期生育は、根出し処理による向上効果が見られた (表 2-3)。また、根出し種子による苗立ち向上効果は「萌えみのり」と「べこごのみ」両品種で同様の傾向が見られた。播種後 10 日間の平均気温

は 11.7~18.6°Cであった (表 2-1)。

出穂期は、有意差はないものの、根出し処理をすることで催芽種子より 1 日程度早まり、普通期播種より早期播種でより早まる傾向があった (表 2-4)。また、種子処理や作期による倒伏程度の差は見られなかった。精玄米重や収量構成要素は、種子処理間や作期間に有意差は認められなかった。

2-4 考察

本章における研究の結果、根長 0.5~5 mm の根出し種子を用いることにより、無コーティング種子の代かき同時浅層土中播種栽培における苗立ちを向上できることが明らかになった。以下その根拠として、室内試験における種子の芽または根の伸長、およびそれらの切除が出芽、苗立ち、初期生育に及ぼす影響と、圃場における根出し種子の苗立ち、初期生育、収量への影響について検討を加える。

室内試験では、根出し種子は、催芽種子より早期に出芽揃いに達し、苗立率と初期生育が向上した (表 2-2)。以上のような、根だけを伸長した種子の苗立率向上や初期生育促進効果に関する報告は見当たらない。従来、幼芽および幼根を同時に伸長した種子を播種した場合、出芽揃いが早く葉齢・草丈などの初期生育が促進する傾向があることが報告されている (田代・千葉 2006、金・木村 1999)。また古畑ら (2006、2007) は、出芽が早いと出芽率および苗立率が高くなり、地上部乾物重が増加すると報告している。根出し種子においても、出芽が早くなることで苗立率や初期生育が向上している可能性がある。根出し種子の根を切除しても、出芽と苗立率、初期生育は根出し種子と同等であったことから、機械播種時に根が損傷しても苗立率や初期生育に及ぼす影響は少ないと考えられる。

芽出し種子は、根出し種子と同様に催芽種子より苗立率と初期生育が向上した。芽出し種子を播種することで出芽が早くなり苗立ちが安定することは、ペースト播種 (荻原 1987、荻原・北田 1991) や、乾田直播における流体播種 (森田・松葉 1993) でも報告されている。一方、芽を切除した種子の出芽と苗立率は催芽種子を下回り、芽出し種子にみられたような苗立率と初期生育の向上効果は認められなかった (表 2-2)。表面播種に比べ土中播種の場合に鞘葉の損傷により出芽が著しく阻害されると長坂ら (1999) は報告しており、代かき同時浅層土中播種栽培における播種時に芽が損傷すれば、出芽や苗立ちが不良になる可能性がある。この他に、芽出し種子は本葉 1 葉まで伸長させると苗立率は低下すると荻原 (1987) は報告している。同様にペースト播種法においても芽の長いものほど苗立率が劣ると鶴田ら (1991) は報告している。森田・松葉 (1993) は、乾田直播において土中で芽が下向きや横向きになると出芽・苗立ちに悪影響があり、催芽程度が進むほどその悪影響が顕著になることを明らかにしている。まとめると、芽出し種子自体は苗立ちが良いものの、機械播種をする場合には芽の損傷や芽の長さ、土中での芽の向きの影響により、催芽種子より苗立率が低下する恐れがあるといえる。したがって、機械播種における苗立ち向上のためには、根だけを伸長させた根出し種子が適すると考えられた。

圃場試験においても室内試験と同様に、根出し種子は催芽種子より苗立率が高く、葉齢や草丈、乾物重といった初期生育が向上し (表 2-3)、根出し種子の播種を行っている生産者の経験 (農山漁村文化協会 2015) を裏付けることができた。このような根出し種子の機械播種による苗立ち向上や初期生育促進に関する報告は見当たらない。水稻直播栽培に

おける稲の出芽期は、雑草との競合下に置かれる (森田 1995)。初中期除草剤の効果を安定させるためには出来るだけ早く散布する必要がある。初中期除草剤の散布早限は、多くの剤で稲の葉齢で決められているため (農林水産消費安全技術センター2017)、根出し種子による葉齢進展の促進は、除草剤散布の適期幅を広げ、雑草防除が安定化すると考えられる。また、鉄コーティング種子を利用した湛水直播栽培において、初期生育量が多いとその後の生育ステージでも同様に生育量が多く推移することが古畑ら (2012) によって報告されている。根出し種子による初期生育量の増加は、その後の生育の安定化につながる可能性がある。なお、催芽種子の苗立率は23%から63%で、白土ら (2016) が報告している65%よりかなり低い場合が見られた。これは、推奨されている播種後10日程度の落水 (白土ら 2020) の代わりに、あえて播種後5日から8日湛水したためと考えられる。無コーティング種子の湛水直播では、排水不良により苗立率が低下すると報告されている (青木ら 2016、白土ら 2016)。このように、落水が十分でない条件においても根出し種子の苗立向上効果が確認できたことは、排水不良箇所のある水田での苗立安定化効果を示唆している。

根出し種子による苗立ち向上効果は、播種後10日間の平均気温が11.7~18.6°Cという幅広い温度条件で確認された (表 2-1)。三石・井村 (1982)、嶽石・福田 (1985) は、過酸化石灰資材をコーティングした種子の場合、出芽・苗立ちの安全性から見た播種期の安全早限は日平均気温13°C以上としており、本研究ではこの気温より低い条件での根出し種子の苗立ち向上効果が認められた。この結果は、根出し種子により播種早限を早く出来る可能性を示している。

播種時の根長は、0.5 mm 以上5 mm 以下で苗立率向上に効果が認められた (表 2-1、表 2-3)。一方、圃場試験の根出し1は催芽より苗立率が劣る場合も見られた (表 2-3)。根出し2では全ての場合で催芽より苗立率が高いことを考えると、ある程度根長が長い方が、効果が安定する可能性がある。しかし、平均根長7 mmの種子では根が絡まり、本無コーティング播種機では播種出来なかった (未発表データ)。したがって、現状の播種機では根長は0.5~5 mmが適切と考えられた。

出穂期は、有意ではないものの、根出し種子が催芽種子より早い傾向にあった (表 2-4)。同様に、芽と根を同時に伸長させた種子を播種した場合、初期生育のみならず出穂期、成熟期が早まる傾向にあることを金・木村 (1999) は報告している。寒冷地における直播栽培は、移植栽培より出穂期が遅くなり登熟未了の危険性があるため、安全出穂期間を考慮した上で播種適地 (嶽石・福田 1985、中林ら 2007) や播種晩限期 (中林ら 2007) が検討されている。今後の研究で根出し種子による出穂期の前進が確認されれば、寒冷地における播種適期や播種適地を拡大できる可能性がある。

収量は催芽種子と同等であった (表 2-4)。この結果は、芽と根を同時に伸長させた種子で、苗立ちや初期生育が良く出穂期が早まったが収量増には必ずしも結びつかなかったという木村・金 (2000) の報告と一致した。

以上のことから、代かき同時浅層土中播種栽培における根出し種子の播種は、苗立ち向上、安定化に有効な技術であると結論した。

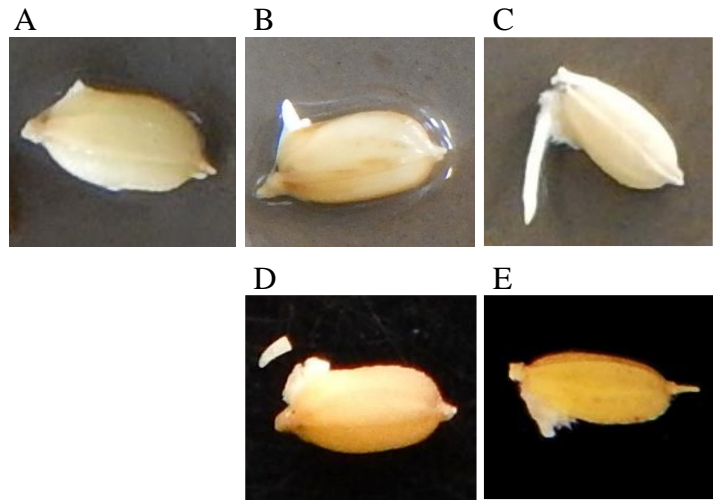


図 2-1 室内試験における播種時の種子の状態
 (A：催芽種子、B：芽出し種子、C：根出し種子、
 D：芽切除種子、E：根切除種子)

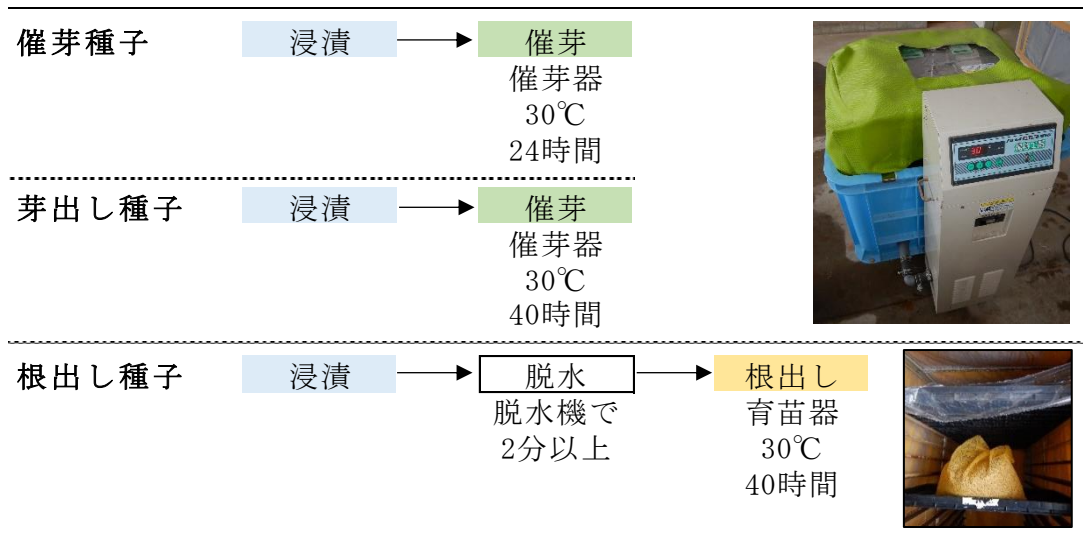


図 2-2 種子処理方法



図 2-3 室内試験における播種時の種子の置床状態
 (この上に代かき土壌を静かに入れ、5 mm 覆土した。)

表 2-1 圃場試験の播種時の催芽程度と播種量、施肥量

年	作期	処理	播種日	播種後 平均気温 (°C)	処理 時間 (hr)	根長		芽長		発芽 割合 (%)	播種量 (kg/10a)	基肥		追肥	
						mm(標準偏差)	mm(標準偏差)	成分 (kg/10a)	施用日 (kg/10a)						
2015	早期	根出し2	4月27日	16.5	52	2.3 (4.0)	0.0 (0.0)	28	6.8	N	9.3	7月24日	3.0		
		根出し1			36	1.0 (2.2)	0.0 (0.0)	18	6.3	P ₂ O ₅	6.1	0.0			
		催芽			20	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0	6.1	K ₂ O	5.1	0.0			
	普通期	根出し2	5月12日	15.7	51	5.0 (5.3)	0.0 (0.0)	56	4.4	N	9.2	7月28日	3.0		
		根出し1			37	1.9 (2.7)	0.0 (0.1)	37	5.7	P ₂ O ₅	6.0	0.0			
		催芽			14	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0	7.7	K ₂ O	5.1	0.0			
2016	早期	根出し2	4月25日	11.7	47	3.8 (3.5)	0.1 (0.3)	68	9.0	N	10.4	-	-		
		根出し1			33	0.3 (0.9)	0.1 (0.4)	11	8.7	P ₂ O ₅	10.4	-	-		
		催芽			15	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	6	8.5	K ₂ O	6.1	-	-		
	普通期	根出し2	5月18日	18.6	47	1.3 (2.0)	0.1 (0.6)	33	8.1	N	10.0	-	-		
		根出し1			33	0.5 (1.3)	0.0 (0.0)	14	7.9	P ₂ O ₅	10.0	-	-		
		催芽			15	0.0 (0.0)	0.1 (0.3)	9	8.1	K ₂ O	5.9	-	-		

2015年は「萌えみのり」、2016年は「べこごのみ」を供試した。播種後平均気温は、播種日から播種9日目までの10日間の日平均気温の平均値を示す。発芽割合は、処理後の種子100粒のうち根又は芽が見えているものの割合を示す。2016年は追肥をしなかった。



図 2-4 圃場試験に用いた種子の育苗器による根出し処理 (2015年早期。30°Cに設定した育苗器内に置いた育苗箱に、脱水した種子の入った網袋を載せた。棚上部には水滴落下を防ぐため板の入った育苗箱を置いた。)

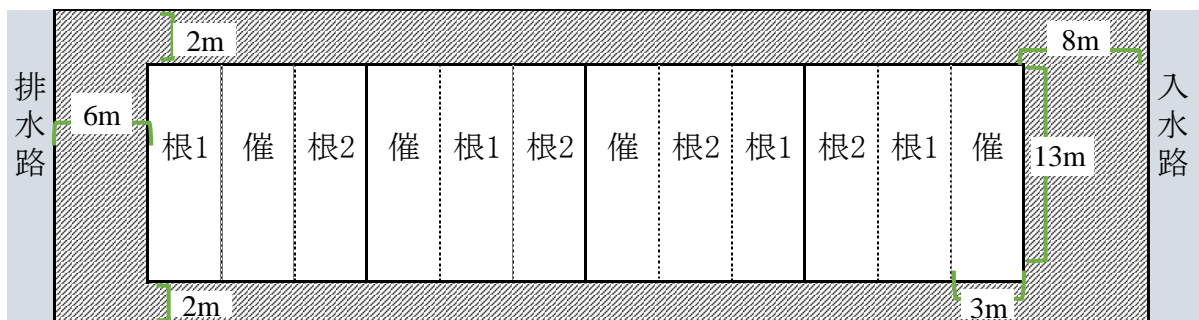


図 2-5 試験区配置 (2015年普通期)

(太枠内は同一ブロック、小枠は試験区、小枠内の文字は処理を示す。斜線はボーダー (代かき同時浅層土中播種した箇所) を示す。)

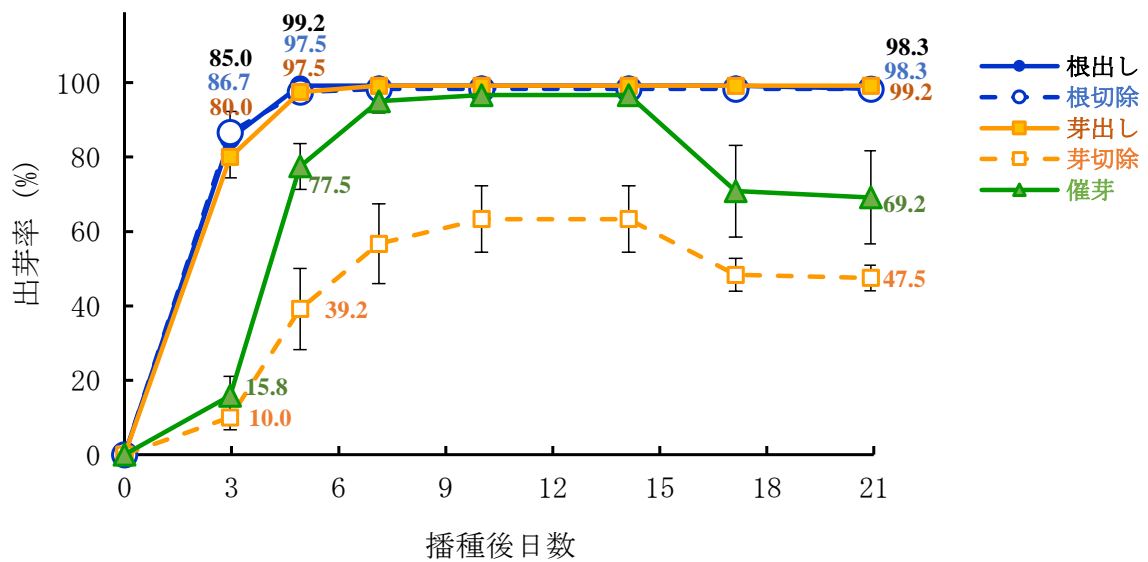


図 2-6 室内試験における出芽率の推移
(図中のバーは標準誤差、数値は出芽率の平均値を示す(n=6).)

表 2-2 室内試験の播種時における
種子の根長および芽長、播種後 21 日目の苗立率、生育

処理	播種時		苗立率 (%)	草丈 (cm)	葉齢	茎葉乾物重 (mg)
	根長 (mm)	芽長 (mm)				
催芽	0.0	0.1	69.2 b	4.1 b	2.2 b	2.9 b
根出し	6.0	0.0	98.3 a	5.4 a	2.6 a	4.6 a
芽出し	0.0	2.0	99.2 a	5.4 a	2.6 a	4.5 a
根切除	切除	0.0	98.3 a	4.8 ab	2.5 a	4.1 a
芽切除	0.0	切除	47.5 c	3.9 b	2.5 a	2.7 b

葉齢は不完全葉を1とした。同じアルファベットは処理間に5%水準で有意差がないことを示す(苗立率はRyan法、その他はTukey法、n=6)。



催芽 根出し 根切除 芽出し 芽切除

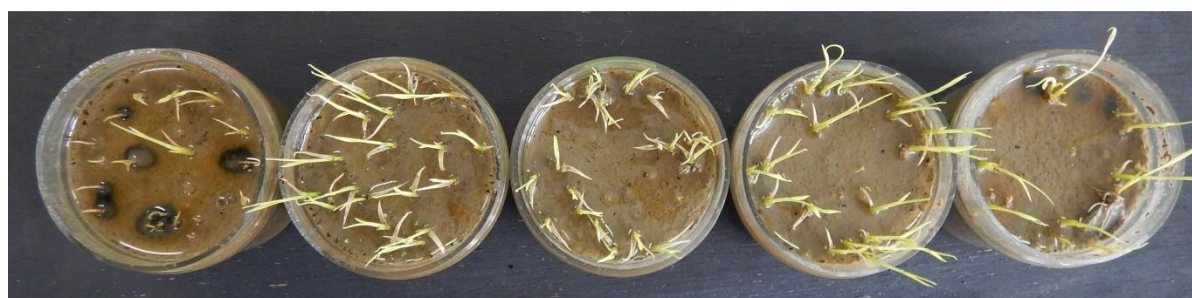


図 2-7 室内試験における苗立ちの様子

表 2-3 圃場試験における出芽期と苗立期の生育と苗立ち

年	作期	処理	出芽期生育		苗立率 %	苗立数 (本 m ⁻²)	苗立期生育			
			草丈 (cm)	葉齢			草丈 (cm)	葉齢	白化茎長 (cm)	茎葉乾物重 (mg)
2015	早期	根出し2	3.9 a	2.5 a	86 a	212	15.5 a	5.7 a	0.2 a	29 a
		根出し1	3.8 a	2.5 a	74 b	170	15.8 a	5.6 a	0.2 a	31 a
		催芽	3.5 a	2.4 a	37 c	83	14.4 a	5.5 b	0.2 a	24 a
	普通期	根出し2	6.1 a	2.8 a	89 a	144	20.2 a	6.9 a	0.2 a	106 a
		根出し1	6.0 a	2.9 a	54 c	114	19.8 a	6.8 a	0.2 a	115 a
		催芽	4.1 b	2.6 b	63 b	177	19.3 a	6.7 a	0.2 a	102 a
2016	早期	根出し2	4.3 a	3.2 a	55 a	154	14.8 a	5.2 a	0.2 a	23 a
		根出し1	3.7 ab	2.9 b	22 c	63	12.7 b	4.6 b	0.3 a	14 b
		催芽	2.7 b	2.3 c	32 b	88	11.6 b	4.3 c	0.2 a	11 c
	普通期	根出し2	6.4 a	3.3 a	42 a	108	24.9 a	6.7 a	0.1 a	96 a
		根出し1	6.1 a	3.4 a	43 a	109	25.6 a	6.7 a	0.1 a	101 a
		催芽	5.7 a	3.3 a	23 b	61	24.9 a	6.6 a	0.2 a	87 a
平均	根出し2	5.2 a	3.0 a	68 a	154	18.8 a	6.1 a	0.2 a	64 a	
	根出し1	4.9 a	2.9 a	49 b	114	18.5 a	5.9 b	0.2 a	65 a	
	催芽	4.0 b	2.6 b	39 c	102	17.5 b	5.7 c	0.2 a	56 b	

2015年は「萌えみのり」、2016年は「べこごのみ」を供試した。葉齢は不完全葉を1とした。同じアルファベットは処理間に5%水準で有意差がないことを示す（苗立率はRyan法、その他はPLSD法、n=4）。

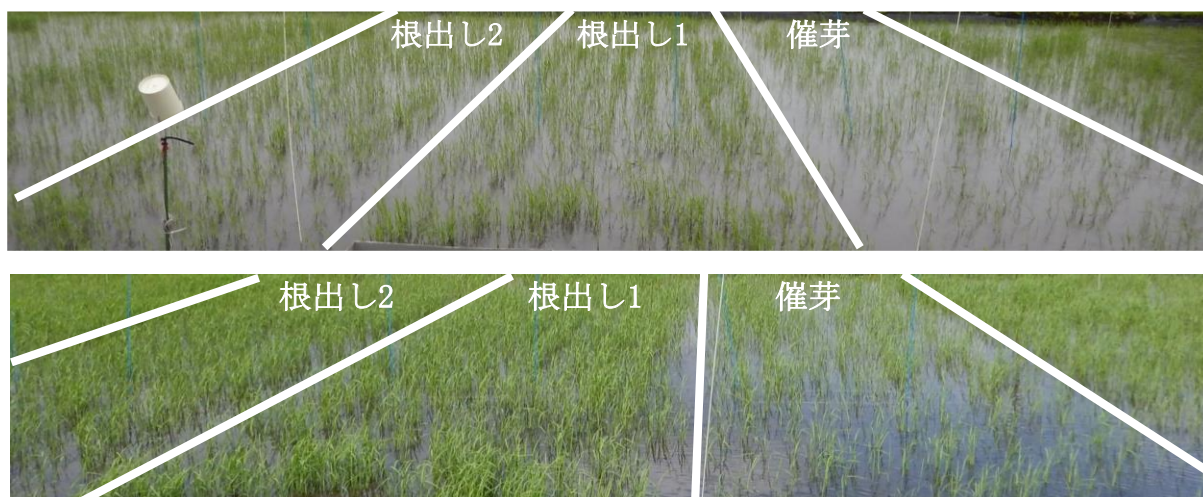


図 2-8 圃場試験における苗立ちの様子
 (上:2015年早期・播種後42日目・萌えみのり、
 下:2016年普通期・播種後35日目・べこごのみ)

表 2-4 圃場試験における出穂期および倒伏程度、収量構成要素

年	作期	処理	出穂期	倒伏程度	精玄米重 ($g\ m^{-2}$)	籾数 ($千粒\ m^{-2}$)	登熟歩合 (%)	千粒重 (g)	穂数 ($本\ m^{-2}$)	一穂籾数
2015	早期	根出し2	8月2日	0.0	703	30.7	91	25.3	567	54
		根出し1	8月2日	0.0	703	30.9	90	25.3	597	52
		催芽	8月3日	0.0	715	32.1	87	25.6	525	61
	普通期	根出し2	8月5日	0.5	787	34.9	89	25.2	625	56
		根出し1	8月5日	0.3	739	32.7	89	25.4	610	54
		催芽	8月4日	0.3	744	32.3	90	25.6	651	50
2016	早期	根出し2	7月23日	0.0	587	30.6	83	23.0	385	80
		根出し1	7月25日	0.0	652	34.0	82	23.2	280	122
		催芽	7月26日	0.0	650	34.2	83	22.9	333	103
	普通期	根出し2	8月1日	0.0	631	29.9	88	23.9	313	96
		根出し1	8月1日	0.0	642	30.3	89	23.8	329	92
		催芽	8月3日	0.0	600	29.0	87	24.0	271	107
平均	根出し2	7月31日	0.1	677	31.6	88	24.4	472	71	
	根出し1	7月31日	0.1	700	33.0	87	24.4	472	80	
	催芽	8月1日	0.1	680	32.1	87	24.5	456	80	

2015年は「萌えみのり」、2016年は「べこごのみ」を供試した。倒伏程度は0(無)～5(甚)とした。篩い目は1.9 mmとした。精玄米重と千粒重は水分15%に換算した。いずれの項目も処理間で5%水準の有意差はなかった(PLSD法、n=4)。

第3章 現地圃場における根出し種子の苗立率と初期生育の向上

3-1 はじめに

第2章において、根のみ伸ばした根出し種子が無コーティング種子代かき同時浅層土中播種栽培の苗立率や初期生育(出芽期と苗立ち期の生育)を向上させることを所内圃場試験で明らかにした。その効果は播種後湛水条件や低温条件でもみられた。この結果は、排水不良や低温といった不良条件における苗立率や初期生育の安定化に有効である可能性を示唆している。さらに、根出し種子は初期葉齢が早く進むことにより初中期除草剤の散布適期を拡大させ、除草剤の効果を安定させる可能性もある。このように、根出し種子は無コーティング種子の代かき同時浅層土中播種栽培を安定化させる可能性のある技術といえる。

しかしながら、根出し種子を用いた代かき同時浅層土中播種栽培の実用化のためには、現地生産規模量の種子処理を行い、その処理効果を現地圃場で実証する必要がある。さらに倒伏や収量、品質への影響を検討する必要がある。

本研究は、水稻無コーティング種子代かき同時浅層土中播種栽培における根出し種子の苗立率と初期生育の向上効果の実証を目的に、寒冷地の秋田県大仙市と横手市において現地実証試験を行った。一度に大量の根出し処理が可能であるか検証するために現地生産規模量の種子を用いて根出し処理をし、処理後の種子を現地圃場に代かき同時浅層土中播種機を用いて播種した。播種後の生育や苗立率を催芽種子と比較し、根出し種子の苗立率と初期生育向上効果について検討した。また、催芽種子や鉄コーティング種子と倒伏程度および収量を比較した。

3-2 材料および方法

1) 種子処理

試験は、秋田県大仙市と横手市の現地圃場で2017年～2019年に実施した(表3-1)。大仙市の試験は水稻品種「ちほみのり」を、横手市の試験は「萌えみのり」を供試した。両品種とも、休眠性は「やや強」、低温発芽性は「やや遅」(福寫ら2017)である。大仙市の試験は、イプコナゾール・銅水和剤7.5倍希釈液の塗抹処理(30ml/kg)済み種子を使用した。横手市の試験は2017年および2018年は温湯消毒済み種子を、2019年はイプコナゾール・銅水和剤7.5倍希釈液の塗抹処理(30ml/kg)済み種子を使用した。種子処理は根出し種子と催芽種子、鉄コーティング種子の3処理とし、横手市催芽種子を除く全ての種子処理を東北農業研究センター大仙研究拠点内で行った。根出し種子の作製は、消毒済み種子を常温(約11℃)で5日間浸漬し、脱水した種子を玄米30kg用紙袋に封入して30℃に設定した育苗器(株式会社啓文社製作所、KT120AD)内に入れて行った(図3-1)。紙袋1袋につき乾籾15～20kgの種子を封入した。育苗器の棚に育苗箱を並べ、その上に種子の入った紙袋を載せた。棚の最上段には水滴落下を防ぐためビニールで被覆した育苗箱を設置した。大仙市の試験では、30～48kgの種子を育苗器で38～41時間処理した。育苗器の設定温度は2017年のみ27℃とした。横手市の試験では、15kgの種子を育苗器で36～45時間処理した。催芽種子は、大仙市の試験では30～45kgの種子を常温で5

日間浸漬後、30°Cに設定した催芽器（株式会社タイガーカワシマ、FH-150ND）で鳩胸程度になるまで16～24時間催芽した。横手市の試験では、実証生産者の慣行により15kgの種子を常温で4～15日間浸漬後、水から揚げて鳩胸程度になるまで屋内暗所で催芽（3～6日）した。鉄コーティング種子は、10～15kgの消毒済み種子を15°Cに設定した人工気象器内で5日間浸漬し、脱水後の種子を鉄粉と焼石膏の混合資材でカルパーコーティングマシン（ヤンマー製 YCT15LSW）を用いてコーティングして作製した。鉄粉の割合は乾粒重量の0.5倍とした。

2) 栽培管理

試験圃場の土壌は、大仙市は細粒質腐植質グライ低地土、横手市は下層無機質腐植質泥炭土であった。無コーティング圃場は、荒代かき後に湛水し、播種前日～当日朝に落水して代かき同時浅層土中播種機（白土ら 2016）で種子を散播した。鉄コーティング圃場は慣行法（山内 2012）に従い、仕上げ代かき後に湛水し、1～2日後に背負い式動力散布機で種子を散播した。大仙市の試験では5月10日～14日に無コーティング種子を5.8～7.9 kg 10 a⁻¹、鉄コーティング種子を4.9～7.3 kg 10 a⁻¹播種した（表 3-2）。横手市の試験では5月8日～9日に無コーティング種子を5.6～7.2 kg 10 a⁻¹、鉄コーティング種子を5.2 kg 10 a⁻¹播種した。

大仙市の試験では、基肥として耕起後荒代かき前の5月3日～13日に、緩効性肥料を含む複合肥料を窒素成分で2017年および2019年は10.0 kg 10 a⁻¹、2018年は7.0 kg 10 a⁻¹施用した。追肥は、7月15～22日に高度化成肥料を窒素成分で1.9～3.0 kg 10 a⁻¹施用した。横手市の試験では、基肥として耕起前の4月29日～5月1日に、高度化成肥料を窒素成分で2017年および2018年は7.8 kg 10 a⁻¹、2019年は9.0 kg 10 a⁻¹施用した。追肥は、2017年と2018年は7月25日に窒素成分で2.0～2.9 kg 10 a⁻¹施用した。2019年は早期に葉色低下が見られたことから、根出し圃場と鉄コーティング圃場は、7月18日、7月24日、8月1日の3回に分けて、催芽圃場は7月24日、8月1日の2回に分けて窒素成分で3.9～4.0 kg 10 a⁻¹施用した。圃場1筆1処理とし、根出し種子と催芽種子の圃場は毎年入れ替えた。

水管理は、大仙市の無コーティング圃場は播種後8～16日間落水、鉄コーティング圃場は播種後5～11日間湛水後4～12日間落水とした。横手市の無コーティング圃場は、2017年の根出し種子のみ播種後9日間湛水後落水とし、それ以外は播種後12～15日間落水とした。鉄コーティング圃場は、播種後4～9日間湛水後4～7日間落水とした。雑草・病虫害防除は適宜行った。

3) 調査方法

種子の浸漬開始日から播種前日までの平均気温は、大曲のアメダスデータを用い、横手市催芽種子のみ横手のアメダスデータを用いて算出した（表 3-1）。処理時間と処理温度は、育苗器または催芽器で処理した時間と設定温度とした。横手市催芽種子の処理温度は催芽処理期間中の日平均気温の平均値とし、横手のアメダスデータを用いて算出した。

播種時の根長と芽長は、播種直前の種子100粒を調査しその平均値とした。発根割合は、100粒のうち根が1mm以上伸長した種子数から算出した。発根平均長は、発根種子の平均根長を示し、根が1mm以上伸長した種子の根長の合計を根が1mm

以上伸長した種子数で除して求めた。含水率は、播種直前の種子の重量と 105°C で 24 時間乾燥後の重量の差を乾燥前重量で除して求めた。

播種後 10 日間の平均気温は、播種日から播種 9 日目までの大曲 (大仙市) と横手 (横手市) のアメダスの日平均気温を用いて算出した (表 3-3)。生育調査と収量調査は圃場 1 筆につき 3 地点調査した (図 3-2)。生育調査は、出芽期と苗立ち期に 1 地点につき各 20 個体を抜き取って行った。出芽期の調査では、根出し種子と催芽種子を対象に、2017 年横手市の試験では播種後 16 日目、その他は播種後 13 日目に草丈と葉齢を調査した。葉齢は不完全葉を 1 とした。苗立ち期の調査では、播種後 30 日前後に全処理を対象に草丈と葉齢、白化茎長、乾物重を調査した。白化茎長は葉鞘基部の白色長を測定した。苗立ち数は、0.42 m² (0.4×1.05 m) の枠を圃場 1 筆につき 9 地点設置 (図 3-2) し、9 地点の苗立本数の合計を m² 当りに換算して求めた。播種粒数を播種量と千粒重から算出し、播種粒数と苗立ち数から苗立率を算出した。

出穂期は、圃場内の有効茎数のうち 40~50% が出穂した日とした。稈長は、出穂期から 16~27 日後に 1 地点につき 10 株の最長稈の稈長を調査した。倒伏程度は、成熟期に達観で 0 (無)~5 (甚) の 6 段階で評価した。収量構成要素は成熟期に各地点 3 m² (2.0×1.5 m) の坪刈りを行い、調査した。精玄米重と千粒重は 1.9 mm で篩分けし、水分 15% 換算で求めた。整粒歩合は、穀粒判別機 (株式会社サタケ、RGQI 10A) を用いて各調査地点 2,000 粒測定し、粒数割合で求めた。全刈収量は、1.9 mm で選別した圃場一筆の精玄米重を 10 a に換算して求めた。

4) 統計処理

年次を反復として、場所を主効果、処理を副効果とする分割区法で統計処理を行った。出芽期生育は分散分析、苗立ち数と苗立ち期の草丈、葉齢、白化茎長、乾物重は、Fisher's PLSD 法により処理間の多重比較をした。苗立率は、arcsine 変換後に分散分析を行った。出穂期や倒伏程度、収量構成要素は Fisher's PLSD 法により処理間の多重比較をした。登熟歩合と整粒歩合は arcsine 変換後の値を使用した。統計処理は、R (Ver.3.5.2) を使用した。

3-3 結果

根出し処理後の根長は、「ちほみのり」は 38~41 時間処理で平均 0.5~2.4 mm、「萌えみのり」は 36~45 時間処理で平均 0.4~2.6 mm であった (表 3-1)。発根割合は、「ちほみのり」と「萌えみのり」ともに 2018 年、2017 年、2019 年の順に低下した。最も高かった 2018 年の発根割合は、「ちほみのり」は 65%、「萌えみのり」は 41% であった。反対に最も低かった 2019 年の発根割合は、「ちほみのり」は 19%、「萌えみのり」は 16% であった。また、「ちほみのり」の発根割合は全年次を通して「萌えみのり」より高かった。発根種子の平均根長は、「ちほみのり」は 2.8~4.2 mm、「萌えみのり」は 2.6~6.4 mm であった。根出し種子の含水率は 30~32% で催芽種子の 28~32% と同程度であった。

播種後 10 日間の平均気温は、大仙市で 15.1~17.7°C、横手市で 14.4~16.2°C であった (表 3-3)。各形質について 3 年間の平均値を処理間で比較すると、播種後 13~

16日目の出芽期では、根出し種子は催芽種子より草丈は1.3 cm ($p < 0.05$) 長く、葉齢は0.5 ($p < 0.01$) 大きかった。

根出し種子の苗立率は62.4%で、有意でないものの51.8%の催芽種子より高い傾向が見られた。根出し種子の苗立ち数は催芽種子より多い傾向であった。播種後29～31日目の苗立ち期の草丈や茎葉乾物重は、有意ではないものの根出し種子は催芽種子より大きい傾向が見られた。根出し種子の葉齢は催芽種子より有意に大きく、その差は0.4であり出芽期の葉齢差と同程度であった。

鉄コーティング種子と比較すると、根出し種子の苗立率は鉄コーティング種子と同程度であった。一方で催芽種子の苗立率は有意ではないものの鉄コーティング種子より低かった。根出し種子の苗立ち期の草丈と葉齢、茎葉乾物重は、鉄コーティング種子より有意に大きかった。白化茎長は、Fisher's PLSD法による多重比較では処理間に有意な差は見られなかった。

根出し種子の出穂期は、催芽種子より0～6日早く、鉄コーティング種子より0～8日早かった(表3-4)。根出し種子の稈長は催芽種子や鉄コーティング種子と同程度であった。倒伏程度はいずれの処理も小さく、処理による倒伏への影響は認められなかった。精玄米重および収量構成要素は、処理間に差はなかった。全刈収量は、根出し種子 $599 \text{ kg } 10 \text{ a}^{-1}$ 、催芽種子 $580 \text{ kg } 10 \text{ a}^{-1}$ 、鉄コーティング種子 $563 \text{ kg } 10 \text{ a}^{-1}$ で、処理間に有意差は認められなかった。

3-4 考察

本章における研究の結果、根出し種子は現地生産規模量の種子処理が可能であり、現地圃場においても苗立率と初期生育を向上させる技術であると判断された。以下に種子処理と苗立率、生育、収量について検討を加える。

本研究では、最大48 kg、60 a圃場分の根出し処理を一度に行い、実用規模の種子処理が可能であることを実証した(表3-1)。本処理法を用いると、育苗器の容量が棚の収納箱数120箱で14段ある場合、一段につき乾籾40 kgの種子を4段毎に設置することで最大160 kgの乾籾が一度に処理可能と考えられた。これは、播種量 $6 \text{ kg } 10 \text{ a}^{-1}$ の場合2.6 haの播種ができる量である。

本処理法で作出した根出し種子の各年次、各品種における平均根長は、0.4～2.6 mmであり播種時に根の絡まりや詰まりは見られなかった。第2章において、平均根長7 mmでは根が絡まり播種できなかつたこと、および播種時の作業性と苗立ち向上効果の面から現播種機における播種時の最適根長は0.5～5 mmであることを明らかにした。本処理条件で作出した種子は播種時の作業に支障は無く、後述するように苗立ち向上効果もみられたことから、適正な処理条件であったことが示された。

根出し処理後の発根割合は、処理時間が同程度であっても年次や品種により差が見られた。さらに、第2章において処理した種子の発根割合も4月下旬と5月中旬で異なっており、発根は年次や品種、処理時期の影響を受けると考えられた。今後、これらの要因と発根との関係について更なる検討が必要であるが、本研究の結果から種子処理期間中の平均気温が12.7～14.7°Cの場合、「ちほみのり」は育苗器で38～41時間以内の処理、「萌えみのり」は育苗器で36～45時間以内の処理で適切な

根長が得られることが示された。

根出し種子は、催芽種子に比べ出芽期の草丈が大きく葉齢は有意に大きかった(表 3-3)。第 2 章の所内圃場試験の結果では、試験年及び作期を込みにした平均値は、草丈は 1.2 cm、葉齢は 0.4 催芽種子より向上しており、本研究結果と出芽期生育が優れる傾向は同様であった。過酸化石灰資材被覆種子を 25℃に設定した育苗器内で 48 時間加温処理した野村ら (2001) は、無加温種子に比べ播種から出芽揃いまでの日数が短縮したと報告している。その中で、処理後の種子の一部で芽や根の伸長が見られたとしている。同様に、密封した過酸化石灰資材被覆種子を 10~30℃で 3 日間貯蔵した吉永ら (2000) も、貯蔵温度が 15℃以上の種子で出芽日数が短縮し、貯蔵温度が高い程幼芽あるいは幼根が伸長した種子の割合が高かったことを報告している。本研究では、30℃に設定した育苗器で 36~45 時間根出し処理をしており、野村ら (2001) や吉永ら (2000) と類似した処理条件であった。本研究において各種子の出芽開始日は不明であるが、催芽種子より根出し種子の出芽期の葉齢が進んでいたことから早期に出芽したと考えられる。湛水土中直播栽培では早期の出芽により、播種後 14 日目の出芽率が高まり、草丈や葉齢、地上部乾物重といった地上部形質が向上する(古畑ら 2006) ことから、根出し種子による出芽の早期化が出芽期生育を向上させた要因である可能性がある。また、初期葉齢が早く進めば除草剤散布時期の早期化による効果的な雑草防除が可能となる。実際に 2017 年の大仙市と横手市では、根出し種子を播種した圃場は催芽種子より 1~2 日早く除草剤散布が実施できた。

根出し種子の苗立率は、有意ではなかったものの催芽種子より高い傾向が見られ(表 3-3)、第 2 章と同様の傾向が現地でも確認できた。本研究では、第 2 章において示した播種後 10 日間の日平均気温が 13℃より低い条件における苗立ち向上効果は実証できなかったが、播種後 10 日間の平均気温が 14.4~17.7℃において苗立ちが向上する可能性が示された。また、第 2 章では、根長が 0.5 mm 以上 5 mm 以下の根出し種子で苗立率向上に効果が認められたが、本研究では平均根長 0.5 mm 未満の種子でも苗立率が向上する傾向が認められた(表 3-1、表 3-3)。さらに発根割合の少ない種子でも同様に苗立率が向上する傾向が認められた。吉永ら (1998) は、過酸化石灰資材被覆種子を密封保存した場合、貯蔵温度が高まるとともに α -アミラーゼ活性が増大し、20~30℃での貯蔵により土中出芽性が向上したと報告している。 α -アミラーゼ活性は、貯蔵中コーティング外に幼芽・幼根が見られた種子だけでなく、幼芽が見られなかった種子においても増大していたことが報告されている。このことは、根出し処理後の未発根種子においても、発根種子同様の苗立率向上効果がある可能性を示唆している。今後、未発根種子でも苗立率や初期生育が向上するかどうかは適切な根出し程度を判断するうえで重要であるため、発根の有無と出芽や α -アミラーゼ活性の関係を明らかにする必要がある。

根出し種子の苗立ち期生育は、催芽種子に比べ草丈と茎葉乾物重は大きく、葉齢は有意に向上した(表 3-3)。特に根出し種子と催芽種子の葉齢差は、出芽期以降解消することなく苗立ち期まで同程度であったことから、出芽の早期化が出芽期のみでなく苗立ち期の生育向上にも寄与した可能性が示唆された。播種深度の目安とな

る白化茎長は、分散分析では有意差が見られたが Fisher's PLSD 法による多重比較では処理間で差が見られなかった。

根出し種子の苗立ち期生育は鉄コーティング種子より優れ、苗立率は鉄コーティング種子と同等であった (表 3-3)。白土ら (2016) は、催芽種子を播種した場合鉄コーティング種子と同程度の苗立率が得られたと報告しているが、本研究では、各年次内の各現地圃場において催芽種子の苗立率が鉄コーティング種子より低い場合が見られた。その要因は特定できなかつたが、このような催芽種子の苗立率の不安定性は、根出し種子を播種することにより回避できる可能性が示された。

根出し種子の出穂期は、催芽種子より 3 日、鉄コーティング種子より 5 日早かった (表 3-4)。これは根出し種子の出穂期が催芽種子より早い傾向にあった第 2 章の結果や、過酸化石灰資材被覆種子の加温処理で出穂期が 2~3 日早まったという花見・手代木 (1998) の報告と同様であった。根と芽をともに伸長させた種子を播種した金・木村 (1999) は、初期生育のみならず出穂期や成熟期が早まる傾向にあることを報告している。根出し種子は、出穂促進効果によって播種適期の短い寒冷地の直播栽培において、播種適地拡大や適期拡大、熟期の遅い品種の使用を可能にすると考えられた。

稈長や倒伏程度は、根出し処理による影響は見られず、催芽種子や鉄コーティング種子と同程度であった (表 3-4)。収量構成要素や全刈収量も処理間で差は無く、収量は催芽種子と同等であった第 2 章の結果と同様であった。本研究では苗立ち数が目標の苗立ち数 100 本 m^{-2} を超えている場合が多く、根出し種子により苗立ち数が増加しても収量に影響を及ぼさなかつたと考えられる。しかし、苗立ち数が少ないために収量が低い条件では、根出し種子により収量が安定する可能性がある。さらに根出し種子は、遅延型冷害時には出穂促進効果による登熟向上により、収量を安定させる効果があると考えられる。

以上より、根出し種子は、育苗器を用いて大量に処理可能であり、現地においても苗立率や初期生育を向上させる技術であることが示された。

表 3-1 種子処理条件および播種時の催芽程度、含水率

年次	場所	処理	品種	処理量 (kg)	平均 気温 (°C)	処理 時間 (hr)	処理 温度 (°C)	根長		芽長		発芽 割合 (%)	発根 平均長 (mm)	含水率 (%)
								mm (標準偏差)	mm (標準偏差)	mm (標準偏差)	mm (標準偏差)			
2017	大仙市	根出し	ちほみのり	48	13.4	41	27.0	2.4 (2.7)	0.0 (0.1)	56	4.2	-		
		催芽		32	13.8	24	30.0	0.0 (0.0)	0.1 (0.4)	0		-		
	横手市	根出し	萌えみのり	15	12.9	36	30.0	1.6 (3.1)	0.0 (0.1)	28	5.8	31.0		
		催芽		15	13.6	144	14.5	0.0 (0.0)	0.0 (0.2)	0		28.9		
2018	大仙市	根出し	ちほみのり	30	12.7	38	30.0	2.0 (2.2)	0.0 (0.1)	65	3.1	30.6		
		催芽		45	13.1	16	30.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.1)	0		31.6		
	横手市	根出し	萌えみのり	15	14.7	45	30.0	2.6 (4.0)	0.0 (0.0)	41	6.4	30.2		
		催芽		15	14.0	96	13.6	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0		28.4		
2019	大仙市	根出し	ちほみのり	40	13.3	40	30.0	0.5 (1.4)	0.0 (0.0)	19	2.8	31.7		
		催芽		30	13.6	16	30.0	0.0 (0.0)	0.0 (0.1)	0		29.1		
	横手市	根出し	萌えみのり	15	13.1	40	30.0	0.4 (1.3)	0.0 (0.1)	16	2.6	30.3		
		催芽		15	12.2	72	14.6	0.0 (0.0)	0.0 (0.0)	0		30.2		

処理量は使用乾粒量を示す。平均気温は、種子の浸漬開始日から播種前日までの日平均気温の平均値を示す。処理時間と処理温度は、育苗器または催芽器で処理した時間と設定温度を示す。横手市催芽の処理温度は、催芽処理期間中の日平均気温の平均値を示す。発芽割合は、処理後の種子100粒のうち根又は芽が1mm以上伸長しているものの割合を示す。発根平均長は、発根種子の平均根長を示す。



図 3-1 根出し種子作製の様子 (2019年大仙市)
(水滴落下防止のため、最上段にポリシートを載せた育苗箱を設置した)

表 3-2 試験圃場の播種量と施肥量

年次	場所	処理	面積 (a)	播種日	播種量 (g m ⁻²)	基肥 (kg/10a)			追肥 (kg/10a)				
						施用日	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	施用日	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
2017	大仙市	根出し	60	5月14日	7.9	5月13日	10.0	3.3	3.3	7月15日	3.0	0.6	3.0
		催芽	38	5月14日	7.2	5月13日	10.0	3.3	3.3	7月15日	3.0	0.6	3.0
		鉄	21	5月14日	4.9	5月12日	10.0	3.3	3.3	7月15日	3.0	0.6	3.0
	横手市	根出し	22	5月9日	6.4	4月29日	7.8	6.0	7.8	7月25日	2.8	1.4	2.8
		催芽	17	5月9日	5.6	4月29日	7.8	6.0	7.8	7月25日	2.9	1.5	2.9
		鉄	19	5月9日	5.2	4月29日	7.8	6.0	7.8	7月25日	2.1	1.1	2.1
2018	大仙市	根出し	38	5月12日	6.8	5月5日	7.0	2.6	1.8	7月18日	1.9	0.4	1.9
		催芽	60	5月12日	6.1	5月5日	7.0	2.6	1.8	7月22日	2.1	0.4	2.1
		鉄	21	5月12日	4.9	5月5日	7.0	2.6	1.8	7月22日	1.9	0.4	1.9
	横手市	根出し	17	5月8日	6.1	4月30日	7.8	6.0	7.8	7月25日	2.0	1.5	1.5
		催芽	22	5月8日	7.2	4月30日	7.8	6.0	7.8	7月25日	2.0	1.5	1.5
		鉄	19	5月8日	5.2	4月30日	7.8	6.0	7.8	7月25日	2.0	1.5	1.5
2019	大仙市	根出し	60	5月11日	5.8	5月3日	10.0	3.7	2.6	7月20日	1.9	0.4	1.9
		催芽	38	5月11日	6.2	5月3日	10.0	3.7	2.6	7月20日	2.1	0.4	2.1
		鉄	21	5月10日	7.3	5月3日	10.0	3.7	2.6	7月20日	1.9	0.4	1.9
	横手市	根出し	22	5月8日	5.9	5月1日	9.0	6.0	6.0	7月18日, 7月24日, 8月1日	3.9	2.0	3.9
		催芽	17	5月8日	6.0	5月1日	9.0	6.0	6.0	7月24日, 8月1日	4.0	2.0	4.0
		鉄	19	5月9日	5.2	5月1日	9.0	6.0	6.0	7月18日, 7月24日, 8月1日	4.0	2.0	4.0

大仙市は「ちほみのり」、横手市は「萌えみのり」を供試した。2019年横手市の追肥は、根出し圃場と鉄圃場は3回、催芽圃場は2回に分けて施用した。追肥量は総施用量を示す。

表 3-3 種子処理が出芽期生育と苗立率、苗立期生育に与える影響

年次	場所	処理	播種後 平均気温	出芽期生育			苗立率 (%)	苗立数 (本 m ⁻²)	苗立期生育								
				播種後 日数	草丈 (cm)	葉齢			播種後 日数	草丈 (cm)	葉齢	白化茎長 (cm)	茎葉乾物重 (mg)				
2017	大仙市	根出し		13	4.4	2.6	75.6	213	30	24.4	5.5	0.5	58.5				
		催芽	16.7	13	2.7	2.2	66.4	171	30	19.1	5.2	0.4	45.9				
		鉄		-	-	-	93.5	161	30	18.7	5.3	0.3	48.7				
	横手市	根出し		16	2.0	1.9	61.5	132	31	17.9	5.5	0.2	43.4				
		催芽	14.4	16	1.1	1.5	53.4	101	31	17.8	5.0	0.3	23.3				
		鉄		-	-	-	41.2	72	31	14.2	4.4	0.3	13.8				
2018	大仙市	根出し		13	2.4	2.0	38.0	93	30	21.3	6.3	0.4	97.9				
		催芽	15.1	13	1.5	1.4	40.6	89	30	23.8	5.8	0.5	78.4				
		鉄		-	-	-	61.5	107	30	19.8	5.6	0.3	53.1				
	横手市	根出し		13	3.0	2.1	72.6	147	29	17.0	5.8	0.2	52.3				
		催芽	14.8	13	2.0	1.5	44.7	108	29	16.6	5.0	0.3	34.9				
		鉄		-	-	-	49.0	84	29	13.6	4.6	0.1	18.8				
2019	大仙市	根出し		13	3.9	2.6	56.0	115	30	24.0	6.9	0.2	114.1				
		催芽	17.7	13	3.4	2.3	37.4	81	30	20.3	6.6	0.2	115.5				
		鉄		-	-	-	56.0	144	29	20.4	6.5	0.1	93.6				
	横手市	根出し		13	4.7	2.7	70.7	144	30	21.1	6.6	0.2	73.1				
		催芽	16.2	13	2.2	2.0	68.4	141	30	16.5	6.4	0.1	62.5				
		鉄		-	-	-	68.2	121	29	16.0	6.3	0.1	57.7				
平均																	
	根出し			3.4	2.3	62.4	a	141	a	20.9	a	6.1	a	0.3	a	73.2	a
	催芽			2.1	1.8	51.8	a	115	a	19.0	ab	5.7	b	0.3	a	60.1	ab
	鉄			-	-	61.6	a	115	a	17.1	b	5.5	b	0.2	a	47.6	b
分散分析	場所			ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	*					
	処理			*	***	ns	ns	ns	*	**	*	**					
	場所×処理			ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns					

大仙市は「ちほみのり」、横手市は「萌えみのり」を供試した。播種後平均気温は、播種日から播種9日目までの10日間の日平均気温の平均値を示す。葉齢は不完全葉を1とした。*、**、*** は分散分析の結果それぞれ5%、1%、0.1%水準で有意であること、nsは5%水準で有意でないことを示し、同じアルファベットは多重比較の結果5%水準で有意差が無いことを示す（出芽期生育は分散分析、苗立率はarcsine変換後Fisher's PLSD法(n=9)、その他はFisher's PLSD法(n=3)）。

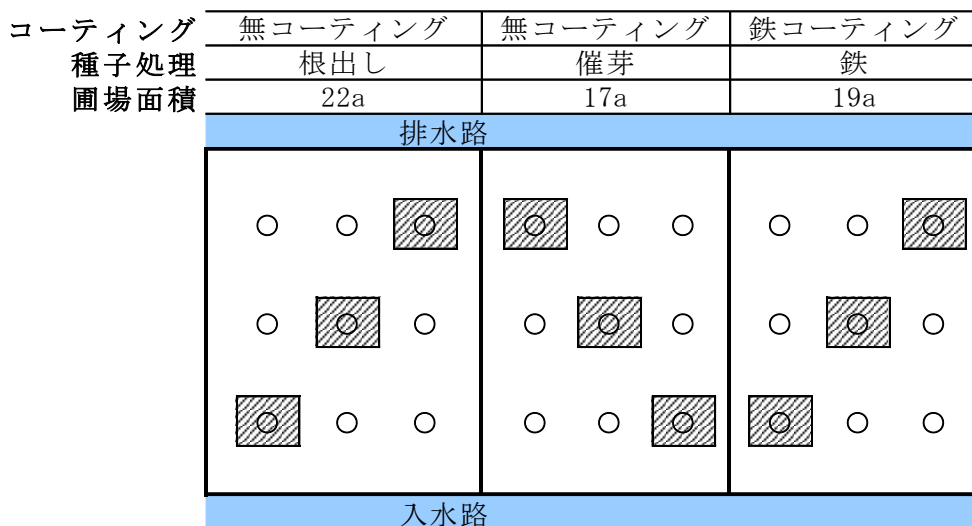


図 3-2 試験区配置図 (2017 年横手市)

(太枠は圃場一筆(1 処理)を示す。斜線枠は生育調査と収量調査の地点、○印は苗立ち調査地点を示す。生育調査および収量調査は一圃場につき 3 地点、苗立ち調査は一圃場につき 9 地点行った。)

表 3-4 種子処理が出穂期と稈長、倒伏程度、収量構成要素、収量に与える影響

年次	場所	処理	出穂期	稈長 (cm)	倒伏程度 (0無~5甚)	精玄米重 (g m ⁻²)	穂数 (本 m ⁻²)	一穂粒数 (粒)	粒数 (百粒 m ⁻²)	登熟歩合 (%)	千粒重 (g)	整粒歩合 (%)	全刈収量 (kg/10a)										
2017	大仙市	根出し	8月6日	72.0	1.6	749	733	52.1	380	79.5	24.8	79.5	655										
		催芽	8月12日	74.4	1.3	639	602	50.5	290	89.8	24.8	81.3	691										
		鉄	8月12日	75.1	2.4	697	646	61.2	393	74.2	24.0	81.9	671										
	横手市	根出し	8月15日	63.4	0.0	621	512	54.8	281	87.5	25.3	83.0	549										
		催芽	8月16日	71.0	0.0	707	592	60.0	355	79.0	25.3	87.0	502										
		鉄	8月18日	70.3	0.0	572	442	66.4	293	76.2	25.5	84.6	527										
2018	大仙市	根出し	8月3日	70.2	0.0	626	573	52.1	297	88.7	23.9	89.8	611										
		催芽	8月6日	72.0	0.8	646	527	57.4	304	87.6	24.2	91.6	603										
		鉄	8月9日	67.7	0.0	553	533	54.5	293	80.8	23.4	91.2	596										
	横手市	根出し	8月7日	63.6	0.0	612	615	51.5	316	79.5	24.3	74.3	547										
		催芽	8月12日	68.4	0.0	299	624	60.6	378	32.4	23.7	65.2	347										
		鉄	8月11日	65.4	0.0	513	591	51.2	295	71.7	24.6	76.6	445										
2019	大仙市	根出し	8月2日	71.8	0.8	707	660	58.8	387	80.0	23.0	79.3	656										
		催芽	8月2日	71.4	0.0	687	588	66.7	390	75.7	23.2	83.6	704										
		鉄	8月2日	68.3	0.0	648	619	53.3	330	83.7	23.2	80.7	674										
	横手市	根出し	8月3日	63.5	0.0	642	638	58.6	368	74.2	24.4	72.5	573										
		催芽	8月5日	62.7	0.0	682	603	54.0	324	84.5	24.9	76.2	636										
		鉄	8月11日	59.0	0.0	607	624	40.7	254	92.2	25.9	78.8	467										
平均	根出し	8月6日	a	67.4	a	0.4	a	660	a	622	a	54.7	a	338	a	81.6	a	24.3	a	79.7	a	599	a
	催芽	8月9日	ab	70.0	a	0.3	a	610	a	589	a	58.2	a	340	a	74.8	a	24.3	a	80.8	a	580	a
	鉄	8月11日	b	67.6	a	0.4	a	598	a	576	a	54.5	a	310	a	79.8	a	24.4	a	82.3	a	563	a
分散分析	場所	*	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**										
	処理	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns										
	場所×処理	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns										

大仙市は「ちほみのり」、横手市は「萌えみのり」を供試した。精玄米の篩目は1.9 mmとし、水分15%換算で精玄米重と千粒重を算出した。2018年横手市の催芽処理は、穂いもち発生により減収した。*、** は分散分析の結果それぞれ5%、1%水準で有意であることを示し、nsは5%水準で有意でないことを示す(登熟歩合と整粒歩合はarcsine変換後Fisher's PLSD法、その他はFisher's PLSD法、n=3)。同じアルファベットは多重比較の結果5%水準で有意差が無いことを示す。

第4章 根出し種子の保存条件と保存可能期間の検討

4-1 はじめに

第2章、第3章において、苗立率や初期生育向上効果、実用性が実証された根出し種子は、播種日に合わせて処理し、処理後5日以内の播種（農研機構東北農業研究センター 2021）が推奨されているが、保存における詳細な条件や温度、期間は明らかになっていない。

種子予措は播種日に合わせて行うことが理想的であるが、事前の一括処理や保存により、繁忙期に効率的な作業計画を組むことができる。しかし、種子の保存により幼芽や幼根の過剰伸長（第2章）が生じると、播種機の操出し不良や幼芽の損傷による苗立率の低下および初期生育の低下（齋藤ら 1997、長坂ら 1999、第2章）を引き起こす恐れがある。実際の生産現場においても、種子の保存により幼芽や幼根が伸長し、播種時に絡まったりした事例がみられた。種子予措を終えた種子を安全に保管するためには、スムーズな播種作業が可能であり、播種後の出芽や苗立ち、生育量を確保できる保存温度および保存可能期間を明らかにする必要がある。

従来、浸漬後催芽させた種子の保存温度および日数は、移植栽培用の催芽種子では5°Cで15日間、15°Cで20日間（諏訪 1979）、過酸化石灰コーティング種子では室温で1日（石丸ら 2000）～1週間程度（渡部ら 1990）、10°Cでは20日（若松・片平 2006）～28日間（石丸ら 2000）、15°Cでは7日間（石丸ら 2000）であることが明らかになっている。本播種栽培（無コーティング種子を使用した代かき同時浅層土中播種栽培）において種子の一括処理を想定した場合、種子の保存期間は、寒冷地である北東北地域における湛水直播栽培の播種適期期間（嶽石・福田 1985、高橋ら 1997、中林ら 2007）である30日程度保存ができれば十分である。一方で、移植栽培用の催芽種子や過酸化石灰コーティング催芽種子の保存期間は、低温保存により長期化が可能となることから、根出し種子の保存においても、同様に長期の場合には低温保存が有効であると予想された。

そこで本研究では、実施しやすい常温保存では最大15日間、低温庫が使用可能な場合ではより長期間の20～30日間程度の保存期間の有効性を検討することとした。まず室内試験において、長期保存を想定した低温保存温度を検討した。低温での保存は、過酸化カルシウムコーティング催芽種子（渡部ら 1990、石丸ら 2000、若松・片平 2006）や移植栽培で使用する催芽種子（Yamadaら 1962、諏訪ら 1979）では5°C～15°Cが検討されてきた。いずれの種子処理条件も本播種栽培で使用する種子処理条件と類似していることから、本研究においても5°C、10°C、15°Cで検討した。次に、圃場試験において、根出し種子を常温および低温で保存し、保存期間中の幼芽や幼根の伸長、無コーティング代かき同時浅層土中播種後の苗立率や生育、出穂期から、各保存条件に適した保存可能期間を検討した。常温や低温における種子の保存方法は、過酸化カルシウムコーティング催芽種子では、ビニール袋による密封保存（下坪ら 1997、石丸ら 2000、吉永ら 2000、野村ら 2002、2003、若松・片平 2006、山内 2010）や、網袋での保存（諏訪ら 1979、

野村ら 2003、若松・片平 2006) について実用性が確認されている。しかしながら、無コーティング種子をビニール保存した場合、保存期間中に袋内に発生した結露を吸収し種子の幼芽や幼根が伸長した事例が見られたことから、結露が発生しにくいパレット等通気性の良い場所で、網袋のまま保存する方法とした。

4-2 材料および方法

1) 試験 1 長期保存を想定した低温保存温度の検討 (室内試験)

水稻品種「萌えみのり」の種子 (イプコナゾール・銅水和剤 7.5 倍希釈液塗抹処理 (30ml/kg) 済み) 1 kg が入った網袋を 15°C に設定した恒温室 (WT-9604、株式会社日本医科器械製作所) 内で 5~6 日間水に浸漬後、根出し処理を行った。根出し処理は、第 3 章の方法に準じて行った。浸漬した種子を脱水し、玄米 30 kg 用紙袋 1 袋につき乾籾 15~20 kg を封入して、30°C に設定した蒸気式育苗器 (KT120AD、株式会社啓文社製作所) 内で 40 時間根出し処理を行った。育苗器の棚に育苗箱を並べ、その上に種子の入った紙袋を載せた。棚の最上段には水滴落下を防ぐためビニールで被覆した育苗箱を設置した。処理後の根出し種子は、網袋のまま 5、10、15°C に設定した人工気象器 (MLR-350HT、三洋電機バイオメディカ株式会社) のメッシュ棚上に 1 cm 以上間隔を空けて静置し、0 (対照区)、5、10、14、21 日間保存した。種子の保存は暗条件で行い、湿度調整は行わなかった。種子の浸漬は、全ての種子の保存終了日が同日となるように逆算して開始した。種子の催芽程度と催芽割合は、保存前および保存後に種子袋内を攪拌して取り出した 100 粒について測定し、それぞれの平均値とした。外穎に亀裂が入った状態から幼芽および幼根の長さが 0~1 mm 未満の種子を 0 mm、1 mm 以上 2 mm 未満の種子を 1 mm とした。幼芽および幼根の長さが 2 mm 以上の種子は、1 mm の種子と同様に小数第一位以下を切り捨てた値を幼芽長および幼根長とした。発根割合は幼根長さが 1 mm 以上の種子の割合とした。含水率は、保存後の種子を採取し、採取時の種子重量と 105°C で 24 時間以上乾燥させた種子重量の差を乾燥前重量で除して求めた。土中出芽試験は、代かきをした水田土壌をアグリポット (直径 6.5 cm×深さ 5.6 cm、東京硝子器械株式会社) に 4 cm の深さに充填し、1 ポット 1 区として保存後の種子 20 粒を播種し、播種深度が 5 mm となるよう前述の代かき土壌で覆土して行った。1 ブロック 17 区をコンテナ (44.3 cm×29.5 cm×深さ 15.9 cm) 内に設置し、3 ブロック乱塊法で試験区を配置した。コンテナは、20°C に設定したグロースチャンバー (PGR15、CONVIRON、明期 12 時間・400 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、暗期 12 時間) 内に設置した。水管理は、播種 13 日後までは浅水~落水状態になるように 1~3 日置きに 1 ポットにつき 3~5 mL 加水し、播種 14 日後以降は 1~2 cm 湛水とした。出芽率は、播種後 21 日間で 1 mm 以上出芽した個体数から算出した。播種 21 日後に試験区ごとに全出芽個体を抜き取り、草丈、葉齢および個体乾物重を測定した。草丈と葉齢は試験区内の全調査個体の平均値とし、葉齢は不完全葉を 1 とした。個体乾物重は、出芽個体の茎葉部を 105°C に設定した乾燥機 (OF-450、アズワン株式会社) で 24 時間以上乾燥させ、試験区毎の全重を出芽個体数で除して求めた。

2) 試験 2 常温および低温保存期間の検討 (圃場試験)

試験は2020年～2021年に農研機構東北農業研究センター大仙研究拠点内の水田にて実施した。基肥として、両年ともに緩効性化成肥料を含む複合肥料(N:P:K=27:10:8)を窒素成分で 8.1 g m^{-2} 施用した。追肥は2020年のみ行い、幼穂形成期に硫酸アンモニウムを、減数分裂期に尿素をそれぞれ窒素成分で 2.0 g m^{-2} 施用した。種子予措として、水稻「萌えみのり」の種子(イプコナゾール・銅水和剤7.5倍希釈液塗抹処理(30ml/kg)済み)5kgが入った網袋を、 15°C で5日間水に浸漬し、脱水後玄米30kg用紙袋に封入して根出し処理を行った。根出し処理は室内試験と同じ条件で実施し、処理後の種子は常温または低温で保存した。常温保存は、作業場の直射日光の当たらない屋内にパレットを置き、その上に網袋のまま静置した。低温保存は 10.0°C 暗条件に設定した人工気象器(MLR-350HT、三洋電機バイオメディカ株式会社)内のメッシュ棚上に網袋のまま保存し、湿度調整はしなかった。保存日数は、常温保存は0(対照区)、5、10、15日間、低温保存は20、29日間とした。種子の浸漬開始日は、全ての種子の保存終了日が同日となるよう逆算して設定した。種子は、代かき同時浅層土中播種機で2020年5月14日と2021年5月18日に乾粒換算で $6.8\sim 8.4\text{ g m}^{-2}$ 散播した(第2表)。試験区は、圃場一筆に保存条件と保存日数の異なる6水準の種子を3ブロック乱塊法で配置(図4-1)した。播種後の水管理は、2020年は播種当日から10日間落水、2021年は鳥害回避のため播種後すぐに湛水し、播種8日後から13日後まで落水状態とした。雑草防除および病虫害防除は適宜行った。

3) 統計処理

室内試験の出芽率と生育は、乱塊法として保存温度毎にWilliams法で0日保存の対照区に対して各保存日数の多重比較をした。出芽率は平方根変換後の値を使用した。圃場試験の生育と苗立率、出穂期は、年次を込みにした3ブロック/年×2カ年の計6ブロックの乱塊法として、保存温度条件毎にWilliams法で保存期間0日の対照区に対して各保存日数の多重比較をした。苗立率は、arcsine変換後の値を使用した。統計処理は、R(Ver.3.5.2)を使用した。

4-3 結果

1) 試験 1 長期保存を想定した低温保存温度の検討 (室内試験)

保存後の芽長および根長は保存前と同じまたは僅かに短くなった(表4-1)。発芽割合は、全保存温度および全保存日数において保存前と同程度であった。発根割合は保存により低下する傾向が見られた。保存後の含水率は、 5°C 保存では24～30%、 10°C 保存では22～28%、 15°C 保存では19～26%であり、全ての保存温度において保存日数が経過するほど低下する傾向が見られ、保存温度が高くなるほど含水率の低下程度が大きかった。根出し保存種子の出芽率は、 5°C 保存では70～82%、 10°C 保存では63～87%、 15°C 保存では58～82%であり、全ての保存温度において保存日数が経過するに従い低下する傾向が見られた(図4-2)。更に、 5°C 保存と 15°C 保存では10日保存以降、 10°C 保存では14日保存以降において対照区より有意に出芽率が低かった。 10°C 保存と 15°C 保存の出芽率は、含水率との間に正

の相関関係 ($10^{\circ}\text{C} : r=0.950^*$ 、 $15^{\circ}\text{C} : r=0.959^{**}$) が認められ、含水率が 10°C 保存では 25%、 15°C 保存では 23% 以下の場合で対照区より有意に低かった (図 4-3)。播種 21 日後の草丈や葉齢、個体乾物重は、同一保存温度内において多くの場合、対照区と同程度であったが、 5°C 保存において 14 日以降の草丈や個体乾物重は対照区と比較すると小さい傾向が見られた (図 4-4)。

2) 試験 2 常温および低温保存期間の検討 (圃場試験)

根出し種子を常温暗所で保存した場合、保存期間中の保存場所の日平均気温が $15.0\sim 18.6^{\circ}\text{C}$ の条件において保存期間の前後で発芽割合はほぼ変化せず、発根割合は同じか低下する傾向が見られた (表 4-2)。低温保存した種子では、発芽割合や発根割合は 20 日保存ではほぼ変化せず、29 日保存ではそれぞれ 4 ポイント、9 ポイント減少した。保存後の種子の含水率は常温保存では 27~29%、低温保存では 24~28% であり、各保存条件において保存日数が経過するほど低下する傾向が見られた。播種量は、乾物換算 $6.8\sim 8.4\text{ g m}^{-2}$ であった。播種 14 日後の草丈や葉齢は、各保存条件において対照区との間に有意差は認められなかったが、常温保存では対照区と同等以上であったのに対し、低温保存では対照区を下回った (表 4-3)。苗立率は、対照区と比較すると常温 5~15 日保存では 5~10 ポイント、低温 20 日保存では 10 ポイント高かったものの、低温 29 日保存では 10 ポイント低かった。播種 29 日後の草丈や葉齢、白化茎長、個体乾物重は、各保存条件において対照区との間に有意差は認められなかったが、低温保存において個体乾物重が対照区より小さい傾向が見られた。出穂期は、有意差は認められなかったが常温保存では対照区より一日早く、低温保存では対照区と同じであった。

4-4 考察

本章における研究の結果、根出し種子の保存は、保存期間中における保存場所の日平均気温の平均値が $15.0\sim 18.6^{\circ}\text{C}$ の常温暗所において、網袋のままパレットの上で保存する場合は 15 日間、 9.5°C の低温庫で通気性の良い台上に網袋のまま保存する場合は、20 日間は保存可能であることが明らかになった。以下に本結論を導き出した根拠を示す。

室内試験において、根出し種子を低温保存する場合は 10°C が適すると考えられた。根出し種子は、保存による発芽や発根、幼芽や幼根の伸長、出芽率、生育に大きな差は見られなかったが、 10°C 保存や 15°C 保存に比べ 5°C 保存では保存が長期になるほど生育量が小さい傾向が見られた (表 4-2、図 4-2、図 4-4)。保存に伴う出芽率の低下には、保存温度間で明確な差が見られなかった (図 4-2)。 10°C と 15°C 保存では出芽率と種子の含水率には負の相関が見られ (図 4-3)、保存に伴う出芽率の低下は種子の含水率の低下が一因と考えられた。含水率の低下は 10°C 保存より 15°C 保存で速い傾向が見られたため、 10°C 保存の方が出芽率低下のリスクが低いと考えられた。野村ら (2002) は、根出し種子と類似した種子予措条件である、鳩胸催芽種子を、過酸化石灰をコーティング後に加温処理した種子を 5°C や 15°C で保存した場合、3 日以上長期保存において出芽促進効果が消失したことを報告している。またその要因として保存種子の含水率低下を示唆している。根出し種子も同様に、

含水率の低下により根出し種子本来の初期生育促進効果や苗立ち向上効果（第2章、第3章、今須ら 2022）が見られなくなる可能性がある。したがって、根出し種子を長期保存するための低温保存温度は、含水率の低下のし易さや播種後の生育から総合的に判断すると、10℃保存が適すると考えられた。

圃場試験において、保存期間中の日平均気温の平均値が15.0～18.6℃において保存期間中に発根や発芽、根の伸長は見られず播種に支障の無い種子が得られた（表4-2）。しかし、幼芽や幼根を伸ばした種子について、加水後の根の細胞分裂や細胞伸長を検討した山川・岸川（1957）は、根端細胞における分裂適温は25℃付近、表皮細胞における伸長適温は30℃付近としており、根出し種子の種子袋内部の温度や湿度が上昇した場合、過度な根の伸長が起こる恐れがある。したがって、根出し種子を保存する場合は、催芽種子同様、種子袋内部の温度や湿度の上昇を防ぐために、直射日光の当たらない屋内暗所で種子袋同士の間隔を空けて置く必要があると考えられた。日平均気温の平均値が15.0～18.6℃の常温で5～15日保存した根出し種子は、苗立率や生育は向上し、出穂期は早まる傾向が見られた（表4-3）。9.5℃の低温で保存した根出し種子の生育は、播種14日後は対照区より小さい傾向が見られたが、播種30日後の生育や出穂期は対照区と同程度であった。苗立率は、20日保存では対照区と同程度であったが、29日保存では対照区より低い傾向が見られた。29日保存種子の播種時の含水率は、室内試験で10℃保存種子において出芽率の低下が認められた25%より低く、苗立率低下の要因となった可能性が考えられた。以上より、根出し種子を常温保存する場合は15日まで、約10℃の低温で保存する場合は20日までが適当であると考えられた。しかし29日保存においても保存期間中に発芽や発根が認められず生育は無保存種子と同程度であったことから、保存期間拡大による作業の効率化を可能とするためにも、保存期間中の種子の含水率低下を抑制し長期保存を可能とする方法や播種量増加による苗立率安定化について今後検討する必要がある。

本研究により種子の保存条件が明らかとなったことで、代かき同時浅層土中播種栽培において種子予措時の作業分散が可能となり、作業効率が向上することで代かき同時浅層土中播種栽培面積の拡大時に柔軟に対応できると考えられた。

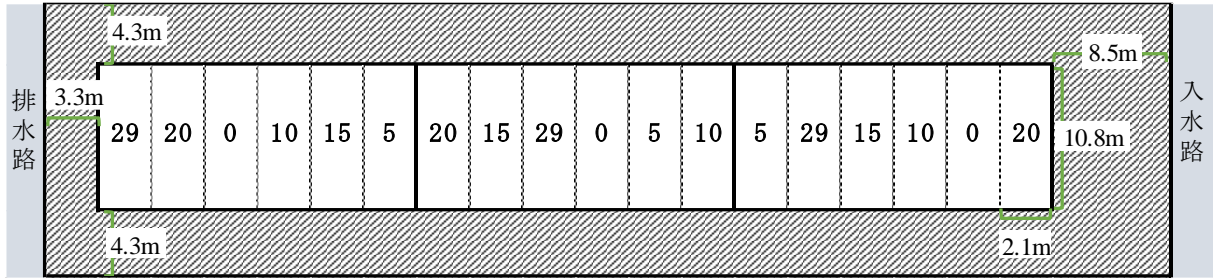


図 4-1 圃場試験の試験区配置 (2020 年)

(太枠内は同一ブロック、小枠内は試験区、小枠内の数値は保存日数を示す。
斜線はボーダー (代かき同時浅層土中播種した箇所) を示す。)

表 4-1 根出し保存種子の保存前および保存後 (播種時) の
催芽程度と催芽割合、含水率 (室内試験)

保存温度 (°C)	保存日数 (日)	保存前				保存後 (播種時)				
		幼芽長 (mm)	幼根長 (mm)	発芽割合 (%)	発根割合 (%)	幼芽長 (mm)	幼根長 (mm)	発芽割合 (%)	発根割合 (%)	含水率 (%)
対照	0	-	-	-	-	0.0	0.5	100	15	32
5	5	0.0	1.0	100	26	0.0	0.7	96	22	30
	10	0.0	0.4	95	14	0.0	0.2	99	9	28
	14	0.0	0.5	98	19	0.0	0.4	99	17	28
	21	0.0	0.5	100	23	0.0	0.3	100	15	24
10	5	0.0	1.2	100	29	0.0	0.5	99	19	28
	10	0.0	0.6	98	18	0.0	0.4	98	14	24
	14	0.0	0.5	96	19	0.0	0.3	100	12	25
	21	0.0	0.4	100	17	0.0	0.3	98	14	22
15	5	0.0	0.9	98	26	0.0	0.9	100	25	26
	10	0.0	0.6	98	19	0.0	0.3	100	15	23
	14	0.0	0.6	98	22	0.0	0.4	100	15	23
	21	0.1	0.3	98	9	0.0	0.3	99	14	19

幼芽長と幼根長は播種直前の種子 100 粒の平均値、発芽割合は幼芽が 0 mm 以上催芽した種子の割合、発根割合は幼根が 1 mm 以上伸長した種子の割合を示す。

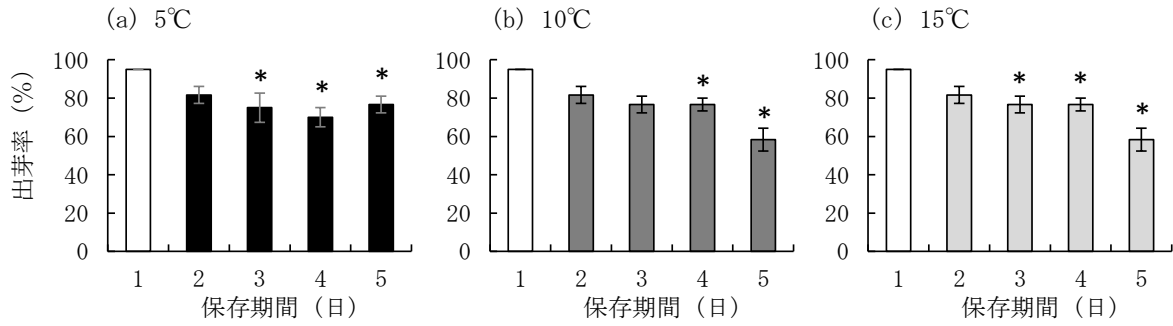


図 4-2 保存温度と期間が根出し保存種子の出芽率に及ぼす影響 (室内試験)
 ((a)5°C保存、(b)10°C保存、(c)15°C保存。図中のバーは標準誤差を示す (n=3)。
 * は同一保存温度内の Williams 検定の結果、対照区と 5%水準で有意差があることを示す。出芽率の検定は arcsin 変換後の数値を使用した。)

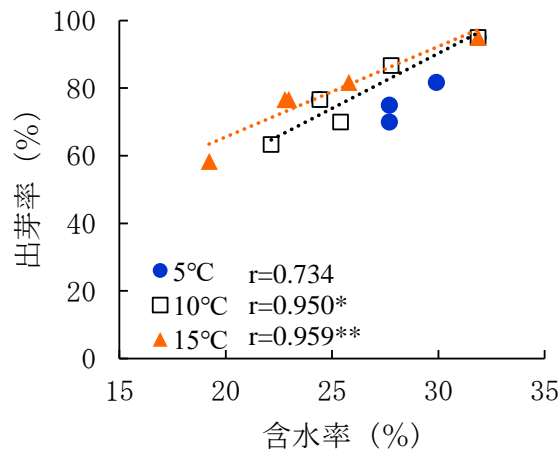


図 4-3 根出し種子の保存後の含水率と出芽率の関係 (室内試験)
 (*、**はそれぞれ 5%、1%水準で有意な相関関係があることを示す (n=5)。)

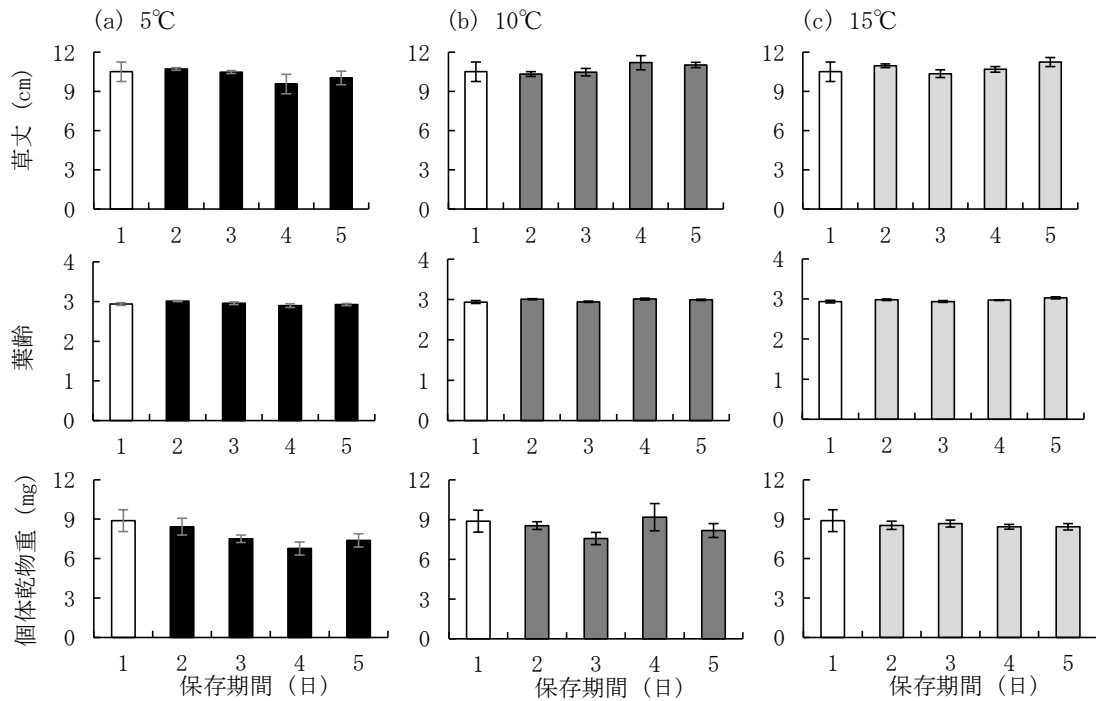


図 4-4 保存温度と期間が根出し保存種子の播種 21 日後の生育に及ぼす影響
(室内試験)

((a)5°C保存、(b)10°C保存、(c)15°C保存。図中のバーは標準誤差を示す (n=3)。
同一保存温度内の Williams 検定の結果、5%水準で対照区と有意差は認められなかった。)

表 4-2 根出し種子の保存温度および播種前後の催芽程度、含水率 (圃場試験)

保存条件	保存日数	保存温度		保存前					保存後				
		2020年 (°C)	2021年 (°C)	幼芽長 (mm)	幼根長 (mm)	発芽割合 (%)	発根割合 (%)	含水率 (%)	幼芽長 (mm)	幼根長 (mm)	発芽割合 (%)	発根割合 (%)	含水率 (%)
対照	0	-	-	-	-	-	-	-	0.0	0.2	96	12	31
常温	5	15.4	18.6	0.0	0.4	97	15	31	0.0	0.3	98	11	29
	10	15.6	18.1	0.0	0.2	96	8	31	0.0	0.2	95	5	29
	15	15.0	17.1	0.0	0.2	93	9	32	0.0	0.3	94	9	27
対照	0	-	-	-	-	-	-	-	0.0	0.2	96	12	31
低温	20	9.5	-	0.0	0.1	91	7	31	0.0	0.2	92	7	28
	29	9.5	-	0.0	0.3	92	12	31	0.0	0.1	88	3	24

保存温度は、常温は室内暗所気温、低温は人工気象器内における保存期間中の平均値を示す。常温保存温度は、左から 2020 年、2021 年の値を示す。保存温度を除くその他の数値は 2020 年～2021 年の平均値を示す。幼芽長と幼根長は播種直前の種子 100 粒の平均値、発芽割合は幼芽が 0 mm 以上催芽した種子の割合、発根割合は幼根が 1 mm 以上伸長した種子の割合を示す。

表 4-3 根出し保存種子の播種量および播種後の生育、苗立率、出穂期 (圃場試験)

保存条件	保存日数	播種量 (g m ⁻²)	播種14日後		苗立率 (%)	播種29日後				出穂期
			草丈 (cm)	葉齢		草丈 (cm)	葉齢	白化茎長 (cm)	個体乾物重 (mg)	
対照	0	8.4	4.2	2.6	51	19.4	6.2	0.1	75	8月16日
常温	5	7.5	4.7	2.6	59	20.1	6.2	0.2	83	8月15日
	10	6.8	4.8	2.6	57	20.1	6.2	0.2	82	8月15日
	15	7.0	4.8	2.7	62	20.5	6.2	0.2	101	8月15日
対照	0	8.4	4.2	2.6	51	19.4	6.2	0.1	75	8月16日
低温	20	7.1	3.7	2.4	61	19.5	6.2	0.2	66	8月16日
	29	7.0	4.0	2.5	41	19.7	6.2	0.2	71	8月16日

値は2020~2021年の平均値を示す。葉齢は不完全葉を1とした。生育調査は、2021年は播種29日目のみ防鳥枠内の個体を調査し、その他は防鳥枠外の個体を調査した。苗立ち調査は防鳥枠内の個体を調査した。保存条件毎にWilliams検定をした結果、対照区と全ての項目において5%水準で有意差が見られなかった。苗立率はarcsin変換後の値を使用した。

第5章 総合考察

水稻無コーティング種子を使用した代かき同時浅層土中播種は、催芽種子を代かきと同時に浅い土中に播種する湛水直播栽培である。しかし、寒冷地において圃場内の排水不良箇所では局所的に苗立ちが低下する場合や、処理済み種子の保存により幼芽や幼根が過伸長となり播種機内で絡まる事例が見られた。そこで本論文では、寒冷地における代かき同時浅層土中播種栽培の苗立ち安定化を目的に、無コーティングの催芽種子より優れる苗立ちを示す種子処理方法および処理種子の保存条件や保存可能期間について検討した。

第2章では、苗立ちを向上させる種子処理技術を開発するために、播種時の催芽程度の違いが苗立ちや初期生育に与える影響について調査した。催芽種子、催芽時に幼芽のみ伸長させた芽出し種子、催芽時に幼根のみ伸長させた根出し種子、機械播種時に催芽部分が損傷することを想定して幼芽や幼根を切除した芽切除種子や根切除種子を播種し、出芽や苗立ち、初期生育を調査した。その結果芽出し種子と根出し種子は、催芽種子より出芽が早く苗立ちと初期生育が向上した(図 2-6、表 2-2)。根出し種子は根を切除しても同様の向上効果が認められたが、芽出し種子は芽を切除すると苗立率は低下した。このことから、根出し種子は損傷による影響を受けにくく、芽出し種子より実用的であることが示された。次に、根出し種子の苗立ちや初期生育の向上効果を、秋田県大仙市にある農研機構東北農業研究センター内の水田圃場において検討した。催芽種子と根出し種子を4月下旬の早期と5月中旬の普通期に代かき同時浅層土中播種し、苗立ちと初期生育、出穂期、収量を調査した。その結果、播種時の根長が0.5 mm以上5 mm以下の根出し種子は、苗立率や初期生育の向上効果が認められた。その効果は、播種後10日間の平均気温が11.7~18.6°Cの幅広い温度条件において確認された(表 2-1、表 2-3)。出穂期は根出し処理により早まる傾向が見られ、精玄米重や収量構成要素は、種子処理間や作期間に有意差は認められなかった。以上より、根出し種子の播種は代かき同時浅層土中播種栽培における苗立ちの向上や安定化に有効な技術であることが示された。

第3章では、現地生産規模量の根出し処理や、根出し種子の苗立率と初期生育の向上効果の実証を目的に、2017年~2019年の3年間秋田県大仙市と横手市の現地圃場で試験を行った。水稻品種「ちほみのり」と「萌えみのり」の種子15~48 kgを30°Cの育苗器で根出し処理したところ、「ちほみのり」は36~41時間、「萌えみのり」は30~45時間の処理で機械播種に適する根長の根出し種子が得られた。処理種子を代かき同時浅層土中播種機で散播するとともに、播種後の苗立ちや初期生育、出穂期、倒伏程度、収量を、催芽種子(代かき同時浅層土中播種)や鉄コーティング種子(動力散布機播種)と比較した。根出し種子は播種13~16日目の出芽期の草丈と葉齢が催芽種子より有意に大きく、苗立率や播種29~30日目の苗立期の草丈、葉齢、茎葉乾物重も大きい傾向にあった(表 3-3)。また、根出し種子は鉄コーティング種子より苗立期の草丈、葉齢、茎葉乾物重が有意に大きかった。出穂期は催芽種子や鉄コーティング種子より早まる傾向が見られた(表 3-4)。倒伏程度と収量は催芽種子や鉄コーティング種子と同程度であった。以上より、根出し種子は育苗器を用いることで現地生産規模量の種子処理が可能であることや、現地圃場においても苗立率や初期生育の向上効果があることが示された。

第4章では、根出し種子の適する保存条件および保存可能期間の解明を目的に行った。

短期保存の場合は常温、長期保存の場合は低温による保存を想定し、まず室内試験において低温保存時の最適温度を検討した。根出し種子を5、10、15°Cに設定した人工気象器内で0(対照区)、5、10、14、21日間保存後、アグリポットに播種し、播種21日目の出芽個体数や生育を調査した。その結果、10°C保存種子は、15°C保存種子で見られた出芽率の早期低下(図4-2)や、5°C保存種子で見られた長期保存による生育低下が認められなかった(図4-4)ことから、10°C程度の低温保存が適すと考えられた。次に圃場において、常温で0(対照区)、5、10、15日間、約10°Cの低温で20、29日間保存した根出し種子を播種し、保存期間中の芽や根の伸長や、播種後の苗立率や初期生育から保存可能期間を検討した。その結果、常温や低温で保存した根出し種子は、保存期間中に発芽や発根、幼芽や幼根の伸長はほぼ認められず播種に支障の無い種子が得られた(表4-2)。また、常温で5~15日間、低温で20日間保存した種子の苗立率や初期生育は、対照区と同等以上であった(表4-3)。一方で、低温で29日保存した種子の苗立率や初期生育、出穂期は対照区より劣る傾向が見られ、今後更なる検討が必要と考えられた。以上より、根出し種子は、常温(15.0~18.6°C)では15日間、低温(9.5°C)では20日間は保存可能であることが示された。

5-1 根出し種子の苗立ち向上要因

第2章および第3章において、積算温度75°C程度で浸漬した種子を30°Cの育苗器で33~52時間処理した平均根長5mm以下の根出し種子は、催芽種子より苗立ちが向上する傾向が認められた。このような根出し種子の苗立ち向上について、今須ら(2022)は、根出し種子の好氣的環境での種子処理および長期間の加温処理が幼芽細胞の分裂や出芽、苗立ちに好影響を及ぼしたと推察している。また類似した種子処理条件である、過酸化石灰資材被覆後に加温処理した種子で認められた α -アミラーゼ活性の増大(吉永ら1998)と同様に、催芽種子より長期間加温処理可能な根出し種子は、種子内部の代謝が活性化し苗立ちに好影響を及ぼした可能性が考えられた。さらに、発芽を阻害する苗腐敗病について、山口・鈴木(1996)は種子の発芽力が高い場合では、菌による発芽障害が少ないことを明らかにしており、出芽の早い根出し種子は土壌病原菌の悪影響を受けにくい可能性が考えられた。

5-2 根出し種子の作製方法および播種時の留意点

根出し種子は、種子を発芽適温で好氣的に処理した場合幼根が幼芽より先に表れる(農山漁村文化協会2004)性質を利用して作製する。作製は育苗器および催芽器を使用する(図5-1、農研機構東北農業研究センター2021)。育苗器を使用する場合は、浸種後の種子を脱水し、玄米30kg用紙袋に封入して30°Cに設定した育苗器内で発根させる。催芽器を使用する場合は、浸種後の種子を28~30°Cに設定した催芽器内で鳩胸状態になるまで催芽し、脱水後、ポリシートで被覆して種子の余熱で発根させる(図5-1)。浸種や催芽後の種子が乾燥すると発根が抑制し発根割合が低下する。そのため、浸種や催芽が終了した種子はすみやかに根出し処理を開始する必要がある。本播種機を用いる場合、処理後の種子の発根割合は65%未満、発根長は平均5mm以内を目安に作製する。種子の発根割合や発根長は、品種および採種年次、種子処理時期、種子消毒法により異なる(農研機構東北農業研究センター2023)ことから、根が過伸長とならないよう処理期間中には定期的な発根

程度の確認が必要である。さらに、穂発芽性「易」の品種および温湯消毒済み種子では発根が促進する傾向にあることから、事前の品種特性および種子消毒方法の確認し処理時間を短めに設定する必要がある。また催芽器を使用する場合には、育苗器を使用する場合と異なり発根処理期間中の温度を制御できないため、外気温や種子の積重位置に応じた対策(農研機構東北農業研究センター 2023)が必要である。

第2章～第4章で作製および保存をした根出し種子では、幼芽の伸長やカビ等の発生は見られなかった。しかし、種子の処理時や保存時に種子に水滴が付着し、幼芽が伸長する可能性や、種籾および使用資材に付着した病原菌により種子が汚染される可能性がある。これらの悪影響を回避するためには、消毒済み種子の使用や、事前の処理機器および使用資材の洗浄、種子処理時の吸水防止対策等を行う必要がある。

根出し種子を播種する場合、発根により催芽種子に比べ播種機からの繰り出し量が減少する。さらに、根出し種子の繰り出し量は種子の発根長や発根割合、乾燥程度により変動する可能性がある。種子の不均一な繰り出しは、播種および苗立ち、生育のムラや雑草発生を助長する可能性があるため、播種機投入前の種子の攪拌や、過乾燥となった場合の種子の事前浸漬(農研機構東北農業研究センター 2021)が必要である。また、播種前には種子の繰り出し量を確認し、目標の播種量となるよう播種機の調整が必要である。一方で、本播種機の種子の繰り出し速度すなわち繰り出し用ロールの回転速度には限界があり、播種量を増加させる場合や高速で播種する場合には目標の種子量を繰り出せない可能性がある。このような場合の対処法として、現状では低速での播種を推奨しているが、今後、より穴の大きいロール(図 5-2)を使用した播種方法や異なる播種機を利用した播種方法等について検討する必要がある。

5-3 根出し種子の利用と留意点

寒冷地における代かき同時浅層土中播種栽培において、根出し種子の播種により出芽が早期化することが明らかとなった。これにより、現地実証圃場では催芽種子を播種した圃場より早期に除草剤散布が可能であった。このように、根出し種子を播種することで除草剤散布適期が拡大し、効果的な防除や効率的な作業が可能であると考えられた。また、根出し種子の播種により苗立ちや初期生育が催芽種子より向上することが明らかとなった。このような根出し種子の苗立ち向上効果は、本研究で供試した品種の他にあきたこまちやはえぬき等の粳米、糯米、飼料用米において認められている(農研機構東北農業研究センター 2023)。しかし、根出し種子を播種した現地圃場において排水不良個所でのカモによる食害や土壌の軟化により苗立ち不良となった場所が見られた。このように、実際の生産現場において本播種栽培の出芽および苗成ちは、種子処理以外にも播種後の環境や土性(東北農業研究センター 2021)に大きく影響を受ける可能性がある。より均一な苗成ちを得るためには、圃場田面の均平作業(牧山・山路 1997b)や、溝切りによる強制排水作業、播種後落水管理(白土ら 2020)等が効果的である。また食害については、各地域に生息する生物を把握し、それぞれに適合した対策をすることで苗成ち低下を抑制できる可能性がある。鳥害の場合、スズメは集落や樹木のある地域で生息密度が高く(大矢ら 1998)、胚乳養分目当てに食害する。特に播種直後から稲2葉期頃までが危険であり、湛水管理により飛来を抑制(酒井ら 1999)できる。カルガモなどの水生鳥種は、完全落水により圃場

内への飛来(酒井ら 1999)や食害、幼苗の引き抜き(高城ら 2000)を軽減できる。このような水管理の他に、テグスや音響等による方法(佐藤・東 2003)も有効な場合がある。出芽後の幼苗を加害する虫害には、薬剤散布や耕種的防除(甲斐ら 2005、和田ら 1999)が有効である。以上のように、苗立ち確保のためには播種後 3 週間程度までは定期的に圃場内の出芽状況や苗の確認を行い、異常が認められた場合には条件毎に対策を行う必要がある。

根出し種子は、日平均気温 13°C(三石・井村 1982)を下回る低温時においても苗立ちおよび初期生育が向上し、早期の播種や冷涼地域での播種が可能となると考えられた。実際に、播種適期から収穫適期までの期間が短く、コーティング種子を使用した直播栽培を行うことが出来ない冷涼地域において、根出し処理した早生品種の播種により直播栽培が可能となった事例が見られた。このように、根出し種子は作付け品種との組み合わせにより播種適地の拡大や播種適期の拡大に寄与する可能性がある。一方で、播種後の気温が高い温暖地においては、催芽種子においても出芽が早いことが想定されるため、根出し種子の播種による苗立ち率の向上効果は明瞭ではない可能性がある。しかし、幼芽が伸長した催芽種子を使用したことで播種時に幼芽が折損(図 5-3)し、種子の繰り出しの妨げとなった事例が見られたことから、より折損しにくい(今須ら 2022)根出し種子の利用が有望と考えられる。

第 2 章および第 3 章の圃場試験において、4 月 27 日～5 月 18 日(表 2-1、表 3-2)に播種した根出し種子の出穂期は 7 月 23 日～8 月 15 日であり、催芽種子に比べ 0～6 日、鉄コーティング種子に比べ 0～8 日早く出穂した(表 2-4、表 3-4)。根出し種子の登熟歩合は催芽種子や鉄コーティング種子と同程度であり、早期出穂による品質低下は認められなかった(表 2-4、表 3-4)。このような根出し種子の出穂促進効果は、生育適期の短い寒冷地の直播栽培において、登熟歩合や玄米品質、収量向上に寄与する可能性がある。同様に、遅延型冷害等の異常気象時における登熟未了を回避できる可能性がある。さらに、作付け品種の拡大や播種適期の拡大により、収穫作業の分散化や播種適地の拡大が可能になると考えられる。一方で、根出し種子の出穂促進効果により移植栽培の収穫時期と重なり、刈り遅れによる品質低下や倒伏等が発生する可能性がある。したがって、品種毎の発育指数(高橋ら 1997)や積算気温(嶽石・福田 1985)等を考慮し、収穫時の作業性を視野に入れた播種日の設定や品種選定が必要である。

根出し種子は常温や低温において保存可能なことが明らかとなり、移植栽培の播種および圃場準備作業や直播栽培の圃場準備作業との競合が回避できる可能性が考えられた。さらに、種子を大量処理し保存することで作業効率の向上や播種面積の拡大にも寄与する可能性が考えられた。一方で保存した根出し種子は、保存期間中の種子含水率の低下(図 4-2)や長期の低温保存(表 4-3)により苗立ち率が低下する場合が認められたため、根出し種子を保存する場合は、含水率の低下程度の確認(農研機構東北農業研究センター 2023)や低温保存する場合には保存期間に注意する必要があると考えられた。

5.4 今後の展望

本研究において、代かき同時浅層土中播種栽培における根出し種子の苗立ち向上効果および実用性が明らかとなった。一方で苗立ちの均一性向上のためには、播種後の圃場巡

回や状況に応じた水管理が重要であることが考えられた。直播栽培の播種は一般的に移植作業より前に行う事が多く、播種後は十分な圃場管理や確認が行えないことが想定される。今後、このような播種後の圃場管理作業を軽量化するためにも、長期間安定して使用できる圃場管理技術の開発および既存技術の更なる精度向上や低価格化が必要と考えられる。また、本播種栽培に限らず、より多くの生産者が低コスト直播を実現可能とするためにも、多様な播種機を用いた根出し種子の直播栽培を検討する必要があると考えられる。さらに、大量の根出し種子作製や保存を可能にするために、大量種子の処理方法および保存方法、常温保存時の最大保存可能期間、保存可能期間の品種間差等について今後更に研究を重ねる必要がある。



図 5-1 根出し種子の作製方法

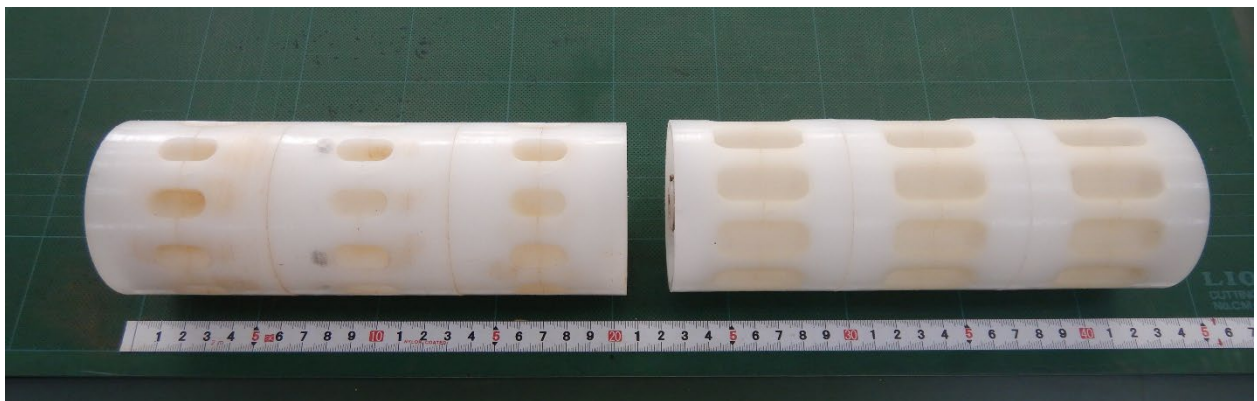


図 5-2 繰り出し用ロール
 (左：小ロール、縦 10×横 20×深さ 5mm、種子繰り出し用
 右：大ロール、縦 14×横 34×深さ 7mm)



図 5-3 折損した幼芽
(繰り出しロール直下に折損した幼芽が堆積した様子。
損傷前の催芽種子の平均幼芽長は 1.4 mm であった。)

第6章 謝辞

本研究は、農業・食品産業技術総合研究機構生物系特定産業技術研究支援センター「イノベーション創出強化研究推進事業(JPJ007097)」の支援を受けて行われたものであり、多くは既報論文(伊藤ら 2018、伊藤ら 2021)として公表されている。

本論文の作成にあたり、秋田県立大学大学院生物資源科学研究科小川敦史教授には懇切なご指導やご助言を賜りました。東北農業研究センター水田輪作研究領域水田輪作グループ白土宏之グループ長(現中日本農業研究センター水田利用研究領域長)には、根出し種子を用いたテーマを与えて頂き、水稻の調査方法や直播栽培方法、研究の遂行やとりまとめに際し始終懇切なご指導を賜りました。川名義明氏には幼齡雑草の判別方法や薬剤の選択方法、現地圃場における防除の判断基準について多大なご指導やご助言、ご協力を賜りました。今須宏美氏には、研究遂行に際し多大なご助言やご協力、精神的な支えとなって下さいました。大平陽一氏(現中日本農業研究センター)、古畑昌巳氏には研究遂行に関して多大なご協力とご助言を頂きました。東北農業研究センター水田輪作研究領域水田輪作グループ国立卓生グループ長には、論文執筆に際し励ましの言葉やご助言を賜りました。秋田県大仙市の農家佐藤寿氏と横手市の農家林輝夫氏には現地試験の圃場提供や栽培管理に協力して頂きました。東北技術支援センター東北第3業務科の職員と契約職員の方々には播種作業や栽培管理、調査にご協力頂きました。東北農業研究センター水田輪作研究領域水田輪作研究グループの契約職員の方々には調査にご協力頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

最後に、今日まで博士課程進学に際し理解や協力、精神的な支えとなってくれた家族に深く感謝致します。

引用文献

- 青木政晴・酒井長雄・塚本隆行 2014. 催芽種子を用いた湛水直播において播種深度および土壌硬度が苗立に及ぼす影響. 北陸作報 49: 69-71.
- 青木政晴・関正裕・土屋学・酒井長雄 2016. 空気搬送式直播機を用いた水稻湛水直播において土壌硬度および田面水が無粉衣種子の苗立ちに及ぼす影響. 北陸作報 51: 36-39.
- 荒川市郎・高橋和平 1998. 水稻直播栽培における技術普及上の課題と対策. 日作東北支報 41: 1-2.
- 嶽石進・福田兼四郎 1985. 湛水土壌中直播栽培の安定化-早生品種を対象とした播種期について-. 日作東北支報 28: 39-41.
- 福嶋陽・横上晴郁・津田直人 2017. 東北農研が育成した水稻品種における低温条件下の発芽性、伸長性、および出芽・苗立ち性. 日作紀 86: 219-228.
- 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(2): 182-190.
- 古畑昌巳・岩城雄飛・有馬進 2007. 出芽速度および嫌気条件下における鞘葉の伸長速度が湛水直播水稻の出芽・苗立ちに及ぼす影響. 日作紀 76(1): 10-17.
- 古畑昌巳・大角壮弘・帖佐直・松村修 2010. 鳥害回避効果に関する鉄コーティング種子の特性. 日作紀 79(別 1): 2-3.
- 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(1): 33-38.
- 萩原素之・井村光夫・三石昭三 1986. 水稻の湛水土壌中直播における異常還元と出芽・苗立ち. 北陸作報 21: 21-23.
- HAGIWARA, M and IMURA, M 1993. Seedling Emergence and Establishment of Direct-sown Paddy Rice in Soils Incorporated with Substances Produced in Reductive Paddy Soil. Crop Sci. 62(4): 609-613.
- 萩原素之・井上直人 1999. 湛水土壌中直播における種子近傍の土壌還元と鞘葉・種子根の伸長. 日作紀 68(別 1): 160-161.
- 花見厚・阿部貞尚 1984. 湛水土中直播栽培の実用化に関する研究. 第 1 報 出芽・苗立におよぼす播種深度の影響. 日作東北支部報 27: 21-22.
- 花見厚・手代木昌弘 1998. 水稻湛水直播栽培における酸素供給剤被覆種子の加温による出芽促進. 東北農業研究 51: 69-70.
- HARA, Y 2013. Improvement of rice seedling establishment on sulfate-applied submerged soil by seed coating with poorly soluble molybdenum compounds. Plant Prod.Sci. 16: 271-275.
- 原嘉隆 2017. 水稻湛水直播栽培における種子のべんモリ被覆. 農業食料工学会誌 79:340-344.
- 今須宏美・白土宏之・伊藤景子・田渕研・古畑昌巳・川名義明 2022. 水稻代かき同時浅層土中播種法における根出し種子の苗立ちと初期生育の向上. 日作紀 91: 205-214.
- 井上博喜・山内稔・宮川久義 2009. 鉄コーティング処理によるイネ育苗器病害の防除. 日植病報 75: 164-169.

- 石川洋・根子善照・鶴田正明・八重樫耕一 1990. 水稻直播栽培における発芽に関する研究. 第2報出芽長、乾燥処理と出芽能力. 日作東北支報 33: 30-31.
- 石丸知道・福島裕助・許斐健治 2000. 水稻湛水直播栽培における過酸化石灰をコーティングした籾の実用的な貯蔵方法. 福岡農試研報 19: 29-31.
- 甲斐伸一郎・安藤俊二・塩崎尚美・吉松英明・大西みどり・白石隆 2005. 水稻湛水直播における初期病害虫の発生実態と病害虫防除法. 大分県農業技術センター研究報告 35:57-68.
- 片岡知守・山口誠之・遠藤貴司・中込弘二・滝田正・横上晴郁・加藤浩 2007. 直播適性が高い良食味水稻品種「萌えみのり」の育成. 東北農研研報 107: 15-28.
- 菊池宏彰・今園支和・木村勝一・坂上修・伊藤信雄 1987. 水稻直播用芽出し播き機の開発. 農業機械学会東北支報 34: 27-30.
- 木村勝一・金忠男 2000. 水稻芽出し籾の利用による直播栽培の安定化-催芽程度による生育及び機械播種の可能性-. 東北農業研究 53: 41-42.
- 金忠男・木村勝一 1999. 水稻催芽籾の利用による直播栽培の安定化. 日作東北支報 42: 11-12.
- 牧山正男・山路永司 1997a. 大区画・湛水散播水田で水稻の個体密度が生育・収量に与える影響. 農業土木学会論文集第191号 65(5): 627-632.
- 牧山正男・山路永司 1997b. 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. 農及園 72: 1097-1102.
- 松浦昌平・竹本一恵・東條元昭・山内稔 2012. 水稻の鉄コーティング湛水直播における *Pythium arrhenomanes* による苗立ち不良. 日植病報 78(4): 301-304.
- 松村修・古畑昌巳 2008. 鉄粉と過酸化石灰の混合紛衣が直播水稻の鳥害と生育に及ぼす影響. 北陸作報. 43: 11-14.
- 三石昭三 1982. 水稻の湛水土壌中直播法が成立するまで. 農業技術 37(7): 294-298.
- 三石昭三・井村光夫 1982. 水稻の湛水直播における諸問題 [3] -湛水土壌中直播法を中心に-. 農及園 57(12): 43-48.
- 三浦恒子・若林一幸 2006. 水稻湛水土中直播における出芽速度, 苗立率と播種後の平均気温との関係. 日作東北支報 49: 41-42.
- 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.
- 森田敏・松葉捷也 1993. 水稻の流体播種における播種条件が出芽苗立に及ぼす影響. 近畿中国農業研究 85: 23-35.
- 村岡哲郎・鴨居道明・則武晃二 1997. 水田における表層剥離の発生機構. 雑草研究 42(3): 227-232.
- 永峯淳一・松田裕之・三浦浩 2000. 水稻直播におけるカルパー無紛衣・長芽出しが苗立ちに与える影響. 日作東北支報 43: 33-34.
- 長坂克彦・鳥山和伸・佐々木良治 1999. 催芽種子の鞘葉切除が直播水稻の苗立ちに及ぼす影響. 北陸作報 34: 49-50.
- 中林光文・横山裕正・木村利行 2007. 青森県における水稻直播栽培の作期推定. 日作東北支報 50: 101-102.
- 中込弘二・山口誠之・片岡知守・遠藤貴司・滝田正・横上晴郁・加藤浩 2008. 東北地域

- 向けの早生の飼料イネ専用品種「べこごのみ」の育成. 東北農研研報 109: 1-13.
- 長坂克彦・鳥山和伸・佐々木良治 1999. 催芽種子の鞘葉切除が直播水稻の苗立ちに及ぼす影響. 北陸作報 34: 49-50.
- 野村幹雄・高橋渉・尾島輝佳・川口祐男 2001. 過酸化石灰被覆籾の加温処理が直播水稻種子の出芽、苗立ちに及ぼす影響. 北陸作報 36: 69-71.
- 野村幹雄・高橋渉・尾島輝佳・川口祐男 2002. 過酸化石灰コーティング籾の加温処理が直播水稻種子の出芽、苗立ちに及ぼす影響 第2報 加温処理開始時期および加温処理後の保存条件が出芽に及ぼす影響. 北陸作報 37: 29-32.
- 野村幹雄・高橋渉・鍋島弘明・尾島輝佳 2003. 過酸化石灰コーティング籾の加温処理が直播水稻種子の出芽、苗立ちに及ぼす影響 第3報 過酸化石灰コーティング後の保存方法と出芽促進効果. 北陸作報 38: 25-28.
- 農研機構東北農業研究センター 2021. 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.6).
https://www.naro.go.jp/publicity_report/publication/files/NonCoating_Manual_Ver6_H.pdf
(2022年8月閲覧).
- 農研機構東北農業研究センター 2023. 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.7). 公開予定(2023年3月)
- 農林水産省 2022. 稲作の現状とその課題について 令和4年7月.
<https://www.maff.go.jp/j/syouan/keikaku/soukatu/attach/pdf/index-94.pdf> (2022年9月閲覧)
- 農林水産省 農業物価統計調査. https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00500204&tstat=000001014483&cycle=1&year=20220&month=12040604&tclass1=000001169786&tclass2=000001169787&result_back=1&tclass3val=0 (2022年10月閲覧).
- 農林水産省 世界農林業センサス 2010. 第2巻農林業経営体調査報告書-総括編-.
<https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00500209&tstat=000001032920&cycle=0&tclass1=000001038546&tclass2=000001045941&tclass3=000001045945> (2022年9月閲覧)
- 農林水産省 農林業センサス 2020. 第2巻農林業経営体調査報告書-総括編-.
<https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00500209&tstat=000001032920&cycle=7&year=20200&month=0&tclass1=000001147146&tclass2=000001155386&tclass3=000001155387> (2022年9月閲覧)
- 農林水産消費安全技術センター 2017. 農薬登録情報提供システム 湛水直播水稻 除草剤.
<http://www.acis.famic.go.jp/search/vtllp401.jsp> (2017/3/15 閲覧).
- 農山漁村文化協会 2004. 稲学大成 第2巻生理編 第1章発芽と休眠の生理. 1: 3-11.
- 農山漁村文化協会 2015. 発芽モミ潤土直播. 現代農業 94(3): 137-141.
- 荻原武雄 1987. 岩手県南部における水稻湛水直播栽培の可能性. 農業機械学会東北支部報 34: 19-22.
- 荻原武雄・北田金美 1991. 芽出し籾土壌ペースト播種による苗立ち向上技術. 日作東北支報 34: 87-88.

- 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.
- 大矢慎吾・鳥山和伸・山口弘道 1998. 潤土直播栽培の出芽・苗立ち期における鳥害を想定した被害解析. 北陸病虫研報 46: 59-63.
- 酒井長雄・斎藤稔・谷口岳志・柳沢健作 1999. 水稻湛水直播栽培における耕種的鳥害防止対策. 北陸作報 34: 59-61.
- 佐藤太郎・東淳樹 2003. 東北地方の湛水直播栽培農家へのアンケート調査によるカルガモ被害の実態解析. 農村計画学会誌 22: 13-18.
- 齋藤祐幸・五十嵐衛 1996. 無コーティング直播における催芽粒の損傷が発芽性と初期生育に及ぼす影響. 第1報催芽程度の違いによる損傷粒の発芽性と初期生育について. 北陸作報 31: 4-5.
- 齋藤祐幸・有坂通展・佐藤徹・水沢誠一 1997. 無コーティング直播における催芽粒の損傷が発芽性と初期生育に及ぼす影響. 第3報圃場内での発芽性とその後の生育について. 北陸作報 32: 31-33.
- 澤村宣志 1998. 定幅散布機を用いた超省力・低コスト水稻潤土直播栽培. 研究ジャーナル 21(4): 27-31.
- 下坪訓次・吉永悟志・富堅辰志 1997. 過酸化石灰コーティング水稻種子の貯蔵条件と土中出芽性. 日作紀 66(1): 16-17.
- 白土宏之・大平陽一・山口弘道・福田あかり 2015. 寒冷地の水稻催芽種子の代かき同時湛水直播栽培における代かき回数と播種様式が苗立ち・収量に与える影響. 日作紀 84: 426-431.
- 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稻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播種の作業性、苗立および収量. 日作紀 85(2): 178-187.
- 白土宏之・伊藤景子・大平陽一・今須宏美・川名義明 2020. 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に適した播種後水管理. 日作紀 89(3): 185-194.
- 諏訪充・星川清親・庄司駒男 1979. 催芽粒の貯蔵と育苗に関する研究. 日作東北支報 22: 1-3.
- 高城哲男・三浦嘉浩・小菅孝一 2000. 水稻湛水直播栽培におけるカルガモ被害の耕種的軽減技術. 日作東北支報. 43: 1-3.
- 高橋智弘・一守貴志・畠山均 1997. 岩手県における水稻直播の作期策定. 日作東北支報 40: 11-14.
- 田中英彦・田中文夫・山崎信弘 2016. 湛水直播水稻における土壌還元処理と *Pythium* 属菌接種による苗立ち率低下の品種間差異. 日作紀 85(2): 168-172.
- 田代卓・千葉和夫 2006. 寒冷地の重粘質土壌における水稻直播栽培の出芽・苗立ちについて. 日作東北支報 49: 37-39.
- 寺中吉造・黒澤健 1969. 水稻機械化湛水直播栽培の立毛安定と培地条件に関する研究. 第1報 種子の埋没と苗立ち. 日作東北支報 11: 21-22.
- 鶴田正明・石川洋・荻原武雄 1989. 岩手県中北部における湛水土壌中直播栽培法の確立. 東北農業研究 42: 7-8.

- 鶴田正明・石川洋・根子善照・八重樫耕一 1991. 芽出し直播栽培法. 第1報 芽出し直播播種機の開発. 東北農業研究 44: 89-90.
- 和田節・市瀬克也・杉浦直幸・福島裕助 1999. 湛水直播水稻におけるスクミリンゴガイによる被害: 播種後3週間落水体系による被害と雑草の発生. 九病虫研会報 45: 68-71.
- 若松一幸・片平光彦 2006. 水稻湛水直播における酸素発生剤紛衣種子の保存技術. 秋田農試研報 45: 11-12.
- 渡部富男 1990. 水稻湛水土壌中直播の出芽・苗立の安定化対策 -千葉県における試験研究を中心にして-. 日作紀 59(1): 201-205.
- 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関する研究. 2. 出芽・苗立ちの安定化. 千葉農試特報 17: 3-22.
- 山田登 1952. 過酸化石灰による作物に対する酸素の供給(予報). 日作紀 21: 65-66.
- YAMADA, N., SUGE, H. and NAKAMURA, H. 1962. Chemical control of plant growth and development. (1) Germination of rice seed as affected by sprouting and gibberellin application. *Crop Sci.* 31(3): 253-257.
- 山口弘道・木村勝一・矢治幸夫・河本英憲・押部明德 2008. 東北中北部向け飼料用稲品種「べこごのみ」を用いた無コーティング湛水土中直播における最適播種期. 日作紀 77(別1): 248-249.
- 山口富夫・鈴木穂積 1966. 稲湛水直播における発芽障害の病理的研究 第2報播種条件と発芽障害. 北陸病研報 14:4-7.
- 山川寛・岸川英利 1957. 水稻根の細胞分裂及び伸長に及ぼす温度の影響. 日作紀 26(別2): 94-95.
- 山本真之・保科亨・瀧村勇二・栗久宏昭・貝淵由紀子・星野滋 2011. 水稻鉄コーティング直播栽培における苗立ち安定化のための水管理および害虫・雑草防除技術. 日作講演会要旨集 231: 494.
- 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(4): 467-476.
- 山内稔 2002. 湛水直播水稻における種子の鉄コーティングによる比重の増加と浮き苗回避. 日作紀 71(別1): 150-151.
- 山内稔 2004. 水稻の鉄コーティング湛水直播. 農及園 79: 947-953.
- 山内稔 2010. 鉄コーティング湛水直播と種子の大規模製造技術による稲作の省力・規模拡大. 農及園 85:70-75.
- 山内稔 2012. 鉄コーティング種子を用いた水稻湛水直播技術. 日作紀 81: 148-159.
- 山崎昌三郎・青山聖子 1987. 水稻湛水土壌中直播栽培におけるイネミズゾウムシの被害実態. 北陸病虫報 35:24-26.
- 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・富樫辰志・田坂幸平・脇本賢三 1998. 過酸化石灰被覆水稻種子の短期間貯蔵条件が土中出芽性に及ぼす影響. 1. 被覆後の乾燥程度及び貯蔵温度の影響. 日作紀 67(別2): 78-79.
- 吉永悟志・脇本賢三・富樫辰志・田坂幸平 2000. 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.

周紅・森田脩・江原宏 1999. 水稻湛水土壤中散播栽培におけるたこあし苗と正常苗の生育の比較. 日作東北支報 128: 9-13.