



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	北海道の水稲直播栽培における落水出芽法の開発
Author(s)	田中, 英彦
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(農学)
Dissertation Number	乙第6989号
Issue Date	2016-03-24
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.r6989
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/62823
Type	doctoral thesis
File Information	Hidehiko_Tanaka.pdf



北海道の水稲直播栽培における
落水出芽法の開発

北海道大学 大学院農学院

田 中 英 彦

北海道の水稲直播栽培における落水出芽法の開発

目 次

第1章 緒言

1. 水稲栽培技術の発展および湛水直播栽培の歴史 1
2. 本研究の目的 8

第2章 低温苗立ち性の品種間差異に関する変動要因の解析 1 1

1. 低温感受性時期の特定 1 1
2. 低温苗立ち性と初期伸長性の関係 1 8
3. 土壌還元と *Pythium* 属菌に対する耐性 2 7

第3章 落水出芽法による苗立ち向上技術の確立 3 6

1. 苗立ちに及ぼす土壌還元の影響と播種直後からの落水の効果 3 6
2. 落水期間が苗立ちと生育収量に及ぼす影響 4 1
3. 落水出芽法における適正播種深度 4 6
4. 播種機の実用性の評価 5 1
5. 最適入水日の推定 5 7

第4章 総合考察 6 8

1. 低温苗立ち性品種の育成 6 9
2. 落水出芽法による苗立ち向上技術の確立 7 2

謝辞 7 6

引用文献 7 8

摘要 8 5

Summary 9 0

第 1 章 緒言

1. 水稻栽培技術の発展および湛水直播栽培の歴史

未開の大地・北海道で米づくりの試みが始まって 300 年以上が経過した。度重なる冷害に見舞われるなか、北海道に適応した早生化突然変異個体を選抜した長年に渡る農民の執念が、熱帯原産のイネの栽培を可能にした。その遺伝子は、農業試験場における事業育種にしっかりと引き継がれて 100 年が経過した。今や、北海道は全国トップクラスの品質・食味を誇る「ゆめぴりか」の育成に至るとともに、生産者の努力により、日本有数の米どころとしての地位を築き上げた。

図 1-1 には、本道における水稻作付面積、収量および栽培技術の変遷を示した。

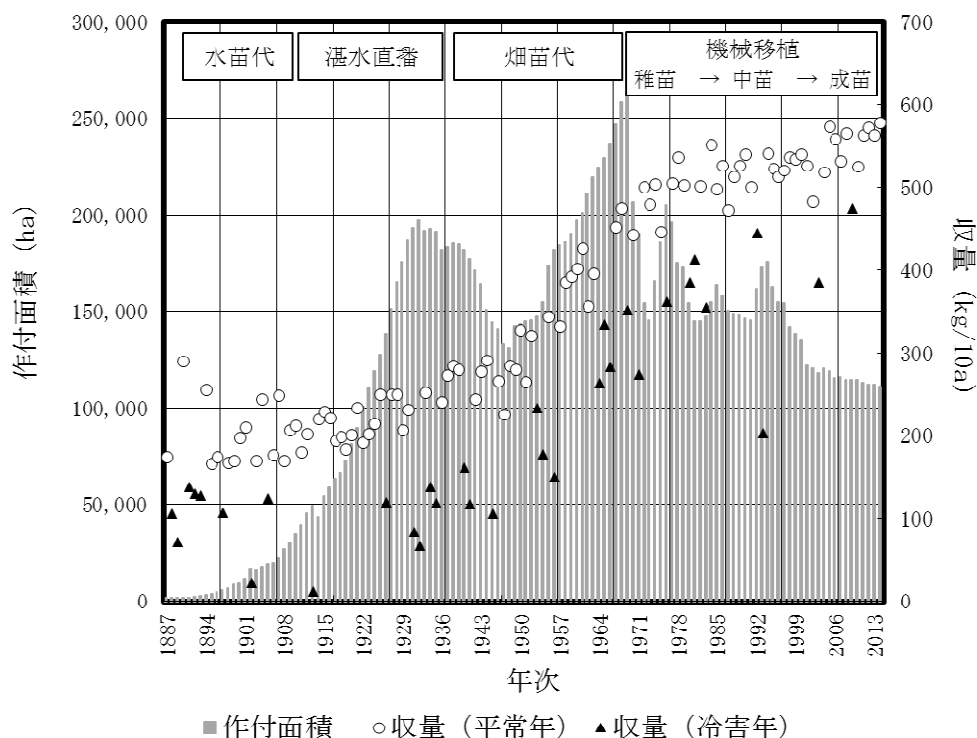


図 1-1 北海道における水稻作付面積および収量の推移

収量は、未だに 4 年に 1 度程度の頻度で発生する冷害による減収が認められるものの、技術の進歩により飛躍的に増加し、現在は 600 kg/10a 近くにまで達している。

る。この間には、栽培技術もダイナミックに変遷した。なかでも、北海道独自の技術として発展した湛水直播栽培は、北海道の稲作の発展に重要な役割を果たした。

北海道の水稲栽培は、導入当初には水苗代栽培が行われていた。すなわち、代かきした水田の苗代に 5 月上旬に播種した苗を 6 月中～下旬に移植するものであった。北海道の米（1921）によれば、「本道における水稲の直播は、明治 26 年（1893）に初めて札幌郡白石村水稲試験場に之を試み、成績良好なりし以来、漸次各地に普及せられ、現今においては札幌、空知、上川、川西、浦河、網走各地方などに多く行わるに至れり。而して本法はその方法宜しきを得るときは、その収量敢えて移植法に劣らざるのみならず、地方によりては多少の増収の傾向あり（表 1-1）。かつ本道の如く水田農家の経営面積大なる地方にありては短期間に挿秧（移植）を行うことは労力の配当上作業容易にあらざるをもって、水田の 1 半は移植法を行い、他半は直播法を行うときは、作業の繁緩を調和し、適期を失せず挿秧及び播種を行うことを得べし」とある。

表1-1 直播対移植収量比較試験成績（北海道の米 1921）

試験区別	本場（札幌）	渡島支場		上川支場		十勝支場
	赤毛	赤毛	地米	赤毛	坊主	黒毛
直播	1.527	2.045	2.157	2.273	2.543	1.82
移植	1.435	2.032	2.155	2.262	2.518	1.63
（直播/移植*100）	（106）	（101）	（100）	（100）	（101）	（112）

表中の数値の単位は、石/反。本場は、明治38～39年の2ヶ年平均。渡島支場は、明治43～大正5年（大正2年を除く）の6ヶ年平均。上川支場は、「赤毛」は明治40～大正3年（明治43、44、大正2年を除く）の5ヶ年平均、「坊主」は、大正4～7年の4ヶ年平均。十勝支場は、大正元～7年（大正2、3年を除く）の5ヶ年平均。

当時においては、直播栽培が水苗代の移植栽培よりも安定多収技術であったことが伺え、これが普及の第 1 の要因であった。すなわち、直播栽培は、水苗代育苗より遅く 5 月中旬に播種することから、低温の影響を受けにくく、さらに活着

による生育停滞がないため、移植栽培よりも生育は促進され、移植栽培より高い収量を示した。

しかし、当初は散播栽培であったため雑草の繁茂が著しく、刈り取りに多くの労力を要した。これを克服したのは、1度に16株の点播を可能にした蛸足黒田式水田粃種直播器（上川郡東旭川村の末松保次郎および黒田梅太郎が開発、専売特許第9520号、実用新案登録第57967号）（北海道農事試験場1925）であった。さらに、手押し式の除草機と、黒田式直播器の改良型が数多く開発され、無芒品種「坊主」とともに、湛水直播栽培は急激に普及し、水田面積の急激な増大を支える原動力となった。

この湛水直播栽培は、代かき後の土壌表面に催芽粃を播種するもので、粃が被泥すると酸素不足となり、苗立ちは不良となるため、澄んだ水中で被泥しないように細心の注意を払って播種する必要があった。また、土壌表面播種であることから、根の土壌中への伸長を促し、浮き苗を防止するために、水苗代と同様に、種粃が芽を出すに至ったら、風のない温暖な日に水を落とす、いわゆる「芽乾」（のちには「芽干し」の用語が一般的となる）を行う必要があった。

昭和初頭には、水稻の作付面積約20万haのうち8割が直播栽培であったが、連続した冷害（昭和6, 7, 9および10年）により大きな被害を受けた。これを契機として、4月に播種できる保護畑苗代栽培法の技術開発が精力的に行われ、安定多収技術として定着、昭和40年代には湛水直播栽培はほぼ消滅した。この畑苗代栽培法は、稚苗から始まる機械移植栽培技術にも活用され現在に至っている。

1960年代前半からの高度経済成長により、労働力不足が深刻となり、全国的に直播栽培に対する期待が高まった。道内では、1963年にヘリコプタ利用による湛水直播の総合組み立て試験が行われた。しかし、苗立ちムラ、雑草害、倒伏など、蛸足式直播よりもさらに不安定要素が大きく、試験は2ヵ年で打ち切られた。こ

れ以降、省力稲作に関する技術開発は、機械移植栽培の実用化を中心に進められたが、直播栽培研究は、農業試験場において細々ながら継続された。

湛水直播は、過酸化石灰剤の出芽・苗立ち向上に対する効果が確認されて（太田・中山 1970）以降、土中に積極的に埋没播種する技術へと発展した。湛水直播は、播種後に常時湛水すると、転び苗あるいは浮き苗が発生する。従来、その原因は水中における酸素不足であり、芽干しは幼苗に酸素を与えて根の発育を促すものとされてきた。三石（1975）は、水田状態の湛水中には飽和状態に近い酸素が溶存していること、芽干しは苗に働く浮力を排除して、幼根の土壌進入力に対する作用支点を与える効果があることを明らかにした。さらに、浮き苗と倒伏を積極的に防止する技術として、過酸化石灰剤を被覆した粃を、10～20 mmの土壌中に播種する湛水土壌中直播栽培（三石・中村 1977a, 1977b）技術を開発した。

道立農業試験場でその適応性と栽培法が検討され、東川町新稲作技術導入研究会を中心とした先進的農家が試作に取り組んだ（天野ら 1988）。しかし、それらの試作では、年次や圃場によって苗立ち率の変動が大きく、その要因解明と対策技術の確立が検討された。その結果、苗立ち率の低下要因は第1に播種深度、第2に苗腐病菌であり、苗立ちの安定化には5 mm以内の浅播きが望ましいこと、苗腐病の病原菌としては、*Pythium* 属菌、*Achlya* 属菌、蛍光性 *Pseudomonas* 属細菌が考えられ、このなかでは *Pythium* 属菌の病原性がもっとも強く、殺菌剤であるヒドロキシイソキサゾール・メタラキシル粉剤と過酸化石灰剤との同時被覆処理が有効なことなどが明らかとなり、上川中央部を適地とする湛水直播栽培暫定基準が策定された（北海道立上川農業試験場 1989, 山崎ら 1992）。

さらに、直播栽培技術の研究は、大幅な低コスト化を目指し、有人ヘリコプタ、背負式動力散粒機およびブロードキャストを用いた大規模散播法の実用性が検討された（北海道立中央農業試験場・上川農業試験場 1993）。この技術開発は、播種

方法を改良して、栽培適地を道央以南の良地帯に拡大した。主に背負式動力散粒機を利用した湛水直播栽培を導入して試作する農家が増加したが、積極的に経営に取り入れるほど技術は完成しておらず、定着には至らなかった。すなわち、浅播きによって苗立ち率は比較的安定したが、除草剤の処理時期との関係や低温の影響で芽出しのタイミングを逸し、浮き苗や苗の吹き寄せが発生したり、中干しが不十分なために倒伏が問題となる場合が多かった。さらに苗立ちを安定・向上するには、浮き苗や倒伏を防止するために、積極的に土中に埋没播種できる技術を開発する必要があった。

直播栽培に適した品種についての検討や品種の育成も行われた。当初、直播栽培試験には、中生の「イシカリ」が用いられ、その後「きたこがね」、「はやこがね」、「キタアケ」、「ともひかり」などの適性が検討された。また、東川町新稲作技術導入研究会では、主に「キタアケ」などの早生品種が供試され、乾田直播が主流の美唄市直播研究会では、「空育 125 号」が美唄の気象条件に適したため用いられた。

その後、上川農試は、極早生の直播専用品種「はやまさり」(1988 年育成、沼尾ら 1990)、および「きたいぶき」(1993 年育成、前田ら 1996)を育成した。しかし、「はやまさり」の食味レベルは「キタヒカリ」並、「きたいぶき」は「ゆきひかり」並で、移植用の品種に比べ 1 ランク低かった。また、直播栽培の普及面積自体が少ないため販売ロットが確保できず、両品種とも本格的な普及には至らなかった。直播栽培の普及場面では、早生品種である「ゆきまる」(1993 年育成)が広く用いられ、さらには収量性と販売面の相対的有利性から美唄市などでは「あきほ」(1996 年育成)へ移行した。

上川農業試験場と北海道グリーンバイオ研究所(現：ホクレン農業総合研究所)が共同開発した「ほしまる」(2006 年育成、佐藤 2006)は、早生の移植・直播兼

用品種で、耐冷性が強く多収で、「ほしのゆめ」並の良食味である。「大地の星」(2003 年育成)は直播向けとして育成されてはいないが、早生・多収の特性が道央地帯の直播栽培に適し、冷凍加工向けの需要にも適応している。これらの 2 品種は、早生・大粒で、直播の収量の安定性に貢献し、近年の直播栽培普及の原動力となっている。しかし、上記の品種はすべて低温苗立ち性に関する改良は行われておらず、直播栽培の安定化には、さらなる改良が望まれる。

表 1-2 には、近年の直播栽培面積を示した。全国では、1974 年の 55 千 ha をピークに年々減少したが、1997 年 (7.7 千 ha) 以降上昇に転じた。岡山県で行われてきた乾田直播栽培が減少する一方で、湛水直播栽培が北陸・東北などで着実に増加し、2000 年には湛水直播の普及面積が乾田直播を上回った。これは、苗立ち向上技術である落水出芽法 (大場 1994, 1997) が全国的に定着し、湛水直播栽培の苗立ちの安定性が大幅に向上したことと、打ち込み式代かき同時点播機や高精度湛水条播機等の開発により、倒伏に弱い「コシヒカリ」でも直播が可能となったことが影響している。2011 年には、直播栽培面積は約 22.6 千 ha、水稻作付面積に占める割合は 1.4% である。

一方、北海道における直播栽培の普及面積は、1997 年には 196 ha まで拡大したが、その後普及は停滞した。しかし、2007 年以降は、乾田直播・湛水直播ともに直線的に増加し、2015 年には 1,862 ha、水稻作付面積の 1.7% に達している。

農林業センサスを用いた北海道農業・農村の動向予測 (道総研中央農業試験場 2013) では、2025 年における全道の販売農家戸数は、2000 年の 6.3 万戸から 2.6 万戸に大幅に減少し、とくに水田作地帯で農家人口、農家戸数の減少程度が大きい。また、2010 年に対比した 2025 年の販売農家 1 戸当たり平均経営耕地面積は、水田作地帯では 1.7~1.9 倍と、畑作や酪農地帯に比べて拡大程度が大きい。

く、販売農家1戸当たり水田面積は、2025年には10～20 haとなり、北空知、南空知では25 ha前後となる市町村も散見されると予測している。

表1-2 全国および北海道における直播栽培の普及面積の推移.

年次	全国			北海道				
	湛水 直播 (千ha)	乾田 直播 (千ha)	直播計 (千ha)	湛水 直播 (ha)	乾田 直播 (ha)	直播計 (ha)	直播の 比率 (%)	水稻 合計 (千ha)
1989	2.6	6.1	8.7	29	9	38	0.0	148
1990	2.4	5.6	8.0	24	10	33	0.0	146
1991	2.5	4.9	7.4	29	7	36	0.0	145
1992	2.5	4.8	7.3	63	12	74	0.0	162
1993	2.4	4.8	7.2	81	37	117	0.1	173
1994	2.5	5.1	7.6	79	75	153	0.1	176
1995	2.6	4.9	7.5	56	88	144	0.1	163
1996	2.8	4.5	7.3	79	106	185	0.1	155
1997	3.1	4.5	7.7	63	134	196	0.1	154
1998	3.6	4.3	8.0	50	122	172	0.1	142
1999	4.2	4.5	8.7	74	93	167	0.1	139
2000	4.5	4.5	8.9	68	75	142	0.1	135
2001	5.6	4.5	10.2	75	77	152	0.1	122
2002	6.8	4.8	11.5	104	72	176	0.1	120
2003	8.3	4.8	13.1	100	74	174	0.1	118
2004	9.6	5.2	14.8	151	88	239	0.2	121
2005	10.2	5.5	15.7	132	77	209	0.2	119
2006	10.5	5.3	15.9	113	81	194	0.2	115
2007	11.8	5.6	17.4	164	122	286	0.2	116
2008	12.5	6.1	18.6	288	144	432	0.4	115
2009	13.0	6.8	19.9	404	187	591	0.5	114
2010	13.6	7.9	21.5	490	355	845	0.7	115
2011	14.2	8.4	22.6	573	446	1019	0.9	113
2012	-	-	-	665	623	1288	1.2	112
2013	-	-	-	754	645	1399	1.2	112
2014	-	-	-	895	788	1683	1.5	111
2015	-	-	-	975	887	1862	1.7	108

2015年の値は暫定値.

したがって、今後の北海道稲作にとっては、大規模化への対応として、省力稲作技術の開発・普及が急務である。北海道における10a当たりの投下労働時間の推移をみると、2000年の21.35時間に対して、2011年は18.30時間と、水田区

画の大型化等によって、本田作業はわずかに減少しているものの、育苗管理には大きな変化はみられていない。GPS など ITC の活用や、無代かき移植などによる作業の効率化や省力化も期待されるが、大幅な規模拡大に対応するには、現状の移植栽培の延長上の技術体系のみでは不可能であると考えられる。

空知農業技術支援会議が、管内の指導農業士を対象に実施した「10 年後の空知農業に関するアンケート調査」(中住 2012) では、10 年後の水稻経営に必要な技術のトップに水稻直播栽培技術(回答率 71%) があげられた。また、畑作物についても、「田畑輪換・水稻直播を組み入れた輪作体系の確立」(回答率 49%) がトップであった。

今後、さらに進行する担い手の減少、大規模化などの構造変化に対応するために、水稻だけではなく、麦・大豆など畑作物や露地野菜なども取り入れた土地利用体系への転換が必要であり、直播栽培技術はその中核技術としても期待されている。

したがって、直播栽培の安定化と更なるコスト低減に向けて、高い低温苗立ち性を有する品種の開発と、安定栽培のための技術革新を早急に進める必要がある。

2. 本研究の目的

北海道の湛水直播栽培においては、府県よりも多くの苗立ち本数が必要で、また無霜期間による制約のため、平均気温が約 12℃となる 5 月中旬に播種される(田中 1995) ことから、低温条件下において安定した出芽率と高い苗立ち率を確保することが極めて重要である。そこで、とくに浮き苗と倒伏を積極的に防止する「土中」播種における低温苗立ち性に係わる要因の解析と、落水出芽法による苗立ち向上技術の確立を目的として研究を行った。

第 2 章においては、低温苗立ち性の品種間差異に関する変動要因を解析した。

すなわち、第 1 節では、精密な低温処理が可能な冷水掛け流し水田を用いて生育時期別に冷水処理を行い、直播された実生の低温感受性が最も高い時期を特定することを目的とした。

低温苗立ち性の遺伝的改良を効率的に進めるには、低温苗立ち性の検定方法の改良点や着目すべき選抜形質を明確にしていく必要がある。そこで、第 2 節では外国稲を含む幅広い品種・系統を供試し、低温条件下において土中播種（播種深度 5 mm）を行い、各品種がどの程度の苗立ち性を示すか、さらに低温発芽性と発芽後の初期伸長性のどちらが低温苗立ち性との関係が深いかを明らかにすることを目的とした。

さらに第 3 節では、北海道内の品種に加え、第 2 節で得られた低温苗立ち性の高い外国稲を供試して、土中播種における苗立ち率低下の主要な要因と考えられる土壌還元と *Pythium* 属菌の単独および組み合わせ処理を行い、苗立ち率の低下に対する品種の反応を明らかにすることを目的とした。

湛水土壌中直播栽培技術の開発以降、苗立ちを安定化する栽培技術開発が様々に行われてきた（下田 1989, 古畑 2009）。そのなかでも、播種後の一定期間に落水管理する落水出芽法は、全国各地で導入されて、湛水直播栽培の普及に大きく貢献している（丸山 2001）。種籾近傍で起こる局所的な土壌還元が湛水土壌中直播栽培における出芽率低下の有力な原因（萩原 1993）とされるなかで、落水管理で苗立ちが安定するのは、表層土壌での通気性の向上（古畑ら 2005a）により土壌還元が抑制されるためと考えられる。また、Hagiwara and Imura (1993) は、局所的還元の出芽に対する影響は温度が低い場合に大きくなるとしていることから、落水出芽法は寒地でも有効と考えられる。しかし寒地にある北海道では、播種後の湛水による保温効果を重視しており、播種直後から落水管理を行うことはリスクがあると考えられてきた。

そこで第 3 章では，落水出芽法による苗立ち向上技術を確立するために，以下に取り組んだ．第 1 節では，温度条件を変えた室内試験において土壌還元処理と落水管理を組み合わせた試験を行い，播種後の落水管理が出芽と苗立ちに及ぼす影響を検討した．

第 2 節では，圃場試験において，播種後落水した落水区と播種後湛水管理した慣行区の苗立ち，生育および収量を比較するとともに，湛水区と落水区の地表下 1 cm の地温を調査し，寒地における落水出芽法の有効性を明らかにすることを目的とした．

第 3 節では，落水出芽法における適正な播種深度を，第 4 節では散播と条播の 2 機種を供試して，とくに播種深度に注目して播種機の実用性を検討することを目的とした．

最後に第 5 節では，播種後の最適な入水日を気温から推定する方法を検討して，過酸化石灰剤被覆種子および無被覆の催芽剤の各々に対して，最適入水日を明らかにすることを目的とした．

第2章 低温苗立ち性の品種間差異に関する変動要因の解析

1. 低温感受性時期の特定

出芽、苗立ちに及ぼす低温の影響を検討することは、低温苗立ち性を具備した品種育成に加えて、安定した苗立ちを得るための栽培システムの改良のためにも重要である (Ogiwara and Terashima 2001). しかしながら、直播された実生の低温感受性の時期に関する報告は少なく、発芽以後初生葉（第1葉）期頃までが最も抵抗力が劣るとした報告（竹川・森脇 1979a）がある程度である。

本節では、精密な低温処理が可能な冷水掛け流し水田を用いて生育時期別に冷水処理を行い、播種後苗立ちに至る過程において最も低温に対する感受性が高い時期を特定することを目的とした。

1) 材料および方法

試験は、1988年に北海道立上川農業試験場の水田で行った。当該地域における湛水直播栽培の標準的な播種期は5月中旬であるが、低温処理の影響を明確にするために、無処理水田の水温が高まる6月7日に播種を行った。水稻マツト苗用育苗箱に土壌を充填し、4条の播種溝を作成し、直播栽培用「上育395号（はやまさり）」のハト胸催芽種子を1条に25粒を配置し、播種深度（粃の最下部から地表面までの距離）5mmに埋め込み播種した。土壌は、代かきした水田土壌と、より酸化的な条件として水稻育苗用人工床土（商品名：中苗用パールマツト）の2土壌を供試した。1区1箱100粒の2反復で試験した。

水田は、冷水掛け流し水田とこれに隣接する無処理水田の2筆（各々約0.1a）を用いた。冷水田は、天野（1984）の方法により、地下水と灌漑水を混合しほぼ11℃で一定に保った水を昼夜掛け流した。さらに、日射による水温の上昇を防ぐため、90%遮光となるよう寒冷紗で水田の上面を覆った。

処理は、育苗箱を両水田間で適宜移動させる方法で行った。冷水処理の開始時

期は、播種直後、出芽揃い期（播種 7 日後、処理開始における出芽率は 28.5～68.0%で、第 1 葉以上抽出率は 0.5～5.5%）、および第 2 葉抽出期（播種 10 日後、処理開始時における第 2 葉抽出率は 4.0～34.5%）の 3 時期とした。処理期間は、7 日間処理と 14 日間処理の 2 水準とした。処理区は、これらに常時無処理水田に設置した無処理区を加えた合計 7 区である。調査は、各冷水処理の開始直前と終了直後に、出芽個体数（地表面から幼芽の一部が露出した個体を出芽個体とした）を出葉程度別に調査し、播種後 35 日目に生存した個体をもって苗立ち率とした。結果はいずれも播種粒数に対する百分率で示し、苗立ち率については、 $\arcsin$ 変換した後、統計的解析を行った。統計解析には、JMP 8.0.2.2 (SAS Institute Japan 株式会社) を用いた。

2) 結果

図 2-1 には、各処理の冷水処理期間と両水田における日最高・最低平均水田水温の推移を示した。無処理水田の水温は、播種後 14 日目までは 15～25℃の間で変動したが、その後はほぼ 25℃前後で推移した。冷水処理水田の水温は、播種後 18 日目以降、地下水くみ上げポンプの不具合によりやや変動したのを除けば、ほ

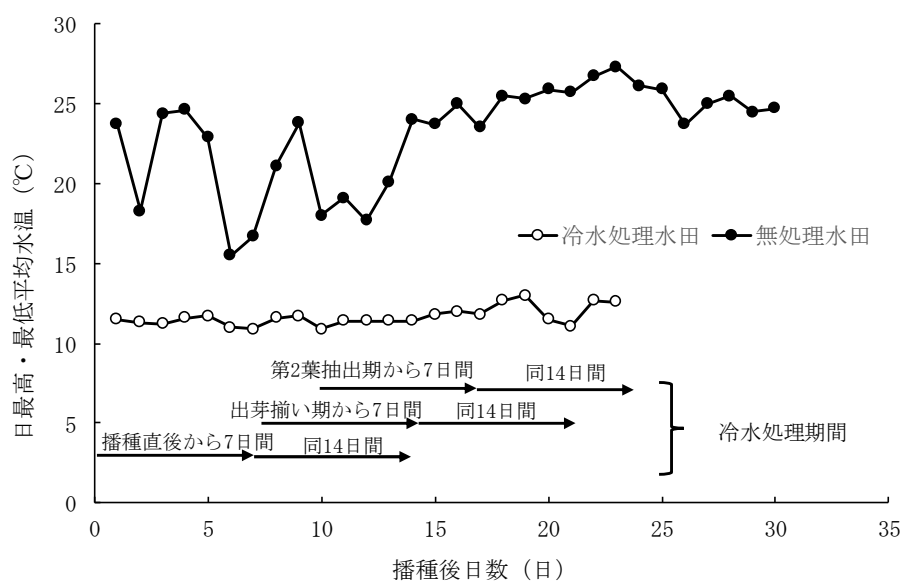


図2-1 冷水処理水田および無処理水田の水温の推移と冷水処理の期間。

ば 11℃前後で一定であった．表 2-1 には，各処理について冷水処理期間中およびその前後の水温を平均値で示した．冷水処理前の水温の平均値は 20.4～20.8℃，冷水処理期間中の水温の平均値は 11.3～11.9℃であった．冷水処理後の水温の平均値は，播種直後から 7 日間処理でやや低かった他は，概ね 25℃程度であった．

表2-1 各処理における試験期間中の水温条件.

処理		冷水処理前7日間			冷水処理期間中			冷水処理後7日間		
開始時期	期間 (日)	日最高 水温 (℃)	日最低 水温 (℃)	日平均 水温 (℃)	日最高 水温 (℃)	日最低 水温 (℃)	日平均 水温 (℃)	日最高 水温 (℃)	日最低 水温 (℃)	日平均 水温 (℃)
播種直後	7	—	—	—	12.1	10.6	11.3	26.4	14.9	20.6
同上	14	—	—	—	12.0	10.6	11.3	33.4	16.4	24.9
出芽揃い期	7	27.4	14.2	20.8	11.9	10.7	11.3	33.4	16.4	24.9
同上	14	27.4	14.2	20.8	12.8	10.5	11.6	34.3	17.2	25.7
第2葉抽出期	7	26.4	14.3	20.4	12.3	10.7	11.5	35.0	17.1	26.1
同上	14	26.4	14.3	20.4	13.0	10.7	11.9	32.8	16.8	24.8

表 2-2 には，各処理の苗立ち率および分散分析の結果を示した．低温処理については，5%水準で有意な差異が認められた．土壌と低温処理の交互作用には有意性が認められなかったので，土壌を込みにして多重比較を行った．無処理区の苗立ち率は，水田土で 24.5%，人工床土で 35.0%であった．冷水処理の影響についてみると，水田土の播種直後から 7 日間の処理を除いたすべての冷水処理区で苗立ち率は無処理よりも低下した．また，水田土の第 2 葉抽出期からの処理を除いて，処理期間が長いほど苗立ち率は低下した．苗立ち率が最も低かったのは，出芽揃い期から 14 日間の処理で，水田土で 4.0%，人工床土で 3.5%と極めて低かった．次いで苗立ち率が低かったのは出芽揃い期から 7 日間処理であった．播種直後からの処理と第 2 葉抽出期からの処理を比較すると，14 日間処理では同程度の苗立ち率であったが，7 日間処理で比較すると第 2 葉抽出期からの処理で低かった．

表2-2 冷水掛け流し処理の開始時期と期間が苗立ち率に及ぼす影響.

処理開始時期	期間 (日)	苗立ち率 (%)		有意差
		水田 土	人工 床土	
播種直後	7	31.5	29.5	30.5 a
同上	14	12.5	18.5	15.5 bc
出芽揃い期	7	8.5	16.0	12.3 cd
同上	14	4.0	3.5	3.8 d
第2葉抽出期	7	10.5	27.0	18.8 abc
同上	14	14.0	18.5	16.3 c
無処理	-	24.5	35.0	29.8 ab
分散分析				
要因		自由度	平均平方	
土壌 (S)		1	121.1	n. s.
低温処理 (T)		6	249.1	*
S×T		6	26.2	n. s.
誤差		14	43.6	

苗立ち率はarcsin変換した後分散分析を行った. 土壌と低温処理の交互作用が有意ではなかったため, 低温処理間の有意差検定は土壌を込みにして行った. 数値に付した同一のアルファベットは5%水準で有意な差異がないことを示す (studentのt検定による). 分散分析表において, * は5%水準で有意であり, n. s. は有意な差異がないことを示す.

次に, 処理前後の出芽個体を出葉程度ごとに分類して各処理による苗立ち率の低下要因を検討した (表 2-3). 播種直後からの処理では, 7 日間, 14 日間処理ともに, 冷水処理の終了時には出芽は全く認められず, また無処理水田に移動後に出芽した個体はすべて苗立ちに至ったことから, 播種直後からの処理における苗立ち率の低下は, 出芽率の低下によるものと考えられた.

出芽揃い期からの処理をみると, 冷水処理開始直前の出芽率は, 人工床土で 52.0~68.0%, 水田土で 25.5~35.0%であり, 水田土で低かった. また, 出芽率はいずれの処理でも冷水処理期間中に低下した. 本葉抽出率 (第 1 葉以上の抽出率) はやや増加し, 鞘葉のみの出芽個体の減少が大きかった.

出芽揃い期からの処理では, 冷水処理直前に第 1 葉を抽出していた個体が処理

表2-3 冷水処理開始前後および播種後35日目の出葉程度別出芽率.

土壌	冷水処理		調査 時期	出葉程度別出芽個体(%)			出芽(生存) 個体合計 (%)
	開始時期	期間 (日)		鞘葉のみ	第1葉まで	第2葉まで	
人工床土	播種直後	7	B	0.0	0.0	0.0	0.0
			C				29.5 ± 3.5
		14	B	0.0	0.0	0.0	0.0
	出芽揃い期	7	C				18.5 ± 2.5
			A	62.5 ± 6.5	5.0 ± 0.0	0.5 ± 0.5	68.0 ± 6.0
			B	44.0 ± 12.0	12.5 ± 3.5	4.0 ± 1.0	60.5 ± 7.5
			C				16.0 ± 1.0
		14	A	48.5 ± 11.5	3.0 ± 2.0	0.5 ± 0.5	52.0 ± 14.0
			B	36.0 ± 7.0	5.0 ± 3.0	4.5 ± 4.5	45.5 ± 14.5
			C				3.5 ± 2.5
	第2葉抽出期	7	A	20.0 ± 1.0	5.5 ± 1.5	34.5 ± 7.5	60.0 ± 8.0
			B	14.0 ± 1.0	3.5 ± 0.5	37.0 ± 8.0	54.5 ± 7.5
			C				27.0 ± 6.0
		14	A	28.0 ± 17.0	2.5 ± 0.5	28.0 ± 20.0	58.5 ± 3.5
			B	13.0 ± 10.0	1.5 ± 1.5	27.0 ± 20.0	41.5 ± 8.5
			C				18.5 ± 16.5
水田土	播種直後	7	B	0.0	0.0	0.0	0.0
			C				31.5 ± 6.5
		14	B	0.0	0.0	0.0	0.0
	出芽揃い期	7	C				12.5 ± 1.5
			A	34.5 ± 4.5	0.5 ± 0.5	0.0 ± 0.0	35.0 ± 4.0
			B	24.5 ± 4.5	3.0 ± 2.0	0.0 ± 0.0	27.5 ± 6.5
			C				8.5 ± 5.5
		14	A	28.0 ± 0.0	0.5 ± 0.5	0.0 ± 0.0	28.5 ± 0.5
			B	14.5 ± 2.5	4.0 ± 2.0	1.0 ± 1.0	19.5 ± 0.5
			C				4.0 ± 2.0
	第2葉抽出期	7	A	16.0 ± 0.0	5.5 ± 0.5	4.0 ± 3.0	25.5 ± 3.5
			B	8.5 ± 2.5	5.5 ± 1.5	5.0 ± 4.0	19.0 ± 8.0
			C				10.5 ± 1.5
		14	A	18.5 ± 2.5	4.5 ± 1.5	10.0 ± 3.0	33.0 ± 2.0
			B	6.0 ± 1.0	2.0 ± 0.0	15.0 ± 3.0	23.0 ± 2.0
			C				14.0 ± 0.0

調査時期については、Aは冷水処理開始直前、Bは冷水処理終了直後、Cは播種後35日目の苗立ち率を示す。表中の値は、各々播種粒数100粒に対する百分率の平均値±標準誤差 (n=2) で示した。無処理区の苗立ち率は、人工床土では35.0%、水田土では24.5%であった。

期間中に第2葉を抽出したものと考えられた。人工床土では、7日間処理の苗立ち率は、処理終了時の本葉抽出率にほぼ相当した。すなわち、苗立ちに至ったのは、処理終了時に第1葉を抽出した個体までで、処理終了時に鞘葉のみの出芽個体は、すべて無処理水田に移動後に枯死に至ったと推察された。14日間処理の苗立ち率は、処理開始時の第1葉抽出個体および処理終了時の第2葉抽出個体にほぼ相当した。すなわち、処理開始時に鞘葉のみの出芽個体は、処理期間中に第1葉を抽出した個体も含めて無処理水田に移行後にほぼすべて枯死に至ったと推察

された．一方，水田土では 7 日間処理の苗立ち率は処理終了時の本葉抽出率よりもやや高く，14 日間の処理の苗立ち率は処理終了時の本葉抽出率にほぼ相当した．

第 2 葉抽出期からの処理では，冷水処理期間中に第 1 葉および第 2 葉抽出個体数に大きな変化は認められなかった．人工床土の苗立ち率は，処理期間にかかわらず処理終了時の第 2 葉抽出率よりも低かった．処理終了時に新葉が黄化した個体が観察されたが，これらが無処理水田に移動後に枯死したものと思われた．一方，水田土では，7 日間処理の苗立ち率は処理終了時の本葉抽出率と同程度であったが，14 日間処理の苗立ち率は処理終了時の第 2 葉抽出率よりも低下した．

以上のように，本葉抽出率の推移と苗立ち率の関係については，土壌間で若干差は見られたが，無処理区の苗立ち率（人工床土で 35.0%，水田土で 24.5%）を加味して，各処理開始時期の苗立ち率低下の要因を整理すると，出芽揃い期からの処理では出芽した個体が第 1 葉を抽出できるかどうか，第 2 葉抽出期からの処理ではそれに加えて本葉を抽出した個体の生存率がそれぞれ苗立ち率の低下に影響したと考えられた．

3) 考察

湛水直播栽培における出芽と苗立ちに関する温度反応に関する研究では，多くの場合播種時期の移動試験や年次間の比較による解析がほとんどであり（笹原・五十嵐 1989），低温処理以外の時期の条件をできるだけ揃えて，厳密に低温感受性の時期を特定する試みは少ない．本研究では，実際の水田レベルで，低温処理時期が苗立ち率に及ぼす影響を精密に解析することを目的に，ほぼ 11℃で一定の冷水を掛け流した冷水田と隣接する無処理水田を用い実験を行った．まず温度条件についてみると，表 2-1 に示したように，各処理における冷水処理期間中の水温の平均値は 12℃未満でほぼ一定に制御された．また，処理前後の無処理水田における温度条件は概ね同等であった．水稻マツト苗用育苗箱を用いて低温苗立ち

性の品種間差異を精密に検定する試みが報告されている（萩原ら 2003）が、精密に温度管理された冷水掛け流し水田と無処理水田を用い、水稻マツト苗用育苗箱を適宜両水田間を移動させることで低温処理時期の影響を評価できると考えられた。

冷水処理を行わなかった無処理区の苗立ち率は、人工床土で 35.0%，水田土で 24.5%と水田土壌に比べて人工床土でわずかに高かったものの両土壌ともに低かった。より酸化的な条件として供試した人工床土で苗立ち率が低下したのは、育苗箱の設置後に土壌表面に湛水中に浮遊した粘土粒子が育苗箱の表面に堆積したためと考えられた。また、その他の処理における処理直前の出芽率は、人工床土では 52.0～68.0%，水田土では 25.5～35.0%であったことから、とくに人工床土の無処理区では出芽個体の生存率が大きく低下したことが考えられるが、その要因については不明である。

これに対し、播種直後から 7 日間処理を除いた冷水処理区の苗立ち率は、両土壌ともに無処理区よりも低かった。なかでも、出芽揃い期からの処理で苗立ち率の低下が極めて大きかった。

苗立ち率低下の要因を処理時期ごとに考察すると、播種直後からの 14 日間処理では出芽率の低下が主な要因と考えられた。湛水土壌中直播栽培における出芽率の低下には、種粒近傍の局所的還元が影響し（萩原ら 1990）、局所的還元の出芽に対する影響は温度が低い場合に大きくなるとの報告（Hagiwara and Imura 1993）もあることから、播種直後からの出芽率低下には、低温と局所的還元の交互作用が影響していると考えられる。

また表 2-3 では、若干土壌間で反応に差は見られたが、出芽揃い期からの処理では出芽個体の本葉抽出率が、第 2 葉抽出始めからの処理では出芽個体の本葉抽出率と本葉抽出個体の生存率がそれぞれ主に苗立ち率の低下に影響したと考えら

れた．出芽と苗立ちの不安定要因として，*Pythium* 属菌，*Achlya* 属菌，蛍光性 *Pseudomonas* 属細菌などによる苗腐病の関与が指摘されており（北海道立上川農業試験場 1989），今回見られた苗立ち率の低下には，低温ストレスとこれら病原菌の相互作用も含まれると考えられた．

以上の結果から，約 11℃の冷水掛け流し処理を行った場合に，最も苗立ちが低下したのは出芽個体の第 1 葉抽出率が低下した場合であり，第 1 葉の抽出前，すなわち鞘葉の伸長期が最も低温に対する感受性が高いと考えられた．この結果は，低温に対する抵抗力が最も劣る時期は発芽以後初生葉（第 1 葉）期頃までの間であるとした竹川・森脇（1979a）の指摘の範囲内にあり，低温感受性の時期をより限定して示したといえる．Ogiwara and Terashima (2001) は，圃場における苗立ちと寒天培地を用いた実生の伸長の関係を調べ，鞘葉の素早い生長が低温条件下において安定して高い苗立ち率の確保に重要としているが，本研究の結果はこれと一致する．

2. 低温苗立ち性と初期伸長性の関係

我が国における水稻直播栽培用品種の具備すべき特性としては，出穂特性，耐倒伏性，密播適応性などとともに，低温発芽性や苗立ち性の重要性が報告されてきた（鳥山 1962，山本 1990）．低温苗立ち性とは，低温，土壤還元，苗腐病菌など外的ストレスが互いに影響しあう環境下で，播種後の出芽から苗立ちに至るイネの生理反応の総合的な結果と考えられる．したがって，低温苗立ち性の遺伝的改良を効率的に進めるには，低温苗立ち性の検定方法の改良点や着目すべき選抜形質を明確にしていく必要がある．

佐々木（1974）は，低温発芽性の検定温度は 13～15℃，置床日数は 10 日とし，発芽性の指標として発芽率を平均発芽日数で除した発芽係数が適することを示す

とともに、低温発芽性は量的形質であり選抜効果が認められることを示し、低温発芽性と初期伸長性や草型などとの関連を詳細に検討した。また、佐々木 (1968) は、低温発芽性の大きい品種は発芽の安定のみではなく、初期生育の安定にとっても有利な特性を有するとした。さらに、佐々木・山崎 (1971) は、低温発芽性と苗立ち率の間に有意な正の相関関係を認め、低温発芽性は寒冷地の湛水直播栽培における苗立ちの安定にとって極めて意義ある特性とした。小高・安部 (1988) は、外国稲を含む 762 品種の低温発芽性を評価するとともに、大型プラスチックバットを用い無覆土 15℃の条件で苗立ち性を検定し、ハンガリー、ソ連、ポルトガル品種の中で、苗立ち性の極めて優れた品種が存在することを示した。

このように、水稻湛水直播栽培における発芽から苗立ちに至る間の品種間差異やその検定方法および各形質間の相互関係を検討した報告の多くは、低温発芽性や土壌表面播種の苗立ち性に関する評価を示したものであった。

本節では、外国稲を含む幅広い品種・系統を供試し、低温条件下において土中播種（播種深度 5 mm）を行い、各品種がどの程度の苗立ち性を示すか、さらに低温発芽性と発芽後の初期伸長性のどちらが低温苗立ち性との関係が深いかを明らかにすることを目的とした。

1) 材料および方法

供試品種は、北海道内の品種・系統 17、府県の陸稲品種 11、外国品種 24 の計 52 品種である (表 2-5)。このうち、品種番号 11～52 は、15℃でのシャーレによる発芽試験において低温発芽性が高いと判定されたもの (小高・安部 1988) で、旧北海道農業試験場稲第 4 研究室から分譲頂いた。供試種子の採種条件の影響をできるだけ小さくするため、各品種は、1986 年に上川農業試験場の水田において移植栽培を行い採種した。一部の熟期の遅い品種については、ビニールハウス内のポット植え栽培で採種した。種子は、播種前に比重 1.10 の塩水選を行った。

低温苗立ち性の検定は、上川農業試験場の水田において、1987年5月18日播種と、同年7月15日播種の2回行った。5月播種は、慣行の播種時期における品種の反応を調べるために、7月播種は低温に対する感受性が高いと考えられる第1葉（不完全葉）抽出始めからの冷水処理に対する反応を調べるために設定した。試験は、水稻マット苗用育苗箱を用い実施した。5月播種については代かきした水田土壌を、7月播種は出芽率を高めるために水稻育苗用人工床土を充填し、4条の播種溝を作成した。各条には1品種25粒を配置し、播種深度5mmに埋め込み播種した。播種前に種子は約11℃で7日間の予浸を実施した後、32℃でハト胸に催芽した。品種によりハト胸に催芽するまでに要する時間が異なるので、ハト胸に達した品種の種子は播種まで約4℃の恒温器内で保存した。5月播種では12反復、7月播種では6反復とした。播種後は各育苗箱を代かきした水田内に設置し、水深3cm程度の湛水管理を行った。7月播種については、第1葉抽出始めの7月23日から9日間、天野(1984)の方法により、地下水と灌漑水を混合してほぼ14℃で一定に保った水を昼夜掛け流した。調査は、出芽個体数、1葉抽出個体数を随時数え、播種後32～33日目に生存した個体数を播種粒数で除して苗立ち率を算出した。

圃場試験とは別に、実験室内で低温発芽性と低温初期伸長性の検定を行った。低温発芽性の検定は、佐々木(1974)の方法に準じた。すなわち9cmのシャーレに濾紙1枚を敷き水道水4mlを加え発芽床とした。1987年2月12日に1区50粒を2反復置床し、15℃の恒温器内に設置した。置床後、毎日の発芽数を14日目まで調査し、発芽率と平均発芽日数を算出した。低温発芽性は、発芽係数（発芽率を平均発芽日数で除した値）で評価した。

低温初期伸長性の検定は、100mlのポリサンプル瓶に水道水を入れ、1987年7月16日に、1品種10粒のハト胸催芽種子を水中に置床し、15℃の恒温器内に設

置し，毎日水を入れ替えた．1品種2反復として，置床後35日目に第2葉長（第2葉の葉鞘長＋葉身長），草丈，葉令，最長根長，種子根を含む根数を調査した．

結果の解析では，百分率で示される形質については， $\arcsin$ 変換した後，統計的解析を行った．苗立ち率の分散分析は，播種期を主区，品種を副区として統合解析法（McIntosh 1983）で行い，品種間の比較はTukeyのHSD検定法（ $p \leq 0.05$ ）で行った．統計解析には，JMP 8.0.2.2（SAS Institute Japan 株式会社）およびMicrosoft Excel 2013を用いた．

2) 結果

図2-2には，苗立ち試験期間中の水田水温の推移を示した．5月播種と7月播種の播種後30日間の水田水温の平均値は，各々 18.7°C と 18.9°C でその差はわずかであったが，5月播種では，播種後11日間が比較的低温に経過し，7月播種では冷水処理により播種後9日目から9日間が低温に経過した．このように，本試験では播種後低温に遭遇する時期が異なる試験区を得ることができた．

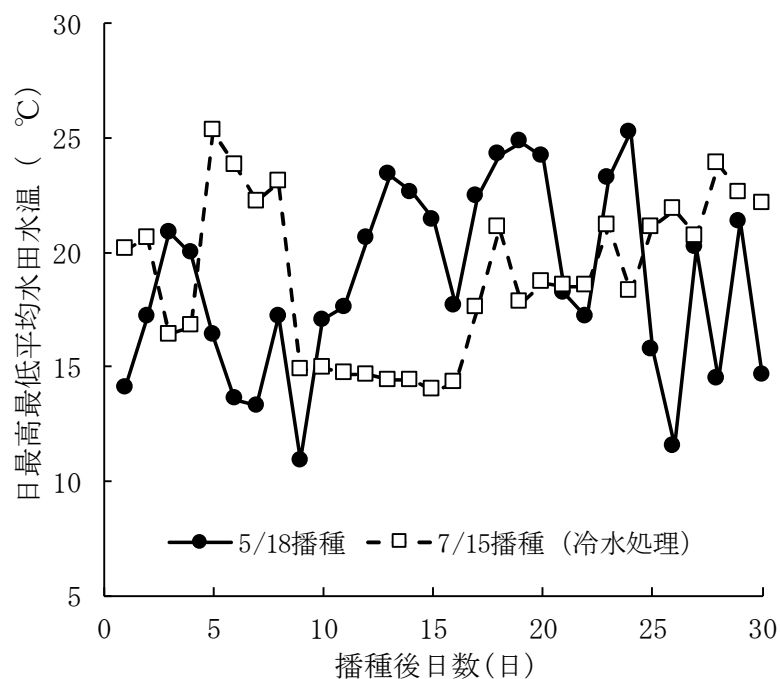


図2-2 苗立ち試験期間中の日最高最低平均水田水温の推移.

表 2-4 は、苗立ち率について主区を播種期、品種を副区とする分散分析を行った結果である。播種期と品種は 0.1%水準で、両者の交互作用は 1%水準で有意であった。

表2-4 苗立ち率の分散分析.

要因	偏差平方和	df	平均平方	F値
主区				
播種期 (S)	105815.2	1	105815.2	162.13 ***
主区誤差	10442.2	16	652.6	
副区				
品種 (V)	84321.8	51	1653.4	19.41 ***
S×V	8458.6	51	165.9	1.95 **
副区誤差	69601.7	817	85.2	

苗立ち率は、arcsin変換した後分散分析を行った。

, *は、各々1%, 0.1%水準で有意であることを示す。

表 2-5 には、両播種期における苗立ち率を示した。苗立ち率は、5 月播種では 2.0～79.5%，7 月播種では 45.9～99.6%の範囲にあり、すべての品種で 7 月播種が高かった。両播種期ともに顕著な品種間差異が認められ、道内の湛水土壌中直播栽培で用いられてきた早生品種「キタアケ」の苗立ち率は比較的低い順位であった。道内の品種・系統の中では、「胆振早稲」が最も高い苗立ち率を示した。

これに対して、外国稲の「Italica Livorno」(イタリア)、「Kaeu-N17」(旧ソ連)、「Arroz da Terra」(ポルトガル)、「Alborio-J1」(イタリア)、「Dunghan Shali」(旧ソ連)、「Sakuzairei」(中国) は、両播種期ともに胆振早稲と同等以上の高い苗立ち率を示した。圃場における観察では、これらの品種は初期生育も旺盛で、浮き苗の発生も少なかった。

苗立ち率は、出芽率 (EM)、出芽した個体の第 1 葉抽出率 (FLE/EM)、第 1 葉抽出個体の生存率 (ES/FLE) の 3 つの構成要素の積で表すことができる。そこで、表 2-6 には苗立ち率を目的変数、3 つの苗立ち構成要素を説明変数とする重

表2-5 苗立ち率の品種間差異.

品種			苗立ち率 (%)	
No.			5月15日播種	7月15日播種
49	Italica Livorno	外国稲	79.5 a	92.9 abc
50	Kaeu-N17	外国稲	76.3 ab	94.9 ab
43	Arroz da Terra	外国稲	74.5 abc	99.6 a
48	Alborio-J1	外国稲	73.1 abcd	92.1 abcd
23	水野黒糯	府県陸稲	71.3 abcde	86.6 abcdef
36	Dunghan Shali	外国稲	68.9 abcdef	95.3 ab
42	Sakuzairei	外国稲	67.1 abcdefg	90.2 abcd
44	A.K.Sally	外国稲	60.4 abcdefgh	95.3 ab
40	USSR22	外国稲	60.2 abcdefghi	84.5 bcdefg
7	胆振早稲	道内品種	59.2 abcdefghi	86.0 abcdef
38	USSR8	外国稲	58.4 abcdefghi	81.0 bcdefg
18	ヒメノモチ	府県陸稲	57.8 abcdefghi	83.6 bcdefg
10	北育78号	道内系統	56.6 abcdefghi	83.8 bcdefg
16	北海215号	道内系統	55.5 abcdefghi	79.0 bcdefgh
28	岩手胡桃早生1号	府県陸稲	54.9 abcdefghi	88.4 abcde
13	上育373号	道内系統	54.6 abcdefghi	77.4 bcdefgh
47	Ryuusen	外国稲	54.5 abcdefghi	88.2 abcdef
29	Promorszkij	外国稲	53.7 abcdefghi	87.4 abcdef
32	C11D早生	外国稲	52.4 abcdefghi	86.0 abcdef
34	Kakai203	外国稲	51.1 abcdefghi	79.4 bcdefgh
37	USSR3	外国稲	51.0 bcdefghi	84.6 bcdefg
14	道北5号	道内系統	50.7 bcdefghi	74.0 bcdefghi
33	684Y	外国稲	49.9 bcdefghi	86.3 abcdef
12	月系8406号	道内系統	48.3 bcdefghij	89.5 abcd
17	はやこがね	道内品種	47.4 bcdefghijk	80.5 bcdefg
5	キタヒカリ	道内品種	46.8 cdefghijkl	93.8 abc
2	ともひかり	道内品種	46.4 cdefghijkl	77.3 bcdefgh
27	大宝早生	府県陸稲	46.4 cdefghijkl	81.8 bcdefg
9	北育77号	道内系統	46.1 cdefghijkl	77.3 bcdefgh
6	みちこがね	道内品種	45.8 cdefghijklm	81.9 bcdefg
46	臨明川	外国稲	45.6 cdefghijklm	75.3 bcdefghi
31	C11D	外国稲	45.3 cdefghijklm	85.5 bcdef
8	上育395号	道内系統	44.8 defghijklm	85.8 abcdef
3	イシカリ	道内品種	44.7 defghijklm	76.5 bcdefgh
4	ゆきひかり	道内品種	44.3 defghijklm	84.6 bcdefg
39	USSR15	外国稲	44.0 defghijklm	81.7 bcdefg
51	Sesia	外国稲	42.1 efghijklmn	86.5 abcdef
1	キタアケ	道内品種	41.3 fghijklmno	78.3 bcdefgh
30	Santahezekij52	外国稲	39.9 fghijklmno	88.6 abcde
41	USSR25	外国稲	38.1 ghijklmno	90.0 abcd
35	Lusitano	外国稲	35.1 hijklmno	82.9 bcdefg
20	チヨミノリ	府県陸稲	34.2 hijklmno	81.8 bcdefg
22	ミズハタモチ	府県陸稲	31.5 hijklmno	89.6 abcd
15	道北9号	道内系統	30.5 ijklmno	70.9 cdefghi
45	Nano X Sollana	外国稲	21.1 jklmno	50.0 hi
19	イワテハタモチ	府県陸稲	20.0 klmno	61.6 fghi
25	ハタホナミ	府県陸稲	19.3 klmno	62.3 efghi
11	札系8484号	道内系統	19.2 lmno	56.5 ghi
26	ハタニシキ	府県陸稲	18.2 mnop	79.2 bcdefgh
21	農林糯4号	府県陸稲	16.1 nop	68.8 defghi
24	旭糯	府県陸稲	15.1 op	56.6 ghi
52	BORO-I	外国稲	2.0 p	45.9 i

各播種日において、数値に付した同一のアルファベットは5%水準で有意な差異がないことを示す (TukeyのHSD検定法による)。

回帰分析を行い，苗立ち構成要素の標準偏回帰係数の大小により苗立ち率に対する影響力を評価した．その結果，5月播種では主に EM が，7月播種では EM と ES/FLE が最も苗立ち率に影響した．両播種期の苗立ち率の間には， $r=0.803$ と 0.1%水準で有意な正の相関関係が認められたが，苗立ち構成要素の相対的重要性は播種期によって異なった．

表2-6 苗立ち率に対する苗立ち構成要素の相対的寄与率.

播種期	出芽率	出芽個体の 第1葉 抽出率	第1葉 抽出個体の 生存率	R^2
5月18日	0.652	0.357	0.062	0.989
7月15日	0.599	0.015	0.548	0.983

表中の数値は，苗立ち率を目的変数，3つの苗立ち構成要素を説明変数として重回帰分析を行ったときの標準偏回帰係数を示す。

次に，表 2-7 には苗立ち率および苗立ち構成要素と低温発芽性および低温初期伸長性との相関関係を示した．両播種期ともに，苗立ち率および苗立ち構成要素と 15℃発芽係数との相関関係は概して弱かったのに対して，15℃初期伸長性のうち，第2葉長，草丈，最長根長と苗立ち率および苗立ち構成要素の間に有意な正の相関関係が認められ，35日目の草丈よりも第2葉長および最長根長との相関係

表2-7 苗立ち率および苗立ち構成要素と低温発芽性および低温初期伸長性の相関係数.

播種期	苗立ち率および 苗立ち構成要素	15℃ 発芽係数	15℃初期伸長性 (35日目)				
			第2葉長	草丈	葉令	最長根長	根数
5月18日	出芽率	0.126	0.550***	0.389**	-0.113	0.543***	-0.096
	出芽個体の第1葉抽出率	0.294*	0.560***	0.469***	-0.066	0.523***	-0.123
	第1葉抽出個体の生存率	0.252	0.375**	0.23	-0.163	0.418**	-0.147
	苗立ち率	0.156	0.604***	0.441**	-0.128	0.587***	-0.118
7月15日	出芽率	0.092	0.520***	0.423**	0.123	0.535***	0.158
	出芽個体の第1葉抽出率	0.084	0.118	0.104	-0.121	0.166	-0.112
	第1葉抽出個体の生存率	0.089	0.455***	0.377**	-0.099	0.482***	0.068
	苗立ち率	0.103	0.570***	0.461***	-0.004	0.593***	0.113

*, **, ***は各々5, 1, 0.1%水準で有意であることを示す (n=52)．

数がやや高かった．葉令および根数と苗立ち率および苗立ち構成要素の間には有意な相関関係は認められなかった．苗立ち構成要素の中では，5月播種の第1葉抽出個体の生存率および7月播種の出芽個体の第1葉抽出率と初期伸長性との関係が弱かった．

図2-3には，15℃発芽係数および第2葉長と5月播種における苗立ち率との関係を示した．品種番号19，24，25，26の陸稲は，低温発芽性は高いが苗立ち率は低く，逆に23の陸稲と43，48の外国稲は，低温発芽性は低いが苗立ち率は高く，これらの品種が全体の相関関係を弱めていた．第2葉長と5月播種における苗立ち率の間には， $r=0.604$ の0.1%水準で有意な相関関係が認められ，道内品種および府県陸稲の第2葉長は短く，外国稲の第2葉長は全般に長く，なかでも「Italica Livorno」の第2葉長が最も長かった．

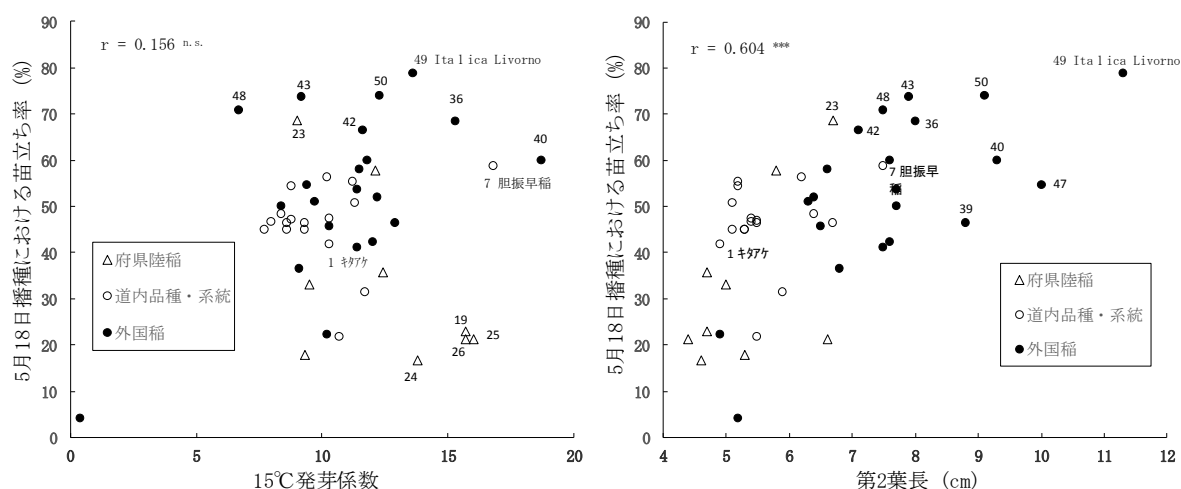


図2-3 低温発芽性および低温伸長性と5月播種の苗立ち率との関係．

図中の数値は第2表における品種No.を示す．n.s.は有意ではないことを，***は0.1%水準で有意であることを示す (n=52)．

3) 考察

まず，ここでは既往の成果から土壌表面播種と土中播種における苗立ち性の差異について考察する．天野ら（1993）は，土壌表面播種における苗立ち率の品種間差異は，第1葉を抽出した個体の第3葉抽出率に支配され，初期伸長性よりも

初期発根性との関係が深いとした。また、Inoue ら（1997）は土壌表面播種における苗立ち率の低下の主な原因は、浮き苗と死亡率の 2 つの独立した要因によるものであり、浮き苗に関しては第 2 葉期までの種子根自体の土壌への貫入能力の差が品種間差異をもたらす主要な要因と考察した。

一方で、太田ら（2003a）は、土壌表面播種での苗立ち率と土中からの出芽率の相関は低く、土中出芽性独自の検定方法の必要性を指摘し、深度 2 cm に播種できるシーダーテープを用いた圃場検定法を開発した（太田ら 2003b）。また、荻原ら（2003）は、育苗箱を用いて、一定の播種深度で低温苗立ち性を検定する方法を報告した。Ogiwara and Terashima（2001）は、土中播種における苗立ちと寒天培地を用いた実生の伸長の関係を調べ、鞘葉の素早い生長が低温条件下において安定して高い苗立ち率を確保するのに重要としている。また、古畑ら（2007）は、嫌気条件下における鞘葉の伸長速度を調べ、早期の出芽によって出芽・苗立ち率は向上して初期生育も促進されることを示した。このように、土壌表面播種と土中播種における苗立ち性は、その要因がかなり異なるものと考えられる。

本研究では、土中播種における低温苗立ち性の品種間差異を明らかにして、これの優れる品種を見出すために、慣行の 5 月播種と第 1 葉抽出始めから冷水処理を行った 7 月播種の 2 播種時期を設定した。品種の苗立ち性の評価は、播種深度 5 mm の土中播種の試験条件で、播種後の出芽から苗立ちに至る過程を調査した結果、両播種期ともに大きな品種間差異が認められた。

両播種期の苗立ち率の間には、有意な正の相関関係が認められたが、分散分析を行ったところ、播種期と品種の交互作用は有意であり、播種期によって品種の反応は異なると考えられた。播種後の温度条件（図 2-2）および苗立ち構成要素（表 2-6）から考察すると、5 月播種では、播種後の低温が出芽率の低下に影響し、7 月播種では第 1 葉抽出始めからの冷水処理が第 1 葉抽出個体の生存率に影響し

たものと考えられた。このように、低温苗立ち性は、経時的で複雑な要因が関与する形質である。

道内の品種・系統の中では、「胆振早稲」の苗立ち率が最も高く、本品種が土中播種における低温苗立ち性に関して当面の目標と考えられた。これに対して、外国稲の「Italica Livorno」, 「Kaeu-N17」, 「Arroz da Terra」, 「Alborio-J1」, 「Dunghan Shali」, 「Sakuzairei」は、両播種期ともに「胆振早稲」と同等以上の高い苗立ち率を示した。このことは、これらの外国稲は播種後からの低温と第1葉抽出後の低温の両者に対して、「胆振早稲」以上の耐性を有する可能性があり、交配母本としての活用が期待される。ただし、それらの特性を導入した実用品種は未だに育成されていない。

次に、低温発芽性および低温初期伸長性が低温苗立ち性に対してどう関わるかを検討した。本研究においては、苗立ち率および苗立ち構成要素と15℃発芽係数の間の相関関係は概して弱かったのに対して、15℃初期伸長性のうち、第2葉長、草丈、最長根長との間に有意な正の相関関係が認められた。このことは、低温発芽性の重要性を指摘した報告（佐々木 1968, 佐々木・山崎 1971, 佐々木 1974）と異なる結果である。全面的に湛水直播が行われるアメリカ合衆国カリフォルニア州においても播種後の冷水温耐性が課題であり、その検定方法は水温15℃程度、水深5 cm程度の水中における苗長を指標としている（Ormrod and Bunter 1961, Adair 1968）。このことから、低温苗立ち性の選抜にあたっては、低温発芽性よりも、発芽以後の初期伸長性に着目していく必要があると考えられる。

3. 土壌還元と *Pythium* 属菌に対する耐性

湛水土壌中直播栽培における土壌還元は苗立ちに影響し（井澤ら 1985）、とくに種籾近傍で起こる局所的な土壌還元が出芽率低下の有力な原因と指摘されてい

る（萩原ら 1990). このように、土壌還元は土中播種における苗立ち率低下の主要な要因と考えられるが、土壌還元に対する苗立ち性の品種間差異に関する報告はわずかで、その要因についても不明な点が多い.

また、病原菌による苗腐病は、寒地における出芽・苗立ちに影響する要因であることが古くから指摘されている（田中ら 1960, 山口・鈴木 1965). 苗腐病の病原菌としては、*Pythium* 属菌、*Achlya* 属菌、蛍光性 *Pseudomonas* 属細菌が考えられ、そのなかで鞘葉と第 1 葉の腐敗の原因となる *Pythium* 属菌の病原性が最も強いとされている（北海道立上川農業試験場 1989).

本節では、苗立ちに及ぼす要因のうち土壌還元と *Pythium* 属菌をとりあげ、両者の単独および組み合わせ処理による苗立ち率の低下に対する品種の反応を検討した.

1) 材料および方法

試験は、1990 年に北海道立上川農業試験場の恒温器内で行った. 供試品種は、前節で優れた苗立ち性を示した外国稲 5 品種および道内の 3 品種である. 供試土壌は、1989 年秋に採取した試験場内の水田土壌をビニールハウス内で十分風乾した後、蒸気殺菌した無代かき土（酸化土：OS）と、乾燥稲わら粉末を 1 kg m^{-2} 相当混和後、 30°C で 5 日間培養した代かき土（還元土：RS）を用いた. 播種は 2 月 7 日に行った. プラスチック製のイチゴパック（縦 17 cm×横 12 cm×高さ 7 cm）にこれらの土壌をそれぞれ充填し、1 パックあたり 25 粒のハト胸催芽種子を、播種深度 5 mm に播種し、恒温器内の循環式定温水槽に定置した. 湛水深は約 2 cm とし、1 区 1 パックで 4 反復とした.

Pythium 属菌の接種試験に供した菌株は、直播水田で採取された鞘葉腐敗個体からの分離菌株で、卵胞子の形成が認められないため種名は未定であるが、遊走子のうの形態は糸状であり（田中ら 1991）、北海道立上川農業試験場田中文夫氏

から分譲（菌株番号:F-2）を受けた．これを蔗糖加用ジャガイモ煎汁培地で 25℃、10～15 日間培養し、100 ml の殺菌水に 30 g の菌体を加えミキサーで軽く摩砕後、その懸濁液を播種 1 日後に生重で 1 パック当たり約 3 ml を約 400 ml の水中に懸濁接種した接種区（IP）と無接種区（NP）を設けた．なお、還元土については播種 7 日後、酸化土については同 10 日後に水を入れ換えた．恒温器内の温度は、播種後 2 日間は出芽を揃えるために 25℃、その後 1 日間は 20℃とし、その後 4 日間は苗腐病の発生を助長するために 5℃の低温処理を行い、その後は 20℃定温条件とした．日長は、試験期間を通じて 12 時間とした．播種後ほぼ毎日、出芽数、第 1 葉（不完全葉）抽出数を計測し、播種 21 日後に生存した個体の割合をもって苗立ち率とした．なお、*Pythium* 属菌接種後に、枯死個体等からの菌の再分離は行わなかった．

各処理区から 6 区をランダムに選び、パック内湛水中の溶存酸素濃度（DO）をデジタル溶存酸素計（DO-3 型、柴田科学）で継続的に測定した．また、土壌の酸化還元電位（Eh）を測定するため、各処理当たり 2 パックに地表下 2 cm に白金電極を設置して、飽和塩化銀電極との電位差を pH 計（HM-30S、東亜電波工業）で継続的に測定した．

結果の解析は、出芽率と苗立ち率については、arcsin 変換した後に行った．出芽率と苗立ち率の分散分析は 3 要因の完全無作為化法で行い、品種間の比較は Tukey の HSD 検定法（ $p \leq 0.05$ ）を用いて行った．統計解析には、JMP 8.0.2.2（SAS Institute Japan 株式会社）を用いた．

2) 結果

表 2-8 には Eh および DO の推移を示した．播種 1 日後の Eh は、酸化土の 400 mV に対して、還元土では -136 mV と強還元の条件が得られた．両土壌とも 5℃の低温処理期間中には大きな変化はなく、その後低下した．還元土では、強還元

のために水面上に赤褐色の浮遊物が出現し、播種 3 日目には出芽や本葉の抽出が確認できない状態となった。

OS/NP 区の DO は、一部を除き 5 ppm 以上で推移した。これに対して、それ以外の区では DO の低下が認められた。この低下は低温処理前で大きく、とくに RS/IP 区では播種後 2～4 日は 0.5 ppm 以下で推移した。

表2-8 土壌の酸化還元電位および湛水中の溶存酸素濃度の推移。

測定項目	処理	播種後日数										
		1	2	3	4	5	7	8	10	12	14	19
酸化還元電位 (mV)	OS/NP	400 (3)	240 (14)	169 (14)	181 (9)	193 (11)	162 (8)	126 (10)	72 (49)	-8 (6)	-26 (2)	-53 (9)
	RS/NP	-136 (2)	-204 (2)	-213 (0)	-188 (16)	-187 (0)	-205 (1)	-199 (11)	-227 (1)	-235 (2)	-239 (1)	-242 (1)
溶存酸素濃度 (ppm)	OS/NP	3.1 (0.2)	6.0 (1.3)	4.2 (1.1)	7.6 (0.8)	5.6 (0.9)	5.0 (0.6)	4.5 (0.7)	5.7 (0.9)	5.6 (0.3)	6.6 (0.2)	7.5 (1.0)
	OS/IP	2.6 (0.3)	0.9 (0.4)	1.6 (1.1)	4.0 (1.1)	4.8 (0.2)	3.9 (0.4)	1.7 (0.7)	3.2 (0.6)	3.6 (0.6)	4.0 (1.0)	3.4 (1.2)
	RS/NP	2.7 (0.5)	2.0 (0.7)	0.9 (0.4)	2.0 (0.5)	2.6 (0.5)	4.4 (0.8)	2.8 (0.6)	2.2 (1.1)	2.0 (0.5)	2.9 (1.3)	2.8 (0.6)
	RS/IP	3.2 (0.8)	0.4 (0.2)	0.5 (0.2)	0.5 (0.4)	1.3 (0.6)	3.6 (0.3)	3.2 (0.9)	2.5 (1.0)	1.5 (0.5)	2.0 (0.8)	2.1 (0.7)

OS, RS, NP, IPは、各々酸化土、還元土、*Pythium*無処理、*Pythium*接種を示す。下段の()内は、標準偏差（酸化還元電位はn=2、溶存酸素濃度はn=6）を示す。

表 2-9 には出芽率と苗立ち率の分散分析の結果を示した。土壌 (S)、*Pythium* 接種 (P) および品種 (V) の主効果はいずれも大きく、有意であった。交互作用については、両形質間で異なる反応が認められた。すなわち、出芽率では S×P と S×V の交互作用が 5%水準で有意で、P×V は有意ではなかったのに対して、苗立ち率では S×P と P×V の交互作用が 0.1%水準で有意であった。

次に、苗立ち率を出芽率、出芽個体の第 1 葉抽出率、第 1 葉抽出個体の生存率の 3 つの構成要素に分け、苗立ち率に対する影響力を重回帰分析により解析した (表 2-10)。その結果、RS/NP 区では出芽率が、OS/IP 区では、出芽個体の第 1 葉抽出率と第 1 葉抽出個体の生存率の影響が大きかった。

表 2-11 には、各処理区の出芽率とともに、品種、土壌、*Pythium* の主効果につ

表2-9 出芽率および苗立ち率の分散分析.

要因	自由度	出芽率		苗立ち率	
		平均平方	F値	平均平方	F値
土壌 (S)	1	7729.9	111.6 ***	671.9	7.7 **
<i>Pythium</i> (P)	1	3203.4	46.3 ***	55294.0	636.6 ***
品種 (V)	7	1912.1	27.6 ***	1414.2	16.3 ***
S×P	1	290.3	4.2 *	11030.2	127.0 ***
S×V	7	257.0	3.7 *	171.5	2.0 n. s.
P×V	7	53.0	0.8 n. s.	447.5	5.2 ***
S×P×V	7	124.5	1.8 n. s.	176.9	2.0 n. s.
誤差	96	69.3		86.9	

両者ともにarcsin変換した後分散分析を行った.

*, **, ***は各々5%, 1%, 0.1%水準で有意であり, n. s. は有意ではないことを示す.

表2-10 苗立ち率に対する苗立ち構成要素の相対的寄与率.

処理	出芽率	出芽個体の第1葉抽出率	第1葉抽出個体の生存率	R ²
OS/NP	0.456	0.413	0.251	0.992
RS/NP	0.594	0.343	0.171	0.990
OS/IP	0.149	0.503	0.505	0.928
RS/IP	0.609	0.720	-0.048	0.858

OS, RS, NP, IPは、各々酸化土, 還元土, *Pythium* 無処理, *Pythium*接種を示す. 表中の数値は, 苗立ち率を目的変数, 3つの苗立ち構成要素を説明変数として, 重回帰分析を行ったときの標準偏回帰係数を示す.

いてその他の処理をプールして示した. OS 区の出芽率は 94%であったのに対して, RS 区では 75%と 19 ポイント低下した. また, NP 区の出芽率は 91%であったのに対して, IP 区では 79%であった. 「Alborio-J1」を除く外国稲の出芽率は, 道内品種よりも有意に高く, とくに「Italica Livorno」, 「Arroz da Terra」, 「Dunghan Shali」では, 各々 96.3%, 95.9%, 94%と高かった. S×V の交互作用が有意となったことから, これらについて多重比較を行った結果, OS 区に比

較して RS 区で有意に出芽率が低下したのは、「Alborio-J1」,「キタアケ」,「胆振早生」であった。また,「Italica Livorno」と「Arroz da Terra」は RS 区における出芽率の低下程度が小さかった。

表2-11 出芽率の品種間差異と土壌還元および*Pythium*属菌接種の効果。

品種	各処理区の出芽率(%)				品種の 効果	土壌の効果		<i>Pythium</i> の効果	
	OS/NP	OS/IP	RS/NP	RS/IP		OS	RS	NP	IP
Italica Livorno	100 ± 0	99 ± 1	99 ± 3	87 ± 5	96.3 a	100 a	95 abc	100	95
Alborio-J1	99 ± 1	84 ± 3	62 ± 8	54 ± 5	75 cd	94 abc	58 e	86	70
Arroz da Terra	100 ± 1	98 ± 2	93 ± 2	93 ± 2	95.9 ab	99 ab	93 abc	98	96
Sakuzairei	99 ± 1	79 ± 6	91 ± 4	81 ± 6	87 bc	92 abc	86 c	96	80
Dunghan Shali	99 ± 2	98 ± 2	96 ± 2	82 ± 6	94 ab	99 ab	90 bc	98	92
キタアケ	97 ± 1	69 ± 4	55 ± 5	53 ± 3	69 d	86 c	54 e	81	61
はやまさり	90 ± 4	70 ± 4	68 ± 6	54 ± 7	71 d	81 cd	61 de	80	62
胆振早生	93 ± 4	79 ± 5	48 ± 2	41 ± 5	65 d	87 c	44 e	74	61
平均	98	87	80	70	86	94	75	91	79

OS, RS, NP, IPは、各々酸化土, 還元土, *Pythium*無処理, *Pythium*接種を示す。各処理区の出芽率は、平均±標準誤差 (n=4) を示した。各処理内で、同一のアルファベット間には5%水準で有意な差異は認められなかった (TukeyのHSD検定による)。分散分析で品種との間に交互作用の認められなかった処理については、多重比較を行わなかった。

表 2-12 には、各処理区の苗立ち率とともに、品種、土壌、*Pythium* の主効果についてその他の処理をプールして示した。OS 区の苗立ち率は 50%であったのに対して、RS 区では 42%であった。一方、NP 区の苗立ち率は 80%であったのに対して、IP 区では 14%と大きく低下した。これらの 2 処理の効果が複合した各区の値をみると、OS/NP 区の苗立ち率 94%に対し、OS/IP 区では 7%と 4 区

表2-12 苗立ち率の品種間差異と土壌還元および*Pythium*属菌接種の効果。

品種	各処理区の苗立ち率(%)				品種の 効果	土壌の効果		<i>Pythium</i> の効果	
	OS/NP	OS/IP	RS/NP	RS/IP		OS	RS	NP	IP
Italica Livorno	99 ± 1	11 ± 7	96 ± 2	23 ± 4	57 a	62	65	98 a	17 de
Alborio-J1	88 ± 3	0 ± 1	29 ± 8	17 ± 6	34 b	35	23	60 bc	6 e
Arroz da Terra	99 ± 2	3 ± 1	88 ± 2	22 ± 5	53 a	53	57	95 a	11 e
Sakuzairei	99 ± 2	9 ± 4	71 ± 3	43 ± 8	55 a	59	57	89 a	24 de
Dunghan Shali	99 ± 3	24 ± 7	83 ± 4	46 ± 12	63 a	71	66	93 a	35 cd
キタアケ	88 ± 2	11 ± 4	27 ± 5	21 ± 6	37 b	49	24	60 bc	15 de
はやまさり	77 ± 4	2 ± 2	51 ± 8	13 ± 9	36 b	33	30	65 b	6 e
胆振早生	83 ± 3	7 ± 2	36 ± 5	12 ± 2	34 b	42	22	61 bc	9 e
平均	94	7	62	24	46	50	42	80	14

OS, RS, NP, IPは、各々酸化土, 還元土, *Pythium*無処理, *Pythium*接種を示す。各処理区の苗立ち率は、平均±標準誤差 (n=4) で示した。各処理内で、同一のアルファベット間には5%水準で有意な差異は認められなかった (TukeyのHSD検定による)。分散分析で品種との間に有意な交互作用の認められなかった処理については、多重比較を行わなかった。

の中で最も低下が大きく、RS/NP 区では 62%であった。RS/IP 区の苗立ち率は 24%で、OS/IP 区よりも高かった。品種の効果については、「Alborio-J1」を除く外国稲の苗立ち率が道内品種よりも有意に高かった。P×V の交互作用が有意となったことから、これらについて多重比較を行った結果は、すべての品種で NP に比べ IP で有意に苗立ち率の低下が認められたが、「Dunghan Shali」の低下程度が最も小さかった。

以上の結果から、土壌還元に対しては「Italica Livorno」と「Arroz da Terra」が、*Pythium* 属菌に対しては、「Dunghan Shali」が比較的高い耐性を有すると判断された。「胆振早生」は、両形質において他の道内の品種に比べて優れる特性は認められなかった。

3) 考察

本節では、苗立ちに影響する重要な個別の要因に対する品種の反応を明らかにするために、土壌還元と *Pythium* 属菌の接種の単独および組み合わせ処理による苗立ち率低下の品種間差異を検討した。

土壌還元については、井澤ら (1985) は湛水直播水稻における苗立ちの安定化を図るには、播種から苗立ちの期間の Eh を 0 mV 以上に保つことが重要とした。Hagiwara and Imura (1993) は、出芽の品種間差異と局所的土壌還元の関係について外国稲も含めて検討し、土中出芽率の品種間差異の発現には、還元域の大きさだけではなく、Eh や還元土壌条件に対する耐性も関与していると考察した。本研究においては、播種後 19 日目までの Eh は -139 ~ -242 mV であり、かなりの強還元の条件下であった。Saka and Izawa (1999) は、播種 15 日後の Eh が -0.23 V、播種深度 10 ~ 20 mm の条件で品種間差異を検討し、「Diga」などの深水イネの生存率が高いことを示している。本研究の播種深度は 5 mm と浅播きではあるが、還元条件としては Saka and Izawa (1999) の試験と同程度であったと

推察される．苗立ち率に及ぼす苗立ち構成要素の重回帰分析の結果から，このような還元条件は，主に出芽率を低下させることにより苗立ち率を低下させることが明らかとなった．そのなかで，「*Italica Livorno*」と「*Arroz da Terra*」は出芽率の低下程度が小さく，強還元条件化における耐性を有していると考えられた．

Pythium 属菌に関しては，松浦ら（2012）は鉄コーティング湛水直播で見られた苗腐敗症状について，腐敗苗からの卵菌類の分離，病原性の確認および種の同定を行い，*Pythium arrhenomanes* Drechsler によるイネ苗腐病であることを明らかにした．しかしながら，*Pythium* 属菌に対する品種の反応に関しては，わずかに田中ら（1991）の報告があるのみで，育種による改良は進んでいない．本研究で供試した菌株は，卵胞子の形成が認められないため種名は未定であるが，接種処理（OS/IP）により苗立ち率は1～26%と大きく低下した．苗立ち率に及ぼす苗立ち構成要素の重回帰分析の結果から，*Pythium* 属菌は，出芽個体の第1葉抽出率と第1葉抽出個体の生存率を低下させることにより苗立ち率を低下させることが明らかとなった．そのなかで，「*Dunghan Shali*」は苗立ち率の低下程度が小さく，比較的耐性が高いと考えられた．

土壌還元と *Pythium* 属菌接種を組み合わせた RS/IP の苗立ち率は，OS/IP よりもすべての品種で高かった．これには，*Pythium* 属菌接種処理後3日間，DOが著しく低下したことが影響したと思われる．このDOの低下は，土壌還元の進行と *Pythium* 属菌の菌体による酸素消費によると考えられるが，このDOの著しい低下が遊走子の実生への感染を阻害し，土壌還元の影響も相まって品種間差異が不明瞭になった可能性がある．また，OS/IP 処理において道内品種を中心に出芽率の低下が認められたが，これに対しても *Pythium* 属菌による感染の影響に加え，接種後のDOの低下が影響している可能性がある．したがって，今後DOを低下させない接種方法についても検討が必要と考えられる．

北海道の在来品種「胆振早生」は、低温発芽性に極めて優れる（佐々木 1974）が、本研究においては、他の道内品種に比べ出芽率および苗立ち率に優れる点は認められなかった。したがって、「胆振早稲」は土壌還元や *Pythium* 属菌に対する耐性という意味では、特別な優位性は持たないと推察された。

第3章 落水出芽法による苗立ち向上技術の確立

1. 苗立ちに及ぼす土壤還元の影響と播種直後からの落水の効果

本節では、温度条件を変えた室内試験において土壤還元処理と落水管理を組み合わせた試験を行い、土壤および種籾近傍の酸化還元状態に着目して、播種後の落水管理が出芽と苗立ちに及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

1) 材料および方法

試験は、1996年に2台の恒温器（LPH-300-RDSMP，日本医化器械製作所，内容積 350 L）内で行った。供試品種は、直播用極早生品種「きたいぶき」とし、慣行法によりハト胸催芽後に過酸化石灰粉粒剤 16 を乾籾重量比 100%で、殺菌剤であるヒドロキシイソキサゾール・メタラキシル粉剤を同 3%で同時被覆した。播種は4月18日に行った。播種前日に直径 11.4 cm の腰高シャーレに風乾土 400 g，水道水 300 ml を入れ代かきし，翌日土壤が落ち着いてから表面水を排出し，ピンセットで播種深度 10 mm に1区あたり 20 粒播種した。温度条件として，昼夜 12 時間ごとに 21/13℃とした高温区と，18/10℃とした低温区を設けた。照明は 12 時間日長とした。土壤は中央農業試験場稲作部のグライ土と泥炭土の2種類を用い，各々に土壤還元処理として，乾燥稲わら粉末を重量比で風乾土の 0.5% を添加した稲わら有区と稲わら無区を設置した。水管理の処理としては，常時約 2 cm に湛水した湛水区と，常時落水し土壤に大きなひび割れが生じない程度に適宜水を加えて管理した落水区を設けた。試験は3反復で実施した。土壤の酸化還元状態の測定は，萩原ら（1987）の方法により，酸化状態では濃青色を呈し，酸化還元電位が 50 mV 程度の還元状態では退色して無色となる酸化還元試薬メチレンブルーを重量比で風乾土の 0.3%添加する方法で測定した。また，腰高シャーレの壁面に沿って 10 粒播種して，土壤全体と種籾近傍の濃青色の呈色および退色程度を経時的に肉眼で観察し，土壤還元の進行程度を全体に対する退色した

部分の割合（退色割合）と全体の 90%が退色した日（90%退色日）で表した．これらは，各処理反復なしで調査した．播種後，出芽数，第 1 葉抽出個体数を経時的に調査し，苗立ち率を高温区は播種後 31 日目，低温区は 46 日目に調査した．

結果の解析では，百分率で示される形質については， $\arcsin$ 変換した後，統計的解析を行った．土壌の退色程度と苗立ち率の分散分析は，温度を主区，その他の処理を副区として統合解析法 (McIntosh 1983) で行った．主誤差が副誤差よりも小さい場合には，誤差をプールした (吉田 1978)．また，交互作用の F 値が 2 以下の場合は誤差にプールした (永田 2000)．統計解析には，JMP 8.0.2.2 (SAS Institute Japan 株式会社)および Microsoft Excel 2013 の分析ツールを用いた．

2) 結果

表 3-1 には，土壌および種籾近傍の酸化還元状態の推移を分散分析の結果とともに示した．湛水区では，播種後日数の経過に伴い，土壌および種籾近傍いずれもメチレンブルーの退色割合が高まり還元の進行を認めた．土壌全体の還元の進行は，とくに稲わら有区で顕著であった．種子近傍の 90%退色日は 10.5~18.0 日と差が見られたが，すべての湛水区で 90%以上の退色に至った．一方落水区では，土壌全体および種籾近傍ともに，播種 9 日目にわずかに退色を認めた区もあったが，その後は退色の進行は認められなかった．このように，落水区では土壌および種籾近傍が酸化的に推移したことが明らかとなった．

図 3-1 には，出芽率および第 1 葉抽出率の推移をグライ土と泥炭土の平均で示した．高温区についてみると，出芽率は稲わら無・湛水区では播種後 15 日目に約 60%に達した後，その後はやや低下した．稲わら有・湛水区では，さらに出芽が抑制された．これに対して，落水区では稲わらの有無にかかわらず，いずれの区でも出芽は順調に進み，80%以上の出芽率を示した．一方低温区についてみると，

稲わら無区では，出芽始めは落水区に比べ湛水区が早かったが，湛水区では播種後 19 日目を過ぎると出芽率は頭打ちとなり，落水区と逆転した．また稲わら有区では，稲わら無区に比べ出芽率は抑制され，その程度は湛水区で大きかった．

表3-1 落水試験における土壌および種籾近傍の酸化還元状態の推移．

温度条件	水管理		退色割合 (%)				90%退色日	
			土壌全体		種籾近傍		(播種後日数±標準誤差 (n=2))	
	稲わら		播種9日後	19日後	播種9日後	19日後	土壌全体	種籾近傍
21-13℃	無	湛水	15	34	63	100	—	13.0 ± 4.0
		落水	3	0	0	0	—	—
	有	湛水	85	100	57	100	9.5 ± 1.5	10.5 ± 1.5
		落水	8	3	15	0	—	—
18-10℃	無	湛水	3	15	5	90	—	18.0 ± 1.0
		落水	0	0	0	0	—	—
	有	湛水	61	95	19	100	13.0 ± 2.0	16.0 ± 1.0
		落水	15	5	5	0	—	—
分散分析	df	平均平方	平均平方	平均平方	平均平方	平均平方		
温度 (T)	1	264 n. s.	116 n. s.	1296 n. s.	81 n. s.			
稲わら (R)	1	3452 **	4258 ***	506 n. s.	81 n. s.			
水管理 (W)	1	2576 **	10353 ***	2756 *	29241 ***			
T × W	1	189 n. s.	233 n. s.	729 n. s.	81 n. s.			
R × W	1	798 n. s.	1828 **	182 n. s.	81 n. s.			
プール誤差	10	156	90	416	16			

土壌にメチレンブルーを0.3%添加して，濃青色の呈色および退色程度を経時的に肉眼で観察し，全体に対する退色した部分の割合（退色割合）と全体の90%が退色した日（90%退色日）で表した．退色割合については，arcsin変換を行い，主区を温度，温度以外の処理を副区に配置した分割区法で，土壌を反復として分散分析を行った．いずれも主誤差が副誤差よりもかなり小さかったため，誤差をプールした．また，すべての調査項目でF値が2以下の交互作用も誤差にプールした．*，**，***は各々5%，1%，0.1%水準で有意であり，n. s. は有意ではないことを示す．

第 1 葉抽出率の推移を出芽率の推移との日数の差に着目してみると，湛水区ではいずれの区でも出芽から 7 日以上遅れて推移したのに対して，落水区ではその差は高温区で 2 日，低温区で 3 日程度であり，落水区では出芽後速やかに第 1 葉が抽出したことが明らかとなった．

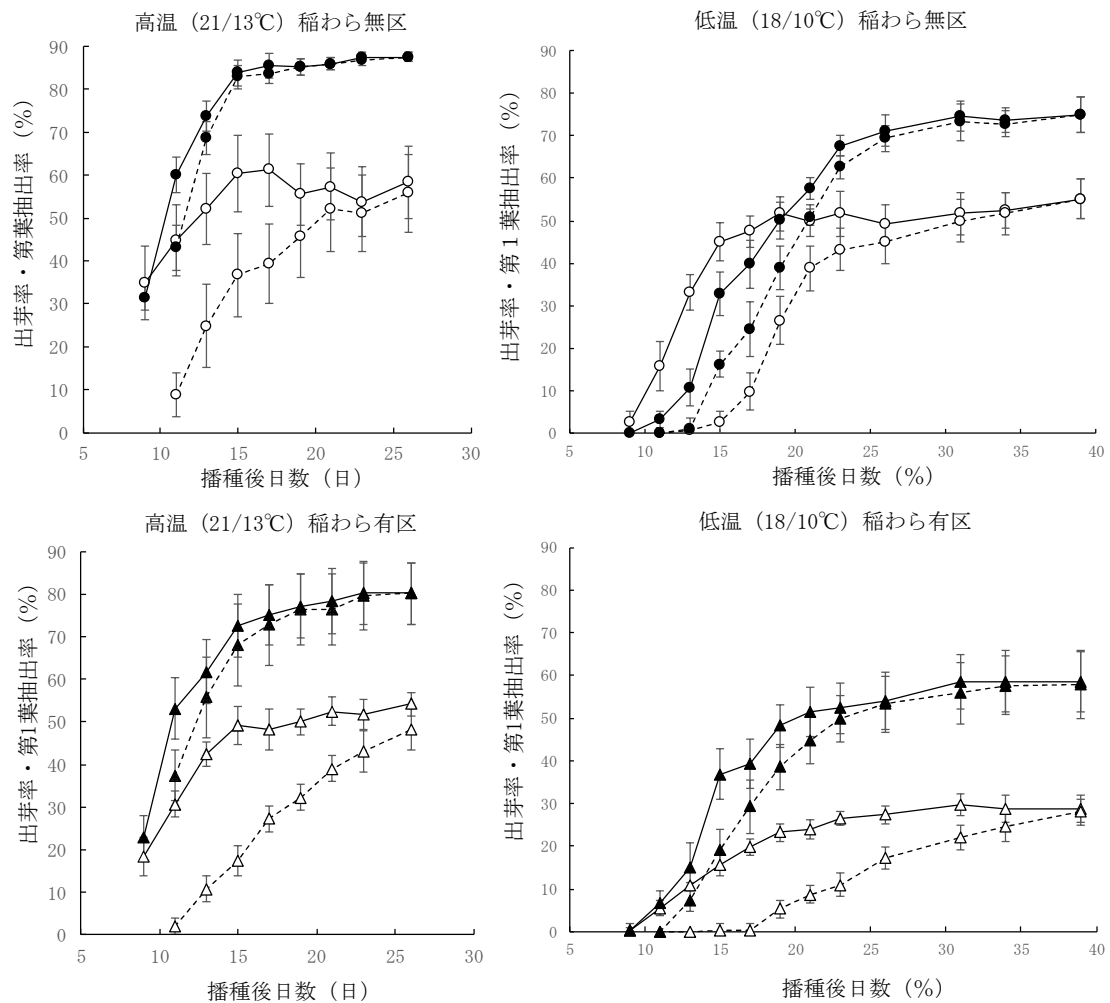


図3-1 出芽率および第1葉抽出率の推移.

実線は出芽率，破線は第1葉抽出率を示し，グライ土と泥炭土の平均で示した．○は稲わら無・湛水区，●は稲わら無・落水区，△は稲わら有・湛水区，▲は稲わら有・落水区を示す．図中のエラーバーは，標準誤差 (n=6) を示す．

表 3-2 には各処理の苗立ち率および分散分析の結果を示した．苗立ち率は，すべての処理で稲わら有区で低下したが，いずれの処理でも湛水区に比べ落水区で苗立ち率は高かった．水管理と稲わらの処理の主効果は，いずれも 0.1%水準で有意であったが，温度と土壌の主効果および各処理の交互作用に有意性は認められなかった．

表3-2 苗立ち率とその分散分析.

		苗立ち率(%)				
		高温 (21/13℃)		低温 (18/10℃)		平均
水管理		稲わら無	稲わら有	稲わら無	稲わら有	
湛水		51.1	35.7	51.6	26.1	40.9
落水		85.1	73.8	69.8	52.0	70.8
平均		高温	62.4	稲わら無	65.2	
		低温	49.8	稲わら有	46.8	
分散分析			自由度	平均平方	F値	
主 区						
温度 (T)			1	647.5	1.74 n. s.	
主区誤差			4	372.3		
副 区						
土壌 (S)			1	14.2	0.16 n. s.	
稲わら (R)			1	1370.7	15.16 ***	
水管理 (W)			1	3704.8	40.97 ***	
T×W			1	244.4	2.70 n. s.	
副区誤差			38	90.4		

苗立ち率はarcsin変換した後，主区を温度，温度以外の処理を副区に配置した分割区法で分散分析を行った．土壌の効果は有意ではなく影響も小さかったことから，苗立ち率は土壌を平均して示した．F値が2以下の交互作用は副区誤差にプールした．***は0.1%水準で有意であり，^{n. s.}は有意ではないことを示す．

3) 考察

土壌，とくに種籾近傍の土壌還元の進行は，土中播種された水稻の出芽と苗立ちを阻害する（井澤ら 1985, 萩原 1993）ことから，湛水直播栽培における出芽と苗立ちの安定化には，この土壌還元の進行を抑制する技術が求められる．本研究では温度条件を変えた室内試験において，稲わら添加による土壌還元処理と落水管理の組み合わせ試験を行い，播種後の落水管理が出芽，苗立ちに及ぼす影響について検討した．その結果，落水区では稲わらを添加した場合においても，土壌および種籾近傍が酸化的に推移し，苗立ち率はすべての処理で湛水区よりも高かった．

星川（1975）は，イネは低酸素濃度のもとでは，形態的に発芽しても，鞘葉だけが伸長し後続して種子根や本葉原基が伸びないと報告している．萩原・井村

(1990) は、湛水土壤中において過酸化石灰は種粒に酸素を供給している可能性は小さく、過酸化石灰の出芽促進効果は土壤酸化作用によるものと推察した。本試験における出芽率と第 1 葉抽出率の推移からみると、湛水区では出芽から第 1 葉の抽出までに 7 日以上要していた。土中播種の播種後湛水管理においては、低酸素条件下にみられる鞘葉だけが伸長する期間が長く、これが出芽と苗立ちの不安定性を生じる主要因であると考えられる。また、*Pythium* 属菌によるイネ苗腐病は、出芽直後の鞘葉の腐敗枯死である（田中ら 1991）ので、第 1 葉の抽出遅れは *Pythium* 属菌の感染リスクを高めると考えられる。

これに対して、落水区では出芽から第 1 葉の抽出までの日数が 2～3 日とかなり短かった。古畑ら（2005a）は、播種後に落水を行うと表層土壤に気相を生じて土壤中の酸素拡散速度が向上し、出芽後の初期成長が促進され、安定した出芽・苗立ちが可能になると推察した。したがって、播種後の落水管理は表層土壤の通気性を高めて、種粒近傍を酸化的に保つことにより、出芽後の第 1 葉の抽出を早め、稲わらを添加した場合でも出芽と苗立ちを向上させると考えられた。

2. 落水期間が苗立ちと生育収量に及ぼす影響

前節の室内試験からみると、播種後の落水管理は出芽と苗立ちの安定化にとって極めて有効であり、寒地においても活用の可能性があると考えられた。そこで圃場試験において、播種後落水した落水区と播種後湛水管理した慣行区の苗立ち本数とその後の生育および収量・収量構成要素を比較した。併せて、湛水区と落水区の地表下 1 cm の地温を調査し、落水条件の圃場における温度の影響を検討した。

1) 材料および方法

試験は、1991 年に北海道立上川農業試験場、1992 年、1994 年および 1995 年

に北海道立中央農業試験場稲作部において、各々隣接する 2 筆の水田で行った。耕種概要および落水期間は表 3-3 に示すとおりで、1 区当たりの供試面積は 1991 年は 100 m^2 、1992 年および 1995 年は 420 m^2 、1994 年は 540 m^2 とした。供試品種は直播栽培用品種で、1991 年と 1992 年は「はやまさり」、1994 年と 1995 年は「きたいぶき」を用いた。種粃は、慣行法によりハト胸催芽後に過酸化石灰粉粒剤 16 を乾粃重量比 100% で、殺菌剤であるヒドロキシイソキサゾール・メタラキシル粉剤を同 3% で同時被覆した。1991～1994 年は背負式動力散粒機で散播し、1995 年は条間 30 cm の条播機で播種した。播種量は、乾粃換算で 1991～1994 年は 10 g m^{-2} 、1995 年は $10.2 \sim 10.6 \text{ g m}^{-2}$ とした。

慣行区については、代かき後 4～5 日後に土壌が落ち着いてから、約 3 cm の濁り水が湛水した状態で播種し、出芽揃い期から 2 日間の芽干し（種子根の土中への貫入を促進するため数日間落水すること）の期間を除いて湛水状態で管理した（山崎ら 1992）。これに対して、播種後落水区（落水区）については、1992 年を除いて、確実に土中播種されるように、播種は代かき当日に行った。1992 年は代かき 2 日後に落水して播種した。1991 年と 1992 年の落水区では、播種 4～5 日後に入水した。これに対して、1994 年と 1995 年は、播種された種粃の出芽と土中への種子根の伸長を確認してから入水した。播種後の落水日数は、1994 年は 12 日間、1995 年は 13 日間であった。

苗立ち本数および苗の生育調査は、播種 35～40 日後に行った。苗立ち本数は、 0.25 m^2 のコドラートを用い、1 区当たり 15～22 ヶ所を調査した。また、1 区当たり 1991 年は 29～30 本、1994 年は 20 本、1995 年は 40 本の苗をランダムに採取して、草丈、葉数、個体当たり分けつ本数、埋没深度を調査した。埋没深度は、苗立ちした個体の茎基部の白色部分の長さを測定した。地上部乾物重は、1 区当たり 50 個体について根を切除した後、 70°C に設定した通風乾燥機で、72 時間

乾燥後に秤量した。収量調査は、1991 年は $2 \text{ m}^2 \times 1$ ヶ所、1992 年は $1 \text{ m}^2 \times 6$ ヶ所、1994 年は $1 \text{ m}^2 \times 4$ ヶ所、1995 年は $1.63 \text{ m}^2 \times 22$ ヶ所で行った。

表3-3 圃場試験の耕種概要および落水期間。

場所	年次	品種	N施肥量	水管理	乾籾換算 播種量	代かき	播種	播種時 湛水深	落水日数・期間	
(土壌)		(播種様式)	(g m^{-2})		(g m^{-2})	(月・日)	(月・日)	(cm)	(日)	(月・日)
上川農試 (褐色低地土)	1991	はやまさり (散播)	8+2	落水区	10.0	5.17	5.17	1	4	5.17～5.21
				慣行区	10.0	5.14	5.17	3	2	5.23～5.25
中央農試 (泥炭土)	1992	はやまさり (散播)	6	落水区	10.0	5.13	5.15	0	5	5.15～5.20
				慣行区	10.0	5.13	5.15	3	3	5.29～6.1
	1994	きたいぶき (散播)	6	落水区	10.0	5.13	5.13	0	12	5.13～5.25
				慣行区	10.0	5.13	5.18	3	2	6.1～6.3
	1995	きたいぶき (30cm条播)	8+2	落水区	10.2	5.15	5.15	0	13	5.15～5.28
				慣行区	10.6	5.15	5.19	3	2	6.1～6.3

過酸化石灰粉粒剤16を乾籾重量比100%被覆した籾を使用。Nの追肥は1991年は止葉期、1995年は分けつ期。慣行区は、出芽揃い期から2日間の芽干しを除いて湛水状態で管理した。除草剤は、1994、1995年の落水区では入水の当日か翌日に、その他は播種後7～10日後にジメピペレート10%・ベンスルフロンメチル0.25%粒剤を3 kg/10a処理した。

中央農業試験場稲作部の隣接する2筆の直播水田において、播種後湛水管理した湛水区と落水管理した落水区で、ポータブル温度計（KADEC-U, UⅡ，コーナースystem）のサーミスタセンサーを地表下1 cmに設置し、10分間隔で地温を測定した（表3-4）。両区の日最高地温，日最低地温，日平均地温（10分間隔の測定値の日平均値）について，日別に比較した。

表3-4 地表下1cmの地温比較の測定条件。

年次	土壌	播種法	播種期 (月・日)		地温の測定期間 (月/日)	n	
			落水区	湛水区		日最高と日平均	日最低
1992	泥炭土	散播	5.15	5.15	5.16 ～ 5.20	5	6
1994	泥炭土	散播	5.13	5.18	5.20 ～ 5.24	5	6
1995	泥炭土	条播	5.15	5.19	5.19 ～ 5.27	9	10
1996	グライ土	散播	5.15	5.17	5.21 ～ 5.29	9	10
1997	グライ土	条播	5.14	5.13	5.21 ～ 5.27	7	8

日平均地温は、10分間隔の測定値の平均値。日最低地温については、測定期間の翌日まで測定した。

2) 結果

表 3-5 には苗立ち本数と苗の生育を示した。播種後の落水期間を 4～5 日とした 1991, 1992 年には, 落水区で浮き苗が多発し, 苗立ち本数は湛水区に比べ少なかった。落水区の草丈および葉数は, 慣行区に比べ有意に劣った。これに対して, 出芽と発根を確認してから入水した 1994, 1995 年の落水区では, 浮き苗は少なく, 苗立ちは良好で, 葉数, 分げつ本数, 地上部乾物重で明らかに慣行区に優った。埋没深度は落水区でやや深かった。

表3-5 播種後の水管理が苗立ち本数および苗の生育に及ぼす影響。

場所	年次	水管理	苗立ち本数 (本 m^{-2})	浮き苗 発生 程度	草丈 (cm)	葉数	分げつ 本数 (本/個体)	地上部 乾物重 (g/10個体)	埋没 深度 (mm)
上川農試	1991	落水区	281 $\pm$ 14	53%	25.8 $\pm$ 0.3	6.0 $\pm$ 0.04	2.0 $\pm$ 0.03	2.2	-
		慣行区	304 $\pm$ 18	13%	27.0 $\pm$ 0.4	6.4 $\pm$ 0.03	2.1 $\pm$ 0.10	2.2	-
		t-検定	n. s.		*	***	n. s.		
中央農試	1992	落水区	147 $\pm$ 13	多	-	-	-	-	-
		慣行区	179 $\pm$ 13	少	-	-	-	-	-
		t-検定	*						
	1994	落水区	269 $\pm$ 22	少	19.9 $\pm$ 0.4	4.8 $\pm$ 0.06	1.8 $\pm$ 0.10	0.81	0.9 $\pm$ 0.02
		慣行区	315 $\pm$ 24	中	19.2 $\pm$ 0.4	4.6 $\pm$ 0.07	0.9 $\pm$ 0.16	0.52	0.3 $\pm$ 0.02
		t-検定	n. s.		n. s.	**	***		*
	1995	落水区	182 $\pm$ 9	少	17.4 $\pm$ 0.3	4.2 $\pm$ 0.06	0.9 $\pm$ 0.10	0.48	3.7 $\pm$ 0.05
		慣行区	160 $\pm$ 15	少	17.3 $\pm$ 0.3	4.0 $\pm$ 0.05	0.3 $\pm$ 0.08	0.34	3.3 $\pm$ 0.04
		t-検定	n. s.		n. s.	**	***		n. s.

慣行区は, 出芽揃い期から2日間の芽干しを除いて湛水状態で管理した。1991年は6月26日, 1992年は月日, 1994年は6月22日, 1995年は6月23日に調査した。苗立ち本数は, 1991年は20ヶ所, 1992年は15ヶ所, 1994年は21ヶ所, 1995年は22ヶ所調査した。浮き苗発生程度は, 無, 微, 少, 中, 多, 極多の6段階で調査した。苗の生育は, 1991年は29-30本, 1994年は20本, 1995年は40本を調査した。埋没深度は, 苗立ちした個体の茎基部の白色部分の長さを測定した。いずれも表中には平均値 $\pm$ 標準誤差で示した。*, **, ***は各々5%, 1%, 0.1%水準で平均値間に有意差があることを示し, n. s. は有意差がないことを示す。

表 3-6 には出穂期, 倒伏程度, 収量および収量構成要素を示した。1991, 1992 年々の落水区では, とくに登熟歩合が低下し, 玄米収量, 検査等級も湛水区に比べ劣った。一方, 1994, 1995 年の慣行区では, いずれの年次も成熟期に部分的にナビキ程度の倒伏がみられたのに対して, 落水区では倒伏は認められなかった。1994 年の落水区の玄米収量は, 登熟歩合は低下したものの, 慣行区に比べ有意に高かった。1995 年の落水区の玄米収量は, 千粒重は低下したものの, 慣行区よりもやや高かった。

表3-6 播種後の水管理が出穂期，倒伏，収量および収量構成要素に及ぼす影響。

場所	年次	水管理	出穂期 (月・日)	倒伏 程度	穂数 (本 m^{-2})	1穂粒数 (粒)	登熟歩合 (%)	千粒重 (g)	玄米収量 (gm^{-2})	検査 等級
上川農試	1991	落水区	7.31	無	1132	26.9	56.8	22.2	351	2下
		慣行区	7.30	無	916	37.2	86.8	22.4	558	2上
中央農試	1992	落水区	8.12	無	593 $\pm$ 35	46.3 $\pm$ 1.5	72.4 $\pm$ 2.6	21.2 $\pm$ 0.1	378 $\pm$ 20	2下
		慣行区	8.10	無	710 $\pm$ 67	42.7 $\pm$ 2.0	80.2 $\pm$ 1.8	21.4 $\pm$ 0.1	394 $\pm$ 18	2中
	1994	落水区	8.01	無	843 $\pm$ 33	36.6 $\pm$ 1.8	74.7 $\pm$ 2.0	22.5 $\pm$ 0.1	490 $\pm$ 8	1
		慣行区	8.02	30%・ナビキ	782 $\pm$ 47	36.6 $\pm$ 2.2	85.5 $\pm$ 0.5	22.4 $\pm$ 0.1	420 $\pm$ 24	1
	1995	落水区	8.08	無	755 $\pm$ 21	47.8 $\pm$ 0.8	80.3 $\pm$ 1.3	22.4 $\pm$ 0.1	532 $\pm$ 19	2上
		慣行区	8.08	10%・ナビキ	713 $\pm$ 31	48.2 $\pm$ 1.2	78.4 $\pm$ 1.1	22.7 $\pm$ 0.1	508 $\pm$ 12	2上

慣行区は，芽干しの期間を除いて湛水状態で管理した．倒伏程度は，成熟期の圃場全体に占める倒伏面積と程度を達観で調査した．収量および収量構成要素は，1991年は2 m^2 ×1ヶ所，1992年は1 m^2 ×6ヶ所，1994年は1 m^2 ×4ヶ所，1995年は1.63 m^2 ×22ヶ所の調査で，平均値±標準誤差で示した．*は5%水準で平均値間に有意差があることを示し，n.s.は有意差はないことを示す．

図 3-2 には落水区の地表下 1 cm の地温を湛水区と比較して示した．日最低地温は湛水区で高く，水による保温効果を認めた．これに対し，日最高地温はむしろ落水区で高い場合が多かった．日平均地温は，落水区で約 1℃低かった．

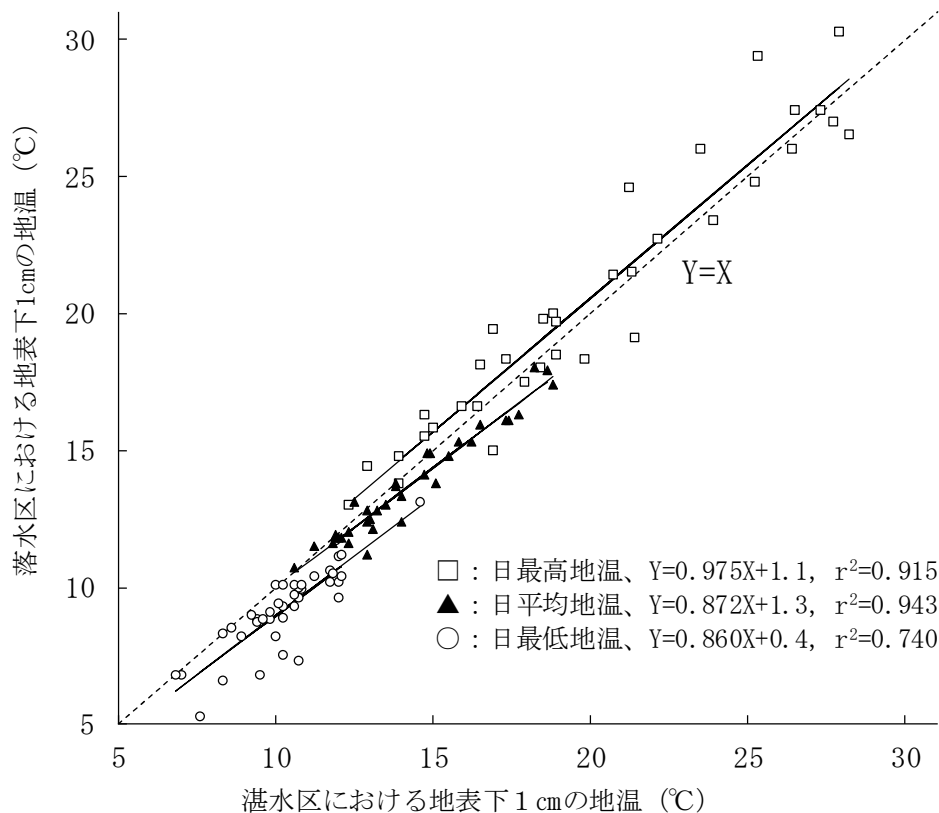


図3-2 湛水区と落水区の地表下 1 cm の地温の比較

3) 考察

播種後の落水の効果を明らかにする目的で、圃場条件において落水期間を検討した。その結果、播種後の落水期間を 4～5 日とした場合には、落水区で浮き苗が多発した。これは、播種後 5 日程度では種子根の伸長はほとんど起こらず、一方で落水によって土壌表面硬度が硬くなり、入水後に種子根が伸長し始めたときに、土中への種子根の貫入に影響したものと考えられた。

一方、落水期間を 12～13 日として、種籾の出芽と土中への種子根の伸長を確認してから入水した場合には、落水区の苗立ちは良好で、慣行区に比べて苗の生育も優り、生育期間中に倒伏も認められず、最終的な玄米収量も優った。したがって、落水は、出芽と発根を確認するまで継続することが重要であり、寒地においては府県よりも長い落水期間が必要と考えられる。

圃場条件下において、落水区と湛水区の地表下 1 cm の地温を比較した結果では、日最低地温は湛水区で高かったが、日最高地温はむしろ落水区で高い場合が多く、日平均地温は落水区で約 1℃低い程度で大差なかった。つまり、最低気温が極端に低下し、氷点下となるような場合を除けば、播種後の落水管理が地温低下に影響する危険性は小さいと判断できる。

以上のことから、播種後の水管理は、出芽と土中への種子根の伸長を確認するまで落水することが、北海道においても出芽と苗立ちの安定化に極めて有効な方法であると考えられた。

3. 落水出芽法における適正播種深度

前節において、播種後の落水管理は、北海道においても出芽と苗立ちの安定化に極めて有効な技術であると考えられたことから、落水出芽法における適正な播種深度について検討した。

1) 材料および方法

試験は、1996 年と 1997 年に北海道立中央農業試験場稲作部（岩見沢市）の水田で行った。1996 年は、グライ土と泥炭土の 2 筆の水田で、1997 年は、グライ土のみで試験を行った。供試品種として、1996 年は直播用極早生品種「きたいぶき」、1997 年は早生品種「ゆきまる」を用いた。種子は慣行法によりハト胸催芽した。過酸化石灰剤の処理として、過酸化石灰粉粒剤 16 を乾籾重量比 100%，および殺菌剤であるヒドロキシイソキサゾール・メタラキシル粉剤を同 3% で同時被覆した区（CAL 区）と催芽籾を直接播種した区（催芽籾区）を設けた。水田は、耕起・代かき後 3～5 日間湛水管理した後、播種当日に落水した。

試験区は、木製の移植用型付け器で、条間 20 cm の区画を区切り、100 cm×20 cm を 1 区とした。播種後に落水管理を行うと、型付け器による溝の部分から大きな亀裂が生ずることから、試験区の播種は、溝の中間部分に種子を 1 区当たり 100 粒配置し、所定の深度になるようにピンセットに目印を付けて、1 粒ずつ埋没播種した。播種深度処理は、5, 10, 15, 20 mm の 4 処理とした。播種後は落水管理し、出芽と発根を確認してから入水した。1996 年は、5 月 17 日に播種し、5 月 30 日に入水（播種後の落水期間は 13 日）した。1997 年は、5 月 16 日に播種し、5 月 28 日に入水（播種後の落水期間は 12 日）した。入水直前に出芽本数を調査した。苗立ち率および苗の生育（葉令、分げつ本数、およびメソコチル長）は、1996 年 6 月 27 日（播種 41 日後）、および 1997 年 6 月 30 日（播種 45 日後）に調査した。

苗立ち率は $\arcsin$ 変換した後、統計的解析を行った。1996 年の分散分析は、土壌を主区、その他の処理を副区とした統合解析法 (McIntosh 1983) で行った。いずれの形質も主誤差が副誤差よりも小さかったことから、誤差はプールした (吉田 1978)。また、交互作用の F 値が 2 以下の場合は誤差にプールした (永田

2000).

2) 結果

表 3-7 には 1996 年における入水直前の出芽率，苗立ち率および苗の生育を分散分析の結果とともに示した．播種深度 5 mm の CAL 区は，落水期間中にカラヒワなどの食害を受けた．入水直前の出芽率は，播種深度 10 mm の CAL 区で約 30%であり，播種深度 15 mm 以上で 10%以下であった．苗立ち率は，泥炭土

表3-7 落水出芽法における播種深度が苗立ち率および苗の生育に及ぼす影響（1996年）．

土 壤	過酸化 石灰剤	播種深度 (mm)	入水直前出芽率		苗 立 ち 率		葉 令		ミコシル長	
			(%)	S. E.	(%)	S. E.	(葉)	S. E.	(mm)	S. E.
グライ土	CAL	5	18 B	11	24 B	13	3.2	0.1	0.0	0.0
		10	36	8	62	2	3.1	0.1	0.1	0.1
		15	10	3	63	4	3.0	0.0	0.4	0.2
		20	1	1	52	1	2.7	0.1	1.5	0.3
		平均	—	—	(59)	—	3.0	—	0.5	—
	催芽糞	5	44	4	50	3	3.2	0.1	0.0	0.0
		10	15	13	52	3	3.1	0.1	0.1	0.1
		15	5	2	38	14	3.0	0.0	0.7	0.1
		20	0	0	18	8	2.9	0.1	1.7	0.7
		平均	—	—	(35)	—	3.1	—	0.6	—
	全平均	—	—	—	(47)	—	3.0	—	0.6	—
泥炭土	CAL	5	26 B	14	34 B	13	3.6	0.1	0.0	0.0
		10	29	14	60	7	3.4	0.0	0.4	0.2
		15	8	14	60	2	3.3	0.0	0.2	0.0
		20	0	1	43	3	3.1	0.0	1.7	0.5
		平均	—	—	(54)	—	3.4	—	0.6	—
	催芽糞	5	56	6	51	2	3.6	0.0	0.0	0.0
		10	6	2	23	15	3.3	0.1	0.2	0.0
		15	1	1	14	9	3.1	0.1	0.7	0.6
		20	1	1	12	2	3.2	0.4	0.9	0.6
		平均	—	—	(16)	—	3.3	—	0.4	—
	全平均	—	—	—	(34)	—	3.3	—	0.5	—
分散分析					df	平均平方	df	平均平方	df	平均平方
土 壤 (S)					1	343 **	1	0.744 ***	1	0.0288 n. s.
播種深度 (D)					2	260 **	3	0.270 ***	3	3.2542 ***
過酸化石灰剤 (C)					1	2090 ***	1	0.001 n. s.	1	0.0001 n. s.
S×C					1	154 n. s.		§		§
プール誤差					18	41	26	0.023	26	0.1775

5月17日に播種し，5月30日に入水した．苗立ち率および苗の生育は6月27日に調査した．種糞処理のCAL区は過酸化石灰粉粒剤16を乾糞重量比100%，および殺菌剤であるヒドロキシイソキサゾール・メタラキシル粉剤を同3%被覆，催芽糞区はいずれも無処理である．Bは鳥による被害を示す．苗立ち率の平均の欄は，播種深度5 mmを除いた値を示す．分散分析は，土壌を主区，その他の処理を副区とした分割区法で行った（苗立ち率については播種深度5 mmを除いた）．主誤差が副誤差よりも小さかったことから，誤差にプールした．また，交互作用のF値が2以下の場合には誤差にプールした（§）．**，***は各々1%，0.1%水準で有意であり，n. s. は有意ではないことを示す．

に比べグライ土でやや高く，催芽粒区に比べ CAL 区が高かった．苗立ち率は，鳥害を除けば播種深度が深いほど低下し，とくに催芽粒区の播種深度 15 mm 以上で低下が大きい傾向であった．分散分析の結果は，過酸化石灰剤の主効果が 0.1% 水準で，土壌および播種深度の主効果は 1% 水準で有意であった．交互作用には有意性が認められなかった．葉令は，グライ土に比べ泥炭土で大きく，播種深度が深いほど低下する傾向であった．また，メソコチル長は，播種深度が深いほど長かった．

1997 年には，試験区全体を防鳥網で覆って鳥害を防止した．表 3-8 には入水直前の出芽率，苗立ち率および苗の生育を分散分析の結果とともに示した．入水時の出芽率は，播種深度 5 mm で 64%，播種深度 10 mm で 1～15% であった．播種深度 15 mm 以上では出芽は見られなかった．CAL 区の苗立ち率は播種深度 10

表3-8 落水出芽法における播種深度が苗立ち率および苗の生育に及ぼす影響(1997年)．

過酸化石灰剤	播種深度 (mm)	入水直前 出芽率		苗立ち率		葉令		個体当たり 分けつ本数		メソコチル長	
		(%)	S. E.	(%)	S. E.	(葉)	S. E.	(本)	S. E.	(mm)	S. E.
CAL	5	64	1	49 ab	3	5.0	0.1	0.4	0.2	0.0	0.0
	10	15	4	57 a	2	4.7	0.1	0.5	0.1	0.3	0.1
	15	0	0	49 abc	3	4.5	0.1	0.3	0.1	0.8	0.3
	20	0	0	33 bcd	2	4.3	0.1	0.3	0.1	1.7	0.2
	平均	—	—	47	—	4.6	—	0.4	—	0.7	—
催芽粒	5	64	8	54 ab	7	4.8	0.1	0.4	0.2	0.0	0.0
	10	1	2	39 abcd	6	4.6	0.0	0.6	0.1	0.2	0.1
	15	0	0	27 cde	9	4.2	0.1	0.2	0.1	1.2	0.2
	20	0	0	12 e	2	4.1	0.0	0.1	0.1	1.2	0.1
	平均	—	—	32	—	4.4	—	0.3	—	0.6	—
分散分析				df	平均平方	df	平均平方	df	平均平方	df	平均平方
播種深度 (D)				3	404.0 ***	3	0.617 ***	3	0.139 *	3	2.567 ***
過酸化石灰剤 (C)				1	480.6 ***	1	0.284 **	1	0.004 n. s.	1	0.007 n. s.
D×C				3	97.1 *		§		§	3	0.208 n. s.
誤差				16	27.0	19	0.025	19	0.036	16	0.093

5月16日に播種し，5月28日に入水した．苗立ち率と苗の生育は6月30日に調査した．種粒処理のCAL区は過酸化石灰粉粒剤16を乾粒重量比100%，および殺菌剤であるヒドロキシソキサゾール・メタラキシル粉剤を同3%被覆，催芽粒区はいずれも無処理である．分散分析において，交互作用のF値が2以下の場合には誤差にプールした (§)．*，**，***は各々5%，1%，0.1%水準で有意であり，n. s. は有意ではないことを示す．苗立ち率に付した同一のアルファベット間には5%水準で有意な差異がないことを示す (TukeyのHSD検定による)．

mm で最も高く、催芽粃区では播種深度が深いほど低下した。分散分析の結果は、播種深度と過酸化石灰剤の主効果は 0.1%水準、両者の交互作用は 5%水準で有意であった。各処理区の苗立ち率を多重比較したところ、CAL 区では播種深度 5 ～15 mm の間に有意な差異は認められなかったのに対して、催芽粃区では播種深度 5 mm と 15 mm の間に有意な差異が認められた。葉令は催芽粃区に比べ CAL 区で多く、いずれの区も播種深度が深いほど小さかった。分けつ本数は、播種深度が深いほど少ない傾向にあった。メソコチル長は、播種深度 15 mm 以上で長かった。

3) 考察

過酸化石灰剤被覆種子を代かき後の湛水土壤中に埋没播種する湛水土壤中直播栽培における播種深度は 10～20 mm が適当とされた（三石・中村 1977a）。その後、北海道においても過酸化石灰剤の実用性が検討され、苗立ち向上効果が確認された（竹川・森脇 1979b, 今野・村上 1982）。しかしながら、田中ら（1986）は播種期をかえて苗立ち率に及ぼす播種深度と過酸化石灰剤の被覆量の影響を検討し、過酸化石灰剤の被覆効果は播種期と播種深度により変動すること、および播種深度 10～20 mm では苗立ち率は劣り、浅播きが望ましいことを報告した。その後、北海道で策定された「水稻湛水直播栽培暫定規準」（北海道立上川農業試験場 1989）では、播種深度は 5 mm にして、浮き苗の発生を防ぐために芽干し（出芽揃い期に 1～2 日間落水する）を行う栽培法が指導された。

本研究では、新たに有効性が認められた落水出芽法における適正播種深度を圃場条件下で検討した。CAL 区では、播種深度 5 mm で鳥による食害も認められたものの、播種深度 15 mm までは、概ね 50%以上の苗立ち率が得られた。これに対して、催芽粃区では播種深度が深いほど苗立ち率の低下が大きく、両年を通じ

て安定的に 50%以上の苗立ち率が得られたのは、播種深度 5 mm のみであった。苗の生育は、葉令、分けつ本数ともに播種深度が深いほど劣り、播種深度 15 mm 以上ではメソコチルの伸長も見られた。以上の結果から、落水出芽法における適正播種深度は、過酸化石灰剤を使用する被覆種子では 10～15mm、過酸化石灰剤を使用しない催芽粒では 5 mm と考えられた。

4. 播種機の実用性の評価

北海道における湛水直播栽培では、播種深度の目標を 5 mm としてきた。これを実現するために、散播の場合は代かきしてから 3～6 日後に、3～5 cm 程度に湛水した濁り水の状態で播種する方法を、機械播種機での条播の場合は、代かきした後、播種の 2～3 日前から落水して土壌表面を固め、さらに播種機の覆土器をはずして強制覆土しない方式を採用した（田中 1995）。

前節において、北海道における落水出芽法の適正播種深度は、過酸化石灰剤を使用する場合 10～15 mm であることが明らかとなった。上述したように従来は 5 mm を目標としてきたので、10～15 mm にするためには播種時の圃場条件および播種方法を変更する必要がある。そこで本節では、現在使用されている播種機を用いて、播種深度を中心にして適応性を検討した。

1) 材料および方法

試験には、表 3・9 に示した散播と条播の代表的な 2 機種を供試した。乗用型散播機は、水田用乗用管理機のアタッチメントとして容量 180 L のホッパと散布幅 10 m の散粒装置を搭載したもので、肥料など粒状物の散布幅は 10 m である。繰り出し量は電動式の横溝ロールで 10～60 g m⁻² の範囲に調節できる。繰り出した粒状物をブローで噴筒内を空気搬送し、衝突板で減速させて 18 ヶ所の噴口から自由落下させる機構である。本機は、主に粒状肥料を散布する機種であり、湛

水直播に用いたときに、過酸化石灰剤過酸化石灰剤の剥離と、播種分布にばらつきが大きいという問題点があった。そこで、本機には衝突版に剥離防止の緩衝材を貼り付けるとともに、播種の均一性を向上するため、衝突板の大きさを調整し、さらに噴頭の両端を開放する改良を行い、播種の均一性を向上させた。

表3-9 供試播種機の仕様。

項 目	乗用型散播機	乗用型施肥条播機 (密条)
型式	JK14-IHB-181S	TRR10M
播種方式	散播	条播(作溝播種強制埋没)
施肥方式	-	側条(作溝播種強制埋没)
全長(mm)	2850	3
全幅(mm)	6740	2200
全高(mm)	1900	1550
重量(kg)	698	720
輪距(mm)	1200～1410	1300
機関出力(PS)	9.4	10.5
作業幅(m)	10	2.2
条間・条数(cm)	-	20(車輪跡は30)・10
タンク容量(L)	180	種子9.5×5、肥料20×5

北海道における湛水直播栽培では条間 20 cm の密条播が適する（丹野ら 2007a）ことから、北海道向けに開発された側条施肥機付きの乗用型施肥条播機を供試した。条間 20 cm の 10 条播種機であるが、走行による播種床への影響がないように、車輪跡の条間 2 ヶ所を 30 cm としており、作業幅は 2.2m である。傾斜回転目皿で各条の種子を繰り出し、送風機で補助的に空気搬送を行う構造である。フロート部には深さ 10 mm の作溝器が配置されており、この作溝に播種し、直後に覆土器で泥土を強制覆土する。

試験は、北海道立中央農業試験場稲作部のグライ土水田で行った（表 3-10）。供試品種は早生品種「ゆきまる」である。種籾は、慣行法によりハト胸催芽後に過酸化石灰粉粒剤 16 を乾籾重量比 100% で、殺菌剤であるヒドロキシイソキサゾー

ル・メタラキシル粉剤を同 3%で同時被覆した。播種は、乗用型散播機では代かきした当日に落水状態で行った。乗用型施肥条播機では、土壌が落ち着いた代かき 3 日後、当日に落水して実施した。いずれの試験区も、播種後は落水状態で管理し、種籾の出芽と土中への種子根の伸長を確認してから入水した。播種後の落水日数は 9 日間であった。

表3-10 耕種概要.

播種機	試験 年次	代かき 日 (月・日)	播種 日 (月・日)	播種時 湛水深 (cm)	播種量 (g m ⁻²)	入水 日 (月・日)	窒素 施肥量 (g m ⁻²)	供試 面積 (a)
散播機	1998	5.19	5.19	0.2	8.7	5.28	8.0	8
施肥条播機	1998	5.15	5.18	0.0	10.6	5.27	7.8	8

乗用型散播機の窒素施肥には、緩効性肥料入りのLP552を用いた。乗用型施肥条播機の窒素施肥は、全層4+側条3.8g m⁻²とした。

出芽深度の調査は、播種 24 日後に、散播機は 64 地点、条播機は 30 地点、1 地点当たり 20 出芽個体をランダムに選び、種籾中心から地表面までの幼芽長を測定した。苗立ち本数の調査は、播種 35 日後に行った。散播機では 0.25 m²×80 地点、条播機では 0.1 m²×60 地点で調査した。収量および収量構成要素は、散播機で 1 m²×5 ヶ所、条播機で 1.45 m²×4 ヶ所を調査した。

各播種機の作業能率は、長辺距離を 100 m、短辺距離を作業幅の整数倍とする 30 a 程度の水田を想定し、実測で得られた作業、旋回および補給時間の値を用い試算した。

2) 結果

表 3-11 には出芽深度の分布を示した。土壌表面に籾が露出した個体は、乗用型散播機で 6.8%，乗用型施肥条播機で 19.3%と後者でかなり多かった。分布のモードはいずれも深度 4 mm にあり、平均出芽深度は各々 5.2, 4.2 mm と浅かった。

表3-11 出芽深度分布.

播種機	調査 個体数	出芽深度 (mm) 別の頻度分布 (%)													出芽深度 (mm)	
		0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	20<	平均	s. d.	
散播機	1280	6.8	12.4	29.0	22.9	13.8	7.6	3.3	1.6	1.3	0.6	0.5	0.1	5.2	3.6	
施肥条播機	600	19.3	13.8	25.0	20.0	11.5	6.7	1.8	1.0	0.3	0.3	0.0	0.2	4.2	3.4	

調査は播種24日後に行い、出芽深度として出芽個体の種粒中心から地表面までの幼芽長を測定した。s. d. は標準偏差。

落水期間中の平均気温は 13.2℃と比較的高く、苗立ち本数と苗立ち率は、乗用型散播機で各々223 本 m^{-2} と 69.2%，乗用型施肥条播機で各々291 本 m^{-2} と 73.5%であり、ともに高かった（表 3-12）。

表3-12 播種粒数，苗立ち本数および苗立ち率.

播種機	播種粒数 (粒 m^{-2})	苗立ち本数 (本 m^{-2})	苗立ち率 (%)
散播機	323	223 ± 72	69.2
施肥条播機	394	291 ± 53	73.5

苗立ち本数の調査面積・地点数は、乗用散播機は0.25 m^2 ×80地点、乗用型施肥条播機は0.1 m^2 ×60地点で、苗立ち本数は、平均値±標準偏差で示した。

乗用型散播機の播種精度を検討するために、苗立ち本数の分布を図 3-3 に示した。機体の進行方向に垂直な各調査地点の平均値は、概ね 200 本 m^{-2} であったが、機体右側 4.75 m 地点ではこれより明らかに低かった。

出穂期，倒伏程度，収量および収量構成要素を表 3-13 に示した。苗立ち本数が多かった乗用型施肥条播機の出穂期は，乗用型散播機よりも 2 日早く，穂数および総粒数も多かった。乗用型散播機では，成熟期近くに倒伏が始まり，苗立ち本数の多い地点では中程度の倒伏に至った。乗用型施肥条播機では，成熟期に部分的に小程度の倒伏が見られた。玄米収量は，両者ともにほぼ 480 g m^{-2} が得られたが，乗用型散播機では試験区内の場所間のばらつきがやや大きかった。

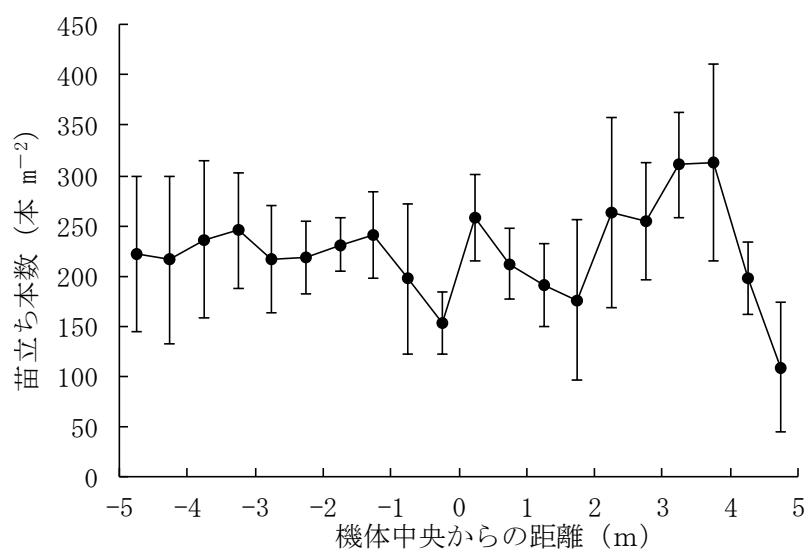


図3-3 乗用型散播機における苗立ち本数の分布．
進行方向に対し垂直方向の分布を示す．エラーバーは
標準偏差 (n=4) を示す．

表3-13 出穂期、倒伏程度、収量および収量構成要素．

播種機	出穂期 (月・日)	倒伏 程度	稈長 (cm)	穂数 (本 m ⁻²)	総収数 (×10 ³ m ⁻²)	登熟歩合 (%)	千粒重 (g)	玄米収量 (g m ⁻²)	検査 等級
散播機	8.11	小～中	55.4 ± 1.1	749 ± 50	34.1 ± 2.1	71.7 ± 1.2	23.0 ± 0.09	478 ± 14	1下
施肥条播機	8.9	無～小	53.0 ± 1.5	929 ± 37	38.4 ± 2.9	71.7 ± 6.2	22.2 ± 0.04	482 ± 5	1下

倒伏程度は、成熟期における遠視調査で、無、ナビキ、小、中、大、甚の6段階で評価した．収量および収量構成要素は、乗用型散播機は1 m²×5ヶ所、乗用型施肥条播機は1.45 m²×4ヶ所の調査で、平均値±標準誤差で示した．

表 3-14 には作業能率の試算結果を示した．乗用型散播機では、散布幅 9.6 m、作業速度 0.46 m/s で試算すると、圃場作業量は 106 a/h であった．乗用型施肥条播機では、作業幅 2.2 m、作業速度 1 m/s で試算すると、圃場作業量は 39 a/h であった．

表3-14 作業能率の試算.

播種機	作業 幅 (m)	工程 数	旋回 回数	種子 投入 回数	肥料 投入 回数	面積 (a)	作業 速度 (m/s)	直進 時間 (s)	旋回 時間 (s)	種子 補給 時間 (s)	肥料 補給 時間 (s)	作業 時間 (s)	有効 作業 量 (a/h)	圃場 作業 量 (a/h)
散播機	9.6	3	2	1	0	28.8	0.46	652	168	158	0	978	159	106
施肥条播機	2.2	13	12	2	1	28.6	1.00	1300	504	500	330	2634	79	39

機種間の比較を容易にするために、長辺距離100 m、短辺距離を作業幅の整数倍とする30 a程度の水田を想定し、実測で得られた作業、旋回および補給時間を元に試算した。

3) 考察

本節では、散播と条播の代表的な機種を供試して、出芽深度・苗立ちの分布、生育・収量および作業能率の観点について、落水出芽法における直播播種機の適応性を検討した。

乗用型散播機では、種粃が土中へ埋没するように、代かきした当日に落水状態で播種した。乗用型施肥条播機では、代かき3日後に土壌が落ち着いてから落水し、田植えと同程度の圃場状態で播種し、覆度器で強制覆土した。出芽した個体の平均出芽深度は散粒機で5.2、条播機で4.2 mmであった。播種深度は、土壌表面から播種した種粃の底面までの深度と定義されるが、ここで示した出芽深度は出芽個体の種粃中心から地表面までの幼芽長を測定したものである。したがって、実際の播種深度と出芽深度は異なり、出芽深度に種粃の幅あるいは長さの1/2を加えたものが出芽個体の播種深度となる。ただし、出芽深度には出芽に至らなかった個体の播種深度が含まれていない。それらを考慮しても、両播種機ともに、播種深度は落水出芽法における適正值よりも浅かったと推察される。

自然落下方式の散播の場合は播種深度のコントロールが難しいが、対策として、湛水部分では種粃の落下スピードが減速するので土中に埋没しにくくなることから、湛水部分をなくすとともに、代かき後できるだけ速やかに播種することが必要となる。条播の場合には開溝覆土装置を改良して、より適正な播種深度が得ら

れるようにする必要がある。

苗立ちおよびその後の生育・収量については、いずれの播種機においても、苗立ち本数 200 本 m^{-2} 以上、苗立ち率 70% 程度、収量 480 g m^{-2} が得られた。ただし、乗用型散播機の場合は、苗立ちのばらつきに起因する倒伏も見られたことから、播種時に播種粒の分布が適正となるように十分調整する必要がある。

実測値をもとに 30 a 規模の水田で試算した圃場作業量は、乗用型散播機で 106 a/h、乗用型施肥条播機で 39 a/h であった。北海道における直播栽培の播種適期の幅は限られており（田中 1995）、また春先には農作業が集中することから、より高い作業能率が求められる。乗用型散播機については、有効作業幅と作業速度の向上、乗用型施肥条播機については、多条化および肥料・種子ホッパの大型化による作業能率の向上が必要である。

以上のように、両機種とも改良を要する点はあるものの、いずれも北海道の落水出芽法において生産現場での使用が可能と判断された。

5. 最適入水日の推定

落水出芽法での入水日について、大場（1994, 1997）は長野県において播種後 10 日以上落水して、田面に出芽を認めたら直ちに湛水するとしている。一方、北海道では過酸化石灰剤の被覆種子を利用した場合に、出芽始めと種子根の土壌中への伸長が認められた日を入水日としている。しかし、適切な入水日について気象条件（気温）との関係から数量的に示した報告はない。最適な入水日を気象条件から数量的に推定することは、いずれの地域の生産現場でも入水日を適期管理するために重要であるが、北海道では播種後の気温が低く、長い落水期間が必要であり、また年次により出芽までの日数が変動しやすいのでさらに重要である。

一方では、落水出芽法の普及による出芽・苗立ちの安定化に伴い、過酸化石灰

剤のコスト削減と被覆作業の省力化に対する生産者の要望は大きく、過酸化石灰剤の種子被覆量を減量する事例が増加しつつある（吉永ら 2007）。播種後の落水管理は、土壌とくに種粒近傍を酸化的に保つことにより苗立ちが安定化する（古畑ら 2005a, 田中ら 2016）。このことから過酸化石灰剤を使用しない場合（催芽粒播種）にも、従来よりも入水時期を遅らせることで出芽・苗立ちが高まることが期待されるが、催芽粒播種の最適な入水日については今日でも不明な点が多い。

そこで本研究では、過酸化石灰剤の種子への被覆の有無が入水日に及ぼす影響を検討した過去の試験結果を用いて、播種後の最適な入水日を有効積算気温から推定する方法（積算気温法）と、1 日当たり発育速度（DVR）から推定する方法（DVI 法）を検討し、北海道での湛水直播栽培の落水出芽法における最適な入水日を推定した。

1) 材料および方法

(1) 過酸化石灰剤被覆種子における最適入水日の推定

試験は、1994～2003 年の 10 年間、北海道立中央農業試験場稲作部（岩見沢市）の水田で行った。供試品種は、1994～1995 年に直播用極早生品種「きたいぶき」、1996 年以降に早生品種「ゆきまる」を使用した。種粒は、慣行法によりハト胸催芽後に過酸化石灰粉粒剤 16 を乾粒重量比 100%，および殺菌剤であるヒドロキシソキサゾール・メタラキシル粉剤を同 3% で同時被覆した。播種は 5 月 13 日～18 日に行った。播種機については、1994 年は背負式動力散粒機（共立，DMD-5502），1995 年は 10 m 条播機（中央農試，試作機），1996～1997 年は乗用散粒機（キセキ，JK14-IHB-181S），1998 年以降は密条型施肥条播機（ヤンマー，TRR10M）を用いた。播種後は落水管理を行い、播種粒数の 30% 程度の出芽と種子根の土中への伸長が確認された日に入水した。苗立ち率は、6 月下旬（イネ 4 葉期以降）に苗立ち本数を 1 区 0.2～0.3 m² を 21～384 ヶ所調査し、播種粒数で除

して算出した。

最適入水日の推定は、積算気温法と DVI 法の 2 つの方法で行った。積算気温法は、日最高最低平均気温から 1～10℃の基準温度を差し引いた値を播種翌日から入水当日まで積算した値を求め、これらの変動係数を比較した。DVI 法は、堀江・中川 (1990) を参考にした。すなわち、播種後毎日の DVR の積算値で表される DVI を播種時に 0、入水適期に 1 となると定義し、DVR は日平均気温の関数として次式で表した。

$$DVR=1/(1+\exp(-A(T-Th)))/G \quad (1)$$

ここで、A は温度係数、Th は発育速度が 1/2 となる気温、G は播種から最適入水日までの最小日数を表す (堀江・中川 1990)。これらのパラメータの最適値を表 3-15 のデータを用い、F-BASIC97 V6.3 (富士通) 上のプログラムにより、シンプレックス法で推定した。なお、気温は岩見沢アメダスの測定値を用いた。両推定法の推定精度の比較には、実測値と推定値の差の二乗和をデータ数 n で除したものの平方根である二乗平均平方根誤差 (Root Mean Square Error, 以下 RMSE) を用いた (中園ら 2014)。

(2) 催芽粃播種における最適入水日

試験は、1998～2002 年の 5 年間、北海道立中央農業試験場稲作部 (岩見沢市) の 450 m² の泥炭土水田で行った。供試品種は、早生品種「ゆきまる」である。種粃として、慣行法によりハト胸催芽後に過酸化石灰粉粒剤 16 を乾粃重量比 100%、およびヒドロキシイソキサゾール・メタラキシル粉剤を同 3% で同時被覆した過酸化石灰剤被覆区 (CAL 区) と、催芽粃を播種機に付着しない程度に播種当日に筵上で風乾した過酸化石灰剤無被覆区 (催芽粃区) を設けた。播種は、密条型施肥条播機を用い、5 月 16 日～19 日に行った。播種量は、乾粃換算で CAL 区で 8.4～10.9 g m⁻²、催芽粃区で 10.3～13.7 g m⁻² であった。

播種後は落水管理を行い、各年 3 水準（1998 年は 2 水準）の入水時期を設定した。すなわち、CAL 区において播種粒数の 30%程度の出芽と種子根の土中への伸長が確認された日を標準区として、その前後 3～4 日前に入水した早期区と、2～3 日後に入水した延長区を設けた。播種機の進行方向に垂直に水田を 3 分割し、水口側から入水時期の早い順に処理区を配置した。処理区の間には、360 cm×24 cm×3 cm の板を水田に打ち込んで、隣接する処理区への水の浸入を抑えた。入水直前の出芽数と 6 月下旬（イネ 4 葉期以降）に苗立ち本数を 1 区 0.2 m²を 8～12 ヶ所調査し、播種粒数で除して入水時出芽率と苗立ち率を算出した。

2) 結果

(1) 過酸化石灰剤被覆種子における最適入水日の推定

表 3-15 には各年次における落水日数、落水期間中の気温および苗立ち率を示した。落水日数は、8～15 日で、平均で 11.7 日であった。苗立ち率は、42.3～79.0%で、平均で 62.4%であった。落水期間中の平均気温が高いほど落水日数は短く、落水日数が短いほど苗立ち率は高い傾向にあり、ともに両者の関係は有意であった（図 3-4）。

最適入水日を播種後の気温から推定するために、積算気温法については、日最高最低平均気温から各々 1～10℃の基準温度を差し引いた値を播種翌日から入水当日まで積算した有効積算気温を求め、変動係数とともに表 3-16 に示した。変動係数は、基準温度が 6℃のときに最も小さく、6℃より低いほど、また高いほど大きかった。このことから、基準温度を 6℃として播種翌日から積算したときに、有効積算気温が 85.9℃を超えた日が最適入水日であるとした。

表3-15 落水期間中の平均気温と苗立ち率（過酸化石灰剤被覆種子）.

年次	播種日 (月・日)	入水日 (月・日)	落水日数 (日)	落水期間中の 平均気温		苗立ち率 (%)
				積算値 (℃)	平均値 (℃)	
1994	5.13	5.25	12	155.5	13.0	68.4
1995	5.15	5.28	13	166.7	12.8	49.5
1996	5.15	5.30	15	172.2	11.5	64.9
1997	5.15	5.28	13	147.8	11.4	42.3
1998	5.18	5.27	9	118.6	13.2	79.0
1999	5.18	5.31	13	176.5	13.6	54.8
2000	5.18	5.26	8	117.7	14.7	76.4
2001	5.17	5.26	9	122.9	13.7	66.3
2002	5.16	5.27	11	138.7	12.6	68.9
2003	5.15	5.29	14	179.7	12.8	53.6
平均	5.16	5.28	11.7	149.6	12.9	62.4

供試品種は1994～1995年は「きたいぶき」，他は「ゆきまる」である．種籾は，ハト胸催芽後に過酸化石灰粉粒剤を乾籾重量比100%，ヒドロキシイソキサゾール・メタラキシル粉剤3%で同時被覆した．播種機は，1994年は背負式動力散粒機，1995年は10m条播機，1996～1997年は乗用散粒機，1998年以降は密条型施肥条播機を用いた．平均気温は，岩見沢アメダスの測定値．

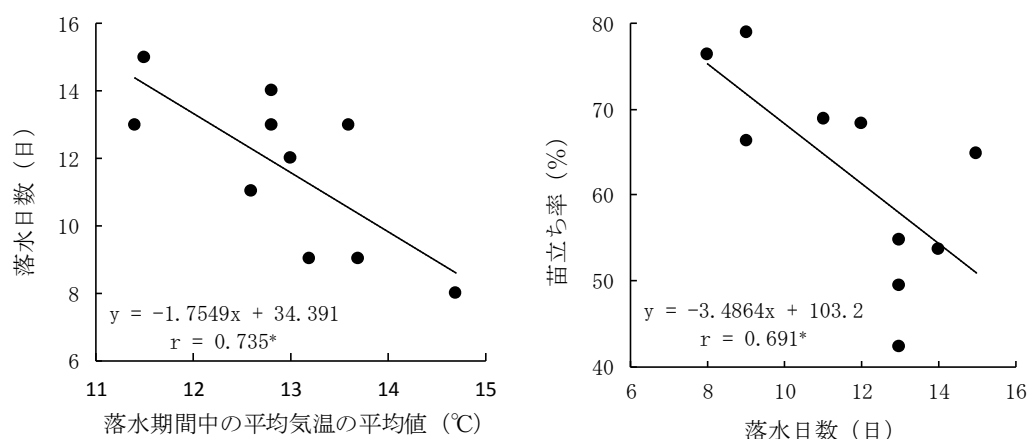


図3-4 落水日数と落水期間中の平均気温および苗立ち率の関係（過酸化石灰剤被覆種子）.

*は、5%水準で有意であることを示す（n=10）.

表3-16 播種後入水日までに要する有効積算気温における基準温度の比較.

年次	落水 日数 (日)	播種後入水日までの有効積算気温 (°C) (日最高最低平均気温から以下の基準温度を差し引いて積算した値)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1994	12	147.6	135.6	123.6	111.6	99.6	87.6	75.6	63.6	51.6	39.6
1995	13	159.6	146.6	133.6	120.6	107.6	94.6	81.6	68.6	55.6	42.6
1996	15	162.6	147.6	132.6	117.6	103.4	89.4	76.3	63.3	50.7	39.6
1997	13	141.5	128.5	115.5	102.5	89.5	76.5	63.5	50.5	37.5	25.5
1998	9	112.5	103.5	94.5	85.5	76.5	67.5	58.5	49.5	40.5	31.5
1999	13	169.0	156.0	143.0	130.0	117.0	104.0	91.0	78.0	65.0	52.0
2000	8	115.5	107.5	99.5	91.5	83.5	75.5	67.5	59.5	51.5	43.5
2001	9	121.7	112.7	103.7	94.7	85.7	76.7	67.7	58.7	49.7	40.7
2002	11	136.9	125.9	114.9	103.9	92.9	81.9	70.9	59.9	48.9	37.9
2003	14	175.1	161.1	147.1	133.1	119.1	105.1	91.1	77.1	63.1	49.1
平均	11.7	144.2	132.5	120.8	109.1	97.5	85.9	74.4	62.9	51.4	40.2
C.V.	20.2	15.6	15.4	15.1	14.9	14.7	14.6	14.8	15.3	16.7	19.1

過酸化石灰粉粒剤を被覆した場合. C.V.は変動係数. 有効積算気温は, 播種翌日から入水当日までの積算値.

DVI 法については, (1) 式における A, Th, G の各パラメータを表 3-15 のデータを用いシンプレックス法で推定した. その結果は図 3-5 に示すとおり, A=0.1908, Th=16.06, G=4.118 の最適パラメータが得られた. このことから, このパラメータを (1) 式に代入し, 播種後の平均気温から日々の DVR を求めて積算したときに, 1 を超えた日が最適入水日とした.

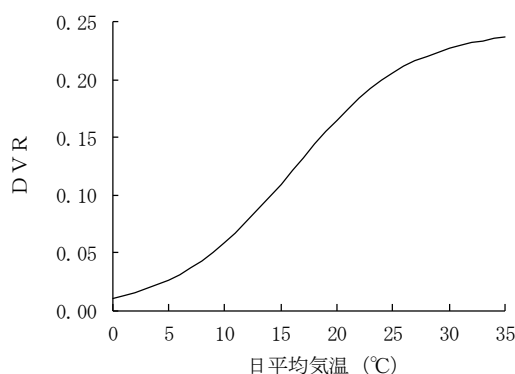


図3-5 日平均気温と播種から入水日までの1日当たり発育速度 (DVR) の関係.

過酸化石灰粉粒剤を被覆した場合. 両者の関係は, 日平均気温 T のとき $DVR=1/(1+EXP(-A*(T-Th)))/G$ で表され, A=0.1908, Th=16.06, G=4.118 である.

表 3-17 には積算気温法ならびに DVI 法の推定精度を示した。両者ともに実測値との間に 1%水準で有意な正の相関係数が認められた。推定精度を表す RMSE は、積算気温法で 1.4 日、DVI 法で 1.2 日と DVI 法の推定精度がやや高かった。

表3-17 積算気温法ならびにDVI法による落水日数の推定精度.

年次	落水 日数の 実測値 (日)	最適落水日数の推定値			
		積算気温法		DVI法	
		落水 日数 (日)	差 (日)	落水 日数 (日)	差 (日)
1994	12	12	0	12	0
1995	13	12	1	12	1
1996	15	15	0	15	0
1997	13	15	-2	14	-1
1998	9	11	-2	11	-2
1999	13	11	2	12	1
2000	8	9	-1	9	-1
2001	9	11	-2	11	-2
2002	11	12	-1	12	-1
2003	14	13	1	13	1
実測値との相関係数		0.796**		0.886**	
RMSE		1.4		1.2	

過酸化石灰粉粒剤を被覆した場合、積算気温法では、日最高最低平均気温 -6°C を播種翌日から積算した値が 85.9°C を超えた日、DVI法では、図3-5に示した1日当たり発育速度（DVR）を播種翌日から積算した発育指数（DVI）の値が1を超えた日を各々最適入水日とした。RMSEは実測値と推定値の二乗平均平方根誤差（Root Mean Square Error）を示す。**は1%水準で有意であることを示す（ $n=10$ ）。

(2) 催芽粉播種における最適入水日

表 3-18 には各年次各区の入水時出芽率および苗立ち率を示した。早期区の落水日数は 6.8 日で、入水時 DVI は 0.65、標準区の落水日数は 10.2 日で、入水時 DVI は 0.97 であった。延長区の落水日数および入水時 DVI は、標準区よりも各々 2.8 日、0.31 大きかった。

表3-18 苗立ち率に及ぼす播種後落水期間延長の効果.

年次 (播種期)	落水 期間	落水日数(日) (入水時DVI)	種粃 処理	播種量 (g m ⁻²)	入水時出芽率 (%)	苗立ち率 (%)
1998年 (5月19 日)	標準	9	CAL	10.0	35.3	72.8
		(0.80)	催芽粃	12.0	17.3	61.5
	延長	12	CAL	10.0	61.8	67.5
		(1.13)	催芽粃	12.0	29.3	69.3
1999年 (5月19 日)	早期	9	CAL	10.0	5.4	45.7
		(0.84)	催芽粃	13.7	0.2	30.1
	標準	12	CAL	10.0	32.7	55.0
		(1.09)	催芽粃	13.7	13.6	50.0
	延長	15	CAL	10.0	32.3	55.0
		(1.49)	催芽粃	13.7	36.2	54.9
2000年 (5月17 日)	早期	8	CAL	9.8	—	58.9
		(0.85)	催芽粃	12.0	—	65.0
	標準	12	CAL	9.8	56.4	74.2
		(1.37)	催芽粃	12.0	50.8	57.4
	延長	14	CAL	9.8	53.6	70.8
		(1.61)	催芽粃	12.0	71.3	76.0
2001年 (5月16 日)	早期	5	CAL	10.9	0.6	71.5
		(0.49)	催芽粃	12.2	1.5	36.5
	標準	9	CAL	10.9	37.9	66.8
		(0.86)	催芽粃	12.2	11.9	37.5
	延長	12	CAL	10.9	42.3	61.3
		(1.14)	催芽粃	12.2	21.6	51.0
2002年 (5月17 日)	早期	5	CAL	8.4	—	71.0
		(0.42)	催芽粃	10.3	—	51.5
	標準	9	CAL	8.4	50.0	83.7
		(0.75)	催芽粃	10.3	31.6	54.5
	延長	12	CAL	8.4	69.1	69.7
		(1.03)	催芽粃	10.3	35.2	51.8
平均	早期	6.8	CAL	9.8	—	62.0 n. s.
		(0.65)	催芽粃	12.1	—	45.7
	標準	10.2	CAL	9.8	42.4	70.9 *
		(0.97)	催芽粃	12.0	23.8 **	52.2
	延長	13.0	CAL	9.8	51.9 n. s.	65.0 n. s.
		(1.28)	催芽粃	12.0	38.4	60.9

供試品種は「ゆきまる」，播種は密条型施肥条播機で行った．落水期間の標準は，出芽始めと土中への種子根の伸長を確認した日に入水した．播種量は乾粃換算で示した．CALは過酸化石灰被覆を，催芽粃は過酸化石灰剤無被覆を示す．平均は，早期は1999～2002年の4年間，標準と延長は5年間の平均値．出芽率と苗立ち率をarcsin変換後，各落水期間別に，年次を反復とするt-検定（早期はn=4，その他はn=5）を行い，CAL区と催芽粃区の間，*，**は各々5，1%水準で有意な差異があり，n. s. は有意な差異はないことを示す．

同一入水日における CAL 区と催芽粃区の入水時出芽率を比較すると，CAL 区

で高く、催芽粃区では出芽が遅れる傾向にあった。5年間の平均では、標準区ではCAL区が42.4%、催芽粃区が23.8%と両区間に有意な差異が認められたのに対して、延長区では催芽粃区の出芽率は38.4%に向上し、CAL区との間に有意な差異は認められなかった。

CAL区の苗立ち率は、概して標準区で最も高く、延長区では標準区よりも低下する場合が多かった。一方、催芽粃区では、2002年以外は延長区で最も苗立ち率が高かった。CAL区と催芽粃区の苗立ち率を5年間の平均値で比較すると、標準区ではCAL区の70.9%に対し、催芽粃区は52.2%と有意に低かった。これに対して、延長区では、両者の苗立ち率は各々65.0%、60.9%で有意な差異は認められなかった。苗立ち率が最も高いCAL区・標準区と催芽粃区・延長区の差は10%と標準区での差よりも小さかった。図3-6には、第4表に示した各区の入水時のDVIと苗立ち率の関係を示した。CAL区では、両者の間に一定の傾向は認められなかったのに対し、催芽粃区では入水時のDVIが大きいほど苗立ち率は高い傾向にあった。

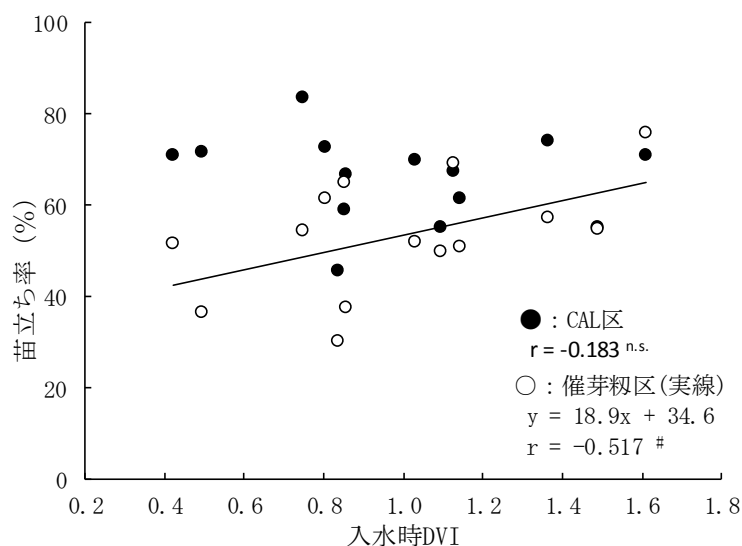


図3-6 入水時の発育指数 (DVI) と苗立ち率の関係
CAL区は過酸化石灰剤被覆区を、催芽粃区は過酸化石灰剤無被覆区を示す。#は10%水準で有意であり、n.s.は有意ではないことを示す (n=14)。

3) 考察

湛水直播栽培における播種後落水の効果と問題点については、古畑（2009）が詳細に報告しているが、落水出芽法の要点である播種後の落水期間、すなわち適切な入水日を示した報告は少ない。大場（1994, 1997）の報告以外では、古畑ら（2005b）は、深さ 1～2 cm に播種された種子が第 2 葉抽出までに要する日数と、暖地におけるノビエの葉令が 2.0 を超えるまでの日数から、初期除草剤の散布を前提とした場合の落水期間の一つの目安が播種後 10 日であると考察している。

寒地の北海道において播種後落水管理の有効性を示した田中ら（2016）の報告を含め、10 年間の落水出芽法による栽培事例では、播種粒数の 30% 程度の出芽と種子根の土中への伸長を確認した日を入水日とした落水期間は、8～15 日で変動した。この落水期間を気温から数量化した結果、積算気温法の場合には、基準温度を 6℃とした播種後の有効積算気温が 85.9℃を超えた日が最適入水日であることが明らかとなった。また、DVI 法の場合には、(1)式における最適パラメータとして、 $A=0.1908$ 、 $Th=16.06$ 、 $G=4.118$ が得られた。ここで、 Th は発育速度が $1/2$ となる気温、 G は播種から最適入水日までの最小日数を表す（堀江・中川 1990）。つまり、落水期間の最適気温は約 32℃、最短の落水日数は 5 日となる。両者の推定精度を比較したところ、DVI 法の RMSE がやや小さかったが、積算気温法における RMSE は 1.4 日であり、実用上は大きな差異はないと考えられる。

北海道の湛水直播における過酸化石灰剤の出芽・苗立ち向上効果については、いくつかの報告（竹川・森脇 1979b, 今野・村上 1982, 田中ら 1986）があるが、いずれも播種後湛水管理を行った場合である。吉永ら（2007）は、東北地域で行われた播種後の落水管理における過酸化石灰剤被覆量の試験事例 27 件を解析し、過酸化石灰剤無被覆では、播種後落水条件（落水日数は平均で 8.9 日）であっても苗立ち率が顕著に低下したと報告した。本研究においても、落水期間の標準区

(落水日数の平均は 10.2 日)においては、催芽粃区の出芽はやや遅れ、CAL 区と催芽粃区の苗立ち率の間に 5 年間の平均で 20%近い有意な差異が認められた。しかしながら、催芽粃区では入水時 DVI が大きいほど苗立ち率は高まる傾向にあり(図 3-6)、落水期間を 3 日程度延長した場合には、催芽粃区の苗立ち率は 8.7%向上し、CAL 区は 5.9%低下し、CAL 区・標準区と催芽粃区・延長区との差は 10%に縮小した。

したがって、催芽粃播種では、過酸化石灰剤被覆種子の標準よりも入水日を 3 日間遅らせ、播種粒数の 30%程度の出芽を確認後に入水すれば、催芽粃播種は実際栽培においても採用可能と考えられる。すなわち、催芽粃播種の最適入水日は、積算気温法の場合には基準温度を 6℃とした播種後の積算気温が 105℃を超えた日、DVI 法の場合には DVI が 1.3 を超えた日である。

第4章 総合考察

北海道の水田農業において、農家戸数の大幅な減少による大規模化が避けられない中で、直播栽培に取り組む生産者が増加している。2015年の直播栽培の普及面積は、水稻作付面積の1.7%とわずかであるが（表1-2）、将来の北海道稲作を支える技術の一つとして、さらにその必要性は高まるものと考えられる。直播栽培に適した品種とその特性を最大限に発揮させる栽培法の開発は喫緊の課題である。

直播栽培は、湛水直播と乾田直播に大別され、北海道においても両者が普及している状況にある。両者には、各々長所と短所があり（表4-1）、栽培される地域、土壌、圃場および経営形態に応じて最適な方法が選択されている。すなわち、代かきを行わない乾田直播は田畑輪換がしやすく、南空知などの転作率が比較的高く、経営規模の大きな地域で主に普及しているのに対して、代かきを行う湛水直播は適応地域が広く、全道各地で普及している。

表4-1 湛水直播と乾田直播の長所と短所

	湛水直播	乾田直播
長所	・全天候型で作業が計画的に行える ・適応土壌が広く取り組みやすい	・大型機械の導入が可能 ・田畑輪換がしやすい ・土壌が酸化的に推移する
短所	・代かきの労力が必要 ・土壌が還元が進みやすい ・地耐力が低下しやすい	・漏水田には不適 ・降雨により計画的な作業に支障が生じやすい ・均平作業が必要 ・畑雑草が発生しやすい

湛水直播栽培の最大の課題のひとつが苗立ちの安定向上である。安定した苗立ち率が得られないと、収量は不安定となる。さらに、播種量を増加する必要がある生産コストを引き上げる。北海道における湛水直播栽培の本格的普及のためには、苗立ち性の向上が不可欠である。

そこで本研究では、低温苗立ち性の遺伝的改良と栽培技術の改良による苗立ちの安定化の両面から検討を行った。まず、「土中播種」による湛水直播栽培において、播種から苗立ちに至る過程のなかで、気温、土壌、病原菌などの環境要因がどのように影響し、品種の低温苗立ち性が成り立つかを検討した。そして、栽培法の改善による苗立ち向上技術として、落水出芽法の北海道における有効性を検討した。以下には、低温苗立ち性品種の育成、および落水出芽法による苗立ち性向上技術の確立について、本研究成果をふまえて、今後の課題について考察する。

1. 低温苗立ち性品種の育成

低温苗立ち性は、高度に複合的な形質である。湛水土壌中に播種された種籾は、発芽、発根、出芽、本葉の出葉を経て苗立ちに至るが、その過程において、時間の経過とともに、温度、酸素、土壌還元物質など様々な環境要因が作用し（笹原・五十嵐 1989）、さらには病原性微生物が影響する（田中ら 1960、山口・鈴木 1965、北海道立上川農業試験場 1989）。したがって、低温苗立ち性の遺伝的改良には、低温苗立ち性に影響する個別の要因に対して、その影響の程度を正確に把握し、個別の要因に対する検定・選抜方法を明確にするとともに、それらを効率よく積み上げて総合的な選抜技術を構築する必要がある。

そこで本研究の第2章第1節では、播種から苗立ちに至るまでの間で、低温による苗立ち率の低下が最も大きい時期を検討し、最も苗立ちに影響するのは、第1葉の抽出前、すなわち鞘葉の伸長期であることを明らかにした。次に第2章第2節では、外国稲を含む52品種・系統を供試して、圃場条件下での低温苗立ち性と発芽以後の低温水中における生育の品種間差異を検討した。低温苗立ち性に優れた外国稲が見出され、発芽以後の初期伸長性の重要性が明らかになった。

第2章第3節では、これらの素材と北海道品種が土壌還元と *Pythium* 属菌の

影響下でどのような反応を示すか検討した．土壌還元に対しては「*Italica Livorno*」と「*Arroz da Terra*」が優れ，*Pythium* 属菌に対しては，「*Dunghan Shali*」が優れ，耐性がそれぞれ異なることを明らかにした．低温苗立ち性の高い品種の育成に向けては，これらの外国稲の各要因に対する耐性のメカニズムを解明し，その耐性因子を積み上げ，より高度の苗立ち性の素材を作る必要がある．

低温苗立ち性の品種間差異や選抜手法に関するこれまでの報告をみると，外国稲のなかに，低温発芽性や低温苗立ち性が高い品種が存在することが報告（小高・安部 1988）され，それらを交配母本に活用し，低温初期伸長性にも着目して，低温苗立ち性を改良する取り組みがいくつか行われてきた．景浦・新橋（1989）は，室内で一度に大量の材料について圃場条件と類似の状態での出芽，苗立ちおよび初期生育を検定できる簡易検定法を開発した．具体的には，野菜用ペーパーポットに水田土壌を充填し，3 mm の覆土条件で乾籾を播種し，これを水温 15℃ の循環式水槽内に設置するものである．この検定法を活用して，「きらら 397」×「*Italica Livorno*」の F₁ の蒔培養から苗立ち性の優れる中間母本「緑育 PL1」が育成された．この方法は，土中播種を採用し，初期伸長性も考慮して選抜を行っているが，無代かき土壌であることから，土中播種で問題となる土壌還元（萩原ら 1990）に対しての能力が検討されていない．また乾籾で播種されるために，出芽や初期生育に対する低温発芽性の影響が大きくなる．

三浦（2003）は，「*Arroz da Terra*」の子葉鞘の低温伸長性に着目し，表現型による選抜と戻し交配によって中間母本「北海 PL8」を育成した．この方法は，滅菌水を満たした長さ 20 cm の試験管の底に幼芽が 1 mm の発芽種子を入れて低温伸長性を評価しており，発芽種子を用いる点と初期の伸長性を選抜指標とした点が評価できる．しかし 2016 年現在，「緑育 PL1」および「北海 PL8」を交配材料にした実用品種は育成できていない．今後は，低温苗立ち性を具備した実用品

種の開発に向けて、本研究で得られた知見もあわせ、播種から苗立ちに至る過程で影響する低温、土壌還元および苗腐敗病菌などの複合的な条件を考慮して、選抜技術を構築する必要がある。

これまで低温苗立ち性の品種が育成されなかった要因について考えると、高い苗立ち率を示した外国稲は、いずれも脱粒性、長稈性あるいは赤米など劣悪な特性を有しており、このことが、実用品種の育成を妨げてきたと考えられる。近年のイネゲノム解析手法の進展により、苗立ち性に関連した形質についても遺伝子レベルで評価できるようになった。福田 (1997) は、「密陽 23 号」と「アキヒカリ」の交配後代を用い、土中出芽性に関する量的形質遺伝子座 (QTL) 解析を行い、検出された染色体領域上には嫌気条件下での出芽性に関連する遺伝子座の存在が考えられるが、遺伝的にも複雑な反応系が存在することが示唆されると報告した。三浦 (2003) は、インド型品種の中にも低温発芽性に極めて優れる有用品種が多数存在することを示し、インド原産品種「Kasalath」の有する低温発芽性に関する QTL を検出し、近接する FLP マーカーを明らかにした。また、低温発芽性に関わる *qLTG3-1* (Fujino and Matsuda 2010) や *qLTG11* (岩田・藤野 2009) に加え、圃場苗立ち性に関わる *qSES11* (岩田ら 2011) が報告されている。このような QTL 解析を利用した育種技術が、低温苗立ち性の獲得と劣悪形質の排除という課題に活用され、高度低温苗立ち性を有した実用品種が早期に開発されることを期待したい。そのために、低温苗立ち性に係わる個々の要素に対して DNA マーカーが開発されることが急務である。

低温苗立ち性に加えて、実用的な直播栽培用品種は、早生であること、耐倒伏性を有し多収であること、実需の求める品質を備えていること、さらには基本的な耐冷性および耐病性を具備していることが必要である。「ほしまる」および「大地の星」が現在の北海道の直播栽培を支えているが、早急にこれらに置き換わる

低温苗立ち性の向上した品種の育成が望まれる。

2. 落水出芽法による苗立ち向上技術の確立

栽培法改良の要点は、苗立ちの低下をいかに克服するかにある。浮き苗や倒伏を防ぐには土中播種が望ましいが、播種深度が深いと苗立ちが低下する。このジレンマからの脱却が必要であった。播種後湛水条件での苗立ち低下の主要な要因として土壌還元が考えられたことから、北海道における落水出芽法の有効性を検討した。このときに、播種後どれくらい落水管理を行うか、そして湛水管理と比べて落水管理で低温の影響がどの程度あるかを明らかにすることが重要なポイントであった。

第3章第1節では、温度条件を変えた室内試験において土壌還元処理と落水管理を組み合わせた試験を行った。落水区では土壌および種籾近傍が酸化的に推移し、苗立ち率はすべての処理で湛水区よりも高かった。播種後の落水管理は、出芽後の第1葉の抽出を早め、稲わらを添加した場合でも出芽と苗立ちを向上させると考えられた。寒地においては、播種後湛水して保温しないと苗立ちに悪影響が出ると考えられてきたが、最高気温、最低気温ともに3℃低くしても、温度の影響よりも落水処理の効果が極めて大きいことを明らかにした。

第3章第2節では、圃場試験において、落水効果を検討した。落水期間を4～5日とした場合には、出芽と発根には不十分で、むしろ浮き苗が多発した。種籾の出芽と土中への種子根の伸長を確認してから入水する必要がある、落水期間は12～13日を要した。この場合には、落水区の苗成ちは良好で、慣行区に比べて苗の生育も優り、生育期間中に倒伏も認められず、最終的な玄米収量も優った。また、落水区と湛水区の地表下1 cmの地温の比較では、日平均地温は落水区で約1℃低い程度で大差なく、播種後の落水管理が地温低下に影響する危険性は小さ

いと判断された。以上のことから、播種後の落水管理は、寒地にある北海道においても出芽と苗立ちの安定化に極めて有効な技術であると結論した。

第3章3節では、落水出芽法における適正な播種深度を検討し、過酸化石灰剤被覆種子における適正播種深度は 10～15 mm、過酸化石灰剤を使用しない催芽粃の適正播種深度は 5 mm とした。北海道の湛水直播栽培において播種後湛水管理を行う場合には、過酸化石灰剤を使用したとしても播種深度は 5mm が限界とされてきたが、落水出芽法の採用により、湛水土壌中直播栽培の当初の目標播種深度に近い栽培が可能となった。これらのことにより、浮き苗の防止と耐倒伏性の向上を期待できることに加えて、使用できる播種機の種類が増加すると考えられた。

そこで第3章第4節では、散播と条播の2機種を供試して、とくに播種深度に注目して播種機の適応性を検討した。播種深度の改善や作業能率の向上など、今後さらに改良する必要があるものの、いずれの播種機も生産現場において利用が可能と判断された。

第3章第5節では、播種後の最適な入水日を明確にするために、これを気温から推定する方法を検討し、過酸化石灰剤被覆種子と無被覆の催芽粃の各々に対して最適入水日を明らかにした。落水管理の長期化は、施肥窒素の利用率の低下（吉永ら 2000）や土壌硬度の増大にともなう出芽率の低下（竹牟禮ら 2000）、あるいは鳥による食害や雑草の発生（大場 1994）、土壌の過度のひび割れによる漏水などを引き起こすため、出芽・苗立ちの安定確保のための最適な入水時期の定量的な推定方法が明らかになった意義は大きい。この結果は、今後生産現場における落水期間の適切な指導に用いられるほか、直播水稻の発育予測モデルの推定精度が向上し、播種時期や品種の選定（丹野ら 2007b）など作付け計画の立案モデルの信頼性が高まることが期待される。ただし、催芽粃播種における落水期間の延

長は雑草の発生を助長し、ノビエの葉令の進展に伴い使用可能な除草剤が限定されるほか、土壌硬度の増大にともなう出芽率の低下などの課題もある。したがって、雑草の発生の多い圃場や土壌硬度が高まりやすい水田では過酸化石灰剤を使用する、また追加的な除草剤のコストと過酸化石灰剤のコストを事前に比較するなど、圃場条件あるいは経営的な視点からの検討も必要となる。

以上のように、北海道においても落水出芽法の有効性が明らかとなり、さらに適正播種深度、最適入水日、使用できる播種機が解明されたことから、湛水直播栽培の安定性の向上が期待される。さらに、湛水直播栽培の本格的普及のためには、移植並みの収量性の確保が大きな課題である。平石・岡田（2015）は、経営的な視点から北海道の直播栽培を展望した。直播栽培の10a当たりの労働時間は移植栽培の0.34～0.81倍と省力的である。しかし、60 kg当たり生産費で比較すると、移植栽培と同等の単収水準を実現している地域では同等から低い生産費を達成しているのに対して、直播の単収水準が移植よりも低い地域では、生産費が移植よりも高かった。したがって、直播栽培を本格導入するには、移植並みの収量確保が極めて重要となる。落水出芽法の苗立ち向上効果を活用し、高い収量を実現する栽培技術が必要である。そのためには、ムラのない均一な苗立ちの確保、早期に必要な茎数を確保する生育促進技術、根の伸長や活性に着目した増収技術、最適籾数を得るための施肥技術など、地域や土壌条件に対応した総合的な技術開発が必要となる。

落水出芽法においては、播種後の落水管理により、施肥窒素が硝酸化成によって流亡し、利用率が低下すること、および雑草の発生時期が早期化し、また発生量が増大する課題がある。窒素の硝酸化成に対しては、被覆尿素などの緩効性肥料の利用技術が開発され（田中ら 2001, 北海道立中央農業試験場・上川農業試験場 2004）、雑草に対しては直播で使用可能な除草剤の開発も進んでいるが、さら

に低温条件の北海道の湛水直播栽培に適した肥料および除草剤の開発を期待する.

以上のように, 低温苗立ち性を具備した実用品種が育成されないなかで, 落水出芽法を採用し, 栽培法の改良によって苗立ちを安定確保することが可能となった. しかしながら, 将来的には, 土中に播種後, 湛水管理しても高い苗立ち率が安定して得られる品種を育成することにより, 特殊な肥料や除草剤などの追加的な資材コストが低減され, 直播栽培技術はさらに低コストな技術になると考えられる.

謝辞

本研究のとりまとめにあたり、学会誌投稿に始まり本論文のとりまとめに至るまで、ご多忙な中終始懇切丁寧なご指導とご校閲をいただきました、北海道大学名誉教授であり同大学院農学研究院基盤研究部門特任教授岩間和人博士に深甚なる謝意を表します。また、ご校閲の労と適切なご教示をいただきました同教授近藤則夫博士、同教授柴田洋一博士、同助教中島大賢博士に深く感謝します。本研究のとりまとめの契機を与えていただき、ご校閲と温かい励ましをいただきました元北海道立中央農業試験場生産システム部長稲津脩博士、同作物開発部長天野洋一博士に心から感謝申し上げます。学会誌の投稿にあたり懇切なるご教示をいただいた日本作物学会紀事編集委員会委員長である龍谷大学教授大門弘幸博士に心から感謝申し上げます。北海道大学農学部および同大学院農学研究科在学時に、農学研究的基礎をご教示いただきました元農学科工芸作物学研究室教授津田周彌博士（故人）、島本義也博士、中嶋博博士に心から感謝申し上げます。

本研究は、1987～1991年に北海道立上川農業試験場水稻栽培科、1992～2003年に同中央農業試験場稲作部栽培第一科（のちに生産システム部栽培システム科）において実施した実験をもとにとりまとめたものです。以下のお世話になった関係各位の所属については、実験実施当時の所属を基本に記載し、その後の所属・職名は割愛しました。

元上川農業試験場水稻栽培科長天野高久博士には、本研究の端緒と多くのご指導をいただきました。元上川農業試験場長仲野博之氏（故人）、同砂田喜與志氏、同佐々木多喜雄博士、元中央農業試験場稲作部長竹川昌和氏、同三浦豊雄氏、元中央農業試験場生産システム部長山本毅氏にはご指導とご配慮をいただきました。

研究の遂行にあたり、元上川農業試験場水稻栽培科長山崎信弘氏、元中央農業試験場稲作部栽培第一科長今野一男博士、元上川農業試験場主任研究員谷川晃一氏、元上川農業試験場水稻栽培科小川勉氏、五十嵐俊成博士、富原睦氏、同病虫科田中文夫博士、長濱恵氏、元中央農業試験場稲作部栽培第一科古原洋博士、宮森康男氏、竹内晴信氏、笛木伸彦博士、渡邊祐志氏、元中央農業試験場生産システム部栽培システム科長丹野久博士および安積大治氏、元中央農業試験場農業機械部主任研究員笹島克己氏、同機械科長玉木哲夫氏、元中央農業試験場生産システム部機械科長竹中秀行氏、同経営科長西村直樹氏には、直播研究に係る共同研究者あるいは研究科の同僚としてデータの提供、ご指導、ご助言、多大なるご協力をいただくとともに、日々直播栽培をはじめ水稻栽培技術の未来について論議させていただきま

した。

元上川農業試験場特別研究員國広泰史氏，同水稻育種科長佐々木一男氏（故人），同前田博氏，同新橋登博士，同菊地治己博士，同沼尾吉則氏，元中央農業試験場稲作部育種科長三分一敬博士，同佐々木忠雄氏，同相川宗厳氏，森脇良三郎氏（故人），楠谷彰人博士および研究職員各位には，水稻育種のみならず稲作技術についてご指導，ご助言と激励をいただきました。

本研究に供試した品種の多くは旧北海道農業試験場稲第 4 研究室長小高真一氏から分譲いただきました。元保土ヶ谷化学工業（株）岡元省三氏（故人）と涌井明氏には，落水出芽法に取り組む契機と全国の直播栽培の情報と多くのご助言をいただきました。元京都大学農学部教授堀江武博士および中川博視博士には発育ステージの推定法をご教授いただきました。ヤンマー農機製造株式会社および井関農機株式会社には播種機の提供などご配慮いただきました。また，東川町，美唄市，妹背牛町をはじめとする全道各地の直播研究会の皆さまには，現地試験・調査にご協力をいただくとともに，試験研究に対する要望は直播研究推進の原動力となりました。

北海道立総合研究機構上川農業試験場研究部長川岸康司博士にはご校閲とご助言をいただきました。同研究部三浦周氏には統計解析についてご助言とご協力をいただきました。

以上の関係各位に篤くお礼申し上げます。

このほか，元上川農業試験場および元中央農業試験場の農業技能員，総務課職員，および多くの臨時職員の方々のご協力とご指導により，本研究を実施し，とりまとめることができました。さらに、ここに記せなかった，ご支援，ご協力、激励をいただいたすべての方々に衷心から感謝の意を捧げます。

引用文献

- Adair, C.R. 1968. Testing rice seedlings for cold water tolerance. *Crop Sci.* 8 : 264-265.
- 天野高久 1984. 水稻の冷害に関する作物学的研究. 北海道立農業試験場報告 46: 1-67.
- 天野高久・小川勉・山崎信弘・田中英彦・高田勇・窪田幸則 1988. 北海道における水稻の湛水土壤中直播栽培. 農及園 63: 603-614.
- 天野高久・田中英彦・井上直人 1993. イネ湛水直播における低温苗立ち性の品種間差異. 京都府立大学農場報告 16: 12-21.
- 道総研中央農業試験場 2013. 農林業センサスを用いた北海道農業・農村の動向予測. 北海道立総合研究機構農業試験場資料 40: 1-59.
- Fujino, K. and Matsuda Y. 2010. Genome-wide analysis of genes targeted by qLTG3-1 controlling low-temperature germinability in rice. *Plant Mol. Biol.* 72: 137-152.
- 福田善通・太田久稔・田村克徳・笹原英樹・福山利範・芦川育夫・上原泰樹・八木忠之 1997. 土中出芽性に関する QTL (計量形質遺伝子座) 解析. 日作紀 66(別 1): 242-243.
- 古畑昌巳・楠田宰・福嶋陽 2005a. 落水処理による土壌三層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・楠田宰・福嶋陽 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 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: 10-17.
- 古畑昌巳 2009. 湛水直播水稻の出芽・苗立ち向上に向けて. 日作紀 78: 153-162.

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粒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. 酸素発生剤を被覆した水稻種粒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.

萩原素之・井村光夫 1990. 過酸化石灰が水稻の湛水土壌からの出芽を促進する機作－硝酸カリウムの出芽促進効果と出芽過程における転形率からの考察－. 日作紀 59(別 1): 66-67.

萩原素之 1993. 水稻の湛水土壌中直播における出芽・苗立ちに関する研究－種子近傍の土壌の酸化還元との関係に特に注目して. 石川農短大特研報 20: 1-103.

Hagiwara, M. and Imura, M. 1993. Varietal difference and temperature response of local soil-reduction around germinating rice seed. Jpn. J. Crop Sci. 62: 105-110.

平石学・岡田直樹 2015. 直播栽培の今後の展望－水田作経営の視点から－. 北農 82: 150-156

北海道農事試験場 1925. 水稻直播器に関する調査. 北海道農事試験場彙報 38: 1-37.

北海道立中央農業試験場・上川農業試験場 1993. 水稻湛水直播・大規模散播法に関する試験.

<http://www.hro.or.jp/list/agricultural/center/kenkyuseika/gaiyosho/h05gaiyo/1992003.htm> (2016/1/5 閲覧)

北海道立中央農業試験場・上川農業試験場 2004. 落水出芽法を用いた水稻直播栽培の安定多収技術.

<http://www.hro.or.jp/list/agricultural/center/kenkyuseika/gaiyosho/h16gaiy>

o/2004510.pdf (2016/1/5 閲覧)

北海道立上川農業試験場 1989. 水稻湛水直播栽培暫定基準－上川中央部における水稻湛水直播栽培法－.

<http://www.hro.or.jp/list/agricultural/center/kenkyuseika/gaiyosho/h01gaiyo/1988002.htm> (2016/1/5 閲覧).

北海道産米百万石祝賀会 1921. 北海道の米.

堀江武・中川博視 1990. イネの発育過程のモデル化と予測に関する研究 第 1 報
モデルの基本構造とパラメータの推定法および出穂予測への適用. 日作紀 59:
687-695.

星川清親 1975. 解剖図説イネの生長. 農山漁村文化協会, 東京. 50-51.

Inoue, N., Amano, T. and Khoko, K. 1997. Seedling establishment of rice sown on soil surface in flooded paddy field I. Varietal difference in seedling establishment. Jpn. J. Crop Sci. 66: 632-639.

井澤敏彦・平岡博幸・西山 岩男 1985. 湛水直播水稻の苗立ちにおよぼす土壤還元の影響 第 1 報 小麦わらおよび炭水化物添加土壌における酸化還元電位と湛水直播水稻の苗立ちとの関係. 日作紀 54 (別 1): 24-25.

岩田夏子・藤野賢治 2009. 低温発芽性遺伝子 *qLTG11* の絞込み. 育種・作物学会北海道談話会会報 50: 43-44.

岩田夏子・品田博史・佐藤毅 2011. イネ圃場苗立ち性遺伝子 *qSES11* の候補領域の絞込み. 育種・作物学会北海道談話会会報 52: 49-50.

景浦強・新橋登 1989. 寒冷地湛水直播用水稻品種の室内簡易苗立検定法の開発. 日作紀 58 (別 2): 199-200.

小高真一・安部信行 1988. 低温条件下におけるイネの高出芽性品種の検索－低温発芽性の品種間差異と苗立ち性検定法の開発－. 農業技術 43: 165-168.

- 今野一男・村上利男 1982. 湛水直播水稻の苗立ちに関する研究 第2報 水温・種子埋没深と出芽, 苗立ちの關係に及ぼす過酸化石灰種子粉衣處理の影響. 日作紀 51(別号 2): 3-4.
- 前田博・相川宗嚴・柳川忠男・佐々木一男・田縁勝洋・丹野久・菅原圭一・吉田昌幸・菊地治己 1996. 水稻新品種「きたいぶき」の育成について. 北海道立農試集報 71: 49-63.
- 丸山幸夫 2001. 直播水稻の栽培技術－水管理－. 「農業技術体系作物編 2 イネ. 基礎技術編」追録 23: 技 402 の 1 の 8.
- 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.
- McIntosh, M.S. 1983. Analysis of combined experiments. Agron. J. 75: 153-155.
- 三石昭三 1975. 水稻の湛水直播における土壤中埋没播種に関する作物学的研究. 石川県農業短期大学特別研究報告 4: 1-59.
- 三石昭三・中村喜彰 1977a. 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.
- 三石昭三・中村喜彰 1977b. 水稻の湛水土壌中直播栽培に関する研究 第2報 播種機の構造と播種精度. 日作紀 46(別 1): 37-38.
- 三浦清之 2003. 水稻直播適性品種育成のための種子発芽性および苗立ち性に関する遺伝育種学的研究. 生物研研究資料 2: 1-44.
- 永田靖 2000. 入門統計解析法. 日科技連出版社. 東京. 30-31.
- 中園江・大野宏之・吉田ひろえ・佐々木華織・中川博視 2014. コムギの發育段階の推定モデル. 日作紀 83: 249-259.
- 中住晴彦 2012. 10 年後の空知農業にとって必要な技術とは. 農家の友 平成 24 年(4): 78-79.

- 沼尾吉則・佐々木多喜雄・佐々木一男・柳川忠男・相川宗嚴・和田定・本間昭・新橋登 1990. 水稻品種「はやまさり」の育成について. 北海道立農試集報 60: 19-30.
- Ogiwara, H. and Terashima, K. 2001. A varietal difference in coleoptile growth is correlated with seedling establishment of direct seeded rice in submerged field under low-temperature conditions. Plant Prod. Sci. 4: 166-172.
- 荻原均・川村陽一・扇良明・谷口岳志・趙志超・吉永 悟志・寺島 一男 2003. 育苗箱を利用したイネ品種の低温苗立ち性の検定方法と苗立ち性の異なる品種を基準品種として用いた評価法. 日作紀 72: 301-308.
- 大場茂明 1994. 無人ヘリによる水稻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.
- 太田久稔・井辺時雄・吉田智彦 2003a. 水稻の湛水土中直播栽培における出芽性の検定方法と遺伝的変異. 日作紀 72: 50-55.
- 太田久稔・上原泰樹・井辺時雄・吉田智彦 2003b. 水稻の湛水土中直播栽培における土中出芽性の新たな検定方法と土中出芽性の新たな遺伝資源. 日作紀 72: 295-300.
- 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.
- Ormrod, D.P. and Bunter, W.A.Jr. 1961. The evaluation of rice varieties for cold water tolerance. Agron. J. 53: 133-134.
- Saka, N. and Izawa, T. 1999. Varietal differences in the survival rate of sprouting rice seed (*Oryza sativa* L.) under highly reduced soil conditions. Plant Prod. Sci. 2: 136-137.

- 笹原健夫・五十嵐弘 1989. 播種時期を異にした場合の水稻品種の出芽・苗立ち率の変動－湛水土壌における出芽・苗立ち率の検定に関する考察－. 農及園 64: 915-920.
- 佐々木多喜雄 1968. 水稻品種の低温発芽性と初期生育との関係 1. 初期伸長性との関係. 北海道立農試集報 17: 34-45.
- 佐々木多喜雄・山崎信弘 1971. 水稻品種の低温発芽性と初期生育との関係 第 4 報 苗立ち性との関係. 日作紀 40: 474-479.
- 佐々木多喜雄 1974. 稲品種の低温発芽性に関する育種学的研究. 北海道立農業試験場報告 24: 1-90.
- 佐藤毅 2006. 水稻新品種「上育 445 号」. 北農 73: 150.
- 下田英雄 1989. 水稻湛水土壌中直播栽培における最近の動向 (2). 農業技術 44: 219-224.
- 竹川昌和・森脇良三郎 1979a. 直播イネの初期生育に及ぼす冷水温の影響. 北海道立農試集報 41: 21-28.
- 竹川昌和・森脇良三郎 1979b. 直播イネの発芽, 苗立ち障害に及ぼす過酸化石灰種子分に処理の効果. 北海道立農試集報 42: 1-9.
- 竹牟禮穰・吉永悟志・脇本賢三・吉田典夫 2000. シラス土壌における水稻湛水直播栽培の落水出芽法が土壌条件および出芽・苗立ちに及ぼす影響. 日作紀 69(別 2): 31-31.
- 田中文夫・田中英彦・涌井明 1991. 湛水直播水稻の苗腐病菌 *Pythium spp.* の接種方法と品種抵抗性検定. 日植病報 57: 120.
- 田中英彦・山崎信弘・天野 高久 1986. 直播水稻の苗立ち率に及ぼす播種深度と過酸化石灰被覆量の影響. 日作紀 55(別 2): 29-30.
- 田中英彦 1995. 直播稲作へのチャレンジ. 農及園 70: 648-653.

- 田中英彦・古原洋・渡辺祐志 2001. 北海道の水稲湛水直播栽培における落水出芽法の適応性について 3) 側条施肥の効果と問題点. 育種・作物学会北海道談話会会報 42: 53-54.
- 田中英彦・古原洋・今野一男 (2016). 北海道の湛水直播水稲における出芽と苗立ちに及ぼす土壌還元の影響と播種直後からの落水の効果. 日作紀 85: 印刷中.
- 田中一郎・成田武四・森芳夫 1960. 北海道における水稲の早植栽培と病害発生相. 北日本病害虫研究会特別報告 5: 1-3.
- 丹野久・相川宗嚴・山崎信弘・森脇良三郎・天野高久 2007a. 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.
- 丹野久・田中英彦・古原洋・佐々木亮・三浦周 2007b. 寒地水稲の湛水土中直播栽培における簡易有効積算気温による品種選定. 日作紀 76: 591-599.
- 鳥山国土 1962. 湛水直播用水稲品種の改良と問題点. 農業技術 17: 305-309.
- 山口富夫・鈴木穂積 1965. イネ湛水直播における発芽障害に関する病原菌. 日植病報 30: 291.
- 山本隆一 1990. 水稲直播栽培用品種開発の道標. 農業技術 45: 385-391.
- 山崎信弘・田中英彦・田中文夫 1992. 北海道における最近の湛水直播栽培 I -1. 現状と問題点. 農業技術 47: 347-351.
- 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落水管理が施肥窒素の動態および水稲の生育・収量に及ぼす影響. 日作紀 69: 481-486.
- 吉永悟志・境谷栄二・吉田宏・山本晶子・若松一幸・菊池栄一・本間昌直 2007. 東北地域の水稲湛水直播栽培における酸素発生剤被覆量と苗立ちとの関係. 日作紀 76: 445-449.
- 吉田實 1978. 応用統計ハンドブック. 養賢堂. 248.

摘 要

北海道の湛水直播栽培における苗立ち向上のために、浮き苗と倒伏を積極的に防止する土中播種における品種の低温苗立ち性に係わる要因の解析と、落水出芽法による苗立ち向上技術の確立を目的に研究を実施した。得られた結果は以下のとおりであり、品種の低温苗立ち性の向上に活用され、落水出芽法は北海道における湛水直播栽培の安定性向上に寄与する。

1. 低温苗立ち性の品種間差異に関する変動要因の解析

1) 低温感受性時期の特定

- (1) 実生の低温感受性が最も高い時期を特定するために、ほぼ 11℃の冷水を掛け流した冷水田を用い、播種直後、出芽揃い期、第 2 葉抽出期の 3 処理開始時期について、各 7 日と 14 日間の冷水処理を行った結果、苗立ち率は、出芽揃い期からの処理で最も低く、次いで第 2 葉抽出期からの処理で低かった。
- (2) 処理前後の出芽個体を出葉程度ごとに分類して、各処理による苗立ち率の低下の要因について検討した結果、播種直後からの処理における苗立ち率の低下は、主に発芽率の低下によると考えられた。出芽揃い期からの処理では発芽した個体が第 1 葉を抽出できるかどうか、第 2 葉抽出期からの処理ではそれに加えて本葉を抽出した個体の生存率がそれぞれ苗立ち率の低下に影響した。
- (3) 以上から、低温処理を行った場合に最も苗立ち率が低下したのは、出芽個体の第 1 葉抽出率が低下した場合であり、低温に対する感受性が最も高い時期は、出芽後第 1 葉の抽出前、すなわち鞘葉の伸長期と判断された。

2) 低温苗立ち性と初期伸長性の関係

- (1) 外国稲を含む 52 品種・系統を供試して、圃場条件下における低温苗立ち性を評価し、さらに低温苗立ち性と 15℃における低温発芽性および 15℃水中に

における初期伸長性との相互関係を検討した。苗立ち試験は 5 月と 7 月に実施し、7 月播種では第 1 葉抽出始めから 9 日間約 14℃の冷水を掛け流した。

- (2) 両播種期ともに苗立ち率に大きな品種間差異が認められた。道内品種では「胆振早稲」の苗立ち率が最も高かったが、外国稲 6 品種は両播種期ともに「胆振早稲」よりも高い苗立ち率を示した。
- (3) 苗立ち率を出芽率 (EM)、出芽した個体の第 1 葉抽出率 (FLE/EM)、第 1 葉抽出個体の生存率 (ES/FLE) の 3 つの構成要素に分解し、苗立ち率に対する相対的な影響力を重回帰分析によって検討した結果、5 月播種では EM が、7 月播種では EM と ES/FLE が最も苗立ち率に影響した。
- (4) 15℃発芽係数 (発芽率を平均発芽日数で除した値) と両播種期の苗立ち率および苗立ち構成要素の間の相関関係は概して弱かったのに対して、15℃における第 2 葉長 (第 2 葉葉鞘+葉身)、草丈、最長根長との間に有意な正の相関関係を認めた。
- (5) 以上の結果から、低温苗立ち性に優れた有望な外国稲が見出されたこと、選抜にあたっては低温発芽性ばかりでなく発芽以後の初期伸長性に着目すべきことを指摘した。

3) 土壌の還元および *Pythium* 属菌に対する耐性

- (1) 高い苗立ち性を示す外国稲を含む水稻 8 品種を供試して、風乾した無代かき土 (酸化土 : OS) と稲わら粉末を添加した代かき土 (還元土 : RS)、および *Pythium* 属菌接種の有無 (接種 : IP と無接種 : NP) の組み合わせ処理を行い、出芽、苗立ちに及ぼす影響を検討した。
- (2) OS 区の出芽率が 94%であったのに対して、RS 区では 75%と低下したが、「Italica Livorno」と「Arroz da Terra」は RS 区における出芽率の低下程度が小さく、土壌還元に対する耐性が高かった。

- (3) *Pythium* 属菌接種の影響では、NP 区の苗立ち率が 80%であったのに対して、IP 区では 14%と大きく低下した。すべての品種で NP 区に比べ IP 区で苗立ち率は有意に低下したが、「Dunghan Shali」の低下程度が最も小さかった。

2. 落水出芽法による苗立ち向上技術の確立

1) 苗立ちに及ぼす土壌還元の影響と播種直後からの落水の効果

- (1) 北海道における播種後落水管理の有効性を検証するため、温度処理（昼/夜，21/13℃と 18/10℃），土壌還元処理（稲わら添加の有無），および水管理（常時湛水区と播種直後から落水区）を組み合わせる室内実験を行った。
- (2) メチレンブルーによる酸化還元状態の調査で、湛水区では土壌と種粒近傍で土壌還元の進行を認め、とくに稲わら有区で顕著であったのに対し、落水区では、土壌、種粒近傍とも還元の進行はほとんど認められなかった。
- (3) 出芽率は、各処理ともに湛水区で抑制がみられ、とくに低温・稲わら有区で抑制が大きかった。苗立ち率は、すべての処理で稲わら有区で低下したが、いずれの処理でも湛水区に比べ落水区で苗立ち率は明らかに高かった。
- (4) 出芽から第 1 葉抽出までの日数は、湛水区で 7 日以上要したのに対し、落水区では 2～3 日と短く、このことが苗立ちの安定化に結びついたと考えられた。

2) 落水期間が苗立ちと生育収量に及ぼす影響

- (1) 圃場試験において、播種後落水区と播種後湛水管理した慣行区を比較したところ、落水期間を 12～13 日として種粒の出芽と土中への種子根の伸長を確認してから入水した場合には、苗成ちは落水区で良好で、慣行区に比べて苗の生育も優り、生育期間中に倒伏も認められず、最終的な玄米収量も優った。
- (2) 圃場における地表下 1 cm の日最低地温は湛水区で高かったが、日最高地温はむしろ落水区で高く、日平均地温は落水区で 1℃低い程度であり、低温の影響

響は小さいと考えられた。

3) 落水出芽法における適正播種深度および播種機の性能

- (1) 過酸化石灰剤被覆種子における適正播種深度は 10～15mm，過酸化石灰剤を使用しない催芽粃の適正播種深度は 5 mm と考えられた。
- (2) 供試した散播と条播の 2 機種は，播種深度の改善や作業能率の向上など改良を要する点はあるものの，いずれも生産現場での使用が可能と判断された。

4) 最適入水日の推定

- (1) 過酸化石灰剤被覆種子を用いた落水出芽法において，最適な入水日を気温から推定する目的で，播種後入水当日までの期間で，日最高最低平均気温から基準温度を差し引いた値を積算する方法（積算気温法）と，1 日当たり発育速度（DVR）を日平均気温（T）の関数（ $DVR=1/(1+\exp(-A(T-T_h)))$ ）/G）として算出した値を積算する方法（DVI 法，入水日が 1）を検討した。
- (2) 積算気温法では，基準温度を 1～10℃の範囲で変化させた場合での積算気温の変動係数を比較したところ，基準温度が 6℃で最も変動係数が小さく，この積算気温が 85.9℃を超えた日が最適入水日と考えられた。DVI 法では， $A=0.1908$ ， $T_h=16.06$ ， $G=4.118$ が最適値となった。
- (3) 落水日数の実測値に対する推定値の二乗平均平方根誤差は，積算気温法で 1.4 日，DVI 法で 1.2 日であった。
- (4) 上述の知見に基づき，生産コストを低減する過酸化石灰剤無被覆での催芽粃播種（催芽粃区）の最適入水日を検討したところ，過酸化石灰剤被覆区（CAL 区）の最適入水日（標準区）では，CAL 区の苗立ち率が 70.9%であったのに対して，催芽粃区では 52.2%と有意に低かった。しかし，標準区よりも約 3 日入水を遅くすると，催芽粃区の苗立ち率は 60.9%に向上した。
- (5) このことから，催芽粃播種における最適入水日は，積算気温法で 105℃，DVI

法で 1.3 を超える日と考えられた.

Draining the soil just after seeding as a method for improving seedling emergence of rice in a paddy field for submerged direct seeding in Hokkaido

Hidehiko Tanaka

Summary

This study was conducted to analyze the factors causing varietal differences in the establishment ability of rice direct-seeded into soil under low temperature conditions, then to develop a seedling emergence improving method by draining just after seeding in Hokkaido.

The results are summarized as follows:

1. Analysis of factors influencing the varietal differences in establishment ability under low temperature conditions

1) Determination of the low-temperature-sensitive stage

(1) A field experiment was conducted in a paddy field for submerged direct seeding where cool water of about 11°C was continuously irrigated, in order to determine the stage that the seedlings were the most sensitive to low temperature. Cool water treatment was given for 7 and 14 days at 3 growth stages, i.e., just after seeding (JAS), full emergence stage (FES), and second leaf appearing stage (SLA). The percentage of seedling establishment was lowest in FES, followed by SLA.

(2) Emerged seedlings were classified depending on the leaf age just before

and after the cooling in order to examine the factors that decreased the establishment percentage in each treatment. The seedling establishment was decreased mainly by the decrease of emergence percentage in JAS. On the other hand, it was reduced mainly by the failure of first leaf elongation after emergence in FES and SLA, and also by the failure to survive after the first leaf elongation in SLA.

- (3) These results indicate that the seedlings were the most sensitive to low temperature just before first leaf elongation, in other words the elongation stage of coleoptile.

2) Relationship between establishment ability and early growth

- (1) We investigated seedling establishment, in the field, and then examined the relationship between germination at 15°C and early growth of seedlings in 15°C water using 52 varieties. Field experiments were conducted in May and July. The plants were continuously irrigated with 14°C water for 9 days after the appearance of the first leaf in July trial.
- (2) Highly significant varietal differences in the percentage of seedling establishment (%ES) were observed in both trials. Several foreign cultivars showed higher %ES than “Iburiwase” which showed the highest %ES among the Hokkaido varieties.
- (3) The %ES was divided into three components: percentage of seedling emergence (EM), percentage of first leaf elongation in the emerged seedlings (FLE/EM) and percentage of establishment of the first leaf elongated seedlings (ES/FLE). The contribution rate of each component was evaluated by multiple regression analysis. The contribution of EM was the highest in

the May trial, while that of ES/FLE was also high in the July trial.

- (4) Significant positive correlations were observed between the %ES and the early growth characters of seedlings, such as second leaf length, shoot length and maximum root length, while the correlation between germination coefficient and %ES was low.
- (5) The present results indicate that several foreign cultivars with a high %ES are useful as breeding materials for direct-seeding and also we need to pay more attention to the early growth of seedlings rather than germination.

3) Tolerance to soil reduction and inoculation of *Pythium spp.*

- (1) A laboratory experiment was conducted to examine the effects of soil reduction and inoculation of *Pythium spp.* on seedling emergence and establishment of rice using 8 varieties including foreign varieties. Two types of soil were prepared, i.e., dry oxidized soil (OS) obtained from a paddy field, and reduced soil (RS) with powdered rice straw added. Each soil type was inoculated with *Pythium spp.* (IP) or not inoculated (NP).
- (2) Emergence percentage was 75% in RS, while 94% in OS. “Italica Livorno” and “Arroz da Terra” showed less reduction of emergence percentage in RS relative to OS, suggesting their tolerance to soil reduction.
- (3) The inoculation of *Pythium spp.* to soil significantly reduced the establishment percentage in all varieties; it was 14% in IP and 80% in NP. However, the reduction in “Dunghan Shali” was relatively small.

2. Development of a method to improve seedling emergence using the draining method

1) Effects of soil reduction and draining just after seeding

- (1) A laboratory experiment was conducted to examine the effect of draining just after seeding compared with a flooded condition on emergence and seedling establishment using a combination of several treatments, such as temperature (21/13°C and 18/10°C of day/night) and soil reduction (reduced soil by adding rice straw and normal soil).
- (2) Methylene blue was used to examine soil reduction. The soil near the seeds in draining treatments maintained an oxidative condition during the experiment even in reduced soil, while soil reduction proceeded in flooded treatments.
- (3) Emergence percentage was inhibited in flooding treatment, especially under combination of lower temperature and reduced soil. Establishment percentage was inhibited in reduced soil, but it was significantly higher in draining than in flooding treatments.
- (4) The period from emergence to first leaf elongation was 2-3 days in draining treatment, while over 7 days in flooding treatments. This quick elongation of the first leaf was considered to be important for stable establishment.

2) Effects of draining on seedling establishment and grain yield

- (1) In the field experiment, draining treatment for 12-13 days just after seeding gave better establishment and seedling growth, and resulted in a higher grain yield compared with the flooded treatment.
- (2) The difference in daily mean soil temperature at one cm under the soil surface between draining and flooding treatments was negligible. These results indicate that draining management is effective for obtaining dense

and stable stands of seedlings even in Hokkaido.

3) Seeding depth and sowing machine

- (1) Recommended seeding depth for better emergence and establishment was 10 to 15 mm in calcium peroxide (CAL)-coated seeds and 5 mm in seeds without CAL.
- (2) Two types of sowing machines for broadcasting and stripe sowing with a side row fertilizer were used. Both machines were considered to be usable for practical seeding, although further improvement is needed for determining the proper seeding depth and operation efficiency.

4) The optimal date of submerging seeds

- (1) Two methods were used to estimate the optimal date to submerge the seeds after draining just after seeding using CAL-coated seeds.
- (2) The first was the accumulated effective temperature (AET) method, in which the accumulated degree was obtained by subtracting basal degree (1 to 10°C) from the daily maximum-minimum average air temperature during the period from the day after seeding to the day the seeds were submerged. The coefficient variation of AET was the smallest when the basal degree was 6°C. The AET at the optimal date was 85.9°C.
- (3) The second was a developmental index (DVI) method, which was given by integrating the developmental rate (DVR), which was defined by an equation, $DVR=1/(1+\exp(-A(T-T_h)))/G$, as a function of daily mean air temperature T . The optimal values of the parameters, $A=0.1908$, $T_h=16.06$, and $G=4.118$, were estimated by the Simplex method.
- (4) Root mean square error of the difference between the measured and estimated dates was 1.4 days in AET method, and 1.2 days in DVI method.

(5) Using these two methods, the establishment percentage without CAL was tested. It was 52.2%, significantly lower than that with CAL (70.9%) in standard draining. However, it increased to 60.9% when the draining period was prolonged about three days. The optimal date of submergence without CAL was estimated to be 105°C by the AET method and 1.3 by the DVI method.