暖地の農家水田におけるべんモリ被覆種子での代かき同時打ち込み点播による 水稻湛水直播の苗立ちと収量および収穫物のモリブデン含有率

原嘉隆¹⁾・秀島好知²⁾

(¹⁾ 農研機構九州沖縄農業研究センター, ²⁾ 佐賀県農業試験研究センター)

要旨: 水稻湛水直播では苗立ちの確保が重要で、このために過酸化カルシウム粉粒剤 (以下、過酸化 Ca 剤) による種子被覆が実施されてきた。過酸化 Ca 剤による被覆は資材費や手間がかかる。これらの負担を軽減するために、新たな種子被覆法としてべんモリ被覆を考案した。この方法は、三酸化モリブデンと酸化鉄とポリビニルアルコールの混合粉末で種子を被覆する。そこで、2013–2015 年に、これまで過酸化 Ca 剤被覆種子で代かき同時打ち込み点播を実施してきた佐賀県上峰地域の農家水田において、過酸化 Ca 剤被覆種子とべんモリ被覆種子を直播する区を設けた。その結果、苗立ち、生育、収量において、種子被覆の違いによる有意差はなかった。また、収穫期の水稻地上部と玄米、および栽培後の土壌のモリブデン含有率に、種子被覆の違いによる有意差はなかった。さらに、試験水田の周辺の農家水田でべんモリ直播の普及がみられたので、それらの水田の苗立ちと収量を調査したところ、十分な苗立ちが得られ、栽培においてべんモリ直播による不都合はみられなかった。以上から、暖地における代かき同時打ち込み点播では、過酸化 Ca 剤被覆の代わりにべんモリ被覆での代替が可能であり、これによって資材費が安く、被覆作業も容易になると期待された。

キーワード: 酸化鉄、収量、種子被覆、水田、水稻、湛水直播、苗立ち、モリブデン。

国内の水稻作は海外に比べて生産費が高く、高齢化などによる担い手の減少が深刻である。苗を作らない直播は、低コストで省力的な技術として期待される。直播の普及面積は増加傾向にあるが、まだ水稻作付面積の 2% にも満たない。

直播面積の大半を占めるのは湛水直播であり、問題として苗立ち不良が起きやすいことが挙げられる。この原因は、湛水した土壌中に播種されたとき酸素が不足するためと考えられる。そこで、酸素を供給する過酸化カルシウム粉粒剤 (以下、過酸化 Ca 剤) で種子を被覆する技術がこれまで用いられてきた。

代かき同時打ち込み点播機 (以下、打ち込み点播機) は、過酸化 Ca 剤被覆種子を播種するために開発された (田坂ら 2003, 農林水産省 2007)。本機は、代かきとともに、回転する鋸歯形のディスクによって種子を土壌に打ち込むことで、代かき直後の柔らかい土壌に深さ 1 cm 程で播種できる。この方法は倒伏しやすい品種にも適用可能であり、北陸地方などを中心に普及している。

また、近年、鉄粉を被覆した鉄コーティング種子を土壌表面に播種して苗立ちを確保する湛水直播技術が開発された (山内 2012)。鉄コーティング種子は、スズメなどの小型野鳥による食害を軽減でき、重いことから水に流されにくい。また、播種数日前に被覆しなければならない過酸化 Ca 剤と異なり、鉄コーティングは 3 ヶ月前からでも実施できる。一方で、被覆後に発熱するため、種子の管理に手間がかかること、被覆種子が埋没すると苗立ち不良となりやすいこと、また土壌表面に播種するため土中播種に比べ

て倒伏しやすいという問題がある。

そこで、種子被覆法を改良する目的で無被覆種子の苗立ち不良要因を調べたところ、硫酸イオンの添加によって苗立ちが不良となったとともに、種子近傍が著しい還元状態になっていた (Hara 2013a)。また、硫化物イオンの生成を抑制するモリブデン酸イオンを土壌に添加すると苗立ち不良が改善されたことから、硫化物イオンの生成が苗立ちを阻害する一因であると推察された (Hara 2013b)。さらに、種子 1 kg あたりモリブデンとして 20–50 mmol 程度の微溶性のモリブデン化合物を種子に被覆することでも苗立ち不良を改善できた (Hara 2013c)。この方法で実際の水田における湛水直播の苗立ちも向上した (秀島ら 2014)。

これらを踏まえ、モリブデン化合物を利用した種子被覆技術を構築した。まず、安価なモリブデン化合物である三酸化モリブデンを、種子 1 kg あたり 5 g (Mo として 33 mmol kg⁻¹) を用いた。この量では重さがほとんど変わらないため、被覆種子が水に流される懸念がある。加重のために還元鉄を用いる鉄コーティングでは、発熱するために被覆後の種子を薄く広げる必要がある。そこで、発熱しない酸化鉄を用いて加重した (原 2012)。また、被覆層を固めるため、過酸化 Ca 剤と鉄コーティングの資材には石膏が混合されているが、石膏 (硫酸カルシウム) に含まれる硫酸イオンは、土壌中で有害な硫化物イオンとなる。そこで、代わりに、増粘材のポリビニルアルコール (以下、PVA) を用いて、被覆資材を種子に付着させることとし、その量は酸化鉄の 1% 重とした。以上から、三酸化モリブデンと

2016 年 11 月 2 日受理。連絡責任者: 原嘉隆 〒833-0041 福岡県筑後市和泉 496

TEL 0942-52-0681, FAX 0942-53-7776, yshara@affrc.go.jp

本研究の一部 (2014–2015 年) 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による「攻めの農林水産業の実現に向けた革新的技術緊急展開事業 (うち産学の英知を結集した革新的な技術体系の確立)」で実施した。

酸化鉄（別名、べんがら）と PVA を混合した粉末で種子を被覆することとし、この方法を「べんモリ被覆」と呼んだ。資材費削減と省力化のため、土中播種を前提として資材を少なくすることに努めた。資材で全体を覆った種子は速く沈んで流されにくいことが観察されたことから、酸化鉄の量は種子全体を覆うのに必要な分として種子の 0.1 倍重とした（原 2013, 原 2014）。

本報では、農家の水田において、慣行法である過酸化 Ca 剤種子を対照として、べんモリ被覆種子の土中播種（べんモリ直播）を 3 年間に計 6 筆の水田で行い、苗立ちと生育と収量を比較した。また、モリブデンは植物の微量必須元素であるが、水稻の種子に被覆した事例がないことから、収穫物や土壌への移行を評価するため、収穫物と栽培後の土壌におけるモリブデン含有率を調査した。さらに、この試験の実施と並行して、試験水田の周辺の農家水田でべんモリ直播の普及がみられたため、これらの水田においても苗立ちと収量を調べた。

材料と方法

1. 種子被覆の比較試験

2013～2015 年に、佐賀県平坦部の上峰町の農家水田 6 筆（A～F、細粒灰色低地土）で試験を実施した。この地域では、過酸化 Ca 剤被覆種子による打ち込み点播が 10 年以上実施されてきた。2013 年は水田 A（20 a）と水田 B（19 a）、2014 年は水田 C（49 a）と水田 D（25 a）、2015 年は水田 E（38 a）と水田 F（49 a）で実施した。水田 A、B の前作は大麦で、前夏作は水稻であった。水田 C、D、F の前作は大麦で、前夏作は大豆であった。水田 E の前作は小麦で、前夏作は水稻であった。麦稈はいずれも麦収穫直後に鋤込んだ。肥料は播種の 5～10 日前に施用した。2013 年は中生品種用の全量基肥肥料（LP コート入り複合 022-BD90 号、N：P₂O₅：K₂O = 20：12：12）を窒素で 8 g m⁻² 施用した。2014 年は晩生品種のヒヨクモチ用の全量基肥肥料（LM コート入り BB270 号 α、N：P₂O₅：K₂O = 22：7：10）を窒素で 12.5 g m⁻² 施用した。2015 年は前年と同等品（LM コート入り BB270 号 β）を窒素で水田 E に 11.3 g m⁻²、水田 F に 8.9 g m⁻² 施用した。これは、前年夏作が大豆の水田では水稻の水田に比べて土壌からの窒素供給が増えることを考慮し、水田 F の窒素施肥量を水田 E の 8 割としたためである。いずれの水田も施肥後に入水し、播種の数日前から前日に荒代を掻いた。

供試品種は、2013 年が中生の「にこまる」、2014、2015 年が晩生の「たちはるか」であった。種子は、比重選（2013、2014 年は塩水選、2015 年は水選）し、消毒と併せて、途中水を替え、日陰で 3 日間浸種した。このとき、一部の種子は発芽した。次に、種子被覆を、2013 年が 6 月 2 日、2014、2015 年が 6 月 3 日に行った。過酸化 Ca 剤による被覆は、風乾種子と同じ重さ（1 倍重）の過酸化 Ca 剤（保土ヶ谷化学 UPL 製 カルパー粉粒剤 16）を専用のコーティング

第 1 表 種子被覆が苗立ちに及ぼす影響。

年	水田	種子被覆	播種量 (g m ⁻²)	苗立ち本数 (m ⁻²)	苗立ち率 (%)
2013	A	過酸化 Ca	3.2	81	69
		べんモリ	4.2	106	67
	B	過酸化 Ca	3.2	69	59
		べんモリ	4.2	91	58
2014	C	過酸化 Ca	2.2	49	56
		べんモリ	2.0	54	68
	D	過酸化 Ca	2.2	51	57
		べんモリ	2.0	50	64
2015	E	過酸化 Ca	0.8	16	58
		べんモリ	1.1	20	53
	F	過酸化 Ca	0.8	23	80
		べんモリ	1.1	30	78
	平均	過酸化 Ca	2.1	48	63
		べんモリ	2.4	59	65 ^{ns}

ns は 5% の水準で有意差がないことを示す。

機で被覆した。べんモリ資材による被覆は、風乾種子 1 kg あたり、酸化鉄 100 g、三酸化モリブデン 5 g、ポリビニルアルコール 1 g の混合資材を、2013、2014 年は上記と同じコーティング機、2015 年はコンクリートミキサーを用いて被覆した。そして、いずれもシートの上に薄く広げて、種子の表面を乾燥させた（2013 年は日向で 1～2 時間、2014、2015 年は日陰で 4～5 時間）。その後、種子は通気性のある袋に集め、直射日光が当たらない状態で保管した。

直播は、2013、2014 年が 6 月 8 日、2015 年が 6 月 4 日に、7 条の打ち込み点播機（条間は 30 cm、1 行程の幅は 210 cm）を用いて、過酸化 Ca 剤被覆種子によるこの地域の慣行に従った。各水田に、過酸化 Ca 剤被覆種子を播種した区（過酸化 Ca 区）とべんモリ被覆種子を播種した区（べんモリ区）を設けた。2013 年は、べんモリ区を 4 行程分設け、残りを過酸化 Ca 区とした。2014、2015 年は、過酸化 Ca 区を一部（水田 C は 8 行程分、水田 D、F は 4 行程分、水田 E は 6 行程分）設け、残りをべんモリ区とした。播種量は、2013 年が約 3～4 g m⁻²、2014 年が約 2 g m⁻²、2015 年が約 1 g m⁻² と年を追って減らした（第 1 表）。直播と同時にビラゾレート系除草剤を散布し、直播の翌日までに入水した。直播後 5 日頃には水が無くなり、出芽が始まった。12 日頃に再び入水し、15 日頃に 2 度目の除草剤を散布した。その後、7 月下旬頃に中干しを実施し、10 月に収穫した。これらの作業は各水田を管理する農家が実施した。

2. 比較試験の調査と分析

播種機の種子吐出口に袋を付けて約 30 株分の種子を回収し、その種子数から 1 株分の種子数を求めた。次に、出芽後の水田で調べた株間から、面積あたりの播種粒数を求めた。さらに、種子 1 粒あたりの重量を調べ、播種量を求めた。

第2表 種子被覆が初期生育に及ぼす影響.

年	水田	種子被覆	草丈 (cm)	葉齡	分けつ数 (個体 ⁻¹)	白化茎長 (mm)
2014	C	過酸化 Ca	22.9	5.6	2.0	4.4
		べんモリ	22.9	5.5	0.9	1.5
	D	過酸化 Ca	24.1	5.5	2.0	4.4
		べんモリ	22.0	5.4	1.3	4.5
2015	E	過酸化 Ca	25.5	6.2	2.0	3.9
		べんモリ	25.2	6.1	1.9	1.1
	F	過酸化 Ca	27.5	6.4	2.2	1.3
		べんモリ	27.4	6.5	2.2	0.3
	平均	過酸化 Ca	25.0	5.9	2.0	3.5 *
		べんモリ	24.4 ^{ns}	5.9 ^{ns}	1.5 ^{ns}	1.8

* は5%の水準で有意差があり, ns はないことを示す.

2013 年は6月18日(播種後10日目)に, 2014 年は6月28日(播種後20日目)に, 2015 年は6月29日(播種後21日目)に, 生存個体数を数え, 苗立ち本数とした. 2013 年は各区内の4カ所(各6 m²), 2014 年は各区内の40カ所(各1.4 m²), 2015 年は各区内の40カ所(各1.8 m²)を調査した. 苗立ち率は, 苗立ち本数を推定播種粒数で除して求めた. さらに, 2014, 2015 年は, 上記と同じ日に各区あたり4カ所でそれぞれ草丈が中庸な20個体を採取し, 草丈, 葉齡, 分けつ数, 白化茎長を調査した.

2014, 2015 年は, 各区内の苗立ち本数が中庸な4カ所で, 分けつ盛期, 最高分けつ期, 幼穂形成期(それぞれ, 2014 年は7月16日, 7月31日, 8月18日, 2015 年は7月16日, 7月30日, 8月13日)に, 草丈, 茎数, 葉色を調査した. 1カ所につき, 草丈は10株, 茎数は1条で1.2 m 分, 葉色は葉緑素計(Konica Minolta 製 SPAD-502 Plus)で展開葉の直下の葉1枚を10株分調査した.

収穫期調査として, 2013 年は10月2日に, 各区の苗立ち本数が中庸な4カ所において, 生育が中庸な5株の稈長, 穂長, 穂数を調べた. 2014 年は10月20日に, 2015 年は10月7日に, 生育途中の調査と同じ場所で, 1カ所に付き10株の稈長と穂長を調査した. 2014, 2015 年の穂数は, 生育途中の調査と同じ場所で, 茎数と同様に求めるとともに, その場所の一部(0.36 m² × 4カ所)の個体から籾数と登熟歩合(籾数に対する粒厚1.8 mm 以上の精玄米の割合)を求めた.

2013 年は10月2日に, 各区内の4カ所(1.8 m²)で地上部を刈り, 地上部重, 全玄米重, 精玄米重(粒厚1.8 mm 以上)を調査した. 2014 年は10月20日に, 2015 年は10月26日に, 各区内の3カ所(4.5 m²)で地上部を刈り, 同様の調査とともに, 精玄米の千粒重, タンパク質含有率(FOSS 製 Infratec1241 による近赤外分析), 品質検査等級(民間農産物検査員による10段階評価)を調査した. なお, 刈り取り時に, 倒伏程度を無(0)から甚(5)までの6段階で判定した.

また, 2013 年は10月2日に, 2014 年は10月24日に,

2015 年は10月23日に, 各区あたり1カ所について, 一掴み分の地上部と, 1.2~1.8 m² から採取した1.8 mm 篩による精玄米のモリブデン含有率(硝酸分解液の ICP 質量分析)を日本食品分析センターに依頼して分析した. さらに, 2015 年は, 各区の5カ所から採取して混合した土壌のモリブデン含有率(硝酸-過塩素酸分解液の ICP 発光分光分析)と可給態モリブデン含有率(シュウ酸アンモニウム抽出液(土壌環境分析法編集委員会 1997)の ICP 発光分光分析)を日本土壌協会(片倉コープアグリ株式会社で実施)に依頼して分析した.

種子被覆による差の有意性は, 水田毎に区の平均を対にした t 検定で判断した.

3. 試験田周辺での農家によるべんモリ直播

試験田の周辺において, 2014 年は18筆(計6.3 ha), 2015 年は22筆(計7.4 ha)で, 農家によるべんモリ直播が実施された. 品種は「たちはるか」, 「ふくいずみ」, 「にこまる」, 「ヒヨクモチ」, 「さがびより」, 「夢しずく」が用いられた. 被覆を含めた種子の調整, 直播, 水管理を含めた栽培は試験田と同様であった. このうち, 2014 年は近隣の14筆(計5.0 ha), 2015 年は近隣の17筆(計5.0 ha)について, 試験田と同様に苗立ち, 収量, 品質を調査した.

結 果

1. 種子被覆の比較試験

苗立ち本数は, 2013 年が69~106 本 m⁻², 2014 年が49~54 本 m⁻², 2015 年が16~30 本 m⁻² と, 播種量を反映して年々少なくなった(第1表). 苗立ち率は, 水田による差がみられたものの, 過酸化 Ca 区の平均は63%, べんモリ区の平均は65%で, 種子被覆による有意差はなかった. なお, 2015 年の水田 E では, スクミリングガイの食害によると思われる局所的な苗立ち不良が起きたので, 調査ではこの局所的な苗立ち不良の部分を避けた.

2014, 2015 年の苗立ち調査時において, 草丈と葉齡は, 種子被覆による有意差がなかった(第2表). 分けつ数は

第3表 種子被覆が生育の推移に及ぼす影響.

年	水田	種子被覆	分げつ盛期			最高分げつ期			幼穂形成期		
			草丈 (cm)	茎数 (m ⁻²)	葉色 ^a	草丈 (cm)	茎数 (m ⁻²)	葉色 ^a	草丈 (cm)	茎数 (m ⁻²)	葉色 ^a
2014	C	過酸化 Ca	45	402	38	77	628	41	98	569	41
		べんモリ	45	371	39	75	630	41	93	504	41
	D	過酸化 Ca	45	411	41	80	588	42	99	475	42
		べんモリ	43	349	40	75	652	41	97	510	41
2015	E	過酸化 Ca	40	215	42	63	391	44	69	386	36
		べんモリ	40	247	42	60	392	37	67	340	34
	F	過酸化 Ca	43	309	42	77	449	43	93	405	41
		べんモリ	42	378	43	76	518	41	91	414	40
	平均	過酸化 Ca	43 ^{ns}	334 ^{ns}	41 ^{ns}	74 [*]	514 ^{ns}	43 ^{ns}	89 ^{ns}	459 ^{ns}	40 ^{ns}
		べんモリ	43 ^{ns}	336 ^{ns}	41 ^{ns}	72 [*]	548 ^{ns}	40 ^{ns}	87 ^{ns}	442 ^{ns}	39 ^{ns}

a: 葉色計の値. * は5%の水準で有意差があり, ns はないことを示す.

第4表 種子被覆が収穫期の生育に及ぼす影響.

年	水田	種子被覆	稈長 (cm)	穂長 (cm)	穂数 (m ⁻²)	倒伏程度 ^a
2013	A	過酸化 Ca	94	19.2	446	0.0
		べんモリ	95	19.2	407	0.0
	B	過酸化 Ca	92	19.5	359	0.0
		べんモリ	90	19.0	385	0.0
2014	C	過酸化 Ca	97	21.5	463	5.0
		べんモリ	95	20.7	374	5.0
	D	過酸化 Ca	97	20.5	422	5.0
		べんモリ	95	21.5	408	5.0
2015	E	過酸化 Ca	84	20.4	299	0.0
		べんモリ	83	20.3	239	0.0
	F	過酸化 Ca	98	20.0	325	0.0
		べんモリ	95	19.3	329	0.0
	平均	過酸化 Ca	94 ^{ns}	20.2 ^{ns}	386 ^{ns}	1.7 ^{ns}
		べんモリ	92 ^{ns}	20.0 ^{ns}	357 ^{ns}	1.7 ^{ns}

a: 0 (無) ~ 5 (甚). ns は5%の水準で有意差がないことを示す.

2014年にべんモリ区が過酸化Ca区に比べて少なかったが、2年間の結果を合わせると区間差は有意でなかった。白化茎長はべんモリ区で有意に短かったが、いずれの区も5mm以下であった。

生育の推移を調べたところ、草丈、茎数、葉色において、べんモリ区と過酸化Ca区に有意差はほとんどみられず、唯一有意となった最高分げつ期の草丈の差もわずか2cmであった(第3表)。

出穂期は、いずれの水田でも過酸化Ca区とべんモリ区で差はみられず、2013年は8月30日、2014、2015年は9月8~9日であった。

収穫期の稈長、穂長、穂数においても、種子被覆による差異はみられなかった(第4表)。なお、2013年はウンカによる局所的な枯れ症状が発生し、2014年は台風が通過し

た10月14日に顕著な倒伏が起きた。これらについても、種子被覆による差異はみられなかった。

収量調査において、べんモリ区の地上部重、全玄米重、精玄米重は、水田A、C、Dで過酸化Ca区よりも高く、水田Eで低かった(第5表)。全水田の平均は、べんモリ区が過酸化Ca区よりもやや高かったが、有意差はなかった。

2014、2015年の籾数、登熟歩合、千粒重、玄米タンパク質含有率、玄米品質検査等級にも、べんモリ区と過酸化Ca区の間には有意差はなかった(第5表)。

水稻地上部のモリブデン含有率は0.50~1.00mg kg⁻¹の範囲で、水田による差はあったものの、種子被覆による有意差はなかった(第6表)。玄米のモリブデン含有率は0.35~0.49mg kg⁻¹の範囲で、種子被覆による有意差はなかった。土壌のモリブデン含有率は、2015年の2筆しか調

第5表 種子被覆が収量構成要素と玄米品質に及ぼす影響.

年	水田	種子被覆	地上部重 ^a (g m ⁻²)	全玄米重 ^b (g m ⁻²)	精玄米重 ^b (g m ⁻²)	籾数 (10 ³ m ⁻²)	登熟歩合 (%)	玄米千粒重 ^b (g)	玄米タンパク質含有率 ^b (10 ⁻² g g ⁻¹)	玄米品質 検査等級 ^c
2013	A	過酸化 Ca	1309	479	368					
		べんモリ	1489	585	487					
	B	過酸化 Ca	1407	553	427					
		べんモリ	1396	548	417					
2014	C	過酸化 Ca	1528	622	528	41.9	54.2	23.7	7.2	10.0
		べんモリ	1691	688	604	32.3	63.0	23.9	6.9	10.0
	D	過酸化 Ca	1427	577	459	36.3	56.9	23.2	7.3	10.0
		べんモリ	1741	701	539	39.1	52.4	22.9	7.5	10.0
2015	E	過酸化 Ca	1330	533	518	26.9	90.3	24.9	6.6	6.0
		べんモリ	1236	507	494	20.6	92.6	25.0	6.4	6.0
	F	過酸化 Ca	2064	819	749	29.4	82.9	22.9	6.6	6.3
		べんモリ	2062	818	745	28.2	84.8	23.0	6.4	6.0
平均		過酸化 Ca	1511	597	508	33.6	71.0	23.7	6.9	8.1
		べんモリ	1602 ^{ns}	641 ^{ns}	548 ^{ns}	30.1 ^{ns}	73.2 ^{ns}	23.7 ^{ns}	6.8 ^{ns}	8.0 ^{ns}

空欄は未調査. a: 乾物の値. b: 水分率を 0.15 g g⁻¹ とした値. c: 1 (1 等上) ~ 10 (規格外). ns は 5% の水準で有意差がないことを示す.

第6表 収穫した水稻と収穫後の土壌のモリブデン含有率.

年	水田	種子被覆	水稻モリブデン含有率 (mg kg ⁻¹)		土壌モリブデン含有率 (mg kg ⁻¹)	
			地上部 ^a	玄米 ^b	全 ^a	可給態 ^a
2013	A	過酸化 Ca	0.50	0.44		
		べんモリ	0.76	0.46		
	B	過酸化 Ca	0.86	0.48		
		べんモリ	0.53	0.47		
2014	C	過酸化 Ca	0.63	0.37		
		べんモリ	0.63	0.39		
	D	過酸化 Ca	0.63	0.35		
		べんモリ	0.93	0.49		
2015	E	過酸化 Ca	0.73	0.44	0.16	0.13
		べんモリ	0.82	0.43	0.17	0.14
	F	過酸化 Ca	1.00	0.37	0.29	0.10
		べんモリ	0.98	0.40	0.29	0.12
平均		過酸化 Ca	0.73	0.41	0.22	0.12
		べんモリ	0.78 ^{ns}	0.44 ^{ns}	0.23 ^{ns}	0.13 ^{ns}

空欄は未調査. a: 乾物の値. b: 水分率を 0.15 g g⁻¹ とした値. ns は 5% の水準で有意差がないことを示す.

査していないが, 全モリブデンと可給態モリブデンのいずれも種子処理による有意差はなかった.

2. 試験田周辺での農家によるべんモリ直播

2014 年に試験田以外でべんモリ直播を実施された水田の苗立ち率は 54~82% で, 苗立ち本数は 43~64 本 m⁻² であった (第 7 表には品種毎の平均を記載, 以下同じ). 2015 年に実施された水田の苗立ち率は 39~85% で, 苗立ち本数は 18~36 本 m⁻² であった.

2014 年は, 台風の通過によって「ふくいずみ」, 「にこま

る」, 「夢しずく」を栽培した水田で著しい倒伏がみられた. 2015 年は, 「にこまる」を栽培した水田で著しい倒伏がみられた. 2014 年の玄米収量は, 早生の「夢しずく」が 247 g m⁻² と少なかったが, それ以外は 389~594 g m⁻² であった. 2015 年の玄米収量は, 早生の「夢しずく」が 356 g m⁻² と少なく, それ以外は 411~686 g m⁻² であった.

考 察

1. 種子被覆が苗立ちに及ぼす影響

2013~2015 年に各年 2 筆の水田において, 過酸化 Ca 被

第7表 ベンモリ直播水田の苗立ちと収量.

年	品種	筆数	苗立ち率 (%)	苗立ち本数 (m ⁻²)	出穂期	倒伏程度 ^a	玄米収量 ^b (g m ⁻²)	玄米品質 検査等級 ^c
2014	たちはるか	1	69	55	9/ 7	0.0	547	9
	ふくいずみ	2	56	44	8/31	5.0	400 ^d	
	にこまる	5	73	58	9/ 5	5.0	471	10
	ヒヨクモチ	2	64	51	9/11	0.0	567	8
	さがびより	3	63	50	9/ 6	1.0	544	7
	夢しずく	1	82	64	8/23	5.0	247	10
2015	ふくいずみ	3	68	32	8/29	2.0	612	5
	にこまる	1	76	35	9/ 6	4.5	626	10
	ヒヨクモチ	7	56	27	9/12	0.0	520	10
	さがびより	5	58	27	9/ 4	0.1	570	5
	夢しずく	1	68	28	8/20	0.0	356	10

値は対象となる水田の平均. 空欄は未調査. a: 0 (無) ~ 5 (甚). b: 水分率を 0.15 g g⁻¹ とした値. c: 1 (1 等上) ~ 10 (規格外). d: 全刈り収量の概数値.

覆種子とベンモリ被覆種子を用いて直播したところ、苗立ち率において被覆方法による有意差はなかった (第1表). また、初期における草丈や葉齢にも有意差はなかった (第2表). 分げつ数は、2014 年においてベンモリ区が過酸化 Ca 区よりも少ない傾向が得られたが、2 年間でまとめると有意差とならなかった. なお、これらの値が 2014 年に比べて 2015 年で大きいのは、2014 年は播種後 20 日目に調査したのに対し、2015 年は播種後 25 日目に調査したためと推察される. 以上から、ベンモリ被覆種子の苗立ち率や初期の生育は過酸化 Ca 被覆種子と変わらないと判断された.

しかし、2014 年にベンモリ区に分げつ数が過酸化 Ca 区よりも少ない傾向があったことから、ベンモリ被覆種子の初期生育が過酸化 Ca 被覆種子よりも遅れる可能性は否定できない. 過酸化 Ca 被覆では、酸素が供給されて生育を促進する. 一方、ベンモリ被覆では、モリブデン酸イオンが土壤中に溶出し、苗立ちを阻害する硫化物イオンの生成を抑制するものの、水稻への直接的な生育促進効果は期待できない. それにもかかわらず、生育に大きな差は生じなかったのは、一因として、試験が九州において麦後の 6 月に実施され、直播の時期が暖かく、生育が旺盛であったからかもしれない. 東北地方などでは、直播の時期は寒く、生育も遅いことから、被覆の違いが初期生育に大きな影響を与える可能性もある. したがって、寒い地域では改めて検討する必要がある.

ベンモリ区の白化茎長が過酸化 Ca 区に比べて有意に短かったことから (第2表)、ベンモリ被覆種子は過酸化 Ca 被覆種子に比べて浅く播種される傾向があると判断された. 過酸化 Ca 被覆では種子と同じ重量の資材を被覆するのに対し、ベンモリ被覆では種子の 0.1 倍重の資材しか被覆しない. このことが播種深度に違いをもたらしたと推測された. 本試験ではこの地域の慣行に従って浅く播種したが、播種深度が浅かったことも、過酸化 Ca 被覆とベン

モリ被覆の苗立ちに差異がほとんどなかった要因かもしれない. 過酸化 Ca 被覆種子に適した播種の深さは約 10 mm といわれる (水稻直播研究会 2012). したがって、本試験よりも播種深度が深い場合、播種法による差がみられる可能性もある. ただし、3 年間の試験ではほぼ良好な苗立ちが得られており、試験田周辺の農家水田で実施されたベンモリ直播でも十分な苗立ちが得られたことから、実際の栽培においても浅い播種深度で直播することが重要であると考えられる. 比較的浅い深さに安定的に播種できる方法として、打ち込み点播は優れていることから、この方法でベンモリ直播を実施すれば、安定的な苗立ちが得られると考えられた.

周辺の農家水田を含めて、鳥による食害は観察されなかった. 一方、スクミリンゴガイによる食害は、2013, 2014 年には問題とならなかったが、2015 年には直播後に雨が続いたため、水田 E と他一筆 (播き直しのため非調査) で発生した. 被害を受けた水田は前年の夏作が水稻であり、前年の夏作が大豆であった水田では被害を受けなかった. 前年の夏作が大豆の水田ではスクミリンゴガイが減少することが報告されている (市瀬ら 2005). これらの食害を種子被覆で回避することは難しいため、直播は、鳥による食害がみられない水田、かつスクミリンゴガイが生息する地域では前夏作が大豆作であった水田で行うことが重要である.

2. 種子被覆が生育と収量に及ぼす影響

2014, 2015 年に各年 2 筆の水田において、分げつ盛期、最高分げつ期、幼穂形成期の草丈、茎数、葉色を調べたところ、ベンモリ区と過酸化 Ca 区に有意差がみられたのは最高分げつ期の草丈だけで、その平均の差も 2 cm 程度と小さかった (第3表). また、収穫期の生育にも種子被覆による有意差はなかった (第4表). さらに、3 年間の地上部重、全玄米重、精玄米重について、平均はベンモ

り区が過酸化 Ca 区よりも大きくなったが、有意差はなかった（第 5 表）。2 年間の籾数、登熟歩合、玄米の千粒重、タンパク質含有率、品質検査等級にも有意差はなかった。なお、これらの籾数、登熟歩合、玄米の千粒重といった収量構成要素からも玄米収量が推定できるが、直接調査した玄米収量と一致しない場合がみられた。これは、籾数と登熟歩合の調査に用いた試料（ $0.36 \text{ m}^2 \times 4$ カ所／区）が玄米収量の調査に用いた試料（ $4.5 \text{ m}^2 \times 3$ カ所／区）よりも少ないためであり、移植と比べて株の大きさがばらつく直播では一致しにくいと推察された。以上から、べんモリ被覆と過酸化 Ca 被覆の生育や収量には差がないと判断された。

3. べんモリ直播水田における生育

2013 年の播種量は慣行に準じ、十分な苗立ちが得られたが、ウンカによる坪枯れが生じたことと、2014 年に台風による倒伏が起きたことから、過繁茂を避けるために年を追うごとに播種量を減らした。2013～2014 年の穂数は 400 本 m^{-2} 程度であったが、播種量が少なかった 2015 年は $240 \sim 330 \text{ 本 m}^{-2}$ 程度であった（第 4 表）。収量は水田 F で最も多く 820 g m^{-2} 程度となった（第 5 表）。このときの穂数は 330 本 m^{-2} 程度で、苗立ち本数は $23 \sim 30 \text{ 本 m}^{-2}$ であった（第 1 表）。また、同様に播種量が少なかった 2015 年の周辺の農家水田においても苗立ち本数は $18 \sim 36$ 本と少なかったが、早生の「夢しずく」を除き、各品種の平均収量は 520 g m^{-2} 以上であった（第 7 表）。一般に、直播での目標苗立ち本数は $70 \sim 100 \text{ 本 m}^{-2}$ とされる（水稻直播研究会 2012）が、本試験のように、分けつが旺盛な暖地において面的に種子が広がり早く葉が茂る打ち込み点播で均一に播種できた条件では、この程度の苗立ち本数でも十分な収量が確保できる可能性を示している。

水田 E の草丈と稈長は、水田 F や他の水田の値よりも短くなった。これは、水田 E ではスクミリンゴガイの被害を受けたため、さらに被害を受けないように落水期間が長くとられた。このことが、分けつを抑制したり、施肥された窒素の硝化や脱窒を促進し、窒素吸収が制限されたためと推測された。

2013 年はウンカによる局所的な枯れが両方の種子被覆区でみられ、近隣の移植田でも多発したことから、種子被覆との関係はないと考えられた。2014 年は台風の通過時に著しい倒伏が起きた。これは下位節間が折れる「挫折型」であった。直播では種子が土壌表面近傍にあり、種子近傍を基点として転ぶ「転び型」倒伏の危険性が増すとされる。しかし、本試験では「転び型」ではなく、近隣の移植でも倒伏が起きていた。この年は 8 月を中心に天候不良であったことから水稻の下位節間が弱くなり、「挫折型」の倒伏につながったと推察された。2014 年に試験田とは別に「たちはるか」を栽培した農家水田で倒伏はなかった（第 7 表）。この水田は、前年の夏作が水稻で、窒素施肥量が 10.3 g m^{-2} であった。前年夏作が大豆の場合は水稻の場合に比べ

て土壌からの窒素供給が多いため、一般的に窒素肥料を減らす。試験田は、前年の夏作が大豆で、窒素施肥量も 12.5 g m^{-2} と多かったため、倒伏が助長されたと考えられた。2015 年は、播種後に雨が多かったものの、それ以降は顕著な病虫害の発生も倒伏もなかった。水田 F において、稈長が 2014 年と同程度にもかかわらず（第 4 表）、倒伏しなかったことは、天候も良く台風も来襲しなかったことに加えて、播種量が少なかったので穂数も 330 本 m^{-2} 程度と少なく、下位節間が折れにくい状態となったためとも推察された。

4. 収穫物と栽培後土壌のモリブデン含有率

べんモリ被覆で用いるモリブデンは動物と植物のいずれにとっても必須元素である。モリブデン欠乏の対策ではモリブデン化合物を葉面や土壌に施用する。高橋ら（1980）によれば、土壌への施用量はモリブデン酸のナトリウム塩やアンモニウム塩で $30 \sim 50 \text{ mg m}^{-2}$ とあり、モリブデンとして $0.15 \sim 0.28 \text{ mmol m}^{-2}$ となる。べんモリ直播で用いるモリブデンは、播種量を 3 g m^{-2} とすれば 0.10 mmol m^{-2} となり、土壌への施用量と比べて多くはない。

多量に施用されると作物のモリブデン含有率が高まり、黄化症状などの過剰症も生じるが、モリブデン汚染水田を調べた野田ら（1994）の報告によれば、水稻の場合、玄米収量に低下がみられるのは、茎葉中のモリブデン含有率が 100 mg kg^{-1} を超える程度からである。しかし、作物に過剰症が生じない程度のモリブデン含有率でも牛に飼料として与えると衰弱する過剰症が知られている（青木・山本 1958）。水稻は藁や地上部全体を牛の飼料とする場合があるので、作物の過剰症よりも牛の過剰症の危険性を考慮しておく必要がある。飼料のモリブデン含有率の上限は、肉用牛について 6 mg kg^{-1} （中央畜産会 2008）、乳用牛について 10 mg kg^{-1} （中央畜産会 2006）という値が示されている。

本試験において水稻地上部のモリブデン含有率を調べた結果、個々の試料でばらつきがあったものの、種子被覆の違いによる有意差はなかった（第 6 表）。このことは、べんモリ直播によって水稻地上部のモリブデン含有率が有意に上昇しないことを示している。また、含有率はいずれも 1 mg kg^{-1} 以下であった。一般的な水稻のモリブデン含有率は 2 mg kg^{-1} 以下とされ（野田ら 1994）、本試験での含有率もこの範囲にある。乳用牛よりも低い肉用牛の上限である 6 mg kg^{-1} の 6 分の 1 以下であり、飼料の基準からも十分に低い。このことから、べんモリ直播によって牛のモリブデン過剰症が生じる可能性は低いと考えられた。

モリブデンは人の必須元素でもある。人におけるモリブデンの過剰症を明確に示された報告はみあたらないが、過剰に摂取する必要もないことから、モリブデンの摂取推奨量は $20 \sim 30 \text{ } \mu\text{g d}^{-1}$ 、耐容上限量は $450 \sim 500 \text{ } \mu\text{g d}^{-1}$ とされている（厚生労働省 2015）。日本食品標準成分表（文部科学省 2015）には、玄米のモリブデン含有率は 0.64 mg kg^{-1} 、

モリブデン含有率が高い食品として大豆(ブラジル産)で 6.6 mg kg^{-1} と記載され、この程度のモリブデン含有率が問題とはされていない。べんモリ直播で得られた玄米のモリブデン含有率は最大 0.49 mg kg^{-1} で(第6表)、日本食品標準成分表に示された含有率よりも低い。したがって、べんモリ直播で米のモリブデン含有率が問題となる可能性も低いと考えられた。

米は鳥や豚の飼料としても利用される。反芻動物である牛によるモリブデン過剰症の報告はあるものの、鳥や豚における報告は見当たらないので、牛で問題なければこれらの動物でも問題となることは無いと考えられた。

2015年のみであるが、栽培後の土壌の全モリブデン含有率と可給態モリブデン含有率も、べんモリ被覆で有意に高くならなかった(第6表)。野田ら(1994)の報告には、非汚染土壌のモリブデン含有率は $0.2 \sim 5 \text{ mg kg}^{-1}$ 程度で、モリブデン汚染土壌は $1.5 \sim 10 \text{ mg kg}^{-1}$ との記載があり、水稻の収量は、土壌の全モリブデン含有率がおおよそ 50 mg kg^{-1} 以下でも低下しないようである。これらの値と比較すれば、本試験後のモリブデン含有率は十分に低いと判断された。一方、モリブデンは過剰よりも欠乏が起きやすく、特にマメ科作物では生育が悪くなる(高橋ら1980)。近年の水田では、大豆との輪作が進んでいることから、べんモリ直播によるモリブデンの供給が大豆の生育を向上させる可能性もあるかもしれない。

以上から、べんモリ直播によって、収穫物や土壌のモリブデン含有率に有意な上昇はみられず、牛の飼料としてもモリブデン含有率が高くて問題となることはないと考えられた。ただし、本試験での結果はいずれも単年でべんモリ直播を実施した試験のものであり、年を重ねて実施した場合の収穫物や土壌におけるモリブデン含有率を確認する必要がある。

5. べんモリ直播の実施に向けて

べんモリ被覆は、過酸化Ca剤被覆に比べて容易である。2013年にべんモリ直播を実施した農家は、過酸化Ca被覆用のコーティング機を用い、一度に風乾で 20 kg 分の種子を約10分でべんモリ被覆した。2014年はコンクリートミキサーを用い、一度に 30 kg 分の種子を約10分で被覆した。これまでの過酸化Ca剤での被覆は、過酸化Ca剤の専用的大型な自動コーティング機を用いて、一度に 15 kg 分の種子を約15分かけて被覆していた。べんモリ被覆では、入手しやすいコンクリートミキサーを利用でき、作業効率は過酸化Ca剤のおおよそ3倍(= $(30 \text{ kg} / 10 \text{ 分}) / (15 \text{ kg} / 15 \text{ 分})$)で多量の種子を短時間で被覆できる。

べんモリ被覆ではすぐに使用できる混合済資材(べんモリ資材)を購入できる(原2016)。べんモリ資材は、種子 1 kg あたり 70 円程度であり、 400 円ほどかかる過酸化Ca剤と比較して安価である。

本試験によって、べんモリ被覆は、打ち込み点播におい

て過酸化Ca剤被覆と同等の苗立ちを確保でき、生育や収量にも差がなかった。収穫物や栽培後の土壌のモリブデン含有率において有意な上昇もなかった。

べんモリ直播は試験水田の近隣の農家水田で短期間に広まった。このことは、農家にとって、べんモリ直播が実施しやすい技術であることを示している。ただし、本報告は一地域の事例にすぎないため、今後は異なる播種法や寒冷地も含めた異なる地域における検証が必要である。

謝辞：本試験の実施にあたり、佐賀県上峰町の農家、上峰町役場の職員、吉田桂一郎氏、百武千文氏を始めとする佐賀県東部農林事務所三神農業改良普及センターの職員、八田聡氏を始めとする佐賀県農業試験研究センターの職員、および岡崎泰裕氏を始めとする農研機構九州沖縄農業研究センターの職員に協力いただいた。ここに記して感謝の意を表す。

引用文献

- 青木茂一・山本有彦 1958. 土壌並びに植物中のモリブデンに関する研究(第1報): 和牛のMo中毒症発生地帯の土壌並びに飼料植物中のMo含量について. 土肥誌 29: 363-367.
- 畜産中央会 2006. 日本飼養標準. 乳牛(2006年版). 独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構編. 丸井工文社, 東京. 42.
- 畜産中央会 2008. 日本飼養標準. 肉用牛(2008年版). 独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構編. 丸井工文社, 東京. 54.
- 土壌環境分析法編集委員会 1997. 土壌環境分析法. 博友社, 東京. 363-367.
- 原嘉隆 2012. 高ケン化度ポリビニルアルコールを用いた酸化鉄の種子被覆-硫化物の給源となる石膏を用いない耐水性種子被覆-. 日作紀 81(別2): 158-159.
- Hara, Y. 2013a. Suppressive effect of sulfate on establishment of rice seedlings in submerged soil may be due to sulfide generation around the seeds. Plant Prod. Sci. 16: 50-60.
- Hara, Y. 2013b. Improvement of rice seedling establishment in sulfate-applied submerged soil by application of molybdate. Plant Prod. Sci. 16: 61-68.
- Hara, Y. 2013c. 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 2013. モリブデンを用いた種子被覆技術. 農業技術大系「作物編」追録35号第2-①巻. 農山漁村文化協会, 東京. 技 402 の1の2~8.
- 原嘉隆 2014. モリブデンを用いた種子被覆技術. 最新農業技術 作物 vol.6. 農山漁村文化協会, 東京. 201-207.
- 原嘉隆 2016. 水稻べんモリ直播マニュアル. http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/laboratory/karc/061801.html (2017/2/6 閲覧).
- 秀島好知・原嘉隆・伊勢村浩司・菊池正男・浅川将暁・牧山繁生 2014. 佐賀平担重粘土地帯での水稻湛水直播栽培におけるモリブデンコーティング種子による苗立ち安定化. 日作九支報 80: 7-9.
- 市瀬克也・和田節・遊佐陽一 2005. 直播水稻栽培のための大豆作導入によるスクミリンゴガイ密度低減. 九州沖縄農業研究センター研究資料 91: 51-54.

- 厚生労働省 2015. 日本人の食事摂取基準 2015 年版. http://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/syokuji_kijyun.html (2017/2/6 閲覧).
- 文部科学省 2015. 日本食品標準成分表 2015 年版. http://www.mext.go.jp/a_menu/syokuhinseibun/1365297.htm (2017/2/6 閲覧).
- 野田滋・高見有一・山根忠昭・山路健 1994. 水稲のモリブデン過剰障害 (1). 島根農試研報 28: 27-39.
- 農林水産省 2007. 水田・畑輪作体系を進める効率的な新技術. http://www.affrc.maff.go.jp/docs/report/report19/no19_p3.htm (2017/2/6 閲覧).
- 水稲直播研究会 2012. 水稲湛水直播栽培の手引き. http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/zikamaki/z_kenkyu_kai/pdf/24chokuha.pdf (2017/2/6 閲覧).
- 高橋英一・吉野実・前田正男 1980. 新版原色 作物の要素欠乏・過剰症. 農山漁村文化協会, 東京. 180-185.
- 田坂幸平・吉永悟志・松島憲一・脇本賢三 2003. 水稲打込み式代かき同時土中点播機の点播形状の改善. 農業機械学会誌 65: 167-176.
- 山内稔 2012. 鉄コーティング種子を用いた水稲湛水直播技術. 日作紀 81: 148-159.

Seedling Establishment, Yield and Molybdenum Content of Harvest in the Submerged Direct-Seeded Rice Cultivation Using Benmoly-Coated Seeds and Shooting Hill-Seeder in Paddy Fields of Farmers in Warm Regions : Yoshitaka HARA¹⁾ and Yoshitomo HIDESHIMA²⁾ (¹⁾*Kyushu Okinawa Agric. Res. Cent., National Agric. Food Res. Org., Chikugo 833-0041, Japan;* ²⁾*Saga Pref. Agric. Exp. Res. Cent.*)

Abstract : In the submerged direct-seeded rice cultivation, seedling establishment is important. For direct seeding, seeds are coated with chemicals such as calcium peroxide. The cost of the chemical is expensive and the coating labor is burdensome. A new seed coating method, “benmoly coating” was invented to lower the cost and burden. In this method, seeds are coated with a powdered mixture of molybdenum trioxide, iron oxide and polyvinyl alcohol. From 2013 to 2015, cultivation trials were conducted in 6 paddy fields in Saga Prefecture in Kyushu. Each paddy field had 2 experimental plots. In one plot, seeds were coated with calcium peroxide, and in another plot, seeds were benmoly-coated. Seeds were directly seeded by a shooting hill-seeder. The seedling establishment was good regardless of the coating method. There was no significant difference between the plots in the seedling establishment, growth, and yield of rice plants. Also there was no significant difference between the plots in molybdenum contents of the above-ground part, husked rice and soil after the cultivation. In the surrounding fields benmoly-coated seeds were cultivated and in these fields, the seedling establishments and yields were also good in general. Accordingly, benmoly coating could be useful in the submerged direct-seeded rice cultivation with a shooting hill-seeder in warm regions. It can save the cost and the labor for coating.

Key words : Iron oxide, Molybdenum, Paddy field, Rice, Seed coating, Seedling establishment, Submerged direct seeding, Yield.