

鉄コーティング種子を用いた水稲湛水直播技術

山内稔

(近畿中国四国農業研究センター)

要旨：稲作の低コスト・省力化のため直播栽培の普及が求められている。本総説では最近開発された鉄コーティング種子を用いた湛水直播技術について、発案と開発の経緯を他の直播技術との関連性に基づいて論じ、技術の内容と評価を概説する。鉄コーティング種子は浸種または催芽した発芽準備期のイネ種子を還元鉄粉で造粒して酸化処理した後乾燥したものであり、手作業で、または機械化して大量に製造できる。鉄コーティング湛水直播は表面播種であることと、コーティング済みの種子を長期保存できそのまま播種できる点において、酸素発生剤を使う土中播種や欧米およびアジアで普及している催芽種子の湛水または落水表面播種とは異なる。鉄コーティング種子は浮かず、スズメによる食害を受けにくく、また種子伝染性病害虫が発生しにくい。本技術を普及させるためにはコーティング種子作製時の鉄の酸化発熱による種子の損傷問題の解決、出芽遅延の軽減、苗立ち期の水管理の改善および収量の向上が課題であり、発芽準備期の種子に関する生理学的解析、点播、条播および散播における収量向上に関する実証的研究および無代かき条件下での播種技術の開発が望まれる。

キーワード：イネ、浮き苗、種子、鳥害、直播、鉄コーティング、苗立ち。

アジアの稲作においては手間のかかる移植から省力的な直播への変換が求められているが、直播の普及面積は灌漑水田を中心とする直播導入可能地域の14%程度に止まっている (Pandey and Velasco 2005)。日本での直播の普及も稲作面積の1%程度に限られている (農林水産省 2008)。

このような中でイネ種子を鉄粉でコーティングして播種する直播技術が2004年に開発されて特許査定されている (山内 2010a)。現在では機械メーカーや農業団体等が全国的に実証試験をしている。普及面積に関する全国的な調査は行われていないが、宮越 (2011) は機械メーカーとしての取り組みについて、2005年から鉄コーティング湛水直播の実証試験が開始され、面積は年毎に倍増して2010年には1137ヘクタールであったと報告している。また、無人ヘリを利用した鉄コーティング種子の散播が2010年には宮城県において200ヘクタールで実施されたと報じられている (注：農機新聞2010年10月19日第4面)。これらは断片的な情報の一部であるが、鉄コーティング湛水直播の実施面積は湛水直播の普及面積の1/10以上を占めている。加えて、2009年より韓国において実証試験が開始され、一層の普及の広がりを見せている (Park and Yamauchi 2011)。

本総説においては、鉄コーティング湛水直播技術を開発してきた立場から開発の経緯とその内容を概説するとともに、技術の評価と普及上の課題について取りまとめる。

1. 開発の経緯

直播には乾田直播と湛水直播がある。ここでは移植から

直播への変換を対象にするため、湛水直播について論じる。

種子の生長する環境は土壌表面と土中で大きく異なる。表面播種では種子に浮力がかかり浮きやすい。田面水に大気中の酸素が溶存しているため土壌表面には数ミリ程度の酸化層があるが、その下は無酸素で還元層になっている。種子の多くは表面播種では好気的な酸化層に、土中播種では嫌気的な還元層に位置する。

湛水直播では種子は催芽して播種される。催芽種子は吸水して重くなっており浮きにくく、また発芽途中であるため出芽が速い。播種から苗立ちの間に種子は鳥害、病虫害、水生生物による攪乱および雑草との競合にさらされるとともに、土壌や気象条件に関連する様々なストレスを受ける。苗立ちに成功するためには、これらの障害を乗り越える必要があるため、発芽速度は大きいほうがよい。Seed vigor (種子活力または種子勢) は「幅広く変化に富む圃場条件下で種子が素早く、均一に出芽して生長を続ける特性」 (Association of Official Seed Analysts 1983) であると定義され、発芽速度はその指標の一つである。高い活力を持った種子の利用は苗立ちの安定化につながる。

(1) 表面播種

表面播種は湛水または落水条件下で行われる。英語で前者は Water seeding、後者は Wet seeding と呼ばれる。後者は日本語では潤土直播 (澤村 1994) と呼ばれる場合もある。

1) 湛水表面播種

アメリカ、オーストラリアおよびイタリアにおける湛水

直播では、乾田条件下で荒く耕起した土壌表面に、湛水した後催芽種子が散播される (Hill ら 1991, 堀尾 1998, 村井・小澤 2001)。種子は水中で土塊が崩壊して薄い土壌の層におおわれ、また土塊の隙間にはまって活着する。

催芽種子の使用には、農繁期に浸種催芽処理することと浸種を開始すると発芽日が決まり播種日の変更が難しくなるという制約がある。そのため、タルクを接着剤で乾粃の表面に付着させ、重量を高めたうえで播種されることもある (Hill ら 1991)。

湛水表面播種では酸素不足に起因する苗立ち不良は発生しない (Chapman and Mikkelsen 1963)。乾田直播に比較して赤米などの雑草管理に優れているといわれている。植え付け時期に降雨が少なく乾田状態で耕起できることと、代かきをしなくても漏水の少ないことが本直播導入の条件になるであろう。

アジアの稲作では代かき後に移植される。代かきには土壌を柔らかくして苗の植え付けを容易にすること、雑草をすきこむと同時に新たな発生を抑制すること、および漏水の抑制や土壌養分の供給を高める効果がある。地形的条件や作付前の降雨のため土壌が過湿になり、乾田状態での耕うんと整地は難しい場合も多い。また漏水の大きい場所に水田は造成されることもある。アジアにおける移植から直播への変換に当たっては、生産者は代かきの持つこのようなメリットをないがしろにできない。

代かき後の湛水表面播種は、日本、アジア、アフリカにおいて試験的に、また一部では実施面積は小さいが生産のため実施されている (谷口 1973, 松島 1992, 及川 2001, Balasubramanian and Hill 2002)。広く普及しない原因は、代かき後の土壌表面は滑らかであるため浮力により種子が浮きあがり活着が難しいためであろう。三石 (1982) は湛水表面播種において浮き苗の発生を回避するためには、水苗代における苗立ち確保の一方法である「芽干し」が有効であるが、面積の広い本田で一斉に芽干しするのは難しいことを指摘している。

代かき後の湛水表面播種において条播する場合は一時的に水を落とすが、再入水時に種子が浮遊する。この問題は界面活性剤を種子に塗布することにより解決できる (高橋ら 1964)。

2) 落水表面播種

代かき後に落水して柔らかい土壌表面に催芽種子を散播し、イネが第2～3葉を展開し始める2～3週間後に湛水する落水表面播種が、1980年代にスリランカ、ベトナム、マレーシア、フィリピン、タイ等に普及した。落水のため溝をきり、田面が強く乾燥するときは走り水をする (Pathinayake ら 1991)。

落水表面播種では浮き苗は発生しない。しかし、種子は地表面で直接大気にさらされるため、種子が土壌に密着していないときは乾燥して枯死しやすい。またスズメの食害を受けやすい、強雨にたたかれ流されやすい、代かき後の

落水期間が長い場合雑草が発生しやすいという弱点もある。代かき水の強制的な落水は水質汚濁を引き起こすとともに水資源の浪費につながる。機械移植技術の普及していない東南アジアにおいては省力化の視点から魅力的な直播法であるが、雑草管理が難しく普及面積は限られている (Pandey and Velasco 2005)。

(2) 土中播種

種子を土中に播種すれば、浮き苗、鳥害、種子の乾燥などの表面播種における問題は軽減される。加えて、たこ足苗の発生に起因する成熟期の転び型倒伏も少なくなり、高い収量を期待できる (三石 1982)。畑において土中播種は常法である。しかし、水田では種子が土壌に埋没すると苗立ちが不良になる (大黒 1936, 宗村・国武 1964)。原因としては種子への酸素供給の不足 (Jones 1933)、酸化還元電位の低下 (青峰・成田 1943)、還元条件下での硫化物 (川口 1944, 赤松 1969) や二価鉄 (Hagiwara and Imura 1993, 山内 2000a) 等の生成が指摘されている。苗立ち不良の度合いは播種深度の増大に伴い大きくなる (Yamauchi and Chuong 1995)。

酸素発生剤 (組成: 16% 過酸化カルシウム, 84% 焼石膏等の鉱物質) でコーティングした催芽種子を 10～15 mm の深さに播種し、引き続いて落水出芽を行うことにより、安定した苗立ちを達成できることが一般に認められている。詳細については古畑 (2009a) の総説に記されている。

土中播種においては酸素発生剤以外の資材を使うことも検討されている。酸素発生剤でコーティングした種子をさらに土壌で被覆して加重する手法 (三石・井村 1981) や酸素発生剤に鉄化合物を混入させて苗立ちを改善する手法も提案された (寺島ら 1989)。原・田坂 (2010) は催芽種子にモリブデンを付着させることにより硫化物の生成を抑制して良好な苗立ちを達成できると報告している。

北野ら (2001) は安価な資材として酸化鉄粉を催芽種子にコーティングする技術を開発した。酸素発生剤のコーティングに比べて出芽速度は遅いが播種深度が浅い場合苗立ち率の低下は小さい。本技術において酸化鉄粉に酸素発生剤を混合することにより苗成率は改善する。

土中播種に耐性のある品種の活用は酸素発生剤を不要にする。笹原・五十嵐 (1989)、藤井ら (1992) および Yamauchi ら (1993) は土中播種耐性の品種間差を確認している。耐性品種は低酸素濃度下での鞘葉の伸長能力が大きく (Yamauchi ら 1994, Yamauchi and Biswas 1997)、土中播種において安定な苗立ちを示すことが熱帯において実証されている (Yamauchi ら 2000b)。土中播種耐性は種子活力によって変動する (Yamauchi and Tun Winn 1996) ため、土中播種技術を実用化するためには、種子活力が安定している品種を選定する必要がある。

これらの研究成果に基づいて判断すると土中播種において良好な苗成率を達成することは可能である。そのために

は第一に催芽種子を資材でコーティングすることまたは土中播種耐性品種を導入すること、第二に播種深度の精度を高めること、第三に落水出芽を実施すること、の3つの条件を満たすことが必要である。

(3) 鉄コーティング種子を用いた湛水直播技術の発案

湛水直播栽培の普及を目指す上では、表面播種は土中播種に比べて制約が少ない。アジアで湛水表面播種が普及していない一因は代かきをした水田における浮き苗の発生である。またアメリカでは催芽種子の使用が作業効率の向上を制約している。これら2つの問題の解決は湛水表面播種技術の改善につながる。

1) 種子の活性化処理

種子の発芽の過程は吸水期、発芽準備期および生長期の3段階に区分できる (Takahashi 1961, 1979)。催芽種子は胚が穎から出てくる直前までに代謝が活性化された発芽準備期の完了間際のものである。高橋 (1960) は、採種・貯蔵条件によってイネ種子の発芽速度は変化するが、その一因は発芽準備期の長短であることを認めている。

浸種催芽中の種子を乾燥して生長を停止させることにより、発芽準備期の短縮された保存性のある種子を準備できることが見出された (山内 2002b)。塩水選後休眠打破した種子を浸種催芽後乾燥させた種子は発芽速度が高まっていた。このような種子は無処理種子に比べて代謝が活性化されていると想定でき、本総説では活性化種子と呼ぶ。

活性化種子は乾燥しているため、その初期生長は吸水済みの催芽種子に比べて遅いが、無処理の乾燥種子に比べると有意に勝っている (山内 2002b)。活性化処理はインディカ品種群にも効果があり、低温下の発芽速度を高め、無酸素下での鞘葉の伸長を促進する。また、湛水土中播種した時、活性化種子の初期生長は無処理種子に勝る。

一般に種子を播種前に吸水させ、引き続いて乾燥させると出芽は早まることが知られており (Lush and Groves 1981, Pill 1994, Turner 2008)、Pre-sowing germination treatment または Pre-sowing seed hardening といわれている。安藤・小葉田 (2002) は播種前のイネ種子を吸水・乾燥処理することにより酵素活性が発芽直前の状態に保たれる結果、乾燥土壌における出芽が向上すると報告している。ハードニングは耐寒性や耐乾性の向上を目的にした処理である。活性化処理は湛水直播における発芽速度の向上を目指しており、目的は異なるが、生理学的な機能変化は同じである可能性が高い。

一般に自然条件下で種子は降雨による吸水とその後の乾燥の繰り返しに遭い、発芽特性は変動するといわれる (Gramshaw and Stern 1977, Vincent and Cavers 1978, Lush and Groves 1981)。ゆえに、活性化処理は発芽準備期の種子を人為的に乾燥させるのであるが、自然界の事象と同等である。

活性化処理は Heydecker (1974) が野菜の種子について

提唱した「ポンプへの呼び水」の概念であるプライミングと類似している。しかし、プライミングでは各種の浸透圧調節物質や代謝産物が使われている。ゆえに、プライミングは自然界の事象ではなく、活性化処理とは異なる。

活性化処理は発芽準備期を短縮または消失させることにより種子活力の指標の一つである発芽速度を高めるにすぎない。しかし、現行の湛水直播において一般に広く行われている浸種催芽処理に乾燥という手順を加えるのみであり、簡易に実施できるメリットがある。

2) 浮き苗の回避技術

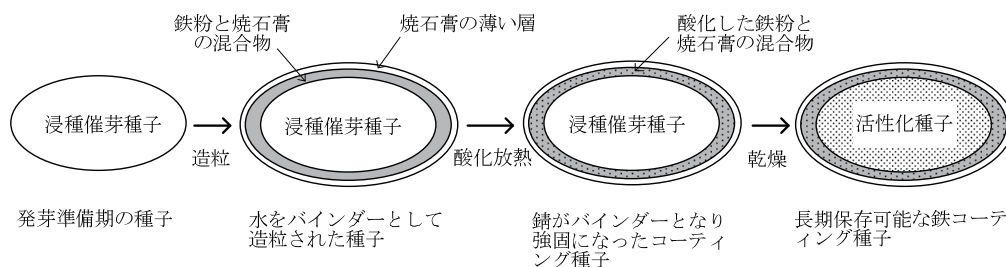
浮き苗になると苗立ちが不良になるばかりでなく、その後の生育にも影響を及ぼし、分けつや乾物重が低下する (周ら 1999)。落水は浮き苗の回避策であり、落水表面播種としてアジアで普及している。土中播種においても播種深度が浅いときは浮き苗が発生するため、播種直後や第2葉期の2~3日の落水 (鍋島・岩井 2000) および落水出芽と同様の処理 (北野・生杉 2002) が提案されている。

湛水表面播種において苗立ちに品種間差が認められ (Inoue ら 1997b, 内村ら 2001, 趙ら 2002, 2004)、それは主として浮き苗の発生の違いに起因している。水中における種子根の土壌への貫入能力が浮き苗発生の品種間差異の主要因であり、浮き苗の小さい品種は種子根のラセン運動の活性が高いことが見出されている (井上 1997a)。この知見に基づいて浮き苗の発生を抑制する目的で、簡易検定法を用いた品種の育成 (荒井ら 1998) や植物ホルモンの活用 (井上・松本 2001, 井上ら 2004) が行われている。

浮き苗の発生の小さい品種の種子比重は1.1以上である (内村ら 2001)。しかし、種子比重の高い品種の選抜には限界もある (Gravois 1992)。同一の品種に限れば比重の高い種子は浮き苗の発生を軽減できるが、比重の高い種子が含まれる割合は小さいため (Venkateswarlu ら 1987)、実用化は難しい。

種子に高比重物質を付着させることは浮き苗を回避する効果的な手法である。諸橋ら (1988) は酸素発生剤でコーティングした種子を湛水条件下で溝の中に覆土なしで播種する方法を検討したが、浮き苗が発生した。その解決策として、粘土と酸素発生剤の混合物をコーティングする方法が優れていることを見出した。このとき、水中で粘土が崩れやすくなることが問題であり、その対策として酢酸ビニル系接着剤を使用することが効果的であったと報告している。

種子を高比重物質でコーティングすることを想定して真比重を比較すると還元鉄が有望である。酸素発生剤の成分である過酸化カルシウムは1.7、硫酸カルシウムは2.3、また土壌の主要な一次鉱物である石英、正長石、白雲母は2.5~3.1、有機物は1.2~1.7であるのに対して、還元鉄は7.9である。酸化鉄の比重は5.1~5.9であり、還元鉄に比べて小さい。銅、銀、鉛、金、白金などの金属の真比重は8.9~21.4と大きい。毒性または資材費の観点



第1図 鉄コーティング種子の作製工程。

から実用的でない。

造粒工学において、水は有用なバインダーの一つである(森脇 1991)。水をバインダーとして使い、イネ種子を還元鉄粉でコーティングして播種と栽培試験を実施した結果、湛水表面播種において、また落水表面播種の出芽時入水において、浮き苗の発生を抑制できることが検証された(山内 2002a)。ここで使われた手法は、催芽種子を使ったこと、鉄コーティング比(鉄粉の乾燥種子に対する重量比)が0.1～4であったこと、およびコーティング後乾かさずに短時間のうちに播種したことにおいて、酸素発生剤でコーティングする技術に類似していた。この研究において、鉄は酸化発熱して種子を傷める可能性が高いため、塩類を含む資材との混用は避けられた。一方で、乾燥すると鉄粉がはがれコーティングが崩壊しやすいため、造粒後は加湿状態を保つ必要があった。

3) 鉄コーティング技術

鉄コーティング技術を実用化するためには、次のような条件を満たす必要がある。1) 鉄の酸化発熱で種子を傷つけないこと。2) 乾燥保存できること。3) 動力散布機や播種機を用いて播種するときに、機械的衝撃によって崩壊しないこと。4) 水中で崩壊しないこと。5) 種子を傷つけないため、コーティングが温和な条件で短時間に容易に行われ、コーティング資材のpHが中性に近いこと。そこで、カルボキシメチルセルロース、焼石膏、ベントナイトなど、様々な物質をバインダーとして造粒試験が行われた。このような中で、酸化発熱の問題はあるが、還元鉄粉の酸化によって生成された錆をバインダーとして利用する方法が2)～5)の条件を満たすことが見出された(山内 2010a)。

鉄の酸化反応には水、塩類および酸素が必要である。塩類としては様々な硫酸塩や塩化物を使うことができる。鉄粉が錆びて、鉄粉の粒子同士が結合するとともに、直接粘りにも付着する。このとき鉄粉の粒子間にシリカゲル、農薬、酸化鉄粉などを固定できる。コーティングの機械的強度は落下試験により評価され、播種時に崩壊しないことが判明している。

鉄コーティングにおける錆びの発生程度とその構成成分について分析され、次のことが明らかになっている。

1) 錆びは鉄粉粒子の表面から生成され始め、中央部は錆びていない。そのため、出来上がった鉄コーティング種子に水が添加されると再度酸化反応が始まり、発熱する。

2) 一般に錆は α 、 β 、 γ 型オキシ水酸化鉄、マグネタイトおよび無定形物質によって構成される。鉄コーティングを構成する錆は97～99%が無定形物質であり、これがバインダーの働きをしていると推定されている。

3) 錆びの水に対する溶解度は小さく、水中でコーティングは崩壊しない。

本技術の弱点は酸化反応に伴う発熱であり、放熱が不十分であると種子の温度が上がり傷む。そのため、造粒した種子を薄く広げることや送風などの放熱対策が不可欠である。

イネ種子の活性化処理と鉄コーティングを組み合わせる「活性化種子を鉄コーティングすることにより、乾粕の湛水直播が可能になる」という仮説がたてられた(山内 2003)。乾粕状態であれば、鉄コーティング種子に保存性があるため、農閑期に準備することにより農繁期の作業競合を軽減できる。

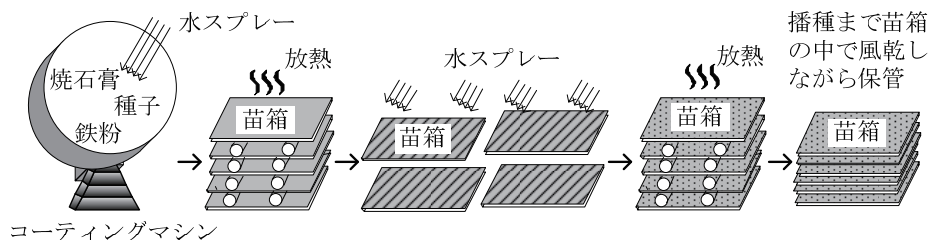
2. 技術の内容

開発された技術を普及技術に仕上げるために、様々な生産者が各地で鉄コーティング種子の作製と播種試験を実施した。2004年からマニュアルの配布を開始するとともに、普及誌(山内 2006b, 2009)で技術の詳細を紹介した。ここでは最近のマニュアル(山内 2010b)に記載されている要点を述べる。なお、鉄コーティング種子を用いた直播は現在までのところ品種に関わらず実施できている。

(1) 鉄コーティング種子の作製方法

鉄コーティング種子の作製は造粒、酸化放熱および乾燥の3工程から成り立っている(第1図)。鉄の酸化促進には様々な塩類を使えるが、普及技術においては焼石膏(硫酸カルシウム・0.5水和物)を使っている。焼石膏は水に対する溶解度が小さいため多量に添加しても発芽障害を引き起こさず、また水の添加により凝結硬化する特性があるため造粒作業を容易にする。

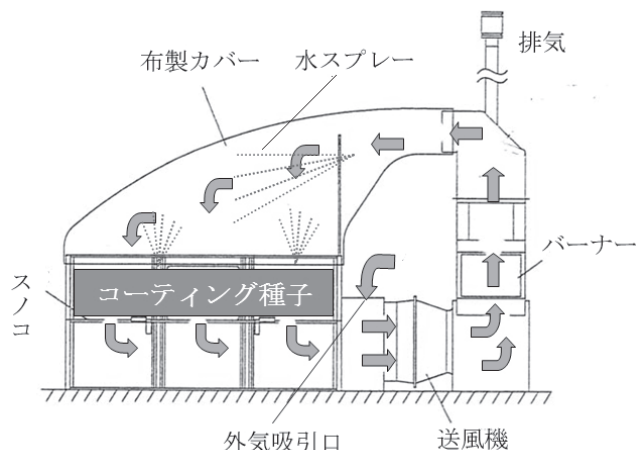
水をスプレーしながら浸種または催芽した種子を還元鉄粉と焼石膏の混合物で造粒する(第2図)。造粒には酸素発生剤用に開発されたコーティングマシンまたは市販の大型コンクリートミキサーを使う。造粒した種子は苗箱などに薄く広げ、自然条件下で放熱させながら錆びさせる。酸化反応は水分が蒸発してなくなると停止する。錆の発生が少なく酸化反応が不十分である時は水をスプレーする。造



第2図 苗箱を利用して鉄コーティング種子をつくる手順。

粒済みの種子の層を厚くして放熱が不十分となり発芽率が低下した事例が報告されている（吉住ら 2006）。このようにして作製された鉄コーティング種子は、表面が乾いても種子自体は水分含量が高く、保存性が低い場合がある。そこで、作製した鉄コーティング種子は苗箱の中に広げたまま、風乾しながら播種まで保管する。

農作物や食品の乾燥に使われる空気循環・平面型乾燥機を改造して、その中で短時間のうちに酸化放熱と乾燥の2工程を完了する鉄コーティング種子の大量製造機が開発された（山内ら 2008, 第3図）。出来上がった鉄コーティング種子の保存性は品種、種子の登熟期の条件および保存状態などにより異なるが、ポリ袋に密封した場合室温で1～2年である（山内 2010c）。



第3図 鉄コーティング種子大量製造機の概念図（断面）。

(2) 直播法

直播栽培における苗立ち数は播種量（種子数/㎡）と苗立ち率によって決まる。最適な苗立ち数は様々な要因によって決定されるが、暖地における散播では50～100個体/㎡である（三石ら 1990）。鉄コーティング種子の苗立ち率は、気象条件、土壌型、有機物施用、苗立ち期の病害虫や水生生物の発生、播種技術などの様々な環境要因によって変動し、地域差も認められる。広島県では苗立ち率は50±20%であることが多いが、北陸地域ではこれより高い。

播種方法には3通りある（第4図）。湛水播種（散播）では湛水条件下で播種した後に初期除草剤ピラゾレート粒剤を散布する（第4図上）。5日から7日間湛水し、出芽開始に落水する。本葉が出たら湛水して一発除草剤を散布する。

湛水播種（条播・点播）では、田面水が条播や点播の精度を落とすため、落水または減水して播種し、直ちに水を入れてピラゾレート粒剤を散布する（第4図中）。この後の栽培管理は湛水播種（散播）と同じである。播種時の落水は手間がかかるうえに水を浪費し水質を汚濁する。湛水播種（散播、条播、点播）の弱点は、湛水期間が長いのでカモによる食害や土壌還元による障害を受けやすいことである。

落水播種（散播・条播・点播）では代かき後初期除草剤ダイムロン・ペントキサゾン水和剤を散布する（第4図下）（山本・貝淵 2010）。4日後には除草剤が効きまた自然減水

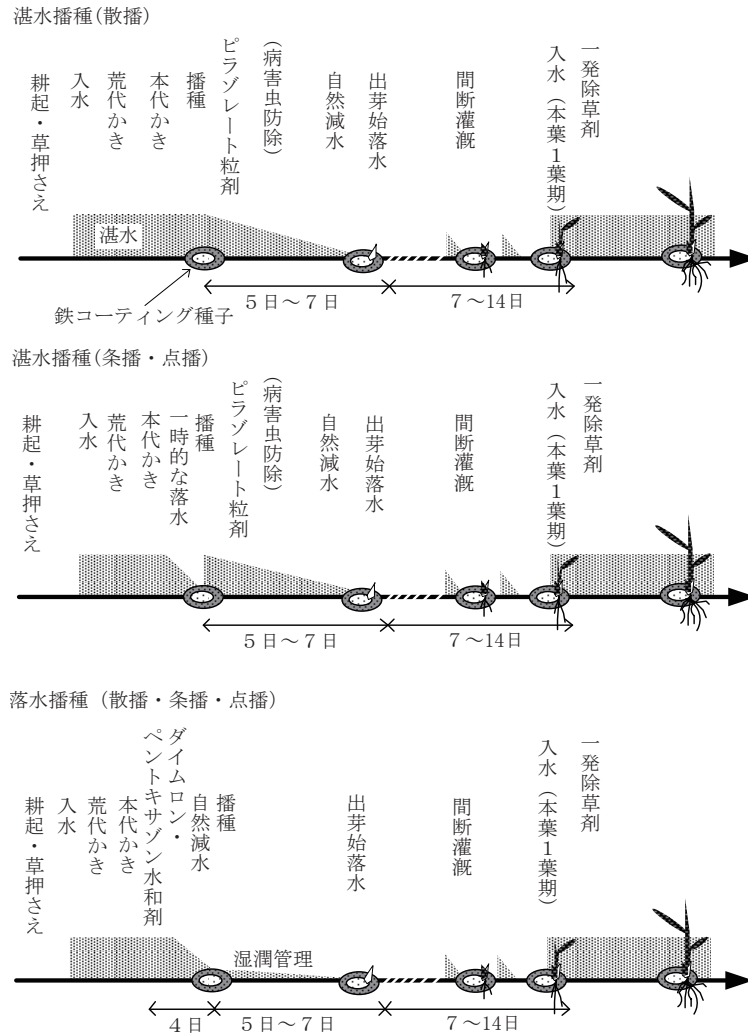
するので播種する。落水状態を維持し、本葉が出たら湛水して一発除草剤を散布する。苗成ちは落水播種が湛水播種に比べて安定している（山本・貝淵 2009, 佐藤ら 2011）。

小さい水田においては背負い式動力散布機を使い畦畔から散播できる。大きな水田では乗用管理機や田植機に乗って動力散布機で、または無人ヘリで効率的に散播できる。条播や点播は散播に比べて時間がかかるが、苗立ち率変動しても条間や株間が一定に保たれ栽植間隔を調節できる利点がある。

土中播種機を利用して土壌表面に条播または点播するときは、溝切と覆土板を取り外す。側条施肥機を使い条播するときは、肥料用のホッパーから鉄コーティング種子を筋状に落下させる。鉄コーティング種子専用の点播・条播機の市販が2010年に開始された。本機は、鉄コーティング種子をホッパーから田面に直接落下させる単純な構造である。このように表面播種には既存の機械の改造や構造の単純化により対応することが可能であり、専用の播種機を必要とする土中播種に比べて普及性は高いと思われる。

(3) 苗立ち期の病害虫と水生生物の発生

湛水直播において病害虫の管理は重要である（平井 1995, 内藤 1995）。鉄コーティング種子の湛水播種においてはイネミズゾウムシ（栗久 2009）、モノアラガイ類（瀧村・星野 2010）、スクミリンゴガイ、苗腐病、カブトエビおよびユスリカによる苗立ち不良が見出されている。これらの



第4図 鉄コーティング種子の直播における播種、水管理および作業の概要。

被害は湛水播種において発生しやすく、落水により軽減できる。また登録された農薬を散布して防除できる (図4)。鉄コーティング湛水直播において特異的に発生する病害虫は見出されておらず、アメリカにおける湛水表面播種において報告されている病害虫 (Hill ら 1998) と同様である。

(4) 鉄コーティングに関わる新たな技術の提案

鉄コーティング直播技術の普及を契機に鉄に関わる新たな技術が提案されている。これらは普及しつつある鉄コーティング直播技術について研究者が個別に追試験した結果、弱点を見出し、それを改善しようとする試みである。そこで、これらの技術と現在普及しつつある原型の鉄コーティング直播との差異を論じる。

原型の鉄コーティング直播技術では鉄コーティング種子作製時の発熱による種子の損傷と播種後の出芽遅延が問題であるという追試験の結果に基づいて、密封式鉄コーティング直播技術が提案された (今川 2006)。使用する資材は原型と同じであるが、催芽種子を造粒直後にポリ袋に密封することにより、大気を遮断して播種まで鉄の酸化を停止

していることおよび催芽種子を乾燥せずに保存して数日のうちに播種する点が異なっている。原型と比較して出芽スピードは3~6日早くなり (今川ら 2008)、苗立ち率、個体乾物重および収量において勝っていると報告されている (白土ら 2008a, 2009a,b)。しかしながら播種時にポリ袋を開封すると酸化反応が始まるためホッパーの中で発熱する事故や、コーティングが崩れて播種機を汚す場合が報告されている (今川 2009)。

酸化鉄コーティングは原型の鉄コーティングにおける酸化発熱の問題を軽減するために提案された (関矢ら 2006, 古畑ら 2008a, 2008b)。種子を酸化鉄粉 (重量比 70%) と還元鉄粉 (30%) の混合物でコーティングする。従前の北野ら (2001) の開発した酸化鉄粉を使う技術と還元鉄の酸化に伴って発生する錆びをバインダーとして使う技術 (山内 2010a) の組み合わせである。酸化鉄コーティングにおいて活性化種子と催芽種子の違いが比較され、催芽種子が出芽、苗立ち、収量において勝っていると報告されている (古畑ら 2008a, 2009b, 2010a, 2011)。

また一方で、焼石膏の代わりに酸素発生剤を還元鉄粉に

混合して催芽種子をコーティングする方法が、酸化に伴う発熱を抑えるのに効果的であると提案されている(白土ら 2008b, 2010)。酸素発生剤を混合した時のコーティングの機械的強度、苗立ち、初期生育、出穂期および収量は密封式鉄コーティング直播と同等である。

3. 技術の評価

(1) 鳥害の抑制効果

直播栽培において鳥害は苗立ちに深刻な被害を与えるため、その回避は重要である。湛水条件下ではカルガモ、落水条件下ではスズメによる被害が大きい。技術開発の初期の段階において、表面播種では種子が地表面に位置するためスズメの食害を被りやすいと想定されていた。開発途中の鉄コーティング種子を用いた栽培試験において、偶然、鉄コーティング処理がスズメの食害を抑制することが見出された(山内 2003)。スズメの食害抑制効果は青森県や秋田県における試験(注:東北農業単年度試験研究成績 2004 年, 2007 年)、新潟県の各地域(水沢 2009)、また多くの実証試験地において認められている。岩手県においては鉄コーティング処理がカワラヒワによる食害に対しても有効であることが認められている(渡邊ら 2006)。

スズメの食害抑制に関して詳細なメカニズムは不明である。鉄コーティング直播水田へのスズメの飛来は観察されており、鉄コーティング比を下げると食害が増える(山内 2006a)ことから忌避効果によるものではない。食害は籾殻が割られて発生していることから、コーティングの機械的強度が関与していると思われる。

鉄コーティング種子の湛水直播では落水条件下でスズメの食害を防げるので、このときカルガモの被害も発生しにくい(山内 2004)。鉄コーティング種子の利用はカルガモの食害に対する耕種的防除策になるであろう。

酸化鉄および酸素発生剤混合の密封式鉄コーティングも鳥害防止効果があると報告されている(白土ら 2008b, 2010, 古畑ら 2009c)。メカニズムとして酸化鉄の忌避効果、コーティングの色調によるカモフラージュ効果および出芽スピードの違いが考察されている(古畑ら 2010b)。

(2) 種子伝染性病虫害の抑制効果

種子に潜伏、付着あるいは混合している病原体や害虫によって引き起こされる種子伝染性病虫害は、移植栽培において大きな被害をもたらすため、化学農薬や温湯による種子消毒が実施されている。金属成分による病害の防除として銅や銀イオンを含む資材が使われ、苗箱に含鉄資材を添加してイネ苗立枯細菌病を防除する研究もおこなわれている(田中 2005)。

井上ら(2009)は苗立枯細菌病、もみ枯細菌病、褐条病、ばか苗病、ごま葉枯病またはいもち病を保菌させた種子を使い、鉄コーティング処理はこれらの病害の発生を化学農薬に匹敵するレベルで抑制することを確認している。鉄

コーティング種子の表面において活性酸素が発生し、病原菌の生育を抑制している可能性が見出されている(藤原ら 2008, 藤原・正岡 2010)。

イネシンガレセンチュウはイネの主要な線虫害であり、種子伝染する。星野ら(2008)はイネシンガレセンチュウに感染した種子を鉄コーティング処理することにより線虫の生存率が低下し、本田における心枯れ症の発病も減少することを見出した。しかし、コーティング処理の工程におけるどの部分でイネシンガレセンチュウが抑制されたのかは不明である。

多くの種子伝染性病害の発病は、直播では播種した種子が低温と酸素不足にさらされるため、移植に比べて減少するであろうと推定されている(内藤 1995)。加えて、鉄コーティング処理が種子伝染性病虫害の発生を抑制することを考慮すれば、鉄コーティング種子を用いた直播において種子伝染性病虫害は発生しにくいと考えられ、種子消毒の必要性について検証が必要である。

(3) 安全性と環境への影響

技術開発の初期には造粒が容易な微細な鉄粉が多く使われた。その後、微細な鉄粉(粒度 $53\ \mu\text{m}$ 以下のものが重量比で 50%を超えるもの)は消防法における危険物(可燃性固体)に該当することが判明し、現在では危険物に該当しない鉄粉のうちで粒度の小さいものがコーティングに使われている。

鉄コーティング種子は表面播種されるため、散播の場合田面水があっても播種できる。そのため、土中播種に比べて強制落水の頻度は減り水質汚濁は軽減するであろう。

鉄は土壌に 7%程度含まれている。また土壌改良のために推奨される鉄資材の連年施用量は転炉さいの場合 $2000\ \text{kg ha}^{-1}$ であり(日高 1981)、鉄成分として換算すると $340\sim580\ \text{kg ha}^{-1}$ である。鉄コーティング湛水直播を実施した場合、鉄の水田への投入量は鉄コーティング比 0.5、播種量(乾籾重) $50\ \text{kg ha}^{-1}$ の時、 $25\ \text{kg ha}^{-1}$ であり、これは連年施用量の 4~7%に相当する。ゆえに鉄コーティング直播によってもたらされる鉄の水田への投入量は、土壌改良に寄与するほどではなく、また投入された鉄が過剰蓄積を通じて環境に悪影響をもたらす可能性も小さい。

(4) 技術の普及

鉄コーティング湛水直播技術は、開発当初は生産者とそれを支援する普及機関の職員によって各地で個別に試験された。水沢(2009)は新潟県において、導入当初は土壌条件に起因する種子埋没等により出芽苗立ちが不安定であったが、播種床をやや硬めにするように生産者に指導した結果 2008 年には安定化し面積は拡大していると報告している。

機械メーカーによって鉄コーティング直播の実証試験が東北から九州にかけて全国的に実施されている(宮越

2011). 各種の栽培マニュアルや営農情報誌を発刊し、インターネットに普及の状況を掲載している。農業団体は2008年より鉄コーティング直播技術の全国的な実証栽培試験を開始するとともに、鉄粉等の資材の取り扱いを開始した(東野 2010, 阿部 2010, 村岡ら 2011)。

農業団体が実施した実証栽培試験における生産者の評価を村岡ら(2011)は以下のように取りまとめている。収量は鉄コーティング直播では慣行栽培(移植および酸素発生剤を使った土中播種)に比較して5%低かった。また、省力、生産コスト、苗立ち、水管理、除草剤、草姿・倒伏、収量、玄米品質の各項目を慣行栽培と比較して評価した結果、省力と生産コストにおいて高評価であったが、水管理、除草剤および収量性の評価が低かった。機械メーカーの実施した実証試験においては、収量は移植と同等か10%低く、除草体系、苗立ち期の水管理、圃場の準備、鉄コーティング種子の取り扱いの改善が、普及上の今後の課題であったと報告されている(宮越 2011)。このように普及における評価はほぼ一致しており、水管理と除草体系の改善および収量の向上が求められている。

JA いずも(島根県出雲市)が2010年より鉄コーティング種子の大量製造と販売を開始した(村岡ら 2011)。近年、生産者は苗を購入して移植栽培することが多い。これと同じように、生産者が鉄コーティング種子を購入して直播栽培するという新たな稲作のシステムが実用化されつつある。苗の場合は生産、販売、移植と時間を追った作業になるが、鉄コーティング種子は保存性が高いため、作業や流通の効率化が進むであろう。

寒冷地では出芽の遅い活性化種子の利用は難しいとの判断に基づいて催芽種子の密封式、酸化鉄および酸素発生剤混合の鉄コーティング技術が提案された。一方で、寒地および寒冷地においても活性化種子を使う原型の鉄コーティング湛水直播は実施可能であると認識している関係者は多い。佐々木・熊谷(2011)は活性化種子を用いた鉄コーティング直播は寒地北海道において実施可能であることを検証している。農業団体の主催する実証試験(注:鉄コーティング湛水直播栽培技術研究会.講演・成績資料集.2011年1月17日.全国農業協同組合連合会,東京.1-239.)においては、東北地域の15試験地のうち深刻な出芽遅延は2試験地においてのみ認められ、そのうち一つは高冷地であったと報告されている。機械メーカーは東北地域において活性化種子を使う原型の鉄コーティング直播技術の普及面積を拡大している(宮越 2011)。このように、寒冷地および寒地における活性化種子の実用性については、関係者の判断は分かれている。

4. 普及上の課題

鉄に関わる新たな技術の提案のもとになった弱点や技術の普及において指摘された評価の低い項目を改善することは、技術の普及性を高める。そこで、普及を目指す上での

今後の課題について論じる。

(1) 酸化発熱による種子の損傷問題の解決

コーティングにおいて鏽をバインダーとして使わない新たな方法を開発すれば酸化発熱の問題は解決される。非水溶性で機械的強度が大きく、長い年月にわたり広い面積で使用して環境に負荷とならないバインダーの選定が求められる。

密封式鉄コーティングにおいては還元鉄粉の酸化発熱反応はポリ袋を開封する播種時に開始するので、反応が進行して種子が高温にさらされる前に播種を完了する。酸化鉄粉や酸素発生剤を混合する鉄コーティングでは還元鉄の濃度を低下させて酸化発熱量を減らしている。このようにして酸化反応を抑制することは発熱を減らす、バインダーとなる鏽の生成量を減少させており、コーティングの機械的強度を低下させるであろう。

酸化発熱による種子の損傷は、技術開発の初期に使用されていた反応性の高い粒度の細かい鉄粉で発生しやすいが、現在では消防法の危険物に該当しない粗い鉄粉が多く使用されており、反応は緩やかである。また鉄コーティング比は0.5が標準的に使われているが、一部では生産者が栽培技術に慣れて0.2~0.3へと低減している。粒度の粗い鉄粉の使用や鉄コーティング比の低減は酸化発熱に起因する種子の損傷事故を少なくするであろう。

(2) 出芽遅延の改善

乾燥した活性化種子の発芽は吸水済みの催芽種子に比べて、吸水に要する時間遅れる。発芽準備期の初期の段階で乾燥した活性化種子の発芽は完了間際で乾燥したものに比べて遅い。発芽準備期の種子を乾燥することによってもたらされる生理学的な影響は未解明であり、活性化処理に関するメカニズムの解明は出芽遅延問題の軽減に寄与するであろう。

活性化種子を用いた直播では、播種直後に種子に吸水させる必要があるため、土壌の湿潤管理が重要である(山本・貝淵 2009, 佐藤ら 2011)。加えて土壌表面の温度は気温や水条件によって影響を受けるため、出芽は土壌の水分含量が低く、また低温条件下では遅れやすい。鉄コーティング種子の表面播種に適した栽培技術の確立が必要である。

(3) 水管理の改善

機械メーカーおよび農業団体の実施した実証試験においては、水および雑草管理技術の改善の必要性が指摘されている(宮越 2011, 村岡ら 2011)。鉄コーティング直播に適用できる水と雑草管理は湛水播種と落水播種の2体系である(第4図)。農業登録された播種時または播種前に使用できる除草剤のうち鉄コーティング直播に適したものはピラゾレート粒剤とダイムロン・ペントキサゾン水和剤の2

剤である。後者は出芽時に落水不良の場合薬害を引き起こし、苗立ちを不良にする。現在ピラゾキシフェン・ベンゾピシクロンフロアブルが播種前処理剤として農薬登録のため検討され、薬害はほとんど発生しないといわれている(山本・貝淵 2010)。播種前および播種時に使用できるイネに安全性の高い除草剤の開発は、水管理を容易にし、雑草害の軽減に結びつく。

水管理は苗立ち期の病害虫や水生生物の発生にも影響を与え、苗立ちの成否を決定する(栗久 2009, 瀧村・星野 2010)。苗立ち期の病害虫被害は落水管理により軽減できるが、たとえ落水できなくても殺虫剤や殺菌剤の使用により抑制できる。このような農薬の使用は水管理を容易にするであろう。

水管理は雑草害、病害虫、水生生物のみならず、水田、地形、気象等の地域の条件と密接に関係しているため、画一的な指針を提示することは難しい。地域の実情に応じた栽培ごよみを作成し、実証試験を行った後、その栽培ごよみを改善するという地道な技術移転が求められる。

(4) 収量の向上

多くの鉄コーティング湛水直播の実証試験においては収量が慣行に比べて同等から 10% 程度低い範囲で変動している(宮越 2011, 村岡ら 2011)。近畿中国四国農業研究センターの試験圃場においてコシヒカリの移植と鉄コーティング種子の表面条播を比較した場合、玄米収量は 2003 年～2005 年の平均値で移植 493 kg/10 a, 条播 528 kg/10 a であった(山内 2006a)。将来、現地において鉄コーティング直播により移植栽培と同等の収量を得ることは可能であろう。

移植栽培において苗は加温された施設で 3 週間かけて準備されるが、鉄コーティング種子の播種は、播種後の低温を避けるため、移植作業の直前または直後である。収穫時期は移植に比べて 1 週間遅れるといわれており、生育期間は移植に比べて約 2 週間短くなる。生育期間の短縮が収量に及ぼす影響を解明する必要がある。

一般に表面播種は土中播種に比べて倒伏に弱いといわれている。しかしながら、アメリカにおける湛水直播は表面播種であるが、倒伏は深刻な問題になっておらず高収量である。日本においても最近では品種「萌えみのり」のように、表面播種において耐倒伏性を持った品種が育成され、鉄コーティング種子の表面散播で高収量が実証されている(片岡ら 2006)。鉄コーティング直播の実証試験において、表面播種は移植に比べて必ずしも倒伏に弱くないと観察されており、倒伏しやすい品種コシヒカリも広く栽培されている(宮越 2011)。湛水直播における耐倒伏性について土中播種と表面播種を比較した研究が必要である。

点播は条播に比べて耐倒伏性が大きく、草型や群落構造が改善され病害虫の発生も少なくなると実証試験において観察されている(宮越 2011)。鉄コーティング種子専用の点播・条播機の開発後時間も経過しておらず、栽培研究は

十分に行われていない。また、ほとんどの実証試験において移植向けの施肥法が使われ、表面播種向けに施肥設計されていない。点播、条播、散播における最適苗立ち数、生育期間、施肥、防除について実証的な比較試験を進めることにより、収量の向上と安定化がもたらされるであろう。

(5) 無代かき直播への適用

実証試験において多くは苗立ちに成功している。しかし、湿田地帯では落水が難しい場合が多く、その結果、カモによる食害、還元障害および苗立ち期の病害虫や水生生物の発生が原因となり、苗立ちに失敗している事例も認められる。このような地域では苗立ちに失敗しない場合でも、生産者は水管理に手間暇をかけて集約的に栽培していることが多い。

わが国の水田は乾田、半湿田、湿田が面積割合でそれぞれ 55%, 22%, 23% 存在する(農林省 1961)。湿田地帯では漏水は小さいため、代かきを省略して透水性や排水を改善したうえで、鉄コーティング種子を直播する技術も必要である。一方で、一部の乾田地帯では、少雨のため代かき用水の確保が難しく、またそのような状況下で代かき後の出芽始の落水処理は、水を無駄にするという意味で生産者にとって多大な負担になっている。今後、乾田地帯でも無代かきで直播できる技術が必要である。

鉄コーティング種子の無代かき湛水直播が可能であることが示されている(山内 2010d, 2011, 佐々木・熊谷 2011)。土壌鎮圧が漏水の抑制と良好な苗立ちに結び付くことが見出されており、鉄コーティング種子を用いた無代かき湛水直播の実証試験が必要である。

引用文献

- 阿部浩人 2010. 鉄コーティング種子による水稻直播栽培 普及拡大をめざして全農が設置する実証展示圃～担い手による地域実証と普及に向けた取り組み～. グリーンレポート 488: 6-7.
- 赤松精一 1969. 水稻の散播に関する研究. (第 9 報) 発芽苗立ちと収量の関係, および発芽障害とその防除対策. 岡山大学農学報 33: 95-104.
- 安藤秀俊・小葉田亨 2002. ハードニング処理したコムギと水稻種子における乾燥土壌下での出芽およびアミラーゼ活性の促進. 日作紀 71: 220-225.
- 青峰重範・成田精一 1943. 土壌の酸化還元電位と水稻種子の発芽. 農及園 18: 185-188.
- 荒井輝博・井上直人・池田良一・平澤秀雄・氏原暉男・南峰夫 1998. 水稻湛水直播に関わる種子根のラセン生長の簡易検定法. 育種学雑誌 48: 301-307.
- Association of Official Seed Analysts 1983. Seed vigor testing handbook. Association of Official Seed Analysts, Iowa, USA. 1-88.
- Balasubramanian, V. and J.E. Hill 2002. Direct seeding of rice in Asia: Emerging issues and strategic research needs for the 21st century. In S. Pandey, M. Mortimer, L. Wade, T.P. Tuong, K. Lopez, and B. Hardy eds., Proceedings of the International Workshop on Direct Seeding in Asian Rice Systems: Strategic Research Issues and Opportunities.

- International Rice Research Institute, Manila, Philippines. 15–39.
- Chapman, A.L. and D.S. Mikkelsen 1963. Effect of dissolved oxygen supply on seedling establishment of water-sown rice. *Crop Sci.* 3 : 392–397.
- 大黒富治 1936. 水中覆土が水稻の発芽に及ぼす影響. *農及園* 11 : 2603–2608.
- 藤井潔・久保田重正・小松勝夫・朱宮昭男・工藤悟 1992. 水稻湛水直播における出芽・苗立ちの生態種および品種間差異と最適催芽程度の解明. *愛知農総試研報* 24 : 1–10.
- 藤原加奈子・山内稔・山本真之・正岡淑邦 2008. 鉄コーティング水稻種子の近傍で発生する2価鉄イオンの作用. *土肥要旨集* 54 : 130.
- 藤原加奈子・正岡淑邦 2010. 鉄コーティング種子から発生する活性酸素とその抗菌効果. *土肥要旨集* 56 : 170.
- 古畑昌巳・帖佐直・松村修・湯川智行 2008a. 種子予措程度が鉄コーティング種子の出芽・苗立ちに及ぼす影響. *北陸作報* 43 : 19–22.
- 古畑昌巳・帖佐直・松村修・湯川智行 2008b. 酸化鉄コーティング種子における異なるのり成分が湛水直播水稻の出芽・苗立ちに及ぼす影響. *北陸作報* 43 : 15–18.
- 古畑昌巳 2009a. 湛水直播水稻の出芽・苗立ち向上に向けて. *日作紀* 78 : 153–162.
- 古畑昌巳・帖佐直・松村修・湯川智行 2009b. 異なる酸化程度とした鉄コーティング種子が湛水直播水稻の出芽・苗立ちに及ぼす影響. *日作紀* 78 : 242–249.
- 古畑昌巳・帖佐直・松村修・湯川智行 2009c. 鉄資材のコーティングが湛水直播水稻の出芽・苗立ちに及ぼす影響－酸素発生資材との比較－. *日作紀* 78 : 170–179.
- 古畑昌巳・帖佐直・松村修・大角壮弘 2010a. 酸化鉄コーティング種子における種子予措が湛水直播水稻の出芽・苗立ちに及ぼす影響. *日作紀* 79 : 363–371.
- 古畑昌巳・大角壮弘・帖佐直・松村修 2010b. 鳥害回避効果に関する鉄コーティング種子の特性. *日作紀* 79 (別 1) : 2–3.
- 古畑昌巳・帖佐直・大角壮弘・松村修 2011. 酸化鉄コーティング湛水直播栽培の出芽・苗立ち、乾物生産および収量特性. *日作紀* 80 (別 1) : 28–29.
- Gramshaw, D. and W.R. Stern 1977. Survival of annual ryegrass (*Lolium rigidum* Gaud.) in a Mediterranean type environment. I Effect of summer grazing by sheep on seed numbers and seed germination in autumn. *Aust. J. Agric. Res.* 28 : 81–91.
- Gravois, K.A. 1992. Genetic effects determining rice grain weight and grain density. *Euphytica* 64 : 161–165.
- Hagiwara, M. and M. Imura. 1993. Seedling emergence and establishment of direct-sown paddy rice in soils incorporated with substances produced in reductive paddy soil. *Jpn. J. Crop Sci.* 62 : 609–613.
- 原嘉隆・田坂幸平 2010. 湛水土中播種におけるモリブデン付加種子の苗立ち向上効果－落水を必要としない安価・容易な水稻直播技術の可能性－. *日作紀* 79 (別 2) : 18–19.
- Heydecker, W. 1974. Germination of an idea : the priming of seeds. *Rep. Sch. Agric. Univ. Nottingham* 1973/1974 : 50–67.
- 日高伸 1981. 鉱物質および合成高分子系資材. 土壌改良と資材. 改訂版. 農林水産省農産園芸局農産課監修. 土壌保全調査事業全国協議会, 東京. 266–274.
- 東野裕広 2010. 鉄コーティング種子による水稻直播栽培 水稻の直播栽培と JA いずもでの普及事例. *グリーンレポート* 488 : 4–5.
- Hill, J.E., D.E. Bayer, S. Bocchi, and W.S. Clampett 1991. Direct seeded rice in the temperate climates of Australia, Italy, and the United States. In *Direct seeded flooded rice in the tropics*. International Rice Research Institute, Manila, Philippines. 91–102.
- Hill, J.E., S.R. Roberts, D.M. Brandon, S.C. Scardaci, J.F. Williams, and R.G. Muttters 1998. Rice production in California. <http://www.plantsciences.ucdavis.edu/ucrice/PRODUCT/prod.htm> (2011/5/10 閲覧).
- 平井一男 1995. 直播水稻の害虫管理. *植物防疫* 49 : 221–224.
- 堀尾光広 1998. イタリアにおける稲作機械化の現状 (第 1 報)－イタリア稲作の概要－. *農業機械学会誌* 60 : 135–138.
- 星野滋・山内稔・井上博喜・富樫一巳 2008. 鉄コーティング処理がイネシנגレセンチュウの生存と増殖に及ぼす影響. *日本線虫学会誌* 38 : 103.
- 今川彰教 2006. 東北地方における鉄コーティング直播栽培技術の導入－コーティング方法の改良－. *日作紀* 75 (別 1) : 284–285.
- 今川彰教・松田裕之・柴田康志 2008. 東北地方における鉄コーティング直播栽培技術の導入－出芽促進に伴う除草剤の効果－. *日作紀* 77 (別 1) : 4–5.
- 今川彰教 2009. 密封式鉄コーティングによる水稻湛水直播. *農及園* 84 : 888–894.
- 井上博喜・山内稔・宮川久義 2009. 鉄コーティング処理によるイネ育苗期病害の防除. *日植病報* 75 : 164–169.
- 井上直人 1997a. 植物の根に関する諸問題 [52]－イネ種子根のラセン運動の生態学的意味－. *農及園* 72 : 1225–1233.
- Inoue, N., T. Amano and K. Khoko 1997b. Seedling establishment of rice sown on soil surface in flooded paddy field. *Jpn. J. Crop Sci.* 66 : 632–639.
- 井上直人・松本禎 2001. 水稻の湛水直播における苗立ち性に関する研究. (7) 浮き苗率を支配する種子根の生長に及ぼす植物ホルモンの影響. *日作紀* 70 (別 1) : 92–93.
- 井上直人・荒井輝博・新川猛 2004. 水稻の湛水直播における苗立ち性に関する研究 (8) 温州みかん果皮抽出液による予措が浮き苗に及ぼす影響. *日作紀* 73 (別 1) : 8–9.
- Jones, J.W. 1933. Effect of reduced oxygen pressure on rice germination. *Journal of the American Society of Agronomy* 25 : 69–81.
- 片岡知守・山口誠之・遠藤貴司・中込弘二・滝田正・横上晴郁・加藤浩 2006. 食味の良い東北地域向け直播用水稻新品種「萌えみのり」の育成. *東北農業研究* 59 : 7–8.
- 川口桂三郎 1944. 水田土壤中に於ける硫酸アンモニアの水稻幼植物並びに初発芽に対する有害作用に就いて. *農学研究* 36 : 484–496.
- 北野順一・中山幸則・神田幸英 2001. 水稻湛水散播栽培における酸化鉄粉被覆種子の出芽苗立ち. *日作紀* 70 (別 2) : 71–72.
- 北野順一・生杉佳弘 2002. 水稻湛水直播栽培における播種後の落水管理が出芽・苗立ちに及ぼす影響. *三重科技セ農研報* 29 : 33–41.
- 栗久宏昭 2009. 水稻鉄コーティング直播でのイネミズゾウムシによる苗立ち不良の発生. 平成 20 年度近畿中国四国農業研究成果情報生産環境推進部会. http://wenarc.naro.affrc.go.jp/seika/seika_nendo/h20/02_kankyo/p6/index.html (2011/5/10 閲覧).
- Lush, W.M. and R.H. Groves 1981. Germination, emergence and surface establishment of wheat and ryegrass in response to natural and artificial hydration-dehydration cycles. *Aust. J. Agric. Res.* 32 : 731–739.
- 松島省三 1992. 稲作革命の夢, ケニアのタナデルタにおける水稻直播栽培試験の概要. *食糧振興* 45 : 2–5.
- 三石昭三・井村光夫 1981. 水稻の湛水土壌中散播栽培におけるベレッ

- ト状種初の利用について. 石川農短大報 11: 5-10.
- 三石昭三 1982. 水稻の湛水土壤中直播法が成立するまで. 農業技術 37: 294-298.
- 三石昭三・森田脩・中島敦司・服部健 1990. 水稻の湛水土壤中散播栽培における苗立ち密度が生育・収量におよぼす影響. 三重大学生物資源学部付属農場研究報告 8: 1-10.
- 宮越強 2011. 水稻鉄コーティング直播栽培の機械化と普及. 日作紀 80 (別 1): 500-501.
- 水沢誠一 2009. 新潟県における水稻の鉄コーティング湛水直播栽培の普及状況～課題の出芽・苗立ちが安定し, 害鳥も抑制～. グリーンレポート 482: 6-7.
- 森脇徹 1991. 転動造粒法. 日本粉体工業技術協会編, 造粒ハンドブック. オーム社, 東京. 133-168.
- 諸橋肇之助・田村隆夫・金子均 1988. 水稻の湛水溝付直播法の出芽・苗立ちに関する研究 第 2 報 種子初めの粘土コーティング法. 日作紀 57 (別 1): 297-298.
- 宗村明次・国武正彦 1964. 水稻湛水直播栽培における種子の埋没が発芽苗立ちに及ぼす影響. 新潟農試研報 14: 10-14.
- 村井信仁・小澤良夫 2001. イタリアの水稻直播栽培 (1). 農業技術 56: 449-453.
- 村岡賢一・東野裕広・阿部浩人・田口稔 2011. 鉄コーティング湛水直播栽培の実証と将来像. 日作紀 80 (別 1): 498-499.
- 鍋島学・岩井昭衛 2000. 水稻湛水直播栽培における苗立ち向上のための水管理 I. 湛水散播栽培での検討. 富山農技セ研報 19: 1-11.
- 内藤秀樹 1995. 水稻の直播栽培における病害. 植物防疫 49: 217-220.
- 農林水産省生産局農産振興課 2008. 水稻直播栽培の現状について. http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/zikamaki/z_genzyo/pdf/all.pdf (2011/5/10 閲覧).
- 農林省振興局農産課 1961. 耕土培養に関する資料. 農林省振興局農産課, 東京. 265.
- 及川正紀 2001. カルバー不要! 深水発芽の秘訣は水苗代に学ぶ. 現代農業 4: 182-184.
- Pandey, S. and L. Velasco 2005. Trends in crop establishment methods in Asia and research issues. In Toriyama, K., K.L. Heong, and B. Hardy eds., Rice is life: scientific perspectives for the 21st century. Proceedings of the World Rice Research Conference, Tokyo and Tsukuba, Japan, 4-7 November 2004. International Rice Research Institute, Philippines and Japan International Research Center for Agricultural Sciences. 178-181. CD.
- Park, K.H. and M. Yamauchi 2011. Evaluation of direct seeding method for rice using iron-coated seeds in Korea. Jpn. J. Crop Sci. 80 (Extra 1): 502-503.
- Pathinayake, B.D., L. Nugaliyadde, and C.A. Sandanayake 1991. Direct seeding practices for rice in Sri Lanka. In Direct seeded flooded rice in the tropics. International Rice Research Institute, Manila, Philippines. 77-90.
- Pill, W.G. 1994. Low water potential and presowing germination treatments to improve seed quality. In A.S. Basra ed., Seed Quality. Food Products Press, New York, USA. 319-359.
- 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-湛水土壤中における出芽・苗立ち率の検定に関する考察-. 農及園 64: 915-920.
- 佐々木亮・熊谷聡 2011. 寒地における鉄コーティング種子を活用した直播栽培技術. 日作紀 80 (別 1): 496-497.
- 佐藤徹・東聡志・市川岳史 2011. 北陸地域における水稻鉄コーティング湛水直播栽培のコーティング量, 播種深および播種後の水管理が出芽・苗立ちに及ぼす影響. 日作紀 80: 157-164.
- 澤村宣志 1994. 潤土直播栽培. 農業技術体系 追録第 16 号技 402 の 66-75.
- 関矢博幸・西田瑞彦・加藤直人 2006. 有機物多量施用条件下における飼料用鉄コーティング種子の苗立ち. 東北農業研究 59: 45-46.
- 白土宏之・吉永悟志・片岡知守・福田あかり・山口誠之・長田健二 2008a. 鉄コーティング種子の密封・加温が東北地方における散播水稻の苗立ちと収量に与える影響. 日作紀 77 (別 1): 8-9.
- 白土宏之・木村勝一・関矢博幸・吉永悟志・福田あかり・長田健二 2008b. 過酸化石灰資材による密封式鉄コーティング水稻種子の発熱遅延. 日作紀 77 (別 1): 6-7.
- 白土宏之・福田あかり・福寫陽・山口弘道 2009a. 水稻鉄コーティング種子の生育と波浪による流去の関係. 日作紀 78 (別 1): 8-9.
- 白土宏之・梶亮太・持田秀之・吉永悟志・小泉信三・福寫陽・福田あかり・山口弘道・長田健二・片岡知守 2009b. 直播向き水稻品種「萌えみのり」の鉄コーティング散播栽培. 日作紀 78 (別 2): 24-25.
- 白土宏之・木村勝一・関矢博幸・吉永悟志・福田あかり・長田健二・福寫陽・山口弘道・片岡知守・梶亮太・山口誠之 2010. 過酸化石灰資材を用いた密封式鉄コーティング水稻種子の苗立ちと収量. 日作紀 79 (別 1): 8-9.
- 高橋鴻七郎・杉本文午・遠藤武男・吉田善吉 1964. 湛水直播における種初めの浮遊防止法. 東北農試研報 2: 9-11.
- 高橋成人 1960. 稲種子の発芽過程における水分の吸水様相 特に発芽遅速よりみた各相の意義について. 日作紀 29: 1-3.
- Takahashi, N. 1961. The relation of water absorption to germination of rice seed. The Science Reports of the Research Institutes Tohoku University 12: 61-72.
- Takahashi, N. 1979. A concept of dormancy, germination and longevity in cereal seeds. Rep. Inst. Agr. Res. Tohoku Univ. 30: 21-27.
- 瀧村勇二・星野滋 2010. 水稻鉄コーティング直播でのモノアラガイ類による苗立ち不良の発生. 平成 21 年度近畿中国四国農業研究成果情報生産環境推進部会. http://wenarc.naro.affrc.go.jp/seika/seika_nendo/h21/02_kankyo/p63/12_212.html (2011/5/10 閲覧).
- 田中孝 2005. 山形県におけるイネ苗立枯細菌病の発生生態と防除に関する研究. 山形農事特研報 27: 14-17.
- 谷口久米蔵 1973. 湛水ばらまき栽培. 宮坂昭編, イネの直播栽培. 山漁村文化協会, 東京. 240-287.
- 寺島一男・下田英雄・平岡博幸・西山岩男・田中耕逸 1989. 湛水直播水稻における出芽・苗立ちの安定化に関する研究 第 3 報 酸素供給用種子粉衣剤 (過酸化カルシウム剤) への鉄化合物の配合が出芽・苗立ちに及ぼす影響. 日作紀 58 (別 2): 1-2.
- Turner, N. 2008. Drought hardening and pre-sowing seed hardening. In S.W. Trimble, B.A. Stewart and T.A. Howell eds., Encyclopedia of Water Science, Second Edition. 218-221.
- 内村要介・佐藤大和・松江勇次 2001. 酸素発生剤を用いない湛水土壤表面直播栽培の出芽苗立ち評価. 日作紀 70: 393-399.
- Venkateswarlu, B., B.S. Vergara, and R.M. Visperas 1987. Influence of photosynthetically active radiation on grain density of rice. Crop Sci. 27: 1210-1214.
- Vincent, E.M. and P.B. Cavers 1978. The effects of wetting and drying on the subsequent germination of Rumex crispus. Can. J. Bot. 56: 2207-2217.

- 渡邊寛明・木村勝一・吉住佳与・山口弘道・河本英憲・荻原均 2006. 飼料イネ品種「べこあおば」の鉄コーティング種子を用いた湛水直播栽培における出芽・苗立ちと鳥害回避効果. 東北農業研究 59 : 47-48.
- 山本真之・貝淵由紀子 2009. 湛水播種後の落水時期および再入水時期が鉄コーティング種子の発芽・苗立ちに及ぼす影響. 日作紀 78 (別 1): 108-109.
- 山本真之・貝淵由紀子 2010. 水稻鉄コーティング直播栽培の苗立ち安定化に適した水管理・除草体系. 日作紀 79 (別 1): 240-241.
- Yamauchi, M., A.M. Aguilar, D.A. Vaughan, and D.V. Seshu 1993. Rice (*Oryza sativa* L.) germplasm suitable for direct sowing under flooded soil surface. *Euphytica* 67 : 177-184.
- Yamauchi, M., P.S. Herradura, and A.M. Aguilar 1994. Genotype difference in rice postgermination growth under hypoxia. *Plant Sci.* 100 : 105-113.
- Yamauchi, M. and P.V. Chuong 1995. Rice seedling establishment as affected by cultivar, seed coating with calcium peroxide, sowing depth, and water level. *Field Crops Res.* 41 : 123-134.
- Yamauchi, M. and Tun Winn 1996. Rice seed vigor and seedling establishment in anaerobic soil. *Crop Sci.* 36 : 680-686.
- Yamauchi, M. and J.K. Biswas 1997. Rice cultivar difference in seedling establishment in flooded soil. *Plant Soil* 189 : 145-153.
- 山内稔 2000a. 湛水直播水稻の苗立ちに及ぼす 2 価鉄の影響. 近畿中国地域における新技術 35 : 72-76.
- Yamauchi, M., D.V. Aragonés, P.R. Casayuran, P.C. Sta. Cruz, C.A. Asis, and R.T. Cruz 2000b. Seedling establishment and grain yield of tropical rice sown in puddled soil. *Agron. J.* 92 : 275-282.
- 山内稔 2002a. 湛水直播水稻における種子の鉄コーティングによる比重の増加と浮き苗回避. 日作紀 71 (別 1): 150-151.
- 山内稔 2002b. 水稻の活性化種子の製造と湛水直播における利用. 日作紀 71 (別 1): 152-153.
- 山内稔 2003. 鉄コーティング湛水直播栽培の概要. 日作紀 72 (別 1): 4-5.
- 山内稔 2004. イネ種子の鉄コーティング方法と湛水直播栽培. 日作紀 73 (別 1): 10-11.
- 山内稔 2006a. 水稻の鉄コーティング湛水直播の普及にかかわる諸問題と今後の課題. 日作紀 75 (別 1): 4-5.
- 山内稔 2006b. 鉄コーティング技術の開発, 普及状況および問題点. 農業技術 61 : 552-555.
- 山内稔・土門正幸・嘉納百樹・藤原逸平 2008. 鉄コーティング種子の大量製造技術. 近畿中国四国地域における新技術 7 : 22-24.
- 山内稔 2009. 水稻の鉄コーティング湛水直播における種子の大量製造と栽培のポイント. 米麦改良 2009 年 10 月号 : 2-8.
- 山内稔 2010a. 鉄粉被覆稲種子の製造法. 4441645 号. 特許権者独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構. 出願日 2004 年 1 月 6 日, 公開日 2005 年 7 月 21 日.
- 山内稔 2010b. 鉄コーティング湛水直播マニュアル 2010. 独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構近畿中国四国農業研究センター. 1-28. http://wenarc.naro.affrc.go.jp/tech-i/iron_coating_seed/iron_coating_seed.pdf (2011/5/10 閲覧).
- 山内稔 2010c. 鉄コーティング湛水直播と種子の大量製造技術による稲作の省力・規模拡大. 農及園 85 : 70-75.
- 山内稔 2010d. 水稻鉄コーティング種子の無代かき直播への適用. 日作紀 79 (別 1): 6-7.
- 山内稔 2011. 水稻鉄コーティング種子の無代かき直播における苗立ちと雑草管理. 日作紀 80 (別 1): 26-27.
- 吉住佳与・渡邊寛明・山口弘道・木村勝一・河本英憲 2006. 飼料イネ品種「べこあおば」における鉄コーティング種子の放熱経過と発芽に及ぼす活性化処理, 種子内水分及び置床前加温の影響. 東北農業研究 59 : 49-50.
- 趙志超・寺島一男・荻原均・長田健二 2002. 水稻湛水直播における浮き苗発生の品種間差異. 日作紀 71 (別 2): 212-213.
- 趙志超・吉永悟志・荻原均・寺島一男 2004. 水稻の湛水表面直播栽培における浮き苗発生の簡易検定法の確立と発生要因の検討. 日作紀 73 (別 1): 288-289.
- 周紅・森田脩・江原宏 1999. 水稻湛水土壤中散播栽培におけるたこあし苗と正常苗の生育の比較. 日作東海支報 128 : 9-13.

注一覧

農機新聞 2010 年 10 月 19 日第 4 面.

東北農業単年度試験研究成績 2004 年, 2007 年.

鉄コーティング湛水直播栽培技術研究会. 講演・成績資料集. 2011 年 1 月 17 日. 全国農業協同組合連合会, 東京. 1-239.

Direct Seeding of Rice Crop in Flooded Paddy Fields Using Iron-coated Seeds : Minoru YAMAUCHI (*National Agricultural Research Center for Western Region, National Agriculture and Food Research Organization, Japan*)

Abstract : Labor costs in rice production can be reduced by changing planting methods from transplanting to direct seeding. However, the adoption of direct seeding in fields is limited, since seedlings tend to float in standing water. We report on a new approach to solve this problem through the use of iron-coated seeds. Soaked or pregerminated rice seeds are covered with reduced iron powder mixed with calcined gypsum using a water spray. The iron powder on the seed surface is oxidized, producing rust which works as a binder constituting a firm coating layer. The iron-coated seeds can be prepared manually or through mechanization in large quantities and safely stored for one to two years. They are sown directly onto the soil surface in the same way as water seeding common in US or wet seeding in tropical Asia. The iron-coated seeds are less vulnerable to sparrow attack and are more resistant to seed-borne diseases and insect damage. This technology is adopted in the farmers' fields in some private sectors. The main issues which must be overcome to further adoption of this method are the protection of seeds from the heat generated by the iron oxidation, the acceleration of initial seedling growth, the improvement of water control, and the increase in grain yield.

Key words : Bird damage, Direct seeding, Establishment of seedling, Floating seedling, Iron coating, Rice, Seed.