

BULLETIN
OF THE
PLANT BIOTECHNOLOGY INSTITUTE
IBARAKI AGRICULTURAL CENTER

NO. 17
March 2023

茨城県農業総合センター 生物工学研究所研究報告

第 17 号

令和 5 年 3 月

茨城県農業総合センター
生物工学研究所

茨城県笠間市安居 3 1 6 5 - 1
Ago, Kasama, Ibaraki, 319-0292, Japan

茨城県農業総合センター生物工学研究所研究報告 No17 の発行にあたって

生物工学研究所が平成4年に設立されてから30年になります。この間、水稻「ふくまる」、ナシ「恵水」、メロン「イバラキング」等、30以上の新品種を育成し、関係機関や生産者の協力により、それぞれの品種にあった栽培技術確立し、普及してきました。そして現在も県産品のブランド化による儲かる農業に貢献するため、新たな品種の育成に取り組んでいます。

生物工学研究所では平成17年度まで農林水産省の陸稲育種指定試験地として陸稲の新品種育成に取り組んでおり、前身の茨城県立農事試験場、続く茨城県農業試験場を経て、現在の生物工学研究所までの77年間に「トヨハタモチ」、「ゆめのはたもち」、「ひたちはたもち」等28品種を育成してきました。陸稲栽培面積の減少等、生産環境の変化に伴い、国内唯一の陸稲育種機関としての役割は全うしましたが、水資源が乏しい新興国の食糧事情の改善、水稻の病虫害抵抗性や成分改変育種のための遺伝資源、そして連作障害回避や有機物供給による持続的生産のツールとして、陸稲は現在も活用されています。

今回、生物工学研究所で培った陸稲の研究資源を後世に活かすため、元陸稲育種指定試験地主任 根本 博 博士 執筆の「陸稲育種マニュアル」を研究報告として発行することとしました。本研究報告が将来の農業研究の発展に寄与することを期待いたします。

令和5年3月

茨城県農業総合センター生物工学研究所

所長 宮城 慎

目 次

報 文

茨城県農業総合センター生物工学研究所における陸稲育種マニュアル

根本 博

要約	1
1 はじめに	1
2 方法	1
3 陸稲品種の特徴	2
4 国内での陸稲育種の変遷	5
5 茨城県農業総合センター生物工学研究所における陸稲育種の流れ	9
6 陸稲の主要特性に関する育種技術	17
7 陸稲の耐干性に関する育種技術	34
8 考察	48
謝辞	50
引用文献	50
英文摘要	54

茨城県農業総合センター生物工学研究所における陸稲育種マニュアル

根本 博¹⁾

(茨城県農業総合センター生物工学研究所)

要約

茨城県では、1929年から陸稲の育種事業を開始し、2006年に終了するまで多くの陸稲品種を育成し、国内での米生産に大きく貢献してきた。加えて陸稲に関する様々な基礎研究を実施してきた。茨城県農業総合センター生物工学研究所に蓄積された陸稲の品種改良に関する技術は、世界の陸稲研究にとっても貴重なものである。本稿では茨城県立農事試験場（1900年創設）時代から茨城県農業試験場（1950年～1992年）を経て茨城県農業総合センター生物工学研究所（1992年～）で実施された陸稲育種の流れや耐干性などの様々な特性検定を解説するとともに、各技術の裏付けとなった基礎的な研究成果を紹介する。

キーワード：陸稲、育種、育種方法、耐干性、茨城県

1 はじめに

世界の稲作において、陸稲による米生産は現在でも大きな割合を占めている。国内の農業でも陸稲は稲作において水稻作を補填して重要な役割を果たし、特に茨城県は陸稲栽培の主産県として中心的な立場であった。そのなかで、茨城県農業総合センター生物工学研究所（旧茨城県立農事試験場・茨城県農業試験場）は、1929年から農林水産省指定試験地として、全国向けに陸稲の育種事業を実施し、多くの陸稲品種を育成・普及させるとともに、陸稲に関する基礎研究を実施してきた。陸稲栽培面積の減少により、2006年に陸稲育種事業は終了したが、茨城県農業総合センター生物工学研究所に蓄積された陸稲に関する技術は、世界の陸稲研究にとって貴重な知見と言える。本稿では茨城県農業総合センター生物工学研究所で実施された陸稲育種関連技術とその背景となった研究成果を紹介する。

なお、本稿では陸稲育種事業の全体を扱うため、1) 陸稲品種の特徴、2) 国内での陸稲育種の変遷、3) 生物工学研究所における陸稲育種の流れ、4) 陸稲の主要特性に関する育種技術、5) 陸稲の耐干性育種に関する育種技術、の構成として、各育種技術の内容を説明し、その裏付けとなった研究成果を紹介した。

文中で農林番号や関東番号で示された品種系統で、陸稲と水稻で同じ名称の品種系統名が存在する例がある。そのため、本資料の中で単に‘関東〇〇号’と記載された場合は陸稲を示し、水稻品種系統の場合は‘水稻関東〇〇号’と記載している。また、本資料中で引用した図表は元資料の掲載誌の紙質が経年劣化しているものが多いため、トレースして掲載した。

2 方法

陸稲育種技術に関する情報収集

各特性検定について、茨城県農業総合センター生物工学研究所（以下「生物工学研究所」と略す。）の陸稲育種チームでは、試験担当者の異動等によって育種技術が失われるのを避けるために、チーム内で陸稲育種に関する栽培・試験手順を共有し、随時担当者が内容を加筆してきた。本稿では本手順を基礎として、平山正賢氏らの陸稲育種チームの旧担当者から具体的な特性検定について聞き取り調査を行い、より詳細な技術の内容を記載するとともに、各技術の裏付けとなる研究成果を加えて、本稿を作成した。

また、文献として茨城県農業試験場研究報告や陸稲育種チームの発表論文に加えて、陸稲育種技術の基礎データとして茨城県以外で実施された陸稲に関する研究成果も引用文献として用いた。一方、陸稲育種チームでは、以前から陸稲育種基礎試験成績書を不定期に発行してきたが、未発表の内容が多いため、今回の取りまとめでは割愛した。

1) 現 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 基盤技術研究本部
遺伝資源研究センター

3 陸稲品種の特徴

陸稲品種は水稻品種と比較して、形態的には、草丈が高い、分げつが少ない、長穂で穂重型、葉は長くて広い、深根性、米の粒形が大粒でやや薄い等の特徴があり、生理的には干ばつやいもち病に強いなどの特徴的な特性をもつ（小野、1975）（表 1）。しかし、日本の陸稲と水稻を明確に区別できる形態的、生理的的特性はなく、両者の特性の変異は連続的である。

生物工学研究所では茨城県立農事試験場の時代から長年に渡って、陸稲の特性に関して様々な調査研究を実施し、その品種特性の傾向を明らかにしてきた。例えば、新妻・小野（1969）は陸稲品種の特徴的な形態特性として、水稻品種より幅が広く、長くて垂れる葉を挙げている。また、陸稲品種内でも多様性を認め、改良型陸稲品種では、中生～晩生品種は早生品種よりも一般に葉や茎が粗剛で止葉が長く、在来陸稲品種に近い傾向があると述べている。岡野ら（1971）は陸稲品種、畑地灌漑栽培用水稻（畑地灌漑を使って畑で栽培される水稻品種）と水稻品種での稈の構造を観察し、稈の直径と稈の組織の厚さは、陸稲＞畑地灌漑栽培用水稻＞水稻の順であることを認め、陸稲の稈質が粗剛なことを構造的に裏付けた。岡野ら（2005）は在来陸稲品種 289 点の主要特性について詳細な調査を行い、在来陸稲品種内に幅広い多様性を確認した。また、それらの生理的・形態的特性に基づき、在来陸稲品種のコアコレクションとして 32 品種を選び、農業・食品産業技術総合研究機構（以下、農研機構と略す）のジーンバンク（https://www.gene.affrc.go.jp/index_j.php）において公開している（岡野ら、2006；農研機構、2021）。

表 1 陸稲と水稻の主要特性の違い（小野、1975）

形 質	陸 稲	水 稻
草姿・草状	粗剛	やさしい
草丈	高い	低い
分げつ	少ない	多い
穂	長く大きい	比較的短い
草型	穂重型が多い	穂数型が多い
葉身	広く長く垂れる	狭く短く直立する
稈	太く硬い	細くしなやか
根	太く、深根が多い	細く、浅根が多い
粳、玄米の形	大粒でやや薄い	小粒で粒張りが良い
玄米品質	つやがなく、色が悪い	光沢が優れ、色調も良い
食味	粘りが弱く、粗雑	粘りが強く、なめらか
耐干性	優れる	劣る
いもち病抵抗性	強いものが多い	比較的弱い
耐倒伏性	弱い	強い
耐肥性	劣る	優る
収量性	劣る（約 200kg/10a）	優る（約 400kg/10a）

3. 1 陸稲品種の起源

角田（1975）は、日本の陸稲品種をその特性によって 3 つのグループ（a）日本水稻からの転用品種、（b）陸稲型品種群、（c）中国（華中～華南）渡来の秈系統に分けている。さらに（b）陸稲型品種には満州から朝鮮の陸稲、乾稲、あるいはインドネシア～フィリピン～台湾の陸稲、水陸兼用稲、山地稲が含まれるとしている。小野（1973）は、主要な在来陸稲品種の起源と特性について整理し、ほとんどの陸稲品種はいくつかの代表的な陸稲品種に起源を遡ることができるとして、在来品種を戦捷系、浦三系、平山系、葉冠系、田優系等に分類した。小野（1973）の分類した在来陸稲品種は、角田（1975）の特性による分類では（b）陸稲型品種群に含まれている。‘戦捷’、‘浦三’、‘平山’、‘田優’はうるち米、‘凱旋’と‘藤蔵

糯’は糯米である。‘田優’は、在来水稻品種から畑作に適応するよう選ばれた品種である。‘戦捷’と‘凱旋’は、1900年代に中国または朝鮮半島に出征した兵士によって日本に持ち帰られた品種に起源すると伝えられる。

3. 2 主な陸稲品種

国内では、改良型陸稲品種として、2008年まで畑地灌漑栽培用の水稻品種‘ミズハタモチ’を含む62の品種が育成され、農林水産省に品種登録された。さらに国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構（以下「農研機構」と略す。）のジーンバンクで約470の国内の在来陸稲品種が保存・公開されている。表2は1993年の主な陸稲品種の栽培面積を示している。国内で最も栽培面積が多い品種は茨城県農業試験場で育成された‘トヨハタモチ’で、当時の国内の陸稲栽培面積の半分を占めた。栽培されている陸稲の99%は糯品種であり、うるち品種の栽培はほとんど見られない。うるち品種が栽培されない理由は、陸稲のうるち米の米飯品質が水稻米に比べて著しく劣るためである。米の生産過剰傾向が続き、良食味米の需要が高い日本では、食味の劣る陸稲うるち米への需要は極めて少ないと言わざるを得ない(根本、1995)。

以下に、主要な陸稲品種について紹介する。

表2 国内で栽培されている主な陸稲品種（1993年）

品種	栽培面積	
	(ha)	(%)
[糯米]		
トヨハタモチ	6,760	54.5
キヨハタモチ	910	7.3
陸稲農林糯26号	770	6.2
ワラベハタモチ	620	5.0
ツクバハタモチ	500	4.5
その他	2,660	21.5
[うるち米]		
陸稲農林24号	10	0.1
その他	110	0.9
合計	12,400	100.0

トヨハタモチ

‘トヨハタモチ’は、茨城県農業試験場で‘石系201号’（後の‘フクハタモチ’）と‘ワラベハタモチ’の雑種後代から育成された、極早生の糯品種（1985年、陸稲農林糯55号）である（金ら、1986）（図1）。この品種の長所は、優れた収量と品質、そして盛夏期の干ばつ害を避ける早生性である。冷害以外のさまざまな気候条件に適応できる安定性の高い品種と言える。‘トヨハタモチ’は山形県、福島県、茨城県、栃木県、群馬県、千葉県、神奈川県等で栽培された。陸稲品種で最も栽培の多い品種であり、1993年の全国の陸稲の栽培面積の約50%で‘トヨハタモチ’が栽培されていた。



図1 陸稲品種‘トヨハタモチ’
(茨城県水戸市農家圃場)

ゆめのはたもち

‘ゆめのはたもち’は、生物工学研究所でインド陸稲品種‘JC81’に‘陸稲農林糯4号’を3回交配した雑種後代から育成された耐干性に優れた中生の糯品種（1996年、陸稲農林糯60号）である（根本ら、1998）（図2）。「JC81」は農研機構のジーンバンクから提供された深根性のインドの在来陸稲品種で、「陸稲農林糯4号」はいもち病抵抗性を持つ中生の品種である。「ゆめのはたもち」は「JC81」由来の深根性を受け継ぎ、高い耐干性と水稻餅並みに優れた餅の食味を持つのが特長である。畑での実際の栽培で「ゆめのはたもち」の根は、他の日本陸稲品種よりも深い土壌層に達していることが確認されている。この深根性により「ゆめのはたもち」の耐干性は、これまでの日本の陸稲品種の中で最高クラスと評価される。また、「ゆめのはたもち」の餅の食味は水稻糯米と同程度に優れ、これまでの陸稲糯米で最も良食味である。「ゆめのはたもち」は茨城県、栃木県、群馬県で奨励品種として栽培された。



図2 陸稲品種‘ゆめのはたもち’
(茨城県農業総合センター
生物工学研究所)

ミズハタモチ

‘ミズハタモチ’は、茨城県農業試験場でスプリンクラー等による灌水を前提とした畑地灌漑栽培用水稲品種として、水稻品種‘越路早生’と‘ハタコガネモチ’の雑種後代から育成された糯品種（1969年、水稻農林糯208号）である（小野ら、1970）。こうした畑地灌漑栽培用に育成された品種は陸稲と水稻の中間的な特性を示すことが多く、「ミズハタモチ」は一般の陸稲糯米と比べて、餅の食味が優れるのが特長であるが、通常の陸稲品種と比べて耐干性やいもち病抵抗性がやや劣るため、畑地灌漑の設備が不可欠とされる。「ミズハタモチ」は、福島県、茨城県、栃木県、群馬県、大分県で栽培された。

キヨハタモチ

‘キヨハタモチ’は、茨城県農業試験場で陸稲同士の‘関東糯 118 号’と‘石系 241 号’の雑種後代から育成された糯品種（1988 年、陸稲農林糯 58 号）である（金ら、1989）（図 3 右）。この品種は倒伏、いもち病、干ばつに対して比較的高い耐性を示し、幅広い環境適応性を備えた早生の品種である。‘キヨハタモチ’は茨城県で奨励品種として採用され、1993 年には‘トヨハタモチ’に次いで国内で 2 番目に広く栽培された。



図 3 陸稲品種‘ひたちはたもち’（関東糯 197 号）（左）と‘キヨハタモチ’（右）
（茨城県農業総合センター
生物工学研究所）

ひたちはたもち

‘ひたちはたもち’は、生物工学研究所で‘ゆめのはたもち’と‘関東糯 166 号’との雑種後代から育成された糯品種（2005 年、陸稲農林糯 61 号）である（石井ら、2006）（図 3 左）。‘ゆめのはたもち’由来の耐干性と‘関東糯 166 号’由来の早生性を備え、盛夏期の干ばつ害を回避することができる。また、‘トヨハタモチ’の欠点であった耐冷性も備えている。茨城県は‘キヨハタモチ’に替えてこの品種の普及を進めた。なお、この品種の育成をもって 77 年間続いた茨城県での陸稲育種事業は終了となった（石井、2007）。

陸稲農林糯 26 号

‘陸稲農林糯 26 号’は、第二次世界大戦直後の 1947 年に茨城県立農事試験場で育成された。この品種は‘陸稲農林糯 3 号’と在来陸稲の‘戦捷茨城 1 号’の雑種後代から選抜された晩生の糯品種である。本品種の特長はいもち病と干ばつに対して高度な抵抗性を備えている点にある。‘陸稲農林糯 26 号’は茨城県、栃木県、東京都、神奈川県、熊本県などで広く栽培され、1950 年代から 1970 年代にかけて国内で最も広く栽培された陸稲品種であり、戦後の食糧難の時代を支えた品種と言える。

陸稲うるち品種

陸稲のうるち品種はこれまでに 26 品種が育成され、農林水産省に品種登録されている。しかし、現在の国内での陸稲のうるち品種の栽培は数十 ha に過ぎない。うるち品種の栽培が少ない原因は、前述したように陸稲うるち米の米飯食味が水稻米に比べて著しく劣る点にある。国内で‘コシヒカリ’など良食味米が求められる中で、陸稲のうるち米は販路を見つけることが難しい。うるちの主な陸稲品種としては、‘陸稲農林 22 号’（1944 年）、‘陸稲農林 24 号’（1944 年）、‘オオスミ’（副島ら、1963）、‘オカミノリ’（小野ら、1966）、‘チョミノリ’（小野ら、1969）等がある。そのなかでは‘陸稲農林 24 号’は、関東地方や西日本で比較的広く栽培されたうるち品種で、その栽培面積は 1960 年に 11,966ha に達した（長谷川、1963）。

4 国内での陸稲育種の変遷

栽培地域の環境に適した新品種を育成し普及させることは、作物の生産性を向上させるための最も効果的な方法と言え、品種育種事業は安定的な作物生産を実現する上で極めて重要な役割を担っている。元来

は半水生植物であるイネを、陸稲として畑というイネにとって過酷な環境で栽培するためには、水稻とは異なった陸稲独自の特性が必要であり、そのための育種目標を明確にすることが重要である。

4. 1 陸稲育種組織の変遷

日本での陸稲の品種改良は、明治の中頃から国立農事試験場が日本各地で収集した在来陸稲品種の品種比較試験として開始された。1900年代には陸稲の本格的な育種事業が公立農業試験場において純系選抜育種法を使って始まり、‘戦捷茨城1号’、‘栃木浦三1号’等の改良型陸稲品種が育成された。1920年頃から交雑育種法を用いた陸稲育種が本格化し、‘愛知新戦捷’、‘熊本1号’等の品種が育成された（小野、1973）。陸稲の全国的な育種体制は、1929年に農林水産省によって設立された。この体制では、国全体を気候条件に基づいて5つの地域に分け、それぞれの地域で陸稲育種に適した県立農業試験場（秋田県（寒冷地）、茨城県（温暖地東部）、三重県（温暖地西部1）、鳥取県（温暖地西部2）、鹿児島県（暖地））を育成地に指定し、各地域に適した陸稲品種の育成を進めた（図4）。このうち茨城県立農事試験場に置かれた陸稲育種チームは、関東東山地域、福島県と静岡県を含む温暖地東部の幅広い地域を担当した。1947年に三重県、鳥取県、鹿児島県の3県と、1951年に秋田県で陸稲育種事業が終了した後は、茨城県農業試験場（現在は茨城県農業総合センター生物工学研究所）が全国向けに陸稲育種を継続した（新妻、1977）。しかし、2006年に国内の陸稲栽培の減少等の理由から茨城県での陸稲育種も終了となり、国内における組織的な陸稲育種事業は幕を下ろすことになった（石井、2007）。



図4 1929年に設置された陸稲育種指定試験地

4. 2 育種目標

作物の育種事業を始めるためには、明確な育種目標を立てるのが最初の作業になる。特に陸稲の場合、栽培品種に求められる特性の水準が、降水量、気温、土壌などの環境条件によって大きく異なるため、普及予定地域の環境条件に応じて合理的な育種目標を定める必要がある。Gupta and O'Toole (1986a) は、陸稲にとって厳しい環境と好適な環境との間で、求められる特性の違いを整理した（表3）。雨が多く好適な環境向けの陸稲品種では、穂数が多く、直立した草型、高収量、良品質が重視すべき育種目標とされ、耐干性や耐病性はその下位に位置付けられる。一方、厳しい環境向けの陸稲品種では高度な耐干性が最優先の育種目標であり、収量の優先度は低く、品質は育種目標とされない可能性もある。このように普及予定地域の環境条件に応じて、陸稲の育種目標は大きく変わってくる。

表3 好適な環境と厳しい環境向けの陸稲品種に求められる特性（Gupta and O'Toole (1986a) から和訳）

好適な環境向け品種	厳しい環境向け品種
・矮性から中間型の草型	・耐干性
・安定して高い収量水準	・深根性
・穂重型からやや穂数型の草型	・中生～晩生
・耐倒伏性	・中度の収量水準
・優れた初期生長力	・穂いもち抵抗性
・深根性	・アルミニウム毒性耐性
・窒素肥料への反応が中程度	・雑草競合性
・耐干性	
・いもち病などへの耐病性	
・低肥沃土、P 欠、アルミニウム毒性酸性土壌への耐性	

図5は、1977年から15年間に国内の陸稲総生産量が低下した原因を示している。この期間に全国の陸稲作で一万トンを超えた減収は7回（1978、1979、1981、1984、1985、1988、1990）あり、その原因を見ると、ほぼ3年に一回干ばつ害と10年に一回冷害により大きな減収が生じていることが分かる。耐病性に関して、陸稲品種は水稲と比べて一般にいもち病に対して抵抗性をもつが、それでもいもち病は依然として陸稲の収量低下の大きな原因の一つである。陸稲育種において、こうした環境耐性や耐病性の向上は水稲育種よりも重要性が高いと言える。

日本の水稲育種では、1920年代から1970年代にかけて国内での食糧事情の変化を受け、最も主要な育種目的が栽培の安定性と米の収量性から米の品質に移ってきた。陸稲育種では、根本（1995）は近年の陸稲の重視すべき育種目的として、(a) 耐干性、(b) 米品質、(c) 晩播適応性を挙げている。これらの育種目標は、国内での陸稲の農業上の役割と栽培状況の変化を反映している。陸稲育種における耐干性の重要性は変わらないが、特に原料米として安価な輸入米と競合するために、餅食味や米菓加工適性の向上が強く求められてきた。また、最近、陸稲は畑輪作で野菜の連作障害を抑制する役割を果たしており、春野菜の収穫後の播種でも安定した収量が得られる晩播適応性の重要性が増した。

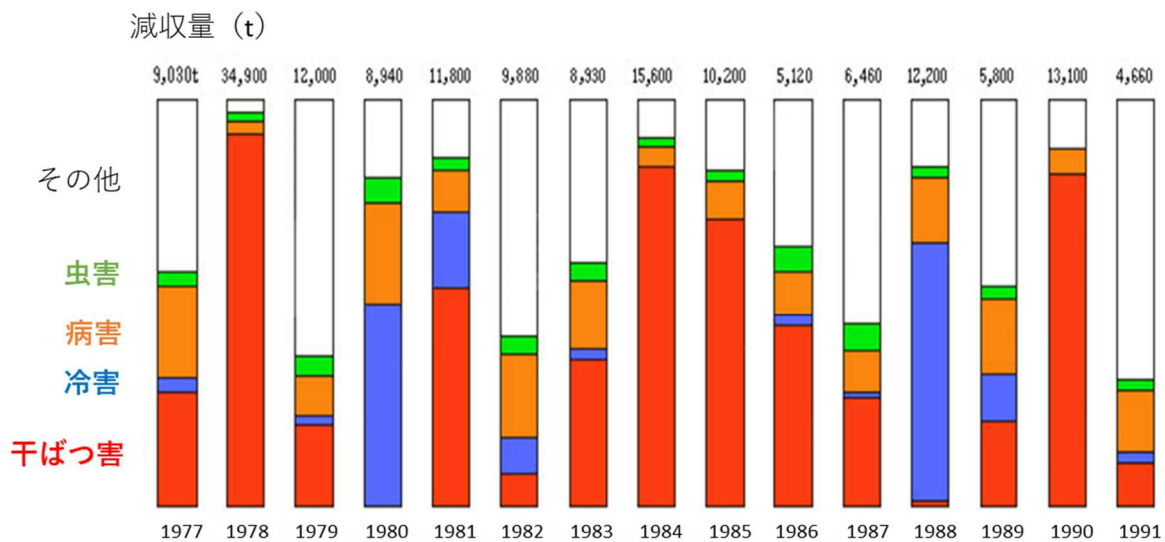


図5 1977年からの15年間ににおける陸稲の減収要因
(農林水産省「作物統計」により作成)

茨城県農業総合センター生物工学研究所普通作育種研究室陸稲育種チーム（以下、生物工学研究所陸稲育種チームと略す）では、陸稲の育種材料を大きく3グループ（a）早生陸稲、（b）中生～晩生陸稲、（c）畑地灌漑栽培用水稲に分けて育種事業を進めた。育成された系統の違いを明瞭にするため、早生と中生～晩生の陸稲系統は‘関東糯〇〇号’、畑地灌漑栽培用水稲は‘石岡糯〇〇号’と異なった地方番号を付けて奨励品種決定調査等に提供した。それぞれの系統グループで求められる特性は、熟期と想定される栽培方法によって異なり、特に必要とされる耐干性の水準が大きく異なる（表4）。早生の陸稲品種の出穂期は梅雨末期の7月末なのに対して、中生～晩生の陸稲は8月中旬から下旬にかけての盛夏期に出穂期を迎えるため、中生～晩生の陸稲品種は早生品種より高い水準の耐干性が必要である。逆に、畑地灌漑栽培用水稲品種はスプリンクラーなど灌漑施設のある畑での栽培を前提としているため、高度な耐干性は不要である。陸稲の3つのグループの育成系統に求められる耐干性の水準は、中生～晩生陸稲>早生陸稲>畑地灌漑栽培用水稲の順となる。中生～晩生陸稲の育種目標は、Gupta and O'Toole（1986a）が厳しい環境向け品種向きに挙げた形質と、畑地灌漑栽培用水稲は好適な環境向け品種向けの形質と一致すると考えられ、早生陸稲はそれらの中間的な立場と言える。

表 4 日本の陸稲育種における育種目標の重要性

品種	耐干性	いもち病 抵抗性	収量	品質
早生陸稲	++	++	+++	++
中生～晩生陸稲	+++	+++	++	+
畑地灌漑栽培用水稲	+	++	+++	+++

陸稲育種において収量水準の目標をどの程度に設定するかは難しい問題である。むやみに高い収量性を目指すと、安定性が低下する危険性があり、注意が必要である。例えば、着粒粒数を多くした陸稲系統は、十分な降雨下では高収が期待できるが、干ばつに遭遇すると不稔粒や登熟不良米が多発し、収量が極端に低下する危険性がある。従って、陸稲育種では収量目標は中庸にとどめ、どんな環境でも一定の収量を確実にあげることができる品種を育成することが重要である。生物工学研究所陸稲育種チームは、天候に影響されずに 300～450kg/10a を得ることができる品種を育成するのが、安定的な陸稲栽培を続けるために適当だと考えて、系統選抜を実施した。

4. 3 陸稲の育種方法

新妻（1977）は、陸稲育種で用いられた育種法の歴史を紹介している。組織的な育種事業が始まる前は、篤農家が在来品種から自然突然変異や純系淘汰法により品種を選抜してきた。茨城県農業試験場の陸稲育種事業では、当初から系統育種法を中心に品種育成を行ってきた。1960 年代には集団育種法がいくつかの組合せで利用されるようになり、マイクロプロットの利用は、1965 年から選抜の効率化を図るために試みられた。1960 年代以来、⁶⁰Co による突然変異育種法が遺伝的分離の拡大と劣性形質の改良を目指して使用されてきた。生物工学研究所陸稲育種チームでは系統育種法を基本として、育種目標によっては突然変異育種法と薬培養による半数体育種法を一部に利用して、陸稲育種を実施した。

以下に、主な育種方法の流れを簡単に紹介する。

(1) 純系淘汰法

品種改良の中で、純系淘汰法は最も初歩的な育種方法と言える。改良品種が普及する前は、多くの在来品種で品種内での遺伝的分離や他の品種との交じりが認められるのは普通であった。そのため、昔から地域内で栽培されてきた在来品種から篤農家が純系淘汰により地域に合った優良株を選抜し、育成者の名前や土地の地名を品種名にして普及した例が多くみられる。例えば、宇都宮市江曾島町の篠崎重五郎氏が在来種から選抜した‘江曾島糯’は、明治後期から太平洋戦争期まで広く栽培され、一時期は栃木県の奨励品種として普及した。1900 年代に開始した陸稲の組織的な品種改良事業でも、公立農業試験場で在来品種の純系淘汰が広く行われ、‘戦捷茨城 1 号’、‘栃木浦三 1 号’等の陸稲品種が育成され、農家に普及した。

(2) 系統育種法

系統育種法は自殖作物の育種で最も広く使用されている方法であり、特に主働遺伝子が制御する特性の改良で効果的である。3 つのステップ、(a) 交配、(b) 個体・系統選抜、(c) 特性検定試験により、目的とする系統を選抜する。一般に、個体選抜は F₃ 世代で行い、その後、単独系統、系統群系統として、特性検定試験の結果を参考に系統選抜を繰り返す（図 6）。この育種法では、目的とする特性が初期世代で遺伝的に固定するため、望ましい個体や系統が初期世代の選抜で効率的に獲得できると期待される。

(3) 集団育種法

この育種法は多くの遺伝子が関与する特性を育種目標とする育種において適切な育種法である。こうした特性は一般に雑種初期世代では分離が著しく、初期世代に選抜を行っても効果が少ない。集団育種法では、初期世代は選抜を加えずに圃場や温室で集団栽培し、遺伝的固定を進める。温室内での世代促進栽培により育成期間の短縮を図ることも効果的である。育種目標とする特性の遺伝的固定が進んだ F₅ から F₇ 世代に個体選抜を開始し、その後は系統育種法と同様に特性調査と系統選抜を進める。

5 茨城県農業総合センター生物工学研究所における陸稲育種の流れ

生物工学研究所陸稲育種チームは通常研究員 4 名、圃場作業員 2 名、数名の契約職員で構成された（1995 年）。育種事業は茨城県農業総合センター農業研究所（茨城県水戸市）内の圃場を使用して実施した。この地域の年間平均気温と降水量は 13.8℃、1,400mm である（新妻、1977）。農業研究所は 7 ha の水田と 18 ha の畑を所有しており、生物工学研究所陸稲育種チームは、農業研究所が行っている大豆や落花生等の原種生産と輪作を組み、例年約 6 ha の畑を使用した。また、青森県農業試験場藤坂支場に現地選抜圃場を持ち、極早生系統の評価と選抜を実施した。表 5 に 1995 年の陸稲育種チームの事業内容を示す。

以下に、生物工学研究所陸稲育種チームの陸稲育種の流れを紹介する。

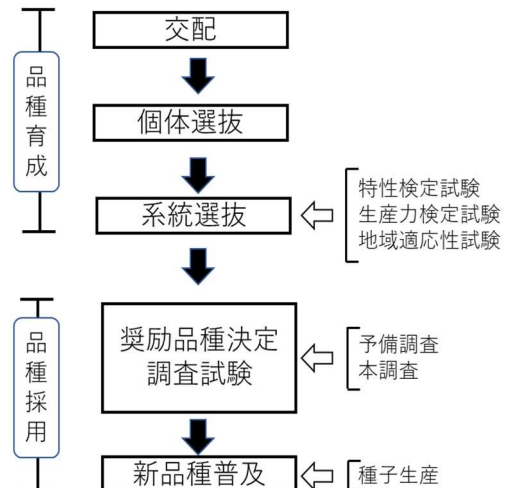


図 6 系統育種法に基づく品種育成の流れ

表 5 茨城県農業総合センター生物工学研究所の陸稲育種の事業内容（1995 年）

材料数	栽培数	選抜数
交配	64 組合せ	64 組合せ
F ₁ 世代	45 組合せ	45 組合せ
F ₂ 集団	43 組合せ	43 組合せ
F ₃ 集団（個体選抜用）	81 組合せ	71 組合せ
系統		
単独系統	50 組合せ	43 組合せ
	610 系統	101 系統
系統群系統	121 組合せ	94 組合せ
	849 系統	135 系統
葯培養系統	3 組合せ	3 組合せ
	15 系統	15 系統
特性検定試験		
生産力検定試験	165 系統	
葉いもち抵抗性検定試験	757 系統	
穂いもち抵抗性検定試験	103 系統	
耐干性検定試験	55 系統	
株枯病抵抗性検定試験	757 系統	

5. 1 交配

一般的な水陸稲の育種事業では、品種育成の第一歩は育種目的に応じて選ばれた両親の交配によって始まる。交配から新品種の育成まで 10 年以上の期間が一般には必要とされる。したがって、交配の目標となる育種目標は、現在求められている特性に加えて、10 年後に必要なと考えられる特性も含める必要がある。また、将来の育種素材として外国品種等との交配によって、耐干性、耐病性、品質等に関する素材系統の開発も重要である。生物工学研究所陸稲育種チームでは、ひと夏で約 50～70 組合せの交配を実施してきた。使用する材料は自前の陸稲系統が多いが、組合せの 3 分の 1 は陸稲品種の品質向上を目的とした水稲品種との交配であった。また、これまでの外国品種を素材に使った経験では、アフリカ、南米、中国に由来するインド型品種は、深根性などの育種の遺伝的多様性を拡大するために有益であり、‘ゆめのはたもち’や‘ひたちはたもち’の育成につながった。

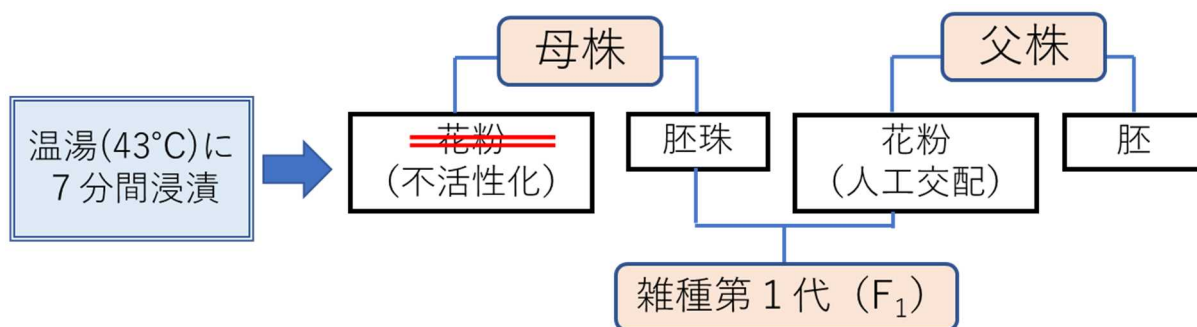


図 7 温湯除雄法による交配手順

陸稲の交配の手順は、基本的に水稲と同様で、生物工学研究所陸稲育種チームでは交配に温湯除雄法を用いた（図 7）。図 8 で実際の交配の流れを写真で示す。交配母本は、干ばつ等の影響を避け、出穂を安定させるため、水田で養成するのが一般的である。交配を行う前日に母株を圃場から株上げし、暗室内に置く（図 8-1）。交配当日、母株を 43℃の温湯に 7 分間浸漬し、除雄する（図 8-2）。交配当日に開花していない穎花は自分の花粉ですでに受精したものや翌日以降に開花するものもあるため、花切りと称して、開花していない穎花をすべて切り落とし、他の花粉による受精を防ぐ（図 8-3）。陸稲の開花適温（30℃）は、水稲（32℃）よりもやや低く（小倉、1949）、日本の陸稲の開花時期は午前 10 時から 11 時で、日本の水稲の開花よりも約 1 時間早い。開花時間は天候の影響を強く受け、雨天の場合は開花が遅くなり、翌日になることもある。父穂は交配当日の朝、水田から採取し、風の入らないガラス室に静置する。母株に花粉を掛けた後、他の花粉が入らないように母株の穂を袋で覆う（図 8-4）。交配時のミスは、その後、数年に渡って誤った材料を扱うことを意味し、非常に大きな労力と時間の浪費となるため、細心の注意を払って交配作業を行う必要がある。



図 8-1 母株の準備

（交配前日の夕方、翌日の交配で母株として使うイネ株を水田から掘上げ、暗室内に置く。翌朝の除雄の直前に暗室から出すことで、母株に揃った開花を促すことができる。）



図 8-2 母株の温湯除雄

(イネの穂を 43℃の温湯に 7 分間浸漬すると、当日開花した穎花の花粉は失活し、受精能力を失うが、雌蕊や胚珠には影響がない。この花粉と雌蕊の温度反応の違いを利用して、母株の除雄を行う。)



図 8-3 花切り

(イネは一つの穂の穎花がすべて同日に開花することではなく、一週間ほどかけて順番に開花する。そのため、同じ穂の中には、前日までに自分の花粉ですでに受精した穎花や翌日以降に開花する穎花もあり、温湯除雄による花粉の失活の効果が十分でない可能性がある。そのため、温湯除雄を行った日に開花した穎花以外は全て切り落とす (左)。穎花の開花は一時間程度であり、その間に開花していない穎花の切り落としを完了させる必要がある。花切りの終わった母株 (右)。)



図 8-4 受粉と袋掛け

(花切りを済ませた母株をガラス室内に持ち込み、父穂の花粉を振りかけ、受精させる (左)。目的とする花粉の振りかけが終わった後に、他のイネの花粉が受精するのを避けるために、母株の穂に袋をかける (中)。夕方に袋を外して、網室に移し、受精した種子の登熟を待つ (右)。)

図 8 陸稲の交配作業

5. 2 選抜

前年交配して得られた F_1 世代の個体は水田で栽培し、その出穂期や草型を観察し、母株の自家受精ではなく雑種であることを確認する。各 F_1 個体から派生した F_2 集団は、特段の選抜を加えずに、次年度に畑で栽培し、 F_1 世代と同様に、形質分離によって雑種であることを確認する。翌年度の F_3 世代では、組み合わせ毎に畑に展開し、個体選抜を行う。一般に、1 組合せ約 800 個体を雑種集団として栽培する。一定間隔に苗を植える水稲と違って、畑に播種する陸稲育種では、どうしても個体間の栽植密度が不均一になる。そのため、個体選抜（株選抜）を行う雑種集団、単独系統、系統群系統では苗の第 4 葉期に、株間 10cm の千鳥 2 条になるよう苗を間引きし、栽植密度を揃える作業を行う（図 9）。



図 9 育種材料の間引き
(左上：間引き前の系統、右上：等間隔に間引きされた系統、下：間引き作業)

図 10 に陸稲育種の選抜作業の流れを示す。 F_3 世代の個体選抜では、陸稲株を個別に観察し、稈長、種子稔性、穂の形状、登熟歩合などによって優れた個体を選ぶ（図 11 左上、右上）。 F_3 集団群から選抜された個体は、次年度に単独系統として栽培される。各単独系統は約 40 株の F_4 個体で構成される。単独系統では出穂期、生育量、稈長、草型、分離程度を観察し、有望と判断された系統から 7~8 個体を圃場で選抜する。これらの選抜された系統は、冬季間に屋内で 2 次選抜として、稈長、穂の形、米粒の品質等を入念に評価し、次年度栽培する 5 株を決定する（図 11 左下、右下）。最終的に選ばれた 5 株を次年度に系統群系統として畑で栽培する。系統群系統では、単独系統と同様に特性を観察し、系統群を構成する 5 系統から最も優れた 1 系統を選抜する。そこから再度優れた 5 個体を選抜し、次年度系統群系統として畑に栽培する。この工程を繰り返して、優れた特性を備え、諸形質が固定した系統を選抜する。

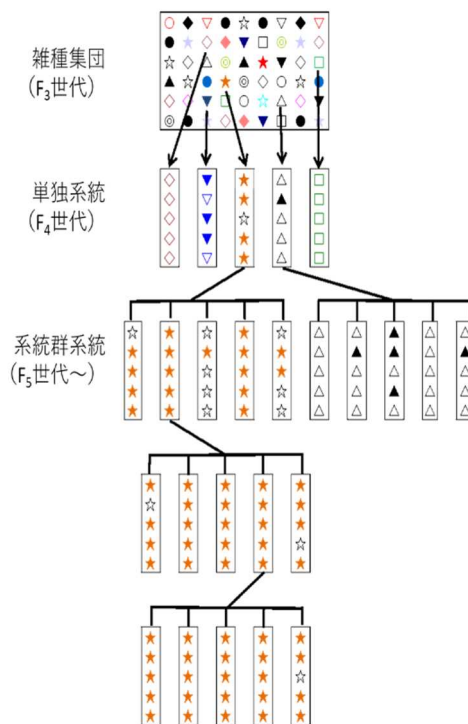


図 10 系統育種法による選抜

畑での観察に加えて、F₅世代以降の系統はいもち病抵抗性等の特性検定試験や生産力検定試験を実施する（表 5）。育成系統は系統選抜圃場での草型等の観察に加えて、特性検定試験の評価や生産力検定試験による収量性などの成績を総合的に判断して、次年度に栽培する系統を決定する。1996 年の育成事業では栽培された単独系統 610 系統のうち 101 系統が選抜され、系統群系統 849 系統のうち選抜されたのは 135 系統のみであった。系統群系統では畑に栽培された系統のうち 8 割以上の系統が何らかの欠点が見出され、廃棄されたことになる。こうした厳しい選抜を何世代も繰り返すことで、優れた陸稲系統が品種として生産者に届けられることになる。



図 11 選抜

（左上：圃場での個体選抜、右上：選抜された個体（青テープ）、左下：室内選抜、右下：室内調査形質）

5. 3 育成系統の調査

（1）圃場観察

系統群系統は系統選抜圃場において、各生育時期に特性を観察し、記録する。

① 苗立ち調査

- ・発芽率調査（「6.1 発芽力と初期生育」で説明）
- ・幼苗草型調査：第 3、4 葉期に幼苗草型を観察し、系統ごとに E（伸長）型、EM（やや伸長）型、M（中間）型、DM（やや矮性）型、D（矮性）型の 5 段階に分類する（図 12）。全体的にみると、畑地灌漑栽培用水稲系統は葉幅が狭く葉が長い E 型が多く、中生～晩生の陸稲系統は葉幅が広くずんぐりした D 型が多い。戸川・安藤（1939）が報告したよう

に、一般的な傾向として幼苗草型が D（矮性）型の系統は E（伸長）型よりも幼苗期の干ばつ害を受けにくく、高度の耐干性が期待できる（図 13）。



図 12 幼苗草型

上：E（伸長）型、下：D（矮性）型

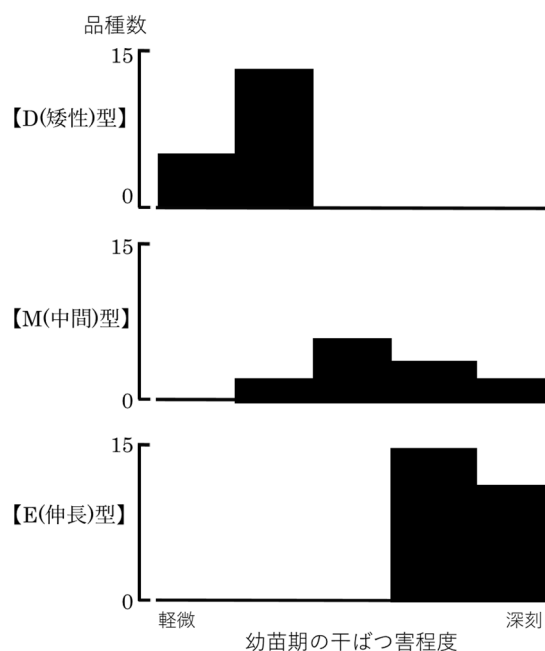


図 13 陸稲の幼苗草型と幼苗期の耐干性
(茨城県農業総合センター生物工学研究所、1996 年)

② 出穂期・成熟期調査

- ・出穂始：系統内で初めて出穂を見た日。
- ・出穂期：出穂すると思われる全茎数の 40～50%が出穂した日。
- ・穂揃い期：出穂すると思われる全茎数の 80～90%が出穂した日。出穂初から穂揃い期までの日数が少ない方が望ましい。
- ・成熟期：すでにほとんどの穂が登熟し、それらの穂の 90%の籾が黄化した時期。一般に出穂後 30～40 日で成熟期になる。

③ 成熟期生育調査

各系統の成熟期に各特性を観察し、多くの場合達観で評価する。

- ・分離：系統内での分離の程度を出穂期や稈長等のバラツキから記録する。特に、在来品種、外国品種、水稻を親とした後代系統では分離が残ることがあるので、注意を要する。どうしても分離が残る系統は打ち切りとする。
- ・生育量：陸稲の生育量は収量性との関連が高く、重要な選抜要因の一つである。観察で、ある程度の稈長、穂数を持ち、バランスの良い個体を選ぶ。
- ・稈長：成熟期に稈長を達観で観察し、極短（50cm 未満）、短（50～60cm）、やや短（60～70cm）、中（70～80cm）、やや長（80～90cm）、長（90～100cm）、極長（>100cm）の 7 段階に分類する。畑内の地力等によっても影響を受けるので、近くにある標準・比較品種を参考に分類する。品種では‘フクハタモチ’が極短、‘陸稲農林糯 1 号’が長にあたる。稈長が長以上の系統は、稈質や気象にもよるが倒伏しやすく、逆にやや短以下の系統は機械収穫で問題となるため通常打ち切りとする。
- ・稈質：稈質には細太（極細、細、やや細、中、やや太、太、極太）と剛柔（極剛、剛、やや剛、中、やや柔、柔、極柔）があり、それぞれ達観で分類する。品種では、細太は‘フクハタモチ’が細、‘水野黒糯’は太である。剛柔では、‘水野黒糯’が剛、‘ミズハタモチ’が柔である。稈質の良し悪しは、倒伏の大きな要因となる。

- ・草型：穂数と穂の大きさとのバランスを相対的にみる形質である。極穂重型、穂重型、偏穂重型、中間型、偏穂数型、穂数型、極穂数型の7段階に達観で分類する。‘水野黒糯’が極穂重型、‘フクハタモチ’が穂数型である。
- ・止葉の直立の程度：止葉を極立、立、やや立、中、やや垂、垂、極垂の7段階に達観で分類する。成熟期の止葉の直立の程度は、草状の良し悪しに少なからず影響を与える。品種では‘水野黒糯’が立、‘タチミノリ’が垂である。
- ・葉の形状・葉色：葉の形状には葉幅（広い、狭い）、長さ（長い、短い）、厚み（薄い、厚い）等があり、葉色には黄、黄白斑、淡緑～濃緑、紫等がある。外国品種等との雑種後代では極端な葉色のものが出現することもある。達観で観察するが、選抜対象ではなく、特性観察として記録する。
- ・穂長：穂長は、極短、短、やや短、中、やや長、長、極長の7段階に達観で分類する。品種では‘フクハタモチ’は短、‘陸稲農林糯26号’はやや長である。
- ・粒着密度：粳と粳が半分以上重なり合っている穂が密、粳と粳の間に隙間があるのが疎である。極密、密、やや密、中、やや疎、疎、極疎の7段階に達観で分類する。
- ・芒の有無と多少：穂の粳全体を見て芒の有無を調べ、有る場合は芒が付いている粳の割合の多少を観察する。無（0%）、稀、極少、少（10%）、やや少、中（25%）、やや多、多（40%）、極多、甚の10段階に分類する。品種では、‘フクハタモチ’や‘ミズハタモチ’が稀、‘ハツサクモチ’や‘陸稲農林糯26号’が少である。芒の発生は天候によっても変動するので、選抜対象とはしないが、極端に芒が多い系統は収穫物の取り扱いが難しいため、一般に避ける方が望ましい。
- ・芒長：芒がある場合、その長さを達観で極短、短（2cm前後）、やや短、中（4cm前後）、やや長、長（6cm前後）、極長の7段階に達観で分類する。芒の状態を示す場合、芒の有無多少と長短をセットで述べることが多い。例えば、稀極短（2～3mmの芒が3%程度の粳についている）、少短（2cmの芒が10%程度の粳についている）等と表現する。芒の有無と同様に、選抜対象とはしないが、極端に芒が長い系統は収穫物の取り扱いが難しいため、一般に避ける。
- ・ふ先色：成熟期のふ先の色を、黄白～黄、黄褐、褐、赤褐、淡赤、赤、淡紫、紫、黒の9段階に達観で分類する。品種では‘ワラベハタモチ’や‘陸稲農林糯4号’は紫、‘フクハタモチ’は褐。黄白は‘ツクバハタモチ’など多数の品種がある。ふ先色は、分類の中間的な色も多く存在するとともに、出穂期頃と、成熟期で黄白から褐や、淡赤、赤、紫から褐に変化する場合がある。したがって、余裕があれば、出穂期と成熟期後に2回調査すると良い。水稻糯品種の育成ではうるち品種と識別するためにふ先色を持つ系統を優先するが、陸稲ではそうした傾向はなく、特性観察として記録する。
- ・熟色：成熟期に穂全体が黄金色になる系統が良い。病虫害（枝梗いもちや穂首いもち、イネキモグリバエ（イネカラバエ）食害）や干ばつ害にあった穂は粳の色につやが無くなり、粒張りも劣る。
- ・種子稔性：冷害や干ばつで不稔が発生したら、その頻度を観察し記録する。外国品種との雑種後代では選抜しても遺伝的な不稔が抜けない系統もあり、そうした材料は早めに打ち切る方が望ましい。
- ・穂型：穂型には、披針状、紡錘状、棍棒状、ほうき状（ススキの穂のように開いた穂）、散形（開いた立ち型の穂）があり、特性として記録する。同時に穂軸の抽出度を観察し、極短から極長まで記録する。参考としての観察だが、穂が途中までしか出ない状態（出すくみ）の系統は避けた方が良い。
- ・脱粒性：穂を握るハンドグリップで評価する。極難、難、やや難、中、やや易、易、極易の7段階に分類する。品種では、‘ワラベハタモチ’や‘ミズハタモチ’は難、‘陸稲農林糯4号’はやや易である。外国品種との後代で時々極易の個体が見られる。特に一見熟色がきれいで、熟上がりの良い株に脱粒易が見られるように思われる。また在来種にも脱粒し易い品種があるので、そうした品種の雑種後代では注意を要する。

収穫期近くに系統選抜圃場で病虫害やその他の被害が認められた場合は、その程度を記録する。倒伏、干ばつ害、いもち害、その他の病虫害などがある。観察された記録は特性検定の結果と合わせて、系統選抜の参考とする。特に、標準の施肥水準で倒伏する系統は、実用化の見込みは薄く、打ち切りとすべきである。

農家栽培に近い栽培を行い、系統群系統の収量性を調査する。生産力検定試験は、予備試験（予検）と本試験（本検）からなり、予検で良い結果を残した系統だけが本検に進む。予検は2反復、本検は3反復で実施する。一区面積は4.5m²（畦長2.5m×畦間60cm×3畦）とし、播種量は5kg/10a相当とする。施肥等の管理は、茨城県普通作物栽培基準に準じて実施する。

- ・ 稈長：株の地際より最長稈の穂首までの長さを測定する。各区の生育中庸な2か所を選んで、合計15株を調査し、その平均値を使用する。
- ・ 穂長：稈長を測定した稈の穂首から穂の先端（芒は除く）までの長さを測定し、15株の平均値を使用する。
- ・ 穂数：生育中庸な2か所を選んで、各50cm間のすべての株の穂数を調査し、m²あたりに換算する。ただし、調査した2か所の数値に1割以上の差がある場合は、もう1か所調査し、3か所の平均値を使用する。



- ・全重 (kg/a)：収穫物全体の重量を測定し、a 当たりに換算する。
- ・精粳重 (kg/a)：脱穀、唐箕選後、粳と粃に分別する。粳の重量を測定し、a 当たりに換算する。
- ・粳わら比 (%)：わら重＝全重－精粳重とし、粳わら比を算出する。
- ・精玄米重、屑米重 (kg/a)：粳摺り後、玄米を 1.7mm で篩選し、篩上を精玄米重、篩下を屑米重とし、a 当たりに換算する。
- ・粳摺歩合 (%)： $100 \times \text{精玄米重} / \text{精粳重}$ 。
- ・玄米千粒重：精玄米 10g の粒数と玄米水分を測定し、玄米水分 15% 換算で玄米千粒重を算出する。
- ・玄米品質：玄米の大小、光沢、色沢や被害発生の多少等の見かけの品質を観察し、上の上、上の中、上の下、中の上、中の中、中の下、下の上、下の中、下の下の 9 段階に分類する。

5. 4 特性検定試験

系統選抜用の栽培圃場では、陸稲の出穂期や草型などは観察できるが、耐病性や環境耐性など様々な特性を一緒に評価することは困難である。そのため、系統選抜試験とは別に、病気や生理障害の出やすい環境で各特性を評価する特性検定試験を実施する。

生物工学研究所陸稲育種チームでは、葉いもち、穂いもち、株枯病の耐病性や耐干性、耐冷性、穂発芽耐性、低温発芽性、餅食味の評価を毎年行った。各検定法の詳細は他の章で説明する。また、単独の育成地で多種類の特性検定を行うことが難しい場合は、他機関の水稲育種チームと連携し、お互いに得意とする特性検定について、相互に相手機関の材料の評価を行うこともあった。生物工学研究所で他県の水稲育種材料の低温発芽性を評価し、直播適性選抜の参考データを提供する一方で、異なった環境で陸稲系統の葉いもちや穂いもち抵抗性の評価を依頼した。各特性検定の詳細については、「6 陸稲の主要特性に関する育種技術」で説明する。

5. 5 地域適応性検定試験（系統適応性試験）

系統選抜を行っている地域以外の環境で、育成された品種がどの程度の能力を発揮できるかを育成地だけの栽培結果から推測することは容易ではない。特に、生物工学研究所陸稲育種チームには東北から九州までのいろいろな環境に向けた陸稲品種の育成が求められていた。このため、地域適応性検定試験として、育成地（水戸市）で有望と判断された陸稲系統に「石系〇〇」の育成地番号を付し、福島、栃木、千葉、熊本、鹿児島県の県立農業試験場に栽培試験を委託し、その地域に適した品種を育成するための情報とした。

5. 6 奨励品種決定調査

イネ、麦、大豆等の作物では県内の農家に栽培を薦める品種として、各県の農業試験場で県内の環境に適した品種（奨励品種）を選定して、普及させている。この試験は一般に奨励品種決定調査と呼ばれ、有望系統が普及品種になる最終的な関門である。陸稲については、1996年には11県の農業試験場で奨励品種決定調査が実施され、各県で有望系統の生産性と安定性が評価された。茨城県においては、茨城県農業総合センター農業研究所が担当した。

奨励品種決定調査は基本調査と現地調査に分かれている。基本調査は農業試験場の場内圃場で実施され、少なくとも3年は栽培試験を繰り返すのが一般的である。調査には予備調査と本調査があり、予備調査で一定の評価を得た系統のみが本調査と現地調査に進むことができる。現地調査は品種の普及予定地域で最も普及している栽培様式により、少なくとも2年程度諸特性を確認するのが一般的である。最終的に基本調査や現地調査の結果に基づき、各県で奨励品種の採用の可否が決定される。採用が予想される有望系統については、普及の準備として採用決定の数年前から種子の特別増殖や普及地域向けの栽培法の検討が行われるのが一般的である。

5. 7 種子生産

陸稲品種の種子生産は基本的に県単位で行われている。種子生産の手順は、(a) 原原種、(b) 原種、(c) 採種の順に進められ、品種固有の特性や形質・純度を維持した種子生産が実施されている。茨城県の陸稲種子生産では、原原種生産は茨城県農業総合センター農業研究所が、原種生産は県からの委託により公益社団法人 茨城県農林振興公社が行っている。採種は熟練した採種農家に委託するとともに、種子生産圃場の指定や種子審査員による圃場審査・生産物審査等によって健全な種子が生産されていることを確認する。最終的に採種された種子は全農茨城県本部から単位農協等を通して、陸稲栽培農家へ販売される。

6 陸稲の主要特性に関する育種技術

作物の育種事業では、極めて多数の育種材料について様々な特性を効率的に評価し、系統選抜に結び付ける必要がある。そのため、生理学や病理学研究での評価方法と比較して、育種事業の特性検定は精度がやや劣ると言われることもあるが、不良材料のふるい落としを目標とする育種事業では多数の材料を評価できる効率性が重要で、精度をある程度犠牲にせざるを得ない場合もある。この章では、生物工学研究所陸稲育種チームで実施した様々な特性検定について紹介する。

6. 1 発芽力と初期生育

一般に春先に畑で直播栽培される陸稲では、安定した苗立ちのために、低温・低土壌水分条件下で発芽する能力が重要である。陸稲の低温発芽能力は、一般に水稻品種よりも優れている（表 6）。

表 6 気温 15℃における発芽力（茨城県農業総合センター生物工学研究所、1995 年）

イネの分類	品種名	発芽率 (%)
陸稲	トヨハタモチ	30.1
畑地灌漑栽培用水稲	ミズハタモチ	19.1
水稻	コシヒカリ	14.7

しかし、陸稲内でも低温発芽性に品種差が見られ、図 15 で示すように、低温発芽性に優れた陸稲系統①と劣った系統②③の間で出芽に明確な違いが認められる。阿部・小野（1973）は、在来陸稲品種≧改良陸稲品種>畑地灌漑栽培用水稲品種>水稻品種の順に低温発芽性が優れていると報告している。また、いくつかの報告では、低温発芽性について品種の稈糯性や熟期との関連が示唆されている。原島（1937）と中村（1938）は糯品種の低温発芽性がうるち品種よりも優れていたと報告しているが、阿部・小野（1973）は稈糯性による低温発芽性の違いは認められなかったと述べている。一方、熟期については、様々な研究で早生の陸稲品種の低温発芽性が中生～晩生の品種より優れていることで一致している（原島、1937；中村、1938；阿部・小野、1973）。この理由として、早生品種は気温が低い時期に播種する早播で栽培されることが多いため、系統選抜の間で自然に低温発芽性に関する選抜を受けた結果だと考えられる。また、水稻では低温発芽性と穂発芽耐性との間に密接な関係が認められ、低温発芽性の選抜によって、穂発芽耐性が低下することが懸念される（池橋、1968）。陸稲でも阿部・小野（1973）は同様の傾向を報告しているが、一方で低温発芽性と穂発芽耐性の両方に優れた陸稲系統を見出したことから、育種によって低温発芽性と穂発芽耐性の関連を切ることは不可能ではないと結論付けている。

生物工学研究所陸稲育種チームでは、単独系統と系統群系統について圃場で出芽の様子を観察した。陸稲は、播種後 2 週間程度で出芽を始めるが、初めて出芽を見た日を「出芽始め」、種子のほとんど（80%）が出芽した日を「出芽揃い」、播種から出芽揃いに至った日数を「出芽日数」として記録した。系統ごとに、出芽歩合が達観で 80%以上を発芽良、60%以下を不良とし、その間を中とする。出芽が遅く、苗立ちが悪い系統は野帳に記録し、成熟期での選抜の参考とした。



図 15 低温年での陸稲育成系統による出芽の違い

①：低温発芽性に優れた陸稲系統、②③：低温発芽性に劣る陸稲系統

陸稲の発芽後の生長速度（初期生長性）は、その後の生長量と雑草との競合力を確保する上で重要であり、陸稲品種にも初期生長性に品種間差が存在する（新妻、1975）。阿部・小野（1973）は、陸稲在来品種群≧同改良品種群>水陸稲交雑品種群>水稻品種群の順に苗の初期生長性が優れていると報告している（図

16)。彼らの研究では、苗の生長量は、幼芽と種子根の長さによって示され、低温発芽性と初期生長性の間には高い相関 ($r = 0.812^{***}$) が観察された。

生物工学研究所陸稲育種チームでは、単独系統と系統群系統について、播種 2 か月後に生育量を達観で観察し、生長の遅い系統は初期生長性が不良と野帳に記録し、選抜の参考とした。

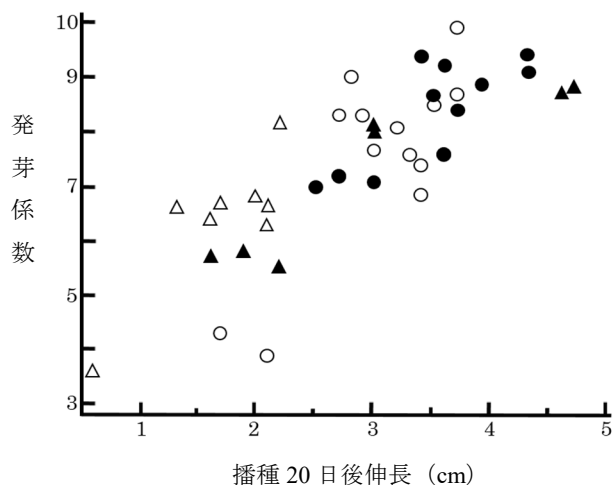


図 16 発芽の速さ（発芽係数）と初期伸長（草丈）との関係（阿部・小野、1973 を一部改変）

- 陸稲在来品種
- 陸稲改良品種
- ▲ 水陸稲交雑品種及び系統
- △ 水稻品種

（発芽係数＝発芽率÷平均発芽日数）

また、生物工学研究所陸稲育種チームでは、畑での観察とは別に、低温（15℃）での系統の発芽力を評価する特性検定を実施した。昭和 60 年代まで、早期栽培用系統の低温発芽性検定として低温下での出芽試験を行い、系統選抜の指標とした。市販の育苗培土を入れた水稻育苗箱（28cm×58cm×28mm）を幅 1cm に 29 列に仕切り、偶数列に乾粃を播種し、厚さ 1cm で覆土する。15℃の定温器内に静置し、15 日後に出芽個体数を調査する。結果は極低・低・やや低・中・やや高・高・極高の 7 段階に分類した。

その後、育成系統の低温下での発芽特性を明らかにするため、発芽性と出芽性を分けて観察した。低温発芽性については、粃内への水分の浸透を均一にするため寒天培地を分注したシャーレに種子消毒した供試系統の乾粃を埋め込むように播種し、15℃のインキュベーター内に静置する（図 17）。播種後 2 週間目に発芽した粃の割合を観察する。低温出芽性試験では、鳩胸状態に催芽した粃を育苗箱に播種し、深さ 2cm に覆土する（図 18）。育苗箱を 15℃の定温器内に保ち、播種後 2 週間目に出芽率を観察する。低温下での発芽率とその後の生長力を確認することで、育成系統の低

温発芽性と出芽性を把握することができる。これらの特性検定結果と選抜圃場での出芽日数や出芽歩合の観察とを照らし合わせることによって、低温下でも安定して出芽する陸稲系統を選抜することができた。

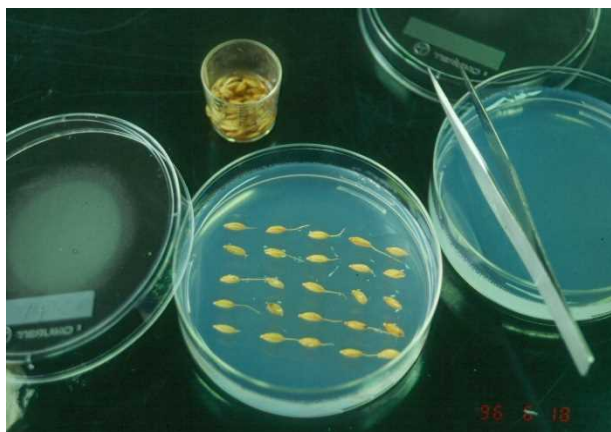


図 17 低温発芽性試験

（左：粃は寒天培地を分注したシャーレに胚を上側にして埋め込む。右：播種されたシャーレは 15℃の定温器内に置く。2 週間後、発芽した粃の割合を調査する。）



図 18 低温出芽性試験

(左：鳩胸状態に発芽した粳を条播用育苗箱に播種する。右：播種後、覆土し、15℃の定温器内に置く。2週間後に出芽した粳の割合を調査する。)

6. 2 草姿・草型

陸稲の草姿は、葉の直立程度や穂の形状から、陸稲型と水稻型に大別される(図 19)。水稻型は短い葉が立っているのに対して、陸稲型は長い葉がゆったりと垂れている。他にも、陸稲型は、稈長が長く、株全体の生長量が大きく、穂が長いなどの特徴がある。新妻・小野(1969)は、陸稲品種、特に在来品種は長くて幅広の葉を持っている一方、改良型の陸稲品種では、熟期によって草姿が異なる傾向があり、中生～晩生品種の止葉は早生品種よりも長く、在来品種に近い傾向が認められると報告している。



図 19 陸稲の草姿 (左：陸稲型、右：水稻型)

イネの草型は、形態的に穂数型、中間型、穂重型に大別される。生物工学研究所陸稲育種チームでの品種分類によると、在来陸稲品種のほとんどは、極穂重型に分類されるのに対して、改良型陸稲品種は穂重型と中間型に分類されるものが多い。陸稲の草型は目的とする普及予定地域の気候条件によっても異なり、Gupta and O'Toole(1986a)は降雨が少なく厳しい地域向けの陸稲には、稈長が中間(119cm)から長稈(139cm)で、生育量があり、穂数は少なめ(3-5 分げつ/株)の草型が望ましいと述べている。日本の陸稲栽培では、前作の野菜栽培で施用された肥料の残効を受けることが多いため、倒伏を避けるために、稈長は1メートル未満が望ましい。例えば、耐倒伏性品種として、‘フクハタモチ’や‘ナツハタモチ’のように半矮性の

陸稲品種（60～70cm）も育成されている。図20に示すように、陸稲の株の生育量（わら重）と最終的な収量の間には正の相関があり、陸稲の生育量は、安定した収量を得るために重要である（酒井ら、1972）。石原（茨城県農業試験場、未発表）は長年に渡る陸稲育種の経験から、国内で多収の陸稲品種としては下記の特性を備えた草型が望ましいと述べている。

- a. 生育量（わら重）：700kg/10a 以上
- b. 稈長：80cm 以上
- c. 穂数：350 本/m² 以上

生物工学研究所陸稲育種チームでは、単独系統と系統群系統について、成熟期に草型に加えて、各系統の茎数や繁茂の程度を観察し、生育量として評価し、選抜の重要なデータとした。成熟期に十分な生育量を確保することが、収量性に大きく影響するため、陸稲の育種事業で系統が打ち切りと判断される理由として、生育量不足は最も頻繁に使われる理由の1つであった。

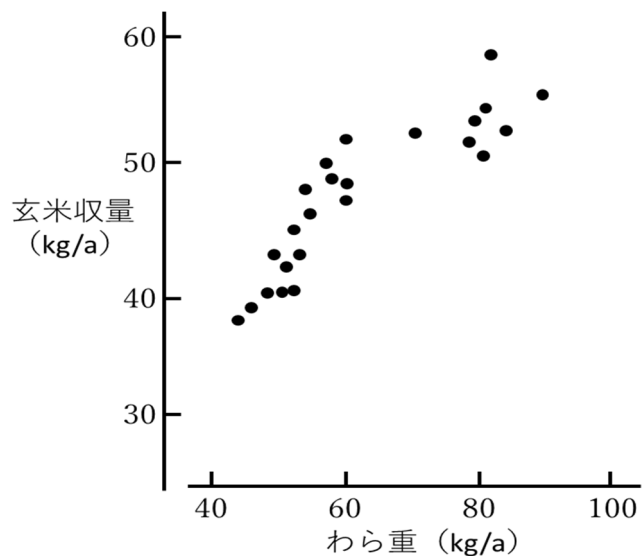


図20 陸稲の玄米収量と株の生育量との関係
（酒井ら（1972）を一部改変）

6. 3 雑草競合力

陸稲栽培において、雑草は干ばつと連作障害とともに生産を不安定にする大きな問題である。一般に、除草は除草剤の使用と手取り除草に依存するが、陸稲品種自体が雑草競合力を備えていれば、農家にとって大きな助けとなる。陸稲の特性の中では、生育初期に土壌表面をすばやく覆う能力と、窒素肥料をすばやく吸収する能力が雑草競合力に関連すると期待されている（Gupta and O'Toole, 1986b）。

生物工学研究所陸稲育種チームでは、単独系統と系統群系統について、生育初期に発芽力、初期生長性、成熟期の生育量を観察したが、雑草競合力を目的としたものではなかった。陸稲系統は熟期によって、草姿に違いがあり、中生～晩生の陸稲系統は早生の陸稲系統と比較して、草丈が高く、株の生長量が多く、葉が長く、下向きに湾曲しているため、早生系統と比べて、土の表面をより覆っている。しかし、育成圃場で早生系統の畑と中生から晩生系統の畑で、雑草の発生程度の差を認めたことはなかった。したがって、雑草競合力を育種目標とするためには、少なくとも日本の陸稲の遺伝的多様性を越える初期生長性や繁茂力が必要だと考える。

6. 4 いもち病抵抗性

イネいもち病菌 *Pryicularia oryzae* の感染によって引き起こされるいもち病は稲作で最も深刻な病気といえる。いもち病は発病したイネの生育ステージや部位によって呼び方が変わる（苗いもち、葉いもち、穂首いもち、枝梗いもち、穂いもち等）（図21）。陸稲品種は水稻品種と比べて、一般にいもち病に抵抗性の傾向があるが、陸稲でも「ひでりいもち」と呼ばれるように、干ばつ年にはいもち病が深刻になることがある。陸稲品種のいもち病抵抗性程度は、しばしば耐干性程度と一致するとされている。阿部ら（1976b）は日本の在来陸稲品種のいもち病抵抗性を比較して、西日本由来の在来陸稲品種のいもち病抵抗性が東日本由来の品種よりも高いことを示し、これが西日本で厳しい干ばつを受けたことで、いもち病抵抗性についても淘汰を受けた結果であると推測している。



図 21 いもち病の病徴（左：葉いもち、右：穂いもち）

江塚ら（1969）や阿部ら（1976b）は国内陸稲品種のいもち病抵抗性の遺伝子型を調べ、日本の陸稲品種の 80%は「新 2 号型（+）」に属し、18%は「愛知旭型（Pia）」であると報告した。国内のほとんどの陸稲品種は、同じ遺伝子型の水稲品種より、いもち病への抵抗性程度が高い傾向がある。陸稲品種の系譜から、これまでに育成された主な改良型陸稲品種のいもち病抵抗性は、在来陸稲品種の‘戦捷’、‘浦三 1 号’、‘黒禾’、‘最上糯 1 号’、‘三重’などに由来すると推定されている（奥津ら、1984）。陸稲のいもち病抵抗性の遺伝学的研究として、東・斎藤（1985）は‘戦捷’のいもち病抵抗性の連鎖群をマーカー遺伝子の連鎖テストで調べ、‘戦捷’の抵抗性は 5 つの連鎖群（II、IV、VIII、X、XI）に座する 5 つ以上の遺伝子によると述べている。また、阿部ら（1974）は‘戦捷’に由来する‘陸稲農林糯 4 号’のいもち病抵抗性が比較的效果の少ない 3 つ以上の微動遺伝子によると報告し、さらに丸山ら（1983）は‘陸稲農林糯 4 号’の抵抗性は、真性抵抗性遺伝子と同様の相加効果を持ついくつかの抵抗性遺伝子によると報告した。また、横尾（1994）は‘陸稲農林糯 4 号’のいもち病抵抗性が少なくとも 4 つの遺伝子によって支配されており、そのうちの 1 つはフェノール反応遺伝子に連鎖する遺伝子であると述べている。また、阿部ら（1976a）は同じく‘戦捷’の子孫である‘陸稲農林糯 26 号’のいもち病抵抗性が、中程度の効果を持つ 2 または 3 個の微動遺伝子と比較的效果の少ない他の微動遺伝子の集積によるものとしている。また、奥津ら（1984）は水稲と陸稲の交雑後代系統である畑地灌漑栽培用水稲をもちいて、微動遺伝子の集積によっていもち病抵抗性の強い品種を育成できる可能性を示した。

日本の水稲育種事業では、いもち病抵抗性を向上させるために外国品種の主働遺伝子の導入を進めた。しかし、育成された水稲品種‘クサブエ’や‘ユウカラ’等が、普及数年後には新しいいもち病レースの拡大によって抵抗性崩壊を起こし、主働抵抗性遺伝子による育種の不安定性を実証することになった。一方、日本の陸稲のいもち病抵抗性は複数の微動遺伝子によるため、抵抗性崩壊を起こしにくいと考えられ、特に‘戦捷’が愛知県農業総合試験場等において育種素材として利用された。しかし、陸稲は食味、品質、収量性等で多くの不良形質を持つため、単交配で陸稲を水稲育種の育種材料として使っても、なかなか望むような水稲系統が得られなかった。丸山ら（1983）は陸稲由来のいもち病抵抗性を水稲に導入する育種法として、最初に陸稲に水稲を 3～4 回戻し交雑して、選抜用の集団を作成する方法を提案している。愛知県農業総合試験場では、‘戦捷’からいもち病抵抗性を水稲品種に取り込むために、最初に‘戦捷’を用いた交配から抵抗性水稲品種‘双葉’を育成するのに 26 年を要している。現在は、‘戦捷’のいもち病抵抗性に関する DNA マーカーが開発され、多くのいもち病抵抗性品種が短期間で育成され、普及している。

生物工学研究所陸稲育種チームではいもち病抵抗性特性検定として、葉いもちと穂いもちの抵抗性を評価し、系統選抜の指標とした。

葉いもち抵抗性検定では、畑晩播多室素栽培法により、自然発病で葉いもちの発病程度を観察した（図 22）。供試材料には早生、中生～晩生、畑地灌漑栽培用の F₅ 世代以降の系統群系統と標準・比較品種を用い、1 区制で行う。

罹病床には次の 16 品種を混合した種子を使用する。日本晴、水稻農林 29 号、ヤマビコ、金南風、愛知旭、藤坂 5 号、トドロキワセ、イナバワセ、タツミモチ、マンゲツモチ、クサブエ、ツユアケ、Pi-No.4、ヤシロモチ、フクニシキ、とりで 1 号。

播種前にロータリー耕を行い、幅 1m×長さ約 20m の短冊を 8～12 本作る。施肥は、基肥として溶燐を 60g/m² 散布後、窒素 15g/m²、リン酸 30g/m²、カリ 22.5g/m² 相当を短冊ごとに散布する。追肥は第 2～3 葉期と第 4～5 葉期に、それぞれ窒素 6g/m² を散布する。基肥散布後に、短冊ごとにロータリー・カルチで耕し、レーキで整地する。短冊の短辺に添って 15cm 間隔で播溝（長さ 50cm）の畦立てを行う。20 畦ごとに標準品種‘陸稲農林糯 4 号’と指標品種‘陸稲農林 12 号’を配置する。

播種は 1 畦（50cm）に 50～60 粒を播種し、最後に短冊の中央線に罹病床用混合種子を播種する。また、短冊の両末端に罹病床として、混合種子を播種する。さらに、スプリンクラーを設置し、必要に応じて灌水する（図 22-1）。

第 5～6 葉期（7 月末頃）に、指標品種の‘陸稲農林 12 号’の病斑が 2.5～3 となった時期に病徴の調査を行う（図 22-2）。その 10 日後に 2 回目の調査を行い、その平均値を評価値とする（図 22-3）。2.5 以上の評価となった育成系統は原則として選抜対象から外し、打ち切りとする。

調査は極強（0）～極弱（5）の 6 段階評価とし、その基準は下記の通りである。

- 0：病斑のないもの、あっても小褐点でその数もわずかなもの
- 1：小褐点が多程度に発生、または崩壊部を持たない褐斑病斑がわずかなもの
- 2：小褐点が多程度に発生、または崩壊部を持たない褐斑病斑が少ななもの
- 3：崩壊部を持たない褐斑が多、または崩壊部を持つ止り型病斑が多いもの
- 4：枯死葉が少し見られるもの
- 5：枯死葉が甚だしいもの

畑作では水田作よりもいもち病が発生しやすいため、陸稲は水稻よりも高い水準のいもち病抵抗性が必要で、水稻育種よりも厳しい基準となっている。生物工学研究所の水稻育種の基準で抵抗性程度“強（1）”と判断される系統も、陸稲の基準では抵抗性程度“中（3）”にとどまる場合が多い。



図 22-1 葉いもち抵抗性検定材料の播種



図 22-2 いもち病発病程度の観察
(系統ごとに発病程度を観察し、6段階に分類する。)



図 22-3 葉いもちの病斑

(左：自然感染による発病、右：短冊内の発病を均一化するために、長辺中央に罹病床用の種子を播種する。必要に応じてスプリンクラー灌水を行う。)

図 22 葉いもち抵抗性検定試験 (茨城県農業総合センター生物工学研究所、1994 年)

穂いもち抵抗性検定では育成材料を畑でスプリンクラー灌漑栽培し、自然発病で穂いもちの発病程度を観察する。供試材料には早生、中生～晩生、畑地灌漑栽培用の生産力検定予備・本試験に供試している系統品種を用いる。

試験区は畦間 60cm×畦長 150cm に 2 条撒きとし、5g/m²相当量を播種する。2 反復で実施する。

指標品種として‘陸稲農林糯 26 号’ (極強)、比較品種として早生系統は‘ワラベハタモチ’ (強)、中生～晩生系統は‘陸稲農林糯 4 号’ (強)、畑地灌漑栽培用は‘ミズハタモチ’ (やや強) を 10 系統ごとに配置する。

肥料は、基肥として窒素：6g/m²、リン酸：12g/m²、カリ 9g/m²相当を施し、その後、追肥として 2 回窒素 3g/m²を施す。

穂いもちの発病調査は原則として、出穂後 30 日目とする。出穂後 30～32 日になる系統品種を一括して調査する。調査方法は無作為に 10 穂を選び、下記の判定基準に従って評価する。観察は 2 回行い、その平均値を評価値とする。

評価基準は極強 (0)～極弱 (10) の 11 段階とし、その基準は下記の通りである。

- 0：罹病を認めない (枝梗いもちが 0 本)
- 1：枝梗いもちがわずかに認められる (枝梗いもちが 1 本)
- 2：枝梗いもちが一見して認められる (枝梗いもちが 2～4 本)
- 3：枝梗いもちが中程度認められる (枝梗いもちが 5～7 本)
- 4：枝梗いもちが多、あるいは穂首いもちがわずかに認められる (枝梗いもちが 8 本以上か穂首いもちが 1 本)
- 5：穂首いもちが一見して認められる (穂首いもちが 2～3 本)
- 6：穂首いもちが中程度認められる (穂首いもちが 4～5 本)

- 7：穂首いもちが多く認められる（穂首いもちが6～7本）
- 8：穂首いもちが甚だしく認められる（穂首いもちが8本）
- 9：ほとんどの穂が罹病する（穂首いもちが9本）
- 10：全穂が罹病する（穂首いもちが10本）

一般に陸稲系統で穂いもちが発生してもほとんどが枝梗いもちの発生にとどまるが、水稻や外国品種との後代系統ではたまに穂首いもちの発生が認められることがあった。そうした組み合わせでは注意を要する。

6. 5 株枯病抵抗性

株枯病（Fusarium blight、Foot Rot）は、*Fusarium moniliforme* の感染によって引き起こされる病害で、水稻ではばか苗病の原因として知られている。陸稲栽培ではこの病気は感染種子の播種によって発病し、さらに分生胞子の飛散で伝染する。陸稲ではその症状は発病するイネの生育段階によって異なり、発芽から幼苗期での典型的な症状は苗立ちの不良と苗の立枯れである。さらに出穂期から成熟期の症状として、急に株が褐変し、枯死する症状“株枯れ”がある（図 23）。陸稲でのこの病気の発生は、栃木県（1953 年）と神奈川県（1954 年）でそれぞれ農家圃場の‘陸稲農林 24 号’で報告された（杉本、1962；鍵渡、1963）。その後、‘陸稲農林 24 号’の栽培が減少するにつれて、株枯病の発生も減少したが、1978 年に陸稲新品種として茨城県で栽培が始まった‘フクハタモチ’に株枯病が多発し、深刻な問題となった（須賀・小川、1987）。須賀・小川（1987）の研究により、‘フクハタモチ’が特異的に株枯病に弱いことが明らかにされた（表 7）。それを受けて、茨城県は県内の陸稲栽培農家に播種前の種子消毒を強く指導するとともに、‘フクハタモチ’を株枯病に中程度の抵抗性をもつ新品種‘トヨハタモチ’に置き換える等の対策をとったことで、県内の株枯病の発生は沈静化した。



図 23 株枯病の病徴
（関東糯 172 号）

表 7 1981 年の茨城県下の陸稲栽培品種における株枯病の発生頻度（須賀・小川（1987）を一部改変）

陸稲品種	調査 圃場数	株枯病の発生頻度（無～甚、6 段階評価）					
		無	微	少	中	多	甚
フクハタモチ	142	18	31	22	9	9	11
ハツサクモチ	95	78	13	2	4	2	1
ハタサンゴク	46	93	7				
陸稲農林糯 26 号	3	100					
ミズハタモチ	91	93	7				
くろめもち	14	71	14	14	14		

須賀ら（1984）、須賀・小川（1987）は、株枯病抵抗性の特性検定法として人工接種試験法を確立した（図 24）。この方法では、鳩胸程度に発芽した籾を、孢子懸濁液で満たされたプラスチックカップに浸し、2 週間後に苗の状況によって抵抗性程度を評価する方法である。須賀・小川（1987）はこの人工接種法による品種反応が農家圃場での重症度とほぼ一致し、‘陸稲農林 12 号’や‘ワラベハタモチ’が安定した抵抗性を示すことを確認した（表 8）。さらに須賀ら（1985、1986）は人工接種試験法によって株枯病抵抗性の遺伝様式を研究し、‘ワラベハタモチ’の抵抗性は優性遺伝子によって支配されていることを明らかにした。

表 8 人工接種試験法による株枯病抵抗性の品種検索
(須賀・小川 (1987) を一部改変)

枯死率	品種数	評価
0 - 15%	16	極強
15 - 30	19	強
30 - 45	17	やや強
45 - 60	7	中
60 - 75	3	やや弱
75 - 90	6	弱
90 -100	1	極弱



図 24-1 孢子懸濁液の接種

(左：接種風景、右：懸濁液に満たされた催芽靱とプラスチックカップ)

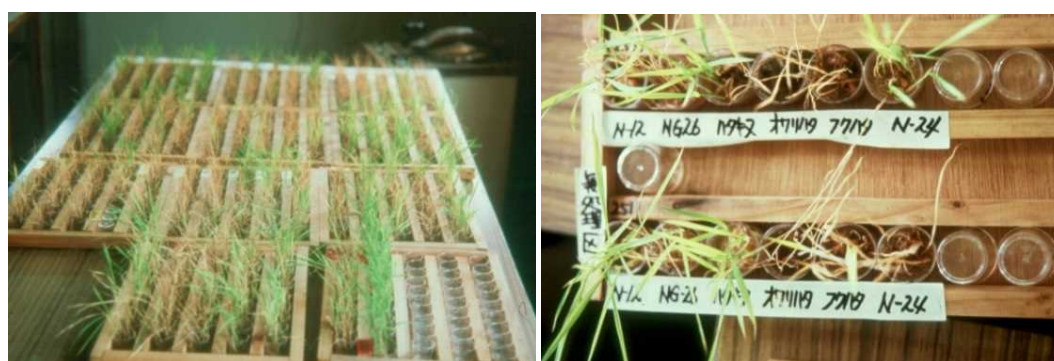


図 24-2 接種 2 週間後の評価 (無発病苗の割合を観察し、5 段階に評価する。)

図 24 人工接種試験法による株枯病抵抗性検定

須賀・小川 (1987) は‘フクハタモチ’に株枯病が多発した原因として‘フクハタモチ’の特徴的な草型が影響したことを明らかにした。株枯病は感染した種子を播種することで発病するが、この感染は地際に形成された株枯病胞子が、株間の気流で舞い上がり、出穂したイネの穎花に感染することで広がる。須

賀・小川 (1987) は‘フクハタモチ’と‘陸稲農林 24 号’の畑でいろいろな高さで浮遊する株枯病の飛散孢子数を比較した。その結果、短い稈長と直立した葉が特徴の‘フクハタモチ’の畑では、孢子の約 30%が穂の高さ (60cm 以上の部分) で浮遊していたのに対して、稈長が中程度で葉が垂れ下がった‘陸稲農林 24 号’では穂の高さ (80cm 以上の部分) の浮遊孢子は 1.4%に過ぎなかった。したがって、長く垂れ下がる葉や高い稈長などの草型が、陸稲の株枯病の感染の抑制に働く可能性が期待できると結論付けた (図 25)。

生物工学研究所陸稲育種チームでは F₅ 世代以降の系統群系統 (900~1,000 系統) を対象として、人工接種試験法によって株枯病抵抗性を評価した。人工接種試験法の供試菌として陸稲株枯病分離菌 5K-2 の振とう培養菌体懸濁液を使用した。この菌は 1963 年に陸稲育種チームが株枯病を発病した陸稲から分離したもので、その後、茨城県農業試験場病虫部で維持されてきた。人工接種試験法では、殺菌した粃をプラスチックカップ (10ml) に 3 日間水浸する。鳩胸程度に発芽した粃 10 粒を、孢子懸濁液 1ml (孢子 5×10⁶ 個/ml) で満たしたプラスチックカップに浸し接種する (図 24-1)。室内の直射日光の当たらない場所に静置し、必要に応じて蒸留水を補充する。2 週間ほど経過し、葉数が 2.0 になった時点で、無発病・半枯死・枯死の苗数を観察し、無発病の苗数の割合で、極強 (無発病率 90%以上)、強 (80~70%)、中 (60~50%)、弱 (30~20%)、極弱 (10%以下) の 5 段階に評価する (図 24-2)。

西アフリカの陸稲品種‘IRAT109’から耐干性を導入した‘関東糯 172 号’は多収で餅の硬化性に優れた系統として期待されたが、株枯病抵抗性検定の結果から、特異的に株枯病に弱いことが判明し、打ち切りとなった。

6. 6 穂発芽耐性

収穫前に秋の長雨が続き、畑で立毛のままに粃が発芽し、米の品質を決定的に低下させることがある。安定した生産を続けるには穂発芽への耐性を備えた品種であることが重要である。しかし、低温発芽力と初期生育の章でも述べたように、低温発芽性と穂発芽耐性との間に密接な関係が認められ、発芽性についての選抜によって穂発芽耐性が低下することがある (池橋、1968 ; 阿部・小野、1973)。しかし、阿部・小野 (1973) は育成系統の特性検定で低温発芽性と穂発芽耐性の両方に優れた陸稲系統を見出したことから、穂発芽耐性を備えた陸稲品種の育成は不可能ではないと述べている。

生物工学研究所陸稲育種チームでは、生産力検定試験に供試した陸稲系統について穂発芽耐性の評価を行った。成熟期に各系統から無作為に 5 穂を抜き取り、供試までビニールで包んで冷蔵庫で保管する。供試する材料がそろった時期に、バットに穂を並べて水に浸し、蒸発を防ぐために、濡らした布で覆う。そのまま定温器内で 25℃に保ち、96 時間後に発芽率を観察して評価した。

6. 7 耐冷性

図 26 は、1890 年以降の日本における水稻での収量の年次変化と冷害の発生年を示している。温帯に位置する日本では、冷害は稲作の最も大きな脅威の一つであり、陸稲でも図 5 に示した 1977 年から 1991 年の間でも 1980 年と 1988 年に深刻な冷害が発生している。さらに、1995 年は東日本を中心とする冷害で全国の作況指数が 74 の大減収となり、タイ等から米を緊急輸入する事態に陥った。この年は陸稲では干ばつ害はほとんど発生しなかった代わりに、主力品種の‘トヨハタモチ’に冷害による障害不稔が多発し、作況指数が 83 にとどまる原因となった。

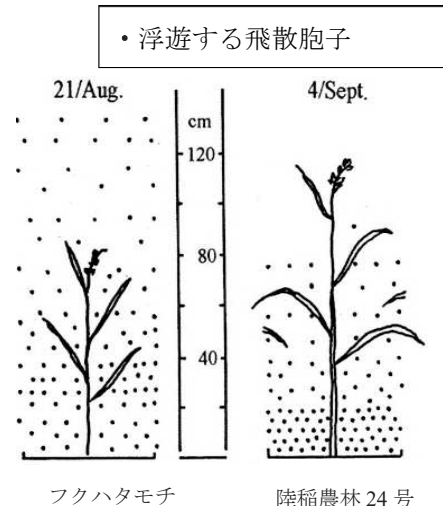


図 25 陸稲の草型が株枯病の飛散孢子の浮遊に及ぼす影響の模式図

(須賀・小川 (1987) を一部改変)

日本では、梅雨の時期は6月中旬から7月下旬であり、その間、稲の生育は栄養生長期から生殖生長期へと進む。穂ばらみ期に、梅雨冷えとして平均気温 20℃以下の日が数日続くか、最低気温が 17℃以下になると、花粉の形成が阻害され、受精できずに種子が不稔になり、収量が低下する（障害型冷害）。水田では、日中に水が温められ、気温が下がる夜間や早朝でも水田の水温は気温よりも高く、水稻の幼穂は冷たい外気から保護されている。しかし、畑作の陸稲では幼穂は冷たい外気に直接さらされ、冷害が水稻よりも深刻になる傾向がある。そのため、陸稲品種は水稻よりも高いレベルの耐冷性が求められる。

苗の生育ステージでは、陸稲の耐冷性は一般に水稻よりも劣るとされる（早道・山

崎, 1971)。しかし、刈屋ら（1997）は生殖生長期の陸稲で耐冷性の品種間差異を調べ、‘陸稲農林糯 1 号’、‘関東糯 165 号’、‘関東糯 174 号’は水稻で最も高度な耐冷性品種と同程度の耐冷性を示したと報告している。

陸稲育種において、干ばつ害を回避するためには梅雨末期までに生殖生長期を迎える早生熟期が好ましいが、一方で梅雨冷えによる冷害を受けないためには耐冷性も併せ持つ必要がある。生物工学研究所では、農業研究所内の井戸水を用いて水温を調整できる耐冷性検定施設で水稻・陸稲の育成系統の耐冷性評価を行った（図 27）。通常、F₅ 世代後の早生系統を対象として、耐冷性検定施設の水田（面積 45 m²、深さ 24cm）で各系統 3～5 株を栽培する。移植後、供試系統は通常の灌漑水で栽培するが、幼穂形成期から出穂期の間、灌漑水を井戸水に切り替え、水温 17℃で栽培する。個々の供試系統の耐冷性は、各株の上位 5 穂の種子稔性によって評価した。表 9 と図 28 に、1996 年の耐冷性に関する陸稲の育成系統の評価結果を示す。供試した早生陸稲系統からも‘石岡糯 23 号’並みに高い耐冷性を備えた育成系統が見出された。

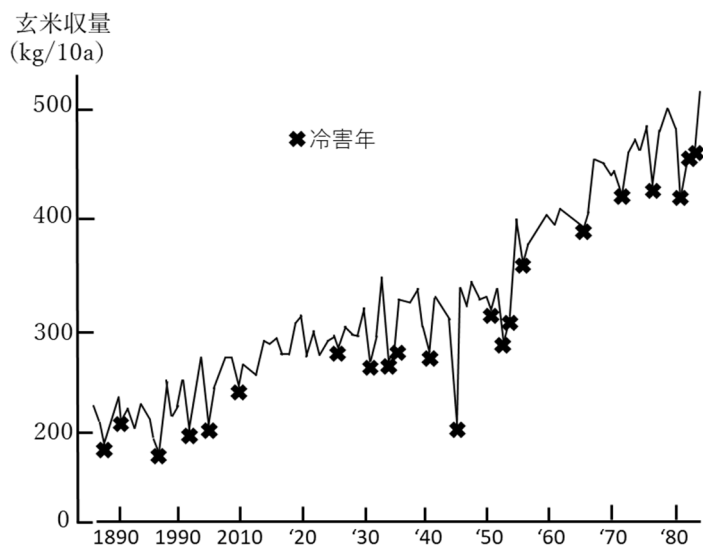


図 26 日本の水稻の単収の変遷と冷害年
（農林水産省「作物統計」により作成）



図 27 耐冷性検定施設

（右側の青い出水口から灌漑する。茨城県農業総合センター農業研究所内。）
（左：移植直後、右：成熟期）

表 9 早生陸稲品種の耐冷性標準品種の種子稔性
(茨城県農業総合センター生物工学研究所、1996 年)

耐冷性 レベル	品種名	種子稔性 (%)	出穂期 (月.日)
極強	石岡糯 23 号	100	8.17
強	石系 323	90	8.18
中	ナエバハタモチ	78	8.15
弱	ワラベハタモチ	69	8.17
極弱	トヨハタモチ	60	8.14

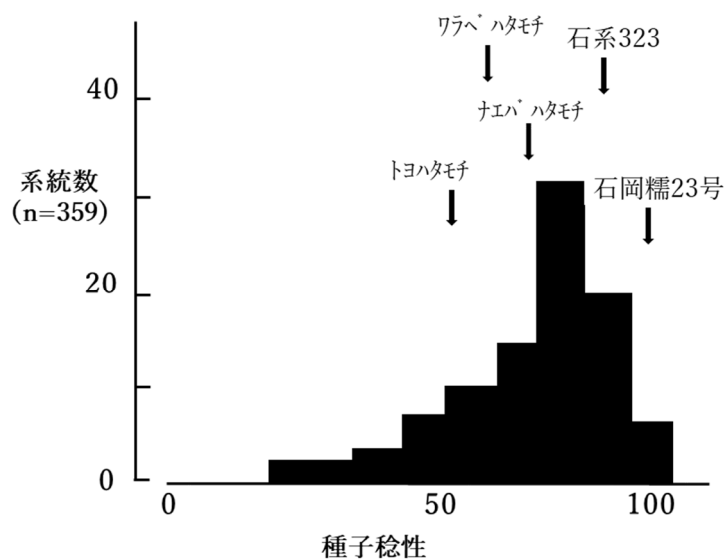


図 28 陸稲系統の耐冷性検定結果
(茨城県農業総合センター生物工学研究所、1996 年)

6. 8 品質

前述したように陸稲のうち米の米飯食味は水稻米よりも著しく劣るとされ、国内で米の生産過剰傾向が続く中で、陸稲うち米への需要を見出すことは難しく、現在栽培されている陸稲の 99%以上は糯品種である。糯米の主要な用途として餅と米菓の原料米があるが、陸稲の餅は水稻と比べて伸びや滑らかさに劣り、陸稲栽培農家でも「おか餅」と呼ばれ評価が低い。そのため、陸稲糯米はあられ等の米菓原料として使われることが多い。今後、陸稲糯米の消費を拡大するには、餅の食味を向上させるとともに、米菓の加工適性の向上が重要な課題となっている。

6. 8. 1 糯米の餅食味と米菓加工適性の評価

図 29 は餅と米菓の加工工程を示す (赤間・有坂、1992)。餅は蒸した糯米を搗いて作られ、米菓は成型した餅生地を揚げる又は焼くなどして加工される。餅の食味で重要な特性として、餅の白さ、滑らかさ、弾力性、粘り、硬さが挙げられる。餅の食味は官能検査で評価するのが一般的であり、生物工学研究所では、以下の方法で餅の食味試験を行った (図 30)。

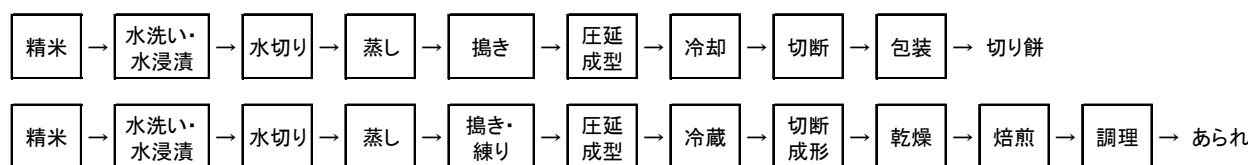


図 29 餅と米菓の加工工程（赤間・有坂、1992）

（1）供試材料

食味試験に供試する育成系統は、立毛調査や生産力検定試験の結果から、新しく地方番号系統の付与が期待できる有望系統を優先して行う。食味試験の材料には、通常生産力検定試験における収量調査後の玄米を精白して使用する。基準品種として、早生系統は‘キヨハタモチ’、中生～晩生系統は‘ツクバハタモチ’、畑地灌漑栽培用水稻系統は‘ミズハタモチ’を用いる。

（2）餅つき

餅つきの前日の午後 3 時以降に米とぎし、水に浸しておく。餅つき当日の朝に水切り用の網ざるに米を空けて水を切る（図 30-1 左）。水が切れたらセイロに編み目の布を敷いて、米を入れる。ガスバーナーを使用して、釜の水を沸騰させ、その上に米を入れたセイロを乗せて 15 分間蒸す。市販の家庭用餅つき機で餅をつく。つきあがった餅は「のし板」で 15mm の厚さにのして成形する（図 30-1 右）。マジックで系統名を書いたビニール袋に名前を書いたラベルと一緒に入れる。餅生地が切りやすい状態まで固まったら、のし板の上で半分に切り、 -80°C の冷凍庫に保管する。つきあがり後、2 時間以内に保管まで完了させる。



図 30-1 材料準備と餅つき

（左：米の水切り、右：のし板での餅の成形）



図 30-2 餅食味試験（左：供試する餅を茹でる、右：供試する餅を取り並べる）

(3) 食味試験準備

食味試験の実施日の朝に、窓際の日当たりの良いところに置き、自然解凍させる（曇っている場合は、ストーブの周囲で解凍するが、直接火にあてないように注意する）。餅生地が包丁で切れる柔らかさになったら、 $2 \times 3\text{cm}$ のさいの目に切る。中央を金網で仕切った鍋に水を入れて沸騰させる。さいの目に切った餅をくっつかないように鍋に入れて茹でる。10分程度で柔らかくなり、食べられる状態になったら、食味試験を開始する（図 30-2、図 30-3）。

(4) 食味試験

基準品種 1 品種と供試系統 3 系統が同じように柔らかくなったら、食味試験用皿の A の位置に基準品種、B～D の位置に供試系統の餅を一個ずつ取り並べる（図 30-2）。各供試系統の餅について、見た目の餅質、味、滑らかさ、歯ごたえ、粘り、総合評価を基準品種と比べ、それぞれに極端に良（+5）・・わずかに良（+1）、同じ（0）、わずかに不良（-1）・・極端に不良（-5）の計 11 段階で評価する。

(5) 加工適性試験

米菓の加工工程では、餅生地の切断や米菓の成型を行う前に、餅生地を冷やして加工できる程度に固める必要があり、餅が固まる速度は米菓の製造効率に大きく影響する（図 29）。より短時間で固まる糯米は製造工程全体が短くなり、生産コストの低減が可能となる。一般的に、陸稲糯米の餅は、水稻糯米よりも固くなるのに時間がかかると言われ、陸稲糯米の利用を拡大するためには、餅の硬化性の早い品種が求められる。餅の硬化性を調べる方法として、冷蔵保存した餅スティックをぶら下げて湾曲度を比較する方法や果実の硬度計を使う方法、テクスチャーメーター、ラピッド・ビスコ・アナライザー等がある（江川・吉井、1990；有坂、1994）。

生物工学研究所陸稲育種チームではラピッド・ビスコ・アナライザー（RVA、図 31）を用いて陸稲糯米の餅の硬化性を簡便に評価することを試みた（岡本・根本、1998）（図 32）。この評価方法では、必要サンプル量が白米粉 3.5g と少なく、育種材料の評価方法として優れている。表 10 に RVA の各測定値と果実の硬度計による餅硬化性との相関係数を示す。その結果、RVA の糊化開始温度とピーク温度は餅の硬さと密接な関係が認められたことから、これらの RVA 値により、餅の硬化性を推定できることを明らかにした。岡本・根本（1998）は RVA を使って、陸稲品種の餅硬化

性の品種検索を実施し、アフリカの品種‘IRAT 109’から育成された‘関東糯 172 号’が優れた餅硬化性を持つことを見出した。さらに、RVA により‘関東糯 172 号’の餅硬化性の遺伝様式を明らかにし、‘関東糯 172 号’の餅の硬度は、糊化開始温度については劣性、ピーク温度については優性に発現する 1 遺伝子座の対立遺伝子に支配されていることを見出した（岡本ら、2003）。



図 30-3 餅の食味試験風景



図 31 ラピッド・ビスコ・アナライザー（RVA）
（茨城県農業総合センター生物工学研究所）

表 10 果実硬度計による餅硬化性と RVA による糊化特性値の相関係数（岡本・根本、1998）

栽培年	糊化開始温度	ピーク温度	最高粘度	最低粘度	ブレイクダウン	最終粘度	コンシステンシー
1995	0.663*	0.534	0.100	0.235	-0.013	0.130	-0.044
1996	0.662*	0.532	-0.192	0.045	-0.303	0.015	-0.013

* 5%水準で有意性あり。

供試系統数：両年とも 11 系統。

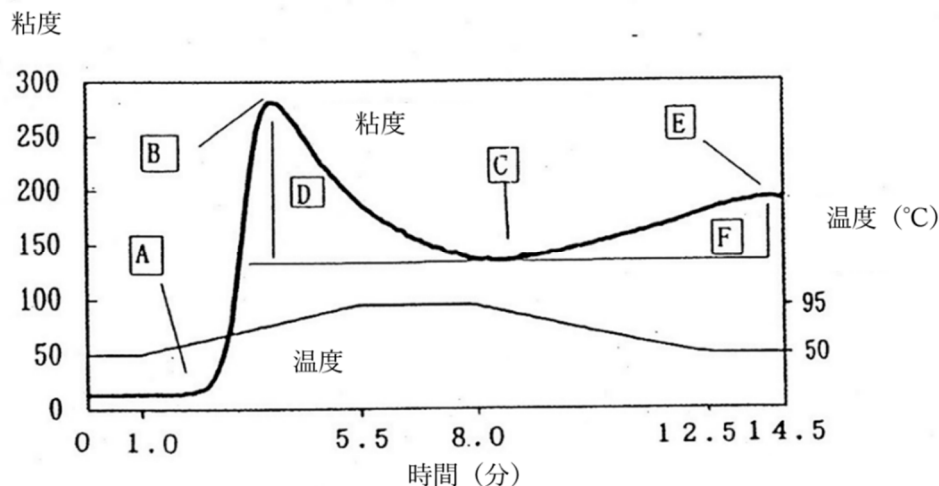


図 32 ラピッド・ビスコ・アナライザーによるでんぷん粘度変化測定

A：糊化開始、B：最高粘度、C：最低粘度、D：ブレイクダウン、
E：最終粘度、F：コンシステンシー

6. 8. 2 品質向上に向けた育種方法

(1) 水稻品種の良食味の導入

一般に、陸稲糯米で作った餅は水稻糯米より伸びや滑らかさが悪く、食味が劣る。そのため、陸稲の品質を向上させるための育種戦略の一つは、陸稲品種に優れた品質の水稻品種を交雑し、水稻品種の良食味を導入することである。代表的な例として、陸稲と水稻との雑種後代から育成された‘ミズハタモチ’や‘オカミノリ’がある（小野ら、1966；小野ら、1970）。両品種とも通常陸稲品種よりも餅や米飯食味は優れているが、耐干性やいもち病抵抗性は劣っており、スプリンクラー灌水が欠かせない。このように水稻との交雑によって食味の向上が期待できるが、陸稲にとって必須な耐干性やいもち病抵抗性が低下する危険性がある。そのため、水稻との雑種後代系統においては、耐干性やいもち病抵抗性の特性検定を繰り返し行い、優良な系統を注意深く選抜する必要がある。

(2) タンパク質含有量に基づく選抜

うるち米ではタンパク質とアミロースの含有量が米飯の食味に重要な役割を果たしている。陸稲の玄米のタンパク質含有量は、水稻のそれを著しく上回っている（平、1970；平・平、1971）。タンパク質含有量が高いことは餅の膨化伸展性にも悪い影響を及ぼすため、陸稲糯米の食味や硬化性が劣る理由の一つと考えられている（柳瀬ら、1984）。生物工学研究所陸稲育種チームでは玄米のタンパク質含有量が餅の食味や硬さと負の関係にあることを確認し、タンパク質含有量の低い陸稲系統を選抜することで、餅食味と餅硬化性の改善を進めた（Nemoto et al., 1993）。根本ら（1994）は、出穂前後の陸稲の葉色値が収穫後の玄米のタンパク質含有量と有意な相関を示すことを確認し（表 11）、葉色による陸稲の簡便な玄米のタンパク質含有量に関する選抜法を提案した。

表 11 水陸稲品種における各生育時期の葉色と収穫後の玄米タンパク質含有量との相関係数
(根本ら、1994)

品種	出穂前後の葉色と玄米タンパク質含有量との相関係数						
	-45	-30	-15	0	+10	+15	+25
	出穂日						
陸稲	0.02	0.30	0.89**	0.87**	0.79*	0.95**	0.94**
水稲	0.51	0.33	0.33	0.61	0.58	0.85	0.81

* 5%水準で有意性あり。 ** 1%水準で有意性あり。

陸稲と水稲の F₃ 集団において、出穂約 2 週間前の葉色値に基づいて個体選抜を行ったところ、次世代系統の玄米のタンパク質含有量を引き下げる選抜効果が確認された (根本ら、1995)。こうして選抜されたタンパク質含有量の低い陸稲系統は餅の食味が向上していることが確認された (Nemoto et al., 1993)。一方、タンパク質含有量を減らすための選抜が、いもち病抵抗性など陸稲にとって不可欠な特性に悪い影響を及ぼす例も認められ、注意が必要である (根本ら、1995) (表 12)。

苗立ち性：葉色が淡い個別の選抜は、糯性の後代系統の苗立ち性には影響は認められなかった。しかし、うるち系統では葉色の淡い個体の選抜で苗立ち性が劣る傾向が認められた。

生育量：葉色が淡い個体の選抜によって晩生系統が多く選ばれた。葉色の淡い個体の選抜で稈長と生育量が低下する傾向が認められた。

いもち病抵抗性：葉色が淡い個体の選抜によって、次世代系統のいもち病抵抗性が有意に弱くなる傾向が認められた。

耐干性：葉色の淡い個体の選抜によって、干ばつによる出穂遅延や種子稔性に影響は認められなかった。

表 12 陸稲と水稲との雑種後代 F₃ 世代における葉色値による個体選抜が次世代系統のいもち病と耐干性に及ぼす影響 (根本ら、1995)

組合せ ^{a)}	F ₃ 世代における 葉色値	いもち病 抵抗性 ^{b)}	干ばつによる生育抑制程度 ^{c)}		
			出穂日数 (日)	稈長 (cm)	種子稔性 (%)
組合せ 1	濃い個体由来	1.4a	1.8a	12.5a	25a
	淡い個体由来	2.1b	3.0a	8.6b	25a
組合せ 2	濃い個体由来	0.9a	3.5a	15.4a	17a
	淡い個体由来	1.6b	3.1a	10.7b	21a

* 5%水準で有意性あり。

a) 組合せ 1：石岡糯 27 号／水稲奥羽 331 号。

組合せ 2：石岡糯 33 号／水稲奥羽 331 号。

b) いもち病抵抗性：0 (抵抗性) - 5 (感受性)

c) 干ばつによる生育抑制程度：灌漑区の生育量 - 干ばつ区の生育量。

6. 9 収量

図 33 は明治以降の日本の農家における陸稲と水稲の単収の推移を示している。約 100 年間に水稲の単収はほぼ倍に増えたのに対して、陸稲の単収は 5 割増しに留まっている。1997 年の陸稲の単収は 240kg/10a で、水稲単収の半分に過ぎない。図 34 は茨城県における 1992 年までの 25 年間の陸稲の単収のバラツキを比較している。水稲の単収が 400~450kg/10a でほぼ安定しているのに対して、陸稲の収量は毎年大きく変動している。しかし、それでも 1980 年以降は変動がやや小さくなっていることが分かる。その原因として、この時期の早期栽培の普及と極早生品種‘トヨハタモチ’の導入が考えられる。これらの技術は、干ばつ害の発生を減少させ、陸稲生産の安定性を高めるのに効果的であったと考えられる。

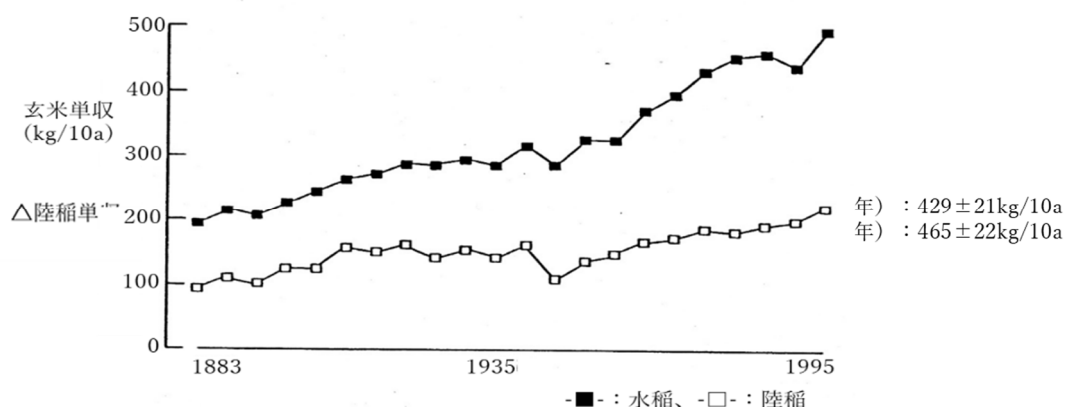


図 33 国内の陸稲と水稲の単収の変遷（農林水産省「作物統計」より作成）

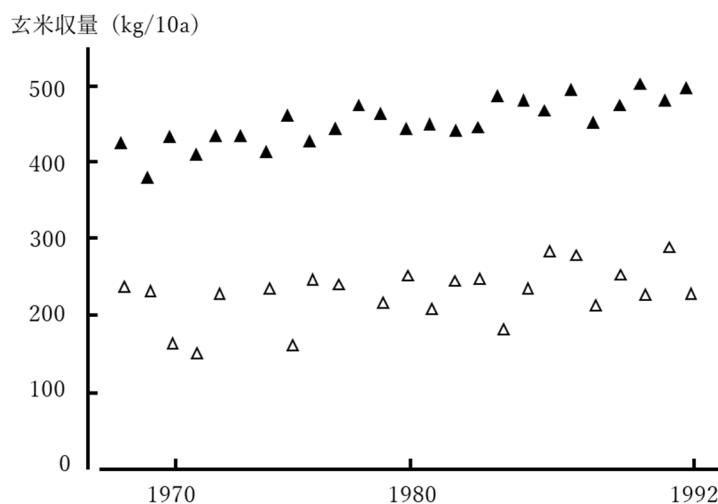


図 34 1968 年から 1992 年の 25 年間の茨城県下における陸稲と水稲の単収のバラツキ（農林水産省「作物統計」より作成）

△陸稲単収 平均（1968-1981年）：196±48kg/10a 平均（1982-1992年）：230±33kg/10a ▲水稲単収 平均（1968-1981年）：429±21kg/10a 平均（1982-1992年）：465±22kg/10a

理想的な条件下なら、陸稲でも水稲並みの収量を得ることは不可能ではないと考えられている。生物工学研究所陸稲育種チームの場内試験でも 1996 年に多収の「関東糯 187 号」を用いて、玄米収量 630kg/10a の収量が記録されている。しかし、陸稲栽培で最も求められるのは、好条件年の多収より、変動の大きな環境変化の中で安定した収量を得ることである。多くの陸稲品種系統を栽培していると、灌漑条件下で多収を示す品種が、干ばつ条件下では逆に低収となる例も良く見られる。石原（1962）は日本の陸稲栽培では、適切な降水量、肥沃な畑、適切な輪作などの良好な環境下なら 500kg/10a 程度の収量を得ることは不可能ではないと述べているが、安定性に配慮するなら、現実的な目標収量は 400kg/10a 程度が適当だと述べている。

7 陸稲の耐干性に関する育種技術

7. 1 干ばつ害

本来、半水生植物であるイネは生育期間中に多くの水を必要とする。そのため、一般に栽培される畑作物の中で、陸稲は最も干ばつ害を受けやすい作物の一つであり、耐干性の向上は陸稲育種で最も重要な育種目標である（図 35）。図 5 に示したように茨城県の陸稲栽培では深刻な干ばつ害が 3 年に一度の頻度で発生している。深刻な干ばつ害が発生した 1994 年に、茨城県の陸稲被害は 7 億円に及んだ。一か月の降水

量が 120mm を下回るか、降雨のない日が 2 週間を越えると、栽培されている陸稲に干ばつ害の発生が危惧される (O'Toole and Moya, 1981)。陸稲の干ばつ害の症状や深刻度は水分欠乏が生じた陸稲の生育時期によって変わってくる。播種期の水分欠乏は苗立ち率の低下によって現れ、栄養生長期の干ばつ害は植物体の小型化や有効分げつの減少、出穂遅延として現れる。生殖生長期の干ばつが陸稲の収量に最も大きく影響する。水分欠乏により穂の奇形や一穂粒数の減少、受精障害など、直接的に収量につながる障害が発生し大きな減収につながる。



図 35 陸稲の干ばつ害（茨城県水戸市の農家圃場、1994 年）
（降雨が少なく、水分不足で葉が巻き、生育が停止し、出穂が不揃いになっている。一部の穂に穂先の退化が認められる。）

7. 2 陸稲耐干性の概念

農作物である陸稲の耐干性は水分欠乏下でも収量を維持する能力と定義される。一般に作物の耐干性の機構として「干ばつ回避性」と「生理的耐干性」が考えられ、さらに生理的耐干性は水分ストレスへの「耐性」とストレス解消後の「回復性」で評価される。

干ばつ回避性は作物が水分ストレスの深刻になる時期を避けて生育する特性である。作物が雨期の間に生育を完了させることができれば、干ばつはほぼ回避することができる。日本では 6～7 月は梅雨期で降水量は多いが、梅雨明けとともに降水量が減り、気温が上昇する（図 36）。陸稲の栄養生長期は梅雨期とほぼ一致するため、この時期の干ばつ害の発生はほとんど見られない。一方、出穂期前後はイネが生育期間中で最も水分を必要とし、水分欠乏に敏感な時期である（玉井、1956；長戸、1949）。中生品種は盛夏期の 8 月中旬に出穂するのに対して、早生品種の出穂期は梅雨末期の 7 月末であり、干ばつが厳しくなる前に通過することができる。目黒ら（1959）は出穂期を 7 月下旬になるよう早期化すると干ばつの頻度は 3 分の 1 に減少すると推測している。

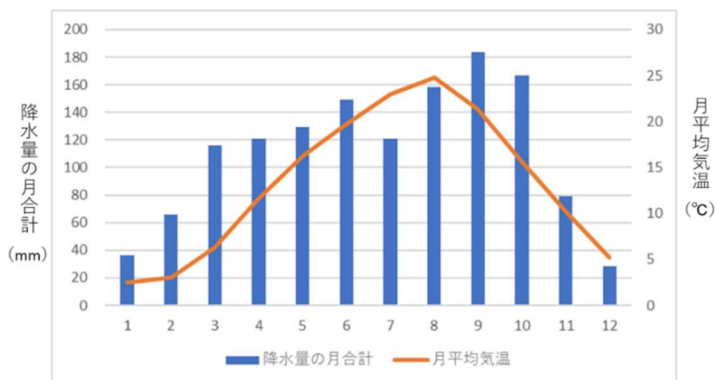


図 36 茨城県水戸市における月の平均気温と降水量
（1977～1991 年、気象庁アメダスデータより作成）

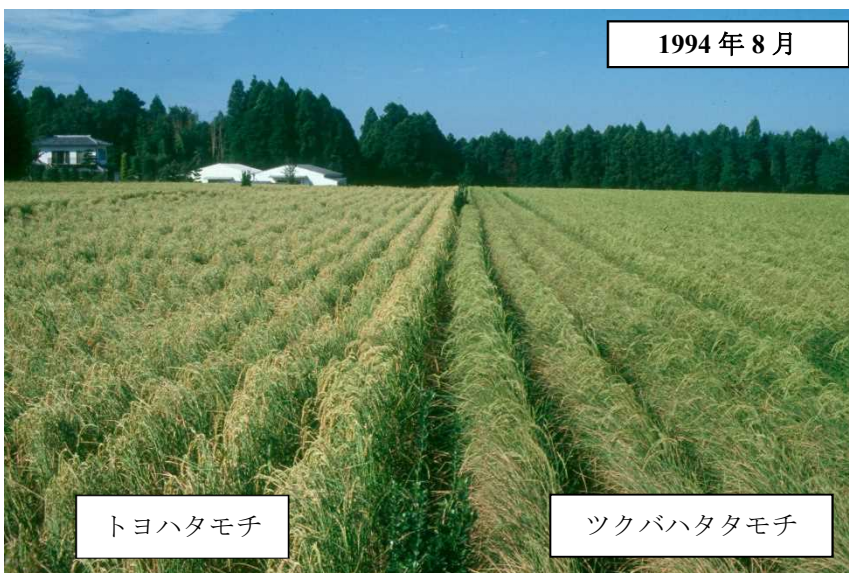
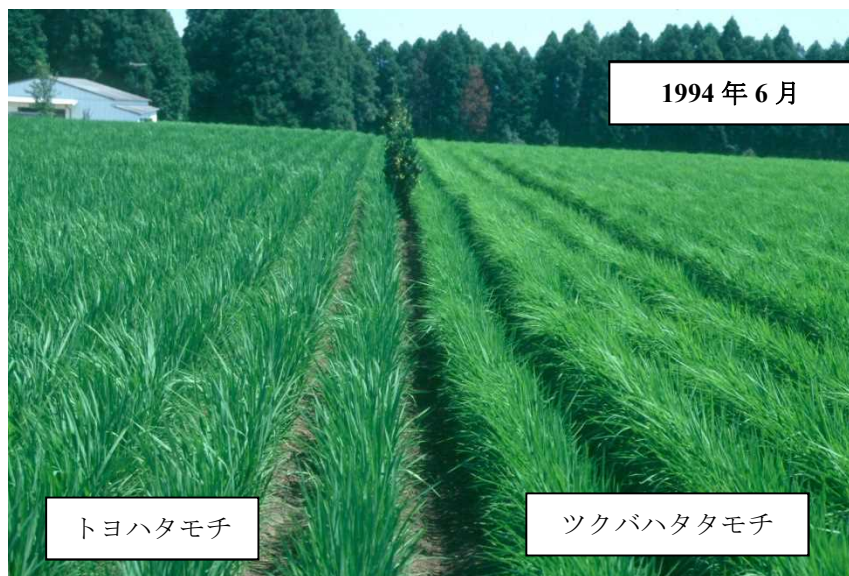


図 37 干ばつ回避性（茨城県那珂町（現那珂市）、1994 年）

（左：極早生品種‘トヨハタモチ’、右：中生品種‘ツクバハタモチ’）

図 37 は干ばつ年であった 1994 年の 6 月（上）と 8 月（下）の同じ陸稲畑の様子で、左側の畑が極早生の‘トヨハタモチ’、右側が中生の‘ツクバハタモチ’である。6 月時点では両品種とも順調に生育していた。しかし、この年は梅雨明けとともに、深刻な干ばつとなり、両品種とも厳しい水分ストレスにさらされた。その結果、8 月の写真では右側の‘ツクバハタモチ’は葉先が枯れ、生育が停止しているのが分かる。しかし左側の‘トヨハタモチ’はすでに成熟期を迎え、穂が垂れている様子から一定の収量が期待できると見られる。極早生の‘トヨハタモチ’は‘ツクバハタモチ’より生理的耐干性は弱い、成熟期が早く梅雨明け前に出穂したことで深刻な干ばつ害を回避したと言える。

7. 3 耐干性の評価法

耐干性は様々な生理形質が関与する複雑な機構である。また、耐干性の機構は、陸稲の生育段階によって異なると考えられる。そのため、耐干性育種を始める前に、栽培する地域では陸稲のどの生育時期に干ばつが問題となるか明らかにし、その生育時期の耐干性に絞って評価と選抜を進める必要がある。下記の

ように各生育時期の耐干性評価法として様々な手法が提案されているが、そこから最も適した評価法を選んで使用する必要がある。

提案されている各生育段階での耐干性評価法

(a) 発芽期

- ・水分欠乏下での発芽率の比較
- ・発芽時の吸水力の比較
- ・種子根の長さ
- ・塩素酸カリウム抗毒性

(b) 栄養生長期

- ・卷葉程度、幼苗の萎凋程度、乾燥後の再灌水による回復程度

(c) 生殖生長期

- ・干ばつによる種子不稔程度、最終的な玄米収量

(d) 登熟期

- ・干ばつ下で収穫された種子の発芽力の比較

7. 3. 1 発芽期

一般に陸稲は水稻よりも土壌からの吸水力や乾燥下での発芽力に優れている。前章の図 17 で阿部・小野（1973）が示したように、陸稲は水分欠乏の状態でも種子根や幼芽の生長が水稻よりも優れ、干ばつ下でも水稻品種よりも高い出芽率が期待できる。小野寺（1934）は発芽期の耐干性程度は必ずしも干ばつ下での減収程度と関連は認められないと述べている。しかし、播種後に降雨が少なく、土壌が乾くと陸稲でも発芽や苗立ちに悪い影響が生じることは明らかであり、発芽期の耐干性は春先の降雨不足の際にも陸稲の苗立ちを安定させる特性であることは間違いない。

(1) 水分欠乏下における発芽・出芽力

水分が欠乏した条件下で、発芽率と出芽率を比較するのは、最も単純な評価法である。しかし、この場合、どのようにして水分条件を揃えるかが鍵であり、乾燥土壌、しょ糖溶液、ペーパータオル等を使う方法が提案されてきた。小野寺（1934）と西川（1946）は濾紙に水を加えた発芽床で発芽試験を行い、しょ糖を使った試験方法も提案している。白土ら（1997）は土壌水分を 9.4 ～9.5%に調整した土壌で様々な水陸稲品種の発芽力を比較し、陸稲や赤米水稻がこの条件でも優れた発芽力と発芽後の生育を示したと報告している。

(2) 吸水力

乾燥した土壌から水分を吸収する能力は発芽期の耐干性に大きく影響すると考えられ、佐藤（1934）はイネ、小麦、大豆等の作物の発芽時の吸水力を 0.3～1.0 M のしょ糖溶液を使って比較し、陸稲の吸水力は 11.1～17.8 気圧で水稻の 9.6～15.9 気圧より優ると報告している。また、西川（1946）は日本、中国、インドのイネ品種の吸水力を比較し、明らかな品種間差が認められると報告している。

(3) 塩素酸カリウム抗毒性

陸稲の発芽期の耐干性と発芽時の塩素酸カリウム溶液への耐性との関連が示唆されている（山崎、1929；金ら、1988）。彼らの報告では、0.3%の塩素酸カリウム溶液に籾を浸漬し、30℃に保ち、6 日後に種子根と幼芽の伸長程度を観察した。塩素酸カリウム溶液中では、発芽率や幼芽等の生長が抑制されるが、その程度には品種間差が認められた。山崎（1929）は塩素酸カリウム溶液内で幼芽と種子根が良く伸長するインド型イネ品種を見出し、発芽期の耐干性の育種素材として期待できるとしている。

7. 3. 2 栄養生長期

栄養生長期の干ばつは植物体の生長を抑制し、降雨で干ばつが解消された後も影響が残る。特に出穂期や一株穂数は栄養生長期の水分ストレスで影響を受け、最終的には収量にまで影響する（丸山・田嶋、1995）

（表 13）。この生育時期の検定は操作が簡単であることから、栄養生長期の耐干性評価は陸稲育種において広く利用されている。

表 13 土壌水分制限による生育および受精障害（丸山・田嶋、1995）

生育抑制				
	出穂日	稈長	1 株穂数	受精歩合
日本陸稲	+ 2	0.89	0.92	0.93
日本育成水稻	+ 5	0.90	0.86	0.86
半矮性インド稲	+4	0.81	0.77	0.78

生育抑制 出穂日：乾燥区－湛水区。稈長、1 株穂数、受精歩合：乾燥区／湛水区。

（1）栄養生長期の耐干性評価法

栄養生長期の耐干性は一般に苗を水分ストレスにさらして、その被害程度によって評価する。いくつもの集団評価法が開発され、陸稲育種で選抜法として利用されている（Gupta and O'Toole, 1986a ; O'Toole and Maguling, 1981）。いずれの方法も水分ストレス下における苗の巻葉、萎凋、生育抑制程度を観察して、スコア化することで、耐干性を評価している。

茨城県農業試験場では IRRI の方法（Gupta and O'Toole, 1986a）をベースとして干ばつによる苗の萎凋程度（耐性）と再灌水後の回復程度（回復性）によって栄養生長期の耐干性を評価する「同時法（萎凋法）」を開発した（目黒ら、1959）。この方法では土を満したバット（52×21×10 cm）に供試材料の催芽籾を播種する。各バットには畦長 5cm、畦間 2cm の 20 畦を設け、各畦に 1 系統 5 株を栽培し、反復を設ける。各バットには基準品種を供試系統に加える。播種後、バットは温室内に置き、必要に応じて灌水する。苗が 5～6 葉期に灌水を停止し、干ばつ処理を行う。8 日後に苗毎に萎凋程度を観察し、0（軽）～5（重）に分類し、耐性の評価を行う。萎凋程度を観察した後で、再度灌水し栽培を続け、9 日後に再度被害程度を 6 段階に分類し、回復性の評価を行う。表 14 に各評価点数の症状を示す。生物工学研究所陸稲育種チームで陸稲の幼苗期での耐干性について品種検索を実施した結果、比較的優れた耐性を示す品種が必ずしも回復性も優れているとは言えなかった。そのため、耐性と回復性はお互いに独立した特性と考えられる。

表 14 生物工学研究所陸稲育種チームにおける幼苗期の耐干性評価基準

干ばつ害	点数	症状
葉巻	0	葉巻なし
	1	葉の先端部が軽く巻く
	2	軽く巻き、一部巻かない
	3	一部は巻かない
	4	全体に巻く
	5	針状に巻き、一部変色する
萎凋	0	葉先に枯死なし
	1	いくつかの葉先が枯死
	2	葉先が枯死
	3	ほとんどの葉先といくつかの葉身が枯死
	4	ほとんどの葉身が枯死
	5	すべての葉身が枯死

茨城県農業試験場では幼苗期耐干性の集団評価法の精度を向上させるために、手法の改良を進めた（目黒ら、1959）。その結果、一定の水分ストレスがかかると葉を折りたたむオジギソウ（ミモザ、*Mimosa pudica*）を使うことで、試験区内で水分ストレスが均一にかかっていることを確認するミモザ法を開発した。この方法では耐干性を評価するバット内の数か所にオジギソウを播種し、その葉の様子から各バットの水分ストレスが均一にかかっていることを確認することができる。また、供試系統を基準品種と常に隣接して配置し、干ばつ害程度を隣の基準品種と比較することで、バット間の誤差を少なくする交互配置法を提案し

た。ミモザ法や交互配置法でも萎凋法と同様に苗の生育期間に灌水を停止し、干ばつ区と灌水区の生育の比較で耐干性を評価する。

これらの評価法によって幼苗期の耐干性に品種間差があることが確認できた。しかし、生物工学研究所陸稲育種チームでは供試系統の耐干性評価を蓄積する中で、日本では栄養生長期は梅雨期と重なるため、この時期に干ばつが問題となる事は少なく、栄養生長期の耐干性評価が必ずしも干ばつ下で圃場での収量性と一致しないと結論付けた。そのため、陸稲育種の特性検定として、幼苗期の耐干性を評価することは止め、生殖生長期の深根性による耐干性の評価に集中して実施するように変更した。

(2) 巻葉

水分欠乏下では陸稲は蒸散量を抑制するため葉を巻く現象が観察される。O'Toole and Moya (1978) は巻葉程度 (1: 巻葉なし、5: 完全に巻く) によって耐干性を評価する検索方法を提案した。Gomosta and Haque (1985) は深根性品種の巻葉程度が浅根性品種より低いと述べている。一方、IRRI (1984) はいくつかの陸稲品種は水稻品種よりも高い巻葉程度を示すことから、巻葉程度が必ずしも植物体内の水分ストレス程度を示していない可能性を示唆している。生物工学研究所陸稲育種チームでは系統選抜圃場において干ばつ下で系統ごとに巻葉程度を観察し、評価を記録した。しかし、巻葉程度と干ばつによる減収程度との間で必ずしも関連を見出せないことから、参考程度の記録にとどめた。

7. 3. 3 生殖生長期

陸稲の生育期間を通して最も水を多く必要とするのは最高分げつ期から出穂期である (図 38)。陸稲の直接的な減収となる受精障害が水分欠乏で引き起こされる時期は、出穂の 2 週間前と出穂期である (長戸、1949) (図 39)。IRRI (1980)

は水分ストレスに敏感で減収の要因となる時期として、開花期が最も重要で、次いで、減数分裂期、幼穂形成期、登熟期の順としている。生殖生長期の耐干性は植物の生育程度、種子稔性、そして最終的な収量で評価される。生物工学研究所陸稲育種チームでは生殖生長期の耐干性評価法として、耐干性検定ハウス法を用いてこの時期の根の発達程度に基づく評価法を開発し、利用した。この方法の詳細については後で説明する。

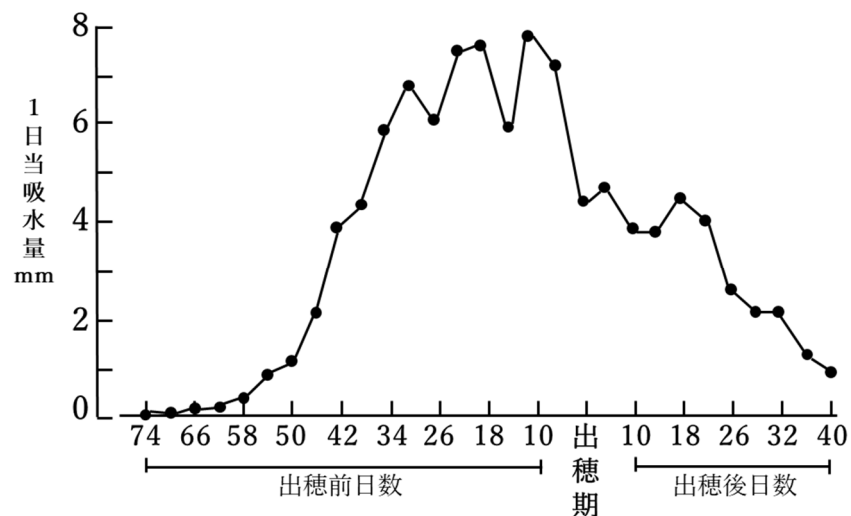


図 38 10a 当たり玄米収量 400kg の時の 1 日当たり吸水量
(関東東山農試 1954~1957 を一部改変)

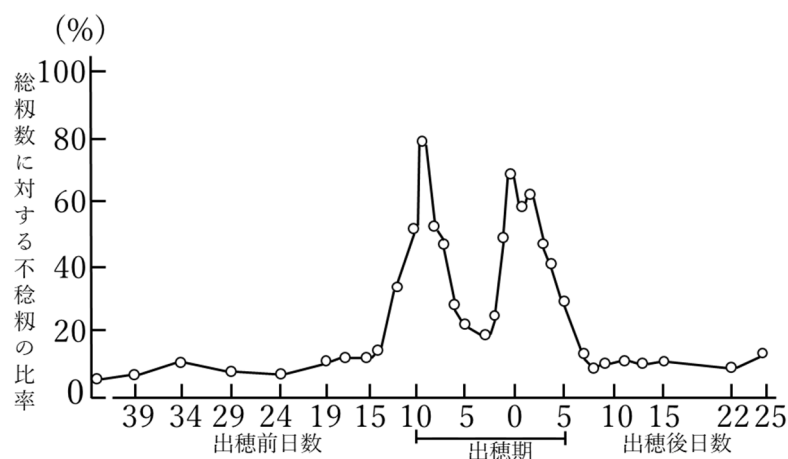


図 39 断水時期が陸稲の稔実に及ぼす影響 (長戸 (1949) を丸山 (1987) が一部改変。)

7. 3. 4 生育全期間

(1) 灌水区と不灌水区での生育量の比較

単純に生育期間を通して耐干性を評価する方法として、灌水の有無による収量への影響をみる方法がある。この方法では、畑と水田で収量を比較する方法と、畑でスプリンクラー灌水の有無による収量差をみる方法がある。耐干性は収量比 ($\text{干ばつ区収量} / \text{灌水区収量} \times 100$) と減収率 ($(\text{灌水区収量} - \text{干ばつ区収量}) / \text{灌水区収量}$) で示される。図 40 に茨城県農業試験場で実施した水陸稲品種の畑栽培 (畑地灌水付き) と水田栽培での収量比を示す。畑栽培で陸稲品種の収量比 ($\text{畑栽培収量} / \text{水田作収量} \times 100$) が高いことが確認できる。しかし、この方法では、陸稲を水田栽培すると早生化し、生育量不足による減収が起こる場合があり、供試材料の出穂期の変動に

配慮して評価する必要がある。一方、畑栽培で灌水の有無が収量に及ぼす影響から耐干性を評価することも考えられる。この試験を畑で実施する場合、試験期間中の降水量が問題となり、降雨が多いと耐干性の評価ができない可能性が高い。そのため、生物工學研究所陸稲育種チームでは降雨の影響を避けるために、ガラスハウス内に陸稲栽培用栽培床を設け、灌水の有無が収量に及ぼす影響を比較した。図 41 は陸稲品種系統の収量をガラスハウス内で灌水の有無で比較した結果である。‘ハタサングク’や‘ミナミハタモチ’、‘陸稲農林 21 号’は灌水区では収量は高いが、干ばつ区では大幅に減収した。一方、‘ゆめのはたもち (関東糯 168 号)’、‘関東糯 172 号’、‘陸稲農林 19 号’は両区とも高い収量を示したことから高度な耐干性が期待された。

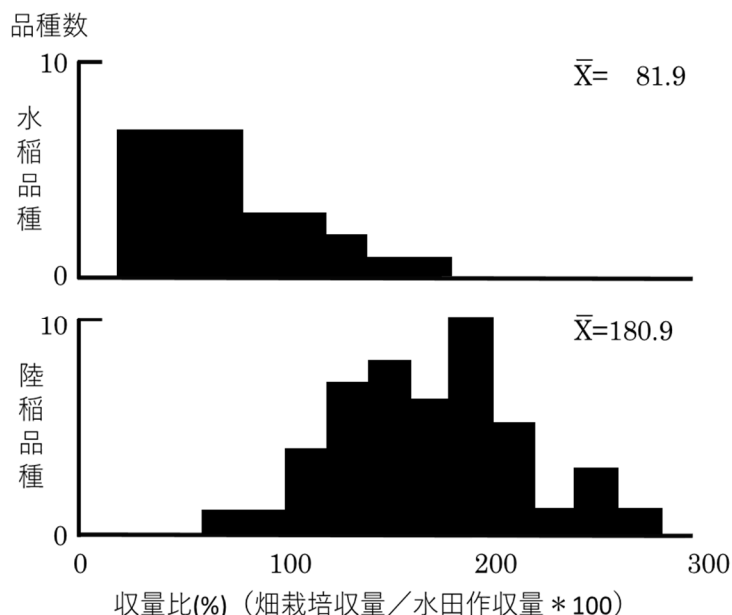


図 40 水陸稲の水田栽培と畑栽培における収量の比較 (茨城県農業試験場、未発表)

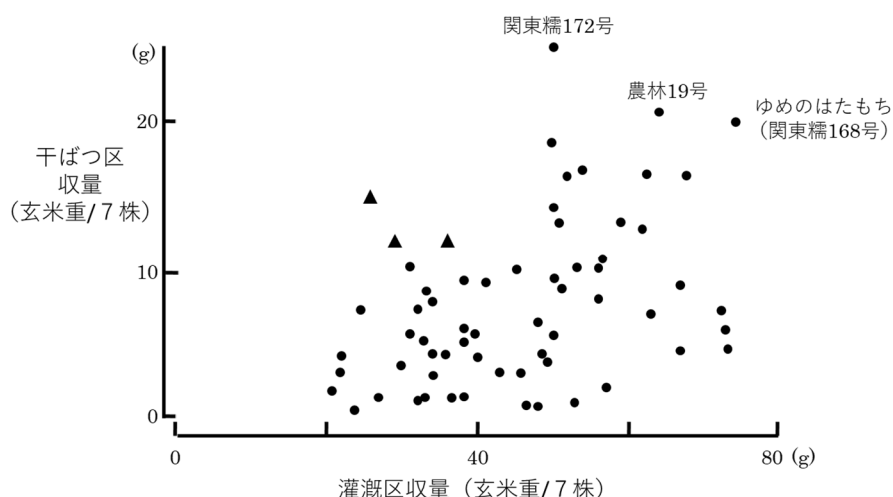


図 41 ガラスハウス内での陸稲における灌漑の有無による収量比較
(茨城県農業試験場、未発表)

7. 4 深根性に基づく選抜

7. 4. 1 深根性が耐干性に及ぼす影響

陸稲の根系の発達程度はその耐干性程度に強く影響する。深く密度の高い根系を持った陸稲品種はより深層から残留水分を吸収し、干ばつ下でも生育を続けることができる。番場・大久保 (1981) は高土壌水分では根は表層部に、低土壌水分では根は深層部に分布する割合が多いことを示した。また、根系分布に作物間差を認め、畑水稻や水稻-陸稲交配稲では根は浅く、陸稲は深いと述べている。三鍋 (1951) は耐干性に優れる陸稲品種の‘東山 36 号’、‘陸稲農林糯 1 号’、‘東海神力’が土壌深層に密度の高い根系を持っていることを報告した。生物工学研究所陸稲育種チームでは根系発達程度に焦点を当てて、耐干性の向上を図った。図 42 で陸稲の根端が到達している土壌深度とその陸稲の蒸散速度を比較すると、極めて高い相関が認められ、土壌深層

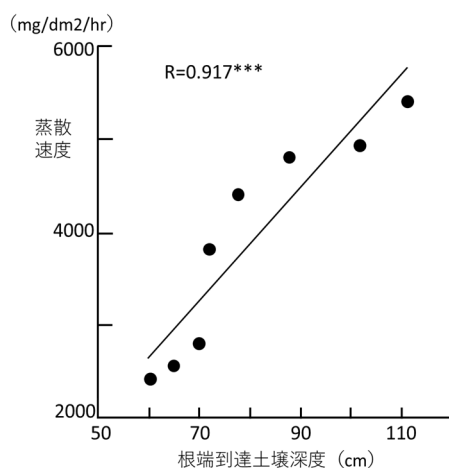


図 42 陸稲の根端深度と蒸散速度との相関関係
(茨城県農業総合センター生物工学研究所、1997 年)

から水分が吸収されていることが示された。さらに平山ら (1995) は干ばつ年に根系発達程度と生殖生長期の干ばつ害である種子稔性との関連を、熟期ごとに比較した。その結果、より厳しい干ばつにさらされる中生～晩生熟期の陸稲では、土壌下層まで根端が達している品種は干ばつ下でも水分欠乏による受精障害の発生が少なく、特に深根性の‘ゆめのはたもち’や‘関東糯 172 号’は高い種子稔性を示した (図 43)。一方、早生品種では根系と不稔率の間に関連が認められず、早生性による干ばつ回避の影響と考えられた。そのため、生物工学研究所陸稲育種チームでは中生～晩生熟期に絞って耐干性と根系発達程度を比較し、耐干性程度と根の最深到達深度に関連があることを認め、耐干性に優れる‘ゆめのはたもち’は干ばつがない年でも深い根系を発達させていることを観察した (平山ら、2007) (図 44)。また、平山ら (2007) は塹壕法 (発掘法) に加えて、モノリス法やコアサンプリング法によって中生～晩生熟期の国内陸稲品種の根系発達程度を繰り返し観察し、この熟期の深根性の標準品種として、‘ゆめのはたもち’ (深)、‘陸稲農林糯 26 号’ (やや深)、‘ミズハタモチ’ (やや浅) を選定した (図 45)。

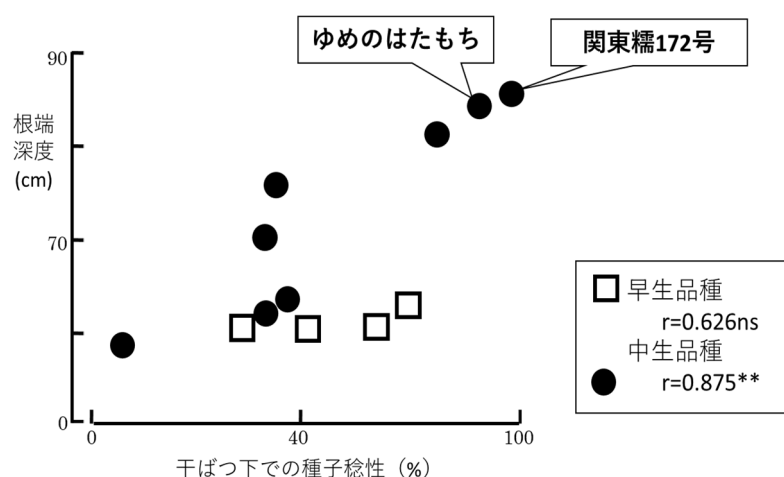


図 43 陸稻の根端深度と耐干性との相関関係
(平山ら、1995 を一部改変)

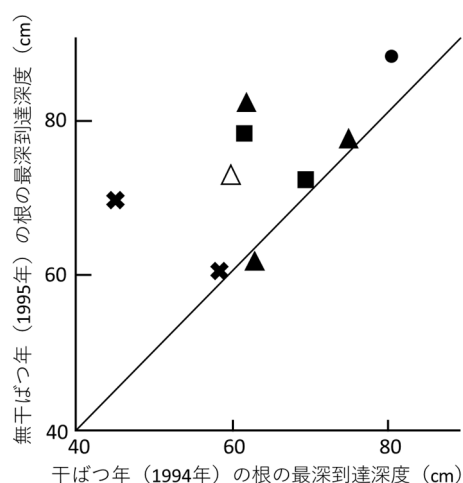


図 44 耐干性の異なる品種の干ばつ年 (1994 年) の根の最深到達深度と無干ばつ年 (1995 年) の根の最深到達深度との関係
(平山ら、2007 を一部改変)
● 極強 (ゆめのはたもち)
■ 強 (ツクバハタモチ、ハタフサモチ)
▲ やや強 (農林糯4号、農林糯26号、ハタキヌモチ)
△ 中 (ハツサクモチチ)
× やや弱～弱 (ミズハタモチ、水稻ウルマモチ)

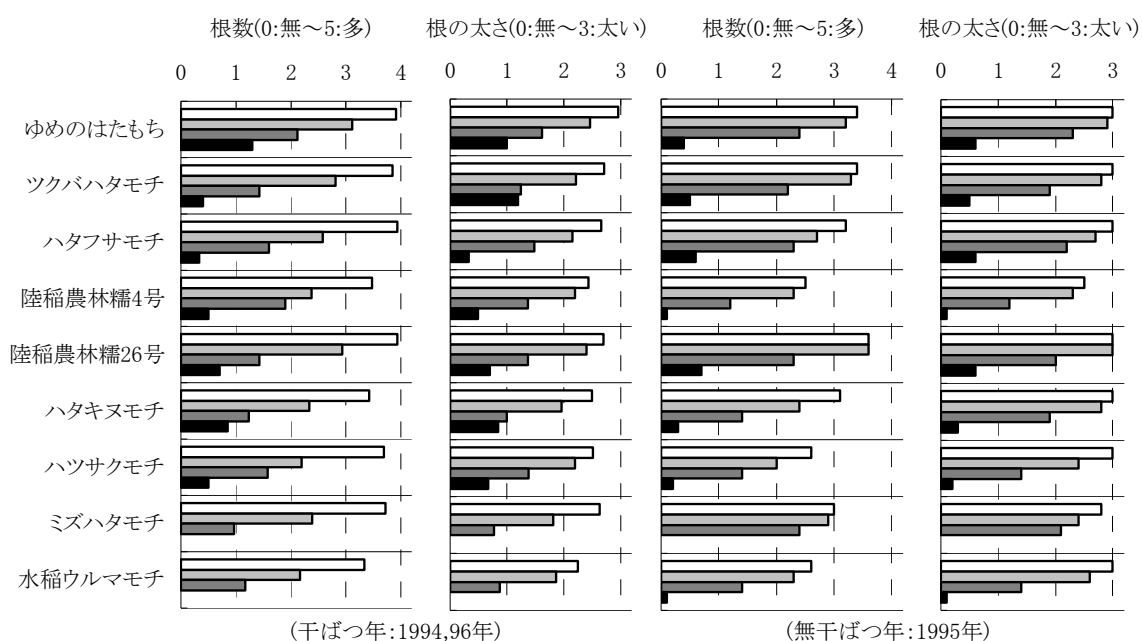


図 45 発掘法で達観調査した中生・晩生品種の根系発達程度 (平山ら、2007 を一部改変)
□ 0-20cm □ 20-40cm ■ 40-60cm ■ 60-80cm

7. 4. 2 深根性の評価法

(1) 耐干性検定ハウス法

陸稲育種での様々な特性調査の中で、深根性の調査は最も時間と労力が必要な作業である。陸稲の根系の発達程度を直接または間接的に知る方法として、引っ張り強度法、根箱法、水耕栽培法、土壌コアサンプリング法など多くの調査法が提案されてきた。

茨城県農業試験場では、日本で問題となる生殖生長期における深根性を比較する手法の開発を試み、特殊な栽培床を用いる「耐干性ハウス法」を開発した（平山・須賀、1995）（図 46、図 47）。この方法では、供試する陸稲は降雨の影響を避けるために、ハウス内に設けた栽培床（長さ 15m、幅 1.2m、高さ 30cm）に播種する。栽培床には干ばつ区と灌水区があり、供試材料を両区に栽培し、生育や収量を比較する。図 46 に干ばつ区と灌水区の横断面を示す。灌水区は表土層が床土と一体化しているのに対して、干ばつ区は土壌表面から 25cm の深さまでの表土層と、その下に 5cm の砂利層が設けられ、表土層を床土と切り離している。播種後、両区とも土壌表面から灌水を続けるが、干ばつ区は生殖生長期に相当する

出穂 2 週間前に灌水を停止する（図 47）。一度、灌水が停止すると干ばつ区の表土層は、砂利層によって床土からの水分の上昇が遮断されるため、著しく乾いた状態になる。そのため、表土層に根をもつ浅根性のイネは著しい水分ストレスにさらされる。しかし、イネの根は砂利層を通過して生長できるため、深根性のイネの根は砂利層を通過し、その下の床土層に達することができる。床土層はある程度の水分を保持しているため、表層からの灌漑が停止しても、深根性のイネは床土から吸水し、生育を続けることができる。供試材料が砂利層を通過できる根系を持っているかどうか、その後の生育や収量に大きく反映することから、干ばつ区と灌水区の収量を比較し、干ばつ区の減収程度が少ない系統は深根性を備えたイネであることが期待できる。

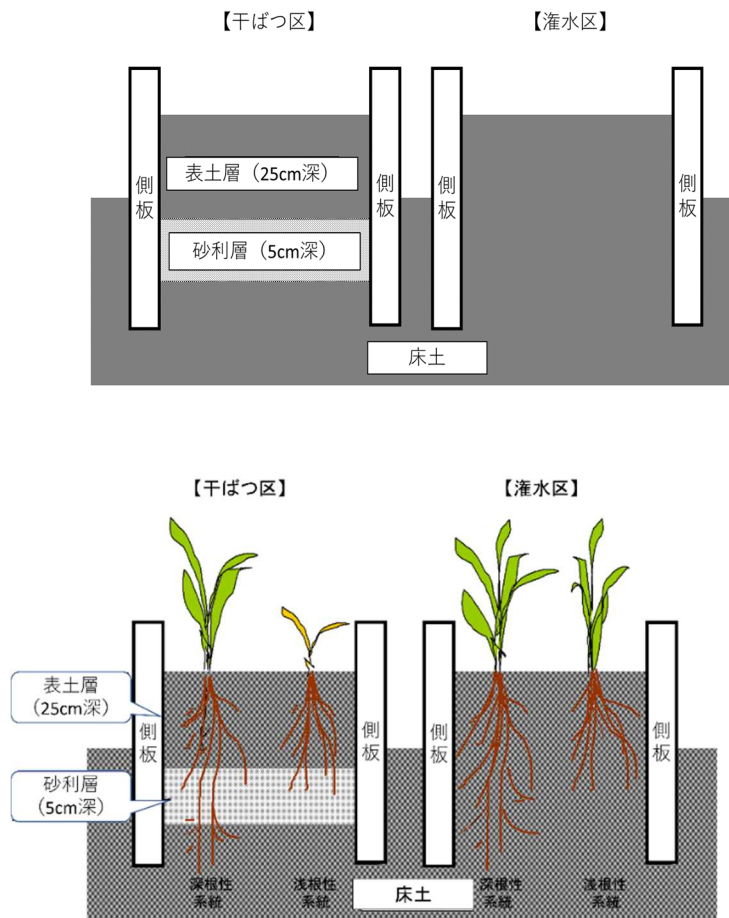


図 46 耐干性検定ハウス栽培床の横断面
(上：播種前、下：干ばつ処理時期の模式図)



図 47 耐干性検定ハウス（茨城県農業総合センター生物工学研究所）
（左：灌水区、右：干ばつ区）

図 48 に本法で得られた水陸稲の収量を示す。耐干性が強い、中生熟期の‘ツクバハタモチ’や‘陸稲農林糯 26 号’は極早生の‘トヨハタモチ’と比べて、干ばつ区の収量が高く減収程度も少ない。また、水稻品種は干ばつ区で著しく低収となり、‘ミズハタモチ’等の畑地灌漑栽培用水稲は、陸稲と水稻の中間に位置し、一般栽培での耐干性程度を反映する結果となった。

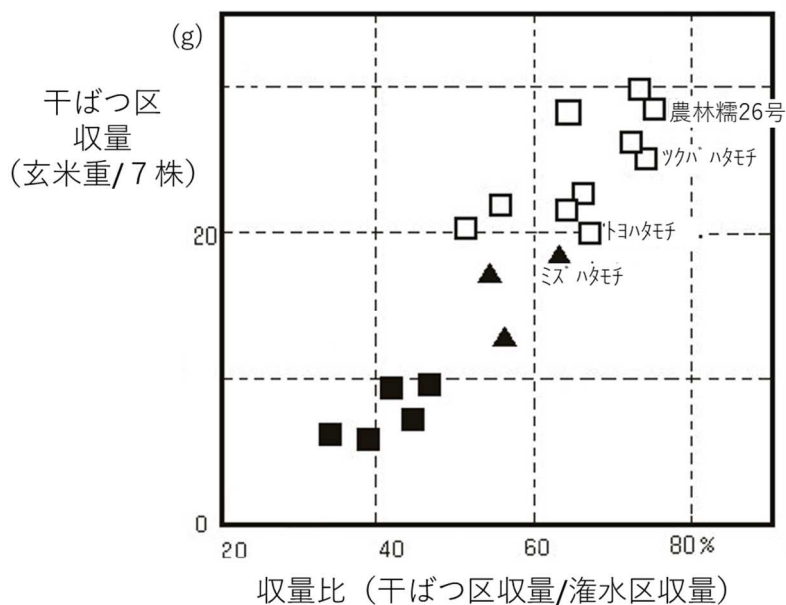


図 48 耐干性検定ハウス法による干ばつ区の収量の品種比較（平山・須賀、1995 を一部改変）
□：陸稲品種系統
▲：畑灌漑栽培用水稲品種系統
■：水稻品種

(2) 塹壕法（発掘法）

塹壕法は実際の陸稲畑で穴を掘って根の生育程度を直接に観察する方法で、様々な根の調査方法で最も労力を必要とするが、最も確実な評価方法と言える。生物工学研究所陸稲育種チームでは陸稲遺伝資源の評価や有望系統について数年に渡って塹壕法によって根系の発達程度を確認する試験を行った。

実施した塹壕法では、各供試陸稲系統を畦長 3m、畦間 60cm に 10 個体を反復なしで栽培した。収穫後、トレンチャーやパワーショベルによって、畦際に深さ約 80cm の溝を掘り、深さ 10cm か 20cm ごとに分布している根の量と太さを観察した（図 49）。観察は溝の断面の各深度に 10×10cm か 20×20cm の観察区を

設け、観察区ごとに根の量と太さを観察し、6段階（0：根ナシ、1：少、細～5：多、太）に分類した。品種の評価は土壌深度毎の平均で示した（平山ら、1995、1996、2007）。



図 49 塹壕法（発掘法）（茨城県農業総合センター生物工学研究所）

（3）塹壕法による品種検索

茨城県農業試験場では 1979 年から 1983 年にかけて、塹壕法を用いて、深根性が期待できる外国原産の水陸稲品種の根系を観察する試験を行った。農研機構のジーンバンクから提供された 8 地域原産の計 255 品種を供試した（Nemoto et al., 1998）。標準品種として、‘農林 12 号’、‘農林 21 号’、‘農林糯 26 号’を用い、供試品種の根系の観察評価を行った。‘農林 21 号’の根量は‘農林 12 号’よりも多く、‘農林糯 26 号’の根量は両品種の間であった。

図 50 に土中深度 40～50cm または 45～60cm における根の量と太さについての品種頻度を原産地別に示した。供試した品種の根はその年の標準品種と比較された。その結果、土壌深層に豊富な根系を持つ品種が西アフリカ、中国、インド原産の品種から見いだされた。IRRI の育成品種は深層に比較的多くの根を持つが、根の太さは標準品種の日本陸稲と同等であった。逆に直播で栽培されるアメリカやヨーロッパ品種には太い根を持つ品種が見られたが、それらの根量は日本陸稲と大差なかった。台湾の陸稲品種もアメリ

カやヨーロッパ品種と同様な傾向であった。中国原産の品種では、雲南省の陸稲品種には日本の陸稲品種よりも土壌深層に多くの根を持つ品種が見られた。アフリカ原産のグラベリマ稲 (*Oryza glaberrima*) も供試したが、その根の量や太さは日本陸稲と大差なかった。実施した品種検索を通して、深根性の遺伝資源として期待できる品種はインド、西アフリカ、中国原産の品種から見いだされた。特に、インド品種‘B5416’と‘JC81’、中国品種‘Nam Sugai 19’、西アフリカ品種‘IRAT10’、‘IRAT109’、‘IRAT110’やIRRI品種‘IR3646’が深根性の遺伝資源として期待され、日本陸稲品種との交配に供された。

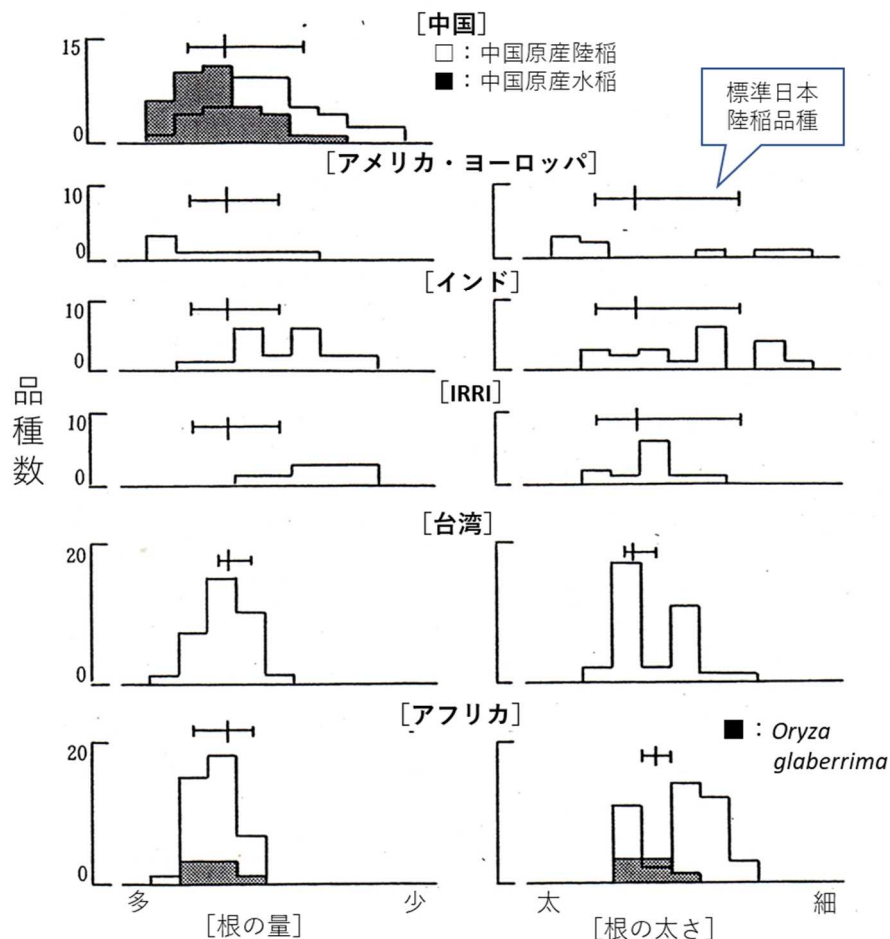


図 50 塹壕法による起源国別の根の特性の分布 (Nemoto et al., 1998 から一部改変)

7. 5 深根性品種‘ゆめのはたもち’の育成

茨城県農業試験場では 1979 年から上記の塹壕法による品種検索で見いだされた外国陸稲品種の深根性を日本陸稲品種に導入する育種を開始した。しかし、外国品種には、極晩生、長稈、低品質等の不良形質が多く、単交配で目的とする深根性のみを導入することは難しく、日本陸稲品種を数回戻交配する必要がある。後代系統は圃場で草型や耐病性等について選抜を行うとともに、上記の耐干性検定ハウス法で深根性に関する選抜を繰り返し行った。その結果、1996 年に生物工学研究所陸稲育種チームは優れた耐干性と餅食味を備えた新品種‘ゆめのはたもち (旧系統名 関東糯 168 号)’を育成した (根本ら、1998) (表 15)。

表 15 陸稲品種‘ゆめのはたもち’の特性

品種名	到穂日数	稈長 (cm)	穂長 (cm)	いもち病抵抗性 ^{a)}	
				葉いもち	穂いもち
ゆめのはたもち	125	71	20.1	1	0
ツクバハタモチ	124	79	20.8	0	0

a) いもち病抵抗性：0（抵抗性）～6（感受性）。

この品種は品種検索で見出した深根性のインド品種‘JC81’にいもち病抵抗性の‘陸稲農林糯4号’を2回戻し交配した組合せから育成された。‘ゆめのはたもち’は稈長が中程度の中生熟期の品種である（表15）。親品種の‘JC81’から優れた深根性を受け継いでいることが特長である。塹壕法によって“ゆめのはたもち”の根系の発達程度を見ると、‘ゆめのはたもち’の根端は他の陸稲品種より20cm程度深い、85cmの深さまで達していることが分かる（図51、図52）。1992年や1994年の干ばつ年にも‘ゆめのはたもち’は他の中生熟期品種よりも比較的高い収量をあげることができた。そのため、‘ゆめのはたもち’の耐干性は、これまで中生熟期で最も高度とされていた‘ツクバハタモチ’や‘陸稲農林糯26号’の耐干性よりも優り、日本の陸稲品種で最上位に位置付けられると考えられた（表16、表17）。また、従来の陸稲の餅は水稻の餅よりも食味が著しく劣るとされていたが、餅の食味試験の結果、‘ゆめのはたもち’の餅は、水稻餅に近い滑らかさや柔らかさを持ち、既存の陸稲糯品種の最上位に位置付けられ、水稻餅に匹敵すると評価された。‘ゆめのはたもち’は日本の陸稲の主産地である北関東3県（茨城、栃木、群馬）で奨励品種に採用され、陸稲作の安定化のために貢献すると期待された。‘ゆめのはたもち’は耐干性の育種素材として利用され、その後代から‘ひたちはたもち’が育成されている（石井ら、2006）。

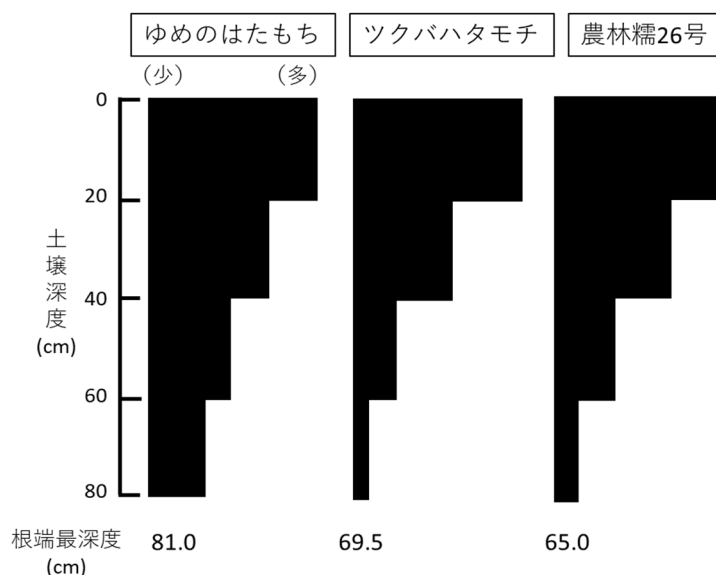


図 51 陸稲品種‘ゆめのはたもち’と他の中生陸稲品種の各土壌深度における根量と根端最深度の比較（根本ら、1998より作成）

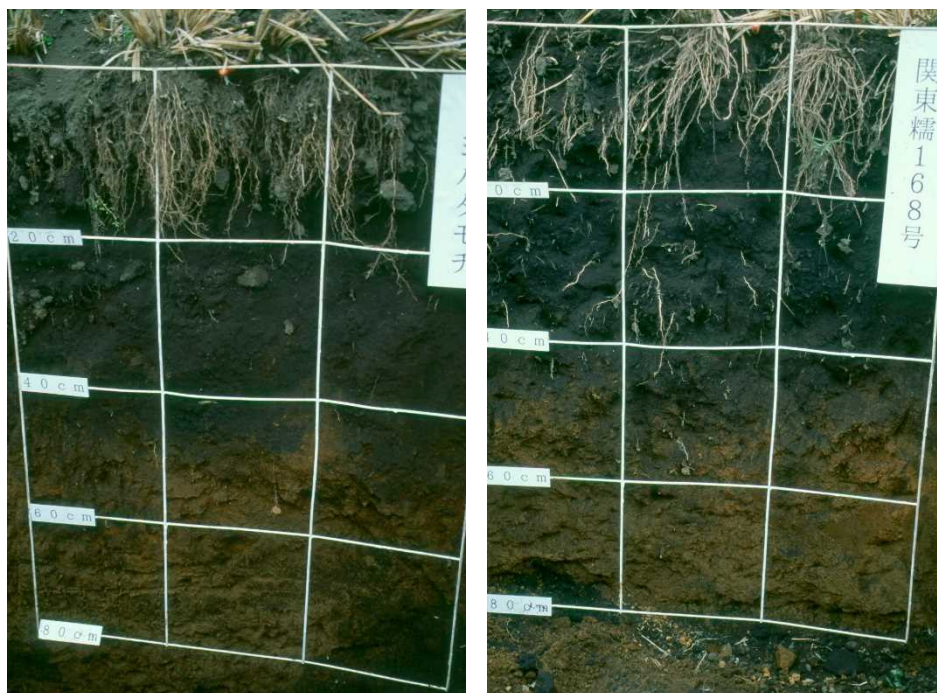


図 52 陸稲品種‘ゆめのはたもち’と‘トヨハタモチ’の根系の発達と比較
(左：トヨハタモチ、右：ゆめのはたもち（関東糯 168 号）)

表 16 干ばつ年の収量でみる陸稲品種‘ゆめのはたもち’の耐干性

品種名	干ばつ年（1992、1994 年） の平均収量と品質 ^{a)}			供試期間（1989-1995 年）を通し た平均収量と品質 ^{a)}		
	収量 (kg/a)	比率 (%)	玄米 品質	収量 (kg/a)	比率 (%)	玄米 品質
ゆめのはたもち	16.4	148	5.2	34.2	111	5.2
ツクバハタモチ	11.1	(100)	5.9	30.9	(100)	5.0
陸稲農林糯 26 号	5.8	52	5.7	27.4	89	5.2

a) 玄米品質：1（良）～9（不良）。

表 17 陸稲品種‘ゆめのはたもち’の干ばつ害程度

品種名	出穂遅延 ^{a)} (日)	稈長抑制 ^{a)} (cm)	種子不稔率 ^{b)} (%)
ゆめのはたもち	1	8	10
ツクバハタモチ	5	13	46
陸稲農林糯 26 号	7	18	42

a) 1989～1995 年の生育—干ばつ年（1992、1994 年）の生育。

b) 干ばつ年（1992、1994 年）の平均種子不稔率。

8 考察

本稿の冒頭でも述べたように、世界的にも陸稲育種は水稻育種と比べて研究が少なく、技術的にも遅れていると言わざるを得ない。陸稲栽培はアフリカ等で重要な役割を果たしているが、栽培国は開発途上国が多いため、各国での陸稲に関する研究は決して多くはないのが現状である。先進国で広く国内で陸稲を栽培した経験を持ち、組織的に品種改良を行ってきたのは日本くらいである。そのため、国内の陸稲栽培

の中心地であった茨城県における陸稲の栽培や育種に関する技術や経験は、世界的にも貴重な知識の集積と言える。

1998年に国際農林水産業研究センターの用務で、西アフリカのコートジボアール国でアフリカ向けに陸稲育種や栽培研究を行っている国際研究機関の西アフリカ稲開発協会（WARDA：West Africa Rice Development Association）（現アフリカ稲センター）を訪問した際に、良い機会だからと開催された所内セミナーで茨城県の陸稲育種を紹介したところアフリカの陸稲研究者から、最初に日本に陸稲栽培があるのかと驚かれ、次に紹介した耐干性検定ハウス法等の陸稲育種技術が極めて実用的であると賞賛されて驚いた記憶がある。茨城県の陸稲育種は世界的にも通用する技術だと実感した。

一方、陸稲育種に関する知見は、その多くが陸稲育種チーム内にとどまっていたことは残念である。得られた知見は成績概要書や陸稲育種基礎試験成績書に記録されていたが、論文として学会誌に投稿された例は必ずしも多くなかった。もし英語で研究を紹介できていれば、海外での陸稲研究で利用された技術は多かったのではないかと考える。陸稲育種に限らず、研究成果の最大化は研究者として肝に銘じなければならないと思う。

8. 1 育種法について

陸稲育種の育種方法は基本的に水稻育種に倣ったものである。一方、水田で栽培される水稻と違って、畑で栽培される陸稲は降雨や気温の影響を水稻以上に強く受けるため、栽培品種に求められる特性の水準が地域によって大きく変動する。そのため、各地域で陸稲作を安定させるには、各地域に適した多様な陸稲品種を細かく普及させることが望ましく、水稻品種のように大物品種が地域を越えて広く普及することは陸稲では考えにくいように思う。国内での陸稲の栽培面積が減少する中では、考える必要のない事だったかもしれないが、書き残しておきたい。

近年の作物育種では、ゲノム情報を利用したDNAマーカー育種法の活用が広がっている。陸稲育種で対象とする形質でもいもち病抵抗性や根の形質に関するDNAマーカーの研究成果が報告されている。陸稲に限らず将来の育種現場では、圃場でしっかり作物を観て評価する能力に加えて、ゲノム情報を活用し、効率化に品種開発を進める必要があると考える。

8. 2 特性検定法について

以前に、植物生理の研究者と特性検定の話をしていた際に、生理研究者から育種の検定法は精度が荒いと苦言を呈されたことがある。しかし、育種研究で行う特性検定法は、検定精度とともに多数の材料を扱うための効率性が不可欠であり、ある意味、不適切な系統を足切りできれば育種の検定法としては十分に役割を果たしていると言える。いもち病など水稻と共通な特性検定については、水稻の研究情報を活用できるが、耐干性など陸稲独自の育種目標については、陸稲育種チーム内で特性検定法を工夫する必要がある。そのため、茨城県農業試験場や生物工学研究所で開発された陸稲育種技術を見ると、科学的な裏付けに加えて、現場での担当者の工夫が見て取れる。例えば、陸稲育種チーム内で語られている耐干性検定ハウス法の開発に関する逸話がある。後に茨城県農業総合センター農業研究所所長を務めた石原正敏氏は、陸稲育種チームの若い研究員として陸稲系統のハウス内での耐干性評価を担当していた。しかし、灌水を止めても干ばつ区の土を均一に乾かすことができずに、耐干性評価のバラツキに悩んでいた。休日、石原氏が趣味のアユ釣りにでかけ、おとりアユを泳がせながら、周辺の風景に目をやっていると、ふと河原の小石に目が留まった。小石は下半分が川に浸かって濡れているのに対して、上半分はくっきり乾いている。こうした小石を使えば、水分を遮断することができるのではないかと石原氏はひらめき、砂利層を内部に設けた栽培床を考案することができたそうである。日常的な工夫の積み重ねが担当する技術の進展につながった例だと考える。

8. 3 耐干性育種について

耐干性の向上は陸稲育種の根幹であり、最も重要な育種目標である。耐干性のメカニズムとしては多くの研究が行われ、いろいろなメカニズムが提案されている。しかし、育種目標として設定するには、作用力の大きな特性でなければ選抜効果は期待できない。その意味で、陸稲育種チームが早生性による干ばつ回避性と、深根性（特に生殖生長期の深根性）に絞って育種を続けたことは世界の陸稲育種の手本になる

と考える。これまでも海外の陸稲育種家に助言を求められたことがあるが、その際には、「あなたの国で干ばつ害が問題となるのは、陸稲のどの生育時期ですか？その時期に必要な耐干性を特定して向上させなさい。」と指導した覚えがある。

一方、深根性の研究は労力のかかる調査である。特に試験圃場の土壌構造を破壊する塹壕法は、めったに実施できない研究手法である。図 49 のような塹壕法を実施できたのは、たまたま次年度倉庫敷地に転用する畑がでて自由に溝を掘ることが許されたのであって、通常なら許可されない試験である。非常に幸運だったと言える。そのため、自由に簡便に実施できる深根性の研究法として、リモートセンシングの技術を利用できないだろうか？ 図 42 に示したように深根性の陸稲は吸水力が強く、蒸散量が多いことから、気化熱により葉面温度が低くなると期待できる。ドローンに掲載したリモートセンシング機器で育成系統の葉面温度を測定し、葉面温度の低い陸稲を選ぶことで深根性の系統が選抜できる手法が期待される。

8. 4 水稲育種の素材としての陸稲について

いもち病抵抗性をはじめとして、陸稲は水稲育種の遺伝資源として有望な素材である。これまでは陸稲を交配親に使った後代系統では、どうしても陸稲の品質の悪さや草型などの不良形質を取り除くことが難しく、水稲育種家は陸稲を使うことに躊躇する傾向があった。ただ、Miyamoto et al (2001) の成果が示すように陸稲のいもち病抵抗性のゲノム研究は進んでおり、ゲノム情報を利用して陸稲‘嘉平’や‘戦捷’のいもち病抵抗性が簡単に利用できるなど陸稲の育種素材としての利用性は高まっていると考える。特に、畑地灌漑栽培用のイネは、陸稲と水稲の中間的な性質を持っており、陸稲の特性を水稲に導入する際に、注目すべき素材であると考えられる。

8. 5 おわりに

国内での組織的な陸稲育種事業は 2006 年に終了し、茨城県農業総合センター生物工学研究所の陸稲育種技術が国内でそのまま再利用される可能性は高くはないと考える。しかし、陸稲育種の担当者の多くが定年を迎え現場を去る中で、本稿が将来に陸稲育種技術を伝える一助になることを期待する。

謝辞

本稿は茨城県立農事試験場時代から 77 年に渡って茨城県農業総合センター生物工学研究所で実施されてきた陸稲育種に関する様々な技術の一部を紹介したものである。考察でも触れたように、その間に陸稲育種に従事された関係者の工夫のたまものである。改めて陸稲育種に係わって来られた関係者の方々に深い敬意を表するものである。また、本稿の資料としての取りまとめにご助言とご尽力いただいた茨城県農業総合センター生物工学研究所普通作育種研究室長の岡野克紀氏と、技術の詳細な点についてご助言をいただいた同研究室の平山正賢氏に敬意の意を表する。

引用文献

- 阿部祥治・小野信一（1973）陸稲の低温発芽性と穂発芽性について．茨城県農業試験場研究報告 13：1-15.
- 阿部祥治・清沢茂久・小野信一（1974）陸稲のいもち病抵抗性の遺伝に関する研究（第 1 報）陸稲農林稲 4 号のいもち病抵抗性の遺伝．茨城県農業試験場研究報告 15：47-64.
- 阿部祥治・須賀立夫・小野信一（1976a）陸稲のいもち病抵抗性の遺伝に関する研究（第 2 報）陸稲農林稲 26 号のいもち病抵抗性の遺伝．茨城県農業試験場研究報告 17：67-76.
- 阿部祥治・須賀立夫・小野信一（1976b）陸稲のいもち病抵抗性の遺伝に関する研究（第 3 報）陸稲品種のいもち病真性抵抗性遺伝子の推定．茨城県農業試験場研究報告 17：77-82.
- 赤間芳洋・有坂将美（1992）加工用品種の育種．日本の稲育種（櫛渕欽也編）．農業技術協会、東京、pp.197-208.
- 有坂将美（1994）米菓製造における澱粉の性質評価に関する研究．新潟県食品研究所研究報告．特別号：1-58.
- 番場宏治・大久保隆弘（1981）畑作物の根系分布と収量との相互関係：第 3 報 畑水稻、水稻-陸稲交配稲および陸稲の根系分布と根量に対する土壌水分の影響．日本作物学会紀事 50（1）：1-7.

- 江川和徳・吉井洋一（1990）産地・品種を異にした、糯米による餅の硬化性．新潟県食品研究所報告 25：29-33.
- 江塚昭典・柚木利文・桜井義郎・篠田治躬・鳥山国土（1969）いもち病に対するイネ品種の抵抗性に関する研究（第1報）真性抵抗性遺伝子型の推定．中国農業試験場報告．E1（4）：1-31.
- Gomosta, A.R. and M.Z. Haque (1985) Leaf rolling and desiccation tolerance in relation to rooting depth and leaf area in rice. *IRRN* 20(4):4.
- Gupta, P.C. and J.C.O'Toole (1986a) Varietal improvement. In "Upland rice, A global perspective". IRRI, Philippines, pp.103-136.
- Gupta, P.C. and J.C.O'Toole (1986b) Weed control practices, rice varieties. In "Upland rice, A global perspectives". IRRI, Philippines, pp.280.
- 長谷川新一（1963）主な品種．作物体系 第1編 稲 IX陸稲．養賢堂、東京、pp.34-39.
- 早道良宏・山崎守正（1971）陸稲と水稻間の耐寒性について（続報）．日本作物学会紀事 44（別1）：61-62（講要）.
- 原島重彦（1937）低温に於ける種子の発芽現象に就き水稻及陸稲の比較．日本作物学会紀事 9（3）：407-417.
- 東 正昭・斉藤 滋（1985）陸稲品種戦捷の葉いもち圃場抵抗性遺伝子の属する連鎖群の同定．育種学雑誌 35（4）：438-448.
- 平山正賢・根本 博・岡本和之・須賀立夫・阿部 淳（1995）陸稲耐干性の品種間差異．育種学雑誌 45（別1）：218（講要）.
- 平山正賢・根本 博・岡本和之・宮本 勝・須賀立夫（1996）陸稲における根系と耐干性の関係．日本作物学会紀事 65（別1）：214-215（講要）.
- 平山正賢・根本 博・平澤秀雄（2007）圃場栽培した中生・晩生熟期日本陸稲品種の根系発達程度と耐干性との関係．日本作物学会紀事 76（2）：245-252.
- 平山正賢・須賀立夫（1995）耐干性．イネ育種マニュアル A. 特性検定 IV生理的特性．農林水産省農業研究センター研究資料 30：152-155.
- 石井卓朗・岡本和之・眞部 徹・岡野克紀・平澤秀雄・平山正賢・宮本 勝・根本 博（2006）陸稲新品種「ひたちはたもち」の育成．茨城県農業総合センター生物工学研究所研究報告 9：1-12.
- 石井卓朗（2007）陸稲育種指定試験地のあゆみ．茨城県農業総合センター生物工学研究所研究報告 10：53-78.
- 石原正敏（1962）陸稲の多収の可能性について．1961年度作物試験研究推進会議推進会議資料．農事試験場．
- 池橋 宏（1968）稲育種における発芽性の問題点（第2報）稲の発芽特性間の相関．農業技術 43（8）：1295-1296.
- International Rice Research Institute (1980) Annual report for 1979. IRRI, Philippines, pp.538.
- International Rice Research Institute (1984) Annual report for 1983. IRRI, Philippines, pp.494.
- 鍵渡徳次（1963）陸稲馬鹿苗病（株枯病）に関する研究．神奈川県農業試験場報告 101：1-116.
- 刈屋国男・松葉修一・川口健太郎・根本 博（1997）陸稲の穂ばらみ期耐寒性と農業形質との関係．日本作物学会紀事 66（別1）：84-85（講要）.
- 金 忠男・平澤秀雄・平山正賢・桐原俊明（1988）陸稲新品種「キヨハタモチ」の育成について．茨城県農業試験場研究報告 28：1-13.
- 金 忠男・奥津喜章・須賀立夫・平澤秀雄・根本博雄（1986）陸稲新品種「トヨハタモチ」の育成について．茨城県農業試験場研究報告 26：1-16.
- 金 忠男・平澤秀雄・平山正賢・桐原俊明（1988）陸稲出芽時における低水分耐性および塩素酸加里抗毒性．日本作物学会関東支部会報 3：59-60（講要）.
- 丸山清明（1987）水分ストレス耐性の改良、耐旱性．新しい植物育種技術（中島哲夫編）．養賢堂、東京、pp.307-313.
- 丸山清明・菊池文雄・横尾政雄（1983）陸稲農林糯4号の葉いもち圃場抵抗性の遺伝分析ならびに育種的利用．農業技術研究所報告 D35：1-31.

- 丸山幸夫・田嶋公一（1995）異なる土壌水分における水稻および陸稻の水分消費特性．日本作物学会関東支部会報 10：21-22（講要）．
- 目黒猛夫・鈴木 厳・高橋正謙・本田太陽・坂本文男・野村 馨（1959）茨城県における陸稻の出穂時期別旱魃の頻度による地域区分について．茨城県農業試験場研究報告 2：7-12．
- 目黒猛夫・野村 馨・坂本文男（1959）陸稻品種の生理的耐旱性検定方法について（第 1 報）幼苗検定方法としての「ミモサ法」ならびに「同時法（萎凋法）」の検討．茨城県農業試験場研究報告 2：13-20．
- 三鍋昌俊（1951）水稻の旱害解析に関する研究：第 2 報 地下部の特性に就いて．日本作物学会紀事 20（1-2）：85-92．
- Miyamoto,M., M.Yano, H.Hirasawa（2001）Mapping of quantitative trait loci conferring blast field resistance in the Japanese upland rice variety Kahei Breed. Res. 51(4):257-261．
- 中村誠助（1938）稻品種の發芽現象に於ける特異性．日本作物学会紀事 10（2）：177-182．
- 長戸一雄（1949）萎凋が陸稻の生育に及ぼす影響．日本作物学会紀事 17（4）：11．
- 根本 博（1995）陸稻育種の現状と今後の方向．農業技術 50（5）：21-25．
- 根本 博・平山正賢・岡本和之・宮本 勝・須賀立夫（1998）陸稻新品種「ゆめのはたもち」の育成．茨城県農業総合センター生物工学研究所報告 2：57-74．
- 根本 博・平山正賢・宮本 勝・岡本和之（1994）葉緑素含量による陸稻玄米の蛋白質含量の選抜と遺伝．育種学雑誌 44（別 1）：278（講要）．
- 根本 博・岡本和之・平山正賢・須賀立夫（1995）陸稻における葉緑素含量の選抜が他形質に及ぼす影響．育種学雑誌 45（別 1）：217（講要）．
- Nemoto,H., K.Okamoto and M.Hirayama（1993）Upland rice lines with low protein content. International Rice Research Newsletter 18(2)：10-11．
- Nemoto,H., R.Suga, M.Ishihara and Y.Okutsu（1998）Deep rooted rice varieties detected through the observation of root characteristics using trench method. Breed. Sci. 48(3)：321-324．
- 西川五郎（1946）種子の吸水力に関し日本水稻粳，中國水稻粳，同籼及び印度稻の比較．日本作物学会紀事 15（1,2）：42-43．
- 新妻芳弘（1975）オカボの品種生態．農業技術体系 作物編オカボ．農文協、東京、pp.41-49．
- 新妻芳弘（1977）指定試験の歩みと実績－茨城県農試における陸稻育種－．農業技術 32（11）：33-35．
- 新妻芳弘・小野信一（1969）日本陸稻品種の止葉の大きさ，開葉角について．日本作物学会紀事 38（別 1）：197-198（講要）．
- 農業・食品産業技術研究機構 遺伝資源研究センター（2021）陸稻在来品種コアコレクション．生物資源ジーンバンク．https://www.gene.affrc.go.jp/databases-core_collections_ur.php（2021 年 6 月 17 日アクセス）．
- 小倉忠治（1949）陸稻に関する研究（第 2 報）開花特性に就いて．日本作物学会紀事 17（4）：12．
- 岡本和之・根本 博（1998）ラピッド・ビスコ・アナライザーによる陸稻糯品種の餅硬化性の評価と高度の餅硬化性を持つ陸稻品種「関東糯 172 号」．日本作物学会紀事 67（4）：492-497．
- 岡本和之・平澤英雄・根本 博（2003）陸稻関東糯 172 号の高度餅硬化性の遺伝子の同定．育種学研究 5：1-7．
- 岡野克紀・岡本和之・眞部 徹・石井卓朗（2005）陸稻在来品種の特性解析．茨城県農業総合センター生物工学研究所研究報告 8：27-49．
- 岡野克紀・岡本和之・眞部 徹・石川友子・石井卓朗（2006）陸稻在来品種コアコレクションの作成．茨城県農業総合センター生物工学研究所研究報告 9：13-26．
- 岡野博文・市川和夫・桐原三好（1971）陸稻の倒伏性に関する研究（第 1 報）畑栽培における水陸稻品種の稈組織の比較．日本作物学会紀事 40（別 1）：49-50（講要）．
- 奥津喜章・古賀義昭・石原正敏・須賀立夫（1984）陸稻のいもち病抵抗性の遺伝に関する研究（第 4 報）微動遺伝子の集積による圃場抵抗性向上の可能性について．茨城県農業試験場報告 24：17-24．
- 小野敏忠（1973）日本陸稻の来歴について．育種学会誌 23（4）：37-41．
- 小野敏忠・岡野博文・新妻芳弘・阿部祥治・石原正敏（1966）陸稻新品種「オカミノリ」について．茨城県農業試験場研究報告 8：99-108．
- 小野信一（1975）分類と形状．農業技術体系 作物編 オカボ．農文協、東京、pp.4-5．

- 小野信一・根本博雄・新妻芳弘・阿部祥治・石原正敏 (1969) 陸稲新品種「ハタホナミ」「ワラベハタモチ」および「チヨミノリ」について. 茨城県農業試験場研究報告 10 : 85-94.
- 小野信一・根本博雄・新妻芳弘・阿部祥治・石原正敏 (1970) 畑地かんがい用水稲品種「ミズハタモチ」について. 茨城県農業試験場研究報告 11 : 1-10.
- 小野寺二郎 (1934) 稲の耐旱性査定方法として籾の発芽検定並に吸水力検定に就いて. 日本作物学会紀事 6 (1) : 20-43.
- O'Toole, J.C. and T.B.Moya (1978) Genotypic variation in maintenance of leaf potential in rice. Crop Sci. 18 : 873-876.
- O'Toole, J.C. and T.B.Moya (1981) Water deficits and yield in upland rice. Field Crop Res. 4:247-259.
- O'Toole, J.C. and M.A.Maguling (1981) Greenhouse selection for drought resistance in rice. Crop Sci. 21:325-327.
- 酒井 一・石原正敏・伏谷勇次郎, 浅野信幸 (1972) 畑水稻の栽培法に関する研究. 茨城県農業試験場研究報告 12 : 1-36.
- 佐藤健吉 (1934) 二三主要作物の種子吸収力に就いて. 日本作物学会紀事 6 (3) : 245-258.
- 白土宏之・森田 敏・高梨純一 (1997) イネ種子の乾燥土壤中出芽性のスクリーニング. 日本作物学会紀事 66 (別 1) : 10-11 (講要).
- 副島四郎・有村清光・松永義迪・野崎国彦・篠原和民・柳衛庄一郎 (1963) 陸稲新品種「オオスミ」及び「ハタメグミ」について. 九州農業研究 25 : 104-105.
- 須賀立夫・小川 奎・古賀義昭 (1984) 陸稲馬鹿苗病 (株枯病) に関する試験 1. 幼苗検定法について. 育種学雑誌 34 (別 1) : 310-311 (講要).
- 須賀立夫・小川 奎・金 忠男 (1985) 陸稲馬鹿苗病 (株枯病) に関する試験 2. 幼苗検定法による F_1, F_2 検定. 育種学雑誌 35 (別 1) : 164-165 (講要).
- 須賀立夫・小川 奎・渡辺 健・金 忠男・奥津喜章 (1986) 陸稲馬鹿苗病 (株枯病) に関する試験 3. 幼苗検定法による F_3 . 育種学雑誌 36 (1) : 212-213 (講要).
- 須賀立夫・小川 奎 (1987) 陸稲株枯病に対する品種抵抗性と発生生態. 農業技術 42 (12) : 549-554.
- 杉本 堯 (1962) 陸稲株枯病に関する研究. 栃木県農業試験場報告 6 : 73-92.
- 平 宏和 (1970) 陸稲玄米のタンパク質含量. 栄養と食糧 23 (2) : 19-23.
- 平 宏和・平 春枝 (1971) 陸稲・水稻および水陸交配系統玄米のタンパク質含量におよぼす概灌の影響. 日本作物学会紀事 40 (3) : 294-298.
- 玉井虎太郎 (1956) 陸稲と二三の作物の生育時期別吸水特性の自記装置による調査. 日本作物学会紀事 25 (2) : 61-63.
- 角田重三郎 (1975) 日本の陸稲品種の系統分類. 育種学雑誌 25 (2) : 121-128.
- 戸川真五・安藤 仁 (1939) 陸稲品種の幼苗草型と耐干性評価. 農業及び園芸 14 (12) : 59-68.
- 山崎守正 (1929) 稲品種の塩素酸加里に対する抗毒性の変異及び実用的意義に就いて. 農事試験場彙報 1 (1) : 1-24.
- 柳瀬 肇・大坪研一・橋本勝彦 (1984) もち米の品質と加工適性に関する研究 (第 6 報) もち生地の湯溶けならびに膨化伸展性の銘柄間差異. 食品総合研究所報告 45 : 1-8.
- 横尾政雄 (1994) 陸稲農林糯 4 号のいもち病抵抗性の遺伝. 育種学雑誌 44 (1) : 97-100.

The Manual for Upland Rice Breeding

in the Plant Biotechnology Institute, Ibaraki Agricultural Center

Hiroshi NEMOTO

Summary

The Plant Biotechnology Institute, Ibaraki Agricultural Center initiated the upland rice breeding program in 1929 and developed many excellent upland rice varieties up until 2006, this work has greatly contributed to nationwide rice production. In addition, various basic research was conducted on upland rice in an endeavor to disseminate a wide range of information on upland rice. The technology for improving upland rice varieties gathered by the Ibaraki Agricultural Center is valuable for upland rice research around the world.

This manual introduces concepts such as breeding flow and various characteristic tests including drought tolerance carried out in upland rice breeding at the Ibaraki Agricultural Center. Additionally, it puts forward basic research carried out in connection with upland rice breeding.

The manuscript consists of the following contents:

1) Characteristics of upland rice varieties, 2) Transition of upland rice breeding system in Japan, 3) Flow of upland rice breeding at of the Plant Biotechnology Institute, Ibaraki Prefectural Agricultural Center, 4) Breeding technologies related to the main characteristics of upland rice, 5) Breeding technologies related to the drought tolerance of upland rice.

Keyword : upland rice, breeding, manual, drought tolerance, Ibaraki

所 長 宮 城 慎

編 集 委 員 石 井 貴

岡 野 克 紀

平 山 正 賢

茨城県農業総合センター生物工学研究所研究報告 第 17 号
令和 5 年 3 月 22 日発行

発行
茨城県農業総合センター生物工学研究所
〒319-0292 笠間市安居 3165-1
電話 0299-45-8330

印刷
佐藤印刷株式会社
〒310-0043 水戸市松が丘 2-3-23
電話 029-251-1212

Bulletin
of Biotechnology Institute
Ibaraki Agricultural Center
No.17 (2023)

Contents

Original Papers

- The Manual for Upland Rice Breeding in the Plant Biotechnology Institute, Ibaraki Agricultural Center • • • 1
Hiroshi Nemoto

Plant Biotechnology Institute
Ibaraki Agricultural Center
Ago, Kasama, Ibaraki 319—0292, Japan