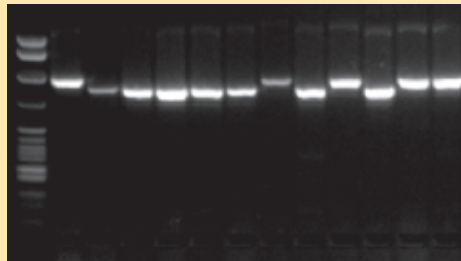


ゲノム情報の品種改良への利用－DNA マーカー育種－



目 次

はじめに	1
1. DNA マーカー育種の特徴	1
(コラム 1) DNA マーカーとは？	2
(コラム 2) DNA マーカー育種とは？	3
2. DNA マーカー育種技術の活用	5
(1) イネ	6
(2) ダイズ	6
(3) 果樹	7
(4) 野菜	8
(5) ブタ	9
3. DNA マーカー育種技術の発展	10
(1) DNA マーカーの高度利用	10
(2) テーラーメイド育種	10
(コラム 3) DNA マーカー育種は万能ではない？	11
おわりに	12

はじめに

農林水産省農林水産技術会議事務局では、農林水産分野の研究開発について広く国民の皆様理解していただくため、農林水産研究開発レポートを発行・配布しています。

今回発行いたしました「ゲノム情報の品種改良への利用－DNA マーカー育種－」では、従来の育種法に替わる革新的な方法として認められつつある DNA マーカー育種に向けたわが国の技術開発状況を紹介します。

我が国の農業は、国際化の加速と国際競争の激化などの中で、早急に体質を強化することが求められています。農林水産物の安定供給の確保などが期待されており、その中で、安定多収性、高品質、病虫害抵抗性などの特性を有する作物や家畜の開発が急務となっています。

本レポートでは、最近のゲノム研究の進展とともに、研究が大きく進んでいる DNA マーカーを利用した品種改良技術である DNA マーカー育種とその技術を利用した作物や家畜に関する研究成果について、農林水産技術会議のプロジェクト研究の成果などを中心に現状と将来展望をまとめました。

1. DNA マーカー育種の特徴

『品種改良』あるいは『育種』とは、生物を遺伝的に改良して新しい品種を育成することです。世界初の遺伝に関する法則であるメンデルの法則の発見から 100 年余りが経っていますが、交雑による品種改良の考え方は、今も昔も変わりません。一方、従来の育種法には、(1) 収量や品質など多くの農業上有用な形質^{*1} は環境の影響を受けるため、形質による選抜に時間と手間がかかる、(2) 遺伝資源^{*2} から高収量や高品質、耐病性などの特性（有用形質）を作物や家畜に導入する際に、有用形質だけでなく不良形質も一緒に導入してしまう可能性が常にある、(3) 複数の遺伝資源から複数の有用形質を導入するためには更に多くの時間と手間がかかる、(4) 育種家の長年の経験と勘を頼りにしている、などの限界がありました。そこで、このような問題を解決し、国民の食に対する多様なニーズに合った品種・系統を迅速かつ効率的に育成するために開発された新しい論理的な育種法が、『DNA マーカー育種』です。

『有用形質』の発現は、天候などの自然環境や、施肥

や播種法などの人為的環境によって影響される面もありますが、その能力・限界を決めているのは遺伝子です。遺伝子は、生物の設計図であるゲノムの中に書き込まれており、この遺伝子の情報をもとにタンパク質が作られます。タンパク質は、酵素として代謝に関与するなど生物の生命現象をつかさどっています。簡単に言えば、生命は遺伝子によって支配されていると言えます。この有用遺伝子のゲノム上の存在位置の目印となる DNA^{*3} 配列が『DNA マーカー』であり、その目印を利用した育種を『DNA マーカー育種』と呼んでいます。本育種法は、環境の影響を受けない DNA マーカーを幼植物の時に解析して選抜を行うため、先に挙げた従来育種の問題点を解決できます。つまり、(1) 形質による選抜に要する時間と手間の低減、(2) 有用形質に基づく選抜時に懸念される不良形質導入の可能性低減、(3) 複数の有用形質を導入する時間と手間の低減、が可能となります。また、その他に (4) 子孫の遺伝的特徴（遺伝子型）、つまり交雑で生まれた子孫が父親タイプの遺伝子のみをもつのか母親タイプの遺伝子のみをもつのかあるいは両方のタイプの遺伝子をもつのかの判断や、(5) 目的とする優良形質以外は全て親と同じである品種・系統の開発を迅速かつ効率的にできるなど、従来育種ではほぼ不可能であったことが可能となります。このように利点の多い『DNA マーカー育種』は、重要な品種改良技術であり、今後、作物や家畜育種の基幹技術になると期待されています。

* 1：特徴のことで、表現型とも呼ぶ。

* 2：遺伝的変異に富む生物集団の総称のこと。

遺伝資源を新しい遺伝子の供給源と考えれば、
遺伝資源は『遺伝子資源』とも言える。

* 3：deoxyribonucleic acid の略で、デオキシリボ核酸のこと。遺伝子の本体である。

DNA マーカーとは？

人間は、一人一人、目の色や背の高さなど様々な特徴を持っています。これと同様に同じイネでも、様々な特徴があり、「コシヒカリ」や「ひとめぼれ」など様々な品種の違いとなっています。

この特徴には、育った環境の違いによるものと遺伝子の違いによるものがあります。遺伝子の違いによるものは、遺伝子の本体であるDNAを構成する4種類の塩基（アデニン（A）、グアニン（G）、シトシン（C）、チミン（T））の並び方（DNA配列、塩基配列）が違うことによっています。この並び方の違いを調べることで、品種や個体を識別する際の目印として利用することができます。このような、目印となるDNAの並び方の違いをDNAマーカーと呼んでいます。

DNAマーカーはDNAそのものですので、当然のことですが、親から子へ、子から孫へと遺伝していきます。高等生物では、1つの細胞には同じ種類のDNAが通常2本入っていますが、生殖細胞（精子や花粉、卵細胞）には、そのうちの1本が伝えられ、受精という方法で子孫にDNAが伝えられます（図1）。生殖細胞を作る際、一对のDNAの間で組換えが起こり、この時、DNA上の遺伝子は、遠くにある遺伝子同士よりも近くにある遺伝子同士の方が組換えは起こりにくいことがわかっています。このため、重要な遺伝子の近くにあるDNAマーカーを見つければ、これを目印に重要な遺伝子の存在を確認することが可能となります。

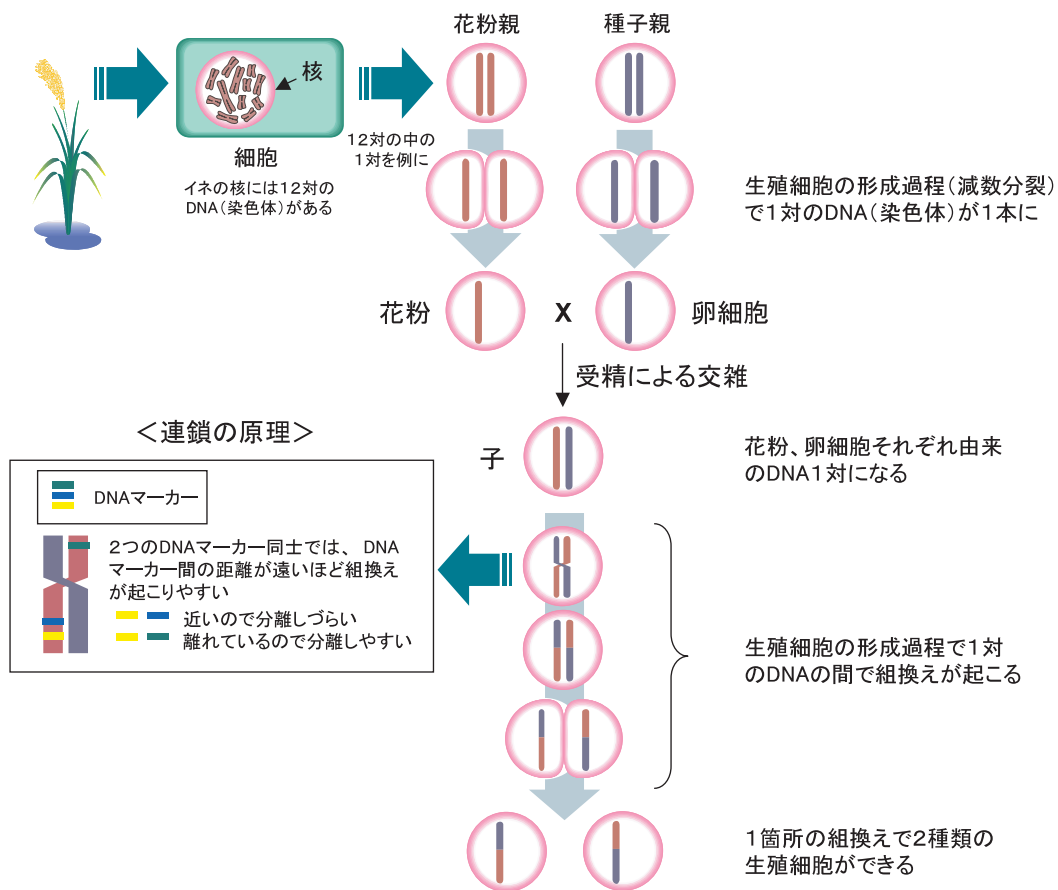


図1 組換えと連鎖の原理の解説

DNA マーカー育種とは？

大昔から人類は、数多くの個体の中から望ましい特徴を持つ個体を選抜することで、優良品種を生み出してきました。品種を改良することを『育種』といいます。育種には様々な方法がありますが、近年 DNA マーカーを用いることで、効率的に育種することが可能となりました。ここでは、これまでの育種（従来育種）と DNA マーカー育種について、いもち病に強いイネを育種することを例にとって具体的に説明します。

ここに、良食味、多収、早生、耐冷性といった多くの優良形質をもっているものの、いもち病には弱い品種（親品種）があるとします。この親品種にいもち病に強い形質を導入することとします。

1. 従来育種

- ① まず、親品種にいもち病に強い品種（耐病性品種）を 1 回交雑します。すると、親品種と耐病性品種の両方の形質を持つ子（ F_1 ）ができます。この F_1 はいもち病に強い遺伝子を持っていますが、この他にも耐病性品種から望ましくない遺伝子を受け継いでいます。目指すのは、いもち病に強い形質以外は親品種と同じである新品種です。
- ② このため、① でできた F_1 と親品種を再度、交雑します。この結果、さまざまな遺伝子をもつ多くの種類の孫ができます。ちなみに、このように、交雑によってできた子とその両親のいずれかを交雑することを「戻し交雑」といいます。
- ③ そして、② によってできた多くの種類の孫のうち、見た目や田んぼでの試験の結果をもとに、親品種の特徴をできるだけ多く持ち、なおかつ、いもち病に強い個体を選抜します。
- ④ さらに、③ で選抜した孫と親品種を再度、交雑します。このような戻し交雑と選抜を繰り返すことで、いもち病に強い形質以外は親品種と同じ新品種が育成されます。

このような従来育種は、多くの種類の子孫の中から、人の目や味覚、実際に田んぼでいもち病に強いかどうかをテストすることなどで、目的とする遺伝子が子孫に受け継がれているかどうかを確認しながら選抜を行っています。このため、大規模な栽培を行う必要がある上に、経験や勘によるところも多く、さらに、良食味や早生などは、イネを成熟させて特徴を確認する必要があるため、時間もかかります。また、見かけ上は親品種と同じでも、育成された品種には耐病性品種のゲノム領域が多く残っています。

2. DNA マーカー育種（図 2）

- ① まず、親品種について、耐病性品種と区別するための DNA マーカーを多数探します。さらに、耐病性品種について、いもち病に強い遺伝子を確認するための DNA マーカーを探します。
- ② それぞれの DNA マーカーを見つけた上で、従来育種と同様にまず親品種に耐病性品種を 1 回交雑して、親品種と耐病性品種の両方の形質を持つ子（ F_1 ）を作ります。
- ③ 次に、② でできた F_1 と親品種を再度、交雑して、さまざまな遺伝子をもつ多くの種類の孫を作ります。
- ④ ここで、③ でできた多くの種類の孫の種をまき、幼苗まで育てた上で、その幼苗から DNA を抽出します。この DNA を調べて、DNA マーカーを目印に、いもち病に強い遺伝子を持ち、なおかつ、親品種の遺伝子より多く受け継いでいる個体を選抜して育てます。
- ⑤ さらに、④ で選抜した孫と親品種を交雑して、④ と同様に DNA マーカーによる選抜を行います。これを繰り返すことで（通常さらに 1～2 回繰り返す）、いもち病に強い遺伝子以外は親品種と同じ新品種が育成されます。

DNA マーカー育種は、通常育種と比べて、幼苗の段階で選抜し、最も良いものだけを残して栽培することがで

きるので、栽培面積や労力がわずかで済みます。さらに、DNA マーカーを目印とすることで、はるかに確実に安定した選抜が短期間でできるのです。また、親品種と同じゲノムを持っていることを確実に判断でき、いもち病に強い遺伝子を含むゲノム領域をできる限り絞り込むこともできます。一方、DNA マーカーの開発に要するコストと期間は、求められる精度などにより違ってきます。例えば、おおよその染色体の場所を特定する DNA マーカーの開発と遺伝子そのものを特定する DNA マーカーの開発はコストも時間も異なります。しかし、一旦 DNA マーカーが開発されれば、その作物や家畜の育種効率と再現性は飛躍的に向上するなど波及効果は大きいので、DNA マーカーの開発は極めて重要な研究です。さらに、開発された DNA マーカーが品種（系統）特異的であればあるほど、汎用性のあるマーカーになります。

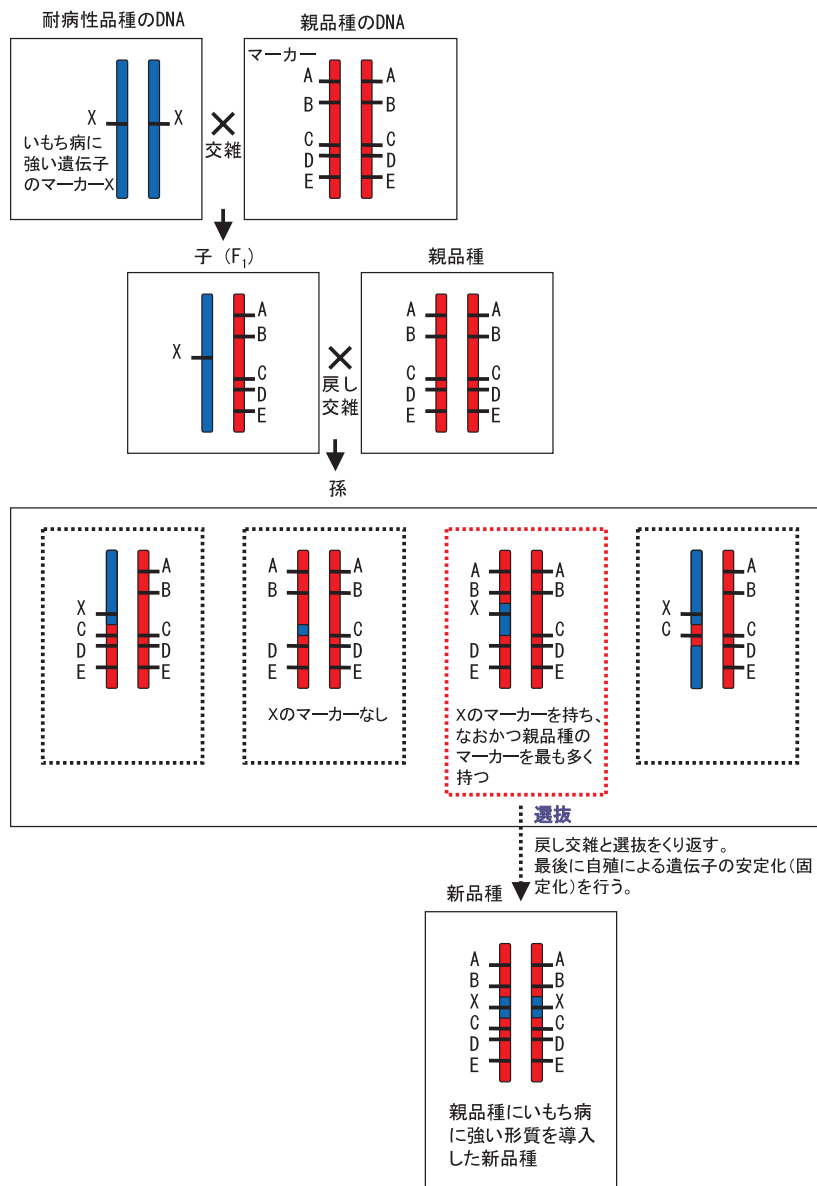


図2 DNA マーカーを利用した戻し交雑の原理

2. DNA マーカー育種技術の活用

DNA マーカー育種は、その有効性や重要性から、世界中で多くの作物や家畜において進められています。国内におけるその進行度と研究の内容は、全ゲノムの解読が終了したイネから、DNA 配列解読が始まってい

るダイズやブタ、ゲノム研究基盤が揃いつつあるカンキツ、さらにはゲノム研究基盤が揃わない中で効率的に DNA マーカー開発を進めるチャまで品目によって様々です。表 1 は、DNA マーカー育種を中心とした各品目の DNA マーカーを利用した研究について、世界や国内の現状をまとめたものです。その中で、いくつかの目立った日本の成果について解説します。

表 1 主要な品目の DNA マーカーに関する現状一覧

品目	世界の状況	日本で開発された DNA マーカー	開発された品種・系統	その他の DNA マーカー利用	国内関係機関
イネ	2004 年にゲノム塩基配列完全解読終了 (日本が主導)	いもち病、縞葉枯病、トビイロウンカなどの病虫害抵抗性、穂ばらみ耐冷性、低温発芽性、出穂性など多数	早生性 (関東 IL1 号)、トビイロウンカ抵抗性 (関東 IL2 号)、晩生性 (関東 IL3 号)、短稈性 (コシヒカリつくば SD1 号)、縞葉枯病抵抗性及び穂いもち抵抗性 (コシヒカリ愛知 SBL) など	SNP マーカーについて近縁品種間での多型解析が進み、品種識別に利用など	独立行政法人農業生物資源研究所、独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構・作物研究所、県の農業試験場など
麦類	欧米諸国ではコムギやオオムギは主要作物であり、特にコムギの輸出国である米国やオーストラリアでは、DNA マーカー育種を積極的に事業育種に導入	製麺性向上に関係する低アミロース、製パン性向上に関係する高分子グルテニンサブユニットなど	通常品種より 2 倍甘いコムギ (スイートウィート) など	RAPD マーカーなどを利用したコムギやオオムギの日本品種の品種識別など	独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構・東北農業研究センターなど
ダイズ	米国では、ダイズを基幹的な輸出作物として位置付けていることもあり、DNA マーカー開発に関わる研究基盤の構築が世界に先駆けて進行中。2006 年 1 月に、米国エネルギー省と農務省が協力してダイズの全ゲノム配列を解読することを公表。	ダイズシストセンチュウ抵抗性 (SSR マーカー)、ハスモンヨトウ抵抗性 (SSR マーカー)、ジャガイモヒゲナガアブラムシ (わい化病を媒介) 抵抗性 (SSR マーカー)、ダイズモザイクウイルス抵抗性 (SSR マーカー) など	実用品種育成中	SSR マーカーなどを利用した日本品種の品種識別など	独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構、北海道立試験場、千葉大学など
果樹	バラ科ナシ亜科に属するリンゴに関しては、米国、ヨーロッパ諸国、ニュージーランドを始め世界各国で精力的にゲノム研究が進められ、バラ科サクラ亜科に関しては、ヨーロッパでモモとアーモンド種間雑種集団を用いた連鎖地図作成などのゲノム研究が進行中。カンキツ (ミカン科ミカン亜科に属する植物の総称) に関しては、米国、スペイン、ブラジルなどで、クレメンチン、オレンジ、レモンなどの幅広い種を対象にゲノム研究が進行中。	ニホンナシの黒星病抵抗性 (RAPD マーカー、SSR マーカー)、黒斑病抵抗性 (SSR マーカー)、カンキツの種なし性 (無核性) (CAPS マーカー)、カンキツトリステザウイルス (CTV) 抵抗性 (CAPS マーカー) など	実用品種育成中	SSR マーカーなどを利用したリンゴ、ナシ、モモ、カンキツなどの主要果樹の品種識別など	独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構・果樹研究所、青森県農林総合研究センター、静岡大学など
野菜	世界的にはトマト (ナス科) やウリ科を中心とした DNA マーカー育種が進展	ハクサイの根こぶ病抵抗性 (SSR マーカー)、メロンのうどんこ病抵抗性 (SSR マーカー)、アブラムシ抵抗性 (SSR マーカー) など	実用品種育成中	イチゴなどの品種識別 (イチゴなどの栄養繁殖性作物は品種内に個体間変異がないため)、純度検定、集団内の多様性を加味した評価法 (野菜では生殖様式に他種性が多いため)、ヘテロ性 (多型性) を認める育種法 (近交弱勢を防ぐため) など	独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構・野菜茶業研究所など
チャ	日本が世界の研究をリードしている	クワシロカイガラムシ抵抗性 (e-RAPD マーカー) など	実用品種育成中	CAPS マーカーなどを利用した日本品種の品種識別など	独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構・野菜茶業研究所など
ブタ	ブタの全ゲノム塩基配列解読のため、2006 年に米国、ヨーロッパ諸国、中国、韓国などが参加して国際コンソーシアムを結成 (日本も参加)	イノシシの濃い赤色と繊維な食感 (SSR マーカー)、「金華豚」の良い肉質 (SSR マーカー) など	イノシシの濃い赤色と繊維な食感を高品質肉の徳島県の大ヨークシャー種系統豚「アウォーク」に導入、金華豚の良い肉質を发育や産肉性が良い静岡県産の「フジロック」に導入など実用品種育成中	ブタのムレ肉 (屠殺前に強いストレスを受けると肉色が淡くドロップの多い肉になる)、黒豚の遺伝子診断など	独立行政法人農業生物資源研究所、独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構・畜産草地研究所、社団法人農林水産先端技術研究所、県の農業試験場など

DNA マーカーの種類については p.13 参照

(1) イネ

イネでは、第1期のイネゲノム研究プロジェクトが品種「日本晴」を材料に1991年にスタートして以来、2004年のゲノムの完全解読終了まで、日本が中心となって研究が進められてきました。イネのDNAマーカー育種に関しても、豊富なゲノム情報を利用して世界で最も進んだ分野となっています。イネのDNAマーカーの連鎖地図は、ゲノムの解読と同時平行して研究が進められてきたため、極めて充実しています。さらに、遺伝的多型(変異)が少なくDNAマーカーの得にくい日本品種同士でも多型解析が進み、ターゲットとする

有用形質に関連した染色体領域に容易にDNAマーカーを設定できるようになっています。これらを利用して、出穂性などの複数の遺伝子が関与する複雑形質についても、染色体上の関係遺伝子を含む領域が詳細に解析され、一部の遺伝子は単離されています。さらに、特定された重要ゲノム領域についてDNAマーカーを開発し、それを利用して早生から晩生まで様々な出穂期をもつように改良したコシヒカリ系統の育成などに成功しています(図3)。収穫期以外はほぼ同じ特性であり、この成果は収穫期の分散化に貢献すると期待されています。

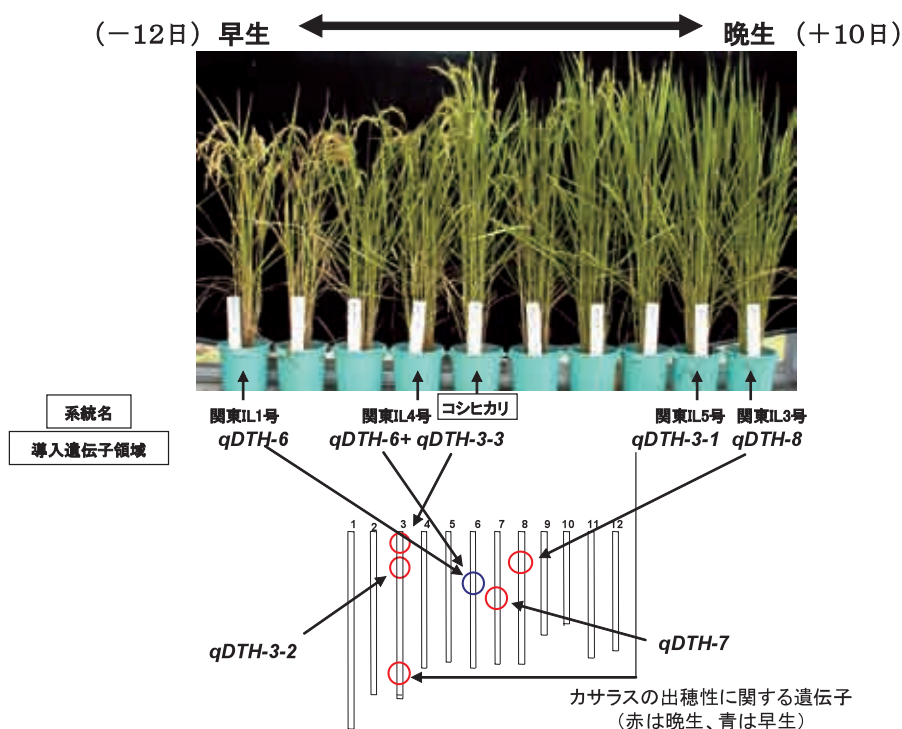


図3 DNAマーカーを利用してイネ品種「コシヒカリ」の出穂期を改変

コシヒカリにインド型品種「カサラス」の出穂期調整に関係するゲノム領域をDNAマーカー選抜をしながら導入。左端の早生と右端の晩生では22日(茨城県つくば市で栽培した場合)の出穂期のずれがある。(独)農業生物資源研究所と(独)農業・食品産業技術総合研究機構作物研究所の共同成果。

(2) ダイズ

ダイズでは、ダイズシストセンチュウ、ハスモンヨトウ、ジャガイモヒゲナガアブラムシ(わい化病を媒介)やダイズモザイクウイルス等の主要な病虫害に対する抵抗性についてDNAマーカー開発が進んでいます。これらの病虫害に対して、ほとんどの在来品種は抵抗性が不十分なため、収量や品質の著しい低下を被ってき

ました。そこで、これらの病虫害に対する抵抗性の探索が広く進められ、抵抗性を持った遺伝資源が見い出されました。しかし、抵抗性遺伝資源は品質や収量などが劣るうえ、その年の天候等によって病虫害の発生が不安定なため、抵抗性を導入した品種を育成するには長い年月と多くの労力が必要でした。また、品種育成の過程でなかなか不良形質を取り除くことができま

せんでした。しかし、これらダイズの主要な病虫害抵抗性について実用的な DNA マーカーを開発し、実用品種

育成に向け研究を進めており、ハスモンヨトウ抵抗性の九系 357 のような有望系統を育成しています (図 4)。

ハスモンヨトウ(白粹内)によるダイズの食害例



ハスモンヨトウ6齢幼虫の摂食量の違い



フクユタカ 九系357 ヒメシラズ

図 4 DNA マーカー選抜によるハスモンヨトウ抵抗性遺伝子を導入したダイズ系統の育成

九系 357 は、現在の代表的品種「フクユタカ」と抵抗性品種「ヒメシラズ」を交雑させた後に、DNA マーカー選抜をしながらフクユタカとの戻し交雑で育成された系統。(独) 農業・食品産業技術総合研究機構九州沖縄農業研究センターによる成果。

(3) 果樹

果樹では、世代のサイクルが 3 ~ 10 年と長いため、新品種育成に長い年月がかかります。さらに、栽培に広大な面積と多大な労力が必要であり、幼若期や若木の形質と成木の性質が異なる特徴があります。したがって、新品種の効率的で早い育成には DNA マーカーは非常に有効といえます。モモ (バラ科サクラ亜科)、ナシ (バラ科ナシ亜科)、リンゴ (バラ科ナシ亜科)、ウンシュウミカン (ミカン科ミカン亜科)、カキ (カキノキ科) などについて、病害抵抗性を中心に DNA マーカー開発が進められています。ニホンナシの栽培では、黒

星病と黒斑病が最も深刻な病気で、特に黒星病に抵抗性を持つ栽培 (商用) 品種はありません。両方の病気に弱い品種では年間約 20 回の農薬散布を必要としますが、一つの病害抵抗性品種では約 5 回の農薬散布を削減でき、両方の抵抗性を持つ新しい品種を開発することで農薬散布を半数に削減することが可能です。現在、それぞれの遺伝子に対応する DNA マーカーを複数の抵抗性品種を用いて多数開発し、これらのマーカーを使って効率的に有望な個体の選抜を行い、複数の病害抵抗性遺伝子を持った新しい品種を育成中です (図 5)。

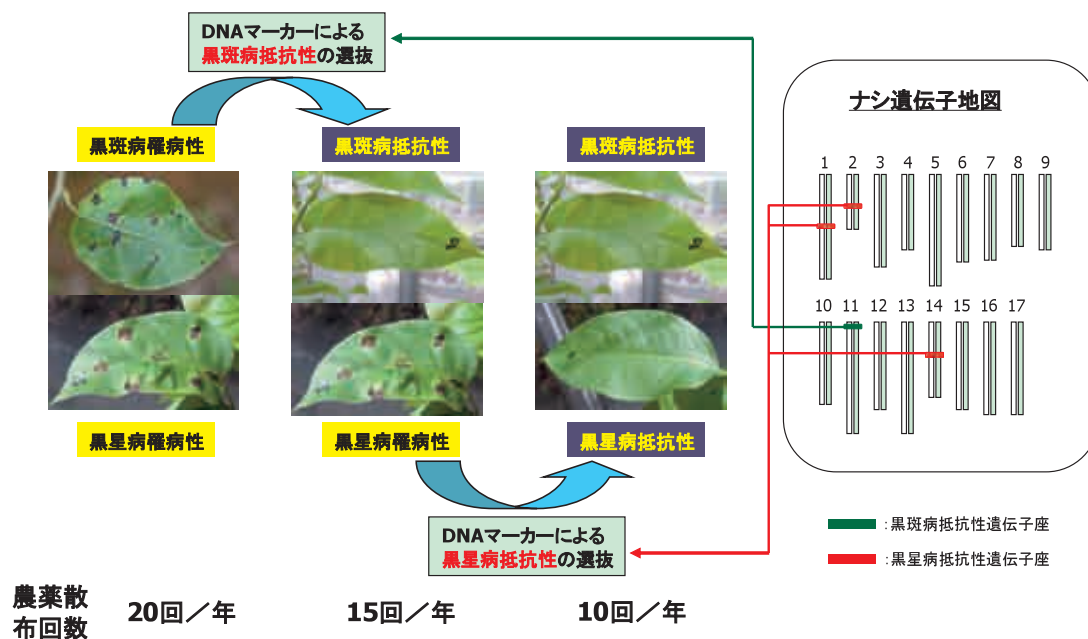


図5 病害抵抗性のニホンナシ育成と減農薬の効果

ニホンナシ品種（「秋麗」など）に1個の黒斑病抵抗性遺伝子（日本の多くの品種は抵抗性をもつ）と3個の黒星病抵抗性遺伝子（ニホンナシ品種「巾着」が第1染色体に、セイヨウナシ品種「ラ・フランス」が第2と第14染色体にもつ）を含むゲノム領域を集積。（独）農業・食品産業技術総合研究機構果樹研究所による成果。

(4) 野菜

野菜では、ナス（ナス科）、ハクサイ（アブラナ科）、メロン（ウリ科）、ネギ（ユリ科）などで、病虫害抵抗性を中心にDNAマーカー開発が進められています。その中で、ハクサイ根こぶ病抵抗性については研究が進み、実用品種の育成に道が開けてきました。ハクサイ根こぶ病は通常の方法では防除の難しい土壌伝染性病害の一つです。これまでも、根こぶ病に対する抵抗性品種の利用により、一定の成果を挙げてきましたが、根こぶ病菌は抵抗性のハクサイ品種を新たに加害できる新しい系統に分化しやすいため、既存の抵抗性品種

が新たに発病し甚大な被害を及ぼすことがあります。さらに、根こぶ病抵抗性は複数遺伝子に支配されているため、技術的にはそれぞれの遺伝子に対応するDNAマーカーを開発し、遺伝子集積系統を育成する必要があります。現在この問題克服のため、根こぶ病に対して強度の抵抗性に対応するDNAマーカーを複数開発し、これらを用いて抵抗性を集積した系統が選抜され、実用品種を育成中です（図6）。

また、メロンでも、うどんこ病、アブラムシなどの病虫害抵抗性のDNAマーカーが選抜育種に利用されています。



ハクサイ根こぶ病



ヨーロッパ原産の飼料用カブ由来の抵抗性素材 (系統G004)



DNAマーカー選抜により2個の抵抗性遺伝子を導入したハクサイ

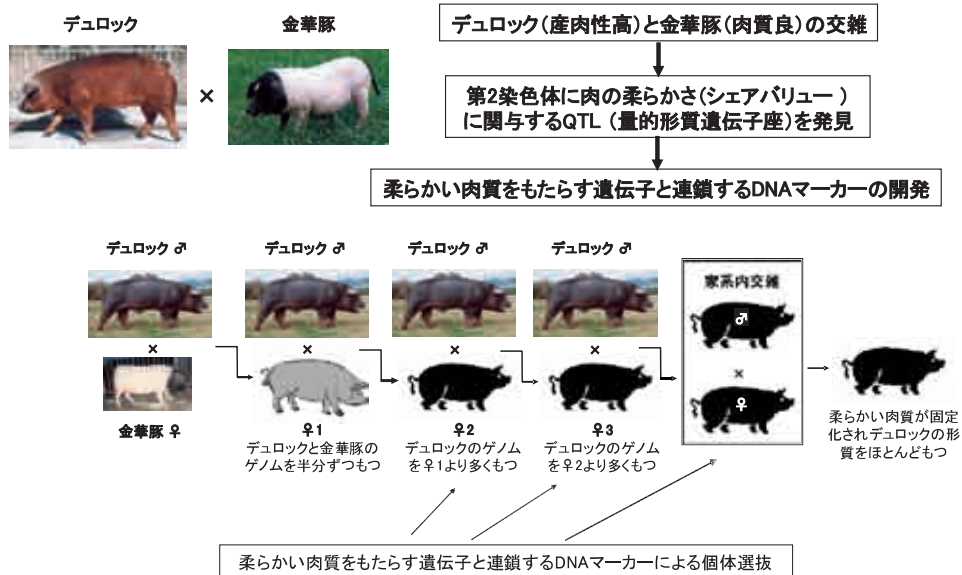
図6 DNAマーカーを用いた根こぶ病強度抵抗性ハクサイの育成

根こぶ病抵抗性遺伝子を全く持たないハクサイとヨーロッパ原産の飼料用カブ由来の抵抗性素材を交雑し、DNAマーカー選抜をしながらハクサイとの戻し交雑で系統を育成。その結果、多くの品種を犯す(多犯性)菌株に対して抵抗性を有するハクサイを得た。(独)農業・食品産業技術総合研究機構野菜茶業研究所による成果。

(5) ブタ

家畜でも、DNAマーカー育種が進められています。その代表格がブタです。国内において、肉質、椎骨数、疾病抵抗性などを対象として、DNAマーカー開発が進められています。例えば、金華豚の柔らかい肉質に関

係したDNAマーカーを開発し、発育や産肉性の良いデュロック系統(静岡県が開発した「フジロック」)に金華豚の柔らかい肉質を導入した成果は、代表的な成果として挙げられます(図7)。



デュロックに、金華豚の柔らかい肉質をもたらしゲノム領域を導入

図7 DNAマーカーを用いてブタ肉の柔らかさを改良

産肉性の高いデュロックに金華豚の柔らかい肉質をもたらしゲノム領域をDNAマーカー選抜をしながら導入。静岡県と(独)農業生物資源研究所との共同成果。

3. DNA マーカー育種技術の発展

(1) DNA マーカーの高度利用

イネの場合は、全ゲノム情報が既にあるため、育種の目標形質に関する遺伝子マッピングも進展し、選抜対象の形質は、単一の遺伝子に支配される病害抵抗性などの質的形質から、複数の遺伝子によって決定される収量や食味などの量的形質にまで幅が広がりつつあります。表2には、これまでの研究によってマーカー選抜が実行可能になったイネの形質を示しています。これらの形質には、遺伝が複雑で交雑後代において選抜が従来容易にできなかった遺伝子も含まれており、DNA マーカー選抜の応用範囲は拡大しています。

染色体上で隣り合う遺伝子は組換えられる頻度が低いため、いつも同じように遺伝しがちです。このことを連鎖の引きずりと呼びます。DNA マーカー育種の利点は、極めて稀にしか起こらない組換えを効率的に検出できることですので、連鎖の引きずりの解消に威力

を発揮します。例えば、イネの育種において、陸稲品種が持ついもち病への強い抵抗性は、古くから育種の対象形質となり、多くの育種家が抵抗性遺伝子の水稻品種への導入を試みてきました。しかし、いずれの場合も、高度に抵抗性を示す後代系統は、食味や収量の面でその評価がきわめて低いものとなり、未だに高度抵抗性を導入した実用的な水稻品種は育成されていません。この原因の一つは、いもち病抵抗性遺伝子と強く連鎖する望ましくない遺伝子の存在であると考えられます。DNA マーカーによる遺伝子の位置の正確な解析により、目的遺伝子とこれに連鎖する望ましくない遺伝子の間に組換えを起こした個体を正確に選び出すことが可能になり、連鎖の引きずりを解消できるようになりました。このように DNA マーカーを高度に利用することで、マーカー遺伝子型を指標に良食味でいもち病への強い抵抗性を持つ有望個体を選抜しており、連鎖の引きずりを初めて解消できる例として期待されています。

表2 イネにおいて DNA マーカー選抜が可能になった形質とそれに関連する遺伝子

形質	遺伝子 (遺伝子が座上する染色体)
病虫害抵抗性	ツマグロヨコバイ抵抗性遺伝子 <i>Grh1</i> (5), <i>Grh2</i> (2), <i>Grh3</i> (6) トビイロウンカ抵抗性遺伝子 <i>Bph1</i> (12), <i>Bph11</i> (3) いもち病真性抵抗性遺伝子 <i>Pib</i> (2), <i>Pizt</i> (6), <i>Pi9</i> (6), <i>Pi2</i> (6), <i>Pi-d2</i> (6), <i>Pi36</i> (8), <i>Pikm</i> (11), <i>Pita</i> (12) いもち病圃場抵抗性遺伝子 <i>pi21</i> (4) 穂いもち病圃場抵抗性遺伝子 <i>Pb1</i> (11) 縞葉枯病抵抗性遺伝子 <i>Stbv1</i> (11)
環境ストレス耐性	穂ばらみ期耐冷性遺伝子 <i>Ctb1</i> (4), <i>qCT7</i> (7), <i>qFRT6</i> (6) 穂発芽耐性遺伝子 <i>Sdr1</i> (3), <i>Sdr4</i> (7) 低温発芽関連遺伝子 <i>qLTG3-1</i> (3)
生育特性・収量	出穂期遺伝子 <i>Hd1</i> (6), <i>Hd6</i> (3), <i>Hd5</i> (8), <i>Lhd4</i> (7), <i>Ehd1</i> (10) 半矮性遺伝子 <i>Sd1</i> (1) 着粒数増加遺伝子 <i>Gn1</i> (1) 脱粒性遺伝子 <i>qSH1</i> (1)

(2) テーラーメイド育種

求められる理想の品種の姿をイメージし、その地域や環境に適した植物の中に、必要な遺伝子を交雑により組み込んでいくような自由自在にデザインする育種(テーラーメイド育種)の実現が期待されています。表

2に示したように、イネについては、いくつかの農業上有用な遺伝子は、マーカー選抜を実行するために十分な精度でマッピングがされていることから、これらの遺伝子のコシヒカリや他の有望系統への導入が進行中です。

もちろんこれだけでも、新品種として利用するのに十分な場合もありますが、マーカー育種のさらに優れたポイントは、複数の形質を組み合わせ、集積することも計画的に行えることです（図8）。これを、遺伝子

の集積（ピラミディング）と呼びます。栽培する地域や使用する目標に応じて、どのような特徴を組み合わせ、どのような品種を作り出すかという育種が計画的かつ効率的に行えるわけです。

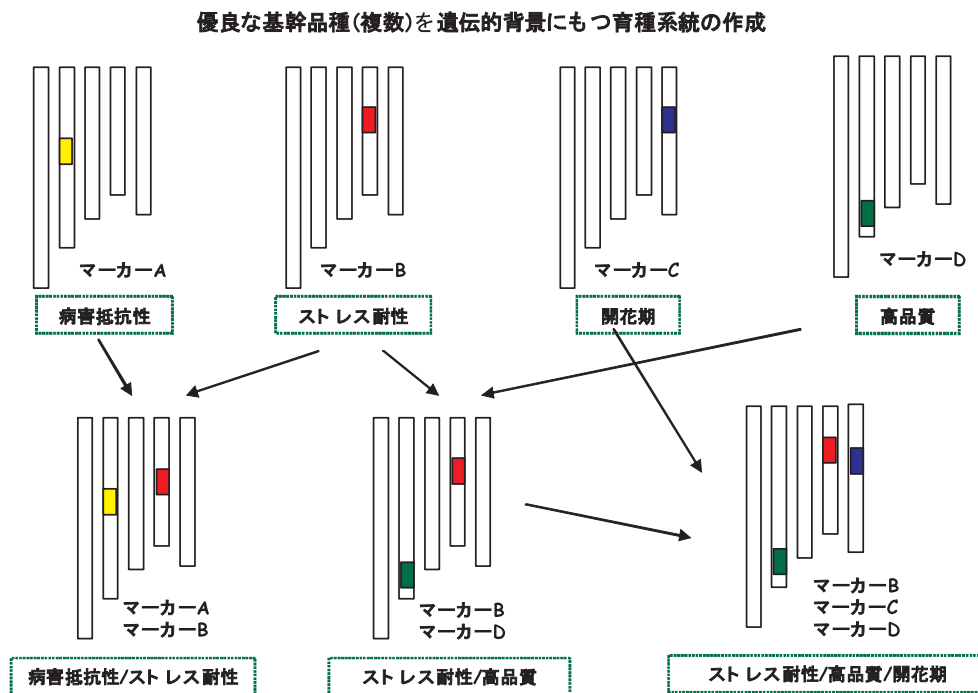


図8 遺伝子集積によるテーラーメイド育種
DNAマーカーを利用した遺伝子の集積（ピラミディング）の模式図

コラム③

DNAマーカー育種は万能ではない？

DNAマーカー育種は、親から子、子から孫へと染色体のどの部分がどのように遺伝したのかを追跡できる非常に有用な技術といえます。そのDNAマーカー開発及び育種を強力に後押しする基盤は、ゲノム塩基配列情報です。そのため、欧米を中心とする世界各国では、基礎科学分野だけではなく、品種改良におけるゲノム塩基配列情報の重要性が認識され、知財確保の観点からも、競うようにあるいは国際コンソーシアムの協力関係を取りながら、作物や家畜を含め多くの生物でゲノム全塩基配列解読が進められています。

一方で、DNAマーカー育種は極めて有効な手法ですが、必ずしも万能ではありません。有用な形質遺伝子をもつ遺伝資源がなければ、使える遺伝子がありません。そのため、それを補う技術が開発されています。自然界で起こる自然突然変異に頼らず、放射線照射など人工的に突然変異を誘発させる技術が1つの有効な手段になります。（独）農業生物資源研究所の放射線育種場では、ガンマ線照射による黒斑病抵抗性ニホンナシ品種「ゴールド二十世紀」の育成、変異誘発剤エチレンイミンによる低グルテリン（米の主要なタンパク質で易消化性）イネ品種「エルジーシー1」の育成などに成功しています。

有効な遺伝資源あるいは突然変異系統が得られない場合は、交雑することのできない他の生物から有用形質遺伝子を利用したり、遺伝子を改変して有効性を高めたりすることが効果的です。この場合に、遺伝子組換え技術が威力を発揮します。既に、世界で日本の国土面積の2倍以上の面積の1億haで遺伝子組換え作物が作付けさ

れています。国内では、例えば、(独)農業生物資源研究所では、スギ花粉症を引き起こすスギ花粉のエピトープ(抗原認識部位)の集合体(7crp)を含む米を作るイネを、遺伝子組換え技術によって開発しています。この米を一定期間食べ続けると、スギ花粉を外敵ではなく食物と認識するようになり、アレルギー反応を抑えることが期待できます。このような米は、遺伝子組換え技術でしか育成できないものです。

おわりに

品種改良は、DNA マーカーの技術開発により、有用形質の安定した選抜が効率的かつ計画的にできるようになりました。一方、DNA マーカー育種では不可能な品種の開発も、科学の進歩により、遺伝子組換えなど

の技術によって可能となってきました。育種家が、育種目標に合わせてそれぞれの技術を使い分け、消費者、実需者及び生産者が必要とするどのような品種・系統でも育成できるようになる、そんな時代が近づいてきているといえるのです。

(執筆担当：福田篤徳、田中淳一、門脇光一)

<参考 DNA マーカーの種類>

• SSR マーカー

SSRは Simple Sequence Repeat の略で、単純配列反復のことであり、マイクロサテライトとも呼ばれる。2～4塩基を単位とした縦列反復は、ゲノム上多数見られ、この反復単位の繰り返し回数に違いが見られることがある。この違いをPCRにより検出し、これをマーカーとする。

• RFLP マーカー

RFLPは Restriction Fragment Length Polymorphism の略で、制限酵素断片長多型のこと。ある特定のDNA領域について、制限酵素認識部位の塩基置換や認識部位にはさまれた部位での欠失や挿入があると、制限酵素によって切断された断片のサイズに違い（多型）が現れるので、これをマーカーとする。

• RAPD マーカー

RAPDは Random Amplified Polymorphic DNA の略で、無作為増幅多型のこと。ゲノムDNAを鋳型として、無作為に合成したプライマーを用いたPCRによって増幅したとき、DNAの塩基配列に違いがあるとプライマーの結合に差異が出るため、増幅されたDNA断片のサイズや数に違いが現れ、これをマーカーとする。

• CAPS マーカー

CAPSは Cleaved Amplified Polymorphic Sequence の略で、切断増幅多型配列のこと。PCRによって増幅させたDNA産物を制限酵素で切断することにより、RFLPの場合のように違いが現れた場合にそれをマーカーとする。

• AFLP マーカー

AFLPは Amplified Fragment Length Polymorphism の略で、増幅断片長多型のこと。制限酵素によって切断したDNA断片をPCRで増幅することにより、RFLPの場合のように違いが現れた場合にそれをマーカーとする。

• SNP マーカー

SNPは Single Nucleotide Polymorphism の略で、一塩基多型のこと。ある特定DNA領域の塩基配列を比較することにより、一塩基の違いを見つけ、これをPCRなどを利用して検出し、マーカーとする。検出方法には、いくつかの方法が知られ、より効率・低コスト化を目指して開発が進んでいる。

本レポートの作成にご協力いただいた方々（敬称略）

- (独) 農業生物資源研究所 QTL ゲノム育種研究センター長 矢野昌裕
家畜ゲノム研究ユニット長 粟田崇
ダイズゲノム研究チーム 片寄裕一
QTL ゲノム育種研究センター 福岡修一
- (独) 農業・食品産業技術総合研究機構 果樹研究所 果樹ゲノム研究チーム長 山本俊哉
作物研究所 稲マーカー育種研究チーム長 安東郁男
野菜茶業研究所 野菜ゲノム研究チーム 上席研究員 福岡浩之
北海道農業研究センター 低温耐性研究チーム 上席研究員 石本政男
- (財) かずさ DNA 研究所 植物ゲノム部 植物分子育種研究室 磯部祥子

図等の出典

- 図 1：矢野昌裕・松岡信（2004）イネゲノム配列解読で何ができるのか，農文協，東京 を元に作成
- 図 3：(独) 農業生物資源研究所 からの資料を元に作成
- 図 4：(独) 農業・食品産業技術総合研究機構 北海道農業研究センター からの資料を元に作成
- 図 5：(独) 農業・食品産業技術総合研究機構 果樹研究所 からの資料を元に作成
- 図 6：(独) 農業・食品産業技術総合研究機構 野菜茶業研究所 からの資料を元に作成
- 図 7：静岡県、(独) 農業生物資源研究所 からの資料を元に作成
- 図 8：(独) 農業生物資源研究所 からの資料を元に作成
- 表 2：(独) 農業生物資源研究所 からの資料を元に作成

参考にした文献

- 鵜飼保雄（2003）植物育種学—交雑から遺伝子組換えまで—，東京大学出版，東京
- 鵜飼保雄・藤巻宏（1984）遺伝と育種 I 植物改良の原理 上下，培風館，東京
- 小畑太郎（2006）特集 わが国における豚の改良の現状と展望 V. ゲノム研究の豚育種への応用：課題と展望，畜産技術，vol.617 p.18-21
- 農業生物資源研究所・農林水産先端技術研究所，分子マーカーを利用した有用形質の遺伝解析方法— QTL 解析を中心として—，<http://rgp.DNA.affrc.go.jp/rgp/protocols/QTL.pdf>
- 原田久也 等（2005）特集 作物育種における DNA マーカーの利用，農林水産技術研究ジャーナル，vol.28 no.9 p.5-49
- 半田裕一 等（2005）技術解説 農林水産植物のゲノム解析研究の現状と今後の展開，Techno Innovation，vol.15 no.3 p.39-102
- 矢野昌裕・松岡信（2004）イネゲノム配列解読で何ができるのか，農文協，東京

『農林水産研究開発レポート』既刊リスト

- No.1 (2001.10) 麦の高品質化を目指して
- No.2 (2002. 1) イネゲノム情報を読む
- No.3 (2002. 5) 循環する資源としての家畜排せつ物
- No.4 (2002. 9) 機能性食品の開発
- No.5 (2002.12) バイオマスエネルギー利用技術の開発
- No.6 (2003. 3) 新たな用途をめざした稲の研究開発
- No.7 (2003. 5) 昆虫テクノロジー研究
- No.8 (2003. 9) 地球温暖化の防止に関わる森林の機能
- No.9 (2004. 2) 海洋生態系と水産資源－持続的水産資源管理の高度化を目指して－
- No.10 (2004.11) 食品の品質保証のための研究開発
- No.11 (2004.12) 食料・環境問題の解決を目指した国際農林水産業研究
- No.12 (2005. 3) 病害虫の総合的管理技術－化学農薬だけに依存しない病害虫防除－
- No.13 (2005. 7) 大豆の安定・多収を目指して
- No.14 (2005.11) 進化する施設栽培－大規模施設から植物工場まで－
- No.15 (2006. 3) イネで牛を育てる－飼料イネによる国産牛生産－
- No.16 (2006. 3) 魚と貝のバイオテクノロジー－安全で信頼できる魚と貝を目指して－
- No.17 (2006. 7) 野生動物による農林業被害を防ぐ技術
- No.18 (2006.10) 新たな用途をめざした稲の研究開発 平成18年度版
- No.19 (2007. 1) 水田・畑輪作体系を進める効率的な新技術
- No.20 (2007. 3) スギ人工林資源活用のための木材加工・利用技術の開発

農林水産研究開発レポートについてお気づきの点等ございましたら、
下記担当までお願いいたします。

担当：〒100-8950 東京都千代田区霞が関1-2-1
農林水産省 農林水産技術会議事務局 技術政策課 広報班
T E L 03-3502-7407
F A X 03-3507-8794
E-Mail : www@s.affrc.go.jp

インターネットでのご利用について

1 農林水産研究開発レポート

<http://www.s.affrc.go.jp/docs/report/report.htm>

2 農林水産研究開発レポート ビデオ版

<http://www.s.affrc.go.jp/docs/movie.htm>

3 その他、農林水産研究成果等の紹介

- ・農林水産省農林水産技術会議

<http://www.s.affrc.go.jp/>

- ・研究成果情報

<http://www.affrc.go.jp/ja/db/seika/index.html>

- ・農学情報資源システム AGROPEDIA

http://rms1.agsearch.agropedia.affrc.go.jp/menu_ja.html

- ・農林水産研究成果ライブラリー

<http://rms2.agsearch.agropedia.affrc.go.jp/contents/JASI/index.html>

- ・プロジェクト研究成果シリーズ

<http://rms2.agsearch.agropedia.affrc.go.jp/contents/JASI/seika.html>

4 食と農の研究メールマガジン

「食と農の研究メールマガジン」は農業担い手や食品産業、農林水産研究者はもちろん、消費者のみなさまなどに役立つ食と農に関する情報をお届けするメルマガです。配信は月2回で無料です。

登録は下記URLからお願いします。

http://www.s.affrc.go.jp/docs/mg/mg_top.htm

農林水産研究開発レポートNo.21

「ゲノム情報の品種改良への利用—DNAマーカー育種—」

2007年7月31日

監 修 農林水産省 農林水産技術会議

編集・発行 農林水産省 農林水産技術会議事務局

〒100-8950 東京都千代田区霞が関1-2-1

TEL : 03-3502-7407

FAX : 03-3507-8794

