

マルチラインにおけるイネいもち病菌レースの 長期変動予測モデルの開発

芦澤武人*¹・森脇丈治*²・平八重一之*²

目 次

I はじめに.....	15	1. モデルの再現性.....	21
II 材料及び方法.....	16	2. 同質遺伝子系統の効果的利用のための 予測結果の評価.....	21
1. モデルの基本構造.....	16	3. 事例研究.....	24
2. パラメータとデータの構成.....	16	IV 考察.....	25
3. 過去の罹病化の事例の計算による評価.....	17	V 摘要.....	27
4. 同質遺伝子系統の 効果的利用のための予測.....	18	引用文献.....	27
5. 事例研究.....	19	Summary.....	29
III 結果.....	21		

I はじめに

イネいもち病は、我が国の植物防疫における指定有害植物の一つで、感染に好適な気象条件が続くと急激に蔓延し、イネに甚大な被害を与える重要病害である。平成 25 年度の本病による被害面積は葉いもち 25.9 万 ha、穂いもち 24.3 万 ha で、延べ防除面積は葉いもち 136.5 万 ha、穂いもち 131.1 万 ha に及び、イネ病害の中でも米生産における損害は依然として最も大きい⁽¹⁾。防除法は化学農薬の散布が主体である一方で、環境に対して負荷を減らす農業の推進や、安全で安心な農産物の生産・消費の観点からもイネ品種のもつ病害抵抗性を利用した本病の防除技術が注目されている。

1960 年代に外国稲由来の新規のいもち病真性抵抗性遺伝子として *Pik*, *Piz*, *Pita*, *Pita-2*, *Pib* 等を持つ品種が育成され普及したが、これらに病原性を示すレースのいもち病菌が出現・蔓延し、抵抗性が無効になった⁽⁶⁾。一方、真性抵抗性遺伝子を個々の系統に導入した系統・品種を混合栽培するマルチライン（多系品種）では、個々の系統に病原性を示す

いもち病菌が出現しても個々の系統の混合割合が少ないために増殖速度が遅くなり、蔓延までの時間を遅延する効果が期待される。

1995 年に我が国で初のマルチライン「ササニシキ BL」が宮城県で普及し、2003 年に「コシヒカリ富山 BL」、2005 年に「コシヒカリ新潟 BL」が普及した^(5, 8, 9, 13)。マルチラインでは、抵抗性系統の混合割合が高いほど発病が少なくなるが^(1, 10)、最適な混植比率や系統の交代時期を決定できるモデルは開発されていない。そこで本研究では、同質遺伝子系統の種類・数、混植比率や系統の交代時期を決定するための「イネいもち病菌レースの長期変動予測モデル」を開発し、ソフトウェアとして作成することを試みた。

本研究は、農林水産省実用技術開発事業「マルチラインの持続的利用に向けたいもち病流行予測システム」で行ったものであり、宮城県古川農業試験場、新潟県農業総合研究センター作物研究所、石川県農業総合研究センター、福井県農業試験場、石川県立

大学、総合研究大学院大学が参画した。なお、本報告に関わるいもち病菌レースの長期変動予測モデルの基本プログラムは総合研究大学院大学教授佐々木顕博士、東京大学研究員中林潤博士が作成し、プロ

グラムの改良と最適化は中央農業総合研究センター芦澤武人が担当し、ソフトウェアの作成は株式会社らせん企画故佐々木隆氏に委託して行った。ここに標して感謝申し上げる。

II 材料及び方法

1. モデルの基本構造

ダイアグラムを Fig. 1 に示した。まず始めに、①イネいもち病菌のレース Y_j に Line j が感染する。②レース Y_j の病斑数 W_j は、基本増殖率 S にマルチラインにおける感受性系統の面積 A を乗じ、これから病原性のコスト C_j を除した値が指数関数に従って増殖する。③1年間の流行期間内の最終病斑数の中から μ の突然変異頻度で抵抗性の系統に病原性を獲得した菌が出現する。④有効集団サイズ N は W_j と突然変異菌で構成し、この中から λ の確率で越冬に成功し、 $(1-\lambda)$ で失敗する2項分布に従って次年度の初期病斑数を構成する。このように、植物と病原の共進化モデルの一つとして Ohtsuki and Sasaki (2006)⁽¹²⁾ の作成したモデルを利用した。

なお、本研究では利用が想定される公設試験研究機関の利便性を考えて、開発環境はオブジェクト指向の Object Pascal 言語でプログラミングし、MS Windows 上で作動するソフトウェアとした。本ソフトウェアは、中央農業総合研究センターのホームページにアクセスし、利用規約を遵守し、ダウンロードして exe 形式で利用できる (<http://www.naro.affrc.go.jp/narc/index.html>)。マニュアルは、ソフトウェアのヘルプメニューから pdf ファイルで閲覧できる。

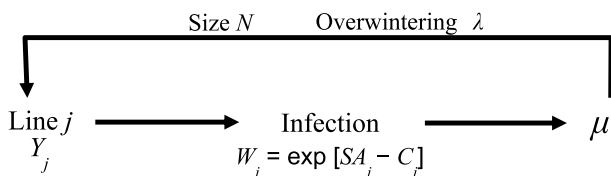


Fig. 1 Diagram of rice-blast fungus co-evolution model. Y_j , Line j infected with race Y_j ; W_j , Number of lesions induced by race Y_j ; S , reproduction rate; A , cultivation area of susceptible lines in the multiline; C_j , fitness cost; μ , mutation rate; λ , probability of overwintering in population of size N .

2. パラメータとデータの構成 (Fig. 2)

1) 系統とレースの組合せ (Near-isogenic lines of rice and blast races)

系統とレースは、宿主 (系統) の遺伝子型を 00, 01, 10, 11, 病原 (レース) の遺伝子型を 00, 01, 10, 11 として宿主-病原の遺伝子型を組合せている (two-locus gene-for-gene system^(2,3))⁽¹²⁾。シミュレーションでは、レース 00 を初期値 1 (比率) として設定し、隣接するレース 01, 10, 11 が順次出現する設定となっている。佐々木・中林が作成した C 言語によるプログラムでは、同様にそれぞれ 00, 01, 10, 11 と、00, 01, 10, 11 となっており、レース 00 からシミュレーションを開始して突然変異により新たに病原性を獲得したレースである 01, 10

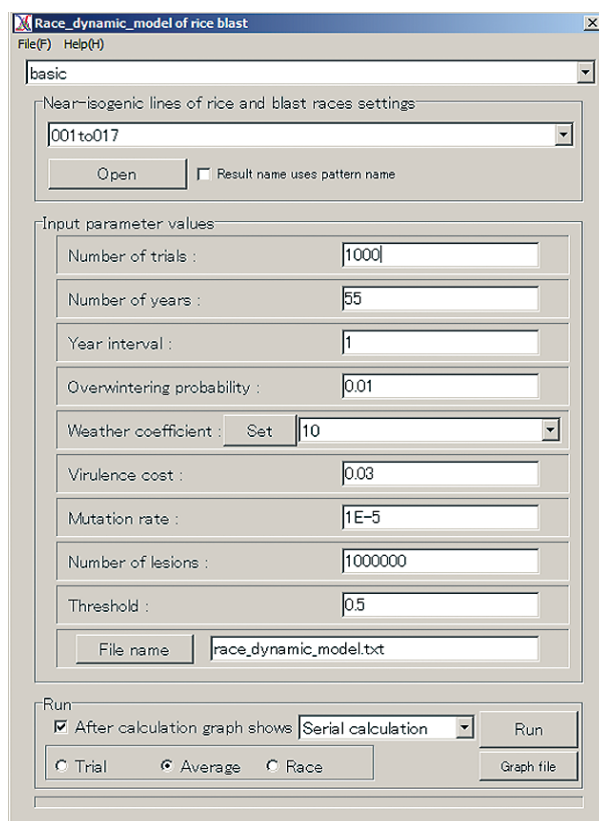


Fig. 2 Input window of parameter values for the "Race dynamic model of rice blast".

がほぼ同時に生じ、続いて11が生じる設定になっている。なお、本プログラムでは4系統までは計算できるが、5系統目以降は一番はじめに出現したレースを選択してしまうようプログラムしている。従って、理論上生じない順番で設定するレースが出現してしまう問題点があり、それを解決するため、5系統-5レース以上の組合せでも出現順位が異なるよう設定できる対応表を任意に作成できるファイルを設けた。また、現状では利用可能な真性抵抗性遺伝子数は十数個であるので、最多を見積もって16系統-16レースまでの対応表をデフォルトとして作成した。このファイルはソフトウェアをインストールして利用する際に個別に値を設定・変更することができる。

2) 試行回数 (Number of trials)

試行ごとに計算結果が出力され、試行ごとあるいは試行回平均値を求めることができる。このため、個々の試行結果で示されるレースと全体のレースの変動を評価することができる。試行回数は1,000回をデフォルト値としているが、回数が多いほど予測精度が高くなる。

3) 計算年数 (Number of years)

真性抵抗性の寿命を判断する観点からすると、数年から十数年の範囲を入力するのが妥当であると考えられるが、1,000年まで設定可能とした。

4) 越冬確率 (Overwintering probability)

越冬確率 λ の値は0.01をデフォルト値としており、いもち病菌の越冬個体数が1/100になることを示す。種子消毒等の効果で個体数が越冬時に減少するパラメータの値として設定できる。

5) 気象係数 (Weather coefficient)

いもち病菌の増殖は気象の影響を受けるため、本菌の増殖に影響するパラメータとして気象係数を設定した。気象係数は、Fig. 1中のS (reproduction rate)の係数としている。

6) 病原性のコスト (Virulent cost)

いもち病菌では新たに病原性を獲得することにより、病原力が低下する等の現象は認められていな

い。本モデルではこれの影響が小さい可能性を考慮してデフォルト値としても0.03という計算結果にほとんど影響しない小さい値を設定している。

7) 突然変異頻度 (Mutation rate)

いもち病菌の水田圃場における突然変異頻度は、高橋ら(2008)⁽¹⁴⁾により 10^{-5} のオーダーであることが報告されている。本モデルではこの値をデフォルトとしている。

8) 最終病斑数 (Number of lesions)

いもち病では、イネの生育ステージごとに苗いもち、葉いもち、穂いもち等に分類される。しかし、いもち病菌の個体数の変動をモデル化する場合、1年間に増殖して最終的に越冬する個体数が必要な値となる。そこで本モデルでは、最終病斑数(個)をパラメータとして設定した。なお、計算では1年間に増殖した個々のレースと突然変異菌のレースは比率として扱い、これを最終病斑数に変換して越冬前個体群とするようプログラムしている。

9) 系統とレースの組合せ

いもち病菌の病原性レースと系統の真性抵抗性は、罹病性(S)と抵抗性(R)の組合せを任意に設定できるようにしている(Fig. 3)。

10) 年次ごとの設定方法

1年ごとに系統の数や混植比率の設定を変更したり、それらを繰り返したり設定できる画面を用意している(Fig. 4, 6)。

3. 過去の罹病化の事例の計算による評価

1) 真性抵抗性の罹病化の再現と基本モデルの再現性

単一の真性抵抗性を導入したイネ品種は、普及から数年で罹病化することが知られている⁽⁶⁾。これは、新たに病原性を獲得した侵害レースが出現・蔓延することにより引き起こされる。そこで、シミュレーションでも同様の計算結果が示されるかを検討した。Pik-s系統の100%(比率で1)が栽培されている地域にレース001.0が優占している場合を想定し、Pik-s系統に代わってPia系統が100%で導入さ

れ、*Pia* 系統を侵害するレース 003.0 がどのように出現・蔓延するか計算を試みた（下記 a. 括弧内の数値は初期値）。

a. *Pik-s*, *Pia* : 001.0 (1), 003.0 (0)

さらに、本プログラムの基本である 4 系統 4 レースの組合せによるレース変動の再現性を確認するため、次の b. と c. の組合せについても検討した。また、各系統の混植比率は等比とした。

b. *Pik-s*, *Pia*, *Pii* : 001.0 (1), 003.0 (0), 005.0 (0), 007.0 (0)

c. *Pik-s*, *Pia*, *Pii*, *Pik* : 001.0 (1), 003.0 (0), 005.0 (0), 011.1 (0), 017.1 (0)

なお、これ以降の計算には、特に記載がない限り試行回数 10,000 回、最終病斑数 10,000,000 個、気象係数 20 として多発年が連続するワーストなケースを想定した設定とした。

2) 宮城県におけるレース変遷の再現

1990 年初頭まで主要な栽培品種が「ササニシキ」（真性抵抗性 *Pia* 保有）であった宮城県では、耐冷性が強い「ひとめぼれ」（同 *Pii*）が 1991 年から普及し、同年に冷害であったことから急速に栽培面積が増加した。宮城県によるいもち病菌レースの調査結果では、*Pia* を侵害する 003.0 が減少し、代わりに *Pii* を侵害する 007.0 が増加した。品種の交代によるレースの変遷がシミュレーションでも同様に再現されるかを検討するために、1990~2004 年までのレースの種類と頻度ならびに栽培品種の真性抵抗性遺伝子型と比率を入力し計算を試みた（Fig. 5, 宮城県笹原剛志氏が提供）。なお、気象係数は 1991, 1993, 2003 年が冷害年であったため、これを 20 とした以外はすべて 1 と設定して計算した。

4. 同質遺伝子系統の効果的利用のための予測

抵抗性同質遺伝子系統を効果的に利用していもち病の発生を抑制する理論研究として、単系統のローテーション⁽¹⁶⁾と多系統を混植⁽¹⁰⁾する方法が考えられる。系統の混植比率や交代時期等も考慮する必要があるが、ここでは系統交代が及ぼす影響の代表的な計算例と新潟県の抵抗性同質遺伝子系統の活用法について検討した。

1) 単系統のローテーション

1 年ごとに抵抗性系統を交代する方法について検討した。*Piks*, *Pia*, *Pii*, *Pik*, *Piz* の各系統を計算開始 1 年目から 5 年目まで設定し、6~10 年目はこれを繰り返して設定した。レースは 001.0 が 100% の分布割合（比率で 1）を設定し、003.0, 007.0, 017.1, 077.1 を初期値 0 として計算を試みた（Fig. 6）。

2) 多系統の等量混植における侵害レース出現・蔓延に及ぼす影響

4 系統以上の混植における侵害レースの増殖については、系統やレースの組合せが等比級数的に多くなるので、ここでは多系統の混植が単系統あるいは 2 系統を侵害するレースの蔓延過程に及ぼす影響を検討した。*Pik*, *Pik-m*, *Piz*, *Pita*, *Pita-2*, *Piz-t*, *Pib* の 7 系統を等量混植するとして設定し、これらを侵害しないレース 007.0 が 100% 分布しているとして計算を行った。レースは個々の系統を侵害するレースをそれぞれ 017.1, 037.1, 047.0, 107.0, 307.0, 407.0, 007.2 とした。さらに、より多犯性のレース 077.1 を追加して計算を試み、その変動も検

File(F)	001.0	003.0	007.0	017.1	037.1	047.0	107.0	307.0	407.0	001.2	001.4	003.2	347.0
<i>Pik-s</i>	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
<i>Pia</i>	R	S	S	S	S	S	S	S	S	R	R	S	S
<i>Pii</i>	R	R	S	S	S	S	S	S	S	R	R	R	S
<i>Pik</i>	R	R	R	S	S	R	R	R	R	R	R	R	R
<i>Pik-m</i>	R	R	R	R	S	R	R	R	R	R	R	R	R
<i>Piz</i>	R	R	R	R	R	S	R	R	R	R	R	R	S
<i>Pita</i>	R	R	R	R	R	R	S	S	R	R	R	R	S
<i>Pita-2</i>	R	R	R	R	R	R	R	S	R	R	R	R	S
<i>Piz-t</i>	R	R	R	R	R	R	R	R	S	R	R	R	R
<i>Pik-p</i>	R	R	R	S	S	R	R	R	R	R	R	R	R
<i>Pib</i>	R	R	R	R	R	R	R	R	R	S	R	S	R
<i>Pit</i>	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	S	R	R

Fig. 3 Near-isogenic lines and blast races setting window. S, susceptible; R, Resistant.

討した。

5. 事例研究

マルチラインが普及している3県では、それぞれ

の利用方法が異なる。宮城県の「ササニシキ BL」では、1994年から3~4系統 (*Pik*, *Pik-m*, *Piz*, *Piz-t*) の混合栽培を数千 ha で行っていたが、本研究で開発したモデルにより示された計算結果を活用

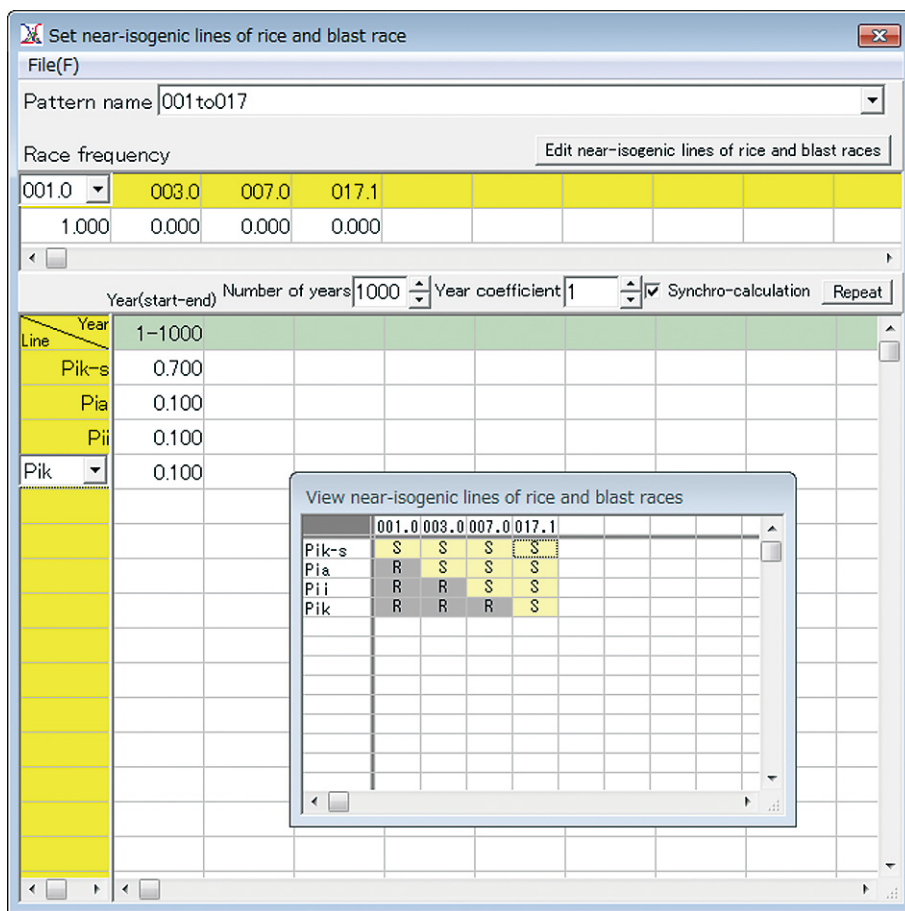


Fig. 4 Set window of near-isogenic lines, and blast races. Yearly change of the proportion and/or number of near-isogenic lines can set in this window.

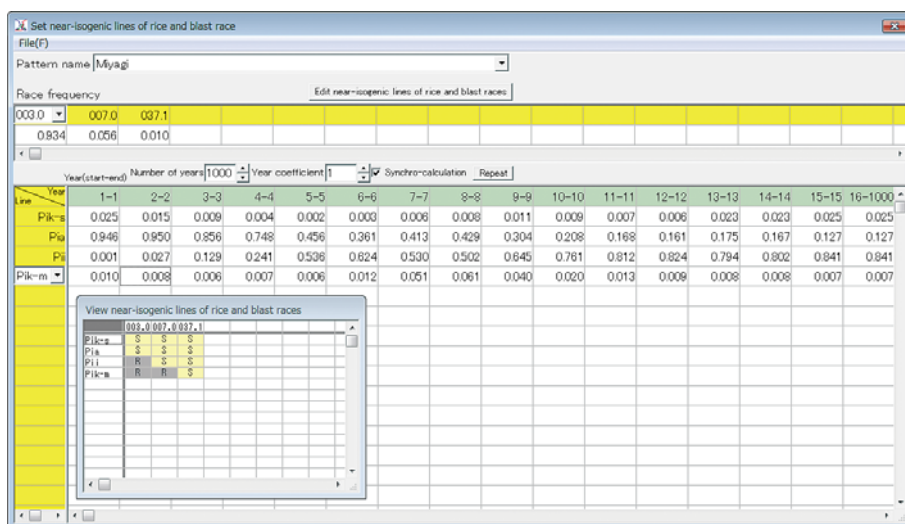


Fig. 5 Setting of near-isogenic lines and blast races for Miyagi prefecture during 1990–2004 (year 1–15). Practical verification was done using these race composition and variety proportions in the prefecture.

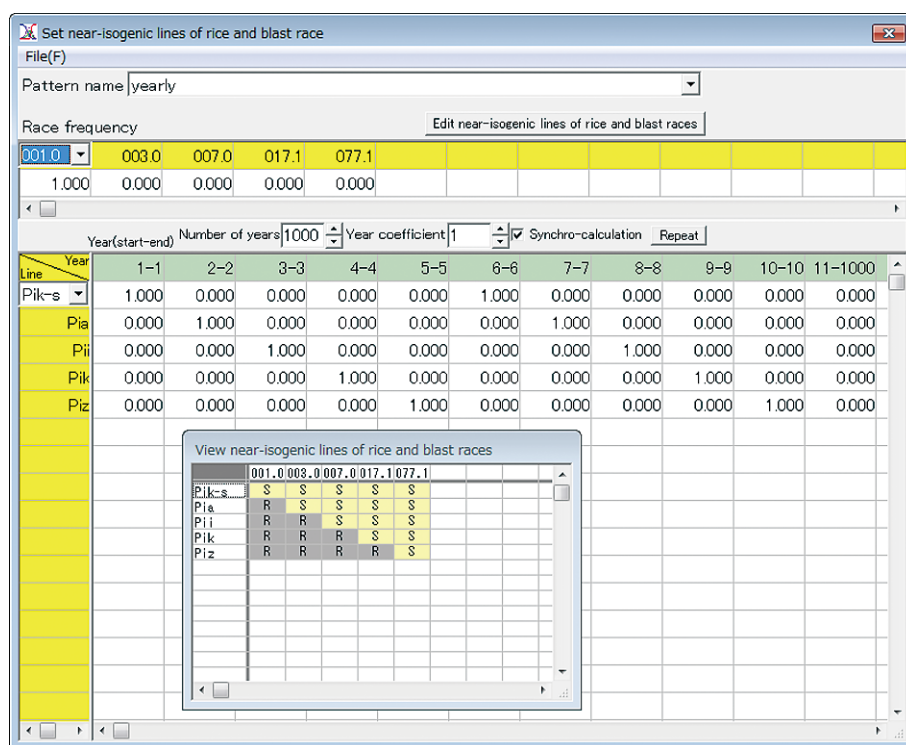


Fig. 6 Setting of near-isogenic lines of rice and blast races. Yearly change of the 5 near-isogenic lines (*Pik-s*, *Pia*, *Pii*, *Pik*, *Piz*, respectively) during 1-5 years and repeats 6-10 years.

して、2006年から抵抗性の7系統 (*Pik*, *Pik-m*, *Piz*, *Pita*, *Pita-2*, *Piz-t*, *Pib*) を等量混合する方法で普及している。富山県では2003年から特別栽培米を目的として抵抗性の3系統 (*Piz-t*, *Pib*, *Pik-p*) の混合栽培を数百haの小面積で実施し、2008年からは *Piz-t* から *Pita-2* を持つ系統へ変更している。新潟県では2005年から罹病性の2系統 (*Pia*, *Pii*) と、抵抗性系統 (*Pita-2*, *Piz*, *Pib*, *Piz-t*) のうちいずれか2系統を混合し、合計4系統の混合で、そのうち罹病性系統は変更することなく抵抗性系統を2~3年ごとに交代しながら、10万haで新潟県全域で栽培している。そこで、これらの利用法が本モデルによってどのようなレース変動の計算結果となるか検討した。

1) ササニシキ BL

上記4. 2) の計算方法と同じである。

2) コシヒカリ富山 BL

富山県では主要品種の「コシヒカリ」が約

30,000haの作付面積があり、これに対して「コシヒカリ富山BL」を約500haとすると、「コシヒカリ」が0.983であり、「コシヒカリ富山BL」が0.017の比率となる。中央農業総合研究センターの研究資料7⁽⁷⁾によると、富山県における優占レースは001なので、ここでは001.0 (1) を初期値として各系統を侵害する011.1, 001.2, 401.1を設定して計算し、さらにすべての「コシヒカリ富山BL」の混合系統を侵害するレース411.3を設定した計算も試みた。

3) コシヒカリ新潟 BL

「コシヒカリ新潟BL」の系統構成とその混合割合は、新潟県のホームページ上で公開されているので、これらの系統の種類・混植比率の変遷を2005~2013年まで入力し、レースは003.0 (1) を初期値として007.0, 043.0, 047.0, 303.0, 307.0, 003.2, 007.2を出現するレースとして設定し計算を試みた (Fig. 7)。

Ⅲ 結果

1. モデルの再現性

a. 罹病化の再現

Pik-s 系統から *Pia* 系統に交代して数年以内に侵害レース 003.0 が急激に増加し、3 年目にはレース 003.0 の割合が 001.0 より多くなり、6 年目には 003.0 がほぼ優占することが計算により示された (Fig. 8).

b. 3 系統等量混植におけるレース変動

Pik-s, *Pia*, *Pii* 系統の等量混植下で、優占レースの 001.0 が減少し、3 系統のうち 2 系統を侵害するレース 003.0 と 005.0 が増加後に減少し、3 系統を侵害する 007.0 が出現・増加し、10 年後に平衡に達することが示された (Fig. 9). これにより順次突然変異してより多犯性のレースが蔓延することが示された. 罹病化の再現例に比べて、系統数が 1 つ増えることによりすべての系統を侵害するレースが蔓延するまでの時間が遅延されることも示された.

c. 4 系統等量混植におけるレース変動

Pia, *Pii*, *Pik* の各系統を個々に侵害するレース 003.0, 005.0, 011.1 が増加後に減少し、代わって *Pia* と *Pik* を侵害するレース 013.1 が出現・増加し 12 年後に平衡に達することが示された (Fig. 10).

系統数の増加に伴い、多犯性レースが蔓延するまでの時間が長くなることが Fig. 9 と同様に示された.

d. 宮城県のレース変動の再現

「ササニシキ」(*Pia*) から「ひとめぼれ」(*Pii*) に品種が変遷したのに伴い、1993 年から 1994 年にかけてレースが 003.0 から 007.0 に変遷したことが調査結果により示されている (Fig. 11). 計算結果でも同様にレースが交代することが示された (Fig. 12). 気象係数を冷害年の場合に 20 と大きく設定したことによりレース変動の時期が実測値と予測値で一致した. なお、レース 037.1 は調査結果で大きな変動がなかったが、計算によっても大きく変動することはないことが示された.

2. 同質遺伝子系統の効果的利用のための予測結果の評価

1) 単系統のローテーション

1 年ごとに系統を交代することにより、より多犯性のレースが順次出現して増加・減少し、すべての系統を侵害するレースが蔓延することが示された (Fig. 13).

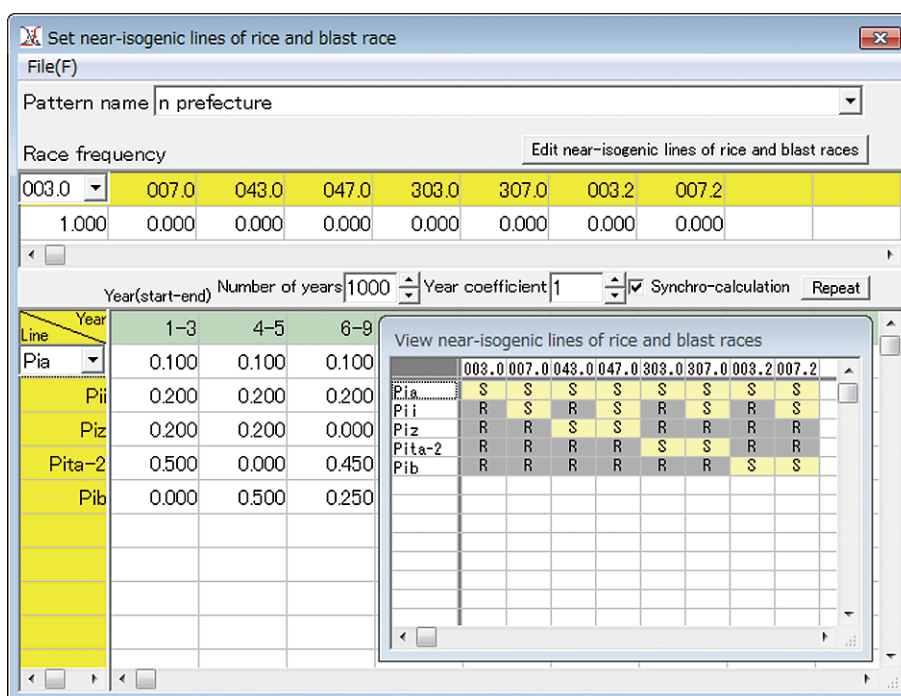


Fig. 7 Setting of near-isogenic lines of rice and blast races during 1-9 years for Niigata prefecture. Actual values of variety proportions were used to simulate race changes.

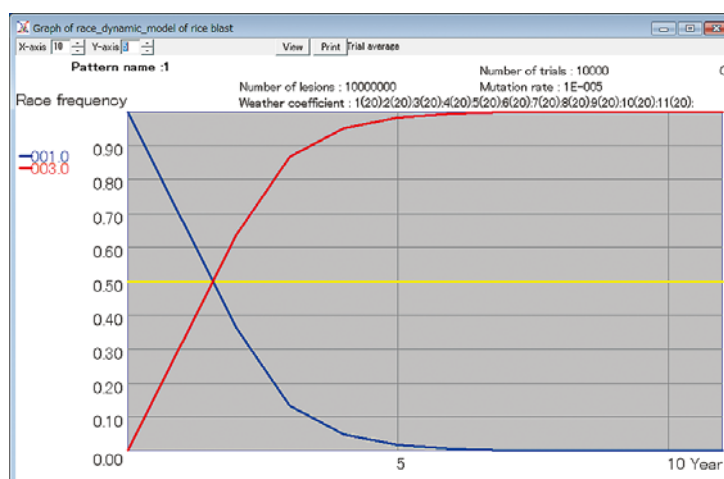


Fig. 8 Breakdown of the *Pia* line caused by newly virulent race 003.0. Predominant race 001.0 decrease and race 003.0 immediately increase for only few years.

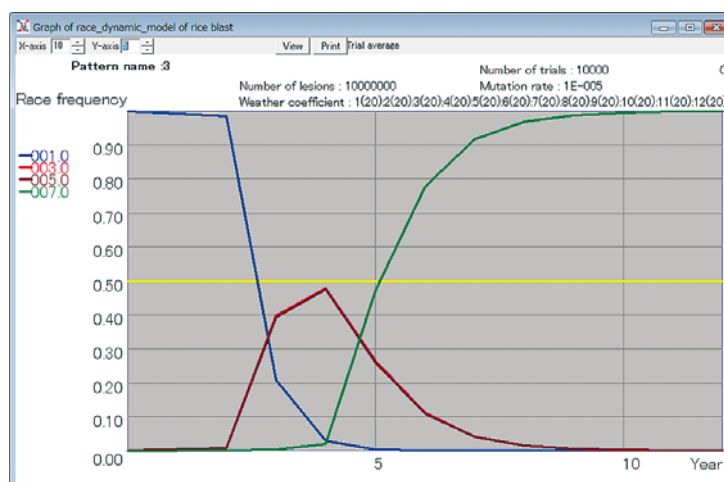


Fig. 9 Blast race changes in an equal mixture of *Pik-s*, *Pia* and *Pii*. Races 003.0 and 005.0 simultaneously were increased and then decreased, and race 007.0 became predominant.

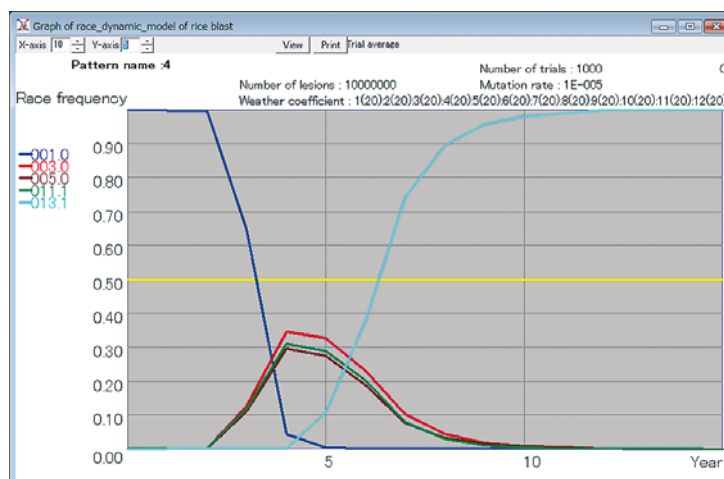


Fig. 10 Blast race changes in an equal mixture of *Pik-s*, *Pia*, *Pii* and *Pik*. Races 003.0, 005.0 and 011.1 were simultaneously increased and then decreased, and race 013.1 became predominant.

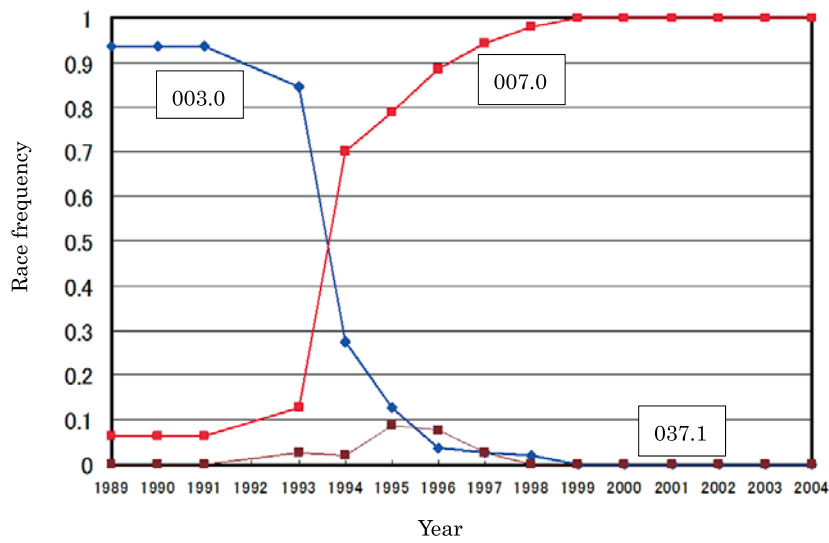


Fig. 11 Observed race changes during 1989–2004 in Miyagi prefecture.

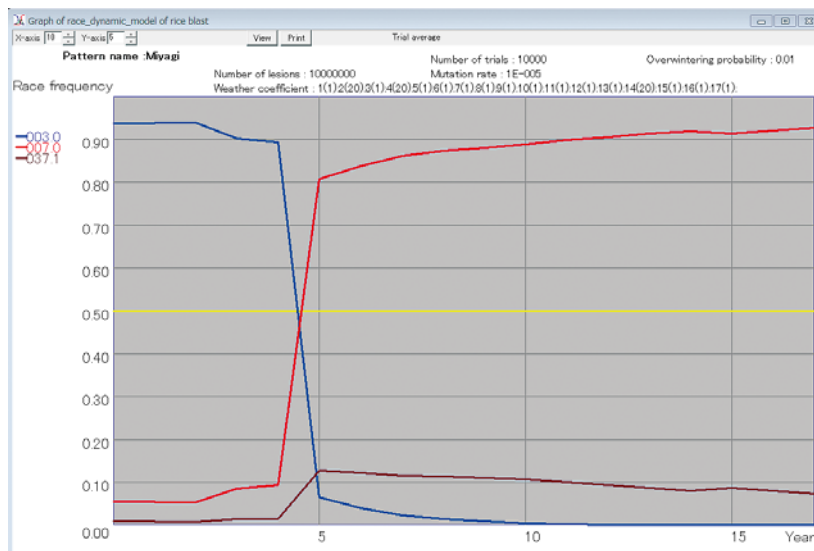


Fig. 12 Simulation of race changes in Miyagi prefecture during 1990–2004. Race change from 003.0 to 007.0 was occurred from the year 1993 to 1994 (year 4–5).

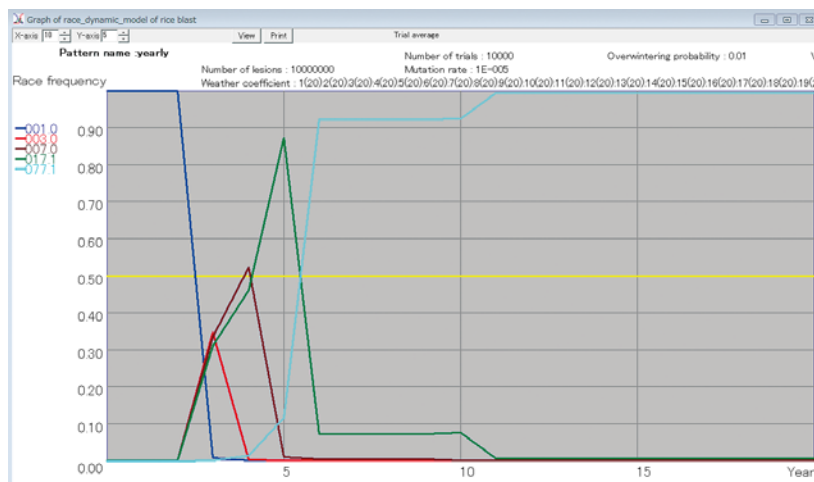


Fig. 13 Race changes under rotation of 5 near-isogenic lines (*Pik-s*, *Pia*, *Pij*, *Pik* and *Piz*) during 1–10 years. Race 077.1 virulent to all the 5 lines was finally predominant.

2) 多系統の等量混植における侵害レース出現・蔓延に及ぼす影響

2系統を侵害するレース037.1が出現・蔓延したが、100年後であってもその他のレースが出現しないことが計算により示された (Fig. 14)。これは個々の系統を侵害するレースが7系統を混植すると増殖できる場となる系統の割合が少なくなり、 10^{-5} の突然変異頻度では出現できなくなることを示している。さらに、より多犯性のレース077.1を追加した結果でも、0.05程度までは増加するがその後は増加することはないことが示された (Fig. 15)。これにより混合する系統数が多い方が多犯性のレースが出現・蔓延しにくいことが計算から明らかになった。

3. 事例研究

1) ササニシキ BL

7系統の等量混植によりすべての系統を侵害するレースは出現しない可能性が高いことが計算により示された (Fig. 14, 15)。

2) コシヒカリ富山 BL

Pik-p, *Pib*, *Piz-t*のうち*Pik-p*, *Pib*の各系統を侵害するレース011.1, 001.2が出現して増加したが、100年後であっても蔓延することはない (Fig. 16)。また、すべての構成系統を侵害するレース411.3を加えても同様の計算結果であった。これは、設定した各系統の混植比率がきわめて小さいため

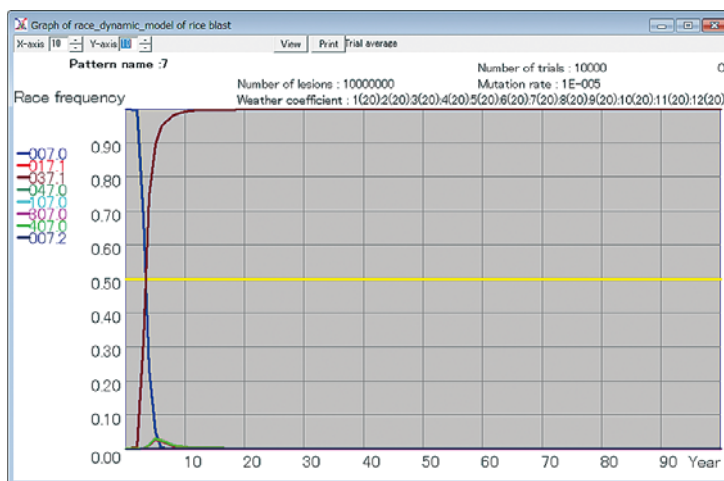


Fig. 14 Simulation of race changes in an equal proportion of 7 resistant near-isogenic lines (*Pik*, *Pik-m*, *Piz*, *Pita*, *Pita-2*, *Piz-t* and *Pib*). Race 037.1 virulent to *Pik* and *Pik-m* was immediately increased, although other races were not increased.

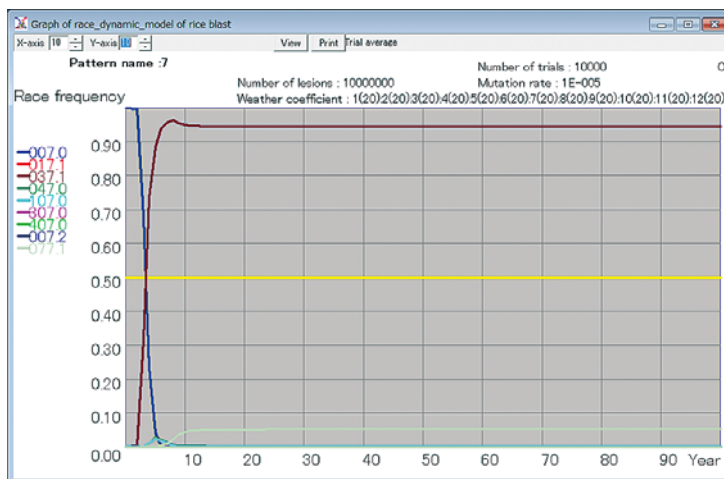


Fig. 15 Race changes in an equal proportion of the 7 resistant lines (*Pik*, *Pik-m*, *Piz*, *Pita*, *Pita-2*, *Piz-t* and *Pib*). Race 077.1 was added for the Fig. 15 simulation settings. Frequency of the race 077.1 was increased until approximately 0.05.

に、変異菌が出現・蔓延しにくいためであり、面積が侵害レースやスーパーレースの出現に影響することが明らかになった。

3) コシヒカリ新潟 BL

個々の系統を侵害するレースが出現し、10年後

には複数のレースが混在することが示された (Fig. 17). これにより、罹病性系統を維持しつつ数年単位で抵抗性系統を交代栽培すると多種類のレースが混在する結果となることが示された。ただし、これはシビアな気象条件が前提となっている。

IV 考察

マルチラインに利用できる抵抗性遺伝資源は限られるので、系統の混合比率、交代時期、ある地域に占めるマルチラインの面積、突然変異頻度、気象条

件等のパラメータを解析できれば、スーパーレースが蔓延しにくい系統利用の最適解が得られる。シミュレーションモデルはこれらを客観的に評価する

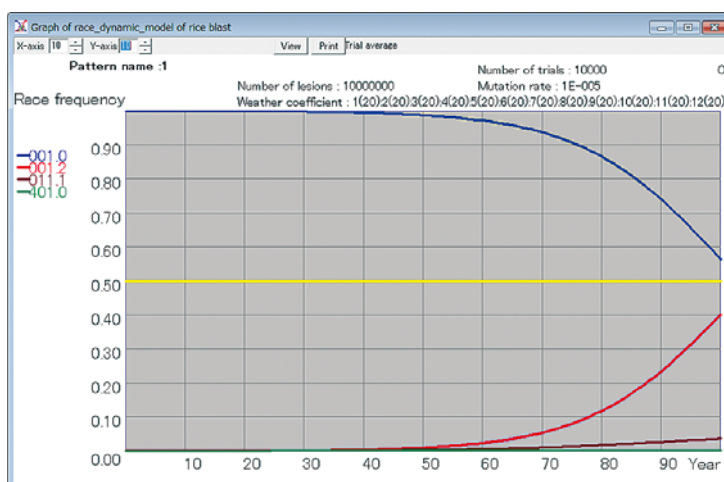


Fig. 16 Race changes in a mixture of *Pib*, *Piz-t*, *Pik-p* (4: 4: 2) during 1–100 years in Toyama prefecture. Even though after 100 years, virulent races 001.2, 011.1 and 401.0 were not predominant.

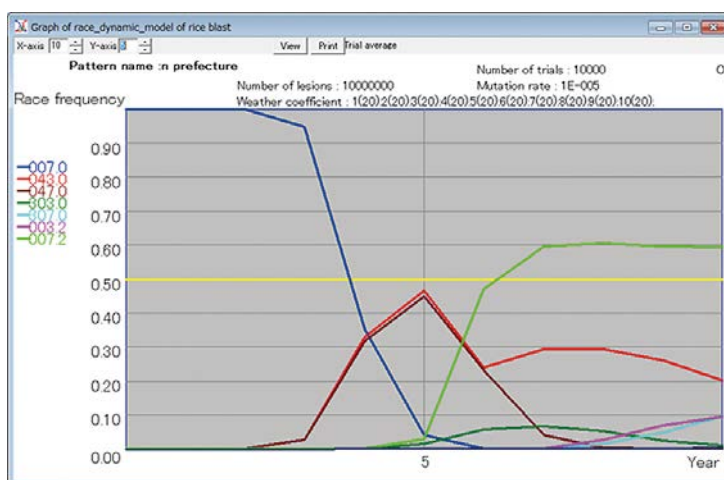


Fig. 17 Rotation of two resistant near-isogenic lines using *Piz*, *Pita-2*, *Piz-t* and *Pib* without any changes of two susceptible near-isogenic lines (*Pia* and *Pii*) during 2005–2013 in Niigata multiline. See the rotation settings in Fig. 7. All of the set races were increased at different frequency during the 10 years.

上で有用である。作成したマルチラインにおける「イネいもち病菌レースの長期変動予測モデル」は、いもち病菌レースの個体数を扱うことで、現実場面における個体群（数）の動態を単純化して模擬することができるため、系統の交代時期や構成系統数を決定する数学的根拠として利用することができる。

本研究では、特に多犯性のレースやすべての系統を侵害するスーパーレースが蔓延するまでの待ち時間を評価することが目的の一つであるので、気象係数や個体数は多発生が続くとして定数として扱い、シミュレーションによる評価を行った。すなわち、単独の真性抵抗性を導入した品種が数年以内に罹病化する歴史の再現では、新たに出現したレースが急速に蔓延することが計算により示された。また、3系統あるいは4系統の等量混植におけるレースの変動では、個々の抵抗性系統に病原性を示すレースが順次出現して蔓延することが示された。過去の罹病化の再現として宮城県のレース変動について実数値を入力した場合でも同様にレースの交代が再現できた。特にこの場合では、冷害年に気象係数の値を高く設定することで現実により近い計算結果を示すことが明らかになった。

マルチラインの発病抑制機構のなかでレース変動に及ぼす要因として、1) ローテーション⁽¹⁶⁾や2) 多系統の混合栽培⁽¹⁰⁾があげられる。1)では単系統を1年ごとに交代する方法が、2)ではなるべく多くの系統を等量混合して放任栽培する方法が考えられるので、それぞれのシミュレーションを試みた。その結果、ローテーションでは個々の系統を侵害するレースが順次出現・蔓延しながら最終的にすべての系統を侵害するレースが蔓延する結果となった。これは多数の単系統が病原菌に遭遇することにより個々の抵抗性を侵害するよう変異しながらすべての系統に対して病原性を獲得することを示している。一方、7系統を等量混合した場合では、2系統を侵害するレースが出現・蔓延するが、その他の個々の系統に病原性を示すレースは出現しないことが示された。これに037.1から出現するレース077.1を加えて同様にシミュレーションを行った結果、5%程度まで077.1が増加するが、その後一定で増加しないことが示された。これは構成する抵抗性系統の数が増えることにより個々の系統の面積が $1/R$ （ R は抵抗性系統の数）の割合で小さくなり、最終病斑数

から算出される突然変異菌の出現数がないか極端に少なくなることにより、確率的に突然変異菌が出現しにくくなることを示している。

マルチラインを導入した3県では、その利用方法が異なる。1995年から3系統を混合栽培した宮城県のマルチラインでは、*Pik*、*Pik-m*系統を侵害するレース037.1が既に分布していたために県内数圃場で発生が見られた⁽¹⁵⁾。その後*Piz-t*系統を追加してその混合割合を増やして対応し、2006年からは7系統を等量混植する方法に変更しており、現在まで大きな罹病化の報告はない。数系統を混合した場合は、シミュレーションによる結果が示すように個々の系統を侵害するレースが出現・蔓延して罹病化する可能性があるが、多系統を混植すると個々の系統の面積が小さくなることで各系統を侵害するレースが突然変異により出現する確率が減ること、抵抗性系統の混植比率が高くなるほど発病抑制効果が高くなること⁽¹⁾、2006年以降の気象条件がいもち病の発生に好適でなかった年が多かったこと、「ササニシキBL」の栽培面積が減少したこと等が、大きな罹病化を見ない要因であろうと考えられる。富山県では、抵抗性3系統の混合栽培を小面積で行うことで変異菌が発生しにくい状態にあると考えられる。シミュレーションでも50年後以降でないと発生しないと計算されるので、基本的に罹病化する可能性はほとんどないと考えられる。一方、新潟県では過去に単一の真性抵抗性を導入した品種で罹病化した歴史を鑑みて、県内に分布する優占レース003.0や007.0を維持しつつ、これらに抵抗性の系統を混合し数年おきにこれを交代する策をとっている。このような方法でシミュレーションを行った結果、多種類のレースが出現して混在することが計算により示された。実際でも多種類の侵害レースが出現することが明らかになっている⁽⁴⁾。しかし、全域のレース分布を毎年モニタリングしながら系統の交代を決定しているため、ある特定のレースが優占する状況とはなっていない。また、系統の交代により侵害レースは減少していることがわかっている。シミュレーションでは、多発生が続く条件設定としていることが実際のレース変動と異なった要因であると考えられ、気象条件もレース変動に影響することが示唆された。

以上のように、マルチラインの問題は病原菌の病

原性と植物の抵抗性の共進化^(2,3) の関係を明らかにしてそれを利用しようとするものである。マルチラインの利用に当たっては、レースの動態に影響するパラメータを「イネいもち病菌レースの長期変動予測モデル」を用いて十分解析し、利用方策を立てる

ことが可能であると考えられた。また、マルチラインの利用により農薬の散布回数が新潟県の例で半分程度に削減されており、環境保全型農業を推進する上でも重要な技術である。

V 摘要

真性抵抗性同質遺伝子系統のイネを混合栽培していもち病を防除するマルチラインを効果的に利用するために、「イネいもち病菌レースの長期変動予測モデル」を作成した。本モデルによるシミュレーションでは、抵抗性系統の単独導入による罹病化の再現や過去の実際に得られた品種の変遷や気象変動を設定して計算すると同様のレース変動を示すこと

ができた。マルチラインが普及し、本モデルを活用している宮城・新潟・富山の各県のシミュレーション結果は、現在罹病化に至っていない要因を示すことが可能であった。以上から、本モデルを用いることにより抵抗性系統の交代時期、構成系統数とその割合等、マルチラインを有効に活用するための数学的根拠として示すことができる。

引用文献

- Ashizawa, T., Sasahara, M., Ohba, A., Hori, T., Ishikawa, K., Sasaki, Y., Kuroda, T., Harasawa, R., Zenbayashi, K. S. and S. Koizumi (2007) Lesion-based analysis of leaf blast suppression in mixture of rice cultivar and a resistant near-isogenic line. *J. Gen. Plant Pathol.*, 73, 15-21
- Flor, H. H. (1942) Inheritance of pathogenicity in *Melampsora lini*. *Phytopathology*, 32, 653-669
- Flor, H. H. (1955) Host-parasite interaction in flux rust-its genetics and other implications. *Phytopathology*, 45, 680-685
- 石川浩司・黒田智久・岩田大介・小瀧慶司・堀武志 (2013) 新潟県内のコシヒカリ同質遺伝子系統において 2007~2012 年に分布したイネいもち病菌のレース. *日植病報*, 79:196
- Ishizaki, K., Hoshi, T., Abe, S., Sasaki, K., Kobayashi, H., Kasaneyama, T., Matsui, T. and S. Azuma (2005) Breeding of blast resistant isogenic lines in rice variety "Koshihikari" and evaluation of their characters. *Breed. Sci.*, 55, 371-377
- 清沢茂久・櫛淵欽也・渡辺進二 (1975) いもち病抵抗性育種および育種研究の現状と問題点 [1]. *農及園*, 50, 25-30
- 小泉信三・岩野正敬・善林薫・フェ デラ ペーニャ・園田亮一・中島敏彦・荒井治喜・中島隆・宮坂篤, 芦澤武人・安田伸子・野口 (辻本) 雅子 (2007) 2001 年に分布したイネいもち病菌のレース. *中央農研研究資料*, 7, 1-63
- 小島洋一郎・蛭谷武志・金田宏・土肥正幸・石橋岳彦・木谷吉則・向野尚幸・山口琢也・表野元保・山本良孝 (2003) 水稻新系統「コシヒカリ富山 BL」の育成と有効活用 I. 「コシヒカリ富山 BL1 号~6 号」の育成. *富山県農技セ研報*, 20, 13-32
- 小島洋一郎・蛭谷武志・金田宏・土肥正幸・石橋岳彦・木谷吉則・向野尚幸・山口琢也・表野元保・山本良孝 (2003) 水稻新系統「コシヒカリ富山 BL」の育成と有効活用 II. BL 系統の混合栽培におけるいもち病抑制効果. *富山県農技セ研報*, 20, 33-40
- Mundt, C. C. (2002) Use of multiline cultivars and cultivar mixtures for disease management. *Ann. Rev. Phytopathol.*, 40, 381-410
- 農林水産省消費・安全局 (2014) 平成 25 年病害虫の発生と防除. *植物防疫*, 68, 3-12
- Ohtsuki, A., Shiroma, K. and A. Sasaki (2006) Epidemiology and disease control under gene-for-gene plant-pathogen interaction. *J. Theor. Biol.*, 238, 780-794
- 佐々木武彦・阿部眞三・松永和久・岡本栄治・永

- 野邦明・丹野耕一・千葉芳則・狩野篤・植松克彦・滝沢浩幸・早坂浩志・涌井茂・黒田倫子・薄木茂樹・千葉文弥・宮野法近・佐々木郁彦・遠藤貴司 (2002) ササニシキの多系品種ササニシキ BL について. 宮城古川農試報, 3, 1-35
14. 高橋真実・芦澤武人・平八重一之・森脇丈治 (2008) 水田圃場におけるイネいもち病菌の突然変異頻度の推定. 北陸病虫研報, 57, 11-17
15. 辻英明・笹原剛志・菅野博英・大場淳司・神名川真三郎 (1999) ササニシキ BL 栽培圃場におけるいもち病菌レースの年次変動. 北日本病虫研報, 50, 16-20
16. Wolfe, M. S. (1985) The current status and prospects of multiline cultivars and variety mixtures for disease resistance. *Ann. Rev. Phytopathol.*, 23, 251-273

Development of a simulator of the rice blast race dynamics in multiline

Takeo Ashizawa^{*1}, Jouji Moriwaki^{*2} and Kazuyuki Hirayae^{*2}

Summary

A race-dynamic simulator for multiline was developed to control rice blast effectively. In our simulation, resistance breakdowns of the single plantings of resistant rice varieties by newly emerged virulent blast races were clearly demonstrated. The simulator could mimic the more than 10 year changes of blast races in the multilines in Miyagi, Niigata and Toyama prefectures well by using actual data of both composition of rice lines and initial proportion of blast races in them, and showed the factors preventing the resistance breakdown in the multilines such as a small cultivated area in Toyama, mixture of 7 components in Miyagi and timely changes of the component lines in Niigata. The developed simulator is effective to determine rotation timing of resistant components as well as composition in the multilines for effective and stable blast control with them.

*1 NARO Agricultural Research Center

*2 NARO Kyushu Okinawa Agricultural Research Center

