作付け前のマメシクイガ (チョウ目: ハマキガ科) 被害リスク推定に基づく防除対策の選定

竹内 博昭^{1,*}・石本 万寿広²・阿曾 和基³・岩田 大介²
栗原 潤^{3,†}・遠藤 信幸¹・渋谷 和樹¹

¹ 農業・食品産業技術総合研究機構中央農業研究センター

² 新潟県農業総合研究所作物研究センター

³ 長野県農業試験場

Pre-planting Estimation of Damage Risk and Selection of Control Methods for the Soybean Pod Borer, *Leguminivora glycinivorella* (Lepidoptera: Tortricidae). Hiroaki TAKEUCHI,^{1,*} Masuhiro ISHIMOTO,² Kazuki Aso,³ Daisuke IWATA,² Jun KURIHARA,^{3,††} Nobuyuki ENDO¹ and Kazuki SHIBUYA¹ ¹Hokuriku Plant Protection Group, Central Region Agricultural Research Center, NARO; 1–2–1 Inada, Joetsu, Niigata 943–0193, Japan. ²Niigata Agricultural Research Institute, Crop Research Center; Nagakura 857, Nagaoka, Niigata 940–0826, Japan. ³Nagano Agricultural Experiment Station; Suzaka, Nagano 382–0051, Japan. *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 64: 115–124 (2020)

Abstract: To estimate the damage risk and select control methods for the soybean pod borer, *Leguminivora glycinivorella* (Matsumura) (Lepidoptera: Tortricidae), over 200 soybean fields cultivated by farmers and treated with insecticides 0–2 times for the borer were surveyed in Niigata and Nagano Prefectures from 2015 to 2018. A decision tree analysis was performed on the non-treated data. The tree-model had four terminal nodes and was split by three factors: soybean continuous cropping year, damage rate in the previous year, and distance to the nearest field where soybeans were cropped in the previous year. The four terminal nodes were ordered from low to high according to the damage level of the fields classified to each node. The order of nodes did not differ between the modeling data and test data, which were data from other uncontrolled fields. As the number of insecticide treatments increased, the ratio of low-damage-level fields increased to > 90% in all terminal nodes except the highest-damage-level node. These results indicate that the order of the four terminal nodes may represent the order of damage risk. The tree-model may enable rational selection of the number of insecticide treatments or rotation of soybean to rice before planting.

Key words: Damage risk; decision-tree; rotation; soybean pod borer; integrated pest management

緒 言

マメシクイガ *Leguminivora glycinivorella* (Matsumura) は、ハマキガ科 Tortricidae に属すダイズ *Glycine max* (L.) Merr. の害虫である (松村, 1898)。幼虫は莢の中で子実を食害して被害粒を発生させる。本州以北の比較的冷涼な地域では年 1 化の発生であるが、被害粒率が数十 % を越えることもあり、防除対策が必要な害虫となっている (内藤・正木, 1962; Kobayashi and Oku, 1980; 石本・岩田, 2018)。

本種に対する主要な防除対策は、輪作 (ダイズからイネ

へ) と殺虫剤の使用である。このうち、水稲との輪作は、水田作のダイズが増えた 1970 年代ごろから推奨されている。ダイズ後に水稲作をすると土中に生息する幼虫は水没後短期間で死滅するとされる (竹内, 2018)。しかし、水稲作後のダイズであっても圃場外から成虫が移入して被害が生じる場合はある (小野, 2009; 石本・岩田, 2018)。一方、殺虫剤の使用も古くから研究され (Kuwayama, 1928)、現在では多くの種類の殺虫剤が使われている (久保田・横田, 2015)。散布回数は通常は 1 回であるが、多発生の場合には 2 回散布が必要とされている (木村・石谷, 2009;

* E-mail: thiroaki@affrc.go.jp

† 現在 長野県農業技術課

†† Present address: Agricultural Experiment and Extension Division, Nagano Prefectural Government, 692–2 Habashita, Minami Nagano, Nagano 380–8570, Japan.

2019 年 5 月 27 日受領 (Received 27 May 2019)

2020 年 5 月 12 日登載決定 (Accepted 12 May 2020)

DOI: 10.1303/jjaez.2020.115

久保田・横田, 2015; 對馬ら, 2017). 総合的害虫管理の概念には複数の防除法を合理的に統合することが含まれている(中筋, 2008). 本種についても被害予測に基づいて多様な防除対策を合理的に選択する方法が必要である.

害虫の被害を予測する方法には, 原因となる害虫の発生量を直接調査して予測する方法と気象条件や栽培条件など間接的な情報で予測する方法とがあり, それぞれ長所と短所がある. 本種の場合, 発生量を直接調査して予測に用いる方法(例えば, 加進ら, 2010)は, 加害前世代の発生時期や量を直接把握することと, 調査から被害発生までの期間が短いことから予測精度を高められる可能性がある. しかし, 予測から防除実施までの期間が短く, 柔軟な対応が必要となる. また, 対策の選択肢に輪作を入れることができない. 一方, 間接的な情報で予測する方法(例えば, 小林・奥, 1976)は, 被害発生までの期間が長いので上述の方法より精度は低い. しかし, 長い準備時間がとれ防除計画は立てやすい. 作付け前予測の場合は対策の選択肢に輪作を入れることもできる. 従って, それぞれの方法の長所を生かした相補的な予測が望ましいと考えられる.

これまで本種を対象に, 間接的な情報で被害を予測しようとした研究がいくつかある. 例えば, 気温と降水量による予測(高野, 1985)や気温, 降水量, 地域の前年被害粒率による予測(平井, 1986)が研究されている. ただし, これらはいずれも広域的な被害の予測を目的としている. 本種の発生量は, 圃場間で大きなばらつきがあることから(船迫ら, 1977; 小野, 2009), 被害予測と対策の選択は個別の圃場ごとに行うのが望ましい.

個別の圃場ごとの被害予測と対策の選択には, 実施者の負担が小さい簡易な方法が必要である. Yes/No で分岐していくチャートで対策を選ぶ方法は, 選択手順が可視化されているので分かりやすく, 分岐する要素を概観したり試行的に選択したりできることから, 取り組みやすい方法と考えられる. これまでも本種の薬剤散布開始時期の決定手順(小野寺, 2012)や, 本種を含むダイズの主要病害虫に対する IPM 体系(小野ら, 2011)の提示の際に使われている. これらでは解析して得られた結果を統合してチャートが作られていることが多いが, 別方法として, 解析の際にチャートを直接作成するモデルを使うことも有効と考えられる.

決定木は, 非線形モデルの 1 つであり, 上述の Yes/No など分岐していくチャートを作成可能なモデルである(廣野・林, 2008). 要因間の相互関係を図示でき, Yes/No チャートと同様に結果を解釈しやすいという利点がある. 決定木は, 以前から害虫管理の道具の 1 つと位置付けられており(Mumford and Norton, 1984; Dent, 2000), チョウ目やエビ目などの防除対策の選定法に活用された例がある(Valentine et al., 1976; Dumbauld et al., 2006; Woodill et al.,

2017). マメシクイガに対してもこの方法を活用できる可能性があると考えられる.

そこで本研究では, 作付け前に被害リスクを推定して対策を選定する方法の構築を目的として, できるだけ数多くの生産者圃場において, 栽培履歴, 圃場周辺環境, 本種発生量, 被害粒率などを調査した. 得られた圃場データは防除回数(0, 1, 2 回)で 3 つに分けた. そして, 播種前に入手可能な情報の中から被害粒率に影響を及ぼす要因を特定するために, 0 回防除圃場データを用いて被害程度を区分する決定木を作成した. この決定木の検証は, 別の 0 回防除圃場データを用いて行った. さらに, 1 回防除と 2 回防除の効果を評価するために, この決定木で 1, 2 回防除圃場データを分類した後, 区分ごと, 防除回数ごとに被害程度を比較した. そして, 各区分の圃場に適した防除対策を推定した.

なお, 本研究の一部は農林水産省の委託プロジェクト研究「多収阻害要因の診断法および対策技術の開発」の予算を用いて行われた.

材料および方法

1. 調査圃場の選定

できるだけ数多くの生産者圃場の栽培履歴やダイズ被害粒率を把握することを目標に, 2015~2018 年に新潟県内(上越, 中越地方)と長野県内(北信, 中信, 南信地方)の 14 地区で, のべ 148 か所の生産者圃場を選定して調査した. 各地区は, 新潟県では標高 100m 以下, 長野県では同 300~750m の範囲にあった. また, 調査圃場の選定にあたっては, 連作年数ができるだけ多様になるように考慮した. これは, 連作すると本種の発生量や被害が増加する(小野ら, 2011; 石本・岩田, 2018)とされているからである. のべ 148 か所のうち, 84 か所は 1 年のみ調査したが, 29, 22, 13 か所は順に 2, 3, 4 年続けて調査した. 調査年が変わると栽培方法や環境条件が変わることが多いことと前作の情報がある圃場の準備が難しいことから, 本研究の解析では同一圃場であっても各年のダイズ栽培は独立とみなした. そのため調査圃場数は, のべ 260 圃場となった.

2. 調査圃場の栽培方法

調査圃場の栽培方針は生産者が決め, 生産者が実施した. 詳細な方法や履歴などは現地調査と事後の聞き取りやアンケートで把握した. それらの概要は次のようであった. 面積の範囲は 5.5~150a (中央値は 30a) であった. 栽培品種は, エンレイ (41%), タチナガハ (18%), ナカセンナリ (18%), すずほまれ (9%), 里のほほえみ (8%), ギンレイ (5%) などのべ 8 品種であった. 播種方法は狭畦栽培もあったが, 一般的な平畝と畝立て栽培が主だった. 播種日は, 5 月下旬から 7 月中旬まで幅があったが 6 月第 1 半月が全体の 32% を占め最も頻度が高かった.

調査した圃場では種子処理剤から散布剤まで多様な時期に多様な殺虫剤が施用された。8月以降に散布された殺虫剤に含まれていた有効成分はMEP、ダイアジノン、エトフェンプロックス、ペルメトリン、クロラントラニリプロールであった。既報(石本・岩田, 2018)と同様に、8月第4半旬以前の散布は本種への被害軽減効果が低いとみなして考慮しないこととした。8月第5半旬以降の散布回数から、全圃場を0回、1回、2回防除圃場に分けた。順に56, 157, 29圃場となった。なお、被害粒率や防除内容が欠測の18圃場はこれらから除外した。

3. 被害粒率の調査

収穫期に各圃場でダイズ25茎を刈り取り、乾燥させ、莢を開いて、かじられたような食害痕があるダイズ粒を選別した。粒数を計測した後、被害粒率(食害粒数/調査全粒数)を求めた。被害粒率は解析のために低、中、高の3段階の被害程度に分けた(低: <5%, 中: ≥5%かつ<15%, 高: ≥15%と定義)。この3段階としたのは、同じダイズ害虫の被害許容水準が、ウコンノメイガ *Pleuroptya ruralis* (Scopoli) では減収率5.7% (高橋ら, 2011)、ダイズカメムシ類では健全粒率90または85% (伊藤ら, 2006) とされているからである。

4. シロイチモジマダラメイガの発生が多い圃場の抽出と除外

両県では、シロイチモジマダラメイガ *Etiella zinckenella* (Treitschke) の発生が多い圃場がある可能性があった。そのような圃場を解析から除外するために、2015~2017年8~10月に各地区の少なくとも1圃場において、フェロモントラップを用いてシロイチモジマダラメイガとマメシンクイガの発生量を並行して調査した。フェロモントラップの設置方法は既報(石本・岩田, 2018)と同様とし、マメシンクイガのフェロモンルアーは、市販品(信越化学株式会社, 東京)(樋口・望月, 2011)を、シロイチモジマダラ

メイガのフェロモン (Tabata et al., 2008) を含むルアーは試作品(信越化学株式会社, 東京)を用いた。のべ182圃場を調査したところ、シロイチモジマダラメイガの捕獲数がマメシンクイガの捕獲数より多かったのは5圃場のみであり、マメシンクイガが優占していることが分かった。この結果と労力の制約を考慮して、2018年はシロイチモジマダラメイガの発生量は調査しなかった。

また、2015~2017年の2年間は、9月下旬(子実肥大後期)に各地区で1または2か所の圃場を選び、10茎を刈り取り、莢を開いてシロイチモジマダラメイガなどマメシンクイガ以外の種の幼虫の有無を調査したが、他種はほとんど発見されなかった。

これらを踏まえ、被害程度が低い圃場ではシロイチモジマダラメイガの影響を考慮せず解析した。被害程度が中または高の圃場では、トラップによるシロイチモジマダラメイガ捕獲数が、マメシンクイガ捕獲数の11~24%に達した圃場が4つ(いずれも1回防除圃場)あったので、これらは除外して解析した。このため1回防除圃場は153圃場となった。

5. 決定木モデルのあてはめ

生産者圃場では、0回防除圃場は56圃場と少なかったもので、全てを決定木モデルの作成に用いた。モデルの目的変数は、上述した3段階の被害程度(低、中、高)とした。

説明変数は、播種前に把握できる情報の中から9個を選定した(Table 1)。各調査圃場の特徴を表す6変数(Table 1の番号順に調査年、県、地区、圃場面積、品種、播種日)および、被害予測ができる可能性がある3変数(番号順に、連作年数、前年の被害粒率、前年ダイズ圃場までの直線距離)である。変数の選定にあたっては、過去の多変量的な解析の報告や被害と関連がある要因を考察している報告(奥, 1993; 小野ら, 2011; 石本・岩田, 2018)を参考にした。

Table 1. Explanatory variables and objective variable for analysis

No.	Variable	Type of variable	Description
1	Year	Nominal	2015, 2016, 2017 and 2018.
2	Prefecture	Nominal	Niigata or Nagano Prefecture.
3	Name of local area	Nominal	Name of researched local area in the two prefectures.
4	Field area	Continuous	Unit is square meters.
5	Cultivar of soybean	Nominal	Enrei, Nakasennari, Tachinagaha, etc.
6	Sowing date	Ordinal	Sowing date is described as an ordinal period in which the period from May 20 to July 10 is divided into 10- or 11-day intervals.
7	Number of soybean continuous cropping years	Ordinal	1, 2, 3, or 4 or more.
8	Damage rate in the previous year	Continuous	0% when other plants were cropped there in the previous year.
9	Distance to nearest source field where soybeans were cropped in the previous year	Continuous	In the range of 0–200 m (distances >200 m were cut off); 0 m when soybeans were cropped continuously in the field.
1	Damage level	Ordinal	Low damage: <5%, Moderate damage: ≥5%, and <15%, High damage: ≥15%.

選定した説明変数のうち、播種日 (No. 6) は、5 月下旬から旬ごとに 1~6 の番号をつけて順序変数とした。播種期が 2 旬にまたがる場合は中間の値とした (例えば 1.5)。連作年数 (No. 7) は、作付け初年を 1 年とし、4 年を超える値は切り捨てとした。前年の被害粒率 (No. 8) は、ダイズ以外の作物が前年に栽培されていた場合は 0% とした。前年ダイズ圃場までの直線距離 (No. 9) は、前年にダイズが栽培され当年に水田化されていない直近の圃場から調査圃場までの直線距離とした。調査圃場の前作がダイズの場合は 0m とした。200m を越える距離は切り捨てとした。なお、調査したダイズ圃場周辺の当年や過去の状況などは現地調査や聞き取りで確認したが、距離や面積の計測が必要な場合には、地理院地図 (<http://www.gsi.go.jp/>) の計測ツールを用いて数値を得た。

決定木分析の方法は複数あるが (廣野・林, 2008)、本研究では市販の統計ソフト JMP13.2.1 (SAS Institute Inc., Cary, NC) を用いたので、このソフトでパーティションと呼んでいる決定木分析の方法に従った。なお、この方法による解析は、いくつかの報告で使われている (Olatinwo et al., 2009; Tanaka et al., 2015; Mehra et al., 2016; Mauro et al.,

2018)。この方法では、対話的な方法で二分木を作成する。1 分岐ごとに分岐基準となる統計量として G^2 (尤度比のカイ 2 乗値) と対数値の 2 つが出力され、デフォルトでは対数値が優先され分岐される。対数値は、 $-\log_{10}(p \text{ 値})$ で定義される統計量である。式の中の p 値は、水準数の多い説明変数が採用されやすい傾向を是正した p 値である (JMP 13.2 マニュアル https://www.jmp.com/ja_jp/support/jmp-software-updates/jmp13-manual-pdf.html)。モデルの作成は、分岐先に含まれる圃場数が 10 未満になるまで続けた。

生産者圃場の調査では、いくつかの説明変数を把握できず、欠測値を含むデータとなることが多かった。そのため解析では欠測値をカテゴリとして扱うオプションを用いた。この場合、欠測は 1 つのカテゴリとして扱われ、対数値を基準に分岐のいずれか一方にまとめて振り分けられた (JMP 13.2 マニュアル)。

6. 決定木モデルの検証

モデルの検証には、農研機構北陸研究拠点 (上越市) にある圃場の調査データと既報 (石本・岩田, 2018) にある圃場データを用いた (Table 2)。前者は 17 圃場あり (2014~2018 年調査)、この内 1 圃場は引用データ (北信越

Table 2. Field data for testing of the tree model

No. ^a	Year	Name of field	Area (a)	Cultivar	Name of soybean cropping years	Damage rate in the previous year (%)	Distance to the nearest source field (m) ^b	No. of terminal nodes classified by tree model	Damage rate (%)	Damage level ^c
1	2014	g	4.8	Enrei	11	28.1	0	4	28.8 ^d	High
2	2015	a	9.0	Enrei	5	48.7	0	4	45.3	High
3	2015	d	7.1	Enrei	1	—	6	2	10.3	Moderate
4	2016	e	7.1	Enrei	1	—	5	2	35.8	High
5	2016	d	7.1	Enrei	2	10.3	0	3	34.2	High
6	2016	c-east	3.5	Enrei	3	29.4	0	4	57.6	High
7	2016	c-west	3.5	Enrei	3	29.4	0	4	80.7	High
8	2016	a	9.0	Enrei	6	45.3	0	4	74.8	High
9	2017	e	7.1	Enrei	2	35.8	0	4	54.1	High
10	2017	d	7.1	Enrei	3	34.2	0	4	31.8	High
11	2017	b	7.8	Enrei	1	—	20	2	5.1	Moderate
12	2017	a	9.0	Enrei	7	74.8	0	4	38.9	High
13	2018	f	7.1	Satonohohoemi	1	—	5	2	1.4	Low
14	2018	e	7.1	Enrei	3	54.1	0	4	13.8	Moderate
15	2018	c	7.1	Satonohohoemi	1	—	5	2	0.9	Low
16	2018	b	7.8	Enrei	2	5.1	0	3	8.8	Moderate
17	2018	a	9.0	Enrei	8	38.9	0	4	1.4	Low
18–36 ^c	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

^a Data for fields No. 1–17 were obtained from research data for NARO experimental fields in Joetsu city. Soybeans were sown at the end of May or early June in each year.

^b Source field means fields where soybeans were cropped in the previous year and rice was not cropped in the present year.

^c Three damage levels: low, moderate and high damage indicate <5%, ≥5% and <15%, and ≥15%, respectively.

^d The damage rate was taken from data provided by the Research Consortium for crop rotation systems in the Hokushin'etsu region (2016).

^e Data for Nos. 18–36 were taken from Ishimoto and Iwata (2018). In their report, the fields ($n=19$) were named Field J in 2011, Fields A, B, C, D, E, J in 2012, Fields B, D, E, F, I in 2013 and Fields B, D, E, F, H, I, J in 2014.

水田輪作コンソーシアム, 2016) を含む。いずれも生産者圃場ではないが地域の一般的な栽培方法に従って栽培されている。また、種子処理剤以外の殺虫剤の施用はない。後者(石本・岩田, 2018)は19圃場(2011~2014年調査)あり、いずれも生産者圃場かつ0回防除圃場である。

決定木で上述の検証用データを分類した後、それぞれの区分で被害程度低、中、高の圃場の数を整理した。次に、決定木でモデル作成用データも同様に分類して整理した。そして、各区分の被害程度を2群間(モデル作成用データと検証用データ)で比較した。被害程度低の割合は中、高の割合より経済的に重要な指標とみなし、2群間でこの割合の差の有無を検定した(2×2の分割表を作成して5%有意水準でFisher's Exact Testを実施)。

7. 各区分で実施された防除回数ごとの被害程度

1回防除と2回防除の効果を評価するために、決定木で1回または2回防除圃場データを分類した後、0回防除圃場データの分類結果と合わせ、区分ごとに防除回数(0~2回)間で被害程度(低、中、高)を比較した。被害程度低の割合が90%を越える防除回数を、防除効果が安定して

いるとみなし、その区分の圃場に適した防除回数とした。

結 果

1. 決定木モデルのあてはめ

最初の分岐において、各説明変数の対数値の値を比較したところ、ダイズ連作年数、前年ダイズ圃場までの直線距離、前年被害粒率の順に値が大きかった(Table 3)。この順序は G^2 でも同様であった。ダイズ連作年数による分岐が採用され、作付け初年(16圃場)と連作(40圃場)の2つに分けられた(Fig. 1)。作付け初年の圃場には、被害程度低、中、高の順に11, 5, 0圃場が含まれた。連作の圃場には、同じ順に0, 18, 22圃場が含まれた。

二番目の分岐は、連作の40圃場に対して実施された。前年被害粒率、ダイズ作付年数、調査年の順に対数値の値が大きかった(Table 3)。この順序は G^2 でも同様であった。前年被害粒率による分岐が採用され、被害粒率10.8%未満(21圃場)と同10.8%以上(28圃場)の2つに分けられた(Fig. 1)。前年被害粒率の値が欠測であった圃場は後者の区分に含まれた。なお、前年被害粒率10.8%未満の

Table 3. Values of the splitting criteria G^2 (likelihood-ratio chi-square) and the LogWorth statistic for the three split points

No.	Variable	First split		Second split		Third split	
		G^2	LogWorth	G^2	LogWorth	G^2	LogWorth
1	Year	12.7	2.0	8.9	1.2	<u>9.3</u>	1.3
2	Prefecture	6.8	1.5	0.5	0.1	6.0	1.3
3	Local area	23.0	3.5	0.5	0.0	<u>9.3</u>	0.8
4	Field area	10.1	1.2	6.6	1.1	4.0	0.6
5	Cultivar	13.4	1.9	6.6	1.0	<u>9.3</u>	1.3
6	Sowing date	9.8	0.9	0.8	0.0	7.5	0.7
7	Number of soybean cropping years	<u>42.9</u>	<u>9.6</u>	9.8	1.7	0.0	0.0
8	Damage rate in the previous year	30.5	6.2	<u>16.7</u>	<u>3.4</u>	0.0	0.0
9	Distance to the nearest source field	33.9	7.6	0.0	0.0	7.5	<u>1.4</u>

Underlined numerical values represent the largest value in each split point.

Fig. 1. Results of fitting a decision tree model to data for uncontrolled fields (no insecticide treatment after August 21). The numerical values in parentheses are the number of fields. The numerical values 1–3 near the split points indicate the first, second, and third split points.

圃場には、被害程度低、中、高、欠測の順に0, 11, 1, 0圃場が含まれた。同10.8%以上の圃場には、同じ順に0, 4, 10, 14圃場が含まれた (Fig. 1)。

三番目の分岐は、初作の16圃場に対して実施された。前年ダイズ圃場までの直線距離の対数値は、他の変数の値よりやや大きく、次いで調査年、県名、品種の値が大きかった (Table 3)。この順序は G^2 では異なり、調査年、県名、品種の値が大きく、次いで直線距離、播種日であった。対数値を優先すると、前年ダイズ圃場までの直線距離が採用され、直線距離167m未満 (9圃場) と167m以上 (7圃場) の2つにデータは分けられた。前作ダイズ圃場までの距離が欠測だった圃場は後者の区分に含まれた。なお、モデル作成に使用したデータでは、距離のデータ点は少なく、100m以上の水準も121, 167, 200mのみで粗かった。また、直線距離167m未満の圃場には、被害程度低、中、高、欠測の順に4, 5, 0, 0圃場が含まれた。同167m以上の圃場には、同じ順に6, 0, 0, 1圃場が含まれた (Fig. 1)。

分岐後の葉に含まれるデータ数が10を下回ったので3回の分岐で解析を止めた。4つの葉に分岐するモデルが作成された (Fig. 1)。各葉の被害程度を相対的に低いほうから高いほうへ並べ番号をつけると、区分1 (初作, 直線距離 ≥ 167 m), 区分2 (初作, 直線距離 < 167 m), 区分3 (連作, 前年被害 $< 10.8\%$), 区分4 (連作, 前年被害 $\geq 10.8\%$) となった (Fig. 1)。

2. 決定木モデルの検証

作成した決定木で検証用データを分類したところ、区分1の圃場はなかったが、区分2, 3, 4には順に10, 16, 10圃場が含まれた (Table 4)。

区分2の被害程度低、中、高の圃場の割合は、検証用データでは順に70, 20, 10% ($n=10$) であり、モデル作成用データでは順に44, 66, 0% ($n=9$) であった (Table 4)。両データ間で被害程度低の圃場の割合に有意な差は認められなかった (Fisher's exact test, $p>0.05$)。また、被害程度高の割合は両データとも低かった。

区分3の被害程度低、中、高の圃場の割合は、検証用データでは順に56, 13, 31% ($n=16$) であり、モデル作成用データでは順に0, 92, 8% ($n=12$) であった。両データ間で被害程度低の圃場の割合に有意な差が認められた (Fisher's exact test, $p=0.003$)。区分3の被害構成は両データ間で異なり、被害程度低の割合に違いがあることが分かった。

Table 4. Comparison of the number of fields at each damage level between the modeling and test data for each terminal node^a

No. of terminal nodes	Data type	<i>n</i>	Number of fields at each of the three damage levels (%)					
			Low ^b		Moderate		High	
1	Modeling	6	6	(100)	0	(0)	0	(0)
	Test ^c	0	—	—	—	—	—	—
2	Modeling	9	4	(44)	5	(66)	0	(0)
	Test	10	7	(70)	2	(20)	1	(10)
3	Modeling	12	0	(0)	11	(92)	1	(8)
	Test	16	9	(56)	2	(13)	5	(31)
4	Modeling	14	0	(0)	4	(29)	10	(71)
	Test	10	1	(10)	1	(10)	8	(80)

^a Modeling data were obtained from a survey of farmers' fields from 2015 to 2018. Test data were obtained from research data for NARO experimental fields or taken from Ishimoto and Iwata (2018).

^b Asterisks (*) indicate a significant difference in the ratio of low-damage-level fields between the modeling and test data. Not significant (n.s.) indicates no significant difference in the ratio. Fisher's exact test was conducted at the 5% significance level.

^c No field was classified into terminal node 1 in the test data.

Fig. 2. Composition of the three damage levels for each number of insecticide treatments in each terminal node. The numerical values above the bar indicate the number of fields in each treatment. The number of insecticide treatments indicates the number of treatments after August 21 in each growing season. The three damage levels are low (damage rate $< 5\%$), moderate ($\geq 5\%$ and $< 15\%$), and high ($\geq 15\%$). Model 0 means data for modeling of the tree model and Test 0 means data for testing, which were obtained from other uncontrolled fields as shown in Table 2.

区分4の被害程度低, 中, 高の圃場の割合は, 検証用データでは順に 10, 10, 80% ($n=10$) であり, モデル作成用データでは順に 0, 29, 71% ($n=14$) であった. 両データ間で被害程度低の割合に有意な差は認められなかった (Fisher's exact test, $p>0.05$). また, 被害程度高の割合はいずれも高かった.

検証用データを決定木で分類し区分単位で見た場合, 区分番号が大きいほど被害程度は高かった (区分2, 3, 4の順) (Fig. 2). 各区分の被害程度の相対的な順序は, モデル作成用データと検証用データとの間に違いがなかった.

3. 各区分の圃場で実施された防除回数ごとの被害程度

区分1における被害程度低の圃場の割合は, 0回防除, 1回防除いずれも 100% であり, 防除回数によらずこの割合は基準として設定した 90% を越える高い値だった (Fig. 2). 区分1の2回防除には分類された圃場がなかった. 区分2における被害程度低の割合は, 0, 1, 2回防除の順に 44, 94, 100% であり, 1回以上防除があるとこの割合は 90% を越えた. 区分3における被害程度低の割合は, 0, 1, 2回防除の順に 0, 69, 100% であり, 防除が2回あるとこの割合は 90% を越えた. 区分4における被害程度低の割合は, 0, 1回防除の順に 0, 36% であった. 2回防除は被害程度高の1圃場のみであった. 区分4では, 被害程度低の割合が 90% を越える防除回数はなかった.

考 察

生産者圃場調査で得られた0回防除圃場のデータに決定木モデルをあてはめたところ, 3つの説明変数 (ダイズ連作年数, 前年被害粒率, 前年ダイズ圃場までの直線距離) によって, 圃場を4つに分類する決定木が作られた (Fig. 1).

決定木の最初の分岐では, ダイズ連作年数でデータが二分された. これまでも連作すると被害が大きくなることは知られ, 輪作が基本的な防除対策として推奨されている (船迫ら, 1977; 小野ら, 2011; 石本・岩田, 2018). 連作圃場では, 前年にダイズ莢内で子実を食害しながら成長した幼虫が, 莢の下に土壌中に移動して土繭を作り越冬し, 8月ごろ蛹化羽化する (樋口・望月, 2011). 従って, 初作と連作との間には, 圃場内から成虫が羽化するかどうかという違いがあると考えられることから (石本・岩田, 2018), モデルが全圃場を初作圃場と連作圃場に分割したことは妥当と考えられた.

2つ目の分岐では, 連作圃場データが前年の被害粒率で二分された. これまでの研究で, 前年発生した幼虫数が翌年の成虫数に影響する可能性があると考えられている (平井, 1986). また, 年次間差が認められるものの, 前年の被害粒率と当年のフェロモントラップ誘殺数との間には関連が認められ, さらに, 当年のフェロモントラップ誘殺数と被害粒率との間にも関連が認められることが報告されて

いる (石本・岩田, 2018). これらの知見から, モデルが連作圃場を前年被害粒率が低い圃場と高い圃場に分割したのは妥当と考えられた.

3つ目の分岐では, 発生源である前年のダイズ圃場までの直線距離で初作圃場データが二分された (Fig. 1). この分岐で用いた初作圃場のデータ数は少なく, 説明変数間の分岐基準値の差も小さかった (Table 3). しかし, 本種成虫の移動性は低いとされ, ダイズ以外の寄主植物としてツルマメ *Glycine soja* Siebold & Zucc. とクズ *Pueraria lobata* (Willd.) Ohwi の2種があるものの利用は少ないとされている (梶原ら, 1986; 樋口・望月, 2011). これらのことから, 本種においては発生源となるダイズ作付け圃場から離れるほど移入する可能性は低くなると考えられ, モデルが初作圃場を発生源から遠い圃場と近い圃場に分けたのは妥当と考えられた.

決定木モデルの作成では圃場が4つに分類されたが, これらを区分単位で被害程度が低い順に並べ番号をつけると, 区分1 (初作, 直線距離 ≥ 167 m), 区分2 (初作, 直線距離 <167 m), 区分3 (連作, 前年被害 $<10.8\%$), 区分4 (連作, 前年被害 $\geq 10.8\%$) となった (Fig. 2). 一方, 検証用データを決定木で分け, 同様に区分単位で被害程度が低い順に並べると, 各区分 (区分2~4) はその区分番号通りの順序で並んだ (Fig. 2). また, 区分2, 4においては, 検証用データとモデル作成用データとの間で被害程度低の割合に違いは認められず, 被害構成も似ていた (Table 4). 上述したように, 本種についてのこれまでの知見は, 3つの分岐の順序や選択された説明変数を支持していた. これらから, 区分番号は被害発生リスクの順序を表すと考えられた. また, 4区分の順序によるリスク推定は今回の調査地域以外にも広く適用できる可能性があると考えられた.

決定木のリスク区分の被害構成が安定している場合には, その区分に一定の防除対策を対応させることができると考えられる. 本研究の区分2, 4においては, 被害構成が検証用データとモデル作成用データとの間で大きな違いはなかった (Table 4). 区分2には被害程度低の圃場が 44 または 70% 含まれ, 区分4には, 被害程度高の圃場が 71 または 80% 含まれていた (Table 4). 従って, 区分2に被害程度低のみ, 区分4に被害程度高のみが分類されるようなことはないものの, これらの区分では被害構成が安定していると考えられた. また, 区分2では1回防除以上で被害程度低の割合は 90% を越えた (Fig. 2). 区分4では, 被害程度低の割合が 90% を越える防除回数はなかった. これらから, 作付け前の時点における適当な防除対策は, 区分2では1回防除, 区分4では水稲との輪作と考えられた.

区分1は, 0回と1回防除のいずれでも被害程度低の圃場が 100% で防除の有無によらず被害は少なかった (Fig. 2). 区分1に分類されるのは, 初作で発生源から遠い圃

場であることから、4つの区分の中で最も被害発生リスクが低いと考えられる。ただし、区分1については別データによる汎用性の検証はできなかった。また、説明変数である連作圃場までの直線距離のデータ点が粗く、区分2との境界値167mの精度は高くないと考えられた。これらから、作付け前の時点における区分1の防除対策は、0回防除または区分2の対策と同等の1回防除と考えられた。なお、本種について標識再捕試験をした報告では、被害の過小推定を避ける保守的な前提を発生源密度などにおいた上で、移入虫による被害がほぼなくなる隔離距離を352mと推定している (Takeuchi et al., 2019)。発生源からの距離が、この距離より大きければ作付け前の時点で0回防除を選択できる可能性は高いと考えられる。

区分3では検証用データとモデル作成用データとの間で、被害程度の構成は異なり、前者では被害程度低の割合が高かった (Fig. 2)。一方、この区分に分類された生産者圃場では、2回防除で被害程度低の割合は90%を越えた (Fig. 2)。これらから、区分3では2回防除の効果は高いものの、分類される圃場の被害構成が不安定なため、対策の絞り込みは難しいと考えられた。作付け前の時点における区分3に適切な防除対策の候補は、2回防除に加え、区分4と同じ水稲との輪作、区分2と同じ1回防除が挙げられると考えられた。なお、これまで本種に対する薬剤防除試験では、防除適期が薬剤によって異なることや (久保田・横田, 2015)、多発生条件でも1回防除が十分な効果を示した事例 (木村・石谷, 2009; 久保田・横田, 2015; 福田・奥谷, 2018) が報告されている。区分3における防除回数や防除剤の選択方法については、さらに検討が必要と考えられる。

本研究では数多くの生産者圃場の調査をして、作付け前に被害リスクの推定と対策の選定をする方法を作成した。これまで、有効な農薬の散布や水稲との輪作が本種の防除対策として推奨されているが (梶原ら, 1986)、それらを被害発生リスクに基づいて合理的に選択する方法はなかった。生産者圃場の実態調査で蓄積したデータを用い、対策の選択法を表すチャートを直接作成するアプローチは、労力や時間がかかるものの研究結果の生産者圃場への適用や生産者への提示が比較的容易と考えられる。ただし、チャートによる作付け前の推定は、対策の大きな方向付けをするためのものである。推定から防除適期までの期間が長いため、気象条件等によって選択した対策が不適になる可能性も高い。防除適期までの期間に発生予察情報など新しい情報を収集して、作付け前以外の多様な時点で対策を検討することも重要と考えられる。

摘 要

ダイズ害虫マメシクイガを対象に、作付け前の時点で

被害リスクを推定して防除対策を選択する方法を構築するために、2015～2018年に新潟県、長野県の200以上の生産者圃場を調査した。これらの圃場では、本種に対する防除回数は0～2回であった。0回防除圃場データを用いて決定木分析をしたところ、3つの説明変数 (ダイズ連作年数、前年被害粒率、前年ダイズ圃場までの直線距離) によって圃場を4つの区分に分類する決定木が作られた。4つの区分は、含まれる圃場の被害程度が小さい順に区分番号 (区分1～4) をつけることができた。この区分番号の順序は別の0回防除圃場データ (検証用データ) でも違いはなかった。1回または2回防除された生産者圃場を決定木で分類し、区分ごと、防除回数ごとに被害程度を比較したところ、最も被害が大きい区分4以外では、防除回数が増えるにつれて被害程度低の圃場の割合は上昇し90%を越えた。これらの結果から、作成した決定木の区分番号は、各区分の被害発生リスクの順序を示すと考えられた。また、作付け前の被害リスク推定に基づいて防除回数や輪作などの対策を合理的に選択することができると考えられた。

引 用 文 献

- Dent, D. (2000) *Insect Pest Management*. 2nd ed. CABI Publishing, New York. 410 pp.
- Dumbauld, B. R., S. Booth, D. Cheney, A. Suhrbier and H. Beltran (2006) An integrated pest management program for burrowing shrimp control in oyster aquaculture. *Aquaculture* 261: 976–992.
- 福田侑記・奥谷恭代 (2018) 鳥取県におけるマメシクイガの発生消長とジアミド系殺虫剤の防除効果. *植物防疫* 72: 319–322. [Fukuda, Y. and Y. Okutani-Akamatsu (2018) Seasonal prevalence of soybean pod borer *Leguminivora glycinivorella* in Tottori prefecture and effect of diamide insecticides. *Plant Prot.* 72: 319–322.]
- 船迫勝男・伊藤春男・小林 尚・奥 俊夫 (1977) 宮城県におけるダイズ子実害虫相の地域性ならびに虫害粒率の発生予察. *北日本病虫研報* 28: 17–21. [Funabasama, K., H. Ito, T. Kobayashi and T. Oku (1977) Local variation and prediction of insect injuries to soybean seeds in Miyagi prefecture. *Ann. Rept. Plant Prot. North Japan* 28: 17–21.]
- 樋口博也・望月文昭 (2011) マメシクイガのダイズ圃場での発生生態. *植物防疫* 65: 225–227. [Higuchi, H. and F. Mochizuki (2011) Ecology of soybean pod borer, *Leguminivora glycinivorella* (Matsumura) (Lepidoptera: Tortricidae) in soybean fields. *Plant Prot.* 65: 225–227.]
- 平井一男 (1986) マメシクイガの被害粒率と気温および降水量の関係. *応動昆* 30: 196–199. [Hirai, K. (1986) The relationship of air temperature and precipitation to percent damaged beans by the soybean podborer, *Leguminivora glycinivorella* Matsumura (Lepidoptera: Tortricidae). *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 30: 196–199.]
- 廣野元久・林 俊克 (2008) JMPによる多変量データ活用術 2訂版. 海文堂出版, 東京. 331 pp. [Hirono, M. and T. Hayashi (2008) *Method to Utilize Multivariate Data by JMP*. 2nd ed.

- Kaibundo, Tokyo. 331 pp.]
- 北信越水田輪作コンソーシアム (2016) 「北信越地域における高性能機械の汎用利用と機械化一貫体系を基軸とした低コスト・高収益水田輪作の実証」技術成果の紹介。農研機構中央農研北陸研究センター, 上越. 34 pp. [Research Consortium for crop rotation systems in the Hokushin'etsu region (2016) *Introduction of the Technical Achievements of the Research Project, Demonstration of a Low-cost and High-yield Crop Rotation System in the Hokushin'etsu Region Based on General-purpose Use of the Latest Machinery and the Mechanization of All Cultivation Processes*. NARO Hokuriku Research Center, Joetsu. 34 pp.]
- 石本万寿広・岩田大介 (2018) マメシクイガ (チョウ目: ハマキガ科) の発生量に及ぼすダイズ連作の影響. 応動昆 62: 239–247. [Ishimoto, M. and D. Iwata (2018) Effects of the continuous cropping of soybean plants on the occurrence of soybean pod borer, *Leguminivora glycinivorella* (Lepidoptera: Tortricidae). *Jpn. J. Appl. Entomol. Zool.* 62: 239–247.]
- 伊藤健二・水谷信夫・田淵 研・守屋成一 (2006) カメムシ低密度地域のダイズ生産における適切な農薬散布回数. 関東病虫研報 53: 105–110. [Ito, K., N. Mizutani, K. Tabuchi and S. Moriya (2006) Determination of the optimal number of pesticide spray applications in soybean cultivation in a low density stinkbug area. *Ann. Rept. Kanto Pl. Prot. Soc.* 53: 105–110.]
- 梶原敏宏・梅谷献二・浅川 勝 (編) (1986) 作物病虫害ハンドブック. 養賢堂, 東京. 1446 pp. [Kajiwara, T., K. Umeza and M. Asagawa (eds.) (1986) *Handbook of Crop Pests*. Yokendo, Tokyo. 1446 pp.]
- 加進丈二・狐塚慶子・辻 英明・畑中 篤・阿部倫則・安藤慎一郎・町 直樹・佐伯研一 (2010) ダイズほ場におけるフェロモントラップを用いたマメシクイガの発生調査. 北日本病虫研報 61: 133–136. [Kashin, J., K. Kitsunozuka, H. Tsuji, A. Hatanaka, T. Abe, S. Ando, N. Machi and K. Saeki (2010) Monitoring of soybean pod borer *Leguminivora glycinivorella* (Lepidoptera: Tortricidae) using pheromone trap in soybean fields. *Ann. Rept. Plant Prot. North Japan* 61: 133–136.]
- 木村勇司・石谷正博 (2009) 合成ピレスロイド剤によるマメシクイガの効率的防除. 北日本病虫研報 60: 180–185. [Kimura, Y. and M. Ishitani (2009) Effective control of soybean pod borer *Leguminivora glycinivorella* using synthetic pyrethroids. *Ann. Rept. Plant Prot. North Japan* 60: 180–185.]
- 小林 尚・奥 俊夫 (1976) 東北地方におけるダイズ害虫の発生相, 虫害相ならびに虫害発生量の予察に関する研究. 東北農試研報 52: 49–106. [Kobayashi, T. and T. Oku (1976) Studies on the distribution and abundance of the invertebrate soybean pests in Tohoku district, with special reference to the insect pests infesting the seeds. *Bull. Tohoku Natl. Agr. Exp. Stn.* 52: 49–106.]
- Kobayashi, T. and T. Oku (1980) Sampling lepidopterous pod borers on soybean. In *Sampling Methods in Soybean Entomology* (M. Kogan and D. C. Herzog, eds.). Springer, New York, pp. 422–437.
- 久保田真衣・横田 啓 (2015) マメシクイガに対する各種殺虫剤の防除適期. 北日本病虫研報 66: 129–131. [Kubota, M. and H. Yokota (2015) Optimal timing of application of several insecticides for control of soybean pod borer, *Leguminivora glycinivorella*. *Ann. Rept. Plant Prot. North Japan* 66: 129–131.]
- Kuwayama, S. (1928) Notes on *Laspeyresia glycinivorella* Matsumura, the soy bean pod borer. *J. Coll. Agric. Hokkaido Imp. Univ.* 19: 261–281.
- 松村松年 (1898) 大豆の害虫に就て. 動物学雑誌 10: 126–130. [Matsumura, S. (1898) An injurious insect of soy bean. *Zool. Mag.* 10: 126–130.]
- Mauro, G. D., P. A. Cipriotti, G. Santiago and J. L. Rotundo (2018) Environmental and management variables explain soybean yield gap variability in Central Argentina. *Eur. J. Agron.* 99: 186–194.
- Mehra, L. K., C. Cowger, K. Gross and P. S. Ojiambo (2016) Predicting pre-planting risk of *Stagonospora nodorum* blotch in winter wheat using machine learning models. *Front. Plant Sci.* 7: 390.
- Mumford, J. D. and G. A. Norton (1984) Economics of decision making in pest management. *Annu. Rev. Entomol.* 29: 157–174.
- 内藤 篤・正木十二郎 (1962) シロイチモジマダラメイガ及びマメシクイガの分布に関する研究. 農事試験場研究報告 2: 145–228. [Naito, A. and J. Masaki (1962) Studies on the distribution and abundance of the lima bean pod borer, *Etiella zinckenella* Tretschke, and the soy bean pod borer, *Grapholitha glycinivorella* Matsumura. *J. Central Agric. Exp. Stn.* 2: 145–228.]
- 中筋房夫 (2008) 総合的害虫管理学の確立に向けて. 岡山大学農学部学術報告 97: 83–86. [Nakasui, F. (2008) Establishment of science for integrated pest management. *Sci. Rep. Fac. Agric. Okayama Univ.* 97: 83–86.]
- 奥 俊夫 (1993) 昆虫の移動性と害虫管理. 北日本病虫研報 44: 1–5. [Oku, T. (1993) Migratory activity of insects and pest management. *Rept. Plant Prot. North Japan* 44: 1–5.]
- Olatinwo, R. O., J. O. Paz, S. L. Brown, R. C. Kemerait, A. K. Culbreath and G. Hoogenboom (2009) Impact of early spring weather factors on the risk of tomato spotted wilt in peanut. *Pl. Dis.* 93: 783–788.
- 小野 亨 (2009) 宮城県北部における最近のダイズ害虫被害の発生と特徴. 北日本病虫研報 60: 186–188. [Ono, T. (2009) Recent occurrence of soybean seed insect pests in northern area of Miyagi prefecture. *Ann. Rept. Plant Prot. North Japan* 60: 186–188.]
- 小野 亨・笹原剛志・城所 隆・加進丈二・辻 英明・星 信幸 (2011) 宮城県のダイズ主要病害虫の IPM 体系に関する研究 1. 近年の病害虫発生の特徴と防除対策. 宮城古川農試報 9: 35–53. [Ono, T., M. Sasahara, T. Kidokoro, J. Kashin, H. Tsuji and N. Hoshi (2011) Studies of integrated pest management system of the major insect pests and diseases of soybean in Miyagi prefecture 1. Recent occurrence and control of soybean insect pests. *Bull. Miyagi Pref. Furukawa Agric. Exp. Stn.* 9: 35–53.]
- 小野寺鶴将 (2012) 大豆のマメシクイガに対する防除適期の判断手法と被害軽減対策. 農家の友 64: 92–94. [Onodera, K. (2012) Optimal control timing and control method to decrease damage caused by the soybean pod borer. *Noukanotomo* 64: 92–94.]
- Tabata, J., T. Yokosuka, M. Hattori, M. Ohashi, H. Noguchi and H. Sugie

- (2008) Sex attractant pheromone of the limabean pod borer, *Etiella zinckenella* (Treitschke) (Lepidoptera: Pyralidae), in Japan. *Appl. Entomol. Zool.* 43: 351–358.
- 高橋良知・菊池英樹・中村智幸 (2011) 秋田県のダイズにおけるウコンノメイガの要防除水準の設定. 北日本病虫研報 62: 130–133. [Takahashi, Y., H. Kikuchi and T. Nakamura (2011) Control threshold of bean webworm, *Pleuroptya ruralis*, in soybean fields of Akita prefecture. *Ann. Rept. Plant Prot. North Japan* 62: 130–133.]
- 高野俊昭 (1985) 重回帰式によるダイズ主要子実害虫の被害量の予察. 北日本病虫研報 36: 58–59. [Takano, T. (1985) Prediction of major insect pests infecting soybean seeds by the multiple regression equation. *Ann. Rept. Plant Prot. North Japan* 36: 58–59.]
- 竹内博昭 (2018) 湛水条件のマメシクイガ幼虫生存率に及ぼす温度の影響. 北陸病虫研報 67: 5–14. [Takeuchi, H. (2018) Effect of flooding temperature on larval survival of the soybean pod borer *Leguminivora glycinivorella*. *Proc. Assoc. Plant Prot. Hokuriku* 67: 5–14.]
- Takeuchi, H., N. Endo and K. Yamamura (2019) Estimation of dispersal distance of the soybean pod borer *Leguminivora glycinivorella* (Lepidoptera: Tortricidae) by mark-recapture experiments. *Appl. Entomol. Zool.* 54: 285–296.
- Tanaka, A., M. Diagne and K. Saito (2015) Causes of yield stagnation in irrigated lowland rice systems in the Senegal River Valley: Application of dichotomous decision tree analysis. *Field Crop Res.* 176: 99–107.
- 對馬佑介・木村勇司・藤村建彦 (2017) 青森県のマメシクイガ甚発生圃場における発生消長と無人ヘリコプター散布による防除方法の検討. 北日本病虫研報 68: 237–241. [Tsushima, Y., Y. Kimura and T. Fujimura (2017) Seasonal occurrence of soybean pod borer *Leguminivora glycinivorella* and its chemical control by radio-controlled helicopter in soybean fields in Aomori prefecture, Japan. *Ann. Rept. Plant Prot. North Japan* 68: 237–241.]
- Valentine, H. T., C. M. Newton and R. L. Talerico (1976) Compatible systems and decision models for pest management. *Environ. Entomol.* 5: 891–900.
- Woodill, A. J., S. T. Nakamoto, A. M. Kawabata and P. Leung (2017) To spray or not to spray: a decision analysis of coffee berry borer in Hawaii. *Insects* 8: 116.
-