

## 履歴データがない地域の農業における統合管理

前田 康成<sup>1</sup>

1) 北見工業大学・地域未来デザイン工学科

**要約：**農業における利益の最大化について、従来から数多く研究されている。農業における利益を最大化するために輪作（栽培作物の選択）と栽培管理（栽培行動の選択）を1つの統合管理問題として解く従来研究がある。従来研究では各種確率が既知という条件のもとで利益が最大化されている。各種確率を推定するためには十分な履歴データが必要なため、従来方法は履歴データがない地域には適用できない。本研究では、履歴データがない地域のための新しい統合管理方法を提案する。未知確率を伴うマルコフ決定過程を用いて統合管理をモデル化し、近隣地域の履歴データを利用する。提案方法は動的計画法によってベイズ基準のもとで利益を最大化する。近隣地域に関する事後確率に応じた適応的な作物選択と栽培行動選択が数値計算例において確認された。本研究は基礎研究であり、今後の拡張研究が必要である。

**キーワード：**輪作, 栽培管理, 統合管理, マルコフ決定過程, 未知確率

## Integrated Management in Agriculture for Areas without Historical Data

Yasunari MAEDA<sup>1</sup>

1) School of Regional Innovation and Social Design Engineering, Kitami Institute of Technology

**Abstract:** There is a lot of previous research on profit maximization in agriculture. In a previous research crop rotation problem and cultivation management problem are solved as one integrated management problem in order to maximize the profit in agriculture. In the previous research the profit is maximized under the condition that probabilities are known. Sufficient historical data is required to estimate probabilities. The previous method cannot be applied to areas where there is no historical data. In this research, a new integrated management method for areas where there is no historical data is proposed. Integrated management is modeled by Markov decision processes with unknown probabilities. Historical data of neighboring areas is used. The proposed method maximizes profit with reference to a Bayes criterion by dynamic programming. In the numerical calculation results, adaptive crop selection and cultivation action selection according to posterior probabilities for neighboring areas are confirmed. This research is a basic research, and future extended research is required.

**Keywords:** crop rotation, cultivation management, integrated management, Markov decision process, unknown probability

---

Yasunari MAEDA

165 Koen-cho, Kitami-shi, Hokkaido, 090-8507, Japan

Phone: +81-157-26-9328, Fax: +81-157-26-9344, E-mail: maedaya@mail.kitami-it.ac.jp

## 1. はじめに

従来から数理工学等の工学分野において、農業における利益（または収入）や収穫量の最大化／増大に関して数多く検討されている[1]-[13]．例えば、輪作問題[1]-[4]では、各作物（カブ、キャベツ等）を栽培した場合の平均的な収穫量等が既知という条件のもとで、栽培作物の選択問題が検討されている．栽培管理問題[5]-[11]では、栽培作物が選択済という条件のもとで、日々の生育状態に応じて栽培行動（肥料の散布、余分な葉／果実／花の間引き等）を選択する問題が検討されている．また、栽培作物と栽培行動の両方を選択する統合管理問題[12][13]も検討されている．

確率モデルを利用する従来研究も多いが、そのほとんどの研究では各種確率の値が既知と仮定する．しかし、実際の農業では各種確率が未知あるいは十分な精度の推定値がない場合も多い．他方、栽培管理の従来研究[6][10][11]では、未知確率の学習も検討している．従来研究[11]では、対象地域における栽培管理の履歴データがない場合（あるいは不足する場合）に、各種確率を推定するのに十分な量の履歴データが存在する近隣地域の各種確率の推定値を利用する方法を検討している．

従来研究の多くでは、栽培作物の選択（輪作）と栽培管理を別々に検討している．例えば、輪作問題の従来研究では過去の各作物の収穫量の平均値（標準的な収穫量）を利用している．しかし、真に期待利益を最大化するためには、期待利益を最大化する栽培管理を実施したもとで、最適な栽培管理による期待利益に基づいて栽培作物を選択する必要がある．このような考え方に基づいて、従来研究[12][13]では栽培作物の選択（輪作）と栽培管理を統合的に管理する統合管理問題を検討している．しかし、従来研究[12][13]では各種確率の値を既知と仮定しており、未知の場合は未検討である．

そこで、本研究では栽培管理の従来研究[11]同様に、対象地域における履歴データがない場合（あるいは不足する場合）を想定し、各種確率を推定するのに十分な量の履歴データが存在する近隣地域の各種確率の推定値を利用する統合管理問題を検討する．具体的には、栽培管理の従来研究[11]および統合管理の従来研究[12]同様に確率モデルとしてマルコフ決定過程を採用し、ベイズ基準のもとで期待利益を最大化する統合管理（栽培作物と栽培行動の選択）の最適解を算出する方法を提案する．また、提案方法の有効性を検証するための数値計算例を解説する．

本研究と従来研究[11][12]の関係を表1に示す．各種

確率が未知という条件のもとで栽培行動のみ選択する栽培管理の従来研究[11]を、栽培作物と栽培行動の両方を選択するように拡張した研究が本研究である．また、各種確率が既知という条件のもとで栽培作物と栽培行動の両方を選択する統合管理の従来研究[12]を、各種確率に関する条件を未知に拡張した研究が本研究とも解釈できる．

表1. 本研究と従来研究[11][12]の関係

	栽培作物の選択	栽培行動の選択
各種確率既知	従来研究[12]	
各種確率未知		従来研究[11]
	本研究	

統合管理では、栽培作物の選択と栽培管理における栽培行動の選択の両方を実施するため、単独の輪作問題や栽培管理問題よりもより大きな意思決定問題を扱う．しかし、各種確率が既知の統合管理問題[12]では、実際に最適化問題を解く際には、輪作の最適化問題と栽培管理の最適化問題に分割し、栽培管理の最適化問題を単独で解いた最適解を輪作の最適化問題で利用することによって統合管理問題全体での最適解を算出できた．これは、当該年の栽培管理後（収穫後）の次の年の輪作問題での状態が直前の栽培管理とは独立と仮定しているからである．

他方、各種確率が未知の統合管理問題の本研究では、栽培管理における栽培行動の選択によって各種確率を支配するパラメータの事後確率が更新されるため、当該年の栽培管理と次の年の輪作問題での状態（正確にはパラメータの事後確率）は独立ではない．よって、輪作と栽培管理を統合した大きな1つの意思決定問題のまま解く必要がある．この点が、各種確率が既知の統合管理問題の従来研究[12]と本研究の違いの1つである．

なお、本研究は基礎研究の初期段階であり、議論を簡便にするために簡易な問題設定を扱っている．よって、今後の拡張研究として、より現実に近い問題設定を検討する必要がある．

## 2. 準備

本研究で使用する各種記号等の多くは、栽培管理の従来研究[11]や統合管理の従来研究[12]と同じである． $a_{1,i} \in A_1$  は  $i$  番目の作物を示し、 $A_1 = \{a_{1,1}, a_{1,2}, \dots, a_{1,|A_1|}\}$  は作物集合である． $c_i \in C$  は作物の

科を示し、 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_{|C|}\}$ は作物の科の集合である。 $c(a_{1,i}) \in C$ は作物 $a_{1,i}$ が属する科である。 $n(a_{1,i})$ は作物 $a_{1,i}$ の輪作年限を示す。作物 $a_{1,i}$ を栽培した場合、同じ場所 $n(a_{1,i})$ 年以内に同じ科 $c(a_{1,i})$ に属する作物（作物 $a_{1,i}$ も含む）を栽培すると連作障害が起きる。例えば、アブラナ科のカブの輪作年限は1年、キャベツは2年である。

$s_i \in S$ は栽培作物の $i$ 番目の生育状態を示し、 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_{|S|}\}$ は生育状態集合である。生育状態は添え字番号が小さい状態ほど良好な状態とする。 $s_{|S|}$ は全滅状態を示し、全滅状態では栽培行動を選択せずに、栽培管理を終了する。 $a_{2,i} \in A_2$ は $i$ 番目の栽培行動（肥料散布、間引きなど）を示し、 $A_2 = \{a_{2,1}, a_{2,2}, \dots, a_{2,|A_2|}\}$ は栽培行動集合である。作物集合 $A_1$ と栽培行動集合 $A_2$ の添え字1

と2は、選択対象の区別のための添え字であり、それ以外の意味はない。 $b(a_{2,i})$ は栽培行動 $a_{2,i}$ のコスト（万円）を示す。本来は、栽培作物の選択に応じて種子などの仕入コストも発生するが、本研究では従来研究[12]同様に簡便のため全作物で同一（あるいは0（万円））と仮定して省略している。また、本来は、栽培行動の候補である栽培行動集合は時期（発芽時期や着果時期など）によって異なるが、本研究ではこれも従来研究[12]同様に簡便のため時期に依存しない架空の同一集合を仮定している。これらの仮定は非現実的な仮定であるが、仮により現実に近いモデル化に向けて本研究を拡張する場合でも、本研究の提案方法の拡張は軽微な変更で対応可能と考える。

$\theta_i \in \Theta$ は各種確率を支配する $i$ 番目のパラメータを示し、 $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{|\Theta|}\}$ はパラメータ集合である。パラメータ集合 $\Theta$ は、十分な履歴データが存在する $|\Theta|$ 個の近隣地域のパラメータの集合である。本研究では統合管理の対象地域の真のパラメータは未知とするが、対象地域がパラメータ既知の近隣地域とどの程度類似しているかに関する事前知識に相当する、既知パラメータ $\theta_i$ に対する事前確率 $\Pr(\theta_i)$ は既知とする。

$\Pr(s_k | a_{1,j}, \theta_i)$ はパラメータ $\theta_i$ のもとで、作物 $a_{1,j}$ を植えた際の初期の生育状態が $s_k$ である初期生育状態確率を示す。 $\Pr(s_m | s_l, a_{2,k}, a_{1,j}, \theta_i)$ はパラメータ $\theta_i$ のもとで、

作物 $a_{1,j}$ を栽培中の生育状態 $s_l$ において栽培行動 $a_{2,k}$ を実施したもとで、次の生育状態が $s_m$ になる生育状態遷移確率を示す。

このように、本研究では統合管理の対象地域の履歴データは存在しないが、 $|\Theta|$ 個の近隣地域には各種確率（初期生育状態確率と生育状態遷移確率）を十分な精度で推定するのに必要な履歴データが存在している設定を対象とする。上記の各パラメータ $\theta_i$ のもとでの各種確率は各近隣地域の推定された確率に相当する。この設定は各種確率が未知の栽培管理の従来研究[11]と同様である。

作物 $a_{1,i}$ を栽培しているとして、初期生育状態から始めて有限の $T'$ 回目の栽培行動選択後の遷移先の生育状態 $s_j$ に対応した作物 $a_{1,i}$ の収穫量 $h(s_j, a_{1,i})$ （トン）が得ら

れる。作物 $a_{1,i}$ の価格を $p(a_{1,i})$ （万円/トン）とする。

価格は農家が出荷する際の価格で、出荷によって売上 $p(a_{1,i})h(s_j, a_{1,i})$ を得る。

連作障害が該当する作物は当該年の選択肢から除外し、有限の $T$ 年間の輪作（作物選択）を対象とする。栽培作物の選択の際には、過去 $N$ 年間の栽培作物の履歴情報を利用して、連作障害に該当するかどうか判断する。 $N$ は次式で算出される。

$$N = \max_{a_{1,i} \in A_1} n(a_{1,i}). \quad (1)$$

各年の最初に栽培作物を選択すると、栽培作物の初期生育状態が生起する。初期生育状態から始めて $T'$ 回の栽培行動の選択を経て当該年の収穫量を得る。栽培作物の選択、 $T'$ 回の栽培行動の選択で構成される1年間を $T$ 回繰返す。よって、全体（ $T$ 年間）で $T$ 回の栽培作物の選択と $TT'$ 回の栽培行動の選択を実施する。このように $T$ 年間の輪作と栽培管理を統合的に検討すると、 $T(T' + 1)$ 回の意味決定を伴う問題になる。

本研究では、 $T(T' + 1)$ 回の意味決定を伴う問題を従来研究[11][12]同様に動的計画法を利用して解く提案方法を提案するが、提案方法の中で意思決定する際の状況を状態として表現する。状態は意思決定に必要な情報で構成される。なお、栽培管理の際の生育状態と提案方法における状態は異なるものである。栽培管理の際の提案方法中の状態を構成する情報の1つとして生育状態が含まれる。各年の最初の状態は輪作（作物選択）の状態である。作物の選択後、栽培管理を実施し $T'$ 回の栽培行動

の選択後 ( $T'$ 回の状態遷移後)の収穫後に次の年になる。次の年の最初の状態も輪作 (作物選択) の状態である。以下、具体的に説明する。

$X_{t,1}$ は $t$ 年目の最初 (1期) の状態であり、 $t$ 年目の作物を選択する状態である。状態を構成する情報の詳細は後述する。  $Y_{t,1} \in A_1$ は $t$ 年目の最初の状態での決定であり、 $t$ 年目の栽培作物である。  $X_{t,i}$ ,  $2 \leq i \leq T' + 1$ は $t$ 年目の $i$ 期の栽培管理の状態である。なお、厳密には、 $X_{t,T'+1}$ において $t$ 年目の最後の栽培行動を選択後に栽培作物の生育状態がもう1度遷移するため、 $X_{t,T'+2}$ が存在する。しかし、収穫後には状態 $X_{t,T'+2}$ を次の年の最初の状態 (作物選択の状態)  $X_{t+1,1}$ に確定的に読み替える。  $Y_{t,i} \in A_2$ ,  $2 \leq i \leq T' + 1$ は $t$ 年目の栽培管理の状態での決定であり、 $t$ 年目の $i - 1$ 回目の栽培行動の選択結果である。

次に提案方法中の状態の構成情報について詳細に説明する。まず、各年の1期目 (輪作) の状態 $X_{t,1}$ である。

$$X_{t,1} = (X_{t,1,1}, X_{t,1,2}). \quad (2)$$

ただし、 $X_{t,1,1}$ は過去 $N$ 年間の栽培作物の履歴情報である。

$$X_{t,1,1} = (Y_{t-N,1}, Y_{t-N+1,1}, \dots, Y_{t-1,1}). \quad (3)$$

$Y_{t-i,1} \in A_1$ は $i$ 年前に栽培した作物である。

$X_{t,1,2} = \Pr(\cdot | X^{t,1}Y^{t,0})$ は $t$ 年目の1期までの状態遷移と行動選択 (厳密には作物と栽培行動の選択) の履歴  $X^{t,1}Y^{t,0}$ のもとでのパラメータの事後確率分布である。

$$\Pr(\cdot | X^{t,1}Y^{t,0}) = (\Pr(\theta_1 | X^{t,1}Y^{t,0}), \dots, \Pr(\theta_{|\Theta|} | X^{t,1}Y^{t,0})). \quad (4)$$

$\Pr(\theta_i | X^{t,1}Y^{t,0})$ は $t$ 年目の1期までの状態遷移と行動選択の履歴  $X^{t,1}Y^{t,0}$ のもとでのパラメータ $\theta_i$ の事後確率である。ただし、1年目は $\Pr(\theta_i | X^{1,1}Y^{1,0}) = \Pr(\theta_i)$ とする。

履歴 $X^{t,1}Y^{t,0} = X^{t,1}Y^{t-1,T'+1}$ は $t$ 年目の1期までの状態遷移と行動選択の履歴である。  $X^{t,1} =$

$X_{1,1}X_{1,2} \dots X_{1,T'+1}X_{1,T'+2}X_{2,1} \dots X_{t-1,T'+2}X_{t,1}$ である。例えば、系列中の $i$ 年目の $X_{i,T'+1}$ では $i$ 年目の最後の栽培行動

を選択して $X_{i,T'+2}$ に遷移後に収穫を得る。  $X_{i,T'+2}$ では行動選択はなく、確定的に次の年の $X_{i+1,1}$ になる。  $Y^{t,0} = Y^{t-1,T'+1} = Y_{1,1}Y_{1,2} \dots Y_{1,T'+1}Y_{2,1} \dots Y_{t-1,T'+1}$ である。各年の行動選択は最初の作物選択とその後の $T'$ 回の栽培行動選択なので、 $i$ 年目のみ抽出すると $Y_{i,1}Y_{i,2} \dots Y_{i,T'+1}$ である。

次に、各年の $i$ 期目、 $2 \leq i \leq T' + 1$  (栽培管理) の状態 $X_{t,i}$ である。

$$X_{t,i} = (X_{t,i,1}, X_{t,i,2}, X_{t,i,3}, X_{t,i,4}). \quad (5)$$

ただし、 $X_{t,i,1}$ は過去 $N$ 年間の栽培作物の履歴情報であり、 $X_{t,i,1} = X_{t,1,1}$ である。

$$X_{t,i,1} = (Y_{t-N,1}, Y_{t-N+1,1}, \dots, Y_{t-1,1}). \quad (6)$$

$X_{t,i,2} = \Pr(\cdot | X^{t,i}Y^{t,i-1})$ は $t$ 年目の $i$ 期までの状態遷移と行動選択 (厳密には作物と栽培行動の選択) の履歴  $X^{t,i}Y^{t,i-1}$ のもとでのパラメータの事後確率分布である。

$$\Pr(\cdot | X^{t,i}Y^{t,i-1}) = (\Pr(\theta_1 | X^{t,i}Y^{t,i-1}), \dots, \Pr(\theta_{|\Theta|} | X^{t,i}Y^{t,i-1})). \quad (7)$$

$\Pr(\theta_j | X^{t,i}Y^{t,i-1})$ は $t$ 年目の $i$ 期までの状態遷移と行動選択の履歴  $X^{t,i}Y^{t,i-1}$ のもとでのパラメータ $\theta_j$ の事後確率である。  $X^{t,i}Y^{t,i-1}$ は $t$ 年目の $i$ 期までの状態遷移と行動選択の履歴である。

$$X^{t,i} = X_{1,1}X_{1,2} \dots X_{1,T'+1}X_{1,T'+2}X_{2,1} \dots X_{t-1,T'+2}X_{t,1} \dots X_{t,i}. \quad (8)$$

$$Y^{t,i-1} = Y_{1,1}Y_{1,2} \dots Y_{1,T'+1}Y_{2,1} \dots Y_{t-1,T'+1}Y_{t,1} \dots Y_{t,i-1}. \quad (9)$$

$X_{t,i,3} = Y_{t,1} \in A_1$ は $t$ 年目の栽培作物、 $X_{t,i,4} \in S$ は $t$ 年目の $i$ 期の生育状態である。

2年目以降 ( $t \geq 2$ ) の1期の事後確率  $\Pr(\theta_i | X^{t,1}Y^{t,0})$  は次式で算出 ( $\Pr(\theta_i | X^{t-1,T'+1}Y^{t-1,T'})$  から更新) される。

$$\Pr(\theta_i | X^{t,1}Y^{t,0}) = \Pr(\theta_i | X^{t-1,T'+2}Y^{t-1,T'+1}) = \frac{\Pr(\theta_i | X^{t-1,T'+1}Y^{t-1,T'})_{B_1}}{\sum_{\theta_k \in \Theta} \Pr(\theta_k | X^{t-1,T'+1}Y^{t-1,T'})_{B_2}}. \quad (10)$$

ただし、

$$B_1 = \Pr(X_{t-1,T'+2,4} | X_{t-1,T'+1,4}, Y_{t-1,T'+1}, Y_{t-1,1}, \theta_i). \quad (11)$$

$$B_2 = \Pr(X_{t-1,T'+2,4} | X_{t-1,T'+1,4}, Y_{t-1,T'+1}, Y_{t-1,1}, \theta_k). \quad (12)$$

上記は  $t-1$  年目の  $T'+1$  期の栽培行動選択  $Y_{t-1,T'+1}$  ( $t-1$  年目の最後の行動選択) によって生育状態  $X_{t-1,T'+1,4}$  から生育状態  $X_{t-1,T'+2,4}$  へ遷移したもとの事後確率の更新である。更新後の事後確率は  $t-1$  年目の最後の事後確率  $\Pr(\theta_i | X^{t-1,T'+2}Y^{t-1,T'+1})$  であり、かつ  $t$  年目の最初の (作物選択前の) 事後確率  $\Pr(\theta_i | X^{t,1}Y^{t,0})$  である。

$t$  年目の2期の事後確率  $\Pr(\theta_i | X^{t,2}Y^{t,1})$  は次式で算出 ( $\Pr(\theta_i | X^{t,1}Y^{t,0})$  から更新) される。

$$\Pr(\theta_i | X^{t,2}Y^{t,1}) = \frac{\Pr(\theta_i | X^{t,1}Y^{t,0}) \Pr(X_{t,2,4} | Y_{t,1}, \theta_i)}{\sum_{\theta_k \in \Theta} \Pr(\theta_k | X^{t,1}Y^{t,0}) \Pr(X_{t,2,4} | Y_{t,1}, \theta_k)}. \quad (13)$$

上記は  $t$  年目の1期の作物選択  $Y_{t,1}$  によって初期の生育状態  $X_{t,2,4}$  が生じたもとの事後確率の更新である。更新後の事後確率  $\Pr(\theta_i | X^{t,2}Y^{t,1})$  は  $t$  年目の2期の (栽培行動選択前の) 事後確率である。

$t$  年目の  $i$  期,  $3 \leq i \leq T'+1$  の事後確率

$\Pr(\theta_j | X^{t,i}Y^{t,i-1})$  は次式で算出 ( $\Pr(\theta_j | X^{t,i-1}Y^{t,i-2})$  から更新) される。

$$\Pr(\theta_j | X^{t,i}Y^{t,i-1}) = \frac{\Pr(\theta_j | X^{t,i-1}Y^{t,i-2})_{B_1}}{\sum_{\theta_k \in \Theta} \Pr(\theta_k | X^{t,i-1}Y^{t,i-2})_{B_2}}. \quad (14)$$

ただし、

$$B_1 = \Pr(X_{t,i,4} | X_{t,i-1,4}, Y_{t,i-1}, Y_{t,1}, \theta_j). \quad (15)$$

$$B_2 = \Pr(X_{t,i,4} | X_{t,i-1,4}, Y_{t,i-1}, Y_{t,1}, \theta_k). \quad (16)$$

上記は  $t$  年目の  $i-1$  期の栽培行動選択  $Y_{t,i-1}$  によって生育状態  $X_{t,i-1,4}$  から生育状態  $X_{t,i,4}$  へ遷移したもとの事後確率の更新である。更新後の事後確率  $\Pr(\theta_j | X^{t,i}Y^{t,i-1})$  は  $t$  年目の  $i$  期の (栽培行動選択前の) 事後確率である。

### 3. 提案方法

以下の提案方法では、動的計画法によって、最初に  $T$  年目の  $T'+1$  期の栽培行動を選択し、1年目の1期まで遡りながら処理する。以下では、提案方法中の処理の順番ではなく、農業における時間経過に従って  $t$  年目,  $1 \leq t \leq T$  の1期の意思決定 (栽培作物の選択),  $t$  年目の  $i$  期,  $2 \leq i \leq T'$  の意思決定 (栽培管理の最後以外 (収穫期を除く) の栽培行動選択),  $t$  年目の  $T'+1$  期の意思決定 (栽培管理の最後の栽培行動選択 (収穫期)) の順に説明する。

$t$  年目,  $1 \leq t \leq T$  の1期の意思決定 (栽培作物の選択) は次式で算出される。

$$v_1(X_{t,1}, t, 1) = \max_{Y_{t,1} \in A_1(X_{t,1})} \sum_{s_j \in S} \overline{\Pr}(s_j | Y_{t,1}, X^{t,1}Y^{t,0}) v_2(X_{t,2}, t, 2). \quad (17)$$

ただし、 $\overline{\Pr}(s_j | Y_{t,1}, X^{t,1}Y^{t,0})$  は履歴  $X^{t,1}Y^{t,0}$  のもとの栽培作物  $Y_{t,1}$  の初期生育状態確率  $\Pr(s_j | Y_{t,1}, \theta_i)$  の事後確率による期待値である。

$$\overline{\Pr}(s_j | Y_{t,1}, X^{t,1}Y^{t,0}) = \sum_{\theta_k \in \Theta} \Pr(\theta_k | X^{t,1}Y^{t,0}) \Pr(s_j | Y_{t,1}, \theta_k). \quad (18)$$

$A_1(X_{t,1})$  は栽培作物の履歴の輪作年限を考慮した状態  $X_{t,1}$  で選択可能な作物集合である。

$$A_1(X_{t,1}) = \{a_{1,l} | \forall k, 1 \leq k \leq N, c(a_{1,l}) \neq c(Y_{t-k,1}) \vee n(Y_{t-k,1}) < k\}. \quad (19)$$

式(17)の $v_1(X_{t,1}, t, 1)$ は $t$ 年目、 $1 \leq t \leq T$ の1期以降の期待利益（総和）の最大値である。式(17)の右辺の最大値に対応する作物が最適な栽培作物である。式(17)の右辺の $v_2(X_{t,2}, t, 2)$ は $t$ 年目の2期以降の期待利益（総和）の最大値であり、次に説明する。

$t$ 年目の $i$ 期、 $2 \leq i \leq T'$ の意思決定（栽培管理の最後（収穫期）以外の栽培行動選択）は次式で算出される。

$$\begin{aligned} & v_2(X_{t,i}, t, i) \\ &= \max_{Y_{t,i} \in A_2} \sum_{s_j \in S} \overline{\Pr}(s_j | X_{t,i,4}, Y_{t,i}, Y_{t,1}, X^{t,i} Y^{t,i-1}) \\ & \quad \times v_2(X_{t,i+1}, t, i+1) - b(Y_{t,i}). \quad (20) \end{aligned}$$

ただし、 $\overline{\Pr}(s_j | X_{t,i,4}, Y_{t,i}, Y_{t,1}, X^{t,i} Y^{t,i-1})$ は履歴 $X^{t,i} Y^{t,i-1}$ のもとでの、生育状態遷移確率 $\Pr(s_j | X_{t,i,4}, Y_{t,i}, Y_{t,1}, \theta_k)$ の事後確率による期待値である。

$$\begin{aligned} \overline{\Pr}(s_j | X_{t,i,4}, Y_{t,i}, Y_{t,1}, X^{t,i} Y^{t,i-1}) &= \sum_{\theta_k \in \Theta} \\ & \Pr(\theta_k | X^{t,i} Y^{t,i-1}) \Pr(s_j | X_{t,i,4}, Y_{t,i}, Y_{t,1}, \theta_k). \quad (21) \end{aligned}$$

$X_{t,i,3} = s_{|S|}$ の場合（ $i$ 期の生育状態が全滅状態の場合）には、栽培行動は選択せずに $v_2(X_{t,i}, t, i) = v_1(X_{t+1,1}, t+1, 1)$ である（事後確率は更新されずに $t+1$ 年目の1期に進む）。式(20)の $v_2(X_{t,i}, t, i)$ は $t$ 年目の $i$ 期、 $2 \leq i \leq T'$ 以降の期待利益（総和）の最大値である。式(20)の右辺の最大値に対応する行動が最適な栽培行動である。

$t$ 年目の $T'+1$ 期の意思決定（栽培管理の最後の栽培行動選択（収穫期））は次式で算出される。

$$\begin{aligned} & v_2(X_{t,T'+1}, t, T'+1) = \max_{Y_{t,T'+1} \in A_2} \sum_{s_j \in S} \\ & \quad \overline{\Pr}(s_j | X_{t,T'+1,4}, Y_{t,T'+1}, Y_{t,1}, X^{t,T'+1} Y^{t,T'}) \\ & \quad \times (p(Y_{t,1})h(s_j, Y_{t,1}) + v_1(X_{t+1,1}, t+1, 1)) \\ & \quad - b(Y_{t,T'+1}). \quad (22) \end{aligned}$$

ただし、 $\overline{\Pr}(s_j | X_{t,T'+1,4}, Y_{t,T'+1}, Y_{t,1}, X^{t,T'+1} Y^{t,T'})$ は履歴

$X^{t,T'+1} Y^{t,T'}$ のもとでの、生育状態遷移確率 $\Pr(s_j | X_{t,T'+1,4}, Y_{t,T'+1}, Y_{t,1}, \theta_i)$ の事後確率による期待値である。

$$\begin{aligned} & \overline{\Pr}(s_j | X_{t,T'+1,4}, Y_{t,T'+1}, Y_{t,1}, X^{t,T'+1} Y^{t,T'}) \\ &= \sum_{\theta_k \in \Theta} \Pr(\theta_k | X^{t,T'+1} Y^{t,T'}) \\ & \quad \times \Pr(s_j | X_{t,T'+1,4}, Y_{t,T'+1}, Y_{t,1}, \theta_k). \quad (23) \end{aligned}$$

$v_1(X_{T+1,1}, T+1, 1) = 0$ である。 $X_{t,T'+1,4} = s_{|S|}$ （ $T'+1$ 期の生育状態が全滅状態）の場合には、栽培行動は選択せずに $v_2(X_{t,T'+1}, t, T'+1) = v_1(X_{t+1,1}, t+1, 1)$ である（事後確率は更新されずに $t+1$ 年目の1期に進む）。式(22)の $v_2(X_{t,T'+1}, t, T'+1)$ は $t$ 年目の $T'+1$ 期以降の期待利益（総和）の最大値である。式(22)の右辺の最大値に対応する行動が最適な栽培行動である。

## 4. 計算例

提案方法の検証のため、数値計算例を示す。

### 4.1 設定

以下に各種設定を示す。なお、以下の各種設定は著者による架空の設定である。より厳密な検証には実データが必要だが、実データによる検証は今後の課題である。将来的に農家／農協／農業試験場などの協力が得られれば実データの入手も可能である。作物数 $|A_1| = 3$ 、作物の科の数 $|C| = 3$ 、生育状態数 $|S| = 4$ 、年数（栽培作物の選択回数） $T = 3$ 、期数（栽培行動の選択回数） $T' = 3$ 、栽培行動数 $|A_2| = 3$ 、既知パラメータ数（履歴データが十分ある近隣地域の数） $|\Theta| = 2$ とする。既知パラメータ $\theta_i$ に対する事前確率 $\Pr(\theta_i)$ は等確率とする。

作物 $a_{1,i}$ の輪作年限 $n(a_{1,i})$ 、科 $c(a_{1,i})$ を表2、栽培行動 $a_{2,i}$ のコスト $b(a_{2,i})$ を表3、生育状態 $s_i$ での作物 $a_{1,j}$ の収穫量 $h(s_i, a_{1,j})$ を表4、作物 $a_{1,i}$ の価格 $p(a_{1,i})$ （万円／トン）を表5に示す。簡便のため、収穫量 $h(s_i, a_{1,j})$ は全作物で共通の設定にした。今回の設定では、式(19)で1年前（前年）の作物を考慮するが、1年目に関しては簡便のため前年に何も栽培していないと仮定して、すべての作物を選択可能な条件のもとで数値計算を実施した。

表2. 作物 $a_{1,i}$ の輪作年限 $n(a_{1,i})$ 、科 $c(a_{1,i})$

	$n(a_{1,i})$	$c(a_{1,i})$
$a_{1,1}$	0年	$c_1$
$a_{1,2}$	1年	$c_2$
$a_{1,3}$	1年	$c_3$

表3. 栽培行動 $a_{2,i}$ のコスト $b(a_{2,i})$

	$a_{2,1}$	$a_{2,2}$	$a_{2,3}$
$b(a_{2,i})$	70万円	50万円	30万円

表4. 生育状態 $s_i$ での作物 $a_{1,j}$ の収穫量 $h(s_i, a_{1,j})$

$h(s_1, a_{1,j})$	$h(s_2, a_{1,j})$	$h(s_3, a_{1,j})$	$h(s_4, a_{1,j})$
120トン	80トン	40トン	0トン

表5. 作物 $a_{1,i}$ の価格 $p(a_{1,i})$  (万円/トン)

	$a_{1,1}$	$a_{1,2}$	$a_{1,3}$
$p(a_{1,i})$	10.0	9.5	10.5

生育状態遷移確率 $\Pr(s_m | s_l, a_{2,k}, a_{1,j}, \theta_i)$ の設定に際しては、簡便のため、パターン1とパターン2の2パターンの遷移確率を用意して、作物とパラメータの組にどちらかのパターンを対応付けるようにした。対応付けを表6に示す。各パターンの遷移確率を表7と表8に示す。初期生育状態確率 $\Pr(s_k | a_{1,j}, \theta_i)$ を表9に示す。

表6. 作物、パラメータとパターンの対応

	$a_{1,1}$	$a_{1,2}$	$a_{1,3}$
$\theta_1$	パターン1	パターン2	パターン2
$\theta_2$	パターン2	パターン1	パターン1

表7.  $\Pr(s_k | s_j, a_{2,i}, a_{1,*}, \theta_*)$ のパターン1

$i$	$j$	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$	$k = 4$
1	1	0.97	0.02	0.008	0.002
1	2	0.6	0.35	0.04	0.01
1	3	0.2	0.6	0.15	0.05
2	1	0.8	0.15	0.04	0.01
2	2	0.25	0.55	0.15	0.05
2	3	0.1	0.4	0.4	0.1
3	1	0.6	0.3	0.07	0.03
3	2	0.05	0.55	0.3	0.1
3	3	0.01	0.09	0.7	0.2

表8.  $\Pr(s_k | s_j, a_{2,i}, a_{1,*}, \theta_*)$ のパターン2

$i$	$j$	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$	$k = 4$
1	1	0.8	0.15	0.04	0.01
1	2	0.25	0.55	0.15	0.05
1	3	0.1	0.4	0.4	0.1
2	1	0.7	0.22	0.06	0.02
2	2	0.15	0.55	0.24	0.06
2	3	0.05	0.25	0.55	0.15
3	1	0.6	0.3	0.07	0.03
3	2	0.05	0.55	0.3	0.1
3	3	0.01	0.09	0.7	0.2

表9. 初期生育状態確率 $\Pr(s_k | a_{1,j}, \theta_i)$

$i$	$j$	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$	$k = 4$
1	1	0.4	0.3	0.25	0.05
1	2	0.2	0.2	0.4	0.2
1	3	0.2	0.2	0.4	0.2
2	1	0.2	0.2	0.4	0.2
2	2	0.4	0.3	0.25	0.05
2	3	0.4	0.3	0.25	0.05

上記設定の各種確率の特徴を説明する。生育状態遷移確率のパターン1とパターン2では、パターン1の方がパターン2よりも高い確率（または同じ確率）で良好な生育状態に遷移する。同じ作物に対してパターン1の地域とパターン2の地域があれば、パターン1の地域の方が当該作物の栽培により適した地域と解釈できる。表6の作物、パラメータとパターンの対応付けより、作物 $a_{1,1}$ により適した地域のパラメータが $\theta_1$ 、作物 $a_{1,2}$ と作物 $a_{1,3}$ により適した地域のパラメータが $\theta_2$ である。表9の初期生育状態確率についても、同様に作物 $a_{1,1}$ についてはパラメータ $\theta_1$ のもとで良好な生育状態の初期生育状態確率が高く、作物 $a_{1,2}$ と作物 $a_{1,3}$ についてはパラメータ $\theta_2$ のもとで良好な生育状態の初期生育状態確率が高い設定である。

上記のすべての設定をふまえ、輪作（作物選択）のみに注目すると、パラメータ $\theta_1$ が該当する近隣地域では作物 $a_{1,1}$ を毎年栽培するのが最適、パラメータ $\theta_2$ が該当する近隣地域では作物 $a_{1,2}$ と作物 $a_{1,3}$ を交互に栽培するのが最適となる設定である。

前述のとおり、上記の各種設定は著者による架空の設定である。上記設定では、異なる作物の生育状態遷移確率が完全に一致することがある設定（例えば、パラメー

タ $\theta_2$ のもとでの作物 $a_{1,2}$ と作物 $a_{1,3}$ ）になっているが、これも実データに基づく設定ではない。パターン1とパターン2の顕著な差も同様である。数値計算例の各種設定の特徴（性質）を理解し易いように設定した、簡便な架空の例である。よって、実際の農業の現場において統計データを収集した場合に、どのような特徴（性質）が実際に把握できるかも含め、今後の課題である。

4.2 数値計算結果

4.1節の設定のもとでの計算結果を紹介する。T = 3年間の期待利益を表10に示す。表10の提案方法は3章の式(17)による $v_1(X_{1,1}, 1, 1)$ の値である。パラメータ $\theta_i$ 既知は、真のパラメータが $\theta_i$ かつ既知の場合のT = 3年間の期待利益の最大値である。また、逆パラメータ $\theta_i$ は、真のパラメータが $\theta_i$ のもとで、もう片方のパラメータ $\theta_j$ （例えば $i = 1$ なら $j = 2$ ）のもとでの最適な意思決定を実施した場合のT = 3年間の利益の期待値である。

表10. 期待利益

	期待利益 (万円)
提案方法	817.77
パラメータ $\theta_1$ 既知	1063.31
パラメータ $\theta_2$ 既知	1111.25
逆パラメータ $\theta_1$	194.02
逆パラメータ $\theta_2$	302.94

各種確率が未知の提案方法において、事前確率が等確率の今回の計算例ではパラメータ既知の場合の両パラメータに対して7割以上の期待利益となっている。他のパラメータのもとで最適な行動選択を実施する逆パラメータ $\theta_i$ では極端に期待利益が低くなっており、提案方法の期待利益と比較すると、提案方法では事後確率の更新によって適切に学習することにより、パラメータ既知の場合に近い期待利益となっていることが確認できる。

栽培作物の選択結果の例の一部を表11に示す。表11中の‘前’は前年の作物番号( $a_{1,i}$ の*i*)、事後1はパラメータ $\theta_1$ の事後確率(1から事後1の値を引いた値がパラメータ $\theta_2$ の事後確率)、『提』は提案方法による作物番号( $a_{1,i}$ の*i*)、既知*i*はパラメータ $\theta_i$ 既知のもとでの最適な作物番号である。事後確率は小数点以下第3位を四捨五入した。

No. 1が1年目であり、事後確率は事前確率そのもので0.5である。提案方法では、パラメータ $\theta_2$ のもとでの最適作物と同じ作物 $a_{1,3}$ を選択している。2年目以降の提案方法では、基本的に事後確率の大きなパラメータのもとでの最適作物と同じ作物を選択している。大きい側の事後確率は0.70から0.90に及ぶが、パラメータのもとでの最適解との一致は学習が進んだ結果と解釈できる。ただし、事後確率が等確率になった場合には、3年目の例では1年目同様にパラメータ $\theta_2$ のもとでの最適作物を提案方法でも選択しているが、2年目の例ではパラメータ $\theta_1$ のもとでの最適作物を選択していた。事後確率が等確率であり、学習は十分ではない状況（履歴）のため、最適解と一致した方のパラメータの地域が対象地域と何らかの基準に近いと判断される状況ではない。

表11. t年目の栽培作物 $Y_{t,1}$

No.	t	前	事後1	提	既知1	既知2
1	1	—	0.5	3	1	3
2	2	3	0.90	1	1	2
3			0.50	1		
4			0.30	2		
5	3	1	0.80	1	1	3
6			0.20	3		
7	3	2	0.80	1	1	3
8			0.50	3		
9			0.20	3		

次に栽培管理の栽培行動選択（各年の2期からT' + 1期の選択）の一部を表12と表13に示す。表12と表13ともに‘前’は前年の作物番号( $a_{1,j}$ の*j*)、‘現’は当該年(t年目)の作物番号( $a_{1,j}$ の*j*)、‘状’は当該期(t年目*i*期)の生育状態番号( $s_j$ の*j*)、事1はパラメータ $\theta_1$ の事後確率(1から事1の値を引いた値がパラメータ $\theta_2$ の事後確率)、『提』は提案方法による栽培行動番号( $a_{2,j}$ の*j*)、既知*j*はパラメータ $\theta_j$ 既知のもとでの最適な栽培行動番号である。事後確率は小数点以下第3位を四捨五入した。

表12の提案方法では、事後確率の大きなパラメータのもとでの最適行動と同じ行動を選択している。大きい側の事後確率は0.81から0.90に及ぶが、パラメータのもとでの最適解との一致は学習が進んだ結果と解釈できる。表12のこの結果（傾向）は、各種確率が未知の栽培管理



のみを検討した従来研究[11]で報告されている数値計算例と同様である。なお、本研究では統合管理として栽培作物の選択（輪作）も実施しているため、表12で確認できる学習結果は当該期までの栽培作物の選択と栽培行動の選択の両方の履歴による学習結果である。他方、従来研究[11]で報告されている結果は栽培行動の選択履歴のみによる学習結果である。

表12.  $t$ 年目 $i$ 期の栽培行動 $Y_{t,i}$  (その1)

No.	$t$	$i$	前	現	状	事1	提	既1	既2
1	1	4	-	3	1	0.81	3	3	1
2						0.19	1		
3	3	2	1	1	3	0.90	2	2	3
4						0.10	3		
5	3	2	2	3	3	0.90	3	3	2
6						0.10	2		
7	3	3	1	1	2	0.90	1	1	3
8						0.10	3		
9	3	3	1	1	3	0.90	1	1	3
10						0.10	3		
11	3	3	2	3	2	0.90	3	3	1
12						0.10	1		
13	3	4	1	1	1	0.90	1	1	3
14						0.10	3		
15	3	4	2	3	1	0.90	3	3	1
16						0.10	1		

表13では、表の上半分で2年目3期の例（正確には5例）、下半分で2年目4期の例（正確には5例）を紹介している。上の例ではパラメータ $\theta_1$ の事後確率が0.95まで大きくなると、提案方法によるベイズ最適な解がパラメータ $\theta_1$ 既知の場合の最適解と一致していない。他方、パラメータ $\theta_2$ の事後確率が0.30（事1が0.70の例）と小さい状況でも提案方法のベイズ最適な解はパラメータ $\theta_2$ 既知の場合の最適解と一致している。また、表13の下半分の例では、逆にパラメータ $\theta_2$ の事後確率が0.95まで大きくなると、提案方法によるベイズ最適な解がパラメータ $\theta_2$ 既知の場合の最適解と一致していない。

仮に対象地域の真のパラメータが $\theta_1$ か $\theta_2$ のどちらかである前提のもとでパラメータ推定をするのであれば、

事後確率が大きい方のパラメータを推定結果とすることにより、推定を間違える確率をベイズ基準のもとで最小化できる。しかし、本研究のような期待利益の最大化が目的の意思決定問題では、必ずしもベイズ最適な解と事後確率が大きなパラメータのもとでの最適解が一致するわけではないことが表13の結果から確認できる。

各種確率が未知の栽培管理のみを検討した従来研究[11]でも表12同様の結果（傾向）は報告されていたが、表13のような結果は従来研究[11]では報告されていない。本研究では統合管理を対象としているが、栽培管理部分のみに関しても従来研究[11]に対して追加の結果（表13）が得られている。

表13.  $t$ 年目 $i$ 期の栽培行動 $Y_{t,i}$  (その2)

$t$	$i$	前	現	状	事1	提	既1	既2
2	3	3	2	3	0.95	3	3	1
					0.80	2		
					0.70	1		
					0.30	1		
					0.20	1		
2	4	3	2	1	0.95	3	3	1
					0.80	3		
					0.70	3		
					0.20	2		
					0.05	1		

## 5. 考察と今後の課題

### 5.1 考察

本研究では、栽培作物の選択（輪作）と栽培行動の選択（栽培管理）を統合的に扱う農業の統合管理において、各種確率が未知である（対象地域の履歴データがない）が近隣地域の各種確率（パラメータ）が既知（各種確率を推定する十分な履歴データが存在）であるような地域を対象として検討した。具体的には、従来研究同様に統合管理をマルコフ決定過程によってモデル化し、ベイズ統計学に基づいて近隣地域に対する事後確率を更新することによって、ベイズ基準のもとで期待利益を最大化する統合管理方法を提案した。

従来から各種確率が未知の場合の栽培管理について研究[11]されており、本研究の数値計算例でも事後確率の大小に応じて事後確率が大きい近隣地域における最適な栽培行動（当該近隣地域に対応するパラメータのもとで最適な栽培行動）と提案方法におけるベイズ最適な

栽培行動が一致する例（表12）が従来研究[11]同様に確認された。本研究は確率未知の栽培管理の従来研究に輪作を追加したと解釈できるが、輪作に関しても同様に事後確率の大きい近隣地域における最適な作物（当該近隣地域に対応するパラメータのもとで最適な作物）と提案方法におけるベイズ最適な作物が一致する例（表11）が確認された。

また、本研究の栽培管理の数値計算例では、単純に事後確率が大きい方の近隣地域の最適行動と提案方法のベイズ最適な行動が一致するのではなく、事後確率が0.9程度以上でようやく当該近隣地域の最適行動と提案方法が一致し、事後確率が0.8から0.7程度では他の近隣地域（事後確率が小さな近隣地域）における最適行動が提案方法の最適解と一致したり、あるいはいずれの近隣地域における最適行動とも異なる行動が提案方法の最適解となる例（表13）も確認された。

一般的に、本研究のような未知情報（本研究では各種確率を支配するパラメータ）を伴う意思決定問題に対するよく見かける対応方法として、2つの方法が挙げられる。1つ目は、本研究のように何らかの観測データ（本研究では行動選択と状態遷移の履歴データ）を用いて未知情報について学習し、未知情報に関する事後確率を用いて最適化したい期待値を最適化（本研究では期待利益を最大化）する対応方法である。この1つ目の方法は最適な方法であるが、事後確率による期待値計算が複雑なため、最適ではないが簡易な2つ目の対応方法が好まれることもある。

2つ目の方法では、未知情報について推定誤り率が最小になるように推定結果を算出後（本研究の問題設定であれば、事後確率が最大の1つのパラメータを推定結果として算出後）、推定結果を真のものと仮定した場合の最適な意思決定を実施する。2つ目の対応方法の未知情報の推定結果は、誤り率最小だが、真のものである保証はない。よって、その推定結果を真のものと仮定した場合の意思決定に関しては、当該意思決定問題全体での最適性は保証されない。このことが、上記の表13の結果からも確認できる。解きたい問題の目的が未知情報の推定そのものであれば、推定誤り率を最小にする推定は好ましいが、目的が本研究のように別の最適化の場合には気を付ける必要がある。

提案方法によって、ベイズ最適という理論的保証がある栽培作物と栽培行動の選択が可能である。しかし、提案方法には実際の農業における作物や栽培行動の選択以外にも用途がある。提案方法では最適な意思決定（作

物、行動）とともに期待利益の最大値も算出される。算出される意思決定は最適解であり、期待利益の最大値は対象とする農業の統合管理で得ることの出来る期待利益の理論的境界に相当する。つまり、各種確率が未知という条件のもとでは、どのような方法であっても、提案方法が算出する期待利益よりも大きな期待利益を得ることはできない。

本研究に限らず最適化問題を解く方法では、問題の規模が大きくなると計算時間が大きくなり、実用には適さない場合も多い。これは農業に関しても当てはまることが想像される。そのような場合には、実用化に向けて近似解や経験則の検討が必要になる。本研究の提案方法で算出される期待利益は超えることができない理論的境界であるので、小規模な問題に関して近似解や経験則の精度／性能を評価する際の比較対象として利用可能である。仮に理論的境界が不明の場合には、近似解法や経験則を適切に評価できず、近似解法や経験則の改善をどの段階で終えるべきかの判断が難しいこともある。よって、本研究の提案方法自体の実用化が計算時間の面で適切ではない場合でも、近似解法や経験則の評価に必要な理論的境界を算出する方法として有用であると考えられる。

## 5.2 今後の課題

本研究は基礎研究であり、簡便のため簡易な問題設定を対象とし、数値計算例におけるデータも著者の主観に基づく設定である。今後の課題として、より現実に近い問題設定のもとでの検討や、実データを用いた提案方法の検証が必要である。より現実に近い問題設定を検討対象とすると、本研究よりも問題の規模が大きくなるため、本研究のような最適化法（動的計画法）を利用する提案方法の計算時間も大きくなる。よって、実用化を目指すには前節でも述べたように近似解法や経験則の模索も必要である。

例えば、本研究では対象となる $T$ 年間全体での最適化問題を対象としたが、より短い期間の最適化問題を1年ごとに繰返し解くような近似解法も考えられる。仮に本来の対象が5年間で、それを2年間の最適化問題の繰返しで近似する場合には、最初に1年目と2年目の2年間の問題を解いた後に実際の統合管理を1年間（1年目分）実施する。2年目の最初には1年目の履歴データを利用（1年目の履歴データのもとでの事後確率を事前確率として利用）したもとの、2年目と3年目の2年間の問題を解いた後に2年目分の統合管理を実施し、以後もこれを繰返す。本研究の提案方法のような履歴に基づく事後確率の更新

を伴う最適化問題の計算時間（計算量）は期間長の指数オーダーになるので、全体の期間長が長い場合には短い期間長の問題を繰返し解く近似解法によって計算時間の短縮が可能と考える。

本研究では、履歴データのない対象地域の農業の統合管理に対応するために、十分な履歴データがある近隣地域の推定済のパラメータを利用する統合管理方法を検討した。具体的にはベイズ統計学に基づいて近隣地域のパラメータに対する事後確率を計算／更新することによって、対象地域と近隣地域の一種の類似度を利用した期待利益の最大化問題を検討した。

他方、近年の農業では温暖化の影響によって、当該地域で従来から良好に栽培してきた作物が従来のように良好に栽培できなくなる事例が報告されている[14]。また、温暖化対策として従来は気候が異なる他の地域で適切とされていた作物を新たに栽培する事例も報告されている。このような温暖化対策にも、本研究の考え方が適用できる可能性がある。本研究では対象地域と近隣地域の類似度（事後確率）を扱ったが、温暖化の影響を受けている対象地域と従来は気候が異なると考えられていた遠方地域の類似度を扱うことによって、新たに適切な作物を発見できる可能性があると考えられる。このとき、遠方地域の履歴データのある程度の年代毎に分けて年代毎のパラメータと現在（または近年）の対象地域との類似度を考える必要がある。

4.2節の数値計算結果では、片方のパラメータの事後確率が大きくなった場合に注目して解説した。しかし、提案方法では期待値計算において全事象を計算（ある栽培行動選択に対して、生育状態の全遷移を計算）するため、表11の例のように期が進んでも事後確率が0.5程度の場合も計算結果に含まれる。事後確率が0.5程度の場合、2つの近隣地域が同程度に対象地域と類似していることを示すが、2つの近隣地域が対象地域とよく類似しているのか、あまり類似していないのかは事後確率のみからは判断できない。そのため、仮に実際に農業の現場で統合管理を実施した際に期が進んでも事後確率が0.5程度で、かつ得られた利益が小さい場合には、利用する近隣地域のデータの見直しが必要と考えられる。他方、十分に大きな利益が得られている場合には、そのまま継続することも考えられる。事後確率が0.5程度で学習が進まない場合の対応の詳細検討は今後の課題である。

また、管理対象の地域での農業の実施が進むと、当該管理対象地域の履歴データの蓄積も進む。よって、ある程度の期間の実施後は近隣地域のデータ使用を止めて、

当該管理対象地域の履歴データから推定される各種確率を使用することや、近隣地域のデータと当該管理対象地域のデータの両方を利用することも考えられる。管理対象地域での実際の農業の実施が進んだ後の対応の詳細検討も今後の課題である。

本研究の数値計算例では著者による架空の設定（データ）を用いたが、本研究やその拡張研究の推進には、実データが必要である。仮に地域ごとに異なる項目／形式のデータが存在する場合、必ずしもデータを有効活用できるとは限らない。よって、全国規模でのデータ項目や形式等の標準化、データ収集、データベース整備が必要である。現在、日本政府が農業データの標準化や全国規模のデータベース整備を進めている[8]。当該データベースが、豊富なデータを蓄積した利便性の高いデータベースになることに期待したい。

## 6. まとめ

従来から農業における栽培作物の選択（輪作）と栽培行動の選択（栽培管理）の統合管理による期待利益の最大化が検討されていたが、各種確率が既知という仮定のもとでの検討のみであった。また、各種確率が未知の場合の栽培管理のみに関する従来研究はあるが、輪作に関しては未検討である。そこで、本研究ではこれらの従来研究を拡張することにより、各種確率が未知の統合管理における期待利益をベイズ基準のもとで最大化する統合管理方法を検討した。

提案方法によって対象地域と近隣地域間での一種の類似度を事後確率として計算することによって期待利益を最大化し、十分に学習が進んだ場合には事後確率が大きな近隣地域における最適な意思決定と提案方法によるベイズ最適な意思決定が一致することが輪作と栽培管理の両方で数値計算例において確認できた。

本研究は基礎研究の初期段階のため、簡易な問題設定を採用し、数値計算例の各種設定は基本的に著者の主観に基づく設定である。よって、より現実に近い問題設定のもとでの検討や、実データに基づくより厳密な検証が必要である。今後は、5.2節で今後の課題として挙げた拡張研究や、より現実に近い問題設定などを検討する。

## 謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP21K04543 の助成による。

## 参考文献

- [1] T. Itoh, H. Ishii and T. Nanseki: A model of crop planning under uncertainty in agricultural management, International Journal of Production Economics, Vol.81-82, pp.555-558, 2003.
- [2] T. Toyonaga, T. Itoh and H. Ishii: A Crop Problem with Fuzzy Random Profit Coefficients, Fuzzy Optimization and Decision Making, Vol.4, pp.51-69, 2005.
- [3] T. Itoh: Innovative Models for Crop Planning Problem to Improve Production Efficiency in Agricultural Management under Uncertainty, Innovation and Supply Chain Management, Vol.8, No.4, pp.169-173, 2014.
- [4] 前田康成：動的計画法を用いた適応的な輪作に関する一考察, バイオメディカル・ファジィ・システム学会誌, Vol. 22, No. 2, pp. 21-32, 2020.
- [5] 玉木浩二：作物の栽培管理システム（第1報）除草作業のモデル定式化, 農業機械学会誌, Vol. 34, No. 3, pp. 262-268, 1972.
- [6] 玉木浩二：作物の栽培管理システム（第2報）シミュレーション, 農業機械学会誌, Vol. 35, No. 1, pp. 45-51, 1973.
- [7] 蔵田憲次：施設園芸における栽培管理ルール学習のためのアルゴリズム, 人工知能学会誌, Vol. 4, No. 6, pp. 714-717, 1989.
- [8] 神成淳司：農業ICTの最新動向, 情報処理, Vol. 58, No. 9, pp. 818-822, 2017.
- [9] 前田康成：マルコフ決定過程を用いたセンサを伴う栽培管理に関する一考察, 電気学会論文誌C, Vol. 141, No. 3, pp. 400-401, 2021.
- [10] 前田康成：マルコフ決定過程を用いた栽培管理の能動学習に関する一考察, 電気学会論文誌C, Vol. 142, No. 2, pp. 147-148, 2022.
- [11] 前田康成：栽培履歴データがない地域における栽培管理, 電子情報通信学会論文誌D, Vol. J105-D, No. 9, pp. 518-522, 2022.
- [12] 前田康成：マルコフ決定過程を用いた輪作と栽培管理, バイオメディカル・ファジィ・システム学会誌, Vol. 23, No. 1, pp. 17-25, 2021.
- [13] 前田康成：センサを伴うスマート農業における統合管理, バイオメディカル・ファジィ・システム学会誌, Vol. 23, No. 2, pp. 31-41, 2021.
- [14] 農林水産省：農業分野における気候変動・地球温暖化対策について, 2021.

<https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/ondanka/attach/pdf/index-72.pdf>, 参照 (2022. 9. 16)



前田康成（まえだやすなり）

平成7年早大・理工卒。平成9年同大学院理工学研究科修士課程修了。日本電信電話（株），東日本電信電話（株），北見工大助手，助教，准教授を経て平成28年同大学教授，現在に至る。博士（工学）。統計的決定理論の学習問題への応用に関する研究に従事。電子情報通信学会等各会員。