THE IEICE TRANSACTIONS ON INFORMATION AND SYSTEMS (JAPANESE EDITION)

電子情報通信学会論文誌 D

情報・システム

VOL. J105-D NO. 9
SEPTEMBER 2022

情報・システムソサイエティ

一般社団法人 電子情報通信学会

THE INFORMATION AND SYSTEMS SOCIETY

THE INSTITUTE OF ELECTRONICS, INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

栽培履歴データがない地域における栽培管理

前田　康成[†a)]（正員）

Cultivation Management for Areas without Cultivation Historical Data

Yasunari MAEDA[†a)], *Member*

[†] 北見工業大学地域未来デザイン工学科，北見市

School of Regional Innovation and Social Design Engineering, Kitami Institute of Technology, 165 Koen-cho, Kitami-shi, 090–8507 Japan

a) E-mail: maedaya@mail.kitami-it.ac.jp

DOI:10.14923/transinfj.2021JDL8009

あらまし　本研究では，農作物の生育を管理する栽培管理問題を対象とする．栽培履歴データがない地域における栽培管理問題を，確率が未知のマルコフ決定過程を用いて定式化し，動的計画法によって期待収益を最大化する．提案方法の有効性を数値計算例で確認する．

キーワード　栽培管理，マルコフ決定過程，未知の確率，統計的決定理論，ベイズ基準

1. まえがき

農業分野では，従来から数理工学の視点に基づいて，農業収入や収穫量の増加について研究されている [1]〜[7]．従来研究 [1], [2] では栽培する作物を選択する輪作問題，従来研究 [3]〜[6] では作物の生育状態を良好に維持するための栽培行動を選択する栽培管理問題が検討されている．また，従来研究 [7] では栽培作物の選択と栽培行動の選択を統合的に行う統合管理も検討されている．近年，ICT（情報通信技術）や機械学習を活用する農業を，特にスマート農業や AI（アグリ・インフォマティクス）農業と呼ぶこともある [5]．

本研究では，栽培管理に焦点をあてる．従来研究 [5], [6] では，生育状態に応じて栽培行動を選択する栽培管理問題を，マルコフ決定過程 [8] 等の確率モデルを用いて多段的な意思決定問題として検討している．これらの従来研究では，栽培管理の対象地域における各種確率が既知，または十分な栽培履歴データが存在して各種確率が推定済の状況が想定されている．しかし，実際には対象地域の履歴データが存在しない場合もある．

そこで，本研究では栽培履歴データがない地域における栽培管理問題を対象とする．ただし，当該地域の履歴データはないが，近隣地域の履歴データは十分に存在し，近隣地域の各種確率は推定済とする．具体的には，各種確率を支配する真のパラメータが未知のマルコフ決定過程を用いて定式化し，統計的決定理論 [9] に基づいてベイズ基準のもとで期待収益を最大化する．

従来研究 [6] では，本研究同様にマルコフ決定過程を用いて生育状態が未知，各種確率が既知の栽培管理問題におけるベイズ最適な栽培管理方法を検討している．よって，本研究は従来研究 [6] における既知/未知の設定を変更したもとで，従来研究同様にベイズ最適な方法を検討する研究に相当する．

なお，本研究は基礎研究であり，提案方法そのものの実用化を目指すものではない．議論を簡便にするために，さまざまな仮定を置いた．よって，提案方法の改良のためには，より現実に近い問題設定への拡張が今後必要である．

2. 準　備

ここでは，本研究で使用する記号等を定義する．定義の多くは従来研究 [6] と同様である．本研究では実データを有していない（利用していない）ため，対象とする作物を具体的に特定しないで，架空の 1 作物を仮定する．従来研究 [7] では，本研究同様のモデルを作物ごとに複数の作物分用意することによって，栽培する作物の選択問題を検討している．$s_i \in \mathcal{S} = \{s_1, s_2, \ldots, s_{|\mathcal{S}|}\}$ は栽培作物の i 番目の生育状態，$\mathcal{S}$ 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で，状態は観測可能（既知）とする．生育状態 $s_{|\mathcal{S}|}$ は全滅状態を示し，全滅状態 $s_{|\mathcal{S}|}$ では栽培行動を選択せず，栽培管理を終了する．$a_i \in \mathcal{A} = \{a_1, a_2, \ldots, a_{|\mathcal{A}|}\}$ は i 番目の栽培行動，$\mathcal{A}$ は栽培行動集合，$c(a_i)$ は栽培行動 a_i のコスト（万円）を示す．栽培行動の例として肥料や農薬の散布，間引きなどが挙げられる．

実際の農業に関するより詳細な定義として，時期（発芽時期，着果時期など）に応じて異なる生育状態集合，栽培行動集合を定義することも考えられる．しかし，本研究では議論を簡便にするために，全期間を通して同じ架空の生育状態集合，栽培行動集合を仮定している．

次に各種確率を説明する．$\theta_i \in \Theta = \{\theta_1, \theta_2, \ldots, \theta_{|\Theta|}\}$ は各種確率を支配する i 番目のパラメータ，Θ はパラメータ集合である．パラメータ集合 Θ は，十分な栽培履歴データが存在する既知（推定済）の $|\Theta|$ 個の近隣地域のパラメータの集合に相当する．各種確率が未知の当該地域の真のパラメータは未知だが，既知のパラメータ θ_i に対する事前確率 $\Pr(\theta_i)$ は既知とする．$\Pr(s_i \mid \theta_j)$ は j 番目のパラメータ θ_j に支配される初期生育状態生起確率を示し，初期の生育状態が s_i の確率である．$\Pr(s_k \mid s_i, a_j, \theta_l)$ は l 番目のパラメータ θ_l に

支配される生育状態遷移確率を示し，栽培行動 a_j によって栽培作物の生育状態が s_i から s_k に遷移する確率である．

上記のとおり，本研究では議論を簡便にするために全期間を通して同じ架空の生育状態集合，栽培行動集合を仮定している．よって，生育状態遷移確率も全期間を通して同じである．より実際の農業に近いモデルとして，時期（発芽時期，着果時期など）に応じた異なる生育状態集合，栽培行動集合を採用する場合には，時期に応じて生育状態遷移確率も異なるモデルが適切と考える．

$h_i \in \mathcal{H} = \{h_1, h_2, \dots, h_{|\mathcal{H}|}\}$ は生育状態 s_i で得られる平均的な収穫量（トン），$\mathcal{H}$ は収穫量の集合を示す．$|\mathcal{S}| = |\mathcal{H}|$ である．栽培作物の単価（万円/トン）を p とする．栽培行動を選択すると，生育状態遷移確率によって次の生育状態に遷移する．栽培行動選択，状態遷移を有限の T 回繰返すと，最終的な生育状態に対して収穫量が得られる．栽培管理を T 期間の決定問題と考え，t 期の状態を示す変数を $\boldsymbol{X_t} \in \mathcal{S}$，$t$ 期の栽培行動を示す変数を $\boldsymbol{Y_t} \in \mathcal{A}$，最終的に得られる収穫量を示す変数を $\boldsymbol{Z} \in \mathcal{H}$ とすると，収益は $\sum_{i=1}^{T}(-c(\boldsymbol{Y_i})) + p\boldsymbol{Z}$ 万円である．$I(\boldsymbol{X_{T+1}})$ を最後の遷移先の生育状態 $\boldsymbol{X_{T+1}}$ の番号（添え字）とすると，$\boldsymbol{Z} = h_{I(\boldsymbol{X_{T+1}})}$ である．

3. 定 式 化

統計的決定理論 [9] に基づいて定式化を行う．最初に，効用関数 $U(d(\cdot,\cdot,\cdot), \boldsymbol{X}^{T+1}\boldsymbol{Y}^{T}\boldsymbol{Z}, \theta^*)$ を次式で定義する．

$$U(d(\cdot,\cdot,\cdot), \boldsymbol{X}^{T+1}\boldsymbol{Y}^{T}\boldsymbol{Z}, \theta^*) = \sum_{i=1}^{T}(-c(\boldsymbol{Y_i})) + p\boldsymbol{Z}, \tag{1}$$

ただし，$d(\cdot,\cdot,\cdot)$ は t 期の生育状態 $\boldsymbol{X_t}$，t 期までの生育状態と $t-1$ 期までの栽培行動の 系列 $\boldsymbol{X}^t\boldsymbol{Y}^{t-1} = \boldsymbol{X}_1\boldsymbol{Y}_1\boldsymbol{X}_2\boldsymbol{Y}_2\cdots\boldsymbol{X}_{t-1}\boldsymbol{Y}_{t-1}\boldsymbol{X}_t$，期を示す自然数 t を受け取って，t 期に選択する栽培行動 $\boldsymbol{Y_t}$ を返す決定関数である．式 (1) の効用関数は真のパラメータ θ^* のもとで，決定関数 $d(\cdot,\cdot,\cdot)$ を用いて，系列 $\boldsymbol{X}^{T+1}\boldsymbol{Y}^{T}\boldsymbol{Z} = \boldsymbol{X}_1\boldsymbol{Y}_1\boldsymbol{X}_2\boldsymbol{Y}_2\cdots\boldsymbol{X}_T\boldsymbol{Y}_T\boldsymbol{X}_{T+1}\boldsymbol{Z}$ に対応する事象が起きた場合の収益である．

次に，真のパラメータ θ^* のもとで，決定関数 $d(\cdot,\cdot,\cdot)$ を用いた場合の効用（収益）の期待値である期待効用 $EU(d(\cdot,\cdot,\cdot), \theta^*)$ を示す．

$$\begin{aligned}
EU(d(\cdot,\cdot,\cdot), \theta^*) &= \sum_{\boldsymbol{X}^{T+1}\boldsymbol{Y}^{T}\boldsymbol{Z}} \Pr(\boldsymbol{X}_1 \mid \theta^*) \\
&\quad \prod_{i=1}^{T} \Pr(\boldsymbol{X}_{i+1} \mid \boldsymbol{X}_i, \boldsymbol{Y}_i, \theta^*) \\
&\quad \Big(\sum_{j=1}^{T}(-c(\boldsymbol{Y}_j)) + p h_{I(\boldsymbol{X}_{T+1})}\Big) \\
&= \sum_{\boldsymbol{X}_1} \Pr(\boldsymbol{X}_1 \mid \theta^*) \\
&\quad \Big(-c(\boldsymbol{Y}_1) + \sum_{\boldsymbol{X}_2} \Pr(\boldsymbol{X}_2 \mid \boldsymbol{X}_1, \boldsymbol{Y}_1, \theta^*) \\
&\quad \Big(-c(\boldsymbol{Y}_2) + \sum_{\boldsymbol{X}_3} \Pr(\boldsymbol{X}_3 \mid \boldsymbol{X}_2, \boldsymbol{Y}_2, \theta^*) \\
&\quad \cdots\Big(-c(\boldsymbol{Y}_T) + \sum_{\boldsymbol{X}_{T+1}} \Pr(\boldsymbol{X}_{T+1} \mid \boldsymbol{X}_T, \boldsymbol{Y}_T, \theta^*) \\
&\quad p h_{I(\boldsymbol{X}_{T+1})}\Big)\cdots\Big)\Big),
\end{aligned} \tag{2}$$

ただし，$I(\boldsymbol{X}_{T+1})$ は最後の遷移先の生育状態 $\boldsymbol{X}_{T+1}$ の番号（添え字）である．式 (2) の期待効用を最大にする決定関数が，真のパラメータ既知の場合に期待収益を最大にする栽培管理方法である．しかし，本研究では真のパラメータは未知である．

本研究では，真のパラメータは未知なので，事前確率 $\Pr(\theta_i)$ に対して期待効用の期待値をとるベイズ期待効用 $BEU(d(\cdot,\cdot,\cdot), \Pr(\theta_i))$ を考える．

$$BEU(d(\cdot,\cdot,\cdot), \Pr(\theta_i)) = \sum_{\theta_i \in \Theta} \Pr(\theta_i) EU(d(\cdot,\cdot,\cdot), \theta_i). \tag{3}$$

式 (3) のベイズ期待効用を最大にする決定関数が，T 回の栽培行動選択における期待収益を統計的決定理論に基づいてベイズ基準のもとで最大化するという意味で最適な栽培管理方法である．式 (3) のベイズ期待効用を書き下すと，式 (2) の期待効用と同様に T 期間の入れ子構造になる．この入れ子構造に動的計画法 [8] を適用してベイズ基準のもとで期待収益を最大化する具体的な栽培管理方法を **4.2** で提案する．

4. ベイズ最適な栽培管理方法

4.1 事後確率の計算

4.2 で提案するアルゴリズム中に出てくる事後確率の計算を示す．

1 期の生育状態（初期生育状態）$\boldsymbol{X}_1$ を観測したもとで，パラメータ θ_i の事前確率 $\Pr(\theta_i)$ は式 (4) によって事後確率 $\Pr(\theta_i \mid \boldsymbol{X}_1)$ に更新される．

$$\Pr(\theta_i \mid \boldsymbol{X}_1) = \frac{\Pr(\theta_i)\Pr(\boldsymbol{X}_1 \mid \theta_i)}{\sum_{\theta_j} \Pr(\theta_j)\Pr(\boldsymbol{X}_1 \mid \theta_j)}. \tag{4}$$

t 期，$t \geq 2$ の生育状態 $\boldsymbol{X_t}$ において t 期の栽培行動 $\boldsymbol{Y_t}$ を選択（実施）して $t+1$ 期の生育状態 $\boldsymbol{X_{t+1}}$ への遷移を観測したもとで，パラメータ θ_i の t 期の事後確率 $\Pr(\theta_i \mid \boldsymbol{X}^t\boldsymbol{Y}^{t-1})$ は式 (5) によって $t+1$ 期の事後確率 $\Pr(\theta_i \mid \boldsymbol{X}^{t+1}\boldsymbol{Y}^t)$ に更新される．

$$\Pr(\theta_i \mid \boldsymbol{X}^{t+1}\boldsymbol{Y}^t) = \frac{\Pr(\theta_i \mid \boldsymbol{X}^t\boldsymbol{Y}^{t-1}) \Pr(\boldsymbol{X_{t+1}} \mid \boldsymbol{X_t}, \boldsymbol{Y_t}, \theta_i)}{\sum_{\theta_j} \Pr(\theta_j \mid \boldsymbol{X}^t\boldsymbol{Y}^{t-1}) \Pr(\boldsymbol{X_{t+1}} \mid \boldsymbol{X_t}, \boldsymbol{Y_t}, \theta_j)}. \tag{5}$$

4.2 提案方法

以下に動的計画法による栽培管理（栽培行動選択）の提案方法を示す．T 期から 1 期まで遡りながら処理を実施する．T 期と T 期以外で処理が異なるため，最初に T 期の処理を示す．

$$V(\boldsymbol{X_T}, \boldsymbol{X}^T\boldsymbol{Y}^{T-1}, T) = \max_{\boldsymbol{Y_T} \in \mathcal{A}} -c(\boldsymbol{Y_T}) + \sum_{\boldsymbol{X_{T+1}} \in \mathcal{S}} \sum_{\theta_i \in \Theta} \Pr(\theta_i \mid \boldsymbol{X}^T\boldsymbol{Y}^{T-1}) \Pr(\boldsymbol{X_{T+1}} \mid \boldsymbol{X_T}, \boldsymbol{Y_T}, \theta_i) p\boldsymbol{Z}, \tag{6}$$

ただし，$\boldsymbol{X_T} = s_{|\mathcal{S}|}$（$T$ 期の生育状態が全滅状態）の場合には，$V(\boldsymbol{X_T} = s_{|\mathcal{S}|}, \boldsymbol{X}^T\boldsymbol{Y}^{T-1}, T) = 0$ で，T 期には栽培行動を選択しない．$V(\boldsymbol{X_T}, \boldsymbol{X}^T\boldsymbol{Y}^{T-1}, T)$ は T 期の状態 $\boldsymbol{X_T}$，系列 $\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{Y}^{T-1}$ のもとでの，収穫物の売上の期待値から T 期目の栽培行動コストを引いた期待収益の最大値である．式 (6) の右辺を最大にする行動 $\boldsymbol{Y_T}$ が T 期の状態 $\boldsymbol{X_T}$，系列 $\boldsymbol{X}^T\boldsymbol{Y}^{T-1}$ のもとでの最適な栽培行動である．

次に t 期，$1 \leq t < T$ の処理を以下に示す．

$$V(\boldsymbol{X_t}, \boldsymbol{X}^t\boldsymbol{Y}^{t-1}, t) = \max_{\boldsymbol{Y_t} \in \mathcal{A}} -c(\boldsymbol{Y_t}) + \sum_{\boldsymbol{X_{t+1}} \in \mathcal{S}} \sum_{\theta_i \in \Theta} \Pr(\theta_i \mid \boldsymbol{X}^t\boldsymbol{Y}^{t-1}) \Pr(\boldsymbol{X_{t+1}} \mid \boldsymbol{X_t}, \boldsymbol{Y_t}, \theta_i) V(\boldsymbol{X_{t+1}}, \boldsymbol{X}^{t+1}\boldsymbol{Y}^t, t+1), \tag{7}$$

ただし，$\boldsymbol{X_t} = s_{|\mathcal{S}|}$（$t$ 期の生育状態が全滅状態）の場合には，$V(\boldsymbol{X_t} = s_{|\mathcal{S}|}, \boldsymbol{X}^t\boldsymbol{Y}^{t-1}, t) = 0$ で，t 期には栽培行動を選択しない．また，生育状態の遷移先 $\boldsymbol{X_{t+1}}$ が全滅状態の場合 ($\boldsymbol{X_{t+1}} = s_{|\mathcal{S}|}$) には，$V(\boldsymbol{X_{t+1}} = s_{|\mathcal{S}|}, \boldsymbol{X}^{t+1}\boldsymbol{Y}^t, t+1) = 0$ で $t+1$ 期以降は栽培行動を選択しない．$V(\boldsymbol{X_t}, \boldsymbol{X}^t\boldsymbol{Y}^{t-1}, t)$ は t 期の状態 $\boldsymbol{X_t}$，系列 $\boldsymbol{X}^t\boldsymbol{Y}^{t-1}$ のもとでの，t 期以降の期待収益の最大値である．式 (7) の右辺を最大にする行動 $\boldsymbol{Y_t}$ が t 期の状態 $\boldsymbol{X_t}$，系列 $\boldsymbol{X}^t\boldsymbol{Y}^{t-1}$ のもとでの最適な栽培行動である．

表 1　パラメータ θ_1 の生育状態遷移確率 $\Pr(s_k \mid s_i, a_j, \theta_1)$

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

表 2　パラメータ θ_2 の生育状態遷移確率 $\Pr(s_k \mid s_i, a_j, \theta_2)$

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

4.3 数値計算例

数値計算例を以下に示す．生育状態数 $|\mathcal{S}| = 4$，栽培行動数 $|\mathcal{A}| = 3$，パラメータ数 $|\Theta| = 2$，期間長 $T = 10$，栽培行動コスト $c(a_1) = 100$，$c(a_2) = 50$，$c(a_3) = 10$，収穫量数 $|\mathcal{H}| = 4$，収穫量 $h_1 = 100$，$h_2 = 70$，$h_3 = 40$，$h_4 = 0$，栽培作物の単価 $p = 8$，生育状態遷移確率を表 1，表 2，初期生育状態生起確率はパラメータ θ_1，パラメータ θ_2 ともに等確率，パラメータの事前確率も等確率とした．

生育状態遷移確率は，コストの高い栽培行動の方がより高い確率で良好な状態に遷移する．また，パラメータ θ_2 ではパラメータ θ_1 よりも低い確率（または同程度）で良好な状態に遷移する．これは，パラメータ θ_1 の地域とパラメータ θ_2 の地域で同じ栽培行動を選択した際に，当該栽培行動の効果がパラメータ θ_1 の地域でより大きく得られる設定である．換言すると，対象となっている作物に関して，パラメータ θ_2 の地域よりもパラメータ θ_1 の地域の方がより適している設定の 1 例である．全滅状態 s_4 に遷移後は栽培行動を選択しないため，遷移元が s_4 の遷移確率は設定していない．なお，本計算例の各種設定は著者による架空の設定であり，実データによる検証は今後の課題である．

提案方法による期待収益の最大値と真のパラメータ既知の場合の期待収益の最大値の比較を表 3，栽培行

表 3 提案方法とパラメータ既知の場合の期待収益の比較

$\boldsymbol{X}_1$	V_{pro}(万円)	V_{θ_1}(万円)	V_{θ_2}(万円)	比較 (%)
s_1	120.78	186.57	79.01	90.96
s_2	77.11	132.27	45.19	86.90
s_3	51.91	97.22	27.41	83.30

表 4 栽培行動の選択例

No.	t	$\boldsymbol{X}_t$	Pos(θ_1)	Pos(θ_2)	d_{pro}	d_{θ_1}	d_{θ_2}
1	1	s_1	0.500	0.500	a_3	a_3*	a_3*
2	2	s_2	0.405	0.595	a_3	a_3*	a_3*
3	5	s_1	0.403	0.597	a_3	a_3*	a_3*
4	5	s_3	0.093	0.907	a_3	a_2	a_3*
5	7	s_1	0.462	0.538	a_3	a_3*	a_3*
6	7	s_2	0.542	0.458	a_2	a_1	a_3
7	7	s_3	0.091	0.909	a_3	a_2	a_3*
8	7	s_3	0.896	0.104	a_2	a_2*	a_3
9	10	s_3	0.551	0.449	a_1	a_1*	a_1*
10	10	s_1	0.541	0.459	a_2	a_1	a_3
11	10	s_1	0.899	0.101	a_1	a_1*	a_3
12	10	s_1	0.090	0.910	a_3	a_1	a_3*

動の選択例を表 4 に示す．

表 3 の V_{pro} は初期状態が $\boldsymbol{X}_1$ の場合の 10 期間での提案方法による期待収益の最大値 $V(\boldsymbol{X}_1, \boldsymbol{X}_1, 1)$ である．V_{θ_i} は真のパラメータが θ_i かつ既知のもとで初期状態が $\boldsymbol{X}_1$ の場合の 10 期間での期待収益の最大値である．V_{θ_i} は式 (2) の期待効用を最大にする決定関数によって算出される．比較 (%) は提案方法による V_{pro} を分子，パラメータ既知の場合の V_{θ_i} の平均を分母とした割合（百分率）である．パラメータの事前確率が等確率のため，分母は V_{θ_i} の平均とした．

表 4 の Pos(θ_i) は，t 期の生育状態が $\boldsymbol{X}_t$ の当該例でのパラメータ θ_i の事後確率である．d_{pro} は t 期の生育状態 $\boldsymbol{X}_t$ においてパラメータ θ_i の事後確率が Pos(θ_i) の場合の，提案方法による最適な栽培行動である．d_{θ_i} は真のパラメータが θ_i かつ既知の場合の最適な栽培行動である．d_{θ_i} は V_{θ_i} 同様に式 (2) の期待効用を最大にする決定関数によって算出される．d_{pro} と同じ栽培行動の d_{θ_i} に記号 $*$ を付与している．

表 3 より，パラメータの事前確率が等確率の場合に提案方法による期待収益が，真のパラメータ既知の場合と比較して 8 割から 9 割であることが確認できる．また，表 4 の例 1，例 2，例 3，例 5，例 9 では，パラメータ θ_1 と θ_2 のもとでの最適な栽培行動が同じ場合に，提案方法も同じ栽培行動を選択している．例 4，例 7，例 8，例 11，例 12 ではパラメータ θ_1 と θ_2 で最適な栽培行動が異なる場合に，当該時点までの学習結果である事後確率が大きい方のパラメータと同じ栽培行動を提案方法が選択している．また，例 6，例 10 ではパラメータ θ_1 と θ_2 で最適な栽培行動が異なる場合に，事後確率が同程度のときには，どちらのパラメータの最適な栽培行動とも異なる栽培行動を提案方法が選択している．このように，提案方法では事後確率の更新による学習結果に応じて適応的に栽培行動を選択していることが確認できた．

5. むすび

農業分野における栽培管理問題について，従来からマルコフ決定過程等の確率モデルを用いて収益等の最大化が検討されてきた．従来研究では対象地域における十分な栽培履歴データの存在または当該地域の各種確率を支配する真のパラメータが既知であることを仮定している．しかし，実際には真のパラメータが未知で栽培管理データが存在しない場合もある．そこで，本研究では栽培履歴データがない地域における栽培管理問題を対象とし，対象地域の近隣地域の推定済パラメータを利用して統計的決定理論に基づきベイズ基準のもとで期待収益を最大化する栽培管理方法を検討した．

小規模の数値計算例であるが，提案方法によって近隣地域のパラメータに関する事後確率を更新しながら学習することによって，適応的な栽培行動の選択が可能であることを確認した．

なお，本研究は基礎検討であり，数値計算例の各種設定は著者の主観に基づく設定である．よって，提案方法に関するより詳細な評価には，実データに基づくより現実に近い設定での検証が必要である．

本研究では議論を簡便にするために全期間を通して同じ生育状態集合，栽培行動集合を仮定したが，より実際の農業に近い定義として時期（発芽時期，着果時期など）に応じて異なる集合も考えられる．時期に応じた集合の場合には，生育状態遷移確率も時期に応じて異なる．よって，対象地域の近隣 2 地域の生育状態遷移確率のパラメータの比較（関係）も本研究の数値計算例のように単純ではない．例えば，栽培期間の前半では差がなく，後半で本研究の数値計算例同様の差がある場合が考えられる．これは，対象作物の栽培に適する度合いが，栽培期間の前半には差がなく，後半には差があることを示す．

利用できる近隣地域のパラメータの組合せについてはさまざまな場合が考えられるが，いずれの場合も本研究同様に理論的にベイズ最適な栽培管理は可能である．しかし，対象地域の気候や土壌の性質が局地的に

近隣地域と大きく異なる場合など，理論的に最適な栽培管理の効果が期待できない場合も存在する．

また，本研究や本研究の拡張研究を実用化に近づけるためには，対象地域の近隣地域の十分な栽培履歴データが必須である．仮に地域ごとに異なる形式でデータが存在しても，有効に利用できるとは限らない．よって，全国規模でのデータ形式の標準化，データ整備も必要である．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整備を進めている [5]．当該データベースが栽培履歴データも含む利便性の高いデータベースになることを期待する．

近年，地球温暖化の影響で栽培に適した作物が変化する地域がある．本研究では近隣地域の推定済パラメータを利用したが，温暖化対策では，従来は気候が異なると考えられていた遠方地域の推定済パラメータの利用を検討したい．当該地域の直近の栽培履歴データと，他地域の推定済パラメータ間の類似性の考慮による，当該地域の現在の気候により適した作物の発見の可能性があるのではないかと考える．

本研究の提案方法の実データに基づく検証や，他地域の推定済パラメータを利用した地球温暖化への対応などは今後の課題である．

謝辞　本研究は JSPS 科研費 JP21K04543 の助成による．

文　　献

[1] 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.

[2] T. Itoh, “Innovative models for crop planning problem to improve production efficiency in agricultural management under uncertainty,” Innovation and Supply Chain Manage-ment, vol.8, no.4, pp.169–173, 2014.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 神成淳司，“農業 ICT の最新動向，” 情報処理，vol.58, no.9, pp.818–822, 2017.

[6] 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，” 電学論（C），vol.141, no.3, pp.400–401, March 2021.

[7] 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.

[8] 森村英典，高橋幸雄，マルコフ解析，日科技連，東京，1979.

[9] J.O. Berger, Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis, Springer-Verlag, New York, 1980.

（2021 年 11 月 1 日受付，2022 年 2 月 11 日再受付，
5 月 12 日早期公開）